

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.06.001

多门窗建筑风压驱动自然通风数值模拟

赵福云^{1,2}, 申广¹, 刘科君¹, 王汉青^{1,3}, 寇广孝¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072;
3. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 采用计算流体力学方法对多门窗建筑风压通风过程进行数值模拟。首先, 通过与经典实验结果进行校验计算, 验证了计算流体力学程序的可靠性; 接着, 对建筑贯流通风不同的开口工况进行了深入分析和计算, 并探究室内空气流动的物理机制; 最后, 讨论并且分析速度矢量、速度大小、速度分量、压力分布、压力系数等结果, 讨论入口风速对于建筑室内通风流场的影响。模拟结果发现, 建筑贯流通风存在侧面通风口时, 背风面的出风口也可能作为进风口。

关键词: 多门窗; 自然通风; 计算流体力学; 风压通风

中图分类号: TU111

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)06-0001-07

A Numerical Simulation of Wind-Driven Ventilation in Buildings with Multiple Windows and Doors

ZHAO Fuyun^{1,2}, SHEN Guang¹, LIU Kejun¹, WANG Hanqing^{1,3}, KOU Guangxiao¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: A numerical simulation has been made of the wind-driven ventilation in buildings with multiple windows and doors by adopting the method of computational fluid dynamics. First, the reliability of the computational fluid dynamics program can be fully verified by checking the calculated results against the classical experimental results. Then, a depth analysis and final calculation have been made of the different opening conditions of the cross flow ventilation, followed by a further study of the physical mechanism of the indoor air-flow. Finally, an analysis has been made of the results under discussion which mainly include the following factors: the velocity vector, velocity magnitude, velocity component, pressure distribution, and pressure coefficient, followed by a tentative study on the influence of incoming wind speed on the air flow field inside the building. The simulation results show that, when there is a side vent in the construction cross flow ventilation, the outlet of the leeward side may be used as an air intake.

Keywords: multiple windows and doors; natural ventilation; CFD; wind-driven ventilation

0 引言

多门窗建筑广泛用于厂房、教学楼及体育馆等

公共建筑, 具有数量多、类型广、更新快等特点, 公众越来越重视其自然通风的情况。以体育馆为例, 随着体育文化的迅猛发展, 老旧体育馆现有功能设

收稿日期: 2017-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208192), 湖南省杰出青年基金资助项目(14JJ1002)

作者简介: 赵福云(1977-), 男, 湖南茶陵人, 湖南工业大学教授, 博士生导师, 主要从事建筑与城市通风, 流动反演问题, 建筑节能等方面的研究, E-mail: zfyfcdnet@163.com

置与市民需求间的矛盾逐渐显露出来。体育馆建筑功能更新指体育建筑在使用过程中,基于外部要求、内部客观实际而对自身功能定位、构成、空间和细部进行重新整合。通过查阅大量文献发现,体育馆如果全年开启空调,能耗太大。体育馆室内空调使用率较低,一般在过渡季节和冬季都不使用,所以有必要根据自然通风情况,结合体育馆发展需求及自身特点,探寻影响其自然通风的因素,借鉴国内外优秀案例实践经验和先进理念,探索体育馆建筑更新方法。

近年来,随着计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的高速发展,在暖通空调应用中采用 CFD 技术来预测气流组织、优化设计,已成为普遍趋势。自然通风主要有以下两种方式:风压通风和热压通风。风压通风是由建筑周围的风压差引起的,建筑周围的开口可以让气流贯穿整个建筑。热压通风则是由进出口的温度不同而导致的一定方向上的浮力引起的。本文利用 CFD 技术,针对有较多门窗的建筑,对其风压通风系统进行研究,并通过与相关论文结果进行对比来验证模拟方法的可靠性^[1],以为多门窗建筑的优化设计提供借鉴。

1 多风口建筑通风模型

1.1 物理模型

考虑到建筑复杂的内外部结构,如果模型过于复杂,网格划分将十分困难,并且会大大增加运算时间。因此,在保证结果尽量接近真实情况的前提下,课题组对多门窗建筑的构造进行了必要的简化。最终模型及计算域如图 1 所示。

