

矩形结构非高斯风荷载特性研究*

李锦华, 吴春鹏, 陈水生

(华东交通大学土木建筑学院 南昌, 330013)

摘要 对矩形建筑结构表面的风压进行了现场实测, 获得了有效的非高斯风压数据。样本的概率密度分布、特征统计、相关性分析表明: 建筑结构迎风面和非迎风面的脉动风压均表现出不同程度的非高斯特征, 非迎风面的非高斯特征强度相对较强表现为负偏, 而迎风面的非高斯特征强度较弱存在着负偏和正偏; 迎风面非高斯脉动风压的统计平均相关性好于非迎风面, 水平测点非高斯脉动风压之间存在着相位角。根据实测非高斯脉动风压, 最后采用最小化预测误差自回归(AR)对样本进行了统计平均功率谱估计, 并拟合出有效的非高斯脉动风压功率谱函数, 建立了拟合参数与峰值频率之间的关系, 峰值频率的取值取决于非高斯特征的强弱。

关键词 风荷载; 非高斯; 现场实测; 功率谱; 矩形结构

中图分类号 TU311; TB55; TH138

引言

在结构设计中, 风荷载是非常重要的设计荷载之一^[1]。风荷载作用, 特别是具有随机特征的脉动风, 将可能使工程结构发生各种形式的风致随机振动^[2-3]。在结构的风振响应分析中, 传统的分析方法是作用在结构上的风荷载假设为高斯随机过程。然而, 在分离流作用的一些重要区域, 由于受到气流的分离、再附和漩涡脱落的影响, 结构表面风压会表现出明显的非高斯特性^[4-5]。这类风压时程与结构表面风场的漩涡运动有着密切的关系, 具有风压分布的不对称性和大幅度脉冲峰值, 更容易使结构发生疲劳破坏, 是导致局部结构构件破坏的主要原因^[6]。因此, 结构表面非高斯风压特性的研究具有重要的意义。

非高斯风压是指风压时间序列概率密度函数分布为非正态分布, 与高斯风压相比较具有非对称高峰态的特征。许多学者通过风洞试验测试到工程结构表面非高斯脉动风压的存在, 并进行了非高斯特性研究。Kumar 等^[4-5]对低矮建筑典型平顶屋面、人字形屋面等进行比较分析, 阐述了结构屋面的非高斯特性, 并进行了高斯与非高斯区域的分区。柯世堂等^[7]对大型冷却塔表面脉动风压的非高斯统计特性进行了研究, 探讨了不同区域的脉动风压形成

机理。楼文娟等^[8]通过对带切角的菱形超高层建筑的风洞试验, 分析了在不同风向角下结构各立面风压高斯与非高斯分布的分区, 发现侧面的前缘气流分离区、背风面以及迎风面切角区域的脉动风压存在显著的非高斯特性。韩宁等^[9]对方形高层建筑脉动风压非高斯特性的研究表明: 风向角对结构非高斯特性的影响较大, 直接受来流风作用的立面, 会出现正偏和负偏, 峰度值相对较小, 主要以高斯区域为主; 分离流和尾流综合作用的立面, 均为负偏且峰度值相对较大, 主要以非高斯区域为主, 当流体再附时, 相应区域的负偏值会增大而峰度值则减小, 导致非高斯区域过渡到高斯区域。

目前, 关注于风压非高斯特性研究的现场实测数据非常有限, 主要以风洞试验数据为主。现场实测结果是掌握风场特性最为直接的资料, 也是修正现有试验方法和理论模型的最为权威的依据。现场实测是结构抗风研究中非常重要的基础性和长期性的方向。笔者通过对矩形建筑结构表面进行非高斯风压的现场实测, 并对实测的非高斯脉动风压进行系统分析。

1 非高斯风压的现场实测

现场实测数据是掌握风场特性最为直接的资料。为了分析结构表面非高斯风压的特性, 文中选

* 国家自然科学基金资助项目(11162005); 江西省自然科学基金资助项目(20132BAB216003); 江西省教育厅基金资助项目(GJJ13310)

收稿日期: 2014-01-08; 修回日期: 2014-03-10

择了一栋办公楼楼顶砌筑的矩形建筑结构(长为5.5 m、宽为3.6 m、高为1.85 m),分别在2012年11月23日和2013年3月1日两次进行了非高斯风压的现场实测。

1.1 实测方案

两次风压的现场实测如图1,2所示,测试结构位于办公楼楼顶,视野开阔。2012年11月23日现场实测(方案1),当天风向为东北风,风力3~4级;2013年3月1日现场实测(方案2),当天南昌市气象台7点30分发布大风蓝色预警信号,局部地区出现7~8级北风,将持续24 h。

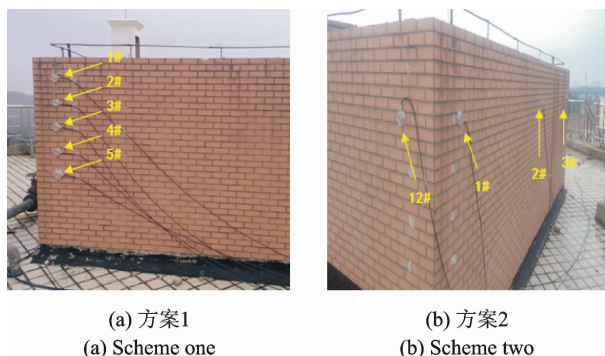


图1 非高斯风压的现场实测

Fig. 1 Field measurement for non-Gaussian wind pressures

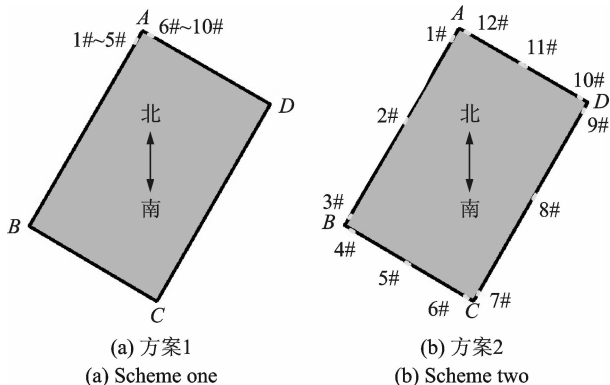


图2 非高斯风压现场实测的平面布置

Fig. 2 Plane layout of field measurement for non-Gaussian wind pressures

方案1:主要测试结构菱角区域风压。在矩形结构AB墙面上,沿竖向每隔21 cm布置1#~5#号风压传感器,DA墙面沿竖向每隔21 cm布置6#~10#号风压传感器。AB,DA墙面的风压传感器均菱角A水平距离23 cm,1#和6#风压传感器均距离结构顶面18 cm。

