

# 考虑台风空间位置的桥址区风特性模型实测研究

张 寒,王 浩,徐梓栋,陶天友,茅建校,郜 辉

(东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室,江苏 南京 211189)

**摘要:** 风特性是桥梁结构抗风设计的前提条件。为准确表征台风移动对桥址区风特性的影响,利用桥梁结构健康监测系统测得的多次台风实测数据,研究了考虑台风空间位置的桥址区风特性模型。基于已有台风解析模型和台风路径数据,模拟了台风过境期间桥址区平均风速时程,并利用实测结果验证了解析模型的有效性。在此基础上,分析了湍流强度、阵风因子、湍流积分尺度等脉动风特性参数随桥址区和台风中心距离的变化规律,据此研究了脉动风特性参数的空间分布模型。结果表明,已有台风解析模型可实现桥址区平均风速的模拟;台风空间位置变化对桥址区脉动风特性影响显著,空间分布模型能有效反映台风移动过程中桥址区脉动风特性的基本变化特征,可为大跨度桥梁等工程结构设计与运维提供有益参考。

**关键词:** 桥梁结构健康监测; 台风; 风特性; 桥址区; 风场模型

**中图分类号:** U448.27;U441+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)05-1430-07

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.05.027

## 引 言

近年来,全球台风灾害频发,造成大量工程结构破坏与倒塌,给人类社会带来巨大的经济损失和惨重的人员伤亡。中国是受台风灾害影响最为严重的国家之一,尤其是东南部沿海地区常年遭受西北太平洋台风侵袭<sup>[1]</sup>,导致区域性重复受灾,大跨度桥梁等风敏感结构的安全面临严峻挑战<sup>[2]</sup>。随着苏通长江大桥、五峰山长江大桥、沪通长江大桥等一系列世界级桥梁工程的陆续建成,以及张皋长江大桥、琼州海峡大桥等超大型桥梁的规划和设计,中国桥梁工程正朝着更大跨、更纤细的方向迅速发展,对桥梁结构的抗风安全提出了更高的要求。

准确的桥址区风特性是桥梁结构抗风设计与研究的重要依据。当前,桥梁结构设计风特性参数主要来源于规范推荐值,一般由区域气象数据统计得到。然而,长期统计结果涵盖台风和良态风等多种资料,难以有效反映强台风特性<sup>[3]</sup>。此外,台风空间位置的改变导致固定桥址区风特性不断发展<sup>[4-5]</sup>,单一统计结果未体现台风移动过程桥址区风特性演变特征。为此,有必要研究台风移动对风特性的影响,揭示桥址区风特性与台风空间位置的关系,实现台风全过程桥址区风特性的准确估计,从而为桥梁设

计与运维提供有效参考。

在台风特性的空间分布方面,Holland<sup>[6]</sup>提出了台风气压场的解析模型,实现了台风气压场的表征。此后,Meng等<sup>[7]</sup>和 Vickery等<sup>[8]</sup>通过现场观测和理论分析提出了更为精细化的台风风场解析模型,量化了台风风速的空间分布规律。在此基础上,Fang等<sup>[4]</sup>通过大量观测,提出了适用于中国东南沿海台风区域特征的风场解析模型,为台风多发地区工程结构抗风设计提供了有效参考。然而,上述风场解析模型大多反映了台风的平均风场特性,较少体现脉动风特性在台风场中的空间分布规律,可同时刻画桥址区脉动风特性的台风模型则更为少见。已有研究表明,脉动风特性对大跨度桥梁结构风效应影响显著<sup>[5,9]</sup>。因此,有必要在台风平均风场解析模型的基础上,研究脉动风特性的空间分布模型,以进一步补充完善台风工程解析模型。现场实测是获取脉动风特征最直接和最有效的手段之一。此前,国内外已有多位学者基于实测进行了台风脉动风特性参数的统计研究。Xu等<sup>[10]</sup>利用青马大桥结构健康监测系统 (Structural Health Monitoring System, SHMS)进行了“胜利”台风的风特性研究。Wang等<sup>[5]</sup>基于 SHMS 研究了苏通大桥实测台风特性。Shu等<sup>[11]</sup>采用气象站长期实测数据研究了台风的阵风因子特性。

