

L 形平面低矮房屋屋面的风荷载特性

陶 玲, 黄 鹏, 顾 明, 全 涌

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过 L 形平面低矮房屋在同济大学 TJ-2 风洞进行的刚性模型测压试验, 首先对其屋面的风压时程概率分布进行了讨论, 试验结果表明, 屋面大部分区域的风压时程偏度较大, 概率分布与三参数 Gamma 分布较为吻合, 其极值的估算更适合用“Sadek-Simiu 法”, 且相比而言, 传统的高斯方法偏于不安全. 继而, 对翼长、坡度及组合屋面形式对屋面风荷载特性的影响进行了研究, 试验结果显示, 翼长的增加, 坡度的减小均会加剧屋面的平均负压和最不利负压; 而屋面由两双坡组合变为双坡、四坡组合后, 屋面的平均负压和最不利负压都有大幅度的减小, 从而得出双坡、四坡组合屋面的 L 形平面房屋比两双坡组合屋面更有利于抗风的结论.

关键词: L 形平面; 低矮房屋; 风荷载; 偏度; 翼长; 屋面组合形式

中图分类号: TU 352

文献标识码: A

Wind Loading Characteristic of Low-rise Buildings Roof with L-Shape Plan

TAO Ling, HUANG Peng, GU Ming, QUAN Yong

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

Abstract: Rigid model pressure measurement tests of low-rise buildings with L-shape plan were conducted in TJ-2 wind tunnel laboratory, the pressure time histories probability distribution was discussed firstly. The experimental results reveal that the skewnesses of most regions pressure time histories of the roof are large, and the probability distribution is well fitted by the three-parameter gamma distribution, consequently, the Sadek-Simiu procedure is preferred to estimate the peak pressure coefficients, and compared with such method, the traditional Gaussian method tends to be unsafe. Then the effects on roof wind loadings of wing length, roof pitch and the roof combination form were studied. The results show that the increasing of the wing length or the decreasing of the roof pitch intensifies the negative mean pressure and the worst negative peak pressure, however, the negative mean pressure and the worst negative peak pressure on gable-hip combined roof are much smaller than that on two-gable combined

roof, thus the conclusion is drawn that the gable-hip combined roof is superior to two-gable combined roof in wind resistance.

Key words: L-shape plan; low-rise buildings; wind loads; skewness; wing length; roof combination form

对低矮房屋的风荷载特性, 国内外学者已做了大量的研究, 并取得较为完善的成果. 比如 Holmes^[1]对双坡屋面所受风荷载的特性作了介绍. Xu 和 Reardon^[2]研究了四坡屋面的风荷载分布规律. 付国宏^[3]分析了高宽比对不同坡度的双坡屋面风荷载所产生的作用. Kopp 等^[4-5]对带有女儿墙的平屋面风荷载分布规律做了系统阐述. 赵雅丽等^[6]讨论了双坡屋面挑檐形式的改变引起屋面风荷载的变化.

但这些研究仅局限于矩形平面房屋, 由于人们生活水平的提高, 对于房屋的美观要求越来越高, 我国低矮房屋平面外形已不再局限于简单的矩形了. 近年来, L 形平面房屋广为流行. 鉴于 L 形平面的房屋在翼长、坡度以及屋面形式的组合方面可多种多样, 而这些参数的不同对 L 形平面房屋屋面的风荷载特性会产生一定的影响, 本文对不同参数的 L 形平面房屋屋面的风荷载作了分析, 并进行了比较. 农村住宅的坡度大都在 20°~35°之间, 故对于 L 形平面房屋的屋面, 主坡坡度取 21.8°、30°和 35°, 相应的次坡坡度分别是 31°、41°和 47°. 主翼长度不变, 为 7.6 m, 刚好是 2 开间, 次翼长选取和主翼长的比分别为 1/1、4/5 和 2/3, 则相应次翼长为 7.6、9.5 m 和 11.4 m. 主翼的宽度选取 5.7 m, 可以有一个楼梯宽和一间房间宽, 次翼的宽度为 3.8 m, 刚好为一个开间尺寸, 这些尺寸的房型均可以满足实际的住房平面布置. 另外, 房屋的檐口高度为 8.5 m, 可以是两层加上阁楼的高度. 屋面组合形式考虑常见的两双坡组合(文中称 A 组合)和双坡、四坡组合(文中称 B 组合).

