

长江流域建筑  
供暖空调

## 栏 首 语

长江流域地区占我国国土面积的 25%，人口占全国总人口的 5%，属高密度人员聚居地区，该地区夏季炎热、冬季阴冷、全年高湿，室内热环境状况恶劣。近年来，随着生活水平的提高，该地区人们追求美好人居环境、改善建筑室内热舒适的愿望越来越强烈。如果照搬我国北方地区及国外的技术路径，不考虑该地区的气候地理特征、建筑结构性能、人们生活习惯等因素，将导致建筑能耗急剧上升，危及我国的能源战略安全，影响我国社会经济发展。因此，发展该地区低耗能的建筑热环境改善关键技术，既是关系民生、以人为本的实际需求，也是我国可持续发展的战略需要。

“十三五”国家重点研发计划项目“长江流域建筑供暖空调解决方案和相应系统”研究涵盖“人-围护结构-设备系统”等范畴，涉及“产-学-研-用”的科技创新路径。为集中报道该项目的研究成果，《暖通空调》杂志推出了“长江流域建筑供暖空调”专栏，并已发表了 2 期。本期专栏组织了 8 篇论文，包括室内热环境营造热过程分析、建筑热工气候区划分、人体热舒适响应、管板蒸发冷却式冷水机组适用性分析、新型无霜空气源热泵系统用除湿剂模型研究、多联机运行能耗分析、低能耗改造路径、相变材料研究等内容。虽然文章所列的成果及技术有些还仅是阶段性成果，且技术内容并未代表目前长江流域建筑供暖空调研究的全部热点，但希望通过这些研究本身及背后展现出的求真与创新精神来推动长江流域建筑供暖空调事业的发展。也欢迎广大同行积极投身到推动长江经济带生态优先、绿色发展的工作中来。

(姚润明 喻 伟)

## 探讨长江流域室内热环境营造 ——基于建筑热过程的分析\*

重庆大学 绿色建筑与人居环境营造教育部国际合作联合实验室  
(科技部)国家级低碳绿色建筑国际联合研究中心 三峡库区生态环境  
教育部重点实验室 贾洪愿<sup>☆</sup> 李百战<sup>△</sup> 姚润明 喻 伟 曹馨匀

**摘要** 长江流域夏季炎热、冬季阴冷、全年高湿，影响建筑室内热环境的因素众多，关系复杂。对该地区建筑热过程的正确理解和分析是提出合理室内热环境营造技术的基础。基于建筑热过程，构建了涵盖设计与运行阶段的室内热环境营造桑基能流图，分析了影响室内热环境营造的主要因素，即得(失)热、冷(热)负荷、供冷(热)量和能源消耗，以及能量流动关系；简要介绍了现有节能技术的原理和在长江流域的应用现状。对长江流域典型城市住宅的室内热环境进行了模拟分析，结果表明：所选住宅夏季围护结构形成的冷负荷占比最大，应首先考虑通过合理的隔热及遮阳措施减少得热，从而减少供冷能耗；冬季冷风渗透形成的热负荷占主导地位，需要提高建筑气密性及围护结构热工性能加强保温；综合过渡季自然通风、供暖空调设备能效提升等措施，可实现在满足热舒适标准基础上全年供暖空调能耗不超过  $20 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$  的目标。

**关键词** 室内热环境 建筑热过程 供暖 空调 建筑能耗 建筑节能 长江流域

## Discussion on built environment design and operation in the Yangtze River Basin—Thermal-behavior based analysis

By Jia Hongyuan<sup>★</sup>, Li Baizhan, Yao Runming, Yu Wei and Cao Xinyun

**Abstract** The Yangtze River Basin has a unique climate with hot summer, cold winter and high humidity all-round the year. There are many factors affecting the indoor thermal environment of the building, and the relationship is complicated. Correctly understanding the building thermal process is essential for creating energy-efficient indoor thermal environments. Establishes an energy flow diagram to show the relationship among the main factors of built environment design and operation such as heat gain/loss, cooling/heating loads, cooling/heating supply and energy consumption. Presents the principles of current building energy saving technologies and their applications in the Yangtze River Basin. Simulates the indoor thermal environments of typical residential buildings in the Yangtze River Basin. The results show that the most influencing factor is building envelope for cooling and infiltration for heating. Integrating natural ventilation and energy efficient equipment, the residential buildings could have an annual HVAC energy consumption of no more than 20 kWh/m<sup>2</sup> on the basis of meeting the thermal comfort standard.

**Keywords** indoor thermal environment, building thermal process, heating, air conditioning, building energy consumption, building energy conservation, Yangtze River Basin

★ Chongqing University, Chongqing, China

### 0 引言

长江流域夏季炎热、冬季阴冷、全年高湿,室内热环境状况恶劣,人们改善建筑室内热环境的愿望迫切<sup>[1]</sup>。然而,目前我国建筑运行能耗已至发达国家建筑能耗的 35%~40%,建筑运行能耗中,约有 50%用于营造室内热湿环境<sup>[2]</sup>。如何提出适宜该地区的低能耗建筑室内热环境改善技术已成为我国社会、经济和环境可持续发展所面临的巨大挑战。在此背景下,“十三五”国家重点研发计划“绿色建筑及建筑工业化”成立重点专项“长江流域建筑供暖空调解决方案和相应系统”,旨在提出满足能耗限额要求的室内热环境改善供暖空调解决方案<sup>[1]</sup>。我国北方地区冬季寒冷,供暖期室内外温差有时甚至可达 40℃<sup>[3-4]</sup>,居住建筑中围护结构的失热及冷风渗透成为冬季热负荷的主导,提高建筑围护结构保温性能在北方取得了较好的节能效果<sup>[5]</sup>。而长江流域独特的气候特征、人员行为和生活习惯,使得该地区建筑热过程有不同于北方的特点,节能技术措施的选择更复杂。

已有学者对现有室内热环境营造技术在长江

流域的适宜性及节能效果进行了研究。孔文懋等人研究了长江流域被动式居住建筑夏季空调系统形式,指出良好的围护结构条件可以显著降低严酷气候条件下的峰值负荷,从而简化空调系统形式<sup>[6]</sup>。简毅文等人研究指出,上海地区居住建筑中东(西)向、北向窗墙面积比的加大会导致建筑全年供暖空调总能耗的增加<sup>[7]</sup>。Yao 等人利用参数化模拟手段对不同被动式技术在长江流域城市“延长非供暖空调期、降低室内峰值负荷”的节能潜力进行了研究,结果显示,通过合理的被动设计可使长沙、重庆和上海的住宅室内达到舒适的时间比例相比 2001 年之前的基准建筑分别提高 18%,20%和 24%,节能率分别达 51.7%,37.6%和 39.8%<sup>[8]</sup>。阮方等人研究了长江流域分室间歇用能对墙体内保温节能效果的影响,结果显示,内墙总耗能份额占总能耗的 45%左右,提出该地区建筑必须兼顾外墙保温和内墙保温<sup>[9]</sup>。Yu 等人对长江流域高层居住建筑围护结构热工性能设计参数进行了敏感性分析,发现制冷季遮阳系数及窗墙面积比影响

\* “十三五”国家重点研发计划项目“长江流域建筑供暖空调解决方案和相应系统”(编号:2016YFC0700301),国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目“基于气候响应和建筑耦合的低碳城市供暖供冷方法与机理研究”(编号:51561135002,EP/N009797/1),重庆市研究生科研创新项目(编号:CYB15040)

