

建筑环境 能源

Building Environment & Energy

2017
06

月刊
总第 06 期

主办：中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院

2017 年全国暖通空调 模拟学术年会论文集



建筑环境与能源官方微信

2017 年全国暖通空调模拟学术年会 概况

模拟技术在暖通空调领域应用广泛，所发挥的作用日益重要。为了总结和交流模拟技术在暖通空调领域应用的科研成果和实践经验，以促进暖通空调专业技术的发展，中国建筑学会暖通空调分会和中国制冷学会空调热泵专业委员会定于2017年12月6-8日在广州市召开“2017年全国暖通空调模拟学术年会”，由广州大学、华南理工大学、广东工业大学承办此次会议。本次会议共收到投稿80篇，论文集收录论文54篇，由《建筑环境与能源》杂志编辑出版。

本次大会内容涵盖了建筑能耗模拟、遮阳与通风、建筑热环境、人行为与热舒适、系统控制与优化等主题，必将有更多思想火花的碰撞，为我国暖通空调计算机模拟领域的发展产生推动力和引导力。

本次年会的筹备工作得到了行业专家的大力支持，在此向他们表示衷心感谢！

主办单位



国际建筑性能模拟协会 - 中国分会

承办单位



广州大学



华南理工大学



广东工业大学

支持单位



北京绿建软件有限公司



建筑环境与能源

(月刊)

主办单位

中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院

支持单位

中国建筑学会暖通空调分会
中国制冷学会空调热泵专业委员会
中国建筑节能协会暖通空调专业委员会
中国建筑节能协会热泵专业委员会

编辑出版

《建筑环境与能源》编辑部
2017年第6期
(每月10日出版)

顾问委员会

主任 郎四维
委员 江 亿 | 吴德绳 | 龙惟定
马最良 | 徐华东 | 罗 英

编辑委员会

主任委员 徐 伟
副主任委员 路 宾
委员 (按姓氏笔画排序)
于晓明 | 方国昌 | 龙恩深 | 田 琦 | 由世俊
伍小亭 | 刘 鸣 | 刘燕敏 | 寿炜炜 | 李先庭
李永安 | 肖 武 | 邹 瑜 | 张子平 | 张建忠
金丽娜 | 徐宏庆 | 黄世山 | 董重成 | 端木琳
潘云钢

编辑部

主 编 徐 伟
副 主 编 路 宾
执行主编 王东青
责任编辑 李 炜 | 李月华
本期编辑 吴会军 | 赵立华 | 杨晚生 | 廖云丹
校 对 才 隽 | 汤 溥
美 编 周 林

地址: 北京市北三环东路30号
邮编: 100013
电话: 010-6469 3285
传真: 010-6469 3286
邮箱: beaebjb@163.com



建筑环境与能源官方微信 全国暖通空调学会官方微信

版权声明: 凡在本刊发表的原创作品版权属于编辑部所有, 其他报刊、网站或个人如需转载, 须经本刊同意, 并注明出处。

目录 CONTENTS

| 2017 年全国暖通空调模拟学术年会论文集 | Proceedings of the 2017 Annual Conference on HVAC simulation in China

基于统计方法的家用电器行为模型——以电视为例	晋远, 燕达, 孙红三 /1
面向建筑设计方案阶段的建筑能耗预估方法初探——基于 LT-Method 预估体系的调整与应用	祝泮瑜, 燕达 /7
基于案例分析与调研问卷的集中供冷系统回弹效应研究	郭悦, 燕达, 胡珊, 周欣 等 /12
区域住宅冷负荷的模拟方法研究	安晶晶, 燕达, 洪天真, 孙开宇 /16
中国城镇住宅电视用能情况及技术政策分析	张洋, 燕达, 郭偲悦, 胡珊 等 /22
夏热冬冷地区住宅小区居民人行为对地水源热泵系统容量冗余问题的影响分析	钱明杨, 燕达, 张伦, 周欣 /26
基于数据挖掘技术的居民用水、用气数据处理方法探讨	周浩, 林波荣, 张仲宸, 戚建强 等 /30
一种快速的建筑能耗模型建立与校正方法	裘舒年, 李铮伟 /36
基于数据驱动的空调水系统模型的建立	吕岩, 潘毅群, 黄治钟 /41
基于强化学习的空调系统运行优化	王尉同, 潘毅群, 黄治钟 /45
智能酒店客房末端控制系统节能潜力分析模型与软件开发	徐蕾, 潘毅群 /50
夏热冬冷地区超低能耗建筑热工优化模拟分析	李峥嵘, 蒿玉辉, 赵群, 齐典伟 等 /54
基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法	杨陶, 潘毅群, 谢建彤, 黄治钟 /58
西安地区居住区室外风环境模拟研究	万怡 /64

西安地区别墅中庭天然采光设计模拟研究	郑婷, 罗智星, 杨柳, 刘加平 /67
草砖民居节能性模拟分析	徐旭东, 杨柳, 杨晶晶 /71
基于能耗模拟的不同地域建筑能耗分布特征研究	白鲁建, 焦婷婷 /74
国家海洋博物馆建筑风环境数值模拟研究	刘泽勤, 赵文元, 李思泽 /77
数值模拟受置换通风与地板送风两种空调模式影响的室内温度分布	才爽, 刘泽勤, 刘太顺 /80
粒子下落特性分析	杨贺, 刘泽勤 /83
外呼吸式玻璃幕墙数值模拟研究	张艺, 刘泽勤 /86
低瑞利数下竖直恒温板自然对流的模拟	刘聪聪, 刘泽勤, 赵永岭 /88
基于不确定性分析的制冷机组群控策略鲁棒分析与选择	廖云丹, 黄公胜, 吴会军, 丁云飞 /91
CIE 标准天空亮度分布模型的选择方法	娄骝渭, 廖云丹, Danny H.W.Li, Joseph C.Lam/95
新型气凝胶建筑玻璃的节能特性分析与计算	黄仁达, 吴会军, 吕亚军, 王珊等 /101
相变平板简化动态模型研究	严天, 徐新华, 徐涛, 凌子夜 /106
建筑墙体湿物性参数优化分析	万航, 徐新华, 刘庆东, 谢得文 /109
基于 Design Builder 模拟的甘肃省被动式太阳房建筑热工设计参数研究	张贺佳, 田喆, 柴国钰, 季翔 /112
CAV 与 VAV 空调控制系统建模与仿真	张珣珣, 周曰勇, 张震, 于玉等 /117
温湿度独立控制系统与传统系统的比较研究	张金磊 /121
空气源热泵空调系统能耗计算软件开发及应用	王东越, 李红旗, 邓壮, 董翔等 /125
湿热地区窗墙比对建筑空调负荷的影响	李倩, 谢静超, 薛鹏, 崔亚平等 /129
北京地铁夏季乘客热舒适的现场研究	杜赛赛, 谢浪, 裴斐, 崔颖等 /133
基于 BIM 技术的建筑能源管理平台在某办公建筑中的应用	邓月超, 李庆平, 王国建, 过昞等 /136

基于 BP 神经网络的办公建筑人员开窗行为预测方法	熊樱子, 韩一叶, 潘嵩, 王国健等 /139
基于高斯分布的开窗行为建模方法研究	韩一叶, 熊樱子, 潘嵩, 夏亮等 /143
光伏窗天然采光与能量性能研究	高敏, 程远达, 彭晋卿, 贾捷 等 /145
基于系统动力学的绿色办公建筑运维方——用户互动模拟与节能策略研究	刘沛, 林波荣, 武晓影 /149
建筑外形基本特征对高层建筑外绕流影响分析	吴小姣, 刘晓平 /154
BIM 技术在绿色建筑设计中的应用	宣晨晨 /159
建筑物自然通风的计算机模拟研究 —— 建筑物绕流及窗户开度对自然通风效果的影响	王力, 秦敬轩, 潘微, 张维 /161
南方中亚热带地区高大空间自然通风分析	项卫中, 李凯 /169
基于不确定性分析及生命周期分析的零能耗建筑系统优化设计	黄佩, 孙勇军, 陈嘉宇 /172
基于盲识别算法的办公室人员数量估计模型	魏祎璇, 刘诗雨, 夏亮, 王国建 等 /178
以通风散热为目的的光伏墙优化设计	马胜兵, 章文杰, 黄自强, 洪洁 等 /181
基于 DeST 的长沙市某综合楼建筑全年动态负荷模拟研究	朱永寅, 王宁宁, 王文祺, 何石泉 等 /187
不同透过率半透明非晶硅光伏窗自然采光性能研究	王春磊, 彭晋卿, 李念平, 王蒙 等 /190
基于地理信息系统的城市建筑节能模拟研究	刘云亮, 田玮, 傅兴, 朱传琪 /195
机器学习方法在城市建筑能耗分析中的应用研究	刘云亮, 田玮, 孟献昊, 高秀玲 200
基于 EnergyPlus 的屋顶绿化热工参数敏感度分析	马路遥, 张磊, 张玉 /204
基于采光和能耗分析的某图书馆内遮阳节能研究	朱尚斌, 李灿, 陈泉, 马千里 /208
“通风”与“捕风”: 亚热带地区高层公共住宅通风效果比较研究	杨娟, 王之昊, 田真, 杜琥 /211
不同结构光伏墙传热模型研究	黄自强, 章文杰, 马胜兵, 洪洁 等 /215
长途巴士中通风和感染源位置对飞沫扩散机制的影响研究	任巧玲, 刘田颖, 杭建 /221

基于统计方法的家用电器行为模型——以电视为例

晋 远, 燕 达, 孙红三

(清华大学建筑节能研究中心, 北京 100084)

[摘 要]随着城镇化进程与人们生活水平的提升, 居民城镇住宅能耗总量与家用电器能耗占比增加。类似的住宅环境, 住户行为差异会带来巨大的实际能耗差异。由于能源问题日益严峻, 新型电网的发展, 使得需求侧响应尤为重要, 这要求对小时间步长、逐时刻的负荷特性有更加深入的研究。因此住宅逐时功率负荷特性, 尤其是家用电器的逐时负荷特性备受关注, 要求模型同时具有三个特性: 人为模式随机性, 可推广性与验证的完备性。本文提出一种基于单户家庭单个家用电器功率数据的分析方法, 与家用电器行为的模型构建思路, 通过模型构建, 实现家用电器能耗与逐时负荷特性的再现。以电视机为例, 研究进行数据分析与模型构建, 经过模型检验, 验证了模型的可靠性。最后, 本文对模型的推广与适用性展开讨论。

[关键词]家用电器; 人行为; 统计随机模型

0 引言

随着我国城镇化进程的发展, 不仅人口向城市转移, 城镇面积也逐渐增大, 建筑能耗中的城镇住宅能耗越来越应引起人们的关注。不包含北方供暖的能耗, 单 2015 年, 城镇住宅的总能耗为 1.99 亿 tce, 比例高达建筑总商品能耗的 23%。从 2001 年到 2015 年, 我国城镇的住宅终端能耗的总量增长了近 2 倍^[1]。

而随着城镇居民的生活水平逐渐提升, 家用电器的数量、使用范围与使用时间逐渐增长, 这都使得家用电器的能耗占比逐渐增加。据统计, 诸如电视机、电冰箱、电脑等家用电器, 其能耗的占比不容忽视。2015 年, 我国城镇住宅的家用电器的能耗高达 1279 亿 kW·h, 平均每户每年的家用电器能耗为 470kW·h, 共占到全国城镇住宅总能耗的 20%^[1]。而家用电器的能耗水平产生原因与用能情况在本专业的研究中还未得到成熟发展。

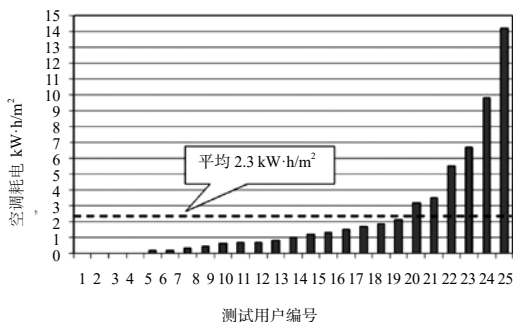
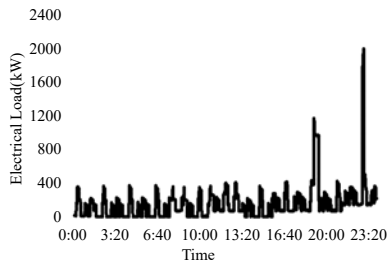


图 1 同一住宅楼不同住户能耗差异

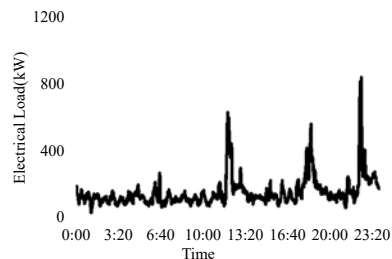
实际上, 个体的用能习惯对于实际能耗具有显著性的影响。如图 1 所示, 以北京的某栋住宅楼的实际调研测试为例, 虽然围护结构、气象参数等诸多客观参数相同, 但是实测发现同一住宅楼中的住户之间能耗仍然存在很大差别。这一现象的形成原因在于住户生活中的行为存在极大差异^[2]。

近年来, 能源状况推动电力供应系统转型发展, 传统的电力供应形式不足以满足新型电力结构模式的发展需求。为了更好地优化供电系统, 保证电力供应的可靠性、自调节性、高效性与高供电品质, 电力系统的发展历程经历了传统的供电模式、智能电表、智能电网、分布式能源以及微网技术等多项技术思路的革新^[3-6]。然而仅仅研究

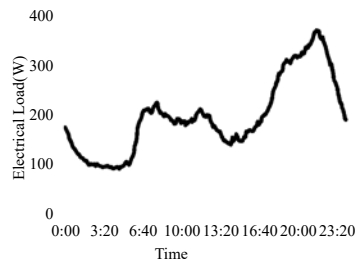
供应侧的电力特征不足以解决问题, 必须同时着眼于能源需求的特征, 对电力需求侧的负载进行能耗数据分析与挖掘, 获取有效信息, 实现需求侧用户的分类, 可以用于指导电力供应中的需求侧响应问题, 也对电力运营具有积极的影响。这要求缩小需求侧用户负载研究的时间步长, 细化研究对象, 因此家用电器负载作为住宅能耗的重要组成部分, 其使用模式与小时间步长、逐时刻的负荷模拟再现就显得尤为重要。



(a) 1 户



(b) 30 户



(c) 500 户

图 2 不同户数对应的住宅负荷曲线

对于电力调控的一大举措需求侧响应技术近些年逐渐得到发展。传统的需求侧响应所遇到的问题与阻碍主要在于电力需求缺乏弹性^[7]，通过市场调控或者激励政策可以有效的扭转这一问题的局面，而在问题研究的过程中，掌握住宅住户各类家用电器负载的使用模式对于末端负载负荷的可调节弹性范围的研究具有重要意义与作用。图 2 是不同户数对应的住宅负荷曲线，由图可知，多户的负荷曲线不是简单的成倍叠加，这就要求在研究过程中，体现不同住户用电特性的随机性。

2 现有模型综述

2.1 统计性模型

Yao R 等人^[8]提出一种住宅建筑能耗体系化模型，其指出影响住宅建筑能耗有两方面决定性因素，一是客观物理参数，包括气象参数以及围护结构等建筑设计参数，二是人员行为因素。因此，其对模型的细节进行了详细的划分考虑，因素包括家庭构成、人员作息以及耗能设备种类等。通过大量调研数据整理，统计得到每个设备的拥有率、日能耗以及使用时间，将这些参数作为输入，采取产生随机数的方式得到输出，即逐天的家用电器用电情况。

对于不同的情况进行大量的模拟，将结果进行聚类，从而得到不同的使用模式，进行综合分析，得到典型的家电能耗使用模型。这一方法将每天的终端平均能耗作为输入量，同时考虑了季节的影响因素，从而得以提高准确性，但是模拟的数据来源直接决定了模拟过程中各个电器的分布比例以及使用状况，数据来源有限，数据量不足将会导致模型的适用性与准确性无法保证。此外，本模型综合大量统计结果进行整合分析，其得到的负荷变化仅具有统计性意义，没有办法得到针对特定用户的用电负荷规律。

2.2 概率性模型

Paatero J V 等人建立模型^[9]，针对家用电器的日能耗波动状况进行模拟。其模型的数据来源主要是从公共报告与统计数据获得的。模型的第一部分是家用电器的拥有率情况。第二部分以概率方程的形式构成，通过对具体设备、一周中的时段、计算时间步长等参数进行考虑，得到电器的开启概率。这一开启概率由四部分构成，季节性因素、一天中的具体时刻、计算时间步长因素与气候和社会因素带来的随机性。得到逐时刻的开启概率后，利用产生随机数的方式进行逐时刻判断，进而得到各个家用电器的逐时开启情况。在得到家用电器的开启情况后，第三部分为能耗计算，该模型在此处进行简化，功率与开启时间长度均为特征抽象的若干各固定值。

这一模型提出了开启情况的概率事件表，综合考虑多个因素，不过对于电器功率，甚至于电器的开启时间长度，都进行了特征简化，这部分是模型无法有效应用于逐时刻的负荷负荷模拟的原因。同时，模型也依赖于原始数据的输入，需要在此方面保证输入数据的可靠性与代表性。

2.3 基于时间利用的模型

Yamaguchi^[10]在建立住宅能耗负荷曲线模型时，将住宅住户行为事件与电器设备的操作分开进行模拟，利用时间利用数据作为输入量，提炼出事件随机概率，在随机方式确定住户行为事件之后，同样利用概率随机过程，将事件与家用电器的使用相关联，从而得到各个家用电器的逐时刻负荷曲线数据。

获取数据后，得到模型所需要的标准输入数据格式，包括：住户的定义（房屋与家庭成员情况）、家用电器的

拥有情况以及功率参数、5min 时间步长的住户事件行为。该模型的在事件行为的模拟工作相比之前的研究工作更加细致，总共定义了 85 种包含工作日、节假日在内的事件行为，将这些行为分为规律性行为与非规律性行为两种，规律性行为主要为三餐、洗浴以及睡眠三种，而其他的事件则归为非规律性的事件。在模拟中，由于规律性行为往往具有显著的时刻特征，因此首先安排规律性行为的时间，它们的优先级更高。在离散分配规律性行为之后，则需要对剩余的所有空闲时间进行分配，直至非规律性行为填充所有的空闲时间段。

规律性行为在模拟时，需要对原始输入数据进行统计整理，得到每一个事件开始的时间概率分布以及持续的时长概率分布，而针对非规律性行为，需要计算一个事件-时刻选择概率矩阵，其含义为在各个时刻，承接各个事件行为的概率，这一个概率不是常数，而是会随着判断的时刻以及之后可以利用填充的空闲时间长度相关。每一个非规律性行为同样对应持续时间概率分布，由此来判断各个事件的持续时间。

得到住宅住户逐时刻事件模拟结果之后，将电器操作与事件的概率关联输入，即可得到各个家用电器的能耗情况，同时也能得到逐时刻的负荷负荷曲线。该模型的验证案例中，节假日的模拟结果偏差较大，同时夜间用电模拟值偏小。该模型没有提出量化的评价指标，此外，该模型也依赖于模型的输入参数，通过大量的时间利用问卷调查，将大量住宅行为整合压缩，从而得到各个事件的概率分布。尽管可以利用随机过程的方法进行事件行为的模拟，但是难以具有可靠性地提取出典型行为模式。

针对需求侧响应的实际应用，模型需要再现住户用电行为的随机性，能够针对不同的住户行为进行推广，同时模型的结果应得到有效的检验，通过综述，对现有多个模型的分析比较，目前模型在实现三个目标，存在不同程度不足。

3 基于统计方法的行为模型

本文基于能耗分析与需求侧响应，构建家用电器行为模型，再现逐时负荷特性，目标是满足模型的随机性、可推广性与检验完备性。

研究通过实测得到电器开启状态逐天分布图，模型需要分析实测数据，得到特征随机变量，包括开启次数、开启时刻与开启时长，并对三者进行分布参数估计，实现压缩提取工作。通过模拟，将提取的参数再解压缩，得到家电开启状态的模拟结果。最后进行模型的检验。

3.1 特征随机变量提取

时序负荷模拟验证过程包含“每天开启次数”、“开启时刻”与“开启时长”三维随机变量。本文总体思路为：利用实测数据统计，分析随机变量的分布特性，针对分析所得分布，对随机变量进行参数估计，使得利用若干少数数据即可描述随机变量，实现模型的压缩过程，减少模型输入数据总量。

3.1.1 每天开启次数

针对每天开启次数的分布特征，将电器的使用分为全天不开启与开启两种情况，计算全天不开启电器的概率，并利用泊松分布对每天开启次数进行参数估计，得到开启次数均值。

3.1.2 开启时刻

不同时段电器的开启时刻与开启时长规律不同，因此

需要结合分布特征,划分时段进行分析。针对每个时段的特征,用正态分布对各个时段开启时刻进行参数估计,由此,均值 μ 体现平均开启时刻,方差体现开启时刻的离散程度。

3.1.3 开启时长

不同时段的开启时长也存在差异,利用对数正态分布进行参数估计,此时, e^μ 等于平均的开启时长,而 e^σ 体现离散程度。

3.2 模型模拟

模拟过程需要将三维随机变量解耦,避免随机变量之间的相互干扰,确保模拟结果与实测原始数据相吻合。具体的模型构建如下(图3):

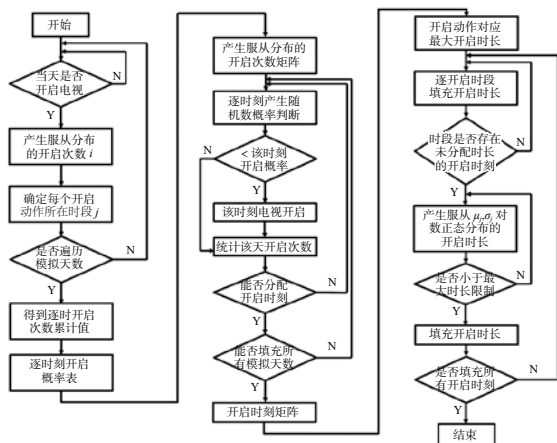


图3 模型构建框图

通过前期试算验证,基于统计分布的开启时刻产生方式,具体模拟逐天电器开启情况时,直接产生服从分布的开启时刻,产生的开启时刻往往趋于集中分布,造成可填充的开启时刻值偏小,影响到开启时长的分布,因此,经过调整,模型在确定开启时刻之前,先产生统计意义下的开启时刻分布值通过统计计算得到逐时刻电器开启概率表,通过概率计算与判断的方式,模拟电器的开启情况。

先生成服从分布的所有模拟的单位时间开启次数;之后,进行开启时刻的模拟,针对单位时间,从第一个时间步长到最后一个时间步长,逐时刻判断电器是否开启,记录单位时间内电器开启的所有时刻,统计模拟产生的单位时间内电器开启的次数,填充进相对应的单位时间序列中,当所有单位时间均完成开启时刻的填充,则可以得到模拟的时间范围内,开启时刻的矩阵。

至此,通过解耦的方法,得以将单位时间的开启次数、开启时刻独立模拟,尽可能防止其分布受到影响。接下来进行开启时长的模拟。由于已经产生了模拟时间范围内的所有开启时刻,为了防止影响单位时间开启次数与开启时刻分布,相邻两个开启时刻已经限制了开启时长的选取,即每一个开启时刻都有相对应的最大开启时长限制。如果逐一模拟产生开启时长,并与最大开启时长比较确定数据是否保留,则会一定程度上影响开启时长的分布,甚至破坏开启时长的分布规律,综合考虑之后,本文提出如下的开启时长模拟方法。识别每一个开启动作发生时刻,判断该时刻所在时段,产生负荷该时段分布的开启时长,遍历该时段为分配开启时长的时刻值,如果符合最大开启时长限制,则对该时刻分配开启时长,否则重新生成服从分布

的开启时长,直至所有的开启时刻均分配开启时长。

得到了开启时长之后,可以结合开启时刻与对应的开启时长输出可视化的模拟结果,得到开启状态矩阵。最后,即可由开启状态情况与电器的额定功率特征值生成家用电器的逐时负荷曲线。

3.3 模型验证

通过本模型得到的电器开启情况,尽管是随机过程结果,但同样需要给出有效的验证方法,本文提出了多个方面的验证方法,确保模型在统计意义上满足要求。整体思路为:通过实测数据与分布估计得到的参数,进行参数估计,从而进行参数假设检验,验证模型在参数提取过程、使用方式在线过程具有统计意义的正确性,同时对模拟结果进行比较。

验证共分为以下几部分:

- (1)对压缩提取过程的检验,检验参数估计的有效性;
- (2)对模拟解压缩过程的检验,检验模拟结果的分布再现准确性;
- (3)对实测与模拟结果开启状态进行对比,分析模型对家用电器使用行为的再现情况;
- (4)对模拟时段开启总时长进行偏差检验。

4 案例分析

本案例选择北京一户家庭的一台电视机作为研究对象,利用仪器——功率计对其进行较长时间段的功率监测,测试时间从2011年3月至2012年7月,原始数据的时间步长为1min。这台电视机位于卧室,该房间由一位老人居住。

4.1 预处理

数据预处理主要工作在于考察数据的合理性。针对电视机的使用特点,选取1天作为电视机使用模型分析的单位时间。对原始数据每一天的数据量进行统计,选取1min作为时间步长,则每1天的合理数据量为1440min功率值。数据量与合理值1440的偏差在5%以上的单位时间,去除该单位时间的数据。其余天中,出现数据冗余的情况时,逐小时判断数据量,准确地删减多余数据;出现数据不足的情况时,合理判断数据缺乏时刻,并通过判断合理补充数据量。

由此通过预处理,得到该测试数据集的有效数据共441天,为之后电视机的使用模型分析奠定基础(图4)。

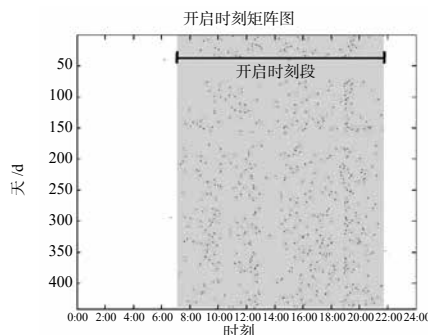


图4 电视机开启时刻

4.2 特征随机变量提取

4.2.1 每天开启次数

针对每天开启次数的分布特征,计算全天不开启电视的概率为0.11,并利用泊松分布对每天开启次数进行参数估计,得到开启次数均值为4.6次/天(图5)。

4.2.2 开启时刻

如图 6 所示,为电视机开启时刻分布,针对其特点,划分不同时间段进行分析,得到不同时间段的电视机开启情况,并用正态分布进行估计,得到每一个时段电视机的平均开启时段以及其离散程度(图 7)。

4.2.3 开启时长

在划分的不同时段中,分别统计开启时刻属于此时段的开启时长,对开启时长进行统计分析,利用对数正态分布对开启时长进行参数估计,得到均值与方差(图 8)。

由此,对于模型的输入参数进行列表汇总总结,通过模型的压缩,对随机变量进行提取,将模型输入确定为:开启次数、开启时刻与开启时长等三组参数,根据行为模式的特性,划分不同时段,最终得到以下的模型输入参数(表 1)。

表 1 模型输入参数汇总表

不使用电视概率	平均每天开启次数	开启时段	开启时刻		开启时长		
			μ	σ	μ	σ	e^{σ^2}
0.11	4.6	0:01~10:30	9:04	52	3.6	0.71	38
		10:31~14:00	12:10	35	3.3	0.63	28
		14:01~18:30	16:09	43	4.3	0.54	73
		18:31~20:00	19:11	12	3.8	0.62	46
		20:01~24:00	20:38	29	4.6	0.44	103

4.3 模型验证

4.3.1 验证一

针对模型在参数提取过程中的验证,确保对于三维随机变量的压缩提取过程,符合原始实测数据的统计规律,采取的方法为对实测统计数据与分布估计参数做参数假设检验,得到结果如表 2 所示,经验证,模型在参数提取过程中符合统计规律。

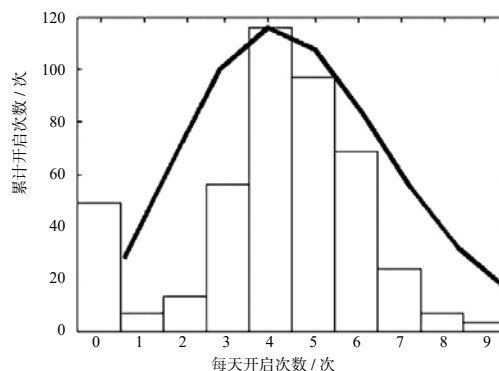


图 5 每天开启次数分布与参数估计分布曲线

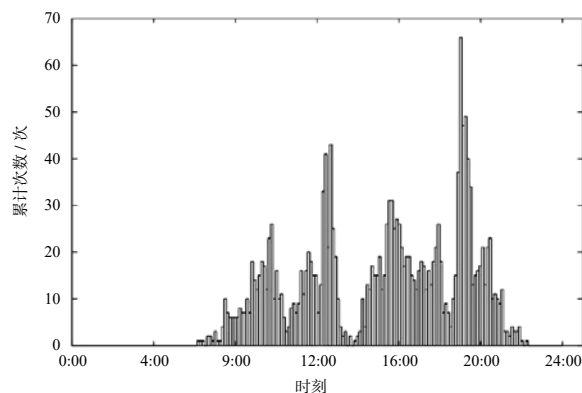


图 6 电视机开启时刻分布

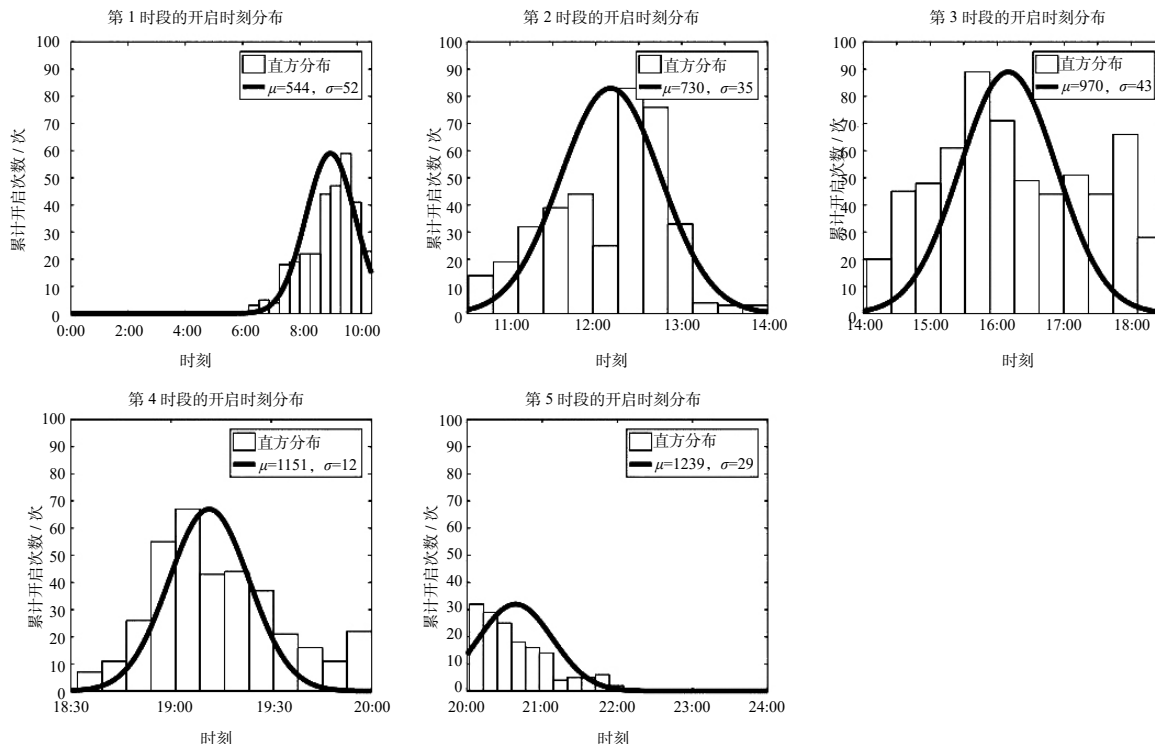


图 7 不同时段开启时刻分布参数估计

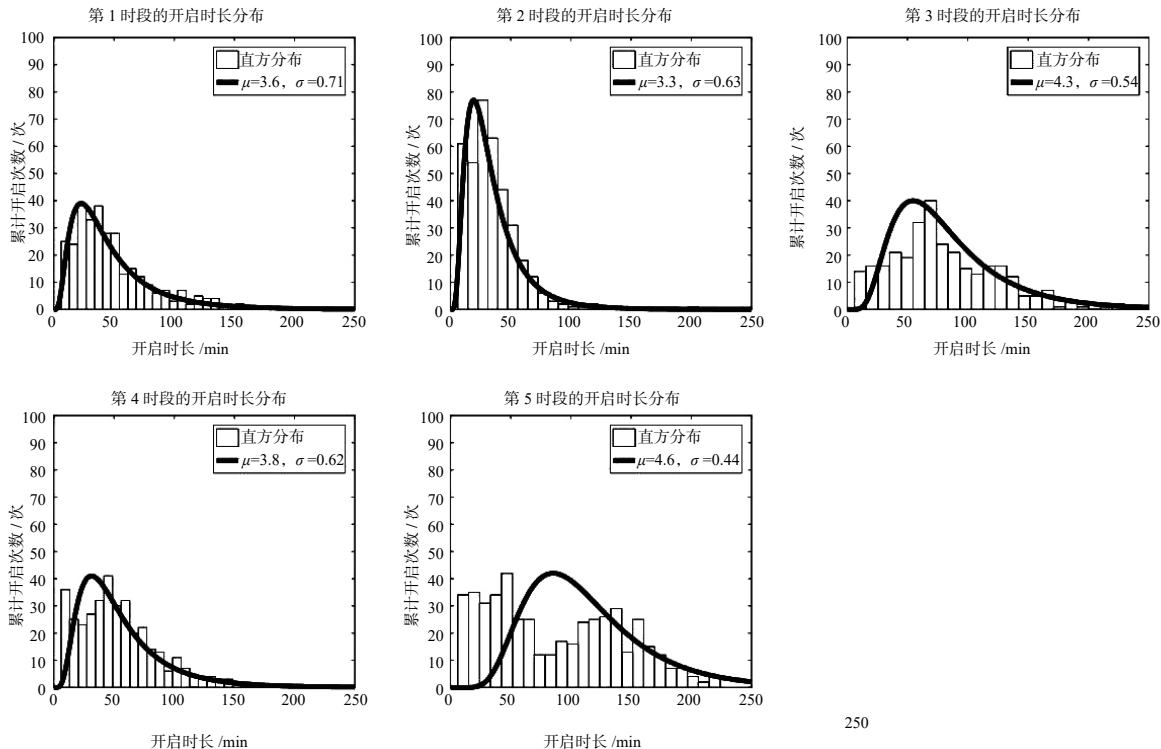


图 8 不同时段开启时长分布参数估计

表 2 参数提取过程检验

开启时刻		开启时长	
是否通过	P 值	是否通过	P 值
通过	0.42	通过	1
	0.18		0.87
	0.07		0.10
	0.09		0.08
	0.80		1

4.3.2 验证二

本文提出了将随机变量解耦进行模拟的方法，针对模型在模拟过程的方法，对模拟得到的数据统计，与提取参数进行对比，确保模拟过程在统计意义上正确，具体方法为：通过分布参数的输入与模型模拟，得到了一组模拟数据，对模拟数据进行统计，与输入的参数进行假设检验，验证模型再现过程统计正确，结果如表 3 所示，验证通过。

表 3 模拟过程检验

开启时刻		开启时长	
是否通过	P 值	是否通过	P 值
通过	0.42	通过	0.23
	0.18		0.65
	0.07		0.24
	0.09		0.84
	0.80		0.26

4.3.3 验证三

模型是否能真实反映电视机的使用情况，但从统计指标的检验情况是无法得到验证的，因此对实测与模拟结果进行比较，判断模型能否有效再现电视机的开启情况，如图 9 为模拟结果与实测结果的对比，由图可知，本模型能

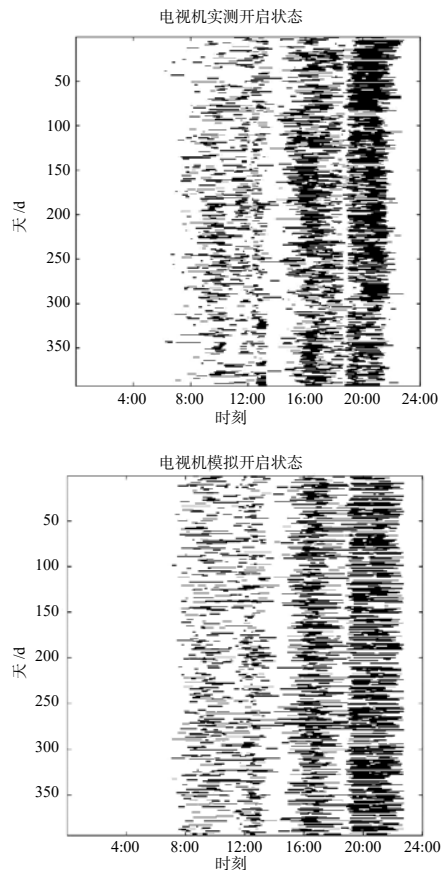


图 9 电视机模拟结果与实测结果对比

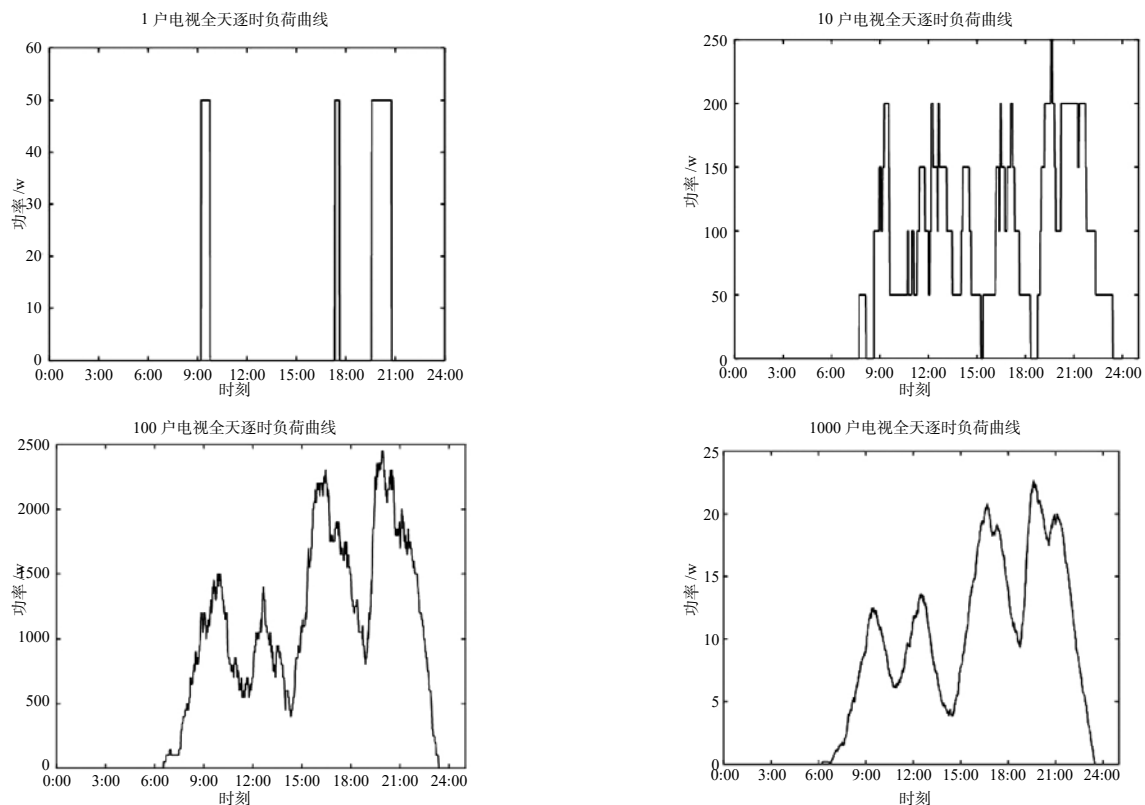


图 10 不同户数的电视全天逐时负荷曲线

够较好地反映电视逐天开启状态特征。

4.3.4 验证四

本模型的目标之一为模拟家用电器的能耗，因此模拟时间范围内的总开启时长作为一项重要的指标，在此进行检验，考虑到模型在模拟过程中具有随机性的特点，统计模拟 100 次的总开启时长结果，得到平均偏差为 0.42%，符合要求。

5 讨论与总结

本模型目标为构建区域负荷特性曲线，从单户家庭至多户家庭，利用模型反映不用家庭使用模式的不同，使得模拟结果更加符合实际情况。本文仍以电视机为例进行说明。图 10 是单户到 1000 户的逐时负荷模拟结果，由图可知，本模型再现了用户行为的随机性，随着户数的增加，逐时负荷特性曲线局部波动性减小，一定程度上反映了模型对于区域性推广的可行性。

通过本研究，发现电视等家用电器的使用模式具有随机性，其开启时刻具有时间反馈性，开启时长具有分布特性。本研究提出一种基于统计分析与概率模拟的家用电器行为模型，可以有效地反映人行为对家电能耗的影响。基于模型的概率随机性特征，本研究提出了随机序列过程模拟的检验方法，并对模型的结果进行全面的检验。

下一步工作在于细化模型的输入，针对不同的使用模式，探究对模型的推广应用，并能够基于大规模调研，得到若干种典型的家用电器使用模式，分别建立模型进行模拟，从而对住宅负荷的用电规律进行更深一步的理解。

参考文献

[1] 中国建筑节能年度发展研究报告 2017.

[2] 李兆坚, 江亿. 住宅夏季空调能耗调查方法分析 [J]. 暖通空调, 2006, 36(9):35–37.

[3] Depuru S S S R, Wang L, Devabhaktuni V. Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2011, 15(6):2736–2742.

[4] Reddy K S, Kumar M, Mallick T K, et al. A review of Integration, Control, Communication and Metering (ICCM) of renewable energy based smart grid[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38:180–192.

[5] 蔡睿贤, 张娜. 关于分布式能源系统的思考 [J]. 科技导报, 2005, 23(0509):7–8.

[6] Zhu X, Han X, Qin W, et al. Past, today and future development of micro-grids in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42:1453–1463.

[7] 电力需求侧响应发展研究综述 伍伟华, 庞建军, 陈广开, 王薪与.

[8] Yao R, Steemers K. A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(6): 663–671.

[9] Paatero J V, Lund P D. A model for generating household electricity load profiles[J]. International journal of energy research, 2006, 30(5):273–290.

[10] Yamaguchi Y, Shimoda Y. Validation of an Energy Demand Model of Residential Buildings[C]//Proceedings of the 2nd Asia Conference on International Building Performance Simulation Association. 2014.

面向建筑设计方案阶段的建筑能耗预估方法初探 基于 LT-Method 预估体系的调整与应用

祝泮瑜, 燕 达

(清华大学建筑节能研究中心, 北京 100084)

[摘 要] LT-Method 可以根据建筑外区和内区的不同能耗特点, 在建筑设计方案阶段对建筑能耗水平进行预估。然而, 由于中外气候条件、建筑形式、用能习惯等方面都存在较大差异, 因此, 该方法并不能直接在我国建设实践中进行应用。本文参照 LT-Method 预估体系, 在充分考虑到中国建筑用能特点的基础上, 提出了 HC-Method, 以对我国办公建筑采暖制冷能耗进行预估。文末通过具体案例对 HC-Method 的应用进行了说明。根据该案例, 使用 HC-Method 预估得到的能耗值与利用能耗模拟软件得到的模拟值之间差距小于 5%。

[关键词] 建筑设计; 方案阶段; 采暖制冷; 能耗水平; 预测方法

1 研究背景

建筑的能耗水平高低与设计方案息息相关。在设计之初对建筑能耗进行预估, 并以节能为目标进行优化十分必要。^[1-4] 目前工程实践中常用的方法是利用能耗模拟软件对设计方案进行模拟。虽然可以得到较为准确的能耗水平, 但要求对模拟软件熟练掌握, 以保证模拟结果的正确性。因此, 建筑师往往需要求助于专业人员或机构, 费时费力, 打破了设计过程的连贯性, 影响了设计人员的节能积极性。因此, 需要研究一种面向建筑设计阶段, 便于建筑师使用的快速能耗预估方法辅助设计。

建筑设计初期建筑师的主要工作是处理空间和流线。由于朝向、窗墙比、室内发热等因素的影响, 不同空间的能耗特征也有很大区别。因此, 根据建筑的形态^[5-9] 和空间布局对能耗水平进行预估比较适合建筑师在设计初期应用。

1.1 LT-Method 预估体系

LT-Method 预估体系正是根据建筑不同空间的分布情况进行能耗预估的一种方法。^[10,11] 它首先将建筑的室内空间划分为外区和内区两部分。建筑外区与室外环境关系密切, 容易实现自然采光、自然通风等对可再生能源的被动式利用, 称为“被动式空间 (passive zone)” (如图 1); 与之相对的内区称为“非被动式空间 (non-passive zone)”。并将从建筑围护结构向内 2 倍于层高的位置作为 passive zone 和 non-passive zone 的分界线。LT-Method 预估体系主要由 LT-Curve 和 LT-Worksheet 两部分组成 (如图 2)。LT-Curve 根据不同朝向, 标识了随窗墙比增大 passive zone 的采暖、制冷、照明能耗强度。其数据来源于对标准外区模型的模拟结果。LT-Worksheet 主要用于记录和计算。在实际使用中根据朝向、窗墙比在对应的 LT-Curve 图表上读出能耗强度, 记录在 LT-Worksheet 中, 并乘以各类空间的面积, 计算建筑总体能耗。

LT-Method 最初是由 Nick Backer 提出, 并由 David Hoch 和 Koen Steemers 进行发展和完善。目前已有 4 个版本, 分别针对欧洲办公建筑 (LT 1.0)、英国办公建筑 (LT 2.0)、南欧建筑 (LT 3.0)、东欧居住建筑 (LT 4.0)。此外, 还有以此为基础针对于葡萄牙建筑的版本 LT-Portugal^[12]。LT-Method 预估体系顺应了建筑设计的需求, 符合建筑师的工作特点和习惯, 适宜在设计初期辅助设计。但是, LT-Method 预估体系的研发基于欧洲气候条件和建筑用能

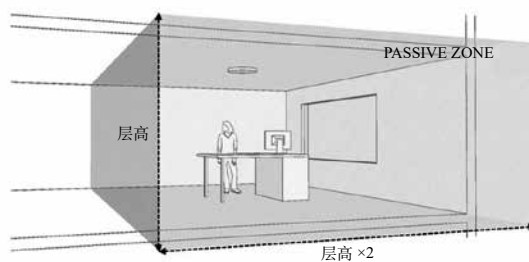


图 1 “Passive zone” 范围图示

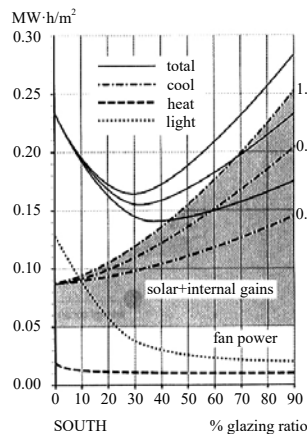


图 2 LT-Curve 图表 (上图) 和 LT-Worksheet (下图)

特点, 与我国实际有较大差距, 因此不能在我国建筑实践中直接应用。

1.2 本研究待解决的问题

1.2.1 能耗预估方法框架

参考 LT-Method 预估体系, 新的能耗预估体系也采取能耗强度图表 (LT-Curve) 与统计计算表格 (LT-Worksheet) 结合的形式。LT-Method 讨论了采暖、制冷、照明三种能耗, 并且各种能耗都折算成一次能耗。这样的做法将建筑热需求与照明需求耦合在一起, 在讨论遮阳等问题时具有优势。但是, 同时讨论热需求和照明需求使得基础模型的基本假设条件增多, 既需要预设采暖/制冷设备的类型、效率, 又要预设照明设备相关信息, 容易造成预设条件与显示条件不相符的情况, 从而导致预估结果的不准确。另一方面, 将各种能耗转换成一次能耗的做法有利于考虑不同能源类型的影响, 但折算过程比较复杂, 在我国的工程实践中不便于应用。因此, 本研究新提出的预估方法只讨论建筑的冷热需求 (heating/cooling demand), 不折算成一次能源, 也不讨论照明能耗。仿照 LT-Method 的命名方法 (Lighting & Thermal), 将新预估方法命名为 HC-Method (Heating & Cooling) (如图 3)。

1.2.2 能耗强度数据库

LT-Method 的核心是用 LT-Curve 表示的不同条件下 passive zone 的能耗强度数据。该数据是通过对于一个基本的 passive zone 参考模型 (basic model) 进行模拟得到。

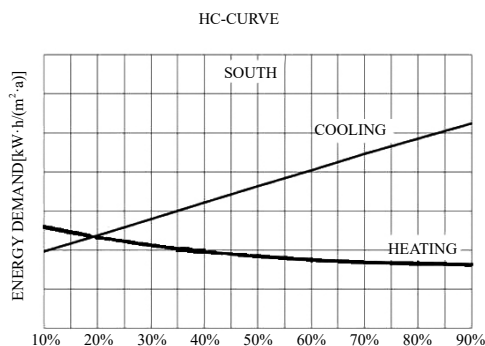
而这个基本模型的建立使用了许多预设参数 (如图 4), 这些参数与中国实际情况并不一致, 因此得到的数据并不能反映我国建筑能耗水平。例如, LT-Method 主要以欧洲气候条件为基础 (根据一月和七月平均气温分为 zone1 和 zone2 两个气候区), 办公建筑采暖制冷按照工作时间全时间 (一周 5 天, 每天 10h) 全空间设定, 采暖制冷设定温度分别为 19°C 和 24°C, 这些都与我国建筑实际不同。因此, HC-Method 需要建立相应的能耗强度数据库。

2 研究方法

根据以上分析, 本研究的重点在于得到符合中国实际的不同影响条件下 passive zone 的采暖制冷能耗强度数据库, 并通过 HC-Curve 图表表达。作为预估方法初探, 本文仅以北京办公建筑为例讨论能耗预估方法。具体研究路线如图 5 所示, 利用能耗模拟软件对不同因素影响下的 passive zone 能耗水平进行模拟, 得到能耗强度数据库。然后, 通过数据拟合将能耗强度数据库用一系列 HC-Curve 图表表达。最后, 以北京某办公楼为例, 将 HC-Method 估算出的能耗水平与该建筑使用模拟软件计算出的能耗水平相比较, 对 HC-Method 进行检验。

2.1 基础参考模型 (basic model)

比照 LT-Method, 本研究也建立了一个 passive zone 模型单元。该模型单元面宽 6m, 深 6m, 层高 3m, 只有一面外墙, 符合 passive zone 的定义。为了节省模拟的时间, 27 个同样尺寸的单元组成了一个 3 层建筑, 其中间层的



HC-WORKSHEET							
		WWR	heating [kWh/(m²a)]	cooling [kWh/(m²a)]	floor area [m²]	heating demand [kWh/a]	cooling demand [kWh/a]
passive zone	EAST						
	SOUTH						
	WEST						
	NORTH						
non-passive zone							
building energy							

图 3 HC-Curve 图表 (左图) 和 HC-Worksheet

Site location	Southern Europe
Orientations	S, E/W, N, Horiz.
Room Height	3 m
Glazing ratio	0-100%
Glazing bars, framing	20%
Glazing type	double
Workplane height	0.9 m
Reflectances	ceiling 0.7, wall 0.5, floor 0.25
Illuminance datum	100, 300, 500 lux
U-Values	external wall 0.6, roof 0.6, window 2.85

Heating ref. point	19°C
Cooling ref. point	24°C
Heating efficiency	0.6
Cooling system CoP	2.5
Fan energy	0.027 MWh/m² (fresh air), 0.075 MWh/m² (air conditioning)
Lighting power	6, 12, 20 W/m²

Building type	hours/day	day/wk	vent. ac/h	light lux	int. gains W/m²
Residential	8	7	1.5	100	8
Office	10	5	1.5	300	15
Retail	10	5	1.5	500	25

图 4 LT-Method 预估体系中 Passive zone 模型的基本假设条件

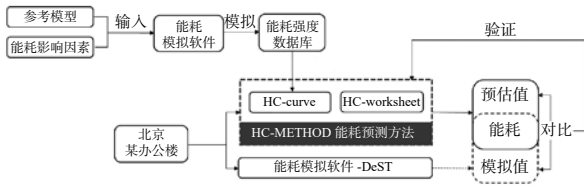


图5 本研究技术路线图

4个单元分别代表了4个朝向的 passive zone 空间；中央的单元6面完全被其他单元包围，可用来表示 non-passive zone（如图6）。各个单元室内温度假设一致，单元间不存在热量交换。所有单元的功能都设置为办公室，工作时间为周一至周五 07:00~18:00。

2.2 参数变量

除了朝向之外，对于 passive zone 能耗水平的模拟还考虑了窗墙比、围护结构热工性能、通风方式、以及用能习惯几方面的影响。其中，围护结构热工性能分别参考

可变参数	变量	参数取值
围护结构	E1	GB50189-2015 $K_{\text{外墙}}=0.45 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ $K_{\text{外窗}}=2.50 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ； $g_{\text{外窗}}=0.5$
	E2	GB50189-2005 $K_{\text{外墙}}=0.50 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ $K_{\text{外窗}}=2.50 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ； $g_{\text{外窗}}=0.7$
通风方式	V1	自然通风 $n_{\text{换气}}=10 \text{ ach}$ （夏季工作时段： $T_{\text{室外}} \leq 26^\circ\text{C}$ ） $n_{\text{换气}}=1 \text{ ach}$ （工作时段非开窗时段）
	V2	机械通风 $n_{\text{换气}}=1 \text{ ach}$ （工作时段）
用能习惯	B1	节约型 采暖设定温度： 16°C 制冷设定温度： 30°C
	B2	奢侈型 采暖设定温度： 20°C 制冷设定温度： 26°C
窗墙比	WWR	10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%

图7 可变参数列表及取值

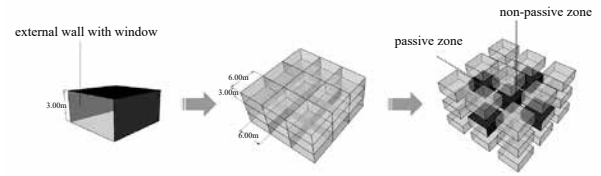


图6 由27个单元组成的基本模型

2005 和 2015 版《公共建筑节能设计标准》^[13,14] 的相关规定，设置了 E1 和 E2 两种围护结构，具体数值如图 7 所示。通风方式^[15-17]方面分自然通风（V1）和机械通风（V2）两种。当夏季办公时段室外温度高于 26°C 时，开窗通风，此时换气率取 10ach；办公时段其余时刻采用机械通风，换气率取 1ach。在用能习惯方面，分为节约型（B1）和奢侈型（B2）两种，其相应的采暖 / 制冷设定温度分别为 $16^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ 和 $18^\circ\text{C}/26^\circ\text{C}$ 。

3 模拟与分析

本研究以 DeST 软件为工具，对不同因素影响下 passive zone 基本单元的采暖制冷能耗水平进行了模拟，结果如图 8 所示。

如图所示，在各个朝向上 passive zone 的能耗都可以根据用能习惯的不同（B1 或 B2）分为两组，组内差异较小，组间差异较大。因此考虑每组组内取平均值，分别拟合两条能耗强度曲线代表不同用能习惯下的能耗水平。从而得到了各个朝向的 HC-Curve（如图 9）。

4 应用与检验

作为对 HC-Method 预估方法的检验，本文选取了北京某办公建筑^[18]为例，分别用 HC-Method 和 DeST 软件

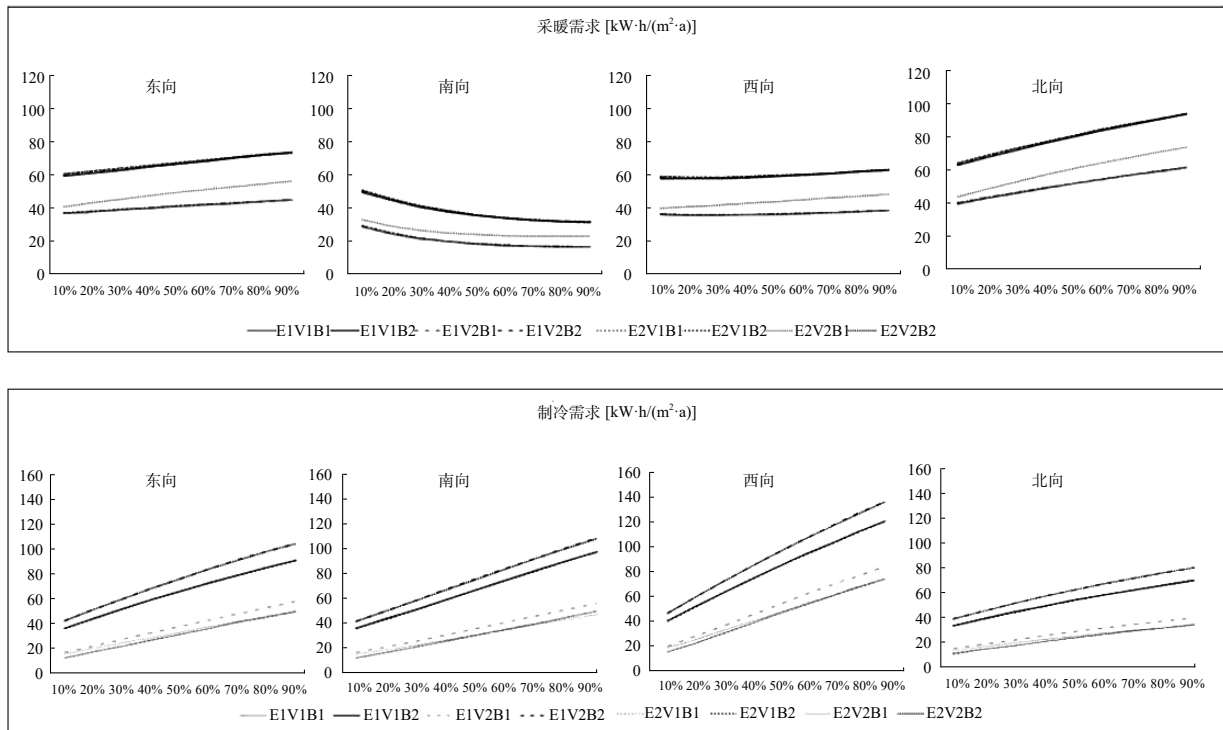


图8 不同因素影响下 passive zone 基本单元的采暖制冷能耗水平

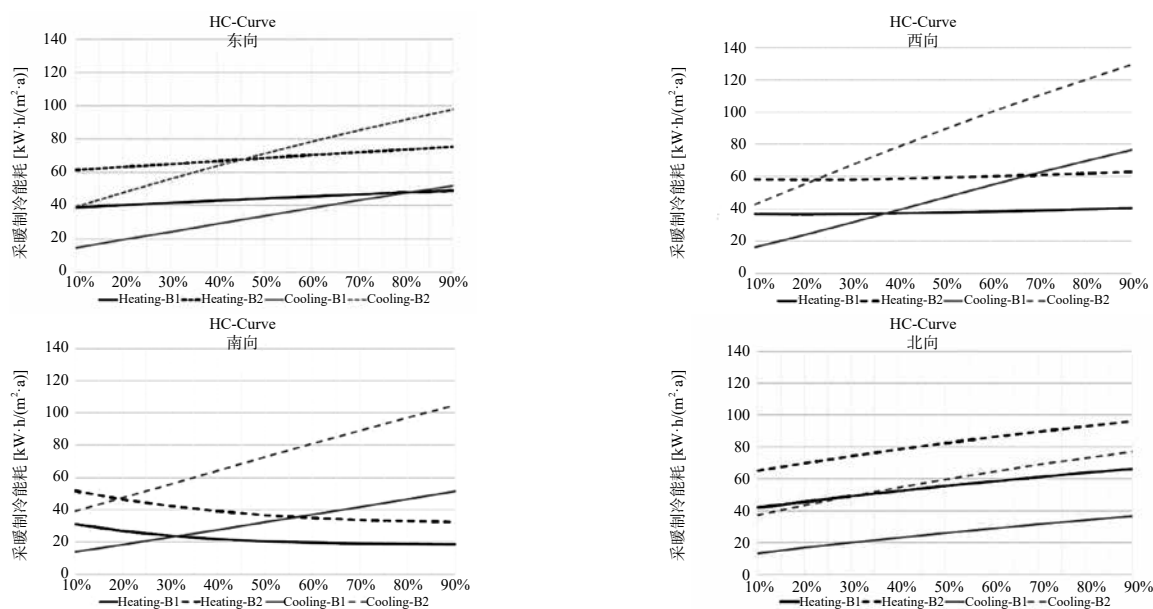


图9 不同朝向的 HC-Curve 图表

模拟对其能耗水平进行判断。该建筑地上部分 20 层，地下 1 层，建筑面积约 55000m²，其中 60% 的面积配备有采暖制冷系统。建筑模型及围护结构性能如图 10 所示。

根据 HC-Method, 首先将该建筑的采暖制冷区域根据朝向不同进行划分并统计面积，并按照窗墙比不同分别计入 HC-Worksheet, 如图 11 所示；然后，如图 12 所

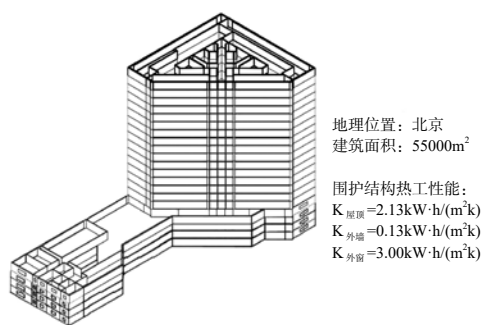


图 10 北京某办公楼模型及案例相关信息

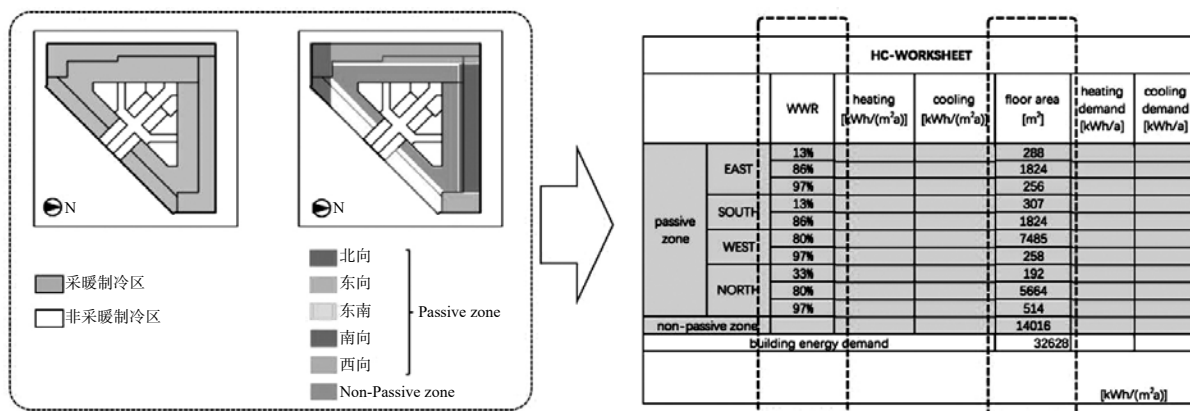


图 11 利用 HC-Method 方法预估能耗第 1 步——分区统计面积

示，对照各朝向 HC-Curve, 读图可得各 passive zone 和 non-passive zone 的能耗强度；最后将能耗强度与对应的面积相乘，求和得到整个建筑采暖制冷热量需求分别为 52.9kW·h/(m²·a) 和 63.9kW·h/(m²·a)。但是，考虑到实际建筑的层高为 3.8m，是 passive zone 基本单元的 1.27 倍，因此，预估能耗应当放大 1.27 倍，得到的最终预估采暖制冷需求为 67.2kW·h/(m²·a) 和 81.2kW·h/(m²·a)。利用 DeST 软件对该建筑建模，模拟得到的采暖制冷需求分别为 67kW·h/(m²·a) 和 78kW·h/(m²·a)。模拟值和 HC-Method 预估值之间的差距不足 5%。根据这个结果，初步认为 HC-Method 对这个案例的预估是较为准确的。

5 讨论与总结

本研究参考 LT-Method 能耗预估体系，针对中国实际提出了面向方案设计阶段的建筑能耗预估方法 HC-Method。通过对不同因素影响下的 passive zone 基本模型单元能耗进行模拟，生成了初步的能耗强度数据库并以一系列 HC-Curve 表格形式表达。最后，以一个现有建筑为例，

查 HC-Curve 图表读数得到能耗强度并填表

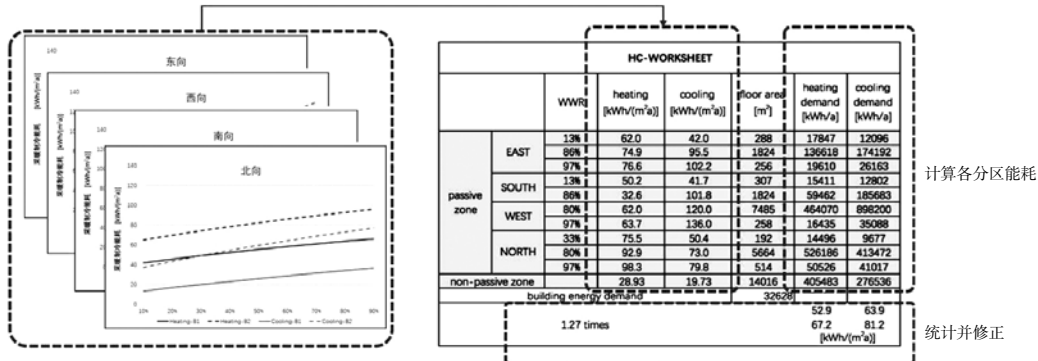


图 12 利用 HC-Method 方法预估能耗第 2 步——读数并填表计算

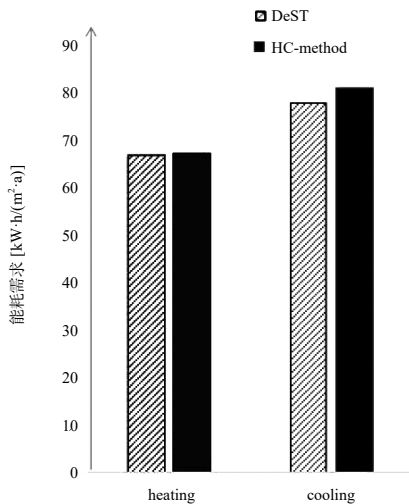


图 13 能耗预估与模拟值的比较

通过 HC-Method 预估值和能耗软件模拟值的对比对所提出的 HC-Method 进行验证, 该案例的验证结果显示 HC-Method 预估结果较为准确。

尽管本文所涉及案例中 HC-Method 的预估结果令人满意, 但 HC-Method 的准确性和可信度还需要进行更为严谨的论证。此外, 用于模拟的 passive zone 基本模型单元目前只包含了窗墙比、围护结构热工性能、通风方式、以及用能习惯几个可变参数, 并且每个可变参数只给出了两个取值, 这远远不能涵盖复杂的实际情况, 还需要进一步扩充和丰富。此外, HC-Curve 的生成过程是通过模拟结果数据拟合得到, 具体的拟合方法也还需要进一步的深入探讨。

参考文献

- [1] 袁景玉, 吴克, 关高庆, 高铨. 建筑能耗预测方法综述[J]. 科技视界, 2014,(31): 291-327.
- [2] 杨妮娜, 王万江. 建筑能耗分析方法的探讨[J]. 山西建筑, 2008,(01):246-247.
- [3] 王晓飞, 喻伟, 孟冲. 区域能源站负荷预测方法[J]. 重庆建筑, 2014,(06):66-69.
- [4] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研

究报告 2017. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017

- [5] OKEIL A. A holistic approach to energy efficient building forms [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(9):1437-44.
- [6] RATTI C, RAYDAN D, STEEMERS K. Building form and environmental performance archetypes analysis and an arid climate [J]. Energy and Buildings, 2003(35):49-59.
- [7] Ratti C, Raydan D, Steemers K. Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate[J]. Energy and buildings, 2003, 35(1):49-59.
- [8] DEPECKER P, MENEZO C, VIRGONE J, et al. Design of buildings shape and energetic consumption [J]. Building and Environment, 2001, 36(5):627-35.
- [9] 胡珊, 燕达, 崔莹. 不同建筑空间形态对住宅建筑能耗的影响. 建筑科学, 2005(10):117-123
- [10] LT Method 3.0—a strategic energy design tool for Southern Europe. Energy and Buildings 23(1996) 251-256.
- [11] University of Strathclyde. http://www.esru.strath.ac.uk/Courseware/Design_tools/LT/LT.htm
- [12] Baker N, Guedes M C, Shaikh N, et al. The LT-Portugal software: A design tool for architects[J]. Renewable energy, 2013, 49:156-160.
- [13] 公共建筑节能设计标准 (GB 50189-2015) [S]. 2015.
- [14] 公共建筑节能设计标准 (GB 50189-2005) [S]. 2005.
- [15] Yun G Y, Steemers K, Baker N. Natural ventilation in practice: linking facade design, thermal performance, occupant perception and control. Building Research & Information, 2008,36(6):608-624.
- [16] Yun G Y, Tuohy P, Steemers K. Thermal performance of a naturally ventilated building using a combined algorithm of probabilistic occupant behaviour and deterministic heat and mass balance models. Energy and Buildings, 2009,41(5):489-499.
- [17] Young G, Steemers K. Night-time naturally ventilated offices: Statistical simulations of window-use patterns from field monitoring. Solar Energy, 2010, 84(7):1216-1231.
- [18] 周欣, 燕达, 安晶晶, 等. 中美四地办公建筑的能耗对比及分析 [J]. 建筑科学, 2014, 30(6):55-65.

基于案例分析与调研问卷的集中供冷系统回弹效应研究

郭偲悦, 燕 达, 胡 珊, 周 欣, 钱明杨

(清华大学建筑学院建筑节能研究中心, 北京 100084)

[摘 要] 近年来, 集中供冷系统由于系统效率较高在我国多个地区被推广。然而, 案例实测表明, 集中供冷系统的能源消耗往往大于分散系统。这一能耗差异主要是由于行为模式的变化导致的。本研究拟基于案例分析与调研问卷, 对不同系统的行为模式差异进行定量研究。同时, 对回弹效应的产生原因进行初步分析。

[关键词] 集中供冷; 回弹效应; 建筑能耗; 使用模式

0 引言

空调用能是我国住宅建筑能耗的重要组成部分。2015年, 我国城镇住宅空调能耗为 745 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 占到全部城镇住宅能耗的 12%, 在过去十五年间增长了约 8 倍, 是我国住宅用能增长最快的分项之一^[1]。结合我国能耗总量与强度双控的理念, 这一部分能耗将要如何发展, 是我国建筑节能面临的重要问题。

近年来, 集中供冷系统在我国迅速发展。许多政府部门将其当做一种高效的空调系统进行推广。在各地的十三五规划中, 有多个地区提出要在十三五期间大力推广集中供冷系统, 作为推进绿色发展理念的重要组成部分。然而, 基于集中供冷系统住宅建筑的测试, 可以发现这一所谓的“节能技术”, 其能源消耗普遍远大于非集中系统^[1]。有些案例的能源消耗甚至是分体空调的 10 倍以上, 如图 1 所示。

理论上来说, 集中空调系统可以达到更高的 COP, 从而可以减低能耗。然而, 从实测数据来看, 我国的集中供冷系统似乎并没有起到节能的效果。造成这一现象的其中一个重要原因是人们在使用了集中系统之后, 会增加空调系统的使用频率^[1]。在这一前提下, 尽管效率有所提升, 总体能耗依然增加, 这一现象即为我们所说的“回弹效应”。

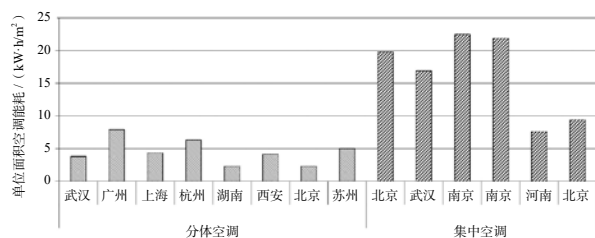


图 1 不同空调系统的实测能耗^[2]

举例来说, 美国自上世纪 80 年代起, 通过提升住宅围护结构性能、推行建筑保温等降低了房屋的需热量。理论上来说, 美国的采暖用能应当能够下降一半^[3]。然而, 据相关研究, 到上世纪 80 年代末, 尽管设备性能与围护结构都有了显著改进, 但居民的采暖行为也发生了改变, 比如每户平均把供暖温度调高了 1K^[4]。从 1980 年到 2000 年, 美国户均采暖能耗下降了约三分之一^[3]。已有研究认为, 美国住宅建筑取暖的回弹效应值在 10%~30% 之间^[5]。

在这一段时间, 美国空调系统的 COP 提升了 50%, 但使用集中空调设备的居民增长了 1.5 倍, 会一直开启空调、从不进行调节的居民也增长了一倍, 最终能源消耗也增长了 1 倍^[6-7]。

目前, 已有关于回弹效应的研究往往聚焦于效应本身是否存在并对其影响进行评估, 或者从经济学与社会学的角度来对这一现象的产生原因进行探讨^[8-11]。然而, 还较少有研究针对系统与行为模式本身进行分析。本研究拟从这一角度入手, 针对集中供冷系统的回弹效应, 基于案例分析、调研问卷以及模拟分析, 对住宅建筑的供冷系统形式与行为模式分布的关系进行研究, 并从系统特性出发, 对集中系统中回弹效应的产生原因进行初步讨论。

1 研究方法

本研究拟通过案例分析、问卷调研以及模拟分析的方式, 对不同供冷系统的能源消耗以及对应的行为模式进行分析。

在本研究中, 通过文献调研、实际测试与访谈对夏热冬冷地区的五个集中供冷小区进行了案例分析, 以了解这一地区居民夏季的空调使用能耗情况。通过这些案例测试, 可以对这一地区集中供冷系统的实际使用情况产生直接、详细的了解。测试与分析的内容主要包括系统形式、末端形式、系统能耗、系统效率等。

为了大规模地了解居民的行为模式以及行为与系统形式的关系, 本研究还对各省居民的空调系统形式与行为模式进行了大规模调研。这一调研于 2015 年进行, 通过网络的形式, 对全国各省共计 15158 户居民进行了问卷调研, 最终回收有效问卷 14728 份。问卷包含了针对居民所使用的空调设备以及空调使用方式的问题。

同时, 使用 DeST 软件可以对典型建筑的空调用能进行模拟。在本研究中, 基于问卷中设置的不同采暖方式, 本研究对上海一住宅建筑的空调能耗进行了模拟, 得到了不同使用模式的能耗情况。结合问卷得到的不同系统形式下的行为模式分布, 可以得到不同系统形式的能耗情况。本研究所使用的建筑模型基于上海一实际住宅, 建于 2010 年, 共 12 层, 各层总面积 233.5 m^2 , 层高 3.6m, 每层有 2 户住户。建筑体形系数为 0.331, 综合窗墙比为 0.31。建筑平面图如图 2 所示。

围护结构基于《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准 (JGJ 75-2012)》中的要求, 设置外墙传热系数为 1.5W/($\text{m}^2\cdot\text{K}$), 屋面传热系数为 1W/($\text{m}^2\cdot\text{K}$), 外窗传热系数为 3.2W/($\text{m}^2\cdot\text{K}$), 综合遮阳系数为 0.4^[12]。

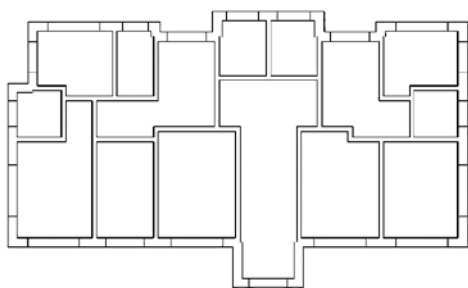
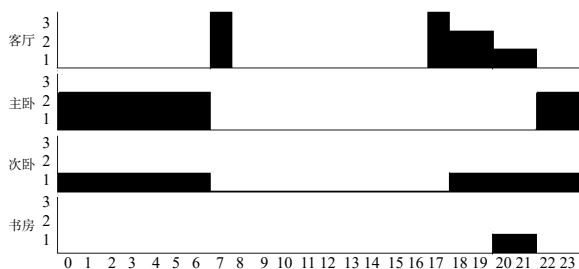
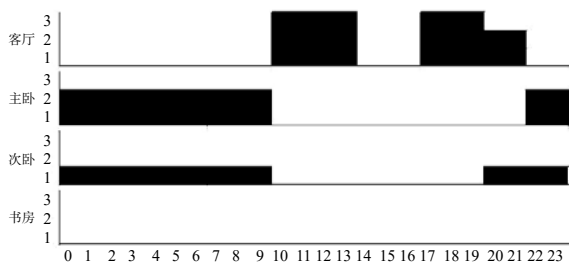


图2 建筑平面图

设定住户为三口之家，两个大人、一个孩子。各房间作息如图3所示。



(a) 工作日



(b) 休息日

图3 各房间人员作息

最后，结合案例分析，以及问卷与模拟得到的结果，结合相关文献，可以从系统形式的角度对集中供冷系统回弹效应的产生进行初步分析与讨论。

2 案例分析

在本研究中，基于文献调研与实测收集了5个案例的信息，并进行了比较研究案例1^[13]为江苏省一集中供冷系统，建筑面积约10000m²，入住率超过90%，采用地源热泵系统，末端为辐射吊顶加置换新风系统。这一案例中，室内环境由调试人员统一控制，居民不能够自己调节设备，按照面积收费。居民普遍采用“全部时间、全部空间”的空调使用方式。该小区空调季制冷能耗约为21.9kW·h_E/m²，其中冷机能耗为13.3kW·h_E/m²，水泵能耗为6.5kW·h_E/m²，其余为新风机组用能。空调季的平均COP约为4.4，系统EER约为3。

案例2位于湖北，小区建筑面积约5000m²，入住率超过90%，采用地源热泵系统，末端为风机盘管系统。居民可以自己调节风速，最终按照用量收费。通过对居民的访谈，发现大部分居民采用了仅在需要的时候开启空调的

使用方式，其使用时间与用分体空调时相比有所延长。小区空调季制冷能耗约7.9kW·h_E/m²，其空调季的平均COP约为3.9，系统EER约为3。

案例3位于江苏省，小区总建筑面积约159000m²，采用地源热泵系统，末端为风机盘管系统。居民能够自己调节设备，按照用量收费。小区空调季的制冷能耗约为6.9kW·h_E/m²，空调季平均COP约2.9，系统EER约2.4。

案例4同样位于江苏省，建筑面积约48700m²，采用污水源热泵系统，末端同样为风机盘管系统。当用户用冷量低于一限值时，向用户收取固定费用，超过限值的部分则根据用量的多少收费。小区空调季制冷能耗约为3.6kW·h_E/m²，空调季平均COP约4.6，系统EER约3.1。监测数据表明，60%的住户所使用的冷量低于限值。

案例5位于江苏省，总建筑面积约159000m²，其系统形式与案例3、4相同，为地源热泵系统与风机盘管系统。同样地，居民能够调节空调设备，且按用量收费。小区空调季的制冷能耗约为6.2kW·h_E/m²，空调季平均COP约2.7，系统EER约2.6。

表1所示为以上五个案例的基本情况汇总。从表中可以看出，对于不同的集中供冷系统，其能源消耗、系统效率、冷负荷可以有极大的差别。这些差别主要是由于使用模式、系统设计、收费方式等导致的。

表1 案例基本情况汇总

	案例1	案例2	案例3	案例4	案例5
地点	江苏	湖北	江苏	江苏	江苏
总建筑面积/m ²	10,000	50,000	48,700	340,000	159,000
冷源	地源热泵	地源热泵	地源热泵	污水源热泵	地源热泵
末端	辐射吊顶加置换新风	风机盘管	风机盘管	风机盘管	风机盘管
能耗/(kW·h _E /m ²)	21.9	7.9	6.9	3.6	6.2
COP	4.4	3.9	2.9	4.6	2.7
EER	3	3.0	2.4	3.1	2.6
冷负荷/(kW·h _E /m ²)	65.7	23.7	16.6	11.2	16.1
使用模式	全部时间 全部空间	部分时间 部分空间	部分时间 部分空间	部分时间 部分空间	部分时间 部分空间
收费方式	按面积	按用量	按用量	按用量	按用量

基于实测调研，我国夏热冬冷地区分体空调能耗约为4~5kW·h_E/m²，取设备COP为2.5，则可以估算出分体空调的平均冷负荷。将集中系统与非集中系统的冷负荷进行比较，如图4所示。

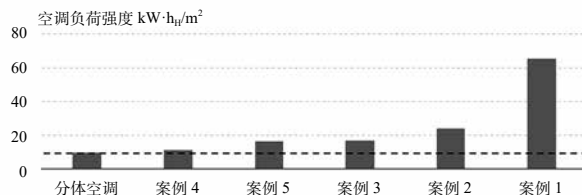


图4 不同系统的冷负荷情况

从图中可以看出，分体空调的冷负荷基本低于集中系统。即使用了集中系统的住户会相对更多地使用空调。这一行为模式的差别即是造成集中供冷系统高效率、高能耗的主要原因。从图中也可以看出，有一些集中供冷系统的

冷负荷与分散系统接近。结合实测过程中与设计或运行人员的交流,可以发现这些系统在设计与运行的过程中更多地结合了用户的实际使用情况。

3 问卷调研与模拟分析

为了更好地了解不同系统的实际使用情况以及回弹效应产生,本研究采用了问卷调研与模拟分析相结合的研究方式,对不同系统的负荷情况进行了模拟研究。

通过问卷调研,可以得到空调设备在我国分布情况。2015年,我国约一半的居民采用分体空调作为主要的制冷设备,采用小区集中供冷的约1%。即分体空调目前仍然是我国主要的空调设备。

结合已有的问卷调研与案例分析,在本研究中,空调使用方式被归纳成了7种,如表2所示。调研结果显示,仅有2%的居民会在整个夏天一直开启空调,绝大部分居民仅在需要时开启所在房间的设备。

表2 问卷中的空调使用模式

模式1	从不使用
模式2	感觉非常热开了空调,睡觉前关
模式3	感觉非常热开了空调,离开房间关
模式4	感觉有点热开了空调,离开房间关
模式5	人在房间就开空调,离开房间关
模式6	一回家就开启所有房间的空调,出门时关
模式7	整个夏天一直开着空调

结合不同的使用模式,以及不同的空调季时长、开启空调时是否开窗,一共可以归纳出61种使用模式。使用DeST-h对这61种模式在上海地区进行模拟,可以得到不同模式的冷负荷情况,并将其按照冷负荷的多少分为高、中、低三类,如图5所示。

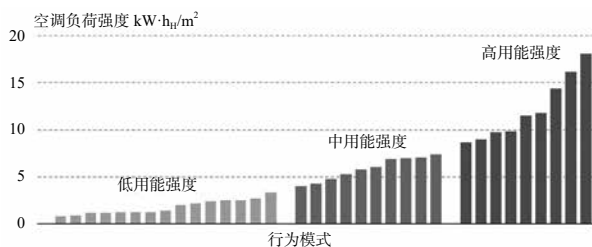


图5 模拟得到的不同空调模式下的冷负荷

对应不同分类的行为模式,可以得到集中系统与分散系统用户的冷负荷分布情况,如图6所示即为两种系统中使用三类行为模式(冷负荷高、中、低)的分布。从图中可以看出,与集中供冷相比,分体空调使用低负荷模式的比例较高、使用高负荷模式的比例较低。

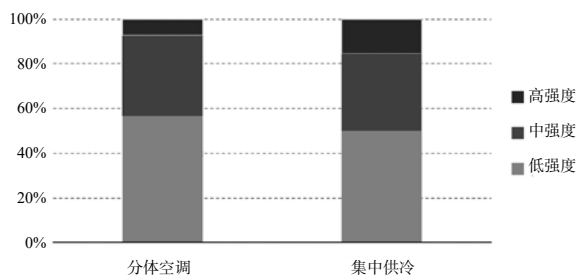


图6 不同系统形式下使用模式的分布

基于不同行为模式的负荷与占比,可以计算得到集中与分散两种系统的平均冷负荷:对于分体空调,平均冷负荷为 $3.7\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,而集中供冷系统的评价冷负荷为 $4.7\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。

取分体空调的COP为2.5,集中供冷系统的EER为3,可以计算得到两种系统的平均用能,如图7所示。分体空调的平均能耗为 $1.46\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。假如居民的空调用量不变,则COP增加20%,对应能源消耗降低17%。然而,由于空调实际使用增加,最终能源消耗不仅没有减少,反而升高了6%,即产生了“回弹效应”。

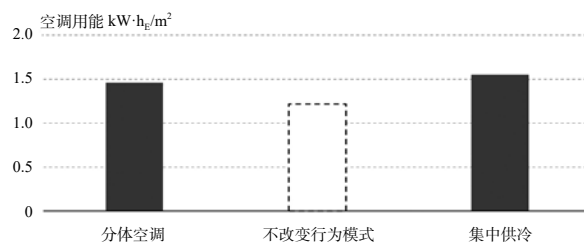


图7 不同系统的平均能耗

从图中可得,如果没有回弹效应的产生,则由于系统效率提升,能源消耗是可以下降的。然而,由于系统形式的改变带来了行为模式的变化,居民用量增加,导致了能耗不降反升。

此外,本研究也对不同空调系统的满意度情况进行了调研。问卷结果显示两种系统形式的满意度相当。

4 讨论

通过案例研究、问卷调研与模拟分析,可以明显看出,由于系统模式的改变,居民使用方式随之变化,因而对最终能耗产生了影响。一般来说,集中供冷系统的能耗会显著增加,但案例4表明,通过较好的设计,集中系统依然有可能实现在不较大改变行为模式的同时能效有所提升,因而高能效、低能耗。要实现这一点,需要对产生行为模式变化的原因进行进一步分析。

通过案例分析,首先可以发现系统的可调性是影响能耗高低的重要因素。不论是案例研究还是问卷调研,都显示我国绝大部分居民依然采用“部分时间、部分空间”的空调使用方式,即仅在需要时开启空调设备。而仅有末端可调时,居民才能够采用这样的使用方式;或者说,当系统完全由运行人员调节时,即使居民希望在不需要的时候关闭设备,也无法做到这一点,被动地采取了“全部时间、全部空间”的使用模式。因此,对于集中系统,首先需要保证末端的可调性,让居民能够根据自身需求开启或关闭设备。

基于案例分析与文献调研,可以发现收费方式也会影响使用模式^[2]。当按照面积收费时,居民会倾向于随意使用空调,进而增加用量。而按照用量收费时,由于收费方式其实与分体空调相同,居民往往会遵循之前的使用模式使用空调。

同时,随着经济的发展与人民生活水平的提升,居民的空调需求随之提升,对空调的使用也会不断增加。因此,我们到底会如何使用空调,是许多研究面临的问题。对于部分住户,提升室内环境的需求的确存在。但是,我们是

否真的需要和一些发达国家中的居民一样,整个夏季一直开启空调呢?基于2013与2014年在银川、成都与北京的2400份问卷,可以发现我国超过90%的居民认为自己理想的空调使用模式是仅在需要时开启设备。

总的来说,系统可调性、收费方式以及空调需求的变化都会增加空调的使用,产生回弹效应。对于前两者,可以通过更精细的系统设计加以改善;而对于居民对室内环境的需求变化,则需要通过生活方式的引导来实现。

目前,分体空调依然是我国的主要供冷设备。并且这一现象将在近几年延续。但结合相关规划,可以发现集中供冷系统近年来迅速增长,可能在若干年内成为一种重要的空调系统形式。因此,我国空调系统究竟应该如何发展,也是值得思考的问题。

通过案例分析可得,集中供冷系统的能源消耗相对来说高于分体空调。但是,通过精细的设计与运行,集中系统可能在效率较高的同时不大幅改变行为模式,因而高能效、低能耗,如案例4。但是,案例4的经济性分析显示,这一案例在现有情况下一直处于亏损状态。而如果要大力发展集中供冷系统,所推广的系统应该能够达到高能效、低能耗且在五年以内收回成本。因此,对于集中供冷系统,依然有大量研究,如设计与运行方案,需要进一步深入。

5 结论

近年来,集中供冷系统在我国发展迅速。已有研究显示,集中系统的能耗往往会高于分体空调。基于案例分析、问卷调研与模拟分析,可以发现行为模式的改变是造成这一能耗增长的主要原因,即所谓的“回弹效应”。

基于进一步的分析,可以发现系统的可调性、收费方式以及居民对室内环境需求的变化是导致行为模式变化的主要原因。目前,分体空调依然是最主要的空调设备,但集中系统近年来发展迅速。对于拟采用集中供冷的系统,需强调其系统应当尽量不改变居民的使用模式,达到高能效、低能耗。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2017[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [2] 周欣. 建筑服务系统集中与分散问题的定量分析方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [3] DOE. building energy data book 2011[R]. DOE, 2012.
- [4] 维托·斯泰格利埃诺著, 郑世高, 刘晓青, 孙旭东译. 美国能源政策: 历史、过程与博弈 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [5] Greening L A, Greene D L, Dfiglio C. Energy efficiency and consumption—the rebound effect—a survey[J]. Energy policy, 2000, 28(6):389–401.
- [6] DOE. Annual Energy Review[E]. DOE, 2011.
- [7] DOE. RESIDENTIAL ENERGY CONSUMPTION SURVEY (RECS)[E]. DOE, 2017.
- [8] Haas, R. and P. Biermayr. The rebound effect for space heating empirical evidence from Austria. Energy policy, 2000, 28(6):403–410.
- [9] Galvin, R. Estimating broad-brush rebound effects for household energy consumption in the EU 28 countries and Norway: some policy implications of Odyssee data. Energy Policy, 2014, 73:323–332.
- [10] Grossmann, D., R Galvin, J. Weiss, R. Madlener, and B.Hirschl. A methodology for estimating rebound effects in non-residential public service buildings: Case study of four buildings in Germany. Energy and Buildings, 2016,111:455–467.
- [11] 薛澜, 刘冰, 戚淑芳. 能源回弹效应的研究进展及其政策涵义 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 10:5559.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准 [S]. 2010-08-01.
- [13] 李哲. 中国住宅中人的用能行为与能耗关系的调查与研究 [D]. 北京: 清华大学, 2012.

区域住宅冷负荷的模拟方法研究

安晶晶¹, 燕 达¹, 洪天真², 孙开宇²

(1. 清华大学建筑学院建筑节能研究中心, 北京 100084; 2. 劳伦斯伯克利国家实验室建筑技术与城市系统部, 伯克利, 美国)

[摘 要] 近年来, 我国的区域供冷系统在城市住宅小区中得以广泛应用。大多数系统存在选型偏大的现象, 初投资浪费、系统运行效率低, 造成能源的浪费。因此, 提出一套协助合理选型的区域负荷准确预测方法是实现区域供冷系统应用需要解决关键问题之一。本研究提出了一套模拟区域住宅冷负荷的新型随机建模方法, 主要包含以下部分: (1) 选取 7 个典型住宅模型来代表整个小区的住宅形式; (2) 基于大量用户问卷调研结果得到的随机的人行为模型来反应小区内不同用户在时间上和空间上行为的差异性; (3) 采用随机抽样的方法组合建筑模型和各类人行为模型来得到整个小区的所有住宅模型。本研究将使用能耗模拟软件为 DeST 对武汉某住宅小区中进行模拟结果与实测结果的对比, 结果表明过于简化的人行为模型会造成系统尖峰负荷和总负荷的过大估计, 本研究提出的模型更贴近实际测试结果。为了推广此模拟方法, 未来工作计划简化模拟流程和数据要求, 进一步探索此方法在热负荷预测和其他区域 (如商业区域) 的应用。

[关键词] 随机模拟; 人行为; 住宅小区负荷; DeST; 冷负荷; 建筑性能模型

0 引言

住宅建筑的能耗在全世界领域的能耗中的占比较大。2006 年, 美国住宅领域的建筑能耗占全体一次能源的 20% 以上^[1]。欧盟的北部住宅能耗占总能耗的 30% 左右^[2]。在 2022 年, 中国建筑领域的能耗预计达到总能耗的 35%, 暖通空调能耗占全体住宅能耗的百分 65%^[3]。因此, 近年来越来越多的学者关注到住宅建筑节能, 研发出一系列降低能耗的技术。

区域能源系统是近年来兴起的一项节能技术^[4-6], 它可以同时为一个区域或城市的多栋建筑供应冷/热量。因此, 与分散的空调设备 (如分体空调) 相比, 此项技术采用的大容量机组具有更高的效率, 以及可利用可再生能源如地下水等^[6,7]。为了更好的利用这项技术, 实现高能效和低能耗, 我们需要更加准确的预测建筑中用户的冷热量需求。

与单户住宅或独栋楼相比, 一个住宅小区通常包含成百上千户不同需求的住户。不同住户的负荷曲线在时间上和空间上存在较大差异。Brounen 等人^[8]调研了 305001 个住宅在 2008~2009 年的用能情况, 其年能耗存在的较大差异证明了这种差异性的普遍存在。Weissmann 等人^[5]采用两栋楼的负荷曲线来表征不同住户负荷的差异性以及其对集中系统供冷负荷尖峰的影响。Fonseca 和 Schluter^[9]强调了解区域系统内用户负荷时间上和空调上的差异性对于设备选型和控制策略应用的重要性。

现在我国设计中常采用两种负荷模拟算法。一种是全时间全空间的模拟算法, 即认为气象是最主要的影响因素, 建筑室内发热量对负荷的影响较小, 假设其为恒定值且不随时间和空间变化, 而所有房间的空调均保持持续开启, 这也是我们设计手册中常用的一种方法。随着动态模拟工具的发展, 很多学者认识到人行为的作用, 因此提出基于实测调研的人员、灯光、设备等作息应该用于区域负荷模拟当中, 否则, 模拟结果将和实际值有较大偏差。但这种作息为预先设定的固定作息, 如人员早晨 8 点离家, 下午 6 点到家, 不受室内外环境的变化和随机因素的影响。简毅文^[10]在北京住宅开展了大量调研测试, 并提炼出典型几类可应用于模拟计算的作息曲线。通常为了简化计算便于工程应用, 每类作息只简化为了有限的几条曲线。然而, 这两种方法都不能全面反应不同用户负荷的差异性, 可能

造成系统尖峰负荷和总负荷的过大估计。因此, 我们需要一套体现不同住户的负荷差异性的系统负荷模拟方法应用于区域能源系统的设备选型。

已有一些研究关注到区域中负荷的差异性, 但他们主要从建筑类型、朝向和围护结构性能等角度描述这种差异性^[5,9,11]。近年来, 越来越多学者认识到人行为是造成不同用户负荷差异的关键因素之一。李兆坚等人^[12]调研了北京市一栋住宅楼内 25 户住宅, 发现其供冷季空调电耗变化范围较大, 从 0 到 15kW·h/m², 证明夏季空调用量的差异不仅受到天气和空调系统类型的影响, 更多受到人行为差异的影响。周欣等人^[13]通过模拟手段分析了在住宅建筑中人员开空调模式对空调能耗的影响, 结果表明不同的空调使用模式可以造成数十倍的空调电量影响。因此, 本研究主要采用详细的人行为模型来刻画不同住户负荷的差异性。

总体而言, 本研究提出了一套模拟区域住宅冷负荷的新型随机建模方法, 主要包含以下部分: (1) 选取 6 个典型住宅模型来代表整个小区的住宅形式; (2) 基于大量用户问卷调研结果得到的随机的人行为模型来反应小区内不同用户在时间上和空间上行为的差异性; (3) 采用随机抽样的方法组合建筑模型和各类人行为模型来得到整个小区的所有住宅模型。本研究将此方法应用于武汉某住宅小区中进行模拟结果与实测结果的对比, 并探讨此方法在区域能源系统冷机选型的应用性。

1 研究方法

1.1 模型介绍

本研究采用自下而上模型来计算整个小区的热负荷如下图所示, 主要考虑了六个主要因素的影响: 住宅类型, 人员位移、空调设定温度、照明开启模式、窗户开启模式和空调开启模式。人员位移主要受到人数和移动方式的影响, 采用事件和马尔科夫矩阵模拟得到^[14-16]。本模型主要考虑了四种人行为: 空调设定温度、照明开启模式、窗户开启模式和空调开启模式。随机人行为方法为每类人行为定义了几种不同的模式, 分别采用不同的概率模式表示^[17,18]。根据实际调研测试结果, 可以知道各影响参数的比例, 假设各影响因素相对独立, 通过随机采样的方式为整个小区内所有住宅指派对应的参数。采用详细的人行为模型和建筑能耗模拟软件, 可以计算得到每个住宅在各时刻人员

位移、人行为以及热负荷，通过加和得到整个住宅区域的逐时热负荷。因此，此模型可以从时间和空间上体现人行为的差异性，这是本模型与传统能耗模拟方法相比最大的创新之处。

本研究采用清华大学自主研发的建筑能耗模型软件 DeST 作为模拟工具^[19]，此软件现已集成人员位移和包括照明人行为、空调开启行为和窗户开启行为在内的人行为模型^[20]。建筑能耗模型建立于原有 DeST 环境中，关于人员位移和人行为相关信息储存在额外的 SQLite 数据库。在建筑能耗模拟过程中，人行为主要通过以下三步进行计算：（1）采用马尔科夫转移矩阵模型计算人员位移，结果也储存在 SQLite 数据库中；（2）基于人员位移情况和室内照度计算照明设备开启情况，结果仍储存在 SQLite 数据库中；（3）空调开启行为和窗户开启行为与当前时

刻的热环境相耦合，模拟模块被离散为 5 或 10min 时间步长。每次计算时，首先确定空调和窗户的状态，再计算得到室内温度、湿度和冷/热负荷，最后把各设备的作息、室内环境参数和建筑能耗储存在输出文件当中。因此，考虑到计算精度和运算时间，本研究采用 10min 作为时间步长。

1.2 技术路线

本研究将提出的区域负荷的随机人行为模拟算法应用于武汉的一个住宅小区中，用于评估此方法是否能准确反应人行为在时间上和空间上的多样性。案例分析的技术路线如图 2 所示。

首先，开展调研测试获取案例小区的建筑信息，包括住宅数量、住宅类型、气象参数和空置率等，这些参数将被用于建立典型住宅能耗模型。此外，我们还测试了案例

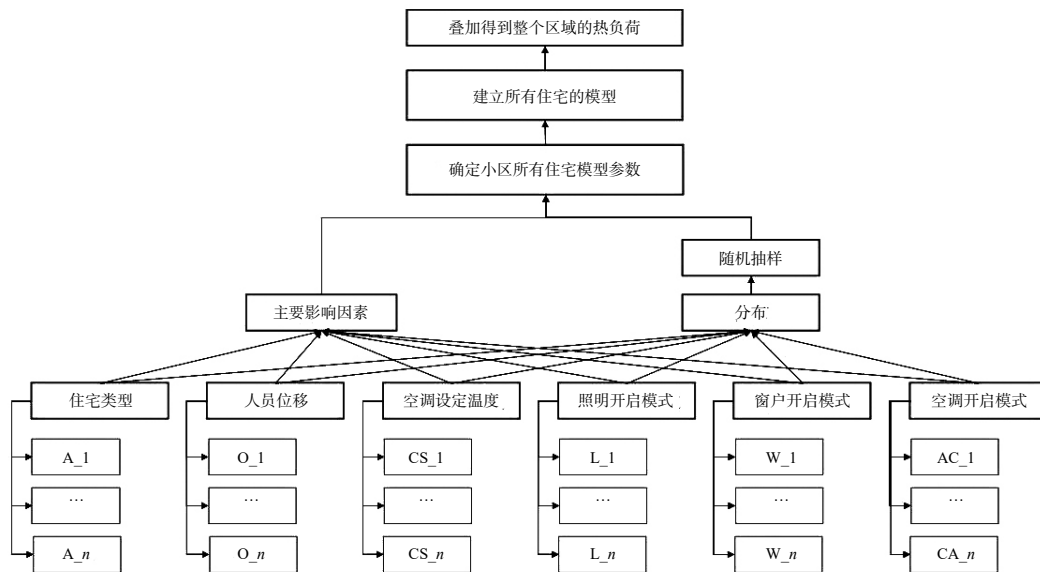


图 1 住宅区域热负荷模拟的自上而下方法

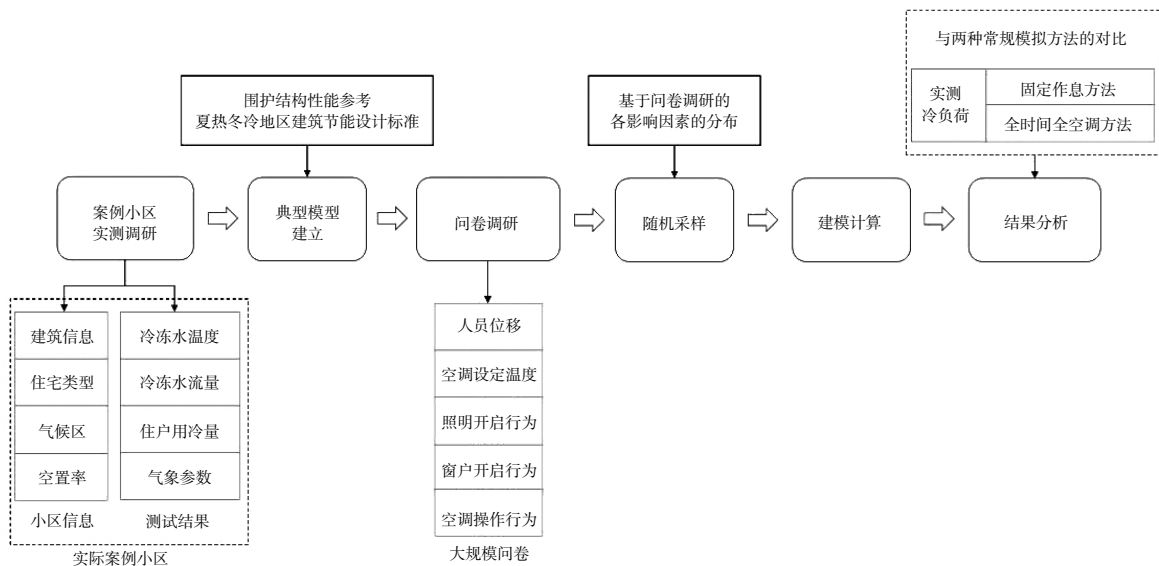


图 2 技术路线图

小区冷站内冷水机组进出口水温 and 流速, 计算获得整个集中空调系统的供冷量, 并将此数据最为评估模拟计算结果的真值。通过和物业管理部分的沟通, 获得各户月空调冷量的统计数据。

其次, 根据调研获得住宅类型建立了 7 个典型住宅模型。由于这个小区建于 2009 年, 围护结构性能采用夏热冬冷地区建筑节能设计标准 2001 版的相关参数。

第三, 开展问卷调查获取人员位移和各类人行为模式的模式和比例, 确定各模式对应的模型参数。本案例中共采用了 6 种人员位移模式, 每类人行为包含 4 或 5 种典型人行为模式。

第四, 基于问卷调查结果采用随机采样的方式为小区中各典型住宅模型确定人员位移模式和人行为模式。

第五, 建立各住宅的能耗计算模型并进行模拟计算, 将所有住宅的负荷曲线叠加得到整个区域负荷曲线。

最后, 通过对比此方法模拟得到的区域负荷, 与常规算法的计算结果、调研测试结果进行对比分析, 评估此方法的效果。

2 案例分析

2.1 案例小区介绍

案例调研的小区位于湖北省武汉市, 建于 2009 年, 包含 5 栋 21 层的住宅楼, 总建筑面积超过 5 万 m^2 。整个小区包含 414 户, 可以根据住宅面积、朝向、分区等划分为 7 类, 因此, 本研究为这 7 类住宅分别建立了典型的住宅模型。小区的空置率为 11%, 即有 45 户没有人居住。

小区采用集中空调系统为整个小区提供 24 小时的冷/热量, 冷源为 2 台额定冷量为 633kW、输入功率为 112kW 和 1 台额定冷量为 928kW、输入功率为 156kW 的水源热泵, 控制策略为台数控制。有 4 台定频的冷冻水水泵。因此, 通过改变冷冻水泵开启的台数和旁通阀开关状态可以调整系统供冷量。空调末端为可以调节开关的风机盘管。小区空调收费方式为根据实际用量收费, 因此可以假设用户空调用量等于用户的实际需求。

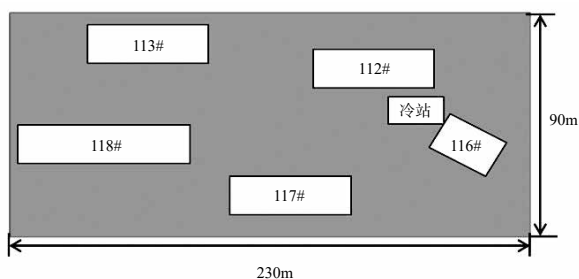


图 3 案例区域的示意图 (5 栋楼和 1 个集中供冷站)

2.2 输入参数汇总

为了评估和验证随机人行为方法的性能, 我们将此方法模拟结果与两种常规算法, 即全时间全空间开启方法和固定作息方法, 及测试结果进行对比。随机人行为方法主要基于随机的人员位移和人行为模型。全时间全空间方法假设所有房间所有时刻都有人, 且室内发热量恒定, 通风换气次数为 1 次每小时, 空调保持开启状态。固定作息方法考虑到室内发热量、通风、空调作息等时间上差异性, 因此采用参考作息作为输入条件。下表汇总了三种模拟算法的输入条件。

表 1 三种模拟算法的模型输入条件

输入参数	随机人行为方法	全时间全空间方法	固定作息方法
建筑外形	实际社区建筑		
空置率	11%		
围护结构性能	参考 2001 年建筑设计节能标准		
气象参数	2013 年实际气象参数		
人员位移作息	人员移动模型	全时间全空间恒定的室内发热量，照明发热密度为 0.0141kW·h/m ² ，人员和设备的发热密度为 4.3W/m ²	不同房间根据实测调研采用不同的人行为、照明和设备的最大发热密度，固定作息
照明开启行为	开灯人行为模型		
设备使用行为	为每种人员位移设定固定设备开启作息		
空调设定温度	26℃		
空调使用行为	空调开启人行为模型	一直开启	各房间采用不同的固定作息，空调启停温度为 29℃
窗户开启行为	窗户开启人行为模型	一直开启，换气次数为 1ACH	动态变化，换气次数为 0.5 至 1ACH
空调房间	除厨房、卫生间和走廊外的主要房间		

2.3 结果分析

模拟计算的结果被整理为与实测相同的时间步长 (5 分钟) 和周期 (7 月 5 日早晨 9 点至 8 月 31 日晚上 24 点), 从以下五个房间展开对比分析:

(1) 区域总冷量对比

结果表明随机人行为方法与实测结果的误差为 -7%, 固定作息方法为 4%, 均可以较好的反应区域的实际总冷量。然而, 全时间全空间方法过大的估计了区域的总冷量 (详见图 4)。

(2) 区域尖峰负荷对比

随机人行为方法具有明显的优越性, 与实测结果相比误差仅为 9%。而两种常规模拟方法的计算结果不尽如人意, 误差分别为 151% 和 55%。固定作息方法比全时间全空间方法的误差更大。主要是因为固定作息方法中, 所有用户采用相同的作息而不是一直开启的作息, 因此在所有用户同时开启空调时就会出现一个较大的尖峰负荷来消除墙体和空气蓄热的影响。而全时间全空间方法假设所有用户一直开启空调, 因此其计算的尖峰负荷要大于实测结果但是仍然比固定作息方法要小 (详见图 5)。

(3) 区域负荷分布对比

所有模拟的负荷分布均与实测结果有较大差别, 主要原因在于测试的冷量数据是冷机的供应量, 而冷机的供冷量主要受到冷机台数和对应的冷冻水泵台数的控制, 因此, 冷机的供冷量是阶梯式变化而不是连续供应的。从图中可以看出, 供冷量主要集中在一些特定值, 如 400kW, 800kW, 1600kW。而三种模拟方法得到的结果均是连续变化的数值, 因此和实测结果差距较大。尽管如此, 随机人行为方法模拟得到的结果与实测结果最为接近, 因为大多数情况下整个区域的负荷均分布在 700~800kW 的范围内, 仅有 20% 的数据大于 1000kW, 这符合实测结果的一些特性。然而, 固定作息方法模拟的结果偏大 (大于 1600kW) 或偏小 (0kW), 而全时间全空间方法模拟的结果严重偏大, 有 30% 的数据大于 1600kW, 这两种常规算法的结果与实测结果存在明显偏差 (详见图 6)。

(4) 区域负荷曲线对比

我们选取其中一周的数据作为示例展示三种模拟算法和实测数据的对比结果。从下图可以看出, 整个区域的负

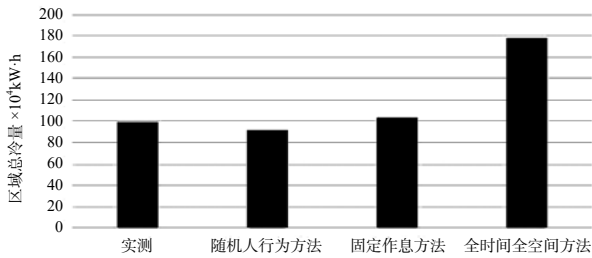


图4 三种模拟算法和测试结果的区域总冷量对比
(7月5日~8月31日)

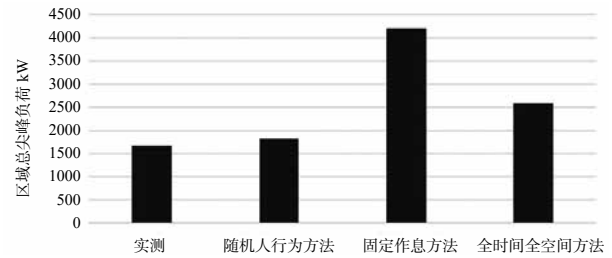


图5 三种模拟算法和测试结果的区域总尖峰负荷对比
(7月5日~8月31日)

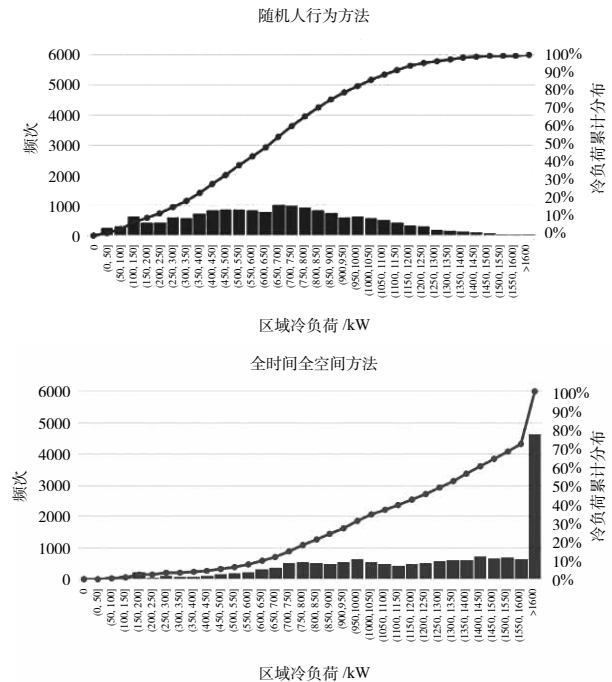
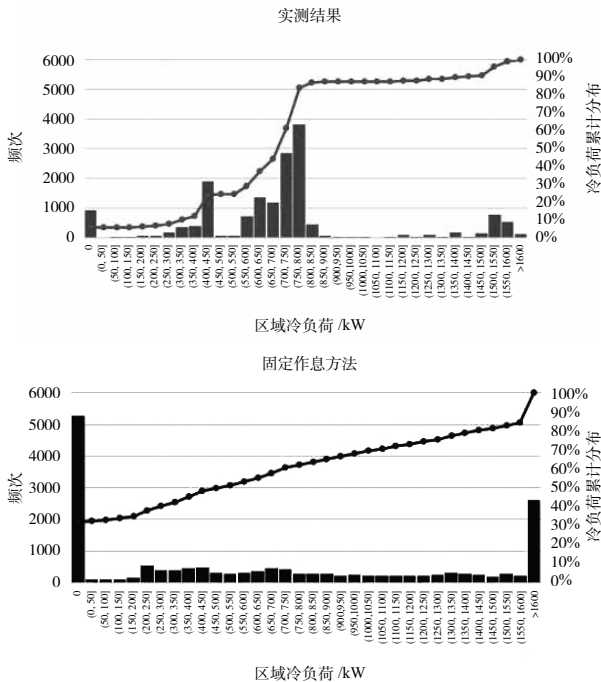


图6 三种模拟算法和测试结果的区域负荷分布对比 (7月5日~8月31日)

荷曲线在上午相对较低,在住户下班回家后开始上涨,直到晚上睡觉曲线趋于平稳。因此,我们可以推测出此小区的大多数住户早晨离家上班、上学等,有一部分住户中午回家后不再外出,大多数住户在夜间均待在家中。不同住户回家的时间不一致,开空调的习惯也有差别,因此各户的空调尖峰负荷出现的时刻不同,由于这种差异性的存在,整个小区的尖峰负荷要小于两种常规算法的计算结果,而随机人行为方法很好的表征了不同用户负荷的差异性。全时间全空间方法假设整个小区全时间全空间的开启空调,区域的负荷曲线主要受到室外气象参数的影响,尖峰负荷出现在中下午 12:00~15:00,即一天中最热的时候,因此区域负荷的尖峰值和总量均大于实测结果。固定作息方法认为所有住户白天不开空调,晚上同时到家后立即开启空调,由于空调需要消除整个白天积蓄在墙体、家具和空气中的蓄热,因此整个区域会出现一个较大的尖峰负荷,之后负荷曲线开始下降,直到住户睡前回到卧室同时打开卧室空调时,又会出现另一个尖峰负荷。因此,固定作息方法模拟的尖峰值要大于全时间全空间方法,但总量和实测结果差别不大。本研究提出的随机人行为方法可以很好

的反应小区不同用户使用的差异性,从而得到符合实际情况的区域负荷曲线(详见图7)。

(5) 各户供冷季总用冷量分布

分别统计各户在7、8月的总用冷量分布,对比结果如下图所示。X轴表示不同的住宅,Y轴表示对应所有住宅在7、8月的总用冷量的累计值。可以看出,随机人行为方法预测的分布情况与实测结果非常接近。然而实测小区用户供冷季总用冷量最大值为8000kW,高于随机人行为方法的模拟结果,主要是因为随机人行为方法仅考虑了最常见的几种行为模式,而且每次计算各住户的行为模式均是随机采样设定,因此,最耗能的住户可能不在模拟设定的算例中。两种常规算法假设所有住户的使用方式一致,因此,相同户型的住宅空调总用冷量相同。全时间全空间方法假设所有房间都开启空调,因此不同户型的影响较大。固定作息方法认为只有卧室和客厅会开启空调,因此户型对总用冷量的影响较小(详见图8)。

2.4 模型应用

本研究提出的随机人行为方法可应用于区域能源系统的空调能源系统的设备选型,尤其是根据尖峰负荷确定设

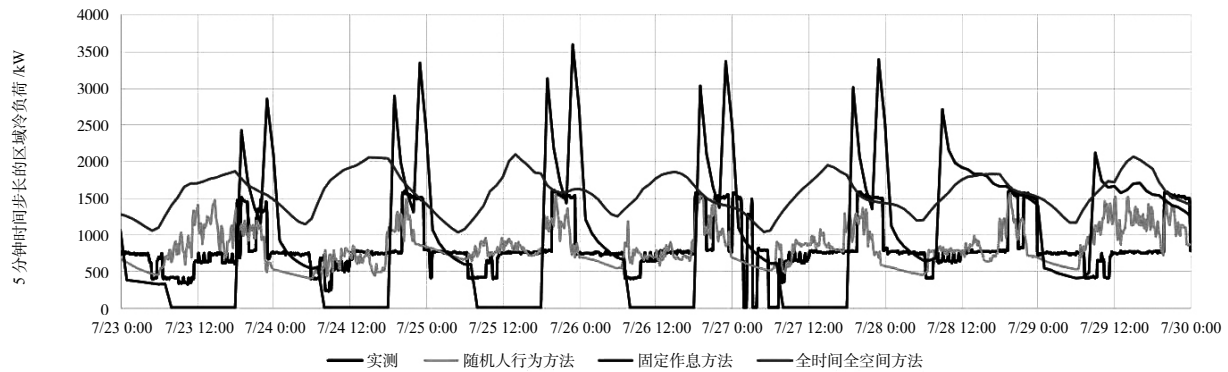


图7 三种模拟算法和测试结果的一周区域负荷曲线对比

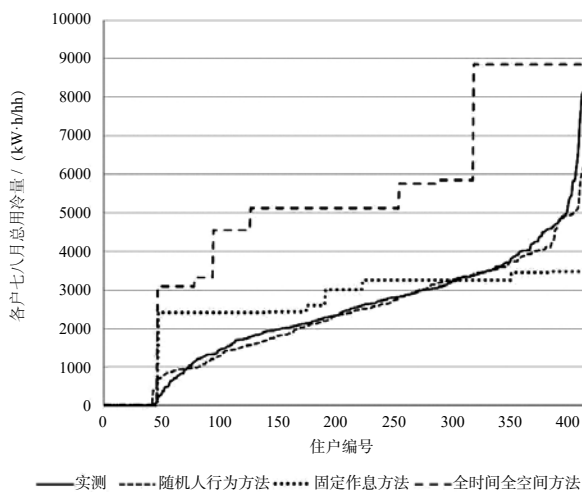


图8 三种模拟算法和测试结果的各户供冷季总用冷量分布 (7月和8月)

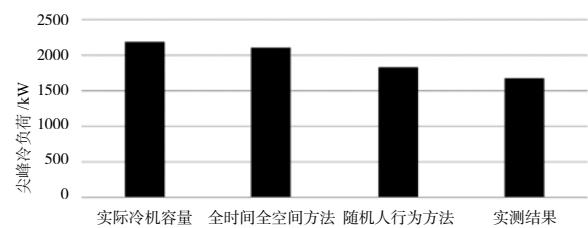


图9 模拟算法和测试结果的尖峰负荷与实际设备容量的对比分析

备的最大容量,根据负荷分布确定设备的搭配。我们在上述案例小区中应用此方法确定冷机的容量见下图所示。由于设备选型阶段位于建筑设计阶段,因此应该假设小区的空置率为0,使用典型气象年的气象参数进行模拟计算。结果表明,实际选型存在30%的冗余现象,如果使用本研究提出随机人行为方法,设备冗余减小到9%,避免设备选型过大,降低初投资,实现设备高效率设备运行(详见图9)。

3 结论

人行为相关的假设对区域负荷预测结果影响较大。本研究提出的随机人行为方法采用随机的人行为模型可以表征详细的人行为,以及不同住户负荷时间上和空间上的差异性。通过五方面的对比分析,随机人行为方法模拟得到的结果和实测结果较为接近,证明了此方法的有效性。本研究也对比了随机人行为方法和两类常规算法的模拟结果。由于常规算法过于简化了人行为的复杂性和差异性,导致总能耗和尖峰负荷的过大估计。此外,本研究也应用此方法于一个区域能源系统的尖峰负荷确定和设备容量确定工作。

本研究是首次应用和评估详细人行为模型应用于区域负荷预测的文章。随着随机人行为模拟方法的发展,如何应用此方法是一个亟待被解决的问题。因此,本研究对于未来在区域负荷预测时使用详细的人行为模型具有重要参

考价。

尽管本研究提出的随机人行为方法显著提高了预测区域负荷的效果,但此方法存在以下缺陷:(1)需要更详细的人行为模型输入条件;(2)需要合理使用人行为模型来保证计算结果的准确性,不合适的模型会导致冷机选型的过大或过小。因此,此方法对用户使用人行为模型的能力要求较高。因此,未来工作需要提出简化随机人行为方法用于实际工程应用。而且需要推广此方法在商业建筑区域或混合建筑区域的应用,以及热负荷模拟。

参考文献

- [1] Ewing R, Rong F. The impact of urban form on U.S. residential energy use. *Hous Policy Debate* 2008;19:1-30. doi: 10.1080/10511482.2008.9521624.
- [2] Guerra Santin O, Itard L, Visscher H. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy Build* 2009;41:1223-32. doi:10.1016/j.enbuild.2009.07.002.
- [3] Lam JC, Wan KKW, Tsang CL, Yang L. Building energy efficiency in different climates. *Energy Convers Manag* 2008;49:2354-66. doi:10.1016/j.enconman.2008.01.013.
- [4] Zhang WJ, Huai LL, Liu JL. Comparison analysis of energy consumption characteristics between decentralized and centralized AC systems in residential buildings by commissioning (Chinese). *Proc. 5th Int. Work. Energy Environ. Resid. Build. 3rd Int. Conf. Built Environ. Public Heal. Guilin, China, 2009*, p. 1768-75.
- [5] Weissmann C, Hong T, Graubner CA. Analysis of heating load diversity in German residential districts and implications for the application in district heating systems. *Energy Build* 2017;139:302-13. doi:10.1016/j.enbuild.2016.12.096.
- [6] Rezaie B, Rosen MA. District heating and cooling: Review

- of technology and potential enhancements. *Appl Energy* 2012;93:2–10. doi:10.1016/j.apenergy.2011.04.020.
- [7] Chow TT, Au WH, Yau R, Cheng V, Chan A, Fong KF. Applying district-cooling technology in Hong Kong. *Appl Energy* 2004;79:275–89. doi:10.1016/j.apenergy.2004.01.002.
- [8] Brounen D, Kok N, Quigley JM. Residential energy use and conservation: Economics and demographics. *Eur Econ Rev* 2012;56:931–45. doi:10.1016/j.eurocorev.2012.02.007.
- [9] Fonseca JA, Schlueter A. Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Appl Energy* 2015;142:247–65. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.068.
- [10] Jian Y. Study on assessment method of thermal performance of residential buildings. 2003.
- [11] Kazas G, Fabrizio E, Perino M. Energy demand profile generation with detailed time resolution at an urban district scale: A reference building approach and case study. *Appl Energy* 2017;193:243–62. doi:10.1016/j.apenergy.2017.01.095.
- [12] Li Z, Jiang Y, Wei Q. Survey on energy consumption of air conditioning in summer in a residential building in Beijing (in Chinese). *Heat Vent Air Cond* 2007;37:46–51.
- [13] Zhou X, Yan D, Feng X, Deng G, Jian Y, Jiang Y. Influence of household air-conditioning use modes on the energy performance of residential district cooling systems. *Build Simul* 2016;9:429–41. doi:10.1007/s12273-016-0280-9.
- [14] Wang C, Yan D, Jiang Y. A novel approach for building occupancy simulation. *Build Simul* 2011;4:149–67. doi:10.1007/s12273-011-0044-5.
- [15] Chen Y, Hong T, Luo X. An agent-based stochastic Occupancy Simulator. *Build Simul* 2017. doi:10.1007/s12273-017-0379-7.
- [16] Ahn K-U, Kim D-W, Park C-S, de Wilde P. Predictability of occupant presence and performance gap in building energy simulation. *Appl Energy* 2017. doi:10.1016/j.apenergy.2017.04.083.
- [17] Ren X, Yan D, Wang C. Air-conditioning usage conditional probability model for residential buildings. *Build Environ* 2014;81:172–82. doi:10.1016/j.buildenv.2014.06.022.
- [18] Yan D, O'Brien W, Hong T, Feng X, Burak Gunay H, Tahmasebi F, et al. Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges. *Energy Build* 2015;107:264–78. doi:10.1016/j.enbuild.2015.08.032.
- [19] Yan D, Xia J, Tang W, Song F, Zhang X, Jiang Y. DeST — An integrated building simulation toolkit Part I: Fundamentals. *Build Simul* 2008;1:95–110. doi:10.1007/s12273-008-8118-8.
- [20] Feng X, Yan D, Hong T. Simulation of occupancy in buildings. *Energy Build* 2015;87:348–59. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.067.
- [21] GJG-134. Design Standard for Energy Efficiency of Residential Buildings in hot summer and cold winter zones. 2010.
- [22] Zhu GJ, Zhang XL, Yan D. Study on simulation method of heating and air-conditioning energy consumption of residential buildings (Chinese). *Journal Chongqing Jianzhu Univ* 2006;28(6):95–8.
- [23] Xia R. Study on the characteristics of heating and air-conditioning load of residential buildings in hot summer and cold winter region. 2013.

中国城镇住宅电视用能情况及技术政策分析

张 洋, 燕 达, 郭偲悦, 胡 珊, 钱明杨

(清华大学建筑学院建筑节能研究中心, 北京 100084)

[摘 要] 本文基于目前家电家庭拥有率提高, 技术种类增多, 节能政策大量出台, 居民使用方式变化大的特点, 应用新的自下而上的宏观能耗模型, 将技术与行为作为输入变量, 考虑了中国不同省份之间的区域差异, 基于 2015 年全国城镇住宅家庭用能情况问卷调查的数据, 以电视机为例, 对中国城镇住宅电视机的用能情况进行了计算与分析。

[关键词] 宏观能耗模型; 城镇住宅; 电视能耗

0 引言

提升和人民生活水平的提高, 我国的城镇住宅能耗近年来持续增长, 根据《中国建筑节能年度发展研究报告 2017》, 从 2001 年到 2015 年, 我国城镇住宅的终端用能总量增长了接近 2 倍。2015 年中国城镇住宅 (不含北方供暖) 的能耗为 1.99 亿 tce, 占建筑总商品能耗的 23%, 其中炊事、照明和家电是城镇住宅能耗中最大的三个分项。从发展趋势上看, 城镇住宅炊事能耗近年来增速已经放缓, 相比之下, 家电与照明能耗增长迅速。根据清华大学建筑节能研究中心 CBEM 的结果, 中国城镇住宅家电的总能耗 2015 年已达到 1297 亿 kW·h, 占城镇住宅总能耗的 20%, 并且保持了迅速上升的趋势。

随着社会的发展, 城镇住宅家电的用能特点也发生了很大变化, 有如下值得关注的几个特点: 第一, 家电保有量不断上升。根据《中国统计年鉴》的数据, 21 世纪以来我国家电的保有量增长迅速, 例如家用电脑在 2000 年的每百户保有量为 9.70 台, 而到 2015 年则增长到了每百户 78.52 台, 在短短的 15 年间迅速普及, 除此之外洗衣机、电视机、电冰箱等主要家电设备的保有率也在快速上升。第二, 家电种类增多, 分为两个方面, 一方面是原有家电在近几年中发展出新的类型, 例如电视机从原有的 CRT 电视, 发展出以平板电视为代表的新种类; 另一方面, 涌现出大量的新家电, 例如烘干机、空气净化器、新风机、智能马桶圈等。第三, 国家出台大量家电节能的相关政策, 例如 2004 年我国启动了能效标识制度, 截至 2016 年, 已经有 35 种产品被纳入了能效标识制度的管理范围, 除此之外, 我国还出台了政府节能采购, 能效领跑者制度, 节能产品惠民工程等政策。这些政策对于我国家电的整体能效情况产生了巨大的影响。第四, 居民的使用行为发生了很大变化, 以电视机为例, 根据央视索福瑞收视率统计的结果, 从 2001 年到 2015 年, 我国观众人均日收拾时间从 184min 逐年下降到 160min, 变化显著。这些用能特点的变化对于我国城镇住宅家庭用能具体产生了怎样的影响, 为实现节能的目标, 应走怎样的发展路径, 值得去研究。

在现有的研究中, 宏观建筑能耗模型是计算研究宏观建筑能耗, 并且分析建筑能耗相关的技术政策效果的重要工具。宏观建筑能耗模型主要分为两大类, 一类是自上而下的“top-down”模型, 这类模型着眼于宏观趋势, 基于历史的宏观数据分析用能和整体经济的关系, 对宏观能耗进行计算和预测, 这种能耗模型对于能耗的研究主要在宏观层面上, 而缺少技术细节。另一类是自下而上的“bottom-up”模型, 基于技术以及行为细节自下而上逐层得出宏观能耗。

目前国内外多家机构建立了宏观能耗模型对于不同国家和地区的建筑用能情况进行了研究。例如国际能源署提出 WEM 模型, 在能耗影响因素方面, 考虑了人均 GDP、人口、城镇化率、建筑面积、住宅入住率、服务业增值、用能价格和历史能耗等因素。模型直接将各个终端用能分项的用能强度作为输入参数, 没有考虑技术与使用行为对于能耗的影响。劳伦斯伯克利国家实验室的 Zhou Nan 等人建立模型对中国的建筑用能进行了研究, 在模型中考虑了人口、户数、建筑面积以及各类建筑终端用能强度对于建筑能耗的影响, 但对于终端用能强度, 只考虑了技术与能效的影响, 而没有考虑使用行为。清华大学杨秀等人建立 CBEM 对中国建筑能耗进行了研究, CBEM 中考虑了不同人群用能习惯的不同, 将住宅各分项的用能强度划分为高中低三档, 但是模型中仍然是将用能强度作为直接输入量, 而没有将设备技术与使用行为作为模型的输入条件进行研究。

总体而言, 目前国内外现有的多数建筑能耗模型对于技术和行为的考虑还不足, 对此有考虑的模型也是将能耗强度作为输入条件, 而未能将技术与行为作为模型的输入变量进行考虑。第一, 对于中国这样的大体量国家很难得到准确的用能强度平均值; 第二, 将宏观影响因素以及各分项用能强度作为输入变量, 也无法具体深入研究技术与行为对于能耗的影响, 研究结果很难应用到实际的政策制定中; 第三, 现有模型对未来技术和行为变化的情况下建筑能耗的分析预测能力有限。

基于目前家电家庭拥有率提高, 技术种类增多, 节能政策大量出台, 居民使用方式变化大的特点, 本研究应用新的模型, 将技术与行为以及中国各省份之间的区域差异作为输入变量进行考虑。并基于 2015 年全国城镇住宅家庭用能情况问卷调查的数据, 以电视机为例, 对中国城镇住宅电视机的用能情况进行了计算与分析。

1 研究方法

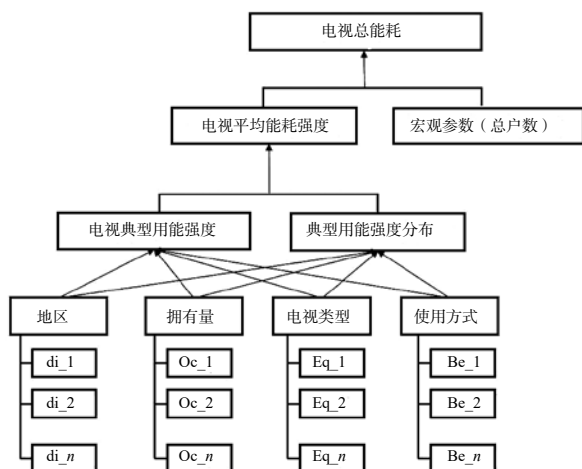
本研究建立了自下而上的宏观能耗模型, 模型的整体结构如图 1 所示, 模型中考虑了地区、每户拥有量、电视类型以及使用方式作为用能强度的影响因素, 总能耗的计算方法如下式:

$$E_{\text{总}} = HH \times \sum_i^n (I_i \times D_i)$$

式中, HH 为城镇住宅总户数; I_i 为典型用能强度, D_i 为各典型用能强度所占的比例; $E_{\text{总}}$ 即为电视机的总用能量。其中 $\sum_i^n (I_i \times D_i)$ 为电视的平均用能强度。

对于城镇住宅总户数, 可从国家统计局获得。

对于典型用能强度及其分布, 则需要对各影响因素进



行定义，如表1所示，地区因素考虑北京、天津、河北、山东等31个省市，对于设备种类，考虑CRT电视、平板电视1~3级以及无能效平板电视5种，家庭电视拥有量分为0台，1台，2台以及3台以上，使用习惯根据2015年全国问卷调研结果，对平均每台电视每天的使用时长进行统计，划分为5个等级。

表1 影响因素定义

地区	设备种类	拥有量	使用习惯
北京	CRT电视	0台	平均每台电视每天使用0~1h
天津	平板电视能效1级	1台	平均每台电视每天使用2~3h
河北	平板电视能效2级	2台	平均每台电视每天使用4~5h
山东	平板电视能效3级	3台及以上	平均每台电视每天使用5~10h
.....	平板电视无能效		平均每台电视每天使用11h以上

典型能耗强度通过 $I = Eq \times Be \times Oc$ 得到，其中 Eq 为不同种类电视每小时的用电量，用电量参考国家标准《平板电视能效限定值及能效等级》以及实验测得数据得出， Be 为家庭平均每台电视每天的使用小时数，通过统计问卷结果，得到每个等级的平均值， Oc 为每户家庭拥有电视机的台数，具体值如表2所示。

表2 设备及使用行为参数定义

电视种类	每小时用电量 /kW·h	使用时长等级	平均每天使用时长 /h
CRT电视	0.15	0~1h	0.78
平板电视1级	0.05	2~3h	2.47
平板电视2级	0.06	4~5h	4.39
平板电视3级	0.11	6~10h	7.58
平板电视无能效	0.15	11h以上	16.79

典型能耗强度的分布根据清华大学建筑节能研究中心于2015年进行的中国城镇住宅家庭用能情况的调研结果得到。

2 问卷调研

2.1 调研方法

为了全面了解目前城镇家庭的能源消耗水平与能源使用的基本情况，2015年秋季清华大学建筑节能研究中心在全国范围内开展了大样本的问卷调研，覆盖北京、上海、广东、浙江等31省市。

为保证调研样本的代表性，研究对样本质量进行了两方面的控制：

第一是样本规模，具有代表性的样本需要具有足够的样本量。基于根据文献调研，通过下述公式计算得出99%置信度下所需要的最小样本量：

$$\text{最小样本量} = \frac{z^2 \times p(1-p)}{e^2} \div \left(1 + \frac{z^2 \times p(1-p)}{e^2 N} \right)$$

其中 N 代表人口规模，取2014年全国城镇住宅总人口7.49亿； e 为误差范围，这里取0.02； z 为 z 分布的取值，在99%置信区间下为2.58。计算得出在上述条件下最小样本量为4160。

本研究在全国共回收问卷11517份，其中有效问卷11287份，大于99%置信度下的最小样本量。

第二是样本分布，为保证样本分布与全国实际分布最大程度上具有一致性，本调研对于样本分布进行了质量控制，根据《2015中国统计年鉴》人口统计数据，确定了样本的年龄以及收入分布情况，在样本收集时遵循以下两个规则：

(1) 40岁以上人口占有有效样本数的40%。

(2) 家庭年收入小于2万元的样本占10%，2~5万元占10%，5~10万元占60%，10~20万元占10%，20万元以上占10%。

问卷的内容主要包括家庭基本信息（居住地、年龄、家庭人数、教育、收入等），住房基本信息（面积、建设年代等），以及家庭的用能情况，在家庭用能情况中，包括了家庭拥有电视机的种类、台数以及电视机的使用习惯等，与电视机相关的问题如表3所示。

表3 调研问卷中电视机相关问题

电视机相关问题
38. 您家有几台电视，是哪一种类型的？[单选题][必答题]
38-2. 液晶/平板电视的能效等级为（如有多台填写最近买的设备情况）：[单选题][必答题]
38-3 您家电视平均每台每天看_____小时？[填空题][必答题]

2.2 调研结果

根据调研结果，在城镇住宅电视机的拥有量方面，全国城镇家庭电视机拥有量分布如图2所示，全国来看，家庭电视机拥有率为11%，其中多数家庭仅有1台电视，一户拥有多台电视的家庭占26%，全国电视机的百户拥有台数为121.7台，根据《中国统计年鉴2015》，全国电视机百户拥有台数为122.3台，调研结果与国家统计局结果相近。

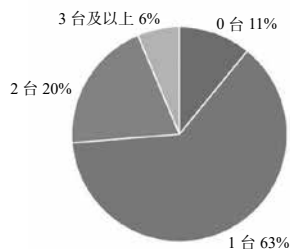


图2 全国电视机家庭拥有量分布

分省来看, 各省的家庭电视机拥有率分布在 0.8~0.95 之间如图 3 所示, 其中贵州、四川、江西等省拥有率较高, 海南、西藏、新疆等省拥有率较低, 地区分布规律不明显。但从各省电视机的百户拥有台数来看(图 4), 各省电视机百户拥有台数分布在 89 台~160 台之间, 其中上海、浙江、江苏等省百户拥有台数较高, 甘肃、宁夏、新疆等省百户拥有台数较低, 整体来看, 百户拥有台数从我国东南到西北递减, 这与经济发展相关, 地区分布规律明显。

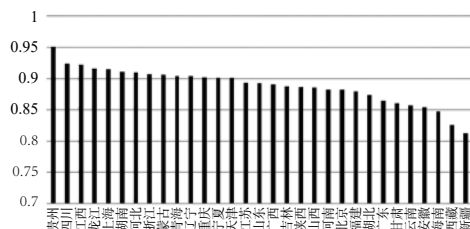


图 3 各省电视机家庭拥有率分布

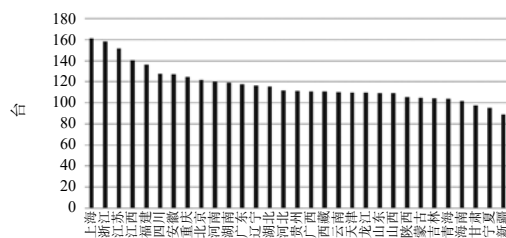


图 4 全国各省电视机百户拥有台数

在电视机种类方面, 平板电视和 CRT 电视在全国家庭中所占的比例如图 5 所示, 目前在全国家庭拥有的电视机中, 平板电视占绝大多数, 占比 83%, CRT 电视仅占比 17%, 分省来看, 各省平板电视与 CRT 电视的相对比例比较接近, 平板电视拥有率绝大多数省份都分布在 80%~90% 之间。全国平板电视的能效分布如图 6 所示, 家庭拥有的平板电视中, 无能效的仅占 8%。

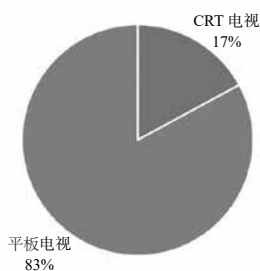


图 5 全国家庭两类电视机拥有率占比

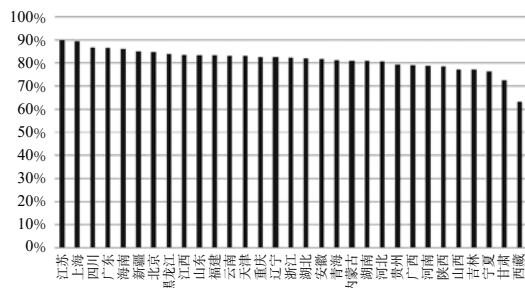


图 6 各省家庭平板电视拥有率分布

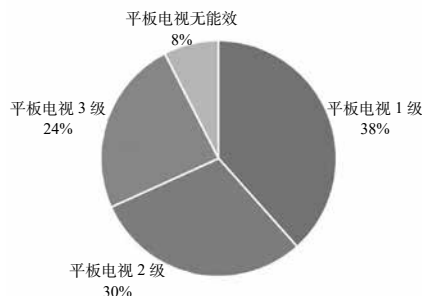


图 7 全国家庭拥有平板电视能效分布

全国家庭每天使用电视机的时长主要分布在 2~5h 之间, 如图 8 所示, 全国家庭平均日使用时长为 4.8h, 分省来看, 电视机的日均使用时长呈现出很强的地区分布规律, 浙江、上海、江西、福建等省家庭电视日均使用时长高, 在 5h 以上, 整体上从东南到西北递减。

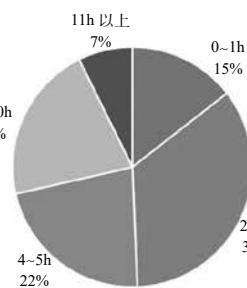


图 8 全国家庭电视机日总使用时长分布

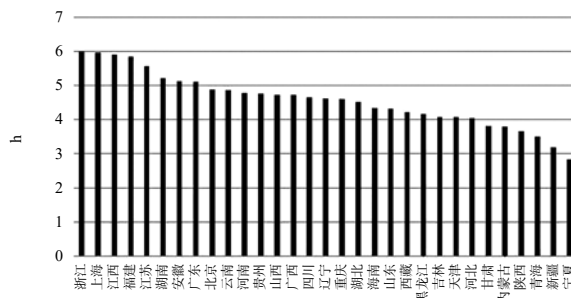


图 9 各省有电视家庭电视机平均日总使用时长分布

3 计算结果

基于以上调研结果及数据来源, 作为模型的输入参数进行能耗计算, 得到 2015 年全国电视机的能耗情况如下:

2015 年全国电视机总用电量 415 亿 kW·h, 平均家庭电耗为 152kW·h, 各省平均家庭年电耗的分布如图 10 所示, 各省的电视机平均家庭年电耗分布在 94kW·h 到 189kW·h 之间, 各省之间差异较大, 其中贵州、浙江、上海、江西、福建等省平均家庭电视机年用电量较高, 海南、宁夏、新疆等省年用电量较低, 整体上具有东南高西北低的特点, 能耗计算结果与问卷调研的结果对应。

例如贵州, 根据问卷调研结果, 电视机的拥有率最高; 平板电视在家庭所拥有电视中所占比例较低, 能耗高的 CRT 电视所占比例较大; 在平均家庭电视日使用时长方面, 贵州省属于中等偏上水平, 所以根据模型计算得到贵州省的平均家庭电视年能耗较高, 所以对于贵州应当加快电视机的更新换代, 更多使用低能耗的电视产品。

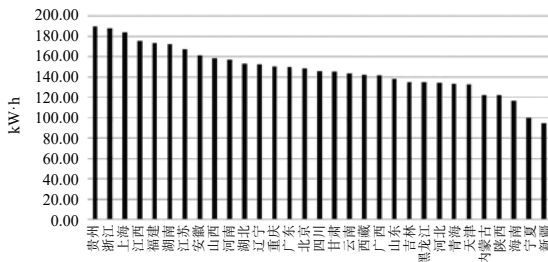


图 10 分省电视机平均家庭年电耗

对于不同设备使用的能耗，如图 11 图 12 所示，2015 年平板电视年总电耗为 230 亿 kW·h，占比 55%，CRT 电视年总电耗为 185 亿 kW·h，占比 45%。根据问卷调研结果，CRT 的家庭拥有率仅占 17%，而消耗了电视机年总电耗的 45%，这是由于 CRT 电视的单位时长用能普遍高于平板电视所致，所以在电视机的节能工作上应当加强对原有 CRT 电视的替代。

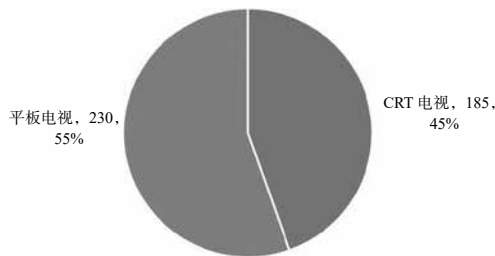


图 11 两类电视全国总电耗占比（单位：亿 kW·h）

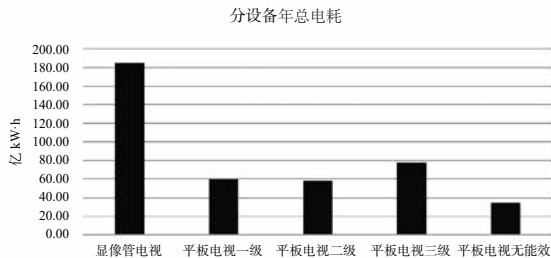


图 12 不同种类电视年总电耗

对于不同类型家庭的用能情况，如图 13 图 14 所示，平均日电视使用时长在 6~10h 的家庭用电量最大，占电视机总用电量的 34%，平均日电视使用时长在 4h 以上的家庭能耗占比达到了 80%，这说明我国电视机能耗的主要产生群体是日均电视使用时长较高的家庭，一部分由于其电视使用时间较长造成的平均家庭能耗高，另一部分由于这部分家庭在中国占比大，所以日均电视使用时长在 4h 以上的家庭群体应是电视节能工作的重点开展对象。

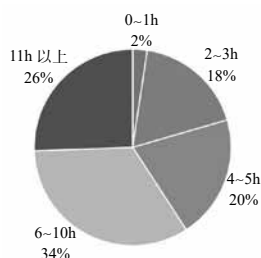


图 13 不同类型家庭用能占比

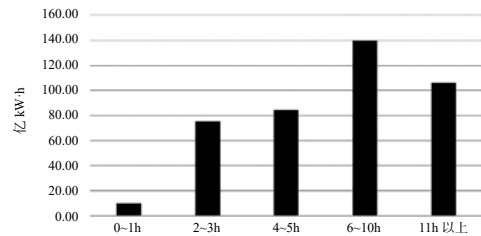


图 14 不同类型家庭年总电耗

4 结论

本文基于目前家电家庭拥有率提高，技术种类增多，节能政策大量出台，居民使用方式变化大的特点，应用新的自下而上的宏观能耗模型，将技术与行为作为输入变量，并且考虑了中国不同省份之间的区域差异。基于 2015 年全国城镇住宅家庭用能情况问卷调研的数据，以电视机为例，对中国城镇住宅电视机的用能情况进行了计算与分析，得到了如下的主要结论：（1）2015 年，全国家庭电视机拥有率在 89% 左右，一户拥有多台电视的家庭占比约 26%，百户拥有台数有一定的地区分布规律，从东南向西北递减；（2）2015 年，全国家庭所拥有的电视中，平板电视占比 83%，目前绝大多数家庭中主要使用的是平板电视；（3）2015 年，全国家庭电视机的平均日使用时长为 4.8h，多数家庭的日使用时长在 2~5h 之间；（4）2015 年，全国电视机总电耗 415 亿 kW·h，平均家庭电耗 152kW·h，各省平均家庭用电量从东南到西北递减；（5）我国 CRT 电视数量占比 17%，但总能耗占到电视机能耗的 45%，应加强对原有 CRT 电视的更新替代工作；（6）日均电视使用时间在 4h 以上的家庭是我国电视机能耗的主要产生群体。

参考文献

- [1] 江亿. 中国建筑节能年度发展研究报告 2017 [R], 清华大学, 2017.
- [2] 彭琛. 基于总量控制的中国建筑节能路径研究 [D]. 清华大学, 2014.
- [3] 杨秀. 基于能耗数据的中国建筑节能问题研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2015[M]. [1] 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [5] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [6] 王钦, 索福瑞. 2014 年中国电视收视市场回顾 [J]. 现代传播, 2015 (2015 年 04):1-10.
- [7] 杜宇宸. 2013 年中国电视收视市场观察 [J]. 现代传播: 中国传媒大学学报, 2014(4):1-8.
- [8] 陈晓洲, 周欣欣. 2011 年中国电视收视市场观察 [J]. 现代传播: 中国传媒大学学报, 2012, 34(4):1-9.
- [9] GB 24850-2013 平板电视能效限定值及能效等级.
- [10] Nan Zhou, Michael A. McNeil, Fridley D, et al. Energy Use in China- Sectoral Trends and Future Outlook. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.
- [11] Kavgić M, Mavrogianni A, Mumovic D, et al. A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector[J]. Building and environment, 2010, 45(7):1683-1697.
- [12] International Energy Agency. World Energy Outlook 2012. Paris: Organization for Economic Cooperation & Development, 2012.

