

上海环球金融中心顶部台风“灿鸿”风速实测

黄子逢, 顾明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于上海环球金融中心顶部(494 m)采集到的台风“灿鸿”风速数据,对平均风速、湍流强度、阵风因子和峰值因子进行了分析。用广义风速谱拟合的方法计算湍流积分尺度,运用拟合参数将风速谱与 Von Karman 谱进行对比。研究结果表明:10 min 最大平均风速与 1 h 平均风速,3 s 最大平均风速与 10 min 平均风速均有较好的线性关系;顺风向和横风向阵风因子与湍流强度之间都满足线性关系;顺风向和横风向湍流积分尺度随 10 min 平均风速的增加而增加;本次实测得到的风速谱与 Von Karman 谱有一定差距。

关键词: 台风“灿鸿”;现场实测;湍流积分尺度;风速谱拟合

中图分类号: TU317.2; TU312.1

文献标志码: A

Field Measurement of Wind Characteristics of Typhoon Chan-hom on Shanghai World Financial Center

HUANG Zifeng, GU Ming

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the measured data of typhoon Chan-hom recorded atop Shanghai World Financial Center (494 m), the wind characteristics, such as mean wind speed, turbulence intensities, gust factors, and peak factors were analyzed. Turbulence integral scales were calculated by fitting a general spectral form to the measured wind velocity data. Wind speed spectra were compared with Von Karman spectra by using fitting parameters. It is shown that the correlation between the maximum 10 min mean wind speeds within 1 hr and the 1 hr mean wind speed, as well as that between the maximum 3 s mean wind speeds within 10 min and the 10 min mean wind speeds, both have a good linear relationship; the longitudinal and lateral gust factors are both linear with the turbulence intensities; the longitudinal and lateral turbulence integral

scales increase as the mean wind speeds increase; and there exist some differences between the measured wind speed spectra and the Von Karman spectra.

Key words: typhoon Chan-hom; field measurement; integral length scale; fitting wind speed spectrum

台风是一种具有很强破坏力的灾害性天气系统。对于超高层柔性结构,风荷载在总荷载中往往起控制作用。而建有大量 200~600 m 高层建筑、高耸结构的我国东南沿海地区是台风登陆的多发区。因此,与风荷载密切相关的风特性研究的重要性日益凸显。风速现场实测是研究高层建筑风特性的重要方法,国外一些国家通过风速实测建立了本地区风特性数据库,如挪威的 Froya 数据库^[1];加拿大和英国的近海观测数据库等。美国 Sparks、日本 Kato 和 Ohukuma 等近些年来进行的大规模观测工作也得到了比较完整的分析结果^[2]。在中国, Li 等^[3]、An 等^[4]、Quan 等^[5]、Xu 等^[6]和顾明等^[2,7]在香港地区和大陆沿海地区进行了台风和良态风的高空实测研究工作。由于上海的纬度相对较高,到达上海的台风数量较少,上海地区台风高空实测数据比较稀缺,因此上海地区进行台风高空实测对了解中国东部高空风特性及扩充上海地区风速数据库非常重要。

本文基于上海环球金融中心顶部(494 m)采集到的台风“灿鸿”风速数据,对平均风速、湍流强度、阵风因子、峰值因子、湍流积分尺度和风速谱进行了详细的分析。

1 台风“灿鸿”

2015年6月30日,2015年第9号台风“灿鸿”

收稿日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(90715040,91215302);土木工程防灾国家重点实验室课题(SLDRCE15-A-04)

第一作者: 黄子逢(1989—),男,博士生,主要研究方向为高层建筑风速及响应实测分析。E-mail: zifengh22@163.com

通讯作者: 顾明(1957—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为结构抗风、数值风洞以及结构振动控制。

E-mail: minggu@tongji.edu.cn

(英文名 Chan-hom)在太平洋海面上生成. 7 月 11 日 16:40,“灿鸿”以强台风级别在浙江省舟山朱家尖登陆,随后“灿鸿”沿着上海东部海面向北偏东方向移动,强度由强台风逐渐减为台风. 图 1 为台风“灿鸿”路径图.

