

# 罩棚式低矮房屋屋面风荷载特性及气动防风措施研究

刘 帅<sup>1,2</sup>, 谢壮宁<sup>1</sup>, 石碧青<sup>3</sup>

(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东广州 510641;

2. 东莞电力设计院, 广东东莞 523009; 3. 汕头大学 土木工程系, 广东汕头 515063)

**摘要:**采用模型的风洞试验详细研究了矩形和圆形罩棚屋面结构的平均风压和峰值风压分布特征,分析了屋面风致破坏的主要原因,在此基础上实施了7种不同的屋面局部修改方案的对比试验,从中筛选出可以有效消减屋面风荷载的防风措施。两种平顶矩形和圆形罩棚屋面结构均以负压为主,试验测得两结构屋面的最高平均负压系数分别为-1.83和-0.97,相应最高极值负压系数为-5.41和-3.11,结果远高于GB 50009—2001《建筑荷载规范》推荐的平均风压乘以阵风系数的方法,这显示规范中的阵风系数方法并不适合于计算该类屋面结构的风压值。根据分析结果给出了平顶矩形和圆形罩棚屋面结构风压体型系数取值的建议值,采用斜切角形式的屋檐或在屋面板和侧面围板交界处开贯通通风槽方式可以使屋面风敏感区域的极值负压削减25%~35%。

**关键词:**罩棚式屋面; 风荷载; 风洞试验; 平均风压; 极值风压

**中图分类号:**TU393.3 TU312.1 TU317.1 **文献标志码:**A

## Study on wind loads on flat roof of canopied low-rise building and aerodynamic strategy for wind load reduction

LIU Shuai<sup>1,2</sup>, XIE Zhuangning<sup>1</sup>, SHI Biqing<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Dongguan Electric Power Design Institute, Dongguan 523009, China;

3. Department of Civil Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China)

**Abstract:** The distributions of mean wind pressure and extreme wind pressure on flat roof of rectangular and circular canopy structure models were investigated in a boundary layer wind tunnel. The mechanism of wind-induced damages of the canopy roof was analyzed. Generally, the cladding design of those canopy structures is dominated by suction wind pressures. The results show that the maximum mean negative pressure coefficients on the rectangular and circular canopy reach -1.83 and -0.97, respectively, and the maximum peak negative pressure coefficients are found to be -5.41 and -3.11 which are much more than the values proposed by the gust factor approach of GB 50009. This indicates that the gust factor approach is not suitable for the calculation of roof pressure on the envelope structures. According to the characteristics of wind loads on the canopy, several aerodynamic strategies to reduce the maximum suction wind pressure at wind sensitive locations on the canopy by venting the leading edges and chamfering the roof edge were recommended. The experimental results show that the suggested strategies can make a reduction of 25% ~ 35% wind load on the roof's sensitive locations. Based on the analysis results, the local shape factors for the rectangular and circular canopy structures were recommended.

**Keywords:** canopied low-rise building; wind load; wind tunnel test; mean wind pressure; extreme wind pressure

基金项目:国家自然科学基金项目(50778108),国家科技支撑计划项目(2006BAJ06B05-3)。

作者简介:刘帅(1983—),男,新疆喀什人,工学硕士。E-mail:liushuai\_20@126.com

通讯作者:谢壮宁(1963—),男,广东汕头人,工学博士,教授。E-mail:znxie@scut.edu.cn

收稿日期:2010年1月

## 0 引言

以加油站(或高速公路收费站)罩棚为代表的—类典型低矮建筑,通常以平屋顶为主,四面开敞,由按一定规则排列的柱将顶棚撑起,顶棚多采用球形网架结构,网架的上表面与周边用彩色压型钢板(或其它覆面材料)包裹。在强风作用下,罩棚式低矮建筑发生整体破坏的情况并不多见,但其屋面局部被掀开以致整个屋面遭受破坏的例子却屡见不鲜,严重影响了整个建筑使用功能的正常发挥。图1为一圆形罩棚式结构屋面在强风作用下覆面层发生破坏的典型实例。



图1 圆形罩棚式建筑屋面围护结构破坏  
Fig.1 Damage of envelope structure on circular canopy roof building

风荷载是引起罩棚式低矮建筑覆面层破坏的主要原因。然而,我国现行荷载规范<sup>[1]</sup>却没有对此类建筑的风荷载取值作出明确的规定与说明;已有的一些针对矩形平屋面建筑的研究工作也多是针对有墙体(包括大跨度空间结构在内)的低矮房屋结构为背景进行:文献[2]以某一体育场屋盖为背景研究了大跨度悬挑平屋面的风压分布特征,由试验得到屋面角区的局部体型系数约为-2.5;文献[3]研究了不同屋面形式的风压分布特征,在平均风速剖面指数为0.25的流场中测得一跨高比为4的四周封闭平屋面的最高平均负压系数为-1.6;文献[4]在B类地貌下对大跨度平屋面结构在四周封闭、四周敞开、有无女儿墙、墙体突然开孔各种不同情况下的刚性模型和气动弹性模型进行了风洞试验,得到四面围闭的平屋面角区局部体型系数约为-1.9;文献[5]对平屋面平均风压系数进行拟合,得到经验公式可以较好描述开阔和郊区地貌的风洞试验结果。为验证风洞试验结果的准确性,不少文献以TTU(德州理工大学)足尺标模为背景进行试验研究<sup>[6]</sup>。在已有研究中专门针对罩棚式低矮建筑的研究相对较少<sup>[7-8]</sup>,特别是针对平屋面的圆形罩棚式结构的研究更是少有涉及,这给此类建筑的结构设计带来了诸多不便。