方案2:主要测试结构四周区域风压。在同一水平面上,AB,CD墙面分别布置间隔均为2.45 m的1#~3#,7#~9#传感器,BC,DA墙面分别布

置间隔均为1.5 m的4#~6#、10#~12#传感器。12个风压传感器均距离结构顶面边缘39 cm,1#~12#,3#~4#,6#~7#,9#~10#传感器分别与结构菱角A,B,C,D水平距离为30 cm。

1.2 数据采集

两次现场实测采用了昆山双桥传感器测控技术有限公司开发的CYG1721T型风荷载压力传感器,它改进了文献[10]用于现场测试的CYG1513T型风压传感器的性能,厚度薄,体积小,可贴于建筑物表面进行测量。风压数据采集系统由笔记本电脑、东华DH5922动态数据采集器以及分析系统组成。两次现场实测均设置采样频率为20 Hz,且采用了10 Hz低通滤波进行风压数据的采集,如图3,4所示。



图3 现场风压数据采集(方案1)

Fig. 3 Acquisition of wind pressures (scheme one)

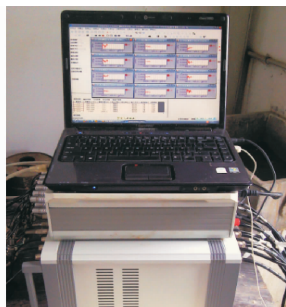


图4 现场风压数据采集(方案2)

Fig. 4 Acquisition of wind pressures (scheme two)

2 结果分析

方案1实测当天为东北风,DA墙面位于迎风面,AB墙面属于非迎风面;方案2实测为北风,AB和DA墙面属于迎风面,而BC,CD墙面属于非迎风面。两次测试数据如图5,6所示,实测风压值均具有间歇的大幅脉冲值,均具有数学上的非高斯特征。

从图5可以看出:迎风面实测风压的偏不是程度明显,即风压分布具有一定的对称性;而非迎风面

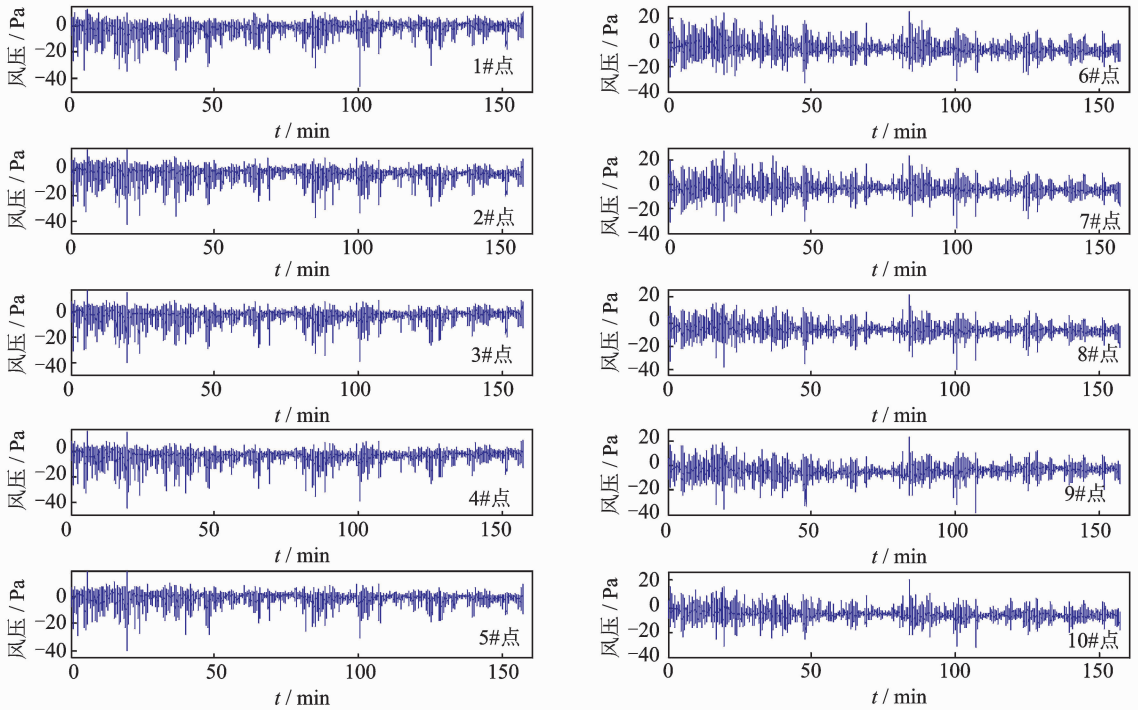


图 5 现场实测风压时程(方案 1)

Fig. 5 Time history of measured wind pressures (scheme one)