收稿日期: 2010-09-09

基金资助: 国家自然科学基金面上项目(50708082); 国家科技支撑计划课题项目(2006BAJ06B05, 2008BAJ08B14)

第一作者: 陶 玲(1980—), 女, 博士生, 主要研究方向为低矮房屋抗风. E-mail: tl800425@126.com

通讯作者: 黄 鹏(1974—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为结构风工程. E-mail: huangtju@tongji.edu.cn

同时,对于低矮房屋的极值风压估算传统上都是基于风压时程满足 Gaussian 分布的假定^[7]. 然而, Sadek 和 Simiu^[8]通过概率曲线相关系数法(PPCC)对各种可能的分布函数进行了测试,发现三参数 Gamma 分布是风压时程的最优分布,进而给出基于 Gamma 分布的极值估算方法. 鉴于此,本文对 L 形平面房屋的屋面极值风压估算方法进行初步的讨论.

1 试验概况

测压试验模型为刚体模型(图 1),用有机玻璃板和 ABS 板制成,具有足够的刚度和强度,使得在 1 m 高度处的试验风速达 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 模型不会发生变形,也不会出现明显的振动现象,以保证测压试验的精度. 模型的几何缩尺比为 1/20,与实物在外形上保持几何相似,风速比设为 1/3,则相应的时间比为 3/20. 试验时将模型放置在转盘中心,通过旋转转盘模拟不同风向. 在屋面挑檐及悬山的上下表面都布置了测点,双面点图中均以实心点表示,屋面最多布点时有 382 个(图 2). 图中,点 1 表示迎风屋面中点,点 2 表示背风屋面中点,点 3 表示背风屋面脊点. 根据村镇建筑的周围环境,本试验的大气边界层流场模拟为 B 类地貌风场^[9],模拟的风场结果如图 3 所示,图中, V 为风速, V_{ref} 为参考高度 10 m 处的风速. 平均风速剖面指数 $\alpha = 0.16$,模型顶部(对应实际 10 m 处)紊流度约为 22%. 试验的工况见表 1,表中所给尺寸为实际建筑尺寸,各参数示意图 4,图中, β 为主坡坡度, φ 为次坡坡度. 为了方便描述, B 为主翼长度, D 为次翼长度, H 为檐口高度, d 为主翼宽度, b 为次翼宽度, D_e 为挑檐长度,为 0.6 m. 屋面各区域的名称见图 5. 把垂直吹向主坡迎风屋面的风向角定义为 0° 风向角,试验风向角间隔取为 15° ,按顺时针方向增加,共 24 个风向角,见图 5. 试验中扫描阀扫描频率设置为 312.5 Hz,一次采样 90 s(对应实际 10 min).

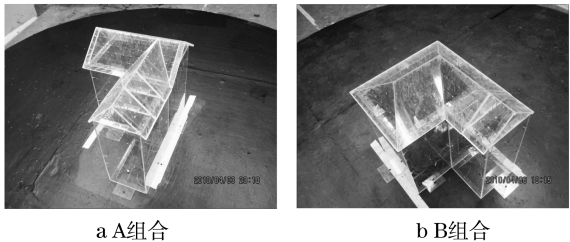


图 1 刚体测压模型

Fig.1 Rigid pressure measurement models

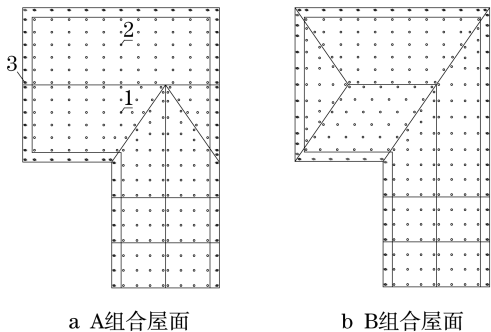


图 2 模型屋面测点布置(实心点为双面点)

Fig.2 Layout of pressure taps (solid circle means two-sided tap)