**收稿日期:** 2021-11-23; **修订日期:** 2022-03-14

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51978155, 51908125, 52108274);江苏省自然科学基金资助项目(BK20190359);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2242020k1G013)。

本文利用苏通大桥 SHMS 多次台风实测风速样本,在考虑台风移动过程的基础上,验证了台风工程解析模型在预测桥址区平均风场方面的有效性,分析了湍流强度、阵风因子、湍流积分尺度等脉动风特性参数随桥址区和台风中心距离的变化规律,研究了脉动风特性参数的空间分布模型。

## 1 桥址区强风实测

### 1.1 风环境监测系统

苏通大桥 SHMS 风环境监测子系统由 4 组三维超声风速仪组成<sup>[5]</sup>,分别为跨中上游风速仪 MS4,跨中下游风速仪 MS4',北塔顶风速仪 MS2,南塔顶风速仪 MS6,如图 1 所示。上述风速仪风速量程 0~70 m/s,测试精度 0.01 m/s;风向测量范围 0°~359.9°,测试精度 0.1°。在实际测量中,风速仪仅开启二维模式,正北方向设定为 0°风向,顺时针变化为正方向,采样频率设定为 1 Hz。

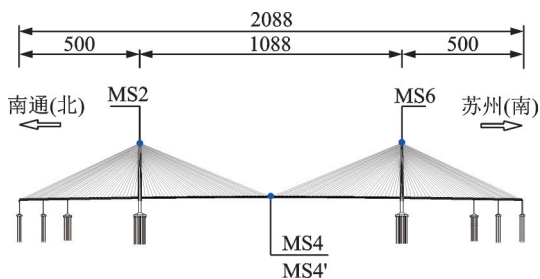


图 1 苏通大桥风环境监测系统(单位: m)

Fig. 1 Anemometers installed on Sutong Bridge (Unit: m)

### 1.2 台风现场实测

利用苏通大桥风环境监测系统,可有效获取台风过境期间桥址区的风速和风向观测资料。通过对长期实测资料的筛分,本文选取了 2012 年至 2019 年间 4 次记录较为完整的台风实测样本,如表 1 所示。此外,图 2 给出了 4 次台风路径轨迹与苏通大桥位置的空间关系示意,其中台风路径数据来源于中国气象局。

结合表 1 和图 2 可知,上述 4 次台风均以较近距

表 1 实测台风概况

Tab. 1 Recorded typhoons

序号	台风命名	编号	实测最大瞬时风速/(m·s <sup>-1</sup> )	
			塔顶	跨中
1	达维	1210	33.40	22.35
2	海葵	1211	54.01	30.33
3	温比亚	1818	57.20	33.00
4	利奇马	1909	41.20	28.90

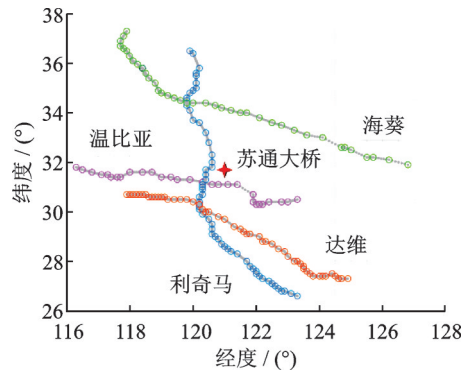


图 2 台风路径示意

Fig. 2 The tracks of the recorded typhoons

离经过苏通大桥,塔顶和跨中实测风速均较高。其中,塔顶最大瞬时风速为 57.2 m/s,跨中最大瞬时风速高达 33.0 m/s。此外,台风“温比亚”过境期间,桥面风力达到十级,一根斜拉索的阻尼器连接螺栓脱落,导致大桥封闭,引发社会广泛关注。