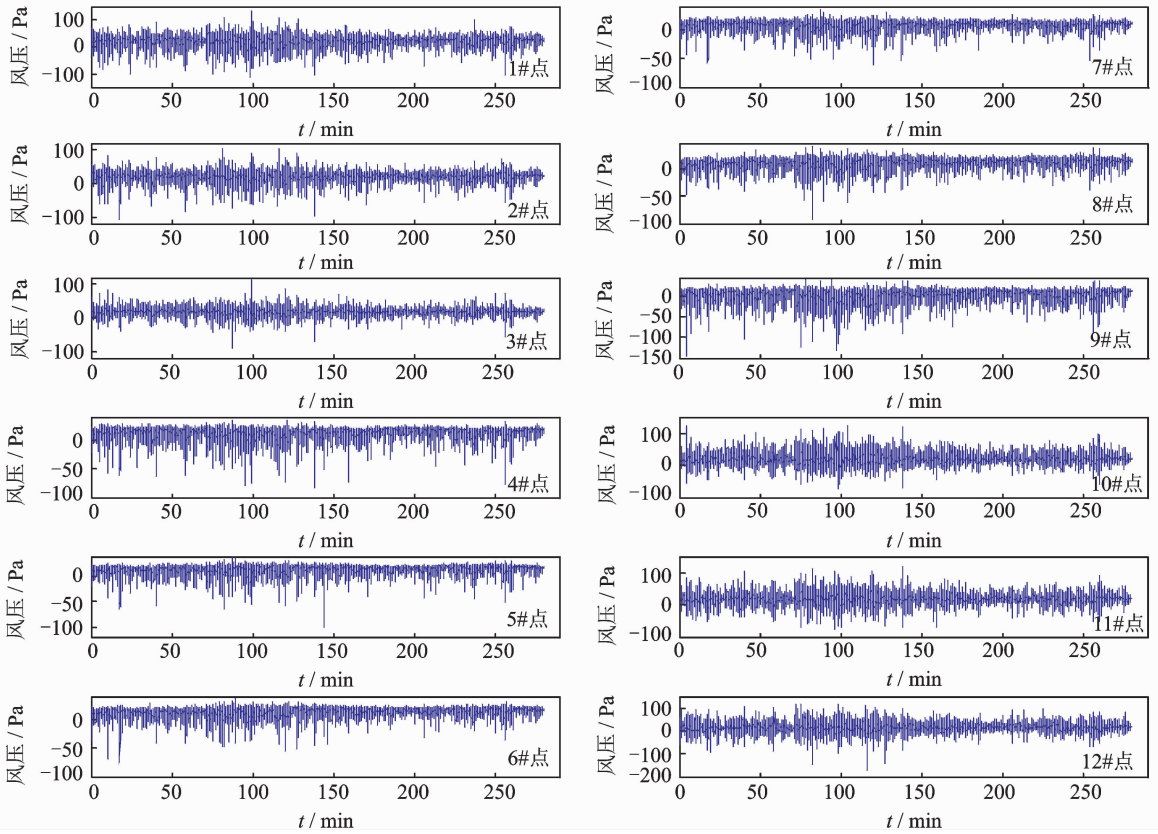


图 6 现场实测风压时程(方案 2)

Fig. 6 Time history of measured wind pressures (scheme two)

风压数据显示具有较为明显的偏度。从图 6 可以看出,非迎风面 BC 和 CD 墙面风压分布具有的偏度明显高于迎风面 AB 和 DA。

2.1 概率密度分布

两次实测脉动风压的概率密度分布如图 7,8 所

示,均与高斯概率密度分布有所偏离,即各墙面脉动风压均具有不同程度的非高斯特征,非高斯特征随着风力等级的加大表现越明显。从图7看出:与AB墙面的概率密度分布相比,DA墙面的分布比较对称;同一墙面的竖向测点脉动风压的概率密度分布差异并不明显,说明竖向测点非高斯脉动风压具有较好的相关性。在方案2实测中同样发现(图8),与非迎风面BC,CD墙面的概率密度分布相比,迎风面AB,DA墙面的分布较为对称。对于同一墙面的水平方向测点的脉动风压的概率密度分布,AB,CD和DA墙面的测点存在明显差异性,说明

水平测点的相关性相对较弱。如图8所示,在AB墙面,与1#、2#测点相比,3#测点脉动风压的概率密度分布与高斯分布的差异最大;在BC墙面,各测点的差异不明显;在CD墙面,9#测点与7#、8#测点有所不同,与高斯分布的差异相对较小;在DA墙面,12#测点与高斯分布的差异相对较小。

2.2 高阶特征统计

以每10min的实测脉动风压时程进行高阶特征统计分析,两次实测脉动风压的偏度和峰度之间的关系如图9,10所示。高斯脉动风压高阶特征统

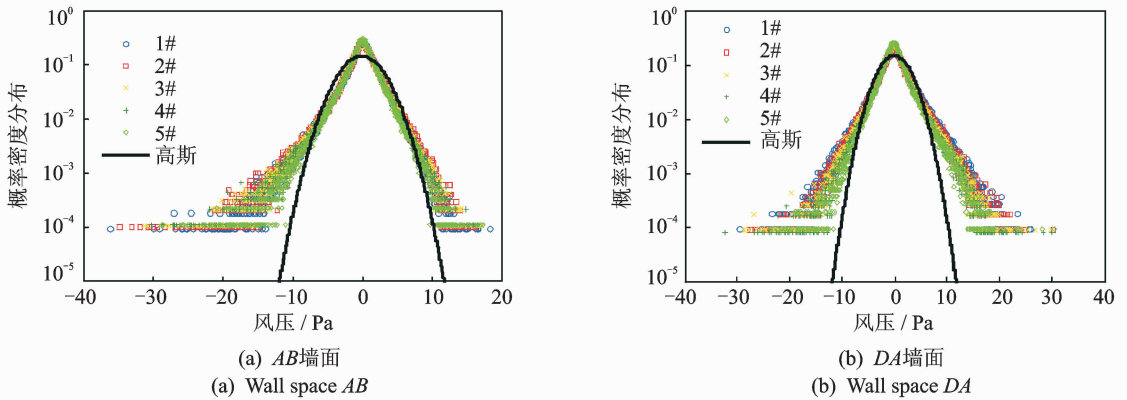


图7 脉动风压的概率密度分布(方案1)

Fig. 7 Probability density distribution of measured fluctuating wind pressures (scheme one)

