

赵峰,王莹,刘士清,等. 连体超高层建筑风压偏度与峰度分布特征分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(2): 35-41. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.02.005

Zhao F, Wang Y, Liu S Q, et al. Distribution Characteristic Analysis of Wind Pressure's Skewness and Kurtosis for Conjoined Super-tall Building [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(2): 35-41. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.02.005

连体超高层建筑风压偏度与峰度分布特征分析

赵峰^{1*}, 王莹¹, 刘士清², 姜天华¹

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 湖北省建筑科学研究设计院, 湖北 武汉 430071)

摘要:在C类地貌中测得某连体超高层建筑的刚性模型风洞试验数据, 基于测点风压的第三、四阶矩统计量计算出每个测点对应的偏度参数和峰度参数. 计算结果显示: 正面迎风时迎风面偏度和峰度的非高斯特性不明显, 结构内侧、背面的偏度和峰度则表现出明显的非高斯特性; 斜向迎风时, 随着风向角的变化风场下游柱体的偏度绝对值和峰度有明显的增大趋势; 结构表面有大量测点脉动风压服从强非高斯分布, 需对这些测点的阵风因子取值进行专门研究.

关键词: 连体结构; 超高层建筑; 风洞试验; 阵风因子; 非高斯特性

中图分类号: TU393.3; TU312.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2019)02-0035-07

Distribution Characteristic Analysis of Wind Pressure's Skewness and Kurtosis for Conjoined Super-tall Building

Zhao Feng¹, Wang Ying¹, Liu Shiqing², Jiang Tianhua¹

(1. Institute of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. Hubei Institute of Building Research and Design, Wuhan 430071, China)

Abstract: The wind tunnel test data was measured by class C terrain environment in a rigid model of one conjoined super-tall building, and the parameters of skewness and kurtosis were calculated, which corresponding to each measuring point. Calculation results show that the non-gaussian characteristics of skewness and kurtosis in front of windward side was not obvious, and the non-gaussian characteristics of skewness and kurtosis which were inside and back of the conjoined structure were more than standard value significantly. With the change of wind angle when inclined windward, the wind field of the downstream cylinder's skewness and kurtosis had increased obviously. The pulsating wind pressure of structure's surface had many points in strong non-gaussian distribution. Some specialized research, on gust factor of these measuring point, need to be done.

Keywords: conjoined structure; super-tall building; wind tunnel test; gust factor; non-gaussian feature

对于超高层建筑而言, 玻璃幕墙等围护结构具有较强风敏感性^[1], 多年来不断有围护结构风毁事件 见诸报端. 而连体超高层建筑由于两个塔楼周围流场会产生干扰效应及特征湍流, 围护结构表面风压时程 表现出明显的非高斯特征, 风吸力明显大于高斯风荷载理论得到的风压极值, 导致围护结构风压取值偏 小, 这是围护结构风致破坏的主要原因之一^[2-3].

收稿日期: 2018-08-25

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2015CFB606); 武汉科技大学青年科技骨干培育计划资助项目(2015xz016)

* 通信作者, E-mail: 572528431@qq.com

在早期的风工程研究中,以 Davenport^[4-5] 为代表的学者为了研究方便,在风工程中引入统计概念,假定脉动风压服从高斯分布,最终基于零值穿越理论而得到峰值因子表达式.但是在实际分析过程中,高斯假设常常与实际情况不符^[6-7],在来流分离区、涡脱控制区等负压区域,风压时程的概率分布严重偏离高斯假定.Kumar 等^[8-9] 通过对低矮平顶和人字形屋面的对比分析,指出了低矮建筑屋顶脉动风压存在非高斯特性,而且对屋顶的高斯和非高斯区域进行了划分;Giofre 等^[10-11] 通过风洞试验,用脉动风压的概率密度分布曲线和相关函数模拟了气流分离区的风压脉动时程.在此情况下,我国建筑结构荷载规范^[12] 中以峰值因子法为基础的计算值常常小于实际值,从而导致建筑围护结构设计偏于危险.对此,许多研究人员相继对传统的峰值因子法做大量改进,其中最具代表性的是 Kareem 等^[13-14] 人的工作;我国学者全涌等^[15] 以经典极值理论为基础,发展了一种短时距计算风压极值的改进 Gumbel 法;田玉基等^[16] 采用 Hermite 矩模型,实现了脉动风非高斯时程与高斯时程的一一对应.

