

基于ANSYS医院街热压通风分析与优化

张以恒

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年1月21日; 录用日期: 2025年2月14日; 发布日期: 2025年2月24日

摘要

随着世界能源形势和气候环境的日益恶化, 可持续发展和节能减排成为全世界关注的焦点, 利用科学技术推动绿色发展成为全球共识。以绿色建筑可持续为背景, 基于Fluent软件对医院街建筑进行热压通风数值模拟研究。首先对外置型医院街标准模型进行模拟分析和验证。然后分析该建筑的风速和温度分布规律, 并与我国绿色建筑设计规范进行比较分析, 最后利用修正开口面积方法进行大小变化来满足更合适的通风量。结果表明: 外置型医院街楼层越高, 室内平均风速越低, 室内温度会在垂直方向上呈现上升的趋势。经过修正方法, 建筑在设计工况下运行时, 每一层楼的通风量基本一致, 通风量相对误差的绝对值在5.0%以内。这说明修正建筑在设计工况下运行良好, 可以克服由于高度不同引起的室内通风量不同的问题。

关键词

医院街, Fluent, 绿色建筑

Analysis and Optimization of Stack Ventilation in Hospital Street Based on ANSYS

Yiheng Zhang

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 21st, 2025; accepted: Feb. 14th, 2025; published: Feb. 24th, 2025

Abstract

With the worsening global energy situation and climate environment, sustainable development and energy conservation have become the focus of worldwide attention. Using science and technology to promote green development has become a global consensus. In the context of sustainable green

buildings, this study conducts a numerical simulation of stack ventilation for hospital street buildings based on Fluent software. First, the external-type hospital street standard model is simulated, analyzed, and validated. Then, the wind speed and temperature distribution patterns of the building are analyzed and compared with the green building design standards in China. Finally, a modified opening area method is applied to adjust the size and variations to achieve a more suitable ventilation volume. The results show that, as the building height increases in the external-type hospital street, the average indoor wind speed decreases, and the indoor temperature exhibits an upward trend in the vertical direction. After applying the modification method, the ventilation volume on each floor of the building under design conditions is nearly consistent, with an absolute value of relative error in the ventilation volume within 5.0%. This indicates that the modified building operates well under design conditions and can overcome the issue of varying indoor ventilation volumes due to height differences.

Keywords

Hospital Street, Fluent, Green Building

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着 21 世纪的到来, 全球正遭受着日益严重的能源需求和碳排放问题。据国际能源署(EPA)指出, 近 30%的能源消耗与 40%的二氧化碳排放源于建筑领域。其中医院建筑作为公共建筑功能非常复杂, 门诊部也因患者数量众多、感染风险高而被视为高危环节[1]。自然通风(NV)可降低建筑能耗并改善室内环境, 已成为建筑行业实现可持续发展的关键解决方案。但是, 建筑的特殊属性对建筑的节能和环境影响巨大, 需要我们针对各点的性能进行比较分析, 选择合适的自然通风策略。热压通风医院街的风速受多种因素影响, 包括室内外温差、风力、建筑物的几何形状等。因此关注门诊优化门诊医院街的空间设计, 从而确保为患者和医护人员营造一个安全、效率高的诊治环境显得至关重要。

建筑设计的模拟与分析, 一般采用场地气候分析工具、气流网络模型、CFD 软件模拟。Rafaella Mateus [2]指出了大空间的研究相对较少, 其中建筑室内采用 RNG $k-\epsilon$ 模型, 相比于标准 $k-\epsilon$ 模型准确, 推荐用于室内空气流动的模拟, 获得整体建筑的基础性参数。对于中庭的研究, 黄澜[3]使用盐水实验对热压通风中庭进行研究, 重点分析中庭结构参数等对自然通风的影响, 比较的通风增强参数和通风增强参数临界值, 还分析了中庭开口面积、中庭高度对楼层和中庭界面高度、体积流量等的影响。肖小康[4]通过 CFD 软件对中庭建筑进行热压通风模拟研究, 了解建筑整体外形对室内热流动的影响;选取代表性的多层开口中庭建筑为研究对象, 得出不同楼层高度、倾斜角度对中庭风速温度带来的影响变化。Ji, Y 和 Fernández-Zaya [5] [6]相关研究表明高中庭不一定能够得到高通风量, 也会影响室内温度, 需要结合开口大小来优化。Shafqat Hussain [7]对一栋无热源的共用通风竖井的三层楼建筑进行了数值模拟研究。其模拟结果表明, 该建筑不同楼层的通风量在不同环境下基本保持一致。而对加热中庭的研究相对较少, 并且几十年来, 国内外研究者大多利用 ASHRAE 55、ISO 7730 和《绿色建筑评价标准》[8]等既定标准作为指导, 这些标准虽然借鉴了大量实证调查得出的计算结果, 却不能充分考虑人和气候在特定建筑物中的特殊性[9]。