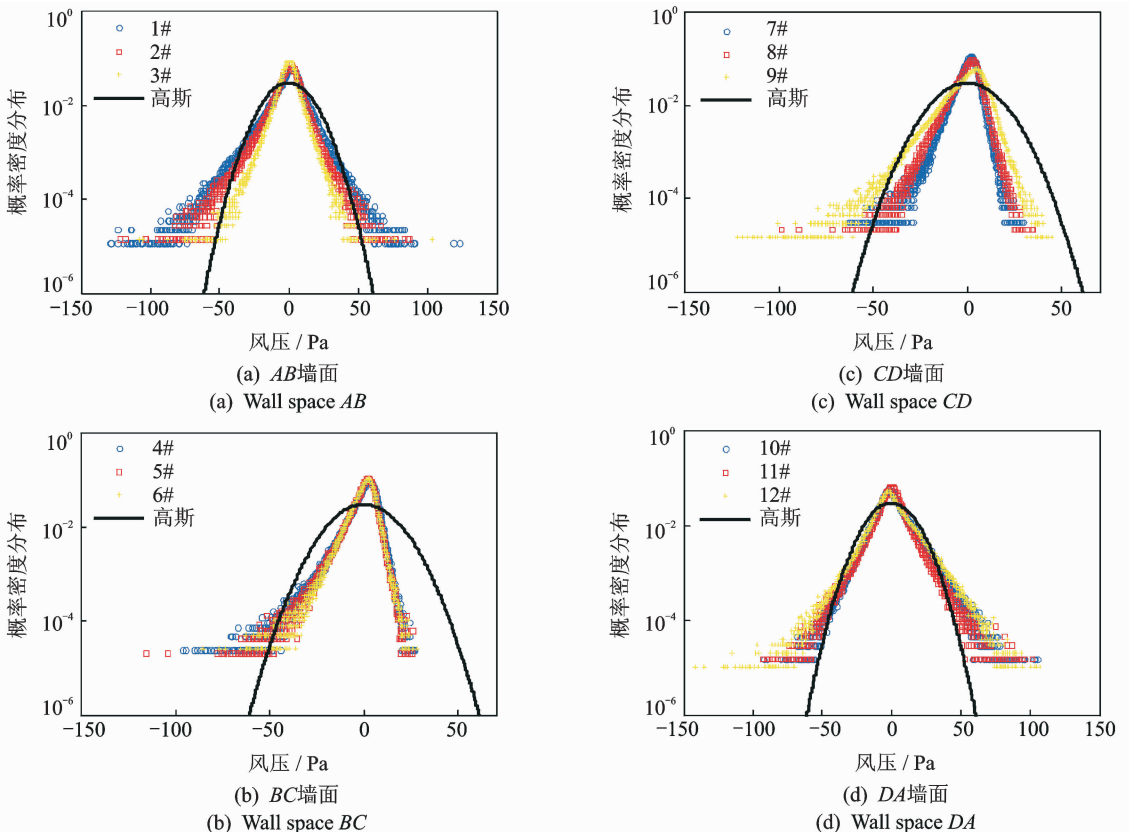


图8 脉动风压的概率密度分布(方案2)

Fig. 8 Probability density distribution of measured fluctuating wind pressures (scheme two)

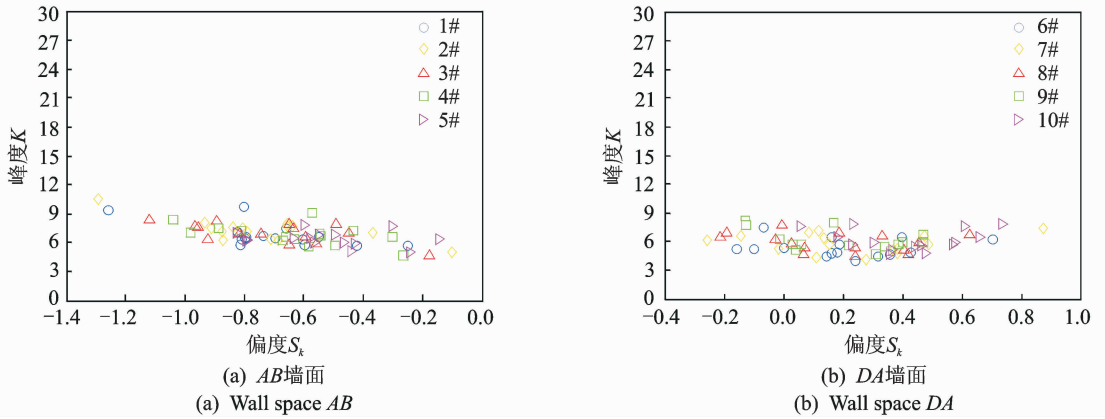


图 9 脉动风压的偏度与峰度之间关系(方案 1)

Fig. 9 The relationship between skewness and kurtosis of measured fluctuating wind pressures (scheme one)

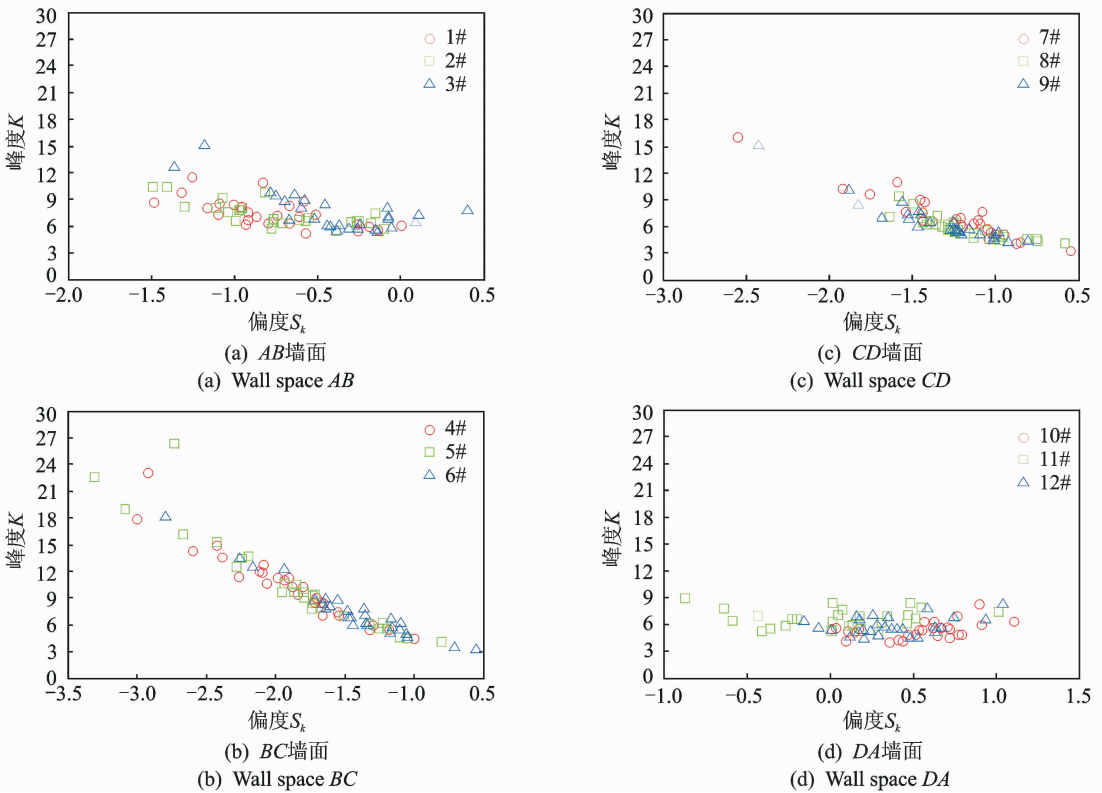


图 10 脉动风压的偏度与峰度之间关系(方案 2)

