

基于结构健康监测的苏通大桥实测强风演变功率谱

王 浩, 程怀宇, 茅建校, 李爱群

(东南大学 混凝土与预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 对基于小波变换的非平稳时间序列演变功率谱密度函数的估计方法进行了总结. 以苏通大桥结构健康监测系统实测的台风达维、海葵以及冬季强北风数据为研究对象, 基于 Morlet 小波计算了上述 3 个实测典型强风的演变功率谱密度函数. 实测风演变谱在时域内的均值与傅里叶谱吻合良好, 验证了演变谱估计结果的准确性. 实测强风的演变功率谱分析结果表明, 脉动风的能量主要集中在低频部分, 且脉动风速功率谱随时间变化显著, 具有较强的非平稳特性. 基于平稳随机过程假设的传统风谱计算方法无法准确描述实测强风风谱的非平稳特征. 研究结论可为桥址区三维非平稳脉动风场的准确模拟以及强/台风作用下苏通大桥的非平稳抖振分析提供实测参考.

关键词: 非平稳随机过程; 脉动风速; 演变功率谱; 小波变换; 苏通大桥; 结构健康监测系统

中图分类号: U448.27; V211

文献标志码: A

Evolutionary Power Spectral Density of Recorded Strong Wind at Sutong Bridge Based on Structural Health Monitoring

WANG Hao, CHENG Huaiyu, MAO Jianxiao, LI Aiqun

(Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The methods for estimating the evolutionary power spectral density (EPSD) of nonstationary time series using the wavelet transform were summarized. Taking typhoon Dawei, typhoon Haikui and the winter monsoon recorded by the structural health monitoring system (SHMS) of Sutong Bridge were as examples, the EPSDs of the three measured strong winds were calculated with the Morlet wavelet. The mean values of EPSDs in the time domain agree well with the traditional Fourier-based PSDs, which verifies the accuracy of the estimated results of the EPSDs. The analysis results of

the EPSDs show that the energy of turbulence wind mainly concentrates on the low frequency range. Besides, the EPSDs of turbulence wind vary remarkably with time and possess strong nonstationary characteristics. Therefore, the traditional wind spectrum calculation method based on the hypothesis of the stationary random process cannot exactly describe the nonstationary characteristics of the measured strong wind spectrum. The conclusions can provide field measurement references for accurate simulation of 3D nonstationary turbulence wind field of bridges and nonstationary buffeting response analysis of Sutong Bridge under strong winds.

Key words: nonstationary random process; turbulence wind speed; evolutionary power spectral density (EPSD); wavelet transform; Sutong Bridge; structural health monitoring system (SHMS)

近年来,国内外修建了一大批跨江、跨海的大跨度缆索支承桥梁.随着桥梁跨径的增加,风荷载逐步成为威胁大跨柔性桥梁安全的主要因素,使得大跨桥梁抗风成为桥梁工程领域的热门研究课题^[1].准确把握桥址区的风特性是桥梁抗风设计的前提和基础.目前已有学者采用现场实测、结构健康监测系统(SHMS)等手段开展了一些桥址区复杂气候条件下的风特性实测研究^[2-4].本课题组也以润扬大桥和苏通大桥等为工程背景,利用 SHMS 实时记录的桥址区风环境数据开展了实测夏季台风和冬季强北风的风特性研究^[5-6].值得注意的是,现有大部分风特性实测研究均以平稳随机过程假设为基础,即假设指定高度处的风速为一个各态历经的平稳随机过程.

已有研究表明,风速作为一种随机过程,不可能在很长一段时间内保持数学期望等特征参数不变.

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2015CB060000);国家自然科学基金(51378111);霍英东青年教师基金(142007);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0128);亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金(2014KA04)

第一作者: 王 浩(1980—)男,副研究员,博士生导师,工学博士,主要研究方向为大跨桥梁抗风抗震和健康监测.

E-mail: wanghao1980@seu.edu.cn

复杂地形的强/台风具有明显的非平稳特征,结构风工程研究由平稳向非平稳过渡是必然趋势^[7].加之近年来极端气候造成的结构破坏不断增多,促使越来越多的学者逐渐将注意力转移到极端气候的非平稳特性研究中. Xu 等^[8]提出了一种利用时变趋势项来反映风速非平稳特征的非平稳风速模型,其中时变趋势项的提取采用了经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)技术. 申建红等^[9]分别采用离散正交小波变换和 EMD 技术提取了非平稳风速的时变均值,对比分析结果表明,小波变换较 EMD 更为准确有效. Chen 等^[10]以香港昂船洲大桥为工程背景,分别采用平稳和非平稳风速模型对桥址区实测风特性进行了对比研究,研究表明采用非平稳风速模型可以更准确地描述桥址区实测强/台风的非平稳特性,但是未能对实测脉动风谱的时变特性进行分析.

