

基于现场实测的大跨度膜结构风场特性分析*

蒋 磊¹, 李锦华², 李春祥¹

(1. 上海大学土木工程系 上海, 200444) (2. 华东交通大学土木工程系 南昌, 330013)

摘要 基于实测数据,对强风作用下某大跨度膜结构进行了近地风场特性、风压特性与非高斯特性分析。该工程对大跨度膜结构进行了多点(21点)同步风压实测,同时进行同步风速风向实测。依靠这些数据得到了平均风速、平均风向、纵向、横向脉动风速、阵风因子、湍流度、风压系数、风压相关性、概率密度分布、高阶特征统计量及功率谱密度等参数。实测数据分析表明:在强风作用下大跨度膜结构膜边缘处的风压呈现出明显非高斯特性,且为峰值大于3的超高斯随机过程;膜边缘测点上下风压呈负相关;该实测风压中低频成分幅值较大,同时,膜结构各位置所受风荷载连续冲击所隔的时间间隔相似。

关键词 现场实测;大跨度膜结构;风场特性;风压特性;非高斯

中图分类号 TU311; TH823

引 言

大跨度膜结构作为一种外观新颖、力学性能优越、轻质透光的新型结构,大量应用于体育馆、会展中心等公共场所。与大跨度屋盖悬挑结构类似,由于气流的脉动、分离及旋涡脱落等因素,使这类结构建筑周围的风场非常复杂。膜结构作为一种轻质柔性材料,在风荷载的作用下会产生较大的变形与振动,影响了膜结构表面风压的分布情况,形成了所谓的“流固耦合”效应。因此对于大跨度膜结构的风场研究十分必要。

国内外对风场特性的研究大多局限于以风洞试验为主的数据研究,现场实测的相关研究较少。作为掌握风场特性最直接的资料,现场实测数据对于风场研究非常重要。申建红等^[1]对强风作用下某超高层建筑表面的风速、风压场进行了同步实测,得到超高层建筑在强风作用下的风场特性及表面的风压分布特征。李锦华等^[2]对一矩形结构建筑进行风压实测,得到矩形结构的非高斯风荷载特性。Li等^[3]对某一低层刚性结构建筑进行风场实测,研究了低矮建筑在热带风暴中的风场特性。汤怀强等^[4]对某超高层建筑表面风压系数的风洞试验结果和实测结果进行了对比,在大跨度膜结构的实际工程应用中,膜的上下表面均受到风场的作用力,实际作用力为上下表面风压力的合力。Liang等^[5]讨论了结构自然振动,静态

风荷载响应和风力动态分析对大跨度膜结构不同预应力和膜拉伸刚度的影响。Bartko等^[6]对某低坡度膜屋面进行风压实测,研究了膜屋面风压特性与风向的关系。李兆杨等^[7]对良态风作用下索膜结构的风压特性进行了现场实测研究。

笔者对强风作用下某大跨度膜结构进行了近地风场特性、风压特性与非高斯特性分析。该工程对大跨度膜结构进行了多点(21点)同步风压实测,同时进行同步风速风向实测,依靠这些数据进行了近地风场特性、风压特性与非高斯特性分析。

1 现场实测概况

乐清市体育场建筑南北长为229 m,东西宽为211 m,柱顶标高为42 m,屋面采用弯月形非封闭空间索桁体系覆盖PTFE膜材,最大悬挑跨度约为57 m。整个膜结构屋面呈曲面波浪形,交替起伏,膜结构曲面波浪由索桁体系上273×10钢管拱支撑成型,在两个波浪的谷底布置索结构下弦索。张志宏等^[8]于2012年12月25日已启动乐清体育中心体育场膜表面整体风压实测研究。

风压仪器现场布置图如图1所示。三维扫描图、测点水平位置坐标图如图2,3所示。风压数据采样频率为100 Hz。风速风向测量仪器有两台,都位于乐清体育场的角柱顶面,分别为R. M. Young 81000

* 国家自然科学基金资助项目(51378304);江西省自然科学基金资助项目(20171BAB206051)
收稿日期:2017-03-10;修回日期:2017-09-22

型超声波和 R. M. Young 05305V 型机械式风速仪, 如图 4 所示。从图 4(b)可以看出, 风速仪周围是篮球

场和网球场, 附近没有建筑物遮挡, 因此风速数据可以忽略其他建筑物对于风速的影响。

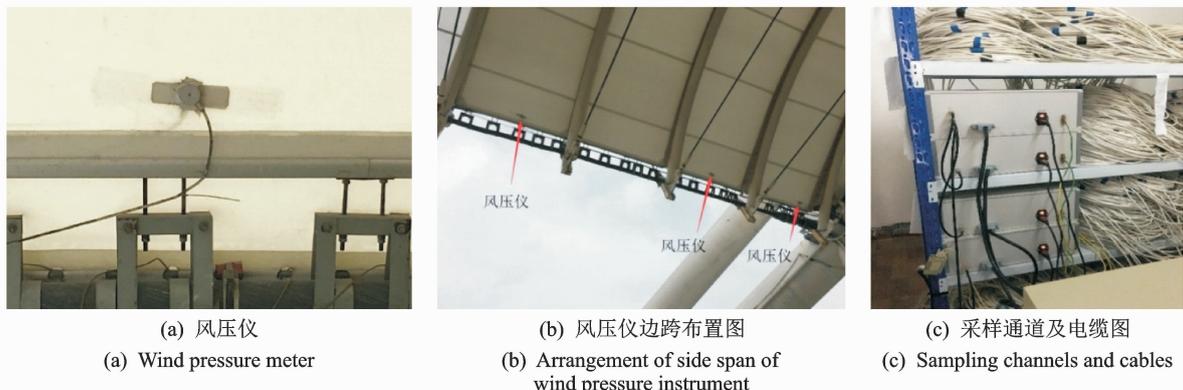


图 1 现场风压仪布置图
Fig. 1 Layout of field wind pressure instrument

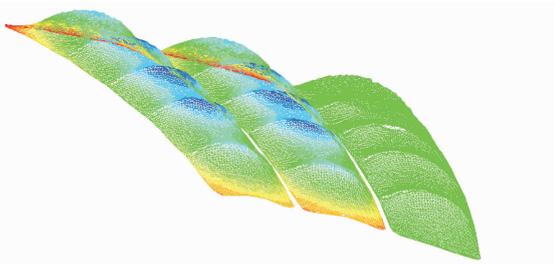


图 2 中间三幅膜三维扫描图
Fig. 2 3D scanning of the middle three pieces of film

		⊗ 8	⊗ 17		
	⊗ 1	⊗ 13	⊗ 21		
		⊗ 12	⊗ 16	⊗ 20	
		⊗ 2	⊗ 7		
		⊗ 6	⊗ 15	⊗ 19	
		⊗ 3	⊗ 9	⊗ 11	
⊗ 4		⊗ 10	⊗ 5	⊗ 14	⊗ 18

