

Experimental Investigation on Wind Effects on Large-Span Cantilevered Structure

Shuxi Xiao^{1*}, Shen'gen Yuan¹, Can Meng¹, Fubin Chen^{2#}, Li Lin³, Bilin Tong²

¹Xiangtan City Building Design Institute, Xiangtan Hunan

²School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

³Institute of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen Fujian

Email: 1046995411@qq.com, #75162016@qq.com

Received: Nov. 9th, 2016; accepted: Nov. 25th, 2016; published: Nov. 28th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The characteristics of wind pressures and wind-induced responses were investigated based on the pressure data with rigid model tests of Qiannan Stadium in detail. The results show that: 1) the mountains and the gymnasium have obvious interference effect on the stadium, and the maximum negative wind loads occur in oblique wind direction; 2) the wind-induced displacement responses are small, and far less than the limit specified in the code; 3) the largest negative wind pressures occur in the windward leading edge, and inverse pressure gradient is observed. The results are expected to be very useful for the design of future large-span cantilevered structures.

Keywords

Large-Span Cantilevered Structure, Wind Tunnel Test, Wind Load, Wind-Induced Response, ESWL

大跨悬挑结构风效应试验研究

肖曙曦^{1*}, 袁深根¹, 孟 灿¹, 陈伏彬^{2#}, 林 立³, 童弼麟²

¹湘潭市建筑设计院, 湖南 湘潭

²长沙理工大学土木与建筑学院, 湖南 长沙

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 肖曙曦, 袁深根, 孟灿, 陈伏彬, 林立, 童弼麟. 大跨悬挑结构风效应试验研究[J]. 土木工程, 2016, 5(6): 270-281. <http://dx.doi.org/10.12677/hjce.2016.56036>

³厦门理工学院土木工程与建筑学院，福建 厦门
Email: 1046995411@qq.com, #75162016@qq.com

收稿日期：2016年11月9日；录用日期：2016年11月25日；发布日期：2016年11月28日

摘要

基于黔南体育场刚性模型测压数据，详细分析了风荷载特征与风致响应特性。结果表明：1) 周边的体育馆与山体对体育场风压具有较为明显的干扰作用，最大负风压发生在斜向来流；2) 风致位移响应较小，远小于规范限值；3) 最大负风压发生在迎风的悬挑前沿，且具有很大的逆压梯度。所得结果可为此类大跨悬挑结构进行风荷载设计提供参考。

关键词

大跨悬挑结构，风洞试验，风荷载，风致响应，等效静风荷载

1. 引言

大跨结构具有造型新颖、建筑空间大等特点，广泛应用于大型体育场馆、火车站、机场航站楼、展览中心等建筑。大跨悬挑结构以其独特的使用功能被广泛应用于体育场建筑中，且随着结构悬挑跨度不断增大，其自振周期变长、阻尼变小，结构的风敏感性逐渐增强，风荷载成为结构设计的主要控制荷载。

风洞试验是目前结构风工程中评估结构风致荷载与风致响应最普遍与最有效的手段。随着信号采集技术的发展，自上世纪 90 年代初开始，同步多点测压系统已应用于结构表面风压的测试，由于可以做到多测点同步监测，便可通过瞬态积分方法获得结构风荷载并开展风致响应研究[1]。国内外众多学者开展了大量常规风场条件下大跨悬挑结构风荷载确定[2][3]和风荷载特性[4][5][6]的风洞试验研究。风致响应计算常用的方法有：频域分析法和时域分析法。频域分析法中荷载以脉动风力谱的形式输入，通过动力传递系数得到反应谱，再由随机理论对反应谱积分计算出结构动力响应值。这种方法概念清晰，计算效率高，因此频域分析方法广泛应用于结构的风致响应计算中。楼文娟等基于刚性模型测压数据提出了用于计算风振响应的多阶模态方法[7]，并被广泛应用于工程实践中[8]。

黔南州全民健身活动中心，由一座体育场(由西看台与东看台组成)与一座体育馆组成(如图 1)，整个建筑造型象征毛尖、山峦与翅膀。毛尖是黔南州特产；山峦是黔南州的整体地形风貌，强调黔南州的地域文化；而翅膀则寓意着黔南州全民健身活动中心的建设必将成为新城区城市经济与精神文化建设的翅膀，在州政府带领下展翅飞翔、越飞越高。体育场北侧毗邻一个约百米高的山体，体育馆位于其东北角，通过连廊连接，在南侧的道路边缘亦有约百米高度的山体，表现为典型西部山区地貌类别。

本文以黔南州全民健身活动中心体育场为研究对象，开展刚性模型测压试验，分析在典型山区地貌下的大跨悬挑结构风荷载特性及风致响应。

2. 风洞试验研究

2.1. 风场条件

试验在湖南科技大学的大气边界层风洞中进行。该风洞为直流单试验段风洞，由风扇段、扩散段、收缩段、试验段、拐角导流片、稳定段、蜂窝器等部分组成，试验段宽 4.0 m，高 3.0 m，长度 21 m，转

