

大跨度三心柱面网壳风压分布试验研究^{*}

张庆华¹, 马文勇², 王强³, 方平治⁴

(1. 华北水利水电大学土木与交通学院 郑州, 450045) (2. 石家庄铁道大学风工程研究中心 石家庄, 050043)
(3. 长江三峡集团福建能源投资有限公司 福州, 350003) (4. 中国气象局上海台风研究所 上海, 200030)

摘要 通过大气边界层风洞刚性模型同步测压试验, 对大跨度三心柱面网壳表面风压分布特性进行了研究。根据试验结果分析了结构不同风向下的平均和脉动风压分布、典型测点脉动风压谱以及相关性等。结果表明: 风向角对网壳表面风压分布有较大的影响, 一般情况下, 结构迎风面为正压区, 顶部为负压区, 尾流区受分离、涡脱和再附等特征紊流影响明显; 结构的边沿处受柱涡、锥形涡影响明显, 风压梯度变化剧烈。迎风面大部分区域脉动风压功率谱类似于典型的纵向风湍流谱, 呈单峰形状, 主要激励为来流湍流; 边沿处风压谱受特征湍流影响明显。结构表面相关性随测点间距离的增加而不断减小; 风向不同, 相关性衰减差别较大。

关键词 三心圆柱面网壳; 风洞试验; 风压分布; 功率谱密度; 相关性

中图分类号 TU312.1; TU393.3

引 言

大跨度空间钢结构是近年来发展最快的结构形式, 因其具有轻质、高柔和小阻尼等特点, 风荷载已成为结构设计的主要控制荷载。大跨空间钢结构在强风作用下的功能失效时有发生^[1-2], 说明现有的结构设计理论仍存在缺陷, 必须对结构风荷载特性及作用机理进行深入研究。

目前, 风洞试验方法已成为工程上确定大跨度空间结构表面风荷载分布特性的主要方法。通过刚性模型同步测压风洞试验, Portela 等^[3]研究了不同径跨比柱面网壳结构屈曲特性对风压分布的影响。Li 等^[4]分析了不同风场、长跨比对柱面网壳结构表面平均风压以及脉动风压分布的影响。Biagini 等^[5]通过风洞试验对希腊奥运会体育场屋盖结构表面风压进行了研究, 基于试验结果分析了结构的动态响应特性。李元奇等^[6]对不同长跨比柱面壳体表面风压分布进行了同步测量, 分析了不同风向和场地条件下柱面壳体表面风压分布特性。黄鹏等^[7]探讨了柱面网壳外表面、内表面和净风压的荷载分布特性, 给出了适合工程应用的体型系数。李庆祥等^[8]对比了大跨屋盖、雨棚和幕墙立面结构表面平均和脉动风压的分布特性, 研究了脉动风压的概率分布和相关性。李秋胜等^[9]以广州国际会展中心为

对象, 研究了高湍流区域大跨屋盖的平均及脉动风压分布特性。马文勇等^[10]研究了 2 种典型拱形壳体结构体型系数与脉动风压系数的分布规律, 比较了底部开口/闭口和两端封闭/开放不同状态对风压分布的影响。

可见, 大跨度柱面网壳结构风压分布规律的研究已经取得了大量有益的结论, 然而该类结构的风压分布除受风场、长跨比和底(端)部开闭口条件等参数影响外, 对网壳曲面形状和边界条件(底部支撑形式)等参数的影响也十分敏感, 需深入研究。笔者以国外一电厂大跨度柱面网壳干煤棚为研究对象, 通过大气边界层风洞刚性模型同步测压试验, 对两端敞口、立柱支撑的典型大跨度三心柱面网壳结构表面风荷载特性进行研究。分析了在不同风向向下结构表面平均、脉动风压分布特性, 脉动风压谱以及测点间脉动风压的相关性。试验结果为类似大跨度柱面网壳结构抗风设计提供理论参考。

