ATLANTIS PRESS
Advances in Engineering Research (AER), volume 132
2017 Global Conference on Mechanics and Civil Engineering (GCMCE 2017)

A study on wind pressure distribution around Long-span roof based on measured data

Zepeng Luo[1] Feng Zhou[*1,2] Jianjun Gan[3] Ligang Cui[1]

1 Civil and Architectural Engineering School, Nanchang Institute of Technology, Nanchang,330099

2 Water conservancy and civil engineering infrastructure safety key Laboratory, Nanchang,330099

3 water conservancy and ecological engineering School, Nanchang Institute of Technology, , Nanchang,330099

*Email: 251230177@qq.com

Keywords: Large span spatial structure, Wind load, Joint probability distribution

Abstract: Recently, The study of wind field characteristics and wind induced vibration about large span spatial structures has become the hot spot of the civil engineering. Even a lot achievements have obtained, the most is based on numerical simulation and a few on wind tunnel test, the test results of which are a little different from the real data due to ratio of similitude even though wind tunnel test can simulate different wind load conditions and wind induced vibration response.With that, this article analyzed turbulent intensity, integral scale,gust factors, wind pressure distribution,joint distribution of wind speed and direction based on the measured data of wind speed, wind direction and wind pressure from above the roof of the large span spatial structure. The analysis results explain well the characteristics of wind field and have very important significance to the research on wind induced vibration.

大跨度屋盖风压分布实测研究

罗泽鹏[1] 周 峰[*1,2] 甘建军[3] 崔理纲[1]

1 南昌工程学院土木与建筑工程学院，南昌，330099

2 江西省水利土木工程基础设施安全重点实验室 南昌，330099

3 南昌工程学院水利与生态工程学院，南昌，330099

关键词：大跨度空间结构；风荷载；联合概率分布
中图分类号：TU332 文献标识码：A

摘 要：近年来，围绕大跨度空间结构的风场特性研究、风振研究逐渐成为土木工程学科的热点研究方向，虽然获得了不少成果，但大多是建立在数值模拟分析基础上，少量学者进行了风洞试验研究，虽然风洞试验可以方便的模拟不同工况条件下的风环境和结构风振响应，但在真实建筑与模型相似比问题上又会使试验结果与真实数据之间存在一定误差，有鉴于此，本文通过实测手段采集到了大跨度空间结构屋盖上方的风速、风向和风压数据，并基于实测数据，对其风荷载的湍流强度、积分尺度、阵风因子、风压分布、风速风向联合分布等指标进行了细致分析，分析结果真实可靠的说明了其屋盖上方的风场特征，对于大跨度空间结构的风振研究具有十分重要的意义。

1.引言

众所周知，风灾发生频率高、次生灾害大、影响范围广，给人类带来了巨大的生命和财产损失。大跨度空间结构因其跨度大、造型复杂，导致作用其上的风效应异常明显，历史上由大风、台风引起大跨度空间结构，尤其是膜结构屋盖撕裂、损毁的实例不胜枚举，虽然近年来国内外在该方面获得了不少的研究成果，但大多是建立在数值模拟分析基础上，少量学者

Copyright © 2017, the Authors. Published by Atlantis Press.
This is an open access article under the CC BY-NC license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

进行了风洞试验研究，虽然风洞试验可以方便的模拟不同工况条件下的风环境和结构风振响应，但在真实建筑与模型相似比问题上又会使试验结果与真实数据之间存在较大误差，而基于现场实测数据的大跨度空间结构屋盖上方风环境的研究却相对较少。有鉴于此，本文实测了河北体育馆上方的风速和风压数据，下面将对其风荷载的多项指标展开细致研究[1-3]。

2. 湍流强度、积分尺度及阵风因子

湍流强度反映了风的脉动强度，是确定结构脉动风荷载的关键参数。定义湍流强度为10*min* 时距的脉动风速标准方差与水平平均风速的比值[4]：

$$I_i = \frac{\sigma_i}{\bar{V}} \quad (i = u, v, w) \qquad (1)$$

式(1)中，σ_i 分别表示脉动风速 *u(t)*，*v(t)*和 *w(t)*的均方根，相当于湍流脉动风速在 i 方向上的动能。

湍流积分尺度可以评价气流中湍流涡旋的平均尺寸，从而反映出脉动风速或风压的空间相关性，湍流积分尺度越大，脉动风的空间相关性就越强，湍流积分尺度是气流中湍流涡旋平均尺寸的量度。纵向湍流积分尺度 Lu 定义为[5]：

$$L_u = \frac{1}{\sigma_u^2}\int_0^{\infty} R_{u1u2}\left(x\right)dx \qquad (2)$$

