

## 基于模拟实验的建筑自然通风模式研究

王学勇<sup>1</sup>,彭振<sup>2</sup>,张琮<sup>1</sup>,张晋浩<sup>1</sup>,张永超<sup>1</sup>

1. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018

2. 泰安市建筑设计院有限责任公司, 山东 泰安 271000

**摘要:** 本文利用 PHOENICS 软件建立 CFD 模型, 深度分析了一栋学校建筑的室内温度、空气流速和压力情况, 并剖析了含有不同变量的案例。研究表明, 建筑开口面积和通风烟囱会对空气流速和气压产生有利的影响, 建筑设计以通过合理地增大开敞面积和烟囱高度来优化建筑的自然通风, 从而实现建筑的节能以及改善室内空气质量。

**关键词:** 自然通风; 烟囱效应; 流体模拟

**中图分类号:** [TU834.5+7]      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-2324(2016)02-0299-05

## Study on the Natural Ventilation Model of a Multi-storey Building Based on Simulation

WANG Xue-yong<sup>1</sup>, PENG Zhen<sup>2</sup>, ZHANG Cong<sup>1</sup>, ZHANG Jin-hao<sup>1</sup>, ZHANG Yong-chao<sup>1</sup>

1. College of Water Conservancy and Civil Engineering/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2. Shandong Tai'an Architecture Design Group Co., Ltd. Tai'an 271000, China

**Abstract:** This paper established a CFD model with PHOENICS software and deeply analyzed the temperatures in doors, airflow speed and pressure distributions in a multi-storey building in a school and investigated a case containing different variables. The results showed that opening area and ventilation window were advantageous for airflow and air pressure, therefore the natural ventilation was improved by reasonable enlargement for opening area and smokestack height so as to realize the energy conservation and improve air quality in buildings.

**Keywords:** Stack ventilation; natural ventilation; CFD simulation

自然通风是提高建筑物室内空气品质, 节约能源的有效途径, 在不同的气候分区都可采用来提高建筑的通风设计效能<sup>[1-2]</sup>。可以通过风压效应、热压效应或两者共同作用来实现<sup>[3]</sup>。精确设计的自然通风建筑可以通过预留的洞口(门、窗)将新鲜空气带入室内, 并带走室内的污浊空气。

自然通风的建筑无法保证恒定的通风率, 不同的气候条件下, 风向和风压的不断变化导致建筑内部的温度和气流速率也会随之改变。通常推荐的建筑通风率为 10 L/s<sup>[4]</sup>。因此, 如何设计满足规定的通风率是建筑设计初期的重要问题。其他影响建筑自然通风的因素, 如人员密度、功能类别、得热分布等也应考虑在内<sup>[5]</sup>。通常应对这些因素的措施包括控制建筑透明部分面积和遮阳构件的方向<sup>[6]</sup>。过去的数十年中, 利用不同的方法预测建筑的通风性能已十分普遍, 如分析模型、经验模型和分区段模型。PHOENICS 模拟分析已成为研究通风的重要途径。CFD 模型主要用来研究室内空气质量和自然通风, 这是其他研究方法很难做到的<sup>[7]</sup>。

本文利用专业的流体力学计算软件——PHOENICS, 测试一栋多层学校建筑使用空间的自然通风情况, 包括温度分布、空气流速和压力分布等。使用者和计算机的占地面积为 3 m<sup>2</sup>/人和 12 m<sup>2</sup>/台。在模拟程序中, 为保证模拟分析及运算结果的合理性, 首先进行网格迭代分析, 确保模拟结果的精确度。然后对不同的建筑通风设计分组进行模拟分析, 确定变量对自然通风效能所带来的影响, 并就如何改进自然通风策略提出建议。

### 1 研究概况

本研究实验案例是一栋三层的学校建筑, 建筑长 6 m, 宽 10 m, 室内净高 3.5 m, 总面积 180 m<sup>2</sup>, 体积 630 m<sup>3</sup>, 如图 1 所示。右侧烟囱高 12.5 m, 宽 2.5 m, 建筑和烟囱现有的开启分别总面积

