

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-210-07

夏热冬冷地区铁路站房复合通风效果分析

卢 焱¹ 周傲轩² 于文华³ 沈天赐⁴

(1. 中国铁建电气化局集团有限公司新型建筑工程公司 太原 030000;

2. 广东迦南通用设备有限公司 佛山 528200;

3. 四川省艾耳能科技有限公司 成都 610083;

4. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 铁路站房采用自然通风+机械通风+空调的复合通风系统可以提高人员热舒适性, 同时降低能耗。采用 EnergyPlus 软件对夏热冬冷地区铁路站房的自然通风潜力、复合通风切换温度和复合通风策略下的通风效果进行了模拟研究。结果表明: 在非供暖季, 夏热冬冷地区铁路站房自然通风平均换气量可达 60~70m³/s, 平均总换气次数可达 1.9 次/h; 复合通风上下切换温度应设置在 23℃ 和 15℃; 与完全采用机械制冷空调系统相比, 自然通风+机械通风+空调的复合通风系统可降低 6.5 万 kWh 左右的能耗。

【关键词】 夏热冬冷地区; 铁路站房; 复合通风; 热舒适性; 节能分析

中图分类号 TU834 文献标志码 A

Analysis on Hybrid Ventilation Effect of Railway Station Buildings in Hot Summer and Cold Winter Regions

Lu Yao¹ Zhou Aoxuan² Yu Wenhua³ Shen Tianci⁴

(1.China Railway Construction Electrification Bureau Group Co., Ltd, New Construction Engineering Company, Taiyuan, 030000;

2.Guangdong Jianan General Equipment Co., Ltd, Foshan, 528200;

3.Sichuan Air Energy Technology Co., Ltd, Chengdu, 610083;

4.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The use of a hybrid ventilation system consisting of natural ventilation, mechanical ventilation and air conditioning in railway station buildings can improve personnel thermal comfort while reducing energy consumption. This paper uses EnergyPlus software to simulate the natural ventilation potential, hybrid ventilation switching temperature and ventilation effect under hybrid ventilation strategies for railway station buildings in hot summer and cold winter regions. The results show that during non-heating seasons the average natural ventilation rate of railway station buildings in hot summer and cold winter areas can reach up to 60-70m³/s. The average total air change rate can reach 1.9 times/h. The temperatures for switching up and down in hybrid ventilation should be set at 23℃ and 15℃. Compared with fully adopting the mechanical cooling system, the hybrid ventilation system combining natural ventilation with mechanical ventilation and air conditioning can reduce energy consumption by about 65000 kWh.

【Keywords】 hot summer and cold winter regions; railway station buildings; hybrid ventilation; thermal comfort; energy saving analysis

作者简介: 卢 焱 (1989.08-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: 386784525@qq.com

通讯作者: 沈天赐 (1996.05-), 男, 在读博士研究生, E-mail: stc@my.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2024-01-18

0 引言

铁路站房是整个铁路交通体系的重要基础设施, 具有大空间、高负荷、客流集中的特点^[1], 其空调系统能耗大部分被通风系统所消耗。夏热冬冷地区夏季闷热, 冬季湿冷, 而过渡季则相对温和湿润, 通风潜力较大^[2]。复合通风是指自然通风和机械通风在一天不同时刻或一年的不同季节里, 在满足热舒适和室内空气品质的前提下交替或联合运行, 在自然通风和机械通风不能满足的情况下再开启空调进行降温的通风系统^[3]。夏热冬冷地区铁路站房采用复合通风系统, 可提高人员热舒适性, 同时减小空调系统开启时间, 大幅降低系统运行能耗。

