

基于实测数据的近地层风特性分析研究*

王雪平¹, 栾雪涛¹, 李万润^{1,2}, 杜永峰^{1,2}

(1. 兰州理工大学防震减灾研究所 兰州, 730050)

(2. 兰州理工大学西部土木工程防震减灾教育部工程研究中心 兰州, 730050)

摘要 根据世界风能技术中心实际测风塔测到的大风天气下近地层不同高度处的风速风向数据, 对该风场的平均风速与风向、湍流度、阵风因子、湍流积分尺度和脉动风速功率谱进行分析。结果表明: 当平均风速曲线出现较大的尖峰时, 平均风向会出现低谷; 顺风向湍流强度和湍流积分尺度都明显大于横风向和竖风向相应的湍流强度和湍流积分尺度, 各分量比值大致为 1:0.121 3:0.188 6; 文献[1-2]中建议的经验公式均能较好地反映顺风向阵风因子与湍流强度的变化关系, 并借助实测数据通过曲线拟合给出了相应的经验公式; 顺风向湍流积分尺度有随平均风速的增大而减小的趋势, 而竖风向湍流积分尺度随平均风速的增大呈幂指数增长; 纵向实测脉动风速功率谱与 Von Karman 和 Kaimal 经验谱吻合较差, 竖向脉动风速功率谱与 Panofsky 经验谱在高频段有所偏差, 通过拟合得到的经验谱与实测谱更为接近。

关键词 风速风向数据; 湍流强度; 湍流积分尺度; 阵风因子; 脉动风速功率谱

中图分类号 TK81; TU312.1

引言

随着各国对化石能源枯竭、供应紧张及气候变暖等问题的日益重视, 解决能源结构的优化问题成为实现经济 and 环境保护协调发展的关键。因此, 新能源事业在世界可持续发展事业中的地位和作用就显得尤为重要, 特别是作为主要推动力的风电产业也逐渐转向稳定和市场化发展。伴随着技术创新和成本的持续下降, 全球风电行业将迎来新的高速增长期。与此同时, 合理的利用土地资源从而使风能资源得到最有效的开发利用也是提高风能利用率的首要措施, 而决定风电机组载荷和发电效率的关键在于外部风况条件, 风电场所在区域强风天气下的风特性^[3-6]则是评判风电机组适于在该地区安装运行的主要依据。因此, 研究风电场所在地区的极端强风特征对风电场的建设布置和发电效益具有重要的指导意义。

作为研究风场特性最直接和最可靠的研究手段, 现场实测已经成为风电场选址及结构抗风设计中尤为重要的环节, 也是对抗风理论研究进行验证的基础和前提。近些年, 国内外在风特性研究领域取得了一些重要的研究成果, 文献[1-2]在完成超高

层建筑风洞实验的基础上, 对内陆良态风作用下的现场实测数据进行了对比分析, 并通过研究内陆良态风和沿海台风风速特性的不同, 发现风特性差别的原因与宏观地貌有很大关系。文献[7-8]基于不同高度处的台风过程中实测数据对风特性经验曲线进行拟合分析, 并对台风和季风作用下的脉动风速谱特性进行了对比分析。王浩等^[9-10]采用多尺度小波变换方法提取时变平均风速, 并对实测脉动风速的非平稳风特性进行了分析。Elliott 等^[11]通过分析风电场气象塔采集的风数据来描述有尾流和无尾流情况下的流场特性, 发现风速和湍流强度的变化与风向和地面粗糙度有关。戴靠山等^[12]基于台风特征参数, 结合现行风荷载规范建立风力发电机有限元模型并进行了风荷载响应分析。虽然国内外学者在风场特性方面做了大量研究工作, 但还未能满足实际工程选址及设计的要求。因此, 笔者根据 2017 年 3 月 8 日 15, 41, 61, 100 及 119 m 高度处的数据, 对大风(瞬时风速达到 17.2~20.7 m/s)天气中平均风速与风向、湍流度、阵风因子、湍流积分尺度和功率谱进行了研究, 为今后风电场的选址和风电结构抗强风设计提供参考。

* 国家自然科学基金资助项目(51568041); 教育部长江学者创新团队资助项目(IRT13068); 甘肃省住建厅科技攻关资助项目(JK2016-12)

收稿日期: 2019-05-24; 修回日期: 2021-03-14

1 风观测系统

1.1 风观测仪器

观测点位于美国可再生能源实验室的国家风能技术中心,位于科罗拉多州博尔德以南约8 km,距丹佛西北36 km、科罗拉多山脉东侧约5 km处,海拔约1 828.8 m。该测风塔上的仪表类型和高度如图1所示。分别在测风塔15,41,61,100和119 m高度处布置超声风速仪,采样频率为20 Hz,通过专用软件同步采集数据。



