

# 复杂体型低矮房屋风荷载特性风洞试验研究

聂少锋<sup>1</sup>, 周绪红<sup>2</sup>, 陶莹<sup>1</sup>, 石宇<sup>2</sup>

(1. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 对具有复杂体型的“L”型和“T”型低层房屋风荷载特性进行了风洞试验研究. 研究了屋面平均和脉动风压系数的分布规律以及体型系数, 并与传统“一”型低层双坡屋面房屋的风荷载特性进行了对比分析. 结果表明: 30°坡角时, 屋檐及屋脊附近因气流分离常形成较高负压, 迎风屋面平均风压系数多呈环状分布; 当屋面处于背风区域时, 风压系数分布较均匀; “L”型和“T”型低层房屋与传统“一”型房屋相应各面体型系数变化规律有一定的相似性, 但是必须考虑各面间的相互干扰使得其风压增大的效应.

**关键词:** 双坡屋面; 复杂体型; 低层房屋; 风洞试验; 风压系数; 体型系数

中图分类号: TU312.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)06-0832-07

## Wind tunnel test on wind load characteristics of low-rise buildings with complex shape

NIE Shaofeng<sup>1</sup>, ZHOU Xuhong<sup>2</sup>, TAO Ying<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Wind tunnel test on wind load characteristics of low-rise buildings with complex shapes of “L” and “T” were presented. The distribution rules of mean wind pressure and fluctuating wind pressure coefficient of roof as well as shape coefficients of each surface were analyzed in detail. The wind load characteristics of “L” and “T” shape models were compared with which of low-rise gable roof building with traditional shape of “-”. The results show that high suction is formed on eave and ridge of windward roof because of the flow separation. The pressure coefficient on windward roof shows ring-form distribution feature when the roof pitch is 30°. The distribution of wind pressure coefficient is relatively homogeneous when the roof is in the leeward region. The changes of shape coefficient on each surface of low-rise buildings with “L” and “T” shape have certain similar regularities with which of traditional building with “-” shape. The interference effect between each surface, which increases the wind pressure, must be taken into consideration.

**Key words:** gable roof; complex shapes; low-rise buildings; wind tunnel test; wind pressure coefficient; shape coefficient

历次的台风灾害调查表明低矮房屋遭受破坏而造成的损失超过总损失的一半, 而屋面破坏是其主要破坏形式之一<sup>[1]</sup>. 对于传统“一”型低矮房屋风荷载特性, 国内外学者已做了大量研究. Case P C<sup>[2]</sup>对双坡屋面低矮房屋以及 Shakeel A<sup>[3-4]</sup>对四坡屋面低矮房屋风荷载特性进行研究, 发现屋面的局部峰值风压一般出现在迎风屋檐或屋脊附近; 在相应风向角下, 屋脊处的最大风吸力随着屋面坡度的增加而增大. Ozmen Y<sup>[5]</sup>对低层双坡屋面进行风洞试验研究发现: 迎风屋面倾角为 15°时所受风吸力影响比 30°和 45°情况下更大. Nozawa<sup>[6]</sup>采用大涡模拟的方法分析了边界层条件下湍流强度、地貌指数等参数对低矮建筑物风荷载的影响. 顾明<sup>[7]</sup>对常见低层双坡屋面房屋的风压分布进行了风洞试验和数值模拟研究, 发现

屋檐、屋脊和外墙的转角等房屋拐角区域均出现高负压和高负压梯度, 迎风挑檐有较大升力. 孙颖昊<sup>[8]</sup>对带檐口曲面双坡屋面低矮房屋进行的数值模拟分析表明: 房屋几何尺寸对曲面双坡屋面风压系数的影响很小; 水平和竖向檐口对曲坡屋面的风压分布和大小影响较大. 陶玲<sup>[9]</sup>通过风洞试验研究表明低矮房屋的屋脊和出山的共同作用能够有效减小屋面的风荷载作用. 张建胜<sup>[10]</sup>对低矮双坡屋面风压进行了数值模拟发现: 屋面坡角和风向角对屋面风压影响较大. 戴益民<sup>[11]</sup>对低矮房屋屋面的风荷载特性进行了实测研究. 王相军<sup>[12]</sup>将低矮房屋表面平均风压风洞试验、数值模拟及实测进行比较研究, 发现迎风面的屋角处是最会被破坏的地方. 聂少锋<sup>[13-14]</sup>通过风洞试验和数值分析研究了低层双坡和四坡屋面的风压系数分布特

