

文章编号:1673-2049(2016)02-0031-10

平面 T 形低矮房屋风荷载特性风洞试验与数值分析

聂少锋¹, 周绪红², 陶莹¹, 周天华¹

(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:对复杂体型的平面 T 形低矮双坡屋面房屋的风荷载特性进行了风洞试验研究,得到了屋面风压系数以及各屋面体型系数的变化规律;采用计算流体力学软件 FLUENT 建立了数值风洞模型,在数值分析结果与风洞试验结果吻合良好的基础上,对影响屋面平均风压系数及体型系数的风攻角、屋面坡角、檐口高度、房屋几何尺寸和屋面形式等参数进行了详细分析。结果表明:屋面坡角和风攻角对屋面风压系数的影响显著;在不同风攻角作用下,迎风屋面屋檐及屋脊附近形成较高负压;当屋面处于背风区域时,风压系数分布较均匀;四坡屋面坡角为 30° 时屋脊背风区域易形成较大负压,局部更易遭受破坏。

关键词:低矮房屋;风洞试验;计算流体动力学;风压系数;体型系数

中图分类号:TU312 **文献标志码:**A

Wind Tunnel Test and Numerical Analysis on Wind Load Characteristic of Plan T-shaped Low-rise Buildings

NIE Shao-feng¹, ZHOU Xu-hong², TAO Ying¹, ZHOU Tian-hua¹

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

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

Abstract: Wind tunnel test on wind load characteristic of complex plan T-shaped low-rise gable roof buildings was presented. The change laws of wind pressure coefficient of roof and shape coefficient of each face were obtained. The computational fluid dynamics software FLUENT was employed to establish the numerical wind tunnel model, and the numerical simulation results agreed well with that of wind tunnel test. Then the detailed parametric analysis was performed for wind pressure coefficient and shape coefficient of roof. The parameters included wind attack angle, roof pitch, eave height, building geometry dimension and roof shape. The results show that roof pitch and wind attack angle have significantly effects on wind pressure coefficient of roof. Under the effect of different wind attack angles, high negative pressure will be formed on eave and ridge of windward roof. The distribution of wind pressure coefficient of roof in the leeward area is uniform. When the roof pitch is 30°, high negative pressure will be more easily formed in the leeward area of hip roof, so that the local area is easier to be destroyed.

Key words: low-rise building; wind tunnel test; computational fluid dynamics; wind pressure coefficient; shape coefficient

收稿日期:2015-09-28

基金项目:国家自然科学基金项目(50578013,51408052);陕西省工业攻关计划项目(2014K06-23);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G1281070)

作者简介:聂少锋(1981-),男,河北石家庄人,副教授,工学博士,E-mail:niesf126@126.com。

0 引言

台风灾后调查研究表明,对于低矮房屋来说,屋面破坏是其主要破坏形式之一^[1]。对传统低矮房屋的风荷载特性各国学者已做了大量的研究。文献[2]~[5]的研究结果表明:屋面的局部峰值风压大小与屋面坡角密切相关,且一般出现在迎风屋檐或屋脊附近;在相应风攻角下,随着屋面坡角的增加,屋脊附近的最大风吸力逐渐增大。Xu等^[6]对低矮四坡屋面房屋模型进行了风洞试验,并与文献[5]中双坡屋面试验结果进行了对比分析。王相军等^[7]采用3种湍流模型对低矮房屋模型迎风面、边缘及屋面的表面风压分布和变化规律进行了数值模拟,并将结果与风洞试验和现场实测结果进行了对比分析。顾明等^[8]通过风洞试验和数值模拟分析对常见低矮双坡屋面房屋进行了风压分布研究,发现房屋屋檐、屋脊和外墙的转角等区域出现较大风吸力,迎风挑檐有较大升力。陶玲等^[9]对L形平面低矮房屋的风洞试验研究表明,翼长增加和坡角减小均会加剧屋面的平均负压和最不利负压。周绪红等^[10-11]对低矮双坡和四坡屋面房屋风荷载特性进行了风洞试验和数值模拟研究。上述研究大多局限于简单“一”形平面房屋,实际中各种复杂体型如T形平面房屋因其美观的外形更受到人们的青睐。

由于T形平面房屋在不同屋面坡角、不同翼长及不同坡面形式等情况下的屋面风荷载特性不同,本文对平面T形低矮双坡屋面房屋进行风洞试验和数值模拟分析,研究各参数对屋面风压系数的分布及体型系数的影响。

1 试验概况

1.1 试验模型和风场模拟

测压风洞试验模型为平面T形低矮房屋,几何缩尺比为1:50,见图1。模型为刚体模型,由有机玻璃制作,在风洞中的阻塞比小于3%。

模型对应实际建筑尺寸和表面定义见图2。图2(a),(b)分别为试验模型平面图和三维图,模型实际尺寸檐口高度 H 为9.9 m,屋面坡角 θ 为 30° ,挑檐长度 B 为0.9 m,山墙宽度为 W ,房屋凸出长度为 L_1 ,两侧翼长为 L_2 ,风攻角为 β ;图2(c),(d)分别为数值分析时四坡屋面模型平面图和三维图。试验中风攻角 $0^\circ\sim 180^\circ$ 每隔 15° 为一个工况。对模型各表面进行统一定义,以图2(b)为例进行说明: 0° 风攻角下($\beta=0^\circ$), A,C_1,C_2 面为迎风墙面, E 面为