图1 测风塔仪器布置示意图

Fig.1 Arrangement of instrument for wind measuring tower

1.2 数据处理

超声风速仪的 x, y, z 轴分别对应于正北、正西和竖直向,测得风速仪坐标下的3个方向的风速序列及风向角,即 $u_x(t), u_y(t), u_z(t)$ 及 β ,根据转换公式推导出脉动风速的纵向分量 $u(t)$ 、横向分量 $v(t)$ 和垂直分量 $w(t)$ 。具体计算公式如下。

平均水平风速为

$$U = [\overline{u_x^2} + \overline{u_y^2}] \quad (1)$$

垂直平均风速为

$$W = \overline{u_z(t)} \quad (2)$$

故各风速子样本的脉动风速分量 $u(t), v(t)$ 和 $w(t)$ 可以根据如下公式进行计算。

纵向脉动风速为

$$u(t) = u_x(t)\cos\beta + u_y(t)\sin\beta - U \quad (3)$$

横向脉动风速为

$$v(t) = -u_x(t)\sin\beta + u_y(t)\cos\beta \quad (4)$$

垂直脉动风速为

$$w(t) = u_z(t) - W \quad (5)$$

2 实测结果

2.1 风速时程分析

笔者选取该测风塔2017年3月8日全天的风速

数据^[13]进行统计分析,按照我国建筑结构荷载规范,将实测数据按10 min平均时距分成不同的数据组,得到了10 min平均风速及平均风向随时间的变化曲线图,如图2所示。全天的平均风向主要分布在 $240^\circ \sim 300^\circ$ 之间,即西南到西北范围内。当平均风速曲线出现向下较大的尖峰时,平均风向也会呈现同样的趋势;当平均风速曲线出现向上较大的尖峰时,平均风向反而会呈现低谷。出现该现象的主要原因在于此次分析选取的数据是大风天气,可能会出现“飊”现象,持续时间短暂,突然发作的大风,使得瞬间风速突增,风向急转。从图3可以看出,最大风速出现在上午9:00左右,15 m和100 m高度处的瞬时风速基本围绕平均风速上下波动。通过对比发现,100 m处的平均风速要大于15 m处的平均风速。

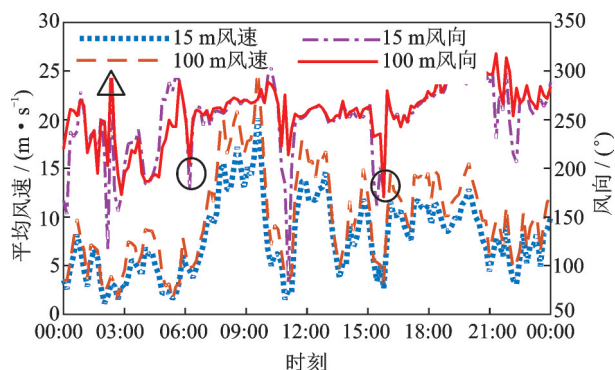


图2 平均风速及平均风向随时间变化曲线

Fig.2 Variation curve of average wind speed and average wind direction

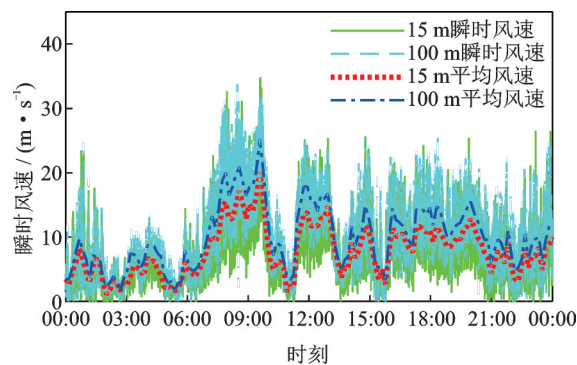


图3 瞬时风速和平均风速时间历程

Fig.3 Time history of instantaneous wind speed and mean wind speed

2.2 风速廓线特征

风速廓线是指大气边界层中平均风速随高度的垂直变化曲线,对于建筑结构选址和设计是重要的参考资料。影响近地层水平风速垂直分布的因素主要从大气层状态、地域环境及天气等方面考虑,风廓线一般服从指数函数和对数函数的分布规律^[14]。

