

## 檐口形状及附属构造对低矮建筑双坡屋面风压特性的影响

黄 鹏, 彭新来, 顾 明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘 要:** 低矮房屋在风灾中首先是围护结构的破坏, 因此对于低矮房屋抗风性能的改进, 最为有效的方法是减小屋面的极值风压。根据我国东南沿海农村住宅的调研报告, 并结合浙江省民用建筑图集 8 种适用于我国东南沿海农村居民低矮房屋建筑的檐口形状(包括各种檐沟或挑檐)在 TJ-2 风洞试验室进行了缩尺模型测压试验。研究发现, 对于 3 种具有不同坡度的双坡屋面低矮房屋, 这些形状各异且具有附属构造的檐口的出现, 抑制了迎风向来流的分离和再附, 从而减小了迎风向屋面前沿区域的负压值; 对于减小的幅度而言, 拥有 26.6° 和 33.7° 坡角的坡屋面要比拥有 14.0° 坡角的双坡屋面小得多; 对于 8 种檐口而言, 具有檐沟、悬挑盖板和垂直挡板的檐口表现出了优异的抗风性能, 对最不利面积极值风压的影响, 折减幅度可以达到 47% 以上。

**关键词:** 低矮房屋; 双坡屋面; 檐口形状; 附属构造; 风洞试验; 面积极值风压

中图分类号: TU352 文献标识码: A

### Effects of eave shapes on wind pressure of gable-roof low-rise buildings

HUANG Peng, PENG Xin-lai, GU Ming

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

**Abstract:** For low-rise buildings, their components and cladding are usually destroyed firstly in wind disasters, so the most effective wind-resist method is to reduce the extreme wind pressure on roofs. According to the investigation report of rural houses in southeast coastal area of China and the drawing collections of civil houses in Zhejiang province, 8 kinds of eave shapes including various configuration details of eave gutters and overhang eaves were designed and tested in the TJ-2 wind tunnel laboratory to study effects of eave shapes on wind loads of gable-roof low-rise buildings with 3 kinds of roof pitches. It was shown that due to presence of attached eave configurations, the flow separation is suppressed and the suctions on the roof's windward edge area are reduced; the reduction level of wind loads on house roofs with 26.6° and 33.7° roof pitches is much smaller than that of wind load on house roof with 14.0° pitch; the eave configuration No. 3 and No. 8 designed by the authors have the best effect, they can reduce the worst area-averaged extreme wind pressure up to 47% or more.

**Key words:** low-rise building; gable roof; eave shape; attached eave configuration; wind tunnel test; area-averaged extreme wind pressure

低矮房屋在风灾中首先是围护结构的破坏, 根据风压分布特点可以知道, 这些破坏主要原因是围护结构所受风荷载的极值超过其承受的能力, 因此, 减少屋面极值风压和加强房屋的抗风承载力是最为有效的方法。由于建筑造型、使用功能和排水等方面的需要, 对我国东南沿海地区大量的低矮居住建筑而言, 采用最多的是双坡屋面。影响坡屋面风压分布的因素有很多, 例如几何形状、建筑尺寸、屋面覆材、墙面开洞等。就坡屋面而言, 我国的民用建筑一般不采取女儿墙, 所以改变檐口的几何形状以及增加附属结构是一相对实

际、有效的气动措施。

最古老的檐口形式是挑檐。对于挑檐的影响, Stathopoulos & Luchian<sup>[1]</sup>的结果显示, 檐口附近的气流分离会导致檐口上下表面的风压系数及压力峰值明显提高, 其提高的幅度与屋面坡角、房屋高度、风向角等均有密切关系。孙瑛等<sup>[2]</sup>讨论了双坡屋面挑檐形式的改变引起的屋面风荷载的变化。关于改变檐口形状对屋面风荷载的影响, 相关的研究并不太多。Blackmore<sup>[3]</sup>通过试验发现, 将平屋面的拐角形状由直角改为斜角时, 可大大减小屋面的局部平均吸力, 其中角部减小可达 70%, 而整个屋面的风荷载可减小 30% 以上。Robertson<sup>[4]</sup>在对 Silsoe 足尺建筑模型进行实测试验时, 将檐口由传统的棱角分明的直线形状改为弧形

