

# 严寒地区超低能耗建筑夜间通风节能潜力分析

李晓旭,黄凯良,冯国会,张东旭

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 利用夜间通风降温技术对严寒地区超低能耗建筑进行研究,分析不同夜间通风换气量下制冷系统的耗能情况。**方法** 以沈阳超低能耗建筑为模型,利用DeST软件对该建筑模型进行夜间通风模拟,实验测试对模拟结果进行验证,再对建筑模型进行不同夜间通风方案进行模拟。**结果** 夜间通风室内温度的模拟结果与实测数据结果整体趋势一致。室内温度峰值与建筑冷负荷皆随着通风换气次数的增加呈现先陡后缓的下降趋势。建筑制冷系统的耗电曲线随着通风换气次数的增加呈现先下降后上升的趋势。夜间通风换气次数在6~8次/h内节能效果最佳。7月份建议采用夜间自然通风节能效果更佳。6、8、9月份在最佳夜间通风方案下的节能率为20.8%、11.11%、29.32%。**结论** DeST软件可以对严寒地区超低能耗建筑进行夜间通风节能效果分析。严寒地区超低能耗建筑利用夜间通风有助于降低室内峰值温度、建筑冷负荷以及制冷系统耗电量。

**关键词** 超低能耗建筑;夜间通风;DeST;风机能耗;空调能耗

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Analysis of Night Ventilation Energy Saving Potential for Ultra-Low Energy Consumption Buildings in Severe Cold Area

LI Xiaoxu, HUANG Kailiang, FENG Guohui, ZHANG Dongxu

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In this paper, the application of night ventilation cooling technology in ultra-low energy consumption buildings in cold region (Shenyang) was studied, and the energy consumption of refrigeration system under different night ventilation ventilation volume was analyzed. The ultra-low energy consumption building in Shenyang taken as a model, its ventilation was simulated with DeST software at night, and the simulation results were verified by experimental tests. Then the building model was simulated with different night ventilation schemes. The simulation results of indoor temperature at night were consistent with the measured data. With the increase of ventilation

收稿日期:2021-10-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0100300)

作者简介:李晓旭(1987—),女,博士研究生,主要从事建筑节能和室内空气质量技术方面研究。

times, both the indoor temperature peak value and the building cooling load show a descending trend of steep at first and then slow. The power consumption curve of building refrigeration system decreases firstly and then increases with the increase of ventilation times. The best energy saving effect is achieved within 6 ~ 8 times /h of ventilation at night. In July, it is recommended to adopt natural ventilation at night for better energy saving effect. In June, August and September, the energy saving rates under the best night ventilation plan are 20.8%, 11.11% and 29.32%. The effect analysis of night ventilation and energy saving for ultra-low energy consumption buildings can adopt the DeST software in cold regions. Night ventilation in ultra-low energy buildings in cold regions can help reduce peak indoor temperature, building cooling load and power consumption of refrigeration system.

**Key words:** ultra-low energy consumption building; night ventilation; DeST; fan energy consumption; energy consumption of air conditioning

超低能耗建筑可以作为建筑行业的发展方向,夜间通风是让超低能耗建筑进一步节能的重要手段。目前,超低能耗的研究主要集中在室内温度与建筑负荷的特性分析上<sup>[1-3]</sup>,对其与通风节能措施相结合的研究较少。夜间通风技术主要集中在日较差较小的城市地区<sup>[4-5]</sup>,对夏季和过渡季具有较大日较差的东北地区的研究较少,对于我国北方大部分地区使用夜间降温技术,是一种较为合适的降温措施<sup>[6]</sup>。陈水英<sup>[7]</sup>对北京地区利用夜间通风降温技术进行的模拟计算,夜间通风房间的室温峰值明显降低。贺志朋等<sup>[8]</sup>利用 EnergyPlus 软件对湖南省某高校的图书馆进行了模拟计算,夜间通风的最优工况下可减少耗电量 $2.71(\text{kW}\cdot\text{h})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,节能率高达 10%。夏利梅等<sup>[9]</sup>利用 EnergyPlus 进行通风模拟分析发现,哈尔滨市相比于其他城市,采用夜间通风工况下的耗电量最少,夜间通风对于严寒地区具有最高的经济效益。蒋琳等<sup>[10]</sup>将夜间通风技术与绿化屋顶措施相结合进行降温实验研究,两种措施结合后可以现在降低室内和屋顶得热量。冯国会等<sup>[11]</sup>对相变墙房间进行夜间通风的实验研究,发现相变储能墙与夜间通风技术结合,有助于降低室内白天的温度,其温降幅度是普通房间的 2 倍。严寒地区夏季风速以及昼夜温差大,室外气温峰值较低,日较差较高,所以在严寒地区的建筑非常适于