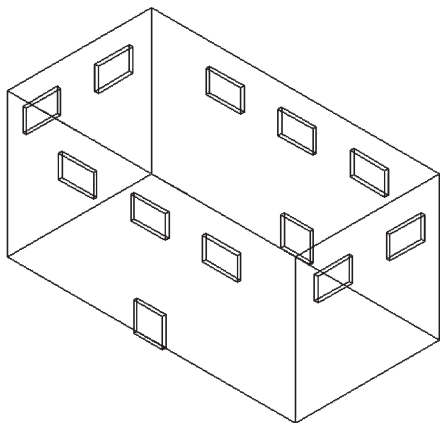
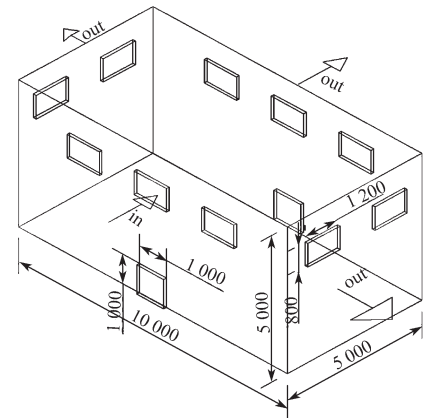


图 1 多门窗建筑简化模型

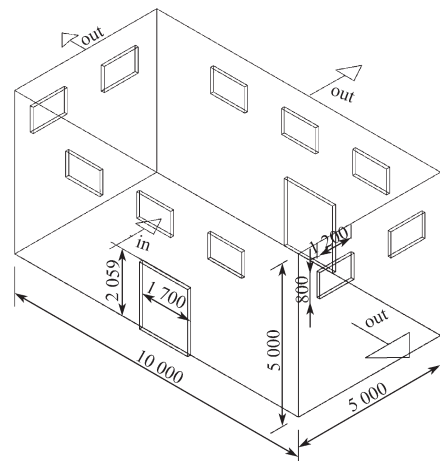
Fig. 1 A simplified model of a building with multiple windows and doors

课题组研究了实际尺寸为 10 000 mm × 5 000 mm × 5 000 mm (包括屋顶高度)的厂房内部及周围的气流组织状况,考虑风压贯流通风的情况,热压通风暂不在本文的讨论范围之内。建筑四周共有 10 个

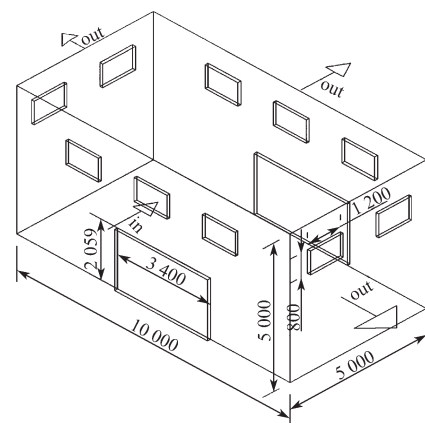
方形门窗,尺寸均为 1 200 mm × 800 mm。窗户中心距离地面的高度均为 3 750 mm,且同一个面上相邻两个窗户之间的距离均为 1 250 mm。本文研究门的大小对建筑室内通风流场的影响。用 Φ 表示门墙面积之比,考虑 $\Phi=7.8\%$, 12.8% , 20.0% 3 种情况,分别记为模型 1、模型 2 及模型 3,模型如图 2 所示。



a) 模型 1



b) 模型 2



c) 模型 3

图 2 多门窗建筑具体模型

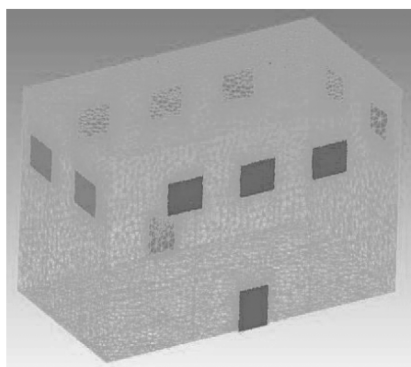
Fig. 2 A specific model of a building with multiple windows and doors