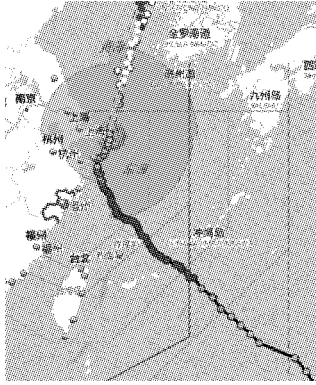
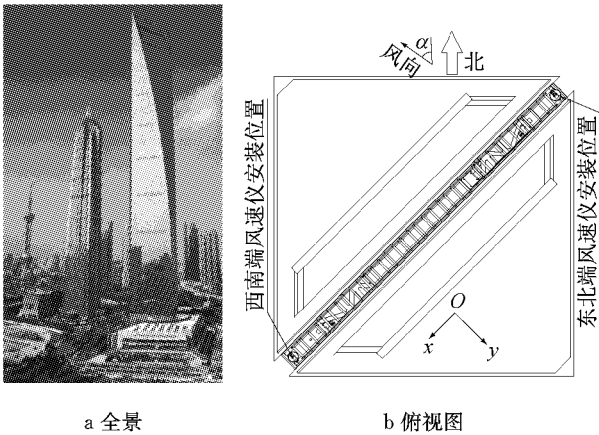


图 1 台风“灿鸿”路径
Fig.1 Path of typhoon Chan-hom

2 上海环球金融中心顶部风速实测概况

如图 2 所示,上海环球金融中心位于上海陆家嘴区,其高度为 494 m,地上共有 101 层. 其周围竖立着大量高层及超高层建筑,金茂大厦(420.5 m)位于环球西北部,上海中心(632 m)位于环球西南部,因此环球周边地貌极其复杂.



a 全景 b 俯视图
图 2 上海环球金融中心全景及俯视图

Fig.2 Overview and aerial view of Shanghai World Financial Center

两个 Windmaster Pro 超声波风速仪(图 2,图 3)分别安装于上海环球金融中心楼顶的东北角和西南角(高 494 m),其水平距离为 71.6 m. 风速仪三个分量 U, V, W 对应的方向分别为正北、正西、竖直向上,风向角以指向正北方向为 0° ,按俯视逆时针方向

递增,如图 3 所示. 风速量程为 $0.01 \sim 65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,采样频率为 10 Hz. 由于环球建筑本身、擦窗机及顶部矮女儿墙会对气流产生影响,根据 CFD (computational fluid dynamics, 计算流体力学)模拟可知,当来流方向在以东北角和西南角连线为平分线 22.5° 范围内可忽略上述影响,即东北端有效风向角为 $112.5^\circ \sim 157.5^\circ$,西南端有效风向角为 $292.5^\circ \sim 337.5^\circ$.

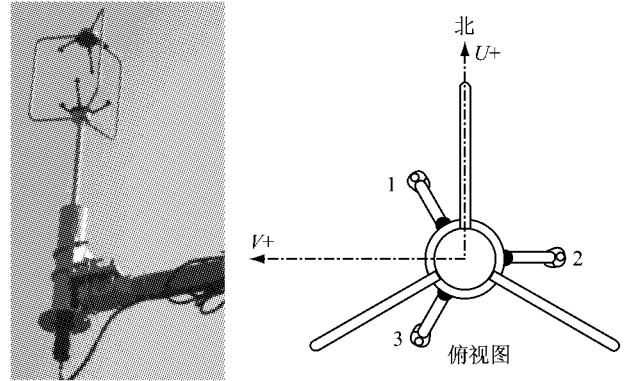


图 3 风速仪及其 U, V 轴定义
Fig.3 WindMaster Pro ultrasonic anemometer and its definition of U, V axes

3 台风“灿鸿”风特性分析

本文选取 2015 年 7 月 10 日 18:30 至 2015 年 7 月 12 日 15:30 共 45 h 的风速时程作为分析样本. 由于风速竖向分量对高层建筑影响较小,本文仅对水平风速进行分析. 风速仪 U, V 方向对应的风速分量分别为 $U(t), V(t)$. 西南端 10 min 平均风向角不在有效范围内,本文只对东北端的数据进行分析.

3.1 平均风速和平均风向角

根据矢量分解法,顺风向平均风速 \bar{U} 和平均风向角 ϕ 计算公式为

$$\bar{U} = \sqrt{U(t)^2 + V(t)^2}$$

$$\cos \phi = \frac{U(t)}{\bar{U}} \tag{1}$$

顺风向和横风向脉动风速分量 $u(t), v(t)$ 的计算公式为

$$u(t) = U(t) \cos \phi + V(t) \sin \phi - \bar{U}$$

$$v(t) = -U(t) \sin \phi + V(t) \cos \phi \tag{2}$$

图 4 和图 5 为环球顶部东北端顺风向 10 min 平均风速和 10 min 平均风向角变化情况. 由图 4 可知,东北端 10 min 平均风速由 $16.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 开始逐渐增加,最大风速达到 $26.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 平均风速在 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右持续了 7 h,随后逐渐减小,最终减小

到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 由图 5 可知,东北端 10 min 平均风向角在前 26 h 内稳定在 120° 左右,然后随着台风向北移动,风向角逐渐增加,最后稳定在 260° 左右.