收稿日期: 2016-01-22

修改稿日期: 2016-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578013, 51408052); 陕西省工业攻关基金资助项目(2014K06-23); 陕西省建设科技计划基金资助项目(2014-K14)

作者简介: 聂少锋(1981—), 男, 博士, 副教授, 从事钢结构、结构风工程方面研究. E-mail: niesf126@126.com

性和体型系数,发现屋面坡度和屋面形式对屋面体型系数影响较大.《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)<sup>[15]</sup>中,仅给出了考虑屋面坡度影响的双坡屋面的体型系数,对于“L”型和“T”型低矮房屋体型系数及其它影响因素均未提及.

分别对具有复杂体型的“L”型和“T”型低矮双坡屋面房屋进行风洞试验研究,研究不同风向角下屋面的平均和脉动风压系数变化规律以及各面体型系数,并与传统“一”型低矮建筑的风荷载特性进行对比分析.

## 1 风洞试验概况

### 1.1 试验模型及测点布置

刚性测压风洞试验模型由3 mm厚有机玻璃制作,保证模型在试验风速下具有足够的强度和刚度.模型的几何缩尺比为1:50,见图1.

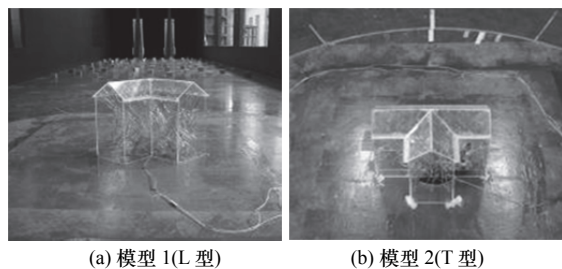


图1 试验模型  
Fig.1 Test models

模型编号及试验工况见表1,模型对应实际建筑尺寸及表面定义见图2.缩尺模型尺寸及测点布置见图3.图2中,模型1和模型2对应实际尺寸檐口高均为9.9 m,双坡屋面,屋面坡度均为30°,挑檐长度均为0.9 m,风向角为 $\beta$ .对房屋各表面进行编号定义,以图2(d)为例进行说明:0°风向角下( $\beta=0^\circ$ ),A、C1和C2面为迎风墙面,E面为背风墙面,T4和T5面为迎风屋面,T3面为背风屋面,B2和D2为左侧风墙面,B1和D1为右侧风墙面,T1和T2面为侧风屋面.

### 1.2 大气边界层风场模拟

采用粗糙元和尖劈被动模拟试验风场.大气边界层中的风速剖面以式(1)形式模拟:

$$U = U_0 (Z/Z_0)^\alpha \quad (1)$$

式中: $Z_0$ 为参考高度; $\alpha$ 为地面粗糙度指数,本文 $\alpha=1.5$ ; $U_0$ 为参考高度处风速; $Z$ 为测点高度; $U$ 为高度 $Z$ 处测点的风速.

大气边界层几何相似比为1:50.试验过程中,选取风洞中未受建筑物干扰点设置为参考高

度,本次试验参考点高度取为0.917 5 m,对应于实际高度45.875 m.试验风速13 m/s.各测点的风压数据采集频率为312 Hz,采集时间为30 s.

表1 模型编号及工况

Tab.1 Numbering and test cases of models

模型编号	屋面形式	挑檐	屋面坡度	风向角 (考虑模型对称性)
模型1	“L”型双坡屋面	有	30°	45°~225°每隔15° 一个风向角
模型2	“T”型双坡屋面	有	30°	0°~180°每隔15° 一个风向角