夏热冬冷地区住宅小区居民人行为对地水源热泵系统容量冗余问题的影响分析

钱明杨¹, 燕 达¹, 张 伦², 周 欣³

(1. 清华大学建筑学院建筑节能研究中心, 北京 100084; 2. 东南大学能源与环境学院, 南京 210096;
3. 东南大学建筑学院, 南京 210096)

[摘 要] 随着夏热冬冷地区居民冬季采暖需求提高, 住宅小区的地水源热泵供暖与供冷系统在夏热冬冷地区被广泛使用。其中地水源热泵系统的热泵容量会影响系统的初投资、系统运行能耗与能效, 是重要的设计参数。热泵容量设计应该依据住宅小区的建筑负荷进行设计。但是, 通过实际现场测试调研, 发现夏热冬冷地区住宅小区地水源热泵容量冗余问题非常普遍, 主要原因是现在的系统容量设计方法中没有考虑到居民的采暖空调人行为。本文通过考虑不同居民采暖空调人行为, 建立建筑负荷模型, 模拟结果说明在夏热冬冷地区住宅小区的地水源热泵系统设计时, 需要考虑不同的居民采暖空调人行为。

[关键词] 地水源热泵; 热泵容量; 人行为; 居民建筑; 夏热冬冷地区

0 引言

居住建筑的能耗是建筑能耗的主要组成部分, 而居住建筑能耗的重要组成部分是空调采暖能耗。随着夏热冬冷地区居民冬季采暖需求提高, 居民需要找到一种提高冬季采暖热舒适的系统。其中地水源热泵系统是一种常见的供暖空调热泵系统, 它是通过使用地埋管从地下土壤或者水源中提取热量供应给末端居民用户。地水源热泵系统可以集中供应冷热量, 被认为相对于分体空调系统能效更高且可以降低设备总的容量, 可以减少采暖空调能耗并且降低系统设备的初投资^[1]。近年来, 在部分优惠政策的支持下, 住宅小区的地水源热泵供暖与供冷系统在夏热冬冷地区被广泛使用^[2]。

地水源热泵系统的热泵容量会影响系统的初投资、系统运行能耗与能效, 是重要的设计参数^{[3][4]}。如果热泵容量设计偏小, 不能满足居民室内热舒适。如果热泵容量设计偏大, 则会造成系统能效偏低的问题^[5]、高昂初投资和长回收期。热泵容量设计应该依据住宅小区的建筑负荷进行设计。但是, 现在的系统容量设计方法中没有考虑到居民的采暖空调人行为^[6], 并且现在越来越多的研究指出建筑负荷设计需要考虑人行为的影响^[7]。

在对地水源热泵系统的研究中, 多个在中国寒冷地区的地水源热泵系统测试调研中发现住宅小区的地水源热泵系统长时间在低负荷率下运行^[2,5,8,9]。但是对于夏热冬冷地区住宅小区地水源热泵系统的调研测试案例缺乏。

本文通过在夏热冬冷地区住宅小区地水源热泵系统的测试调研, 发现夏热冬冷地区住宅小区地水源热泵容量冗余问题非常普遍。主要原因是现在的系统容量设计方法中没有考虑到居民的采暖空调人行为。本文将通过考虑不同居民采暖空调人行为, 使用 DeST (Designer's Simulation Toolkits) 软件建立建筑负荷模型, 模拟结果说明在夏热冬冷地区住宅小区的地水源热泵系统设计时, 需要考虑不同的居民采暖空调人行为。如图 1 所示, 本文的研究思路是通过实测调研获得使用地水源热泵系统的住宅小区供暖供冷负荷峰值, 并对峰值负荷与热泵设计容量, 然后对于住宅小区末端采暖空调设备使用率进行调研, 提出居民采暖空调使用人行为典型模式, 建立 DeST 建筑负荷计算模型, 用调研的其中一个案例进行模拟分析。

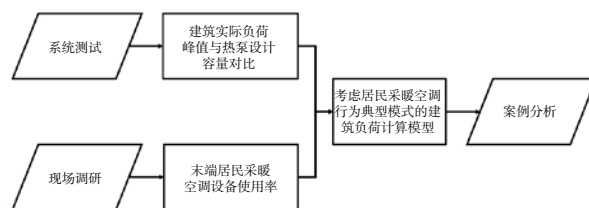


图 1 研究思路

1 实测与调研

在 2011 年至 2016 年, 对 14 个夏热冬冷地区的住宅小区地水源热泵系统进行了系统测试。这些系统的末端采暖设备形式主要分为两种, 一种是风机盘管系统, 另一种是地板采暖系统。对于住宅小区地水源热泵系统峰值负荷进行测试, 并通过公式 (1)、(2) 计算出峰值负荷相对于系统设计容量的负荷率。

$$Q = \rho \cdot c_p \cdot |t_{\text{supply}} - t_{\text{return}}| \cdot G \quad (1)$$

$$R_{\text{peak}} = \frac{Q_{\text{peak}}}{Q_{\text{designed}}} \quad (2)$$

其中: Q 为系统供应冷热负荷 (kW); ρ 为水的密度 (1000kg/m^3); c_p 为水的比热容 (4.2kJ/kg); t_{supply} 为系统用户侧供水温度 ($^{\circ}\text{C}$); t_{return} 为系统用户侧回水温度 ($^{\circ}\text{C}$); G 为系统用户侧水流量 (m^3/s); R_{peak} 为峰值负荷相对于系统设计容量的负荷率 (%); Q_{peak} 为峰值冷热负荷 (kW); Q_{designed} 为系统设计容量 (kW)。

通过实地测试调研, 夏热冬冷地区住宅小区的地水源热泵系统的峰值负荷率如图 2 图 3 所示, 可见系统设计容量冗余问题非常普遍。对于末端是地暖的系统, 其供暖峰值负荷率在 68%~99% 之间。对于末端是风机盘管的系统, 其供暖峰值负荷率在 21%~68% 之间, 供冷峰值负荷率在 29%~63% 之间。

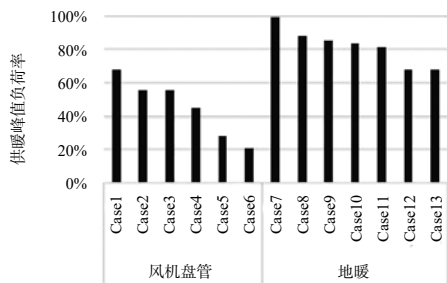


图2 热泵系统供暖峰值负荷率

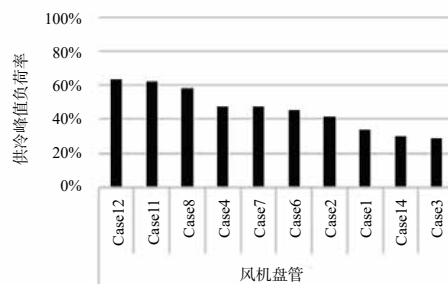


图3 热泵系统供冷峰值负荷率

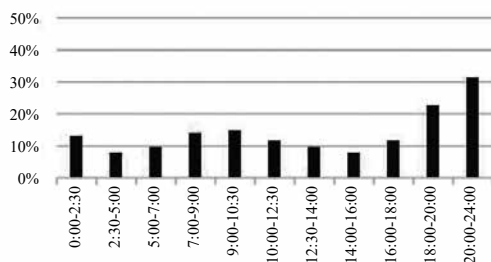


图4 小区用户在供暖典型日末端FCU设备开启率

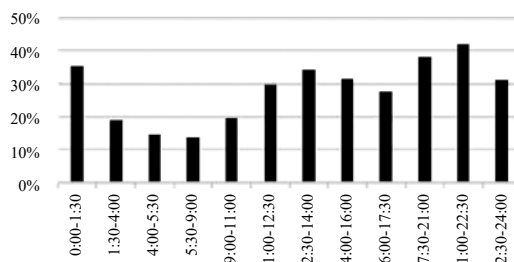


图5 小区用户在供冷典型日末端FCU设备开启率

通过现场调研发现,热泵容量冗余的主要问题是末端用户更愿意在离开房间的时候关闭房间采暖空调设备。对于调节性更好的风机盘管末端,如图4图5所示,是河南的住宅小区在供暖供冷典型日当天的末端风机盘管的开启率,其供暖季和供冷季的风机盘管开启率均低于45%。对于末端是地板采暖的系统,调研的住宅小区住户家中的厨房和卫生间是没有采暖的,所以对于住宅建筑,不是所有房间的采暖空调设备是全时间全空间开启的。然而目前的采暖空调负荷设计方法是按照全空间全时间采暖空调进行设计的,并没有考虑到居民主动关闭采暖空调的行为模式。所以由于居民采暖空调行为带来的末端设备的低使用率是导致热泵系统容量冗余问题严重,特别是末端为风机盘管的系统,更加需要考虑居民采暖空调人行为的影响。

2 建筑负荷模型建立

为了定量说明居民采暖空调行为对于峰值负荷的影响,本文通过对河南调研的案例进行建模计算。首先根据在河南实际调研的案例,使用DeST (Designer's Simulation Toolkits) 模拟软件进行建模^[10],模型如图6所示,其围护结构性能参数按照夏热冬冷地区标准取值^[11]。

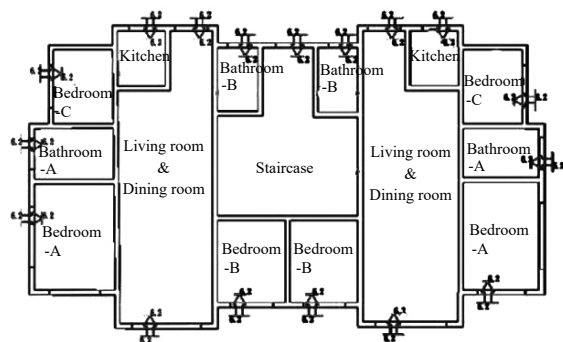


图6 居住建筑负荷计算模型 (DeST 软件模型)

模型案例中一户住户有三个卧室、一个餐厅、一个客厅、两个卫生间和一个厨房。房间供暖季室内设定温度是18℃,供冷季室内设定温度是26℃。

由于居民会在离开房间时主动关闭房间采暖空调设备,所以不同的住户运行的采暖空调设备的房间数量不同,也是采暖空调负荷计算的关键因素。通过实际调研,获得了供暖与供冷典型日的运行不同数量风机盘管的不同住户的比例,图7和图8是调研末端设备是风机盘管的住宅小区的住户比例。从图中可知,在供暖供冷典型日,85%的住户同时使用风机盘管的房间不会超过三个房间。

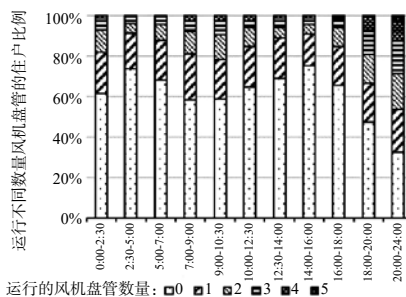


图7 供暖典型日运行不同数量风机盘管的住户比例变化

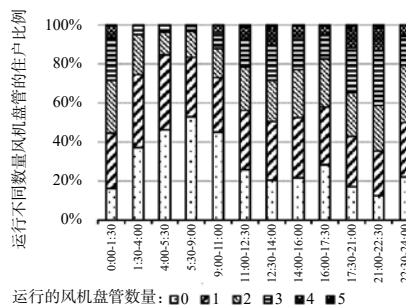


图8 供冷典型日运行不同数量风机盘管的住户比例变化

由于不同住户会使用不同数量的末端设备收到不同住户的不同人行为的影响,为了在建筑负荷计算模型中考虑不同的居民采暖空调行为,本文提出了七种典型居民采暖空调行为模式,如表 1 所示。

表 1 七种典型居民采暖空调行为模式

	同时在运行末端采暖空调设备的房间数量	具体末端采暖空调设备同时运行的房间
Type-1	8	所有房间
Type-2	5	除了卫生间和厨房的所有房间
Type-3	4	除了卧室 C、卫生间和厨房的所有房间
Type-4	3	客厅、餐厅和卧室 A
Type-5	2	客厅和餐厅
Type-6	1	卧室 A
Type-7	0	没有房间使用采暖空调设备

本文将上述七种典型居民采暖空调行为模式加入到建筑负荷计算模型中进行计算建筑的供暖与供冷负荷峰值。其中 Type-1 是考虑到现有的热泵容量设计方法是按照全空间进行设计的,所以作为现有设计方法的参考模式。其他模式是按照实际案例调研中发现的居民典型采暖空调模式。由于实际建筑供暖供冷负荷主要取决于不同居民典型采暖空调模式下的用户比例,为了接近真实峰值负荷,所

以本文使用实际调研的真实用户比例数据来计算建筑的峰值负荷。

3 模拟结果分析

建模计算的采暖空调房间供暖供冷负荷峰值模拟结果如图 9 图 10 所示,相对于全时间全空间开启采暖空调设备的参考模式 Type-1,除了 Type-5 的其他房间,由于需要给邻室传热,所以这些模式的采暖空调房间的单位采暖空调面积峰值负荷低于 Type-1,而 Type-5 由于是客厅和餐厅进行采暖与空调,客厅的室内发热量小于卧室,所以其计算的采暖负荷高于 Type-1,但是供冷负荷低于其他所有模式。其中 Type-6 是只对卧室 A 采暖与空调,其外围护结构面积较多,所以计算出的采暖空调单位使用面积的峰值负荷均为最大的。

但是,如果计算单位建筑面积的采暖空调峰值负荷,即将建筑负荷除以整体建筑面积,则如图 11 图 12 所示,采暖空调峰值负荷会随着同时使用的采暖空调设备变少而减少。

由于 Type-1 是设置的参考模式,是按照现有的全时间全空间设计的方法进行设置的模式,认为其计算峰值结果就是现在设计的热泵容量,以此计算其他模式的峰值负荷率,如图 13 图 14 所示,其他模式下的供暖峰值负荷率

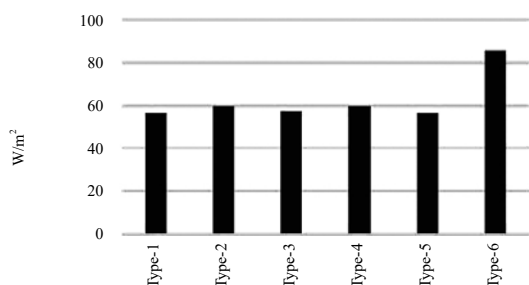


图 9 采暖房间单位使用面积供暖负荷峰值模拟结果

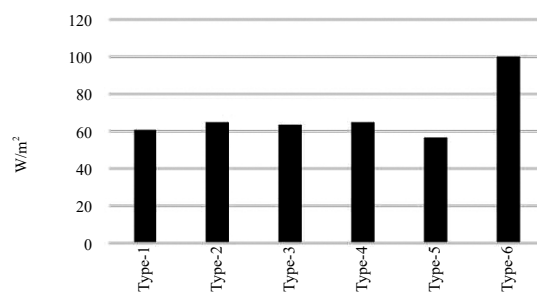


图 10 空调房间单位使用面积空调负荷峰值模拟结果

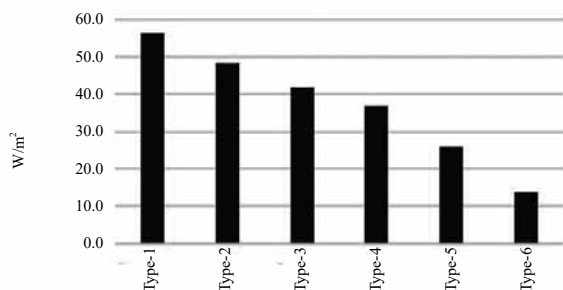


图 11 一户居民的供暖负荷峰值模拟结果

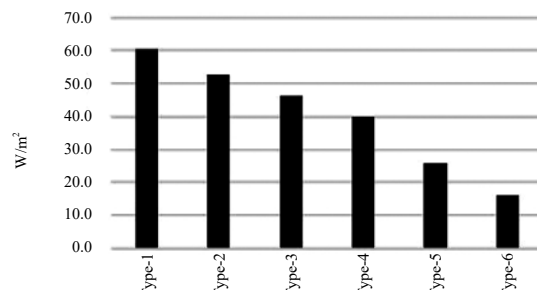


图 12 一户居民的供冷负荷峰值模拟结果

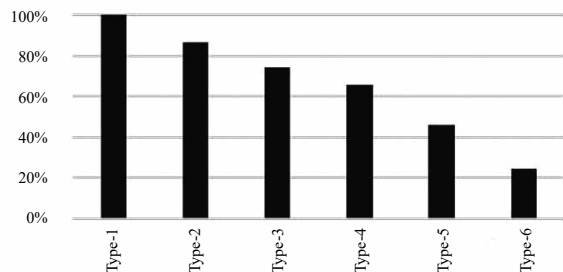


图 13 不同典型模式的供暖峰值负荷率

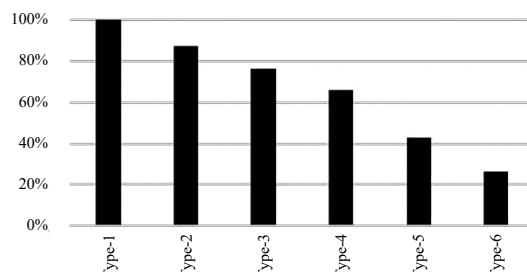


图 14 不同典型模式的供冷峰值负荷率

在 25%~87% 之间, 供冷峰值负荷率在 26%~84% 之间。其中 Type-2 是代表末端是地板采暖, 除了卫生间和厨房其他房间都供暖, 计算的供暖峰值负荷率为 87%, 这与调研的结果一致, 地板采暖系统的峰值负荷率在 90% 以下。Type-2 到 Type-6 可以认为是代表了末端为风机盘管的系统的峰值负荷率, 模拟计算的负荷率能够覆盖调研中获得的负荷率范围, 这说明居民采暖空调行为模式是居住建筑负荷的重要影响因素。

对于在河南调研的案例, 将获得的供暖与供冷典型日的运行不同数量风机盘管的不同住户的比例 (如图 7、图 8) 与对应模拟的峰值负荷率相结合, 通过公式 (3) 进行求和计算, 模拟出该案例整个小区的供暖供冷峰值负荷率。

$$R_{community-simulated} = \sum_{i=1,2,3} R_{i-simulated} \times P_i \quad (3)$$

其中: $R_{community-simulated}$ 整个小区的供暖供冷峰值负荷率的模拟值; $R_{i-simulated}$ 是单户居民的七种典型居民采暖空调模式供暖供冷峰值负荷率的模拟值; P_i 是对应七种典型居民采暖空调模式的住户比例。

图 15 是实测的峰值负荷率与模拟的峰值负荷率的比较, 供暖和供冷的模拟峰值负荷率均与实测值较为接近。由于缺乏具体的每一户住户的具体房间信息, 典型住户的选取只考虑了开启设备的房间数量, 没有具体将不同类型的房间进行分类, 所以存在一定的误差。

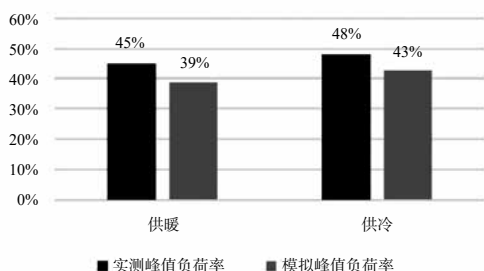


图 15 实测与模拟峰值负荷率对比

通过模拟, 可以证明热泵系统容量冗余问题主要原因是目前的容量设计方法没有考虑到居民人行为的影响, 居民实际上更加愿意部分空间开启采暖空调设备, 在离开房间时主动关闭采暖空调设备, 而末端设备同时使用率对供暖供冷负荷峰值影响巨大, 所以在设计夏热冬冷地区的住宅小区集中采暖空调时, 需要考虑居民的人行为。特别是, 不同的末端设备, 如地暖和风机盘管, 其人为行为差别巨大, 所以设计容量时应该考虑到不同末端设备选用不同的设计方法。

4 结论

本文开展了对夏热冬冷地区住宅小区的地水源热泵供暖供冷系统的实测调研, 并通过模拟仿真量化地分析了夏热冬冷地区住宅小区居民人行为对地水源热泵系统容量冗余问题的影响, 主要结论如下:

(1) 通过对 14 个夏热冬冷地区的住宅小区地水源热泵供暖供冷系统的实地测试调研, 发现系统设计容量冗余问题非常普遍。对于末端是地暖的系统, 其供暖峰值负荷率在 68%~99% 之间。对于末端是风机盘管的系统,

其供暖峰值负荷率在 21%~68% 之间, 供冷峰值负荷在 29%~63% 之间。

(2) 通过现场调研, 发现系统设计容量冗余问题的主要原因是目前的容量设计方法没有考虑到居民人行为的影响, 居民实际上更加愿意部分空间开启采暖空调设备, 在离开房间时主动关闭采暖空调设备。居民末端设备的开启率是影响整个小区建筑供暖供冷负荷的重要影响因素, 所以在设计系统容量时应该考虑居民的采暖空调行为。

(3) 对于夏热冬冷地区的住宅小区地水源热泵系统, 不同的末端设备, 如风机盘管与地暖, 使用不同末端设备的居民采暖空调行为模式差别较大, 所以在设计系统容量时应该考虑对于不同末端形式的系统用不同的方法进行设计。

参考文献

- [1] Shimoda, Yoshiyuki, et al. "Verification of energy efficiency of district heating and cooling system by simulation considering design and operation parameters." Building and Environment 43.4 (2008): 569–577.
- [2] Liu, Xiaobing, et al. "A comparative study of the status of GSHP applications in the United States and China." Renewable and Sustainable Energy Reviews 48 (2015):558–570.
- [3] Aikins, Kojo Atta, and Jong Min Choi. "Current status of the performance of GSHP (ground source heat pump) units in the Republic of Korea." Energy 47.1(2012):77–82.
- [4] Alavy, Masih, et al. "A methodology and computerized approach for optimizing hybrid ground source heat pump system design." Renewable energy 57(2013):404–412.
- [5] Zhou, Xin, et al. "Influence of household air-conditioning use modes on the energy performance of residential building cooling systems." Building Simulation. Vol. 9. No. 4. Tsinghua University Press, 2016.
- [6] 2012 G B. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 [S] [D]. 2012.
- [7] Peng, Chen, et al. "Quantitative description and simulation of human behavior in residential buildings." Building simulation. Vol. 5. No. 2. Tsinghua University Press, co-published with Springer-Verlag GmbH, 2012.
- [8] Wu, Wei, et al. "A potential solution for thermal imbalance of ground source heat pump systems in cold regions: Ground source absorption heat pump." Renewable energy 59(2013): 39–48.
- [9] Zhang, Shuyang, et al. "Field testing and performance analyses of ground source heat pump systems for residential applications in Hot Summer and Cold Winter zone in China." Energy and Buildings 133 (2016): 615–627.
- [10] Yan, Da, et al. "DeST—An integrated building simulation toolkit Part I: Fundamentals." Building Simulation. Vol. 1. No. 2. Tsinghua University Press, co-published with Springer-Verlag GmbH, 2008.
- [11] 2010 J G J. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准 [S] [D]. 2010.

基于数据挖掘技术的居民用水、用气数据处理方法探讨

周 浩¹, 林波荣¹, 张仲宸¹, 戚建强², 郑立红²

(1. 清华大学建筑学院, 北京 100084; 2. 天津生态城绿色建筑研究院, 天津 300450)

[摘 要] 数据挖掘技术, 通过一系列的数据预处理及挖掘算法, 将所收集的海量数据转化为有价值的知识, 从而实现数据平台“智能/智慧管理”的目标。本文基于天津市某城区 3 个小区用户两年的用水、用气数据, 基于数据挖掘技术, 利用数据标准化、基于临近性的检测、箱线图等方法, 对用能异常、邻月用能数据变化异常的用户进行了检测, 并横向比较了 3 个小区的总体用能水平。最后, 在讨论部分, 基于问卷调查数据, 通过信息增益及 C4.5 决策树等数据挖掘算法, 建立了用户用能水平与用户特征及用户行为间的关联关系。本文的研究工作有望辅助能耗数据管理平台的构建。

[关键词] 数据挖掘; 异常点检测; 箱线图; C4.5 决策树

0 引言

近年来, “智能/智慧建筑”、“智慧城市”等成为建筑领域的热点名词, 而国内外越来越多的城市正朝着“智慧城市”的目标迈进。无论是智能建筑还是智慧城市, 其实现的重要要素是数据采集(感知)与数据平台(数据存储、处理与可视化等)。随着传感、通信、计算等硬件及软件开发成本的下降, 包括低成本的传感器的发展、互联网、移动互联网普及带来的通信基础设施的完善, 部署大量低成本建筑能耗(电、热、气等)监测传感器, 并借助 IT 等领域的数据传输、存储、处理与挖掘技术, 使得持续地远程地建筑能耗数据自动上传代替人工读表录入、搭建建筑基本信息与能耗数据管理可视化平台以及基于所收集的数据分析用户用能水平、挖掘用户用能特征与用户特性的关联关系成为可能, 为建筑能耗管理、建筑节能改造与能效提升等工作开展提供重要数据基础与战略规划支撑。

数据挖掘是数据平台的核心工具, 其通过一系列的数据预处理及挖掘技术与流程, 将所收集的海量数据转化为有价值的知识, 从而实现数据平台“智能/智慧管理”的目标。本文基于天津市某城区 3 个小区用户两年的用水、用气数据, 利用数据挖掘技术, 探索用能异常检测、用能水平横向比较等方法, 并以讨论的形式探讨了用户用能水平与用户特征及用户行为间的关联关系。

1 研究数据与方法

1.1 数据来源与概况

本研究数据来源于天津市某区的 3 个临近小区的社区服务中心, 涵盖了 3 个小区共 2035 个用户的 2015~2016 年逐月的用气和用电量数据。为描述方便, 将 3 个小区分别编号为 A (2012 年正式运营, 含 1094 个用户)、B (2013 年正式运营, 含 452 个用户) 和 C (2013 年正式运营, 含 501 个用户)。

1.2 异常点检测方法

异常点(离群点)检测, 是为找出其行为很不同于大多数对象的过程。造成异常的原因, 可能是监测设备发生故障, 也可能是用户的某些异常的用能行为导致等。因此, 若能通过核实的方法找出异常点, 则可进行针对性调研工作, 了解异常原因, 从而及时做出调整。

在本研究中, 异常点检测过程遵循如下步骤: “数据清理与集成→数据标准化→异常点检测→散点图可视

化”。由于数据量较大, 分析工作均在自编写的 Python 程序中完成。

(1) 数据清理与集成: 本研究所涉及的数据清理工作, 主要是去掉缺值点或重复数据; 数据集成, 则是将各用户的用水、用电数据合并。

(2) 数据标准化: 异常是相对的而非绝对, 采用标准化的方法可将所有数据映射到一个无量纲化的测评区间, 即所有数据均处于同一数据级、但相对关系不变, 便于比较分析。本节所用的测评区间为 $[-2, 2]$, 可将用水或用电数据分配到 4 个指标段: “很低(-2)~偏低(-1)”, “偏低(-1)~一般(0)”, “一般(0)~偏高(1)”, “偏高(1)~很高(2)”。假定 $\min_A$ 和 $\max_A$ 分别是属性 A 的最小值和最大值, 则 A 的值 a_i 被标准化为 a'_i , 由下式计算:

$$a'_i = \frac{a_i - \min_A}{\max_A - \min_A} (\max'_A - \min'_A) + (\min'_A) \quad (1)$$

这里, $\max'_A = 2$, $\min'_A = -2$ 。基于该标准化方法, 用户的用气量和用水量数据可被划分到 4 个 2×2 大小的用能水平区间(I, II, III 和 IV 区), 如图 1 所示。其中, 区间 I 的用户用水和用气量均较大; 区间 II 的用户用水量较大; 区间 III 的用户用水和用气量均偏低; 区间 IV 的用户用气量较大。

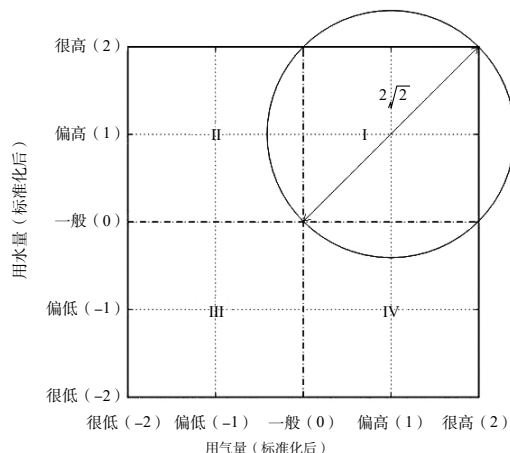


图 1 用气、用水数据标准化后的用能水平区间划分

(3) 异常点检测: 异常点检测方法主要有统计学方法、基于聚类的方法和基于临近性的方法等 3 类。其中, ① 统计学方法通常假定数据由一个正态分布产生, 利用数据与期望值的偏差大小识别离群点 (最大似然检测或箱线图法), 当离群点与正常数据相差较大、特别是数量级上的差别时, 整体数据的期望和方差会有很大偏离, 造成离群点无法识别或错误识别; ② 基于聚类的方法, 通过考察对象与簇之间的关系检测离群点: 当一个对象归属于小的稀疏簇或不属于任何簇时, 可被视为离群点, 因此考察对象中离群点越多, 聚类得到的簇也越多。然而, 该方法要求提前给定簇的数量, 如何给出合理的簇数值是一大挑战。③ 基于临近性的方法, 是通过考察各对象的邻域中的其他对象的个数来认定是否离群。由于方法③ 相对简单、合理, 本报告中采用了该方法:

对于数据集 D , 用一个距离阈值 r 来定义对象的邻域。对于每个对象 ω , 考察 ω 的 r -邻域中的其他对象的个数。定义一个比例阈值 τ , 如果 D 中大多数的数据对象都远离 ω , 即 ω 的邻域中数据对象的个数占 D 中数据总量的比例低于 τ 时, ω 可被视为一个离群点, 即当:

$$\frac{|\{\omega | \text{dist}(\omega, \omega') \leq r\}|}{|D|} \leq \tau \quad (2)$$

时, ω 为离群点。其中 $\text{dist}(\omega, \omega')$ 为 ω 与另一数据对象 ω' 的欧式距离。在进行离群点检测时, 逐个计算数据集中每个对象与其他对象之间的距离, 统计该对象的 r -邻域中其他对象的个数。一旦在该对象的 r 距离内找到 $\tau |D|$ 个其他对象, 即可判断该对象不是离群点。

向量 $p(p_1, p_2, \dots, p_m)$ 和向量 $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ 之间的欧式距离 $d(p, q)$ 计算公式如式 (3) 所示:

$$d(p, q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_m - q_n)^2} \quad (3)$$

本研究中, 可将所有用户的数据视为 1 个数据集, 其中每个用户的数据均可表示为一个由标准化后的用气量和用水量组成的二维向量, 从而可计算欧式距离。

1.3 邻月异常变动点检测与可视化

图 1 中的一个点从 1 个用能水平区间移动到另 1 个用能水平区间的最大距离是 $2\sqrt{2}$ 。因此, 若某用户某月与下个相邻月的用能数据点间的距离超过 $2\sqrt{2}$, 则认为该点为“邻月异常变动点”, 计算公式如式 (4) 所示:

$$d(p, q) = \sqrt{(p_w - q_w)^2 + (p_g - q_g)^2} \geq 2\sqrt{2} \quad (4)$$

其中 $p(p_w, p_g)$ 和 $q(q_w, q_g)$ 为某月和邻月的用能数据,

p_w, q_w 为用水数据, p_g, q_g 为用气数据。

本研究中采取“无记忆”检测, 即仅考察相邻两个月的数据移动, 而不考虑此前或此后的数据变化; 此外, 异常变动点检测过程只针对“非异常点”用户数据, 即已通过 1.2 节所提方法, 去掉了“用能异常”点。

1.4 不同小区用能水平比较

由于各小区的用户数量以及入住率均不相同, 且同时有用水量和用气量两种数据, 很难用单一的用能总量或均值来衡量各小区的用能水平。因此, 本报告尝试从用能分布角度来对比不同小区的用能水平:

(1) 假定“当用户该月的用水量和用气量同时为 0 时, 该用户该月是无人居住的”, 由此计算各小区各月的入住率;

(2) 计算各小区所有入住用户在不同用能水平区间的分布比例 (以本小区用户数为基准), 并用箱线图 (包括 2015~2016 年所有数据) 表达在图 1 所示的用能水平图上;

(3) 计算各小区入住用户在各用能水平区间上的分布百分比, 计算公式如式 (5):

$$r_j(i) = \frac{N_{ji}}{N_j - N_{j,o}} \quad (5)$$

式中, $r_j(i)$ 为 j 小区分布在 i 区间内的点数比例, N_{ji} 为 j 小区分布在 i 区间内的点数, N_j 为 j 小区的所有用户数 (点数), $N_{j,o}$ 为 j 小区的异常点数。

(4) 依据 (3) 的计算结果, 综合比较所有小区的总用能水平。落在高用能水平区间的用户比例越大, 该小区的总用能水平越高。

2 结果

2.1 同一小区内部异常点检测

以 A 小区 2005 年 1 月的数据为例, 取检查半径 r 为 0.5, 比例阈值 τ 为 0.01, 则该小区内部异常点检测结果如图 2 所示, 包括原始数据、标注异常点以及去掉异常点后的散点图结果:

(1) 异常点的存在导致大部分数据点集中在“很低 (-2) ~ 一般 (0)”区间内, 不符合一般规律 (通常假定为正态分布), 如图 2 (a) 和 (b) 所示。

(2) 如图 2 (b) 所示, 偏离大部分数据对象的点被检测出来并标记为异常点, 这些点不仅包含了一些用水量和用气量都很大的用户 (如 012-01-04-02), 同时也包括了一些用水量或用气量单峰高的用户。日常生活中, 水是不可或缺的, 不做饭或不采用燃气壁挂炉供应生活热水或

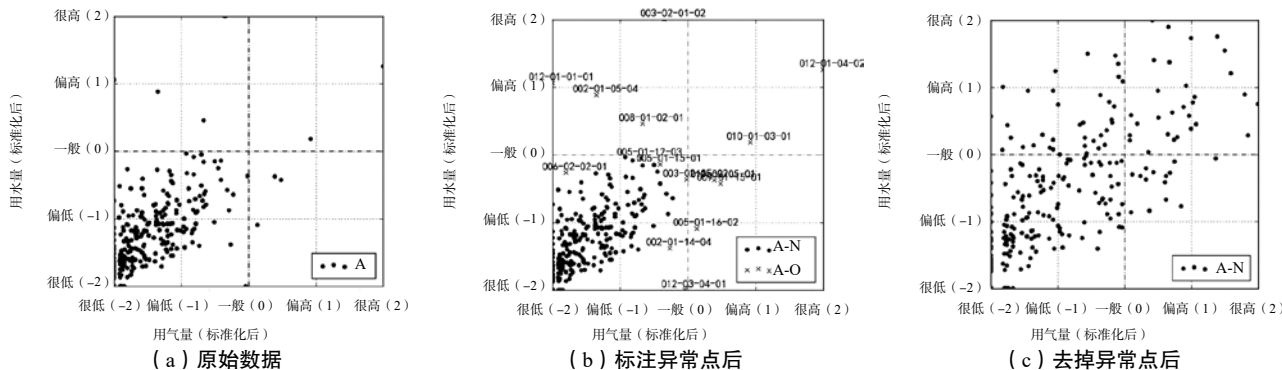


图 2 A 园 2005 年 1 月用气与用水量数据异常点检测散点图

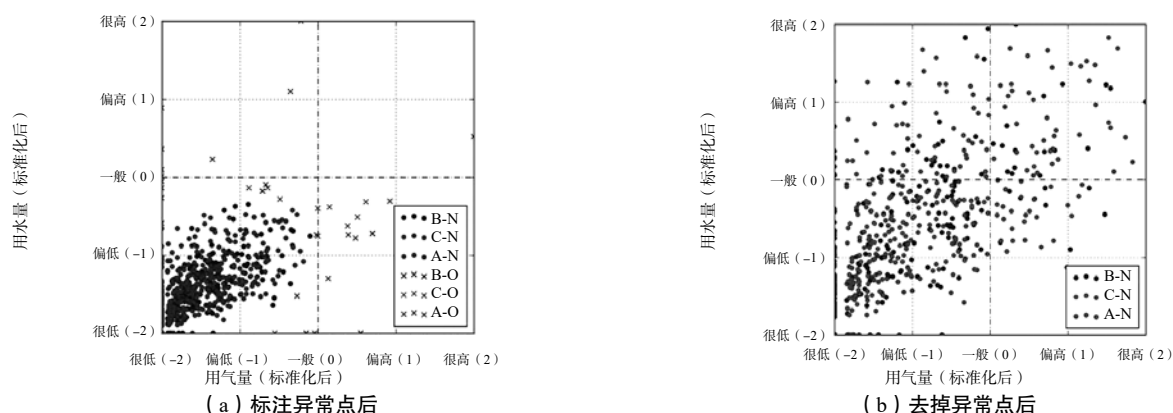


图3 3个小区2015年1月用气与用水量数据异常点检测散点图

供暖时,则可不用气。然而,如012-03-04-01用水量几乎为0,而用气量则达到了一般水平是比较反常的;如012-01-01-01用水量很高,说明户内有人长期居住、用水频繁,然而用气量几乎为0则同样是反常的,因为用户会偶尔做饭、或用在1月份用燃气供热水(如洗澡等)。

(3)从图2(c)可以看到,在去掉异常点后,数据点分布均匀。

统计A小区在2015和2016年度出现用能异常的用户及其累计出现的次数,结果如表1所示:每年同一用户成为异常点的次数可高达8~11次,且部分“异常”用户在两个年度均以较高频次出现,如A-012-01-04-02、A-028-02-01-01等,这些用户需在后续的异常原因调研工作中重点关注。对比A-012-01-04-02用户在2015年1月、7月和12月的用能分布情况,可发现该用户的用气量要远高于大多数用户。因此,后期可着重调查该用户的燃气计量表以及用气行为。

表1 A小区2015和2016年度用能异常用户及其累计次数
(仅列出超过6次的)

2015	异常次数	2016	异常次数
A-012-01-04-02	11	A-029-02-05-01	8
A-009-01-15-01	9	A-004-02-01-01	8
A-028-02-01-01	9	A-023-01-01-01	8
A-026-01-03-02	8	A-010-02-02-01	7
A-004-02-01-01	6	A-001-03-03-02	7
A-003-02-01-02	6	A-033-01-01-04	7
A-002-01-05-04	6	A-026-01-03-02	7
		A-011-02-05-01	7
		A-012-01-04-02	6
		A-030-01-13-03	6
		A-023-02-02-01	6

2.2 所有小区横向比较检测

在能源管理工作中,经常需要对不同小区的用能情况进行横向对比。因此,本研究采用2.1中类似的方法,将所有3个小区的数据汇总并进行异常点检测及可视化,如图3所示(以2015年1月为例)。此时,数据的标准化是在汇总后的数据集中进行的。

从图3中可以看到,去掉异常点后,3个小区在各区间内的数据点分布较为均匀;各小区的数据点较为集中地分布在“很低(-2)~一般(0)”区间内,即各小区用

能数据的分布情况差别不大。

同样,若统计3个小区在2015和2016年度出现用能异常的用户及其累计出现的次数,结果如表2所示:出现频次较多(超过5次)的异常点全部来源于C和A小区;在单个小区内出现频次较高的用户,在所有小区集也可能成为异常点,如A-012-01-04-02。

表2 三个小区2015和2016年度用能异常用户及其累计次数
(仅列出超过6次的)

2015	异常次数	2016	异常次数
C-002-02-09-01	10	C-002-02-09-01	10
C-002-02-09-02	10	C-002-02-09-02	9
A-012-01-04-02	10	A-004-02-01-01	8
A-028-02-01-01	9	C-002-01-01-02	7
A-009-01-15-01	8	A-012-01-04-02	6
A-026-01-03-02	7	A-001-03-03-02	6
A-004-02-01-01	6	A-023-01-01-01	6
C-001-01-05-01	6		
C-009-01-01-01	6		

2.3 邻月异常变动点检测

以B小区2015年1月~2月期间的异常变动点检测为例,其结果如图4所示。可以看到,发生异常变动的用户,可能是因为入住,如B-012-01-09-01;也可能是因为退住,如B-009-01-10-03和B-009-01-03-03;也可能是用户因某些因素导致的用能行为变动造成的,如B-011-01-18-03。

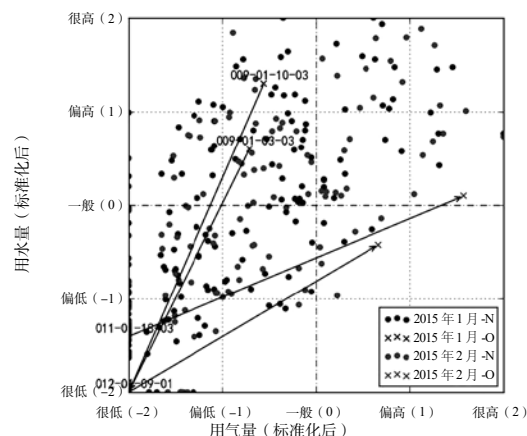


图4 B小区2015年1月~2月期间的异常变动点检测结果

汇总 3 个小区 2015~2016 年间各月异常变动点数量, 如图 5 所示: (1) 总体看, A 小区异常变动点数量多且不同时段波动幅度大, C 小区异常变动点数量少且不同时段波动幅度小, B 小区居中; (2) A 小区在 2015 年 2 月~3 月期间, 异常变动点的数量高达 46 个, 检查发现该段时间内小区的入住率从 20% 骤然提高到了 51% (入住率计算过程将在后文中给出), 可见异常变动点的变化与人员流动情况密切相关; (3) 此外, 每年 1~3 月份及 7~9 月份, 异常变动点数量同样会有较大波动, 其可能原因是 1~3 月份为春节期间, 人员聚散现象增多; 而 7~9 月份为夏季, 洗澡频繁会导致用水、用气量增大。

2.4 不同区逐月用能水平比较

基于 2.3 和 2.4 节的分析, 可对所有小区的逐月用能进行横向对比。

首先, 按照 1.4 节所述方法计算各小区各月的入住率, 结果如图 6 所示: (1) 各小区的入住率呈现整体递增趋势, 其中 B 小区的入住率最高, C 小区的入住率最低; (2) A 小区入住率波动较大, 尤其是从 2015 年 2 月到 2015 年 3 月, 此时段内用户增加较多。

随后, 依据式 (5) 计算各小区所有入住用户在不同用能水平区间的分布比例 (以本小区用户数为基准), 并用箱线图 (包括 2015~2016 年所有数据) 表达在用能水平图上, 如图 7 所示。

根据用能水平分布图, 比较各区间的箱线图 (如中位数), C 小区分布在区间 I 和 II 区的用户比例是 3 个小区中最高的, 分布在区间 IV 的用户比例与其他 2 个小区基本持平; A 小区分布在区间 I 和 II 区的用户比例则均要略高于 B 小区。因此, 若对 3 个小区的用能水平 (综合了用水量和用气量) 进行排序, 可认为:

C 小区 > A 小区 > B 小区

然而, 从箱线图上可看到, 3 个小区在各区间上的用户分布比例差别很小, 约在 5% 以内, 可认为各小区内的不同用能水平的用户 (不同人群) 比例基本相同。

3 讨论

本研究基于实际采集的数据, 探讨了基于数据挖掘技术的大批量居民用水、用气数据的处理方法, 因为所使用的方法可直接辅助将来的能耗数据管理平台的数据处理、分析与展示工作。然而, 数据挖掘的更深层次目标, 是从挖掘数据集中隐藏的模式或规律。因此, 本研究在上述数据处理与分析的基础上, 补充了部分调研工作, 尝试探究用户的特性及用水、用气行为与其用能水平 (本文表示正常或异常) 的关联, 以期辅助能耗管理者和用户提高其用能效率。

(1) 调研数据采集

根据第 2 节中的异常检测结果, 我们从所分析的 3 个

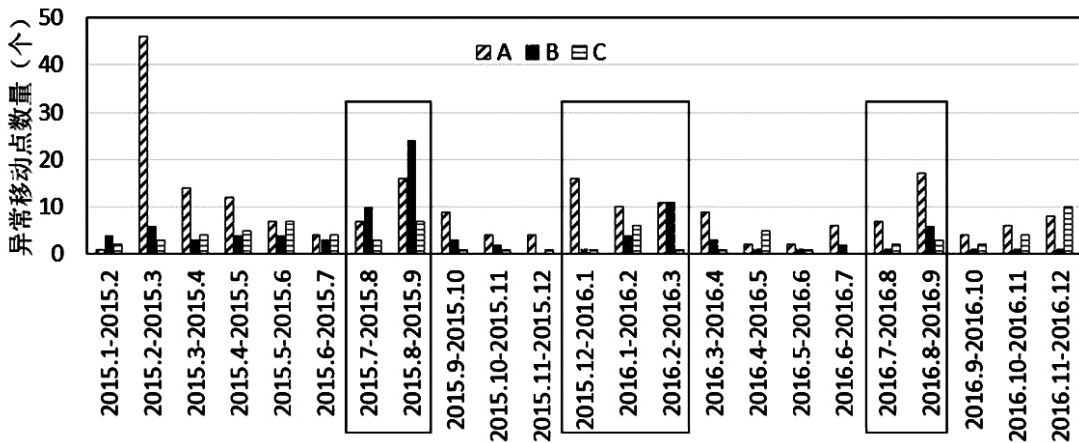


图 5 所有 3 个小区 2015~2016 年间个月异常变动点数量汇总图

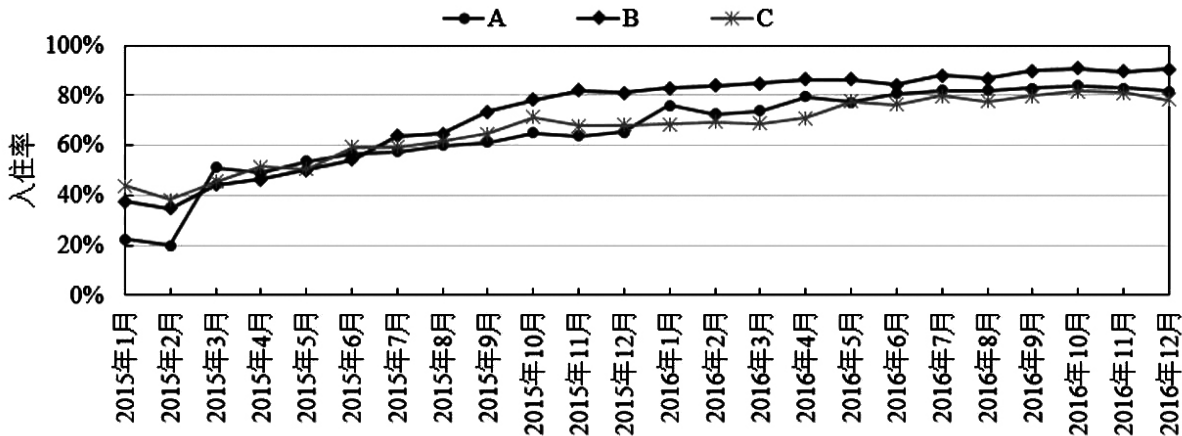


图 6 各小区 2015~2016 年逐月入住率计算结果

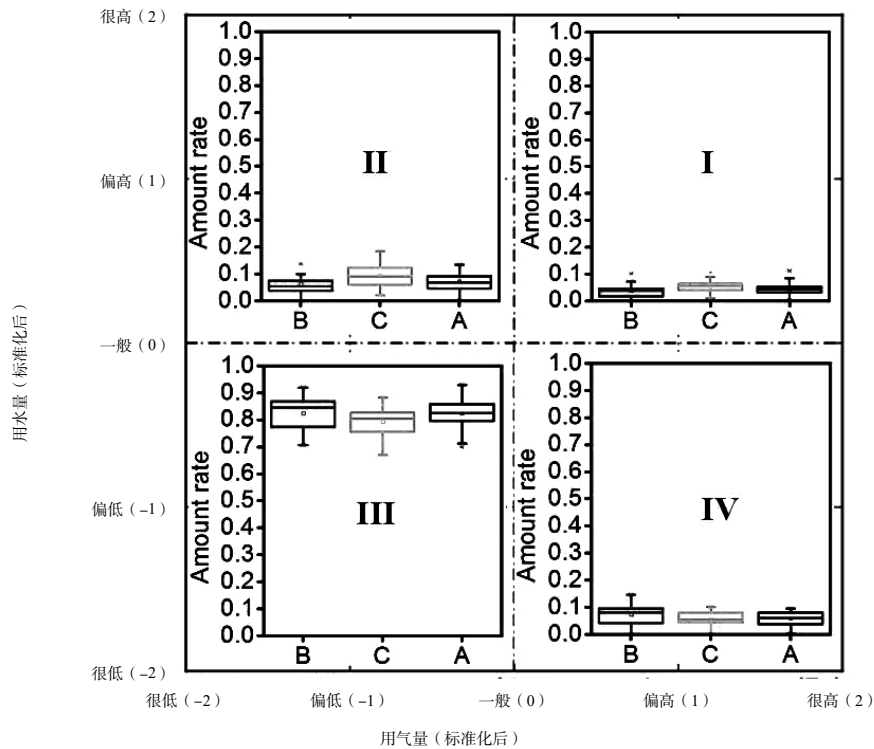


图7 各小区入住用户的用能在各区间上的分布比例箱线图

小区中,初步抽取了7个用能异常及10个用能正常用户进行了采访或问卷调查(由于隐私等问题,问卷调查难度非常大,最后仅收集到了共17份问卷)。其中,7个用能异常用户在2015-2016年度多次出现异常。问卷调查内容包括:用户的基本信息如居住类型(租住或自住)、年总收入、家庭成员最高学历、家庭人数以及入住时长等,以及用户的用水和气的行为习惯以及节约(节水、节气)意识自打分等,并将各量化指标进行离散分级,如表3所示,并对用户用能数据按照“正常(Normal)”和“异常(Outlier)”进行标记,采集的数据结果如表4所示。

表3 调研项(部分)区间分布及相应等级划分

年总收入	区间	>6w	6~11w	≥12w		
	等级	低	中等	高		
最高学历	区间	专科及以下	本科	硕士及以上		
	等级	低	中等	高		
家庭人数	区间	1~2人	3~4人	5~6人		
	等级	小	中等	大		
家庭组成	区间	成人	成人+幼儿	成人+老人	成+老+幼	成+老+幼+青
	等级	I	II	III	IV	V
入住年限	区间	<1y	1~3y	4~5y		
	等级	短	中等	长		
炊事用气	区间	≤7	8~14t	15~20t	≥21	
	等级	低	中等	高	频繁	
炊事及饮用水	区间	≤7	8~14t	15~20t	≥21	
	等级	低	中等	高	频繁	
洗浴用水	区间	≤7	8~14t	15~20t	≥21	
	等级	低	中等	高	频繁	

表4 调研数据结果

序号	住户类型	年总收入	最高学历	家庭人数	家庭组成	入住年限	炊事用气	炊事及饮用水	洗浴用水	节约意识	归类
1	户主	中等	高	小	I	中等	低	中等	中等	高	正常
2	户主	高	高	小	I	短	低	中等	低	高	正常
3	户主	高	高	小	I	中等	低	低	低	高	正常
4	户主	高	中等	中等	I	长	中等	高	低	高	正常
5	户主	中等	高	小	I	短	低	高	低	高	正常
6	户主	中等	中等	大	IV	短	频繁	频繁	高	中等	正常
7	户主	低	中等	中等	II	中等	低	低	低	高	正常
8	租户	低	高	小	I	中等	中等	中等	低	中等	正常
9	户主	中等	高	大	IV	中等	频繁	频繁	中等	高	正常
10	户主	低	高	中等	IV	中等	频繁	频繁	低	高	正常
11	租户	中等	高	小	I	短	频繁	频繁	中等	高	异常
12	户主	高	中等	中等	II	长	频繁	频繁	低	高	异常
13	户主	中等	中等	中等	III	长	频繁	频繁	中等	高	异常
14	租户	低	高	小	I	中等	频繁	频繁	低	高	异常
15	租户	低	高	小	I	中等	频繁	频繁	中等	高	异常
16	租户	中等	中等	中等	III	中等	频繁	频繁	低	高	异常
17	租户	低	高	小	I	中等	频繁	频繁	低	高	异常

从表4中可以看到,用能异常的用户用气和用水都非常频繁的,但奇怪的是所有用能异常的用户都认为自己的节气、节水意识很高。

(2) 关联关系挖掘方法

研究分两步来挖掘用户的特性及用水、用气行为与其用能水平的关联关系:首先,通过基于信息理论的信息增益计算,分析用户特性及用能行为与其用能水平的相关性并进行排序;随后,基于信息增益计算结果,利用C4.5

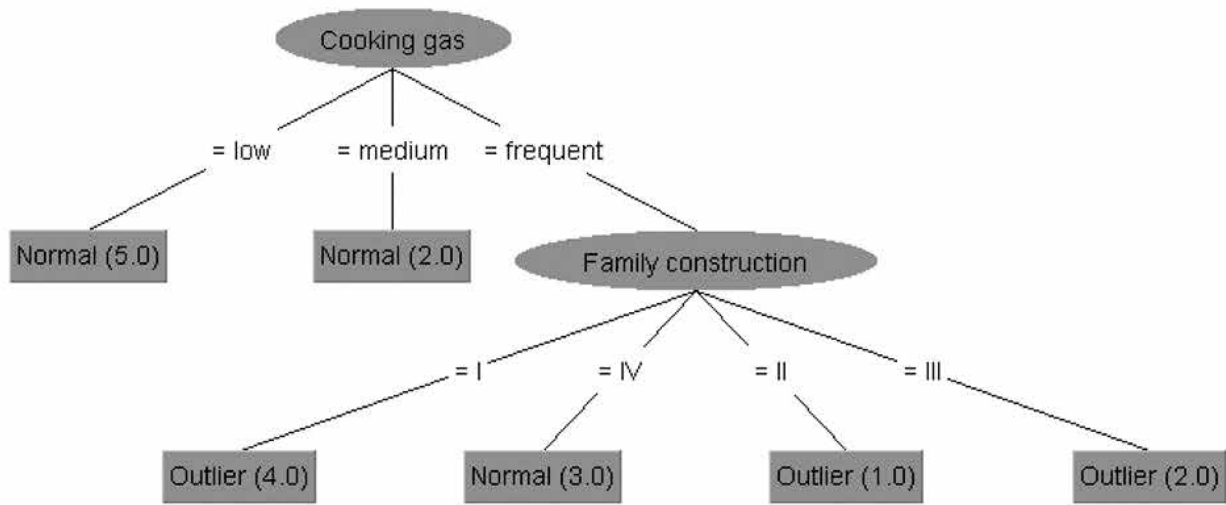


图 8 用户的特性及用水、用气行为与其用能水平的关联关系决策树模型

决策树分类算法^[1]，建立用户特性及用能行为与其用能水平间的关联规则。相对信息增益计算和 C4.5 决策树分类算法在建筑环境领域的应用案例可参照文献 [3]，由于篇幅限制，不再赘述。

(3) 结果

相对信息增益计算结果如 5 表所示，其中信息增益值越高，表明该变量与用能水平的相关性越大。可以看到：① 炊事用气和用水习惯是影响用户用能水平的最主要因素，其次是住户类型以及家庭组成；② 由于炊事用气和用水频率基本一致，因此两个参数的信息增益值是相等的，即信息是重复的；③ 用能水平与家庭的经济水平（年总收入）和学历水平几乎无相关关系；④ 用户用能水平与其节水意识相关性不强。从问卷调研汇总结果中可以看到，大部分用能异常用户的节水意识自打分都很高；⑤ 样本量较少，所得结果仅反映了该样本集中的相关性。

表 5 信息增益计算结果

	住户类型	年总收入	最高学历	家庭人数	家庭组成	入住年限	炊事用气	炊事及饮用水	洗浴用水	节水意识
信息增益	30.5%	2.8%	1.3%	10.0%	28.9%	5.3%	45.9%	45.9%	8.0%	9.8%

基于以上信息增益计算结果，以信息增益值最高的四个参数作为输入变量，采用 C4.5 决策树分类算法，建立用户的特性及用水、用气行为与其用能水平的关联关系，如图 8 所示。

基于图 8 所示决策树模型，可得到 6 条关联规则如表 6 所示。以第 3 条规则为例，可表达为：“如果炊事用气很频繁，且家庭组成是 I 型（家里都是成人，无小孩和老人，参见表 3），则该用户用能水平异常”。

由于样本量较少：（1）所有 17 个样本均用于算法训练；（2）住户类型这一参数并没有参与树枝的划分；（3）所得到的关联规则仅能代表该 17 个样本的统计规律。然而，其结果显示，若将来的数据量能够积累到一定程度后，本文所述的方法是可以辅助分析用能异常原因的。

表 6 用户的特性及用水、用气行为与其用能水平的关联规则

序号	条件	归类	置信度	支持度
1	Cooking gas=low	Normal	100%	5
2	Cooking gas=Medium	Normal	100%	2
3	Cooking gas=Frequent, Family construction=I	Outlier	100%	4
4	Cooking gas=Frequent, Family construction=IV	Normal	100%	3
5	Cooking gas=Frequent, Family construction=II	Outlier	100%	1
6	Cooking gas=Frequent, Family construction=III	Outlier	100%	2

4 结论

根据本文的结果，可得到如下结论：

（1）可通过标准化、基于临近性的方法，有效检测大批量用户用水、用气数据的异常点；

（2）可通过标准化后的用能区间图，结合欧式距离法，有效检测用户用水、用气的邻月异常变动情况；

（3）可通过标准化后的用能区间图，结合箱线图的方法，合理比较不同小区的综合用能水平；

（4）信息增益、C4.5 决策树等数据挖掘算法，可辅助分析用户用能异常原因，从而知道节能。本文的研究工作有望辅助能耗数据管理平台的构建。

参考文献

- [1] Segal I E. A note on the concept of entropy[J]. Journal of Mathematics and Mechanics, 1960, 9(4):623–629.
- [2] Zhao J, Lasternas B, Lam K P, et al. Occupant behavior and schedule modeling for building energy simulation through office appliance power consumption data mining[J]. Energy and Buildings, 2014,82:341–355.
- [3] Zhou H, Qiao L, Jiang Y, et al. Recognition of air-conditioner operation from indoor air temperature and relative humidity by a data mining approach[J]. Energy and Buildings, 2016, 111:233–241.

一种快速的建筑能耗模型建立与校正方法

裘舒年, 李铮伟

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 200092)

[摘要] 当前, 建筑能耗模型对于建筑节能与故障诊断工作有重要作用。为了使建筑能耗模型准确反映出建筑真实情况, 建模人员往往需要投入较多的精力与时间进行建模, 并对模型进行反复调参与校正^[1]。为了使建模人员能够更有方向性、更快速地完成建筑能耗模型的建立与调参校正, 本文提出了一种快速的建筑能耗模型的建立与校正方法。本方法主要由两部分组成: 一、使用 Monte-Carlo 方法对建筑能耗模型的各个参数进行分析, 筛选出对于建筑能耗影响较大的参数, 简化模型变量, 为建模人员校正模型提供方向性; 二、提出了一种自动模型自动校正的方法, 并在 VBA 宏中实现了规范型建筑能耗模型模拟软件 EPSCT (美国佐治亚理工学院开发) 的模型自动校正。文章第一部分为方法介绍, 第二部分为实际案例的方法应用与分析, 第三部分为结论。

[关键词] 建筑能耗模拟; 建筑节能

0 引言

建筑能耗模型是一种能够准确反映现有建筑或尚未建设的建筑的能耗情况的模型。它一般由几个部分组成: 建筑几何结构、建筑围护结构参数、建筑系统设备参数、建筑系统形式^[2]、建筑人员设备排期表等。建筑能耗模型在当前建筑、暖通学界的应用十分广泛。其原因在于, 建筑能耗模型不仅可以为建筑设计工作提供参考, 还可以为建筑节能工作、建筑系统故障诊断指明方向^[1]。

要获得一个准确的建筑能耗模型, 需要经过完整的建筑能耗模拟过程, 该过程包含建筑能耗模型建立、建筑能耗模型校正两个步骤。具体来说, 研究者需要先搜集建筑及其系统的相关参数、建筑使用情况等多项数据, 然后在建筑能耗模拟软件中, 建立建筑及其系统的模型, 该模型应当尽可能真实地体现建筑的静态数据, 例如建筑几何结构、建筑系统形式等, 需要注意的是, 对于因客观因素无法获取的数据, 研究者需要参考相关规范标准, 例如 GB 50189-2015, 公共建筑节能设计标准等, 使用参考值来建立模型。

模型初步建立完成后, 研究者便需要对模型进行校正, 校正的过程实质上是对于初步建立的模型中, 未获取到、或虽获取到但准确性难以保证的参数进行调整, 使建筑能耗模型尽可能准确反映建筑及其系统的真实能耗及运行情况。而模型是否准确的评判依据, 则是能耗模型输出的能耗与建筑实测能耗是否能达到一致^[2]。该调参过程依赖于建模人员的经验, 并需要消耗较多时间。

为了提高建筑能耗模型的建立与校正效率, 本文提出了一种快速的建筑能耗模型建立与校正方法。

1 快速的建筑能耗模型的建立与校核方法

1.1 规范型能耗模型介绍

规范型建筑能耗模型是一套规范化的建筑能耗计算方法, 这套方法参考了 CEN/ISO 等能耗计算标准。规范型建筑能耗模型往往被用于进行标准化的建筑性能评价^[2]。规范型建筑能耗模型具有间接、透明、鲁棒性好、可重复性好等多种优点。规范性能耗模型的主要原则在于以下两点:

- (1) 所有建模过程中的估计均是规范化的, 由此可以避免建模人员的人为因素造成的偏差。
- (2) 建模过程中涉及到的建筑的使用情况均是规范化

的, 所以建模过程中不存在对于建筑实际使用情况的预测^[3]。

规范型建筑能耗模型的计算方法已经通过了一系列严谨的验证^[3]。并且, 已有一项重要研究^[4], 在不同规模的建筑上定量地分析了这个问题, 将规范型建筑能耗模型和完全基于模拟的建筑能耗模型做了比较, 并得出了结论。结论是, 虽然规范型建筑能耗模型并不能呈现建筑及其系统的所有性质, 但是依然具备很高的可信度^[3]。

由以上可见, 规范型建筑能耗模型的计算方法具备操作简单、透明度高、鲁棒性好、可重复性好^[5]等多个优势。规范型建筑能耗模型非常适合被用于评价建筑能源系统的性能^[3]。

1.2 模型建立方法

本方法使用规范型能耗模拟软件 EPSCT 进行能耗建模, 需要用到的输入量如下表所示。其中, 所有参数的获取途径主要是建筑图纸和设备铭牌值, 次要途径是用户输入与规范参考值。

在建模过程中, 首先需要将上述输入量中, 建筑层面的输入量输入 EPSCT 的 INPUT 界面。然后, 需要按照建筑各个区域的使用时间段、温度设定点时间表、区域功能, 对建筑各个区域进行分区。分区完成后, 使用用户输入数据搭配规范参考值, 将各个小区区域的参数补全, 即可完成建模。软件将输出建筑全年逐月的冷负荷、热负荷、建筑每个子系统全年逐月模拟能耗数据。

1.2 模型校核方法简述

由于能耗模型将被用于后续建筑系统性能的诊断, 本方法应当使能耗模型能够尽可能准确地反映出建筑真实的运行情况。因此, 建立能耗模型之后, 我们还需要对能耗模型进行校准。对建筑能耗模型进行校核的过程, 是调整能耗模型的各个参数, 如冷机效率、人员在室率等, 使建筑能耗模拟结果与实际能耗曲线达到一致, 在标准允许范围内, 可以有一定的偏差^[1]。

一般的建筑能耗模型校核过程, 仅比较建筑总电耗、总燃气消耗量的模拟结果与实际结果曲线, 通过对模型调参, 使得这两条曲线匹配后, 即认定为模型校准完成^[1]。本方法的校正过程, 将建筑的各个子系统分离出来独立校正, 要求建筑各个子系统的模拟与实际的能耗曲线均匹配。这样的校正方法与要求可以提高校正后的建筑能耗模型可靠性, 也在一定程度上增加了模型校正的难度。

表 1 建模所需要的输入量

变量名称	获取途径	变量名称	获取途径
建筑所处地理位置（城市）	建筑图纸	日间照明系数，照明持续控制系数	用户输入
气象数据	依据建筑位置确定	设备房，车库，仓库的机械通风量	用户输入或规范参考
建筑所处地势，建筑高度	建筑图纸	锅炉效率	铭牌
围护结构几何参数	建筑图纸	冷机效率	铭牌
围护结构材料	建筑图纸	开窗面积与开窗角度	用户输入
暖通系统形式（全空气，风盘等）	建筑图纸	建筑漏风系数	规范参考值
通风形式（机械，自然，半机械半自然）	建筑图纸	风机功率	铭牌
热水系统形式，热水循环高度	建筑图纸	风机控制系数	用户输入 (依据风机控制方式选参考值)
各区域温度设定点	用户输入各区域的用途和使用时间及空调时间	PV 板各参数	建筑图纸与用户输入
每个大分区内，各个小房间设备安装功率密度，照明安装功率密度	建筑图纸	风轮各参数	建筑图纸与用户输入
大分区内，各房间的人员密度	用户输入（用户没有数据时，使用规范的参考值）	太阳能热水设备参数	建筑图纸与用户输入
各个小分区（zone）的三项内热源工作时刻表	用户输入		
各个 zone 的生活热水需求量	规范参考		

本方法对于模型校正结果吻合程度的判别，使用了平均误差 (MBE) 和均方根变异系数 (CV(RMSE)) 两个指标，两个指标的计算公式如下式 (1)、(2)。对于两个指标的限值，本方法参考了 ASHRAE Guideline-14a^[6] 所给的限值，逐月 MBE 允许范围 $\pm 5\%$ ，逐月 CV(RMSE) 允许范围 $\pm 15\%$ 。

$$MBE = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - y_i)}{n \times y_i} \quad (1)$$

$$CV(RMSE) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n} \div \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}} \quad (2)$$

式中： x_i 为能耗模型模拟出的第 i 个月的能耗； y_i 为实际数据中第 i 个月的能耗； n 为一年的总月数，取 12。

在调参过程中，区分模型各项输入参数，对于建筑总能耗、建筑各子系统能耗的影响，对调参的效率和准确性有很大帮助。因此，本方法使用了 Monte-Carlo 方法，探究了 EPSCT 中的各项输入参数与各个建筑子系统能耗之间的关系，并利用 Monte-Carlo 方法确定输出量对于各个输入量的敏感度。将敏感度确定下来后，在后续调参过程中，本方法将按照敏感度排序，依次进行调参。即，优先调节敏感度较高的参数，再调节敏感度一般的参数。对于敏感度非常低，而且没有建筑实测数据的参数，可直接选用规范参考值，即不调节这类参数。同时，本方法包含了一种能耗模型自动校正的方法，且本文作者通过编程，已将该方法实现，即实现了能耗模型部分子系统的自动调参。

1.3 Monte-Carlo 方法

首先，我们需要获取足够数量的数据（本方法采用 100 条）。数据形式为 $n \times m$ 的矩阵 X ，以及一个 $n \times 1$ 的向量 Y 。其中， n 为数据总条数， m 为输入量个数，该矩阵为自变量矩阵， $X(1,2)$ 表示第一组数据中第二个输入量的值， Y 的 n 个维度值分别为 n 次输出结果。

随后，使用多元线性回归方法，按下式对各个输入量和输出量进行多元线性回归，并获取各输入量的系数 b_j 。以下流程涉及的输入量、输出量，均为单个子系统的输入量和输出量。

$$I_{o,i} = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j v_{i,j} \quad (3)$$

式中： $I_{o,i}$ 为第 i 组输入量所对应的输出结果； b_j 为第 j 个输入量对应的系数， b_0 为常数项； $v_{i,j}$ 为第 i 组输入量中，第 j 个输入量的值^[7]； K 为输入量总个数。

随后，按以下两个式子，分别计算输入量与输出量的均值：

$$\bar{v}_j = \sum_{i=1}^n \frac{v_{i,j}}{n} \quad (4)$$

$$\bar{I}_o = \sum_{i=1}^n \frac{I_{o,i}}{n} \quad (5)$$

式中： $\bar{I}_o$ 为输出量的均值； $\bar{v}_j$ 为第 j 个输入量的均值； n 为数据总组数^[7]。

然后，用下面两式分别计算各个输入量和输出量自身的标准差。

$$S_j = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(v_{i,j} - \bar{v}_j)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$S = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(I_{o,i} - \bar{I}_o)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (7)$$

式中： S_j 为第 j 个输入量的标准差； S 为输出量的标准差。

最后，计算各个输入量的敏感度 R_j ，指标越大，说明该输入量对输出量的影响越大。同时，本方法还将根据部分 R_j 绝对值总和占当前子系统所有 R_j 绝对值总和的比重，筛选出敏感度极小的参数。

$$R_j = \frac{b_j \cdot S_j}{S} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^x |R_j| < \varepsilon \sum_{j=1}^k |R_j| \quad (9)$$

式中： R_j 为第 j 个输入量的敏感度； ε 为敏感度界定参数，取 5%； x 为将输入量按敏感度从小到大排序后，前 x 个输入量的敏感度的绝对值之和小于当前子系统所有输入量敏感度的绝对值之和，而前 $x+1$ 个输入量的敏感度

则不满足。

1.4 自动调参方法与程序介绍

在进行建筑能耗模型校正时，目前主流的校正方法是由研究者人工调整建筑及其系统的各个参数，使得能耗模型输出的建筑总电耗、总燃气消耗曲线与实测的建筑总电耗、总燃气消耗曲线分别达到一致。这样的模型校正方法对于模型校正人员的工程经验、模型校正经验有着较高的要求，且需要消耗校正人员较多的时间与精力。

由于本方法提出对于建筑各个子系统分别进行校正的思路，并要求建筑各个子系统的逐月能耗都能够达到模拟曲线与实际曲线的一致。因此，假如按照主流方法通过人工调参进行模型校正，本方法的校正难度对于模型校正人员是一个较大的挑战。

为了减少模型校正过程对人力的依赖，并提高模型校正的速度，本方法的作者提出了一种自动调参方法，并通过编程实现了 EPSCT 能耗模拟软件部分建筑系统的自动调参功能。该自动调参方法的具体运作流程如下。

第一步，所有参数均取建模时的输入值，并以此作为自动调参的起点；

第二步，由用户指定，选定当前要做调参的子系统，和调参次数上限；

第三步，软件根据用户选定的子系统筛选出需要调节的参数，并根据 Monte-Carlo 方法的敏感度分析结果，将对当前子系统影响较小的参数标记，在后续调参过程中，这些参数将会被跳过，以提高调参速度，其余参数进入自动调参过程；

第四步，对于进入自动调参过程的参数，对第一个参数在其当前值的 $\pm 10\%$ 范围内取随机数。当前参数取完随机数后，新值将被填入 EPSCT 的输入表单，并对当前子系统的进行一次能耗模拟，记录下当前子系统的能耗模拟曲线的 CV (RMSE) 值；

第五步，进行判断，刚输出的 CV (RMSE) 值是否小于先前 CV (RMSE) 值。假如是，则新值保留为最优，且下一次这个参数取随机时，以新值为轴，在 $\pm 10\%$ 单位内进行取值。假如否，则新值不保留，下一次该参数取随机值时，依然以旧值为轴；

第六步，循环 4、5 两步，使所有参数都进行一次随机过程；

第七步，循环 4、5、6 三步，使总调参次数达到上限；

第八步，将所有参数保留下来的最优值填入 EPSCT 的输入表单，做一次最优的能耗模拟，并输出结果，自动调参过程至此完成。

自动调参的人员监控界面如下图所示，研究者可以在下拉框选定当前需要进行调参校正的建筑系统，可以在绿色框指定调参循环次数上限，并可以实时看到调参的进度。在黄色行以上部分是实时的能耗模型各区域参数，黄色行下方是实时的能耗模型系统参数以及实时的能耗模型输出的 CV (RMSE) 值。

2 本方法的案例分析

2.1 本文所使用的建筑实例介绍

青浦夏阳湖酒店位于上海市青浦区，为一家五星级的皇冠假日酒店。建设用地总面积 40303 平方米，总建筑面积达 45122 平方米。地上部分 1 号楼东西两翼分别为九层和十一层，2 号楼为三层，3 号楼为 5 层，地上部分建筑面积为 36375 平方米，主楼建筑高度为 41.20 米（至机房屋面）。设施主要有客房、餐饮及宴会厅等。

酒店目前主要的用能系统主要包括：暖通空调系统、游泳池环境控制系统、冷柜冷藏系统、照明系统、电梯系统、锅炉系统、消防系统、给排水系统。主要使用的能源类型包括：电力、天然气、水。根据酒店用能数据分析结果，能源消费最大的是电力，其次是天然气和水。

暖通空调系统主要用能设备包括：水冷机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔及空调末端（风机盘管）。1 号楼客房采用风机盘管加新风系统，1 号楼其余部分采用全空气系统。2 号楼中餐厅采用全空气系统，2 号楼其余部分采用风机盘管加新风系统。3 号楼主要是客房与办公室，全部采用风机盘管加新风系统。

主要冷热源设备参数如下：

空调主机：二台离心式冷冻机组（功率 346kW），一台螺杆式全热回收机组（273/454kW）。

水泵：三台冷冻水循环泵（二台 45kw，一台 37kw），三台冷却水循环泵（二台 55kw，一台 45kw），二台热回收水循环泵（二台 15kw）。

冷却塔：二台冷却塔。

空调末端：风机盘管为主，少量空调机组及新风机组。

锅炉：两台燃气热水锅炉，供空调与生活热水；两台

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	建议从上述子系统选择自动调参	fan				自动调参并记录							
2	调参	下方单元格填写你需要的 monte carlo 数据条数				点按按钮，将对选定的子系统进行自动调参，并记录该次调参的每一轮数据（记录于与子系统同名的工作表）							
3	FROM INPUT	300	调参进度-->		100 %					生成 monte carlo 数据表			
4	Zone	1Zone1	1Zone2	1Zone3	2Zone1	2Zone2	2Zone3	3Zone1	3Zone2	3Zone3	nei10 (No-HVAC)		
5	Space Name	doorway and stairs	office	big space with small occu	suite	0	0	0	3Zone2 dining hall (including kitchen)	0	storage and equip		
6	Gross Floor Area (m2)	4000	1200	10500	12000	0	0	0	2000	0	3900		
7	Occupancy (n2/person)	91.53	4.77	19.59	24.89	0.00	0.00	0.00	4.78	0.00	1000.00		
8	Metabolic rate (W/person)	130.00	130.00	130.00	130.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	30.00		
9	Appliance (W/m2)	0.00	19.03	2.34	15.49	0.00	0.00	0.00	10.09	0.00	26.00		
10	Lighting (W/m2)	4.34	8.37	10.72	9.03	0.00	0.00	0.00	9.31	0.00	3.84		
11	Outdoor Air (liter/s/person)	21.94	25.96	34.75	19.35	0.00	0.00	0.00	26.56	0.00	0.00		
12	DHW (liter/m2/month)	0.00	14.38	0.00	100.33	0.00	0.00	0.00	137.08	0.00	0.00		
13													
14													
15													
16													
17													
18	12.57%			7.50%			10.23%			21.38%			
19	hot water			lighting			load (occu, equip) and chiller			fan			
20	boiler efficiency	0.73		daylight control constant control	0.4670786		chiller con window opened leakage	4.01		fan specific fan control mechanic	1.41		
21				0.8333553			58.04			0.72			
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31													
32													
33													
34													
35													
36													
37													
38													
39													
40													
41													
42													
43													
44													
45													
46													
47													
48													
49													
50													
51													
52													
53													
54													
55													
56													
57													
58													
59													
60													
61													
62													
63													
64													
65													
66													
67													
68													
69													
70													
71													
72													
73													
74													
75													
76													
77													
78													
79													
80													
81													
82													
83													
84													
85													
86													
87													
88													
89													
90													
91													
92													
93													
94													
95													
96													
97													
98													
99													
100													

图 1 自动调参功能的研究者使用界面

蒸汽锅炉供酒店后勤使用。

2.2 案例模型建立

本案例的能耗模型依据 1.2 陈述的方法进行建立。建立根据夏阳湖酒店的实际情况,本次建模使用的分区情况如下所述。

首先,建筑各区域由于温度设定点的不同,被分为四个大类:主要在夜间使用、主要在白天使用、间歇使用、非空调区。然后,我们需要在大类中继续细分小区域。

主要在夜间使用这个大类仅包含一个小区域,即客房。主要在白天使用这个大类包含 3 个小区域:中庭、办公室、走廊。间歇使用这个大类仅包含一个小区域,即宴会厅。非空调区为仓库和设备房,这个区域仅使用机械通风。

2.3 应用 Monte-Carlo 方法时,输入量与输出量分组

本方法在调参时,依据的思路是对建筑的逐个子系统依次调参,即,先对相对独立的系统调参,如生活热水、照明、一般设备等系统。对这些系统调参完成后,再对较为复杂,变量之间关联度较高的系统调参,如制冷系统、室内侧输配系统。

因此,在利用 Monte-Carlo 方法进行敏感度分析时,也应对多个建筑子系统分别分析。本方法对于建筑的子系统的分组如表 3 所示。

2.4 Monte-Carlo 方法的数据获取

本方法使用的能耗模拟软件 EPSCT 是基于微软的 Excel 软件开发的。为了更加直接直观地进行输入输出,本方法在 Monte-Carlo 方法的数据获取这一过程中,直接使用微软 EXCEL 内置的 VBA 编程来实现功能。本方法按照如下流程获取并记录单个子系统在 Monte-Carlo 方法中所需的数据:

第一步,选定一个建筑子系统;

第二步,对该子系统,所有参数均以参考值或实测值填入 EPSCT 并生成该子系统的能耗模型与能耗模拟结果,并将初始参数和第一次输出的该系统全年能耗记录;

第三步,将该系统所有参数在初始值 $\pm 10\%$ 范围内取一随机值并填入 EPSCT 中,同时记录下每个参数相对初始值偏离的百分比;

第四步,计算出在当前输入下,该子系统的全年能耗值与第一次输出的全年能耗值的相对偏差,并记录;

第五步,重复 3.4 两步获取 100 组数据,每组数据应包含各个参数相对初值偏离的百分比(即章节 3.4.2 中所描述的输入量),以及该组参数所对应的该子系统的全年能耗值偏差(即章节 3.4.2 中描述的输出量)。

获取到的数据样例如表 2 所示。

表 2 章节 2.4 获取的数据样例

热水系统全年能耗值相对偏差	办公室热水需求量相对偏差	客房热水需求量相对偏差	宴会厅热水需求量相对偏差	锅炉效率相对偏差
0.00875	0.04110	0.00668	0.01590	-0.04208
0.02248	-0.03961	0.05494	-0.09719	0.05214
0.01509	0.06289	0.04180	-0.09092	-0.01719
0.04039	0.07252	0.05809	-0.02529	0.09239
-0.04921	0.07428	-0.08875	0.08991	-0.02719

2.5 Monte-Carlo 方法的输入量敏感性分析结果

本方法在 jupyter notebook (适用于 python 的一款加

强交互式代码编辑器)环境下,使用由本文作者编写的基于 python 语言的 Monte-Carlo 算法程序,对前文获取到的 Monte-Carlo 数据进行处理,并进行敏感度分析。

敏感度分析完成后,各个子系统下的各个参数所对应敏感度系数 R_j 如下表所示。表中,依据式(8)、(9)计算而得的结果,对所属于系统的影响极小的部分参数被标下划线。这部分参数在后续调参过程中将被跳过。

表 3 建筑各个子系统的变量敏感度分析结果

输出量	输入量名称	R_j
生活热水能耗	客房逐月热水需求量密度	1.237
	宴会厅逐月热水需求量密度	-0.268
	办公室逐月热水需求量密度	-0.933
	锅炉效率	-0.833
照明电耗	客房照明安装功率密度	0.361
	走廊照明安装功率密度	0.346
	办公室照明安装功率密度	-0.006
	宴会厅照明安装功率密度	0.588
	中庭照明安装功率密度	0.514
	设备房照明安装功率密度	0.049
	日间照明控制系数	-0.06
	持续照明控制系数	1.203
风机电耗	客房新风量需求	0.252
	办公室新风量需求	-0.780
	走廊新风量需求	0.852
	中庭新风量需求	-0.906
	宴会厅新风量需求	-0.956
	设备房机械通风量	-0.618
	风机功率	-0.878
制冷系统电耗	风机控制系数	-1.400
	客房人员密度	0.073
	客房设备功率密度	0.210
	走廊人员密度	0.144
	走廊设备功率密度	0
	办公室人员密度	-0.331
	办公室设备功率密度	0.179
	中庭人员密度	0.228
	中庭设备功率密度	0.635
	宴会厅人员密度	-0.019
	宴会厅设备功率密度	0.153
	冷机效率	-0.765
	建筑漏风系数	0.194
	建筑自然通风开窗面积	-0.123

2.6 模型校正结果及分析

本方法使用自动调参程序,针对该建筑实例的模型校正结果如下,建筑总电耗、建筑各个子系统电耗的逐月模拟值与实际值基本能够达到 ASHRAE Guideline14 对于能耗模型校准的要求,即 MBE 绝对值 $\leq 5\%$, CV(RMSE) $\leq 15\%$ 。

在建筑总用电方面,实际能耗曲线在 5 月与 10 月出现了显著的峰谷。我通过将夏阳湖酒店的信息中心、特殊功能设备、动力设备等系统的 2014 年逐月电耗计量数据与夏阳湖酒店 2014 年逐月宴会厅使用频率、客房入住率两项数据比对,发现这些设备的电耗与客房入住率呈现较显著的正相关性。因此,本方法对于设备的逐月用电量,依据客房入住率进行了修正。在对设备用电量进行了修

正后, 能耗模型的建筑总用电模拟结果 CV(RMSE) 达到 15.24%, 已较为接近 ASHRAE Guideline 所给的限值。

然而, 在 10 月份, 一般设备的用电量相比前几个月大幅下降, 然而客房入住率在 10 月份却恰恰相反达到全年最高, 同时 10 月份宴会厅使用频率未出现明显改变。目前本方法认定, 这个现象的内在原因为 10 月份夏阳湖酒店一般设备系统的分项计量电耗数据有问题。

因此, 本方法在对模型校正结果进行评估时, 对于本文案例, 剔除 10 月份的建筑总用电数据, 最终模型校正结果如表 4 所示。

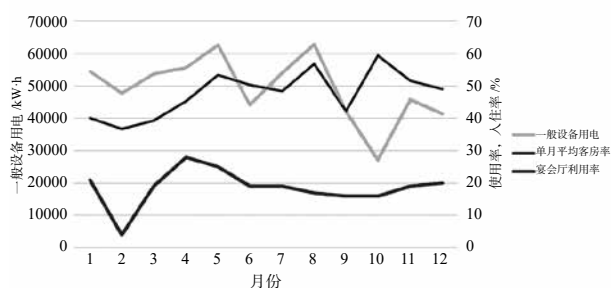


图 3 一般设备用电与客房入住率、宴会厅使用频率的关系

表 4 模型校正后各个建筑子系统的能耗模拟结果匹配程度

	建筑总用电	暖通	冷机	燃气	风机	照明
MBE	-0.07 %	-4.90 %	-2.58 %	6.25 %	-2.37 %	1.01 %
CV(RMSE)	11.66 %	13.39 %	10.19 %	14.57 %	19.72 %	7.50 %

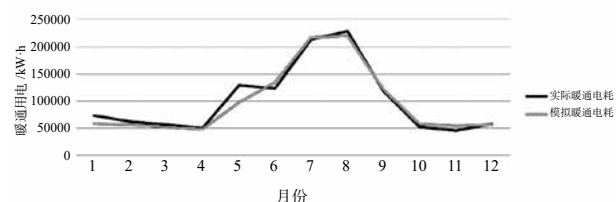


图 4 模型校正后, 暖通用电的实际数据 - 模拟结果对比图

3 结论

本文阐述了规范性建筑能耗模型的优势, 该部分内容有助于建筑能耗模拟方面的从业者更清晰地使用规范型建筑能耗模型。

本方法使用了 Python 作为编程语言, 通过将 Monte-Carlo 方法应用到建筑能耗模型中, 筛选出较为重要的建筑参数、建筑系统参数, 进而加快建筑能耗模型校正速度, 提高模型校正效率。

不仅如此, 本方法还提出了建筑部分系统的自动调参方法, 并使用 VBA 编程环境对自动调参方法进行实现。本文所提出的方法均以位于上海青浦的夏阳湖酒店为案例进行了验证。验证结果显示, 本文所提出的自动调参、参数筛选两个方法, 在建筑能耗模型校正中均能起到良好效果。

参考文献

- [1] Pan Yiqun. Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai[J]. Energy and Buildings, 2007(39): 651-657.
- [2] 王永龙, 潘毅群. 典型办公建筑能耗模型中输入参数单因子敏感性的分析研究 [J]. 建筑节能, 2014, 42(2): 9-14.
- [3] Sang Hong Lee. The use of normative energy calculation beyond building performance rating systems: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association[C]. Sydney, 2011.
- [4] Sun, Y., Y. Heo, et al. Uncertainty Quantification of Microclimate Variables in Building Energy Simulation: Building Simulation 2011[C]. Sydney, Australia, 2011.
- [5] Van Dijk, D. and M. E. Spiekman. CEN Standards for the EPBD - Calculation of energy needs for heating and cooling[R]. EPBD Buildings Platform, 2007.
- [6] ASHRAE Guideline Project Committee 14. ASHRAE Guideline 14-2014[K]. USA: Atlanta, 2014.
- [7] Li Zhengwei. Preventive approach to determine sensor importance and maintenance requirements[J]. Automation in Construction, 2013(31): 307-312.

基于数据驱动的空调水系统模型的建立

吕 岩, 潘毅群, 黄治钟

(同济大学, 上海 200092)

[摘 要] 目前, 对于公共建筑的集中式空调系统来说, 其规模一般是比较大的。这也就意味着, 储存在其水系统的冷冻水之中的冷量是相当可观的, 具有利用的价值。在系统优化运行控制的层面来看, 对该部分冷量的利用, 相当于对空调水系统的运行进行优化的过程中, 考察其自身的蓄能特性。在考虑到蓄能作用基础上的空调水系统优化算法, 可以实现对应于峰谷电价的错峰填谷、提前关闭系统以利用剩余冷量等更广泛的优化排期功能。

本研究以某公共建筑 BA 系统所收集得到的空调水系统运行数据为基础, 总结了部分适用于实际项目的空调水系统半物理模型的建立方法, 并采用实测数据对系统模型进行了验算, 证明了该空调水系统模型的有效性, 并为进一步的工作提出了设想。

[关键词] 空调水系统; 蓄能

0 引言

研究对象为空调水系统。其中, 冷水机组、末端设备中的冷盘管, 以及管道, 都具有一定的蓄能能力。关于冷冻水的蓄能, 其实质上是属于空调水系统的非稳态特性的一部分, 所以该研究必须从建立水系统设备的动态模型着手。理论上来说, 首先对这三个部分分别建立起描述其动态特性的设备模型, 再以变量传递的方式将它们连接起来, 就可以构建整个空调水系统(冷冻水环路)的动态特性模型。

在当前几乎所有的成熟的楼宇能耗模拟软件或算法中, 基本上都只采用设备的稳态模型。包括广泛采用于对瞬态系统进行模拟的平台 TRNSYS (Transient System Simulation Program), 其提供用于模拟 HVAC 相关机电系统的 TESS 库中的模型, 多数也都只能够描述设备的稳态特性, 即使是缩小模拟计算的时间步长, 模型的输出只会发生“突变”, 而无法给出其在动态响应特性下的各个变量值。不过管道的动态模型的相关研究是比较成熟的, 例如在 TRNSYS 中所提供的管道模型却是一个动态模型 (TRNSYS 自带模块 Type 709, Pipe_Duct 模型), 它考虑到了管道和内部流体的热容, 可以直接用于对管道蓄能能力的描述。

此外值得注意的是, 若研究的对象主要为冷冻水本身的蓄冷能力, 在此前提下, 由于冷水机组和末端设备中存储的冷冻水量绝对值并不大, 系统中绝大多数冷冻水都在管道之中, 所以可以只对管道的蓄冷能力进行考察, 而忽略冷机和末端处的蓄冷。事实上, 冷机和末端处的动态模型更多的也是用于描述冷机内部制冷循环的动态响应特性, 或是末端冷盘管的干湿过程的动态特性, 而这些设备的内部过程并不在 BA 系统的监测范围之内, 因此在本研究中对其采取忽略处理是可行的。

1 研究方法

一般来说, 常规的基于模型的空调水系统的运行状态优化的实现方式为: 以目前常见的集中式空调所采用的水系统为研究对象, 建立描述其设备性能的仿真模型, 并在此基础上对整个空调水系统进行模拟。基于当前和过去时刻的空调水系统负荷数据, 对未来时刻的水系统负荷进行预测, 并将预测负荷数据和预测天气参数作为系统模型的输入变量, 模拟得到未来时刻空调水系统的运行参数预测值。以此为基础选择合适的目标函数和优化变量, 对未来时刻空调系统的运行控制进行优化, 给出未来时刻最优的

控制排期表。

用于优化排期的模型一般来说都只给出的系统的静态特性, 没有考虑到系统中设备与管道的蓄能能力。因此, 在原有模型的基础上, 再引入表征空调水系统和建筑物蓄能能力的模型; 在对蓄能组件的模型进行验证后, 还需要确定一整套与之配套的系统优化排期的计算方法, 从而最终得到完整的系统模型。

目前所获得的已有数据为外滩茂悦酒店在 5 月至 7 月两个月的时间中 BA 所检测到的数据, 其采样间隔为 5min, 较短的采样间隔可以表征出模型的动态特性。其中, 将所监测到的 AHU 的回风温度平均值, 视作当前时刻的室内温度; 作为训练集的数据中, 各个时刻的实际负荷值由冷冻水的流量、冷冻水额定供回水温差以及水的比热相乘得到。

根据酒店 BA 系统的实际运行情况, 选择以下变量作为建立模型所必需的监测变量, 监测间隔按表 1 确定。

表 1 空调水系统监测变量

设备(环路)	监测变量	符号(单位)	备注
冷却水环路	冷却水质量流量	m_{cw} (kg/s)	
	冷却水进塔温度	T_{cws} (°C)	相当于冷却水冷水机出口温度 T_{cwo}
	冷却水出塔温度	T_{cwr} (°C)	相当于冷却水冷水机进口温度 T_{cwi}
冷冻水环路	冷冻水质量流量	m_{chw} (kg/s)	
	冷冻水进口温度	$T_{chw,i}$ (°C)	
	冷冻水出口温度	$T_{chw,o}$ (°C)	
冷却塔	冷却塔风机功率	P_{fan} (kW)	功率与风量 m_g (kg/s) 之间的关系: $m_g = k^3 / P_{fan}$
冷机	冷机输入功率	P (kW)	
水泵	水泵总功率	P_{pump} (kW)	
	冷却泵出口压头	H_{cw} (m)	
	冷冻泵出口压头	H_{chw} (m)	
天气参数	室外湿球温度	T_{wb} (°C)	
	室外干球温度	T_{db} (°C)	
末端设备	AHU 回风温度	T_i (°C)	

2 模型建立

目前, 有关空调水系统模型的相关研究已经非常成熟, 已有很多用于描述各类设备的模型, 并且能达到很高的精度。由于本研究所建立的空调系统模型是基于大量实测数据的基础之上的, 所以在此选择采用成熟的半物理的经验

模型来对各个设备进行建模。具体操作为：

2.1 冷却塔

模型输入：冷却水质量流量 m_{cw} ，冷却塔风量 m_a ，冷却水进塔温度 $T_{cw,s}$ ，室外湿球温度 T_{wb} ；

模型输出：冷却塔换热量 Q_{rej} ，冷却水出塔温度 $T_{cw,r}$ ，冷却塔风机功率 P_{fan} ；

模型方程：

$$Q_{rej} = \frac{Am_{cw}^c}{1+B(\frac{m_{cw}}{m_a})^c} (T_{cw,s} - T_{wb}) \quad (1)$$

$$P_{fan} = \frac{1}{k} \sqrt{m_a^3} \quad (2)$$

训练模型时，冷却水出塔温度的监测数据为已知值，因此可以结合水的比热容 c_{pw} （取 $c_{pw}=4.19\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ）、冷却水质量流量和冷却水进塔温度计算得到冷却塔换热量。反之，当模型用于优化仿真时，可以通过求得的 Q_{rej} 得到冷却水出塔温度作为模型输出：

$$Q_{rej} = c_{pw}m_{cw}(T_{cw,s} - T_{cw,r}) \quad (3)$$

在对冷却水出塔温度的设定值的可行性进行判断时，冷却塔需要提供换热量 Q_{rej}' 可以通过冷机的冷量 Q_e 和冷机的输入功率 P 计算得到：

$$Q_{rej}' = Q_e + P \quad (4)$$

由此和设定的冷却水出塔温度（作为优化变量）反推得到冷却水进塔温度，将其作为输入由模型方程得到此工况下冷却塔的最大换热量，并依此确定冷却水出塔温度的下限值，与设定的冷却水出塔温度作比较，根据其值是否合理及收敛运算是否完成进行判断。

对于只有总管数据而没有支管数据的 BA 系统而言，在训练模型前应通过计量得到的设备能耗数据判断开启冷却塔或冷机的台数，并将各计量得到的输入变量除以台数以得到单台设备的输入变量（此处默认各台对应设备是相同型号的）。

2.2 冷机

模型输入：制冷量 Q_e ，冷却水进口温度 $T_{cw,i}$ ，冷冻水出口温度 $T_{chw,o}$ ，冷冻水进口温度 $T_{chw,i}$ ；

模型输出：冷机输入功率 P ；

模型方程：

$$P = (AQ_e + B)\frac{T_{cw,i}}{T_{chw,o}} + CQ_e + D \quad (5)$$

训练模型时，制冷量可以由水的比热容 c_{pw} 、冷冻水质量流量 m_{chw} 、冷冻水出口温度和进口温度 $T_{chw,i}$ 得到：

$$Q_e = c_{pw}m_{chw}(T_{chw,i} - T_{chw,o}) \quad (6)$$

当模型用于优化仿真时，冷机的制冷量可以近似看作优化时刻的空调水系统盘管负荷预测值，直接将其作为模型的输入。

2.3 水泵

模型输入：水泵入口流体温度 $T_{in}(T_{cw,in}, T_{chw,in})$ 、水泵流量 $m_w(m_{cw}, m_{chw})$ ；

模型输出：水泵出口流体温度 $T_{out}(T_{cw,out}, T_{chw,out})$ 、水泵总功率 P_{pump} 、水泵总效率 η 、出口流体全压升 Δp ；

待定参数：泵送流体吸收热量的比例系数 (f_{loss})，以及用以描述水泵工作特性曲线、管路特性曲线以及水泵效

率与水泵工况之间关系的各项参数。

在本模型中，由于水泵的流量在计算时是作为模型已知的输入变量，所以可以不需要对水泵的工作特性曲线进行描述，而只拟合出管路特性曲线，对应给定的流量值，在管路特性曲线上就可以确定其工作状态点。

当变流量泵变频时，其工作特性曲线发生相应的变化，并通过新的工作特性曲线和管路特性曲线，确定水泵新的工作状态点。

2.4 系统蓄冷能力

引入的管道模型：

模型输入：冷冻水质量流量 m_{chw} ，管道入口温度 T_{in} ，管道长度 L ，管道直径 d ，仿真时间步长 Δt ；

模型输出：管道出口温度 T_{out} ；

模型参数： α 、 β 、 k 、 n 。

模型方程：

$$T_{out} = \frac{1}{m_{chw}\Delta t} \sum_{j=1}^{k-1} M_j T_j + \alpha M_k T_k \quad (7)$$

其中， M_j 为当前时刻管道出口前第 j 个时间步长中进入管道的流体总质量， T_j 为该时刻进入管道的流体的温度。因此，参数 α 、 k 以及各时刻的 M_j 应满足下式：

$$m_{chw}\Delta t = \sum_{j=1}^{k-1} M_j + \alpha M_k \quad (8)$$

在该模型的计算过程中，由于对当前时刻的出口温度的求解需要用到以前时刻的变量值，所以在每一个时间步长计算完成后，需要将该时刻的 M_j 与 T_j 值保存下来，直到后续计算中不再用到该时刻的储存值为止（该时刻进入管道的流体已全部流出管道）。每个时刻的 M_j 值按下式计算：

$$M_j = m_{chw,j}\Delta t \quad (9)$$

计算中，为了确定每个计算时刻 M_j 的取值，首先需要计算整个管道可以容纳的 M_j 的数量，这可以通过管道的总长和直径估算得到：

$$\rho_w \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 L = \sum_{j=1}^{n-1} M_j + \beta M_n \quad (10)$$

以该式为基础，可以得到在给定时刻，在各个时段进入管道的流体段 ($M_j T_j$) 在管道中的分布，那么也就可以得到需要用于计算管道出口流体温度的各个流体段的参数值，在每个时间步长计算完成后，需要对该式进行更新，以确定新的管道内的流体段状态。该计算原理的示意图如下所示：



图1 管道模型示意图

3 系统仿真

3.1 设备模型连接

系统模型由设备模型连接而成。设备模型的连接通过变量的传递实现。

设计规范规定，冷却塔和冷机之间应为并联连接，即各个运行的冷机的冷却水出口应并联至一根总管，总管将冷却水输送至室外，通过分水器将冷却水分送给各个运行中的冷却塔。冷却塔的回水也应并联至总管，再由分水器分送至各环路。在冷却水环路上，冷却塔到冷机之间设有

冷却水泵,按照不同楼宇空调系统设计方案的的不同,水泵与冷机可以一一对应连接,也可以并联连接。

冷机的冷冻水出口则与冷冻水泵连接,同样既可以一一对应连接,也可以采用并联的方式。冷冻水泵的出口并联至空调水系统的供水干管,将冷冻水送至末端设备。冷冻水回水干管在机房通过分水器与冷机的冷冻水入口相连接。

模型中,认为各个冷却水泵之间,以及各个冷冻水泵之间是相同的,并且在所有分水器中,冷却水、冷冻水被均匀分配给各个支路。

由此可得设备模型连接中的变量传递:

冷却水进塔温度 $T_{cw,s}$ 与冷却水冷水机出口温度 $T_{cw,o}$:

$$T_{cw,s} = T_{cw,o} \quad (11)$$

冷却水出塔温度 $T_{cw,r}$ 、冷却水泵的进口温度 $T_{cw,in}$ 、出口温度 $T_{cw,out}$ 和冷机进口温度 $T_{cw,i}$:

$$T_{cw,r} = T_{cw,in}, T_{cw,out} = T_{cw,i} \quad (12)$$

冷冻水冷水机出口温度 $T_{chw,o}$ 与冷冻水泵的进口温度 $T_{chw,in}$:

$$T_{chw,o} = T_{chw,in} \quad (13)$$

3.2 系统模型建立

综上所述,目前对本研究内容中问题的解决思路初步确定为:以前文部分中所给出的空调水系统仿真优化模型(稳态)为基础,在系统模型中现有的设备模型中引入管道动态模型,按后文中所述方式对其进行修改,从而使其可以描述出系统的动态特性,将其蓄能力定量化,用于后续的系统优化控制。

在考虑水系统蓄冷的情况下,仿真模型的计算方法见图2。

4 结果与讨论

在进行实验验证前,可以通过部分仿真数据对该模型的动态特性进行验证。在 TRNSYS 平台中,将管道模型引入到了系统模型里,运行得到了仿真数据,其结果可以看出管道模型可以反映出系统的动态特性(负荷的传递有

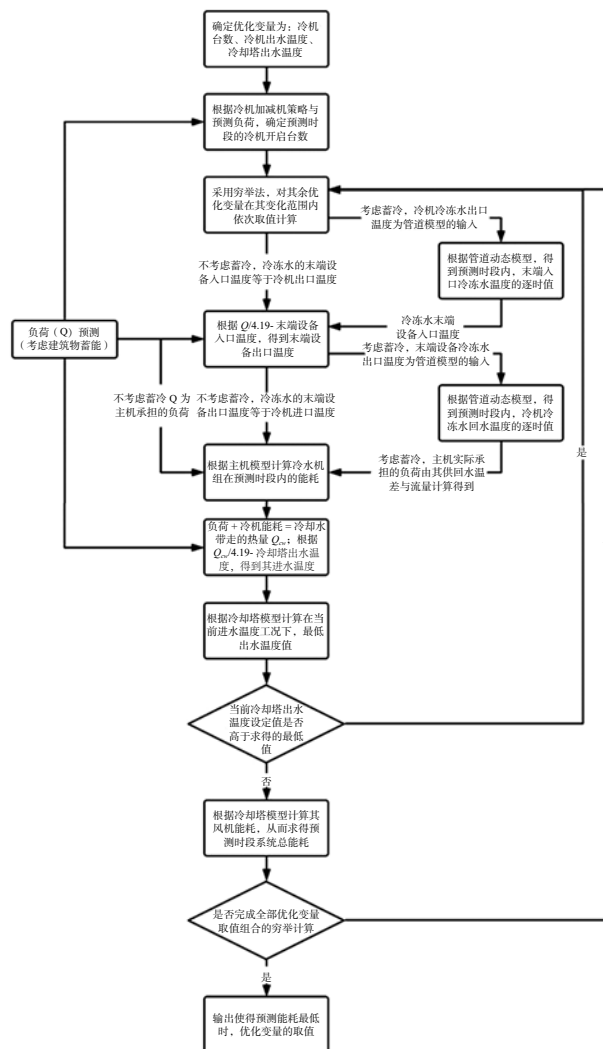


图2 系统模型计算流程

了延迟)。

表 2 管道模型验证

Time	OutCHWTemp	Terminal InTemp	InCHWTemp	Terminal OutTemp
4225.80	7.00	7.00	7.48	7.48
4225.90	7.00	7.00	7.48	7.48
4226.00	8.00	7.33	7.47	7.47
4226.10	8.00	7.48	7.70	7.80
4226.20	8.00	7.63	7.89	7.94
4226.30	8.00	7.83	8.04	8.08
4226.40	8.00	7.97	8.22	8.28
4226.50	8.00	8.00	8.37	8.41
4226.60	8.00	8.00	8.43	8.44
4226.70	8.00	8.00	8.44	8.43
4226.80	8.00	8.00	8.43	8.43

在以稳态运行的系统中,突然改变进入管道的冷冻水的温度,观察管道出口的温度变化速度。可以看出,管道出口处的温度变化延迟有将近 30min 的延迟效果(管段长度取 150m,管道直径取 400mm),设定温度突变为 7°C 到 8°C:

将建立好的系统模型用已有的楼宇监测数据进行训练,其中 70% 的数据作为训练集,30% 的数据作为测试集。运行结果如下图所示:

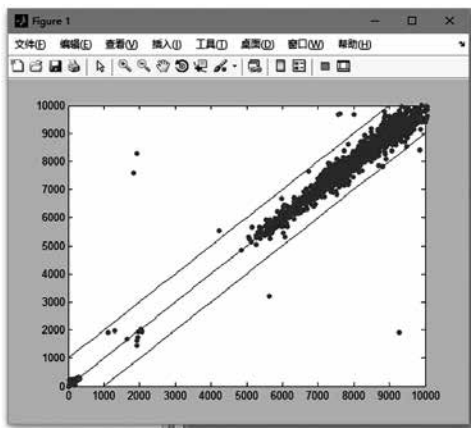


图 3 模型验算结果

平均误差为 1.6%,异常点很少,说明该系统模型的精度基本可以适用。也就是说,按本文所述方法所建立的空调水系统模型,在基于数据驱动的背景下,是满足要求的。

然而,目前值得注意的问题是,为了得到能够表征空调水系统停机后建筑物的动态响应特性,理论上应该选取系统发生开关机操作时的一段非稳态的时段的数据来作为训练集构建模型。但是在目前所获得的数据中,由于系统全程处于夏季制冷工况中,没有发生开关机的情况,所以暂时这种构建模型的思路还不能进行。可以等到过渡季有合适工况下的数据积累后,再进行模型的验算。

参考文献

- [1] 付朋,张吉礼,赵天怡.中央空调冷水机组性能模型实验研究[J].《建筑热能通风空调》,2016,35(3):1-5.
- [2] Lee T S, Liao K Y, Lu W C. Evaluation of the suitability of empirically-based models for predicting energy performance of centrifugal water chillers with variable chilled water flow [J]. Applied Energy, 2012,93:583-595.
- [3] 孟华,龙惟定,王盛卫.中央空调水系统优化控制研究的发展及现状[J].《建筑热能通风空调》,2002,21(6):29-32.
- [4] TRNSYS Manual Type709.
- [5] 徐哲恬,潘毅群,黄治钟.基于人工神经网络的机械通风开式冷却塔运行性能在线预测[C].上海市制冷学会2013年学术年会论文集,2013-12-18.
- [6] 赵振国,冷却塔[M].北京:中国水利水电出版社,2001.

基于强化学习的空调系统运行优化

王尉同¹, 潘毅群¹, 黄治钟²

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学中德工程学院, 上海 201804)

[摘要] 空调系统运行优化是建筑节能的重要组成部分。本文将强化学习算法应用在空调系统运行优化中。首先建立空调系统运行优化任务的马尔科夫决策过程模型, 接下来确立规则对探索空间进行进一步缩减, 使探索过程尽可能满足系统设备运行和被控区域舒适度的约束, 最后应用 Q-Learning 算法探索学习不断改进控制策略。通过仿真案例对算法进行了测试。采用动态仿真软件 TRNSYS 和 MATLAB 进行联合仿真, 对被控区域送风量进行了优化, 仿真结果显示, 与基于固定规则的控制策略和 PID 控制相比, 本文提出的基于强化学习的控制方法可以在小幅提升被控区域舒适度的同时可将运行费用分别降低超过 7% 和 4.5%。

[关键词] 空调系统; 运行优化; 强化学习; Q-Learning

0 引言

空调系统运行优化是建筑节能的重要组成部分。建筑运行优化的基本目标是在满足被控区域舒适度要求的前提下尽可能的降低能耗或者能耗消费。为了适应室外不断变化的天气情况和室内负荷变化情况, 如何动态调整系统中的设定值或者运行规则从而提高建筑能效一直是建筑运行优化的研究重点。

经典控制器包括基于规则的控制(如启停控制), PID 控制等由于结构简单, 初投资较低被广泛应用, 然而空调系统是典型的高度非线性、不确定性、时变性、耦合性的复杂系统, 导致经典控制方式的表现并不理想^[1]。近年来模型预测控制(MPC)在空调系统中的应用受到广泛的关注, MPC 的基本思想是在每个时间步长, 通过对未来一段时间窗内进行滚动优化得到最优的控制策略。通过对未来的室内扰动和室外天气状况进行预测, 可以显著提高建筑能效^[2]。然而 MPC 的实际运行效果严重依赖模型的准确度, 尤其是对于建筑热湿环境控制问题, 难以建立精确且能应用在实时优化控制中的建筑动态模型, 一旦数学模型与实际情况存在较大偏差, MPC 计算得到的控制策略的效果将难以保证。Killian^[3-5]等人针对将 MPC 实际应用建筑运行中遇到的挑战进行了阐述与总结。

随着强化学习在算法和理论上的研究深入, 强化学习算法在实际的工程优化和控制中得到了广泛的应用^[6]。与 MPC 的特点相反, 基于强化学习的免模型控制方法是一种数据驱动的控制方法, 通过不断尝试, 利用反馈的信息来更新控制策略, 降低了对先验知识的依赖。基于强化学习的控制方法与人类通过学习获取经验的方式非常相似^[7], 吸引了部分研究人员对其应用在建筑运行优化上进行了初步的尝试。Liu^[8]等人将强化学习应用在空调蓄能装置运行优化中, 作者指出使用的经典 Q-Learning 算法存在对于高维度空间学习效率低下的问题。Dalamagkidis^[9]等人将经典的强化学习控制方法与传统的启停控制, 和模糊 PD 控制进行了对比, 结果表明, 在使用几年的仿真数据训练之后的强化学习控制器的控制表现与其他控制器控制效果大致相等或表现更加出色。Li^[10]等人提出了多尺度强化学习, 用来加速最优控制策略求解过程。Yang^[11]等人将强化学习控制器应用在低焓建筑中, 通过仿真进行了验证, 但计算过程并未考虑建筑的热惰性。Ruelens^[12]等人使用强化学习控制器确定温度设定重置策略, 提升热泵运行效率, 仿真结果显示与固定温度状态点的方式相比节能显著。Costanzo^[13]等人将强化学习控制器应用在建筑

需求相应中, 并通过实验进行了验证, 定量分析表示强化学习控制策略可以达到 90% 的全局最优解。Wei^[14]等人提出了基于深度强化学习的空调系统控制方法, 并验证了深度强化学习控制器的可扩展性, 但深度强化学习控制器存在训练所需的时间过长的问题。总体来说, 目前相关研究主要集中在验证强化学习算法在不同的空调系统运行优化场景中的表现, 其应用方式缺乏系统性的梳理, 如何进一步提升强化学习控制器的实用性仍然是目前主要的研究方向。

本文将强化学习算法应用在空调系统运行优化中, 首先对目前的空调系统运行优化方法进行了梳理, 重点介绍基于强化学习的系统运行优化目前的研究情况, 其次介绍强化学习相关理论和算法, 提出强化学习控制器在空调系统中完整的应用流程, 最后通过仿真案例进行验证, 以一小办公建筑作为研究对象, 使用强化学习控制器动态调节房间送风量, 对其应用效果进行分析。

1 强化学习与 Q-Learning 算法

1.1 强化学习

强化学习是一种以环境反馈作为输入的、特殊的、适应环境的机器学习方法, 它的主要思想是与环境交互和试错, 利用评价性的反馈信号实现决策的优化^[15]。图 1 为强化学习的一个简单图示。强化学习任务通常用马尔科夫决策过程来描述: 包括 S 状态集, A 动作集, P 转移函数和 R 奖赏函数。在每个决策时刻 t , 智能体选择执行动作 $a_t(a_t \in A)$, 经过一个时间步长 Δt , 环境 E 从状态 s_t 转变为 s_{t+1} , 在 $t+1$ 时刻, 智能体根据奖赏函数计算此时间步长内的奖赏 r_t 。转移函数描述在执行动作 $a \in A$ 后, 状态从 s 转移到 s' 的概率, 在马尔科夫决策过程中, 环境的下个状态仅与当前的状态和当前采取的动作有关。强化学习的目标是获取一个策略函数 $a=\pi(s)$, 通过执行策略函数即可最大化累计奖赏^[16], 此策略函数即为学习到的最优控制策略。强化学习方法具有目标导向特点, 善于求解未知环境下的决策链路优化问题。

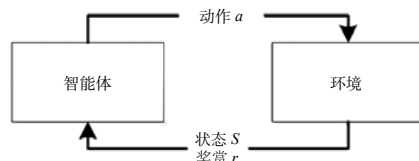


图 1 强化学习图示

1.2 表格型 Q-Learning 算法

Q-Learning 算法是一种可以求解具有不完全信息的马尔科夫决策问题的强化学习方法。算法考察的对象是状态—动作对所对应的值函数,即 Q 值函数,用 $Q(s,a)$ 表示,代表状态 s 下执行动作 a 系统将获得获得的累计奖赏值。表格型 Q-Learning 是指算法将有限个状态—动作对的 Q 值存储在一张表中,初始阶段 Q 值为随机初始值,在智能体与环境不断交互的过程中通过式 (1) 对表格中的 Q 值进行更新:

$$\begin{aligned} \Delta Q(s,a) &= \alpha(R(s) + \gamma_{a \in A(s')} Q(s',a') - Q(s,a)) \\ Q(s,a) &\leftarrow Q(s,a) + \Delta Q(s,a) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $A(s)$ 为在状态 s 可以采取的动作集合, s' 为在状态 s 下执行动作 a 后到达的下一状态,奖赏折扣因子 $\gamma \in [0, 1]$, 表示当前动作对未来奖赏的影响程度,当 $\gamma=0$ 时,智能体只考虑立即奖赏,而 $\gamma=1$ 则表示智能体赋予长期奖赏和立即奖赏同样的重要性。学习率 $\alpha \in (0, 1)$ 为 Q 值的更新速度,较大的学习率可以提高算法的收敛速度,较小的学习率可以提升算法的稳定性^[17]。

在学习过程中,智能体通过不断尝试获取经验,经历一段时间的学习之后,智能体得到具有一定性能的策略,为了测试是否还有改进策略的可能,需要对已有策略建议之外的部分进行探索,然而探索过程具有牺牲性能的风险,若仅利用已有知识则无法进一步改进策略, ϵ -贪心探索是一种用于平衡探索和利用的方法^[11],即智能体在每个决策时刻以 ϵ 的概率随机选择一个动作,以 $1-\epsilon$ 的概率选择 Q 值最高的动作。在智能体进行了足够多的探索之后,则不再探索,按照贪婪控制准则执行最优控制策略。

1.3 Q-Learning 算法的改进

表格型 Q-Learning 算法是针对离散状态和动作空间的马尔科夫决策过程,但实际工程中的许多优化决策问题都具有大规模或连续的状态和行为空间,因此表格型 Q-Learning 会面临维数灾难^[6]。为了解决这个问题,通常将泛化方法例如神经网络用于强化学习的 Q 值函数逼近。常见的用于 Q 值估计的神经网络结构如图 2 所示。

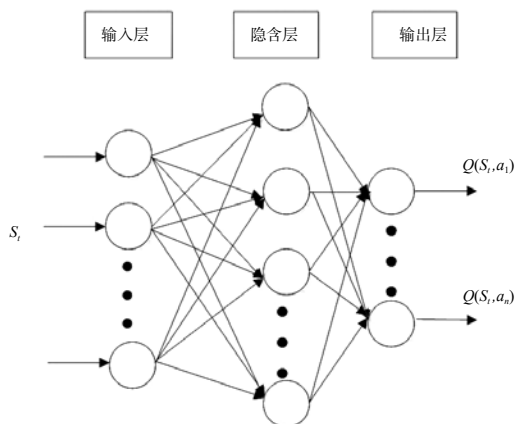


图 2 一种用于 Q 值估计的神经网络

训练过程通常采用经验回放的方式^[18],将最近的 N 条数据 $(s_t, a_t, r_{t+1}, s_{t+1})$ 存储在回放存储器中,在训练过程中,每次随机挑选 M ($M < N$) 条数据,被选取的数据被称作微批数据。通过式 (2) 计算微批数据中每个样本的期望输

出值,最后使用微批数据中的 s_t 和计算得到的期望输出值更新神经网络的权重。

$$\text{label}(s_t) = \begin{cases} Q(s_t, a_t) + \Delta Q(s_t, a_t) & \text{if } a = a_t \\ Q(s_t, a_t) & \text{if } a \neq a_t \end{cases} \quad (2)$$

2 基于强化学习的空调系统运行

基于强化学习的空调系统运行将环境视为“黑箱”,通过收集到的信号反馈不断改进控制策略,降低了对先验知识(如建筑热惰性,设备特性等)的依赖。然而将强化学习应用在空调系统运行优化时需要注意两个问题,其一如何实现有效的状态特征表达,当状态所包含的信息越完整,则智能体所学习到的策略越接近最优策略。针对建筑运行问题,通常需要完整考虑室外天气状况,室内环境状态和空调系统运行情况。其二强化学习通过不断尝试来改进策略,本文提出通过确立规则对探索空间进行缩减,从而确保智能体在探索过程中避免损害设备,同时尽可能的满足被控区域舒适度的要求。在考虑以上两个问题的基础上并结合改进的 Q-Learning 算法,本文提出的基于强化学习的空调系统运行流程如表 1 所示,接下来通过仿真案例对强化学习控制算法进行验证和分析。

表 1 基于强化学习的空调系统运行流程

准备阶段:

- (1) 将空调系统运行优化问题建模为马尔科夫决策过程。
- (2) 定义规则缩减探索空间。
- (3) 初始化用于 Q 值估计的神经网络。

探索阶段:

- (1) 获取当前状态量 s_t 。
- (2) 重复以下过程,并且每隔固定时间步长从回放存储器中随机抽取 M 条数据更新用于 Q 值估计的神经网络的权重:
 - (a) 计算状态为 s_t 下不同动作的 Q 值。
 - (b) 按照 ϵ -贪心探索选择动作 a_t , 执行动作 a_t 直至下一决策时刻。
 - (c) 测量和降维获得当前时刻状态量 s' , 并计算此控制时间步长内奖赏 r , 将 (s, a, r, s') 存入回放存储器。
 - (d) 将 s' 赋值给 s 。

运行阶段:

- (1) 获取当前状态量 s_t 。
- (2) 重复以下过程,并且每隔固定时间步长从回放存储器中随机抽取 M 条数据更新用于 Q 值估计的神经网络的权重:
 - (a) 计算状态为 s_t 下不同动作的 Q 值。
 - (b) 选取 Q 值最高的动作 a_t , 执行动作 a_t 直至下一决策时刻。
 - (c) 测量和降维获得当前时刻状态量 s' , 并计算此控制时间步长内奖赏 r , 将 (s, a, r, s') 存入回放存储器。
 - (d) 将 s' 赋值给 s 。

3 仿真实验

3.1 仿真案例简介

本文选取的研究对象为一单层办公建筑,总空调面积为 475m^2 ,空调系统为变风量空调系统,强化学习控制器负责调节被控区域送风量,满足室内舒适度需求的同时尽可能的降低能耗消费。

通过 TRNSYS 与 MATLAB 进行联合仿真,TRNSYS 负责建筑及空调系统仿真,强化学习控制策略通过 MATLAB 实现,二者通过 TRNSYS 组件 Type155 进行通信。围护结构热工参数的设置参照 GB 50189-2005《公共建筑节能设计标准》,具体的热工参数包括:外墙为 $0.888\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$,屋顶为 $0.638\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$,外窗为 $2.73\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 。内热源部分设置人员密度为 $0.25\text{p}/\text{m}^2$,设备密度为 $20\text{W}/\text{m}^2$,照明密度为 $11\text{W}/\text{m}^2$ 。建筑运行时间为制冷季 6.1~9.20 间每天 8:00~18:00。设定室内送风温度为 15°C ,人均新风量为 $30\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{p})$ 。建筑依靠额定 COP 为 5 的离心式制冷机组提供冷量,冷冻水泵为变频水泵,冷却水泵为定频水泵。

在 TRNSYS 中建立好建筑空调系统仿真模型,如图 3 所示。

在准备阶段,第一步先建立此运行优化问题的马尔科夫决策过程模型,首先定义动作,即被控区域送风量。确定最小送风量为室内人员所需新风量,最大送风量确定为满足室内 6 次换气次数,将动作区间离散为四个水平 $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$, 设置控制时间步长为 0.2h (12min)。接下来定义状态,本案例选取时间,室外天气情况,被控区域温度作为状态。其中时间用于反映如室内热扰等与时间相关信息。室外天气状况选取当前时刻室外温度,当前室外太阳辐射和预测的未来一小时的温度变化值。被控区域温度应包含室内空气温度和壁面温度两部分,其中壁面温度用于反映建筑蓄热情况,然而在实际工程中通常无法测量,本文采用过去五个时间步长的室内空气温度的均值来近似反映建筑蓄热情况。最后定义奖赏函数,奖赏函数如式 (3) 所示分为两个部分,一部分为此控制时间步长内的能耗消费,其中能耗为冷机,冷冻水泵,冷却水泵,冷却塔能耗之和,能耗费用按照上海市分时电价计算,另一部分为室内温度超出舒适度范围时的惩罚项,按照 GB 50736-2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》,夏季室内温度应保持在 24~28℃ 之间,故取温度上限为 28℃,下限为 24℃。第二步定义规则对探索空间进行缩减,本案例中我们定义两条规则用于确保系统运行满足舒适度约束,当室内温度大于 27.5℃ 时,按照最大送风量送风,避免温度进一步上升,当室内温度小于 24.5℃ 时则按照最小送风量送风,降低能耗开销。第三步初始化用于 Q 值估计的神经网络,本文采用的神

经网络包括三个隐藏层,每个隐藏层的神经元数分别为 32、64、32。前两个隐藏层采用修正线性单元作为激活函数,最后一个隐藏层采用线性单元作为激活函数。

$$r_t = -\text{cost}(s_{t-1}, a_{t-1}) + \text{penalty}(T_t)$$

$$\text{penalty}(T_t) = \begin{cases} -\beta(T_t - T_{\text{lower bound}})^2, & \text{if } T_t < T_{\text{lower bound}} \\ -\beta(T_t - T_{\text{upper bound}})^2, & \text{if } T_t > T_{\text{upper bound}} \\ 0, & \text{if } T_{\text{lower bound}} \leq T_t \leq T_{\text{upper bound}} \end{cases} \quad (3)$$

在应用阶段,设置第一年运行探索阶段,即采用 ϵ -贪心探索选择动作。从第二年起即转为运行阶段。本案例用上海市典型气象年数据模拟气象参数,温度预测值采用真实温度加入 $N(0,0.2)$ 正态分布随机误差计算得出。强化学习控制器相关参数见表 2。

表 2 强化学习控制器相关参数

参数	值
学习率 α	0.05
奖赏折扣因子 γ	0.1
回放存储器容量 M	1200
微批数据容量 N	50
探索比例 ϵ	0.1

3.2 仿真结果讨论与分析

图 4 为在运行阶段室内温度变化情况,可以看出在室外温度不断变化的过程中,强化学习控制器可以保证在绝大多数时间内满足舒适度的需求。

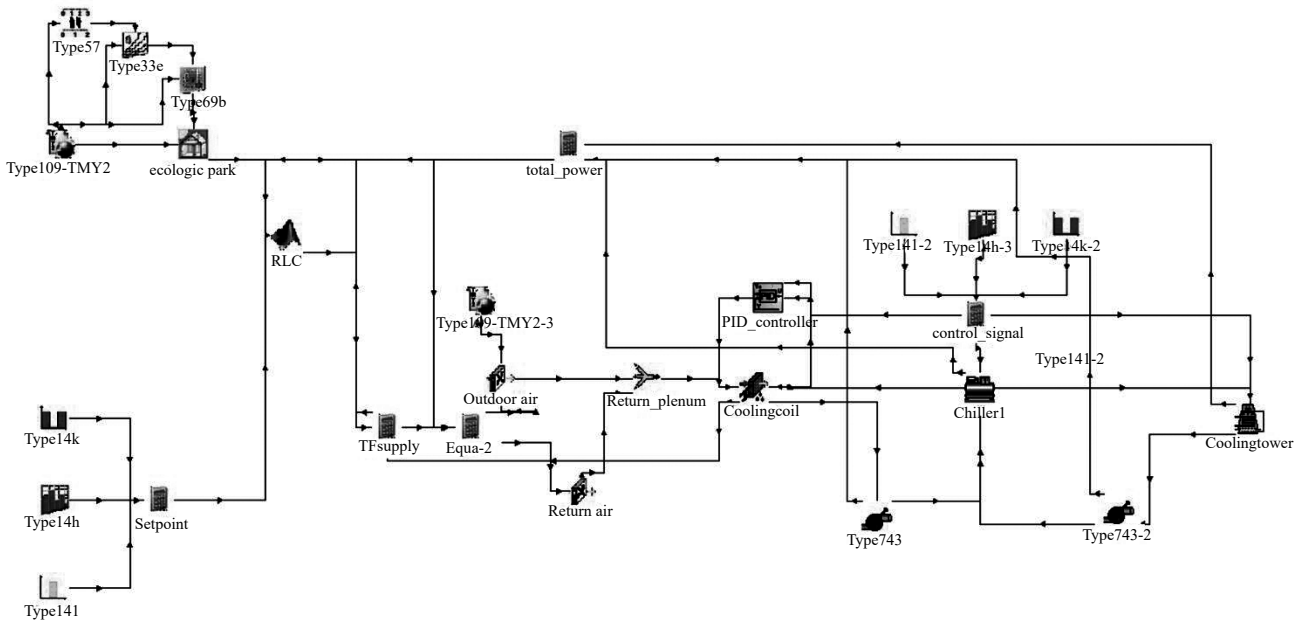


图 3 TRNSYS 中建筑空调系统仿真模型

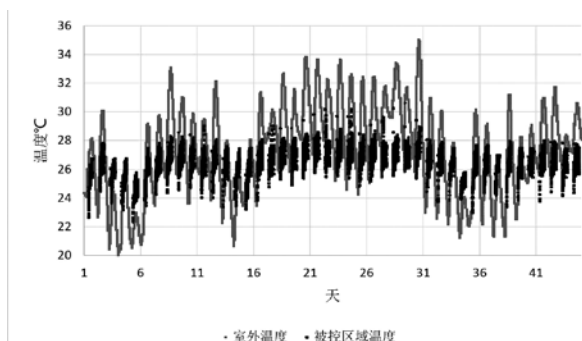


图4 被控区域温度变化情况

为了量化强化学习控制器的控制效果，基准控制策略选取类似于启停控制的基于规则的控制策略（RBC）和固定温度设定值的PID控制器作为对比对象，RBC具体设置为当被控区域温度超过27.5℃时，保持最大送风量送风，当被控区域温度低于24.5℃时，则保持最小送风量送风，PID控制器的温度设定值为26℃，通过对送风量的调整维持室内温度的稳定。从能耗消费和被控区域舒适度情况对三种控制策略进行对比，结果如图5所示，

从结果对比可以看出，在探索阶段，由于强化学习控制器（RLC）通过不断尝试更新策略，导致非舒适时长百分比有所增加。但在运行阶段，利用已经学习到的经验，强化学习控制器的表现均优于基准策略。与RBC和PID控制相对比，在小幅提升室内舒适度水平的同时，分别将运行费用降低超过7%和4.6%。并且随着运行时间的推进，强化学习控制器仍可以不断改进控制策略。

在应用过程中，强化学习控制器利用反馈回来的信号不断改进控制策略，自适应性强，降低了对先验知识的依赖，与基于模型的控制方法相比，无须进行滚动优化，故计算速度方面具有优势。但是强化学习也存在学习效率不高的问题，然而建筑运行具有长生命周期的特点，通过大量的监测数据反馈，强化学习控制器可以提炼运行经验，实现空调系统精细化运行，提高建筑能效。

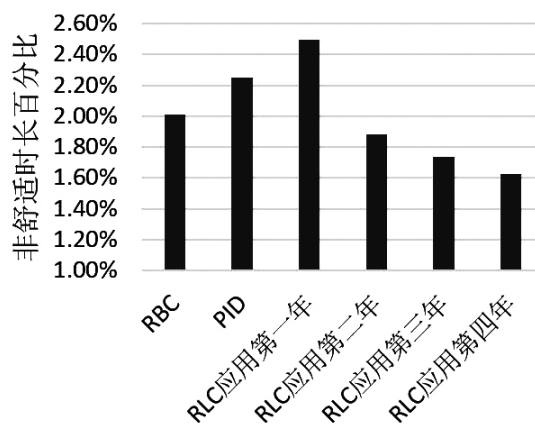
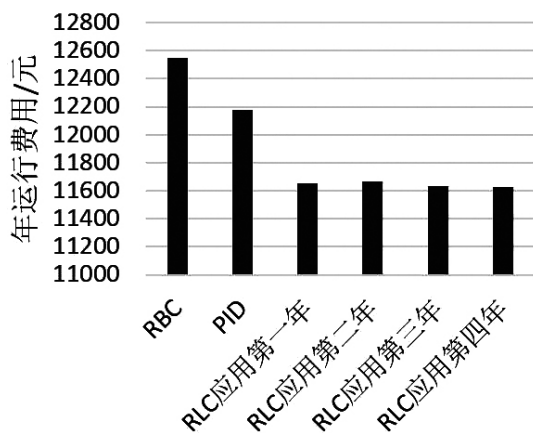


图5 控制效果对比

4 结论

近年来楼宇自动化系统的普及和计算机成本的下降，探索数据驱动的建筑运行优化具有十分重要的研究意义。强化学习控制器利用监测数据的反馈不断改进控制策略，具有免模型，自适应性强，目标导向等特点。本文将强化学习应用在空调系统运行优化中，将应用过程分为准备阶段，探索阶段和运行阶段，描述了各阶段完整的算法流程，算法具备一定的通用性。通过仿真实验验证强化学习控制器的控制效果，在满足被控区域舒适度要求的前提下，可有效地降低运行费用，提高建筑能效。

本文以单区域送风量调节作为验证案例进行分析，如何将强化学习控制器有效的应用在多区域控制，增强其可扩展性是下一步的研究方向，同时考虑到建筑内扰等不确定因素，未来的工作也包括通过实验对强化学习控制策略的效果进行验证。

参考文献

- [1] 刘羽岱, 潘毅群, 黄治钟. 基于模型预测控制的空调系统运行优化仿真研究 [C]// 上海市制冷学会 2013 年学术年会. 2013.
- [2] Dong B, Lam K P. A real-time model predictive control for building heating and cooling systems based on the occupancy behavior pattern detection and local weather forecasting[J]. Building Simulation, 2014, 7(1):89-106.
- [3] Killian M, Kozek M. Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings[J]. Building & Environment, 2016, 105:403-412.
- [4] Široký J, Oldewurtel F, Cigler J, et al. Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system[J]. Applied Energy, 2011, 88(9):3079-3087.
- [5] Siddharth Goyal, Herbert A. Ingley, Prabir Barooah. Occupancy-based zone-climate control for energy-efficient buildings: Complexity vs. performance ☆ [J]. Applied Energy, 2013, 106(11):209-221.
- [6] 陈学松, 杨宜民. 强化学习研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(8):2834-2838.

- [7] Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning.[J]. Nature, 2015, 518(7540):529.
- [8] Liu S, Henze G P. Experimental analysis of simulated reinforcement learning control for active and passive building thermal storage inventory: Part 1. Theoretical foundation[J]. Energy & Buildings, 2006, 38(2):142–147.
- [9] Dalamagkidis K, Kolokotsa D, Kalaitzakis K, et al. Reinforcement learning for energy conservation and comfort in buildings[J]. Building & Environment, 2007, 42(7):2686–2698.
- [10] Li B, Xia L. A multi-grid reinforcement learning method for energy conservation and comfort of HVAC in buildings[C]// IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. IEEE, 2015:444–449.
- [11] Yang L, Nagy Z, Goffin P, et al. Reinforcement learning for optimal control of low exergy buildings[J]. Applied Energy, 2015, 156:577–586.
- [12] Ruelens F, Iacovella S, Claessens B J, et al. Learning Agent for a Heat-Pump Thermostat With a Set-Back Strategy Using Model-Free Reinforcement Learning[J]. Energies, 2015, 8(8):8300–8318.
- [13] Costanzo G T, Iacovella S, Ruelens F, et al. Experimental analysis of data-driven control for a building heating system[J]. Sustainable Energy Grids & Networks, 2016, 6:81–90.
- [14] Wei T, Wang Y, Zhu Q. Deep Reinforcement Learning for Building HVAC Control[C]// Design Automation Conference. ACM, 2017:22.
- [15] 高阳, 陈世福, 陆鑫. 强化学习研究综述 [J]. 自动化学报, 2004, 30(1):86–100.
- [16] 周志华. 机器学习 [M]. 清华大学出版社, 2016年1月.
- [17] Sutton R S, Barto A G. Reinforcement Learning: An Introduction[M]. MIT Press, 1998.
- [18] Wawrzyński P, Tanwani A K. Autonomous reinforcement learning with experience replay[J]. Neural Networks the Official Journal of the International Neural Network Society, 2013, 41(5):156–167.

智能酒店客房末端控制系统节能潜力分析 模型与软件开发

徐 蕾, 潘毅群

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海, 201804)

[摘 要] 随着人民生活水平的日益提高, 我国酒店业市场呈现显著增长趋势。从国家能源安全和节能减排工作的角度出发, 酒店类建筑面积的日益增长所带来的能源消耗和碳排放问题日益凸显; 从酒店提高自身效益的角度出发, 设备节能则是扩大利润的有效途径。本文根据酒店客房实测数据, 确定了酒店客房人员在室率时间表; 根据调研数据, 建立了不同气候区不同客房尺寸的典型客房模型, 并开发软件根据用户选择的节能措施对模型进行修改, 模拟计算得到客房负荷; 同时, 建立了采暖空调设备侧模型用于计算能耗。通过基准模型和设计模型的能耗比较, 可以得到选用节能措施的节能效果。

[关键词] 酒店节能; 在室率; 能耗模拟; 典型模型

0 引言

随着我国经济的快速发展和国民生活水平的快速提高, 我国成为了最热门的酒店投资地之一。平均每四天就有一家国际品牌酒店开业, 中国成为酒店行业增长最快的市场^[1]。研究表明, 中国酒店业整体仍然处于高能耗阶段, 酒店能耗水平远远高于居民能源消费水平, 具有巨大的节能减排潜力^[2]。周伟业^[3]对全国 310 家五星级酒店能耗情况进行了调研, 与模拟能耗区间进行对比, 发现实际能耗值比模拟能耗值明显偏高。模型设定建筑所有热工性能及设计参数均满足节能性要求。刘芳^[4]等人调研广州 3 家酒店能耗数据及空调用能现状, 发现在选型及运行阶段均存在不合理造成能源浪费。黄崎^[5]等人对上海地区酒店建筑进行了最长达 5 年的数据采集和分析, 发现部分二、三星级酒店的单位建筑面积能耗数值远远高于合理值, 并且酒店的供暖空调能耗占比最高。马明明^[6]对重庆主城区的 14 家酒店能耗进行调研, 发现酒店的空调能耗占比平均为 34.13%, 总能耗指标平均值为 131kW·h/m²。

因此, 越来越多建筑节能技术在酒店中得以实施。刘蕾^[7]等人对我国酒店的节能状况进行了调研与分析, 总结了主要节能技术与节能管理经验。调研发现通过技术节能, 如使用高效照明产品, 智能化控制系统, 变频改造等, 节能量占总结能量的 60%。Rajesh Chedwal^[8]等人对印度斋普尔地区酒店进行实测和模拟发现按照节能规范设计酒店建筑和使用节能措施将会大幅减少酒店能耗, 并且拥有较短的投资回报周期。

随着酒店行业的不断发展繁荣, 酒店建筑的能源消耗水平也会逐渐提高, 这不仅给环境和能源供给造成巨大压力, 同时也给酒店经营者带来不小的经济压力, 酒店建筑节能势在必行。本研究旨在提出一套通用快速且较为准确的智能客房末端控制系统的节能分析方法或模型。研究主要由两部分构成: 酒店客房负荷计算和能耗计算。本文有以下几个研究目标:

- (1) 得到酒店客房人员在室率时间表;
- (2) 建立不同地区不同房间尺寸的典型酒店客房模型;
- (3) 根据用户对节能措施的选择修改模拟文件, 模拟得到客房负荷;

(4) 建立采暖空调设备侧模型, 根据负荷输入得到客房能耗。

1 方法

1.1 在室率

人员是影响建筑能耗的主要因素之一^[9]。酒店客房人员主要通过开关空调, 使用设备等活动对建筑能耗产生影响。因此, 在对酒店客房负荷进行计算时, 首先需要确定酒店客房人员在室率情况, 才能较为准确地对负荷进行模拟估算。

本文在室率数据来源于上海市某星级酒店。人员是否在室内的判断原理为: 每当房门动作(开关)一次, 房间内人员动作探测器启动工作, 若监测到有人活动, 则判断为有人, 若没有检测到人员活动, 则判断为无人, 将数据记录到数据库。

处理数据时, 首先去掉非客人卡操作和未出租房间数据记录。同一房间, 两条记录间隔时间内的房间人员在室情况和第一条记录相同。例: 第一条记录显示房间有人, 第二条记录显示房间无人, 则两条记录之间的时间间隔内房间内有人。

$$Occupancy(t_1 \text{ to } t_2) = Occupancy_1(t_1)$$

$$Occupancy = \begin{cases} 1 & (\text{有人}) \\ 0 & (\text{无人}) \end{cases}$$

各个房间逐时的在室率为该房间该小时内, 有人的时间除以 1h 得到的数值。所有房间逐时在室率的平均值则为总的在室率。

$$\text{在室率} = \frac{\text{某小时内房间有人的时间 (min)}}{60 (\text{min})}$$

1.2 建立典型模型

典型酒店客房模型的建立的数据主要通过工程经验以及调研相关设计规范^[10, 11]得到。本研究考虑了表 1 中所列出的四种气候区以及九种客房面积, 相应的模型设计参数也列在表中。表中所列照明和设备功率设定值均可以通过用户在软件界面输入进行修改。

$$\text{设备 / 照明密度} = \frac{\sum \text{功率} \times \text{使用系数}}{\text{房间面积}}$$

建立典型模型时,考虑了朝向对负荷的影响,因此在几何模型中,各个尺寸的客房均有四个朝向的模型,如图1所示。对于无人房间,根据客房出租与否,又分为已租无人房间和待租房间。无人房间默认为无新风需求和照明设备需求。

酒店客房中,由于沐浴造成的空调系统的湿负荷较大,也将此部分负荷考虑到模型中。对于有人房间,在EnergyPlus中设置了WaterUse:Equipment用于计算洗澡造成的湿负荷。

表1 典型酒店客房模型参数

地区		夏热冬冷	寒冷	严寒	夏热冬暖
面积		20~60m ² ，每 5m ² 一个模型			
层高		3m			
窗墙比		50%			
墙体	U 值 -W/(m ² ·K)	0.8	0.5	0.38	1.5
	U 值 -W/(m ² ·K)	2.4	2.2	1.9	2.7
外窗	SHGC	0.35	0.43	0.43	0.35
	VT	0.7	0.7	0.7	0.7
供冷设定温度 °C		24			
供暖设定温度 °C		20			
设备密度 W/m ²		15			
照明密度 W/m ²		7			
渗透 次 /h		0.1			
人员 / 个		2			
新风量		100 (m ³ /zone·h)			

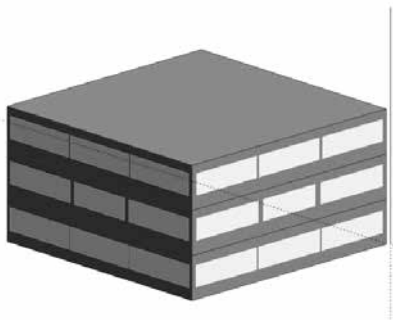


图1 典型酒店客房模型示意图

为便于采暖空调设备侧能耗计算,本文所指负荷均为盘管侧负荷。因此,在各个典型酒店客房模型中搭建风机盘管加新风系统。模拟时,直接输出房间盘管侧负荷。

1.3 负荷计算

计算负荷时,将酒店房间模型分为设计模型和基准模型。基准模型为不添加任何节能措施的模型。设计模型又分为有人房间,已租无人和待租房间,根据房间类型不同,用户可以选择不同的末端节能措施。节能措施包括:(1)客人离房关闭窗帘;(2)智能插卡取电,即能通过判断室内是否有人关闭室内照明设备,调节空调设定等;(3)无人房间或有人房间夜间空调温度改变;(4)改变空调设定温度可调节上下限;(5)待租房间关闭空调等。

因此,需要根据用户输入修改对应的模拟文件,得到房间盘管侧负荷,再把不同朝向不同类型的负荷叠加,得到总的盘管侧负荷。

$$\text{酒店 } t \text{ 时总负荷} = \sum_{\text{房间类型}}^3 \sum_{\text{朝向}}^4 \text{各朝向房间 } t \text{ 时负荷} \times \text{各朝向房间数}$$

各个类型房间数计算如下:

t 时刻,某朝向有人房间数:

$$\text{RoomNum}_{\text{occ}}(t, \text{orientation}) = \text{Sum} \times R \times \text{Occupancy}(t)$$

t 时刻,某朝向已租无人房间数:

$$\text{RoomNum}_{\text{unocc},r}(t, \text{orientation}) = \text{Sum} \times R \times (1 - \text{Occupancy}(t))$$

t 时刻,某朝向待租房间数:

$$\text{RoomNum}_{\text{unrent}}(t, \text{orientation}) = \text{Sum} \times (1 - R)$$

其中,Sum为某朝向总房间数; R 为出租率;Occupancy(t)为 t 时刻在室率。

1.4 节能措施

本文所考虑的节能措施如图3中所示。对于不同类型的房间,用户可以设定不同的节能措施,节能措施的实现如下:

(1) 电动窗帘

若用户选择保留状态,则不对模拟文件进行修改;若用户选择关闭,则在模拟文件中,将内遮阳设置为开启状态。

(2) 插卡取电

普通插卡取电为只要取电卡槽内有卡插入,则判断房间有人;带身份识别插卡取电为取电卡槽内的卡需为客人房卡才将房间判断为有人房间;无插卡取电则是根据室内声波探测器监测室内是否存在人员活动来判断房间是否有人。不拔卡系数为已经出租的客房中,客人离房后不取出房卡的比例。对于无插卡取电来说,不拔卡系数为0。对于其他两种取电方式,由于存在不拔卡系数,则已租房间中有人和无人的房间数将会有所改变:

t 时刻,某朝向有人房间数:

$$\begin{aligned} \text{RoomNum}_{\text{occ}}(t, \text{orientation}) \\ = \text{Sum} \times R \times \text{Occupancy}(t) + \text{Sum} \times R \times (1 - \text{Occupancy}(t)) \times \text{NoPull} \end{aligned}$$

t 时刻,某朝向已租无人房间数:

$$\begin{aligned} \text{RoomNum}_{\text{unocc},r}(t, \text{orientation}) \\ = \text{Sum} \times R \times (1 - \text{Occupancy}(t)) \times (1 - \text{NoPull}) \end{aligned}$$

其中, NoPul为不拔卡系数。

(3) 保温模式

保温模式为客人离房后,上调或下调房间设定温度到保温温度已达到节能目的的措施。用户设置保温温度后,修改已租无人房间和待租房间的制冷供热设定温度。

(4) 夜间模式及温度偏差

夜间模式为在用户设定的时间范围内,对设定温度进行调整(制冷季升温,供暖季降温)的节能措施。用户设定起始时间,持续时间及偏差温度后,修改模拟文件中设定温度时间表及制冷供热设定温度。其中:

$$\text{新制冷温度} = \text{默认制冷温度} + \text{温度偏差值}$$

$$\text{新供热温度} = \text{默认供热温度} - \text{温度偏差值}$$

(5) 空调面板可设定温度范围

酒店空调面板原可设定温度范围为16~30℃,通过用户输入数值修改可调节温度范围上下限。由于冬夏季用户设定温度分布数据未知,本文假设设定温度分布服从正态

分布。从而得到各个温度设定点的概率值, 事先计算好各个设定温度对应的负荷值, 以及正态分布下的总负荷:

$$\text{总负荷} = \sum \text{设定点概率} \times \text{设定点负荷}$$

用户输入上下限值数值后, 可以得到新的概率分布 (低于下限温度的设定点概率算入下限温度概率, 高于上限温度的设定点概率算入上限温度概率), 从而算出新的负荷。事先计算好所有可能设定温度范围的负荷以及其相对于原负荷减少的比例。用户设定温度范围上下限后, 将对应的百分比用于修正计算出的总负荷。

$$\begin{aligned} \text{酒店 } t \text{ 时总负荷}' \\ = \text{酒店 } t \text{ 时总负荷} \times (1 - \text{负荷减少百分比}) \end{aligned}$$

1.5 能耗计算

本研究建立了设备侧模型用于快速估算采暖空调能耗。设备包括了冷机, 水泵, 冷却塔以及锅炉。首先对机组进行选型, 冷机放大系数为 1.15, 冷却塔为 1.5, 锅炉为 1.05。冷机 COP 通过部分负荷率进行修正, 修正公式如下:

$$\text{COP}' = [a(\text{PLR})^2 + b(\text{PLR}) + c] \times \text{COP}$$

$$\text{部分负荷率 } \text{PLR} = \frac{\text{Chiller Load}(t)}{\text{Chiller's Capacity}}$$

上式中 COP 修正系数, 根据 EnergyPlus 中修正曲线系数进行选取。T 时刻冷机功率计算如下:

$$\text{Power}(t) = \frac{\text{Chiller Load}(t)}{\text{COP}'} (W)$$

水泵额定功率计算如下:

$$P_N = Q \cdot H / \eta (W)$$

其中, 额定流量为:

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = \frac{[\text{Cooling Load}]_{\text{max}}}{\Delta t \times \rho \times c}$$

式中, Δt 为进出水温差, 冷冻水泵与冷却水泵取 5°C , 热水泵取 10°C ; ρ 为水的密度; c 为水的比热容。

H 为水泵扬程, 根据工程经验选取; η 为水泵效率, 取值为 0.6。水泵实际功率为:

$$P_i = P_N \times \text{PLR}$$

锅炉的功率计算如下,
额定效率:

$$\text{Nominal thermal efficiency } \eta = 0.96$$

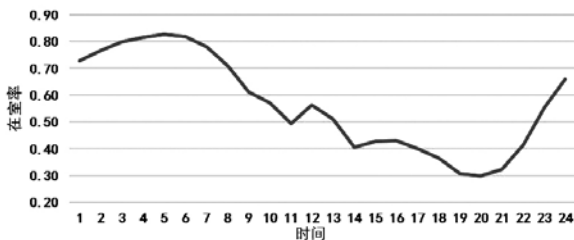


图2 酒店客房逐时在室率

效率修正曲线:

$$\text{Boiler Efficiency Curve Ooutput} = a + b(\text{PLR}) + c(\text{PLR})^2$$

功率:

$$\text{Fuel used} = \frac{\text{heating Load}}{(\text{Nominal Thermal Efficiency}) \times (\text{Boiler Efficiency Curve Ooutput})} (W)$$

因此, 通过输入酒店客房盘管侧负荷, 可以根据上述方法对采暖空调设备进行选型及能耗计算。

酒店客房内部设备照明等能耗根据用户输入的功率密度和建筑面积计算得到。风机功率通过模拟输出也可以得到。

2 结果与分析

2.1 在室率

通过对酒店数据库数据的处理, 可以得到如图 2 所示的酒店客房逐时在室率。从图中可以看出, 从早上 7 点开始, 在室率出现明显下降, 客人逐渐离房退房; 中午 12 点出现上升, 为新客人入住导致在室率升高; 而后客人逐渐离开外出, 在室率再次降低; 晚上 8 点开始, 在室率明显上升, 说明客人逐渐回到酒店房间内。

2.2 节能量快速估算软件

根据节能措施以及用户需求开发了如图 3 所示的节能量快速估算软件。登陆后, 用户首先选择酒店所在城市与客房面积, 软件会选择对应的模拟文件。然后, 用户需要输入各个朝向的房间数量, 用于计算总客房负荷时乘以对应的房间数。接着, 用户可以输入酒店年平均出租率或者季度平均出租率, 在室率使用前文计算出的在室率作为默认值, 用户也可以根据经验自行修改或使用某酒店数据库文件通过软件处理得到该酒店在室率数据。接下来, 用户将选择对于不同类型的房间使用的节能措施, 酒店的空调系统属性以及客房内部照明及设备功率。点击开始计算后, 软件将会自动修改模拟文件, 调用 EnergyPlus 进行模拟, 输出盘管侧负荷, 叠加后输入到设备模型中, 计算得到能耗数据。通过基准模型和设计模型能耗比较, 得到节能率。同时, 用户也可通过输出数据查看能耗构成的饼图和逐月能耗比较的柱状图。

3 结论

本文建立了不同气候区不同几何尺寸的典型酒店客房模型。通过处理酒店数据库文件, 得到酒店客房逐时在室率数据。开发了酒店客房节能量快速估算的软件, 可以根据用户的输入, 修改对应的模拟文件。模拟后, 输出房间盘管侧负荷, 叠加处理后输入到采暖空调设备侧模型中,



图3 软件界面

得到对应能耗。通过比较设计模型与基准模型能耗,得到采用节能措施的酒店客房的节能率。

随着酒店行业的快速发展,酒店建筑的能耗将会在总建筑能耗中占据越来越大的比例,酒店建筑节能将会成为建筑节能的重要课题之一。本文提出了一种快速通用的估算客房节能措施节能量的方法。同时,本研究也存在以下不足。客房模型中,设备照明以及沐浴的时间表均是根据相关规范以及工程经验选取,需要进一步了解研究其用能时间表。设备侧模型较为简化,没有考虑实际运行中设备的控制策略,同时也只考虑了酒店客房中的负荷,没有考虑酒店其他部分产生的负荷,因此设备选型和能耗不够准确,只能部分反映客房用能情况。

参考文献

- [1] 李艳,孙文慧.中国酒店业发展分析[J].商业经济,2013(10):61-62.
- [2] 刘益.中国酒店业能源消耗水平与低碳化经营路径分析[J].旅游学刊,2012,27(1):83-90.
- [3] 周伟业.五星级酒店建筑能耗水平及节能潜力分析[D].天津大学,2016.
- [4] 刘芳,周孝清,陈伟青,等广州市酒店类建筑空调系统能耗现状调查分析[J].制冷空调与电力机械,2008(03):78-80.
- [5] 黄崎,康建成,黄晨皓.酒店业碳排放评估与节能减排潜力研究[J].资源科学,2014(05):1013-1020.
- [6] 马明明.公共建筑空调系统改造与节能潜力的研究[D].重庆大学,2007.
- [7] 刘蕾,焦健,戴彦德.酒店行业节能调查与分析[J].中国能源,2012(11):17-20.
- [8] CHEDWAL R, MATHUR J, AGARWAL G D, et al. Energy saving potential through Energy Conservation Building Code and advance energy efficiency measures in hotel buildings of Jaipur City, India[J]. Energy and Buildings, 2015,92:282-295.
- [9] YAN D, HONG T, DONG B, et al. IEA EBC Annex 66: Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings[J]. Energy and Buildings, 2017.
- [10] 中国国家标准化管理委员会,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 14308-2010 旅游饭店星级的划分与评定[S]. 2010.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50189-2015 公共建筑节能设计标准[S]. 2015.

夏热冬冷地区超低能耗建筑热工优化模拟分析

李峥嵘, 蒿玉辉, 赵 群, 齐典伟, 李 翠

(同济大学, 上海 201804)

[摘 要] 超低能耗建筑已在全世界范围内得到了应用, 其中德国关于超低能耗建筑的技术体系较为完整, 而我国夏热冬冷地区还未有根据气候条件及用能特征建立起的气候适应性超低能耗建筑采暖供冷技术路线。本文首先对夏热冬冷地区气象参数和德国地区气象参数进行了对比, 分析夏热冬冷地区超低能耗建筑的适用性, 后对夏热冬冷地区超低能耗建筑的围护结构进行了优化分析。本文选取了上海地区一酒店式超低能耗建筑, 通过建筑能耗模拟软件 EnergyPlus 进行模拟分析, 运用正交试验法, 分析了外窗、外墙、屋面三者的传热系数对建筑供热负荷、制冷负荷及全年总负荷的影响, 并得出最优围护结构传热系数设计方案。结果表明, 当外窗、外墙、屋面的传热系数分别为 $2.0\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、 $0.2\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、 $0.2\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 时, 建筑全年总负荷达到最低。本文的研究结果可为夏热冬冷地区超低能耗建筑围护结构的设计提供借鉴, 亦可为夏热冬冷地区超低能耗建筑采暖供冷技术路线提供基础。

[关键词] EnergyPlus; 超低能耗建筑; 模拟; 正交试验

0 引言

建筑能耗作为社会能耗的重要组成部分, 承担着节能减排的重要职责, 是世界公认的三大节能减排的主要领域之一, 节能潜力最大。根据清华大学建筑节能研究中心的研究成果表明, 从 2001 年~2013 年, 建筑能耗总量及其中电力消耗量均大幅增长。2013 年建筑总商品能耗为 2.56 亿 tce, 约占我国能源消费总量的 19.5%, 节能减排的重要性愈加凸显^[1]。然而现如今人们对于居住质量和舒适性的要求也越来越高, 为了营造更加舒适的居住环境, 建筑消耗能源也在不断增加, 如何解决好人们对居住环境要求的提升和降低建筑能耗这两大矛盾, 一直是建筑节能研究领域的重要内容, 因此, 低能耗高舒适度的高性能建筑研究一直是建筑节能领域研究的热点, 绿色建筑、生态建筑、低能耗建筑、被动房、超低能耗建筑、零能耗建筑、正能耗建筑的概念不断涌现^[2]。

被动式超低能耗建筑从其低碳、环保、节能的优势逐渐成为建筑业发展的重大方向之一。自 1991 年世界上第一座被动房在德国诞生, 到目前全世界已拥有超过 3 万座被动房^[3]。现如今被动式超低能耗建筑也在我国日益兴起, 夏热冬冷地区也有已建成或正在施工的被动式超低能耗建筑项目, 而目前大多数项目在设计中依据的标准为德国能耗标准, 因夏热冬冷地区与德国气候区不同, 如果照搬德国体系, 采用德国能耗标准进行设计施工, 将会存在气候不适应性, 因此需要结合本地的用能习惯和用能特征, 建立气候适应性超低能耗建筑采暖供冷技术路线, 实现超低能耗建筑的目标。本文对上海地区的某酒店式超低能耗建筑进行模拟, 运用正交试验法, 分析外窗、外墙、屋面在不同传热系数水平下对建筑负荷的影响, 得出最优设计方案, 可为夏热冬冷地区超低能耗建筑围护结构的设计提供参考。

1 气候概况对比分析

德国地处欧洲的中部, 属于北温带气候, 地理位置为北纬 46.5° 到 55° , 与中国东北哈尔滨市以北地区的纬度相似, 然而其气候条件更和我国的华北地区相似。但其冬季供暖度日数与沈阳接近, 供冷度日数与哈尔滨相近, 也就是说德国相比于我国同纬度的地区气候更加温和, 供暖为主而空调需求较小^[4]。被动式超低能耗建筑主要着眼于解决冬季供暖问题, 所应用技术也以解决供暖为主, 对应用在夏季需要主动供冷的地区的研究较少。本文选取了上

海、南京、合肥、武汉四个城市和柏林进行温度及太阳辐射量对比 (气象参数来自于 EnergyPlus 软件的气象数据网站的 CSWD 格式的典型气象年数据)^[6], 这四个城市皆属于夏热冬冷地区, 由图 1 柏林与夏热冬冷地区各城市月平均温度对比图可以看出, 夏热冬冷地区四个城市各月平均温度皆高于柏林, 夏季 7、8 月的月平均温度接近 30°C , 存在着供冷需求, 而柏林最高月平均温度只有不到 20°C , 夏季无需空调供冷, 冬季夏热冬冷地区各城市的月平均温度也要高于柏林 $3\sim 4^\circ\text{C}$, 说明夏热冬冷地区冬季供暖需求要低于德国。由图 2 可以看出, 虽然夏热冬冷地区各城市间的太阳辐射量有一定的差异性, 但夏热冬冷地区的太阳能利用要比柏林地区有更加有利的条件, 冬季所能接收到的太阳辐射远大于柏林, 为太阳能的高效利用提供了充分的条件, 充分利用太阳能资源可有效降低冬季供暖能耗。

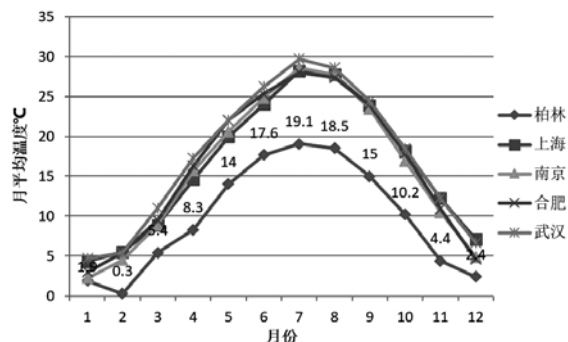


图1 柏林与夏热冬冷地区各城市月平均温度对比图

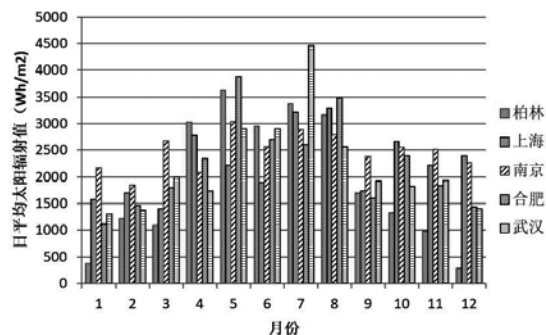


图2 柏林与夏热冬冷地区各城市日平均太阳辐射对比图

由气象数据对比分析可得,夏热冬冷地区与德国地区气候条件差异很大,导致供暖需求和供冷需求也存在着巨大的差异,冬季供暖需求低于德国地区,且冬季太阳辐射量要远高于德国地区,说明夏热冬冷地区具有比德国地区更高的超低能耗建筑应用潜力,也更加说明了德国的超低能耗指标体系不适用于我国夏热冬冷地区,急需建立起适应夏热冬冷地区的气候适应型超低能耗建筑采暖供冷技术路线。

2 基准建筑基本情况

本文选取了上海地区某酒店式超低能耗建筑进行分析,为使研究问题更加方便,本文将此建筑简化成一栋三层的基础建筑,包括底层、标准层和顶层。根据建筑设计图纸,通过 Sketchup 软件建模,建立基础建筑模型如图 3 所示,基准建筑的建筑总面积为 1024.6m²,长 46m,宽 11.5m,一层层高为 3.8m,二、三层层高为 3.2m,后导入 EnergyPlus 软件中进行进一步模拟分析。

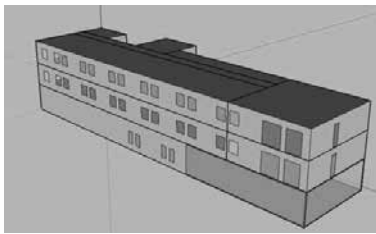


图 3 建筑能耗分析模型

根据设计图纸,基础建筑模型中设置的围护结构参数如下表所示:

表 1 围护结构参数

围护结构	材料	传热系数 (W/m ² ·K)
外窗	6mm low-E 玻璃 + 12mm 氩气 + 6mm 玻璃	2.10
屋面	40mm 细石混凝土 + 80mm 加气混凝土 + 160mm 硬泡聚氨酯 + 20mm 水泥砂浆 + 150mm 钢筋混凝土 + 10mm 混合砂浆	0.20
外墙	5mm 水泥砂浆 + 200mm 玻璃棉板 + 20mm 水泥砂浆 + 200mm 多孔砖 + 15mm 混合砂浆	0.21
地面	200mm 重型混凝土 + 50mm 保温板	0.56
楼板	40mm 珍珠岩板 + 150mm 钢筋混凝土 + 15mm 水泥砂浆 + 50mm 玻璃棉板 + 5mm 水泥砂浆	0.67

根据《被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居住建筑)》^[6],超低能耗建筑应选择高效节能光源,照明功率密度值取 3W/m²,除照明外的建筑内部得热取 2W/m²。建筑模型中空调房间的冬夏季的室内设计温度分别为 20℃ 和 26℃^[9]。本次模拟中的气象数据采用上海典型气象年逐时气象数据,本文中的气象数据均来自于美国能源部出品的 EnergyPlus 软件的气象数据网站下载得到的 CSWD 格式的典型气象年数据^[7],该数据是由清华大学与中国气象局联合出版,名为“中国标准气象数据”。

3 正交试验法

正交试验法是研究多因素多水平的一种设计方法,它是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了“均匀分散,齐整可比”的特点,正交试验是分析因式设计的主要方法。是一种高效率、快速、经济的实验设计方法。模拟也属于试验,在本模拟中需考虑外窗、外墙、屋面三个因素对供暖热负荷、

空调冷负荷、全年总负荷的影响,若进行全面模拟,则需考虑较多的模拟工况,工作量而采用正交试验设计则可大大减少模拟次数,同时也可得到合理正确的结论。

3.1 试验工况设计

在本次模拟试验中,共有外窗、外墙、屋面三个因素,根据《被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居住建筑)》中对外窗、外墙、屋面的传热系数推荐值进行水平的确定。在此技术导则中,对围护结构外墙、屋面的平均传热系数参考值为 0.20~0.35W/m²·K。外窗传热系数的参考值为 1.0~2.0W/m²·K。试验的因素和水平的选取如下表所示。

表 2 模拟工况因素和水平的选取

水平	因素		
	外窗 (A) (W/m ² ·K)	外墙 (B) (W/m ² ·K)	屋面 (C) (W/m ² ·K)
1	1.1	0.20	0.20
2	1.4	0.25	0.25
3	1.7	0.30	0.30
4	2.0	0.35	0.35

本次模拟只考虑三个因素对基础建筑负荷的影响,不考虑因素间的交互作用。选用 L₁₆(4³) 正交表,如下表所示。在本次模拟中,只用设置 16 次模拟工况即可代替全部 4×4×4=64 组全部工况。

表 3 L₁₆(4³) 正交表 16 种模拟工况

模拟 工况	因素			模拟 工况	因素		
	外窗 (A) (W/m ² ·K)	外墙 (B) (W/m ² ·K)	屋面 (C) (W/m ² ·K)		外窗 (A) (W/m ² ·K)	外墙 (B) (W/m ² ·K)	屋面 (C) (W/m ² ·K)
1	1	1	1	9	3	1	3
2	1	2	2	10	3	2	4
3	1	3	3	11	3	3	1
4	1	4	4	12	3	4	2
5	2	1	2	13	4	1	4
6	2	2	1	14	4	2	3
7	2	3	4	15	4	3	2
8	2	4	3	16	4	4	1

3.2 模拟结果分析

对上表所列 16 种工况分别用 EnergyPlus 软件进行模拟分析,得出每种工况的夏季制冷负荷、冬季供热热负荷和全年总负荷。模拟结果如表 4 所示。

表 4 各模拟工况模拟结果

模拟工况	因素			负荷指标 (kW·h/m ²)		
	A	B	C	供热负荷	制冷负荷	全年总负荷
1	1	1	1	3.77	49.56	53.32
2	1	2	2	5.25	48.63	53.88
3	1	3	3	7.39	47.94	55.33
4	1	4	4	9.49	47.19	56.68
5	2	1	2	4.65	48.81	53.46
6	2	2	1	4.59	48.33	52.93
7	2	3	4	8.39	47.61	56.00
8	2	4	3	8.80	46.69	55.49
9	3	1	3	5.25	47.87	53.12
10	3	2	4	7.53	47.49	55.02
11	3	3	1	5.61	46.95	52.56
12	3	4	2	8.00	46.03	54.02
13	4	1	4	7.13	47.12	54.25
14	4	2	3	7.13	46.60	53.73
15	4	3	2	7.19	46.08	53.27
16	4	4	1	7.57	45.27	52.83

3.3 各因素的影响分析

为分析外窗、外墙、屋面三个因素不同水平下对建筑负荷的影响,需计算各因素在不同水平下的综合平均值 K_{ij} 。以计算 A 因素 1 水平下的综合平均值为例:

$$IA(\text{供热负荷})=3.77+5.25+7.29+9.49=25.90$$

$$IA(\text{制冷负荷})=49.56+48.63+47.94+47.19=193.32$$

$$K_{IA}(\text{供热负荷})=IA(\text{供热负荷})/4=25.90/4=6.47$$

$$K_{IA}(\text{制冷负荷})=IA(\text{制冷负荷})/4=193.32/4=48.33$$

根据此法分别计算出其他因素相应水平的综合平均值。综合平均值计算表如下表所示。

表 5 各因素相因水平下综合平均值计算表

	K 值	A	B	C
供热负荷 (kW·h/m ²)	K_{1j}	6.47	5.20	5.38
	K_{2j}	6.59	6.12	6.27
	K_{3j}	6.60	7.15	7.14
	K_{4j}	7.06	8.46	8.13
制冷负荷 (kW·h/m ²)	K_{1j}	48.33	48.34	47.53
	K_{2j}	47.86	47.76	47.39
	K_{3j}	47.09	47.15	47.35
	K_{4j}	46.26	46.29	47.27
全年总负荷 (kW·h/m ²)	K_{1j}	54.80	53.54	52.91
	K_{2j}	54.47	53.89	53.66
	K_{3j}	53.69	54.29	54.49
	K_{4j}	53.32	54.76	55.41

同时为了更直观的反映各因素对负荷的影响规律和趋势,分别以因素水平为横坐标,综合平均值为纵坐标,得出各因素对负荷的影响趋势图,详见图 4—图 6。

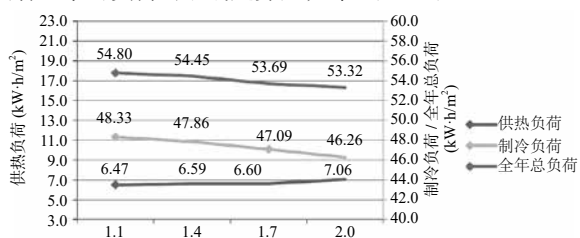


图 4 冷、热、总负荷随外窗传热系数变化趋势

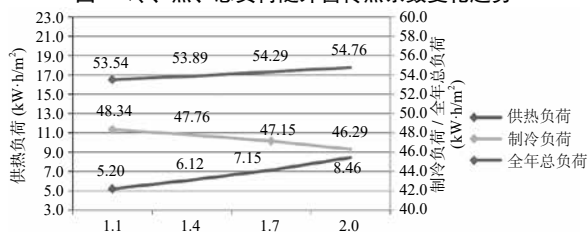


图 5 冷、热、总负荷随外墙传热系数变化趋势

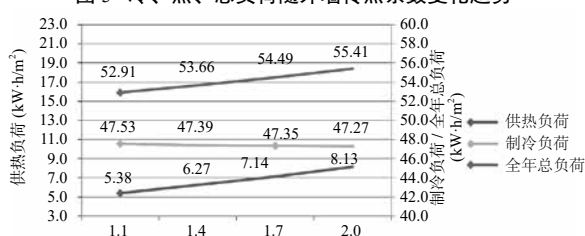


图 6 冷、热、总负荷随屋面传热系数变化趋势

由图 4—图 6 可以看出,模拟工况下,建筑冬季供暖负荷值远远低于夏季供冷负荷,主要是因为建筑围护结构保温性能良好,室内热量较难散失,室内照明、设备人员的散热量可储存在房间中。但是同时随着围护结构保温性能的增加,制冷负荷也在不断增长,原因同样是因为当围护结构保温性能增加后,室内热量较难散失,墙体蓄热量较高,导致冷负荷的增加。由此可得出,在围护结构设计,并非传热系数越小越好。

最优方案的确定

根据综合平均值计算表,得到制冷负荷最小的最优方案是 A4B4C3,供热负荷最小的最优方案是 A1B1C1,全年总负荷最小的最优方案是 A4B1C1。以全年总负荷最小作为优化目标,此时围护结构参数表如下图所示。

表 6 最优设计方案

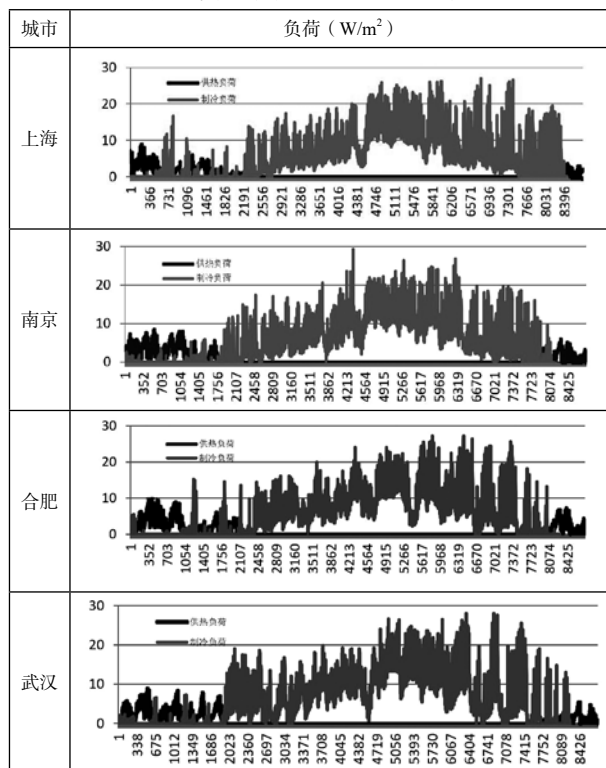
维护结构	传热系数 (W/m ² ·K)
外窗	2.0
外墙	0.20
屋面	0.20

此最优方案并未在模拟的 16 个工况中,这也正是正交试验的优点所在,它可以指出寻找最优实验条件的途径所在。对最优方案进行重新模拟得到,冬季热负荷指标为 4.49kW·h/m²,夏季冷负荷指标为 47.31kW·h/m²,全年总负荷为 51.80 kW·h/m²。

4 逐时负荷分析

本文对夏热冬冷地区上海、南京、合肥、武汉四个城市全年范围内的逐时负荷进行了分析,暂以上节所得的围护结构最优设计方案作为围护结构的输入参数,输入至 EnergyPlus 软件中进行模拟分析。模拟所得逐时负荷结果如表 7 所示。

表 7 夏热冬冷地区各城市逐时负荷



由上表模拟结果可得,夏热冬冷地区四个城市的逐时供热负荷皆低于 $10\text{W}/\text{m}^2$,大部分处于 $0\sim 5\text{W}/\text{m}^2$,逐时制冷负荷皆低于 $30\text{W}/\text{m}^2$,大部分处于 $10\sim 20\text{W}/\text{m}^2$,在《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 134-2010)的基准线基础上大幅降低了建筑负荷,有效实现了建筑节能的目标。

使用被动式技术亦可有效降低建筑供暖制冷负荷,但本文中未对基础建筑加入遮阳、自然通风等被动式技术进行模拟分析,可参考前人结论,设置遮阳百叶可节能 $17.4\sim 35.6\%$ ^[11],夜间自然通风技术可使次日温度峰值降低约 1°C ^[12],超低能耗建筑围护结构的良好保温性能使得建筑供热供冷需求大幅降低,也为太阳能为主的供热空调系统的应用提供了良好基础。由此可见在本文最优围护结构设计的基础上,再考虑遮阳、自然通风、自然采光、太阳能等被动式技术所能带来的节能效应后,建筑能耗可有效降低,从而达到超低能耗建筑的能耗要求。

5 结论:

(1) 本文运用正交试验法,对多因素多水平工况进行了试验设计,通过 EnergyPlus 模拟分析,得出了外窗、外墙、屋面的传热系数对建筑负荷的影响趋势,当围护结构保温性能增加时,供暖热负荷减少,同时制冷负荷也会增加,全年总负荷却并不一定会减少。

(2) 本文由模拟结果分析得出所建基础建筑的最优围护结构设计方案:外窗传热系数为 $2.0\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$,外墙和屋面的传热系数为 $0.2\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 。在此方案下建筑的全年总负荷达到最低,以此为夏热冬冷地区超低能耗建筑合理围护结构的设计提供参考。

(3) 本文对夏热冬冷地区四个城市气象条件下建筑逐时负荷进行了分析,建筑逐时供热负荷皆低于 $10\text{W}/\text{m}^2$,逐时制冷负荷皆低于 $30\text{W}/\text{m}^2$,在《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 134-2010)的基准线基础上大幅

降低了建筑负荷,如再辅以其他被动式技术如自然通风、遮阳、太阳能供暖供冷等优化设计后,可更加有效降低建筑能耗,达到超低能耗建筑的能耗要求。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2015[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [2] 徐伟,孙德宇. 中国被动式超低能耗建筑能耗指标研究[J]. 动感: 生态城市与绿色建筑, 2015(1):37-41.
- [3] 陈强. 山东地区被动式超低能耗建筑节能研究[D]. 山东建筑大学, 2016.
- [4] 张神树,高辉. 德国低/零能耗建筑实例解析[M]. 中国建筑工业出版社, 2007.
- [5] 彭梦月. 被动房在中国北方地区及夏热冬冷地区应用的可行性研究[J]. 建设科技, 2011(5):48-50.
- [6] 住房和城乡建设部. 被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居住建筑). 2015.
- [7] EnergyPlus. The United States Department of Energy. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [8] 潘黎,徐强. 上海地区气候适应型被动式超低能耗建筑技术路线探索[J]. 建设科技, 2015(23):22-23.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准(GB 50189-2015)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准(JGJ 134-2010)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [11] 李峥嵘,陶求华,蒋福建,等. 建筑外百叶最佳固定倾角与动态百叶节能潜力[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(6):767-772.
- [12] 许艳. 长沙地区办公建筑夜间通风技术实验研究及 DeST 模拟分析[D]. 湖南大学, 2007.