1 风洞试验概况

1.1 柱面网壳结构简介

笔者研究的大跨度柱面网壳干煤棚为典型三心圆柱双层正放四角锥柱面网壳结构, 横向跨度为

^{*} 河南省科技攻关资助项目(182102310768); NSFC-河南人才培养联合基金资助项目(U1504502); 河南省高等学校重点科研资助项目(13A560691); 中国长江三峡集团公司科研资助项目(CTGFB/0015-2016)

收稿日期: 2017-08-23; 修回日期: 2018-01-08

125 m,纵向长度为 138 m,底面立柱高为 6 m,网壳矢高为 40.969 m,矢跨比为 1:3,两端敞口,结构简图如图 1 所示。该柱面网壳结构跨度大、质量轻,为典型的风敏感结构。

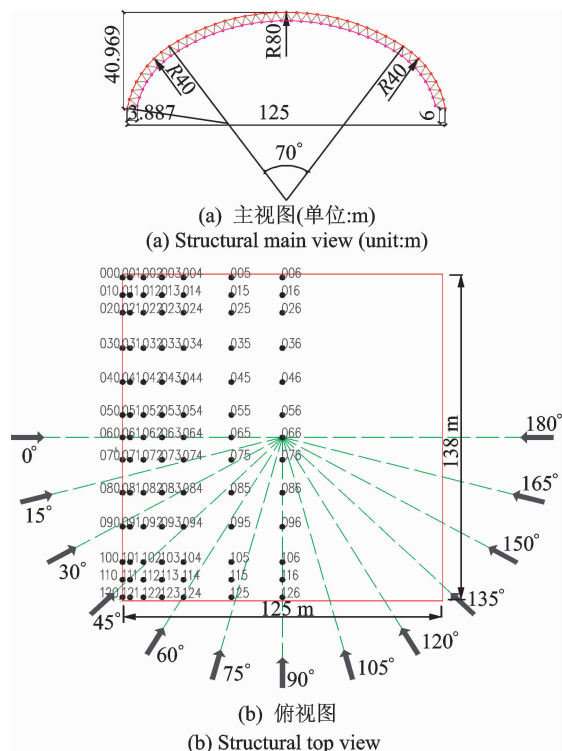


图 1 网壳简图、测点布置及风向角定义

Fig. 1 Cylindrical shell profile diagram, pressure taps and wind directions of wind tunnel test

1.2 风洞试验风场模拟

风洞试验在石家庄铁道大学风工程研究中心大气边界层风洞进行。该风洞低速试验段参数:宽为 4.4 m、高为 3.0 m、长为 24.0 m,风速连续可调,最高试验风速能达到 30 m/s。低速试验段的圆形工作平台直径为 1.5 m,360°风向角连续可调。试验采用的测试设备主要包括美国 Scanivalve 电子压力扫描阀、Cobra 三维风速探头和信号分析和数据采集系统等。

试验风场采用被动模拟技术,通过布置尖塔、粗糙元模块模拟大气边界层风场。风场的风速剖面 and 湍流度剖面模拟结果与我国《建筑结构荷载规范》GB50009-2012^[11]中的 A 类地貌吻合,如图 2 所示。

规定垂直于煤棚轴线为 0°风向角,以 15°为间隔,按逆时针方向增加,考虑结构对称性,在 0°~180°风向角范围内对模型进行试验。模型试验风向角如图 1 所示。

