

陶林,戴益民,刘泰廷,等.某体育场环状悬挑屋盖风载特性试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(4):25-32.  
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.004

TAO L, DAI Y M, LIU T T, et al. Experimental Investigation on Wind Load of Long-span Annular Cantilevered Roof [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(4): 25-32. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.004

# 某体育场环状悬挑屋盖风载特性试验

陶林,戴益民\*,刘泰廷,徐瑛,袁养金

(湖南科技大学 结构抗风与振动控制湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;  
湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**针对缩尺比为1:200的某体育场刚性模型开展风洞测压试验,研究悬挑屋盖表面风压分布特征及其风载变化规律.结果表明:对屋盖整体而言,其上下表面均受风吸力作用且二者随风向角的变化呈相同的变化趋势;来流上游屋盖表面净平均风压系数趋于0,来流下游屋盖表面净平均风压系数为负值,屋盖总体受到向上的升力;来流下游屋盖内缘迎风区域的风压波动强烈,净脉动风压系数远大于其他区域;净极小值风压系数分布规律与净脉动风压系数分布规律一致,均在来流下游屋盖内缘迎风区域达到最大值,抗风设计中应对该区域进行加强.

**关键词:**悬挑屋盖;风洞试验;层间缝隙;风压系数

**中图分类号:**TU312.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)04-0025-08

## Experimental Investigation on Wind Load of Long-span Annular Cantilevered Roof

TAO Lin, DAI Yimin, LIU Taiting, XU Ying, YUAN Yangjin

(Key Laboratory for Wind Resistance and Vibration Control of Structures in Hunan Province, Xiangtan 411201, China;  
School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The rigid model of stadium with a scale ratio 1 : 200 was adopted to obtain the distribution regularity of wind pressure on upper and lower surface of the cantilevered roof, by using synchronous pressure measurement in wind tunnel test. The results indicated that both of the upper and lower surface suffers suction and show the same tendency with variation of wind direction. The net mean wind pressure coefficients on roof located in upcoming flow is nearly to be 0 while the negative net wind pressure coefficients is found on roof in downstream flow field, which result in uplift force for the whole roof. The fluctuation of wind pressure in windward region of inner side for roof located in downstream flow field is more intensive than other part and the net fluctuating wind pressure coefficients is larger as well. The net min wind pressure coefficients show the same regularity with net fluctuating wind pressure coefficients, both of which get the maximum absolute value in windward region of inner side for roof located in downstream flow field, so the corresponding areas should be enhanced in wind resistance design.

**Keywords:** cantilevered roof; wind tunnel test; slots between roof floors; wind pressure coefficients

收稿日期:2018-12-11 修改日期:2021-11-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578237);湖南省研究生学位教育重点改革项目资助(2019JGZD063);湖南省教育厅科学研究重点项目资助(19A168)

\*通信作者,E-mail:dymzzy@163.com

大跨悬挑屋盖结构可提供较大无内柱空间,因而广泛应用于体育场看台、航站楼以及客运站台等大型公共建筑中,但由于其跨度大、质量轻等特点导致其屋盖结构柔性大,自振频率低且分布密集,因此,大跨悬挑屋盖对风荷载较为敏感<sup>[1]</sup>.

国内外学者对不同形式的大跨悬挑屋盖的风载特性进行研究,并得到了一些有意义的结论.张建等<sup>[2]</sup>对某波纹状悬挑屋盖与光滑表面屋盖的风载特性进行了对比分析,结果表明波纹形状会增大作用于悬挑屋盖上的平均风荷载、脉动风荷载及极值风荷载,但会减缓风荷载在折算频率 0.1~0.2 范围内的能量集中;李波等<sup>[3]</sup>对灵武体育场双侧月牙形大跨悬挑屋盖风压特性的分析表明,来流下游悬挑屋盖的平均风荷载、脉动风荷载均较来流上游悬挑屋盖大,上表面的极值风压数值普遍大于下表面且变化更为剧烈;陈亚楠等<sup>[4]</sup>运用数值模拟方法研究了多参数对某环状大悬臂挑篷风载特性的影响,分析表明增大看台后部的通风率会减小水平屋盖净平均风压系数绝对值极值,在屋盖前缘设置竖向导流板可有效地减小屋盖前缘局部极值风压,且屋盖上表面平均风压系数绝对值随导流板高度的增大而减小;吴海洋等<sup>[5]</sup>分析比较了前缘有拱与无拱 2 种形式大跨悬挑屋盖结构的抗风性能,结果表明来流风因受前缘拱阻挡,在屋盖上下表面均会发生流动分离,致使屋盖上下表面均呈现负风压,从而减小屋盖向上的升力;沈国辉等<sup>[6]</sup>以某航站楼为例,结合平屋面分析复杂体型屋面对风压分布的影响,结果表明迎风方向悬挑屋面呈现“上吸下顶”的风压叠加作用,其他风向则呈现出“上吸下吸”的风压抵消作用;Killen 等<sup>[7]</sup>通过风洞试验证实改变双侧布置的体育场的挑篷倾角及跨高比对挑篷峰值弯矩系数无显著影响,挑篷前缘开槽及设置竖向挑口板均可减小挑篷表面风荷载,增大看台后部的通风率可在一定程度上减小挑篷风荷载,但一般不超过 10%;Marighetti 等<sup>[8]</sup>对某圆环形平面体育场悬挑屋盖风压特性的研究表明,看台后方设置开放式的环形边界时,屋盖净平均升力系数要小于封闭式环形边界,但会使得局部区域的升力系数增大;Melbourne 等<sup>[9]</sup>对单侧布置的悬挑屋盖气弹模型进行前缘开槽优化处理,结果表明最优开槽宽度为屋盖悬挑长度的 5%,此时屋盖响应可减小 25%;Lam K M 等<sup>[10]</sup>对某单侧布置的水平大跨悬挑屋盖表面极值升力产生机理的研究表明,极值升力与屋盖上下表面的升力相关,且上表面对极值升力的贡献更大;李波等<sup>[11]</sup>、李毅等<sup>[12-13]</sup>对不同结构形式对屋盖的风荷载特性的影响进行了研究.