基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法

杨 陶¹, 潘毅群¹, 谢建彤¹, 黄治钟²

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学中德工程学院, 上海 201804)

[摘 要] 由于建筑能耗模型与实际数据间存在信息差, 其模拟结果和实测值之间常出现误差, 且此误差有时甚至超过 100%。误差的存在大大降低了模型的可信度, 也削弱了其在建筑运行评价中发挥的作用。因此在建模的过程中, 需要对模型进行校验, 以降低模拟值和实际值之间的误差, 增加可靠性。本文提出一种基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法, 将人工校验的知识和逻辑模块化, 为人工智能大趋势下结合人工和自动校验双边优势的途径发展提供一种可能。

[关键词] 建筑能耗模拟; 模型校验; 符号有向图; 时间表

0 引言

模拟人员在针对建筑能耗进行建模时, 常常因为对实际情况无法获得详尽信息的描述, 导致所建立的能耗模型与实际情况有所偏差^[1]。这种偏差必然存在, 但如果太大, 则会大大降低模型的可信度, 极度影响其在建筑性能评价中所发挥的作用。为了保证建筑能耗模拟具有普遍的可靠性, 则需要通过模型校验, 使其能够较为准确地代表实际建筑。

因为建筑能耗模拟中涉及大量的参数, 从而使校验成为一项不确定性很高的工作。当前已有世界公认的建筑能耗模型校验的评价标准, 但迄今为止没有达成共识的通用方法, 最初的人工迭代校验依然是最常用的途径^[2]。人工校验的优点在于可以利用模拟人员本身的知识 and 经验, 而缺点则是费时费力, 并且因为涉及到大量的参数调整, 很容易使模拟人员因精力有限而出现错误。因而, 最近几年人们开始尝试引入自动校验的手段, 利用计算机高效的数据处理能力, 帮助模拟人员对建筑能耗模型进行校验, 从而很大程度上减轻模拟的负担。但当前建筑能耗模型的自动校验仍处于初级阶段, 现行的方法是剔除物理逻辑而把迭代校验当作纯粹的数学方法进行处理, 即将建筑能耗物理模型直接抽象成多目标的数学优化问题。这时的模型输出结果只能满足已用测量数据时间段内的输出结果准确度, 但很难保证输入参数的准确性。在自动校验的基础上依然需要专业人士的学术知识和工程经验的参与, 即使使用迭代自动校验也需要通过一定的物理逻辑来判断缩小待调整参数的范围。而这一方法的应用最好便于实现自动化。因此, 本文在前人悉心研究的基础上尝试更进一步, 建立一种基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法。它可以为结合人工和自动校验双边优势的途径发展提供一种可能, 是利用因果关系判断待调整输入参数的更为完备的建筑能耗模型校验方案。

文章首先采用符号有向图的形式绘制出建筑体内各参数与能耗之间的影响关系图, 然后基于符号有向图提出建筑能耗模型的参数调整方法, 最后分别在一个实验模型和一个实际建筑模型中验证方法的有效性。

1 建筑能耗符号有向图的建立

建筑能耗四大项可分为照明能耗、设备能耗、暖通空调能耗和动力能耗。其中动力能耗在本文中不作讨论。

1.1 建筑照明能耗和设备能耗的影响因素分析

建筑照明能耗可由式 (1) 表示:

$$Q_{li} = n_{li} \times q_{li} \times A_i \times h_{li} \quad (1)$$

因此, 照明能耗的主要影响因素为照明功率密度、照

明运行小时数、照明使用率、照明面积、玻璃类型、遮阳系数和窗墙比等。照明能耗与影响因素的关系可由式 (2) 和图 1 表示。

$$Q_{li} = f(n_{li}, q_{li}, A, h_{li}, B_{win}, A_w, K_c, S_{win}) \quad (2)$$

室内设备能耗与照明能耗类似, 其与影响因素的关系可由式 (3) 和图 2 表示。

$$Q_{eqpt} = f(n_{eqpt}, q_{eqpt}, A, h_{eqpt}) \quad (3)$$

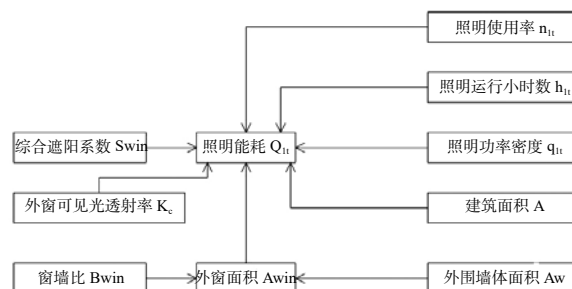


图 1 照明能耗影响关系

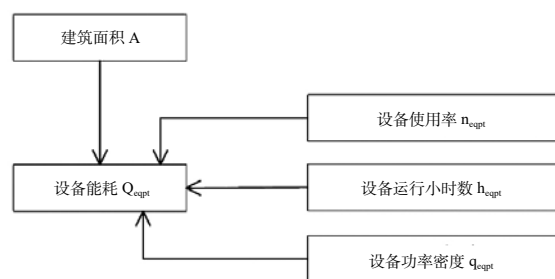


图 2 设备能耗影响关系

1.2 建筑空调系统能耗影响因素分析

空调系统能耗包括三大部分: 冷水机组能耗、水系统能耗 (冷冻水泵、冷却水泵和冷却塔) 和风系统能耗 (风机盘管风机和空调箱风机)。空调系统的本质是通过自身的运行来消除室内的负荷从而保持房间既定的环境指标, 空调系统运行的流程是利用能源完成负荷的“搬运”工作, 其工作效率由以上提到的空调部件共同决定。因此, 空调系统能耗影响因素, 可分为空调负荷和空调系统效率两部分。

以下分别以外窗传热负荷和冷水机组能耗为例，对负荷和系统效率两部分进行分析。

1.2.1 以外窗传热负荷为例分析空调负荷

空调系统负荷 L 可分为外扰和内扰，外扰主要由外围护结构传热负荷 L_e （外墙传热负荷 L_w 、屋顶传热负荷 L_r 、外窗传热负荷 L_{win} ）和新风负荷 L_{oa} 组成，内扰主要由人员负荷 L_p 、照明散热负荷 L_{lt} 和办公设备散热负荷 L_{eqpt} 组成。

通过建筑外围护结构外表面进入室内的热量来源分为两部分：一部分来自户外空气以对流方式传给围护结构外表面的热量；另一部分则为围护结构外表面接受的太阳直射、散射和反射以及地面辐射的热量。

外窗的传热负荷除了和外墙和屋顶类似的传热途径外，因其具有透光性，故通过其进入室内的热量还有太阳辐射透射得热。因此，外窗传热负荷 L_{win} 与影响因素可表示为式（4）。

$$L_{win} = f(A_w, B_{win}, A_{win}, U_{win}, t_{ode}, t_{ids}, S_{win}, n_{win}, q_a, I, \tau_{win}, t_g, a_{win}) \quad (4)$$

1.2.2 以冷水机组能耗为例分析空调系统效率

空调系统用能设备主要有冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔风机和空调末端风机，共同决定空调系统的总效率。

冷水机组能耗可由式（5）表示：

$$E_{chi} = q_c \times EER \times h_c \quad (5)$$

冷水机组瞬时供冷量 q_c ，主要与空调系统负荷有关；冷水机组的能效比 EER ，主要与冷水机组的性能系数 COP 、冷水机组的负荷率、冷冻水供水温度、冷却水进水温度和是否变频等有关；空调系统运行时间 h_c ，在供冷季时间和每日开关机时间固定时，与是否能够利用自然冷源减少开机时间有关。

冷水机组能耗 E_{chi} 影响因素关系可表示为式（6）。

$$E_{chi} = f(L_c, COP, PLR, T_{chw}, T_{cw}, h, T_{csa}) \quad (6)$$

1.3 基于校验的建筑能耗影响因素分类

在建筑能耗模拟中，常常需要面对的是几十甚至几百

的参数输入控制，因此相应的校验工作是不确定性很高。如果对这样一个模型的参数全部进行校正，那么可想而知是一项十分浩大的工程。大量的输入参数不能够完全被可获得的确定数据所决定，可能导致参数输入的混淆和误差。因此，在进行校验之前，对涉及的输入参数先进行梳理，将它们分成模型校验的梯度顺序。

首先，输入参数可以分为两类：可校验参数和不可校验参数。不可校验数据是指根据模拟人员所选择的模拟软件的不同，相应某些参数不便于在模型中输入。这部分参数要么通过公式化为其他可输入的参数，要么省略留给模拟软件默认计算。其次，可校验参数可进一步分为可获得参数和不可获得参数。可获得参数对应于实际情况中模拟人员可获得的准确数据，如建筑的物理尺寸、窗户的类型、设备的台数、天气参数等。获得的途径可以通过获取建筑图纸，也可以是走访调研，或者与运行维护人员交谈。再次，不可获得参数再细分为时间表参数和调整类参数。时间表参数是具有随机性且具有 24 维，不适用于符号有向图的校验，所以用规则判断的方法先进行调整。剩下的参数则是调整类参数，利用本文所建立的符号有向图校验部分完成校验。最后，调整类参数可通过敏感性分析再分为强影响参数和弱影响参数。强影响类参数对相应的能耗具有更大的影响力，在需要的情况下可以基于敏感性分析对符号有向图模型进行简化，提高校验的效率。

1.4 建筑能耗的符号有向图

根据所分析的建筑能耗中的影响关系，建立建筑能耗的符号有向图。本文所建立的建筑能耗符号有向图包括 86 个节点。其中，有 14 个不可校验参数、18 个可获得参数、9 个时间表参数和 45 个调整类参数。根据具体建筑能耗模型校验需要，可进一步进行分类和简化。

建筑能耗符号有向图局部见图 3 示例。其中，箭头表示影响关系，箭头上的正负号表示影响方向，即正号表示正影响，负号表示负影响，问号表示视情况而定。两者之间的影响方向是假定其他参数不变的情况下而确定。

2 基于符号有向图的校验方法

本文提出的校验过程分为两个阶段进行。第一阶段是利用“典型日时间表校验法”对建筑运行的时间表进行校

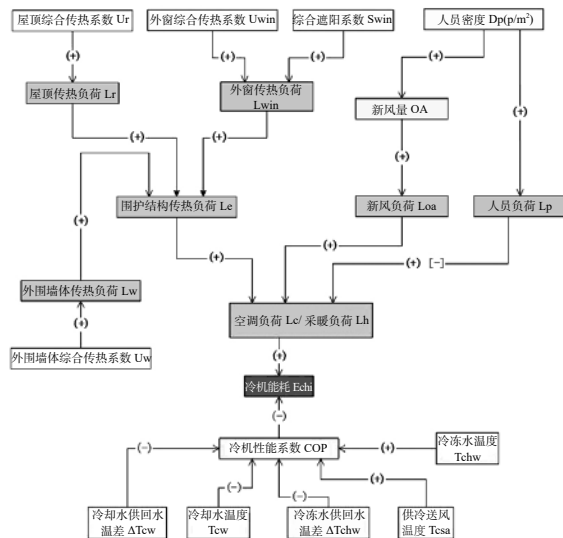


图 3 与冷机能耗相关的局部建筑能耗符号有向图

验；第二阶段是利用“分步分部参数校验法”对调整类参数进行校验。

2.1 建筑能耗模型中时间表的校验

时间表因为是一组随机性很大的参数，所以通常在建筑能耗模拟中，时间表一般采用默认时间表代替。而实际时间表与典型时间表有所差别。

2.1.1 照明和设备系统时间表的校验

照明系统和设备系统的时间表是介于 0~1 闭区间的值，由 24h 每一时刻的负荷率组成。以照明为例进行校验方法的阐述。

(1) 数据获得。在一年十二月中选择同时覆盖三种日类型的月份进行照明能耗逐时检测。

(2) 数据分类。将检测得到的建筑照明能耗数据按工作日、周末和假期进行分类。

(3) 计算照明密度。见式 (7)。

$$q_{li} = \frac{Q_{lmax} / 1h}{A} / \alpha_{lmax} \quad (7)$$

式中， q_{li} 为建筑照明负荷 (kW/m^2)； Q_{lmax} 为照明最高峰值时能耗 ($\text{kW}\cdot\text{h}$)； A 为建筑面积 (m^2)； α_{lmax} 为照明负荷系数，一般取 0.95。

(4) 计算时刻负荷率。见式 (8)。

$$n_{lthd} = \frac{Q_{lthd}}{Q_{lmax} / \alpha_{lmax}} \quad (8)$$

式中， n_{lthd} 为第 d 天第 h 小时的时刻负荷率； Q_{lthd} 为第 d 天第 h 小时的照明能耗 ($\text{kW}\cdot\text{h}$)。

(5) 基础典型日时间表生成。分别在工作日、周末和节假日三种日类型的所有照明时间表中，每一时刻取平均值，得到三种基础典型日时间表，由式 (9) 计算。

$$n_{lthi} = \frac{\sum_d n_{lthdi}}{D_{di}} \quad (9)$$

式中， n_{lthi} 为日类型 i 的第 h 小时的时刻负荷率； n_{lthdi} 为日类型 i 的第 d 天第 h 小时的典型日时刻负荷率； D_{di} 为日类型 i 的天数。

(6) 逐月时间表生成。根据第三步中计算的照明负荷以及月照明能耗，以等比例放大和缩小的方式，得到逐月时间表，见式 (10)~式 (11)。此逐月时间表即为实际时间表。

$$n_{lthim} = n_{lthi} \times \delta_{lim} \quad (10)$$

$$\delta_{lim} = \frac{Q_{lim}}{\sum_i \sum_h n_{lthi}} \quad (11)$$

式中， δ_{lim} 为逐月照明时间表缩放系数； Q_{lim} 为照明月能耗 ($\text{kW}\cdot\text{h}$)。

2.1.2 人员在室时间表的校验

室内人员在室情况可以通过人员检测设备（如红外线仪）得到，也可以通过二氧化碳聚集情况、室内温度变化、光线变化等环境检测来间接获得。本文基于 Yang-Seon Kim^[3] 室内人员与设备的相关关系公式计算室内人员数量，并以此生成实际人员在室率的时间表。具体方法与照明时间表生成类似。

2.1.3 空调运行时间表的校验

这里所说的空调运行时间表同时包括供冷和供暖。空调运行时间表可分为三个部分：空调启停时间表、室内供冷设定温度时间表以及室内供暖设定温度时间表。

(1) 空调启停时间表

空调启停时间表是最简单的时间表形式，其每时刻的值只有 0 或 1，开启即为 1，关闭即为 0。可以利用冷机的运行状况，进行空调启停时间表的生成。

(2) 室内供冷、供暖设定温度时间表

设定温度时间表可以通过对不同季节的室内设定温度进行检测，然后按照以上照明时间表的生成方法获得。

2.2 建筑能耗模型中调整类参数的校验

2.2.1 调整类参数的符号有向图模型简化

简化的目的在于提高校验的效率，其主要内容如下：

- (1) 可获得参数的简化；
- (2) 已完成校验参数的简化；
- (3) 模拟软件中难以设置的参数的简化；
- (4) 不可测量参数的简化。

2.2.2 调整类参数校验的方法和逻辑

对于调整类参数的校验主要有两个关键性步骤，这也是整个建筑能耗模型校验过程中最重要的两步，即待调整参数的确定和调整幅度的建议。

本文提出的对于调整类参数的校验方法，主要是基于建筑能耗符号有向图。推理逻辑也即是由符号有向图的推理机制产生。

(1) 反向推理机制 - 待调整参数的确定

反向推理是在已知的样本中进行，从当前所关注的后果节点向可能的所有原因节点反向探索可能的影响通路。从选定的后果节点向前搜索完备的且独立的相容影响通路，从而得到可能的原因节点集。本文提出的基于符号有向图的建筑能耗模型中，调整类参数的校验中调整参数的确定，则是属于此项推理机制。

以冷机能耗为例说明调整类参数校验中待调整参数集搜索。图 3 即为与冷机能耗相关的局部建筑能耗符号有向图。每一条影响路径都有其内在的物理逻辑，完整的可能输入参数偏差见表 2。

表 2 造成冷机能耗偏高可能的输入参数集

输入参数	墙体综合传热系数 U_w	屋顶综合传热系数 U_r	外窗综合传热系数 U_{win}	综合遮阳系数 S_{win}	外窗面积 A_{win}	人员新风量 OA_p	人员密度 D_p (p/m^2)
冷机能耗 E_{chi+}	+	+	+	+	+	+	+
输入参数	冷却水供回水温差 DT_{cw}	冷机性能系数 COP	冷却水温度 T_{cw}	冷冻水温度 T_{chw}	冷冻水供回水温差 DT_{chw}	供冷送风温度 T_{csa}	
冷机能耗 E_{chi+}	+	-	+	-	+	-	

(2) 正向推理机制 - 调整幅度的建议

正向推理的前提是模型的所有节点的状态未知。在模型节点状态未知的情况下多采用此推理方法。在模型中，从选定的原因节点向后果节点搜索。每一个原因节点都要对所有的后果节点做一次全面搜索，并且在搜索中对通路经过的节点作相容标记（预估）。最后应当对所有搜索到的可能的且独立的相容通路进行合理性分析。本文在后文幅度调整建议中即用到此推理路径，通过拟合方法，建立输入参数与输出参数的关系，作为幅度调整建议的依据。

在分析的过程中，同时计算单个输入参数对不同的分项能耗的敏感性，以此作为参数调整优先次序的依据。选取微分敏感性分析式进行计算，如式 (12)。

$$IC = \frac{\frac{\Delta E_i}{E_{ib}}}{\frac{\Delta IP_j}{IP_{jb}}} \quad (12)$$

式中, IC 为敏感性因子; ΔE_i 为分项 i 的能耗变化值 ($\text{kW}\cdot\text{h}$); E_{ib} 为分项 i 的基准能耗 ($\text{kW}\cdot\text{h}$); ΔIP_j 为输入参数 j 的变化值; IP_{jb} 为输入参数 j 的基准值。

2.3 基于建筑能耗符号有向图的建筑能耗模型校验的步骤

结合以上向前和向后推理的分析, 本文提出基于建筑能耗符号有向图的建筑能耗模型校验的步骤:

(1) 建立初始模型。尽可能搜集目标建筑相关的信息, 包括天气参数、建筑几何参数、围护结构物性参数、空调系统信息等。

(2) 对时间表参数进行校验。按照“典型日时间表校验法”, 利用短期测量逐时数据, 推算照明、设备、人员、空调系统的实际时间表。

(3) 误差较大分项的单独校验。优先针对个别能耗误差在 30% 以上的分项进行校验, 对应调整输入参数集选定的前提是其不对误差在 30% 以下的其他分项能耗产生影响, 调整目标是使其处于 30% 误差以下。具体调整方法为“比例调整法”, 即根据模拟值反函数结果离实际值距离反函数结果的百分比, 调整当前误差输入参数。具体计算如式 (13)。

$$x_2 = x_1 \times \left(1 + \frac{f^{-1}(y_0) - f^{-1}(y_1)}{f^{-1}(y_1)}\right) \times \theta \times \phi \quad (13)$$

式中, x_2 为调整参数值; x_1 为当前参数值; $f^{-1}()$ 为 $f(x)$ 的反函数, $f(x)$ 即为拟合的能耗关系式; y_0 为目标模型或者实测建筑的输出值; y_1 为当前模型的输出值; θ 为分担系数, 需要同时调整影响同一输出值的输入参数时用决定分担比例; ϕ 为步长控制系数, 用以在调整过程中控制调整的步长。

(4) 对误差 15% 以上分项的集中校验。经过针对个别较高能耗误差分项的校验之后, 对误差在 15% 以上的分项集中进行校验。

(5) 空调负荷侧参数的校验。空调负荷侧任意参数的

调整, 都将对总负荷产生影响, 根据多数分项误差确定负荷侧参数的调整方向。因为负荷侧的参数较多, 故根据各参数的敏感性分析结果制定优先级进行调整。

(6) 局部微调。若依然由误差值在 15% 以上, 或者对某些部件的误差不太满意, 可在这一步再对其进行微调。

以上 3~6 步是针对调整类参数进行校验的“分步分部校验法”, 即按照一定的逻辑步骤、依据各空调部件的模拟误差进行校验, 每一步校验的参数选择和幅值调整都是基于符号有向图所建立的信息库得到, 并且通过 Python 程序辅助进行。

3 案例验证

为了验证基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法的有效性, 本文分别对基于模拟数据和基于实际数据的建筑能耗模型开展校验, 同时以此作为具体应用的展示。

3.1 基于模拟数据的校验方法验证

对于实际建筑, 很难获取真实准确的输入参数信息, 所以先通过虚拟的典型建筑模型进行实验。本文借用“双盲实验”的理念, 由课题组另一位同学将已建好的基础模型中的输入参数随机修改, 以此作为目标模型, 而基础模型则为初始模型。需要做的是利用前文提出的方法对初始模型中的输入参数进行调整, 直到其输出能耗结果和目标模型的能耗结果在允许的误差范围之内。随后再将调整后模型的输入参数与目标模型的输入参数进行比较, 分析方法的有效性。

3.1.1 实验模型概况

本文进行实验所建立的模型为上海市办公建筑典型模型。这栋虚拟建筑为 12 层、层高为 4m 的办公建筑, 其标准层为 1600m²。根据调研结果和《公共建筑节能设计标准》^[4] 确定其围护结构、系统设置等各项参数。

3.1.2 实验模型的校验过程

(1) 初始模型的建立

按照典型模型建筑信息进行建模, 建筑外形图见图 4。对比初始模型与目标模型输出的逐月能耗结果, 见图 5~图 9。

从以上图中可直观地看出初始模型和目标模型之间存在很大的误差, 且其值普遍低于目标模型。具体的分项误

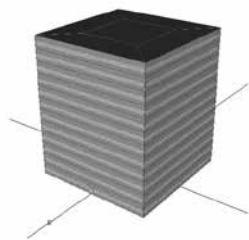


图 4 实验典型模型 3-D 外视图

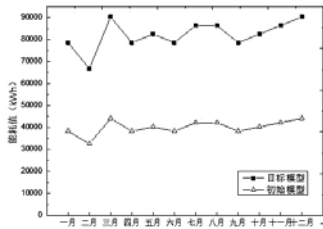


图 5 初始模型和目标模型的逐月照明电耗对比

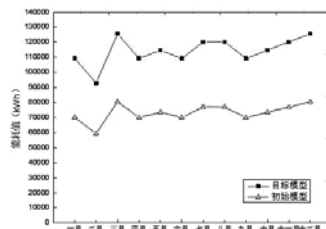


图 6 初始模型和目标模型的逐月设备电耗对比

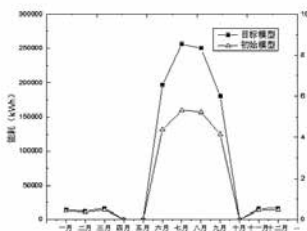


图 7 初始模型和目标模型的逐月空调电耗对比

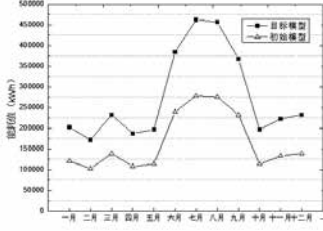


图 8 初始模型和目标模型的逐月总电耗对比

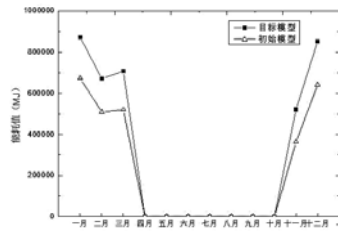


图 9 初始模型和目标模型的逐月总气耗对比

差见表 3。

从表 3 中可知, 初始模型的总电耗均方根变异系数为 42.15%, 总气耗为 25.50%, 高出推荐的 15% 误差。在空调系统中, 冷却塔的误差最高, 其均方根变异系数达到 84%, 其次是冷冻泵, 均方根变异系数为 45.66%。接下来, 利用分项误差表, 基于前文提出的校验方法对初始模型进行校验。

(2) 模型的校验

模型的校验总共分为五步。

1) 第一步 时间表的校验

建筑能耗模型中的时间表包括照明系统时间表、设备系统时间表、人员在室时间表和空调运行时间表。以下以照明时间表为例, 利用时间表校验方法对初始模型中的照明系统进行校验。

① 数据获得。输出目标模型 10 月份的逐时照明能耗值。

② 数据分类。将 10 月 31 天的照明能耗数据按照工作日、周末、节假日分开。

③ 计算照明密度。所有的逐时能耗数据中, 最大值为 357.54kW·h, 通过折算, 照明密度为 19.6W/m²。

④ 计算负荷率。将逐时能耗值与最大能耗值/0.95 相比, 即得到该时刻的照明负荷率。如 10 月 4 日早上八点, 其照明能耗为 112.91kW·h, 则此时的照明负荷率为 0.3。

⑤ 典型日时间表生成。分别在工作日、周末和节假日三种日类型的所有照明时间表中, 每一时刻取平均值, 得到三种基础典型日时间表。

校验后的照明密度和照明时间表带入模型中计算后, 校验模型和目标模型的照明逐月能耗均方根变异系数误差为 1.11%。

全部时间表调整后, 能耗误差降低, 总电耗均方根变异系数从原来的 42.15% 变为 11.83%, 已经达到允许的误差范围之内。特别是与时间表直接相关的照明系统和设备系统, 其均方根变异系数分别为 1.11% 和 1.20%。但是, 其他分项仍然存在一定的误差, 比如冷却塔和冷冻泵, 误差在 50% 以上。因此可以看出分项能耗分析的必要性, 当总能耗误差达到允许范围之时, 仍有可能部分部件的能耗误差很大, 即相应的参数设置依然存在问题。

2) 第二步 误差较大分项的单独校验

当前误差较大的分项为冷却塔和冷冻泵的能耗, 均方根变异系数分别为 82.08% 和 56.87%。故需先针对这两项进行调整。

根据建筑能耗符号有向图的搜索, 在这一步的校验中, 需要增加冷却塔效率 EIR, 增加冷冻泵效率以及增加冷冻

水供回水温差。寻出待调整参数集后, 得到冷却塔效率为 0.1, 冷冻水供回水温差为 6.44℃, 冷冻水泵效率为 0.86, 调整至校验模型 1 中, 得到校验模型 2, 并运行输出模拟结果。此时, 冷却塔和冷冻泵的分项能耗误差已经得到很大程度上降低, 冷却塔能耗的从 82.08% 降至 14.76%。

3) 第三步 对误差 15% 的分项集中校验

经过针对个别较高能耗误差分项的校验之后, 对误差在 15% 以上的分项集中进行校验。同样根据建筑能耗符号有向图的搜索。寻出待调整参数集后, 冷冻水供回水温差为 7.11℃, 冷机性能系数 (EIR) 为 0.13, 锅炉效率 (EIR) 为 1.52。调整至校验模型 2 中, 得到校验模型 3, 并运行输出模拟结果。

4) 第四步 负荷侧参数的校验

经过前三步的调整, 各分项的能耗误差已经在一个相对低且相近的范围内。此时对负荷侧的参数进行调整。负荷侧的每一项参数都将对整个负荷产生影响, 进而影响所有的空调系统部件。大多数的部件误差为负, 则以负向差来分析负荷侧参数的误差情况。负荷侧的调整, 从敏感性较大的外墙传热系数和室内人员密度参数开始, 将其调整得到校验模型 4, 运行输出模拟结果。

经过第四步负荷侧的调整, 校验模型 4 的能耗总量逐月误差已经很低, 总耗电量和总耗气量的均方根变异系数误差分别为 1.44% 和 3.15%。

5) 第五步 局部微调

最后一步是对部分依然在 15% 以上的误差部分进行微调, 对冷冻泵相关参数进行调整, 调整方法依然是基于符号有向图的方法。冷冻水供回水温差调整至 7.22℃, 调整后的逐月总能耗见图 11~图 12, 分项误差见表 3。

3.1.3 实验模型的结果分析

(1) 能耗结果分析

最终的校验结果见 11~图 12 和表 3。从直观上看, 显然校验模型的能耗值已经非常接近目标能耗值。从数据上看, 所有的分项均方根变异系数误差在 15% 以下, 电耗总量和耗气总量的误差分别为 1.42% 和 3.15%。初始模型和校正完全模型的误差见表 3。经过校验后的模型在输出能耗方面拥有很好的表现。

(2) 输入参数调整分析

参数识别为基于符号有向图根据分项误差搜索出可能误差参数集, 本次校验中参数识别正确率为 76.92%, 未识别出的主要原因在于对与正常值无异参数的识别错误。比较校验后参数与目标参数的值, 最大的输入参数误差为外墙综合传热系数, 误差为 31.25%, 最小为设备功率密度, 误差为 1.20%, 所有参数误差的平均值为 9.87%。

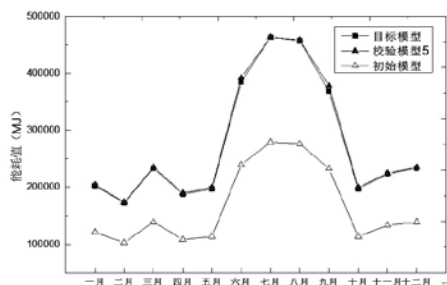


图 11 目标模型和校验模型 5 的耗电总值对比

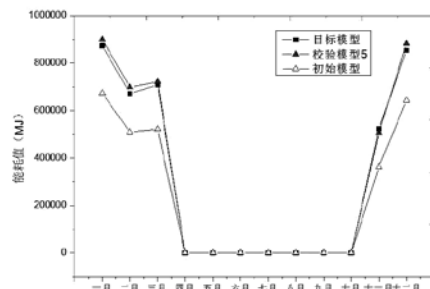


图 12 目标模型和校验模型 5 的耗气总值对比

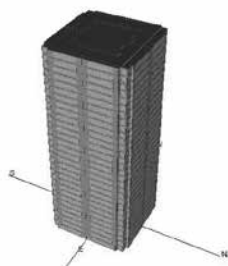


图 13 上海市某办公大楼的 3-D 外形模型

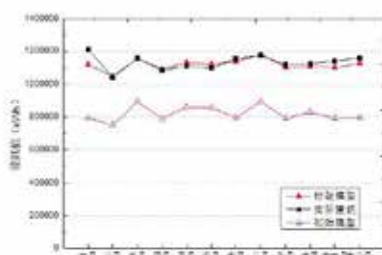


图 14 校验模型和实际建筑照明设备能耗对比

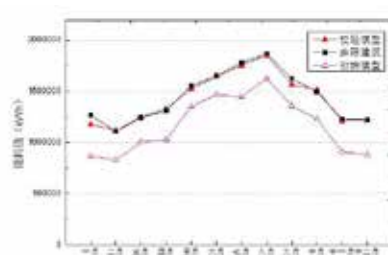


图 15 校验模型和实际建筑总电耗对比

表 3 初始模型和目标模型的分项误差

误差分析	初始模型		校验模型	
	MBE	CV(RMSE)	MBE	CV(RMSE)
总电耗	-39.76%	42.15%	1.01%	1.42%
总气耗	-25.35%	25.50%	2.21%	3.15%
照明	-51.20%	51.35%	1.11%	1.11%
设备	-35.92%	36.03%	1.20%	1.20%
冷机	6.46%	6.34%	15.04%	14.77%
冷却塔	-83.01%	84.64%	-11.82%	12.94%
冷冻泵	45.61%	45.66%	14.13%	14.15%
冷却泵	-4.87%	4.88%	5.06%	5.07%
供冷风机盘管	-13.02%	13.04%	-0.97%	0.98%
供热风机盘管	-13.02%	13.10%	-0.97%	0.98%
热水泵	-17.59%	17.69%	-7.48%	7.52%
锅炉	-25.68%	25.50%	1.88%	3.15%

综合来看,本文提出的基于符号有向图的建筑能耗模型的校验方法具有较好的表现,特别是在输出能耗方面的误差较低。输入参数的误差原因主要在于其数量过多,又缺少一些中间变量真实测量数据,导致存在很大的不确定性。随着楼宇技术的发展和能源监测系统的完善,建筑数据的分辨率将会更高,此时利用本文建立的建筑能耗符号有向图将可以进一步提高建筑能耗模型的准确性。

3.2 基于实际数据的校验方法验证

3.2.1 实际建筑能耗模型的概况

该办公大楼位于上海市长宁区,总建筑面积为 73680m²,建筑高度约为 132m,共 30 层。根据建筑图纸,其中冷热源系统采用冷源为 2 台制冷量为 2813kW 和 1 台制冷量为 1758kW 的离心式电制冷冷水机组,热源为 2 台制热量为 2300kW 的燃气热水锅炉。建筑办公室内采用全空气变风量空调系统,空调水系统采用四管制闭式循环系统,提供全年 7~13℃ 的冷冻水和 60~48℃ 的热水。

3.2.2 实际建筑能耗模型的校验过程

基于以上办公建筑信息,利用 eQUEST 建立建筑能耗模型,外形 3-D 图见图 13。该楼宇无法对气耗进行记录,因此本文对此建筑模型的校验不涉及锅炉的气耗校验。

从图 14 中看到,初始模拟模型的照明设备能耗与实际数据相差较大,数据上均方根变异系数误差为 27.83%,超出误差允许范围。从图 15 可知,建筑总电耗模拟数据误差相对前者较小,同时从图上看,该误差为全年误差,数据上均方根变异系数误差为 19.77%。

对该建筑模型按照前文提出的基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法对该初始模型进行校验,利用典型日方法校验模型时间表和利用分步分部法校验调整类参数。具体方法应用已在前一小节的典型模型验证中展示,故不在此赘述。不同点在于,对实际建筑的校验需要在第一步中

用实际天气参数替换初始建模时所用的典型气象参数。

校验后的校验模型和实际建筑的数据比较见图 12 和图 13。从图 14 和图 15 中可以看到,照明设备的误差已经降到很低,均方根变异系数误差为 2.93%,总电耗误差为 2.63%。

3.2.3 实际建筑能耗模型的结果分析

对于实际建筑的能耗模型校验,本文所提出的基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法依然具有很好的适用性。相较于计算机虚拟模型,实际建筑的校验结果不能保证那么高的准确性,这是因为在实际建筑中存在更多的不确定性,如时间表更加随机等。提高实际检测数据的分辨率可以有效减少这些不确定性。但是,当检测数据的分辨率提高到一定程度之后,数据驱动模型的准确度等优势将更加明显,此时则需要重新思考和平衡物理模型的地位和作用。

4 结论

本文提出一种基于符号有向图的建筑能耗模型校验方法,将人工校验的知识和逻辑模块化,为人工智能大趋势下结合人工和自动校验双边优势的途径发展提供一种可能。

(1) 制作建筑能耗符号有向图。建筑能耗符号有向图基于实际的建筑内部能耗有关参数相互影响的联系,可以帮助建立对建筑能耗研究的全局认识,同时也是进行建筑能耗模型校验最根本的依据。

(2) 提出建筑能耗模型校验方法。本文提出的校验方法基于建筑能耗符号有向图,通过输入参数的分类筛选,采用“典型日时间表校验法”对模型的时间表参数进行调整和采用“分步分部校验法”对模型的调整类参数进行校验。

以上建筑能耗模型校验方法基于建筑能耗知识建立,并且可借助于计算机编程(本文使用 Python)实现完全的自动化,这就是本文所提供的对接人工校验和自动校验两者优势的“桥梁”。

参考文献

- [1] Reddy TA. Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools. ASHRAE transactions. 2006;112.
- [2] Coakley D, Raftery P, Keane M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. Renewable and sustainable energy reviews. 2014;37:123-41.
- [3] Kim Y-S, Heidarinejad M, Dahlhausen M, Srebric J. Building energy model calibration with schedules derived from electricity use data. Applied Energy. 2017;190:997-1007.
- [4] 《公共建筑节能设计标准 GB 50189-2015》. 2015.

西安地区居住区室外风环境模拟研究

万 怡

(西安建筑科技大学建筑学院, 陕西西安 710055)

[摘 要] 由于居住区建筑密度的增大, 室外风环境成为影响人居环境品质的重要因素, 并关系到行人的舒适性甚至安全问题, 通过软件对居住区风环境进行模拟研究, 以便在建筑设计阶段通过调整建筑群的布局来进行室外风环境的改善。文章通过计算机仿真系统采用计算流体动力学 (CFD) 数值模拟技术和多区域网络模型方法, 配合《绿色建筑评价标准》和相应规范, 对西安地区居住区室外风环境进行了计算机模拟, 对室外行人高度风环境进行定量评估, 针对居住区中行人高度风对建筑外形设计、布局分布影响提出了相应的改进建议。

[关键词] CFD; 居住区; 计算机数值模拟; 风环境分析

0 引言

CFD (计算流体动力学) 是通过计算机数值计算和图像显示, 对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。随着 CFD 技术和计算机技术的发展, 使用计算机对居住区风环境进行模拟研究成为评价居住区规划好与坏的一个必要有效的手段^[1]。CFD 技术方包含 3 个主要环节——建立数学物理模型、数值算法求解、结果可视化输出^[2]。目前 CFD 在应用研究方面主要是研究室内湿度和结露分布、对自然通风的数值模拟 (美国 MIT 和香港大学借助大涡模拟工具研究自然通风问题^[3])、置换通风的数值模拟 (美国 MIT、丹麦 Aalborg 大学和中国清华大学在地板置换通风、座椅送风方面进行研究^[3])、高大空间的数值模拟 (中国清华大学以体育场馆为主的高大空间的气流组织设计及其与空调负荷计算的关系研究^[3])。

文章利用 CFD 应用基础研究的前期成果来研究居住区的自然通风, 对建筑物室外气流组织进行模拟, 并通过对建筑物布局等进行良好规划进而影响建筑物室外流场, 达到最佳流场分布需求^[4]。首先针对居住区建筑室外布局的特点, 使用 Phoenix 软件在计算机中形成简化模型, 在此基础上分析居住区建筑室外流场以及风速度场、风压力场分布, 研究相邻建筑间风环境影响参数, 讨论了建筑物高度、间距以及宽度等因素对于高层建筑室外风环境的影响^[5]。

1 风环境评价方法与依据

1.1 风环境评价方法与依据

在风环境评价中, 风环境的主要感受对象是人。研究表明: 在同时考虑平均风速和脉动风速的情况下, 行人的舒适感与风速之间的关系如表 1 所示。

表 1 行人的舒适感与风速的关系表格^[6]

风速 (m/s)	人的感觉
$V \leq 5$ 舒适	舒适
$5 < V \leq 10$	不舒适, 行动受影响
$10 < V \leq 15$	很不舒适, 行动严重受影响
$15 < V \leq 20$	不能忍受
$V > 20$	危险

调查统计显示: 在建筑物周围行人区, 若平均风速 $V > 5\text{m/s}$ 的出现频率小于 10%, 行人少有抱怨; 频率在 10%~20% 之间, 抱怨将增多; 频率大于 20%, 则应采取补救措施以减少风速。另外, 行人在风速分布不均匀区域活

动时, 若在小于 2m 的距离内平均风速变化达 70%, 即从低风速区突然进入高速区, 人对风的适应能力将大减^[6]。

居住区风环境评价研究主要依据《陕西省绿色建筑评价标准实施细则》^[7] 中有关规划设计阶段改善居住区风环境条款中相关要求。评价标准如下: 场地内风环境有利于室外行走、活动舒适和建筑的自然通风, 评价总分为 6 分, 并按下列规则分别评分并累计:

(1) 在冬季典型风速和风向条件下:

① 建筑物周围行人区风速小于 5m/s, 且室外风速放大系数小于 2.0, 得 2 分;

② 除迎风第一排建筑外, 建筑迎风面与背风面表面压差不大于 5Pa, 得 1 分;

(2) 过渡季、夏季典型风速和风向条件下:

① 场地内人活动区不出现涡旋或无风区, 得 2 分;

② 50% 以上可开启外窗内外表面的风压差大于 0.5Pa, 得 1 分^[7]。

本居住区的风环境模拟分析主要针对以下 3 个内容进行:

(1) 首先对整个规划地块风环境进行模拟, 给出总体风环境评价结论, 筛选内部不利风环境区域。

(2) 针对小区入口、道路节点处进行模拟分析。

(3) 给出居住区中劣势风环境区域的改进建议。

依据甲方提供的规划图纸, 通过现场实地考察及测试, 应用 CFD 相关软件 Phoenix 建立建筑组团模型, 在此次建模过程中只考虑小区内部的风环境, 小区周围暂不考虑。对该项目进行 CFD 数值模拟分析工作, 主要完成了居住区 1.5m 高度处夏季、冬季的风速矢量分布图、风压等值梯度分布图^[8]。

2 实例分析 — 西安某居住区风环境模拟分析

2.1 当地气候介绍

西安气候属暖温带半湿润大陆性季风气候。四季分明, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷少雨雪, 春秋时有连阴雨天气出现。西安市及各郊县年平均气温 13.1 至 13.4℃。年极端最高气温 35 至 41.8℃; 极端最低 -16 至 -20℃。全年以 7 月最热, 月平均气温 26.1 至 26.3℃, 月平均最高气温 32℃左右; 1 月最冷, 月平均气温 -0.3 至 -1.3℃, 月平均最低气温 -4℃左右, 年较差达 26 至 27℃。

《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736-2012) 中给出了西安冬夏两季平均风速, 最多风向风速等信息, 见表 2^[9]。

表 2 西安风向、风速及频率

参数	冬季		夏季	
	C	ENE	C	ENE
最多风向	C	ENE	C	ENE
最多风向的频率 (%)	41	10	28	13
平均风速 (m/s)	2.5	2.5	2.5	2.5

2.2 数值计算条件

(1) 计算区域和观测面设置

由于在实际生活中, 建筑物往往和其它周边建筑是相邻的, 其周围的风场通常会受到周边相邻建筑物的影响。计算范围主要包括 1#~18# 楼和总平面图中的周围建筑物; 竖直方向主要包括各主要建筑高度以及延伸至距离地面 250m 的空间范围, 观测面为规范要求的人员活动区域距地面 1.5m 高平面。

(2) 网格设置

为保证计算结果准确, 本次模拟计算网格对建筑及其周边进行局部加密, 模型和网格划分情况分别如图 1 和图 2 所示, 计算网格总数为 4443439。

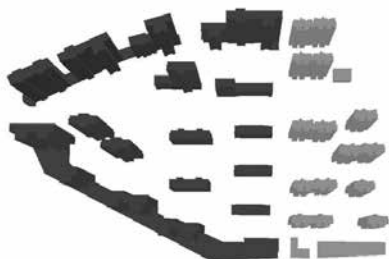


图 1 项目及周边建筑模型

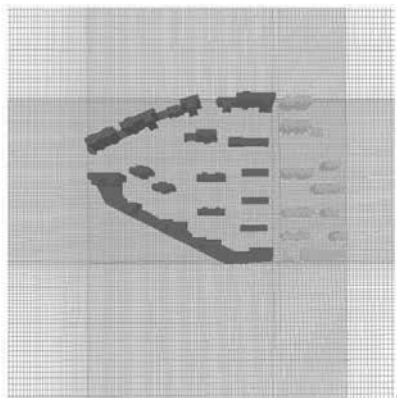


图 2 网格划分

2.3 风环境分析评价及建议

2.3.1 夏季风环境模拟评价

夏季风环境模拟主要评价露天公共活动空间的风向、风速是否适宜人们户外活动的散热。图 3 中黄色区域形成了居住区的风口, 风速相对较大, 从图中右侧风速数据上可知此风口的风速是周围风速的 2 倍以上, 风速适宜, 比较适合夏季人们在此区域进行户外乘凉。

图 3 是在 2.5m/s 的东北偏东风场下, 项目场地内室外 1.5m 高度处的风速云图。

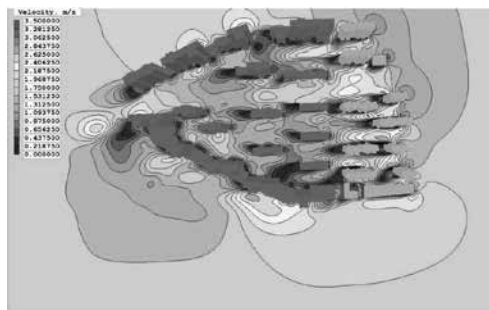


图 3 夏季风速云图 (1.5m 高度处)

通过以上居住区夏季风环境模拟分析可以得出, 夏季居住区整体气流分布合理, 各处行人高度平均风速在 2.8m/s 以下, 整体通风状况良好, 未出现影响污染物消散的漩涡和无风区, 满足人们舒适性要求。

2.3.2 冬季风环境模拟评价

冬季风环境模拟主要评价交通要道上是否存在不利风场, 人们公共活动区域是否充分避风。图 4 为在 2.5m/s 的东北偏东风场下, 项目场地内室外 1.5m 高度处的风速矢量图。室外最低和最高风速出现在建筑物的背风处和前排建筑迎风墙角处, 周边建筑遮挡了部分的风量, 计算区域内风速范围约在 0.1~2.8m/s。项目周边人行区的风速基本在 2.5m/s 以内, 小于 5m/s。但是图 4 中黄色区域容易形成风口, 冬季寒风对小区入口影响很大, 大部分入口恰好处在风口, 会给人们的日常生活带来不便, 并会对居住区人们的出行造成一定的影响。

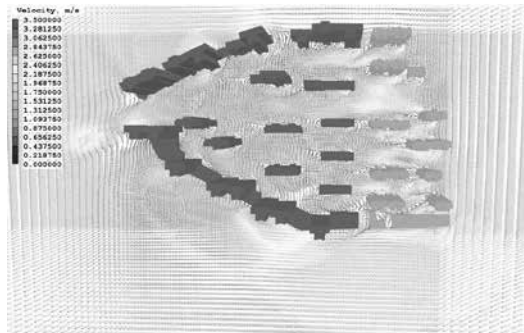


图 4 冬季风速矢量图 (1.5m 高度处)

图 5 为在 2.5m/s 的东北偏东风场下, 项目场地内室外 1.5m 高度处的风速放大系数云图, 从图中可以看出区域内风速放大系数约在 0~1.5 之间, 满足标准规定的不大于 2 的要求。

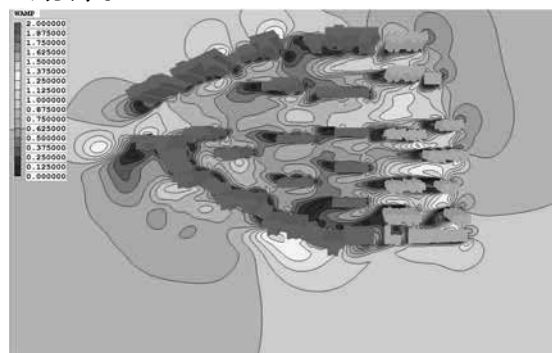


图 5 冬风速放大系数云图 (1.5m 高度处)

3 风环境建议

西安地区冬夏两季最多风向和风速一致,盛行东北偏东风,因此居住区建筑布局应遵循东或北一侧低、其他三侧高,呈环状布局;夏季小区内不容易出现风影区,由于下沉横风作用,建筑之间风速反比建筑两端大,且建筑前后易于形成风压差,有利于自然通风。

建筑冬季东北侧高楼可以阻挡寒风入侵(图6),东北高大建筑有力阻挡寒风来袭,可使居住区内风速低至无风,除东北高楼前后风压差较大外,居住区内建筑前后风压差很小,不易形成冷风渗透,有利于围护结构冬季保温。

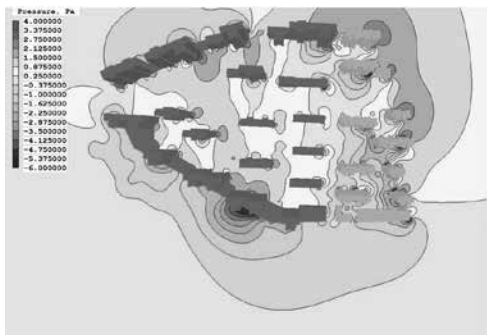


图6 风压云图(1.5m高度处)

通过以上模拟分析可知:我国西安地区或者北方严寒及寒冷地区居住区的整体规划布局应根据当地风气候条件进行合理的规划布局(阶梯状或环状),避开冬季寒风,

利用夏季季风。小高层、高层北立面应尽量避免内凹面或凹角,应避免小高层、高层北向的环状、漏斗状建筑布局。适度控制小高层、高层南向环状、漏斗状布局,以及南立面出现较大凹角或凹面。^[8]

参考文献

- [1] 王菲,肖勇全.应用PHOENICS软件对建筑群风环境的模拟和评价[J].山东建筑工程学院学报,2005,20(5):39-42.
- [2] 杨丽.居住区风环境分析中的CFD技术应用研究[J].建筑学报,2010,4:5-9.
- [3] 王福军.计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [4] 刘朔.高层建筑室外气流场的数值模拟研究[D].哈尔滨,哈尔滨工业大学,2007.
- [5] 姚雪松,冷红,庞瑞秋.基于改善风环境的高层住区户外空间优化策略[J].中华建设,2012(10):108-110.
- [6] 李云平.寒地高层住区风环境模拟分析及设计策略研究[D].哈尔滨,哈尔滨工业大学,2007.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.《绿色建筑评价标准》(GB/T50378-2014)[Z].2015.01.01.
- [8] 牛盛楠,张欣宜,黄成,辛振宇.天津地区居住区采光与室外风环境模拟研究[J].山东建筑大学学报,2013(1):13~17.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736-2012)[Z].2012.10.01.

西安地区别墅中庭天然采光设计模拟研究

郑 婷, 罗智星, 杨 柳, 刘加平

(西安建筑科技大学, 西安 710055)

[摘 要] 以西安地区某别墅设计方案为例, 通过对其窗户的位置、窗户的大小、窗户的形状以及是否有遮阳等变量进行全年动态模拟软件 Daysim 分析, 并以采光系数 DF (Daylight Factor)、采光量 DA (Daylight Autonomy) 和有效照度 UDI (Useful Daylight Illuminance) 为评价指标, 为建筑师在设计初期进行住宅的中庭采光设计提供参考依据。

[关键词] 中庭采光; DF; DA; UDI; daysim 模拟

0 引言

现在, 随着城市用地的紧张及建筑技术的发展, 大跨度、大进深的空间成为了很多建筑的常态, 人们追求空间的最大利用化, 同时也需要满足舒适度的要求, 设计合理的中庭成为解决此类问题的有效手段之一。其中, 中庭的采光质量不仅影响建筑室内环境的品质, 而且影响人们的健康。

目前来说, 国内对于中庭天然采光的研究较多, 但是研究大部分在定性分析和案例研究上, 在光环境评价中依旧参照传统的评价指标, 很少从全年动态光环境评价指标入手, 对中庭的光环境进行定量的研究。其中对于办公、商业建筑的中庭采光研究较多, 鲜有针对住宅中庭的采光设计研究。

本文提到的案例较为特殊, 地点位于寒冷地区, 是一座具有双向中庭的别墅。作者根据中庭设计的常用手法设计了五个方案进行对比研究^[1], 用 daysim 软件进行全年动态模拟研究, 以窗户的位置、窗户的大小、窗户的形状以及是否有简易动态遮阳装置为变量, 以采光系数 (DF)、采光量 (DA) 和有效照度 (UDI) 为评价指标^[2], 为建筑师在设计初期进行住宅的中庭采光设计提供参考依据。

1 案例概况

西安位于关中平原中部, 属暖温带半湿润大陆季风气候, 冬季寒冷、风小、多雾、少雨雪; 夏季炎热多雨, 伏旱突出, 多雷雨大风。全年日照时间 1500h 左右, 属于 IV 类光气候区, 室外设计照度 13500lx, 光气候系数 K 值为 1.10。

此别墅位于西安市南郊区域, 总建筑面积 333.2m², 占地面积 197.4m², 一层层高 3900mm, 二层层高 3000mm, 坐北朝南, 建筑有两层, 一层主要是公共空间, 有客厅、中庭、餐厅、厨房、书房、客房、设备间、楼梯间等, 二层主要为私密空间, 有一个带更衣室的主卧、楼梯间、和两个次卧, 屋顶是上人屋面。

2 研究方法

2.1 模拟软件

本文将选择全年动态模拟软件 Daysim, 对此住宅中庭的光环境进行多方案对比模拟分析。

Daysim 由加拿大 NRC-IRC 的 Christoph Reinhart 等开发^[3], 利用 Radiance 软件作为计算核心, 采用 Perez 全气象条件天空模型、Radiance 的蒙特卡洛采样和反向的光线追踪算法。可利用全年的太阳辐射数据, 通过设定各种照明控制模式计算全年的照明能耗。该软件没有建模界面, 但可以读入一些常用软件生成的文件, 如 3DMAX、AutoCAD、SketchUp 和 Ecotect 等, 已有大量研究表明此软件的准确性和有效性^[4]。

2.2 量化指标

采光系数是静态评价指标, 它表示室内给定水平面上某一点由全阴天天空漫射光所产生的照度和同一时间同一地点, 在室外无遮挡水平面上由全阴天天空漫射光所产生的照度的比值, 其表征了全年中最不利的天气条件下的采光情况, 也作为采光标准中的规定指标^[5]。对于本案例来说, 《建筑设计采光标准》GB 50033-2013 中规定: 住宅建筑的卧室、起居室 (厅) 的采光不应低于采光等级 IV 级的采光标准值, 侧面采光的采光系数标准值为 2.2%, 顶部采光的采光系数标准值为 1.1%, 室内天然光照度不应低于 300lx。此标准中的采光系数标准值和室内天然光照度标准值均为参考平面上的平均值。

采光量 DA (Daylight Autonomy) 定义为建筑中的某一点全年工作时段内仅靠天然采光就可达到最小设计照度要求的时间百分比, 采光量值越高, 建筑的采光性能就越理想, 但是, 由于其值只是个临界值, 没有考虑到室内天然光过高的情况; 连续采光量 DAcon (Continuous Daylight Autonomy) 是 Roger 提出的一个较新的概念, 在天然光照度小于标准照度时, 使用权衡系数的方式来考虑这种不满足程度。例如本案例中设计最小照度值是 300lx, 实测某时刻室内照度值是 120lx, 计算出的权衡系数即为 120/300=0.4, 因此本指标可以体现满足或不满足采光要求的程度。

有效照度 UDI (Useful Daylight Illuminance) 是 Mardaljevic 和 Nabil 于 2005 年提出的基于工作面照度信息的一个动态天然采光性能评价指标^[6], 当室内天然光照度处于一定范围内, 可以满足工作者的正常视觉作业, 可以称之为有效, 一般认为是 100~2000lx, 即 UDI₁₀₀₋₂₀₀₀; 当室内天然光照度低于 100lx 时, 即 UDI₁₀₀, 可认为无法满足最基本的视觉工作需要, 这时需要有一定的人工照明进行补充; 当室内天然光照度超过 2000lx, 即 UDI₂₀₀₀, 就会对视觉工作有影响, 或者是产生视觉不适感。

表 1 本研究使用的住宅中庭光环境评价标准

指标	符号	参考量
采光系数 (侧面采光)	DF	2.2%
采光系数 (顶部采光)	DF	1.1%
采光量	DA	DA > 300lx
连续采光量	DAcon	DAcon > 300lx
有效照度	UDI	UDI > 100lx/100lx < UDI < 2000lx/UDI > 2000lx

本文中, 讨论结果时, 均采用统一的标准。在每一个评价指标下, 统计每一种工况在全年工作时段内达到所要求的照度标准的时间百分比。其中 DA_{con} 值代表满足或不满足照度标准的权衡系数。

2.3 建模与参数设置

寒冷地区住宅可利用天然光时间为 08:00~18:00, 在 ecotect2011 中建立模型, 一层中庭层高 3900mm, 二层中庭层高 3000mm, 中庭尺寸 4000mm×4000mm, 用 Ecotect 结合 daysim3.1 进行全年动态光环境模拟, 其中, 最小照度值设置为 300lx。

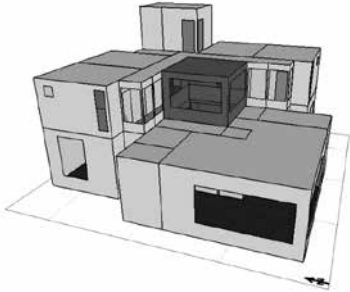


图 1 建筑模型 (中间深色区域是中庭部分)

表 2 Daysim 模拟全局设置及其他基准参数设置表

Daysim 全局设置		其他基准参数设置	
天空模型	Perez 天空模型	遮阳方式	动态遮阳
气象数据	CHN_Shaanxi.Xian.570360_CSWD.epw	中庭面积	16m ²
地面反射率	0.31	玻璃类型	low-E 中空玻璃
墙面反射率	0.84	玻璃尺寸	6low-E+12A+6C
顶棚反射率	0.75	玻璃颜色	无色
模拟步长	60min	玻璃可见光透射比	0.76
模拟时间	08:00~18:00	玻璃可见光反射比	0.11
照明功率密度	6w/m ²	玻璃太阳光直接透射比	0.47
参数平面高度	750mm	玻璃太阳光总透射比	0.54
是否有人使用	是	玻璃遮阳系数	0.62
采光方式	天窗、侧窗组合	玻璃光热比	1.41
网格总数	1600	网格大小	100×100mm

注: 墙面、地面和顶棚分别以常见的白色乳胶漆、浅色地砖和白色粉刷为例。

2.4 模拟方案

本设计方案朝向和平面图已经确定, 所以对于中庭的采光方案优化, 集中于以窗户的位置、窗户的大小、窗户的形状以及是否有简易动态遮阳装置为变量, 改变四种设计参数来评价对采光质量的影响。

基准方案的中庭的高度为 6900mm, 开窗形式为二层南向和西向有横向侧窗, 对于中庭的采光属于高侧窗, 窗地面积比为 69%, 无天窗, 平均采光系数是 7.19%, 《建筑采光设计标准》(GB 50033-2013) 中规定, 采光系数值不宜高于 7%, 所以, 对此方案进行改良设计。

3 模拟结果与讨论

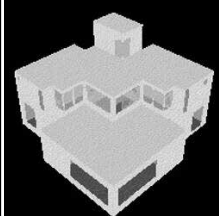
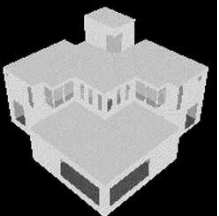
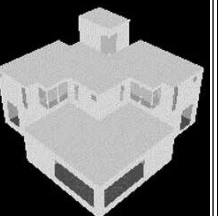
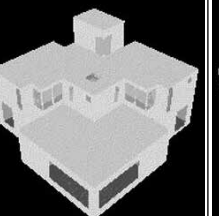
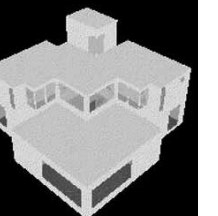
由于方案都是双侧采光或者三侧采光, 为了更好地说明各指标在空间上的分布特征, 则坐标原点为中庭西南角点, 横坐标为原点两边对角线上的网格交点。其中, 方案五在方案一的基础上增加了简易动态遮阳装置, 且照明控制也为主动式, 即根据环境照明情况控制人工照明设施, 在早晨打开遮阳, 而白天则视情况部分关闭以避免直射阳光。

模拟结果显示, 同样的工况下, 传统的 DF 采光评价指标与动态光环境评价指标差别较大。采光空间分布特征上, DF 与 DA、DA_{con}、UDI₂₀₀₀ 的变化趋势相同, 但是 UDI₁₀₀、UDI₁₀₀₋₂₀₀₀ 却不同。

对于指标 DF 在空间上的分布特征, 五种方案都满足 DF 平均值大于 2.2% 的标准, 且近窗处 DF 值较小, 因为一层和二层的室内外构件对自然光有遮挡, 远窗处的 DF 值也较小, 这也符合人们的日常感知。方案一与方案五的 DF 平均值都高于其他方案, 方案五与方案一相比, 增加了简易动态遮阳装置, 但是其 DF 值的变化趋势基本一致, 可知简易动态遮阳装置对采光系数的影响很小。方案三的 DF 平均值为 2.2%, 开窗面积比为 14%, 刚好满足采光标准。方案四在方案三的基础上增加了天窗, 提高了 DF 平均值。方案二与方案四的 DF 值均在 2%~5% 之间, 较为理想。

对于指标 DA 和 DA_{con} 在空间上的分布特征, 同一种工况, 随着距离的增加, DA 和 DA_{con} 的差别不大, 各方案的 DA 和 DA_{con} 基本都在 50% 以上, 只有方案五的

表 3 多方案设计参数对照表

参数变量	方案一 (基准方案)	方案二	方案三	方案四	方案五
方案形式					
窗户形式	西向与南向皆为横向侧窗	西向与南向皆为竖向条窗	西向与南向皆为方窗 + 竖条窗	西向与南向皆为方窗 + 竖条窗, 有天窗	西向与南向皆为横向侧窗
窗户尺寸	3300×1800×2	500×1800×3×2	500×1800×2、600×600×2	500×1800×2、600×600×2、1200×1200	3300×1800×2
有无天窗	无	无	无	有	无
有无遮阳	无	无	无	无	简易动态遮阳装置
窗地面积比	69%	31%	14%	14% (侧窗)、7% (天窗)	69%

注: 简化动态遮阳装置: 在此模式下, Daysim 假定建筑使用通风百叶, 并采用简化的遮阳计算模型模拟通风百叶对于全年自然采光的影响。当遮阳关闭时, 直接使用当前模型进行模拟, 当遮阳开启时, 则假定所使用的通风百叶能正好挡住直射光并允许 25% 散射光进入室内。

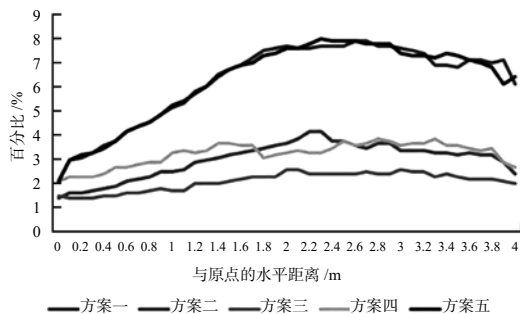


图2 采光系数 DF

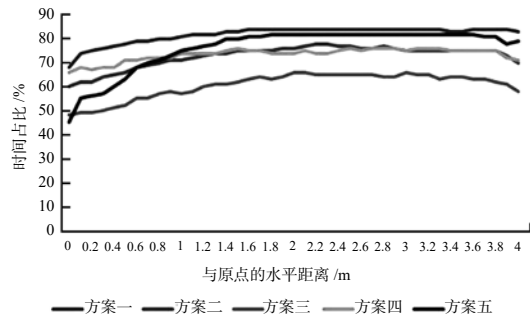


图3 采光量 DA

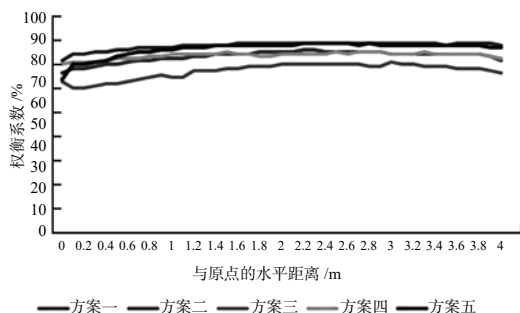


图4 连续采光量 DAcon

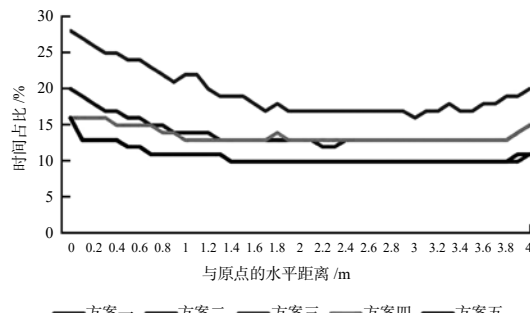


图5 UDI100

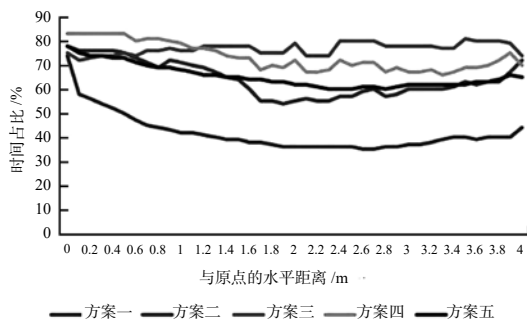


图6 UDI100-2000

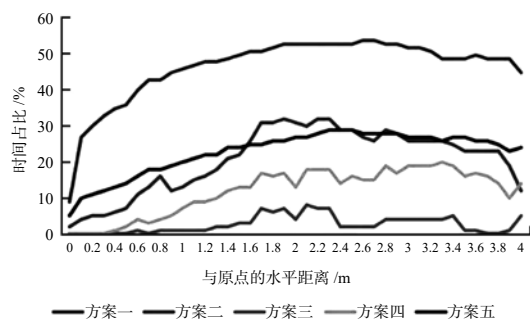


图7 UDI2000

近窗处的 DA 下降到 46%。仅此两项指标评价, 方案一的 DA 范围是 69%~85%, 平均值为 83%, 即全年中平均有 83% 的时间可以满足最低照度值, 其 DA_{con} 的范围是 81%~89%, 平均值为 88%, 即全年中最不利情况下, 照度值也可以达到 264lx, 采光效果最佳, 其次是方案五、方案四、方案二、方案三。

对于有效照度 UDI 在空间上的分布特征, 各方案近窗处和远窗处的 UDI_{100} 和 $UDI_{100-2000}$ 均较高, UDI_{2000} 较低。其中方案三 $UDI_{100-2000}$ 随距离变化差别不大, 且范围在 73%~82%。方案五与方案一相比, $UDI_{100-2000}$ 提高了 24%, UDI_{2000} 降低了 24%, UDI_{100} 基本不变, 全年可利用天然光时间比增加, 采光效果明显得到改善。方案二与方案一相比, 窗地面积比减小了 38%, 同时改变了窗户形状, 其 $UDI_{100-2000}$ 增加了 24%, UDI_{2000} 减少了 28%, UDI_{100} 增加了 4%, 其改善效果略低于方案五。方案四与方案三相比, 屋顶增加了平天窗, UDI_{100} 降低了 6%, $UDI_{100-2000}$ 差别不大, UDI_{2000} 降低了 8%, 采光效果也得到一些改善。仅有效照度指标评价采光质量, 方案三的采光效果最佳, 其次是方案四、方案五、方案二、方案一。

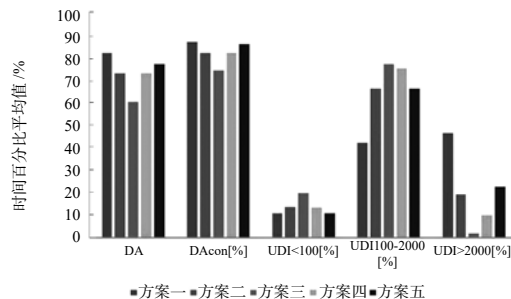


图8 不同方案不同采光标准平均值对比

图 8 中, 将分析网格中 1600 个数据做平均值, 得到中庭空间各项评价指标的平均水平。综合各项指标来看, 方案四 DA 平均值为 74%, DA_{con} 平均值为 83%, $UDI_{100-2000}$ 平均值为 76%, 采光效果最佳, 方案五、方案二的采光效果也较为理想。

3 结论

本文在方案的设计阶段, 基于中庭采光设计方法, 通过改变其窗户的位置、窗户的大小、窗户的形状、以及

是否有简易遮阳装置等变量产生了五种方案,进行全年动态模拟软件 Daysim 分析,并在传统采光系数评价指标中引入了动态光环境评价指标 DA, DA_{con} 与 UDI。在模拟过程中,静态评价指标采光系数 DF 与动态评价指标评价结果指向有所不同,例如方案一的 DF 平均值很高,但是实际全年可利用天然采光 $UDI_{100-2000}$ 时长并不理想,因此,在评价中庭空间的天然光环境时,使用动态光环境指标代替传统 DF 有其必要性。而且,在建筑方案设计阶段,通过模拟方法进行多个采光方案的对比研究,并选择合适的评价指标综合分析,可以有效地指导建筑师进行合理的设计,并提高工作效率。

通过以上模拟分析,对此别墅的中庭采光设计提出合理的建议。大面积的高侧窗设置动态遮阳后可以有效改善其采光质量,增加了实际全年可利用天然采光 UDI 时长,也减少了出现眩光的几率。将大面积的高侧窗改为竖向窄窗,减小了窗地面积比,但增加了实际全年可利用天然采光 UDI 时长,同样改善了中庭的光环境。在满足最低采光系数 DF 标准值的情况下,实际全年可利用天然采光 UDI 时长也较为理想,但是低于 100lx 的照度的时长增多,且采光量 DA 会显著下降,可能导致空间中部分时间段出现照度不满足标准值的情况。增加天窗可以有效地提高光环境的各项评价指标,是提高中庭采光质量的有效手段。

参考文献

- [1] 杨江,吴江滨.寒冷地区采光中庭设计方法解析.工业建筑 2013 年第 43 卷增刊.
- [2] 吴蔚,刘坤鹏.浅析可取代采光系数的新天然采光评价参数[J].照明工程学报,2012,23(2):1-7.
- [3] Daysim 软件使用手册[G].
- [4] 罗涛,燕达,赵建平等.天然光环境模拟软件的对比研究[J].建筑科学.2011(10):1-6.
- [5] 建筑采光设计标准:GB 50033-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [6] NABIL A,MARDAJEVIC J.Useful daylight illuminance:A new paradigm for assessing daylight in buildings[J].Lighting Research and Technology,2005.
- [7] 刘昆明.全年动态模拟软件 DAYSIM 在天然采光设计中的适用性研究[D],南京:南京大学,2011.
- [8] 项路遥,倪蔚超,吴恩.基于全年动态光环境模拟条件的典型阅览空间参数设计研究,照明工程学报,Jun.2017. Vol. 28 No. 3.
- [9] 云朋.建筑光环境模拟,北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [10] 山如黛,席明明,严云波,夏晓东.基于参数化的天然采光评价指标的对比研究——以沈阳地区典型办公空间为例,建筑科学,Vol. 32,No.12 Dec. 2016.

草砖民居节能性模拟分析

徐旭东, 杨 柳, 杨晶晶

(西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710005)

[摘 要] 在全球环境问题越来越严重的背景下, 草砖因其节能、生态性被广泛运用于世界各地的乡村建筑中。为了解草砖建筑在中国五大气候区的节能性, 本文选取我国当今典型新型农宅为研究对象, 利用能耗模拟软件 DesignBuilder、隔热计算软件 Kvalue 建立模型, 对比分析了五大气候区代表城市中草砖建筑与普通砖房的建筑使用能耗、居住空间热舒适性及墙体热工性能。结果表明, 与传统砖房相比, 草砖建筑保温性能优异, 隔热性能一般; 能显著降低取暖能耗, 提升室内热舒适度。

[关键词] 草砖; 民居; DesignBuilder; 能耗模拟; 保温隔热

0 引言

长期以来, 我国广大农村的住宅围护结构, 均采用常规材料。尤其西部贫困地区农村, 甚至城中低层住宅, 依旧存在大量 240mm 清水砖墙, 且无任何保温措施, 从而导致住宅能耗高, 热舒适要求难以满足。

草砖建筑是以机械压力捆扎的麦草秸秆为构造性或非构造性墙体而建造的房屋, 具有节能、环保、生态、健康的优点, 尤以节能性能最为突出。它最早起源于 20 世纪初的美国内布拉斯加州, 目前正在加拿大、法国、澳大利亚、英国、荷兰、中国、蒙古、阿根廷、墨西哥和新西兰等 40 多个国家推广应用, 近年来, 国内外学者针对草砖建筑热工性能^[2]、防潮防霉^[3]、防火^[4]、减碳潜力^[5]展开了一系列的研究, 并建造了数以万计的优秀草砖住宅。

1999 年起, 中国 21 世纪议程管理中心与安泽国际救援协会合作, 在我国北方农村地区开始实施“节能草砖房建设与示范工程”。经过数十年的发展, 全国各地的广大农村涌现出一大批草砖民居。墙体材料的革新既是保护土地资源、节能减排、改善环境的重要措施, 同时也是中国村镇可持续发展规划研究的重要内容^[6]。

1 草砖建筑概况

草砖是将农作物的干燥秸秆经草砖机冲击挤压并捆绑而成, 其三维尺寸可根据需求调整。长多为 600mm~1000mm, 宽 300mm~500mm, 高 300mm~500mm, 密度 90kg/m³~130kg/m³。其生产工艺简单、设备投资少, 可直接作为保温材料填充于框架结构中。

我国居住建筑节能设计标准规定, 夏热冬冷地区居住建筑外墙传热系数限值为 1.0W/m²·K, 严寒及寒冷地区居住建筑外墙传热系数限值为 0.25W/m²·K。干草的导热系数 λ 仅为 0.09W/m·K, 理论上 350mm 厚的抹灰草砖墙传

热系数便可达到 0.25W/m²·K, 保温性能是普通红砖墙的 6 倍。

草砖建筑出现之初, 由草砖块独自承重。目前, 新型的草砖建筑大多采用钢筋混凝土框架、木框架、轻钢框架承重, 以草砖块填充。先进的有英国 Modcell 公司和 University of Bath 合作研制的装配式草砖墙^[7]。

2 建筑性能对比分析

2.1 模拟软件介绍

DesignBuilder 是专门针对 EnergyPlus 而开发的用户图形界面软件, 包括了所有 EnergyPlus 的建筑构造和照明系统数据的输入部分, 可对建筑采暖、制冷、照明、通风、采光等进行全能耗模拟分析和经济分析。DesignBuilder 可以将复杂的建筑迅速模型化, 将建筑划分为不同区域, 对围护结构进行参数设置。其采用简单易用的 Open GL 三维固体建模器, 可以对建筑及其构件的详细尺寸进行可视化掌控。可输出的模拟结果包括: (1) 建筑能耗, 表示为消耗的能源或者电能; (2) 室内空气温度、湿度、平均辐射温度; (3) 舒适度, 包括温度分布曲线以及 ASHRAE 舒适标准; (4) 通过建筑围护结构的传热量; (5) 供热和制冷负荷等。

Kvalue 是中国建科院建筑环境与节能研究院专为《民用建筑热工设计规范》GB 50716-2016 隔热计算开发, 可以用来判定墙体热工参数是否满足规范要求, 也可以用来显示室外综合温度、内外壁面温度、围护结构衰减倍数和延迟时间。

2.2 模型设置

2.2.1 研究用模型建构

本文选用我国农村典型二层住宅为研究对象, 其建筑平面图如图 1 所示。建筑总开间 11.1m, 总进深 8.6m, 总

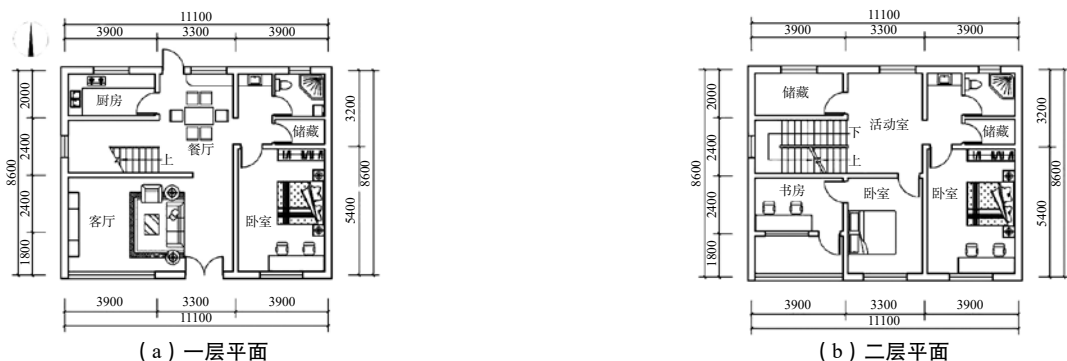


图 1 建筑平面图

建筑面积 190m²，层高 3.3m，坡屋顶。

2.2.2 室内热环境参数设置

参考《农村居住建筑节能设计标准(GB/T 50824-2013)》^[9]中规定，本研究将冬季卧室、起居室、其他房间采暖温度分别设置为 18℃、16℃、14℃，采暖起始温度为 16℃、14℃、12℃，当低于该温度时启动供暖。夏季卧室、起居室制冷温度设置为 26℃，制冷起始温度为 28℃，其他房间不制冷。

2.2.3 围护结构参数设置

根据各地区气候条件的不同，各气候区主要围护结构构造及参数设置见表 1。其中关于砖混墙体厚度的设置，因为气候条件的不同，严寒地区砖墙多为 490mm，而在寒冷地区 370mm 和 240mm 均有，为了和草砖墙体厚度设为一致，因此取 370mm。而在其他气候区，240mm 的砖墙最为普遍，因为设定为 240mm。而对于草砖墙体的设置，相关文献中规定墙体厚度最少为 330mm，因此在严寒地区草砖厚度为 450mm，其他地区均为 350mm。

表 1 外墙及屋顶参数设置

热工气候区	外墙及屋面	传热系数 W/(m ² ·K)
严寒地区	25 石灰抹灰 + 450 草砖 + 25 石灰抹灰	0.3
	传统 490 砖墙	1.18
	屋面	0.6
寒冷地区	25 石灰抹灰 + 350 草砖 + 25 石灰抹灰	0.38
	传统 370 砖墙	1.45
	屋面	0.45
夏热冬冷地区	25 石灰抹灰 + 350 草砖 + 25 石灰抹灰	0.38
夏热冬暖地区	传统 240 砖墙	1.89
温和地区	屋面	0.45

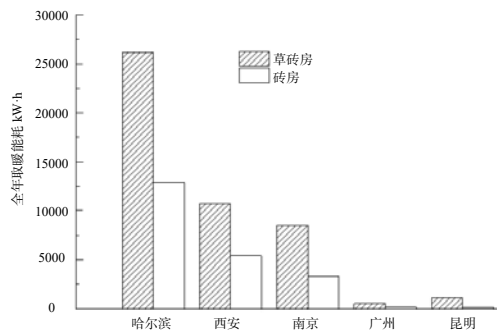


图 2 全年取暖能耗对比

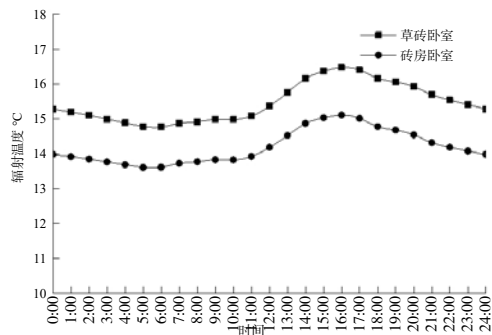


图 4 西安地区室内辐射温度对比

2.2.4 室内设备及人员活动量

为研究建筑本身围护结构对能耗的影响，室内空间的 Activity 参数，即室内电器功率、运行时间表、人员活动量，均选择软件内置参数文件：Residential spaces。

2.3 建筑能耗分析

选取五大气候区代表城市哈尔滨，西安，南京，广州，昆明，导入其气象参数，模拟对比分析五大城市的全年全暖能耗和全年制冷能耗。模拟结果如图 2、3 所示。由图 2 可以看出，在严寒、寒冷地区，草砖建筑对比砖混建筑，采暖能耗均可节约 50% 的采暖能耗，而在夏热冬冷地区仍然可节约 50% 左右的采暖能耗。一方面是因为草砖本身保温性能良好，另一方面限于墙体构造的要求，草砖墙体厚度大于砖混墙体厚度。从图 3 可以看出，不管是在炎热的广州还是严寒的哈尔滨，草砖的隔热性能均不显著，主要原因应该在于草砖属于轻质材料，蓄热能力较低，会造成室内温度波动较大，墙体延迟较长，室内最高温度出现的时间较早，不利于利用夜间冷空气降温，从而增加部分制冷能耗。因此虽然草砖墙体能阻挡室外热量通过传热作用进入室内，但其隔热效果仍不太理想。

2.4 室内热环境分析

辐射是一种对人体更直接、更快速的热交换方式，对人体的热损失和舒适状态影响相当大。为考察草砖建筑对室内热环境的改善作用，本文模拟了大寒日哈尔滨、西安地区的二层东侧卧室辐射温度变化，结果如图 4、5 所示。由模拟结果可知，在室内空气温度相同的情况下，草砖墙体可提高环境辐射温度 1.2℃~2℃，提升了居住的舒适性。

2.5 墙体隔热性能分析

选取广州地区南向自然通风房间，相同厚度的草砖与黏土砖墙进行对比，运用 Kvalue 软件计算室内外双向波

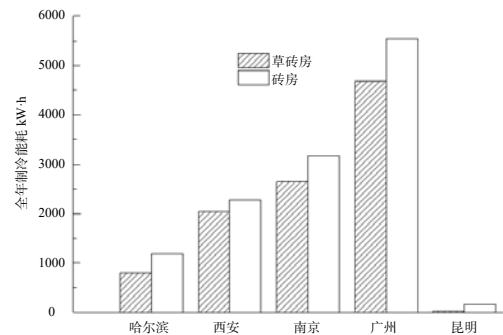


图 3 全年制冷能耗对比

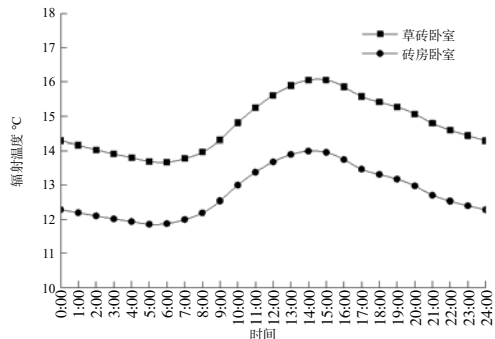


图 5 哈尔滨地区室内辐射温度对比

作用下的内表面温度变化、衰减和延迟时间。墙体构造见表 2。

表 2 墙体构造参数输入

墙体类型	材料	厚度 mm	密度 kg/m ³	导热系数 W/(m·K)	比热容 kJ/(kg·K)
草砖墙	石灰砂浆	20	1800	0.93	1.05
	草砖	350	130	0.18	1.2
	石灰砂浆	20	1800	0.93	1.05
砖墙	石灰砂浆	20	1800	0.93	1.05
	黏土砖	350	1800	0.81	0.88
	石灰砂浆	20	1800	0.93	1.05

温度输出结果如图 6 所示。在室外综合温度一定时，草砖墙外表面、内表面温度波动均大于普通砖墙。草砖墙热惰性指标、衰减倍数分别为 3.89、8.49，低于砖墙的 4.89、16.39；因此轻质草砖墙抵抗温度波动能力较普通砖墙要差。

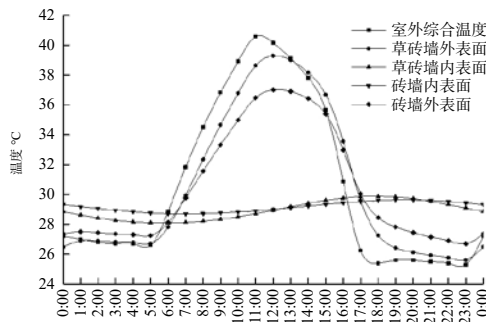


图 6 壁面温度变化曲线

3 结论

本文借助 DesignBuilder、Kvalue 模拟计算软件，对比分析了不同气候区的新型建草砖建筑的热工性能，得出以下结论：草砖作为建筑材料保温效果显著，适用于我国

北方严寒及寒冷地区，理论上可减少 50% 以上取暖能耗，室内舒适度优于传统建筑；而在温和地区、夏热冬暖地区，与普通砖墙对比，草砖墙隔热效果不明显、抵抗双向热作用能力较差。

草砖建筑的运用对节约农村居民采暖开支、缓解环境压力起到一定作用，具有推广价值以及进一步的研究价值。给严寒寒冷地区改善农村居住条件提供了思路，给新建农宅以及现有农宅改造提供了实际的节能建议。

参考文献

- [1] 刘婷婷, 余自若, 杨雷. 秸秆建筑 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007:15.
- [2] F. D'Alessandro, F. Bianchib, G. Baldinellc, et al. Straw bale constructions: Laboratory, in field and numerical assessment of energy and environmental performance [J]. Journal of Building Engineering, 2017(11):56–68.
- [3] Kyle Holzhuetter, Koji Itonaga. An Evaluation of WUFI-Bio to Predict Mold Growth in Straw Bale Walls in Japan [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2017(5):357–362.
- [4] 王礼, 史毅, 全玉. 非承重草砖墙体的耐火性能试验分析 [J]. 中国安全科学学报, 2011,21(11):62–66.
- [5] Alejandro, D. González. Energy and carbon embodied in straw and clay wall blocks produced locally in the Andean Patagonia [J]. Energy and Buildings, 2014(40):15–22.
- [6] 邸芃, 耿娇, 刘兰斗. 秸秆节能墙体的应用研究 [J]. 工业建筑, 2011,41(5):57–59.
- [7] Katharine Wall, Christopher Gross, Pete Walker, et al. Development and testing of a prototype straw bale house [J]. Construction Materials, 2012, 165(6):377–384.
- [8] 陈二松. 上海某多功能体育馆空调系统夏季能耗模拟与节能探讨 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [9] GB/T 50824–2013, 农村居住建筑节能设计标准 [S], 2013.

基于能耗模拟的不同地域建筑能耗分布特征研究

白鲁建, 焦婷婷

(西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055)

[摘要] 基于地域气候环境进行建筑节能设计是提高建筑节能性的途径之一。研究采用模拟分析的方法通过对比各地区建筑能耗分布特征来反映地域气候环境对建筑能耗的影响, 从而为建筑节能设计措施的应用提供更加直观地指导。研究发现东北地区冬季通风失热量最大, 而东南沿海地区部分城市全年通风换气得热量要明显高于失热量。在全年制冷负荷中的显热与潜热负荷分布状况方面, 从西北至东南沿海潜热负荷逐渐成为全年制冷负荷中的主要构成部分。

[关键词] 建筑节能; 能耗模拟分析; 建筑能耗分布

0 引言

建筑能耗与建筑节能设计均与地域气候特征有着密不可分的关系^[1,2]。随着我国近几十年来社会经济的快速发展以及人民生活水平的提高, 居住建筑乃至办公建筑能耗量均呈现快速增加地趋势^[3]。中国建筑节能年度发展研究报告的数据显示, 截止 2014 年我国建筑能源消耗量已经占到了全国能源消耗总量的 32%^[4]。为实现社会的可持续发展, 建筑节能形势日趋严峻。

自 20 世纪 70 年代以来, 建筑节能理念在人们的意识中逐渐提高。不少新的建筑节能技术和建筑节能理论被提出, 如被动式建筑设计, 近零能耗建筑设计以及零碳排建筑设计等^[5-7]。这些建筑节能技术和理论既包含有针对建筑围护结构的节能技术创新也包含有暖通空调等建筑设备的节能技术创新。但是不同的建筑节能技术的应用均对外部气候环境有着一定的要求, 如被动式建筑设计中的蒸发降温技术^[8]、蓄热降温技术^[9]、空调节能器的应用^[10]等。因此, 充分了解地域气候特征对提高建筑的节能率具有重要意义。

近些年来, 不少学者均采用气候区划的方式来分析我国不同地域的气候特征以及可以采用的建筑节能技术和方法, 如付祥钊和张慧玲等人建立的建筑节能气候区划^[11,12], Joseph C. Lam 等人建立的被动式设计气候区划^[13]等。这些气候区划的建立为建筑节能设计提供了更为直观的指导。然而, 这些区划大多是通过分析与建筑节能技术有关的气候要素来建立的, 不能直接体现建筑能耗的地域分布特征。近几十年来建筑能耗模拟技术不断发展, 能耗模拟分析为建筑节能设计提供了便利, 而且能耗分析结果可以量化地反映出气候对建筑的影响以及适宜的建筑节能技术措施。为此, 文章拟采用建筑能耗模拟分析技术来分析不同地域居住建筑能耗的构成及分布特征, 以期能为建筑节能技术的应用提供更多指导。

1 研究方法

点式高层住宅在我国大多数城市的住宅建设中占据主要类型之一。为此, 文章根据不同点式高层住宅的户型分布特征建立了代表建筑模型并用于模拟分析。为了对比分析不同地域气候特征以及能耗构成的差异, 文章依据地理分布从全国均匀地选取了 45 个代表城市用于分析和研究。

由于研究主要是为了对比分析不同地域间建筑能耗构成的差异性, 所以代表建筑模型的围护结构等热工性能参数均根据《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 134-2010)^[14]所规定的限值设定, 并且假定所有的窗户均不设置遮阳。

目前常用的建筑能耗模拟分析软件较多, 其中应用较

为广泛的是美国能源部发布的 EnergyPlus 软件。该软件可以输出多种建筑能耗以及热量传递参数, 为建筑能耗的细节分析提供了便利。因此, 文章中居住建筑的能耗数据均是通过 EnergyPlus 软件计算得到。为更加直观的体现出不同地域间能耗构成的差异, 建筑能耗对比分析结果均通过 ArcGIS 软件平台呈现。具体用于模拟的气象数据以及建筑模型信息如 1.1 以及 1.2 节所述。

1.1 气象数据

采用 EnergyPlus 软件进行能耗模拟分析需要逐时的典型年气象数据作支撑。为此, 研究选用《中国建筑热环境分析专用气象数据集》^[15]作为分析用气象数据。

1.2 建筑模型

代表建筑楼层平面图如图 1 所示。每层建筑面积为 516.8m², 其中包括有空调供暖设备的空间 (429.56) 和非空调供暖设备的空间 (87.24m²)。建筑层高为 2.8m, 共计 30 层。在模拟过程中代表建筑的有关围护结构及室内环境控制参数的设置如表 1 所示。

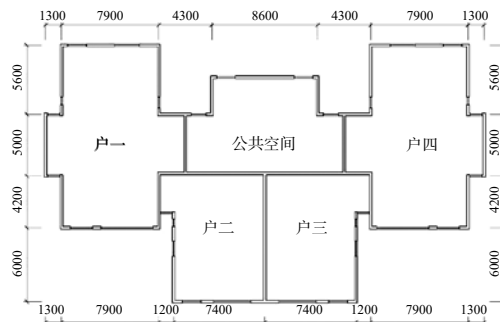


图 1 代表建筑楼层平面图

表 1 围护结构及室内环境控制参数设置

参数名称		设定值	参数名称	设定值
外墙传热系数 (W/(m²·K))		1.5	人员密度 (m²/ 人)	26.34
屋顶传热系数 (W/(m²·K))		1.0	换气次数 (次 /h)	0.5
楼板传热系数 (W/(m²·K))		3.1	室内照明功率密度 (W/m²)	6
隔墙传热系数 (W/(m²·K))		2.0	采暖温度 (℃)	18
外窗传热系数 (W/(m²·K))	南	3.2	制冷温度 (℃)	27
	北	4.0	最低湿度设置 (%)	30
	东 / 西	4.7	最高湿度设置 (%)	60

2 结果分析

室外气候通过外窗、外非透明围护结构等多种途径对室内热环境造成影响, 而通常建筑冷热负荷也主要由围护结构传热、透风渗透热、室内得热共三大部分构成。在研究中通过 EnergyPlus 软件分析得到了窗户太阳直射/散射

辐射得热量、窗户总得热量与失热量、通风换气总得热与失热量、室内采暖显热/潜热/总负荷以及室内制冷显热/潜热/总负荷共 12 个参数值。依据这些参数类别,下文共分为三个部分来进行对比分析:

- (1) 通过窗户的传热量;
- (2) 通风换气引起的传热量;
- (3) 建筑采暖/制冷负热量。

2.1 通过窗户的传热量

通过图 2 可以看出,总体上 45 个代表城市的窗户总得热量要大于总失热量。从窗总太阳辐射直射得热量的全国分布特征可以看出,我国西部以及东北地区的直射辐射得热量都比较大,而东南沿海地区则相对较小。这与全国的太阳辐射量以及日照时数分布特征有着直接关联。其中直射太阳辐射得热量最低值出现在重庆。直射太阳辐射得热量较大的地区对采用被动式太阳能采暖降低冬季采暖能耗非常有利。窗总太阳辐射散射得热量在全国各个地区分布较为均匀,散热辐射得热量主要是由于周围建筑或墙体对太阳辐射的反射以及天空对太阳辐射的漫反射等构成。通过窗总得热量以及总失热量的分布特征可以看出,西北以及东北地区的得热及失热量均大于东南沿海地区。东北以及西北地区窗总失热量较大主要是由于冬季时间长且室外温度低造成的。

2.2 通风换气引起的传热量

图 3 显示出了全国不同地区由于通风换气引起的得热量和失热量分布特征。通风换气是改善居住建筑室内空气品质的主要途径,在春秋等过渡季节也是调节室内舒适度的有效手段之一。然而,由于冬季室外空气温度往往低于室内舒适温度值以及夏季室外空气温度往往高于室内舒适温度值,通风换气量的大小也直接影响到了冷热负荷的大小。此外,由于冬夏季室外空气温度与室内舒适温度值的关系,通风换气引起的得热主要发生在夏季,而通风换气引起的失热主要发生在冬季。

从图 3 中可以看出,从东北和西北地区至东南沿海地区由于通风换气引起的失热量逐渐降低,而得热量则逐渐增加。此外,在东北和西北地区通风换气引起的失热量显著高于得热量。这主要是由于这些地区冬季室外温度较低造成。室内外通风失热量的分布特征也表明在东北和西北

地区,提高建筑的密闭性,尽可能降低除必要通风换气以外的渗透风对于降低冬季建筑能耗量是十分有利的。

值得注意的是在广州、厦门、韶关、南宁以及琼海这五个城市室内外通风得热量要高于失热量。这主要是由于这一地区冬季温和夏季酷热的气候特征造成的。这也表明在这些地区夏季尤其是温度较高的白天进行较大的室内外通风换气对节能是不利的。

2.3 建筑采暖/制冷负热量

在这一节分析中,全国不同地区建筑采暖或制冷负荷的显热和潜热负荷也进行了对比分析(分别如图 4a 和图 4b 所示),而且通过比例的方式对比分析了各地区每种负荷量的构成差异(图 4c)。在我国现行建筑热工设计分区以及其他研究性区划中均没有对我国不同地区的湿度状况进行详细分析。通过对比各个地区显热和潜热负荷的大小可以间接反映出不同地区的湿度状况,并可以为空调等设备的设计提供参考。

结合图 4a 和图 4c 可以看出,在我国西北和东北地区采暖负荷较大,同时在采暖/制冷负荷构成比中采暖负荷也是占据主要部分。对比采暖负荷中显热与潜热负荷的全国分布特征可以看出,在我国东北地区显热负荷需求量最大,而且整个东北和西北地区采暖期间的潜热负荷需求量明显高于我国华北以及东南沿海地区。冬季潜热负荷大说明这些地区室外空气湿度低不能满足舒适需求,需要向室内加湿。

结合图 4b 和图 4c 可以看出,制冷负荷较大的地区主要集中在我国东南沿海地区,这一地区全年的采暖需求较小。此外,北京、济南、郑州、西安等城市所在地区制冷负荷也相对较大。从制冷期间显热负荷与潜热负荷的大小分布特征可以看出,北京、济南、郑州、西安等建筑热工设计分区中的寒冷地区城市制冷负荷主要有显热负荷构成,而武汉、重庆、长沙、杭州等建筑热工设计分区中的夏热冬冷地区城市显热负荷大小与潜热负荷基本相等,广州、南宁、厦门、琼海等建筑热工设计分区中的夏热冬暖地区城市潜热负荷是构成夏季制冷负荷的主要部分。

4 结论

文章采用建筑能耗模拟分析的方法研究了我国不同地区建筑能耗的分布特征。通过对 45 个代表城市的对比分



图 2 全国窗户传热量分布特征



图 3 全国由通风换气引起的传热分布特征

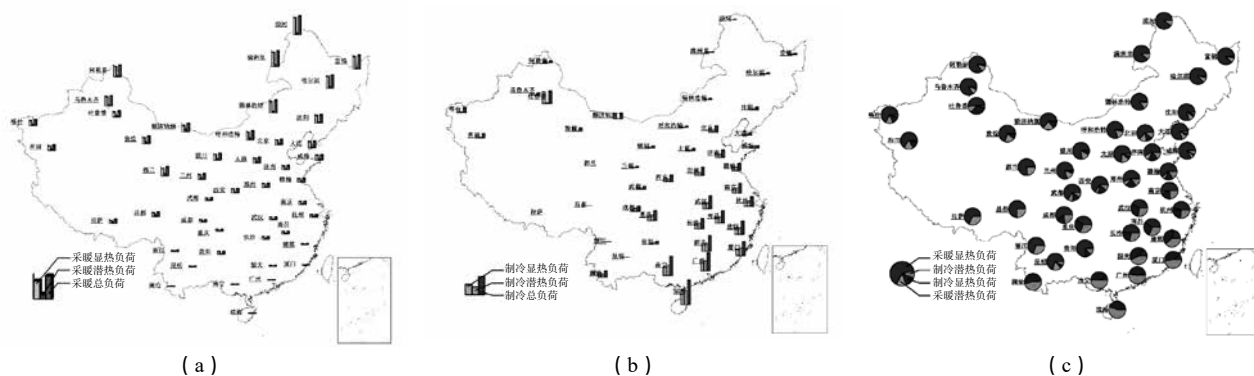


图4 全国建筑采暖 / 制冷负荷分布特征

析发现, 全国所有地区通过窗户的全年总得热量要高于失热量, 而且西北和东西地区的窗户直射太阳辐射得热量要明显高于其他地区。通风换气得 / 失热量也是影响建筑能耗的主要变量之一, 研究发现东北地区冬季通风失热量最大, 而东南沿海地区部分城市全年通风换气得热量要明显高于失热量。在全年制冷负荷中的显热与潜热负荷分布状况方面, 从西北至东南沿海潜热负荷逐渐成为全年制冷负荷中的主要构成部分。

参考文献

- [1] Givoni B. Climate considerations in building and urban design[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1998.
- [2] (美) 阿尔温·克里尚等尼克·贝克斯莫斯·扬纳斯 S·V·索科洛伊. 建筑节能设计手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径 [J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 30-40.
- [4] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [5] A.J. Marszal, P. Heiselberg, J.S. Bourrelle, et al. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(1): 97-979.
- [6] Amélie Robert, Michaël Kummert. Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past[J]. Building and Environment, 2012, 55(1): 150-158.
- [7] A.R. Dehghani-sanij, M. Soltani, K. Raahemifar. A new design of wind tower for passive ventilation in buildings to reduce energy consumption in windy regions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42(1): 182-195.
- [8] 邱静, 李保峰. 被动式蒸发冷却下向通风降温技术的研究与应用 [J]. 建筑学报, 2011, 9.
- [9] Baruch Givoni. Comfort, climate analysis and building design guidelines[J]. Energy and Buildings, 1992, 18(1): 11-23.
- [10] Gang Wang, Li Song. Air handling unit supply air temperature optimal control during economizer cycles[J]. Energy and Buildings, 2012, 49(1): 310-316.
- [11] 付祥钊, 张慧玲, 黄光德. 关于中国建筑节能气候分区的探讨 [J]. 暖通空调, 2008, 32(2): 44-47.
- [12] 张慧玲, 付祥钊. 基于主成分-聚类分析法的建筑节能气候区划 [J]. 暖通空调, 2012, 42(7): 119-124.
- [13] Joseph C. Lam, Liu Yang, Jiaping Liu. Development of passive design zones in China using bioclimatic approach[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(1): 746-762.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准 (JGJ 134-2010)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

国家海洋博物馆建筑风环境数值模拟研究

刘泽勤, 赵文元, 李思泽

(天津商业大学, 天津 300134)

[摘要] 异形建筑风环境与建筑自身结构特点, 季节气候, 风向等因素有着十分复杂的关系, 中国海洋博物馆作为标志性异形建筑, 对其进行分析与优化研究有利于探索异形建筑周边风向环境特点与其内在规律。本文基于计算流体动力学软件 STAR-CCM+, 采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流物理模型和非结构化网格进行数值模拟, 得出不良风环境区域及优化方案, 对中国海洋博物馆建筑风环境进行客观评价, 为改善建筑风环境品质提供科学依据。

[关键词] 异形建筑; 数值模拟; STAR-CCM+; 建筑风环境

0 引言

随着结构理论和技术的发展, 建筑结构的体形已不再成为束缚建筑多样性的主要因素, 建筑造型日趋异形化。建筑单体设计的不当不仅会对城市风环境带来一定的负面影响, 同时也会改变周边住宅的风环境, 影响行人的安全与舒适性, 污染物难以扩散等问题。因而, 对异形建筑风环境进行模拟研究, 探讨其内在机理与规律是必要过程。建筑风环境的应用最早可追溯到古罗马时期, 工程师根据风向来布置军营驻地网格状街道的方向^[1]。目前, 对空气流动规律的研究方法主要有三种: 现场实验, 风洞实验, 计算及数值模拟。由于前二者均存在无法在较低成本状态下精确反映建筑实际风环境全貌, 因而, 随着计算流体力学的不断发展, 计算及数值模拟成为建筑风环境前期预测与研究的主要方法。1933 年, 英国人 Thom^[3] 首次数值求解了二维粘性流体偏微分方程, CFD 由此而生^[2], 并在多种工程领域的探索研究中得到广泛应用^[3]。例如, 1984 年, Beranek^[4] 利用 CFD 技术模拟研究矩形建筑附近行人高度处的风环境, Shnsuke^[5] 等根据三维数值模拟得出城市风场, 清华大学建筑学院的赵彬、林波荣^[6] 等利用 PHOENICS 软件对北京市某住宅小区的规划方案进行了计算机数值模拟并借此优化了设计方案, 众多实验研究表明 CFD 模拟技术能较好预测建筑物周围气流流动状况。

本文通过选用计算流体动力学软件 STAR-CCM+, 建立刚性计算模型, 模拟计算国家海洋博物馆在大气边界层中的风场绕流及风压分布情况, 研究建筑物的布局对过渡季节及冬、夏季节风速场参数的影响。

1 工程概况

国家海洋博物馆集收藏保护、展示教育、科学研究、交流传播等功能于一体的综合性国家建筑, 项目选址于天津滨海旅游区, 总建筑面积 80000m², 高 33.8m, 周边 6km² 整体定位为中国海洋文化博览产业基地、生态宜居旅游城区。



图1 国家海洋博物馆效果图

2 方案分析

方案创意核心是将展馆设计成开放的模式, 希望通过人们自己去完成对建筑的认识, 鼓励人们去探索和发现, 建筑造型运用隐喻手法, 外形似跃向水面的鱼群, 停泊岸边的船坞, 海洋的生物等等, 优美但不具象。

方案选择初期, 选用计算流体动力学软件 STAR-CCM+, 建立刚性计算模型, 模拟计算国家海洋博物馆在大气边界层中的风场绕流及风压分布情况。选用 realizable $k-\varepsilon$ 模型作为湍流模型, 标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型在实际工程中有广泛应用, 但在强旋流, 弯曲壁面等情况下, 其计算结果有一定失真^[7], 国家海洋博物馆作为典型异形建筑, 在进行模型选择与计算时, 选用针对标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型的改进方案: Realizable $k-\varepsilon$ 模型。

Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型中湍动能 k 和 ε 耗散率的模数化输运方程组:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \left[\frac{(\mu + \frac{\mu_t}{Sc_k})}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + Gk - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \left[\frac{(\mu + \frac{\mu_t}{Sc_\varepsilon})}{\partial \delta_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \delta_\varepsilon} \right] + \rho C_1 E_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2)$$

其中, $\delta_\varepsilon = 1.2$, $C_2 = 1.9$, $C_1 = \max(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5})$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $\eta = \sqrt{(2E_{ij} \cdot E_{ij})} \frac{\varepsilon}{k}$, $E_{ij} = (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$, $C_\mu = \frac{1}{A_0 + \frac{A_s U^*}{\nu}}$, A_0 , A_s 和 U^* 都是速度梯度函数。

为精确得到建筑物附近风场环境, 模拟地面湍流与建筑物附近风场绕流情况, 模拟采用非结构化网格, 同时在建筑物表面进行网格加密。图 2 为建筑物网格加密图。

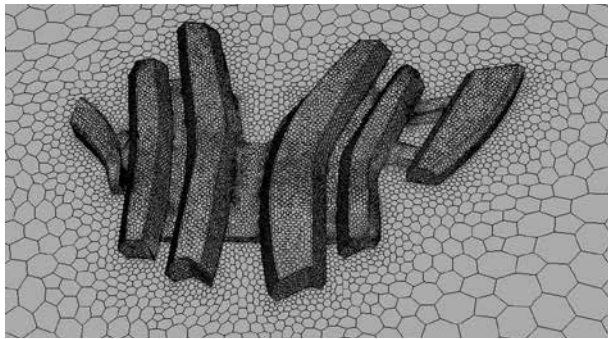


图2 建筑物网格加密图

为探讨出最佳方案, 寻找具备最优风环境的建筑模型, 归纳列出两种模型进行比较。图 3 是设计分析得出的两个方案对比图, 图 4 为两种方案分析结果, 通过 STAR-CCM+ 模拟分析得出, 紧凑式方案只在建筑物背面产生负压, 风场分布较为合理, 不会产生较大涡流, 对于行人安全和周边建筑物产生较小影响, 最终确定其为最终方案。

3 结果分析

项目区的气候属于大陆性半湿润季风气候，四季特征分明，每年 1~3 月份西北风最多；4~6 月份以南风居多；从 7 月份开始到 9 月份东风最多；10~12 月份，西北风、西南风最多。由于本案例，结构自身为复杂，大跨度屋盖结构，风荷载分布特性较为复杂，因此，模拟通过对过渡季节与冬夏季节风速场进行模拟研究，得到规律性结论。

图 5 为国家海洋博物馆冬季周边人行区 1.5m 高度处速度与压力分布图，从图 5(1)中我们看到，迎风面为正压，风越过屋面压力很快由正压变为负压，到建筑物的屋面凸起处，形成最大负压。出现正压的位置主要在建筑物迎

风面上垂直风向上，并且风压较大。负压在屋顶上较小，接近后边缘的地方最大，且其等值线的形状与屋面轮廓线相似，说明了风沿着屋面发生了气流分离；并且在建筑物的背风面，建筑物凹进的表面形成了负压。通过对建筑物结构的调整与方位的合理布置，最终建筑方案能提供良好的自然通风环境，避开了冬季不利风向，通过防风带（如植物）、微地形等挡风措施阻隔冬季冷风。

图 6、图 7 为夏季与过渡季节建筑物周边风速，图中可以看到，在人行高度 1.5m 处，风速低于 5m/s，保证人员行走时候的舒适性与安全性，同时也保证了空气自然流通与室外空气质量。

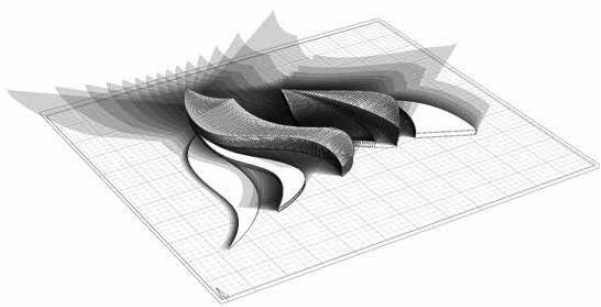


图 3 (1) 紧凑式方案

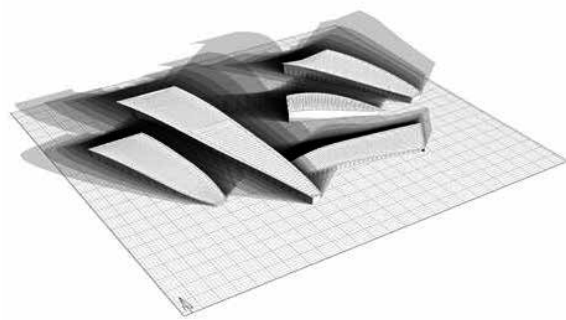


图 3 (2) 分布式方案

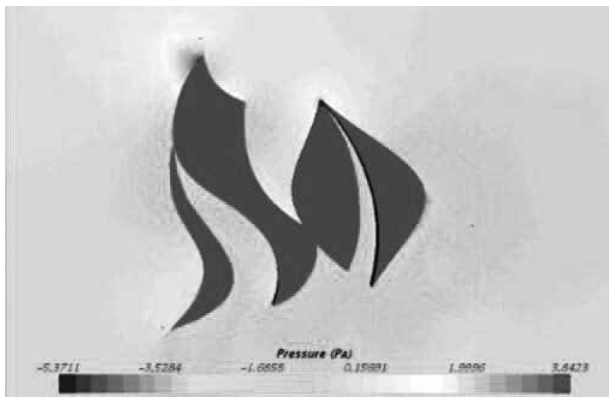


图 4 (1) 紧凑式方案风压模拟

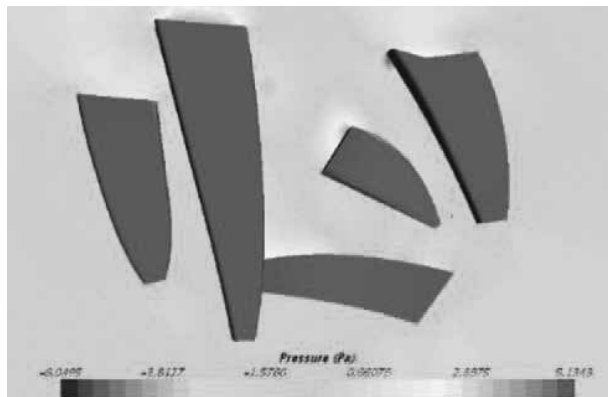


图 4 (2) 分布式方案风压模拟



图 5 (1) 冬季 1.5 米处建筑物周边压力场

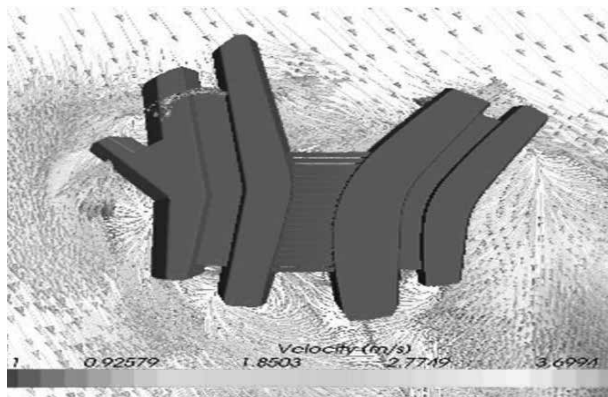


图 5 (2) 冬季 1.5 米处建筑物周边风速场



图6 夏季 1.5 米处建筑物周边风速场

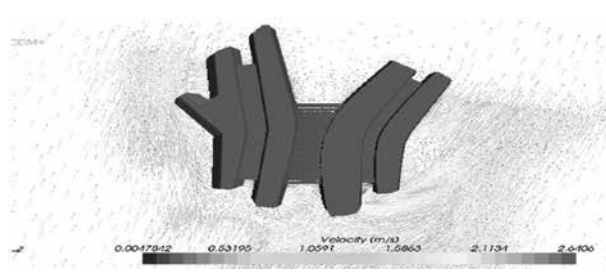


图7 过渡季节 1.5 米处建筑物周边风速场

4 结论

数值模拟能够较为全面的模拟建筑物周边环境,并为建筑设计可行性提供依据,STAR-CCM+ 作为最先进的连续介质力学数值技术,采用多面体网格,实现计算性能 3~10 倍的提高^[8],为此类标志性异形建筑提供较好技术支撑。

本论文以中国国家海洋博物馆室外风环境为研究对象,通过 STAR-CCM+ 计算流体动力学软件,对博物馆在大气边界层中的风场绕流及风压分布规律进行探索,研究了建筑物的布局对过渡季节及冬、夏季节风速场参数的影响,得出以下结论:

本工程规划布局营造良好的风环境,提供良好的自然通风环境,避开了冬季不利风向,通过防风带(如植物)、微地形等挡风措施阻隔冬季冷风。

通过建立本工程室外风环境模拟模型,分析比较两种方案压力与速度分布,得出最终方案。通过计算夏季、冬季、过渡季三个工况下速度分布情况,对建筑周边的人行区的环境舒适性、自然通风的可行性及建筑周边空气质量进行了分析。模拟结果表明本项目区域周边的流场分布较为均匀,气流通畅,无涡流、滞风区域;主要通道风场流线基本明显,无明显的气流死区;建筑物周边人行区域 1.5m 高度处风速均小于 5m/s。

参考文献

- [1] 维特鲁威 (Vitruvius). 建筑十书 [M]. 北京:知识产权出版社, 2001.
- [2] Patrick J Roache. putanona Hermosa Publishers, 1980, Fluid Dynamics. United Kin-16-21.
- [3] 刘刚, 吴春燕. 方形散流器风口速度场数值模拟 [J]. 东华大学学报, 2003(6):27-29.
- [4] Beranek W J. Wind environment around single buildings of rectangular shape [J]. H eron, 1984, 29(1):3-31.
- [5] Shinsuke K, Huang H. Ventilation efficiency of void space surrounded by buildings with wind blowing over built-up urban area [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(7-8): 358-367.
- [6] 赵彬, 林波荣, 李先庭, 江亿. 建筑群风环境的数值模拟仿真优化设计 [J]. 城市规划汇刊, 2002/02.
- [7] Deardorff, J.W. (1970), A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, J. Fluid Mech, 41, 453-480.
- [8] 邱静, 王国志, 李玉辉. 基于 STAR-CCM+ 的简单流体模型 CFD 研究 [J]. 液压气动与密封. 2010(10):8-1.

数值模拟受置换通风与地板送风两种空调模式影响的室内温度分布

才 爽, 刘泽勤, 刘太顺

(冷冻冷藏技术教育部工程研究中心, 天津市制冷技术重点实验室, 天津商业大学机械工程学院, 天津 300134)

[摘 要] 为能更好地了解下送风方式对人体热舒适性的影响, 本文采用数值模拟方式探索受参数影响的地板送风方式和置换通风方式对室内温度场的变化规律。通过在送风量分别为 $216\text{m}^3/\text{h}$ 和 $302\text{m}^3/\text{h}$ 的工况下对地板送风与置换通风的比较, 发现在相同送风温度和送风量的工况下, 地板送风系统的温度梯度达 10°C , 远大于置换通风系统的温度梯度 5°C ; 研究表明, 置换通风系统使得办公室内温度分布较为均匀; 地板送风系统使得人体周围工作空间温度分布梯度更小。

[关键词] 地板送风; 置换通风; 数值模拟; 温度场

0 前言

随着人们对可持续发展认识的不断深入, 节能和环保已成为当今空调发展的两大主题。置换通风系统与地板送风系统由于其较好的温度调节能力和良好的空气品质, 已经在工程实践中得到应用。

所谓地板送风, 是指从地面送出具有一定速度的空气, 在向上流动过程中, 与工作区的空气迅速大量掺混进行热交换达到调节工作区温度的作用。当气流进入非工作区时, 通过自然对流从上部排风口排出, 或部分空气通过地面回入地板下与一次空气混合经下设的风机处理后送出^[1]。而置换通风, 则将低温、低速的新鲜空气送入室内, 在重力作用下先是下沉, 随后慢慢扩散, 在地面上形成一层薄薄的空气湖, 使得新鲜的空气得以直接进入呼吸区。与此同时, 室内热源产生的热对流气流由于浮力作用而上升, 并在上升过程中不断卷吸周围空气。由于热浊气流上升过程中的“卷吸”作用和后继新鲜空气的“推动作用”, 以及排风口的“抽吸”作用, 覆盖在地板上方的新鲜空气也缓慢上升。这样工作区的污浊空气不断地被后继的新风所取代^[2,3]。由于地板送风与置换通风在送风速度上有着较大的不同, 本文将通过 fluent 计算软件, 对具有室内热源工况下的模型房间进行置换通风系统与地板送风系统的室内温度场进行数值模拟探究, 比较置换通风系统与地板通风

系统在室内工作区域的温度分布特性。

1 模型建立及数值模拟计算

在进行数值模拟之前, 必须要对研究对象进行基本假设: (1) 进风口附近区域空气流动主要受进风口空气速度影响; (2) 办公室其他区域空气的动力主要来自于室内热浮升力。(3) 流场为稳态、流体为不可压缩流体; (4) 室内空气与引入的室外新鲜空气充分混合; (5) 空气的各项物性参数满足 Boussinesq 假设, 除密度随温度和浓度变化外, 其它物性参数均视为常数; 办公室气密性好, 无漏风现象; (6) 除人体与计算机外, 流场内部不存在其他热源及固体障碍物, 且模型房间其它各墙体、顶面和底面均为绝热表面, 室内外无热交换作用。

用于数值模拟的典型办公室模型尺寸为 4m (长) $\times 3\text{m}$ (宽) $\times 2.8\text{m}$ (高)。由于置换通风系统与地板送风系统原理不同, 送风口的位置与尺寸也有所区别。外部新鲜空气由房间底部进风口进入室内, 受室内热源的作用, 被卷吸到浑浊的热羽流中, 上升至房间顶部后经出风口排至室外, 如图 1、图 2 所示。

室内气体运动的控制方程设置为 Navier-Stokes 方程, 使用定常分析方法求解室内流体粘性流动以及设定状态下的质量连续性方程、动量方程和能量方程。由于此模型研究因密度差所引起的自然对流, 所以在模拟中启用浮力模

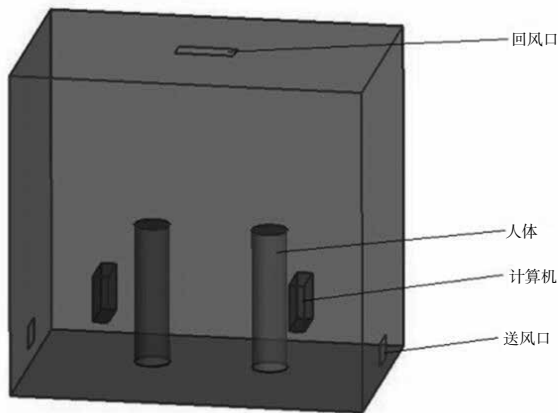


图1 置换通风模型

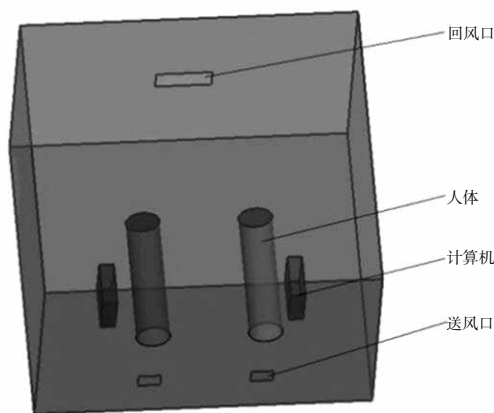


图2 地板送风模型

型, 并使用参考密度以避免计算舍入误差。办公室内空气流动与传热过程由质量连续性方程、动量方程和能量方程表示如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

其中: ρ 为流体密度; t 为时间; $\mathbf{U}$ 为流速向量 $U_{x,y,z}$ 。

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + S_M \quad (2)$$

其中: $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量; p 为热力学压强; S_M 为流体动量源。

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot S_M + S_E \quad (3)$$

其中: 流体总焓 $h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2$; h 为流体静态焓; λ 为流体热导率; T 为热力学温度; S_E 为流体能量源。

典型办公室内部分边界条件类型及边界条件详细参数设置见表 1。其中: 置换通风送风口尺寸为 300mm (长) × 200mm (宽), 送风速度分别为 0.5m/s、0.7m/s, 送风方向朝向人体并与地板呈 60°; 地板送风口尺寸为 200mm (长) × 150mm (宽), 送风速度分别为 1m/s、1.4m/s, 送风方向垂直于壁面。根据室内热负荷确定送风温度为 17°C。

2 模拟结果分析与讨论

热舒适是人体通过自身的热平衡和热感觉所感受到的环境状况, 综合后所获得是否舒适的感觉^[4]。研究表明, 当人体头部 (距地 1.1m) 与脚踝 (距地 0.1m) 之间温差

表 1 模型边界条件设置

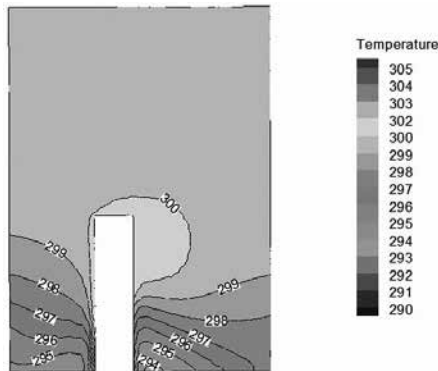
序号	名称	边界条件类型	边界条件详细参数
1	进风口	Inlet	Normal speed and Static temperature
2	出风口	Outlet	Static pressure: 0 Pa
3	墙体	Wall	Heatflow: 0W/m ²
4	人体	Wall	Heatflow: 97W/m ²
5	计算机	Wall	Heatflow: 568W/m ²

超过 5°C 时, 人体对热舒适不满意度高于 20%^[5]。本文目的是研究人体在不同送风方式下在实验室的热舒适性及温度在办公室内的分布情况, 在单位时间内送风量相同的条件下, 选用在 $x=1\text{m}$ 处垂直平面的数值模拟温度分布图与在 $z=1\text{m}$ 处水平平面的数值模拟温度分布图, 数值模拟结果见图 3 至图 6。

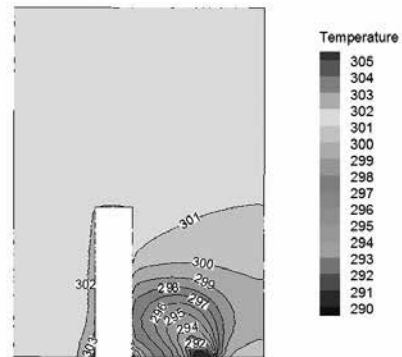
2.1 送风方式对办公室内空气温度的影响

由图 3 和图 5 可知, 对比竖直方向的温度分布梯度, 地板送风系统的梯度远大于置换通风, 如图 3 所示, 在地面至 0.6m 之间, 置换通风系统温度变化范围为 294K~299K (21°C~26°C), 地板送风系统风口附近位置温度变化范围 290K~300K (17°C~27°C)。置换通风系统温度变化范围远低于地板送风系统。在除风口位置的空间里, 置换通风垂直方向的温度低于地板送风温度。

由图 4 与图 6 可知, 置换通风系统在 1m 处的水平温度低于地板送风相同位置的温度。如图 4 所示, 置换通风在该水平面的温度范围为 299K~301K (26°C~28°C), 地

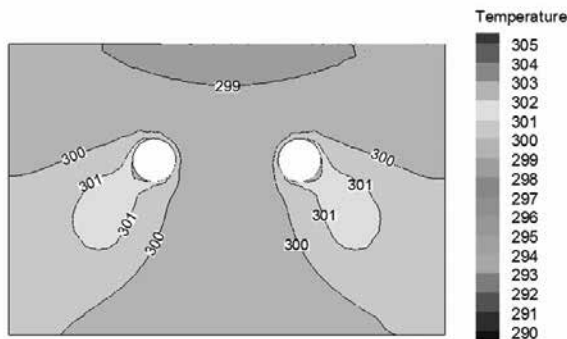


置换通风 $v=0.5\text{m/s}$; $x=1\text{m}$ 温度分布云图

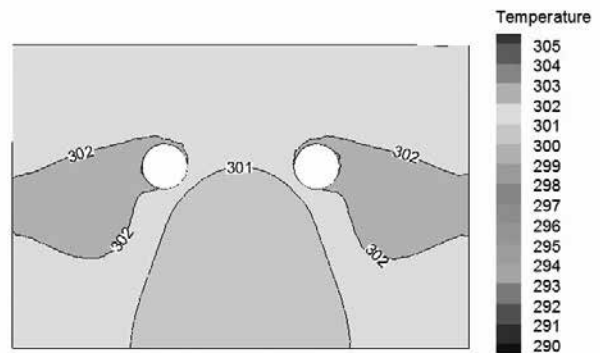


地板送风 $v=1\text{m/s}$; $x=1\text{m}$ 温度分布云图

图 3 送风量为 216m³/h 时, 置换通风与地板送风在 $x=1\text{m}$ 处温度分布对比

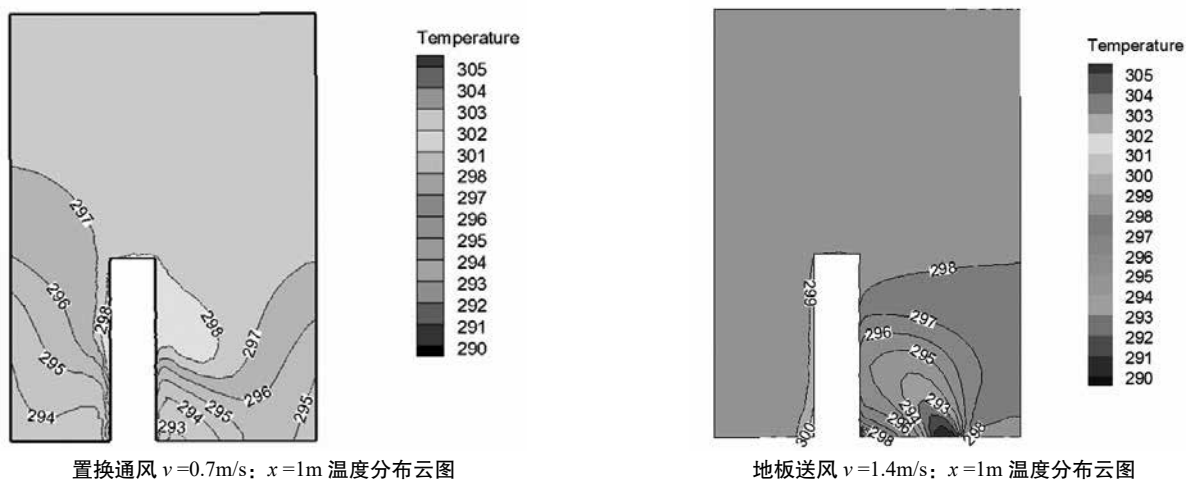
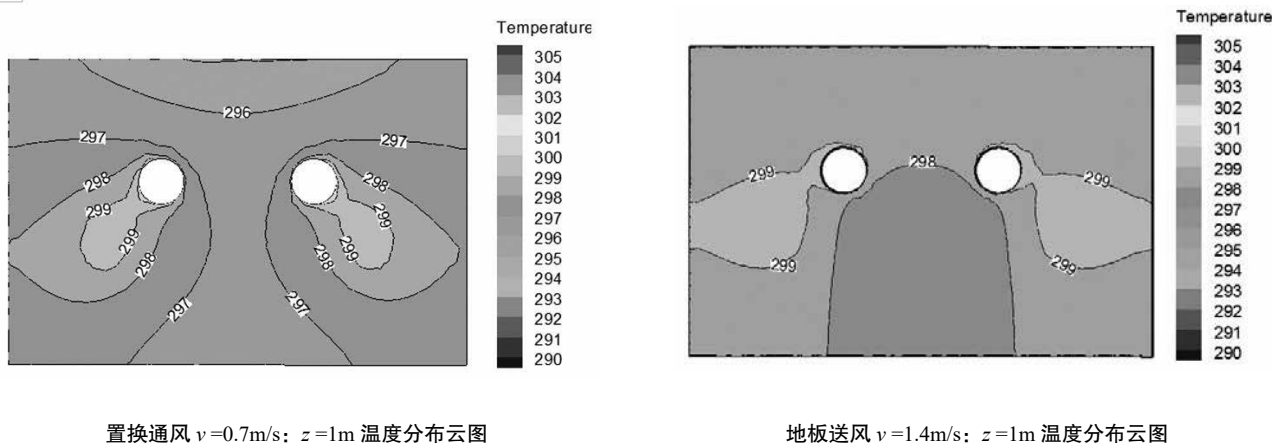


置换通风 $v=0.5\text{m/s}$; $z=1\text{m}$ 温度分布云图



地板送风 $v=1\text{m/s}$; $z=1\text{m}$ 温度分布云图

图 4 送风量为 216m³/h 时, 置换通风与地板送风在 $z=1\text{m}$ 处温度分布对比

图5 送风量为 $302\text{m}^3/\text{h}$ 时, 置换通风与地板送风在 $x=1\text{m}$ 处温度分布对比图6 送风量为 $302\text{m}^3/\text{h}$ 时, 置换通风与地板送风在 $z=1.1\text{m}$ 处温度分布对比

板送风在该水平面的温度范围为 $301\text{K}\sim 302\text{K}$ ($28^\circ\text{C}\sim 29^\circ\text{C}$)。

2.2 送风方式对人体周围工作区域温度的影响

由图3对比图5可知, 在送风量为 $302\text{m}^3/\text{h}$ 的工况下, 对于人体周围的工作区域温度, 地板送风系统的温度跨度小于置换通风, 更加符合人体的舒适性要求。如图5所示, 置换通风系统在人体周围的工作区域温度变化范围 $293\text{K}\sim 299\text{K}$ ($20^\circ\text{C}\sim 26^\circ\text{C}$), 地板送风系统在人体周围的工作区域温度变化范围 $295\text{K}\sim 299\text{K}$ ($22^\circ\text{C}\sim 26^\circ\text{C}$)。但在图3送风量为 $216\text{m}^3/\text{h}$ 的工况下, 置换通风优于地板送风。

3 结论

通过对不同送风量条件下地板送风与置换通风计算结果的比较分析, 对室内温度分布规律进行了探索, 计算结果表明:

(1) 在相同送风温度和送风量的工况下, 地板送风系统的温差 (10°C) 远大于置换通风系统的温差 (5°C)。

(2) 当送风量较小时, 置换通风系统能提供更好的舒适性, 使人体周围的工作区域温度保持在 $22\sim 27^\circ\text{C}$ 范围中, 但温度变化范围仍较高; 当送风量较大时, 地板送风系统

使人体周围的工作区域温度保持在 $21\sim 26^\circ\text{C}$ 范围中, 能够更好地满足人体的舒适性。

(3) 置换通风系统适用于对整个办公室的温度控制, 而地板送风系统适用于对人体周围的局部空间的温度控制。

参考文献

- [1] D B Spaiding. PHOENICS Reference Manual [M]. London: CHAM Ltd., UK, 1994.
- [2] 刘泽勤. 室内自然置换通风两种典型浮力源的探讨. 中国制冷学会 2005 年制冷空调学术年会. 516-519.
- [3] 陈益武. 置换通风和效果评价及其通风量的确定, 洁净与空调技术.
- [4] 朱颖心, 彦启森. 《建筑环境学》(第二版), 中国建筑工业出版社, 2005, 北京.
- [5] 2001 ASHRAE Handbook, Fundamentals (SI), American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329.

粒子下落特性分析

杨 贺, 刘泽勤

(冷冻冷藏技术教育部工程研究中心, 天津市制冷技术重点实验室, 天津商业大学机械工程学院,

天津 300134)

[摘 要] 本文主要利用 DPM-FLUENT 模型对粒子自由下落过程中, 对粒子在不同密度和不同散料器开口口径的情况下的下落特性进行分析。研究发现, (1) 粒子靠近中心轴线处速度随着粒子密度的增加而增加。(2) 随着散料器开口口径的增大, 粒子下落过程散射半径也随之增大。

[关键词] 粒子密度; 粒子速度; 散料器开口口径; 散射半径

0 前言

近年来, 随着国民经济的不断增长和人民生活水平的不断提高, 城市化和工业化迅速扩展和发展, 使得各类环境问题日益突出, 空气污染现象尤其是粉尘污染最为明显。工业生产中排放到大气中的粒子在空气中形成悬浮粒子 (TSP), 而悬浮粒子 (TSP) 与气象条件的共同作用是雾霾天气形成的主要原因^[1]。由于雾霾天气对人们的生产生活以及人身健康危害十分严重, 越来越多的学者投入到粉尘污染机理与控制的研究当中。在冶金、医药、水泥、化工、食品等行业存在散装物料转运、输送、装料、卸料等过程, 在此过程中会产生大量的粉尘和固体悬浮粒子等有害物质, 进入空气中形成悬浮粒子, 引起生产生活环境的恶化。同样, 在物料输送下落过程中与输送壁面产生碰撞产生反弹作用, 导致粉尘污染的面积成倍增加^[2]。在工业生产中粉尘的扩散会破坏生产设备, 影响照明, 导致劳动效率的降低, 并且当粉尘量达到一定程度会有发生爆炸的危险^[3]。空气中漂浮的粉尘还会对工作人员的身体健康构成威胁, 增加致病和死亡的风险, 当空气中的粉尘量达到一定的值还存在发生尘爆的危险, 导致更大的危害。

为了解决此类问题, 前人运用实验和数值模拟方法对自由下落物料进行了研究, 研究内容主要集中在卷吸空气量, 粒子流特性及产生量等方面。Hemon 教授^[4]针对在静止的环境空气中只受重力影响的单个粒子自由下落模型, 给出了空气卷吸量与粒子物理参数值参数之间的关系。Tooker 教授^[5]在 Hemon 教授的基础上引进新的物理参数, 得到微粒流在自由下落过程中所卷吸的空气量与粒子流物理参数之间的关系。Tomomi Uchiyama^[6]通过数值模拟揭示了非定常流动中存在各种尺度涡以及微粒密度和粒径对微粒速度分布存在影响。Liu 通过实验给出了一个经验卷吸系数, 提出新的两相流模型来预测静止空气中自由下落粒子的卷吸空气量。王锐^[7]等人利用三维格子方法模拟了均以粒径粒子流的速度场。

本文利用 DPM-FLUENT 数值模拟计算方法, 以粒子自由下落过程为研究对象, 对粒子在不同密度以及在散料器不同口径的情况下下落特性进行分析, 以期明确粒子下落过程中的流场特性, 为今后进一步对实际工程研究提供一定的参考。

1 模型建立及数值模拟计算

基于粒子的运动特性, 在进行环境空气自由下落粒子数值模拟之前, 需要对微粒羽流的理论模型进行几点基本假设:

(1) 粒子视为球形, 密度均匀;

(2) 粒子密度远大于气体密度;

(3) 粒子体积分数小于 10%, 忽略粒子间的相互碰撞;

(4) 气体视为不可压缩的连续相。

对于假设的不可压缩气体相, 忽略体积力, 则气相控制方程可表示为:

连续性方程:

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) - \frac{1}{\rho} f_b \quad (2)$$

式中: i 为 x 方向节点与界面的标号; j 为 y 方向节点与界面的标号; U_i 、 U_j 为气相研究节点 i 、 j 方向的速度分量; P 为压力; ρ 为空气密度; f_b 为单位控制体积的粒子作用于气体的阻力。

粒子在自由下落过程中, 所受到的作用力包括重力、浮力、气体作用于粒子的曳力、压力梯度力等。

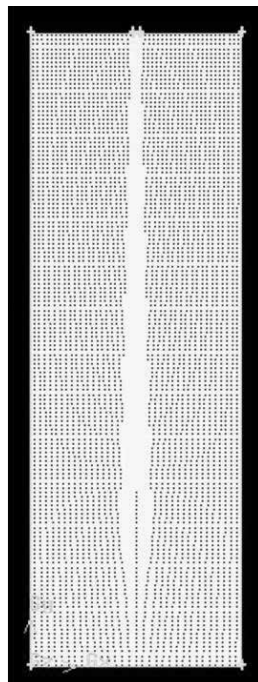


图 1 物理模型

图 1 为粒子下落计算区域模型, 计算区域为二维空间, 大小为 0.5m×1.5m, 粒子通过长度为 0.02m 的条缝区域进入静止空气空间内。该模型被离散为 35400 个网格, 用来计算粒子自由下落的流场特性。

本文数值模拟粒子入口的边界条件设置为速度入口 (velocity inlet), 空气速度的大小为 0.02m/s。在本模型中, 上侧边界除粒子下料口外其余设置为墙壁, 并且本模型左右两侧边界和下侧边界设置为自由出流 (outflow) 边界。在模拟过程中, 连续相采用标准 $k-\epsilon$ 模型, 由于粒子的体积分数小于 10%, 粒子相采用 DPM 模型。在本模拟中, 粒子质量流量设置为 0.052kg/s, 直径为 0.000567m。

2 模拟结果分析与讨论

在工业物料输送中,因输送物料种类的不同以及物料下落过程中漏斗直径的不同会对物料下落过程产生不同的影响。因此,本文为了研究物料在下落过程中的运动特性,对模拟中物料的下落速度及物料散落半径进行分析,进而得出其相关规律。

2.1 粒子密度对其运动特性的影响

同一直径(0.000567m),密度分别为350kg/m³、500 kg/m³、1000 kg/m³、1500 kg/m³、2000 kg/m³以及2500 kg/m³的6种粒子在口径为0.02m的漏斗中进行下落,其下降速度随下降高度增大所呈现的变化规律如图2~图7所示。由图中可以看出,粒子在散料器出口处初始速度较大,并且随着下降高度的增加,其速度出现衰减现象,但粒子群外围粒子速度大致相同。

在图中可以看出,随着粒子密度的增加,靠近中心轴

线处粒子速度的大小以及衰减度呈现不同的变化规律。当粒子密度增加时,粒子靠近中心轴线处速度呈现出递增趋势,即粒子密度越大,其中心轴线速度也越大,并且随着粒子下落距离的增加,粒子下降速度衰减程度减小。呈现这一现象的原因是粒子密度越大,其单个粒子在下落过程中所获得的动能也越大,因此速度越大。并且由图中可以看出,随着粒子密度的增加,在相同高度粒子的散射半径 r 减小。

2.2 散料器开口口径对粒子散射程度的影响

图8~图11为散料器出口口径为10mm、20mm、30mm以及40mm时,下落粒子浓度随高度的变化趋势图。由图中可以看出,在粒子在下落初始段粒子散射半径 r 距离并不显著,在这一阶段粒子与空气接触并不充分,只有粒子群外围粒子与空气进行摩擦作用。在随后的下落过程中,粒子散射半径 r 有显著的变化,在这一阶段粒子群中

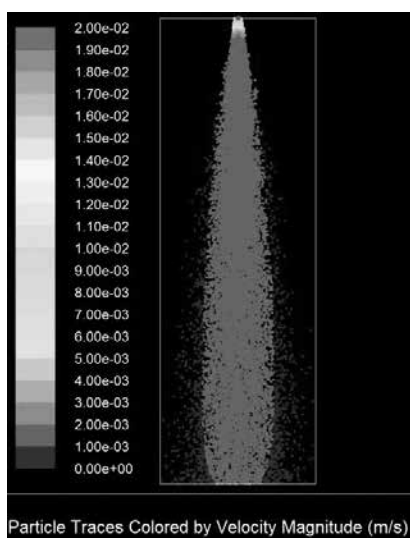


图2 粒子密度 2500kg/m³

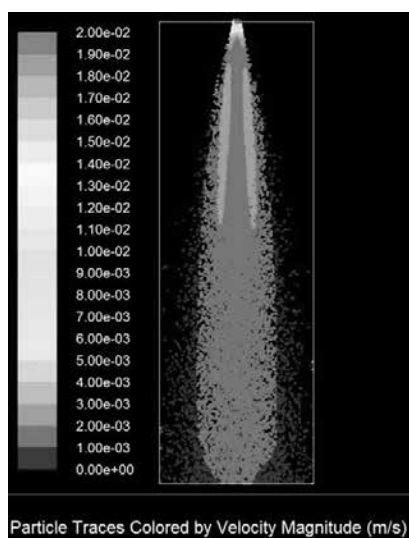


图3 粒子密度 2000kg/m³

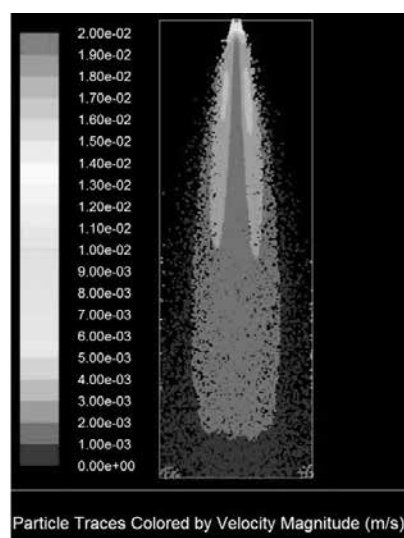


图4 粒子密度 1500kg/m³

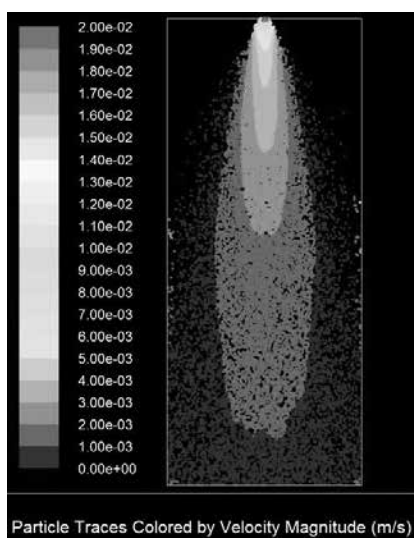


图5 粒子密度 1000kg/m³

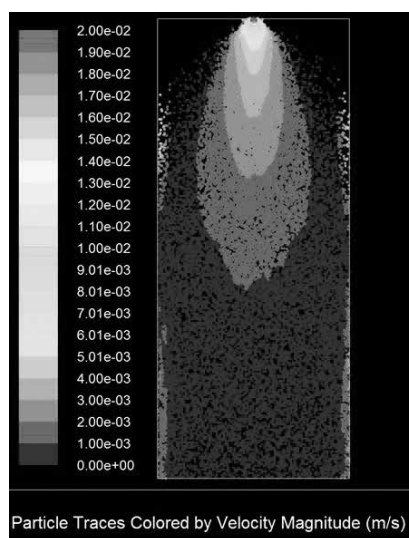


图6 粒子密度 500kg/m³

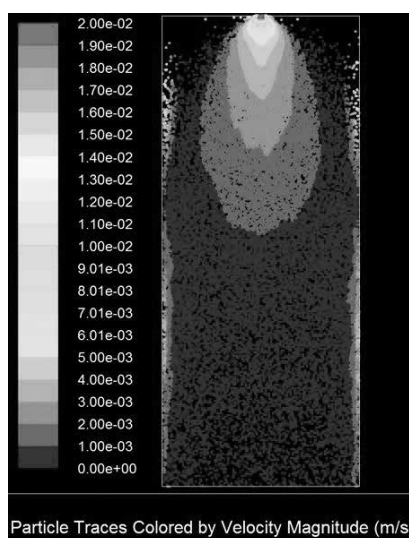


图7 粒子密度 350kg/m³

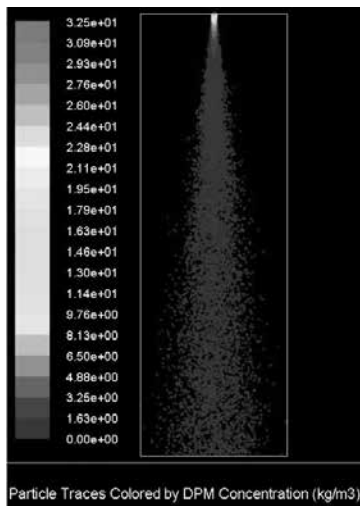


图 8 开口口径 10mm

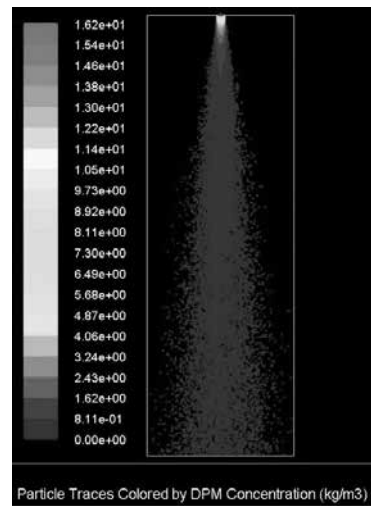


图 9 开口口径 20mm

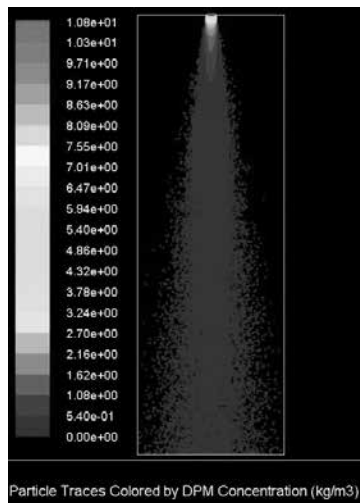


图 10 开口口径 30mm

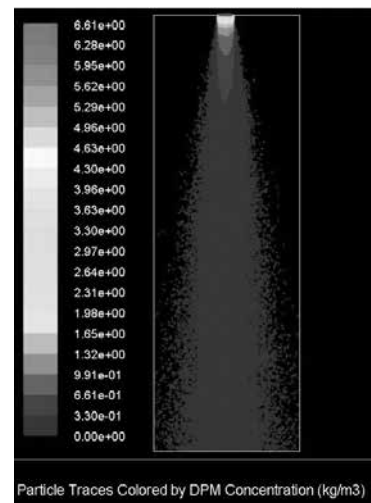


图 11 开口口径 40mm

有更多的粒子与空气发生相互作用并且产生的剪切力与羽流作用迫使粒子在下降过程中横向散射。在最终阶段粒子散射半径 r 趋于平缓,在这一阶段粒子与空气的相互作用达到了平衡,重力对粒子的运动起到了主导作用。

另外由图 8~ 图 11 可以看出,散射粒子半径随着散料器出口口径的增大也在增加,这是因为随着散料器出口口径的增大,散射粒子外围粒子与空气的相互作用力也在不断增大,这就导致散射半径 r 越大。

3 结论

通过对不同密度粒子下落状态以及在不同散料器出口口径粒子下落状态进行分析可以得出以下结论:

1、粒子在散料器出口处初始速度较大,并且随着下降高度的增加,其速度出现衰减现象,但粒子群外围粒子速度大致相同。与此同时,随着粒子密度的增加,粒子靠近中心轴线处速度呈现出递增趋势,即粒子密度越大,其中心轴线速度也越大。

2、对于不同散料器出口口径,粒子在下落初始阶段其散射半径 r 距离并不显著。但随着下落过程的持续,粒子散射半径随着散料器出口口径的增大而增大。

参考文献

- [1] 王勤波,肖文娟,安勇,王学勤. 雾霾的形成原因及治理方法小析[J]. 科技视界, 2014,(14):256. [2017-10-12].
- [2] Heitbrink, W., A., Baron, P. A., and Willeke, K., "An Investigation of Dust Generation by Free Falling Powders", American Industrial Hygiene Association, J., 53(10), October, 1992, pp.617-624.
- [3] 孙一坚. 工业通风[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [4] Hemon, WCL, Plant and process ventilation.[M] The Industrial Press, 1963.
- [5] Tooker G.E. Controlling fugitive dust emissions in material handling operations[J]. Bulk Solids Handling, 1992, 12(2): 227-32.
- [6] Uchiyama T. numerical analysis of particulate jet general by free falling particles. Powder technology 2004, 145(2):123-130.
- [7] 王锐,陈斌. 三维格子涡方法模拟自由下落粒子群[J]. 工程热物理学报, 2014,35(03):499-502. [2017-10-13].

