

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.148

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



被上游建筑遮挡的下游建筑表面风压 CFD 模拟的可靠性研究

付琳莉^{1a}, 殷维^{1a,2}, 王天文^{1a}, 郝小礼^{1a}, 刘何清^{1b}, 张国强², 陈翠²

(1.湖南科技大学 a.土木工程学院;b.资源与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;2.湖南大学 建筑学院,长沙 410007)

摘要:研究城市通风或建筑风环境的主要目的是探索建筑之间和建筑内外的气流运动及污染物扩散规律,主要手段有风洞实验和计算流体动力学(CFD)模拟,后者相对前者的优点是易操作且成本低,但由于流体运动的高度不确定性,其结果的准确性存疑。在城市中,建筑之间的互相遮挡是主要特征之一,提取其中最基本单元,把两个建筑之间的遮挡问题分为上游建筑有孔(如穿堂风)与无孔两种情况,运用 CFD 中的雷诺平均模型(RANS)模拟下游建筑表面的风压,并与风洞实验进行严格对比,以讨论 CFD 方法在这一基本单元问题中的可靠性。网格敏感性分析显示,建筑表面最小网格为建筑高度的 2% 时,可获得可靠的结果。5 种常用 RANS 模型的结果与风洞实验严格对比表明:RANS 模型对模拟上游有孔遮挡的可靠性明显高于模拟无孔遮挡;RANS 模型对于建筑上部的风压模拟结果普遍好于建筑下部;其中,SST $k-\omega$ 模型准确性最高,在上游有孔时,平均误差 11%,上游无孔遮挡时,则为 16%。

关键词:城市通风;建筑遮挡;风压;计算流体动力学;风洞

中图分类号:TU119 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2020)01-0180-11

Reliability of CFD simulation for the wind pressure on a cubic after another cavity in comparison of wind tunnel experiment

Fu Linli^{1a}, Yin Wei^{1a,2}, Wang Tianwen^{1a}, Hao Xiaoli^{1a},
Liu Heqing^{1b}, Zhang Guoqiang², Chen Hui²

(1a. School of Civil Engineering; 1b. School of Resource & Environmental and Safety Engineering,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China;
2. School of Architecture, Hunan University, Changsha 410007, P. R. China)

Abstract: Urban ventilation or wind environment focus on the air flow distribution and pollution dispersion which are studied by the tools of wind tunnel and computational fluid dynamics (CFD) simulation. The latter is easy to be employed, but its reliability is under suspicion due to the high uncertainty of air stream. In the city, the sheltering

收稿日期:2019-04-27

基金项目:国家自然科学基金(51474105,51308206);科技部国际合作项目(2014DFA72190);湖南省研究生科研创新项目(CX20190799)

作者简介:付琳莉(1995-),女,主要从事建筑通风与节能研究,E-mail:fulinli2018@163.com。

殷维(通信作者),男,博士,副教授,E-mail:yinwei@hunst.edu.cn。

Received:2019-04-27

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51474105, 51308206); Ministry of Science and Technology International Cooperation Project (No. 2014DFA72190); Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate (No. CX20190799)

Author brief: Fu Linli (1995-), main research interests: HVAC, E-mail: fulinli2018@163.com.

Yin Wei (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: yinwei@hunst.edu.cn.

among buildings affects each other in air flow, and the basic element is the two-building model. Shade problem between the two buildings are divided into upstream building with a hole (such as drafts) with no hole two situations, Reynolds average model of using CFD (RANS) simulation of wind pressure on the surface of the building downstream, and compared with wind tunnel experiments are strictly, to discuss the CFD method in question the reliability of the basic unit. The analysis of grid sensitivity states that the smallest side length of the cell around 2% of building height is sufficient to obtain steady results. The comparison of five typical RANS model presents: the reliability of RANS model to the upstream with hole occlusion was significantly higher than that of simulation without hole occlusion; estimations on upper parts of building are more accurate than on lower parts; the SST $k-\omega$ model can acquire best results with error of 11% in porous interfering building, and with 16% in sealed one, in comparison of experimental data.

Keywords: urban ventilation; building sheltering; wind pressure; computational fluid dynamics (CFD); wind tunnel

研究城市通风或建筑风环境的主要目的是探索建筑之间和建筑内外的气流运动及污染物扩散规律,例如,自然通风是其中主要研究内容之一^[1]。建筑间气流的现场测量存在不稳定性、多样性等特点,而风洞手段结合简化建筑模型,能够得到相对稳定可靠的实验结果^[2-4]。另一方面,越来越多的研究人员运用更为方便和低成本的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称CFD)来研究此类问题,其中,建筑内外的气流耦合模拟成为研究热点^[5-7]。

Straw等^[6]的通风研究表明,与测量的体积流速(偏差为28%~32%)相比,压力系数与孔口方程的结合使用,并不能较为准确地预测体积流速,当存在(大)开口时,其压力系数与同一主体上的压力分布不对应。对于自然通风的研究,Kavara等^[3]针对一个单区两开口的一般性模型进行了风洞实验,研究分为两对称墙上开洞与侧墙上开洞两种情况。结果表明,经典的伯努利方程计算出的气流流量公式与实际情形相差较大,建筑之间的遮挡会极大地削弱自然通风的效果,两个建筑的互相遮挡是其最简单的形式。在现有遮挡研究中,主要讨论两建筑之间水平方向、垂直方向对建筑荷载的影响^[8-10]。基于Kavara等^[3]的研究,Tominaga等^[11-12]在相同模型下进一步探讨了污染物扩散情况,此外,还讨论了建筑周边无遮挡和有遮挡两种情况,发现当周边有遮挡建筑时,穿过建筑的气流量将下降30%,但Tominaga等仅研究了单区间建筑内部穿堂风的分布规律。Van Hooff等^[13]基于Tominaga等^[11]的实验结果,针对无遮挡的情况,运用CFD方法进行了模拟研究。结果显示,所有的雷诺平均模型(Reynolds Average Navier-Stokes,简称RANS)可以较好地模拟建筑内部的气流场,却无法较好地模拟湍流动能分布,而大涡模型(Large Eddy Simulation,简称LES)则可以较好地模拟出所有参数,包括速度、湍流动能和换气量。但Smal^[14]针对Tominaga等^[12]的有

遮挡情况,运用稳态雷诺平均NS方程模型与非稳态雷诺平均NS方程(RANS与URANS)进行了模拟。结果显示,所有模型所得到的速度和湍流度模拟结果都与实验结果的吻合度较差,只有RSM湍流模拟出的室内气流的风向与实验相一致。