1.3 试验模型

试验为刚性模型测压试验,模型采用 ABS 板制

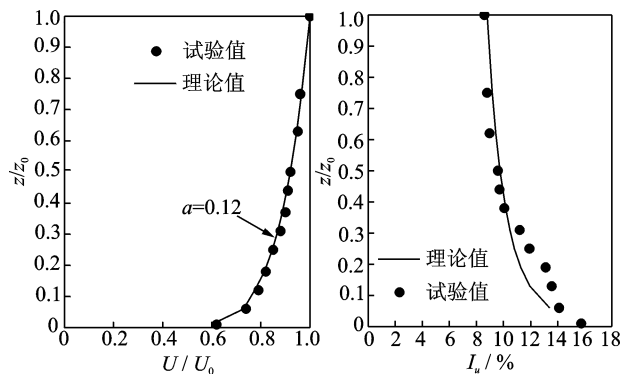


图 2 风场平均风剖面 and 湍流度剖面

Fig. 2 Profile of mean velocity and turbulent intensity

作,几何缩尺比为 1:100,模型制作时应尽可能保证模型具有足够的强度和刚度。模型共安排了 91 个测压点(182 个测孔),由于结构内外表面同时受风,每个测点内、外表面同步测压(测孔上、下表面相对对应布置)。考虑端部为网壳结构风荷载分布的敏感区域,测点布置时在端部进行了加密,模型测压点布置如图 1 所示。风洞测压试验的试验风速为 16 m/s,采样频率为 312.5 Hz,采样时间为 19.2 s。

需要说明的是,笔者研究的柱面网壳模型几何尺寸和试验风速均小于实际值,因而雷诺数也远小于实际结构。由于雷诺数效应对柱面结构表面风压分布特性影响明显^[6,12],风洞试验时将通过改变表面粗糙度的方法模拟高雷诺数效应^[13]。

1.4 试验数据处理

笔者研究的网壳结构主要关心的是上下表面受到的净风压。将模型上下表面对应位置 2 个测点的测压值进行叠加,即为该测点的净风压值

$$p_i(t) = p_{iu}(t) - p_{id}(t) \quad (1)$$

其中: $p_{iu}(t)$ 和 $p_{id}(t)$ 分别为结构表面 i 测点上、下表面对应的测压值。

为了方便应用,将净风压值无量纲化,即

$$C_{p_i}(t) = \frac{p_i(t) - p_{\infty}}{p_0 - p_{\infty}} \quad (2)$$

其中: $C_{p_i}(t)$ 为结构 i 测点的风压系数; p_0 和 p_{∞} 分别为测压试验参考点处的净风压和静压。

根据式(2),结构表面 i 测点的平均风压系数为

$$\bar{C}_{p_i} = \sum_{m=1}^N C_{p_i}(t) / N \quad (3)$$

其中: N 为总的采样点数。

结构表面 i 测点的脉动风压系数为

$$\bar{C}_{p_i} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N [C_{p_i}(t) - \bar{C}_{p_i}]^2}{N-1}} \quad (4)$$

2 风压分布特性分析

考虑到模型的对称性,选取 0°,45°和 90°风向角的风压测量结果作为典型情况做介绍。

2.1 平均风压

图 3 给出了 0°,45°和 90°风向下,网壳结构平均风压系数分布等值线。

0°风向时,网壳迎风面呈弧状,下部区域迎风倾斜角最小,受气流撞击形成正压区域,最大正压值达到 1.4 左右;网壳下边缘的下沉气流,从立柱处穿过,使最边缘处风压值略低于极值。随气流沿网壳表面上升,在接近迎风面网壳约 2/3 高度处产生流动分离,从而在网壳顶部区域形成极值约为-1.1 的负压区。在尾流区,气流绕过网壳并发生再附着,负压值不断减小,直至在下部区域形成较小的正压区。

当来流与网壳呈 45°风向时,结构的右侧横向

边缘气流产生流动分离,形成了明显的锥形涡^[1],迎风边缘后面产生负压特征凸角,涡的中心是很高的负压区,负压极值约为-3.0,由于该处高的平均吸力,将会使覆盖结构容易损坏。结构左侧区域为迎风面,气流直接作用形成正压区。由于风偏角的存在,结构顶部负压区向端部进行了偏移;尾流区(离迎风面较远处)由于流动再附形成较小的负压区。

90°风向时,来流沿结构纵向吹来,在网壳迎风前缘分离,形成柱状涡,在网壳端部形成了较大的负压区,极值负压为-1.0,在进行结构设计应重点关注该区域,防止被风掀起破坏。由于结构纵向尺寸较大,在网壳的后部,气流再附形成较小的正压分布,随着风压系数的减小,风压对网壳的影响大大减弱。