目前有较多学者对复合通风系统进行了研究, Short^[4]等对位于美国芝加哥地区的学院新建校舍应用了复合通风技术, 并对运行效果进行了跟踪调查。Li^[5]等对复合通风系统进行了数值模拟研究。罗国志^[6]等利用 EnergyPlus 对成都地区的办公建筑自然通风、机械通风和复合通风应用效果进行了分析, 复合通风可有效降低风机能耗, 达到节能目的。沈意成^[7]认为在过渡季节适合采用自然通风或自然通风辅以机械通风的复合通风方式来保障室内舒适性并节能。柯尊友^[8]对某采用不同系统的机场航站楼进行全年能耗模拟, 得出机械辅助自然通风的复合通风比全部采用机械通风节能 66.7%, 比 VAV 空调系统节能 96.6%。卢佑波^[9]对广州某航站楼进行节能性研究, 得出利用空调与通风联合运行策略可大量减少空调运行时间。目前, 针对夏热冬冷地区铁路站房复合通风的研究还较少。

本文提出一种适用于铁路站房的复合通风控制策略, 并采用 EnergyPlus 软件针对夏热冬冷地区中小型铁路站房的复合通风效果进行研究, 分析复合通风系统在夏热冬冷地区铁路站房的应用效果。

1 复合通风运行策略

1.1 气象数据分析

夏热冬冷地区处于我国寒冷地区与热带地区之间的过渡带, 覆盖范围大致为陇海线以南, 南岭以北, 四川盆地以东, 范围广大^[10]。本文选择武汉、南京和成都作为夏热冬冷地区的代表性城市对其气候特征进行分析。

图 1 显示了夏热冬冷地区的三个代表性城市

的月平均室外温度, 三个地区最冷月 1 月平均温度为 0~10℃, 最热月 7 月平均温度 25~30℃, 符合夏热冬冷地区指标定义。武汉和南京的夏季室外温度较高, 成都夏季室外温度较低。成都冬季室外温度较高, 武汉和南京冬季室外温度较低。

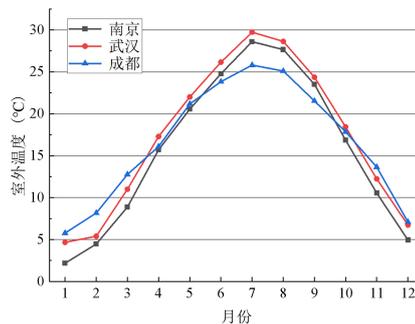


图 1 室外月平均温度

Fig.1 Outdoor monthly average temperature

竞峰^[11]等对部分城市建筑的通风潜力进行分析, 得出利用自然通风时室外空气最低温度为 12℃。从图 1 可以看出, 三个城市在 3 月~11 月间室外温度基本高于 12℃, 而三个城市的供暖期也基本在 12 月~次年 3 月^[10], 该段时间不考虑自然通风。因此, 选择三个城市的非供暖期进行复合通风系统效果研究, 其复合通风时间如表 1 所示。

表 1 复合通风时间

Table 1 Hybrid ventilation time

| 城市 | 供暖期 | 复合通风时间 |
|----|--------------------|--------------------|
| 南京 | 11 月 24 日~3 月 12 日 | 3 月 13 日~11 月 23 日 |
| 武汉 | 11 月 27 日~3 月 4 日 | 3 月 5 日~11 月 26 日 |
| 成都 | 12 月 8 日~2 月 14 日 | 2 月 15 日~12 月 7 日 |

1.2 热舒适评价标准

针对站房候车厅复合通风的研究, 需确定通风条件下的室内热舒适评价标准。目前, 国际上广泛应用于自然通风环境下的热舒适标准主要是适应性模型, 站房候车厅的适应性模型^[12]采用式 (1) 分析。

$$t_c = 0.228t_o + 17.03 \quad (1)$$

式中, t_c 为室内热中性温度, °C; t_o 为室外环境温度, °C。

以热中性温度为中心, 以 7℃ 为 80% 的人可接受的舒适区宽度定义室内舒适温度的范围, 即 $t_c \pm 3.5$ °C。

1.3 复合通风控制目标参数

对于复合通风建筑而言, 室内的热舒适以及空

气环境主要是通过自然通风、机械通风和空调系统协调配合来保障。通过对影响人体热舒适及室内空气质量的因素进行分析,目前通风控制研究中常用的控制参数包括室内外空气温度、湿度、室内空气流速、空气换气次数以及室内 CO_2 浓度等^[13-15]。考虑实际运行的简便性,本文铁路站房复合通风控制系统调控的参量选用室内外空气温度和室内外空气焓值。

