

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.014



房间自然通风运用多区域网络模型的修正

陆齐力^{1,2}, 官燕玲¹, 王巧宁³

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710064; 2. 中国联合工程公司, 杭州 310052;
3. 西安航空学院 能源与建筑学院, 西安 710077)

摘要:多区域网络模型计算中采用简化假设, 忽略隔门位置对通风量的影响, 实际运用中对通风量计算误差较大。通过风洞实验, 对不同开口率工况下进行隔门位于中间和侧边时通过模型的流量进行对比; 对模拟与实验进行验证后, 进行数值模拟拓展, 分别分析没有隔门、前隔门、后隔门、前后隔门均在时, 隔门偏移量对通过模型流量的影响。结果表明, 当来流风速一定时, 只要当开口率足够小时能忽略来流空气动量的影响; 否则, 需要类比为射流模型, 通过计算最大射流长度确定影响情况并进行修正。

关键词:多区域网络模型; 风洞实验; 数值模拟; 射流

中图分类号: TU834.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)06-0105-06

Correction method of multizone airflow model in natural ventilation room

Lu Qili^{1,2}, Guan Yanling¹, Wang Qiaoning³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China;
2. China United Engineering Coproration, Hangzhou 310052, P. R. China; 3. School of Energy and Architecture, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, P. R. China)

Abstract: Multi-zone airflow modeling uses some simplifying assumption which ignores the influence of airflow rate by different door position. And it would lead to large error in airflow rate calculation. This paper compares airflow rate through the models with door position in the middle and at the sides in different window opening ratio conditions by wind tunnel experiment. After comparing simulation model result with experimental model result, the numerical simulation is researched in different conditions: no door, front door, back door, front and back doors. The airflow rate through the models with different doors position is compared. Experimental results show that the effects of airflow momentum can't be ignored but only the window opening ratio small enough, or the free space jet or confined space jet models need to be compared, and the largest jet length is used to optimize multi-zone airflow model's results.

Keywords: multizone airflow model; wind tunnel experiment; numerical simulation; jet flow

收稿日期: 2017-03-03

基金项目: 陕西省住房和城乡建设厅科学技术计划项目(2014-04); 西安市建设科技项目(201106)

作者简介: 陆齐力(1991-), 男, 主要从事建筑通风研究, (E-mail) luqili126@163.com.

官燕玲(通信作者), 女, 教授, 博士生导师, (E-mail) guanyll@163.com.

Received: 2017-03-03

Foundation item: Science and Technology Project of Shaanxi Provincial Department of Housing and Urban Rural Construction (No. 2014-04); Xi'an Construction Science and Technology Project (No. 201106)

Author brief: Lu Qili (1991-), main research interest: building ventilayion, (E-mail) luqili126@163.com.

Guan Yanling(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) guanyll@163.com.

自然通风是一种悠久的通风方式,除了可以满足房间一定的舒适度,保持室内空气的清洁,还能有效降低能耗,更有利于居住者的身心健康^[1-2]。建筑设计受制于时间限制对自然通风的计算,并不能使用 CFD 数值模拟,通常采用多区域网络模型进行计算。

多区域网络模型思想于 20 世纪 80 年代末被正式提出^[3-4],用于研究多房间建筑内部的空气流动问题。多区域网络模型将建筑内部各空间视为不同的节点,并在节点处做出假设:1)假设空气充分混合,其空气参数一致;2)忽略空气来流动量的影响^[5]。这样的简化假设与实际情况不符,影响计算的精度。Wang 等^[6-7]对多区域网络模型的假设进行评价,比较当模型采用多区域网络模型计算结果和模型实测结果的区别。Chu 等^[8-10]希望通过对开口流量系数 C_d 的修正以提高计算的精度,运用风洞实验和数值模拟不断改变模型对流量系数进行修正。王怡等^[11-12]对大开口窗户的房间进行研究,对大开口自然通风的流量系数进行分析并且对小空间射流进行研究。丁勇等^[13]对建筑朝向对自然通风的影响进行了研究。李安桂等^[14]进行小尺寸 PIV 实验对水电站走廊小空间空气扰动进行研究。谭洪卫等^[15]运用风向变化的风洞和 CFD 模拟对非稳态风边界条件下的自然通风机理及效率进行研究。多区域网络模型应用于建筑设计,既能推广自然通风在建筑中的应用起到节能减排的效果,又能提升设计的精确性确保自然通风的效果^[1-16]。

