

桥梁及结构风效应 精细化研究新进展

第二届江苏省风工程学术会议论文集

主 编 · 王 浩 柯世堂 荀 勇
副主编 · 张静红 王立彬 陶天友



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

桥梁及结构风效应精细化研究新进展： 第二届江苏省风工程学术会议论文集

王 浩 柯世堂 荀 勇 主 编
张静红 王立彬 陶天友 副主编



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内 容 提 要

本书为“第二届江苏省工程师学会风工程学术会议暨第二届江苏省风工程研究生论坛”论文集,经广泛征集、严格审理,最终共收录 43 篇论文,包含 22 篇专家论文和 21 篇研究生论文,主题包括:大气三维风场探测技术及应用;强风数值模拟与特征预测;工程结构风环境监测与分析;桥梁与结构物风作用及效应分析;风致振动控制理论、方法及应用;计算风工程方法的工程应用及发展;风洞试验技术与方法研究;结构风灾分析与损失预估。入选论文集的论文反映了近年来江苏省风工程领域研究的最新理念、进展及未来发展方向。

本书可供从事风工程研究的科研工作人员、高等院校相关专业师生和土木工程设计院所工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁及结构风效应精细化研究新进展:第二届江苏省风工程学术会议论文集 / 王浩,柯世堂,荀勇主编.
南京:东南大学出版社,2019.3

ISBN 978-7-5641-8330-1

I. ①桥… II. ①王… ②柯… ③荀… III. ①抗风结构—学术会议—文集 IV. ①TU352.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 046967 号

桥梁及结构风效应精细化研究新进展:第二届江苏省风工程学术会议论文集

Qiaoliang ji Jiegou Fengxiaoying Jingxihua Yanjiu Xinjinzhan:

Di-er Jie Jiangsusheng Fenggongcheng Xueshu Huiyi Lunwenji

主 编 王 浩 柯世堂 荀 勇

副 主 编 张静红 王立彬 陶天友

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人 江建中

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d.d.00@163.com

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

版 次 2019 年 3 月第 1 版

印 次 2019 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 12.5

字 数 296 千

书 号 ISBN 978-7-5641-8330-1

定 价 50.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

会议学术委员会

顾问委员会：陈政清 葛耀君 李爱群 王同光 叶继红

主 席：王 浩

副 主 席：柯世堂 艾未华 陈 鑫

秘 书 长：周广东

委 员（按姓氏拼音排序）：

曹九发 陈 力 陈建稳 操礼林 姜海梅 蒋金洋
刘 平 明 杰 闵剑勇 马 麟 孙 勇 孙 震
孙正华 王 珑 王立彬 徐庆阳 谢以顺 熊 文
杨会峰 杨 青 殷勇高 左晓宝 荀 勇 张静红

会议组织委员会

主 席：许 钧 徐 义 荀 勇

副主席：王立彬 吴发红 陈鸣永 臧 蕾 徐爱斌
周公矿 王照宇 徐桂中

秘书长：张静红 张荣兰 陶天友

委 员：朱晓蓉 蔡宗雅 蔡文华 胡 浩 董晓慧
丁友军 徐梓栋 高宇琦 柳家为 卫俊岭
张 寒 王 浩 徐 璐 余文林

序 言

江苏省是沿海省份,夏秋季台风多发,且盐城等地区灾害性天气(龙卷风等)较为频繁,风能资源丰富的同时又蕴含较大的灾害风险。我省高校和科研院所众多,从事风工程研究的科技工作者分散在土木、气象、能源等领域。为增进风工程领域科技工作者交流与合作,加强风工程领域咨询服务,在江苏省科学技术协会的关心和指导下,依托江苏省工程师学会,于2017年3月11日筹备成立了江苏省工程师学会风工程专业委员会。在成立近两年的时间里,专委会开展了多项学术及社会公益活动,取得了较大的社会反响与正面评价。

为了更好地组织风工程领域科技工作者开展交流、研讨活动,加强跨界交流和相互协作,经专委会讨论决定,于2019年1月4~6日召开“第二届江苏省工程师学会风工程学术会议暨第二届江苏省风工程研究生论坛”。本次会议由江苏省工程师学会风工程专业委员会主办,盐城工学院、盐城市土木建筑学会承办,东南大学、南京航空航天大学、河海大学、南京林业大学、阜宁县住房和城乡建设局协办,是我省风工程界交流学术观点和理念、科研成果及其应用的一次盛会。