以上研究表明,CFD模拟对于有遮挡后方的气流预测准确性较差,且未讨论上游建筑有孔时对下游建筑的影响,即未见穿堂风对下游建筑表面压力的影响。针对上游建筑为有孔遮挡与无孔遮挡两种遮挡情形,将CFD模拟结果与风洞实验数据进行严格对比,探究在提高模拟可靠性的同时,降低计算硬件要求与时间成本。

1 风洞实验设置

1.1 研究方案与模型

为了避免由实验模型造成的实验误差,上游与下游建筑采用与Karava等^[3]相似的建筑模型,与Tominaga等^[11]实验中的模型尺寸完全相同,与真实建筑比例为1:100,上下游两个建筑的外形尺寸都为 $W \times D \times H = 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.16 \text{ m}$,两建筑间的距离固定为2倍建筑宽度(0.4 m)。只讨论一个来流风向——垂直于上游建筑迎风面。实验对象分为两组:1)有孔遮挡,上游建筑为中空,且迎风面与背风面各有一个相同面积与位置的对称开口,开口位置位于迎风面和背风面中心,高度 $h = 80 \text{ mm}$,开口面积为 $3.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$;2)无孔遮挡,上游建筑同为中空建筑,但建筑各表面无开口,为封闭模型。两组实验模型如图1所示。压力系数测量点布置于下游建筑表面,建筑模型测点分布如图2所示。

1.2 风洞设置

风洞为一座水平直流吸入式单试验段低速风洞,风洞试验段长21 m、高3 m、宽4 m,使用尖顶和表面粗糙度的组合来创建近似3类大气边界层的流动风剖面。来流风平均速度服从幂指数为0.25的函数公式,见式(1)。

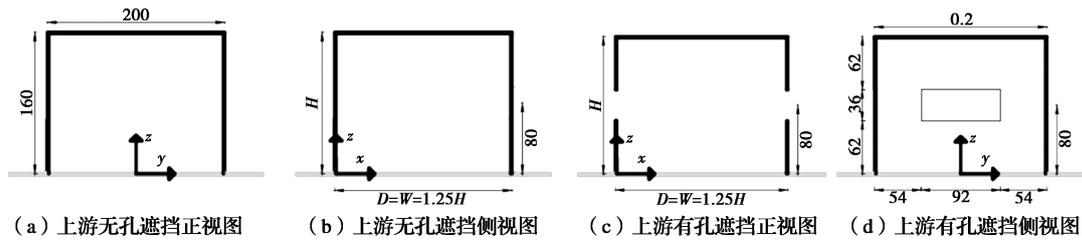


图 1 建筑尺寸(单位:mm)
Fig.1 Building size (unit:mm)

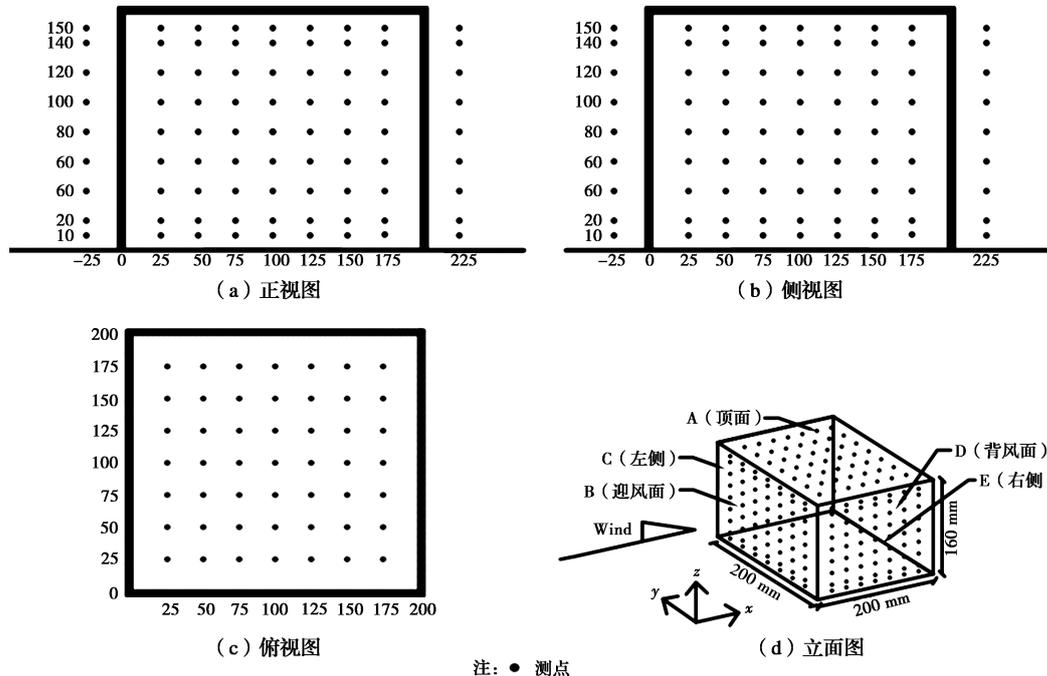


图 2 下游建筑表面测点分布图
Fig.2 Measurement points in downstream building

$$\frac{U_z}{U_H} = \left(\frac{z}{H}\right)^{0.18} \quad (1)$$

式中: U_z 和 U_H 分别为高度 z 和建筑高度 H 处的来流风平均速度。

通过测量来流风 3 个方向的分速度,拟合出湍流能在高度上的近似曲线,见式(2)。

$$\frac{\kappa(z)}{U_H^2} = -0.058e^{-0.19(\frac{z}{H})} \quad (2)$$

式中: $\kappa(z)$ 为高度 z 处的湍流动能。

图 3 为风洞中实测来流风速曲线与湍流动能曲线。风向垂直于建筑迎风面,在建筑物高度 H 处 (0.16 m) 测得风速(U_H) 为 4.5 m/s,对应的雷诺数约为 47 000。这个雷诺数与 Tominaga 等^[11] 实验中的 45 000 接近,达到雷诺数独立(Reynolds Independence, 又称雷诺数无关)。3 个月后的重复实验获得非常相似的结果,实验具有较好的重复性。