本文计算采用 Fluent 软件, 首先基于医院街标准模型进行分析验证, 然后研究风速、温度及通风量的规律, 最后对比不同开口大小寻找适合的优化方法。

2. 数值模拟

2.1. 模型几何

本文采用的软件是 Ansys Fluent，同时它也是世界范围内应用广泛的 CFD 软件。它的市场占有率也较高，Fluent 的涉及面较广，囊括了流体、传热和化学反应等相关的行业，建筑专业、土木工程专业、航空航天专业等专业的某些研究方向均会用到 Fluent。CFD 是计算流体力学(Computational Fluid Dynamics)的简称，依据质量守恒方程、能量守恒方程、连续性方程等计算每个微小控制体内的空气流动，可以得出整个区域内的气流、气压、温度分布状态，该研究方法比较实验的方法可以节约成本，同时快速获得相对精确的求解结果。

对于医街模式医院总平布置形式，不同研究者给出评价标准有所差别，外置型医院街指医院街相对于医院各个功能模块的位置有一边直接与外部空间相通，这类型的医街模式规模一般适中，并结合医院门诊空间进行单边设置。

如图 1 所示，本文所设计为带有医院街的综合医院建筑，忽略正门开口设计，仅考虑单侧向室内候诊、科室的开口和医院街的顶部开口。各层楼的长×宽×高为 50 m × 20 m × 4 m，医院街长 × 宽 × 高为 50 m × 14 m × 16 m，窗户的长 × 宽为 6 m × 1 m，顶部开口的长 × 宽为 30 m × 7 m。

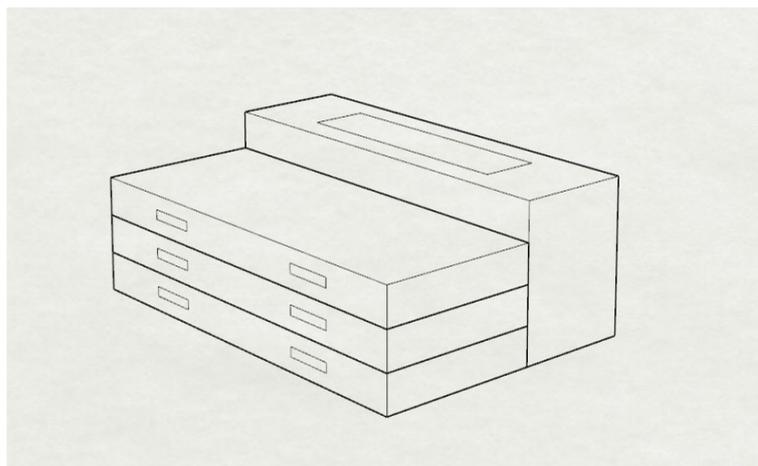


Figure 1. Geometric model diagram
图 1. 几何模型示意图

2.2. 网格划分

在采用数值方法求解控制方程时，首先要将控制方程在空间区域上进行离散，从而求解得到离散方程组，因此必须使用网格，见图 2，目前主流的划分网格的方法分为结构和非结构网格。前者比较规范，网格往往成行成列分布，行线和列线较为明显。后者在空间分布上不需要明显的行线和列线。本文采用非结构网格，开口间隔大小选择 0.1，其余间隔大小为 5。

2.3. 湍流模型与边界条件

本文采用的是与标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型相似的全浮力 RNG $k-\varepsilon$ 的湍流模型：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_K \quad (1)$$