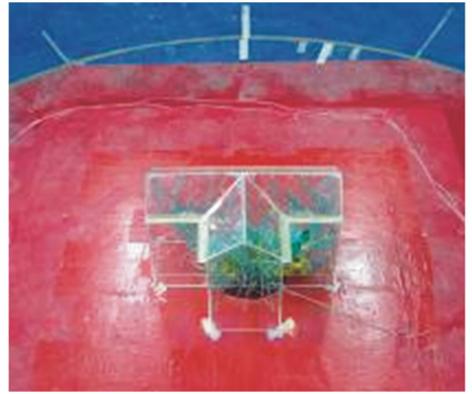


图1 试验模型

Fig. 1 Test Model

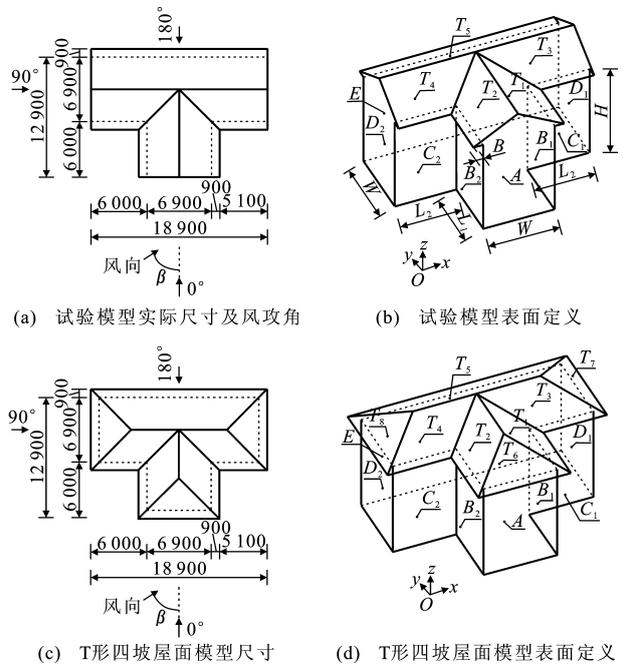


图2 模型实际尺寸和表面定义(单位:mm)

Fig. 2 Actual Dimension and Surface Definition of Models (Unit:mm)

背风墙面, T_3,T_4 面为迎风屋面, T_5 面为背风屋面, B_2,D_2 面为左侧风墙面, B_1,D_1 面为右侧风墙面, T_1,T_2 面为侧风屋面。试验模型屋面测点布置见图3。

试验风场采用被动方法模拟。大气边界层中的风速剖面按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[12]以幂函数表示,即

$$U=U_0\left(\frac{Z}{Z_0}\right)^\alpha \quad (1)$$

式中: Z_0 为参考高度; α 为地面粗糙度指数,本文仅对B类地貌风场进行模拟; Z 为测压点高度; U_0 为参考高度处风速; U 为离地面高度 Z 处的风速。

风速参考点高度为0.917 5 m,在模型缩尺比

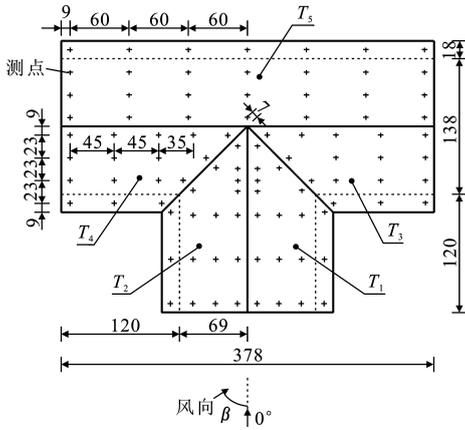


图 3 试验模型屋面测点布置(单位:mm)

Fig. 3 Measuring Point Arrangement of Roof for Test Model (Unit:mm)

为 1:50 的情况下对应于实际高度 45.875 m, 试验直接测得的各点风压系数都是以该高度处的风压为参考风压, 试验风速为 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.2 数据处理和试验结果

根据参考点处的总压和静压以及各测压点风压, 以试验参考点处的动压为参考风压, 按式(2)处理试验数据, 得到各测压点量纲一的风压系数, 并将参考高度换算为 10 m 高度, 即

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

式中: C_{pir} 为第 i 测压孔的风压系数; p_i 为第 i 测压孔的风压; q_r 为参考点处的动压; $p_{r0}, p_{r\infty}$ 分别为参考点处的总压和静压。

体型系数 μ_s 为按式(3)将局部体型系数对所在面进行面积加权平均后的结果, 即

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

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

模型各屋面平均风压系数见图 4, 屋面体型系数的变化见图 5。

2 数值分析模型的建立

基本模型与试验模型相同, 编号定义为 M3, 屋面坡角为 30° 。计算流域取 $160 \text{ m} \times 110 \text{ m} \times 70 \text{ m}$, 建筑物置于流域沿流向前 $1/3$ 处。各模型网格总数为 120×10^4 左右, 模型网格划分见图 6。

选用不可压缩的常密度空气模型, 采用三维单精度和分离式求解器, 速度压力耦合采用 SIMPLEC 算法, 对流项的离散采用 2 阶迎风格式。对壁面附近复杂的流动现象选用非平衡壁面函数来模拟。对 B 类风场的湍流强度 I 取值如下^[13]

$$I = \begin{cases} 0.23 & Z \leq 5 \text{ m} \\ 0.1 \left(\frac{Z}{350}\right)^{-0.2} & 5 \text{ m} < Z \leq 350 \text{ m} \end{cases} \quad (4)$$