采集的实验数据包括来流风速、风压、静压、湍流度等。实验采用三维脉动风速仪(TFI, Cobra Probe)进行风速测量;采用 PSI 公司的 512 通道电

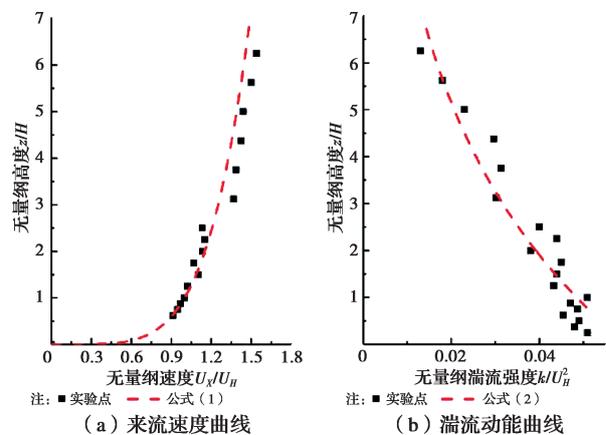


图 3 风洞实验来流曲线图

Fig.3 Inflow profiles of wind tunnel experiment

子压力扫描阀系统进行压力测量,测量时长为 30 s,采样频率为 332.5 Hz,采样点数为 301 个;可视化实验中的发烟试剂采用了 15% 的丙烯乙二醇溶液,发烟点位于上游建筑地面中心,为半径 1 cm 的圆形发烟口,发烟口高度距离地面 2 cm,在风场稳定后持续发烟,发烟时长为 60 s,采用摄像机记录可视化实

验中各遮挡情形气流变化。

1.3 实验分组

在风洞中进行两组实验,分别为上游有孔遮挡与上游无孔遮挡,摆放模型图以及现场实验图如图 4 所示。

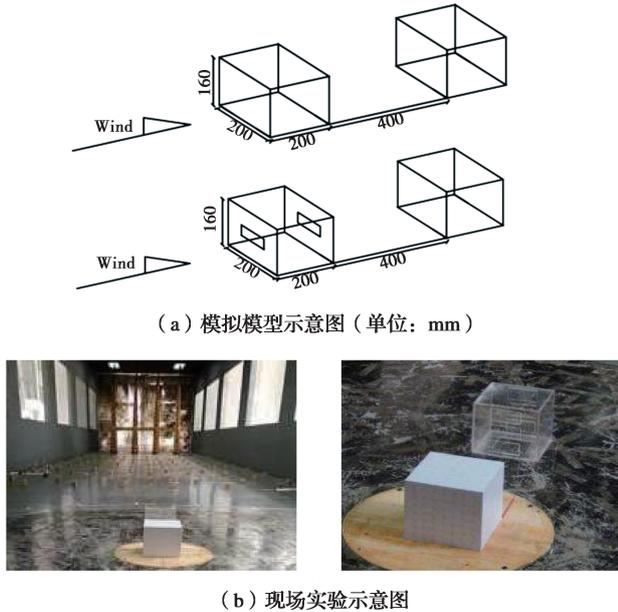


图 4 实验图
Fig.4 The diagram of experiment

2 CFD 模拟设置与参数

2.1 计算域设置

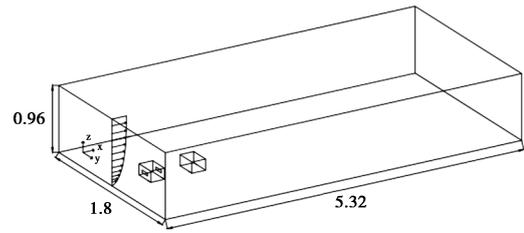
计算模型与风洞实验中的模型相同,与真实建筑比例为 1:100,墙壁与天花板的厚度均为 3 mm。计算域基于 Tominaga 等^[12]和 Blocken^[15]的最佳实践指南构建,即从建筑物到计算域的顶部和两侧的距离为 $5H$,下游建筑物背风面和计算域的出口边界之间的距离为 $15H$ 。该区域的上游长度为建筑物高度的 3 倍 ($3H$),此距离可以限制进近流动剖面中意外的流向梯度的发生^[15-16]。得到的计算域尺寸为 $5.32 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 0.96 \text{ m}$ ($L \times W \times H$),与 Van Hooff 等^[13]研究中的计算域一致,计算域尺寸与建筑模型网格如图 5 所示。

2.2 边界条件设置

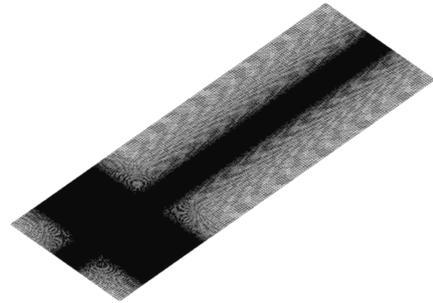
在 Fluent 软件中设置模型边界条件:地面和建筑物表面用自动墙面处理;计算域顶部及侧面的边界条件为 Symmetry;出口处设置为 Vent-outflow;入口处设置为 Velocity-inlet,边界条件编译用由风洞实验所得到的速度曲线与湍流动能曲线编写的 UDF。来流边界条件再现风洞实验期间的条件。基于式(1)描述的幂函数分布构造对数入口速度分布。由此产生的对数方程为

$$U_{(z)} = \frac{u_H^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) \quad (3)$$

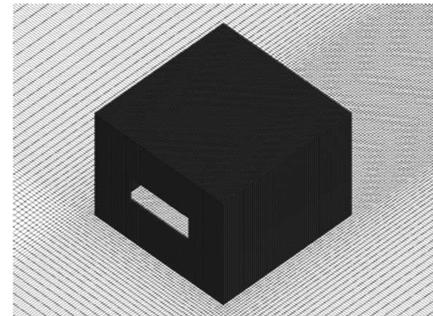
式中: u_H^* 为风洞试验中的摩擦速度, κ 为卡曼常数,取 0.42; z 为高度坐标。由于对数定律优于幂律,因此,采用对数函数计算湍流耗散率 ϵ 曲线所需的 u_H^* 值。空



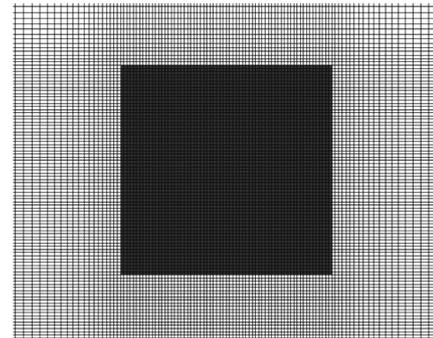
(a) 计算域尺寸 (单位: m)



(b) 计算域网格



(c) 上游建筑模型网格



(d) 下游建筑俯视图

图 5 基础网格的计算域及模型

Fig.5 Computational domain and model for basic grid

气动力学粗糙度长度 z_0 基于拟合公式确定,该拟合公式使用所测量的速度分布,在缩小比例下, $z_0 = 0.0009 \text{ m}$ 。由式(2)计算湍流耗散率 ϵ ,见式(4)^[17]。

$$\epsilon(z) = \frac{(u_H^*)^3}{\kappa(z+z_0)} \quad (4)$$

计算 SST $k-\omega$ 模型的特定耗散率 ω ,见式(5)。

$$\omega(z) = \frac{\epsilon(z)}{C_\mu \kappa(z)} \quad (5)$$

式中: C_μ 是等于 0.09 的经验常数。此部分的参数设置采用 Richard 等^[17]、Gousseau 等^[18-21]以及 Van Hooff 等^[13]研究中 CFD 的参数设置。