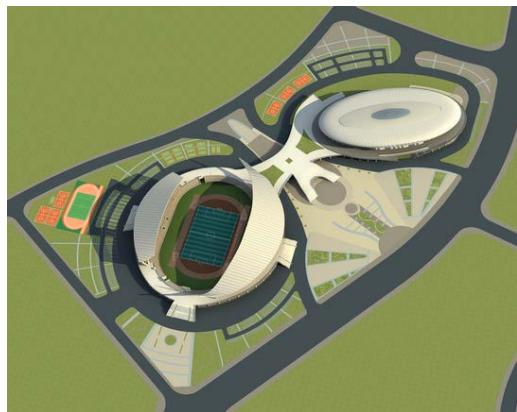


Figure 1. The national fit-keeping program center of Qiannan state

图 1. 黔南州全民健身活动中心

盘直径 3 m。调速系统采用西门子 6RA7090 型直流调速装置，风洞风速控制、数据采集与试验监视基本全部集中在主控制室以实现全自动化计算机系统控制，风速 1~30 m/s 连续可控。试验区流场的速度不均匀性小于 1%、湍流度小于 0.2%、平均气流偏角小于 0.5°，流场性能良好。

地貌类型按国家《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012) [9] 中规定的 B 类地貌考虑，地貌粗糙度系数(指数律) $\alpha = 0.15$ 。在试验之前，首先以二元尖塔、挡板及粗糙元来模拟 B 类地貌的风剖面及湍流度分布，如图 2 所示。本次风洞试验中，参考高度取为 60 cm，对应实际高度 150 m。

2.2. 试验模型

黔南州全民健身活动中心体育场试验模型是用 ABS 板制成的刚体模型，具有足够的强度和刚度。模型与实物在外形上保持几何相似，缩尺比为 1:250，高度约为 20 cm。周边模型比例也为 1:250。将模型固定在风洞试验室的木制转盘上，如图 3 所示。

为了测取屋面上的风压分布，在模型屋面上共布置 254 对测点。其中在体育馆西看台屋面布置了 96 对测点(LUD1~LUD96)；在东看台屋面布置 158 对测点(UD1~UD158)。测点布置图详见图 4。

风洞试验时，每一个风向测量一组数据。风向角间隔为 10°，以正北向来风定义为 0° 风向，顺时针旋转，总共有 36 个风向，如图 5 所示。

3. 数据处理

3.1. 风压数据处理

模型试验中符号约定以压力向内(压)为正，向外(吸)为负。屋盖表面各点的风压系数由下列公式给出：

$$c_{pi}(t) = \frac{p_i(t) - p_\infty}{p_0 - p_\infty} \quad (1)$$

式中， $c_{pi}(t)$ 是试验模型上第 i 个测压孔所在位置的风压系数， $p_i(t)$ 是该位置上测得的表面风压值， p_0 和 p_∞ 分别为参考点处测得的平均总压和平均静压。对于悬挑的位置(上下对应布置两个测压孔)，由上下表面对应的测压点测出的压力相减得到：

$$\Delta c_{pi}(t) = \frac{p_i^u(t) - p_i^d(t)}{p_0 - p_\infty} \quad (2)$$

其中， $\Delta c_{pi}(t)$ 表示试验模型上第 i 个测压孔所在位置的风压差系数， $p_i^u(t)$ 、 $p_i^d(t)$ 分别表示该位置上下

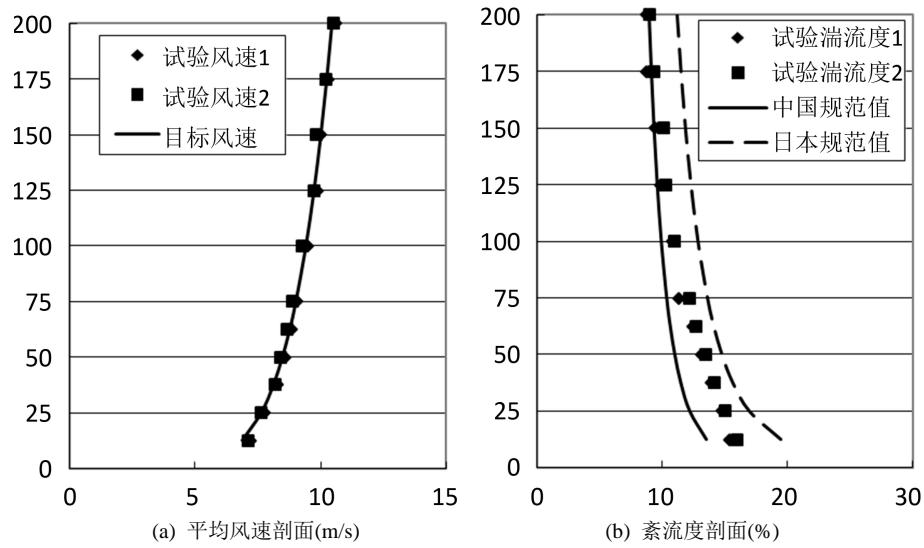
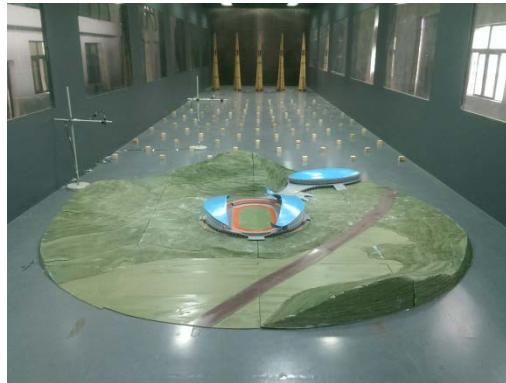
**Figure 2.** Profiles of wind field at terrain B