选用基于雷诺平均的 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 计算中通过在入流面以直接给定湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 的方式定义来流湍流特性: $k = 1.5 (UI)^2, \epsilon = 0.09^{0.75} k^{1.5} / l, l$ 为湍流积分尺度, $l = 100(Z/30)^{0.5}$ 。

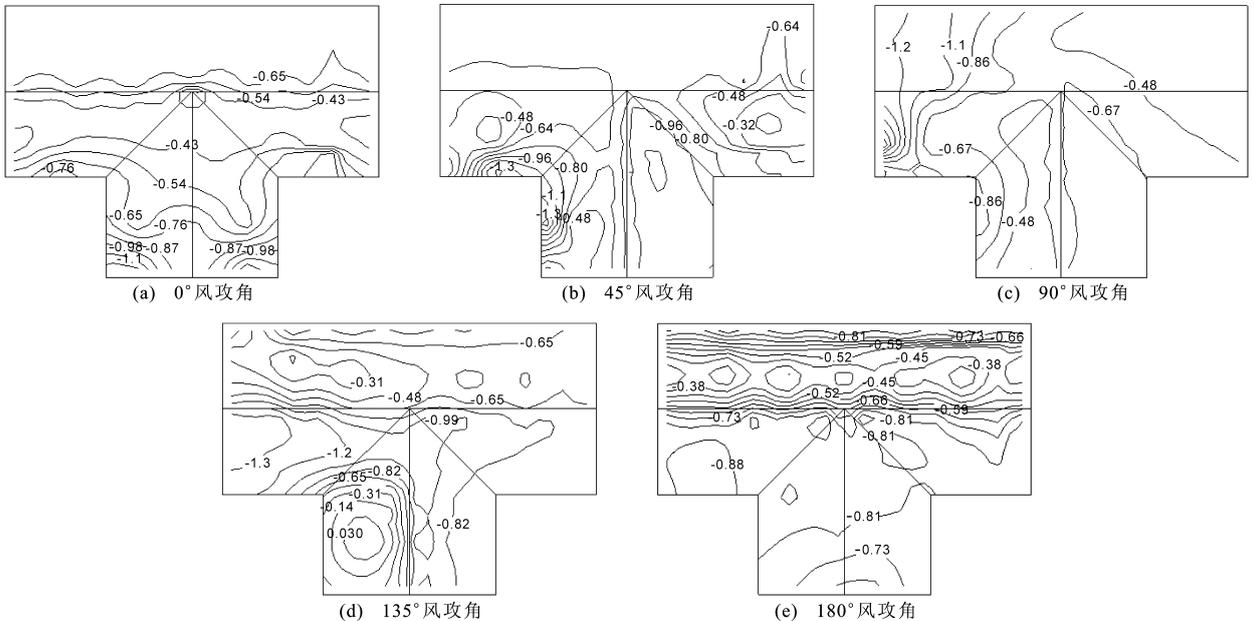


图 4 各屋面平均风压系数

Fig. 4 Mean Wind Pressure Coefficients of Each Roof

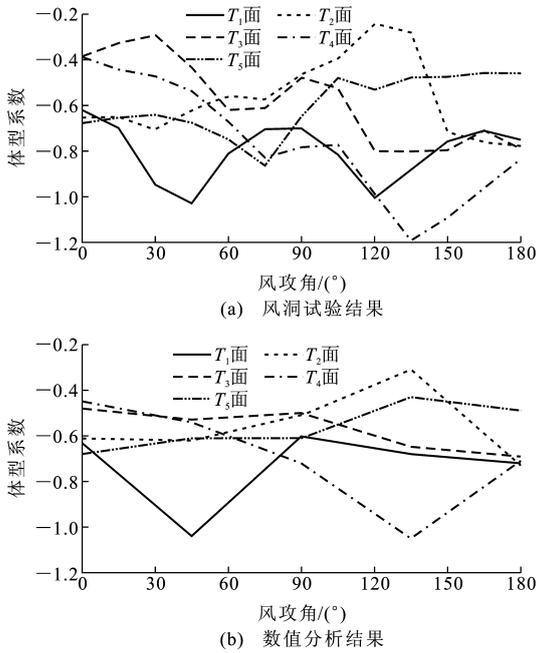


图5 屋面体型系数的变化

Fig. 5 Variations of Shape Coefficients of Roofs

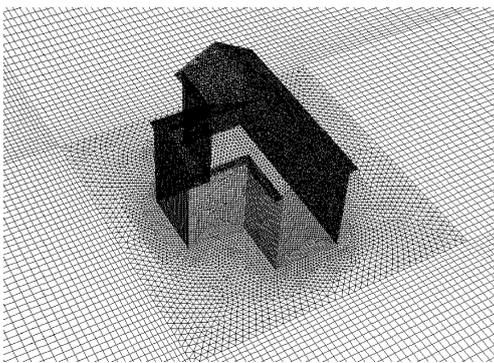


图6 模型网格划分

Fig. 6 Mesh Division of Model

3 平面T形低矮房屋风荷载特性影响因素分析

数值分析模型编号及尺寸见表1,风攻角分别为 0° , 45° , 90° , 135° , 180° 五种工况。

3.1 屋面坡角的影响

图7给出了在不同风攻角和部分屋面坡角下模型的屋面平均风压系数。模型各面体型系数随屋面坡角的变化见图8。将图4和图7中M3模型 30° 屋面坡角的屋面平均风压系数进行对比分析可知:数值分析结果与风洞试验结果具有相同的变化规律,数值吻合较好。

