

超强台风山竹近地风场特性实测

谢壮宁¹, 段静¹, 刘慕广¹, 张丽²

(1. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东广州 510641; 2. 深圳市国家气候观测台, 广东深圳 518040)

摘要: 基于356 m高的深圳气象梯度塔(SZGMT)的实测风速时程数据, 分析了超强台风山竹侵袭过程风场特性的竖向分布规律。结果表明, SZGMT上游地面的平均风速剖面指数为0.238, 略高于建筑结构荷载规范(GB50009—2012)的C类地貌的指数值; 纵向湍流强度接近GB50009—2012 D类地貌的建议值, 三向湍流强度比值较我国公路桥梁抗风设计指南的建议值小, 并随高度的增加而增大; 阵风因子和湍流强度呈高度线性相关, 各向峰值因子的拟合结果接近2.5; 纵向湍流积分尺度略大于日本规范AIJ 2004和美国规范ASCE7—2010的建议值; 实测纵向风速谱和Von Karman谱具有较好的一致性。

关键词: 风场特性; 剖面; 下垫面; 台风实测

中图分类号: TU312.1; TU317.2

文献标志码: A

Field Measurement of Near-Ground Wind Characteristics of Supper Typhoon Mangkhut

XIE Zhuangning¹, DUAN Jing¹, LIU Muguang¹, ZHANG Li²

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040, China)

Abstract: Based on the wind speed records from the 356m high Shenzhen Meteorological Gradient Tower (SZGMT), this paper analyzes the vertical distribution of wind characteristics during the invasion of the super typhoon Mangkut. The results show that: the mean wind speed profile exponent of the upstream surface of the SZGMT is 0.238, which is slightly higher than that of the Load Code for the Design of Building Structures (GB50009-2012) for terrain category C. The longitudinal turbulence intensity distribution is close to the recommended value of GB50009-2012 for terrain category

D. The three-direction turbulence intensity ratio is smaller than the recommended value of Highway Bridge Wind Resistance Design Guide, and increases with the increase of height. The gust factor is highly linear with the turbulence intensity, and the fitting result of the peak factor is close to 2.5. The observed longitudinal turbulence integral scale profile is slightly larger than the recommended value of AIJ 2004 and ASCE7-2010, and the longitudinal wind speed spectra are consistent with Von Karman spectrum.

Key words: wind characteristics; wind profile; underlying surface; typhoon observation

在强(台)风作用下边界层高度范围内风场特性参数(包括平均风速剖面、湍流强度剖面、脉动风速功率谱密度和湍流积分尺度剖面等)的科学描述对于风敏感结构的风效应评估和抗风设计具有十分重要的意义。现场测量是研究大气边界层风场特性的最可靠的方法, 其测量结果可用于结构抗风设计规范取值的合理性验证, 同时也是开展混合数值模拟分析并核查其结果可靠性的唯一依据。

通常情况下, 依靠大量地面站获取低空风实测数据比较容易, 而获取高空风特性的实测数据则非常困难, 可靠的数据尤其是能够反映大气湍流特性的时变脉动风速数据极为稀少, 后者通常是通过为数不多的高耸测风塔获取。如Li等^[1-2]利用325 m高的北京气象塔上风速仪多年测量的大风风速数据和暴风期间部分高度三维超声风速仪记录的风速时程数据, 分析给出了平均风速剖面、湍流强度、阵风因子、湍流积分尺度和三维脉动风速功率谱密度等反映大气湍流特征的重要信息, 并将其与经验模型的预测进行比较, 评估了现有理论和经验模型的适当性。李利孝等^[3]和肖仪清等^[4]利用100 m测风塔和

收稿日期: 2020-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(51978285); 亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金(2021ZB11)

第一作者: 谢壮宁(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构风工程。

E-mail: znxie@scut.edu.cn



论文
拓展
介绍

风廓线雷达获取的实测数据,研究了台风黑格比发展过程风剖面特征,以及海上台风的平均风场和脉动风场特性,指出近海海面风剖面指数较规范偏小,台风风场结构存在一定正攻角。近年来激光雷达也应用于近地面台风湍流特性的研究中。姚博等^[5]利用激光测风雷达获取了超强台风中心区和眼壁强风区等位置的290 m近地实测风速,指出台风结构中不同位置风场特性存在明显差异。超高层建筑和高耸结构抗风设计中更加关心工程项目所在地高空的实际风速。近年来城市地区超高层建筑顶部逐渐成为安置测风仪器的热门位置^[6-7],但是这种方式获取的风速实测数据通常是高空位置的单点数据,无法实现对风场剖面规律的连续描述,同时建筑顶部的风速容易受到建筑本身的影响,测量数据即便是平均风速也需要经过严格的校准才能够代替实际自由来流的风速。

基本风压取值是规范(文中如无特殊说明,均指现行《建筑结构荷载规范》^[8])中的强制条款,故描述平均风速剖面形状的剖面指数是结构抗风设计和风工程研究中首要关注的重要参数。文献[1-2]的研究结果显示,北京气象塔主导风向上游为多层建筑构成的密集型上游地貌,其平均风速剖面指数达0.397,这个远超过现行规范D类地貌风场的风速剖面指数。全涌等^[9]用缩尺模型模拟了上海市同济大学四平路校区所处城市中心区域西北西方向上1.8 km×8.0 km范围内的真实地貌,通过对该地貌的风洞试验研究了城市地貌特征、远场与近场地貌对平均风速剖面的影响。结果表明,研究范围内的大城市中心地貌的地面粗糙度指数达到0.50~0.75,远大于我国现行规范给出的大城市中心地貌的地面粗

糙度指数值0.30。目前结构抗风设计中取D类地貌的依然很少,很多项目依然倾向于取偏于保守的C类地貌进行设计。在结构抗风设计中对现代宜居城市建设所配套的密集绿化带和成片森林公园的地貌粗糙度取值仍存在争议^[10],工程中依然偏向于按B类地貌取值进行设计。

