

复杂体型低矮房屋风荷载特性风洞试验研究

聂少锋¹, 周绪红², 陶莹¹, 石宇²

(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 Shaofeng¹, ZHOU Xuhong², TAO Ying¹, SHI Yu²

(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^[1]. 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^[2]对双坡屋面低矮房屋以及 Shakeel A^[3-4]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^[5]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^[6]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^[7]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^[8]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面屋面的风压分布和大小影响较大. 陶玲^[9]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^[10]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^[11]对低矮房屋屋面的风荷载特性进行了实测研究. 王相军^[12]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^[13-14]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)^[15]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.

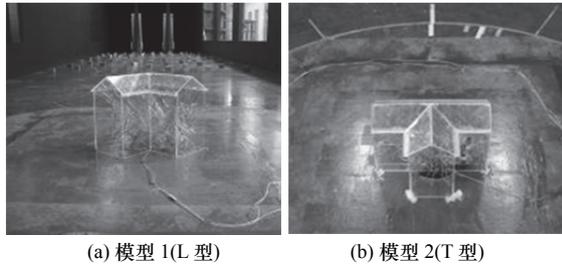


图 1 试验模型
Fig.1 Test models

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 β . 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:

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

式中: Z_0 为参考高度; a 为地面粗糙度指数, 本文 $a=1.5$; 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

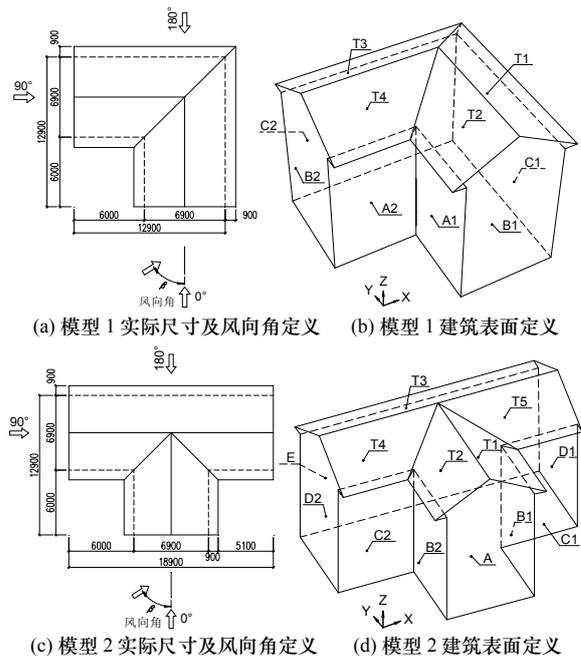


图 2 模型实际建筑尺寸
Fig.2 Actual dimension of models

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:

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

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

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; σ_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

直接测得的风压系数换算为以 10 m 高度处风压为参考风压的风压系数.

2.2 体型系数

将各测点局部体型系数按式(3)对所在面进行面积加权平均, 得到该面体型系数:

$$\mu_s = \frac{\sum \mu_{si} A_i}{\sum A_i} \quad (3)$$

式中: μ_{si} 为第 i 点局部体型系数, A_i 为第 i 点所属表面积.