使用夏季夜间通风技术。笔者以沈阳某高校内的超低能耗建筑为模型,进行相关夜间通风的模拟与测试,并对其进行分析效果评价,意在评价夜间通风在严寒地区超低能耗建筑节能潜力。

## 1 工程概况

笔者所研究的超低能耗建筑案例位于沈阳市,建筑外立面如图 1 所示。该建筑首层层高为 3.3 m,包括客厅、卧室、示范展厅等房间;2 层高为 3.6 m,包括办公室、卫生间等房间。建筑在设计、施工、运行管理等各个阶段均采用先进的绿色节能技术,大幅度减少了对化石燃料的需求。



图 1 超低能耗建筑外观图

Fig. 1 Appearance of the Ultra-low energy building

该建筑主体结构为 H 钢框架 + 现浇聚苯颗粒泡沫混凝土墙体,围护结构采用保温性能良好的技术措施,屋面与地面的传热系数为  $0.098 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $0.113 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。窗的气密性等级达到 8 级,窗体的传热系统为

1.0 W/(m<sup>2</sup>·K)。该超低能耗建筑的建筑总面积为 302.4 m<sup>2</sup>, 体型系数为 0.47, 窗墙比分别为 0.09、0.12、0.12、0.05。建筑平面图如图 2 所示。

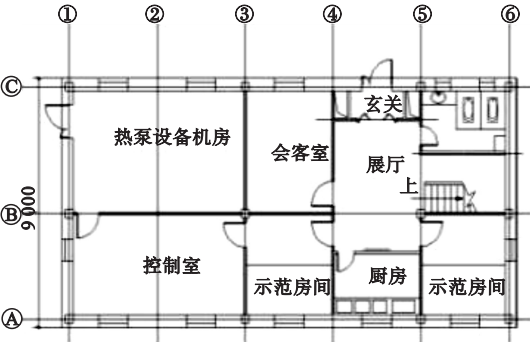


图 2 示范建筑平面图

Fig. 2 Plane of the model building

2 模型建立

2.1 超低能耗建筑模型

沈阳市属于严寒地区, 超低能耗建筑根据《公共机构超低能耗建筑技术标准》(T/CECS713—2020) 设置参数(见表 1)。图 3 为建筑在 DeST 软件中的建筑模型。

表 1 超低能耗建筑维护结构热工性能参数  
Table 1 Parameter setting of thermal performance for maintenance structure of ultra low energy consumption building

围护结构	传热系数取值/(W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> )
窗户	1.0
外墙	0.1
地板	0.12
屋面	0.1

笔者利用 DeST 软件模拟建筑采用夜间通风技术的可行性, 在不同夜间通风工况下, 模拟建筑室内热环境与建筑冷负荷的变化规律, 并对夜间通风节能效果进行分析。

2.2 模拟方案

笔者对建筑模型南向会客室进行夜间通风方案下的自然室内热环境模拟, 计算建筑模型的冷负荷, 计算建筑制冷系统的耗电量。建筑夜间通风方案中的通风时间段分别设置为: 0:00—7:00、0:00—8:00、23:00—次日 7:00、23:00—次日 8:00、22:00—次日 7:00、22:00—次日 8:00。将每小时的换气量分别设置为: 1 次/h、2 次/h、3 次/h、4 次/h、5 次/h、6 次/h、7 次/h、8 次/h、9 次/h、10 次/h、11 次/h、12 次/h, 将 6 种通风时间段与 12 种换气量进行正交, 得到 72 中不同夜间通风的模拟方案。将不同夜间通风方案与模拟内容相结合, 分析不同通风方案下, 会议室内的自然热环境的变化规律和建筑整体冷负荷的变化规律, 以及空调环境下, 建筑制冷系统总耗电量的变化规律, 并对空调环境下的建筑进行节能效果分析, 确定节能效果最佳的通风方案。制冷月建筑采用风机盘管加新风系统的空调制冷方案。