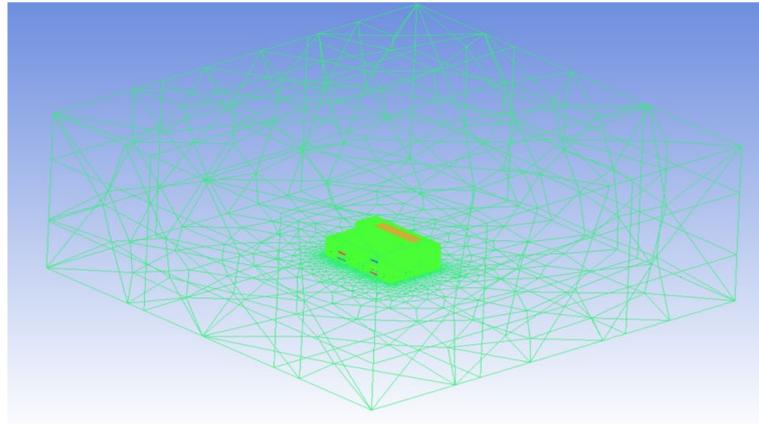


Figure 2. Model mesh
图 2. 模型网格

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2)$$

其中 G_k 表示由于平均速度梯度而产生的湍流动能， G_b 表示由于浮力而产生的湍流动能， Y_M 表示可压缩湍流中的波动膨胀对总耗散率的贡献。 S_ε 和 S_k 是源术语， S_ε 和 S_k 是逆有效普朗特数，用于湍动能及其耗散， μ_{eff} 是湍流的有效粘度。模型常数 $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ ，由 RNG 理论解析得出的值，这些值是 $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.68$ 。

求解方法 SIMPLEC 对于求解非复杂问题时较为合适，求解速度快、收敛快。但是热压自然通风是动量、能量相互耦合问题，因此，本文求解模型采用 Coupled 算法，加速模型的收敛。x、y、z 方向上的速度，湍动能方程，湍动能耗散率方程的残差均小于 $1e^{-3}$ ，能量方程的残差小于 $1e^{-6}$ 时，或者开口监测点流量已经平稳或在极小范围流动，则计算达到收敛。

人员密度为 $8 \text{ m}^2/\text{人}$ ，则每层楼 125 人。人员散热量的组成包括：人体显热散热量 $60 \text{ W}/\text{人}$ ，门诊照明功率密度 $9 \text{ W}/\text{m}^2$ ，设备功率为 $20 \text{ W}/\text{m}^2$ ，得到建筑单位面积散热量为 $36.5 \text{ W}/\text{m}^2$ 。设计环境温度为 20°C ，过余温度为 7°C 具体边界条件如表 1 所示。

Table 1. Boundary condition setting
表 1. 边界条件设置

类别	设置对象	设置
流场材料	/	不可压缩材料
求解方法	/	Coupled
边界条件	外部流场	恒温： 20°C (293.15 K)
	房间地板	恒定热流密度的固定无滑移壁面 热通量 $36.5 \text{ W}/\text{m}^2$
其余壁面	绝热的固定无滑移壁面	其余壁面

2.4. 网格无关化验证

Fluent 求解的精度和速度和网格的质量和数量都有关，网格的质量已经在前文的叙述中进行了检验，

后文将对网格的数量的无关性进行检验。网格数量的无关性是指模拟结果的精度不随网格数量的增加而提高或者提高程度极小。为了检验网格数量的无关性，本文建立了两种网格数量的模型，如表 2 所示。

Table 2. Mesh type

表 2. 网格类型

	网格类型	网格数量(百万)
1	Quad	1
2	Quad	5

将这两种数量的网格导入至 Fluent 中进行模拟。除网格数量不同以外，网格的类型、Fluent 的求解设置均采用统一设置。对每层楼房间的进风口风量、通风竖井出口风量进行监测记录，计算两种网格数量下模拟结果的差异，从而验证网格的无关性。验证网格无关性时各边界条件设置以标准工况为基准。

由表 3 可知，虽然 100 万的网格和 500 万网格在数量级上差了 5 倍，但是其计算结果的精度却在同一量级，各监测点的相对误差均在 1% 以内，所以 100 万的网格模型已经足够满足模拟精度。随着网格数量的增大，计算机的模拟效率会降低，但同时模拟精度却没有明显的提升，因此在这种情况下选择 100 万的网格模型已经足够，在满足计算精度的同时，也保证了模拟的效率。