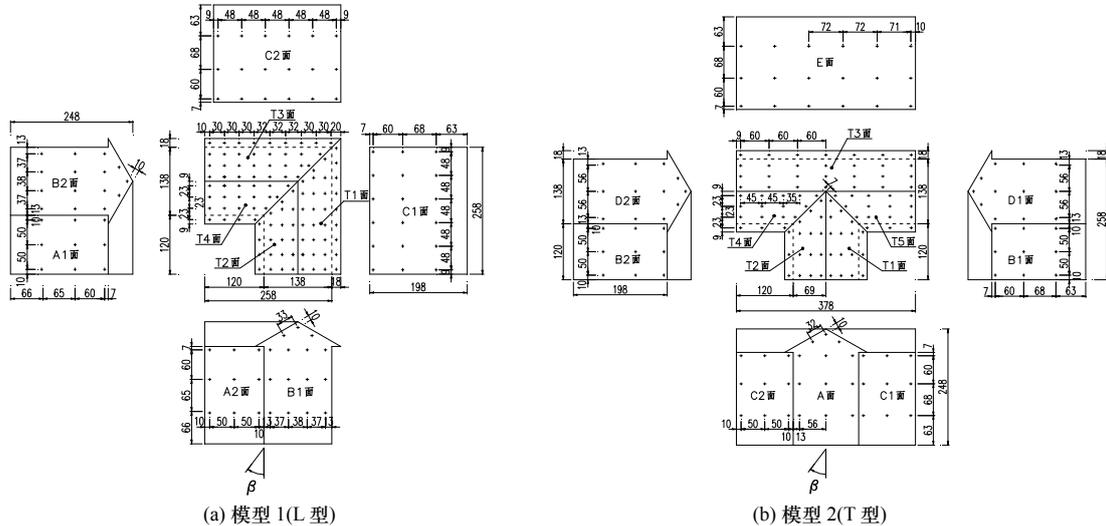


图3 模型尺寸及测点布置图

Fig.3 Dimension and pressure tapping locations of models

3 风压系数等值线

3.1 模型1平均风压系数

部分风向角下模型1屋面的平均风压系数等值线见图4. 由图4知: 45°风向角下, T2和T4面的屋檐处由于气流分离产生较大的风吸力, 而出现绝对值最大的平均负风压系数, 其值为-1.6. T1和T2面以及T3和T4面相交的阳屋脊处, 平均负风压系数绝对值较大. 绝对值最小的平均负风压系数分别出现在T2和T4面的中心区域. 背风屋面T1和T3面平均风压系数分布较均匀, 其值在-0.85~-1.0之间. 90°风向角下, 整个屋面的绝对值最大平均负风压系数为-1.7, 出现在T4面的来流风向山墙附近. T3面的平均风压系数分布很不均匀, 由靠近山墙侧的-1.3逐渐向远离来流方向减小为-0.64. T2面的平均风压系数在-0.42~-0.86之间. T1面作为背风屋面, 其平均风压系数分布非常均匀. 135°风向角下, 斜向迎风T3面的中心区域平均负风压系数较小, 为-0.31, 以环状逐渐向外增大, 屋檐和屋脊处最值为-0.99. 整个屋面的绝对值最大的平均风压系数出现在T4面阳屋脊处, 其值为-1.3. T1面的平均风压系数分布相对比较均匀, T2面的平均风压系数分布很不均匀, 由四周的-0.82逐渐向中心区域变

为0左右. 180°风向角下, 迎风面T3面平均风压系数与150°和165°风向角下的分布情况相似. T1面内以及T1与T3面的阳屋脊背后区域存在较大的负压, 绝对值最大平均负风压系数达-1.1左右, 远离来流风向的一侧的绝对值最小平均负风压系数为-0.54. T2和T3面平均风压系数分布较均匀. 225°风向角下, 屋面的绝对值最大平均负风压系数出现在背风屋面T2和T4面的阴屋脊线后部, 其值为-1.2. 绝对值最小平均负风压系数出现在斜向迎风屋面T1和T3相交阳屋脊附近区域.

3.2 模型1脉动风压系数

部分风向角下模型1屋面的脉动风压系数等值线见图5. 由图5知: (1) 45°风向角下, T2和T4面的屋檐处由于气流分离严重而产生较大脉动风压系数值0.8, 而后脉动风压系数向着屋脊方向逐渐减小. 背风屋面T1和T3面的脉动风压系数分布很均匀. (2) 90°风向角下, 整个屋面的最大脉动风压系数为0.8, 出现在T4面的来流风向靠近山墙处. 迎风面T2面屋檐附近的脉动风压系数最大为0.6. 侧风面T3面的脉动风压系数呈阶梯状. (3) 45°~90°风向角下, 背风屋面T1面的脉动风压系数分布非常均匀. (4) 135°风向角下, T3面变为迎风屋面, 该面在来流风向下, 屋檐及靠近山墙附近脉动风压系数最大, 为0.7. T2面中心区

域, 以及 T1 面内与 T2 面的屋脊背后也存在较大的脉动风压系数, 其值为 0.50. (5) 135°~210°风向角下, T4 面为背风屋面, 该面上的脉动风压系数分布均非常均匀. (6) 180°风向角下, 迎风屋面 T3 面屋檐处的脉动风压系数最大, 其值为 0.60, 而后向远离来流方向逐渐减小. T1、T2 和 T4 面上的脉动风压系数均分布相对均匀. (7) 225°风向角下, 最大脉动风压系数出现在 T1 和 T3 面迎风侧的角部, 其值达 0.55. 背风面 T2 和 T4 面在屋脊附近也存在较大的脉动风压系数.