外呼吸式玻璃幕墙数值模拟研究

张 艺, 刘泽勤

(冷冻冷藏技术教育部工程研究中心, 天津市制冷技术重点实验室, 天津商业大学机械工程学院,
天津 300134)

〔摘 要〕本文以某办公楼的外呼吸式玻璃幕墙为例, 利用 CFD 软件对幕墙内部的流场进行了数值模拟研究, 对比不同宽度热通道内的流场变化对通道内空气流动换热效率的影响, 得出热通道宽度越宽越不利于其内部空气换热, 进而增大了建筑能耗的结论, 该结果对实际工程设计有一定的参考价值。

〔关键词〕玻璃幕墙; 流场; 换热效率; 建筑能耗

0 引言

双层玻璃幕墙又被称为双层通风幕墙或热通道幕墙等, 最早出现在 20 世纪 90 年代的欧洲。双层玻璃幕墙以良好的通透性、新颖的造型和合理的结构为人们所青睐, 是目前高档建筑显著的特征。呼吸式双层幕墙由内外 2 层玻璃幕墙组成, 在内外幕墙之间形成一个相对封闭的空间, 空气一般从幕墙下部进风口入, 从上部排风口出, 通道内的空气通常处于流动状态。根据空气流动方式的不同, 双层玻璃幕墙又分为外呼吸式和内呼吸式两种。内呼吸式玻璃幕墙的外层玻璃是完全封闭的, 内层玻璃幕墙上设置进风口和出风口, 其空气循环过程均在室内进行, 使得内层幕墙的外表面温度接近室内温度, 降低了采暖和制冷的能耗。而外呼吸式玻璃幕墙则与内呼吸式的设计相反, 其内层玻璃是完全封闭的, 在外层玻璃幕墙上设置进风口和出风口, 室外新风从幕墙下部的进风口进入通道, 经过热通道时带走热量, 而后从幕墙上部的出风口排出^[1]。外呼吸玻璃幕墙是目前双层通风幕墙中应用最广泛的一种, 在夏季, 利用内外层幕墙之间形成通风通道的烟囱效应和自然通风, 带走通道间的热量, 降低内层幕墙外表面温度, 达到降低房间温度的目的, 在冬季, 关闭外层幕墙上的通风口, 热通道成为封闭空间, 利用温室效应, 提高内层幕墙的外表面温度, 起到保温作用, 减少建筑物的采暖负荷^[2]。与传统的单层玻璃幕墙相比, 双层玻璃幕墙可节能 40%~60%, 而且具有集采光、防水、防风、隔声和装饰于一体的优点。因此, 外呼吸式双层玻璃幕墙在现代建筑中有很高的应用和研究价值。

本文采用 CFD 对某一办公楼的外呼吸式玻璃幕墙进行数值模拟研究, 为控制热通道内的空气流速不受外界环境的影响保持定值, 模拟时采用机械通风的方式, 在出风口处加装风机进行强制通风。探究在相同的出风速度条件下, 不同的热通道宽度对其内流场形态的影响。

1 数值模拟

1.1 模型简介

以某一办公楼的外呼吸式玻璃幕墙为研究对象, 分析幕墙在夏季的工作状况。为研究方便将整体的幕墙模型进行简化, 幕墙内外层采用钢化玻璃, 进风口高度设为 250mm, 幕墙热通道的长为 2000mm, 高为 4000mm, 模拟热通道的宽度范围取为 500mm~600mm, 以 250mm 为单位划分, 分别模拟热通道的宽度为 500mm、525mm、550mm、575mm、600mm。图 1 为幕墙热通道宽度为 500mm 的模型。

1.2 工况与边界条件设定

工况假设:

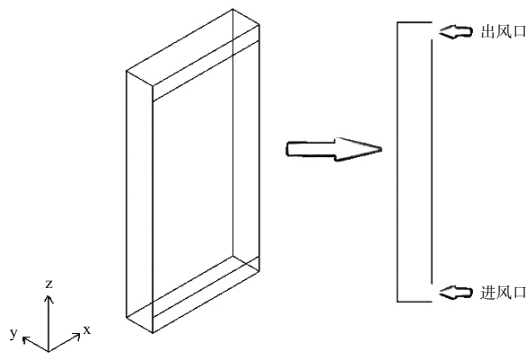


图 1 模拟幕墙热通道宽度为 500mm 的模型

(1) 对于外界环境方面: 外界环境稳定, 忽略室外风速的影响;

(2) 对于幕墙自身方面: 不考虑玻璃的蓄热, 幕墙封闭性良好, 不考虑空气渗透, 幕墙材料特性恒定;

(3) 对于热通道方面: 通道内空气为不可压缩牛顿流体, 满足 Boussinesq 假设, 热通道四周绝热, 热通道内空气只与幕墙内外层钢化玻璃换热。

边界条件设定:

(1) 对所有玻璃壁面上的速度取无滑移边界条件 $u=v=0$; 根据舒适性空调夏季室内设计参数, 假设室内空气温度恒定维持在 26°C , 为简化计算, 内层幕墙表面温度假定与室内温度一致, 按等温边界 26°C 设定; 对于外层幕墙, 边界设为第二类边界条件, 即定热流边界条件, 考虑到太阳辐射及透过外层钢化玻璃的透射比, 太阳辐射强度按 $300\text{W}/\text{m}^2$ 考虑, 除内外层玻璃幕墙外, 其他边界均按绝热计算^[3]。

(2) 采用机械通风, 通风机设置于出风口处, 出风口风速定为 $2\text{M}/\text{S}$, 进风口设为压力入口, 因不考虑风压影响, 即压差 $\Delta P_{\text{wind}}=0\text{Pa}$ 。进风口处温度与室外温度一致, 根据气象资料选择为室外空气温度 $T_{\text{out}}=32^{\circ}\text{C}$ 。

2 模拟结果分析

热通道内的空气流动状态是呼吸式玻璃幕墙最重要的特征, 空气流动一方面带走了通道内大部分外层玻璃幕墙接受的太阳辐射热量, 另一方面也有有效的阻隔了通道内的热量向内层玻璃传递, 使得内层玻璃处在相对较低的温度环境中, 从而有效的降低了向室内传递的热量, 减少了建筑的热损失和能耗^[4]。因此幕墙热通道内的空气流动状态直接关系到墙体的热工性能和建筑节能的效果, 因此幕墙内空气流动的空间分布是研究的重点^[5]。图 2 为不同宽度

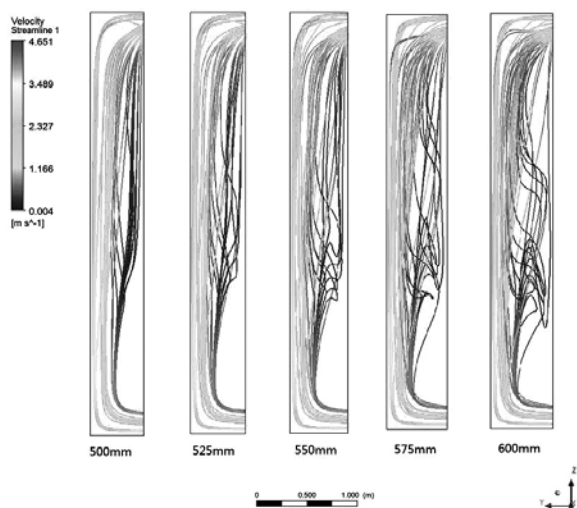


图2 不同宽度热通道的模拟结果流线对比图

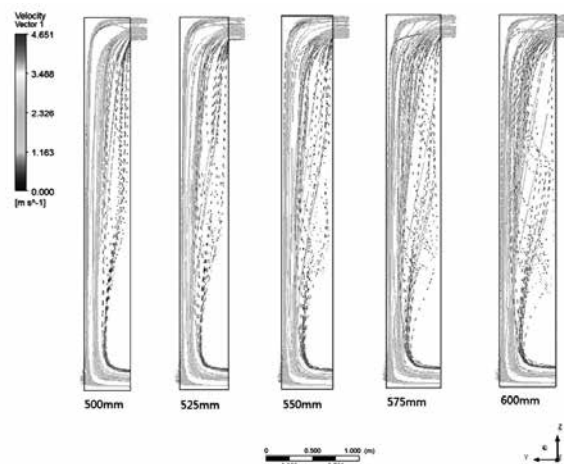


图3 不同宽度热通道的模拟结果流线速度矢量对比图

的热通道模拟结果显示的流线对比图,图3为不同宽度的热通道模拟结果显示的流线速度矢量对比图,由于通道内气流组织在一段时间后可以达到稳定状态,因此模拟视为稳态过程,由流线图可知迹线图从而有助于了解幕墙内的流动状况。

由图2、图3的模拟结果显示图可知,该种进出风口的位置设置使得靠近内层玻璃的空气流速要大一些,随着热通道宽度的增加靠近内层玻璃侧的空气流速没有太大的变化,而靠近外层玻璃侧的空气流速总体上处于减弱趋势,使得通道内空气流动整体的换热效率减小。主要有两点原因:

(1) 由于空间的增大,靠近内层玻璃侧比较高速的流体由于卷吸作用会把部分低速流体卷吸进高速流体中,使得本就处于劣势的靠近外层玻璃空气的换热量更少。

(2) 虽然在卷吸的过程中也会有漩涡的产生(漩涡的产生使得进入通道的室外空气与通道内的空气能够充分混合,从而提高换热效率和幕墙的热工性能),但是低速的漩涡与高速的卷吸相互作用使得靠近外层玻璃侧空气的流速随着热通道宽度的增加而逐渐减少。

3 结论

热通道内的主要热量是由于外层玻璃幕墙接受的太阳

辐射热量所致,靠近外层玻璃幕墙侧的空气流速因此应尽可能大些,可以带走更多的热量。模拟结果表明,随着热通道宽度的增加不仅使得靠近外层玻璃幕墙侧的空气流速减小,降低整体的换热效率和幕墙的热工性能,增加建筑能耗,而且还占用建筑空间,浪费办公室的可用空间,得不偿失。该模拟结果对外呼吸式双层玻璃幕墙的设计具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 孙海波,王汉青,王志勇,陈裕. 外呼吸玻璃幕墙传热特性CFD模拟研究[J]. 建筑热能通风空调,2010,29(06):98-100.
- [2] 曹军. 外呼吸式双层玻璃幕墙模拟分析[J]. 建材技术与应用,2011,(04):1-2.
- [3] 侯茂盛. 《玻璃幕墙工程技术规范》简介[J]. 工程建设标准化,1996,(05):23-25.
- [4] 刘东亮,岳永亮,胡居传. 外呼吸式双层玻璃幕墙内流动和换热的数值研究[J]. 制冷与空调,2010,10(04):97-100+104.
- [5] 贺孟春. 双层玻璃幕墙建筑的室内空气环境控制研究[D]. 同济大学,2009.

低瑞利数下竖直恒温板自然对流的模拟

刘聪聪¹, 刘泽勤¹, 赵永岭²

(1. 冷冻冷藏技术教育部工程研究中心, 天津市制冷技术重点实验室, 天津商业大学机械工程学院, 天津 300134; 2. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225009)

[摘要] 本文对竖直恒温板的自然对流换热进行模拟, 研究处于 $Ra=5.31 \times 10^8$, $Pr=6.2442$ 状态下的近板处流体的温度、速度变化。通过对近板处流体的温度、速度进行分析, 发现近板处的流体的温度、速度先是迅速增加, 随着换热的继续, 流体温度、速度的变化趋势减弱, 并稳定在一个值附近; 距离竖直板相同距离的位置, 随着竖直方向高度的增加, 流体的温度、速度也在增加, 且增长趋势在逐渐减弱, 达到稳定的时间也越长; 处于相同竖直高度的位置, 距离竖直板越远的流体, 其温度越低, 速度越大, 且温度、速度的波动越大。

[关键词] 竖直恒温平板; 对流换热; 数值模拟; 温度; 速度

0 前言

自然对流是没有外界驱动力, 流体依然存在运动的流动状态。由于流体内部存在温度差, 使得高温流体密度小, 形成向上的流动, 低温流体密度大, 形成下降的流动, 进而引起流体内部的流动。

竖直平板处的自然对流换热与流动是一个经典问题, 从上个世纪五十年代, 就有研究人员对竖直平板热边界层不稳定性进行研究。竖直平板自然对流有很多工程应用的背景, 如放射性废料的冷却、核反应堆中的换热等^[1], 掌握流动边界层的流动和换热特性对解决工程问题具有实际意义^[2]。高温竖直壁面与周围低温流体存在温差, 则会形成沿壁面上升的流动; 低温竖直壁面与周围高温流体存在温差, 则会形成沿壁面下降的流动。当流动处于低雷诺数下时, 层流占流动主体; 当流动处于高雷诺数下, 流动中则会出现层流、过渡、湍流三种区域^[3]。

本次模拟使用 Fluent15.0 软件, 采用层流模型、SIMPLE 算法, 对低雷诺数状态下的恒温竖直平板进行模拟, 目的在于分析其边界层内的温度、速度特性。

1 物理模型与数学模型

1.1 物理模型

计算物理模型如图 1 所示, 模型为二维, EB 是恒温换热板, ABCD 区域是流体, 流体选用水, 网格尺寸为 336×127 。

模型的边界条件如表 1 所示。

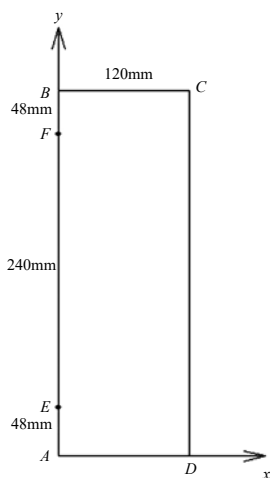


图 1 模拟模型

表 1 模型边界条件设置

边	名称	边界条件类型	边界条件详细参数
EB	恒温换热板	Wall	300.15K
AE	墙体	Wall	Heatflow: 0W/m²
AD	墙体	Wall	Heatflow: 0W/m²
BC	压力出口	Pressure outlet	298.15K
CD	压力入口	Pressure inlet	300K

1.2 数学模型

模拟采用 Boussinesq 假设流体, 质量守恒方程、二维动量守恒方程以及能量守恒方程形式如下:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{Ra}{Pr} T \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

式中: u 、 v 分别表示 x 、 y 方向上的速度; p 表示压力; τ 表示时间; ρ 表示流体密度; T 表示温度。

瑞利数与普朗特数的计算公式如下:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta\phi H^3}{\nu k}$$

$$Pr = \frac{\nu}{k}$$

式中: g 是重力加速度; β 是流体热膨胀系数; ν 是流体动力粘性系数; k 是流体的热扩散率^[4]。

本次模拟选用层流模型, 并用 SIMPLE 算法处理压力-速度耦合。

2 模拟结果分析与讨论

经计算, 本次模拟的瑞利数为 5.31×10^8 , 普朗特数为 6.2442。模拟通过分析在不同时间各个观测点的温度、速度值, 得出了边界层处的温度、速度变化规律。

2.1 竖直方向温度、速度变化

图 2 显示了距离竖直平板 0.1mm 处各观测点的温度, 竖直板周围的流体温度会先增长, 经历一个波动后, 最终稳定在某一值附近。当模拟开始, 观测点温度变化非常快, 随着时间的推移, 温度的变化率变小。由竖直板上游 (0.1,49) 到 (0.1,58) 十处观测点的温度曲线能够发现, 随着高度的增加, 观测点的温度增加, 且增长趋势在逐渐减弱, 温度达到平衡的时间也越长。由下游处 (0.1,88),

(0.1,128), (0.1,168), (0.1,208), (0.1,248) 五个点, 能够看出相同趋势, 越是竖直高度高的观测点, 其温度值的波动会越大, 且波动的时间会越长。

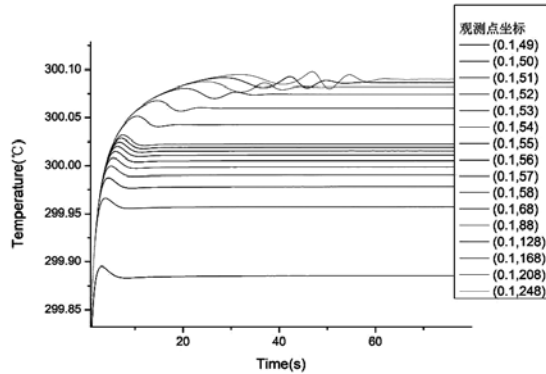


图2 距离竖直板 0.1mm 观测点的温度

图3显示了观测点在水平方向上的速度曲线图。各观测点的x方向速度先迅速增长, 经历一段波动后, 最终稳定在某一值附近。当模拟开始, 观测点速度变化非常快, 随着时间的推移, 速度的变化率变小。由竖直板上游(0.1,49)到(0.1,58)十处观测点的温度曲线能够发现, 随着高度的增加, 观测点在x方向的速度减小, 且减小趋势在逐渐减弱, 速度达到平衡的时间也越长。由下游处(0.1,88), (0.1,128), (0.1,168), (0.1,208), (0.1,248)五个点, 能够看出相同趋势, 越是竖直高度高的观测点, 其速度值的波动会越大, 且波动的时间会越长。

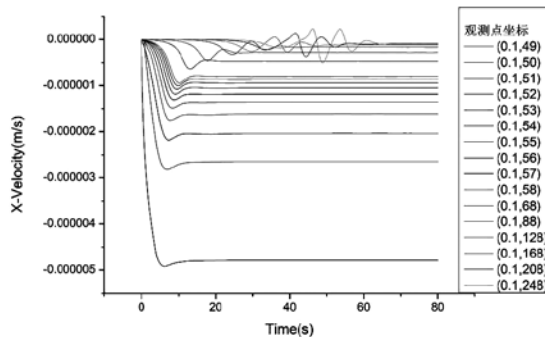


图3 距离竖直板 0.1mm 观测点的 x 方向速度

图4显示了各观测点在垂直方向上的速度曲线图。各观测点的y方向速度都是增加, 然后稳定在某一值附近。当模拟开始, 观测点速度变化非常快, 随着模拟的进行, 速度的变化率变小。由竖直板上游(0.1,49)到(0.1,58)十处观测点的温度曲线能够发现, 随着高度的增加, 观测点在y方向的速度增加, 且增加趋势在减弱, 速度达到平衡的时间也越长。由下游处(0.1,88), (0.1,128), (0.1,168), (0.1,208), (0.1,248)五个点, 能够看出相同趋势, 越是竖直高度高的观测点, 其速度值的波动会越大, 且波动的时间会越长。

由观测点x、y方向的速度, 我们能得到观测点的速度, 由于x方向速度差y方向速度两个数量级, 所以观测点的速度更多取决于y方向的速度。

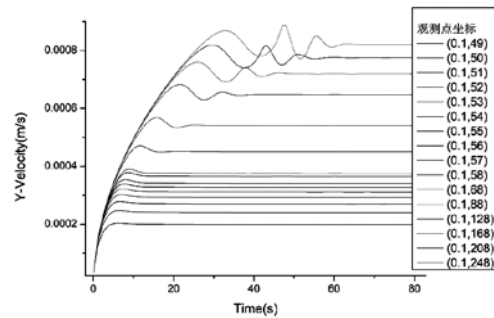


图4 距离竖直板 0.1mm 观测点的 y 方向速度

图5是(0.1,49)、(0.1,50)、(0.1,51)、(0.1,52)、(0.1,53)、(0.1,54)、(0.1,55)、(0.1,56)、(0.1,57)、(0.1,58)十个点在同一时刻温度的分布图。从图中我们能够看出, 在模拟进行到2.1645s时, 除了(0.1,49), 其余观测点的温度几乎相同; 当模拟进行到5.1615s时, 各观测点的温度有了明显的差别, 即随着竖直高度的增加, 观测点的温度也在增加, 但其增加趋势减小。观测点的温度都在随时间增加, 但部分观测点在5.1615s时的温度高于10.1615s时的温度, 这是因为在5.1615s时, 观测点的温度存在波动。

接着我们又分析了距离竖直平板0.5mm、1mm处观测点的温度、速度分布, 其分析结果与上述结果相同。

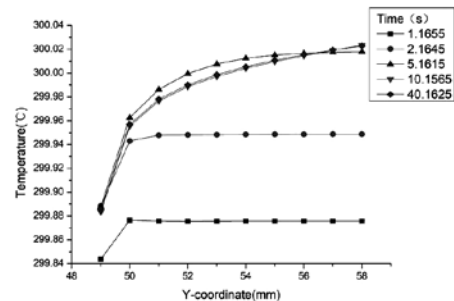


图5 同一时刻, 距离竖直板 0.1mm 观测点的温度

2.2 水平方向温度、速度变化

图6显示了同一高度, 距离竖直板距离不同的三个观测点的温度分布, 所选观测点分别为(0.1,168)、(0.5,168)、(1,168)。通过观测点的温度曲线图能够发现, 各观测点的温度先是迅速增长, 随着模拟的继续, 温度的变化幅度减小, 且模拟期间会经历一个温度波动阶段, 最后稳定在一个值附近。随着观测点距离平板的距离增加, 其温度呈现下降趋势, 且温度达到平衡的时间增加, 波动阶段的波动幅度增加。

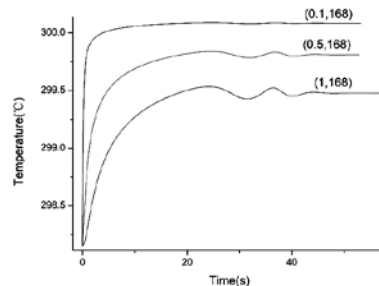


图6 同一竖直高度的观测点的温度

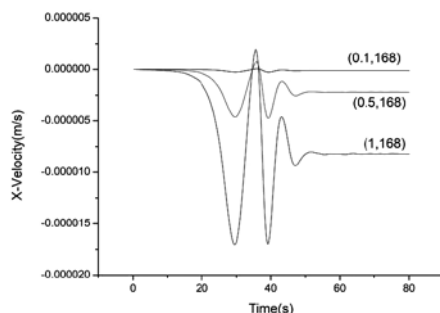


图7 同一竖直高度的观测点的 x 方向速度

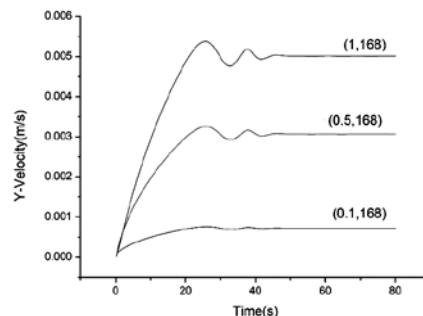


图8 同一竖直高度的观测点的 y 方向速度

图7、8分别展示了观测点在x、y方向上的速度分布。距离垂直板距离近的观测点速度变化小,随着距离的增加,观测点速度增加。在模拟中,流体速度会经历一个波动阶段,且距离平板距离越远,其波动幅度越大,最终速度会稳定在一个值附近。

3 结论

通过对竖直平板自然对流的模拟,分析了竖直板附近流体的温度、速度变化,得到以下结论:

在竖直平板自然对流换热中,板附近的流体的温度、速度一开始会迅速的增加,随着换热的继续,流体温度、速度会稳定在一个值附近,在稳定前,温度、速度还会经历一段波动;

在相同时刻,距离竖直板相同距离的位置,随着竖直方向高度的增加,流体的温度、速度也在增加,这种增长趋势在逐渐减弱,竖直方向高度越高的位置,流体温度、速度达到稳定的时间也越长;

在相同时刻,处于相同竖直高度的位置,距离竖直板越远的流体,其温度越低,速度越大,且温度、速度的波动越大。

参考文献

- [1] 阳祥,陶文铨.高瑞利数下封闭腔内自然对流的数值模拟.西安交通大学学报.27-31.
- [2] 闫理贵,傅松.竖直加热平板对流边界层的数值模拟.山东大学学报.143-146.
- [3] Yongling Zhao, Chengwang Lei, John.C.Patterson. Response of a vertical natural convection boundary layer to random and single-mode perturbations.Australasian Fluid Mechanics Conference.
- [4] Yongling Zhao, Chengwang Lei, John.C.Patterson. Response of the thermal boundary layer adjacent to an isothermally heated vertical surface.

基于不确定性分析的制冷机组群控策略 鲁棒分析与选择

廖云丹¹, 黄公胜², 吴会军¹, 丁云飞¹

(1. 广州大学 土木工程学院, 广州 510006; 2. 香港城市大学 建筑与土木工程系, 香港 999077)

[摘要] 制冷机组是空调系统的核心部件, 其能耗比例在整个空调系统中可高达 60%。合理的冷机群控是优化冷机系统运行、降低机组能耗并保证建筑热舒适性的主要措施。然而, 在实际应用中, 冷机群控会受到不确定性因素的影响而无法有效地根据负荷控制冷机台数, 并且不同控制策略会随着制冷机组本身的不确定性情况体现出不同的可靠性和鲁棒性。因此, 本文提供一种基于不确定性分析的制冷机组群控策略选择的简化数值方法。该方法利用机组运行数据建立制冷机组平台, 以不确定性研究为基础, 对备选的群控策略进行鲁棒分析, 并通过多准则决策方法选出最适合于该制冷机组的群控策略。案例研究表明, 该方法可以根据冷机本身的不确定性情况, 简便有效地选择出最合理的群控策略, 提高了群控的可靠性和鲁棒性。

[关键词] 制冷机组; 群控; 不确定性; 可靠性; 鲁棒性

0 引言

随着空调系统在现代建筑中的广泛应用, 空调带来的巨大能耗受到了密切的关注。目前, 全球 40% 的能量用于建筑系统, 而空调的能耗占了其中的大部分。尤其是在大型公共建筑中, 空调所占

的能耗比例高达 70%^[1]。制冷机组作为空调系统的核心部件, 其能耗比例在整个空调系统中可达 60% 以上^[2]。因此, 实现制冷机组的高效稳定运行, 并在保证建筑热舒适性的同时降低机组的能耗是实现建筑节能的有效途径。

实现制冷机组的高效节能, 合理的冷机群控是关键。冷机群控是利用自动控制技术对制冷站内的相关设备进行自动化的监控, 从而使制冷机组的冷量供给与末端冷负荷需求相适应。常用的四种群控策略包括了冷负荷控制法, 回水温度控制法, 电流比控制法和旁通流量控制法^[3]。这些策略采用不同的负荷指标指示当前的建筑负荷, 并与设定的阈值进行对比, 决定增开或者减少一台冷机, 从而实现根据负荷变化进行冷机台数控制。从理论上讲, 这些策略具有相同的准确性和可靠性。

然而, 在实际应用中, 由于不确定性因素的存在, 这些控制策略往往不能进行有效的群控。不确定性 (uncertainty) 是指没有足够信息来精确描述当前情况的状态。对于制冷机组群控而言, 不确定性指的是运行过程中控制策略未能准确得知负荷的真实状态, 从而无法有效可靠地进行群控的现象。例如, 由于测量误差的影响, 冷负荷控制法所计算的负荷偏差可达 25% 以上, 基于这样的偏差值进行的群控不但出现了能源浪费和冷量供应不稳定, 而且频繁开关机对机组设备的运行寿命造成了严重的威胁^[4]。Liao 等^[5]的研究表明, 冷机群控策略会随着制冷机组本身的不确定性情况体现出不同程度的可靠性和鲁棒性。根据制冷机组本身的不确定性情况对群控策略进行鲁棒分析和选择是提高群控性能的必要措施。因此, 本文将提供一种基于不确定性分析的制冷机组群控策略的选择方法。该方法以简化的冷机模型为平台, 以不确定性研究为基础, 对备选的群控策略进行鲁棒分析, 并通过多准则决策方法选出最适合于制冷机组的群控策略。

1 冷机群控策略及不确定性分析

制冷机组群控的基本控制原理是直接或者间接测出建筑的负荷, 将之与所设定的制冷机组供冷能力阈值相比

较, 从而决定增开或者减少一台冷机。其目的是使制冷机组提供的冷量与建筑的冷负荷相适应, 从而使运行中的冷机效率达到最高, 如图 1 所示。其中, Q 是建筑负荷, 由方程 1 计算所得, Q_z^h 是对应 z 台冷机的制冷能力, 如果 $Q < Q_z^h$ 则说明运行 $z-1$ 台冷机的效率会高于运行 z 台冷机的效率, 从而需要关闭一台运行中的冷机。

$$Q = c_w \dot{m}_p (T_{rm} - T_{sup}) \quad (1)$$

其中, c_w 是冷冻水的比热容; $\dot{m}_p$ 是一次侧的冷冻水流量; T_{rm} 是冷冻水回水温度, T_{sup} 是冷冻水供水温度。公式 1 中的流量和温度均可在一次定流量回路的供回水干管上测得, 从而计算出冷负荷用于冷机群控, 即冷负荷控制法。

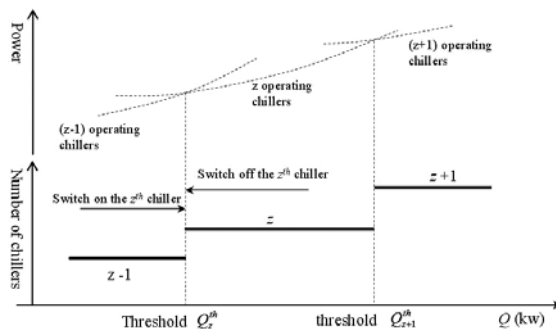


图 1 制冷机组群控的基本原理图

在实际应用中, 制冷机组可能具有不同的系统结构, 也会采用不同的指标来指示建筑的负荷变化, 因此, 根据负荷指标的不同, 产生了不同的群控策略。常用的策略包括: 冷负荷控制法, 回水温度控制法, 电流比控制法和旁通流量控制法。根据 Liao 等^[5]的研究, 这四种方法主要受到了四类不确定性因素的影响, 并且不同的群控策略对应的不确定性因素不同, 如表 1 所示。冷负荷控制法由于直接测量冷负荷, 只受到测量误差的影响; 电流比控制法由于需要通过利用 COP 曲线将冷负荷和控制指标对应起来, 因此, 在受到测量误差的影响的同时还受到了阈值误差的影响。回水温度控制法假定了供水温度和供水流量是恒定的, 但实际上供水温度是受制冷机内置控制器控制的,

存在控制误差；而水流量受到压差、管道变化阻力等因素的影响，存在运行误差；因而回水温度控制法受到了测量误差、控制误差和运行误差的影响。旁通流量控制法仅适用于一次定流量/二次变流量系统。该方法假定了一次侧流量恒定，故存在运行误差；二侧次流量由压差控制器控制，存在控制误差；并且该方法的阈值从原理上大于其他控制方法，存在阈值误差，因此该方法受到了测量误差，控制误差，运行误差和阈值误差的影响。

表 1 与制冷机组群控相关的不确定性因素

群控策略	测量误差	控制误差	运行误差	阈值误差
冷负荷控制法	√			
电流比控制法	√			√
回水温度控制法	√	√	√	
旁通流量控制法	√	√	√	√

由此可见，不同的群控方法受到不同不确定性因素的影响，当系统的配置不同，不同的控制策略必将体现出不同的控制效果，因此，基于不确定性的鲁棒分析选择出最适合的群控策略，必将有利于提高制冷机组群控的可靠性、稳定性和鲁棒性。

2 研究平台

由于四种典型的群控策略均可在二次泵变流量系统上应用，因此，本文以典型的二次泵变流量系统为研究平台，对群控策略进行不确定性分析，平台结构如图 2 所示。该系统由一次定流量系统和二级变流量系统组成，一级系统包括 4 台冷水机及对应的定流量水泵组成；二级系统由多台变流量水泵和空气处理机组组成。系统设置集水器及分水器，中间设旁通管连接进行一、二级流量平衡。

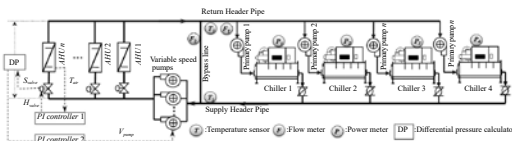


图 2 冷源系统结构图

3 鲁棒分析及策略选择的数值方法

3.1 数值方法框架

根据冷机群控的基本原理以及不确定性因素的特性，本文开发了一种鲁棒分析及策略选择数值方法，其框架如图 2 所示。该方法的主要步骤包括：（1）收集数据：在测试的过程中收集制冷机组的基本参数，并通过运行数据确定不确定性参数；（2）建立模型和模拟运算：用所收集的数据建立简化的制冷机组模型和不确定性因素模型，建立带有不确定性的负荷指标；以简化的制冷机组模型为平台，以带不确定性的负荷指标为指标，采用蒙特卡洛方法^[7]对备选的控制策略在不确定性情况下的鲁棒性进行分析；（3）鲁棒分析与选择：根据鲁棒分析的结果和决策者的偏好，利用多准则决策方法，计算出综合指标的大小，从而选择出最适合该制冷机组的控制策略。

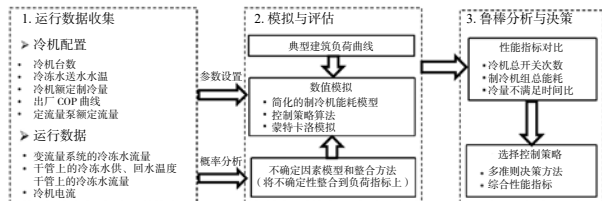


图 3 数值算法框架图

3.2 数据收集

所需收集的数据包括两组：第一组是收集制冷机组的基本参数，如制冷机台数及额定制冷量（用于建立控制策略）、送水温度和定流量系统的额定流量（用于计算理想情况下的负荷曲线）和出厂 COP 曲线（用于建立简化的机组能耗模型）。第二组是收集制冷机组的运行数据，用于建立不确定性参数的模型，例如，通过运行数据的统计方法获取供、回水温度和流量测量误差的期望值和标准差以得到其正态分布模型；通过压差的运行参数获取旁通流量控制法的控制误差模型等。

3.3 制冷机组的简化数值模型和不确定因素模型

制冷机组的数值模型由所收集的运行数据拟合而成，所需的模型公式如图 3 所示。首先，运行数据将被用于拟合部分负荷与 COP 之间的关系曲线（即，PLR-COP 曲线， $COP=f_1(PLR)$ ），从而得到简化的能耗模型用于计算机组的能耗；同时，运行数据也被用于拟合负荷变化与二级水流量之间的关系曲线（ $Q-m$ 曲线），从而得到二级变流量系统的流量模型（即 $\dot{m}_s=f_2(Q/Q_{max})\cdot\dot{m}_{max}$ ）。设定典型的建筑负荷变化曲线，比较负荷与在线制冷机总额定制冷量之间的关系，确定制冷机组在 i^{th} 时刻所负载的冷负荷 $Q_{me}(i)$ ，然后根据图中的公式计算出 i^{th} 对应的各个变量：部分负荷率 $PLR(i)$ ， $COP(i)$ ，冷冻水回水温度 $T_{rm}(i)$ ，冷冻水送水温度 $T_{sp}(i)$ ，一级流量 $\dot{m}_p$ 和在线制冷机的总功率 $P_{tot}(i)$ 。根据以上所得的变量，利用负荷指标计算公式将变量与不确定因素的模型结合，即可计算出可以模拟实际过程的具有不确定性的负荷指标。比较这些指标与控制阈值即可获得制冷机组群控信号。

根据 Liao 等^[5]的研究，四个影响制冷机组群控的误差量可以用不同的数学模型来表示。其中，根据 JCGM 100^[6]的推荐，测量误差可以用无偏正态分布来表示，即

$$\Delta \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

式中， σ 是标准方差，可以由传感器的精度来确定。

控制误差和运行误差呈现周期性变化，采用傅里叶快速变换方法对运行数据进行分析，得到控制误差和运行误差可以用公式 3 表示，其中， n_c 是需要考虑的项数， ω_i ， c_i 是第 i 项的频率和振幅。

$$\Delta_{con,oper} = \sum_{i=1}^{n_c} c_i \sin(\omega_i t) \quad (3)$$

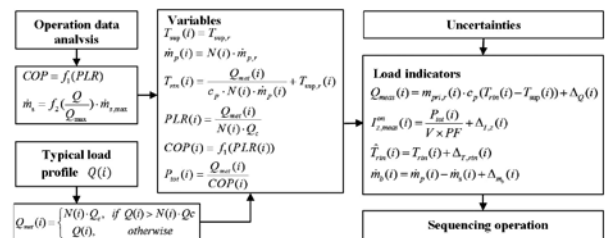


图 4 制冷机组的数值模型

数据分析表明，电流比控制法的阈值误差可以用正态分布来表示（式 1），而流量控制法中的阈值误差是由控制法本身的设定值确定的，故而不需要单独模型^[5]。

由于一个控制策略受到多个不确定性因素的影响，要对不确定性因素进行鲁棒分析，需要将不确定因素整合到负荷指标上。四种控制策略的整合方法可以参考文献

[5], 这里只给出整合的结果。

负荷控制法的指标是所测得的建筑负荷, 其偏差值的计算方法为:

$$\Delta_Q = \Delta_{m,p,meas}(T_{rin,meas} - T_{sup,meas}) + \dot{m}_{p,meas}(\Delta_{T,rin,meas} - \Delta_{T,sup,meas}) \quad (4)$$

其中, $\dot{m}_{p,meas}$, $T_{rin,meas}$, $T_{sup,meas}$ 是在一次侧干管上实际测得的冷冻水流量, 回水温度和供水温度。 $\Delta_{m,p,meas}$, $\Delta_{T,rin,meas}$, $\Delta_{T,sup,meas}$ 是对应的测量误差。

回水温度控制法的负荷指标是回水温度, 其偏差的计算方法为:

$$\Delta_{T,rin} = \frac{\Delta_{m,p,oper}}{\dot{m}_{p,r}}(T_{rin,meas} - \Delta_{T,rin,meas} - T_{sup,st}) - \Delta_{T,sup,cont}(1 + \frac{\Delta_{m,p,oper}}{\dot{m}_{p,r}}) - \Delta_{T,rin,meas} \quad (5)$$

其中, $\dot{m}_{p,r}$, $\Delta_{m,p,oper}$ 是一次侧测定流量水泵的额定流量和运行误差, $T_{sup,st}$ 和 $\Delta_{T,sup,cont}$ 是冷冻水供水温度的设定值和控制误差, $\Delta_{T,rin,meas}$ 是冷冻水回水温度的测量误差。

旁通流量控制法的负荷指标是旁通管中的旁通流量, 其偏差的计算方法为

$$\Delta_{m,b} = \Delta_{m,p,oper} - \Delta_{m,s,cont} + \Delta_{m,b,meas} \quad (6)$$

其中, $\Delta_{m,s,cont}$ 是二次侧压差控制引起的控制误差; $\Delta_{m,p,oper}$ 是一次侧测定流量水泵的运行误差; $\Delta_{m,b,meas}$ 是旁通流量的测量误差。

电流比控制法的负荷指标是电流。其对应的偏差计算方法为

$$\Delta_{I,z} = \Delta_{I,meas} - \frac{\Delta_{COP}}{COP_r}(I_{z,meas}^{on} - \Delta_{I,meas}) \quad (7)$$

其中 $\Delta_{I,meas}$ 是电流测量误差; Δ_{COP} 是阈值误差; COP_r 是额定的 COP 曲线上的值; $I_{z,meas}^{on}$ 是理想的控制阈值。

3.4 鲁棒分析与多准则决策

为了量化四种制冷机组群控策略的控制性能, 本文定义了三个性能指标: 制冷机组的总开关次数 (N_t), 总的能耗量 (E_n) 以及冷量不满足时间比 (P_{uc})。其中, 总开关次数用于量化制冷机开关频率, 每次开机或者关机则总数加 1。能耗用于量化在不同控制策略下制冷机组的耗能情况, 等于运行期间内所有运行中的制冷机组的能耗总和。制冷机组群控的目的是在提供热舒适的同时提高能效, 因此, 冷量不满足时间比是用来量化制冷机组在控制情况下所引起的不舒适程度。本文中假设当冷冻水供水温度高于一定值 ε 时, 机组所提供的冷量远远不足, 即:

$$P_{UC} = \frac{1}{\tau} \sum_k \zeta_k \Delta t \quad (8)$$

其中, ζ_k 是布尔变量, $\zeta_k = \begin{cases} 1, & \text{if } T_{sup,act,k} > T_{sup} + \varepsilon \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$; τ 是总运行时间; Δt 是时间步; $T_{sup,act,k}$ 是所测得的供水温度; ε 是用户自定义参数, 本文设定为 0.5°C 。

鲁棒性是一个系统抵御外界变化并维持本身特性的能力^[7], 根据这个定义, 群控策略的鲁棒性应该由其在考虑不确定性和不考虑不确定性情况下的控制性能的变化来描述。因此, 以上定义的两个性能指标的变化率将被用于描述控制策略的鲁棒性和可靠性, 其计算如下

$$\Delta N_t = \frac{N_t - N_{t,0}}{N_{t,0}} 100\%, \Delta P_{UC} = P_{UC} - P_{UC,0}, \Delta E_n = \frac{E_n - E_{n,0}}{E_{n,0}} 100\% \quad (9)$$

其中, $N_{t,0}$, $P_{UC,0}$, $E_{n,0}$ 是不考虑不确定性因素情况下的控制性能。

为了选择更合适于所考虑的制冷机组的控制策略, 决策者需要同时考虑以上三个性能并权衡三者之间的重要性。考虑到决策者可能对不同的性能会有不同的偏好, 根据多准则决策方法, 本文定义了一个综合指标 D 来综合描述控制策略的鲁棒性和决策者的偏好, 其定义如下

$$D = \sqrt{(w_1 \cdot \Delta N_t)^2 + (w_2 \cdot \Delta P_{UC})^2 + (w_3 \cdot \Delta E_n)^2} \quad (10)$$

其中, w_1 , w_2 , w_3 是决策者对每个性能参数的加权值, $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。

4 验证与结果分析

为了验证数值方法的有效性和可靠性, 作者将该方法应用到图 2 所示的制冷机组上, 四种基本控制策略作为选项。每个控制策略的控制性能将与文献 [5] 中所示的具体模拟平台 (TRNSYS) 所得结果对比, 若是本文所开发的简化方法可以得到与具体模拟平台所得的结果相同, 则说明该方法是有效和可靠的, 因为该方法在提供可靠结果的同时大大降低了建立具体模拟平台的复杂性。

首先对该制冷机组的运行数据进行收集和分析。该制冷机组由四台制冷量为 600kW 的冷水机组并联组成, 四台流量为 28.65L/s 的定流量水泵与冷水机组连锁控制。冷冻水的送水温度为 7°C , 二次侧变流量控制, 最大流量为 114.6L/s。一周的冷负荷曲线将被用于模拟运行。制冷机组所受到的不确定性因素可以用表 2 来表示, 而其拟合 PLR-COP 曲线和 Q - m 曲线如方程 11、12 所示。四种控制策略的阈值设置则如表 3 所示。其中, 由于冷负荷控制法遵循了冷机群控的基本原理, 可以看作是基准策略, 其阈值设置可作为参考值, 其他方法的阈值在其基础上计算得出。在不考虑不确定性的情况下, 其控制性能可以作为基准值, 用于计算控制性能的变化率。

$$COP = -6.3845 \cdot PLR^2 + 11.349 \cdot PLR - 0.0611 \quad (11)$$

$$\dot{m}_s = [0.61 \cdot (\frac{Q}{Q_{max}})^2 + 0.6955 \cdot (\frac{Q}{Q_{max}}) - 0.02571] \cdot \dot{m}_{s,max} \quad (12)$$

表 2 制冷机组的不确定性因素

不确定性因素	偏差大小	频率 (Hz)
测量误差	温度: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ / 流量: $\pm 3\%$ / 电流: $\pm 1\%$	--
控制误差	温度控制法: $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 流量控制法: $\pm 4\%$	温度控制法: $2.34 \times 10^{-4} / 1.8 \times 10^{-4}$ 流量控制法: $6.5 \times 10^{-5} / 2.6 \times 10^{-4}$
运行误差	$\pm 3\%$	$2 \times 10^{-4} / 2.6 \times 10^{-4}$
阈值误差	$\pm 3\%$	--

表 3 群控策略的阈值设置

控制策略	开机阈值	关机阈值
负荷控制法	From 1 to 2: $Q > 592.8 \text{ kW}$ From 2 to 3: $Q > 1162.8 \text{ kW}$ From 3 to 4: $Q > 1732.8 \text{ kW}$	From 2 to 1: $Q < 547.2 \text{ kW}$ From 3 to 2: $Q < 1117.2 \text{ kW}$ From 4 to 3: $Q < 1687.2 \text{ kW}$
回水温度控制法	From 1 to 2: $T_{rm} > 11.94^\circ\text{C}$ From 2 to 3: $T_{rm} > 11.85^\circ\text{C}$ From 3 to 4: $T_{rm} > 11.81^\circ\text{C}$	From 2 to 1: $T_{rm} < 9.28^\circ\text{C}$ From 3 to 2: $T_{rm} < 10.10^\circ\text{C}$ From 4 to 3: $T_{rm} < 10.51^\circ\text{C}$
电流比控制法	From 1 to 2: PFLA $> 98.13\%$ From 2 to 3: PFLA $> 95.34\%$ From 3 to 4: PFLA $> 94.45\%$	From 2 to 1: PFLA $< 45.60\%$ From 3 to 2: PFLA $< 62.07\%$ From 4 to 3: PFLA $< 70.30\%$
旁通流量控制法	The deficient flow > 0	The surplus flow $> 120\%$ of a chiller rated flow

由于不确定性因素具有随机性, 为了更准确评估控制策略的控制性能, 每个策略在随机模型下重复运行 100 次 (蒙特卡洛模拟), 并以均值表示各个策略的控制性能。

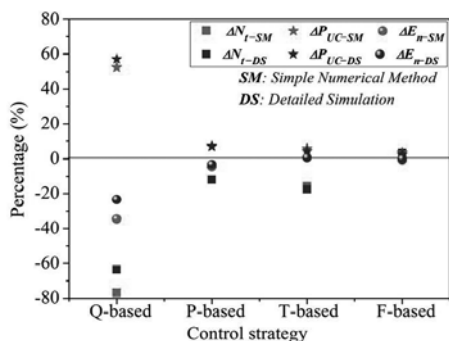


图5 简化数值方法与详细系统模拟的性能指标对比

然后将控制性能指标与 TRNSYS 详细系统平台的性能指标进行对比。如图 5 所示,采用简化数值方法得到的结果(红色图标)与采用详细系统平台所得到的结果(黑色图标)非常相近。虽然由于系统简化使得结果存在细微的差别,但是并不改变各个控制策略之间的相对性能。这一结果充分证明了由该方法得到的结果具有可靠性。

基于鲁棒分析的结果,假设决策者偏重于热舒适性并将每个指标的权重值设定为 $w_1=0.2$, $w_2=0.6$, $w_3=0.2$, 根据公式 10, 可以得出每个控制策略的综合指标如图 6 所示。显然,旁通流量控制法的综合指标最小,证明对于这个制冷机组,在偏重热舒适的情况下,旁通流量控制法具有最好的鲁棒性,因此,可被认为是最好的选择。可见,该方法不但实现了在不确定情况下对控制策略进行鲁棒分析,而且可以根据决策者的偏好选择出最鲁棒、最合适的控制策略。

5 结论

本文提了一种基于不确定性分析的冷机群控策略选择的简化数值方法。该方法利用制冷机组的运行数据建立简化的制冷机组模型和不确定性因素模型,对备选的群控策略进行鲁棒分析,并通过多准则决策方法选出最适合于制冷机组的群控策略。案例分析表明,该方法不但具有与详细模拟平台相近的可靠性,而且可以根据决策者的偏好选

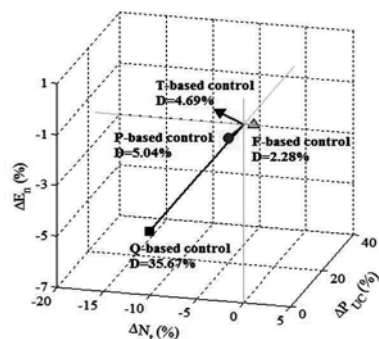


图6 四种控制策略综合指标对比

择出最鲁棒、最合适的控制策略。由于只需利用运行数据进行分析,无需建立详细的模拟平台,大大简化了控制策略的选择过程,因此更适合实际应用。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告, 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] Lam JC, Energy analysis of commercial buildings in sub-tropical climates, Build Environ 2000; 35:19–26.
- [3] Wang SW, Intelligent buildings and building automation, London & New York: Spon Press, 2010.
- [4] Huang GS, Wang SW, Sun YJ, Enhancing the reliability of chiller sequencing control using fused measurement of building cooling load, HVAC&R Research 2008;14: 941–958.
- [5] Liao YD, Huang GS, Sun YJ, Zhang LF, Uncertainty analysis for chiller sequencing control. Energy Build 2014;85: 187–98.
- [6] JCGM 100, Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008.
- [7] Fishman GS, Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications, New York: Springer, USA, 1995.
- [8] Rosenhead J, Robustness Analysis. Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, 2011.

CIE 标准天空亮度分布模型的选择方法

姜骊渭¹, 廖云丹¹, Danny H.W. Li², Joseph C. Lam²

(1. 广州大学土木工程学院, 广州 510006; 2. 香港城市大学建筑与土木工程系, 香港 999077)

[摘要] 太阳能及日光对节能设计及清洁能源利用十分重要。国际照明委员会(CIE)采用15个标准天空模型来规定了可能出现的天空散射亮度在不同位置的分布及变化情况。天空模型是计算不同朝向的散射辐射率以及光照度的基础, 而选择合适的天空模型是用天空模型计算太阳辐射及照度的前提。过去的研究中, 天空模型的选择需依靠天空亮度分布立面散射辐射率等参数。而这样的参数的测量并不普及。本文提出了一种方法, 根据常见的气象参数选择合适的CIE标准天空模型。使用该方法确定的天空模型计算立面太阳辐射率以及光照度, 其结果均方根误差小于23%。

[关键词] 天空亮度模型; CIE标准天空; 数据挖掘; 决策树

1 介绍

太阳能及自然光对建筑节能十分重要。准确计算不同朝向的太阳辐射率(E , W/m^2)以及光照度(I , lm/m^2 , 即勒克斯)可用于评估光伏板的发电量及室内自然采光^[1,2]。太阳能以及自然光包括太阳直射辐射以及天空散射辐射^[3]。天空散射光不易产生炫光^[4], 因此适用于自然采光, 以节约部分照明用电。与来自单一朝向的直射不同, 散射辐射及照度在天空中的不同方位的强度不同^[5], 同时又受天气状况影响。由于散射的这种各向异性, 作用在建筑不同朝向的外表面的散射辐射率以及天空照度亦不相同^[6]。因此, 研究散射亮度以及辐射率在天空不同方位的分布及变化模式对于主动及被动式的建筑节能设计十分重要。

文献中有许多模型用于估计天空亮度(L , $W/m^2 \cdot sr$ 及辐射率(R , $lm/m^2 \cdot sr$, 即 $cd \cdot sr$)分布, 及对应的任意斜面上的光照度及辐射率^[5,7,8]。除太阳高度、方位角外, 天空亮度及辐射率的分布及变化模式受气象条件的影响。相近的气象因素决定相似的亮度、辐射率的分布、变化模式, 可以被认为是同一种“天空状态”。通常, 天空状态可分为阴、晴及多云。1998年, Kittler等人进一步将分类细化为15种情况^[9], 其后被国际照明委员会(CIE)采纳, 成为15个CIE标准天空^[16]。各标准天空的亮度变化模式均由连续的数学表达式给出。许多国际研究指出标准天空可全面地模拟自然界的天空亮度分布^[10-12]。由于散射辐射率及亮度都具有相似的特征, CIE标准天空也被用于描述散射辐射率的变化^[13]。

天空亮度通常由天空扫描仪测量。该扫描仪可依次测量并记录天空中145个方位的亮度及辐射率, 作为一组数据。然而该扫描仪昂贵且活动部件易于损坏。完成一次145个方位的测量需要10min, 天空状态可能发生变化。此外, 天空亮度数据只在部分地区短期内测量。由于相近的气象因素决定相似的亮度、辐射率的分布、变化模式, 一种确定天空状态的简化方法是将天空状态与各种气象参数关联。过去的研究基于CIE标准天空方程及其积分结果的数学特征指定了分类标准^[14,15]。这种分类方法取决于立面及天顶的散射光或辐射数据, 其测量仍不普及。另一种方法是通过机器学习及数据挖掘的方式, 建立天空状态与较为普及的气象参数之间的关联。例如文献^[16,17]采用了人工神经网络的方式识别天空状态。然而对神经网络模型的物理意义解释较为困难。本文的作者使用天空扫描仪, 采集了2004年至2005年间我国香港地区的天空亮度数据。本文利用该数据研究了CIE标准天空分类。通过决策树的数据挖掘方法开发了基于常见气象参数的分类方法, 以识

别晴、阴及多云的天空状态。并通过天空状态计算东南西北四个立面上的太阳辐射率及光照度, 与测量值进行比较以验证模型。

2 基于天空扫描仪的CIE标准天空分类

CIE标准天空模型指定了天空各朝向的亮度($L_{\alpha\phi}$)与天顶亮度(L_z)的比例^[18]。由于光是太阳辐射的可见部分, 该模型亦适用于天空散射辐射率分布。如公式1~3所示, $L_{\alpha\phi}$ 与 L_z 的比例为相对亮度梯度函数 $\phi(Z)/\phi(0)$ 和相对散射指标函数 $f(x)/f(Z_s)$ 的乘积。相对亮度梯度函数(式2)给出了地平线到天顶的亮度/辐射率变化趋势。相对散射指标函数(式3)给出了从太阳到远离太阳的天空位置的亮度/辐射率下降趋势。

$$\frac{L_{\alpha\phi}}{L_z} = \frac{f(x)\phi(Z)}{f(Z_s)\phi(0)} \quad (1)$$

$$\frac{\phi(Z)}{\phi(0)} = \frac{1+a\exp(b/\cos Z)}{1+a\exp b} \quad (2)$$

$$\frac{f(x)}{f(Z_s)} = \frac{1+c[\exp(dx)-\exp(d\pi/2)]+e\cos^2 x}{1+c[\exp(dZ_s)-\exp(d\pi/2)]+e\cos^2 Z_s} \quad (3)$$

其中 a, b, c, d, e 为系数, 其不同取值代表15种不同的CIE标准天空情况, 即五种晴空模型(10~15号天空), 五种多云模型(6~10号天空)和五种阴天模型(1~5号天空)。图1描绘了各种角度。 Z 代表天空任意位置的天顶角(rad); Z_s 代表太阳天顶角; x 为散射角, 代表从某朝向天空到太阳位置的最短距离, 由公式4给出(rad)。 ϕ_s 和 ϕ 分别代表太阳和天空的方位角。

$$x = \arccos(\cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos|\phi - \phi_s|) \quad (4)$$

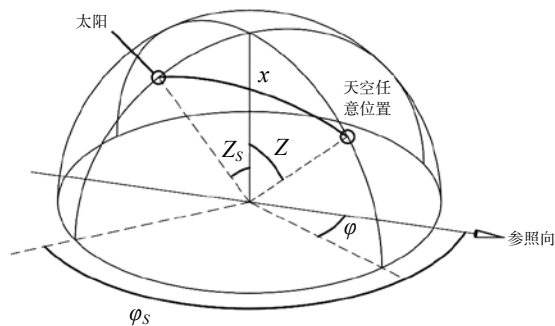


图1 太阳及天空某朝向的角度

选择CIE标准天空最全面、最直接的方法是对比测量的天空亮度与CIE标准中规定的15种天空亮度分布状况。天空扫描仪可依次测量天空中145个区域的亮度($L_i, i=1$

到 145)。然而,对于低纬度地区(如我国香港地区乃至广东省),当太阳位置接近天顶时,太阳直射辐射可能影响天顶的散射亮度测量^[19]。因此,将亮度归一化时,需用水平面散射光亮度替代天顶点亮度,如公式 5、6 所示。

$$L_{i,nor} = \frac{L_i}{V_h} \quad (5)$$

$$l_{i,nor} = \frac{l_i}{v_h} \quad (6)$$

$L_{i,nor}$ 及 $l_{i,nor}$ 分别代表经过归一化的,15 个 CIE 标准天空规定的及实际测量的亮度。 V_h 及 v_h 分别表示 15 个 CIE 标准天空规定的及实际测量的水平面散射光亮度,其计算细节在文献 [19] 中已经给出。适用的标准天空的 $L_{i,nor}$ 应与实际测量的 $l_{i,nor}$ 误差最小,其误差计算由公式 7 给出。

$$rms = \sqrt{\frac{1}{145} \sum_{i=1}^{145} (L_{i,nor} - l_{i,nor})^2} \quad (7)$$

图 2 列出了该方法所选定的标准天空的出现频率。天空亮度数据的测量时间为 2004 年 1 月至 2005 年 12 月,地点为香港城市大学,测量间隔为 10min。天空扫描仪的型号为 EKO MS-301LR,产地日本,曾于 2003 年校准。测量时,扫描仪改变测量方位角及高度角,以获得天空中 145 个不同区域的亮度数据。扫描仪中,光传感器的视角为 11 度,每次扫描可覆盖 68% 的天空。当亮度大于 3.5 万 cd/sr (即测量到了太阳直射辐射)时,扫描仪自动屏蔽该区域以保护传感器。两年间,总计测量了 45,199 组天空亮度分布数据。其中,21.2%、35.5% 及 43.3% 的情况被分别认定为晴、多云及阴。最常见的 CIE 标准天空类型为 13, 8, 1 号天空,其出现率为 24.2%、27.6 及 14.8%。该结果与同一地区^[20]以及另一气候相似区域^[11]的其它研究类似。由于其它天空出现频率低,为简便起见,我们用这三类天空分别代表所有的晴、多云及阴的天空状况。

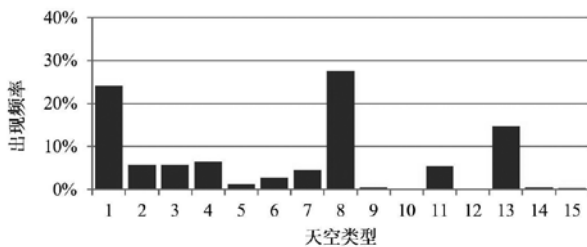


图 2 2004 至 2005 年香港 CIE 标准天空的出现频率

3 基于气象参数的 CIE 标准天空分类方法

基于天空亮度扫描的天空分类十分可靠,然而其局限性明显。最主要的问题是其亮度分布数据仅在个别地区有短期(两年内)测量。如此短期的数据测量不适合用于建筑或光伏板全生命周期的能源研究。因此,CIE 标准天空的分类依据应以气象站测量的常见气象数据为宜。在本研究中,我们利用决策树的方法,将由天空亮度分布确定的 CIE 标准天空与香港天文台(政府官方气象部门)测量的气象参数关联起来。由决策树所描述的关联物理意义较为明确,并可确定本地及相似气候区域长期的天空状态及亮度、辐射率分布变化情况。

3.1 气象数据

用于关联 CIE 标准天空的气象数据于表 1 列出。公式 8 至 10 给出了晴空指数 K_t , 散射辐射率 K , 以及浊度 T_L 的定义^[21]。

$$K_t = E_{HG}/E_{HE} \quad (8)$$

$$K = E_{HD}/E_{HG} \quad (9)$$

$$T_L = \frac{\ln(E_{NE}/E_{NB})}{a_r m} \quad (10)$$

其中 a_r 代表理想晴空的瑞利散射项, $a_r = (9.4 + 0.9m)^{-1}$; m 代表大气质量, $m = [\sin \alpha_s + 0.50572(\alpha_s + 6.07995)^{-1.6364}]^{-1}$ ^[22]; E_{HG} 代表水平面总辐射的辐照度; E_{HE} 代表太阳常数在水平面上的分量; E_{HD} 代表水平面散射辐射的辐照度; E_{NB} 代表直射辐射的辐照度; E_{NE} 代表太阳常数,约等于 1367W/m²。 K_t 表征穿过大气层的太阳辐射的比例; K 表征以散射辐射的形式到达地面的太阳辐射占地面总辐射的比例; T_L 代表与实际大气层造成的衰减相当的理想瑞利晴空的数量。 K_t 、 K 不同于 E_{HG} 、 E_{HD} , 其主要由天空状态决定,受太阳高度的影响较少,更适合作天空亮度模型的选择条件。太阳辐照度的测量来自香港城市大学,均采用 Kipp & Zonen CM11 热电堆辐射计,与天空亮度分布的测量同时进行。CM11 的精度属于世界气象组织规定的最高类别。辐射计在测量前于 2003 年校准。表 1 中的其它参数来自于香港天文台间隔为 1 小时的测量。采用 MATLAB2015b 版^[23]内置的三次保形样条曲线插值法^[24],将逐时的测量数据扩展到 10 分钟间隔。表 2 给出了根据 CIE 标准^[25],对水平面总辐照度及散射辐照度的数据质量控制。值得注意的是,有 7,600 组数据由于太阳高度角 α_s 和总辐照度 E_{HG} 太低被剔除。另外,有 3,474 组数据由于天空亮度测量的问题被剔除。最后得到了 39,153 组数据以开发 CIE 标准天空与气象参数的关联模型。

表 1 用以关联 CIE 标准天空的气象参数

参数	符号	单位	参数	符号	单位
直射辐射的辐照率	E_{NB}	瓦 / 平米	日照时间	h	小时
晴空系数	K_t		散射辐射比例	K	
太阳高度角	α_s	度	浊度	T_L	
湿球温度	t_{wet}	摄氏度	云量	cld	八分比 (Okta)
干球温度	t_a	摄氏度	能见度	vis	米
露点温度	t_{dew}	摄氏度	风速	v	米 / 秒
相对湿度	rh	百分比	海平面压力	P	帕斯卡

表 2 依据 CIE 标准的数据质量控制

CIE 检测等级	标准	数据量	
		剔除	接受
样本总量	$\alpha_s > 0^\circ$		51,195
0 级	$\alpha_s > 4^\circ$; $E_{HG} > 20$ 瓦 / 平米	7,600	43,595
1 级	$0 < E_{HG} < 1.2E_{HE}$; $0 < E_{HD} < 0.5E_{HE}$; $0 \leq E_{HB} < E_{HE}$	968	42,627
2 级	$E_{HD} < E_{HG}$	0	42,627
亮度扫描及香港天文台测量	所有 145 个亮度 > 0 香港天文台气象数据无错误信息	3,474	39,153

3.2 决策树

决策树算法最早由 Breiman^[26]提出。该算法根据样本的自变量 ($Var_1, Var_2, \dots$), 通过逐次分裂将样本分成多个组(集合)。如图 3 所示, 分裂 i 根据自变量 Var_i 的特定阈值, 将节点 A 中的 N_i 个样本分成节点 B、C 中的两个子集。参数及其阈值的选择应使得各子集中 CIE 标准天空的类型尽量单一。公式 (11) 给出了基尼系数的计算方法, 用以表征各节点样本集合的混乱度。公式 (12) 给出

了单个分裂所降低的样本量加权基尼系数。其中, $p(k)$ 表示 CIE 标准天空类型为 k 的样本在某个子集中的百分比。

$$G = 1 - \sum_k [p(k)]^2 \quad (11)$$

$$\Delta G = G_i N_i - G_{i+1} N_{i+1} - G_{i+2} N_{i+2} \quad (12)$$

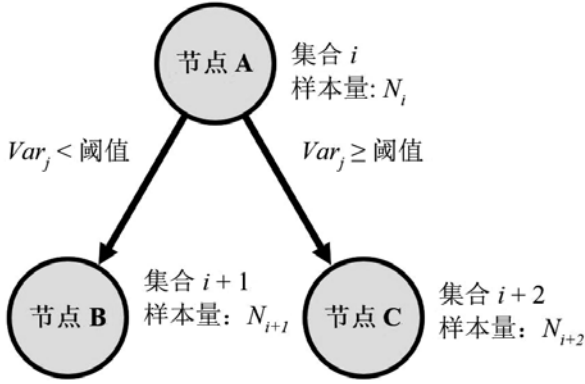


图3 决策树的单个分裂

如果节点中样本的 CIE 标准天空类型超过一种, 节点的基尼系数则大于 0。分裂可不断重复, 直到节点中仅存在单一 CIE 标准天空类型, 亦可在节点中的样本量小于设定值 (叶子节点最小样本量 L_{MIN}) 时停止^[27]。较小的 L_{MIN} 设定允许算法加入更多分裂, 建立更加复杂的决策树以提高叶子节点中标准天空的单一性。然而, 过于复杂的模型可能缺乏可移植性, 或者由于测量误差的原因导致过拟合。因此, 需要测试不同 L_{MIN} 设定下的决策树性能。本研究中, 我们测试了 L_{MIN} 为 10 到 500 的决策树的性能。

3.3 不同复杂度 (L_{MIN} 设定) 情况下的决策树性能

本研究采用 MATLAB 2015b^[28] 中的机器学习工具箱开发决策树。我们采用 5 次交叉验证, 以评估各种 L_{MIN} 下的 C_Trees 性能^[29], 确定提供最佳 CIE 标准天空估计的 L_{MIN} 。该评估重复 1000 次, 在合理的时间减少随机选择训练和测试数据的不确定性。图 5 显示了 L_{MIN} 取为 10 至 500 时, 决策树给出错误 CIE 标准天空判断的可能性 (%Mis)。结果显示, 当 L_{MIN} 从 10 增加到 500 时 % Mis 先降后升。 L_{MIN} 较低的取值可导致决策树过拟合, 从而引起较高的错误率 (% Mis)。但是, L_{MIN} 过高的取值将导致决策树过于简单, 不足以有效地判断标准天空的类型。 L_{MIN} 为 50 时, 决策树给出最低错误率。

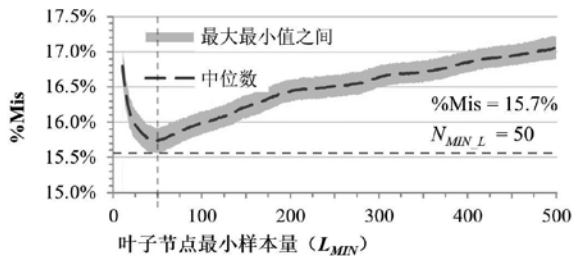


图5 决策树采用不同叶子节点最小样本量 (L_{MIN}) 时的误差

3.4 自变量参数重要性分析

使用较少的输入变量可以节省数据测量成本, 提高模型的适用性。决策树可衡量各输入变量对于识别标准天空

的重要性, 从而可以舍弃不重要的输入变量。变量的重要性由各变量对样本量加权基尼系数的降低量 (即式 12 中的 ΔG) 所决定。因此, 重要的输入变量应频繁被选作分裂的依据, 或大幅度降低样本量加权基尼系数。我们采用自助法重复训练了 10,000 次决策树模型, 并评估各决策树的输入参数重要性, 以评估模型对于不同数据样本的置信区间。各输入变量的重要性结果被按比例缩放为百分比, 所有输入变量的重要性总和为 100%。图 6 展示了 10,000 次自助法测试给出的相对重要性大于 3% 的输入变量。图中, 矩形盒表示 10,000 次自助法结果的上、下四分位数 (q_1 及 q_3)^[30], 上、下边缘表示 $q_1 - 3(q_3 - q_1)$ 及 $q_3 + 3(q_3 - q_1)$, 其外的情况通常为异常值, 不予画出。

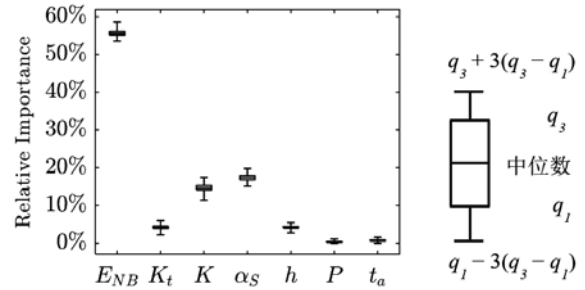


图6 各输入参数对区分阴、晴、多云天空状态的决策树的重要性

由图 6 看出, 对于阴、晴、多云的三种类型的天空分类, E_{NB} , K 及 α_s 的相对重要性大于 10%。这是由于不同的天空情况会对太阳辐射产生不同的散射及反射, 并导致不同的 E_{NB} 和 K 值。 E_{NB} 可表征太阳辐射在其传播方向上的衰减。 K_t 只能表明太阳辐射未穿过大气的部分, 并不能直接反映散射的情况, 因此其重要性较低。日照时间对于模型的重要性约为 6.2%。

图 7 展示了阴、晴、多云天空的 K_t , K , E_{NB} 及 h 的出现频率, 以探究其高重要性的原因。符合阴天的天空辐射率、亮度分布的情况, E_{NB} , K_t , h 通常较低, 而 K 较高。这是天空中的大量云雾对太阳能的散射造成的。对于符合多云及晴空的天空辐射率、亮度分布的情况, 该四个参数的趋势与阴天的情况相反。如图 7 (c) 所示, 以 50 W/m^2 作为阈值, 85% 的多云及 98% 的晴空的 E_{NB} 大于此阈值, 而对于阴天而言, 只有 15% 的情况如此。因此, 尽管 E_{NB} 的测量不如 E_{HG} 般普及, 其仍是选择阴晴多云的天空模型的重要参数, 这与图 6 中, 通过数据分析的发现一致。如图 7 (a) 和 (d) 所示, 对于多云和晴空, K_t 和 h 的频率曲线相似。这表示仅靠 K_t 和 h , 难以区分多云及晴空, 从而导致 K_t 和 h 在图 6 中的低重要性。

3.5 决策树形态的最终确定

为了简化决策树并使其易于使用, 我们使用重要性分析选定的重要输入参数 E_{NB} , K_t , K , α_s 及 t_a 开发决策树。不使用 h 和 P 的原因是其重要性较低, 或测量不够普及。节 3.3 给出的方法可用于确定给出最小误差的 L_{MIN} , 但其决定的决策树仍包含大量的分割, 从而增加了使用的困难度。决策树需要修剪, 以减少不必要的分支。常用剪枝方法需衡量剪枝的错误成本以及可降低的模型复杂度^[36]。该方法将复杂度参数 α 定义为: 剪除每个叶子节点所产生的额外误差。从 α 较低的分支开始的修剪, 可在剪除更多的叶子节点的同时产生更少误差。图 8 给出了依次剪除决

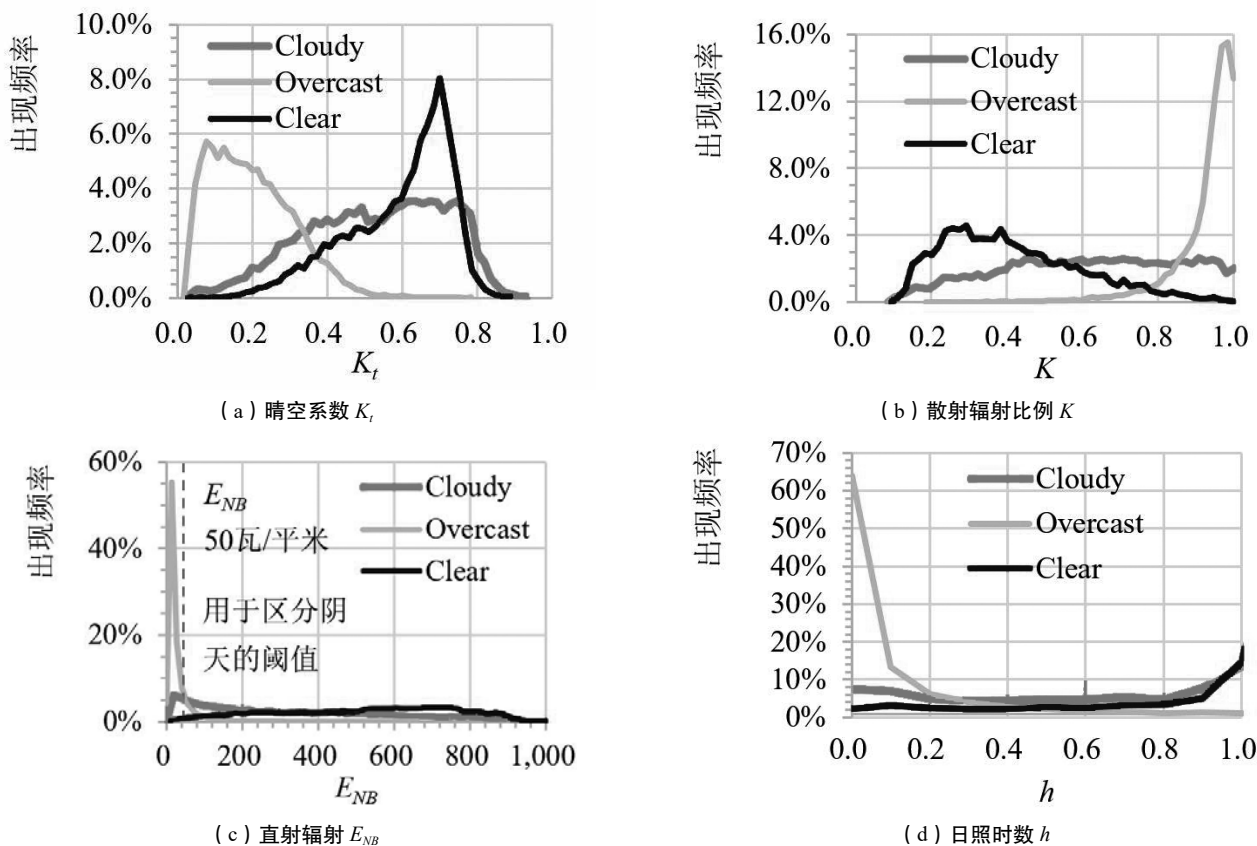


图7 参数对于符合阴、晴及多云天空的亮度、辐射率分布出现频率

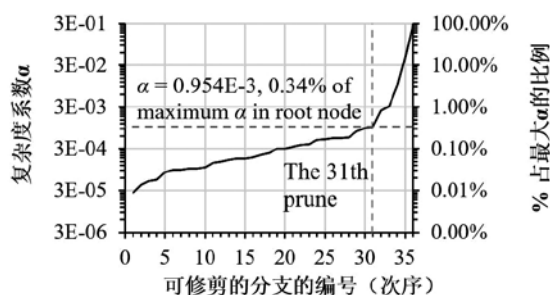
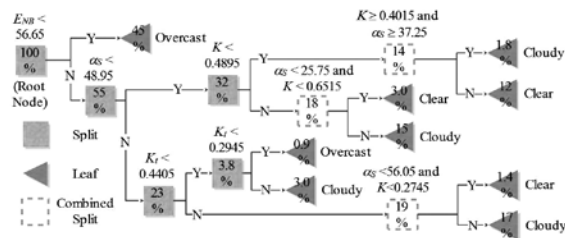
图8 依次剪除的决策树分支的复杂度系数 α 

图9 判断阴、晴及多云天空的决策树, 基于香港的数据测量

策树的 36 个分支所产生的 α 值。剪除前 31 个分支所产生的最大 α 为 $0.954E-3$, 约为根节点 α 值的百分之 0.34。第 32 个可修剪的分支的 α 值为第 31 个分支的 2.4 倍, 明显高于之前的修剪。因此可采用前 31 次修剪来简化决策树模型。简化后的决策树如图 9 所示, 其可以用来判断阴、晴及多云的基本天空状态。

4 决策树评估

图 9 中的决策树与依据天空亮度的分类结果之比较见表 3。横行表示基于天空亮度分类的天空数, 纵列表示基于决策树分类的天空数。该表格显示两种分类方法的结果较为一致。决策树所认定的天空有 83.2% 与基于天空亮度扫描的分类结果一致。尤其需要指出的是, 决策树与亮度分布不一致的结果多见于区分阴、多云或多云、晴空的情况。因此, 这一分类方式是可靠的。

表3 决策树与依据天空亮度的分类结果之比较

		通过决策树确定的样本数量		
		阴	多云	晴
通过天空亮度分布确定的样本数量	阴	15,432 (39.4%)	1,369 (3.5%)	51 (0.1%)
	多云	2,536 (6.5%)	11,631 (29.7%)	876 (2.2%)
	晴	154 (0.4%)	1,608 (4.1%)	5,496 (14.0%)

注: 百分比是依据数据库的总样本量计算的 (i , e , 39, 153)。

作用于斜面上的散射辐照度及光照度来自未受遮挡的天空。因此, 由天空状态决定的天空辐射率及亮度的变化情况将影响决定不同朝向的斜面的辐照度、光照度。因此,

利用作用于倾斜面上的辐照度及光照度可有效评估天空分类效果^[31]。公式 13 给出了倾斜面上的总太阳辐照度或光照度 ($E_{\beta G}$) 的组成包括了直射 ($E_{\beta B}$)、天空散射 ($E_{\beta D}$) 和地面反射部分 ($E_{\beta R}$)，各部分的计算由公式 14 至 16 给出^[1]。

$$E_{\beta G} = E_{\beta B} + E_{\beta D} + E_{\beta R} \quad (13)$$

$$E_{\beta B} = [(E_{HG} - E_{HD}) / \sin \alpha_s] [\sin \alpha_s \cos \beta + \cos \alpha_s \sin \beta \cos(\phi_s - \phi_N)] \quad (14)$$

$$E_{\beta R} = \rho E_{HG} (1 - \cos \beta) / 2 \quad (15)$$

$$E_{\beta D} = \int_{\phi_N - \pi}^{\phi_N + \pi} \int_0^{0.5\pi} \max[0, R_{\alpha\phi} [\cos \beta \sin \alpha + \sin \beta \cos \alpha \cos(\phi - \phi_N)]] \cos \alpha [\delta \alpha \delta \phi] \quad (16)$$

式中： α_s 表示太阳高度角， $\alpha_s = \pi/2 - Z_s$ ； ϕ_N 表示斜面的方位角； ρ 表示地面反照率，通常取 0.2^[32-34]； β 表示斜面倾角； $R_{\alpha\phi}$ 代表取决于天空亮度分布模型的，高度角为 α ，方位角为 ϕ 处天空的辐射率或亮度。通过决策树选择合适的天空模型后， $E_{\beta D}$ 可通过数值积分得出^[35]，地面反射的部分 $E_{\beta R}$ 可认为具有各向同性。Gueymard 的研究显示，对立面上的辐照度的计算误差往往比低角度的斜面更大。这是由于里面上的总辐照度对散射、反射部分的计算十分敏感^[36]。同时，因立面只受半个天空的天空影响，相比于其它低倾角的情况，立面与水平面上的散射辐射条件最不相同。

用于测量立面光照度的光度计 MINOLTA T-10M 于 2002 年购买。与水平面总辐照度及散射辐照度的测量相同，立面辐照度的测量亦是采用四只于 2003 年校准的 Kipp & Zonen CM11 热电堆式太阳辐射计。低于 20W/m² 的辐照度数据，以及低于 2000Lx 的光照度数据因其可能存在较大的绝对误差被剔除。表 4 给出了根据决策树决定的天空亮度分布计算立面总辐照度及光照度的均方差 (RMSE 公式 17)。各朝向均方差与其平均值之比为相对均方差 (%RMSE)。数据来自我国香港地区 2004 至 2005 年的实地测量，东南西北四朝向辐照度、光照度的数据各有约 35,000 个。结果亦与 Perez1990 模型对比。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (E_{\beta G} \text{ by regression} - E_{\beta G} \text{ by measurement})^2} \quad (17)$$

表 4 表明，根据天空模型确定的各朝向辐照度、光照度的相对均方差均小于 23.1%。其中，通过天空亮度分布确定的辐照度、光照度的误差最小。由决策树确定的辐照度相对均方差在 15% 至 21% 之间，光照度相对均方差在 14.1% 至 23% 之间，稍大于 (1.6%) 由天空亮度分布决定的误差。对于北向立面的辐照度，由决策树决定的相对均方差比 Perez 模型低 4.7%。对其它情况，决策树及

Perez 模型的误差相近，由决策树决定的立面辐照度相对均方差比 Perez 模型低 0.3% 到 1% (除北向外)，光照度比 Perez 模型低 0.5% 到 1.3%。结果表面，对香港地区，决策树可以有效地选定合适的天空亮度模型。

5 结论

本研究应用决策树的方法，将基于天空亮度分布确定的 CIE 标准天空模型与气象参数关联。所开发的决策树模型可依据晴空系数、散射辐射比例、直射辐射辐照度及太阳高度角确定天空的阴、晴及多云的状态并选择合适的 CIE 标准天空模型，从而确定天空亮度、辐射率分布、变化情况。相比于神经网络，决策树的物理意义较为明显，便于解读。模型可靠性方面，对香港地区，该决策树选择的阴、晴及多云天空，83.2% 与基于亮度分布的方法一致。此外，模型可准确计算作用于立面上的辐照度及光照度，其误差小于 23%，且略优于 Perez 模型。基于决策树的方法对于建筑的主、被动式节能设计评估有着重要作用。

参考文献

- [1] Muneer T, Gueymard C, Kambezidis H. Solar Radiation and Daylight Models. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann; 2004.
- [2] Muneer T. Solar irradiance and illuminance models for Japan I: Sloped surfaces. International Journal of Lighting Research and Technology. 1995;27:209-22.
- [3] Li DHW, Lou SW, Lam JC. An analysis of global, direct and diffuse solar radiation. Energy Procedia. 2015;75:388-93.
- [4] Piccolo A, Pennisi A, Simone F. Daylighting performance of an electrochromic window in a small scale test-cell. Sol Energy. 2009;83:832-44.
- [5] Perez R, Seals R, Michalsky J. All-weather model for sky luminance distribution-Preliminary configuration and validation. Sol Energy. 1993;50:235-45.
- [6] Li DHW, Lam JC, Lau CCS. A new approach for predicting vertical global solar irradiance. Renewable Energy. 2002;25:591-606.
- [7] Igawa N, Koga Y, Matsuzawa T, Nakamura H. Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution. Sol Energy. 2004;77:137-57.
- [8] Li DHW, Lam JC. Evaluation of slope irradiance and illuminance models against measured Hong Kong data. Build Environ. 2000;35:501-9.
- [9] Kittler R, Darula S, Perez R. A set of standard skies. Bratislava: Polygrafia SAC; 1998.
- [10] Li DHW, Lau CCS, Lam JC. A Study of 15 Sky Luminance Patterns against Hong Kong Data. Architectural Science Review. 2003;46:61-8.

表 4 不同计算方法对 2004 至 2005 年立面总辐照度及光照度计算的均方差

计算方法	误差	辐照度 (W/m ²)				光照度 (lux)			
		北	东	南	西	北	东	南	西
基于决策树选择典型阴、晴及多云天空模型	RMSE	18.7	38.8	31.8	33.2	3,048	3,894	3,198	3,452
	%RMSE	17.1%	21.9%	15.4%	17.8%	23.1%	20.4%	14.6%	17.2%
基于天空亮度分布选择天空模型	RMSE	18.1	34.2	30	28.2	2,969	3,520	2,838	3,035
	%RMSE	16.6%	19.3%	14.5%	15.1%	22.5%	18.4%	12.9%	15.1%
Perez 1990 模型	RMSE	22.9	39	31.6	33.1	3,167	4,072	3,257	3,407
	%RMSE	20.9%	22%	15.3%	17.7%	24%	21.3%	14.9%	17%

- [11] Wittkopf SK, Soon LK. Analysing sky luminance scans and predicting frequent sky patterns in Singapore. *Light Res Technol.* 2007;39:31–51.
- [12] Luo T, Yan D, Lin R, Zhao J. Sky-luminance distribution in Beijing. *Light Res Technol.* 2014.
- [13] Li DHW, Chau TC, Wan KKW. A review of the CIE general sky classification approaches. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2014;31:563–74.
- [14] Kittler R, Darula S. Parametric definition of the daylight climate. *Renewable Energy.* 2002;26:177–87.
- [15] Li DHW, Lau CCS, Lam JC. Standard skies classification using common climatic parameters. *J Sol Energy Eng.* 2004;126:957–64.
- [16] Li DHW, Tang HL, Lee EWM, Muneer T. Classification of CIE standard skies using probabilistic neural networks. *Int J Climatol.* 2010;30:305–15.
- [17] Lima FJL, Martins FR, Pereira EB, Lorenz E, Heineemann D. Forecast for surface solar irradiance at the Brazilian Northeastern region using NWP model and artificial neural networks. *Renewable Energy.* 2016;87, Part 1:807–18.
- [18] CIE. Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky. CIE Central Bureau. Vienna: CIE Central Bureau; 2003.
- [19] Tregenza PR. Analysing sky luminance scans to obtain frequency distributions of CIE Standard General Skies. *Light Res Technol.* 2004;36:271–81.
- [20] Ng E, Cheng V, Gadi A, Mu J, Lee M, Gadi A. Defining standard skies for Hong Kong. *Build Environ.* 2007;42:866–76.
- [21] Navvab M, Karayel M, Ne'eman E, Selkowitz S. Analysis of atmospheric turbidity for daylight calculations. *Energy Build.* 1984;6:293–303.
- [22] Kasten F, Young AT. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Appl Opt.* 1989;28:4735–8.
- [23] Mathworks. Curve fitting toolbox user's guide. Natick, MA: The MathWorks, Inc.; 2015.
- [24] Fritsch FN, Carlson RE. Monotone Piecewise Cubic Interpolation. *SIAM J Numer Anal.* 1980;17:238–46.
- [25] CIE. Guide to recommended practice of daylight measurement. central bureau of the CIE. Vienna, Austria: central bureau of the CIE; 1994.
- [26] Breiman L, Friedman J, Olshen RA, Stone CJ. Classification and regression trees: CRC press; 1984.
- [27] Khoshgoftaar TM, Allen EB, Deng J. Controlling overfitting in software quality models: experiments with regression trees and classification. *Software Metrics Symposium, 2001 METRICS 2001 Proceedings Seventh International* 2001. p. 190–8.
- [28] Mathworks. Statistics and Machine Learning Toolbox User's Guide. Natick, MA: The MathWorks, Inc.; 2015.
- [29] Kohavi R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. *International joint conference on artificial intelligence (IJCAI).* Montreal, Quebec, Canada 1995.
- [30] Frigge M, Hoaglin DC, Iglewicz B. Some Implementations of the Boxplot. *The American Statistician.* 1989;43:50–4.
- [31] Ho J, Ng E, Chan P. Predicting the hourly Hong Kong representative sky from Typical Meteorological Year data for dynamic daylighting simulation. *Light Res Technol.* 2014.
- [32] Ng E. A simplified daylighting design tool for high-density urban residential buildings. *Lighting Res Technol.* 2001:259–72.
- [33] Tregenza PR. Mean daylight illuminance in rooms facing sunlit streets. *Build Environ.* 1995;30:83–9.
- [34] Li DHW, Cheung GHW, Lam JC. Simple method for determining daylight illuminance in a heavily obstructed environment. *Build Environ.* 2008;44:1074–80.
- [35] Li DHW, Lou S, Lam JC, Wu RHT. Determining solar irradiance on inclined planes from classified CIE (International Commission on Illumination) standard skies. *Energy.* 2016;101:462–70.
- [36] Gueymard CA. Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications. *Sol Energy.* 2009;83:432–44.

新型气凝胶建筑玻璃的节能特性分析与计算

黄仁达, 吴会军, 吕亚军, 王 珊, 杨丽修

(广州大学土木工程学院, 广州 510006)

[摘 要] 气凝胶玻璃由于具有良好的隔热透光性能在建筑窗户中展现出良好的节能应用前景。通过溶胶凝胶和常压干燥法制备得到气凝胶颗粒, 设计制成了 8 种不同结构尺寸的气凝胶玻璃, 研究了填充厚度和气凝胶粒径对气凝胶玻璃节能特性参数的影响。结果表明适当增大填充厚度和减小气凝胶颗粒粒径能有效减小遮蔽系数、传热系数及可见光透射比, 且填充厚度对气凝胶玻璃的热工性能影响较大, 而粒径影响较小。基于实验分析结果, 采用数值拟合的方法建立了遮蔽系数、传热系数与气凝胶填充厚度、粒径的函数关系, 研究结果可用于指导气凝胶玻璃的合理设计及其在建筑工程的节能应用。

[关键词] 气凝胶玻璃; 遮蔽系数; 传热系数; 填充厚度; 平均粒径

0 引言

窗户作为建筑围护结构的重要组成部分, 它直接影响室内的采光、通风, 同时又是建筑能源消耗的重要部件, 其中 50% 建筑围护结构能量消耗是通过窗户玻璃散失的^[1,2]。因此窗户玻璃的热工性能直接影响到室内的光环境和能源在建筑中的使用效率。

气凝胶由于具有高孔隙率、低密度、低热导率、高疏水性及高透明性(可见光透过率高达 87%)等性能, 在力学、声学、热学及光学等领域展现出良好的节能应用前景^[3-5]。为了克服纯气凝胶的力学性能差的缺点, 通常的办法是复合力学性能较好的纤维形成气凝胶复合材料^[6,7]或与玻璃、墙体组合成气凝胶玻璃及墙体等围护结构^[8,9]。将气凝胶与玻璃组合制成气凝胶玻璃能克服气凝胶本身力学性能差的缺点, 而很好的应用在建筑围护结构中。Buratti 等^[10]将气凝胶颗粒填充到 4mm 厚的浮法玻璃的 14mm 空腔中, 测试得到气凝胶玻璃的传热系数为 $1.31\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$, 太阳能透射率为 29%; Garnier 等^[11]将气凝胶颗粒填充在两块 4mm 厚玻璃中间, 得到当填充厚度为 16mm 时, 传热系数为 $1.4\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 的气凝胶玻璃, 并应用于伦敦的一个 $20\text{m}\times 10\text{m}\times 4\text{m}$ 的办公室, 模拟发现使用这种玻璃能比使用双层玻璃太阳辐射得热量减少 30%, 采光系数减少 20%; 另外, Gao 等^[12]制作了两不同粒径(3~5mm 和 <0.5mm)的气凝胶玻璃, 结果发现小粒径的气凝胶玻璃的可见光及太阳辐射透过性较差, 传热系数低; Huang 等^[13]发现使用气凝胶玻璃能维持室内更长时间的热舒适区, 且空调系统能耗能减少 4~7%; 王欢等^[4]将利用 IESVE 软件模拟发现气凝胶玻璃遮蔽系数的大小主要取决于太阳光直接透射比的大小, 减小玻璃的红外透射率是降低玻璃遮阳系数, 减少空调冷负荷的有效方法; 研究结果都表明气凝胶玻璃应用在窗户中能够有效降低太阳辐射透过率和传热系数, 从而降低建筑能耗, 实现建筑节能。

气凝胶玻璃结构的合理设计是实现窗户玻璃节能的重点, 且玻璃热工性能参数与其结构尺寸密切相关^[14], 因此有必要分析结构尺寸对气凝胶玻璃热工性能的影响。目前分析遮阳影响的方法主要有计算法、图解法、模型实验法等, 其中计算法相对复杂, 图解法使用不便, 而试验法难以评价^[14], 因此对建筑玻璃遮阳的影响处于实验阶段, 基于实验测试数据的数值拟合能较好的总结归纳出结构尺寸影响气凝胶玻璃节能特性的一般规律, 从而为建筑工程提供理论指导。

本文制作了 8 种不同结构尺寸的气凝胶玻璃, 测试了气凝胶玻璃的光谱透射率、可见光透射率、传热系数等节

能特性参数, 研究了气凝胶颗粒粒径、填充厚度等结构尺寸对气凝胶玻璃热工性能的影响, 数值拟合归纳出结构尺寸对气凝胶玻璃热工性能参数影响的一般影响规律。

1 实验

采用溶胶凝胶和常压干燥法制备得到气凝胶颗粒, 图 1 为制备气凝胶颗粒的工艺流程图。实验采用正硅酸乙酯 (TEOS)、无水乙醇 (EtOH)、盐酸 (HCl)、氨水 ($\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$)、等离子水等试剂为原材料, 其最终反应的定量配比为: TEOS:EtOH:HCl: $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$: H_2O =1:7:0.25:10⁻³:3.57 $\times 10^{-3}$:2, 经水解、缩聚、陈化、老化、置换改性、清洗、常压干燥等步骤完成气凝胶颗粒的制备, 具体实验步骤可参考文献[7]。

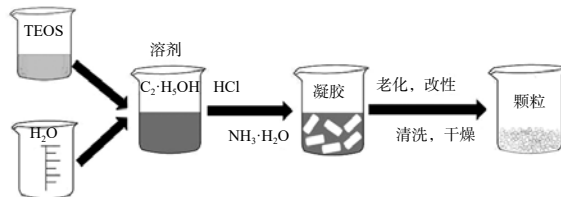


图1 气凝胶颗粒制备工艺流程图

其次用筛分机将不同颗粒的气凝胶颗粒筛分出四种不同粒径范围的气凝胶颗粒, 图2为筛分的4种不同粒径的气凝胶颗粒, 图3为4种不同的气凝胶粒径分布图, 四种气凝胶颗粒的粒径范围分别为 0.25mm~0.5mm、0.5mm~0.83mm、0.83mm~1mm、1.00mm~4.00mm, 经测量计算得到平均粒径分别为 0.41mm、0.64mm、0.93mm、2.7mm。其次将4种不同粒径的气凝胶颗粒分别填充在中空腔厚度为 5mm 和 7.5mm 的中空玻璃间设计制成气凝胶玻璃, 单层玻璃厚为 4mm, 如图4为填充厚度为 5mm、四种不同粒径的气凝胶填充玻璃, 可见气凝胶玻璃的透光性能较好。

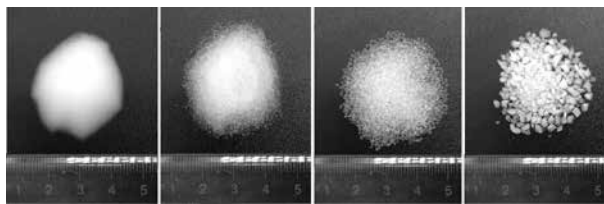


图2 不同粒径的气凝胶颗粒

(a) 0.41mm (b) 0.64mm (c) 0.93mm (d) 2.7mm

2 气凝胶玻璃的节能特性参数分析

气凝胶玻璃节能特性参数主要包括可见光透射比、遮蔽参数、传热系数等性能参数。气凝胶玻璃的节能特性参

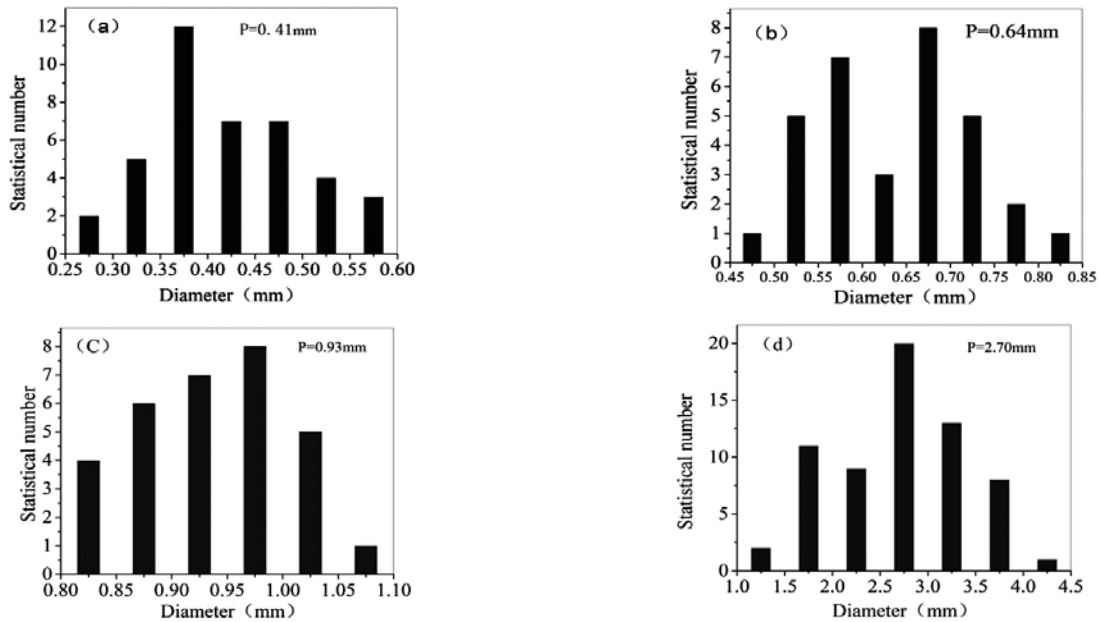


图3 气凝胶颗粒粒径分布

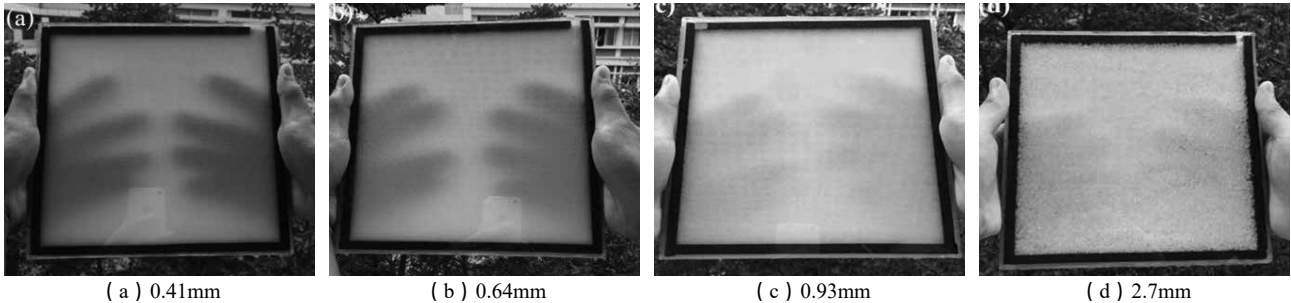


图4 不同气凝胶粒径的气凝胶玻璃

数与其结构尺寸密切相关, 本文重点研究了结构尺寸参数气凝胶填充厚度和粒径对气凝胶玻璃可见光透射比、遮蔽参数、传热系数等节能特性参数的影响。

2.1 气凝胶玻璃的可见光透射比

采用美国 PerkinElmer 生产的 Lambda 1050 紫外可见分光光度计附加 150mm 积分球测试气凝胶玻璃对 300~2500nm 波段的光的透射比, 其中可见光是 390nm~780nm 波段, 计算出试样的可见光透射比, 根据 GB/T 2680-1994 《建筑玻璃可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳光总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定》^[15], 可见光透射比计算式为:

$$\tau_v = \frac{\int_{380}^{780} D_i \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} D_i \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \approx \frac{\int_{380}^{780} D_i \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\int_{380}^{780} D_i \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \quad (1)$$

式中: τ_v 为中空玻璃的可见光透射比 (%); $\tau(\lambda)$ 为中空玻璃的可见光光谱透射比 (%); D_i 为标准照明体 D65 的相对光谱功率分布; $V(\lambda)$ 为明视觉光谱光视效率; (按波长 λ 及其相对应的光谱光视效率 (λ) 作出的曲线, 在明视觉条件下, 其最大值在 $\lambda=555\text{nm}$ 处, 称为明视觉的光谱光视效率曲线或光谱灵敏度曲线); $\Delta\lambda$ 为波长间隔, 此处为 10nm。

2.2 气凝胶玻璃的遮蔽系数

气凝胶玻璃的遮蔽系数是衡量门窗玻璃产品对太阳能

的透过性能, 遮蔽系数 Sc 越小, 阻挡阳光辐射的性能越好, 根据 300nm~2500nm 波段的光的透射比可计算出其遮蔽系数 Sc 。可见光遮蔽系数计算公式如下式 (2) ^[15]:

$$Sc = \frac{g}{\tau_3} \quad (2)$$

式中 Sc 为气凝胶玻璃遮蔽系数; τ_3 为 3mm 厚普通平板玻璃太阳能总透射比, 取 88.9%; g 为太阳能总透射比, 又被称为太阳得热系数 (SHGC) 用下式计算:

$$g = \tau_3 + q_i \quad (3)$$

式中 τ_3 为太阳光直接透射比; q_i 为被吸收的太阳能向内侧传递的部分, 计算可参考 GB/T 2680-1994^[21]。

2.3 气凝胶玻璃的传热系数

中空玻璃的传热系数计算如式 (4):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i} \quad (4)$$

其中, h_o 、 h_i 分别为室内外换热系数, h_t 为中空玻璃系统内部的热传导系数, 与填充物质和材料有关。可知气凝胶玻璃的传热系数与室内外换热系数、玻璃热阻、气凝胶玻璃夹层的传热系数、气凝胶空腔厚度间隔层热阻等有关。而气凝胶玻璃夹层的传热系数主要取决于气凝胶自身的热阻、充斥于颗粒间隙的空气本身的对流换热热阻以及

夹层物质的辐射热阻^[16]。

实验采用沈阳紫薇 CD-DR3030 (J) 导热系数测定仪 (图 5) 测试玻璃样品的传热系数。设备运用热流法进行测试, 其测试的计算公式 (5) 为:

$$U = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \Delta t} \quad (5)$$

式中: U 为气凝胶玻璃的传热系数; Q 为气凝胶玻璃的热流量; d 为气凝胶玻璃的厚度;

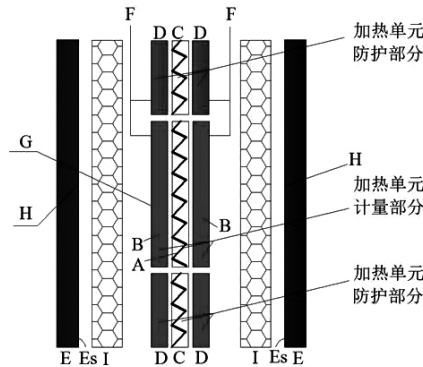


图 5 测试装置结构图

A- 计量加热器; B- 计量面板; C- 防护加热器; D- 防护面板;
E- 冷却单元; Es- 冷却单元面板; F- 温差热电偶;
G- 加热单元表面热电偶; H- 冷却单元表面热电偶; I- 试件

3 结果与分析

3.1 气凝胶玻璃结构尺寸对节能特性参数的影响

3.1.1 气凝胶颗粒粒径和填充厚度对可见光透射率的影响

中空玻璃的可见光透射率一般在 70%~80%，而在两块玻璃种填充气凝胶颗粒（气凝胶透射率高达 0.87）后，其透射率有所降低。图 6 比较了不同种类玻璃的可见光透射比，比较可知中空玻璃的透射率较普通白玻的小，而气凝胶玻璃的可见光透射比明显小于中空玻璃或普通白玻，如针对填充厚度为 5mm，粒径分别为 0.41mm、0.64mm、0.93mm、2.7mm 气凝胶玻璃，可见光透射比分别减少 70.2%、63.1%、61.9%、60.7%。分析比较填充厚度对气凝胶玻璃可见光透射比的影响，当气凝胶颗粒粒径一定时，填充厚度越大，可见光透射比越小，如当填充厚度由 5mm 增大到 7.5mm 时，对于粒径为 0.41mm、0.64mm、0.93mm、2.7mm 的气凝胶，气凝胶玻璃的可见光透射比从 0.25mm、0.31mm、0.32mm、0.33mm 降低为 0.14mm、0.17mm、0.22mm、0.24mm，下降率分别为 44%、45%、31%、27%。而 Gao 论文^[12]结果表明当粒径范围在 3~5mm 时，填充厚度从 14mm 增大到 38mm 时，其可见光透射比从 0.5 明显减小到 0.04，而针对气凝胶粒径范围 < 0.5mm 时，在相同情况下，可见光透射比从 0.16 减小到 0.02。而当填充厚度为 14mm、19mm、29mm、38mm 不变，粒径从 3mm~5mm 减小到 < 0.5mm 时，可见光透射比分别减小 68%、70.5%、62.5%、50%。研究结果都表明增大气凝胶填充厚度和减小气凝胶的粒径能明显减小可见光透射比，因此在建筑围护工程中，选择适宜厚度的填充厚度和气凝胶颗粒粒径能维持气凝胶玻璃的适当大小的可见光透射比，维持建筑室内良好采光和热舒适性要求。

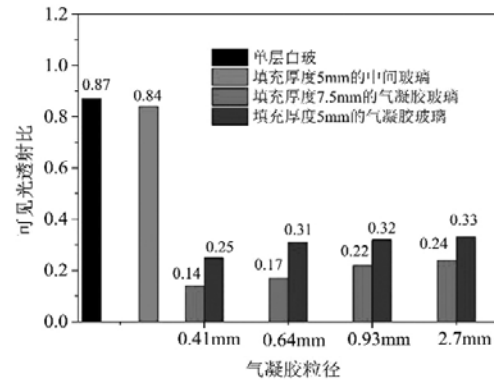


图 6 不同种类的玻璃的可见光透射比

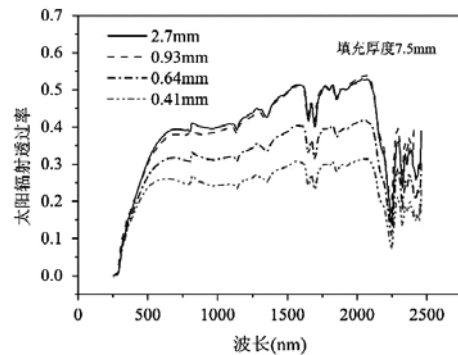


图 7 气凝胶玻璃的太阳辐射透射率随波长的变化

另外，以 7.5mm 填充厚度的气凝胶玻璃为例，图 7 为四种不同粒径的气凝胶玻璃的太阳辐射透射率随波长的变化，可以看出不同粒径的气凝胶玻璃对于太阳辐射相同波段透过趋势相一致，当气凝胶颗粒增大时，太阳辐射透过率增大，尤其是当气凝胶颗粒平均粒径由 0.41mm 增大到 0.64mm 和由 0.64mm 增大到 0.93mm 时，太阳辐射透过率增加非常明显，而当气凝胶颗粒平均粒径 0.91mm 增大到 2.7mm 时，太阳辐射透射率变化不明显，可见气凝胶颗粒增大到 0.93mm 以后，再增大气凝胶的粒径并不能明显的增加太阳辐射的透射率。分析结果表明：气凝胶玻璃在使用小粒径颗粒填充时，太阳辐射透射率明显降低，具有更强的阻隔光透射和热量传递的能力。

3.1.2 气凝胶颗粒粒径和填充厚度对遮蔽系数的影响

气凝胶玻璃的遮蔽系数反映阻挡太阳光辐射性能的重要节能特性参数，图 8 比较了填充厚度为 5mm、7.5mm 两种填充厚度的四种不同气凝胶颗粒粒径的气凝胶玻璃的遮蔽系数，结果表明在气凝胶粒径相同的情况下，填充厚度越厚，其遮蔽系数越小。例如当填充厚度从 5mm 增大 50% 时到 7.5mm 时，对于气凝胶粒径为 0.41mm、0.64mm、0.93mm、2.7mm 的气凝胶玻璃的遮蔽系数分别从 0.39mm、0.46mm、0.48mm、0.49mm 降低到 0.28mm、0.31mm、0.35mm、0.36mm，降低率分别为 26.8%、32.6%、27.1%、26.5%。而当填充厚度不变，气凝胶颗粒粒径从 0.41mm 增大 56.1% 到 0.64mm 时，填充厚度为 5mm、7.5mm 气凝胶玻璃的遮蔽系数分别增大 15.2%、9.6%，说明气凝胶填充厚度与气凝胶颗粒粒径对气凝胶玻璃的遮蔽系数的大小存在耦合效应，填充厚度对气凝胶玻璃遮蔽系数的影响较大，而气凝胶颗粒粒径对遮蔽系数的影响较小。

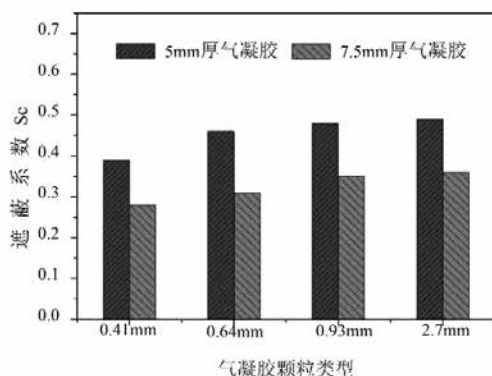


图8 不同结构尺寸的气凝胶玻璃的遮蔽系数

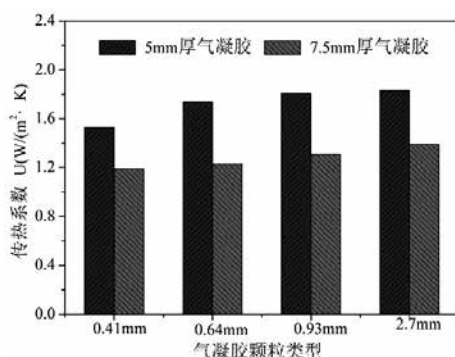


图9 不同结构尺寸的气凝胶玻璃的传热系数

3.1.3 气凝胶颗粒粒径和填充厚度对传热系数的影响

气凝胶玻璃的传热系数是衡量其隔热性能的重要指标，在两块平板玻璃填充不同粒径和不同厚度的气凝胶颗粒填充能有效降低中空玻璃的传热系数并能保持足够的可见光透过性，维持室内的采光，图9比较了8种不同结构尺寸的气凝胶玻璃的传热系数。结果表明针对同种填充厚度的气凝胶玻璃，气凝胶粒径越大，传热系数越大。而针对同种粒径的气凝胶玻璃，填充厚度越厚，传热系数越小。以填充厚度为5mm为例，当粒径分别从0.41mm增大56.1%、126%、558%到0.64mm、0.93mm、2.7mm时，传热系数分别增大13.7%、18.3%、19.3%；而当填充厚度从5mm增大50%到7.5mm时，针对粒径为0.41mm、0.64mm、0.93mm、2.7mm的气凝胶玻璃，传热系数分别减小22.2%、29.3%、27.6%、24.0%，这说明填充厚度对气凝胶玻璃传热系数影响较大，而粒径的大小对气凝胶玻璃的传热系数影响较小，同时说明填充厚度及粒径的大小对气凝胶玻璃传热系数的影响存在耦合效应。

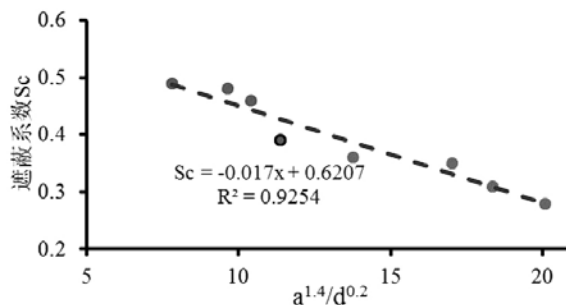
3.2 气凝胶粒径和填充厚度对气凝胶玻璃节能特性的数值拟合

由3.1分析可知，气凝胶玻璃的填充厚度与气凝胶粒径在很大程度上影响气凝胶玻璃的光学、热工性能，因此为了量化关系，在本节采用数值拟合的方式，尝试寻找气凝胶玻璃结构尺寸关系（填充厚度 a 、粒径大小 d ）与气凝胶玻璃的遮蔽系数、传热系数及可见光透射比等节能特性参数的关系式。

3.2.1 遮蔽系数的数值拟合

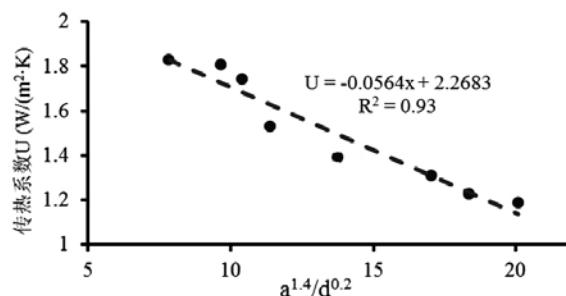
由3.1.2分析表明填充厚度和气凝胶颗粒粒径对遮蔽系数的影响存在耦合影响，当由不同结构尺寸构成的气凝

胶玻璃的遮蔽系数 Sc 关于结构尺寸 a/d 进行拟合时，得到当 $m=1.4, n=0.2$ 时，即 $x=a^{1.4}/d^{0.2}$ ，相关度 R^2 较高(0.92)，图10为遮蔽系数 Sc 随结构尺寸 $a^{1.4}/d^{0.2}$ 的变化。结果表明气凝胶玻璃的遮蔽系数随着 $a^{1.4}/d^{0.2}$ 的增大而减小，且成线性变化，计算公式为 $Sc=-0.017a^{1.4}/d^{0.2}+0.6207$ ，当 $x=0$ 时，代表的为填充厚度为0，遮蔽系数代表的是双层普通玻璃的遮蔽系数。结果说明气凝胶填充厚度对气凝胶玻璃的遮蔽系数的影响较大，而气凝胶颗粒的粒径影响减小，适当增大气凝胶玻璃的填充厚度和减小气凝胶颗粒的填充粒径能减小气凝胶玻璃的遮蔽系数。

图10 遮蔽系数 Sc 随结构尺寸 $a^{1.4}/d^{0.2}$ 的变化

3.2.2 传热系数的数值拟合

同理，由3.1.3分析可知，结构尺寸的大小对气凝胶玻璃的传热系数存在耦合影响，当考虑气凝胶玻璃的传热系数关于结构尺寸 a/d 的线性拟合时，计算得到当 $m=1.4, n=0.2$ 时，相关度 R^2 较高(0.93)，此时传热系数计算式为 $U=-0.0564 a^{1.4}/d^{0.2}+2.2683$ 。图11为气凝胶玻璃的传热系数随结构尺寸 $a^{1.4}/d^{0.2}$ 的变化，结果表明气凝胶玻璃的传热系数随着 $a^{1.4}/d^{0.2}$ 的减小而减小，且成线性变化，这说明填充厚度对传热系数的影响较大，而气凝胶粒径影响较小，当 $x=0$ 时， $U=2.2683\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，此时代表的填充厚度为0，传热系数代表的为双层普通玻璃的传热系数。结果表明适当增大气凝胶玻璃的填充厚度和减小气凝胶颗粒的填充粒径能减小气凝胶玻璃的传热系数，因此当已知此种结构尺寸的气凝胶玻璃的填充厚度及气凝胶粒径，可估计计算出气凝胶玻璃的传热系数。

图11 气凝胶玻璃的传热系数随结构尺寸 $a^{1.4}/d^{0.2}$ 的变化

3.2.3 传热系数与遮蔽系数的数值拟合

图12为气凝胶玻璃的遮蔽系数随传热系数的变化，图中结果表明随着气凝胶玻璃传热系数的增大，遮蔽系数也随之增大，这说明遮蔽系数与传热系数存在影响关系式，当遮蔽系数 Sc 与传热系数 U 拟合时，其线性拟合的相关度 R^2 高达0.98，结果表明遮蔽系数与传热系数存在正比

的关系, 计算公式为 $Sc=0.3003U-0.0615$ 。因此当已知不同结构尺寸的气凝胶玻璃的传热系数值时, 遮蔽系数的大小可根据传热系数的大小用此公式估计大小, 从而可为建筑工程设计适当大小的遮蔽系数和传热系数的气凝胶玻璃提供理论指导。

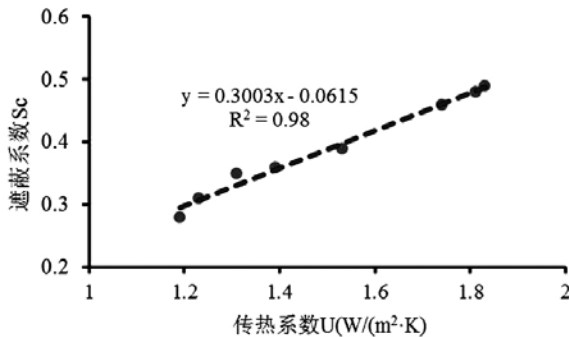


图 12 气凝胶玻璃传热系数对遮蔽系数的影响

4 结语

通过溶胶凝胶和常压干燥法制备得到气凝胶颗粒, 设计制成了 8 种不同结构的气凝胶玻璃, 研究了结构尺寸对气凝胶玻璃节能特性参数的影响, 主要结论如下:

(1) 选择适宜的填充厚度和气凝胶颗粒粒径能维持气凝胶玻璃适当大小的可见光透射比, 保持室内良好的采光及热舒适性;

(2) 增大填充厚度和减小气凝胶颗粒粒径能有效减小气凝胶玻璃的遮蔽系数和传热系数, 当填充厚度从 5mm 增大 50% 时, 针对气凝胶粒径 0.41mm 的气凝胶玻璃的遮蔽系数和传热系数分别减小 28%、22%, 而当气凝胶粒径 d 从 0.41mm 增大 56% 时, 填充厚度为 5mm、7.5mm 的气凝胶玻璃的遮蔽系数分别增大 17%、10%, 传热系数分别增大 13.7%、3.3%, 表明填充厚度对气凝胶玻璃的热工性能影响较大, 气凝胶粒径影响相对较小;

(3) 气凝胶玻璃的遮蔽系数、传热系数、可见光透射比都随结构尺寸 $a^{1.4}/d^{0.2}$ 增大而线性减小, 且随着传热系数的增大, 遮蔽系数也随之线性增大, 研究结果可为气凝胶玻璃的结构尺寸的合理设计提供理论指导。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 [M]. 中国建筑工业出版社, 2014.
- [2] 王欢, 吴会军, 丁云飞, 等. 建筑外窗热工性能对空调能耗与节能的影响分析 [J]. 节能技术, 2011, 29(2):172-5.
- [3] 王欢, 吴会军, 丁云飞, 等. 夏热冬暖地区新型气凝胶节能玻璃遮阳性能优化 [J]. 建筑技术, 2014, 45(2): 174-7.
- [4] Wu H, Chen Y, Chen Q, et al. Synthesis of flexible aerogel composites reinforced with electrospun nanofibers and microparticles for thermal insulation[J]. Journal of Nanomaterials, 2013, 2013(1-2):10.
- [5] Bheekhun N, Talib A R A, Hassan M R. Aerogels in Aerospace: An Overview[J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2013, 2013(48):18.
- [6] He Y L, Xie T. Advances of thermal conductivity models of nanoscale silica aerogel insulation material[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 81:28-50.
- [7] Wu H, Liao Y, Ding Y, et al. Engineering Thermal and Mechanical Properties of Multilayer Aligned Fiber-Reinforced Aerogel Composites[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2012, 63(3):445-456.
- [8] Huang Y, Niu J L. Application of super-insulating translucent silica aerogel glazing system on commercial building envelope of humid subtropical climates – Impact on space cooling load[J]. Energy, 2015, 83(1):316-325.
- [9] Petter J B, Ruben B, Arild G. Aerogel insulation for building applications[M]// The Sol-Gel Handbook - Synthesis, Characterization, and Applications. 2015:1385-1412.
- [10] Buratti C, Moretti E. Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems[J]. Applied Energy, 2012, 97(3):430-437.
- [11] Garnier C, Muneer T, Mccauley L. Super insulated aerogel windows: Impact on daylighting and thermal performance[J]. Building & Environment, 2015, 94:231-238.
- [12] Tao G, Jelle B P, Ihara T, et al. Insulating glazing units with silica aerogel granules: The impact of particle size[J]. Applied Energy, 2014, 128(3):27-34.
- [13] Huang Y, Niu J L. Energy and visual performance of the silica aerogel glazing system in commercial buildings of Hong Kong[J]. Construction & Building Materials, 2015, 94:57-72.
- [14] 西安建筑科技大学, 刘加平. 建筑物理 [M]. 中国建筑工业出版社, 2009.
- [15] 全国建筑用玻璃标准化技术委员会. 建筑玻璃 可见光透射比, 太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定 [M]. 国家质检总局. 1993.
- [16] 王珊. 透光隔热气凝胶玻璃与建筑节能应用研究 [D]; 广州大学, 2016.

相变平板简化动态模型研究

严天¹, 徐新华¹, 徐涛², 凌子夜³

(1. 华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 广州大学土木工程学院, 广东广州

510006; 3. 华南理工大学化学与化工学院, 广东广州 510641)

[摘要] 本文针对相变平板建立了一种热容热阻(4R2C)简化动态传热模型, 并根据数值传热模型的计算结果对简化模型的 RC 参数进行辨识, 进而模拟相变平板的传热特性。本文进一步将简化模型的计算结果与数值结果进行对比, 验证了简化模型及其参数的准确性。结果表明, 简化模型的计算结果与数值模型计算结果基本一致, 平板表面温度平均误差小于 0.3℃, 通过左、右表面热流平均相对误差分别为 10.4% 与 5.1%, 表明了 4R2C 简化动态模型具有较好的准确性。简化模型的计算时间小于数值模型计算时间的 0.1%, 其计算效率远高于数值模型。

[关键词] 相变平板; 简化动态模型; 数值模型; 传热特性; 计算效率

0 引言

相变材料通过相态变化以实现潜热存储与释放, 能够提高能源的利用效率, 解决能源供应在时间与空间矛盾^[1]。在建筑领域, 相变材料多以平板的形式嵌入墙体, 以实现建筑围护结构的蓄能隔热^[2]。文献[3]提出了一种新型双层相变墙系统, 通过模拟发现该相变墙系统能够降低建筑 35.4% 的峰值负荷与 12.8% 的全年能耗。文献[4]将相变材料置于房间墙体内, 通过模拟分析表明, 相比于普通房间, 相变房间在供热季的空调能耗降低了 17%。文献[5]提出了一种结合太阳能集热器的相变蓄能地板采暖系统, 实验结果表明该相变蓄能地板有效的维持房间温度, 提高房间热舒适性。

近年来, 不少学者相变材料的传热模型进行了研究。文献[3]基于有效焓的方法建立了相变平板的传热模型, 并采用有限差分法对模型进行了求解计算。文献[6]采用有效热容法及有效焓两种方法对相变材料的传热特性进行数值模拟计算, 并通过实验验证分析了两种方法的适用性。在相变平板传热特性的研究中, 传统的传热模型多为数值模型^[3,4], 求解效率低, 耗时长, 且不易于嵌入整个建筑热湿模型。因此, 建立快速、准确的相变传热简化模型对相变平板的仿真与应用十分重要。

本文建立了相变平板的 4R2C 一维热容热阻简化动态模型, 利用数值模型的计算结果辨识模型的 RC 参数, 进而对相变平板的传热特性进行模拟。利用数值结果对简化动态模型进行了对比分析, 进一步验证了简化模型的准确性与适用性, 为相变平板材料的模拟研究提供了参考。

1 简化动态传热模型

相变平板结构如图 1(a) 所示, 图 1(b) 为相变平板的一维简化动态热容热阻(RC)传热模型示意图, 简化 RC 传热模型能够快速的模拟相变材料的动态传热过程, 通过输入不同的边界条件, 计算模拟得到相变材料表面的温度与通过相变材料的热流, 进而获得相变平板材料的传热特性。对于相变平板, 本文建立了一种 4R2C 简化传热

模型, 利用集总参数法^[7], 将材料的总热容分为两个集总等效热容(C_1 与 C_2), 总热阻分为两个集总等效热阻(R_1 、 R_2 、 R_3 与 R_4), 进而根据利用热力学第三定律建立相变平板的一维简化动态 RC 传热模型。

以对流边界为例, 相变平板的动态 RC 传热模型如式(1)与(2)所示, 通过左、右表面的热流 q_1 与 q_2 可根据式(3)进行计算, 相变平板左、右表面的温度 T_1 、 T_2 可根据式(4)进行计算, 其中 T_{out1} 与 T_{out2} 分别为相变平板左、右侧环境温度(℃); T_{p1} 与 T_{p2} 分别表示内节点的温度(℃); h_1 与 h_2 分别为左右两边的对流换热系数(W/(m²·℃)); t 为时间变量(s)。在简化模型中, 假设相变材料是各向同性的均匀连续介质, 其 RC 参数通过辨识获取。

$$C_1 \frac{dT_{p1}}{dt} = \frac{T_{out1} - T_{p1}}{1/h_1 + R_1} - \frac{T_{p1} - T_{p2}}{R_2 + R_3} \quad (1)$$

$$C_2 \frac{dT_{p2}}{dt} = \frac{T_{p1} - T_{p2}}{R_2 + R_3} - \frac{T_{p2} - T_{out2}}{R_4 + 1/h_2} \quad (2)$$

$$q_1 = \frac{T_{out1} - T_{p1}}{1/h_1 + R_1}, \quad q_2 = \frac{T_{p2} - T_{out2}}{R_4 + 1/h_2} \quad (3)$$

$$T_1 = (h_1 R_1 T_{out1} + T_{p1}) / (h_1 R_1 + 1),$$

$$T_2 = (h_2 R_4 T_{out2} + T_{p2}) / (h_2 R_4 + 1) \quad (4)$$

2 模型参数辨识

在非稳态边界条件下, 相变材料热特性的理论解获取困难, 多采用数值方法^[3,4,6]求解, 其数值结果能够较为准确的反映相变材料的热特性。对于简化动态 RC 模型, RC 参数辨识可以简化为寻找一组最优的 R、C 分配比例, 进而确定各节点之间的热阻(R_1 、 R_2 、 R_3 与 R_4)、热容(C_1 与 C_2)参数, 使得相变平板的温度与热流响应与数值解的误差最小。在 4R2C 模型中, 相变平板的总热阻 R_{total} 与总热容 C_{total} 可利用式(5)~(6)进行计算^[8]; T 表示节点温度。将相变平板分为节点 p_1 与节点 p_2 的两部分; β_1 表示其节点分配比; β_2 与 β_3 分别表示每个节点部分前后的热阻参数分配比; 模型 R_i 、 C_i 参数如式(7)~(8)所示。式中 δ 为相变平板的厚度(m); K_s 、 K_l 分别为相变材料固相与液相时的导热系数(W/(m·℃)); c_{ps} 、 c_{pl} 分别为相变材料固相与液相时的比热,J/(kg·℃); ρ_s 、 ρ_l 分别为相变材料固相与液相时的密度(kg/m³); λ 为相变潜热(J/kg); T_s 、 T_l 分别为相变材料的凝固温度与熔化温度(℃)。

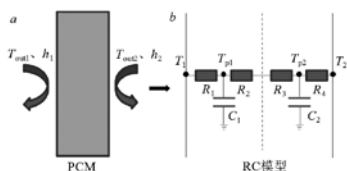


图 1 相变平板结构(a)与简化动态 RC 模型(b)

$$R_{total} = \delta / K_{pcm}(T), K_{pcm}(T) = \begin{cases} K_s & T < T_s \\ (T - T_s) \frac{(K_l - K_s)}{(T_l - T_s)} & T_s \leq T \leq T_l \\ K_l & T > T_s \end{cases} \quad (5)$$

$$C_{total} = \delta C_{pcm}(T), C_{pcm}(T) = \begin{cases} \rho_s c_{ps} & T < T_s \\ \frac{\rho_s c_{ps} + \rho_l c_{pl}}{2} + \frac{\rho_s + \rho_l}{2} \left(\frac{\lambda}{T_l - T_s} \right) & T_s \leq T \leq T_l \\ \rho_l c_{pl} & T > T_s \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} R_1 &= (\beta_1)_{4R2C} \cdot (\beta_2)_{4R2C} \cdot R_{total}(T_{p1}), \\ R_2 &= (\beta_1)_{4R2C} \cdot (1 - (\beta_2)_{4R2C}) \cdot R_{total}(T_{p1}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} R_3 &= (1 - (\beta_1)_{4R2C}) \cdot (\beta_2)_{4R2C} \cdot R_{total}(T_{p2}), \\ R_4 &= (1 - (\beta_1)_{4R2C}) \cdot (1 - (\beta_2)_{4R2C}) \cdot R_{total}(T_{p2}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= (\beta_1)_{4R2C} \cdot C_{total}(T_{p1}), \\ C_2 &= (1 - (\beta_1)_{4R2C}) \cdot C_{total}(T_{p2}) \end{aligned} \quad (9)$$

本文以时域内简化模型计算得到的相变平板的表面温度及热流与数值模型求解结果的误差的最小值作为优化目标,利用遗传算法^[9,10](GA)对相变平板4R2C模型参数进行辨识。优化目标函数为 $J(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$,如式(10)所示,其中 T_s 、 q_{sz} 表示相变平板右壁面温度以及通过右壁面热流的数值解, $N-1$ 为误差样本总数, W 为权重,可根据材料热阻确定。

$$J(\beta_1, \beta_2, \beta_3) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (q_2 - q_{sz})^2}{N-1}} + W \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_2 - T_{sz})^2}{N-1}} \quad (10)$$

3 案例计算

3.1 数值参考模型

本文以某相变平板为例,利用ANSYS建立某相变平板的数值模型,进而获得相变平板材料传热特性。相变平板材料选用SP29^[11],厚度为0.01m,其物性参数如表1所示。对数值模型进行网格无关性验证,确定网格数量为2万个,模拟时间步长为1.0s,相变模型的迭代收敛精度为 10^{-6} ,数值模型的计算结果作为4R2C模型的参数辨识与模型验证依据。

表1 相变平板物性参数

材料	厚度/m	密度/(kg/m ³)	比热/(J/kg·°C)	导热系数/(W/m·°C)	相变潜热/(J/kg)	凝固温度/°C	熔化温度/°C
SP12	0.01	1 530 (solid)	2 000	0.6	190 000	28	30
		1 520 (fluid)					

表2 模型RC参数

模型	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	C ₁	C ₂
4R2C	0.4025R _{total}	0.2215R _{total}	0.3497R _{total}	0.0263R _{total}	0.6240C _{total}	0.3760C _{total}

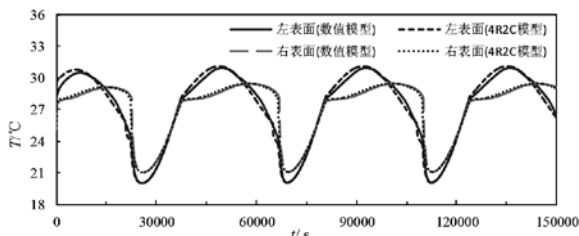


图2 相变平板表面温度

3.2 工况模拟

利用上述数值模型对该相变平板的传热特性进行模拟计算,得到相变平板材料壁面温度及热流,其周期性边界条件如式(11)~(12)所示,各工况的初始温度均为25°C。利用工况1边界条件下的数值结果作为简化模型的参数辨识的依据,通过遗传算法辨识,确定4R2C简化模型的RC参数。此外,为验证模型及参数的准确性,本文进一步利用4R2C简化模型对上述相变平板在工况2边界条件下的传热特性进行了模拟,并与数值模型的计算结果进行了对比分析。

工况1(参数辨识):

$$T_{out1} = 29 + 8 \times \sin\left(\frac{\pi}{12 \times 3600} t + \frac{\pi}{3}\right), T_{out2} = 27 \quad (11)$$

工况2(模型验证):

$$T_{out1} = 27 + 8 \times \sin\left(\frac{\pi}{6 \times 3600} t + \frac{\pi}{3}\right), T_{out2} = 27 \quad (12)$$

4 结果与验证

4.1 RC参数

根据工况1边界条件下相变平板材料数值模型的计算结果,对4R2C简化模型的RC参数进行辨识,结果如表2所示。其中总热容、热阻可由式(8)~(9)计算得到。

4.2 传热特性模拟与模型验证

为进一步验证简化模型的适用性,根据辨识得到的参数利用简化模型对工况2边界条件下相变平板材料的传热特性进行模拟,图3表示工况2下相变平板材料的左、右表面温度,可以看到采用4R2C简化模型计算得到的相变平板的表面温度及其变化与数值模型的计算结果十分吻合,在单个周期内,左表面的平均温度误差为0.26°C;右表面平均温度误差为0.12°C,结果表明采用辨识后的RC参数时,4R2C简化模型能够准确的反映相变平板材料的温度及变化。

图4表示简化模型与数值模型求解的工况2下相变平板材料的左、右表面热流,结果表明采用简化模型计算得到的平板表面热流基本吻合,在单个周期内,通过右表面的热流平均相对误差很小,仅为5.1%;由于左表面的边界条件动态特征明显,采用简化模型计算左表面热流误差有所增加,但仍维持在10%左右,结果进一步表明了4R2C简化模型的具有很好的准确性及适用性。

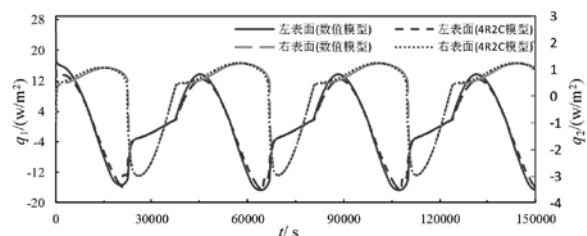


图3 通过相变平板左表面的热流(q_1)与右表面热流(q_2)

4.3 计算效率

本文所建立的 4R2C 简化模型能够有效的提高计算效率。以工况 2 为例,在同一台计算机(i7 处理器,8 核)上,利用 ANSYS 数值模型模拟所需耗时约 2.5 天,简化模型在进行模拟求解时仅需 1min 左右,小于数值模型计算所需时间的 0.1%,计算效率明显提高。

5 总结

本文针对相变平板建立了一种热容热阻(4R2C)简化动态传热模型,并根据具体工况下数值模型的求解结果对简化模型的 RC 参数进行辨识,模拟分析相变平板材料的传热特性。本文进一步对比分析了同一边界条件下简化模型与数值模型的计算结果,对简化模型及其 RC 参数的准确性进行了验证。结果表明,4R2C 简化模型能够准确的反映相变平板材料的传热特性。在工况 2 边界条件下,简化模型计算的相变平板左、右表面的温度与通过左、右表面的热流与数值模型的结果基本一致,其左、右表面温度平均差均小于 0.3℃,通过左表面热流平均误差为 10.4%,通过右表面热流平均误差为 5.1%,表明 4R2C 简化模型具有很好的准确性。此外,采用简化模型计算时,计算时间远小于数值模型计算所需的时间,计算效率明显提高,可广泛应用于相变材料的仿真与应用。

致谢

感谢国家自然科学基金(51678263)的资助。

参考文献

- [1] Pielichowska K, Pielichowski K., Phase change materials for thermal energy storage[J], Progress in Materials Science, 2014,65:67–123.
- [2] Kuznik F, David D, Johannes K, et al. A review on phase change materials integrated in building walls[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2011,15:375–391.
- [3] Diaconu B M. Cruceru M. Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings [J]. Energy and Buildings, 2010,42(10):1759–1772.
- [4] Chen Chao, Guo Haifeng ,Liu Yuning ,et al. A new kind of phase change material (PCM) for energy storing wallboard[J]. Energy and Building, 2008,40(5):181–190.
- [5] 肖伟,王馨,张群力,等. 结合太阳能空气集热器的定形相变蓄能地板采暖系统实验研究 [J]. 太阳能学报,2008,29(11):1319–1323.
- [6] Lamberg P, Lehtiniemi R ,et al. Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(3):277–287.
- [7] 章熙民,任泽霏. 传热学(第四版). 北京: 中国建筑工业出版社,2001.
- [8] Alawadhi E M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material[J]. Energy and Buildings, 2008,40:351–357.
- [9] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [10] Wang Shengwei., Xu Xinhua, Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45:419–432.
- [11] Meng E, Yu Hang, Zhan Guangyi, et al. Experimental and numerical study of the thermal performance of a new type of phase change material room[J]. Energy Conversion and Management.2013,74:386–394.

建筑墙体湿物性参数优化分析

万 航, 徐新华, 刘庆东, 谢得文

(华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北武汉 430074)

[摘 要] 建筑墙体湿物性参数随墙体湿度变化而变化, 墙体湿传递为 - 非线性过程, 求解复杂, 且消耗大量计算资源。针对这一现象, 本文对墙体湿传递过程进行线性化, 采用理论分析与数值模拟的方法, 对线性化后的湿传递方程的定湿物性参数进行优化, 使优化后的定湿物性参数计算得到的内表面湿流与变湿物性参数的结果一致, 从而简化墙湿传递的计算。结果表明, 与给定相对湿度下的湿物性参数相比, 利用优化后的湿物性参数计算得到的墙体内部湿流最接近变湿物性参数的结果, 优化得到的湿容与水蒸气渗透系数可用于建筑湿环境模拟中墙体湿传递定湿物性参数的参考值。

[关键词] 吸湿性材料; 湿传递线性化; 湿物性参数优化

0 引言

建筑湿环境对室内空气质量^[1], 人员舒适度^[2]和建筑围护结构的耐用性^[3]具有重要影响。建筑围护结构墙体内部常采用多孔材料如石膏板, 木板, 水泥砂浆等, 多孔材料具有吸湿性, 其吸放湿会影响室内湿环境^[4]。Osanvintola 等^[5]将吸湿性材料应用于空调受控房间, 结果表明室内冷负荷与热负荷降低了 5%~30%。Simonson^[6]等研究了吸湿性材料与建筑通风的关系, 发现当增加吸湿性材料后, 室内通风量可适当减少同时能耗降低。

建筑墙体吸湿性材料的湿物性参数随材料的相对湿度变化而变化^[7], 湿传递控制方程为 - 非线性偏微分方程。在对建筑进行湿环境模拟时, 非线性偏微分方程的存在会增大求解难度, 且会消耗大量的计算资源, 因此对墙体吸湿性材料的湿传递过程进行线性化显得尤为重要。

针对建筑墙体吸湿性材料湿物性参数变化导致墙体湿传递求解困难的现象, 提出对墙体湿传递方程进行线性化, 并采用理论分析与数值模拟的方法, 对线性化后的湿传递方程的定湿物性参数进行优化, 使优化后的定湿物性参数计算得到的内表面湿流与变湿物性参数的结果一致, 从而简化墙湿传递的计算。

1 建筑墙体湿传递模型

1.1 模型假设

建筑墙体受室内与室外环境综合的影响, 其内部湿传递较为复杂。一些学者采用实验与数值模拟的方法研究室外环境通过建筑围护结构对室内湿环境造成的影响。实验研究^[8]与模拟结果^[9]显示, 相较于室内人员与渗透风的产湿, 从室外通过建筑围护结构渗透到室内的湿量可以忽略不计, 因此墙体外表面可以看作不可渗透面。与室外环境相比, 室内温度与湿度更加稳定与温和, 调查研究^[10]显示, 无论是对于空调房间还是非空调房间, 室内相对湿度基本保持在 40%~70% 之间。

当相对湿度不超过 90% 时, 墙体吸湿性材料内液态水传导传输可以忽略不计^[11], 水蒸气扩散传输占主导地位^[12]。基于以上分析, 对墙体吸湿性材料湿传递过程作如下假设:

(1) 墙体内部表面温度波动较小, 内表面吸湿性材料湿传递看作等温过程。

(2) 水蒸气相对湿度作为湿传递的唯一驱动力且湿传递看作一维。

(3) 忽略吸放湿过程的湿滞影响, 材料湿容为吸湿过程与放湿过程的平均值。

1.2 湿传递模型

墙体吸湿性材料内吸放湿的控制方程如式 (1):

$$\xi(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \delta_v(\varphi) P_{sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (1)$$

$$\xi(\varphi) = \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \varphi} \quad (2)$$

式中: ξ 为湿容, 其值为等温吸放湿曲线斜率 (kg/m^3); φ 为相对湿度; δ_v 为材料中水蒸气扩散系数 ($\text{kg}/(\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$); P_{sat} 为饱和水蒸气压力 (Pa); ρ_0 为材料干密度 (kg/m^3); u 为材料含水量 (kg/kg)。

内表面 ($x=0$) 边界条件:

$$\delta_p \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_m \cdot P_{sat} (\varphi_i - \varphi_0) \quad (3)$$

$$\varphi_i = \varphi_{int} + \varphi_{amp} \sin(\omega t) \quad (4)$$

外表面 ($x=L$) 边界条件:

$$\delta_p \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (5)$$

式中: h_m 为墙体表面湿交换系数 ($\text{kg}/(\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s})$); φ_i 为室内相对湿度, 呈正弦周期变化; φ_{amp} 为相对湿度变化幅值; φ_{int} 为平衡相对湿度; ω 为室内湿变化的角频率; L 为墙体吸湿性材料厚度 (m)。

2 建筑墙体湿传递的线性化

墙体湿物性参数并不是一个固定值, 而随墙体湿环境变化而变化。变物性参数会导致墙体湿传递为 - 非线性过程。在对墙体湿传递进行数值模拟的时候, 解非线性偏微分方程会消耗大量的资源, 甚至会造成求解失败。因此, 在合理的范围内对其进行线性化显得尤为重要。

当墙体材料湿物性参数取定值时, 湿传递控制方程 (1) ~ (2) 可改写为式 (6) 与式 (7):

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi = \frac{\partial}{\partial x} D_w \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (6)$$

$$D_w = \frac{\delta_v P_{sat}}{\xi} \quad (7)$$

与墙体热传递类似, 根据初始条件及边界条件对式 (3) ~ (7) 求解, 可获得墙体吸湿性材料内表面与室内湿交换的频域解^[13]:

$$\varphi_{line,TF}(s) = \frac{h_m \delta_p P_{sat} \sqrt{\frac{s}{D_w}}}{\delta_p \sqrt{\frac{s}{D_w}} + h_m \coth(L \sqrt{\frac{s}{D_w}})} \varphi(s) \quad (8)$$

式中: $w' = \sqrt{s(2D_w)}$, $H = h_m / \delta_p$, $\Delta = \arctan(w' / (H + w'))$ 。

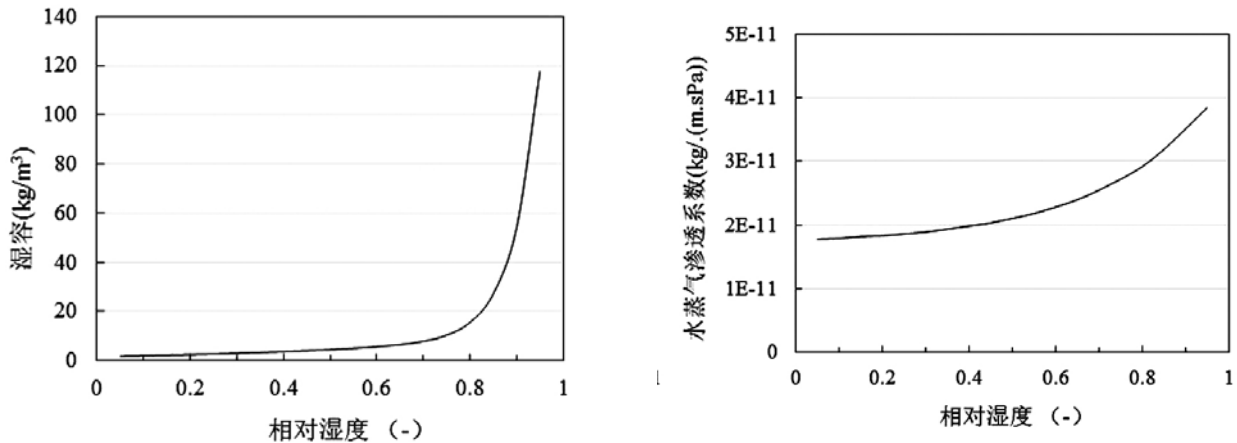


图1 石膏板湿物性参数湿容与水蒸气渗透系数

3 建筑墙体湿物性参数优化

国际能源组织 IEA Annex41 项目《Whole Building Heat, Air and Moisture Response》ST2 子项目《Experimental Analysis of Moisture Buffering》对石膏板的热湿特性进行了实验研究^[14], 对石膏板的湿物性参数进行了测量, 如表 1。根据测量的数据可以计算得到石膏板的湿容与湿阻, 如图 1。从图 1 可以看出, 石膏板的湿容随相对湿度的增加而增大, 湿渗透系数同样随相对湿度的增加而增大。

表 1 石膏板等温吸放湿线与等效空气扩散厚度

相对湿度 /%	等温吸放湿线 /(kg/kg)	等效空气扩散厚度 /m
5	0.001316	0.136
10	0.001552	0.135
15	0.001753	0.133
20	0.001944	0.132
25	0.002135	0.13
30	0.002333	0.128
35	0.002542	0.125
40	0.002769	0.122
45	0.003019	0.119
50	0.003299	0.115
55	0.00362	0.111
60	0.003996	0.106
65	0.004447	0.101
70	0.005007	0.095
75	0.005729	0.089
80	0.006719	0.083
85	0.008195	0.076
90	0.010746	0.069
95	0.0168	0.063

利用 Comsol Multiphysics 多物理场模拟软件, 对墙体吸湿材料非线性偏微分方程进行数值求解, 得到一个周期内墙体内部表面的湿流 Φ_{sim} 。利用 GA 遗传算法^[15], 求解墙体吸湿性材料湿容与水蒸气渗透系数的最优值, 使线性化后计算得到的湿流 Φ_{linear} 与非线性偏微分方程数值计算得到的湿流 Φ_{sim} 的差值最小, 目标函数如式 (10), 此时的

湿容与水蒸气渗透系数即为吸湿性材料线性化的优化湿容 ξ_{opt} 与优化水蒸气渗透系数 δ_{opt} 。

$$J(\xi_{opt}, \delta_{opt}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i |\Phi_{i,sim} - L^{-1}[\Phi_{i,linear,TF}(s)]|^2} \quad (9)$$

4 优化结果与分析

给定室内边界条件, 即可求得墙体吸湿性材料内表面湿流。当室内湿度如式 (10) 变化时, 采用 Comsol Multiphysics 多物理场模拟软件与优化算法计算得到的内表面湿流如图 2 所示。本文同时计算了给定湿容与水蒸气渗透系数时墙体吸湿性材料内表面湿流, 分别选取平衡相对湿度为 40%、60% 和 80% 时对应的参数进行计算。

$$RH_{ambition} = 0.2224 \sin\left(\frac{\pi}{43200} t\right) + 0.6267 \quad (10)$$

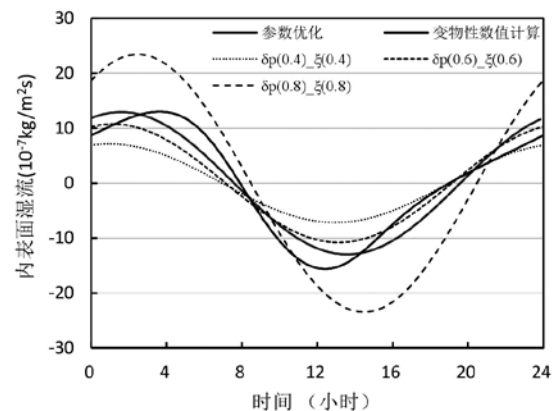


图 2 不同定物性参数与变物性参数下墙体内部表面湿流

表 2 优化参数和给定参数下墙体内部表面湿流与变湿物性参数的偏差

湿物性参数	优化参数	湿容与渗透系数对应的相对湿度		
		0.4	0.6	0.8
ξ/δ_p	2.3/7.2e ⁻¹¹	3.7/2.0e ⁻¹¹	5.6/2.3e ⁻¹¹	15.6/3.0e ⁻¹¹
湿流均方根 (*10 ⁻⁷)	2.5	5.0	3.1	8.3

采用不同定湿物性参数计算得到的墙体内部表面湿流与变湿物性参数时墙体内部表面湿流的均方差如表 2 所示。采用优化参数计算得到湿流与变湿物性参数结果偏差最小,其均方差仅为 $2.5 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$, 当给定某一相对湿度下的湿容与水蒸气渗透系数时,采用平衡相对湿度为 40%、60% 和 80% 时的湿物性参数计算得到的湿流与变物性参数间的均方差分别为 $5.0 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $3.1 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 和 $8.3 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$, 平衡相对湿度为 60% 对应的湿物性参数的计算结果误差最小。

5 结论

本文采用理论分析的方法,建立了墙体吸湿性材料湿传递的理论模型,在给定边界条件下,当材料为定湿物性时,推导出了墙体内部表面湿流的计算方程。同时,采用 Comsol Multiphysics 多物理场模拟软件计算得到变湿物性参数时墙体内部表面的湿流,以两种方式得到的湿流间的偏差作为优化参数对定湿物性参数进行优化。

结果表明,与给定相对湿度下的湿物性参数相比,利用优化后的湿物性参数计算得到的墙体内部表面湿流最接近变湿物性参数的结果,优化得到的湿容与水蒸气渗透系数可用于建筑湿环境模拟中墙体湿传递定湿物性参数的参考值。

参考文献

- [1] H.J. Moon, S.H. Ryu, J.T. Kim. The effect of moisture transportation on energy efficiency and IAQ in residential buildings. *J. Energy & Buildings* 75(2) (2014) 439–446.
- [2] L. Fang, G. Clausen, P.O. Fanger. Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality. *J. Indoor air* 8(2) (1998) 80–90.
- [3] F. Lucas, L. Adelaar, F. Garde, et al. Study of moisture in buildings for hot humid climates. *J. Energy and Buildings* 34(4) (2002) 345–355.
- [4] Liu Y, Wang Y, Wang D, et al. Effect of moisture transfer on internal surface temperature [J]. *Energy & Buildings*, 2013, 60(6):83–91.
- [5] O.F. Osanyintola, C.J. Simonson. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: experimental facilities and energy impact. *J. Energy and Buildings* 38(10)(2006) 1270–1282.
- [6] C.J. Simonson, M. Salonvaara, T. Ojanen. Moderating Indoor Conditions with Hygroscopic Building Materials and Outdoor Ventilation. *J. ASHRAE Transactions* 110(2)(2004).
- [7] Tariku F, Kumaran K, Fazio P. Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 53(15):3035–3044.
- [8] Labat M, Woloszyn M, Garnier G, et al. Dynamic coupling between vapour and heat transfer in wall assemblies: Analysis of measurements achieved under real climate [J]. *Building and Environment*, 2015,87:129–141.
- [9] Steeman M, Goethals K, Laverge J, et al. On modelling moisture buffering when evaluating humidity controlled HVAC systems[C]. *The 11th International Building Performance Simulation Association Conference*, 2009:819–826.
- [10] CDH Energy Corp and Building Science Corp. Analysis of indoor environmental data, Research Report-0601[R]. http://buildingscience.com/sites/default/files/migrate/pdf/BA-0601_Indoor_Environment.pdf, 2006.
- [11] Kwiatkowski J. Moisture in buildings air-envelope interaction [D]. *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*, 2009.
- [12] T.Z. Harmathy. Simultaneous moisture and heat transfer in porous systems with particular reference to drying. *J. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 8(1) (1969) 92–103.
- [13] Chen Y, Chen Z. Transfer function method to calculate moisture absorption and desorption in buildings[J]. *Building & Environment*, 1998, 33(4):201–207.
- [14] Rode C, Peuhkuri R, Woloszyn M. Simulation Tests in Whole Building Heat and Moisture Transfer [J]. 2006.
- [15] Zhu Q, Xu X, Wang J, et al. Development of dynamic simplified thermal models of active pipe-embedded building envelopes using genetic algorithm [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 76(2):258–272.

