



台风非平稳湍流特性研究进展与思考

陶天友 王浩

Research progress and considerations in the research of non-stationary turbulent characteristics of typhoon wind fields

TAO Tianyou, WANG Hao

引用本文:

陶天友, 王浩. 台风非平稳湍流特性研究进展与思考[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(4): 162–171. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0063

TAO Tianyou, WANG Hao. Research progress and considerations in the research of non-stationary turbulent characteristics of typhoon wind fields[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2021, 39(4): 162–171. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0063

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0063>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

计算气动光学研究进展

Progress in computational aero-optics

空气动力学学报. 2019, 37(2): 186–192 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2017.0180>

直线翼垂直轴风力机气动特性研究综述

A review on aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbine

空气动力学学报. 2017, 35(3): 368–382 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2016.0189>

超强台风山竹近地层外围风速剖面演变特性现场实测

Observation-based study for the evolution of vertical wind profiles in the boundary layer during super typhoon Mangkhut

空气动力学学报. 2019, 37(1): 43–54 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2018.0297>

机器学习在湍流模型构建中的应用进展

Progresses in the application of machine learning in turbulence modeling

空气动力学学报. 2019, 37(3): 444–454 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2019.0036>

非稳态超声速燃烧研究进展

Overview on the research progress of unsteady supersonic combustion

空气动力学学报. 2020, 38(3): 532–551 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2020.0045>

可压缩湍流边界层燃烧减阻研究综述

Review of researches on compressible turbulent boundary layer combustion for skin friction reduction

空气动力学学报. 2020, 38(3): 593–602 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2019.0147>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463375

Email: kqdlxxb@163.com

网址: <http://kqdlxxb.xml-journal.net/>



关注微信公众号
获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2021)04-0162-10

台风非平稳湍流特性研究进展与思考

陶天友^{1,2}, 王浩^{1,2,*}

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

2. 东南大学 土木工程学院, 南京 211189)

摘要: 台风湍流特性研究一直是结构风工程领域的重点研究方向之一。与传统良态风存在明显差异, 台风是具有突出非平稳特性的特异风场, 其湍流特性十分复杂, 难以采用良态风场参数对其进行表征。基于国内外长期现场实测与分析所取得的成果, 本文对台风非平稳湍流特性的研究进展进行综述, 归纳总结台风非平稳湍流特性的分析方法及参数模型。首先, 回顾了平稳与非平稳风速模型, 对比分析二者之间的特点与区别, 并介绍时变平均风速的有效确定方法。随后, 针对湍流典型统计特征参数, 从湍流强度、湍流积分尺度、演变谱密度、时变相干函数等方面阐述台风非平稳湍流特性的研究进展, 并重点讨论当前面临的困难与挑战。最后, 对台风非平稳湍流特性有待进一步深入研究的问题进行展望。

关键词: 台风; 湍流; 非平稳特性; 参数化表征; 研究进展

中图分类号: P458.1⁺24 文献标识码: A doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0063

Research progress and considerations in the research of non-stationary turbulent characteristics of typhoon wind fields

TAO Tianyou^{1,2}, WANG Hao^{1,2,*}

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

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The turbulent characteristics of typhoon wind fields has been a vital research focus in the field of structural wind engineering. Unlike the conventional boundary-layer wind fields, the typhoon is an exceptional wind field with extremely complicated non-stationary features that cannot be characterized by the parameters of statistically stationary wind fields. Based on the domestic and overseas achievements on long-term field measurements and accompanied analyses, this paper presents a review on the advances in the research of non-stationary turbulent characteristics of typhoon wind fields, aiming to summarize the approaches and models to characterize the non-stationary wind characteristics. Firstly, models for stationary and non-stationary wind speeds are reviewed, and the approaches to determine time-varying mean wind speeds are introduced. Secondly, advances in characterizing the turbulence intensity, turbulence integral length, evolutionary power spectral density, and time-varying coherence of non-stationary turbulence of typhoon wind fields are illustrated. Challenges in characterizing these statistics are emphatically discussed. Finally, problems that deserve a further in-depth research are proposed in allusion to the non-stationary characteristics of typhoon wind fields.

Keywords: typhoon; turbulence; non-stationary characteristics; parametric characterization; research progress

收稿日期: 2021-04-24; 修订日期: 2021-06-19; 录用日期: 2021-07-04; 网络出版时间: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(51908125, 51978155); 江苏省自然科学基金(BK20190359)

作者简介: 陶天友(1992-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事桥梁抗风研究. E-mail: tytao@seu.edu.cn

通信作者: 王浩*(1980-), 男, 教授, 博导, 主要从事桥梁抗风研究. E-mail: wanghao1980@seu.edu.cn

引用格式: 陶天友, 王浩. 台风非平稳湍流特性研究进展与思考[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(4): 162-171.

TAO T Y, WANG H. Research progress and considerations in the research of non-stationary turbulent characteristics of typhoon wind fields[J].

Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(4): 162-171(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0063

0 引言

台风是发生在热带或副热带洋面上的低压涡旋, 具有影响范围广、破坏力强等特点^[1-3]。在大西洋和东太平洋地区, 台风也称为飓风。每次台风登陆后, 均造成了大量工程结构破坏与倒塌, 给人类生命与财产安全造成了严重威胁。随着全球气候的变化, 台风在世界范围的发生频次具有逐步升高的趋势, 引起了世界各地对该灾害的密切关注^[4]。我国是受台风灾害影响最为严重的国家之一, 每年遭受约7~10次台风的正面侵袭, 造成的直接经济损失巨大^[5]。为提升工程结构的抗台风性能, 有必要深入研究台风风场特性, 对其进行有效表征与刻画, 从而服务于结构抗风分析与设计。

现场实测是准确掌握台风特性最为直接有效的方法。近年来, 风速仪、气象雷达等测试装置快速发展, 给台风现场实测提供了便捷条件^[6-7]。风环境的现场实测方法一般分为两类。一类是通过专用观测点对登陆台风特性进行监测, 如气象站、观测塔等^[8-12], 这些观测点位置长期固定, 仅当台风经过观测点附近时才能获得有效风场数据。针对该问题, 国内外学者发明了可移动型测风装置, 如追风车、追风房等^[13-14], 可根据台风预测路径将测风装置移动至理想观测区域, 并通过在试验车辆或可移动房屋上安装的传感器实现台风特性实测。随着结构健康监测技术快速发展, 诸多大跨度桥梁、高层建筑等重要工程结构均安装了结构健康监测系统, 其风环境监测子系统可为桥址区风场实测提供便捷条件, 从而成为了台风特性现场实测的另一类有效手段^[15-19]。