图 2. B 类风场参数

**Figure 3.** Wind tunnel models
图 3. 风洞试验模型

表面的风压值，为了简化叙述，本文均采用压力系数 $c_{pi}(t)$ 来表示公式(5)、(6)两种情况。

对于脉动风压，可以通过公式(7)来求得脉动风压均方根值 C_{prms} ：

$$C_{prms} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (C_{pik} - \bar{C}_p)^2 / (N-1)} \quad (3)$$

其中， C_{pik} 为第 i 个测压孔所在位置的风压差系数时程， N 为样本数。

依此可以求出测点的峰值风压系数：

$$C_{p\max} = \bar{C}_p + gC_{prms} \quad (4)$$

$$C_{p\min} = \bar{C}_p - gC_{prms} \quad (5)$$

其中， \bar{C}_p 为平均风压系数， g 是峰值因子。本文取峰值 $g = 3.5$ 。

3.2. 风致响应分析——多阶模态力法[7]

对于大跨度弹性屋面结构，其有限元振动方程为：

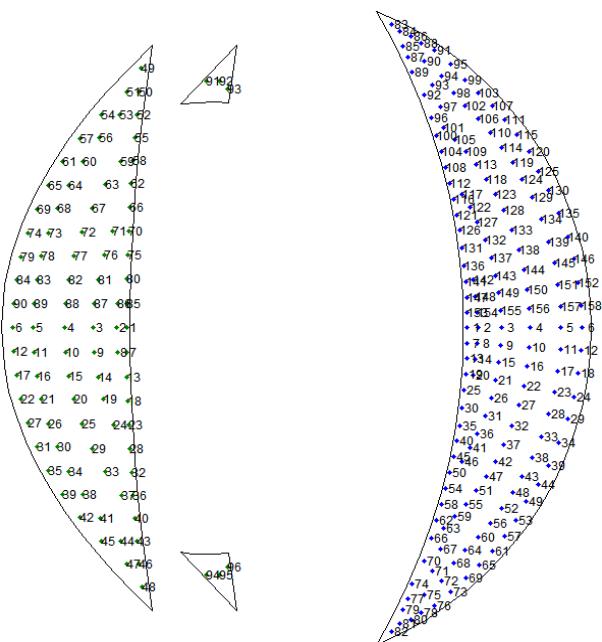


Figure 4. Layout of wind pressure taps
图 4. 测点布置图

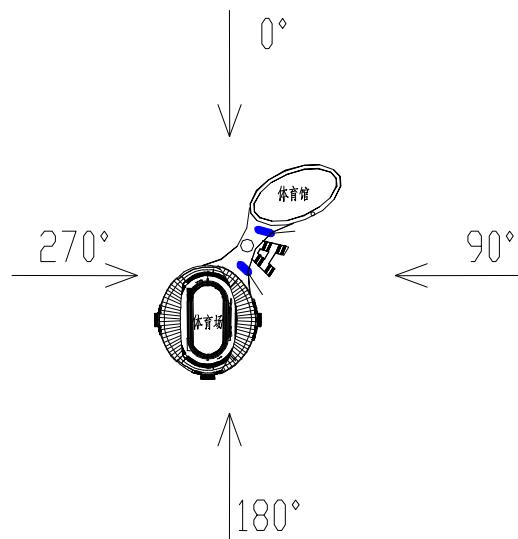


Figure 5. Definition of wind attack angles
图 5. 风向角定义

$$[M]\{y''\} + [C]\{y'\} + [K]\{y\} = \{P(t)\} \quad (6)$$

式中: $P(t)$ 为屋面上各点的风致气动力。设位移按振型分解, 对于第 j 阶振型, 则有:

$$q_j'' + 2\xi_j \omega_j q_j' + \omega_j^2 q_j = \frac{F_j(t)}{M_j} \quad (7)$$

式中: M_j 为第 j 阶广义质量; $F_j(t)$ 为风致气动力的第 j 阶模态力, 定义为:

$$F_j(t) = \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} p(x, y, t) \phi_j(x, y) dx dy \quad (8)$$

