

多层建筑太阳能烟囱的全年通风潜力评价

张明杰, 郜 志

(南京大学 建筑与城市规划学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 模拟研究多层建筑太阳能烟囱全年热压通风效果并进行通风潜力评价。基于设计平台搭载的性能模拟工具 Honeybee 和 RhinoCFD 构建耦合模拟 workflow, 计算太阳能驱动下烟囱逐时通风量; 根据房间最小新风量要求、通风时长等因素计算单位时间有效流量, 并定义为烟囱的通风潜力值; 选取南京某办公建筑双入口太阳能烟囱进行了案例研究。结果表明: 该太阳能烟囱全年逐月通风潜力值呈现出“M”形波动, 潜力值较大主要集中在 4~6 月和 9~11 月, 其中 10 月份达到最大的 $637.7 \text{ m}^3/\text{h}$; 烟囱通风存在流量分配失衡现象, 一层入口流量满足房间新风量要求的时长远大于二层; 对比发现, 独立式烟囱可实现更均衡的流量配置。单位时间有效流量能够较好反映多层太阳能烟囱的通风潜力; 相关研究方法 with 结论可为设计阶段的烟囱性能评估与优化提供参考。

关键词: 太阳能烟囱; 通风潜力; 建筑性能模拟; 计算流体力学; 流量分配系数

中图分类号: TU 834.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)02-0283-06

Evaluation of the annual ventilation potential of solar chimneys for multi-story buildings

ZHANG Mingjie, GAO Zhi

(School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The present work aims at studying the annual stack ventilation of solar chimney in multi-storey buildings and evaluating the ventilation potential. A simulation workflow coupling Honeybee and RhinoCFD, performance simulation tools on design platform, is proposed to calculate the hourly ventilation rate of chimney driven by solar energy. Then the effective hourly ventilation rate, which is defined as the ventilation potential value, is determined according to the ventilation duration and the minimum fresh air requirement of each room. A case study of a double-inlet solar chimney in an office building in Nanjing was carried out. The results indicate that the monthly ventilation potential value of the solar chimney shows a "M" shape fluctuation. The value is higher mainly from April to June and September to November, and reaches the maximum, $637.7 \text{ m}^3/\text{h}$, in October. The phenomenon of flow distribution imbalance exists in the chimney, and the duration of the first-floor inlet flow meeting the requirements of fresh air volume is longer than that of the second floor. The comparison shows that the independent chimney can achieve more balanced flow configuration. The effective hourly ventilation rate turns out to be a useful indicator for multi-story chimney's ventilation potential. The research method in this paper can provide reference for chimney performance evaluation and optimization in design stage.

Key words: solar chimney; ventilation potential; building performance simulation; computational fluid dynamics; flow distribution coefficient

建筑自然通风有助于提高室内空气品质和降低建筑空调负荷。然而, 自然通风受室外气象条件影响具有不稳定性的特征^[1]。作为一种有组织自然通风的装置, 太阳能烟囱可以将辐射得热转化为热压动力从而强化建筑自然通风, 在研究和应用中受到越来越多的关注。

国内外已有研究探讨了多种太阳能烟囱在不

同工况下的通风效果^[2-3]。缩尺和全尺寸实验研究奠定了太阳能烟囱通风效果研究的基础。但由于成本较高, 较难开展系统性的研究。随着相关研究的不断深入, 太阳能烟囱通风流量计算理论模型被提出并得到不断完善。上世纪九十年代, Bansal 等^[4]、Andersen^[5]提出可用于简化计算的太阳能烟囱流量公式; 公式包含烟囱出入口温度和流量

收稿日期: 2020-10-23

修改稿日期: 2021-03-19

基金项目: 中国科技部国家重点项目(2017YFC0702502)