式(2)中，$R_{u1u2}\left(x\right)$ 为两个纵向脉动风速分量，$u_1 = u(x,t)$ 和 $u_2 = u(x_1 - x, t)$ 的互协方差函数；σ_u^2 为纵向风速的脉动方差。

湍流积分尺度是与湍流空间相关性有关的参数，如果结构上两点的距离超过湍流积分尺度，则这两点间的脉动风速的相关程度就会相应降低，其对结构的作用也会相互抵消，结构的响应也会减小。

湍流积分尺度计算精度主要取决于计算分析所采用数据长度及平稳程度。对于湍流积分尺度计算，可按照 Von-karman 谱计算公式并根据采集到的数据计算得到功率谱分布值，利用最小二成拟合其湍流积分尺度 Lu 值。

由于风荷载具有较强的脉动特性，因此，如何分析统计其强度特性就至关重要，显然用10 分钟内平均风速去衡量其强度会严重低估风荷载的瞬时强度，当风荷载的平均时距取的越小时，其统计结果就越大，也越保守，显然是不合理的，因此，可用阵风因子去衡量风荷载的瞬时风强度特性。按照经验，阵风因子计算时距取 3 秒[4]。

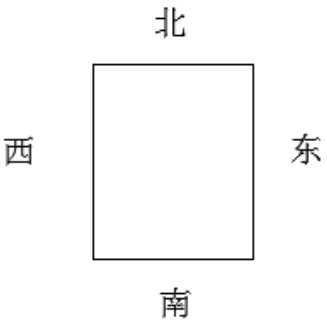
$$G_u(t_g) = 1 + \frac{\max(\overline{u(t_g)})}{\bar{V}} \qquad (3)$$

$$G_v(t_g) = \frac{\max(\overline{v(t_g)})}{\bar{V}} \qquad (4)$$

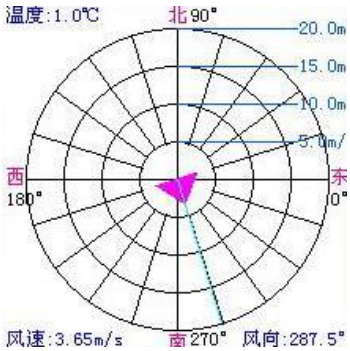
$$G_w(t_g) = \frac{\max(\overline{w(t_g)})}{\bar{V}} \qquad (5)$$

$\bar{V}$ 为平均风速，σ_i 为风速标准差，t_g 为阵风周期，为 3s，G_u、G_v、G_w 为空间三个方向的阵风因子，$\overline{u(t_g)}$，$\overline{v(t_g)}$，$\overline{w(t_g)}$ 为空间三个方向在阵风周期内的平均风速。

3. 风荷载数据分析



a) 建筑方向示意图



b) 风速仪方向示意图

图 1 建筑和风速仪的方向图

从图 3 可以看出，结构周围环境风速的纵向湍流强度值集中在 67%～70%之间；横风向湍流强度值集中在 67%～70%之间；竖风向湍流强度值则主要分布在 99%～102%之间。各湍流强度值明显高于空旷地面、低多层建筑物及超高层建筑周围的强度值，说明该结构屋盖上方风场环境复杂，风的脉动性较强，同时从图 2 的平均风速和风向监测结果也可看出风荷载的不稳定性，应该由屋盖表面凹凸不平的气枕所致，分析结果符合实际情况。