脉动风速功率谱密度能够反映不同频率成分脉动风的能量贡献,是结构抗风研究的基础性参数,然而已有风谱模型研究大都基于平稳随机过程假设. 为了准确描述脉动风的非平稳特性,推动风特性研究朝精细化方向发展,有必要建立随时间变化的脉动风功率谱,即演变功率谱. Spanos 等^[11]将演变功率谱值假定为各尺度小波频域函数平方的“加权”和,通过求解不同频带上的权系数来估计演变功率谱值,并在地震波演变谱估计中进行应用. 之后, Huang 等^[12]对该法进行了推广,将其应用于演变风谱研究. 周广东等^[13]也建立了非平稳随机脉动风时变功率谱估计的小波函数加权法和,并采用模拟非平稳脉动风和实测台风过程对理论推导结果进行了验证. 但目前鲜有文献对工程场地的实测非平稳风进行演变功率谱密度研究.

本文基于苏通大桥结构健康监测系统(SHMS)平台,以实测台风达维、海葵以及冬季强北风为研究对象,采用小波函数加权和法进行了桥址区实测台风的演变功率谱密度分析,重点分析了典型实测强风的脉动风速能量在时域和频域内的分布情况及变化规律. 研究结果可为开展桥址区三维非平稳脉动风场模拟及苏通大桥非平稳抖振响应分析提供参考.

1 基于小波变换的非平稳风速演变功率谱估计方法

小波变换理论是近几十年来发展起来的信号处理技术. 小波分析方法提出了长度可变的时间窗,当

需要精确的低频信息时,采用长的时间窗,当需要精确的高频信息时,采用短的时间窗. 其在时域和频域都可以达到较高的分辨率,因而被称为“数学显微镜”,在多个领域得到了广泛应用.

1.1 小波变换原理

对于任意 $\Psi(t) \in L^2(R)$, ($L^2(R)$ 表示在实数空间平方可积), 且满足条件

$$\int_R \Psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

则称 $\Psi(t)$ 为基本小波. 引入尺度因子 a 和平移因子 b ($a, b \in \mathbf{R}$ 且 $a \neq 0$), 将基本小波进行平移和伸缩, 得到相应的分析小波函数族 $\Psi_{a,b}(t)$ 为

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

于是, 函数 $y(t) \in L^2(R)$ 的小波变换定义为

$$W_y(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, a \neq 0 \quad (3)$$

式中: $\Psi^*(t)$ 为 $\Psi(t)$ 的共轭函数, 若为实函数, 则 $\Psi^*(t) = \Psi(t)$.

若 $\Psi(t)$ 满足式(4)所示的条件时, 则该函数存在小波逆变换如式(5)所示.

$$C_\Psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4)$$

$$y(t) = C_\Psi^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{a,b}(t) W_y(a, b) db \frac{da}{|a|^2} \quad (5)$$

式中: $\hat{\Psi}(\omega)$ 是 $\Psi(t)$ 的傅里叶变换.

对时间序列信号进行小波变换得到的小波变换系数本身就反映了信号能量的时频特征, 但这并不能替代经典功率谱图所蕴藏的全部信息, 有必要进一步开展实测风的演变功率谱分析.

1.2 演变功率谱理论

由 Priestley 定义的演变谱^[14]可知, 任意非平稳随机过程 $y(t)$ 可以表达为

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, t) e^{i\omega t} d\bar{Z}(\omega) \quad (6)$$

式中: $A(\omega, t)$ 为非均匀调制函数; $\bar{Z}(\omega)$ 为复正交随机增量随机过程, 可以由下式确定:

$$\begin{cases} E[d\bar{Z}(\omega) d\bar{Z}^*(\omega')] = 0, \omega \neq \omega' \\ E[|d\bar{Z}(\omega)|^2] = S_{\Pi}(\omega) d(\omega), \forall \omega \end{cases} \quad (7)$$

式中: $E[\cdot]$ 为数学期望; $S_{\Pi}(\omega)$ 为平稳随机过程 $\bar{y}(t)$ 的功率谱密度函数; $\bar{Z}^*(\omega)$ 为 $\bar{Z}(\omega)$ 的复共轭函数.