图 3 测点水平位置坐标图
Fig. 3 Horizontal position of measuring points



(a) 现场风速仪布置图
(a) Layout of field wind speed instrument



(b) 风速仪周围环境图
(b) Environmental map of wind speed instrument

图 4 现场风速仪布置图与风速仪周围环境图
Fig. 4 Layout of field wind speed instrument and environmental map of wind speed instrument

2 近地风场特性

2.1 风压、风速与风向

实测数据记录了 2013 年 7 月 14 日凌晨 0 点到午时 12 点乐清体育场膜结构表面所测得的风压, 其中 4:00~5:00 期间风速达到最大值 11.59 m/s, 为台风“苏力”登陆时间, 风力等级达到 6 级, 属于强风

级别。取体育场中间三幅膜结构为采样部位, 并以 4:00~5:00 所测风压数据作为膜结构非高斯特性研究的数据样本。现拥有 21 个测点上表面瞬时风压数据 $p_u(t)$ 与下表面瞬时风压数据 $p_d(t)$, 使用差压公式 $\Delta p(t) = p_u(t) - p_d(t)$ 求得 21 个测点的综合风压如图 5 所示。21 个测点的实测风压数值均具有间歇的大幅脉冲值, 即非高斯特征。其中, 测点 #4, #21 风压值过大, 为明显的测量误差, 不做进

一步讨论。测点#1, #5, #6, #7, #8, #10, #11, #12, #13, #15及#17主要表现出正压(10~

50 Pa), 而测点#3, #14及#19表现出负压(-10~-20 Pa)。

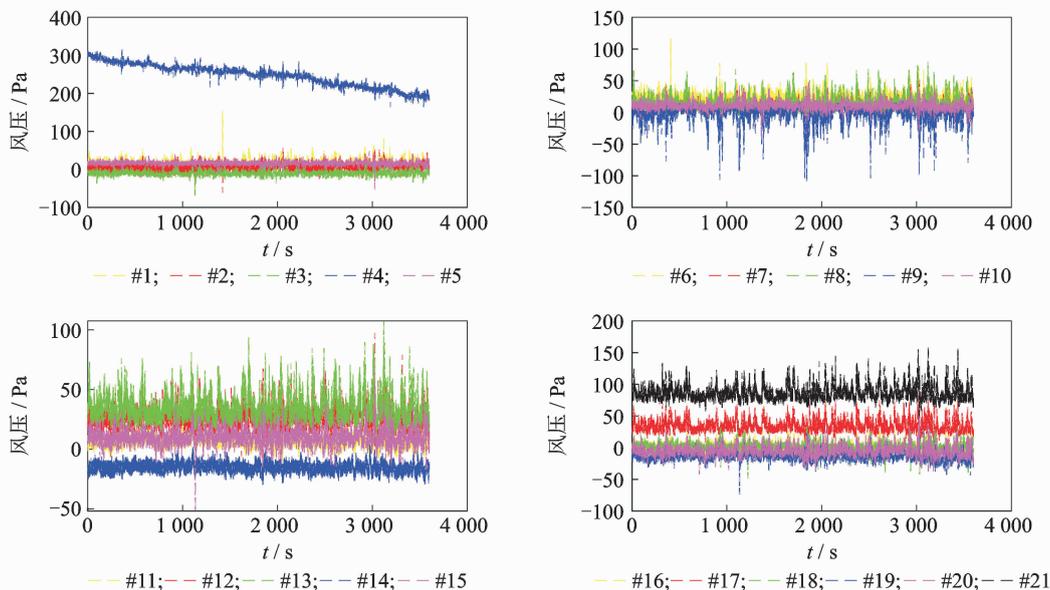


图5 21个测点综合风压实测值

Fig. 5 The measured value of the wind pressure on the upper surface of the 21 measuring points

根据现场风速风向测量仪器的记录, 得到2013年7月14日4:00到5:00乐清体育场周围风场的水平风速 $w(t)$ 。水平风速时程图与风向时程图如图6所示。在检测时间段内, 正北为 0° , 乐清体育场周围风向角以 180° 到 225° 为主, 属于东南风。选取时间 T 为时距, 平均水平风速 U 可表示为

$$U = \frac{1}{T} \int_0^T w(t) dt \quad (1)$$

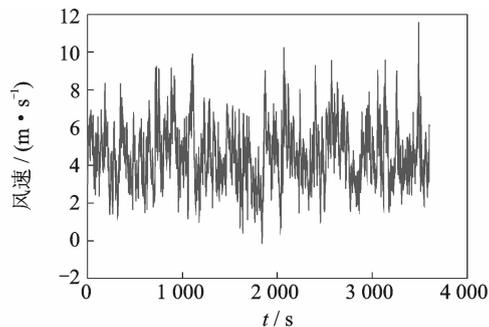
一般来说, T 取10 min为基本时距, 但在本次实测研究选取的1 h风压时程研究区间中, 10 min的时距难以体现风场特性, 故选取3 min为基本时距。以3 min为基本时距的平均风速时程图与平均风向时程如图7所示。在选取的4:00~5:00的观测时间中, 总的平均风速为4.55 m/s, 最大3 min时距平均风速为5.28 m/s。

实测合风压 $\Delta p(t)$ 得到时距为 T 的平均合风压 $\overline{\Delta p(t)}$ 为

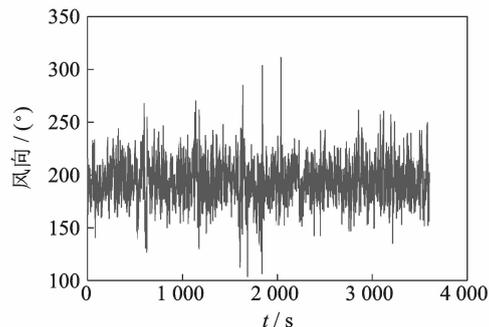
$$\overline{\Delta p(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p(t) dt \quad (2)$$