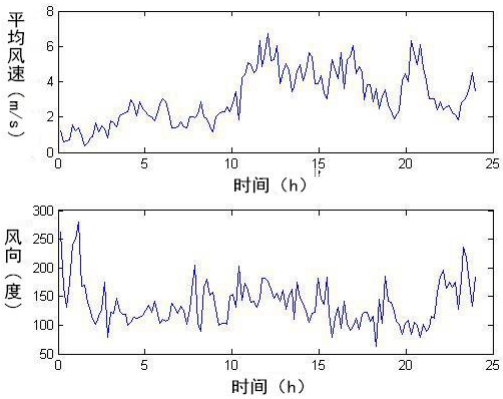
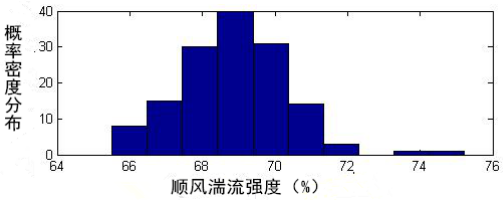
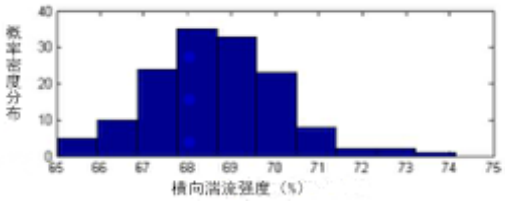


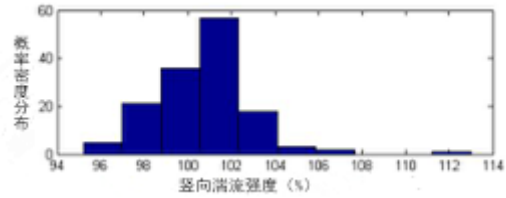
图 2 速及风向随时间变化



(a)顺风向湍流强度随时间变化及分布规律



(b)横风向湍流强度随时间变化及分布规律



(c)竖风向湍流强度随时间变化及分布规律

图 3 湍流强度随时间的变化情况及分布规律

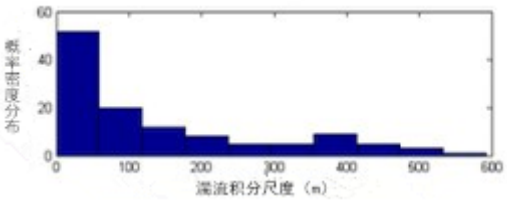
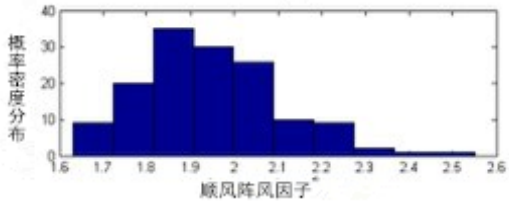
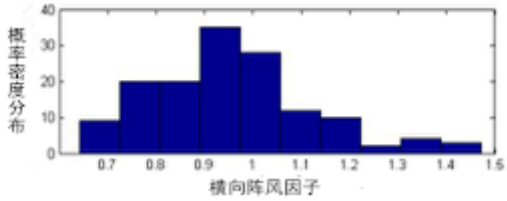


图 4 湍流积分尺度随时间变化及分布规律

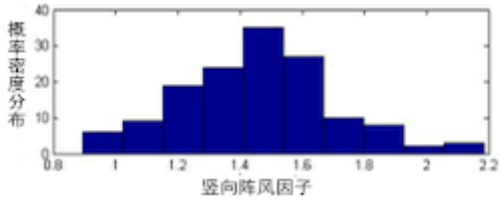
从图 4 中可以看出，该建筑上方的湍流积分尺度主要集中在 0～50 米范围内，而通常情况下湍流积分尺度应在 100 米～200 米范围内，说明该建筑物屋盖上方风场的相关性较小，同样地，导致该结果的主要原因还是由于建筑物上方的不平坦性增加了流体的湍流特性，使其空间、时间相关性降低。