1.4 复合通风切换温度

复合通风切换温度决定了开启自然通风和机械通风的时间。本文中,当采用自然通风时,人员活动区温度与热舒适下限温度交点所对应时刻的室外空气温度,即为复合通风下切换温度 T_{wx} ; 当仅采用自然通风无法将室内温度控制在热舒适范围内,即人员活动区温度与热舒适上限温度交点所对应时刻的室外空气温度,即为复合通风上切换温度 T_{ws} 。

1.5 复合通风控制策略

复合通风控制逻辑为:检测室外空气温度 T_w , 当室外空气温度 T_w 大于 T_{wx} (通风下切换温度) 且小于 T_{ws} (通风上切换温度) 时,开启自然通风。检测室外空气温度和室内外空气的焓值,当室外空气温度 T_w 大于 T_{ws} 且室外空气焓值 E_w 低于室内空气焓值 E_n 时,关闭自然通风,开启机械通风风机。然后,对室内空气温度 T_n 进行持续监测,若室内空气温度持续上升,超过热舒适上限温度,则关闭机械通风风机和自然通风,开启空调系统,若室内空气温度持续降低,则保持机械通风。当室外空气温度 T_w 大于 T_{ws} 且室内空气焓值 E_n 高于室外空气焓值 E_w 时,关闭机械通风风机和自然通风,开启空调系统。

2 模型概况

2.1 建筑概况

本文以中小型铁路站房建筑为研究对象,该建筑仅一层,为正东朝向,总面积为 5135.1m^2 ,顶部为坡屋顶,顶部最高为 22.2m 。候车厅上部可开启窗户面积为 86.9m^2 ,下部外门开启面积为 84m^2 。

2.2 计算模型

采用 Designbuilder 软件进行建模,该铁路站房模型如图 2 所示,门窗分布如图 3 所示。

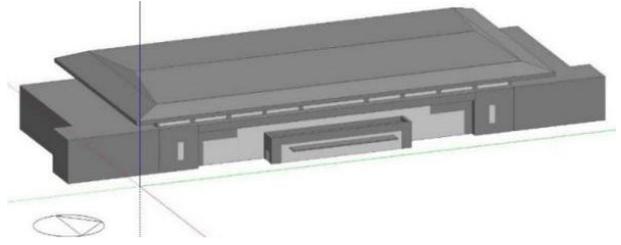


图 2 站房模型图

Fig.2 Station model



图 3 站房门窗分布图

Fig.3 Distribution of station doors and windows

2.3 模拟参数设置

本文主要研究该站房建筑的自然通风效果,模拟时间为非供暖季(夏季和过渡季),具体时段见表 1。模拟所采用的夏热冬冷地区代表城市的气象参数来源于 EnergyPlus 官网。

站房的围护结构参数满足《建筑节能与可再生能源利用通用规范》^[16]中规定的围护结构传热系数限值,外墙传热系数为 $0.6\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,屋顶传热系数为 $0.4\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,外窗(含透光幕墙)传热系数为 $2.2\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。站房内最高聚集人员为 1000 人,设备负荷为 $15\text{W}/\text{m}^2$,室内灯光负荷取 $9\text{W}/\text{m}^2$ ^[17]。顶部外窗全天开启,而下部外门只在开站时间即 06:00~23:00 内开启。机械通风风机的通风量为 2.5 次/h^[17]。

3 结果分析

采用 EnergyPlus 软件对夏热冬冷地区三个代表城市铁路站房非供暖季的自然通风潜力、复合通风切换温度和复合通风策略下的通风效果进行模拟分析。

3.1 自然通风潜力

(1) 自然通风换气量

图 4 至图 6 分别给出了南京、武汉、成都地区铁路站房在非供暖季的自然通风换气量,候车厅的总换气量分别在 $20\sim 100\text{m}^3/\text{s}$ 、 $20\sim 90\text{m}^3/\text{s}$ 、 $20\sim 90\text{m}^3/\text{s}$ 的范围内变化,非供暖季的平均总换气量分别为 $69.6\text{m}^3/\text{s}$ 、 $61.3\text{m}^3/\text{s}$ 和 $63.6\text{m}^3/\text{s}$,平均换气次数分别

