

严寒地区超低能耗教学建筑新风系统 适用性分析

康智强,王彤,王云毅,郝宝瑞,刘馨

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁沈阳110168)

摘要 目的 解决严寒地区超低能耗建筑中人员密集场所供暖期新风系统的适用性问题。方法 以沈阳市某小学教学楼中三种典型教室为例,应用 Designbuilder 软件建立能耗模型,分析自然通风、有无热回收的定(变)风量机械通风五种工况下超低能耗建筑的各项能耗、相对节能率和本体节能率,以及室内 CO₂ 体积分数变化。结果 无热回收的变风量、有热回收的定(变)风量与无热回收的定风量机械通风相比,节能率分别为 12%~30%、32%~46%、38%~57%;有热回收的变风量机械通风总能耗最低,且接近自然通风工况;五种工况室内 CO₂ 体积分数均小于 0.09%。结论 人员密集场所中有热回收的定(变)风量机械通风节能效果显著;建筑气密性的提高导致机械通风系统新风能耗增加,经济性和节能性下降。

关键词 超低能耗建筑;Designbuilder;相对节能率;建筑气密性;新风系统

中图分类号 TU833

文献标志码 A

引用格式:康智强,王彤,王云毅,等.严寒地区超低能耗教学建筑新风系统适用性分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):345-351.(KANG Zhiqiang,WANG Tong,WANG Yunyi,et al. Applicability analysis of fresh air system in teaching buildings with ultra-low energy consumption in severe cold area[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(2):345-351.)

Applicability Analysis of Fresh Air System in Teaching Buildings with Ultra-Low Energy Consumption in Severe Cold Area

KANG Zhiqiang, WANG Tong, WANG Yunyi, HAO Baorui, LIU Xin

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

Abstract: The aim in this paper is to solve the applicability of fresh air system in the heating period of densely populated places for ultra-low energy buildings in cold areas. Three typical classrooms in a primary school in Shenyang taken as an example, an energy consumption model is established by Designbuilder software. The energy consumption, the energy saving rates, the

收稿日期:2023-02-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52108081);辽宁省教育厅科研计划项目(JYTZD2023161)

作者简介:康智强(1980—),女,副教授,博士,主要从事建筑节能及可再生能源等方面研究。

relative energy efficiency and the variation of indoor CO₂ concentration for ultra-low energy consumption building are analyzed under five working conditions-natural ventilation, constant air volume mechanical ventilation with or without heat recovery, and variable air volume mechanical ventilation with or without heat recovery. Compared with mechanical ventilation with constant air volume without heat recovery, the energy saving rates of variable air volume without heat recovery and constant (variable) air volume with heat recovery are 12% ~ 30%, 32% ~ 46% and 38% ~ 57% respectively. The total energy consumption of variable air volume with the heat recovery is the lowest and close to natural ventilation, and the indoor CO₂ concentration is less than 0.09% under five working condition. The energy-saving effect of mechanical ventilation with constant (variable) air volume and heat recovery in crowded places is remarkable, and the improvement of building air tightness leads to the fresh air energy consumption increase of mechanical ventilation systems and the decrease of economic energy-saving performance of fresh air systems.

Key words: ultra-low energy consumption building; Designbuilder; relative energy efficiency; building air tightness; fresh air system