在近地层,风速随高度变化的风剖面公式如下。
指数函数

$$u = u_0 (z/z_0)^\alpha \quad (6)$$

对数函数

$$u = \frac{1}{k} u_0 \ln \frac{z}{z_0} \quad (7)$$

其中: u 为高度 z 处的风速; α 为指数函数中风廓线幂指数值; z_0 为粗糙度长度; u_0 为粗糙度长度 z_0 处的风速; k 为卡曼常数。

为合理地描述风剖面指数分布规律,笔者对其进行最小二乘拟合,并给出该地区平均风速风剖面指数的统计直方图。从图4中可以看出,风剖面指数的整体波动范围为0.2~0.7,平均值为0.34,标准差为0.101,离散性较大,并且在0.2~0.4之间较为集中。通过对大风时段2个风速样本进行适应性拟合(如图5所示),从适应性效果可以看出,实测数据用指数函数和对数函数拟合垂直风廓线,拟合效果都比较好。

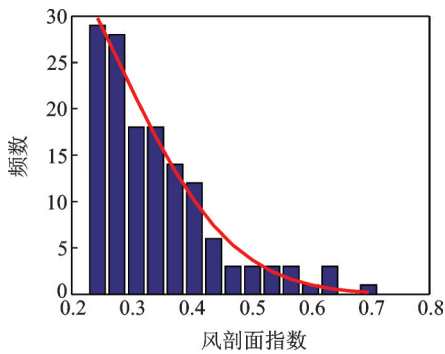


图4 风剖面指数分布直方图
Fig.4 Histogram of wind profile index

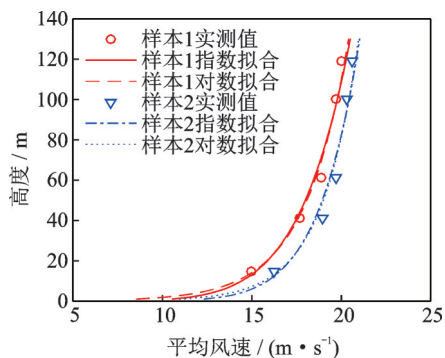


图5 平均风速剖面图
Fig.5 Average wind velocity profile

3 湍流特性分析

3.1 湍流强度特征

湍流强度表示瞬时风速偏离平均风速的程度,

是衡量大气运动稳定程度的重要特征量。影响湍流强度的因素主要有天气状况、地表粗糙度及地域等。在风电工程中,常选取10 min平均风速作为计算湍流强度的标准,公式为

$$I = \sigma_i / U \quad (i = u, v, w) \quad (8)$$

其中: U 为10 min平均风速; σ_i 为10 min平均时距内各分量瞬时风速的标准值。

针对观测期间大风天气进行湍流强度计算,实测平均风速与湍流强度曲线如图6所示。由图可知:风速较小时湍流强度变化较大;风速较大时,湍流强度则变化较小;顺风向湍流强度明显大于横风向和竖风向湍流强度。

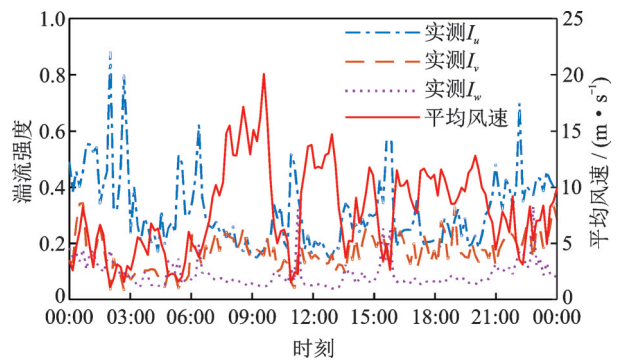


图6 湍流强度变化曲线
Fig.6 Variation curve of turbulence intensity

图7给出了各高度处湍流强度随平均风速的变化曲线,可以看出:顺风向和竖风向湍流强度随平均风速的变化趋势近似服从指数分布,并且随着高度的增加,湍流强度随平均风速指数函数分布的幂指数值逐渐增大;低风速时,顺风向和竖风向湍流强度较大,最大值分别达到1.0和0.4;随着平均风速的增大,湍流强度逐渐减小。

图8给出了各向湍流强度随高度的变化曲线以及国内外经验曲线,并基于各高度处实测数据对各向湍流度平均剖面进行 $I_i = c(z/10)^d$ 的拟合。由图8可以看出:相较于欧洲规范和日本规范的规定,各高度纵向湍流强度实测结果都偏大,与英国工程科学数据库(engineering sciences data unit,简称ES-DU)经验值相比数值又明显偏小;各高度处横向湍流强度和竖向湍流强度实测结果均较经验结果偏大,经验公式不再适合该风场的实际情况。考虑到在横风向和竖风向方面得出的经验规律尚不完善,于是分别得到拟合修正后的经验公式如图8(b)所示。