2.3 能耗数学模型

(1) 通风机能耗数学模型

夜间通风采用定风量风机进行通风模拟, 此时夜间通风的主要能耗为风机的能耗, 定风量风机的能耗计算方法。

$$W_0 = \frac{G_0 P_0}{102 \phi_1 \phi_2} \tag{1}$$

式中:  $W_0$  为风机能耗, W;  $G_0$  为风量, m<sup>3</sup>/s;  $P_0$  为风机风压, Pa;  $\phi_1$  为风机效率;  $\phi_2$  为传动效率。

(2) 制冷系统能耗数学模型

制冷系统能耗主要包括夜间通风机能耗和空调系统能耗。

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 \tag{2}$$

式中:  $Q_0$  为制冷系统能耗, kW;  $Q_1$  为夜间通

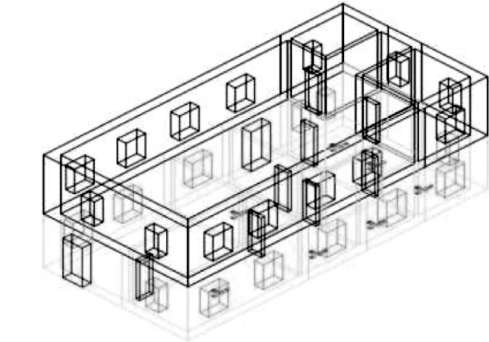


图 3 超低能耗建筑模型

Fig. 3 Model of ultra low energy consumption building

风机能耗, kW;  $Q_2$  为空调系统能耗, kW。

### 3 实验验证

冯国会等<sup>[12]</sup>2019 年对示范建筑在夜间通风状态下的室内温度进行了实验测试。超低能耗建筑的能耗计算模型使用其测试结果进行验证。夜间通风工况下,室内温度的变化幅度为 3.17 °C,室内最高温与室外最高温的差值为 9.7 °C。与夜间非通风工况相比,室内温度的变化幅度增大,室内最高温与室外最高温的差值增大。同时,建筑进行夜间通风会使室内温度峰值出现的时刻较室外温度峰值出现的时间相比有所延迟。笔者模拟得出该建筑模型在夜间通风方案下全天的室内温度变化情况。夜间通风工况下,室内温度的变化幅度为 3.97 °C;室内最高温与室外最高温的差值为 9.37 °C。与夜间非通风工况相比,室内温度的变化幅度增大,室内最高温与室外最高温的差值增大。并且在夜间通风工况下,室内温度峰值出现的时刻较室外温度峰值出现的时刻相比有所延迟。

将实验测试结果与 DeST 模拟结果对比分析,室外气象参数相近条件下,实验数据和 DeST 模拟数据的标准误差为 0.6,平均相对误差为 6.2%。图 4 为实验测试和 DeST 模拟夜间通风工况下的室内温度变化情况,可以看出夜间通风技术在实验和仿真模拟中得

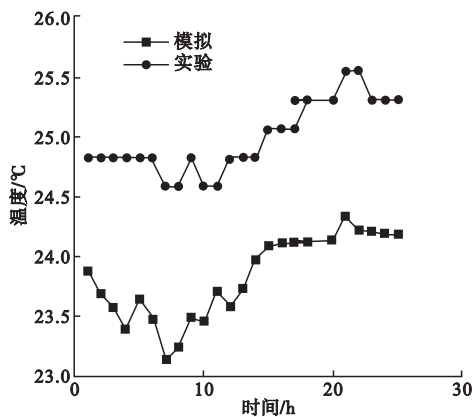


图4 室内温度

Fig. 4 The temperature of indoor air

到数据和图形整体趋势基本一致,表明实验结果与 DeST 模拟结果一致度较高。实验数据与 DeST 模拟数据之间的误差主要是由于两者室外环境参数条件的不严格一致形成的。因此,可以利用 DeST 软件对严寒地区超低能耗建筑夜间通风技术的节能潜力进行研究。

