

倒伞形挑篷群体风荷载试验研究

黄 鹏 戴银桃 顾 明

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要 以某实际结构工程为背景, 在同济大学的 TJ-3 大气边界层风洞中对 26 个倒伞形挑篷群体结构进行了测压试验, 得到了挑篷群上的平均风压系数、脉动风压系数、典型风向角下的分块体型系数和倾覆力矩系数, 讨论了挑篷上表面、下表面和净风压的风压分布特性和最不利风向, 并分析了挑篷间的相互气动干扰效应。结果表明, 挑篷上的风荷载主要以向上的合风力为主, 某些工况下挑篷会受到较大的倾覆力矩, 而且端部和位置高的挑篷受到的风荷载较大, 需要加强和注意防护。

关键词 倒伞形, 风洞试验, 体型系数, 干扰效应, 倾覆力矩

Experimental Study of Wind Loads on Inverted Umbrella-Shape Canopies Group

HUANG Peng DAI Yintao GU Ming

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

Abstract Based on an actual structural project, a wind tunnel test of 26 inverted umbrella-shape structures was carried out in TJ-3 boundary layer wind tunnel in Tongji University. The wind loads on the structures (canopies) were analyzed in detail according to the test results, such as the mean and root-mean-square (rms) pressure coefficients, area shape coefficients and overturning moment coefficients in some typical wind directions. The wind pressure distribution characteristic on the upper and lower surfaces and the net pressures of the canopies, as well as the worst wind direction were also discussed. Meanwhile, the aerodynamic interference effects between 26 canopies group structures were also studied. The results show that the wind loads on canopies are mainly negative pressures acting upward, and the canopies will bear high overturning moment in some cases, and the canopies at the end and the higher location will suffer greater wind loads, which should be paid attention.

Keywords inverted umbrella-shape, wind tunnel test, shape coefficient, interference effect, overturning moment

1 引 言

膜结构以建筑膜材为主要受力材料, 具有重量轻、跨越能力强、建筑造型丰富、经济实惠等优点, 已得到迅速推广^[1]。张拉式索膜结构多由玻璃纤维或聚酯织物等材料制成, 表面一般为复杂的空间曲面, 是一种柔性结构, 通常比较低矮, 常在大气边界层内湍流度高的近地区域, 因此其

绕流和空气动力作用非常复杂。膜张拉结构的形状非常丰富, 伞型膜张拉结构是一种常见的形状, 对其风荷载已进行了一定研究^[2-4]。倒伞形膜张拉结构较少, 对其进行风荷载研究的更少。文献[5]对单个倒伞式可展索膜结构进行了结构受力分析, 结果表明风荷载是最主要的控制荷载, 并发现倒伞式索膜结构比普通的索膜结构受力更合理。多个倒伞形挑篷群体结构在风荷载作用下相互间气动干扰严重, 风荷载分布情况复杂, 目前还

收稿日期: 2010-09-19

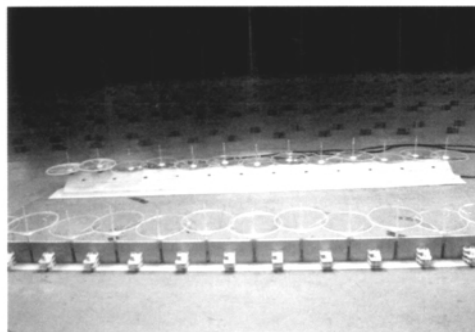
* 联系作者, Email: huangtju@tongji.edu.cn

未见有研究报道,而《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)^[6]中也未提供类似结构的体型系数等风荷载计算参数。

本文以某赛车场看台膜结构工程为背景,研究了倒伞形挑篷群体的风荷载特性。整个看台全长 288 m,看台顶篷采用了新型的膜结构形式,由 26 个独立的索杆梁膜结构单体组成,其设计灵感源自于江南水乡的“荷叶”造型。每个单体结构及形式相同,呈不对称倒伞形,相邻单体落差 2.5 m,沿看台高低错落一字排开。单体膜平面投影形状为椭圆,长轴 31.6 m,短轴为 27.6 m,悬挑长度为 24.3 m,展开面积约为 720 m²。承重结构包括主桅杆、上下环及支撑系统、谷索、吊索(见图 1(a))。



(a) 实际工程照片



(b) 试验模型照片

图 1 某赛车场看台挑篷

Fig. 1 Canopies structure of a circuit grandstand

由于该挑篷群跨度大,呈不对称倒伞形,且处于基本风压较大的沿海强风区,风荷载将对结构设计起控制作用。本文根据风洞模型试验结果,给出了挑篷上典型测点的平均风压系数、脉动风压系数,不同风向角下的分块体型系数以及不利挑篷的风压系数等高线图,分析了挑篷间的相互气动干扰效应,方便结构设计人员进行计算和分析。