1.2 计算模型

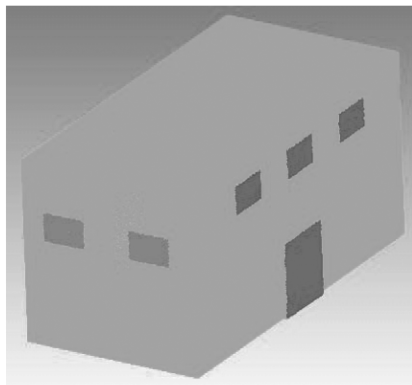
ANSYS ICEM CFD (the integrated computer

engineering and manufacturing code for computational fluid dynamics, ICEM CFD)^[2-3] 是一款功能强大的网格划分软件, 不仅可以为主流 CFD 软件 (如 FLUENT) 提供高质量网格, 而且还可以为 CAE 软件提供前处理, ICEM CFD 是现在市场上六面体结构化网格最强大的生成工具, 在建模过程中可以生成必要的几何元素 (点、线、面), 能够自动检测修补模型中存在的非封闭部位。该软件将几何文件和块文件分别保存, 当几何模型发生轻微变化时, 只需要稍微改变映射关系就可以完成网格生成工作。此外, ICEM CFD 还自带网格装配功能, 可以实现不同类型网格之间的装配, 尤其是对拓扑结构复杂的模型, 可以大大减少工作量。对于三维几何体, ICEM CFD 可以实现四/六面体混合格网, 在平坦的面上自动生成六面体单元, 在面的交线处自动生成金字塔单元。该软件采用先进的 O 型网格技术, 可以显著提高曲率较大处网格质量, 特别适用于外部绕流问题。

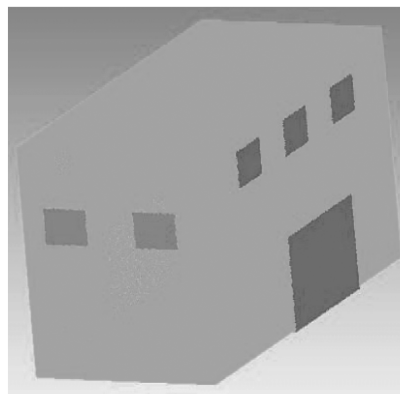
本文主要使用 ICEM CFD 进行三维网格划分, 依照已定建筑尺寸采用 CAD 软件建立三维几何模型, 再导入 ICEM CFD 软件建立基本的物理模型后, 选用贴体性较好的四面体非结构网格单元对其空间进行网格划分; 对进风口、出风口以及建筑壁面处进行局部加密处理。网格划分如图 3 所示。



a) 模型 1



b) 模型 2



c) 模型 3

图 3 不同模型的网格划分示意图

Fig. 3 A schematic diagram of grid partition of different models

2 计算流体力学方法

目前研究自然通风的方法有多种, 比如实验研究、使用 CFD 的数值模拟方法以及理论研究等。

研究自然通风建筑流体流动特性最普遍的方法是实验法, 参考文献 [4-10] 就采用了该方法。J. P. Cockroft 等^[4] 提出了只有一个开口允许气流进入的理论模型, 通过测量这个模型的风压通风来预测气流特性。E. D. Dascalaki 等^[5] 通过实验研究了 52 种单侧自然通风的不同工况, 并与通风模型的预测结果进行对比, 提出了一个预测单侧自然通风空气流动速率的新模型。E. D. Dascalaki 等^[6] 在参考文献中, 做了 4 组单侧风压驱动自然通风实验, 使用示踪气体衰减法得到了开口处的平均空气交换率。P. S. Carey 等^[7] 采用通风率的风洞模型实验研究了 3 种不同工况, 探究自然通风设计的合理性。Jiang Y. 等^[8] 考虑使用风洞实验来研究单开口小型建筑模型的通风现象。S. Murakami 等^[9] 在风洞中仔细测量风速、压力和通风率等指标, 用以分析贯流通风特性。M. Ohba 等^[10] 使用能够测量不同方向分速度的分离影像探测器, 探究了贯流通风模型的内部气流特性。

参考文献 [11-13] 均使用 CFD 的数值模拟方法, G. M. Stavrakakis 等^[11] 不仅在试验箱中进行了实验, 还使用 CFD 数值模拟技术研究了开口在不对称位置情况下的自然贯流通风。李林等^[12] 利用计算流体力学的方法, 对不同热源位置下的单侧双开口室内热压自然对流换热过程进行研究。肖婷等^[13] 对变截面风管内以及出风口处的气流组织进行数值模拟研究。