(a)顺风向阵风因子随时间变化及其分布规律



(b)横风向阵风因子随时间变化及其分布规律

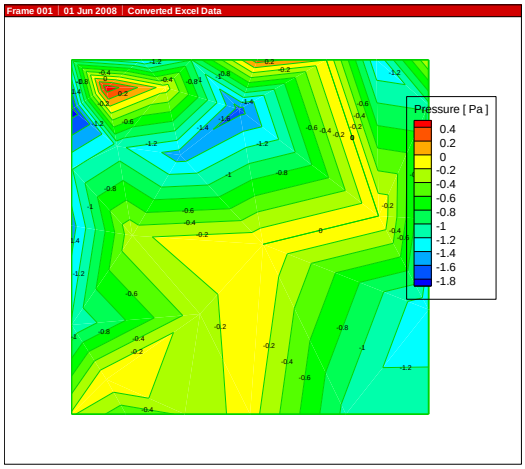


(c)竖风向阵风因子随时间变化及其分布规律

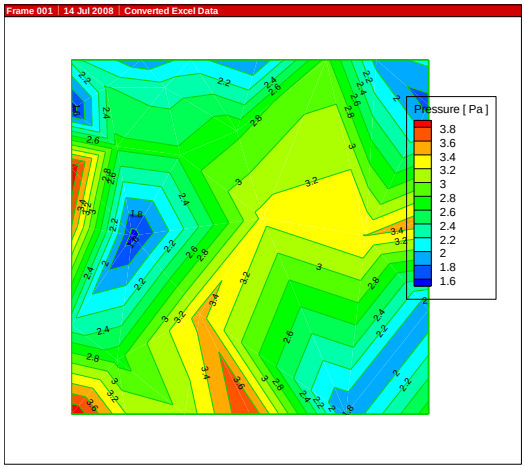
图 5 阵风因子随时间变化及其分布规律

从图 5 可以看出，结构屋盖上方风场的顺风向阵风因子主要分布在 1.8～2.0 之间；横风向阵风因子主要分布在 0.7～1.0 之间；竖风向阵风因子则主要分布在 1.3～1.7 之间，其竖风向阵风因子异常的大。，该值通常情况下较小，众所周知，风的来流方向通常为水平方向，只有当风在遇到某一阻挡物时才会发生爬升现象，从而增大风在竖向的攻角，考虑到该建筑正北方有建筑群阻挡，使该建筑处于其尾流之中，这也就解释了竖风向阵风因子异常较大的原因。

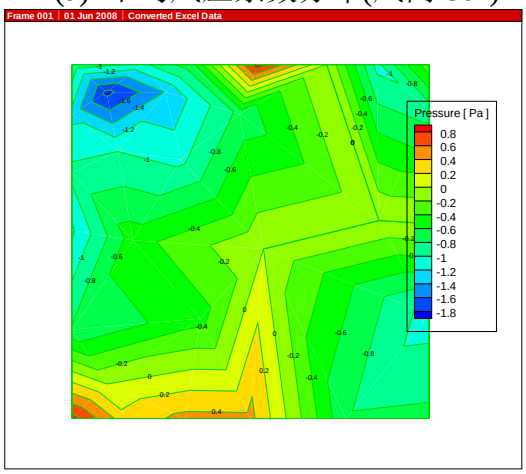
4. 屋盖风压分布分析



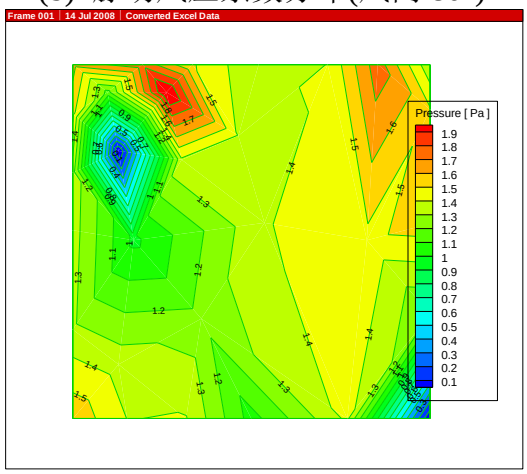
(a) 平均风压系数分布(风向 80°)



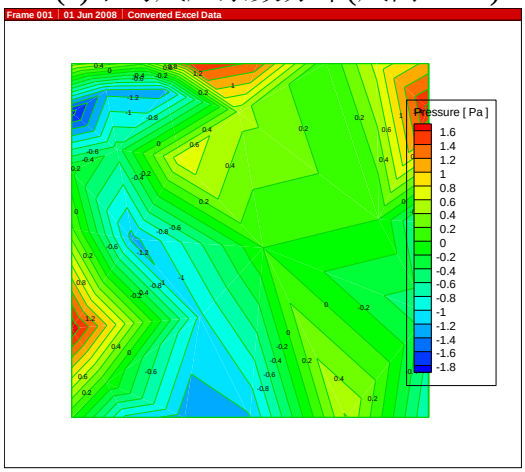
(b) 脉动风压系数分布(风向 80°)