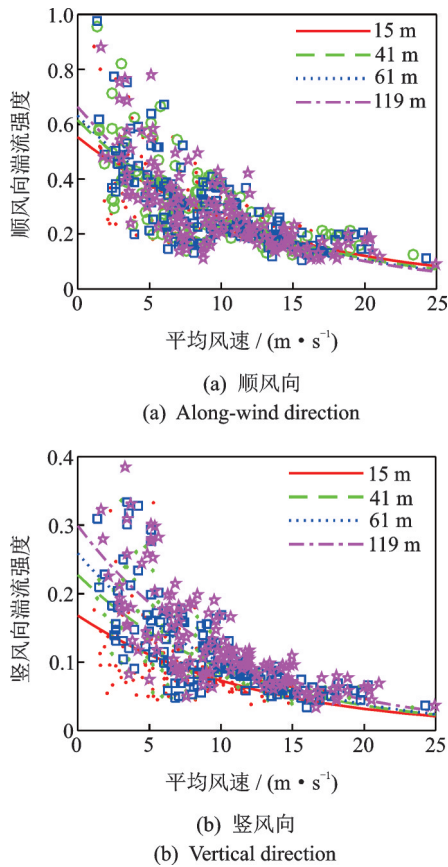


图 7 湍流强度随风速的变化

Fig.7 Relationship of turbulence intensity and wind speed

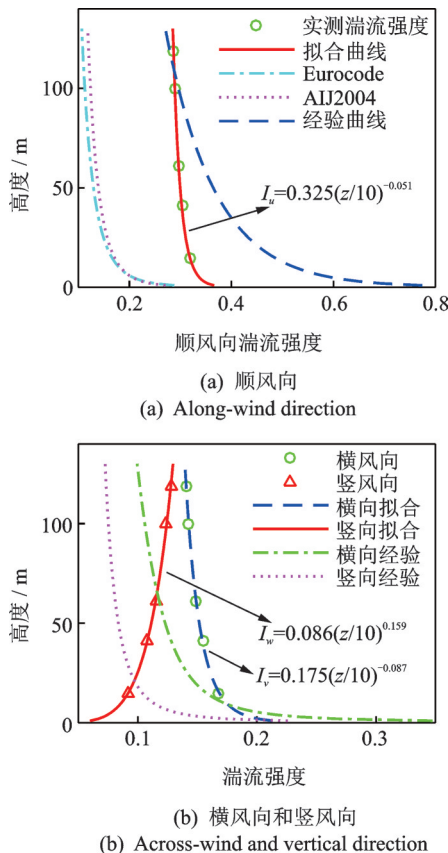


图 8 湍流强度剖面图

Fig.8 Turbulence intensity profile

3.2 湍流积分尺度

湍流积分尺度是湍流漩涡平均尺度的度量,定义为脉动风速相关函数的无穷积分,反映大气湍流涡旋的扩散能力。在此,通过式(9)计算脉动风速的湍流积分尺度

$$L_i = \frac{U}{\sigma_i^2} \int_0^\infty R(\tau) d\tau \quad (i = u, v, w) \quad (9)$$

其中: $R(\tau)$ 为脉动风速的自相关函数。

表 1 给出了观测期间湍流强度实测结果汇总。通过表 1 可以看出,在近地面顺风向湍流积分尺度与竖风向湍流积分尺度都随高度增加而增大,顺风向、横风向、竖风向湍流积分尺度平均值分别为 177.62, 21.54 和 33.50 m, 各分量的比值大致为 1:0.121:0.189, 顺风向湍流积分尺度明显大于横风向和竖风向湍流积分尺度。

表 1 湍流积分尺度汇总表

Tab.1 Values of turbulence integral scale

H/m	湍流积分尺度平均值/m			$L_u:L_v:L_w$
	L_u	L_v	L_w	
15	138.079	19.791	14.930	1:0.208:0.150
41	173.615	22.029	30.174	1:0.196:0.235
61	183.367	22.952	36.965	1:0.190:0.260
100	195.584	21.476	42.288	1:0.178:0.297
119	197.463	21.465	43.146	1:0.171:0.294
平均值	177.621	21.542	33.501	1:0.121:0.188

为研究顺风向湍流积分尺度与平均风速之间的变化率随高度的变化情况,采用线性的倾斜程度来进行判断。由图 9 可以看出:顺风向湍流积分尺度与平均风速的相关性较强,随着平均风速的增长,各高度处的顺风向湍流积分尺度呈线性增长,并且随着高度的增加,线性变化率逐渐增大;而横风向和竖风向湍流积分尺度与平均风速的相关性较差,湍流积分尺度分布较离散。

通过最小二乘法拟合,得到拟合结果及经验公式如图 10 所示,受到温度、地面粗糙度等因素的影响,在不同地区所统计出来的结果是不尽相同的。对比发现,经验公式得到的顺风向湍流积分尺度结果要大于实测结果,各向湍流积分尺度通过 $L_i = a(z/30)^b$ 拟合得到的拟合结果较为理想。