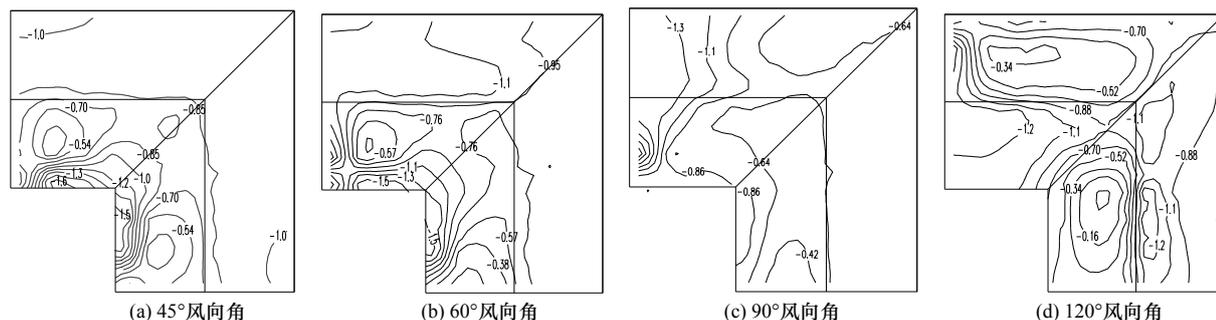
3.3 模型 2 平均风压系数

部分风向角下模型 2 屋面平均风压系数等值线见图 6. 由图 6 知: (1) 0°风向角下, 侧风屋面 T1 和 T2 面靠近迎风墙处的绝对值最大平均负风压系数达-1.1, 而后向远离来流方向逐渐减小. T4 和 T5 面的迎风屋檐处绝对值最大平均负风压系数达-0.76. 背风屋面 T3 面平均风压系数分布很均匀. (2) 45°风向角下, 迎风屋面 T2 和 T4 面平均风压系数分布沿阴屋脊线对称分布, 该面上绝对值最大平均负风压系数在檐口处为-1.3, 而绝对值最小平均负风压系数为-0.32. 背风屋面 T1 和 T3 面平均风压系数分布很均匀. T5 面由于受到 T1 和 T2 面的遮挡, 平均风压系数分布很不均匀, 在-0.16~-0.80 之间. (3) 90°风向角下, T3 和 T4 面为侧风屋面, 绝对值最大负平均风压系数出现在 T4 面上, 达-1.4. T3 面的平均风压系数分布与文献[13]“一”型双坡屋面房屋 90°风向角下侧风屋面的平均风压系数分布情况相似. 背风屋面 T1 面平均风压系数分布非常均匀. (4) 135°风向角下, T3 面变为迎风屋面, 该面上的平均风压系数分布情况与文献[13]“一”型双坡屋面房屋在 45°风向角下相同位置迎风屋面的平均风压系数分布情况相似, 屋檐与屋脊处平均负风压系数较大, 为-0.65, 中心区域平均负风压系数较小, 为-0.31. T4 面的平均风压系数由靠近山墙处的-1.3

逐渐变为屋脊处的-0.99. T2 面内中心区域的平均风压系数为 0.03, 然后以环状向四周负压逐渐增大, 绝对值最大负平均风压系数为-0.99. T1 和 T5 面上的平均风压系数分布较均匀. (5) 180°风向角下, T3 面为正迎风面, 屋檐和屋脊处均产生较大的负平均风压系数. 中心区域的平均风压系数较小. T4 和 T5 面平均风压系数分布较均匀. T1 和 T2 面平均风压系数在-0.73~-0.81 之间.