式中： $p(x, y, t)$ 为屋面上某一点(x, y)处的竖向脉动风压时程， $\phi_j(x, y)$ 为第 j 阶模态的竖向分量。 L_1, L_2 分别为屋盖的面积积分范围。 j 阶模态力 $F_j(t)$ 可以进一步表达为类似于风压系数的无量纲参数 $C_{F_j(t)}$ ：

$$C_{F_j(t)} = \frac{F_j(t)}{Q_H B_j} \quad (9)$$

式中： $C_{F_j(t)}$ 称为模态力系数， Q_H 为参考风压， $Q_H = \frac{1}{2} \rho v^2 H$ ， B_j 可以通过下式确定

$$B_j = \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \phi_j^2(x, y) dx dy \quad (10)$$

第 j 阶模态力下的模态位移的均值和方差分别为：

$$q_j = \frac{F_j}{M_j (2\pi f_j)^2} = \frac{Q_H \overline{C}_{f_j}}{m (2\pi f_j)^2} \quad (11)$$

$$q_j = \frac{Q_H C_{f_j}}{m (2\pi f_j)^2} \left\{ 1 + \frac{\pi}{4\xi_j} \frac{f_j S_{F_j}(f_j)}{\sigma_{F_j}^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

式中： M_j 为第 j 阶广义质量， m 为屋面的单位面积质量， ξ_j 为屋面结构的第 j 阶阻尼比， f_j 为结构的第 j 阶自振频率， $\frac{f_j S_{F_j}(f_j)}{\sigma_{F_j}^2}$ 为 j 阶模态力归一化谱在频率 f_j 下的值， σ_{F_j} 为第 j 阶模态力的均方根值。

由各振型叠加可以得到屋面上各点的位移响应均值、均方根值分别为：

$$\bar{y} = \sum_{j=1}^N q_j \phi_j(x, y) \quad (13)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{j=1}^N q_j^2 \phi_j^2(x, y)} \quad (14)$$

阵风荷载因子法(GLF)是指在一定的时间范围内由平均风压和脉动风压共同作用的总响应与平均风压产生的响应之比。如果是位移响应之比，那么该比值就是位移风振系数，即：

$$\beta_D = \frac{y_{\max}}{|\bar{y}|} = 1 + g \frac{\sigma_y}{|\bar{y}|} = 1 + g \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N q_j^2 \phi_j^2(x, y)}}{\sum_{j=1}^N q_j \phi_j(x, y)} \quad (15)$$

式中： g 为峰值因子，本文取 3.5。

4. 结果分析

4.1. 风压分布特性

本文研究以 10° 为间隔的 36 个风向角下体育场屋盖结构表面风压的分布情况。限于篇幅，本文仅给出了 4 个典型风向角($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$)下屋盖的平均风压系数分布，如图 6 所示。

从图 6 可以看出：在 0° 风向角下，受到体育场两端尖角的上挑(东看台)与下折(西看台)的影响，在迎风角部形成净正风压，而在下游气流分离的尖角部位形成负风压，相似趋势也发生在 180° 风向角。在 90° 风向角下，东看台位于来流的上风向，气流沿着东看台东侧边缘分离，出现了较为明显的柱状涡，在分

