

文章编号: 0258-1825(2017)02-0242-09

# 近海岸强风风场特性现场实测研究

胡尚瑜<sup>1,\*</sup>, 聂功恒<sup>1</sup>, 李秋胜<sup>2</sup>, 张敏<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 香港城市大学 土木及建筑工程系, 中国 香港 999077)

**摘要:**基于近海岸 100 m 测风塔获取的近海面地貌条件 5 个不同高度风速数据。以 10 m 标准高度平均风速大于 10 m/s 为强风标准,选取台风和季风风场强风样本,应用 Bootstrap 统计分析法,对强风条件下近地层平均风剖面、湍流强度剖面、湍流特征参数进行分析,探讨了台风和季风条件下这些参数的差异,并将实测结果与风荷载规范规定值进行比较,检验风荷载规范的适宜性。分析结果表明:近地边界层的平均风剖面符合指数律或对数律,台风和季风风剖面指数分别约为 0.12 和 0.06;近地平均湍流度剖面符合指数律,台风风场各高度平均湍流度与现行规范相接近;台风风场各高度阵风因子均值较风荷载规范推算值要大,但季风风场阵风因子均值与规范推算值相接近。  
**关键词:**风荷载;平均风剖面;湍流度;阵风因子;Bootstrap 统计

中图分类号:TU312.1

文献标识码:A

doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0009

## Field measurement study on wind characteristics of strong windstorm in coastal terrain

Hu Shangyu<sup>1,\*</sup>, Nie Gongheng<sup>1</sup>, Li Qiusheng<sup>2</sup>, Zhang Min<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving,

Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077)

**Abstract:** Mean wind speed and wind turbulence characteristics of strong winds in surface boundary layer were studied by bootstrap method based on strong wind data sample in accordance with 10m height and mean wind speed higher than 10 m/s. The strong wind data were recorded from 100 m meteorological tower at sites near seashore with strong wind conditions and coastal terrain. The major objective of the paper is to further understand differences between near ground typhoon-generated and monsoon wind characteristics. Furthermore, the estimated wind profile and turbulence profiles were compared to those stipulated by wind loads Standard to verify the suitability of the wind load specification. The results reveal that in the near-surface range vertical distribution of mean wind speed can be well described by a logarithmic law and a power law. The mean values of exponent of the power-law profile are 0.12 and 0.06 for the coastal terrain in the typhoons and monsoon wind climates, respectively. The variation of the mean longitudinal turbulence intensity with varying height approximately follows a power law. The mean value of longitudinal turbulence intensity at five heights was fitting the results of the turbulence intensity profile. The profile is which was approximately same as that stipulated in wind loads Standard for coastal terrain exposure. Meanwhile, the measured gust factor of typhoons is larger than that stipulated in wind loads Standard for the coastal terrain exposure, but for the monsoon, it is close to the code value.

收稿日期:2015-10-21; 修订日期:2015-12-08

基金项目:国家自然科学基金(51308140,51668015);广西自然科学基金(2015GXNSFAA139251);广西建筑新能源与节能重点实验室(16-J-21-7);广西高校科研项目(2013YB103)

作者简介:胡尚瑜\*(1981-),男,湖南永州人,工学博士,副教授,研究方向:结构风工程. E-mail:hushangyu@glut.edu.cn

引用格式:胡尚瑜,聂功恒,李秋胜. 近海岸强风风场特性现场实测研究[J]. 空气动力学学报, 2017, 35(2): 242-250.

doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0009 Hu S Y, Nie G H, Li Q S. Field measurement study on wind characteristics of strong windstorm in coastal terrain[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2017, 35(2): 242-250.

**Keywords:** wind loads; mean wind speed profile; turbulence intensity; gust factor; bootstrap statistics

## 0 引言

近年来近海岸建筑和高耸结构及超大跨度桥梁等工程不断兴建,近海岸工程的结构抗风设计和安全可靠性能显得尤为重要。在强/台风极端条件下,近地风场特性和结构极值风荷载的现场实测研究,对近海岸工程结构抗风设计和结构安全评估有着重要的意义。近年来国内外学者<sup>[1-10]</sup>通过移动测风塔和近海岸观测塔等各种测试平台,获取了大量的近地台风风场数据。基于现场实测数据,统计分析了近地平均风剖面指数、湍流度、阵风因子等物理量。由于受台风自身湍流结构及随机性,不同台风区域和不同强风标准及统计方法等因素影响,近地台风风场湍流特性参数取值存在较大差异。

本文基于近海岸 100 m 测风塔在 2009~2011 年期间测得的 10 m、50 m、65 m、80 m、100 m 5 个不同高度实测风速数据,以 10 m 高度平均风速大于 10 m/s 为强风标准,选取有效分析风速样本,应用 Bootstrap 统计方法,对近海岸海面来流地貌条件,台风和季风风场的平均风剖面、湍流强度剖面及相关湍流特征参数进行分析,并探讨了台风和季风风场近地层的平均风剖面指数、湍流度和阵风因子等参数的差异,同时将实测结果与风荷载规范规定值进行比较,检验风荷载规范的适宜性。本文研究结果可为近海岸工程结构抗风设计风剖面参数取值提供参考。

## 1 近地边界层风特性

### 1.1 平均风剖面

在强风作用下,近地中性稳定大气边界层的湍流主要由地面粗糙度控制,平均风速剖面变化规律常认为符合指数律或对数律<sup>[11-12]</sup>。

指数律模型:

$$U(z_i) = U(z_R) \left( \frac{z_i}{z_R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中:  $z_R$  为参考高度;  $\alpha$  为幂指数,其值与地貌状况相关。

对数律模型:

$$U(z_i) = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z_i}{z_0} \right) \quad (2)$$

式中:  $k$  为卡曼常数,取 0.4;  $u_*$  为摩擦速度;  $z_0$  为地面粗糙度长度。

#### 1.1.1 指数律模型拟合

依据指数律模型式可得:

$$\ln \left( \frac{U(z_i)}{U(z_R)} \right) = \alpha \ln \left( \frac{z_i}{z_R} \right) \quad (3)$$