上述研究多针对单侧及双侧布置的悬挑屋盖,与环状悬挑屋盖相关的风洞试验研究则较少.文章以某体育场环状悬挑屋盖(屋盖表面设置多道通风带)为例,采用同步测压风洞试验方法对屋盖表面的平均风荷载、脉动风荷载及极值风荷载的分布特性进行研究,所得结果可为该类结构抗风设计提供参考.

## 1 风洞试验概况

### 1.1 工程背景

本试验以湖南省攸水湾生态城文体中心项目为工程背景,该文体中心由一场两馆组成,其平面图及立面图如图 1 所示.体育场平面为椭圆形,呈中心对称,南北向长轴长为 289 m,东西向短轴长为 245 m,其屋盖为椭圆形环状悬挑结构,屋面高度自短轴两端向长轴两端跌落,最大悬挑高度及悬挑长度位于短轴两端,分别为 36.4 与 39.3 m,最小悬挑高度及悬挑长度位于长轴两端,分别为 25.4 与 17.8 m.屋盖自上而下共分为 9 层,为满足通风要求,层间设缝处理.本试验仅研究体育场悬挑屋盖表面风荷载.

### 1.2 试验模型及流场模拟

试验采用由 PVC 材料制成的缩尺比为 1:200 的刚性模型,与实际结构在外形上保持几何相似.为获得体育场屋盖表面的真实风荷载,对周边建筑也进行了模拟.该体育场为开敞式结构,为了同时获得屋盖上下表面的风压时程数据,在屋盖上下表面共布置 430 对测点(共计 860 个测点),每对测点位置一一对应.测压设备采用美国 PSI 公司生产的电子压力扫描阀,采样频率为 312.5 Hz,每个测点采样次数为 10 000.在 0°~360°范围内逆时针每隔 10°进行一次风压测量,典型风向角如图 1a 所示.

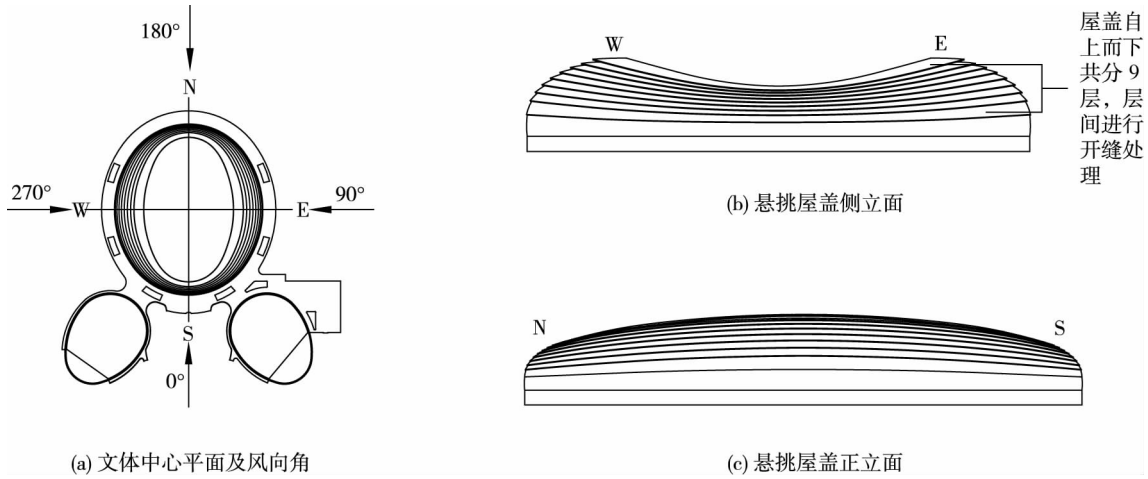


图 1 文体中心平面及悬挑屋盖立面

试验在湖南科技大学风工程试验研究中心大气边界层直流风洞中进行,采用尖劈、粗糙元及挡板等被动模拟装置模拟出符合我国规范规定的缩尺比 1 : 200 的 B 类地貌风场,平均风剖面指数  $\alpha$  为 0.15,测压参考高度  $H_r$  为 35 cm,对应实际高度 70 m.平均风速及湍流度剖面如图 2 所示,其中  $U$  为试验平均风速,  $U_r$  为参考高度处的平均风速,取值为 10 m/s,  $H$  为风洞试验高度.风洞试验模型如图 3 所示.