以3 min为基本时距, 选取风压测点#1~#11合风压数据并计算其平均风压时程, 如图8所示。对比图7发现, 在选取的1 h实测数据时长内, 平均风速、风向角变化较大, 同时各测点平均风压的变化趋势与平均风速、平均风向的变化趋势存在一定的规律性。

机械式风速仪输出的是水平方向上的风速数据, 对应 x, y 两轴上的风速分量。在安装的时候, x



(a) 风速时程图
(a) Time series of horizontal wind speed

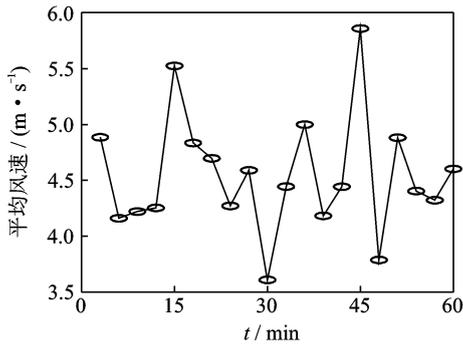


(b) 风向时程图
(b) Time series of wind direction

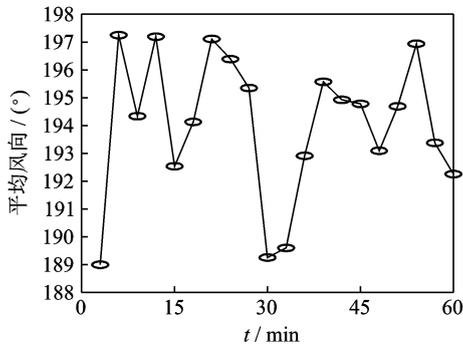
图6 风速时程图与风向时程图

Fig. 6 Time series of horizontal wind speed & time series of wind direction

轴朝北, y 轴朝西。 x, y 轴上的风速分量分别用 $u_x(t)$ 和 $u_y(t)$ 表示。取基本时距为3 min, 平均水平风速 U 与平均水平风向角 φ 分别为



(a) 平均风速时程图
(a) Time series of average wind speed



(b) 平均风向时程图
(b) Time series of average wind direction

图 7 平均风速时程图与平均风向时程图

Fig. 7 Time series of average wind speed & Time series of average wind direction

$$U = \sqrt{\overline{u_x(t)^2} + \overline{u_y(t)^2}} \quad (3)$$

$$\cos(\varphi) = \overline{u_x(t)} / U \quad (4)$$

其中: $\overline{u_x(t)}$ 和 $\overline{u_y(t)}$ 分别为 x , y 轴上的风速分量对应的 3 min 时距下的平均风速。

平均水平风向角 φ 按俯视逆时针方向递增, 风速以北风为 0° , 西风为 90° , 以此类推, 如图 2 所示。

将 x , y 轴上的风速分量 $u_x(t)$ 和 $u_y(t)$ 按平均风向角 φ 分解到顺风向和横风向, 得到纵向水平分量与横向水平分量。水平风速 $w(t)$ 可表示为

$$w(t) = U + u(t) = u_x(t)\cos(\varphi) + u_y(t)\sin(\varphi) \quad (5)$$

求得 $u(t)$ 与 $v(t)$ 分别为

$$u(t) = u_x(t)\cos(\varphi) + u_y(t)\sin(\varphi) - U \quad (6)$$

$$v(t) = -u_x(t)\sin(\varphi) + u_y(t)\cos(\varphi) \quad (7)$$

其中: $u(t)$ 与 $v(t)$ 分别为纵向与横向脉动风速。

2.2 阵风因子

阵风因子是阵风持续时间 τ 中的最大平均风速与较长参考时距 T 中的平均风速的比率。目前, 国内外的抗风设计规范中大多将阵风因子定义为 3 s 阵风风速(澳大利亚规范现采用 0.2 s 阵风)与

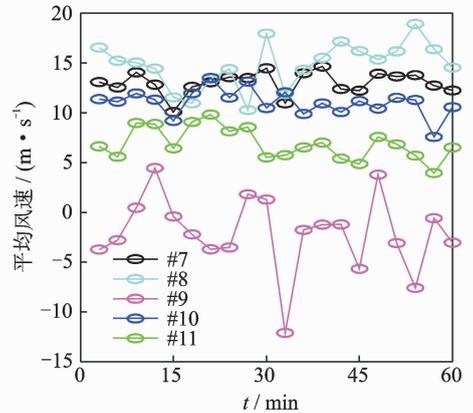
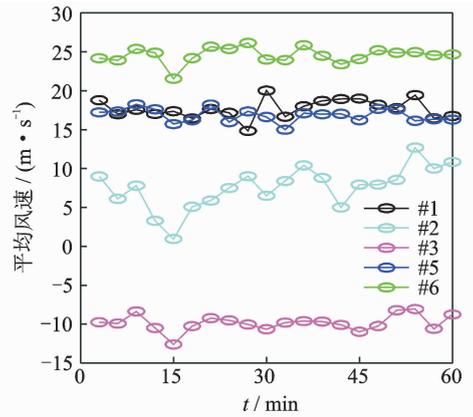


图 8 测点 1~11 平均风压时程图

Fig. 8 Average velocity time history chart of point 1 to point 11

10 min 或 1 h 时距下平均风速的比值^[9], 笔者取 3 s 阵风风速与 3 min 时距下平均分速。

阵风因子的表达式为

$$G_u(\tau, T) = \frac{\max\{\overline{w(\tau)}\}}{U} = 1 + \frac{\max\{u(\tau)\}}{U} \quad (8)$$

$$G_v(\tau, T) = \frac{\max\{v(\tau)\}}{U} \quad (9)$$

其中: $\overline{w(\tau)}$ 为水平风速在阵风持续时间 τ 中的平均风速; $\overline{u(\tau)}$ 与 $\overline{v(\tau)}$ 分别为纵向脉动风速与横向脉动风速在阵风持续时间 τ 中的平均风速。

此时, 取 $\tau = 3$ s, $T = 3$ min, $G_u(3, 180)$ 与 $G_v(3, 180)$ 如图 9 所示。 $G_u(3, 180)$ 的取值范围为 1.304 4~1.878 5, $G_v(3, 180)$ 的取值范围为 0.310 4~0.698 9。