当连体超高层结构正面迎风时,由于双塔结构的干扰作用,双塔内侧表面风压有增大趋势;而侧面迎风时,上游结构的涡脱尾流会使得下游结构的表面风压出现变异;当斜向迎风时,情况会更加复杂.本文在分析某连体超高层结构刚性测压模型风洞试验数据的基础上,选取 0°,45°,90°这 3 个风向角数据作为研究对象,对连体超高层建筑结构表面风压时程的高阶统计矩的分布规律进行了分析,为将来规范修订提供支撑.

1 风洞试验

风洞试验在武汉大学大气边界层风洞试验室内进行.风场按 C 类地貌考虑,模型比例为 1 : 300,刚性测压模型由工程塑料制成,以 15°为间隔,采用同步测压技术测得 24 个风向角下建筑物的风压时程,测压模型四周放置周边建筑物模型对结构附近风场进行模拟,采样频率为 331 Hz,采样时间为 120 s,相关实验模型和风场参数如图 1 所示.取结构表面 490 个测点所测的数据作为研究对象,对结构表面极值风压进行计算分析.

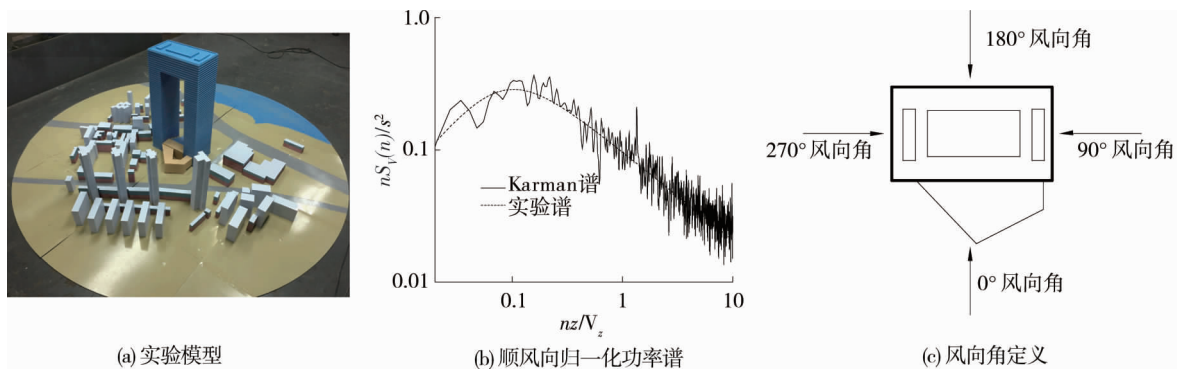


图 1 实验模型和风场参数

2 非高斯特性

根据空气动力学中的点涡模型理论^[17-18],在现代风工程研究中,建筑表面风压分布可近似看作是风场中很多尺度不同的点涡作用叠加的效应总和.对于结构迎风面而言,当点涡尺度大于风场中的特征涡尺度时,点涡之间对应的空间相关性衰减很快,此时我们认为空间中的每个点涡作用独立且同分布,作用效应总和符合高斯分布特性;当气流经过结构的边拐角、顶脊等处时,会产生气流分离区,分离区上方可能存在锥形涡、柱状涡等有组织的漩涡结构,使得建筑表面风压的变化特性与风场中来流的变化特性不再一致,此时建筑表面风压的空间相关性较强,中心极限定理独立且同分布的前提条件不再适用,从而表现出非高斯特性.

对于非高斯信号,我们很难直接获得其概率密度函数,在处理过程中常采用多阶统计矩(特别是三阶和四阶)来描述概率密度函数的特征^[19].三阶和四阶统计量分别称为偏度(skewness)和峰度(kurtosis)^[20],偏度用于描述非高斯分布偏离的非对称性,峰度用于描述非高斯概率密度分布曲线的凸起

程度.当偏度为0,峰度为3时,风压则符合高斯分布.偏度 γ_3 和峰度 γ_4 可以按照式(1)和式(2)^[21]计算:

$$\gamma_3 = E \left[\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \right)^3 \right] = \frac{1}{\sigma^3} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3 f(x_i); \quad (1)$$

$$\gamma_4 = E \left[\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \right)^4 \right] = \frac{1}{\sigma^4} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4 f(x_i). \quad (2)$$

式中: X 为随机变量; μ 为样本均值; σ 为样本方差.