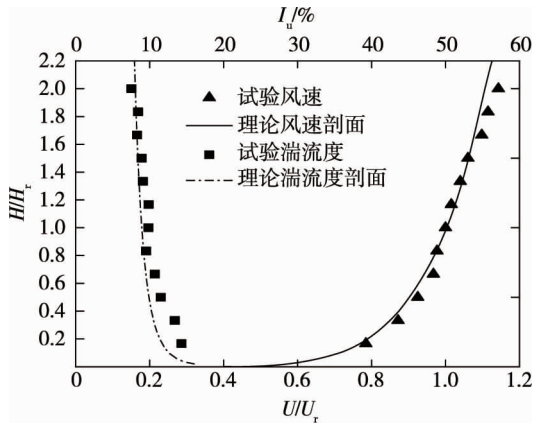


图 2 平均风速及湍流度剖面

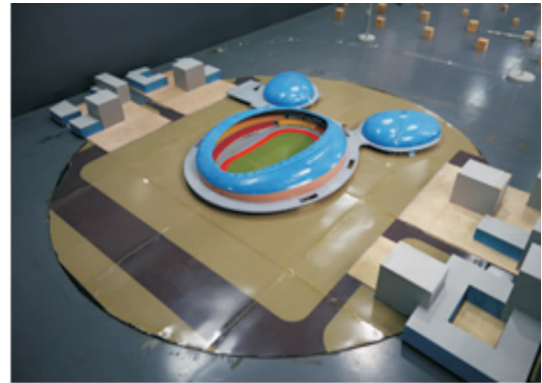


图 3 风洞试验模型

### 1.3 数据处理

试验符号约定以压力向内(压)为正,向外(吸)为负,屋盖表面各测点的平均风压系数为

$$\bar{C}_{pi} = \frac{\bar{p}_i - p_\infty}{p_0 - p_\infty}$$

式中:  $\bar{C}_{pi}$  为模型上测点  $i$  处的平均风压系数;  $\bar{p}_i$  为测点  $i$  处测得的平均风压;  $p_0$  和  $p_\infty$  为参考点处的平均总压与平均静压.

对于开敞式悬挑屋盖,净平均风压系数由上下表面对应测点的平均风压系数相减得到:

$$\bar{C}_{pi,net} = \frac{\bar{p}_i^u - \bar{p}_i^d}{p_0 - p_\infty} = \frac{\bar{p}_i^u}{p_0 - p_\infty} - \frac{\bar{p}_i^d}{p_0 - p_\infty} = \bar{C}_{pi}^u - \bar{C}_{pi}^d$$

式中:  $\bar{C}_{pi,net}$  为模型上测点  $i$  处的平均风压差系数,即净平均风压系数;  $\bar{p}_i^u, \bar{p}_i^d$  为屋盖上表面与下表面测点  $i$  处的平均风压;  $\bar{C}_{pi}^u, \bar{C}_{pi}^d$  为屋盖上表面与下表面测点  $i$  处的平均风压系数.

对于双面布置测点的悬挑屋盖,净脉动风压均方根系数由屋盖上下表面对应测点的合风压系数求得

$$\bar{C}_{pi,rms}^{net} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (C_{pi,k} - \bar{C}_{pi,net})^2 / (N - 1)}$$

式中:  $C_{pi,k}$  为测点  $i$  处第  $k$  次采样对应的合风压系数;  $N$  为时程内采样总数.

因此,可求出测点  $i$  的净极大值风压系数  $\bar{C}_{pi,max}$  与净极小值风压系数  $\bar{C}_{pi,min}$  为

$$\bar{C}_{pi,max} = \bar{C}_{pi,net} + g\bar{C}_{pi,rms}^{net};$$

$$\bar{C}_{pi,min} = \bar{C}_{pi,net} - g\bar{C}_{pi,rms}^{net}.$$

式中:  $g$  为峰值因子,取值范围为 2.5~4.0,此处取 3.5.

求得各测点风压系数后,屋盖表面升力系数  $C_w$  为

$$C_w = \frac{\sum_{i=1}^n C_{pi} A_i \cos \beta_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

式中:  $C_{pi}$  为测点  $i$  处的风压系数;  $A_i$  为测点  $i$  的附属面积;  $\beta_i$  为测点  $i$  处外法线与竖直方向的夹角.

