

# 双坡屋面低矮建筑群风干扰效应数值模拟

刘也,戴益民,邹思敏,刘求山,雷静敏,蒋荣正

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**基于 Fluent 6.3 软件平台,采用 RNG  $k - \varepsilon$  湍流模型,对日本东京工业大学风洞试验模型及数据进行了验证,结果表明数值模拟与风洞实验数据拟合较好.同时,对2栋相同低矮双坡屋面建筑在不同受扰建筑布置角度时对建筑群的影响进行了数值模拟分析,结果表明,施扰建筑的表面风压分布及大小受影响较小,与单体建筑表面风压接近;而受扰建筑的影响相对较为明显,尤其是施扰建筑与受扰建筑纵轴夹角不大的情况下,受扰建筑屋脊背面角部负风压较大.研究结果对低矮建筑群的风效应研究具有参考价值.

**关键词:**低矮建筑;干扰效应;数值模拟;双坡屋面

**中图分类号:**TU312+.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2014)04-0074-05

## Numerical simulation analysis of wind interference effects on low - rise gable - roofed buildings

LIU Ye, DAI Yimin, ZOU Simin, LIU Qiushan, LEI Jingmin, JIANG Rongzheng  
(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** A RNG  $k - \varepsilon$  model, the reynolds averaged navier - stokes equations (RANS) turbulence model, was added in software Fluent 6.3 to simulate the wind tunnel model of Tokyo Polytechnic University, it turned out that simulating results fit well with the wind tunnel test data. Then a detailed simulation analysis was performed for average pressure coefficient of two same low - rise gable - roofed buildings which at different angles of the downstream building. The results show that the average pressure coefficient of upstream building is hardly affected by the angle changing of the downstream building, and its surface pressure is close to individual building. But the downstream building is affected relatively clear especially the corner area of ridge at small angles. The results of the study have reference value for wind effect research of low - rise buildings.

**Key words:** low - rise building; interference effect; numerical simulation; gable roof

西北太平洋是全球生成热带气旋最多的海区,全球约有30%的热带气旋生成于西北太平洋,并且其中的约80%会发展成为台风<sup>[1]</sup>.由于我国农村、城镇的建筑面积问题,构造以及规划不合理等,使得农村、城镇低矮建筑成为在台风期间主要的受损破坏建筑.通过近几十年国内外专家学者的研究,对单体低矮房屋的破坏机理及表面风压等已有很深的认识.如国内的周绪红,聂少锋<sup>[2]</sup>较系统的

研究了来流风向角、屋面坡度、挑檐长度、檐口高度和房屋长宽比对低层双坡屋面风压系数和各表面体型系数的影响.李秋胜、戴益民等<sup>[3-4]</sup>对台风登陆期间的低矮房屋风压特性等做了大量的风洞实验和现场实测,总结了坡角及风向对低矮房屋屋面局部风压的影响规律等,取得了大量的现场实测数据.由于低矮建筑大多成群建设,建筑之间存在气动干扰效应,研究单体房屋破坏机理等一些结论较

实际有所差别,所以80年代后期国内外专家学者开始对群体建筑的风场和风环境进行了大量研究. Tsutsumiet<sup>[5]</sup>, Ho等<sup>[6]</sup>讨论了低矮建筑间的干扰效应,得出在低矮建筑之间干扰效应应得到重视. Santiago<sup>[7]</sup>通过对2栋平屋面低矮建筑进行风洞试验研究得到,目标建筑的屋面荷载会因上游出现比目标建筑高的建筑而增大,并且随着上游建筑高度的增加而增大. Chang和Meroney<sup>[8]</sup>研究了建筑群在不同布置间距和不同对称布置形式下所受干扰效应,其得出当布置间距狭小时屏蔽效应明显,当其在城市街区比在开阔地域影响更大. Yong等<sup>[9]</sup>通过大量风洞试验,考虑受扰建筑周围施扰物密集程度及上游距离等因素对受扰建筑风荷载的影响. 赵青春等<sup>[10]</sup>对低矮双坡屋面建筑的干扰效应进行了数值分析,得出相邻低矮建筑间距小于2倍建筑宽度时应充分考虑干扰效应. 陈波等<sup>[11]</sup>对2个平屋面建筑进行了风荷载干扰效应的风洞试验研究,得出了施、受扰物串列布置、并列布置以及斜风向布置时的干扰效应,干扰效应对屋面角部区域的极值风压影响较大. 全涌等<sup>[12]</sup>对被同类型周边建筑包围的低矮建筑的表面风压系数等进行的研究,分析了周边建筑密度对被包围低矮建筑平屋面上最大局部负压及最大屋面升力的干扰效应. Zhang等<sup>[13]</sup>对并列形式建筑进行了数值模拟,得出了建筑间距以及两建筑物的高度对建筑周围风环境的影响,当上游建筑与下游建筑等高或者上游建筑高于下游建筑时,对周围的影响较大.