0° 风攻角下由于模型沿中心线具有对称性,模型各面体型系数也具有对称性。侧风屋面 T_1 , T_2 在5种屋面坡角下均承受负压力。体型系数绝对值

表1 T形低矮房屋模型编号和尺寸

Tab. 1 Numbers and Dimensions of T-shaped Low-rise Building Models

模型编号	L_1/m	L_2/m	W/m	H/m	B/m	$\theta/(^\circ)$
M1	6	6	6.9	3.3	0.9	30
M2	6	6	6.9	6.6	0.9	30
M3	6	6	6.9	9.9	0.9	15, 25, 30, 35, 45, 60
M4	6	6	6.9	13.2	0.9	30
M5	6	9	6.9	9.9	0.9	30
M6	6	12	6.9	9.9	0.9	30
M7	6	6	6.9	9.9	0.9	30

注:模型M1~M6为双坡屋面;模型M7为四坡屋面。

随着屋面坡角的增加而减小。屋面坡角为 60° 时,迎风屋面 T_3 , T_4 的体型系数均为正值,其余屋面坡角时均为负值, T_3 , T_4 面体型系数分别由 15° 时的 -0.77 , -0.83 逐渐增加到 60° 时的 0.22 , 0.21 。屋面坡角为 15° , 25° , 30° , 35° 时,背风屋面 T_5 均承受负压力,体型系数在 $-0.68\sim-0.65$ 之间,但当屋面坡角大于 35° 时,由于屋脊处钝体尖角突显,钝体绕流气流分离而导致背部形成较大的漩涡,此时 T_5 面所受吸力较大, 60° 屋面坡角时体型系数为 -0.94 。

45° 风攻角下迎风屋面 T_2 , T_4 受屋面坡角的影响最大。随着屋面坡角的增加,背风屋面 T_1 上的风压系数分布逐渐均匀,较大负压出现在屋脊背部,体型系数受屋面坡角的影响较小,且均为负值。 T_3 面位于 T_1 , T_2 面的背部尾流区域,其风压系数呈环状分布,体型系数均为负值,且随着屋面坡角的增加,其绝对值逐渐增大。背风屋面 T_5 均承受负压力,且分布非常均匀。

90° 风攻角下背风屋面 T_1 的体型系数受屋面坡角的影响较小,其值在 $-0.61\sim-0.53$ 之间。随着屋面坡角的增加,迎风屋面 T_2 的体型系数由负值逐渐变为正值;侧风屋面 T_4 的体型系数绝对值逐渐减小。 T_3 面位于 T_1 面的尾流区域,其体型系数由 -0.34 变为 -0.62 ,即体型系数绝对值随屋面坡角的增加而增大。侧风屋面 T_5 的体型系数绝对值随屋面坡角的增加而增大。

135° 风攻角下斜向迎风屋面 T_5 和尾流区域的 T_2 面受屋面坡角的影响最大,其中 T_5 面体型系数由负值逐渐变为正值,即由 -0.84 变为 0.22 , T_2 面均为负压,体型系数的绝对值随屋面坡角的增加而增大,即由 -0.25 变为 -0.81 。背风区域的 T_1 , T_3 , T_4 面体型系数受屋面坡角的影响较小。

