

# 基于 EVSEWT 的下击暴流时变平均风提取\*

李春祥, 李 洲

(上海大学土木工程系 上海, 200444)

**摘要** 下击暴流等极端风具有强烈的非平稳特性, 给风场特性分析、结构响应计算带来挑战。根据经验将非平稳风分为时变平均风和零均值脉动风分别进行分析, 是处理非平稳风速信号的有效方法。分析了几种常见时变均值提取方法的优缺点, 在此基础上提出一种基于能量波谷寻找的经验小波变换方法, 用于下击暴流时变平均风速提取, 并将提取的时变平均风和脉动风用于分析某幢高层建筑顶部位移响应。对 2 组下击暴流的分析结果得出: 与经验模态分解和离散小波变换方法相比, 基于能量波谷寻找的经验小波变换方法模型提取的时变平均风更符合预期, 对应的结构响应偏于安全。

**关键词** 下击暴流; 时变均值; 非平稳响应分析; 经验小波变换; 能量波谷

**中图分类号** TU311; TH765

## 引 言

极端风(热带气旋、下击暴流、龙卷风等)特性研究对于提高结构抗风设计水平、完善风荷载规范等意义重大。与大气边界层(atmospheric boundary layer, 简称 ABL)风不同, 极端风具有明显的非平稳性, 即风信号的统计特征值具有时变性。为了便于分析, 学者们通常将非平稳风视为时变平均风与零均值随机脉动风的叠加<sup>[1]</sup>。在非平稳风特性分析中时变平均风提取的准确与否会影响时域中的相关分析或频域中的功率谱分析, 从而产生较大误差, 甚至使低频谱完全失去真实性。另外, 在非平稳脉动风模拟与预测、结构非平稳振动响应分析和结构参数识别等研究中都涉及到信号时变平均项的提取<sup>[2]</sup>。因此, 合理时变平均风速的提取对于非平稳风研究具有重要意义。

在时变均值提取的各类方法中, 平均斜率法、差分法、最小二乘拟合等通常需要预先知道信号趋势项的类型, 对处理具有复杂变化趋势的信号并不适用<sup>[3]</sup>。线性拟合、高阶滤波和滑动平均等缺乏统一的定量提取方法或准则, 提取效果依赖于使用者的经验以及计算参数的选择, 影响了模型的实用<sup>[4]</sup>。与此同时, 由于经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称 EMD)具有自适应性, 不需要先

验信息, 使用方便; 离散小波变换(discrete wavelet transform, 简称 DWT)在处理复杂信号上具有良好的时频分辨率, 故这两种方法得到了学者们的普遍使用。陈隽等<sup>[4-5]</sup>提出使用 EMD 方法, 并引入脉动风平稳度标准和截止频率, 来提取台风风速记录中的时变平均风。申建红等<sup>[3]</sup>基于人工模拟风速数据, 提出利用单尺度小波能量的突变确定时变均值分解的准确层次, 较 EMD 分解方法更加准确有效。Su 等<sup>[6]</sup>基于下击暴流实测数据, 针对 Kernel 回归、DWT 和集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, 简称 EEMD)方法给出了选择合适的方法和时间窗大小以获得合理的时变平均值的建议, 推荐采用高阶的 DWT 方法用于下击暴流时变非平稳风提取。Wang 等<sup>[7]</sup>将 DWT 方法用于时变均值提取, 用非平稳风速模型对苏通大桥风场数据进行了分析, 分析结果与早期结果吻合。但是 EMD 方法仍存在模态混叠、端部效应和缺乏数学理论等不足, DWT 方法对信号分解层次和母小波类型的选择有较严格的条件, 相关参数的确定需要依据经验。另一方面, 目前的非平稳风研究虽然取得一定进展和突破, 但仍存在以下一些挑战: 由于下击暴流、龙卷风的发生具有偶然性, 相关实测样本仍不丰富; 对极端风机理揭示不足, 数学分析理论有待创新; 传统方法仍需要凭借丰富的经验, 新一代精细化时频分析技术急需研究。

\* 国家自然科学基金资助项目(51778354, 51378304)

收稿日期: 2019-04-08; 修回日期: 2019-08-16

本研究的重点是提出一种基于能量的波谷寻找经验小波变换方法(energy valley searching empirical wavelet transform,简称EVSEWT),并给出了时变平均风的确定准则。首先,简要介绍了时变平均风提取的常用方法,包括EMD,EEMD和DWT方法;其次,针对时变平均风的特征,对经验小波变换(empirical wavelet transform,简称EWT)进行改进,提出EVSEWT,着重于提高对低频信息的分辨率;最后,给出了时变平均风提取的结论和关于EVSEWT的改进和应用方面的展望。为避免以往研究只在信号层面进行效果验证,笔者将提取的时变平均风和脉动风用于结构非平稳响应分析,通过2组下击暴流风速试验,对比EMD,EEMD,DWT(db10,db18)和EVSEWT的效果。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据说明

2002年6月4日和15日,在图1所示的沿直线均匀分布的7座观测塔上,同时记录两组不同高度的下击暴流风速时间序列。测量了超过40 m/s的阵风风速。一个记录的下击暴流被归类为后翼下沉气流(rear-flank downdrafts,简称RFD),另一个归类为Derecho。该实测数据具有强烈非平稳特性,其中采样频率为1 Hz,总时长为30 min,具体实测信息可参考文献[8]。笔者选取塔4上高度15m处的RFD数据和Derecho数据,如图2所示。