☆ 贾洪愿,男,1989 年 6 月生,在读博士研究生

△ 李百战(通信作者)

400044 重庆市沙坪坝区沙正街 174 号重庆大学 B 区城市建设与环境工程学院

E-mail:baizhanli@cqu.edu.cn

收稿日期:2018-12-10

修回日期:2019-01-16

最大,制热季墙体传热系数和体形系数影响最大<sup>[10]</sup>。Chow 等人以宁波市为例,利用情景分析法对未来 10 年、40 年、70 年的既有公共建筑节能改造技术可行性进行了分析,认为通过提高围护结构性能可显著提升建筑性能以应对未来气候变化<sup>[11]</sup>。Yu 等人的研究表明,提升居住建筑的遮阳和外保温是降低该地区空调能耗的最佳手段,对于长沙某居住建筑节能率可分别达 11.31% 和 11.55%,最佳的被动技术组合可降低全年能耗 25.92%<sup>[12]</sup>。

综上,影响长江流域建筑热环境营造过程的因素众多,现有研究多将节能措施分为被动式与主动式两大类,通过分析节能措施实施前后建筑能耗的变化来量化节能效果,而针对不同节能措施对建筑热过程的影响未进行充分研究,同时缺少建筑热环境营造系统设计及运行阶段主要影响因素及各因素之间能量流动关系的分析。因此,本文基于建筑热过程构建桑基能流图(Sankey diagram),分析室

内热环境营造过程主要因素,并总结现有节能技术的原理和应用现状,为长江流域建筑节能技术的研发及应用提供参考。

### 1 室内热环境营造中的建筑热过程

对建筑热过程的正确理解和分析是提出合理室内热环境营造技术的基础。条理清晰地表述该过程,有利于分析主要影响因素,厘清营造过程。桑基图适合展示不同阶段的能量流动,已广泛应用于能源、材料和金融领域等<sup>[13]</sup>,但鲜有从单个建筑尺度对建筑环境营造过程中的能量流动采用桑基图表示。本文基于建筑热过程,构建了涵盖设计与运行阶段的室内热环境营造桑基能流图,见图 1。由于建筑不同时刻的能量流动存在差异,图中流线的粗细仅起示意作用,重点在于表示各影响因素对室内热环境营造的影响;同时考虑设备系统供冷/热量与实际能耗之间存在能源转化,其流线在图中用虚线表示。下文将基于建筑热过程对室内热环境营造系统中的能量传输及转化进行说明。

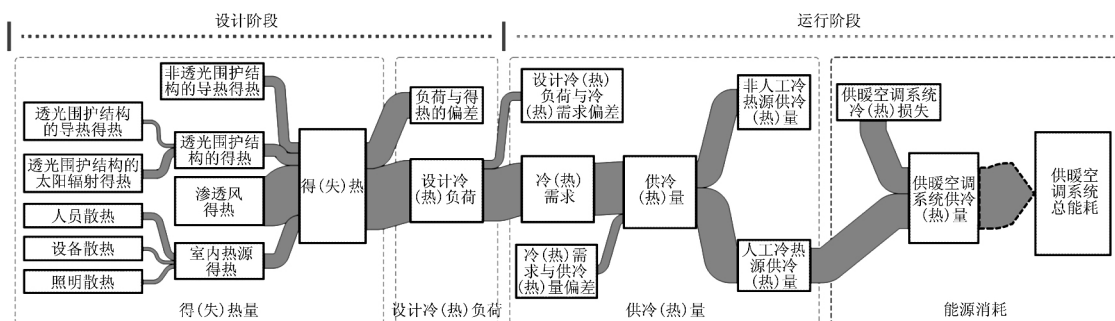


图 1 基于建筑热过程的室内热环境营造桑基能流图

建筑在内外扰作用下与周围环境进行换热。如图 1 所示,透光和非透光围护结构的导热得热、透光围护结构的太阳辐射得热、渗透风得热及室内热源得热等四部分构成了该建筑的总得热。其中,室内热源得热及太阳辐射得热始终在加热室内空间,而围护结构导热的方向及渗透风得热还是失热,则与当前室内外温度相对高低有关。

对于有热环境控制需求的建筑,空调设计冷负荷和供暖设计热负荷是确定供暖空调系统的设备容量、系统参数及控制方案的基础。对于送风空调系统来说,室内负荷与得热并不相等,前者只包含得热中的对流部分。从图 1 可以看出,降低室内得(失)热,将从源头上减少设计负荷。

建筑室内热环境营造系统运行时,室内冷(热)量需求为当前时刻人体达到热舒适时与外界的换

热量。由于人员所需的室内舒适温度与设计温度存在差别,导致室内设计冷(热)负荷与人体冷(热)量需求存在偏差。加之实际运行工况中内外扰如气象条件、室内热扰大小等与设计工况不同,也使得人体冷(热)量需求与营造系统末端实际供冷(热)量存在偏差。室内人员的热不舒适正是由这种偏差引起的。若末端实际供冷(热)量大于人员冷(热)量需求,则会导致室内过冷(过热),同时也增加了供暖空调能耗。

从全年的时间尺度来看,室内供冷(热)量既可来自于非人工冷热源,如过渡季自然通风时较低温度的室外空气,也可来自于供暖、空调等人工冷热源。减少供暖空调能耗的途径之一是尽可能减少室内热环境营造对人工冷热源的需求。而供暖空调系统提供的冷(热)量除到达室内末端部分外,另

一部分受管网保温隔热等影响消耗在运输途中。设备及系统的能量传输和转化效率影响营造系统的最终能耗。

可见,从建筑热过程的角度,室内热环境营造经历了得(失)热、冷(热)负荷、供冷(热)量到能源消耗之间的能量传输与转化过程。下文将逐一加以分析。

## 2 室内得热和失热

室内得热是指某时刻在内外扰作用下进入室内的总热量<sup>[14]</sup>。当得热量为负值时,意味着房间损失热量,即为失热。得热考察的对象是室内空间,是从房间热平衡的角度来说的。

从图 1 可以看出,限制建筑在夏季得热和冬季失热,将从源头上降低室内冷(热)负荷。建筑得热直接受建筑所处室外气象条件的影响,当前基于气候响应的被动式设计(climate-responsive passive design)<sup>[8]</sup>越来越受到重视。被动式建筑强调尽可能地利用建筑本身的空间布局、材料构造及细部处理等方法营造舒适的室内热湿环境,其首要考虑的因素是如何通过建筑设计减少建筑得热和失热<sup>[15]</sup>。

建筑得热( $G$ )主要由通过非透明和透明围护结构的导热( $G_c$ )、通过透明围护结构的短波辐射得热( $G_s$ )、室内热源得热( $G_h$ )及渗透风得热( $G_i$ )等四部分组成,如图 2 所示。