顺风向 $L_u = 90.595(z/30)^{0.167}$

横风向 $L_v = 18.644(z/30)^{0.036}$

竖风向 $L_w = 5.536(z/30)^{0.440}$

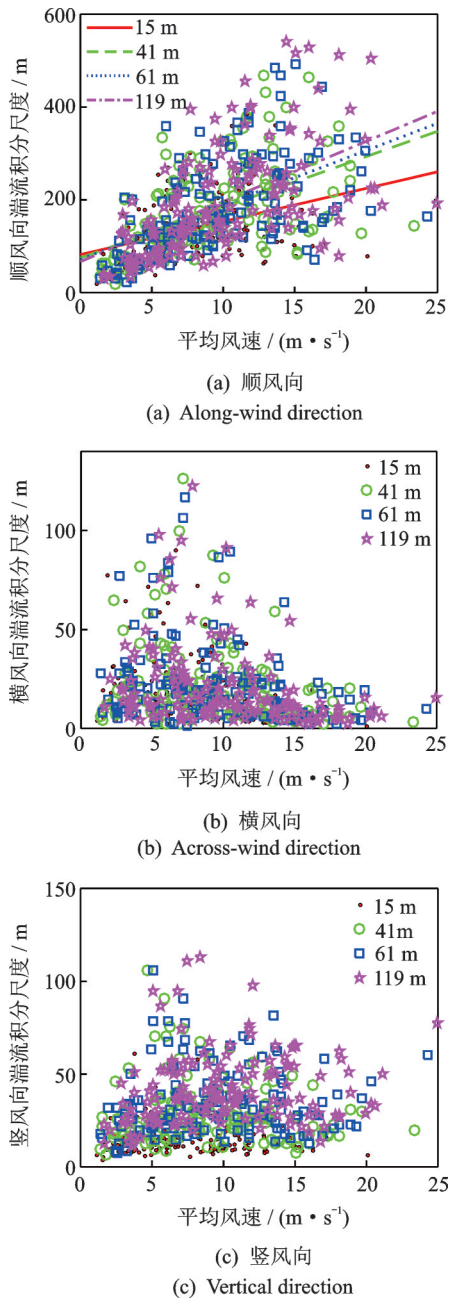


图9 湍流积分尺度随风速变化图

Fig.9 Relationship of turbulence integral scale and wind speed

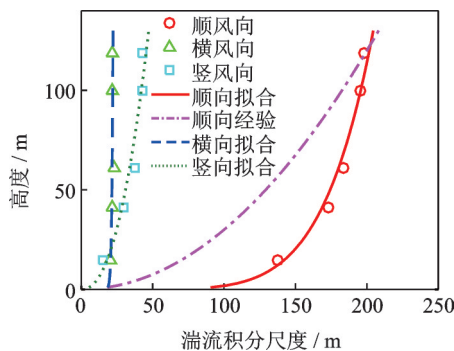


图10 湍流积分尺度剖面图

Fig.10 Turbulence integral scale profile

3.3 阵风因子

阵风系数也是风电工程中需要重点关注的参数,同样可以表征脉动风的强弱程度。通常定义为平均时距为3 s的最大风速 U_{3s} 与10 min平均风速的比值,即

$$G_i = \frac{U_{3s,i}}{U} \quad (i = u, v, w) \quad (10)$$

表2给出了观测期间各向湍流强度实测结果汇总,可以看出,在近地面各方向阵风因子比值与高度关系不大,顺风向、横风向、竖风向阵风因子平均值分别为1.715,0.861和0.558,各分量比值大致为1:0.502:0.326,顺风向阵风因子都大于1,明显大于其余两个阵风因子分量。

表2 阵风因子汇总表
Tab.2 Values of Gust factor

H/m	阵风因子平均值			$G_u : G_v : G_w$
	G_u	G_v	G_w	
15	1.779	0.942	0.429	1:0.524:0.235
41	1.729	0.881	0.549	1:0.497:0.305
61	1.696	0.862	0.582	1:0.492:0.330
100	1.692	0.809	0.605	1:0.469:0.343
119	1.678	0.809	0.625	1:0.470:0.356
平均值	1.715	0.861	0.558	1:0.502:0.326

顺风向阵风因子与湍流强度的经验表达式为

$$G_u = 1 + cI_u^d \ln(T/t) \quad (11)$$

其中: T 为平均风速时距,即10 min; t 为阵风风速时距,取为3 s; c 和 d 为常数(Cao等^[15]建议 $c=0.5$, $d=1.15$;Ishizaki^[16]建议 $c=0.5$, $d=1$;Choi^[17]建议 $c=0.62$, $d=1.27$)。