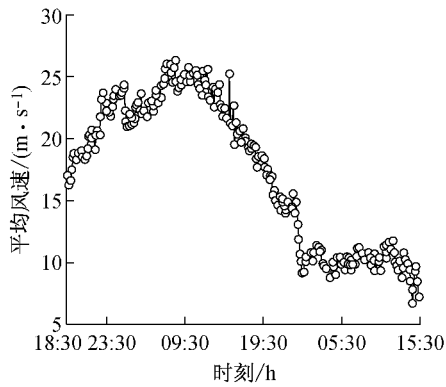


图 4 10 min 平均风速
Fig.4 10 min mean wind speed

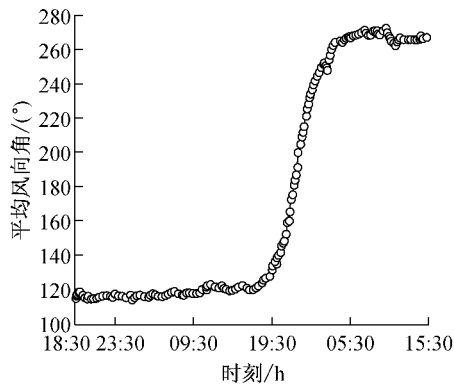


图 5 10 min 平均风向角
Fig.5 10 min mean wind direction

假定本次台风平均风速剖面满足指数率,其公式为

$$U(z) = U_G(z/H_G)^\alpha \quad (3)$$

式中: H_G 为梯度风高度; U_G 为梯度风速; α 为粗糙指数. 由《建筑结构荷载规范》^[8]可知,B类地貌中 H_G 取为 350 m, α 取为 0.15;D类地貌中 H_G 取为 550 m, α 取为 0.3.

将环球金融中心所在的陆家嘴地区取为 D类地貌,实测得到的台风最大 10 min 平均风速 $26.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为环球顶部 494 m 的 10 min 平均风速. 根据梯度风速不随地貌改变这一条件,由式(3)可计算得本次台风作用下,上海地区 B类地貌,10 m 高度最大 10 min 基本风速 v_{10} 为 $15.96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对应的基本风压为 $\omega = 0.5\rho v_{10}^2 = 0.5 \times 1.25 \times 15.96^2 / 1000 = 0.159 \text{ kPa}$, ρ 为空气密度. 假定基本风压满足极值 I 型分布,根据《建筑结构荷载规范》^[8]给出的上海地区 10 年和 100 年重现期的基本风压 $\omega_{10} = 0.4 \text{ kPa}$, $\omega_{100} = 0.6 \text{ kPa}$,及基本风压 ω_R 与其对应重现期 R 的

关系为

$$\omega_R = \omega_{100} + (\omega_{100} - \omega_{10})(\ln R / \ln 10 - 1) \quad (4)$$

可以算出由本次台风实测结果推算的上海地区 10 m 高度基本风压 $\omega = 0.159 \text{ kPa}$ 对应的重现期为 3 年.

图 6 为 1 h 内时距为 3 s,10 min 和 1 h 时的平均风速. 1 h 平均风速比 10 min 最大平均风速略小,而 3 s 最大平均风速明显大于 10 min 最大平均风速,其最大值可达到 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 三个平均时距平均风速的变化趋势一致.

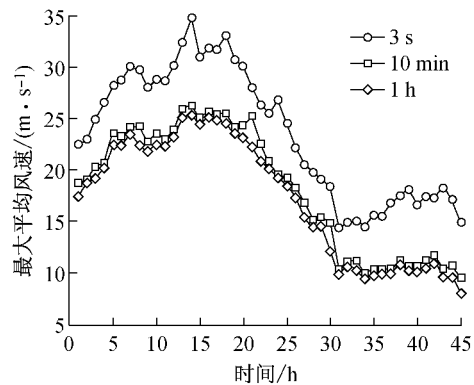


图 6 1 小时内不同平均时距最大平均风速
Fig.6 Maximum mean wind speeds in 1 hr for different durations

不同平均时距风速的相互关系对于结构抗风设计具有重要参考价值,这里取平均风速大于 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速段进行分析. 图 7 和图 8 分别为 3 s 最大平均风速随 10 min 平均风速变化关系和 10 min 最大平均风速随 1 h 平均风速变化关系,两图同时给出了变量之间的线性拟合关系. 结果表明,10 min 最大平均风速与 1 h 平均风速有很好的线性关系: $y = 1.049x + 0.204$,10 min 平均风速的标准差较小,大部分都小于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 3 s 最大平均风速与 10 min 平均风速也呈现线性关系: $y = 1.206x + 0.693$,3 s 平均风速的标准差较大,变化范围是 $1.5 \sim 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.2 脉动风特性分析

本文取 2015 年 7 月 10 日 18:30 至 2015 年 7 月 11 日 20:40 东北端风向角在有效范围内风速数据进行脉动风特性分析.