## 2 考虑台风空间位置的平均风特性

### 2.1 平均风速时程

本文采用 Fang 等<sup>[3-4]</sup>发展的台风平均风场解析模型。该模型由 Fang 等根据西北太平洋台风最佳路径数据和长期现场实测资料研究得到。为验证已有平均风速模型的适用性,本文根据中国气象局提供的台风路径数据,采用 Fang 模型模拟了上述 4 次台风过境期间桥址区的平均风速时程。值得注意的是,《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)<sup>[12]</sup>给出的平均风速基本时距为 10 min,与台风路径数据 1 h 的记录间隔存在差异。因此,本文采用线性插值方法对台风路径数据展开预处理,从而得到 10 min 间隔的路径数据,进而为后续台风平均风特性和脉动风特性分析提供便利。在此基础上,模拟了 4 次台风期间苏通大桥南塔顶位置的平均风速时程,并与实测风速样本进行了对比,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,桥址区实测台风风速变化主要分为两类趋势。第一类趋势,台风逐渐靠近桥址区引起风速升高,接着台风中心经过桥址区,导致实测风速发生先降低再升高的突变,此后台风远离桥址区,风速逐渐下降,如图 3(c)和(d)所示。第二类趋势,台风靠近桥址区再逐渐远离,但台风中心未过桥址区,实测风速表现为先升高再降低,如图 3(a)和(b)所示。对于第一类变化趋势,理论模拟风速时程可反映台风风眼过境时出现的“M”型变化过程,但在台风风眼过境时模拟风速相对实测风速偏高。对于第二类变化趋势,理论模拟风速时程与实测结果

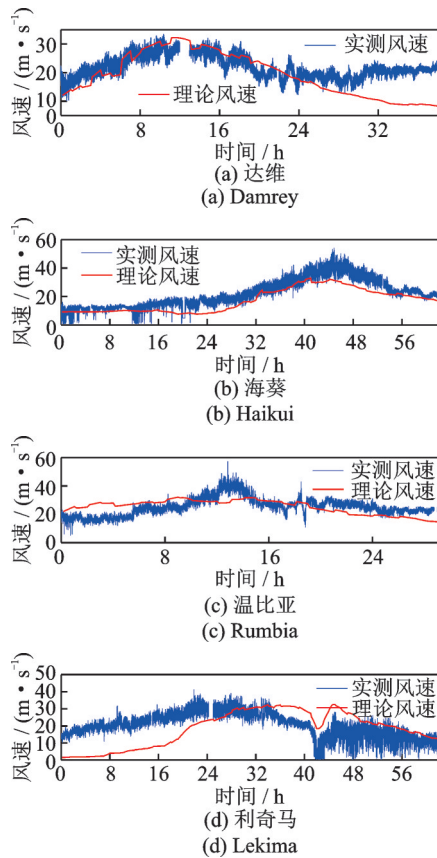


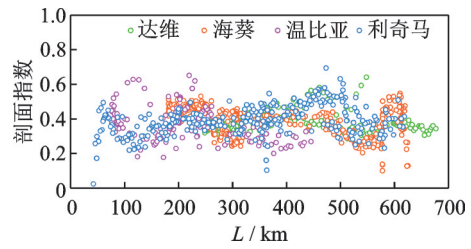
图3 实测台风风速样本与理论模拟风速

Fig. 3 Measured typhoon wind speed samples and theoretical simulated wind speed

吻合较好,理论模型可有效模拟台风期间桥址区风速变化特点。结合图2可知,台风中心路径与桥梁位置较为接近时,如“利奇马”和“温比亚”,理论模型计算风速与实测结果存在一定差异。反之,台风中心路径距桥梁位置相对较远时,理论模型计算风速可较好地预测实际风速。