2021年,全国共有普通小学15.43万所,校舍建筑面积约87128.98万m²,在校学生1.08亿人^[1]。学校建筑是人员密集场所,学生在校期间平均每天有80%的时间处于教室中^[2],我国现有中小学教学楼大多采用自然通风方式来调节室内空气质量^[3],通风效率难以保证,而实测研究表明,机械通风是提高教室内空气品质的有效途径^[4-5],增大通风量可有效降低教室挥发物含量^[6]。A. Kabirikopaei等^[7]通过实测分析了稳态、衰变率、累积三种方法在教室通风率计算中的误差。M. Gil-Baez等^[8]通过西班牙南部两所学校实测对比得到该地区采用自然通风与机械通风的能源节约率。Y. Liu等^[9]从节能角度分析了影响建筑能耗的因素,得到各因素的最优水平和最佳节能组合。吴毅学等^[10]对夏热冬冷地区中小学教室新风系统中全热交换器适用性进行了模拟研究。黄河等^[11]对北京地区三种通风工况的全年空调冷负荷进行计算,并分析了各自的节能效率。雷小慧等^[12]研究了长沙某办公建筑自然通风换气能耗、机械通风新风能耗。王莹等^[13]以北京某住宅建筑为例研究通风方式对能耗的影响,并以不同气候区典型城市为例确定了新风系统应用的影响因素。

以往的新风系统研究主要集中在寒冷地

区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区,且未对定、变风量机械通风及各自采用热回收装置后的节能率进行定量分析,对于新风系统在超低能耗建筑中的应用研究也不足。基于此,笔者以严寒地区某超低能耗改造建筑中的三种典型教室为例,模拟分析在自然通风、有无热回收的定(变)风量机械通风五种工况下的各项能耗大小,研究各新风系统总能耗的相对节能率及室内CO₂体积分数变化,并进行超低能耗建筑本体节能率测算,以建筑气密性 $N_{50} = 0.6 \text{ h}^{-1}$ 为例分析严寒地区超低能耗建筑人员密集教学场所新风系统适用性及高气密性的适宜性问题。

1 模型建立及通风工况设定

1.1 建筑模型

研究对象为辽宁省沈阳市(N42.19°, E123.31°)某小学处于设计阶段的超低能耗改造教学楼,共四层,层高3.6m,建筑面积5632m²,内设有教室及教学辅助用房等,模拟地属严寒C区,供暖期从11月1日至次年3月31日。采用Designbuilder能耗模拟软件建立建筑模型,如图1所示。

教室类型分为普通教室和专技教室,并且专技教室种类不一,选取普通、美术、劳技三种典型教室作为研究对象,建筑面积分别

为 474.93 m²、235.98 m²、104.88 m²,如图 2 所示。

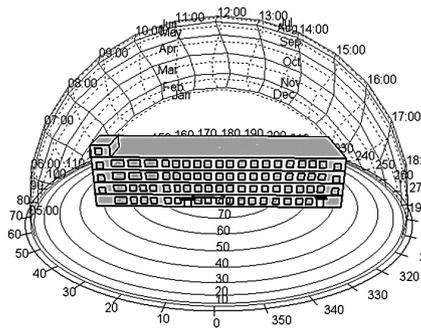


图 1 建筑整体模型图

Fig. 1 Overall model diagram of the building

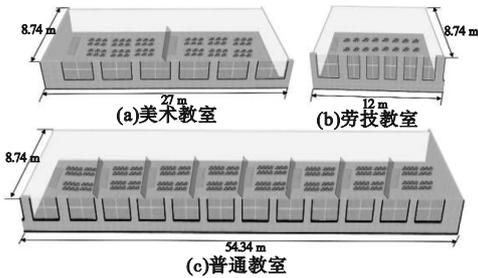


图 2 教室模型图

Fig. 2 Classroom model diagram

1.2 模型参数

将原有供暖设备燃煤锅炉更换为高效燃气锅炉;末端设备铸铁翼式散热器不变;加设新风热回收系统,显热回收效率大于 75%;在原建筑外墙、屋面、地面等保温基础上增加岩棉板、挤塑聚苯乙烯板等保温层;将原有外门窗更换为高性能外门窗。改造后建筑围护结构热工参数如表 1 所示。