Table 3. Changes in air volume at each monitoring point

表 3. 各监测点风量变化

通风口名称	网格数量(百万)	风量(kg/s)		相对变化率
一楼进风口(对称两窗户)	1	4.8	4.824	4.824
	5	4.965	4.993	4.993
二楼进风口(对称两窗户)	1	4.08	4.14	4.14
	5	4.193	4.198	4.198
三楼进风口(对称两窗户)	1	3.222	3.258	3.258
	5	3.280	3.299	3.299
医院街出口	1		24.324	
	5		24.928	2.48%

2.5. 计算结果分析

为更好研究稳定后整个医院街建筑内部速度及温度变化，设置窗口立面为参考平面，如图 3、图 4。在参考面上显示的速度和温度从而分析出整个室内和医院街的热对流状况。

传统中庭顶部区域由于热气上升，热空气在中庭顶部汇集，风速较低。此区域可能出现负压，导致空气从下方流向上方。中庭底部区域由于热空气向上升，底部区域的风速较高。热空气在中庭底部与外部气流相互作用，形成一种强烈的流动模式。风速在此处通常较大，尤其是在气温差较大的情况下。外置型医院街由于内部热源与外部空气产生的热差并且侧边科室开口提供的气流，可以大大提升医院街底部的风速，不至于底部过热。气流通道如开口会显著影响风速分布。开口处的风速较高，通常表现为流入或流出的气流，形成明显的风速梯度。

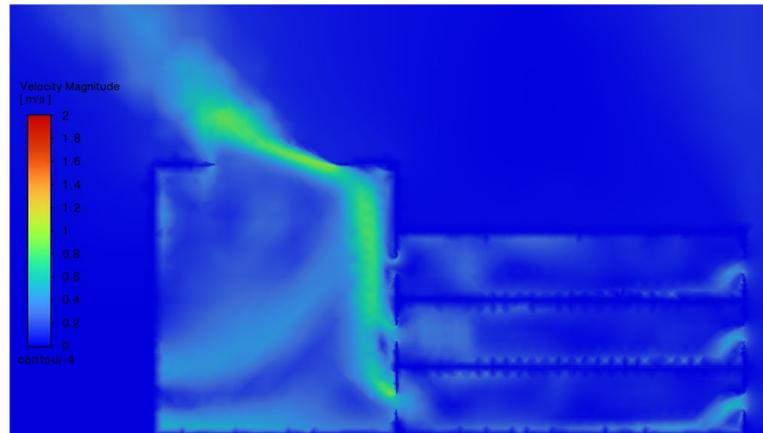


Figure 3. Velocity magnitude
图 3. 立面风速云图

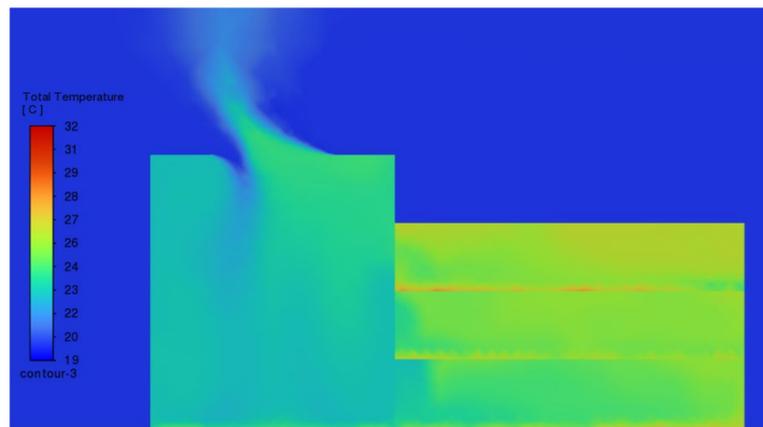


Figure 4. Total temperature
图 4. 立面温度云图

由图 3、图 4 可知，外置型医院街侧边科室楼层越高，室内平均风速越低。随着楼层数的增大，室内温度会在垂直方向上呈现上升的趋势，且在层数较高的居室内，会获得一个较差的通风率。选取各层开口测点布置，得出各楼层平均风速大小及楼层通风量，如表 4 所示。