2 实验概况

2.1 风洞设备及测量系统

倒伞形挑篷群体结构模型风洞试验(图 1(b))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-3 大气边界层风洞中进行的。该风洞是一座竖向回流式低速风洞,试验段尺寸为 15 m 宽、2 m 高、14 m 长。根据项目周围数公里范围内的建筑环境,大气边界层流场模拟为 B 类地貌风场。按照文献[7]的方法,以 1/90 的几何缩尺比模拟了 B 类风场,流场结果如图 2 所示。在风洞试验中使用了测量风速和风压的两套测量系统,试验流场的参考风速是用皮托管和微压计来测量和监控的;风压测量、记录及数据处理系统是 American Scanivalve 扫描阀公司的量程为 ± 254 mm 和 ± 508 mm 水柱的 DSM3000 电子式压力扫描阀系统、PC 机以及自编的信号采集和数据处理软件组成的。

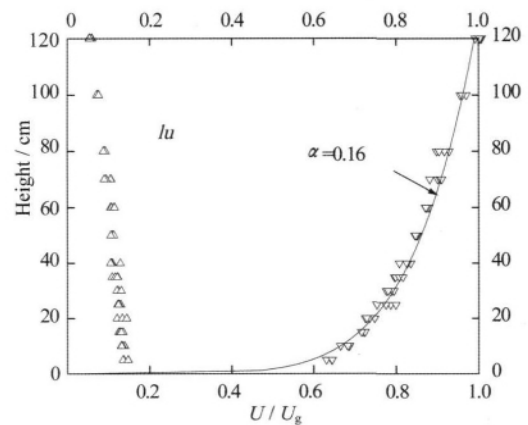


图 2 风洞中模拟的 B 类地貌平均风速和紊流度剖面图

Fig. 2 Profiles of mean velocity and turbulence intensity

2.2 试验模型和测点布置

倒伞形挑篷群体结构刚体模型用有机玻璃板和 ABS 板制成,具有足够的强度和刚度,在 12 m/s 的试验风速下不发生变形,并不出现明显的振动现象,以保证压力测量的精度。模型几何缩尺比为 1/90,模型与实物在外形上保持几何相似。试验时将模型放置在直径为 4.0 m 的转盘中心,通过旋转转盘模拟不同风向。由于 26 个单体膜结构挑篷基本上是对称布置的,不考

考虑周边的影响,根据对称性,对其中的7个挑篷在风洞中进行了试验,如图3所示。在7个挑篷模型上总共布置了308对测点,即每个挑篷模型上布置了44对测点。每对测点包括上下两个测压孔,以同时测量挑篷上该点上下表面的压力,该测点最终的压力为上下表面压力之差。限于篇幅此处给出1号挑篷上测点的布置,见图4,图中测点编号前一数字表示轴号,后一数字表示点号。轴号为1~7,分别对应7个单体挑篷结构。

定义来流风垂直吹向挑篷结构群排列方向时风向角为0°,风向角间隔取为15°,按顺时针方向增加,如图3所示,并增加了一个正东方向(216°)这样共有测试了25个风向。风洞测压试验的参考点风速为12 m/s。测压信号采样频率约为312.5 Hz,每个测点采样样本总长度为6 000个数据,采样时间19.2 s。

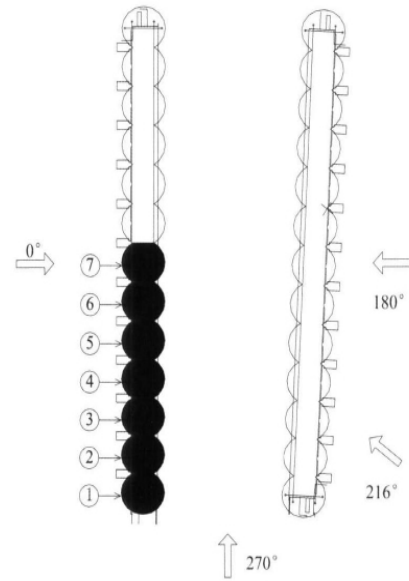


图3 各挑篷位置、挑篷轴编号和风向角定义
Fig.3 Definition of canopies location, number and wind directions