本文基于356 m高的深圳气象观测梯度塔(SZMGT)在超强台风山竹发展期间获取的实测风速记录,讨论了平均风速、湍流强度、阵风因子、湍流积分尺度和脉动风速功率谱沿高度的分布规律,对比规范并尝试对风场特性剖面进行参数拟合。台风作为一种特殊的涡旋结构,其风场特性异于依托北京气象塔测得的良态风场^[1-2],通过本文研究期望对高耸和超高层结构抗台风设计以及未来规范修订提供一些边界层风场特性的有价值信息。

1 实测概况及方法简介

1.1 台风概况

超强台风山竹(编号201822)于北京时间2018年9月7日在西北太平洋洋面生成,9月11日8时升级为超强台风,9月15日2时以超强台风在菲律宾吕宋岛东北部沿海登陆(登陆时中心附近最大风速为 $65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),9月16日17时在广东台山海晏镇登陆(登陆中心附近最大风速为 $45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),沿西西北方向向内陆移动,9月17日17时停止记录。根据深圳气象台的站点记录结果,最大瞬时风速为 $48.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大10 min平均风速为 $40.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图1为深圳台风网记录的超强台风山竹的路径示意图,台风在移动过程中与深圳市最近距离大约120 km。

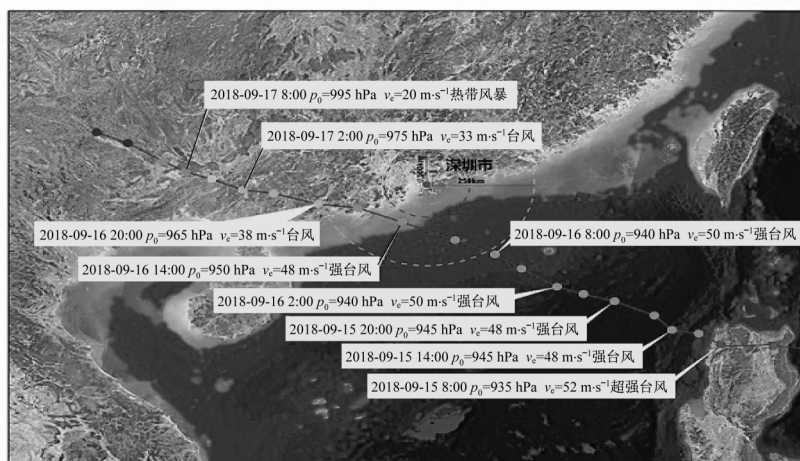


图1 山竹路径图

Fig. 1 Path of typhoon Mangkhut

1.2 测点简介

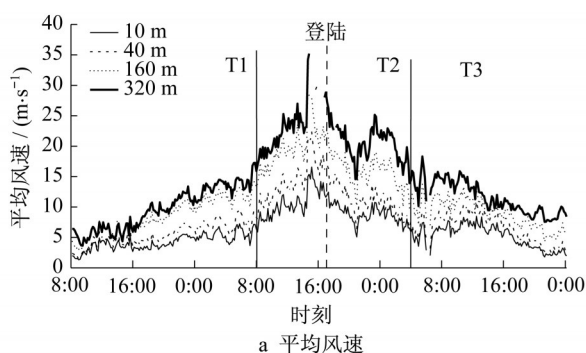
位于深圳市宝安区铁岗水库的气象观测梯度塔,是目前亚洲第一、世界第二高的桅杆结构铁塔。塔址周边(近场)覆盖大片茂密的低矮果树林(高度大约是4~6 m),远处(东面)有成片的多层和低矮厂房的建筑群。塔身设置13个外平台用于气象梯度观测,其中10、40、160和320 m高度同时设置风杯式风速仪和超声风速仪。为本文提供实测数据来源的超声风速仪采样频率为10 Hz,能满足精度要求。

1.3 数据处理

实测风速序列分析时段为2018年9月15日8:00—2018年9月17日24:00,共计64 h时长。参考文献[4],采用五点三次平滑法与滑动平均法相结合的方式对实测数据进行平滑处理。以10 min为基本时距对采样序列进行划分,并按照顺序编号。320 m高度处14:40—18:00之间有8个子样本的数据出现无法弥补的缺失,10 m和40 m高度处各有2个样本其数据经判断出现明显的质量问题,分析时不予考虑。4个梯度高度的时间序列,分析时段内有效子样本数量共计 $384 \times 4 - 8 - 4 = 1524$ 。

根据矢量分解法,平均时距内水平方向的风速 \bar{U} 和平均风向角 $\bar{\alpha}$ 表达如下:

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



$$\bar{\alpha} = \begin{cases} 180^\circ - \arcsin\left(\frac{\bar{u}_y(t)}{\bar{U}}\right) & \bar{u}_y(t) < 0 \\ \arcsin\left(\frac{\bar{u}_y(t)}{\bar{U}}\right) & \bar{u}_y(t) > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\bar{W} = \bar{u}_z(t) \quad (3)$$

$$\begin{cases} \bar{u}(t) = u_x(t)\sin\bar{\alpha} + u_y(t)\cos\bar{\alpha} - \bar{U} \\ \bar{v}(t) = -u_x(t)\cos\bar{\alpha} + u_y(t)\sin\bar{\alpha} \\ \bar{w}(t) = u_z(t) - \bar{W} \end{cases} \quad (4)$$