本文所涉及的结构为非典型超高层连体建筑,由于受气流撞击、分离、再附着、涡脱等影响,建筑表面风压大多表现出非高斯特性,图2和图3给出了其中490个测点的偏度和峰度值.

2.1 偏度值分布分析

不同风向角时各测点偏度分布如图2所示.如果以上下浮动0.4作为阈值,模型侧向迎风(90°风向角)时,有超过50%的测点偏度值表现出明显的非高斯特征,模型斜向迎风(45°风向角)时,由于特征湍流强度增加,出现了偏度值的极大值.

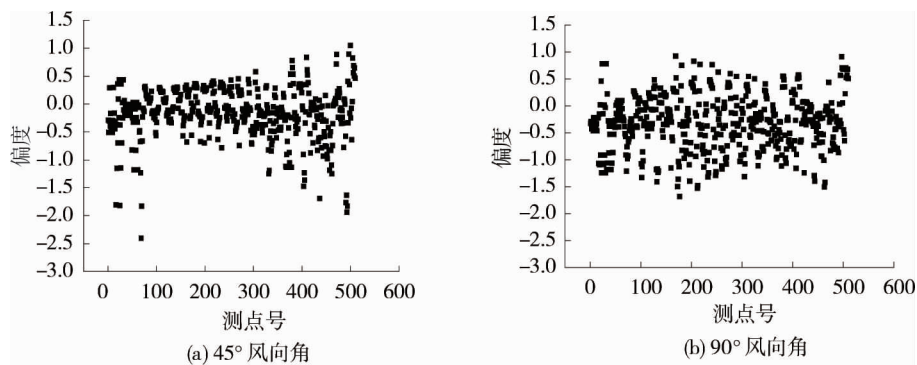


图2 不同风向角时各测点偏度分布

2.2 峰度值分布分析

不同风向角时各测点峰度分布如图3所示,如果以上下浮动0.7作为阈值,模型侧向迎风(90°风向角)时,有超过45%的测点峰度值表现出明显的非高斯特征,模型斜向迎风(45°风向角)时,由于特征湍流强度增加,出现了峰度值的极大值.

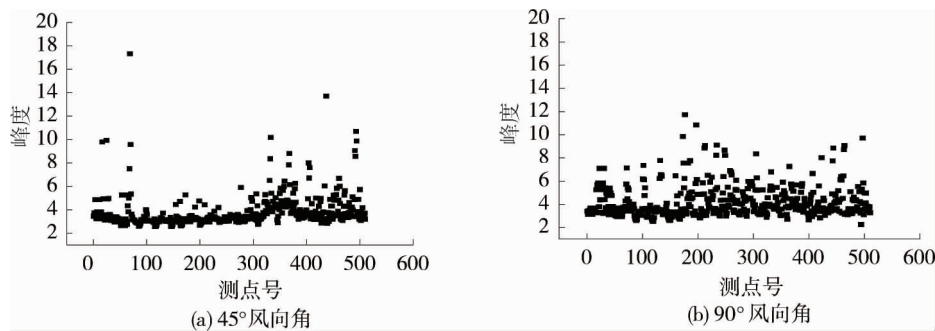


图3 不同风向角时各测点峰度分布

2.3 南立面偏度和峰度

不同风向角时南立面偏度和峰度分布如图4所示.不同风向角时南立面偏度分布如图4a~图4c所示,0°风向角时,南立面处于迎风面位置,大部分测点偏度在-0.2~0.2范围内浮动,基本服从高斯分布;45°风向角时,大部分测点偏度值在-0.2~0.4范围内,上部结构偏度绝对值明显小于下部结构偏度值;在90°风向角时,南立面处于侧风面位置,整体结构偏度在-1.1~0.0范围内浮动,上游测点偏度小于下游测点偏度,说明上游柱体的尾流对下游柱体表面风压的非高斯特性产生了较大影响.