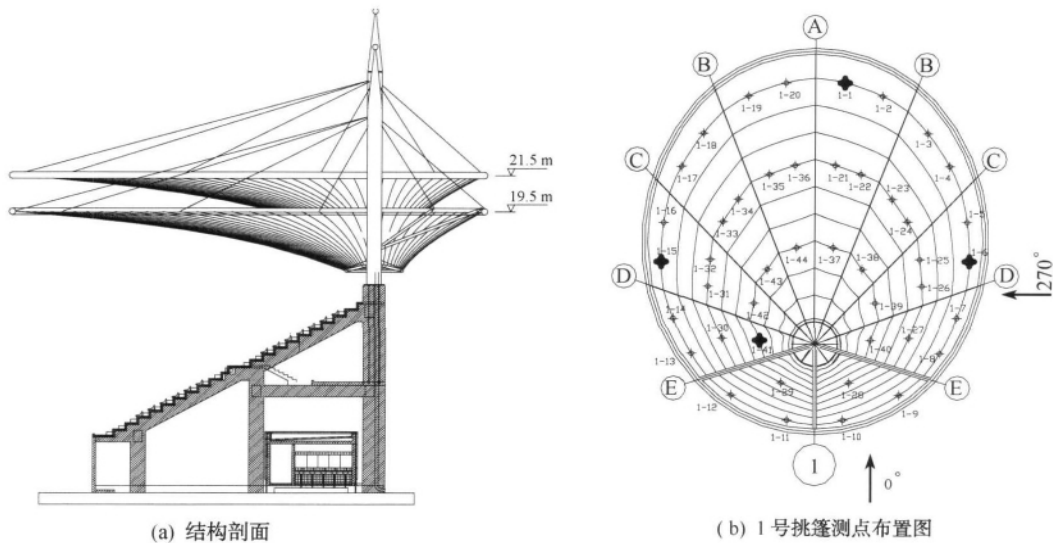


图4 结构剖面 and 测点布置图
Fig.4 Section of structures and pressure taps layout

3 数据处理方法

3.1 压力系数与点体型系数

在空气动力学中,物体表面的压力通常使用无量纲压力系数 C_{Pi} 表示为

$$C_{Pi} = \frac{P_i - P_\infty}{P_0 - P_\infty} \quad (1)$$

式中 C_{Pi} 为测点 i 处的压力系数; P_i 为测点 i 处的压力; P_0 和 P_∞ 分别是试验时参考高度处的总压和静压。

本项目选取较高倒伞挑篷的膜顶平面(离地高度为21.5 m)为参考高度。对挑篷结构,在进行结构设计时,需要用到的是各测点对上的净压差值,即将各测压点上下表面同步测压所获得的测点对的两个时域信号相减后得到该测点处的净风压时域信号,再对其进行统计分析。上下表面同步测量的各对测压点上的净压力系数由式(2)导出如下:

$$C_{Pi} = \frac{P_{iu} - P_{id}}{P_0 - P_\infty} \quad (2)$$

式中 P_{in} 为作用在测点 i 处的上表面压力; P_{id} 为作用在测点 i 处的下表面压力。

对压力系数时程序列分别求平均值和均方根, 即得到了平均压力系数 $C_{pi, mean}$ 和均方根压力系数 $C_{pi, Rms}$ 以及上下表面的压力系数。

风荷载体型系数是指风作用在建筑物表面上所引起的实际压力(或吸力)与来流速度压的比值。根据试验测得的各测点的平均风压系数可以很容易的得到 i 测点的体型系数, 换算公式如下:

$$\mu_{si} = C_{pi, mean} \times (z_{ref}/z_i)^{2\alpha} \quad (3)$$

式中 α 为平均风速剖面指数, B 类风场下, α 等于 0.16; z_{ref} 为试验参考高度; z_i 为 i 测点高度。

3.2 分块体型系数和倾覆力矩系数

由于点体型系数不便于直观分析最不利风向及其对应的风荷载, 为方便工程应用, 将结构表面划分为若干个区域, 基于压力等效计算出每个分块的分块体型系数:

$$\mu_s = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{si} \mu_{zi} A_i}{\mu_z A} \quad (4)$$

式中 μ_{si} , μ_{zi} , A_i 分别为测点 i 的体型系数、风压高度变化系数和对应的面积; A 为分块的总面积; μ_z 为分块中心的风压高度变化系数。

倾覆力矩是用于结构或构件稳定性计算的常用

荷载依据, 倾覆力矩的大小等于产生倾覆作用的荷载与荷载作用点到倾覆点间距离之乘积。为使研究对象无量纲化, 本文用倾覆力矩系数 C_M 来定义为

$$C_M = \frac{\sum_{i=1}^n C_{pi, mean} A_i L_i}{A \sqrt{ab}} \quad (5)$$

式中 A_i 为第 i 个测点所占的面积; A 为单个挑篷总面积; L_i 为该点到倾覆轴线的水平距离(倾覆轴线位于经过挑篷主桅杆中心点的水平面内, 并与对应的来流风向垂直); a , b 分别为挑篷长半轴和短半轴的长度。