本文通过矩形和圆形两个典型的罩棚式结构模型的风洞试验,在分析其风压分布特点的基础上,给出了可直接用于此类结构覆面层设计的风荷载局部体型系数,以供设计人员参考。同时,在不影响建筑整体外观的情况下,对矩形和圆形罩棚式结构分别进行了5种和2种气动抗风措施的对比试验研究,得到了能有效降低建筑屋面局部风荷载的方案措施。

## 1 风洞试验概况及数据处理

### 1.1 试验模型

风洞试验中,矩形和圆形的两个测压模型均是通过实地调研,以实体建筑为原型,采用有机玻璃缩尺制作而成的(模型缩尺比1:30)刚性模型。矩形罩棚模型的平面投影尺寸为600mm×500mm,高为175mm,屋面共布置了140个测压点,所有测压点均为双面布置测压孔。考虑到此类低矮建筑在斜风作用下,由于锥形涡等的影响将在屋角部位产生变化比较剧烈的强负压,故在屋角局部范围内对测点进行了加密,图2、图3分别是该模型的风洞试验照片和模型屋面上的测压孔布置图,图中小圆圈表示测压孔的位置,填充线表示支撑柱的位置。圆形罩棚模型的平面投影半径为300mm、高175mm,屋面共布置了105个测压点,同样也采用双面布置测压孔的方式进行同步测压,根据以往经验,整个圆形顶棚的外缘将是负压较大且容易发生破坏的区域,而中部风压相对较小,因此在该模型的边缘布置了相对较多的测压孔,图4为圆形罩棚模型的风洞试验照片,图5为模型屋面的测压孔布置图。根据建筑原型外观,两个模型的顶棚外缘还设有一圈25mm高的竖向围板,模型侧面及屋面边缘的局部放大图见图6。

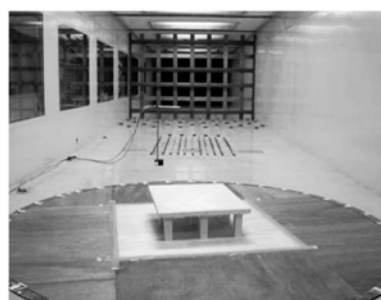


图2 矩形罩棚模型风洞试验照片  
Fig.2 Rectangular canopy structure model in wind tunnel

### 1.2 试验设备及风场模拟

风洞试验在汕头大学的大气边界层风洞中进行,该风洞是一座具有串置双试验段的全钢结构闭口回流式矩形截面风洞,主试验段宽3m、高2m、长20m,风速连续可调,最大风速可达45m/s。

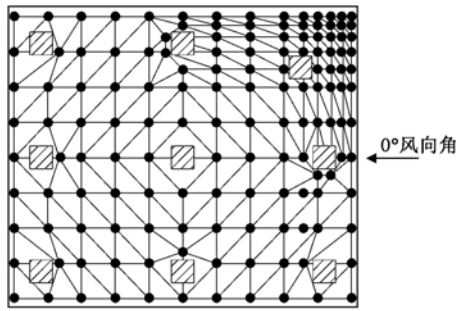


图3 矩形罩棚模型屋面测压孔布置图  
Fig. 3 Tap locations of rectangular canopy structure model

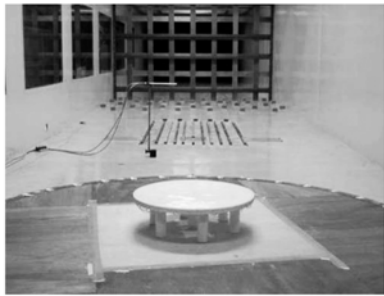


图4 圆形罩棚模型风洞试验照片  
Fig. 4 Circular canopy structure model in wind tunnel

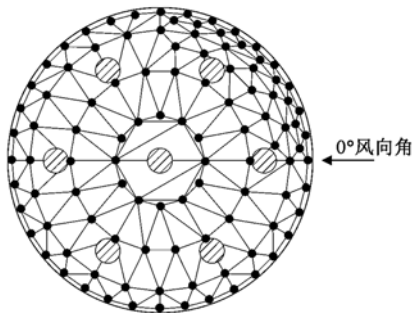


图5 圆形罩棚模型屋面测压孔布置图  
Fig. 5 Tap locations of canopy structure model

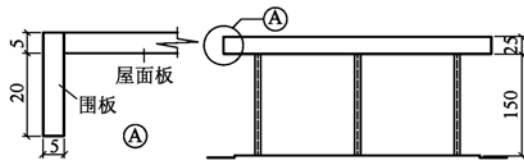


图6 矩(圆)形罩棚模型立面及屋面边缘局部放大图  
Fig. 6 Model dimensions on face and view of magnified edge of roof