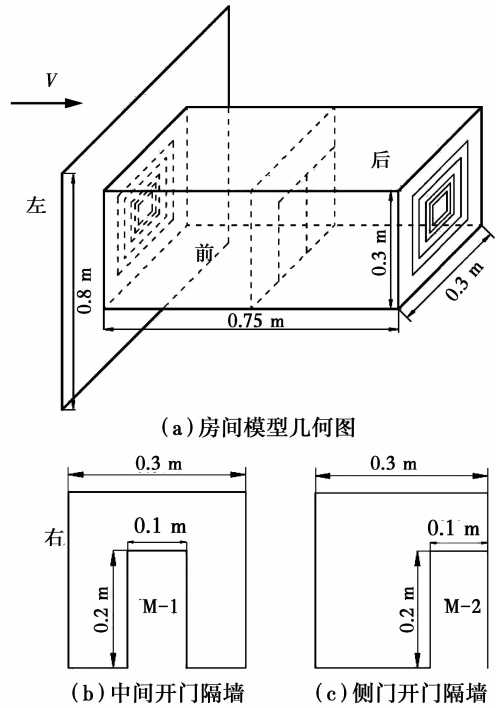
对于民用建筑自然通风主要为风压自然通风^[1],本文针对节点内空气静压不变假设对多区域网络模型计算结果的影响进行分析。运用风洞模型实验对最简单的多区建筑模型进行研究,分析不同开口下两个房间隔门位置不同对通过模型建筑风量的影响。

1 模型实验法

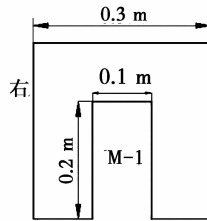
1.1 实验模型及测点布置

图 1(a)为房间模型几何尺寸图,模型几何尺寸为 $0.75\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$,实验模型的缩小比为 1:10,所对应的实际房间尺寸为 7.5 m (长) $\times 3\text{ m}$ (宽) $\times 3\text{ m}$ (高)。模型由 6 mm 厚有机玻璃制成。模型迎风面和背风面的窗户,位置均设在模型中心,形状为正方形,为嵌入式可更换窗户并配有密封胶。窗户的的边长分别为 0.05、0.075、0.1、0.15、

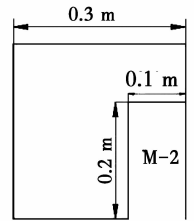
0.2 m,对应的开口率为 2.78%、6.25%、11.11%、25%、44.44%。隔门形式如图 1(b)、(c),为卡槽式接入模型,卡槽位置位于模型长边中间。



(a) 房间模型几何图



(b) 中间开门隔墙

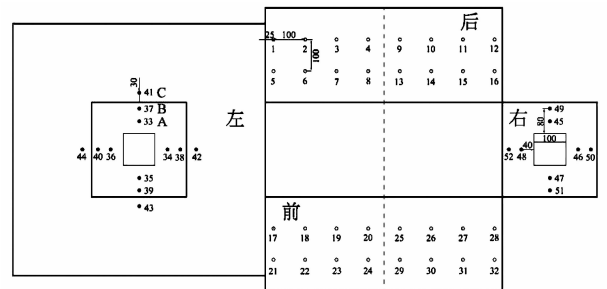


(c) 侧门开门隔墙

图 1 模型房间

Fig. 1 Model room

图 2 为压力测点位置俯视图,测压孔直径为 1 mm,各测点的位置均在图中所示位置,共计 52 个压力测点。参考文献[8],测点距窗户边沿大于 30 mm 时,压力值波动较小,对模型迎风面进行挑檐设计,考虑风洞阻塞率各边的挑檐宽度均为 0.25 m,如图 1(a);挑檐上的压力测点布置如图 2,测点 41~44。