基金项目: 上海市浦江人才计划、国家自然科学基金项目(51178352); 教育部留学回国人员科研启动基金

收稿日期: 2011-08-30

第一作者 黄 鹏 男, 博士, 副教授, 1974 年 4 月生

后,发现迎风屋面靠近檐口的 1/3 范围内,屋面吸力大为降低。

根据对我国东南沿海农村住宅的调研<sup>[5]</sup>,由于檐沟是有组织排水形式,大大满足了我国东南沿海雨水较多地区屋面排水的需要,也符合人们的审美要求,因此成为越来越普遍的檐口形式,檐沟也就成了屋面抗风不可忽略的附属物。根据我国东南沿海农村住宅的调研报告,并结合浙江省民用建筑图集<sup>[6]</sup>,本文设计了 8 种檐口形状(包括各种檐沟或挑檐),在同济大学 TJ-2 风洞进行了一系列刚性模型测压风洞试验,研究了檐口形状及附属构造对于坡屋面风压的分布影响,得出了一些有意义的结论,以便对今后低矮房屋的设计提供一定建议。

### 1 试验概况和数据处理方法

本次风洞试验是在同济大学土木工程防灾国家重点实验室风洞试验室的 TJ-2 大气边界层风洞中进行的。根据我国民用建筑的周围环境,确定本试验的大气边界层流场模拟为 B

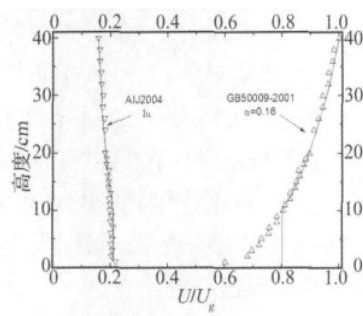


图 1 平均风速和紊流度剖面  
Fig. 1 Profiles of wind speed and turbulence intensity

类地貌风场;图 1 为风洞中模拟的 B 类地貌平均风速和紊流度剖面。

试验模型对应的实际建筑尺寸为长 10 m,宽 6 m,高 8 m,坡角有三种,分别为 14.0°、26.6°和 33.7°。模型采用了 1/20 的几何缩尺比(见图 2(a)),风速比约为 1/3。采样频率为 312.5 Hz,每个测点采样时间为 60 s。以试验风垂直吹向山墙方向为 0°风向角,按顺时针方向增加风向角,取风向角间隔为 15°。ASCE 7-05 荷载规范<sup>[7]</sup>中对于坡屋面(7° < θ ≤ 45°)进行了分区,除了屋面的屋角、边缘以及内部区域之外,靠近屋脊边缘的区域也是设计重点观察和注意的地方。故对这些地方也进行了加密(如图 2(b)所示)。模型墙体和屋面上的测点一共 378 个,三种角度的坡屋面测点总数相同,坐标轴的定义如图中所示。在模型屋面上布置了 356 个测点,见图 2(b)。根据我国东南沿海农村住宅的调研报告,并结合浙江省民用建筑图集,本文设计了 8 种檐口形状(包括各种檐沟或挑檐),见图 3。

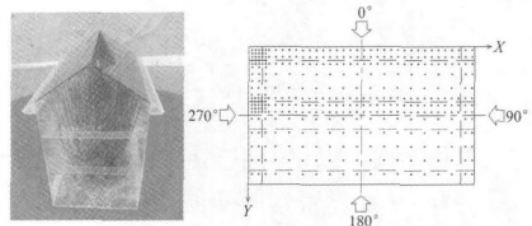


图 2 (a) 试验模型照片 (b) 测点布置和风向角定义  
Fig. 2 (a) Photo of model (b) Layout of pressure taps