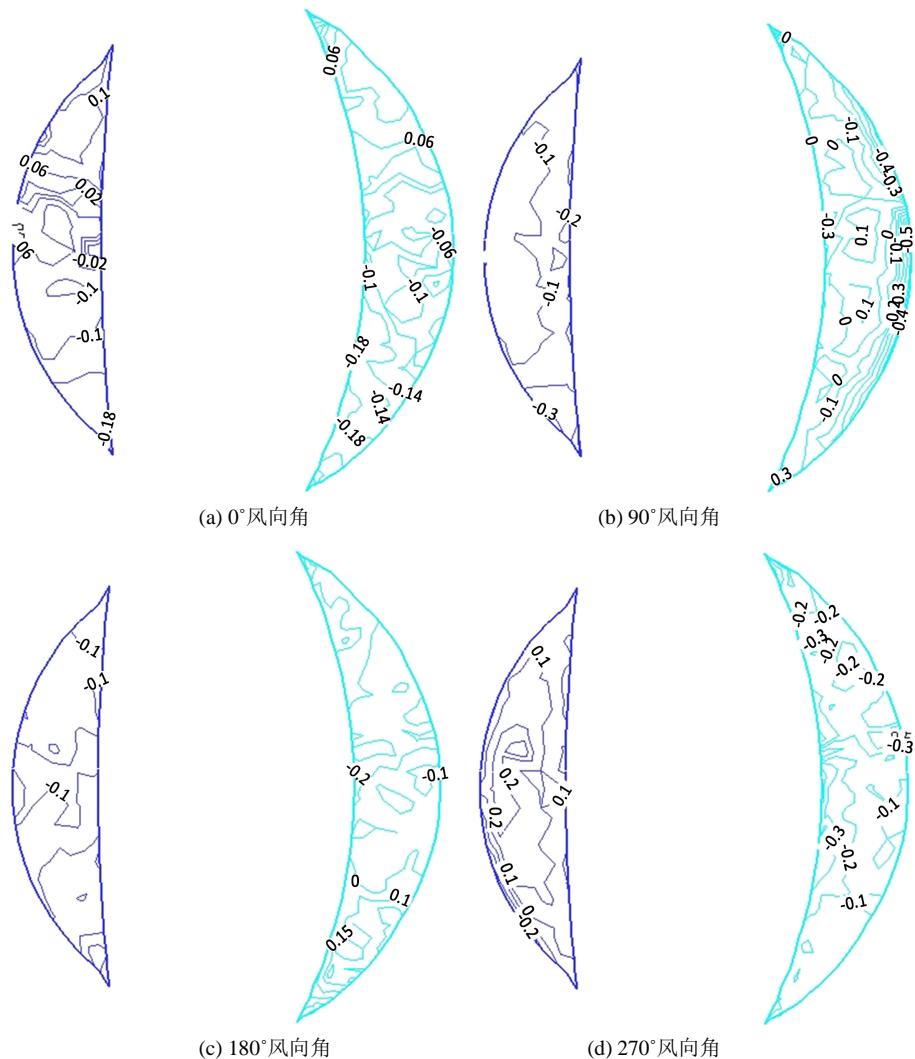


Figure 6. Mean wind pressure coefficients distributions for the typical wind directions of 0° , 90° , 180° and 270°

图 6. 典型风向角 0° , 90° , 180° 和 270° 下平均风压系数分布

离区出现较大的负风压系数(-0.5)，随着气流的再付作用，在东看台中间位置出现了正风压，而在下风向的边缘区域，由于气流的分离又出现明显的负风压；此时，位于下风向的西看台，其位于东看台的尾流区，屋面也出现较大的负风压。在 270° 风向角下，西看台位于来流的上风向，明显的柱状涡出现在迎风的边缘区域，由于西看台是一个较为明显的上挑构造，屋面主要呈现正风压(净风压)，这与 90° 来流下的东看台屋面的风压分布正好相反；此时，东看台位于下风向，屋面主要为负风压分布。

建筑表面的脉动风压，除了受到来流的湍流影响外，主要还受到自身的特征湍流影响。**图 7** 给出了 4 个典型风向下的脉动风压系数分布。从**图 7** 可以看出，脉动风压分布与平均风压分布具有相同的趋势，平均风压大的地方其脉动风压也相对较大。

4.2. 风致响应及风振系数

本文基于楼文娟教授提出的模态力法[7]，计算获得了悬挑屋盖风致响应(加速度响应及位移响应)，以及结构等效静风荷载计算用的(位移)风振系数。**图 8~图 10** 分别给出了全风向下最大平均位移响应、加