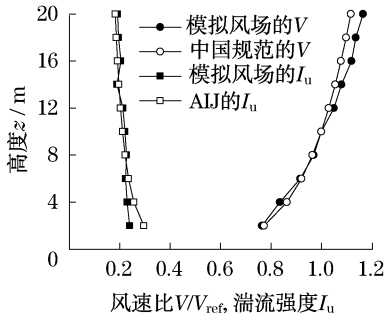


图 3 风洞模拟结果

Fig.3 Parameters of the simulated wind field

表 1 试验工况表

Tab.1 Test cases

工况	屋面形式	主坡坡度 度 $\beta/(^\circ)$	次坡坡度 度 $\varphi/(^\circ)$	次翼长度 D/m
1~3	两双坡组合屋面(A 组合)	21.8	31	7.6;9.5;11.4
4~6	两双坡组合屋面(A 组合)	30	41	7.6;9.5;11.4
7~9	两双坡组合屋面(A 组合)	35	47	7.6;9.5;11.4
10~12	双坡、四坡组合屋面(B 组合)	30	41	7.6;9.5;11.4

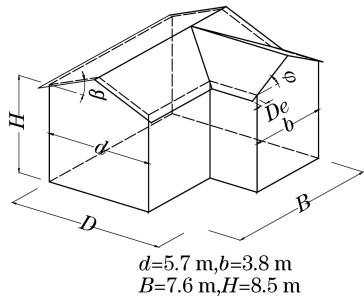


图 4 L 形平面房屋各参数的示意图

Fig.4 Schematic diagram of building parameters

2 数据处理方法

2.1 平均风压系数

建筑表面的风压用量纲一压力系数表示为

$$C_p(i, \theta, t) = p(i, \theta, t)/(0.5\rho V_H^2) \quad (1)$$

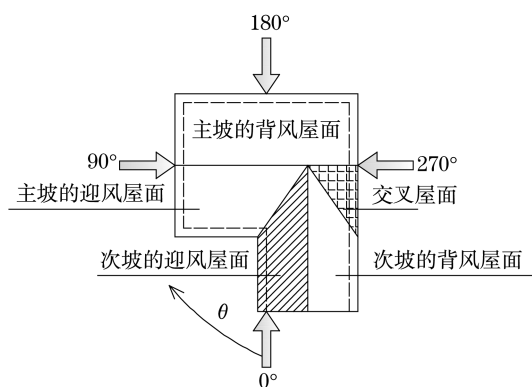


图5 试验风向角

Fig.5 Test wind direction angles

式中, $C_p(i, \theta, t)$ 和 $p(i, \theta, t)$ 分别为 i 测点在 θ 风向角下 t 时刻的风压系数及风压; V_H 是参考动压高度的风速, 这里取平均屋面高度; ρ 是空气密度. 文中规定 i 测点在 θ 风向角下的平均风压系数用 $C_{p, mean}(i, \theta, t)$ 表示.

2.2 风压时程概率分布

传统的方法假定风压时程满足 Gaussian 分布, 其概率分布函数为

$$f(x) = \exp(-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2)) / (\sigma(2\pi)^{1/2}) \quad (2)$$

式中: μ 是位置参数; σ 是尺度参数. Davenport^[7] 在此基础上运用零值穿越理论, 得出峰值因子, 用来估算极值, 该方法已被广泛应用.

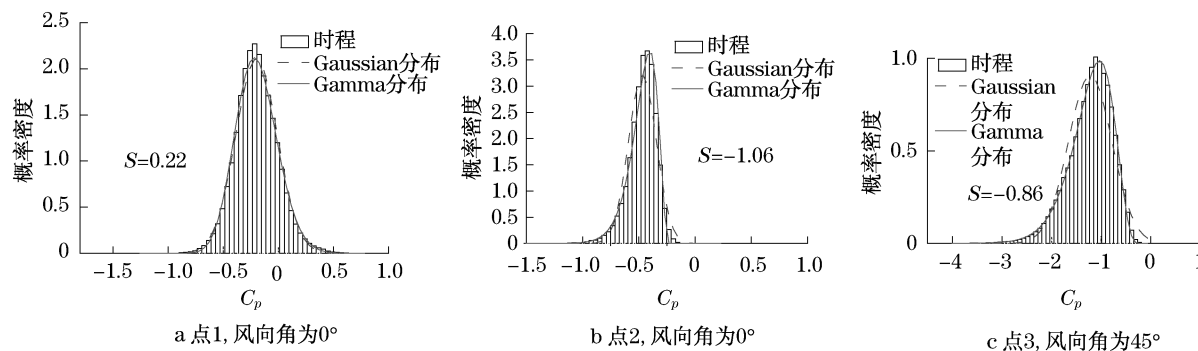


图6 屋面各典型区域点的风压系数时程概率分布

Fig.6 Probability density of pressure coefficient time histories on typical taps of roof

2.3 极小风压系数

根据上述分析结果, 本文的极小风压系数 $C_{p, min}(i, \theta, t)$ 估算采用的是“Sadek-Simiu 法”^[8]. “Sadek-Simiu 法”是基于 Gamma 分布利用“转换过程法 (translation process approach)”将非高斯风压时程的概率分布函数映射成标准高斯分布, 然后直接采用零值穿越理论获得风压系数极值.