注: 空心圆为内压测点, 实心圆为外压测点

图 2 测压点位置分解示意图

Fig. 2 Exploded view of pressure tap locations

1.2 实验方法与步骤

实验中通过建筑模型的流量测量采用文丘里流量计,为保证流量计的使用条件在模型后增加了一

段辅助管段,文丘里流量计与模型的连接见图 3。实验现场照片见图 4。

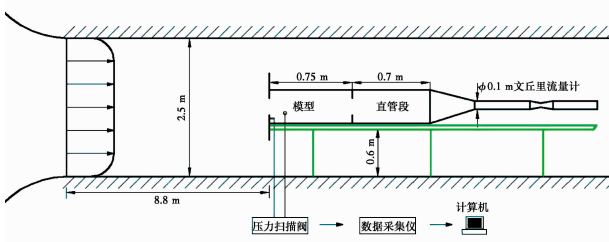


图 3 试验系统原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental system setup



(a) 风洞照片

(b) 实验系统照片

图 4 风洞试验照片

Fig. 4 Photograph of wind tunnel experimental setup

实验工况为不断的改变前后窗户的开度,是否增加隔门,以及隔门的类型,共计 75 个工况。每个工况的实验风速为 11~18 m/s,风速变化为 1 m/s,该风速下满足雷诺数 Re 大于第二临界值 Re_c ,满足相似理论要求。每次更换工况将风洞风速降低至 2 m/s 以下,由实验人员进入风洞更换窗户或隔门,连接测试设备。实验时,待确定风场稳定后开始记录实验数据。

1.3 测试方法及设备

实验在长安大学风洞实验室进行,风洞的测试断面尺寸为 3.0 m(宽) \times 2.5 m(高)。实验段长 15 m,最高风速为 53 m/s。压力的测量及采集使用电子压力扫描阀:256 通道,量程 10 inch 水柱,精度 0.1%,DTCNET 型;数据分析采集系统:64 通道 DEWEPRON-2010 型采样时间为 28 s,频率为 312.5 Hz。模型房间的流量采用标准文丘里流量计测量:型号为 BN-BW-DN100,精度为 1.0 级;流量采集器型号为 OM-DAQ-USB-2401,读数误差为 0.015%,采样时间为 120 s,测量频率为 1 Hz。

2 结果与分析

本文并不涉及模型门和窗户流量系数 C_a 计算的讨论,因此,不对测量的压力情况进行分析。随机

选择一个工况(前后开窗边长均为 0.15 m,中门,15 m/s 风速下),对测量的流量进行分析,如图 5 记录的流量均在一个值上下波动,可采用平均法对各工况流量进行处理。

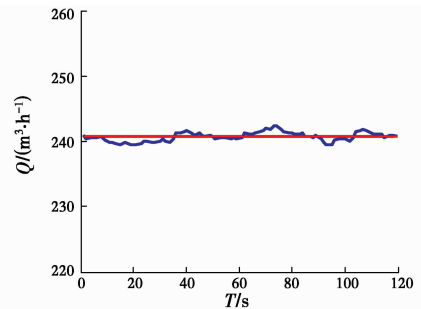


图 5 流量瞬时值

Fig. 5 Transient value of Ventilation rate

自然通风多为前后开窗相同的形式,因此选择前后开窗率相等的工况进行分析。根据[17]定义的开口率 $\leq 10\%$ 的开口为小开口,开口率 $> 10\%$ 的开口为大开口将 5 个实验工况分为两类。大开口:0.2 m \times 0.2 m、0.15 m \times 0.15 m、0.1 m \times 0.1 m;小开口:0.075 m \times 0.075 m、0.05 m \times 0.05 m。

由图 6 分析得,对于大开口窗户的房间,无论何种来流风速下隔门位于中间时通过模型的流量均大于隔门位于侧边时的流量。当开口越小,两种隔门情况下流量相差越大;当来流风速越大,两种隔门情况下流量相差越大。显然,这与多区域网络模型的假设:忽略来流风速的动量不符。