第一作者: 张明杰(1992—), 男, 博士生, 主要从事绿色建筑方面研究。E-mail: mzhang@smail.nju.edu.cn

通信作者: 郜 志(1972—), 男, 副教授, 主要从事建筑能源与环境、室内空气品质等方面研究。E-mail: zhgao@nju.edu.cn

系数等自变量. 流量系数可取经验值, 范围在 0.6 ± 0.1 , 其值与孔口形状、阻力等因素相关^[2]. 2003年, Ong^[6]提出了一个简单的 Trombe 式太阳能烟囱稳态传热数学模型, 通过矩阵反演方法求解包含烟囱玻璃罩表面、吸热墙壁面和腔体内空气等边界温度的热网络方程组, 进一步完善了烟囱理论模型. 之后, 一些学者^[7-8]建立了太阳能烟囱动态能量模型, 考虑烟囱运行过程的非稳态和热惯性特征, 可以用于计算烟囱流量和空腔内部温度随时间的变化. 除了实验和理论研究, 计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)和建筑能源模型(Building Energy Model, BEM)等数值计算方法也逐渐应用在太阳能烟囱研究领域. 这尤其促进了对应用于多层建筑的太阳能烟囱进行系统分析. 雷先鹏^[9]应用 CFD 模拟分析了稳态条件下长沙某多层建筑太阳能烟囱通风性能, 结果表明一层通风量显著大于其他楼层. 赵爽^[10]使用 FLUENT 软件模拟分析了夏季正午天津某五层办公建筑的太阳能烟囱通风性能, 结果表明随着太阳能烟囱的深度增加, 各层进风口部位逐渐出现局部的涡流现象. 为了分析太阳能烟囱通风长周期自然通风效益, 一些研究选择使用 EnergyPlus 模拟方法. Asadi 等^[11]利用 EnergyPlus 模拟研究了伊斯法罕典型七层办公楼多种太阳能烟囱设计方案, 结果表明太阳能烟囱布置在建筑物的东南部时可提供最大的通风量. 查新或^[12]利用 EnergyPlus 研究了上海三层建筑太阳能烟囱的节能效果, 全年节能率达到 12.9%. Hong 等^[13]使用 EnergyPlus 单区域烟囱模型分析了杭州二层独立式住宅太阳能烟囱增强通风及其节能效益, 结果显示全年机械通风耗能降低 77.8%.

值得注意的是, 利用 CFD 进行太阳能烟囱通风效果研究, 准确定义特定工况下的边界条件仍较为困难; 应用 EnergyPlus 单区域烟囱模型模拟多层太阳能烟囱通风情况时, 需提前测定各入口流量分配系数; 对太阳能烟囱的通风性能评价仍多使用流量、流速等基础参数, 无法满足综合潜力评价的需求^[1, 14-15]. 本文研究提出构建一个工作流来评估多入口烟囱太阳能驱动下的全年通风潜力. 首先基于建筑设计平台 Rhino 上的性能模拟工具 Honeybee (EnergyPlus)^[16] 和 RhinoCFD (PHOENICS)^[17] 进行耦合模拟, 从而较为便捷地计算烟囱全年逐时流量. 其次, 定义一个烟囱通风潜力评价指标, 提升烟囱性能评价的简便性和综合性. 为了展示该工作流可行性和适用性, 本文研

究以南京某三层办公建筑中太阳能烟囱为例进行了案例演示, 并对比了多入口烟囱和独立式烟囱的通风潜力情况.

1 研究方法

1.1 烟囱流量计算模型

应用 Energyplus 单区域烟囱模型计算太阳能驱动下的烟囱流量^[13], 见式(1).

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2gL(T_o - T_r)}{T_r}} \quad (1)$$

式中: Q 为烟囱体积流量, m^3/s ; C_d 为流量系数, 取经验值^[3], 如 0.5; A 为烟囱横截面面积, m^2 ; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; L 为烟囱高度, m ; T_o 为烟囱出口空气温度, K ; T_r 为烟囱入口空气温度, K .

