

# 外形几何参数对双坡屋盖升力系数极值的影响

顾 明, 顾玮玲

(同济大学 土工工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 对我国浙江沿海多个风灾频发区域进行深入调研, 全面地确定了新农村典型低矮建筑双坡屋盖的外形几何参数. 基于此进行了刚性模型测压风洞试验, 研究了屋盖升力系数极值的变化规律, 讨论了最不利屋盖升力系数随建筑外形几何参数的变化, 用多参数非线性最小二乘法将最不利屋盖升力系数拟合为屋盖坡角、高宽比和厚宽比的函数, 并对拟合函数进行了误差分析. 这些结论及拟合函数对于新农村低矮建筑的结构设计及相关规范手册的制订提供了系统的参考数据.

**关键词:** 低矮建筑; 风洞试验; 升力系数; 极值; 误差分析  
**中图分类号:** TU 973.213; TU 317.1 **文献标识码:** A

## Effects of Geometrical Parameters on Extreme Uplift Force Coefficients on Gable-roofs of New Rural Low-rise Buildings

GU Ming, GU Weicheng

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** By investigating into the areas in Zhejiang Province of China where wind disaster happens frequently, the geometrical parameters of the new rural low-rise buildings are obtained comprehensively. Based on the information, the wind-tunnel pressure tests for rigid models of such buildings are done. The law of the extreme uplift force coefficients on the roofs is studied. The effects of geometrical parameters on the most unfavorable uplift force coefficients on the gable roofs are given and then fitted as a function of roof pitches, aspect ratios and side ratios with the multi-parametrical least-squares method. The error analysis is made to assess the rationality of the result. These conclusions and the fitted function are useful references for wind loads standards and structure design of new rural low-rise buildings.

**Key words:** low-rise building; wind tunnel test; uplift force

coefficients; extreme; error analysis

对浙江沿海地区风灾调查(表 1)表明, 我国东南沿海地区的风灾发生频繁, 破坏范围广, 破坏程度严重. 在强风作用下低矮建筑整个屋面被掀起的情况极为常见, 因此研究整个屋面升力系数极值的规律对我国新农村房屋的抗风设计具有重要意义. 笔者对浙江沿海风灾频发地区进行深入调研后, 对设计后的刚性模型进行测压风洞试验, 全面分析了试验结果, 研究了屋盖升力系数极值的变化规律<sup>[1-4]</sup>, 并讨论了最不利屋盖升力系数随建筑几何形状参数的变化规律, 得到了一些有价值的结论, 并将屋盖升力系数极值拟合成为屋盖坡角、高宽比和厚宽比的函数形式<sup>[5-6]</sup>. 对其结果的合理性进行误差分析, 确保拟合公式具有一定的实用价值, 为新农村低矮建筑的结构设计及相关规范手册的制订提供指导与参考.

## 1 风洞试验概况

测压风洞试验依托的实验室为同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-2 风洞, 试验段宽 3.0 m、高 2.5 m、长 15.0 m, 风速范围 1.0~68.0 m·s<sup>-1</sup>连续可调. 试验长度、风速和时间比分别取 1/40, 1/3 和 3/40. 试验选择 B 类风场作为试验风场, 10.0 cm(对应实际 10 m)高度处的湍流强度为 0.23 左右, 30.5 cm 高度处的试验风速为 6.60 m·s<sup>-1</sup>(对应实际 20.0 m·s<sup>-1</sup>), 23.0 cm 高度处的试验风速为 6.26 m·s<sup>-1</sup>(对应实际 18.8 m·s<sup>-1</sup>), 15.5 cm 高度处的试验风速为 5.99 m·s<sup>-1</sup>左右(对应实际 18.0 m·s<sup>-1</sup>). 风洞试验模型图片如图 1, 模型坡角为 18.4°.