3.2.1 湍流强度与阵风因子

湍流强度反映了脉动风的相对强度. 湍流强度定义为平均时距内脉动风的标准差与平均风速的比值,这里平均风速分析时距取为 10 min (下文中若无特别说明,平均时距均取 10 min):

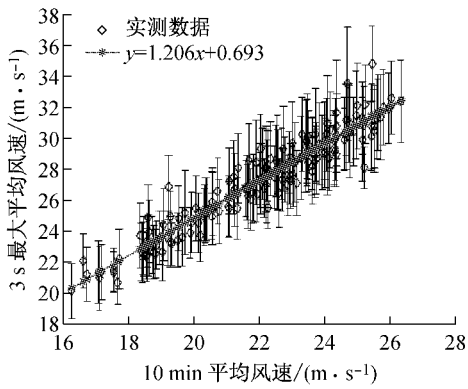


图 7 3 s 最大平均风速随 10 min 平均风速变化关系

Fig.7 Maximum 3 s mean wind speeds versus 10 min mean wind speeds

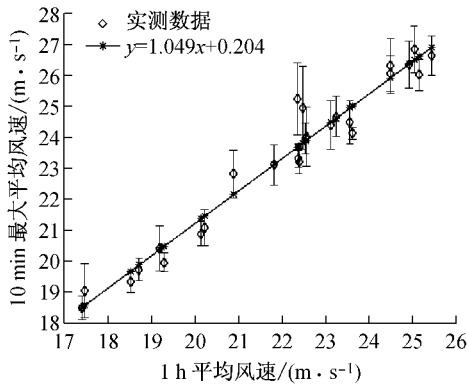


图 8 10 min 最大平均风速随 1 h 平均风速变化关系

Fig.8 Maximum 10min mean wind speeds versus 1 h mean wind speeds

$$I_i = \sigma_i / \bar{U}, i = u, v \quad (5)$$

式中： $\sigma_i (i = u, v)$ 表示顺风向和横风向脉动风速分量的标准差。

图 9 为顺风向和横风向湍流强度 I_u, I_v 随 10 min 平均风速变化情况。由图可知, I_u 变化范围是 $[0.061, 0.155]$, 均值为 0.107; I_v 变化范围是 $[0.040, 0.158]$, 均值为 0.066。 $I_u : I_v = 1 : 0.62$ 。其中 I_u 随平均风速的增加没有明显的变化趋势, 而 I_v 随着平均风速的增加而逐渐减小。An 等^[4]和 Quan 等^[5]分别分析了台风“梅花”作用下和良态风下环球顶部脉动风的湍流强度随 10 min 平均风速变化情况。“梅花”作用下 10 min 平均风速范围是 $8 \sim 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 良态风下 10 min 平均风速范围是 $8 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。表 1 为三次实测中湍流强度结果的对比。从表 1 可以看出, 台风“灿鸿”测得的两个方向湍流强度的变化区间和均值都要比“梅花”测得的湍流强度小, 而“灿鸿”中 10 min 平均风速的变化范围 ($16 \sim 26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 比“梅花”大。综合这两次台风实测结果可得,

I_u, I_v 随着 10 min 平均风速的增加而减小。Quan 等^[5]的实测结果表明, 在良态风下, 环球顶部 I_u, I_v 随着 10 min 平均风速的增加而减小, 其结果与两个台风综合分析的结果一致。在日本规范(2004)^[9]中, 相同高度(494 m), 相同地貌(V类)的顺风向湍流强度值为 0.11, 与本次实测结果(0.107)一致。中国规范^[8]中, 相同高度(494 m), 相同地貌(D类)的顺风向湍流强度值为 0.12, 与本次实测结果也很接近。