采用上述两类测试手段, 国内外学者已开展了大量的台风现场实测^[12-13, 16-23]。由于风速通常被视为平均风速与脉动风速的叠加, 台风特性分析主要考虑平均风特性与脉动风特性(即湍流特性)两方面^[24-26]。针对湍流的不确定性, 传统风特性分析假设风速为平稳随机过程。在此前提下, 平均风速在基本时距内保持恒定, 脉动风速各态历经^[27]。基于平稳风速模型, 目前已积累了较为丰富的台风特性参数。然而, 随着对台风特性认识的逐步深入, 实测台风因存在明显的时变均值、时变方差与时变频率等特征, 其难以服从平稳随机过程假设^[28-29]。同时, 采用平稳分析理论无法准确评估台风作用下的结构风振响应, 该现象对于台风眼壁区尤为显著。因此, 由平稳向非平稳过渡成为了台风特性分析的重要发展趋势^[30], 传统的平稳风速模型也已逐步发展为非平稳风速模型^[31-32]。近年

来, 国内外基于非平稳风速模型, 开展了较为丰富的台风湍流特性研究, 从湍流强度、湍流积分尺度、演变谱密度、相干函数等方面实现了台风非平稳特性的有效表征。

考虑台风湍流特性对工程结构抗风分析与设计的重要意义, 本文系统梳理了国内外关于台风非平稳湍流特性的研究进展, 从风速模型、湍流特征参数等方面归纳总结了已取得的研究成果, 并分析了当前有待进一步深入研究的关键问题, 以期为台风非平稳湍流特性的深化研究及应用提供借鉴与参考。

1 风速模型

1.1 平稳风速模型

在给定基本时距内, 风速可表示为顺风向、横风向及竖向风速的矢量叠加。根据矢量分解, 平均风速矢量对应的方向为顺风向, 而与之垂直的两个方向即为横风向与竖向^[24-26]。根据平稳随机过程假设, 顺风向、横风向及竖向风速可表示为:

$$\begin{bmatrix} U(t) \\ V(t) \\ W(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $U(t)$ 、 $V(t)$ 、 $W(t)$ 分别为顺风向、横风向、竖向风速; \bar{U} 为顺风向平均风速; $u(t)$ 、 $v(t)$ 、 $w(t)$ 分别为顺风向、横风向、竖向零均值脉动风速。

若将任意时刻的脉动风速视为随机变量, 则在平稳风速模型中, 该变量于不同时刻的概率分布均相同。因此, 脉动风速的统计特性随时间保持不变, 即均值、方差、相关函数的数学期望不随时间变化。根据平稳随机过程的各态历经特性, 变量在任意时刻的统计均值与其关于时间的均值相等、任意时刻的统计相关函数与关于时间的相关函数相等, 因而可采用关于时间的统计参数描述风场特性。考虑相关函数与功率谱密度、相干函数的关系, 各方向脉动风速的功率谱密度及相干函数亦随时间保持不变。

1.2 非平稳风速模型

针对台风、下击暴流等特异风场, 非平稳风速模型可有效描述其风速的时变趋势。基于非平稳风速模型, 笛卡尔坐标系下给定基本时距内纵向、横向、竖向风速可表示为

$$\begin{bmatrix} U(t) \\ V(t) \\ W(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{U}(t) \\ \tilde{V}(t) \\ \tilde{W}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u^*(t) \\ v^*(t) \\ w^*(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\tilde{U}(t)$ 、 $\tilde{V}(t)$ 、 $\tilde{W}(t)$ 分别为纵向、横向、竖向时变平均风速; $u^*(t)$ 、 $v^*(t)$ 、 $w^*(t)$ 分别为对应的非平稳脉动风

速。值得注意的是,考虑到平均风向在基本时距内并非保持恒定,所以式(2)中的纵向、横向及竖向一般与风速仪的坐标系保持一致。

若采用式(2)描述台风风速,最关键的问题即确定各方向的时变平均风速。目前,确定时变平均风速的主要方法包括滑动平均法、小波变换法、经验模式分解法等^[29, 32-36]。上述方法提取的结果一定程度上依赖于模型参数的选取。为此, Su 等研究了不同窗宽条件下核回归、小波变换、经验模式分解等方法的提取结果,针对各方法提出了窗宽的建议取值^[37]。Tao 等将信号平稳性评估与小波变换、经验模式分解相结合,建立了风速时变趋势的自适应提取方法^[35]。Tubino 与 Solari 分析了不同权函数对核回归法提取结果的影响,并给出了针对性的建议^[38]。虽然各种方法均能有效提取时变平均风速,但不同方法的提取结果存在一定的差异且参数的选取受主观因素影响,有必要进一步研究时变平均风速提取的标准化准则,以减小不同方法间的差异性。此外,风速的非平稳性与基本时距相关,总体表现出随基本时距增加而增加的规律,因而时变平均风速提取的标准化准则研究需考虑基本时距的影响。

以某台风纵向实测风速样本为例,图1对比了平稳与非平稳风速模型下的平均风速。由图可知,采用非平稳风速模型可以有效描述台风风速的时变趋势,且该趋势在基于平稳风速模型获取的常量平均风速两侧波动。从统计角度来看,各方向时变平均风速关于时间的均值与平稳风速模型的常量均值相等^[35],因而各方向非平稳脉动风速关于时间的均值亦为0。

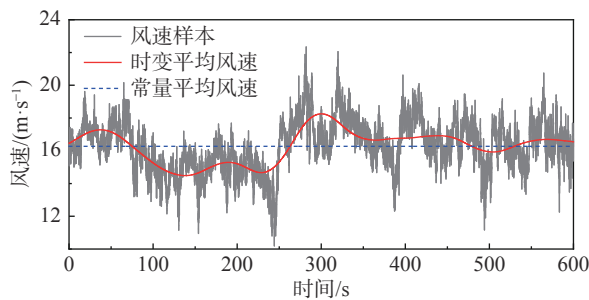


图1 时变平均风速与常量平均风速对比

Fig. 1 A comparison of time-varying and constant mean wind speeds

在式(2)的基础上,基本时距内的时变平均风速、时变方位角、时变攻角可表示为:

$$\tilde{U}_T(t) = \sqrt{\tilde{U}(t)^2 + \tilde{V}(t)^2 + \tilde{W}(t)^2} \quad (3)$$

$$\alpha(t) = \arctan \frac{\tilde{W}(t)}{\sqrt{\tilde{U}(t)^2 + \tilde{V}(t)^2}} \quad (4)$$

$$\beta(t) = \text{sign}[\tilde{V}(t)] \cdot \arccos \frac{\tilde{U}(t)}{\sqrt{\tilde{U}(t)^2 + \tilde{V}(t)^2}} \quad (5)$$