设  $y_i = \ln \left( \frac{U(z_i)}{U(z_R)} \right)$ ,  $x_i = \ln \left( \frac{z_i}{z_R} \right)$ , 对各高度实测平均风速,应用最小二乘法对风剖面指数  $\alpha$  进行拟合,当拟合计算风速与实测风速离差平方和趋于零可得  $\alpha$  的计算公式为:

$$\alpha^{LS} = \sum_{i=1}^N x_i y_i \Bigg/ \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (4)$$

各高度拟合计算风速与实测风速离差平方和计算式如下:

$$R = \sum_{i=1}^N [U(z) - U(z_i)]^2 \quad (5)$$

式中:  $U(z)$  为实测值,  $U(z_i)$  为拟合计算风速。

各高度拟合计算风速与实测风速离差平方和均方根误差计算式如下:

$$RMSE = \sqrt{R/N} \quad (6)$$

拟合风剖面的相对误差大小定义为离差平方和均方根误差与参考风速大小的比值如下:

$$E_n = RMSE / U_n \quad (7)$$

#### 1.1.2 对数律模型拟合

依据对数律模型计算式可得:

$$U(z_i) = U(z_R) \frac{\ln \left( \frac{z_i}{z_0} \right)}{\ln \left( \frac{z_R}{z_0} \right)} \quad (8)$$

应用最小二乘法对各高度实测平均风速进行线性拟合,当拟合计算风速与实测风速离差平方和趋于零,可得地面粗糙度  $z_0$  的计算公式<sup>[13]</sup>如下:

$$\ln(z_0) = \frac{U(z_R) \left\{ \sum_{i=1}^N [\ln(z_i)]^2 - \ln(z_R) \sum_{i=1}^N \ln(z_i) \right\} - \ln(z_R) \sum_{i=1}^N [U(z_i) \ln \left( \frac{z_i}{z_R} \right)]}{\left\{ U(z_R) \sum_{i=1}^N \ln(z_i) - \sum_{i=1}^N \left[ U(z_i) \ln \left( \frac{z_i}{z_R} \right) \right] - NU(z_R) \ln(z_R) \right\}} \quad (9)$$

摩擦速度定义为:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (10)$$

式中:  $\tau_0$  为地表的剪切应力,  $\rho$  为空气密度。本文摩擦速度依据地面粗糙度  $z_0$  拟合值和不同高度的风速代入公式(2), 运用最小二乘法进行线性拟合, 可得其对应的摩擦速度  $u_*$  拟合值。

## 1.2 湍流强度

湍流度反映了风的脉动强度, 是确定脉动风荷载的关键参数之一。湍流度定义为平均时距的脉动风速标准差与水平方向平均风速的比值:

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \quad (11)$$

式中  $\sigma_u$  为 1s 采样频率脉动风速的标准差, 文中的湍流度主要反映大尺度湍流脉动的特征。依据文献[14]比较超声测风仪和 NRG 杯式测风仪实测湍流强度分析, 认为两个风速仪获得的湍流强度具有相同趋势, 超声风速仪的湍流强度略大于 NRG 杯式测风仪, 因而本文对 NRG 杯式测风仪实测各高度的湍流强度乘以 1.1 进行了相应的修订。

GB50009-2012 建筑结构荷载规范<sup>[15]</sup> 给出了各高度平均湍流强度剖面计算式:

$$I_u(z) = I_{10} (10/z)^\alpha \quad (12)$$

式中  $\alpha$  为风剖面指数, 其值与地貌状况相关。对应于 A 类地貌, 规范给定值为 0.12。  $I_{10}$  为 10 m 高度名义湍流度, 对应 A 类地貌取值为 0.12。

## 1.3 阵风因子

风的脉动强度也可用阵风因子来表示。阵风因子定义为阵风持续期的平均风速最大值与平均时距内平均风速的比值:

$$G_{(t_g, T)} = \frac{U_{\max, t_g}}{\bar{U}_T} \quad (13)$$

本文取阵风持续期  $t_g = 3$  s, 平均时距  $T = 10$  min。

阵风峰值因子定义为:

$$g(3, z) = \frac{U_{\max, t_g} - \bar{U}_T}{\sigma_u} \quad (14)$$

式中:  $U_{\max, t_g}$  为阵风时距内最大平均风速。

阵风因子和湍流度在物理上都表示风速的脉动强度, 相互关系可表示为:

$$G(z)_u = 1 + gI_u(z) \quad (15)$$

依据式湍流强度剖面计算式(12)和式(15)可得各高度的阵风因子剖面计算式:

$$G(z)_u = 1 + gI_{10} (10/z)^\alpha \quad (16)$$

## 1.4 Bootstrap 分析思路

以选取梯度风各高度范围内的强风风速样本, 采

用指数律模型拟合得到各样本的风剖面指数计算序列  $(\alpha_{s1}, \alpha_{s2}, \dots, \alpha_{sn})$  为例。运用 Bootstrap 方法, 统计分析风剖面指数置信区间的分析思路如下:

1) 根据风速数据样本拟合得到的  $\alpha$  指数, 记作  $\alpha_s$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ );

2) 根据样本值  $X = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) = (\alpha_{s1}, \alpha_{s2}, \dots, \alpha_{sn})$ , 计算样本均值  $\bar{X}$  和方差  $S^2$ 。

3) 对样本作有放回模拟再抽样<sup>[16]</sup>: 采用 Monte-Carlo 法随机抽出一个数据, 共抽取  $n$  次, 得到第一个 Bootstrap 样本  $X''_1 = (\tau''_{11}, \tau''_{21}, \dots, \tau''_{n1})$ ;

4) 按步骤 3) 连续重复  $B$  次, 即得到  $B$  个 Bootstrap 再生样本, 用矩阵表示为:

$$X'' = \{X''_1, X''_2, \dots, X''_B\} = \begin{bmatrix} \tau''_{11} & \tau''_{12} & \dots & \tau''_{1B} \\ \tau''_{21} & \tau''_{22} & \dots & \tau''_{2B} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tau''_{n1} & \tau''_{n2} & \dots & \tau''_{nB} \end{bmatrix} \quad (17)$$