本论文集收录了所有录用论文的扩展摘要,并正式出版,供与会代表交流。“江苏省工程师学会风工程学术会议”和“江苏省风工程研究生论坛”的宗旨是为江苏省风工程领域的工作人员和研究生提供一个能够充分交流各自成熟或非成熟的创新学术观点和理念以及最新研究成果的平台。因此,允许作者根据学术交流后的反馈结果对论文全文进行适当的修改后向相关学术期刊投稿。

本次会议得到了上级学会江苏省工程师学会的大力支持和指导,也得到了许多委员单位和其他相关单位的热情赞助,借此致以衷心的感谢。本会议论文集的出版得到了国家和江苏自然科学基金、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)青年科学家专题项目的资助,在此一并感谢。最后,衷心感谢支持本届会议的各位专家、学者以及研究生同学,感谢辛勤付出的会务人员。祝愿大家身体健康,工作顺利!

第二届江苏省工程师学会风工程学术会议学术委员会
第二届江苏省工程师学会风工程学术会议组织委员会

2018年12月

目 录

第 一 部 分

实测台风温比亚演变谱分析 2

风力机台风全过程风振特征分析 9

不同风环境下大跨桥梁风致响应特征分析 18

CFD 在超高电梯测试塔设计中的应用研究 25

登陆台风边界层湍流特征观测分析 40

考虑屋盖振动影响的大跨曲面屋盖结构风荷载研究 46

弯扭复合运动下的桥梁非线性自激气动力 52

开敞式张拉膜结构的风致响应研究 60

大跨度桥梁非平稳抖振时域分析 67

沿海地区输电塔结构抗风加固技术研究 78

基于检监测数据的运维期桥梁评估体系研究与应用 83

第 二 部 分

苏北沿海林场建设案例及防风功效数值分析 90

高耸结构 TMD 减振参数多目标优化设计 93

降雨条件下双波段风廓线雷达垂直气流探测数据分析 96

龙卷风模拟及对低矮房屋的破坏分析 99

桥梁颤振导数的强迫振动数值模拟识别 103

SST $k-\omega$ 模型边界条件对污染物扩散的影响 106

高速铁路连续梁桥冲击系数取值标准研究 109

风电场的尾流模型与气动噪声模型耦合计算方法研究 112

基于梯度算法的平屋盖女儿墙防风效果优化研究 114

工业厂房大跨屋盖体外预应力法抗风加固设计 117

大跨度悬索桥颤振稳定性可靠度评估 120

第 三 部 分

强/台风作用下大跨度桥梁桥面行驶车辆动力响应快速估计方法研究 124

风荷载变化对木结构紧固件设计的影响分析 127

台风期间苏通大桥实测抖振演变谱分析	130
基于风洞试验南京美术馆风荷载分布研究	133
苏通大桥桥址区“安比”台风特性实测研究	136
钢框架-CLT 剪力墙结构抗震性能试验研究	139
高墩大跨连续刚构桥最大悬臂阶段风效应	142
BIM 技术在高铁连续梁桥前处理中的应用	145
电厂新建冷却塔对既有冷却塔的风致干扰效应研究	148
多因素耦合作用下混凝土结构风振响应分析	152
地震作用下风力发电塔架 TMD 减震分析	157
基于 WRF/CFD 方法台风与良态风下航站楼屋盖风压非高斯特性研究	160
基于 CFD 的高铁连续梁桥主梁典型断面静力三分力系数研究	165
基于多尺度有限元方法特大型冷却塔动力特性和静风响应分析	168
船载激光雷达测风系统方案设计	172
BIM 技术在高铁连续梁桥悬臂施工阶段风特性监测中的应用	175
稳定大气条件下风力机的气动载荷计算	178
不同布局方式对高速收费站区室外风环境影响的数值模拟	181
柱形屋盖风场模拟研究	183
球形充气膜屋盖的风压数值模拟	186
龙卷风对低风速风力机气动载荷的影响	189

第一部分

实测台风温比亚演变谱分析

王 浩¹, 徐梓栋¹, 陶天友¹

(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, 江苏南京 211189)