采用 ANSYS 中的 Fluent 软件进行计算,计算模型为 5 类 RANS 模型:Standard $k-\epsilon$ 模型(标准 $k-\epsilon$ 模型,下文简称 SKE)、Realizable $k-\epsilon$ 模型(可实现化 $k-\epsilon$ 模型,简称 RLZ)、RNG $k-\epsilon$ 模型(简称 RNG)、SST $k-\omega$ 模型(简称 SST)和 RSM 湍流模型(简称 RSM)。所有控制方程均采用二阶下的有限体积法进行离散化,选用 SIMPLE 方案耦合压力和速度。采用 Intel 至强 32 核心处理器,所有模型的计算时长约为 4 个月。

2.3 数据处理方法

对实验与模拟所得结果通过式(6)得到各点的平均风压系数。

$$C_P = \frac{P - P_0}{1/2\rho U_H^2} \quad (6)$$

式中: C_P 为各点的平均风压系数; P 为总压值; P_0 为静压值; ρ 为空气密度; U_H 为建筑高度处的气流速度。通过式(7)得到各面的面标准化平均风压系数值。

$$S_{C_{Pi}} = \frac{\overline{C_{Pi}}}{C_P} \quad (7)$$

式中: $S_{C_{Pi}}$ 为下游建筑 i 面标准化面平均风压系数值; i 为 A、B、C、D、E 面; $\overline{C_{Pi}}$ 为下游建筑 i 面的面平均风压系数均值; $\overline{C_P}$ 为下游建筑所有测点平均风压系数绝对值均值。定义 $S_{C_{Pi}}$ 为风洞实验的 i 面标准化平均风压系数值。将实验值与模拟值进行对比,通过式(8)得到模拟与实验的误差。

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left(\frac{S_{C_{Pi}}}{\overline{S_{C_{Pei}}} } - 1 \right)^2}{5}} \quad (8)$$

式中: E 为模型模拟结果与实验结果误差。

2.4 与实验结果的对比

上游建筑采用与 Van Hooff 等^[13]完全相同的模型与相似模拟方法,将上游建筑内部模拟气流速度与 Tominaga 等^[11]的实验数据进行对比,得到沿建筑中心平面 $x/D = 0.125, 0.5, 0.875$ 等 7 条曲线的无量纲速度(U_x/U_H),对比结果如图 6 所示。将计算结果与文献[13]中相应的结果对比发现,模拟结果与实验结果误差较小,可靠度较高,该模拟方法满足后续研究要求。

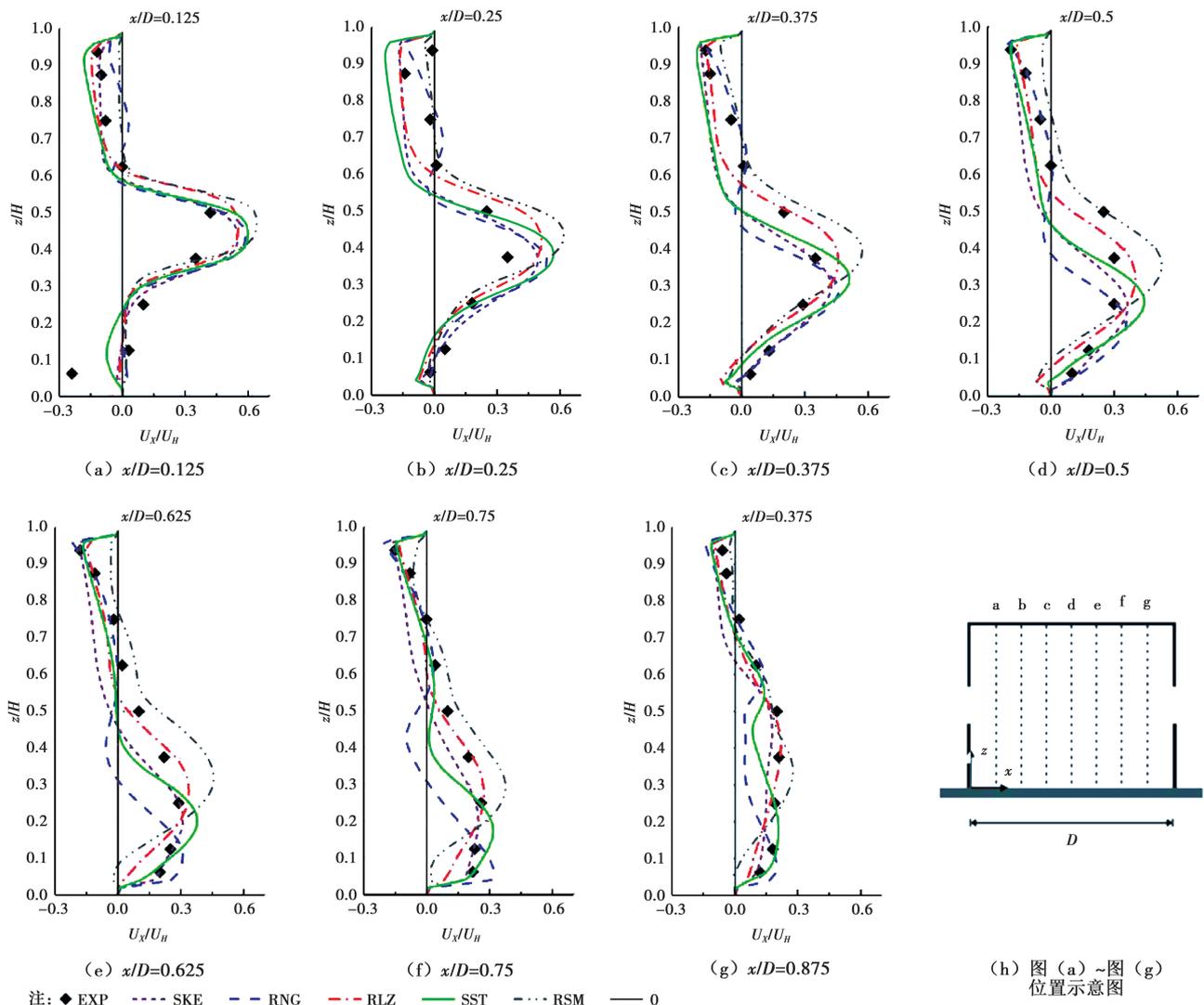


图 6 上游建筑内部气流无量纲速度 (U_x/U_H) 与实验结果对比

Fig.6 Comparison of dimensionless mean x-velocity (U_x/U_H) obtained with different turbulence model with wind tunnel measurement