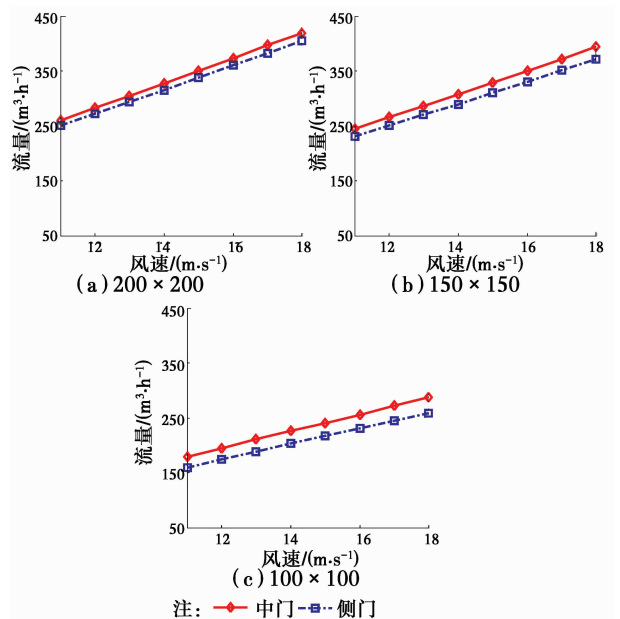


图 6 大开口模型不同隔门位置流量变化

Fig. 6 Model with large opening different door's position and airflow rate

由图 7 分析得,对于小开口房间,当开口越小,两种隔门情况下流量相差越小;当来流风速越大,两种隔门情况下流量相差越大。观察图 7(b)当开口足够小时,房间隔断门无论位于何位置,相同来流风速下通过房间的流量保持不变,满足多区域网络模型的假设:可以忽略来流风速的动量。

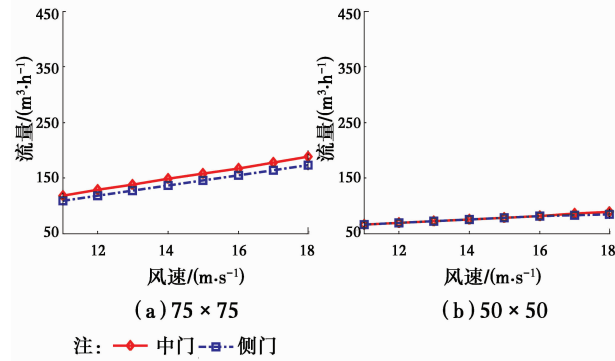


图 7 小开口模型不同隔门位置流量变化
Fig. 7 Model with small opening different door's position and airflow rate

3 计算机模拟验证及拓展

对实验结果进行分析,隔门位置不同对通过模型的流量大小存在影响,在应用多区域网络模型进行通风量计算时不能忽略空气来流动量的影响。由于实验工况并不能满足进一步研究的需要,先对实验工况使用 Fluent 软件数值模拟进行验证后进一步对模型进行拓展研究建筑自然通风。