计算再生样本的统计量:

$$Y'' = \{y''_1, y''_2\}^T = \{\bar{X}'', S''\}^T \quad (18)$$

其中:  $y''_i = y''_{i1}, y''_{i2}, \dots, y''_{iB}$ ,  $i = 1, 2$ 。

5) 根据再生样本  $y''_i$ , 可以得到  $\mu$  和  $\sigma^2$  的估计:

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= (\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2, \dots, \hat{\mu}_B), \\ \hat{\sigma}^2 &= (\hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2, \dots, \hat{\sigma}_B^2) \end{aligned} \quad (19)$$

6) 采用百分位法进行参数的区间估计: Bootstrap 估计量  $\theta$  按从小到大排序, 则置信度  $1 - \delta$  的置信区间为  $(k_{\delta/2}, k_{1-\delta/2})$ , 其中  $k_{\delta/2}, k_{1-\delta/2}$  为  $\hat{\theta}_i^*$  的经验分位数。

## 2 现场实测及数据选取

### 2.1 实测系统及场地条件

测风塔位于海南文昌木兰头, 东经  $110^\circ 44'$ , 北纬  $20^\circ 09'$ , 在离地面 10 m、50 m、65 m、80 m、100 m 高度处布设安装了 NRG-Symphonie 型杯式风速仪进行风速观测, 同时在 50 m、65 m、100 m 高度处安装了风向仪进行风向角的观测。测试系统采样频率为 1 Hz, 每 10 min 输出 1 组平均风速风向、极大风速风向和风速、风向标准差等。观测塔观测地貌状况: 东北方位来流地貌条件为海面, 距离海岸线约为 50 m; 西南方位为平坦开阔场地, 下垫面为近地有 2~3 m 高的马尾松防护林。

### 2.2 强风样本选取

2009 年 7 月至 2011 年 7 月两年期间, 近海岸梯度风观测塔获取的近地台风风场及季风风场有效观测样本的极值风速统计如表 1 所示, 台风“彩虹”实测 3 s 最大平均风速为 26.2 m/s, 10 min 最大平均风

速为 20.4 m/s。台风“凯萨娜”实测 3 s 最大平均风速为 26.2 m/s, 10 min 最大平均风速为 20.3 m/s。台风“芭玛”实测 3 s 最大平均风速为 20.1 m/s, 10 min 最大平均风速为 14.7 m/s。

表 1 观测样本资料

Table 1 Observation of wind records used in study

风场	登录时间	高度	10 min 最大风速	3 s 最大阵风风速
彩虹(0913)	2009-9-11	10 m	20.4 m/s	26.2 m/s
凯萨娜(0916)	2009-9-29	10 m	20.3 m/s	26.2 m/s
芭玛(0917)	2009-10-12	10 m	14.7 m/s	20.1 m/s
季风	2009~2011	10 m	12.4 m/s	15.9 m/s

注：表中高度为相对地面高度。

本文以测风塔 10 m 高度处 10 min 平均风速大于 10 m/s 为强风标准, 选取台风和季风风场的强风样本数据, 对近地边界层风特性进行分析。10 m 高度处台风和季风风场强风风速、风向角样本分布如图 1(a、b) 所示: 台风和季风风场强风样本主要分布在  $30^\circ \sim 60^\circ$  范围内, 因而本文选取风向角分布在  $30^\circ \sim 60^\circ$  范围内的强风样本, 该方位来流地貌为近海面, 考虑来流经历由海面地貌到近海岸地貌条件, 存在内部边界层高度需确定问题。参考文献[17]给出的内部边界层高度计算公式, 根据测风塔距其海岸线大约为 50 m, 假设海面地貌粗糙度长度由 0.002 m 过渡到 0.02 m 地貌条件时, 其内部边界层高度值约为 7.1 m。

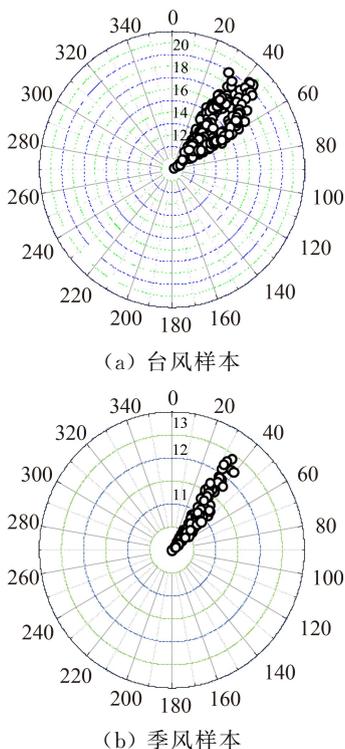


图 1 台风和季风风场测风塔 10 m 高度选取样本平均风速、风向分布

Fig. 1 Distribution of mean wind speeds and directions for Typhoons and Monsoons at 10 m height

因而本文实测各高度风速实测大小反映来流为海面地貌条件下的边界层风速, 旨在分析近海岸海面地貌状况下台风风场和季风风场特性。各观测层的高度应从海平面开始, 根据实际量测测风塔相对海面高度差约为 4 m。同时考虑到强风条件下受海浪的影响, 测风塔平面位置相对海面高度差近似取为 3 m, 即各观测层的高度分别为 13 m、53 m、68 m、83 m、103 m。