参考文献 [14] 使用理论研究的方法, Zhang J. H. 等^[14] 研究压力校正方程的稳态换流方案在自然对流室中的应用。

本文使用 CFD 数值模拟方法进行研究, 其中 FLUENT 是用于计算流体流动和传热问题的程序包, 是 CFD 数值模拟的工具, 可以处理 ICEM 划分的网格 mesh 文件, FLUENT 还可以根据计算结果调整网格, 这种自适应型网格对于求解具有较大梯度的流场具有重要意义, 而且该网格的自适应只是在需要加密的流动区域里实施, 而非整个流场, 所以可以节省大量时间。

CFD 的数值模拟方法相比于其他研究自然通风的方法, 有着明显的优势, 因为它能为全尺度模型实验提供一种既节约成本又精确的选择, 同时, 它也能快速改变任何一个模拟的变量或参数。正因为具备了这些优势, CFD 数值模拟方法才在自然通风研究中被广泛地使用。本课题组采用 CFD 数值模拟的方法进行研究, 并且利用 FLUENT 软件建模、划分网格及计算。

然而, 国内外目前关于多门窗建筑自然通风的研究成果和实践, 偏重于工程实例的说明、新技术的应用等, 以设计理念、技术结构及节能利用等研究为主, 对多门窗建筑生态化发展和建筑物理环境、建筑绿色技术的应用等问题的研究还处于起步阶段, 对于既有多门窗建筑的自然通风设计策略研究较少。同时自然通风的研究受到气候条件的限制, 自然通风只在一些有特定限制的气候条件下才有效。因此, 本文对于多门窗建筑风压驱动的研究, 有一定的实用性和研究意义。

3 数值计算结果与分析

采用 Tecplot 360 软件, 对计算结果进行可视化的处理。FLUENT 自带的后处理软件已经较为全面, 但通常还需要专业的绘图软件做进一步处理, Tecplot 是 Amtec 公司推出的一款功能强大的后处理软件, 提供多种绘图格式的 2D/3D 面绘图、3D 体绘图。该软件针对 FLUENT 设有专门的数据接口, 可直接读取 cas 和 dat 文件, 可以显示流域的压力、速度分量、污染物浓度、湍流动能等分布情况, 在单机使用鼠标可直接知道流场中任意点的数值大小, 能够随意增加和删除指定的等值线, 可以导出 BMP、FLASH、AVI、JPEG 等常用文件格式。

3.1 送风均匀性分析

入口风速为 2 m/s 时的速度矢量如图 4 所示。图 4 中, 左下角的门窗为进风口, 其他的门窗均为出风口, 当入口风速为 2 m/s 时, 背风面的通风口出乎意料地作为进风口而不是出风口, 这可能是由于侧面的

通风口过大, 使得大部分从迎风面流进的空气从侧面的通风口流出, 使得背风面通风口流出的空气流量过小。当侧面的通风口全部关闭时, 入口风速为 2 m/s 时的速度矢量图如图 5 所示。