**收稿日期:** 2014-05-20      **修回日期:** 2014-05-30

**基金项目:** 泰安市大学生科技创新行动计划项目(2014D006)

**作者简介:** 王学勇(1970-),男,副教授,主要从事建筑节能、生态建筑以及传统民居保护研究. E-mail:wxy199@163.com

数字优先出版:2016-04-08 http://www.cnki.net

为 1.433 m<sup>2</sup> 和 2.045 m<sup>2</sup>。左侧编号 1、2、3 的窗洞对应的面积分别为 0.330 m<sup>2</sup>、0.421 m<sup>2</sup> 和 0.682 m<sup>2</sup>。窗口和通风口的空气流通率分别为 0.27 m<sup>3</sup>/s 和 0.81 m<sup>3</sup>/s。图 2 中建筑在原有的基础上进行镜像，扩大建筑的内部空间，同时增大通风烟囱的宽度，初始数据与图 1 中完全一样。

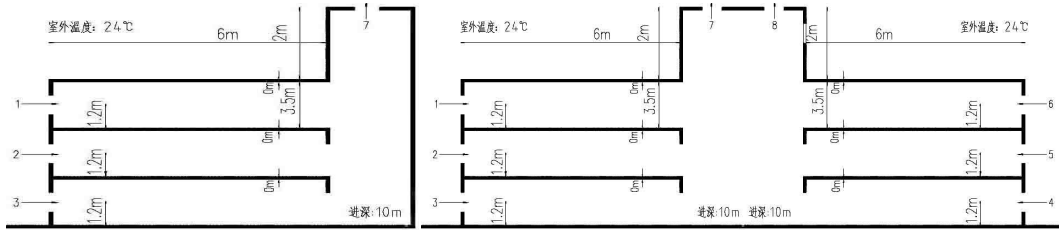


图 1 多层教学建筑示意图

Fig.1 The multi-storey teaching building

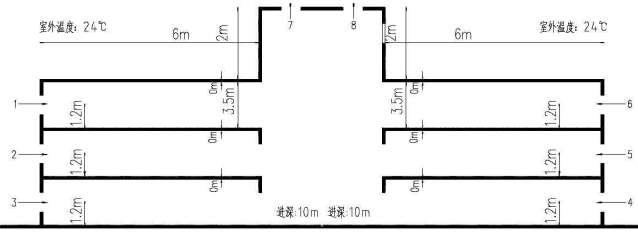


图 2 镜像后建筑示意图

Fig.2 The building after mirror image

## 2 实验分组与研究方法

为确定不同条件对建筑产生的不同影响，实验共分为以下五组。

### 2.1 实验分组 1

利用实验案例建筑初始条件，预测该建筑的气流和温度分布情况。本组实验为参照组，测得的实验数据为基础数据。

### 2.2 实验分组 2

本组实验在第 1 组实验的基础上，调整开启部分的面积，因建筑依靠内外温度差压实现其自然通风，利用下面的公式 1，公式 2 可计算建筑调整后开启部分面积。

$$\text{公式 1: } \Delta P_s = \rho_{\text{ext}} g h T_{\text{ext}} \left( \frac{1}{T_{\text{ext}}} - \frac{1}{T_{\text{int}}} \right)$$

$$\text{公式 2: } Q = C_d A \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}$$

$$\text{公式 3: } Q = \frac{N \times V}{3600}$$

在公式 1 中， $\Delta P_s$ =内外压力差 (Pa)， $\rho_{\text{ext}}$ =室外空气密度(1.2 kg/m<sup>3</sup>)， $T_{\text{int}}$ =室内温度(K)， $T_{\text{ext}}$ =室外温度(K)， $g$ =重力加速度(9.8 m/s<sup>2</sup>)， $H$ =压力平衡面与洞口之间的距离。