180° 风攻角下迎风屋面 T_5 受屋面坡角影响最

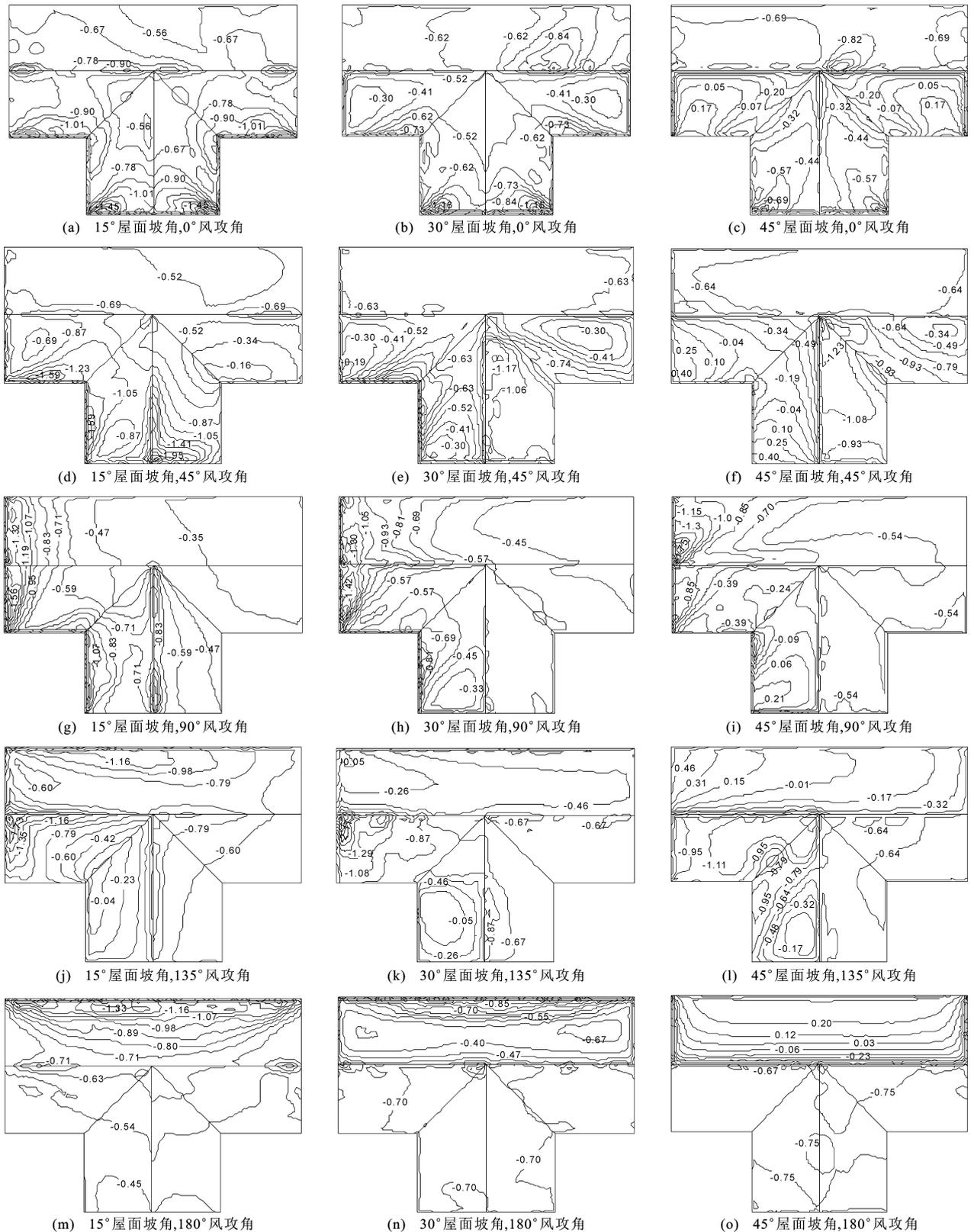


图 7 部分屋面坡角下的屋面平均风压系数

Fig. 7 Mean Wind Pressure Coefficients of Roof Under Different Roof Pitches

大,该面的体型系数表现出由较大的负压逐渐变为正压的规律,即随着屋面坡角的增加,其值由 -0.88 变为 0.41 。由于模型的对称性, T_1 面和 T_2 面, T_3