摘 要:以 2018 年“温比亚”台风期间苏通大桥 SHMS 实测风数据为研究对象,采用游程检验法对桥址区实测风速进行了平稳性检验,采用基于小波变换的演变功率谱(Evolutionary Power Spectral Density, EPSD)估计方法,进行了实测台风非平稳脉动风速 EPSD 分析。结果表明,实测风速表现出明显的非平稳特性,EPSD 直观地反映了实测台风脉动风速能量的时频分布特征,基于复 Morlet 小波及滤波谐和小波可增强 EPSD 估计结果的时域平滑性。研究结果可为今后非平稳风场实测分析及数值模拟提供参考。

关键词:结构健康监测; 台风; 谐和小波; 演变功率谱

1 引言

随着全球气候变化,风灾所造成的人类生命财产损失日益加剧。台风作为常见风灾,严重威胁沿海大跨度桥梁等风敏感结构的安全。因此,有必要开展实测台风特性分析从而为风敏感结构的抗风研究奠定基础^[1-2]。结构健康监测系统(Structural Health Monitoring System, SHMS)的出现使结构性能和结构所处环境的实时监测成为可能,大跨度桥梁 SHMS 所包含的风速监测子系统可提供桥址区极端风天气的可靠实测风数据。在进行风特性分析时常将脉动风速视为平稳随机过程。然而,实测研究表明,台风存在明显非平稳特性,脉动风速功率谱表现出时变特征,传统平稳风特性分析有必要向非平稳过渡^[3-4]。

与平稳风速模型不同,非平稳风速模型将实测风数据分解为时变平均风与脉动风速之和。对非平稳脉动风速,可由 Priestley^[5]所定义的演变功率谱(Evolutionary Power Spectral Density, EPSD)刻画其时频特性。小波变换(Wavelet Transform, WT)^[6]是近几十年发展起来的信号时频处理技术,因其良好的时频分辨率被誉为数学显微镜。Spanos 等^[7]基于小波方法发展了计算 EPSD 的 Spanos-Failla 框架,该方法将信号 EPSD 视为若干时频解耦函数的乘积之和,并通过合理选择小波基函数,从而实现对不同类型非平稳信号 EPSD 的合理估计。对实测台风非平稳脉动风速而言,采用不同的小波基函数开展 EPSD 估计,其结果将存在差异。对比不同小波基函数下实测台风脉动风速 EPSD,不仅可以对 EPSD 估计结果进行相互验证,也可为小波基函数的合理选取提供参考。

本文以建成时国内第一大跨度斜拉桥——苏通大桥为工程背景,采用该桥结构健康监测系统实时采集的台风“温比亚”实测风数据开展其非平稳脉动风速 EPSD 分析。在采用

基于 WT 的 EPSD 估计方案时,分别选取了 Morlet 小波、复 Morlet 小波、广义谐和小波 (Generalized Harmonic Wavelet, GHW) 及滤波谐和小波 (Filtered Harmonic Wavelet, FHW) 作为小波基函数,并将实测台风脉动风速 EPSD 进行对比,以期小波基函数的合理选取及大跨度斜拉桥的抗风设计与研究提供参考。

2 台风“温比亚”实测风数据

2.1 苏通大桥风速仪布置

主跨 1 088 m 的苏通大桥连接南通、苏州两市,距长江入海口 108 km,为双塔双索面钢箱梁斜拉桥。为了对大桥结构响应及周围环境进行监测,该桥配备了较为全面的 SHMS。风速监测子系统包含 4 个 Delta HD2003 型三维超声风速仪 (ANE),其中 2 个分别安装在主梁跨中上、下游侧 (FS4, FS4'),离水面高约 76.9 m;另外 2 个分别安装在南、北两主塔塔顶正中 (FS2, FS6),离水面高度约 306 m,风速仪布置见图 1。风向角正北被定义为 0°,为了便于数据储存和管理,设定风速仪采样频率为 1 Hz,采样精度为 0.01 m/s,风速数据按每段 1 h 长度进行储存^[3]。