图11给出了15 m和100 m高度基于实测数据得到的顺风向阵风因子与湍流强度的变化关系,与经验结果进行对比发现,Ishizaki和Choi建议的经验计算结果均能较好地反映阵风因子和湍流强度之间的变化趋势。基于式(11)对实测结果进行了最小二乘拟合,得到了最佳的拟合参数, c 和 d 的拟合值在15 m和100 m高度处分别为0.594和1.253,0.519和1.136。

由图12可以看出:在竖风向上,阵风因子随着湍流强度的增大而增大,通过最小二乘法拟合,发现竖风向线性函数的适应性较好,但在高度上拟合曲线倾斜度并无规律性变化;在横风向上,阵风因子与湍流强度的相关性较差,分布趋势不明显。

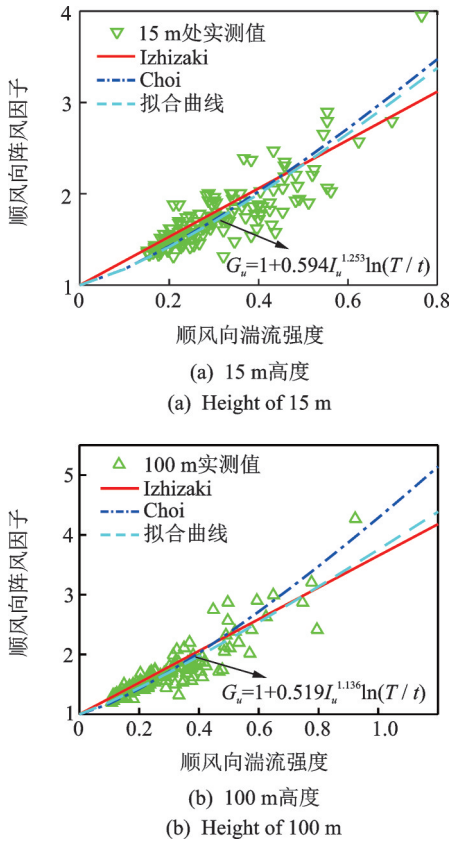


图 11 顺风向湍流强度与阵风因子关系图
Fig.11 Relationship of turbulence intensity and gust factor

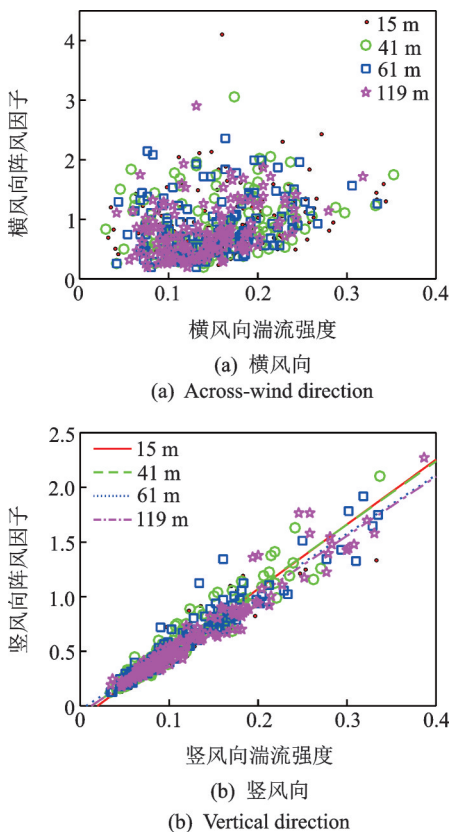


图 12 湍流强度与阵风因子关系图
Fig.12 Relationship of turbulence intensity and gust factor

3.4 脉动风速谱

脉动风速谱包括顺风向、横风向及竖风向脉动风速谱,能够清晰展示各向脉动风能量在频率域的分布,也是风电工程抗风设计的重要参考指标。根据 Kolmogrove 理论^[18],功率谱密度函数统一表示为

$$\frac{nS_u(n, z)}{\sigma_u^2} = \frac{P_1 f^{(P_2 P_4 - \frac{2}{3})}}{(1 + P_2 f^{P_3})^{P_4}} \quad (12)$$

其中: P_1, P_2, P_3, P_4 为需要拟合的参数,取值均大于 0; n 为脉动频率; f 为相似律坐标或者莫宁坐标。

基于实测数据对式(12)进行拟合,并用式(13)衡量实测谱与经验谱或拟合谱之间吻合程度

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \left(\frac{F^i - F_0^i}{F_0^i} \right)^2 \quad (13)$$

其中: $F = nS(n)/\sigma^2$, $S(n)$ 为经验风谱值或拟合谱值; $F_0 = nS_0(n)/\sigma^2$, $S_0(n)$ 为实测风谱值。