式(1)~(4)中: $u_i(t)$ ($i=x, y, z$)为在 x 轴、 y 轴、 z 轴下的实测风速记录; $\bar{u}_i(t)$ ($i=x, y, z$)为在 x 轴、 y 轴、 z 轴下平均时距内的风速时程平均值; \bar{U} 为平均时距内水平方向平均风速; \bar{W} 为平均时距内竖向平均风速; $\bar{\alpha}$ 为平均时距的水平风向角均值; $\bar{u}(t)$ 、 $\bar{v}(t)$ 、 $\bar{w}(t)$ 分别为纵向、横向、竖向的脉动风速时程。

2 实测数据分析

2.1 平均风速、风向

根据平均风向角的变化规律,将分析时段细化为3个时段:9月15日8:00—9月16日8:00为T1,9月16日8:00—9月17日4:00为T2,其他时段为T3。不考虑风攻角的情况下,分析10 min时距划分的子样本的平均风速和平均风向角随时间的变化规律,其结果见图2。

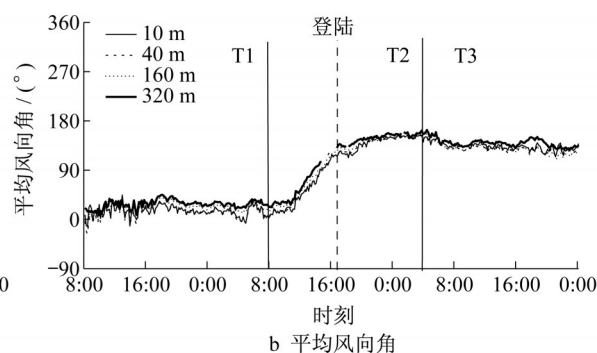


图2 不同高度处平均风速及风向时程

Fig. 2 Time histories of mean wind speed and direction at different heights

由图2a可见,台风山竹在发展初期,梯度塔捕获的风速时程曲线随时间呈现先增大后减小的趋势,台风登陆时刻并非为风速最大时刻,登陆前即16日约15时左右达到了各梯度高度的最大平均风速;平均风速随着高度的增加而增大。

图2b所显示的不同高度处测得的平均风向角无明显差异,同时台风发展初期和后期平均风向角随时间无明显变化,风向转变明显时段正对应风速

时程的大风时段。

2.2 平均风速剖面

参考Davenport提出的指数律表达形式,以10 m高度作为参考高度计算出的各子样本的平均风速剖面的指数时程见图3。按照上述的时段划分考虑指数时程曲线,地面粗糙度指数取值在T1和T3时段离散性较大,其均值分别为0.237 8和0.239 6;在T2对应的大风时段则相对平稳,其均值为0.236 0;

统计所有子样本的地面粗糙度指数均值为0.2387。由图3可见,大风时段风速特性参数相对稳定可靠,故后文的分析重点围绕大风时段展开。

选址于B类地貌的梯度塔在大风时段其地面粗糙度指数取值更偏于C类地貌;因而在以往的结构抗风设计中,将工程所在地上游的较高密集绿植或茂密绿化带地形当作B类地貌处理是偏于保守的。

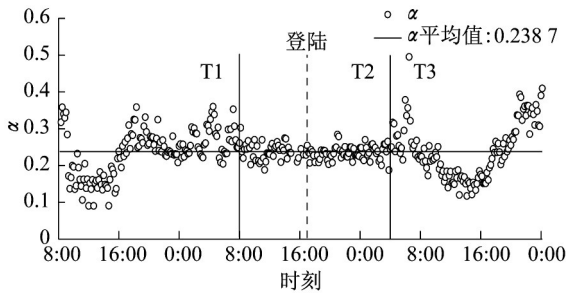


图3 地面粗糙度指数时程

Fig. 3 Time history of ground roughness index

2.3 湍流强度

湍流强度 I 定义为 10 min 时距内脉动风速均方差 σ 和平均风速 \bar{U} 的比值。根据梯度塔不同高度的风速时程数据分析得到的 3 个方向的湍流强度 (I_u 、

I_v 、 I_w) 时程结果见图 4。由图 4 可知,湍流强度随高度的增加而减少;台风登陆前湍流强度偏大,登陆后逐渐变小;大风时刻附近,各向湍流强度会出现“小高峰”。

样本的湍流强度统计分析结果如表 1 所示。不同时段湍流强度的差异主要表现在:①湍流强度有随台风的发展呈现减小趋势;同时随高度的增加也呈现减小趋势;但纵向湍流强度在大风时段的实测值相对偏高,10 m 高度测点不满足该规律。②台风登陆前的 T1 时段其三向湍流强度比值比公路桥梁规范^[11] 建议值 1:0.88:0.55 要大,且其值均随高度增加而增大,高空处横向湍流强度甚至超过纵向湍流强度;大风时段三向湍流强度比值比规范建议值小,其三向湍流强度比值随高度的增加呈现增大趋势。

取纵向湍流强度均值结果比较其剖面变化规律,结果见图 5。由图 5 可知,大风时段的纵向湍流强度剖面为所有时段最大,大于日本规范^[12] 的 III 类地貌对应的湍流强度剖面,且与中国规范 D 类地貌对应的湍流强度剖面更为接近;但是 10 m 高度的纵向湍流强度实测值比规范值偏小约 20%。