基于 Design Builder 模拟的甘肃省被动式太阳房建筑热工设计参数研究

张贺佳, 田 喆, 柴国钰, 季 翔

(天津大学, 天津 300350)

[摘 要] 本文对位于甘肃省不同热工气候分区中的七个典型城市的被动式太阳房建筑进行 Design Builder 能耗模拟, 由模拟所得的采暖与空调能耗值分析不同被动式太阳房的参数设定对太阳房节能效果的影响。得到了直接受益式、集热蓄热墙式和附加阳光间式三种被动式太阳房建筑在不同城市时随影响因素的变化规律, 从而确定在甘肃省不同热工气候分区下三种被动式太阳房的热工设计参数推荐值。

[关键词] 被动式太阳房建筑; 热工设计参数; 建筑节能; Design Builder

0 引言

随着社会的发展和进步, 人类社会所需要的能量将不断增加, 能源危机也将深化。面对这一现实, 在家用低级热能方面, 应该更积极地发挥太阳能的潜力。从改善广大人民的居住环境、节约能源及保护环境等方面考虑, 推广建造太阳能建筑是最好的选择。

在推广太阳能建筑时, 被动式太阳房建筑是一种利用效率非常高的能源利用方式。被动式太阳房是通过建筑朝向、平面布局及外部形态的合理布置、内部空间和外部形体的巧妙处理、建筑构造的合理设计、建筑材料的合理选择, 使得其以自然运行的方式获取、储存和利用太阳能的一类建筑。由于太阳辐射具有时空不连续性的特点, 为了获取舒适的室内热环境, 时常在建筑中同时使用被动式和主动式太阳能方式甚至添加辅助能源。被动式太阳房的基本形式, 按其利用太阳能的热过程和方式, 一般分为三种: 直接受益式、集热墙式和附加日光间式。

甘肃省有着丰富的太阳能资源, 十分适合推广建造被动式太阳房建筑, 我国的第一栋被动式太阳房也正是于 1977 年建在甘肃省民勤县, 这是一栋南窗直接受益结合实体集热墙集取太阳热量的组合式太阳房。甘肃省地处黄土、青藏和蒙古三大高原交汇地带, 光照充足, 太阳辐射强, 年日照时数为 1631~3391h, 自东南向西北增多, 太阳能资源丰富, 年太阳总辐射达 $6350\text{MJ}/\text{m}^2$, 年太阳总辐射和直射的地理分布特征为由西至东、由北至南递减。太阳散射在空间分布上总体较为平缓, 甘肃地区直接辐射比例均 $>40\%$, 十分有利于太阳能热利用^[1]。因此在甘肃省如何设计、建造被动式太阳房, 以求最大限度的利用太阳能十分重要。

气候影响建筑形式, 建筑形式要适应于当地的气候特征。被动式利用太阳能的太阳房更应如此。在我国已建成的太阳房中, 有些太阳房, 由于在建造之前没有认真地按正确的方法进行定量的建筑热分析计算和设计效果预测和优化, 致使建成后室温偏低, 达不到舒适性要求; 或对于有些地区, 初投资过高, 回收期过长, 影响了太阳房的推广。因此为完善地解决太阳房的经济、适用问题, 需要就甘肃省的地域特征对被动式太阳房进行针对性研究工作, 确定适应于甘肃省地域特征的被动式太阳房建筑热工设计参数。

本文针对甘肃省典型气候特点, 选择 7 个代表城市作为研究对象的地域条件。采用动态能耗模拟软件 Design

Builder 作为计算分析手段, 建立系列多层被动太阳能建筑模型, 包括直接受益窗式, 附加阳光间式与集热墙式太阳房, 并对被动式太阳房建筑热工设计参数进行优化。优化分析主要考虑在现有经济条件下, 最大限度利用太阳能采暖, 将辅助热源限制在最低的范围内。

1 被动式太阳房建筑模拟

1.1 典型气候条件选择

由于甘肃省中的不同城市包含多种不同气候条件, 因此必须分别研究在各种不同典型气候条件下被动式太阳房建筑热工设计参数的选择。根据甘肃省被动式太阳房建筑采暖和降温气候分区以及甘肃省建筑气候分区划分^[2], 本文选择乌鞘岭、合作、酒泉、敦煌、平凉、兰州和武都七个典型城市作为能耗模拟计算的城市。这七个城市能够代表甘肃省太阳能建筑采暖和降温气候分区的类型以及建筑气候分区类型, 可通过不同类型下的城市进行对比, 分析不同气候条件下被动式太阳房建筑的能耗特点, 从而有针对性地对不同气候条件下的被动式太阳房建筑进行参数优化。

1.2 基本建筑模型

本文所模拟的基本建筑为我国典型的居住建筑, 调查结果^[3]表明我国典型居住模式为三口之家, 两室或三室一厅。家庭一般作息为上班时间家里少人。因此选定进行能耗模拟分析的参考户型为具有一定代表性的两室一厅的户型, 户型面积 84.6m^2 , 并分别采用 Design Builder 模拟软件按一层、四层和九层建立建筑模型, 这三种建筑模型如图 1 所示。

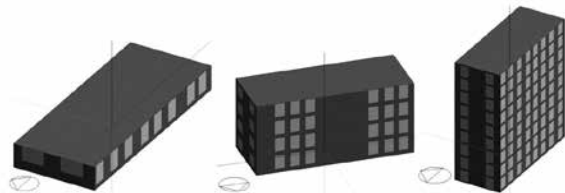


图 1 单层、四层、九层建筑模型

用 Design Builder 所简化表示的该典型居住建筑的平面图如图 2 所示。建立不同气候条件的各城市的建筑模型, 按国家节能设计标准中围护结构热工性能的规定设置不同建筑热工分区下的城市建筑模型的各围护结构参数, 建筑重要围护结构参数值见表 1。

表 1 模拟建筑围护结构参数设置表

城市	层数	传热系数 $W/(m^2 \cdot K)$								窗墙面积比 %		
		外墙	内墙	屋面	地板	外门	南外窗	东、西外窗	北外窗	南向	东、西向	北向
乌鞘岭	1	0.25	1.2	0.2	0.3	1.5	1.6	2	2	0.4	0.3	0.25
	4	0.4	1.2	0.25	0.4	1.5	1.8	2.5	2	0.4	0.3	0.25
	9	0.5	1.2	0.25	0.3	1.5	2	2.5	2.2	0.4	0.3	0.25
合作	1	0.3	1.2	0.25	0.3	1.5	1.6	2	2	0.45	0.3	0.25
	4	0.45	1.2	0.3	0.45	1.5	1.9	2.5	2.2	0.45	0.3	0.25
	9	0.55	1.2	0.3	0.45	1.5	2	2.5	2.2	0.45	0.3	0.25
酒泉	1	0.35	1.5	0.3	0.35	1.5	1.6	2	1.8	0.45	0.3	0.25
	4	0.5	1.5	0.4	0.35	1.5	2	2.5	2.2	0.45	0.3	0.25
	9	0.6	1.5	0.4	0.5	1.5	2	2.5	2.2	0.45	0.3	0.25
敦煌 平凉 兰州	1	0.35	1.5	0.35	0.45	2	2	2.8	2.8	0.45	0.3	0.3
	4	0.6	1.5	0.45	0.6	2	2	3.1	2.8	0.45	0.3	0.3
	9	0.7	1.5	0.45	0.6	2	2.3	3.1	2.8	0.45	0.3	0.3
武都	1	0.8	1	0.5	0.7	2	2.8	2.8	2.8	0.45	0.35	0.3
	4	1	1	0.8	0.7	2	2.8	3.2	3.2	0.45	0.35	0.4
	9	1	1	0.8	0.7	2	2.8	3.2	3.2	0.45	0.35	0.4

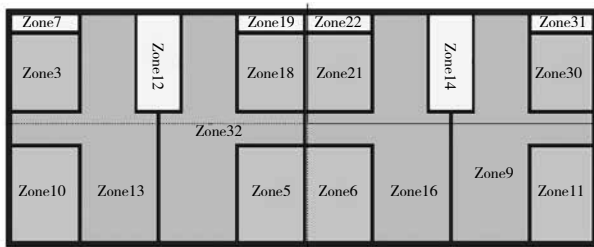


图 2 居住建筑平面图布局简化

在对以上建筑模型的设置过程中,根据居住建筑实际情况设置建筑内各房间的温度及热扰。在建筑暖通空调系统的设置中,采暖热源设定燃煤锅炉,根据国家标准《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》^[4]中规定的燃煤锅炉的效率值在 74% 到 82% 之间,因此设定锅炉效率为 80%。对于居住建筑来讲,空调设备的配置主要为居民个人行为,主要使用单体空调。本文中设定,空调设备额定能效比为 2.3。且不同建筑热工分区的采暖月和空调月时间设置见表 2。

表 2 甘肃省典型城市采暖月和空调月时间表

城市	所属建筑热工分区	采暖月	空调月
乌鞘岭、合作、酒泉	严寒	1, 2, 3, 11, 12	6, 7, 8
敦煌、平凉、兰州	寒冷	1, 2, 3, 11, 12	6, 7, 8, 9
武都	夏热冬冷	1, 2, 3, 12	5, 6, 7, 8, 9

1.3 被动式太阳房模拟参数设置

常用的被动式太阳房建筑有直接受益式、集热蓄热墙、附加阳光间三种形式,本文分别对这三种形式的被动式太阳房建筑进行模拟与分析。

直接受益式太阳房是让阳光透过窗户直接照射进来,一个开有南向玻璃窗的房间即看作是一个直接受益式太阳房。白天,阳光照射加热室内的地板、墙壁及家具等,当室温低于储热体表面温度时,这些物体开始放热供暖。其中南向集热窗可以利用进入室内的太阳辐射热的 65~70%。直接受益式太阳房中南向集热窗的传热系数大小以及窗墙比会影响太阳房的集热效率。本文针对南向集

热窗的传热系数进行模拟分析,确定不同热工分区下南向集热窗传热系数限值大小,以优化被动式太阳房的设计。本文将表 1 中设定的建筑模型作为模拟中的对照组,在对照组的基础模型上改变南向窗墙比为国家行业标准《被动式太阳房建筑设计规范》中推荐的 50%,然后将南向集热窗传热系数从 $0.2W/(m^2 \cdot K)$ ~ $5W/(m^2 \cdot K)$ 不断变化确定实验组建筑模型,并利用 Design Builder 能耗模拟软件模拟分析建筑采暖和空调能耗的变化。

集热蓄热墙式太阳房即在南向透明玻璃窗后砌一道重型结构墙作为集热装置的太阳房,也称为特朗勃式太阳房。集热蓄热墙式太阳房的南向墙体的结构为外部是透明玻璃,中间为空气夹层,里面是一层重质结构墙。集热蓄热墙的空气夹层和墙体厚度是影响太阳房集热效率的重要因素。空气夹层在白天可以起到阻止热量向外界散失的作用,夜间除了保温以外也可以将白天蓄得的热量传给集热墙从而传给室内。因此空气夹层厚度过高和过低都不利于集热蓄热墙的集热和蓄热,空气夹层厚度过高,集热墙加热夹层内的空气损失的热量就会增多,从而向室内传递的热量就会降低;而空气夹层的厚度过低,则墙体的保温性就会降低,热量向外界散失的就会变多。同样,集热蓄热墙的墙体厚度过高和过低都不利于集热蓄热墙的采暖效果。墙体过厚,墙体蓄热量很高,但传热系数也较高,从而导致向室内传递的热量降低;墙体过薄,墙体的传热系数降低,建筑围护结构的热工参数达不到设计值,而房间内所接受的太阳辐射的热量不足以维持人体活动的最低温度值,室内温度也会降低。因此本文采用应用较为普遍的砖墙结构作蓄热墙材料并设置玻璃的传热系数为 $1.99W/(m^2 \cdot K)$,主要探讨空气夹层和墙体厚度对集热蓄热墙式太阳房节能效果的影响。Design Builder 模拟时集热蓄热墙结构图及集热蓄热墙式太阳房局部示意图如图 3 所示。

在对空气夹层和墙体厚度进行探讨时,参数按如下方式设置。对于空气夹层,本文将集热蓄热墙空气夹层厚度从 1cm 变化到 20cm,其他设置均保持相同,模拟甘肃省不同城市单层建筑的采暖和空调能耗,以空气夹层厚度为 1cm 时的能耗为基准,分别求得各夹层厚度对应的建筑单位面积节能量。对于墙体厚度,本文将集热墙砖墙厚度从

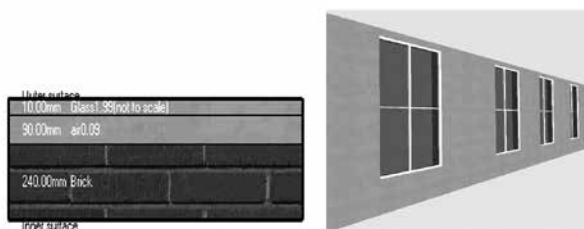


图3 集热蓄热墙结构图及集热蓄热墙式太阳房局部示意图

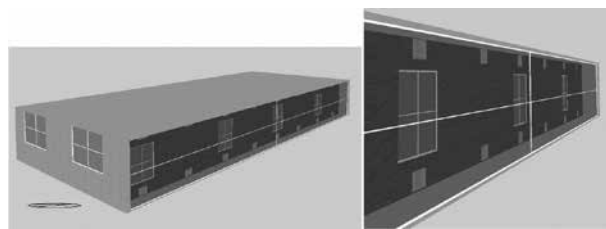


图4 附加阳光间式太阳房整体与局部示意图

8cm 变化到 50cm, 其他设置均保持相同, 模拟甘肃省不同城市单层建筑的采暖和空调能耗, 以墙厚度为 8cm 时的能耗为基准, 分别求得各种墙厚度对应的节能量。

附加阳光间式太阳房可以看作是集热蓄热墙形式的发展, 即将玻璃和墙之间的夹层放宽, 形成一个可以使用的空间, 称为附加阳光间或附加温室。附加阳光间与房间之间的关系较为灵活, 既可以用砖石墙间隔, 也可用落地窗隔开, 白天, 阳光间可向室内供暖, 晚间可作为房间的保温层。附加阳光间式太阳房中附加阳光间和相邻房间之间常设置内玻璃门(窗), 内门窗的设置可以让阳光直接进入相邻房间, 此时内窗玻璃面积成为影响集热效率的一个主要因素。面积太大, 由于窗户的传热系数较大且蓄热能力较大导致附加阳光间的夜间保温性能下降。因此合理的内门窗面积对于附加阳光间的设计尤为重要。此外, 由于阳光间白天可以集取热量向室内传递, 夜间除了保温以外也可以将白天蓄得的热量传给室内。因此阳光间的进深过大或过小都不利于阳光间的集热和蓄热性能。阳光间进深太大, 一方面在建造阳光间时所占的建筑面积较大不易于实现且造价较高, 另一方面进深过大导致白天阳光间的温度不会升高太多, 从而向室内传递的热量就会减少; 而阳光间进深过低, 则阳光间的保温性就会降低, 热量向外界散失的就会变多。由于附加阳光间的玻璃的传热系数对采暖能耗影响不明显^[4], 因此本文设置玻璃为透光性较好的单层低铁玻璃, 主要探讨内门窗面积和阳光间进深对附加阳光间式太阳房节能效果的影响。Design Builder 模拟时附加阳光间式太阳房的整体与局部示意图如图4所示。

在对内门窗面积和阳光间进深两个参数进行探讨时, 参数设置方式如下所示。对于内门窗面积, 本文在附加阳光间内隔墙设置塑钢单层玻璃窗, 高度为 2.1m, 逐步调整内窗的宽度, 计算能耗量, 以得到内窗宽度(面积)与能耗的关系。对于阳光间进深, 本文在 0.6m~1.8m 范围内逐渐改变阳光间进深, 以得到阳光间进深与能耗的关系。

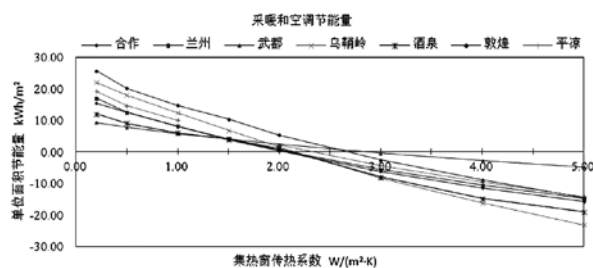
2 模拟结果及热工设计参数分析

2.1 直接受益式太阳房

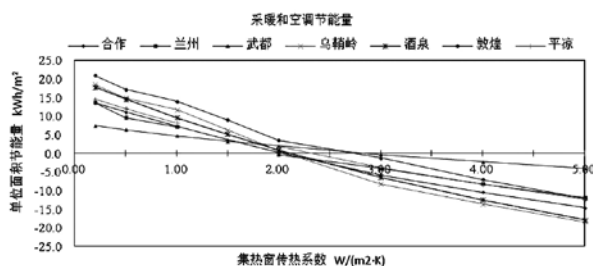
本文取实验组建筑采暖和空调总能耗相比对照组建筑采暖和空调总能耗的变化量与建筑总面积的比值, 即单位建筑面积的节能量与传热系数的变化相比较。图5表示甘肃省不同典型城市的建筑节能随南向集热窗传热系数变化的关系曲线。

从图中可以看出, 采暖和空调节能量随着南向集热窗传热系数的增大而减小, 当节能量等于零时所对应的传热系数即为南向集热窗传热系数的限值。表3表示了不同典型城市中直接受益式太阳房南向集热窗传热系数的限值, 由于同一个城市不同层数的建筑, 其南向集热窗传热系数限值相差不大, 因此可以对同一个城市的不同层数建筑的

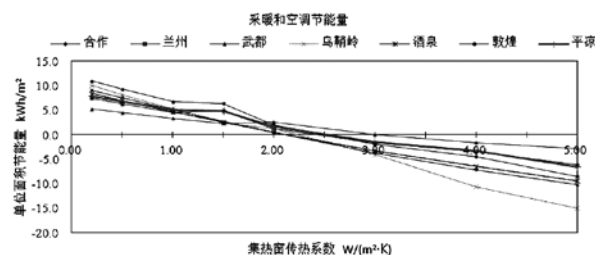
南向集热窗传热系数限值取平均值。再将同处一个建筑设计气候分区的城市的集热窗传热系数限值取平均值, 可得严寒地区集热窗传热系数限值为 $2.09 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 寒冷地区集热窗传热系数限值为 $2.34 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 夏热冬冷地区集热窗传热系数限值为 $2.81 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。



(a) 单层建筑



(b) 四层建筑



(c) 九层建筑

图5 采暖和空调节能量随南向集热窗传热系数变化的关系曲线

表 3 直接受益式太阳房南向集热窗传热系数限值 $W/(m^2 \cdot K)$

城市	1 层	4 层	9 层	平均
乌鞘岭	2.14	2.13	2.13	2.13
合作	2.03	2.04	2.03	2.03
酒泉	2.10	2.12	2.12	2.11
敦煌	2.62	2.65	2.66	2.65
平凉	2.29	2.30	2.31	2.30
兰州	2.07	2.09	2.09	2.08
武都	2.78	2.81	2.83	2.81

2.2 集热蓄热墙式太阳房

集热蓄热墙的空气夹层和墙体厚度是本文研究的两大因素。图 6 表示了建筑单位面积节能量与空气夹层厚度的关系曲线。从图中可以看出,随着空气夹层厚度的增加,节能量也随着增加,当空气夹层增加到某个特定值时,节能量增加幅度越来越小,直到趋近于某个定值。且通过图中的曲线可以发现,不同城市集热墙最佳空气夹层厚度略有不同。乌鞘岭、合作以及酒泉三个位于严寒地区的城市其集热墙空气夹层厚度取 10cm 左右较为合理,位于寒冷地区和夏热冬冷地区的其他四个城市的集热墙空气夹层的厚度取 4~6cm 为宜。

图 7 表示了建筑单位面积节能量与砖墙墙体厚度的关系曲线。从图中可以看出,随着砖墙墙体厚度增加,各城市的节能量均增加,且在墙体厚度达到 24cm 时,节能量的变化曲线开始平缓。当厚度达到 32cm 之后,节能量又有一定程度的增加,但变化幅度不是特别大。而墙体厚度的增加也会带来一定的初投资。因此考虑节省初投资,对于夏热冬冷地区,推荐集热墙厚度不宜超过 24cm,而寒

冷地区,集热墙厚度建议不超过 37cm。和严寒地区,集热墙厚度不宜超过 49cm,建议取 37cm。如此设置可以与我国建筑热工分区下的普通墙体的厚度值保持一致。

2.3 附加阳光间式太阳房

附加阳光间的内窗宽度和阳光间进深本文研究的两个参数。由图 8~9 可得,随着内窗宽度的增加,采暖节能量逐渐增大,空调整能量为负增长。其中节能量是以不设置内窗时的能耗为基准相比较的节能量。可以看出,附加式阳光间内门窗宽度越大,直接照射进入室内的太阳辐射量越多,采暖节能量越大。这种影响在严寒地区最为明显,寒冷地区次之。夏热冬冷地区随着内门宽度的增大,采暖节能量为负值,表示建筑能耗增大。所以在严寒和寒冷地区封闭阳台,如果在附加日光间内墙上设置密封较好的透明玻璃门,可以提高附加阳光间式太阳房的集热效率。从图 9 可以看出,增加内窗面积时,空调能耗会增加,而由于阳光间会遮挡部分太阳辐射,空调能耗增加幅度较小。因此附加阳光间的内部集热墙可以适当的开窗以增加辐射量,开窗面积应大于 20%。

图 10 表示了各城市不同进深的附加阳光间式太阳房,以进深为 0.6m 为基准的相对节能量。由图中可以看出,随着附加阳光间进深的增大,建筑能耗增大,呈线性关系。不同气候条件,进深对建筑能耗的影响程度不同。总体来看,气候越寒冷,进深越大越不利于节能。由于武都太阳总辐射量较小,太阳辐射对建筑能耗影响不显著,进深对能耗的影响幅度相对较小。因此对于附加阳光间式太阳房,阳光间进深最好控制在 1m 以内,进深过大会增加建筑能耗。

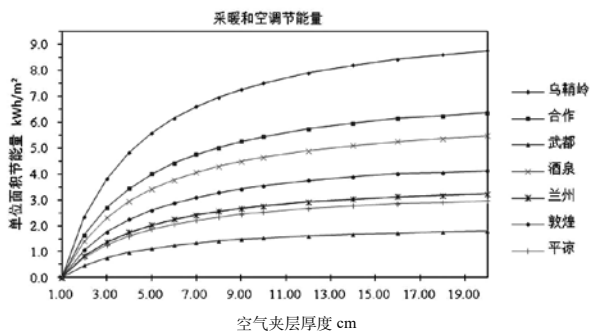


图 6 采暖和空调整能量随空气夹层厚度变化的关系曲线

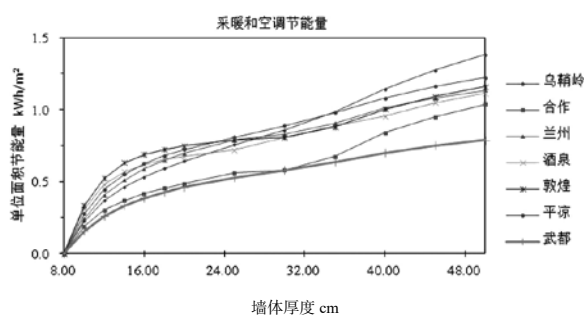


图 7 采暖和空调整能量随墙体厚度变化的关系曲线

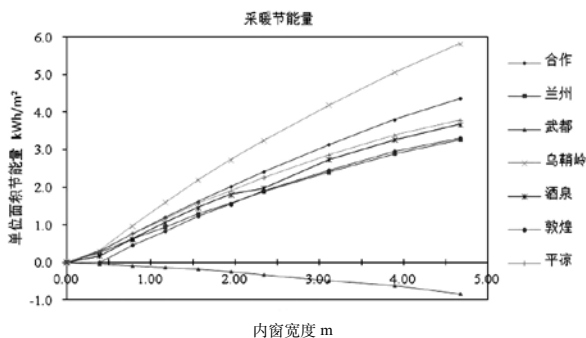


图 8 采暖节能量随内窗宽度变化的关系曲线

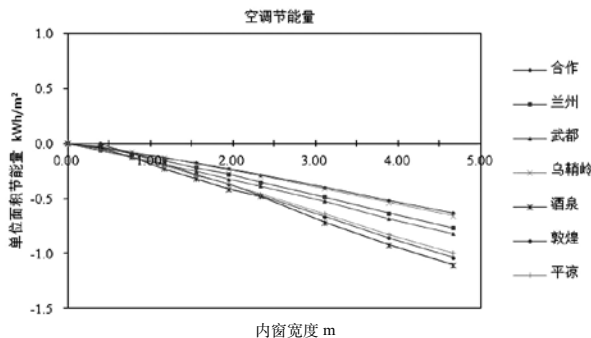


图 9 空调整能量随内窗宽度变化的关系曲线

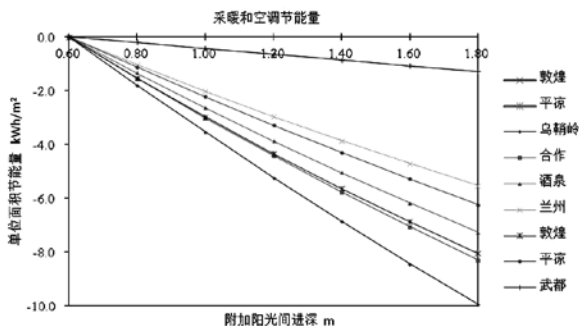


图 10 采暖和空调节能量随附加阳光间进深变化的关系曲线

通过上述分析可以得到甘肃省各典型城市在进行直接受益式、集热蓄热墙式和附加阳光间式三种被动式太阳房设计时应采用的适宜参数，从而可以确定甘肃省不同热工分区气候条件下的最优热工设计参数。

3 结论

本文对处于甘肃省不同热工气候分区中的七个典型城市的被动式太阳房建筑进行 Design Builder 模拟，由模拟所得的采暖与空调能耗值分析不同被动式太阳房的参数设定对太阳房节能效果的影响，从而确定不同气候条件下不同形式太阳房的热工设计参数推荐值。对被动式太阳房建筑热工设计参数的优化分析结果如下：

(1) 对于直接受益式太阳房建筑，南向集热窗传热系数的限值按照严寒、寒冷、夏热冬冷地区分别取 $2.09 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $2.34 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $2.81 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

(2) 对于集热蓄热墙式太阳房建筑，集热蓄热墙空气夹层厚度对采暖与空调能耗的影响较小，一般取 4~6cm 为宜。集热蓄热墙的厚度对于严寒地区可以采用较厚的重质墙体，其它地区厚度在 24cm 为宜。

(3) 对于附加阳光间式太阳房建筑，附加阳光间内门窗面积增大会导致采暖能耗逐渐降低，同时空调能耗升高，但幅度较小。因此附加阳光间可以设置 20%~50% 的玻璃内窗，用于节约采暖能耗。附加阳光间的采暖与空调能耗与阳光间进深呈正比关系，进深越大，能耗也越大。从采暖效率方面考虑，应控制阳光间进深在 0.6m~1.5m。

参考文献

- [1] 朱飙, 李春华, 方锋. 甘肃省太阳能资源评估 [J]. 干旱气象, 2010, 02: 217-221.
- [2] 中华人民共和国标准, 被动式太阳房建筑技术规范, JGJ/T 267-2012, 2012.
- [3] 高庆龙. 被动式太阳能建筑热工设计参数优化研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2006.
- [4] 中华人民共和国行业标准. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准 JGJ 26-2010 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.8.5.

CAV 与 VAV 空调控制系统建模与仿真

张珣珣, 周曰勇, 张 震, 于 玉, 朱孟隆

(山东建筑大学, 山东济南 250101)

[摘 要] 以济南市某办公楼为例, 利用 TRNSYS 仿真模拟软件平台搭建其建筑模型, 在此基础上分别构建定风量 (Constant air volume, CAV) 空调控制系统和变风量 (variable air volume, VAV) 空调控制系统的 TRNSYS 仿真模型。在满足室内相同温度的条件下, 对 CAV 空调系统与 VAV 空调系统的仿真结果进行研究比较分析。实验结果表明, 变风量空调系统比定风量系统更节能。

[关键词] VAV 空调系统; TRNSYS 仿真模拟; 节能

0 前言

在楼宇自动化系统的众多设备中, 空调系统能耗所占的比重较大, 随着人们对空气质量、温度以及湿度的要求越来越高, 其能耗将变得更大^[1], 因此提高系统资源的有效性, 节省能耗, 有非常重要的意义。CAV 与 VAV 空调系统因发展历史悠久、容易实现, 因而在实际工程中均得到广泛应用^[2]。CAV 与 VAV 空调系统均包括空气处理机组、各种风管、静压测量装置、室内温控器等装置, 不同的是 VAV 空调系统还包括 VAVBOX (变风量空调箱)^[3], 因此, VAV 空调系统末端就变得相对复杂; CAV 空调系统一般是维持全年的风量固定不变, 并且是按房间最大热、湿负荷确定的送风量, 在大多数情况下, 空调房间所需的负荷是低于最大负荷的, 当实际负荷低于最大负荷时, 为了维持室温设计水平, 必须通过再热或混合来减少送风温差, 形成冷热量抵消, 另外, 当室内负荷不是最大负荷时, 送风量大于实际需要量, 则风机需要多消耗电能^[4]。可见, CAV 与 VAV 空调系统各有其利弊, 基于此, 本文将制定合理的 CAV 和 VAV 空调系统的基本控制方法, 并采用 TRNSYS 分别对 CAV 与 VAV 空调控制系统进行建模与仿真, 从能耗方面进行分析。

1 VAV 空调系统与 CAV 空调系统的控制方法

VAV 是根据室内负荷的变化, 保持恒定的送风温度, 自动调节空调系统的送风量, 达到室内要求温度的全空气空调系统^[5-7]。图 1 为 VAV 空调系统串级控制方框图, 内环是风量控制, 外环是温度控制。由于在理想情况下, 风量和风机的转速呈正比, 为了简化控制仿真模型, 本文采用温度控制直接调节风机的转速, 从而使室内温度满足控制要求。

CAV 是根据室内负荷变化, 保持恒定的送风量, 自动调节空调系统送风温度给定值, 从而使室内参数达到要求的全空气空调系统^[8,9]。图 2 为 CAV 空调系统串级控制

方框图, 内环为送风温度控制, 外环为室内温度控制。在 CAV 空调控制系统仿真模型中不考虑内环送风温度控制, 只通过外环控制修订送风温度给定值, 认为通过内环控制完全满足控制要求, 即实际送风温度和给定值一致。

2 建筑动态空调负荷模拟

为得到比较合理的空调运行时段, 也为方便后期进行详细研究, 及对设备选型提供依据, 在此建立了建筑动态空调负荷模拟。

选取济南地区的某办公建筑, 总共 3 层, 每层高 4m。为简化操作, 选取其中一间长 10m、宽 6m 的房间作为模拟对象, 南面与北面的窗墙比为 0.4。根据规范可知^[10], 冬季空调房间内的温度为 18℃, 夏季为 26℃。本文拟采用换气次数模拟送风量, 参数设置如下:

表 1 建筑结构参数设定表

名称	参数设定	总厚	传热系数 K
外墙	砖 240mm、 绝热层 100mm、 石膏 15mm	355mm	0.339w/m ² k
内墙	石膏 12mm、 绝热层 100mm、 石膏 12mm	74mm	0.652w/m ² k
屋顶	混凝土墙体 240mm、 绝热层 160mm	400mm	0.233w/m ² k
外窗	双层		1.4w/m ² k
楼板	地板 5mm、 石板 60mm、 隔音层 40mm、 钢筋混凝土 240mm	345mm	0.834w/m ² k
地层	地板 5mm、 石板 60mm、 隔音层 40mm、 钢筋混凝土 240mm、 绝热层 80mm	425mm	0.313w/m ² k

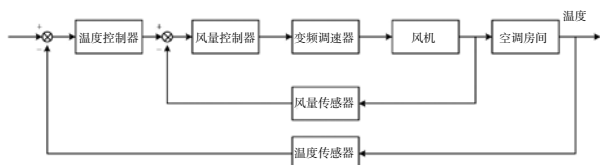


图 1 VAV 系统控制方框图



图 2 CAV 系统控制方框图

表 2 建筑环境模拟设定表

名称			参数设置	参数类型
冷风渗透			工作时间内, 0.4 次 /h	Input
机械通风	风量		0.5 次 /h	Input
	湿度	夏季	40%	Input
		冬季	70%	
	人员			6 人
电脑			6 台	Schedule
工作时间			8:00~18:00	
夏季	温度控制		26℃	Input
	去湿控制		50%	Input
冬季	温度控制		18℃	Input
	加湿控制		60%	Input

设定好该模型的相关参数后, 在 Studio 中点击运行, 将出现建筑动态负荷曲线图, 通过对空调运行时段进行多次调节, 得出比较合理的建筑动态负荷图, 如图 3。由此图可知, 733h~800h 和 1242h~1328h, 热负荷较小; 3708h~3853h 和 5100h~5295h, 冷负荷较小。

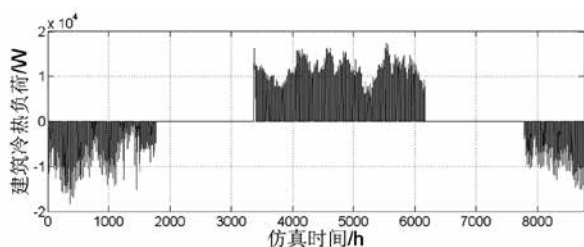


图 3 建筑动态负荷图

根据图 3 绘制冷热负荷统计表, 如下:

表 3 冷热负荷统计表

季节	运行总时间	总负荷	平均负荷	最大冷(热)负荷
夏季	1170h(117d)	12519749.16W	10700.64W/h	17317.97W/h
冬季	1140h(114d)	5052338.11W	4431.88W/h	18325.82059W/h

3 VAV 空调控制系统和 CAV 空调控制系统仿真模型

3.1 夏季与冬季空调运行时段设定

根据建筑动态负荷图及当前空调实际的运行情况, 设置夏季与冬季空调运行时段表, 如表 4 所示。夏季运行时间为 5 月 21 日到 9 月 15 日; 冬季运行时间为 11 月 20 日到次年 3 月 15 日。

表 4 夏季与冬季空调运行时段设定表

全年模拟小时(h)	0~1776	1776~3360	3360~6168	6168~7785	7785~8760
对应日期(月日)	1.1~3.15	3.15~5.21	5.21~9.15	9.15~11.20	11.20~12.31
冬季	1	0	0	0	1
夏季	0	0	1	0	0

3.2 CAV 空调控制系统仿真模型

送风量和送风温度由 Equa 模块来模拟, 根据相关规范及经验, 本文设定夏季初始送风温度为 15°C, 冬季为 19°C, 用迭代反馈控制器来调节送风温度, 为保证送风温度在规定的范围(夏季温度范围为 15°C~24°C; 冬季温度范围为 19°C~30°C)内, 将控制信号设定为: 1~1.6。其中, 控制信号与夏季温度的变化成反比, 与冬季成正比。利用 Type14 和 Equa 模块来控制的风机启停, 如表 3 所示: 在夏季或冬季, 信号为 1, 空调启动运行; 在过渡季以及非工作时间时, 信号为 0, 空调停止运行。根据需要选择风机功率为 0.5kW, 将步长设定为 0.125。每天的运行时间为 8:00~18:00。

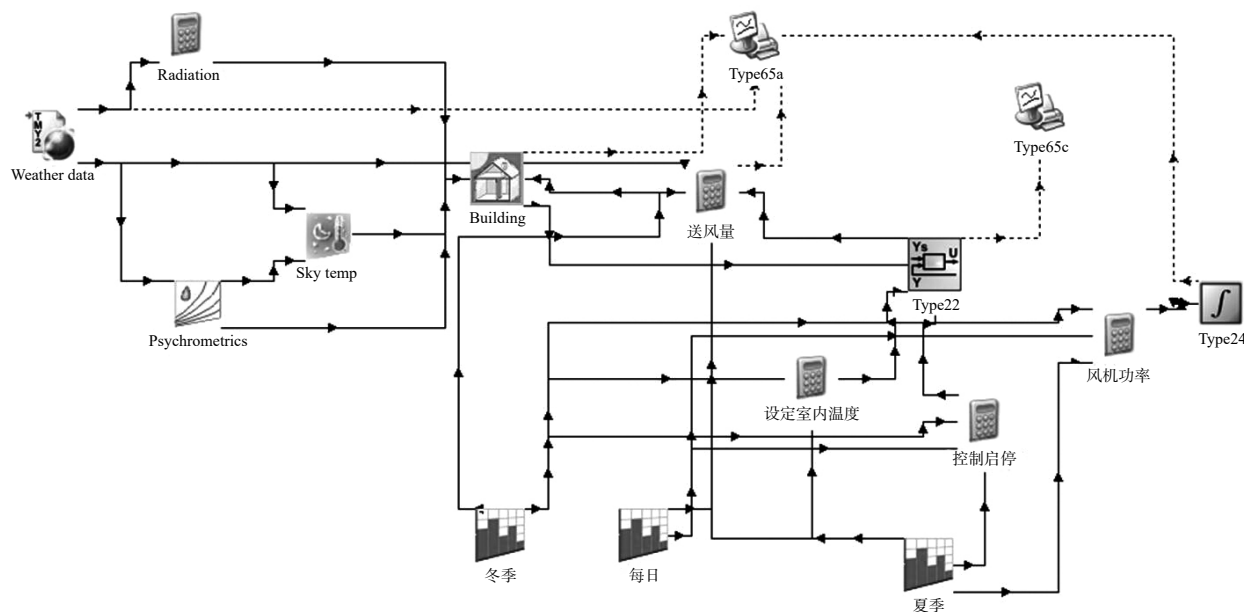


图 4 CAV 空调控制系统仿真模型

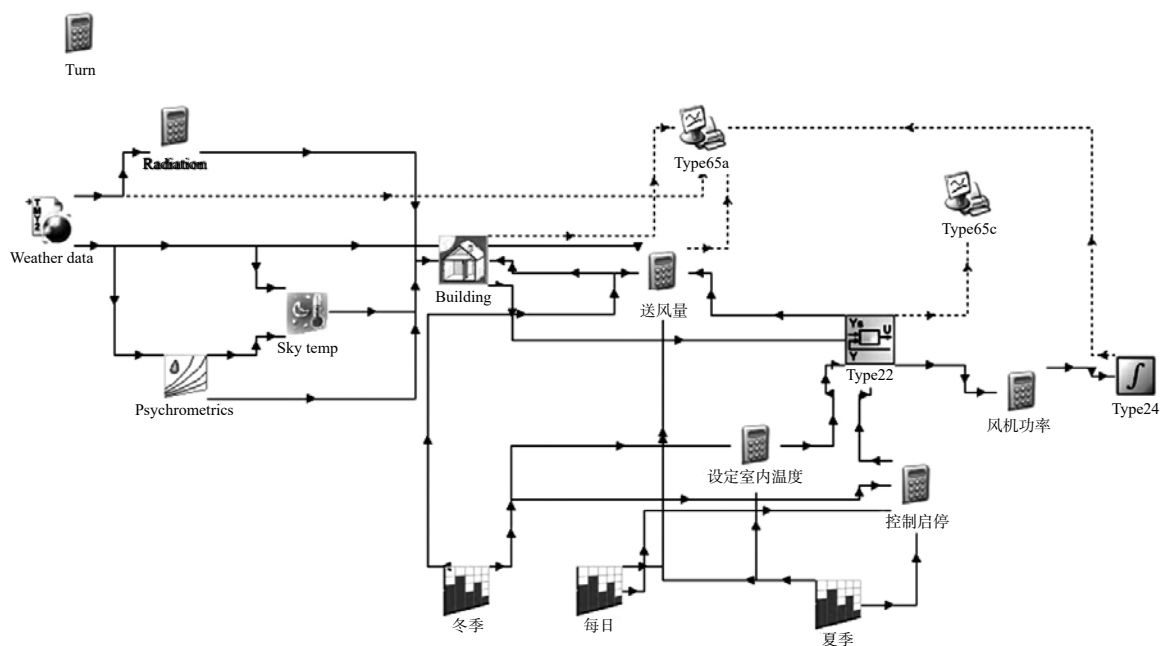


图 5 变风量空调系统模型

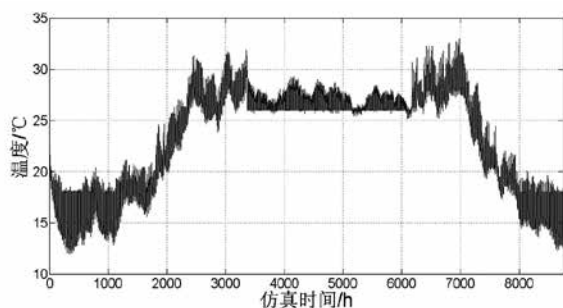


图 6 定风量空调房间的温度曲线图

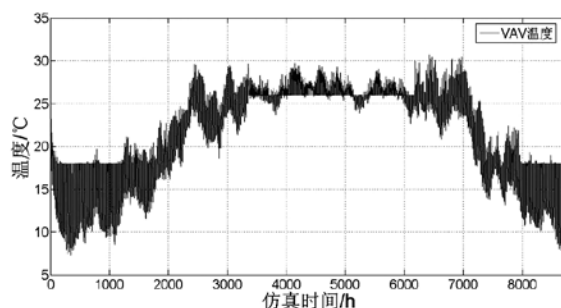


图 7 变风量空调房间的温度曲线图

3.3 VAV 空调控制系统仿真模型

送风量和送风温度由 Equa 模块来模拟，机械通风的风量为 0.5 次/h，共运行 10h，因此设定送风量为 5 次换气量，用迭代反馈控制器来调节送风量，按照常规，将控制信号设定为：0-1。设定夏季送风温度为 19°C，冬季为 25°C。根据功率比等于转速比的立方，利用 Equa 模块计算出风机运行一年所做的功。此处未作介绍的模块与 CAV 控制平台的设置相同。

4 仿真结果分析

4.1 温度分析

由图 6 和图 7 可知，冬季工作时间内，室内温度控制在 18°C 左右；夏季时，室内温度控制在 26°C 左右。两者的温度变化曲线相似，证明两模拟仿真系统的参数设置合理。两图均在 733h~800h 和 1242h~1328h，温度高出温度设定值；3708h~3853h 和 5100h~5295h，温度低于设定值。原因是这两个时间段内的动态负荷较小，这与图 3 所描述的相吻合。

4.2 能耗分析

由图 8 可知，CAV 空调系统运行一年风机的能耗为 1185kW·h，VAV 空调系统运行一年风机的总能耗

为 402.3kW·h，比定风量空调系统的风机能耗节省了约 66%。

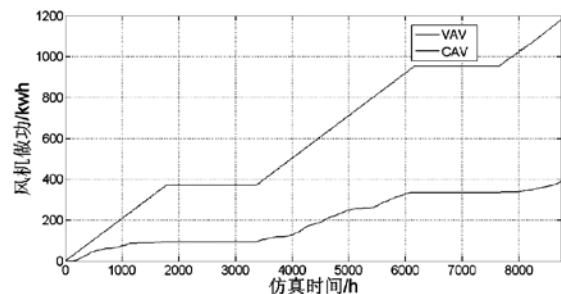


图 8 VAV 与 CAV 空调系统风机能耗曲线图

5 结论

通过在 TRNSYS 模拟仿真中搭建办公楼建筑模型、变风量空调系统模型及定风量空调系统模型，实现了 VAV 和 CAV 的控制系统仿真，通过该仿真、模拟过程可得出如下结论：

(1) TRNSYS 与之前的能耗模拟仿真软件相比，其更具优势，它不仅能模拟出建筑物的动态负荷，而且能较

好地实现控制系统的模拟仿真, 它的模块化思想使得其具有较强的适用性, 将各模块根据使用人员的个人需求进行多种组合, 可实现不同系统的控制过程, 例如: 太阳能供热系统、地源热泵系统等;

(2) 从理论上来看, 变风量空调系统的各控制回路之间不存在明显的联系, 但从仿真的过程中可以看出, 当系统中的某一控制回路无法正常工作时, 其余的控制回路系统也将会受到或多或少的影响, 一个控制回路的输出同样又是另一个控制回路的输入, 它们之间存在着较强的耦合性;

(3) 在确保室内舒适性的条件下, 对变风量空调系统和定风量空调系统的控制仿真模拟结果进行比较分析, 数据结果表明, VAV 比 CAV 更节能, 特别是风机的节能效果, 节省了约 66% 的功率。

参考文献

- [1] 陆耀庆. 暖通空调设计指南 [M]. 中国建筑工业出版社, 1996.
- [2] 空调定风量、变风量空调系统综述 [EB/OL]. http://wenku.baidu.com/link?url=aj1wPXiZXJTGEQ2euDr_e_S0IfBHBUpopOpba5Ja1WWpaOYp7hNdEpmIVTDdbqdj317P-gPkZ7symgPF0e-wXMRvxFgIYKhfAOhARuJRG44e.
- [3] 樊琰, 俞国华, 郑庆红. 关于变风量系统发展的综述. 制冷与空调, 2008(22):101-105.
- [4] 变风量空调系统与定风量空调系统比较 [EB/OL]. <http://blog.zhulong.com/blog/detail4689050.html>.
- [5] 刘巧玲. 基于 TRNSYS-FLUENT 协同仿真的 VAV 空调系统多传感器控制策略研究 [D]. 上海交通大学, 2013.
- [6] 郭金钱. 变风量空调系统的建模与控制仿真 [D]. 青岛理工大学, 2014.
- [7] 胡卫东. 变风量空调系统控制的研究 [J]. 长沙铁道学院学报, 2001,01(3):100-109.
- [8] 王粟, 黄烜. 定风量空调系统的建模和仿真 [J]. 湖北工业大学学报, 2009,04(8):63-66.
- [9] PengSun,XiangGao.Series arc fault diagnosis technology research based on the analysis of current rate[A].International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST),2011.565-568.
- [10] GB 50736-2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 [S].

温湿度独立控制系统与传统系统的比较研究

张金磊

(山东建筑大学热能工程学院, 济南 250100)

[摘要] 温湿度独立控制系统是一项较新的技术, 其节能效果非常明显, 不仅仅用在舒适性空调方面, 同样可以用在洁净工程上。随着社会对运行成本的要求不断提升, 这种项目会越来越多。文章介绍了温湿度独立控制系统的特点、前景及其与传统系统的比较。

[关键词] 温湿度独立控制系统; 节能分析; 原理

0 引言

空调的广泛需求, 人居环境健康的需要和能源系统平衡的要求, 对目前空调方式提出了挑战。新的空调应该具备的特点为:

- (1) 减少室内送风量, 部分采用与采暖系统公用的末端方式;
- (2) 加大室外新风量, 但又不增加处理能耗;
- (3) 取消潮湿表面, 采用新的除湿途径;
- (4) 不用空气过滤式过滤器, 采用新的空气净化方式;
- (5) 少用电能, 以低品位热能为动力;
- (6) 尽量多使用清洁、“免费”的自然能源;
- (7) 能够实现高体积利用率的高效蓄能。

目前普遍认为热湿独立控制的空调系统可能是一个有效的解决途径。

1 温湿度独立控制系统的特点

温湿度独立控制的系统: 用干燥新风通过变风量方式调节室内温度, 用高温冷水通过独立的末端调节室内湿度。温湿度独立控制空调系统的主要组成部分是处理显热的系统和处理湿度的系统。处理显热的末端装置可以采用辐射板或干式风机盘管。由于供水温度高于室内空气露点温度, 因而不存在结露的危险。

(1) 空调系统承担者排除室内余热、余湿、 CO_2 与异味的任务。研究表明: 排除室内余湿与 CO_2 、异味所需要的新风量与变化趋势一致, 即可以通过新风同时满足排除余湿、 CO_2 与异味的要求, 而排除室内余热的任务则通过其他的系统 (独立的温度控制系统) 来实现。由于无需承担除湿的任务, 因而用较高温度的冷源即可实现排除余热的任务。

(2) 温湿度独立控制空调系统中, 采用温度与湿度两套独立的空调控制系统, 分别控制、调节室内的温度与湿度, 从而避免了常规空调系统中热湿联合处理所带来的损失。由于温度、湿度采用独立的控制系统, 可以满足不同区域和同一区域不同房间热湿比不断变化的要求, 克服了常规空调系统中难以同时满足温度、湿度参数的要求, 避免了室内湿度过高 (或过低) 的现象。

(3) 温湿度独立控制空调系统的基本组成为: 处理显热的系统与处理潜热的系统, 两个系统独立调节分别控制室内的温度与湿度。处理显热的系统包括: 高温冷源、余热消除末端装置。采用水作为输送介质。由于除湿的任务由处理潜热的系统承担, 因而显热系统的冷水温度不再是常规冷凝除湿空调系统中的 7°C , 而是提高到 18°C 左右, 从而为天然冷源的使用提供了调节, 即使采用机械制冷方式, 制冷机的性能系数也有大幅度的提高。因而消除

末端装置可以采用毛细管网换热器、辐射板、干式风机盘管等多种形式。由于供水的温度高于室内空气的露点温度, 因而不存在结露的危险。处理潜热的系统, 同时去除室内 CO_2 、室内异味等, 以保证室内空气质量。此系统由新风处理机组、送风末端装置组成, 采用新风作为能量输送的媒介。在处理潜热的系统中, 由于不一定需要处理温度, 因而湿度的处理可能有多种方法, 入冷凝除湿、吸附除湿等。

(4) 在温湿度独立控制空调系统中, 采用新风来承担排除室内余湿、 CO_2 与异味的任务, 以保证室内空气质量。一般来说, 这些排湿, 排有害气体的负荷仅随室内人员数量而变化, 因此可采用变风量方式, 根据室内空气的湿度或 CO_2 的浓度调节风量。由于仅是为了满足新风和湿度的要求, 如果人均风量 $40\text{m}^3/\text{HR}$, $5\text{m}^2/\text{人}$ 。则换气次数只在 2~3 次 /HR, 远小于变风量系统的风量, 这部分空气可通过置换送风的方式从下侧或地面送出, 也可采用个性化送风方式直接将新风送入人体活动区。

(5) 室内的显热则通过另外的系统来排除 (或补充)。由于这时只需要排除显热, 就可以用较高温度的冷源通过辐射、对流等多种方式实现。当室内设定温度为 25°C 时, 采用屋顶或垂直表面辐射, 即使平均水温为 20°C , 每平方米表面仍可排除显热 $40\text{W}/\text{m}^2$, 已基本可满足多数类型建筑物排除围护结构和室内设备发热量的要求。由于水温一直高于室内露点温度, 因此不存在结露的危险和排除冷凝水的要求。

(6) 温湿度独立控制空调系统实现了室内温度和湿度的分别控制。尤其实现了新风量随人员数量的同步增减, 从而避免了变风量系统冬季人员增加, 热负荷降低, 新风量也随之降低的问题。与目前的风机配管加新风方式比较, 免去了凝水盘和凝水排除系统, 彻底消除了实际工程中经常出现问题隐患, 同时由于不再存在除湿表面。根除了滋生霉菌的温床, 可有效改善室内空气品质。由于室内相对湿度可一直维持在 60% 以下, 较高的室温 (26°C) 就可以达到热舒适要求。这就避免了由于相对湿度太高, 只得把室温降低 (甚至到 20°C) 以维持舒适度要求的温度。既降低了运行能耗, 由减少了由于室内外温差过大造成的热冲击对健康的危害。

2 传统系统存在的问题

非温湿度独立控制的系统: 新风处理机组只负担新风的全部冷负荷和部分湿负荷, 由风机盘管负担房间全部的余热余湿和部分新风湿负荷。由于风机盘管负担湿负荷, 因此此空气处理过程称为湿式风机盘管处理过程。此时冷水供水温度为 7°C 。

从人体的热舒适度与健康出发, 要求对室内温度、

湿度进行全面控制,夏季人体舒适区为 25°C ,相对湿度 60%,此时露点温度为 16.6°C 。空调排热排湿的任务可以看成是从 25°C 的环境中向外排热,在 16.6°C 的露点温度的环境下向外排湿。目前空调方式的排热排湿都通过空气冷却器对空气进行冷却和冷凝除湿,实现排热排湿的目的。常规温湿度混合处理的空调方式存在如下问题:

(1) 能源浪费。使用一套系统同时制冷和除湿,为了满足冷凝方法排除室内余湿,冷源的温度需要低于室内的露点温度,考虑传热温差与介质输送温差,实现 16.6°C 的露点温度需要约 7°C 的冷源温度,这是现有空调系统采用 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$ 的冷冻水、房间空调器中直接蒸发器的冷媒蒸发温度也多在 5°C 的原因。在空调系统中,占总负荷一半以上的显热负荷部分,本可以采用高温冷源排走的热量却与除湿一起共用 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$ 的低温冷源进行,造成能量利用品位上的浪费。而且经过冷凝除湿后的空气虽然湿度(含湿量)满足要求,但温度过低,有时还需要再热,造成能源的进一步浪费与损失。

(2) 难以适应热湿比的变化。通过冷凝方式对空气进行冷却和除湿,其吸收的显热与潜热比只能在一定的范围内变化,而建筑物实际需要的热湿比却在较大的范围内变化。一般是牺牲对湿度的控制,通过仅满足室内温度的要求来妥协,造成室内相对湿度过高或过低的现象。相对湿度过高的结果是不舒适,进而降低室温设定值,通过降低室温来改善热舒适,造成能耗不必要的增加。相对湿度过低也将导致由于与室外的焓差增加使处理新风的能耗增加。

(3) 造成室内空气品质下降。大多数空调依靠空气通过表冷器对空气进行降温除湿,这就导致表冷器表面成为潮湿表面甚至产生积水,空调停机后这样的潮湿表面就成为霉菌繁殖的理想场所。空调系统繁殖和传播霉菌成为可能引起健康问题的主要因素。另外,目前我国大多数城市的主要污染物仍是可吸入颗粒物,因此有效过滤空调系统引入的室外空气是维持健康环境的重要问题。然而过滤器内必然是粉尘聚集处,如果再漂溅过一些冷凝水,则也成为各种微生物繁殖的理想场所。频繁清洗过滤器既不现实,也不是根本的解决方案。

(4) 传统的室内末端装置有局限性。为排除足够的余热余湿同时又不使送风温度过低,就要求有较大的循环通风量。例如每平方米建筑面积如果有 $80\text{W}/\text{m}^2$ 显热需要排除,房间设定温度为 25°C 时,当送风温度为 15°C 时,所要求循环风量为 $24\text{m}^3/\text{HR}/\text{m}^2$,这就往往造成室内很大的空气流动,使居住者产生不适的出风感。为减少这种出风感,就要通过改变送风口的位置和形式来改变室内空气组织,这往往要在室内布置风管,从而降低室内净高度或者加大楼层间距。很大的通风量还极易引起空调噪声,并且很难有效消除,在冬季,为了避免出风感,即使安装了空调系统,也往往不使用热风,而是通过另一套的暖气系统(如采暖散热器)供热。这样就导致室内重复安装两套环境控制系统,分别供冬夏使用。

(5) 输配能耗的问题。为了完成室内环境控制的任务就需要有输配系统,带走余热、余湿、 CO_2 、气味等。在中央空调系统中,风机、水泵消耗了 40%~70% 的整个空调系统的电耗。在常规中央空调系统中,多采用全空气系统的形式,所有的冷量全部用空气来传递,导致输配系统效率很低。相对而言, 1m^3 水所输送的热量是 3840m^3 空

气输送的热量是相对的。

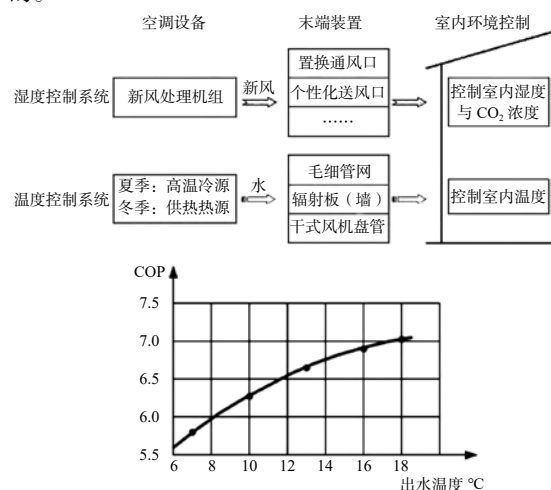
此外,随着能源问题的日益严重,以低品位热能作为夏季空调动力成为迫切需要,目前北方地区大量的热电联产集中供热系统在夏季由于无热负荷而无法运行,使得电力负荷出现高峰的夏季热电联产发电设施反而停机,或者按纯发电模式低效运行。如果可以利用这部分热量驱动空调,既省下空调能耗,又可使热电联产正常运行,增加发电能力。这样即可减缓夏季供电压力,又提高能源利用率,是热电联产系统继续发展的关键。由于空调负荷在一天内变化显著,与热电联产提供热能并不是很好匹配,如何实现有效的蓄能,以协调二者的矛盾也是热能使用当中存在的问题。

综上所述,空调的广泛需求、人居环境健康的需要和能源协调平衡的要求,对目前空调方式提出了挑战。新的空调应该具备的特点:减少室内送风量、高效换热末端、采用低品位能源、设置冷热蓄能系统。从如上要求出发,目前普遍认为温湿度独立控制可能是一个有效的解决途径。

3 温湿度独立控制空调系统与传统空调的对比

温湿度独立控制空调系统,采用两套独立的系统分别控制与调节室内湿度和温度,从而避免了常规空调系统中温湿度联合处理所带来的能源浪费和空气品质的降低等问题。独立新风除湿机组向室内送入干燥的空气,通过调节送风状态点控制室内湿度;室内干工况末端(干式风机盘管或平面辐射毛细管系统)通过处理室内空气的显热来调节室内温度,可满足房间热湿比不断变化的要求,避免了室内温湿度过高或过低的现象。

传统空调除了承担空气的显热负荷还要承担空气的潜热负荷,因此为了除去空气中的湿负荷,制冷剂的蒸发温度将很低,制冷机效率大为下降。若采用温湿度独立控制,制冷机只需承担空气的显热负荷,空气的湿负荷则采用独立的除湿设备来承担,大大提高制冷剂的蒸发温度,进而提高机组效率。通过提高蒸发温度,减小了蒸发温度和冷凝温度的差值,提高了压缩机效率,从而达到了节能的目的。



与常规空调系统相比,采用温湿度独立控制具有以下节能优势:

(1) 制冷时,可利用高温冷源(约 $16\sim 18^{\circ}\text{C}$),提高空调主机的能效比 20% 以上;

(2) 可精确控制送风绝对湿度(含湿量), 始终维持室内湿度控制要求;

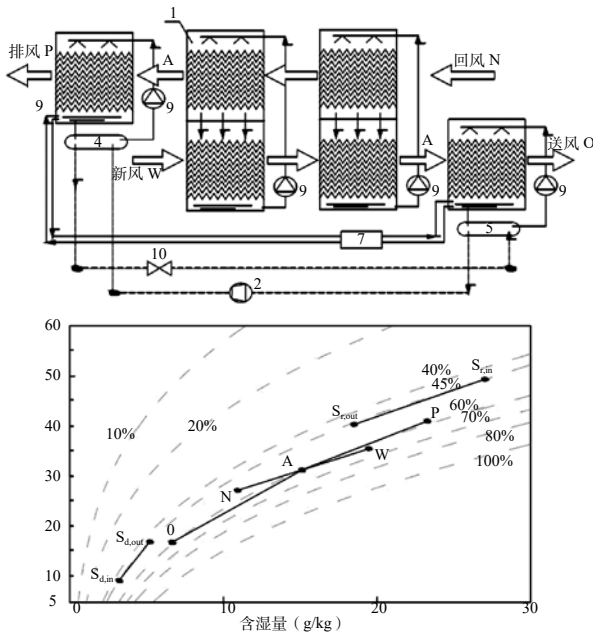
(3) 系统无冷凝水的潮湿表面, 根除了滋生霉菌的温床, 改善室内送风空气品质, 确保室内人员舒适健康;

(4) 和毛细管辐射末端装置相结合, 真正实现室内温度、湿度独立调节, 精确控制室内参数, 提高人体舒适性;

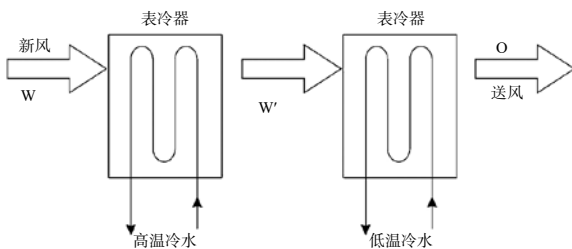
(5) 除湿量可调节范围大, 可精确控制送风温度和湿度, 即使对于潜热变化范围较大的房间, 也能够始终维持室内环境控制要求。

4 设计系统图

4.1 溶液除湿的系统图



4.2 冷凝除湿的系统图



5 温湿度独立控制系统与传统系统的制冷量的比较

5.1 温湿度独立控制系统状态参数及计算公式

新风含湿量:

$$d_o = d_n - \frac{M_w}{\rho M_o}$$

求出 d_o

$$\text{送风量: } M_s \cdot H_s + Q = M_s \cdot H_n$$

求出 M_s

风机盘管出风量:

$$M_o \cdot d_o + M_f \cdot d_f = M_s \cdot d_s$$

求出 M_f

处理后新风的温度:

$$M_o T_o C_p + M_f T_f C_p = M_s T_s C_p \quad (\text{出风温度 } T_f = 21.4^\circ\text{C})$$

求出 T_o

由处理后新风的 d_o 与 t_o 和焓湿图来查处处理后新风的焓值 H_o 。

新风所需制冷量:

$$Q_1 = M_o \cdot (H_o - H_n) \quad (\text{A 点理想状态为室外新风状态点和室内空气状态点的中点})$$

风机盘管所需制冷量:

$$Q_2 = M_f \cdot (H_n - H_f)$$

总的制冷量:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

5.2 列举一个实际工程的例子

5.2.1 温湿度独立控制系统(溶液除湿)

整体室内设计参数按照:

$$t_n = 26^\circ\text{C},$$

$$\text{相对湿度 } \Phi = 50\%, \quad h_n = 53.3 \text{ kJ/kg}, \quad d_n = 10.6 \text{ g/kg}.$$

室外设计参数为:

$$t_w = 35.8^\circ\text{C}, \quad h_w = 89 \text{ kJ/kg}, \quad d_w = 20.6 \text{ g/kg}.$$

A 点的状态参数:

$$h_a = 71.15 \text{ kJ/kg} \quad (\text{理想情况下是室内与室外的中点})$$

风机盘管设计参数为:

$$t_f = 21.4^\circ\text{C}, \quad h_f = 48.5 \text{ kJ/kg}, \quad d_f = 10.6 \text{ g/kg}.$$

总是湿负荷 2720.39 kg/h , 总冷负荷 4068 kW , 最小新风量 $299542.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

同上: $d_o = 3.56 \text{ g/kg}$, $\varepsilon = 5383.35$, 热湿比线与 21°C 的交点为送风状态点

$$\text{则 } t_s = 21^\circ\text{C}, \quad d_s = 8.8 \text{ g/kg}, \quad h_s = 43.6 \text{ kJ/kg}.$$

$$M_s = 419.4 \text{ kg/s}, \quad M_f = 312.1 \text{ kg/s}, \quad t_o = 19.8^\circ\text{C}, \quad h_o = 29 \text{ kJ/kg}$$

制冷量新风:

$$Q_1 = M_o \cdot (h_o - h_n) = 4524.2 \text{ kW}$$

风机盘管制冷量:

$$Q_2 = 1498.1 \text{ kW}$$

总制冷量:

$$Q = 6022.3 \text{ kW}$$

5.2.2 使用传统的系统

新风制冷量:

$$Q_1 = 3831.90 \text{ kW}$$

风机盘管制冷量:

$$Q_2 = 4259.27 \text{ kW}$$

总制冷量:

$$Q = 8091.2 \text{ kW}$$

采用温湿度独立控制的系统(氯化锂溶液除湿)比传统的风机盘管加新风的系统制冷量少了 2068.9 kW , 而且也采用了高温冷源。

5.2.3 温湿度独立控制系统(采用冷凝除湿)

该系用先采用高温冷水预冷, 然后采用低温冷水对新风进行处理。最理想的是预冷处理焓值是信封处理焓值的一半。 $h_{w1} = 59 \text{ kJ/kg}$

高温冷水制冷量为:

$$Q_1 = M_o \cdot (h_w - h_{w1}) = 3220.2 \text{ kW}$$

低温制冷为:

$$Q_2 = M_o \cdot (h_{w1} - h_o) = 3220.2 \text{ kW}$$

风机盘管制冷量:

$$Q_3 = 1498.1 \text{ kW}$$

总制冷量:

$$Q = 7938.5 \text{ kW}$$

比传统的节省制冷量不是很多 152.7kW，但是运用了高温冷水。

6 结论

与目前普遍使用的风机盘管加新风方式或全空气方式相比，温湿度独立控制系统的特点可总结如下：

(1) 适应室内热湿比的变化。温湿度独立控制系统分别控制房间的温度和湿度，能够满足建筑物热湿比随时间与使用情况的变化，全面控制室内环境。并根据室内人员数量调节新风量，因此可获得更好的室内环境控制效果和空气质量。

(2) 末端方式不同。可采用辐射式末端或者干式风机盘管吸收或提高显热，采用置换通风等方式送干燥的新风去除显热，冬夏共用同样的末端装置。处理显热的系统只需要 18℃ 的冷水，这可通过多种低成本的和节能的方式提供，降低运行费用。

(3) 可以利用低品位能源，即使采用配套空调机组系统能效也会大大提高。这个特点有利于能源的广泛选择利用，特别有利于利用低品位的再生能源：如太阳能、地能、热电厂余热回收等，对节能降耗意义重大。

(4) 舒适度大大提高。没有强风感，没有噪声、不传

播细菌，是一种健康绿色的空调方式。

温湿度独立控制系统是一项较新的技术，其节能效果非常明显，但造价较高。不仅仅用在舒适性空调方面，同样可以用在洁净工程上。随着社会对运行成本的要求不断提升，这种项目会越来越多。希望大家多去了解这方面的资讯，并应用到实际的工程案例中，让这种技术成为我们赢得客户的“秘密武器”。

参考文献

- [1] 石刚. 不同形式温湿度独立控制空调系统在华南地区办公建筑节能潜力研究.
- [2] 刘晓华. 基于溶液除湿方式的温湿度独立控制空调系统性能分析.
- [3] 江亿. 温湿度独立控制空调系统研究成果及未来发展趋势分析, 完整版.
- [4] 陈喜山. 温湿度独立控制空调的原理与性能分析.
- [5] 江忆. 温湿度独立控制空调系统.
- [6] 徐征. 温湿度独立控制空调系统节能性实例分析.
- [7] 黄蓉. 温湿度独立控制空调系统在长沙地区的应用研究.

空气源热泵空调系统能耗计算软件开发及应用

王东越, 李红旗, 邓 壮, 董 翔, 谢 鹏, 范晓光, 朱玉鑫

(北京工业大学, 北京 100124)

[摘 要] 本文介绍了空气源热泵空调系统能耗计算软件的开发及应用。该软件根据室外逐时干球温度、建筑物逐时热负荷、热泵空调出水温度计算空气源热泵的供暖季逐时能耗。逐时参数的应用使得本软件在机组能耗计算方面更加准确。在准确计算能耗的基础上, 本软件还能就北方城市常见的供暖方案进行经济性分析及节能效益分析。

[关键词] 空气源热泵; 能耗; 软件

0 引言

现在, 在我国暖通空调领域中, 应用较多的空调机组能耗计算模拟软件是 DeST 以及 Energy Plus 软件。但 DeST 和 Energy Plus 软件着重对于建筑热负荷的模拟分析, 其中的模块只能对采用软件内置的机组参数以及不同送风方式的热泵进行能耗计算, 没有对于空气源热泵变工况能耗的计算, 且其模拟计算需要建立建筑模型与整体的热泵空调系统模型^[1,2]。虽然这种模拟的精确度很高, 但对于软件的使用者来说需要有较强的专业知识。这不仅限制了能耗模拟软件在工程项目中的推广, 也制约了其在工程项目中的应用^[3], 使得在工程中进行供暖方案的设计以及机组选型时, 还是一般按照机组的固定能效和总运行时间, 对热泵系统的能耗与经济性估算。这种一般方法没有考虑到空气源热泵的变工况特性, 以及建筑物的逐时热负荷特性, 其计算过于简单粗糙与实际情况相差较大。因而据此设计出的供暖方案和选择的热泵机组并不十分理想。

综上所述, 设计出一款界面友好、操作简单, 适用人群更广, 计算较为准确且可用于方案论证和设计的空气源热泵空调系统能耗计算软件就显得十分有必要。

1 软件开发

本软件是在 Visual Basic 6.0 平台上开发完成的。Visual Basic 6.0 是可以运行在 Microsoft Windows 操作系统下的一种面向对象的可视化集成开发环境, 在该环境中集程序的设计、运行和调试于一体。由于 Visual Basic 6.0 为很多类型的程序提供了框架代码, 在使用时不需要编写描述每个对象的功能特征的代码, 只需要在使用时调用其提供的控件即可, 这使得本软件的开发工作量减少了很多。并且 Visual Basic 6.0 还具有强大的数据库访问与管理机制。利用其提供的 ADO 访问机制和 ODBC 数据库连接机制, 可以有效地访问多种数据库, 这也为软件所需数据的整理与查找提供了支持^[4]。

1.1 软件功能

本软件应用于北方主要城市的空气源热泵空调系统的设备选型、设备能耗计算以及经济性分析及节能减排效果的评估。因而本软件需要满足以下几个功能:

(1) 根据输入的气象参数、制热季开始及结束日期、每天机组的开机时间、实际建筑物的建筑面积与负荷修正系数, 计算建筑的逐时热负荷;

(2) 根据选择的末端供热方式、机组出水温度以及输入的机组选型标准, 选择合适的热泵机组;

(3) 根据选择的机组容量调节方式, 以及输入的水箱温度参数, 计算机组的逐时制热量、逐时功率以及逐时 COP 等参数;

(4) 根据输入的水泵能耗、水泵流量计算全年热泵

的总能耗;

(5) 根据输入的其它冬季供暖方式参数, 对热泵供暖及其它供暖方式进行经济性分析及减排效果分析;

(6) 可对每一步的计算结果和总体结果导出并生成计算数据报告。

为满足上述的功能, 空气源热泵空调系统能耗计算软件可分为 5 个基本模块, 包括 1 个参数输入模块与 4 个计算模块。气象参数设定、建筑负荷计算、机组选型、机组能耗计算以及经济性与节能性分析。分别可以完成对建筑所在地区的气象参数设定, 建筑逐时热负荷的计算, 对所需热泵机组进行选型计算、计算机组的逐时制热量、功耗、COP, 最后对冬季常见供暖方式进行技术经济性分析并对节能减排效果进行计算分析, 并给出分析结果。本软件可以为北方主要城市的住宅和办公建筑冬季供暖工程以及供暖节能改造工程的立项决策和初步设计提供方便快捷的技术支持, 以及对工程的节能减排效果进行评估, 对北方地区空气源热泵工程项目的科学合理建设起到指导作用。

1.2 建筑模型

为了提高软件计算的精确性。本文决定使用清华大学建筑技术科学系 DeST 开发组开发的 DeST-h 建筑能耗模拟软件计算建筑物在不同地区的热负荷特性。在建立一个基础建筑模型后, 使用 DeST-h 软件计算在不同地区的基础建筑模型的热负荷, 得到基础建筑的逐时单位面积热负荷特性, 再根据实际建筑的建筑面积得到实际建筑逐时热负荷变化。

1.2.1 基础建筑概况

软件所使用的基础建筑基于位于北京的某栋建筑物修改而成, 该建筑的立面图如图 1 所示。该建筑一共五层, 第一层高 4m, 其余四层均高 3.5m。该建筑物为南北朝向, 总建筑面积为 3525m², 该建筑物所围的体积为 12690m³, 建筑物外表面积为 3012.6m², 故该建筑物的体形系数为 0.24。



图 1 建筑物立面图

1.2.2 基础建筑围护结构

考虑到我国节能建筑设计以及标准的制定起步较晚^[5,6], 因而在众多建筑中, 普通非节能建筑面积占总建筑面积比例较大^[7,8], 因而该建筑的围护结构应该分为普通建

筑与节能建筑两种,以提高该建筑模型的适用性。作为普通建筑,该基础建筑的围护结构如表 1 所示。

表 1 基础普通建筑围护结构

结构名称	材料	厚度 (mm)	导热热阻 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)	传热系数 [$\text{W} / (\text{K} \cdot \text{m}^2)$]	热惰性指标
楼地	混凝土	60	0.026	—	0
地板	钢筋混凝土	125	0.097	3.055	1
内墙	陶粒混凝土	220	0.430	1.515	0.430
屋顶	加气混凝土	365	1.074	0.812	1.074
外墙	多孔混凝土	290	1.245	0.713	1.245
外窗	单层玻璃	—	—	5.700	—

根据文献 [9], 为保证该建筑的建筑结构满足严寒地区节能建筑的窗墙比的限值要求,故设定该建筑东、西、南、北四个朝向的窗墙比分别为 0.15、0.2、0.3、0.25。同时,在文献中也对北方不同气候分区中的节能建筑围护结构热工性能参数作了限值。因此,基础节能建筑模型是在基础普通建筑维护结构的基础上修改外墙、屋顶保温结构以及更改外窗的材料而建立的,具体围护结构见表 2。

表 2 基础节能建筑维护结构

结构名称	材料	厚度 (mm)	导热热阻 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)	传热系数 [$\text{W} / (\text{K} \cdot \text{m}^2)$]	热惰性指标
楼地	混凝土	60	0.026	—	0
地板	钢筋混凝土	125	0.097	3.055	1
内墙	陶粒混凝土	220	0.430	1.515	0.43
寒冷 (A、B) 区					
屋顶	钢筋混凝土 + 膨胀珍珠岩保温层	235	1.495	0.605	1.150
外墙	多孔混凝土 + 聚苯乙烯保温层	290	1.245	0.713	1.245
外窗	双层玻璃	—	—	2.800	—
严寒 (A) 区					
屋顶	钢筋混凝土 + 膨胀珍珠岩保温层	375	3.908	0.246	3.563
外墙	多孔混凝土 + 聚苯乙烯保温层	310	2.495	0.377	3.134
外窗	双层玻璃	—	—	1.800	—
严寒 (B) 区					
屋顶	钢筋混凝土 + 膨胀珍珠岩保温层	335	3.219	0.296	3.219
外墙	多孔混凝土 + 聚苯乙烯保温层	290	2.070	0.449	2.070
外窗	双层玻璃	—	—	2.200	—
严寒 (C) 区					
屋顶	钢筋混凝土 + 膨胀珍珠岩保温层	285	2.357	0.398	2.184
外墙	多孔混凝土 + 聚苯乙烯保温层	280	1.857	0.496	1.857
外窗	双层玻璃	—	—	2.200	—

1.2.3 室内设计参数

根据国家标准 [10], 基础建筑的室内设计参数如表 3 所示。

表 3 基础建筑的室内设计参数

建筑功能	冬季房间温度 / $^{\circ}\text{C}$	设备热扰 / (W / m^2)	人均发热量 / W
办公室	22	21	66
走廊	16	5	58
居住	21	28	61

1.3 机组能耗计算算法

考虑到目前并联热泵机组的容量调节形式,本软件涉及了其中常见的 3 中调节类型,分别为由水箱温度控制的

开停调节相同制热量并联机组、水箱温度控制的开停调节不同制热量并联机组、以及无级调节并联机组。

1.3.1 开停调节相同制热量并联机组

水箱温度控制机组开停调节的计算框图如图 2 所示。

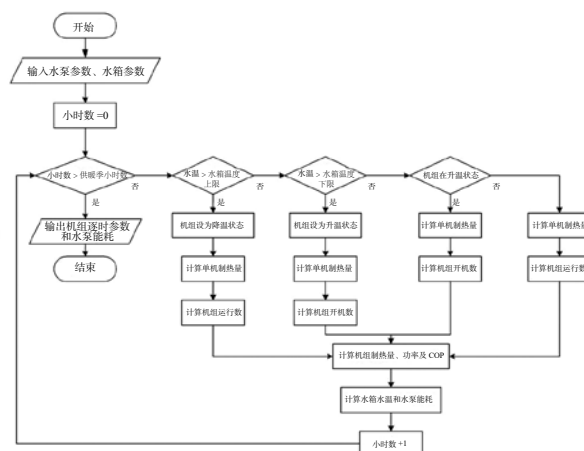


图 2 开停调节并联机组能耗计算流程图

其中水箱温度的计算公式为:

$$t_w = \frac{Q_H - Q_B}{V_w \rho_w c_p} + t'_w \quad (1)$$

式中: t_w 为当前计算步长中的水箱温度 ($^{\circ}\text{C}$); t'_w 为上一步计算步长中的水箱温度 ($^{\circ}\text{C}$); Q_H 为热泵机组提供的热量 (kJ); Q_B 为建筑得热量 (kJ); V_w 为水箱容积 (m^3); ρ_w 为水的密度 (kg / m^3); c_p 为水的定压比热容 ($\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$)。

开机数 m 的计算公式为:

$$m = \left(\frac{q_B}{q_H} \right) + 1 \quad (2)$$

式中: m 为热泵机组开机数 (台); q_B 为建筑热负荷 (kW); q_H 为热泵机组单机制热量 (kW)。

即, 开机数为建筑热负荷除以单机制热量的商, 取整后加 1。

运行数 n 的计算公式为:

$$n = \left(\frac{q_B}{q_H} \right) \quad (3)$$

式中: n 为热泵机组运行数 (台)。其它符号与式 (2) 中符号意义相同。即, 运行数为建筑热负荷除以单机制热量的商, 取整。

软件在每一个计算步长中均要计算水箱水温。当水温 t_w 大于水箱温度上限时, 机组设为降温状态, 机组的运行台数 n 由式 (3) 计算, 此时热泵机组的制热量低于建筑热负荷, 在经过一个步长的计算后, 水箱的温度下降, 之后机组的运行台数 n 均由式 (3) 计算得到, 直至水箱温度降到水箱温度下限为止; 当水温 t_w 小于等于水箱温度上限时, 机组设为升温状态, 机组的开机数 m 由式 (1) 计算, 此时机组的制热量高于建筑物的热负荷, 在经过一个步长的计算后, 水箱的水温升高, 此后机组的开机台数 m 均由式 (2) 计算得到, 直至水箱温度升到水箱温度上限为止。

1.3.2 开停调节不同制热量并联机组

水箱温度控制的开停调节不同制热量并联机组能耗计算。该计算方法是在图 2 的基础上, 在当机组为升温状态时, 添加了计算热负荷余量 Δq 的流程, 用以判断是否需

要启用负荷调节机。图中机组运行数 n 按式 (3) 计算。热负荷余量 Δq 则按式 (4) 计算:

$$\Delta q = q_B - nq_H \quad (4)$$

若热负荷余量 Δq 小于等于负荷调节机制热量时, 负荷调节机开启; 而当热负荷余量 Δq 大于负荷调节机制热量时, 负荷调节机不启动, 热泵机组再增开一台机组以满足建筑热负荷需求。

1.3.3 无级调节并联机组

由于不需要由水箱温度来控制热泵机组的开停机, 且无级调节机组的制热量等于建筑热负荷, 因而无级调节的计算比较简单。通过建筑热负荷以及机组的单机制热量, 得到机组的开机率 N 。开机率 N 由式 (5) 计算可得。

$$N = \frac{q_B}{q_H} \quad (5)$$

在得到热泵机组的开机率 N 后, 就可很便利地计算热泵机组的功耗以及 COP 等参数。

2 工程实例

北京的一项建筑节能改造项目, 该建筑为 6 层普通建筑, 建筑面积 4000m², 其中办公面积 3000m²、居住面积 1000m²。计划采用热泵替代原来的燃气锅炉进行冬季采暖。采暖方式为地暖。采暖日期为每年 11 月 15 日至次年 3 月 15 日, 全天采暖。

将计算所需的气象参数与建筑参数输入软件中, 如图 3 所示。



图 3 软件参数设定界面

考虑到该建筑窗墙比较大, 故将负荷修正系数设定为 1.5, 计算得到的逐时热负荷如图 4 所示。该建筑的最大热负荷为 284.45kW, 此时环境温度为 -9.54℃, 故以此作为负荷平衡点选择热泵机组。

由于工程数据中没有提到机组出水温度, 故先按软件推荐的 55℃ 进行设置。软件选择 1 台 LT-S-3014-H 型单

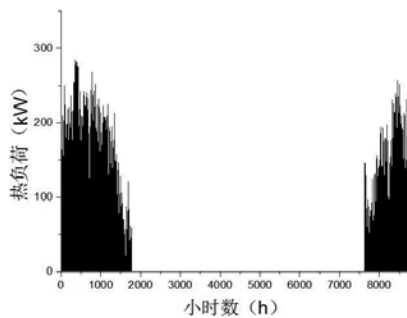


图 4 建筑逐时热负荷

机双级螺杆热泵机组。在进行机组能耗计算时, 设定水泵参数为软件默认参数 (功率 7.5kW, 流量 30m³/h, 供水水温差 10℃), 设定水箱参数为容积 40m³, 水箱温度下限 45℃、上限 55℃。机组逐时能耗计算结果如图 5 热泵机组逐时功耗所示, 该机组供热季总能耗为 99436.67kW·h。机组逐时 COP 结果如所示, 该机组供暖季平均 COP 为 2.84。

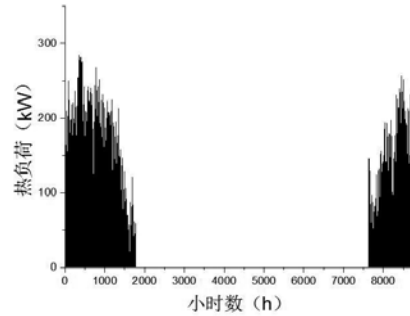


图 5 热泵机组逐时功耗

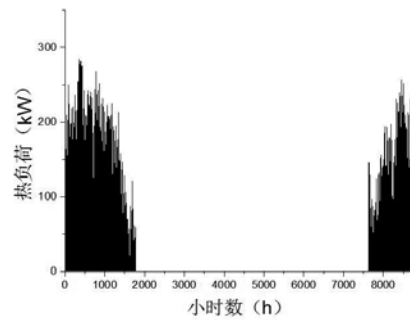


图 6 热泵机组逐时 COP

在对常规热源参数, 包括设备价格、人工费用、能源价格等参数进行设定, 就可以将经济性及节能分析结果通过 Excel 输出, 结果见表 4。

表 4 经济性 & 节能减排效果分析结果

供暖方式	燃煤锅炉	燃气锅炉	电锅炉	补气增焓涡旋热泵	单机双级螺杆热泵
燃料种类	原煤	天然气	电	电	电
热效率	0.75	0.90	0.95	2.39	2.84
年消耗燃料费用 (万元)	2.59	11.69	14.87	5.91	4.97
15 年消耗燃料费用 (万元)	38.87	175.35	223.04	88.69	74.56
年人工成本 (万元)	10.80	10.80	10.80	3.60	3.60
15 年度人工成本 (万元)	162.00	162.00	162.00	54.00	54.00
设备数量 (台)	1	1	1	5	1
设备初期投资成本 (万元)	30.00	35.00	50.00	285.00	60.00
15 年度总成本 (万元)	230.87	372.35	435.04	427.69	188.56
标准煤质量 (吨/年)	45.99	36.39	36.58	14.55	12.23
年节约标准煤 (吨/年)	—	-9.60	-9.41	-31.45	-33.77
减少 CO ₂ 排放 (吨/年)	—	-26.41	-25.89	-86.48	-92.85
减少 SO ₂ 排放 (吨/年)	—	-0.29	-0.28	-0.94	-1.01
减少氮氧化物排放 (吨/年)	—	-0.04	-0.04	-0.13	-0.14
减少粉尘排放 (吨/年)	—	-0.19	-0.19	-0.63	-0.68

从表中可以看出对于北方建筑的大面积供暖,使用螺杆式空气源热泵的经济性及节能减排效果是要优于使用涡旋热泵以及燃煤锅炉、燃气锅炉和电锅炉的。同样属于空气源热泵,螺杆式空气源热泵的经济性及节能减排效果相较于涡旋式空气源热泵还是有较大优势,这是由于螺杆式热泵的单机制热量要高于涡旋式热泵,且在冬季环境温度较低时,螺杆式热泵的 COP 要高于涡旋式热泵,螺杆式热泵的低温性能要优于涡旋式热泵。而对比燃煤、燃气、电三种锅炉,虽然燃煤锅炉的年消耗燃料费用最低,但其具有较低的环保效益。对于燃气锅炉和电锅炉,虽然电锅炉的热效率较高,但考虑到燃气具有较高的热值,因此燃气锅炉的年标准煤消耗量以及年燃料消耗费用反而低于电锅炉,且燃气锅炉的环保效益稍微由于电锅炉。所以对于冬季供暖的辅助热源而言,除非该地靠近发电厂使得电费较低外,使用燃气锅炉的经济性及环保效益相较于使用电锅炉是具有一定优势的。

3 结语

该空气源热泵能耗计算软件界面清晰友好,操作易于上手,是对空气源热泵机组进行能耗计算与经济性及节能效益分析的有力的工具。该软件能方便快捷准确地完成对空气源热泵能耗的计算,并输出详细的经济性与节能效益分析结果,能为北方主要城市的住宅和办公建筑冬季供暖工程以及供暖节能改造工程的立项决策和初步设计提供方便快捷的技术支持,减少工程人员的工作量,提高工作效率,加快热泵空调系统能耗模拟软件在我国的推广应用。

参考文献

- [1] 黄俊鹏,李峥嵘.建筑节能计算机评估体系研究[J].暖通空调,2004,34(11):30-35.
- [2] 刘晓男,孙建. EnergyPlus 能耗分析软件在空调系统节能改造中的应用[J]. 施工技术,2012(s1):398-401.
- [3] 李准. 基于 EnergyPlus 的建筑能耗模拟软件设计开发与应用研究[D]. 湖南大学,2009.
- [4] 赵永发等. Visual Basic 从入门到精通(第3版)[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [5] 王甜,宋丁全. 浅析建筑节能现状及其应用[J]. 金陵科技学院学报,2017,33(01):24-28. [2017-08-29]. DOI: 10.16515/j.cnki.32-1722/n.2017.01.006.
- [6] 王爱兵. 浅析建筑节能现状及建筑节能新技术[J]. 城市建筑,2013,(16):141. [2017-08-29].
- [7] 田昕,徐俊芳,李楠,邱样娥. 北京市建筑节能发展现状和展望[J]. 建设科技,2017,(08):17-19+33. [2017-08-29]. DOI:10.16116/j.cnki.jskj.2017.08.003.
- [8] 李红亚,魏铭呈. 建筑节能在我国的现状及改进措施[J]. 包钢科技,2010,36(04):67-69. [2017-08-29].
- [9] JGJ26—2010,严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [10] GB 50736—2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

湿热地区窗墙比对建筑空调负荷的影响

李 倩, 谢静超, 薛 鹏, 崔亚平, 刘加平

(北京工业大学, 北京 100124)

[摘 要] 本文以某宾馆为对象, 采用 Eenergyplus 能耗模拟软件分析了无外遮阳时不同地区及不同窗户类型情况下, 建筑窗墙比对夏季空调负荷的影响, 并探讨了常夏无冬的琼海地区建筑在采用外遮阳条件下全年空调负荷随窗墙比的变化情况。结果表明, 无遮阳时同一建筑的夏季空调负荷在琼海地区时约为 $61\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, 较在福州和上海时大; 维持能耗量不增的情况下, 采用热工性能较好的窗户可有效降低夏季空调负荷, 从而放宽对窗墙比的限制; 在有固定外遮阳时, 琼海地区建筑全年空调负荷可降低 5%~7% 左右, 窗墙比可适当增大至 0.5 左右。

[关键词] 窗墙比; 窗户类型; 空调能耗; 朝向; 遮阳

0 引言

窗墙面积比指的是窗户面积与房间立面单元面积 (即建筑层高与开间定位线围成的面积) 的比值^[1-2], 是影响建筑本体性能, 实现建筑节能的重要因素。近年来, 消费者越来越倾向于窗墙比较大的住宅以获得良好的通风和采光效果, 且有益于身心健康, 但是这对建筑节能来说却不一定是有利的。各地区由于气候条件、地理位置等存在差异, 故窗墙比对建筑能耗的影响略有不同。因此, 人们针对不同建筑气候区典型城市的窗墙比进行了研究。

针对严寒地区的住宅建筑, 卢丽冰、董海荣等人通过理论计算分析了围护结构耗热量随窗墙比增加迅速上升^[3], 李桂文等人通过实地调研结合实例给出了严寒地区村镇住宅窗墙比范围^[4]。对于寒冷地区居住建筑, 付素娟等人采用 DeST 模拟了不同窗墙比下的自然室温及空调、供暖能耗指标^[5], 常静和李永安模拟分析了不同朝向窗墙比与供暖能耗的关系^[6]。关于夏热冬冷地区窗墙比的研究相对较多, 简毅文等通过对上海某住宅建筑进行模拟得出各朝向窗墙面积比对建筑全年供暖空调总能耗的影响规律^[7]; 龙恩深等人采用特征温度法以重庆市某公寓式居住建筑为对象, 研究了窗墙比对建筑冷热耗量及能耗相对变化率的影响^[8]。孙海莉等人以夏热冬暖北区深圳市某酒店为研究对象模拟分析了建筑体形系数和窗墙比对建筑能耗的影响^[9]。但以往关于窗墙比的研究多是集中在需供暖的地区, 针对夏热冬暖地区 (尤其是南区) 的研究相对较少。

考虑到上述情况, 本文以某东西朝向的宾馆建筑为对象, 选取夏热冬暖南区、北区及夏热冬冷地区三个分区典型城市的气象参数作为边界条件, 采用三种不同类型的窗户, 分析了东西朝向窗墙比变化对夏季空调负荷的影响。并根据琼海地区常夏无冬的气候特点, 分析了该地建筑在添加外遮阳设施后窗墙比变化对全年空调负荷的影响, 旨在为湿热地区建筑窗墙面积比的合理取值提供参考。

1 研究方法及模型介绍

1.1 研究方法

本文运用 Energyplus 能耗模拟软件对该建筑不同工况下的逐时空调负荷进行动态模拟计算。整个研究过程中, 保持建筑其他设定参数不变, 只改变客房窗墙比的朝向及大小, 并考虑不同形式遮阳设施的作用, 根据软件输出的相关能耗数据判断不同情况下窗墙比对建筑空调能耗的影响。

Energyplus 是由美国能源部和劳伦斯·伯克利国家实验室共同开发的一款建筑能耗模拟软件, 是在 BLAST 和 DOE-2 的基础上进行开发的, 基于热平衡算法进行求解,

采用中国标准气象数据作为室外边界条件进行能耗模拟计算。对围护结构的导热、对流以及辐射的计算提供了多种方法, 用户可根据需要进行选择。此外, Energyplus 可以识别带有各种遮阳设施、双层屋顶等复杂结构的几何模型且内置多种阴影计算模型可供用户选择, 满足本文的计算要求。

1.2 建筑模型

本文以夏热冬暖地区某拟建宾馆建筑为对象进行研究, 其一层平面图见图 1, 各楼层功能房间位置相同。该建筑共三层, 总建筑面积为 2049.6m^2 , 内含 48 个标准间, 客房面积占 63%。二、三层南端为露台, 故每层房间数目不一致, 一、二、三层分别为 20 间、16 间、12 间, 东西侧客房数量相同。从图 1 可以看出, 建筑中间为走廊宽 2.7m, 两侧为客房。客房尺寸相同, 宽 3.9m, 进深 6.9m, 层高为 3.9m, 窗口大小 (阳台门及窗户) 为 $2.7\text{m}\times 2.1\text{m}$, 折合成窗墙比为 0.37。客房外侧设有 1.8m 宽的阳台, 其中相邻客房的阳台部分以垂直遮阳板分隔, 均起到一定的遮阳作用。

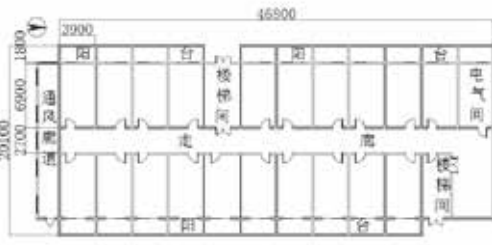


图 1 建筑一层平面图

1.3 模拟参数设置

1.3.1 主要围护结构

建筑屋面、外墙的参数设置依据设计说明给出的进行设定, 其中屋顶、外墙的设置如表 1 所示, 能够满足夏热冬暖南区、北区及夏热冬冷地区建筑节能设计标准的要求, 模拟中采用的三种窗户类型单层窗、普通中空、中空镀膜窗的性能参数见下表。

表 1 建筑物主要围护结构

围护结构	屋面	外墙	单层窗	普通中空	中空镀膜
传热系数	0.503	0.707	5.778	2.822	1.771
太阳得热系数	—	—	0.819	0.702	0.568

1.3.2 内热源及新风量

模拟过程中保持其他参数不变, 仅窗墙面积比为变量。由于该建筑还未竣工, 实际的人员入住率、灯光设备使用

情况等固定条件的取值主要参照国家相关标准^[6], 具体参数设置见表 2。

表 2 内热源及新风量设定

人员密度	2 人/间	电器设备功率	15W/m ²
灯光密度	7W/m ²	新风量	30m ³ /(h·人)

1.3.3 空调系统

根据《公共建筑节能设计标准》中关于宾馆建筑的相关规定, 设定空调系统在计算时段内的运行时间 1:00~24:00, 空调温度设定为 25℃, 相对湿度设定为 65%。由于走廊的室内外温差小于 10℃, 因此不设置空调系统; 布置在建筑北侧有一定隔热作用的楼梯间、杂货间, 包括通风廊道及双层屋顶等空间内也不设置空调。

2 计算结果及分析

2.1 无遮阳情况下, 不同地区及不同窗户类型时窗墙比对夏季空调负荷的影响

该宾馆建筑屋顶和外墙的热工性能能够满足夏热冬暖南区、北区及夏热冬冷地区建筑节能设计标准的要求, 故分别选取了三个分区内典型邻海城市(琼海、福州、上海)的气象参数作为室外边界条件, 各城市气候特点见表 3。结合三种不同窗户类型, 即单层窗、普通中空及中空镀膜, 计算了其夏季逐时空调负荷, 结果如图 2。在进行本部分的模拟计算时, 建筑模型不涉及阳台及遮阳板部分。

表 3 气候特点

地区	地理位置	所属气候分区	年平均温度/℃	气温年较差/℃	年平均相对湿度/%
琼海	19.23°N, 110.47°E	夏热冬暖南区	24.5	10	85.5
福州	26.08°N, 119.28°E	夏热冬暖北区	20.3	17.6	75.9
上海	31.54°N, 121.45°E	夏热冬冷	16.6	23	76.3

从表 3 可以看出, 琼海的年平均温度约为 24.5℃, 年相对湿度为 85 左右, 且年较差仅为 10℃。可见相较于福州和上海, 琼海地区纬度较低, 且具有年平均温度、相对湿度较高, 气温波动较小的气候特点。此外, 因琼海位于夏热冬暖南区, 所以无需考虑冬季供暖问题。当采用单层窗, 窗墙比为 0.37 时, 该建筑在琼海、福州、上海的夏季空调负荷分别为 61kW·h/m²、54kW·h/m²、47kW·h/m², 琼海最高, 福州次之, 上海最低。

从图 2 可以看出, 在无遮阳情况下, 当增大窗墙比时, 夏季空调负荷基本呈线性增长且西向窗墙比对空调能耗的影响要大于东向。透过窗户的太阳辐射与温差传热均与其面积成正比, 在模拟过程中仅窗墙比为变量, 故空调负荷基本呈线性增长。此外, 由于西向所接受到的太阳辐射较东向多, 故随西向窗墙比增长速率要快于东向。以琼海为例, 当采用单层窗时, 西向、东向窗墙比每增加 0.1, 夏季空调负荷约分别增加 1.74kW·h/m²、1.4kW·h/m²。以采用单层窗时建筑的夏季空调负荷不变为衡量标准, 若将位于琼海的建筑移至福州, 其东向(西向)窗墙比可增至 0.8(0.6); 移至上海, 其东向(西向)窗墙比甚至可增大至 0.9。

选用的单层窗、普通中空及中空镀膜三种窗户类型传热系数及太阳得热系数依次降低, 可见中空镀膜窗的热工性能最好。由图 2 可得, 采用热工性能较好的窗户类型, 可降低夏季的空调负荷, 且在空调能耗较大的地区, 效果更为理想。以琼海为例, 建筑东向窗墙比维持 0.37 不变, 当采用普通中空窗、中空镀膜窗时, 夏季空调负荷相较于采用单层窗时分别降低了 3.1kW·h/m²、6.3kW·h/m², 而在上海采用这两种类型的窗户时, 空调负荷分别降低了 1.95kW·h/m²、4.28kW·h/m²。透过窗户的太阳辐射热量是构成夏季空调负荷的重要组成部分, 而且窗户的传热系数要远远大于墙体, 因此窗户是降低夏季空调能耗的薄弱环节。

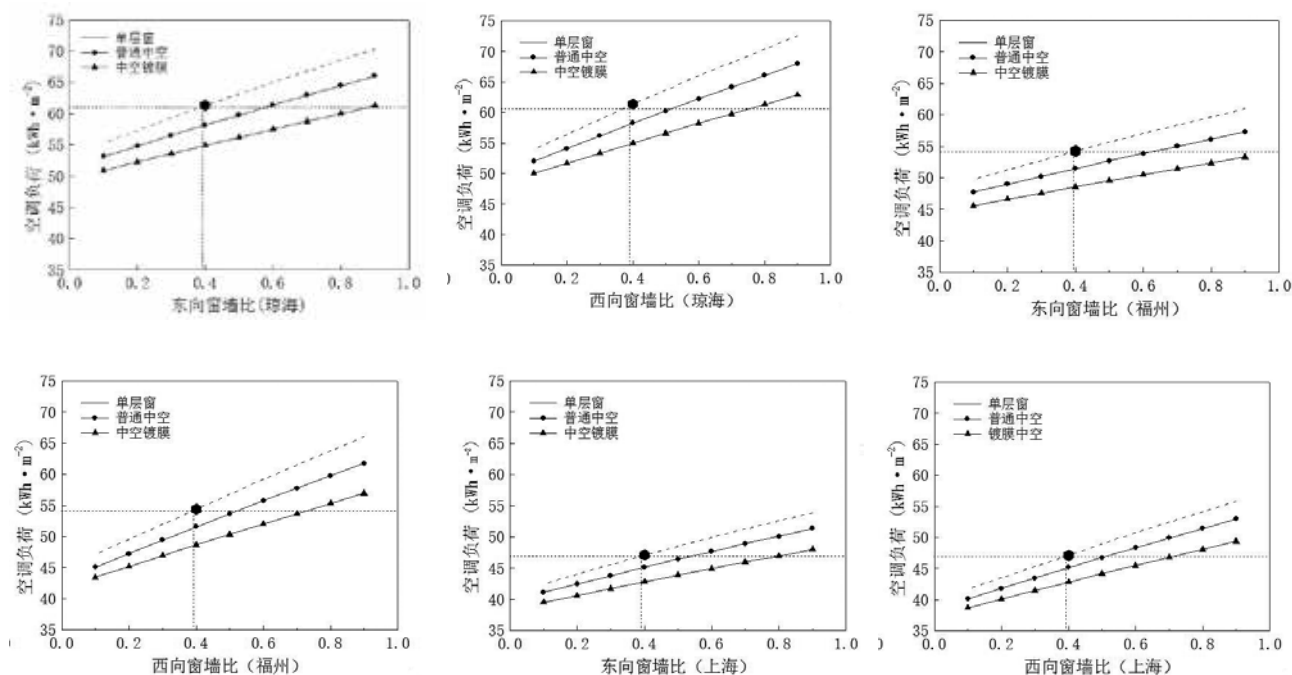


图 2 不同地区、窗户类型下窗墙比对夏季空调能耗的影响

节。其传热系数、太阳得热系数越小，透过窗户进入室内的热量也就越小，从而有利于降低空调负荷。

随着窗墙比的增大，采用三种不同的窗户类型时，其夏季空调负荷差异也随之增大。以琼海为例，当东向窗墙比为 0.5 时，相较于采用单层窗时，采用普通中空、中空镀膜窗其夏季空调负荷分别降低 $3.4\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 、 $6.9\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ；当东向窗墙比为 0.9 时，其相较于采用单层窗时，其空调负荷分别降低 $4.3\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 、 $9\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。可见，建筑的窗墙比越大时，采用热工性能好的窗户类型的节能效果更明显。

改用热工性能较好的窗户类型，维持空调负荷不变的情况下，可适当增加窗墙比范围。以琼海为例，采用单层窗时建筑夏季空调负荷为 $61\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，而若改为采用中空窗，其东向（西向）窗墙比可增大至 0.55（0.5），若改为采用中空镀膜窗，其东向窗墙比可增大至 0.85（0.7）。

2.2 添加固定外遮阳设施后窗墙比对建筑全年空调负荷影响

外遮阳可将太阳辐射热量直接挡在室外，从而降低空调负荷。通过对琼海气象数据的分析可知，该地常夏无冬，不存在冬季利用太阳辐射的情况，所以太阳辐射对该地而言均为不利因素，所以固定外遮阳对该地而言是一种有效的节能措施。

以琼海地区的气象数据为室外计算条件，采用中空镀膜窗，计算其全年逐时空调负荷。各朝向窗墙比自 0.1 至 0.9 变化时，在采用水平、垂直及综合遮阳情况下建筑的空调负荷，见图 3。为了便于比较，窗墙比在无遮阳情况下变化时的空调负荷用虚线表示。琼海属夏热冬暖地区，建筑全年空调负荷为 $140\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，潜热负荷为 $52\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，占 37%。西、东向窗墙比每增加 0.1，建筑全年空调负荷分别增加 $4.8\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 、 $3.7\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，可见西向窗墙比对空调负荷影响较东向大。

窗墙比越大，外遮阳对空调负荷的降低作用越大。如东向窗墙比为 0.37 时，添加水平、垂直及综合遮阳后空调负荷分别下降了 $7\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 、 $5\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 和 $10.7\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ；当窗墙比增大至 0.7 时，空调负荷分别降低了 $9.6\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 、 $7\text{kW}/\text{m}^2$ 和 $15\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。且窗墙比增大时，空调负荷曲线有下凹的趋势，说明增长速率变小。如东向采用综合遮阳时，窗墙比由 0.1 增加至 0.2，空调负荷增加了 $2.6\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ；窗墙比由 0.7 增大至 0.8，空调负荷增加了 $1.9\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。遮阳设施会对空调负荷随窗墙比增大呈线性增长的趋势

势有一定影响，且该朝向太阳辐射强度越大，遮阳系数越大，影响程度越大。

水平、垂直及综合遮阳三种固定外遮阳方式中，综合遮阳节能效果最好。窗墙比为 0.37 时，空调负荷在水平遮阳情况下减少了 $6.5\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，在垂直遮阳情况下减少了 $5\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，综合遮阳时减少了 $10.5\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。保持建筑原有窗墙比 0.37 不变，水平遮阳可使得建筑空调负荷降低 5%，综合遮阳时降低 7% 左右。但综合遮阳构件间存在相互遮挡，因此其节能效果要比单独采用两种遮阳时的叠加效果要差。随窗墙比的增大，负荷降低程度减小，说明外遮阳不能够抵消由于窗户面积增大所带来的负荷增加，而减小窗墙比可达到与采用外遮阳相同的节能效果。东向（西向）窗墙比减小到 0.2 时，负荷降低约为 5%，与水平遮阳的效果相当。

采用外遮阳后，无遮阳情况下窗墙比为 0.37 时的空调负荷与增加遮阳设施后空调负荷随窗墙比变化曲线交点后延，所对应的窗墙比增大。保持建筑原有能耗量不增，窗墙比的设定范围可在增加不同形式外遮阳情况下相应增大。采用水平遮阳时，东（西）向的窗墙比可由 0.37 增大至 0.65（0.55）；采用垂直遮阳时，可使得东向（西向）窗墙比由 0.37 增加到 0.55（0.5）；采用综合遮阳可使得建筑东（西）向的窗墙比由 0.37 增大至 0.85（0.75）。

3 结论

（1）夏季空调负荷随窗墙比增大基本呈线性增长，与建筑地理位置及窗户类型关系不大，且西向窗墙比的影响较东向大，因此应对建筑窗墙比尤其是西向窗墙比加以限制。

（2）当窗墙比为 0.37 时且采用单层窗情况下，该宾馆位于夏热冬暖南区琼海市时的夏季空调负荷为 $61\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，高出福州 $7\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，高出上海 $14\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，可见同样是在夏季，建筑位于琼海的空调负荷要高于夏热冬暖北区的福州及夏热冬冷地区的上海。

（3）采用热工性能较好的窗户类型可有效降低空调负荷，将位于琼海的建筑窗户类型由单层窗改为中空窗、中空镀膜窗，其夏季空调负荷可分别降低 $3.1\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 、 $6.3\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。在维持夏季空调负荷不变的情况下，将位于琼海的建筑窗户类型由单层窗改为中空窗，其东向（西向）窗墙比可增大至 0.55（0.5），若改为采用中空镀膜窗，其东向（西向）窗墙比可增大至 0.85（0.75）。

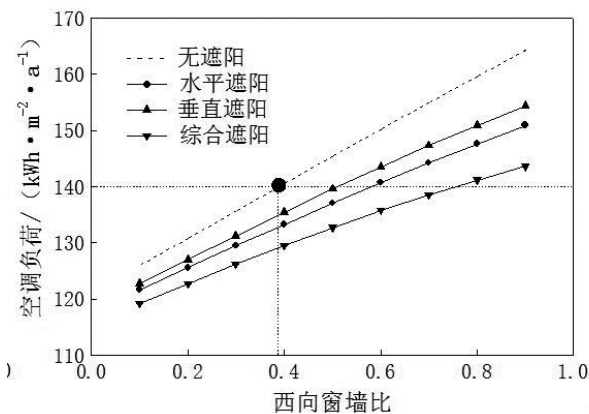
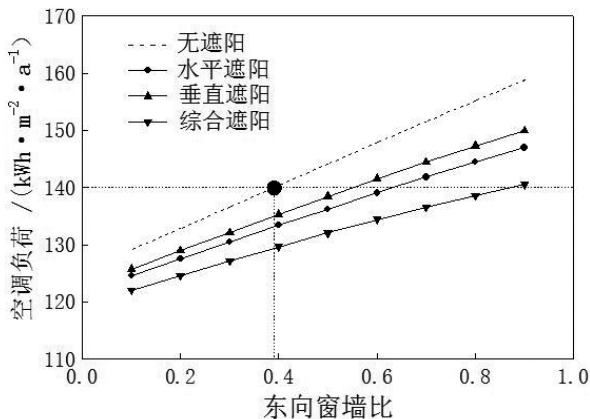


图 3 不同形式外遮阳情况下全年空调负荷随窗墙比的变化

(4) 琼海地区常夏无冬, 故不存在利用太阳辐射降低热负荷的情况, 因此外遮阳是一种有效的节能措施。其中综合遮阳的节能效果最好, 窗墙比为 0.37 时, 节能率在 7% 左右。东西向采用水平遮阳节能率均在 5% 左右, 且窗墙比越大, 采用水平、垂直遮阳两种方式的差异越明显。

(5) 保持建筑原有能耗量不增, 琼海地区宾馆建筑窗墙比的设定范围可在增加不同形式外遮阳情况下相应增大。采用水平遮阳时, 东(西)向的窗墙比可由 0.37 增大至 0.65(0.55); 采用垂直遮阳时, 东(西)向的窗墙比可由 0.37 增大至 0.55(0.5); 采用综合遮阳时, 东(西)向的窗墙比可由 0.37 增大至 0.85(0.75)。

参考文献

- [1] 中国建筑科学研究院. 夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准: JGJ 75-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] 中国建筑科学研究院. 公共建筑节能设计标准: GB 50189-2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [3] 卢丽冰, 王玉石, 高梦, 等. 窗墙比对围护结构传热的影响分析 [J]. 低温建筑技术, 2011, 33(10):105-106.
- [4] 李桂文, 徐聪智, 张滨, 等. 严寒地区村镇住宅窗墙面积比值范围的研究 [J]. 建筑节能, 2011, 39(10): 52-56.
- [5] 付素娟, 刘欢, 郝雨杭. 窗墙比对农村住宅室内温度的影响分析 [J]. 建筑节能, 2015, (7):55-58.
- [6] 常静, 李永安. 居住建筑窗墙面积比对供暖能耗的影响研究 [J]. 暖通空调, 2008, 38(5):109-112.
- [7] 简毅文, 江亿. 窗墙比对住宅供暖空调总能耗的影响 [J]. 暖通空调, 2006, 36(6):1-5.
- [8] 龙恩深, 付祥钊. 窗墙比对居住建筑冷热耗量指标及节能率的影响 [J]. 暖通空调, 2007, 37(2): 46-50.
- [9] 孙海莉, 王智超. 夏热冬暖地区窗墙比和体形系数对宾馆建筑能耗影响分析及节能潜力研究 [J]. 建筑节能, 2013, (11): 38-40.

北京地铁夏季乘客热舒适的现场研究

杜赛赛¹, 谢浪², 裴斐¹, 崔颖¹, 吴金顺⁴, 潘嵩^{1,3}

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京博锐尚格节能技术股份有限公司, 北京 100192; 3. 北京工业大学 绿色建筑环境与节能技术北京市重点实验室, 北京 100124; 4. 华北科技学院 建筑工程学院, 河北廊坊 065201)

[摘要] 随着地铁的迅猛发展, 地铁热舒适情况也越来越受到人们关注, 但目前关于地铁环境热舒适的研究较少。研究者针对北京某两个地铁站及其往来车辆的热环境情况及乘客热舒适情况进行了现场调研, 对 628 人次的调研数据从热环境及热感受方面进行了分析, 得到了我国寒冷地区的地铁热环境情况, 确定了各区域的中性温度及 80% 可接受温度的范围, 分析了乘客乘车过程中的热感觉变化。

[关键词] 寒冷地区; 地铁; 热环境; 热感受

0 引言

地铁建筑不同于办公、住宅等建筑, 其乘客流动性大, 停留时间短暂, 乘客密度变化显著, 因此地铁的热舒适研究也不同于一般的地上建筑^[1-5]。

本文针对地铁站公共区的热环境特点, 以我国北京为代表的寒冷地区的夏季地铁热舒适现场为研究主题, 分析地铁热环境、地铁乘客的热感受和适应行为的变化特征, 以期获得寒冷地区地铁乘客在建筑环境中的热适应规律, 为今后寒冷地区的地铁热环境设计与评价提供参考。

1 研究方法

1.1 研究对象

选取我国北京市 8 号线 A 站、B 站以及两站之间来往车辆的车厢为研究对象。本文主要针对乘客活动的公共区部分进行研究。地铁站内部公共区通常分为出入口、站厅层、站台等, 由于不同区域影响人体热舒适的因素不同, 本研究根据热环境状况、人体活动情况等, 将地铁站分为三个区域进行研究: 进站口、站厅站台。各区域的详细情况见表 1。

表 1 地铁内各区域基本情况

区域	停留时间 /s	运动强度	备注
进出口	20~50	站立	受室外影响大, 风速较大
站厅	50~90	行走	
站台	0~120	站立, 偶尔走动	受站台形式及活塞风影响较大
车厢		静坐, 站立	

1.2 受试者

随机选取在北京学习生活的男、女大学生作为受试者, 基本信息见表 2。受试人员共 60 人, 测试当天要求穿着与室外天气条件相匹配的服装。

表 2 测试人员基本信息

	年龄 / 岁	性别	身高 / cm	体重 / kg	服装热阻 / clo
范围	20~26	男, 女	158~183	45~75	0.45~0.55

1.3 现场测试调研方法

本研究采用客观测量和主观调查相结合的方法。具体测试采用追踪式的方法, 即对受试者从进站乘车到出站的全过程进行测试。考虑重复测试可能会使受试者产生过度熟悉或厌烦感的不利因素的影响^[6], 每周只进行一次测试, 每次测试 4 趟乘坐地铁过程。每趟测试历时约 30min, 每个受试者完成一份调查问卷。受试者填写问卷的同时由调研人员测试受试者所在区域的热环境参数。

1.3.1 主观测试

主观调查方法主要是获得受试者对热环境的感受, 本次调查问卷分为 2 部分, 服装和热感受。热感受分三种, 分别是热感觉、热舒适和热可接受度, 采用如图 1 所示的标尺进行投票。

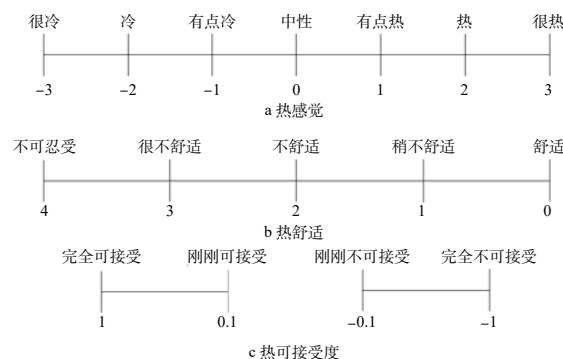


图 1 调查问卷用投票标尺

1.3.2 客观测量

选用 MS6508 数字温湿度表和 GM8903 热敏风速计对空气温度、相对湿度和空气流速 3 个热环境物理量进行测试, 测试位置分别室外、进站口、站厅 1 (售票处)、站厅 2、站台、车厢、站台、站厅 2、站厅 1 (售票处)、出站口和站外 11 个区域。测试仪器的基本信息见表 3。

表 3 主要测量仪器

仪器名称	精度
MS6508 数字温湿度表	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (0~45 $^{\circ}\text{C}$)
GM8903 热敏风速计	$\pm 3\% \pm 0.1\text{m/s}$

调研从 2016 年 5 月开始, 于 2016 年 5 月进行了两次测试, 2017 年 6 月~7 月持续两个月共进行测试 7 次, 总计获得 46 趟出入地铁乘车, 628 人次的原始数据。以每人每趟经历的进站乘车到出站所经历的 12 个过程为一个标本量, 共计获得标本量 628 个。

2 结果分析与讨论

2.1 热环境

乘客经历各区间相对湿度变化情况如图 2 所示, 由图可知当室外相对湿度较低时, 地铁内相对湿度明显高于室外, 且在车厢达到最大值, 这主要是由于地铁空调系统

及人员散湿引起的；当室外相对湿度较高时，地铁内相对湿度反而出现下降趋势，引起这一变化的原因为空间传湿的滞后性。

测试周期内不同区域测到的相对湿度值的描述性统计如图3所示。ASHRAE 推荐相对湿度值范围为30%~60%^[7-9]。由图可知，地铁各区域相对湿度基本都在ASHRAE 推荐范围内，但总体来看相对湿度在站台、车厢处较高，地铁空调系统运行除湿效果不明显。

乘客经历各区间的温度变化情况如图4所示，由图可知，夏季公共区内温度明显低于室外，平均温度变化情况大体呈V字形，在车厢内达到最低值，说明地铁空调系统的运行明显改善地铁的热环境，使之处于较舒适状态。

不同位置所测到的干球温度值的描述性统计如图5所示。可以看出，站厅和进站口的测量干球温度稍高，其中进站口温度高可能由室外温度高所引起，空调系统没有使

站厅温度达到ASHRAE 推荐的22.2~27.2℃的温度范围内^[7-9]。站台与车厢的干球温度测量值基本在温度范围内，且车厢内干球温度低于车站其他区域温度，表明车厢内空调降温效果良好。

2.2 热感受

2.2.1 热感觉

热感觉随乘客所处区间的变化如图6所示。受试者在室外的热感觉在有点热与热状态之间，在进站口下降为中性与有点热状态之间，在站厅与站台区域继续下降基本处于热中性状态，到车厢位置降到最低，为中性（偏冷）状态。下车出站过程热感觉变化情况与进站乘车过程基本一致。

2.2.2 热舒适

将多次测试的问卷调查所得的乘客热舒适情况作80%及以上的受试者热舒适投票满意的热环境范围如图7所示，由图可得，站厅、站台、车厢部分乘客感到舒适的

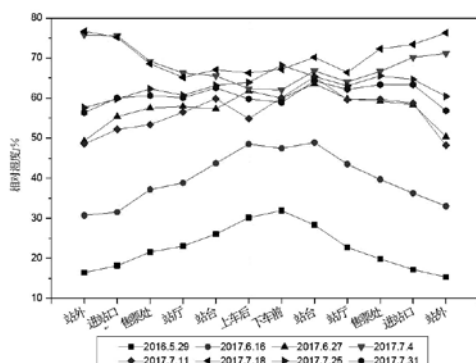


图2 乘客经历各区间的相对湿度变化情况

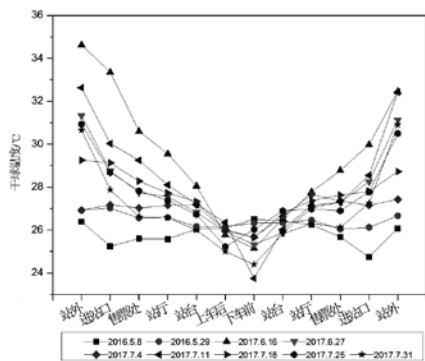


图4 乘客经历各区间的温度变化情况

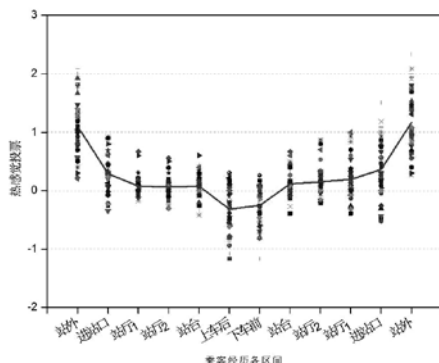


图6 热感觉随乘客所处区间的变化情况

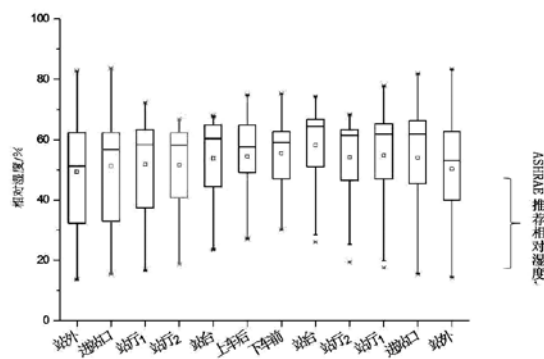


图3 乘客经历各区间相对湿度值的描述性统计

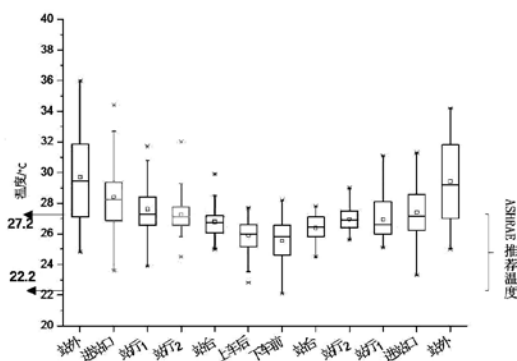


图5 乘客经历各区间干球温度值的描述性统计

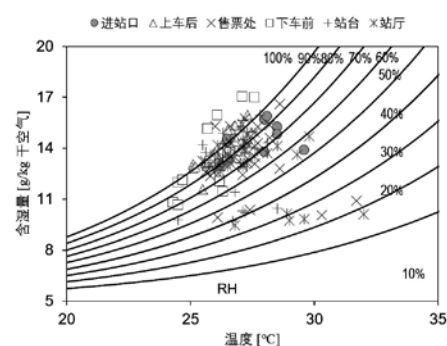


图7 80%及以上的受试者热舒适投票满意的热环境范围

温度基本在 $25^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ 范围之间,即可初步推断站厅、站台、车厢的热中性温度为舒适温度 $25^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ 范围内。此外,图中站厅、站台、车厢处的小部分 80% 及以上的受试者热舒适投票满意的温度在 $25^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ 之外,范围较广,初步推断动态过程中,当前所处环境热舒适情况与上一时刻所处环境相关。

整体来看乘客进站乘车到下车出站全过程中,地铁站内环境的热舒适性是可接受的,但在进站口、站厅及站台位置,热环境是微热状态,而在车厢内的乘车过程,热环境是稍冷状态,由此可见,理想的热环境并未在地铁中实现,地铁空调系统运行情况仍需进一步改进。

3 结论与展望

本文采用主观问卷调查与实际测试相结合的研究方法,调查研究北京市地铁的热环境情况。研究结果表明:北京市地铁热环境基本处于舒适状态,但在站台、站厅位置,环境稍热,乘客渴望更凉的环境;车厢内乘客热感受为舒适状态,但热感觉为稍冷,拥有一定的节能空间,建议升高空调设定温度。站厅、站台、车厢的热中性温度为舒适温度 $25^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ 。

研究过程中发现通过实测热环境参数计算所得的相对热指标值有部分出现与实际乘客问卷调查不一致的情况。本文以乘客问卷调查为重点对地铁热环境状况进行了分析,后续会继续分析相对热指标在北京地铁的适用性问题。

参考文献

- [1] 毛保华,姜帆,刘迁.城市轨道交通[M].北京:科学出版社,2001.
- [2] 张庆贺,朱合华,庄荣.地铁与轻轨[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [3] 王梦恕.我国城市交通的发展方向[J].铁道工程学报,2003,(1):43-47.
- [4] 梁广深.地铁设计中几个热点问题的探讨[J].城市轨道交通研究,2001,(2):1-5.
- [5] 刘晓光,王莹,赵杨.我国城市轨道交通建设的历程、问题与对策[J].中国国情国力,2010,(10):59-62.
- [6] Wyon D P.室内环境研究的方法论[J].张宇峰,译.暖通空调,2006,36(5):51-54.
- [7] ASHRAE, (2004). ASHRAE Standard 55-2004. Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of heating ventilation and air conditioning.
- [8] ASHRAE, (2002). ASHRAE Insights, American Society of heating ventilation and air conditioning guidelines for Railway HVAC. 17(4).
- [9] ASHRAE, (1989). ASHRAE standards 62-1989, Ventilation for acceptable indoor air quality, American Society of heating ventilation and air conditioning.

基于 BIM 技术的建筑能源管理平台在某办公建筑中的应用

邓月超¹, 李庆平¹, 王国建¹, 过 畅¹, 高 洋¹, 潘 嵩²

(1. 北京市住宅建筑设计研究院有限公司科研中心, 北京 100005; 2. 北京工业大学建工学院, 北京 100024)

[摘 要] 本文介绍了基于 BIM 技术的建筑能源管理平台在北京某办公建筑中的应用情况, 项目充分利用 BIM 技术的三维可视性和基于建筑全生命周期的持续性, 通过系统设置、智能空调、智能照明、数据监测、限电器、物业管理、运行记录等功能的实现, 对建筑进行运维管理。不同于传统建筑运行维护系统, 平台以可视化的友好用户界面帮助业主了解建筑运行状态, 实现建筑管理功能, 提高建筑管理效率。项目的实施可以为基于 BIM 技术的能源管理平台的后续应用提供参考。

[关键词] BIM 技术; 能源管理平台; 办公建筑; 能耗

0 引言

办公建筑在城市生活中所扮演的角色越来越重要, 其中的质和量也成为了衡量一座城市经济发展水平及城市化的标准之一; 随着生活水平的不断提高, 人们对建筑室内的舒适性、功能性的要求也越来越高, 使得办公建筑的能耗也随之攀升。在资源枯竭和环境恶化问题亟待解决的今天, 对我国办公建筑能耗进行科学管理, 寻找减少办公建筑能耗的有效途径, 防止我国办公建筑能耗迅猛增长, 具有重要意义。

随着建筑业信息技术的发展, 建筑信息模型 (Building Information Modeling, 简称 BIM) 技术的应用在国内勘察设计行业高速推进。然而 BIM 在我国的应用大多处于项目的设计阶段, 没有真正应用于建筑全生命周期范围。

因此, 本文以采用基于 BIM 技术的能源管理平台的某办公楼为例, 介绍该平台的具体应用。项目充分利用 BIM 技术的三维可视性和基于建筑全生命周期的持续性, 通过对建筑各系统群控关键监控数据的选取、采集、传输和存储, 对建筑的能源系统进行管理, 同时实现建筑内空间管理、物业管理、资产管理、室内环境精细化管理等功能, 并对建筑内的空调及照明系统进行智能控制。该平台为降低建筑能源系统在全生命周期内的运行能耗提供技术支持, 为 BIM 技术在我国的研究和实践提供参考, 以推动我国建筑节能工作的开展。通过该平台, 在满足节能的同时减轻了运行管理的人力、物力成本。

1 基于 BIM 技术的能源管理平台

基于 BIM 技术的能源管理平台采用现场控制总线技术和双模通信免布线技术 (PLC+RF), 可以深入到建筑物内各个区域, 实现对能源消耗全过程、全参数 (能耗、空调、照明状态等) 的在线监测; 系统软件对各种监测数据进行统计和分析, 并生成各类报表和违规报警; 系统还可以根据各监测点监测数据变化情况对能耗设备进行自动控制。系统硬件架构如图 1 所示。不同于传统建筑运维系统, 本平台以可视化的友好用户界面帮助业主了解建筑运行状态, 实现建筑管理功能, 提高建筑管理效率。

2 办公楼能源管理系统

2.1 办公楼概况

将基于 BIM 技术的建筑能源管理平台应用于北京地区某办公建筑 (图 2), 该楼建筑面积约 3000m², 共三层。采用 6 台 VRV 空调为建筑提供冷热源。办公楼的用电设备包括 VRV 空调、照明、插座等。另外, 根据用户对办

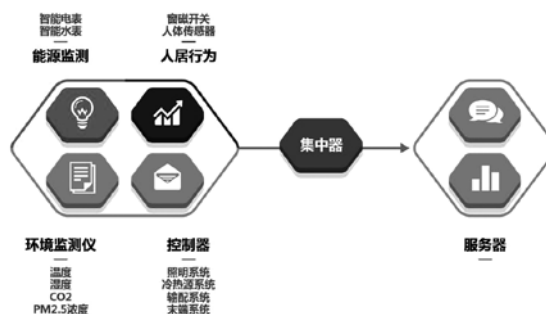


图 1 系统硬件架构

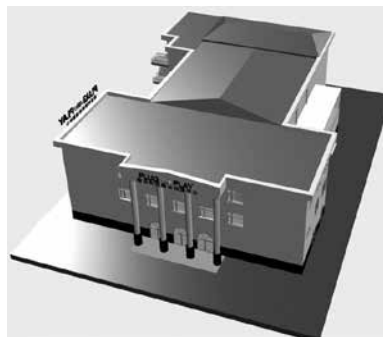


图 2 办公楼 BIM 模型

公空间空气质量的要求, 分别对楼内 6 个办公空间的温湿度、PM_{2.5} 浓度进行监测。

2.2 软件功能

平台的软件功能如图 3 所示, 包括系统设置、智能空调、智能照明、数据监测、限电器、物业管理、运行记录 7 个模块。软件具体功能详见图 3。

(1) 系统设置。系统设置模块可实现账号管理、角色管理、模块管理、楼层管理、租户管理等功能。为本平台的使用设置权限, 为物业人员实时了解平台、掌握本楼基本情况提供帮助。

(2) 智能空调。智能空调模块可实现实时监控功能, 即可对各个空调的远程状态实时监控, 可远程查看空调的状态、运行风速、模式、定时情况、设定温度和当前温度。还可进行本地控制及远程控制, 即采用智能空调控制器, 对空调进行定时设置、温度设置、限定运行温度调节范围、

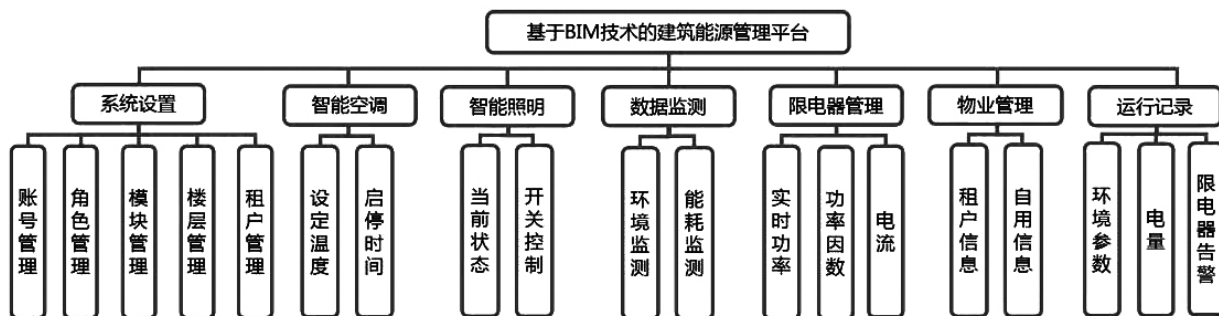


图3 软件功能模块

时间设置,实现自动调节、自动控制功能。并可通过网络对各个空调进行远程控制。例如,下班时,管理人员可以通过该功能关闭办公人员忘记关闭的空调,实现管理节能的目的。上班时,管理人员可以远程查看每个办公室是否按照规定把空调调节在适当的温度,若不符合国家有关规定,可远程对其进行调节,进而达到节能的目的。

(3) 智能照明。智能照明模块可实时显示每路照明系统的使用状态;并可根据管理要求,对每一路照明系统进行单独的供电和断电控制;控制照明系统的启停时间。

(4) 数据监测。数据监测模块可对建筑的用能情况进行分类分项计量,实时显示建筑内的能耗情况。同时可实时监测指定办公空间的温湿度、 $PM_{2.5}$ 浓度。方便管理人员及用户及时了解建筑内的能耗及室内空气质量。

(5) 限电器。限电器模块根据电器功率的大小和特点进行限制、告警。

(6) 物业管理。物业管理模块可统计各层各房间用户信息(名称、负责人、电话等),并进行物业管理(物业费结算、结算时间、操作等)。

(7) 运行记录。运行记录模块可存储并调取相应监测数据;利用监测系统的数据库,实现建筑能耗的在线统计、用能水平分析,室内空气品质评价,为建筑节能潜力分析和建筑节能改造提供可靠的数据依据。

通过三维模型可以精确显示各区域内的情况,其软件显示界面如图4、5所示。

3 运行情况分析

本文选取了该办公楼2017年10月16日至10月22日能源管理系统的监测数据。图6为该楼总用电量、空调用电、办公用电、及其它用电每小时的变化情况。可见,由于楼内能耗系统运行时间为10月中下旬,空调未开启,

故空调用电(室外机)可基本忽略,其它用电(应急照明、排烟风机)也很小。建筑的总用电量基本为办公用电(照明、插座等),一日内的用电量从上午9:00急剧增加,20:00后开始下降。一日内的峰值耗电量基本在10:00~20:00之间。另外,明显可见周末的用电量比工作日用电量降低很多,即符合办公建筑的特点。一周内的日平均用电量为 $375.6kW \cdot h/d$,工作日日平均用电量为 $435.6kW \cdot h/d$,周末日平均用电量为 $225.6kW \cdot h/d$ 。

图7为办公楼一层办公室温湿度、 $PM_{2.5}$ 浓度每小时变化情况,可见,本周内该办公室的温度基本处于 $24.1 \sim 25.3^{\circ}C$ 之间,湿度处于 $26.4 \sim 41.3\%$ 之间,空气相对较干燥。 $PM_{2.5}$ 浓度处于 $14 \sim 80\mu g/m^3$ 之间,日平均浓度 $46\mu g/m^3$,小于相关标准规定的 $75\mu g/m^3$,个别时间段室内 $PM_{2.5}$ 浓度超标,但持续时间不长,这是由于当时室外浓度超标,开窗所致。

可见,通过该平台,宏观上可以得到整个建筑的用能情况,能耗对比情况;微观上可以具体到各个耗能系统的用能情况,并且能耗数据与三维模型一一对应,清晰、直观展示建筑所有用能设备的能耗情况。通过三维模型可以精确显示各区域室内环境参数,通过房间的运行参数,就可以知道建筑内各个房间的舒适度情况,明确建筑的节能空间。

4 结论

基于BIM技术的三维数字化能源管理平台,包括能耗监控、智能空调、智能照明、能耗统计、能耗分析等功能,在运维阶段,打造绿色节能建筑。不同于传统建筑运行维护系统,平台以可视化的友好用户界面帮助业主了解建筑运行状态,实现建筑管理功能,提高建筑管理效率。

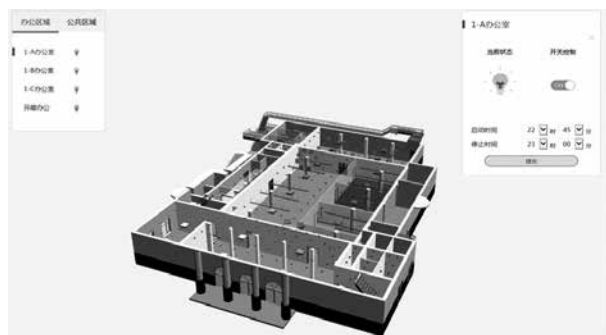


图4 智能照明软件界面图

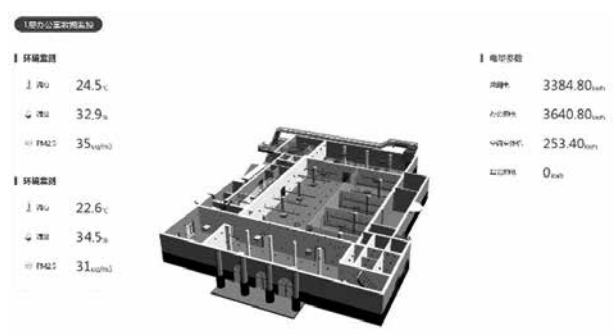


图5 数据监测软件界面

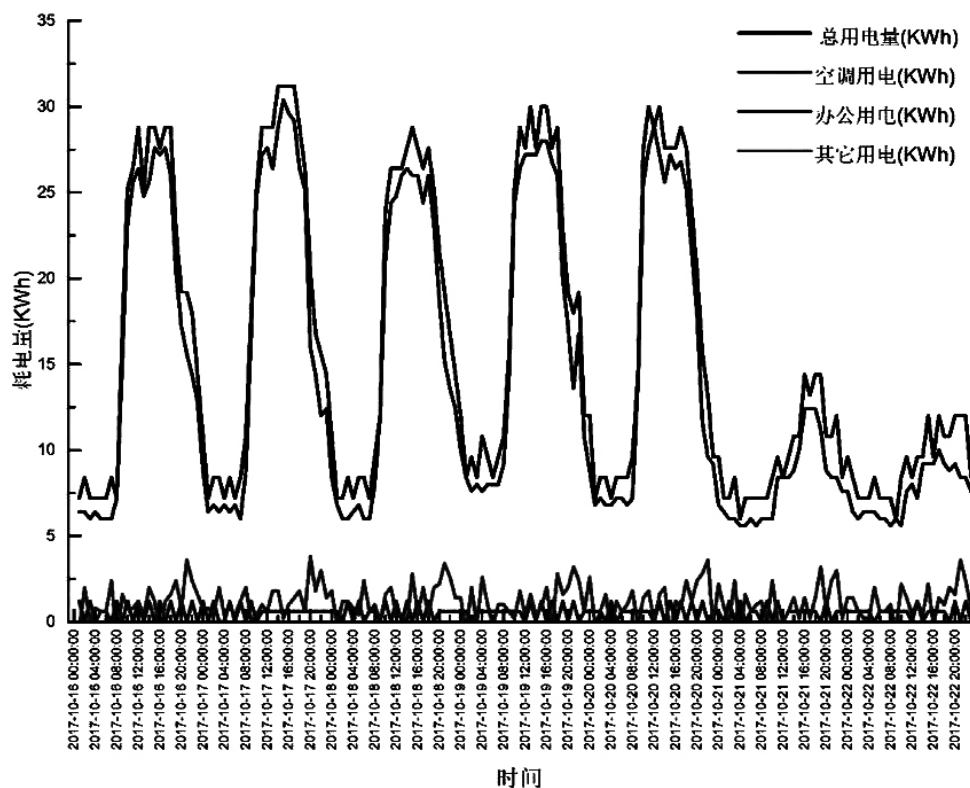
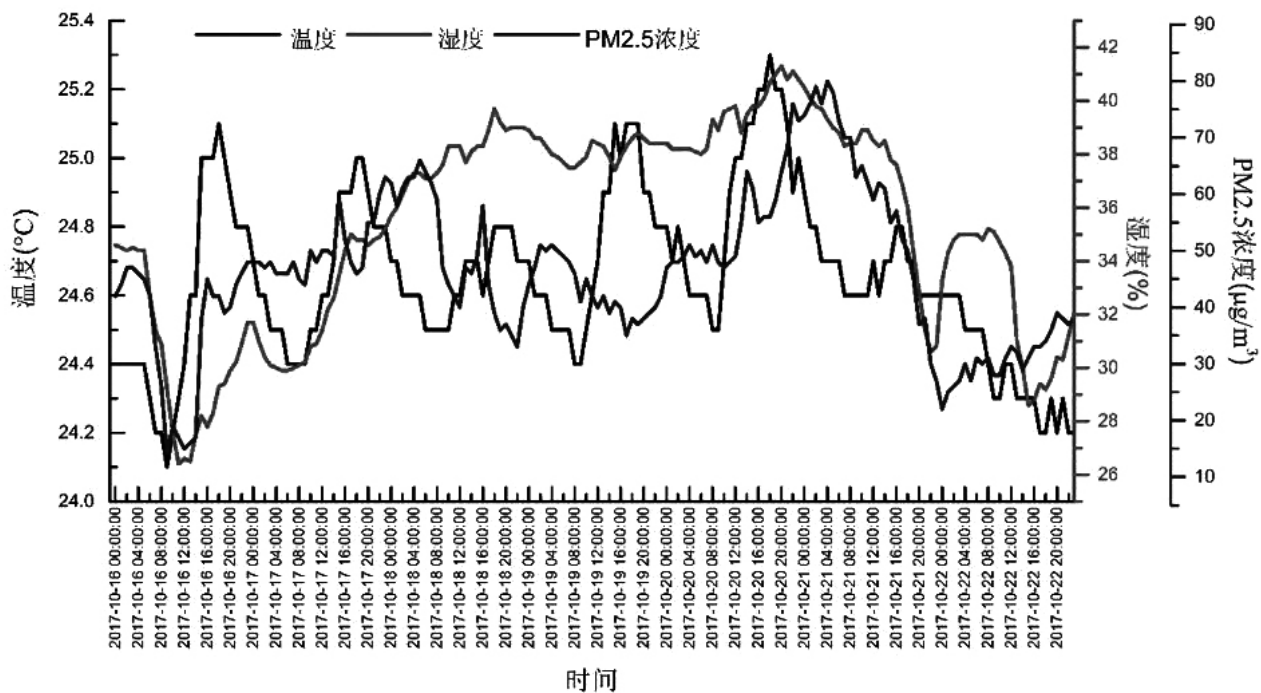


图6 每小时电耗分布

图7 该楼一层办公室温湿度、PM_{2.5}浓度变化情况

基于 BP 神经网络的办公建筑人员开窗行为预测方法

熊樱子¹, 韩一叶¹, 潘 嵩¹, 王国健², 夏 亮³, 魏 绅⁴

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100024; 2. 北京住宅建筑设计研究院科研中心, 北京 100005; 3. 宁波诺丁汉大学理工学院, 浙江宁波 315100; 4. 伦敦大学巴特利特建筑与工程管理学院, 英国伦敦)

〔摘 要〕自然通风是目前降低建筑能耗的主要方法, 为了更好地实现自然通风系统的设计与控制, 建立准确的开窗行为模型至关重要。本研究试图利用机器学习技术, 即人工神经网络 (ANN) 来实现这一模型, 并与流行的 logistic 回归方法进行比较。比较结果表明, 人工神经网络对办公建筑人员开窗率的预测精度在 70% 左右, 明显优于逻辑回归的建模方法, 具有较高的精度和可靠性。

〔关键词〕人员开窗行为; BP 神经网络; 自然通风; 办公建筑

0 引言

随着快速城镇化带动建筑业持续发展, 我国建筑业规模不断扩大, 建筑节能是建设资源节约型社会的重要组成部分, 建筑节能工作面临着巨大的压力与挑战。多项研究表明, 人行为是造成建筑能耗不确定性的关键因素^[1,2,17,18], 建筑中的人员行为对建筑能耗的显著影响也已经得到了学术界的普遍认可^[3,4]。人员的开窗行为是人行为中影响因素较多、较为复杂的一类行为。人员的开窗行为既可以调节室内热湿状况和空气品质状况, 又能在一定程度上影响建筑能耗^[5-7]。

因此相关研究也最多。为了更好地实现自然通风系统的设计与控制, 人员开关窗行为已经在国外很多国家得到了广泛的重视, 尤其是在欧洲的很多国家, 如英国, 丹麦, 德国等等。很多研究人员也已经对人员开窗行为做了详细地研究并基于实测数据开发了相应的人员开关窗行为的预测模型^[8-14]。目前经典的人行为 (包括开关窗行为) 预测模型主要基于 logistic 回归法和马尔科夫法^[15]。前者的方法将人行为发生的概率与相对应的影响因素建立了线性关系。用于体现人行为发生的随机性^[16]。后者的方法同样也是基于 Logistic 回归法进行人行为建模。与前者不同的是马尔科夫链需要考虑前一个窗户状态对当前窗户状态的影响。换句话说就是如果之前窗户已经被打开, 当前状态下窗户保持打开的状态和需要从前关闭状态到现在打开状态的决策过程和因素是不一样的。因此, 利用马尔科夫链建模时, 之前窗户状态也被引入到模型之中作为影响参数之一。

但这两种建模方法在开窗行为建模和应用中仍存在较多问题:

(1) 逻辑回归模型属于典型的统计学模型, 目标变量中每个类别所对应的样本数量要足够充分才能支持建模, 否则会出现较大偏差。但在实际过程中, 人行为的实测成本较高, 数据较难大量获取。急需寻找也适用于小样本量的高精度的开窗行为建模方法。

(2) 逻辑回归和马尔科夫建模都是数据驱动型模型, 与实测样本密切相关, 模型的通用性较差。那么开发出能够适合不同的应用情况, 比如在不同的地区甚至不同的国家都可使用的开窗模型就变得尤为重要和有意义。

神经网络原理是利用网络的学习和记忆功能, 让神经



图 1 试验用办公楼 (左) 和典型办公室 (右)

网络学习各个类别中的样本特征, 在遇到待识别样本时神经网络利用记住的特征信息对比输入向量, 从而确定待测样本所属类别^[19]。BP 神经网络是目前最流行发展较成熟的一种神经网络模型, 它是一种多层前馈神经网络, 该网络的主要特点是信号前向传递, 误差反向传递。BP 神经网络的分类, 具有非线性映射能力强、并行分布处理、自学习和自适应能力强和数据融合能力强等优点^[20]。

使用 BP 神经网络分类的方法来预测开窗行为, 既可以利用黑箱模型的优势来规避开窗行为中难以量化和加入建模的一些影响因素, 如生理、心理等因素。又可以利用 BP 神经网络的自学习、自适应和泛化能力来寻求更具通用性的开窗行为建模方法。所以, 在人行为研究中引入机器学习的方法, 探究基于 BP 神经网络的办公建筑人员开窗行为的预测方法具有十分创新的研究意义。

1 实测

1.1 建筑概况

本实验的实验地点位于北京某高校的一座办公楼里。办公楼主要由钢筋和砖块砌成。建筑周围没有高大建筑物和树木, 与欧洲被测建筑相似。该建筑共两层, 如图 1 (左), 一层是一些实验室, 二层是 9 间面积和布局完全相同的办公室, 如图 1 (右)。每间面积均为 10m²。每间办公室可以同时容纳两个人工作。但在测试期间, 所有被监测的办公室都只有一个办公人员, 并长期在该办公室办公。每间办公室都有一个朝南的滑动式玻璃窗。冬季, 该建筑主要是水循环式散热器 / 对流散热器以及天然气锅炉作为主要的供热方式, 有时会采用市政热水作为辅助供暖; 夏季, 每间办公室分别由一台分体式空调供冷。为了节约建筑能耗, 在过渡季节, 所有办公室采用自然通风方式, 并由办公人员通过开关窗自行控制。根据测试期间对办公人员进

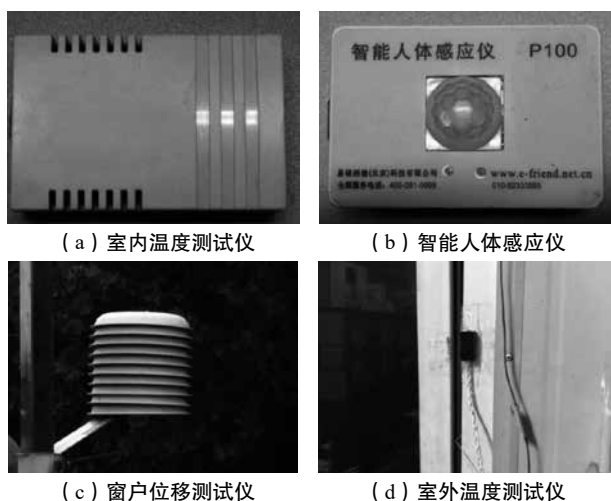


图2 测量设备

行的问卷调查,可以确定建筑周围噪声很少,不会对人员开关窗行为造成影响。6个被测房间中的办公人员都无吸烟史。

1.2 参数测量

该研究的测试时间包括了三个北京的过渡季节,分别是2014年3月16号到4月30号,2014年10月8号到11月16号和2015年3月16号到4月30号。测试期间,6间位于二层的办公室被安装了先进的测试设备,包括智能人体感应仪(用于记录人员在室情况;记录间隔:1min;感应范围:5m),窗户开关测试仪(记录间隔:10min;感应距离:3cm)和室内温度测试仪(记录间隔:

10min;精度: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$),如图2所示。另外,一个室外温度测试仪(记录间隔:10min;精度: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)被安装在测试楼楼顶,用于记录室外温度。

2 开窗影响因素的分析与建模参数的选取

在统计分析开窗行为影响因素时,采用控制变量的方法,分别对单个影响因素与开窗率之间的变化进行统计分析,以探寻各影响因素与人员开窗概率之间的规律。

从图3和4可以看出,过渡季办公室人员的开窗率随室内外温度的升高开窗率也大体上是升高的。

从图5和6可以看出,在室外风速小于3m/s时,室内人员的开窗率变化幅度很小,开窗率总体在40%上下波动。在室外风速大于3m/s时,将对室内人员造成明显的吹风感,室内人员的开窗率明显随着室外风速的增大而减小。随着日照小时数的增加,开窗率逐渐减小,当日照小时数超过10h时,开窗率变化幅度很小。

从图7和8可以看出,随着室外湿度的升高,室内人员开窗率也会有所增加,但当室外湿度在继续增加时,开窗率会减小。对于这种现象,考虑当室外湿度在60%~70%范围内人体感觉是比较舒适的,过高或过低都会引起人体的不适。

随着 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的升高,室内人员的开窗率先是小范围波动,再大幅度下降。从图中可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在该限值附近的开窗率变化较小,考虑可能是因为此时的室外污染状况凭肉眼不易察觉;当室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上时,通过人眼观察可以大致评判室外的空气污染情况,在健康意识的驱动下多数人会选择通过关窗来隔断污染源,从图中也可以明显的看到开窗率有所下降,从图中也可以看出,当室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,很少有人开窗。

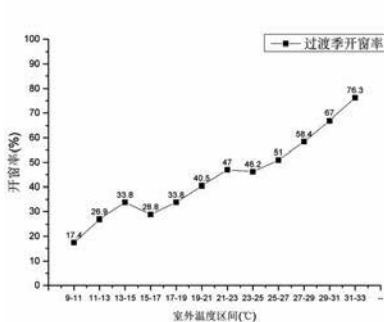


图3 开窗率随室外温度的变化

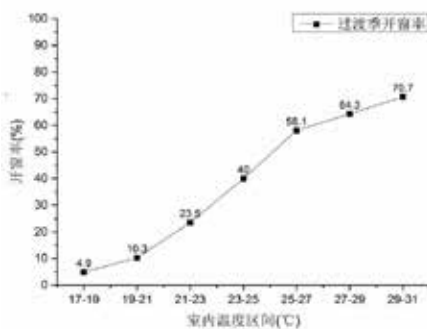


图4 开窗率随室内温度的变化

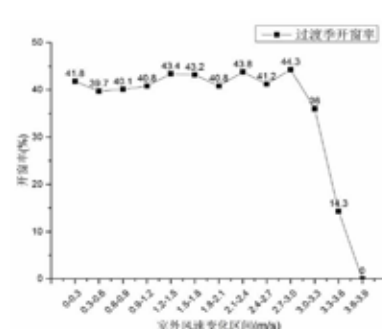


图5 开窗率随室外风速的变化

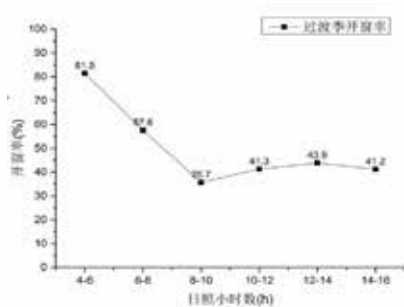


图6 开窗率随日照小时数的变化

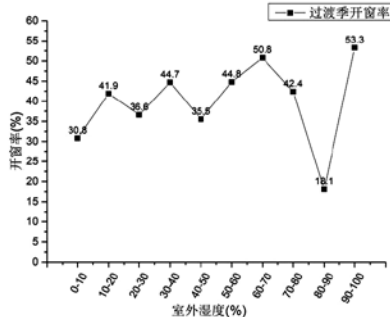
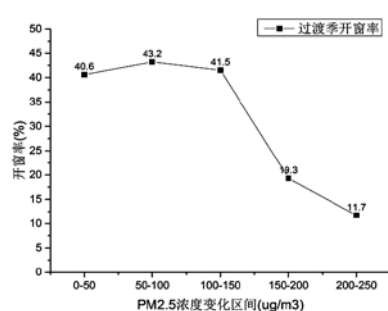


图7 开窗率随室外湿度的变化

图8 开窗率随室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化

所以，在 BP 建模中，我们考虑以上 6 个对办公建筑人员开窗行为有明显影响的环境参数，具体为室内温度、室外温度、室外风速、日照小时数、室外湿度、室外 PM_{2.5} 浓度。

3 基于 BP 神经网络的开窗行为模型

3.1 建模思路与实现

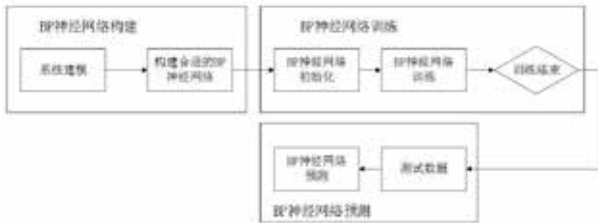


图 9 BP 神经网络的构建思路

(1) 网络设计：根据输入输出数据特点确定 BP 网络的结构，由实测数据中选择影响因素的维数为 6，和输出结果（窗户状态开/关）的 2 类。可确定 BP 神经网络的结构为 6-X-2。即输入层有 6 个节点，隐含层有 X 个节点，输出层有 2 个节点。其中 X 隐含层节点数由经验公式、数据量、识别率和误差收敛情况进行调节。

本研究采用动量反传和动态自适应学习率的梯度下降 bp 算法 (traingdx)，学习速率为 0.1，激活函数为 softmax，误差限制为 0.1。

(2) 评价指标：本研究以分类准确率、与预测数据拟合度两个方面来评价基于 BP 算法的开窗行为建模。

3.2 实验仿真与建模结果

本研究的实验仿真在 matlab R2016b 程序上实现。研究共进行了 8 次实验，样本数据量分别为从总样本中随机选取，训练组与预测组样本数量比例为 4:1，预测组用于检测所训练模型的性能，对训练过程无影响。

所选取的各组实验数据情况与预测结果如表 1 所示：

表 1 各实验总数数据量

实验编号	总数据量 (组)	训练用数据量 (组/天数)	预测用数据量 (组)	准确率	数据拟合度
1	5400	4320/30	1080	80.869%	0.77678
2	4500	3600/25	900	79.088%	0.78074
3	3600	2880/20	720	81.667%	0.78074
4	2700	2160/15	540	78.293%	0.77875
5	1800	1440/10	360	68.611%	0.78425
6	900	720/5	180	61.111%	0.77985
7	360	288/2	72	70.833%	0.77557
8	180	144/1	36	80.000%	0.77527

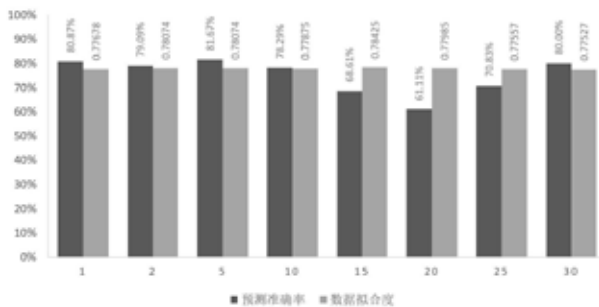


图 10 BP 预测结果

由图 10 可以看出，对于本研究关于窗户状态预测的 8 次实验，BP 模型对窗户状态预测的准确率基本维持在 70% 以上，多组实验预测准确率达到了 80%。这说明使用 BP 神经网络分类的方法建立开窗行为的模型是具有适用性的，并且预测准确率可以维持在较高的水平。

4 模型的比较与验证

为了说明 BP 模型的对于窗户状态预测的准确率情况，使用相同的数据建立逻辑回归模型进行对比分析，各实验模型及其预测准确率如表 2 所示，BP 模型与逻辑回归模型的对比如表 3 和图 11 所示。

表 2 逻辑回归模型各试验结果统计

实验编号	训练数据	模型公式	预测准确率
1	30	$\text{logitP} = -8.973 + 0.35\text{Tin} + 0.015\text{Tout} + 0.514\text{V} - 0.001\text{PM} + 0.018\Phi_{\text{out}} - 0.118\text{H}$	68.2%
2	25	$\text{logitP} = -9.347 + 0.361\text{Tin} + 0.016\text{Tout} + 0.5\text{V} - 0.002\text{PM} + 0.018\Phi_{\text{out}} - 0.114\text{H}$	67.8%
3	20	$\text{logitP} = -9.347 + 0.361\text{Tin} + 0.017\text{Tout} + 0.5\text{V} - 0.001\text{PM} + 0.018\Phi_{\text{out}} - 0.114\text{H}$	67.8%
4	15	$\text{logitP} = -9.316 + 0.383\text{Tin} + 0.015\text{Tout} + 0.451\text{V} - 0.002\text{PM} + 0.015\Phi_{\text{out}} - 0.128\text{H}$	68.1%
5	10	$\text{logitP} = -8.903 + 0.047\text{Tin} + 0.32\text{Tout} - 0.002\text{PM} + 0.311\text{V} - 0.009\Phi_{\text{out}} - 0.054\text{H}$	68.2%
6	5	$\text{logitP} = -7.623 + 0.274\text{Tin} + 0.056\text{Tout} + 0.009\Phi_{\text{out}} + 0.208\text{V} - 0.002\text{PM} - 0.082\text{H}$	69.9%
7	2	$\text{logitP} = -8.357 + 0.375\text{Tin} + 0.037\text{Tout} + 0.005\text{V} - 0.008\text{PM} + 0.013\Phi_{\text{out}} - 0.156\text{H}$	63.2%
8	1	$\text{logitP} = -9.562 + 0.442\text{Tin} + 0.031\text{Tout} + 0.2\text{V} - 0.21\text{H} - 0.006\text{PM} + 0.009\Phi_{\text{out}}$	72.7%

其中，P 为开窗概率；Tin 为室内温度 (°C)；Tout 为室外温度 (°C)；Φ_{out} 为室外湿度 (%)；V 为室外风速 (m/s)；PM 为室外 PM_{2.5} 浓度 (μg/m³)；H 为日照小时数 (h)。

表 3 两模型试验数据量及结果统计

实验编号	训练数据量 (天)	逻辑回归模型预测准确率 (L)	BP 模型预测准确率 (G)	两模型预测差值 (G-L)
1	30	68.2%	80.869%	12.7%
2	25	67.8%	79.088%	11.3%
3	20	67.8%	81.667%	13.9%
4	15	68.1%	78.293%	10.2%
5	10	68.2%	68.611%	0.41%
6	5	69.9%	61.111%	-8.8%
7	2	63.2%	70.833%	7.6%
8	1	72.7%	80.000%	7.3%

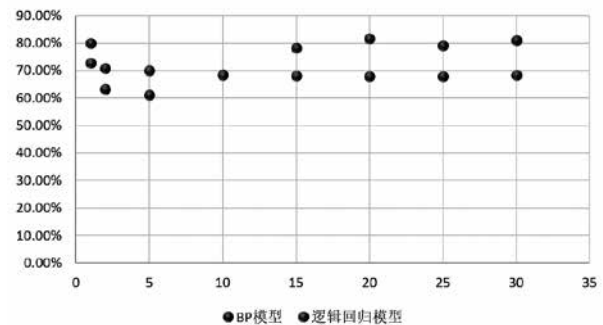


图 11 两模型预测结果对比

由图 11 可以看出,对于本研究关于窗户状态预测的 8 次实验, BP 模型对窗户状态预测的准确率基本维持在 70% 以上。逻辑回归建模对窗户状态预测的准确率基本维持在 60% 左右。相比于逻辑回归建模的准确率,对于本研究中的 8 次实验, BP 模型用于窗户状态预测的准确率明显优于逻辑回归的准确率,提高的准确率基本也在 10% 左右。因此,总体来说,将 BP 模型用于预测窗户状态具有良好的适用性,并且相比于逻辑回归模型也表现出绝对的优越性。

5 结论

将 BP 模型用于预测窗户状态具有良好的适用性,并且预测准确率可以维持在较高的水平,相比于逻辑回归模型也表现出绝对的优越性,为今后人行为的建模方法提供了新思路。

参考文献

- [1] Bahaj AS, James PAB. Urban energy generation: the added value of photovoltaics in social housing[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007; 11: 2121–36.
- [2] Andersen R. The influence of occupants' behaviour on energy consumption investigated in 290 identical dwellings and in 35 apartments[J]. In: Proceedings of healthy buildings 2012, 8–12 July 2012, Brisbane, Australia 2012.
- [3] H.B. Gunay, W. O'Brien, I. Beausoleil-Morrison, A critical review of observation studies, modeling, and simulation of adaptive occupant behaviors in offices, Building and Environment, 70 (0) (2013) 31–47.
- [4] D. Yan, T. Hong, Proposal: New Annex Proposal on occupant behavior, in, International Energy Agency, 2013.
- [5] V. Fabi, R.V. Andersen, S.P. Corgnati, Influence of occupant's heating set-point preferences on indoor environmental quality and heating demand in residential buildings, HVAC&R Research, 19 (5) (2013) 635–645.
- [6] R. Haas, H. Auer, P. Biermayr, The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating, Energy and Buildings, 27 (2) (1998) 195–205.
- [7] S.M. Porritt, P.C. Cropper, L. Shao, C.I. Goodier, Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves, Energy and Buildings, 55 (0) (2012) 16–27.
- [8] Haldi, F. and D. Robinson, Interactions with window openings by office occupants. Building and Environment, 2009. 44(12): p. 2378–2395.
- [9] Herkel, S., U. Knapp, and J. Pfafferott, Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. Building and Environment, 2008. 43(4)(4): p. 588–600.
- [10] Rijal, H.B., et al., Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. Energy and Buildings, 2007. 39(7)(7): p. 823–836.
- [11] Wei, S., R. Buswell, and D. Loveday, Factors affecting 'end-of-day' window position in a non-air-conditioned office building. Energy and Buildings, 2013. 62(0): p. 87–96.
- [12] Yun, G.Y. and K. Steemers, Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer. Building and Environment, 2008. 43(9)(9): p. 1471–1482.
- [13] Yun, G.Y. and K. Steemers, Night-time naturally ventilated offices: Statistical simulations of window-use patterns from field monitoring. Solar Energy, 2010. 84(7)(7): p. 1216–1231.
- [14] Zhang, Y. and P. Barrett, Factors influencing the occupants' window opening behaviour in a naturally ventilated office building. Building and Environment, 2012. 50(0): p. 125–134.
- [15] Hosmer, D.W. and S. Lemeshow, Applied logistic regression (2nd Edition). Second Edition ed. 2000: New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [16] Nicol, F.J. and M.A. Humphreys, A stochastic approach to thermal comfort - Occupant behaviour and energy use in buildings. ASHRAE Transactions, 2004. 110 (Part I): p. 554–568.
- [17] 李楠, 夏热冬冷地区人员行为对住宅建筑能耗的影响研究 [D], 重庆大学博士学位论文, 2011 年.
- [18] 简毅文, 李清瑞, 白贞, 孔祥栋, 住宅夏季空调行为对空调能耗的影响研究 [J], 建筑科学, 第 27 卷第 12 期, 2012 年 12 月, 1002-8528(2011)12-0016-04.
- [19] 王宏涛, 孙剑伟, 基于 BP 神经网络和 SVM 的分类方法研究 [J], 软件, 第 36 卷第 11 期, 2015 年, 10.3969/j.issn.1003-6970.2015.11.024.
- [20] 李文婷, 基于 BP 神经网络和 SVM 的信息分类方法的研究 [D], 南京师范大学硕士学位论文, 2011 年.