### 3 风特性分析

#### 3.1 平均风特性

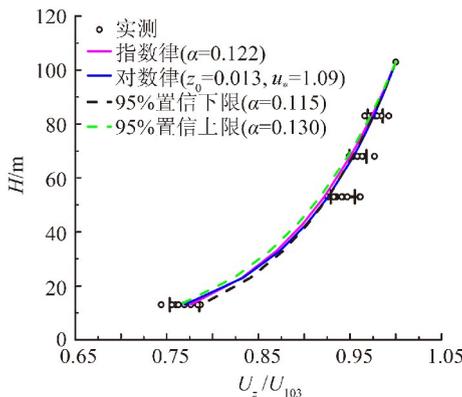
选取来流为近海面地貌条件下, 实测台风“彩虹”、“凯萨娜”、“芭玛”及季风风场各观测高度的平均风速数据, 应用对数律模型和指数律模型对风剖面进行最小二乘线性拟合。考虑当 10 m 高度风速达到 17.2 m/s 时, 风力等级将达到八级大风级。因而以风速 17.2 m/s 为分界线对台风“凯萨娜”风速划分区间, 区间  $[10, 17.2)$  为“凯萨娜”(I), 区间  $[17.2, 20.3)$  为“凯萨娜”(II)。指数律、对数律风剖面参数拟合值如表 2 所示: 台风“彩虹”风剖面指数  $\alpha$  均值为 0.122, 应用 Bootstrap 法计算得到的风剖面指数  $\alpha$  均值在 95% 置信度条件下的置信区间为  $[0.115, 0.130]$ ; 台风“凯萨娜”(I) 平均风速小于 17.2 m/s 样本的风剖面指数  $\alpha$  均值为 0.128; 台风“凯萨娜”(II) 平均风速大于等于 17.2 m/s 大风样本的风剖面指数  $\alpha$  均值为 0.119; “芭玛”风场风剖面  $\alpha$  指数均值为 0.118, 各台风风场与规范 GB50009-2012 中 A 类地貌条件风剖面指数  $\alpha$  规定值 0.120 相近。季风风场风剖面指数  $\alpha$  均值为 0.062, 其 95% 置信区间为  $[0.060, 0.063]$ 。季风风场风剖面指数  $\alpha$  均值小于规范值和台风风场值。台风风场地面粗糙度长度和摩擦速度与平均风速大小相关, 与季风风场相比, 地面粗糙度长度和摩擦速度相对增大。近地 100 m 高度范围内的指数律和对数律剖面以及相关拟合曲线如图 2 所示。由图 2(a) 可知: “彩虹”台风近地层平均风剖面各高度平均风速变化规律符合指数律和对数律模型。同理由图 2(b-e) 可知, 指数律和对数律模型对台风“凯萨娜(I、II)”和“芭玛”及季风风场近地层平均风剖面各高度风速拟合基本较好, 各台风指数律风剖面拟合相对误差值与参考风速变化关系如图 2(f) 所示, 整体上相对误差约为 2% 左右, 表明强风条件下指数律和对数律模型都能较好的反映近地 100 m 高度范围内的平均风速变化规律。值得说明的是, 在 50~70 m 高度范围, 近地层存在一段风速变化大小变化不明显区间, 这与文献[18]在近海平坦地貌条件, 海面来风时, 在 50~70 m 高度范围, 风

表 2 平均风剖面参数

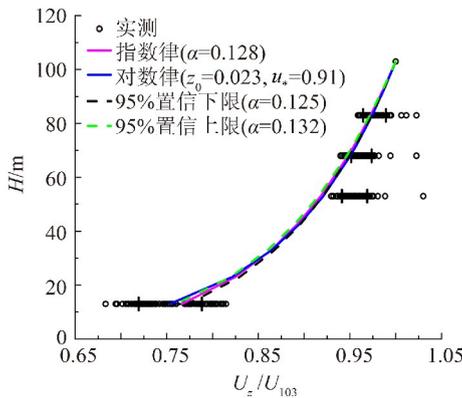
Table 2 Parameters of mean wind speed

风场	平均风速范围/(m·s <sup>-1</sup> )	样本数	$u_s$ /(m·s <sup>-1</sup> )	$Z_0$ /m	$\alpha$
彩虹	18~20.4	8	1.09 [1.02, 1.16]	0.013 [0.007, 0.018]	0.122 [0.115, 0.130]
凯萨娜	10.2~17.2	97	0.91 [0.87, 0.95]	0.023 [0.019, 0.027]	0.128 [0.125, 0.132]
芭玛	17.2~20.3	58	1.01 [0.98, 1.04]	0.011 [0.008, 0.014]	0.119 [0.115, 0.122]
季风	11.3~14.7	50	0.75 [0.70, 0.80]	0.018 [0.012, 0.025]	0.118 [0.112, 0.125]
季风	10.0~12.4	235	0.28 [0.28, 0.29]	0.00082 [2.2×10 <sup>-5</sup> , 1.2×10 <sup>-4</sup> ]	0.062 [0.060, 0.063]

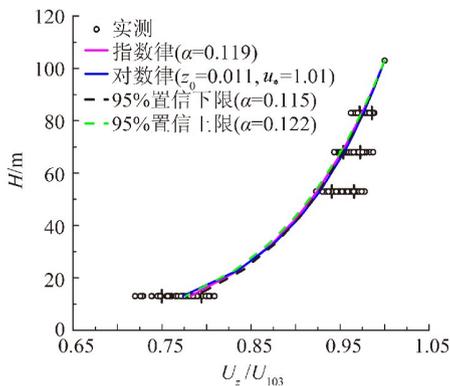
注: [ ] 为 Bootstrap 法预测均值 95% 置信区间。



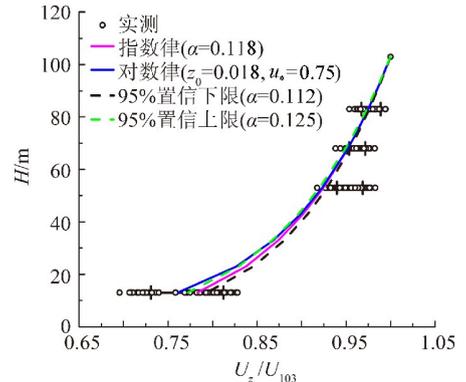
(a) 台风“彩虹”