结合实际建筑周边情况,风洞中模拟风场的地貌粗糙度系数按规范<sup>[1]</sup>中的B类地貌考虑,即 $\alpha = 0.16$ ,同时考虑到低矮建筑的近地高湍流特性,试验前,参考TTU实测的有关文献<sup>[9-10]</sup>,首先对3种不同缩尺比的TTU模型在采用3种不同方法模拟出的B类风场中进行了试验<sup>[11]</sup>,最终确定采用隔栅+粗糙

元方法模拟出的风场用于本文试验,模拟出的近地湍流度可达24%,流场的风剖面、湍流度分布见图7,脉动风速谱较接近Karman谱,见图8。

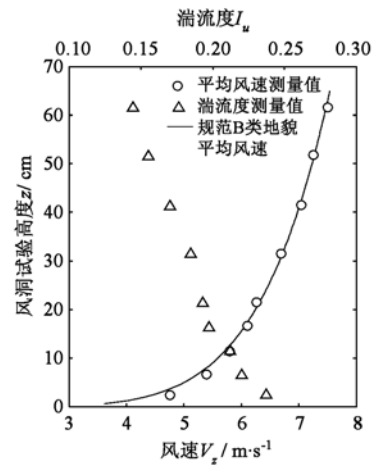


图7 平均风速和湍流度剖面  
Fig. 7 Mean velocity and turbulence intensity profiles

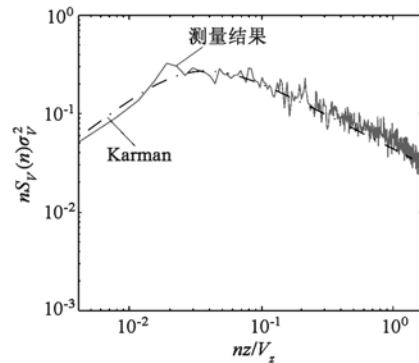


图8 模型屋面高度处脉动风速功率谱密度图  
Fig. 8 Fluctuating wind speed PSD at roof height of model

试验中,用毕托管测得的60cm高度处(即在缩尺比为1/30情况下对应于实际高度18m)的试验风速为8.8m/s。测压系统采用美国Scanivalve扫描阀公司的DSM3200电子压力扫描阀系统对所有测点进行同步测压,采样样本长度为20480数据,采样频率为312.5Hz。信号统计分析时根据压力传输管道的传递函数对脉动风压测试中的信号畸变进行了修正。试验中风向角以10°为间隔,分别测出了36个风向角下模型表面测点的风压数据。

### 1.3 试验数据处理

以模型屋面高度(17.5cm)处的风压作为无量纲化的参考风压,根据测压结果可得到模型表面各点的风压系数时程:

$$C_p(t) = \frac{p_i(t) - p_0}{q} = \frac{p_i(t) - p_0}{0.5\rho V_H^2} \quad (1)$$

式中, $p_i(t)$ 为模型表面某一测点上测得的瞬态风压, $t$ 为时间, $p_0$ 为毕托管测得的参考静压, $q$ 为模型屋面高度处由毕托管测得的参考风压, $\rho$ 为空气密

度,  $V_H$  为模型屋面高度  $H$  处的平均风速, 可由实际参考风速由下式得到:

$$V_H = V_r \left( \frac{H}{z_r} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中,  $V_r$  为模型试验参考高度  $z_r$  的平均风速。对于本文研究的罩棚式结构, 任一测压点位置的风荷载是罩棚上、下表面测压孔风压的压差。相应的这种风压差系数时间历程描述为:

$$C_{\Delta p_i}(t) = \frac{p_{ui}(t) - p_{li}(t)}{q} \quad (3)$$

其中,  $p_{ui}(t)$  及  $p_{li}(t)$  是同一时刻分别在罩棚屋面上、下表面测压孔测得的瞬态风压。为简明起见, 统一用  $C_p(t)$  表示风压系数时间历程和风压差系数时间历程, 并且都称为风压系数。

由风压系数的时程关系, 并考虑到测压管路对信号的衰减作用, 可由下式计算得到测点的平均风压系数和均方根风压系数:

$$\bar{C}_p = \frac{1}{T} \int_0^T C_p(n) dt \quad (4)$$

$$\tilde{C}_p = \sqrt{\int_0^\infty \frac{S_{C_p}(n)}{|H(n)|^2} dn} \quad (5)$$

其中,  $H(n)$  为测压管道的频率响应函数,  $S_{C_p}(n)$  为所测风压系数时间历程的功率谱密度函数,  $n$  为风压脉动频率。由此可以求得测点的极值正压系数和极值负压系数:

$$\check{C}_p = \bar{C}_p + g\tilde{C}_p \quad (6)$$

$$\hat{C}_p = \bar{C}_p - g\tilde{C}_p \quad (7)$$

式中,  $g$  是阵风峰值因子。综合有关文献<sup>[12]</sup>及围护结构的风压分布特征, 本文统一取  $g = 4.0$ 。

鉴于两个罩棚模型顶棚上的风压都以负压为主, 同时实际屋面结构在大风中局部被卷起而损坏的原因也往往是由于峰值负压在屋面表面产生的强大吸力。因此文中将主要对极值负压系数  $\hat{C}_p$  的变化进行分析对比。