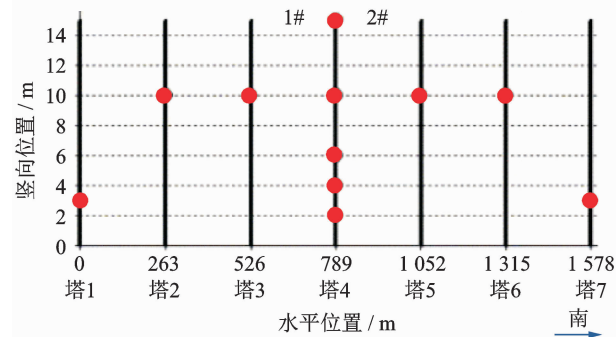


图1 下击暴流测点布置示意图

Fig. 1 Diagram of measuring point arrangement of downburst

### 1.2 常用方法

在时变均值提取的诸多方法中,本章主要介绍离散小波变换、经验模态分解和经验小波变换方法。

离散小波分析法是用小波基函数逼近信号的时频分析方法。小波基函数是一组由快速衰减、有限

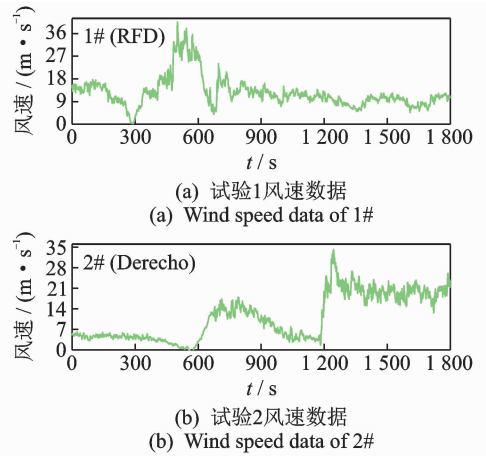


图2 两组下击暴流实测数据

Fig. 2 Two sets of downburst data

长的母小波经缩放和平移而生成的函数序列,常用的母小波函数有db族小波、Harr小波、sym小波、Morlet小波和Meyer小波等。但离散小波分析法存在分解层数和小波母函数选择的困难,对不同特征的数据,母函数的效果也有较大差距,常需要按经验选择。

EMD方法是一种信号分析方法,依据数据的时间尺度特征进行信号分解,无须预先设定基函数。它将一个信号分离为多个本征模态函数(intrinsic mode function,简称IMF)与一个余项R之和。本征模态函数视为信号中的振动成分,反映了信号中不同频率的成分。从原始信号中先分离出来的本征模态函数较后分离出来的频率高,余项的频率最低,为趋势成分,这样通过选择性地叠加低频分量就可得到原始信号的低频趋势项。EMD方法使用简单,适用于大多数非平稳信号分析,但EMD分解的结果会出现端部效应和模态混叠的问题,同时存在缺乏数学基础理论、分解的子信号物理意义不明确等不足。为了改进EMD的端部效应和模态混叠,Wu等<sup>[9]</sup>提出集成经验模态分解,通过在原信号中加入合适比例的白噪声,来补充一些缺失的尺度,在机械、土木、航空航天等领域的信号分解中具有良好表现。

在时变均值提取的应用中,Holmes等<sup>[10]</sup>通过两个准则确定移动平均法中的窗口大小,即时变平均风速需要反映原始风速低频部分的趋势、峰值以及脉动风的均值应趋近为0。Su等<sup>[6]</sup>根据如下3个准则确定合理的小波基函数和分解层数:①时变平均风速应反映原始风速的变化趋势;②对应脉动风的演化功率谱密度(evolutionary power spectral density,简称EPSD)估计结果应具有物理意义的解释;③EPSD作用下的高层建筑顺风向结构响应是

否相对保守。为了简便,本研究中 DWT 方法按照尺度小波能量的突变确定时变均值的准确层次<sup>[3,11]</sup>;EMD 和 EEMD 方法取分解结果中小于截止频率  $f_c$  的子信号为时变均值项,通过间歇检测准则来完成,截止频率确定取决于高通信号的平稳性,参考文献[12]。

### 1.3 经验小波变换

为了解决小波变换参数选择困难、经验模态分解缺乏数学理论以及模态混叠等问题,Gilles<sup>[13]</sup>提出了一种经验小波变换。这种方法可以看作是构造 1 组带通滤波器和 1 个低通滤波器,用于将原信号分解成多个频率均一、稳定的子信号。具体实现流程如下:

- 1) 如图 3 所示,对原信号进行快速傅里叶变换,得到原信号标准化傅里叶谱(横轴标准化至  $0 \sim \pi$ );
- 2) 在傅里叶谱上确定各带通滤波器的边界,并基于这些边界,利用 Meyer 小波构造滤波器组;
- 3) 原信号通过低通滤波器和这些带通滤波器,被分解为频率从高到低的若干子信号集。

