

环境风激励下中信广场的模态参数识别^{*}

孙猛猛^{1,3}, 郅伦海²

(1. 中南大学土木工程学院 长沙, 410075) (2. 西安建筑科技大学省部共建西部绿色建筑国家重点实验室 西安, 710055)
(3. 湖南科技大学结构抗风与振动控制湖南省重点实验室 湘潭, 411201)

摘要 为了准确地识别建筑结构的模态参数, 提出了一种基于多重信号分类算法 (multiple signal classification, 简称 MUSIC)、经验小波变换 (empirical wavelet transform, 简称 EWT) 和同步提取小波变换 (synchroextracting transform, 简称 SET) 的结构模态参数识别方法。首先, 通过 MUSIC-EWT 对实测振动信号进行分解; 其次, 使用 SET 对单模态信号进行去噪处理; 然后, 采用自然环境激励技术 (natural excitation technique, 简称 NExT) 得到单模态信号的自由衰减响应; 最后, 利用 Hilbert 变换 (hilbert transform, 简称 HT) 和曲线拟合获得结构的自振频率和阻尼比。通过三层框架结构的数值模拟验证了该方法的准确性和鲁棒性。利用该方法对台风“达维”作用下广州中信广场的实测加速度数据进行分析, 并将估计的结构模态参数和其他识别方法的分析结果进行对比, 进一步证明了该方法的准确性和鲁棒性。

关键词 模态参数识别; 多重信号分类算法; 经验小波变换; 同步提取小波变换; 阻尼比; 自振频率
中图分类号 TU973.2; TU311.3; TH113.1

引言

结构健康监测中经常遇到的一个关键问题是如何根据实测响应准确估计结构模态参数 (如自振频率和阻尼比等), 进而通过结构动力特性 (阻尼比和自振频率等) 的变化判断结构的健康状况和损伤程度。传统的模态参数识别方法, 往往要求激励是平稳的, 然而高层建筑受风荷载作用时, 环境激励是非平稳的, 如何处理非平稳信号, 是环境风激励下结构模态参数识别的难点。近年来, 先进的时频信号处理技术如小波变换 (wavelet transform, 简称 WT) 和希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform, 简称 HHT) 等被广泛地用于土木结构的模态参数估计^[1-3]。小波变换要求窗口内的信号是平稳的, 需要选择恰当的小波基才能达到理想的识别效果。同时, 小波变换对含有噪声的测量信号处理能力较差, 然而环境激励下建筑结构实测的响应信号往往含有噪声, 这必然会影响到其参数识别精度。HHT 变换的第一步需要用到经验模态分解 (empirical mode decomposition, 简称 EMD)。EMD 是一种能够自

适应分析非线性和非平稳信号的新方法, 然而其在信号处理的过程中不可避免的存在着模态混叠、端点效应及虚假模态等一系列问题。

Gilles^[4]提出了经验小波变换 (EWT), 是一种基于频域的自适应信号分解方法。它以小波作为理论基础, 通过搜寻频域极大值点自适应地对信号的傅里叶频谱进行分割, 然后在每个区间上构造小波滤波器组, 最后信号被分解为一系列调频调幅分量。然而当分析的信号含有噪声时, 频谱的划分会出现误差, 这将会导致 EWT 的分解能力降低。最近, Amezcua-Sanchez 等^[5]提出了一种新的自适应信号分析方法 (MUSIC-EWT), 它使用多重信号分类算法 (MUSIC) 算法来估计信号中包含的频率并划分频谱的边界, 通过划分的边界构造正交小波滤波器组, 然后, 使用 EWT 将信号分解为一系列的模态。它可以克服部分噪声的干扰, 剔除虚假模态, 适用于分析非平稳, 非线性且含有噪声的信号, 但是仍然不能解决频率混叠的问题。

受到同步挤压变换 (synchrosqueezed wavelet transform, 简称 SST)^[6] 和理想时频分析的信号能量只出现在瞬时频率轨迹的理论的启发, Yu 等^[7]提

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (51978230); 省部共建西部绿色建筑国家重点实验室开放基金资助项目 (LSKF201916); 湖南科技大学结构抗风与振动控制湖南省重点实验室开放基金资助项目
收稿日期: 2018-07-11; 修回日期: 2018-08-14