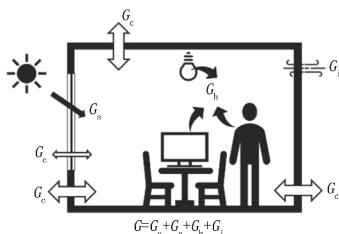
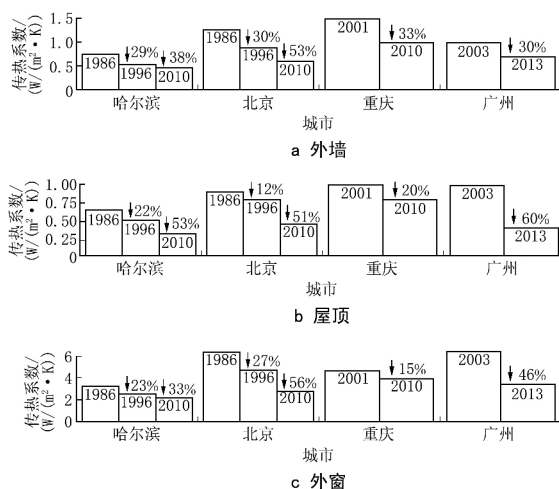


图 2 建筑室内得热示意图

限制室内得热应从各组成部分入手,提出适宜的建筑围护结构、遮阳和混合通风技术方案,从而降低供暖空调负荷。

### 2.1 提高围护结构保温隔热性能

对于长江流域来说,由于传统建筑的保温隔热性能较差,因此提高新建建筑围护结构的热工性能,可从一定程度上限制通过围护结构的传热,起到保温隔热作用。图 3 显示了各版本建筑节能设计标准中不同气候区典型城市围护结构传热系数要求的演变过程。可见,按照现行节能设计标



注:1) 哈尔滨、北京取 4~8 层,体形系数 $\leq 0.3$ 、 $0.2 \leq$ 窗墙面积比 $\leq 0.3$ 的居住建筑的要求值;  
2) 重庆取 4~11 层,体形系数 0.4、窗墙面积比 0.25、热惰性指标 2.5 的居住建筑的要求值;  
3) 广州取北区热惰性指标 $\geq 0.25$ 、平均窗墙面积比 $\leq 0.25$ 、外窗加权平均综合遮阳系数 $\leq 0.9$ 的居住建筑的要求值。

图 3 我国不同气候区典型城市居住建筑围护结构传热系数要求的演变

准设计的建筑,其围护结构热工性能相比老建筑已有了显著提升。全面切实执行 JGJ 134—2010《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》是实现高质量、低能耗供暖空调的基本条件<sup>[16]</sup>。

需要指出的是,全年不同时间,甚至是全天不同时段对围护结构的热工性能要求也不尽相同。对于夏季空调时段,目标是阻隔室外热量进入室内;冬季供暖时段,则希望减少室内热量传向室外。上述 2 种情况均需考虑提高围护结构的保温隔热性能。然而对于不需要空调的偏热季节或夏季夜间,则希望更大的围护结构传热系数,促进室内热量通过围护结构向室外传递,此时过高的隔热性能反而成为室内向室外散热的不利因素。因此对围护结构节能效果的评估也应从全年综合效果的角度进行审视。

### 2.2 动态控制透过外窗的太阳辐射

长江流域设置活动外遮阳的作用效果明显,对外窗的传热系数和窗户的遮阳系数作出严格的限制,是长江流域建筑节能设计的特点之一<sup>[17]</sup>。遮阳系数和窗墙面积比是影响长江流域夏季空调能耗的重要因素<sup>[10]</sup>。夏季降低窗户对太阳辐射的透射比,可减少太阳辐射所形成的冷负荷;然而冬季由于存在供暖需求,增大通过外窗进入室内的太阳辐射有助于降低室内热负荷。因此,冬夏季热环境

营造系统对于窗户太阳辐射透过性能的需求是矛盾的,实现对室内太阳辐射得热的动态调控应是追求的目标。

已有研究对电致变色(electrochromic, EC)和热致变色(thermochromic, TC)等新型变色玻璃<sup>[18]</sup>在长江流域的应用进行了初步探索。这2种玻璃的优势在于可动态改变自身太阳辐射透射比,具有传统玻璃窗和遮阳设施的双重功能。研究发现,在上海办公建筑非供暖空调情况下,采用电致变色玻璃晴天时可显著降低玻璃温度,平均可降低室内黑球温度2.03℃,秋季室内热舒适率提高66.1%<sup>[19]</sup>。然而电致变色玻璃在多云天和阴天时对室内热环境改善效果有限,同时电致变色玻璃较为昂贵,一般每m<sup>2</sup>数千元,目前仅有美国、日本、德国和法国等国家能够规模化生产,我国仍处于产业化探索当中<sup>[18]</sup>。

### 2.3 建筑气密性及渗透风的影响

渗透风是影响建筑得热和失热的重要因素<sup>[20]</sup>。我国对建筑气密性的规定主要侧重于建筑物单一构件,如外窗、外门的气密性等级。现行建筑节能标准中对建筑整体气密性指标尚无明确限值规定<sup>[21]</sup>。

GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》按照人均居住面积规定了设置新风系统的居住建筑所需最小换气次数,范围在0.45~0.70 h<sup>-1</sup>之间。丰晓航等人研究了建筑气密性对住宅能耗的影响,结果显示,在满足换气次数要求的前提下,随着门窗气密性的提高,供暖能耗明显降低,空调能耗基本不变,总能耗逐渐降低<sup>[22]</sup>。Cheng等人对广州地区202个住户的渗透风量进行了实测,结果显示,渗透风换气次数大致服从对数正态分布( $R^2=0.85$ ),仅有16%住户的渗透风

量满足国家规范中室内换气次数的最低要求<sup>[23]</sup>。长江流域尚未见对建筑气密性的大规模实测分析。需要注意的是,气密性的提高意味着通过门窗渗入的新风量的降低。在未开窗时段,如夏季开启空调时,过高的气密性可能导致空气渗透量无法满足人体新风需求,因此需要综合考虑确定建筑的气密性等级和通风模式。

### 3 空调设计冷负荷和供暖设计热负荷

负荷是指为维持建筑物的热湿环境满足一定基准(设计条件)温湿度的要求而必须向房间提供或从房间带走的热量<sup>[14]</sup>。与供暖空调系统设计选型直接相关的是设计负荷,即在设计工况下各逐时冷负荷或热负荷的综合最大值<sup>[24-25]</sup>。室内冷(热)负荷与得(失)热一般不相等,其关系取决于建筑的构造、围护结构的热工特性和热源的特性。在夏季,围护结构内表面吸收的辐射热量在未传递给室内空气之前,只是房间得热量的一部分,而非负荷。因此冷负荷与得热量相比,根据建筑材料特性不同在时间上有相应的延迟,幅度上有相应的衰减,见图4。热负荷与失热也有类似关系。

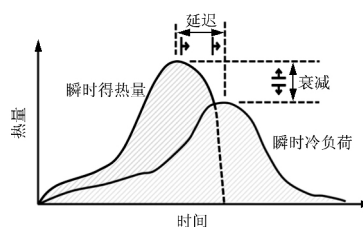


图4 得热量与冷负荷<sup>[14]</sup>

对于送风空调系统,以室内空气为参考对象,不考虑空气的蓄热能力,将其简化成单节点,则室内显热负荷 $Q_l$ 主要由室内热源对流换热负荷( $Q_{h,c}$ )、室内表面对流换热负荷( $Q_{s,c}$ )和渗透风负荷( $Q_i$ )三部分组成,如式(1)所示<sup>[26]</sup>。

$$Q_l = Q_{h,c} + Q_{s,c} + Q_i = \sum_{i=1}^n h_i A_i (t_{h,i} - t_{sp}) + \sum_{j=1}^m h_j A_j (t_{s,j} - t_{sp}) + \dot{m}_{inf} c_p (t_o - t_{sp}) \quad (1)$$