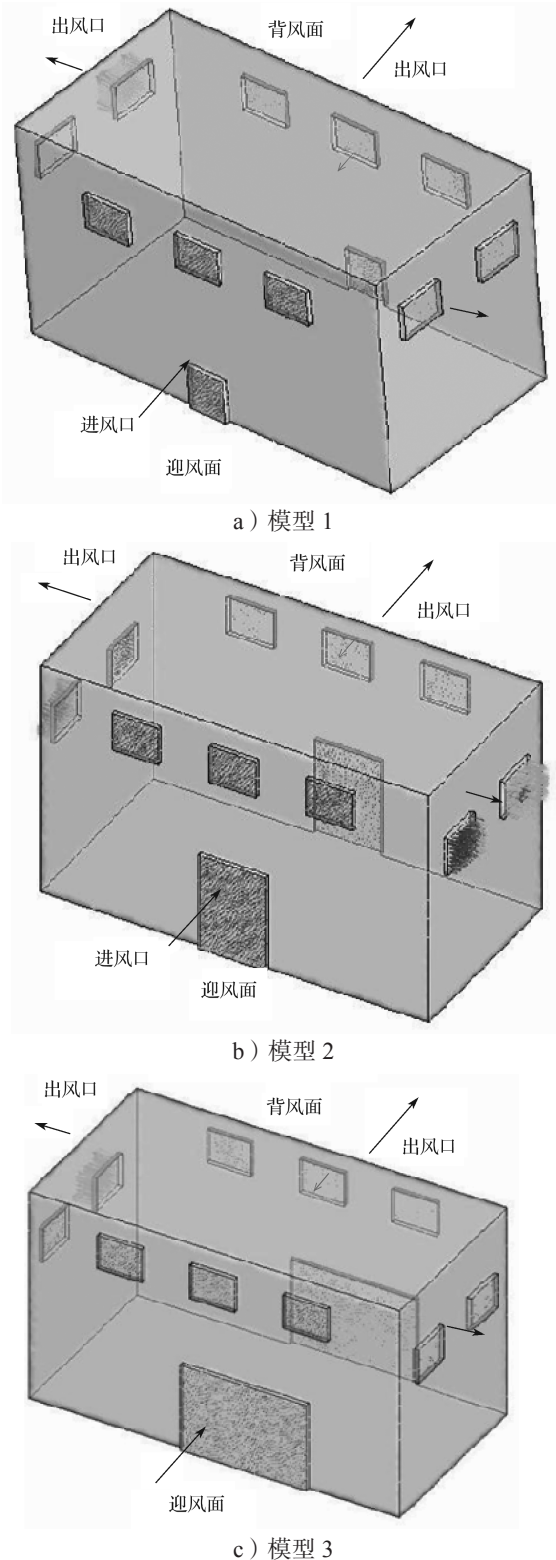


图 4 入口风速为 2 m/s 时不同模型的速度矢量图
Fig. 4 Velocity vector diagram of different models at an inlet speed of 2 m/s

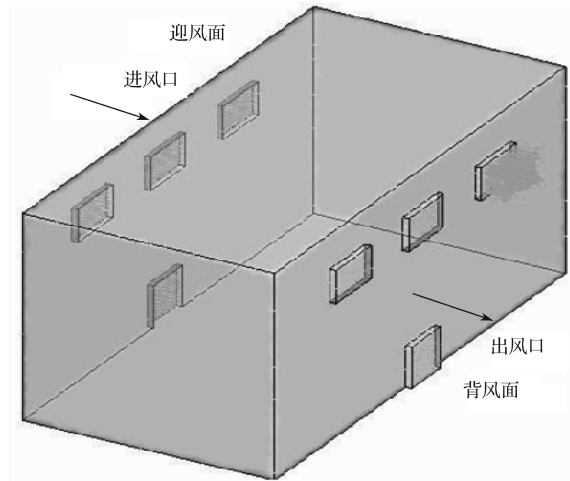
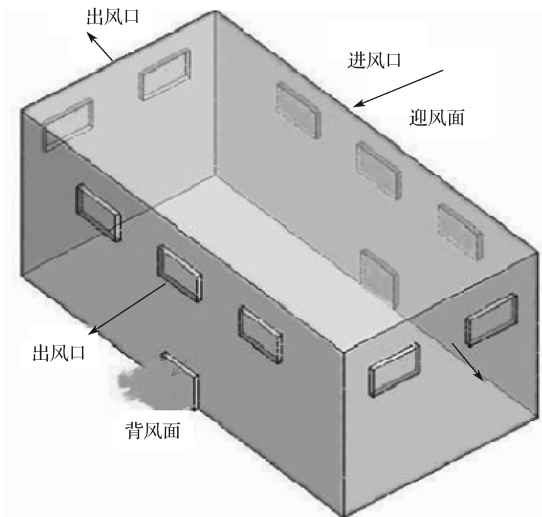
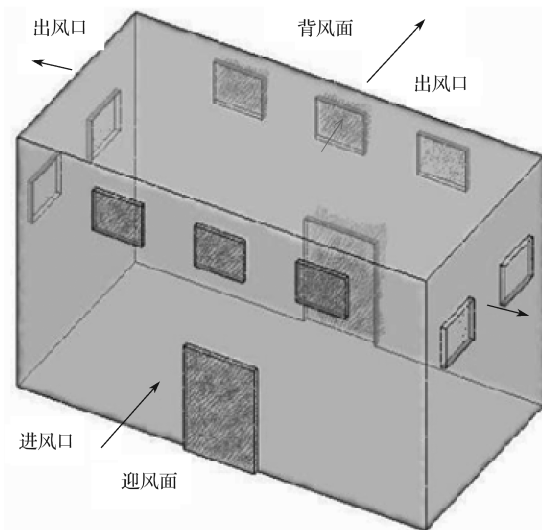