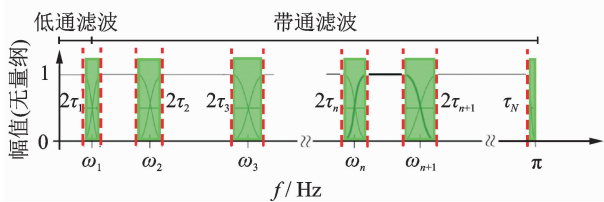


图 3 标准化傅里叶谱的划分

Fig. 3 Classification of standardized Fourier spectra

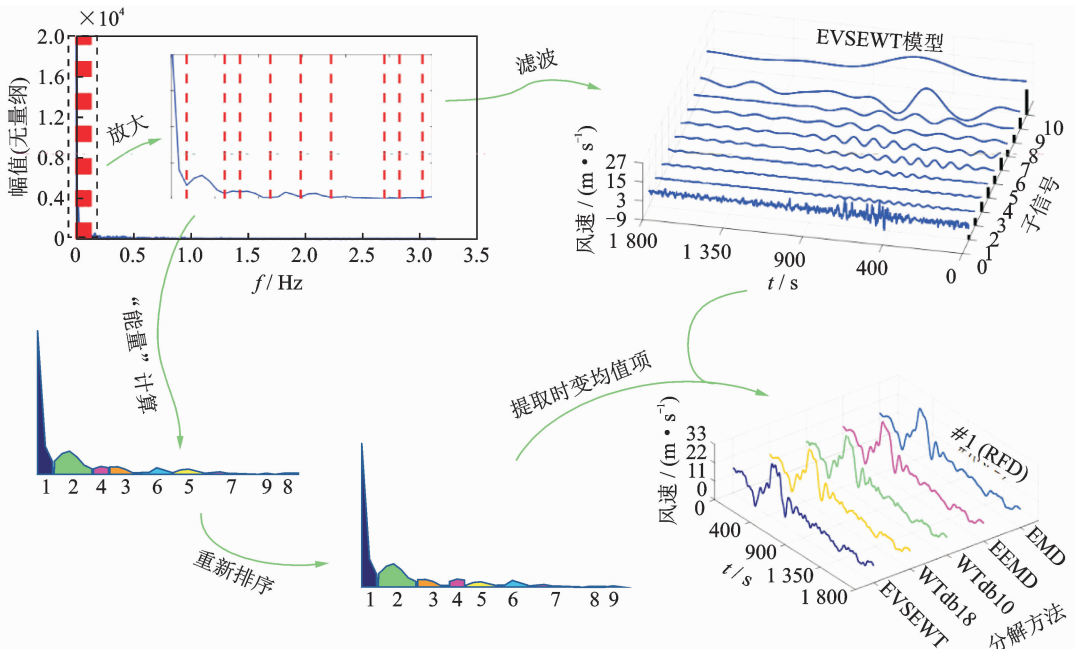


图 4 基于能量的波谷寻找经验小波变换原理图

Fig. 4 Schematic diagram of energy-based valley searching empirical wavelet transform

### 1.4 EVSEWT 介绍

尽管 EWT 已经给出了几种傅里叶边界划分的策略,如“locmaxmin”,“adaptive”和“scalespace”等,但由于应用的目的和场景不同,难以结合时变平均风的提取。不过,EWT 方法有完整的数学理论,笔者基于 EWT 的理论框架,在傅里叶谱边界划分上更注重低频频段的提取,提出 EVSEWT,图 4 所示为其提取时变趋势项的流程,具体如下:

- 1) 对原始信号计算进行快速傅里叶变换,获得标准化傅里叶谱;
- 2) 在傅里叶谱的  $0 \sim X$  之间,对每一处波谷设立划分边界,边界数量自适应确定;
- 3) 计算相邻两边界与傅里叶谱围成的面积,作为子信号能量指标,并按照能量从大到小对子信号进行排序;
- 4) 依据步骤 2 确定的边界,利用 Meyer 小波构造滤波器,按能量从大到小逐次提取子信号放入时变趋势项中,剩余部分子信号作为脉动分量;
- 5) 利用 Runtest 法确定脉动风的平稳性;
- 6) 重复步骤 4 和 5,直到脉动风为平稳数据且均值趋近于零,若对  $0 \sim X$  的信号处理完后,脉动风的平稳性要求未能满足,则只取  $0 \sim X$  之间频段作为时变平均风。

在结构动力学分析中,一般认为平均风速最高频率为结构基频的  $1/5 \sim 1/10$  时,可以忽略其动力放大效应,按拟静力分析<sup>[6]</sup>。因下面分析的结构基

频为 0.23 Hz,故平均风速最高频率为 0.023 Hz。对采样频率为 1 Hz 的信号来说,0.023 Hz 在标准化傅里叶谱上对应为 0.144 Hz。笔者确定  $X$  为 0.144 Hz,时变趋势项的频率控制在  $0 \sim X$  范围内,且  $X$  可以视使用情况调整。总体来讲,EVSEWT 注重低频部分的分解,即  $0 \sim 1/10$  结构基频处,这样提取的时变均值项满足按拟静力分析的要求,也能较好地刻画实测数据的趋势。

## 2 非平稳随机响应分析

### 2.1 理论介绍

将实测风速分为时变平均风和脉动风

$$U(t) = \bar{U}(t) + U'(t) \quad (1)$$

对应的广义力  $Q(t)$  则分为时变平均风速引起的广义力  $\bar{Q}(t)$  和脉动风速引起的广义力  $Q'(t)$ ,其中  $\bar{Q}(t)$  产生对应的广义位移均值分量  $\bar{q}(t)$ ,可以由拟静力分析获得

$$\bar{q}(t) = \bar{Q}(t) / (M_1 \omega_1^2) \quad (2)$$

其中:  $M_1$  为结构第 1 阶振型的广义质量;  $\omega_1$  为结构第 1 阶振型的角频率。

任意响应  $R(t)$  随时间变化的均值分量  $\bar{R}(t)$  及动力响应的均方根值  $\sigma_{R'}(t)$  可确定为

$$\bar{R}(t) = \Gamma \bar{q}(t) \quad (3)$$

$$\sigma_{R'}(t) = \Gamma \sigma_{q'}(t) \quad (4)$$

其中:  $\Gamma$  为结构第 1 阶振型的参与系数;  $\sigma_{q'}(t)$  为广义位移的 RMS 值,  $\sigma_{q'}(t) = \sqrt{2 \int_0^\infty \mathbf{S}_{q'}(\omega, t) d\omega}$ ;  $\mathbf{S}_{q'}(\omega, t)$  为广义位移脉动分量  $q'(t)$  的演化功率谱密度(演化功率谱计算理论可参见文献[14])。