3 网格敏感性分析

计算网格使用 Van Hooff 等^[13]的表面网格技术创建。计算网格仅由长方体网格单元组成,在建筑物及其开口附近加密。为控制总体的网格数,由建筑物到计算域边界进行放大,每个方向的缩放因子 r 为 1.05。网格分辨率采用 3 种不同的网格密度,这些网格通过精炼和粗化基本网格产生,涉及 3 种网格密度,对比分析 3 种网格大小对同一遮挡情形同一模拟模型的影响,模拟对象为上游有孔遮挡的 SST $k-\omega$ 模型,3 种网格密度分别为精细网格(网格密度最大 0.02,最小 0.002)、基础网格(网格密度最大 0.03,最小 0.003)与粗化网格(网格密度最大 0.04,最小 0.004),对应网格数分别为 2 300 万、850 万与 450 万。

粗化、基础、精细 3 种网格都采用 SST 粘性模型进行对比,图 7 显示了下游建筑表面的中位背脊线和不同高度腰周线。将不同网格密度模拟结果与风洞实验的结果进行对比,得到有孔遮挡建筑后下游建筑表面的中位背脊线和中位腰周线平均风压系数曲线,如图 8 所示。3 种网格密度模拟平均风压系数相近,变化趋势相同。

修改 Roache^[22]提出的网格收敛指数(The grid-convergence index,简称 GCI)用于估算基础网格在

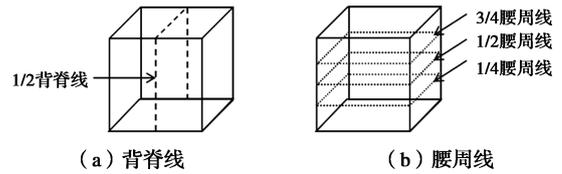


图 7 下游建筑背脊线与腰周线示意图

Fig.7 Schematic diagram of the backline and waistline of the downstream building

平均风压系数上的误差。

$$GCI_{basic} = F_s \left| \frac{\gamma^p [(C_{P_{basic}} - C_{P_{fine}})/C_{P_{fine}}]}{1 - \gamma^p} \right| \quad (9)$$

式中: r 为每个方向的缩放因子($r=1.05$),由于采用二阶离散化求解方案模拟, $p=2$; F_s 是安全系数(safety factor),在分析 3 种或者更多种网格密度时的推荐值为 1.25^[22]。沿下游建筑背脊线和腰周线的计算 GCI 如图 9 所示,精细网格与基础网格的误差较小,其计算 GCI 平均值分别为 4.0% 和 5.0%。可得知采用基础网格计算时,模拟结果已经可以满足网格独立要求。在综合考虑时间成本,计算结果收敛性以及满足网格独立等要求后,模拟的最佳网格为基础网格(网格密度最大 0.03,最小 0.003),均采用基础网格密度进行计算。

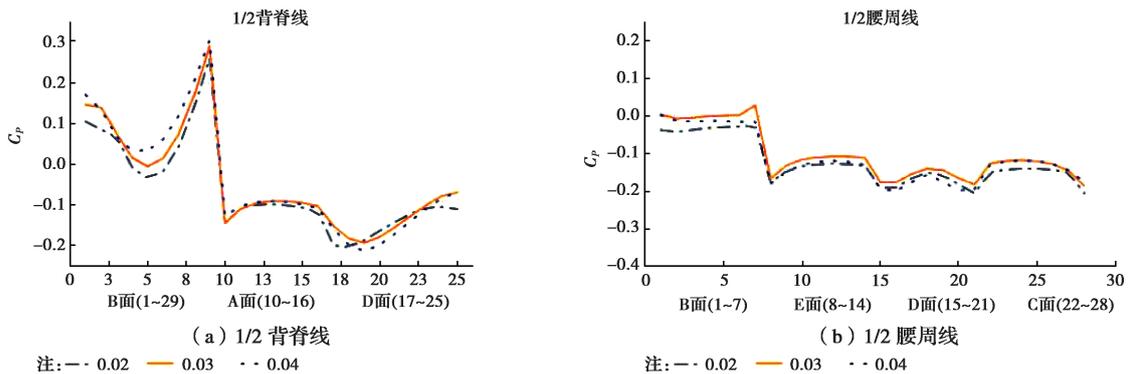


图 8 下游建筑 1/2 背脊线与 1/2 中腰线平均风压系数

Fig.8 Mean wind pressure coefficient of the middle backline and middle waistline of downstream building

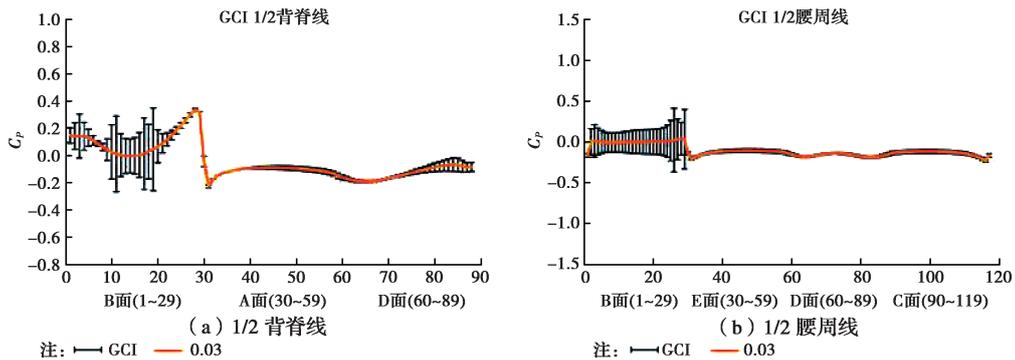


图 9 基础网格收敛指数(GCI)

Fig.9 The grid-convergence index of basic grid

4 CFD 模拟结果与风洞实验对比

4.1 上游遮挡建筑有孔情形

研究有孔遮挡时 5 类 RANS 模型的可靠性,定义下游建筑顶部为 A,迎风面为 B,来流风向左侧为 C,来流风向右侧为 E,下游建筑背风面为 D,展开图如图 10 所示。将模拟结果与风洞实验结果进行比较,得到有孔遮挡时下游建筑表面平均风压系数的中位背脊线及距地 1/4、1/2 与 3/4 建筑高度的腰周线,如图 11 所示。其中,Exp1、Exp2 为两次有孔遮挡风洞实验下游建筑表面风压系数。为减少风速对结果的影响,将 5 类模型的面平均压力系数进行标准化处理,即每个面的风压系数与 5 个面的平均风

压系数的比值(等于下游建筑所有测点平均风压系数),再与实验值比较,得到的数值误差见表 1。表 1 中 Exp1 与 Exp2 分别为上游有孔遮挡风洞实验的第 1 次与第 2 次实验平均风压系数标准化数值结果。