又 $\bar{y}(t)$ 可表示为

$$\bar{y}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} d\bar{Z}(\omega) \quad (8)$$

则非平稳随机过程 $y(t)$ 的演变功率谱密度函数为

$$S_{ff}(\omega, t) = |A(\omega, t)|^2 S_{ff}(\omega) \quad (9)$$

1.3 基于小波变换的非平稳时间序列演变功率谱估计方法

将式(3)中的 $y(t)$ 由式(6)代替, 则小波变换变为如下形式:

$$W_y(a_j, b) = |a_j|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a_j} \right) dt = |a_j|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, t) e^{i\omega t} dZ(\omega) \right\} \cdot y(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a_j} \right) dt \quad (10)$$

由于小波函数 $\Psi(t)$ 具有紧支性, $\Psi((t-b)/a_j)$ 主要集中在 b 附近, 于是, 可以作如下近似:

$$W_y(a_j, b) \approx |a_j|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, b) \cdot \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} \Psi^* \left(\frac{t-b}{a_j} \right) dt \right\} dZ(\omega) \quad (11)$$

令 $\tau = (t-b)/a_j$, 则式(11)右端可化为

$$W_y(a_j, b) \approx \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, b) \cdot \left\{ |a_j|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega a_j \tau} \Psi^*(\tau) d\tau \right\} e^{i\omega b} dZ(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, b) |2\pi a_j|^{-1/2} \hat{\Psi}^*(\omega a_j) e^{i\omega b} dZ(\omega) \quad (12)$$

于是, 式(12)可改写为

$$W(a_j, b) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, b) e^{i\omega b} dZ'(\omega) \quad (13)$$

其中

$$dZ'(\omega) = |2\pi a_j|^{-1/2} \hat{\Psi}^*(\omega a_j) e^{i\omega b} dZ(\omega) \quad (14)$$

由式(13)可知, 非平稳时间序列在尺度 a_j 下的小波变换系数本身也可看作是一个以时间因子 b 为变量的随机过程. 那么由式(9)可知其演变功率谱密度可表示为

$$S_{yy}^{a_j}(\omega, b) = |A(\omega, b)|^2 2\pi a_j |\hat{\Psi}^*(\omega a_j)|^2 S_{ff}(\omega) \quad (15)$$

$$E[W(a_j, b)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} S_{yy}^{a_j}(\omega, b) d\omega = 4\pi a_j \int_0^{\infty} |A(\omega, b)|^2 |\hat{\Psi}(\omega a_j)|^2 S_{yy}(\omega, b) d\omega \quad (16)$$

需要注意的是, $a_j |\hat{\Psi}^*(\omega a_j)|^2$ 是在尺度 a_j 时小波函数的模的平方, 即

$$a_j |\hat{\Psi}^*(\omega a_j)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a_j}} \hat{\Psi} \left(\frac{t-b}{a_j} \right) e^{-i\omega t} dt \right|^2 \quad (17)$$

对于不同尺度系数 a_j 有

$$\begin{cases} E[W(a_1, b)^2] = 4\pi a_1 \int_0^{\infty} |A(\omega, b)|^2 \cdot |\hat{\Psi}(\omega a_1)|^2 S_{yy}(\omega, b) d\omega \\ E[W(a_2, b)^2] = 4\pi a_2 \int_0^{\infty} |A(\omega, b)|^2 \cdot |\hat{\Psi}(\omega a_2)|^2 S_{yy}(\omega, b) d\omega \\ \vdots \\ E[W(a_m, b)^2] = 4\pi a_m \int_0^{\infty} |A(\omega, b)|^2 \cdot |\hat{\Psi}(\omega a_m)|^2 S_{yy}(\omega, b) d\omega \end{cases} \quad (18)$$

式中: m 为小波变换中尺度因子 a 的离散总数. 为了求解方程(18), 可假设演变功率谱密度函数 $S_{yy}(\omega, b)$ 如下:

$$S_{yy}(\omega, b) = \sum_{j=1}^m c_j(b) |\hat{\Psi}(\omega a_j)|^2 \quad (19)$$