2.3 湍流度

湍流度描述大气湍流运动特性, 是反映脉动风速的相对强度的参数, 同时也是确定结构风荷载的重要参数。湍流度定义为相应时距内脉动风速标准差与水平平均风速 U 的比率。同样, 平均风速一般取时距为 3 min, 公式为

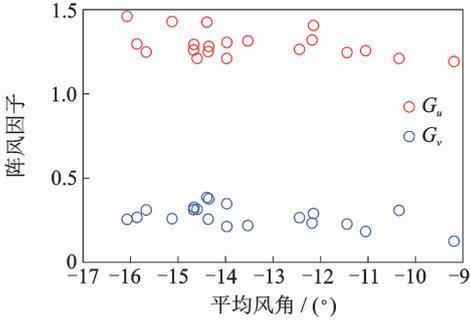


图 9 纵向和横向脉动风速阵风因子

Fig. 9 Measured longitudinal and lateral gust factors

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \quad (10)$$

$$I_v = \frac{\sigma_v}{U} \quad (11)$$

其中: I_u 与 I_v 分别为纵向与横向的湍流度; σ_u 与 σ_v 分别为纵向脉动风速与横向脉动风速在分析时距下的标准差。

如图 10 所示, 在平均风向 $189^\circ \sim 197.5^\circ$ 的变化范围内, I_u 从 $0.7273 \sim 0.7742$ 变化, I_v 从 $0.7123 \sim 0.7629$ 变化。

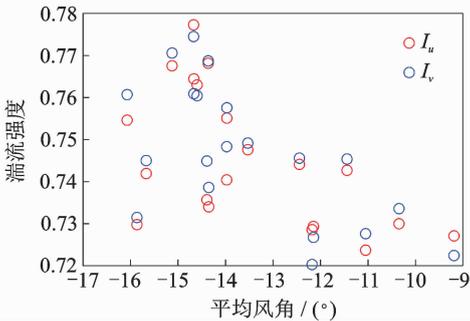


图 10 纵向和横向脉动风速湍流度

Fig. 10 Measured longitudinal and lateral turbulence intensity

3 风压系数

为了更好地分析风压特性, 在国际上引入了风压系数 C_p 这一概念。根据 Kumar 等^[10] 以及文献 [3] 的研究, 风压系数 C_p 可以表示为

$$C_p = \frac{p(t)}{1/2\rho U^2} \quad (12)$$

其中: $p(t)$ 为压力传感器测得的风压, 即瞬时压力减去大气静压力; ρ 为空气密度 (这里默认为标准情况下 1.29 kg/m^3); U 为以 3 min 为时距的平均水平风速。

对于大跨度膜结构, 合风压的方向与上表面风压的方向一致, 即向下的压力为正, 向上的吸力为

负。上下表面的风压系数可以分别用式 (12) 求出, 而测点的合风压系数 $C_p(t)$ 可以表示为

$$C_p(t) = \frac{p_u(t) - p_d(t)}{1/2\rho U^2} = C_{pu}(t) - C_{pd}(t) \quad (13)$$

其中: $p_u(t)$ 为测点上表面测得的风压; $p_d(t)$ 为测点下表面测得的风压; $C_{pu}(t)$ 为测点上表面的风压系数; $C_{pd}(t)$ 为测点下表面的风压系数。

平均风压系数 $C_{p_{\text{mean}}}$ 可以表示为

$$C_{p_{\text{mean}}} = \frac{\overline{p(t)}}{1/2\rho U^2} \quad (14)$$

其中: $\overline{p(t)}$ 为测点在基本时距为 3 min 时的风压平均值; 其他系数同式 (12)。

同样的, 平均合风压系数 $C_{p_{\text{mean}}}(t)$ 可以用上下表面的平均风压系数来表示

$$C_{p_{\text{mean}}}(t) = C_{p_{\text{mean}}^u}(t) - C_{p_{\text{mean}}^d}(t) \quad (15)$$

其中: $C_{p_{\text{mean}}^u}(t)$ 为膜上表面的平均风压系数; $C_{p_{\text{mean}}^d}(t)$ 为膜下表面的平均风压系数。

将式 (14) 中分子 $\overline{p(t)}$ 求平均值改为求风压值的均方根 p_{rms} , 得到脉动风压均方根系数 $C_{p_{\text{rms}}}$ 为

$$C_{p_{\text{rms}}} = \frac{p_{\text{rms}}}{1/2\rho U^2} \quad (16)$$

对于合风压的均方根系数, 根据多维随机变量性质^[11], 可以表示为

$$C_{p_{\text{rms}}}(t) = \sqrt{C_{p_{\text{rms}}^u}^2(t) + C_{p_{\text{rms}}^d}^2(t) - 2\gamma_{ud}C_{p_{\text{rms}}^u}(t)C_{p_{\text{rms}}^d}(t)} \quad (17)$$

其中: $C_{p_{\text{rms}}^u}(t)$, $C_{p_{\text{rms}}^d}(t)$ 分别为膜上、下表面的风压均方根系数。

γ_{ud} 为上下表面风压的相关系数, 根据文献 [11] 可表示为

$$\gamma_{ud} = \frac{E[C_{pu}(t)C_{pd}(t)] - E[C_{pu}(t)]E[C_{pd}(t)]}{C_{p_{\text{rms}}^u}(t)C_{p_{\text{rms}}^d}(t)} \quad (18)$$

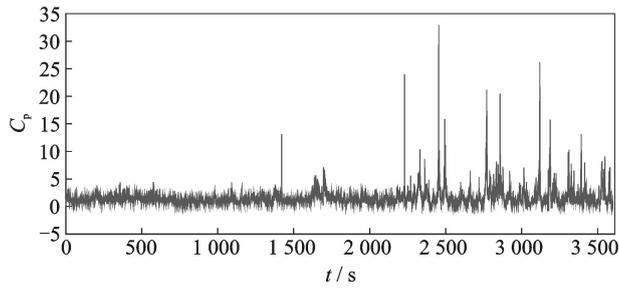
为了方便计算, 直接采用式 (17) 进行计算

$$\gamma_{ud} = \frac{C_{p_{\text{rms}}^u}^2(t) + C_{p_{\text{rms}}^d}^2(t) - C_{p_{\text{rms}}}^2(t)}{2C_{p_{\text{rms}}^u}(t)C_{p_{\text{rms}}^d}(t)} \quad (19)$$