在公式 2 中， $C_d$ =开启面积有效系数， $C_d$ 通常取 0.61<sup>[8]</sup>。 $A$ =房间洞口面积(m<sup>2</sup>)， $Q$ =规定空气流速(m<sup>3</sup>/s)。

在公式 3 中，根据英国通风设计手册 CIBSE GUIDE A 建议合理的空气交换率为 2/ach<sup>-1</sup>。为区分不同通风口产生的影响，假定分组 2 中空气交换率为 3/ach<sup>-1</sup>，因此公式 3 中： $N=3/\text{ach}^{-1}$ ， $V=630 \text{ m}^3$ 。因此  $Q=0.525 \text{ m}^3/\text{s}$ 。窗洞 1、2、3 对应的  $H$  值分别是 9.15 m，5.65 m 和 2.15 m。温差设定为 2 K，因此调整后三个洞口开启部分的面积分别是： $A_1=0.786 \text{ m}^2$ ， $A_2=1.000 \text{ m}^2$ ， $A_3=1.622 \text{ m}^2$ 。通风口处的空气流通率应为 1.575 m<sup>3</sup>/s，通风口总面积等于 4.86 m<sup>2</sup>。

### 2.3 实验分组 3

实验分组 3 的研究针对含有镜像部分的建筑。由于原有建筑进深加大，建筑可能存在通风不畅带来室内温度过高的问题。因此本组实验有主要研究原有建筑进深加大后的自然通风情况。由公式 1，公式 2 和公式 3， $H$  值与  $A$  值及温差值不变，因此空气流速为 0.27 m<sup>3</sup>/s。

### 2.4 实验分组 4

实验分组 4 所用建筑与第三组相同，调整了部分实验条件。CIBSE GUIDE A 建议窗洞的有效空气交换效率为 10/ach<sup>-1</sup>。假定建筑各层的空气交换效率为 10/ach<sup>-1</sup>，因此本组实验中建筑各层的空气流速可设为 1.75 m<sup>3</sup>/s。又因  $H$  值保持不变，所以实验分组 4 的压力差与实验分组 3 相等。同理，由公式 1，公式 2 和公式 3 计算可得，建筑一层至三层的窗洞面积分别为 2.621 m<sup>2</sup>、3.335 m<sup>2</sup> 和 5.4

m<sup>2</sup>。每层均有两组具有相同开启面积的通风口, 所以 A<sub>1</sub>=A<sub>6</sub>=1.310 m<sup>2</sup>, A<sub>2</sub>=A<sub>5</sub>=1.668 m<sup>2</sup> 和 A<sub>3</sub>=A<sub>4</sub>=2.7 m<sup>2</sup>。通风口处的空气流速应为 5.25 m<sup>3</sup>/s。

## 2.5 实验分组 5

第五组实验以第四组实验为基础, 窗面积、换算系数、温差等参数与分组 3、4 中保持一致。烟囱高度增加 5.5 m。本组实验旨在研究压力水平面对通风产生的影响。窗洞口设置与分组 4 相同, 压力水平面与洞口之间的距离 H<sub>1</sub>=10.9 m, H<sub>2</sub>=7.4 m, H<sub>3</sub>=3.9 m。因此空气流速: Q<sub>1</sub>=0.77 m<sup>3</sup>/s, Q<sub>2</sub>=1 m<sup>3</sup>/s, Q<sub>3</sub>=1.29 m<sup>3</sup>/s。

## 3 网格分析

为了确保模拟数据的准确性, 在精确分析前, 对实验分组 1 进行了应用网格分析。实验分组 1 采用了三种不同规格的网格, 如表 1 所示。网格 1 为默认值, 另两组网格中在窗洞和使用者周围布置了更为密集的网格。根据模拟结构的变化率来判断网格是否达到精确模拟分析的要求。网格灵敏性分析的循环次数取 3000。