本文基于CFD软件平台Fluent 6.3,采用RNG  $k - \varepsilon$  湍流模型对日本东京工艺大学风洞试验模型及数据进行数值风洞模拟,对表面风压系数进行比较分析;对两个相同的低矮双坡屋面建筑在只改变受扰建筑布置角度下进行数值模拟,分析其对施扰建筑及受扰建筑表面风压的影响,结果可为我国沿海低矮建筑群风效应影响研究提供一些有价值的参考.

## 1 风洞试验建筑模型的数值模拟

### 1.1 模型及计算域

采用日本东京工艺大学大气边界层风洞实验室的试验模型和得出的数据进行对比分析,此模型是模拟C类地貌情况下的模型,本文在进行数值模拟时通过对UDF函数(User Defined Functions)中载入地面粗糙度的修改来达到模拟目标建筑周围的情况以及边界条件的近似情况. 模型的外形尺寸为长( $L$ ) $\times$ 宽( $W$ ) $\times$ 高( $H$ ) $=24\text{ m}\times16\text{ m}\times12\text{ m}$ ,屋面坡角为 $21.8^\circ$ . 计算域取为 $228\text{ m}\times128\text{ m}\times82\text{ m}$ ,满足阻塞率小于3%的要求,建筑物位于流域上流向1/3处. 采用混合网格划分方式,计算流域划分为内外2个部分:模型附近区域采用四面体

单元划分,网格较密;远离模型的外部空间采用六面体单元划分,网格向远离模型方向渐疏. 整个流域网格数量在130万左右. 模拟 $0^\circ$ 风向角下建筑各表面的平均风压系数.

### 1.2 边界条件及湍流模型

进流面用速度进口边界条件(velocity - inlet),采用指数率模拟边界层风速剖面: $U = U_0 \times (z/z_0)^\alpha$ . 式中 $z$ 为离地面高度,  $m$ ;  $z_0$ 为参考高度,  $m$ ;  $U_0$ 为参考高度处平均风速,  $m/s$ ,取10 m参考高度,风速为22  $m/s$ ;  $\alpha$ 为地面粗糙度指数,取为0.2. 梯度风高度取为450  $m$ . 湍流动能 $k$ 和湍流耗散率 $\varepsilon$ 的定义为 $k = 1.5 \times (U \times I)^2$ ,  $\varepsilon = 0.09^{3/4} k^{3/2}/L$ .  $I$ 为无量纲湍流强度,  $L$ 为湍流积分尺度,  $m$ . 进口风速剖面、湍流动能 $k$ 和湍流耗散率 $\varepsilon$ 均采用UDF编程与Fluent做接口实现. 出流面采用完全发展的出流边界条件(outflow). 流域两侧及顶面采用对称边界条件(symmetry),等价于自由滑移壁面. 地面及建筑物表面采用无滑移壁面条件(wall).

采用RNG  $k - \varepsilon$  湍流模型,对流项用二阶迎风格式,速度压力耦合用SIMPLE算法,壁面采用标准壁面函数(Standard Wall Functions),流体控制方程收敛标准为不大于 $10^{-4}$ .