图 5 无侧面通风口入口风速为 2 m/s 时的速度矢量图
Fig. 5 Velocity vector diagram of an inlet velocity of 2 m/s without the side vent

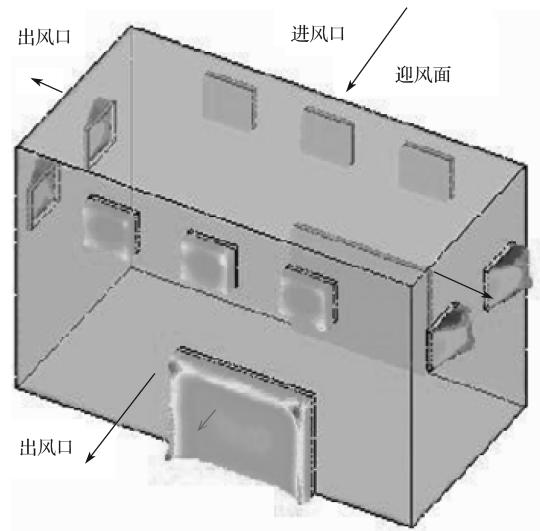
当侧面没有通风口时, 由图 5 显示, 背风面的通风口由进风口转变为出风口。当侧面的通风口全部打开时, 入口风速为 10 m/s 的速度矢量图如图 6 所示。



a) 模型 1



b) 模型 2



c) 模型 3

图 6 入口风速为 10 m/s 时的速度矢量图

Fig. 6 Velocity vector diagram of an inlet velocity of 10 m/s

图 6 中入口风速为 10 m/s 时, 背风面的通风口作为出风口, 而侧面的通风口风速随着入口面积加大而变大, 而且基本上是均匀分布的。

3.2 压力系数分析

入口风速为 2 m/s 时的压力云图如图 7 所示。



图 7 模型 1 入口风速为 2 m/s 时的压力云图

Fig. 7 Pressure nephogram of model one with an inlet velocity of 2 m/s

图 7 显示, 建筑内部的压力变化范围非常小, 然而, 室内靠近壁面处的压力比室内中间区域的压力相对要大一些。压力系数分布状况表明: 在所有通风口都开启的情况下, 迎风面作为进风口最为合适, 而其他通风口都应当作为出风口, 这样最有利于提升室内空气换气次数。

4 计算模型校验

为了验证本文数值模拟方法的可靠性和正确性, 课题组将模拟结果与 T. Kobayashi 等在文献 [15] 中的原始结果进行了对比。图 8 为文献 [15] 中的建筑模型及尺寸。

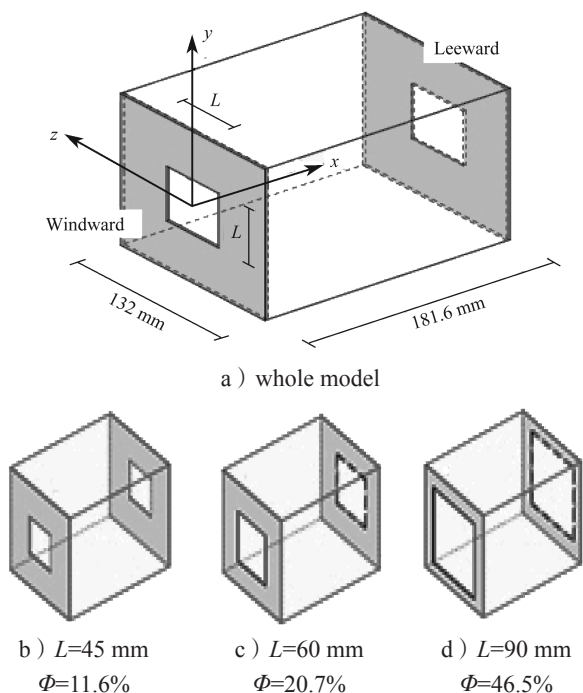


图8 文献[15]中的建筑模型及尺寸

Fig. 8 Building models and dimensions in [15]