由于式(1)中  $V_H$  直接采用的是屋面高度处的风速, 故由式(4)、(7)算得的测点平均风压系数  $\bar{C}_p$  和极值负压系数  $\hat{C}_p$  也就是测点的平均局部体型系数  $\bar{\mu}_{si}$  和极值负压局部体型系数  $\hat{\mu}_{si}$ 。因此, 建筑原型屋面上对应试验模型第  $i$  测点的风压标准值  $w_{ki}$  可表示如下:

$$w_{ki} = \hat{C}_p q_k = \hat{C}_p \mu_2 w_0 = \hat{\mu}_{si} \mu_2 w_0 \quad (8)$$

式中:  $q_k$  为与模型屋面高度相应的建筑原型上的风压值;  $\mu_2$  为风压高度变化系数, 对于高度小于 10m 的建筑, 可按规范取 1.0;  $w_0$  为按规范取得的基本风压。按有关国外文献<sup>[13]</sup>建议, 由上述计算式得到的风压值可直接作为围护结构外覆面的风压标准值, 而不必再计入阵风系数  $\beta_{gz}$ 。

## 2 风荷载特性分析

### 2.1 风压系数分布特性

当风向角变化时, 两个模型屋面上主要显示的是负压。屋盖上表面均以负压(吸力)为主且分布规律性较强; 下表面均以正压(压力)为主, 总体风压值较小且由于受顶棚网架的影响, 分布规律性较差。

#### 2.1.1 方形罩棚模型

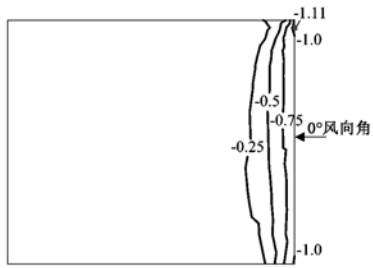
图 9 是方形罩棚模型屋面上表面在  $0^\circ$ 、 $40^\circ$  和  $50^\circ$  风向角下的平均风压系数分布图, 图中“■”表示最高负压位置。 $0^\circ$  风向角下, 在迎风屋面边缘由于气流分离, 产生柱状涡<sup>[14-15]</sup>, 致使该区域出现了高负压, 且屋角区域的负压系数值往往要高于其它区域, 大致在  $-1.0$  左右, 见图 9a; 整个屋面上, 较高的负压仅分布在靠近迎风屋面边缘区域内, 其它区域风压普遍较低, 在  $90^\circ$  风向角下的风压分布也体现出类似特点。 $40^\circ$  和  $50^\circ$  风向角下, 屋角部位由于锥形涡<sup>[14-16]</sup> 的原因使得迎风的屋角部位出现了高负压, 并有沿两侧屋面边缘向屋面中心区域衰减、扩散的趋势; 就整个屋面而言, 较高的负压主要分布在屋角和与屋角紧邻的两个屋面边缘区域上, 且越靠近迎风屋角负压越高, 见图 9b 和 9c。这些特征和其它形式矩形平屋面建筑的试验结果<sup>[2-6]</sup> 有很大的相似性。

以上 3 个风向角下极值负压系数的分布与相应平均风压系数的分布具有相似分布趋势。

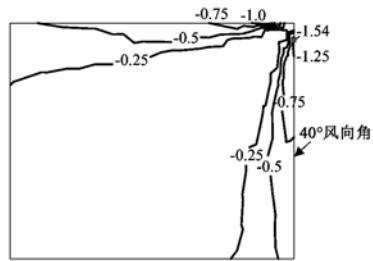
考虑不同风向的影响, 计算屋面所有位置风压系数的包络值得到所谓的全风向风压分布, 结果见图 10。考虑到结构的对称性, 图中给出模型 1/4 屋面的全风向平均风压和极值负压系数等压线分布图。由图可以看出, 最高的平均和极值负压系数均出现在屋角附近, 分别达到了  $-1.83$  和  $-5.41$ , 且该区域负压系数值的变化也比较剧烈; 整个屋面的屋角及其边缘是负压较高的区域, 而屋面中心的大部分区域上, 平均、极值负压系数绝对值分别在 0.5 和 1.0 以下, 相对较低且较为平均, 可以近似认为是等压区。

#### 2.1.2 圆形罩棚模型

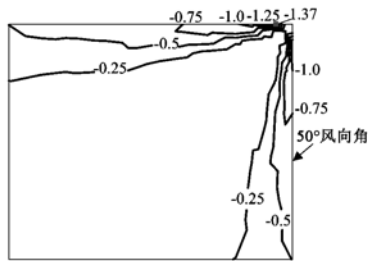
选择测点的加密区处在屋面的迎风区的  $30^\circ$  风向角风压分布情况进行分析, 结果见图 11。从图中可以看出: 屋面整体呈现负压, 风压分布等压线的形状与屋面轮廓线比较一致, 沿屋面边缘呈圆弧形分布, 且具有很好的对称性; 屋面高负压主要集中在迎风的屋面边缘附近, 平均风压系数绝对值达到 1.0 以上, 极值负压系数绝对值最大值达到 2.75, 同时, 该区域上的平均风压系数变化梯度亦较大, 而其他区域上风压系数绝对值相对较小且变化缓慢。