4 试验结果与分析

选择具有代表性的最外缘的 1 轴(低)和 2 轴(高)挑篷和最中间的 6 轴(高)和 7 轴(低)挑篷的试验结果进行分析。

4.1 平均风压

4.1.1 点平均风压系数(合风力)

选择挑篷上具有代表性的 1 号点(前缘)、6 号点(右边缘)、11 号点(后缘)和 40 号点(底部), 其平均风压系数(合风力)随风向角变化的曲线见图 5。由图 5 可见, 1 轴和 2 轴上对应的测点的平均风压系数绝对值较 6 轴和 7 轴上的测

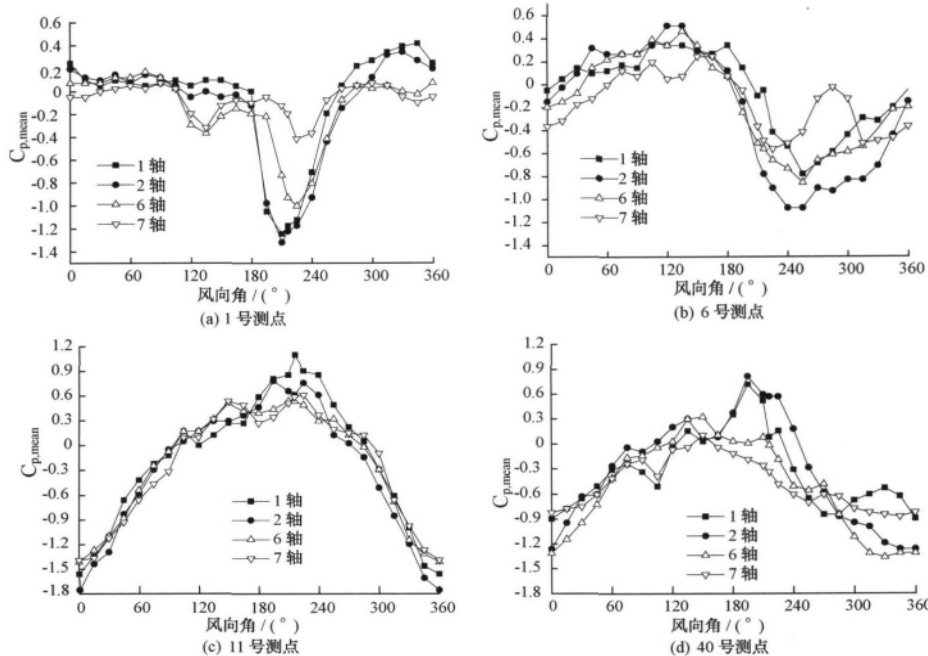


图 5 测点的平均风压系数

Fig. 5 Mean pressure coefficients of test points

点值大 ,即处在外边缘的挑篷比处在中部的挑篷大。另外一个方面 ,高的挑篷(2 轴和 6 轴)所受风荷载较低的挑篷(1 轴和 7 轴)大 ,即高度越高 ,所受风荷载越大。

对 1 号测点而言 ,处于曲面平缓的挑篷前缘 ,其所受风荷载(上、下表面的合力)以向上的风荷载为主。平均风压系数在 $210^{\circ} \sim 225^{\circ}$ 风向角范围内有明显的峰值 绝对值最大的平均风压系数为 -1.32 ,发生于 2 轴的 210° 风向角。在该风向下 2 轴挑篷上风向没有建筑物遮挡 来流基本上未受到另一个看台挑篷的干扰。2 轴挑篷又较高 ,其曲面形状呈下凹状 ,气流在挑篷前缘发生较为强烈的旋涡脱落 在上表面形成较大的负压(吸力);而挑篷下表面受三角形阶梯式看台的影响 ,其在一定程度上阻塞气流分离 使得挑篷下表面主要受压力。这样上、下两个表面的荷载叠加作用下使得 1 号测点受到一个较大的向上的合力。6 号测点在挑篷的侧边缘 ,对各轴挑篷而言 ,在 0° 和 180° 风向角附近时绝对值均较小 ,而在 90° 和 270° 风向角附近时绝对值均较大 ,因此其随风向角变化的曲线图与正弦曲线类似。11 号测点在挑篷后缘 ,在 0° 附近向上的风力最大 绝对最大值发生在 2 轴 0° 风向角 ,为 -1.76 ;而在 $210^{\circ} \sim 225^{\circ}$ 范围内与 1 号测点相反 ,

向下的合力最大 ,最大值发生在 1 轴 216° 风向角 ,为 1.10 。40 号测点在挑篷的后缘底部 ,平均风压系数随风向角的变化与 11 号测点类似 ,但局部有相对小的起伏 波动较大 ,最大值发生在 2 轴 195° 风向角 ,为 1.12 。