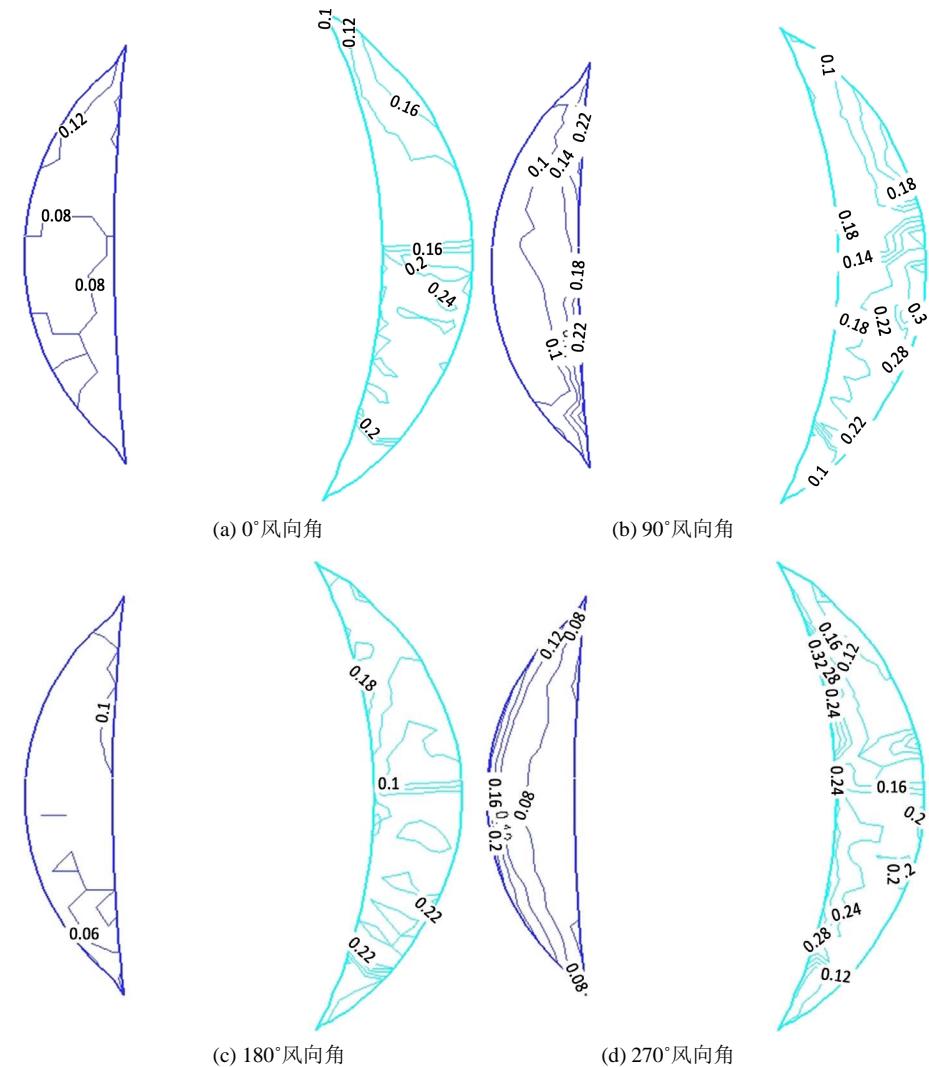


Figure 7. Fluctuating wind pressure coefficients distributions for the typical wind directions of 0° , 90° , 180° and 270°

图 7. 典型风向角 0° , 90° , 180° 和 270° 下脉动风压系数分布

速度响应根方差以及有效风振系数。

从图 8 可以发现, 在结构自重及风荷载作用下, 其最大平均位移响应为 12 mm, 相应的挠度约为 0.03%, 远小于规范限定值[10]。最大的加速度响应为 0.4 m/s^2 , 发生在东看台的悬挑远端。有效的风振系数介于 1.5 到 1.65 之间, 符合大跨结构风振系数的分布规律。

4.3. 区域等效静风荷载

为了便于工程设计时使用, 将测点的风振系数乘上测点的平均风压则得到了测点的设计用等效静风荷载。显然对于工程设计人员而言, 采用大量的测点等效静风压进行加载设计是不现实的, 需要通过将点荷载转变为面荷载。首先, 将屋面不同位置进行区域划分; 其次, 将区域内所有测点风荷载根据测点所属面积进行区域内等效。通过此类等效后, 结构所受的总风荷载没有变化, 因此不影响结构的安全设计, 但又方便了工程设计人员。

图 11 给出了体育场东看台与西看台的区域划分图, 其中东看台分为 32 个区域, 西看台划分为 26 个

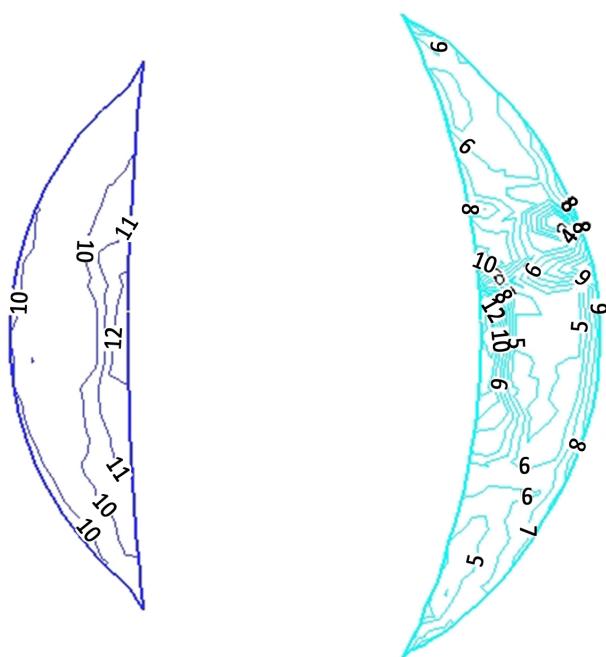


Figure 8. Maximum mean wind-induced displacement responses (unit: mm)

图 8. 最大平均位移响应(单位: mm)

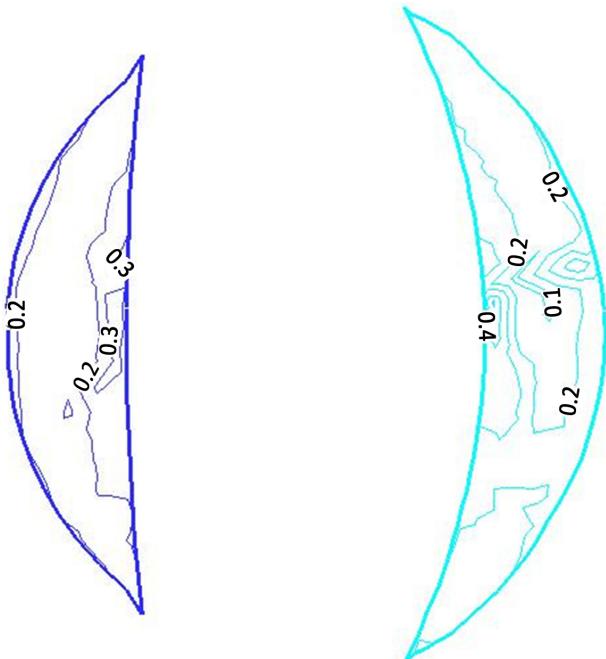


Figure 9. Maximum RMS of acceleration (unit: m/s^2)