表 1 实验分组 1 的三种网格分析  
Table 1 Analysis on three meshes in case 1

实验组 Group	网格 1 Mesh 1	网格 2 Mesh 2	网格 3 Mesh 3
实验分组 1	76*21*92, 146832cells	76*46*105, 367080 cells	76*59*112, 502208 cells

由表 2 可知, 三组模拟实验结果差值较小, 窗洞处的空气流速大致相等。网格 2 和网格 3 更详尽地记录了中央涡流区。因此网格 2 即可满足模拟分析的要求。

表 2 三种网格下实验分组 1 的气流速率  
Table 2 Airflow rates in three meshes of case 1

实验组 Group		网格 1 Mesh 1	网格 2 Mesh 2	网格 3 Mesh 3
实验分组 1	开口 1	0.473 kg/s	0.458 kg/s	0.479 kg/s
	开口 2	0.473 kg/s	0.465 kg/s	0.472 kg/s
	开口 3	0.427 kg/s	0.422 kg/s	0.415 kg/s
	开口 7	-1.373 kg/s	-1.345 kg/s	-1.367 kg/s

## 4 建立 CFD 模型

研究中使用通风模拟软件 PHOENICS 评价建筑中的空气流通情况。室外温度恒定为 24 °C, 假定模型中所有的外表面和室内地面均为忽略了结构厚度的平面, 可令软件计算更精确高效。除此之外, 研究中假设墙壁和天花板均绝热。由于气流入口附近的压力和风速均未知, 窗洞附近的风速是推理得出的, 且都乘以二次折减系数 2.69。这种方式替代了线性压力差边界条件的形式, 且更为准确。折减系数的取值可由 1/0.612 求得。

在湍流模型方面, 标准 K-ε模型与 RNG K-ε模型相比, 后者更适合模拟空气流动<sup>[9]</sup>, 因此研究中选用了 RNG K-ε模型, 同时选用布西涅斯克模型作为浮力模型, 这也是 RNG K-ε模型的一部分。

第一组和第二组实验中建筑每层容纳 20 人, 布置 5 台计算机。其余三组实验中建筑每层均有 20 人及 20 台计算机。假定每人释放 130 W 热量, 每台计算机释放 125 W 热量<sup>[10]</sup>。前两组实验中每 5 人和 1 台电脑编为 1 组, 后三组实验中每 5 人和每 5 台电脑编为 1 组。则分组 1 和分组 2 中, 每组释放热量 640 W, 分组 3、4 和 5 中, 每组释放热量 1270 W。为建立合适的网格进行了大量模拟, 运用国际收敛标准 0.1% 误差得到了较为理想的收敛数据。表 3 记录了所有分组中网格和循环的具体情况。

表 3 各分组实验的循环次数及网格数  
Table 3 Meshes and cycles in all cases

实验组 Group	迭代次数 Iterations	网格 x*y*z Meshes
实验分组 1	5000	76*46*105, (367080 cells)
实验分组 2	5000	76*46*105, (367080 cells)
实验分组 3	4000	76*65*88, (434720 cells)
实验分组 4	4000	100*102*65, (663000 cells)
实验分组 5	4000	100*95*73, (693500cells)

### 5 结果与分析

主要从室内温度分布、空气流速以及压力三个方面对模拟结果进行讨论分析,表 4 总结了各分组的对比情况。

表 4 实验结果分组对比

Table 4 Comparisons among different simulation cases

模拟结果对比 Comparison between cases	变量 Variable
实验分组 1 对比实验分组 2	实验分组 2 在分组 1 的基础上增加窗洞开启部分的面积
实验分组 1 对比实验分组 3	实验分组 3 在分组 1 的基础上增加镜像部分
实验分组 3 对比实验分组 4	实验分组 4 在分组 3 的基础上增加窗洞开启部分面积
实验分组 4 对比实验分组 5	实验分组 5 在实验分组 4 的基础上增加烟囱的高度