为 2.0 次/h、1.8 次/h 和 1.9 次/h。三个代表城市都属于内陆地区, 武汉和成都室外平均风速相差不多, 在 1.2m/s 左右, 南京的室外平均风速相对较高一些, 因此南京地区的自然通风换气量相对较高些。逐时统计来看, 夏热冬冷地区铁路站房的自然通风换气量多数在 60~70m³/s, 换气次数在 1.9 次/h。

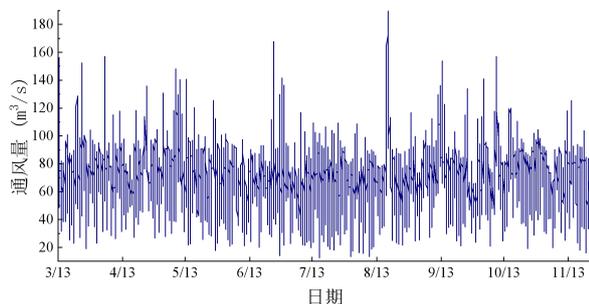


图 4 南京地区自然通风换气量

Fig.4 Natural ventilate rate in Nanjing

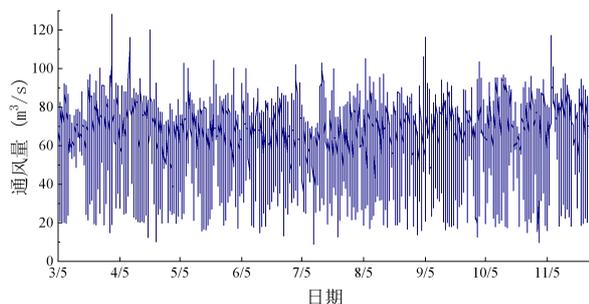


图 5 武汉地区自然通风换气量

Fig.5 Natural ventilate rate in Wuhan

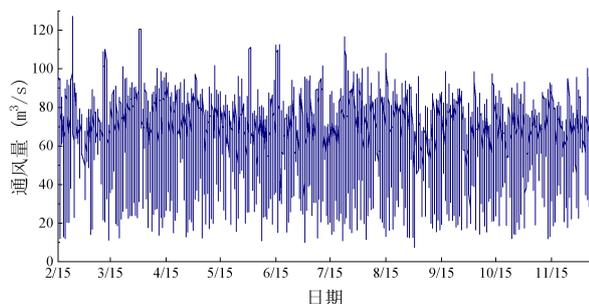


图 6 成都地区自然通风换气量

Fig.6 Natural ventilate rate in Chengdu

(2) 自然通风热舒适性

图 7 至图 9 分别给出了南京、武汉、成都地区自然通风条件下人员活动区温度变化, 同时给出了 80% 的人可接受的热舒适上下限温度。当人员活动区温度处于热舒适上下限温度区间时, 表明有 80%