采用精确且高效的虚拟激励法对结构的随机动力响应进行分析,结构的虚拟激励力可以表示为

$$\tilde{Q}(\omega, t) = A_{Q'}(\omega, t) e^{i\omega t} \quad (5)$$

$$A_{Q'}(\omega, t) = \sqrt{\mathbf{S}_{Q'}(\omega, t)} \quad (6)$$

虚拟位移  $y(\omega, t)$  可以由 Newmark- $\beta$  逐步精细积分法计算,参见文献[15],则广义位移脉动分量的 EPSD 矩阵  $\mathbf{S}_{q'}(\omega, t) = y(\omega, t) y(\omega, t)^\top$ 。当非平稳风荷载的 EPSD 时间变化率大于结构自然周期时,则可以采用拟平稳假设计算  $\mathbf{S}_{q'}(\omega, t)$ ,结果更偏保守,计算快速

$$\mathbf{S}_{q'}(\omega, t) = |H(\omega)|^2 \mathbf{S}_Q(\omega, t) \quad (7)$$

其中:  $H(\omega)$  为基本振型下的频率响应函数<sup>[16]</sup>,  $H(\omega) = 1 / [M_1(-\omega^2 + 2i\xi_1\omega_1\omega + \omega_1^2)]$ 。

由以上分析可知,计算 3 个响应值问题可以转

化为计算时变平均风速引起的广义力  $\bar{Q}(t)$  和脉动风速引起的广义力的 EPSD 矩阵  $\mathbf{S}_{Q'}(\omega, t)$ 。以下推导  $\bar{Q}(t)$  和  $\mathbf{S}_{Q'}(\omega, t)$  的计算过程。

假设高层建筑顺风向气动力服从片条假定,在任意高度  $z$  处,单位高度上顺风向风荷载可以分解为均值分量  $\bar{P}(z, t)$  和脉动分量  $P'(z, t)$  的叠加

$$P(z, t) = \bar{P}(z, t) + P'(z, t) \quad (8)$$

$$\bar{P}(z, t) = 0.5\rho C_D B \bar{U}^2(z, t) \quad (9)$$

$$P'(z, t) = \rho C_D B \bar{U}(z, t) \cdot$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \chi_D(\omega) g(z, \omega, t) e^{i\omega t} d\Theta(z, \omega) \quad (10)$$

其中:  $\rho$  为空气密度,取  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $C_D$  为阻力系数,取 1.2;  $B$  为建筑物长度;  $\chi_D(\omega)$  为气动导纳函数;  $g(z, \omega, t)$  为调制函数;  $d\Theta(z, \omega)$  表示复值零均值正交增量随机过程。

笔者选取 Davenport 气动导纳函数

$$|\chi_D(\omega)|^2 = 2/\lambda_y (1 - 1/\lambda_y + 1/\lambda_y e^{-\lambda_y})$$

其中:  $\lambda_y = k_y f D / U_{\max}$ ;  $k_y = 8$  为衰减因子;  $f$  为频率;  $U_{\max}$  为时变平均风速的最大值。

当只考虑结构的第 1 阶振型时,广义力的时变均值和脉动分量计算如下

$$\bar{Q}(t) = \int_0^H \bar{P}(z, t) \varphi(z) dz \quad (11)$$

$$Q'(t) = \int_0^H P'(z, t) \varphi(z) dz \quad (12)$$

其中:  $\varphi(z) = (z/H)^\beta$  为第 1 阶振型的振型函数;  $\beta$  为振型指数,当振型为线性时取为 1。

将式(9)代入式(11)可得

$$\bar{Q}(t) = Q_R \left[ \int_0^H \frac{\bar{U}^2(z, t)}{U_{\max}^2} \varphi(z) dz \right] / H \quad (13)$$

其中:  $Q_R = 0.5\rho C_D B H U_{\max}^2$ 。

广义力的脉动分量  $Q'(t)$  的 EPSD 可表示为

$$\mathbf{S}_{Q'}(\omega, t) = |\chi_D(\omega)|^2 4Q_R^2 / (HU_{\max})^2 \cdot \int_0^H \int_0^H \frac{\bar{U}(z_1, t)}{U_{\max}} \frac{\bar{U}(z_2, t)}{U_{\max}} \varphi(z_1) \varphi(z_2) \cdot S_{u'}(z_1, z_2, \omega, t) dz_1 dz_2 \quad (14)$$

其中:  $S_{u'}(z_1, z_2, \omega, t)$  为  $u'(z_1, t)$  和  $u'(z_2, t)$  之间的互 EPSD 函数,并且满足  $S_{u'}(z_1, z_2, \omega, t) = \sqrt{S_{u'}(z_1, \omega, t) S_{u'}(z_2, \omega, t)} \gamma_{u'}(z_1, z_2, \omega, t)$ 。