式中  $h_i$  和  $h_j$  分别为第  $i$  个热源和第  $j$  个表面与空气的对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $A_i$  和  $A_j$  分别为第  $i$  个热源和第  $j$  个表面与空气接触的面积,  $m^2$ ;  $n$  和  $m$  分别为热源和表面与空气接触的总个数;  $t_{h,i}$  和  $t_{s,j}$  分别为第  $i$  个热源和第  $j$  个表面的温度,  $^\circ C$ ;  $t_{sp}$  为室内空调设定温度,  $^\circ C$ ;  $\dot{m}_{inf}$  为渗透风的质量流量,  $kg/s$ ;  $c_p$  为干空气的比定压热容,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $t_o$  为室外空气温度,  $^\circ C$ 。

负荷大小与室内所期望达到的温度直接相关,如何确定或调整该温度将从一定程度上直接决定室内负荷的大小;同时,负荷的大小受室内各表面的温度及各表面与室内空气的对流换热系数的影响,而各表面温度分布及变化则与建筑墙体蓄热特性相关。

#### 3.1 基于人体适应性确定适宜的室内设计温度

JGJ 134—2010《夏热冬冷地区居住建筑节能

设计标准》给定的室内(卧室、起居室)设计温度夏季为  $26^{\circ}\text{C}$ , 冬季为  $18^{\circ}\text{C}$ 。然而人并非室内环境的被动接受者, 而是会通过生理、心理及行为等多方面去主动适应环境<sup>[27-30]</sup>。在热适应性研究的基础上, GB/T 50785—2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》给出了非人工冷热源环境下体感温度范围随室外平滑周平均温度的变化关系及不同室内热湿环境评价等级对应的操作温度限定范围, 夏热冬冷地区 I 级为  $18\sim 28^{\circ}\text{C}$ , II 级为  $16\sim 30^{\circ}\text{C}$ <sup>[31]</sup>。操作温度不仅反映了环境空气温度的影响, 同时还包括了平均辐射温度的作用。因此若室内设计温度范围与人体达到热舒适所需要的温度范围不一致, 则设计负荷与人员冷热量需求会存在偏差, 如图 1 所示。研究表明, 如果将重庆住宅夏季室内空调设定温度从  $26.0^{\circ}\text{C}$  提高到  $27.5^{\circ}\text{C}$ , 则可节约  $16.5\%$ <sup>[32]</sup>。Wang 等人根据集总参数四节点状态空间模型指出, 长江流域冬季“部分时间、部分空间”运行模式下的合理室内供暖设定温度为  $17\sim 18^{\circ}\text{C}$ <sup>[33]</sup>。在考虑人员对环境的生理、心理及行为等适应性因素的基础上, 确定适宜的室内设计温度, 不仅可提高室内热环境营造的舒适性, 防止过冷、过热, 还可降低热环境营造系统的设计负荷, 减少能耗。

### 3.2 间歇用能模式下建筑蓄热性能的影响

建筑热过程是导热、对流、辐射和蓄热综合作用的结果。长江流域居住建筑中房间空调器大多间歇启停, 对于上班族以 12:00—14:00 和 18:00—23:00 使用为主<sup>[34]</sup>。间歇运行模式下, 建筑围护结构的蓄热性能将影响室内负荷。已有学者针对间歇用能模式下外墙内、外保温在长江流域的适用性进行了初步研究, 指出外墙内保温形式热响应速度更快, 蓄热负荷更低, 具有一定的节能潜力, 该地区围护结构设计需兼顾内、外保温<sup>[9, 35-37]</sup>。然而具体保温设计方法尚待研究。

相变材料(phase change material, PCM)可增加围护结构的蓄热能力, 使室内表面温度波动幅度减小, 延长室内冷热负荷峰值的到达时间并降低峰值<sup>[38]</sup>。研究表明, 将定型相变材料应用于武汉等长江流域地区, 可分别降低室内峰值冷负荷  $3.1\%\sim 3.8\%$ 、热负荷  $8.6\%\sim 11.3\%$ , 降低供冷、供暖能耗分别达  $3.4\%\sim 3.9\%$  和  $14.8\%\sim 18.8\%$ <sup>[39]</sup>。另外相变材料还可与供暖空调系统相结合, 形成多种相变储能系统, 如相变蓄热太阳能

供暖、相变蓄热辐射供暖、相变蓄冷新风机组等<sup>[38, 40]</sup>。

### 4 人员冷(热)量需求与实际供冷(热)量

民用建筑室内热环境营造系统的服务对象是在室人员。在室内热环境营造系统设计时, 设计负荷是假定室内温湿度位于设计室内温湿度区间范围(如  $18\sim 26^{\circ}\text{C}$ )内。如图 5 所示, 人员处在热环境中, 会通过生理、心理及行为等多方面去主动适

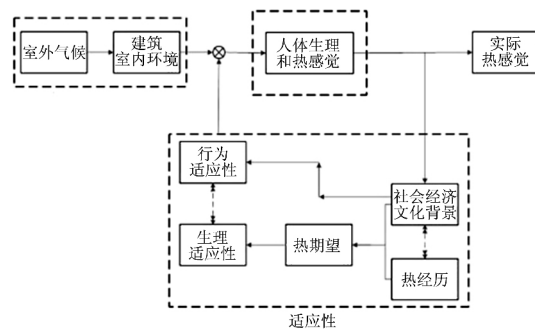


图5 热舒适自适应机制<sup>[27]</sup>

应环境。典型的“适应性(负)反馈”行为包括穿/脱衣服、开/关门窗、开/关风扇、开/关空调、喝热/冷饮等<sup>[27]</sup>。因此, 室内所需温度为满足人员生理、心理及行为适应性后人体的热中性温度, 人员冷(热)量需求为维持人体热中性温度时人体与外界的换热量。而供暖空调系统实际供冷(热)量, 一方面由于实际工况内外扰变化, 其大小与设计负荷已不同; 另一方面当达不到室内人员热环境定量需求时, 人员的适应性行为, 如调节空调送风温度, 又会直接影响其大小。因此, 在人员冷(热)需求与实际供冷(热)量的匹配过程中, 室内人员行为和用能模式成为了关键影响因素。

室内设计负荷大并不意味着建筑环境营造系统的运行能耗就高; 而供暖空调系统向室内提供多少热(冷)量则与能耗直接相关, 并受室内人员行为和用能模式的影响。最简单的例子即为长江流域“人走关机”的用能方式, 当将空调关闭时, 由于空调设备没有任何供冷(热)量, 并不消耗能源。

#### 4.1 “部分时间、部分空间”的间歇用能

长江流域属于传统的非集中供暖区域。该地区人员供暖用能行为与北方地区有显著区别。针对长江流域典型城市上海、苏州和南京的 16 个小区高层住宅的入户调研和实测结果显示, 客厅供暖设施开启时间集中在 16:00—19:00, 卧室集中在