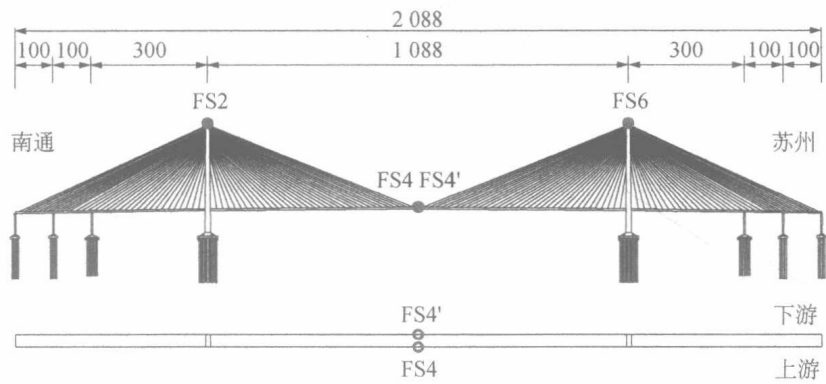


图 1 苏通大桥风速仪布置图

2.2 风速时程

2018 年台风“温比亚”在上海市浦东新区登陆并影响东南沿海各省,苏通大桥位于此次台风的影响区,台风路径见图 2。苏通大桥 SHMS 对此次台风进行了 24 h 全天候监控,考虑作用于主梁上的风荷载对整个桥梁产生的影响最大,且为了避免气流经过主梁及桥面附属设施后产生的尾流效应影响,本文以主梁跨中迎风侧风速仪所采集的风数据为研究对

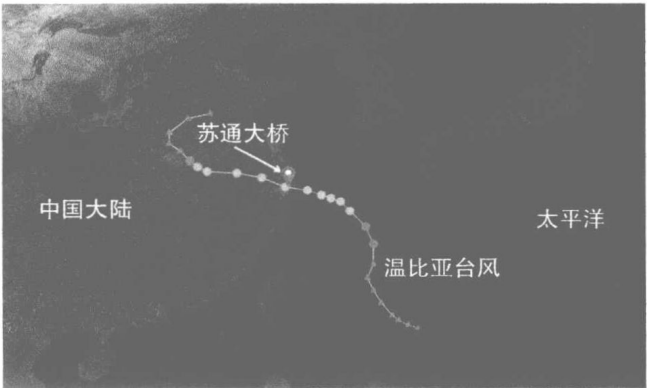


图 2 “温比亚”台风路径

象,选取 8 月 17 日 15:00—16:00 时段实测风速数据[图 3(a)]开展分析。经游程检验^[8],该段实测数据非平稳,采用 db10 小波^[6]剔除时变平均风所得脉动风速时程如图 3(b)所示。

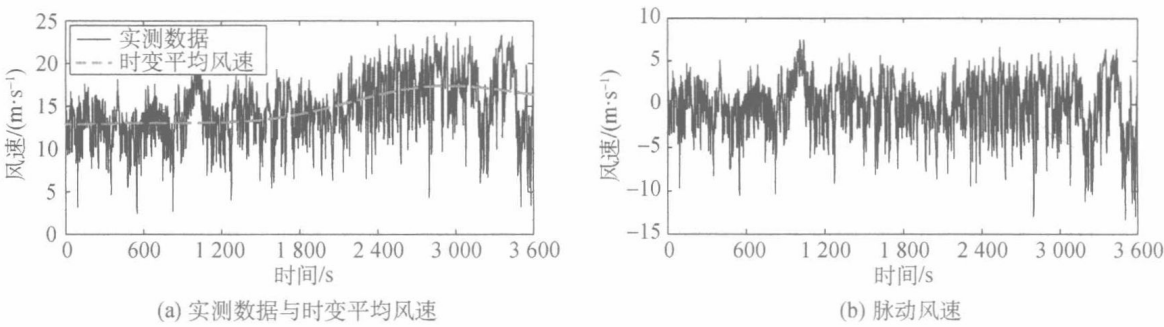


图 3 实测台风数据

3 非平稳随机过程 EPSP 估计

3.1 小波变换

对能量有限信号 $f(t)$, 其连续小波变换定义为^[7]:

$$CW(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

式(1)中, $\phi(t)$ 为小波基函数; a 为尺度因子; b 为平移因子; $*$ 表示复数共轭。小波基函数 $\phi(t)$ 的傅立叶变换定义为:

$$\Phi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

为方便数值计算,常将尺度因子与平移因子进行如下离散^[7]:

$$a_i = \sigma^i, b_j = (j-1)\Delta b \quad (3)$$

式(3)中, σ 与 b 为常数。

3.2 小波基函数

Morlet 小波是工程中常用的小波函数,该小波为复值小波,表达为^[7]:

$$\phi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \left(e^{-i\omega_0 t} - e^{-\frac{\omega_0^2}{2}} \right) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (4)$$