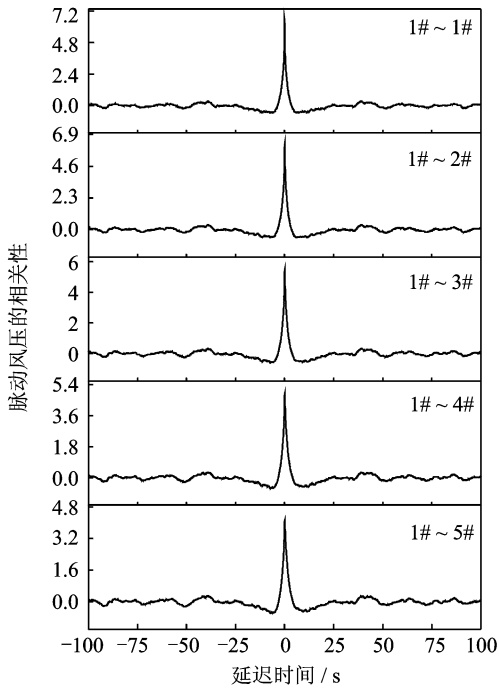
Fig. 10 The relationship between skewness and kurtosis of measured fluctuating wind pressures (scheme two)

计参数的偏度和峰度分别为 0 和 3,而两次测试的脉动风压时程的偏度和峰度均有所偏离,风力等级越大偏离越大。在图 9 中,非迎风面测点 1#~5# 的脉动风压为负偏,迎风面测点 6#~10# 的脉动风压存在正偏和负偏;当偏度位于 $-1.0 < S_k < 1.0$ 区间,脉动风压的峰度 K 主要分布在 3~9 之间;当偏度位于 $S_k \leq -1.0$ 区间,峰度随着偏度绝对值的递增而递增分布。方案 2 实测存在着类似的特征如图 10 所示:非迎风面测点的脉动风压为负偏,迎风面测点存在正偏和负偏;当偏度在 $-1.0 < S_k < 1.0$ 之间,峰度 K 主要在 3~9 之间分布,而偏度在

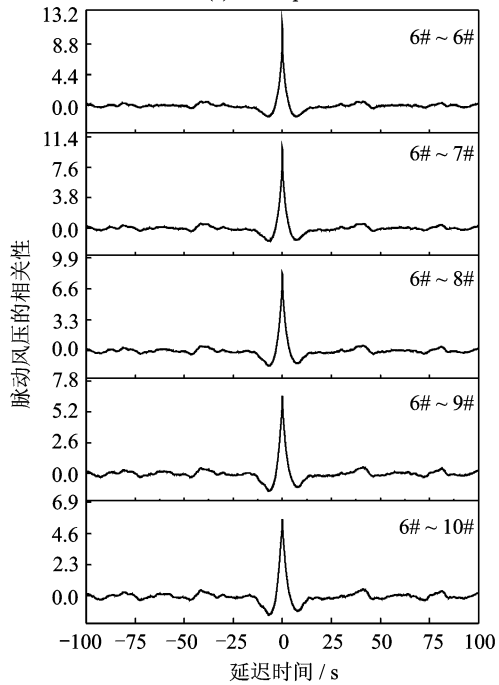
$S_k \leq -1.0$ 或 $S_k \geq 1.0$,峰度随着偏度绝对值的递增而递增分布。

2.3 相关性

方案 1 实测了结构竖向测点的脉动风压,其相关性如图 11 所示。1#,6# 测点脉动风压分别与 1#~5#,6#~10# 测点脉动风压的相关性逐渐减弱,符合脉动风压相关性随着间距的增加而减弱的规律。大约 20 s 的时间间隔,测点脉动风压的相关性就会衰减为零,说明脉动风压相关性的衰减很快。DA 墙面测点脉动风压的相关性好于 AB 墙面,说



(a) AB墙面
(a) Wall space AB



(b) DA墙面
(b) Wall space DA

图 11 脉动风压的相关性(方案 1)

Fig. 11 The correlation of measured fluctuating wind pressures (scheme one)

明迎风面测点风压的相关性较好。在同一墙面由于测点间距较小,且风速同时到达各竖向测点即未出现相位角,因此竖向测点之间脉动风压的相关性衰减较慢,具有较好的相关性,表现为同一墙面竖向测点脉动风压的概率密度分布没有明显差异,如图 7 所示。

方案 2 实测了结构四周同一水平面测点的脉动风压,其同一墙面测点的相关性如图 12 所示。在同一墙面,水平测点之间的非高斯脉动风压相关性同样符合随着测点间距的增加而减弱的规律。在时间上,脉动风压相关性的衰减很快,且测点之间的相关性峰值均存在明显的时移,说明水平测点脉动风压之间存在相位差。相位差的存在是因为当各水平测点所在平面与风向垂直截面存在一定夹角,导致风速不能同时到达各水平测点。夹角大小会改变水平测点在风向垂直截面的投影距离,因此风向会影响水平测点之间脉动风压相关性的衰减。AB, DA 墙面测点脉动风压的相关性好于 BC, CD 墙面,说明迎风面测点风压的相关性较好。在 AB, CD 和 DA 墙面,同一墙面各测点之间的脉动风压相关性衰减相对较为明显,表现为同一墙面水平测点脉动风压的概率密度分布存在明显差异,如图 8 所示。

2.4 功率谱

脉动风压功率谱是基于一个有限的数据集来描述脉动风压的功率(在频率上的)分布。功率谱估计方法主要有经典谱估计和现代功率谱估计。现代功率谱估计即参数谱估计方法是通过观测数据估计参数模型再按照求参数模型输出功率的方法估计脉动风压功率谱,该方法的提出主要是针对经典谱估计方法的分辨率和方差性能不好的问题。笔者采用了现代功率谱估计中的最小化预测误差自回归(AR)谱估计,对两次实测非高斯脉动风压进行了样本时间平均功率谱分析,通过实测数据回归拟合出非高斯脉动风压功率谱公式

$$\frac{fS_P(f)}{\sigma_P^2} = 2.5 \frac{fX}{(1 + 16.5(fX)^2)^{32/33}} \quad (1)$$