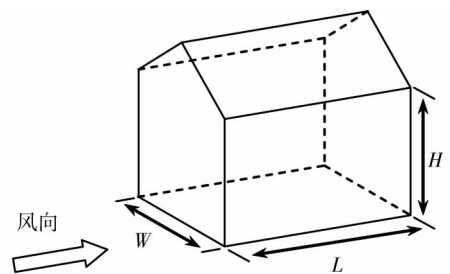


图1 模型几何尺寸及风向角

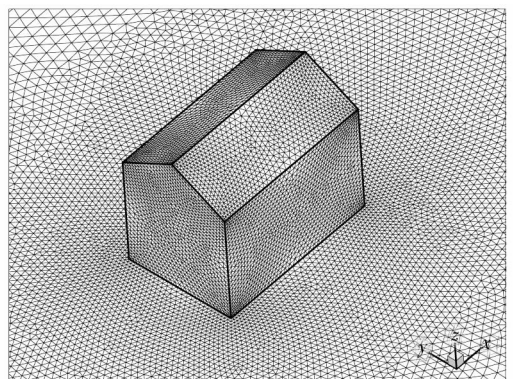


图2 模型 $0^\circ$ 风向角网格划分

### 1.3 数值模拟验证

无量纲的压力系数 $C_p$ 的定义<sup>[14]</sup>为

$$C_p = 2p/\rho U_0^2. \quad (1)$$

式中, $p$ 为建筑表面绝对压力,  $Pa$ ;  $\rho$ 为空气密度, 取 $1.225\text{ kg/m}^3$ .

图3为东京工业大学风洞试验 $0^\circ$ 风向角下建筑各表面的平均风压系数,图4为与之对应的数值模拟对比。

从2个图对比可以得出,数值模拟可以较好的反应风压系数的变化趋势,尤其是建筑两侧面拟合较为精确,迎风屋面、屋顶以及背风面的风压系数较风洞试验数据较为偏大.其误差一方面是风洞试验由于缩尺效应使有效粘性增大,使得风洞试验结果比真实值偏小.另一方面与数值模拟选择的湍流模型有关.综合以前一些学者对TTU模型的数值模拟及对比可以得到,数值模拟结果一般均稍大于风洞试验结果,如黄强<sup>[15]</sup>在论文中模拟TTU标准模型得出RNG  $k - \varepsilon$ 模型比风洞试验结果偏大约20%.因此,此数值模拟对东京工业大学风洞试验数据验证具有较好的结果。

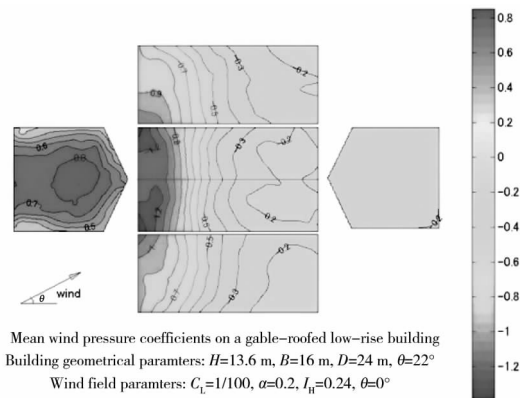


图3 风洞试验平均风压系数

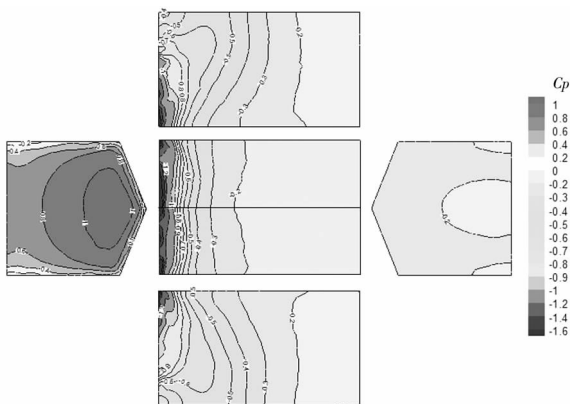


图4 数值模拟平均风压系数

## 2 低矮双坡屋面干扰效应数值模拟分析

现实中低矮建筑一般成群建设,且形式大体相同,但由于各种因素,2座建筑物纵轴线未必是平行的,会相差一定角度,更有一些建筑物纵向轴线是相互垂直的.因此为了使模拟更贴近现实,更好的研究低矮建筑间的干扰效应,模拟采用2个相同外形尺寸的低矮建筑模型,仅改变受扰建筑的布置