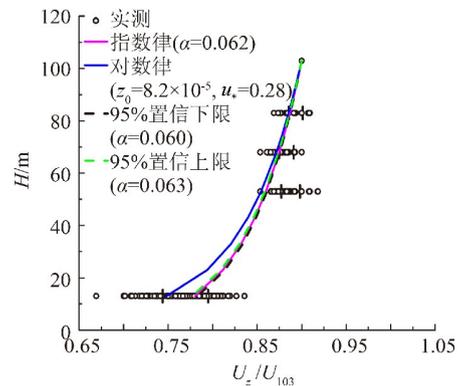
(b) 台风“凯萨娜”(I)



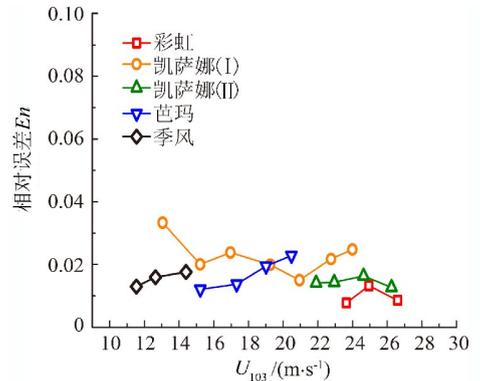
(c) 台风“凯萨娜”(II)



(d) 台风“芭玛”



(e) 季风风场



(f) 相对误差

图 2 台风和季风风场平均风剖面

Fig. 2 Mean wind speed profiles of typhoon and monsoon

速大小变化不明显,具有相似的现象,在高度 60 m 附近范围存在强风区段。其主要原因仍需要通过采用超声风速仪等资料分析其区间梯度风变化规律及差异产生的原因。

### 3.2 湍流特性

#### 3.2.1 湍流强度及剖面

选取来流为近海面地貌条件下,实测台风“彩虹”、“凯萨娜”、“芭玛”及季风风场各观测高度的平均风速及风速标准差的强风样本,统计分析了近海岸地貌下,台风和季风风场近地边界层湍流度分布规律。

如表 3 所示：“彩虹”、“凯萨娜”样本(I)、(II)和“芭玛”台风风场 13 m 高度湍流强度均值分别为 0.119、0.135、0.123 和 0.125，均值范围为 0.119~0.135，略大于现行规范 A 类地貌规范计算值 0.116。季风风场 13 m 高度湍流强度均值为 0.104，略小于现行规范 A 类地貌规范计算值。

如图 3 所示，台风风场平均湍流度沿高度变化规律符合指数律分布，各台风湍流强度平均剖面与现行规范给定值相接近。应用公式(12)和实测风剖面指

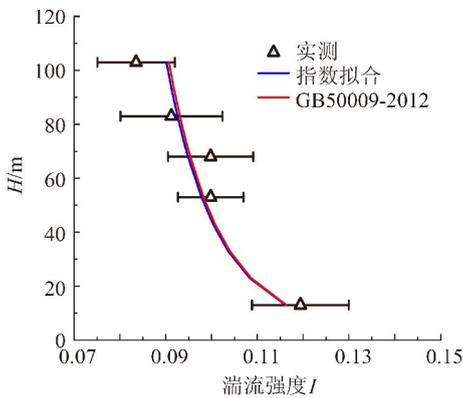
数  $z_0$  拟合值，采用最小二乘法线性拟合，可得“彩虹”、“凯萨娜”样本(I)、(II)和“芭玛”台风风场 13 m 高度湍流度拟合值。同时考虑到 13 m 高度的湍流实测值可能受到近地面干扰影响，在湍流特性参数拟合计算时未采用 13 m 高度湍流实测值。拟合所得各台风 13 m 高度湍流度拟合值分别为 0.116、0.114、0.108 和 0.109，与规范给定计算值 0.116 较为接近，小于实测值。各高度的规范推荐值能较好反映实测各台风风场平均湍流度剖面均值分布特性。从图 3(e)

表 3 各高度的湍流强度与阵风因子统计

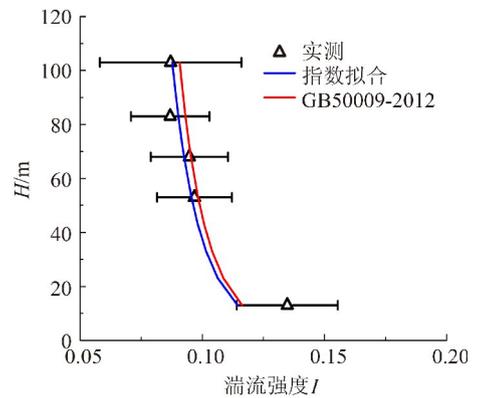
Table 3 Parameter of wind turbulence intensity and gust factors statistics

高度 /m	参数统计	彩虹		凯萨娜(I)		凯萨娜(II)		芭玛		季风		规范计算值	
		$I_u$	$G_u$	$I_u$	$G_u$	$I_u$	$G_u$	$I_u$	$G_u$	$I_u$	$G_u$	$I_u$	$G_u$
103	Mean	0.084	1.24	0.087	1.22	0.078	1.21	0.081	1.23	0.065	1.21	0.091	1.23
	Std	0.008	0.036	0.029	0.039	0.011	0.029	0.018	0.044	0.012	0.040	-	-
83	Mean	0.091	1.25	0.087	1.24	0.086	1.23	0.085	1.24	0.069	1.21	0.093	1.23
	Std	0.011	0.031	0.016	0.044	0.011	0.033	0.016	0.048	0.012	0.042	-	-
68	Mean	0.100	1.27	0.095	1.25	0.093	1.25	0.093	1.26	0.074	1.22	0.095	1.24
	Std	0.009	0.055	0.016	0.038	0.012	0.034	0.016	0.048	0.012	0.042	-	-
53	Mean	0.100	1.28	0.097	1.26	0.094	1.26	0.094	1.26	0.074	1.22	0.098	1.25
	Std	0.007	0.041	0.015	0.040	0.011	0.035	0.015	0.044	0.012	0.044	-	-
13	Mean	0.119	1.33	0.135	1.38	0.123	1.36	0.125	1.37	0.104	1.30	0.116	1.29
	Std	0.011	0.030	0.021	0.058	0.015	0.041	0.022	0.071	0.014	0.048	-	-