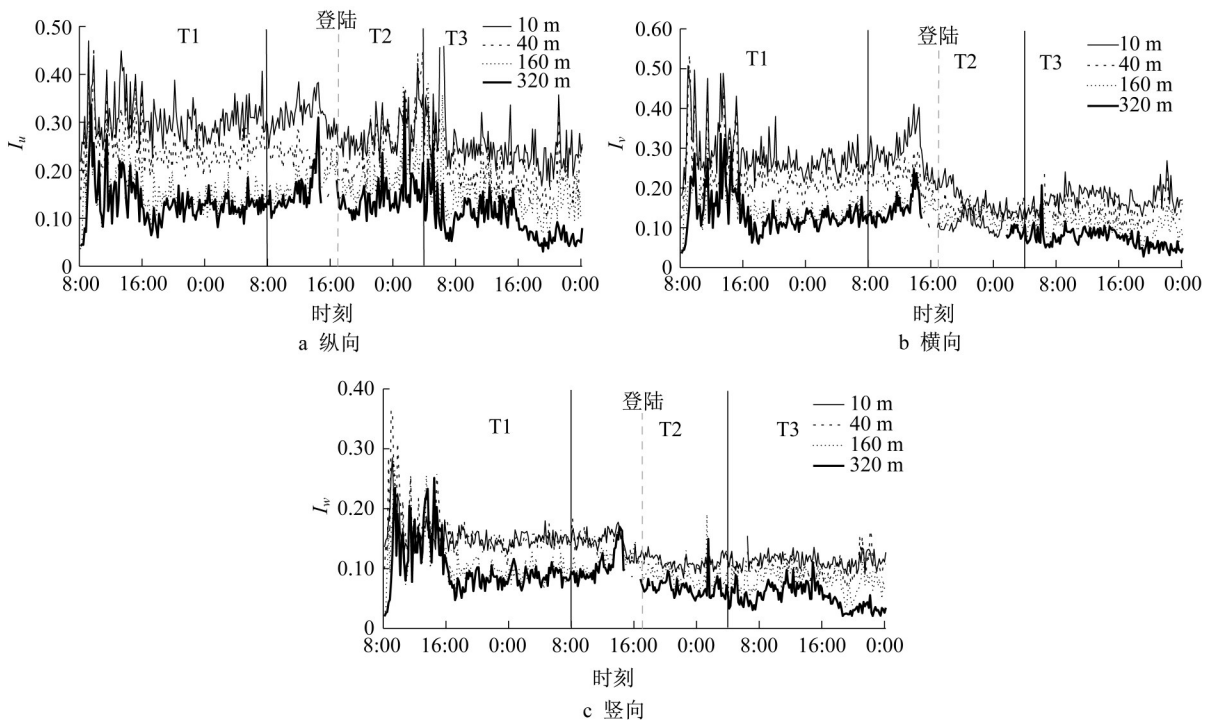


图4 湍流强度时程

Fig. 4 Time history of turbulence intensity

2.4 阵风因子

阵风因子 G 定义为一定持续期 t_g 内的平均风速

与特定平均时距内的平均风速之比。这里阵风持续期 t_g 取 3 s, 平均时距取 10 min。图 6 为各向阵风因

表1 湍流强度统计结果

Tab.1 Statistic results of turbulence intensity

高度/m	时段	I_u	I_v	I_w	$I_u : I_v : I_w$
10	T1	0.307	0.285	0.154	1:0.93:0.50
	T2	0.295	0.219	0.126	1:0.74:0.43
	T3	0.246	0.174	0.113	1:0.71:0.46
40	T1	0.248	0.236	0.162	1:0.95:0.65
	T2	0.251	0.180	0.122	1:0.72:0.49
	T3	0.193	0.140	0.101	1:0.73:0.52
160	T1	0.152	0.149	0.113	1:0.98:0.74
	T2	0.183	0.146	0.099	1:0.80:0.54
	T3	0.147	0.105	0.082	1:0.71:0.56
320	T1	0.133	0.135	0.102	1:1.02:0.77
	T2	0.148	0.123	0.082	1:0.83:0.55
	T3	0.094	0.072	0.052	1:0.77:0.55

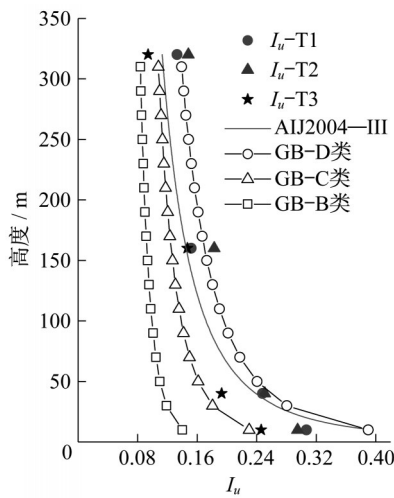


图5 湍流强度剖面

Fig. 5 Profile of turbulence intensity

子随时间的变化。由图6可知,各向阵风因子随高度的增加而减小;各向阵风因子在台风登陆后随时间增加呈现减小趋势,该趋势在横向和竖向阵风因子时程中更明显。分时段考虑样本阵风因子的统计结果见表2。由表2可知,各高度处阵风因子取值规律和湍流强度相似,纵向阵风因子在大风时段取值相对偏高(10 m测点除外),其余各向阵风因子随台风登陆和发展逐渐变小;阵风因子及三向之比也随高度的增加而减小。

考虑阵风因子和湍流强度之间的关系,将不同高度的各向阵风因子和对应的湍流强度进行对比分析,结果见图7。根据阵风因子的定义,图7中对于顺风向、横风向和竖向的阵风因子和湍流强度的关系分别按照 $G_u = 1 + aI_u$ 、 $G_v = aI_v$ 和 $G_w = aI_w$ 进行拟合分析(a 为待定系数)。由图7可知,不同高度处各向阵风因子和湍流强度呈现出相似的线性趋势。对于纵向,10、40、160和320 m处系数 a 的拟合结果

分别为2.639、2.472、2.375和2.352;对于横向,10、40、160和320 m处系数 a 的拟合结果分别为2.597、2.482、2.455和2.454;对于竖向,10、40、160和320 m处系数 a 的拟合结果分别为2.360、2.566、2.652和2.662。

中国规范给出的顺风向围护结构的阵风系数是描述速压的变化,其计算形式为 $\beta_{zg} = 1 + 2gI_u$,而台风的顺风向阵风因子计算形式为 $G_u = 1 + aI_u$,这两者中的 a 和 g 在物理意义上是一致的,均为反映脉动风压变化的峰值因子。阵风因子计算公式中系数 a 的拟合结果接近2.5,这意味着台风山竹统计的各向峰值因子接近2.5。