收稿日期: 2019-11-06

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2008BAJ08B14)

第一作者: 顾 明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构抗风. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

表 1 浙江沿海地区风灾调查  
Tab.1 Wind disaster investigation in Zhejiang province

时间	名称	风灾受损
2002-09-07	16 号“拉克”	苍南县损坏房屋 6 800 间,倒塌 1 200 间,死亡 17 人,经济总损失高达 5.29 亿元.
2004-08-12	14 号“云娜”	浙江省倒塌房屋 4.24 万间,死亡 115 人,受伤 1 800 多人.
2005-07-19	5 号“海棠”	浙江省倒塌房屋 1.2 万间,死亡 5 人,失踪 6 人,直接经济损失近 81 亿元.
2005-08-07	9 号“麦莎”	浙江省倒塌房屋 1.3 万间,直接经济损失达 65.6 亿元.
2005-09-12	15 号“卡努”	全国 1.9 万间房屋倒塌,死亡 16 人,失踪 9 人,直接经济损失 99 亿元.
2006-08-10	8 号“桑美”	温州 81 人死亡,11 人失踪,直接经济损失超过 45 亿元.
2007-09-19	13 号“韦帕”	浙江 5 人死亡,3 人失踪,闽浙 808 万人受灾,直接经济损失达 66.2 亿元.
2007-10-08	16 号“罗莎”	700 多万人受灾,直接经济损失达 75 亿元.

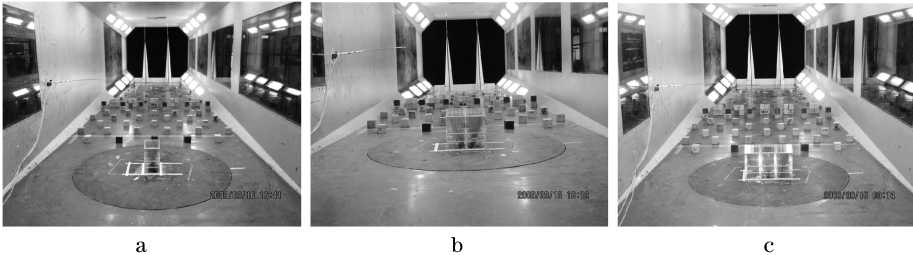


图 1 风洞试验中的模型图片  
Fig.1 Model pictures of wind tunnel test

试验采用由有机玻璃制成的刚性测压模型,图 2 给出了试验模型及其参数和坐标轴的定义,图中, $H$  为高度, $B$  为宽度, $L$  为厚度, $\theta$  为风向角, $\beta$  为屋面坡角.对 54 个双坡屋面建筑模型进行了表面压力测量风洞试验.模型高宽比  $H/B$  分别为 0.55,0.80 和 1.05,厚宽比  $L/B$  分别为 0.60,1.20 和 1.80,屋面坡角  $\beta$  分别为:  $9.5^{\circ}$ ,  $18.4^{\circ}$ ,  $21.8^{\circ}$ ,  $26.6^{\circ}$ ,  $30.0^{\circ}$  和  $45.0^{\circ}$ ,风向角  $\theta$  为  $0\sim 90^{\circ}$ ,增量为  $15^{\circ}$ ,共 7 个角度,总共 378 个试验工况(模型工况见表 2).

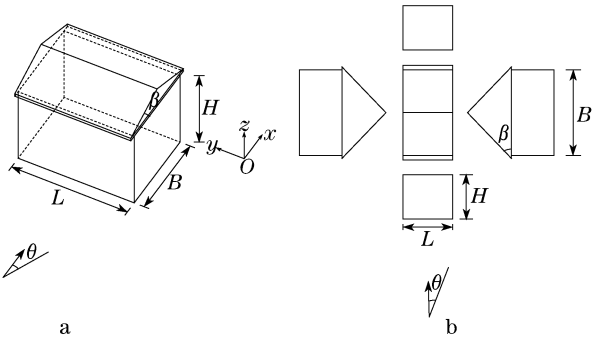


图 2 试验模型及其几何参数定义和坐标轴定义  
Fig.2 Test model, geometrical parameters and coordinate axis

试验中扫描阀扫描频率设置为 312.5 Hz,一次采样 57.6 s(对应实际 12.8 min).由得到的风压时程序列根据式(1)计算得到测点风压系数时程

$C_p(i, \theta, t) = p(i, \theta, t)/(0.5\rho V^2)$  (1)  
式中:  $C_p(i, \theta, t)$ 和  $p(i, \theta, t)$ 分别为风向角为  $\theta$  时测点  $i$  处的风压系数及风压的时间序列; $0.5\rho V^2$  为屋檐高度处来流风压.