## 2 平均风荷载特征

### 2.1 平均升力系数

图 4 为体育场悬挑屋盖表面整体平均升力系数随风向角变化的曲线.由图 4 可知:屋盖上下表面及净平均升力系数均为负值(为便于描述,将下表面向下的风吸力也视为升力),由前述符号约定可知屋盖上下表面均受到风吸力作用.屋盖上下表面平均升力系数绝对值(为便于描述,后文所述升力系数均为其绝对值)随风向角的增加呈先减小后增大,而后再减小再增大的趋势,形状类似“M”.屋盖上表面平均升力系数始终大于下表面,介于 0.24~0.32,下表面平均升力系数不超过 0.2,屋盖上表面承受更大的风吸力.0°风向角时,屋盖上下表面平均升力系数均达到最大,分别为 0.32, 0.20.在 60°及 250°风向角附近,屋盖上下表面平均升力系数达最小值,分别为 0.24, 0.08.

净平均升力系数的变化趋势则与屋盖上下表面平均升力系数的变化趋势相反,呈先增大后减小,而后再增大再减小的趋势,形状类似“W”.净平均升力系数在 60°及 250°风向角附近达到最大值 0.17,与上下屋盖表面情形相反.0°及 180°风向角时,净平均升力系数均较小,其值分别为 0.12, 0.11,净平均升力系数在 180°风向角时两侧几乎呈对称分布.

### 2.2 平均风压系数

选取 0°, 90°这 2 种典型风向角下屋盖表面的平均风压系数进行分析,结果如图 5 和图 6 所示.由图 5 可知:0°风向角下,由于所研究的建筑及其周边建筑关于来流方向基本对称,故东、西两侧悬挑屋盖表面平均风压系数关于来流方向也基本呈对称分布.另外,以短轴为界,南、北两侧屋盖净平均风压系数分布的差异较大.由图 5a 和图 5b 可知:来流上游南侧屋盖上下表面除南端外缘区域外,风吸力幅值相当,上下表面风压系数均介于 -0.2~-0.4,二者叠加形成“上吸下吸”的抵消结果,使得南侧屋盖表面整体净平均风压系数绝对值较小,接近 0(如图 5c 所示).

屋盖南端附近外缘区域净平均风压系数为正值,最大值达 0.5,这是因为此时外缘区域位于迎风面,且气流受两侧体育馆阻挡产生一定的“兜风效应”,因而该区域产生一定正压(如图 5a 所示).而在屋盖下表面外缘区域,气流流经层间缝隙,形成一定的流动分离产生负压,上下表面风压系数叠加使得外缘区域的净平均风压系数较大.由图 5c 可知:此时该处风压等值线分布较为密集,表明该区域风压变化剧烈,风压梯度较大.

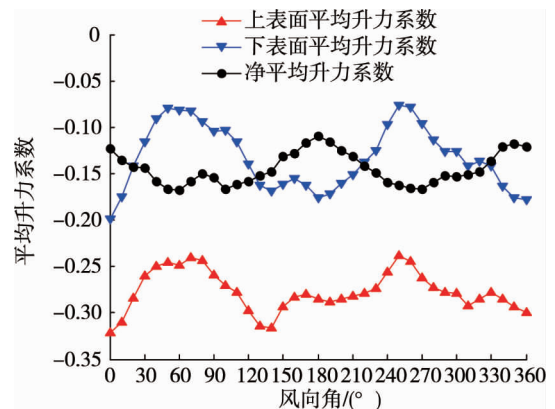


图 4 屋盖整体平均升力系数随风向角变化的曲线

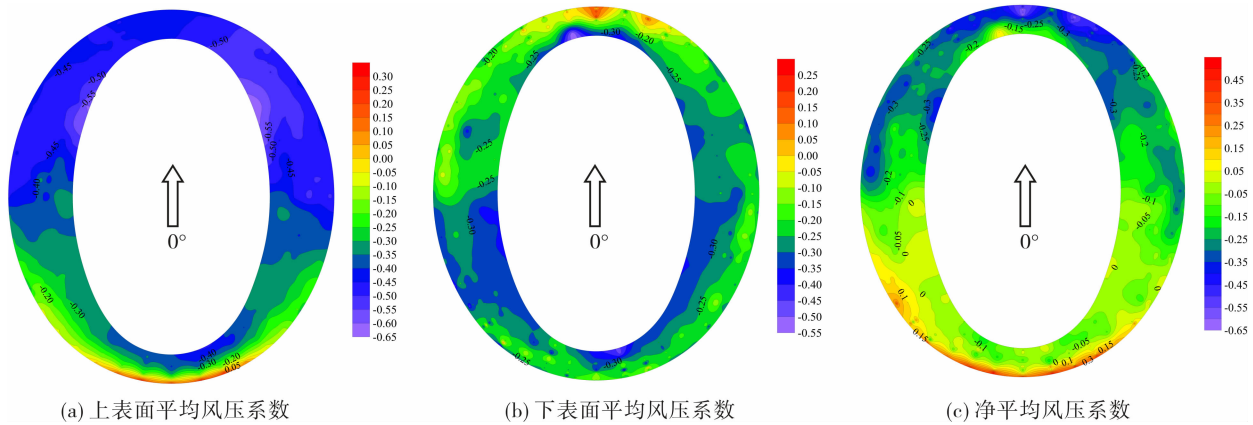


图 5 体育场悬挑屋盖平均风压系数分布(0°风向角)