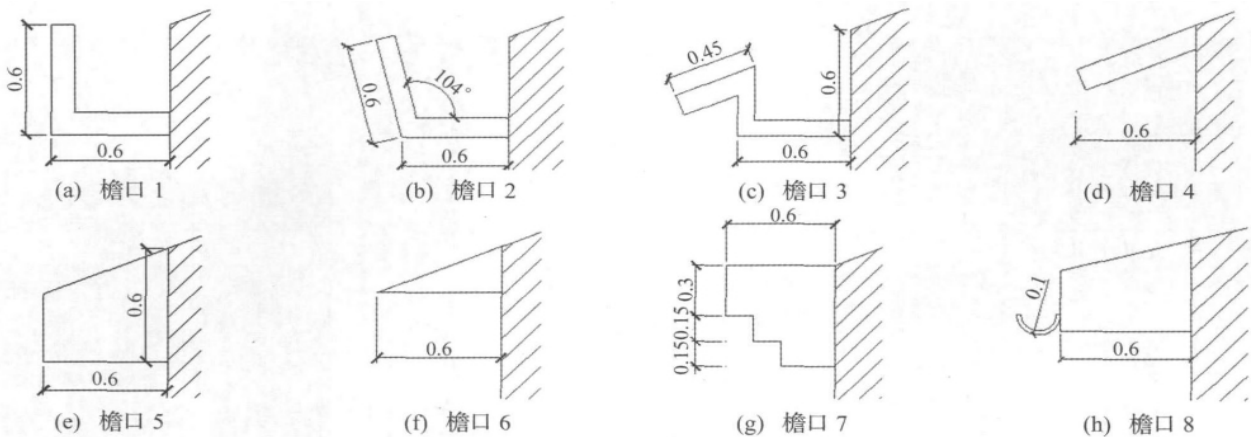


图 3 八种檐口形状图示  
Fig. 3 Eight kinds of eaves with different geometry shapes

风压系数定义:

风压系数是风致压力以无量纲化参数表达的一种形式。试验得到的各个测点的风压无量纲化后得到风压系数表达式如下:

$$C_{pi}(t) = \frac{p_i(t) - p_s(t)}{q_{Ref}} \quad (1)$$

式中:  $C_{pi}(t)$  为测点  $i$  在  $t$  时刻的风压系数,  $p_i(t)$  为测点  $i$  的测得的压力,  $p_s(t)$  为静压;  $q_{Ref}$  为参考点的动压,取屋檐高度处(即实际 8 m 高度)的动压为参考值,等于  $0.5\rho V_{Ref}^2$ 。 $\rho$  为试验空气密度,  $V_{Ref}$  为参考点高度处的风速。与局部一个点的风压相比,整体的风压或者面积平均风荷载在实际工程中更有实际意义。考虑到局部

区域内的各个点的瞬态风压之间的空间和时间相关性,采用面积平均压力系数是更合理的。为了得到墙上或者屋面上某一块区域的面积平均风压系数时程,需要每一个测点的压力时程乘以权重系数然后相加,即:

$$C_{p, \text{area}}(t) = \sum_{i=1}^n C_{p_i}(t) A_i / \sum_{i=1}^n A_i \quad (2)$$

式中:  $A_i$  对应测点  $i$  的附属面积,  $n$  代表的是该块有效面积的上所有的测点总数。

作用在结构上的风荷载总是随时空变化的,工程师们最关注的往往是风荷载中的极值,用极值验算结构的安全性,因此极值的计算方法在风工程界中一直是受到广泛关注的课题。本文采用的极值估计方法是 Davenport 提出的峰值因子法<sup>[8]</sup>。假设脉动风压服从高斯分布,并利用基于高斯过程的零值穿越理论给出峰值因子,以该峰值因子乘以脉动风压后再加上平均风压则得到极值风压。考虑面积平均后的极值风压系数计算式如下:

$$C_{p, \text{peak}} = \bar{C}_{p, \text{area}} \pm g C_{p, \text{peak}} \quad (3)$$

$$g = \sqrt{2 \ln v T} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln v T}} \quad (4)$$

式中  $v$  为单位时间内以正斜率穿越平均值的平均次数,  $T$  一般取 600 s。计算得到的  $g$  值即峰值因子,它被广泛应用于各国的规范中,本文亦利用此种方法计算极值风压系数。