面和 T_4 面的风压系数分布完全对称,且非常均匀。体型系数绝对值随屋面坡角的增加而逐渐增大,由 0.50 增大到 0.95 。

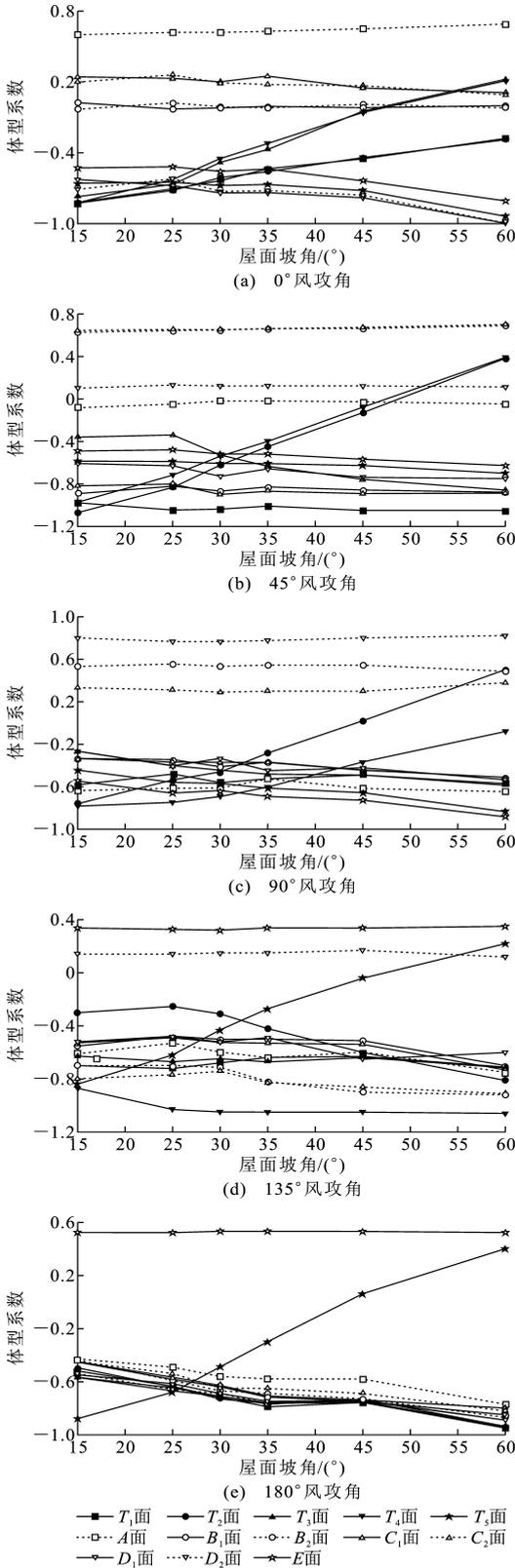


图8 体型系数随屋面坡角的变化

Fig. 8 Variations of Shape Coefficients with Roof Pitches

3.2 檐口高度的影响

3种檐口高度下房屋表面体型系数随檐口高度变化曲线见图9,屋面平均风压系数见图10。

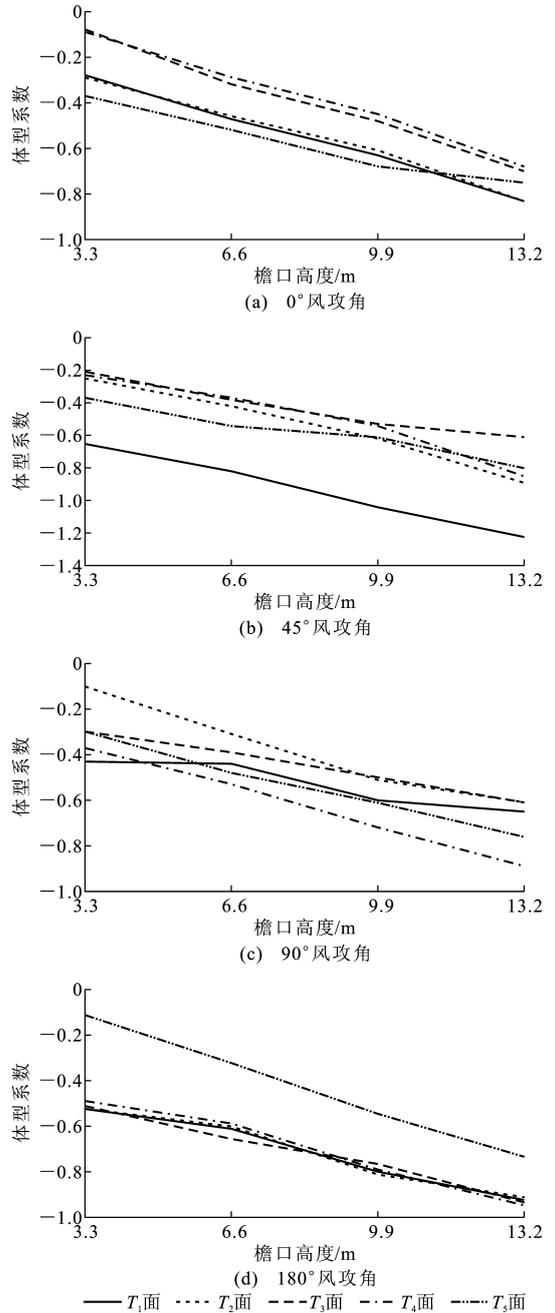


图9 体型系数随檐口高度的变化

Fig. 9 Variations of Shape Coefficients with Eave Heights

由图9,10可知,各屋面体型系数均为负值,且其绝对值均随檐口高度的增加而增大。 0° 风攻角下 T_1, T_2 面的最大风压系数出现在来流迎风山墙屋檐处。背风屋面 T_5 的负压分布非常均匀。 45° 风攻角下 T_2, T_4 面的迎风一侧檐口处风压系数较小,而后向屋脊方向逐渐增大, T_3 面上风压系数呈环状分布,背风屋面 T_1, T_5 上的负压分布非常均匀。 90° 风攻角下各模型的最大风压系数均出现在侧风屋面 T_4, T_5 的来流方向山墙气流分离处,而后向着远离来流方向逐渐减小。背风屋面 T_1, T_3 的负压分布