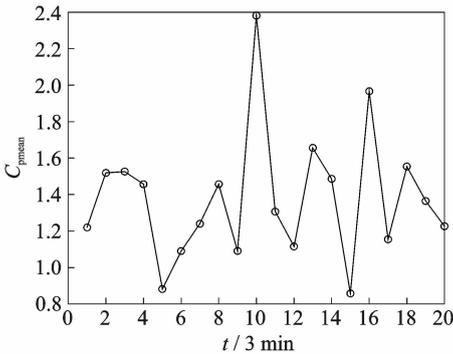
以 3 min 为基本时距, 选取测点 1 的合风压数据计算其风压系数。平均风压系数和风压均方根系数如图 11 所示。可以发现, 测点 1 的平均风压系数与风压均方根系数变化趋势完全一致, 仅数值略有差异。

图 12(a) 为测点 1 上下表面风压相关系数 γ_{ud} 的时程分析图, 可以发现其相关系数不随时间变化而产生巨大改变, 故可取其平均值作为测点 1 的相关系数。同样的, 可以求得所有 21 测点的相关系数直方图如图 12(b) 所示。

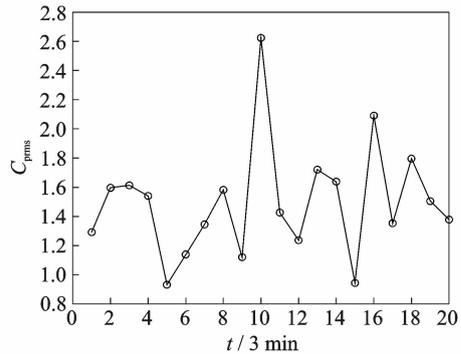
观察图 12(b) 发现, 测点 #1, #6, #7, #8,



(a) 测点1风压系数时程图
(a) Wind pressure coefficient schedule of point 1



(b) 3min基本时距下测点1平均风压系数时程图
(b) Mean wind pressure coefficient of point 1 (3min)

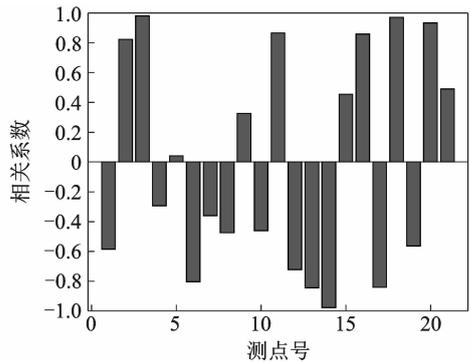


(c) 3min基本时距下测点1风压均方根系数时程图
(c) Wind pressure root mean square coefficient of point 1 (3min)

图 11 测点 1 风压系数、平均风压系数、风压均方根系数时程图

Fig. 11 C_p , C_{pmean} , C_{prms} time history chart of point 1

#10, #12, #13, #14, #17 及 #19 相关系数为负值。参考图 3 各测点位置可以发现,这些点大多出现在膜边缘处,而膜中央的测点相关系数几乎都为正值。由此可以得到结论,大跨度膜上下表面风压负相关的区域大多出现在膜边缘。可以从物理意义上解释此现象,在强风经过的过程中,膜边缘位置上表面受很大的吸力,下表面由于分离流导致了局部气流堵塞,产生正压,形成“上吸下顶”的风压分布特征,上下膜表面风压相关性呈负值,而其余区域上多产生“上压下压”、“上吸下吸”的风压平衡,为风压正相关区域。对大跨度膜结构而言,这类风压负相关区域是主要造成局部结构破坏的地方。在考虑结构脉动负风压的设计值时,应对“上吸下顶”的风压负相关区域进行重点考查。

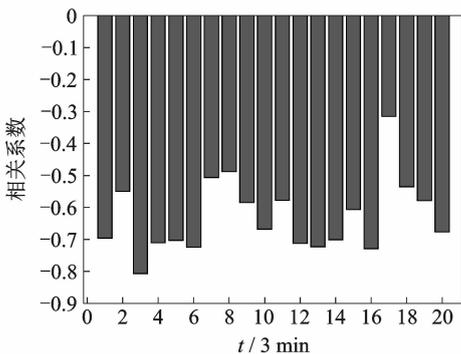


(b) 21测点的相关系数直方图

(b) The correlation coefficient histogram of 21 measurement points

图 12 测点 1 上下表面风压相关性时程图及 21 测点的相关系数直方图

Fig. 12 Wind pressure correlation time history diagram of upper and lower surfaces of measuring point 1 & correlation coefficient histogram of 21 measurement points