其中: $S_P(f)$ 为非高斯脉动风压功率谱密度函数; σ_P^2 为非高斯脉动风压的方差值; f 为频率; X 为拟合参数。

如图 13, 14 所示,两次实测的各测点非高斯脉动风压功率谱均与式(1)吻合非常好,相关拟合参数如表 1, 2 所示。将式(1)功率谱峰值对应的频率定义为峰值频率 f_s 。从图 13, 14 中可知,相关拟合参数 X 的改变会伴随着峰值频率 f_s 的变化,即拟合参数与峰值频率存在某种关系。实测非高斯脉动风压的峰值频率如表 1, 2 所示。随着拟合参数 X 的增加,实测功率谱峰值频率 f_s 逐渐减小,如图 15 所示,存在如下关系

$$X = \frac{0.254}{f_s} \quad (2)$$

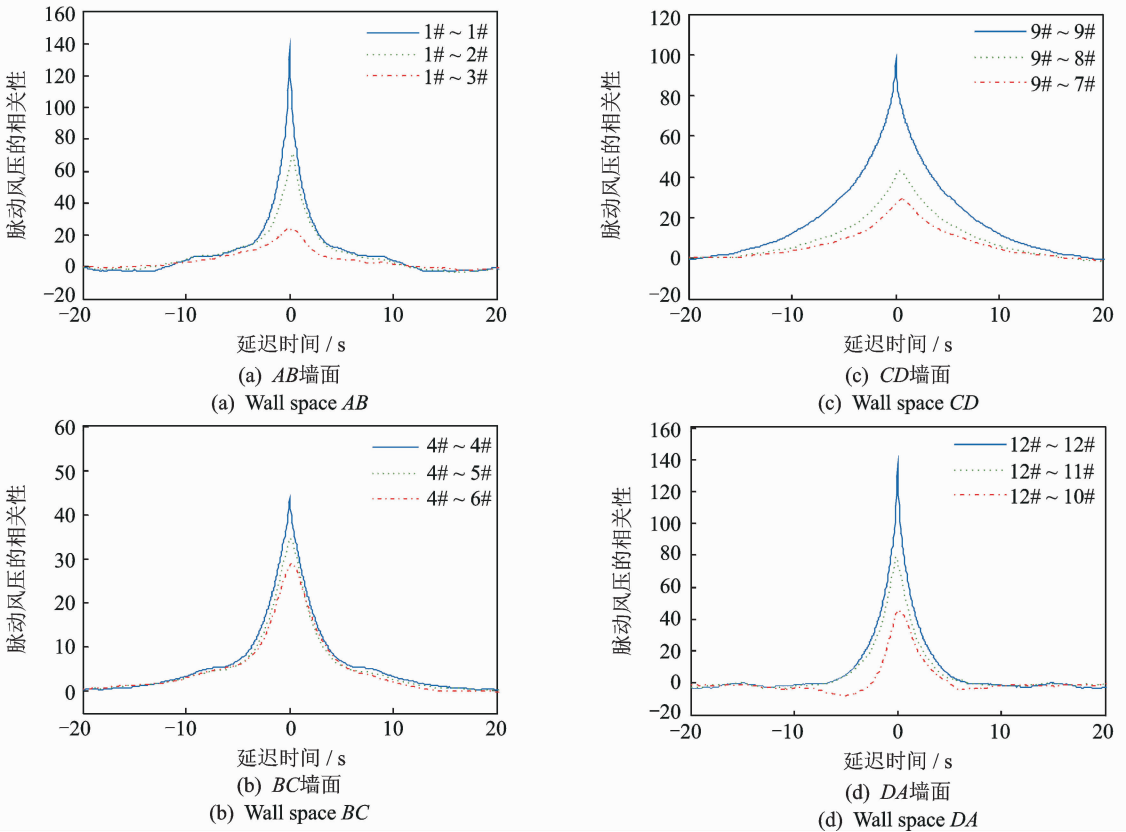


图 12 脉动风压时程的相关性(方案 2)

Fig. 12 The correlation of measured fluctuating wind pressures (scheme two)

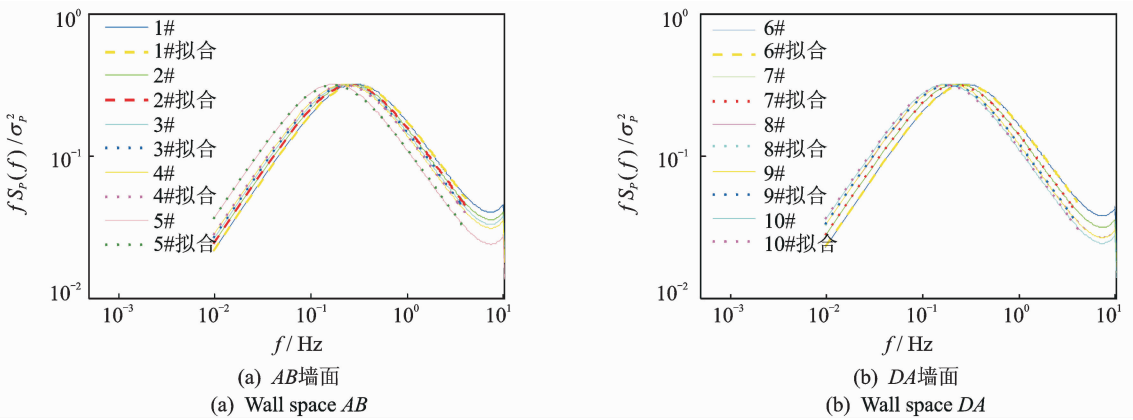


图 13 非高斯脉动风压的功率谱(方案 1)

Fig. 13 Power spectrum of measured fluctuating non-Gaussian wind pressures (Scheme one)