图 9. 最大加速度响应根方差(单位: m/s^2)

区域(其中区域 25/26 为西看台两端下方封板区)。在工程设计中,不能对所有风向下的等效静风荷载进行加载计算,往往通过确定最不利风向角来确定。一般而言,对于大跨结构而言,主要有总升力最大,总正压最大,总负压最小等三种工况,而悬挑结构主要是总升力最大来控制。本文根据总升力最大分别确

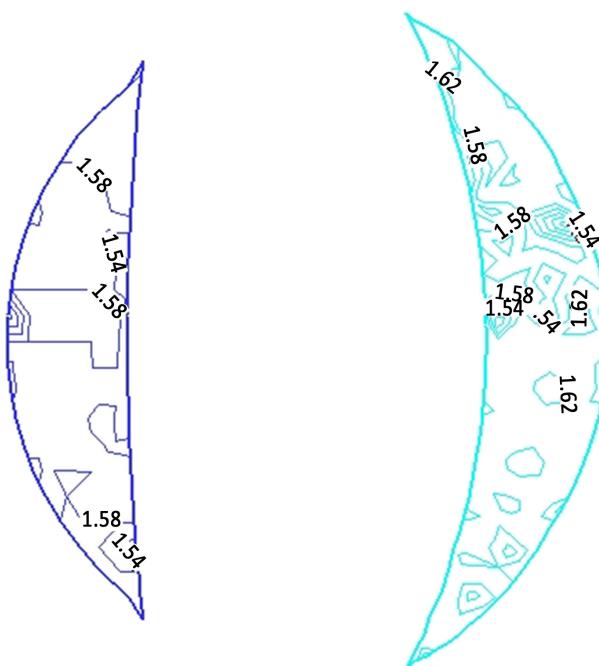


Figure 10. Distribution of wind vibration coefficients
图 10. 风振系数分布图

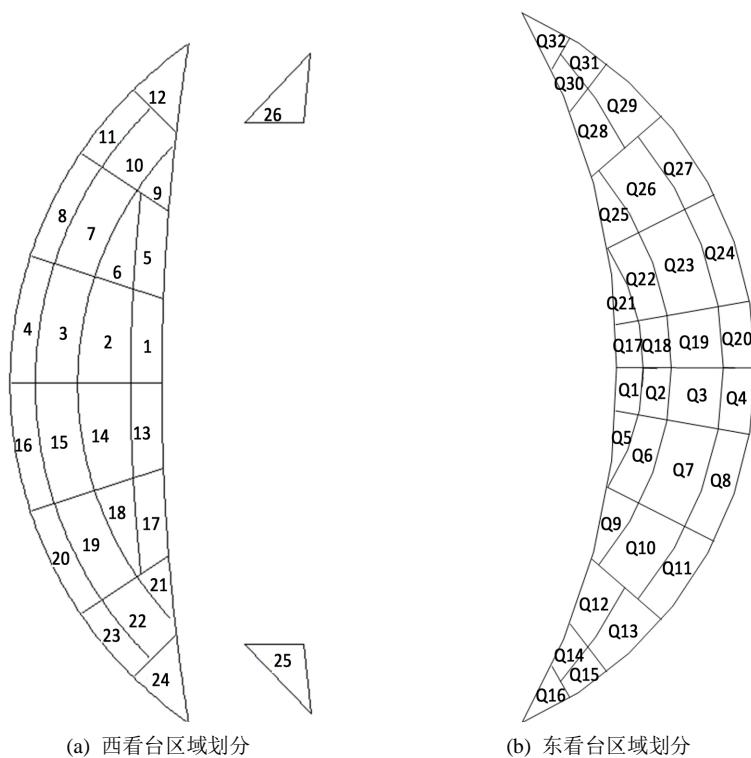


Figure 11. Schematic drawing of area division
图 11. 区域划分示意图

定了东看台和西看台的最不利风向角，分别为 220° 和 40° ，均为在斜风向下，而非垂直方向，笔者认为这主要是由于周边的体育馆以及周边的山体的干扰影响。

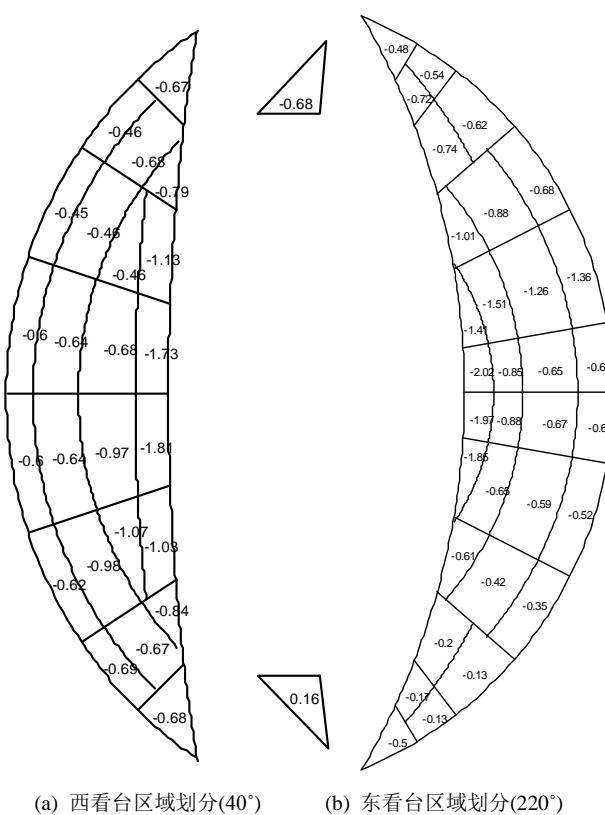


Figure 12. ESWLs for areas
图 12. 区域等效静风荷载

图 12 给出了体育馆东、西看台的最不利风向下的等效静风荷载。从图上可以看出，负风压最大均出现在迎风的悬挑外端，且向内部区域逐渐较小，并且存在很大的逆压梯度，这与平均风压的分布规律相一致。

5. 结论

在大气边界层风洞中对黔南州全民健身活动中心体育场在周边山体与体育馆干扰作用下的刚性模型测压试验，详细分析风荷载与风致响应特征，并获得了结构设计用等效静风荷载，得出以下几点结论：

- (1) 悬挑屋盖表面以负风压为主，在迎风的屋檐出现明显的气流分离，存在很大的负风压；下风向区域负风压很小甚至出现较小的正风压。脉动风压系数分布与平均风压分布具有类似特征。
- (2) 仅在结构自重与风荷载作用下，结构的风致响应较小，最大平均位移响应为 12 mm，远小于规范限值。
- (3) 模态力法属于频域计算方法，其计算工作量较少，但也忽略了高阶模态的影响，对精度有一定影响。若需高精度的结果，则需通过时域计算获得。
- (4) 受到周边的体育馆与山体的影响，最不利风向角发生在斜向来流，具有较为明显的干扰作用。
- (5) 根据区域面平均法获得的分区结构设计等效静风荷载比较适用于工程设计人员使用，可提高工作效率。

基金项目

国家自然科学基金项目(51408062, 51541809)，湖南省创新平台与人才计划项目(2015RS4050)；中国

博士后基金(2015M572238); 湖南省教育厅项目(15C0054); 长沙理工大学桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室开放基金(13KB01); 长沙理工大学土木工程湖南省优势特色重点学科创新性项目; 湖南省研究生科研创新项目(CX2016B397)。

参考文献 (References)

- [1] Cermak, J.E. (2003) Wind-Tunnel Development and Trends in Applications to Civil Engineering. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, **91**, 355-370. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00396-3](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00396-3)