基于高斯分布的开窗行为建模方法研究

韩一叶¹, 熊樱子¹, 潘 嵩¹, 夏 亮², 杜博宇², 燕 达³

(1. 北京工业大学, 北京 100024; 2. 宁波诺丁汉大学, 浙江宁波 315100; 3. 清华大学, 北京 100084)

[摘 要] 人员作为建筑系统的主动参与者, 当感觉不舒适时, 可以通过开关窗提升室内空气品质, 满足人员对室内热湿环境条件的要求。通过研究室内人员的开窗行为, 建立描述有关室内人员的开窗行为模型, 对建筑节能、室内空气质量以及热舒适等相关研究都有一定意义。然而在处理这类不确定或者说随机性问题方面, 现有模型在一定程度上都存在一定的局限性。本文在过渡季对北京某高校进行的为期两月实测的基础上, 提出一种基于高斯分布的室内人员开窗行为建模方法。相比于传统的逻辑回归模型, 该模型在窗户状态预测方面具有一定的适用性。该建模方法也为后续的人行为建模研究提供了一条新思路, 将新的开窗行为模型不论是用于能耗模拟软件还是与自动控制结合, 来实现节能和舒适也都是十分有意义的。

[关键词] 开窗行为模型; 高斯分布; 逻辑回归; 过渡季实测

0 引言

计算机技术的不断发展使得建筑能耗模拟这样一个技术成为可能, 建筑能耗模拟也逐渐成为人们优化建筑设计方案和分析建筑经济性程度的一个重要途径。其中在收集模拟参数、建立建筑物理模型和设置内扰参数这三大方面均涉及有关室内人员方面参数的设置。有关室内人员建筑用能的实际情况是当人们感觉不舒适时, 会通过开关窗等行为来调节室内温湿度等参数, 使周围环境满足自身热舒适的要求。因此, 若没有建立正确的符合实际的人行为描述, 不可避免的会对建筑能耗模拟结果有一定影响, 甚至会导致模拟结果与实际情况差异较大^[1,2-4]。

从以往有关开窗行为的研究文献中可以看出, 早期研究者多采用阈值模型去预测适应性人行为^[5,6-7], 这类模型通常很简单也容易被集成到能耗模拟软件中。这类从某一环境参数的大小判断室内人员是否一定会开窗的模型的预测准确率也通常很低。之后又有学者提出采用线性模型去预测适应性人行为^[8,9-11], 但是由于线性模型不能很好的处理当自变量不是正态分布的情况, 对于自变量值处于极端情况时, 该模型的拟合优度以及预测准确率都很低。鉴于以上两种模型的不足, 后又有研究者提出广义线性模型如逻辑回归模型, 相比于前两种模型, 该模型能较好的拟合室内人员的适应性行为, 是目前开窗行为研究中多采用的一种模型, 但该模型的预测准确率通常在 70% 左右, 和实际行为情况仍有较大差别。

针对目前国内有关室内人员开关窗行为模型研究较少的现状以及传统人员开窗行为模型的局限性, 本文提出了一种基于高斯分布的人员开窗行为预测模型, 相比于传统的逻辑回归模型, 该模型在窗户状态预测方面具有一定的适用性。总的来说, 该建模方法也为后续的人行为建模研究提供了一条新思路, 将新的开窗行为模型不论是用于能耗模拟软件还是与自动控制结合, 来实现节能和舒适也都是十分有意义的。

1 基于高斯分布的开窗行为建模

1.1 基本原理

由于本研究中室内人员开关窗行为的影响因素可能不止一个, 考虑采用多元高斯分布模型, 其表示为一个向量叠加的高斯分布模型, 该模型确定的开窗率计算如公式 (1) 所示:

$$P(X)=\sum_{i=1}^I m_i F(x_i|\mu_i, \sigma_i^2) \quad (1)$$

其中, $P(X)$ 开窗概率; X 是 t 个相关影响因素 ($X_i, i=1\sim t$) 组成的向量, 高斯分布的累积分布函数 $F(x_i|\mu_i, \sigma_i)$ 为一混合组件, 其均值为 μ_i , 方差为 σ_i^2 , 其计算如公式 (2) 所示:

$$F(x_i|\mu_i, \sigma_i^2)=\frac{1}{\sigma_i\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^x \exp(-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}) \quad (2)$$

m_i 为混合系数 (权重)。考虑到归一性要求, 必存在 $P(X)=(x_i|\mu_i, \sigma_i)=1$, 可得公式 (3) 如下:

$$\sum_{i=1}^I m_i=1 \quad (3)$$

为确定权重 m_i , 我们需要确定开窗概率 $P(X)$, $P(X)$ 与窗户状态相关, 可以确定:

$$P(X) < 0.5 \Leftrightarrow \text{窗户状态为关或 } 0 \quad (4)$$

$$P(X) \geq 0.5 \Leftrightarrow \text{窗户状态为开或 } 1$$

由此得到以下方程和不等式组合:

$$\sum_{i=1}^I m_i F(x_i, \mu_i, \sigma_i) < 0.5, \text{ 即 } i=1\sim k \text{ 窗户状态为 } 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=k+1}^I m_i F(x_i, \mu_i, \sigma_i) < 0.5, \text{ , 即 } i=k+1\sim t \text{ 窗户状态为 } 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I m_i=1 \quad (7)$$

其中每一个 $F(x_i|\mu_i, \sigma_i)$ 可以通过实测值确定, 因此通过式 (4)~(7) 可求出 m_i 的范围。从而对于任何需预测的状态变量 X 我们都可以计算其开窗概率 $P(X)$, 并依据公式 (1)~(3) 得知窗户状态。

1.2 建模步骤

基于高斯分布的开窗行为模型建立主要包括以下步骤:

(1) 对于用于试验模型训练的数据, 采用统计分析和逐步回归分析确定影响室内人员开窗行为的因素;

(2) 对于确定的对窗户状态有显著影响的每个环境参数变量, 在一定的区间间隔内分布统计出其对应的开窗率, 取各区间中间值对应于相应的开窗率, 得到一系列散点;

(3) 采用最小二乘法对统计出的各变量散点数据进行拟合, 找出每个变量对应的均值和方差;

本研究所用的最小二乘法算法为:

```
function F = myfun(x,x3data)
%F = x(1)*exp(x(2)*xdata);
```

$F = \text{cdf}(\text{'normal'}, x3\text{data}, x(1), x(2));$

(4) 输入训练数据, 使用高斯分布的概率密度函数以及 `linprog` 函数对模型加以训练;

(5) 读入预测数据, 使用训练后的模型进行预测, 输出预测结果。

3 模型分类训练及结果

3.1 输入参数的确定

本研究共进行了 8 次实验, 对于该过渡季为期两月的监测, 剔除人员不在室的情况后共有 5944 组有效数据, 对于本研究进行的 8 次实验, 样本数据量分别为从该 5944 组数据中随机选取的结果。在进行训练前分别将每次实验的样本量分为两组:

(1) 训练组 80% 样本用于训练模型;

(2) 预测组 20% 样本用于检测所训练模型的性能, 对训练过程无影响。

另外, 对于本研究的 8 次实验, 采用前述的方法确定的各实验模型的输入参数为室内温度、室外温度、室外湿度、日照小时数, 输出参数为窗户状态。

3.2 模型预测结果

为了说明高斯分布模型的对于窗户状态预测的准确率情况, 考虑采用逻辑回归模型进行相应的训练, 其中逻辑回归模型与对应编号的高斯分布模型所采用的训练数据和预测数据相同, 预测结果对比如表 1 及图 1 所示。

表 1 两模型试验数据量及结果统计

实验编号	逻辑回归模型 预测准确率 (L)	高斯模型预测 准确率 (G)	两模型预测 差值 (L - G)
1	61.4%	58.3%	3.1%
2	65.1%	61.7%	3.4%
3	65.9%	67.4%	-1.5%
4	74.4%	68.0%	6.4%
5	71%	67.5%	3.5%
6	70.1%	66.5%	3.6%
7	56.8%	63.2%	-6.4%
8	42.9%	45.9%	-3.0%

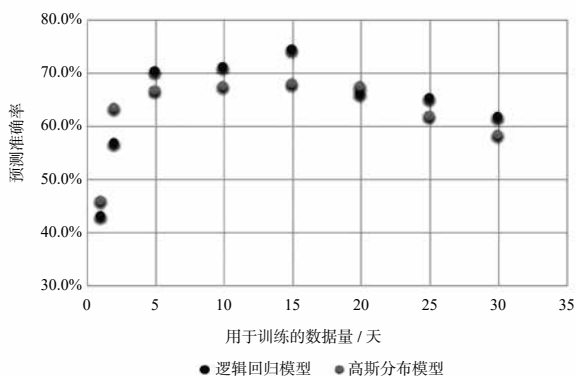


图 1 两模型预测结果对比

由图 1 可以看出, 对于本研究关于窗户状态预测的 8 次实验, 高斯分布模型对窗户状态预测的准确率随训练样本量变化的规律性与采用逻辑回归模型的大体相同。且从表中还可以看出, 对于本研究中的 8 次实验, 高斯分布模型用于窗户状态预测的准确率与逻辑回归模型的预测结果相差最大为 6.4%, 基本在 3% 左右, 也会有高斯分布模型

的预测准确率高于逻辑回归模型预测准确率的情况, 总体来说, 将高斯分布模型用于窗户状态具有一定的适用性。

4 结论及展望

本文提出一种基于高斯分布的室内人员开窗行为建模方法, 且利用针对开窗行为的现场实测数据进行了 8 次实验, 本研究提出的高斯分布模型用于窗户状态预测的准确率与逻辑回归模型的预测结果相差在 1.5%~6.4%, 结果表明该模型对预测室内人员开窗行为有一定的适用性。

基于高斯分布的人员开窗行为建模在人为研究领域是一种相对较新的理论方法, 但模型还有待进一步深入研究。如可以对高斯分布模型建模机理进行深入分析, 优化该模型使其能更好的处理开窗这类非线性 (二分类) 问题, 以及对开窗行为发生机理进行深入分析, 考虑历史环境参数对当前开窗行为的影响和考虑对输入变量进行适当地傅里叶变换以使模型预测结果更能反映室内人员开关窗的真实情况。

针对目前高斯模型存在的不足之处, 在接下来的时间里还会继续深入研究, 发掘其中的内在机理, 以使模型预测结果更贴合实际。

参考文献

- [1] 刘煜. 绿色建筑工具的分类及系统开发 [J]. 建筑学报, 2006,07:36-40.
- [2] 苏华, 王靖. 建筑能耗的计算机模拟技术 [J]. 计算机应用, 2003,23(12): 411-413.
- [3] 聂梅生, 张雪舟, 赵凤山. 建筑节能优化设计案例分析 [J]. 建筑学报, 2005(10)20-22.
- [4] DB.Crawley, JW.Hand.Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs [J], Building and Environment, 2008,43(4): 661-673.
- [5] Newsham G. Manual control of window blinds and electric lighting: implications for comfort and energy consumption. Indoor and Built Environment 1994;3:135-44.
- [6] Goller M. Integration of daylighting technologies in demand side management programmes: estimation of the energetical and peak load potential.Fraunhofer-IRB-Verlag; 1998. Final report; SAVE project no. XVII/4.1031/S/94-138.
- [7] Lee ES, Selkowitz SE. The design and evaluation of integrated envelope and lighting control strategies for commercial buildings. CA (United States):Lawrence Berkeley Lab.; 1994.
- [8] Warren P, Parkins L. Window-opening behaviour in office buildings. Building Services Engineering Research and Technology 1984;5:89-101.
- [9] Inkarojrit V, Paliaga G. Indoor climatic influences on the operation of windows in a naturally ventilated building. In: 21th PLEA conference, Eindhoven, The Netherlands 2004.
- [10] Inoue T, Kawase T, Ibamoto T, Takakusa S, Matsuo Y. The development of an optimal control system for window shading devices based on investigations in office buildings. ASHRAE Transactions 1988;94:1034-49.
- [11] Foster M, Oreszczyn T. Occupant control of passive systems: the use of venetian blinds. Building and Environment 2001;36:149-55.

光伏窗天然采光与能量性能研究

高 敏¹, 程远达¹, 彭晋卿², 贾 捷¹, 韩 俊³

(1. 太原理工大学, 陕西太原 030600; 2. 湖南大学, 湖南长沙 410082; 3. 赫瑞瓦特大学, 爱丁堡 EH14 4AS)

[摘 要] 本文综合利用采光模拟软件 Daysim 与能耗分析软件 EnergyPlus, 从采光质量与综合能耗角度出发, 探讨了寒冷地区单、双层光伏外窗的优化设计策略, 在此基础上与传统外窗系统进行了对比分析。从而得到以下结论, 对于单、双层光伏外窗在满足室内天然采光质量前提下综合能耗较小的光伏电池覆盖面积比分别为 50% 和 40%, 同时双层光伏窗节能效果最为显著, 相比于传统单层透明窗、双层透明窗和双层 low-e 窗系统综合能耗分别下降了 30.6%、18.6% 和 9.5%。

[关键词] 光环境; low-e

0 引言

目前, 建筑能耗约占全社会总能耗的 1/3^[1], 而且保持着持续增长的趋势。其中外窗作为建筑保温, 隔热的薄弱环节, 热损失较大从而导致了更多的能源消耗。因此, 高效节能的新型外窗系统研究成为建筑节能的前沿方向。半透明光伏外窗系统作为一种新型节能外窗系统, 相比于传统外窗除了有常规的采光、保温隔热、防水等作用外, 还可以生产清洁电力共建筑或并网使用, 节能潜力显著, 受到了国内外的广泛关注。

Leite^[2] 研究比较了光伏外窗和普通外窗在巴西两座城市福塔雷萨和弗洛里亚诺波利斯应用时的建筑能耗, 发现光伏外窗节能百分比分别达到了 39% 和 43%。仇中柱^[3] 等则针对中国不同纬度地区光伏窗不同朝向的发电量进行了对比研究, 得到了太阳能发电量与光伏窗朝向、季节以及建筑所处纬度之间的关系; Li^[4] 等通过实验和模拟研究了半透明光伏模块的节能潜力, 发现安装有半透明光伏窗的办公空间每年节约电能 1203MW·h, 同时可降低峰值负荷 450kW。而对半透明光伏窗而言, 光伏电池覆盖面积比不仅对影响建筑能耗情况, 同时也影响着室内的天然采光质量, 因此光伏电池覆盖面积比的优化研究至关重要。Miyazaki.T^[5] 对不同可见光透过率的半透明光伏外窗在日本东京地区的应用进行了模拟研究, 发现透过率为 40% 且窗墙比为 50% 时能量性能最佳, 节能效果显著。Xu^[6] 等针对不同建筑因素下 (朝向、进深和窗墙比) 安装光伏外窗时的建筑能耗进行了综合模拟研究, 并提出了不同建筑因素下最佳的光伏电池覆盖比。而 Eero.V^[7] 则利用数值模拟研究了不同纬度地区光伏电池覆盖率的变化对室内天然采光性能的影响。

以往研究大都单从采光质量或者综合能耗出发探讨最佳的光伏电池覆盖率, 综合两者分析文献并不多见。同时

关于采光质量的研究内容侧重于保证室内工作面的最小天然采光照度, 而忽略了照度过大时产生的眩光现象的对人员视觉舒适度的影响。因此本文结合传统方法定义了一个新的天然光环境评价指标——N-Daylit 区域评价室内光环境, 从而改善了传统评价参数对眩光问题考虑的不足。在此基础上将室内采光质量与综合能耗相结合探讨单、双层光伏窗的最佳光伏电池覆盖面积比。最后将其与传统外窗系统进行了分析比较, 探讨其替代传统外窗的可能性。

1 模型建立与工况设置

1.1 光环境模型

本研究中的室内天然采光模拟采用目前国内外广泛使用动态采光模拟软件 Daysim, 但由于 Daysim 不支持建模功能, 在此采用 SketchUp 软件创建研究房间的几何模型, 如图 1 所示, 尺寸 3.1m×3.1m×2.8m (长×宽×高), 光伏窗位于南向立面, 尺寸 2.4m×1.3m, 窗台高 1.0m, 窗墙面积比 40%。室内各表面反射率分别为: 天花板 0.6, 内墙 0.5, 地板 0.3^[8]。采光计算中, 工作面高度设置为 0.8m, 工作面上共划分 50×50 共 2500 个网格, 照明控制系统维持工作面最小照度 450lux。

研究所用光伏玻璃采用常见的夹层玻璃, 光伏电池片夹在两层相同的可见光透过率为 88% 普通透明白玻之间, 光伏电池片的光热性能参数根据 Miyazaki.T^[5] 假设。双层光伏窗系统则由最外层的光伏玻璃, 中间空气层以及内层普通透明白玻组成 (图 2)。将各玻璃层、光伏电池层以及空气层的相关参数导入软件 Optics5 与 Window7.4 计算可得不同光伏电池覆盖率下单、双层光伏窗的光热特性参数 (表 1)。

1.2 热工模型

建筑能耗模拟软件 EnergyPlus 用来模拟建筑能耗与光伏组件发电量, 其可靠性已经得到了先前诸多的实验验证

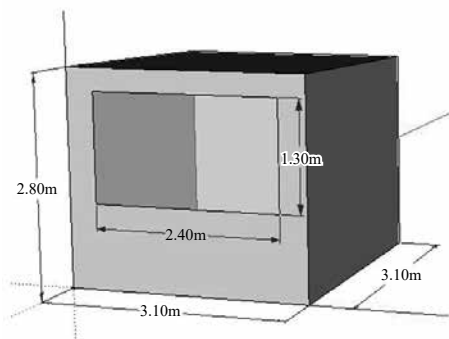


图 1 几何模型

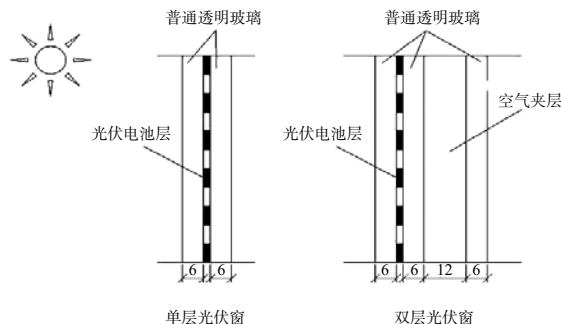


图 2 单、双层光伏窗结构示意图

表 1 不同光伏电池覆盖率单、双层光伏窗热性能参数

光伏电池覆盖率	单层光伏窗			双层光伏窗		
	可见光透过率 (T_{vis})	传热系数 (U)	太阳得热系数 ($SHGC$)	可见光透过率 (T_{vis})	传热系数 (U)	太阳得热系数 ($SHGC$)
20%	0.290	5.118	0.440	0.694	1.904	0.634
30%	0.387	4.847	0.490	0.612	2.044	0.572
40%	0.484	4.568	0.543	0.528	2.170	0.512
50%	0.581	4.282	0.598	0.444	2.283	0.453
60%	0.677	3.990	0.656	0.358	2.386	0.394
70%	0.774	3.690	0.717	0.270	2.480	0.336

表 2 标准光伏模块发电性能参数

相关参数	有效面积	串联电池个数	并联电池个数	短路电流 /A	开路电压 /V	短路电流温度系数 /(A/K)	开路电压温度系数 /(V/K)	最大功率点电流 /A	最大功率点电压 /V
数值	0.657	39	1	3	20.3	0.000552	-0.000216	2.5	16

[9-11]。建筑室内人员密度 $4\text{m}^2/\text{人}$ ，照明功率 $11\text{W}/\text{m}^2$ ，设备功率 $20\text{W}/\text{m}^2$ ，人员新风量 $30\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ ，人员的办公时间为每天的 8:00 到 18:00 之间。空调设计温度为夏季 26°C ，冬季 20°C ，冷热源采用空气源热泵系统，制冷和采暖 COP 分别取 3 和 2.75^[12]。空调系统运行的时间段内，假设该模拟房间和相邻房间的温度一致，因此将内墙、天花板和地板设置为绝热边界，外墙的传热系数为 $0.43\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 。照明能耗计算所需的照明功率时间表采用前述 Daysim 的照度模拟结果得到。标准光伏模块的发电性能参数见表 2。

1.3 工况设置

如表 3 所示，本文共模拟了 15 个工况，研究了不同外窗系统对建筑室内光环境和综合能耗的影响。其中工况 1~6 分别为不同光伏电池覆盖率光伏单层窗，工况 7~12 分别为不同光伏电池覆盖率光伏双层窗，工况 13~15 则对传统的单层透明窗、双层透明窗和双层 low-e 窗进行了模拟研究。

表 3 模拟工况

模拟工况	外窗	光伏电池覆盖率	备注
Case1	单层光伏窗	20%	南向，窗墙比 40%
Case2		30%	
Case3		40%	
Case4		50%	
Case5		60%	
Case6		70%	
Case7	双层光伏窗	20%	
Case8		30%	
Case9		40%	
Case10		50%	
Case11		60%	
Case12		70%	
Case13	单层透明窗	—	
Case14	双层透明窗	—	
Case15	双层 low-e 窗	—	

2 结果分析

采光评价方面，综合广泛使用的动态采光评价指标 DA、UDI^[13]，将 DA 的照度阈值界定为 450lux – 2000lux 。优化的 $\text{DA}_{450-2000}$ 不仅满足了人员工作所需的最小光照度，同时 2000lux 的上限值也避免了眩光现象的干扰。结合北美照明工程协会 (IESNA) 所提出的 Daylit 区域^[14-16]，采用优化的 $\text{DA}_{450-2000}$ 值从而得到了新的采光评价参数 N-Daylit 区域。该区域面积越大，室内采光质量越好。

在能耗评价方面，采用综合能耗作为能耗评价指标，

其包括了采暖/制冷能耗，照明能耗，同时减去光伏窗发电量。综合能耗越小表明建筑节能效果越好。

图 3 为单层光伏窗、双层光伏窗 N-Daylit 区域室内面积占比随光伏电池覆盖面积比的变化情况，从图中可以看出，室内采光质量受光伏电池覆盖率影响较为显著，两种类型光伏窗下室内 N-Daylit 区域面积占比变化趋势基本相同，均随着光伏电池覆盖面积比的不断增大呈现显著的先上升后下降的变化趋势。这主要由于光伏电池覆盖面积的增加阻碍了部分太阳直射光进入室内，从而明显改善了近窗处的眩光现象，但是过大的覆盖面积则会使室内整体照度较小，无法满足人员视觉需求。双层光伏窗在低覆盖率工况下（小于 40%），由于眩光现象被显著改善所以室内天然采光质量优于光伏单层窗，而在高覆盖率工况下（大于 40%），由于远窗处天然光照度过低，采光质量相较于单层光伏窗明显较差。总体来看，单层光伏窗在光伏电池覆盖率为 40%~50% 时，室内 N-Daylit 区域室内面积比相对较大，而对于光伏双层窗系统而言采光的最佳覆盖率则有所下降，为 30%~40%。

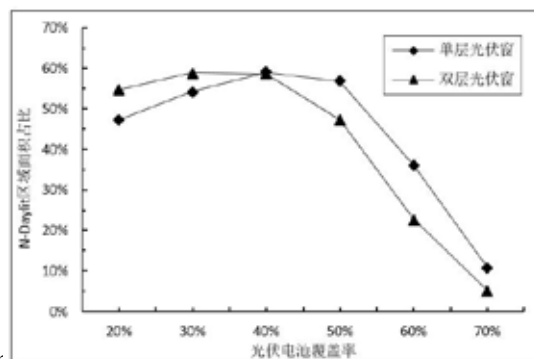


图 3 单层光伏窗、双层光伏窗 N-Daylit 区域室内面积占比随光伏电池覆盖率的变化

进一步分析单、双层光伏窗不同光伏窗覆盖率下建筑能耗以及光伏组件发电量（图 4），可以看出，两者的建筑能耗以及光伏组件发电量有着相似的变化趋势。光伏系统发电量随着光伏电池覆盖面积的增加线性上升，同时由于进入室内太阳直射辐射的减少导致辐射得热量的下降，夏季时降低了制冷能耗，而在冬季采暖能耗则会相应增加，与其相比照明能耗的较不明显。这四者的相互影响作用下，建筑综合能耗呈现缓慢的下降趋势在光伏电池覆盖率大于 60% 后小幅上升。但是光伏双层窗系统相较于单层光伏窗可以通过其良好的保温隔热性能减少冬季室内的热损失，从而降低采暖能耗达到相应的节能效果，综合能耗降低了

13%~16%。总体来看,两者的综合能耗在 50%、60% 和 70% 光伏窗覆盖率工况下达到最低且相差较小。

综合各光伏电池覆盖率下室内光环境与综合能耗情况可知,单、双层外窗光伏电池覆盖率分别为 50%、40% 工况下室内天然采光质量较好,综合能耗较低,可作为设计的推荐选择。同时在保证相同采光质量的前提下,光伏双层窗能量性能优于光伏单层窗。

结合前述所得的单、双层光伏窗满足室内天然采光质量与较小综合能耗的最佳光伏电池覆盖面积比,将其与传统外窗系统(单层透明窗、双层透明窗、双层 low-e 窗)进行了分析比较,各外窗的结构参数见表 4。

表 4 不同外窗系统结构

	结构(从外层到内层)
单层光伏窗	6mm 50% 光伏电池覆盖率光伏玻璃
双层光伏窗	6mm 40% 光伏电池覆盖率光伏玻璃 +12mm 空气夹层+6mm 普通白玻
单层透明窗	6mm 普通白玻
双层透明窗	6mm 普通白玻+12mm 空气夹层+6mm 普通白玻
双层 low-e 窗	6mm low-e 玻璃+12mm 空气夹层+6mm 普通白玻

图 6 给出了单、双层光伏窗与传统外窗单层透明窗、双层透明窗、双层 low-e 窗的 N-Daylit 区域室内面积占比情况,从图中可以看出,各类型外窗系统下室内光环境质量的差别较大,可见光透过率较高的单层透明窗、双层透明窗并没有如预期取得最佳采光效果,反而是单、双层光伏窗室内 N-Daylit 区域面积更大,采光质量更佳。其主要原因过高透过率的外窗系统虽然可以改善远处区域的采光

质量,但是近窗区域眩光现象的出现则会对室内人员的视觉舒适度产生一定的负面影响。

结合图 7 各外窗下建筑能耗与光伏组件发电量情况可以看出,由于较好的保温隔热性能,光伏双层窗能量性能优于光伏单层窗。同时光伏组件的发电量对光伏外窗系统的综合能耗产生了较大的影响,由于考虑了光伏组件的发电量,光伏窗综合能耗整体上低于传统外窗系统,其中双层光伏窗相较于传统普通单、双层透明外窗综合能耗减少达 30.6% 和 18.6%,与表面辐射率较低、能量性能较好的双层 low-e 窗相比综合能耗依旧下降了 9.5%,节能效果显著。

3 结论

本文研究探讨了寒冷地区半透明单、双层光伏外窗在保证室内采光质量以及较小综合能耗前提下的最佳光伏电池覆盖面积比。在其基础上将最佳光伏电池覆盖率的单、双层光伏窗与传统单层透明窗、双层透明窗、双层 Low-E 窗进行了对比分析,可以得到以下结论。

(1) 对两种形式结构光伏窗而言,室内采光质量受光伏电池覆盖面积比影响较为显著,均随光伏电池覆盖面积比的不断增大呈现显著的先上升后下降的变化趋势。综合能耗与之相反,呈小幅先下降后上升趋势。

(2) 单、双层光伏外窗在满足室内天然采光质量前提下综合能耗较小的光伏电池覆盖面积比分别为 50% 和 40%,且在保证相同采光质量前提下双层光伏窗能量性能优于光伏单层窗,综合能耗降低了 13%~16%。

(3) 光伏窗整体能耗低于传统外窗系统,其中双层

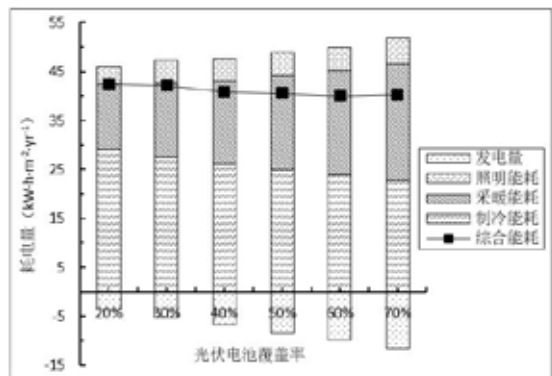


图 4 不同光伏电池覆盖率单层光伏窗光伏系统的发电量及建筑能耗

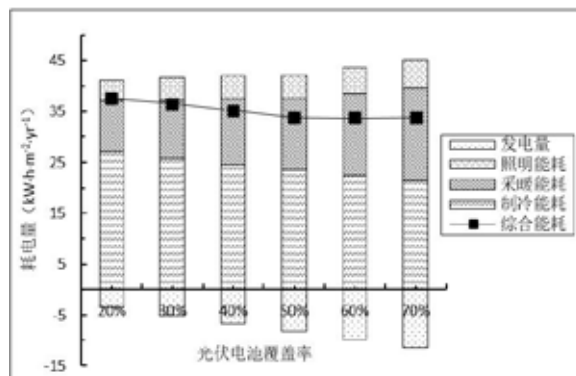


图 5 不同光伏窗透过率双层光伏窗光伏系统的发电量及建筑能耗

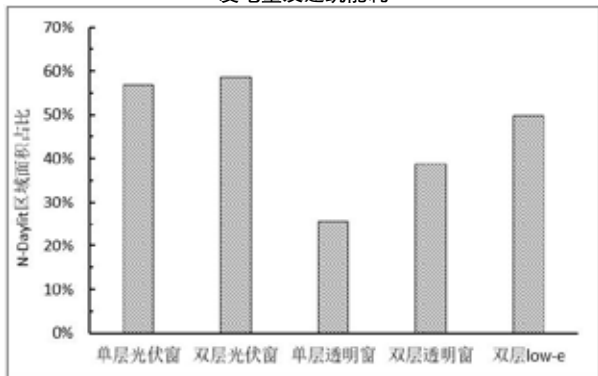


图 6 不同外窗类型 N-Daylit 区域室内面积占比

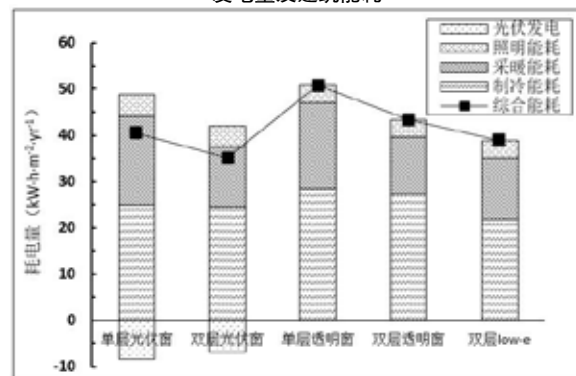


图 7 不同外窗类型光伏系统的发电量和建筑能耗

光伏窗相较于传统普通单层透明窗、双层透明窗和双层 Low-E 窗综合能耗分别减少达 30.6%、18.6% 和 9.5%，节能效果显著。

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（51408391）；国家自然科学基金海外及港澳学者合作研究基金（51528804）；山西省回国留学人员科研资助项目（2015-041）。

参考文献

- [1] 仇中柱, 郭文雯, 张雷, 等. 光伏窗能量性能的朝向特性研究 [C]// 首届中国工程院 / 国家能源局能源论坛. 2010.
- [2] Didoné E L, Wagner A. Semi-transparent PV windows: A study for office buildings in Brazil [J]. Energy & Buildings, 2013, 67(4): 136–142.
- [3] 仇中柱, 周天泰, 李芄, 等. 光伏窗太阳能发电量的数值分析 [J]. 华东电力, 2009, 37(5): 146–149.
- [4] Li D H W, Lam T N T, Chan W W H, et al. Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings [J]. Applied Energy, 2009, 86(5): 722–729.
- [5] Miyazaki T, Akisawa A, Kashiwagi T, et al. Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows [J]. Renewable Energy, 2014, 30(3): 281–304.
- [6] Xu S, Liao W, et al. Optimal PV cell coverage ratio for semi-transparent photovoltaics on office building façades in central China [J]. Energy & Buildings, 2014, 77: 130–138.
- [7] Vartiainen E, Peippo K, Lund P. Daylight optimization of multifunctional solar façades [J]. Solar Energy, 2000, 68(3): 223–235.
- [8] GB 50033-2013, 建筑采光设计标准 [S].
- [9] Zhou Y P, Wu J Y, Wang R Z, et al. Simulation and experimental validation of the variable-refrigerant-volume (VRV) air-conditioning system in EnergyPlus [J]. Energy & Buildings, 2008, 40(6): 1041–1047.
- [10] Tabares-Velasco P C, Christensen C, Bianchi M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies [J]. Building & Environment, 2012, 54(7): 186–196.
- [11] Peng J, Curcija D C, Lu L, et al. Developing a method and simulation model for evaluating the overall energy performance of a ventilated semi-transparent photovoltaic double-skin facade [J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2016, 24(6): 781–799.
- [12] JGJ 67-2006, 办公建筑设计规范 [S].
- [13] Reinhart C F, Mardaljevic J, Rogers Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design [J]. Leukos, 2006, 3(1): 7–31.
- [14] Reinhart C F, Wienold J. The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylight spaces [J]. Building & Environment, 2011, 46(2): 386–396.
- [15] Reinhart C F, Weissman D A. The daylight area - Correlating architectural student assessments with current and emerging daylight availability metrics [J]. Building & Environment, 2012, 50(5): 155–164.
- [16] IESNA. Lighting measurement — spatial daylight autonomy (draft). NY: Illuminating Engineering Society of North America New York, September 2011.

基于系统动力学的绿色办公建筑运维方 ——用户互动模拟与节能策略研究

刘 沛^{1,2}, 林波荣¹, 武晓影¹

(1. 清华大学建筑学院, 北京 100084; 2. 山东大学(威海)商学院, 山东威海 264209)

[摘 要] 针对绿色办公建筑存在的能耗性能差异问题, 本文考虑建筑运行过程中运维方—用户互动过程, 考虑用户类型的不同和运维方能效管理水平的不同, 建立系统动力学模型, 模拟运维方—用户互动过程对性能差异的动态影响, 通过蒙特卡洛分析制定运维方的节能策略。模型应用于我国寒冷地区绿色办公建筑, 通过蒙特卡洛分析发现, 绿色办公建筑运维方能效管理水平不同时, 面对不同类型用户群体时应有针对性的策略。对于标准型和节俭型用户, 如果能够实现与用户的有效沟通, 则可以降低性能差异; 而对于浪费型用户, 则需要提高自身能效管理水平, 同时保持较高的沟通强度才可能实现性能差异的降低。

[关键词] 绿色办公建筑; 性能差异; 运维方—用户互动; 系统动力学; 蒙特卡洛分析

0 引言

建筑业是能源消耗和 CO₂ 排放的主要行业之一, 建筑业能耗约占全球能耗的 40% 并造成超过 30% 的 CO₂ 排放^[1]。大力发展绿色建筑, 对降低建筑业能耗和 CO₂ 排放有重要作用。绿色办公建筑是绿色建筑的主要构成部分, 然而, 目前我国绿色办公建筑往往存在性能差异(Performance gap), 即建筑运行后的实际性能没有达到运行之前的预期性能^[2,3]。建筑性能主要包含两方面的表现——能耗与室内环境品质(Indoor environment quality, IEQ), 绿色办公建筑在能耗与室内环境品质方面均存在性能差异^[2], 本文重点关注能耗差异, 下文的性能差异均指能耗差异。

国内外研究从绿色办公建筑生命周期的不同阶段分析了产生性能差异的多种原因, 包括设计阶段、施工阶段、以及运行阶段的原因。设计阶段, 用户与设计团队沟通不畅^[4], 以及设计团队不能充分预测建筑的将来使用功能和运营需求均会造成性能差异^[5]; 施工与交付阶段, 施工质量不符合规格要求以及对隔热和气密性重视不够会导致实际能耗高于预期^[6]; 运行阶段, 造成能耗性能差异的主要原因总结为两方面: 一是用户实际行为与设计假设不同^[7]; 二是建筑运行设备(HVAC 系统、照明系统等)的实际控制设定(如热状态、运行时间设定等)与设计假设不一致^[8], 这是因为绿色办公建筑的中央设备通常由运维方管理, 运维方的管理水平对实际运行能耗有重要影响^[9]。

对于建筑运行阶段, 现有研究分别从用户和运维方两方面分析了性能差异的原因, 但是没有进一步考虑运维方与用户的互动过程及其对性能差异的影响。绿色办公建筑在运行使用过程中, 用户与运维方不是独立存在的两方主体, 而是存在互动。例如, 运维方对用户行为和建筑实际能耗进行监测、对用户不合理的设备使用行为进行纠正、与用户沟通以提高其节能意识; 反之, 用户能源费用的节省有助于用户与运维方产生更好的目标一致性, 用户对运维方工作的信任有助于设备运行策略的改进和有效实施。由此可见, 运维方—用户的互动存在一系列相互关联的环节, 并形成随时间的反馈作用, 从而对用户行为和运维方的管理策略产生动态影响, 最终影响实际运行能耗。

系统动力学(System dynamics, SD)由麻省理工学院的 Jay W. Forrester 教授于 1956 年创立, 是利用系统结构、各环节因果关系和反馈回路建立综合模型, 通过计算机仿

真来分析系统动态行为的一种方法。系统动力学尤其适合处理社会—技术系统由于多要素相互关联产生的非线性、信息反馈和动态复杂性问题。本文引入系统动力学方法, 模拟绿色办公建筑运行过程中运维方—用户的互动过程, 制定针对性的运维管理策略以降低实际能耗、缩小性能差异。根据系统动力学建模与仿真的主要步骤^[10], 本文首先建立运维方—用户互动对性能差异影响的因果回路图, 然后建立系统动态仿真模型, 最后利用动态仿真模型进行蒙特卡洛分析和策略制定。

1 绿色办公建筑运维方—用户互动的系统动力学模型

1.1 运维方—用户互动的因果回路图

因果回路图是定性表达系统要素相互关联与反馈结构的重要工具。运维方—用户互动的因果回路图的建立以实地调研为基础, 选取了我国多栋绿色办公建筑开展调研, 对运维方、用户等利益相关方就业务范围、竞争优势、行业变化、节能途径等主题进行开放式访谈。获取利益相关方经验知识后进行建模, 建模团队由一位系统动力学学者和两位建筑专业学者组成, 建筑专业学者对访谈内容进行解读, 系统动力学学者根据解读, 抽象出关键词及其因果关系, 再由建筑专业学者确认因果关系是否成立, 由此反复直至形成共识, 得运维方—用户互动的因果回路图如图 1 所示。

因果回路图显示, 绿色办公建筑实际性能受到三个正、负反馈环耦合作用的影响, 对耦合的反馈环进行解耦分析如下:

(1) 正反馈环 1(R1): 绿色建筑实际性能(能耗)→(-) 用户能源费→(+) 用户的长期成本→(-) 用户对运维方的配合概率→(+) 绿色建筑实际性能(能耗)。即, 绿色办公建筑实际能耗的降低使用户能源费降低, 增强了用户对运维方工作的信任与配合, 从而使实际能耗在下一时间段进一步降低, 形成不断加强的正反馈环。

(2) 负反馈环 1(B1): 绿色建筑实际性能(能耗)→(-) POE 实测 IEQ 数值→(+) 用户的 IEQ 满意度→(+) 用户对运维方的配合概率→(+) 绿色建筑实际性能(能耗)。实际上, 建筑实际能耗不可能无限降低, 这是因为能耗降低到一定程度, 将导致用户舒适度的下降, 用户的舒适需求改变用户行为并限制对运维方的配合, 阻碍实际能耗的进一步降低, 形成抑制作用的负反馈环。

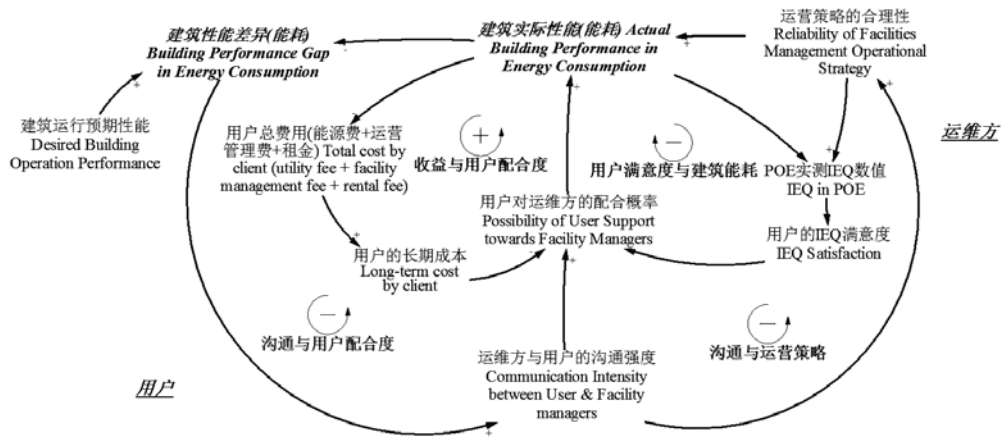


图 1 绿色办公建筑运维方—用户互动的因果回路图

(3) 负反馈环 2 (B2)：绿色建筑实际性能 (能耗) → (-) 绿色建筑性能差异 (能耗) → (+) 运维方与用户的沟通强度 → (+) 运维策略的合理性 → (+) 绿色建筑实际性能 (能耗)。即，实际能耗越高，能耗性能差异越大，则运维方与用户的沟通强度越高，运维方节能策略实施的可能性越高，从而使实际能耗降低。

综合上述作用，建筑实际能耗性能复杂的动态变化是上述正负反馈环综合作用的结果。

1.2 运维方—用户互动的动态仿真模型

根据运维方—用户互动的因果回路图，建立系统动态仿真模型，模型框架如图 2 所示。

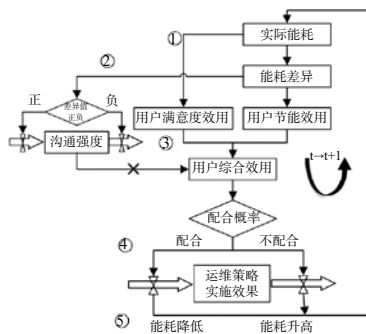


图 2 绿色办公建筑运维方—用户互动动态仿真模型框架

动态仿真模型随时间向前迭代运行，在每一个时间段 t 内，模型的运行包含 5 个子模块的计算，如图 2 所示。首先，

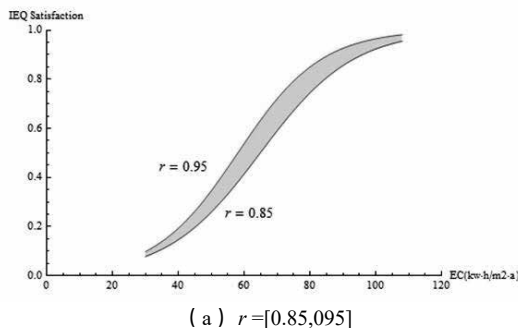
根据 $t-1$ 模型计算的实际能耗，与预期能耗对比，得能耗差异以及用户的节能效用。用户的节能效用是用户对节能量的主观感受，与用户类型有关。根据文献 [11] 的分类，将用户分为标准型、节俭型和浪费型用户，不同用户类型节能效用在模型中以表函数描述。另一方面，用户的节能效用也受到运维方与用户沟通的影响，通过沟通有助于用户提高节能意识，且性能差异越大，沟通强度越大，用户节能效用越高。

实际运行能耗的变化一方面改变节能量以及用户的节能效用，另一方面会造成用户 IEQ 满意度的变化，因此需要建立能耗与 IEQ 满意度的关联关系。考虑到能耗—IEQ 满意度关系受建筑类型、运维方管理水平、用户偏好等多种因素的影响，具有不确定性，因此本文定义一定的能耗—IEQ 满意度波动范围，并进行蒙特卡洛分析。参考文献 [12] 建立的能耗与 IEQ 满意度关联曲线，可用 Logistic 函数表达能耗与 IEQ 满意度之间的关系：

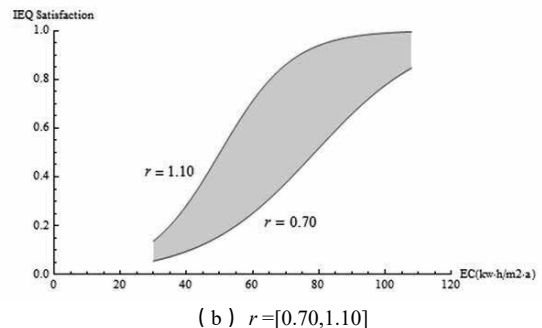
$$I_{IEQ} = \frac{C \cdot K \cdot P_0 \cdot e^{r \cdot EC}}{K + P_0 \cdot (e^{r \cdot EC} - 1)} \quad (1)$$

其中 I_{IEQ} 为 IEQ 满意度，为实际能耗。然后，根据实地调研的能耗与 IEQ 满意度数据校准函数参数，其中参数用于表征曲线形状，根据参数值不同可以定义不同的能耗—IEQ 满意度波动范围，用于反映运维方实际能效管理水平的差异，如图 3 所示。

根据用户的 IEQ 满意度得 IEQ 满意度效用值。用户综合考虑节能效用和 IEQ 满意度效用做出是否配合运维方



(a) $r=[0.85,0.95]$



(b) $r=[0.70,1.10]$

图 3 不同运维方能效管理水平下能耗—IEQ 满意度波动范围

节能措施的决定,配合概率的计算依据多属性效用理论^[13]。如果用户配合,则时间段 t 内运维方能够实施节能措施,实际能耗下降;如果用户不配合,运维方不能实施节能措施,实际能耗无法下降。最后,模型根据时间段 t 内的能耗计算结果,进行 $t+1$ 时间段的计算,由此形成随时间的反馈,并实现对运维方—用户互动的动态模拟。

2 仿真结果与策略建议

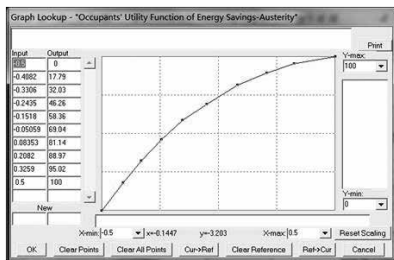
2.1 参数设置

绿色办公建筑运维方—用户互动动态仿真模型的开发采用系统动力学专业软件 Vensim DSS® (Ventana Systems, inc., Harvard, MA, USA)。参数设置依据的数据来自对中国寒冷地区 15 个绿色办公建筑的实地调研、公开发表的文献[3,14]、以及《民用建筑能耗标准》等,另有部分参数根据调研数据经过模型校准而得。模型参数设置如表 1 所示。

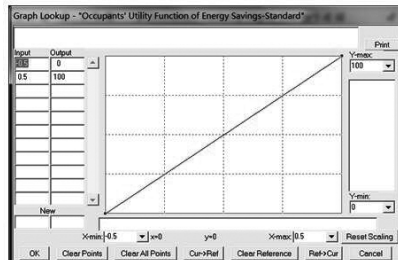
表 1 运维方—用户互动动态仿真模型参数设置

参数	参数值	单位
平均单位面积能耗初始值	73.2	$\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$
单位面积预期能耗	60	$\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$
平均用户 IEQ 满意度初始值	0.73 (0-1)	Dmnl
性能差异(百分比)初始值	22%	Dmnl
能耗-IEQ 满意度函数参数 K	10.01	Dmnl
能耗-IEQ 满意度函数参数 C	0.1	Dmnl
能耗-IEQ 满意度函数参数 P0	0.1	Dmnl
能耗-IEQ 满意度函数参数 r 初始值	0.9	Dmnl
标准型/节俭型/浪费型用户节能效用	表函数	-
最大沟通强度	4	次/月
IEQ 满意度效用因子	100	Dmnl
用户节能效用因子	-100	Dmnl
单位面积能耗变化校准参数	0.296	Dmnl

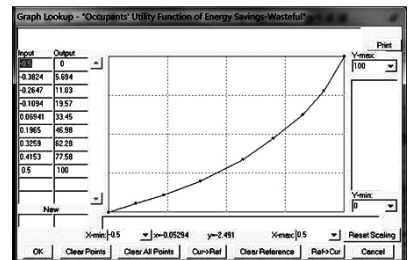
表 1 中不同用户类型的节能效用表函数如图 4 所示。



(a) 节俭型



(b) 标准型



(c) 浪费型

图 4 不同用户类型的节能效用曲线

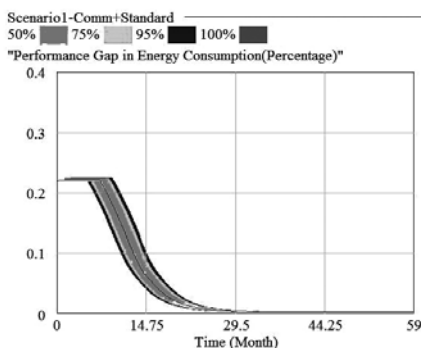


图 5 (a) $\Delta r = \pm 0.1$ 时标准型用户的性能差异分布

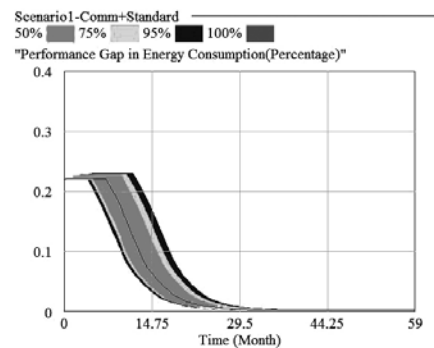


图 5 (b) $\Delta r = \pm 0.2$ 时标准型用户的性能差异分布

2.2 仿真结果

模型对不同能效管理水平的运维方与不同类型的用户之间的互动进行了仿真。用户类型不同体现为不同的节能效用曲线,运维方能管理水平的不同体现为能耗—IEQ 满意度波动范围不同,考虑能耗-IEQ 满意度函数参数 r 的两个不同波动范围: $\Delta r = \pm 0.1$ 和 $\Delta r = \pm 0.2$ 。仿真结果如下。

(1) 当用户为标准型用户时, $\Delta r = \pm 0.1$ 和 $\Delta r = \pm 0.2$ 时性能差异(百分比)分布结果分别如图 5 (a)和图 5 (b)所示。

(2) 当用户为节俭型用户时, $\Delta r = \pm 0.1$ 和 $\Delta r = \pm 0.2$ 时性能差异(百分比)分布结果分别如图 6 (a)和图 6 (b)所示。

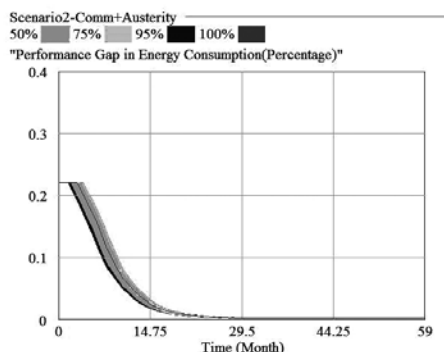
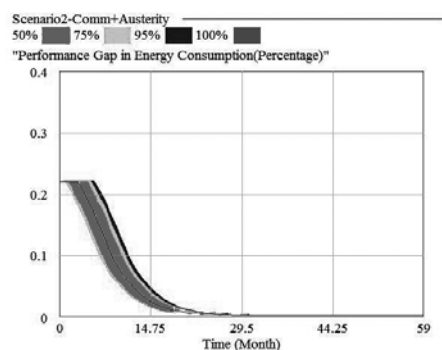
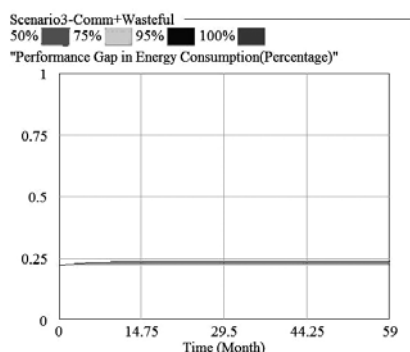
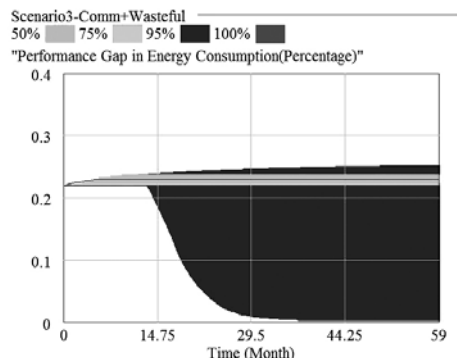
对比上述标准型和节俭型用户的性能差异波动幅度,发现节俭型用户波动幅度更小,性能差异开始降低的时间更早,这是因为节俭型用户的节能意识更强,对 IEQ 的波动有更大程度的容忍度。

(3) 当用户为浪费型用户时, $\Delta r = \pm 0.1$ 和 $\Delta r = \pm 0.2$ 时性能差异(百分比)分布结果分别如图 7 (a)和图 7 (b)所示。

结果显示,对于浪费型用户, $\Delta r = \pm 0.1$ 时能耗—IEQ 满意度变化范围幅度较窄,性能差异分布没有显著变化,即用户节能效用一直较低,一直处于不配合状态从而导致运维节能措施无法实施;而当 $\Delta r = \pm 0.2$,即能耗—IEQ 满意度波动范围幅度变大时,性能差异出现下降可能。

2.3 运维方节能策略建议

本文的运维方—用户互动模型考虑了两种运维方的节能策略:一是沟通,通过与用户的有效沟通,提高用户的节能效用;二是提高自身的能效管理水平,即在同等能耗下达到更高的 IEQ 满意度。两种措施的目的是提高用户

图 6 (a) $\Delta r = \pm 0.1$ 时节俭型用户的性能差异分布图 6 (b) $\Delta r = \pm 0.2$ 时节俭型用户的性能差异分布图 7 (a) $\Delta r = \pm 0.1$ 时浪费型用户的性能差异分布图 7 (b) $\Delta r = \pm 0.2$ 时浪费型用户的性能差异分布

的综合效用,从而使用户更有可能配合运维方的节能措施,以降低实际能耗、缩小性能差异。通过上述蒙特卡洛分析可以发现:

(1) 标准型和节俭型用户对运维方能效管理水平差异造成能耗—IEQ 满意度波动具有一定的容忍度,运维方通过有效的沟通均能实现性能差异的降低。

(2) 对于浪费型用户,当 $\Delta r = \pm 0.1$ 时,同等能耗下对应的 IEQ 满意度较低,造成用户 IEQ 满意度效用基础值较低(如图 9 箭头①所示);另一方面,基于浪费型用户的节能效用曲线特性,节能带来的效用也不高,造成用户不会配合运维方的节能措施而无法实现性能差异的降低。而当 $\Delta r = \pm 0.2$ 时,同等能耗下对应的 IEQ 满意度更高,此时降低能耗,IEQ 满意度在较高的水准上下降(如图 8 箭头②所示),结合一定强度的沟通提高用户节能效用,才可能使浪费型用户实现配合。

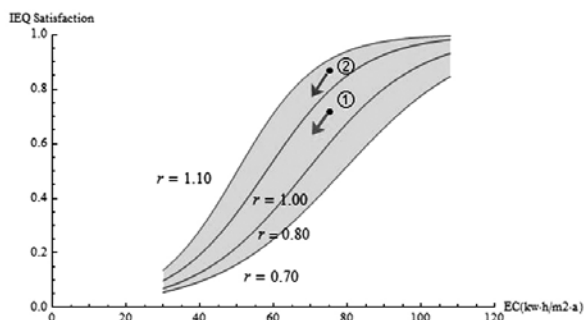


图 8 能耗-IEQ 满意度不同分布范围对浪费型用户的影响

这表明,对于浪费型用户,运维方需要同时采取上述两种策略才有可能实现性能差异的降低,即提高能效管理水平,在同等能耗下达到更高的 IEQ 满意度,同时保持较高的沟通强度。

3 结论

本文引入系统动力学方法,模拟绿色办公建筑运行过程中运维方—用户的互动过程,考虑不同的用户类型,并考虑运维方能效管理水平差异造成的能耗—IEQ 满意度的波动范围,通过蒙特卡洛分析,给出运维管理策略建议,以缩小绿色办公建筑性能差异。通过不同用户类型的分析和对比可以发现,绿色办公建筑运维方能效管理水平不同时,面对不同类型用户群体时应有针对性的策略。对于标准型和节俭型用户,如果能够实现与用户的有效沟通,则可以降低性能差异;而对于浪费型用户,则需要提高自身能效管理水平,同时保持较高的沟通强度才可能实现性能差异的降低。

致谢

本研究受到国家自然科学基金(NSFC)项目“中英低碳建筑整体性能测试与模型研究”(项目号 51561135001)的资助。

参考文献

- [1] Yang L, Yan H, Lam J C. Thermal comfort and building energy consumption implications—a review[J]. Applied Energy, 2014, 115:164—173.
- [2] De Wilde P. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation[J]. Automation in Construction, 2014, 41:40—49.
- [3] 林波荣,刘彦辰,裴祖峰. 我国绿色办公建筑运行能

耗及室内环境品质实测研究 [J]. 暖通空调, 2015, 45(03): 1-8+21.

[4] Newsham G R, Mancini S, Birt B J. Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but...[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(8): 897-905.

[5] Korjenic A, Bednar T. Validation and evaluation of total energy use in office buildings: a case study[J]. Automation in construction, 2012, 23: 64-70.

[6] Menezes A C, Cripps A, Bouchlaghem D, et al. Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap[J]. Applied Energy, 2012, 97: 355-364.

[7] Yan D, O'Brien W, Hong T, et al. Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges[J]. Energy and Buildings, 2015, 107: 264-278.

[8] Dasgupta A, Prodromou A, Mumovic D. Operational versus designed performance of low carbon schools in England: Bridging a credibility gap[J]. HVAC&R Research, 2012, 18(1-2): 37-50.

[9] Ju C, Ning Y, Pan W. A review of interdependence of sus-

tainable building[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2016, 56: 120-127.

[10] 钟永光, 贾晓菁, 李旭. 系统动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[11] Hong T, Lin H W. Occupant behavior: impact on energy use of private offices[R]. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (US), 2013.

[12] Wong L T, Mui K W. An energy performance assessment for indoor environmental quality (IEQ) acceptance in air-conditioned offices[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1362-1367.

[13] Blondeau P, Spérandio M, Allard F. Multicriteria analysis of ventilation in summer period[J]. Building and Environment, 2002, 37(2): 165-176.

[14] Lin B, Liu Y, Wang Z, et al. Measured energy use and indoor environment quality in green office buildings in China[J]. Energy and Buildings, 2016, 129: 9-18.

[15] 中国住房和城乡建设部. 民用建筑能耗标准 [EB/OL]. (2016-04-15)[2017-10-25]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201605/t20160517_227497.html.

建筑外形基本特征对高层建筑外绕流影响分析

吴小姣, 刘晓平

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009)

[摘要] 城市中高层建筑会显著改善建筑周围的风环境, 合理准确的预测建筑周围的风环境十分必要。本文采用 CFD 数值模拟方法研究了 6 种不同尺寸的板式及塔式高层建筑周围的大气特征, 主要对行人风场和再循环区域进行总结和展示。

[关键词] 行人高度风环境; 高层建筑; CFD

0 引言

城市化进程的加速导致建筑技术的不断提高, 涌现出各种体型复杂, 布局多样的高层及超高层建筑群, 由此带来的健康、安全、节能等诸多风环境问题也日益显著^[1]。建筑物布局的不合理会导致建筑物周围呈现出“涡流死区”甚至可能导致行人受伤^[2]。合理的建筑布局可以帮助我们远离危害, 因此对于建筑物外形基本特征的研究就具有很大的现实意义。

目前对于建筑风环境研究的主要方法有现场测量、风洞实验以及数值模拟。相对于现场测量与风洞实验的研究方法, 以计算流体力学知识为理论基础的数值模拟则具有省时、高效、低成本等诸多优点。Yoshihide Tominaga^[3]在论文中提到 CFD 用于研究建筑室外污染扩散已被广泛使用, 甚至可以代替风洞实验。M. Late^[4]比较了三种方法的优缺点, CFD 可获取全场的数值, 且对于等尺寸及缩尺寸模型的研究都适用。国内外很多学者运用 CFD 研究了建筑物周围风环境特征, Yoshihide Tominaga^[5]用 CFD 研究了建筑物周围行人风环境的特征, 并结合日本风工程学会 AIJ 风洞验证了 CFD 技术的可靠性; Yaxing Du^[6]等人运用 CFD 从 3 个不同风向研究了香港不同建筑物结构下行人高度风处舒适度的影响并为香港地区风舒适度的评价提供了标准; C.W. Tsanga^[7]等人研究了建筑物尺寸和间隔对高层建筑行人风环境舒适度的影响, 研究表明当建筑物间隔小于建筑物宽度的一半时不利于建筑物周围通风; Jian H^[8]研究了建筑物高度变化对于城市污染物扩散以及行人风环境的影响, 表明对于高度变化均匀的建筑群减低长宽比或者增加街道长度有利于污染物的扩散;

本文使用 CFD 模拟的方法研究了 6 种不同尺寸的板式及塔式建筑物周围的大气特征, 包括行人高度风场和再循环区域的总结与展示。

1 模拟的数值方法

1.1 计算方法

建筑周边流动的大气模型一般都是低速不可压缩的湍流模型, 此类模型的基本控制方程包括连续性方程、动量守恒方程以及能量守恒方程, 但为了更好地进行模拟需要引用湍流模型, 考虑到标准的 $k-\epsilon$ 模型具有计算周期短、收敛快的优势, 因此选取标准的 $k-\epsilon$ 模型。采用 SIMPLE 算法, 即求解压力耦合方程组的半隐式方法处理压力—速度耦合关系。控制方程的扩散项采用中心差分的离散格式, 对流项采用二阶迎风格式。

由于本问研究区域范围大, 节点数量多, 同时考虑计算机的运算能力, 计算时间成本等因素, 收敛标准确定为: 连续性方程、各速度分量、 k 、 ϵ 的残差收敛标准为 10^{-4} 。

1.2 计算区域的确定

运用 CFD 进行数值模拟时风环境计算区域的大小直接影响到模拟结果的真实性。本文根据满足计算域尺寸选取时应该满足的最小要求^[9]选取入口界面距建筑物迎风面 $5H_{\max}$, 出口界面距建筑物背风面 $15H_{\max}$, 上界面距建筑物顶部 $5H_{\max}$, 前后界面距建筑物前后表面 $5H_{\max}$ ($H_{\max}$ 是指建筑物的高度), 如图 1 所示:

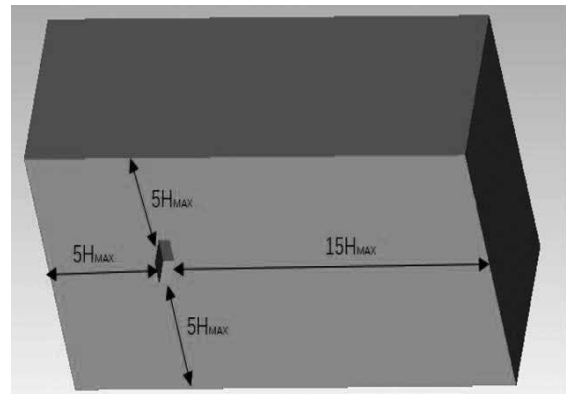


图 1 计算域尺寸

1.3 边界条件的设置

1.3.1 来流边界

通过 Holmes^[10]对幂指数函数与对数函数的仔细对比得出的结论可知幂指数函数更适用于城市冠层, 对数函数更适用于惯性子层的平均速度剖面。由于本文所研究的是建筑周围大气扰流情况, 因此采用的是指数函数模型。其形式是:

$$U(Z) = U_a \left(\frac{Z}{Z_a} \right)^\alpha$$

其中: U_a 是参考高度 Z_a 处平均风速, 取 3m/s; Z_a 是参考高度, 一般设置为 10m; Z 是近地面高度未知数; α 是地面粗糙度; α 的取值和地面特征有关, 根据规范^[11]去 α 取 0.3。

1.3.2 出流边界

AIJ^[12]认为可以把所有主流边界条件设为变量梯度为零。COST^[13]认为流出边界采用开始边界条件, 一般采用出流或静定压条件。本文设置的出流边界设置为自由出流边界, 压力速度充分自由发展不做限制。

1.3.3 大气和侧面边界

对于大气边界条件的设定, 通常在计算域顶部位置, 沿整个顶部边界指定入流速度和湍流参数。对于侧边界, 当流动方向平行于侧边界时, 通常设置为对称边界条件。

1.4 建筑模型

根据《高层建筑防火设计规范》GB 50045-95^[14]中规定板式建筑指主要朝向建筑大于次要朝向建筑长度 2 倍以上的建筑；塔式建筑指长高比小于 1 的建筑，且塔式建筑各朝向均为长边。因此选取了 6 种不同的板式、塔式建筑物进行探讨高层建准对周围大气扰流的影响，建筑物模型见图 2，其具体尺寸见表 1：

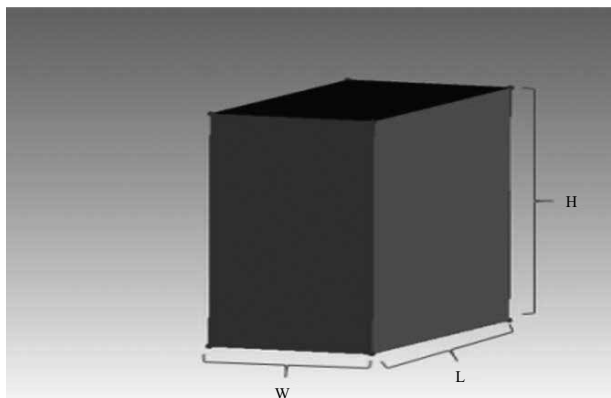


图 2 建筑物模型

表 1 建筑物尺寸

建筑模型尺寸	建筑长度 L/m	建筑厚度	建筑高度 H/m
板式 1	60	30	60
板式 2	120	30	60
板式 3	180	30	60
塔式 1	30	30	60
塔式 2	30	30	90
塔式 3	30	30	120

2 模拟结果及分析

2.1 模型验证

对于模型可靠性的验证，我们采用塔式 1:1:2 的建筑与日本风工程学会 AIJ 所做的风洞实验进行对比。

文中比较了建筑物前方 $x/b=0.75$ 以及建筑物 $z=0.13H$ 处的风速进行了比较，得出的曲线部分见图 3、图 4。从图中可以发现用 CFD 的模拟所得数据和实验所得数据进

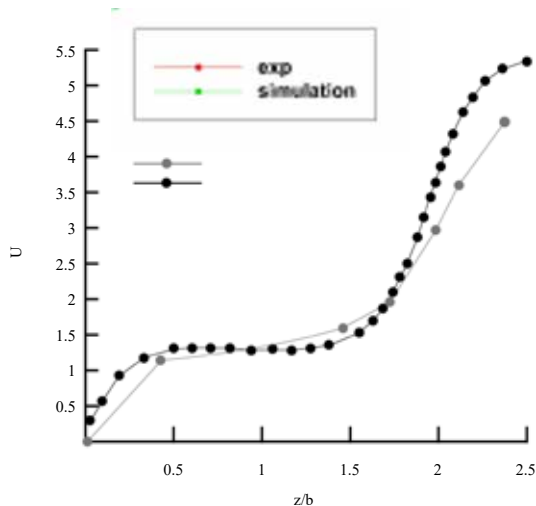


图 3 建筑物前方速度对比

行对比总体上符合要求。从图中 3 可以看出建筑在 $0.5 < z/b < 2$ 处数据结合的比较，在 $0 < z/b < 0.5$ 以及 $z/b > 2$ 的 CFD 模拟数据与实验结果相差较大，但仍在误差范围内。而对于建筑物高度 $z=0.13H$ 出的数据模拟得到在建筑物 $0.5 < y/b < 1$ 处的数据结合较好，而在 $y/b=0.75$ 处出现了较大的数据差异，虽然有所差异但在接受范围内。通过分析可知 CFD 的模拟与实验数据是符合的，因此模型的建立是符合要求的，我们可以在此模型基础上进行深入的研究。

2.2 行人高度处平均风速比

图 5 给出了不同建筑物在行人高度处的平均风速比云图，由图中可以看出建筑周围的平均风速比都可以分为上游近场低速区（ULWV），侧面近场高速区（LHWV），下游近场低速区（DNLWV），下游远场低速区（DFLWV）几个特征区。

板式建筑物的 ULWV 随着建筑物迎风面长度增加而不断扩大；LHWV 由于建筑物遮挡作用在迎风面以及背面形成了不同的风压，导致迎风面长度加速度比值有 1.2 增加至 1.8；DNLWV 随着建筑物迎风面长度增加面积和分隔距离均增加；DFLWV 随着建筑迎风面长度增加而不断远离建筑，并且面积逐渐减小；塔式建筑风速区分布较为简单，只有上游近场低速区（ULWV）、侧面近场高速区（LHWV）和下游低速区（DLWV），相比于板式建筑来说，少了下游远场低速区（DFLWV），图中我们明显可以看出，塔式建筑的下游低速区并未分离成近场和远场。

对比六个案例可以看出，当建筑物高度不变，迎风长度是建筑物宽度 3 倍时，侧面高速区风速比达到 1.8，基本构成令人不舒适的拐角风；而建筑物迎风长度不变，高度是宽度 4 倍时，侧面高速区风速比依旧为 1.4 左右。

2.3 建筑物周围速度

在距离建筑物四个垂直表面外侧 10m 的行人高度（1.75m）处，围绕建筑画一圈闭合线，并在如图 6 中指定位置将线圈展开，将该直线上速度值绘制成图。

图 7 给出了建筑周围 10m 处的速度图，观察发现速度峰值出现在建筑物两侧并靠近来流风的位置。同时对比 6 个案例发现塔式建筑物被封面速度场分布在中心两侧基本呈现对称单调递增趋势，中心线处速度值最低；而板式建筑虽然整体呈现对称趋势，但速度增加时出现多个拐点，

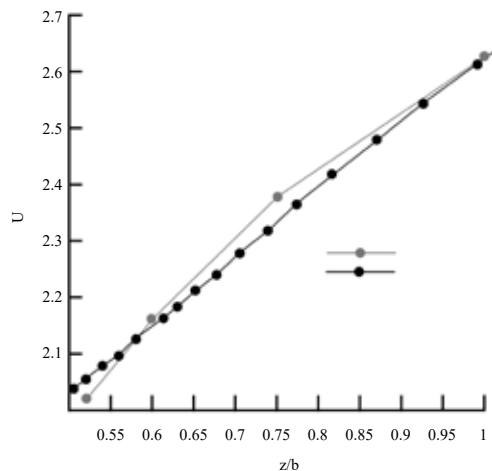


图 4 高度 $z=0.13H$ 处速度对比

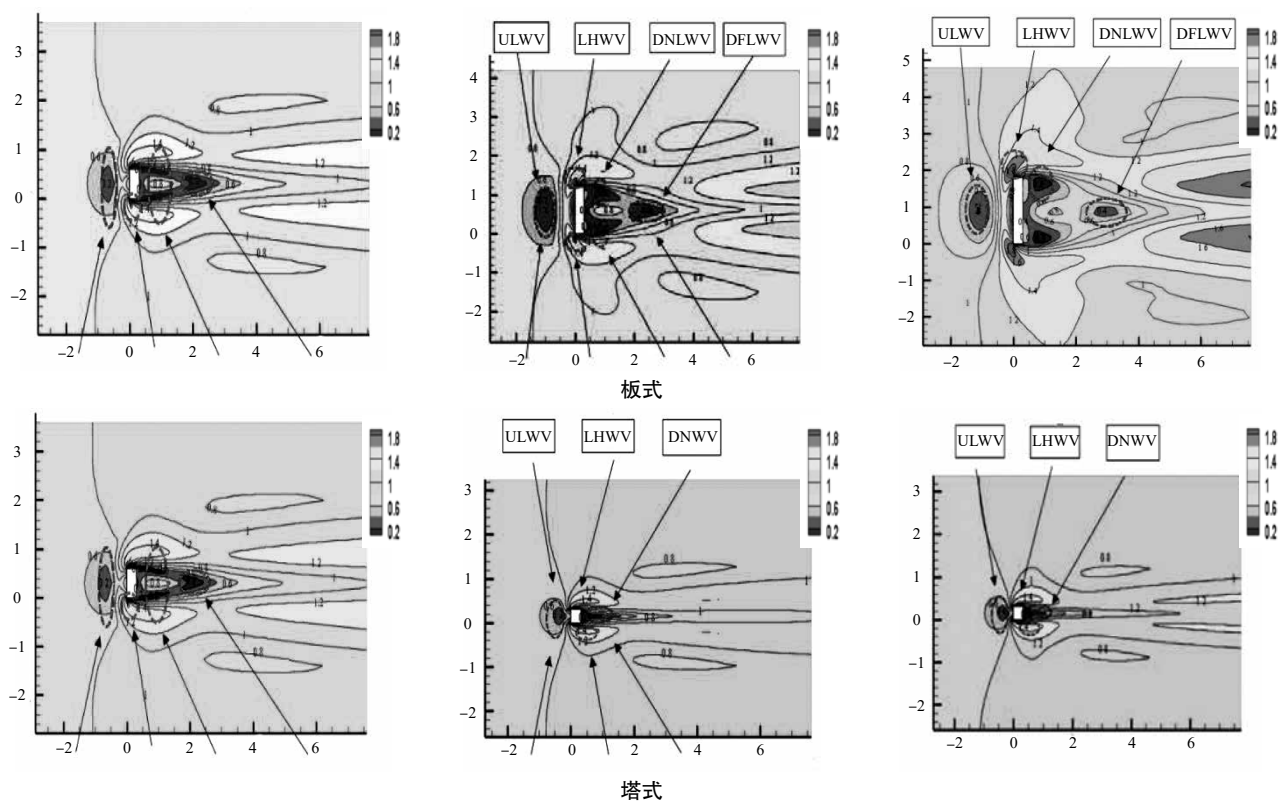


图5 行人高度水平速度云图

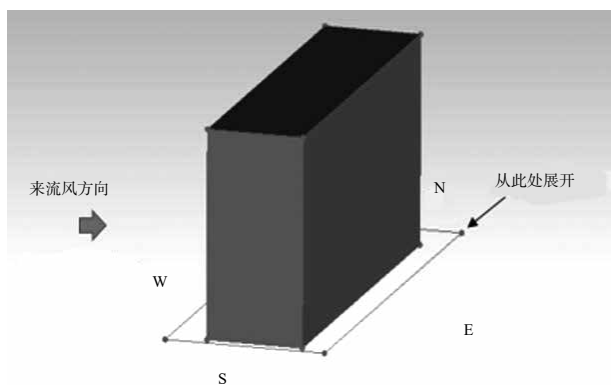


图6 建筑周围10m处速度闭合线图

中途出现下降趋势,考虑到板式建筑背风面长度较大,因此风速分布复杂。

总体来说塔式建筑周围10m处行人高度风更为平稳,并且风速较小,板式建筑反之。其中塔式建筑2和3周围行人风速度值较小,板式建筑3周围行人风速度值最大。

图8显示了建筑物10m后Y/Z纵剖面速度图,由于板式建筑较长的迎风长度导致再循环区分布复杂,发现板式建筑1、2的背后区域基本相同,而3的背后循环区低速区有所分离;同时近地面侧面风场随着建筑物迎风面长度增加而逐渐消失;塔式建筑物随着高度的增加侧面高速区宽度、速度都有所增加。

通过对比发现距建筑物背风面10m处区域仍处于建筑物再循环区域内,再循环区域除了当板式建筑迎风面长度过大时分布复杂,其他情况下基本不随建筑物形体改变发生。而建筑后10m处侧面高速风区域随建筑物形体的不同变化较为明显,塔式建筑物侧面区域风速明显较高,且随着建筑物高度增加,风速增大。

3 结论

以上数值模拟方法清晰地展示不同特征的高层建筑周围大气绕流特征,同时也表明了数值模拟方法的可行性,结论如下:(1)由于建筑物的遮挡作用,当迎风面为建筑主要长度和高度组成面时,过长的板式建筑会导致建筑物背风面再循环区域面积增大,因此建议板式建筑的主要长度与次要长度不宜过大;(2)塔式建筑在背风面形成的再循环区域和尾流区以及侧面高速区的影响较为持续,并且距建筑物背风面相同距离处侧面高速区风速更大,因此对于建筑物周围一定距离的风场而言,塔式建筑相比于板式建筑的影响更为深远;(3)模拟结果可以看出建筑物过高时在附着点有所后移,再循环区域变大,由此导致的污染物聚集、室外污染物进入室内、不舒适的行人风等问题,因此对所有建筑而言在建立时需要仔细考虑建筑周围的风场;(4)对所有建筑而言建筑物侧面区域不宜设置休息区等行人滞留空间。侧面高速区风速较大,且随迎风方向风速降低,这种风速不均匀分布的风场不仅会对行人安全产生影响,滞留时间较长时还会带来不舒适感。

致谢

本文得到国家重点研发计划资助
(编号:2017YFC0803300)

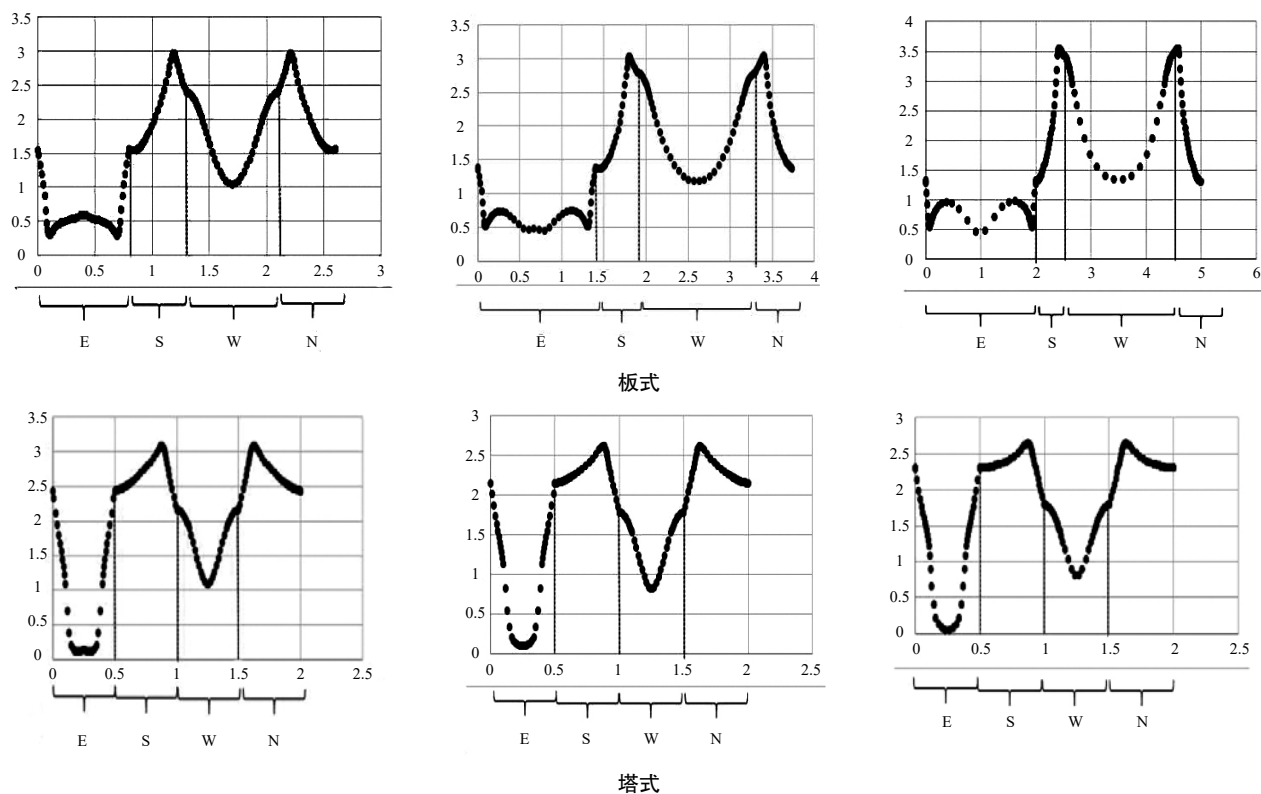


图7 建筑周围 10m 处速度闭合线图

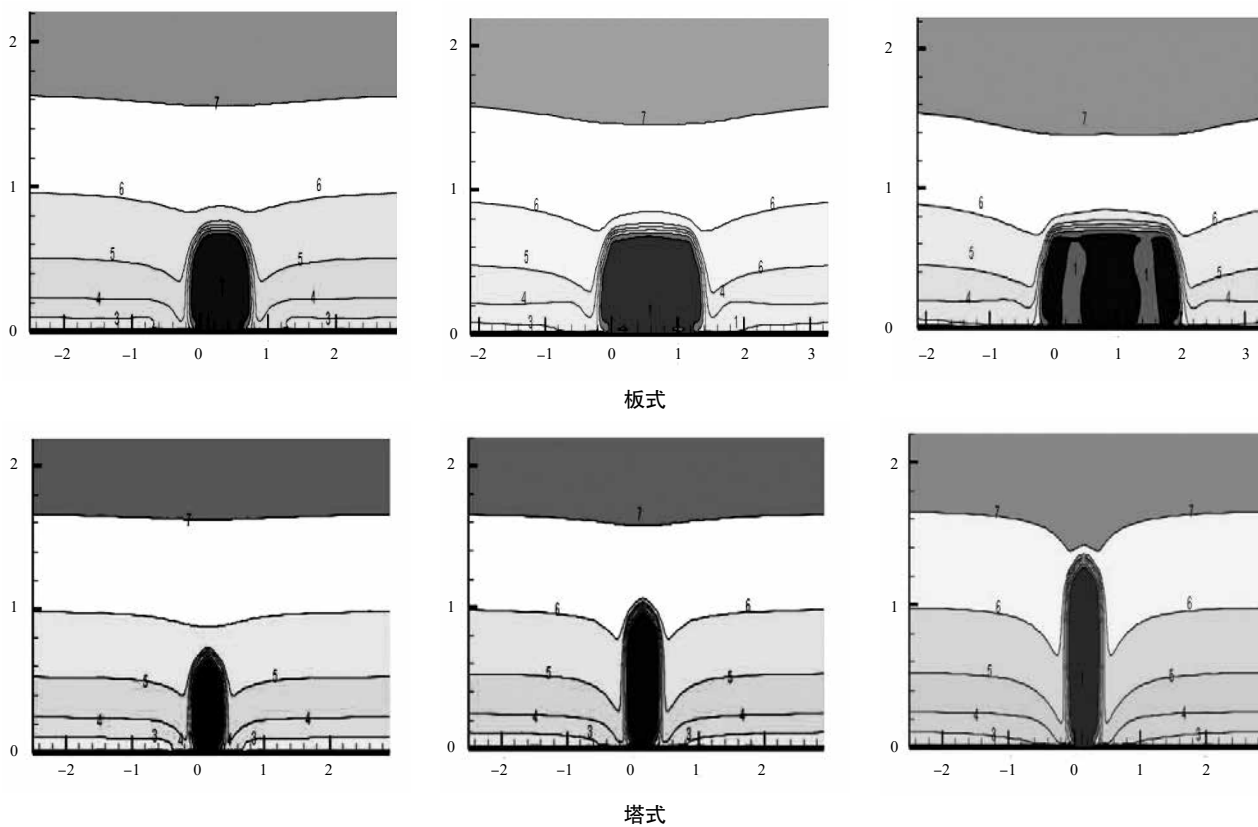


图8 建筑物 10m 后 Y/Z 纵剖面速度图

参考文献

- [1] Chang C.H. Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind-tunnel and computational data[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91:1141–1154.
- [2] Ping H. Numerical simulation of air flow in an urban area with regularly aligned block[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67:281–291.
- [3] Tominaga and Stathopoulos, Y. Tominaga, T. Stathopoulos. CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: a review of current modeling techniques Atmos. Environ., 79 (2013), pp. 716–730.
- [4] Lateb M, Meroney R N, Yataghene M, et al. On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments--A review[J]. Environmental Pollution, 2016, 208(Pt A):271.
- [5] Yoshihide Tominaga. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96 (2008) 1749–1761.
- [6] Yaxing Du. New criteria for assessing low wind environment at pedestrian level in Hong Kong[J]. Building and Environment 123 (2017) 23–36.
- [7] C.W. Tsanga. Wind tunnel study of pedestrian level wind environment around tall buildings[J]. Building and Environment 49 (2012) 167–181. Effects of building dimensions, separation and podium.
- [8] Jian H. The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas[J]. Building and Environment 56 (2012) 346–360.
- [9] B Blocken. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations[J]. Building and Environment 91 (2015) 219–245.
- [10] Holmes, J.D., 2001. The atmospheric boundary layer and wind turbulence. In: Wind Loading of Structures. Spon Press, ISBN 978-0-419-24610-7.
- [11] GB/50009-2012. 建筑结构荷载规范 [S].
- [12] Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96:1749–1761.
- [13] Franke J, Hellsten A, Schlö nzen H, et al. The COST 732 best practice guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2011, 44 (1-4):419–427.
- [14] GB/50045-95. 高层建筑防火设计规范 [S].

BIM 技术在绿色建筑设计中的应用

宣晨晨

(广东博意建筑设计院有限公司, 广东 528311)

[摘要] BIM 技术与绿色建筑都是目前被广泛提起的两个概念, 本文将 BIM 技术应用到绿色建筑的设计中, 利用 BIM 三维建模软件搭建模型导入到绿色建筑分析软件, 进行小区日照时间和风环境分析。此项应用具备行业领先性, 综合了建筑信息模型与绿色建筑两种新技术, 有一定的推广意义。

[关键词] BIM 技术; 绿色建筑; Ecotect Analysis

0 引言

随着中国经济的发展, 对生存环境以及居住舒适性的要求不断提高造成了不加节制的开发与建设, 给环境和资源带来了沉重的负担。因此推进建筑节能, 着力发展绿色建筑及其相关技术产业是实现国家经济可持续发展的重要举措。我国《绿色建筑评价标准》中给出关于绿色建筑的定义: 在建筑的全寿命周期内, 最大限度的节约资源, 做到节能、节地、节水、节材, 保护环境和减少污染, 为人们提供健康、适用的空间, 能与自然和谐共生的建筑。绿色建筑具有较高的经济效益, 提高生产效率, 降低运行费用和维护费用等。

与此同时, BIM 技术也在国内乃至全世界范围得到广泛的应用与推广, 绿色建筑设计是一个跨学科、跨阶段的综合性设计过程, 如果将 BIM 技术应用到绿色建筑设计中, 通过建筑信息模型模拟在真实环境中的建筑朝向、日照、遮阳及建筑全年能耗, 将保证从建筑方案阶段开始, 就始终将环保、低碳、绿色、节能的概念贯穿全设计过程, 达到双管齐下的效果。本文基于某实际规划方案项目, 应用 BIM 技术建立三维模型, 并使用绿色建筑分析软件 Ecotect Analysis 对小区建筑的日照时间和整体风环境进行的模拟分析, 并给出了相关改进建议。

1 绿色建筑分析

1.1 项目介绍

本项目为一住宅小区, 附带商业配套, 总建筑面积为 1887513.34m^2 。投资方希望对小区高层住宅部分进行日照时间和风环境分析。

1.2 项目建模

本项目利用 BIM 三维建模软件来搭建模型, 绿色建筑分析使用的是 Ecotect Analysis 软件。该软件是一款全面的技术性能分析辅助设计软件, 主要用于建筑方案的设计

与优化, 可进行建筑热工与节能、建筑日照、建筑采光与房间声学等多物理性能参数的分析。本项目采用 REVIT 三维建模软件, 搭建建筑体量和场地模型, 再输入到 Ecotect Analysis 软件中进行相关分析。

1.3 绿色建筑分析

在 REVIT 软件中利用模型生成 XML 格式的文件, 导入 Ecotect Analysis 分析软件中进行日照和风环境分析, 与规范中相关要求进行了对比, 评价是否达到绿色建筑的标准。

根据《城市居住区规划设计规范》GB 50180-93 (2002 年版) 的要求, 住宅之间间距应满足大寒日有效日照时间不少于 2h 的要求, 由大寒日照时间分布图可以看出, 个别位置有效日照时间不足 2h, 应适当调整建筑物布局或增加相邻建筑物的间距。

根据《绿色建筑评价标准》的要求, 在夏季主导风向及平均风速模拟条件下, 住宅场地主要人行通道, 距地面 1.5m 高度处风速未超过 5m/s, 由小区 1.5m 高风矢量图可以看出基本符合室外活动舒适度及通风要求, 场地内未出现明显漩涡及静风区。

2 结语

绿色建筑与 BIM 技术都是社会发展应运而生的新技术, 利用 BIM 技术搭建三维模型不仅可以体现建筑信息模型的优势, 同时后续的成果还可以接着用来服务于绿色建筑设计。目前我国乃至全世界都在提倡节能环保, 大力建设绿色建筑, 相信在不久的将来, 我国大地上将会涌现出越来越多的绿色建筑。

参考文献

- [1] Autodesk Ecotect Analysis 应用教程, 第一版.
- [2] 仇保兴. 我国绿色建筑发展和建筑节能的形势与任务——第八届国际绿色建筑与建筑节能大会主题报告. 建设科技, 2012(10):12-17.

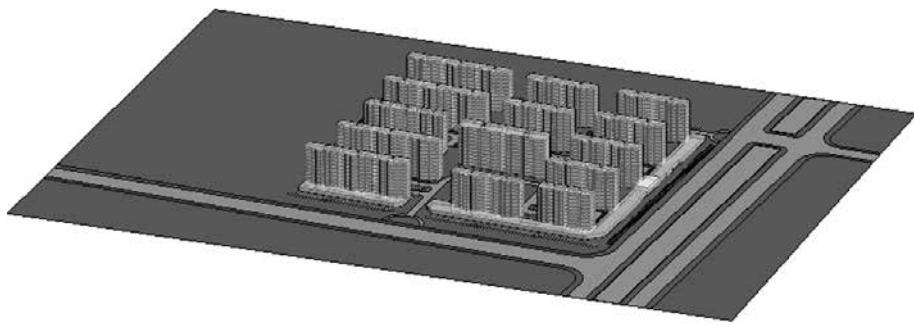


图1 小区高层住宅和场地建模图

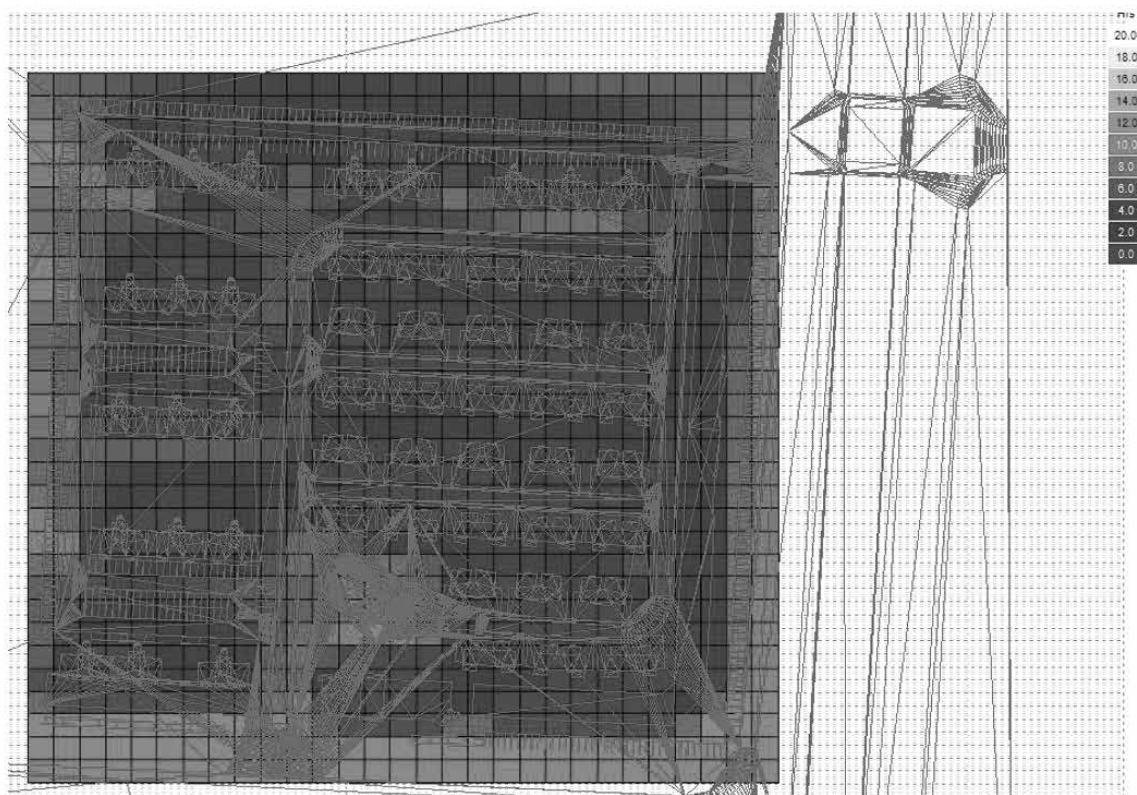


图2 小区大寒日照时间分布图

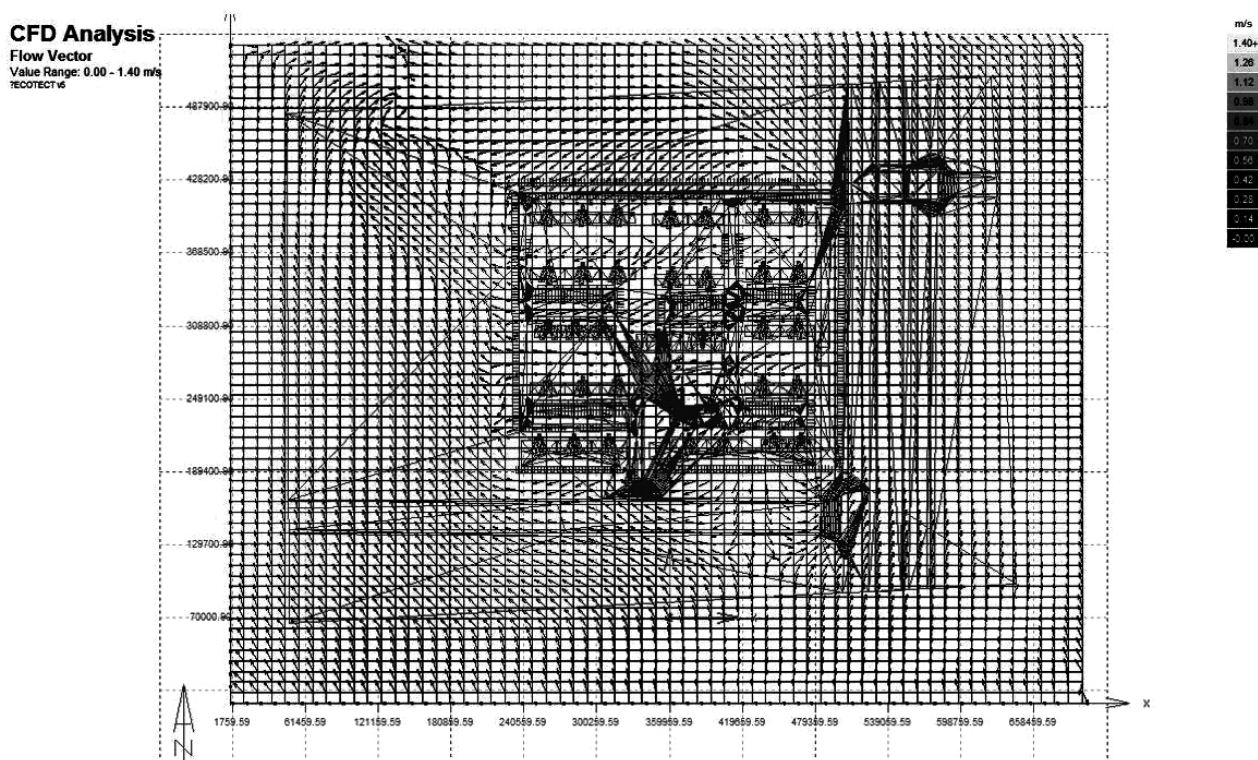


图3 小区1.5m 高风矢量图

建筑物自然通风的计算机模拟研究 ——建筑物绕流及窗户开度对自然通风效果的影响

王 力, 秦敬轩, 潘 微, 张 维

(杭州龙碧科技有限公司, 浙江杭州 310053)

[摘 要] 杭州地处亚热带季风气候区, 过渡季节较长, 每日温度不同, 同时开窗时窗户开度会影响室内通风效果。本研究采用计算流体力学模拟技术 (Computational Fluid Dynamics/CFD), 依据风洞实验数据, 在固定室内热源的条件下, 通过调节窗户开度, 验证室内自然通风的效果以及讨论自然通风和机械通风转换机理。通过和实验结果的对比研究表明: 采用时间平均紊流处理方法 (RANS) 模型中的 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型模拟建筑物绕流和实验结果吻合度良好, 确认了这种紊流模型用于研究建筑自然通风的可行性。另外对杭州某特定目标建筑进行自然通风 CFD 模拟研究, 定量地确认了目标建筑在过渡季迎风面和背风面形成的风压差, 最终形成走廊风现象。通过对不同窗户开度通风效果的对比研究, 确认了目标建筑在低于 50% 窗户开度时, 将导致各房间内通风量偏小, CO_2 浓度偏高。特别是目标建筑的房间 9、房间 10 及房间 12~16 窗户开度至少大于 50%, 房间 1~8 及房间 11 窗户开度至少达到 100% 才能维持建筑室内的舒适度, 同时也讨论了目标建筑在过渡季自然通风和机械通风的转换机理。

[关键词] 建筑窗户开度; 自然通风; 机械通风; CFD; RNG $k-\varepsilon$ 模型; 走廊风

0 引言

随着社会的发展, 机械通风的方式目前已存在于绝大多数建筑, 然而机械通风需要能耗, 从建筑节能的角度考虑, 在气候舒适的天气尽量不使用建筑机械通风而采用自然通风就是一个很好的选择, 因此近年来自然通风在建筑节能中的重要性逐渐凸显, 如果能合理有效的利用自然通风来改善室内空气质量, 则能达到建筑节能和改善室内空气质量的双重目的。

国内外对建筑室内自然通风效果研究较广, 吸引众多学者采用实验或计算机模拟方法进行研究, 得到很多有意义的结论, 如: 探究不同因素对自然通风效果的影响, 其中包括建筑户型、建筑位置、建筑窗户位置等^[1-3]; 分层的自然通风属于置换通风方式, 也可以大大提高空气品质^[4]; 通过采用自然通风不仅可以提升室内空气质量, 而且可以降低机械通风能耗^[5]。但是, 目前用计算机模拟技术详细定量分析窗户开度对室内自然通风效果的影响以及讨论自然通风和机械通风转换机理的研究还不多, 本文依据风洞实验数据, 在固定室内热源的条件下对此进行详细的计算机模拟分析, 并通过结果给出一些有参考价值的结论。

在自然通风的条件下, 室外温度及窗户开度对室内空气质量影响较大, 因此本文从这两个角度出发, 首先采用开源软件^[6], 对一个标准的 2:1:1 建筑绕流进行了 CFD 模拟, 并用风洞试验结果进行验证, 然后以杭州临平银泰城二楼为目标建筑, 研究建筑在过渡季时窗户开度对自然通风效果的影响, 同时考虑室内温度、 CO_2 等参数来评判室内空气质量, 研究建筑窗户开度对室内空气质量的影响及自然通风和机械通风转换的机理。

1 模型验证

1.1 建筑物物理模型

本文首先为了验证计算模型模拟自然通风的合理性, 选用了如图 1 所示的模型与文献 [7] 的实验值进行验证。给定建筑物来流风速呈指数分布: $U \propto z^{0.27}$, 建筑物长宽分别为 0.08m、0.08m、0.16m。

1.2 数值模拟计算域的设定

计算域采用了 Liu 和 Niu^[8] 建议的大小, 如图 2 所示,

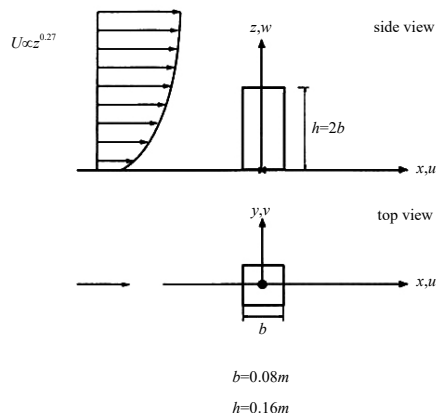


图 1 建筑物绕流的物理模型

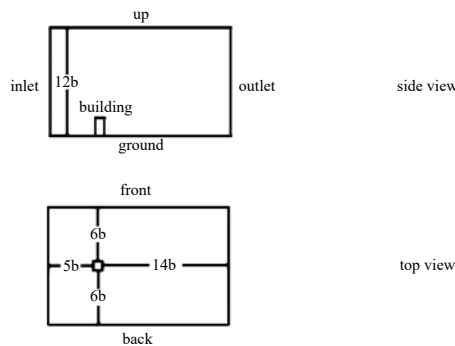


图 2 计算域的大小设置

大小为 $20b \times 13b \times 12b$, 其中 b 即为建筑的宽度 0.08m。

1.3 网格

为了设定合理的网格分布, 本文参考了 Spalart^[9] 的分区方法, 将建筑物绕流分为如图 3 所示的 Eluer 区、RANS 区、LES 区。其中 Eluer 区占大多数区域, 包括远场与来流区域, 如图 3 中的 ER (Eluer Region) 区域, 这些区域

涡的影响较小,粘性力较小,因此被称为 Eluer 区;RANS 区域主要为近壁区,如图 3 中的 RR (RANS region) 区域,这一区域靠近壁面,粘性力占主要作用,因此被称为 RANS 区;LES 区域主要为钝体后面的区域,如图 3 中 FR (Foucs Region) 与 DR (Depature Region),FR 为流体经过钝体后的尾涡区,这一区域由于剪切作用流场中存在很多细小的涡,DR 区为分离区,由于耗散作用,这一区域的涡比 FR 区域要少。因此,在 Eluer 区(迎风与远场)采用较为稀疏的网格,而在 LES 区(背风)进行了网格加密。

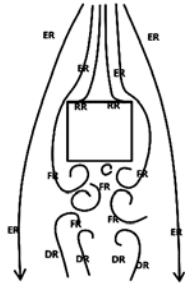


图 3 钝体绕流的不同区域

在 RANS 区,采用了壁面函数^[10], Δy^+ 取值为: $30 < \Delta y^+ < 200$ 。其中 Δy^+ 可以通过 $\Delta y^+ = \delta y u \tau / \nu$ 得到, u_τ 为壁面摩擦速度,可以通过 $u_\tau = C_\mu^{0.25} k^{0.5}$ 估计。其网格如图 4 所示:

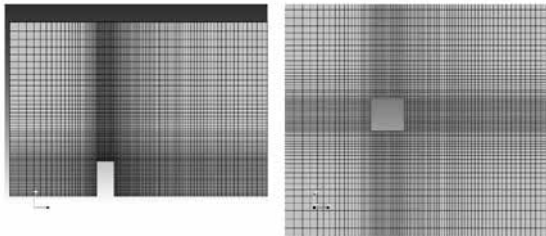
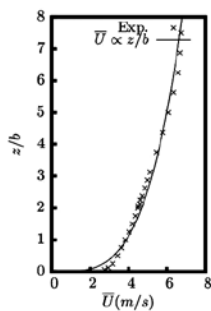


图 4 标准建筑模型网格

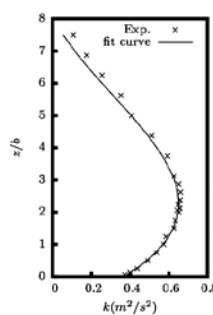
1.4 边界条件

表 1 标准建筑模型的边界条件

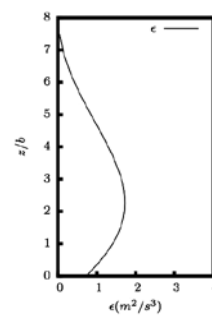
case boundary	Inlet	Outlet	Up	Building Ground	Front Back
u	拟合曲线 (图 5a)	速度出口 (式 1)	滑移 (式 2)	壁面函数 (式 4)	滑移 (式 3)
p	零梯度	固定值 0	零梯度	零梯度	零梯度
k	拟合曲线 (图 5b)	零梯度	零梯度	壁面函数 (式 4)	零梯度
ε	拟合曲线 (图 5c)	零梯度	零梯度	壁面函数 (式 4)	零梯度



(a) 流向的平均速度



(b) 紊流能量



(c) 紊流耗散率

图 5 来流处拟合值与实验值的对比图

Outlet: 出口采用了速度出口边界条件:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, u > 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

其他值如表 1 中所示。

Front/Back: 两侧面采用了滑移边界,垂直于壁面的速度分量设置为固定值 0,其速度分量设置为零梯度。在 Up 面上:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

在 Front/Back 面:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0 \quad (3)$$

其他值如表 1 中所示为零梯度。

Building/Ground: 壁面处采用了壁面函数,根据 Kim 和 Moin^[11] 的结论,当 P 点满足 $30 < y_p^+ < 300$ 时,壁面处无量纲速度 u^+ 满足 log 率:

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln(E y_p^+) \quad k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad \varepsilon = \frac{u_\tau^3}{k y} \quad (4)$$

(4) 中 Von Karman 常数为 $k=0.41$,对于光滑壁面其壁面粗糙系数 $E=9.8$ 。

Inlet: 此边界为自然风来流入口边界,在 RANS 中进口速度 u 、紊流能量 k 可以直接拟合得到,耗散率则通过公式得到:

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}$$

如图 5 所示。其中红点为文献 [7] 中的实验值,蓝色实线为根据文献 [7] 得到的拟合结果。(a) 为进口速度流向 u 的分量(其他分量为 0), (b) 为紊流能量, (c) 为计算得到的紊流耗散率。压力在进口处则为零梯度。

1.5 计算格式与模型选用

本次计算选用 RANS 中的 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型^[12],这一紊流模型广泛应用于 CFD 计算,但其在建筑绕流应用中的准确性的验证较少,因此本文结合文献 [7] 的实验值,对模型进行了验证。

本次计算中对流项采用三阶 QUICK 格式,扩散项采用二阶中心差分格式,时间项采用 Eluer 显式推进方法,时间步长 Δt 为 10^{-4} s。

压力速度耦合采用 PISO 算法,压力泊松方程采用 GAMG 算法求解,速度修正方程采用 PBICG(预处理双共轭梯度)算法求解,紊流耗散率与紊流能量运输方程同样采用 PBICG 算法求解。

1.6 计算结果与验证

文献 [7] 的实验记录了如图 6 所示的坐标点数据，一共 9 列，每个点代表了此截面上对应的位置，都处于 $y/b=0$ 截面上，本次计算分别对比了这几条线上的平均值。其中 a 为 1~10 点所在的直线，同理， $b-i$ 依次类推。

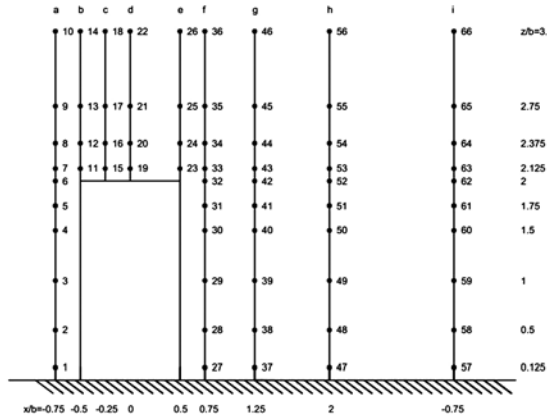


图 6 实验选取点的位置

结合方柱绕流其斯特劳哈尔数 $Sr(fD/U)$ 为 0.13 左右，平均速度以 0.3m/s 计算，计算平均时间需要大于其周期 ($1/f \approx 0.2s$)，因此选择计算的平均时间 ΔT 为 0.4s (推进了 4000 步)。图 7 为不同模型在 $y/b=0$ 截面上模拟得到的平均速度与图 6 所选实验值的对比图，其中红色方块为实验值，蓝色实线为 RNG $k-\epsilon$ 模型在平均时间 ΔT 内的平均速度值。x 轴为平均时间 ΔT 内的平均速度，y 轴为高度 z 。从本次计算的数据中选取直线 $a-i$ 的结果，并将计算结果与直线上对应点的实验值进行对比。

如图 7，(a) 为迎风区的平均速度对比图，RNG $k-\epsilon$ 模型计算结果与实验值很接近；7(b)、7(c)、7(d)、7(e) 为建筑物上部的平均速度对比图，这一区域流体经过建筑物上方会产生分离涡，RNG $k-\epsilon$ 模型模拟结果在这一区域也基本与实验值吻合；7(f)、7(g)、7(h)、7(i) 为建筑的背风区的平均速度对比图，在这一区域 RNG $k-\epsilon$ 模型的结果与实验值相差较大，特别是在 $z=0.15m-0.2m$ 时，模拟的平均速度要小于实验值，这是因为 RNG $k-\epsilon$ 模型对紊流能量采用各向同性的假定，会过大地估计建筑物背风区涡的大小，因此在这一范围内计算的平均速度小于实验值。

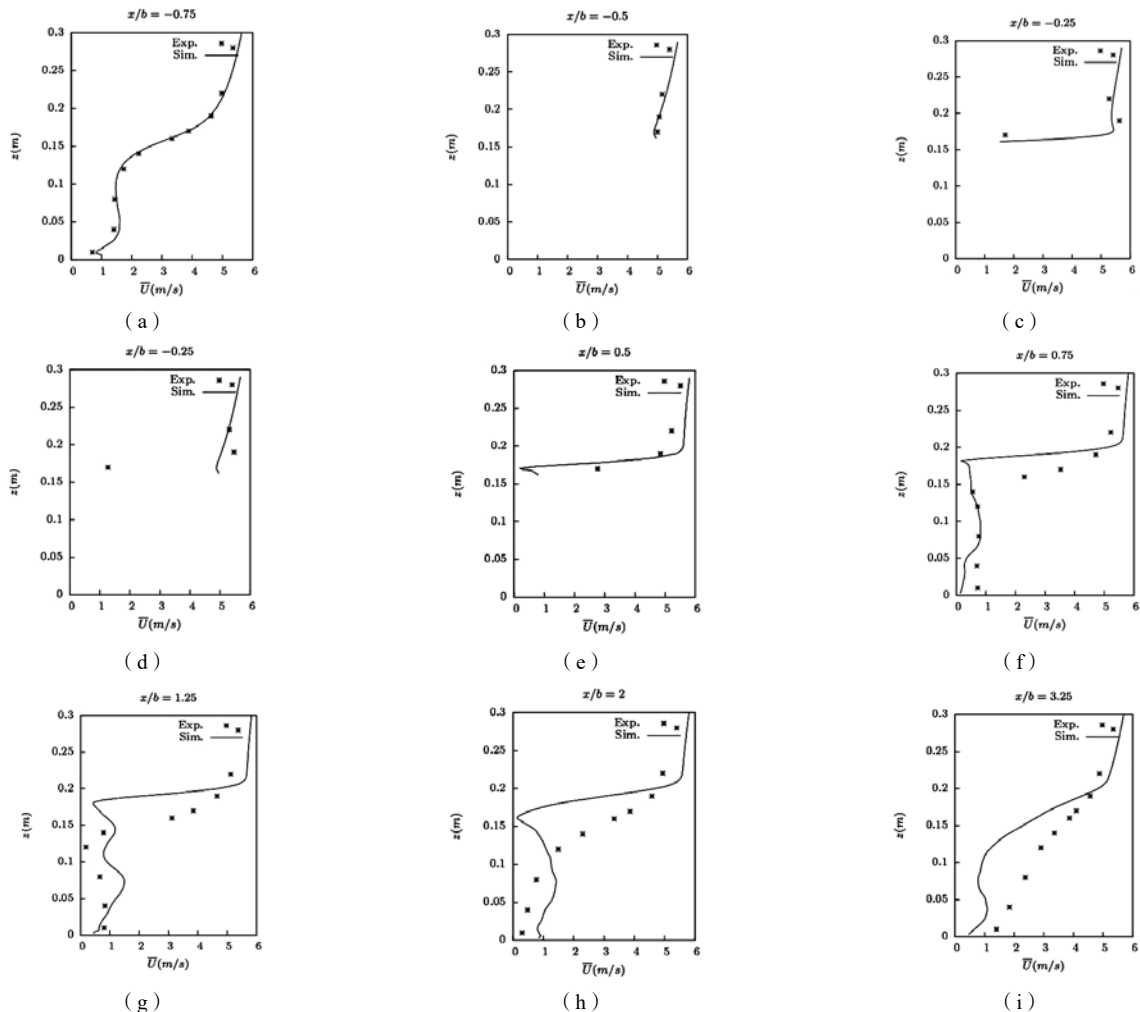


图 7 平均速度的计算值与实验值的对比图

图 8 为 RNG $k-\varepsilon$ 模型计算的 ΔT 内的平均速度以及流线图。经过时间平均后的流场在建筑背风区为一对对称的涡。

经过对比发现采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型能基本反映建筑绕流的流场分布情况，特别是迎风区和建筑物上方的计算结果较为准确，因此本文采用这一紊流模型研究自然通风是合适的。

2 杭州银泰城实际应用案例

2.1 物理模型

本文以杭州临平银泰城为例，如图 9 (a) 所示，为银泰城实际外观图。本文所研究目标建筑为银泰城商场二楼区域，如图 9 (b) 中指出的建筑 M。

以过渡季 5 月份为例，杭州临平银泰城所在环境条件：由气象局数据分析可知，室外温度为 27°C ，来流风向以东南方向为主，各高度来流风速大小遵循 U 的指数变化规律，其中 U 由实验得到。

$$U = 2.04 \times \left(\frac{H}{10} \right)^{0.27} \quad (5)$$

式中： U 为来流风速 (m/s)； H 为距地面高度 (m)。

假定研究目标建筑 M 内热源仅来源于人体散热，其室内热源及 CO_2 散发量参数如表 2。

2.2 网格划分和边界条件

为了使计算结果更加精确，本文将其余建筑与目标建筑 M 进行整体化建模及网格划分，由于其结构较复杂，采用非结构网格划分方式，对 M 的墙体、前后窗户及人体进行局部加密处理（如图 11~13）。本模型中边界条件如表 1 所示，为了简化计算，假定建筑内人体为 32°C 恒温热源、其余均为固体绝热壁面。

如图 11，将建筑外的整个计算域内最大网格设置为 4000mm ；计算域空气入口、出口最大网格设置为 2000mm 、左右面及上下面最大网格为 4000mm 。

表 2 室内热源及 CO_2 散发量参数表

	A 区 (如图 10) 人	B、C 区 (如图 10) 人	人体表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)	呼吸散热温度 ($^{\circ}\text{C}$)	CO_2 轻微运动散发量 $\text{m}^3/(\text{人} \cdot \text{h})$
儿童	10	0	32	37	0.0144
成人	2	5	32	37	0.0173

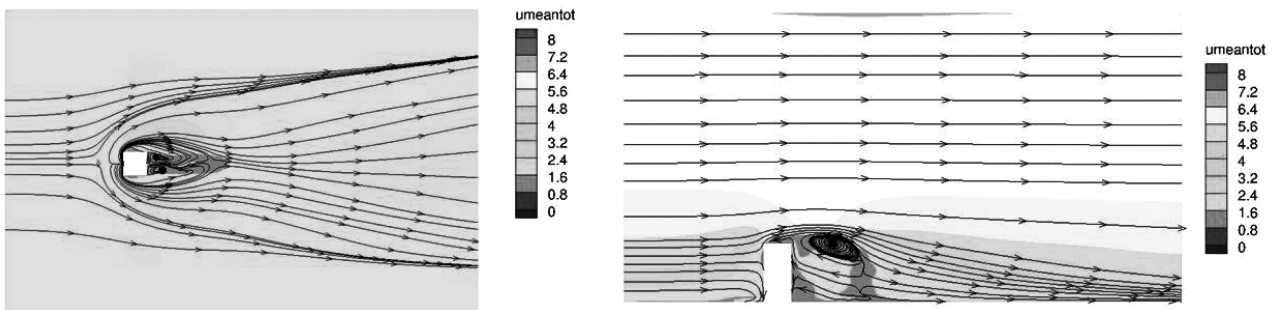
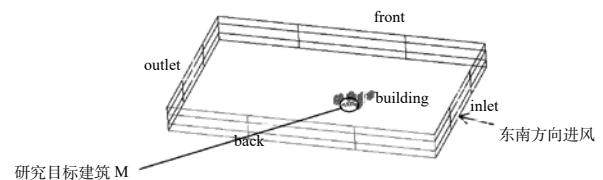


图 8 $z/b=0.125$ (左图) 界面与 $y/b=0$ (右图) 界面上平均速度



(a) 银泰城实际外观图



(b) 为银泰城计算域

图 9 银泰城整体建筑布局图

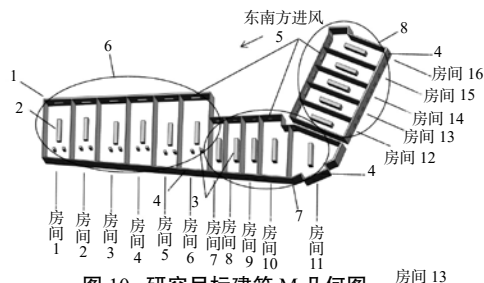


图 10 研究目标建筑 M 几何图

1 为墙体；2 为儿童简化；3 为成人简化；4 为前窗户，处于背风面；5 为后窗户，处于迎风面；6 为幼儿园区 (A 区)；7 为商铺区 (B 区)；8 同为商铺区 (C 区)

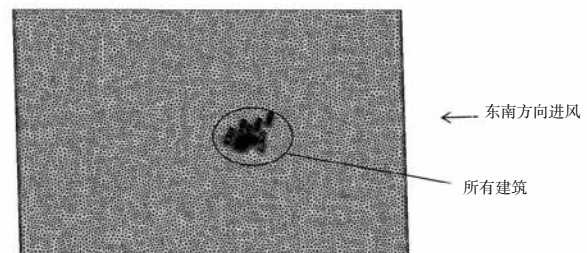


图 11 整体网格划分

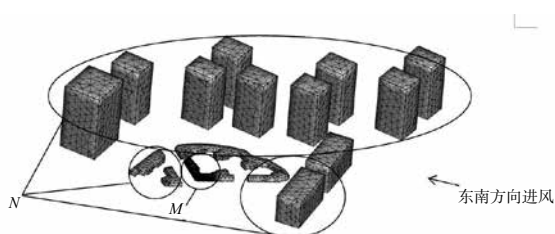


图 12 整体建筑网格划分

其中, M 为自然通风研究目标建筑; N 为其余楼房建筑。

图 12 中除 M 外所有高层建筑表面最大网格设置为 1500mm, 低层建筑表面设置为 800mm, 部分面积较小建筑表面最大网格设置为 150mm。

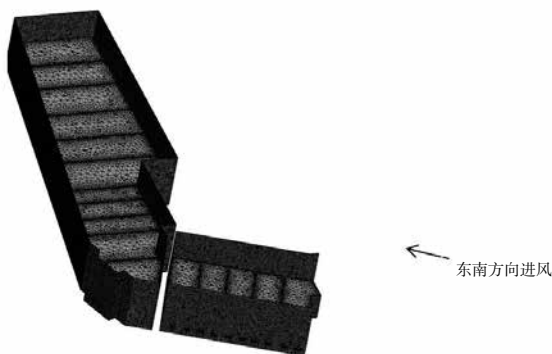


图 13 自然通风研究目标建筑 M 网格划分

图 13 中展示了研究目标建筑 M 的网格划分, 其中由于墙体与墙体之间缝隙较小, 避免两墙体上的网格交错, 所以将墙体表面最大网格设置为 30mm; 各房间房顶和地面最大网格设置为 300mm; 各房间内简化的人体表面最大网格为 80mm; 人体呼出 CO_2 出口简化后及出口其余侧面面积最小, 其最大网格设置为 1mm; 穿过墙体的前、后窗户面上最大网格设置为 5mm; 最终计算域网格总数为 4047042 个。

3 计算方法

3.1 求解过程

由于本文最终求得稳态结果, 因此定义模型为隐式求解, 参照本文第 2 章节中模型验证的结论, 选择 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型, 为了方便计算, k 与 ϵ 取图 5(b)(c) 中最大值, $0.6\text{m}^2/\text{s}^2$ 及 $1\text{m}^2/\text{s}^3$ 。

3.2 计算过程

窗户开度越大室内自然通风效果越好, 间接增强节能效益, 但是过渡季节气候条件不同, 开度越大, 室内舒适度不一定越好。为了研究窗户开度对自然通风效果的影响, 本文设置目标建筑的前后窗户开度为 20%、50%、100% 三种开窗方案, 并分别建立三种几何模型, 通过 CFD 计算, 对比分析各开度下目标建筑室内通风量、 CO_2 浓度及温度等参数变化, 以找出最佳工况。三种模型参数如表 3。

表 3 三种方案对比表

方案	窗户开度 %	网格划分	室内热源	室外温度 $^{\circ}\text{C}$	人体舒适温度 $^{\circ}\text{C}$	室外 CO_2 浓度 ppm	室内 CO_2 浓度限制 ppm
方案一	20	非结构划分方式、局部加密	均为固定壁面温度	27 $^{\circ}\text{C}$	25-28	400	<1000
方案二	50						
方案三	100						

4 计算结果与分析

4.1 整体压力、速度分析

速度 (m/s) 0 1 2 3

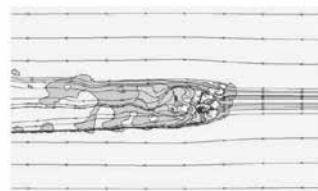


图 14 1.2m 高度速度流线等值线图

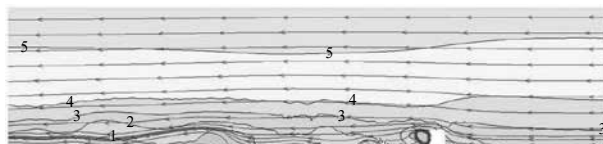


图 15 纵剖面速度流线等值线图

整体来流速度按照速度指数的变化规律, 由下至上, 速度越来越大, 达到 10m 高度时, 速度达到最大值 2.04m/s。如图 14、图 15 为 1.2m 高度及纵剖面上速度流线等值线图, 来流靠近建筑时受建筑阻挡影响, 使部分空气上移至建筑顶部流过, 且在较高建筑前, 即迎风面上速度由下至上显著增大; 另一部分空气则由建筑侧面, 即建筑与建筑之间的缝隙流过, 导致此缝隙处空气流速较大, 易形成风速较大的走廊风。

压力 (Pa) -3.5 -2.2 -0.9 0.4 1.7 3



图 16 1.2m 高度压力等值线图



图 17 纵剖面压力等值线图

如图 16、图 17, 为 1.2m 高度及纵剖面上压力等值线图。建筑前, 即迎风面上空气流速较小, 压力较高, 形成较大正压区, 同时越靠近建筑, 压力越大; 在较高建筑后和建筑顶部, 即背风面上易形成较大速度漩涡, 同时形成较大负压。这与文献 [13] 中提到的结论一致: 利用建筑前后的正负压差, 同时若建筑局部留有横向通道, 可以使建筑内达到一定的自然通风效果。

如图 18、图 19 为目标建筑 M1.2m 高度的速度及压力等值线图。M 周围流速及压力受其余建筑影响，导致后窗（如图 10）处于迎风面，前窗处于背风面，且迎风面压力较大，背风面压力较小。打开 M 内各房间窗户，易形成走廊风现象，此时，通过改变窗户开度，便可调节自然通风效果。

4.2 研究目标建筑内通风量及 CO₂ 浓度分析

通过取样求得流经研究目标建筑 M 各房间窗户截面的平均速度，进一步求得各房间内通风量，如表 4 所示，三种方案均按速度梯度流场持续给风，由于周围建筑影响研究目标建筑 M 的风速风压，流经各房间窗户的平均风速已降至 0.4m/s 以下；窗户开度由 20% 增加至 100%，窗户通风面积逐渐增加，经计算得到通风量随之增大，间接影响各房间内的 CO₂ 浓度。

如图 20，为三种窗户开度方案的 CO₂ 浓度等值线图，

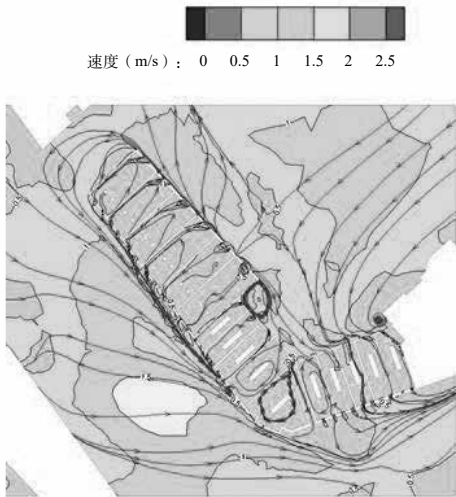


图 18 研究目标建筑 M 内速度等值线图

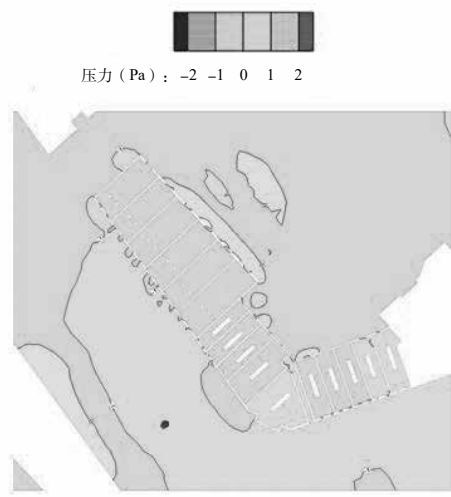


图 19 研究目标建筑 M 内压力等值线图

表 4 各房间通风量表

	窗户开度 /%	房间 1	房间 2	房间 3	房间 4	房间 5	房间 6	房间 7	房间 8
各房间窗户面积 m ²	20	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.084	0.084
	50	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.21	0.21
	100	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.42	0.42
各窗户平均流速 m/s	20	0.13	0.15	0.13	0.14	0.12	0.15	0.3	0.3
	50	0.1	0.11	0.09	0.12	0.11	0.14	0.23	0.21
	100	0.11	0.14	0.12	0.15	0.14	0.18	0.31	0.23
各房间通风量 m ³ /h	20	91.7	105.8	91.7	98.8	84.7	105.8	90.7	90.7
	50	176.4	194.0	158.8	211.7	194.0	247.0	248.4	226.8
	100	388.1	493.9	423.4	529.2	493.8	635.4	468.7	347.8
	窗户开度 /%	房间 9	房间 10	房间 11	房间 12	房间 13	房间 14	房间 15	房间 16
各房间窗户面积 m ²	20	0.084	0.084	0.07	0.138	0.138	0.138	0.152	0.07
	50	0.21	0.21	0.175	0.345	0.345	0.345	0.38	0.175
	100	0.42	0.42	0.35	0.69	0.69	0.69	0.76	0.35
各窗户平均流速 m/s	20	0.32	0.3	0.38	0.18	0.16	0.16	0.19	0.21
	50	0.25	0.24	0.26	0.13	0.14	0.13	0.13	0.24
	100	0.23	0.22	0.31	0.1	0.1	0.11	0.15	0.19
各房间通风量 m ³ /h	20	96.8	90.7	95.8	89.4	79.5	79.5	104.0	52.9
	50	189.0	181.4	163.8	161.5	173.9	161.5	177.8	151.2
	100	347.8	332.6	390.6	248.4	248.4	273.2	410.4	239.4

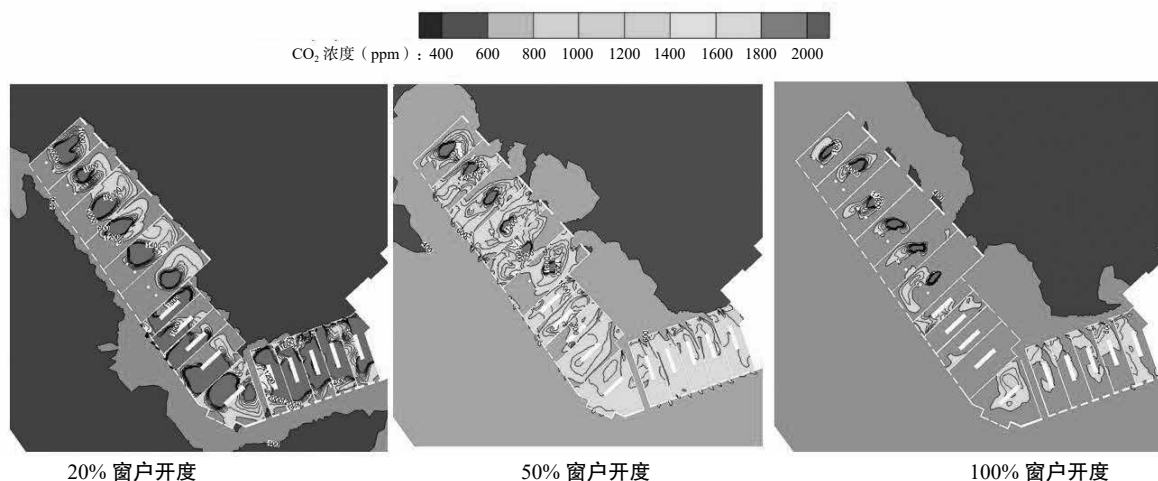


图 20 研究目标建筑 M 内 CO₂ 浓度等值线图

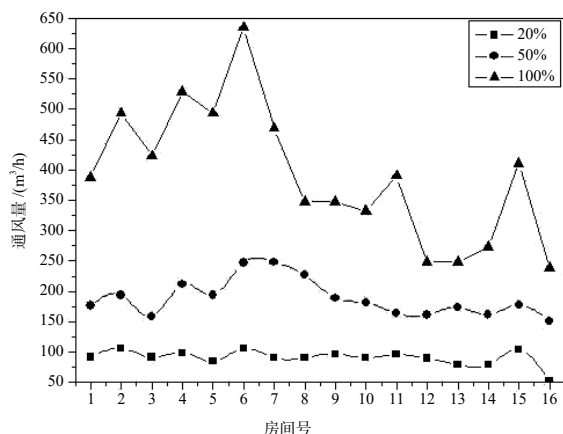


图 21 各房间通风量的变化图

如图 21 为不同窗户开度条件下各房间的通风量变化图。由于开度不同,使其通风面积不同,导致通风量不同,20% 窗户开度时,房间 6 通风量最大为 108.5m³/h,房间 16 通风量最小为 52.9m³/h; 50% 窗户开度时,房间 6 窗户开度时变为 247m³/h,房间 7 通风量最大为 248.4m³/h,房间 16 通风量仍然最小为 151.2m³/h; 100% 窗户开度时,房间 6 通风量仍最大为 635.4m³/h,房间 16 通风量仍最小为 239.4m³/h。结合图 18、19,后窗户位置处于迎风面,房间 6、7 正与来流风向相对,风力较大,风压最小,导致此处风速偏高,通风量最大; 100% 窗户开度时,房间 11 的通风速度最大,是因为房间 11 与房间 12 之间处于较大走廊风位置,导致房间 11 的风速较高,但是其窗户面积相对其他房间较小,所以通风量较小。如图 18、19,房间 16 迎风面(后窗户)处于涡流区,其风压较小,极易造成风速较小,导致通风量较小。

5.3 研究目标建筑内温度分析

如图 22,是三种不同窗户开度方案下的温度变化等值线图。由于窗户开度不同,导致经过目标建筑的走廊风不同。由 20% 增加到 100% 窗户开度,走廊风流量也在逐渐增加,周军莉等^[14]与董成杰等^[15]也提到,开口开度越大,流量系数越大,即通风量越大,走廊风越大,自然通风效

果越好。本模型中窗户开度 20% 时,走廊风最小,致使建筑内通风量最小,而目标建筑内热源散热量不变,最终导致 20% 窗户开度下的室内温度最高,建筑 A 区室内局部温度可以达到 27.6℃,B、C 两区域由于室内面积较小,温度增加较大,局部已超过人体生活适宜温度 28℃; 50% 窗户开度下,建筑 A 区整体室内温度已控制在 27.6℃ 以下,B、C 三区温度有所改善; 100% 窗户开度下,整个目标建筑室内温度均在 27.6℃ 以下。因此,室外温度 27℃ 时,目标建筑内若要达到适宜温度,研究目标建筑所有窗户开度至少 50%。

5 结论

为了验证 CFD 模拟自然通风的合理性,本文计算了 2:1:1 建筑物绕流并和风洞实验值进行了对比,进而又进行了杭州临平银泰城的建筑物绕流与通风案例的模拟研究,得出了以下结论:

1. RANS 模型中的 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型能很好的适用于建筑物绕流的计算,其结果接近于实验值,确认可以应用于自然通风研究。

2. 将 RNG $k-\epsilon$ 模型应用于杭州临平银泰城的自然通风计算中发现:

(1) 由于目标建筑坐落在建筑群中,其自然通风除受到建筑内热源影响以外,还受到其周围建筑形成的走廊风影响,使得目标建筑迎风面与背风面形成一定压差,最终形成室内走廊风现象;

(2) 针对目标建筑室内空气质量,在杭州过渡季节,室外风以东南风为主,风速大小遵循指数变化规律时,低于 50% 窗户开度会导致各房间内通风量较小,CO₂ 浓度较高,因此研究目标建筑的房间 9、房间 10 及房间 12~16 窗户开度至少大于 50%,房间 1~8 及房间 11 窗户开度至少达到 100%,才能保证室内 CO₂ 浓度符合室内限值要求(<1000ppm);

(3) 在杭州过渡季节 5 月份,室外空气来流温度达到 27℃,研究目标建筑内若要达到适宜温度,窗户开度必须在 50% 以上。在自然通风不满足室内舒适条件时,必须考虑切换成机械通风模式。

综上所述,在杭州过渡季时期,一定风速情况下的自然通风通过调节窗户开度,可以达到较好的自然通风效果,

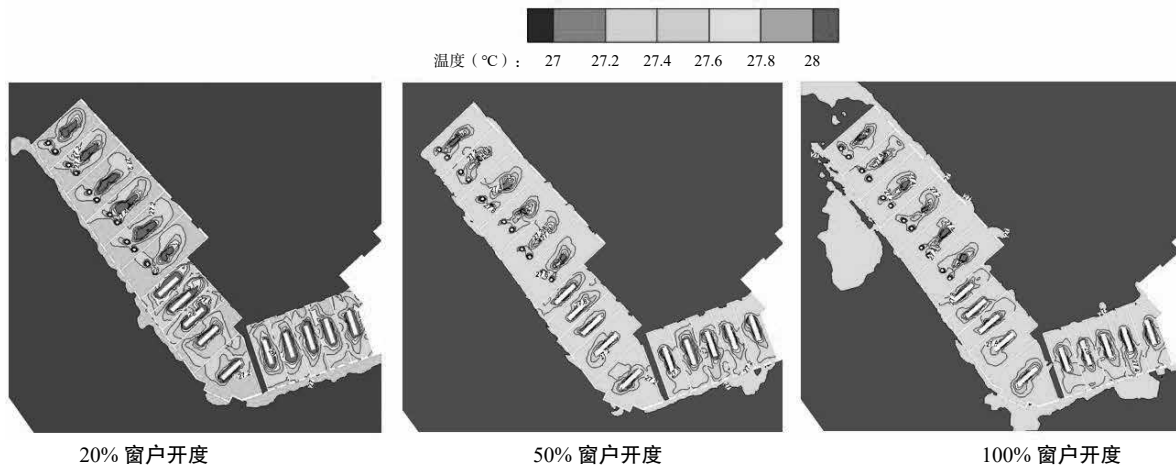


图 22 研究目标建筑 M 内不同开度的温度等值线图

若室外温度过高、室外风速降低时,则需转换为机械通风。另外,本文仅探讨了杭州过渡季 5 月持续一定风速时,窗户开度对室内自然通风效果的影响,更详细的自然通风讨论,如脉动风速、变换风向及开窗位置、建筑布局等因素的影响,还需要在今后的研究中进行综合分析。

注:本论文为龙碧科技参与《建筑自然通风设计标准》编制工作的部分研究内容,此标准由湖南大学张国强教授领导的编制组编制,在此特别感谢编制组相关工作人员及组织单位。

参考文献

- [1] P.A. Favarolo, H. Manz. Temperature-driven single-sided ventilation through a large rectangular opening [J]. Building and Environment. 2005, 40(5): 689–699.
- [2] 吕书强. 窗户位置和尺寸对住宅室内自然通风的影响及效果评价 [D]. 天津大学, 2010.
- [3] 朱柯, 杨家明, 郑昌金, 刘乘铭. 自然通风与建筑节能分析 [J]. 科技展望, 2017, 27 (21): 30.
- [4] 张兵, 耿世彬, 彭关忠等. 不同通风方式对室内空气品质的影响研究 [C]. 江苏省暖通空调制冷 2005 年学术年会论文集. 2005: 245–250.
- [5] 林波荣, 肖娟. 我国绿色建筑常用节能技术后评估比较研究 [J]. 暖通空调, 2012, 42(10): 20–25.
- [6] OpenFOAM User Guide [M]. OpenFOAM Foundation Ltd, 2017.
- [7] Meng Y, Hibi K. Turbulent measurements of the flow field around a high-rise building [J]. JWE, 2010, 1998(76): 55–64.
- [8] Liu J, Niu J. CFD simulation of the wind environment around an isolated high-rise building: An evaluation of SRANS, LES and DES models [J]. Building & Environment, 2016, 96: 91–106.
- [9] Philippe R. S. Young-Person's Guide to Detached-Eddy Simulation Grids [M]. NASA Langley Technical Report Server, 2001.
- [10] H K Versteeg, W Malalasekera. An Introduction to Computational Fluid Dynamics [D]. Pearson Education Limited, 2007.
- [11] Moin P, Kim J. Numerical investigation of turbulent channel flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 118(-1): 1280–4.
- [12] Yakhot V, Orszag S A, Thangam S, et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique [J]. Physics of Fluids A, 1992, 4(7): 1510–1520.
- [13] 钟军立, 曾艺君. 建筑的自然通风设计浅析 [J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(2): 19–21.
- [14] 周军莉, 张国强, 许艳. 等. 自然通风开口流量系数影响因素探讨 [J]. 暖通空调, 2006, 36(12): 42–45.
- [15] 董成杰, 刘鹏. 建筑户型对自然通风效果的影响 [J]. 山西建筑, 2010, 36 (22): 209–210.