表 2 双坡顶低矮建筑风洞试验模型工况  
Tab.2 Wind tunnel test cases on gable-roofs of low-rise buildings

$B/\text{m}$	$L/\text{m}$	$H/\text{m}$	$\beta/(^{\circ})$
12.0	7.2	6.6	$9.5(1/6), 18.4(1/3)$
12.0	14.4	9.6	$21.8(1/2.5), 26.6(1/2)$
12.0	21.6	12.6	$30.0, 45.0$

屋面升力系数由试验模型屋面测点的风压系数进行空间平均得到,其计算式如下:

$$C_f(\theta, t_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_p(\theta, i, t_k) \quad (2)$$

式中:  $C_f(\theta, t_k)$ 为风向角  $\theta$  下  $t_k$  时刻屋面升力系数; $n$  为屋面上的测点数(所有测点均匀布置在屋面上); $C_p(\theta, i, t_k)$ 为某试验工况模型屋面第  $i$  个测点在风向角  $\theta$  下  $t_k$  时刻的风压系数.得到  $C_f(\theta, t_k)$  后,某一风向工况下屋面升力系数的极值  $C_{f,ex}(\theta)$  计算如下:

$$C_{f,ex}(\theta) = \min_{k=i \sim M} (C_f(\theta, t_k)) \quad (3)$$

## 2 屋盖升力系数极值

图3给出了所有54个模型工况屋盖升力系数极值随风向角变化的曲线。

(1) 屋盖坡角 $\beta$ 的影响. 不论高宽比和厚宽比如何,屋盖坡角越大,屋盖升力系数极值受风向角的影响越大.

影响越大. 在风向角为 $90^\circ$ 时,理论上每一个图中代表不同屋盖坡角试验结果的各条曲线都应汇集于一点,但是由于近地风场的高紊流性,所以实际结果出现微小波动. 在风向角为 $0^\circ$ 时,在当屋面坡角较大(大于 $18.4^\circ$ )时,屋盖升力系数极值随坡角的增大而减小,这是由于迎风坡的吸力将随坡角的增大而减小.