其中 a_j 和 b 分别为小波的尺度因子和平移系数; $c_j(b)$ 为依赖于时间的加权系数, 可由下式求得:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{1,1} & \Delta_{1,2} & \cdots & \Delta_{1,m} \\ \Delta_{2,1} & \Delta_{2,2} & \cdots & \Delta_{2,m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta_{m,1} & \Delta_{m,2} & \cdots & \Delta_{m,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1(b) \\ c_2(b) \\ \vdots \\ c_m(b) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E[|W_y(a_1, b)|^2] \\ E[|W_y(a_2, b)|^2] \\ \vdots \\ E[|W_y(a_m, b)|^2] \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: $W_y(a_j, b)$ 为非平稳随机过程 $y(t)$ 在尺度 a_j 和时间 b 处的小波变换; 系数矩阵元素 $\Delta_{i,j}$ 可通过下式求得:

$$\Delta_{i,j} = \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{\Psi}(\omega a_i)|^2 |\hat{\Psi}(\omega a_j)|^2 d\omega \quad (21)$$

据此, 总结了非平稳脉动风速演变功率谱估计的小波频域函数的加权和法. 首先, 通过式(21)建立对称系数矩阵, 并结合小波变换系数建立权系数方程式(20). 求解式(20)可得演变功率谱的权系数 $c_j(b)$, 代入式(19)便可计算出非平稳随机过程 $y(t)$ 的演变功率谱.

2 基于 SHMS 的实测强风数据

苏通大桥主跨 1 088 m, 2008 年建成通车时为世界第一大跨度斜拉桥. 为了保证苏通大桥在整个设计使用寿命内的安全运营, 评估和预测各种灾害影响下的结构健康状态, 同时为大桥的管理维护提供决策依据, 建立了较为全面的 SHMS. 该 SHMS 中的 4 个三维风速风向仪分别安装在大桥南、北塔

塔顶以及主梁跨中截面的上下游,如图1所示。风速仪风速和风向的测量精度分别设定为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0.1° , 采样频率设为 1 Hz 。上述风速仪对桥址区风环

境进行全天候实时监控,可为开展超大跨度斜拉桥风环境研究工作提供可靠的现场实试验证平台。

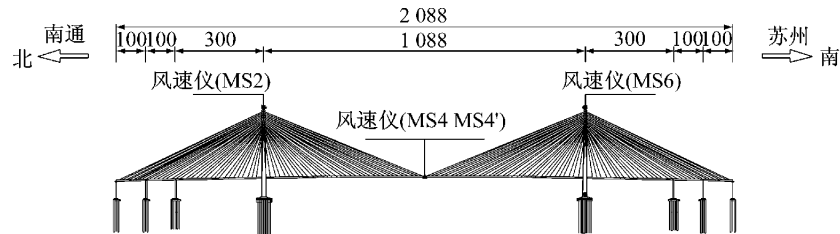


图1 苏通大桥 SHMS 传感器布置图(单位:m)

Fig.1 Layout of SHMS sensors on Sutong Bridge(unit: m)

基于该桥 SHMS 的风特性数据,选择强风期间的典型时段进行桥址区实测风谱的时变特性研究: ① 2012 年 8 月 3 日达维台风期间实测风速数据;② 2012 年 8 月 8 日海葵台风期间实测风速数据;③ 2013 年 1 月 3 日冬季实测强风。分析时段均选用 07:00—09:00 两小时,每段数据长度为 7 200 个。由于主梁为斜拉桥的主要受风构件之一,故选取主梁跨中截面的实测风数据为研究对象。分析中选择迎风侧风速仪所测数据,以避免气流经过主梁及桥面附属设施所致尾流风效应的影响。对上述数据采用矢量分解法^[1]处理后,得到顺风向脉动风速时程如图 2 所示,对应的平均风速分别为 $13.18, 16.70$ 和 $9.42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

动风速时程曲线均呈现出较明显的时变趋势,不服从平稳随机假设。游程检验法^[15]为常用的随机样本过程平稳性检验方法,该方法通过“正”次数 N_1 、“负”次数 N_2 及游程数 R 来判断样本的平稳性。由于游程数近似服从正态分布,当 N_1 或 $N_2 > 15$ 时可通过检验统计量 $Z = (R - \mu) / \sigma$ 来判断样本的平稳性, μ 和 σ 由下式定义:

$$\begin{cases} \mu = \frac{2N_1N_2}{N} + 1 \\ \sigma = \sqrt{\frac{2N_1N_2(2N_1N_2 - N)}{N^2(N-1)}} \\ N = N_1 + N_2 \end{cases} \quad (22)$$