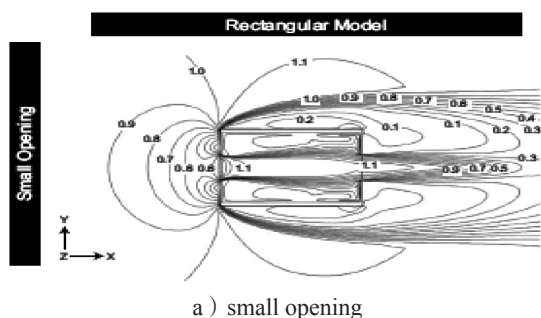
文献[15]中的建筑模型及尺寸与文中 $\Phi=7.8\%$, 12.8% , 20.0% 3个模型类似, 因此, 课题组使用参考文献[15]给出具体的算法、初始条件、边界条件等, 如图9所示。

Program	Fluent 6.2 (rectangular model), Fluent 6.1 (detached house model)		
Differential scheme	Quick		
Algorithm	Steady state (SIMPLEC)		
Turbulence model	Reynolds stress model		
Model type	Rectangular		
Boundary condition	Inlet	Velocity	10 m/s
		Turbulent intensity	1%
		Length scale	126 mm
	Outlet	Gauge pressure: 0 [Pa]	
	Walls	Wall: Standard Wall Function	
		Symmetry: free slip	
The number of grids	$\Phi = 11.6\%$	1,526,904	
	$\Phi = 20.75\%$	1,503,264	
	$\Phi = 46.5\%$	1,502,337	

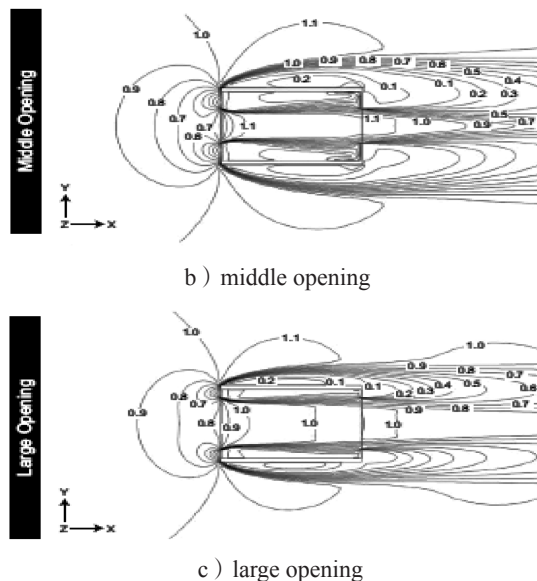
图9 文献[15]中的CFD分析综述

Fig. 9 Summary of CFD analysis in [15]

文献[15]中无量纲速度通过CFD在垂直剖面上的分布如图10所示。与文中入口边界条件速度为10 m/s的结果进行对比分析。



a) small opening



b) middle opening

c) large opening

图10 文献[15]中无量纲速度通过CFD在垂直剖面上的分布

Fig. 10 Distribution of dimensionless velocity through CFD on the vertical profile in [15]

文献[15]模拟结果中显示, 靠近壁面的区域速度较小, 而远离壁面的区域速度较大。鉴于论文在研究建筑自然通风特性的内容重点在于建筑模型室内的速度分布特点, 因此, 室外的数值模拟结果中某些速度分布可以忽略不计; 然而, 在室内的模拟结果得到了较好的验证。同时, 网格数太密或者太疏都可能产生误差较大的计算结果, 网格数在一定范围内的结果才与实验值接近, 本文在划分网格时首先依据已有的经验大致划分一个网格进行计算, 将计算结果与实验值进行比较, 然后酌情加密或减少网格, 再进行计算并与前一次计算结果比较, 加密网格对计算结果影响较小(大约在2%左右), 而减少网格对结果影响较大, 说明本文网格计算结果是可信的。所以认为模拟结果与文献结果相符, 研究风压驱动自然通风的理论及方法是可靠的。

5 结论

主要探讨了风压驱动的多门窗建筑室内自然通风流动过程, 揭示了内部压力场、速度场以及流场的分布状况。根据模拟分析结果, 可得如下结论:

1) 通过速度分布图显示, 当存在侧面通风口时, 背风面的开口可以做为进风口; 当侧面通风口关闭时, 背风面通风口通常为出风口。

2) 建筑室内风速随着进口风速增大而线性增大; 当进口风速为10 m/s时, 背风面的通风口已经转为出风口。

3) 压力系数分布状况表明, 在所有通风口都开启的情况下, 迎风面作为进风口最为合适, 而其他通风口都应当作为出风口, 这样最有利于提升室内空气换气次数。

参考文献:

- [1] PATANKAR S V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow[M]. Washington D.C.: Hemi, 1980: 1-11.
- [2] 朱红钧. FLUENT 15.0 流场分析实战指南 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 1-20.
- ZHU Hongjun. FLUENT 15.0 Analysis of the Actual Flow Guide[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015: 1-20.
- [3] 丁源, 王清. ANSYS ICEM CFD从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 10-50.
- DING Yuan, WANG Qing. ANSYS ICEM CFD from Entry to Master[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 10-50.
- [4] COCKROFT J P, ROBERTSON P. Ventilation of an Enclosure Through a Single Opening[J]. Building & Environment, 1976, 11(1): 29-35.
- [5] DASCALAKI E, SANTAMOURIS M, ARGIRIOU A, et al. Predicting Single Sided Natural Ventilation Rates in Buildings[J]. Solar Energy, 1976, 55(5): 327-341.
- [6] DASCALAKI E, SANTAMOURIS M, ARGIRIOU A, et al. On the Combination of Air Velocity and Flow Measurements in Single Sided Natural Ventilation Configurations[J]. Energy & Buildings, 1996, 24(2): 155-165.
- [7] CAREY P S, ETHERIDGE D W. Direct Wind Tunnel Modelling of Natural Ventilation for Design Purpose[J]. Building Services Engineering, 1999, 20(3): 131-140.
- [8] JIANG Y, ALEXANDER D, JENKINS H, et al. Natural Ventilation in Buildings: Measurement in a Wind Tunnel and Numerical Simulation with Large Eddy Simulation[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2003, 91(3): 331-353.
- [9] MURAKAMI S, AKABAYASHI S, KIM Y D, et al. Wind Tunnel Test on Velocity-Pressure Field of Cross-Ventilation with Open Windows[J]. ASHRAE Transactions, 1991, 97: 525-538.
- [10] OHBA M, IRIE K, KURABUCHI T. Study on Airflow Characteristics Inside and Outside a Cross-Ventilation Model and Ventilation Flow Rates Using Wind Tunnel Experiments[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2001, 89(14/15): 1513-1524.
- [11] STAVRAKAKIS G M, KOUKOU M K, VRACHOPOULOS M G, et al. Natural Cross-Ventilation in Buildings: Building-Scale Experiments, Numerical Simulation and Thermal Comfort Evaluation[J]. Energy & Buildings, 2008, 40(9): 1666-1681.
- [12] 李林, 肖婷, 廖婉婷, 等. 双开口室内热压自然对流模拟及热源分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(2): 1-7.
- LI Lin, XIAO Ting, LIAO Wanting, et al. Simulation of Indoor Heat Press Natural Convection with Double Openings and Thermal Source Analysis[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(2): 1-7.
- [13] 肖婷, 李林, 梅硕俊, 等. 变截面风管均匀送风的气流组织 CFD 模拟 [J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(2): 13-20.
- XIAO Ting, LI Lin, MEI Shuojun, et al. CFD Simulation of Air Distribution in Variable Cross-Section Duct with Uniform Air Supply[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(2): 13-20.
- [14] ZHANG J H, ZHANG D D, ZHAO F T, et al. Nonunique Steady Flow Solutions for Pressure Correction Equations Applied in the Regime of Natural Convection Inside the Free Vented Enclosures[J]. Numerical Heat Transfer Part A, 2016, 70(2): 1-17.
- [15] KOBAYASHI T, SAGARA K, YAMANAKA T, et al. Power Transportation Inside Stream Tube of Cross-Ventilated Simple Shaped Model and Pitched Roof House[J]. Building & Environment, 2009, 44(7): 1440-1451.

(责任编辑: 申剑)