## 2 气动影响效果研究

如前所述,对三种坡度的双坡低矮房屋,分别在 8 种檐口形状下进行了风洞试验。同时,也对没有任何附属檐口构造的坡屋面进行了风洞试验以作为对比,将其定义为初始檐口(檐口形状 0)。

### 2.1 平均风压系数

限于篇幅,图 4 仅给出了 14.0° 坡屋面在典型风向角(0°)下的 9 种檐口形状的平均风压系数等值线图。由图可见,对于没有任何附属檐口构造的坡屋面(檐口 0),由于坡度较低,迎风屋面负压较大,绝对值最大平均负压为 -1.8 左右。由于屋脊的出现,来流会发生二次分离,并在屋脊的背风面附近产生一个较大负压区。附属构造的出现(檐口形状 1~8),对迎风前缘的平均负压产生较大影响,而对屋脊后面背风区的负压影响较小。0° 风向下,各种附属构造均使得迎风前缘的风压均值绝对值减小,其中檐口形状 3 和 8 的效果最优,相比于初始檐口,减小幅度可达 30% 以上。

对于 26.6° 和 33.7° 坡角的坡屋面,各种附属构造也能使得迎风前缘的风压均值绝对值有所减小,但减小的幅度较 14.0° 坡角的坡屋面要小得多。

### 2.2 脉动风压系数

同样限于篇幅,图 5 仅给出了 14.0° 坡屋面 315° 风向角下的 9 种檐口形状的脉动风压系数等值线图。由图可见,对于没有任何附属檐口构造的坡屋面(檐口 0),315° 风向角下屋面迎风端的屋角处受锥形涡的影