根据调研结果和标准规定^[14],考虑最不利工况(满座),确定各教室内人员密度(计算面积不包括墙体),普通教室人员密度为 0.9 人/m²,美术教室人员密度为 0.75 人/m²,劳技教室人员密度为 0.5 人/m²。依据学生作息表,建立教室内人员密度时刻表,人员室内活动水平设置为 0.75 met(成人为 1 met)。参照《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350—2019)^[14],模拟教室采暖温度设定为 20 ℃,气密性模拟值控

制为 $N_{50} = 0.6 \text{ h}^{-1}$,参照《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB50736—2012)^[15],教室每人所需最小新风量为 24 m³/(h·人)。

表 1 改造后建筑围护结构热工参数表

Table 1 Thermal parameter of the building envelope after renovation

围护结构	材质、构造	传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
外墙	200 mm 粉煤灰砌块 + 90 mm A 级复合酚醛板 + 150 mm 岩棉板(自内向外)	≤0.17
屋面	110 mm 岩棉板 + 150 mm XPS 板 + SBS 防水(自内向外)	≤0.20
外门	塑钢,气密性大于 6 级	≤1.6
外窗	塑钢,气密性大于 6 级,外窗口线脚 50 mm A 级保温浆料	≤1.4
地面	周边 60 mm 挤塑聚苯乙烯板,非周边 20 mm 挤塑聚苯乙烯板	≤0.30

1.3 数学模型

Designbuilder 是以热平衡法进行建筑能耗模拟的,热平衡法根据热力学第一定律,通过建筑外表面热平衡、建筑体热平衡、内表面热平衡和室内空气热平衡方程式来计算室内热负荷。室内空气热量增长率:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_i} Q_i + \sum_{i=1}^{N_s} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_s} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} C_p (T_{inf} - T_z) + m_{sys} C_p (T_s - T_z). \quad (1)$$

式中: C_z 为当前步长下房间空气中的热容, kJ/℃; t 为时间, s; Q_i 为各内热源对流引起的热负荷, kJ; h_i 为 i 步长区域对流换热系数, kJ/(s·m²·℃); A_i 为 i 步长区域表面积, m²; C_p 为空气比热容, kJ/(kg·℃); T_{si} 为 i 步长区域表面温度, ℃; T_z 为当前时间步长区域空气温度, ℃; T_{zi} 为 i 步长区域空气温度, ℃; T_{inf} 为室外空气温度, ℃; m_i 为 i 步长区域的空气质量流量, kg/s; m_{inf} 为外部空气渗透及自然通风空气质量流量, kg/s; m_{sys} 为

新风系统空气质量流量, kg/s。

采用瞬态空气质量平衡方程来计算室内 CO₂ 体积分数:

$$\rho_a V_z C_{CO_2} \frac{dC_z^t}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sj}} m_0 + \sum_{i=1}^{N_{zj}} m_i (C_{zi} - C_z^t) + m_{inf} (C_\infty - C_z^t) + m_{sys} (C_{sup} - C_z^t) \quad (2)$$

式中: ρ_a 为房间空气密度, kg/m³; V_z 为房间体积, m³; m_0 为房间内初始 CO₂ 质量流量, kg/s; C_{CO_2} 为二氧化碳含量增加值, %; C_z^t 为当前步长下房间空气中的 CO₂ 体积分数, %; C_{zi} 为 i 步长下房间空气中的 CO₂ 体积分数, %; C_∞ 为室外空气中 CO₂ 体积分数, %; C_{sup} 为新风系统供应新风中的 CO₂ 体积分数, %; m_i 、 m_{inf} 、 m_{sys} 同式(1)。

1.4 通风工况

教室内人员数量越多,对空气质量影响越显著。为了保证室温,冬季外窗多数为关闭状态,通风效率难以保证;开窗通风,人体热舒适度会降低,且加大供暖能耗。严寒地区室内外温差大,新风预热能耗也比较大。传统的变风量系统根据室内负荷调整送风量,虽然节能,却降低了室内空气质量^[16]。因此,在原有的变风量系统基础上加设需求通风(DCV)和 CO₂ 体积分数控制,根据教室内人员密度及 CO₂ 体积分数向教室内送风,确定各新风系统的相对节能率及适用性。基于此,设定“自然通风、有无热回收的定(变)风量机械通风”五种通风工况,分别模拟采用自然通风后供暖能耗增长率和教室内 CO₂ 体积分数变化,以及采用四种机械通风方式冬季供暖能耗、风机能耗、新风预热能耗、热回收总量及总能耗大小,教室内 CO₂ 体积分数变化。