式中, $\tilde{U}_T(t)$ 为风速样本的时变平均风速; $\alpha(t)$ 为时变平均攻角; $\beta(t)$ 为时变平均方位角。

由式(3)~(5)可知,时变平均风速的方位角及攻角随时间而变化,因而难以采用类似平稳风速模型的方法确定顺风向、横风向和竖向的脉动风速。Zhang 等提出根据任意时刻的时变平均方位角和平均风攻角对该时刻的风速进行分解,从而将不同时刻分解后风速连成序列,形成顺风向、横风向及竖向的脉动风速^[39]。该方法已应用于下击暴流的风场描述,但隐含了不同时刻同一维度的脉动风速存在方向差异的前提。针对台风风场,基于非平稳风速模型的时变平均方位角、时变平均攻角在对应基于平稳风速模型的平均方位角、平均攻角左右波动,且存在的差异相对较小。因此,非平稳风速模型的顺风向、横风向及竖向一般可与平稳风速模型确定的维度保持一致。

2 台风湍流特性

湍流具有极强的不确定性,其特性描述主要从统计意义开展,具体参数包括湍流强度、湍流积分尺度、湍流功率谱密度、湍流空间相干函数等^[24-26]。早期的台风湍流特性分析以平稳风速模型为基础,大量的现场实测形成了丰富的风特性参数数据库。随着非平稳风速模型的引入,台风湍流特性分析逐步由平稳向非平稳过渡。

2.1 湍流强度

湍流风速描述自然风中脉动风速的相对强度,是开展结构风振分析、风洞试验的重要参数。在平稳模型中,湍流强度被定义为脉动风速均方差与平均风速的比值^[24-25]。非平稳湍流强度与平稳湍流强度具有相同的物理意义,其定义为^[29]:

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

式中, I_i^* 为非平稳湍流强度; σ_i^* 为非平稳脉动风速关于时间的均方差; \bar{U}^* 为时变平均风速 $\tilde{U}_T(t)$ 关于时间的均值。

式(6)对时变平均风速取平均,使其物理意义与平稳湍流强度一致。Wang 与 Kareem 考虑不同时刻的时变平均风速,根据均方差与时变平均风速比值的数学期望定义非平稳湍流强度^[36]。经实测数据分析,基于数学期望的分析结果与式(6)基本吻合^[35]。考虑式(6)与平稳湍流强度的相似性,一般采用式(6)计算非平稳湍流强度。

基于非平稳湍流强度模型, Xu 与 Chen 基于青马大桥监测系统开展了“胜利”台风的湍流强度分析^[29]; Wang 等分析了苏通桥址区“达维”台风的湍流强度, 并与平稳湍流强度进行了对比^[40]; Huang 等研究了三次典型台风的非平稳湍流强度, 分析了台风经过测点全过程的湍流强度差异^[17]; 孙海等分析了台风与季风非平稳湍流强度的差异^[41]。以上分析结果均表明: 对于同一风速样本, 采用非平稳模型计算的湍流强度小于平稳计算值。以某风速样本为例, 平稳与非平稳湍流强度对比如图 2 所示。由图可知, 对于大部分样本, 非平稳湍流强度明显小于平稳湍流强度, 而部分样本中二者几乎一致。该现象主要取决于风速样本的非平稳性差异^[42-44]。对于非平稳性较弱的样本, 其可满足平稳随机过程假设, 故平稳与非平稳模型的计算结果差异较小。随着风速样本非平稳性的增加, 平稳与非平稳湍流强度的差异则越趋明显^[35]。

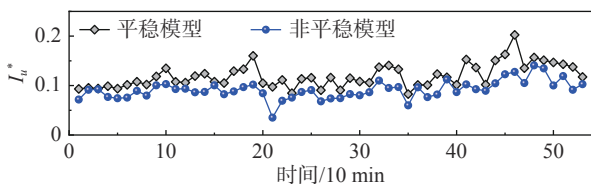


图 2 平稳与非平稳湍流强度对比

Fig. 2 A comparison of stationary and non-stationary turbulence intensities

《公路桥梁抗风设计规范》建议顺风向、横风向、竖向湍流强度的比值按 1 : 0.88 : 0.5 考虑^[45], 该比值源于平稳良态风的现场实测数据。基于非平稳模型, 典型台风在三个方向的湍流强度比值为: 1 : 0.94 : 0.56 (台风凡亚比, 35 m)^[17]、1 : 0.93 : 0.54 (台风鲶鱼, 55 m)^[17]、1 : 0.94 : 0.39 (台风杜鹃, 30 m)^[46]、1 : 1.16 : 0.48 (台风杜鹃, 50 m)^[46]、1 : 0.73 : - (台风达维, 76 m)^[40]。对比上述比值可知, 横风向、竖向非平稳湍流强度与顺风向湍流强度的比值具有较大的波动性, 该比值一方面受观测高度、测点距台风中心位置影响, 另一方面受地面粗糙度影响^[17, 47]。受观测条件所限, 现有台风实测数据大多从固定位置及高度获得。由于台风路径存在不确定性, 已积累的非平稳湍流强度数据难以全面覆盖台风主体结构的脉动风速特征。因此, 仍需进一步加强台风现场实测研究, 以分析距台风中心不同位置、不同高度处的非平稳湍流强度, 建立合理有效的台风三维非平稳湍流强度模型。

2.2 湍流积分尺度

湍流可视作不同尺寸的涡旋叠加而成, 湍流积分尺度用以描述风场中涡旋的平均尺寸。基于泰勒假设, 湍流积分尺度常采用自相关函数积分法进行计

算^[24-26]。在平稳模型的基础上进行拓展, 非平稳湍流积分尺度的定义为:

$$L_i^* = \frac{\bar{U}^*}{(\sigma_i^*)^2} \int_0^\infty R_i^*(\tau) d\tau, \quad (i = u, v, w) \quad (7)$$

式中, L_i^* 为非平稳湍流积分尺度; $R_i^*(\tau)$ 为非平稳脉动风速的自相关函数; τ 表示滞后时间。为避免泰勒假设引起较大误差, 式(7)的积分上限建议取首个满足 $R_i^*(\tau) = 0.05(\sigma_i^*)^2$ 的 t_s ^[48]。

非平稳湍流积分尺度模型与平稳模型的差异主要体现在脉动风速的均方差及相关函数。He 等采用两种模型分别计算了“苏迪罗”台风 53 m 高度处的积分尺度, 发现平稳积分尺度 $L_u = 206.8$ m 且 $L_u : L_v = 1 : 0.79$, 而非平稳积分尺度 $L_u^* = 49.4$ m 且 $L_u^* : L_v^* = 1 : 0.90$ ^[47]; 在文献 [17] 中, “鲶鱼”台风于 35 m 高度处 $L_u = 247$ m 且 $L_u : L_v : L_w = 1 : 0.68 : 0.065$ 、 $L_u^* = 100$ m 且 $L_u^* : L_v^* : L_w^* = 1 : 0.80 : 0.15$; 于 95 m 高度处 $L_u = 290$ m 且 $L_u : L_v : L_w = 1 : 0.62 : 0.15$ 、 $L_u^* = 119$ m 且 $L_u^* : L_v^* : L_w^* = 1 : 0.73 : 0.33$ 。可见, 当风速非平稳性较强时, 非平稳湍流积分尺度总体小于平稳湍流积分尺度。