3.1 实验工况验证

对实验模型及延长段辅助模型进行 1:1 建模,对文丘里流量计处简化为设置阻尼断面,计算区域按风洞尺寸建模,数值计算模型采用 LES 大涡模型。

随机选择一个实验工况(前后开窗边长均为 0.2 m,中门,11 m/s 风速下)进行验证,压力云图及速度矢量图如图 8、9 所示。模拟结果汇总表 1。

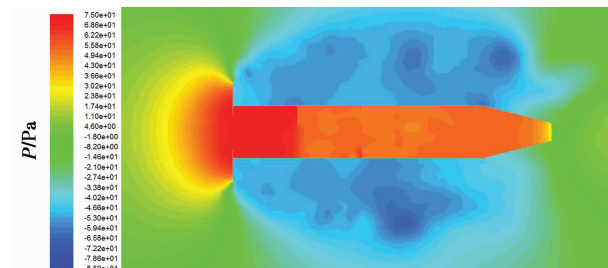


图 8 验证模型压力云图

Fig. 8 Verification models pressure nephogram chart

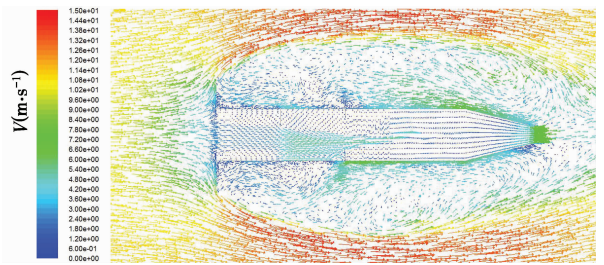


图 9 验证模型速度矢量图

Fig. 9 Verification models velocity vector chart

表 1 对比结果汇总

Table1 Comparison of results

数据类别	来流风速 / 通风量 Q / (m · s ⁻¹) (m ³ · h ⁻¹)	迎风侧压 力 P ₁ /Pa	背风侧压 力 P ₄ /Pa	前侧房间 压力 P ₂ / Pa	后侧房间 压力 P ₃ / Pa
实验实测	11 250.16	76.31	55.34	73.23	55.67
数值模拟	11 252.83	74.87	52.56	71.22	53.23
相对误差 / %	-1.01	1.88	5.02	2.74	4.38

由表 1 内结果可以认为数值模拟模型内部压力分布及流场分布与实验实测模型内部相近,最大误差约为 5%。因此,可认为数值模拟能真实反应实验的状况。

3.2 模型建立及网格划分

由实验结果分析,自然通风来流的影响与射流原理相似,文献[6]将来流的影响与射流相类比进行分析。模拟模型将图 1 实验模型进行了延长,进深为 1.125 m,开间和高度均不变为 0.3 m,由两个隔墙划分为 3 个等大小的房间;迎风面和背风面开口大小选择 0.1 m × 0.1 m、0.15 m × 0.15 m,使开口率为 11.11%、25%,既属于大开口又较接近实际建筑开口率;前后隔墙上设置 0.1 m × 0.2 m 的开口,记为前门和后门,开口的位置分别偏移中轴线 0、0.025、0.05、0.075、0.1 m;模型放置在风洞正中心,风洞与实验时相同为 3 m × 2.5 m;网格划分采用渐变划分,主计算区域加密以确保计算准确度,划分形式见图 10;数值计算模型采用 LES 大涡模型。



图 10 网格划分

Fig. 10 Meshing generation

模型计算时扩大 10 倍,尺度与实际建筑相符合,来流风速设置为 2 m/s 为西安地区年平均风速,该风速下满足雷诺数 Re 大于第二临界值 Re_{c2}。计

算时监测迎风窗和背风窗体积流量,当流量稳定时计入该工况下流量。

3.3 模拟结果及分析

当不设置隔门,来流风速一定,窗户开度为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 时,通过模型的流量为 $2.491\text{ m}^3/\text{s}$; 窗户开度为 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 时,通过模型的流量为 $1.018\text{ m}^3/\text{s}$ 。

当仅设置一个隔门的情况下,对同一来流风速、不同窗户开度和隔门位置条件下进行模拟,得出隔门偏移量和通过模型流量的关系如图 11 所示。从图中可以看出,不同的隔门位置下,通过模型的流量是不同的。当隔门位于后门处时,随着隔门偏移量流量变化比隔门位于前门时小;当窗户开度为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 时,隔门位于前门偏移量为 $0 \sim 0.5\text{ m}$ 时通过模型的流量相近,而窗户开度为 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 时,隔门位于前门偏移量为 $0 \sim 0.25\text{ m}$ 时通过模型的流量相近;当隔门位于后门位置时,通过模型流量最大处均为偏移量 0.75 m 处。

当同时设置两个隔门的情况下,对同一来流风速、不同窗户开度和隔门位置条件下进行模拟,得出隔门偏移量和通过模型流量的关系如图 12 所示。从图中可以看出,一般当前后隔门偏移量相同时,通过模型的流量最大,但存在两处例外,当窗户开度为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$,前隔门偏移量为 0.5 m 时,后隔门偏移量为 0.75 m 时通过模型的流量最大。而当窗户开度为 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$,出现例外的位置与窗户开度为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 时相同。