角度,分析不同角度对2个建筑的影响。

### 2.1 模型及计算域

采用的模型外形尺寸为长( $L$ ) $\times$ 宽( $W$ ) $\times$ 高( $H$ )=12 m $\times$ 8 m $\times$ 8 m,双坡屋面角度为 $30^\circ$ ,2个建筑间距 $S$ ,取为18 m.受扰建筑纵轴线变换角度 $\theta$ 取为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 $90^\circ$ .模型尺寸及布置情况如图5所示.计算域取为160 m $\times$ 80 m $\times$ 48 m,满足阻塞率小于3%的要求,建筑物位于流域上流向1/3处.依然采用混合网格划分方式,计算流域靠近模型区域采用较密的四面体单元划分;远离模型的外部空间采用六面体单元划分,模型附近加密处理.整个流域网格数量在80万左右,图6为 $\theta$ 取 $20^\circ$ 时的网格划分情况。

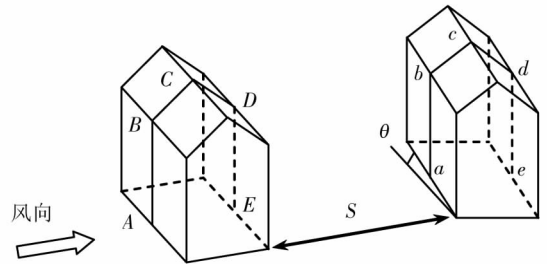


图5 模型几何尺寸及风向角

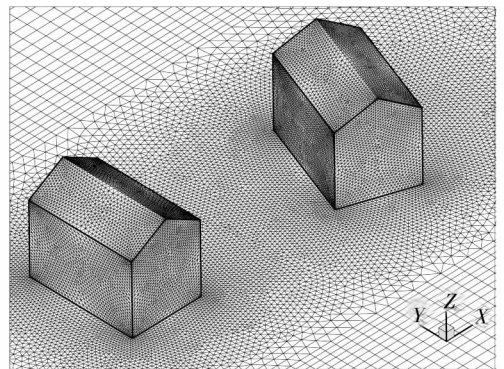


图6  $\theta$ 为 $20^\circ$ 时网格划分

### 2.2 边界条件及湍流模型

选用B类地面粗糙度,对应的地面粗糙度系数 $\alpha$ 为0.16,梯度风高度为350 m.进流面用速度进口边界条件(velocity-inlet),采用指数率模拟边界层风速剖面: $U = U_0 \times (z/z_0)^\alpha$ .取10 m参考高度处风速为12 m/s.湍流动能 $k$ 和湍流耗散率 $\varepsilon$ , $k = 1.5 \times (U \times l)^2$ , $\varepsilon = 0.09^{3/4} k^{3/2} / L$ 均采用UDF编程与Fluent做接口实现.出流面采用完全发展的出流边界条件(outflow).流域两侧及顶面采用对称边界条件(symmetry),等价于自由滑移壁面.地面及建筑物表面采用无滑移壁面条件(wall).

采用RNG  $k - \varepsilon$ 湍流模型,对流项用二阶迎风格式,速度压力耦合用SIMPLE算法,壁面采用标准壁面函数(Standard Wall Functions),流体控制

方程收敛标准为不大于  $10^{-4}$ .

### 2.3 计算结果及分析

通过数值模拟分析发现,受扰建筑的转动对上风向施扰建筑的表面风压系数影响很小,如图7所示,此时施扰建筑风压系数与单体情况下的模拟结果很接近,各情况下中轴线风压系数基本一致,只有当 $\theta$ 等于 $60^\circ$ 和 $90^\circ$ 时,背风墙面的风压系数偏小.而对于受扰建筑,则表现出有比较大的屏蔽效应,尤其是当 $\theta$ 等于 $90^\circ$ 时,受扰建筑各个面的风压系数接近为零.从图8受扰建筑中轴线风压系数变化情况可以得出, $\theta$ 为 $45^\circ$ 和 $60^\circ$ 时靠近施扰建筑的壁面风压系数略有偏大,其他情况下各壁面风压系数变化基本一致;当 $\theta$ 为 $45^\circ$ 时,除了迎风屋面风压系数较其他情况偏小,其他壁面、屋面的风压系数均为最大(绝对值).

