

上海环球金融中心大楼顶部良态风风速实测

顾明¹, 匡军¹, 韦晓², 熊里军², 全涌¹

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市地震局, 上海 200062)

摘要: 对结构高度为 492 m 的上海环球金融中心大楼顶部实测到的良态强风时段下的平均风速和脉动风速数据进行了分析, 得到了 3 s、10 min 以及 1 h 时距下的平均风速值, 并对其进行了线性拟合. 结果表明, 10 min 平均风速与 3 s 平均最大(瞬时最大)风速的比值约为 0.876 8. 根据实测数据, 还分析了湍流度和阵风因子, 结果表明, 湍流度和阵风因子均随平均风速的增大而减小, 此外, 对比了部分时段内的实测脉动风速功率谱密度与 Von-Karman 谱, 两者较为吻合.

关键词: 实测; 平均风速; 脉动风速; 湍流度; 阵风因子; 功率谱密度

中图分类号: TH 212; TH 213.3

文献标识码: A

Field Measurement of Strong Wind Speed of Normal Climate on Top of Shanghai World Financial Center

GU Ming¹, KUANG Jun¹, WEI Xiao², XIONG Lijun², QUAN Yong¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Seismological Bureau of Shanghai, Shanghai 200062, China)

Abstract: The mean and fluctuating wind speed data of strong wind of normal climate measured on the top of Shanghai World Financial Center with a height of 492 m were analyzed. Mean wind speeds in different intervals of 3 s, 10 min and 1 hour were separately computed. The results showed that the averaged mean wind speed ratio between 10 min mean wind speed and 3 s maximum mean wind speed was approximately 0.876 8. The formulas for the ratios were then derived by using curve-fitting technique. The turbulence intensity, gust factor were also computed based on the measured data. The results indicate that both turbulence intensity and gust factor decrease with the increase of mean wind speed. In addition,

the power spectral densities of fluctuating wind speeds are in agreement with the Von-Karman spectrum.

Key words: field measurement; mean wind speed; fluctuating wind speed; turbulence intensity; gust factor; power spectral density

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^[1]. 新加坡的 Choi^[2], 日本 Kato, Ohkuma^[3] 等近些年来进行的大规模观测工作得到了比较完整的分析结果, Kato 等^[3] 自 1986 年起在 Tokyo 和 Yokohama 地区利用超声风速仪进行的长期的实测研究工作. Durst 等^[4] 人于 1960 年对不同高度, 不同时距的平均风速进行了实测研究, 并总结了适用于一定地貌的经验公式. 通过实测, 风工程研究发达的国家近年来已经相继建立了当地的风特性数据库, 如加拿大和英国的近海观测数据库等^[5], 挪威的 Froya 数据库^[6-7]. 近年来我国的风特性实测研究也取得了一些进展, 如 Li^[8], Xu^[9] 等人分别在高 420.5 m 的上海金茂大厦和高 384 m 的深圳地王大厦等高层建筑上进行了相关的实测研究工作, 他们都研究了强风的平均和脉动特性, 以及结构在强风下的响应, 并给出了相关的拟合经验公式. 李杰等^[10] 于 2006 年在我国华东某地区安装了强风风场观测台阵, 利用三维超声风速仪实测了台风“韦帕”, 研究了典型的农村地貌上的多点边界层风特性. 尽管人们在强风分布及结构响应的实测方面做了很多努力, 由于强风分布特性现场实测的费用大、周期长、难度大, 人们对近地风特性的认识还远不清楚.

本文通过对环球金融中心顶部的风速监测系统投入使用以来所测得的多个时段的良态强风实测数据的处理, 得到了平均风和脉动风特性, 并重点分析

收稿日期: 2010-08-03

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90715040)

第一作者: 顾明(1957—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为结构抗风. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

通讯作者: 全涌(1971—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为结构抗风. E-mail: quanyong@tongji.edu.cn

对比了不同时距时所得到的平均风速大小间的关系,以及不同时距下的湍流统计特性间的关系.