2.2 脉动风压

图 4 给出了 0°,45°和 90°风向下,网壳结构脉动风压均方根分布等值线。

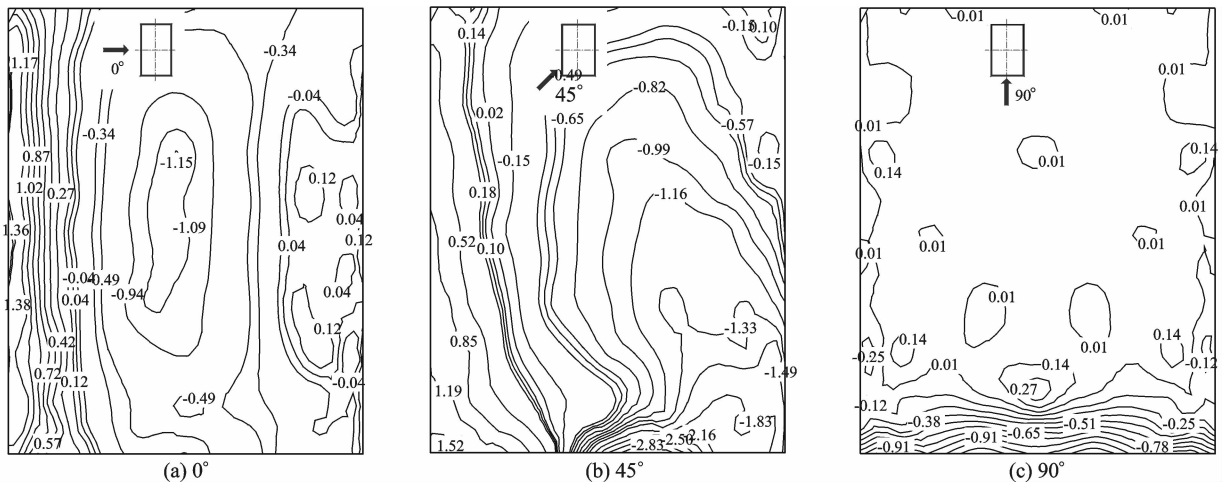


图 3 不同风向平均风压分布

Fig. 3 Contour of mean wind pressure coefficients

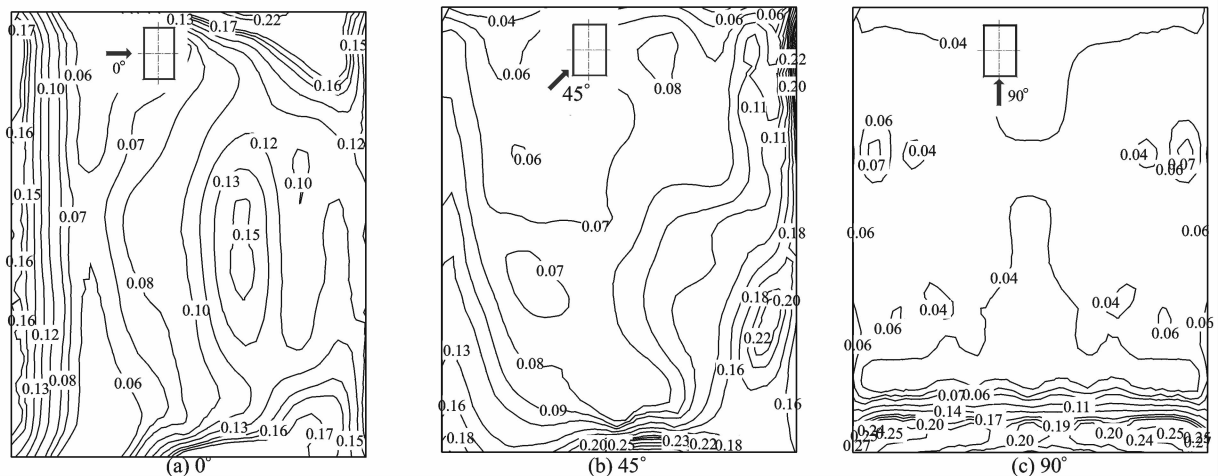


图 4 不同风向脉动风压分布

Fig. 4 Contour of root mean square of fluctuating wind pressure coefficients

脉动风压的分布情况与平均风压基本相似。在 0° 风向角下,受气流撞击,脉动风压系数最大值在 $0.16\sim 0.18$ 之间,出现在结构迎风面下边缘区域。气流在网壳中上部分离、脱落,使结构表面脉动风压线减小后增大,过了顶部后气流出现再附着,尾流区域为较小的正压区,脉动风压系数变化不大。在网壳尾流左右两侧,由于气流的分离形成锥形涡产生了比较大的脉动风压值,在最边缘处产生的脉动最大值为 0.22 。

45° 的斜风向下,左侧迎风面底部区域受气流直接撞击,脉动风压系数值增大明显。结构右侧边缘受锥形涡的影响,风压系数值脉动很大(最大值为 0.25),梯度变化剧烈。尾流区域与 0° 风向类似,是较小的正压区,脉动风压系数变化不大。

90° 风向下,由于结构迎风前缘柱状涡的存在,诱导产生强烈的湍流脉动,从而产生较大脉动风压。结构纵向尺寸较大,气流在远离迎风面边缘的区域出现较规则的分离、脱落和再附等现象,脉动风压系数值在该区域呈现较均匀的分布特性。