不同风向角时南立面峰度分布如图4d~图4f所示,0°风向角时,南立面正面迎风,结构上部峰度在3左右浮动,说明上部测点基本服从高斯分布,而下部测点由于受到周边建筑的干扰,测点的峰度极大值达

到6.5,表现出明显的非高斯性;45°风向角时,上部来流分离点附近测点的峰度值在3左右波动0.2,而气流再附区的峰度值基本上为3,这说明来流再附会引起局部峰度值有小幅波动;在90°风向角时,这一规律也有所体现,此时南立面处于侧面迎风状态,上游柱体表面峰度值达到9.5的峰值,说明强分离区内的气压非高斯性达到极高水平,而下游柱体表面风压的峰度值也达到6左右,下游的非高斯性也不可忽略.

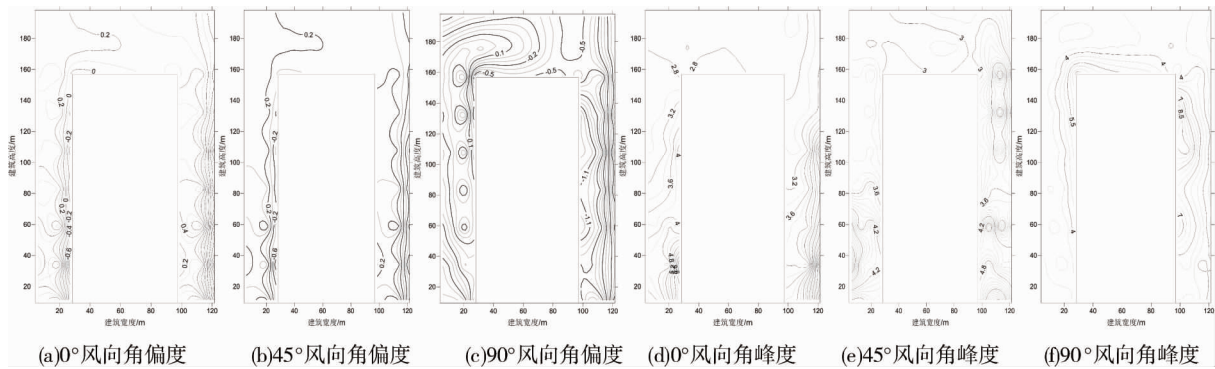


图4 不同风向角时南立面偏度和峰度分布

2.4 东侧外立面偏度和峰度

不同风向角时东侧外立面偏度和峰度分布如图5所示.不同风向角时东侧外立面偏度分布如图5a~图5c所示,0°风向角时,东侧外立面处于侧面迎风状态,结构偏度在-0.9~-0.1范围内浮动,且结构上部偏度绝对值小于结构下部峰度,说明东侧外立面脉动风荷载服从非高斯分布,且下部非高斯性强于下部的非高斯特性;45°风向角时,大部分测点偏度值在0.1~0.3范围内,但在下部部分测点达到0.4~0.6;在90°风向角时,东侧外立面处于正面迎风位置,上部结构偏度在0.1~0.2附近浮动,下部结构表面偏度略大,达到0.5~0.8.

不同风向角时东侧外立面峰度分布如图5d~图5f所示,0°风向角时,东立面侧面迎风,结构上部峰度在3.5左右浮动,下部峰度在5.5~7.5范围内浮动,说明东立面整体非高斯分布,下部测点由于受到周边建筑的干扰,表现出明显的非高斯性;45°风向角时,上部来流分离点附近测点的峰度值在3左右波动0.2,而气流再附区的峰度值基本上为3,这说明来流再附会引起局部峰度值有小幅波动;在90°风向角时,东侧外立面处于正面迎风状态,峰度值与3之间的差异相对较小,整体处于弱非高斯分布状态^[20].