对于设计有多个入口的太阳能烟囱, 不同入口处的流量(Q_i)可结合分配系数(r_i)计算得到, 各分配系数之和等于 1, 见式(2)和式(3):

$$Q_i = r_i Q \quad (2)$$

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1 \quad (3)$$

应用 PHOENICS 开展烟囱内热压通风模拟, 以求解各入口流量分配系数. 模拟所需边界条件则由 Energyplus 热工模拟获得^[18], 见式(4).

$$h_w(T_{w,s} - \bar{T}_s) + h_g(T_{g,s} - \bar{T}_s) = \frac{c_p Q}{\omega} \frac{dT_s}{dz} \quad (4)$$

式中: h_w 为吸热墙壁面对流换热系数, $\text{W/m}^2\text{K}$; $T_{w,s}$ 为吸热墙壁面温度, K ; \bar{T}_s 为烟囱内空气温度, K ; h_g 为玻璃盖板壁面对流换热系数, $\text{W/m}^2\text{K}$; $T_{g,s}$ 为玻璃盖板内壁面温度, K ; ρ 为烟囱内空气密度, kg/m^3 ; c_p 为空气比热容, J/kgK ; ω 为烟囱宽度, m .

1.2 模拟工作流和通风潜力指标

建筑设计平台 Rhino 同时搭载了能耗和气流模拟插件 Honeybee 和 RhinoCFD, 分别以 EnergyPlus 和 PHOENICS 为计算引擎. 结合二者搭建耦合模拟工作流, 可以便捷地实现数据交互, 协同模拟效率较高. 工作流包括三个步骤: 1) 预模拟. 提取 Rhino 中的几何模型, 利用 Honeybee 转化为热工模型. 定义烟囱热工区域时, 流量系数使用经验值, 流量分配系数或参照相近案例设定近似值, 或设置均分值. 进行全年周期模拟. 2) 典型工况模拟. 拾取 Rhino 中烟囱几何模型, 转化为 RhinoCFD 模拟计算域. 基于预模拟结果, 定义至少 3 组典型工况, 进行热压气流模拟. 求解完成

后,提取各出入口流量,计算得到流量分配系数。
3)全年周期模拟。根据 RhinoCFD 模拟获得的流量分配系数,调整热工模型设置,重新计算全年周期烟囱热压通风效果。输出各功能房间在室人数、太阳能烟囱各入口逐时通风量等数据。

定义太阳能烟囱通风潜力值为单位时间的有效通风量,见式(5)。

$$P_{\infty} = \sum \frac{Q_{k,i}}{t} \quad (5)$$

式中: P_{∞} 为潜力值, m^3/h ; k 为与烟囱连通房间序号; i 为人员在室时刻; t 为人员在室总时长, h ; $Q_{k,i}$ 为房间逐时有效新风量, m^3 。 $Q_{k,i}$ 随房间人员密度和逐时在室率而变化,且仅当烟囱入口流量满足房间最小新风量时计入有效流量,见式(6)。

$$Q_{k,i} = \begin{cases} Q_{k-d,i} & \text{if } Q_{k-d,i} < Q_{\infty-k,i} \\ 0 & \text{if } Q_{k-d,i} > Q_{\infty-k,i} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $Q_{k-d,i}$ 为房间最小新风需求量, m^3 。 $Q_{\infty-k,i}$ 计算见式(7)。

$$Q_{\infty-k,i} = A_k d_{k,i} q_k \Delta t \quad (7)$$

式中: A_k 为房间面积, m^2 ; $d_{k,i}$ 为房间人员密度, $\text{人}/\text{m}^2$; q_k 为在室率; q_k 为单人最小新风量, $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$; Δt 取 1 h ; $Q_{\infty-k,i}$ 为烟囱带动房间 k 逐时通风量, m^3 。

以往研究发现了太阳能烟囱流量过剩^[12],即烟囱实际流量远大于新风需求的现象。通风潜力值 P_{∞} 的定义公式使用房间逐时有效新风量 $Q_{k,i}$ 作为因子,可以排除流量过剩现象对潜力值判定的干扰。

2 案例研究

2.1 案例建筑

案例建筑位于江苏省南京市。通过分析南京气象文件(epw 格式),发现日间时段(8:00~18:00)静风时数达到 550 h,占比为 13.70%;日间时段风速不超过 2 m/s 的时数达到 1 768 h,占比达 44.03%。静风或低风速情况下,热压通风,尤其是太阳能烟囱等增强自然通风装置可以很好地提升建筑通风换气。本节研究即设置环境为静风,重点关注太阳能驱动下的烟囱热压通风效果。