4.1.2 平均风压系数等值线

为了研究不同工况下结构表面全区域的风压变化规律 ,得到了结构上表面、下表面和合力平均风压系数等值线图。由于挑篷曲面的特点 ,在上表面和下表面风压变化规律有各自的独特性:上表面呈凹状主要以负压为主 ,当风向角为 0° 时 ,由于迎风面较陡而尾流区较平坦 ,上表面基本被涡旋覆盖 , 180° 附近时挑篷迎风前缘区上表面产生较强的气流分离而负压很大 ,挑篷后半部分上表面迎风而受正风压;下表面相对而言为下凸曲面 故迎风面为正压背风面产生涡旋为负压;叠加后总体上保持迎风区为负压尾流区为正压同时存在的特点 ,端部挑篷(1 轴、2 轴)在 270° 时处在最上游 ,平均风压比 90° 时的要大 ,说明气流经过一系列的挑篷干扰后使得下游挑篷平均风压明显减少;在斜风向角时风压出现峰值 此时对于端部挑篷尤为不利。由于篇幅所限 ,本文给出了下面几种不利情形下的等高线图 ,如图 6 所示。

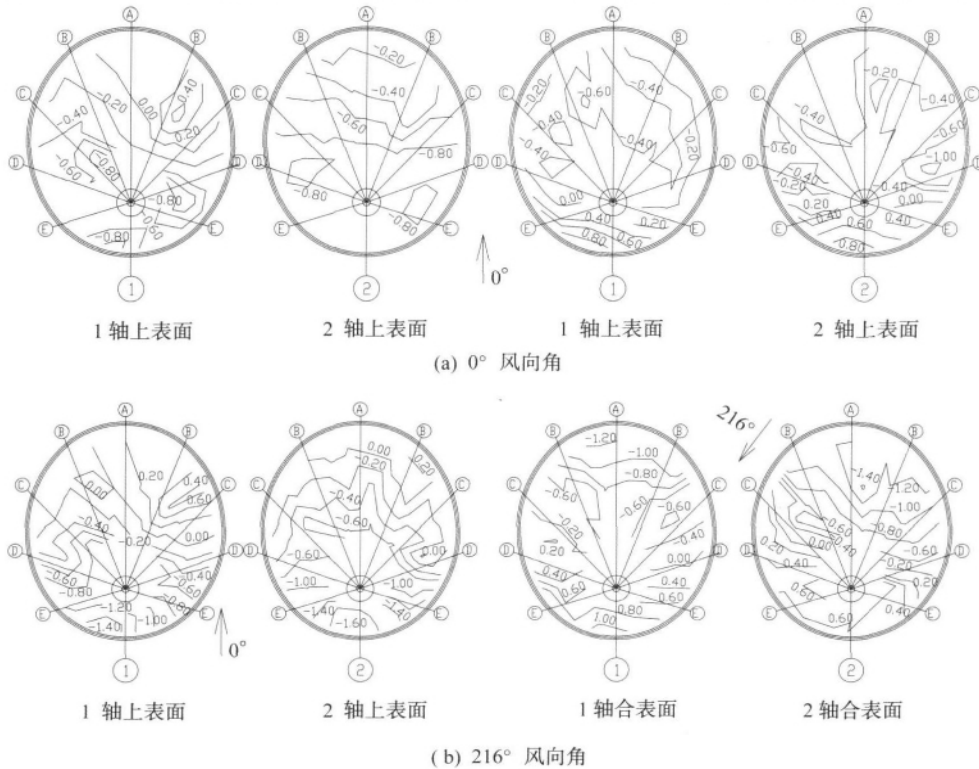


图 6 平均风压系数等值线图

Fig. 6 Contour of mean pressure coefficients

4.2 脉动风压

4.2.1 点脉动风压系数(合风力)

脉动均方根风压系数表征风的脉动程度,限于篇幅,本文仅给出具有代表性的 1 号和 6 号测点的脉动系数进行分析(图 7)。对 1 号测点而言,与平均风压系数不同,6 轴、7 轴的脉动压力系数较大,在

120°~255°风向角范围内为 0.3~0.4,最大的脉动压力系数为 0.44,发生在 1 轴 225°风向角和 6 轴 210°风向角。这些风向角下,上游的看台挑篷对下游挑篷整体上具有明显的气动干扰作用,导致下游挑篷上脉动风压系数较大。对 6 号测点而言,较大的脉动压力系数为 210°~270°风向角范围,最大的脉动压力系数为 0.49,发生在 2 轴 210°风向角。