当脉动风的 EPSD 假定为沿着建筑高度不变时,即  $S_{u'}(z_1, \omega, t) = S_{u'}(\omega, t)$ ,式(14)可表示为

$$\mathbf{S}_{Q'}(\omega, t) = |\chi_D(\omega)|^2 4Q_R^2 / (HU_{\max})^2 \cdot \int_0^H \int_0^H \frac{\bar{U}(z_1, t)}{U_{\max}} \frac{\bar{U}(z_2, t)}{U_{\max}} \varphi(z_1) \varphi(z_2) S_{u'}(\omega, t) dz_1 dz_2 \quad (15)$$

若时变平均风剖面进一步简化为

$$\bar{U}(z, t) = \bar{U}(z) d(t) U_{\max} \quad (16)$$

其中:  $\bar{U}(z)$  为归一化的时不变竖向风剖面。

此时, 时变平均风速引起的广义力可表示为

$$\bar{Q}(t) = \bar{A} Q_R d^2(t) \quad (17)$$

其中:  $\bar{A} = \left[ \int_0^H \bar{U}^2(z) (z/H)^\beta dz \right] / H$ ;  $d(t)$  为平均风速调制函数, 取平均风与其风速最大值的比值。

相应的, 式(15)可以简化为

$$S_Q(\omega, t) = 4Q_R^2 S_{u'}(\omega, t) d^2(t) |\chi_D(\omega)|^2 |J_z(\omega)|^2 / U_{\max}^2 \quad (18)$$

其中:  $|J_z(\omega)|^2$  为联合接收函数。

$$|J_z(\omega)|^2 = \frac{1}{H^2} \cdot$$

$$\int_0^H \int_0^H \tilde{U}(z_1) \tilde{U}(z_2) \left(\frac{z_1}{H}\right)^\beta \left(\frac{z_2}{H}\right)^\beta \text{coh}(z_1, z_2, \omega) dz_1 dz_2 \quad (19)$$

由于实测样本少以及在数学上处理的困难, 在大多数研究中会采用时不变指数函数或 Davenport 提出的相干函数。笔者假设  $z_1$  和  $z_2$  高度处的相干函数是时不变的

$$\text{coh}(z_1, z_2, \omega) = \exp\left(\frac{k_z \omega |z_1 - z_2|}{2\pi U_{\max}}\right) \quad (20)$$

其中:  $k_z$  为衰减因子, 取值为 8。

本研究中, 下击暴流风速的竖向风剖面选取 Wood<sup>[17]</sup> 提出的时不变经验模型

$$\bar{U}(z) = 1.55 \left(\frac{z}{\delta}\right)^{1/6} \left[1 - \text{erf}\left(0.7 \frac{z}{\delta}\right)\right] \quad (21)$$

其中:  $\text{erf}(z) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^z e^{-x^2} dx$  为误差函数;  $\delta$  为竖向风剖面中风速达到最大值的一半时的高度, 本研究取  $H/\delta = 0.75$ 。

以上数值风剖面经验公式已经通过实测风速数据验证<sup>[18]</sup>, 在其他研究中也广泛采用<sup>[6, 16]</sup>。由于目前尚缺乏深入的下击暴流风速知识以及足够数目的观测样本, 虽然上述假定在研究中会产生不确定性, 但是这些简化处理不会影响一般性的规律与结论。

除此之外, 采用基于穿越率的极值分布理论可以得到响应的平均极值和标准差<sup>[19-20]</sup>。设  $R(t)$  为时间周期  $T$  内的非平稳响应, 根据穿越率的泊松近似关系, 在时刻  $t$  和水平  $r$  的平均穿越率可由下式计算

$$v(r, t) = \frac{\sigma_{\dot{R}}(t)}{2\pi\sigma_R(t)} \exp\left\{-\frac{[r - \mu_R(t)]^2}{2\sigma_R^2(t)}\right\} \quad (22)$$

其中:  $\mu_R(t)$  和  $\sigma_R(t)$  分别为  $R(t)$  的时变平均值和标准差;  $\dot{R}(t)$  为  $R(t)$  的导数;  $\sigma_{\dot{R}}(t)$  为  $\dot{R}(t)$  的时变标准差。

当高层建筑的响应可以视为以高层建筑固有频率  $\omega_1$  为中心频率的窄带过程时, 有  $\sigma_{\dot{R}}(t)/\sigma_R(t) \approx \omega_1$ <sup>[20]</sup>。

由文献[21]可知, 非平稳响应  $R(t)$  在某时间周期  $T$  内的极值的累积分布函数如下

$$Q_{\max}(r) = \exp\left[-\int_0^T v(r, t) dt\right] \approx \exp\{-\exp[-\alpha_r(r - \hat{r})]\} \quad (23)$$

其中:  $\hat{r}$  为位置参数;  $1/\alpha_r$  为尺度参数。

$\hat{r}$  和  $1/\alpha_r$  可通过线性拟合  $r$  函数的曲线  $-\ln\{-\ln[Q_{\max}(r)]\}$  得到, 相应的平均极值计算公式为

$$\mu_{r, \max} = \hat{r} + 0.577 / \alpha_r \quad (24)$$

## 2.2 结果分析

为了验证 EVSEWT 在时变均值项提取中的有效性, 将 EVSEWT 用于 RFD 和 Derecho 两组实测下击暴流风速的时变均值提取试验, 并选取 EMD, EEMD 和 DWT 做对比分析。根据文献[6]的建议, 母小波函数选择 db10 和 db18, 最后将提取的结果用于某幢高层钢结构建筑的随机动力响应分析。