(a) 0°风向角



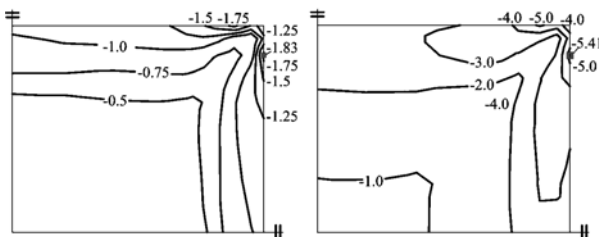
(b) 40°风向角



(c) 50°风向角

图9 矩形模型屋面上表面典型风向角下平均风压系数分布

Fig. 9 Distribution of mean pressure coefficients at the typical direction on upper surface roof of rectangular model



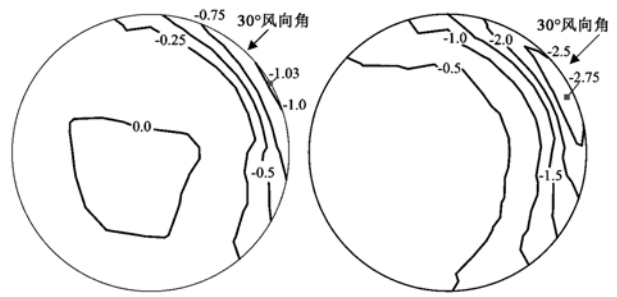
(a) 平均风压系数

(b) 极值负压系数

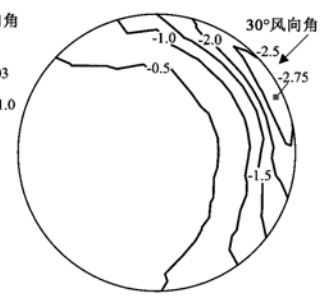
图10 矩形模型屋面全风向角风压系数包络分布

Fig. 10 Distribution of omnidirectional extreme pressure coefficients on roof of rectangular model

图12是圆形罩棚模型全风向角下屋面的平均和极值负压系数等压线分布图。两图中的风压分布等压线基本沿屋面轮廓线呈环状分布,由外至内,各测点风压系数绝对值逐渐减小;图12a中模型最外圈测点的平均吸力系数基本上分布在 $-0.92$ 附近,不超过 $-0.97$ ,屋面上以 $R/2$ 为半径的中心区域风压系

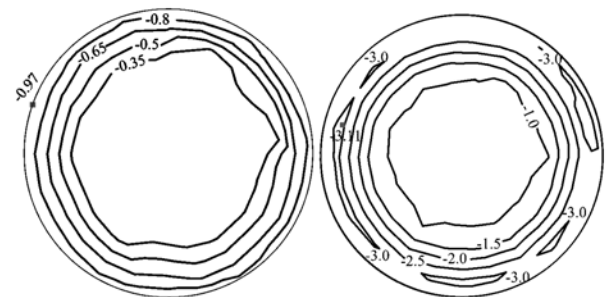


(a) 平均风压系数



(b) 极值负压系数

图11 圆形模型屋面上表面30°风向角下风压系数分布  
Fig. 11 Distribution of wind pressure coefficients on upper surface roof of circular model at wind direction 30°



(a) 平均风压系数

(b) 极值负压系数

图12 圆形模型屋面全风向角风压系数包络分布  
Fig. 12 Distribution of omnidirectional pressure coefficients on roof of circular canopy model

数绝对值相对较低且变化缓慢,可作等压区看待;与图12a相比,图12b中靠近屋面边缘的环状区域上,极值负压系数数值都比较接近,大致在 $-3.0$ 左右。

## 2.2 用于结构设计的局部风压分块体型系数

为了便于应用,将屋面分块,取每块区域内测点体型系数( $\bar{\mu}_{si}$ 或 $\rho_{si}$ )的最大值(绝对值)作为该分块区域的局部风压体型系数(平均风压体型系数 $\bar{\mu}_{s,e}$ 或极小风压体型系数 $\rho_{s,e}$ ),对于围护结构设计而言,这种取值方法相对可靠且较为简捷,便于工程应用。

图13为矩形罩棚屋面在全风向角下的分块体型系数,图中所示的各分块区域内,括号里的数据表示的是该区域的平均风压体型系数 $\bar{\mu}_{s,e}$ ,括号外的数据表示的是该区域的极小风压体型系数 $\rho_{s,e}$ 。考虑到圆形罩棚屋面结构的对称性,图14直接给出了整个屋面上平均和极值负压体型系数沿半径方向的分布,图中最高平均和极值负压体型系数分别是 $-0.97$ 和 $-3.11$ 。

对于罩棚的围板部分,其风压体型系数分布直接列于表1,表中“+”、“-”号分别表示风压作用方向朝向或背离围板外表面。在矩形罩棚的角区域(定义离角点 $1/10$ 宽度的区域),由于气流分离的影响,