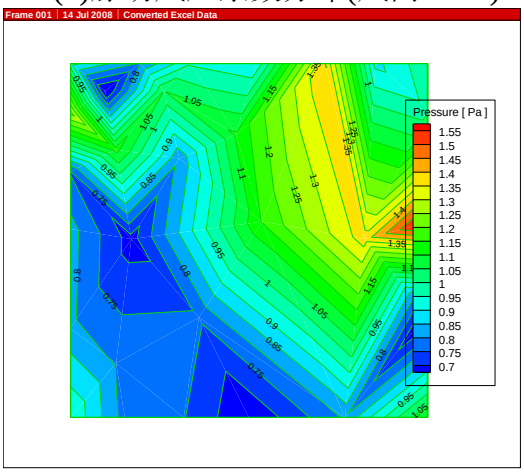
(c)平均风压系数分布(风向 165°)



(d)脉动风压系数分布(风向 165°)



(e)平均风压系数分布(风向 250°)



(f)脉动风压系数分布(风向 250°)

图 6 风压系数分布

风压系数可表示为[6]：

$$C_P = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2} \qquad (6)$$

式(3)中，C_p 为风压系数，P 为风压，P_∞ 为参考压力，ρ 为来流空气密度，U 为来流平均风速。

从图 6 可以看出，当风向为北风时，屋盖北缘角部的风压梯度变化较大，而屋盖中央的梯度变化较小，且屋盖角部的风压系数多为负值，这就意味着此处正发生着大面的旋涡脱落，

风在此处发生分离，从而产生了风吸力，而在屋盖靠南的区域风压力系数为正值，说明风荷载在此处发生了再附现象，从而产生了正压，该监测结果与理论及风洞结果十分吻合。

当风向为南风时，屋盖南缘的风压系数趋近于负值，而屋盖北缘为正，说明此时的风荷载在屋盖南缘发生分离，产生旋涡，而在北缘发生再附现象，因而，屋盖北部出现正压区，而南部出现负压区。

而当风向偏西北时，屋盖北缘的西北角仍存在负压区，而正压区却向东南方移动，该种现象符合以往的风洞实验的结果，也符合流体的绕流特性。

从统计的脉动风压力分布图可以看出：处在尾流之中的区域，其流体的脉动性较强，主要原因为：由于屋盖表面的粗糙度较高，当流体流经屋面时，随着所流经路径 长 度 的 增加，其流体的平均风速降低，而脉动风速相对升高，由此导致脉动风压的增加。

5. 屋盖上方风速风向联合分布

对于大跨度空间结构而言，风对结构的作用不仅体现在静力方面还尤其体现在动力方面，即便当风荷载强度相同时，由于风荷载作用方向不同，其对结构所产生的静、动力影响也大不相同，因此，有必要研究建筑物周围风速风向联合分布规律，为结构安全评估提供更为细致、可靠的荷载信息。

5.1 风荷载风速风向联合分布概型

本文所采用的联合分布概型反映了风速和风向的联合分布作用，其极值分布函数是由风向频度函数和各风向风速分布函数组成的，如下式[7]:

$$F(u,\theta) = f(\theta)\cdot P_u(U<u,\theta) \qquad (7)$$

$f(\theta)$ 是反映平均风方向的风向出现频度函数，而 $P_u(U<u,\theta)$ 是对应于各个方向的风速分布函数，是在各个方向上分别拟合得到的。

5.2 极值风速样本的抽取和整理

表 1 平均风速风向出现频度表(%)

风速(m/s) 风向	2	4	6	8	10	总和
22.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000
45.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000
67.5	0.569	0.427	0.000	0.000	0	0.996
90.0	0.569	3.698	4.979	0.427	0	9.673
112.5	2.134	7.112	8.250	1.138	0	18.634
135.0	4.694	7.824	8.819	0.569	0	21.906
157.5	6.259	3.698	2.560	0.427	0	12.945
180.0	2.418	4.125	2.845	0.427	0	9.815
202.5	1.280	1.707	0.711	0.000	0	3.698
225.0	0.853	2.134	0.000	0.000	0	2.987
247.5	0.996	2.418	0.284	0.000	0	3.698
270.0	1.280	5.263	2.987	0.000	0	9.531
292.5	1.565	3.698	0.711	0.000	0	5.974
315.0	0.142	0.000	0.000	0.000	0	0.142
337.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000
360.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000
总和	22.76	42.105	32.15	2.987	0	100