1 实测概况

上海环球金融中心(SWFC)(图 1)的监测系统主要由风速监测系统和结构振动监测系统两部分组成,自大楼投入使用以来,该系统就已经安装就位并独立地进行数据采集和存储.风速监测系统的测点(图 2)分别设置在该大楼顶部两侧,即东北端和西南端,这两侧各装有 Windmaster Pro 三轴超声风速仪(英国 Gill 公司生产)一台(图 3a),离地约 494 m,两端仪器间距约 72 m,按照安装要求,该风速仪 U 轴朝北, V 轴向西, W 轴向上,如图 3b 所示.风向角按俯视逆时针方向递增,得到的风速以南风为 0° ,东风为 90° ,风速量程为 $0.01 \sim 65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大动态响应频率为 40 Hz,实际采样频率设为 10 Hz,并通过 Campbell 公司生产的 CR1000 数据采集系统程序实时采集和存储.为了防止风速仪遭受雷击,将其固定在通过法兰连接于该大楼两端的避雷针杆的横挑上,由于限制了其安装高度,经 Fluent 流体计算软件模拟得知,仅考虑环球金融中

心单体存在时,当风速测点安装在离女儿墙顶端约 1.5 m 的情况下,各方向的来流均会受到结构本身的绕流影响,使所测得的平均风速和脉动风速均受到了不同程度的干扰,但当来流方向与该大楼的东北、西南角对角线夹角不大于 15° 时,可基本忽略绕流影响.因此这里定义东北端有效风向角为 $120^\circ \sim 150^\circ$,西南端有效风向角为 $300^\circ \sim 330^\circ$,本文所分析对象分别取自有效风向角内 10 min 平均风速较大(大于 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的时段内的实测风速样本.

2 风速实测数据分析

2.1 平均风特性

超声风速仪可同时测量三个正交方向的风速分量,记为 $u_x(t)$, $u_y(t)$, $u_z(t)$,分别对应 U , V , W 轴下的时间序列,这里采用矢量分解法^[11]得到平均风速大小 U 和平均风向 φ ,计算式如下:

$$U = \sqrt{\bar{u}_x(t)^2 + \bar{u}_y(t)^2} \quad (1)$$

$$\cos \varphi = \bar{u}_x(t)/U, \sin \varphi = \bar{u}_y(t)/U \quad (2)$$

将 $u_x(t)$, $u_y(t)$ 分别在平行和垂直于平均风速方向上投影,可得到纵向和横向脉动分量.根据式(3),(4)得到纵向脉动分量 $u(t)$,横向脉动分量 $v(t)$,这里不考虑竖向平均及脉动风速.

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

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

2.1.1 3 s、10 min、1 h 平均风速和风向

本文所选取的实测样本分别来自西南端和东北端测点,所选取的实测样本记录状况见表 1.主要分析了 3 s 平均最大风速(瞬时最大风速)、10 min 平均风速以及 1 h 平均风速大小间的关系,并给出了 1 h 平均风向角,如图 4 所示.该图的横坐标时间并非代表连续的时间,而是按照表 1 中的从上到下的顺序整理给出,绘于同一坐标系下的结果.图 4 中给出了 1 h 平均风速,每小时内的 10 min 最大风速以及 3 s 平均最大风速(也称为瞬时最大风速),可以看到,所分析的时段内两端的平均风向角相对变化不大,平均风速随着平均时距的增大而减小,但 1 h 内 10 min 平均风速最大风速与对应的 1 h 平均风速较接近.

2.1.2 3 s、10 min、1 h 平均风速大小间的关系

Durst 等^[4]于 1960 年根据实测风速资料给出了不同高度处平均风速大小与平均时距之间的关系,如式(5).文献^[12]根据 Durst 等^[4]的实测结果给出了在开阔地形条件($z_0 \approx 0.05 \text{ m}$),高度 $z = 10 \text{ m}$ 的系数 $c(t)$,见表 2.