## 2.2 平均风速剖面

平均风速竖向分布是结构抗风设计中的关键要素。中国《公路桥梁抗风设计规范》(JTJ/T 3360-01—2018)<sup>[12]</sup>中采用指数律模型来描述风速沿垂直高度方向的分布。指数律风速剖面模型作为一种经验模型被广泛应用于桥梁、建筑等结构抗风设计与分析领域。然而,已有研究表明,台风风场中的风剖面指数在较大范围内变化,且与观测点距风场中心距离有关。因此,现有固定指数的风剖面模型不适用于台风全过程桥梁抗风设计。本文利用达维、海葵、温比亚和利奇马4次台风期间塔顶和跨中两个高度处的实测风速,以 $T=10$  min为基本时距计算了上述两个高度处的平均风速,据此分析得到台风过境期间的风剖面指数,并研究了该指数与桥址区和台风中心距离 $L$ 的变化关系,结果如图4所示。

图4 实测风剖面指数随 $L$ 的变化关系Fig. 4 Relationship between measured wind profile index and  $L$ 

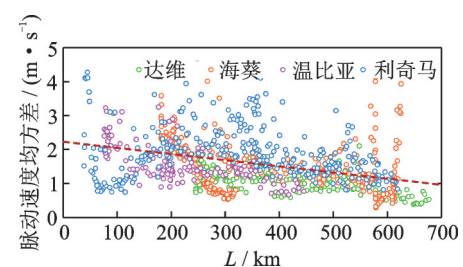
由图4可知,在距台风中心50 km以上的外围区域,桥址区实测风剖面指数在0.2~0.6范围内围绕特定值波动,与参考文献[13]研究结果相符。台风达维、海葵、温比亚、利奇马过境期间的实测风剖面指数分别为0.3863, 0.3814, 0.3673和0.3786,表明各次台风过境期间,该参数基本保持一致。根据上述4次台风实测结果计算得到桥址区平均风剖面参数为0.3784,大于《公路桥梁抗风设计规范》(JTJ/T 3360-01—2018)<sup>[12]</sup>中推荐的最大值0.3。在距台风中心50 km以内的区域,由于风速变化剧烈,风剖面指数变化较大,且相对低于外围区域。值得注意的是,受限于桥上既有风环境监测系统,本文所采用的4个风速仪的安装位置不在同一竖线上,且仅采用两点的风速不足以推算出更精确的风剖面指数。因此,有必要进一步积累台风全域实测风速数据,以进一步研究平均风速的空间分布规律。

## 3 考虑台风空间位置的脉动风特性

### 3.1 湍流强度

为研究湍流强度空间分布特性,首先,以 $T=10$  min为基本时距,计算了达维、海葵、温比亚和利奇马4次台风期间桥塔顶顺风向脉动风速均方差,并研究了脉动风速均方差随 $L$ 的变化规律,结果如图5所示。

由图5可知,4次台风实测脉动风速均方差变化趋势相似,均表现为随桥址区与台风中心距离增大

图5 实测脉动风速均方差随 $L$ 的变化关系Fig. 5 Standard deviation of measured fluctuating wind speed varied with  $L$



而减小。上述现象表明,距离台风中心越近的区域,风速脉动程度越高。根据上述变化趋势,线性拟合得到脉动风速均方差  $\sigma_u$  随距离  $L$  变化的关系表达式为:

$$\sigma_u = -0.0018L + 2.2279 \quad (1)$$

上述关系式对应图 5 中的虚线,除台风利奇马脉动速度均方差离散程度相对较大外,式(1)可反映实测台风脉动风速均方差随  $L$  的大致变化趋势。在此基础上,采用上述理论表达式反算不同距离位置脉动风速均方差,据此模拟 4 次台风过境时的顺风向湍流强度,与实测结果进行对比,如图 6 所示。