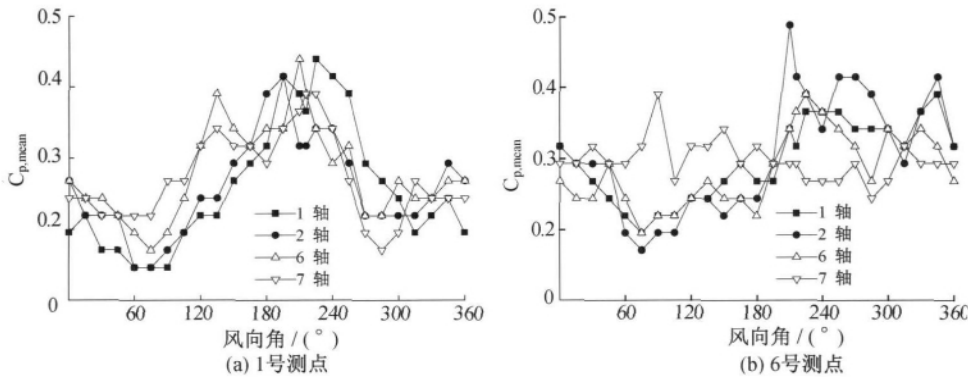


图 7 测点的脉动风压系数

Fig. 7 Fluctuating pressure coefficients of test points

4.2.2 脉动风压系数等值线

由于挑篷曲面的特殊性以及各单体之间的相互干扰,单体挑篷边缘的总脉动比中间高,位置高的挑篷比相邻位置低挑篷的脉动稍大。上下表面脉动分布规律也各自不同:对于迎风面平均风压较大(为正)的情况下对应的局部脉动也较大;在不同风向角下,当挑篷上表面或下表面边缘某区

域作为迎风面承受正风压时,该区域面上脉动值也较大;斜风向时,迎风前缘上表面气流分离,产生强烈的脉动,上表面脉动值为下表面的两倍。位于群体中央位置的挑篷受周边的干扰,脉动值变化较为稳定。下面给出了不利方向角下 1 轴、2 轴上表面、下表面和合风力脉动风压系数等值线图见图 8。