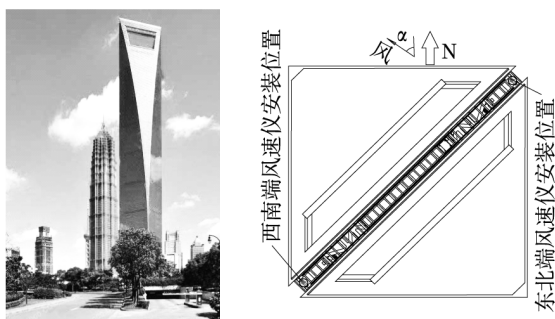


图 1 环球金融中心 图 2 风速仪安装方位示意
Fig.1 SWFC building Fig.2 Position of anemometers

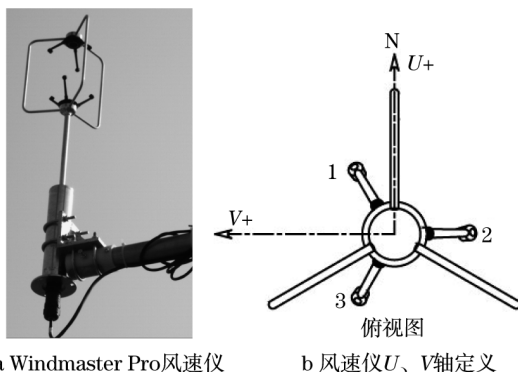


图 3 实测用 Windmaster Pro 风速仪
Fig.3 Anemometer Windmaster Pro for the measurement

表 1 实测样本记录情况

Tab.1 Condition of the measured records

方位	日期	记录时间	记录长度/ min	10 min 平均最大风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
西南端	2008 年 12 月 9 日	0:00:00~9:59:59	600	14.37
	2009 年 2 月 13 日	4:50:00~10:49:59	360	21.77
	2009 年 2 月 15 日	14:00:00~23:59:59	600	15.17
东北端	2009 年 11 月 9 日~10 日	22:20:00(11 月 9 日)~6:19:59(11 月 10 日)	480	16.97
	2009 年 11 月 16 日	14:00:00~17:59:59	240	16.36

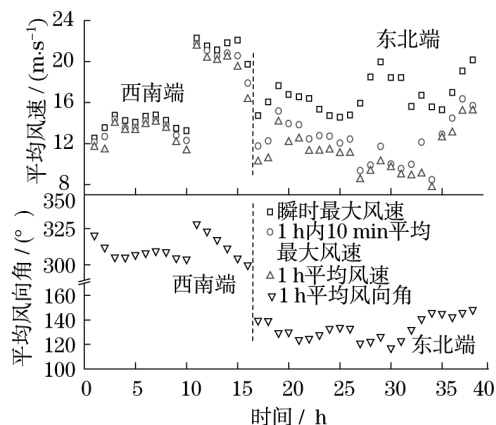


图 4 1 h 平均风向和不同时距下的平均风速

Fig.4 1 h mean wind direction and mean wind speed in different intervals

$$U_t(z) = U_{3600}(z) \left(1 + \frac{\beta^{1/2} c(t)}{2.5 \ln(z/z_0)} \right) \quad (5)$$

式中: z_0 为地面粗糙长度 m ; 参数 β 对应相应的 z_0 值, 一般假设其不随高度变化; $U_{3600}(z)$ 为高度 z 处的 1 h 平均风速; $c(t)$ 是根据风速资料的统计分析确定的参数, 由表 2 可知, 它是平均时距 t 的单调减

表 2 系数 $c(t)$ Tab.2 Coefficients of $c(t)$

t/s	1	10	20	30	50	100	200	300	600	1 000	3 600
$c(t)$	3.00	2.32	2.00	1.73	1.35	1.02	0.70	0.54	0.36	0.16	0

2.2 脉动风特性

2.2.1 湍流度与阵风因子

湍流度和阵风因子均反映了脉动风的相对强度, 湍流度常定义为平均时距内的脉动风速的标准差与相应时距的水平平均风速大小 U 的比值, 这里平均风速分析时距取为 10 min (本文中若无说明, 均取 10 min 平均时距, 下同):

$$I_i = \frac{\sigma_i}{U}, \quad i = u, v \quad (6)$$

式中: σ 代表脉动风速的标准差; u, v 分别代表纵向、横向脉动风速分量.