### 4 结果分析

#### 4.1 室内热环境分析

整理室外气象参数,得到 6 月份、7 月份、8 月份、9 月份室外日平均温度分别为 21.46 °C、25.67 °C、23.16 °C、17.22 °C;室外平均日较差为 9.91 °C、8.77 °C、8.76 °C、12.14 °C。笔者选取 6 月 28 日、7 月 11 日、8 月 11 日、9 月 11 日作为各个月份的代表日,其平均温度分别为 21.24 °C、25.63 °C、23.03 °C、15.58 °C;室外平均日较差分别为 10.2 °C、9.1 °C、8.7 °C、12.1 °C。以首层南向会议室为代表房间进行室内温度变化情况的分析,模拟不同通风方案下该房间自然室内温度峰值。室内峰值变化如图 5 所示。

根据模拟结果显示,6 至 9 月份室内温度峰值随着通风量的增加均呈现先陡后缓的下降趋势。室内温度峰值随着通风时长的增加而降低,随着通风换气频率的增加而降低。在 72 种夜间通风方案下,4 个月份室内温度峰值最高点均出现在 00:00—次日 7:00 时间段通风 1 次/h 的方案下,温度峰值分别为 38.87 °C、39.73 °C、39.42 °C、38.48 °C;室内峰值的最低点均出现在 22:00 至次日 8:00 时间段通风 12 次/h 的方案下,温度峰值分别为 27.17 °C、29.76 °C、26.49 °C、24.04 °C。

在夜间由于超低能耗建筑具有良好的蓄冷保温功能,可以将送入到室内的夜间低温空气的冷量储存。在白天由于建筑良好的气密性,一方面在全封闭状态下可以消减室外温度对室内温度的影响;另一方面利用夜间储存的冷量来降低室内温度,从而使得室内温度的峰值降低。然而,夜间蓄冷量与夜间