2.5 湍流积分尺度

本文采用基于Taylor假设的自相关函数直接积分法计算湍流积分尺度,各向湍流积分尺度的计算公式参考文献[13]。图8为各向不同高度处湍流积分尺度随时间的变化。由图8可知,相比其他风特性参数,湍流积分尺度的离散特征更为明显。随着高度的增加,各向湍流积分尺度呈现增大的趋势;同高度处纵向湍流积分尺度 > 横向湍流积分尺度 > 竖向湍流积分尺度。

取以上湍流积分尺度的均值列于表3进行对比。由表3可知,同高度的湍流积分尺度在不同时段的实测值有较为明显的偏差,大风时段的实测结果相对偏大。考虑三向湍流积分尺度的相互关系,通常在各项同性湍流领域,纵向湍流规模是横向和垂直方向的2倍,在靠近地面的点伴随着速度切变,纵向湍流规模是垂直方向的3倍;本文通过对实测湍流积分尺度的统计分析发现,高空测点纵向湍流积分尺度约为横向湍流积分尺度的2倍左右,约为竖向湍流积分尺度的3~4倍。但10 m高度测点不符合该规律,其横向湍流尺度相对偏大,竖向湍流尺

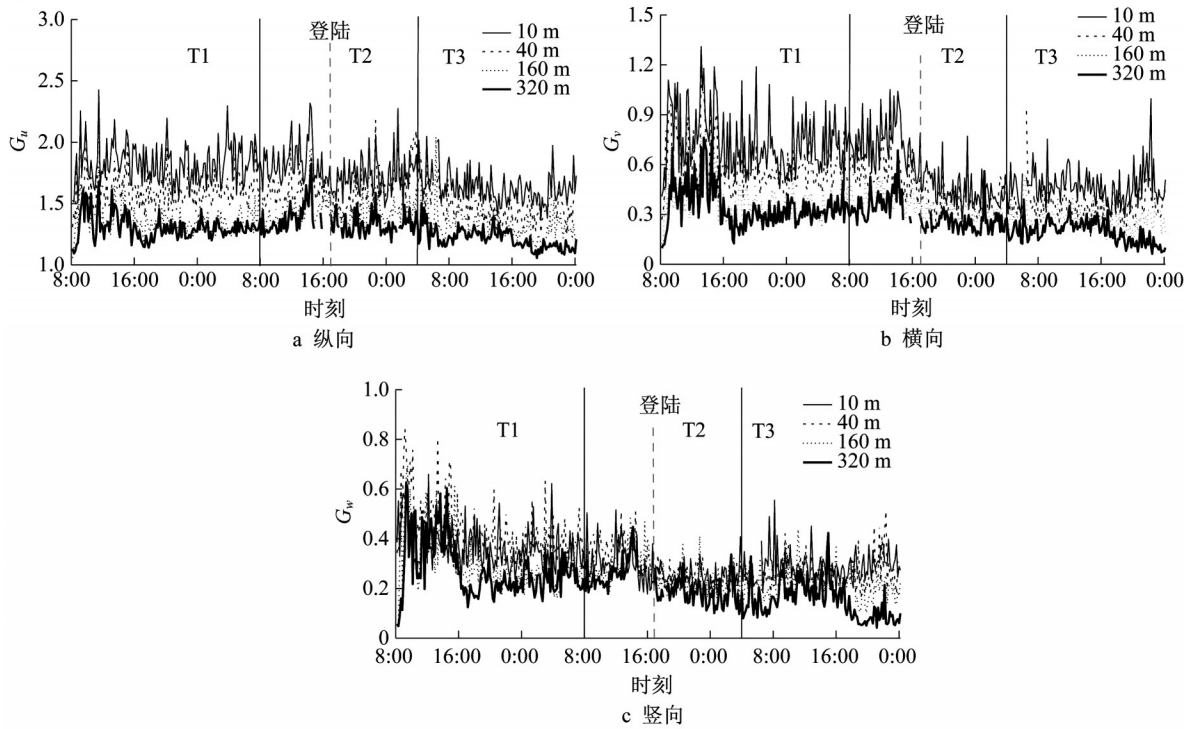


图6 阵风因子时程

Fig. 6 Time history of gust factor

表2 阵风因子统计结果

Tab. 2 Statistic results of gust factor

高度/m	时段	G_u	G_v	G_w	$G_u : G_v : G_w$
10	T1	1.829	0.737	0.366	1:0.40:0.20
	T2	1.773	0.572	0.274	1:0.32:0.15
	T3	1.631	0.468	0.287	1:0.29:0.18
40	T1	1.612	0.587	0.431	1:0.36:0.27
	T2	1.625	0.456	0.291	1:0.24:0.18
	T3	1.474	0.356	0.265	1:0.24:0.18
160	T1	1.364	0.382	0.306	1:0.28:0.22
	T2	1.448	0.354	0.261	1:0.24:0.18
	T3	1.326	0.275	0.221	1:0.21:0.17
320	T1	1.306	0.344	0.273	1:0.26:0.21
	T2	1.360	0.295	0.217	1:0.22:0.16
	T3	1.211	0.193	0.148	1:0.16:0.12