作为典型案例, 图 3 对比了某台风样本的平稳与非平稳湍流积分尺度。由于时变趋势项的剥离, 湍流中的大尺度涡旋占比下降, 从而导致平均涡旋尺寸显著降低。此外, 提取时变平均风速后, 横风向、竖向积分尺度与顺风向积分尺度的比值相比平稳计算值有所增加, 表明各方向湍流积分尺度的差异在考虑非平稳性后显著减小。然而, 与湍流强度表现类似, 非平稳湍流积分尺度在不同台风的实测中存在较大区别, 仍需进一步积累台风非平稳湍流积分尺度数据库, 以从三维空间位置、台风演化状态等方面对其进行精细表征。

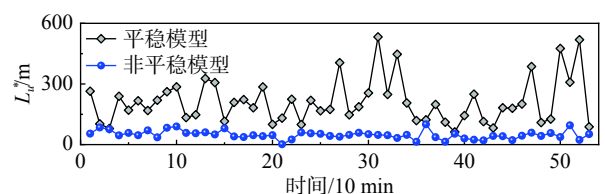


图 3 平稳与非平稳湍流积分尺度对比

Fig. 3 A comparison of stationary and non-stationary turbulence integral scales

2.3 湍流功率谱密度

湍流功率谱密度描述湍流能量在频率上的分布密度, 即湍流中不同尺度涡旋对湍流动能的贡献。由于频率与涡旋尺寸成反比, 故功率谱密度的低频部分对应大尺度涡旋, 高频部分对应小尺度涡旋^[49]。在结构风响应分析中, 湍流功率谱密度是直接影响风振

分析准确性的关键参数之一^[24-26]。基于平稳风速模型,国内外学者通过大量强风现场实测,建立了多个脉动风谱模型,如 Kaimal 谱、Von Karman 谱、Davenport 谱、Panofsky 谱等^[26]。其中, Kaimal 谱^[50]、Panofsky 谱^[51]被我国《公路桥梁抗风设计规范》所采用,分别作为顺风向和竖向脉动风谱模型^[45]。由于台风湍流特性与良态风存在差异, Kaimal 谱、Panofsky 谱等难以较好地描述台风湍流功率谱密度。为此,诸多文献对台风的实测功率谱密度进行了深入研究,并建立了相应的湍流功率谱模型^[52-60]。这些风谱模型的参数存在一定差异,但其表达形式符合 Kolmogrov 假设^[26, 61],即湍流功率谱密度可表示为:

$$\frac{nS_i(n)}{u_*^2} = \frac{Af}{(B+Cf^\alpha)^\beta}, \quad (i = u, v, w) \quad (8)$$

式中, $S_i(n)$ 为湍流功率谱密度; n 为脉动风的频率; $f = nz/\bar{U}$ 表示 Monin 坐标; z 为观测点高度;考虑湍流积分尺度随高度的变化, Monin 坐标中的 z 亦可采用湍流积分尺度予以代替; u_* 表示摩擦速度,可根据 $u_*^2 = \sigma_i^2/6$ 近似计算; A 、 B 、 C 、 α 、 β 为待拟合参数且满足 $\alpha\beta = 5/3$ 。

式(8)描述的风谱模型可以有效表征惯性子区及低于该子区频率范围的台风风谱。然而,由于台风过程常伴随着降雨,空气中雨滴蒸发与相对运动会产生额外的小尺度湍流,从而使得台风风谱存在超越惯性子区的高频子区^[62]。该现象在“海葵”、“苏迪罗”等台风实测中均曾发生^[16, 63-64]。据此, Li 等提出了考虑全子区分布的台风风谱概念模型^[62]。此外,顺风向、横风向及竖向湍流功率谱密度常根据式(8)单独拟合,不考虑任意两者之间的联系。然而,三个方向的湍流同源,其是笛卡尔坐标系下的三个不同分量,因而各方向湍流风谱间存在隐含联系。根据各向同性假设,顺风向、横风向及竖向湍流功率谱间的关系见式(9)^[65]。

$$S_v(n) = S_w(n) = \frac{1}{2} \left[S_u(n) - n \frac{dS_u(n)}{dn} \right] \quad (9)$$

然而,实际台风湍流难以满足各向同性假设。因此, Tao 等对式(9)进行了修正,从而有效考虑了各方向湍流功率谱之间的联系^[66]。

上述模型均将湍流视为平稳随机过程,未考虑湍流能量随时间的演变规律。已有研究表明,忽略湍流风谱的时变特征将一定程度低估结构的风振响应^[67-68]。为此,基于 Priestley 演化谱理论^[69],台风湍流频谱分析逐步由功率谱密度过渡为演变谱密度。图4为某台风样本的顺风向标准化演变谱密度。由图4可知,

台风湍流能量随时间而变化,且不同频率范围的变化规律表现不一。因此,建立有效刻画实测台风湍流演变谱密度的数学模型成为了台风非平稳特性分析的关键问题。

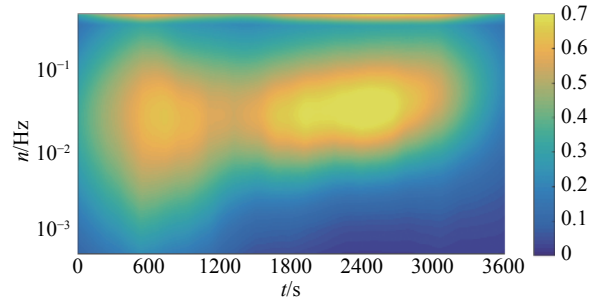


图4 考虑高频子区的台风顺风向标准化演变谱模型

Fig. 4 Normalized longitudinal evolutionary spectrum of a typhoon wind field considering the high-frequency subrange

文献[70]提出了一种描述地震波演变谱密度的分析模型, Huang 等将其拓展应用于台风湍流演变谱密度表征^[71]。该模型假设台风湍流为若干均匀调制非平稳随机过程的叠加,从而湍流演变谱密度可表示为:

$$S_i(n, t) = \sum_{k=1}^p g_k^2(t) S^k(n), \quad (i = u, v, w) \quad (10)$$

式中, $S_i(n, t)$ 表示湍流演变谱密度; $g_k(t)$ 为时间调制函数; $S^k(n)$ 为平稳功率谱密度; p 表示均匀调制平稳随机过程的数量; t 表示时间。