的人对室内温度感到舒适。

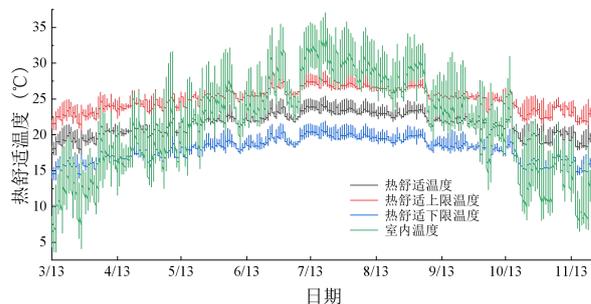


图 7 南京地区站房人员活动区温度

Fig.7 Air temperature in the occupied zone of station buildings in Nanjing

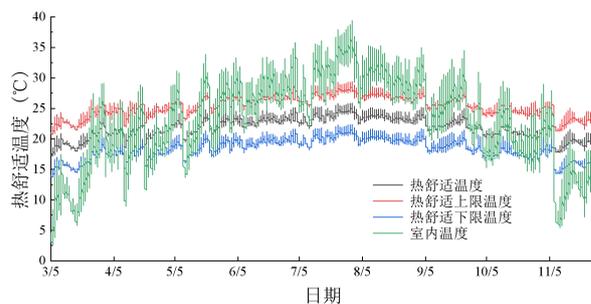


图 8 武汉地区站房人员活动区温度

Fig.8 Air temperature in the occupied zone of station buildings in Wuhan

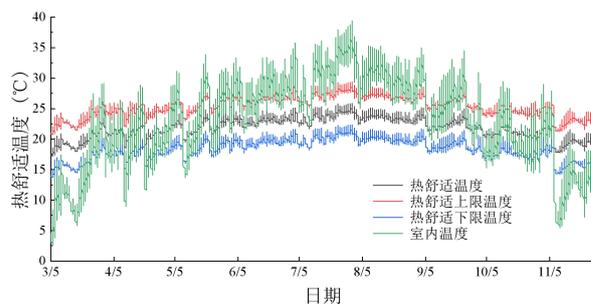


图 9 成都地区站房人员活动区温度

Fig.9 Air temperature in the occupied zone of station buildings in Chengdu

由图 7 可见, 南京地区在 4 月初至 5 月中旬和 9 月初至 10 月中旬, 采用自然通风, 即不进行控制的条件下 (外窗全天开启, 外门工作时间开启) 可以达到热舒适需求而不开启空调系统。而在 5 月中旬至 9 月初, 人员活动区温度基本高于热舒适上限温度, 需要关闭外窗减少自然通风, 通过机械通风风机或空调设备进行降温。由图 8 可见, 对于武汉地区, 在 4 月初至 5 月中旬和 9 月中旬至 11

中旬,仅采用自然通风即可满足热舒适需求。而在5月中旬至9月中旬,需要关闭外窗减少自然通风,通过机械通风风机或空调设备进行降温。由图9可见,对于成都地区,在4月中旬至5月末和9月中旬至11月中旬,仅采用自然通风即可满足热舒适需求。在6月初至9月中旬,需要关闭外窗减少自然通风,通过机械通风风机或空调设备进行降温。

从三个城市室内人员活动区温度可见,夏热冬冷地区在非供暖期间有很大的自然通风潜力,在4月初至6月初以及9月初至10月末期间,有100天左右的时间可直接采用自然通风满足人员热舒适需求。

3.2 复合通风切换温度

由综合站房人员活动区温度图(见图7~图9)与室外月平均温度图(见图1)可见,三个城市复

合通风的上切换温度范围在22~27℃,下切换温度范围在13~17℃。为进一步确定最合理的上下切换温度取值,对非供暖期内复合通风系统在不同通风切换温度下的室内人员活动区热舒适时间和复合通风系统节能率进行分析。复合通风系统节能率为复合通风系统(机械通风风机+空调系统)相比于全采用空调系统节约的能耗与全采用空调系统能耗之比。

由图10(a)、11(a)和12(a)可见,当通风上切换温度不变时,通风下切换温度增加,非供暖期间的热舒适时间呈先升高后不变的趋势,在15℃左右,人员活动区热舒适小时数最多。而通风下切换温度不变,热舒适时间随通风上切换温度的增加而降低,在22~23℃时,室内人员活动区的热舒适小时数最多。