南方中亚热带地区高大空间自然通风分析

项卫中, 李 凯

(中国中元国际工程有限公司, 北京海淀 100089)

[摘 要] 本文通过一个实际工程案例探讨 CFD 在高大空间自然通风分析设计中的应用。建筑设计中往往需要判断自然通风所能取得的效果, 也经常需要比较各种不同方案的优劣。在传统设计自然通风的效果以及各种方案的比较通常通过经验分析、类比等方法来完成, 这显然不是一种理想的设计与优化方法。在计算机高速发展的信息时代, 我国的建筑设计行业也必将走上一条更加现代化的道路, 而计算机模型分析与设计技术的高度融合将无疑是建筑设计现代化的显著标志之一。

[关键词] 自然通风; CFD; 高大空间; 设计现代化

0 引言

自然通风, 顾名思义就是利用自然的力量进行通风的技术。自然通风具有通风量大, 不需要消耗动力的优点, 利用的是真正意义上的可再生能源。应该在建筑, 特别是高大空间建筑中得到广泛的应用。高大空间建筑具有建筑面积大, 人员密集, 空调负荷大的特点, 正确设计自然通风系统可以极大地减少空调系统的能耗。如果能够把足够量的室外空气搬运到大剧院内部, 就可以消除其围护结构得热, 人体灯光散热以及人体散发的 CO_2 , 气味等。创造一个相对舒适的环境, 又可以节省大量能源, 体现绿色建筑的真正内涵。

自然通风按其推动力可分成两类: 风力驱动的自然通风和浮力驱动的自然通风。风力驱动的自然通风受风力大小, 方向的影响 (则有风时有通风, 无风时无通风), 所以不是一种稳定的驱动力。而浮力驱动的自然通风取决于室内外的温差, 室内的发热量以及进风口的高差。高大空间建筑由于其进深很大, 一般不适宜采用依靠风力作用的自然通风。对于像影剧院, 车站, 展览中心这样的高大建筑, 由于人员大多集中在建筑物的下部而建筑的高度又往往很大, 又具有大量的余热, 因而特别适合采用依靠浮力的自然通风。

我国南方中亚热带地区夏季气候炎热, 单纯依靠自然通风无法解决建筑的降温问题。自然通风只能作为过渡季降温的一种手段。不过这个地区在春夏之间, 秋冬之间各有一个较长的过渡季。以湖南长沙为例, 从3月中旬到6月中旬已经从8月下旬到11月上旬这段时间, 室外的气温大多在 $18^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ 之间。这个温度适合进行自然通风。见图1。

这样算来, 在长沙以及附近的方中亚热带地区每年有4~5个月时间适合进行自然通风。然而也要注意, 在这个地区冬季的室外温度还是很低的。在进行自然通风设计时, 同时还要考虑建筑物的冬季保暖和密封。

1 自然通风的舒适性

热舒适是指人们对所处室内气候环境 (主要指冷暖、阳光、通风等) 满意程度的感受, 夏季采用自然通风降温是改善舒适度的主要手段之一。如果室外最高温度不超过 $28\sim 32^\circ\text{C}$, 日温差小于 10°C 的地区, 在室内利用自然通风能够达到通风降温的目的。并且利用自然因素形成的空气流动, 能够加快人体皮肤的汗液蒸发, 减少人体的热不舒适。根据参考文献 [1], 风速对室内热舒适的影响如表1所示:

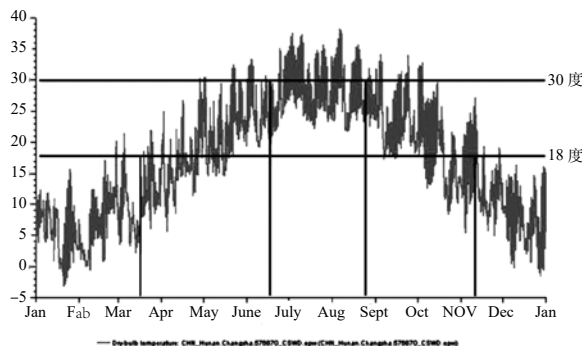


图1 长沙地区全年干球温度变化

表1 风速对自然通风舒适性的影响

风速 / (m/s)	相当于温度降低幅度 / $^\circ\text{C}$	对舒适度的影响
0.05	0	静止, 不舒服
0.2	1.1	几乎感觉不到风, 但比较舒服
0.4	1.9	可以感觉到风而且比较舒服
0.8	2.8	比较大的风, 但在某些多风地带, 炎热地区还可以接受
1.0	3.3	在气候干燥炎热地区自然通风的良好风速
2.0	3.9	在气候潮湿炎热地区自然通风的良好风速

由表1可见, 当风速提高时, 虽然温度较高但仍可获得较高的舒适度。例如, 当自然通风风速达到 $0.8\text{m/s}\sim 1.0\text{m/s}$ 时, 感受到温度比实际温度可降低 $2.8^\circ\text{C}\sim 3.3^\circ\text{C}$ 。也就是说当气温为 $31^\circ\text{C}\sim 32^\circ\text{C}$, 风速为 $0.8\text{m/s}\sim 1.0\text{m/s}$ 时, 人体的感觉与受空气静止气温为 $28^\circ\text{C}\sim 29^\circ\text{C}$ 时相类似。这样的环境应该还是可以接受的。

2 株洲某大剧院自然通风设计

自然通风是一个非常复杂的流动与传热过程。自然通风的效果如何对于一个十分复杂的建筑物用常规方法通常难以判断。CFD (计算流体动力学技术) 是分析浮力作用下自然通风效果的有效工具。这里对位于株洲某大剧院的自然通风状况进行分析, 对不同自然通风设计方式进行对比。

该大剧院项目位于湖南省株洲市。大剧院由一个1400座大剧院、一个400座试验剧场及公共服务空间、后勤辅助用房组成。总建筑面 40388m^2 , 总长度 200.3m , 总宽度 124m 。图2为株洲某大剧院远眺。



图2 株洲某大剧院远眺

该大剧院由大剧场,实验剧场及其他辅助用房所组成。为了简化模型,抓住自然通风计算的关键,大剧场内部空间简化为如图3所示。由图可见,虽经简化,大剧场内部空间仍然是相当复杂的。

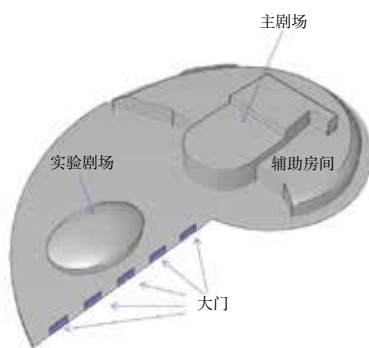


图3 大剧院内部结构

一开始,对于株洲大剧院的自然通风,存在两种不同的意见。一种意见认为应该采用如图4左面的大屋顶开启的通风方法,进风则采用大门开启以及沿外墙下部的开窗来解决。

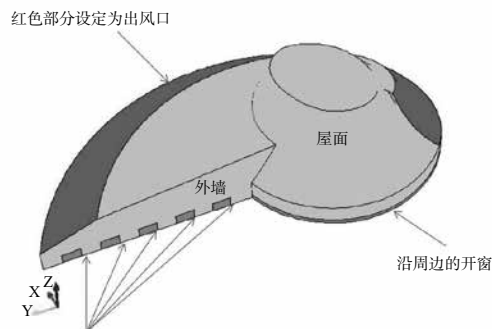


图4 大部分屋面通透自然通风方式(CFD计算几何模型)

经过分析认为这种方式具有以下缺点:

(1) 大面积屋面开启,即使采用防雨百叶,漏雨问题仍然不易解决;

(2) 冬季屋面无法关闭,无法保持内部舒适环境(株洲地区虽然处在我国南方,但冬季仍然可能出现温度远低于 0°C 的状况)。

如图5所示的自然通风方式可以在保证获得良好自然通风效果的前提下,避免大屋面开启通风方式所带来的一些难以避免的缺点。为了对比两种自然通风方式的效果,对这两种方式分别进行模拟计算。计算的条件为:室外干球温度为 30°C 。

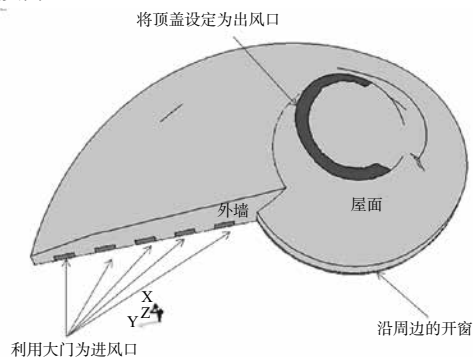
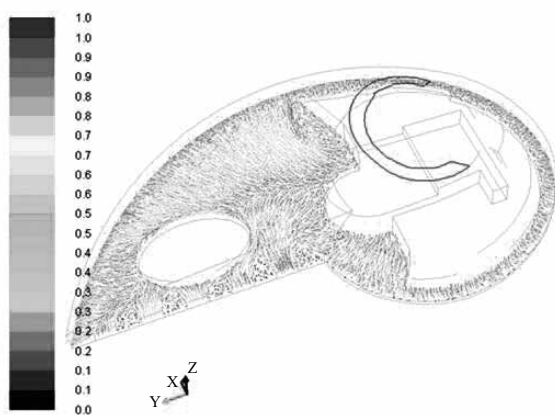
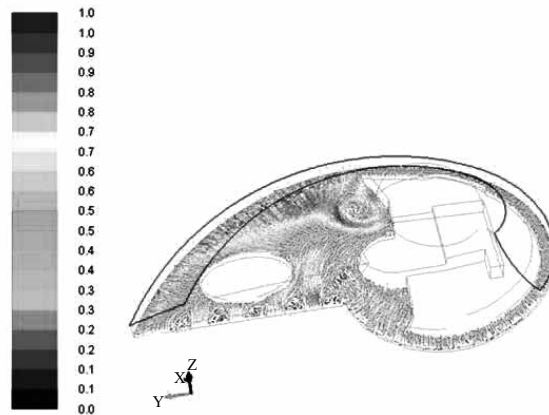


图5 最高处集中开口方式自然通风方式(CFD计算几何模型)



大剧院最高处集中开口方式某剖面空气流速 (m/s)



大部分屋面通透方式某剖面空气流速 (m/s)

图6 两种自然通风方式的流场比较

2.1 夏季自然通风效果的比较

图 6 对两种自然通风方式的流场进行比较。由图可见采用最高处集中开口方式，大剧院内部公共空间的气流速度比较均匀，而采用大屋面通透方式气流主要集中在公共空间左上角的地方。在靠近大剧场左面入口附近还产生了一个大漩涡。

这里比较采用大剧院最高处集中开口方式和大部分屋面通透方式在距地 1.5m 高处的空气温度。左图为采用大剧院最高处集中开口方式，右图为大部分屋面通透方式。从图可见，采用最高处集中开口方式在 1.5m 高度处的空气温度优于大部分屋面通透方式。两种方式的最高温度都出现在大剧院的入口处，为改善舒适度建议在此处设置机械送风。

2.2 冬季保温效果的比较

图 8 对两种开口方式对冬季室内环境的比较。大面积屋面开启方式由于屋顶的百叶冬季无法关闭，室内热量从屋顶开口排出而室外空气同时又会大量冷空气从屋顶开口进入。从而使室内温度与室外几乎相等。

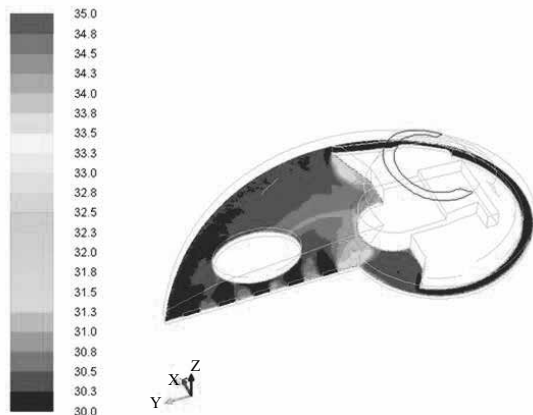
而采用顶部可关闭集中开口通风方式，在冬季可以将绝大部分通风口关闭，仅仅打开小部分通风口以满足大剧

院最小通风量的要求。这样由于通风量的大大减少，因为大剧院内部的发热，太阳得热等。使得大剧院内部空间的温度至少比大屋面开启方式提高 5℃ 以上。以冬季当室外温度 10℃ 为例，大屋面开启方式的大剧院内部空间的温度与室外温度几乎没有差距。而采用顶部可关闭集中开口通风方式，剧院内部空间温度可达 15℃ 以上。大大改善了大剧院公共空间的冬季舒适性。

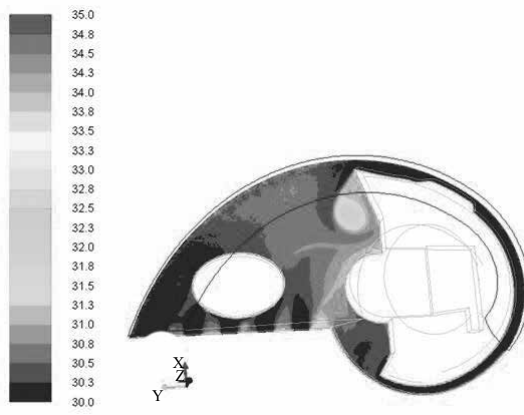
经过以上分析分析与讨论，该项目最终决定采用最高处集中开口方式自然通风方式。

3 讨论

CFD 分析技术从实质上将是一种半理论的分析问题的方法，这与传统设计中遇到复杂问题时经常采用的凭经验、类比甚至拍脑瓜是一种巨大的进步。如果我们在分析时能够选用正确的计算模型、正确的边界条件并对一些重要问题作正确假设，CFD 分析在建筑设计方面具有十分广泛的应用前景。我国正处于产业转型的重要阶段，如何实现设计与研发技术的现代化是一个十分值得思考的问题。毫无疑问，计算机模型分析在设计和研发过程中使用的深度、广度及效果是区别传统设计（研发）与现代设计（研发）的重要标志。

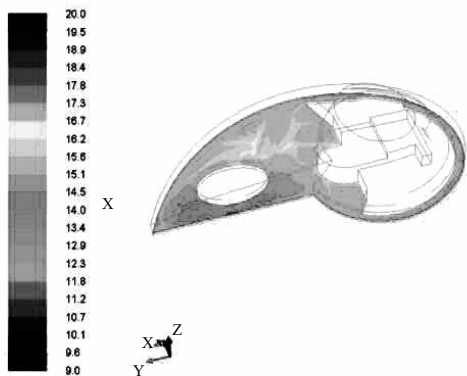


大剧院最高处集中开口方式 1.5m 高度处空气温度

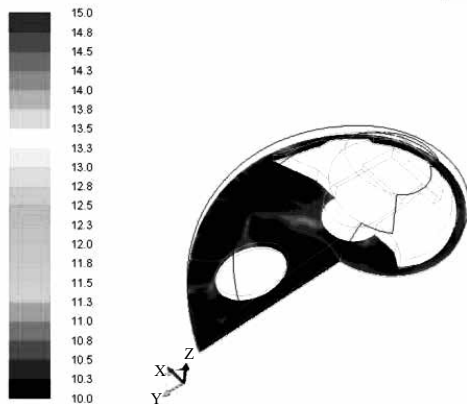


大部分屋面通透方式 1.5m 高度处空气温度

图 7 两种自然通风方式的温度场比较



大剧院最高处可集中开口方式 1.5m 高度处空气温度（集中开口关闭）



大部分屋面通透方式 1.5m 高度处空气温度（通透百叶不能关闭）

图 8 两种自然通风方式冬季保温效果的比较

基于不确定性分析及生命周期分析的 零能耗建筑系统优化设计

黄佩¹, 孙勇军¹, 陈嘉宇²

(1. 香港城市大学建筑科技学部; 2. 香港城市大学建筑与土木工程学系, 香港 999077)

[摘要] 零能耗建筑被看做是降低建筑碳排放和减少建筑能耗的有效解决方法。合理地设计零能耗建筑系统(如暖通空调系统, 产能系统, 储能系统等)对零能耗建筑有良好的能耗表现, 热舒适表现, 以及电网友好性至关重要。老化现象在零能耗建筑能源系统中广泛存在, 并会不可避免地导致零能耗建筑长期的表现变差。在设计阶段忽略系统部件老化, 可能会导致设计的系统仅能在运行最初几年有满意的表现。因此, 本文提出了一种分析零能耗建筑生命周期表现的方法, 来评估老化对零能耗建筑长期表现的影响。该方法不仅考虑了建筑热负荷和天气参数的不确定性, 也考虑了零能耗建筑能源系统组件的老化。基于此分析生命周期表现的方法, 本文还提出了一个简单的两阶段优化设计零能耗建筑系统的方法, 并与传统的设计方法对比。结果表明考虑了老化影响的方法设计出的系统从长远来看有更好的表现。

[摘要] 零能耗建筑; 老化; 不确定性分析; 生命周期表现

0 引言

在全球范围, 建筑占总能耗的 40%, 在香港, 建筑所占能耗甚至高达 60%。零能耗建筑被看做是降低建筑碳排放和减少建筑能耗的有效解决方法。目前, 全球很多政府机构已制定了零能耗建筑相关的法律或规范来促进零能耗建筑的应用。例如, 欧洲建筑能源绩效部计划在 2020 年之后实现所有新建筑物为“近零能耗建筑”^[1,2]。美国政府制定了至 2040 年 50% 的商业建筑实现零能耗, 至 2050 年 100% 的商业建筑实现零能耗的目标^[3]。合理地设计零能耗建筑系统(如暖通空调系统, 产能系统, 储能系统等)对零能耗建筑系统有良好的能耗表现, 热舒适表现, 以及电网友好性至关重要。然而, 有两个影响零能耗建筑系统设计的重要因素: 建筑物使用情况和天气参数中存在的的海不确定性, 以及零能耗建筑系统部件的老化^[4,5]。前者容易造成建筑能源需求评估不准确, 从而导致设计的零能耗系统过大^[6], 后者可能导致设计的系统从长远角度看表现不好。

近年来, 学者逐渐意识到不确定性的重要性, 并提出了一些基于不确定性的零能耗建筑系统的设计方法。例如 Sun^[6] 和 Zhang^[7] 提出了基于不确定性和多标准决策的零能耗建筑系统设计方法, 在多标准决策的框架下选择最优设计。该方法考虑了三个性能指标: 初始成本, 热舒适度, 和功率不匹配度。Lu 提出了基于单目标优化和多目标优化(帕累托优化)的零能耗建筑的可再生能源系统设计方案, 并比较了两种设计方法的优劣^[2]。Yu 提出了一种基于多标准表现和遗传算法的系统设计方案^[8]。以上方法都能有效的处理零能耗建筑系统中存在的不确定性, 然而都忽略了系统老化的影响。目前仍然缺乏一个在设计中考虑老化因素的方法。

老化现象在零能耗建筑系统中普遍存在, 从电力负荷侧制冷机的制冷容量, 水泵和风扇效率, 到电力供应侧光伏电池板和风力发电机的效率, 到储能系统的电池容量。老化现象对零能耗建筑的长期性能表现有很大的影响。例如, 制冷机的老化会造成制冷容量减小, 因而可能导致在极端炎热的天气条件下热舒适度不能满足需求。光伏板和风力发电机的老化会导致发电效率下降, 从而导致每年产电量减小。而储能系统的老化会增加零能耗建筑与电网的

相互作用, 破坏电网的稳定性。因此, 忽略老化现象对零能耗建筑的影响很容易造成设计的系统仅能在安装初几年满足性能需求。

因此, 本研究提出了一种基于不确定性的分析零能耗建筑生命周期性能的方法。该方法不仅考虑了设计中存在的不确定性因素, 还考虑了零能耗建筑系统(包括暖通空调系统, 光伏电池板, 风力发电机和储能系统)的老化因素。基于提出的分析生命周期性能的方法, 本文还提出一种简单的两阶段优化零能耗建筑系统设计的方法。目的是为设计者提供更全面的有关系统性能的信息, 从而帮助设计者在设计阶段合理的设计零能耗建筑系统, 以更好地满足用户需要。

1 基于冷负荷不确定性分析和生命周期分析的零能耗建筑系统设计

1.1 老化模型

本文使用随机老化率方法来模拟系统的老化现象。随机老化率方法的计算如公式(1)所示, 其中使用一个随机量来表示单位时间内的平均老化率。

$$Q_t = Q_0 \times (1 - At) \quad (1)$$

在该模型中, A 代表每一年的平均老化率, Q_0 代表运行年份, 代表系统初装时的值(可以是制冷剂冷容量, 水泵效率, PV 板效率等)。

目前已有许多关于 PV 板和风机的老化现象的研究, 本文参考文献中的实验数据对 PV 板和风机的平均老化率的直接进行量化^[9-12]。

储能电池的老化受材料, 温度, 年龄等因素的影响。同时, 其也受到电池充放电使用情况的影响, 即放电深度(DoD)和循环次数。本文主要研究电池充放电使用情况对储能电池老化的影响。通常, 电池可以在较低的放电深度下可以循环使用更多的次数。基于储能电池运行的 DoD, 本文使用雨流计数算法来预测电池的老化率^[13,14]。雨流计数算法的过程如下。

步骤 1: 时间序列的 DoD 文件被缩减为仅包含波谷和波峰的序列。这一步可以通过判断相邻线之间斜率正负号是否相同来实现。例如, 图 1a 中具有 14 个数据点的原始 DoD 文件在图 1b 中被简化成仅具有 8 个数据点的序列。

步骤 2: 使用来自 DoD 文件的相邻三个点 ($X(i)$, $X(i+1)$, $X(i+2)$) 来确定两个范围 R_1 和 R_2 , 如公式 (2) 所示。

$$R_1 = |X(i) - X(i+1)|, R_2 = |X(i+1) - X(i+2)| \quad (2)$$

步骤 3: 使用公式 (3), 判断范围为半个 (0.5) 或一个 (1) 周期。

$$Cycle = \begin{cases} 0.5, & \text{if } R_1 \leq R_2, \text{ or } i=1 \\ 1 & \text{if } R_1 > R_2 \end{cases} \quad (3)$$

步骤 4: 使用步骤 2 和 3 中的规则来识别 DoD 文件中的等于 1 的周期, 并将计为对应该周期的范围。然后, 丢弃在步骤 2 中选择的第一点和第二点。例如, 在图 1c 中, 范围 CD 大于 BC, 因此 BCB' 被识别为一个周期, 范围为 CD。然后 B 和 C 点移出序列。使用相同的方法可以识别另一个周期 EFE' (见图 1d)。

步骤 5: 识别所有 $R_1=R_2$ 的三点系列并将其计为一个周期。然后在计数后移除第一和第二点 (见图 e)。例如, 在图 e 中, DGH 被识别为一个周期。

步骤 6: 分析所有剩余的数据点。每个剩余的范围被计为半个周期。例如, 在步骤 4 和步骤 5 之后仅剩下的 AH, 被计为 0.5 个周期, 范围为 AH (见图 1e)。

图 1 还总结了该示例中计算的范围和周期。基于计算的范围和周期, 电池的累积衰减率可用公式 (4) 计算, 式中 A 和 B 是决定 DoD-周期曲线的系数。

$$D_{CL} = \sum_{k=1}^m \frac{Cycle \text{ of } R_k}{A \times (R_k)^B} \quad (4)$$

1.2 基于不确定性的生命周期表现评估

通过研究零能耗建筑系统的老化, 可以预测零能耗建筑的生命周期表现。图 2 显示了基于不确定性的零能耗建筑的生命周期表现分析过程, 主要包括四个步骤: 不确定性量化, 基于不确定性的零能耗建筑系统设计, 衰减率量化和基于老化模型和不确定性的生命周期表现分析。1.1 节详细介绍了如何量化衰减率量化, 本节主要介绍其它三个步骤。

不确定性量化: 在该步骤中, 使用统计分布 (例如正态分布, 均匀分布, 三角分布等) 来描述建筑物冷负荷预测和天气参数中存在的不确定。根据 Hopfe^[15] 和 Wang^[16] 的研究, 设计阶段的不确定性可以分为三类, 物理参数的不确定性, 情景参数的不确定性, 以及模型形式的不确定性。各类参数的不确定性将根据文献中已有的数据进行量化。

基于不确定性的零能耗建筑系统设计: 该步骤按照标准的设计方法设计零能耗建筑的系统。第一, 使用不确定的参数以及固定的输入来预测零能耗建筑的最大冷/热负荷; 第二, 使用计算的最大冷/热负荷值来设计 HVAC 系统中冷水机组和锅炉的容量大小; 第三, 加入其他建筑用电设备, 计算整个零能耗建筑的年耗电量; 第四, 根据零能耗建筑的年耗电量来确定 PV 板和风机的容量; 第五, 根据零能耗建筑实时的耗电量和产电量来设计储能电池的容量。

基于老化模型和不确定性的生命周期表现分析: 通过将量化的不确定性和老化率导入到零能耗建筑模型和系统模型中, 可以预测零能耗建筑的生命周期表现, 具体过程如图 2 所示。生命周期分析基于评估系统每年的表现。建筑的使用年份从 1 (年) 开始, 将其导入到老化模型来预测各系统在这一年的老化程度, 考虑过老化作用的参数将作为分析系统在该年度表现的输入参数。通过蒙特卡洛模拟得到系统每年的表现参数后, 将其提取出来并存入一个数据库, 之后将年份增加一年, 重复整个分析过程, 直到系统运行的年份等于其使用寿命。本文使用 EnergyPlus 来计算 HVAC 系统和其它耗电系统的耗电量, 使用 Trnsys 计算 PV 板和风机的发电量。

1.3 两步优化设计方法

本节提出了一个基于零能耗建筑生命周期表现评估的两阶段优化设计方法, 以降低零能耗建筑的生命周期成本。图 3 显示了实现该两阶段优化方法的过程。第一阶段主要优化可再生能源系统 (如 PV 板和风机) 的容量大小。第二阶段在优化的可再生能源系统基础上, 进一步优化储能系统的容量。

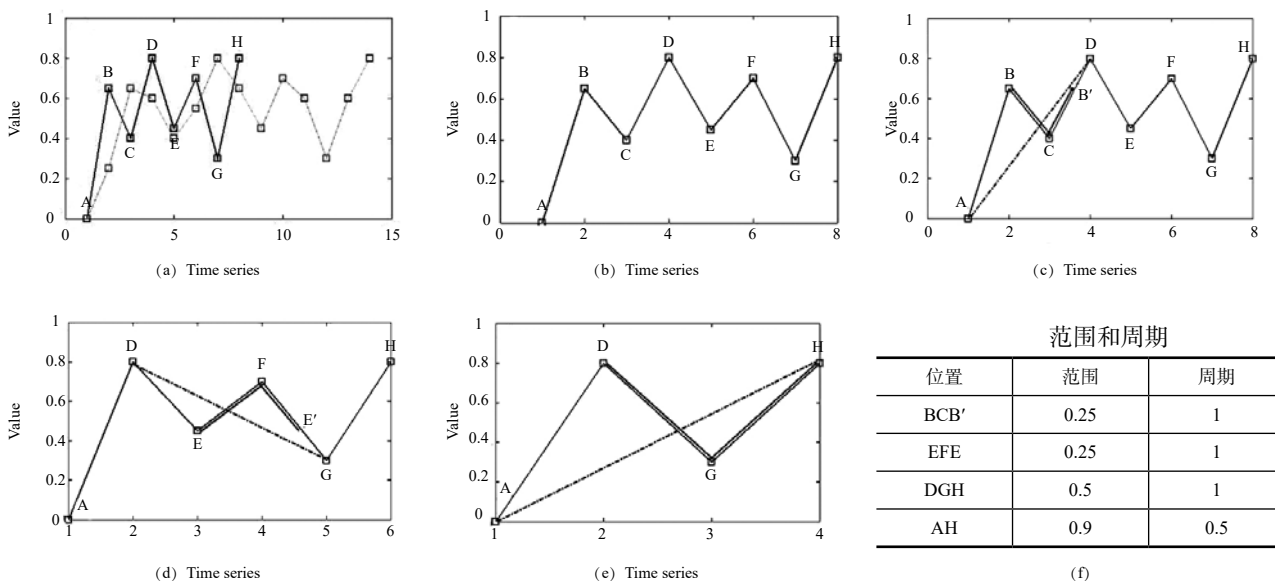


图 1 雨流计数算法说明

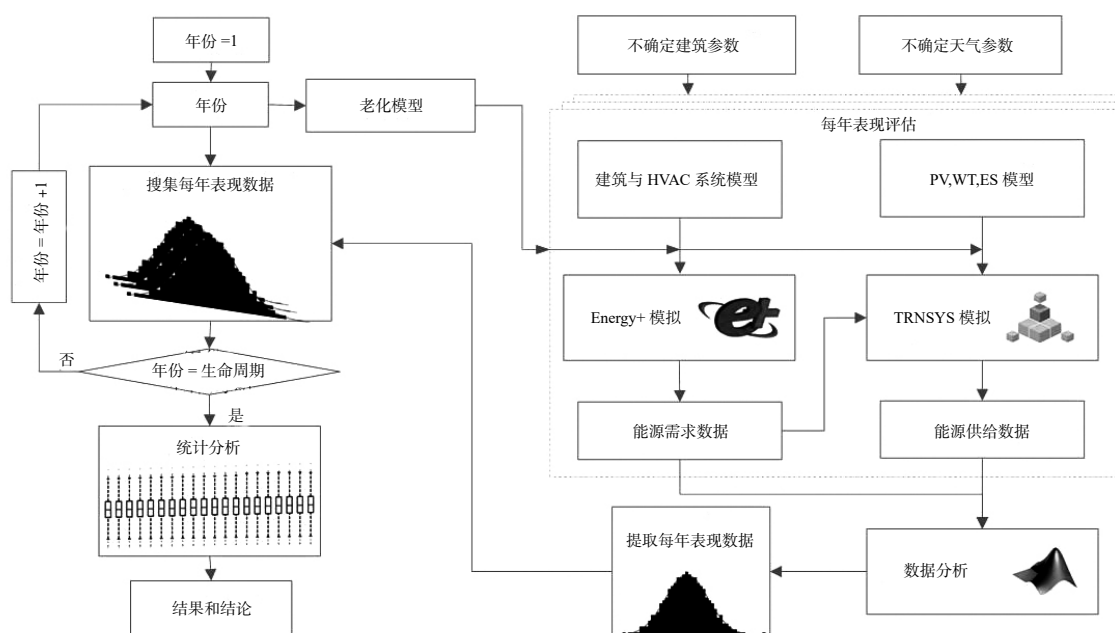


图2 基于不确定性分析的零能耗建筑生命周期表现评估

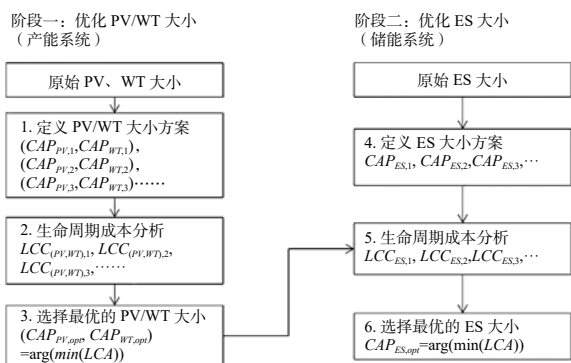


图3 基于生命周期成本分析的两级优化设计流程图

在第1阶段，首先，根据使用标准设计方法确定的PV/WT容量大小，定义一组新的PV/WT容量方案。然后，使用第1.2节中提出的分析生命周期表现的方法来评估每个PV/WT容量方案的生命周期成本。注意在第1阶段分析中不改变储能系统（ES）的容量大小。第三，比较每个PV/WT容量方案的生命周期成本，选择生命周期成本最小的方案作为第1阶段的最优设计。

类似地，在第2阶段，首先根据使用标准设计方法确定的ES容量大小，定义一组新的ES容量方案。第二，评估每个ES容量方案的生命周期成本。注意在第2阶段分析中，PV/WT容量大小是第1阶段选出的最优设计。第三，比较评估每个ES容量方案的生命周期成本，选择生命周期成本最小的方案作为最终优化设计。

2 案例分析

本文使用一个案例分析来展示提出的零能耗建筑生命周期表现分析的过程，以及使用该方法优化设计。在EnergyPlus中，对一个位于香港，大小为25m×25m×3m的零能耗建筑进行建模。该零能耗建筑物配有HVAC系统，发电系统（PV板和风机）以及储能系统。图4展示了该

零能耗建筑的原理图。该建筑连接到电网。优先使用可再生能源系统和储能系统满足HVAC系统和建筑其他耗电设备的能源需求，其次再通过从电网进口电量来满足剩余能源需求。

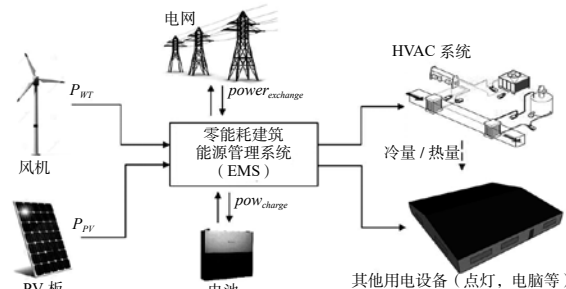


图4 零能耗建筑案例原理图

由于香港大部分时间都不需要采暖，因此本研究主要考虑HVAC系统的制冷工况。室内空气温度设定值为25℃，相对湿度设定为50%。根据设定，计算建筑最大冷负荷为279kW。因此，HVAC系统的容量规模为279kW。计算零能耗建筑的年总耗电量为365,417kW·h。本研究使用一个简单的配置，预期PV板和风机产生相同的发电量。该配置下计算的PV板面积为1298.6m²，所需风机数量为16台（额定功率为30kW），储能系统的容量为1571.8kW·h。

2.1 量化平均老化率

根据现有文献，HVAC系统制冷机最大制冷量，PV板发电效率和风机发电效率的平均老化率分别为0.25%，1.3%和1.6%^[11, 12, 17]。根据1.1节介绍的雨流计数算法计算储能电池容量的衰减。图5显示了一年时间内储能系统的放电深度DoD变化趋势，其在0和1之间重复变化。表1列出了计算的DoD序列平均范围和周期。使用公式（4）计算储能电池每年的累积衰减率为5.73%。

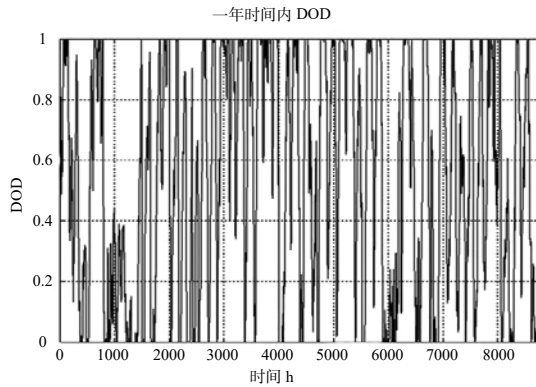


图 5 储能电池一年内 DoD 的变化

表 1 决定空调设计方案

范围		平均范围 R_k	周期	子老化率
从	至			
0.9	1	0.95	23.5	1.80%
0.8	0.9	0.85	6	0.42%
0.7	0.8	0.75	3	0.19%
0.6	0.7	0.65	7	0.39%
0.5	0.6	0.55	2.5	0.12%
0.4	0.5	0.45	6.5	0.27%
0.3	0.4	0.35	7	0.24%
0.2	0.3	0.25	11	0.29%
0.15	0.2	0.175	6	0.12%
0.1	0.15	0.125	18	0.27%
0.05	0.1	0.075	53	0.53%
0.025	0.05	0.0375	70	0.40%
0.0	0.025	0.0125	297	0.70%
1 年内累计老化率				5.73%

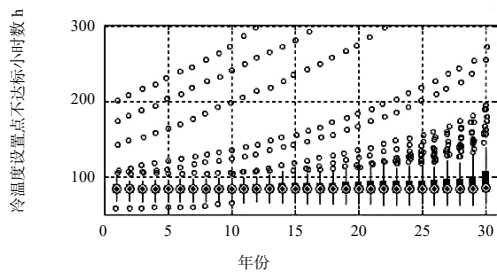
2.2 生命周期表现评估结果

设定零能耗建筑系统的使用寿命为 30 年^[18]。在每年的模拟中,使用拉丁超立方体抽样方法,从量化的不确定分布中给每个不确定参数生成 100 个样本。蒙特卡洛模拟总共重复 3000 次。

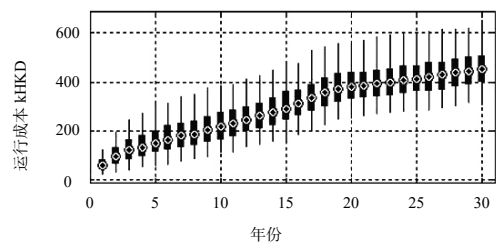
图 6 显示了零能耗建筑四个性能指标随使用时间的变化,即室内温度设定点未满足小时数,运行成本,能量平衡和电网独立性。对于每个箱线图,中心标记点代表中位数,箱的边缘代表上下四分位数,线的两端代表最大最小值,箱线图外的单个点代表异常值^[19]。在使用 30 年后,每年室内温度设定点未满足的时间增加 30%,增长趋势呈指数关系(见图 6a)。年平均运行成本从 60.7kHKD 增加到 456.5kHKD(见图 6b)。能量平衡指数从 -0.03 下降到 -0.63。生命周期后几年的减小速度(见斜率)比初期几年更快(见图 6c)。电网独立性指标从 0.69 降低到 0(见图 6d)。电网独立性指标的变化趋势在 18 年后发生了很大变化,这是由于在 18 年以后,储能系统的容量已经下降到 0(平均老化率为 5.73%)。在这种情况下,零能耗建筑需要完全依靠电网来调节其能源需求和供应的不平衡。在储能系统的容量降低到 0 以后,运行成本的变化趋势也发生了变化(见图 6b)。当电网独立性指标大于 0.5,零能耗建筑可以被认为是电网友好型建筑^[8]。可以看出,该零能耗建筑只在前 11 年符合电网友好型建筑。

2.3 两步优化设计结果

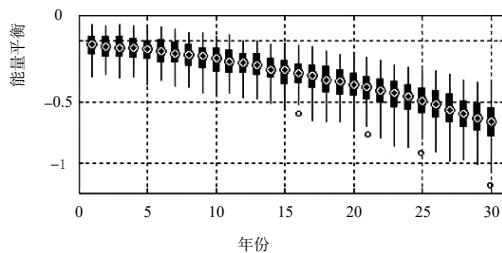
使用两阶段优化设计方法来优化零能耗建筑可再生能源系统和储能系统的容量大小。在第 1 阶段,基于原始的可再生能源系统容量(定义为方案 1),定义了 17 个具有不同可再生能源系统容量的方案,在 17 个方案中,风机的数量从 16 依次递增至 32,由于本案例分析中定义风机与 PV 板产电量相同,因此 PV 板的面积也随着风机数量的增加而增加。在阶段 1 不改变储能系统的容量。图 7a



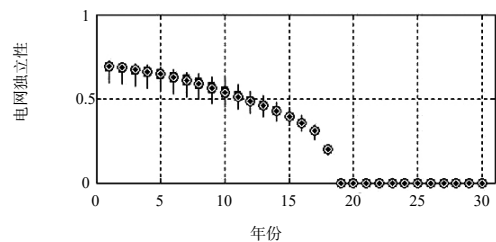
(a) 年度制冷温度设置点不达标小时数



(b) 年度运行成本

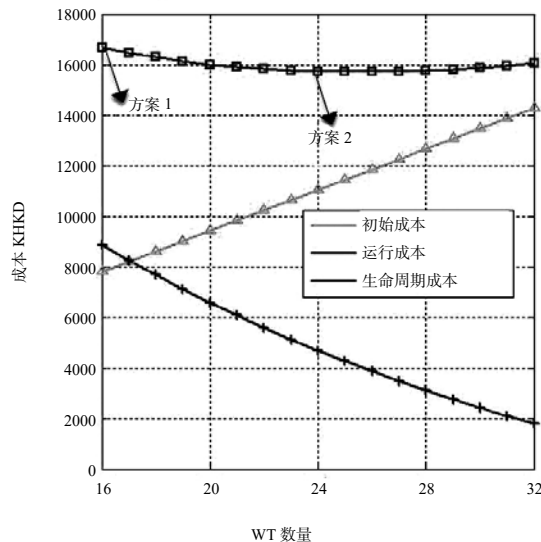


(c) 年度能量平衡

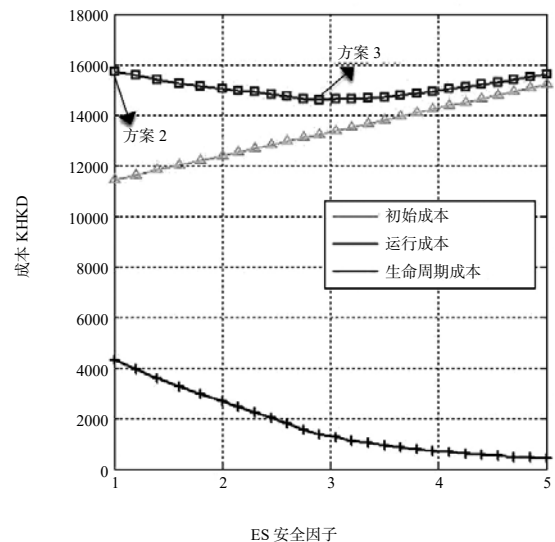


(d) 年度电网独立性

图 6 四个表现因子随使用年份变化的趋势



(a) 生命周期成本随 WT 数量变化



(b) 生命周期成本随 ES 大小变化

图 7 系统 1 到 9 在生命周期的能耗表现

比较了 17 个方案的生命周期成本。随着风机数量的增加, 零能耗建筑系统的初始成本也增加。由于大容量的可再生能源系统有更大的发电量, 因而系统运行成本逐渐下降。整体上, 系统生命周期成本先随着风机数量的增加而减小, 达到一个最低值之后增加。选出具有最低生命周期成本的方案作为方案 2。表 2 列出了方案 2 系统的具体配置。

方案 2 中风机的数量和 PV 板面积作为第 2 阶段优化的固定输入。基于原始的储能系统电池的容量, 定义一组范围从 1 到 5 的设计因子作为设计方案, 实际电池的容量可以通过计算方案 1 中电池的容量 (1571.8kW·h) 与设计因子的乘积得到。图 7b 比较了系统生命周期成本随电池容量的变化。运行成本随着电池容量增加而逐渐减小, 并最终趋于一个稳定值。这是由于电池本身并不能生产电能, 其仅提供足够的容量来存储多余的电量, 运行成本的下限值最终是由可再生能源系统的容量决定的。对每个设计方案的生命周期成本进行分析和比较, 选择具有最低生命周期成本的方案作为方案 3。表 2 列出了方案 3 系统的具体配置。

表 2 每个方案系统容量配置

组件	每个方案的容量		
	一	二	三
风机 (个数)	16	25	25
PV 板 (m ²)	1299	2029	2029
电池 (kW·h)	1572	1572	4558

表 3 两阶段优化设计生命周期成本比较

阶段	生命周期成本 (k HKD)			降低的生命周期成本	
	方案一	方案二	方案三	总额 (k HKD)	百分比
阶段 1	16,705	15,741	—	963.8	5.77%
阶段 2	—	15,741	14,599	1,142.3	6.84%
合计				2,106.1	12.61%

表 3 比较了三种设计方案的生命周期成本, 并计算了通过两个阶段的优化节省生命周期成本的百分比。第一

阶段将方案一优化为方案二, 将成本降低了 5.77%。第二阶段将方案二优化为方案三, 将成本进一步降低了 6.84%。总体上, 通过两个阶段的优化, 零能耗建筑系统的使用寿命成本降低了 12.61%。

3 结论

本研究提出了一种基于不确定性的分析零能耗建筑系统性能的方法, 其中包括以下主要步骤: 不确定性量化, 零能耗系统设计, 衰减率量化和生命周期表现分析。该方法使用随机分布来描述负荷侧和天气参数的不确定性, 考虑了零能耗建筑能源系统的老化现象, 并分析了这些不确定因素和老化现象对零能耗建筑长期表现的影响。本文还提出一种简单的两阶段优化零能耗建筑系统设计的方法: 该方法在第一阶段优化 PV 板和风机的容量大小, 在第二阶段优化储能系统。与传统不考虑老化因素的设计方法相比, 该方法可以设计出从长远角度看具有更好表现的系统 (如生命周期成本等)。

致谢

本文得到国家自然科学基金项目, 编号 51608463 的赞助与支持, 以及香港特别行政区早期职业计划, 编号 CityU 21207915 的赞助与支持。

参考文献

- [1] Buildings DEotEPaotCoMotepo. Official Journal of the European Union, Legislation. 2010:13.
- [2] Lu Y, Wang S, Shan K. Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings. Appl Energy. 2015;155:463–77.
- [3] Pless S, Paul Torcellini PhD P. Getting to net zero. ASHRAE Journal. 2009;51:18.
- [4] Huang P, Huang G, Wang Y. HVAC system design under peak load prediction uncertainty using multiple-criterion decision making technique. Energy Build. 2015;91:26–36.
- [5] Monforti F, Gonzalez-Aparicio I. Comparing the impact

of uncertainties on technical and meteorological parameters in wind power time series modelling in the European Union. *Appl Energy*. 2017;206:439–50.

[6] Sun Y, Huang P, Huang G. A multi-criteria system design optimization for net zero energy buildings under uncertainties. *Energy Build*. 2015;97:196–204.

[7] Zhang S, Huang P, Sun Y. A multi-criterion renewable energy system design optimization for net zero energy buildings under uncertainties. *Energy*. 2016;94:654–65.

[8] Yu ZJ, Chen J, Sun Y, Zhang G. A GA-based system sizing method for net-zero energy buildings considering multi-criteria performance requirements under parameter uncertainties. *Energy Build*. 2016;129:524–34.

[9] Abete A, Scapino F, Spertino F, Tommasini R. Ageing effect on the performance of a-Si photovoltaic modules in a grid connected system: experimental data and simulation results. *Photovoltaic Specialists Conference, 2000 Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE: IEEE*; 2000. p. 1587–90.

[10] Radue C, Van Dyk E. A comparison of degradation in three amorphous silicon PV module technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2010;94:617–22.

[11] Jordan DC, Kurtz SR. Photovoltaic degradation rates—an analytical review. *Progress in photovoltaics: Research and Applications*. 2013;21:12–29.

[12] Le B, Andrews J. Modelling wind turbine degradation and

maintenance. *Wind Energy*. 2016;19:571–91.

[13] Chawla M, Naik R, Burra R, Wiegman H. Utility energy storage life degradation estimation method. *Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010 IEEE Conference on: IEEE*; 2010. p. 302–8.

[14] Alam M, Saha T. Cycle-life degradation assessment of Battery Energy Storage Systems caused by solar PV variability. *Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016: IEEE*; 2016. p. 1–5.

[15] Hopfe CJ. Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization. PhD diss, Eindhoven University. 2009.

[16] Wang Q. Accuracy, validity and relevance of probabilistic building energy models: Georgia Institute of Technology; 2016.

[17] HUANG P, HUANG G, AUGENBROE G. Sizing HVAC systems under uncertainty in both load-demand and capacity-supply side from a life-cycle aspect. *Science and Technology for the Built Environment*. 2017;23:2:15.

[18] Berggren B, Hall M, Wall M. LCE analysis of buildings—Taking the step towards Net Zero Energy Buildings. *Energy Build*. 2013;62:381–91.

[19] McGill R, Tukey JW, Larsen WA. Variations of box plots. *The American Statistician*. 1978;32:12–6.

基于盲识别算法的办公室人员数量估计模型

魏玮璇¹, 刘诗雨¹, 夏亮¹, 王国建², 张行星³, 韩梦捷³, 潘嵩⁴

(1. 宁波诺丁汉大学建筑与建筑环境系, 浙江宁波 315100; 2. 北京市住宅建筑设计研究院, 北京 100005; 3. 瑞典达纳拉大学能源、森林及建筑环境系; 4. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

[摘要] 本文基于盲识别模型, 即最大似然估计法的数理统计方法建立了一个估算室内人员数量的模型, 通过对北京某办公室作为案例分析可知, 最大似然估计法可有效解决估算的延迟问题, 对办公室室内人员数量进行较为准确的估算。相比于美国 ASHRAE 协会给出的瞬时室内人员计算算法, 最大似然估计法的估算结果与空调能耗的相关性更高, 作为数据驱动模型的输入参数可以得到更为准确的空调能耗预测结果。

[关键词] 最大似然估计法; 室内人员数量; 建筑能耗

0 引言

目前, 用于建筑能耗模拟与预测的模型多为传统的方法, 如 EnergyPlus, DeST, IES 等建筑模拟能耗软件, 以及回归分析法、自回归移动模型、RC 网络的灰箱模型等^[1]。这些传统的能耗模拟方法基于详细的建筑围护建构热工参数、室外气象参数以及准确的人员行为模型才能构建。由于建筑能耗的复杂性以及室内人员行为的随机性, 造成传统的计算方法在短期动态的实时预测中准确度低且运算时间长。而数据驱动模型例如人工神经网络、支持向量机、决策树、基因算法等, 作为用于数据处理的通用算法, 建立的“黑箱”数学模型可以消除传统的方法在处理非线性问题时的局限性, 利用历史的能耗测量数据与环境监测数据反复训练数据驱动模型, 得到输入参数与输出参数之间的准确映射, 从而避免建立各变量参数间的复杂耦合关系, 使得模型的动态能耗预报结果更加接近真实值^[2]。

在一系列的数据驱动模型中, 人工神经网络 (ANN) 在建筑能耗管理中的应用尤为广泛。ANN 模拟人脑神经系统以神经元为节点形成层, 采用某种网络拓扑结构传递信号的活动网络。它善于以任意精度迅速逼近复杂的非线性函数, 具有较强的鲁棒性和容错性, 以及对数据噪音的免疫力。鉴于 ANN 的这些优点, 其应用在暖通空调领域的有益尝试开始于本世纪 90 年代, 包括能耗负荷预测、空调系统故障诊断、多目标节能改造、楼宇智能控制等^[3]。

近些年来, 许多学者对于 ANN 动态负荷预测模型做了深入研究。在训练方式的优化上, Setiawan 等人^[4]采用持续屏除最旧能耗数据并加入最近能耗数据的滑动式训练, 在办公楼冷水机组实时负荷预测模型中获得准确的结果。除此之外, 为了解决传统 ANN 模型在训练过程中产生的局部优化问题, Yokoyama 等人^[5]提出了一种全局优化的训练算法, 该算法在实时冷负荷预测实验中取得了较传统 ANN 算法更加准确的预测结果。ANN 模型输入参数的选择和数据预处理是准确预测的必要条件, Carlos 等人^[6]基于 ANN 提出了动态电耗预测模型, 上一时刻的实际电耗、制冷/制热量日小时数等被认为是重要的输入参数。Karatasou^[7]的研究表明, ANN 模型的预测准确性并不随着输入参数的增多而有明显提高, 过多的输入参数会造成增加运算时长, 造成过拟合的训练结果及较高的预测错误。目前已有的 ANN 动态负荷预测模型多以室外气象参数、过去时刻能耗、时间标记参数、室内人员作息等作为输入参数展开模拟^[8], 其中室内人员作息多为静态固定的简单描述, 这些依据规范或个人经验的假设难以反映人员活动

对建筑能耗的波动性影响, 从而造成负荷预测的误差。为了填补 ANN 实时负荷预测模型与动态人员作息之间的耦合性研究, 本文介绍了一种盲识别算法模型测量值估测室内人员数量, 作为 ANN 动态能耗预测模型的输入参数。

为了准确描述在室人员曲线, 近年来国内外较多学者对人员行为预测进行了深入研究并建立了不同的数学模型。对于建筑用户的在室行为研究的相关参数测量方法包括问卷调查、图像测量、被动式红外线测量法、超声波测量法、无线信号测量法、分项能耗测量法、环境参数测量法等^[9]。然而鉴于设备费用或用户隐私等因素的影响, 个别测量方法在短时间内难以实施。因此, 利用盲识别算法在数据缺失的情况下获得较为准确的在室人员曲线是解决该问题的主要方法。本文的主要任务是利用室 CO₂ 浓度及送风量数据, 采用盲识别模型估测室内人员数量, 采用的具体算法为最大似然估计法。

1 盲识别算法模型的建立

1.1 室内 CO₂ 浓度动态模型

在分析能耗模拟结果之前, 对本文研究的问题进行数学定义和描述。在室人员曲线的描述需要采用最大似然估计法的模型进行定量刻画。本模型的计算假设包括:

(1) 室内空气均匀混合, $\bar{C}(t) \in R$ 为室内 CO₂ 浓度的测量值;

(2) 室外 CO₂ 浓度 $C(t)$ 为恒为 420ppm;

(3) 室内维持平衡通风, 即门窗缝隙渗入风量等于渗出风量, 记为 $\dot{Q}^{\text{leak}}(t)$;

(4) 室内人员人均 CO₂ 产生量 g 为 0.005L/S;

(5) 室内新风量 $\dot{Q}^{\text{vent}}(t)$ 可随室内 CO₂ 浓度调整。

根据质量守恒定律, 室内 CO₂ 浓度模型可以简化为:

$$\frac{d\bar{C}(t)}{dt} = \frac{\dot{Q}^{\text{vent}}(t) + \dot{Q}^{\text{leak}}(t)}{V} (C(t) - \bar{C}(t)) + \frac{g}{V} O(t) + e(t) \quad (1)$$

其中 V 为测量房间容积, $O(t)$ 为室内人员数量, $e(t)$ 为方差 σ^2 的高斯白噪音。将连续时间模型 (1) 进行反向欧拉差分, 可以得到:

$$\frac{\bar{C}(k) - \bar{C}(k-1)}{T} = \beta_m (C(k) - \bar{C}(k)) + \gamma O(k) + e(k) \quad (2)$$

其中 T 为数据采集时间步长, k 为时间离散时刻, $\beta_m = \frac{\dot{Q}^{\text{vent}}(t) + \dot{Q}^{\text{leak}}(t)}{V}$, $\gamma = \frac{g}{V}$, 通过环境测量数据可以定义:

$$\bar{C} := \begin{bmatrix} \bar{C}(1) \\ \bar{C}(2) \\ \vdots \\ \bar{C}(n) \end{bmatrix}, C := \begin{bmatrix} C(1) \\ C(2) \\ \vdots \\ C(n) \end{bmatrix}, O := \begin{bmatrix} O(1) \\ O(2) \\ \vdots \\ O(n) \end{bmatrix}, e := \begin{bmatrix} e(1) \\ e(2) \\ \vdots \\ e(n) \end{bmatrix}$$

通过对 (2) 式进行整理可得:

$$(I-a\Delta)\bar{C}(k)=b_u C(k-I)+b_o O(k-I)+e(k) \quad (3)$$

其中 $b_u=\beta_{in}T$, $b_o=\gamma T$, 进一步整理可得:

$$(I-a\Delta)\bar{C}=b_u\Delta C+b_o\Delta O+\Delta e \quad (4)$$

$$\bar{C}=(I-a\Delta)^{-1}b_u\Delta C+(I-a\Delta)^{-1}b_o\Delta O+(I-a\Delta)^{-1}\Delta e \quad (5)$$

其中 I 为 N 维单位矩阵, Δ 为 $N-1$ 维单位矩阵, 即:

$$\Delta=\begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ & \ddots & \\ I_{N-1} & & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

因此, (3) 式中 $\bar{C}$ 与 C 为实际测量的已知参数, a , b_u , b_o , e , O 为未知参数, O 其中为待估参数。

1.2 最大似然估计法模型

最大似然估计法是概率论与数理统计中的一种参数估计的方法。设有固定样本观测值 $(x_1, x_2 \dots x_n)$, 其总体分布为 $p(x, \theta)$, 且 $p(x, \theta)$ 形式已知, θ 为一个或多个未知参数组成的参数向量, 根据样本观测值可以列出该样本值出现的概率 $L(\theta)=\prod_{i=1}^n p(x_i; \theta)$, $L(\theta)$ 称为似然函数。最大似然估计法的运算目的是, 在 θ 的可能取值范围内挑选使似然函数 $L(\theta)$ 达到上限的 $\hat{\theta}$ 作为参数 θ 的估计值^[10]。

在本案例中的应用里, 最大似然估计模型的未知参数 θ 定义为:

$$\theta_o=[a \ b_u \ b_o \ \sigma^2 \ O(1) \ O(2) \dots O(n)]^T \quad (7)$$

其中 $e(t)$ 服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$, 式 (5) 遵循的概率分布 $p(\bar{C}; \theta_o)$ 为:

$$p(\bar{C}; \theta_o)=N(m_{\bar{C}}, cov_{\bar{C}}) \quad (8)$$

其中,

$$\begin{cases} m_{\bar{C}}=(I-a\Delta)^{-1}b_u\Delta C+(I-a\Delta)^{-1}b_o\Delta O \\ cov_{\bar{C}}=\sigma^2(I-a\Delta)^{-1}(I-a\Delta)^{-T} \end{cases} \quad (9)$$

因此, 我们可以用最大似然估计法来估算使得概率分布 $p(\bar{C}; \theta_o)$ 最大的未知参数 θ_o , 计算过程可视为最优化求解问题, 利用 matlab 中的 fmincon 命令可完成最大似然估计法的计算。

2 办公楼在室人员曲线案例分析

2.1 建筑模型及数据采集

本案例选取位于北京市办公楼中的某间办公室, 模型所含区域如图 1 方框中所示。

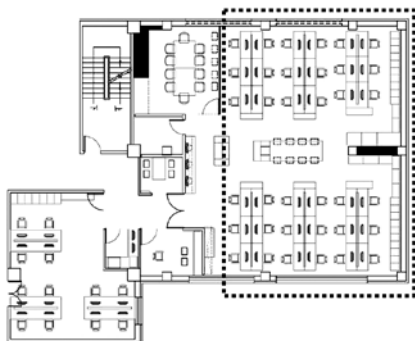


图 1 案例建筑模型及选取空间

该办公楼经过被动式超低能耗建筑改造, 用于模拟的办公区域室内建筑面积 $152m^2$, 房间净高 $2.9m$ 。办公室夏季空调设计参数为温度 $26^{\circ}C \sim 28^{\circ}C$, 相对湿度 $50\% \sim 65\%$, 办公楼采用 VRV 空调系统加独立新风系统。根据桌位统计室内办公人员数量最多可达 36 人, 上班时间为 09:00~17:00, 空调和新风系统在上班期间开启, 下班时间关闭。门为常闭状态, 窗户在上班时间内有开启状态的可能性。能耗监测平台采集了包括空调系统、新风系统、吊扇和照明系统在内的能耗数据, 以及包括温度、相对湿度、二氧化碳浓度的室内环境测量数据, 还有包括室外温度、相对湿度、风速和太阳辐射瞬时值的室外环境监测数据。数据测量及采集时间段为 2017 年 6 月 13 日至 2017 年 9 月 3 日, 采集间隔为 10min。

2.2 模拟结果

利用最大似然估计法和美国 ASHRAE 协会给出的瞬时室内人员计算算法^[11], 根据室内浓度测量值计算了各个时刻房间在室人数的估测值。图 2 展示了办公室选取空间某一工作日的模拟结果, 从中可以观察到两种方法描绘的在室人员曲线略有偏差, 主要体现在以下参数: 瞬时人员数量、最早到达时间、最晚离开时间、人员在室时长等。一些研究表明, 间接利用环境参数的测量值计算在室人员状态、用户位置、人数及活动时会有存在最高达 30min 的时间延迟^[9]。在本案例中, 除 CO_2 浓度测量数据以外, 建筑分项能耗中的插座电耗用以辅助验证人员最早到达时间和最晚离开时间, 结果表明相比于传统的 ASHRAE 协会瞬时室内人员计算算法, 最大似然估计算法可以有效解决人员数量计算的延迟问题。

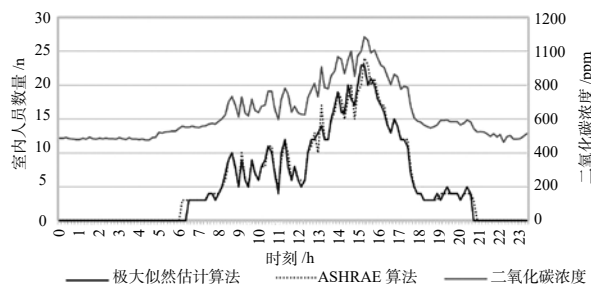


图 2 某工作日内室人员数量、二氧化碳浓度

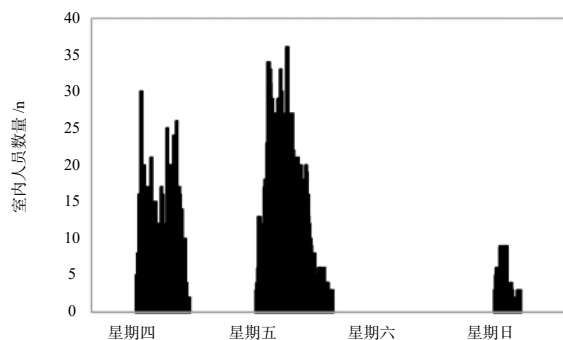


图 3 连续 4 日室内人员数量 (最大似然估计法)

图 3 给出了利用最大似然估计法得到的办公室连续 4 日室内人员数量估计值, 从中可以看出即使在同样的工作日内, 办公人员出勤率、最早到达时间和最晚离开时间都

存在较大差异。另外由于加班的原因,工作日的晚上及休息日有人员在室的可能性。因此,在建筑能耗模拟中使用静态固定的人员作息会引起较大的计算误差。

为了研究该办公室空调能耗与室内人员数量的相关性,本案例使用了决定系数 R^2 来表征二者相关的密切程度,即依变量(空调能耗)的变异中有多少百分比可由自变量(人员数量)解释,其取值在 0 到 1 之间。表 1 分别给出了两种计算方法得到的室内人员数量与空调电耗之间的,计算结果表明,利用最大似然估计法得到的室内人员数量与空调能耗之间 R^2 的为 0.503387,高于 ASHRAE 算法的 R^2 值 0.459588。因此可以推断,使用最大似然估计法得到的室内人员数量作为预测空调能耗的输入参数可以得到更为准确的结果。

表 1 办公室空调电耗与室内人员数量的相关性

空调电耗 (kW·h)	R^2
室内人员数量 (ASHRAE 算法)	0.459588
室内人员数量 (最大似然估计法)	0.503387

3 结语

本文基于盲识别模型,即最大似然估计法的数理统计方法建立了一个估算室内人员数量的模型,通过对某办公室作为案例分析可知,最大似然估计法可对办公室室内人员数量进行较为准确的估算。本文的局限性在于缺少室内实际人员的统计数据验证盲识别算法的可靠性,这将成为下一步的研究重点。此外,该模型的室内人员计算值将作为神经网络空调电耗预测模型的输入参数,用以提高能耗预测的准确度。对于神经网络模型的优化,譬如训练样本的自适应调整、预测准确率的提高、动态获取在线数据等方面还有大量工作可进一步研究。

参考文献

- [1] 郝有志,李德英,郝斌. 基于神经网络的供热计量系统热负荷短期预测 [J]. 暖通空调, 2003, 33(6):105–107.
- [2] Wei Y, Zhang X, Shi Y, et al. A review of data-driven ap-

proaches for prediction and classification of building energy consumption[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 82:1027–1047.

[3] 李玉云,王永骥. 人工神经网络在暖通空调领域的应用研究发展 [J]. 暖通空调, 2001, 31(1):38–41.

[4] Setiawan A, Koprinska I, Agelidis V G. Very short-term electricity load demand forecasting using support vector regression[C]// International Joint Conference on Neural Networks. IEEE Press, 2009:3348–3354.

[5] Yokoyama R, Wakui T, Satake R. Prediction of energy demands using neural network with model identification by global optimization[J]. Energy Conversion & Management, 2009, 50(2):319–327.

[6] Roldán-Blay C, Escrivá-Escrivá G, Álvarez-Bel C, et al. Upgrade of an artificial neural network prediction method for electrical consumption forecasting using an hourly temperature curve model[J]. Energy & Buildings, 2013, 60(60):38–46.

[7] Karatasou S, Santamouris M, Geros V. Modeling and predicting building's energy use with artificial neural networks: Methods and results[J]. Energy & Buildings, 2005, 38(8):949–958.

[8] Yezioro A, Dong B, Leite F. An applied artificial intelligence approach towards assessing building performance simulation tools[J]. Energy & Buildings, 2008, 40(4):612–620.

[9] Labeodan T, Zeiler W, Boxem G, et al. Occupancy measurement in commercial office buildings for demand-driven control applications—A survey and detection system evaluation[J]. Energy & Buildings, 2015, 93(4):303–314.

[10] 丛凌博, CONGLing-bo. 最大似然估计的教学方法 [J]. 高师理科学刊, 2012, 32(4):76–78.

[11] Mumma, S.A.. (2004). Transient occupancy ventilation by monitoring CO2. ASHRAE IAQ Applications. 21–23.

以通风散热为目的的光伏墙优化设计

马胜兵, 章文杰, 黄自强, 洪洁, 杨洪欢

(南京理工大学, 江苏南京 210094)

[摘要] 当前在光伏建筑应用相关的设计中, 光伏组件在建筑上布置时存在很大的随意性, 对于安装方式大多情况下出于建筑外立面的美观或结构强度及经济性等方面的考虑, 忽略了光伏组件背板的通风散热问题。本文借助计算流体力学软件, 对不同安装尺寸的节点开放式光伏墙进行模拟计算与对比分析, 对光伏组件与建筑墙体间的间距以及阵列中组件间排布间距进行优化, 使得整个墙体结构可以有效散热, 从而提高组件发电效率及降低室内得热量。

[关键词] 光伏墙; 通风散热; CFD; 优化设计

0 引言

随着我国城镇化的快速发展, 居民生活水平不断提高, 建筑能源消耗也在不断增长, 为解决这些问题, 太阳能等可再生能源在建筑中的应用也引起了广大研究者的兴趣, 而光伏发电技术由于在建筑应用中存在大量的优点, 通过合理的设计将光伏组件与建筑围护结构相结合, 不仅节省了外饰层材料、美化建筑外观, 同时还能起到隔热保温的效果, 降低空调负荷从而进一步降低建筑能耗。然而, 当前我国相关技术的发展在研究与应用上海存在很多问题。在技术上, 对于光伏组件安装在屋顶或坡屋面上, 已有大量研究, 有诸多的方法与经验可取。而对于安装在建筑立面上, 由于之前固有的“发电效率至上”原则, 使得这一方式并不被看好, 相关研究也相对较少, 且主要集中在低纬度地区, 均停留于通过实验或计算模拟的方法论证光伏组件在建筑中应用可降低夏季建筑冷负荷, 降低建筑空调能耗。但对于普通墙体加装光伏组件后的热性能研究则相对较少, 更没有针对此类墙体在设计时需要考虑的结构形式及各部分间的几何尺寸等方面的研究。本研究以三维模型的方式, 对于光伏组件挂装于墙体外立面时上下左右均存在开口的“节点开放 (Open Joint)”的安装方式, 将室外大气层纳入计算域中, 并根据室外风环境模拟中来流风轮廓线分布对不同高度的风速进行假设, 以更接近真实的条件下, 对光伏组件内外两侧的空气在热压和风压的共同作用下的流动进行了模拟仿真, 借助 FLUENT 流体动力学计算软件, 对于光伏墙中组件与墙体间的距离, 以及组件与组件间的距离进行了优化设计。

1 理论方程及模型

1.1 流动相关方程及模型

1.1.1 基本控制方程

对于所有的流动问题的求解, 都应当满足质量和动量守恒。在本研究中, 由于同时涉及到流动与传热耦合的问题, 所以还应当满足能量守恒。

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

由于本研究为不可压缩流动, 因此有

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

(2) 动量守恒方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu_{eff} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + \rho \beta (T_0 - T) g_i \end{aligned} \quad (3)$$

其中, ρ 是空气密度; x_i 表示方向 (1, 2, 3); u_i 为在 x_i 方向上的速度分量; u_j 为在 x_j 方向上的速度分量; P 是压力; μ_{eff} 是有效粘性系数; β 是热膨胀系数; T_0 是参考点温度; T 是温度; g_i 代表 i 方向的重力加速度。其中 $\rho \beta (T_0 - T) g_i$ 项为浮力项, 为了确定浮力项和温度分布, 必须求解能量平衡方程。

(3) 能量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [\Gamma_{T,eff} \frac{\partial T}{\partial x_j}] + \frac{q}{C_p} \quad (4)$$

其中, $\Gamma_{T,eff}$ 是温度的有效紊流扩散系数, $\Gamma_{T,eff} = \frac{\mu_{eff}}{P_{eff}}$; P_{eff} 为有效普朗特数, $P_{eff}=0.9$; q 为热源强度; C_p 是比热容。

1.1.2 湍流模型

为了求解上述基本控制方程, 则需要配合使用湍流模型使其封闭, 本研究中采用重整化群 RNG (Renormalization-group) $k-\varepsilon$ 模型。RNG $k-\varepsilon$ 模型湍流动能 (k) 方程及湍流耗散率 (ε) 方程分别如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} [(\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} [\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

其中, G_k 为平均速度梯度引起的湍动能产生项; G_b 为浮力引起的湍动能产生项; Y_M 为可压湍流脉动膨胀对总耗散率的贡献; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; α_k 、 α_ε 分别为 k 和 ε 湍流 P_r 数; S_k 、 S_ε 为根据计算工况定义的源项;

1.2 传热相关方程及模型

1.2.1 能量运输方程

在对于光伏组件或墙体的固体区域中, 能量输运方程则可表述为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (7)$$

1.2.2 辐射模型

对于光伏墙中相关辐射传热研究, 重点是要考虑各表面间的辐射换热, 同时将尝试加载空气内部介质辐射, 根据其对各部分温度的影响进行对比分析后再确定是否需要考虑; 对于光伏组件表面的玻璃盖板以及半透明光伏组件, 存在镜面壁面和半透明壁面等问题; 同时考虑便于采用 DO 辐照模型算法的太阳辐射加载模型以及一定的计算精度及适当计算量等方面, 因此在本研究中对于辐射问题的求解选用 DO 辐射模型。

其方程式可表示为:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} (I(\vec{r}, \vec{s}) \Phi(\vec{s}, \vec{s}')) d\Omega' \quad (8)$$

1.3 自然对流换热模型

1.3.1 自然对流相关理论

对于光伏墙自然通风的研究, 主要围绕光伏组件和墙体的表面在太阳辐射的情况下使得周围空气被加热产生浮力驱动和在建筑周围空气流动产生的风压驱动的自然对流(混合对流)的整个过程。其中, 纯粹自然对流是由于流体受热不均而使得内部存在一定的温度差, 导致各部分流体的密度不同, 而密度变化引起的重力差异, 从而产生浮力驱动流体的流动。对于混合对流中, 浮力的影响可通过格拉晓夫数与雷诺数的比值来判断:

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{\Delta \rho g h}{\rho \nu^2} \quad (9)$$

当此数值接近或超过 1.0 时, 浮力对流动将存在较大的影响。相反, 若此数值较小, 浮力的影响则可以忽略。在纯粹自然对流中, 浮力引致的流动强度使用瑞利数来判断:

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3 \rho}{\mu \alpha} \quad (10)$$

当瑞利数大于 10^8 时, 浮力驱动的对流为层流; 向湍流转捩的瑞利数为 $10^8 < Ra < 10^{10}$ 。^[1,2]

1.3.2 自然对流数值模拟

CFD 软件中常用的 FLUENT 软件不仅能够对常见的各类型传热问题进行求解, 而且能够实现传热和流动的耦合计算, 包括比较复杂的浮力驱动下的各类流动, 且针对自然对流问题建立了专门的求解模型。对于 Boussinesq 假设, 一般用于稳态计算中对于流体密度变化不是很大的情况下。在本研究中, 操作温度设定为 25°C , 此时空气密度 $\rho_0 = 1.29 \text{ kg/m}^3$, 热膨胀系数 $\beta = 0.00335 \text{ K}^{-1}$ 。本研究在自然条件下, 空气被加热的温差在 50°C 范围内, 因此该方法适用的。

2 方法描述

2.1 CFD 模型

2.1.1 计算域划定

在本研究中, 对于光伏墙自然通风的 CFD 模拟, 扩大计算域, 由安装有光伏墙的建筑和室外大气两部分组成, 通过模拟室外大气边界层的流态, 实现在风压和热压共同作用下的光伏墙周围及中间空气层的流场研究。为了能够准确的反映建筑周围大气的真实流动状况, 计算域的大小

参照相应的准则^[3,4]进行设置, 如图 1 所示。根据实际风向及风速来设置计算域的特定面为速度入口边界条件。

2.1.2 网格划分

本研究中, 考虑到物理模型较为规则, 选择结构化网格进行划分, 而且结构化网格的拓扑结构严格有序, 有较高的计算精度并且易于生成。同时, 考虑到计算域中不同研究对象在几何尺度上相差较大, 因此采用了分区结构化网格。为了能让计算域边界上的流动充分发展, 因此模拟室外大气层的计算域尺寸相对较大(沿空气流动方向最长可达 64m), 而对于光伏组件, 其厚度仅为 10mm 左右, 周围的铝包边型材的厚度仅为 2mm 左右, 因此对计算域进行了分区网格划分。对于室外大气层的网格基准尺度控制在 0.05m~0.02m; 对于建筑墙体的则控制在 0.01m~0.005m 左右, 而对于光伏组件及铝包边则控制在 0.5mm~2.0mm 左右, 并对需要重点研究的光伏组件外表面和光伏组件背面的墙体外表面等区域进行加密处理, 以达到不影响计算结果的基本要求, 如图 2 所示为某一算例下的网格划分结果。

2.1.3 边界条件设置

(1) 入口边界条件

对于上述计算域中室外大气边界层的入口设置为速度入口边界条件(Velocity inlet)。假设入口流速按室外风环境模拟中来流风轮廓线分布, 即来流速度在不同的高度按如下指数分布^[5,6]:

$$u_h = U_0 (\delta_0 / h_0)^a (h / \delta)^a \quad (11)$$

其中, U_0 为气象观测站所测得的风速, h_0 为气象观测站风速测头离地面的高度, δ 为不同地形所对应的大气边界层厚度, a 为不同地形所对应的地面粗糙系数。在此由于气象观测站位于实验地点内, 位于“大城市中心且周围 50% 以上建筑高于 21m”, 因此, 取 $a=0.3$, $\delta_0=\delta=460\text{m}$, 入口边界高度 h 处的湍流脉动动能 k_h 和湍流耗散率 ε_h 有^[7]:

$$k_h = (I_h U_h)^2 \quad (12)$$

$$\varepsilon_h = C_\mu^{1/2} k_h \frac{U_0}{h_0} a \left(\frac{h}{h_0} \right)^{(a-1)} \quad (13)$$

$$I_h = 0.1 \left(\frac{h}{\delta} \right)^{(-a-0.05)} \quad (14)$$

其中, I_h 为高度 h 处的湍流强度, 取经验常数 $C_\mu=0.09$ 。

(2) 出口边界条件

对于上述计算域中室外大气边界层的出口边界条件,

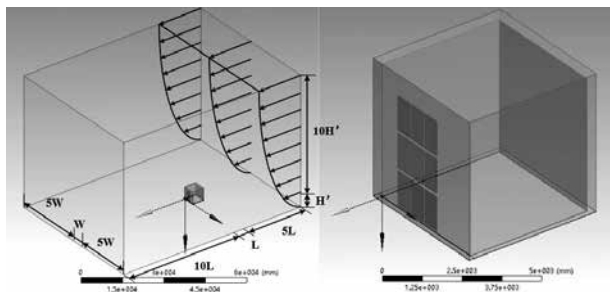


图 1 模拟室外大气边界层的计算域大小及光伏墙建筑模型

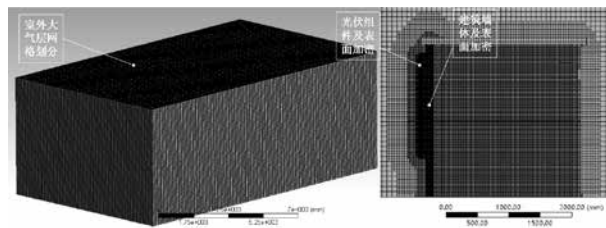


图 2 某算例采用分区结构化网格并局部加密后的划分结果

考虑到在计算域出口处的速度与压力未知,同时根据计算域的划分认为出口处的流动是充分发展的,因此选择自由出流边界条件(Outflow)。由此,无需对出口边界进行定义,由 Fluent 软件对自行计算。

(3) 大气层顶部及气流左右侧面边界条件

根据图 1 中的尺寸倍数对计算域进行划分,则可认为在顶部和沿着气流方向的左右侧面上的气流已经恢复为与壁面平行流动,不存在穿过此边界面上的速度分量。因此,将这三个面设置为对称边界条件(Symmetry)。

(4) 光伏组件和墙体自身边界条件

对于本研究中涉及的光伏组件、墙体与周围空气的换热过程,在 FLUENT 软件默认情况下会将壁面当作是没有厚度的薄壁,不考虑壁面上的热阻,当需要考虑壁面法向方向的导热时,则只需要设置壁面厚度,同时给出壁面厚度方向上材料的热阻。此种壳层导热的方法虽然简便,但不能适用于使用辐射模型/能量耦合的情况。但在本研究中希望能够真实的模拟光伏墙的传热机理,需要考虑光伏组件正面太阳辐射吸热后传导到背面且与周围空气换热的过程。因此在本研究中对光伏组件及墙体以实际的几何尺寸厚度进行体网格划分。对于光伏组件(包括铝包边和光伏板)和墙体则设置为固体边界条件(Solid),并设置相关材料的热物理性。

(5) 光伏组件和墙体表面边界条件

对于光伏组件和实验小屋的外表面及内表面、计算域底面等均设置为壁面边界条件(Wall)。在本研究中,存在太阳、光伏组件、墙体及周围环境(地面)等多个物体间的辐射换热过程。在 FLUENT 中,对于上述各表面间的辐射换热,是作为对应能量方程的源项进行加载并参与计算的。因此,对于光伏组件和实验小屋的外表面设置为直接进行导热、对流和辐射换热的耦合计算(Coupled);对于实验小屋的内表面设置为第三类边界条件,给定室内空气温度和其表面对流换热系数。计算域底面假设为 200mm 厚的水泥铺装面,相关材料的热物理性质参考墙体的进行设置。

2.2 实验验证模型

表 1 模拟计算时输入的各项气象参数

项目	风速	风向	室外温度	相对湿度	大气压	太阳总辐射	散射辐射
数值	2.0m/s	170	33.1℃	40.7%	100.3kpa	715.4w/m ²	172.3w/m ²

根据实验小屋西向上挂装的光伏组件及各部分间的几何尺寸,建立如图 3 所示的计算模型。其中光伏组件背面与建筑墙体间的距离为 150mm,空气层上下左右均与大气相连无封堵,其他各部分尺寸如图中所示。为了能更真

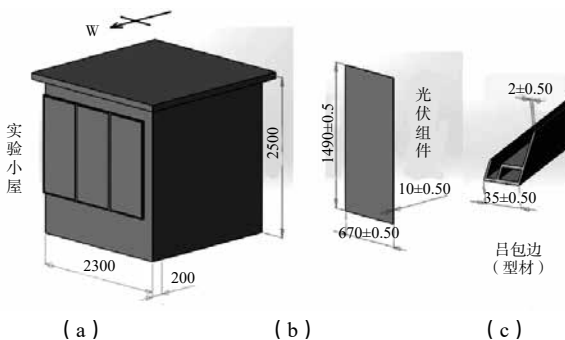


图 3 用于模拟仿真计算的物理模型各部分几何尺寸

实的反映光伏组件边缘的温度情况及边缘与空气换热的情况,对光伏组件的铝包边部分进行了细致的建模,充分考虑了铝型材中间空气腔的存在,相关模型如图 3(c)所示。模拟计算时采用稳态计算,对应时刻为 7 月 2 日 14:30 分左右,因此输入此刻相应的气象参数进行模拟与仿真,如表 1 所示。其中风速为现场建立的气象数据采集系统记录的相对实验小屋地面高 3.5m 处的风速。

2.3 结果对比与分析

(1) 与实测点处的温度对比

对应模拟仿真计算的时刻,将光伏组件背板、空气层和墙体外表面三者在上、中和下三个高度实测的温度值与模拟值进行对比,相应的结果如表 2 所示。可见,对于光伏背板温度的模拟计算结果相对较为准确,对于墙体外表面和空气层的温度的模拟结果误差则相对大一些,平均绝对误差的值在 1.5K 左右。同时,由图 4 可见,在中间 1.45m 处三者的模拟结果误差相对大于下部和上部。

表 2 不同位置温度模拟计算结果与实测结果对比

高度 H/m	项目	光伏组件背板	建筑墙体外表面	空气层
0.8	实测(K)	322.10	305.10	308.5
	模拟(K)	322.53	308.73	307.12
1.45	实测(K)	323.30	309.30	309.40
	模拟(K)	323.97	309.10	307.83
2.1	实测(K)	323.90	310.10	310.30
	模拟(K)	324.76	311.71	308.87
平均绝对误差(K)		0.65	1.81	1.46

(2) 借助热成像技术对面上温度场的对比

借助热成像设备,对实验小屋光伏墙外表面进行热成像采集,相应的结果如图 5(a)所示,同一时刻通过 FLUENT 计算得出的光伏组件温度云图如图 5(b)所示。对于整体的温度场分布,定性来看,在三块光伏板中对于中间和右侧两块,由 FLUENT 计算出的温度云图与实际热成像结果的变化趋势大致相近,而对于图中左侧的一块,尤其在接近左侧边缘处,计算结果与热成像结果在温度分布场上明显不同,模拟计算结果并没能表现出风向在图中大致是由右侧往左侧吹的。

定量分析,如图 5(a)所示,在热成像图片中提取中间一块光伏板位于中轴线 A-A(折线)上的温度数值,并与模拟结果相同位置处的温度进行对比,如图 4 中所示,模拟温度值略高于热成像所获得的温度值 0.2K~0.3K 左右(不考虑下部偏折段),对位于中间的这块光伏组件,可认为对温度的模拟结果与实际情况间相接近。

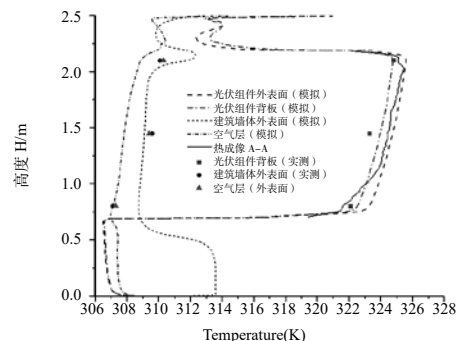
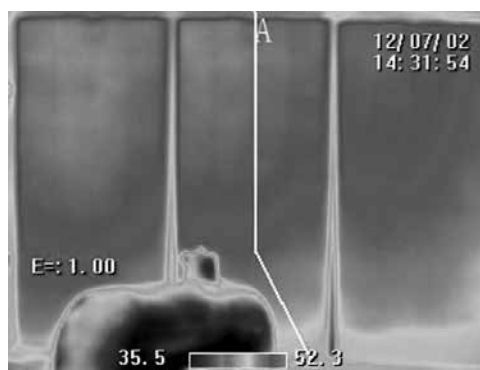
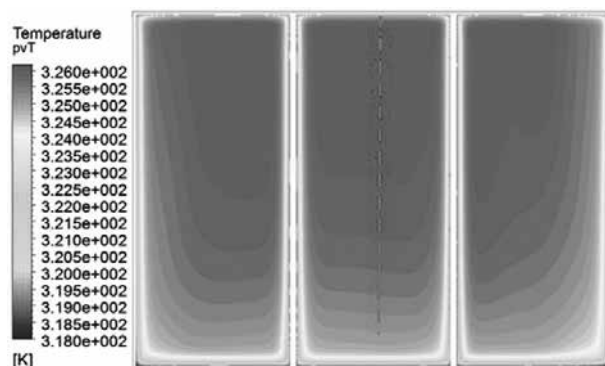


图 4 模拟结果与实测结果对比



(a) 由热成像设备拍摄



(b) FLUENT 模拟计算结果

图5 光伏组件外表面模拟结果与热成像设备拍摄结果对比

3 尺寸优化设计

针对在建筑立面上安装一定规模的光伏阵列时,为达到良好通风散热目的,光伏墙各部分间相关尺寸需优化设计,本研究主要考虑以下三个方面的间距问题:光伏组件与墙体间的距离 D ,为表述方便,用 $a=D/H$ 来表示此距离相对于光伏组件在垂直方向上长度 H 的大小、垂直方向上两块相邻光伏组件间的间距 H_g ,即,相当于其在垂直方向上安装时的开口宽度,并用 $b=H_g/H$ 来表示此距离相对于光伏组件在垂直方向上长度 H 的大小和水平方向上两块相邻光伏组件间的间距 L_g ,即,相当于其在水平方向上安装时的相邻距离,并用 $c=L_g/L$ 来表示此距离相对于光伏组件在水平方向上宽度 L 的大小。如图6所示,为上述相关间距的示意图。

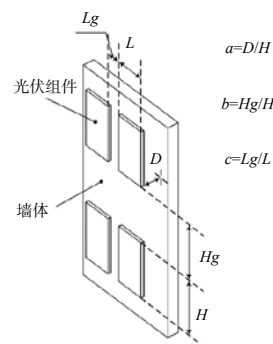
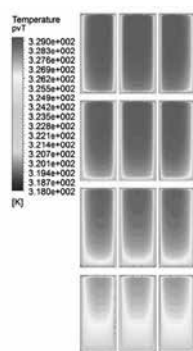
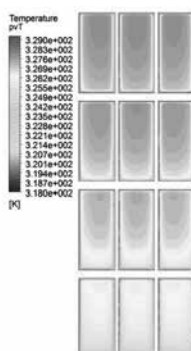
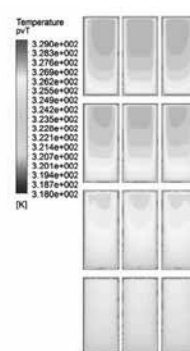
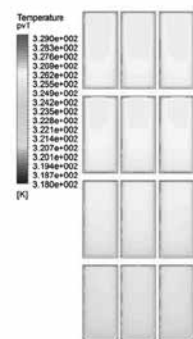
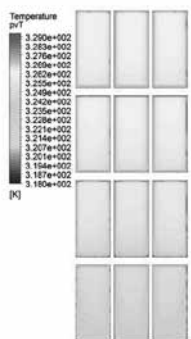
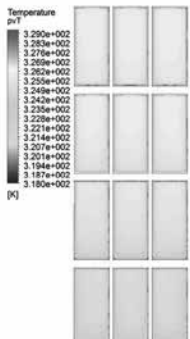


图6 光伏组件与墙体间相关间距示意图

(a) $a=0.05$ (b) $a=0.10$ (c) $a=0.15$ (d) $a=0.20$ (e) $a=0.25$ (f) $a=0.30$ 图7 不同 a 取值下光伏阵列温度变化情况

3.1 组件与墙体的距离

为研究不同间距下的光伏墙温度变化情况,建立如图7所示的 3×4 的光伏阵列,图中为当 $b=0.1$ 、 $c=0.1$ 时, a 从0.05变化到0.3时对应的光伏组件表面温度变化情况。由图7(a)~(f)可明显看出,当 $a=0.05$ 时,整个算例中的光伏组件温度均明显高于其他五个算例,且在垂直方向上温度升高的速度也明显快于其他算例。随着 a 值的增加,各算例整体温度逐渐降低,且垂直方向上的温差也明显减小,到 $a=0.30$ 时,垂直方向上的温差已不明显。

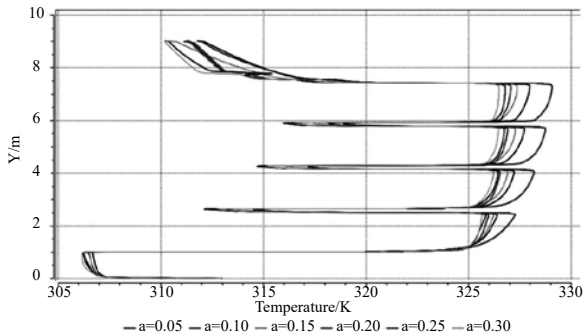


图8 不同 a 取值下光伏组件外表面中轴线上温度变化情况
如图8所示,为 a 取不同值时,各算例光伏组件外表

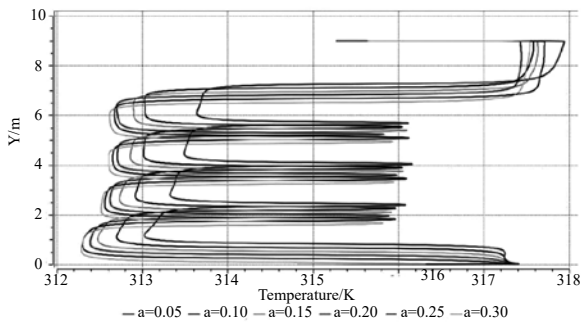


图9 不同 a 取值下墙体外表面中轴线上温度变化情况

面中轴线上的温度随高度的变化的情况。可看出,当 a 从0.05到0.10时温度的降低最为明显,约降低了 a 从0.05到0.30的45%左右,最大降幅可达1.5K左右, a 从0.05到0.15则降低了到 $a=0.30$ 时的70%左右,降幅约0.7K,随后降幅则逐渐减小。如图9所示,为 a 取不同值时,各算例中墙体外表面中轴线上的温度随高度的变的情况。在 a 取从0.05到0.30,光伏组件背面墙体温度降低的差最大为1K左右,并不明显,但从 $a=0.05$ 到 $a=0.1$ 对墙体表面降温还是比较明显的,最大差值仍然可达到0.6K左右。

图10不同 a 值下,对空气层的温度的变化差别较为明显; $a=0.05$ 时,空气层过窄,受开口处进入空气的影响明显。当 a 逐渐增大时,温度的降低幅度同样在逐渐减小。当 a 从0.05变化到0.10时,对于空气层上部的温度降低最为明显,可达到2.4K,再到0.15时又可降低2K左右,此时已降低了到0.30时降幅的65%左右。

因此,对于 a 的取值可为0.10~0.15对于光伏墙中组件温度和空气层温度的降低均有明显效果,对于墙体外壁面的影响则相对弱一些。

3.2 在垂直方向的距离

如图11所示图中为当 $a=0.1$ 、 $c=0.1$ 时, b 从0变化到0.3时对应的光伏组件表面温度变化情况。由图11(a)~(d)可明显看出,当 $b=0$ 时,整个算例中的光伏组件温度均明显高于其他几个算例,且在垂直方向上温度升高的

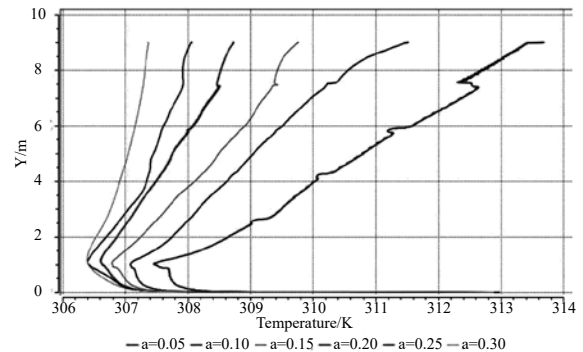
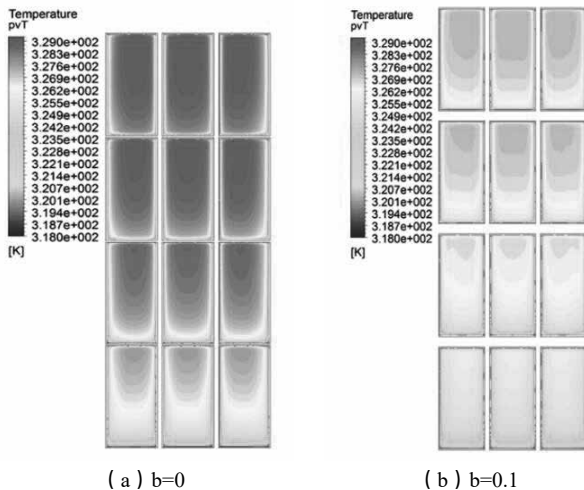
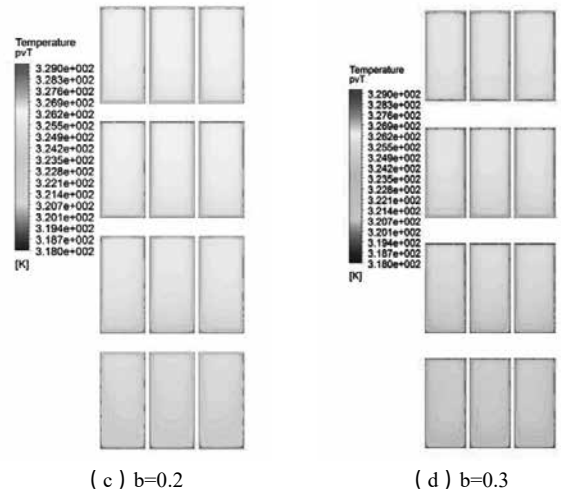


图10 不同 a 取值下空气层在中轴线上温度变化情况



(a) $b=0$

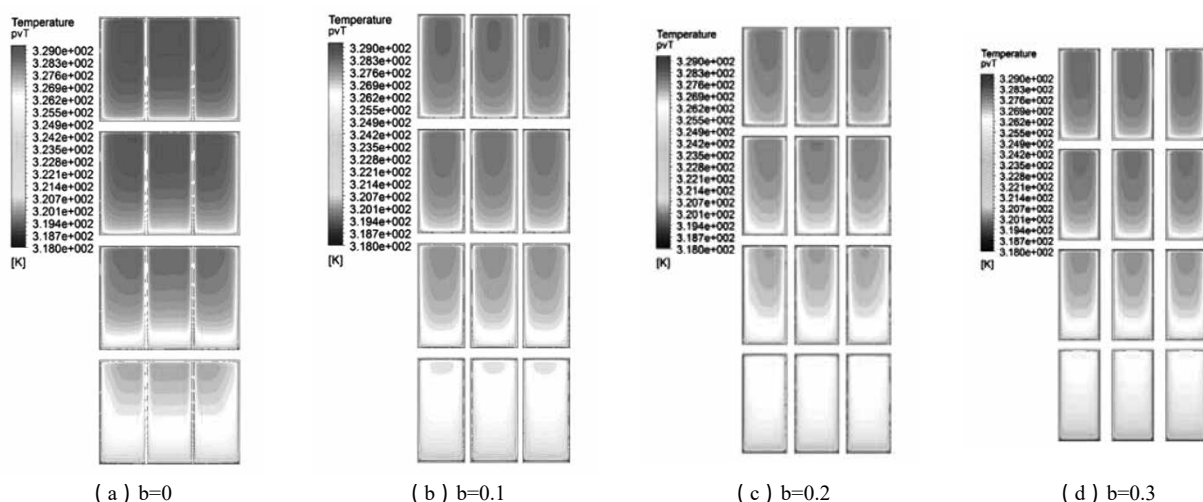
(b) $b=0.1$



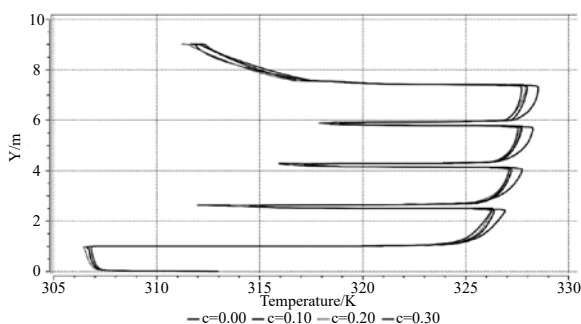
(c) $b=0.2$

(d) $b=0.3$

图11 不同 b 取值下光伏阵列温度变化情况

图 12 不同 c 取值下光伏阵列温度变化情况

速度也明显快于其他算例。随着 b 值的增加, 各算例整体温度逐渐降低, 且垂直方向上的温差也明显减小, 且 b 由 0 到 0.10 时降温幅度最为明显; 到 $b=0.20$ 时, 垂直方向上的温差已不明显。因此, 对于 b 的取值可为 0.10 左右, 对于降低光伏组件表面温度的效果相对更为明显。

图 13 不同 c 取值下光伏组件外表面中轴线上温度变化情况

3.3 在水平方向的距离

如图 12 所示, 当 $a=0.1$ 、 $b=0.1$ 时, c 从 0 变化到 0.3 时对应的光伏组件表面温度变化情况。由图 12 (a) ~ (d) 可明显看出, 当 $c=0$ 时, 整个算例中的光伏组件温度均明显高于其他几个算例, 且在水平方向上中间的光伏组件外表面温度最高。随着 c 从 0 变化到 0.10, 各算例整体温度逐渐降低, 且垂直方向上的温差也明显减小, 但当 c 进一步增加时, 整个光伏阵列的温度变化已不明显。这一结论同样也可从图 13 中得出, 当 c 从 0 变到 0.1 时, 光伏组件外表面中心轴上的温度明显减小, 而当 c 进一步加大时, 温度基本没有变化。因此, 在横向上留一定的间隙对于光伏墙整体散热有一定的帮助, 但无需过大, 会导致架设光伏阵列时的有效面积降低。

4 结论

针对不同安装尺寸的节点开放式光伏墙进行模拟计算与对比分析, 得出:

(1) 当 a (组件背面和墙体间的距离与组件垂直方向长度的比) 0.10~0.15 间时, 对光伏组件、空气层和墙体

温度的降低最为明显;

(2) 当 b (上下相邻两块组件间在垂直方向上的间隙与组件垂直方向长度的比) 由 0 变为 0.1 时, 对光伏组件温度的降低最为明显;

(3) 同样, 当 c (左右相邻两块组件间在水平方向上的间隙大小与组件横向宽度的比) 由 0 变为 0.1 时, 对光伏组件温度的降低有一定的作用, 而后再进一步增加对温度的降低不再有明显作用。

参考文献

- [1] 刘小波. 建筑混合通风的模拟研究 [硕士学位论文]. 湖南: 湖南大学土木工程学院, 2005.
- [2] 温正, 石良辰, 任毅如. FLUENT 流体计算应用教程. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [3] 苏雅旋. 建筑绕流模拟计算要素设定研究 [学士学位论文]. 北京: 清华大学建筑学院, 2007.
- [4] Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10-11):1749-1761.
- [5] 章宇峰. 自然通风与建筑热模型耦合模拟研究 [硕士学位论文]. 北京: 清华大学建筑学院, 2004.
- [6] ASHRAE Handbook - 2001 Fundamentals Chapter 26, Atlanta GA.
- [7] Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10-11):1749-1761.

基于 DeST 的长沙市某综合楼建筑 全年动态负荷模拟研究

朱永寅^{1,3}, 王宁宁^{1,3}, 王文祺^{1,3}, 何石泉^{2,3}, 周孝清^{2,3}

(1. 广州大学土木工程学院, 广东广州 510006; 2. 广州大学建筑节能研究院, 广东广州 510006;

3. 广东省建筑节能与应用技术重点实验室, 广东广州 510006)

【摘要】本文采用 DeST-C 对某综合楼进行了模型全年动态负荷计算, 并对其全年逐时负荷进行了软件计算与手动计算的校核验证。根据计算结果, 进行了分频统计, 提出了该工程的空调系统运行策略。

【关键词】综合楼; DeST; 负荷计算; 负荷分析

0 引言

在进行空调工程设计时, 通常把逐时负荷最大值作为设计工况。在实际运行过程中, 由于空调系统大多数时间在部分负荷工况下运行。

该综合楼的空调控制模式采用定风量系统, 定风量控制中的风阀节流方式, 将会造成较大的能耗浪费^[1]。本项目采用 DeST-C 对该建筑进行负荷动态预测, 可为其节能改造的诊断工作提供理论指导。

1 工程概况

该工程项目位于湖南省长沙市, 属于的夏热冬冷地区, 总建筑面积为 83000 余 m², 建筑高度 99.75m。其中, 地下 1~2 层为车库、设备机房, 地上 1~5 层为商业综合层, 地上 6~28 层为酒店区域。

商业区域包括卖场、办公、包厢等功能区, 营业时间为 8:00~22:00; 酒店区域包括休闲、住宿、办公、会议、健体等功能区域, 全时段经营。

2 边界条件

2.1 DeST 模型

为了综合评价空调系统方案, 合理确定空调冷热源以及指导运行策略的制定, 需要对该酒店建筑全年逐时负荷



图 1 该综合楼建筑实拍图

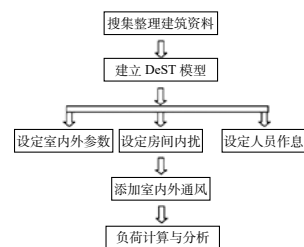


图 2 DeST-C 负荷模拟技术路线图

进行计算, 技术路线见图 2。

在保证建筑整体负荷准确以及负荷特性稳定的前提下, 本设计根据该建筑的原始平面图对模型进行了适当的简化和修正, 建立了 DeST 模型, 见图 3。

2.2 室外参数设定

根据《中国建筑热环境分析专用气象数据集》等气象数据以及相关规范^[2], 查得长沙市包括室外逐时干球温度、全年各月平均干球温度、逐时太阳辐射量等全年逐时室外参数, 其逐时变化情况见图 4。



图 3 (a) 酒店综合楼 DeST 模型效果图

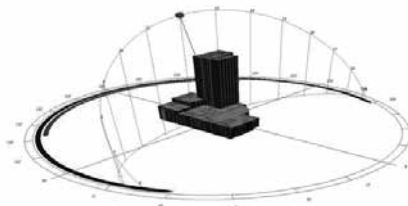
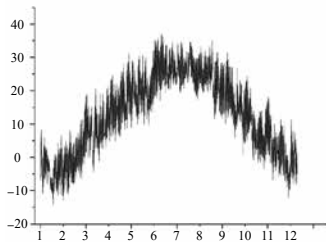
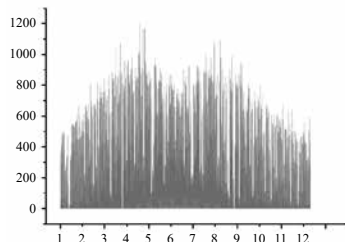


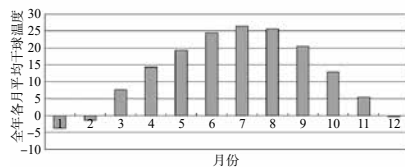
图 3 (b) 综合楼日照效果图



(a) 室外逐时干球温度



(b) 逐时太阳辐射量



(c) 全年各月平均干球温度

图 4 室外气象参数

2.3 室内参数设定

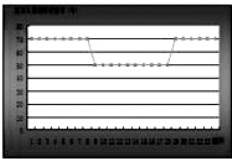
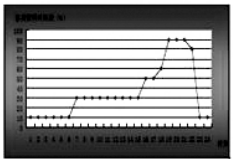
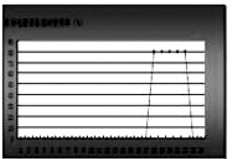
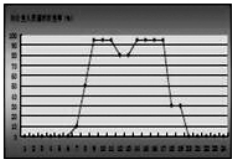
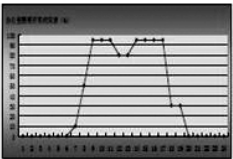
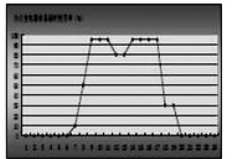
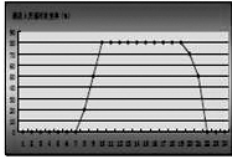
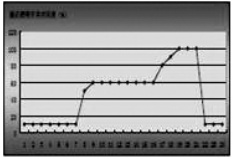
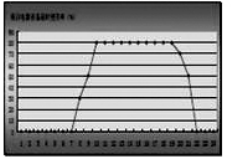
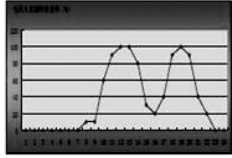
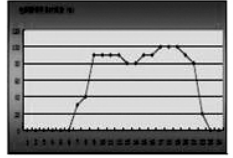
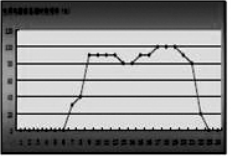
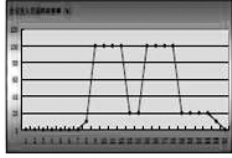
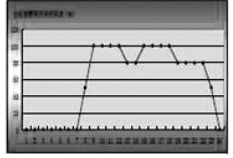
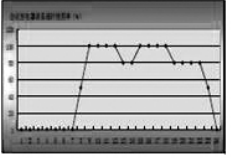
由于不同房间的使用功能不同,且房间内温湿度分布是一个范围而非某一特定点,对于围护结构、室内人员、设备以及照明等参数,将在既定的范围内进行设计计算^[3,4],部分参数输入见表1,表2。

对于商场区域,在13:00~17:00,由于室外气温逐渐升高以及太阳辐射逐渐增强,且人员活动较为频繁,导致建筑冷负荷增大且比较明显,并达到最大值;之后,室外气温与太阳辐射强度逐渐降低,使得建筑总冷负荷逐渐减少;晚上21:00以后,在室人员减少且大多数的照明灯具

表1 室内设计计算参数

房间名称	干球温度 /℃		相对湿度 /%		人员密度	照明负荷	新风指标	设备负荷
	夏季	冬季	夏季	冬季	人 /m ²	W/m ²	m ³ /(h·人)	W/m ²
商场	24~26	20~22	55~65	≥ 30	0.5	40	20	20
物管用房	24~26	20~22	50~60	≥ 30	0.1	13	30	20
消防控制室	24~26	20~22	50~60	≥ 30	0.1	13	30	20
办公室	24~26	20~22	50~60	≥ 30	0.1	13	30	20
餐厅	24~26	20~22	55~65	≥ 30	0.5	20	25	20
客房	22~24	20~22	55~65	≥ 40	0.05	20	40	20
会客室	24~26	18~20	55~65	≥ 40	0.2	20	30	5
服务休息室	24~26	20~22	55~65	≥ 40	0.3	20	30	20
保健按摩室	24~26	20~22	55~65	≥ 35	0.1	20	30	20
办公室	24~26	18~20	55~65	≥ 35	0.2	18	30	20
会议室	24~26	18~20	55~65	≥ 35	0.5	18	25	5
设备室	24~26	18~20	55~65	—	0.0	20	30	13
健身室	24~26	20~22	55~65	≥ 40	0.4	20	40	5
接待休息	24~26	18~20	55~65	≥ 30	0.3	20	30	0

表2 人员、设备以及照明作息表

	人员逐时在室率 /%	照明开关时间表 /%	电器设备逐时使用率 /%
客房			
办公室			
商店			
包间			
会议室			

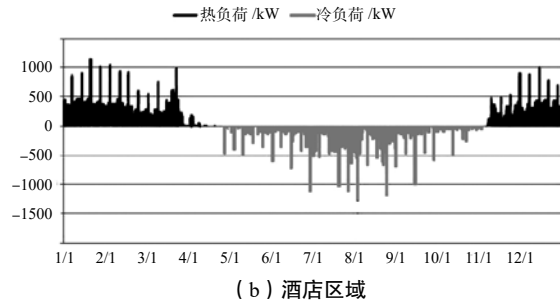
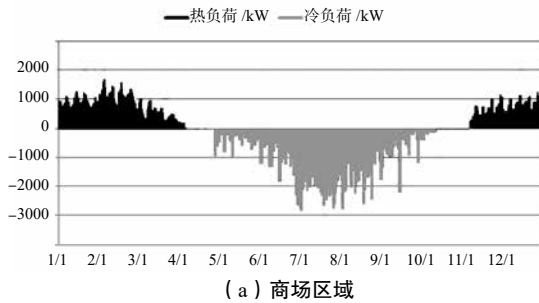


图 5 空调全年负荷变化图

及设备均处于关闭状态，系统运行负荷减少。

对于酒店区域，在 13:00~17:00，由于室外气温逐渐升高以及太阳辐射逐渐增强，且住客陆续入住，导致建筑冷负荷增大比较明显；晚上 20:00 以后，酒店建筑的在室人员增多且照明灯具及设备均同时运行，系统运行负荷达到最大值，但室外气温与太阳辐射强度逐渐降低，使得建筑总冷负荷趋于动态平衡；清晨 7:00 以后，随着室外气温的升高以及在室人员数的减少，使得室内的热量存在波动上升。房间内扰设定参数如前所述，设定所对应的作息情况时，按照（GB 50189-2015）《公共建筑节能设计标准》结合 DeST 软件默认的作息情况。

3 动态负荷计算及分析

3.1 动态负荷计算

针对该建筑，进行了全年动态负荷模拟，综合楼商场部分的区域和酒店部分的区域的全年逐时空调负荷计算结果见图 5，全年空调系统负荷频率如表 2 所示。

表 3 全年空调系统负荷频率统计表

负荷范围 /kW	≤ 840	841~1680	1681~2520	2521~3360	3361~4200
负荷率 /%	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
运行时间 /h	628.2	1067.8	1387.4	392.8	123.8
时间频率 /%	17.45	29.66	38.54	10.91	3.44

计算得出：全年主要热负荷集中在每年的 11 月至 3 月，为冬季空调季。商场区域的逐时热负荷最大值呈现于 2 月 6 日下午 3 点，最大值为 1604.0kW；酒店区域的逐时热负荷最大值呈现于 1 月 31 日上午 11 点，最大值为 1160.9kW。

全年冷负荷集中在每年的 6 月至 9 月，为夏季空调季。商场区域的逐时冷负荷最大值呈现于 7 月 2 日下午 4 点，最大值为 2843.1kW；酒店区域的逐时冷负荷最大值呈现于 8 月 3 日下午 8 点，最大值为 1374.1kW。以总冷负荷为 4217kW，供冷时间为 3600h 进行统计，负荷分布情况见表 3 与图 6。

3.2 动态负荷分析

由于商场空调系统全年运行时间较长，而酒店受节假日

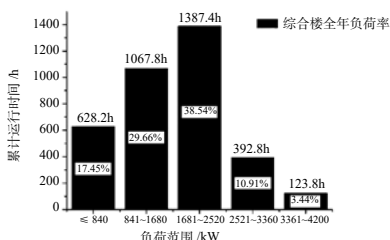


图 6 全年冷负荷频率统计

日、季节更替等因素导致的入住率波动，对空调系统产生的影响较大，由图 6 可知，该建筑 96.56% 的时间在部分负荷工况下工作，仅 3.44% 的时间接近满负荷状态。

该建筑全年 6~9 月的冷负荷较大，此时，入住率及人员密度较高，人员、新风及空调房间的同时使用系数较大，从而冷负荷较高。根据候温法对季节的定义^[1]，将本建筑工况划分为三种：冬季工况、夏季工况和过渡季工况，见表 4 与图 7。

表 4 综合楼空调系统运行策略

运行工况	时间	运行策略	时间 / 天
夏季	6 月 1 日至 9 月 14 日	供冷	106
冬季	11 月 15 日至次年 3 月 31 日	供热	136
过渡季	4 月 1 日至 5 月 31 日 或 9 月 15 日至 11 月 14 日	全新风	123

4 结论

据鸿业、DeST 以及手算的计算结果可知，该建筑全年逐时冷负荷最大值出现在 8 月 3 日下午 16:00。此时正值酷暑季节，酒店、商场正处于旺季，整体负荷水平较高。

由于软件本身相关参数的差异性，在 4 组数据中，DeST 与手算的最大偏差 9.6%，鸿业与手算的最大偏差 6.5%，均属于可接受范围。通过对比分析与互相验证，说明上述的计算方法及计算结果是可信的，可以为设计后期的围护结构优化设计、冷冻站及泵站方案、空气处理设备校核以及输配系统方案提供指导。

参考文献

- [1] 薛志峰. 既有建筑节能诊断与改造 [M]. 中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [M]. 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 中国建筑科学研究院. 公共建筑节能设计标准:GB 50189-2015[M]. 中国建筑工业出版社, 2015.
- [4] 佚名. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 [M]. 中国建筑工业出版社, 2012.

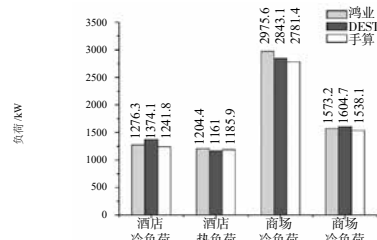


图 7 负荷计算结果对比

不同透过率半透明非晶硅光伏窗自然采光性能研究

王春磊, 彭晋卿, 李念平, 王 蒙, 李 雪, 何颖东

(湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082)

[摘 要] 使用 Rhino 建立了配备中空型半透明非晶硅光伏窗的办公房间模型, 再由 DIVA-for-Rhino 设置非晶硅光伏玻璃光学性能参数, 对应用了中空型非晶硅光伏窗的办公房间进行自然采光计算与全年动态光环境模拟, 研究了不同透过率下非晶硅光伏窗的采光性能。结果表明高透过率的中空型半透明非晶硅光伏窗基本能满足室内采光需求, 最佳视觉舒适度下的透过率范围为: 0.4~0.6, 研究结果为光伏窗的选用及优化设计提供了参考。

[关键词] 非晶硅光伏窗; 透过率; 光环境模拟; DIVA-for-Rhino

0 引言

近年来, 光伏窗因其节能性优点应用愈加广泛^[1-2]。相关研究表明, 将光伏组件用作建筑窗体材料, 既能减少太阳直射得热, 又可省去遮阳装置, 还能避免室内眩光现象的产生。光伏打效应产生的电能还可供室内使用, 一举多得。光伏双层窗以其良好的隔热性能尤为受欢迎^[3-5]。

然而, 不可忽视的是, 光伏组件的使用会减少室内太阳直射, 降低室内照度, 不同程度上影响室内采光需求。特别是晶体硅电池片的使用, 会造成室内不同程度的阴影遮挡, 影响视觉效果。光线通过电池片之间的间隙传入室内, 采光不均匀^[6]。而半透明非晶硅薄膜组件没有阴影遮挡问题, 应用于建筑窗体, 自然采光均匀, 视觉效果更好。

为评估半透明光伏窗的采光性能, 本文以长沙地区配备中空型半透明非晶硅光伏窗的办公房间为例, 进行了静态与全年动态采光模拟, 并与普通透明双层中空玻璃进行对比, 最后比较了不同透过率下光伏窗的采光性能。结果表明高透过率的中空型半透明非晶硅光伏窗基本能满足室内采光需求, 并且有效避免眩光现象。其最佳视觉舒适度下的透过率为: 0.4~0.6。本文研究结果为视觉舒适度下光伏窗的选用及优化设计提供了参考。

1 光伏窗模型

1.1 窗户结构模型

本文研究所用的中空型半透明非晶硅光伏窗结构形式如图 1 所示: 外层是半透明非晶硅光伏组件, 内层是 3 mm 透明玻璃, 中间有 9 mm 的空气层。

其中, 外层半透明非晶硅薄膜由内外两层钢化玻璃保护, 钢化玻璃厚度 3mm。窗户太阳得热系数为 0.284, U 值为 $2.936\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$, 遮阳系数为 0.326, 导热系数为 $0.1157\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 。

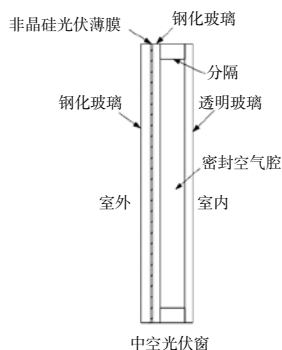


图 1 中空型非晶硅光伏窗结构图

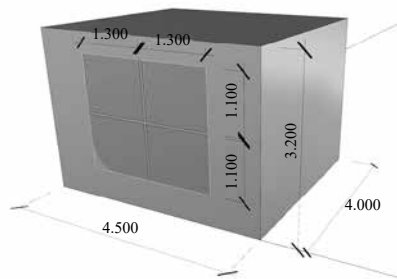


图 2 办公房间模型



图 3 房间内部视角下光伏窗视觉效果

1.2 模拟工具介绍

本文研究主要用到的模拟分析软件有三维建模软件 Rhino 及其参数化设计插件 Grasshopper, 采光模拟软件 DIVA-for-Rhino。

Rhino 是基于 NURBS 的三维建模软件, 建模精度高, 编辑分析功能强大, 主要用于办公房间模型的建立。

DIVA-for-Rhino 是由哈佛大学设计研究生院开发的以 Radiance 为核心的采光性能模拟与能耗分析软件。作为 Rhino 的插件, DIVA-for-Rhino 具有良好的建模与结果可视化功能。它使用 Radiance 的计算核心, 并可与参数化分析插件 Grasshopper 相结合, 进而联合 EnergyPlus 等进行能耗分析^[7]。

Radiance 基于反向光线追踪模型进行光线计算, 它使用的这种将随机采样与光源和镜面对象的确定性计算结合在一起的混合式光线跟踪法具有很高的计算效率与计算精度高, 扩展性强^[8]。

1.3 模型搭建

图 2 为使用 Rhino 建立的办公房间模型, 南向开窗。房间尺寸 $4.5\text{m}\times 4\text{m}\times 3.2\text{m}$, 采用 4 块 $1.1\text{m}\times 1.3\text{m}$ 的中空型非晶硅光伏玻璃, 可见光透过率约 22%, 窗墙比约为 0.4。

实测光伏组件光学特性、热导率、红外发射率等参数, 将参数输入 Optics 6 软件并建立用户定义的数据库文件。将数据库文件导入 WINDOW 7.4, 设置双层中空结构, 单个光伏玻璃尺寸 $1.1\text{m}\times 1.3\text{m}$, 计算出窗户结构的透过率、反射率、红外发射率、太阳得热系数、综合传热系数等参数。将光伏组件红、绿、蓝光透过率参数作为 DIVA-for-Rhino 模型中光伏窗性能参数的输入条件。

从室内看向窗外时中空型非晶硅光伏窗的视觉效果如图 3 所示。测得光伏组件的光学性能参数如表 1 所示。

表 1 非晶硅光伏组件光学特性

参数	数值
厚度	8mm
垂直太阳辐射透过率	0.1871
正面太阳辐射反射率	0.178
背面太阳辐射反射率	0.40
可见光透过率	0.22
正面可见光反射率	0.079
背面可见光反射率	0.44
红外发射率	0.84%

在 DIVA-for-Rhino 中设定墙体的粗糙度, 反射率, 镜面反射率等参数, 作为模拟计算的边界条件。设置计算动态光环境模拟计算网格大小为 0.2m, 感光测试点工作平面高度 0.75m, 如图 4 所示。模拟采用的时间表为办公房间常用的上午 8 点到下午 6 点。

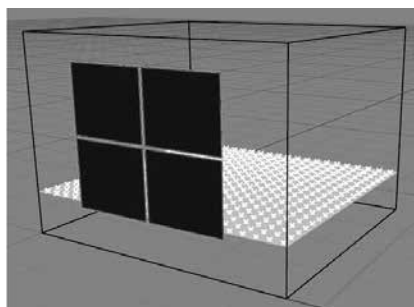
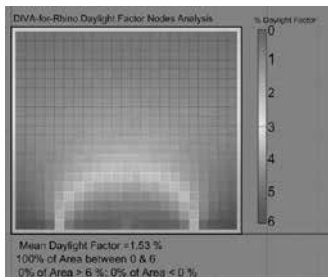


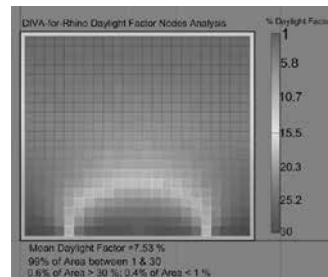
图 4 模拟计算网格与感光点设置

2 光环境模拟

为评估半透明光伏窗的自然采光性能, 对配备中空型半透明非晶硅光伏窗的办公房间进行了静态与动态光环境模拟。动态采光评价标准可从不同方面反映建筑的自然采光状况, 相比静态光环境分析具有一定的先进性^[9]。故本文光环境模拟以动态模拟为主, 静态模拟为辅。

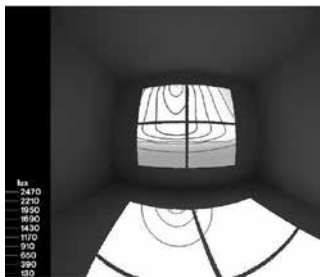


(a) 中空型非晶硅光伏窗 DF 分布

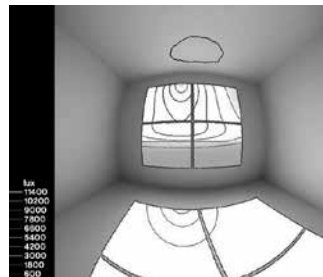


(b) 普通中空型双层玻璃窗 DF 分布

图 5 两种窗采光系数对比



(a) 冬至日 12 时中空型非晶硅光伏窗照度等值线



(b) 冬至日 12 时普通中空型层玻璃窗照度等值线

图 6 两种窗冬至日照度值对比

将外层光伏玻璃换成透过率 90% 的普通 3mm 透明玻璃, 对比分析了中空型非晶硅光伏窗与普通中空型玻璃窗的自然采光特性。

2.1 静态光环境模拟

2.1.1 采光系数 (DF)

采光系数 (DF) 是室内目标点上的照度与全阴天室外水平面照度的比值, 表征了全年中最不利天气条件下的采光情况。对办公建筑而言, 其最佳范围为 2%~5%^[10]。两种窗 DF 模拟结果如图 5 所示。

结果显示, 中空型光伏窗各点平均采光系数 1.5%, 采光系数高于 2% 的空间占室内面积的 24%, 如图 5 (a) 所示。普通中空型双层玻璃窗的平均采光系数 7.53%, 采光系数高于 2% 的空间占室内面积的 97%, 如图 5 (b) 所示。相比之下, 普通中空玻璃的采光系数过高, 靠近窗户的地方采光系数达到了 20% 以上。而透过率 22% 的中空光伏窗采光系数偏低, 远离窗户的半个房间只有 1%。

2.1.2 眩光可能性 (DGP)

眩光现象与人眼反应有关, 当视野范围内出现较强的亮度或者极端的亮度对比时, 眼睛感到不适, 产生眩光现象。评价指标方面, Wienold^[11] 等提出的眩光可能性指标 DGP 将数学算法与经验模型结合在一起, 充分考虑了人眼对光源的舒适度反应, 相比眩光值 (GR) 与统一眩光值 (UGR) 更加科学。当 $DGP < 35\%$ 时, 属不可感知的眩光; 当 $35\% \leq DGP < 40\%$ 时, 属可感知的眩光; 当 $40\% \leq DGP < 45\%$ 时, 属不舒适的眩光; 当 $DGP \geq 45\%$ 时, 属不可接受的眩光。

本文采用 DGP 评估眩光的程度。将镜头置于房间正中位置, 距离地面 1.2m, 对准窗户, 以代替静坐办公时的人眼视野范围。模拟冬至日 12 月 22 号中午 12 点照度等值线视觉效果, 渲染结果如图 6 所示。图 6 (a) 是中空型非晶硅光伏窗, 图 6 (b) 是普通中空型玻璃窗。

图 6 (a) 是中空型非晶硅光伏窗, 窗户上部照度达到

2200lux, 中部达到 1200lux, 边缘区域在 400lux 左右。模拟 DGP 值为 25%, 小于轻微眩光临界值 35%, 属于不可感知的眩光范围; 图 6 (b) 是普通中空型玻璃窗, 窗上部照度达到 10000lux, 中部达到 6000lux, 边缘区域在 3000lux 左右。模拟 DGP 值为 53%, 大于不可接受的眩光临界值 45%, 属于不可接受的眩光范围。这表明中空型非晶硅光伏窗的眩光现象人眼几乎感觉不到, 可忽略不计。普通中空型双层玻璃窗的眩光严重, 属不可接受的范围, 若不添加遮阳装置, 对静坐办公的人员影响较大。

2.2 动态光环境模拟

2.2.1 全自然采光时间百分比 (DA)

建筑中某一点的全年自然采光时间百分比 (DA) 是指全年工作时间内单独依靠自然采光就能达到最小照度要求的时间百分比^[12]。设置办公房间照度值 300lux^[13], 两种窗户的全年全自然采光时间百分比 (DA) 分布如图 7 所示。由图 7 (a) 可以看出: 靠近中空型非晶硅光伏窗的地方全自然采光时间百分比 (DA) 可达到 80%, 远离窗户的两个角落达到的全自然采光时间百分比 (DA) 约为 10%, 靠近窗户的两个角落几乎不能靠自然采光满足需求。0.75m 工作面上全年平均全自然采光时间百分比 (DA) 为 33.6%。由图 7 (b) 可以看出: 靠近普通中空玻璃窗的地方全自然采光时间百分比 (DA) 可达到 95% 以上, 远离窗户的两个角落达到的全自然采光时间百分比 (DA) 也有 60%。0.75m 工作面上全年平均全自然采光时间百分比 (DA) 为 81%。

2.2.2 有效全自然采光时间百分比 (UDA)

有效全自然采光时间百分比 (UDA) 与有效自然采光照度 (UDI) 是基于工作平面照度信息的动态自然采光性能评价指标, 主要考察能有效利用自然光的时间^[14]。对办公建筑自然采光而言, 当 $UDI < 100\text{lux}$ 时, 采光量不足; 当 $UDI > 2000\text{lux}$ 时, 采光量过大, 可能发生眩光导致视觉不舒适感; 当 $100\text{lux} \leq UDI \leq 2000\text{lux}$ 时, 表明

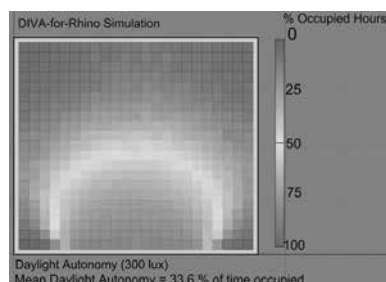
是可利用的情况。中空型半透明非晶硅光伏窗与普通中空型双层窗的采光百分比分布对比如图 8 所示。对中空型半透明非晶硅光伏窗而言, 当 $UDI < 100\text{lux}$ 时, 时间占比 29.6%; 当 $100\text{lux} \leq UDI \leq 2000\text{lux}$ 时, 时间占比 65.62%; 当 $UDI > 2000\text{lux}$ 时, 时间占比 4.85%; 而对于普通中空型双层窗, 当 $UDI < 100\text{lux}$ 时, 时间占比 5.72%; 当 $100\text{lux} \leq UDI \leq 2000\text{lux}$ 时, 时间占比 69.77%; 当 $UDI > 2000\text{lux}$ 时, 时间占比 24.52%;。两种窗户在可利用的有效采光区间占比相差不大, 但非晶硅光伏窗在照度小于 100lux 的区间下时间占比远大于普通中空型玻璃窗, 采光量稍显不足。可适当增加透过率以提高非晶硅 $UDI < 100\text{lux}$ 的时间比。相反地, 在照度大于 2000lux 的区间下, 普通中空型玻璃窗时间占比更大, 易发生眩光现象。

2.2.3 连续全自然采光时间百分比 (cDA)

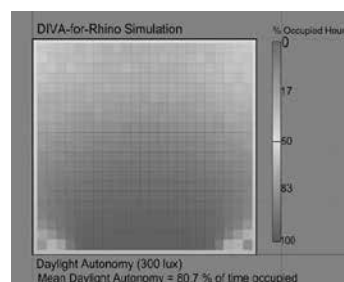
连续全自然采光时间百分比 (cDA) 在自然采光照度小于最小设计照度时, 采用权衡系数的方式综合考察其不满足程度。例如当最小设计照度 300lux 时, 若某个时间步长内照度为 240lux, 此时间步长的权衡系数为 $240/300=0.8$, 模糊了临界值的界限。研究表明这项指标的改进是合理的^[15]。两种窗的连续全自然采光时间百分比 (cDA) 分布如图 9 所示。由图 9 (a) 可以看出, 模糊了界限之后, 中空型非晶硅光伏窗的采光百分比达到了 61.17%, 优于 DA 的 33.6%。这表明, 使用光伏窗之后的室内照度虽然有时达不到 300lux 的水平, 但是其接近 300lux 的时间很多, 也是可以利用的。由图 9 (b) 可以看出, 普通中空型双层玻璃窗的采光百分比达到了 90.76%, 高于 DA 的 80.7%。

2.2.4 空间自然采光百分比 (sDA)

与全自然采光时间百分比 (DA) 不同的是, 空间自然采光百分比 (sDA) 是面积与面积的比值^[16]。sDA 是 50% 的工作时间光照强度大于 300lux 的面积, 占整个房间面积的百分比。模拟结果显示: 使用中空型非晶硅光

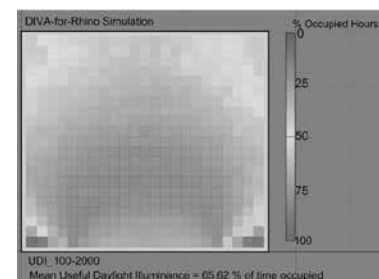


(a) 中空型非晶硅光伏窗 DA 分布

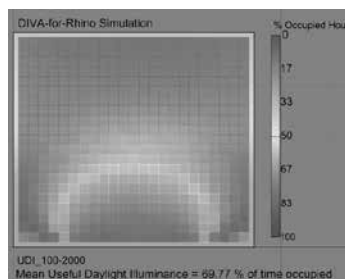


(b) 普通中空型双层玻璃窗 DA 分布

图 7 两种窗全自然采光时间百分比分布对比

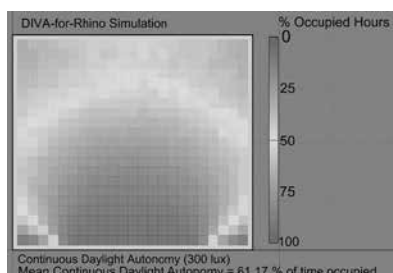


(a) 中空型非晶硅光伏窗 UDI_100-2000 分布

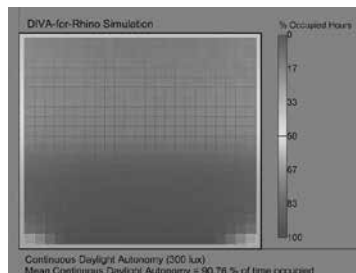


(b) 普通中空型双层窗 UDI_100-2000 分布

图 8 两种窗有效全自然采光百分比分布对比

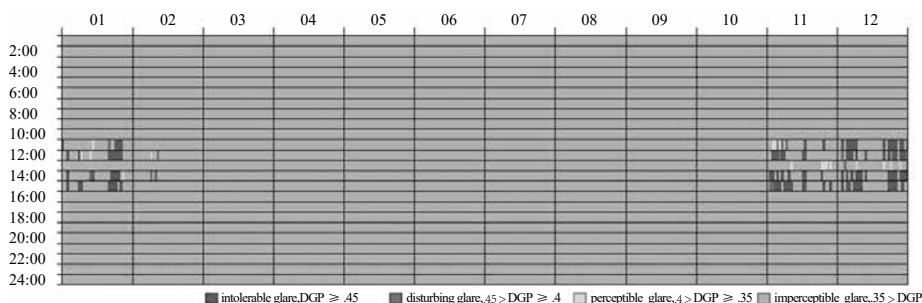


(a) 中空型非晶硅光伏窗 cDA 分布

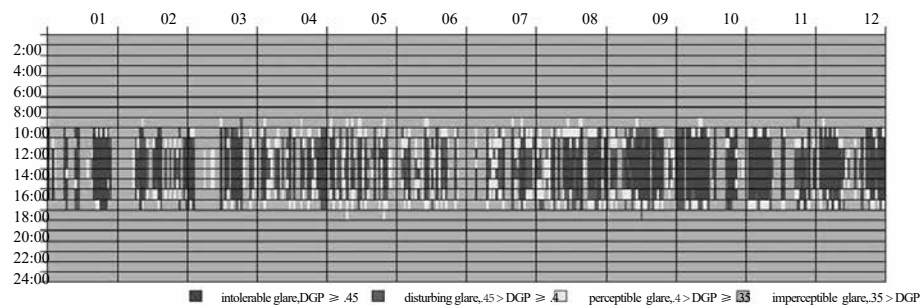


(b) 普通中空型双层玻璃窗 cDA 分布

图 9 连续全自然采光百分比分布



(a) 中空型非晶硅光伏窗年 DGP 分布



(b) 普通中空型双层玻璃窗年 DGP 分布

图 10 两种窗全年眩光可能性对比

伏窗的房间，sDA 的值为 27%，这表明，房间 27% 的面积在至少 50% 以上的工作时间内，照度能达到 300lux；使用普通中空型玻璃窗的房间，sDA 的值为 99%，房间 99% 的面积在至少 50% 以上的工作时间内，照度能达到 300lux。

2.2.5 全年眩光可能性 (cDGPs)

前面静态光环境模拟中仅分析了冬至日中午十二点的眩光可能性，有一定局限性。为评估两种窗户房间中的视觉舒适度，对两种窗户全年眩光可能性进行了对比分析，结果如图 10 所示。由图 10 (a) 可知：使用中空型非晶硅光伏窗的房间，3.3% 以内的办公时间，其 $DGP \geq 0.4$ ，会发生不舒适的眩光现象。由于冬季太阳高度角较低，眩光都发生在冬季。而由图 10 (b)：使用普通中空型双层玻璃窗的房间，有 35.8% 的办公时间，其 $DGP \geq 0.4$ ，会发生不舒适的眩光，秋冬季节眩光更加严重。这意味着，如果不加设遮阳装置，是无法正常办公的。

3 不同透过率的光伏窗采光性能

由前面的静态与动态光环境模拟发现，无论是 22% 透过率的中空型非晶硅光伏窗，还是普通中空型双层玻璃窗，其自然采光性能都有所不足。采用的中空型非晶硅光

伏窗的透过率太低，导致室内采光不足，而普通中空型双层玻璃窗的透过率太高，易造成室内照度过大，还有眩光现象产生。若选用选用稍高透过率的薄膜组件，则可解决这对矛盾。非晶硅薄膜组件透过率的改变可通过激光蚀刻来实现。

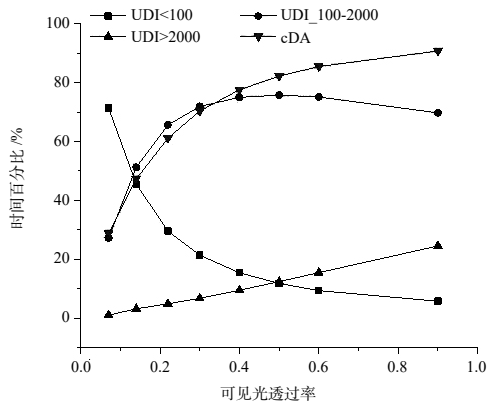


图 11 不同透过率下非晶硅光伏窗采光性能

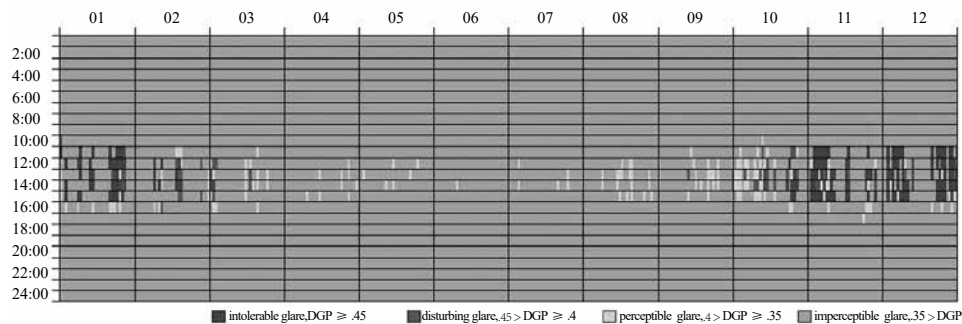


图 12 透过率 0.4 的非晶硅光伏窗年 DGP 分布

模拟分析了不同透过率下中空型非晶硅光伏窗的有效自然采光照度与连续全自然采光百分比,结果如图 11 所示(其中透过率 0.9 的是普通中空玻璃)。

可以看出:随透过率增加,连续全自然采光时间百分比 cDA 与有效自然采光照度 $UDI > 2000\text{lux}$ 时的自然采光时间百分比都增加,这是由于随透过率增加,进入室内的可见光增加,室内照度增大。相应地, $UDI < 100\text{lux}$ 时的自然采光时间百分比减少。 $100\text{lux} \leq UDI \leq 2000\text{lux}$ 的自然采光时间百分比先增加后减少,在透过率 0.5 左右的时候到达顶峰。透过率在 0.4~0.6 之间时, $UDI_{100-2000}$ 的采光时间百分比变化不明显,故为使光伏组件效率最大化,可选用透过率为 0.4 的组件。

如图 12 所示,透过率 40% 的非晶硅光伏窗全年 cDGPs 为 6.0%。这意味着,全年 6.0% 以内的办公时间,其 $DGP \geq 0.4$,会发生不舒适的眩光现象。这既能最大限度满足室内采光需求,又不至于使得室内光线过强造成大范围眩光。

4 结论

本文建立了办公建筑应用中空型半透明非晶硅光伏窗的自然采光模型,进行了全年光环境模拟,分析了不同的采光性能指标,并与普通的中空型双层玻璃窗进行了对比。最后模拟了不同透过率下中空型非晶硅光伏窗的采光性能。结论如下:

(1) 相比静态光环境分析,动态光环境模拟结果可直观全面地考察全年中自然采光性能。靠近窗户的地方,采光效果更好,远离窗户的角落,采光效果稍差。

(2) 无论是低透过率的中空型半透明非晶硅光伏窗,还是高透过率的普通中空型双层玻璃窗,其采光性能均有缺陷。案例采用的中空型非晶硅光伏窗自然采光量不足,而普通中空型双层玻璃窗室内照度太大,易发生眩光现象,影响视觉舒适度。

(3) 增加中空型半透明非晶硅光伏窗的透过率,可提高其自然采光性能。以有效自然采光照度 UDI 为目标函数的优化结果显示,当非晶硅光伏窗透过率为 0.4~0.6 时,自然采光效果最好。为使光伏组件效率最大化,可选择透过率为 0.4 的非晶硅组件。

参考文献

- [1] Han J, Lin L, Yang H. Numerical evaluation of the mixed convective heat transfer in a double-pane window integrated with see-through a-Si PV cells with low-e coatings[J]. Applied Energy, 2010, 87(11):3431–3437.
- [2] Peng J, Lu L, Yang H, et al. Comparative study of the

thermal and power performances of a semi-transparent photovoltaic façade under different ventilation modes[J]. Applied Energy, 2015, 138:572–583.

[3] Fung T Y Y, Yang H. Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings[J]. Energy & Buildings, 2008, 40(3):341–350.

[4] Chow T.T., Fong K.F., He W. Performance evaluation of a PV ventilated window applying to office building of Hong Kong[J]. Energy and Buildings, 2007, 39:643–650.

[5] Li D H W, Lam T N T, Chan W W H, et al. Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings[J]. Applied Energy, 2009, 86(5):722–729.

[6] 李卓. 天津地区高层办公建筑应用光伏玻璃的天然采光与能耗研究[D]. 天津大学, 2014.

[7] Jakubiec A J, Reinhart C F. DIVA 2.0: Integrating daylight and thermal simulations using Rhinoceros 3d, DAYSIM and EnergyPlus[C]// Building Simulation. 2011.

[8] 尤伟, 吴蔚. 浅探运用 Radiance 模拟天然采光[J]. 照明工程学报, 2008, (01):25–32.

[9] 张立超. 基于动态采光评价的办公空间侧向采光研究[D]. 天津大学, 2014.

[10] GB 50033-2013. 建筑采光设计标准(附条文说明)[S].

[11] Wienold J, Christoffersen J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras[J]. Energy & Buildings, 2006, 38(7):743–757.

[12] Reinhart C F. Daylight availability and manual lighting control in office buildings-simulation studies and analysis of mesuremnets[D]. Department of Architecture, Technical University of Karlsruhe, Germany, 2001.

[13] GB 50034-2013. 建筑照明设计标准(附条文说明)[S].

[14] Nabil A, Mardaljevic J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors[J]. Energy & Buildings, 2006, 38(7):905–913.

[15] Rubinstein F M. Comparison of Control Options in Private Offices in an Advanced Lighting Controls Testbed[J]. Journal of the Illuminating Engineering Society, 2000, 29(2):39–60.

[16] Hescong L, Wymelenberg V D, Keven (ViceChair), et al. Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)[J]. IES - Illuminating Engineering Society, 2012.

基于地理信息系统的城市建筑节能模拟研究

刘云亮, 田 玮, 傅 兴, 朱传琪

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

[摘 要] 研究系统性提出一套适用于城市环境大规模建筑群的能耗模拟与节能潜力评估的方法。包括: 地理信息系统数据的处理、自动化建模方法、机器学习代理模型建立方法、节能方案可视化评估等内容。地理信息系统数据处理部分提出了建立建筑能耗模型所需数据库的基本框架; 自动化建模部分实现了城市建筑群的建模自动化; 机器学习代理模型的建立大幅提高了建筑能耗预测效率, 通过比较五种机器学习模型的性能, 得到适用建筑能耗模拟预测最佳的多元自适应回归样条模型; 节能方案可视化提出创建三维能耗地图的方法来直观评估节能方案的节能潜力。

[关键词] 建筑能耗预测; 地理信息系统; 机器学习模型; 可视化评估

0 引言

2014 年我国竣工建筑面积总量约 561 亿 m^2 , 预计 2020 年之前形成的建筑规模将达 700 亿 m^2 左右^[1]。城市建筑规模的快速增长, 从建造和运行两方面驱动了能源消耗和碳排放增长。城市建筑冬季供暖所需能耗, 也是导致北方城镇雾霾问题持续发酵的重要原因之一^[2]。因此城市规模建筑能耗分析已经成为国内外研究热点。目前, 城市规模建筑能耗的模拟尚处于初级研究发展阶段^[3]。主要面临以下三个难点: (1) 城市通常有大量的建筑, 手动建模非常困难, 同时也可能导致很多错误, 所以如何使用计算机程序使城市建筑能耗模型实现程序化, 是建模过程中的主要难点; (2) 城市建筑能耗特有的复杂性, 城市环境中影响建筑能耗的因素有很多, 如建筑围护结构热特性、建筑使用时刻表、建筑用途、内部设备、人行为、气象参数等。如何对这些因素进行敏感性分析, 是制定更高效节能方案的重要课题; (3) 城市规模建筑能耗模型数量庞大, 对不同节能方案进行模拟计算成本昂贵, 如何降低节能方案模拟计算成本以及模拟结果直观地可视化, 是城市建筑节能方案评估的重点任务。

智慧城市及相关信息技术的发展为城市规模建筑节能研究提供了很好地大数据支持^[4]。数据科学、机器学习建模技术经过多年的发展积累, 其方法和工具已较为成熟, 这为城市大数据的处理提供了便利条件^[5]。地理信息系统的最新进展提供了更好的空间分析技术平台, 同时提供了更加详实的建筑信息数据^[6-8]。这些条件使得建立城市规模建筑能耗模型成为可能, 从而为深入了解城市不同空间尺度的建筑能耗分布, 分析评估不同节能措施, 制定城市建筑节能规划政策提供现实指导。

本研究以天津市城区某高校建筑群为例, 提出了一套基于地理信息系统的城市建筑能耗模拟与节能性能评估的系统研究方法, 包括: 地理信息系统数据的处理、城市规模建筑建模自动化、机器学习代理模型建立、节能方案可视化评估四个主要部分。这种方法即适用于新低碳城镇的设计规划, 也可用于已有城区的节能改造。

1 研究方法

本研究的技术路线如图 1 所示, 主要分四个主要步骤:

(1) 数据前处理: 根据数据获取来源与类型不同, 将数据分为地理信息系统数据、外部环境数据、建筑自身特性数据、建筑运行时态数据等模型其他信息。需要将这些信息整理成一个标准的参数集合以方便程序化建模调用。

(2) 城市规模建模自动化: 自动化建模采用 R 语言^[9]

编程实现, 因能耗模拟软件 EnergyPlus^[10] 的模型输入文件为 ASCII 码文件, 所以本研究利用 R 语言强大的文本编辑功能编写了自动化建模程序包 (AutoBuilding-R)。自动建模完成后, 可将模型直接输入到 EnergyPlus 中进行模拟。

(3) 建立机器学习代理模型: 建立机器学习代理模型的目的是将大规模建筑能耗模型替换为数学模型, 从而大幅度提高计算效率, 实现对不同节能方案的快速预测。其主要方法是使用机器学习建模。

(4) 城市规模建筑能耗及节能方案的可视化评估: 城市规模建筑能耗的可视化评估主要是基于地理信息系统建立一个反应现有建筑 (方案) 的能耗地图 (Energy-Map)。结合三维动态能耗地图可以方便地进行城市建筑能耗的空间分析。根据城市建筑能耗的空间分布特点, 再对区域建筑进行针对性的敏感性分析, 从而帮助制定更精准的节能方案。制定的节能方案通过机器学习代理模型的快速计算得出对应的能耗结果, 该结果同样使用 Energy-Map 进行可视化, 然后与原方案对比, 可快速直观地评估节能效果。

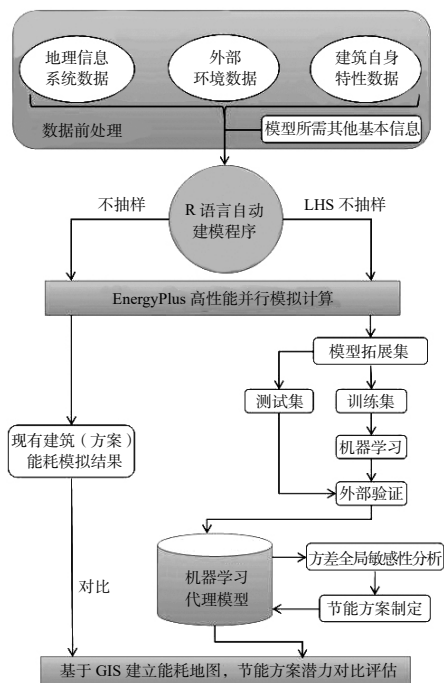


图 1 本研究总技术路线

2 数据前处理

城市规模建模自动化过程需要使用程序化读取用于构建建筑群每个建筑的不同种类参数,这需要对众多输入参数进行标准化。标准化的内容包括数据类型、格式、结构等。本研究建立了一个标准化的建筑动态能耗模型输入参数集(简称为 DBEMIPS)。DBEMIPS 的数据大致可以分为静态参数与动态参数两类。

静态参数包含建筑自身特性参数、建筑地理信息数据两类。建筑自身特性参数包括建筑类型、围护结构的热特性、窗墙比、换气次数等参数。此类数据主要通过实地调研、相关设计标准^[11,12]等渠道获取。建筑地理信息数据主要包括建筑的地理坐标、建筑编码、建筑外形、面积、层高、层数等参数。此类数据主要通过现有地理信息系统获取,这需要将一系列数据简化、转化:如将建筑物坐标数据转化为通用 Well Know Text 格式(简称 WKT 格式)。相关过程不在此赘述。

动态参数包含建筑运行时态数据、气象数据两类。建筑运行时态数据包括建筑物内部得热时刻表、暖通空调系统运行时刻表、人员活动时刻表等具有时间属性的数据。此类数据通过建筑设计文件、相关标准^[11,12]、能耗监管平台^[13]、实地调研等方式获取。外部环境参数主要包括建筑所在地区的气象数据。采用的气象数据来自中国气象局气象信息中心和清华大学建筑技术科学系共同编制的《中国建筑热环境分析专用气象数据集》^[14]。气象数据采用 8760h 的逐时数据。

3 城市规模建模自动化

在城市规模建模自动化过程中,自动化建模程序包(AutoBuilding-R)是自动建模步骤的核心。本研究在自动化建模程序编写上做了大量的工作,所编写的城市规模自动化建模程序可深化至对每栋建筑每层进行热工分区(Zone)的划分。

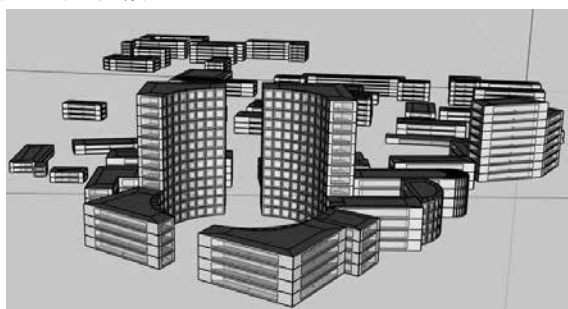
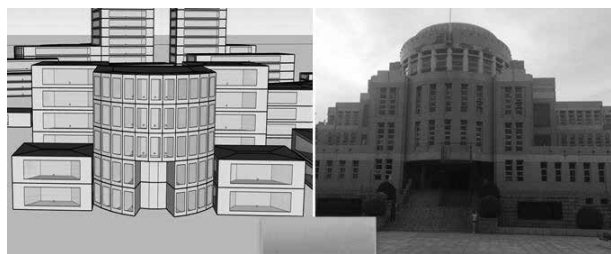


图2 天津科技大学河西校区建筑群



(a) 图书馆

AutoBuilding-R 是在 R 语言环境下编写的一个 2500 行左右的程序,包括建筑形体建立、热工分区(zone)、围护结构热工特性、建筑内部得热设定、暖通系统建立等。Znoe 的概念是 EnergyPlus 计算的基本单元体,Zone 是一种热工概念上的分区而非空间分区,越详细的 Zone 划分越有利于模拟结果的真实性^[15-18],本研究采用了典型四外区和一内区的分区方法。有了 DBEMIPS 数据库与 AutoBuilding-R,即可进行自动化建模,目标区域建筑群的自动化建模结果如图 2 所示。目标区域共 68 栋建筑,建模时间为 5min。平均个模型用时 4.4s,而手动建立一个最简单的带分区 2 层建筑模型的时间约为 2min,AutoBuilding-R 是手动方法的 27 倍,而且由于计算机的机器特性,模型数量越多,这种人机差距越大。如图 2 和图 3 所示,AutoBuilding-R 的建模性能良好,所建物理模型为下一步的建筑能耗模拟分析以及建立机器学习代理模型奠定了基础。

4 机器学习代理模型

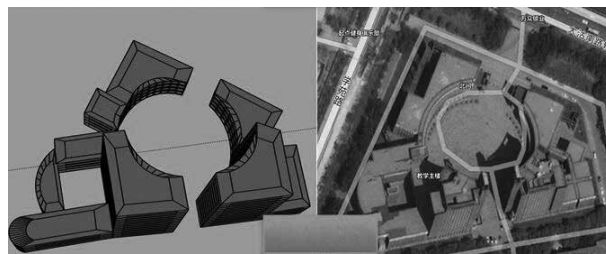
建立城市建筑能耗代理模型的本质是用统计学模型代替原有物理模型,以达到大规模建筑群建筑能耗的快速计算,高效评估不同节能措施的节能潜力。使用 EnergyPlus 进行模拟,研究采用 38 核计算机对 13600 个模型进行高性能并行计算,得出结果数据大小为 80.3G 总用时 12.9h,单个模型计算时间平均为 120s。

本研究使用 RF(Random Forest, 随机森林)、MARS(multivariate adaptive regression splines, 多元自适应回归样条)、BMS(Bagging MARS, 自助多元自适应回归样条)、SVM(support vector machine, 支持向量机)、TGP(Treed Gaussian process, 树形高斯过程)等五种机器学习方法建立能耗代理模型,并使用外部验证法比较各类模型性能。表 1 展示了外部验证结果。本研究中使用决定系数和均方根误差两个指标表征机器学习模型的预测能力,高决定系数和低均方根误差表明所得模型误差小。

表 1 五种机器学习模型的外部验证结果

方法	决定系数 (R ²)	均方根误差 (RMSE)	单个模型计算时间 (单位: s)
BMS	0.9988937	2.003661	7.5
MARS	0.9987831	2.080842	2.5
RF	0.9963343	3.522927	7
SVM	0.9552941	13.79442	2
TGP	0.9226273	15.979135	11

使用气泡图如图 4 所示比较五种机器学习模型性能。图 4 中,气泡图横坐标表示模型的均方根误差(RMSE),



(b) 双子楼

图3 部分建筑外形验证

纵坐标为模型的决定系数 (R^2), 气泡直径表示单个模型的计算时间。由图中信息可得, MARS 模型与 BMS 模型有较小的均方根误差, 但 MARS 计算时间更短。因此, 综合比较后选择 MARS 方法建立的模型 (在 R 语言环境中定义为 earthFit) 作为建筑能耗代理模型。

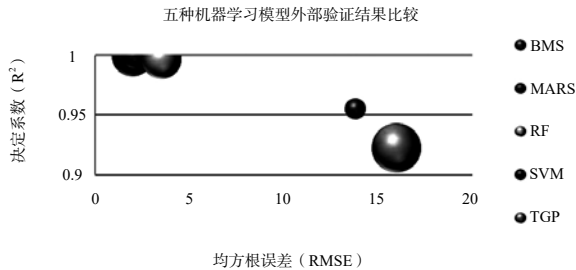


图 4 五种机器学习模型结果比较的气泡图

5 节能方案可视化评估

5.1 节能方案的制定

研究对现有建筑 (方案) 能耗结果进行敏感性分析。敏感性分析可以帮助分析不同因素对能耗结果的重要性, 从而帮助制定城市规模尺度上更精准的节能方案。先前的大部分研究依然利用局部敏感性分析方法, 不能在输入数据的整个空间范围内探讨不同节能措施对于节能效果的影响。本研究采用 TGP 方法进行全局敏感性分析。TGP 方法属于元模型敏感性分析方法的一种, 使用该方法有四个主要优点^[19]: 一是可以计算出敏感性指标的概率分布, 给出更全面的信息; 二是能显示出不同输入变量如何影响输出变量的具体变化图, 方便的分析不同变量的影响; 三是 R 语言中有成熟的 tgp 包^[20], 可以一步到位地实现元模型方法, 方便调用; 四是可方便的实现不同元模型之间的转换, 以校核所得结果可靠性。

本研究将研究目标区域建筑分为教学建筑 (class)、办公建筑 (office)、图书馆 (Lib)、公寓楼 (dorm) 等四类。使用 TGP 方法对四类建筑的全年碳排放量进行敏感性分析。图 5 展示的是办公建筑 (office) 的全局敏感性分析结果。从左到右依次为: 主效应图 (Main Effects)、为一阶敏感

性指数 (1st order Sensitivity Indices)、全效应指数 (Total Effect Sensitivity Indices)。对办公建筑的全年碳排放敏感性水平首位影响因素是 EP (设备功率密度)、排名第二的是 Ach (换气次数); 第三位是 OP (人员密度)。对四类建筑同时进行敏感性分析, 得到不同建筑的全年碳排放影响因素排名, 据此制定精细化节能方案。本研究根据敏感性分析结果制定一个节能方案示例 (Model of Energy Saving Scheme, 以下简称为: Model-ESS)。

5.2 GIS 可视化评估

本研究目标区域天津科技大学河西校区 68 栋建筑总建筑面积约 20.5 万 m^2 。现有建筑经过建筑能耗模拟软件 EnergyPlus 计算, 全年碳排放量为 22057.3ton。全区各建筑全年碳排放密度使用能耗地图可视化结果如图 6 所示。

在代理模型计算得出结果后, 将结果收集, 利用 Arcgis 进行 Model-ESS 节能潜力的 GIS 可视化评估。如图 7~9 所示, 三幅图分别对比了原有建筑 (方案) 与 Model-ESS 的全年碳排放密度 (单位: $kgCO_2/m^2$)、全年热负荷密度 (单位: $kW \cdot h/m^2$)、全年冷负荷密度 (单位: $kW \cdot h/m^2$)。通过 GIS 可视化对比, 可以对 Model-ESS 的节能潜力有比较直观的了解, 本研究 GIS 可视化方案使用三维信息与五级色带两种表达数值水平的可视化办法。色带图例如图中左下角所示, 颜色由绿到红能耗值越来越高。另外, 建筑高度越高, 代表能耗值越高。

由图 7 可得, 在原有建筑 (方案) 中教学区 (图中上部建筑群) 很多红色建筑在 Model-ESS 中转变为橘黄色或者黄色建筑, 这意味着该部分建筑全年碳排放由 $130kgCO_2/m^2$ 以上降低至 $110\sim130kgCO_2/m^2$ 之间; 而对于较低碳排放的建筑 (黄、绿色, 碳排放密度 $0\sim90kgCO_2/m^2$ 之间), Model-ESS 基本没有改变。

图 8 展示了 Model-ESS 对目标建筑群全年供暖热负荷的改善情况, 由图可得 Model-ESS 重点改善了热负荷密度较高的教学区部分建筑, 宿舍区热负荷密度与原方案相比基本不变。图 9 展示了 Model-ESS 对目标建筑群的全年制冷负荷的改善情况, 由图可得 Model-ESS 重点改善了宿舍区的制冷负荷密度, 对教学区制冷负荷较大的主楼建筑也实施了一定的节能措施。

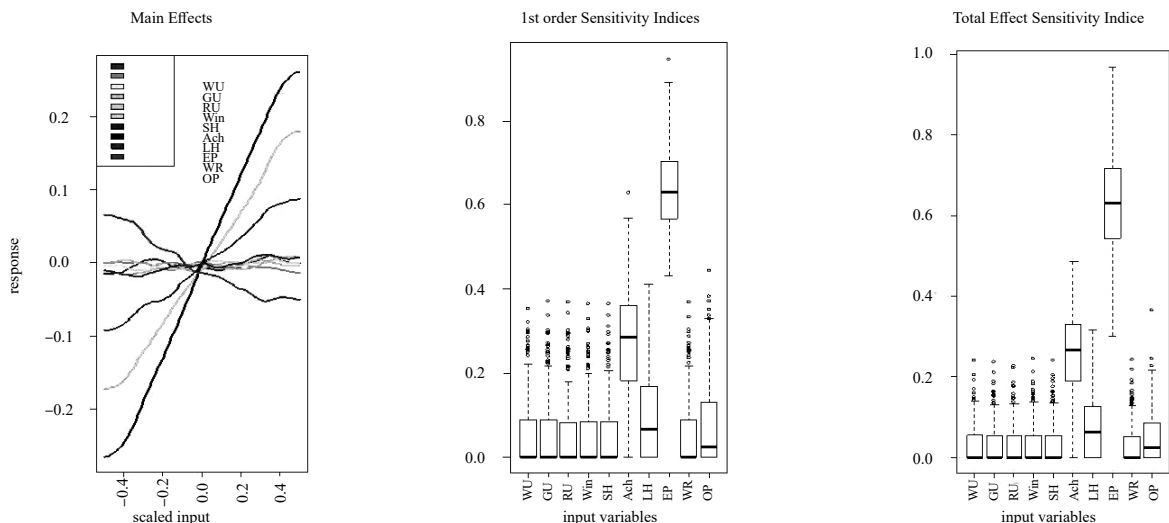


图 5 办公建筑综合碳排放敏感性分析

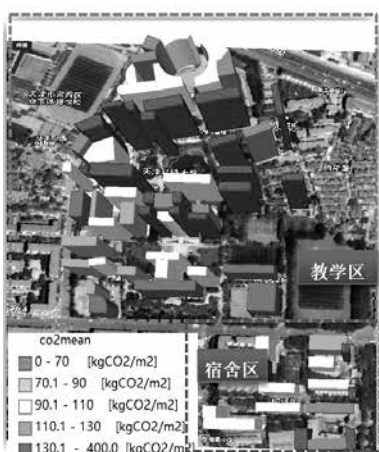


图 6 建筑能耗全年碳排放可视化

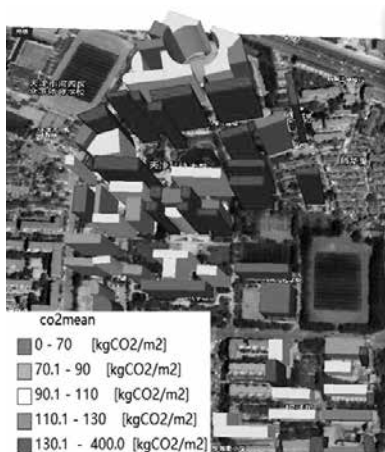


图 7 节能方案全年碳排放量 GIS 可视化对比

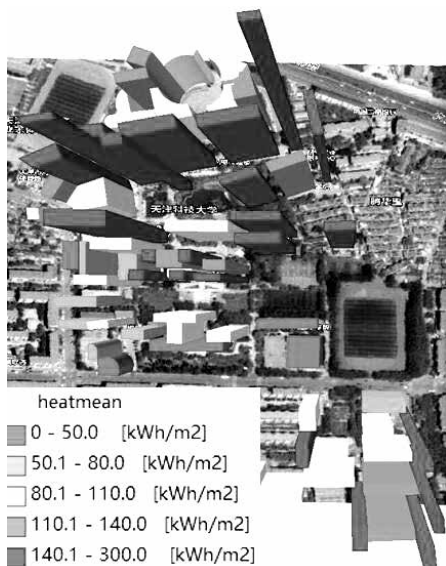


图 8 节能方案全年供暖能耗 GIS 可视化对比

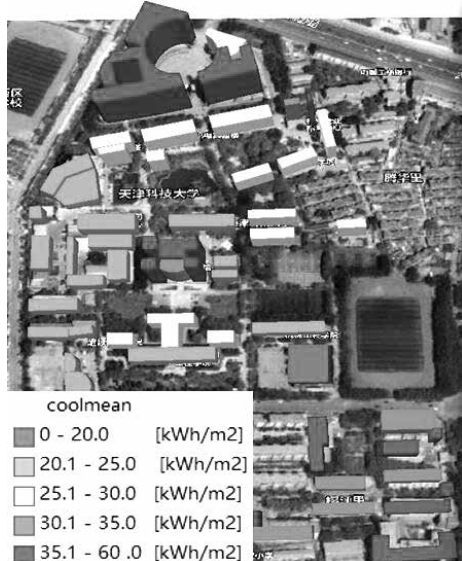


图 9 节能方案全年制冷能耗 GIS 可视化对比

综上, Model-ESS 通过对不同分类建筑实施差异化的节能措施, 改善目标建筑群全年热负荷、全年冷负荷、全年电负荷, 降低建筑能耗需求与单位面积碳排放, 从而达到综合节能减排的结果。

6 结语

(1) 针对地理信息系统涵盖的数据信息过于庞大, 探讨了基于地理信息系统建立城市建筑能耗模型过程所遇到的主要问题, 给出从三维地理信息系统提取、简化数据的方法, 同时制定了自动化建模所用数据库—DBEMIPS 的架构及标准。为城市规模建筑能耗自动化建模奠定数据基础;

(2) 本研究完成了利用三维地理信息系统建立城市建筑能耗模型的程序化, 完成形式是以计算机语言 R 为基础的程序包 (Collect-R)。该程序包所建模型性能良好, 可实现建筑物每层的热工区划分。

(3) 本研究通过比较五种不同的机器学习方法, 得出适用于建立城市建筑能耗代理模型最佳的机器学习方法—多元自适应回归样条回归法 (MARS)。同时建立了代本研究的代理模型—earthFit。代理模型相比与使用 EnergyPlus 软件模拟, 运算速度至少提高 10^2 倍数量级。

(4) 本研究提供了基于 GIS 地理信息系统的建筑节能评估与可视化技术, 综合了大规模建筑机器学习建模代理技术、城市建筑能耗敏感性分析技术、GIS 可视化技术等多种技术方法, 帮助能源决策者直观分析城市建筑能耗影响因素, 制定精细化的节能方案, 并快速直观地评价不同节能方案的节能潜力。对于本研究制定的节能方案示例, 研究结果表明, 可有效地降低目标区域内的整体建筑运行能耗水平同时节省更多成本。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告. 2016 [M]. 中国建筑工业出版社.
- [2] 高甫生. 雾霾天气、环境与能源——暖通空调行业的对策 [J]. 暖通空调, 2013, 43(09): 33–47.
- [3] Robinson D. Computer modelling for sustainable urban design [M]. Earthscan, 2011.
- [4] 辜胜阻, 杨建武, 刘江日. 当前我国智慧城市建设中的问题与对策 [J]. 中国软科学, 2013, (1): 6–12.
- [5] Kuhn M, Johnson K. Applied Predictive Modeling [M]. Springer New York, 2013.
- [6] Tian W, Song J, Li Z. Spatial regression analysis of domestic energy in urban areas[J]. Energy, 2014, 76:629–640.
- [7] Kennedy K H. Introduction to 3D Data:Modeling with ArcGIS®; 3D Analyst™ and Google Earth™ [M]. John Wiley, 2009.
- [8] 李志刚, 蒋捷, 翟永, 等. 面向分布式服务聚合的“天地图”总体技术架构 [J]. 测绘地理信息, 2012, 37(5):13–15.
- [9] 兰德 贾 P, 蒋家坤. R 语言 [M]. 机械工业出版社, 2015.
- [10] Crawley D B, Pedersen C O, Lawrie L K, et al. Energy-Plus:Energy Simulation Program[J]. Ashrae Journal, 2000, 42(4):49–56.
- [11] 中国建筑科学研究院, 中国建筑业协会建筑节能专业委员会. 2005. GB 50189–2005 公共建筑节能设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [12] 中国建筑科学研究院. 2015. 公共建筑节能设计标准:GB 50189–2015[S]. 中国建筑工业出版社.
- [13] 孟庆新. 天津科技大学能耗管理平台建设 [J]. 建设科技, 2010, (2):43–46.
- [14] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [M]. 中国建筑工业出版社, 2005.
- [15] Chen Y, Gu L, Zhang J. EnergyPlus and CHAMPS-Multizone co-simulation for energy and indoor air quality analysis[J]. Building Simulation, 2015, 8(4):371–380.
- [16] Crawley D B, Lawrie L K, Winkelmann F C, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program[J]. Energy & Buildings, 2001, 33(4):319–331.
- [17] Krarti M, Ihm P. Implementation of a building foundation heat transfer model in EnergyPlus[J]. Journal of Building Performance Simulation, 2009, 2(2): 127–142.
- [18] 朱丹丹, 燕达, 王闯, 等. 建筑能耗模拟软件对比:DeST、EnergyPlus and DOE-2[J]. 建筑科学, 2012, 28(s2): 213–222.
- [19] Arminger G, Muthén B O. A Bayesian approach to non-linear latent variable models using the Gibbs sampler and the metropolis-hastings algorithm[J]. Psychometrika, 1998, 63(3): 271–300.
- [20] Gramacy R B. tgp: An R Package for Bayesian Nonstationary, Semiparametric Nonlinear Regression and Design by Treed Gaussian Process Models[J]. Journal of Statistical Software, 2007, 19(i09).