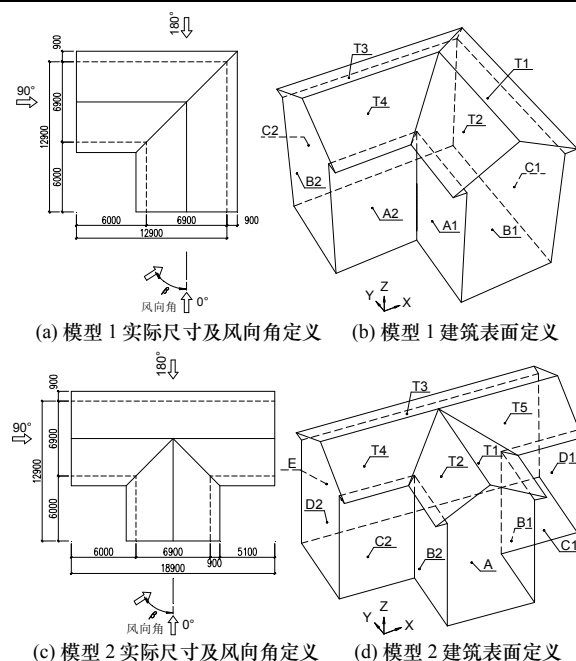


图2 模型实际建筑尺寸

Fig.2 Actual dimension of models

## 2 试验结果处理

### 2.1 平均和脉动风压系数

根据各测点风压值和参考点处的总压和静压值,首先以试验参考点处的动压为参考风压,按式(2)计算各测压点的无量纲风压系数和脉动风压系数:

$$C_{pir} = \frac{p_i - p_{r\infty}}{p_{r0} - p_{r\infty}} = \frac{p_i - p_{r\infty}}{q_r} \quad (2a)$$

$$C_{pirmsr} = \frac{\sigma_p}{p_{r0} - p_{r\infty}} \quad (2b)$$

式中: $C_{pir}$ 为第 $i$ 测点的风压系数; $C_{pirmsr}$ 为第 $i$ 测点的脉动风压系数; $p_i$ 为第 $i$ 测点的风压; $q_r=p_{r0}-p_{r\infty}$ 为参考点处的动压; $p_{r0}$ 和 $p_{r\infty}$ 分别为参考点处的总压和静压; $\sigma_p$ 为脉动风压均方根.