已有的研究表明<sup>[20-21]</sup>, 下击暴流风速会随地面高度增加而增加, 在 50~200 m 高度处达到峰值, 再往上风速下降缓慢。因此, 下击暴流可能对悬臂结构产生显著的风荷载影响<sup>[18]</sup>。下面以一座高  $H=200$  m, 长  $B$  和宽  $D$  均为 40 m 的结构为例。结构密度设为  $192 \text{ kg/m}^3$ , 结构的基频  $f_1 = 46/H = 0.23 \text{ Hz}$ , 振型阻尼比  $\xi_1 = 1\%$ 。对于高层建筑, 风振响应一般以基本振型为主, 高层振型的贡献可以忽略, 笔者只考虑第 1 振型的影响, 且振型形状假定为线性函数。具体地, 以结构顶端均值位移、基于拟平稳和非平稳的 RMS 位移等结构响应值以及结构非平稳响应的平均极值作为评价指标。

简洁起见, 只给出了 RFD 的情况作图示说明。图 5 是由 EMD, EEMD, DWT(db10), DWT(db18) 和 EVSEWT 方法, 依据各自的准则提取的时变平均风速和脉动风速。图 6 是脉动风速的 EPSP 图, EPSP 图刻画了信号在不同时刻、不同频率上的能量分布, 一般认为大多数嵌入在脉动风中的能量分布在 0~0.1 Hz 的低频范围内。同时, 在一定时间内, 随着频率的增加, 大多数 EPSP 都呈现出衰减的趋势。脉动风 EPSP 也是后续结构响应分析中需要用到的物理

量之一。从图 2 中 RFD 的实测数据可以看出,信号的能量主要集中在 150~700s 之间,这与图 6 结果相吻合,且能量集中在 0~0.1 Hz 频段,与经验相符。另外,从图 6 的结果来看,EMD 和 EEMD 的低频部分能量最高,可能导致更大的结构动力响应,EVSEWT 次之,DWT 的最小。对应图 5 中提取的时变平均风,DWT 方法的波动比较明显,EMD 和 EEMD 的波动平缓,EVSEWT 介于两者之间。

与 ABL 风相似,非平稳风激发的结构响应一般分为静风响应和动力响应两部分。前者由时变平均风速引起,通过拟静力方法简单计算;后者由平稳/非平稳脉动风引起,通过动态分析进行计算<sup>[22]</sup>。图 7 是不同信号分解下,RFD 风速在结构顶端产生的均值位移(Mean)、基于拟平稳(Pseudo-stationary)和非平稳的(RMS)位移。可以发现,均值位移与提取的时变平均风的趋势类似,DWT 方法的波动较大,EMD 和 EEMD 方法的均值位移相对平缓。需要指出,基于非平稳假设计算的 RMS 位移的最

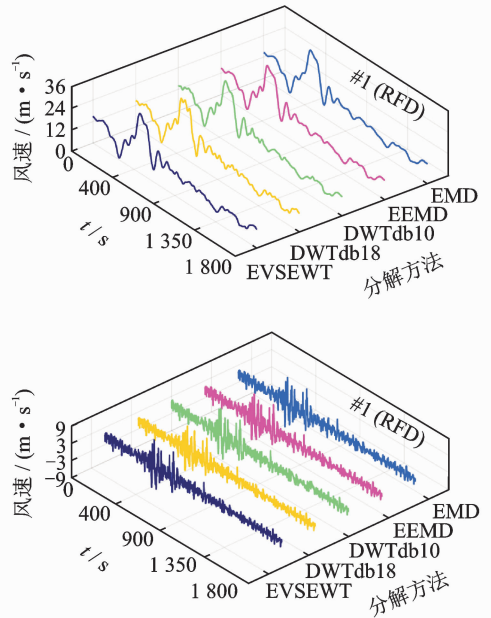


图 5 不同分解方法获得的平均风速和脉动风速  
Fig. 5 Time-varying mean and fluctuating wind speeds obtained by different decomposition methods