由于 i 测点在每个风向角下都有一个极小风压

然而, Sadek 和 Simiu^[8] 通过概率曲线相关系数法 (PPCC) 对多种分布函数进行了测试, 确定了低矮建筑表面大多数区域风压时程的最优概率分布为三参数 Gamma 分布, 其分布函数为

$$f(x) = \{ (x - \mu) / \beta \}^{\gamma-1} \exp \{ - (x - \mu) / \beta \} / (\beta \Gamma(\gamma)), \quad x > \mu \quad (3)$$

式中: μ 、 β 、 γ 分别为位置参数、尺度参数及形状参数; Γ 为 Gamma 函数. 运用该式时, 偏度 S 为负的时程均应乘以 -1 . 本文运用 Tieleman 等^[10] 给出的矩估计方法获得式中的参数.

图6为A组合屋面的L形平面房屋 ($\theta = 30^\circ$, $D = 9.5$ m) 屋面典型区域点的风压系数时程概率分布, 从图中可以看出, 在 0° 风向角和 45° 风向角时, 偏度较小 (偏度的大小均是指其绝对值) 的风压时程 (点1, 图2a所示) 分布和高斯分布及 Gamma 分布均较接近, 但偏度较大的时程 (点2和点3, 图2a所示) 只和 Gamma 分布较吻合. Tieleman^[10] 给出了只有偏度小于 0.35 的时程才和 Gamma 分布及高斯分布均较吻合, 而偏度大于 0.35 的时程只与 Gamma 分布较吻合. 图7给出了同样工况下屋面 253 个测点在 0° 风向角和 45° 风向角下的偏度分布, 从图中可以看出 0° 风向角下偏度大于 0.35 的测点占屋面总测点的 70%, 45° 风向角下偏度大于 0.35 的测点占屋面总测点的 83%.

系数, 那么在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 所有风向角下总有一个最小值, 称为 i 测点的最不利负风压系数, 表示为

$$C'_{p, min}(i) = \min_{\theta = 0^\circ \sim 360^\circ} (C_{p, min}(i, \theta)) \quad (4)$$

从而定义屋面的最大最不利负风压系数为

$$C''_{p, min} = \min_{i=1 \sim M} (C'_{p, min}(i)) \quad (5)$$

式中, M 为屋面上的点数.

本文描述的负压大小均是指其绝对值的大小.

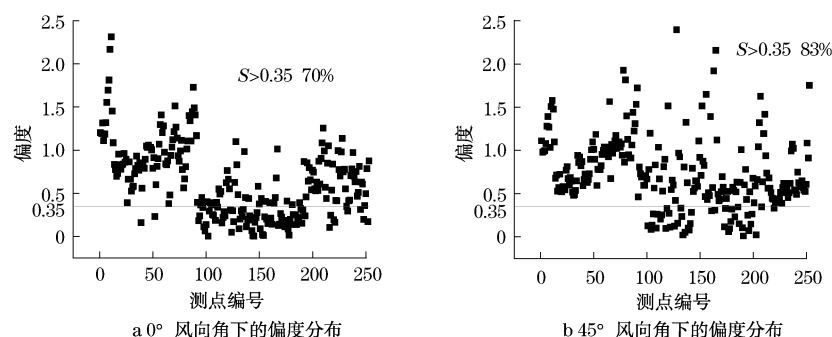


图 7 屋面所有测点的偏度分布

Fig.7 Skewness distributions of all roof taps

3 试验结果分析

3.1 屋面平均风压系数等值线图

3.1.1 L形平面房屋翼长的影响

图 8 给出了各感兴趣参数下的 L 形平面房屋屋面的平均风压系数等值线图. 从图 8a、8b 和图 8c 可以看出, 随着次翼长的增加, 在 45° 风向角下, 主坡迎风屋面和次坡迎风屋面相交处的负压增大, 主坡靠近来流处的背风屋面平均负压略有减小. 135° 风向角下, 次坡背风屋面的屋脊处负压增大. 225° 风向角下, 主坡迎风屋面负压增大. 315° 风向角下, 次坡的迎风屋面及主坡的迎风屋面和次坡靠近的地方负压也增大.