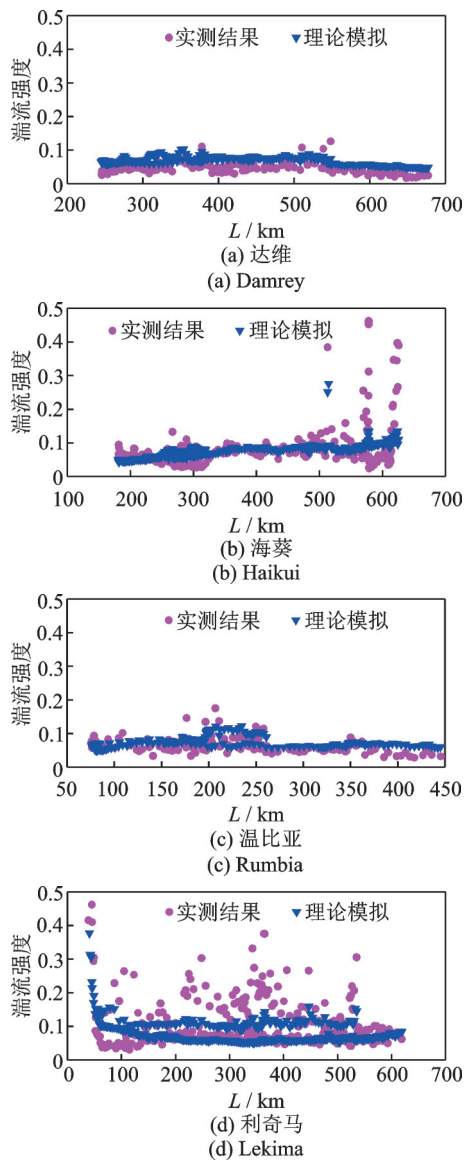


图 6 实测湍流强度与理论模拟结果

Fig. 6 Measured turbulence intensity and theoretical simulation results

由图 6 可知,理论模拟湍流强度与实测结果吻合,二者变化趋势和变化范围基本一致,验证了解析表达式的有效性。此外,由图 6(d)可知,台风利奇

马中心经过桥址区,实测湍流强度高于理论模拟结果,但在靠近台风中心的区域内,理论模拟可反映出实测湍流强度较高的特点。

### 3.2 阵风因子

已有研究表明,阵风因子与湍流强度具有较强的相关性。阵风因子与湍流强度之间的关系常用下式表达<sup>[5]</sup>:

$$G_u(t_g, T) = 1 + k_1 I_u^{k_2} \ln\left(\frac{T}{t_g}\right) \quad (2)$$

式中  $G_u$  为阵风因子;  $I_u$  为湍流强度;  $k_1$  和  $k_2$  为待定参数;  $T$  为基本时距; 阵风持续期  $t_g$  一般取为 3 s。

计算 4 次台风过境期间塔顶阵风因子,并采用式(2)表达阵风因子和湍流强度之间的关系,从而拟合得到参数  $k_1$  和  $k_2$  分别为 0.2381 和 0.7638,实测结果和拟合结果如图 7 所示。

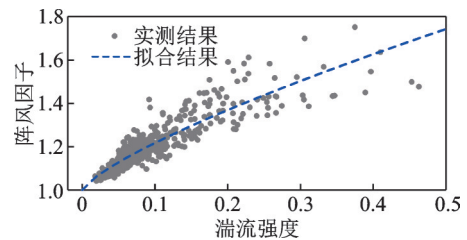


图 7 阵风因子与湍流强度的关系

Fig. 7 Relationship between gust factor and turbulence intensity

由图 7 可知,台风过境期间,桥址区阵风因子主要集中在 1~1.5 的范围内。在此范围内,由拟合结果可知,式(2)所示非线性表达式可有效表征阵风因子和湍流强度之间的关联。此外,尽管少量高湍流区的实测数据与上述关系差异较大,但该表达式总体上与实测结果吻合较好。因此,基于上述关系模型,可在模拟湍流强度的基础上,进一步展开阵风因子的模拟,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,模拟的阵风因子与实测结果吻合较好,表明采用理论模型可有效预测台风过境期间桥址区阵风因子。随着距离  $L$  的增大,阵风因子整体上呈现先增大后逐渐减小的变化趋势,表明在台风中部高风速区域阵风效应较强,在台风外围区域阵风效应相对较弱。

### 3.3 湍流积分尺度

对数正态分布函数为:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式中  $x$  为随机变量;  $\mu$  和  $\sigma$  分别为变量对数的平均