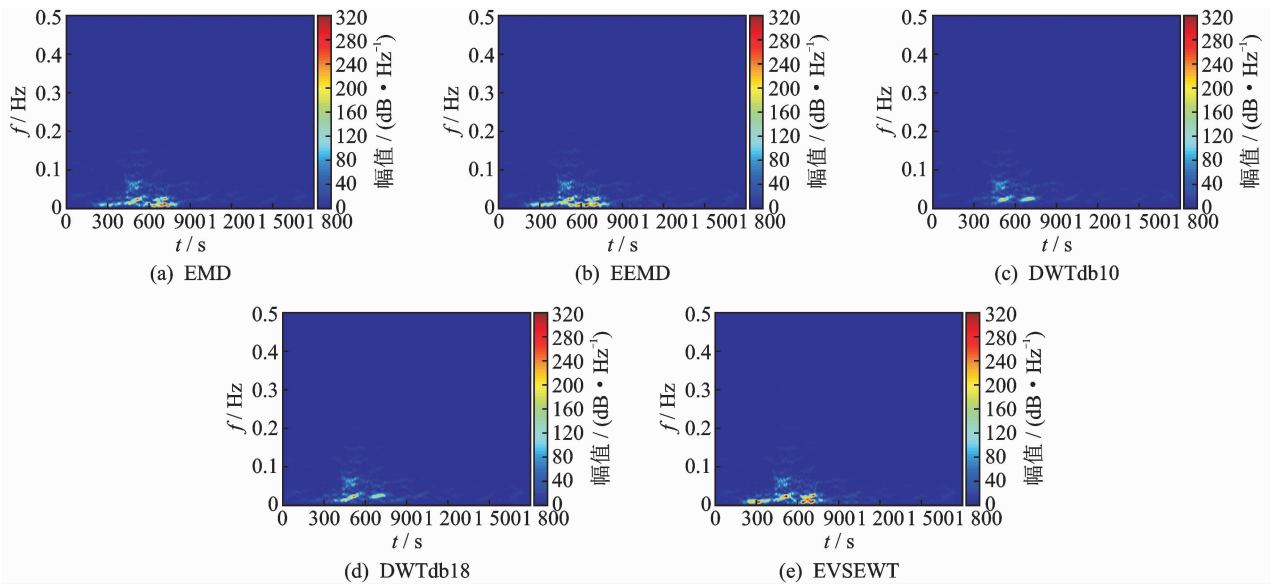


图 6 不同分解方法对应脉动风的演化功率谱密度  
Fig. 6 Evolutionary power spectral density of fluctuating wind speeds extracted by different methods

大值略小于基于拟平稳假设的方法,且在时间上,非平稳响应最大值要滞后于拟平稳响应和均值位移的最大值,这与文献[6,15]的结论一致。

表 1 和表 2 分别是 RFD 和 Derecho 两组下击暴流风速在不同方法下得到的结构 200 m 高度处的均值位移最大值、RMS 位移最大值和平均极值位移。综合图 7、表 1 和表 2,可以得出以下结论:①在 RFD 风速中,最大相差发生在 RMS 位移,为 11.24%(EMD 法和 EVSEWT 法之间),均值位移相差最大达 9%

(EMD 法和 EVSEWT 法之间),相对来看,Derecho 风速中各方法相差较小,为 RMS 位移的 7.81%(EMD 法和 EVSEWT 法之间),说明 EVSEWT 方法对结构响应分析相对保守;②从 3 项位移指标来看,2 组试验均表现出 EVSEWT 方法最佳、DWT 方法次之、EEMD 和 EMD 略差的结果,这可能是由于 EVSEWT 方法是基于信号傅里叶谱进行的分解,在信号低频部分具有更好的分辨率,配合相应的准则能比较合理地提取时变平均风速。

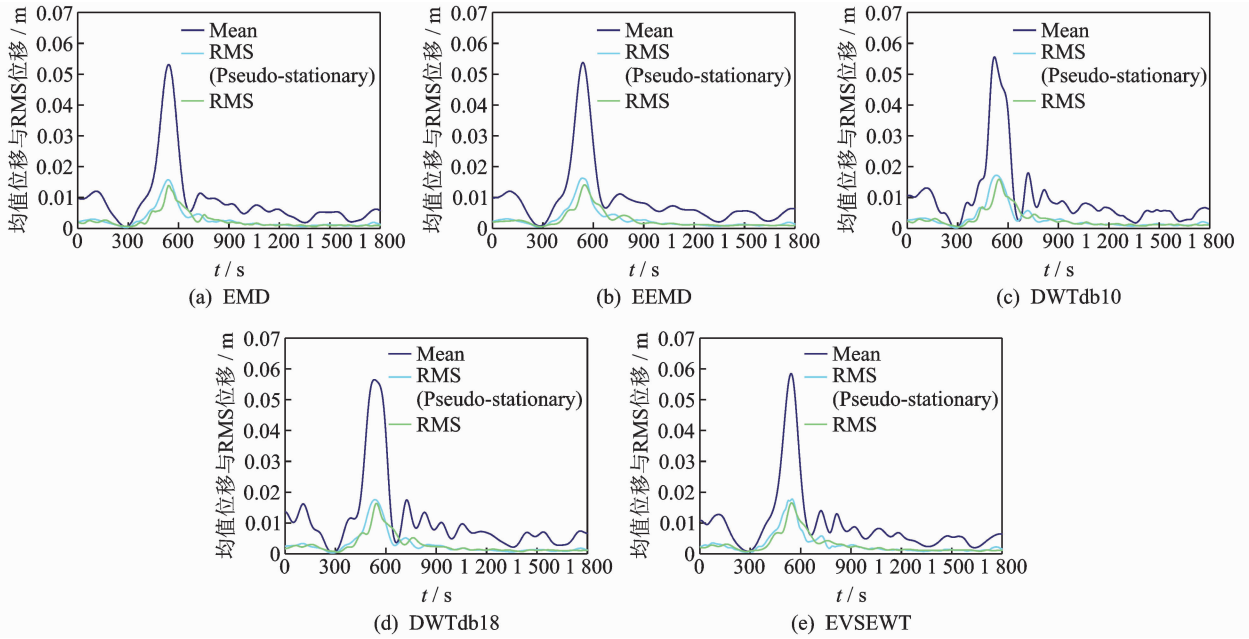


图7 顶端位移均值和RMS位移

Fig. 7 Mean and RMS responses of tip displacement

表1 试验1(RFD)结构顶端位移的最大均值、最大RMS和平均极值位移

Tab. 1 The maximum mean, maximum RMS and mean extreme displacement of top displacement of structures for case 1 (RFD)

方法	最大均值/m	最大RMS/m	平均极值/m
EMD	0.053 1	0.015 8	0.090 7
EEMD	0.053 8	0.016 3	0.091 4
DWT(db10)	0.055 6	0.017 2	0.093 2
DWT(db18)	0.056 5	0.017 6	0.095 4
EVSEWT	0.058 4	0.017 8	0.095 8