(a) 测点1上下表面风压相关性时程图

(a) The correlation coefficient of measurement point 1

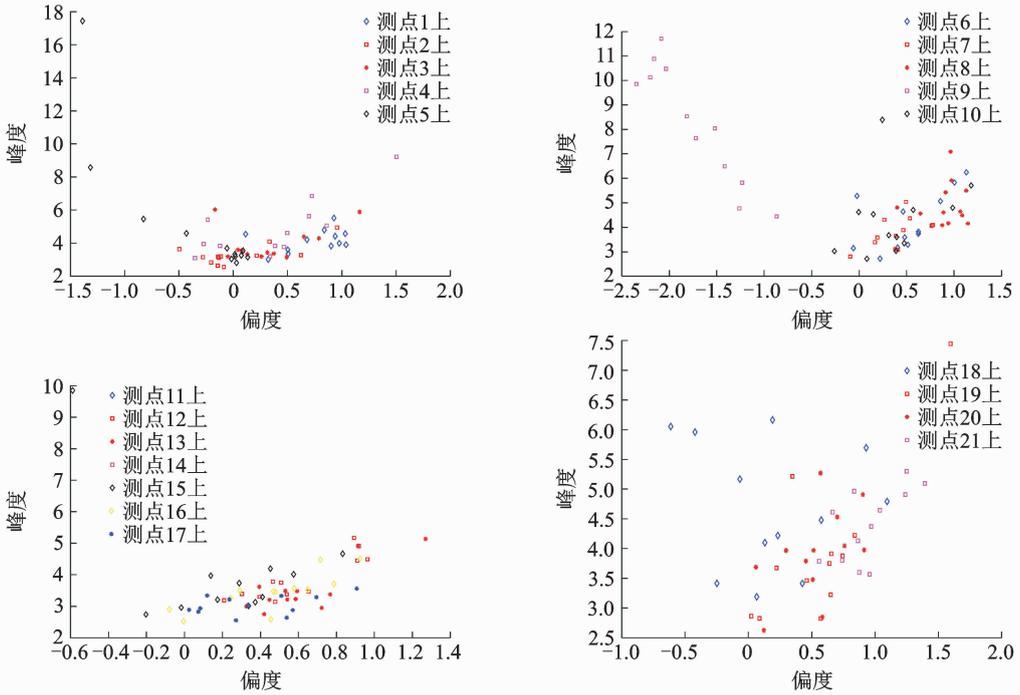
4 非高斯特性分析

4.1 高阶特征统计

偏度(skewness)和峰度(kurtosis)是表征随机变量数学特征的高阶特征统计参数。高斯随机过程的偏度为 0,峰度为 3,21 个测点上下表面风压时程

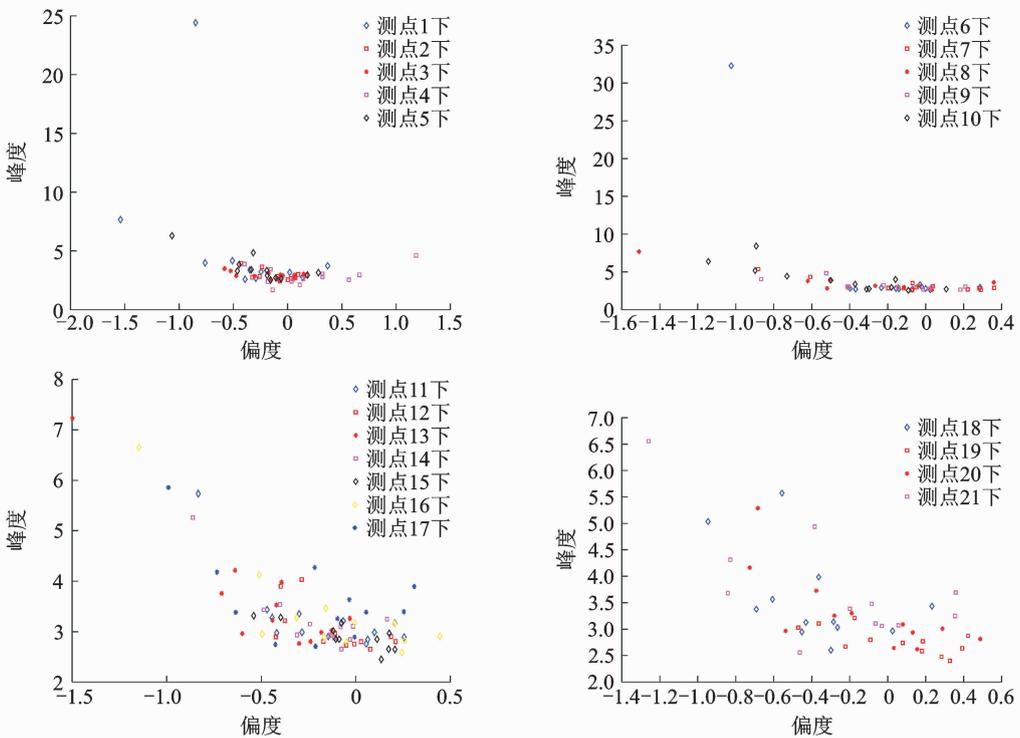
的偏度与峰度相较于高斯随机过程均有不同程度的偏离。通过观测比较上下表面各测点的偏度峰度分布图(图 13)可以发现:a. 在上表面的测点中,偏度值大多分布于 $-1 < SK < 1$,而在下表面的测点中,偏度值大多处于 $-0.5 < SK < 0.5$,由此可知下表面风压的偏度值绝对值较之上表面风压的偏度值更

小;b. 在上表面的测点中,峰度值 K 主要分布在 3 ~6 之间,而在下表面的测点中峰度值 K 主要分布在 2~4 之间,更为靠近高斯分布峰度为 3 的值,可见,大跨度膜结构在强风作用下,膜上表面较之膜下表面具有更强的非高斯性质;c. 不论是上表面还是下表面,风压的峰度值随着偏度值绝对值的递增而



(a) 21个测点上表面实测风压偏度与峰度关系

(a) The relationship between skewness and kurtosis of wind pressure on upper surface of 21 points



(b) 21个测点下表面实测风压偏度与峰度关系

(b) The relationship between skewness and kurtosis of wind pressure on lower surface of 21 points

图 13 21个测点实测风压偏度与峰度关系

Fig. 13 The kurtosis & skewness of measured wind pressure of the 21 measuring points