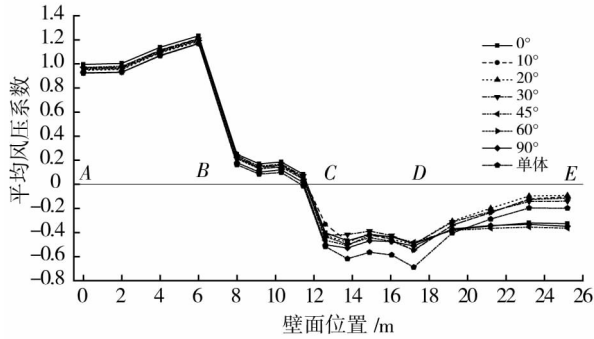


图7 施扰建筑中轴线平均风压系数

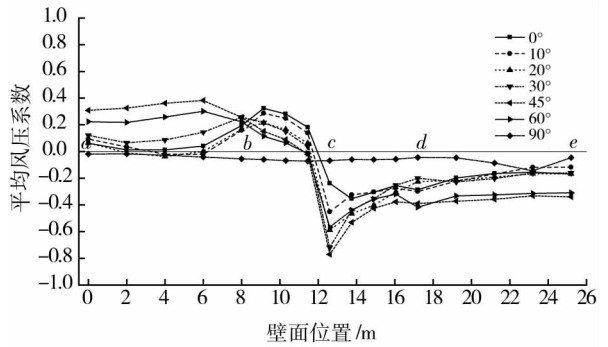


图8 受扰建筑中轴线风压系数

图9为受扰建筑屋面风压系数随 $\theta$ 的变化图.从中可以看出,迎风屋面的风压系数很小,最大负压都出现在背风屋面屋脊处.当 $\theta$ 为 $0^\circ$ 时,背风屋面屋脊处负风压较为均匀,随着 $\theta$ 的增大,最大负压逐渐向靠近受扰建筑的屋脊角部移动,当 $\theta$ 在 $10^\circ \sim 30^\circ$ 之间时,来流风在靠近受扰建筑的屋脊角部分离形成锥形涡,导致在此处出现的局部高压区,风压系数最大,对抗风较为不利.因此,在实际低矮建筑纵轴线变化不大的情况下,对屋脊角部需要做更为安全的抗风处理.当 $\theta$ 从 $45^\circ$ 再逐渐变大时,整体的受扰建筑各表面风压系数均减小,当 $\theta$ 为 $90^\circ$ 时,屋面风压系数几乎为零,表现出较强的屏蔽效应.