图 13 给出了 41 m 和 100 m 高度处各向功率谱密度函数变化曲线,从图中可以看出,顺风向功率谱密度函数略大于横风向和竖风向功率谱密度函数值,高频部分能量波动幅度较大。由图 14 可见, Kaimal 经验谱与 Vor karman 经验谱明显低于实测

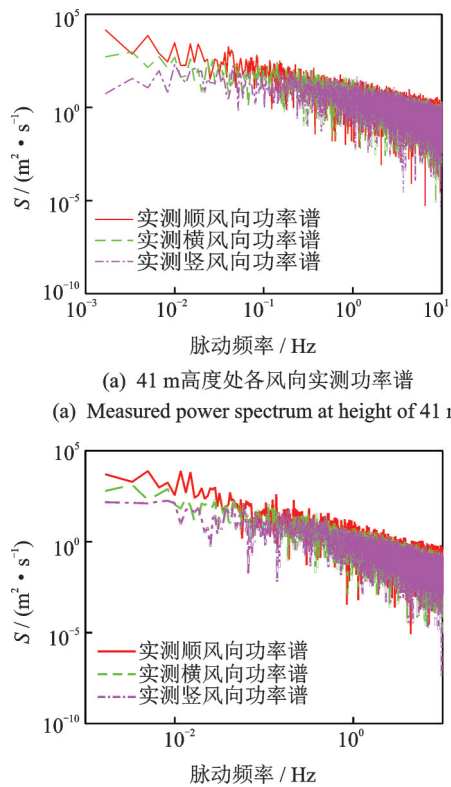


图 13 实测功率谱对比图
Fig.13 Contrast diagram of measured wind speed spectrum

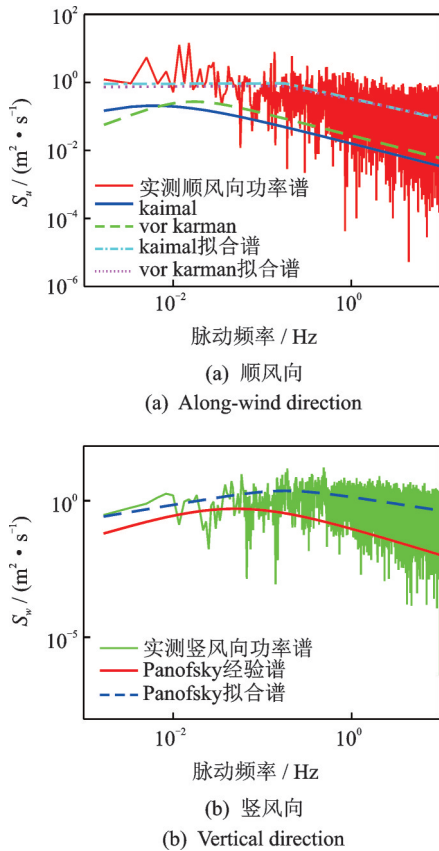


图 14 大风时段脉动风速功率谱

Fig.14 Power spectrum of fluctuating wind speed components during windy period

顺风向风谱值, Panofsky 经验谱在低频段与实测功率谱比较接近, 高频段吻合程度较差。通过式(12)对实测谱进行拟合, 对原始谱进行了改进, 对比结果如表 3 所示。

表 3 脉动风速谱的参数拟合结果

Tab.3 Parameter fitting results of wind speed spectrum

参数	P_1	P_2	P_3	P_4	原始谱 偏差 δ	拟合谱 偏差 δ
Vor Karman	0.886	0.001	87.089	0.007	0.170	0.118
Kaimal	8.555	59.773	1.274	0.145	0.165	0.120
Panofsky	0.802	1.357	1.919	0.548	1.468	0.811

4 结论

1) 各高度纵向湍流度实测结果均较欧洲规范和日本规范的规定都偏大, 与 ESDU 经验值相比数值又明显偏小, 并对实测数据进行拟合得到了各分量湍流度剖面的经验公式。

2) Ishizaki 和 Choi 建议的经验公式能较好地反

映顺风向阵风因子与湍流强度的变化关系, 并对实测得到的阵风因子和湍流强度结果进行参数拟合。

3) 顺风向湍流强度随湍流积分尺度的增大而减小, 服从指数分布; 横风向湍流强度随湍流积分尺度的增大而增大, 服从幂函数分布, 凹面向下。

4) Kaimal 经验谱与 Vor karman 经验谱明显低于实测顺风向功率值, 竖向脉动风速功率谱与 Panofsky 经验谱在高频段有所偏差。通过最小二乘法拟合后的经验谱与实测谱更加吻合。