本文采用该方法对上述脉动风速的均值和方差进行了检验,检验时对脉动风速按 50 s 时长分段,共 144 段,显著性水平取 5%,若 $|Z| \leq 1.96$ 则接受平稳性假设。稳性检验结果如表 1 所示,上述 3 段样本风速均不符合平稳随机假设。

表1 脉动风速平稳性检验结果

Tab.1 Stationary test results of turbulence wind

样本	均值检验				方差检验				检验结果
	N_1	N_2	R	Z	N_1	N_2	R	Z	
达维台风	66	78	30	-7.16	56	88	67	-0.43	非平稳
海葵台风	72	72	41	-5.35	56	88	57	-2.19	非平稳
冬季强风	77	67	23	-8.34	57	87	64	-1.03	非平稳

3 基于小波变换的实测强风演变功率谱分析

3.1 小波函数的选取

由于小波变换具有宽度可调的时频分析窗口,其在时频分析领域具有独特的优势。由 Heisenberg 测不准原理可知,时、频窗口是相互制约的,同一个波函数不可能同时在时域和频域都是带宽有限的。因此在进行脉动风速演变功率谱分析时,要根据

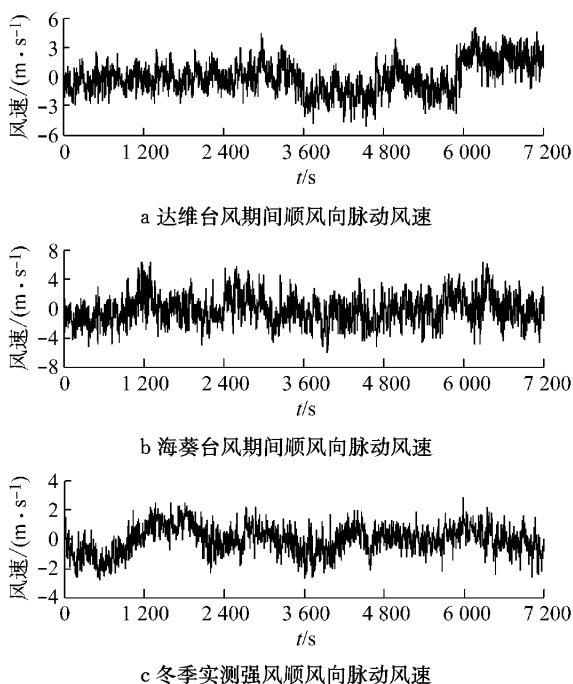


图2 实测顺风向脉动风速时程数据

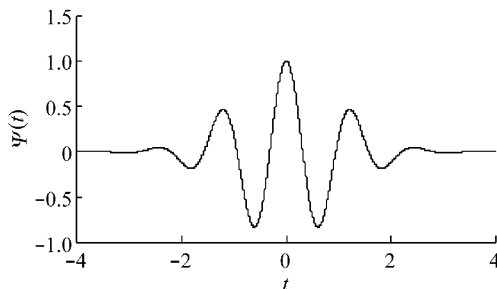
Fig.2 Measured longitudinal turbulence wind speed

从图2中可以看出,两实测台风和冬季风的脉

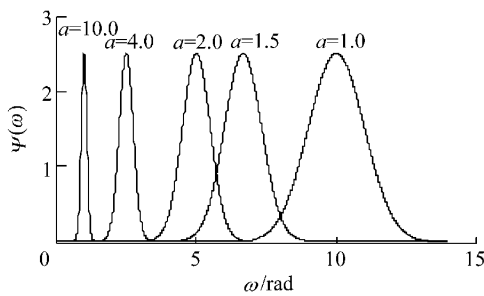
脉动风速数据的特点对小波函数的时域和频域局部特性进行折中考虑. 本文选取了在时、频域都具有较好局部性的 Morlet 小波做为母小波. Morlet 小波是一种单频复正弦调制高斯波, 其在频域具有紧支性, 可有效避免频域分析时频率之间的能量交叉泄漏现象, 频率分辨率更易保证. 式(23)为 Morlet 小波在时域和频域内表达式. 对于不同的尺度 a , Morlet 小波的频域形式如式(24)所示. Morlet 小波的中心频率为 ω_0/a , 本文中 ω_0 取为 10, 其时频图如图 3 所示.

