文章编号: 0258-1825(2013)04-0511-07

体育场悬挑屋盖结构风荷载解析模型

梁枢果1,王 磊1,郑以微1,温四清2,李庆祥3

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院,湖北 武汉 430072; 2. 武汉市建筑设计院,湖北 武汉 430010;
 3. 广东省建筑科学研究院,广东 广州 510500)

摘 要:结合援莫桑比克国家体育场刚性模型风洞试验数据,分析了悬挑屋盖结构表面风压分布特性、脉动风荷载 谱特性和脉动风压空间相关性,并利用体育场风洞试验测压数据,拟合了各区域脉动风压谱和相干函数的经验公 式,建立了此类结构的风荷载解析模型。经过工程算例表明,本文建立的风荷载解析模型用于悬挑屋盖结构的动 力响应计算具有较高的精度,有一定的实用价值。

关键词:悬挑屋盖;风荷载特性;解析模型;风洞试验;动力响应

中图分类号:TU312⁺.1;V211.7 文献标识码:A

0 引 言

援莫桑比克国家体育场是我国援建莫桑比克的 一座大型综合性体育场。该体育场看台采用钢筋混 凝土结构,体育场主看台屋盖为大悬挑钢桁架结构, 屋盖最大悬挑长度为27m,最大高度为32m,具有自 重较轻、阻尼较小,且柔度大、受风面积大的特点,对 风荷载十分敏感。风荷载是援莫桑比克国家体育场 屋盖结构的控制荷载之一。

援莫桑比克国家体育场这类大跨度悬挑屋盖结构的抗风性能研究主要包括风荷载特性、风致响应和等效风荷载三个部分,其中风荷载特性是三者中最基础的部分。但迄今为止,对于悬挑屋盖结构风荷载特性研究还远远不够,尚未能像高层建筑结构那样建立 起简捷合理的风荷载解析模型^[1-2]。

本文以援莫桑比克国家体育场为研究对象,在刚 性模型测压风洞试验基础上,重点研究了援莫桑比克 国家体育场主看台悬挑屋盖的风荷载分布特性、风荷 载谱特性和各测点间风荷载相关性,进而提出了此类 结构的风荷载解析模型。这一风荷载解析模型的建 立避免了耗时、耗资的逐个结构测压风洞试验,在实 际工程应用和理论分析中都有重要意义。同时,本文 给出的该类结构脉动风压谱经验公式反映了其随风 向角、屋盖区域变化而改变的特征,为进一步研究此 类结构的风荷载谱特性提供了重要的参考依据。

1 风洞试验概况

援莫桑比克国家体育场测压模型由有机玻璃制成的全模型,几何缩尺比为1:150(如图1),图2为风场各风向角示意图。模型共布置432个测压点,其中体育场屋盖结构布置328个测点。试验在湖南大学 HD-2风洞试验室中进行,采用美国 TSI 公司的IFA300热线/热膜风速仪测量参考高度处风速,用美国 PSI 扫描阀公司 DTCnet 电子式压力扫描阀测压系统测量模型表面风压。7个扫描阀同时测量,依次对所有测压点的压力信号进行扫描,脉动压力的采样时间为30.185s,每个测点的采样频率为330Hz,试验风速为10.0m/s。扫描时两个相邻测点风压采样



图 1 风洞试验模型 Fig. 1 Wind tunnel test model



图 2 风场各风向角示意图 Fig. 2 Sketch of wind directions in wind tunnel

的时间间隔是 7μs,同一点的两个相邻风压采样的时间间隔为 3030μs。测得每一点的风压时程后,根据 各点采样的时间差通过线性插值得到同一瞬时各点 的风压值。

2 悬挑屋盖结构平均风荷载分布特性

由于来流分离、漩涡脱落、再附着等因素,屋盖表 面风压的分布非常复杂。平均风压系数直接反映了 屋盖表面静风压的分布特征。本文以上下表面迭加 后的平均风压系数为研究对象,选取了六个特殊的风 向角来研究屋盖表面平均风压分布的特征。图 3(a ~f)分别为 0°、45°、90°、180°、225°、270°风向角时屋 面平均风压系数等值线图。