依据标准要求,新风热回收系统显热回收效率设为 75%,学校建筑工作日运行时间设为 8:00-18:00^[14]。依据实际调研得到的学生在室率确定各机械通风工况新风量的大小,并设置自然通风时长。

2 冬季模拟结果分析

2.1 供暖能耗

图 3 为各教室采用自然通风、有(无)热回收,定(变)风量五种工况的供暖能耗模拟结果,包括把空气经热交换器预热到 20℃ 所需的能耗。

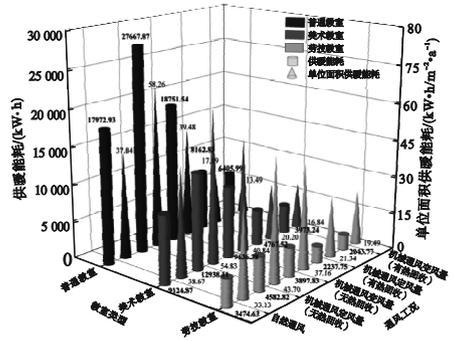


图 3 各教室五种工况供暖能耗模拟结果

Fig. 3 Simulation results of heating energy consumption under five working conditions in each classroom

由图 3 可见,普通、美术、劳技教室采用自然通风方式单位面积供暖能耗分别为 37.84 (kW·h)/(m²·a)、38.67 (kW·h)/(m²·a)、33.13 (kW·h)/(m²·a)。采用机械通风无热回收装置、定风量时,普通、美术、劳技教室全年供暖能耗分别为 27 667.87 kW·h、12 938.11 kW·h、4 582.82 kW·h;采用变风量时,相对节能率为 32.23%、25.52%、14.95%。采用机械通风有热回收装置方式、定风量时,普通、美术、劳技教室全年供暖能耗分别为 8 162.83 kW·h、4 767.52 kW·h、2 237.75 kW·h;变风量时,相对节能率为 21.52%、16.66%、8.67%。有热回收的变风量系统供暖能耗为 6 405.99 kW·h、3 973.24 kW·h、2 043.77 kW·h,单位面积供暖能耗分别为 13.49 (kW·h)/(m²·a)、16.84 (kW·h)/(m²·a)、19.49 (kW·h)/(m²·a)。由于新风被加热至 20℃,因此各教室中采用不同机械通风工况单位面积供暖能耗均较大,其中采用无热回收的定风量机

械通风工况时供暖能耗最大,自然通风工况供暖能耗大于采用热回收的定(变)风量机械通风工况。

2.2 风机能耗

各教室有无热回收的定(变)风量工况风机能耗模拟结果如图4所示。

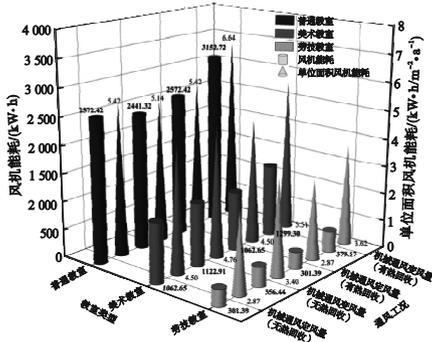


图4 风机能耗模拟结果

Fig.4 Simulation results of fan energy consumption

由图4可知,定风量机械通风有热回收工况运行所需压力小于系统额定压力,即定风量工况下,无论有无热回收,都不影响风机能耗。在定风量工况下,普通、美术、劳技教室的风机能耗分别为2572.42 kW·h、1062.65 kW·h、301.39 kW·h。无热回收的变风量工况相对于定风量工况变化值较小,由于系统余压不足难以承担热回收设备产生的压力,有热回收的变风量工况,会引起风机能耗大幅增长。