在方案 1 中,同墙面竖向测点脉动风压的概率密度分布比较接近,如图 7 所示,且非高斯强度比较弱,偏度和峰度主要分布在 $-0.89 \leq S_k \leq 0.47$ 和 $6.51 \leq K \leq 9.55$ 区间,实测峰值频率在 $0.176 \leq f_s \leq 0.293$ 之间,如表 1 所示。在方案 2 实测中,各测点脉动风压的非高斯强弱程度有所不同,如图 8 所示,在迎风面,非高斯强度较弱,偏度和峰度主要分布在 $-0.86 \leq S_k \leq 0.59$ 和 $6.43 \leq K \leq 9.28$ 区间,实测峰值频率在 $0.195 \leq f_s \leq 0.244$ 之间。在非迎风面,非高斯强度较强,偏度和峰度主要分布在

$-2.10 \leq S_k \leq -1.25$ 和 $7.07 \leq K \leq 13.06$ 区间,实测峰值频率在 $0.049 \leq f_s \leq 0.127$ 之间,如表 2 所示。

很明显,非高斯强度较强,峰值频率则较小,峰值频率以下的低频部分功率谱增大,高频部分逐渐减小,如图 13,14 所示。从图 8 中的 AB,CD,DA 墙面的脉动风压概率密度分布可以观察到,概率密度分布越偏离高斯分布,则对应列表 2 中的峰值频率就越小。根据实测结果,可初步确定峰值频率的

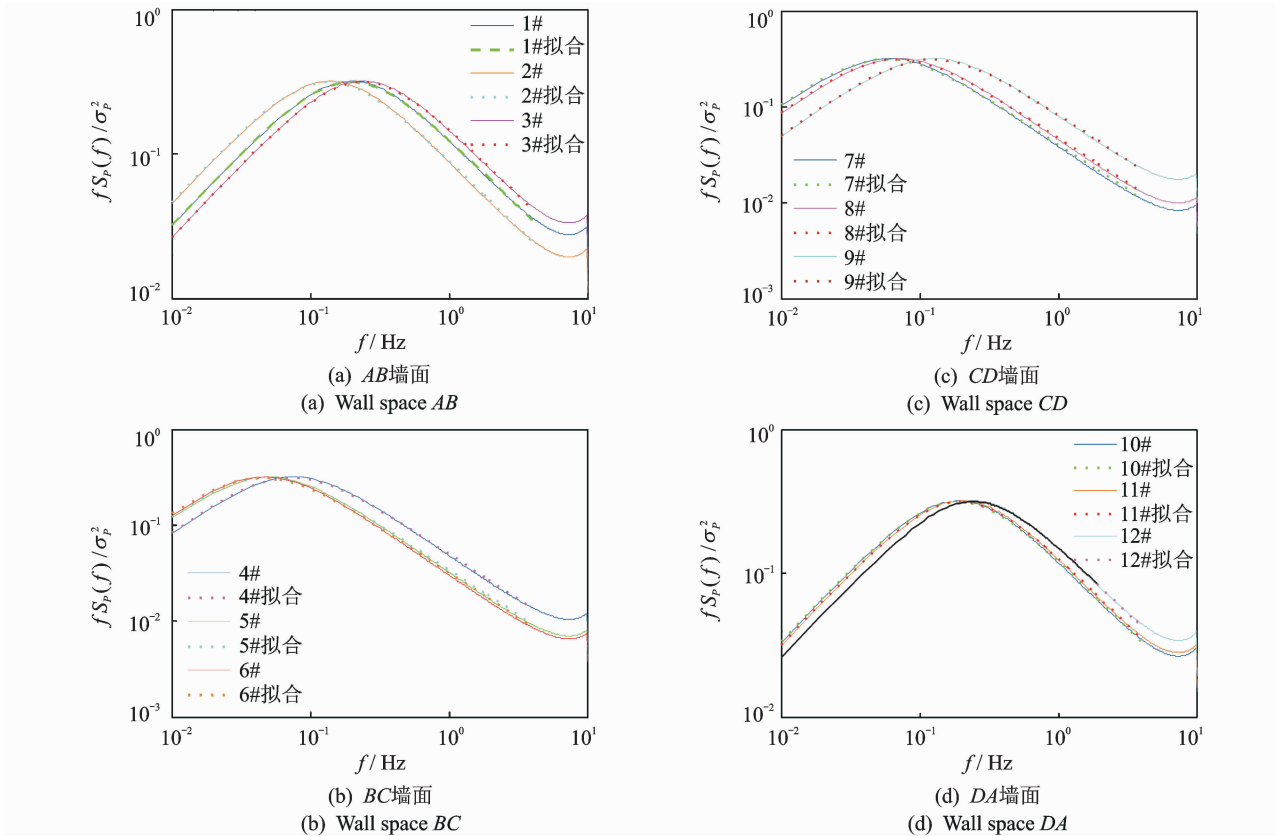


图 14 非高斯脉动风压的功率谱(方案 2)

Fig. 14 Power spectrum of measured fluctuating non-Gaussian wind pressures (scheme two)

表 1 非高斯脉动风压的相关参数(方案 1)

Tab. 1 The related parameters of measured fluctuating non-Gaussian wind pressures (scheme one)

非迎风面					迎风面				
测点	偏度 S_k	峰度 K	拟合参数 X	峰值频率 f_s / Hz	测点	偏度 S_k	峰度 K	拟合参数 X	峰值频率 f_s / Hz
1#	-0.83	8.78	0.88	0.293	6#	0.22	6.51	0.94	0.273
AB 2#	-0.89	9.55	1.00	0.254	DA 7#	0.27	7.06	1.14	0.225
墙 3#	-0.85	9.23	1.08	0.234	墙 8#	0.23	7.29	1.35	0.195
面 4#	-0.74	8.80	1.15	0.225	面 9#	0.27	7.56	1.35	0.195
5#	-0.62	8.36	1.50	0.176	10#	0.47	7.50	1.48	0.176

表 2 非高斯脉动风压的相关参数(方案 2)

Tab. 2 The related parameters of measured fluctuating non-Gaussian wind pressures (scheme two)