19:00—22:00, 平均每天供暖时间短于 2 h<sup>[41-42]</sup>。对重庆市住宅冬季热环境及供暖现状的实测调研也得到了类似的结论, 空调及电暖炉每天的平均使用时间分别仅为 2~4 h 和 3 h<sup>[43]</sup>。对长江流域住宅中 8.9 万台房间空调器连续 1 年的监测结果显示, 长江流域普遍有“部分时间、部分空间”的供暖系统间歇用能特点, 空调器使用时间集中在 12:00—14:00 和 18:00—23:00<sup>[34]</sup>。这种用能特点也是长江流域不能直接照搬北方“全时间、全空间”集中供暖模式的原因之一<sup>[44]</sup>。如果充分利用这一间歇用能的特点, 将系统供冷量和供热量与用户的行为及用能习惯相匹配, 优化系统控制策略、调整系统运行模式, 将产生显著的节能效果。

同时需要说明的是, 长江流域“部分时间、部分空间”的间歇用能特点, 使得室内有相当长时间处于非人工冷热源环境下, 此时传统的预计平均热感觉指数  $PMV$  模型评价结果与实际值存在偏差, 应根据 GB/T 50785—2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》的规定采用预计适应性平均热感觉指数  $aPMV$ <sup>[27]</sup> 或图示法进行评价。 $aPMV$  提出了自适应系数  $\lambda$  来衡量气候、心理、生理及行为适应性等对人体热舒适的影响, 改善了  $PMV$  模型对实际非人工冷热源建筑热舒适评价的不足和不适用性。

#### 4.2 利用被动技术减少人工冷热源需求

如图 1 所示, 从全年时间尺度来看, 将室内供冷(热)量来源分为非人工冷热源和人工冷热源 2 类, 则降低热环境营造系统对人工冷热源的需求就成为了减少营造系统能耗的另一个有效的措施。从全年室内冷热需求来看, 非人工冷热源需求和人工冷热源需求呈负相关, 即通过非人工冷热源向室内提供冷(热)量, 如过渡季自然通风, 则相应的人工冷热源需求减少, 全年非供暖空调期延长。

研究表明, 重庆地区过渡季, 公共建筑采用全新风运行的机械通风模式, 可充分利用室外的低温空气营造舒适的室内热环境, 设备功耗仅为空调模式的 15% 左右<sup>[45]</sup>。夜间通风也已被证实为一种有效的降温方式。夜间把室外相对干冷的空气引入室内, 直接降低室内空气的温度和相对湿度, 排除室内蓄热<sup>[46]</sup>。在上海地区, 夜间通风能够显著减小室内热源对空调开机负荷的影响。在室内发热量由 0 增至 35 W/m<sup>2</sup> 的过程中, 空调系统累计负荷增幅超过 40%, 而进行有效的夜间通风后, 基本

可抵消夜间室内 15~25 W/m<sup>2</sup> 的内部热扰量<sup>[47]</sup>。Yao 等人对我国不同气候区典型城市办公建筑的自然通风降温潜力进行了分析, 指出自然通风降温效果受当地气候、建筑围护结构热工性能及通风类型和通风资源等的影响, 对于长江流域地区, 仅用自然通风无法完全满足夏季供冷需求, 建议采用混合通风技术以实现自然通风与空调系统的综合利用<sup>[48]</sup>。

#### 5 供暖空调系统的能耗

降低供暖空调系统能耗是建筑节能的根本目标。从建筑热过程的角度看, 当非人工冷热源供冷量或供热量无法满足室内热环境营造需求时, 就需要使用主动式供暖空调系统。热环境营造系统中消耗的能源主要用于供暖空调系统做功以提供冷量和热量, 能耗大小与设备能效及系统运行策略有关。对于送风空调系统来说, 系统所提供的冷量( $Q$ ), 除了用于维持室内设定温度外( $Q_0$ ), 还有相当一部分冷量消耗在送风机的温升、空气的再热、送风管道的冷热损失等方面( $Q_{lo}$ )。室内热环境营造系统的能耗( $E$ )可利用系统  $COP$  来表示:

$$E = \frac{Q}{COP} = \frac{Q_0 + Q_{lo}}{COP} \quad (2)$$

这时, 降低供暖空调系统的能耗就是要提高机械系统消耗能源向营造系统提供冷(热)量的能量传输和转换效率。

##### 5.1 冬夏两用的舒适性末端

长江流域同时存在夏季供冷和冬季供暖需求, 以房间空调器为代表的对流型末端和以辐射地板供暖系统为代表的辐射型末端在该地区都已得到应用<sup>[34, 43]</sup>。然而目前长江流域供暖空调末端均无法很好地满足冬夏两用的问题。对流型末端冬季供暖时室内温度在竖直方向上易形成明显的温度梯度, 加之热空气上浮, 导致人员活动区域温度不易达到舒适性要求, 不得不增加供热量。而辐射型末端虽竖直方向温度梯度较小, 但由于辐射地板自身的热惰性, 供暖响应速度慢, 使得达到相同的室内温度需要更长的系统运行时间, 同时夏季采用辐射供冷容易出现结露问题。

长江流域地区冬夏两用的舒适性末端的研发, 应综合考虑建筑围护结构性能、人员行为特征、冷热源设备及系统运行方式等因素, 对末端进行设计及运行参数优化。对于对流型末端, 应重点结合人

体热舒适试验,利用红外传感器检测人体表面温度和位置,优化末端送风方式及送风参数,研发智能人员感知与舒适送风的空调产品;对于辐射型末端,重点在于优化末端设计结构,提升热响应速度,同时开展诱导送风与辐射供冷/供暖复合空调末端的室内气流组织形式和室内舒适性研究,以实现冬夏统一末端,提升热舒适性。

## 5.2 适应长江流域气候条件的空气源热泵系统

长江流域的气候、地理资源及热泵技术的成熟和大规模生产使供暖工程普遍采用空气源热泵技术成为可能。该地区夏季空调时间长,供冷负荷大,冬季供暖时间相对较短,供暖热负荷小,空气源热泵作为冬季供暖热源在长江流域是适宜的。目前房间热泵空调器冬季供暖的 COP 值已达到 2.5 及以上,价格便宜,使用简单,维护修理较容易<sup>[16]</sup>。

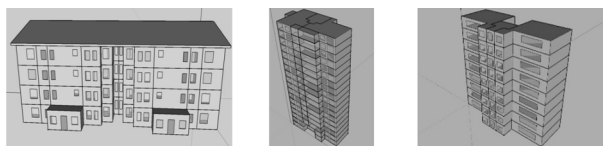
然而空气源热泵应用于长江流域在冬季也遇到一些技术难题。长江流域全年冬夏气温变化大、湿度高,对热泵在变工况运行时的性能和效率及极端工况下的可靠性提出了挑战。传统空气源热泵运行时往往出现压比调节不适应、易结霜等问题<sup>[49]</sup>。延长除霜周期、降低除霜能耗和减少对用热侧的影响是实现该地区空气源热泵高效供热目标的关键问题之一,应着力研究低温高湿环境下空气源热泵的探霜、抑霜与除霜技术<sup>[50]</sup>。

## 6 基于建筑热过程的居住建筑室内热环境模拟

前面从建筑热过程的角度对长江流域室内热环境营造进行了探讨,下面将采用数值模拟的方法,对长江流域住宅室内热环境及供暖空调能耗进行分析。“十三五”国家重点研发计划专项“长江流域建筑供暖空调解决方案和相应系统”提出了项目示范住宅全年供暖通风空调能耗不超过 20

kW·h/m<sup>2</sup> 的用能目标。本文所选的 3 栋住宅均为该项目示范住宅,模拟重点在于考察通过建筑热过程的分析方法,以被动设计优先、主动设备系统性能提升为策略营造建筑室内热环境,使示范住宅实现全年供暖通风空调能耗不超过 20 kW·h/m<sup>2</sup> 的用能目标。需要说明的是,本文将人员行为简化成固定作息处理,这种简化方式无法很好地表征人员行为对建筑热湿环境和能耗的复杂动态作用<sup>[51]</sup>,而人员行为模拟对建筑能耗计算有显著影响<sup>[52]</sup>。上述示范住宅的实际室内热环境及能耗将通过建筑建成后 1 年以上的实时测试数据,包括室内温湿度、人员行为及供暖空调能耗等进行体现及验证。