式(10)的拟合效果依赖于 $g_k(t)$ 与 $S^k(n)$ 的函数形式。同时,若 p 的数值较大,式(10)的待拟合参数显著增加,从而使得拟合过程变得十分复杂。Hu 等考虑拟合参数的时变特性,将平稳功率谱密度模型进行拓展,建立了式(11)所示的湍流演变谱密度模型^[72]。该模型在各时刻与平稳风谱模型形式相同,因而易于开展参数拟合。Tao 与 Wang 在该模型的基础上考虑超越惯性子区的高频子区,从而进一步完善了台风湍流演变谱模型^[73]。虽然式(10)可以有效描述实测台风的湍流演变谱密度,但参数 $A(t)$ 、 $B(t)$ 、 $C(t)$ 的拟合结果与时变平均风速、湍流强度等参数的规律往往不明,难以对拟合参数进行深入刻画,从而使得模型的应用存在一定的局限性。因此,仍有必要进一步研究实测台风演变谱密度,逐步建立考虑观测位置、融入三维关联、参数易表征的台风演变谱模型。

$$\frac{nS_i(n, t)}{u_*^2(t)} = \frac{A(t)f(t)}{[B(t) + C(t)f(t)^\alpha]^\beta}, \quad (i = u, v, w) \quad (11)$$

2.4 空间相干函数

空间相干函数用以描述不同位置湍流的相关性,

是结构风振分析重点关注的参数之一^[24-26]。在平稳随机过程的框架下,湍流相干函数主要刻画任意两个湍流样本在各频率上的线性相关程度,其定义见式(12)。传统风特性分析有时会忽略相位或虚部对相干函数的贡献,其对结构风振响应分析存在一定影响。湍流相干函数随着频率、距离的增加而递减,常采用 Davenport 函数予以定量描述^[27]。Davenport 函数假设湍流相干函数服从指数递减律,不同方向的相干函数可通过改变衰减系数进行表达。台风湍流相干函数也常采用 Davenport 模型,其通过现场实测确定衰减系数的取值^[74-77]。然而, Davenport 相干函数隐含湍流在频率为 0 时完全相关、与距离无关的假定,但大尺度涡旋的相关性随着距离的增加而减小。因此, Krenk 等从各向同性湍流物理描述入手,建立了湍流相干函数的修正模型^[78-79]。

$$\gamma_{jk}(n) = \frac{S_{jk}(n)}{\sqrt{S_{jj}(n)S_{kk}(n)}} \quad (12)$$

式中, $\gamma_{jk}(n)$ 为第 j 、 k 点处湍流间的相干函数; $S_{jk}(n)$ 为第 j 、 k 点处湍流间的互功率谱密度; $S_{jj}(n)$ 、 $S_{kk}(n)$ 分别表示第 j 、 k 点处湍流的自功率谱密度。

在 Priestley 演化谱理论下,结构非平稳风振分析采用时不变相干函数描述湍流的空间相干特性^[31]。然而,现场实测结果表明:台风等极端风场的湍流相干函数存在时变特征,采用时不变相干函数难以准确预测结构风振响应。Peng 等针对下击暴流实测风速,建立了其湍流时变相干函数模型^[80]。Huang 等采用 S 变换计算了实测台风的时变相干函数,并将 Krenk

模型由频域拓展至时频域^[81]。Tao 等基于昂船洲大桥的实测数据,建立了“天鸽”台风水平向的时变相干函数时频分布模型,并对比分析了时变与时不变相干函数对桥梁抖振响应的贡献^[82]。基于 Krenk 模型拓展的时变相干函数模型可表示为:

$$\gamma_{jk}(n,t) = \left[1 - \frac{1}{2} \frac{n_x(t)r}{\bar{U}_T(t)} D(t) \right] \exp \left[-\frac{n_x(t)r}{\bar{U}_T(t)} D(t) + i \frac{2\pi n r}{\bar{U}_T(t)} d(t) \right] \quad (13)$$

$$n_x(t) = \sqrt{n^2 + \left[\frac{U_T(t)}{2\pi L(t)} \right]^2} \quad (14)$$

式中, $\gamma_{jk}(n,t)$ 为第 j 、 k 点处湍流间的时变相干函数; r 表示第 j 、 k 点之间的间距; $d(t)$ 、 $L(t)$ 、 $D(t)$ 为待拟合参数; i 表示虚数,用于描述相干函数的相位。

图 5 描述了某台风的时变相干函数模型。由图 5 可知,台风相干函数的时变特征显著,在虚部处尤为明显;虚部在某些频段内的相干函数值与实部相当,因而结构风振分析需考虑相干函数虚部的影响。台风相干函数的计算依赖于多个风速仪的同步实测数据。同时,需结合湍流积分尺度的大小,在一定范围内布置风速仪。若风速仪间距超出积分尺度范围,则测点间的相关性较弱,不利于建立时变相干函数。在实际台风观测中,风速仪的测点数量有时不够充裕,从而难以建立有效的相干函数模型。此外,式(13)中待拟合参数与时变平均风速、湍流强度等参数的规律亦不明确,难以采用简单直观的表达形式对式(13)进行简化。因此,仍需深入研究实测湍流时变相干函数,以期建立更为直观有效的数学模型。

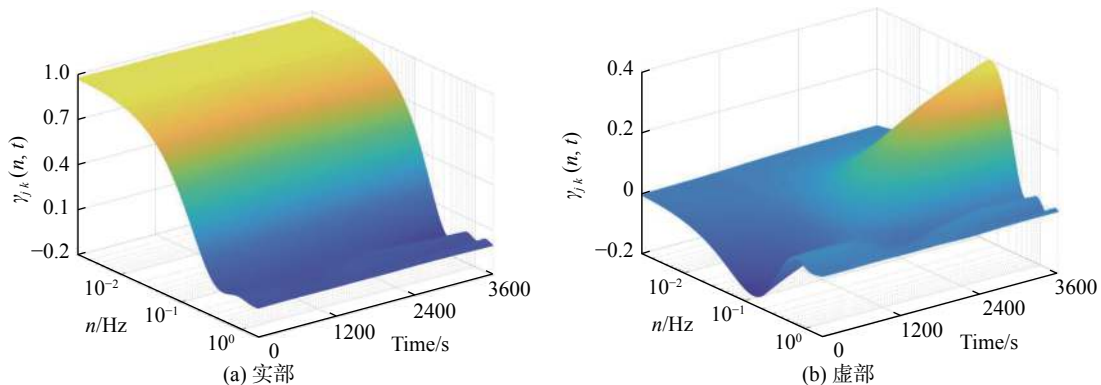


图 5 台风时变相干函数模型

Fig. 5 The time-varying coherence model for a typhoon wind-field

3 展望

台风是具有突出非平稳特性的特异风场,其湍流特性十分复杂。准确掌握台风湍流特性并进行有效表征,对于开展结构抗风分析与设计具有重要意义。

本文在总结回顾平稳与非平稳风速模型的基础上,重点介绍了台风非平稳湍流特性的研究进展,主要包括:时变平均风速、湍流强度、湍流积分尺度、湍流演变谱密度、时变相干函数等方面。总体而言,国内外学者在台风湍流非平稳特性方面已开展了很多研究