非迎风面					迎风面				
测点	偏度 S_k	峰度 K	拟合参数 X	峰值频率 f_s / Hz	测点	偏度 S_k	峰度 K	拟合参数 X	峰值频率 f_s / Hz
BC 4#	-2.10	13.06	3.48	0.078	AB 1#	-0.80	8.84	1.29	0.205
墙 5#	-2.03	13.00	5.24	0.049	墙 2#	-0.86	9.28	1.87	0.137
面 6#	-1.60	9.73	5.61	0.049	面 3#	-0.41	8.99	1.07	0.244
CD 7#	-1.37	8.84	4.38	0.059	DA 10#	0.59	6.43	1.35	0.195
墙 8#	-1.25	7.07	3.69	0.068	墙 11#	0.06	7.93	1.28	0.205
面 9#	-1.46	8.27	2.05	0.127	面 12#	0.32	7.12	1.04	0.244

取值范围。当迎风面和非迎风面非高斯强度较弱时,即当偏度和峰度主要分布在 $-1.0 < S_k < 1.0$ 和 $3 < K < 9$ 区间时,峰值频率可在 $0.15 < f_s < 0.30$ 取值;当非迎风面非高斯强度较强时,即当偏度和峰度主要分布在 $-2.5 < S_k \leq -1.0$ 和 $9 \leq K$

< 13.5 区间时,峰值频率可在 $0.05 \leq f_s \leq 0.15$ 取值。因此,式(1)可以进一步表示为

$$\frac{fS_p(f)}{\sigma_p^2} = 0.635 \frac{f/f_s}{(1 + 1.065(f/f_s)^2)^{32/33}} \quad (3)$$

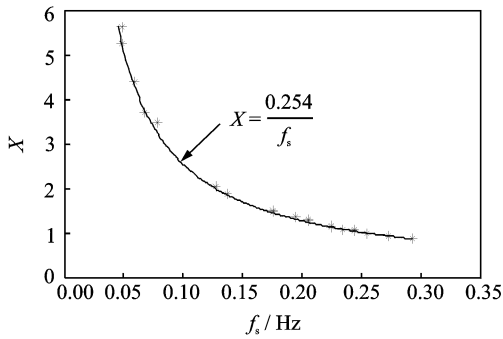


图 15 拟合参数 X 与峰值频率 f_s 的关系

Fig. 15 The relationship between fitting parameter X and peak frequency f_s

3 结 论

1) 迎风面和非迎风面的脉动风压均具有不同程度的非高斯特征。其中,非迎风面的非高斯特征强度相对较强表现为负偏,而迎风面的非高斯特征强度较弱存在着负偏和正偏。

2) 非高斯特征强度相对较弱区域,统计平均偏度和峰度主要分布在 $-1.0 < S_k < 1.0$ 和 $3 < K < 9$ 区间。相对较强区域的非高斯脉动风压,偏度和峰度主要分布在 $-2.5 < S_k \leq -1.0$ 和 $9 \leq K < 13.5$ 区间,且随着偏度绝对值的增加,峰度值随之增加。

3) 迎风面测点脉动风压的统计平均相关性好于非迎风面,且符合脉动风压相关性随着间距的增加而减弱的规律。竖向测点之间脉动风压不存在相位角,而当水平测点所在平面与风向垂直截面存在一夹角时,风速不能同时到达各水平测点,从而使得水平测点之间存在相位角,表现为相关函数的时移。

4) 根据实测脉动风压,回归拟合了非高斯脉动风压的统计平均功率谱函数。建立了拟合参数与峰值频率间的关系,峰值频率的取值取决于非高斯特征的强弱。

参 考 文 献

[1] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures [M]. New York, US: John Wiley & Sons, Inc, 1986: 327-383.

[2] 柯世堂, 陈少林, 赵林, 等. 超大型冷却塔等效净风荷载精细化计算及应用 [J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(5): 824-830.

Ke Shitang, Chen Shaolin, Zhao Lin, et al. Refined theory method and application of equivalent static wind loads for super large cooling towers [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(5): 824-830. (In Chinese)

[3] 邹良浩, 梁枢果, 徐金虎. 大型煤气柜风振响应与抗风性能分析 [J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1): 41-44.

Zou Lianghao, Liang Shuguo, Xu Jinhu. Analysis of wind-induced displacement response and wind-resistant capability of huge gas tank [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1): 41-44. (in Chinese)

[4] Kumar K S, Stathopoulos T. Fatigue analysis of roof cladding under simulated wind loading [J]. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 77-78(1): 171-183.

[5] Kumar K S, Stathopoulos T. Synthesis of non-Gaussian wind pressure time series on low building roofs [J]. Engineering Structures, 1999, 21(12): 1086-1100.

[6] Kumar K S, Stathopoulos T. Wind loads on low building roofs: a stochastic perspective [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(8): 944-956.

[7] 柯世堂, 葛耀君, 赵林. 大型双曲冷却塔表面脉动风压随机特性—非高斯特性研究 [J]. 实验流体力学, 2010, 24(3): 12-18.

Ke Shitang, Ge Yaojun, Zhao Lin. Research on features of fluctuating wind pressure on large hyperbolic cooling tower: features of non-Gaussian [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(3): 12-18. (in Chinese)

[8] 楼文娟, 李进晓, 沈国辉, 等. 超高层建筑脉动风压的非高斯特性 [J]. 浙江大学学报, 2011, 45(4): 671-677.

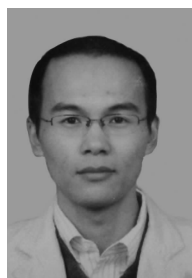
Lou Wenjuan, Li Jinxiao, Shen Guohui, et al. Non-Gaussian feature of wind-induced pressure on super-tall building [J]. Journal of Zhejiang University, 2011, 45(4): 671-677. (in Chinese)

[9] 韩宁, 顾明. 方形高层建筑风压脉动非高斯特性分析 [J]. 同济大学学报, 2012, 40(7): 971-976.

Han Ning, Gu Ming. Analysis on non-Gaussian features of fluctuating wind pressure on square tall buildings [J]. Journal of Tongji University, 2012, 40(7): 971-976. (in Chinese)

[10] 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 buildings under strong wind gusts [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 62-68. (in Chinese)



第一作者简介: 李锦华, 男, 1981 年 12 月生, 博士、讲师。主要研究方向为土木工程结构抗风与抗震研究。曾发表《Simulation of non-gaussian stochastic process with target power spectral density and lower-order moments》(《Journal of Engineering Mechanics ASCE》2012, Vol. 138, No. 5) 等论文。
E-mail: jinhua@ecjtu.edu.cn