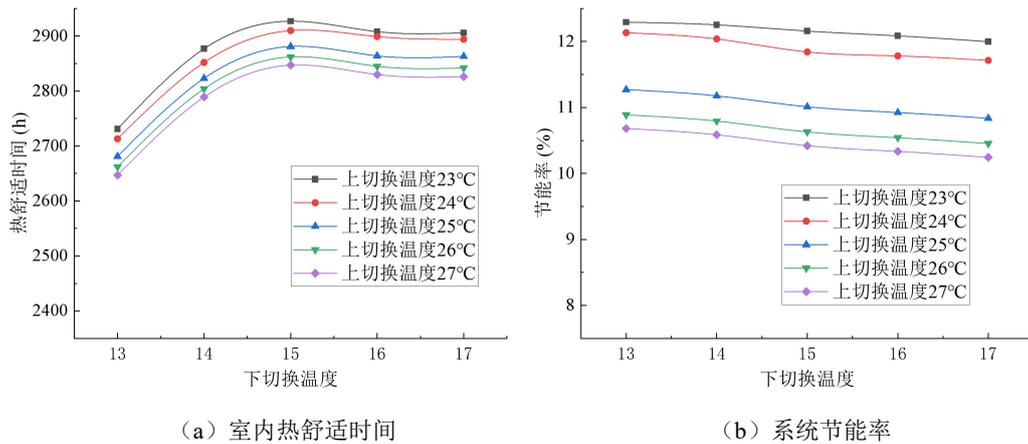


图10 南京地区不同通风切换温度下室内热舒适时间和节能率

Fig.10 Indoor thermal comfort time and energy saving rate under different ventilation switching temperatures in Nanjing

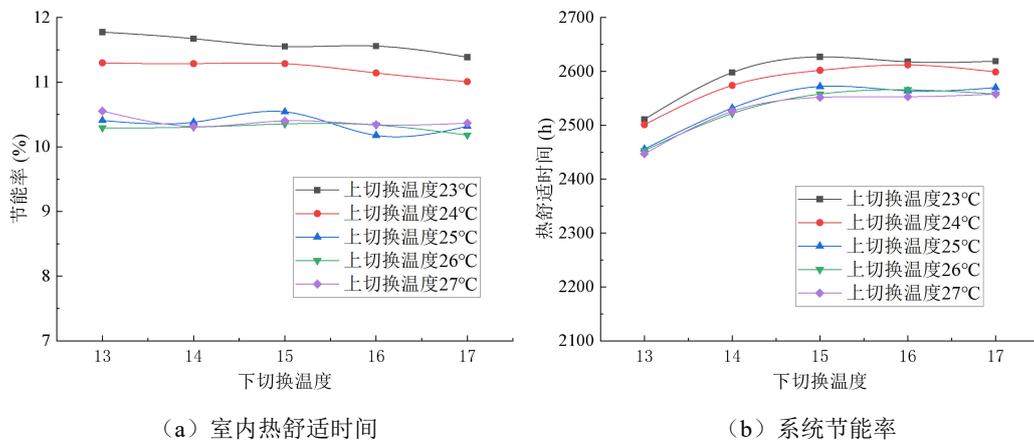
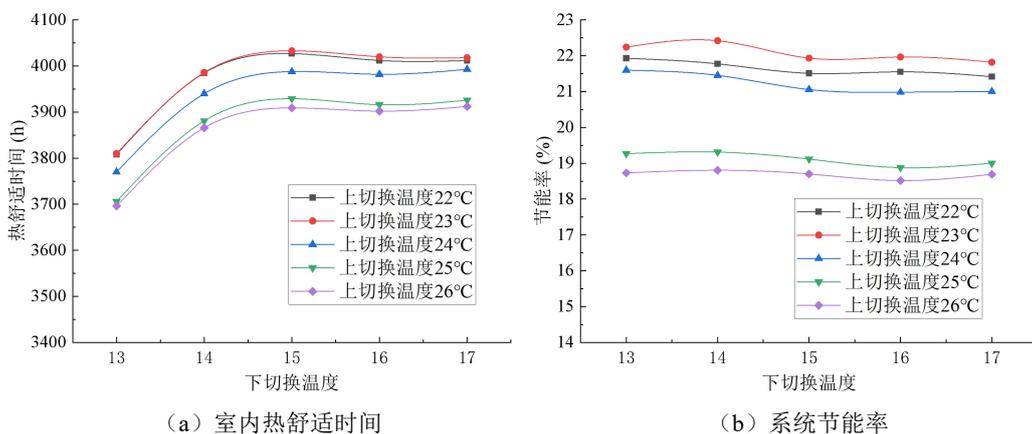


图11 武汉地区不同通风切换温度下室内热舒适时间和节能率

Fig.11 Indoor thermal comfort time and energy saving rate under different ventilation switching temperatures in Wuhan