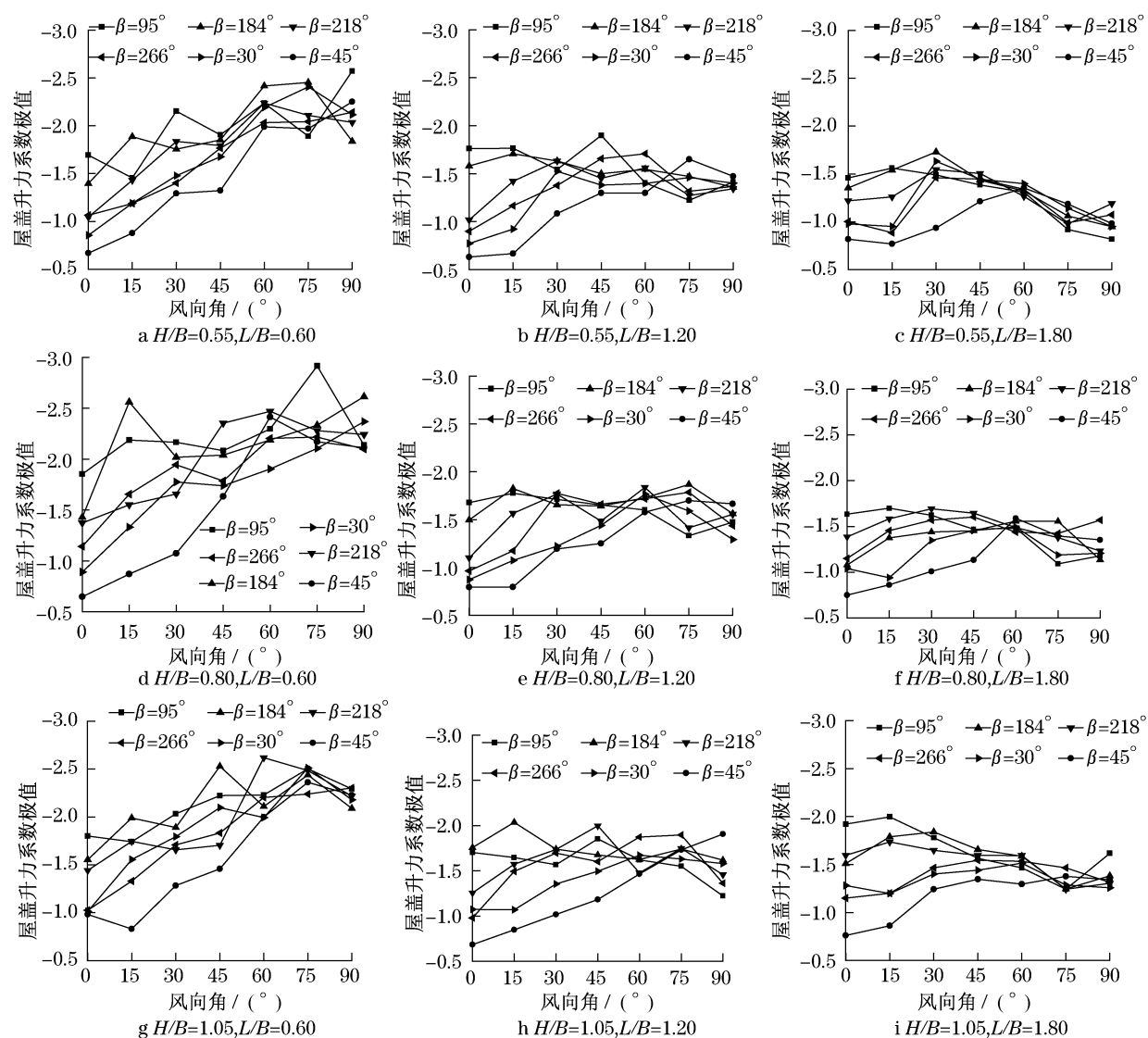


图3 屋盖升力系数极值随风向角的变化

Fig.3 Variation of uplift force coefficients with wind direction

(2) 高宽比 $H/B$ 的影响. 风向平行于屋脊时,屋盖升力系数极值随高宽比的增大逐渐增大. 随着模型高度的增大(即屋盖离地高度越高),来流的湍流强度减小,导致测点吸力风压系数极值减小,但湍流减小导致各测点处风压脉动的相关性增强,从而导致整个屋盖升力系数增大.

(3) 厚宽比 $L/B$ 的影响. 风向平行于屋脊时,屋盖升力系数极值随屋盖厚宽比的增大急剧减小,这是由于屋盖上方漩涡脱落的影响区域的面积占屋盖总面积的比例随屋盖厚宽比的增大而减小引起的. 屋盖的升力系数极值随厚宽比的增加而变化平稳.

### 3 最不利屋盖升力系数

从图4中可以看出,最不利屋盖升力系数(即任意风向角下屋盖升力系数极值的最大值)的变化规

律比较复杂.

(1) 屋盖坡角  $\beta$  的影响. 图4分析了最不利屋盖升力系数随屋盖倾角的变化情况. 总体上看,最不利屋盖升力系数在  $-1.3 \sim -2.9$  之间变化,大多数情况下随屋盖坡角的增大呈减小趋势.

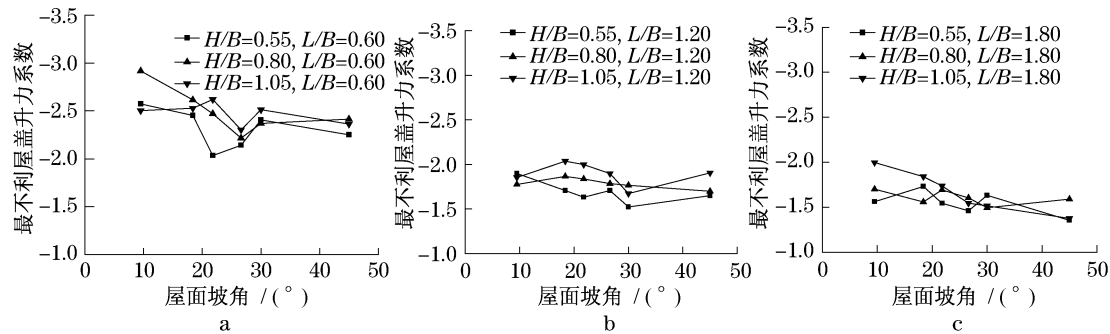


图4 屋盖坡角对最不利屋盖升力系数的影响

Fig.4 Variation of the most unfavorable uplift force coefficients with roof pitches