其傅立叶变换为:

$$\Phi(\omega) = \pi^{-\frac{1}{4}} \left[e^{-(\omega - \frac{\omega_0}{2})^2} - e^{-\frac{\omega_0^2}{2}} e^{-\frac{\omega^2}{2}} \right] \quad (5)$$

式(4)和(5)中,当 $\omega_0 \geq 5$ 时, $e^{-\frac{\omega_0^2}{2}} \approx 0$ 。因此, Morlet 小波通常也可近似表示为:

$$\phi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{-i\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}, \omega_0 \geq 5 \quad (6)$$

相应的傅立叶变换为:

$$\Phi(\omega) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2}} \quad (7)$$

实际工程应用时,常取 Morlet 小波的实部来进行小波分析,即:

$$\phi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \cos(5t) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (8)$$

此时 Morlet 小波称为实值 Morlet 小波。

GHW 为一种正交小波,具有“盒形”频谱特征,由尺度因子 (m, n) 及平移因子 k 所确定的 GHW,其时、频域表达式如下^[9]:

$$\begin{cases} \Phi_{m,n}(\omega) = \frac{1}{(n-m)2\pi}, & m2\pi \leq \omega \leq n2\pi \\ \Phi_{m,n}(\omega) = 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\phi_{m,n,k}(t) = \frac{e^{in2\pi(t-\lceil k/(n-m) \rceil)} - e^{im2\pi(t-\lceil k/(n-m) \rceil)}}{i2\pi(n-m)\left(t - \frac{k}{n-m}\right)} \quad (10)$$

式(9)和(10)中, m, n 可取任意正实常数,通常取各尺度下小波函数频带宽相等,即 $n_i - m_i = n_j - m_j (i, j = 1, 2, \dots, l)$ 。

FHW 可视作 GHW 的改进后小波,比 GHW 具有更高的时间分辨率^[9]。在 GHW 频域表达式基础上加 Hanning 窗函数可得到 FHW 的频域表达^[9]:

$$\Phi_{m,n}(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{(n-m)2\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{\omega - m2\pi}{n-m}\right) \right], & m2\pi \leq \omega \leq n2\pi \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

3.3 基于 WT 的 EPSD 估计框架

对非平稳随机过程 $f(t)$, 其 EPSD 可以表示为^[7]:

$$S_{yy}(a, \tau) = \sum_{j=1}^{m_a} M_j(\tau) |\Phi(\omega a_j)|^2 \quad (12)$$

式(12)中, m_a 为所选择尺度的总数; $M_j(\tau)$ 为与时间相关的参数,可由下式求解^[7]:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{1,1} & \Delta_{1,2} & \cdots & \Delta_{1,m} \\ \Delta_{2,1} & \Delta_{2,2} & \cdots & \Delta_{2,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \Delta_{m,1} & \Delta_{m,2} & \cdots & \Delta_{m,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1(\tau) \\ M_2(\tau) \\ \cdots \\ M_m(\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E[|CW_y(a, \tau_1)|] \\ E[|CW_y(a, \tau_2)|] \\ \cdots \\ E[|CW_y(a, \tau_m)|] \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)中,系数 $\Delta_{i,j}$ 表示为^[7]:

$$\Delta_{i,j} = \int_{-\infty}^{+\infty} |\Phi(\omega a_i)|^2 |\Phi(\omega a_j)|^2 d\omega \tag{14}$$

根据不同小波基函数及其频域表达式,即可根据式(12)~(14)计算非平稳随机过程 EPSD,并据此对非平稳过程开展时频分析。

4 非平稳脉动风速 EPSD 估计

采用上述基于 WT 的非平稳过程 EPSD 估计方法,对所选取苏通大桥实测“温比亚”台风脉动风速开展了 EPSD 分析。EPSD 估计时,分别选取了 Morlet、复 Morlet、GHW 与 FHW 作为小波基函数,各小波函数参数取值参见文献[6]。为验证所得 EPSD 的准确性和可靠性,将各频率对应的演变谱曲线在时域范围内进行积分,并将积分结果平均后与 Pwelch 方法计算所得功率谱进行对比,计算结果如图 4 和图 5 所示。同时,为比较采用不同小波基函数所得台风脉动风速 EPSD 间差异,取所得 EPSD 在 0.05 Hz 处的频率切片进行对比分析,结果如图 6 所示。