其次,为便于体型系数对比分析,将试验中





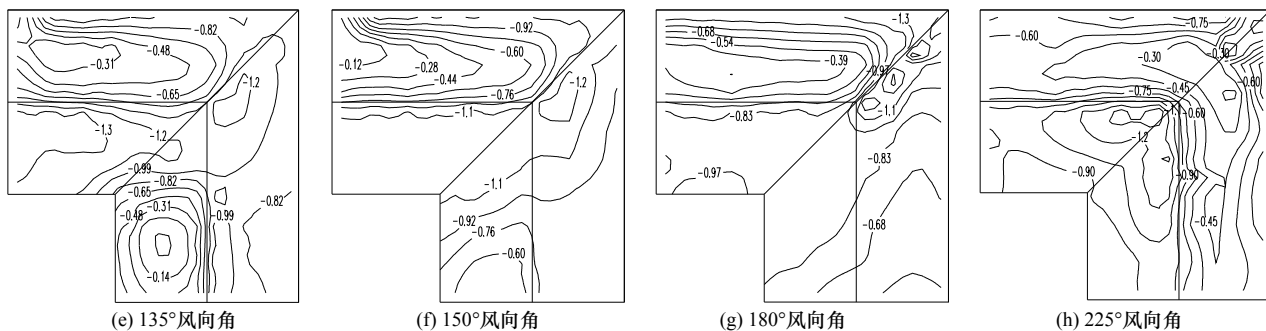


图4 模型1平均风压系数等值线

Fig.4 Isolines of mean pressure coefficient of model 1

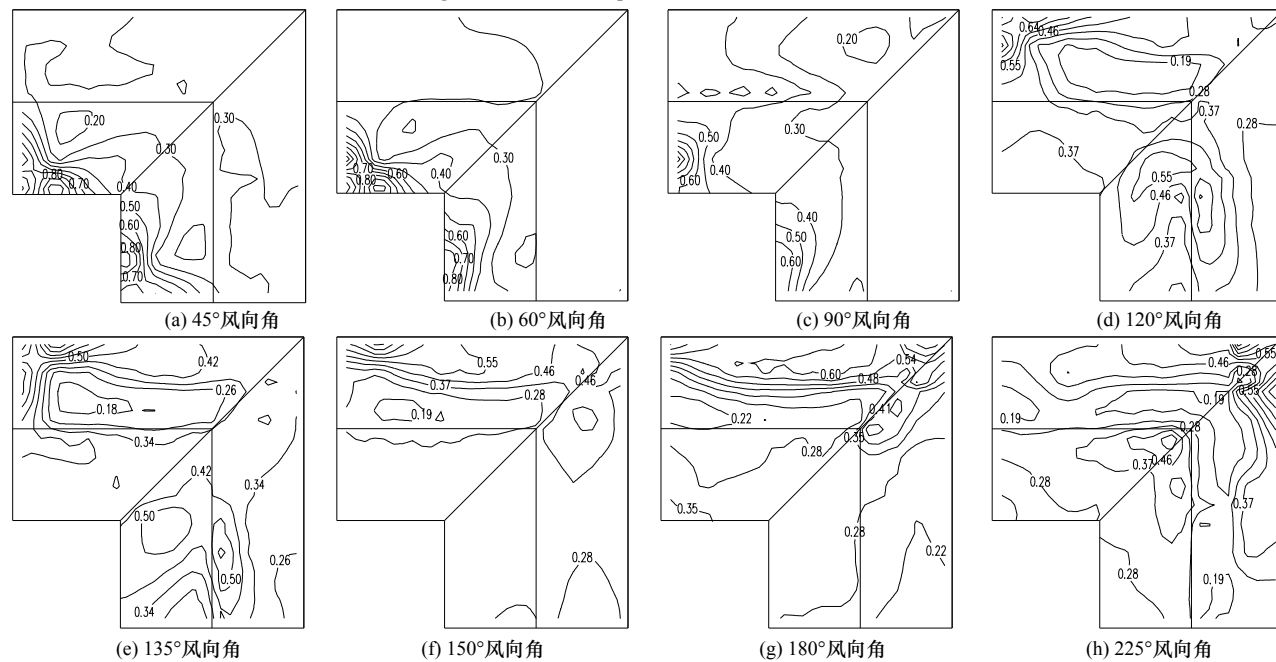


图5 模型1屋面脉动风压系数等值线

Fig.5 Isolines of fluctuating pressure coefficient of model 1

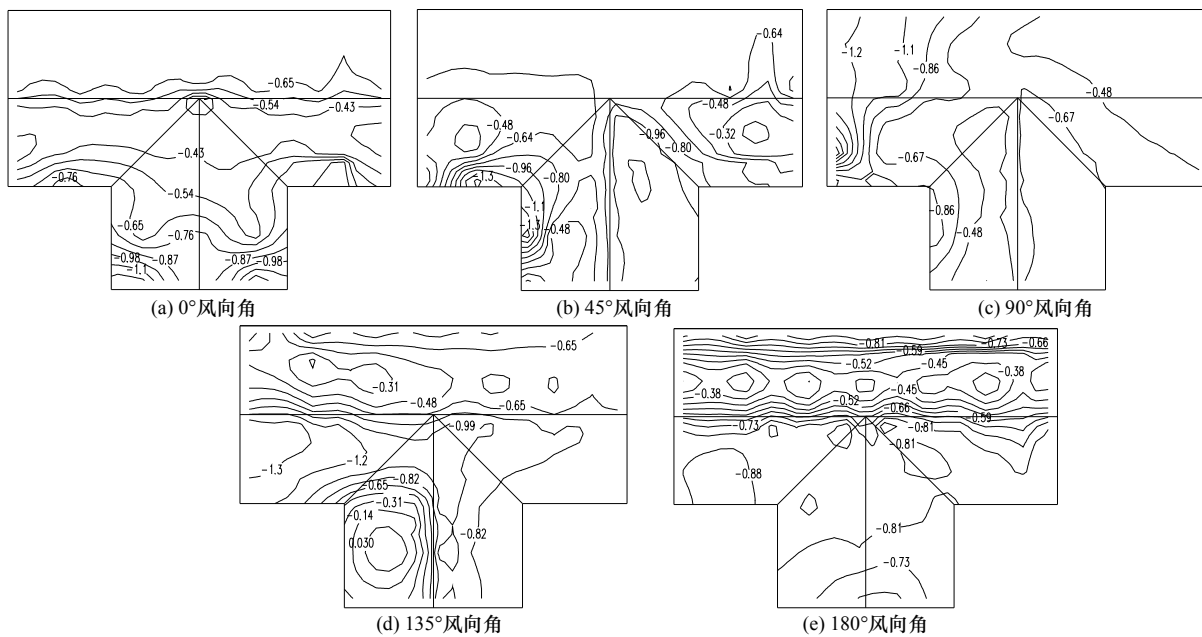