通风换气量关系密切,蓄冷量随着换气量的增加而增大,进而使得室内温度随着通风换

气量的增大而降低。

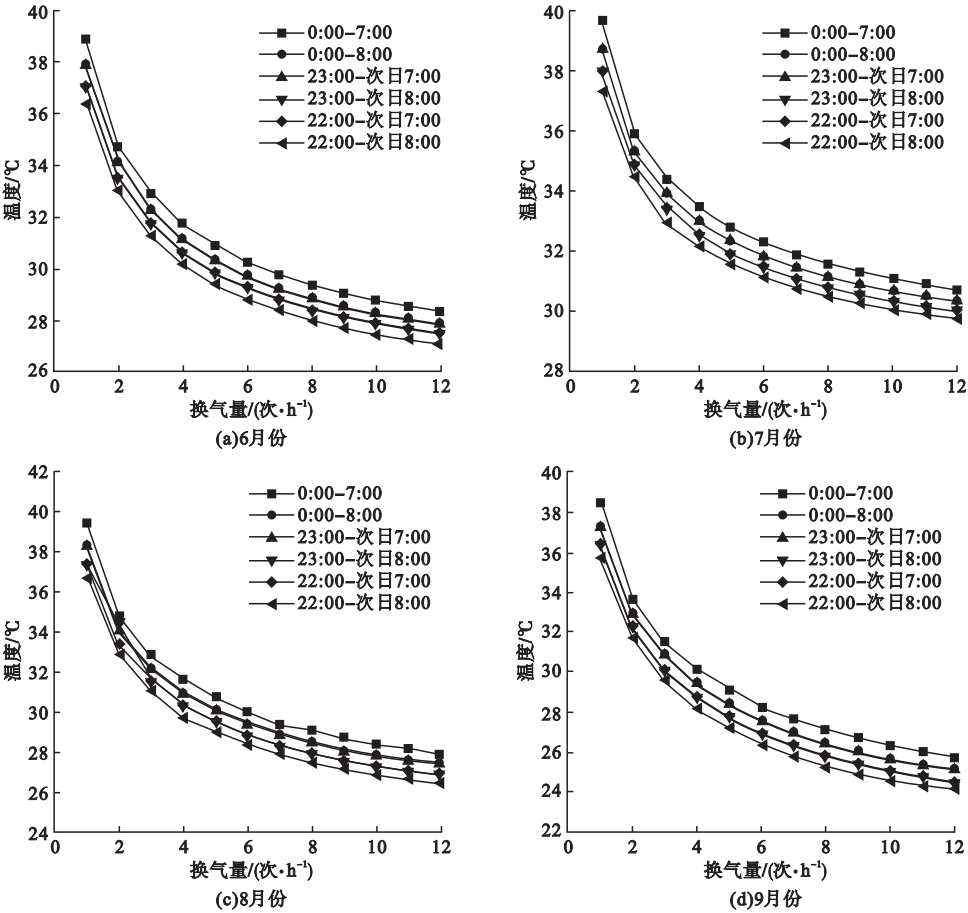


图5 6至9月份室内温度峰值

Fig. 5 The maximum temperature of indoor air from June to September

4.2 建筑负荷分析

沈阳地区的用冷月时间为6月至9月,案例建筑的用冷房间最高温度设置为26℃,最低温度设置为24℃,人员密度、最大照明功率、设备功率分别为0.3人/m<sup>2</sup>、11W/m<sup>2</sup>、5W/m<sup>2</sup>,对建筑进行逐时冷负荷模拟计算,整理统计各月份冷负荷数据,得出超低能耗建筑各月份在不同通风方案下的冷负荷曲线(见图6)。从图可以看出,各月份在不同的通风方案下,建筑冷负荷变化曲线均呈先陡后缓的下降趋势;建筑冷负荷随着通风时间和换气频率的增加而降低。这是由于通风换气频率和通风时间的增加增大了建筑结构蓄

存的冷量,冷量的增加抵消部分建筑冷负荷,从而减少了建筑所需的冷量。

从图中建筑冷负荷的数值变化可以看出,7月份和8月份的建筑冷负荷较大,其中7月份建筑冷负荷最大。6月份和9月份的建筑冷负荷较小,其中9月份的建筑冷负荷最小。由于沈阳地区7月份和8月份室外昼夜温度均高于6月份和9月份室外昼夜温度,所需冷量较大;且昼夜温度的日较差小于6月份和9月份,使得建筑结构体夜间储冷量较小。因此,7月份和8月份的建筑冷负荷高于6月份和9月份的建筑冷负荷。