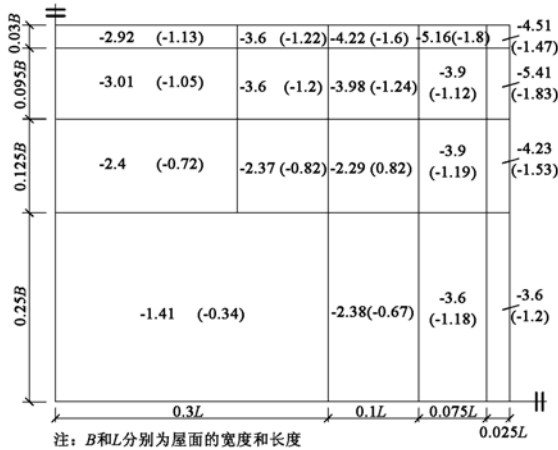


图 13 矩形模型屋面分块局部风压体型系数  
Fig. 13 Distribution of local shape factors on roof of rectangular model

该处围板在和来流方向平行且处于迎风部位时由于流动分离将会以风吸力为主,全风向角下的最高极值负压体型系数达 -4.0;角区以外的围板其风荷载则由正压控制,最大正压出现在围板迎风且垂直于来流方向。圆形罩棚围板所受的风吸力明显低于其所受的风压力,全风向角下,各处风压较为接近。

表 1 围板的风压体型系数分布

Table 1 Distribution of local shape factors on boarding

结构类型	区域	平均	峰值	作用方向
矩形罩棚围板	角区	0.80	2.60	+
	非角区	-1.35	-4.00	-
圆形罩棚围板	所有区域	1.05 <sup>⊕</sup>	3.15	+
		-0.75	-1.85	-

注:平均正压体型系数大于 1 是考虑围板内外两面压差的缘故。

### 2.3 阵风系数

屋面的极值负压体型系数和平均风压体型系数的比值实质上就是规范中的阵风系数。对于矩形罩棚模型屋面,由试验得到的阵风系数大致在 2.5 ~ 3.5 之间;圆形罩棚模型中,其屋面边缘附近的阵风系数约为 3.2,中心区域约为 2.7,在 0.7R ~ 0.8R 的环形区域上该比值则高达 5.0 以上;然而,按规范<sup>[1]</sup>根据屋面高度和所处地貌类型确定的阵风系数  $\beta_{gz}$  值却仅为 1.88,远小于以上由试验方法得到的所有不同模型和位置的阵风系数。图 14 显示了风洞试验得到的极值负压体型系数和规范方法(阵风系数  $\beta_{gz}$  与平均风压体型系数的乘积)得到的极值负压体型系数的对比结果。图中  $a$  为屋面中心到其上某一测点的距离。

以上表明,规范中通过阵风系数计算围护结构风压值的方法对此类结构的屋面是不适用的,这主要是因为规范中给出的阵风系数基于风速脉动(瞬

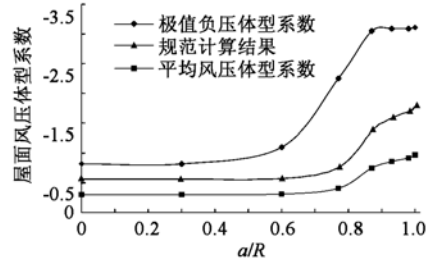


图 14 圆形模型屋面分块局部风压体型系数  
Fig. 14 Distribution of local shape factors on roof of circular canopy model

时风速幅值和 10min 平均风速的比值)的统计公式,而围护结构的设计风压(瞬时风压)通常由流动分离控制,一般来说,两者的作用机制不同。

### 2.4 小结

以上分析表明,平顶罩棚类低矮建筑,屋面中心区域风压较小,而边缘区域的风压相对较大,特别是迎风屋面的前缘区域和屋角(矩形罩棚),在强风来袭时往往会成为首先破坏的部位,因此,在进行屋面板及其连接件的设计时,有采取必要的构造措施,防止迎风屋面边缘和屋角被风掀起而破坏。

从屋面风压分布规律可以看出,罩棚类结构中来流分离是导致屋面局部高负压的主要原因,凡是屋面负压比较高的部位总是伴随有来流分离现象出现。对于矩形罩棚式结构,来流分离区主要集中在迎风的屋面边缘和转角部位,而圆形罩棚式结构则主要集中在迎风的屋面边缘附近。同时,屋面上表面因流动分离而产生负压,而其下表面却基本呈现微弱正压,这使得整个屋面的大部分区域处在上下顶的合力作用下,很容易在屋面边缘的某一局部区域上形成较高的风荷载,导致屋面局部被掀开而损坏。

对比矩形和圆形两种不同形式屋面表面风压分布可见:圆形罩棚结构屋面表面的峰值负压要远低于矩形罩棚结构,屋面整体风压分布也较矩形罩棚结构更为均匀,具有相对较好的抗风气动性能。即便如此,这两种结构的极值负压系数仍然偏高,矩形和圆形屋面的最高极值负压体型系数分别达到 -5.41 和 -3.11,气动性能较好的圆形罩棚结构在强风作用下仍然出现破损(见图 1),因此采用适当的气动措施减少屋面的风荷载无疑是提高结构自身抗风性能的一条重要途径。