3.1.2 L形平面房屋坡度的影响

从图 8d、8b 和图 8e 的比较发现, 随着屋面坡度的增大, 在 45° 风向角下, 主坡迎风屋面和次坡迎风屋面相交处以及主坡的背风屋面靠近来流的负压均会减小; 在 135° 和 225° 风向角下, 屋面的各个区域负压都有不同程度的减小; 在 315° 风向角下, 除了主坡的背风屋面变化不大, 其余区域的负压也都略有减小.

3.1.3 L形平面房屋屋面组合形式的影响

比较图 8b 和图 8f 来看屋面的组合形式所产生的影响. 这里的 2 种屋面次坡都是双坡, 主坡分别为双坡和四坡. B 组合相对于 A 组合, 在 45° 风向角下, 主坡背风屋面靠近来流的负压减小; 在 135° 风向角下, 主坡迎风屋面靠近来流山墙端的负压减小, 主坡迎风屋面的中间及次坡背风屋面的很小区域负压略有增大; 在 225° 风向角下, 屋面大部分区域负压都有大幅度的减小; 在 315° 风向角下, 四坡屋面在远离来流方向的次坡 (这里是指四坡屋面本身的次坡) 和主坡的迎风屋面的相交处负压略有增大.

因此, 翼长的增加会加剧屋面的平均负压, 坡度的增加会减小屋面的平均负压, 双坡、四坡组合较两

双坡组合屋面对减小屋面的平均负压较为有利.

3.2 最不利负风压系数等值线图

3.2.1 L形平面房屋的翼长的影响

各感兴趣参数的 L 形平面房屋的最不利负风压系数等值线如图 9 所示. 由图 9a、9b 和图 9c 的比较发现, 随着次翼长的增加, 主坡的迎风屋面和次坡的迎风屋面相交处的较大最不利负压的区域会沿着主屋脊和次屋脊的方向延长, 屋面一些最不利负压较大的区域也微有增大, 次翼随着自身长度的增大, 最不利负压不会增大, 只是按照先前的规律相应地延长.

3.2.2 L形平面房屋的坡度的影响

图 9d、9b 和图 9e 的比较表明, 随着坡度的增加, 屋面最不利负压较大的区域明显减小, 相应的最不利负压也有很大程度的减小.

3.2.3 L形平面房屋的组合屋面形式的影响

图 9b 和图 9f 的比较, 最明显的是图 9b 中 A 组合屋面的主坡迎风屋面和次坡迎风屋面相交处及交叉屋面和次坡背风屋面相交处的较大最不利负压区域在 B 组合屋面中没有了, 其次是屋角和屋脊处的最不利负压在 B 组合屋面中也明显减小, 但在次坡的背风屋面屋脊处的负压略有增大.

3.3 两种极值估算方法的比较

前面所讨论的极小风压系数都是在考虑了非高斯性后, 用“Sadek-Simiu 法”估算得来的, 为了阐述此方法与传统的高斯方法的差异, 表 2 给出了 A 组合屋面的 L 形平面房屋 ($\theta = 30^\circ$, $D = 9.5 \text{ m}$) 用“Sadek-Simiu 法”估算的前 10 个最大最不利负压系数和对应点的用“Davenport 法”估算的值. 可以看出, 高斯方法所估算的值较小, 偏于不安全.