2.3 局部风压

为了分析网壳结构表面不同位置风压随风向变化情况,选取网壳中部和边缘处的4个关键测点060,066,120和126(测点位置及编号参见图1)为研究对象,研究结构关键位置最不利风荷载情况。图5为关键测点平均及脉动风压系数随风向变化。

由图5(a)可见,由于测点066,126位于网壳的顶部,平均风压相对于 90° 风向呈对称分布。在全部风向角下基本均为负压,其中测点066的极值负压值约为 -1.3 ,出现在 15° 和 165° 风向左右;测点126的极值负压值约为 -2.5 ,出现在 45° 和 135° 风向左右。网壳底部的测点060和120在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 风向角范围内为正压,在 $90^\circ\sim 180^\circ$ 风向角范围内为负压。其中, 0° 风向测点060正向迎风,平均风压系数达极值约为 $+1.4$;测点120在 45° 风向平均风压系数达极大值,约为 $+1.7$,在 105° 风向达极小值,约为 -1.7 。通过4个关键点平均风压比较可以看到,网壳顶部测点的控制风压为负压,底部区域测点的控制风压随测点的位置、风向等参数不同而变化。

由图5(b)可见,网壳中部节点(060,066)脉动风压系数随风向变化不大,基本在 $0.1\sim 0.2$ 附近上下波动。网壳横向边缘的测点120,126的脉动风压系数随风向明显有较大的变化,其中,测点120在 90° 风向出现明显的峰值,最大值约为 0.5 ;测点126在 $30^\circ, 150^\circ$ 风向出现峰值,最大值约为 0.6 。上述