案例建筑为正南朝向三层办公建筑,见图 1a。建筑东侧布置办公空间,每个办公室建筑面积约 230 m^2 。建筑南侧设置太阳能烟囱,尺寸为 $3 \text{ m} \times 0.35 \text{ m} \times 8.1 \text{ m}$ 。烟囱底部设置有第一个进风口(面积 0.9 m^2),连通一层办公室。距烟囱底部 3.6 m 处设置第二个进风口(面积 0.9 m^2),连通二层办公室。烟囱顶部高出女儿墙 0.9 m ,设置出风口

(面积 0.9 m^2)。太阳能烟囱构造如图 1(b)所示,详细构造信息及热工参数见文献[12]。

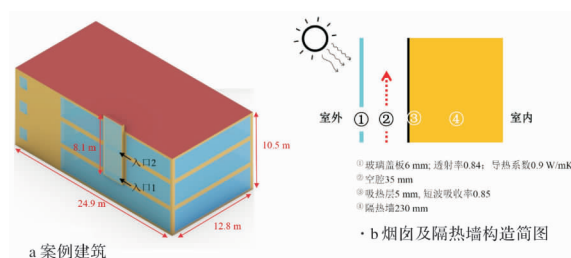


图1 案例建筑模型

Fig. 1 Model of the case building

2.2 模拟工作流应用

参照 GB50189—2015《公共建筑节能设计标准》和 DG J32/J96—2010《江苏省公共建筑节能设计标准》,办公室人员密度设置为 $4 \text{ m}^2/\text{人}$,人员工作日在室时段为 7:00~19:00,逐时在室率设参照标准设置。非工作日设定室内无人员活动。办公空间室内照明功率密度设置为 $9 \text{ W}/\text{m}^2$,电器设备功率密度设置为 $20 \text{ W}/\text{m}^2$ 。渗风换气次数设定为 $0.5 \text{ 次}/\text{h}$ 。其他热工区域根据房间类型和使用情况进行室内热源的具体设置,详见文献[12]。参照舒适性空调设计要求,功能空间有人员活动时温度控制在 $[16, 28 \text{ }^{\circ}\text{C}]$ 区间。一层和二层办公室使用烟囱加强自然通风的方式引入新风。启用能源管理系统管理烟囱入口开闭状态。设定人员在室时段,当室外气温同样在 $[16, 28 \text{ }^{\circ}\text{C}]$ 区间时,烟囱入口开启。该规则有助于避免过热或过冷室外空气的引入导致室温偏离舒适性区间及伴随的冷热负荷增加。区域烟囱模型中,流量系数设置为 0.5,入口 1 和入口 2 的流量分配系数均设置为 0.5。三层办公室启用新风系统引入室外空气,流量按照办公空间最小新风量要求设置为 $30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$ 。

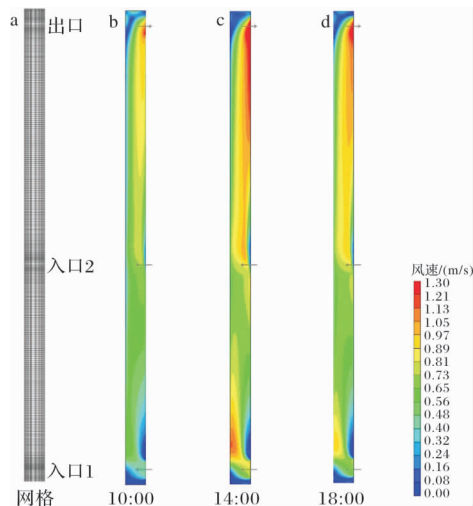


图2 网格及气流模拟结果

Fig. 2 Mesh and air flow simulation results

模拟完成后发现,太阳能烟囱有效运行时段主要在 3 月~11 月.提取 4 月 5 日和 7 月 5 日 10:00、14:00 和 16:00 三个时刻的数据,建立共计 6 组 CFD 模拟工况.烟囱网格划分如图 2(a)所示, y 方向设置网格精度为进深的 1/35,烟囱出

入口处网格加密处理,总网格数达到 567 000.图 2(b)~(d)展示了 4 月 5 日三个工况的烟囱中部 (y - z)剖面空气流速云图.结果表明,不同的边界条件下,烟囱内气流模式差异较小.