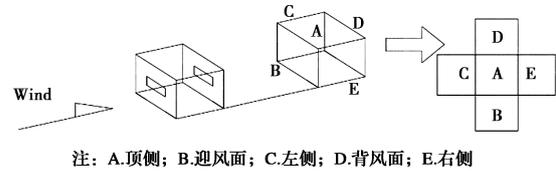


图 10 下游建筑展开各面示意图
Fig.10 The exploded view of each surface of the downstream building

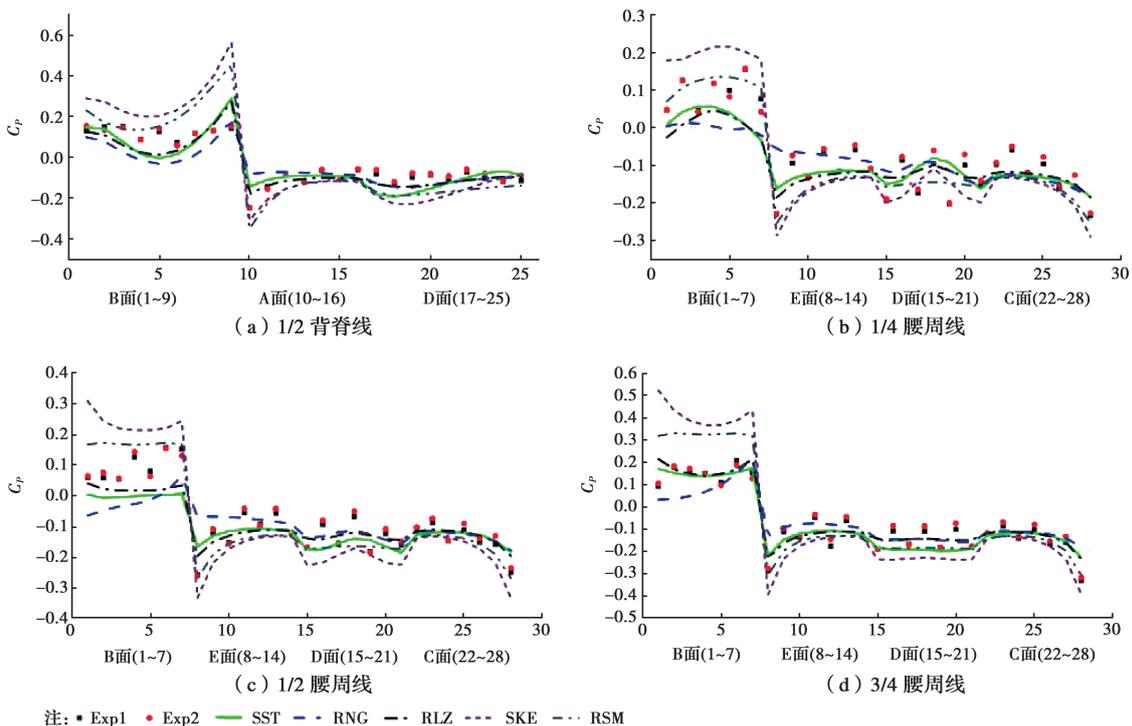


图 11 有孔遮挡情形下游建筑背脊线与腰周线平均风压系数对比图

Fig.11 Comparison of mean wind pressure coefficient between the backline and the waistline of the downstream building shielded by a building with two openings

表 1 有孔遮挡情形下不同模型标准化数值分析

Table 1 Standardized numerical analysis of different models in the case of hole occlusion

实验与模型	A	B	C	D	E	与 Exp1 误差/%	与 Exp2 误差/%
Exp1	-0.77	0.97	-1.13	-1.16	-0.97		
Exp2	-0.83	0.99	-1.09	-1.12	-0.97		
SST	-0.88	0.78	-1.11	-1.20	-1.03	11	10
RSM	-0.92	1.12	-1.00	-0.95	-1.00	15	11
RLZ	-0.99	0.82	-1.09	-1.01	-1.09	17	13
RNG	-0.87	0.59	-1.36	-1.33	-0.85	22	23
SKE	-0.81	1.53	-0.89	-0.89	-0.89	30	28

对比有孔遮挡的不同模型结果与实验结果可以发现:

1)图 11(a)背脊线结果表明,SKE 模型在迎风面(1~9 号测点)明显高估于实验值,RSM 模型在迎风面的高估程度仅次于 SKE 模型,5 类模型在顶面(10~16 号测点)与背风面(17~25 号测点)结果较于迎风面均拟合较好。

2)由图 11(b)、(c)、(d)腰周线可知,SKE 模型与 RSM 模型在迎风面(B 面 1~7 号测点)也存在明显的高估,且 SKE 模型在下游建筑两侧面(C 面 22~28 号测点和 E 面 8~14 号测点)模拟值低估于实验值。

3)图 11(b)、(c)、(d)还表明,对于不同位置高度的腰周线,5 种 RANS 模型都显示出建筑上部的模拟结果明显好于建筑下部,这可能是下垫面的粗

糙程度对模拟结果存在干扰。

4)图 11 各图都显示,SST 与 RLZ 模型在背脊线与腰周线各面的拟合程度都高于 SKE、RNG、RSM 模型。

5)由表 1 可知,SST 模型在数值上表现出高的可靠度(与 Exp1 和 Exp2 误差分别为 11%、10%),其次为 RSM 模型(与 Exp1 和 Exp2 误差分别为 15%、11%)。

6)由图 11 和表 1 可知,SKE 模型的模拟可靠性最低,其标准化结果偏差最高为 30%。

由此可见,SST 模型模拟可靠度最高。

4.2 上游遮挡建筑无孔情形

图 12(a)为上游建筑为无孔遮挡时,下游建筑中位背脊线平均风压系数对比图。图 12(b)、(c)、(d)分别为下游建筑距地面 1/4 高度、1/2 高度与 3/4 高度的腰周线风压系数,其中,Exp3、Exp4 为 2 次