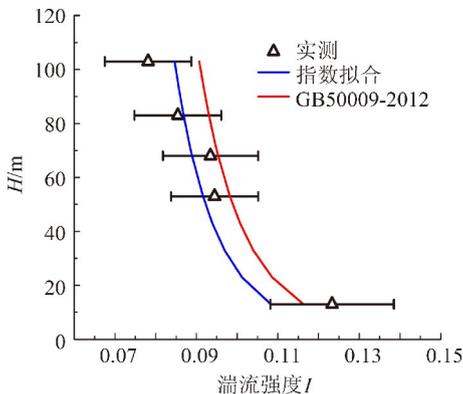
注：表中高度为相对海平面高度，Mean、Std 为平均值、方差， $I_u$  为顺风向湍流度(其值为式(11)计算值乘以修正系数 1.1)， $G_u$  顺风向为阵风因子。



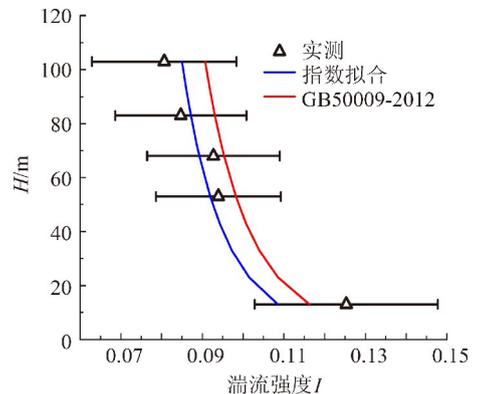
(a) 台风“彩虹”



(b) 台风“凯萨娜”(I)



(c) 台风“凯萨娜”(II)



(d) 台风“芭玛”

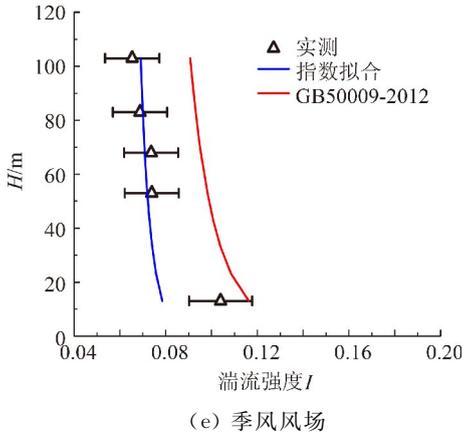
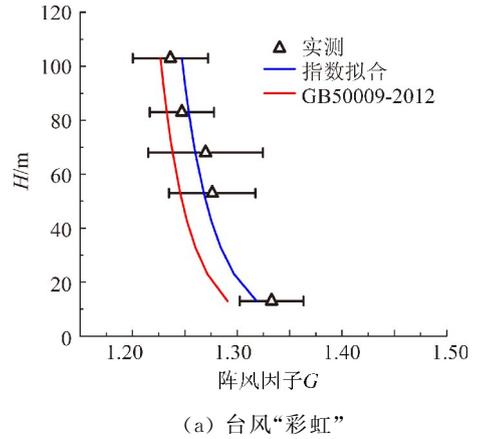


图 3 台风风场和季风风场湍流度剖面  
Fig. 3 The mean turbulence intensity profile

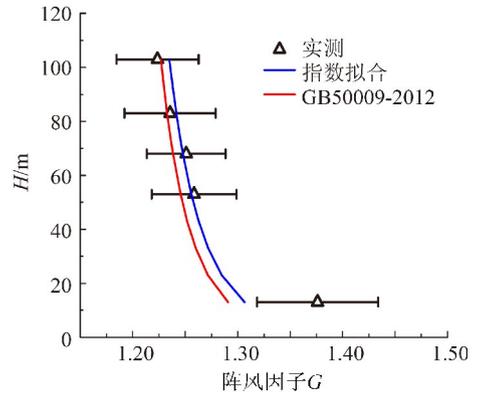
可以看出,季风实测各高度湍流度明显小于规范推荐值。同理对季风风场湍流剖面进行拟合,可得季风风场 13 m 高度湍流度拟合值为 0.078,小于 13 m 高度实测湍流度均值 0.104 和规范计算值 0.116。近地 13 m 高度的湍流度的拟合值与实测值差别的主要原因是:通常湍流参数的内边界层高度是平均风速的 2 倍,相对近地 13 m 高以下大气湍流的更易受近地植被扰动作用影响。

3.2.2 阵风因子及剖面

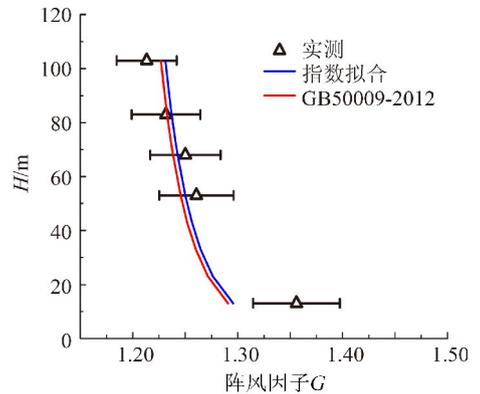
基于 13 m、53 m、68 m、83 m、103 m 5 个不同高度处相对应的平均风速及 3 s 最大阵风风速,统计分析台风和季风风场近地边界层阵风因子及剖面。如表 3 所示;台风“彩虹”、“凯萨娜(I)”、“凯萨娜(II)”和“芭玛”在 13 m 高度处的阵风因子均值分别为 1.33、1.38、1.36、1.37,略大于现行规范 A 类地貌规范计算值 1.29。季风风场 13 m 高度阵风因子均值为 1.30,与现行规范 A 类地貌规范计算值接近。如图 4 所示,实测台风和季风风场阵风因子沿高度变化规律同样符合指数律分布,台风风场阵风因子剖面大于现行规范给定值,季风阵风因子与规范推算值相接近。依据阵风因子计算式(16),采用实测风剖面指数  $\alpha$  拟合值和各台风风场湍流强度剖面拟合 13 m 高度湍流度拟合值即  $I_{13}$  取 0.116、0.114、0.108 和 0.109,对各台风风场阵风因子剖面进行最小二乘线性拟合。拟合“彩虹”、“凯萨娜”(I)、(II)和“芭玛”台风风场的峰值因子  $g$  值分别为 2.74、2.68、2.73 和 2.84,略大于规范给定值 2.5。同理对季风风场阵风因子剖面进行拟合得季风峰值因子  $g$  值为 3.07,大于规范给定值。相对而言,近地 13 m 高度的阵风因子的拟合值与实测值差别的主要原因是受近地面干扰作用影响产生一定大尺度阵风湍流。