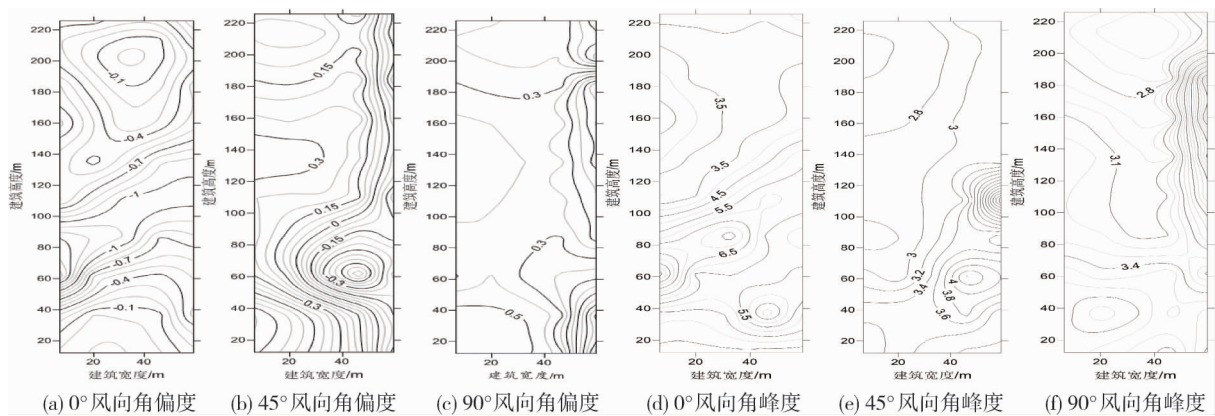


图5 不同风向角时东侧外立面偏度和峰度分布

2.5 东侧内立面偏度和峰度

不同风向角时东侧内立面偏度和峰度分布如图6所示.不同风向角时东侧内立面偏度分布如图6a~图6c所示,0°风向角时,东侧内立面处于侧面迎风状态,结构偏度在-1.4~-0.1范围内浮动,且结构上部偏度绝对值小于结构下部峰度,说明东侧内立面脉动风荷载服从非高斯分布,且下部非高斯性强于下部的非高斯特性,相对于外立面,东侧内立面由于受到西侧塔楼的干扰,偏度绝对值有所增加;45°风向角时,大部分测点偏度值在-0.5~-0.1范围内,但在下部部分测点达到0.4~0.9;在90°风向角时,东侧内立面处

于背风面位置,上部结构偏度在-0.3~-0.1 附近浮动,下部结构表面偏度略大,达到-0.4~-0.6.

不同风向角时东侧内立面峰度分布如图 6d~图 6f 所示,0°风向角时,东侧内立面侧面迎风,结构上部峰度在 3.5 左右浮动,下部峰度在 5.5~7.5 范围内浮动,说明东侧内立面脉动风荷载服从非高斯分布,下部测点由于受到周边建筑的干扰,表现出强非高斯性^[22];45°风向角时,上部来流分离点附近测点的峰度值在 3 左右波动 0.2,而气流再附区的峰度值基本上为 3,这说明来流再附会引起局部峰度值有小幅波动;在 90°风向角时,东侧内立面处于背风面位置,峰度值与 3 之间的差异相对较小,除小部分区域外,大部分测点风压属于弱非高斯分布.