根据各典型风向角的平均风压系数等值线图可 以看出屋盖风压的分布规律大致为:

(1) 由图 3(c)、图 3(f)可以看出,悬挑屋盖在上 述正风向角作用下,结构表面以负压为主,特别是在 迎风向屋盖边缘区域,出现较大的负压。这是由于气 流在迎风面边缘处出现瞬时分离,形成柱状涡,致使 屋盖表面大部分区域产生向上的升力,特别是在气流 分离区域,影响尤为强烈。

(2) 由图 3(a)、图 3(d)可以看出,在屋盖表面侧 边区域也有正压出现,这是由于在 0°和 180°风向角, 气流在迎风侧边分离,屋盖上表面和下表面同时出现 负压,当下表面负压较大时,叠加后显示风压为正压。 同时,由于屋盖的坡度较小且沿来流方向跨度大,气 流分离后会发生再附效应,在屋盖表面下游区域也会 产生正压。

(3) 由图 3(b)、图 3(e)可以看出,悬挑屋盖结构 的风荷载在斜风向角下,由于气流在边缘处出现小尺 度的分离,形成锥形涡,致使屋盖表面一定区域产生 向上的升力,形成负压。

(4)当风从体育场副看台吹向主看台时,主看台 上屋盖上表面风压为负,下表面大部分地方的风压为 正,但是上表面的负压较下表面的负压幅值大许多, 叠加后呈负压。从压力大小的分布规律来看,屋盖上 表面前缘部分的负值风压比较大,这主要是作用于屋盖 上表面的气流于屋盖边缘发生较强的流动分离所致。

由以上的风压分布规律可知,在进行屋面板结构 设计和连接件设计时,屋盖迎风面边缘部分应采取必 要的构造措施,防止屋盖角部被风掀起而破坏。



图 3 各风向角平均风压系数

ig. 3 Mean wind pressure coefficients for different wind directions

3 悬挑屋盖结构风荷载解析模型研究

3.1 悬挑屋盖风荷载基本理论

屋盖表面的风荷载是一种随机荷载,屋盖面积 A 上的荷载历程可表示为:

$$F(t) = \int_{A} \omega(x, y, z, t) dA$$
(1)

ω(x,y,z,t)为屋盖面上任意位置(x,y,z)处的 单位面积脉动风荷载,可由刚性模型测压风洞试验直 接测量。

在对实际工程进行抗风性能分析时,需要在结构 模型上布置足够多的离散测点,通过风洞试验测得各 个测点的风压时程,每个测压点所测风压代表其所属 面积的风压。可将面积 A_i 上作用的风压矢量 F_i(t) 向 x、y、z 轴分解为相互正交的三个分量:

 $F_{ik}(t) = \omega(x_i, y_i, z_i, t)A_{ik}$, k = x, y, z (2) $\omega(x_i, y_i, z_i, t)$ 表示第 *i* 个测点处风压时程; A_{ik} 表示 屋盖第 *i* 个测点所属面积 A_i 在 *k* 方向的投影面积。 设屋盖面积 A 上的测点数为 M 个,则屋盖上在 x, y, z*z* 轴三个方向的脉动风压荷载时程共有 3M 个。第 *m* 个和第 *n* 个脉动风压荷载时程的互相关函数可以 表示为:

$$R_{F_{mm}}(x_{m}, y_{m}, z_{m}, x_{n}, y_{n}, z_{n}, \tau) = \lim_{T_{0} \to \infty} \frac{1}{T_{0}} \int_{-T_{0}/2}^{T_{0}/2} F_{m}(x_{m}, y_{m}, z_{m}, t) \cdot F_{n}(x_{n}, y_{n}, z_{n}, t + \tau) dt$$
(3)

对互相关函数进行傅立叶变换,可得到其互功率 谱密度函数:

$$S_{F_{mn}}(x_{n}, y_{n}, z_{n}, x_{m}, y_{m}, z_{m}, n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{F_{mn}}(x_{n}, y_{n}, z_{n}, x_{m}, y_{m}, z_{m}, \tau) e^{-i2\pi n\tau} d\tau$$
(4)