工作,并取得了一定的研究成果,但相关研究在系统性、完备性方面仍有待进一步深入与突破。

基于当前台风非平稳湍流特性的研究进展,总结了该领域未来有待进一步深入的发展方向,主要包括:

1) 研究考虑非平稳度、基本时距、风向变化等因素的台风时变趋势分离方法,建立时变平均风速的标准化提取准则。

2) 加强登陆台风的现场实测,丰富台风非平稳湍流强度、非平稳积分尺度的数据库,建立考虑三维空间位置、台风演化状态等因素的湍流强度、积分尺度非平稳模型。

3) 基于长期实测台风的三向演变谱密度,研究台风各向演变谱密度的表征方法,建立考虑观测位置、三维关联的台风演变谱模型。

4) 结合实测台风湍流积分尺度,加强面向台风湍流相干函数实测的风速仪测点布置研究。

5) 研究湍流三维时变相干函数,建立考虑单点三维关联、多点空间衰减及相位差异的台风时变相干函数模型。

参 考 文 献:

- [1] EMANUEL K. Tropical cyclones[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2003, 31: 75–104.
doi: 10.1146/annurev.earth.31.100901.141259
- [2] 葛耀君, 赵林, 项海帆. 结构风工程中的台风数值模拟研究进展[C]// 第十一届全国结构风工程学术会议论文集, 2004:48–54.
- [3] 陈洁, 汤立群, 申锦瑜, 等. 台风气压场与风场研究进展[J]. *海洋工程*, 2009, 27(3): 136–142.
CHEN J, TANG L Q, SHEN J Y, et al. Advances in typhoon wind field and pressure field[J]. *The Ocean Engineering*, 2009, 27(3): 136–142 (in Chinese).
doi: 10.16483/j.issn.1005-9865.2009.03.001
- [4] 赵宗慈, 江滢. 热带气旋与台风气候变化研究进展[J]. *科技导报*, 2010, 28(15): 88–96.
ZHAO Z C, JIANG Y. Review on climate changes of tropical cyclones and typhoons[J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(15): 88–96 (in Chinese).
- [5] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴(2019)[M]. 北京: 气象出版社, 2020.
- [6] 李松奎, 边泽强, 刘昕. 超声波风速仪测量结果不确定度评定[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(15): 112–116.
LI S K, BIAN Z Q, LIU X. Evaluation of uncertainty of measurement result of ultrasound anemometer[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(15): 112–116 (in Chinese).
doi: 10.19651/j.cnki.emt.1902736
- [7] 匡昌武, 张雪芬, 黄斌, 等. 南海海洋气象观测技术现状与发展[J]. *气象科技进展*, 2020, 10(4): 151–152.
KUANG C W, ZHANG X F, HUANG B, et al. Present situation, and development of marine meteorological observation technology in the South China sea[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2020, 10(4): 151–152 (in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.04.029
- [8] CAO S Y, TAMURA Y, KIKUCHI N, et al. Wind characteristics of a strong typhoon[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97: 11–21.
doi: 10.1016/j.jweia.2008.10.002
- [9] 李永乐, 喻济昇, 张明金, 等. 山区桥梁桥址区风特性及抗风关键技术[J]. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51(5): 530–542.
LI Y L, YU J S, ZHANG M J, et al. Wind characteristics of a bridge site and wind-resistance key technology in complex mountains[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2021, 51(5): 530–542 (in Chinese).
doi: 10.1360/SST-2020-0151
- [10] HUANG M F, WANG Y F, LOU W J. Examination of typhoon-wind profiles reaching 1000-m height over the Southeast China sea based on reanalysis data set and mesoscale simulation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(9): 04020192.
doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002744
- [11] 张志田, 谭卜豪, 陈添乐. 丘陵地区深切峡谷风特性现场实测研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(7): 113–122.
ZHANG Z T, TAN B H, CHEN T L. Study on field measurement of wind properties near a canyon deep-cut to hilly land[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(7): 113–122 (in Chinese).
doi: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2019.07.013
- [12] CHOI E C C. Extreme wind characteristics over Singapore - an area in the equatorial belt[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 83: 61–69.
doi: 10.1016/S0167-6105(99)00061-6
- [13] 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, 31(4): 54–61.
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, 31(4): 54–61 (in Chinese).
doi: 10.14006/j.jzjzxb.2010.04.007
- [14] 赵林. 虎门大桥涡振应急工作日志(三): 涡振原因与控制[EB/OL]. 同济风工程(微信公众号)[2020-06-11]. <https://mp.weixin.qq.com/s/XYG9MpUOJZdFriNOEgzx4g>
- [15] FENERCI A, ØISETH O. Strong wind characteristics and dynamic response of a long-span suspension bridge during a storm[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 172: 116–138.
doi: 10.1016/j.jweia.2017.10.030
- [16] 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.
doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002138
- [17] HUANG P, XIE W, GU M. A comparative study of the wind characteristics of three typhoons based on stationary and nonstationary models[J]. *Natural Hazards*, 2020, 101: 785–815.
doi: 10.1007/s11069-020-03894-0
- [18] 傅国强, 全涌, 顾明, 等. 上海陆家嘴地区高空台风“温比亚”风特性实测[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(1): 100–107.
FU G Q, QUAN Y, GU M, et al. Field measurement of wind characteristics of typhoon Rumbia in upper air of lujiuzui district at Shanghai[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(1): 100–107 (in Chinese).
doi: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2021.01.011
- [19] HUA X G, XU K, WANG Y W, et al. Wind-induced responses and dynamic characteristics of a super-tall building under a typhoon event[J]. *Smart Structures and Systems*, 2020, 25(1): 81–96.
doi: 10.12989/sss.2020.25.1.081
- [20] 王旭, 刘文韬, 叶仲韬, 等. 沿海大跨径桥址处台风“山竹”风特性实测研究[J]. *桥梁建设*, 2021, 51(1): 29–36.
WANG X, LIU W T, YE Z T, et al. Field measurement of wind characteristics at long-span bridge site in coastal area during typhoon