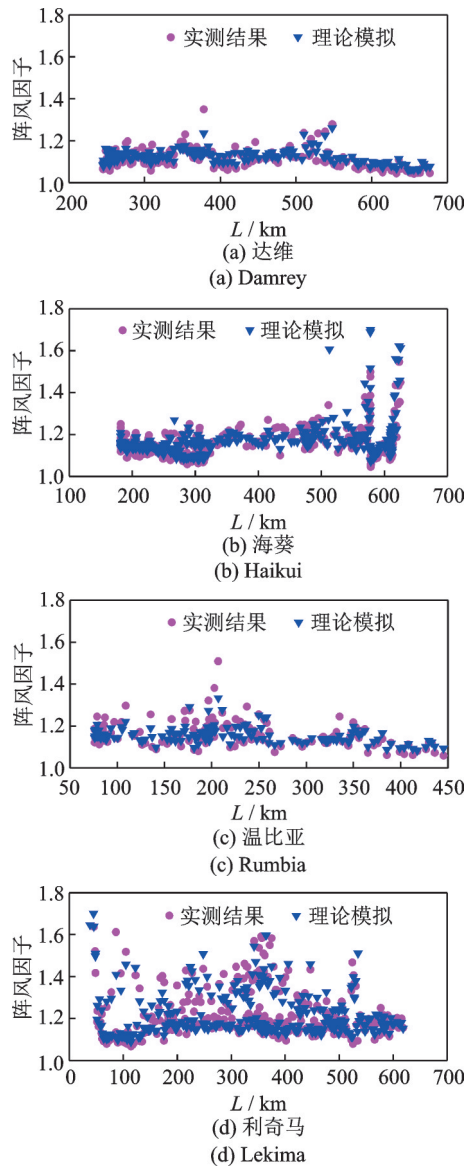


图8 实测阵风因子与理论模拟结果

Fig. 8 Measured gust factor and theoretical simulation results

值和标准差。

为研究台风过境期间桥址区湍流积分尺度的空间分布特征,将桥址区与台风中心的距离 $L$ 划分为 $0\sim 100$ ,  $100\sim 200$ ,  $200\sim 300$ ,  $300\sim 400$ ,  $400\sim 500$ ,  $500\sim 600$ 和 $600\sim 700$  km共7个区间。计算各距离区间内的顺风向湍流积分尺度,并利用式(3)拟合各区间湍流积分尺度的概率密度分布,结果如图9所示。

由图9可知,各距离区间内实测湍流积分尺度均集中在小于500 m的范围内,在大于500 m的范围分布较少。此外,对数正态分布函数的概率密度拟合结果与实测结果吻合较好,可有效反映湍流积分尺度的概率分布特征。在此基础上,利用拟合得到的对数正态分布均值,计算各距离区间内的平均湍流积分尺度,以代表该区间内的湍流积分尺度。同时,采用各距离区间中间值代表桥址区与台风中