Table 4. Ventilation volume of each floor
表 4. 各楼层通风量

楼层	开口平均风速(m/s)	开口面积(m ²)	通风量(m ³ /h)
1	0.802	6	601.5
2	0.685	6	513.75
3	0.54	6	405

3. 医院街开口修正分析与优化

3.1. 绿色建筑规范

当室内气流平均速度低于 0.3 m/s^2 时，舒适温度在 $20.5^\circ\text{C} \sim 27.5^\circ\text{C}$ ；当室内气流平均速度在 $0.3 \text{ m/s}^2 \sim 0.6$

m/s^2 时, 舒适温度在 $20.5^\circ\text{C}\sim 28.7^\circ\text{C}$; 当室内气流平均速度在 $0.6\text{ m/s}^2\sim 0.9\text{ m/s}^2$ 时, 舒适温度在 $20.5^\circ\text{C}\sim 29.3^\circ\text{C}$; 当室内气流平均速度在 $0.9\text{ m/s}^2\sim 1.2\text{ m/s}^2$ 时, 舒适温度在 $20.5^\circ\text{C}\sim 29.7^\circ\text{C}$ 。

3.2. 开口大小修正方法

为了使得医院街建筑每层通风量尽量相等且满足规范要求, 本文将每层开口大小进行修正。现一层平均风速已经满足舒适温度在 $20.5^\circ\text{C}\sim 29.3^\circ\text{C}$ 的范围值中, 在此基础上不改变一层通风面积, 并且设通风医院街增强系数为 $E_N=1$, 通过中庭热相关公式修正[10]。

中庭增强系数公式为

$$E_n = [E_N^3 + (N-1) \times 2]^{1/3} \quad (3)$$

(1) 第一层楼通风医院街增强系数

$$\begin{aligned} E_1 &= [E_N^3 + (N-1) \times 2]^{1/3} \\ &= [1^3 + (3-1) \times 2]^{1/3} = 1.71 \end{aligned}$$

(2) 第二层楼通风医院街增强系数

$$\begin{aligned} E_2 &= [E_N^3 + (N-1) \times 2]^{1/3} \\ &= [1^3 + (2-1) \times 2]^{1/3} = 1.44 \end{aligned}$$

(3) 第三层楼通风医院街增强系数

$$\begin{aligned} E_3 &= [E_N^3 + (N-1) \times 2]^{1/3} \\ &= [1^3 + (1-1) \times 2]^{1/3} = 1 \end{aligned}$$

人均通风面积为

$$A_n = \frac{1}{E_n^3}$$

(1) 一楼的人均通风面积:

$$A_1 = \frac{1}{E_1^3} = 0.69$$

(2) 二楼的人均通风面积:

$$A_2 = \frac{1}{E_2^3} = 0.78$$

(3) 三楼的人均通风面积:

$$A_3 = \frac{1}{E_3^3} = 1$$

每层楼医院街通风口面积为: $A_n^* = n\lambda AH^2$, n 为每层人数, H 为高度, 取一层通风面积为 $A_1 = 6\text{ m}^2$ 。

(1) 通风有效系数 λ :

$$\lambda = A_n^* / nA_1H^2 = 0.0043$$

(2) 二楼通风口的有效面积:

$$\begin{aligned} A_2^* &= n_1\lambda_p A_2 H^2 \\ &= 125 \times 0.0043 \times 0.78 \times 16 \\ &= 6.71 \end{aligned}$$

(3) 三楼通风口的有效面积:

$$\begin{aligned} A_3^* &= n_1\lambda_p A_3 H^2 \\ &= 125 \times 0.0043 \times 1 \times 16 \\ &= 8.6 \end{aligned}$$

通过中庭增强系数公式的修正得出了新的开口面积, 如表 5 所示

Table 5. Correction of opening area before and after correction

表 5. 修正前后开口面积

楼层	原开口面积(m ²)	修正开口面积(m ²)
1	6	6
2	6	6.71
3	6	8.6

3.3. 优化结果分析

保持原模型形体不变, 其余参数都不变, 根据修正的面积模拟计算, 仍旧设置 $y = 12.5$ m 的截面为参考平面, 如图 5、图 6。将参考面上显示的速度和温度与修正前室内和医院街的热对流状况进行比较。