图 7 分别给出了湍流度和阵风因子与 10 min 平

均风速间的关系. 图 7a 中, 很明显, 纵向、横向湍流度均随着平均风速的增大而减小. 纵向湍流度分布区间为 $[0.010 1, 0.29 8]$, 平均值为 0.084 9, 横向湍流度分布区间为 $[0.008 6, 0.246 2]$, 平均值为 0.074 9, $\bar{I}_u : \bar{I}_v = 1 : 0.882 3$, 在日本规范 (2004)^[14] 中, 相同地貌 (按 V 类地貌), 相同高度 (493m) 的纵向湍流度取值约为 0.11, 接近本次纵向实测湍流度平均值. 我国现行的《建筑结构荷载规范》中没有对湍流强度做专门的说明, 但是可以根据规范中的脉动系数, 结合湍流强度的定义式, 可得到与其相应的湍流强度^[15]:

$$I(z) = 0.1 \times 3.5^{1.8(\alpha-0.16)} \left(\frac{z}{10}\right)^{-\alpha} \quad (7)$$

式中, α 是平均风速剖面指数. 若按照 D 类地貌计算, 得到该高度 (493 m) 的纵向湍流强度为 0.036 04, 远小于实测值和国外规范取值, 可见中国规范中的湍流强度取值明显偏低.

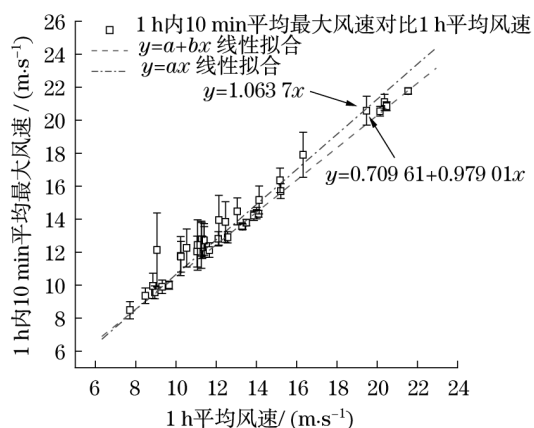


图 5 10 min 平均风速与 1 h 平均风速

Fig. 5 1 h mean wind speed vs 10 min wind speed

阵风因子 (gust factor) 反映了阵风风速与平均风速相对大小, 通常定义为阵风持续时间 t_g (结构风工程中一般取阵风持续时间为 3 s) 内最大平均风速与分析时距 (10 min) 的水平平均风速 U 之比, 即:

$$G_u(t_g) = 1 + \frac{\max(\bar{u}(t_g))}{U} \quad (8a)$$

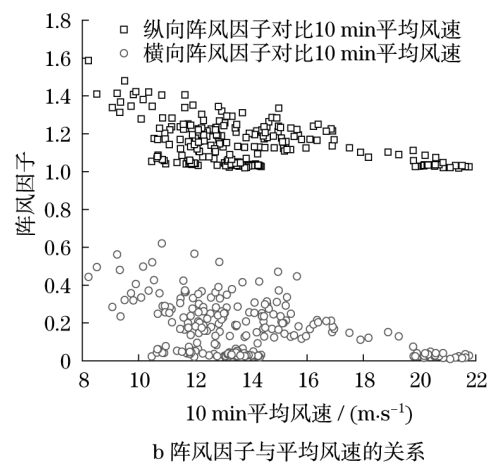
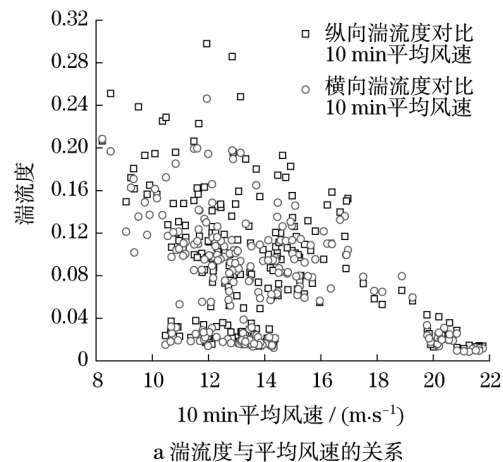


图 7 湍流度和阵风因子与 10 min 平均风速间的关系

Fig. 7 Variation of turbulence intensity and gust factor with 10 min mean wind speed