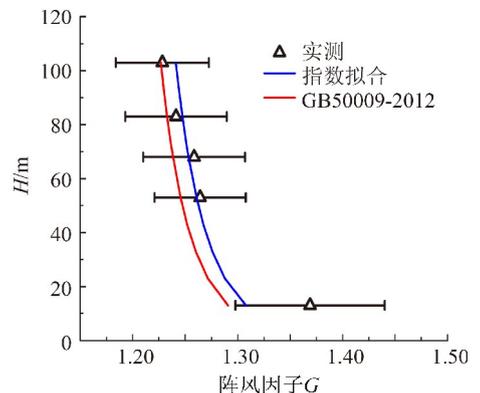
(a) 台风“彩虹”



(b) 台风“凯萨娜”(I)



(c) 台风“凯萨娜”(II)



(d) 台风“芭玛”

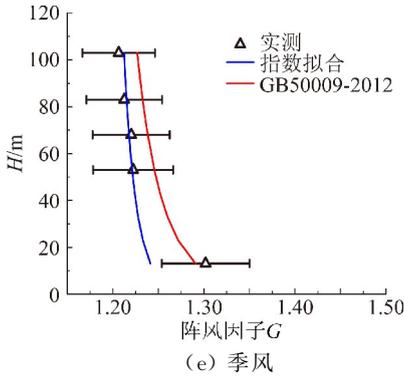


图 4 阵风因子剖面  
Fig. 4 Gust factor profiles

### 3.3 风特性参数与平均风速

选取台风“凯萨娜”(I)、(II)风场样本统计的风特性参数,探讨风特性参数与平均风速的相关性。台风风场风剖面指数与平均风速的关系如图 5 所示;台风风剖面指数  $\alpha$  随平均风速增大有减小趋势。类似对数律拟合得台风风场摩擦速度和地面粗糙度长度与平均风速大小相关,如图 6、图 7 所示,台风风场地面粗糙度长度随平均风速增大而减少,而摩擦速度随平均风速增大而增大。

台风“凯萨娜”(I)、(II)风场样本的相对海面高度为 13 m 处的湍流强度与平均风速的关系如图 8 所

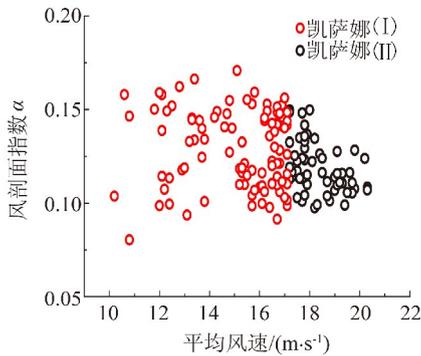


图 5 风剖面指数与平均风速的关系  
Fig. 5 Variation of power law index with mean wind speed

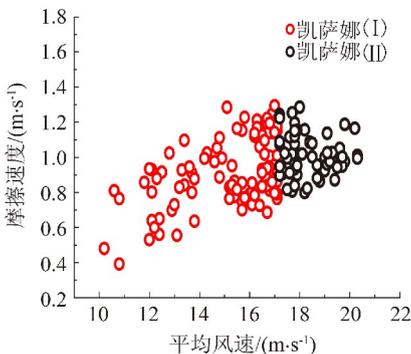


图 6 摩擦速度与平均风速的关系  
Fig. 6 Variation of friction with mean wind speed

示,在平均风速 10~22 m/s 范围内,台风的湍流强度随平均风速增大而减小,随平均风速的进一步增大而相对趋于稳定。相对海面高度为 13 m 处的阵风因子与平均风速的关系如图 9 所示,台风风场在平均风速 10~22 m/s 范围内,阵风因子随平均风速的变化相对稳定。综上所述,近海岸地貌强风条件下,台风风场风剖面指数、湍流强度和阵风因子大于季风风场实测值。各台风风场湍流参数随着平均风速增大有减小的趋势,随着风速的继续增大而趋于稳定。与文献 [6-7] 具有相似的结论,各台风风场湍流参数随着平

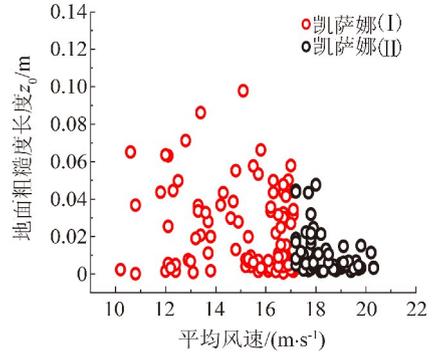


图 7 地貌粗糙度与平均风速的关系  
Fig. 7 Variation of roughness with mean wind speed

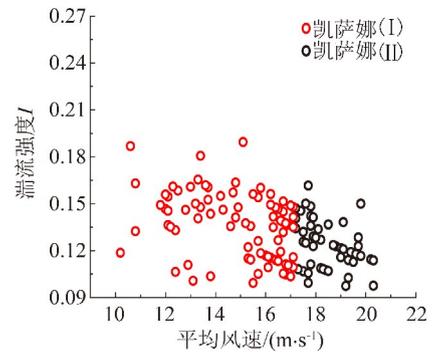


图 8 湍流度与平均风速的关系  
Fig. 8 Variation of turbulence intensities with mean wind speed