表 1 不同工况下烟囱入口 1、2 流量系数

Tab. 1 Flow distribution coefficients of inlet one and two of the chimney under different conditions

工况	4 月 5 日			7 月 5 日		
	10:00	14:00	18:00	10:00	14:00	18:00
烟囱出口流量 $q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	0.521	0.948	0.789	0.625	0.734	0.691
烟囱入口 1 流量 $q_1/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	0.466	0.840	0.700	0.567	0.655	0.619
流量系数 r_1	0.89	0.89	0.89	0.91	0.89	0.90
烟囱入口 2 流量 $q_2/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	0.055	0.108	0.089	0.058	0.078	0.072
流量系数 r_2	0.11	0.11	0.11	0.09	0.11	0.10

提取所有模拟工况烟囱出口和两个入口的流量,并计算得出各个入口的流量分配系数,如表 1 所示.可以发现在不同的边界条件下,流量分配系数变化不大.这反映出,相比于边界条件,烟囱本身的构造材料和几何尺寸等设计参数更直接决定了各入口流量分配系数.设定所研究太阳能烟囱入口 1 流量分配系数为 0.89,入口 2 流量分配系数为 0.11.将分配系数写入热工模型设置,重新计算.

2.3 结果分析

图 3(a)和 3(b)依次展示了 4 月和 7 月第 1 周一、二、三层办公室新风供需关系.新风需求根据人员密度、逐时在室率和新风量设计标准而确定.除渗风换气外,一层、二层办公室新风由太阳能烟囱增强自然通风供给,三层办公室则由机械通风系统供给.图 3 同时展示了模拟工况中烟囱玻璃盖板入射太阳辐射强度的波动情况.值得注意的是,受到太阳高度角和天气的影响,7 月第一周玻璃盖板接收到的太阳辐射强度整体偏小.

从图 3(a)所示结果发现,当周内太阳能烟囱有效运行时段主要在 4 日至 7 日(即 24~120 h).从通风量上看,太阳能烟囱供给一层办公室的最大新风流量达到 $0.80 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右;4 天内通风量达到需求的烟囱有效运行时长依次为 9 h、11 h、11 h、10 h.而太阳能烟囱供给二层办公室的最大新风流量仅为 $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右;房间新风流量均未能达到要求.对比三层办公室机械通风方式,烟囱增强自然通风供给一层办公室的新风量远远高于实际需求,而供给二层办公室的新风量却不能满足需求.这与当前多层太阳能烟囱不同入口的流量分配比例有关,也反映出该烟囱在平衡流量分配

上存在欠缺.由于 3 日(0~24 h)室外最高气温为 14.4°C ,低于设定的室内热舒适区间,能量管理系统控制烟囱两个入口状态为关闭,因此未观察到太阳能烟囱向一、二层办公室供给新风.