(2) 高宽比  $H/B$  的影响. 图5给出了最不利屋盖升力系数随高宽比变化的情况. 在厚宽比  $L/B$  等于0.55时,随着屋面坡角的增大,最不利屋面升力系数趋于平稳. 在厚宽比  $L/B$  等于0.80时,不管屋盖坡角怎样,最不利屋盖升力系数大都随高宽比的增大而增大,在  $-1.5 \sim -2.0$  之间变化. 总体来看,

随高宽比的增大最不利屋盖升力系数呈增大趋势.

(3) 厚宽比  $L/B$  的影响. 图6给出了最不利屋盖升力系数随厚宽比变化的情况. 最不利屋盖升力系数随厚宽比的变化规律受屋盖坡角的影响较大,总体上随厚宽比的增大而减小,且减小幅度明显. 当厚宽比为0.6时,最不利屋盖升力系数较大.

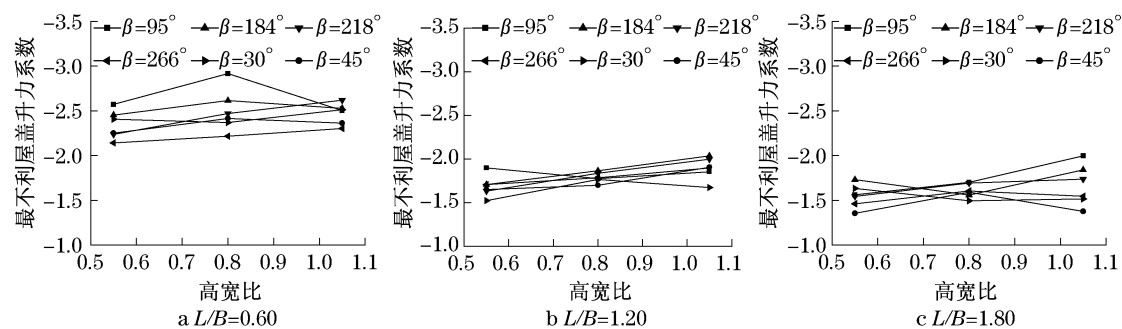


图5 高宽比对最不利屋盖升力系数的影响

Fig.5 Variation of the most unfavorable uplift force coefficients with wind direction

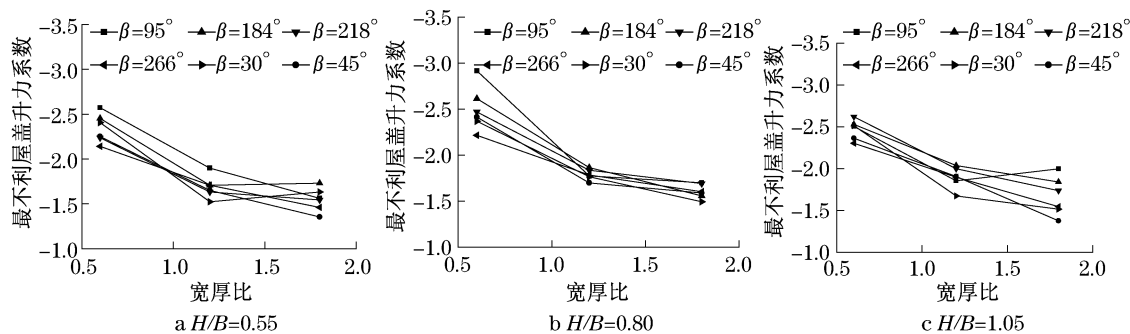


图6 厚宽比对最不利屋盖升力系数的影响

Fig.6 Variation of the most unfavorable uplift force coefficients with side ratios

为了便于工程应用,基于上述试验数据处理的結果,利用多参数的最小二乘法,拟合得到如下最不利屋盖升力系数  $\bar{C}_{f,ex}$  的函数表达式

$$\begin{aligned} \bar{C}_{f,ex} = & -2.92 - 1.45\phi + 2.09\varphi + 0.48\phi^2 - \\ & 0.65\varphi^2 - 0.39\beta^2 + 0.14\phi\varphi + 0.82\beta\phi + \\ & 0.34\beta\varphi - 0.28\beta\phi\varphi \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\phi = H/B$ ;  $\varphi = L/B$ .