#### 5.1 温度分布

实验中所有分组的温度分布情况相似,三层的温度略高于二层和一层,建筑窗洞口附近的温度略低于建筑的其他部分。特别指出的是,由于人和计算机释放的热量,使用者周围空间的温度略高于建筑通风口附近温度。比较分组 1 和分组 2 可得,增大建筑开口面积是降低建筑室内温度的有效方式。分组 1 中室内最高温度约 32 °C,比室外温度高近 8 °C。室内平均温度 30.4 °C,仍比室外温度高 6°。而且右侧使用部分的温度比左侧高出 3°。分组 2 中,最大温差为 4 °C 左右,平均温度比分组 1 低 3.2 °C。比较第一组实验和第三组实验,其平均温度达 33 °C,最高温度可达 36 °C,使用者能明显感受到室内高温。根据过热标准:室温超过 28 °C 的时间不得持续 120 h 以上,且温差不得超过 5 °C。室内有人时,室温不得超过 32 °C。由于建筑通风不畅,污浊热空气在室内滞留时间过长,因此建筑的所有房间都存在过热问题。第四组实验中的建筑与第三组相同,但室内最高温度 29 °C,较实验 3 中的最高温度低 7 °C。室内平均温度接近室外温度,对使用者来说,该温度体感较舒适。使用空间的温度为 27 °C,只比室外温度高 3 °C。第五组实验的最高温度 29 °C,平均温度 26 °C,高于室外温度 2 °C。以上所有分组实验中,第四组实验的新风面积最广、污浊空气面积最小。第三组实验的室内温度最不舒适。且第三、四、五组试验中,新建部分的建筑温度高于原有建筑的温度。

#### 5.2 空气流速

所有分组测得的空气流速分布皆相对合理,实验结果统计可见表 5、6、7。

表 5 实验分组 1 和 2 流速对比					表 6 实验分组 3、4、5 左侧窗洞流速					表 7 实验分组 3、4、5 右侧窗洞流速				
Table 5 Comparison of airflow rates between case 1 and 2					Table 6 Airflow rates of left side windows in case 3, 4 and 5 (R1)					Table 7 Airflow rates of right side windows in case 3, 4 and 5 (R1)				
组 Group	Win-1 kg/s	Win-2 kg/s	Win-3 kg/s	Win-7 kg/s	组 Group	Win-1 kg/s	Win-2 kg/s	Win-3 kg/s	Win-7 kg/s	组 Group	Win-4 kg/s	Win-5 kg/s	Win-6 kg/s	Win-8 kg/s
组 1	0.46	0.47	0.42	-1.35	组 3	0.526	0.53	0.48	-1.53	组 3	0.53	0.53	0.49	-1.55
组 2	0.81	0.81	0.78	-2.41	组 4	1.13	1.39	1.54	-3.65	组 4	1.12	1.41	1.59	-4.54
					组 5	2.1	1.81	2.39	-6.09	组 5	2.06	2.22	2.41	-6.9

由表 5、6、7 可知,实验分组 1 中的平均空气流速最低,其次由低至高分别是实验分组 3、2、4 和 5。实验分组 1 中空气流速较低,污浊空气在室内滞留的时间长于其他实验分组。第二组实验中,建筑的窗面积较大,因此空气流速高于第一组实验,空气快速进入室内,又快速排至室外。实验分组 3 与实验分组 1 中的窗洞面积相等,平均空气流速低于实验分组 2、4 和 5。实验分组 3 由于增加了宽度,其空气流速仍高于实验 1,但该流速不能满足建筑对于通风的要求。实验分组 4、5 中增大了窗洞面积,增加了烟囱高度,因此提高了空气流速。比较实验分组 4、5,烟囱高度将影响建筑通风率。实验分组 4 和实验分组 5 的通风模式相似,且无风区的面积最小。随着烟囱高度的增加,压力平衡面也升高至另一水平面。因此实验分组 4 和实验分组 5 中的通风最为有效。