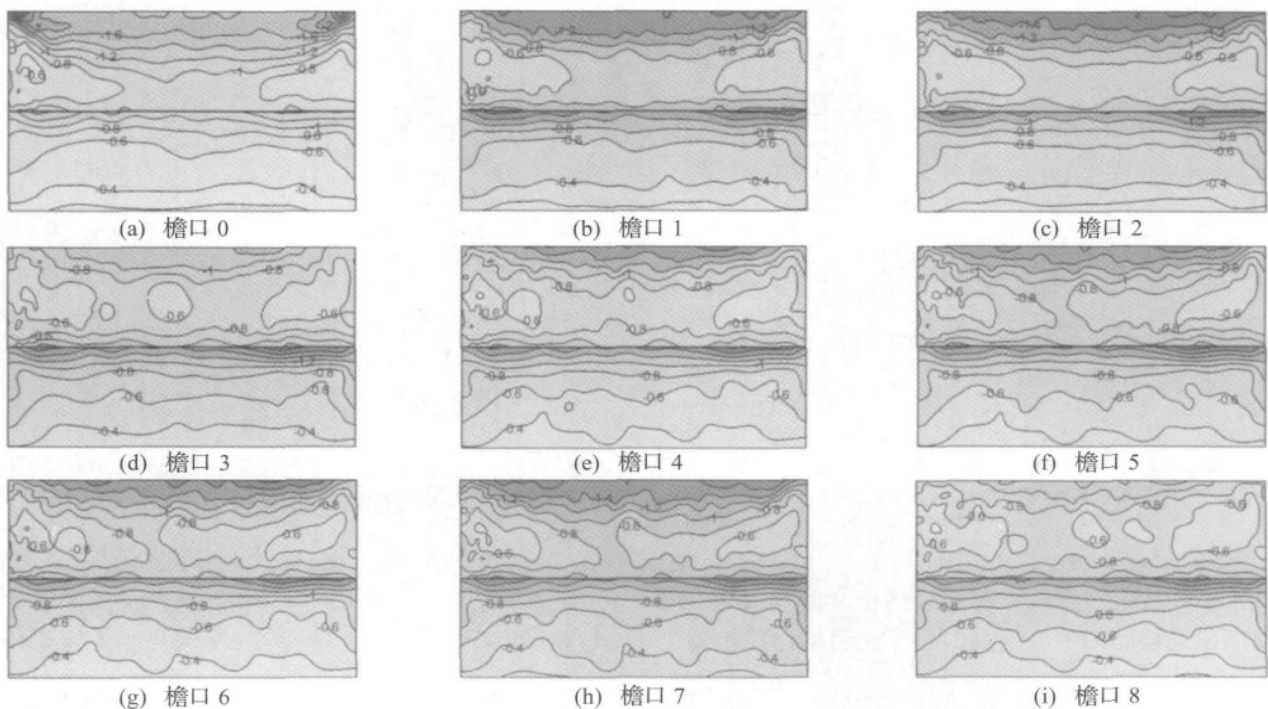


图 4 14.0° 坡屋面在 0° 风向角的平均风压系数等值线

Fig. 4 Contours of mean pressure coefficient of 14.0° roof pitch in 0° wind direction

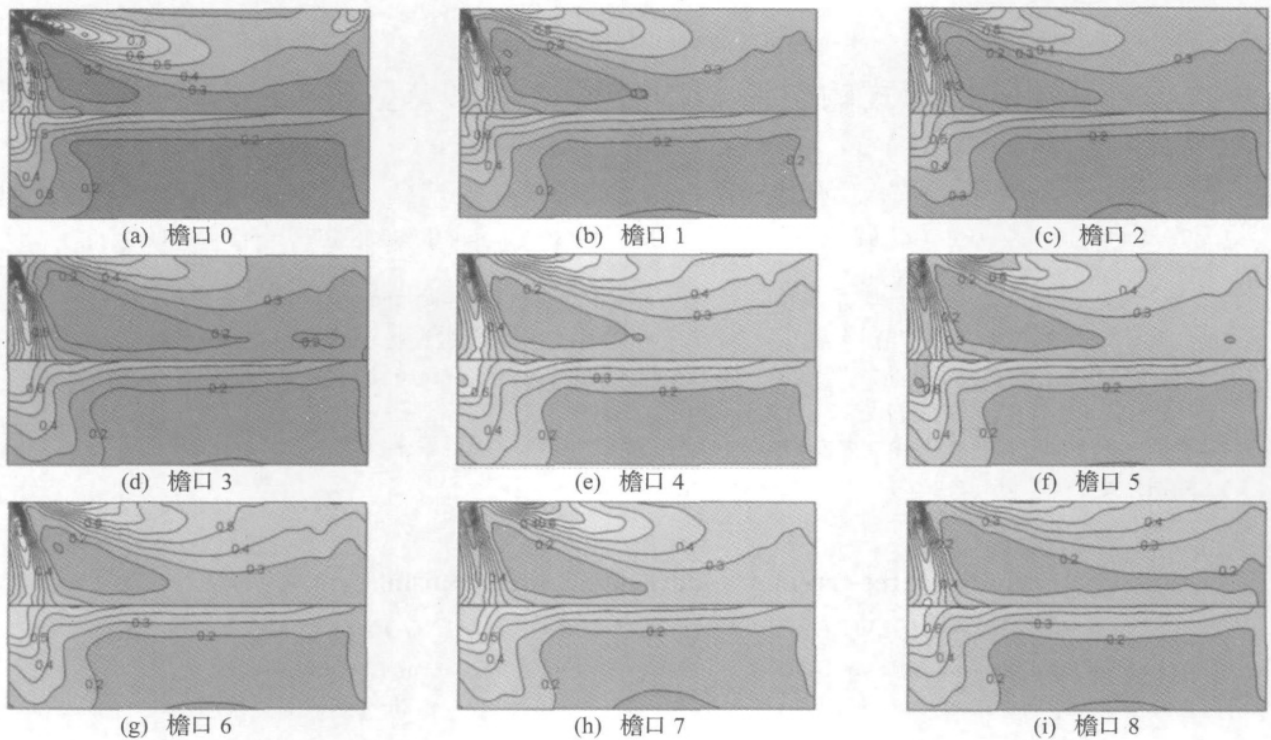


图 5 14.0°坡屋面在 315°风向角的脉动风压系数等值线

Fig. 5 Contours of fluctuating wind pressure coefficient of 14.0° roof pitch in 315° wind direction