3.4 模型 2 脉动风压系数

部分风向角下模型 2 屋面的脉动风压系数等值线见图 7. 由图 7 知: 0°风向角下, 最大脉动风压系数出现在 T1 和 T2 面迎风侧的角部, 其值为 0.65, 而后向远离来流方向逐渐减小为 0.26. T4 和 T5 面的脉动风压系数由屋檐处的 0.54, 向屋脊方向逐渐减小为 0.21. 背风屋面 T3 面上的脉动风压系数分布均匀. 45°风向角下, 最大脉动风压系数也出现在迎风屋面 T2 和 T4 面的屋檐处, 其值为 0.63, 而后向远离来流方向逐渐减小. T1、T3 和 T5 面的脉动风压系数分布较均匀. 90°风向角下, 最大脉动风压系数出现在 T4 面来流风向处, 其值为 0.66. 迎风屋面 T2 面屋檐处脉动风压系数也较大, 为 0.59. T1 和 T5 面上的脉动风压系数分布很均匀. 侧风屋面 T3 面上的脉动风压系数从来流一侧的 0.38 向远离来流风向一侧逐渐减小为 0.17. 135°风向角下, T3 面上的脉动风压系数分布情况与文献[13]“一”型双坡屋面房屋在 45°风向角下相同位置迎风屋面的脉动风压系数分布情况相似, 该面迎风一侧的角部脉动风压系数最大, 而中心区域的脉动风压系数较小. 180°风向角下, T3 面上的脉动风压系数分布与文献[13]“一”型双坡屋面房屋在 0°风向角下相同位置迎风屋面的脉动风压系数分布情况相似. 靠近来流方向屋檐处出现最大的脉动风压系数 0.5, 随后向屋脊方向逐渐减小. 其余背风屋面的脉动风压系数分布均较均匀.