出了一种新的时频分析方法,同步提取变换(SET)。SET 消除受污染的时频能量,只保留了与目标信号的时变特征最相关的短时傅里叶变换(short-time Fourier transform,简称 STFT)结果的时频信息。利用 SET 这一特性,可以消除频率混叠的影响,去除单分量信号中的噪声。SET 适用于提取非线性和非平稳信号的瞬时属性,但要求目标信号的不同分量之间有足够的距离。由于建筑结构的实测数据是非平稳和非线性的,且具有宽带和多频的特性,所以单独使用 SET 方法应用于实测数据时效果不佳。笔者综合 MUSIC-EWT 和 SET 的优点,提出了一种 MUSIC-EWT-SET 的信号分解方法,并结合自然环境激励技术和 Hilbert 变换实现了结构自振频率频率及阻尼比的准确识别。通过 3 层框架结构的数值模拟,验证了本方法(文中称之为 MUSIC-EWT-SET 方法)的准确性和有效性。使用该方法对台风“达维”作用下广州中信广场的实测振动信号进行时频分析,有效地识别了结构的自振频率和阻尼比,并将识别的结构模态参数和其他方法(MUSIC-EWT 和自适应无参经验小波变换(adaptive parameterless EWT,简称 APEWT))的分析结果开展对比性研究。

1 理论基础

1.1 基于多重信号分类算法的经验小波变换

MUSIC-EWT 是一种能够有效分析非平稳、非线性和噪声信号的自适应时频分析方法^[8-9]。它将多分量信号分解为多个单分量信号,每一个单分量被视为结构的每一阶模态。MUSIC-EWT 的分解分为两步完成。首先,使用 MUSIC 来估计与结构的自振频率所对应的信号中包含的频率,并且建立适当的边界来创建小波滤波器组;然后,使用 EWT 将信号分解为不同的频带(每个频带具有单个频率)。

1.1.1 Fourier 频谱区间划分及边界确定

EWT 将信号 $f(t)$ 分解为 $N+1$ 个模态函数 $f_k(t)$ 之和: $f(t) = \sum_{k=0}^N f_k(t)$, 其中,模态函数 $f_k(t)$ 为调频调幅函数(AM-FM)。

首先使用 MUSIC 算法获取信号的伪谱,然后找出 MUSIC 伪谱的所有局部最大值,最后确定两个局部最大值之间的局部最小值 ω_n , 每个局部最小值对应于一个小波滤波器组的边界,以此将相关频

率与噪声和其他频率隔离。以 ω_n 为中心向两边扩展 τ_n , 取宽度 $T_n = 2\tau_n$, 作为过渡段。假设将傅里叶支撑 $[0, \pi]$ 分割为 N 个连续的部分 Λ_n , 0 和 π 分别为第 1 条和最后 1 条边界线。

$$\begin{cases} \Lambda_n = [\omega_{n-1}, \omega_n] & (n=1, 2, \dots, N) \\ U_{n=1}^N \Lambda_n = [0, \pi] \end{cases} \quad (1)$$

1.1.2 滤波器组的构建及经验小波变换(信号重构)

经验小波被定义为每个 Λ_n 上的带通滤波器,根据 Meyer 小波构建经验小波^[10-12], 确定经验尺度函数 $\hat{\varphi}_n(\omega)$ 和经验小波函数 $\hat{\psi}_n(\omega)$ 分别如式(2)和(3)所示

$$\hat{\varphi}_n(\omega) = \begin{cases} 1 & (|\omega| \leq \omega_n - \tau_n) \\ \cos\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\tau_n}(|\omega| - \omega_n + \tau_n)\right)\right] & (\omega_n - \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_n + \tau_n) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\hat{\psi}_n(\omega) = \begin{cases} 1 & (\omega_n + \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_{n+1} - \tau_{n+1}) \\ \cos\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\tau_{n+1}}(|\omega| - \omega_{n+1} + \tau_{n+1})\right)\right] & (\omega_{n+1} - \tau_{n+1} \leq |\omega| \leq \omega_{n+1} + \tau_{n+1}) \\ \sin\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\tau_n}(|\omega| - \omega_n + \tau_n)\right)\right] & (\omega_n - \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_n + \tau_n) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\beta(x)$ 是任意 C^k 函数在 $[0, 1]$ 之间,该方法中选择 $\beta(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3)$; $\tau_n = \gamma\omega_n$, 且 $0 < \gamma < 1$ 。