根据分析结果, 风速和温度分布与修正前通常表现为以下几个特点:

外侧科室区域随着楼层越高, 依旧呈现室内平均风速越低的规律, 但是由于每层的开口面积随层数增大, 平均风速的大小差有所减少。随着楼层数的增大, 室内温度会在垂直方向上升的趋势有所减缓, 在层数较高的居室内, 获得一个较好的通风率。

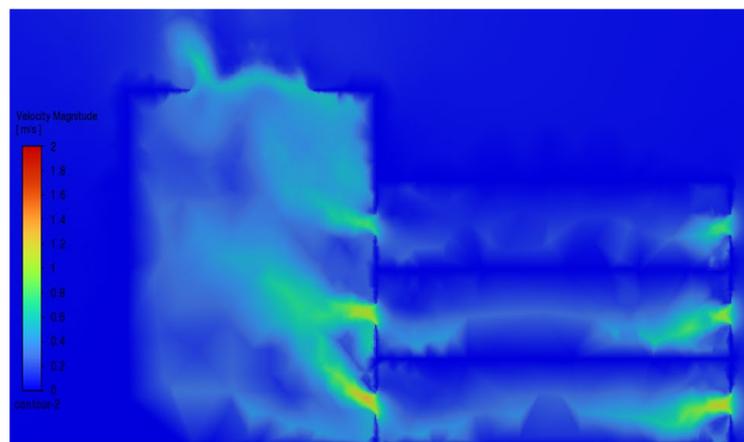


Figure 5. Vertical velocity magnitude cloud map

图 5. 立面风速云图

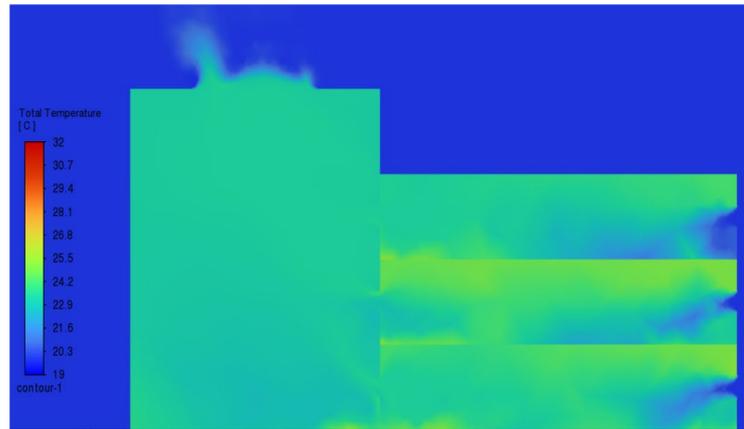


Figure 6. Vertical total temperature cloud map
图 6. 立面温度云图

Table 6. Comparison of ventilation volume before and after correction
表 6. 修正前后通风量比较