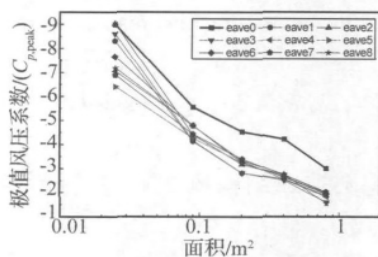
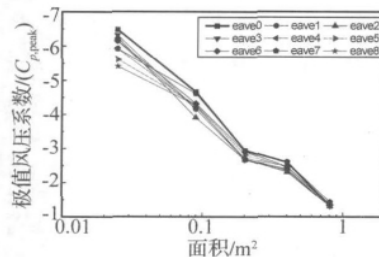
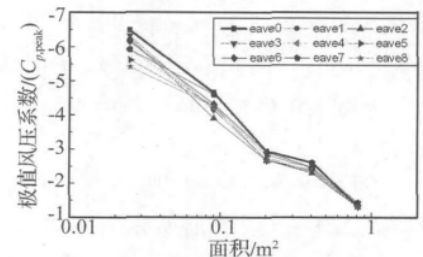


图 6 14.0°坡屋面不同形状檐口的最不利极值风压  
Fig. 6 Worst extreme values of area wind pressure coefficients of 14.0° roof pitch with different eaves



(a) 26.6° 坡角



(b) 33.7° 坡角

图 7 不同形状檐口下坡屋面的最不利极值风压  
Fig. 7 Worst extreme values of area wind pressure coefficients with different eaves

响较大,产生了很大的脉动压力。附属构造的出现(檐口形状 1~8)对屋角处的脉动压力均有一定程度的减小作用,其中檐口形状 3 和 8 的效果较佳。而对于 26.6°和 33.7°坡角的坡屋面,各种附属构造对脉动风压的影响规律类似于前述对平均风压的影响规律。

### 2.3 面积平均后的极值风压

与局部一个点的风压相比,整体的风压或者面积平均风荷载在实际工程中更有实际意义。图 6 为 14.0°坡屋面不同形状檐口的最不利极值风压随附属面积的变化曲线。由图可见,随着附属面积的增大,最不利极值风压减小得很快。对于附属面积为 0.81 m<sup>2</sup>的面积平均的最不利极值风压,初始檐口下(檐口 0)坡屋面最不利面积极值风压为 -3.01,而减小效果最好的檐口形状 3 和 8 下的坡屋面最不利极值风压为 -

1.59 和 -1.54,折减达 47% 以上,其它檐口形状也有较大的折减。这主要由于附属结构的出现一定程度上抑制了屋面来流的分离,因而对屋面在所有风向下的最不利极值有一定的削减作用。

图 7 为 26.6°和 33.7°坡屋面在不同形状檐口下最不利面积极值风压随附属面积的变化曲线。由图可见,随着附属面积的增大,最不利极值风压同样有较大的减小。附属构造的出现(檐口形状 1~8),相比于初始檐口,对最不利极值风压均有一定程度的减小作用,但减小的幅度较 14.0°坡角的坡屋面要小得多。

### 3 结论

本文选取了 8 种有特点的檐口形状,对 3 种坡  
(下转第 152 页)

kV 典型单回路酒杯型输电塔和双回路鼓型输电塔简化模型,计算了简化模型的风致响应,与根据实际结构有限元模型计算得到的响应结果进行了比较。结果表明,“串联多质点系”简化模型不适合用于格构式结构局部杆件的响应分析,但在估算结构整体受力情况,特别是计算反映结构整体特性的响应(如基底弯矩)具有很高的精度,同时,简化模型的计算效率也大大优于有限元模型。