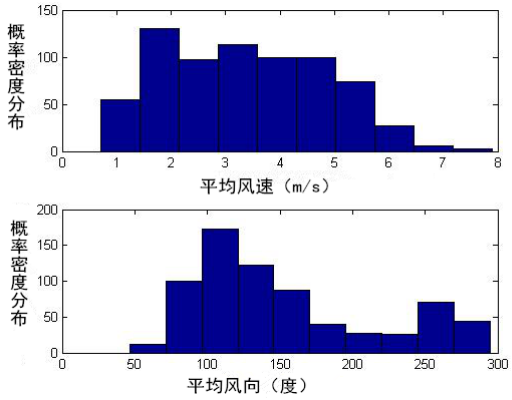


图 7 30 天极值风速及对应风向统计图

确定考虑风速风向联合分布的基本风速的前提是在进行平均风速观测采样时记录风速大小的同时记录对应的风向。由于本项目采集到的风速、风向样本有限，因此采用小时最大风速及对应的风向作为极值样本进行统计分析，分析结果如表 1。

根据 30 天数据，统计出的小时极值平均风速、风向出现频度表，风速划分区间长度为 2m/s，风向划分区间长度为 22.5°，共 16 个子区间。

由表 1 中可以看出，此时的风荷载以西北风为主，完全符合北京地区冬季的季风特性。在拟合联合分布函数时需引入两个基本假定:(1) 同一地点不同方向的平均风速服从同一种类型的极值分布概型,并且由该地点所有方向上的极值风速样本来拟合最优极值分布概型。(2) 同一地点不同方向的平均风速分布概型参数是相互独立的,并且由该方向的极值风速样本来优化估计。

根据三种极值风速分布概型和本文采用的风向风速联合分布概型方法的原理,可得到风速风向联合分布的三种联合分布模型:

1.Gumbel 分布

$$P(U>x,\theta)=f(\theta)\cdot\left\{1-\exp[-\exp\left(-\frac{x-b(\theta)}{a(\theta)}\right)]\right\} \tag{8}$$

2.Frechet 分布

$$P(U>x,\theta)=f(\theta)\cdot\left\{1-\exp[-\left(\frac{x)}{a(\theta)}\right)^{-r(\theta)}]\right\} \tag{9}$$

3.Weibull 分布

$$P(U>x,\theta)=f(\theta)\cdot\exp[-\left(\frac{x}{a(\theta)}\right)^{r(\theta)}] \tag{10}$$

$f(\theta)$ 是反映极值风速样本在各个风向分布情况的频度函数，可以从极值风速样本在各个风速和各个风向范围内的频度统计表的最后一列得出，联合分布函数的其它参数均为风向的函数。

对风速风向联合分布概型进行拟合时参数估计的方法有多种选择，本文采用最小二乘法。其拟合结果如表 2 、3、4 所示。

5.3 拟合效果检验

用最小二乘法进行曲线拟合的拟合效果检验标志是剩余标准差和相关系数，其表达式分别为：

$$S=\sqrt{\frac{1-R^2}{n-2}\sum(y_i-\bar{y})^2} \tag{11}$$

$$R^2 = \frac{[\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2} \tag{12}$$

表2 Gumbel 分布拟合参数表

角度θ	$f(\theta)$	a	b	相关系数 R	标准差 S
22.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
45.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
67.5	0.010	0.981	1.171	0.997	1.457
90.0	0.097	0.921	7.114	0.995	2.725
112.5	0.186	0.933	7.492	0.997	2.703
135.0	0.219	0.943	7.789	0.998	2.480
157.5	0.129	0.951	7.704	0.999	2.354
180.0	0.098	0.959	7.350	0.999	2.570
202.5	0.037	0.968	6.432	0.999	2.827
225.0	0.030	0.972	6.173	0.999	2.917
247.5	0.037	0.978	5.194	0.998	4.401
270.0	0.095	0.974	6.956	0.999	3.030
292.5	0.060	0.976	6.953	1.000	2.722
315.0	0.001	0.976	7.531	1.000	2.236
337.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
360.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表 3 Frechet 分布拟合参数表