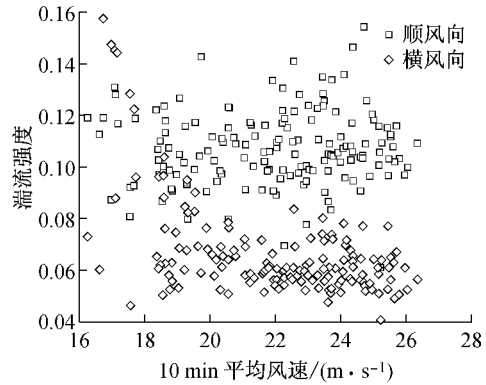


图 9 湍流强度与 10 min 平均风速关系

Fig.9 Turbulence integral scales versus 10 min mean wind speeds

表 1 湍流强度对比

Tab.1 Comparison of turbulence intensities					
实测工作	风场类型	I_u 变化范围	I_u 均值	I_v 变化范围	I_v 均值
文献[4]	台风“梅花”	0.05~0.29	0.140	0.04~0.26	0.130
文献[5]	季风	0.01~0.30	0.085	0.01~0.25	0.075
本文	台风“灿鸿”	0.06~0.15	0.107	0.04~0.16	0.066

阵风因子反映了阵风风速与平均风速的相对大小, 阵风因子定义为阵风持续时间 t_g (本文取 3 s) 内最大平均风速与分析时距(10 min)平均风速 U 的比值, 即

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

$$G_v = \frac{\max(\overline{v(t_g)})}{\bar{U}} \quad (6)$$

式中： $\max(\overline{u(t_g)})$, $\max(\overline{v(t_g)})$ 分别为顺风向、横风向阵风持续时间 t_g 内最大的脉动平均风速。

图 10 为顺风向、横风向阵风因子 G_u, G_v 随 10 min 平均风速变化情况。由图可知, G_u 变化范围是 $[1.112, 1.385]$, 均值为 1.226; G_v 变化范围是 $[0.088, 0.705]$, 均值为 0.177。 $G_u : G_v = 1 : 0.14$ 。其中 G_u 随平均风速的增加没有明显的变化趋势, 而 G_v 随着平均风速的增加而逐渐减小。

An 等^[4]和 Quan 等^[5]分别分析了台风“梅花”作用下和良态风下环球顶部阵风因子随 10 min 平均风速的变化情况。从表 2 可以看出, “灿鸿”与“梅花”

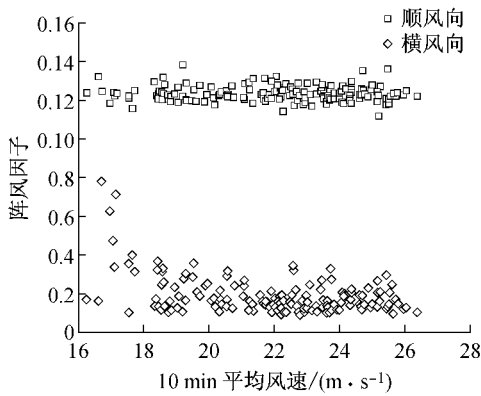


图 10 阵风因子与 10 min 平均风速关系

Fig.10 Gust factors versus 10 min mean wind speeds

表 2 阵风因子对比

Tab.2 Comparison of gust factors

实测工作	风场类型	平均风速范围/(m·s ⁻¹)	G _u 变化范围	G _u 均值	G _v 变化范围	G _v 均值
文献[4]	台风“梅花”	8~17	1.11~1.64	1.28	0.10~0.73	0.31
文献[5]	季风	8~22	1.02~1.59	1.15	0.01~0.62	0.17
本文	台风“灿鸿”	16~26	1.11~1.38	1.23	0.09~0.70	0.18

$$G_u(t_g) = 1 + k_1 I_u^{k_2} \ln(T/t_g) \quad (7)$$

式中: T 为平均时距, 取为 10 min; t_g 为阵风持续时间, 取为 3 s.

顺风向、横风向阵风因子与湍流强度之间关系的线性拟合结果分别为 $G_u = 1.66I_u + 1.05$, $G_v = 4.57I_v - 0.13$. 通过式(7)对顺风向、横风向阵风因子与湍流强度进行非线性拟合, 结果分别为 $G_u = 1 + 0.26I_u^{0.82} \ln(600/3)$, $G_v = 2.17I_v^{1.56} \ln(600/3)$. 由图 11 可知, 两个方向非线性拟合结果与线性拟合结果均吻合较好, 这说明该高度上顺风向、横风向阵风因子与湍流强度都满足线性关系.