#### 5.3 空气压力

模拟结果显示,除实验分组 5 外,前四组实验的压力面一致,零压力面与 NPL 面相接近。但在一些分组实验中,压力平衡面与设定位置不同。实验分组 2 的室内平均压力最高,是 $-0.804765$  pa。实验分组 3 的室内压力最低。通过比较实验分组 1 和实验分组 2 发现,适当增加建筑的窗洞面积可减小室内外压力差。实验分组 3、4 建筑的压力趋势相同,实验 3 的压力差更大。实验分组 5 中,由于高起的烟囱能聚集更多的暖空气,烟囱处的压力高于建筑其他部分。

## 6 结论

通过实验结果的对比和分析,实验分组 2、4、5 的通风是有效的,舒适度优于实验分组 1 和实验分组 3。实验分组 3 中原有建筑和新建建筑皆存在室内温度过高的问题。实验分组 1 和实验分组 3 的气流速率较低。因风速较小,实验分组 4 和实验分组 5 的气流分布情况相似,速率较快,通风情况较好,这表明增大开窗面积、增加烟囱高度可以有效解决建筑物室内温度过高的问题,提高自然通风的效能。

## 参考文献

- [1] 杨柳.建筑气候分析与设计策略研究[D].西安:西安建筑科技大学,2003
- [2] 夏伟.基于被动式设计策略的气候分区研究[D].北京:清华大学,2009
- [3] 陈飞,蔡镇钰,王芳.风环境理念下建筑形式的生成及意义[J].建筑学报,2007(7):29-33
- [4] Holmes M, Wilson A. Section 5: Thermal response and plant sizing//Guide A steering committee. CIBSE Guide A Environment Design[M]. London: The Yale Press Ltd, 1999
- [5] Lomas KJ, Ji Y. Resilience of naturally ventilated buildings to climate change: advanced natural ventilation and hospital wards[J]. Energy Buildings, 2009,41(6):629-653
- [6] Allocca C, Chen QY, Glicksman LR. Design analysis of single – sided natural ventilation[J]. Energy and Buildings, 2003,35(8):785-795
- [7] Chen QY. Ventilation performance prediction for buildings: a method overview and recent applications[J]. Building Environment, 2009,44(4):848-858
- [8] CIBSE. CIBSE-AM10:Natural ventilation in non-domestic buildings: Developing the design strategies. London: Chartered Institution of Building Services Engineers, 2005
- [9] Chen QY. Comparison of different K-emodels for indoor airflow computations[J]. Numerical Heat Transfer Part B Fundamentals: An International Journal of Computation Methodology, 1995,28(3):353-369
- [10] Adamu ZA, Price ADF, Cook MJ. Performance evaluation of natural ventilation strategies for hospital wards - A case study of Great Ormond Street Hospital[J]. Building and Environment, 2012,56(3):211-222

-----  
(上接第 298 页)

散热器的换热量为设计工况下换热量的 96.12%; 9 m/s 环境风速下,空冷散热器的换热量为设计工况下换热量的 80.34%。数值模拟是在来流稳定,稳态传热情况下的计算结果,与实际情况存在一定差异。数值计算结果还需要风洞试验和现场实测数据的验证。

## 参考文献

- [1] Al-Waked R, Behnia M. The performance of natural draft dry cooling towers under crosswind: CFD study[J]. International journal of energy research, 2004,28(2):147-161
- [2] Du Preez AF, Kroger DG. Effect of Wind on Performance of a Dry Cooling Tower[J]. Heat Recovery System & CHP, 1993,13(2):139-146
- [3] Yang LJ, Chen L, Du XZ, *et al.* Effects of ambient winds on the thermo-flow performances of indirect dry cooling system in a power plant[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013,64(2):178-187
- [4] Su MD, Tang GF, Fu S. Numerical simulation of fluid flow and thermal performance of a dry-cooling tower under cross wind condition[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999,79(3):289-306
- [5] Yang LJ, Wu XP, Du XZ, *et al.* Dimensional characteristics of wind effect on the performance of indirect dry cooling system with vertically arranged heat exchanger bundles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013,67:853-866