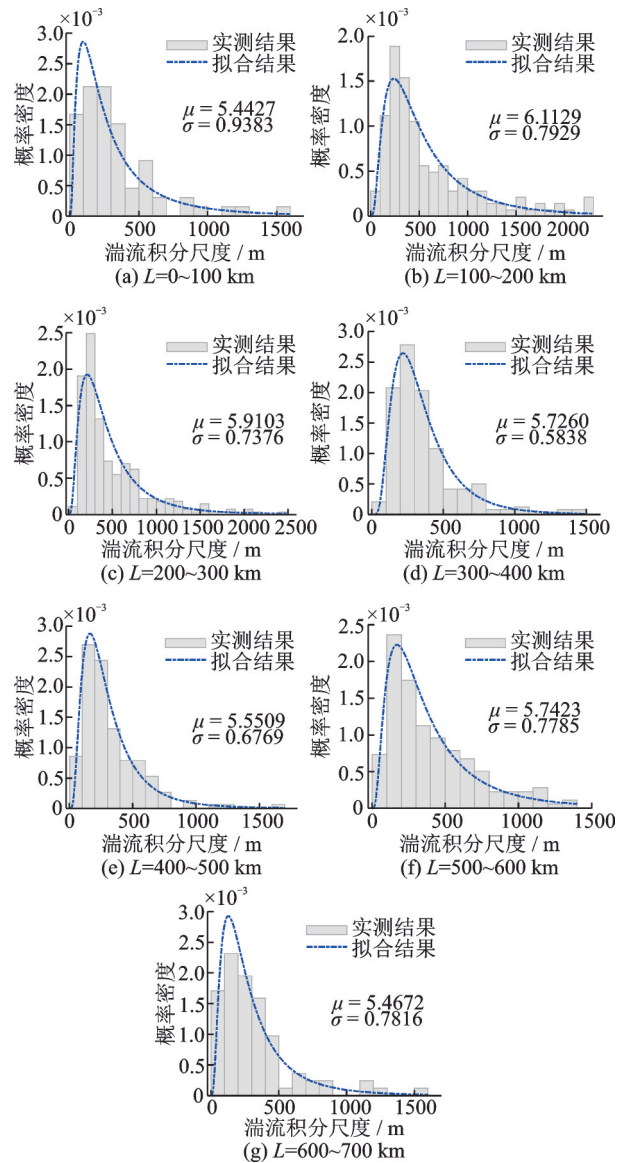


图9 不同距离区间湍流积分尺度概率分布特征

Fig. 9 Turbulence integral scale probability distribution in different distance intervals

心的距离,以研究桥址区湍流积分尺度随距离的变化关系。然而,由于台风中心区域内风场变化剧烈,仅有的少量的实测数据难以反映此区域内湍流积分尺度的空间变化规律。为此,本文仅采用线性拟合的方式,建立台风中心区域以外湍流积分尺度 $L_u$ 的空间分布模型:

$$L_u = \frac{-0.374L + 472.273}{1000} \quad (4)$$

相应的拟合结果如图10所示。

由图10可知,湍流积分尺度随着距离的增加呈现出先增大后减小的趋势。在距台风中心50 km左右的区域内,湍流积分尺度较小。随着距离增大到距台风中心150 km左右,湍流积分尺度达到峰值,研究表明此区域一般为台风的高风速区域。在高风速区外围,随着距离进一步增大,湍流积分尺度以近似线性的变化趋势逐渐减小,并在距台风中心

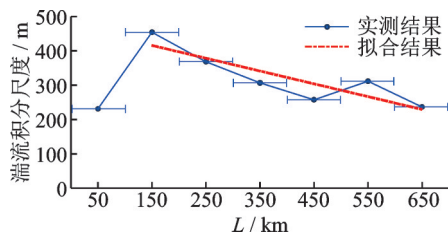


图10 湍流积分尺度随 $L$ 的变化关系

Fig. 10 Relationship between the turbulence integral scale and  $L$

650 km左右的区域减小至初始水平。此外,在台风中心区域以外,所建立的湍流积分尺度空间分布关系模型可反映湍流积分尺度的基本变化特征。

## 4 结论

(1)基于台风风场解析模型和台风路径数据,可实现台风过境期间桥址区平均风速时程模拟。在台风路径未经过桥址区的情况下,模拟效果相对较好。

(2)在台风中心以外区域,各次台风期间实测风剖面指数相近,在0.2~0.6范围内围绕特定值波动,且基本不随桥址区与台风中心距离的变化而变化。

(3)桥址区实测脉动风速均方差随桥址区与台风中心距离的增大而减小,且整体表现为线性变化趋势。利用此线性变化趋势,可有效模拟桥址区湍流强度的空间分布特征。结合阵风因子与湍流强度的非线性关系,可进一步实现阵风因子的有效反演。