图6 模型2屋面平均风压系数等值线

Fig.6 Isolines of mean pressure coefficient of model 2

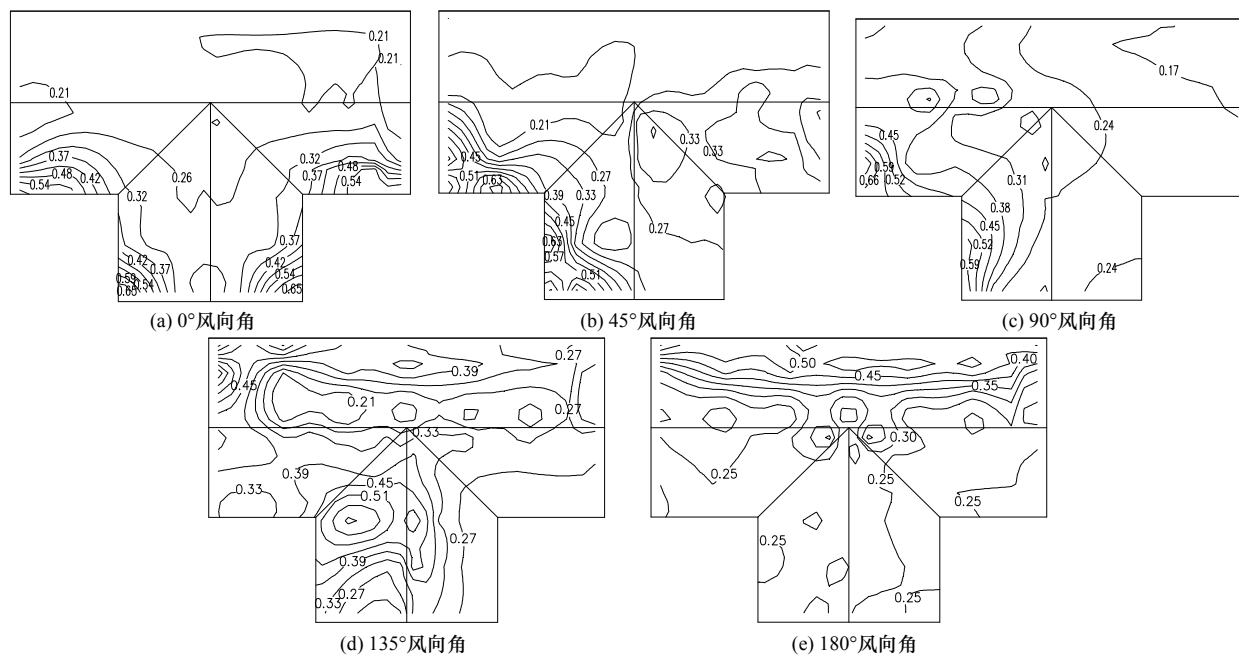


图7 模型2屋面脉动风压系数等值线  
Fig.7 Isolines of fluctuating pressure coefficient of model 2

## 4 体型系数

模型各屋面体型系数随风向角变化曲线及对比分析见图8. 图8中根据模型1的对称性, 将其各屋面在0~45°风向角下的体型系数补齐.