文献 [16-17] 对阵风因子、湍流度 I_u 和阵风持续时间 t_g 之间的关系进行了研究, 综合 Ishizaki [16] 和 Choi [17] 的经验公式, 有如下形式 [18]:

$$G_u(t_g) = 1 + k_1 I_u^2 \ln(T/t_g) \quad (9)$$

式中, T 为平均时距, 一般取为 10 min 或 1 h,

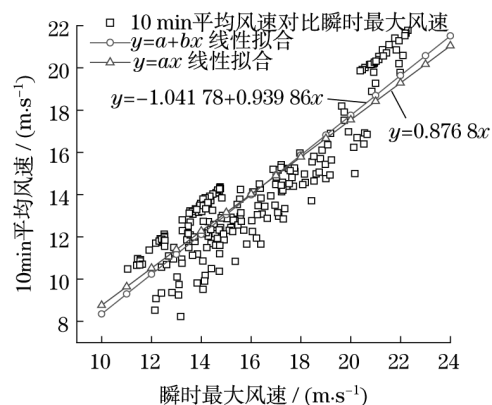


图 6 10 min 平均风速与瞬时最大风速之间的关系

Fig. 6 Relationship between 10 min mean speed and 3 s max mean speed

$$G_v(t_g) = \frac{\max(\bar{v}(t_g))}{U} \quad (8b)$$

式中: $\max(\bar{u}(t_g))$, $\max(\bar{v}(t_g))$ 分别表示纵向, 横向脉动风在平均时距内阵风持续时间 t_g 时间平均最大风速. 从实测结果看, 当阵风持续时间 t_g 取 3 s 时, 纵向阵风因子分布范围为 1.017 7~1.586 7, 平均值为 1.150 8, 横向阵风因子分布范围为 0.009 6~0.62, 平均值为 0.173 9, 均值之比 $\bar{G}_u : \bar{G}_v = 1 : 0.390 7$, 如图 7b 所示, 纵、横向阵风因子均随 10 min 平均风速的增大而减小, 最后随着平均风速的增大 (约大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 基本保持不变.

Ishizaki [16] 分别以 10 min 和 1 h 为平均时距, 对纵向阵风因子与湍流度的线性拟合后取拟合系数 $k_1 = 0.5$, $k_2 = 1.0$, 而 Choi [17] 以 1 h 为平均时距, 建议取 $k_1 = 0.62$, $k_2 = 1.27$. 图 8 反映了当阵风持续时间 $t_g = 3 \text{ s}$ 时, 纵向、横向阵风因子与湍流度间的关系.

显然,纵、横向阵风因子均随湍流度的增加而递增.对实测结果进行形如 $y = a + bx$ 的线性拟合以及形如式(9)的非线性拟合发现纵向、横向各自的线性和非线性拟合结果相差不大,说明该高度上的阵风因子与湍流度满足线性关系.这里纵、横阵风因子—湍流度的线性拟合关系式为:纵向 $G_u = 1.013\ 07 + 1.621\ 46I_u$, 横向 $G_v = -0.005\ 66 + 2.396\ 23I_v$.

图9和图10分别是三维坐标下的纵向、横向实测结果(空心圆点)和形如式(9)的非线性拟合结果(实线).可知,当湍流度一定时,阵风因子随着阵风持续时间 t_g 增大有递减的趋势.纵、横阵风因子—湍流度的非线性拟合结果:纵向 $G_u = 1 + 0.2591 I_u^{0.866\ 8} \ln(600/t_g)$, 横向 $G_u = 0.441\ 6 I_u^{0.996\ 2} \cdot \ln(600/t_g)$.