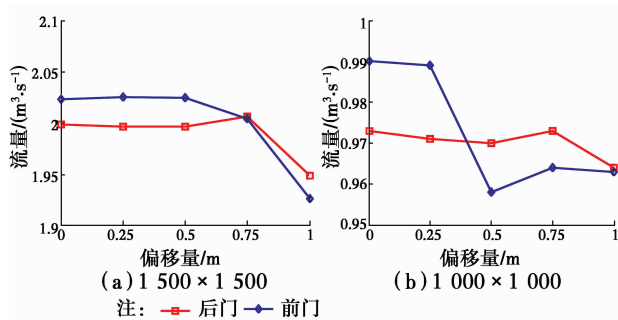


图 11 隔门偏移量和流量变化
Fig. 11 Door's offset and Airflow change

对上述现象进行分析,与射流现象相似。当不受约束则为自由射流如图 13 所示;当受到墙体的约束则形成受限射流如图 14 所示。当来流通过迎风窗,过流断面减小形成射流。当窗户开度越大,射流断面越大,隔门偏移所引起的流量变化越小;后隔门比前隔门距离窗户的距离远,所处的射流断面大,后隔门偏移所引起的流量变化小。若隔门距窗位置大

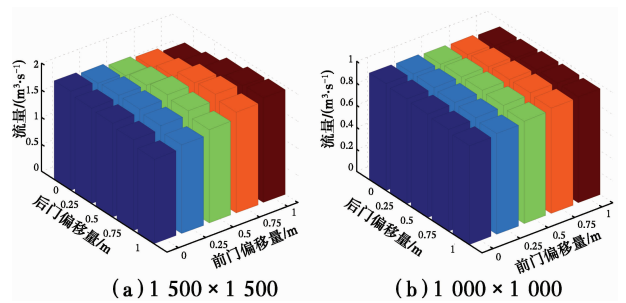


图 12 隔门偏移量和流量变化

Fig. 12 Doors' offset and Airflow change

于最大射流长度,则隔门的偏移量对通过模型流量的影响很小,工程设计中可忽略。最大射流长度 $L_{\max} = 1.13 \times KQ / (U_c \times \sqrt{C_d \cdot R_{fa} \cdot A_c})$, 式中 K 为射流试验常数与喷口形状和紊流系数有关; U_c 为射流耗散段特征速度工程上去 0.25 m/s ; C_d 为开口流量系数与开口形式相关一般取 $0.65 \sim 0.95$; R_{fa} 为有效截面比率; A_c 为开口面积。当隔门位于后门时,偏移量为 0.75 m 时通过模型的流量最大,则可能如图 14 所示,受到墙壁阻挡对射流进行反射引起射流叠加所造成。

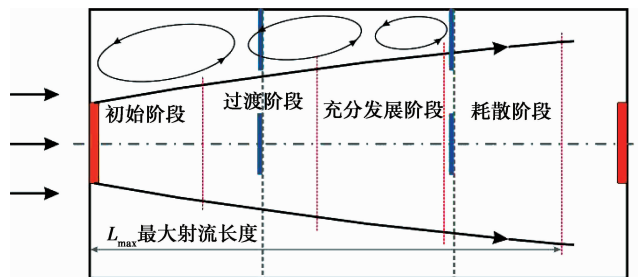


图 13 自由空间射流示意图

Fig. 13 Illustration of a jet airflow in a free space

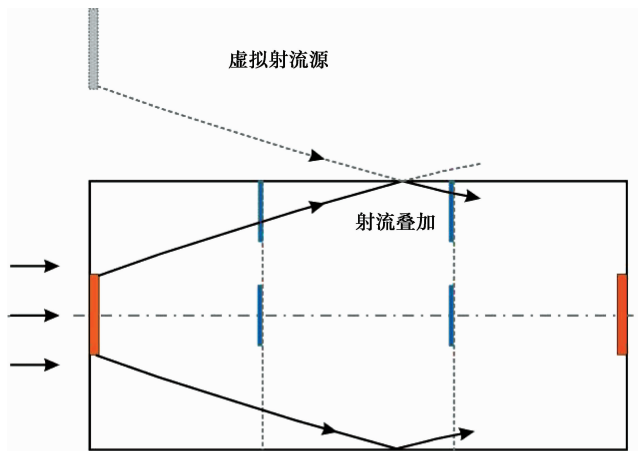


图 14 受限空间射流示意图

Fig. 14 Illustration of a jet airflow in a confined space

4 结论

通过对模型的风洞实验和计算机模拟,得出以

下主要结论。

1)对于一般多区域房间自然通风,不能简单地忽略空气来流动量的影响,隔断的位置不同,通过房间的流量不同。只有当迎风开口率足够小(实验显示约 3%)时,可将房间内部认为静压相对,忽略空气来流动量的影响。