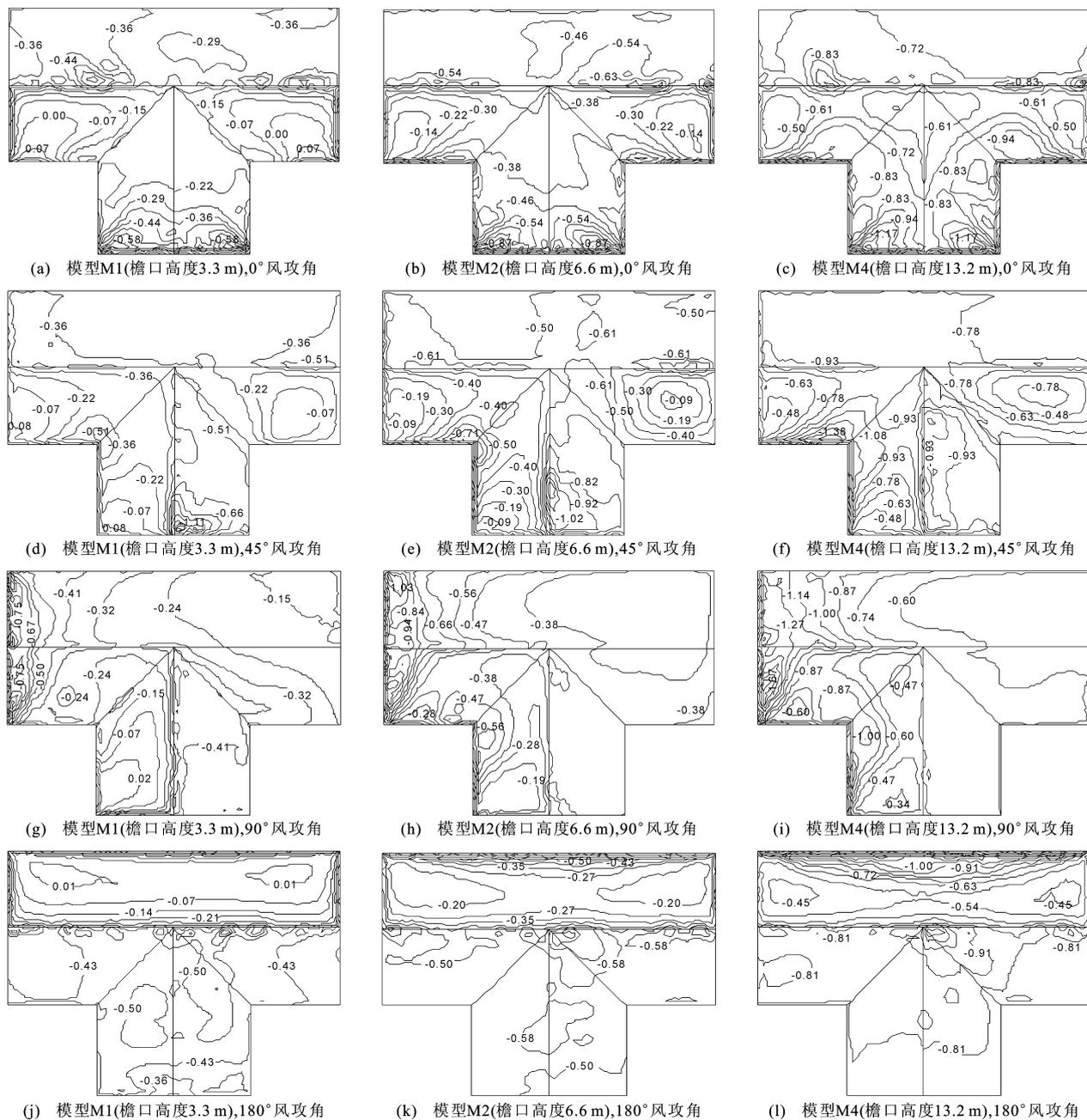


图 10 不同檐口高度下平均风压系数

Fig. 10 Mean Wind Pressure Coefficients Under Different Eave Heights

非常均匀。135°风攻角下 T_4 面靠近来流方向的屋脊背后负风压系数为整个屋面的最大负风压系数,其值为 -1.92 。背风屋面 T_1, T_3 上风压系数分布非常均匀。180°风攻角下迎风屋面 T_5 的迎风屋檐处和屋脊处出现最大风压系数,该面的中心区域风压系数相对较小。背风屋面 T_1, T_2, T_3, T_4 的风压系数分布较为均匀。

3.3 房屋几何尺寸的影响

房屋不同翼长下的屋面平均风压系数见图 11, 体型系数随翼长的变化见图 12。0°风攻角下房屋

翼长对迎风屋面 T_3, T_4 的体型系数影响较小, 体型系数在 $-0.48 \sim -0.44$ 之间。翼长对侧风屋面 T_1, T_2 以及背风屋面 T_5 面体型系数的影响较大。45°风攻角下翼长对斜向迎风屋面 T_2, T_4 以及背风屋面 T_5 体型系数的影响较小。对背风屋面 T_1, T_3 体型系数的影响较大, 随着翼长的增大, T_1 面体型系数绝对值逐渐减小。90°风攻角下屋面均承受负压力, 随着翼长的增大, 各屋面体型系数绝对值逐渐减小, 但是当翼长增大到一定程度时, 各面体型系数随翼长变化将不再明显。