来流下游北侧屋盖净平均风压系数为负值,大部分区域风压系数集中在 $-0.45 \sim -0.10$ ,最小风压系数出现在屋盖北侧端部外缘区域,其值为 $-0.65$ .体育场悬挑屋盖自短轴两端向长轴两端跌落,短轴两端较为突出,气流在此处发生流动分离形成高负压区,屋盖上表面风压系数介于 $-0.65 \sim -0.35$ (如图 5a 所示).由于层间间隙宽度较小,气流经过层间缝隙时,在屋盖下表面流动分离受限,因而屋盖下表面大部分区域的负风压系数绝对值较小,其值介于 $-0.25 \sim 0.00$ ,上下表面风压系数叠加所得净平均风压系数为负值,表现为向上的升力.对于北侧端部外缘部分,屋盖上表面因处于尾流区域而表现为负压,风压系数介于 $-0.5 \sim -0.4$ ,屋盖下表面因层间缝隙宽度较小,且屋盖接近于正对来流方向(如图 1b 所示),因而表现为正压,风压系数介于 $0.00 \sim 0.25$ ,上下表面风压系数呈“上吸下顶”的叠加效果,从而使得北侧端部外缘区域的净平均风压系数较大.

由图 6 可知:90°风向角下,以长轴为界,东、西两侧屋盖净平均风压系数分布的差异较大.此时,东侧屋盖位于迎风面,由图 6a 和图 6b 可知:来流上游东侧屋盖上下表面除东侧外缘区域均为负压,上表面屋盖平均风压系数介于 $-0.4 \sim -0.1$ ,下表面屋盖平均风压系数介于 $-0.25 \sim -0.10$ ,二者叠加作用使得东侧屋盖大部分区域净平均风压系数绝对值较小,介于 $-0.15 \sim 0.00$ (如图 6c 所示).这是由于气流流经东侧屋盖时受到周边建筑阻挡被削弱(如图 3 所示),且屋盖各层之间设有狭长通风孔隙,气流流经缝隙在屋盖上下表面各层迎风边缘均产生流动分离,使得屋盖上下表面均受风吸力而产生“上吸下吸”的抵消作用.

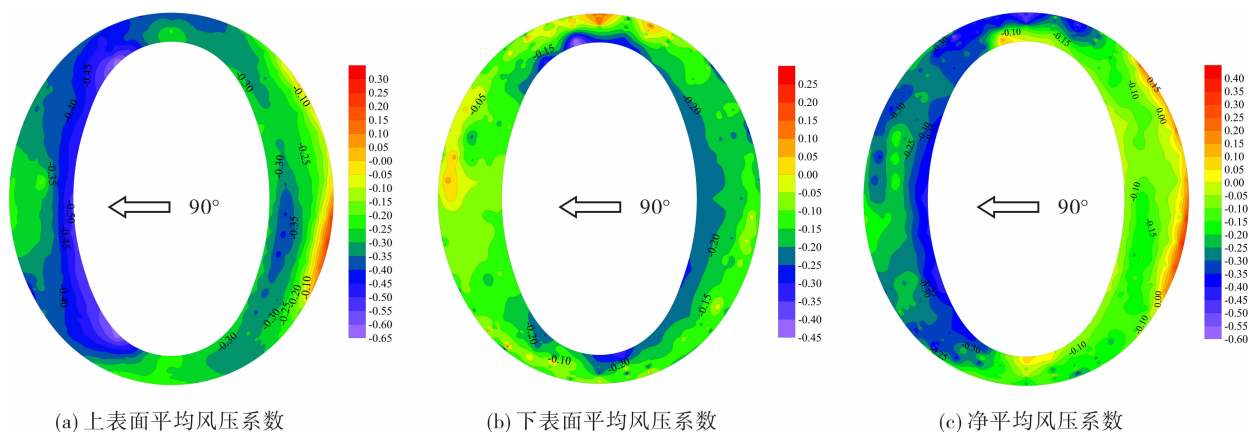


图 6 体育场悬挑屋盖平均风压系数分布(90°风向角)

东侧迎风屋面外缘区域几乎正对来流方向(如图 1b 所示),使得屋盖上表面产生正压,风压系数介于 $0.00 \sim 0.25$ ,受层间缝隙宽度限制,通过缝隙的气流较少,因而屋盖下表面气流分离受限,负风压系数绝对值较小,介于 $-0.10 \sim -0.15$ .上下表面风压系数的叠加作用使得外缘区域净平均风压系数为正,其值介于 $0.0 \sim 0.4$ .由图 6c 可知:此处风压系数较为密集,表明此处风压系数变化剧烈,风压梯度较大.

来流下游西侧屋盖表面净平均风压系数为负,其值介于 $-0.15 \sim -0.45$ .因西侧屋盖迎风前缘较长,气流



流经此处时,在上表面发生流动分离形成高负压区,大部分区域风压系数介于 $-0.20 \sim -0.65$ .在屋盖下表面,气流分离受层间缝隙宽度的限制而减弱,大部分区域负风压系数绝对值均较小,其值介于 $-0.25 \sim 0.00$ .上下表面风压系数叠加作用后所得净平均风压系数为负值,表现为向上的升力.