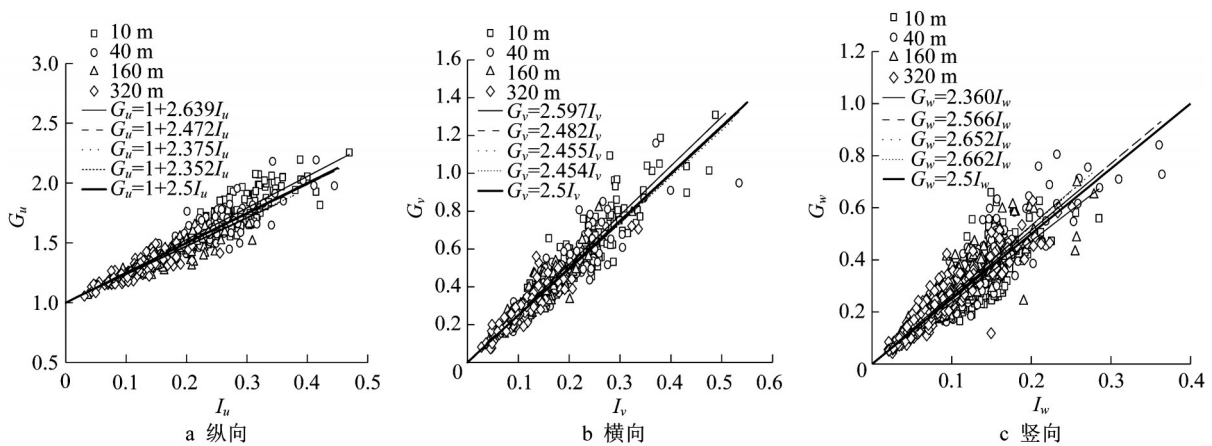


图7 阵风因子随湍流强度的变化规律

Fig. 7 Gust factor versus turbulence intensity

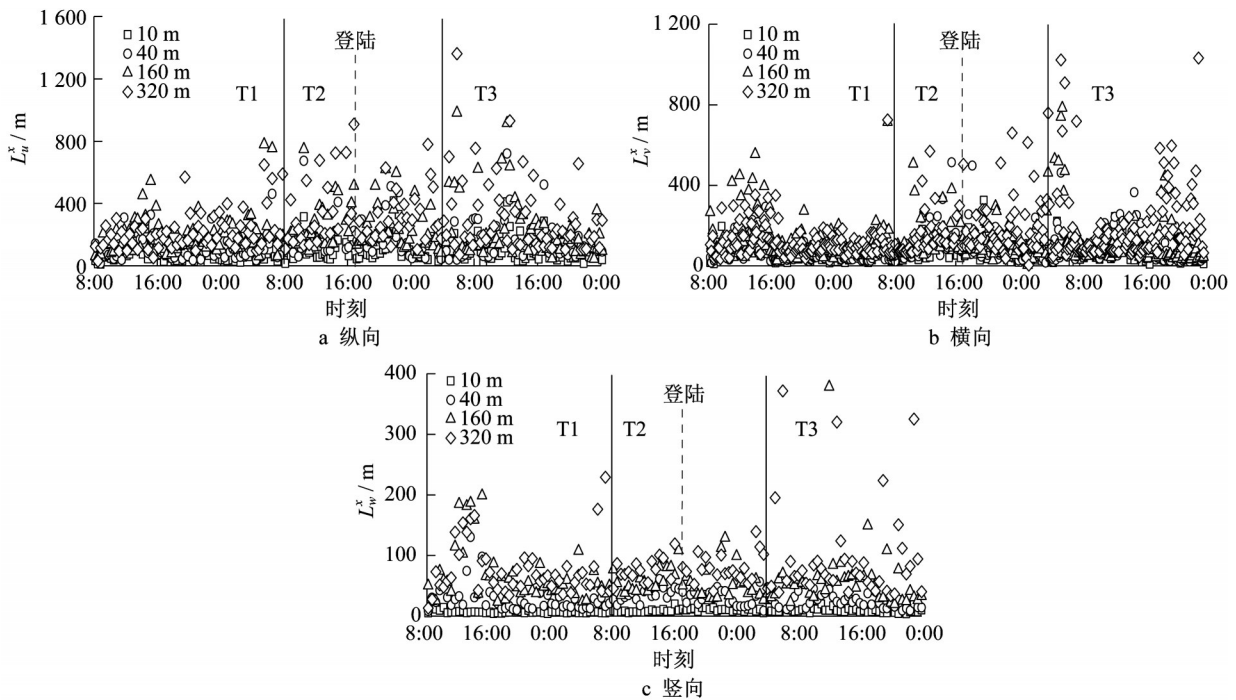


图8 湍流积分尺度历程

Fig. 8 Time history of turbulence integral scale

度相对偏小。日本规范 AIJ 2004 和美国规范 ASCE7—2010^[14] 中纵向湍流积分尺度剖面计算公式如式(5)和式(6)所示。根据最小二乘法拟合湍流积分尺度剖面,拟合形式见式(7)。

$$L_u^x = \begin{cases} 100(\frac{z}{30})^{0.5} & 30 < z \leq z_g \\ 100 & z \leq 30 \end{cases} \quad (5)$$

$$L_u^x = 97.54(\frac{z}{10})^{1/3} \quad (6)$$

$$L = L_0(\frac{z}{z_{min}})^\beta \quad (7)$$

式(5)~(7)中: z_g 为梯度风高度; z_{min} 为离地最小高

度,根据前面分析的塔址实际地貌情况,按照中国规范C类地貌取值,应为15 m; β 为待拟合的幂指数。取各时段湍流积分尺度实测均值,对湍流积分尺度剖面分时段考虑,其结果见图9。由图9可知,大风时段的湍流积分尺度最大;其结果与AIJ 2004建议的剖面相比,低空位置取值较规范推荐值偏大,高空位置取值和规范推荐值接近;ASCE7—2010建议的纵向湍流积分尺度剖面和大风时段的实测湍流积分尺度剖面整体比较接近,但是高空位置取值较规范推荐偏小。深圳气象塔在大风时段的实测湍流积分尺度剖面拟合结果如下:

表3 湍流积分尺度统计结果

Tab.3 Statistic results of turbulence integral scale

高度/m	时段	L_u^x/m	L_v^x/m	L_w^x/m	$L_u^x : L_v^x : L_w^x$
10	T1	72.3	52.5	7.2	1:0.73:0.10
	T2	105.1	66.3	9.4	1:0.63:0.09
	T3	88.6	53.4	10.0	1:0.60:0.11
40	T1	121.5	67.2	28.2	1:0.55:0.23
	T2	181.2	98.8	29.8	1:0.55:0.16
	T3	162.1	89.8	26.2	1:0.55:0.16
160	T1	191.3	120.6	67.1	1:0.63:0.35
	T2	243.1	120.5	57.7	1:0.50:0.24
	T3	226.9	108.5	59.7	1:0.48:0.26
320	T1	218.1	123.0	77.4	1:0.56:0.35
	T2	325.7	174.7	83.7	1:0.54:0.26
	T3	295.9	192.6	83.8	1:0.65:0.28

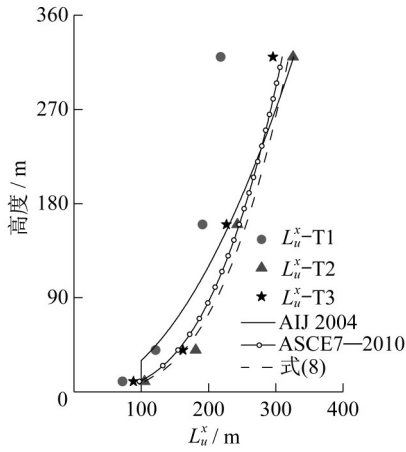


图9 湍流积分尺度剖面

Fig. 9 Scale profile of turbulence integral

$$L_u^x = 120 \left(\frac{z}{15} \right)^{0.32} \quad (8)$$

2.6 脉动风速功率谱

脉动风功率谱能够清晰展示脉动风能量在频域的分布,是风场的重要参数。大量的实测结果认为 Von Karman 谱描述台风湍流能量的分布比较合适。

进行功率谱分析时样本取大风时段附近时长 1 h 的样本(9月16日13:00—14:00)。脉动风速功率谱横坐标采用莫宁坐标形式,湍流积分尺度的计算沿用公式(8)。纵向脉动风速 Von Karman 谱为

$$\frac{fS_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \left(\frac{fL_u}{U} \right)}{\left[\left(1 + 70.8 \left(\frac{fL_u}{U} \right)^2 \right)^{5/6} \right]} \quad (9)$$

式中: $S_u(f)$ 为纵向脉动风速功率谱; σ_u^2 为纵向脉动风速方差; L_u 为纵向湍流积分尺度; f 为实测脉动风频率。

限于篇幅,本文仅对各高度处纵向脉动风速功率谱进行分析,其结果见图10。由图10可知,计算得到的大风时刻风速序列的实测功率谱密度曲线和 Von Karman 谱趋势较为一致。对于纵向脉动风速功率谱,两者在低频段吻合良好,特别是高空位置,实测谱和 Von Karman 谱的一致性相对更好。Von Karman 谱描述台风湍流能量分布规律特别是高空台风较为合适的。