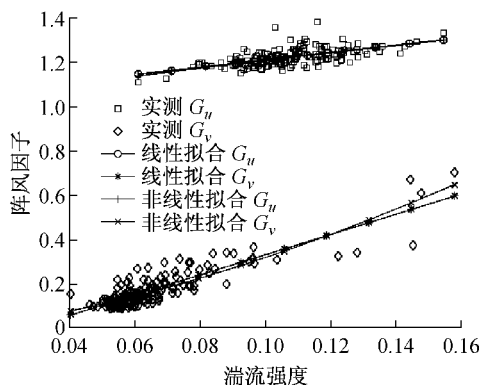


图 11 湍流强度与阵风因子

Fig.11 Gust factors versus turbulence intensities

3.2.2 峰值因子

峰值因子同样表现了脉动风速的瞬时强度, 其定义式为

$$g_u = (\hat{U}_{t_g} - \bar{U}) / \sigma_u \quad (8)$$

测得的两个方向阵风因子变化区间的下限一致, “灿鸿”测得的变化区间上限和均值都要比“梅花”测得的结果小. 综合这两次台风实测结果可得, G_u, G_v 随着 10 min 平均风速的增加而减小. Quan 等^[5]的实测结果表明, 在良态风下, 环球顶部 G_u, G_v 随着 10 min 平均风速的增加而减小, 其结果与两个台风综合分析的结果一致.

图 11 为顺风向、横风向阵风因子与湍流强度之间的关系. 由图可知, 两个方向的阵风因子均随着湍流强度的增加而增加. Cao 等^[10]给出了阵风因子和湍流强度关系非线性拟合的公式

式中: \hat{U}_{t_g} 是平均时距(10 min)内持续时间 t_g (3 s) 最大的平均风速; σ_u 是平均时距内脉动风速 $u(t)$ 标准差.

图 12 为峰值因子随 10 min 平均风速变化情况. 峰值因子的变化区间为 [1.57, 3.32], 均值为 2.12. An 等^[4]测得台风“梅花”的峰值因子变化区间为 [1.37, 3.13], 均值为 2.11. 本文实测峰值因子的变化区间和均值比“梅花”的结果略高, 综合两次台风的实测结果可知, 峰值因子随 10 min 平均风速的增加有增加的趋势.

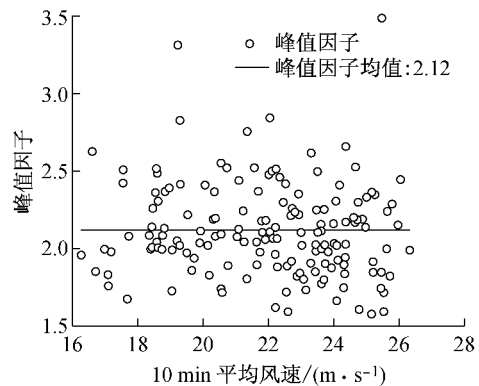


图 12 峰值因子随 10 min 平均风速变化

Fig.12 Peak factors versus 10 min mean wind speeds

3.2.3 湍流积分尺度和风速谱

本文用实测风速对广义谱进行拟合来求湍流积分尺度, 根据各向同性假设和相关函数与功率谱互为傅里叶变换这两个条件, 推得顺风向和横风向广义风速分别为

$$\begin{cases} \frac{nS_i(n)}{\sigma_i^2} = \frac{4f}{(1 + Gf^b)^c}, i = u \\ \frac{nS_i(n)}{\sigma_i^2} = \frac{4f(1 + F(1 + \gamma\beta)f^\beta)}{(1 + Ff^\beta)^{\gamma+1}}, i = v \\ f = \frac{nL_i}{U} \end{cases} \quad (9)$$

式中： S_i 为顺风向和横风向风速谱； σ_i 是两个方向脉动风速的标准差； G, b, c 为顺风向广义谱待拟合参数； F, γ, β 为横风向广义谱待拟合参数； U 为顺风向平均风速； L_i 为顺风向和横风向湍流积分尺度； n 为频率，Hz。

图 13 为顺风向、横风向湍流积分尺度随平均风速变化的规律。 L_u 变化区间为 [74 m, 392 m]，均值为 187 m； L_v 变化区间为 [27 m, 183 m]，均值为 72 m。 $L_u : L_v = 1 : 0.38$ 。An 等^[4] 计算台风“梅花”湍流积分尺度的结果为： L_u 均值为 217.60 m， L_v 均值为 117.98 m。Quan 等^[5] 计算了环球顶端良态风的湍流积分尺度： L_u 均值为 200 m， L_v 均值为 160 m，与 An 等和 Quan 等的结果对比可知，本次台风“灿鸿”的湍流积分尺度偏小。