### 3 脉动风荷载特征

#### 3.1 脉动升力均方根系数

图7为体育场悬挑屋盖表面脉动升力均方根系数随风向角变化的曲线.由图7可知:屋盖上下表面脉动升力均方根系数随风向角变化的趋势基本一致,上表面脉动升力均方根系数始终大于下表面脉动升力均方根系数,这与平均升力系数变化的规律一致.在 $0^\circ \sim 150^\circ$ 风向角范围内,二者均呈先增大后减小,再增大再减小的变化趋势,上表面脉动升力均方根系数最大值为0.1,下表面脉动升力均方根系数最大值为0.09;在 $160^\circ \sim 240^\circ$ 风向角范围内,上表面屋盖脉动升力均方根系数在0.085上下波动,下表面脉动升力均方根系数在0.075上下波动;在 $250^\circ \sim 360^\circ$ 风向角范围内,二者数值略有增大,上表面屋盖脉动升力均方根系数在0.095上下波动,下表面脉动升力均方根系数在0.08上下波动.

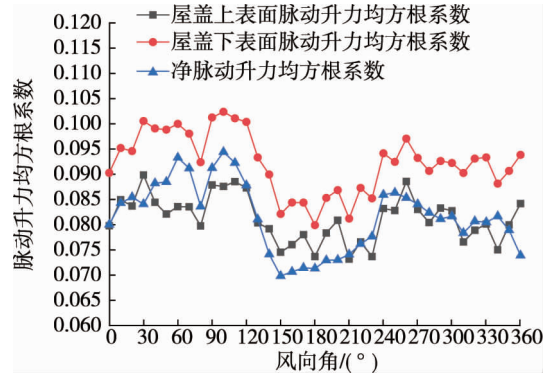


图7 脉动升力均方根系数随风向角变化曲线

净脉动升力均方根系数在 $0^\circ \sim 150^\circ$ 风向角范围内的变化规律与屋盖上下表面相同,呈先增大后减小,再增大再减小的变化趋势,在 $100^\circ$ 风向角时达到最大值0.095;在 $110^\circ \sim 150^\circ$ 风向角范围内,呈明显递减趋势,在 $150^\circ$ 风向角时达到最小值0.07;在 $160^\circ \sim 360^\circ$ 风向角范围内呈先增大后减小的趋势,且净脉动升力均方根系数与下表面脉动升力均方根系数接近.

#### 3.2 净脉动风压均方根系数

图8为 $0^\circ, 90^\circ$ 风向角下,悬挑屋盖净脉动风压均方根系数分布云图.由图8a可知: $0^\circ$ 风向角下,以短轴为界,南、北两侧屋盖净脉动风压均方根系数分布的差异明显.来流上游南侧屋盖从内缘到外缘区域,净脉动风压均方根系数逐渐增大,且梯度较大,越靠近外缘变化越剧烈;靠近内缘区域净脉动风压均方根系数介于 $0.02 \sim 0.10$ ,表明此处风压波动较小;南侧屋盖外缘部位净脉动风压均方根系数介于 $0.10 \sim 0.16$ ,表明此处风压波动稍大于屋盖内缘部位.总体而言,来流上游南侧屋盖净脉动风压均方根系数的变化较小,这可能是由于南侧屋盖为沿来流方向呈缓慢上升趋势的曲面构型,无锐利边缘,气流在屋盖各层上下表面的分离不强烈,且气流可顺畅地通过屋盖各层间缝隙,受到的阻碍较小,因而风压脉动较小.来流下游北侧屋盖表面净脉动风压均方根系数整体上大于南侧屋盖,绝大部分区域的净脉动风压均方根系数介于 $0.16 \sim 0.25$ ,这是由于短轴北侧屋盖处于来流下游方向,气流在短轴处分离后,屋盖大部分区域处于分离泡范围内,且气流在屋盖下方体育场内也会受到一定阻碍,形成复杂的三维流动,使得屋盖表面风压脉动较大.