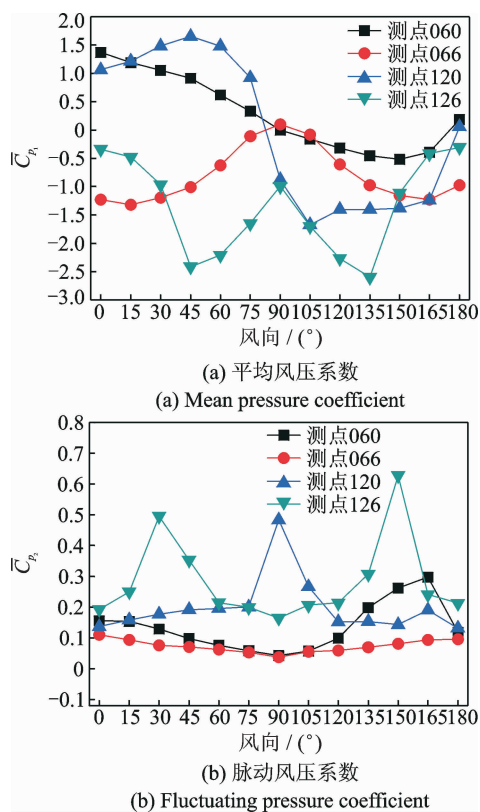


图5 关键测点风压系数随风向变化

Fig. 5 The variations of wind pressure coefficient of typical pressure taps with wind directions

风压峰值的出现主要是由于气流的分离形成了较强的漩涡,从而使关键测点风压脉动增大。

3 脉动风压功率谱特性

通过对风荷载功率谱分析,可以求出风压信号中各个频率成分的幅值和能量分布,衡量不同频率对风压脉动量的贡献,也是对结构进行频域响应分析的重要参数。通过功率谱分析,可以进一步加深对结构表面风荷载作用规律的认识,也将为建立准确的结构表面风压谱解析模型提供参考。

根据风洞试验结果,图6给出了典型测点060,066,120,126在 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 风向时脉动风压功率谱。图中,横坐标 fz/v 为无量纲频率,其中: f 为频率(Hz); z 为模型试验的参考高度(m); v 为参考高度处试验风速(m/s)。纵坐标 $f S(f)/\sigma^2$ 为无量纲功率谱,其中: $S(f)$ 为脉动风压功率谱; σ^2 为脉动风压方差。

由图6可见, $0^\circ, 45^\circ$ 风向时,4个典型测点无量纲功率谱都呈单峰形状,峰值均出现在低频段(对应无量纲频率约为 0.2)。随着频率的增加,功率谱值逐渐衰减,即脉动风压的能量主要集中在低频区域。

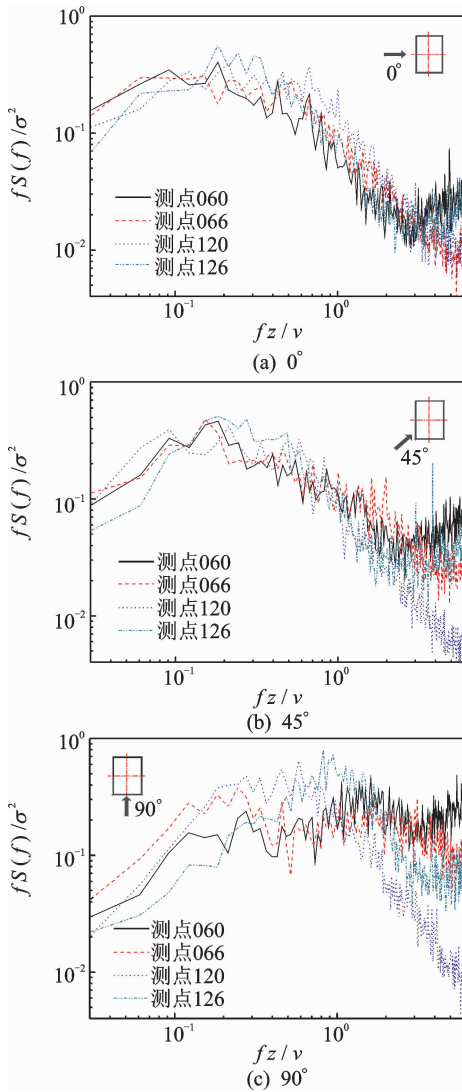


图 6 不同风向典型测点风压功率谱

Fig. 6 Wind pressure spectra of typical pressure tapes at wind directions of 0°, 45°, 90°

测点 126 位于网壳顶部最边缘处, 气流在该处出现流动分离, 风压梯度变化剧烈, 该点处的无量纲功率谱峰值最大。测点 060, 066, 120 都位于迎风面, 无量纲功率谱曲线较为接近, 类似于典型的纵向风湍流谱, 其主要激励为来流湍流。