(a) 室内热舒适时间

(b) 系统节能率

图 12 成都地区不同通风切换温度下室内热舒适时间和节能率

Fig.12 Indoor thermal comfort time and energy saving rate under different ventilation switching temperatures in Chengdu

由图 10 (b)、11 (b) 和 12 (b) 可见, 通风上切换温度确定了开启机械通风风机的时间, 复合通风系统的节能率与通风上切换温度密切相关, 受通风下切换温度的影响较小。通风下切换温度不变, 复合通风系统的节能率随通风上切换温度的增加而逐渐下降。但通风上换温度不能设定过低, 否则会增加机械通风风机能耗, 降低节能率。

综合考虑不同通风切换温度下的热舒适时间和节能率, 三个地区选择的通风上下切换温度分别为 15°C 和 23°C。

3.3 复合通风系统效果

根据上述确定的通风切换温度以及 1.5 节的控制策略, 采用 EnergyPlus 软件对铁路站房在非供暖季采用复合通风控制方案进行模拟计算。站房人员活动区的温度变化如图 13~15 所示。

从图 13~15 可以看出, 通过控制外窗、机械通风风机和空调的开启, 在非供暖季工作时间内, 夏热冬冷地区铁路站房复合通风系统控制下的室内人员活动区温度基本都处于热舒适范围内。

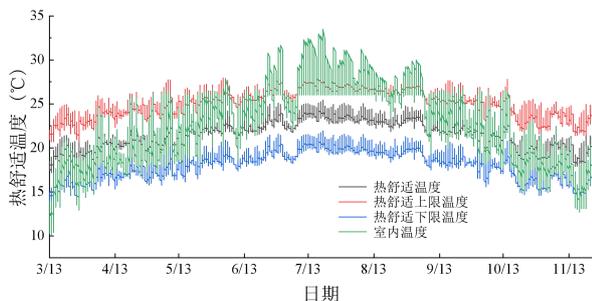


图 13 南京地区复合通风方案下的人员活动区空气温度
Fig.13 Air temperature of the occupied area under hybrid ventilation scheme in Nanjing

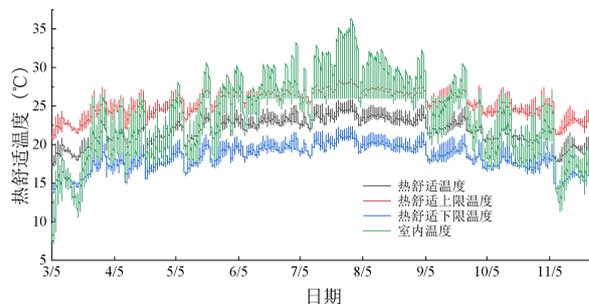


图 14 武汉地区复合通风方案下的人员活动区空气温度
Fig.14 Air temperature of the occupied area under hybrid ventilation scheme in Wuhan

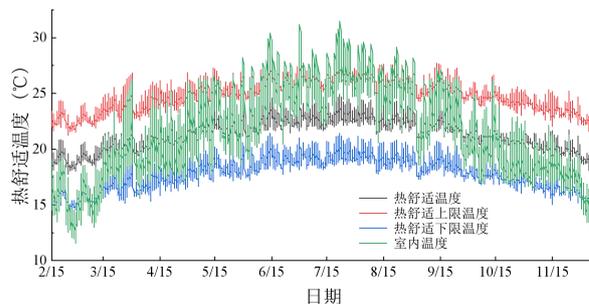


图 15 成都地区复合通风方案下的人员活动区空气温度
Fig.15 Air temperature of the occupied area under hybrid ventilation scheme in Chengdu

3.4 复合通风系统节能率

机械制冷空调系统主要考虑在制冷季开启冷水机组, 过渡季利用组合式空气处理机组的风机直接通风降温。对铁路站房分别采用自然通风+机械通风+空调的复合通风系统与机械制冷空调系统方案进行分析, 不同系统的能耗如表 2 所示。其中, 方案 1 为机械制冷空调系统, 方案 2 为复合通风系统。