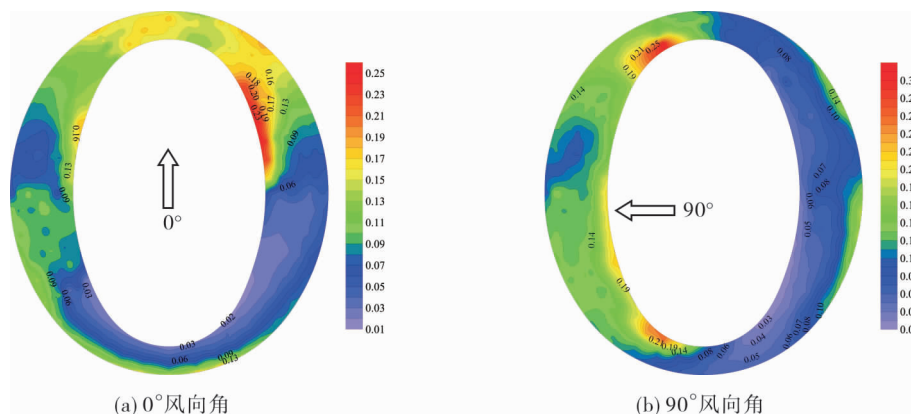


图8 体育场悬挑屋盖净脉动风压均方根系数分布

由图 8b 可知:90°风向角下,以长轴为界,东、西两侧屋盖净脉动风压均方根系数分布的差异较大.来流上游东侧屋盖,与 0°风向角类似,从内缘到外缘区域,净脉动风压均方根系数逐渐增大,但变化梯度小于 0°风向角时的情形,净脉动风压均方根系数沿短轴方向的变化较为均匀,在短轴两侧的变化较为剧烈.靠近内缘大部分区域,净脉动风压均方根系数均较小,介于 0.02~0.11,表明该处风压波动较小;靠近外缘大部分区域,净脉动风压均方根系数介于 0.11~0.18,稍大于内缘区域.与 0°风向角类似,位于来流上游的东侧屋盖整体上的净脉动风压均方根系数较小,这主要是因为 90°风向角时,来流受东侧屋盖上游周边建筑的阻挡而减弱且气流可顺畅通过屋盖各层间的狭长缝隙,气流脉动程度减小.处于来流下游的西侧屋盖净脉动风压均方根系数整体上大于东侧屋盖,介于 0.10~0.25.西侧屋盖靠近内缘区域的净脉动风压均方根系数较大,尤其是长轴两端处,该值要大于其他区域,且变化梯度较大,这是由于屋盖内缘区域位于来流下游迎风面,气流在迎风边缘发生较为强烈的流动分离形成分离泡,屋盖大部分区域位于分离泡内,且流经东侧屋盖缝隙的气流在体育场内汇聚,形成复杂的三维流动,因而迎风内缘风压波动较外缘区域剧烈.

## 4 极值风荷载特性

对于大跨悬挑屋盖而言,向上的风吸力所产生的影响要大于向下的风压力,因此文章仅分析 0°与 90°这 2 种典型风向角下的极小值风荷载分布情况.

### 4.1 极小值升力系数

图 9 为体育场悬挑屋盖表面极小值升力系数随风向角变化的曲线.由前述符号约定,屋盖表面受风吸力作用,且上表面极小值升力系数始终大于下表面,这与前述平均升力系数及脉动升力均方根系数随风向角变化的规律相同.在 0°~120°风向角范围内,上下表面极小值升力系数随风向角总体上均呈先减小后增大的趋势,120°风向角时,屋盖上表面极小值升力系数达最大值 0.65;在 130°~180°风向角范围内,其值略有降低;190°~260°风向角时,该值在 0.6 上下波动;270°~360°风向角时,其值略有增大,但不超过 0.65.屋盖下表面极小值升力系数的变化幅度稍大于上表面,0°风向角时,下表面极小值升力系数达最大值 0.48;130°~180°风向角时,该值在 0.42 上下波动;190°~250°风向角时,呈明显的减小趋势,250°风向角时达最小值 0.37;260°~360°风向角时,其值呈显著增大趋势.

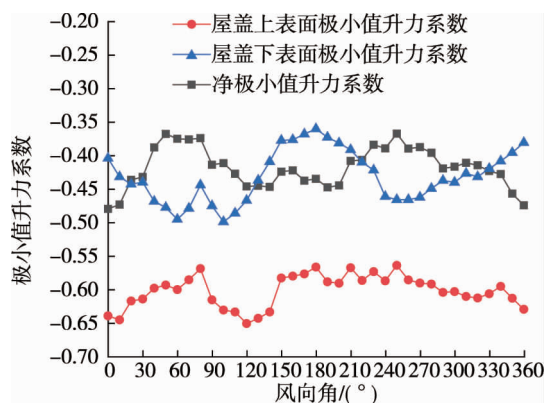


图 9 极小值升力系数随风向角变化曲线

净极小值升力系数在 0°~100°风向角范围内的变化较大,呈先增大后减小再增大的趋势,在 60°及 100°风向角时达最大值 0.5;在 110°~360°风向角范围内,呈先减小后增大再减小的趋势,180°风向角时达最小值 0.36.

### 4.2 净极小值风压系数

图 10 为 0°与 90°风向角下屋盖表面净极小值风压系数分布云图.由图 10a 可知:0°风向角下,以短轴为界,来流上游南侧屋盖净极小值风压系数的绝对值普遍小于来流下游北侧屋盖,前者介于-0.10~-0.45,后者介于-0.45~-1.25,北侧屋盖端部外缘及内缘区域净极小值风压系数的绝对值较大,与净脉动风压均方根系数的分布规律类似.气流在短轴处产生较强的流动分离,来流下游北侧屋盖处于分离泡下,平均及脉动风压均方根系数均较大,因而净极小值风压系数绝对值较大.

由图 10b 可知:来流上游东侧屋盖净极小值风压系数的绝对值普遍小于来流下游西侧屋盖,东侧屋盖净极小值风压系数介于-0.15~-0.50,西侧屋盖介于-0.50~-1.45,且在西侧屋盖内缘迎风边缘处净极小值风压系数的绝对值较大,这与净脉动风压均方根系数的分布规律一致.