$$\begin{cases} \Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} e^{j\omega_0 t}, \omega_0 \geq 5 \\ \Psi(\omega) = \sqrt{2\pi} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2}} \end{cases} \quad (23)$$

$$\Psi(a\omega) = \sqrt{2\pi} e^{-\frac{(a\omega - \omega_0)^2}{2}} = \sqrt{2\pi} e^{-\frac{a^2(\omega - \frac{\omega_0}{a})^2}{2}} \quad (24)$$



a 时域图



b 频域图

图3 Morlet小波函数图

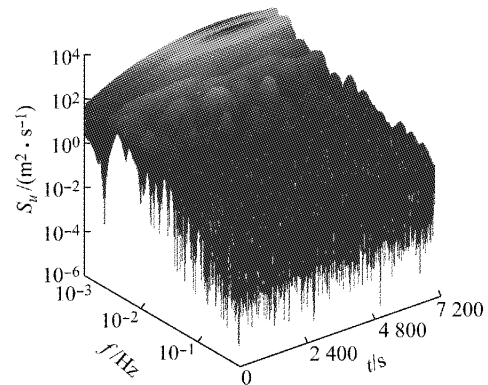
Fig.3 Function of Morlet wavelet

由于实测风速的采样频率为 1 Hz, 则小波变换的分析频率在 0~0.5 Hz 范围内. 而小波函数加权和法的分析频率范围是与小波函数的尺度因子有关的, 分析频率范围是 $\frac{\omega_0}{a_{\max} 2\pi} \sim \frac{\omega_0}{a_{\min} 2\pi}$, 故设定尺度因子 a 的范围为 $(1.5^{0.08})^{31} \sim (1.5^{0.08})^{230}$, 则分析频率即为 0.000 49~0.582 30 Hz, 能够覆盖信号的分析频率.