表 2 两种降温方案能耗对比
Table 2 Comparison of energy consumption of two cooling schemes

| 城市 | 方案 1 能耗 (kWh) | 方案 2 能耗 (kWh) | 节约能耗 (kWh) | 节能率 |
|----|------------------|------------------|---------------|-------|
| 南京 | 48.7 万 | 42.8 万 | 5.9 万 | 12.1% |
| 武汉 | 55.7 万 | 49.3 万 | 6.4 万 | 11.5% |
| 成都 | 32.5 万 | 25.4 万 | 7.1 万 | 21.8% |

相比于全机械制冷空调系统,南京地区铁路站房采用复合通风系统可节约能耗 5.9 万 kWh,节能率为 12.1%;武汉地区铁路站房可节约能耗 6.4 万 kWh,节能率为 11.5%;成都地区铁路站房可节约能耗 7.1 万 kWh,节能率为 21.8%。因此,与完全采用机械制冷空调系统,夏热冬冷地区铁路站房采用复合通风系统可以降低约 6.5 万 kWh 左右的能耗,复合通风系统节能效果显著。

4 结论

本文针对夏热冬冷地区铁路站房复合通风效果进行了分析,得到如下结论:

(1) 以室内外空气温度及室内外空气焓值为调控参量,提出了自然通风+机械通风+空调的复合通风系统控制策略。

(2) 夏热冬冷地区铁路站房自然通风效果较好,在非供暖季站房自然通风换气量基本在 60~70m³/s,换气次数约 1.9 次/h;在 4 月初至 5 月末以及 9 月初至 10 月末,有 100 天左右的时间直接采用自然通风就可以满足热舒适需求。

(3) 根据铁路站房内人员活动区热舒适时间和复合通风系统的节能率确定了通风切换温度,夏热冬冷地区复合通风上下切换温度分别为 23℃和 15℃。

(4) 与完全采用机械制冷空调系统相比,夏热冬冷地区铁路站房采用复合通风系统可节约能耗 6.5 万 kWh 左右,节能效果显著。

参考文献:

[1] 徐杰.铁路客站建筑节能技术可持续发展研究[D].天津:河北工业大学,2010.

- [2] 金双双.建筑自然通风气候潜力分区研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
- [3] 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.
- [4] Short C A, Lomas K J. Exploiting a hybrid environmental design in a US continental climate[J]. Building Research & Information, 2007,35(2):119-143.
- [5] Li Y G, Delsante A, Symons J. Prediction of natural ventilation in buildings with large openings[J]. Building and Environment, 2000,35(3):191-206.
- [6] 罗国志,李楠,唐曦,等.成都地区办公建筑复合通风应用效果[J].暖通空调,2013,43(8):67-70.
- [7] 沈意成.寒冷地区火车站自然通风的可行性研究[C].上海市制冷学会 2013 年学术年会论文集,2013:4.
- [8] 柯尊友.昆明市机场航站楼自然通风可行性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [9] 卢佑波.大空间建筑空调与混合通风系统联合运行节能研究[D].广州:广州大学,2015.
- [10] GB 50176-2016,民用建筑热工设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [11] 竟峰,张旭,杨洁.我国部分城市办公建筑自然通风潜力分析[J].同济大学学报(自然科学版),2008,(1):92-96.
- [12] 杨静竹.火车站候车厅自然通风热舒适性与节能研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [13] Karava P, Athienitis A K, Stathopoulos T, et al. Experimental study of the thermal performance of a large institutional building with mixed-mode cooling and hybrid ventilation[J]. Building and Environment, 2012,57:313-326.
- [14] Schulze T, Eicker U. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings[J]. Energy and Buildings, 2013,56:221-232.
- [15] Hu J, Karava P. Model predictive control strategies for buildings with mixed-mode cooling[J]. Building and Environment, 2014,71:233-244.
- [16] GB 55015-2021,建筑节能与可再生能源利用通用规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [17] TB 10100-2018,铁路旅客车站设计规范[J].北京:中国铁道出版社,2018.