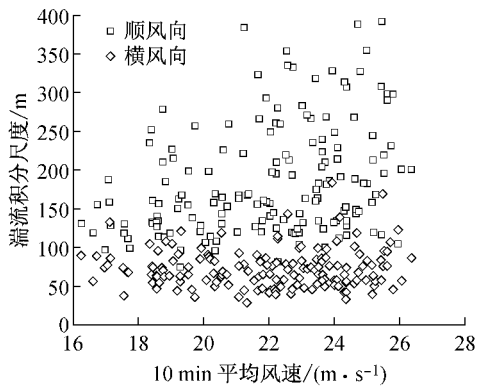


图 13 湍流积分尺度随 10 min 平均风速变化

Fig. 13 Turbulence integral scales versus 10min mean wind speeds

本文将广义风速谱拟合参数与 Von Karman 谱的参数进行对比，Von Karman 谱公式为

$$\begin{cases} \frac{nS_i(n)}{\sigma_i^2} = \frac{4f}{(1 + 70.8f^2)^{5/6}}, i = u \\ \frac{nS_i(n)}{\sigma_i^2} = \frac{4f(1 + 755.2f^2)}{(1 + 283f^2)^{11/6}}, i = v \\ f = \frac{nL_i}{U} \end{cases} \quad (10)$$

图 14 和图 15 为顺风向和横风向实测风速谱 (黄色实线)、拟合谱 (绿色虚线)、平均拟合谱和对应的 Von Karman 谱。由图 14 可以看出，对于顺风向风速谱，平均拟合谱与 Von Karman 谱在低频区一

致；平均拟合谱的峰值比 Von Karman 谱的略大，峰值对应的频率比 Von Karman 谱的略小；在高频区，平均拟合谱小于 Von Karman 谱。顺风向风速谱参数 G 的变化区间为 [12.38, 69.53]，均值为 42.96； b 的变化区间为 [1.02, 28.41]，均值为 4.17； c 变化区间为 [0.06, 2.36]，均值为 0.65，这与 Von Karman 谱的 70.8, 2, 5/6 有一定差距。由上述分析可知，此次台风顺风向风速谱与 Von Karman 谱有一定差异。

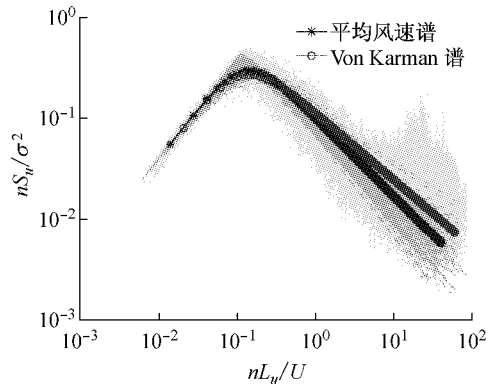


图 14 顺风向量纲一化风速谱

Fig. 14 Normalized spectra of longitudinal fluctuating wind speeds

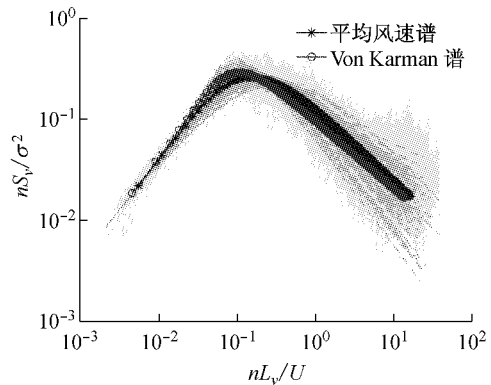


图 15 横风向量纲一化风速谱

Fig. 15 Normalized spectra of later fluctuating wind speeds

由图 15 可以看出，对于横风向风速谱，实测与拟合风速谱在低频区均比较集中，平均拟合谱的峰值比 Von Karman 谱峰值大，峰值频率比 Von Karman 谱峰值频率大。在高频区平均拟合谱要比 Von Karman 谱小。横风向平均拟合谱的参数 $F(1 + \gamma\beta)$ ， F, γ, β 分别为 28.0, 10.2, 1.38, 1.26，这与 Von Karman 谱的 755.2, 283, 11/6, 2 有较大差距。由上述分析可知，此次台风横风向风速谱与 Von Karman 谱也有一定差异。

Kolmogorov 通过量纲分析得出量纲一风速谱在惯性子区应该满足 $-2/3$ 率,即 $bc-1=2/3$. 图 16 为拟合参数 $bc-1$ 频率分布图. 由图可知, $bc-1$ 变化区间为 $[0.5, 1.2]$, 均值为 0.79, 比 $2/3$ 大, 且有 80% 的数据大于 $2/3$, 从统计的角度来看, 本次台风顺风向风速并不满足 $-2/3$ 率. Cao 等^[10] 在其文献中提到, 有些台风风速谱不满足 Von Karman 谱.