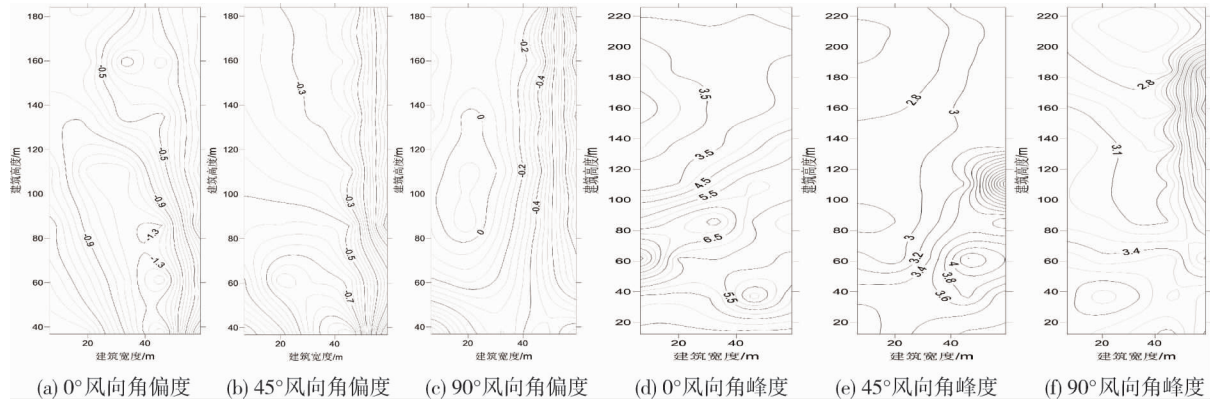


图 6 不同风向角时东侧内立面偏度和峰度分布

2.6 西侧内立面偏度和峰度

不同风向角时西侧内立面偏度和峰度分布如图 7 所示.不同风向角时西侧内立面偏度分布如图 7a~图 7c 所示,0°风向角时,西侧内立面处于侧面迎风位置,结构偏度在-1.4~-0.1 范围内浮动,且结构上部偏度绝对值小于结构下部峰度,说明西侧内立面脉动风荷载服从非高斯分布,且下部非高斯性强于下部的非高斯特性,偏度绝对值有所增加;45°风向角时,大部分测点偏度值在-0.1~0.3 范围内,基本属于高斯分布范畴;在 90°风向角时,西侧内立面位于风场上游且处于背风面位置,上部角落结构偏度在-0.9~-0.7 附近浮动,下部结构表面偏度相对较小,在-0.5~-0.3 范围内波动.

不同风向角时西侧内立面峰度分布如图 7d~图 7f 所示,0°风向角时,西侧内立面侧面迎风,结构峰度在 5.5~7.5 范围内浮动,说明西侧内立面脉动风荷载服从非高斯分布,下部测点由于受到周边建筑的干扰,峰度值较上部结构略大,表现出强非高斯性;45°风向角时,上部来流分离点附近测点的峰度值在 3.5 左右,局部由于周边建筑的干扰达到 7.5;在 90°风向角时,西侧内立面处于迎风面位置,但受到上游柱体的干扰,峰度值与 3 之间的差异相对较小,除小部分区域外,大部分测点风压服从强非高斯分布.

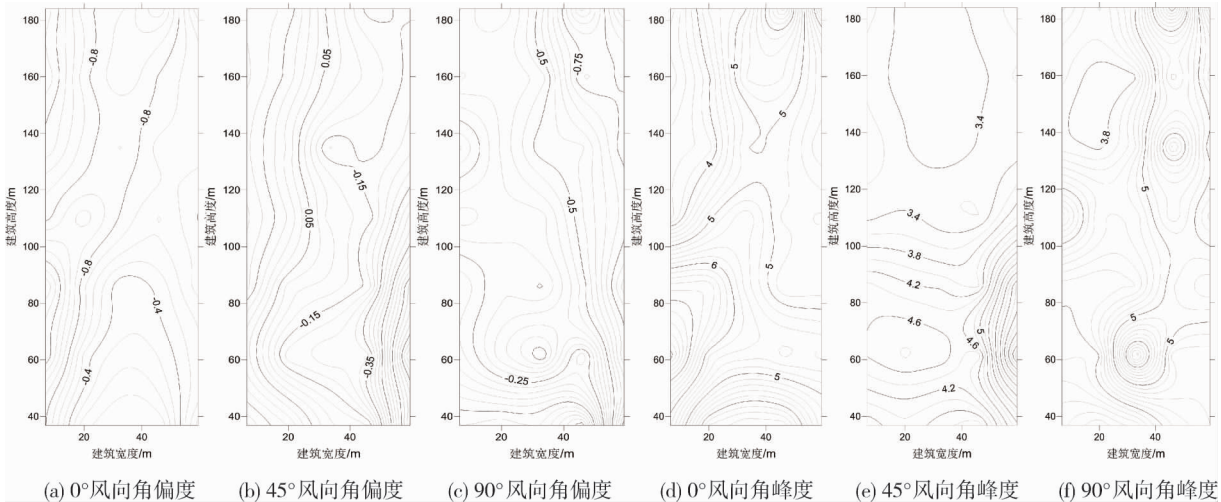


图 7 不同风向角时西侧内立面偏度和峰度分布

2.7 连体结构下部偏度和峰度

不同风向角时连体结构下部偏度和峰度分布如图 8 所示.不同风向角时连体结构下部偏度分布如图 8a~图 8c 所示, $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向角时,连体结构下部偏度在 $-1.4\sim -0.4$ 范围内浮动,且偏度绝对值随风向角增大有增大趋势,为强非高斯分布状态.

不同风向角时连体结构下部峰度分布如图 8d~图 8f 所示, 0° 风向角时,连体结构下部峰度在 $3.0\sim 4.5$ 范围内浮动; 45° 风向角时,连体结构下部峰度在 $3.2\sim 6.5$ 范围内浮动; 90° 风向角时,连体结构下部峰度在 $4.0\sim 8.5$ 范围内浮动,随着风向角的增大,峰度值有明显的增大趋势,且在模型短边迎风时,模型明显受到两个柱体的干扰,局部出现峰度值超过 8.5 的强非高斯情况.