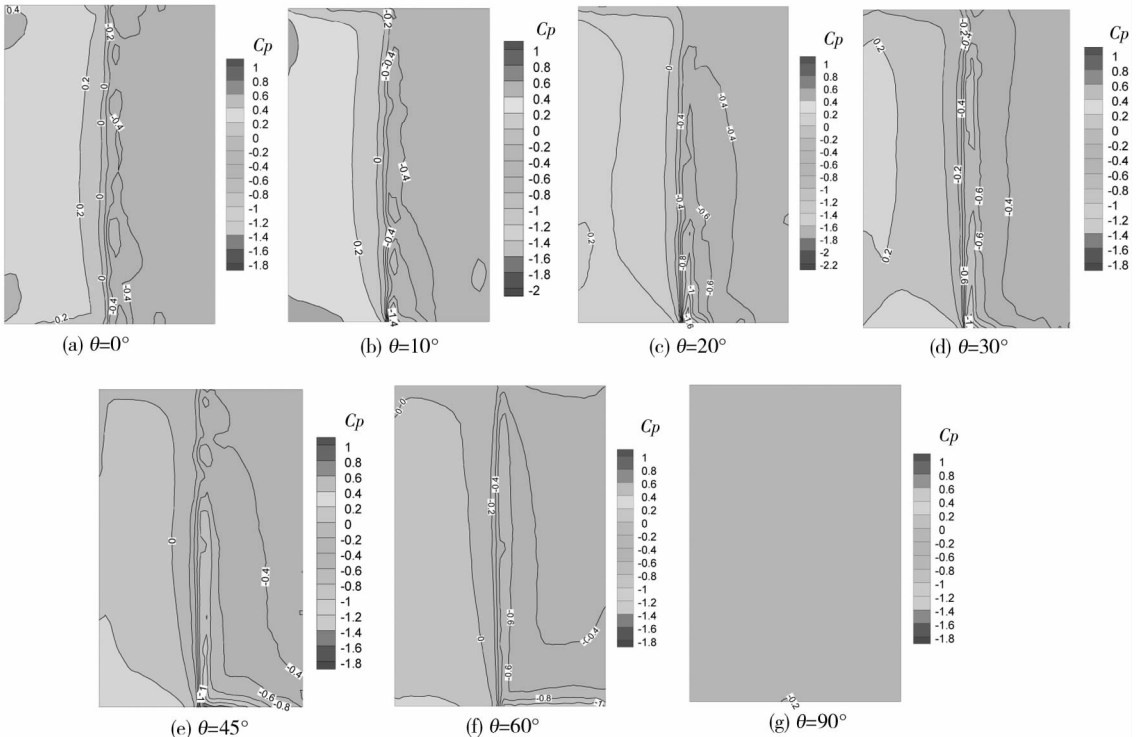


图9  $\theta$ 为不同角度时受扰建筑屋面平均风压系数

### 3 结论

1)数值风洞模拟可以较好的模拟低矮建筑表面风压分布情况,与风洞试验得出的表面风压系数数据大致趋势一致,较风洞数据偏大。

2)对于形状尺寸相同的低矮建筑,来流上游方向的施扰建筑受下游受扰建筑的位置角度变化不大,其表面风压分布及大小与单体情况基本相同;但下游受扰建筑对其自身的位置角度变化相对较大,尤其是在角度变化在 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间,屋脊角部区域负压较大,应加强抗风处理。

3)由于实际中群体低矮建筑房屋布置情况不固定,房屋间距、屋面坡角、位置转角等因素对房屋表面风压的影响对研究低矮建筑群的抗风有一定的现实意义.对于这些因素变化对低矮建筑群风效应的综合影响将是后续研究的重点。

#### 参考文献:

[1] 黄本才,汪丛军. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2008.

[2] 周绪红,聂少峰,周天华,等. 低层双坡屋面建筑三维定常风场的数值模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 19-29.

[3] 李秋胜,胡尚瑜,李正农. 低矮房屋风荷载实测研究(II)—双坡屋面风压特征分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 1-8.

[4] 戴益民,李秋胜. 低矮房屋迎风屋面局部风压特性研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(6): 103-109.

[5] Tsutsumi J, Katayama T, Nishida M. Wind tunnel tests of wind pressure on regular aligned buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992(41/42/43/44): 1799-1810.

[6] Ho T C E, Surry D, Davenport A G. The variability of low - building wind loads due to surrounding obstructions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990(38): 161-170.

[7] Santiago P, José M, Sebastián F. Influence of an upstream building on the wind - induced mean suction on the flat roof of a low - rise building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011(99): 889-893.

[8] Chang C H, Meroney R N. The effect of surroundings with different separation distances on surface pressures on low - rise buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(8): 1039-1050.

[9] Yong C K, Akihito Y, Yukio T, et al. Influence of surrounding buildings on wind loads acting on low - rise building [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(2): 275-283.

[10] 赵青春,彭兴黔,周显鹏,等. 低矮双坡屋面房屋风干扰效应的数值模拟分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 863-867.

[11] 陈波,贾露宇,张丽娜,等. 单个建筑物对平屋面风荷载的干扰效应试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(12): 78-84.

[12] 全涌,顾明,田村幸雄,等. 周边建筑对低矮建筑平屋盖上风压的干扰效应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(12): 1576-1580.

[13] Zhang A S, Zhang L, Xie Z N. Influence of wind direction on pressure distributions of adjacent buildings [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(4): 28-33.

[14] 张敏,楼文娟,何鸽俊,等. 群体高层建筑风荷载干扰效应的数值研究[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 179-185.

[15] 黄强. 低层建筑表面风荷载数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.