4 结语

通过 L 形平面低矮房屋的风洞试验结果分析比

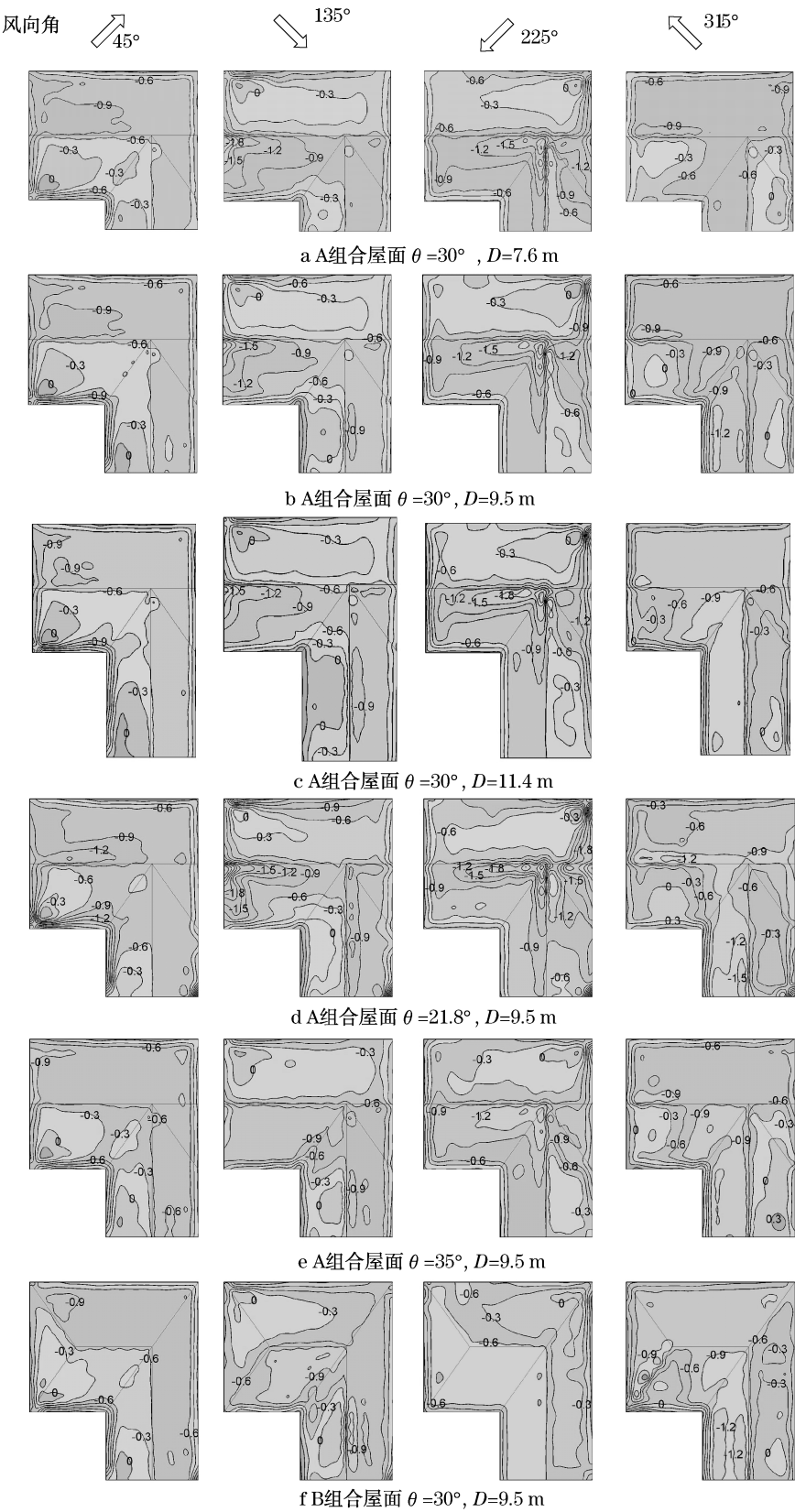


图 8 不同参数的 L 形平面房屋的平均风压系数等值线

Fig.8 Mean pressure coefficient distributions over the roofs of L shape buildings with varied parameters

较,可以得出以下结论:

(1) 主坡 30° 的两双坡组合屋面的大部分区域 的风压时程偏度较大,和三参数 Gamma 分布较为吻合,只有少数偏度较小的区域满足高斯分布,故而屋

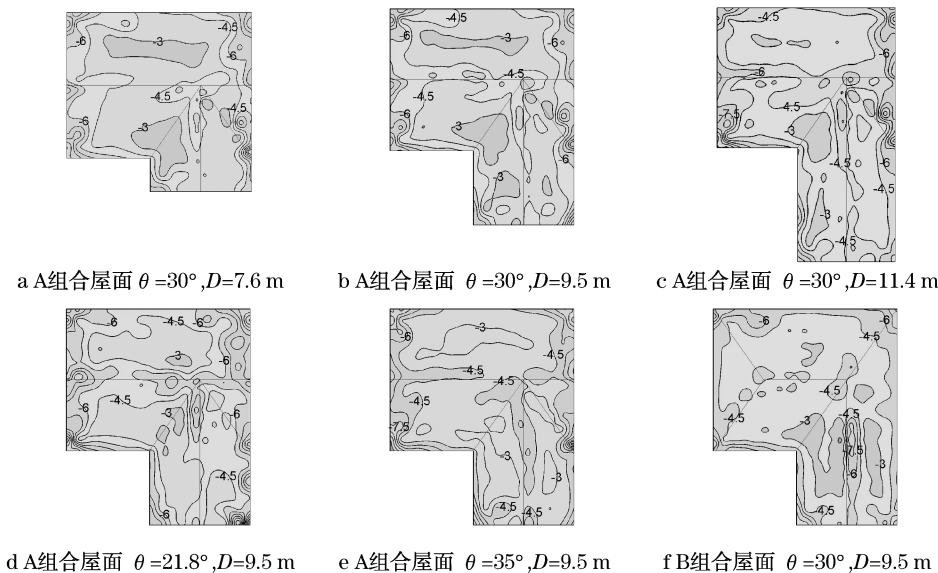


图 9 不同参数的 L 形平面房屋屋面的最不利负风压系数等值线

Fig.9 Worst negative peak pressure coefficient distributions over the roofs of L shape buildings with varied parameters

表 2 “Davenport 法”与“Sadek-Simiu 法”估算的极值比较

Tab.2 Comparison of peak values estimated by “Davenport ” procedure and “Sadek-Simiu” procedure

极值估算方法	前 10 个最大最不利负压系数									
Davenport 法	- 7.31	- 4.72	- 7.20	- 6.48	- 7.21	- 6.42	- 5.29	- 6.13	- 6.31	- 5.03
Sadek-Simiu 法	- 10.73	- 10.03	- 9.56	- 9.16	- 9.05	- 8.48	- 8.32	- 8.28	- 8.19	- 8.06

面区域极值的估算更适合用“Sadek-Simiu 法”. 考虑非高斯性估算的极值要比用高斯方法估算的值大了很多,说明传统的高斯方法偏于不安全.

(2) L 形平面房屋翼长的增加,会略微增加屋面的平均负压和最不利负压;坡度的减小会加剧屋面的平均负压和最不利负压,其 21.8° 屋面比 35° 屋面的最大最不利负压系数增加了 1 左右.

(3) L 形平面房屋的双坡、四坡组合屋面相对于两双坡组合屋面,无论是平均负压还是最不利负压都有很大程度的减小,其最大最不利负压系数从 -10.72 减小到 -9.05 .

参考文献:

[1] Holmes J D. Wind pressures on tropical housing[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1994,53:105.
[2] Xu Y L,Reardon G F. Variations of wind pressure on hip roofs with roof pitch[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1998,73:267.
[3] 付国宏. 低层房屋风荷载特性及抗台风设计研究[D]. 杭州:浙江大学土木建筑工程学院,2002.
FU Guohong. Wind load characteristics and wind resistant design of low-rise building[D]. Hangzhou:Zhejiang University. School of Civil Engineering,2002.

[4] Kopp G A,Surry D,Mans C. Wind effects of parapets on low buildings:part 1. Basic aerodynamics and local loads[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93:817.
[5] Kopp G A,Surry D,Mans C. Wind effects of parapets on low buildings: part 2. Structural loads [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2005,93:843.
[6] 赵雅丽,全涌,黄鹏,等. 典型双坡屋面风压分布特性风洞试验研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(11):1586.
ZHAO Yali,QUAN Yong,HUANG Peng,et al. Wind tunnel test study on wind pressure on typical gable roofs of low-rise buildings[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010,38(11):1586.
[7] Davenport A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading[J]. Journal Institution of Civil Engineering,1964,24:187.
[8] Sadek F,Asce M,Simiu E. Peak non-Gaussian wind effects for database-assisted low-rise building design [J]. Journal of Engineering Mechanics,2002(5):530.
[9] GB50009—2001 建筑结构荷载规范(2006 年版)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
GB50009—2001 Load code for the design of building structures (2006 edition) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2002.
[10] Tieleman H W, Ge Zhongfu, Haji M R, et al. Theoretically estimated peak wind loads[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ,2007,95:113.