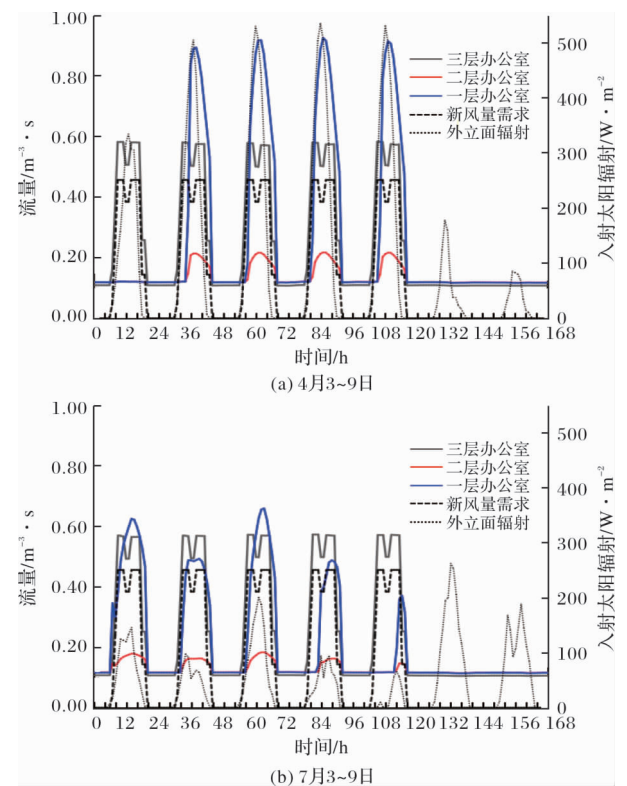


图 3 功能房间新风流量

Fig. 3 Outdoor air flow rates of office rooms

从图 3b 所示结果发现,当周内太阳能烟囱有效运行时段主要在 3 日至 6 日(即 0~96 h).从通风量上看,太阳能烟囱供给一层办公室的最大新风流量达到 $0.54 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右;4 d 内通风量达到需求的烟囱有效运行时长依次为 12 h、10 h、10 h、8 h.3 日和 5 日多数时段,一层办公室烟囱增强自

然通风流量高于与三层办公室机械通风;4日和6日多数时段,前者低于后者。由于7日白天为阴天,17:00以后烟囱辐射得热带动热压通风,最终当日烟囱供给一层办公室的通风量达到要求的时长仅2 h。该周内太阳能烟囱供给二层办公室的最大通风流量仅为 $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,均未能达到新风量要求。

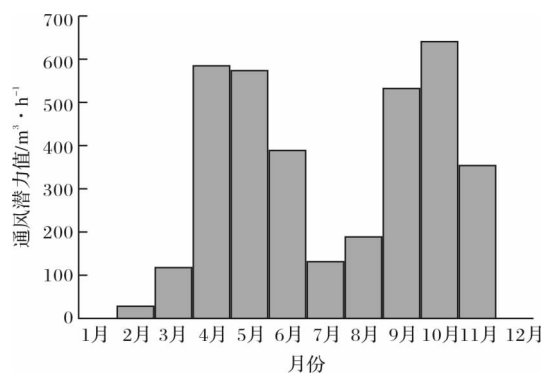


图4 太阳能烟囱逐月通风潜力值

Fig. 4 Monthly ventilation potential values of the studied solar chimney

图4展示了全年逐月太阳能烟囱通风潜力值的波动情况。太阳能烟囱通风潜力值呈现出“M”形波动。潜力值较高主要集中在4~6月和9~11月。其中10月份太阳能烟囱通风潜力值最大,达到约 $637.7 \text{ m}^3/\text{h}$,相当于室内人数为21人的房间新风需求量。由于1月和12月室外气温过低,自然通风易造成冷不舒适和热负荷增加。根据2.2节设定规则,判定太阳能烟囱通风潜力值为零。该太阳能烟囱年通风潜力值为 $292.1 \text{ m}^3/\text{h}$,相当于10人房间的新风量。

2.3 对比独立式与双入口烟囱

为了对比独立式烟囱与所研究双入口烟囱在流量分配和通风利用效率上的差异,在所研究太阳能烟囱入口2下方设计隔断,行成两个高度依次为4.5 m、3.6 m的独立烟囱。上方烟囱与二层办公室连通,下方烟囱与一层办公室连通。