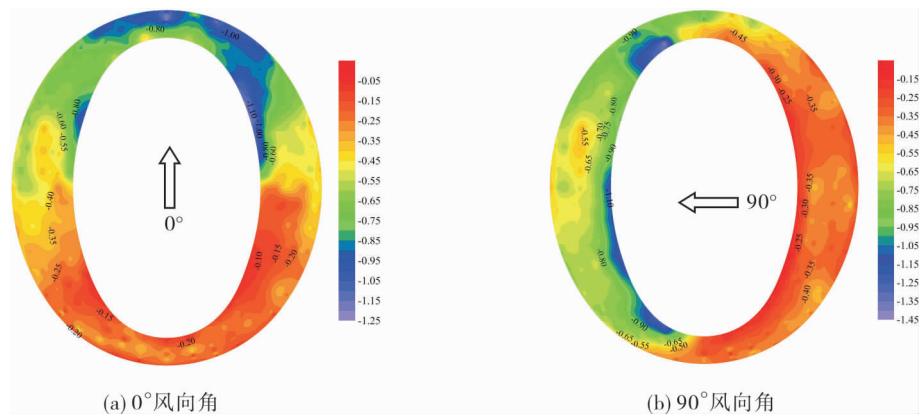


图 10 体育场悬挑屋盖净极小值风压系数分布

## 5 结论

1) 屋盖上下表面的平均升力系数、脉动升力系数和极小值升力系数随着风向角的增加呈现先减小后增大,而后再减小再增大的趋势,且上表面的升力系数始终大于下表面。屋盖净平均升力系数随风向角的变化趋势则与屋盖上下表面相反,并在  $60^\circ$  及  $250^\circ$  风向角附近达到最大值 0.17。净脉动升力均方根系数在  $0^\circ \sim 150^\circ$  风向角范围内的变化趋势与屋盖上下表面相同,在  $160^\circ \sim 360^\circ$  风向角范围内则与下表面脉动升力均方根系数接近。净极小值升力系数在  $0^\circ \sim 100^\circ$  风向角范围内呈先增大后减小再增大的趋势,在  $60^\circ \sim 100^\circ$  风向角范围内达到最大值 0.5,在  $110^\circ \sim 360^\circ$  风向角范围内呈先减小后增大再减小的趋势,在  $180^\circ$  达到最小值 0.36。

2) 来流前缘区域的净平均风压系数为正值,且风压变化剧烈,最大值可达 0.5,在设计时要对这些区域进行额外的加固处理。来流上游屋盖上下表面的平均风压系数相互抵消导致净平均风压系数趋于 0,来流下游屋盖的净平均风压系数为负,屋盖总体受到向上的升力。

3) 来流下游屋盖内缘迎风区净风压均方根系数远大于其他区域,且净极小值风压系数的分布规律则与净风压均方根系数的分布规律一致,说明在结构设计时应增加这部分的刚度及疲劳强度以提高其抗风能力。

## 参考文献:

- [1] Holmes J D. Wind Loading of Structures[M]. 全涌,李加武,顾明,译.北京:机械工业出版社,2015.
- [2] 张建,李波,单文姗,等.波纹状悬挑大跨屋盖的风荷载特性[J].建筑结构学报,2017,38(3):111-117.
- [3] 李波,冯少华,杨庆山,等.体育场月牙形大跨悬挑屋盖风荷载特性[J].哈尔滨工程大学学报,2013,34(5):588-592.
- [4] 陈亚楠,周岱,孙颖昊.环状大悬臂挑篷风载特性与风场绕流分析[J].建筑结构学报,2012,33(5):53-61.
- [5] 吴海洋,梁枢果,郭必武.大跨悬挑屋盖结构形式对抗风性能的影响[J].重庆建筑大学学报,2007,29(5):97-102.
- [6] 沈国辉,孙炳楠,楼文娟.复杂体型大跨屋盖结构的风荷载分布[J].土木工程学报,2005,38(10):39-43.
- [7] Killen G P, Letchford C W. A parametric study of wind loads on grandstand roofs[J]. Engineering Structures, 2001, 23(6): 725-735.
- [8] Marighetti J, Wittwer A, Bortoli M D, et al. Fluctuating and mean pressure measurements on a stadium covering in wind tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 84(3): 321-328.
- [9] Melbourne W H, Cheun J C K. Reducing the wind loading on large cantilevered roofs[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 28(1/3): 401-410.
- [10] Lam K M, Zhao J G. Occurrence of peak lifting actions on a large horizontal cantilevered roof[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(8): 897-940.
- [11] 李波,魏梓曦,单文姗,等.建筑造型对悬挑屋盖风荷载的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(5):94-101.
- [12] Li Y, Li Y G, Li Q S, et al. Investigation of wind effect reduction on square high-rise buildings by corner modification[J]. Advances in Structural Engineering, 2018,22(1):1488-1500.
- [13] Li Y, Tian X, Tee K F, et al. Aerodynamic treatments for reduction of wind loads on high-rise buildings[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2018, 172:107-115.