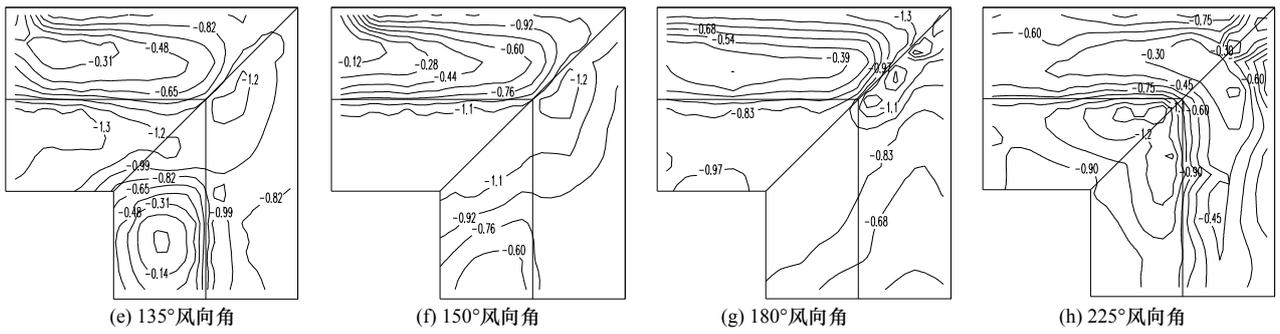


图4 模型1平均风压系数等值线
Fig.4 Isolines of mean pressure coefficient of model 1

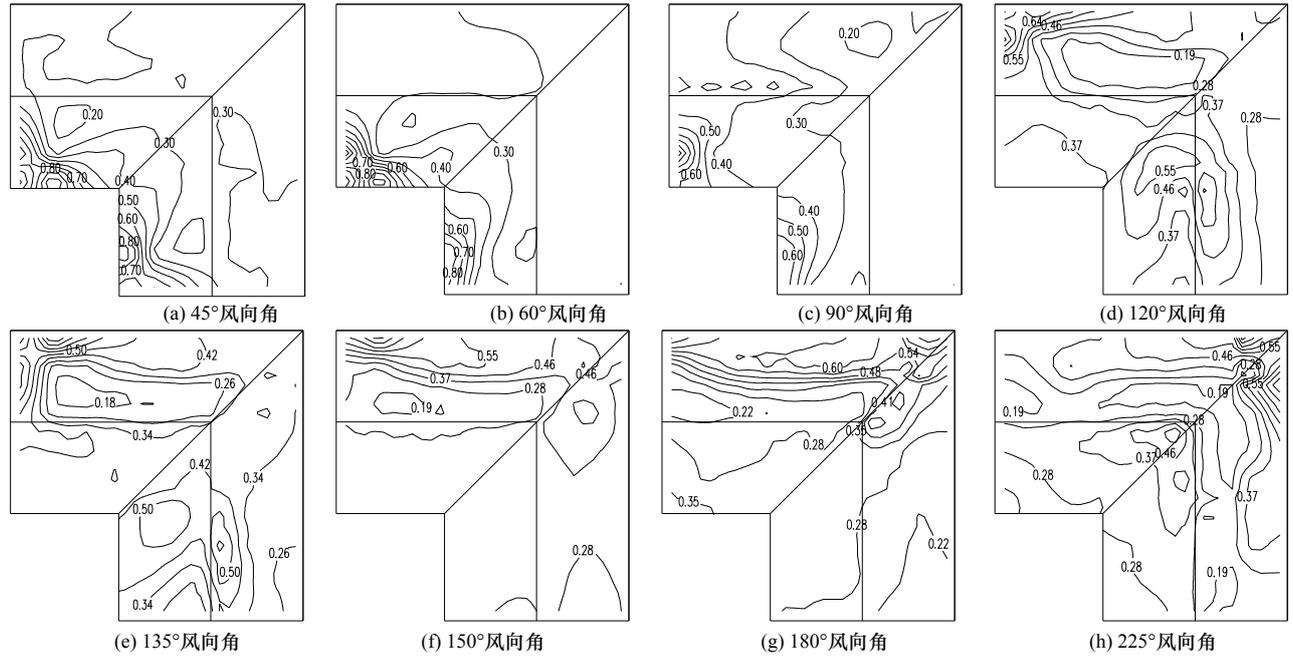


图5 模型1屋面脉动风压系数等值线
Fig.5 Isolines of fluctuating pressure coefficient of model 1

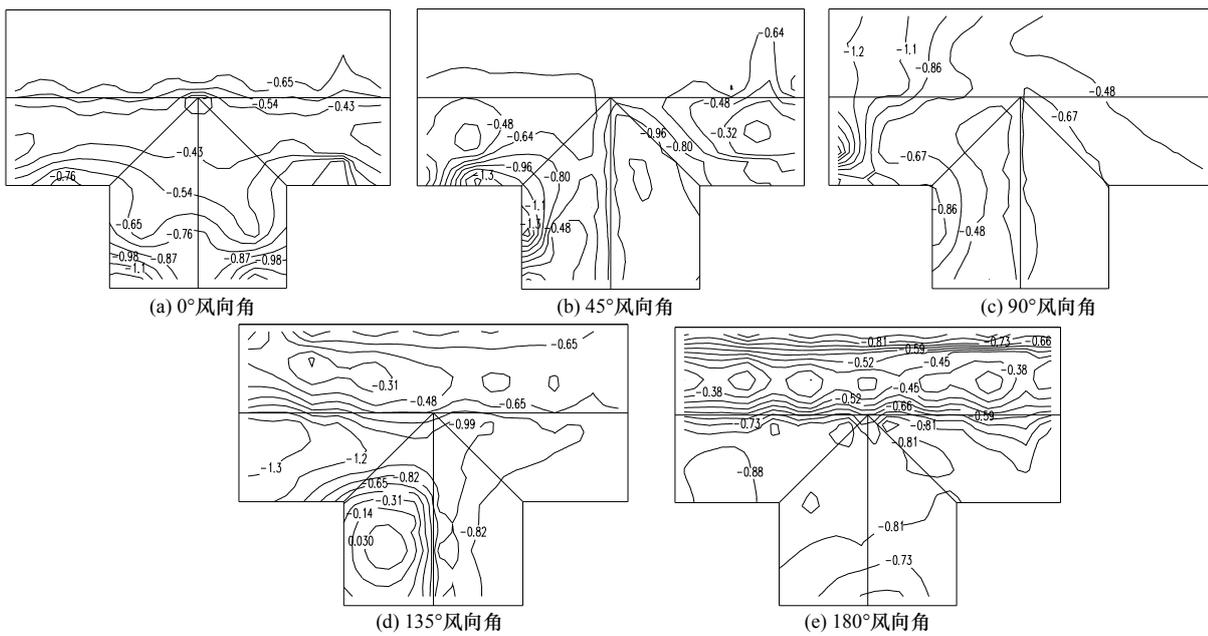


图6 模型2屋面平均风压系数等值线
Fig.6 Isolines of mean pressure coefficient of model 2

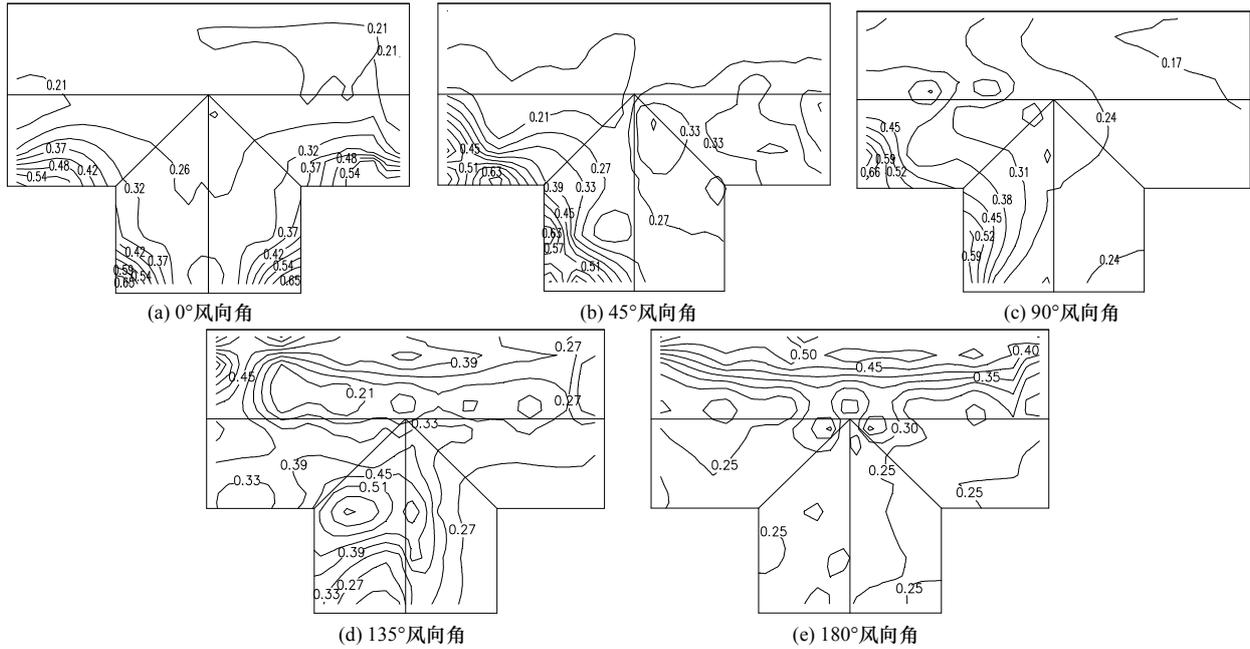


图 7 模型 2 屋面脉动风压系数等值线
 Fig.7 Isolines of fluctuating pressure coefficient of model 2