2.3 新风预热能耗

由于沈阳冬季室外空气温度较低,直接送入新风会导致新风机组冻坏,且降低人体热舒适度,因此需对新风预热至5℃,再经热交换器加热,图5为各机械通风系统新风预热能耗模拟结果。对比分析得出,采用定风量系统,普通、美术、劳技教室新风预热能耗分别为10346.68 kW·h、4276.01 kW·h、1214.69 kW·h,变风量系统新风预热能耗相对节能率分别为36.6%、31.77%、23.25%。冬季采用变风量系统可大大降低新风系统的预热能耗。

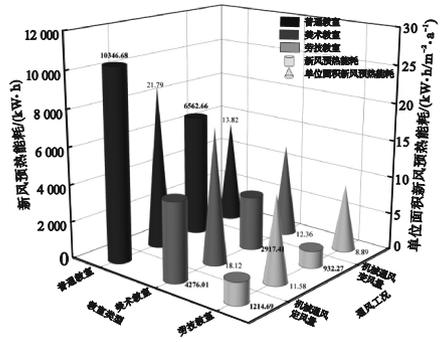


图5 新风预热能耗模拟结果

Fig.5 Simulation results of fresh air preheating energy consumption

2.4 供暖期总能耗

图6为各教室五种工况供暖期的总能耗模拟结果。

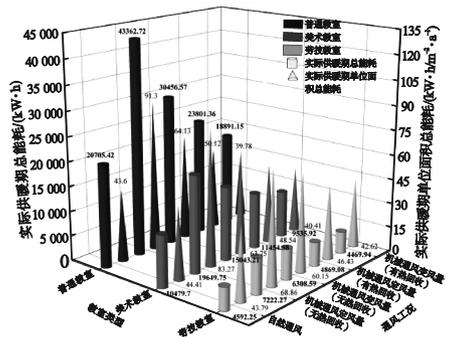


图6 实际供暖期总能耗模拟结果

Fig.6 Simulation results of total energy consumption during the actual heating period

由图6可知,各教室采用自然通风的总能耗与采用有热回收的变风量机械通风的总能耗相差不大。采用无热回收的定风量工况的普通、美术、劳技教室供暖期总能耗分别为43362.72 kW·h、19649.75 kW·h、7222.27 kW·h,在普通教室中,相对于无热回收的定风量工况,无热回收的变风量工况、有热回收的定风量工况、有热回收的变风量工况的相对节能率分别为29.76%、45.11%、56.43%;美术教室相对节能率分别为23.44%、44.71%、51.47%;劳技教室相对节能率分别为12.65%、32.58%、38.11%。可见,采用热回收设备节能效果显著,但有热回收的定风量工况相对于有热回

收的变风量工况节能率较低,且随着室内人员密度的降低而降低。

2.5 室内 CO₂ 体积分数

我国室外空间的 CO₂ 体积分数一般在 0.03%~0.05% 之间^[17],沈阳市室外 CO₂ 体积分数为 0.04%。《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350—2019)中要求,人员密集场所的长期停留区域室内 CO₂ 体积分数应

不大于 0.09%^[14]。图 7 为各教室 CO₂ 体积分数变化模拟结果。由图 7 可知,经自然通风及定风量、变风量机械通风系统处理,普通教室和美术教室采用定风量机械通风系统可更有效降低室内 CO₂ 体积分数,室内人员密度较低的劳技教室采用定风量和变风量两种机械通风系统室内 CO₂ 体积分数接近。各教室 CO₂ 体积分数均达到要求。