## 3 气动抗风措施研究

根据建筑结构自身特点,在尽量不改变建筑原有外形的条件下,对矩形罩棚模型进行了 5 种气动

抗风措施的对比风洞试验,在此基础上又对圆形罩棚模型进行了2种抗风措施的对比风洞试验,图15是相应于不同抗风措施的模型局部修改方案示意图。图中所示各方案均是以图6中图①为原型经局部修改而得到的,其中方案①是在整个屋面板下方屋面边缘处又加了一圈屋面板,而方案②则是在屋面板与侧面围板的交界处开了一圈上下贯通的透风槽;方案④、⑤是均以影响来流在屋面边缘处的分离状态为出发点而设计的,方案④将屋面边缘的直角切成了斜角,方案⑤则将围板上下做了弧形延长;方案③是方案②、⑤的结合。上述所有气动抗风措施,其最终目的都是为了能削减屋面边缘上的高负压。

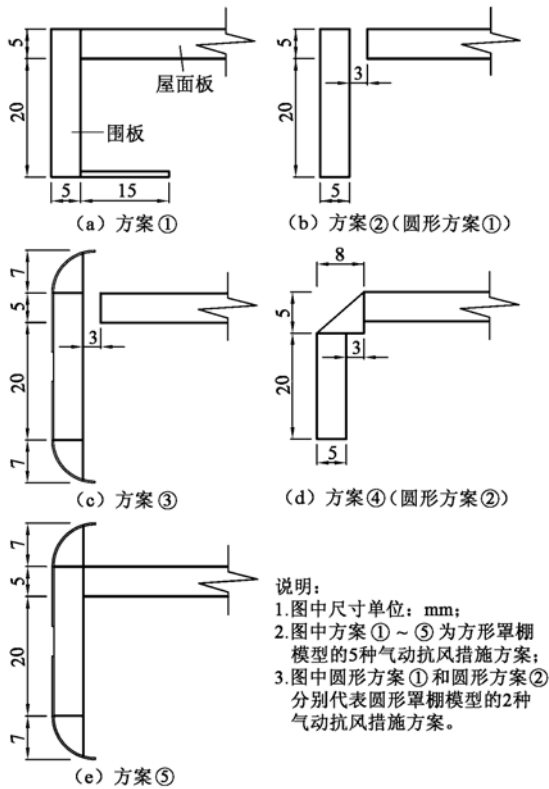


图15 气动抗风措施示意图  
Fig. 15 Sketch of aerodynamic strategy for wind load reduction

### 3.1 矩形罩棚屋面

图16显示了方案②~⑤全风向角下屋面的极值负压体型系数(屋面上下表面压差)等压线的分布情况,将其与图10b对比发现:方案②③④都显示了十分显著的抗风效果,3种方案分别使原型屋面上的最高极值负压体型系数由-5.41变为-3.69、-3.61和-3.71,绝对值降幅均在30%以上,和方案②相比,方案③实现稍微复杂且有升高屋面内部风压的问题,故不推荐此方案;方案⑤不但没有明显效果,反而使屋角上的负压进一步升高,是不利于结构抗风的方案。方案①风压分布结果与原型一致故其分

布图没有给出,这说明下屋面板对矩形屋面的风压分布没有影响。

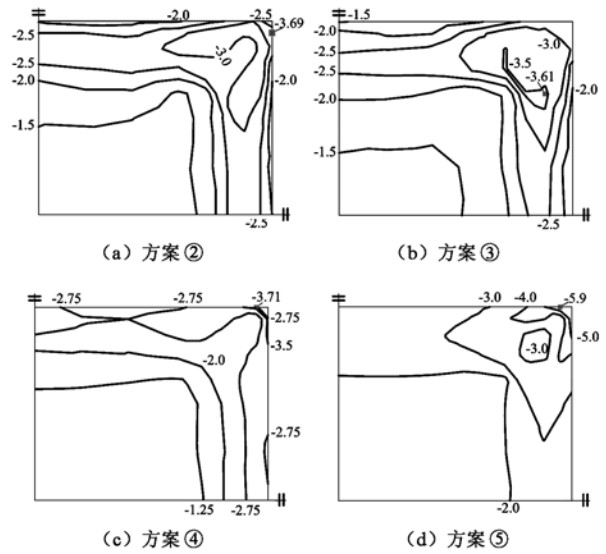


图16 气动抗风措施对矩形罩棚模型极值负压体型系数的影响

Fig. 16 Effects of aerodynamic strategy on peak negative pressure coefficients on rectangular canopy model

### 3.2 圆形罩棚屋面

圆形罩棚屋面风压因基本不受风向角变化的影响,将 $a/R$ 相同的测点在36个风向角下的风压体型系数最大值(绝对值)取出后平均,则可通过对比该值的变化来评价相应方案的抗风效果。图17是两种修改方案与原型的对比结果图,由图可见:方案①在屋面边缘处可降低35%的负压值,在 $a/R = 0.93$ 处较原型亦可降低25%的风压,随 $a/R$ 值的减小,其效果逐渐减弱且会使风压增大,但由于风压体型系数值增大区域的风压值本身不大而不会降低整个屋面的抗风能力;方案②也有一定的效果,但在负压较高的屋面边缘处其作用并不显著。从重要性的角度对比而言,方案①要比方案②效果更佳。