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.

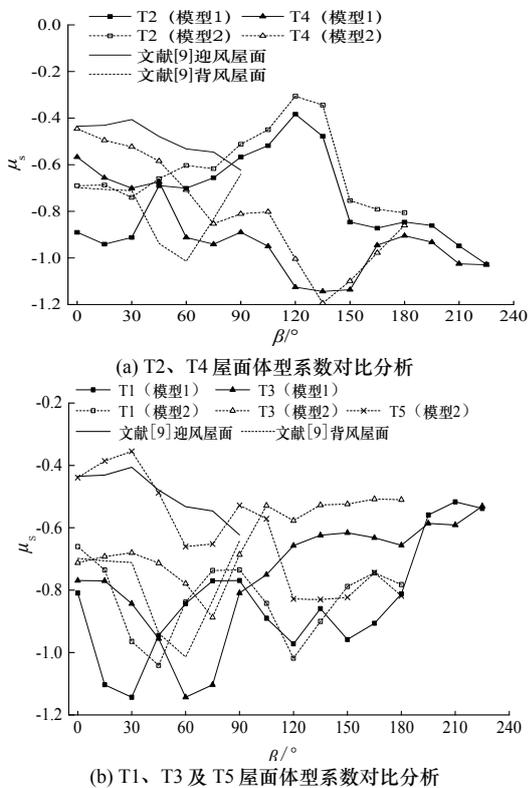


图 8 各屋面体型系数随风向角变化曲线及对比分析
 Fig.8 Variation curves of shape coefficient with wind direction of roofs

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° 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° 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° 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° 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-scall 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)