- Mangkhat[J]. *Bridge Construction*, 2021, 51(1): 29–36 (in Chinese).
- [21] 喻梅, 倪燕平, 廖海黎, 等. 西垭门大桥桥位处风场特性实测分析[J]. *空气动力学学报*, 2013, 31(2): 219–224.
YU M, NI Y P, LIAO H L, et al. Field measurement and analysis of the natural wind characteristics at site of Xi-Hou-men Bridge[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2013, 31(2): 219–224 (in Chinese).
doi: 10.7638/kqdlxxb-2011.0157
- [22] HOUSTON S H, FORBES G S, CHIU A N L. Impacts of super typhoon Paka's (1997) winds on Guam: meteorological and engineering perspectives[J]. *Natural Hazards Review*, 2002, 3(2): 36–47.
doi: 10.1061/(asce)1527-6988(2002)3: 2(36)
- [23] 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(10-11): 533–547.
doi: 10.1016/j.jweia.2010.04.003
- [24] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [25] 项海帆. 现代桥梁抗风理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [26] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design[M]. Wiley: New York, 1996.
- [27] DAVENPORT A G. A statistical approach to the treatment of wind loading on tall masts and suspension bridges[D]. Bristol: University of Bristol, 1961.
- [28] ADHIKARI R, YAMAGUCHI H. A study on the nonstationarity in wind and wind-induced response of tall buildings for adaptive control[C]//9th International Conference on Wind Engineering, Wiley Eastern Limited, 1995.
doi: 10.1016/S0167-6105(97)00261-4.
- [29] XU Y L, CHEN J. Characterizing nonstationary wind speed using empirical mode decomposition[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(6): 912–920.
doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2004)130: 6(912)
- [30] KAREEM A. Numerical simulation of wind effects: a probabilistic perspective[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10-11): 1472–1497.
doi: 10.1016/j.jweia.2008.02.048
- [31] KAREEM A, HU L, GUO Y L, et al. Generalized wind loading chain: time-frequency modeling framework for nonstationary wind effects on structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2019, 145(10): 04019092.
doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002376
- [32] HU L, XU Y L, HUANG W F. Typhoon-induced non-stationary buffeting response of long-span bridges in complex terrain[J]. *Engineering Structures*, 2013, 57: 406–415.
doi: 10.1016/j.engstruct.2013.09.044
- [33] 何旭辉, 陈政清, 李春光, 等. 斜拉索风雨振非平稳风场特性分析[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(10): 54–60.
HE X H, CHEN Z Q, LI C G, et al. Nonstationary wind characteristics analysis for wind-rain induced vibration of stay cables[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(10): 54–60 (in Chinese).
doi: 10.13465/j.cnki.jvs.2011.10.034
- [34] 申建红, 李春祥, 李锦华. 基于小波变换和EMD提取非平稳风速中的时变均值[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(12): 126–130, 185.
SHEN J H, LI C X, LI J H. Extracting time-varying mean of the non-stationary wind speeds based on wavelet transform (WT) and EMD[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(12): 126–130, 185 (in Chinese).
doi: 10.13465/j.cnki.jvs.2008.12.037
- [35] TAO T Y, WANG H, WU T. Comparative study of the wind characteristics of a strong wind event based on stationary and nonstationary models[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(5): 04016230.
doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001725
- [36] WANG L J, KAREEM A. Modeling of non-stationary winds in gust fronts[C]//9th ASCE Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, New York, 2004.
- [37] SU Y W, HUANG G Q, XU Y L. Derivation of time-varying mean for non-stationary downburst winds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 141: 39–48.
doi: 10.1016/j.jweia.2015.02.008
- [38] TUBINO F, SOLARI G. Time varying mean extraction for stationary and nonstationary winds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 203: 104187.
doi: 10.1016/j.jweia.2020.104187
- [39] ZHANG S, SOLARI G, BURLANDO M, et al. Directional decomposition and properties of thunderstorm outflows[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 189: 71–90.
doi: 10.1016/j.jweia.2019.03.014
- [40] WANG H, WU T, TAO T Y, et al. Measurements and analysis of non-stationary wind characteristics at Sutong bridge in typhoon Damrey[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 151: 100–106.
doi: 10.1016/j.jweia.2016.02.001
- [41] 孙海, 陈伟, 陈隽. 强风环境非平稳风速模型及应用[J]. *防灾减灾工程学报*, 2006, 26(1): 52–57.
SUN H, CHEN W, CHEN J. Nonstationary wind speed model and its application in strong winds[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2006, 26(1): 52–57 (in Chinese).
- [42] MCCULLOUGH M, KWON D K, KAREEM A, et al. Efficacy of averaging interval for nonstationary winds[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014, 140(1): 1–19.
doi: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000641
- [43] 史康, 何旭辉, 邹云峰, 等. 西江大桥桥位处实测良态风非平稳特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(5): 1352–1359.
SHI K, HE X H, ZOU Y F, et al. Nonstationary wind characteristics of wind speed of normal climate at Xijiang bridge site[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2017, 48(5): 1352–1359 (in Chinese).
doi: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.05.030
- [44] 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): 106–113.
WU B G, FU J Y, WU J R. 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): 106–113 (in Chinese).
doi: 10.14006/j.jzjgxb.2016.02.014
- [45] 中华人民共和国交通部. 公路桥梁抗风设计规范 JTG/T D60-01—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wind-resistant design specification for highway bridges. JTG/T D60-01—2004[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. (in Chinese).
- [46] CHEN J, HUI M C H, XU Y L. A comparative study of stationary and non-stationary wind models using field measurements[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 122(1): 105–121.
doi: 10.1007/s10546-006-9085-1
- [47] HE X H, QIN H X, TAO T Y, et al. Measurement of non-stationary characteristics of a landfall typhoon at the Jiangyin bridge site[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2186.
doi: 10.3390/s17102186
- [48] FLAY R G J, STEVENSON D C. Integral length scales in strong winds