参 考 文 献

[1] 梁枢果, 彭晓辉, 王磊, 等. 良态风作用下超高层建筑风压特性现场实测与风洞试验对比研究[J]. 土木工程学报, 2015(5):35-43.
LIANG Shuguo, PENG Xiaohui, WANG Lei, et al. Comparative study between field measurement and wind tunnel test for wind pressure on Wuhan International Stock Building[J]. China Civil Engineering Journal, 2015(5):35-43. (in Chinese)

[2] 王磊, 王永贵, 梁枢果, 等. 内陆良态风与沿海台风风特性实测对比研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(1):59-64.
WANG Lei, WANG Yonggui, LIANG Shuguo, et al. Comparative study on field measurement of wind characteristics between inland normal wind and coastal typhoon wind[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(1):59-64. (in Chinese)

[3] TORIUMI R, KATSUCHI H, FURUYA N. A study on spatial correlation of natural wind [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2000, 87(2):203-216.

[4] MASTERS F J, TIELEMAN H W, BALDERRAMA J A. Surface wind measurements in three Gulf Coast hurricanes of 2005 [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2010, 98(10):533-547.

[5] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1962, 88(376):197-198.

[6] 蒋磊, 李锦华, 李春祥. 基于现场实测的大跨度膜结构风场特性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2019(1):68-77.
JIANG Lei, LI Jinhua, LI Chunxiang. Wind field characteristics of large span membrane structure based on field measurement [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019(1):68-77. (in Chinese)

- [7] 王旭,黄鹏,顾明,等.台风“米雷”近地层脉动风特性实测研究[J].土木工程学报,2013(7):28-36.
WANG Xu, HUANG Peng, GU Ming, et al. Research on fluctuating wind characteristics near ground of typhoon 'Soulik' by field measurement [J]. China Civil Engineering Journal, 2013(7):28-36. (in Chinese)
- [8] 黄鹏,戴银桃,王旭,等.上海沿海地区近地风脉动风速谱及相干性研究[J].工程力学,2014,31(4):126-133.
HUANG Peng, DAI Yintao, WANG Xu, et al. Field measurement on power spectra and coherence characteristics of near-ground wind in Shanghai coastal area [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 31(4):126-133. (in Chinese)
- [9] 王浩,茅建校,杨敏,等.润扬大桥桥区实测台风非平稳特性研究[J].振动工程学报,2016,29(2):298-304.
WANG Hao, MAO Jianxiao, YANG Min, et al. Study on non-stationary characteristics of measured typhoons at Runyang Suspension Bridge site [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(2):298-304. (in Chinese)
- [10] 王浩,程怀宇,茅建校,等.基于结构健康监测的苏通大桥实测强风演变功率谱[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(6):838-844.
WANG Hao, CHENG Huaiyu, MAO Jianxiao, et al. Evolutionary power spectral density of recorded strong wind at sutong bridge based on structural health monitoring [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2015, 43(6):838-844. (in Chinese)
- [11] ELLIOTT D L, BARNARD J C. Observations of wind turbine wakes and surface roughness effects on wind flow variability [J]. Solar Energy, 1990, 45(5):265-283.
- [12] 戴靠山,盛超.风力发电机台风荷载响应分析[J].结构工程师,2015,31(6):98-106.
DAI Kaoshan, SHENG Chao. Wind turbine tower structural responses under typhoon loads [J]. Journal of Structural Engineers, 2015, 31(6):98-106. (in Chinese)
- [13] NREL. NWTC information portal [DB/OL]. (2015-04-01) [2018-06-06]. <https://nwtc.nrel.gov/>.
- [14] DAVENPORT A G. Rationale for determining design wind velocities [J]. Proc Asce, 1960, 86:39-68.
- [15] CAO S, TAMURA Y, KIKUCHI N, et al. Wind characteristics of a strong typhoon [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2009, 97(1):11-21.
- [16] ISHIZAKI H. Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon-prone regions [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1983, 13(1):55-66.
- [17] CHOI E C C. Gradient height and velocity profile during typhoons [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1984, 13(1):31-41.
- [18] 徐安,傅继阳,赵若红,等.土木工程相关的台风近地风场实测研究[J].空气动力学学报,2010,28(1):23-31.
XU An, FU Jiyang, ZHAO Ruohong, et al. Field measurements of typhoons according to civil engineering research [J]. Journal of Aerodynamics, 2010, 28(1):23-31. (in Chinese)



第一作者简介:王雪平,男,1976年9月生,硕士、副教授。主要研究方向为结构健康监测、地理信息系统及其应用。
E-mail:wangxueping@lut.cn

通信作者简介:李万润,男,1985年12月生,博士、副教授。主要研究方向为结构健康监测及损伤识别。
E-mail:ce_wrli@lut.cn