根据随机振动理论, 屋盖上第 m 个和第 n 个脉 动风压的互谱密度函数可以由自谱密度函数和相干 函数的乘积计算得到:

$$S_{F_{mn}}(x_{m}, y_{m}, z_{m}, x_{n}, y_{n}, z_{n}, n) = \sqrt{S_{F_{m}}(x_{m}, y_{m}, z_{m}, n)S_{F_{n}}(x_{n}, y_{n}, z_{n}, n)} \cdot \gamma_{mn}$$
(5)

综上, 屋盖表面脉动风荷载解析模型的主要未知 量为各测点脉动风压谱密度函数 S_ω(x, y, z, n)、和各 测点谱密度间的相干函数 γ_{mn}, 有了这两个函数就可 以得到屋盖结构的荷载谱矩阵, 进而通过频域积分求 得屋盖的风致动力响应。所以, 脉动风压谱密度函数 和相干函数解析形式的确定是建立屋盖风荷载谱密 度解析模型的关键问题。

3.2 体育场悬挑屋盖结构风荷载频谱特性分析

通过对屋盖在各风向角下各测点的风压系数与 频谱的比较以及在此基础上的计算分析,发现当风向 角为 180°至 360°时,也就是风由体育场主看台背面 吹向体育场时,主看台悬挑屋盖上各测点的平均风压 系数、均方根风压系数、功率谱能量以及该结构风致 响应计算结果一般明显小于风向角为 0°至 180°时的 对应值。因此,本文仅选取主看台悬挑屋盖在 0°至 180°风向角下各测点的风压时程进行傅立叶变换,得 到各工况下各测点的风压时程进行傅立叶变换,得 到体育场悬挑屋盖结构的风荷载频谱特性。通过统 计分析所有测点的风压谱,其频谱特性可归纳如下: (1)在各风向角下,各测点的频谱在低频段有明显谱峰,功率谱曲线能量主要分布在低频区域,并随着频率的增加而呈衰减趋势。

(2) 在 90°风向角,沿屋盖纵向跨度方向每一条 带上各测点的频谱曲线较为一致,前后缘各测点的频 谱均在折算频率<u>nH</u>=0.1~0.15(H 为前缘屋盖高 度,U_H为该高度上平均风速)范围内有一尖锐的谱 峰,这显然与气流在屋盖前缘分离以及尾流中的漩涡 脱落有关。功率谱能量随频率的增加迅速地衰减。 在 60°至 120°风向角,屋盖上各测点频谱曲线的特点 与分布规律与 90°风向角时类似。

(3) 在 0°和 180°风向角, 气流在屋盖迎风侧边 (分别为左侧边和右侧边)分离后在中下游屋盖上发 生再附,因而在同一纵向条带上各测点频谱曲线的差 异较大。整体上看,频谱曲线的能量虽然仍集中在低 频段,但是频谱能量随频率增加衰减较慢,谱峰形状 较粗,对应的频带较宽,在屋盖后缘区域还出现了双 ⁻峰。当风向角由 0°逐渐增加,或由 180°逐渐减小 时,屋盖表面风压频谱特性大体与 0°和 180°风向角 相近。但是当风向角大于 45°或小于 135°时,屋盖表 面风压频谱曲线的特点与分布规律随着风向角接近 90°逐渐与 90°风向角时雷同。

通过对脉动风压功率谱特性的分析总结发现,可 将功率谱分为两类,第一类针对单峰谱,第二类针对 双峰谱。将屋盖分成6个分区(见图2)即可对不同 风向角下不同区域的谱类型进行拟合,考虑到屋盖的 对称性,只需分析0°至90°范围的典型风向角。第一 类谱的经验公式的解析形式可以表述为:

$$\frac{nS(n)}{\sigma^2} = \frac{p_1 \cdot \bar{n}^{p_2}}{p_3 \cdot \bar{n}^2 + 1} + \frac{p_4 \cdot \bar{n}^{p_5}}{p_6 \cdot \bar{n}^3 + 1}$$
(6)