图7与图8对拟合式(4)的准确性进行了分析.可以看出,试验值比较均匀地分布于代表拟合值的直线的上下两侧.拟合公式能够较好地预测试验结果.

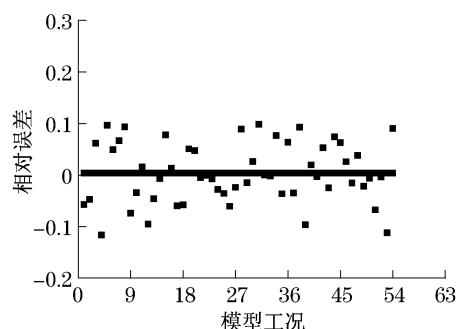


图7 拟合函数相对误差分析

Fig.7 Analysis of relative error of fitted function

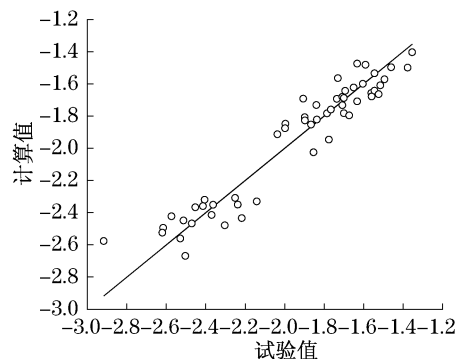


图8 拟合函数的误差分析

Fig.8 Analysis of relative error of fitted function

为了能更好地量化分析拟合公式的误差,定义误差率如下:

$$\delta = (a - b)/b \quad (5)$$

式中:  $\delta$  为误差率;  $a$  为拟合值;  $b$  为试验值.

利用上面给出的试验结果进行计算,结果表明,式(4)的误差率的平均值为 0.32%,标准差为 11.4%.

## 4 结论

对新农村典型低矮建筑双坡屋盖的升力系数极值进行了分析,并讨论了建筑屋盖坡角、高宽比和厚宽比对最不利屋盖升力系数的影响,得到以下结论:

(1) 相同高宽比下,厚宽比越大,屋面最大升力系数随屋盖坡角的增大而减小.

(2) 相同厚宽比下,高宽比越小,屋面最大升力系数越小,并且不同高宽比下的差距随着屋盖坡角的增大而减小.

(3) 最不利屋盖升力系数随高宽比增大而增大,而这种增大的趋势随着屋盖坡角的增大而减小.

(4) 拟合公式(4)能够较好地预测村镇典型双坡顶低矮房屋的最不利屋盖升力系数,误差率的平均值和标准差分别为 0.32% 和 11.4%.

## 参考文献:

- [1] Stathopoulos T. Turbulent wind action on low-rise buildings [D]. London: The University of Western Ontario. Faculty of Engineering Science, 1979.
- [2] Holmes J D. Wind pressures and forces on tropical houses [R]. Canberra: Australian Housing Research Council, 1980.
- [3] Holmes J D. Wind pressure on tropical housing[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 53: 105.
- [4] Holmes J D. Wind loading of structures [M]. London: Spon Press, 2001.
- [5] 全涌, 田村幸雄, 松井正宏, 等. 低矮建筑气动数据库介绍 [C]// 第七届全国风工程和工业空气动力学学术会议. 成都: 西南交通大学, 2006, 355 - 360.  
QUAN Yong, TAMUNA Yukio, MATSUI Masahiro, et al. Introduction of aerodynamic database for low-rise buildings [C]// The 7th Academic Conference for National Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006, 355 - 360.
- [6] 陈斌. 典型低矮建筑屋面风压的概率统计分析 & 极值研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2008.  
CHEN Bin. Probability characteristics and extreme values of wind pressure on roofs of typical low-rise buildings [D]. Shanghai: Tongji University College of Civil Engineering, 2008.