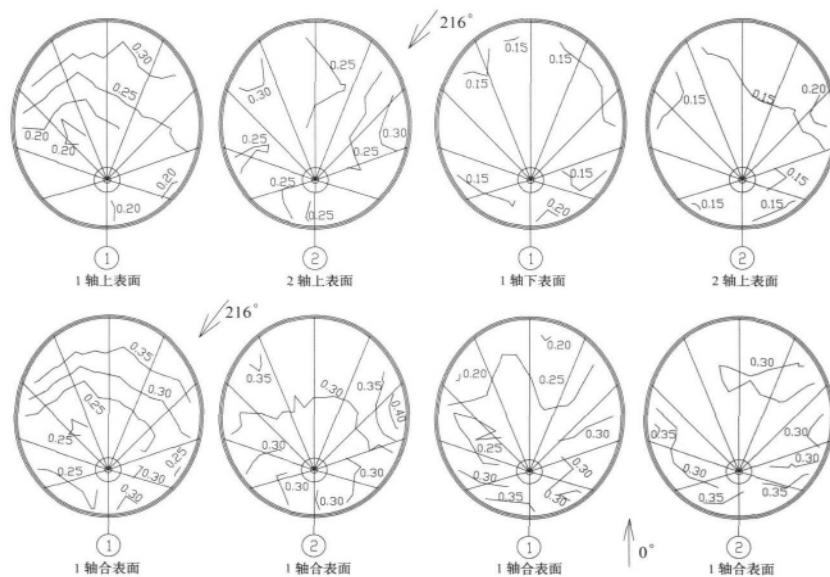


图 8 脉动风压系数等值线图

Fig. 8 Contour of fluctuating pressure coefficients

4.3 分块体型系数

为便于结构设计人员使用,将结构表面划分为若干个区域,给出了每个分块的分块体型系数。

限于篇幅,这里给出几个典型风向角(0° , 180° 和 270°)以及最不利方向角下(216°)挑篷各分块部分的分块体型系数,见图9。

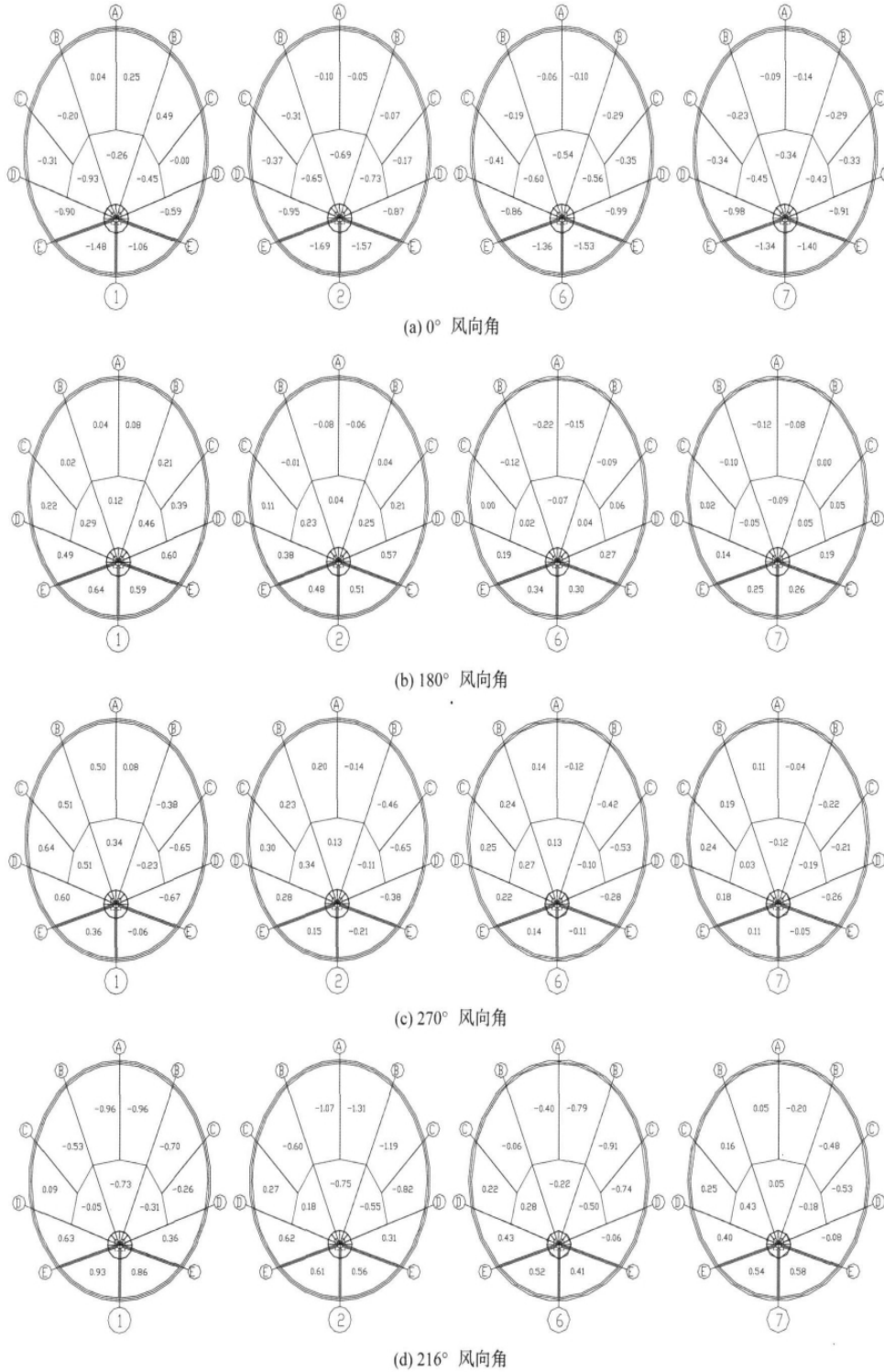


图9 分块体型系数分布图

Fig. 9 Distribution of block shape factors

风向角为 0° 时,风从后缘沿结构中轴线吹向挑篷,因此挑篷后缘受到较大的向上的荷载,而前缘荷载较小。在此风向角下,位于群体中间的挑篷(6轴、7轴)受力比在端部的挑篷(1轴、2轴)的要小且较为均匀;1轴挑篷在来流方向的尾流区域分块体型系数出现正值,而其它各轴挑篷均为负值。2轴挑篷所受风荷载较大,各轴挑篷中绝对值最大的分块体型系数是2轴的-1.69。风向角为 180° 时,风从前缘沿结构中轴线吹向挑篷。由于前看台挑篷的遮挡效应,该风向角下挑篷上的风荷载均不大。与 0° 风向角类似,端部的挑篷所受风荷载较在群体中间的挑篷要大,最大的分块体型系数是1轴的0.64。风向角 270° 时,即风向平行于看台展向,由于挑篷下部空间较大,气流流通较为顺畅受阻力小,挑篷上下表面均为负压,互相抵消,故各挑篷总体受力上较小,绝对值最大的分块体型系数是1轴的-0.67。