式中, $\bar{n} = nH/U_H$ 为无量纲频率, p_1 、 p_4 控制谱峰左 侧曲线形状, p_3 、 p_6 控制谱峰右侧曲线形状, p_2 、 p_5 控制谱峰大小。具体而言,可将这类谱根据参数的不 同进一步归结为 a、b、c 三种, a 类谱形式分布在 60° 至 90°风向角的屋盖全部区域及 45°风向角的左侧和 上缘区域(ABCE 区); b 类谱集中分布在 0°风向角前 缘左侧区域(A 区), c 类谱集中分布在 0°风向角前缘 右侧区域(B 区)及 45°风向角的右侧下缘区域(DF 区)。

对于 0°风向角后缘条带出现双峰的情况,将其 划归为第二类谱,可采用如下形式进行经验公式的拟 合:

$$\frac{nS(n)}{\sigma^2} = \frac{p_1 \cdot 0.03}{(\bar{n} - p_3)^2 + p_2} + \frac{p_4 \cdot \bar{n}^{p_5} \cdot 5}{p_6 \cdot \bar{n}^3 + 1}$$
(7)

其中,公式右边两部分分别控制两峰的曲线, p1、p4 控制两峰能量的相对大小。同样地,也根据参数和分 区的不同将这类谱细分为 a、b 两种, a 类谱分布在后 缘条带的左侧区域(CE 区), b 类谱分布在后缘条带 的右侧区域(DF 区)。0°至 30°风向角内屋盖各区域 的频谱类型及分布与 0°风向角相同。

图 4 给出了以上各类谱的拟合情况,各谱函数的 拟合参数值见表 1。考虑同一分区的均方根风压幅 值具有一定的稳定性,将相应风向角下的该区域全部 测点均方根风压进行面积加权平均得到的 ō,即可作 为以上各类归一化风压谱的均方根风压系数,ō 值见 表 2。0°至 30°风向角内各区域均方根风压系数与 0° 风向角时相同。





图 4 不同类型荷载谱图

Fig. 4 Different types of wind load spectra

表1 各类谱的参数值

Table 1 Parameters of wind load spectra

谱分类	p_1	p_2	p_3	p_4	p_{5}	p_{6}
第一类 a	0.37	0.42	2.60	5.00	0.85	600
第一类 b	1.20	0.15	0.65	-0.40	-0.075	0.05
第一类 c	1.06	0.20	0.80	-0.31	-0.20	0.08
第二类 a	0.35	0.97	0.15	0.40	0.90	90
第二类 b	0.30	0.97	0.11	0.50	1.20	30

表 2 不同分区均方根风压系数

Table 2 RMS wind pressure coefficient in each division

风向角	Α区	Β区	C区	DX	Ε区	FΣ
0°	0.11	0.10	0.06	0.09	0.06	0.19
45°	0.38	0.26	0.23	0.14	0.15	0.12
60°	0.36	0.33	0.22	0.15	0.14	0.12
90°	0.39	0.37	0.18	0.17	0.12	0.12

3.3 相干函数分析

首先对体育场屋盖上各测点两两之间的互谱进 行相干分析,发现在0°至180°间的各个风向角,各测 点间的相干特性非常一致。为了研究的方便,在体育 场屋盖中选取一定的测点,分别按照横向跨度方向和 纵向跨度方向进行分析,比较两个方向的相干函数, 可以得出以下结论:

(1)在屋盖全区域范围内,相干函数特性比较一 致,即随频率的增加,相干函数值衰减的很快,这与文 献[7]是很吻合的。在频率达到 20Hz 时,相干函数 值已经接近于零。

(2) 在同一频率下,相干函数值随着距离的增大 而呈衰减趋势,根据数据显示,一般两测点间的间距 达到4倍相邻测点间距时,两测点的相关性非常小, 可认为两测点不相关(测点图如图2)。另外,相干函 数曲线在一定无量纲频率范围有所波动,而不是单调 减小的(如图5)。





(3)如图 6,不同测点间的相干函数随风向角有 所变化,但没有明显的变化规律,且不同风向角下的 相干函数差别很小,可以认为用同一拟合公式描述各 风向角下的相干函数能够满足工程实际需要。



图 6 不同风向角的相干函数

Fig. 6 Coherence function of different wind azimuth

对相干函数进行回归分析,拟合得出经验公式表 达式为:

 $\gamma_{hij}(n) = \cos(-0.1n\delta/v_z) \cdot e^{-10n\partial\pi/v_z}$ (8) 式中, \delta 为两测点间的距离, v_z 为参考高度 z 处的风速, 计算时取 $z = \frac{1}{2}(z_i + z_j), z_i, z_j$ 分别为测点 *i* 和 测点 *j* 的高度, 图 5 中测点位置见图 2。

4 实例分析

4.1 动力响应计算基本理论

根据随机振动理论,建立屋盖结构的荷载谱矩阵 并由有限元模型算得结构的动力特性后,即可得到结 构各阶振型间的广义荷载互谱密度函数。假定屋盖 有 N 个节点,每个节点有 x、y、z 三个方向的位移,取 屋盖前 M 阶振型,则可知任意两振型的广义荷载谱 可表示为:

$$S_{ij}^{*}(n) = \sum_{k=1}^{3N} \sum_{m=1}^{3N} S_{km}(n) \phi_{i}(k) \phi_{j}(m) / (M_{i}^{*}M_{j}^{*}) \quad (9)$$

式中 S_{ij}^{*} (n)为第 i、j 阶振型的广义荷载谱, φ_i(k)、φ_j (m)为第 i、j 阶振型, M^{*}_i、M^{*}_j为第 i、j 阶振型的广 义质量。S_{km}(n)为节点荷载谱矩阵第 k 行 m 列的 值。由此可得第 i、j 振型位移互方差为:

$$\sigma_{ij}^2 = \int_0^\infty H_i(in) H_j(-in) S_{ij}^*(n) dn \qquad (10)$$

$$H_{i}(in) = \frac{1}{\left[(2\pi n_{i})^{2} - (2\pi n)^{2} + i(2\xi_{i}(2\pi n_{i})(2\pi n))\right]}$$
(11)

$$\frac{1}{\left[(2\pi n_j)^2 - (2\pi n)^2 - i(2\xi_j(2\pi n_j)(2\pi n))\right]}$$
(12)

上式中 *H_i*(*in*)为第*i* 振型的传递函数,*ξ_i*为第*i* 振型的阻尼比。

第 L 个节点(即按照振型排列顺序在第 L 个位 置上的节点)y 轴向位移响应均方根为:

$$\sigma_{y}(L) = \sqrt{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{M} \sigma_{ij}^{2} \phi_{i}(L_{y}) \phi_{j}(L_{y})}$$
(13)

同理,任一节点在 x、y、z 轴向的位移响应均方 根都可采用与式(13)相同的算式求得。

4.2 例1

 $H_i(-in) =$

以援莫桑比克国家体育场单侧挑蓬为例,选取 90°风向角这一最不利工况,采用本文方法建立各测 点的自谱密度函数和各测点间的互谱密度函数,建立 屋盖的荷载谱矩阵。通过结构有限元模型求得结构 的动力特性,然后采用4.1节的方法对悬挑屋盖进行 动力位移响应计算,并与数值计算方法结果相比较, 对比结果表明本文建立的风荷载解析模型具有实用 性和合理性。

援莫桑比克国家体育场有限元屋盖模型总节点 数为 2151 个,载入总节点数为 1293 个,通过有限元 软件进行结构动力特性分析,为了保证风振响应的计 算精度,取结构前十三阶振型进行动力响应计算,其 每阶频率和阻尼比见表 3。选取具有代表性的屋盖 前缘节点为对象,由解析谱计算得到的竖向(z向)均 方根位移结果和数值谱计算得到的相应结果比较见

表 3 结构各振型频率与阻尼比值

 Table 3
 Values of structural frequency and damping ratio for each mode

振型阶数	1	2	3	4	5	6	7
自振频率	1.409	1.466	1.506	1.622	1.714	1.926	1.95
阻尼比	0.026	0.018	0.016	0.012	0.015	0.01	0.014
振型阶数	8	9	10	11	12	13	
自振频率	2.072	2.089	2.18	2.393	2.931	3.285	
阻尼比	0.03	0.031	0.01	0.01	0.01	0.01	

图 7。图 7 中节点号为屋盖前缘自测点 1 到测点 24 范围内 所选取的 36 个节点。





Fig. 7 Comparison of RMS vertical displacements of nodes

由上述的结果可以看出,本文所建立的风荷载频 域解析模型,能够较好的反映脉动风荷载的频谱特 性,计算得到的风振位移响应结果误差较小,能够满 足工程实际应用的精度要求。