3 栋住宅分别位于江苏南通、浙江杭州、四川宜宾,各住宅模型见图 6。其中南通某住宅共 4 层 16 户,建筑面积 2 312 m<sup>2</sup>,记为 A 楼;杭州某住宅共 18 层 36 户,建筑面积 4 141 m<sup>2</sup>,记为 B 楼;宜宾某住宅共 9 层 18 户,建筑面积 2 418 m<sup>2</sup>,记为 C 楼。



a 江苏南通某4层住宅 b 浙江杭州某18层住宅 c 四川宜宾某9层住宅

图6 3栋住宅模型

## 6.1 工况设计

3 栋住宅均采用了优于 JGJ 134—2010 标准要求的围护结构,旨在限制建筑冬季失热和夏季得热,同时优化户型开口布置,创造良好的自然通风条件,尽可能地提升建筑在非人工冷热源环境下的室内舒适水平,延长非供暖空调期。各住宅采用的节能技术措施见表 1。

表1 建筑基本信息

		设计值			JGJ 134—2010 规范限值
		A 楼	B 楼	C 楼	
围护结构传热系数/(W/(m <sup>2</sup> ·K))	屋面	0.21	0.33	0.54	0.80
	外墙	0.29	0.45	0.65	1.00
	分户墙	0.56	1.65	1.65	2.00
	外窗	1.00	1.50	2.40	2.50~4.70
外窗综合遮阳系数	东、西向 0.17,南向 0.33	东、西向 0.40,南向 0.42	东、西向 0.40,南向 0.42	东、西向 0.40,南向 0.45	
其他被动式优化设计	活动外遮阳+水平遮阳;选址规划和户型设计利于自然通风	活动外遮阳;户型设计利于自然通风	户型设计利于自然通风		
设备 COP 提升(冬/夏)	2.5/3.1	2.5/3.0	3.0/3.0	1.9/2.3	

采用 EnergyPlus<sup>[53]</sup> 进行模拟,内扰设置参照 JGJ 134—2010,具体见表 2。

## 6.2 模拟结果及分析

### 6.2.1 室内得热和失热



表2 室内设计参数及内扰设置

人员散热量	1.2 met(静坐)
人员在室时间	客厅:08:00—12:30,14:00—22:00; 卧室:12:30—14:00,22:00—次日 08:00
照明功率	6 W/m <sup>2</sup>
照明开启时间	客厅:17:00—22:00,卧室:22:00—24:00
设备功率	4.3 W/m <sup>2</sup>
自然通风策略	人员在室时段,房间温度不满足舒适需求时优先开启自然通风
空调设备启停策略	人员在室时段,自然通风不满足室内热舒适需求时开启空调设备
建筑整体气密性	1 h <sup>-1</sup>

考察人员全天在室、无自然通风的不利情况下,A,B,C楼冬夏季设计日室内累计显热得热,模拟计算结果见表3。可以看出:虽然3栋住宅处于长

表3 设计日室内累计显热得热和失热分布

%

	占总得热比例(夏季设计日)			占总失热比例(冬季设计日)		
	A楼	B楼	C楼	A楼	B楼	C楼
渗透风得热	16.7	21.8	12.0	61.3	62.8	47.2
非透光围护结构得热	22.2	25.5	12.6	35.8	27.8	35.8
透光围护结构得热	4.7	7.7	2.3	2.9	9.4	17.0
通过透光围护结构的太阳辐射得热	8.8	9.3	11.0	-12.9	-10.0	-16.7
室内热源得热	47.6	35.6	62.0	-31.5	-21.8	-77.2

### 6.2.2 室内冷负荷和热负荷

表4给出了上述不利条件下设计日室内累计显热负荷的分布情况。对于夏季,3栋住宅的冷负荷分布呈现相似规律,但却与表3中室内得热分布情况不同。此时由围护结构形成的冷负荷占比最大,其次是室内热源冷负荷,最后是渗透风冷负荷。这是由于模拟建筑中采用的是房间空调器,各项得热中仅部分以对流方式与室内空气换热,成为冷负

表4 设计日室内累计显热冷(热)负荷分布

%

	占总冷负荷比例(夏季设计日)			占总热负荷比例(冬季设计日)		
	A楼	B楼	C楼	A楼	B楼	C楼
围护结构负荷	53.9	60.6	55.1	19.7	26.3	8.1
渗透风负荷	16.7	20.8	13.3	80.3	73.7	91.9
室内热源负荷	29.4	18.6	31.6	-27.6	-15.4	-69.5

### 6.2.3 全年供暖空调能耗

按照表2设置得出3栋住宅不同情境下全年供暖空调能耗模拟结果,见图7。仅按照JGJ 134—2010限值设置围护结构及设备系统,基准建筑全年供暖空调能耗均超过了38 kW·h/m<sup>2</sup>。示范住宅采用了被动节能措施后,全年供暖空调能耗出现了显著下降,A,B,C楼分别达到了24.15,25.58,26.56 kW·h/m<sup>2</sup>。在此基础上采用高效设备后,能耗进一步下降,分别降至18.12,19.53,19.33 kW·h/m<sup>2</sup>,均满足了示范住宅工程全年能耗不超过20 kW·h/m<sup>2</sup>的目标。本文模拟对人员

江流域不同地区,但是其冬夏季室内得热分布呈现相似规律,即夏季室内热源累计得热占比最大;对于失热,冬季室内冷风渗透起主导作用;由于3栋示范住宅均采用了优于标准要求的保温隔热措施,使得通过非透光围护结构的夏季得热和冬季失热占比次之。冬季室内热源及透过外窗等的太阳辐射得热抵消了由其他因素引起的失热。冬夏季由渗透风形成的显热失热与显热得热占比差别大的原因在于冬季供暖时室内外温差(约12℃)大于夏季空调(约6℃)。对于冬季除了考虑保温措施外,也应通过合理的气密性措施,减少由室外冷风渗透造成的室内失热。

荷,辐射部分则需要先加热室内表面后再通过对流形式进入空气中成为冷负荷。冬季则与室内得热分布相似,渗透风形成的累计显热负荷占主导地位,但C楼累计热负荷明显小于A,B楼。这是由于C楼位于四川宜宾,供暖室外计算温度为4.5℃,明显高于南通(A楼,-1.0℃)和杭州(B楼,0.0℃)。冬季温和的气候使得C楼供暖需求显著小于A,B楼。

行为进行了简化,全年能耗模拟结果与实际值可能存在偏差,上述示范住宅的实际供暖空调能耗将在建筑建成后进行1年以上的实时监测。

## 7 结语

本文基于建筑热过程构建桑基能流图,分析了室内热环境营造过程中的主要因素,并总结了现有节能技术的原理和应用现状;对长江流域典型城市住宅室内热环境进行了模拟分析,综合自然通风等措施及提高设备能效基础上可实现全年供暖空调能耗不超过20 kW·h/m<sup>2</sup>。本文分析时仅针对室内显热得热及负荷,未考虑室内潜热得热及负荷。