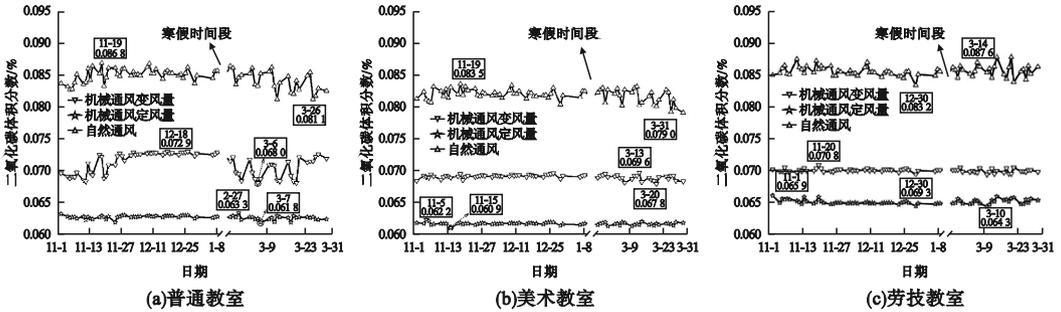


图 7 各教室 CO₂ 体积分数模拟结果

Fig. 7 Simulation results of CO₂ volume fraction in each classroom

2.6 超低能耗建筑评价指标

严寒地区公共建筑超低能耗技术指标要求为建筑本体节能率(不含可再生能源发电)不小于 25%。根据相关参数设置,通过计算得到普通、美术、劳技教室供暖期基准建筑总能耗分别为 24 007.97 kW·h、12 155.37 kW·h、5 518.86 kW·h,以总能耗最低的有热回收变风量机械通风系统工况为例,计算得普通、美术、劳技教室本体节能率分别为 21.31%、21.55%、19.01%,均不能满足规范要求。对比发现,采用自然通风工况的总能耗与采用有热回收的变风量机械通风工况的总能耗相差不大,主要原因是建筑气密性的提高导致机械通风系统新风能耗增加。室内新风主要来源于机械通风,同时建筑气密性引起的空气渗透也是主要来源。建筑气密性提高的同时,虽然降低了供暖能耗,但也使得空气渗透量减少,为满足室内空气品质要求,必须增加机械通风的新风量,进而引起新风能耗和新风设备损耗增加,建筑气密性施工技术难度与建设成本也随之提高。

建筑气密性越高,机械通风引起的新风能耗在总能耗中占比越大,且应用新风系统的经济性和节能性均下降。因此,可在满足室内人员新风量需求的基础上通过降低建筑气密性来减少机械通风供给新风量来解决。值得注意的是,建筑气密性降低带来的供暖能耗增加与机械通风新风量减少带来的新风能耗降低需进行耦合分析,以获得其最佳方案。

3 结论

(1)严寒地区超低能耗教学建筑机械通风工况中,增加热回收设备后节能效果显著,人员密集场所的新风系统应优先考虑增加热回收设备,其次考虑采用可控制送风量的变风量机械通风系统。