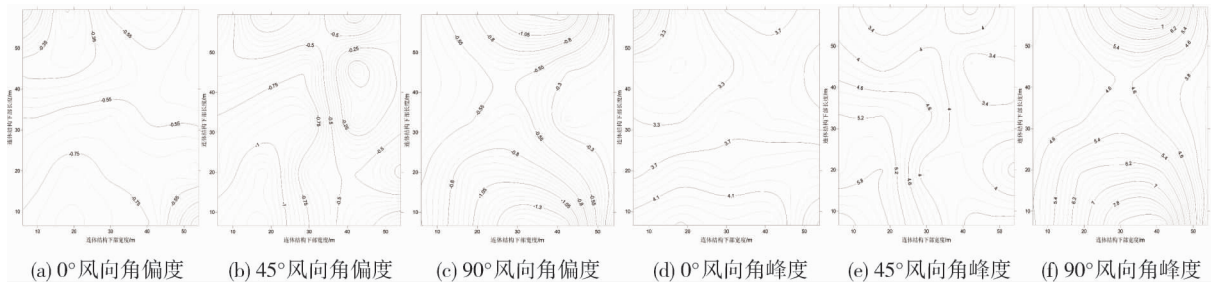


图 8 不同风向角时连体结构下部偏度和峰度分布

2.8 北面偏度和峰度

不同风向角时北面偏度和峰度分布如图 9 所示.不同风向角时北立面偏度分布如图 9a~图 9c 所示, 0° 风向角时,北立面处于背风面位置,大部分测点偏度在 $-0.7\sim -0.4$ 范围内浮动; 45° 风向角时,大部分测点偏度值在 $-0.2\sim 0.4$ 范围内,基本属于高斯分布范畴,但在局部由于干扰及分离流作用,偏度达到 0.8 以上,表现出强非高斯特性;在 90° 风向角时,北立面处于侧风面位置,上部角落结构偏度在 $-1.1\sim 0.0$ 范围内浮动,整体而言上游测点偏度小于下游测点偏度,说明上游柱体的尾流对下游柱体表面风压的非高斯特性产生了较大影响.

不同风向角时北面峰度分布如图 9d~图 9f 所示, 0° 风向角时,北立面处于侧面迎风状态,结构峰度在 $3.4\sim 5.4$ 范围内浮动,且结构上部峰度小于结构下部峰度,说明北立面脉动风荷载服从非高斯分布; 45° 风向角时,大部分测点峰度值在 $4\sim 5$ 范围内,但在局部达到 $10\sim 15$;在 90° 风向角时,北立面处于侧面迎风位置,上部结构峰度在 3.5 附近浮动,下部结构表面峰度略大,达到 6.5.

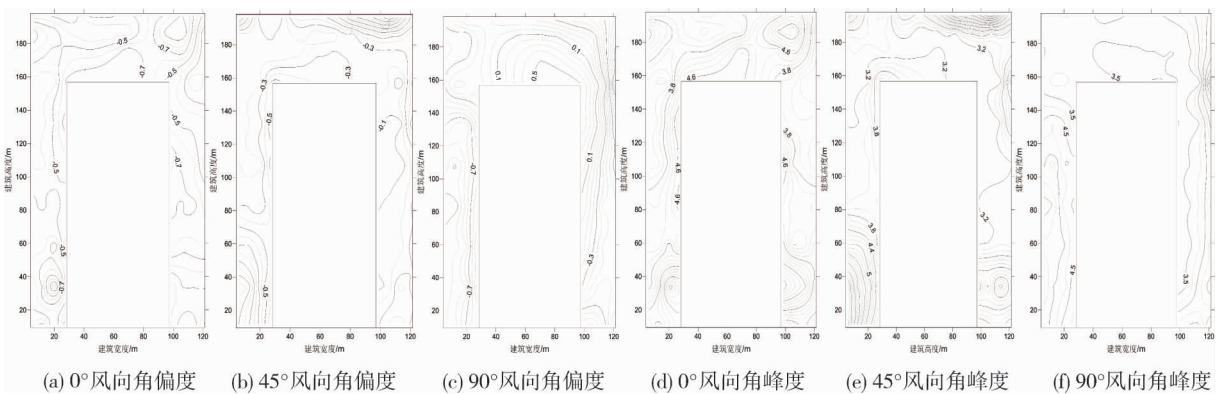


图 9 不同风向角时北面偏度和峰度分布

3 结论

1) 结构表面大量测点数据不符合高斯假定,规范中以高斯假定为前提的阵风因子法存在误差,需要对其进行修正.