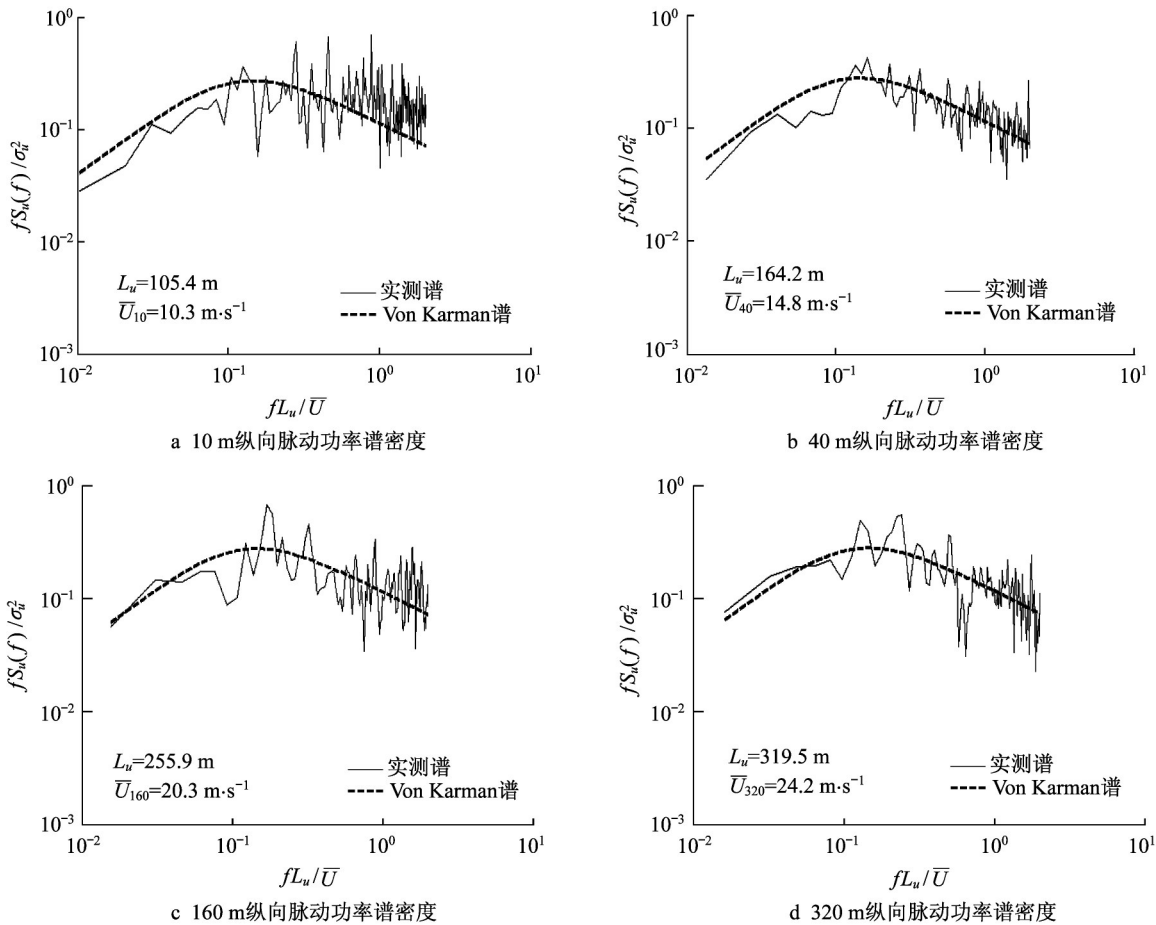


图10 脉动风速功率谱

Fig. 10 Pulsating wind speed power spectrum

3 结论

根据本文研究可得以下结论:

(1)梯度塔所处的深圳市郊,平均风速剖面在大风时段取值相对稳定,风剖面指数均值为0.238。结合梯度塔大风风向的上游地形情况,对于工程所在地为开阔但存在密集较高植被的地貌,其地面粗糙度可按C类地貌处理。

(2)大风时段的纵向湍流强度最大,其剖面接近中国规范D类地貌的建议值。大风时段的湍流强度三向比值小于桥梁规范的建议值。台风登陆前高空横向湍流作用加强,湍流强度甚至超过纵向湍流强度。

(3)阵风因子和湍流强度存在线性关系;基于线性关系拟合的峰值因子取值和中国规范的建议值2.5接近。

(4)大风时段三向湍流积分尺度关系约为 $L_u^x = 2L_v^x = (3 \sim 4)L_w^x$,且纵向湍流积分尺度的拟合分布略大于ASCE7—2010的建议值。

(5)实测得到的纵向脉动风速功率谱和Von Karman谱的一致性较好。

作者贡献说明:

谢壮宁:统筹论文研究工作,指导论文的研究方向并修改论文。

段 静:查找文献,分析数据,负责论文的撰写工作。

刘慕广:参与部分数据分析,提供修改意见。

张 丽:负责台风风速数据的测量工作,提供气象问题的咨询。

参考文献:

- [1] LI Q S, ZHI L H, HU F. Field monitoring of boundary layer wind characteristics in urban area [J]. *Wind and Structures* 2009, 12: 553.
- [2] LI Q S, ZHI L H, HU F. Boundary layer wind structure from observation on a 325 m tower [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98: 818.
- [3] 李利孝,肖仪清,宋丽莉,等.基于风观测塔和风廓线雷达实测的强台风黑格比风剖面研究[J].*工程力学*,2012,29(9):284.
LI Lixiao, XIAO Yiqing, SONG Lili, *et al.* Study on wind profile of typhoon hagupit using wind observed tower and wind profile radar measurements [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(9): 284.
- [4] 肖仪清,李利孝,宋丽莉,等.基于近海海面观测的台风黑格比风特性研究[J].*空气动力学学报*,2012,30(3):380.
XIAO Yiqing, LI Lixiao, SONG Lili, *et al.* Study on wind

- characteristics of typhoon Hagupit based on offshore sea surface measurement[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012,30(3):380.
- [5] 姚博,聂铭,谢壮宁,等.台风“海马”登陆过程近地风场脉动特性研究[J].*建筑结构学报*,2018,39(1):28.
YAO Bo, NIE Ming, XIE Zhuangning, *et al.* Study on near-ground turbulence characteristics of typhoon Haima during land falling [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(1): 28.
- [6] 安毅,全涌,顾明.上海陆家嘴地区近500m高空台风“梅花”脉动风幅值特性研究[J].*土木工程学报*,2013,46(7):21.
AN Yi, QUAN Yong, GU Ming. Turbulence characteristics analysis of typhoon “Muifa” near 500 m above ground in Lujiazui district of Shanghai [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(7): 21.
- [7] 吴本刚,傅继阳,吴玖荣.实测风场风速风向耦合的三维非平稳特征研究[J].*建筑结构学报*,2016,37(2):106.
WU Bengang, FU Jiyang, WU Jiurong. Three dimensional non-stationary analysis on field measured wind data with coupling wind speed and wind direction [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(2):106.
- [8] 中国建筑科学研究院.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012 [S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
China Academy of Building Research. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [9] 全涌,陈润翔,杨淳,等.大型中心城市平均风速剖面特性的风洞试验[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2020,48(2):185.
QUAN Yong, CHEN Jiongxiang, YANG Chun, *et al.* Wind tunnel experiments of the mean wind profile characteristics over a large central city [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(2):185.
- [10] 孙娇.城市景观建设生态功能评价研究[D].武汉:华中科技大学,2008.
SUN Jiao. Study of assessment on ecological functions of the urban landscape construction [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008.
- [11] 项海帆,林志兴,鲍卫刚,等.公路桥梁抗风设计指南[M].北京:人民交通出版社,1996.
XIANG Haifan, LIN Zhixing, BAO Weigang, *et al.* Highway bridge wind resistance design guide [M]. Beijing: China Communications Press, 1996.
- [12] Architectural Institute of Japan. AIJ recommendations for loads on building: AIJ 2004 [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004.
- [13] 庞加斌,葛耀君,陆焯.大气边界层湍流积分尺度的分析方法[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2002,30(5):622.
PANG Jiabin, GE Yaojun, LU Ye. Methods for analysis of turbulence integral length in atmospheric boundary-layer [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2002, 30(5):622.
- [14] American Society of Civil Engineerings. Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE7—2010 [S]. Reston: American Society of Civil Engineerings, 2010.