(2)供暖期人员密集场所建筑气密性的提高会加大机械通风系统新风能耗和新风设备损耗以及建设成本,并对超低能耗建筑本体节能率的提高产生不利影响。

(3)在保证室内空气品质的基础上,可通过降低建筑气密性与减少机械通风供给新

风量相结合的优化方案,实现严寒地区超低能耗教学建筑总能耗和成本的降低。

参考文献

- [1] 中华人民共和国教育部. 2021 年全国教育事业发展统计公报[J]. 中国地质教育, 2022, 31(3): 109-112.
(Ministry of Education of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of education in China in 2021 [J]. Chinese geological education, 2022, 31(3): 109-112.)
- [2] 刘雅楠. 郑州地区中小学教室新风系统的应用与优化研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
(LIU Yanan. Study on the application and optimization of the fresh air system in classroom buildings in elementary and secondary schools of Zhengzhou [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.)
- [3] 马福生. 严寒地区中小学教学楼空间通风设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
(MA Fusheng. Study on spatial ventilation design primary and secondary teaching building in severe cold regions [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.)
- [4] 李旻雯, 黄衍, 李景广. 某中学教室 PM_{2.5} 污染防治技术方案分析及工程效果验证[J]. 暖通空调, 2019, 49(7): 31-35.
(LI Minwen, HUANG Yan, LI Jingguang. Analysis and effect validation of PM_{2.5} pollution prevention technology in a middle school classroom [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2019, 49(7): 31-35.)
- [5] ALMEIDA R M S F, FREITAS V P. Indoor environmental quality of classrooms in Southern European climate [J]. Energy and buildings, 2014, 81: 127-140.
- [6] HADDAD S, SYNNEFA A, MARCOS MÁ P, et al. On the potential of demand-controlled ventilation system to enhance indoor air quality and thermal condition in Australian school classrooms [J]. Energy and buildings, 2021, 238: 110838.
- [7] KABIRIKOPAEI A, LAU J. Uncertainty analysis of various CO₂-based tracer-gas methods for estimating seasonal ventilation rates in classrooms with different mechanical systems [J]. Building and environment, 2020, 179: 107003.
- [8] GIL-BAEZ M, BARRIOS-PADURA Á, MOLINA-HUELVA M, et al. Natural ventilation systems in 21st century for near zero energy school buildings [J]. Energy, 2017, 137: 1186-1200.
- [9] LIU Y, WANG X, ZHOU S, et al. Enhancing public building energy efficiency using the response surface method: an optimal design approach [J]. Environmental impact assessment review, 2021, 87(1): 106548.
- [10] 吴毅学, 何梅玲, 张敏敏, 等. 夏热冬冷地区中小学教室中不同新风方式的分析研究[J]. 流体机械, 2021, 49(4): 85-90.
(WU Yixue, HE Meiling, ZHANG Minmin, et al. Analysis and research on different fresh air ways in primary and secondary school classroom in hot summer and cold winter area [J]. Fluid machinery, 2021, 49(4): 85-90.)
- [11] 黄河, 李晓峰, 张明瑞, 等. 自然通风建筑能耗全年模拟研究[J]. 建筑科学, 2012, 28(2): 46-50.
(HUANG He, LI Xiaofeng, ZHANG Mingrui, et al. Simulation study on annual energy consumption of naturally ventilated buildings [J]. Building sciences, 2012, 28(2): 46-50.)
- [12] 雷小慧, 杨昌智, 王琳. 设置新风系统与开窗换气的空调能耗对比研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 339-345.
(LEI Xiaohui, YANG Changzhi, WANG Lin. A comparative study on the energy consumption of air conditioning with mechanical fresh air systems and ventilation by opening window [J]. Science technology and engineering, 2018, 18(3): 339-345.)
- [13] 王莹, 李晓峰, 郑博伦. 非集中空调建筑新风量及其对能耗的影响[J]. 暖通空调, 2016, 46(6): 5-9.
(WANG Ying, LI Xiaofeng, ZHENG Bolun. Outdoor air rate of building without central air conditioning and its influence on energy consumption [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2016, 46(6): 5-9.)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 近零能耗建筑技术标准: GB/T 51350—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for nearly zero energy buildings: GB/T 51350—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.)
- [15] 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 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB50736—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [16] 康智强, 董建男, 程小聪, 等. 空调区域空气品质控制方法综述[J]. 流体机械, 2017, 45(4): 82-86.
(KANG Zhiqiang, DONG Jiannan, CHENG Xiaocong, et al. Review on the controlling study of indoor air quality in an occupied space [J]. Fluid machinery, 2017, 45(4): 82-86.)
- [17] American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers. Ventilation for acceptable air quality: ASHRAE Standard 62.1—2016 [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 2016.
(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)