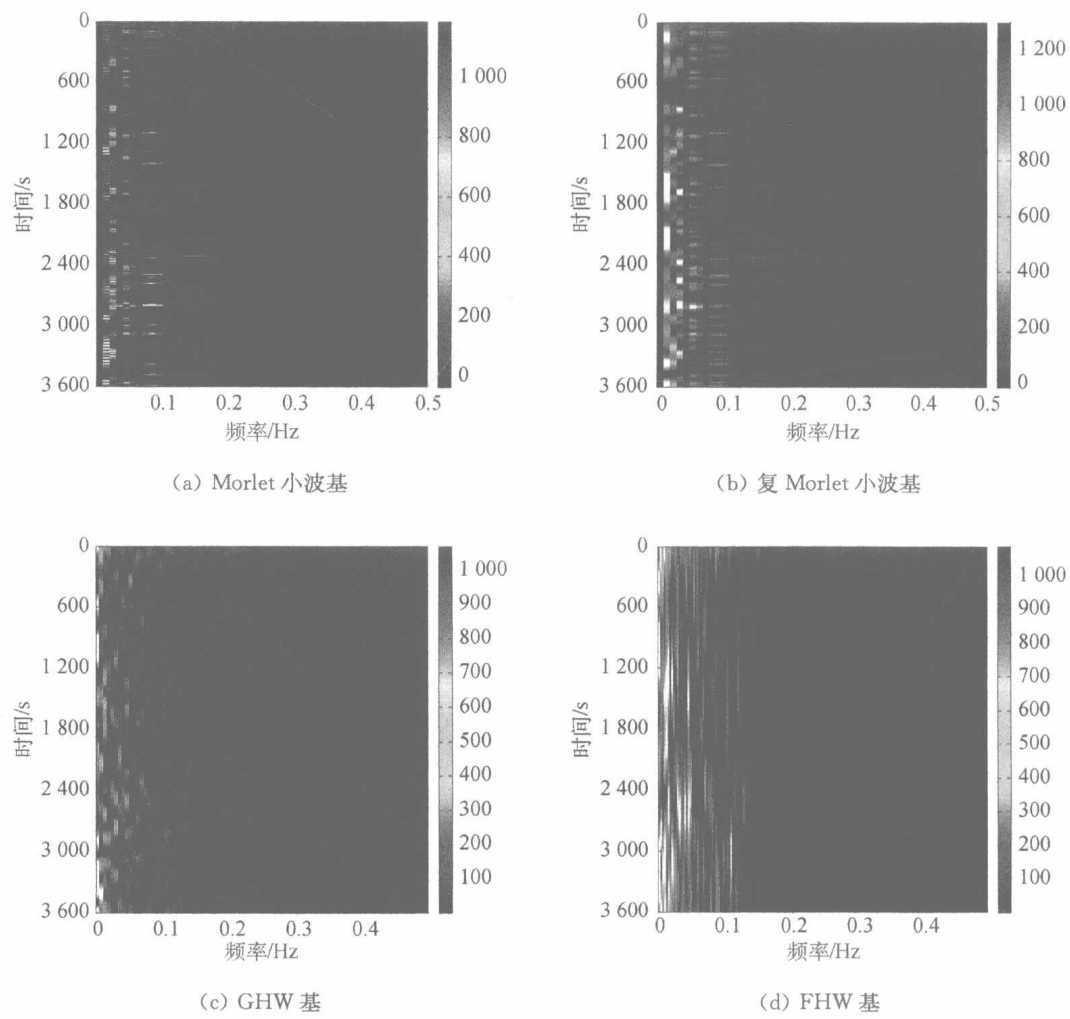


图 4 实测台风 EPSD

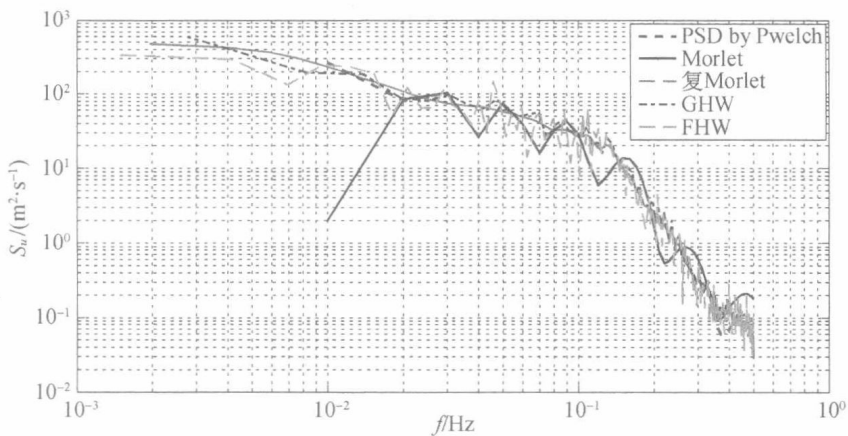


图 5 演变谱均值与功率谱对比

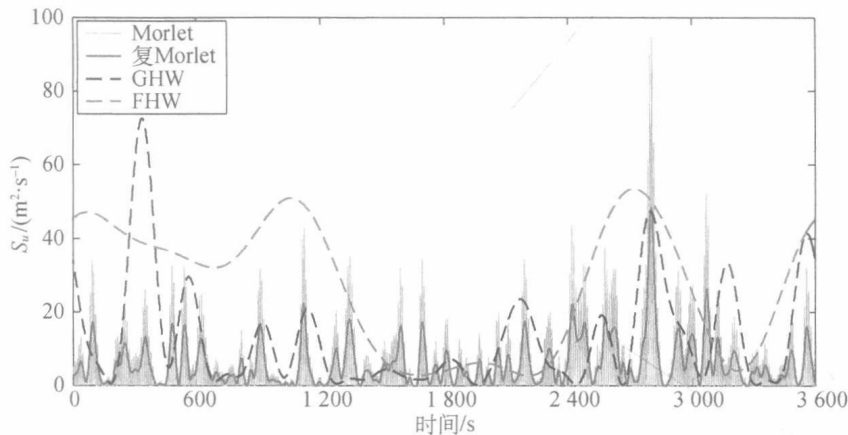


图 6 0.05 Hz 处频率切片

由图 4 可知,用不同小波基函数估计所得 EPSD 均表现出明显时变特性,表明实测“温比亚”台风脉动风速存在非平稳特性。由图 5 可知,除采用 Morlet 小波估计所得 EPSD 时均谱与 Pwelch 方法计算所得功率谱在低频区存在较大差异外,其余小波函数估计所得 EPSD 时均谱与 Pwelch 方法计算所得功率谱较为吻合。因此,基于 Morlet 小波开展台风非平稳脉动风速 EPSD 估计并不合理。由图 6 可知,复 Morlet 小波较 Morlet 小波而言,其时域分辨率较高。FHW 时域曲线最为光滑,基本包络了 Morlet 小波与复 Morlet 小波结果。GHW 结果在 200~400 s 范围出现峰值,与复 Morlet 小波及 FHW 估计结果存在差异,表明其时域分辨能力较弱。实际工程中,推荐采用复 Morlet 小波及 FHW 开展实测台风非平稳脉动风速 EPSD 估计。

5 结论

以“温比亚”台风期间苏通大桥 SHMS 实测风数据为研究对象,综合采用非平稳风速模型和基于 WT 的 EPSD 估计方法,开展了实测台风非平稳脉动风速 EPSD 分析,得出如下

结论:

(1) 实测风速数据表现出较强的非平稳性,采用非平稳风速模型得到的时变平均风速可以更好地反映非平稳风速的变化趋势。

(2) 基于不同小波基函数估计所得台风非平稳脉动风速 EPSD 存在差异。其中,基于 Morlet 小波估计所得 EPSD 在低频区与实际存在较大偏差,不推荐将其用于实测台风非平稳脉动风速 EPSD 估计。