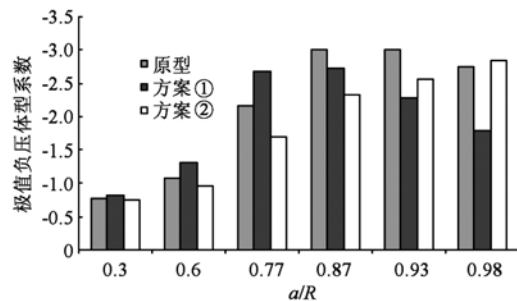


图17 气动抗风措施对圆形罩棚模型极值负压体型系数的影响

Fig. 17 Effects of aerodynamic strategy on peak negative pressure coefficients on circular canopy model

## 4 结论

(1)对于罩棚式建筑的屋面,总体风荷载以负压为主,有很明显的上吸作用;屋面上平均风压分布和极值负压分布具有相似的规律,其规律与相应的封闭式平顶建筑屋面较为相似。

(2)从屋面总体向上的风吸力比较而言,矩形模型屋面上总的风吸力随风向角变化较为明显,而圆形模型上总的风吸力变化不大;就风压分布来看,圆形模型的风压分布也较方形的更为均匀,屋面的最高极值负压体型系数值也远小于矩形结构,因此,圆形罩棚较矩形罩棚对抗风更为有利。

(3)按规范<sup>[1]</sup>中确定阵风系数的方法折算得到的罩棚类屋面的阵风系数 $\beta_{gz}$ 值都要远高于规范中的相应值,这说明规范中的阵风系数方法不适合于计算屋面的风压值。

(4)采用斜切角形式的屋檐或在屋面板和侧面围板交界处开贯通透风槽方式可以使罩棚屋面风敏感区域的极值负压削减25%~35%。

### 参 考 文 献

- [1] GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. (GB 50009—2001 Load code for the design of building structures[S]. (in Chinese))
- [2] 傅继阳,谢壮宁,倪振华. 大跨悬挑平屋盖结构风荷载特性的试验研究[J]. 土木工程学报,2003,36(10):7-14. (FU Jiyang, XIE Zhuangning, NI Zhenhua. Experimental investigation on wind load characteristics of large span cantilevered flat roof structure[J]. China Civil Engineering Journal,2003,36(10):7-14. (in Chinese))
- [3] 程志军,楼文娟,孙炳楠,等. 屋面风荷载及风致破坏机理[J]. 建筑结构学报,2000,21(4):39-47. (CHENG Zhijun, LOU Wenjuan, SUN Bingnan, et al. Wind load on roof structures and mechanism of wind-induced damages[J]. Journal of Building Structures, 2000,21(4):39-47. (in Chinese))
- [4] 陆锋,楼文娟,孙炳楠. 大跨度平屋盖结构风洞试验研究[J]. 建筑结构学报,2001,22(6):87-94. (LU Feng, LOU Wenjuan, SUN Bingnan. Study on wind tunnel tests for large-span flat roof structures [J]. Journal of Building Structures,2001,22(6):87-94. (in Chinese))
- [5] Sathopoulos T. Wind pressure functions for flat roofs [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1981, 107(5):889-905.
- [6] Bienkiewicz B, Sun Y. Local wind loading on the roof of a low-rise building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 45(1):11-24.
- [7] Letchford C W, Ginger J D. Wind loads on planar canopy roofs: part 1: mean pressure distributions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 45(1):25-45.
- [8] Ginger J D, Letchford C W. Wind loads on planar canopy roofs: part 2: fluctuating pressure distributions and correlations [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 51(3):353-370.
- [9] Levitan M L, Mehta K C. Texas Tech field experiments for wind loads: part 1: building and pressure measuring system [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43(1-3):1565-1576.
- [10] Levitan M L, Mehta K C. Texas Tech field experiments for wind loads: part 2: meteorological instrumentation and terrain [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43(1-3):1577-1588.
- [11] 刘帅. TTU 标模及平顶罩棚类低矮建筑的风洞试验研究[D]. 汕头:汕头大学,2009. (LIU Shuai. Wind tunnel investigation of TTU standard model and the flat canopied low-rise buildings [D]. Shantou: Shantou university, 2009. (in Chinese))
- [12] Sadek F, Simiu E. Peak non-Gaussian wind effects for database-assisted low-rise building design [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(5):530-539.
- [13] Wind Tunnel Testing: A General Outline [R]. London, Ontario, Canada: The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, The University of Western Ontario, Faculty of Engineering Science, 1999.
- [14] Ginger J D, Letchford C W. Characteristics of large pressures in regions of flow separation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 49(1-3):301-311.
- [15] Lin J X, Surry D, Tieleman H W. The distribution of pressure near roof corners of flat low buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 56(2-3):235-265.
- [16] Kawai H, Nishimura G. Characteristics of fluctuating of suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 60:211-225.