4.3 例 2

某体育场看台挑棚平面如图 8 所示,该体育场结构与莫桑比克体育馆较为相似,限于篇幅,此处不对此体育场及风洞试验做详细介绍。对于最不利的90°风向角,可将屋盖的测点谱划归为第一类谱 a,此处选取部分测点画出其谱曲线见图 9(a),并给出部分测点的相干函数见图 9(b)。可以看出,本文给出的荷载谱及相干函数的拟合效果较好,依此荷载谱和相干函数的拟合结果作为计算依据是可行的。





图 9 荷载谱和相干函数的拟合结果

Fig. 9 Fitted result of wind load spectra and coherence

5 结 论

结合工程实例,对体育场悬挑屋盖的风荷载特性 进行深入研究,得到如下结论:

(1)结合援莫桑比克国家体育场屋盖表面风压 分布特征,归纳了此类结构表面风压分布规律,为此 类结构的屋面围护结构设计和连接件设计提供了重 要的参考依据。

(2)分析了援莫桑比克国家体育场屋盖各个测点在各个风向角下的脉动风压谱特性和空间相关性,在此基础上对脉动风压谱和相干函数进行了回归分析,建立了此类结构的风荷载解析模型,该模型对于体育场单侧挑蓬的动力风荷载的描述具有一定的普适性,可直接用于此类结构的抗风设计计算,避免了耗资、耗时的逐个结构风洞试验。

(3) 将本文建立的大跨屋盖动力风荷载解析模

型的风振响应计算结果与风洞试验建立的数值动力 风荷载模型的风振响应计算结果进行对比,总体的相 对误差在10%以内,说明该解析模型有较高的精确度。

体育场屋盖结构形式比较丰富,凭借某种体育场 屋盖模型获得的经验公式有其局限性。所以,还需对 各种典型的体育场屋盖形式的风荷载特点进行研究、 分类,建立相应的风荷载解析模型库,以利工程设计 应用。

参考文 献:

- LIANG Shu-guo, LI Q S, LIU Shen-chun, et al. Torsional dynamic wind loads on rectangular tall buildings
 [J]. Engineering Structures, 2004, 26:129-137.
- [2] LIANG Shu-guo, LIU Shen-chun, ZHANG Liang-Liang, et al. Mathematical model of across-wind dynamic loads on rectangular tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2002, 90 : 1757 -1770.
- [3] 张相庭.结构风工程理论·规范·实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:125-128.
- [4] 黄本才.结构抗风分析原理及应用[M].上海:同济大 学出版社,2001:53-58.
- [5] 欧进萍, 王光远. 结构随机振动[M]. 北京: 高等教育 出版社, 1998: 141-146.
- [6] 谢壮宁, 倪振华, 石碧青. 大跨度屋盖结构的等效静风 荷载[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(1):55-60.
- [7] 黄本才,王国砚,林颍儒.上海虹口足球场大型悬挑钢 屋盖抗风分析[J].噪声与振动控制,1999,6(2):61-66.

Mathematical model of wind loads on cantilevered roof of stadiums

LIANG Shu-guo¹, WANG Lei¹, ZHENG Yi-wei¹, WEN Si-qing², LI Qing-xiang²

(1. School of Civil and Building Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Wuhan Architecture Design Institute, Wuhan 430010, China;

3. Guangdong Provincial Academy of Building Technology, Guangzhou 510500, China)

Abstract: On the basis of pressure data acquired from wind tunnel test of rigid model of Mozambique National Stadium, the characteristics of surface pressure distribution on cantilevered roof structure and wind force spectra were analyzed, and spatial coherence of fluctuating wind pressure was also discussed. The regional spectra of fluctuating wind pressure and the empirical formula of coherence function were fitted, furthermore, the mathematical model for this kind of structures was established. By comparing the responses evaluated by the mathematical model and the numerical model, the engineering examples show that the mathematical model is accurate and applicable for calculations of dynamic response of the cantilevered roof structure under wind actions.

Key words: cantilevered roof; characteristics of wind load; mathematical model; wind tunnel test; dynamic response