角度	f	γ	a	相关系数 R	标准差 S
22.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
45.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
67.5	0.010	1.052	0.034	0.997	1.656
90.0	0.097	0.974	11.752	0.999	1.067
112.5	0.186	0.975	17.854	1.000	1.050
135.0	0.219	0.977	24.710	1.000	0.787
157.5	0.129	0.981	22.204	1.000	0.644
180.0	0.098	0.985	14.924	1.000	0.892
202.5	0.037	0.992	5.607	1.000	1.193
225.0	0.030	0.994	4.292	1.000	1.316
247.5	0.037	0.998	1.517	0.999	2.939
270.0	0.095	0.992	9.693	1.000	1.422
292.5	0.060	0.992	9.707	1.000	1.080
315.0	0.001	0.991	17.794	1.000	0.517
337.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
360.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表 4 Weibull 分布拟合参数表

角度	f	γ	a	相关系数 R	标准差 S
22.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
45.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
67.5	0.010	1.032	7.737	1.000	0.472
90.0	0.097	1.018	4.848	1.000	0.849
112.5	0.186	1.013	4.085	1.000	0.958
135.0	0.219	1.010	3.999	1.000	0.971
157.5	0.129	1.012	6.089	1.000	0.768
180.0	0.098	1.010	5.764	1.000	0.789
202.5	0.037	1.012	10.844	1.000	0.612
225.0	0.030	1.009	7.992	1.000	0.422
247.5	0.037	1.008	6.768	1.000	0.542
270.0	0.095	1.006	5.515	1.000	0.821
292.5	0.060	1.008	9.129	1.000	0.823
315.0	0.001	1.006	7.283	1.000	0.523
337.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
360.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

从表 2～4 的分析结果可以看出，Weibull 分布相关系数最大，剩余标准差最小，其拟合的效果最好，因此，可认为该建筑所受风荷载的风速风向联合分布规律符合 Weibull 分布，其拟合参数见表 4。

6．结论

本文利用实测数据对新型大跨度空间结构的风场特性进行了细致研究，得出以下结论：

1、受周围建筑群及结构自身特性影响，该建筑上方湍流强度值明显高于空旷地面低多层建筑物及超高层建筑的强度值，湍流积分尺度也小于常规结构，主要集中在 0～50 米范围内，同时，受正北方建筑群影响，其竖向阵风因子偏大。

2、风压监测结果显示，当来流方向不同时，屋盖表面风压基本遵循来流方向负风压，尾流处正风压，边缘风压达极值，屋盖角点形成小范围负压区的规律性，其风压分布规律与风洞试验结果吻合，同时脉动风压系数较常规结构为大。

3、风速风向联合分布结果显示，其分布规律符合 Weibull，拟合效果理想。

基金项目

国家自然科学基金应急管理项目（41641023）;江西省科技支撑(20133BBG70099);江西省青年基金(20144BAB2160014);江西省教改课题（JXJG-12-18-18）;江西省科技项目(GJJ151125);2015年国家(江西省)大学生创新创业训练计划资助项目(201511319013);

References

[1] Jiangsheng Fang, Wind load characteristics and wind resistant design of complex large span roof structures. Tongji University,2007:5~10

[2] Hai Jin,Lin Cheng, Meizhu Chen, Jianwei Fei. Wind resistant design and construction of light steel building roof retaining structure [J]. Steel structure,2015,(03):33-35+45.

[3] Jialiang Yu, Guomin Liu, Conglv Qin, Xiaozhi Luo,Yicheng Wang, Yanbin Shen. Wind resistant test and analysis of steel shed in grandstand of Zhoushan Sports Center Stadium [J/OL]. Steel structure,2016,(07):42-45

[4] Zhongyue Pan, A comparative study of wind response and wind load codes for tall buildings. Hunan University,2012:11~16

[5] S. Campbell, K.C.S. Kwok, P.A., Hitchcock. Full-scale measurements of two high-rise residential buildings in Hong Kong during a typhoon. Proceedings of Fifth International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications. 2004:313~316
[6] Ying Sun,Yue Wu,Zhixing Lin,Shizhao Shen, Study on wind pressure pulse characteristics of large span flat roof. engineering mechanics,2007,24(4):95~96
[7] Q.S. Li, J.R. Wu, S.G. Liang, Y.Q. Xiao, C.K. Wong. Full-scale measurements and numerical evaluation of wind-induced vibration of a 63-story reinforced concrete tall building. Engineering Structures. 2004, 26 (12):1779~1794