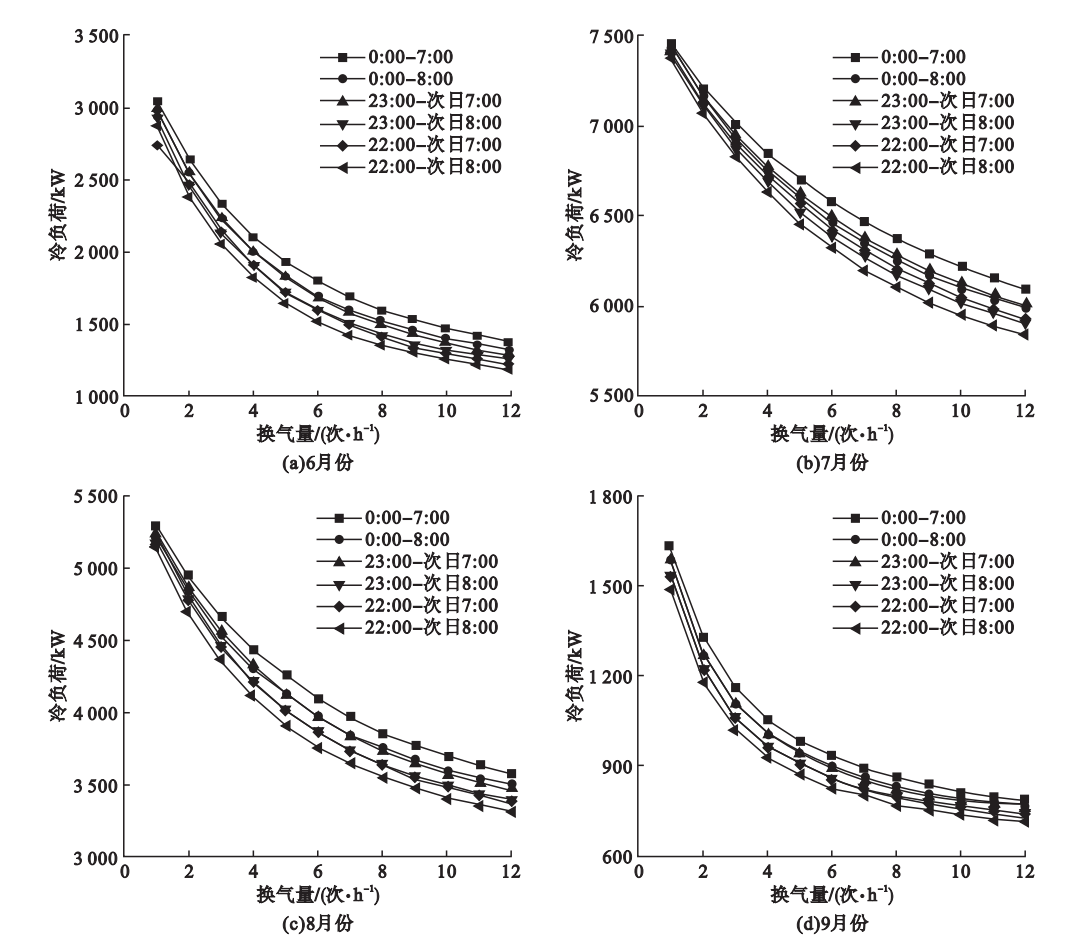


图6 6至9月份建筑冷负荷

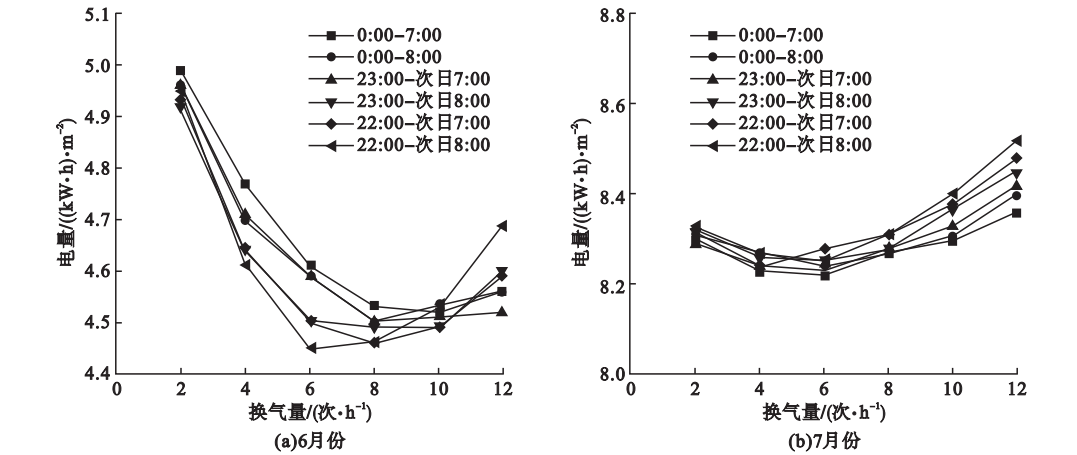
Fig. 6 The cooling load of building from June to September