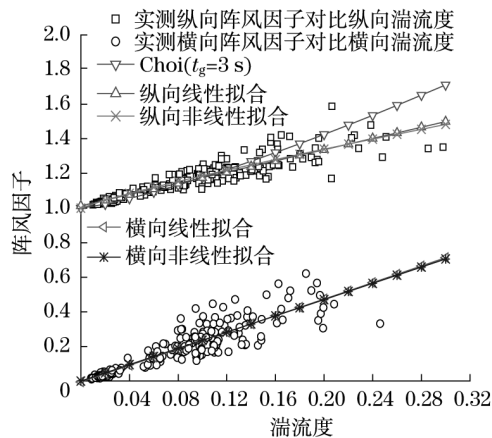


图8 湍流度与阵风因子

Fig.8 Gust factor vs turbulence intensity

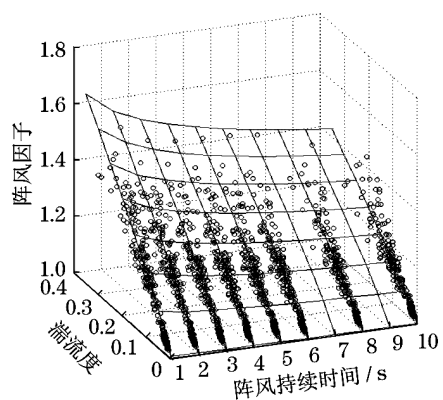


图9 纵向阵风因子、湍流度与阵风持续时间

Fig.9 Longitudinal gust factor vs turbulence intensity and gust averaging time

2.2.2 脉动风功率谱密度

脉动风功率谱密度用来描述湍流中不同尺度的涡的动能对湍流脉动动能的贡献.它在频域上的分布代表了湍流动能在不同尺度上的能量分布比例. Xu

等^[9]以及日本的 Kato 等^[3]对以往的台风实测得到的纵向脉动风功率谱与纵向 Von-Karman 谱吻合,但是横向却不能较好符合.图11纵横向是本次实测的纵向、横向脉动风速功率谱密度,图中, f 为频率, $S(f)$ 为脉动风功率谱密度, σ_u 和 σ_v 分别为纵、横向脉动风速均方根, L_u^x, L_v^x 分别为纵向、横向脉动风湍流积分尺度.图11与 Von-Karman 谱基本吻合.

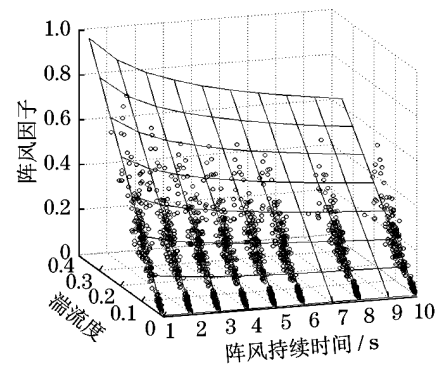
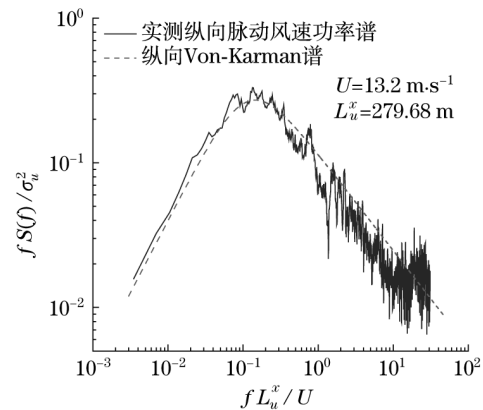
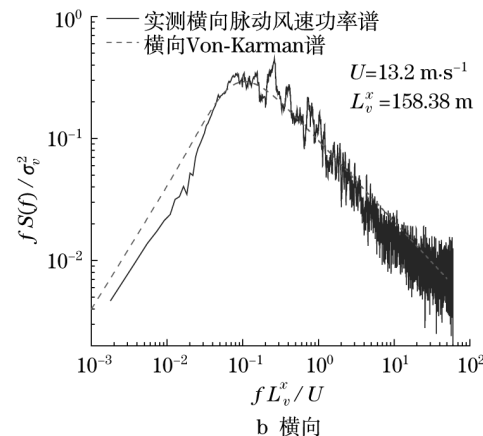


图10 横向阵风因子、湍流度与阵风持续时间

Fig.10 Lateral gust factor vs turbulence intensity and gust averaging time



a 纵向



b 横向

图11 纵向和横向脉动风功率谱密度

Fig.11 Spectra of longitudinal and lateral fluctuating wind speed

3 结论

本文利用超声风速仪对上海环球金融中心大楼顶部的多次良态强风进行了实测,并对数据进行了分析处理,主要结论如下:

(1) 通过线性拟合,1 h 平均风速与该小时内的 10 min 平均最大风速的比值约为 1 : 1.06,且在大多数情况下,1 h 内的 10 min 平均风速标准差不大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,10 min 平均最大风速与该时段内的 3 s 平均最大风速的比值约为 0.876 8,表明平均时距在 10 min 到 1 h 内的平均风速大小基本趋于稳定。