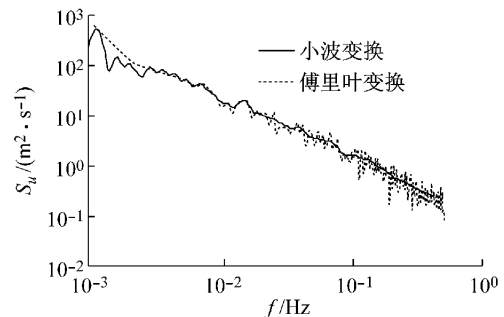
3.2 实测强风演变功率谱分析

采用上述基于小波频域函数加权和法的非平稳风速演变功率谱密度函数估计方法, 对苏通大桥 SHMS 实测风速进行了演变功率谱 (S_u) 分析, 结果

见图 4a, 5a, 6a. 为了对所得演变谱的准确性和可靠



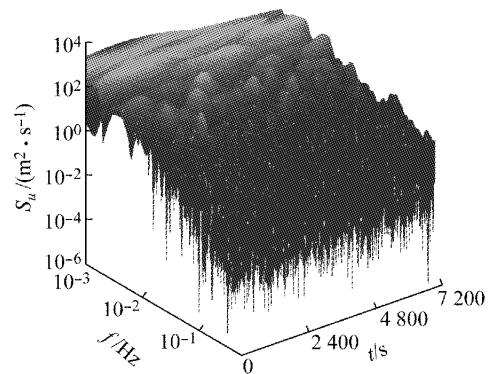
a 演变功率谱密度函数



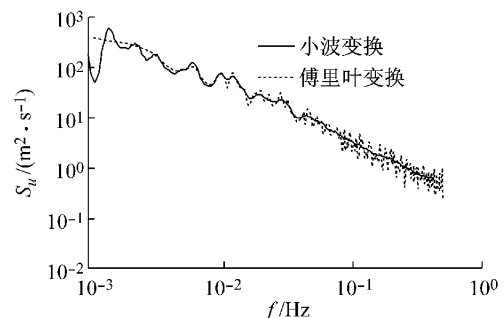
b 演变谱均值与傅里叶谱对比

图4 达维台风演变谱功率密度分析

Fig.4 EPSP analysis of typhoon Dawei



a 演变功率谱密度函数



b 演变谱均值与傅里叶谱对比

图5 海葵台风演变谱功率密度分析

Fig.5 EPSP analysis of typhoon Haikui

性进行验证,对每个频率对应的演变谱曲线在整个时间范围内进行积分,并将积分结果平均后与傅里叶变换谱进行对比,结果见图4b,5b,6b。

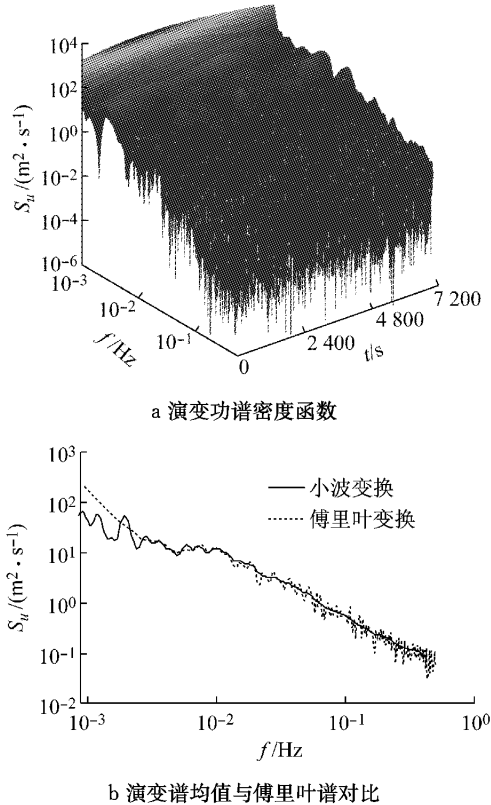


图6 冬季风演变功率谱分析

Fig.6 EPSD analysis of winter monsoon

由图4b,5b,6b可直观地看出脉动风速功率谱随时间变化的情况:从能量分布上来看,脉动风速能量主要集中在低频部分,这与现有基于平稳随机假设的风特性实测研究结果^[2-6]一致;从功率谱的时变特性来看,脉动风速功率谱在时域内的变化非常明显,这与传统的平稳随机过程假设存在较大差别。例如,达维台风演变功率谱显示脉动风在低频能量一开始逐渐变大,随时间的推移低频脉动风能量又有减小趋势。不同时刻的脉动风谱值并不相等,说明传统基于平稳随机过程的功率谱存在缺陷,无法估计脉动风能量随时间的变化,这同时也体现出演变谱分析的必要性。从图4b,5b,6b中可以看出,采用基于小波频域函数加权和法求得的功率谱均值与傅里叶变换谱吻合良好,验证了本文脉动风速演变谱估计的准确性。

为分析相同频率脉动风能量随时间变化的规律,对上述脉动风速演变功率谱进行了频率“切片”,即指定频率 ω_0 之后的演变谱值。选择的切片频率为0.005,0.020,0.200 Hz,频率“切片”如图7所示。由

图7可知:①随着切片频率的增加,功率谱幅值逐渐减小,说明低频部分所做贡献相对较大;②不同样本风速的功率谱值相差较大,海葵台风期间脉动风速功率谱最大,达维台风次之,冬季强北风最小,但是所有频率切片均表现出较明显的时变特性。

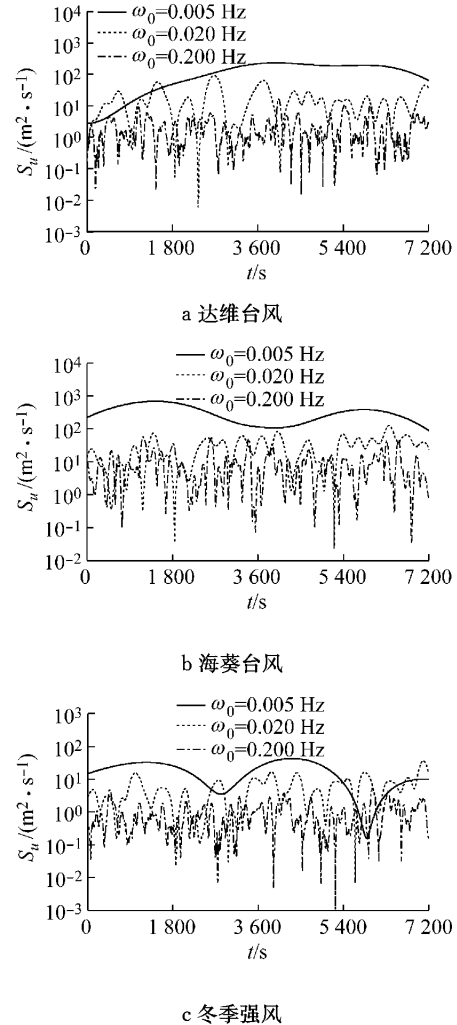


图7 脉动风速演变功率谱频率切片

Fig.7 Frequency slice of EPSD of turbulence wind

4 结论

本文利用小波频域函数加权和法研究了苏通大桥 SHMS 实测强风的演变功率谱密度,得出以下结论:

(1)由于小波变换具有宽度可调的时频分析窗口,选择合适的小波变换尺度范围后,小波频域函数加权和法可有效分析非平稳风速功率谱密度的时变特性。

(2)苏通大桥桥址区实测风速表现出较强的非平稳特性:无论是达维台风、海葵台风还是冬季强北

风,其脉动风速时程曲线均表现出明显的时变趋势,不完全符合平稳随机假设,与游程检验结果一致。

(3)由脉动风演变功率谱可知:脉动风速能量主要集中在低频部分,且脉动风速演变功率谱值随时间变化明显,这与传统的基于平稳随机过程假设的脉动风速功率谱存在较大差别。

(4)采用基于小波频域函数加权和法求得的脉动风速功率谱均值与傅里叶变换谱吻合良好,验证了本文脉动风速演变谱估计的准确性。

必须指出,本文仅选了3个典型实测强风为例进行演变谱分析,所得结论还有待考证。有必要利用长期实测数据进一步分析脉动风速功率谱演变规律,深入开展实测风的非平稳特性研究。

参考文献:

- [1] 项海帆,葛耀君,朱乐东,等.现代桥梁抗风理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2005.
XIANG Haifan, GE Yaojun, ZHU Ledong, *et al.* Modern theory and practice on bridge wind resistance[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 庞加斌,林志兴,葛耀君.浦东地区近地强风特性观测研究[J].流体力学实验与测量,2002,16(3):32.
PANG Jiabin, LIN Zhixing, GE Yaojun. Field measurements of strong wind characteristics near ground in Pudong district [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2002, 16(3): 32.
- [3] Xu Y L, Zhan S. Field measurements of Di Wang tower during typhoon York[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(1): 73.
- [4] Adhikari R, Yamaguchi H. A study on the nonstationarity in wind and wind-induced response of tall buildings for adaptive active control[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 72: 213.
- [5] 王浩,李爱群,黄瑞新,等.润扬悬索桥桥址区韦帕台风特性现场实测研究[J].工程力学,2009,26(4):128.
WANG Hao, LI Aiqun, HUANG Ruixin, *et al.* Field measurements on wind characteristics of typhoon Wiphaat at the Runyang Suspension Bridge [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(4): 128.
- [6] Wang H, Li A, Niu J, *et al.* Long-term monitoring of wind characteristics at Sutong Bridge site [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 115: 39.
- [7] Kareem A. Numerical simulation of wind effects: a probabilistic perspective[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10): 1472.
- [8] Xu Y L, Chen J. Characterizing nonstationary wind speed using empirical mode decomposition [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(6): 912.
- [9] 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.
SHEN Jianhong, LI Chunxiang, LI Jinhua. 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.
- [10] 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.
- [11] Spanos P D, Failla G. Evolutionary spectra estimation using wavelets[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(8): 952.
- [12] Huang G, Chen X. Wavelets-based estimation of multivariate evolutionary spectra and its application to nonstationary downburst winds[J]. Engineering Structures, 2009, 31(4): 976.
- [13] 周广东,丁幼亮,李爱群,等.基于小波变换的非平稳脉动风时变功率谱估计方法研究[J].工程力学,2012,30(3):89.
ZHOU Guangdong, DING Youliang, LI Aiqun, *et al.* Estimation method of evolutionary power spectrum for non-stationary fluctuating wind using wavelet transforms [J]. Engineering Mechanics, 2012, 30(3): 89.
- [14] Priestley M B. Power spectral analysis of non-stationary random processes [J]. Journal of Sound and Vibration, 1967, 6(1): 86.
- [15] 杨位钦,顾岚.时间序列分析与动态数据建模[M].北京:北京理工大学出版社,1988.
YANG Weiqin, GU Lan. Time series analysis and modeling of dynamic data [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988.