呈递增分布。

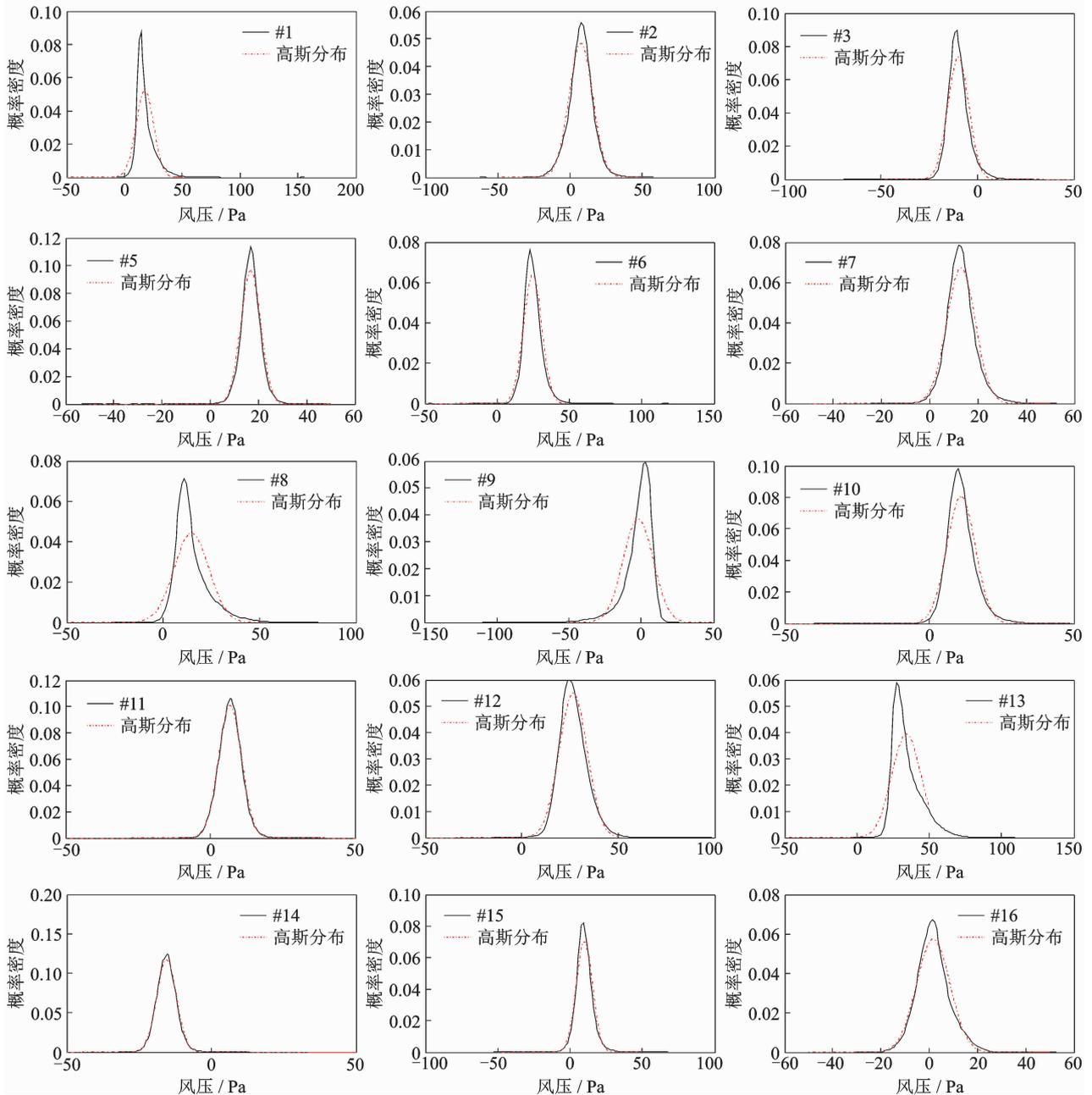
4.2 概率密度函数

概率密度函数(probability density function,简称 PDF)描述了随机变量的数值分布特征。对 18 个测点的合风压数值进行概率密度函数计算,并与高斯分布进行了对比,如图 14 所示。可以发现,膜边缘测点 #1, #8, #9, #13 及 #17 等点与高斯分布曲线存在较大偏离,而其余测点尤其是膜中心部分的测点,如 #11, #12 及 #14 等概率密度函数曲线几乎与高斯分布重合。由此可以得到结论:a. 膜边缘测点实测风压值的概率密度存在明显的非高斯特性,而膜中央的大部分测点概率密度服从高斯分

布;b. 观察所有存在非高斯特性测点的概率密度函数图可以发现一个共同点,这些测点的概率密度曲线较之高斯分布更为陡峭,呈现出较高的峰度值($K > 3$),由此表示,在本次大跨度膜结构的风压实测中,所测得的非高斯过程属于超高斯随机过程。

4.3 功率谱密度

笔者采用了 welch 法进行功率谱估计,welch 法是在分段平均周期法的基础上,对每一小段数据进行加窗技术,这样可以减小频率泄漏,增加频峰的宽度。与周期图法相比,welch 法可以改善功率谱曲线的光滑性,大大提高谱估计的分辨率。图 15 为 21 个测点合风压功率谱密度。可以发现,随着频率