(2) 湍流度与阵风因子均随平均风速的增大而减小,当平均风速大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时两者变化不明显。本次实测得到的湍流度平均值:纵向为 0.084 9,横向为 0.074 9。按 D 类地貌,我国规范取值为 0.036 04,按 V 类地貌,日本规范(ATJ—2004)取值约为 0.11,与实测结果较接近。对阵风持续时间为 3 s 时的阵风因子与湍流度进行了线性和非线性拟合,拟合结果几乎无差别,与 Choi 经验曲线进行了比较,当湍流度大于 0.16 时,对应的阵风因子偏大。同时还利用类似 Choi 经验式对湍流度、阵风持续时间、以及阵风因子进行了非线性拟合,拟合结果与 Ishizaki 和 Choi 拟合结果均有所不同,且当阵风持续时间一定时,阵风因子随湍流度的增大基本保持线性递增关系。

(3) 部分时段的纵、横向的脉动风速功率谱与 Von-Karman 谱基本吻合。

参考文献:

- [1] 顾明. 土木工程抗风研究进展及基础科学问题[R]. 北京: 科学出版社, 2006.
GU Ming. The research process and basic scientific issues about civil structure[R]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] Choi E C C. Field measurement and experimental study of wind speed profile during thunderstorms [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92: 275.
- [3] Kato N, Ohkuma T, Kim J R, et al. Full scale measurements of wind velocity in two urban areas using an ultrasonic anemometer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41 - 44: 67.
- [4] Durst C S. Wind speeds over short periods of time [J]. The Meteorological Magazine, 1960, 89(1056): 181.
- [5] 庞加斌, 林志兴, 葛耀君. 浦东地区近地强风观测研究[J]. 流体力学试验与测量, 2002, 16(3): 32.
- [6] PANG Jiabin, LIN Zhixing, GE Yaojun. Field measurement of strong wind characteristics near ground in Pudong district[J]. Experiment and Measurement in Fluid Mechanics, 2002, 16(3): 32.
- [7] Andersen O J, Lovseth J. Gale force maritime wind. the Froya data base. part 1: sites and instrumentation. review of the data base [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 57(1): 97.
- [8] Andersen O J, Lovseth J. Stability modifications of the Frøya wind spectrum[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(4 - 5): 236.
- [9] Li Q S, Xiao Y Q, Fu J Y, et al. Full-scale measurements of wind effects on the Jinmao Building[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 445.
- [10] Xu Y L, Zhan S. Field measurements of Diwang Tower during Typhoon York[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89: 73.
- [11] 李杰, 阎启, 谢强, 等. 台风“韦帕”风场实测及风致输电塔振动响应[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 1.
LI Jie, YAN Qi, XIE Qiang, et al. Wind field measurements and wind-induced vibration responses of transmission tower during Typhoon Wipha [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 1.
- [12] 项海帆, 葛耀君, 朱乐东, 等. 现代桥梁抗风理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
XIANG Haifan, GE Yaojun, ZHU Ledong, et al. Modern theory and practice on bridge wind resistance [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [13] 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]. 上海: 同济大学出版社, 1992.
Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures—introduction to wind engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1992.
- [14] 张相庭. 结构风压和风振计算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.
ZHANG Xiangting. Wind pressure and calculation of wind-induced vibration [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1985.
- [15] AIJ-RLB—2004 Recommendations for loads on buildings[S]. [S. l.]: Architecture Institute of Japan, 2004.
- [16] 洪小健, 顾明. 顺风向等效风荷载及响应——主要国家建筑风荷载规范比较[J]. 建筑结构, 2004, 34(6): 39.
HONG Xiaojian, GU Ming. Longitudinal equivalent wind load and response: comparison of major national building wind load code[J]. Building Structures, 2004, 34(6): 39.
- [17] Ishizaki H. Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon-prone regions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 13: 55.
- [18] Choi E C C. Wind loading in Hong Kong—commentary on the code of practice on wind effects Hong Kong[R]. Hong Kong: Hong Kong Institute of Engineers, 1983.
- [19] Cao Shuyang, Yukio Tamura, Naoshi Kikuchi, et al. Wind characteristics of a strong typhoon [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97: 11.