(4)湍流积分尺度随着桥址区与台风中心距离的增加而先增大后减小。在台风中心以外区域,所建立的湍流积分尺度空间分布关系模型可反映湍流积分尺度的基本变化特征。

## 参考文献:

- [1] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2005.
- [2] 宋玉鹏, 陈建兵, 彭勇波. 二维空间脉动风场波数-频率联合功率谱表达的FFT模拟[J]. 振动工程学报, 2020, 33(4): 660-666.  
Song Yupeng, Chen Jianbing, Peng Yongbo. Simulation of fluctuating wind field in two-spatial dimensions by FFT implementation of wavenumber-frequency joint power spectrum[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(4): 660-666.
- [3] 方根深, 赵林, 卫苗苗, 等. 沿海典型大跨桥梁桥址区台风极端风荷载预测与应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(10): 1390-1398.  
Fang Genshen, Zhao Lin, Wei Miaomiao, et al. Estimation and application of typhoon extreme wind loadings at typical long-span bridge sites in coastal regions [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(10): 1390-1398.
- [4] Fang G S, Zhao L, Cao S Y, et al. A novel analytical model for wind field simulation under typhoon boundary layer considering multi-field correlation and height dependency[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 175: 77-89.
- [5] Wang H, Tao T Y, Gao Y Q, et al. Measurement of wind effects on a kilometer-level cable-stayed bridge during Typhoon Haikui [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(9): 04018142.
- [6] Holland G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes [J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(8): 1212-1218.
- [7] Meng Y, Matsui M, Hibi K. An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 56(2-3): 291-310.
- [8] Vickery P J, Twisdale L A. Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(11): 1700-1709.
- [9] 陶天友, 王浩. 大跨度桥梁主梁节段模型非平稳抖振时域模拟与分析[J]. 振动工程学报, 2019, 32(5): 830-836.  
Tao Tianyou, Wang Hao. Time-domain simulation and analysis of nonstationary buffeting responses of girder section model of a long-span bridge[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(5): 830-836.
- [10] Xu Y L, Zhu L D, Wong K Y, et al. Field measurement results of Tsing Ma suspension Bridge during Typhoon Victor [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2000, 10(6): 545-559.
- [11] Shu Z R, Li Q S, He Y C, et al. Gust factors for tropical cyclone, monsoon and thunderstorm winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 142: 1-14.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京:人民交通出版社, 2018.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [13] 赵林, 杨绪南, 方根深, 等. 超强台风山竹近地层外围风速剖面演变特性现场实测[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(1): 43-54.  
Zhao Lin, Yang Xunan, Fang Genshen, et al. Observation-based study for the evolution of vertical wind profiles in the boundary layer during super typhoon Mangkhut [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(1): 43-54.

## Measurement study on wind characteristics model at bridge site considering typhoon spatial position

ZHANG Han, WANG Hao, XU Zi-dong, TAO Tian-you, MAO Jian-xiao, GAO Hui

(Key Laboratory of C&PC Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** Wind characteristics are important for wind resistance design of bridges. The wind characteristic model considering the location of typhoon is investigated using the typhoon wind data measured by the bridge structural health monitoring system to characterize the influence of typhoon movement on the wind characteristics at the bridge site. Based on the existing typhoon analytical model and typhoon path data, the time history of mean wind speed at the bridge site during typhoon is simulated, which is regarded as the validation of the analytical typhoon model. On this basis, the variation of fluctuating wind characteristic parameters such as turbulence intensity, gust factor and turbulence integral scale with the distance between the bridge site and the typhoon center are analyzed. The spatial distribution model of fluctuating wind characteristic parameters is investigated. The results show that the existing typhoon analytical model can simulate the mean wind speed at the bridge site. The spatial positions of typhoons present a significant influence on the characteristics of fluctuating wind at the bridge site. The model in this paper can effectively reflect the variation of fluctuating wind characteristics at the bridge site during typhoons, which is expected to be a useful reference for the design, operation and maintenance of structures such as long-span bridges.

**Key words:** bridge structural health monitoring; typhoon; wind characteristics; bridge site; wind field model

**作者简介:** 张 寒(1995—),男,博士研究生。电话: 18851655399; E-mail: zhanghan@seu.edu.cn。

**通讯作者:** 王 浩(1980—),男,博士,教授。电话: (025)85893327; E-mail: wanghao1980@seu.edu.cn。