(3) 采用复 Morlet 小波基估计所得 EPSD 较 Morlet 小波估计结果而言,其时域分辨率较高。采用 FHW 估计所得 EPSD 时域结果最为光滑,且基本包络 Morlet 小波与复 Morlet 小波 EPSD 估计结果。实际工程中,推荐采用复 Morlet 小波及 FHW 开展实测台风非平稳脉动风速 EPSD 估计。

参考文献

- [1] 项海帆.现代桥梁抗风理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 张明金,李永乐,唐浩俊,等.高海拔高温差深切峡谷桥址区风特性现场实测[J].中国公路学报,2015,28(3):60-65.
- [3] 王浩,杨敏,陶天友,等.苏通大桥桥址区实测强风非平稳风特性分析[J].振动工程学报,2017,30(2):312-318.
- [4] 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.
- [5] Priestley M B. Evolutionary spectra and non-stationary processes[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1965, 27(2): 204-237.
- [6] Wang H, Xu Z, Wu T, et al. Evolutionary power spectral density of recorded typhoons at Sutong Bridge using harmonic wavelets[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2018, 177: 197-212.
- [7] Spanos P D, Failla G. Evolutionary spectra estimation using wavelets[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004,130(8): 952-960.
- [8] Bendat J S. Random Data Analysis and Measurement Procedures[M]. New York: Willey and Sons, 1971.
- [9] Spanos P D, Tezcan J, Tratskas P. Stochastic processes evolutionary spectrum estimation via harmonic wavelets[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194(12-16): 1367-1383.

风力机台风全过程风振特征分析

柯世堂¹, 王 浩¹

(1.南京航空航天大学 江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 江苏南京 210016)

摘 要: 台风自身结构的复杂性导致当大型风力机处于台风不同生命周期影响下的振动特征差异巨大, 目前针对台风过境全过程风力机结构安全的影响研究尚属空白。本文在结合宏观台风实测研究成果的基础上, 提出了一种针对大型风力机的台风过境全过程风振分析方法。以美国国家可再生能源实验室(NREL)5 MW 风力发电机组为例, 系统研究了台风过境全大型风力机的风振响应特征, 并揭示了台风全过程效应对大型风力机振动特征的作用机理, 提出了可考虑台风全过程效应的大型风力机振动放大效应评价方法。

关键词: 抗台风设计; 大型风力机; 台风过境全过程; 风振分析

1 引言

大型风力机的“叶片-轮毂-传动链-机舱-塔架”的耦合系统具有阻尼小、自振频率低、振动剧烈等特征, 强台风作用会进一步放大系统的柔性特征, 近年频繁出现大型风力机在台风影响过程中的结构安全事故^[1]。然而, 已有研究成果和相关规范^[2-4]大多基于传统的良态风抗风设计理论进行大型风力机体系的结构安全研究, 针对台风过境全过程风力机结构安全的影响研究尚属空白。许多学者已对良态风作用下大型风力机的风致响应进行了较为系统的研究^[2-3], 相关研究成果已成为目前大型风力机结构设计的参考依据。目前针对台风作用下大型风力机的结构抗风安全问题仍需进一步深入。已有研究中: 文献[1]结合台风“杜鹃”和实际风力机叶片结构的破坏特征, 指出台风作用所引起叶片超设计载荷是叶片结构破坏的主要原因。文献[5]进一步指出, 由于现有风力机运行控制系统大都未考虑极端台风作用的影响, 因此普遍存在抵御台风载荷的设计缺陷, 这是导致风力机结构在台风载荷作用下易发生失效破坏的主要原因。一些学者尝试采用简化风力机体系进行更全面的台风效应研究, 如文献[6]采用简化的静力分析方法开展了台风荷载下风力机塔筒的应力分析, 并针对台湾某风力机台风致失效事故进行破坏机理分析。然而, 上述研究均基于特定阶段的某一台风实测数据或良态风统计数据进行分析, 并未有涉及强台风过境全过程的大型风力机体系振动研究, 无法有效揭示大型风力机在台风过境全过程的振动特征。

本文针对大型风力机台风过境下的抗风安全性问题, 整合已有台风工程模型和动力学建模方法, 在此基础上, 以美国国家可再生能源实验室(NREL)5 MW 风力机为例, 建立该机型的动力学分析模型, 并验证了模型的有效性。在此基础上, 系统研究了台风过境全过