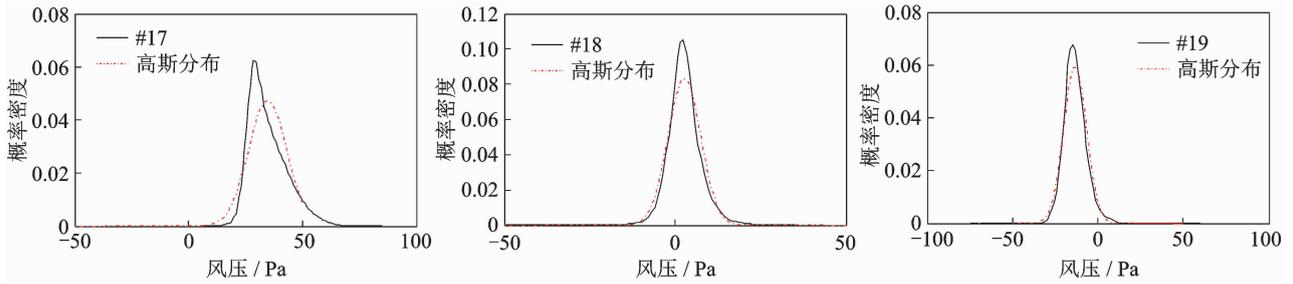


图 14 18 个测点合风压概率密度函数

Fig. 14 The PDF of wind pressure of the 18 measuring points

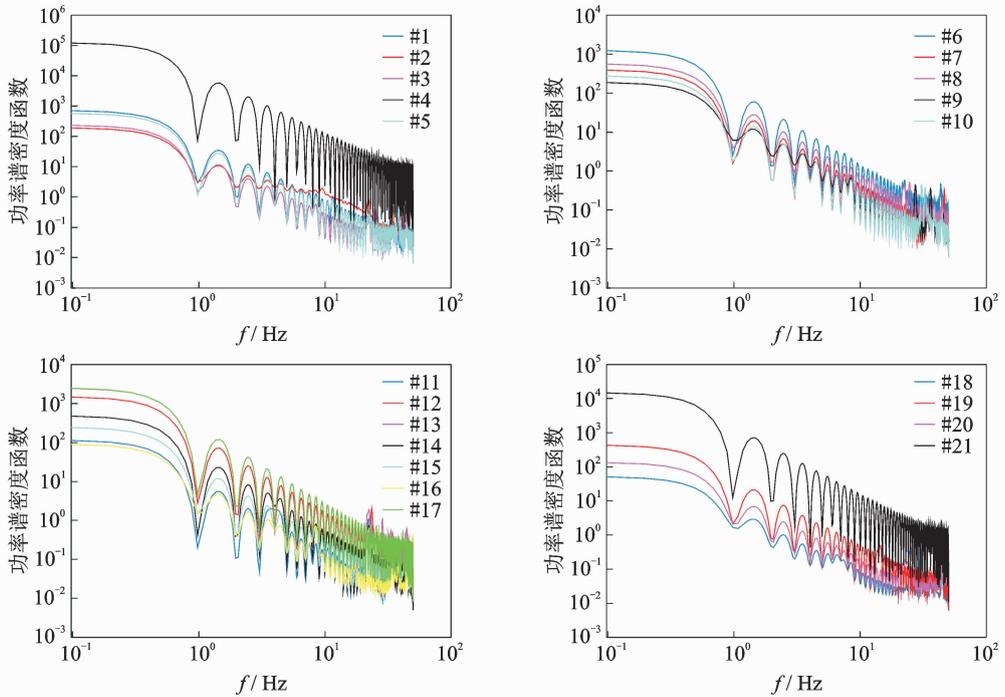


图 15 21 个测点合风压功率谱密度

Fig. 15 The PSD of wind pressure of the 21 measuring points

的增加,各测点合风压的功率谱密度呈减少趋势,说明该实测风压中低频成分幅值较大。同时发现,各测点合风压的功率谱密度峰值与谷值往往出现在相同的频率值上,说明膜结构各位置所受风荷载连续冲击所隔的时间间隔相似。

5 结论

1) 取阵风持续时间 $\tau = 3$ s,基本时距 $T = 3$ min,阵风因子顺风向 $G_u(3,180)$ 的取值范围在 1.304 4~1.878 5,横风向 $G_v(3,180)$ 的取值范围在 0.310 4~0.698 9。纵向脉动风湍流度 I_u 从 0.727 3~0.774 2 变化,横向脉动风湍流度 I_v 从 0.712 3~0.762 9 变化。

2) 大跨度膜上下表面风压负相关的区域大多

出现在膜边缘,形成了“上吸下顶”的风压分布特征。这类风压负相关的区域往往是主要造成局部结构破坏的地方。在考虑结构脉动负压的设计值时,应对“上吸下顶”的风压负相关区域进行重点考查。

3) 大跨度膜结构在强风作用下,膜上表面较之膜下表面具有更强的非高斯性质。不论是上表面还是下表面,风压的峰度值随着偏度值绝对值的递增而呈递增分布。

4) 膜边缘测点实测风压值的概率密度存在明显的非高斯特性,而膜中央的大部分测点概率密度服从高斯分布。在本次强风作用系大跨度膜结构的风压实测中,测得的非高斯过程峰度值大于 3,属于超高斯随机过程。

5) 该实测风压中低频成分幅值较大,同时可以发现各测点合风压的功率谱密度峰值与谷值往往出

现在相同的频率值上,说明膜结构各位置所受风荷载连续冲击所隔的时间间隔相似。

致谢 上海师范大学张志宏教授课题组提供了乐清体育馆风压实测数据以及大量的指导与帮助,笔者在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 申建红,李春祥. 强风作用下超高层建筑风场特性的实测研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 62-68.
Shen Jianhong, Li Chunxiang. Full-scale measurement-based investigation on wind field characteristics of super tall building under strong wind gusts[J]. Vibration and Shock, 2010, 29(5): 62-68. (in Chinese)
- [2] 李锦华,吴春鹏,陈水生. 矩形结构非高斯风荷载特性研究[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5): 951-959.
Li Jinhua, Wu Chunpeng, Chen Shuisheng. Characteristics of non-Gaussian wind pressures on rectangular structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5): 951-959. (in Chinese)
- [3] Li Qiusheng, Wang Yujin, Li Jiacheng. Monitoring of wind effects on an instrumented low-rise building during the landfall of a severe tropical storm[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2016, 24 (6): e 1917.
- [4] 汤怀强,梁枢果,王磊,等. 武汉证券大厦表面风压风洞试验与现场实测研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(3): 88-93.
Tang Huaiqiang, Liang Shuguo, Wang Lei, et al. Comparative study of wind tunnel test and field measurements of wind pressure of Wuhan international stock building[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(3): 88-93. (in Chinese)
- [5] Liang Fei, Xian Jiahao, Wang Jianwen. Wind-induced dynamic analysis of rung-shape long-span tensile cable membrane structure[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 578-579: 432-440.
- [6] Bartko M, Molleti S, Baskaran A. In situ measurements of wind pressures on low slope membrane roofs[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2016, 153: 78-91.
- [7] 李兆杨,杨彬,张其林,等. 良态风作用下索膜结构风压特性现场实测研究[J]. 施工技术, 2016, 45(11): 102-107.

Li Zhaoyang, Yang Bin, Zhang Qilin, et al. Field measurement research on wind pressure characteristics of a cable-membrane structure during normal wind[J]. Construction Technology, 2016, 45(11): 102-107. (in Chinese)

- [8] 张志宏,刘中华,董石麟. 强/台风作用下大跨空间索桁体系现场风压风振实测研究[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2013, 42(5): 546-550.
Zhang Zhihong, Liu Zhonghua, Dong Shilin. Field measurement of wind pressure and wind-induced vibration of large-span spatial cable-truss system under strong wind or typhoon[J]. Journal of Shanghai Normal University: Natural Sciences, 2013, 42(5): 546-550. (in Chinese)
- [9] 李利孝,郑斌,肖仪清,等. 考虑结构尺寸效应的台风场阵风因子特性分析[J]. 振动工程学报, 2016, 29(1): 177-183.
Li Lixiao, Zheng Bin, Xiao Yiqing, et al. Characteristics of gust factors considering the structural size effect in typhoon wind field [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1): 177-183. (in Chinese)
- [10] Kumar K S, Stathopoulos T. Wind loads on low building roofs: a stochastic perspective [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(8): 944-956.
- [11] 庞加斌,朱乐东,陈伟. 大面积屋顶上下表面脉动风压的相关性分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2001(5): 626-630.
Pang Jiabin, Zhu Ledong, Chen Wei. Fluctuating pressure correlativity analysis between up and down surfaces of large roof[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001(5): 626-630. (in Chinese)



第一作者简介: 蒋磊,男,1991年6月生,博士生。主要研究方向为结构风工程。曾发表《Comparative study on non-gaussian characteristics of wind pressure for rigid and flexible structures》(《Shock and Vibration》2018, Vol. 26)等论文。

E-mail: 790700811@qq.com

通信作者简介: 李春祥,男,1964年12月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构风工程及结构振动分析。

E-mail: li-chunxiang@vip.sina.com