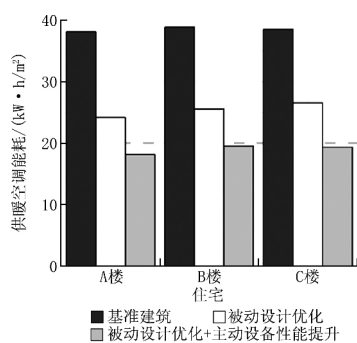


图7 全年供暖空调能耗模拟结果

我国长江流域全年潮湿,与北方相比,建筑墙体湿传递对墙体的热工性能有重要影响<sup>[54]</sup>,同时高湿的室外空气渗入室内所带来的湿负荷也比较大<sup>[55]</sup>,具体有待后续研究完善。

每种营造技术都有其限制条件和适用范围,如果仅从建筑热环境营造所涉及的某单一过程入手,或进行简单的技术堆砌,而不从建筑热过程整体考虑,深入分析技术的节能路径与适用范围,将无法保证预期的节能效果。长江流域气候特点、当地居民的热舒适调控行为及用能模式,使该地区建筑热过程有其自身特点,决定了该地区需要探索一条与北方不同的室内热环境营造技术路径:

1) 夏季炎热、冬季阴冷、全年高湿的气候,使得提高建筑围护结构保温隔热性能无法获得类似我国北方地区的显著节能效果。该地区应从限制室内得热和失热的角度出发,通过合理的隔热及遮阳措施减少夏季得热,提高建筑气密性及围护结构热工性能加强冬季保温。

2) 设计温度的确定将直接影响室内热环境营造系统的设计负荷,其设定值应考虑人员对环境生理、心理及行为等适应性因素,在研究该地区居民可接受的室内热舒适温度范围的基础上确定。

3) “部分时间、部分空间”的供暖空调用能习惯,使得该地区不能直接照搬北方地区“全时间、全空间”集中供暖模式。人员行为对建筑热环境及建筑能耗的影响更加突显,更加不易预测,但同时也意味着巨大的节能潜力。对于该地区的室内热环境营造,应当基于人员行为确定室内热环境改善的定量需求,做到供冷量和供热量与需求匹配。

4) 高效末端及设备系统对于降低供暖空调系统能耗效果显著,应开发适宜于长江流域气候特征及“部分时间、部分空间”用能特点的冬夏两用舒适

性末端和高效热泵设备系统。

影响建筑室内热环境因素众多,关系复杂。长江流域室内热环境营造应以延长非供暖空调期、提升供暖空调系统全年能效为目标。应在深入分析该地区建筑热过程的基础上,结合不同的运行模式和生产生活习惯,明确室内热环境营造需求;同时采用优秀的建筑设计,最大程度延长非供暖空调期,配合高效冷热源设备与供暖空调系统,最终实现该地区室内热环境低碳绿色营造。

致谢

感谢“十三五”国家重点研发计划项目“长江流域建筑供暖空调解决方案和相应系统”各参与单位及研究人员作出的积极贡献。

参考文献:

- [1] 姚润明,喻伟,王晗,等. 长江流域建筑供暖空调解决方案和相应系统重点项目研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(2): 1-9
- [2] 刘晓华,谢晓云,张涛,等. 建筑热湿环境营造过程的热学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 2
- [3] NING H R, WANG Z J, ZHANG X X, et al. Adaptive thermal comfort in university dormitories in the severe cold area of China [J]. Building and Environment, 2016, 99: 161-169
- [4] 宁浩然. 严寒地区供暖建筑环境人体热舒适与热适应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 58
- [5] 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]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 10
- [6] 孔文慷,龚延风,于昌勇,等. 夏热冬冷地区被动式居住建筑夏季空调系统形式研究[J]. 暖通空调, 2017, 47(7): 112-117
- [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] YAO R M, COSTANZO V, LI X Y, et al. The effect of passive measures on thermal comfort and energy conservation. A case study of the hot summer and cold winter climate in the Yangtze River region [J]. Journal of Building Engineering, 2018, 15: 298-310
- [9] 阮方,钱晓倩,朱耀台,等. 分室间歇用能对墙体内外保温节能效果的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(1): 1-7
- [10] YU J H, TIAN L W, YANG C Z, et al. Sensitivity analysis of energy performance for high-rise residential envelope in hot summer and cold winter zone of China[J]. Energy and Buildings, 2013, 64:

- 264-274
- [11] CHOW D H C, LI Z L, DARKWA J. The effectiveness of retrofitting existing public buildings in face of future climate change in the hot summer cold winter region of China [J]. Energy and Buildings, 2013, 57: 176-186
- [12] YU J H, YANG C Z, TIAN L T. Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(8): 1536-1546
- [13] SUBRAMANYAM V, PARAMSHIVAN D, KUMAR A, et al. Using Sankey diagrams to map energy flow from primary fuel to end use[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 91: 342-352
- [14] 彦启森,赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1986:4
- [15] 杨柳,杨晶晶,宋冰,等. 被动式超低能耗建筑设计基础与应用[J]. 科学通报,2015,60(18): 1698-1710
- [16] 付祥钊,樊燕. 夏热冬冷地区供暖探讨[J]. 暖通空调,2013,43(6): 78-81
- [17] 中国建筑科学研究院. 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: 62
- [18] 刘玮,郝雨楠. 智能窗发展现状研究[J]. 门窗,2017(8): 12-14
- [19] 李峥嵘,句俊玲. 电致变色玻璃对办公建筑室内光热环境的控制[J]. 建筑节能,2016,44(2): 68-71,114
- [20] ZHANG T T, TAN Y F, YANG H X, et al. The application of air layers in building envelopes: a review[J]. Applied Energy, 2016, 165(Supplement C): 707-734
- [21] 潘振. 我国建筑整体气密性研究应用现状[J]. 建筑节能, 2018, 46(3): 53-56
- [22] 丰晓航,燕达,彭琛,等. 建筑气密性对住宅能耗影响的分析[J]. 暖通空调,2014,44(2): 5-14
- [23] CHENG P L, LI X F. Air infiltration rates in the bedrooms of 202 residences and estimated parametric infiltration rate distribution in Guangzhou, China[J]. Energy and Buildings, 2018, 164: 219-225
- [24] 李百战. 空调动态负荷计算机方法的研究[J]. 重庆建筑工程学院学报,1986(2): 74-80
- [25] 田胜元,李百战. 空调负荷的动态分析与设计负荷[J]. 重庆建筑工程学院学报,1988(3): 27-35
- [26] Department of Energy, US. EnergyPlus Version 8.7 documentation: engineering reference [EB/OL]. [2018-12-25]. <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-7/engineering-reference/air-system-control.html#air-system-control>
- [27] YAO R M, LI B Z, LIU J. A theoretical adaptive model of thermal comfort—adaptive predicted mean vote (aPMV)[J]. Building and Environment, 2009, 44(10): 2089-2096
- [28] YANG Y, LI B Z, LIU H, et al. A study of adaptive thermal comfort in a well-controlled climate chamber[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 76: 283-291
- [29] LIU J, YAO R M, WANG J, et al. Occupants' behavioural adaptation in workplaces with non-central heating and cooling systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 35: 40-54
- [30] 刘红,郑文茜,李百战,等. 夏热冬冷地区非采暖空调建筑室内热环境行为适应性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(6): 1805-1812
- [31] 重庆大学,中国建筑科学研究院. 民用建筑室内热湿环境评价标准:GB/T 50785—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2012:11
- [32] LI B Z, YU W, LIU M, et al. Climatic strategies of indoor thermal environment for residential buildings in Yangtze River Region, China[J]. Indoor and Built Environment, 2011, 20(1): 101-111
- [33] WANG Z, DE DEAR R, LIN B R, et al. Rational selection of heating temperature set points for China's hot summer-cold winter climatic region [J]. Building and Environment, 2015, 93(2): 63-70
- [34] 徐振坤,李金波,石文星,等. 长江流域住宅用空调器使用状态与能耗大数据分析[J]. 暖通空调,2018,48(8): 1-8,89
- [35] 徐强,潘黎,王博. 间歇用能模式下外墙内保温的适宜性分析[J]. 上海节能,2014(10): 7-10
- [36] 阮方,钱晓倩,钱匡亮,等. 实际用能方式下的夏热冬冷地区居住建筑围护结构节能设计研究[J]. 建筑科学,2015,31(10): 112-116
- [37] 潘黎,徐强,邱童,等. 间歇用能模式下内、外保温墙体蓄热性能研究[J]. 暖通空调,2014,44(7): 59-62, 105
- [38] 张亮,晏华,余荣升,等. 相变材料的研究进展及其在建筑领域的应用综述[J]. 材料开发与应用,2010,33(1): 69-73
- [39] ZHU N, LIU P, HU P, et al. Modeling and simulation on the performance of a novel double shape-stabilized phase change materials wallboard [J]. Energy and Buildings, 2015, 107(Supplement C): 181-190
- [40] 王宝龙,石文星,李先庭. 空调蓄冷技术在我国的研究进展[J]. 暖通空调,2010,40(6): 6-12