90° 风向时, 结构迎风前缘出现柱状涡, 间歇性漩涡脱落使测点 120, 126 无量纲功率谱在相应主导频率处能量增加, 出现峰值, 对应无量纲频率约为 0.6~0.8, 即来流湍流已不再是测点风压的主要激励。测点 060, 066 处于远离迎风面边缘的区域, 气流的分离、再附以及漩涡脱落等特征湍流使风压频谱特性更加复杂, 其无量纲功率谱呈现双峰形状。

4 脉动风压相关性

相干性从时域上表征了结构表面不同位置处风

压的相关特征, 对正确认识脉动风荷载的作用机理以及结构精细化的风致动力响应分析具有重要意义。

结构表面脉动风压的相关性可以表示为

$$\text{Cor} = \sigma_{ij} / (\sigma_i \sigma_j) \quad (5)$$

其中: σ_i, σ_j 和 σ_{ij} 分别为 i, j 两点风压的根方差和协方差。

笔者以测点 120 为参考点, 选取结构边沿处纵向(测点 120→060)和横向(测点 120→126)典型测点(测点编号参见图 1), 根据风洞试验测压结果, 分析了网壳表面关键位置上测点间脉动风压的相关性。0°, 45°, 90° 风向时测点相关系数如表 1 所示。

表 1 典型测点 0°, 45°, 90° 风向相关性

Tab. 1 Correlations of typical pressure tapes at wind directions of 0°, 45°, 90°

风向	测点	120	121	122	123	124	125	126
0°	120	1.00	0.54	0.24	0.07	0.01	-0.15	-0.14
	110	0.70	0.55	0.36	0.20	0.11	-0.11	-0.06
	100	0.42	0.43	0.35	0.25	0.15	-0.04	-0.01
	090	0.02	0.10	0.19	0.20	0.12	0.08	0.06
	080	-0.06	-0.04	0.05	0.09	0.07	0.07	0.06
	070	-0.09	-0.09	0.00	0.06	0.07	0.06	0.05
	060	-0.04	-0.04	0.04	0.10	0.11	0.03	0.01
45°	120	1.00	0.80	0.66	0.57	0.50	0.39	0.09
	110	0.80	0.67	0.58	0.53	0.48	0.40	0.15
	100	0.54	0.49	0.45	0.46	0.45	0.40	0.20
	090	0.26	0.24	0.25	0.28	0.29	0.34	0.28
	080	0.14	0.15	0.17	0.20	0.22	0.30	0.28
	070	0.06	0.07	0.08	0.12	0.12	0.21	0.23
	060	0.07	0.08	0.09	0.12	0.13	0.22	0.23
90°	120	1.00	0.10	0.13	0.17	0.13	0.17	0.14
	110	0.59	0.44	0.31	0.30	0.23	0.26	0.24
	100	0.61	0.38	0.29	0.29	0.23	0.26	0.24
	090	0.50	0.36	0.29	0.27	0.21	0.26	0.26
	080	0.28	0.30	0.25	0.23	0.19	0.23	0.23
	070	0.27	0.28	0.21	0.19	0.15	0.19	0.20
	060	0.17	0.25	0.18	0.16	0.15	0.15	0.15

可见, 0°, 45° 风向角下, 结构纵向和横向不同位置处各测点间相关性都随测点间距离的增加而不断减小。风向角不同, 相同的两测点间其相关系数衰减速度差别较大, 原因在于笔者研究的关键点位于网壳边沿处, 来流风向不同时, 受流动分离、特征湍流诱导形成的漩涡形式、尺度大小的影响较大。90° 风向时, 网壳横向迎风, 测点 120→126 脉动风压受柱涡控制, (与 0°, 45° 风向不同) 测点间相关系数值均较小。