4.3 夜间通风能效分析

4.3.1 制冷系统能耗分析

在集中用冷月,每日空调的工作时间段为9:00至19:00,对不同夜间机械通风方案

下整栋楼的能耗情况进行模拟分析。确定供冷期各月份的最佳通风时间及换气频率。建筑系统耗能情况如图7所示。



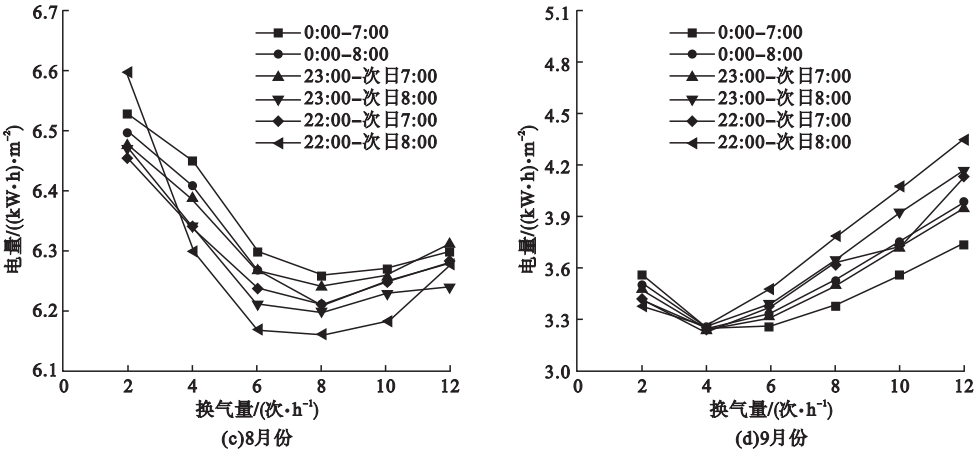


图7 6至9月份建筑制冷耗电

Fig. 7 The power consumption of building cooling from June to September

由于超低能耗建筑良好的存储冷量性能,可以将夜间的储存的冷量来抵消白天的冷负荷,从而降低空调负荷,但当夜间通风时长越长,换气量越大,风机耗能越大,同时空调系统的耗能越小,因此夜间通风与空调系统的总耗电量随通风量的变化存在最小值。最佳通风方案如表2所示。

表2 最佳通风方案		
Table 2 The optimum ventilation scheme		
月份	换气时间段	换气量/(次·h <sup>-1</sup> )
6	22:00—8:00	6
7	23:00—7:00	6
8	22:00—8:00	8
9	22:00—7:00	7

4.3.2 节能效果分析

用冷月最佳夜间通风方案下的建筑制冷系统能耗与无夜间通风时的制冷系统能耗进行对比,6至9月份超低能耗建筑的节能效果如图8所示。模拟得出6至9月份的制冷系统节能率分别为20.8%、0.3%、11.11%、29.32%。可以看出9月份的夜间通风节能效果最佳,7月份的节能效果较差。6月份与9月份为过渡季节,室外温度日较差较大,超低能耗建筑可以很好利用夜间较低温度室外空气进行蓄冷。7月份和8月份白天与夜晚的室外温度均较高,特别是7月份,室外温度

整体最高,昼夜温差较小,使超低能耗建筑夜晚存储冷量较少,夜间机械通风又需要消耗电能,增加了制冷系统的耗电,因此7月份制冷系统节能率较差。

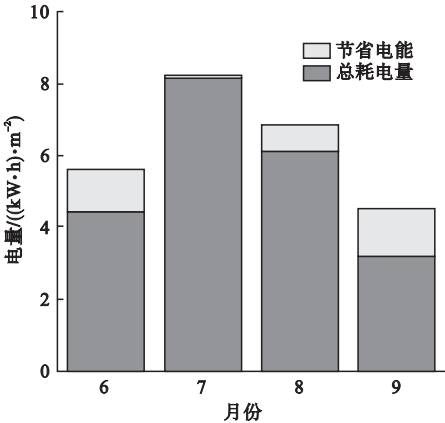


图8 6至9月份建筑制冷耗电和节能情况

Fig. 8 The power consumption and energy saving of building refrigeration from June to September

5 结论

- (1)严寒地区超低能耗建筑夜间通风的模拟与实测平均相对误差为6.2%,建立的模型和模拟方法可靠,可以对严寒地区超低能耗建筑进行夜间通风多工况模拟分析。
- (2)对建筑6个通风时间段的12种夜间机械通风方案模拟,在夜间通风模式下建筑温降的变化规律皆是先陡后缓,连续两点最大温差值出现时间段皆在0:00至7:00,