- [2] Biagini, P., Borri, C., Majowiecki, M., Orlando, M. and Procino, L. (2006) BLWL Tests and Design Loads on the Roof of the New Olympic Stadium in Piraeus. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, **94**, 293-307. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.01.016>
- [3] Biagini, P., Borri, C. and Facchini, L. (2007) Wind Response of Large Roofs of Stadions and Arena. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, **95**, 871-887. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.01.025>
- [4] Kawai, H., Yoshie, R., Wei, R. and Shimura, M. (1999) Wind-Induced Response of a Large Cantilevered Roof. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, **83**, 263-275. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00077-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00077-X)
- [5] Lam, K.M. and Zhao, J.G. (2002) Occurrence of Peak Lifting Actions on a Large Horizontal Cantilevered Roof. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, **90**, 897-940. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00212-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00212-X)
- [6] 孙瑛, 许楠, 武岳. 考虑特征湍流影响的体育场悬挑屋盖脉动风压谱模型[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(10): 24-33.
- [7] 楼文娟, 杨毅, 庞振钱. 刚性模型风洞试验确定大跨屋盖结构风振系数的多阶模态力法[J]. 空气动力学学报, 2005, 23(2): 83-87.
- [8] Chen, F.B., Li, Q.S., Wu, J.R. and Fu, J.Y. (2011) Wind Effects on a Long-Span Beam String Roof Structure: Wind Tunnel Test, Field Measurement and Numerical Analysis. *Journal of Constructional Steel Research*, **67**, 1591-1604. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.003>
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50017-2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

Hans 汉斯

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org