机器学习方法在城市建筑能耗分析中的应用研究

刘云亮, 田 玮, 孟献昊, 高秀玲

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

[摘 要] 由于数量庞大以及影响因素的复杂性, 城市规模建筑群的大规模能耗模拟计算非常耗时。研究以天津某高校建筑群为例, 使用了五种不同的机器学习方法建立建筑能耗数学代理模型。并使用外部验证的方法比较不同机器学习模型的性能, 得出适用于建立该城区建筑能耗代理模型最佳的机器学习方法——多元自适应回归样条回归法 (multivariate adaptive regression splines, 简称 MARS)。与使用建筑能耗模拟程序 EnergyPlus 软件所建立的模型相比, 运算速度至少提高 102 倍数量级。并使用代理模型评估了基于元模型敏感性分析方法法制定的节能方案, 预测结果发现节能方案对目标区域建筑能耗情况有显著的改善。

[关键词] 机器学习; 城市建筑能耗; 代理模型

0 引言

在城市环境中, 影响建筑能耗的因素有很多, 城市建筑能耗模型输入参数与能耗结果数据之间的关系也是错综复杂。如果需要对建筑能耗数据与模型输入参数进行较为可靠的敏感性分析, 需要相当数量的建筑能耗模型训练集。城市规模建筑能耗研究要处理的建筑数量本身已经很大, 而这些模型训练集中每一组都应包括输入参数与能耗结果数据两部分。构建这些模型训练集传统做法有两种: 一是获取现实数据, 即收集或调用现实中城市规模的建筑能耗的输入参数与能耗结果数据。二是能耗模拟, 即利用能耗模拟软件如 EnergyPlus 不断改变模型的输入参数, 然后获得对应的能耗数据。这两种方法中, 第一种方法很大程度上受限于数据的可用性。第二种方法, 若对建筑模型的输入参数进行 1000 次以上的变量抽样后再利用 EnergyPlus 软件模拟能耗结果, 有两个主要缺点, 一个是传统的建模方法不适用, 需要消耗大量的时间精力去修改模型参数; 另一个是软件模拟运行时计算机的运算负荷非常大且计算效率极低。所以, 需要新的方法解决这些问题。

针对机器学习的应用已经遍及人工智能相关的各个分支, 如智能机器人、数据挖掘、自然语言处理、模式识别等。由于其出色的模型预测能力, 现在已经有许多学者将其应用到建筑能耗模拟计算领域^[1-3]。Tian 和 Choudhary 用 MARS (多元自适应回归样条, Multivariate adaptive regression spline) 算法建立非参数能耗模型来估计伦敦中学建筑的能耗使用情况^[4]。Jain 等使用支持向量机算法来预测城市环境的多户居住建筑的能耗使用状况^[5]。Howard 等应用鲁棒多元线性回归 (robust multivariate linear regression) 方法分析纽约市的建筑能耗的最终用途去向^[6]。田玮等对机器学习算法在建筑能耗领域的适用性进行了研究^[7]。对于多种机器学习方法, 单一算法在建筑能耗领域的研究较多, 然而对比不同算法模型性能及评估节能方案的在城市建筑能耗应用研究还不多见。本研究在数据分析环境 R 语言中, 使用 5 种机器学习方法建立城区建筑代理模型并比较不同模型性能, 结合元模型全局敏感性方法制定节能方案, 最后使用代理模型高效预测节能效果。

1 研究方法

建立城市建筑能耗代理模型的本质是用数学模型代替原有物理模型, 以达到大规模建筑群建筑能耗的快速计算, 高效评估不同节能措施的节能潜力。建立城市建筑能耗代理模型的过程主要分为机器学习样本集建立和机器学习

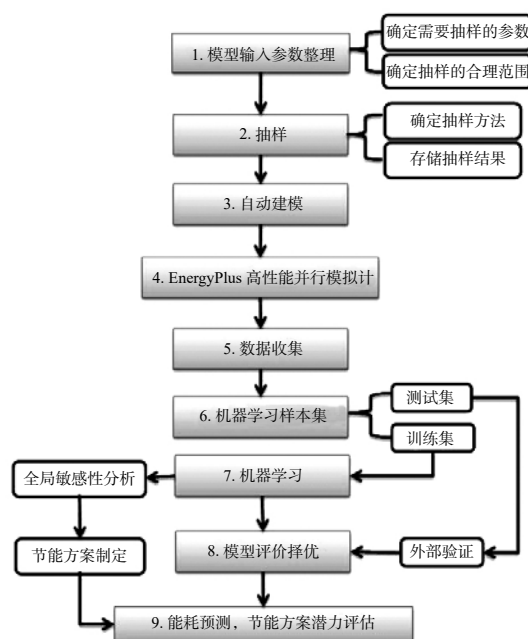


图1 机器学习建模技术路线

习建模择优两大步骤。图1展示了本研究建立机器学习代理模型的技术路线, 其中步骤1~6为建立机器学习样本集; 步骤7~8为机器学习建模与模型择优过程; 步骤9为使用能耗代理模型进行预测。

2 机器学习样本集的建立

机器学习建模时应首先决定该用哪些样本来进行模型的评价。理论上, 用于模型评估的数据不应用来建立或者调试模型, 这样才能给出模型效果的无偏估计。在大数据量情况下, 通常预留一部分样本用于模型评估, 其他部分样本用于建模。通常将用于建模的样本集称为“训练集”, 用于模型评估的样本集称为“测试集”。本研究将“训练集”与测试集统称为“机器学习样本集”。机器学习样本集的建立主要分为两大步骤: 一是将现有的建筑能耗物理模型集拓展至一定数目; 二是模拟结果收集, 即将这些拓展后

的模型集输入到 EnergyPlus 中运行后, 收集能耗结果数据, 同时整合对应的输入参数, 从而得到机器学习可用样本集。

2.1 建筑能耗物理模型的拓展

本研究选用校区建筑群共 68 栋建筑, 每栋建筑只有一个物理模型, 不足以建立机器学习代理能耗模型。研究首先所有建筑的基础数据, 通过查阅相关标准确定可抽样的范围。本研究选用的参数抽样方法是拉丁超立方抽样(简称为 LHS), 抽样结束后存储抽样结果, 然后使用自主开发的自动建模程序包(AutoBuilding-R)进行拓展集的建模。在对模型输入参数实施拉丁超立方抽样的过程中, 需设置一个伪随机种子来确保结果可重复运行。研究通过设置 2 个不同的随机种子对 68 建筑能耗物理模型集拓展 2 次, 一次拓展所得作为模型训练集, 另一次用于评估模型性能的测试集。

表 1 抽样参数取值范围

序号	参数	取值范围	单位	来源
1	WallU	0.4~0.6	W/(m ² ·K)	《GB 50189-2005》 ^[8] P7
2	GroundU	0.5~0.66	W/(m ² ·K)	《GB 50189-2005》 ^[8] P7
3	RoofU	0.3~0.55	W/(m ² ·K)	《GB 50189-2005》 ^[8] P7
4	WindowU	2.2~3.0	W/(m ² ·K)	《GB 50189-2005》 ^[8] P7
5	WinSHGC	0.56~0.79	W/(m ² ·K)	《GB 50189-2005》 ^[8] P9
6	ACH	1~1.5	次/h	《中国建筑节能年度发展报告-2016》 ^[9] P44
7	Lighting	8~15	W/m ²	《GB 50189-2015》 ^[10] P48
8	Equipment	5.0~20.0	W/m ²	《GB 50189-2015》 ^[10] P50
9	WWR	0.18~0.3	—	《GB 50189-2015》 ^[10] P7
10	Occupant	4.0~10.0	m ² /人	《GB 50189-2015》 ^[10] P49

表 1 展示了本研究选取的抽样参数及范围, 如表所示研究选取的抽样参数为: wallU (墙)、RoofU (屋顶)、WindowU (窗户传热系数)、WinSHGC (窗的太阳得热系数)、WWR (窗墙比)、ACH (换气次数/渗风率)、Lighting (灯的功率密度)、Equipment (设备功率)、Occupant (人员密度) 等十个参数。

在一次拓展过程中, 参数的抽样方法采取拉丁超立方抽样(LHS), 在参数取值范围内每个模型抽样 100 次, 再运行 R 语言进行自动化建模, 这样每个建筑都能得到 100 个抽样拓展的建筑能耗模型, 共计可得 6800 个物理学习模型。之后便可进入到 EnergyPlus 中模拟。参数的拉丁超立方抽样过程也是在 R 语言环境中实现的, 通过调用 R 中 lhs 程序包来实现。

2.2 模拟结果数据收集

本研究采用 40 核小型工作站使用 EnergyPlus 软件进行模拟。对 13600 个模型进行高性能并行计算, 得出结果数据大小为 80.3G 总用时 12.9h。

模拟产生的数据集比较庞大, 这是因为经由 Energy-plus 模拟后输出不同格式的结果与日志文件, 这些数据几乎不可能以人工的方式去整理, 因此本研究在 R 语言环境中编写了专门用于自动收集所需能耗结果数据的 R 程序—CollectR。CollectR 的核心类似一个本地的“爬虫”, 在指定本地文件目录夹下寻找符合设定条件的数据。例如, 收集建筑全年供暖能耗(heat)、全年制冷能耗(cool)、全年用电量(elec)、建筑总面积(area)等数据并与前述抽样参数匹配。每一次参数抽样与其对应的模拟输出结果为一组数据, 每一栋建筑都有 100 组训练集和 100 组测试集, 共 13600 组数据。

3 建筑能耗代理模型

3.1 机器学习方法选取

本研究选用的 5 种机器学习方法为:

- (1) RF (Random Forest, 随机森林);
- (2) MARS (multivariate adaptive regression splines, 多元自适应回归样条);
- (3) BMS (Bagging MARS, 自助多元自适应回归样条);
- (4) SVM (support vector machine, 支持向量机);
- (5) TGP (Treed Gaussian process, 树形高斯过程)。

3.2 模型评价指标

本研究中在一个给定的机器学习方法中, 每个可变化参数均有 10 个可能值, 采用交叉验证法 (Cross validation) 确定每个可能值时的模型预测效果, 预测效果用均方根误差 (Root Mean Square Error, 简称为 RMSE) 和决定系数 (Coefficient Of Determination, 简称为 R²) 来表示。

均方根误差 (RMSE) 和决定系数 (R²) 是表达模型精度的常用统计量^[11]。均方根误差能够很明确的反应出在计算过程中对于误差的过大和过小, 因此, 均方根误差对于预测的精密度是一种很有效的度量手段。均方根误差的结果越小, 表明模型的仿真程度越高。

均方根误差的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (1)$$

式中: X_{obs} 为样本观测值; X_{model} 为样本真值; n 为样本量。

决定系数是模型中变量可以解释的方差与总方差的比值, 即为用训练得出的模型可以解释原结果的百分比。其计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum Y_i^2} \quad (2)$$

由公式可以看出决定系数的取值位于 0 和 1 之间。其数值越接近于 1, 证明模型的精度越高, 能够越好的表明输入变量与输出变量之间的关系。

3.3 模型调优与外部验证

大多数机器学习方法都可以调整至少一个参数, 以平衡模拟过拟和预测精度, 提高模型的预测效果。这些参数往往是无法直接通过数据估计的, 称之为调优参数。例如 RF 方法中分裂点随机选取预测变量的数量 (树节点预选的变量个数), 多元自适应回归样条法 MARS 中剪枝个数和交互作用级数等。

寻找最优参数有多种不同的方法, 本研究采用候选值集合法。原理是先定义一个调优参数的候选值集合, 然后, 对于每个候选调优参数值, 训练集将通过重抽样来评估模型表现。最后, 这些结果将进行汇总, 选择能给出最佳模型预测的值。

在 R 语言中使用 caret 包中的 tunelength 与 tuneGrid 参数可以快速实现各种算法的参数寻优。tunelength 是一个整数, 用于划分网格, 其原理是根据针对该算法的前人经验默认一个初始参数调优范围, 然后根据 tunelength 的值将该范围均匀分段。tuneGrid 类似于自定义各算法的调优参数集合, 然后结合 traincontrol 参数设定的重抽样方法建模并给出评估。这些调优参数调至某一范围内趋于稳定。本研究机器学习建模选择各类算法的调优参数汇总如

表 2 所示。

表 2 五种机器学习算法的调优参数

序号	算法	调优参数 (含义)	取值
1	RF	mtry(每个切分点上随机选择的预测变量数目)	7
2	MARS	.degree(添加进模型的特征阶数)	3
		.nprune(保留特征的项数)	10
3	BMS	.degree(添加进模型的特征阶数)	2
		.nprune(保留特征的项数)	22
4	SVM	Sigma(尺度因子)	0.075
		Cost(代价参数)	2
5	TGP	内部自动调优	—

参数调优所用的交叉验证数据集来自同一个训练集,属于内部验证的一种,其目的是寻找该机器学习算法下最优的建模参数。不管采用何种交叉验证方法,所使用的样本集均来自于一个随机种子拓展所得的训练集。由于训练集数目有限,这其中可能存在关联性。因此,在得到各类算法的最佳模型后,本研究采用外部验证的方法,即由另一随机种子拓展所产生的“测试集”来评价各类算法最佳模型的性能。外部验证结果如表 3 所示。

表 3 五种机器学习模型的外部验证结果

方法	决定系数 (R^2)	均方根误差 (RMSE)	单个模型计算时间 (单位: s)
BMS	0.999	2.004	7.5
MARS	0.999	2.081	2.5
RF	0.996	3.523	7.0
SVM	0.955	13.794	2.0
TGP	0.923	15.979	11.1

使用如图 3 的气泡图比较五种机器学习模型性能。图 3 中,气泡图横坐标表示模型的均方根误差 (RMSE),纵坐标为模型的决定系数 (R^2),气泡直径表示单个模型的计算时间。由图中信息可得,MARS 模型与 BMS 模型有较小的均方根误差,但 MARS 计算时间更短。因此,综合比较后选择 MARS 方法建立的模型(在 R 语言环境中定义为 earthFit)作为建筑能耗代理模型。

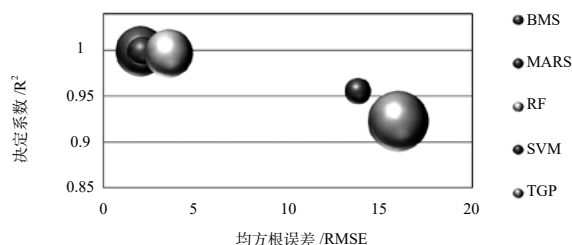


图 3 五种机器学习模型预测性能的气泡图比较

4 代理模型进行能耗预测

4.1 节能方案制定

本研究依据建筑的功能进行分类,将天津某高校区 68 栋建筑群大致分为:教学楼(简称 class)、综合办公楼(简称 office)、图书馆(简称 lib)、公寓楼(简称 dorm)等四类建筑。对不同建筑进行全局敏感性分析。

节能方案的制定应^[12-15]综合考虑多方面因素,如:建筑能耗敏感性分析结果、建筑年龄、节能措施实施难易程度、节能措施初投资与回收周期等。本研究对四类建筑使用元模型方法的全局敏感性分析,考虑敏感性分析结果与各节能措施实施难易程度,制定一个节能方案如表 4 所示。

表 4 节能方案组合

建筑类型	节能措施	原方案标准	节能方案取值	变化百分比
教学	1: 降低 ACH	0.6	0.48	20%
	2: 降低 EP	10	9.6	20%
	3: 安装节能开关	0	1	--
	4: 增加 OP	5	6	20%
办公	1: 降低 EP	20	16	20%
	2: 降低 ACH	0.8	0.64	20%
	3: 减小 LH	10	8	20%
	4: 减小 OP	10	8	20%
	5: 安装节能开关	0	1	20%
图书馆	1: 降低 ACH	1.1	0.88	20%
	2: 减小 OP	8	6.4	20%
	3: 减小 LH	12	9.6	20%
公寓楼	1: 降低 ACH	0.8	0.64	20%
	2: 降低 EP	15	12	20%
	3: 增加 OP	3	4	20%

如表 4 所示,ACH(换气次数)与建筑气密性有关,在现有建筑条件下更换墙体材料、门窗等来降低 ACH 是不经济了,但是,可以通过供暖与供冷时的门窗通风管理来实现,即在供暖与制冷系统开启时,减少门窗的通风。降低 EP(设备功率密度)可以通过降低办公设备功率、提高使用效率等实现。降低 LH(照明功率密度)可以通过降低峰照明功率密度可通过更换节能灯管实现;节能开关是通过各种光敏方案自动开关屋内照明的开关,0 代表无,1 代表有。OP(人均占有的建筑面积)因素,由于人为行为模式的复杂,OP 因素在不同类型建筑、不同类型能耗的敏感性分析中呈现出不同的特性。在实际操作中可以通过减少独立办公室,增加公共办公区工位,均匀化建筑运行时刻表(调节建筑运行时刻,削减使用高峰期)等方式实现。

4.2 能耗预测

将节能方案带入到代理模型可迅速得到预测结果。图 4 展示了目标区域建筑全年碳排放密度的对比情况,图中可以看出在原有建筑(方案)中教学区(图中上部建筑群)很多红色建筑在节能方案中转变为橘黄色或者黄色建筑,这意味着该部分建筑全年碳排放由 $130\text{kgCO}_2/\text{m}^2$ 以上降低至 $110\sim 130\text{kgCO}_2/\text{m}^2$ 之间;而对于较低碳排放的建筑(黄、绿色,碳排放密度 $0\sim 90\text{kgCO}_2/\text{m}^2$ 之间),节能基本没有改变。

表 5 是节能方案对四类建筑全年碳排放密度不同程度的改善数据。该方案对办公类(office)建筑改善幅度最大,表现为全年碳排放密度降低了 24%;对教学类建筑(class)改善幅度最小,表现为全年碳排放密度降低了 12.1%。综合,本研究目标区域平均全年碳排放密度由原来的 $0.107\text{t/a}\cdot\text{m}^2$ 降低至 $0.088\text{t/a}\cdot\text{m}^2$,该方案节能潜力为 17.7%。

表 5 节能改造前后的单位建筑面积全年碳排放量比较

建筑类型	原建筑 ($\text{t/a}\cdot\text{m}^2$)	节能方案 ($\text{t/a}\cdot\text{m}^2$)	变化百分比 (%)
class	0.091	0.080	-12.1
office	0.121	0.092	-24.0
lib	0.092	0.078	-15.1
dorm	0.108	0.089	-17.6
全区域平均	0.107	0.088	-17.7

5 结语

本研究通过比较了 RF(随机森林)、MARS(多元

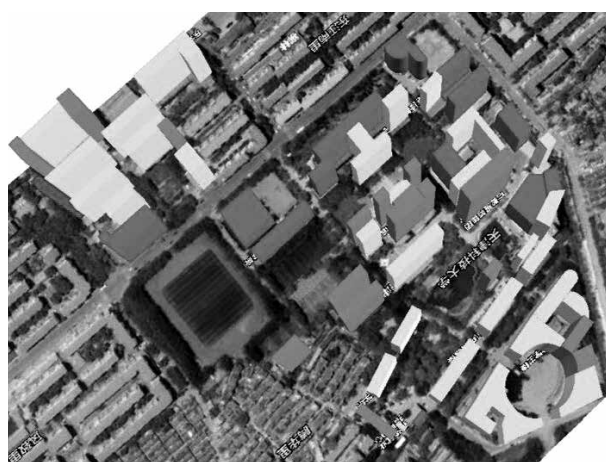
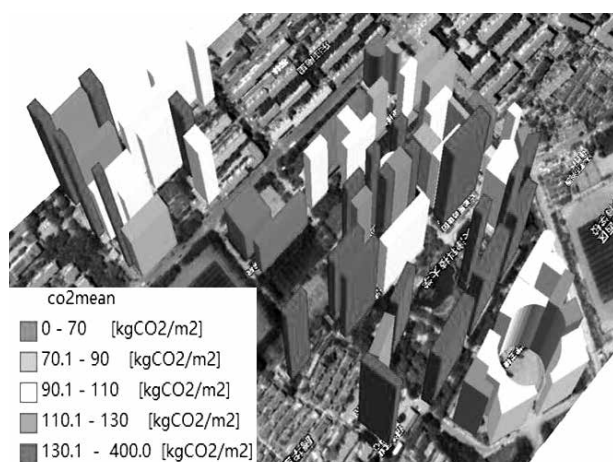


图4 节能方案全年碳排放量 GIS 可视化对比

自适应回归样条)、BMS(袋装多元自适应回归样条)、SVM(支持向量机)、TGP(树形高斯过程)等五种机器学习方法的建筑能耗代理模型预测性能。对于天津某高校建筑群,得出适用于建立该校建筑能耗代理模型最佳的机器学习方法——多元自适应回归样条回归法(multivariate adaptive regression splines, 简称 MARS)。与使用建筑能耗模拟程序 EnergyPlus 软件所建立的物理模型相比,运算速度至少提高 10^2 倍数量级。机器学习模型结合元模型敏感性分析方法制定的精细化节能方案,可实现对节能方案的快速预测,预测结果表明节能方案对目标区域建筑能耗情况有显著的改善。机器学习方法城市能耗代理模型的建立使得城市大量建筑的节能分析评估成为可能,同时也为需要大量计算的建筑能耗不确定性及敏感性分析提供了必要基础。

参考文献

- [1] Fumo N. A review on the basics of building energy estimation[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 31(31):53–60.
- [2] Wu N, Silva E A. Artificial Intelligence Solutions for Urban Land Dynamics: A Review[J]. Journal of Planning Literature, 2010, 24(3):246–265.
- [3] Zhao H X, Magoulès F. A review on the prediction of building energy consumption[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6):3586–3592.
- [4] Tian W, Choudhary R. A probabilistic energy model for non-domestic building sectors applied to analysis of school buildings in greater London[J]. Energy & Buildings, 2012, 54(6):1–11.
- [5] Jain R K, Smith K M, Culligan P J, et al. Forecasting energy consumption of multi-family residential buildings using support vector regression: Investigating the impact of temporal and spatial monitoring granularity on performance accuracy[J]. Applied Energy, 2014, 123(3):168–178.
- [6] Howard B, Parshall L, Thompson J, et al. Spatial distribution of urban building energy consumption by end use[J]. Energy & Buildings, 2012, 45:141–151.
- [7] 田玮, 魏来, 李占勇, 等. 基于机器学习的建筑能耗模型适用性研究[J]. 天津科技大学学报, 2016, 31:54–59.
- [8] 中国建筑科学研究院, 中国建筑业协会建筑节能专业委员会. 2005. GB 50189–2005 公共建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [9] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告. 2016 [M]. 中国建筑工业出版社.
- [10] 中国建筑科学研究院. 2015. 公共建筑节能设计标准:GB 50189–2015[S]. 中国建筑工业出版社.
- [11] Kuhn M, Johnson K. Applied Predictive Modeling [M]. Springer New York, 2013.
- [12] Chen Y, Gu L, Zhang J. EnergyPlus and CHAMPS-Multizone co-simulation for energy and indoor air quality analysis[J]. Building Simulation, 2015, 8(4):371–380.
- [13] Crawley D B, Lawrie L K, Winkelmann F C, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program[J]. Energy & Buildings, 2001, 33(4):319–331.
- [14] Krarti M, Ihm P. Implementation of a building foundation heat transfer model in EnergyPlus[J]. Journal of Building Performance Simulation, 2009, 2(2):127–142.
- [15] 朱丹丹, 燕达, 王闯, 等. 建筑能耗模拟软件对比:DeST、EnergyPlus and DOE-2 [J]. 建筑科学, 2012, 28:213–222.

基于 EnergyPlus 的屋顶绿化热工参数敏感度分析

马路遥¹, 张磊¹, 张玉²

(1. 华南理工大学建筑学院, 广州 510641; 2. 华南理工大学化学与化工学院, 广州 510641)

[摘要] 屋顶绿化是公认的解决城市综合性环境问题的有效途径之一。屋顶绿化可以显著的降低建筑空调能耗, 减少碳排放量, 从而减轻全球温室效应。同时, 屋顶绿化在减少城市污染, 降低城市噪声, 缓解城市热岛, 美化城市景观等方面发挥着极为显著的作用。

在现今的建筑设计, 特别是绿色建筑设计中, 计算机模拟发挥着举足轻重的作用。然而, 大部分模拟软件在对屋顶绿化模型的描述不够全面、详尽。相较于其他大部分模拟软件, EnergyPlus 对屋顶绿化模型的描述更为全面, 包括植被层热工参数、基质层热工参数、降雨(或灌溉)对其热工性能的影响等等。当使用 EnergyPlus 对屋顶绿化进行模拟时, 一共需要输入 16 种热工参数(不包括降雨或灌溉), 这对建筑设计人员进行屋顶绿化的相关模拟无疑会造成巨大的困扰。

本文基于 EnergyPlus 屋顶绿化模块, 使用正交试验分析方法, 对屋顶绿化所有热工参数进行正交分析, 找出所有热工参数中对屋顶绿化热工性能影响最为显著的热工参数并确定最优组合, 为建筑设计人员进行屋顶绿化模拟工作提供参考。

[关键词] 屋顶绿化; EnergyPlus; 热工参数; 正交分析

0 引言

随着经济的增长, 许多国家正在经历着快速的城市化进程。中国的城市化进程迅速, 然而伴随着快速的城市化进程, 中国的能源消费总量也以年均 6.1% 的速度增加。年能源消费总量从 1990 年的 98703 万吨标准煤增加到了 2009 年的 306647 万吨标准煤^[1]。巨大的能源消耗随之带来的便是城市环境问题。例如, 温室效应、城市热岛效应、空气污染、噪声污染^[2]等。

屋顶绿化被广泛的认为是解决上述城市环境问题的有效途径之一。不仅如此, 屋顶绿化还可以有效的减少地表径流, 增加城市生物多样性, 延长建筑物屋顶使用寿命, 并且具有极强的美学价值^[3-5]。

唐鸣放^[6]在重庆大学测试分析中心实验楼顶层布置两间大小、朝向相同但不相邻的试验房间, 面积均为 18m² 左右, 其中一间房间的屋顶布置绿化(基质层厚度 50cm, 植被层为佛甲草), 另一间对比房间屋顶无绿化。测试结果显示: 整个 7、8 月份有绿化的屋顶的房间能耗为无屋顶绿化房间的能耗的 1/4。

苏浩、丁云飞^[7]在夏热冬暖地区对某图书馆的既有屋面进行了绿化处理(模块化种植), 并对该绿化屋面降温节能性能进行了实测。测试结果显示: 在 10 月份正午时分, 绿化屋面表面温度比无绿化屋面表面温度低 7.8℃; 种植箱底温度比无绿化屋面最多可降低 23.1℃。此外, 无绿化屋面内表面全天温度波幅较大, 最大达到 25.1℃; 而绿化屋面在 9:00~18:00 时间段内内表面温度维持在 26℃ 左右。

Piero Bevilacqua^[8]在卡拉布里亚大学(意大利)一栋五层教学楼楼顶安装轻型屋顶绿化(基质层厚度 80mm)并进行实测分析。测试结果显示, 与传统的黑色沥青屋顶相比, 在夏季, 屋顶结构层内表面温度平均降低 12℃; 在冬季, 屋顶结构层内表面温度平均高 4℃。与传统黑色沥青屋顶相比, 在夏季, 从屋顶进入到室内的热流可以减少 100%; 在冬季, 从屋顶散失到室外的热量可以减少 30%~37%。

Getter^[9]在美国中西部实际测试了一块 325m² 的轻型屋顶绿化(安装在传统砾石隔热屋面上)的节能性能。测试结果显示, 与传统砾石隔热屋面相比, 在冬季, 通过屋面的热流平均减少了 13%; 在夏季, 通过屋面的热流平均减少了 167%。

在现今的建筑设计中, 特别是涉及绿色建筑设计, 计算机模拟已成为重要的使用工具之一。然而, 大部分主流模拟软件进行建筑能耗模拟时无法对屋顶绿化进行较为全面详尽的描述。例如, 使用 DeST 进行有屋顶绿化建筑的能耗模拟时, 只是简单地将屋顶绿化折算成当量热阻(0.9m²·K/W)^[10]。这种简易的折算方法虽然可以方便设计人员进行建筑能耗模拟, 但是其不能完整的描述屋顶绿化的热工性能; 并且, 随着目前建筑节能要求的越发提高, 使用简易的模拟方法已不能满足目前的节能要求。

EnergyPlus 是由美国能源部(DOE)和劳伦斯·伯克利国家实验室(LBNL)共同开发的一款建筑能耗模拟引擎, 是较为流行的一款模拟软件。其中的屋顶绿化模块(Material:RoofVegetation)可以对屋顶绿化进行较为全面详尽的描述, 并且在模拟计算时可以引入灌溉(或降雨), 这与实际情况更为相符, 其计算结果也更为准确。EnergyPlus 中屋顶绿化模块包括植被层热工参数、基质层热工参数以及降雨(或者灌溉), 其中热工参数一共 16 种, 如图 1 所示。因此, 对于建筑设计人员, 使用 EnergyPlus 进行屋顶绿化模拟时, 输入这些热工参数无疑会遇到巨大的阻碍。

本文基于 EnergyPlus 屋顶绿化模块, 使用正交试验分析方法, 对屋顶绿化所有热工参数进行正交分析, 找出所有热工参数中对屋顶绿化热工性能影响最为显著的热工参数并确定最优组合, 为建筑设计人员进行屋顶绿化模拟工作提供参考。

Field Name	Units	Obj
Height of Plants	m	.2
Leaf Area Index	dimensionless	1
Leaf Reflectivity	dimensionless	.22
Leaf Emissivity		.95
Minimum Stomatal Resistance	s/m	180
Soil Layer Name		Green Roof Soil
Roughness		MediumRough
Thickness	m	.1
Conductivity of Dry Soil	W/m-K	.35
Density of Dry Soil	kg/m3	1100
Specific Heat of Dry Soil	J/kg-K	1200
Thermal Absorptance		.9
Solar Absorptance		.7
Visible Absorptance		.75
Saturation Volumetric Moisture Content of the Soil Layer		.3
Residual Volumetric Moisture Content of the Soil Layer		.01
Initial Volumetric Moisture Content of the Soil Layer		.1
Moisture Diffusion Calculation Method		Advanced

图 1 EnergyPlus 屋顶绿化模块热工参数

正交试验设计和分析方法是目前最常用的工艺优化试验设计和分析方法,是部分因子设计的主要方法。正交试验以概率论、数理统计和实践经验为基础,利用标准化正交表安排试验方案,并对结果进行计算分析,最终迅速找到优化方案,是一种高效处理多因素优化问题的科学计算方法^[11]。

1 研究方法

1.1 模拟模型

本文使用 SU 插件 Open Studio 建立简易模型,如图 2 所示。模型为典型的一梯两户居住建筑(24m×10.4 m×3 m)。建筑外墙构造层为 25mm 水泥砂浆+190mm 加气混凝土+20mm 石灰砂浆;梁柱构造层为 25mm 水泥砂浆+300mm 钢筋混凝土+20mm 石灰砂浆;建筑外窗 U 值为 4.0, SHGC 为 0.44,可见光透过率为 0.7;屋顶为不节能屋顶(20mm 水泥砂浆+200mm 钢筋混凝土+20mm 石灰砂浆)上附加屋顶绿化。卧室、起居室和书房设置为空调房间,空调房间总面积为 174.4m²。模拟期间为 1 月 1 日~12 月 31 日,空调为理想空调,制冷温度 26℃,全天开启,房间内无内热源,模拟用气象数据为广州地区气象数据。

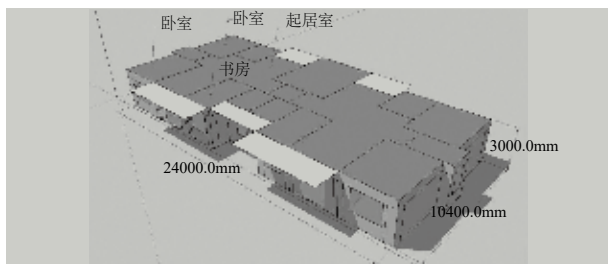


图 2 EnergyPlus 模拟模型

1.2 模拟方案

本文使用正交试验方法,以模拟期间房间总制冷负荷为模拟结果,找出对屋顶绿化热工性能影响最为显著的热工参数并确定最优组合。EnergyPlus 屋顶绿化模块中所

需要输入的热工参数共有 16 种,如表 1 所示。其中,干土壤初始体积含水率 (IVW) 必须小于等于干土壤饱和体积含水率 (SVW),因此在编制模拟方案时将干土壤初始体积含水率 (IVW) 与干土壤饱和体积含水率 (SVW) 设置为相同值。

综上所述,本文正交模拟试验选用 21 因素 4 水平的正交分析表最为合适,并且不考虑交互因素。由于篇幅有限,空余的五列因素没有列出。因素编号及热工参数见表 1,模拟方案及模拟结果如表 2 所示。

表 1 EnergyPlus 屋顶绿化模块热工参数及因素编号

因素编号	热工参数
A	植物高度 (HP, m)
B	叶面积指数 (LAI)
C	叶面反射率 (LR)
D	叶面发射率 (LE)
E	气孔阻力 (MSR, s/m)
F	粗糙度 (R)
G	土壤层厚度 (ST, m)
H	干土壤导热系数 (CDS, W/m·k)
I	干土壤密度 (DDS, kg/m ³)
J	干土壤比热容 (SHDS, J/Kg·k)
K	干土壤热吸收率 (TA)
L	太阳吸收率 (SA)
M	可见光吸收率 (VA)
N	干土壤饱和体积含水率 (SVW)
O	干土壤残余体积含水率 (RVW)
P	干土壤初始体积含水率 (IVW)

2 模拟结果

2.1 极差分析

极差分析又称直观分析法,极差分析法简单直观,是正交试验常用的结果分析方法。通过极差分析,可以非常清晰的看出各因素的优先顺序,找出优水平,确定优组合^[12]。极差结果分析如表 3 所示。

表 2 EnergyPlus 屋顶绿化模块热工参数敏感度分析模拟因素水平表

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
	HP	LAI	LR	LE	MSR	R	ST	CDS	DDS	SHDS	TA	SA	VA	SVW	RVM	IVM	模拟结果 (W)
1	0.1	2	0.15	0.85	150	smooth	0.1	0.2	500	600	0.85	0.6	0.65	0.15	0.02	0.15	945
2	0.1	2	0.15	0.85	150	rough	0.2	0.3	900	1000	0.89	0.7	0.75	0.25	0.04	0.25	1055
3	0.1	2	0.15	0.85	150	Medium rough	0.3	0.4	1300	1400	0.93	0.8	0.85	0.35	0.06	0.35	1053
4	0.1	2	0.15	0.85	150	very rough	0.4	0.5	1700	1800	0.97	0.9	0.95	0.45	0.08	0.45	1065
5	0.1	3	0.25	0.89	200	smooth	0.1	0.2	500	1000	0.89	0.7	0.75	0.35	0.06	0.35	763
6	0.1	3	0.25	0.89	200	rough	0.2	0.3	900	600	0.85	0.6	0.65	0.45	0.08	0.45	778
7	0.1	3	0.25	0.89	200	medium rough	0.3	0.4	1300	1800	0.97	0.9	0.95	0.15	0.02	0.15	981
8	0.1	3	0.25	0.89	200	very rough	0.4	0.5	1700	1400	0.93	0.8	0.85	0.25	0.04	0.25	944
9	0.1	4	0.35	0.93	250	smooth	0.1	0.2	500	1400	0.93	0.8	0.85	0.45	0.08	0.45	689
10	0.1	4	0.35	0.93	250	rough	0.2	0.3	900	1800	0.97	0.9	0.95	0.35	0.06	0.35	674
11	0.1	4	0.35	0.93	250	medium rough	0.3	0.4	1300	600	0.85	0.6	0.65	0.25	0.04	0.25	849
12	0.1	4	0.35	0.93	250	very rough	0.4	0.5	1700	1000	0.89	0.7	0.75	0.15	0.02	0.15	852
13	0.1	5	0.45	0.97	300	smooth	0.1	0.2	500	1800	0.97	0.9	0.95	0.25	0.04	0.25	647
14	0.1	5	0.45	0.97	300	rough	0.2	0.3	900	1400	0.93	0.8	0.85	0.15	0.02	0.15	651
15	0.1	5	0.45	0.97	300	medium rough	0.3	0.4	1300	1000	0.89	0.7	0.75	0.45	0.08	0.45	807
16	0.1	5	0.45	0.97	300	very rough	0.4	0.5	1700	600	0.85	0.6	0.65	0.35	0.06	0.35	785
17	0.2	2	0.25	0.93	300	smooth	0.2	0.4	1700	600	0.89	0.8	0.95	0.35	0.04	0.35	1135
18	0.2	2	0.25	0.93	300	rough	0.1	0.5	1300	1000	0.85	0.9	0.85	0.45	0.02	0.45	1497
19	0.2	2	0.25	0.93	300	medium rough	0.4	0.2	900	1400	0.97	0.6	0.75	0.15	0.08	0.15	726

20	0.2	2	0.25	0.93	300	very rough	0.3	0.3	500	1800	0.93	0.7	0.65	0.25	0.06	0.25	925
21	0.2	3	0.15	0.97	250	smooth	0.2	0.4	1700	1000	0.85	0.8	0.85	0.15	0.08	0.15	1037
22	0.2	3	0.15	0.97	250	rough	0.1	0.5	1300	600	0.89	0.8	0.95	0.25	0.06	0.25	846
23	0.2	3	0.15	0.97	250	medium rough	0.4	0.2	900	1800	0.93	0.7	0.65	0.35	0.04	0.35	754
24	0.2	3	0.15	0.97	250	very rough	0.3	0.3	500	1400	0.97	0.6	0.75	0.45	0.02	0.45	829
25	0.2	4	0.45	0.85	200	smooth	0.2	0.4	1700	1400	0.97	0.6	0.75	0.25	0.06	0.25	693
26	0.2	4	0.45	0.85	200	rough	0.1	0.5	1300	1800	0.93	0.7	0.65	0.15	0.08	0.15	1029
27	0.2	4	0.45	0.85	200	medium rough	0.4	0.2	900	600	0.89	0.8	0.95	0.45	0.02	0.45	710
28	0.2	4	0.45	0.85	200	very rough	0.3	0.3	500	1000	0.85	0.9	0.85	0.35	0.04	0.35	847
29	0.2	5	0.35	0.89	150	smooth	0.2	0.4	1700	1800	0.93	0.7	0.65	0.45	0.02	0.45	641
30	0.2	5	0.35	0.89	150	rough	0.1	0.5	1300	1400	0.97	0.6	0.75	0.35	0.04	0.35	660
31	0.2	5	0.35	0.89	150	medium rough	0.4	0.2	900	1000	0.85	0.9	0.85	0.25	0.06	0.25	734
32	0.2	5	0.35	0.89	150	very rough	0.3	0.3	500	600	0.89	0.8	0.95	0.15	0.08	0.15	786
33	0.3	2	0.35	0.97	200	smooth	0.3	0.5	900	600	0.93	0.9	0.75	0.45	0.06	0.45	1101
34	0.3	2	0.35	0.97	200	rough	0.4	0.4	500	1000	0.97	0.8	0.65	0.35	0.08	0.35	934
35	0.3	2	0.35	0.97	200	medium rough	0.1	0.3	1700	1400	0.85	0.7	0.95	0.25	0.02	0.25	1116
36	0.3	2	0.35	0.97	200	very rough	0.2	0.2	1300	1800	0.89	0.6	0.85	0.15	0.04	0.15	884
37	0.3	3	0.45	0.93	150	smooth	0.3	0.5	900	1000	0.97	0.8	0.65	0.25	0.02	0.25	913
38	0.3	3	0.45	0.93	150	rough	0.4	0.4	500	600	0.93	0.9	0.75	0.15	0.04	0.15	895
39	0.3	3	0.45	0.93	150	medium rough	0.1	0.3	1700	1800	0.89	0.6	0.85	0.45	0.06	0.45	762
40	0.3	3	0.45	0.93	150	very rough	0.2	0.2	1300	1400	0.85	0.7	0.95	0.35	0.08	0.35	852
41	0.3	4	0.15	0.89	300	smooth	0.3	0.5	900	1400	0.85	0.7	0.95	0.15	0.04	0.15	1014
42	0.3	4	0.15	0.89	300	rough	0.4	0.4	500	1800	0.89	0.6	0.85	0.25	0.02	0.25	844
43	0.3	4	0.15	0.89	300	medium rough	0.1	0.3	1700	600	0.93	0.9	0.75	0.35	0.08	0.35	723
44	0.3	4	0.15	0.89	300	very rough	0.2	0.2	1300	1000	0.97	0.8	0.65	0.45	0.06	0.45	672
45	0.3	5	0.25	0.85	250	smooth	0.3	0.5	900	1800	0.89	0.6	0.85	0.35	0.08	0.35	928
46	0.3	5	0.25	0.85	250	rough	0.4	0.4	500	1400	0.85	0.7	0.95	0.45	0.06	0.45	835
47	0.3	5	0.25	0.85	250	medium rough	0.1	0.3	1700	1000	0.97	0.8	0.65	0.15	0.04	0.15	687
48	0.3	5	0.25	0.85	250	very rough	0.2	0.2	1300	600	0.93	0.9	0.75	0.25	0.02	0.25	849
49	0.4	2	0.45	0.89	250	smooth	0.4	0.3	1300	600	0.97	0.7	0.85	0.25	0.08	0.25	838
50	0.4	2	0.45	0.89	250	rough	0.3	0.2	1700	1000	0.93	0.6	0.95	0.15	0.06	0.15	786
51	0.4	2	0.45	0.89	250	medium rough	0.2	0.5	500	1400	0.89	0.9	0.65	0.45	0.04	0.45	1181
52	0.4	2	0.45	0.89	250	very rough	0.1	0.4	900	1800	0.85	0.8	0.75	0.35	0.02	0.35	1196
53	0.4	3	0.35	0.85	300	smooth	0.4	0.3	1300	1000	0.93	0.6	0.95	0.45	0.04	0.45	773
54	0.4	3	0.35	0.85	300	rough	0.3	0.2	1700	600	0.97	0.7	0.85	0.35	0.02	0.35	760
55	0.4	3	0.35	0.85	300	medium rough	0.2	0.5	500	1800	0.85	0.8	0.75	0.25	0.08	0.25	1155
56	0.4	3	0.35	0.85	300	very rough	0.1	0.4	900	1400	0.89	0.9	0.65	0.15	0.06	0.15	1290
57	0.4	4	0.25	0.97	150	smooth	0.4	0.3	1300	1400	0.89	0.9	0.65	0.35	0.02	0.35	798
58	0.4	4	0.25	0.97	150	rough	0.3	0.2	1700	1800	0.85	0.8	0.75	0.45	0.04	0.45	782
59	0.4	4	0.25	0.97	150	medium rough	0.2	0.5	500	600	0.97	0.7	0.85	0.15	0.06	0.15	1029
60	0.4	4	0.25	0.97	150	very rough	0.1	0.4	900	1000	0.93	0.6	0.95	0.25	0.08	0.25	696
61	0.4	5	0.15	0.93	200	smooth	0.4	0.3	1300	1800	0.85	0.8	0.75	0.15	0.06	0.15	805
62	0.4	5	0.15	0.93	200	rough	0.3	0.2	1700	1400	0.89	0.9	0.65	0.25	0.08	0.25	803
63	0.4	5	0.15	0.93	200	medium rough	0.2	0.5	500	1000	0.93	0.6	0.95	0.35	0.02	0.35	683
64	0.4	5	0.15	0.93	200	very rough	0.1	0.4	900	600	0.97	0.7	0.85	0.45	0.04	0.45	677

表3 极差结果分析

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	HP	LAI	LR	LE	MSR	R	ST	CDS	DDS	SHDS	TA	SA	VA	SVW	RVW	IVW
均值 K1	3385	4107	3451	3669	3417	3416	3556	3101	3497	3412	3807	3167	3496	3611	3566	3611
均值 K2	3460	3583	3586	3385	3437	3457	3478	3262	3486	3434	3597	3487	3485	3477	3432	3477
均值 K3	3502	3225	3475	3432	3458	3450	3541	3627	3548	3546	3298	3475	3544	3372	3438	3372
均值 K4	3563	2995	3398	3424	3599	3537	3335	3921	3379	3518	3208	3781	3386	3450	3474	3450
极差 R	179	1113	188	283	182	122	221	820	170	133	599	613	158	239	134.5	239.3
主次顺序	LAI>CDS>SA>TA>LE>SVW (IVW) >ST>LR>MSR>HP>DDS>VA>RVW>SHDS>R															
优水平	A1	B4	C4	D2	E1	R1	G4	H1	I4	J1	K4	L1	M4	N2	O2	P2
优组合	A1 B4 C4 D2 E1 F1 G4 H1 I4 J1 K4 L1 M4 N3 O2 P3															

由表 3 可看出, 叶面积指数对屋顶绿化热工性能影响最大, 基层粗糙度对屋顶绿化热工性能影响最小。各因素对模拟期间房间制冷负荷影响顺序为: LAI>CDS>SA>TA>LE>SVW>ST>LR>MSR>H-P>DDS>VA>RVW (IVW)>SHDS>R, 最优组合为: A1 B4 C4 D2 E1 F1 G4 H1 I4 J1 K4 L1 M4 N3 O2 P3, 即 HP=0.2, LAI=4.5, LR=0.45, LE=0.89, MSR=150, R=smooth, ST=0.4, CDS=0.2, SHDS=600, TA=0.97, SA=0.6, VA=0.95, SVW (IVW)=0.35, RVW=0.04。

2.2 方差分析

虽然极差分析法简单直观, 但是其不能估算实验过程中存在的必然误差, 因而不能确定某一因素各水平相对应的实验结果是由于水平的变化所引起的还是由于实验本身所存在的误差所引起的, 因此仅使用极差分析法所计算的结果不够准确。使用方差分析法可以弥补极差分析法的不足。

方差分析法又称变异数检验或 F 检验, 其可以从诸多因素中确定哪些因素是对指标影响显著的因素。将极差和方差分析法相结合, 可以提高实验精度^[12]。方差分析结果如表 4 所示。

表 4 方差结果分析

	因素	偏差平方和	自由度	F 值	P 值	显著性
1	HP	16474	3	0.55	0.655	
2	LAI	711456	3	23.72	0.000	*
3	LR	18519	3	0.62	0.613	
4	LE	47875	3	1.60	0.225	
5	MSR	20496	3	0.68	0.574	
6	R	4728	3	0.16	0.923	
7	ST	35086	3	1.17	0.349	
8	CDS	426805	3	14.23	0.000	*
9	DDS	9462	3	0.32	0.814	
10	SHDS	7820	3	0.26	0.853	
11	TA	249772	3	8.33	0.001	*
12	SA	198825	3	6.63	0.003	*
13	VA	13578	3	0.45	0.719	
14	SVW	28823	3	0.96	0.432	
15	RVW	10305	3	0.34	0.794	
16	IVW	28823	3	0.96	0.432	
	误差	179943	9997			
	合计	1958436				

由表 4 可看出, 叶面积指数 (LAI)、干土壤导热系数 (CDS)、干土壤热吸收率 (TA) 以及干土壤太阳吸收率 (SA) 对屋顶绿化热工性能影响最为显著, 这与极差分析结果一致。

3 结论

本文使用正交试验方法, 以模拟期间房间总制冷负荷为模拟结果, 寻找出对屋顶绿化热工性能影响最为显著的热工参数并确定最优组合。通过极差与方差分析, 得出以下结论:

(1) 叶面积指数 (LAI)、干土壤导热系数 (CDS)、干土壤热吸收率 (TA) 以及干土壤太阳吸收率 (SA) 对屋顶绿化热工性能影响最为显著。

(2) 各因素对模拟期间房间制冷负荷影响顺序为:

LAI>CDS>SA>TA>LE>SVW (IVW)>ST>LR>MSR>HP>DDS>VA>RVW>SHDS>R。最优组合为:

HP=0.2, LAI=4.5, LR=0.45, LE=0.89, MSR=150, R=smooth, ST=0.4, CDS=0.2,

SHDS=600, TA=0.97, SA=0.6, VA=0.95, SVW (IVW)=0.35, RVW=0.04。

(3) 为提高屋顶绿化的热工性能, 可采用叶面积指数 (LAI) 较高的植被层以及选用导热系数较小、厚度较大的基层层。

(4) 当使用 EnergyPlus 进行屋顶绿化相关模拟时, 如果某些热工参数不可知, 使用人员可以优先输入对屋顶绿化热工性能影响较大的热工参数, 如叶面积指数、基层层导热系数等。

本文基于 EnergyPlus 屋顶绿化模块, 使用正交试验分析方法, 对屋顶绿化所有热工参数进行正交分析, 找出所有热工参数中对屋顶绿化热工性能影响最为显著的热工参数并确定最优组合, 为建筑设计人员进行屋顶绿化模拟工作提供参考。这些热工参数值 (水平) 是在 EnergyPlus 屋顶绿化模块可输入范围内选取的, 具有一定的随机性。如建筑设计人员需要确切的每一种热工参数, 可进行屋顶绿化的实测, 将所得的热工参数输入到 EnergyPlus 中进行模拟, 并且与实测结果进行对比, 这也是笔者接下来需要进行的工作。

参考文献

- [1] 马珩. 中国城市化和工业化对能源消费的影响研究 [J]. 中国软科学, 2012(1):176-182.
- [2] 张琨晔. 论建筑行业对全球主要环境问题的贡献 [J]. 山西建筑, 2010, 36(26):347-348.
- [3] 魏艳, 赵慧恩. 我国屋顶绿化建设的发展研究——以德国、北京为例对比分析 [J]. 林业科学, 2007, 43(4):95-101
- [4] Carter T, Keeler A. Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 87(3):350-363
- [5] Teemusk A, Mander Ü. Green roof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia [J]. Building and Environment, 2009, 44(3):643-650
- [6] Zhao M, Tabares-Velasco P C, Srebric J, et al. Effects of plant and substrate selection on thermal performance of green roofs during the summer [J]. Building & Environment, 2014, 78(8):199-211.
- [7] 苏浩, 丁云飞, 王剑平, 等. 夏热冬暖地区既有建筑屋面绿化改善室内环境效果测试分析 [J]. 新型建筑材料, 2016, 43(6):92-94.
- [8] Bevilacqua P, Mazzeo D, Bruno R, et al. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area [J]. Energy & Buildings, 2016, 122:63-79.
- [9] Qin X S, Wu X Y, Yeemeng C, et al. A green roof test bed for stormwater management and reduction of urban heat island effect in Singapore [J]. British Journal of Environment & Climate Change, 2012.
- [10] 本社. JGJ 75-2012 夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准 [M]. 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇伟, 等. 正交试验设计和分析方法研究 [J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9):52-55.
- [12] 郝拉娣, 张娴, 刘琳. 科技论文中正交试验结果分析方法的使用 [J]. 编辑学报, 2007, 19(5):340-341.

基于采光和能耗分析的某图书馆内遮阳节能研究

朱尚斌, 李 灿, 陈 泉, 马千里

(湖南工业大学土木工程学院, 湖南株洲 412007)

[摘 要] 以夏热冬冷地区某高校图书馆为模拟案例, 利用 DeST 软件对有无内遮阳以及不同深浅颜色的内遮阳模型进行室温 and 能耗模拟计算, 结果表明: 内遮阳可以有效改善室内热环境, 缩减了全年 17.5% 的 35℃ 以上高温小时数, 中庭室温平均下降 0.83℃。浅色内遮阳引入更少的照明能耗, 深色内遮阳阻隔更多的太阳得热量, 从而降低空调能耗, 但浅色内遮阳的综合能耗更少。利用 Ecotect 和 Radiance 软件对中庭和边庭进行自然采光和室内眩光模拟分析, 研究结果表明: 内遮阳可以有效改善顶部采光质量, 降低中庭较高的采光系数, 减少眩光, 采光均匀度 U_1 可以提高 40%。内遮阳百叶有利于边庭光环境的调节, 在典型夏季日 (7 月 1 日), 调节遮阳百叶角度为 60°, 边庭红色易眩光区域大面积减少, 全室内光亮度可以控制在 2000lux 以内, 室内采光均匀度大幅度提升。

[关键词] 内遮阳; 能耗; 采光均匀度; 眩光

0 引言

图书馆是每个学校最重要的学术资料中心, 是为老师和学生提供学术服务的机构, 是学术信息化和社会信息化的主要基地。当代高校图书馆的设计大都倡导采用通透式、大开间、大面积玻璃幕墙的理念。从 20 世纪 80 年代末到现在, 高校图书馆建筑中含有中庭空间占我国所有高校图书馆的比例明显增加。中庭空间呈现逐年递增的趋势, 到 2012 年该比例已超过 90%^[1]。对于高校图书馆类型的建筑, 进深较深, 采用大面积的幕墙和天窗设计, 可以很大程度上提高内部空间的采光质量, 创造良好的光环境, 但由于玻璃自身阳光透射能力较强, 夏季势必会引入过多的太阳辐射, 这无疑会增加建筑围护结构的得热量, 提高空调能耗和室内温度, 由此建筑的遮阳减耗措施显得格外重要。

建筑遮阳对于建筑节能具有重要意义, 它是夏季隔热降温最便利的措施, 对减少空调能耗发挥着重要作用; 在冬季, 合理的建筑遮阳做法可以在一定程度上降低采暖能耗。与此同时, 建筑遮阳对调节室内光环境效果明显, 可预防眩光产生、节约照明能耗。近几年来, 通过在建筑天窗内表面安装遮阳篷以及在玻璃幕墙内外增设遮阳装置来隔热降温已成为一种趋势, 有研究认为窗户内遮阳可以减少 60% 以上的太阳辐射^[2], 也有研究表明, 采用遮阳对于削减电力高峰负荷起到关键作用, 可节约 25% 以上的空调能耗^[3]。本文以某高校节能型图书馆实际建筑为基础建立模型, 通过在天窗和玻璃幕墙实施内遮阳的方案, 进行能耗和采光模拟分析, 研究其对建筑能耗和室内光环境的影响, 得出最佳的遮阳措施, 为既有建筑的遮阳改造提供理论参考。

1 研究方法

本文参照某高校图书馆建筑底图, 通过导入 DeST 软件建立实体模型, 对有无内遮阳以及不同深浅颜色内遮阳的中庭进行能耗和室温模拟计算, 分析比较室内温度、照明能耗以及太阳得热量等参数; 通过 gbXML 格式转换到 Ecotect 软件中, 对模型进行修复完善, 并对不同遮阳工况下的室内自然采光环境进行模拟, 同时结合《建筑采光设计标准》中相关条文, 对不同情况下的室内采光均匀度进行评估; 最后采用 Radiance 高级光环境模拟软件, 对边庭玻璃幕墙有无内遮阳情况下室内眩光环境进行比较分析。

2 模型简介

该图书馆位于湖南省株洲市, 属于典型的夏热冬冷气候区, 其中最热月平均温度为 28.5℃, 最冷月平均温度

为 5℃, 全年 6 至 9 月份太阳辐射量较大, 平均逐时太阳辐射量超过 500W/m²。该图书馆共七层, 建筑占地面积约为 7290.0m², 总建筑面积 35545.6m², 三分之二以上面积是大开间、通透式的开架藏书阅览室, 图书馆采用核心式中庭设计, 顶部是面积为 600m² 的平面型采光天窗, 二至五层南侧采用开阔式的全玻璃幕墙边庭设计, 可以为学生阅读创造良好的视野环境。空调设计区域包括报告厅、办公室、小演播厅、电子阅览室等, 总空调区面积约 10500m², 约占建筑总面积的 1/3, 三维模型见图 1。

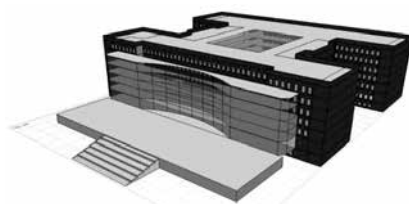


图 1 图书馆建筑模型

该图书馆设计初期, 希望建成节能设计的示范工程, 设计过程中根据所在地的气候和环境条件, 因地制宜的进行设计, 各主要围护结构的性能参数^[4]达到相关规范限制标准范围内, 具体见表 1 所示, 在 DeST 中各围护结构的参数依据此表进行取值。该图书馆主要阅览室的室内空调设计参数满足《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736-2012) 的相关要求, 其中室温夏季为 24℃~28℃, 冬季为 18℃~22℃; 相对湿度夏季为 40%~65%, 冬季为 40%~60%。

3 热环境模拟分析

3.1 内遮阳对室温影响

在 DeST 软件中, 对天窗无内遮阳和设置普通内遮阳的模型进行全年 8760 小时的自然室温计算, 计算得到中庭全年室温以及室外温度的分布情况如下图 2 所示, 其中两种情况下全年超过 35℃ 以上高温的累计小时数分别为 417h 和 345h 小时, 通过在中庭设置内遮阳, 全年累计减少了 17.5% 的高温小时数, 而超过 30℃ 以上的高温小时数减少了 7.5%。此外, 夏季设计日中庭平均室温变化曲线如下图 3, 可以发现设置内遮阳模型的中庭室温整体上大幅度下降, 午后太阳辐射最强烈时段温降明显, 平均下降了 0.83℃。通过以上室温计算, 中庭设置内遮阳后, 一定程度上改善了室内的热环境。

表 1 图书馆各围护结构性能参数指标

项目					限制（标准指标）		实际结果	是否符合标准
外围护结构	传热系数 K/[W·(m²·k)⁻¹]			屋面	≤ 0.7	0.68	是	
				外墙	≤ 1.0	0.98	是	
				架空或外挑楼板	≤ 1.0	0.87	是	
	热阻 /[(m²·K)/W]			地面	≥ 1.2	0.41	否	
				地下室外墙	≥ 1.2	—	—	
				传热系数 (K)	≤ 3.0	3.4	是	
	屋顶透明天窗			遮阳系数 (SC)	≤ 0.4	0.55	否	
				占屋顶面积百分比	≤ 20%	13%	是	
外墙 (透明幕墙)	朝向	窗墙比	传热系数	遮阳系数	可见光透射比	可开启面积	遮阳形式	
	东	0.15	3.4	0.6	0.3	40%	内遮阳	
	南	0.39	3.4	0.55	0.3	40%	内遮阳	
	西	0.16	3.4	0.6	0	0	—	
	北	0.28	3.4	0.57	0.3	40%	内遮阳	

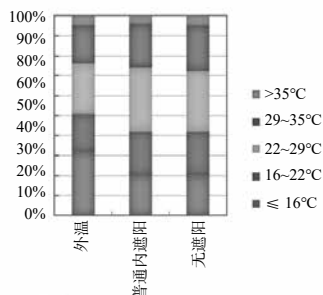


图 2 全年中庭自然室温及外温分布

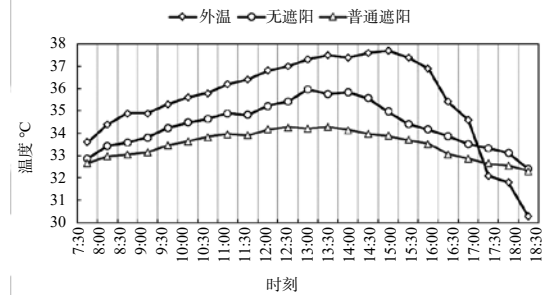


图 3 夏季设计日中庭室温及外温分布

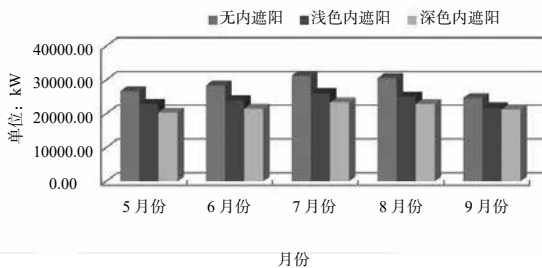


图 4 5 至 9 月份逐月中庭室内太阳得热量

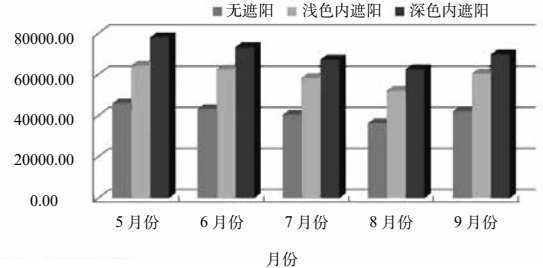


图 5 5 至 9 月份逐月照明能耗

3.2 内遮阳颜色对建筑能耗的影响

该工况下分别选取高反射率的浅蓝色内遮阳 (短波反射率 0.8, 遮阳系数 0.6) 和低反射率的深蓝色内遮阳 (短波反射率 0.3, 遮阳系数 0.45), 设置相同的遮阳周期为 6 月 1 号至 9 月 30 号, 每天 8 点至 17 点, 并按照图书馆建筑顶部采光下满足最低照度 300lux^[5] 进行设置, 进行采光和照明能耗模拟计算, 统计得出深浅不同的内遮阳对中庭室内太阳得热量和照明能耗的影响规律, 见下图 4 和 5 所示。

通过图 4 对比可知, 采光中庭通过设置内遮阳室内的太阳得热量明显下降, 这是由于增加内遮阳可以使一部分太阳辐射的反射和吸收在天窗玻璃和内遮阳材料之间进行, 这就导致经过室内多重反射并返回至室外的太阳辐射比例增加, 进而太阳得热减少^[6]。根据图 5 中变化趋势可知, 在采光顶设置内遮阳可以一定程度上增加照明能耗, 这是由于内遮阳有效隔热的同时对室内采光具有一定的消极影

响, 部分角落区域为满足最低照度 300lux 的要求会增加该区域的照明, 照明时长的增加无疑会增加照明能耗。

通过数据分析可知, 深色内遮阳在遮阳周期内累计减少了 25.3% 约 7922.45kW 的太阳得热量, 同时增加了 65.3% 约 27580.83kW 的照明能耗; 而浅色内遮阳增加了 43.2% 约 18231.30kW 的照明能耗, 减少 16.5% 约 5166.97kW 的太阳得热量。但综合考虑太阳得热和照明能耗时, 浅色内遮阳的综合能耗更少。浅色内遮阳由于本身较高的太阳透射率, 对室内采光影响小的同时增加更少的照明能耗, 更适合采光天窗的遮阳; 此外深色遮阳材料太阳吸收率更高, 会产生更多的发热量, 随回风进入空调末端处理设备, 额外增加了空调能耗。

4 光环境分析

该图书馆大型天窗的设计, 极大地满足了室内采光的需求, 然而影响人类视觉的因素是多样的, 优良的视觉环境应该包括适当的照度, 合理的亮度比, 舒适的均匀度等。

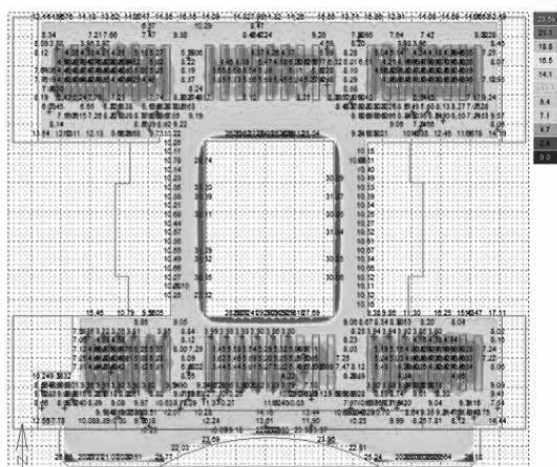


图6 无遮阳时采光系数色彩图

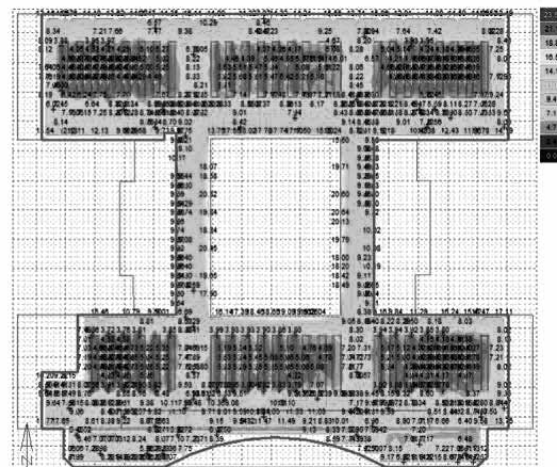


图7 内遮阳时采光系数色彩图

根据《建筑采光设计标准》中的要求,图书馆阅览区应满足顶部采光不低于2%以及侧面采光不低于3%的采光系数标准值。而有效照度一般分为三个范围(小于100lux、100~2000lux以及大于2000lux),它将眩光问题考虑在内,通常认为照度在100~2000lux范围内的室内采光质量较佳^[7]。此外,室内采光系数的最低值和其平均值要有一定限制,以使室内达到较好的均匀度,室内采光系数均匀度有2种表示方法^[8]:

$$U_1 = C_{\min} / C_{\max} \quad (1)$$

$$U_2 = C_{\min} / C_{\text{ave}} \quad (2)$$

式中: $C_{\min}$ 为最小采光系数; $C_{\max}$ 为最大采光系数; C_{ave} 为平均采光系数。

4.1 采光系数和均匀度的变化

在 Ecotect 软件中夏季设计日均天空模式下,对原始没有遮阳措施模型以及中庭和边庭均设置内遮阳的模型在同一标准层下进行自然采光模拟分析。图6和图7分别是无遮阳和设置内遮阳时距地面0.75m高度平面处采光系数分布云图,为了便于观察,把标签值范围调成一致并显示最大和最小值,观察结果可知,无遮阳时图书馆阅览区、开闭书架区最小采光系数平均值为4.5%,加内遮阳后该值为3.3%,均满足《建筑采光设计标准》中标准限值的要求,说明良好天气状况下该内遮阳设置时仍然可以依靠自然光源满足室内采光的要求;同时对比发现,图5中红色区域到图6中明显减少,中庭走廊区域采光系数最大值从平均26.6%下降到18.3%,表明内遮阳的设置极大地削弱了投射进来的光线强度,这将会有助于减弱眩光和提高采光均匀度,改善光环境。

按照公式(1)和(2)采光均匀度的计算方法,在中庭阅览区和走廊均匀选取若干点进行计算,计算结果的趋势变化如图8所示,其中 U_1^* 和 U_2^* 是加内遮阳后的采光均匀度。通过观察图中 U_1 、 U_1^* 以及 U_2 、 U_2^* 的变化,发现变化趋势较为明显,采光均匀度 U_1 整体上提高了40%,采光均匀度 U_2 整体上提高了28.6%,说明加内遮阳整体上改善了中庭周围的采光均匀度。

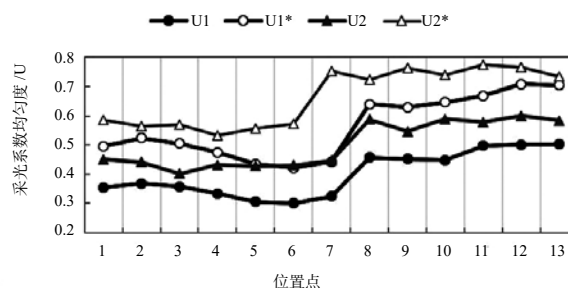
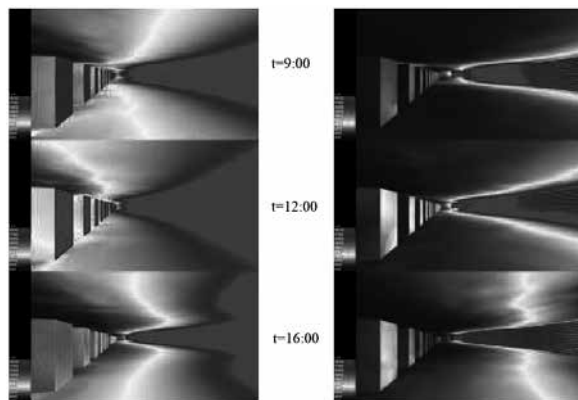


图8 采光均匀度趋势图

4.2 内遮阳百叶调节边庭光环境

结合 Radiance 软件在典型夏季日(7月1日)的9:00、12:00和16:00三个时刻对边庭阅览区的室内采光照度进行模拟,其中该图书馆南侧边庭采用可见光透射比为0.3的双层玻璃幕墙设计。结果见图9所示,无遮阳时白天太阳光的入射造成幕墙周围和书架南侧面的照度值过大,这些照度值大于2000lux的红色区域由于过亮,会造成眩光或者VTD反射眩光^[9]的产生,并且随着室外光环境的改变室内光环境的质量会进一步下降。

(下转第225页)



无遮阳模型

内遮阳百叶模型

图9 典型夏季日(7月1日)室内照度伪色彩图

“通风”与“捕风”：亚热带地区高层公共住宅通风效果比较研究

杨娟¹, 王之昊¹, 田真¹, 杜琥²

(1. 苏州大学金螳螂建筑学院, 苏州 215000; 2. 英国卡迪夫大学威尔士建筑学院, 卡迪夫 CF10 3NB)

[摘要]良好的自然通风不仅可加强人与自然的联系, 节约能源, 而且能提升空气质量, 营造良好的室内外风环境。如何有效的利用建筑组群、单体与构造设计来获得良好的室内外自然风环境在住宅设计中具有重要意义。通过 CFD 模拟仿真可有效分析室内外空气分布的详细情况, 分析建筑室内外通风效果, 从而指导和优化设计。本文利用 CFD 数值模拟, 以香港穗禾苑小区风环境为例展开模拟对比分析, 通过调整建筑组群、单体布局以及通风廊道的方向, 进行室内外风环境的“通风”与“捕风”分析, 探索在亚热带气候条件下高层公共住宅中如何通过设计优化与 CFD 模拟手段有效提升与优化建筑室内外自然通风环境。

[关键词] CFD 模拟; 自然通风; 捕风; 通风廊道; 高层经济适用住宅

0 香港穗禾苑

巴马丹拿事务所成立于 1938 年, 是东南亚地区内历史最悠久、规模最庞大的建筑及工程事务所。香港穗禾苑住宅小区是由 1980 年设计的经济适用高层公屋住宅, 该小区位于沙田西北面山坡上, 俯瞰整个沙田市中心, 该公屋住宅类似国内的经济适用住宅或者公共租赁住宅, 小区内户型可租可售。穗禾苑小区占地 9.1hm², 总建筑面积 18.3 万 m², 是香港 70 年代末期开始的“居者有其屋”计划下设计最理想的屋苑之一^[1]。

如图 1 所示, 穗禾苑建筑群由 9 栋高层住宅楼、幼儿园、学校、活动中心及商场等组成, 每栋住宅楼均为 36 层。建筑组群采取每 3 栋住宅楼形成一个组团, 3 个组团的建筑布局形式相近, 采用品字型布局, 但品字型开口不同, 分别面向东西向开口。9 栋高层住宅基本上面向主导风向。各个组团中心庭院的布景形式不同。北边的组团布置了一个健身公园, 中间的组团是一个带喷水池的公园, 南边的组团设计了一个锦鲤池。微风徐来, 花香扑鼻, 景色宜人, 水声潺潺, 提升了建筑的空间品质。

高层住宅的标准层平面每层 8 户, 整个建筑单体平面呈风车状。在每个楼梯间里, 走廊端部的两户与走廊边上的一户错开半层。如图 1 平面图所示, 3、6、9、12 四户在一个标高上, 剩下的八户在一个标高上, 错层设计, 避开了相邻几户的干扰, 营造了私密的人户空间。电梯每三层停靠一次, 提高了电梯的工作效率。每层中间的走廊不是封闭的, 中间有一个大的公共平台(图 2), 可供人们

室外活动。在电梯不停靠的两层, 楼梯走廊挡板处设置了大圆洞, 可供不同楼层间的人们相互对望, 增加生活的情趣^[2]。

作为政府公屋, 户型套内建筑面积约 37.3m²~56.6 m², 为 2 房 2 厅 1 厨 1 卫, 或 3 房 2 厅 1 厨 1 卫设计, 户型设计相当经济和紧凑。

穗禾苑设计方案在 1981 年荣获香港建筑师学会“银奖”。穗禾苑小区虽落成已经近 40 年, 但由于良好的维护与定期整修, 整个小区运行情况良好, 完全看不出是一个楼龄接近四十年的经济适用房小区。过渡季节及初夏, 小区及室内凉风习习, 几乎不用开空调也能达到较好的热舒适度, 为人所称道。

1 香港穗禾苑风环境分析

根据香港气象数据, 夏季工况主导风向为东南风, 东偏南 22.5°, 参考高度处 (H=10m) 风速 2.7m/s。冬季工况取主导风向东北风, 东偏北 22.5°, 参考高度处 (H=10m) 风速 2.9m/s。采用计算流体力学 (CFD, Computational Fluid Dynamics) 的方法对方风环境状况进行模拟评价, 本次模拟采用的是绿建斯维尔公司开发研制的 Vent 软件 (Open Foam 计算核心)。在计算软件 Vent 进行三维流动数值模拟从而得到建筑周边的流场和建筑表面的压力分布。为了简化模型, 对模型做了适当的简化, 忽略了部分

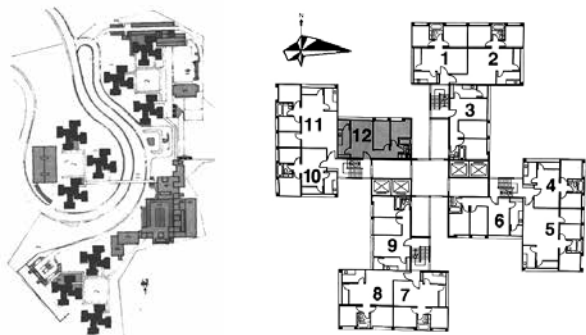


图 1 穗禾苑总平面图及标准层平面图



图 2 穗禾苑外观及单元公共空间

对风压分布影响较小的建筑构件。为评价不同组团开口对风环境影响,分别对南部的东向开口组团及中部的西向开口组团进行单独分析。

1.1 Vent CFD 模拟软件

Vent 软件采用标准 $k-\varepsilon$ 模型对室外风环境进行数值模拟。

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{U}\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi}\text{grad}\phi) + S_{\phi}$$

式中的 ϕ 可以是速度、湍流动能、湍流耗散率以及温度等。针对不同的方程,表现形式如表 1。

表 1 计算流体力学的控制方程

方 程	ϕ	Γ	S_{ϕ}
连续性方程	1	0	0
x- 动量方程	U	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial x})$
y- 动量方程	v	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y})$
z- 动量方程	W	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial z})$
湍流动能方程	K	$\alpha_k \mu_{\text{eff}}$	$G_k + G_B - \rho \varepsilon$
湍流耗散率方程	ε	$\alpha_{\varepsilon} \mu_{\text{eff}}$	$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_B) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_{\varepsilon}$
温度	T	$\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}$	S_T

表中的常数如下:

$$G_k = \mu_t S^2, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}), G_B = \beta_t g \frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial y},$$

$$\mu_t = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}, C_{\mu} = 0.0845, C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68,$$

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{\sqrt{u^2 + w^2}}\right|, \sigma_T = 0.85, \sigma_c = 0.7,$$

$$\alpha_k = \alpha_c \text{ 由 } \left|\frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929}\right|^{0.6321} \left|\frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929}\right|^{0.3679} = \frac{\mu}{\mu_{\text{eff}}} \text{ 计算。}$$

其中 $\alpha_0 = 1.0$ 。如果 $\mu < \mu_{\text{eff}}$, 则 $\alpha_k = \alpha_c \approx 1.393$ 。

$$R_{\varepsilon} = \frac{C_{\mu} \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{(1 + \beta \eta^3)} \times \frac{\varepsilon^2}{k},$$

其中 $\eta = Sk/\varepsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$ 。

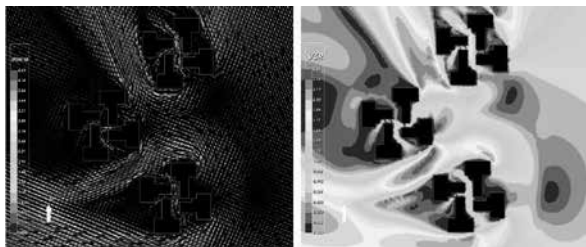


图 3 南部组团东向开口夏季东南风速度矢量及风速系数放大图

目前 CFD 计算方法主要采用有限差分法和有限体积法。一般情况下,两者的数学本质及其表达是相同的,只是物理含义有所区别,有限差分基于微分思想,有限体积基于物理守恒的原理。Vent2016 软件采用有限体积法,同时采用压强校正法 (SIMPLE) 处理连续性方程,将运动方程的差分方程代入连续性方程建立起基于连续性方程代数离散的压强联系方程,求解压强量或压强调整量。Vent CFD 计算需要将 CFD 数学模型中的高度非线性的方程离散为可用于求解的方程,这个过程需要用到差分方法。Vent 采用二阶迎风格式对方程进行离散,二阶迎风格式的准确性可满足一般流体模拟计算的要求^[3],同时满足《建筑通风效果测试与评价标准》JGJ/T 309-2013 对于模拟算法的要求。

1.2 香港穗禾苑建筑组团通风效果分析

速度场主要是查看人行高度处风速分布情况,根据评价要求,方便评价是否有超过 5m/s 的情况。该项目模拟结果如图 3~6 所示。

从夏季的模拟结果来看,东向开口组团及西向开口组团建筑周边行人高度处夏季室外风速有小部分区域低于 0.5m/s,场地风速均低于 5m/s,场地内各栋建筑交界处因为峡谷风效应,使得风速较快,风速放大系数可能大于 2。模拟中未包括小区绿化树木模型,实际情况下小区内部绿化环境优美,可通过乔木与灌木结合能够合理引导风的流动,减小风速放大系数,消除不利情况。从结果对比情况来看,东开口组团由于迎向夏季东南风向,使得各栋建筑室外都有较好的风环境,静风区域较小,而西开口组团因为最北面建筑处于东南及南面两栋建筑的影响,静风区域较大。在各栋单体建筑中,因为风车型的平面布局,使得中部的开口及边翼的展开起到了较好的“捕风”功能,促进了夏季风的流动。另外建筑建筑师设计了一条南北方向的主要风廊以及东西向次要的风廊,以此通过风廊来进一步导风到各个住宅户型单元。

在室外活动场所,每个组团都增添水景设施或者采用渗水路面或者绿化砖,减少了局部热岛效应^[4]。大部分建筑前后存在一定压差,满足《绿色建筑评价标准》中的夏

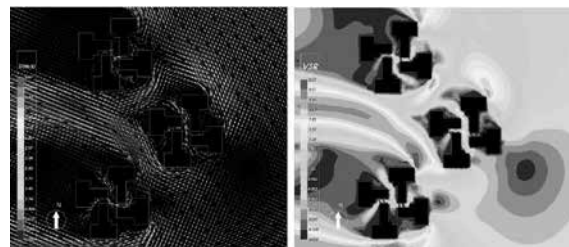


图 4 中部组团西向开口夏季东南风速度矢量及风速系数放大图

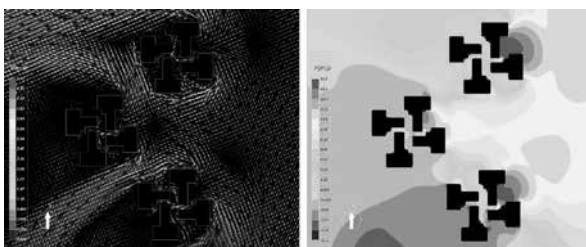


图 5 南部组团东向开口冬季东北风速度矢量及压强云图

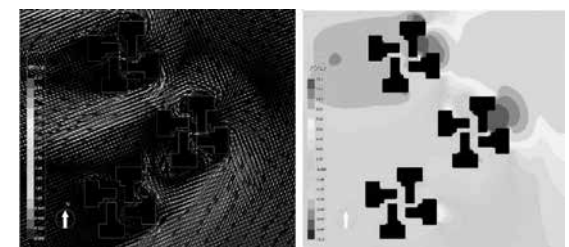


图 6 中部组团西向开口冬季东北风速度矢量及压强云图

季建筑前后风压压差大于 0.5Pa 的规定^[5]。

压力场主要通过不同高度处的压力分布等值线图以及建筑表面风压分布图来进行评价和计算建筑迎风面和背风面的压力差。从冬季的模拟结果来看,整体上室外行走空间风速不超过 5m/s ,大量的乔木与灌木结合能够合理引导风的流动,减小风速,消除不利情况。由于香港主导风向是东风,穗禾苑布局排列方式造成9栋高层建筑都是迎风建筑。所以在冬季建筑前后压差较大,不利于冬季保温,不可以确保冬季建筑前后压差不大于 5Pa ,因此应重视东侧建筑和高层建筑的东西向外窗气密性。西部开口组团南侧建筑因处于背风处,整体风速较低。从夏季及冬季建筑组团分析情况来看,东向开口3栋建筑均处于可迎风情况,而西向开口秋冬季总有一栋建筑处于背风处。因而东向开口整体室外风速较为均匀而且风速放大系数较小而占优,但是优势并不明显,因此整体上两种组团布置方式差别不大。

1.3 穗禾苑建筑组团通风方案比较

由于穗禾苑小区属于政府公屋,在整体上需要节省用地并降低成本,因此如何实现最小占地以及最小的公摊面积的要求使得建筑师创造性地设计了一个风车型的平面,同时利用公共走道连接各户型。整体上,穗禾苑的平面布局能够改善空气质量,提高室内外新鲜空气的流通,促进自然风循环,营造出高品质的通风环境。错层设计使建筑各个方向均匀设有开口,不仅避免了相邻住户的相互干扰,而且中间的公共平台与通风廊道起到了引导风向的作用。穗禾苑的建筑平面设计中有一条南北向主要通风廊道,可以通过改变通风廊道的方向,分别通过旋转平

面的最简单方式来调整通风廊道的方位来评估其他方案的优劣。方案一,将平面镜像,使通风廊道的进风方向和出风方向与现有情况恰好相反;方案二,把平面顺时针旋转 90° ,使主通风廊道呈东西向布置,与该区域冬季主导风向几乎保持一致。

从图7图8与图3对比看,旋转 90° 后夏季室外通风情况为最佳,室外风速放大系数最小。其主要原因在旋转后东南角通风开口与风廊道最大,侧翼展开距离也最大,因而通风潜力与“捕风”能力也最大,在室外可提供更好的通风环境。另外从图8风速矢量图可以看出,呈品字型排列的三栋建筑内风廊处风速流向比较统一,而现有设计及镜像方案中三栋建筑通风廊道内风速流向各异。

从图9、图10与图5对比看,方案一与方案二均比现有设计更佳。主要原因是通过现有平面的镜像或者旋转 90° ,使得建筑组团东北角面向东北风的开口更大,因而冬季的主导风可通过风廊顺利输送到建筑下风侧,可以减少迎风面风压,从而减少冬季迎风面门窗的冷风渗透。

2 穗禾苑建筑单体室内风环境分析

从以上模拟结果可知,整体上穗禾苑具有良好的自然通风效果,但也存在着夏季局部区域风速偏低,同时各栋建筑冬季东北风风压较大。现有设计与方案二(旋转 90°)相对镜像方案更佳。现有设计与旋转方案的室内风环境云图与空气龄图见图11~12。

从图11~12模拟结果和图13室内换气次数统计结果,可得出如下主要结论:

(1) 现有设计与旋转方案夏季室内主要空间通风状况良好,空气换气次数高。在夏季室外风速为东南风 2.7m/s

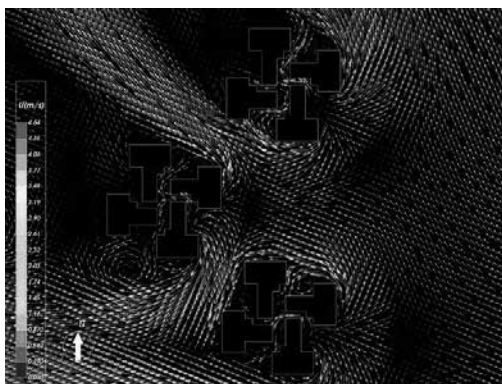


图7 方案一夏季东南风速度矢量图

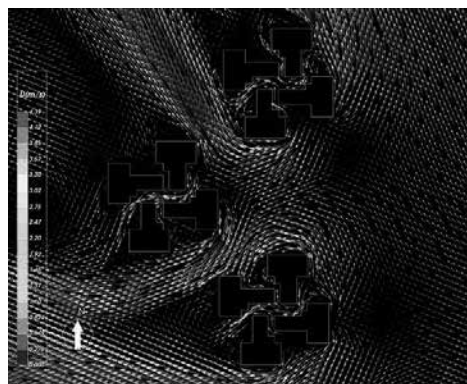


图8 方案二夏季东南风速度矢量图

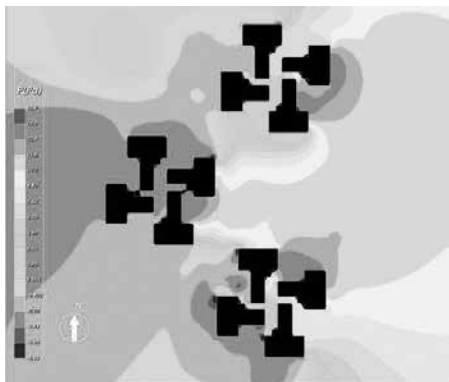


图9 方案一冬季东北风压强云图



图10 方案二冬季东北风压强云图



图 11 设计方案夏季东南风室内风速云图与室内空气龄图



图 12 旋转 90° 方案夏季东南风室内风速云图与室内空气龄图

的情况下, 12 个户号室内换气次数为 39~181ACH, 平均换气次数达到了 89ACH。

(2) 无论是现有设计还是旋转方案, 建筑西北角即图 1 平面图中的户号 10、11 和 12 因为处于整个户型平面的负压区, 虽然建筑平面设置了连廊作为风廊, 但是因为所处的位置不佳因而换气次数比其他户号小。户号 3 与 6 亦因东南侧被遮挡, 换气次数低于迎风侧户号。

(3) 整体而言, 现有设计与旋转方案在夏季室内通风情况差距较小, 但旋转方案冬季室外整体风压较小。通过对各户的夏季室内换气次数比较 (图 13), 可以发现, 旋转户型 90° 后, 提升了部分换气次数较低户号的室内换气次数 (户号 1、6、8、11、12), 因而在风速较小的条件下可提升室内通风换气量, 因而比现有设计更优。

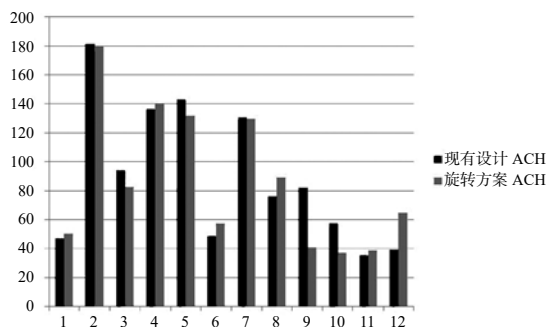


图 13 现有及旋转方案夏季各户号室内换气次数

3 结语

巴马丹拿设计的风车形的穗禾苑户型, 住宅楼内部都有一条通风廊道。从 CFD 模拟结果可以看出, 通风廊道的设计比以往设计方案中的封闭走廊, 室内外通风效果要增强很多。针对风车户型平面, 可通过户型平面凹入与凸出, 利用通风廊道, 采用的“通风”与“捕风”的方法来组织高层住宅走廊的气流, 减少风影区的覆盖区域, 使

得建筑周围获得相对较好的自然通风环境。这种布局能够引导气流斜向进入建筑群内部, 减少气流的阻力, 能够使气流流线间距拉长, 有利于高层住区的通风, 加强了室外的自然通风能力。

同时, 如果让通风廊道与冬季室主导风向一致, 东北风不会在建筑墙面向上大量聚集, 使外墙压强减小, 减少冷风渗透量, 有利于冬季的保温防寒效果。

从对比方案的模拟结果来看, 当住宅楼内部主要通风廊道与该区域主导风向在一个方位上, 可改善建筑组群内风环境, 加强室内自然通风, 因此采用旋转后的公共风廊道布局方式比现有方案更优。当然该建筑建于 1980 年代, 当时基于 CFD 计算的分析方法还未开始, 而在今天通过基于 CFD 模拟的住宅风环境比较与优化方法获得了更为广泛的认可。

自然通风是高层住宅设计中改善室内环境舒适度的一种有效手段, 不同的规划布局、窗口布置、窗户选型以及室外绿化都会对小区和室内的风环境产生一定的影响^[6]。因此, 在进行方案设计时, 通过 CFD 模拟分析与比较, 可更好地将自然通风与建筑设计相结合, 有利于实现更好的建筑室内外自然通风。

参考文献

- [1] 顾大庆. 经济适用原则乃公共住宅设计之源——香港早期公屋设计特色初探 [J]. 时代建筑, 2011(04):50-55.
- [2] 唐玉恩. 香港穗禾苑 [J]. 世界建筑, 1987(03):56-57.
- [3] 绿建斯维尔. Vent 用户使用手册. 2016 版. 北京绿建斯维尔公司.
- [4] 林波荣. 绿色建筑性能模拟优化方法 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [5] 中国建筑科学研究院. 绿色建筑评价标准技术细则 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [6] 彭云龙. 基于 CFD 模拟的济南地区高层住宅自然通风优化设计策略研究 [D]. 山东建筑大学硕士论文, 2015.

不同结构光伏墙传热模型研究

黄自强, 章文杰, 马胜兵, 洪洁, 周子华

(南京理工大学, 江苏南京 210094)

[摘要] 针对现有的一维非稳态传热模型应用于多种不同结构光伏幕墙计算时存在的问题, 本文通过控制体积法将相应的计算域在垂直方向上划分为多个连续的体积单元, 对其中的网格节点分别求解, 实现对空气层开口、空气层封闭和无空气层这三种光伏墙及普通墙体等四种结构形式中各部位温度及热流等参数的模拟计算, 并结合实验数据对采用此种方法改进后的计算模型的准确性进行了验证。

[关键词] 光伏墙; 空气层; 数值模拟

0 引言

光伏墙作为建筑节能的一项重要技术手段, 得到了广泛的应用, 如何提升光伏墙的各项性能也就成为了当前重要的研究方向, 尤其对光伏墙热性能的研究, 其直接影响着光伏系统发电效率及建筑室内供暖空调能耗。在对各类光伏墙热性能模拟计算方面, 各类研究大致都采用了一维非稳态传热模型, 计算分析的侧重点也有所不同^[1-5], 但由于光伏组件对太阳辐射的遮挡及中间留有的空气层对传热的影响, 光伏幕墙的传热过程往往比普通墙体更为复杂。本文通过控制体积法对现有的一维非稳态传热模型进行了改进, 考虑到各类墙体在垂直方向上的温度梯度分布, 将相应的计算域在垂直方向上划分为多个连续的体积单元, 而后对各网格节点中的温度和热流等参数分别进行求解, 针对空气层并开口、空气层封闭和无空气层等三种结构形式的光伏墙及普通墙体中多种热传递过程进行计算, 并结合实验数据进行了验证。

1 实验装置

关于光伏墙热性能研究的实验平台搭建在一座按照真实尺寸建设的专用于实验研究的小屋南向墙面上。地点位于香港理工大学某教学楼顶, 全年没有其他物体对实验平台形成遮挡。

三种光伏墙体的结构如图 1 所示, 其中, A 墙体中光伏组件直接贴墙面安装; B 墙体在光伏组件背面左右两边框采用 50mm 厚的聚苯板进行围挡, 使得中间形成上下开口的流道; C 同样采用 50mm 厚的聚苯板对光伏组件背板与墙体间的空气层进行围合, 使其不与外界相通。

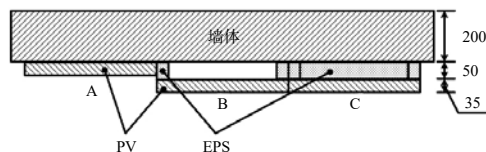


图 1 三种光伏墙体背面结构示意图 (俯视)

对于普通墙体, 测点布置在紧邻的另一座围护结构工法相同的实验小屋南向壁面上。

光伏组件采用三块 120W 的多晶硅组件, 采用巡检仪对各参数的测量传感器进行巡检, 后将参数传给电脑进行数据记录存储。

2 数学模型

2.1 光伏墙热平衡传热模型

本研究中所涉及的光伏墙结构如图 2 (a)、(b) 和 (c) 所示, 整体由光伏组件、建筑墙体及二者之间所围合的空气层等几部分组成。根据光伏组件与建筑墙体之间是否存在空气层、空气层上下是否开口与外界大气相连这两点对光伏墙整体传热的影响分别建立不同的数学计算模型。

为了简化计算, 在计算模型建立时作如下假设:

(1) 由于光伏组件和建筑墙体长和宽的几何尺寸均远大于二者在厚度上的尺寸, 因此可以将二者内部的导热问题看作无限大平板内的导热问题, 同时, 由于并不对光伏组件及墙体内部各材料间的导热问题作研究, 因此假设光伏组件和墙体各项均质, 不考虑二者中多层材料间的导热

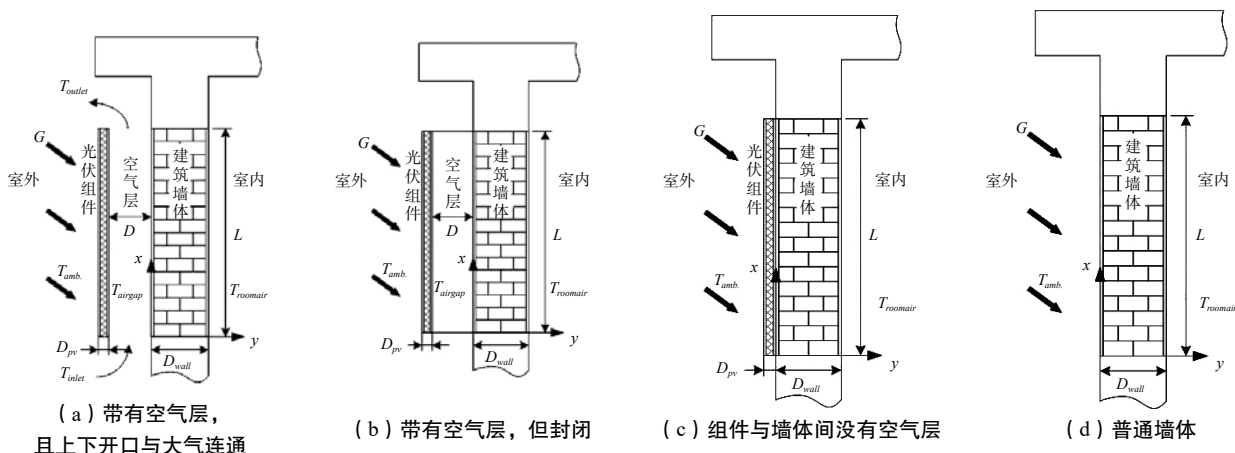


图 2 各类光伏墙和普通墙体结构示意图

和沿 x 方向的传热；从而假设二者内部为一维非稳态传热。

(2) 在计算过程中空气、光伏组件及墙体等材料各向物理性质不变；

(3) 同时空气层内流速在 y 轴方向上的速度分量为 0，且在空气层水平截面上均匀分布。

2.1.1 空气层上下开口的光伏墙

针对光伏组件和墙体之间带有空气层且上下开口与外界空气相连的光伏墙结构，建立如图 2(a) 所示的二维坐标系，其中 x 轴方向为空气流动方向， y 轴垂直于墙体表面面向内，光伏组件下边沿对应的墙面处为坐标原点。光伏组件垂直方向连续安装的高度为 L ，宽度为 W ；光伏组件背面与建筑墙体外表面之间的空气层厚度为 D 。

基于上述假设，对上述中间带有空气层的光伏墙进行热平衡分析，可分为以下三部分：

(1) 光伏组件

光伏组件通过太阳辐射得热，与外界环境及内部墙体外表面进行辐射换热，与室外空气及空气层进行对流换热，同时存在一部分电能输出，其余则变为自身的内能，使得自身温度发生改变。由此，相应的热平衡方程可表述为：

$$C_{pv} M_{pv} \frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = a_{pv}(1-b_{pv})GA - P_e A - h_{pv,out} A(T_{pv,out} - T_{amb}) - Q_{pv,out} - h_{pv,in} A(T_{pv,in} - T_{airgap}) - A\sigma(T_{pv,in}^4 - T_{wall,out}^4)/(1/\epsilon_{pv,in} + 1/\epsilon_{wall,out} - 1) \quad (1)$$

其中，对于光伏组件外表面对流换热系数 $h_{pv,out}$ 的计算，考虑到在白天和夜晚光伏组件与环境之间的温差可能出现正负交替，从而表面空气流动方向有所不同，同时，由于光伏组件外表面为光滑的玻璃面，因此采用以下对流换热系数进行计算：

$$h_{pv,out} = \sqrt{h_n^2 + (2.38V^{0.89})^2} \quad (2)$$

上式中， V 为参考风速，通常取室外高度 10 米处的空气流速； h_n 为自然对流换热系数，当光伏组件外表面温度大于环境温度，即 $T_{pv,out} > T_{amb}$ 时，则光伏组件外表面空气被加热，从而向上流动，此时有：

$$h_n = 9.482 \frac{\sqrt[3]{|T_{pv,out} - T_{amb}|}}{7.328 - |\cos\theta|} \quad (3)$$

当光伏组件外表面温度低于环境温度，即 $T_{pv,out} < T_{amb}$ 时则光伏组件外表面空气被冷却，从而向下流动，此时有：

$$h_n = 1.810 \frac{\sqrt[3]{|T_{pv,out} - T_{amb}|}}{1.382 - |\cos\theta|} \quad (4)$$

式中 θ 为安装倾角，对于本研究中光伏墙， $\theta = 90^\circ$ ，即 $\cos\theta = 0$ 。

对于式 (1) 中 $Q_{pv,out}$ 项，为光伏组件外表面长波辐射损失项，这其中主要包括光伏组件与周围空气、天空及地面间的辐射换热等三部分所产生的热损失，因此可以表述为：

$$Q_{pv,out} = A\epsilon_{pv,out} \sigma [F_{amb}(T_{amb}^4 - T_{pv,out}^4) + F_{sky}(T_{sky}^4 - T_{pv,out}^4) + F_{gro}(T_{gro}^4 - T_{pv,out}^4)] \quad (5)$$

其中，假设地面温度近似等于环境温度，即 $T_{gro} \approx T_{amb}$ ；天空温度 T_{sky} 可以由环境温度 T_{amb} 近似计算得出：

$$T_{sky} = 0.0552 T_{amb}^{1.5} \quad (6)$$

辐射角系数 F_{amb} 、 F_{sky} 和 F_{gro} 取决于光伏组件安装倾

角 θ ，可根据下式计算：

$$F_{sky} = \frac{1 + \cos\theta}{2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), F_{gro} = \frac{1 - \cos\theta}{2}, F_{amb} = 1 - F_{sky} - F_{gro} \quad (7)$$

此处垂直安装，即 $\theta = 90^\circ$ ，则 $F_{sky} = 0.3536$ 、 $F_{gro} = 0.5$ 和 $F_{amb} = 0.1464$ 。

上述各式中：

G 为单位面积光伏组件上的太阳辐射强度 (W/m^2)； A 为光伏组件面积， $A = L \times W$ (m^2)； C_{pv} 为光伏组件的比热容 ($J/(kg \cdot K)$)； a_{pv} 为光伏组件的吸收率，为无量纲量； b_{pv} 为光伏组件表面反射率，为无量纲量； P_e 为光伏组件单位面积电力输出 (W/m^2)； $T_{pv,in}$ 和 $T_{pv,out}$ 分别为光伏组件内外表面温度 (K)； T_{amb} 为室外空气温度 (K)； T_{airgap} 为空气层温度 (K)； σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ($W/(m^2 \cdot K^4)$)； $\epsilon_{pv,out}$ 、 $\epsilon_{pv,in}$ 、 $\epsilon_{wall,out}$ 分别为光伏组件外表面和内表面及建筑墙体外表面的发射率，为无量纲量；对于光伏组件内表面对流换热系数 $h_{pv,in}$ 可采用如下方程进行计算：

$$h_{pv,in} = Nu k_{airgap} / D_h \quad (8)$$

其中努谢尔特准则数 Nu 为：

$$Nu = 5.801 + 0.086 Re D_h / L \quad (9)$$

其中： k_{airgap} 为压力损失系数，为无量纲量； D_h 为空气层沿 x 轴方向流动的水力直径 (m)。

(2) 空气层

在光伏墙中，空气层与光伏组件背板及墙体外表面为垂直夹层的传热过程，因此当空气层宽度 D 与光伏组件连续安装高度 L 的比，即 $D/L > 0.3$ 时，可看作为无限空间中竖直接板间的自然对流换热；当即 $D/L < 0.3$ 时，将可看作为有限空间中竖直接板间的自然对流换热。

当空气层与外界大气相通时，其中流经的空气通过对流换热所得的热量将有一部分被排出的空气带走，而余下的热量将转变为空气内能，使得空气层温度提高，相应的热平衡方程可表述为：

$$C_{air} M_{airgap} \frac{\partial T_{airgap}}{\partial \theta} = h_{pv,in} A(T_{pv} - T_{airgap}) + h_{wall,in} A(T_{wall,out} - T_{airgap}) - C_{air} m_{airgap} (T_{outlet} - T_{inlet}) \quad (10)$$

其中， T_{inlet} 、 T_{outlet} 分别为空气层进出口温度 (K)； $h_{wall,out}$ 为空气层与墙体外表面的对流换热系数，由于两个壁面流态及对流换热规律相似，因此取 $h_{wall,out} = h_{pv,in}$ ； C_{air} 为空气的比热容 ($J/(kg \cdot K)$)。

对于内部空气的流动，由于沿着 x 轴方向空气与光伏组件背板和墙体外表面不断进行换热，上下产生温差，从而形成热压作用；同时，由于建筑周围风场的影响，在空气层中产生风压作用；此外，在二者共同作用下的流动过程中，在进出口处和流道内还分别存在局部阻力和沿程阻力。其中局部气流组织情况与空气层的设计方式、尺寸以及内部构造情况有着密切的关系，如内部支吊架的布置，所以流动情况存在一定的复杂度。在此作出简化，对于空气层中空气的平均质量流速可用下式计算：

$$m_{airgap} = \rho_{air} A_x \sqrt{\frac{2\psi(T_{outlet} - T_{inlet})Lg \sin\theta + \zeta V}{K_{inlet} + K_{outlet} + fL/D_h}} (T_{inlet} + T_{outlet})/2 \quad (11)$$

其中， A_x 为空气层以 x 轴为法向的截面积， $A_x = D \times W$ (m^2)； ψ 为空气热膨胀系数，通常取 $\psi = 0.00335$ ($1/K$)；

f 为空气层中的沿程阻力系数, 为无量纲量; K_{inlet} , K_{outlet} 分别为进出口局部阻力系数, 为无量纲量; ζ 为风压系数, 通常取 $\zeta=0.25$ 。

(3) 建筑墙体

对建筑墙体的内能的影响, 主要来自于室外太阳辐射、墙体内外两侧的对流换热和辐射等几部分, 相应的能量平衡方程可表示为:

$$C_{wall}M_{wall}\frac{\partial T_{wall}}{\partial \tau}=G-h_{wall,out}A(T_{wall,out}-T_{airgap})-\sigma A(T_{wall,out}^4-T_{wall,in}^4)(1/\varepsilon_{pv,in}+1/\varepsilon_{wall}-1)-\sigma A(T_{wall,out}^4-T_{pv,in}^4)(1/\varepsilon_{pv,in}+1/\varepsilon_{wall,out}-1)-h_{wall,in}A(T_{wall,in}-T_{roomair})-\varepsilon_{wall,in}\sigma A(T_{wall,in}^4-T_{roomsurface}^4) \quad (12)$$

其中, $T_{roomair}$ 为室内温度, 作为初始输入参数, 计算时其值取夏季和冬季不同城市的供暖空调室内设计温度; $T_{roomsurface}$ 为室内其他墙面及物体表面温度, 近似有 $T_{roomsurface} \approx T_{roomair}$; $h_{wall,in}$ 为墙体内部表面与室内空气的换热系数, 通常取 $h_{wall,in}=8.7W/(m^2 \cdot K)$; M_{wall} 为墙体质量 (kg); C_{wall} 为墙体的比热容 ($J/(kg \cdot K)$); $\varepsilon_{wall,in}$ 为墙体内部表面发射率, 为无量纲量。

但同时根据假设 (1), 墙体内部传热可看作是一维非稳态过程, 传热方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}=\frac{\lambda_{wall}}{\rho_{wall}C_{wall}}\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (13)$$

其中, λ_{wall} 为墙体导热系数 ($W/(m \cdot K)$); ρ_{wall} 为墙体密度 (kg/m^3)。

该方程的初始条件为:

$$T_{\tau=0}=T_0(y) \quad (14)$$

该方程的边界条件如下:

对于墙体外表面:

$$-\lambda_{wall}\frac{\partial T}{\partial t}|_{y=0}=h_{wall,out}(T_{wall,out}-T_{airgap})+(T_{wall,out}^4-T_{wall,in}^4) \cdot (1/\varepsilon_{pv,in}+1/\varepsilon_{wall,out}-1) \quad (15)$$

对于墙体内部表面:

$$-\lambda_{wall}\frac{\partial T}{\partial t}|_{y=D_{wall}}=h_{wall,in}(T_{wall,in}-T_{roomair})+\sigma\sum_{j=1}^nF_{wall-room,j}(T_{wall,in}^4-T_{room,j}^4) \quad (16)$$

当 $T_{room,j} \approx T_{roomair}$ ($j=1 \sim n$) 时, 则可以对上式进行简化:

$$-\lambda_{wall}\frac{\partial T}{\partial t}|_{y=D_{wall}}=\alpha_n(T_{wall,in}-T_{room}) \quad (17)$$

其中, $F_{wall-room,j}$ 为墙体内部表面对室内其他表面的角系数; $T_{room,j}$ 为室内第 j 个表面的温度 (K); D_{wall} 为墙体在 y 轴方向的厚度 (m); α_n 为综合对流和辐射的总传热系数 ($W/(m^2 \cdot K)$)。

2.1.2 空气层封闭的光伏墙

空气层封闭不与大气相通的光伏墙与上述可流通的形式, 在传热机理方面基本相似, 不同之处在于: (1) 在公式 (10) 中, 由于空气层是封闭的, 因此不存在最后一项 “ $-C_{air}m_{airgap}(T_{outlet}-T_{inlet})$ ”, 即不存在流出的空气带走的热量; (2) 在公式 (9) 中对于空气层中空气与光伏组件背板及墙体外表面对流换热系数计算时涉及到的努谢尔特

准则数 Nu 可以由下式计算^[6]:

$$Nu=1+1.44[1-\frac{1708(\sin 1.8\theta)^{1/6}}{Racos\theta}][1-\frac{1708}{Racos\theta}]^*+[(\frac{Racos\theta}{5830})^{1/3}-1]^* \quad (18)$$

其中, * 所标出的项如果为正时才可用, 当为负值时可取 0。同时需要指出的是, 上式可用于 θ 为 $0^\circ \sim 75^\circ$ 时的计算。对于光伏墙, $\theta=90^\circ$ 时根据 Tabor (1958) 的方法计算显示, 此时趋近于 $\theta=75^\circ$ 时的计算结果。因此对于垂直的光伏墙推荐采用 $\theta=75^\circ$ 计算的计算值。

对于瑞利数 Ra , 可通过下式计算:

$$Ra=\frac{g\psi(T_{upper}-T_{bottom})D^3}{\mu\zeta} \quad (19)$$

其中, T_{bottom} 空气层底部温度, 计算时近似等于环境温度, 即, $T_{bottom} \approx T_{amb}$ (K); T_{upper} 为空气层顶部温度 (K); g 为重力加速度 (m/s^2); μ 为空气层中空气的动力粘度 ($Pa \cdot s$); ζ 为空气层中空气的热扩散系数, 为无量纲量。

对于建筑墙体中的传热, 空气层封闭的和开敞式的在传热方程和边界条件等方面均相同, 可以采用公式 (12) ~ (16) 进行计算。

2.1.3 无空气层的光伏墙

没有空气层的光伏墙相对于有空气层的光伏墙来说要简单的多, 在这种情况下, 公式 (1) 中光伏组件的热平衡方程中内表面与空气层的对流换热项及与墙体外表面的辐射换热项将被省去, 而增加了组件与墙体的热传导项。

同时, 在公式 (15) 中, 对于墙体的外表面也减少了对流换热项和辐射换热项, 而变为导热项。

对于墙体内部表面的边界条件, 则与有空气层的形式相同, 仍采用公式 (17)。

2.1.4 普通墙体

对于普通墙体, 只有单层材料, 等同于将带有空气层的光伏墙中的光伏组件外表面看作为建筑墙体外表面, 墙体内部表面传热形式不变, 中间不存在其他形式的换热, 只有单一材料的内部导热, 则其热平衡方程为:

$$C_{wall}M_{wall}\frac{\partial T_{wall}}{\partial \tau}=\alpha_{wall,in}(1-\beta_{wall,out})GA-h_{wall,out}A(T_{wall,out}-T_{amb.})-Q_{wall,out}-h_{wall,in}A(T_{wall,in}-T_{roomair})-\varepsilon_{wall,in}\sigma A(T_{wall,in}^4-T_{roomsurface}^4) \quad (20)$$

其中, $\alpha_{wall,out}$ 为墙体表面的吸收率, 为无量纲量; $\beta_{wall,out}$ 为墙体表面反射率, 为无量纲量; 在此种情况下, 对于墙体外表面与外界空气间的对流换热系数 $h_{wall,out}$, 则可按公式 (2) ~ (4)

对于墙体外表面长波辐射损失项 $Q_{wall,out}$, 同样可按照公式 (5) 的形式计算:

此时, 对于普通墙体一维非稳态传热方程的外表面边界条件则为:

$$-\lambda_{wall}\frac{\partial T}{\partial t}|_{y=0}=\alpha_{wall,out}(1-\beta_{wall})G+h_{wall}(T_{wall,out}-T_{amb.})+Q_{wall,out}/A \quad (21)$$

墙体内部表面的边界条件与有空气层的光伏墙内部表面相同, 仍可采用公式 (17) 的形式。

2.2 各部位温度计算

对于中间存在空气层的光伏墙体, 根据上述实验研究的结论, 空气层中温度在垂直方向上的变化并不能简单的

假设为线性的, 如果通过平均温度的方法, 简单的看成是沿着 y 轴方向的一维传热问题, 将会存在一定的误差。

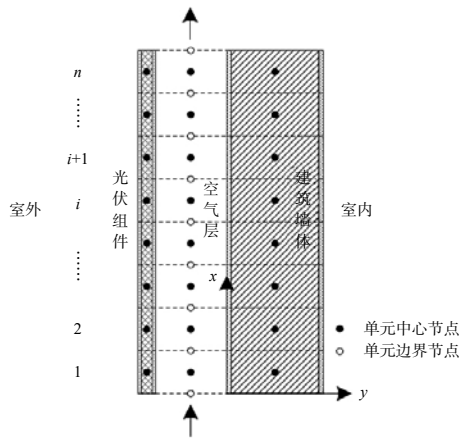


图3 带有空气层的光伏墙垂直方向上控制单元划分示意图

因此, 在本研究中, 针对这两种光伏墙体, 拟根据上述对光伏墙各部分的热平衡分析, 通过对相应墙体在垂直方向上划分出多个一维非稳态传热方程的求解单元, 计算出相应墙体的得热量。具体为在墙体一维非稳态传热方程求解的基础上, 通过控制体积法将相应的计算域在垂直方向上划分为 n 个连续的体积单元, 在每个体积单元中设置相应的网格节点而后分别求解来实现, 如图3所示。

因此, 对于上下开口的空气层, 根据式(10), 则对于每一个控制单元相应的热平衡方程可表述为:

$$C_{air} M_{airgap} \frac{\partial T_{airgap,i}}{\partial \tau} = h_{pv,in} A_i (T_{pv,i} - T_{airgap,i}) + h_{wall,out} A_i (T_{wall,out,i} - T_{airgap,i}) - C_{air} m_{airgap} (T_{outlet,i} - T_{inlet,i}) \quad (22)$$

其中, $T_{inlet,i}$, $T_{outlet,i}$ 分别表示第 i 个控制单元进出口温度, $T_{inlet,i} = T_{outlet,i-1}$; 对于从底部计数的第一个控制单元 $T_{inlet,1}$ 近似等于环境温度, 即, $T_{inlet,1} \approx T_{amb}$ (K); 由于在对控制单元划分时, 其在 x 轴方向的长度 L_i 远小于在 y 轴方向上的长度 D_i , 因此对于整个单元内空气的温度 $T_{airgap,i} = (T_{inlet,i} + T_{outlet,i})/2$ (K); A_i 为单元中垂直方向上的面积, $A_i = L_i \times W$ (m^2)。

同样, 对于控制单元中的光伏组件和建筑墙体, 根据式(1)和式(12)也存在如下的平衡方程:

$$C_{pv} M_{pv} \frac{\partial T_{pv,i}}{\partial \tau} = \alpha_{pv} (1 - \beta_{pv}) G A_i - p_e A_i - h_{pv,out} A_i (T_{pv,out,i} - T_{amb}) - Q_{pv,out,i} - h_{pv,in} A_i (T_{pv,in,i} - T_{airgap,i}) - A_i \sigma (T_{pv,in,i}^4 - T_{wall,out,i}^4) / (1/\epsilon_{pv,in} + 1/\epsilon_{pv,out} - 1) \quad (23)$$

$$C_{wall} M_{wall} \frac{\partial T_{wall,i}}{\partial \tau} = G - h_{wall,out} A_i (T_{wall,out,i} - T_{airgap,i}) - \sigma A_i (T_{wall,out,i}^4 - T_{pv,in,i}^4) (1/\epsilon_{pv,in} + 1/\epsilon_{wall,out} - 1) - h_{wall,in} A_i (T_{wall,in,i} - T_{roomair}) - \epsilon_{wall,in} \sigma A_i (T_{wall,in,i}^4 - T_{roomsurface}^4) \quad (24)$$

其中各字母含义与上述公式相同, 增加的下标 i 代表第 i 个控制单元。

因此, 根据式(22)~式(24), 基于有限差分法进

行数值求解, 则相应的离散方程可表述为:

(1) 开口空气层控制单元边界节点温度 $T_{outlet,i}^{k+1}$:

$$T_{outlet,i}^{k+1} = -T_{inlet,i}^{k+1} + [1 + \frac{2m_{airgap}\Delta t}{\rho_{air}DW\Delta x} - \frac{\Delta t}{\rho_{air}C_{air}D} (h_{pv,in} + h_{wall,out})] T_{inlet,i}^k + [1 - \frac{2m_{airgap}\Delta t}{\rho_{air}DW\Delta x} - \frac{\Delta t}{\rho_{air}C_{air}D} (h_{pv,in} + h_{wall,out})] T_{inlet,i}^k + \frac{2\Delta t}{\rho_{air}C_{air}D} (h_{pv,in}T_{pv,in,i}^k + h_{wall,out}T_{wall,out,i}^k) \quad (25)$$

(2) 光伏组件控制单元中心节点温度 $T_{pv,i}^{k+1}$:

$$T_{pv,i}^{k+1} = T_{pv,i}^k + \frac{\alpha_{pv}(1-\beta_{pv})G\Delta t}{C_{pv}\rho_{pv}D_{pv}} - \frac{h_{pv,out}\Delta t}{C_{pv}\rho_{pv}D_{pv}} (T_{pv,out,i}^k - T_{amb}) - \frac{Q_{pv,out,i}\Delta t}{C_{pv}\rho_{pv}D_{pv}W\Delta x} - \frac{h_{pv,in}\Delta t}{C_{pv}\rho_{pv}D_{pv}} (T_{pv,in,i}^k - T_{airgap,i}^k) - \frac{\sigma\Delta t((T_{pv,in,i}^k)^4 - (T_{wall,out,i}^k)^4)}{C_{pv}\rho_{pv}D_{pv}(1/\epsilon_{pv,in} + 1/\epsilon_{wall,out} - 1)} \quad (26)$$

(3) 建筑墙体控制单元中心节点温度 $T_{wall,i}^{k+1}$:

$$T_{wall,i}^{k+1} = T_{wall,i}^k + \frac{G\Delta t}{C_{wall}\rho_{wall}D_{wall}W\Delta x} - \frac{h_{wall,out}\Delta t}{C_{wall}\rho_{wall}D_{wall}} (T_{wall,out,i}^k - T_{airgap,i}^k) - \frac{\sigma\Delta t((T_{wall,out,i}^k)^4 - (T_{pv,in,i}^k)^4)}{C_{wall}\rho_{wall}D_{wall}(1/\epsilon_{pv,in} + 1/\epsilon_{wall,out} - 1)} - \frac{h_{wall,in}\Delta t}{C_{wall}\rho_{wall}D_{wall}} (T_{wall,in,i}^k - T_{roomair}^k) - \frac{\epsilon_{wall,in}\sigma\Delta t((T_{wall,in,i}^k)^4 - T_{roomsurface}^4)}{C_{wall}\rho_{wall}D_{wall}} \quad (27)$$

其中, 上标 k 为离散方程中代表时间点的符号; Δt 为时间差分; Δx 为沿着 x 轴方向的空间坐标差分。

对于空气层封闭的光伏墙, 光伏组件和建筑墙体的离散方程在表述形式上与开口的一致, 仅在空气层的离散方程上存在差异, 即封闭空气层控制单元边界节点温度 $T_{outlet,i}^{k+1}$:

$$T_{outlet,i}^{k+1} = -T_{inlet,i}^{k+1} + [1 - \frac{\Delta t}{\rho_{air}C_{air}D} (h_{pv,in} + h_{wall,out})] T_{inlet,i}^k + [1 - \frac{\Delta t}{\rho_{air}C_{air}D} (h_{pv,in} + h_{wall,out})] T_{outlet,i}^k + \frac{2\Delta t}{\rho_{air}C_{air}D} (h_{pv,in}T_{pv,in,i}^k + h_{wall,out}T_{wall,out,i}^k) \quad (28)$$

表1 计算中所涉及到的各类材料热性能参数

	材料名称	导热率 λ W/(m·K)	密度 ρ Kg/m ³	比热 C J/(kg·K)	厚度 d mm
光伏组件 ^[7]	多层材料	0.5868	1444	1229	10
铝包边	铝型材	237	2719	871	2
实验小屋墙体/ 香港普通墙体	水泥砂浆 δ_1	0.72	1860	1050	10
	混凝土 δ_2	1.73	2400	840	150
	内饰层 δ_3	0.38	1120	840	10
长沙普通墙体	水泥砂浆 δ_1	0.93	1800	1050	10
	多孔砖 δ_2	0.58	1400	1062.3	240
	内饰层 δ_3	0.81	1600	1050	10
北京普通墙体	水泥砂浆 δ_1	0.93	1800	1050	10
	加气混凝土砌块 δ_2	0.2	500	1461.4	300
	内饰层 δ_3	0.81	1600	1050	10

3 结果与分析

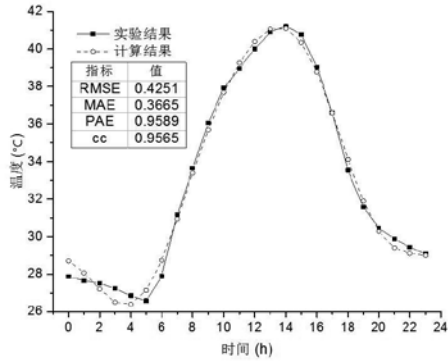
以下为各种光伏墙和普通墙体各部位温度计算结果和实验测试值的对比:

(1) 空气层上下开口的光伏墙

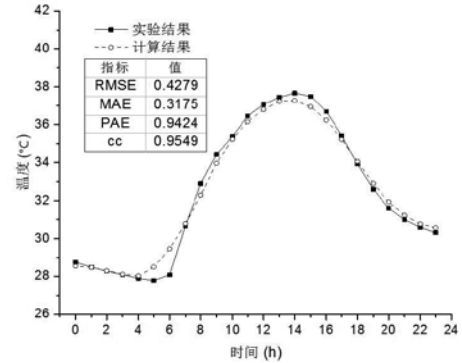
如图4所示, 光伏组件背板温度和开口空气层的温度计算与实验值间误差相对较大, 主要出现在拐点处。

(2) 空气层封闭的光伏墙

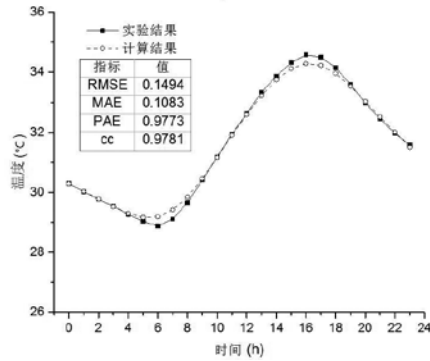
如图5所示, 空气层封闭的光伏墙各表面温度计算值



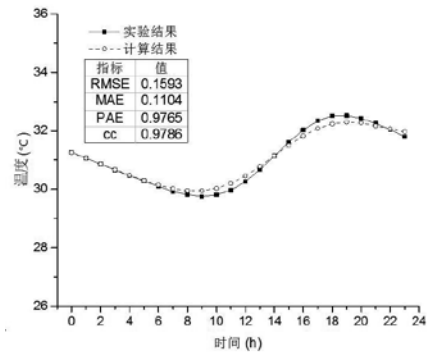
(a) 光伏组件背板温度



(b) 开口空气层温度

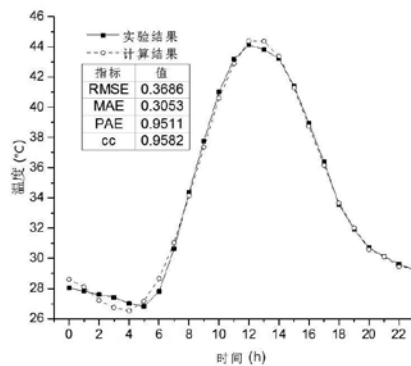


(c) 墙体外表面温度

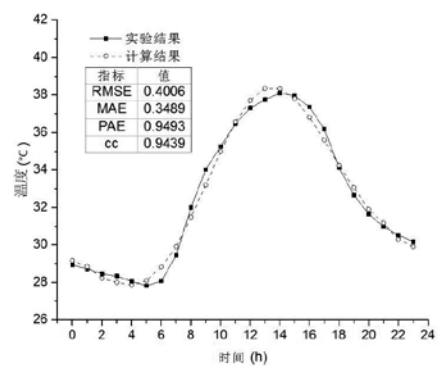


(d) 墙体内表面温度

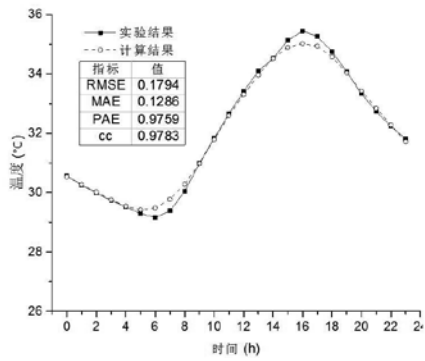
图4 空气层上下开口的光伏墙各表面温度计算结果与实验对比



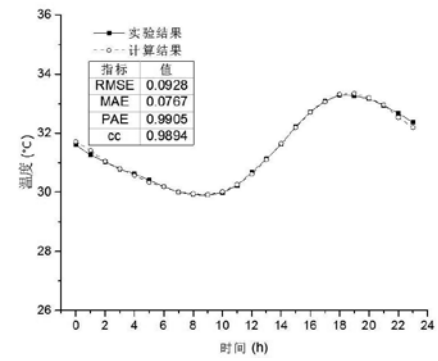
(a) 光伏组件背板温度



(b) 封闭空气层温度



(c) 墙体外表面温度



(d) 墙体内表面温度

图5 空气层封闭的光伏墙各表面温度计算与实验结果对比

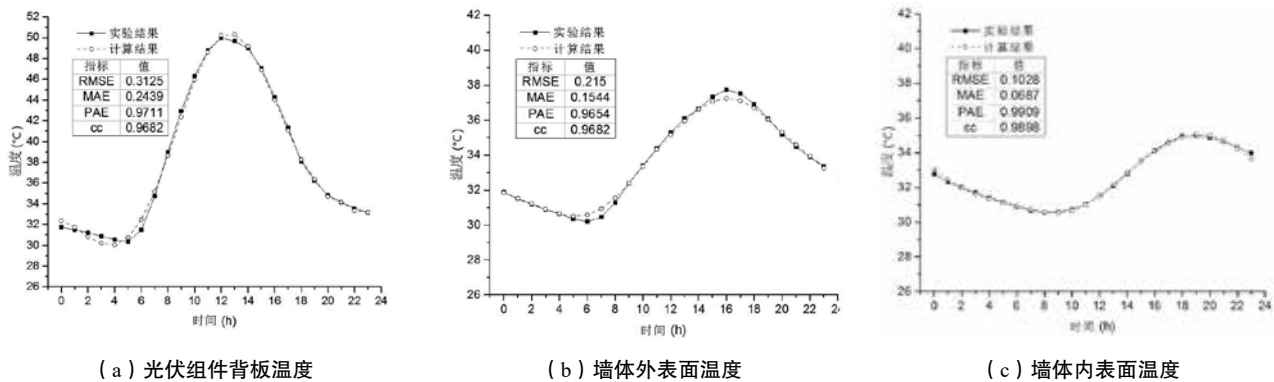


图6 无空气层的光伏墙各表面温度计算与实验结果对比

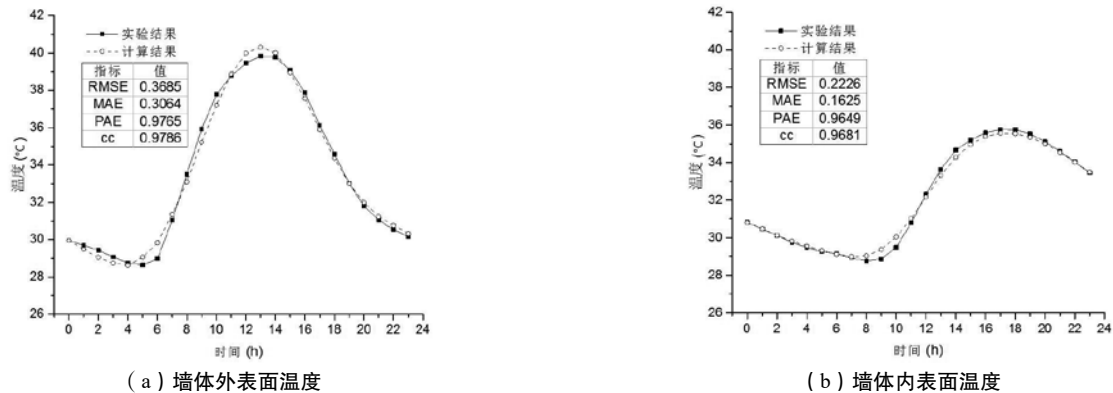


图7 普通墙体内外表面温度计算与实验结果对比

与实验值间的误差略小于上述空气层开口的光伏墙。光伏组件背板温度误差主要在夜间到早晨日出时和午后。

(3) 无空气层光伏墙

如图6所示,无空气层的光伏墙各表面温度计算结果与实验结果间的吻合度明显高于上述空气层封闭的光伏墙。

(4) 普通墙体

如图7所示,普通墙体内外表面温度的计算结果与实验结果有较好的吻合度。明显的误差同样是出现在温度最小值和最大值的拐点处。

对于上述多种墙体计算结果和实验结果均在早晨日出时和午后出现相对较大的误差,分析可能是由于计算时作了相应的简化,并没有区分太阳辐射中的直射和散射所引起的。在早晨日出时和午后太阳辐射强度明显降低时,直射和散射辐射的构成比发生较大的变化,直射和散射辐射中光谱构成不同,所以导致光伏组件或墙体对不同时刻太阳辐射得热量吸收不同,因此对光伏组件背板温度产生相对较大的误差,经过传递,使得空气层和墙体外表面出现同样的误差,对此有待进一步研究。

4 结论

综合以上四种墙体各部位温度计算结果和实验结果的对比情况,可见二者能够较好的吻合。由此可以认为,本文采用控制体积法,考虑了各类光伏墙在垂直方向上的温度梯度分布的影响,对现有一维非稳态传热模型改进后的新模型,应用于上述几种不同结构光伏墙热性能模拟计算,具有一定的准确性。

参考文献

- [1] 杨洪兴, 季杰. BIPV 对建筑墙体得热影响的研究 [J]. 太阳能学报, 1999,03:270-273.
- [2] Yang H. X., John B., Ji J.. Simple approach to cooling load component calculation through PV walls. Energy and Buildings, 2000, 31(3):285-290.
- [3] M.J. Jimenez, H. Madsen, J.J. Bloem, et al. Estimation of non-linear continuous time models for the heat exchange dynamics of building integrated photovoltaic modules. Energy and Buildings, 2008, 40:157-167.
- [4] Lee E. High-Performance Commercial Building Facades. Building technologies Program, Environment Energy technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California Berkeley, USA (LBNL-50502).
- [5] Nynne Friling, Maria Jose Jimenez, Hans Bloem et al. Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules. Energy and Buildings, 2009, 41:1051-1057.
- [6] Duffie J A, Beckman W A, Solar Engineering of Thermal Processes 4th ed. Wiley-Inter science, 2013.
- [7] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 1996. Introduction to Heat Transfer, third ed. John Wiley and Sons Inc., United States.

长途巴士中通风和感染源位置对飞沫扩散机制的影响研究

任巧玲, 刘田颖, 杭建

(中山大学, 广东广州 510006)

[摘要] 长途巴士内置空调且为封闭空间, 空气主要在内部流通, 呼吸道传染病极易在这样的密闭环境中传播。加上车内人员多而杂, 乘客间的距离通常小于 1m, 且在车厢内停留时间长达数小时, 大大增加了传染几率。本文利用 CFD 数值模拟长途巴士内部流场, 在考虑了座椅和行李架的阻碍、人的呼吸及人体散热对空气流动的促进作用的情况下, 研究了空调风速、风向及感染源位置对车内病毒气溶胶飞沫扩散的影响, 以更好地预防和控制呼吸道传染病在长途巴士中的传播。实验结果表明, 通风对细颗粒气溶胶飞沫的扩散有很大影响, 当空调风速较小或空调斜吹时, 悬浮的飞沫数量增多。而粗颗粒气溶胶飞沫在不同的通风情况下均是沉积于感染源周围, 扩散范围不大。

[关键词] CFD; 长途巴士; 通风; 飞沫扩散

0 引言

悬浮在气体(如空气)中含有病毒的液态或固态微粒称为病毒气溶胶(车风翔, 1992)。近几年, 新发呼吸道病毒传染病, 如 SARS、禽流感、甲型 H1N1 流感等成为公共卫生的重大威胁。当患者呼吸、咳嗽和打喷嚏时, 飞沫(气溶胶液滴, 直径在 $1\mu\text{m}$ 到 $100\mu\text{m}$ 之间)从人的口、鼻中释放出来, 从而感染人群(周晓瑜, 施玮, 宋伟民等, 2005)。由此可见病毒气溶胶飞沫在室内传播扩散机制对预防和控制病毒性呼吸道传染病的重要性。

随着城市化以及城镇化进程的加快, 城际和市郊的交通需求持续增长, 长途巴士以其高速、舒适、覆盖率高以及交通需求高等优势逐渐趋向公交化。而长途巴士因内置空调且为封闭空间, 空气主要在内部流通, 车内人员多而杂, 人与人之间的距离通常小于 1m, 且乘客在车厢内停留时间较长, 可达数小时, 病毒性呼吸道传染病极易在这样的密闭环境下传播。由此可见研究长途巴士中的飞沫扩散机制的必要性与紧迫性。然而目前关于室内病毒性气溶胶扩散机制的研究主要都集中在医院病房、飞机客舱、高铁上。如 Sagnik Mazumdar 等人研究了飞机中移动的人体对飞沫扩散效果影响(Mazumdar, 2011), Jitendra K.Gupta 等人数值模拟了患病乘客的咳嗽和呼吸运动对疾病传播的影响(Jitendra, 2011), 张磊等人则考察了高铁列车中患者的咳嗽对疾病传播的影响(Zhang, 2012), 中国香港的李玉国研究小组则对气溶胶飞沫的大小、传播距离、飞沫的蒸发、SARS 多床病房的气流分布、颗粒浓度情况进行了较系统的研究(Yuguo Li, 2010)。

因此, 本文利用 CFD 方法对载有乘客的长途巴士进行了数值模拟研究。考虑了巴士通风系统、座椅及行李架对车内空气流动的阻碍作用、人的呼吸及人体散热等对其周围空气流动的影响(自然情况下, 人体周围空气因人体散热而向上流动, 称为热羽流)的情况下, 用不同直径($5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$)的颗粒物模拟携带有病毒的飞沫, 研究不同空调送风模式及感染源(传染病患者)位置对不同大小飞沫扩散的影响, 通过统计飞沫最后的状态(沉积、悬浮、逃逸)以及各个区域悬浮和沉积的飞沫数量, 预测周围乘客感染几率, 进而有效地进行病毒性呼吸道传染病的预防、控制、检测与隔离。为此, 本文设置了以下 9 个案例(表 1)。巴士内部结构、感染源位置编号及巴士内区域划分对照图 1。

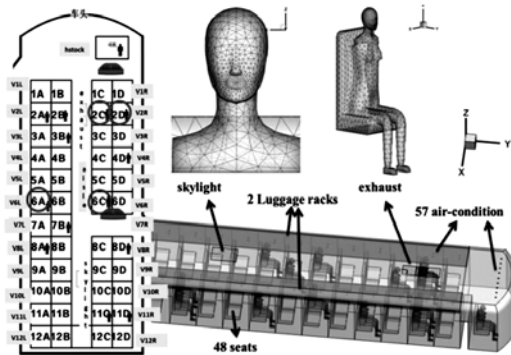


图 1 模型总览

表 1 各具体算例条件设置

算例名称	ACH	空调风矢量	感染源位置	试验目的
Base-6A	8.6	(0, 0, -1) 竖直向下	6A 空调下方, 离排风机远	探究空调风速对飞沫扩散的影响
Wind0.5	4.3	(0, 0, -1)	6A	
Windnx	8.6	(-1, 0, -1) 吹向左墙	6A	
Windny	8.6	(0, -1, -1) 吹向车尾	6A	
Windpx	8.6	(1, 0, -1) 吹向过道	6A	
Windpy	8.6	(0, 1, -1) 吹向车头	6A	
2C	8.6	(0, 0, -1)	2C 离空调远, 离排风机近	结合 Base-6A, 探究不同感染源位置对飞沫扩散的影响
2D	8.6	(0, 0, -1)	2D 空调下方, 离排风机近	
6C	8.6	(0, 0, -1)	6C 离空调远, 离排风机远	

注: ACH 指 Air Exchange Rate, 空气置换率, 单位: 次/小时

图1为模型总览(右边三幅图是巴士模型和人体模型)(左图中灰色方框圈的是区域编号,共分为27个区域,其中roof区域未在图中标出)(未用方框圈出的是座位编号,红色圆圈是对照试验中感染源位置,黑色小人代表乘客分布)

1 数值模型的建立

本文以2015年5月26日韩国MERS患者所乘坐的广州至惠州的长途巴士为原型建立了一个长11.63m(Y轴),宽2.6m(X轴),高2m(Z轴)的模型,内设行李架、座位、空调口以及逼真的人体模型。采用四面体非结构化网格,网格间距参数如图2所示。

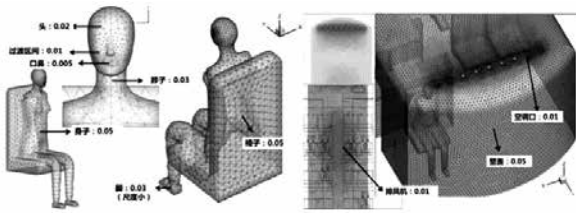


图2 模型网格间距参数

计算流场时,采用RANS中的RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型及标准壁面方程(Standard Wall Functions)。使用Boussinesq模式以考虑浮力效应。所有的运动、传输方程均使用有限体积方法求解,并采用二阶方案计算。同时选用SIMPLE方案耦合压力和速度并考虑热力学因素。表2显示了流场中各边界条件的设置。

表2 流场中边界条件设置

空调口	velocity inlet, 在Wind0.5算例中风速为1.5m/s,其他算例中风速为3m/s; 不同算例中的风向如表1所示,温度为17°C,湍流强度10%,水力直径0.0342857m
嘴巴和鼻子	Velocity inlet, 呼吸速率0.12m/s,温度30°C湍流强度10%,水力直径0.027m
排风机	Outflow
天窗	No slip wall, 热通量为0
人体表面	No slip wall, 乘客(睡觉)热通量为26W/m ² ,司机(清醒)热通量为58.5W/m ²
墙壁、行李架	no slip wall

表3-1 颗粒物最终状态百分比(总数是137600,标黄的是数值最大的)

	Base-6A		Wind0.5		Windnx		Windpx		Windpy		Windpy		2C		2D		6C	
	5 μ m	50 μ m	5 μ m	50 μ m	5 μ m	50 μ m	5 μ m	50 μ m	5 μ m	50 μ m	5 μ m	50 μ m	5 μ m	50 μ m	5 μ m	50 μ m	5 μ m	50 μ m
悬浮	4.99%	2.18%	10.97%	1.35%	7.72%	1.51%	12.59%	2.19%	4.78%	0.54%	3.73%	2.84%	1.89%	2.10%	3.33%	0.76%	7.31%	1.48%
逃逸	11.73%	0.00%	12.31%	0.00%	11.98%	0.00%	10.05%	0.00%	2.20%	0.00%	4.75%	0.00%	61.42%	23.34%	13.98%	0.28%	5.76%	0.00%
沉积	83.29%	97.82%	76.72%	98.65%	80.30%	98.49%	77.36%	97.81%	93.02%	99.46%	91.52%	97.16%	36.69%	74.55%	82.69%	98.96%	86.93%	98.52%

表3-2 悬浮在各个区域的颗粒物数量(加粗且划下划线的是感染源所在区域,标黄的是除感染源区域外数量较多的区域)

	Base-6A	Wind0.5	Windnx	Windpx	Windpy	2C	2D	6C
name	Sum	Sum	Sum	Sum	Sum	Sum	Sum	Sum
passenger	7.04%	3.41%	2.81%	6.13%	1.87%	3.57%	5.96%	1.25%
passenger	11.82%	27.93%	17.82%	65.76%	9.56%	48.42%	3.89%	27.25%
seat	28.56%	17.42%	12.67%	17.86%	26.43%	28.77%	40.26%	21.65%
floor	22.62%	18.09%	14.29%	11.86%	2.84%	18.38%	17.83%	15.22%
wall	89.89%	22.57%	13.24%	6.32%	55.12%	7.97%	33.33%	32.41%
roof	11.96%	13.92%	10.56%	17.74%	17.05%	13.11%	15.94%	13.05%
door	1.20%	1.00%	0.79%	1.26%	1.14%	0.41%	0.91%	0.88%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
light	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
vent	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
door	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
chair	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
baggage	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%
air	1.90%	0.33%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%	0.19%

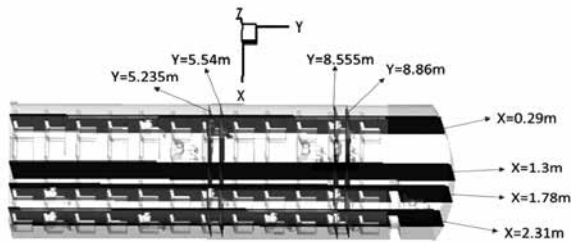


图 3-1 切面位置三位示意图

图注:

X=0.29m 为感染源 6A 所在的 YZ 平面; X=1.3m 为通过排风机口的过道所在 YZ 平面;

X=1.78m 为乘客 2C 所在的 YZ 平面; X=2.31m 为乘客 2D 所在的 YZ 平面;

Y=5.235m 为对感染源 6A 所在的 XZ 平面; Y=5.54m 为感染源 6A、乘客 6C 前面空调口所在的 XZ 平面;

Y=8.555m 为乘客 2C、2D 所在的 XZ 平面; Y=8.86m 为乘客 2C、2D 前面空调口所在的 XZ 平面。

趋于不明显。颗粒物悬浮数量最多的区域主要为车厢顶部及过道, $50\mu\text{m}$ 颗粒物主要悬浮区由 Base-6A 中 V7L 区域变为 V5L 区域 (表 3-2)。颗粒物沉积数量较多的乘客均变为 6C (除病原体外)。由图 3-2 (a3) (b3) (c3), 当风吹向过道时, 人体热羽流明显, 因此悬浮状态颗粒物所占比例明显增大。对于细小颗粒物, 随着人体周围向上的气流同时向前输送, 加上空调风向的影响, 使其向右前方输送。但对于 $50\mu\text{m}$ 颗粒物, 由于重力影响大, 在人体前方斜向过道下沉, 使其主要落于过道对面的乘客 6C 体表。

表 3-2 中加粗且双划线的是感染源, 标黄的是除感染源外沉积数量大于 500 的乘客。

当风吹向左墙 (Windnx) 时, 细颗粒物悬浮比例均有所增大, 沉积比例稍有下降, $50\mu\text{m}$ 颗粒物悬浮比例则明

显减小, 沉积比例稍有升高 (表 3-1)。与 Base-6A 相比, 悬浮细颗粒物数量最多的区域无明显改变, 但数量明显增多; 而 $50\mu\text{m}$ 颗粒物浓度主要悬浮区由 V7L 变为 V5L, 且数量显著减少 (表 3-2)。细颗粒物沉积数量最多的乘客分别变为 3B、3B 和 4D。而 $50\mu\text{m}$ 颗粒物沉积数量最多的乘客 (除感染源外) 由 7B 变为 6C (表 3-3)。结合图 3-2 (a4) (b4) (c4), 人体周围几乎都是上升气流, 但没有算例 Windpx 明显, 因此悬浮状态颗粒物所占比例与 Baes-6A 相比稍有增大。同时由于风吹向墙壁, 使得细小颗粒物的主要落区由地板变成了墙壁。对于 $50\mu\text{m}$ 颗粒物, 因由空调风引起的环流形势的变化, 使其沉积于感染源体表及乘客 6C 体表的数目大大增加。

当风吹向车头时 (Windpy) 时, 颗粒物悬浮比例除 $5\mu\text{m}$ 外均有所增大, 沉积数量也大大增加, 而逃逸的颗粒物比例大大减小 (表 3-1)。与 Base-6A 相比, 悬浮细颗粒物数量最大区域无明显改变, 而 $50\mu\text{m}$ 颗粒物主要悬浮区由 V7L 变为 V5L (表 3-2)。颗粒物主要落区均变为座椅, 且对于细颗粒五比重达 70% 以上 (表 3-3)。 $5\mu\text{m}$ 颗粒物主要向正前方运动, 因此主要悬浮区除 V6L 外, 还有 V5L, 向前运动的悬浮颗粒物由于座椅的阻挡作用而层层递减, 因此悬浮的颗粒物数目有所减少, 沉积颗粒物也主要落在座椅上。对于大颗粒物, 由于重力作用比较明显, 因此大部分都被挡在了前方的座椅背后, 使运动路径发生了转向, 使得沉积数量最多的由乘客 7B 变成了乘客 6C。

当风吹向车尾 (Windny) 时, 与 Base-6A 相比, 悬浮颗粒物数量均下降, 沉积状态颗粒物占比均增大。悬浮颗粒物数量最大区域变为 V7L, 颗粒物主要落区变为座椅。沉积数量最多的乘客均变为 8A。 $50\mu\text{m}$ 颗粒物沉积数量最多的依旧为乘客 7B, 但数量急剧减少。人体前后和座椅下都出现了一个逆时针微尺度环流, 使得颗粒物极易在座位上积聚, 而不易被气流向上带出从而排出车厢外, 因此逸出车厢外的颗粒物是所有案例中最少的。

2.3 感染源位置对颗粒物扩散的影响

当感染源离排风机近且离空调远 (算例 2C) 时, 逃

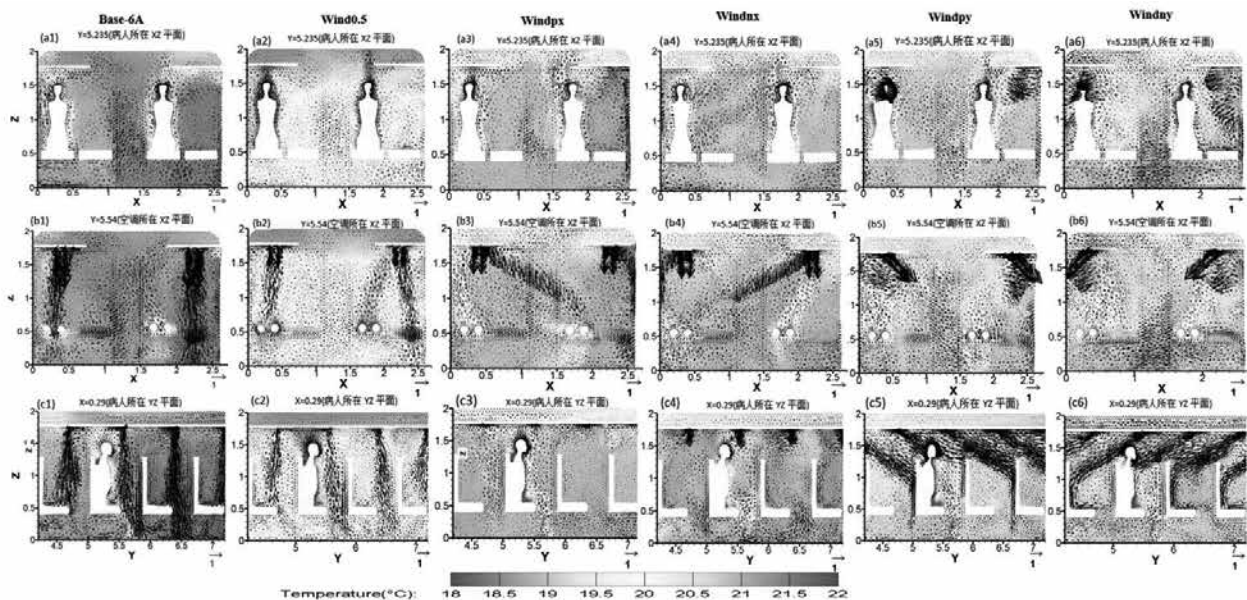
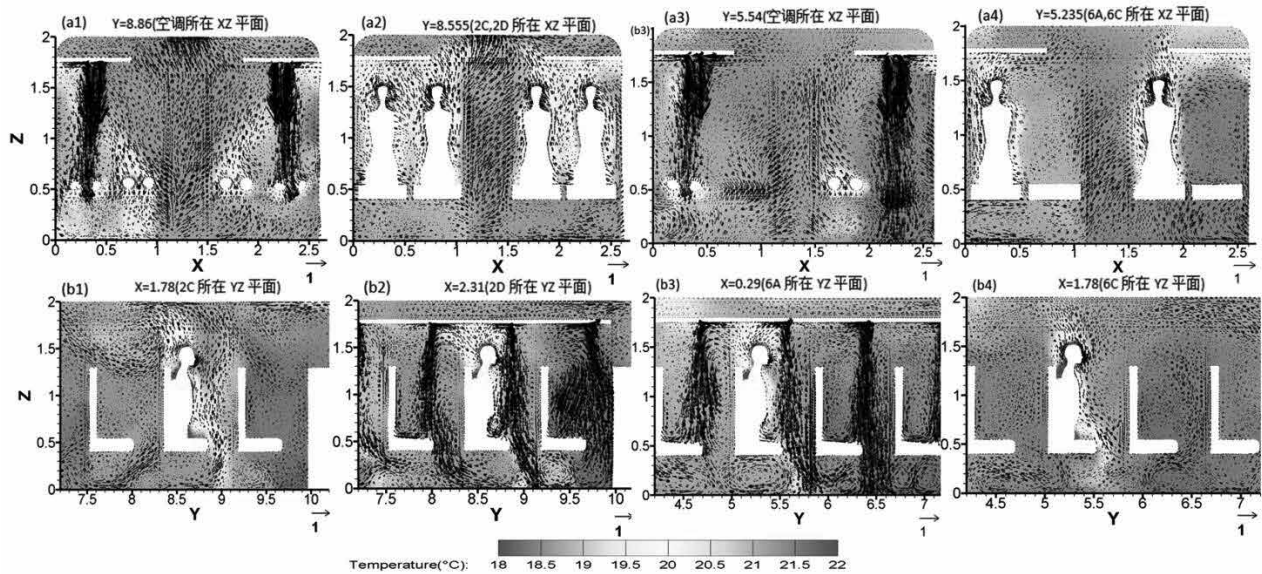


图 3-2 温度填色 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 叠加速度矢量切面图

图 3-3 温度填色 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 叠加速度矢量切面图

逸颗粒物占比高达 2D 算例的数倍,同时也是所有算例中最高。50 μm 颗粒物悬浮的数量比 2D 多,这可能是由于大颗粒物的重力影响大,加上排风机的抽吸作用及空调下沉气流引起 2C 座位处上升气流的影响,使得 50 μm 颗粒物大多悬浮在感染源所在区域。2C 算例沉积的颗粒物大多在 2D 身上,主要因为过道处存在强大上升气流,两边为空调向下的气流,于是在空调与排风机之间形成次级环流,导致 2C 前方有一支斜向 2D 方向的上升气流。而 2D 算例中沉积于人体表面的颗粒物则大多在感染源自己身上,其次是乘客 2C。同时发现,2C 和 2D 算例中沉积于地板的颗粒物数量大大减少,再次说明在排风机附近存在较强的上升气流。

当感染源离排风机远且离空调远(算例 6C)时,细颗粒物悬浮数量约是 Base-6A 的 2 倍,但几乎有一半分布于车顶,其他区域的悬浮量相对较少。而 50 μm 悬浮的颗粒物数量则有所减少,通过排风机排出车厢的颗粒物数量也大大减小,沉积情况则基本一致,大多沉积于地板。由此说明,当感染源不位于空调下方时,颗粒物受下沉气流影响小,使得大部分颗粒物悬浮于车厢顶部,此处又离排风机远,车厢顶部无热力环流,风速较弱,颗粒物难以运动到车厢前部,因此从排风机排出车厢的颗粒物数量减少。

3 结论

在考虑了巴士通风系统、座椅和行李架对车内空气流动的阻碍作用以及人的呼吸和人体散热对其周围空气流动的影响下,探究了不同空调风速、风向、感染源位置及天窗开闭状态对不同大小的颗粒物扩散运动的影响,得到以下几点结论:

(1) 通风主要影响细颗粒物 (5 μm , 10 μm) 的扩散,大颗粒的病毒性气溶胶因重力较大而多数沉积于感染源周围,因此对车内其他人的影响不大。

(2) 由于长途巴士内的座椅将车厢分成许多小的隔间,使得颗粒物在传播过程中多数沉积于座椅表面,因此定期换洗座椅外套有利于病毒性呼吸道传染病的控制。同时,也有大多数的颗粒物在空调向下的气流或重力作用下

沉积于地板与墙面,因此定期打扫车厢、保持车厢内的干净整洁对于传染病的控制也是非常必要的。

(3) 向下送风时,易感染区域总是位于感染源的正前方区域。当 ACH 减半时,沉积的细颗粒物数量减少,处于悬浮状态的细颗粒物数量明显增多,几乎为正常风速的 2 倍,易感染几率大大增加。

(4) 当风吹向墙壁或吹向过道时,悬浮的颗粒物数量均增多,且当风吹向墙壁时,沉积于乘客身上的颗粒物数量大大增加。当风吹向车头或车尾时,由于座椅的阻挡,沉积颗粒物大大增加,但影响范围扩大。因此空调风斜吹时不利于呼吸道传染病的控制。

(5) 当感染源离排风机近且离空调远时,颗粒物易从排风机排出,扩散范围不大;当感染源离排风机远且离空调远时,通过排风机排出的颗粒物数量大大减少,但多数悬浮于车厢后部的车顶区域,使得总体扩散至乘客区域的颗粒物数量不大。因此感染源位置离排风机近或离空调远可有效降低车内其他乘客被传染的几率。

除了空调风速、风向以及感染源位置对长途巴士内部飞沫扩散机制有影响外,感染源(病人)不同的呼吸活动【呼吸(空气流动速度在 0.2m/s~0.3m/s 之间,每秒产生 1 μm 的气溶胶飞沫核约 100 个)、说话(空气流动速度在 0.7m/s~5.3m/s 之间,每秒产生 1 μm 的气溶胶飞沫核约 100 个)、咳嗽(空气流动速度在 1.5m/s~28.8m/s 之间,每秒产生 1 μm 的气溶胶飞沫核约 600 个)、打喷嚏(空气流动速度在 25.0m/s~40.0m/s 之间,每秒产生 1 μm 的气溶胶飞沫核约 4500~100 万个之多)】、不同的室内温度和相对湿度也会影响车内飞沫扩散的机制。此外,人体口鼻释放的颗粒物因含有水,在空气中存在因蒸发使颗粒物质量减小从而改变运动轨迹的过程。因此在未来的研究中,可以考虑感染源不同呼吸活动、不同室内温度和相对湿度对车内飞沫扩散机制的影响。

参考文献

[1] Casey MInnotecS. Best Practice Advance for CFD in Turbomachinery Design.QENT CFD Network Newsletter.

2(3),2003 年,35-37.

[2] Chen. Viral kinetics and exhaled droplet size affect indoor transmission dynamics of influenza infection. Indoor Air. 2009 年,卷 19(5),401-413.

[3] Guo,Niu,Morawska. Distribution of respiratory droplets in enclosed environments under different air distribution methods.Build Simulation: Int J.2008 年,卷 1(4),326-335.

[4] Hong-min GAO. Epidemic Characteristics and Preventive Measures of Infectious Respiratory Disease.Occup and Health.25(24),2009 年,2819-2821.

[5] Jitendra. Transport of expiratory droplets in an aircraft cabin.Indoor Air.21,2011 年,3-11.

[6] Mazumdar. Impact of scaling and body movement on contaminant transport in airliner cabins.Atmospheric Environment.45,2011 年,6019-6028.

[7] Wan,Chao. Transport characteristics of expiratory droplets and droplet nuclei in indoor environments with different ventilation airflow patterns.J Biomech Eng.2007 年,卷 129(3),341-354.

[8] Yuguo Li H Qian. Removal of exhaled particles by ventilation and deposition in a mutilated airborne infection isolation

room.Indoor Air.2010 年,卷 20,284-297.

[9] Zhang. Dispersion of coughed droplets in a fully-occupied high-speed rail cabin. Building and Environment.47, 2012 年,58-66.

[10] Zhao Bin et al. Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method.Building and Environment.2004 年,卷 39,1-8.

[11] Zhu. Experimental and numerical investigation of micro-environmental conditions in public transportation buses. Building and Environment.45,2010 年,2077-2088.

[12] 车凤翔. 病毒气溶胶检测的进展和评论. 中国卫生检验杂志. 1992 年,卷 2(5),259-263.

[13] 杜茜等. 病毒气溶胶飞沫在室内环境中传播扩散机制的研究进展. 军事医学. 2011 年,卷 35(8),631-635.

[14] 是勋刚. 湍流直接数值模拟的进展和前景. 水动力学研究与进展. 1992 年,卷 7(1),103-109.

[15] 赵彬. 室内不同通风方式下生物颗粒的分布比较. 暖通空调. 2003 年,卷 33(1),34-36.

[16] 周晓瑜,施玮,宋伟民等. 室内生物源性污染对健康影响的研究进展. 公共卫生. 2005 年,卷 34(3),367.

(上接第 210 页)

由文献 [10] 可知当光源位置和人眼的垂直角度大于 60° 时,人眼将不会产生眩光,本文考虑最优化的遮阳方式,将内遮阳百叶角度设置为 60° ; 观察遮阳后的模拟结果,易产生眩光的红色区域大面积较少,只分布在幕墙表面,整个阅览区域的采光均匀度提高,室内大部分空间照度值在 2000lux 以内,明显降低了眩光产生的可能性; 另一方面,当室外照度剧烈变化时,由于内遮阳的阻隔一天之中室内平均照度不会有太大变化,加上人为的调节措施,可以进一步有效的控制室内光环境的变化。

5 结论

图书馆是学生学习知识的海洋,室内光热环境的改善将更有利于学生发挥创造。本文通过结合某图书馆实际案例的采光能耗模拟计算结果和分析比较,主要得出以下结论:

(1) 天窗内遮阳的设置可以有效降低室内温度,改善热环境。本文中通过设置内遮阳,中庭空间全年累计高温小时数可以减少 17.5%,室温平均可以下降 0.83°C 。内遮阳的设置可能会导致室内照度变得过低,从而增加了人工照明能耗,且内遮阳材料色调越深,照明能耗越大;但同时内遮阳的设置会阻挡太阳光入射,减少进入室内的太阳得热量,进而降低空调能耗,且内遮阳颜色越深,空调能耗越少,因此,在实际的设计过程中要综合考虑空调和照明能耗。本文中通过模拟发现浅色内遮阳可以产生更少的综合能耗,更适合采光天窗的遮阳。浅色遮阳材料的太阳吸收率更低,发热量的减少又会降低由回风带来的空调能耗。

(2) 内遮阳的设置可以有效改善室内光环境,一方面

降低中庭周围较高的采光系数,减少眩光可能产生的区域,另一方面可以提高室内的采光均匀度,改善整体上的采光质量。本文中庭的顶部采光采用内遮阳,采光均匀度 U_1 整体上提高了 40%, U_2 提高了 28.6%,低采光区域的采光质量得到改善。边庭的侧面采光通过采用内遮阳百叶后可以有效地阻挡强烈太阳光的低角度入射,加上人为调节,阅览区的室内照度可以控制在 2000lux 以内,减弱了眩光和反射眩光的产生,提高了室内照度均匀度。

参考文献

- [1] 吴海华,王立城. 现代图书馆建筑节能问题研究 [J]. 山东图书馆学刊,2013,(5):71.
- [2] 李岳. 窗口内外遮阳性能差异实验研究 [D]. 华南理工大学,2010.
- [3] 岳鹏. 建筑遮阳技术手册 [M]. 北京: 化工工业出版社,2014:6.
- [4] 王汉青,谭超毅. 夏热冬冷地区图书馆节能设计指南 [M]. 中南大学出版社,2016.
- [5] GB 50033-2013, 建筑采光设计标准 [S].
- [6] 刘庆军. 遮阳幕帘对中庭建筑能耗与热环境的影响及其通风控制策略 [D]. 广州大学,2016.
- [7] 石铁矛等. 建筑全年动态采光与总能耗模拟方法研究 [J]. 建筑技术,2016,(11):966-969.
- [8] 王刚等. 学校中小型体育馆自然采光模拟分析 [J]. 建筑节能,2008,(2):60-62.
- [9] 邓天福等. 外遮阳百叶隔热性能与采光分析 [J]. 建筑热能通风空调,2008,8.
- [10] 朱颖心. 建筑环境学 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社,2005:284.

杂志免费索阅表

本刊由中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院主办，中国建筑学会暖通空调分会、中国制冷学会空调热泵专业委员会、中国建筑节能协会暖通空调专业委员会、中国建筑节能协会地源热泵专业委员会支持。栏目范围：建筑环境、建筑能源、空调、热泵、通风、净化、供暖、计算机模拟。填此表格免费获取《建筑环境与能源》杂志一期。

请您完整填以下信息

姓 名		先生 / 女士	
部 门		职 务	
单位名称		邮 箱	
通讯地址			
联系电话		传 真	
手 机		电子邮箱	

您对本刊物有哪些建议或意见？

编辑部联系方式：

地址：北京市北三环东路 30 号
 中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院
 节能示范楼 208 室
 邮编：100013
 邮箱：beaebjb@163.com
 电话：010-64693285

聚焦建筑环境与能源 推动行业科技进步与发展



杂志微信 beaebjb



学会微信 cc-hvac

建筑环境 能源

Building Environment & Energy

主办

中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院

支持

中国建筑学会暖通空调分会

中国制冷学会空调热泵专业委员会

中国建筑节能协会暖通空调专业委员会

中国建筑节能协会地源热泵专业委员会



聚焦 建筑环境与能源 推动 行业技术进步与发展



建筑环境与能源官方微信

联系方式:

地址: 北京市朝阳区北三环东路30号

中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院

邮编: 100013

电话: 010-64693285

传真: 010-64693286

邮箱: beaebjb@163.com



学会官方微信

中国建筑学会暖通空调分会
中国制冷学会空调热泵专业委员会

秘书处

地址：北京市北三环东路30号中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院

电话：010-64517224 64693285 传真：010-64693286

邮箱：chvac2008@sina.com 网站：中国暖通空调网 www.chinahvac.com.cn