#### 参考文献

- [1] 国家电网公司. 浙江舟山亚洲第一输电线路大跨越全线贯通 [EB/OL]. <http://www.sgcc.com.cn/xwzx/gsxw/2010/06/224790.shtml>, 2010.
- [2] Ozono S, Maeda J, Makino M. Characteristics of in-plane free vibration of transmission line systems [J]. *Engineering Structures*, 1988, 10: 272-280.
- [3] Ozono S, Maeda J. In-plane dynamic interaction between a tower and conductors at lower frequencies [J]. *Engineering Structures*, 1992, 14(2): 210-216.
- [4] 李宏男,王前信. 大跨越输电塔体系的动力特性 [J]. *土木工程学报*, 1997, 30(5): 28-35.
- [5] 李宏男,石文龙,贾连光. 考虑导线影响的输电塔侧向简化抗震计算方法 [J]. *振动工程学报*, 2003, 16(2): 233-237.
- [6] 李宏男,石文龙,贾连光. 导线对输电塔体系纵向振动的影响界限及简化抗震计算方法 [J]. *振动与冲击*, 2004, 23(2): 1-7.
- [7] 瞿伟廉,殷惠君,陈波. 输电线路动力分析的多质点模型研究 [J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2003, 20(2): 1-5.
- [8] 张庆华,顾明,黄鹏. 500 kV 单回路输电塔塔头风荷载计算模型研究 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(12): 151-154.
- [9] 张庆华,顾明,黄鹏. 格构式塔架风力特性试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(2): 1-4.
- [10] 张庆华,顾明,黄鹏. 典型输电塔塔头风力特性试验研究 [J]. *振动工程学报*, 2008, 21(5): 452-457.
- [11] 张庆华. 典型输电塔风荷载及效应研究 [D]. 上海: 同济大学, 2011.
- [12] 王肇民, Peil U. 塔桅结构 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.

(上接第 147 页)

角的双坡屋面低矮房屋进行了一系列风洞模型试验,并与没有任何附属檐口构造的坡屋面风荷载进行了对比分析,并由此得出下列结论:

(1) 屋面坡度的改变影响迎风面来流分离和再附。当屋面坡度为  $14.0^\circ$  时,无论是平均、脉动还是极值风压,迎风面都非常大;而随着屋面坡度增加,迎风面负压会逐渐减小,当达到一定的坡度时甚至会出现正压。

(2) 对于低矮双坡屋面房屋,檐口采用各种附属构造可以减小迎风屋面前檐口附近的风压(平均、脉动和面积平均的最不利极值风压),这主要由于附属结构的出现一定程度上抑制了屋面来流的分离,因而对屋面风压有一定的削减作用。而对于减小的幅度而言,  $26.6^\circ$  和  $33.7^\circ$  坡角的坡屋面要比  $14.0^\circ$  坡角的坡屋面小得多。

(3) 通过对不同几何形状的附属构造的对比,本文所示的檐口形状 3 和 8 的折减效果最好,对附属面积为  $0.81 \text{ m}^2$  的最不利面积极值风压,折减可达 47% 以上。

#### 参考文献

- [1] Stathopoulos T, Luchian H. Wind-induced forces on eaves of low buildings [J]. *Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1994, 52: 249-261.
- [2] 孙瑛,全涌,田村幸雄等. 不同屋檐类型对低矮建筑表面风荷载的影响 [C] // 第十三届全国结构风工程学术会议论文集. 大连, 2007: 837-742.
- [3] Blackmore P H. Load reduction on flat roofs-the effect of edge profile [J]. *Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1988, 29(1-3): 89-98.
- [4] Robertson A P. Effect of eaves detail on wind pressures over an industrial building [J]. *Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1991, 38(2-3): 325-333.
- [5] 黄鹏,陶玲,全涌等. 浙江省沿海地区农村房屋抗风情况调研 [J]. *灾害学* 2010, 25(4): 90-95.
- [6] 浙江省标准设计站. 05J 系列浙江省建筑标准设计图集—瓦屋面 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [7] American Society Of Civil Engineering. Minimum design loads for buildings and other structures [S]. ANSI/ASCE 7-05, ASCE, New York, 2006.
- [8] Davenport A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1964, 28: 187-196.