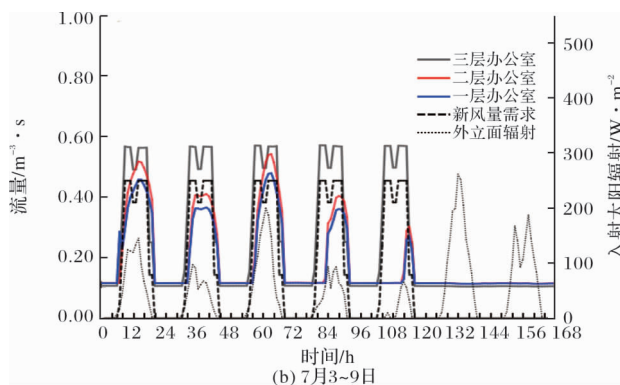
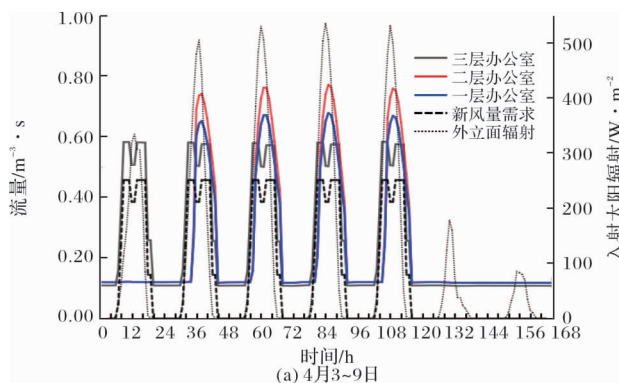


图5 功能房间新风流量

Fig. 5 Outdoor air flow rates of office rooms

图5依次展示了独立式烟囱建筑4月和7月第1周一、二、三层办公室新风供需关系。对比图3可以发现,4月份第一周有效运行时段内太阳能烟囱增强自然通风能够同时满足一层和二层办公室的新风需求,优于原烟囱设计;而7月份第一周,太阳能烟囱增强自然通风在达到新风需求的时段较原烟囱通风缩短。

图6展示了改造后全年逐月太阳能烟囱通风潜力值的波动情况。其中10、11月份太阳能烟囱通风潜力值有明显提升,涨幅达到52.7%、61.3%。而5~7月份太阳能烟囱通风潜力值则降低,其中5月和6月均降幅达25%以上。总体来看,改造为两个独立烟囱后,太阳能烟囱年通风潜力提高至 $347.9 \text{ m}^3/\text{h}$,增长了19.0%。这反映出将当前烟囱改造为两个独立烟囱会优于原双入口烟囱设计。

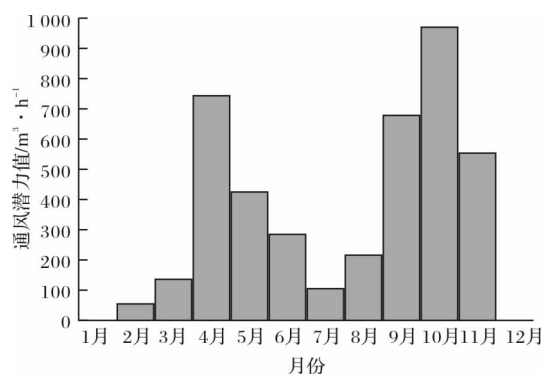


图6 太阳能烟囱逐月通风潜力值

Fig. 6 Monthly ventilation potential values of the studied solar chimney

3 结论

(1)太阳能烟囱通风潜力的量化评价有助于优化烟囱设计和完善烟囱调控策略。本文提出的基于Honeybee和RhinoCFD耦合模拟工作流与通风潜力值指标,可以用于多层建筑太阳能烟囱的全年

通风潜力评价。

(2)以江苏南京某三层办公建筑太阳能烟囱为例进行了案例研究。CFD模拟分析得到烟囱入口1、2的流量系数依次为0.89、0.11。热工模拟得到全年烟囱通风结果表明,4~6月和9~11月太阳能烟囱通风潜力较高,其中10月份达到最高。案例研究显示所提出的工作流及通风潜力指标具有较好的适用性。