表2 试验2(Derecho)结构顶端位移的最大均值、最大RMS和平均极值位移

Tab. 2 The maximum mean, maximum RMS and mean extreme displacement of top displacement of structures for case 2 (Derecho)

方法	最大均值/m	最大RMS/m	平均极值/m
EMD	0.041 0	0.011 8	0.073 8
EEMD	0.041 2	0.012 2	0.074 2
DWT(db10)	0.040 9	0.012 7	0.075 3
DWT(db18)	0.040 2	0.012 5	0.074 3
EVSEWT	0.042 1	0.012 8	0.075 7

### 3 结论

1) EWT提取的时变均值能兼顾实测信号趋势和低频波动,对低频信息的分辨率更优秀。

2) 在时变平均风极大值和脉动风的能量都不突出的情况下,能计算得到偏于安全的结构响应位移,说明EVSEWT的确定准则更加合理。

3) 3个响应位移之间相互关系符合经验<sup>[19,23]</sup>,即非平稳RMS位移极大值略小于拟平稳RMS位移极大值,且滞后于拟平稳RMS位移极大值和均值位移最大值。

4) 总体来说,EVSEWT具有非常好的信号低频分辨率,对2组试验数据的时变均值提取试验效果较好。后续的研究可以考虑用于桥梁和高层建筑结构健康监测信号时频分析<sup>[24]</sup>、机械故障诊断和生物医学信号处理等领域。另一方面,受到多元经验模态分解的启发,将EVSEWT扩展到空间信号处理问题,对于注重空间相关性的风场分析也很有意义。

**致谢** 本研究风速数据来源于德州理工大学风工程研究中心,在此表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- [1] XU Y L, CHEN J. Characterizing nonstationary wind speed using empirical mode decomposition[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(6):912-920.
- [2] 高品贤. 趋势项对时域参数识别的影响及消除[J]. 振动、测试与诊断, 1994, 14(2):20-26.  
GAO Pinxian. Effect and removal of trends on parameters identification in time domain[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1994, 14(2):20-

26. (in Chinese)
- [3] 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.  
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):126-130. (in Chinese)
- [4] 陈隽,吴敏,赵永磊. 时变平均风提取方法研究[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(4):514-518.  
CHEN Jun, WU Min, ZHAO Yonglei. On extraction approach time-varying mean wind speed [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(4):514-518. (in Chinese)
- [5] 陈隽,徐幼麟. 经验模分解在信号趋势项提取中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2005, 25(2):101-104.  
CHEN Jun, XU Youlin. Application of EMD to Signal trend extraction[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2005, 25(2):101-104. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] GAST K D. A comparison of extreme wind events as sampled in the 2002 thunderstorm outflow experiment [D]. Lubbock, TX: Texas Technology University, 2003.
- [9] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1):1-41.
- [10] HOLMES J D, HANGAN H M, SCHROEDER J L, et al. A forensic study of the Lubbock-Reese down-draft of 2002[J]. Wind and Structures, 2008, 11(2):137-152.
- [11] 王浩,杨敏,陶天友,等. 苏通大桥桥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.  
WANG Hao, YANG Min, TAO Tianyou, et al. Analysis on non-stationary wind characteristics of measured strong winds at the site of Sutong Bridge[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(2):312-318. (in Chinese)
- [12] XU Y L, CHEN J. Characterizing nonstationary wind speed using empirical mode decomposition[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(6):912-920.
- [13] GILLES J. Empirical wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 61(16):3999-4010.
- [14] PRIESTLEY M B. Evolutionary spectra and non-stationary processes[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1965, 27(2):204-237.
- [15] LIN J H, ZHANG Y H, LI Q S, et al. Seismic spatial effects for long-span bridges, using the pseudo excitation method [J]. Engineering Structures, 2004, 26(9):1207-1216.
- [16] CHEN X Z. Analysis of alongwind tall building response to transient nonstationary winds[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(5):782-791.
- [17] WOOD G S, KWOK K C S, MOTTERAM N A, et al. Physical and numerical modelling of thunderstorm downbursts[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2001, 89(6):535-552.
- [18] HJELMFELT M R. Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado [J]. Journal of Applied Meteorology, 1988, 27:900-927.
- [19] HUANG G Q, CHEN X Z, LIAO H L, et al. Predicting of tall building response to non-stationary winds using multiple wind speed samples [J]. Wind and Structures, 2013, 17(2):227-244.
- [20] HOLMES J D. Wind loading of structures[M]. London: Spon Press, 2001:245-251.
- [21] CHOI E C C. Field measurement and experimental study of wind speed profile during thunderstorms[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92:275-290.
- [22] 苏延文. 非平稳激励下大跨桥梁随机响应方法研究与应用[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [23] 彭留留. 非平稳极端风实测、建模和模拟及高层建筑风致响应研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- [24] 李春祥,张佳丽. 传感器故障后多变量经验小波变换多点预测[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(1):203-214.  
LI Chunxiang, ZHANG Jiali. Multivariable empirical wavelet transform for multipoint forecasting after sensor fault [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(1):203-214. (in Chinese)



**第一作者简介:**李春祥,男,1964年12月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构抗震与风工程、结构振动控制、人工智能与结构健康监测等。曾发表《Non-Gaussian non-stationary wind pressure forecasting based on the improved empirical wavelet transform》(《Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics》2018, Vol. 179)等论文。

E-mail:li-chunxiang@vip.sina.com