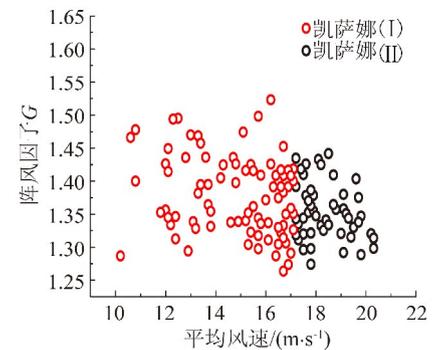


图 9 阵风因子与平均风速的关系  
Fig. 9 Variation of gust factor with mean wind speed

均风速增大而减少,而在平均风速 17.2~22 m/s 区间范围相对趋于平稳。

## 4 结 论

基于近地层风场风特性的实测强风风速样本,对近海岸地貌强风条件下台风和季风风场参数如风剖面指数、湍流度和阵风因子等进行了统计分析,得到如下结论:

1) 强风风场近地平均风速剖面符合指数律或对数律,台风风场风剖面指数  $\alpha$  均值约为 0.12,与规范规定值接近。季风风场风剖面指数  $\alpha$  均值为 0.06,小于规范值。台风风场地面粗糙度长度及摩擦速度较季风风场值偏大达 70%;

2) 台风风场平均湍流度剖面符合指数律分布,台风湍流强度平均剖面与规范 A 类地貌湍流强度推算值相一致。季风风场各高度实测湍流度明显小于规范给定值;

3) 台风风场阵风因子剖面变化规律同样符合相应的平均风速剖面  $\alpha$  指数律分布。台风风场阵风因子剖面大于现行规范给定值,季风风场阵风因子与规范给定值接近;

4) 台风风场平均风剖面  $\alpha$  指数、湍流度和阵风因子大于季风风场实测值。各台风风场湍流参数随着平均风速增大而减少,而在平均风速 17.2~22 m/s 区间范围相对趋于平稳。

讨论:本文依据近海岸观测塔获取的台风和季风强风特性的实测数据进行统计分析,得出了近海岸海面地貌条件下近地平均风速剖面、湍流度剖面及阵风因子剖面的变化规律与现行规范 A 类地貌条件推荐值具有较好的一致性,但具体量值存在的差异,风速剖面参数化仍需要更多的有效实测强风样本确定和验证。

致谢:感谢中国华能海南文昌风电厂提供的实测风速数据。

## 参 考 文 献:

[1] Schroeder J L, Edwards B P, Giammanco I M. Observed tropical cyclone wind flow characteristics[J]. Wind and Structures, 2009, 12(4): 349-381.

[2] Masters F J, Tieleman H W, Balderrama J A. Surface wind measurements in three Gulf Coast hurricanes of 2005[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(10): 533-547.

[3] Fujimura M, Maeda J. Cross-correlation of fluctuating components of wind speed based on strong wind measurement[C]// Proceedings of 7th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, T1-D, Taipei, 2009.

[4] 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): 11-21.

[5] Zheng Q M, Luo Y L. Investigations on the terrain classification and characteristics of atmospheric turbulent boundary layer [J]. Journal of Architecture, 2009(68\_S): 103-120. 郑启明, 罗元隆. 风力规范之标准地况分类与紊流边界层特性研究[J]. 建筑学报, 2009(68\_S): 103-120.

[6] Hu S Y, Song L L, L Q S. Monitoring of typhoons in surface boundary layer and analysis of wind turbulence characteristics [J]. Journal of Building structures, 2011, 32(4): 1-8. 胡尚瑜, 宋丽莉, 李秋胜. 近地边界层台风观测及湍流特征参数分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(4): 1-8.

[7] Xiao Y Q, Li L X, Song L L, et al. Study on wind characteristics of typhoon hagupit based on offshore sea surface measurements[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(3): 380-389. 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): 380-389.

[8] Song L L, Mao H Q, Huang H H, et al. Analysis on boundary layer turbulent features of landfalling typhoon[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6): 915-921. 宋丽莉, 毛慧琴, 黄浩辉, 等. 登陆台风近地层湍流特征观测分析[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 915-921.

[9] Song L L, Pang J B, Jiang C L, et al. Field measurement and analysis of turbulence coherence for typhoon nuri at macao friendship bridge [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(10): 2647-2657.

[10] Li Q S, Dai Y M, Li Z N, et al. Surface layer wind field characteristics during a severe typhoon 'Hagupit' landfalling[J]. Journal of Building structures, 2010, (4): 54-61. 李秋胜, 戴益民, 李正农, 等. 强台风“黑格比”登陆过程中近地风场特性[J]. 建筑结构学报, 2010, (4): 54-61.

[11] Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones [J]. Nature, 2003, 422: 279-283.

[12] Choi E C C. Characteristics of typhoons over the south China sea[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1978, 3: 353-365.

[13] Archer C L, Jacobson M Z. Spatial and temporal distributions of US winds and wind power at 80 m derived from measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2003, 108(D9).

[14] Song L, Li Q S, Chen W, et al. Wind characteristics of a strong typhoon in marine surface boundary layer[J]. Wind and Structures, 2012, 15(1): 1-15.

[15] Load code for the design of building structures. GB50009-2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012: 55. 建筑结构荷载规范. GB50009-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 55.

[16] Bradley E. Bootstrap methods: another look at the Jackknife [J]. The Annals of Statistics, 1979, 7(1): 1-20.

[17] Savelyev S A, Taylor P A. Internal boundary layers: I. Height formulae for neutral and diabatic flows [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 115(1): 1-25.

[18] Li L X, Xiao Y Q, Song L L, et al. Study on wind profile of typhoon hagupit using wind observed tower and wind profile radar measurements[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 284-293. 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): 284-293.