- below 20 m[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 28 (1-3): 21-30.
doi: 10.1016/0167-6105(88)90098-0
- [49] TAO T Y, WANG H, LI A Q. Stationary and nonstationary analysis on the wind characteristics of a tropical storm[J]. *Smart Structures and Systems*, 2016, 17(6): 1067-1085.
doi: 10.12989/sss.2016.17.6.1067
- [50] KAIMAL J C, WYNGAARD J C, IZUMI Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1972, 98 (417): 563-589.
doi: 10.1002/qj.49709841707
- [51] PANOFSKY H A, MCCORMICK R A. The spectrum of vertical velocity near the surface[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1960, 86 (370): 495-503.
doi: 10.1002/qj.49708637006
- [52] LI Q S, ZHI L H, YI J, et al. Monitoring of typhoon effects on a super-tall building in Hong Kong[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2014, 21 (6): 926-949.
doi: 10.1002/stc.1622
- [53] LI L X, XIAO Y Q, KAREEM A, et al. Modeling typhoon wind power spectra near sea surface based on measurements in the South China sea[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 104-106: 565-576.
doi: 10.1016/j.jweia.2012.04.005
- [54] HUA X G, CHEN Z Q, YANG J B, et al. Turbulence integral scale corrections to experimental results of aeroelastic models with large geometric scales: application to gust loading factor of a transmission line tower[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2014, 17(8): 1189-1197.
doi: 10.1260/1369-4332.17.8.1189
- [55] 武占科, 赵林, 朱乐东, 等. “罗莎”(0716)台风高空实测脉动风特性分析[J]. *空气动力学学报*, 2010, 28(3): 291-296.
WU Z K, ZHAO L, ZHU L D, et al. High-altitude observation about turbulence characteristics for “Krosa” (0716) strong typhoon[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2010, 28(3): 291-296 (in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.0258-1825.2010.03.009
- [56] 林立, 陈政清, 华旭刚, 等. 福建滨海区台风过程风特性实测及分析[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(2): 244-250.
LIN L, CHEN Z Q, HUA X G, et al. Measurement and analysis of wind characteristics of typhoon near-earth boundary layer in Fujian coastal area[J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(2): 244-250 (in Chinese).
- [57] 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): 380-387.
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): 380-387 (in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.0258-1825.2012.03.017
- [58] 何旭辉, 秦红禧, 邹云峰, 等. 台风外围影响下的大跨度拱桥桥区近地风特性实测研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(1): 23-31.
HE X H, QIN H X, ZOU Y F, et al. Field measurement and investigation of wind characteristics at the site of a long-span arch bridge in the periphery of typhoon Kujira[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(1): 23-31 (in Chinese).
doi: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2017.01.004
- [59] PAURUS M, MIAU J J, CHENG Y R. Wind turbulence characteristics under typhoon conditions[C]//Proc of the 2020 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), Taichung City, Taiwan, China. IEEE, 2020: 356-360.
doi: 10.1109/IS3C50286.2020.00098.
- [60] YU B, GAN CHOWDHURY A, MASTERS F J. Hurricane wind power spectra, cospectra, and integral length scales[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 129(3): 411-430.
doi: 10.1007/s10546-008-9316-8
- [61] 葛耀君. 大跨度悬索桥抗风[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
GE Y J. Wind resistance of long span suspension bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese).
- [62] LI L X, KAREEM A, HUNT J, et al. Turbulence spectra for boundary-layer winds in tropical cyclones: a conceptual framework and field measurements at coastlines[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, 154(2): 243-263.
doi: 10.1007/s10546-014-9974-7
- [63] HE Y C, CHAN P W, LI Q S. Wind characteristics over different terrains[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 120: 51-69.
doi: 10.1016/j.jweia.2013.06.016
- [64] YE X W, XI P S, SU Y H. Analysis of non-stationary wind characteristics at an arch bridge using structural health monitoring data[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2017, 7(4): 573-587.
doi: 10.1007/s13349-017-0244-5
- [65] SHIAU B S. Velocity spectra and turbulence statistics at the northeastern Coast of Taiwan under high-wind conditions[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 88(2-3): 139-151.
doi: 10.1016/S0167-6105(00)00045-3
- [66] TAO T Y, SHI P, WANG H. Spectral modelling of typhoon winds considering nexus between longitudinal and lateral components[J]. *Renewable Energy*, 2020, 162: 1919-2030.
doi: 10.1016/j.renene.2020.09.130
- [67] HU L, XU Y L. Extreme value of typhoon-induced non-stationary buffeting response of long-span bridges[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2014, 36: 19-27.
doi: 10.1016/j.probengmech.2014.02.002
- [68] TAO T Y, WANG H, SHI P, et al. Stationary and non-stationary buffeting analyses of a long-span bridge under typhoon winds[J]. *Wind and Structures*, 2020, 31(5): 455-467.
doi: 10.12989/was.2020.31.5.445
- [69] PRIESTLEY M B. Spectral analysis and time series[M]. New York: Wiley, 1981.
- [70] CONTE J P, PENG B F. Fully nonstationary analytical earthquake ground-motion model[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123(1): 15-24.
doi: 10.1061/(asce)0733-9399(1997)123:1(15)
- [71] HUANG G Q, ZHENG H T, XU Y L, et al. Spectrum models for nonstationary extreme winds[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(10): 04015010.
doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001257
- [72] HU L, XU Y L, ZHU Q, et al. Tropical storm-induced buffeting response of Long-Span Bridges: enhanced nonstationary buffeting force model[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(6): 04017027.
doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001745
- [73] TAO T Y, WANG H. Modelling of longitudinal evolutionary power spectral density of typhoon winds considering high-frequency subrange[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 193: 103957.
doi: 10.1016/j.jweia.2019.103957
- [74] 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.

- doi: [10.1007/s11431-010-4084-3](https://doi.org/10.1007/s11431-010-4084-3)
- [75] 罗叠峰, 李正农, 回忆. 海边三栋相邻高层建筑顶部台风风场实测分析[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(12): 133-139.
LUO D F, LI Z N, HUI Y. Field measurement and analysis of typhoon wind field on top of three adjacent high-rise buildings at seaside[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(12): 133-139 (in Chinese).
doi: [10.14006/j.jzjgxb.2014.12.017](https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2014.12.017)
- [76] 王旭, 黄鹏, 顾明. 基于台风“梅花”的近地层脉动风速功率谱及相干性研究[J]. *空气动力学学报*, 2013, 31(6): 776-782.
WANG X, HUANG P, GU M. Field measurements for the power spectral densities and spatial coherence of fluctuating wind speed near ground during typhoon ‘Muifa’[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2013, 31(6): 776-782 (in Chinese).
- [77] MIYATA T, YAMADA H, KATSUCHI H, et al. Full-scale measurement of Akashi-Kaikyo Bridge during typhoon[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(12-15): 1517-1527.
doi: [10.1016/S0167-6105\(02\)00267-2](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00267-2)
- [78] KRENK S. Wind field coherence and dynamic wind forces[M]//IUTAM Symposium on Advances in Nonlinear Stochastic Mechanics. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996: 269-278.
DOI: [10.1007/978-94-009-0321-0_25](https://doi.org/10.1007/978-94-009-0321-0_25)
- [79] HANSEN S O, KRENK S. Dynamic along-wind response of simple structures[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 82(1-3): 147-171.
doi: [10.1016/S0167-6105\(98\)00215-3](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00215-3)
- [80] PENG L L, HUANG G Q, CHEN X Z, et al. Evolutionary spectra-based time-varying coherence function and application in structural response analysis to downburst winds[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(7): 04018078.
doi: [10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002066](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002066)
- [81] HUANG Z F, XU Y L, TAO T Y, et al. Time-varying power spectra and coherences of non-stationary typhoon winds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 198: 104115.
doi: [10.1016/j.jweia.2020.104115](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104115)
- [82] TAO T Y, XU Y L, HUANG Z F, et al. Buffeting analysis of long-span bridges under typhoon winds with time-varying spectra and coherences[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(12): 04020255.
doi: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002835](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002835)

(本文责编: 王颖 英文编审: 董思卫)