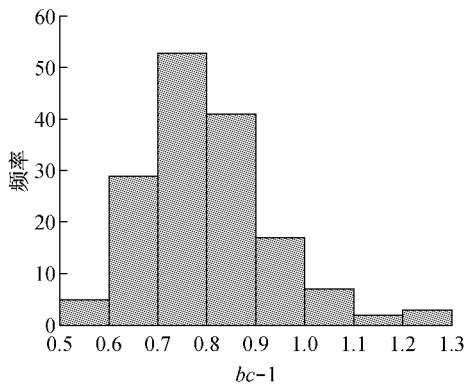


图 16 参数 $bc-1$ 频率分布

Fig. 16 Frequency distribution of parameter $bc-1$

4 结论

(1) 10 min 最大平均风速与 1 h 平均风速有很好的线性关系: $y=1.049x+0.204$, 10 min 平均风速的标准差较小, 大部分都小于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 3 s 最大平均风速与 10 min 平均风速也呈线性关系: $y=1.206x+0.693$, 3 s 平均风速的标准差较大, 变化范围是 $[1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}]$.

(2) 顺风向和横风向湍流强度 I_u, I_v 均值分别为 0.107 和 0.066, $I_u : I_v = 1 : 0.62$. I_u 随平均风速的增加没有明显的变化趋势, 而 I_v 随着平均风速的增加而逐渐减小.

(3) 顺风向和横风向阵风因子 G_u, G_v 均值分别为 1.226 和 0.177, $G_u : G_v = 1 : 0.14$. G_u 随平均风速的增加没有明显的变化趋势, 而 G_v 随着平均风速的增加而逐渐减小.

(4) 顺风向和横风向阵风因子与湍流强度之间关系的线性拟合结果分别为 $G_u=1.66I_u+1.05$, $G_v=4.57I_v-0.13$. 两个方向非线性拟合结果与线性拟合结果均吻合较好, 表明该高度上顺风向和横风向阵风因子与湍流强度都满足线性关系.

(5) 峰值因子的变化区间为 $[1.57, 3.32]$, 均值

为 2.12.

(6) 顺风向和横风向湍流积分尺度 L_u, L_v 随着 10 min 平均风速的增加而增大, L_u, L_v 的均值分别为 187 m 和 72 m, $L_u : L_v = 1 : 0.38$.

(7) 在环球金融中心顶部测得的台风“灿鸿”的顺风向风速谱与 Von Karman 谱有一定差异.

参考文献:

- [1] Andersen O J, Løvseth J. The Frøya database and maritime boundary layer wind description[J]. *Marine Structures*, 2006, 19(2): 173.
- [2] 顾明, 匡军, 全涌, 等. 上海环球金融中心大楼顶部风速实测数据分析[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(12): 114.
GU Ming, KUANG Jun, QUAN Yong, et al. Field measurement of wind characteristics atop the Shanghai World Financial Center[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(12): 114.
- [3] Li Q S, Xiao Y Q, Fu J Y, et al. Full-scale measurements of wind effects on the Jin Mao building [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(6): 445.
- [4] An Y, Quan Y, Gu M. Field measurement of wind characteristics of Typhoon Muifa on the Shanghai World Financial Center [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 2012:1.
- [5] Quan Y, Wang S, Gu M, et al. Field measurement of wind speeds and wind-induced responses atop the shanghai world financial center under normal climate conditions [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013:1.
- [6] Xu Y L, Zhan S. Field measurements of Di Wang tower during typhoon York[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(1): 73.
- [7] 顾明, 匡军, 韦晓, 等. 上海环球金融中心大楼顶部良态风风速实测[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(11): 1592.
GU Ming, KUANG Jun, WEI Xiao, et al. Field measurement of wind speeds atop the Shanghai World Financial Center under normal climate conditions[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(11): 1592.
- [8] 中华人民共和国住建部. GB 5009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Housing and Construction Department of the People's Republic of China. GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [9] Jun Kanda. AIJ-RLB-2004 AIJ recommendations for loads on buildings[S]. Japan: Architecture Institute of Japan, 2004.
- [10] Cao S, Tamura Y, Kikuchi N, et al. Wind characteristics of a strong typhoon[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(1): 11.