(3)由于流量分配不均,二层办公室烟囱增强自然通风在通常未能达到新风量要求。改造为独立式烟囱则可以较好满足二层办公室的新风需求。10、11月份太阳能烟囱通风潜力值有明显提升;但太阳辐射强度较低时独立式烟囱通风量偏小,有造成两个房间均无法达到新风量要求的风险,表现在5~7月份太阳能烟囱通风潜力值降低。全年来看,独立式烟囱可以提升通风潜力19.0%。

参考文献 References

- [1] 张国强, 阳丽娜, 周军莉, 等. 自然通风潜力评估体系的建立与应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(1): 25-28.
ZHANG Guoqiang, YANG Lina, ZHOU Junli, et al. Development and application of natural ventilation potential evaluation system[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2006, 33(1): 25-28.
- [2] ZHAI X Q, SONG Z P, WANG R Z, A review for the applications of solar chimneys in buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(8): 3757-3767.
- [3] 查新彧, 秦孟昊. 太阳能烟囱通风效果的实验研究与数值模拟[J]. 建筑科学, 2017, 33(4): 8-14.
ZHA Xinyu QIN Menghao. Experimental investigations and numerical analysis of solar chimney for building ventilation [J]. Building Science, 2017, 33(4): 8-14.
- [4] BANSAL N K, MATHUR R, BHANDARI M S. Solar chimney for enhanced stack ventilation[J]. Building and Environment, 1993, 28(3): 373-377.
- [5] ANDERSEN K T. Theoretical considerations on natural ventilation by thermal buoyancy [J]. ASHRAE Transactions, 1995, 101(2): 1103-1117.
- [6] ONG K S. A mathematical model of a solar chimney [J]. Renewable Energy, 2003, 28(7): 1047-1060.
- [7] MARTI-Herrero J, HERAS-Celemin M R. Dynamic physical model for a solar chimney[J]. Solar Energy, 2007, 81(5): 614-622.
- [8] GODOY-Vaca L, MANUEL A, KASTILLO J, et al. Dynamic-physical model to predict the performance of a solar chimney in a warm-humid climate with different absorbent materials [C]//Proceedings, 15th International Conference of the International Building Performance Simulation Association (Building Simulation 2017). USA, San Francisco; 2017: 294-303.
- [9] 雷先鹏. 太阳能烟囱强化自然通风在多层建筑中的应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
LEI Xianpeng. The application of solar chimney for strengthening natural ventilation in multistoried building [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [10] 赵爽. 绿色建筑太阳能烟囱强化通风设计及室内热环境模拟[D]. 天津: 天津大学, 2018.
ZHAO Shuang. Design of solar chimney for enhanced natural ventilation and indoor thermal environment simulation in green building [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [11] ASADI S, FAKHARI M, FAYAZ, R. et al. The effect of solar chimney layout on ventilation rate in buildings[J]. Energy and Buildings, 2016(123): 71-78.
- [12] 查新彧. 太阳能烟囱的通风效果与节能效果研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
ZHA Xinyu. Experimental investigations and numerical analysis of solar chimney for building ventilation [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [13] HONG S, HE G, GE W, et al. Annual energy performance simulation of solar chimney in a cold winter and hot summer climate [J]. Building Simulation, 2019, 12(5): 847-856.
- [14] GERMANO M, ROULET C A. Multicriteria assessment of natural ventilation potential[J]. Solar Energy, 2006, 80(4): 393-401.
- [15] LUO Z, ZHAO J, GAO J, et al. Estimating natural-ventilation potential considering both thermal comfort and IAQ issues[J]. Building and Environment, 2007, 42(6): 2289-2298.
- [16] Ladybug Tools LLC. What is Honeybee? [EB/OL]. (2020-09-08) [2020-09-08]. <https://www.ladybug.tools/honeybee.html/>.
- [17] CHAM. RhinoCFD, CFD plugin for Rhino3D [EB/OL]. (2020-09-08) [2020-09-08]. <http://rhinocfd.com/rhinoCFD.php/>.
- [18] MEKKAWI G, ELGENDY R A. Solar chimney for enhanced natural ventilation based on CFD-simulation for a housing prototype in alexandria, Egypt[J]. International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, 2016, 3(5): 5-10.

(编辑 桂智刚)