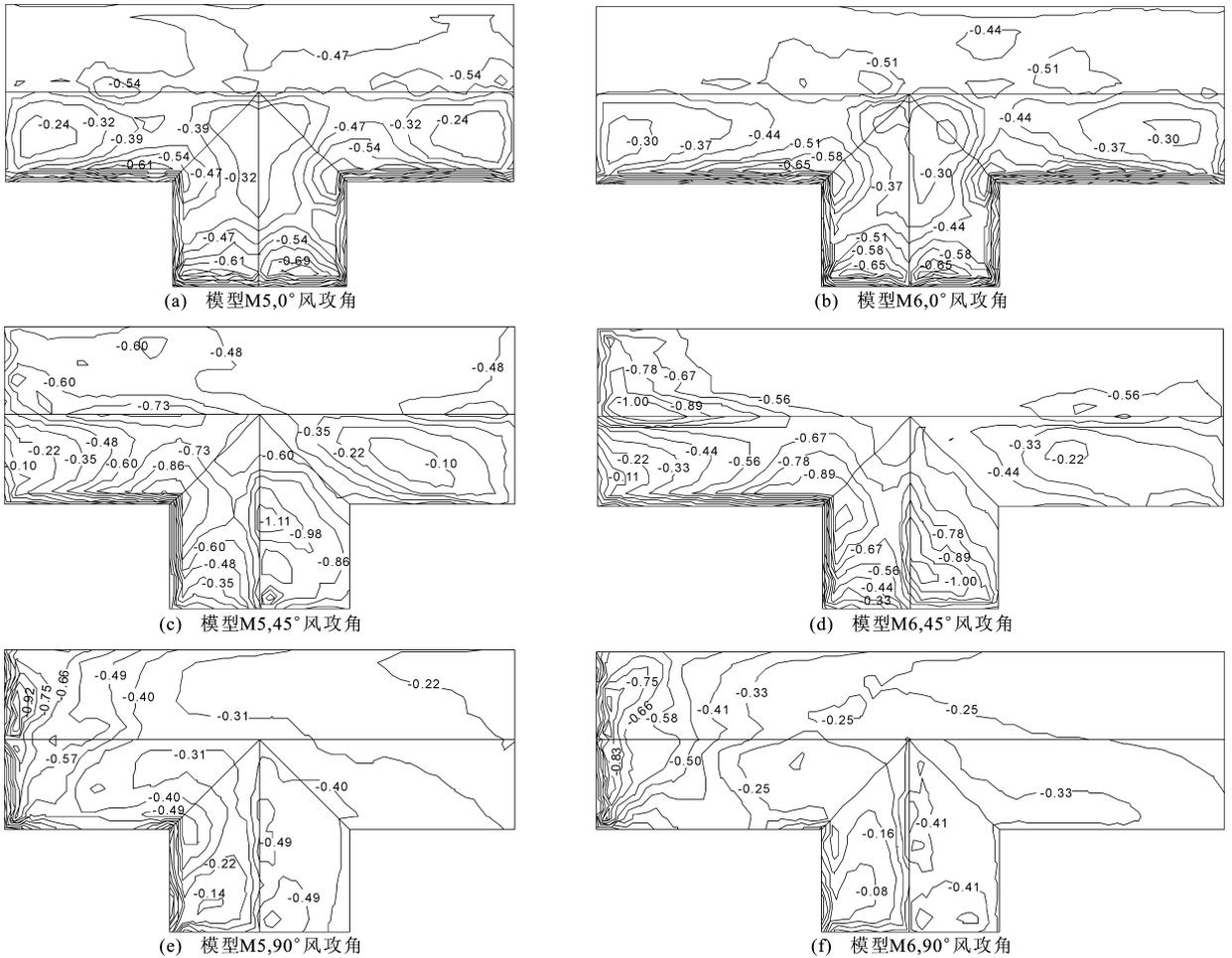


图 11 不同翼长下平均风压系数

Fig. 11 Mean Wind Pressure Coefficients Under Different Lengths of Wings

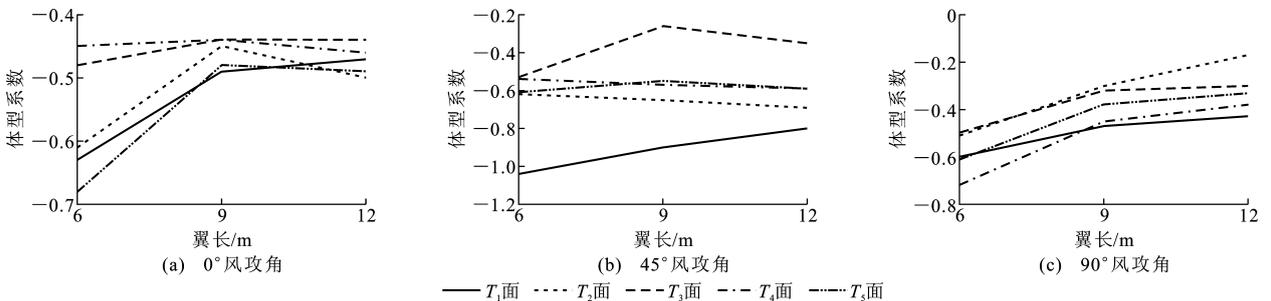


图 12 体型系数随翼长的变化

Fig. 12 Variations of Shape Coefficients with Lengths of Wings

3.4 屋面形式的影响

保持基本模型 M3 尺寸及屋面坡角为 30° , 仅将双坡屋面改为四坡屋面, 建立模型 M7, 屋面平均风压系数见图 13。四坡屋面阳屋脊相对较多, 在阳屋脊的背风区域易出现较大负压, 这些负压向远离来流方向逐渐减小。

0° 风攻角下 M3 模型侧风屋面 T_1, T_2 的体型系数大于 M7 模型, M3 模型 T_1, T_2 面上的最大负风压系数为 -1.16 , 而在 M7 模型中仅为 -0.59 , 这是

因为 M7 模型中迎风一侧 T_1, T_2 面气流分离处的负压被 T_6 面有效地减小了。M7 模型屋面上的最大负压系数 -1.16 出现在 T_4 面与 T_8 面, T_3 面与 T_7 面相交的阳屋脊背后区域, 使得 T_7, T_8 面的体型系数高达 -0.81 。因此, M7 模型 T_3, T_4 面的体型系数略小于 M3 模型。背风屋面 T_5 的体型系数在 M3, M7 模型中相差不大。

45° 风攻角下四坡屋面各屋面的风压系数分布情况与双坡屋面相比变化较大。M7 模型中的最大

- 民房破坏的调查[J]. 浙江建筑, 1995, 12(4): 19-23.
SUN Bing-nan, FU Guo-hong, CHEN Ming, et al. Survey of Building Destroy in Wenzhou Under Typhoon No. 9417[J]. Zhejiang Construction, 1995, 12(4): 19-23.
- [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] AHMAD S, KUMAR K. Interference Effects on Wind Loads on Low-rise Hip Roof Buildings[J]. Engineering Structures, 2001, 23(12): 1577-1589.
- [4] AHMAD S, KUMAR 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] HOLMES J D. Wind Pressures on Tropical Housing [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 53(1/2): 105-123.
- [6] 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(3): 267-284.
- [7] 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 Xiang-jun, DAI Yi-min, YAN Xu-guang, 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.
- [8] 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 Ya-li, 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.
- [9] 陶玲, 黄鹏, 顾明, 等. L形平面低矮房屋屋面的风荷载特性[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(11): 1586-1591.
TAO Ling, HUANG Peng, GU Ming, et al. Wind Loading Characteristic of Low-rise Buildings Roof with L-shape Plan [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(11): 1586-1591.
- [10] 周绪红, 聂少锋, 周天华, 等. 低层双坡屋面建筑三维定常风场的数值模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 19-29.
ZHOU Xu-hong, NIE Shao-feng, ZHOU Tian-hua, et al. Numerical Simulation of 3D Steady Atmospheric Flow Around Low-rise Gable Roof Building [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 19-29.
- [11] 聂少锋, 周绪红, 石宇, 等. 低层四坡屋面房屋风荷载的风洞试验与数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(3): 39-49.
NIE Shao-feng, ZHOU Xu-hong, SHI Yu, et al. Wind Tunnel Test and Numerical Simulation of Wind Loads on Low-rise Hip Roof Buildings [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(3): 39-49.
- [12] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012, Load Code for the Design of Building Structures[S].
- [13] AIJ 2004, AIJ Recommendations for Loads on Building[S].