2)当来流通过窗户,过流断面缩小与射流现象相似。对于受限空间射流可考虑运用对称虚拟射流源进行叠加分析;对于一般情况的非受限射流,则可通过对与喷口形状和紊流系数相关的实验系数 K 修正后,计算最大射流长度 L_{\max} ,并利用射流特性进行分析。将射流特性归纳为经验公式,不但能提高通风量计算的精度并且保留多区域网络模型计算快速的特点。

3)对于存在多个房间串联的模型,从模拟的结果显示,当来流通过模型房间 1 进入下一个房间时,通过模型的流量依然受到之后隔门位置的影响。对于该现象能否继续使用射流理论解释,需要进一步的实验验证。

参考文献:

- [1] SANTAMOURIS M, ALLARD F. Natural ventilation in buildings: a design handbook [M]. Earthscan, 1998.
- [2] OLESEN B W. Guidelines for comfort[J]. ASHRAE Journal, 2000, 42(8): 41-47.
- [3] KOTSOPOULOS S D, GUERMEUR F, CASALEGNO F. Using computational fluid dynamics to design natural airflow at a prototype house interior [J]. Blucher Design Proceedings, 2013, 1(7): 373-377.
- [4] 段双平, 张国强, 彭建国, 等. 自然通风技术研究进展 [J]. 暖通空调, 2004, 34(3): 22-28.
DUAN S P, ZHANG G Q, PENG J G, et al. Development in research of natural ventilation [J]. HV&AC, 2004, 34(3): 22-28. (in Chinese)
- [5] AXLEY J. Multizone airflow modeling in buildings: history and theory [J]. HVAC&R Research, 2007, 13(6):907-928
- [6] WANG L, CHEN Q. Evaluation of some assumptions used in multizone airflow network models [J]. Building and Environment, 2008, 43(10): 1671-1677.
- [7] WANG L, CHEN Q. Validation of a coupled multizone-CFD program for building airflow and contaminant transport simulations [J]. HVAC&R Research, 2007, 13(2): 267-281
- [8] CHUC R, CHIU Y H, WANG Y W. An experimental study of wind-driven cross ventilation in partitioned buildings[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(5): 667-673.
- [9] CHU C R, CHIU Y H, CHEN Y J, et al. Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross-ventilation [J]. Building and Environment, 2009, 44(10): 2064-2072.
- [10] CHU C R, CHIANG B F. Wind-driven cross ventilation in long buildings [J]. Building and Environment, 2014, 80: 150-158.
- [11] 王怡, 文福, 刘加平. 大开口自然通风实验研究及数值模拟分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(4): 432-436.
WANG Y, WEN F, LIU J P. Research on natural ventilation through large opening and numerical simulation analysis [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2010, 31(4): 432-436. (in Chinese)
- [12] HUANG Y, WANG Y, LIU L, et al. Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant [J]. Building and Environment, 2015, 85: 94-103.
- [13] 丁勇, 李百战, 沈艳, 等. 建筑平面布局和朝向对室内自然通风影响的数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2010(1): 90-95.
DING Y, LI B Z, SHEN Y, et al. Simulation for the effect of building plan and orientation on natural ventilation [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010(1): 90-95. (in Chinese)
- [14] LI A, TAO P, BAO X, et al. PIV measurements of air distribution in a reduced-scale model-Ventilation of a busbar corridor in a hydropower station [J]. International Journal of Ventilation, 2013, 12(1): 81-98.
- [15] 谭洪卫, 季亮, KATO, 等. 非稳态风边界条件下的自然通风机理及效率[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6):2424-2433.
TAN H W, JI L, KATO, et al. Natural ventilation performance and mechanism on condition of fluctuating wind[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(6): 2424-2433. (in Chinese)
- [16] SCHULZE T, EICKER U. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings [J]. Energy and Buildings, 2013, 56: 221-232.
- [17] SEIFERT J, LI Y, AXLEY J, et al. Calculation of wind-driven cross ventilation in buildings with large openings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(12): 925-947.