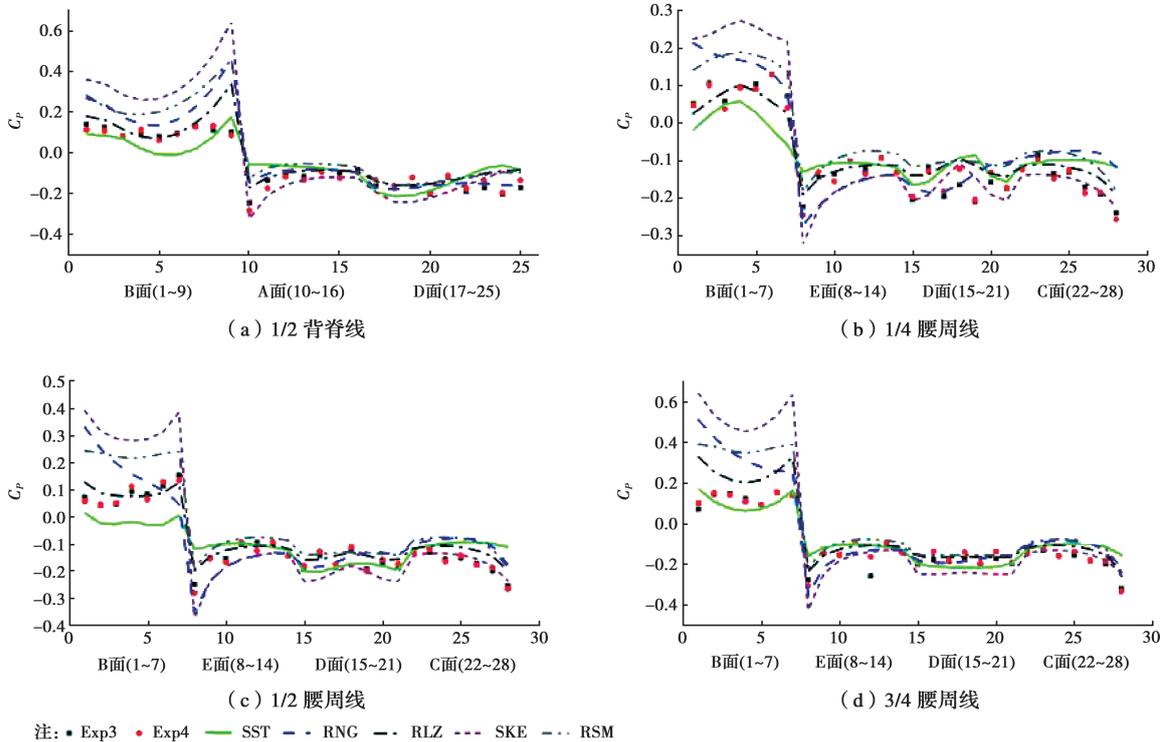


图 12 无孔遮挡情形下游建筑背脊线与腰周线平均风压系数对比图

Fig.12 Comparison of mean wind pressure coefficient between the backline and the waistline of the downstream building shielded by a cube

表 2 无孔遮挡情形下不同模型标准化数值分析

Table 2 Standardized numerical analysis of different models in the case of on hole occlusion

实验与模型	A	B	C	D	E	与 Exp3 误差/%	与 Exp4 误差/%
Exp3	-0.74	0.83	-1.17	-1.26	-1.01		
Exp4	-0.88	0.79	-1.18	-1.14	-1.02		
SST	-0.77	0.62	-1.02	-1.51	-1.08	16	19
RSM	-0.68	1.76	-0.82	-0.92	-0.82	54	59
RLZ	-0.83	1.23	-0.97	-0.99	-0.98	25	27
RNG	-0.69	1.51	-0.69	-0.96	-1.14	43	47
SKE	-0.76	1.69	-0.85	-0.84	-0.86	51	54

风洞实验下游建筑平均风压系数。将 5 类模型面平均压力系数进行标准化处理,得到的数值误差如表 2 所示。其中 Exp3 与 Exp4 为无孔遮挡风洞实验的两次实验平均风压系数标准化数值。

对比无孔遮挡的不同模型背脊线和腰周线计算结果与实验结果可以发现:

1)图 12(a)下游建筑表面平均风压系数中位背脊线显示,SKE 与 RSM 模型在迎风面(B 面 1~9 号测点)明显高估于实验值,在顶面(A 面 10~16 号测点)与背风面(D 面 17~25 号测点)5 类模型模拟结果均拟合较好。

2)由图(b)、(c)、(d)中的腰周线可知,在迎风面(B 面 1~7 号测点)上,SKE、RSM、RNG 模型存在明显高估。总体上 SST 模型(与 Exp3 和 Exp4 误差分别为 16%、19%)与 RLZ 模型(误差分别为 25%、27%)拟合最好

3)由表 2 数据可知,无孔遮挡的 RSM 模型模拟结果的可靠性最差,与 Exp3 和 Exp4 误差分别达 54%、59%,其次为 SKE 模型,与 Exp3 和 Exp4 误差分别为 51%、54%。

由此可见,SST 模型对于无孔遮挡的模拟可靠

性最高。

4.3 有孔遮挡与无孔遮挡比较

表 1 与表 2 显示同一种 RANS 模型对于不同遮挡情形的模拟结果偏差不一样。分别比较有孔遮挡与无孔遮挡的 5 种 RANS 模型可以发现,RSM 模型针对有孔遮挡情形的模拟可靠性结果较好,但对于无孔遮挡情形的模拟结果可靠度最低。表 1 与表 2 也表明,无论是有孔遮挡还是无孔遮挡,其模拟结果可靠性最高的都为 SST 模型。

基于 SST 模型分别得到两种遮挡情形的中垂面速度矢量图,如图 13 所示。由图 13(a)可知,当上游为封闭建筑,即为无孔遮挡时,气流绕过上游遮挡建筑,在两个建筑间形成一个大的涡旋;由图 13(b)可知,当上游为有孔遮挡时,上游建筑的穿堂风会影响建筑间的涡旋,因此,减少上游建筑遮挡的作用,进而流场更接近无遮挡情形,模拟结果更为精确。

将模拟结果进行处理,得到标准化误差表,见表 3。由于两次风洞实验值接近,对比结果都取第 1 次实验结果。由表 3 平均风压系数标准化后结果可知:有孔遮挡模拟结果相较于无孔遮挡误差约小 40%(误差 11%与 16%的对比)。

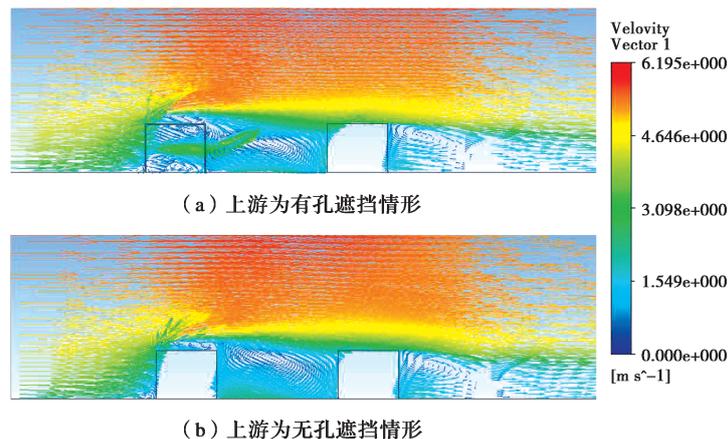


图 13 有孔遮挡与无孔遮挡情形下中垂面速度矢量图

Fig.13 The velocity vector diagram of vertical plane with hole occlusion and no hole occlusion