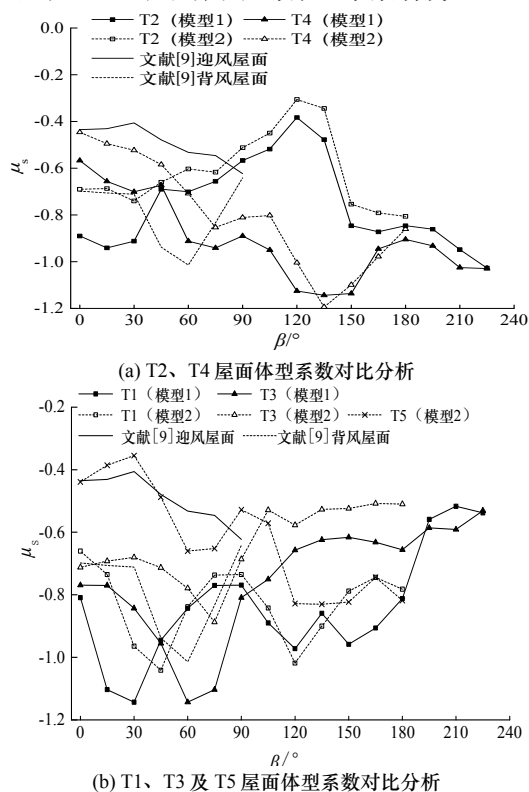


图8 各屋面体型系数随风向角变化曲线及对比分析  
Fig.8 Variation curves of shape coefficient with wind direction of roofs

### 4.1 模型1 (“L”型房屋)各面体型系数

由图8知: 在各风向角下, 四个屋面均承受负压力. T1、T2、T3 和 T4 分别在 30°、225°、60°、135° 风向角下体型系数达到最大负值 -1.143、-1.027、-1.143、-1.144. 将模型1各屋面体型系数与文献[9]中“一”型双坡屋面房屋中相应屋面体型系数进行对比分析: 90°风向角下, 迎风屋面 T2 面和背风屋面 T1 面的体型系数分别为“一”型双坡屋面房屋在 0° 风向角下迎风屋面和背风屋面体型系数的 1.3 倍和 1.1 倍; 侧风屋面 T3 和 T4 面体型系数分别为“一”型双坡屋面房屋中侧风屋面体型系数的 1.3 倍和 1.42 倍. 180°风向角下, 侧风屋面 T1 面体型系数约为“一”型双坡屋面房屋在 0° 风向角下迎风屋面体型系数的 1.5 倍; 迎风屋面 T3 面体型系数约为“一”型双坡屋面房屋中相应侧风屋面体型系数的 1.26 倍.

### 4.2 模型2 (“T”型房屋)各面体型系数

由图8知: 在各风向角下, 五个屋面均承受负压力. T1、T2、T3、T4 和 T5 面分别在 45°、180°、75°、135°、135° 风向角下体型系数达到最大负值 -1.041、-0.806、-0.887、-1.194、-0.83.

将模型2各屋面体型系数与文献[9]中“一”型双坡屋面房屋中相应屋面体型系数对比分析: 0° 风向角下, 侧风屋面 T1 和 T2 的体型系数与“一”型双坡屋面房屋在 90° 风向角下侧风屋面 T1 和 T2 的体型系数基本相等, 其值分别为 -0.66 和 -0.69 左右; 迎风屋面 T4 和 T5 面的体型系数与

“一”型双坡屋面房屋在  $0^\circ$  风向角下的迎风屋面体型系数基本相等,均为  $-0.44$  左右;背风屋面 T3 面体型系数与“一”型双坡屋面房屋背风屋面体型系数也基本相等,分别为  $-0.712$  和  $-0.698$ 。  $90^\circ$  风向角下,背风屋面 T1 面体型系数为“一”型双坡屋面房屋中背风屋面体型系数的  $1.05$  倍;迎风屋面 T2 面体型系数为“一”型双坡屋面房屋中正向迎风屋面体型系数的  $1.18$  倍;侧风屋面 T3 和 T4 面体型系数分别为“一”型双坡屋面房屋中侧风屋面体型系数的  $1.27$  倍和  $1.07$  倍。  $180^\circ$  风向角下,迎风屋面 T3 面体型系数为“一”型双坡屋面房屋中正向迎风屋面体型系数的  $1.17$  倍;背风区域屋面(T1、T2、T4 和 T5)体型系数相差不大,约为  $-0.82$  左右,是“一”型双坡屋面房屋中背风屋面体型系数的  $1.17$  倍。在该风向角下,模型 2 与“一”型双坡屋面房屋相应屋面体型系数的差异有一定原因是由房屋长度尺寸不同引起的。

## 5 结论

(1) 由于试验模型沿中心线具有对称性,在相应风向角下,风压系数也呈对称分布。在  $30^\circ$  坡角下,屋面屋檐及屋脊附近因气流分离常形成较高负压,迎风屋面风压系数多呈环状分布;当屋面处于背风区域时,平均和脉动风压系数分布相对均匀。来流方向屋檐处常有较高脉动风压系数。