通风换气量在1次/h与2次/h,差值分别为4.17℃、3.82℃、4.64℃、4.79℃。

(3)严寒地区超低能耗建筑夜间机械通风量达到5~8次/h时,制冷系统节能效果明显。制冷月份不同,最佳通风量和通风时间段略有不同。

(4)超低能耗建筑在夜间最佳机械通风方案下,6、9月份节能率较高,分别为20.8%、29.32%;8月份的节能率居中为11.11%;7月份的节能率较差。在室外环境条件允许的条件下,采用夜间自然通风降温技术,会降低投资运行费用,增大节能率。

## 参考文献

- [1] 吕欢.严寒和寒冷地区近零能耗建造负荷特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.  
(Lü Huan. Analysis on load of nearly zero energy buildings in severe cold and cold zones [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.)
- [2] 冯国会,崔航,黄凯良,等.严寒地区超低能耗建筑负荷特性分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(4):724-729.  
(FENG Guohui, CUI Hang, HUANG Kailiang, et al. Load characteristics of ultra low energy consumption building in severe cold area [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(4): 724-729.)
- [3] 冯国会,徐小龙,王悦,等.以能耗为导向的近零能耗建筑围护结构设计参数敏感性分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(6):1069-1077.  
(FENG Guohui, XU Xiaolong, WANG Yue, et al. Sensitivity analysis of nearly zero energy buildings envelope design parameters based on energy consumption [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(6): 1069-1077.)
- [4] 宋庆龙.重庆地区居住建筑夜间通风实用技术研究[D].重庆:重庆大学,2013.  
(SONG Qinglong. Optimizing research on performance of residential building cooled by night ventilation in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.)
- [5] 康艳兵,江亿,张寅平.夜间通风相变储能堆积床系统降温效果实验研究[J].暖通空调,2003,33(2):24-26.  
(KANG Yanbing, JIANG Yi, ZHANG Yinping. Experimental of night ventilation with PCM packed bed storage system [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2003, 33(2): 24-26.)
- [6] 亓晓琳.北方办公建筑夜间通风降温潜力及适用性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2009.  
(QI Xiaolin. Cooling potential and applicability of night ventilation on office buildings in North China [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.)
- [7] 陈水英.现代办公建筑表皮设计研究[D].西安:西安建筑科技大学,2005.  
(CHEN Shuiying. Study on the design of current office building skin [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.)
- [8] 贺志朋,刘泽华,彭达玮,等.高校图书馆建筑在夜间通风模式下空调能耗及室内热舒适性研究[J].建筑节能,2018,46(9):41-47.  
(HE Zhipeng, LIU Zehua, PENG Dawei, et al. Air-conditioning energy consumption and indoor thermal comfort of university library building at night ventilation mode [J]. Building energy efficiency, 2018, 46(9): 41-47.)
- [9] 夏利梅,卞维军,周雪涵,等.图书馆建筑的夜间通风节能效益分析[J].建筑节能,2019,47(7):80-84.  
(Xia Limei, Bian Weijun, Zhou Xuehan, et al. Energy saving benefit of night ventilation in library buildings [J]. Building energy efficiency, 2019, 47(7): 80-84.)
- [10] 蒋琳,唐鸣放,冉建东.重庆地区绿化屋顶与夜间通风联合作用的降温实验研究[J].暖通空调,2018,48(3):112-119.  
(JIANG Lin, TANG Mingfang, RAN Jiandong. Experimental study on green roof combined with night ventilation in Chongqing area [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2018, 48(3): 112-119.)
- [11] 冯国会,韩淑伊,刘馨,等.相变墙房间夏季通风效果实验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(4):693-697.  
(FENG Guohui, HAN Shuyi, LIU Xin, et al. Experimental study on night ventilation effect in a phase change wall room in summer [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(4): 693-697.)
- [12] 冯国会,岳明靓,黄凯良.沈阳超低能耗建筑夏季夜间通风效果分析[J].建筑节能,2021,49(7):32-37.  
(FENG Guohui, YUE Mingliang, HUANG Kailiang. Night ventilation analysis of ultra-low energy buildings of Shenyang city in summer [J]. Building energy efficiency, 2021, 49(7): 32-37.)
- (责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)