2) 通过对连体结构各个面上风荷载的分析,发现特征湍流及周边扰流起作用的部位,结构表面风荷

载的非高斯特性极其明显,对气流分离点、角落部位,受周边建筑干扰较强烈部位的阵风因子取值需进行专门研究.

3)结构表面风荷载的非高斯特性与高度有较大关系,模型下部由于来流湍流度较高,受到周边建筑干扰强度大,表现出强非高斯特性,而结构上部大部分测点风荷载的脉动特性可近似认为服从高斯假定.

参考文献:

- [1] 徐海巍,楼文娟,余世策.建筑围护结构内部设计风荷载研究[J].建筑结构学报,2016,37(12):41-48.
- [2] 徐海巍,余世策,楼文娟.开孔结构内压脉动影响因子的试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2014,48(3):487-491.
- [3] Keerthana M, Harikrishna P. Hermite model based estimation of peak factors for tall buildings subjected to wind induced pressures [J]. Journal of Structural Engineering, 2017,44(3):203-213.
- [4] Davenport A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with applications to gust loading [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineering, 1964, 28(2):187-196.
- [5] Davenport A G. Gust loading factors [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1967, 93(3):11-34.
- [6] 蒋磊,李春祥,邓莹.基于LPZ谱分析法的非高斯脉动风压模拟[J].上海大学学报(自然科学版),2017,23(4):600-608.
- [7] 林巍,黄铭枫,楼文娟.大跨屋盖脉动风压的非高斯峰值因子计算方法[J].建筑结构,2013,43(15):83-87.
- [8] Kumar K S, Stathopoulos T. Wind loads on low building roofs: a stochastic perspective [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(8):944-956.
- [9] Kumar K S, Stathopoulos T. Synthesis of non-Gaussian wind pressure time series on low building roofs [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 21(12):1086-1100.
- [10] Giofre M, Gusella V, Grigoriu M. Non-Gaussian wind pressure on prismatic buildings. I: stochastic field [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(9):981-989.
- [11] Giofre M, Gusella V, Grigoriu M. Non-Gaussian wind pressure on prismatic buildings. II: numerical simulation [J]. Journal of Structural Engineering, 2001,127(9):990-995.
- [12] 中华人民共和国建设部.GB50009-2012,建筑结构荷载规范[S].2012.
- [13] Kareem A, Zhao J. Analysis of non-Gaussian surge response of tension leg platforms under wind loads [J]. Journal of off-shore Mechanics and Arctic Engineering, 1994,116(3):137-144.
- [14] Kwon D, Kareem A. Peak factor for non-Gaussian processes revisited [C]//Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on wind engineering, Taipei, 2009.
- [15] 张秉超,全涌,顾明.考虑极值风速方向性的围护结构设计风荷载概率估计方法研究[J].建筑结构学报,2018,39(4):1-7.
- [16] 罗颖,黄国庆,杨庆山,等.基于高阶矩的非高斯风压极值计算[J].建筑结构学报,2018,39(2):146-152.
- [17] 徐华舫.空气动力学基础(上册)[M].北京:北京航空学院出版社,1987.
- [18] 埃米尔-希缪,罗伯特·H·斯坎伦.风对结构的作用:风工程导论[M].刘尚培,项海帆,谢霁明,译.上海:同济大学出版社,1992.
- [19] 邱天爽,张旭秀,李小兵,等.统计信号处理:非高斯信号处理及其应用[M].北京:电子工业出版社,2004:114-119.
- [20] 王旭,黄鹏,刘海明,等.超强台风作用下低矮建筑屋盖风压非高斯特性研究[J].建筑结构学报,2016,37(10):132-139.
- [21] 叶江水,王仲刚,陈友良,等.基于前四阶矩的非高斯响应概率密度函数逼近方法研究[J].后勤工程学院学报,2010,26(1):12-16.
- [22] 陈龙,王丛菲,武岳,等.基于“风压脉冲”的大跨屋盖结构极值风压估计方法研究[J].建筑结构,2018,48(12):85-91.