表 3 有孔遮挡与无孔遮挡 SST 模型标准化数值分析

Table 3 Standardized numerical analysis of SST model with hole occlusion and no hole occlusion

实验情形	A	B	C	D	E	与 Exp1 误差/%	与 Exp3 误差/%
Exp1	-0.77	0.97	-1.13	-1.16	-0.97		
有孔遮挡	-0.88	0.78	-1.11	-1.20	-1.03	11	
Exp3	-0.74	0.83	-1.17	-1.26	-1.01		
无孔遮挡	-0.77	0.62	-1.02	-1.51	-1.08		16

由此可见,SST 模型对于有孔遮挡情形好于无孔遮挡情形。

4.4 可视化实验

可视化实验中发烟口位于上游建筑地面中心,

发烟试剂采用了 15% 的丙烯乙二醇溶液,实拍照片如图 14 所示。可视化实验效果(图 14)与 SST 模型模拟结果(图 13(b))有比较好的相似性。

图 14 与图 13(b)都显示,上游建筑的穿堂风在出口处形成冲击气流,破坏了两建筑间的涡旋,在一定程度上减少了建筑遮挡的作用,使得下游建筑更接近于无遮挡的环境。这有可能是有孔遮挡的 CFD 模拟好于无孔遮挡的原因。



图 14 上游有孔遮挡可视化图

Fig.14 The visualization diagram of the downstream building shielded by a building with two openings

5 结论

通过与风洞实验数据的严格对比,分析上游建筑有孔、无孔两种遮挡情形下,下游建筑表面压力 CFD 模拟可靠性与准确性。通过比较分析 3 种网格密度及 5 种 RANS 模型,得到以下结论:

1) 网格敏感性分析显示,当建筑表面的最小网格为建筑高度的约 2% 时,计算结果满足网格独立性要求。

2) 对上游建筑为有孔遮挡或无孔遮挡时,5 种常见 RANS 模型中,SST $k-\omega$ 模型的模拟可靠性最高。采用 SST $k-\omega$ 模型对有孔遮挡与无孔遮挡的模拟对比显示,对前者的模拟误差比后者误差还要低,即上游建筑有孔时,下游建筑表面的风压的数据预测准确性反而更高。这有可能是由于穿过的气流更接近无遮挡的情形造成的。

3) 发烟可视化实验显示,有孔遮挡 SST $k-\omega$ 模型模拟的中垂面气流组织与风洞可视化实验有比较好的相似性。穿堂风气流破坏了建筑间的回流涡旋,削弱了建筑遮挡的效果,使得气流运动更接近无遮挡的情况,这也许是有孔遮挡较无孔遮挡模拟可靠性更高的原因。

采用的 CFD 设置方法可作为类似风环境模拟的参考方法。只讨论一个风向与一个间距,讨论了稳态 RANS 模型,而未讨论非稳态 RANS 模型和 LES 大涡模拟,这些需要在以后的研究中逐步完成。

参考文献:

- [1] YIN W, ZHANG G Q, YANG W, et al. Natural ventilation potential model considering solution multiplicity, window opening percentage, air velocity and humidity in China[J]. Building and Environment, 2010, 45(2): 338-344.
- [2] TABLADA A, DE TROYER F, BLOCKEN B, et al. On natural ventilation and thermal comfort in compact urban environments- the Old Havana case[J]. Building and Environment, 2009, 44(9): 1943-1958.
- [3] KARAVA P, STATHOPOULOS T, ATHIENITIS A K. Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements [J]. Building and Environment, 2011, 46(1): 266-279.
- [4] JI L, TAN H W, KATO S, et al. Wind tunnel investigation on influence of fluctuating wind direction on cross natural ventilation [J]. Building and Environment, 2011, 46(12): 2490-2499.
- [5] BLOCKEN B. 50 years of computational wind engineering: Past, present and future[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 129: 69-102.
- [6] STRAW M P, BAKER C J, ROBERTSON A P. Experimental measurements and computations of the wind-induced ventilation of a cubic structure [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 88(2/3): 213-230.
- [7] 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 and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(3): 331-353.
- [8] HUANG P, GU M. Study on wind-induced mean interference effects between two tall buildings [J]. Journal of Building Structures, 2002, 8(3): 67-72.
- [9] KARAVA P, STATHOPOULOS T, ATHIENITIS A K. Wind-induced natural ventilation analysis[J]. Solar Energy, 2007, 81(1): 20-30.
- [10] KIM W, TAMURA Y, YOSHIDA A, et al. Generalization of wind-induced loading between two tall buildings [C]//The 2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM16), Jeju Island, Korea, August 28-September 1, 2016.
- [11] TOMINAGA Y, BLOCKEN B. Wind tunnel experiments on cross-ventilation flow of a generic building with contaminant dispersion in unsheltered and sheltered conditions [J]. Building and Environment, 2015, 92: 452-461.

- [12] TOMINAGA Y, BLOCKEN B. Wind tunnel analysis of flow and dispersion in cross-ventilated isolated buildings: Impact of opening positions[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 155: 74-88.
- [13] VAN HOOFF T, BLOCKEN B, TOMINAGA Y. On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments [J]. *Building and Environment*, 2017, 114: 148-165.
- [14] SMAL R. CFD analysis of natural ventilation in a generic environment impact of street width on indoor airflow pattern and airflow rate[D]. Eindhoven, Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2017.
- [15] BLOCKEN B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations[J]. *Building and Environment*, 2015, 91: 219-245.
- [16] BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, CARMELIET J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(2): 238-252.
- [17] RICHARDS P J, HOXEY R P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\epsilon$ turbulence model[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 46/47: 145-153.
- [18] GOUSSEAU P, BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, et al. Near-field pollutant dispersion in an actual urban area: Analysis of the mass transport mechanism by high-resolution Large Eddy Simulations [J]. *Computers & Fluids*, 2015, 114: 151-162.
- [19] GOUSSEAU P, BLOCKEN B, VAN HEIJST G J F. Quality assessment of Large-Eddy Simulation of wind flow around a high-rise building: Validation and solution verification[J]. *Computers & Fluids*, 2013, 79: 120-133.
- [20] GOUSSEAU P, BLOCKEN B, VAN HEIJST G J F. CFD simulation of pollutant dispersion around isolated buildings: On the role of convective and turbulent mass fluxes in the prediction accuracy [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 194: 422-434.
- [21] GOUSSEAU P, BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, et al. CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: A case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(2): 428-438.
- [22] ROACHE P J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1997, 29(1): 123-160.

(编辑 邓云)