5 结论

1) 网壳结构表面风压分布受风向影响明显。迎风面为正压区,顶部为负压区,尾流区受分离、涡脱和再附等特征紊流影响明显,形成较小的正压区。在结构的边沿处,受柱涡、锥形涡影响明显,风压梯度变化剧烈。一般情况下,在平均风压达到极值的区域,脉动风压系数数值均较大。

2) 迎风面大部分区域脉动风压功率谱类似于典型的纵向风湍流谱,呈单峰形状,主要激励为来流湍流。结构边沿处受特征湍流影响明显,气流的分离、再附以及漩涡脱落等使风压频谱特性更加复杂。

3) 结构表面测点间相关性随测点间距离的增加而不断减小;风向不同,相关性衰减差别较大;受柱涡影响区域相关系数数值均较小。

参 考 文 献

- [1] 黄本才,汪丛军. 结构抗风分析原理及应用 [M]. 上海:同济大学出版社,2008:8-13.
- [2] 方江生. 复杂大跨度屋盖结构的风荷载特性及抗风设计研究 [D]. 上海:同济大学,2007.
- [3] Portela G, Godoy L A. Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with a dome roof [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(6): 808-824.
- [4] Li Y Q, Tamura Y, Yoshida A, et al. Wind loading and its effects on single-layer reticulated cylindrical shells [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2006, 94(12): 949-973.
- [5] Biagini P, Borri C, Facchini L. Wind response of large roofs of stadiums and arena [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2007, 95(9-11): 871-887.
- [6] 李元齐,田村幸雄,沈祖炎. 柱面壳体表面风压分布特性风洞试验研究 [J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 26(11): 104-111.
Li Yuanqi, Tamura Yukio, Shen Zuyan. Wind tunnel tests for wind pressure distribution characteristics on cylindrical shells [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 26(11): 104-111. (in Chinese)
- [7] 黄鹏,顾明,叶孟洋. 干煤棚柱面网壳结构风荷载试验研究 [J]. 建筑结构, 2011, 41(S1): 1432-1438.

Huang Peng, Gu Ming, Ye Mengyang. Experimental study on wind loads on cylindrical reticulated shells [J]. Building Structure, 2011, 41(S1): 1432-1438. (in Chinese)

- [8] 李庆祥,孙炳楠,沈国辉,等. 湖州大剧院屋盖及幕墙的风荷载分布特性 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(9): 1531-1536.
Li Qingxiang, Sun Bingnan, Shen Guohui, et al. Wind load distribution on the roof and curtain wall of Huzhou grand theater [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(9): 1531-1536. (in Chinese)
- [9] 李秋胜,陈伏彬,傅继阳,等. 大跨屋盖结构风荷载特性的试验研究 [J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009, 36(8): 12-17.
Li Qiusheng, Chen Fubin, Fu Jiyang, et al. Experimental investigation of the wind load characteristics of long span roof [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2009, 36(8): 12-17. (in Chinese)
- [10] 马文勇,刘庆宽,肖彬. 典型拱形壳体风荷载分布规律 [J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5): 63-68.
Ma Wenyong, Liu Qingkuan, Xiao Bin. Wind loads distribution on typical vaulted shells [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(5): 63-68. (in Chinese)
- [11] GB50009—2012. 建筑结构荷载规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [12] Qiu Ye, Sun Ying, Wu Yue, et al. Modeling the mean wind loads on cylindrical roofs with consideration of the Reynolds number effect in uniform flow with low turbulence [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 129(6): 11-21.
- [13] 李鹏飞,赵林,葛耀君,等. 超大型冷却塔风荷载特性风洞试验研究 [J]. 工程力学, 2008, 25(6): 60-67.
Li Pengfei, Zhao Lin, Ge Yaojun, et al. Wind tunnel investigation on wind load characteristics for super large cooling towers [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(6): 60-67. (in Chinese)



第一作者简介:张庆华,男,1977年8月生,博士、副教授。主要研究方向为格构式结构抗风。曾发表《典型格构式结构风荷载及风致响应规范比较》(《振动与冲击》2015年第34卷第6期)等论文。
E-mail: zqh@ncwu.edu.cn