(2) “L”型和“T”型低层房屋因其形状相对复杂,各面间的相互干扰较大,因此体型系数变化规律也相对复杂的多,尽管与传统“一”型房屋各面体型系数变化有一定的规律性,但是必须考虑各面间的相互干扰使得其风压增大的效应。

## 参考文献 References

- [1] 张相庭. 工程抗风设计计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.  
ZHANG Xiangting. Calculation handbook for wind resistant design of engineering[M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 1998.
- [2] CASE P C, ISYUMOV N. Wind loads on low buildings with 4:12 gable roofs in open country and suburban exposures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 77/78: 107-118.
- [3] SHAKEEL A, KRISHEN K. Interference effects on wind loads on low-rise hip roof buildings[J]. Engineering Structures, 2001, 23(12): 1577-1589.
- [4] SHAKEEL A, KRISHEN K. Effect of geometry on wind pressures on low-rise hip roof buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(7): 755-779.
- [5] OZMEN Y, BAYDAR E, BEECK J P A J V. Wind flow over the low-rise building models with gabled roofs having different pitch angles[J]. Building and Environment, 2016, 95(1): 63-74.
- [6] NOZAWA K, TAMURA T. Large eddy simulation of the flow around a low-rise building immersed in a rough-wall turbulent boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 1151-1162.
- [7] 顾明, 赵雅丽, 黄强, 等. 低层房屋屋面平均风压的风洞试验和数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(1): 82-87.  
GU Ming, ZHAO Yali, HUANG Qiang, et al. Wind tunnel test and numerical simulation of mean wind pressures on roof of low-rise buildings[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(1): 82-87.
- [8] 孙颖昊, 周岱, 陈怡然. 带檐口曲面双坡屋面风压数值模拟[J]. 空间结构, 2013, 19(1): 41-49.  
SUN Yinghao, ZHOU Dai, CHEN Yiran. Numerical simulation of wind pressure on concave gable roof with cornice[J]. Spatial Structures, 2013, 19(1): 41-49.
- [9] 陶玲, 黄鹏, 全涌, 等. 屋脊和出山对低矮房屋屋面风荷载的影响[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 113-127.  
TAO Ling, HUANG Peng, QUAN Yong, et al. Effect of ridge and protruding gable wall on wind loadings on low-rise buildings' roof[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 113-127.
- [10] 张建胜, 周锋卢, 成原, 等. 典型低矮双坡屋盖平均风压的数值模拟[J]. 浙江工业大学学报, 2014, 42(3): 302-306.  
ZHANG Jiansheng, ZHOU Fenglu, CHENG Yuan, et al. Numerical simulation study of wind pressures on typical low-rise building with gable roof[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2014, 42(3): 302-306.
- [11] 戴益民, 李秋胜, 李正农. 低矮房屋屋面风压特性的实测研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 9-13.  
DAI Yimin, LI Qiusheng, LI Zhengnong. Experimental study of wind pressures on a low-rise full-scale building[J]. Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 9-13.
- [12] 王相军, 戴益民, 闫旭光, 等. 低矮房屋表面平均风压的数值模拟和实测及风洞试验比较研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(10): 84-88.  
WANG Xiangjun, DAI Yimin, YAN Xuguang, et al. Numerical simulation, field measurements and wind tunnel of mean wind pressures on the low-rise building surface[J]. Building Structure, 2014, 44(10): 84-88.
- [13] 聂少锋, 周绪红, 石宇, 等. 低层坡屋面房屋风荷载特性风洞试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(3): 118-125.  
NIE Shaofeng, ZHOU Xuhong, SHI Yu, et al. Wind tunnel test on wind load characteristic of low-rise sloping roof buildings[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(3): 118-125.
- [14] 周绪红, 聂少锋, 周天华, 等. 低层双坡屋面建筑三维定常风场数值模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 19-29.  
ZHOU Xuhong, NIE Shaofeng, ZHOU Tianhua, et al. Numerical simulation of 3D steady atmospheric flow around low-rise gable roof building[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 19-29.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB50009-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB50009-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

(编辑 吴海西)