对挑篷结构整体受力而言,最不利风向为 $210^\circ \sim 225^\circ$,其中 216° 风向角下各轴的分块体型系数见图9(d)。该风向角下,来流斜向吹向1轴和2轴挑篷,且未受到上游看台挑篷的遮挡,造成1轴和2轴挑篷上的风荷载较大,绝对值最大的分块体型系数是2轴的-1.31。而且,对各轴挑篷,前缘体型系数为绝对值较大的负值,后缘为较大的正值,因此整个挑篷受到较大的倾覆力矩,值得注意。相对而言,位于群体中间的挑篷风荷载小于端部的挑篷。

4.4 倾覆力矩系数

考虑结构的特殊性,分析了挑篷的倾覆力矩随风向角的变化规律,典型挑篷(1,2,6,7)上的倾覆力矩系数由式(5)可得到,如图10所示。力矩系数在斜风向角时出现峰值,端部的2号挑篷最不利。1轴、2轴在 $210^\circ \sim 225^\circ$ 风向角下较大,在 120° 附近出现的峰值较小,这与来流经过前排挑篷时,因为紊流度增加,削弱了挑篷顶部气流的分离有关,由于2轴实际高度比1轴高,故其峰值也大;6轴、7轴峰值接近,对称性更明显,主要是由于位于挑篷群列的中央,受到两侧挑篷的干扰。

5 结 语

通过对某实际工程的倒伞形挑篷群体结构进行风洞测压试验及分析,得到如下结论和建议:

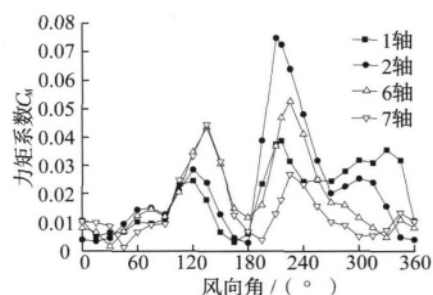


图 10 倾覆力矩系数随风向角变化

Fig. 10 Overturning moment factors in different wind directions

(1) 倒伞形结构群(挑篷)上的风荷载主要以向上的合风力为主。某些风向角下,挑篷上表面为吸力,而下表面出现正压力,造成合风力较大。

(2) 在来流方向的前缘,通常出现向上的合风压,而在后缘则为向下的合风压,整个挑篷受到较大的倾覆力矩,值得注意。

(3) 由于挑篷间的相互气动干扰效应,靠近端部的挑篷受力较大,位置高的挑篷处于不利的位置,因此在结构设计时要特别注意对端部挑篷的加强和防护。

参考文献

- [1] 冯虹,钱素萍,袁勇.索膜结构分析理论研究综述与展望[J].同济大学学报,2002,30(9):1033-1037.
Feng H, Qian S P, Yuan Y. Summarization and prospects for analysis of cable-membrane structures [J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(9): 1033-1037. (in Chinese)
- [2] 向阳,沈世钊,赵臣.伞形屋盖风压分布系数的风洞实验研究[J].哈尔滨建筑大学学报,1998,31(4):19-23.
Xiang Y, Shen S Z, Zhao C. Tunnel test study on wind pressure distribution of umbrella-shape roof [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1998, 31(4): 19-23. (in Chinese)
- [3] 余世策,孙炳楠,沈国辉,等.伞形膜结构组合屋盖风荷载特性的风洞试验研究[J].空气动力学学报,2005,23(1):40-45.
Yu S C, Sun B N, Shen G H, et al. Experimental investigation of wind loads on umbrella-shaped membrane assembled roofs [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2005, 23(1): 40-45. (in Chinese)
- [4] 方立新,顾建新,冯健.类锥形组合群膜结构的风荷

- 载探讨[J]. 工业建筑 2006 36(增刊):474-476.
Fang L X ,Gu U J X ,Feng J. Exploration of wind loads on tensile membrane structures with conic-form cells [J]. Industrial Buildings 2006 36(Supplement) :474-476. (in Chinese)
- [5] 殷志祥 ,孙芳锦. 倒伞式可展索膜结构静力特性分析[J]. 工程力学 2006 23(7) :160-164.
Yin Z X ,Sun F J. The analysis of static mechanical properties of deployable upside-down umbrane structures [J]. Engineering Mechanics ,2006 ,23 (7) : 160-164. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国建设部. GB 50009—2001 建筑结
构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社 2002.
Ministry of Construction P. R. China. GB 50009—2001 Loading Code for Design of Building Structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press ,2002. (in Chinese)
- [7] 黄鹏 ,全涌. 风洞中模拟大气边界层流场的方法研究[J]. 同济大学学报 ,1999 27(2) :136-144.
Huang P ,Quan Y. Research of passive simulation method of atmospheric boundary layer in TJ-2 wind tunnel [J]. Journal of Tongji University ,1999 27(2) : 136-144. (in Chinese)