楼层	原开口通风量(m ³ /h)	修正开口通风量(m ³ /h)
1	601.5	601.6
2	513.75	596.77
3	405	580.5

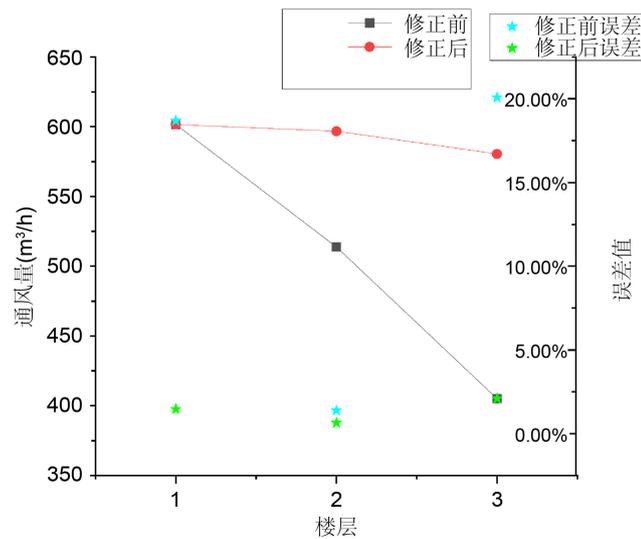


Figure 7. Floor ventilation volume and error
图 7. 楼层通风量及误差

根据表 6 及图 7 可知, 修正后的楼层通风量整体提升且与平均通风量误差值缩小, 使得三层楼的风量基本一致, 且温度满足舒适度范围, 修正结果良好。

3.4. 医院街优化总结

为了提高医院街的热压通风效果和空气质量, 本文采取以下优化策略: 增加自然通风口的面积, 以

此提高热压效应带动的空气流动,提升医院内的空气流通性。除此之外还可以调整建筑物高度与间距:通过合理设计建筑物的高度与间距,可以避免过于密集的结构,减少对空气流动的阻碍,促进空气顺畅流通。在医院街周围增加绿化带,尤其是垂直绿化,可以缓解热岛效应,减少温度差异对热压通风的影响,从而优化通风和空气质量。通过安装温度、湿度、风速和空气质量的传感器,实时监控医院街的通风状态,及时调节通风设备,确保空气质量和环境舒适度。

4. 结论

本文基于 Fluent 软件计算了外置型医院街建筑风速、温度、通风量分布规律并与规范分析比较,得出以下结论:

1) 针对加热的医院街建筑标准模型的模拟结果与其他文献中试验和数值模拟的结果吻合较好,表明本文的计算方法和参数设置具有一定合理性。

2) 对于选择的抽象建筑模型,每层的建筑开口面积大小一致,在这个条件下,外置型医院街楼层越高,室内平均风速越低。随着楼层数的增大,室内温度会在垂直方向上呈现上升的趋势,且在层数较高的居室内,会获得一个较差的通风率。

3) 利用面积设计法设计的建筑与设计工况下的运行效果进行比较:在设计工况下,一楼、二楼和三楼的通风量分别为 $601.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $513.75 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $405 \text{ m}^3/\text{h}$,修正后的一楼、二楼和三楼的通风量分别为 $601.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $596.77 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $580.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。面积修正设计法可以使房间克服由于医院街高度引起的浮力不足缺陷,可以使得三层楼的风量基本一致。此外,室内均布的热源使得房间内的空气流动呈环状,使室内空气达到充分混合的状态,形成了良好的室内热环境。

参考文献

- [1] 张春阳,覃丹,姜晚竹,等. 防疫常态化背景下综合医院门诊部优化设计探讨[J]. 新建筑, 2023(1): 17-22.
- [2] Mateus, R., Pereira, J.M.C. and Pinto, A. (2023) Natural Ventilation of Large Air Masses: Experimental and Numerical Techniques Review. *Energy and Buildings*, **291**, Article ID: 113120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113120>
- [3] 肖小康. 热压自然通风对中庭环境的影响[D]: [硕士学位论文]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017.
- [4] 黄澜. 中庭建筑热压通风的盐水模型实验研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
- [5] Ji, Y., Cook, M.J. and Hanby, V. (2007) CFD Modelling of Natural Displacement Ventilation in an Enclosure Connected to an Atrium. *Building and Environment*, **42**, 1158-1172. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.002>
- [6] Fernández-Zayas, J.L., Villa-Medina, J.F., Valle, N.C. and Porta-Gándara, M.Á. (2021) Experimental Analysis of Natural Ventilation of an Office Building in Mexico City. *Case Studies in Thermal Engineering*, **28**, Article ID: 101661. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101661>
- [7] Guo, P., Wang, S., Xu, B., Meng, Q. and Wang, Y. (2018) Reduced-Scale Experimental Model and Numerical Investigations to Buoyance-Driven Natural Ventilation in a Large Space Building. *Building and Environment*, **145**, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.019>
- [8] 绿色建筑评价标准. GBT 50378-2019 新国标细则[S]. 北京: 住房和城乡建设部, 2019.
- [9] Shen, X., Zhang, H., Li, Y., Qu, K., Zhao, L., Kong, G., et al. (2023) Building a Satisfactory Indoor Environment for Healthcare Facility Occupants: A Literature Review. *Building and Environment*, **228**, Article ID: 109861. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109861>
- [10] Acred, A. and Hunt, G.R. (2014) Stack Ventilation in Multi-Storey Atrium Buildings: A Dimensionless Design Approach. *Building and Environment*, **72**, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.007>