(下转第 42 页)

- [2] STOECKER W F. How frost formation on coils affects refrigeration systems [J]. Refrigeration Engineering, 1957, 65(2): 42-46
- [3] BARROW H. A note on frosting of heat pump evaporator surfaces[J]. Heat Recovery System, 1985, 5(3): 195-201
- [4] YAO Y, JIANG Y Q, DENG S M, et al. A study on the performance on the air-side heat exchanger under frosting in air-source heat pump water heater/chiller unit[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 17-18
- [5] 张杰, 兰菁, 杜瑞环, 等. 几种空气源热泵除霜方式的性能比较[J]. 制冷学报, 2012, 33(2): 47-49
- [6] 汪峰, 梁彩华, 张小松. 超疏水翅片表面的抑霜机理和融霜特性[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(5): 1066-1070
- [7] 汪峰, 梁彩华, 吴春晓, 等. 疏水性铝翅片表面的结霜/融霜特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(4): 1368-1373
- [8] WANG F, LIANG C H, YANG M T, et al. Preliminary study of a novel defrosting method for air source heat pumps based on superhydrophobic fin[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90: 136-144
- [9] 张又升, 赵敬德, 王金龙. 空气源热泵室外换热器翅片管的融霜过程分析[J]. 流体机械, 2016, 44(6): 66-71
- [10] KIM J, CHOI H J, KIM K C. A combined dual hot-gas bypass defrosting method with accumulator heater for an air-to-air heat pump in cold region[J]. Applied Energy, 2015, 147: 344-352
- [11] 谭海辉, 陶唐飞, 徐光华, 等. 翅片管式蒸发器超声波除霜理论与技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(9): 105-113
- [12] TAN H H, XU G H, TAO T F, et al. Investigation on the ultrasonic propagation mechanism and its application on air-source heat pump defrosting[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 479-492
- [13] 张凡, 吴薇, 王琴, 等. 一种复合型无霜空气源热泵系统性能分析[J]. 暖通空调, 2015, 45(12): 82-87
- [14] 郝鹏飞, 王沅浩, 王志华, 等. 蓄热除湿耦合型无霜空气源热泵热水器实验研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(4): 85-91
- [15] 姚杨, 姜益强, 高强. 无霜空气源热泵系统初步实验研究[J]. 建筑科学, 2012, 28(2): 198-199
- [16] 付慧影, 姜益强, 姚杨. 喷淋溶液对无霜空气源热泵系统特性的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(增刊 2): 193-197
- [17] SU W, ZHANG X S. Performance analysis of a novel frost-free air-source heat pump with integrated membrane-based liquid desiccant dehumidification and humidification[J]. Energy and Buildings, 2017, 145: 293-303
- [18] SU W, LI W H, ZHANG X S. Simulation analysis of a novel no-frost air-source heat pump with integrated liquid desiccant dehumidification and compression-assisted regeneration [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 1157-1169
- ~~~~~
- (上接第 11 页)
- [41] LIN B R, WANG Z, LIU Y C, et al. Investigation of winter indoor thermal environment and heating demand of urban residential buildings in China's hot summer-cold winter climate region[J]. Building and Environment, 2016, 101(Supplement C): 9-18
- [42] 王者. 夏热冬冷地区城镇住宅采暖需要与适宜末端研究[D]. 北京: 清华大学, 2017: 21
- [43] 陈金华, 张静, 范凌泉, 等. 重庆市住宅冬季热环境及供暖现状[J]. 暖通空调, 2016, 46(11): 90-94
- [44] 江亿. 南方不适合集中供暖[J]. 中国经济和信息化, 2013(增刊 1): 102
- [45] 丁勇, 苏莹莹, 李百战, 等. 全新风机械通风在重庆地区的应用[J]. 煤气与热力, 2011, 31(2): 18-21
- [46] 朱新荣, 杨柳, 刘加平. 建筑夜间通风降温研究进展[J]. 暖通空调, 2010, 40(6): 111-116
- [47] 李峥嵘, 曹斌. 上海地区间歇式空调建筑夜间通风降温策略[J]. 暖通空调, 2013, 43(7): 73-77
- [48] YAO R M, LI B Z, STEEMERS K, et al. Assessing the natural ventilation cooling potential of office buildings in different climate zones in China [J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2697-2705
- [49] 李宁, 石文星, 王宝龙, 等. 广义空气源热泵制热/除霜周期的性能模型[J]. 制冷学报, 2015, 36(2): 1-7
- [50] 李先庭, 宋鹏远, 石文星, 等. 实现冬夏季均高效运行的新型热泵系统——柔性热泵系统[J]. 暖通空调, 2016, 46(12): 1-7
- [51] 燕达, 丰晓航, 王闯, 等. 建筑中人为模拟研究现状和展望[J]. 建筑科学, 2015, 31(10): 178-187
- [52] 燕达, 陈友明, 潘毅群, 等. 我国建筑能耗模拟的研究现状与发展[J]. 建筑科学, 2018, 34(10): 130-138
- [53] CRAWLEY D B, LAWRIE L K, WINKELMANN F C, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program[J]. Energy and Buildings, 2001, 33(4): 319-331
- [54] 刘向伟. 夏热冬冷地区建筑墙体热、空气、湿耦合迁移特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015: 116
- [55] 刘拴强, 刘晓华, 江亿. 温湿度独立控制空调系统中独立新风系统的研究(1): 湿负荷计算[J]. 暖通空调, 2010, 40(1): 80-84