当 $\gamma < \min\left(\frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_{n+1} + \omega_n}\right)$ 时, $[\varphi_1(t), \{\psi_n(t)\}_{n=1}^N]$ 构成了一个紧支框架。

根据定义的经验小波函数和经验尺度函数,经验小波变换的细节系数 $W_f^\varepsilon(n, t)$ 和近似系数 $W_f^\varepsilon(0, t)$ 分别与小波函数和尺度函数内积产生。

细节系数

$$W_f^\varepsilon(n, t) = [f, \psi_n] = \int f(\tau) \overline{\psi_n(\tau - t)} d\tau = F^{-1}(f(\omega) \hat{\psi}_n(\omega)) \quad (4)$$

近似系数

$$W_f^\varepsilon(0, t) = [f, \varphi_1] = \int f(\tau) \overline{\varphi_1(\tau - t)} d\tau = F^{-1}(f(\omega) \hat{\varphi}_1(\omega)) \quad (5)$$

其中: $\hat{\psi}_n(\omega)$ 和 $\hat{\varphi}_1(\omega)$ 分别为 $\psi_n(t)$ 和 $\varphi_1(t)$ 的 Fourier 变换函数; $\overline{\psi_n(t)}$ 和 $\overline{\varphi_1(t)}$ 分别为 $\psi_n(t)$ 和 $\varphi_1(t)$ 的复共轭函数; \langle, \rangle 为内积计算; F^{-1} 为傅里叶逆变换。

由此,信号 $f(t)$ 的重构表达式为

$$f(t) = f_{i=0}(t) + f_{i=n}(t) = F^{-1}(\hat{W}_j^\varepsilon(0, \omega) \hat{\varphi}_1(\omega) + \sum_{n=1}^N \hat{W}_j^\varepsilon(n, \omega) \hat{\varphi}_n(\omega)) \quad (6)$$

1.2 同步提取小波变换(SET)

SET 的主要思想是只保留与信号时变特征最相关的 STFT 结果的时频信息,并去除大部分被污染的时频能量,使得时频表示的能量集中度可以大大提高^[7,13]。利用 SET 降低噪声和提取信号时变特征的能力对信号进行处理,可以去除噪声,消除频率混叠的影响。

信号 $s(t)$ 的标准 STFT 公式 $G(t, \omega)$ 乘以相位因子 $e^{i\omega t}$ 时,表示为

$$G_e(t, \omega) = G(t, \omega) e^{i\omega t} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\xi) \hat{g}(\omega - \xi) e^{i\xi t} d\xi \approx \sum_{j=1}^m A_j(t) \hat{g}(\omega - \varphi'_j(t)) e^{i\varphi_j(t)} \quad (7)$$

其中: $g(u-t)$ 为移动的窗口; $\hat{s}(\xi)$ 为信号的傅里叶变换; $g(\omega - \xi)$ 为 $g(u-t)$ 的傅里叶变换; A_j 和 φ_j 分别为第 j 阶模态对应的瞬时幅值和瞬时相位角。

STFT 谱在瞬时频率处具有最佳的噪声鲁棒性,理想时频分析的信号能量只出现在瞬时频率轨迹上,因此仅提取 STFT 谱在瞬时频率位置的时频系数,可得到

$$Te(t, \omega) = G_e(t, \omega) \delta(\omega - \varphi'(t, \omega)) \quad (8)$$

其中: $\delta(\omega - \varphi'(t, \omega)) = \begin{cases} 1 & (\omega = \varphi'(t, \omega)) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$ 为同步提取算子。

根据式(7,8),可推导出

$$Te(t, \omega) \Big|_{\omega = \sum_{j=1}^m \varphi'_j(t) = 0} = G_e(t, \omega) \Big|_{\omega = \sum_{j=1}^m \varphi'_j(t) = 0} \approx \sum_{j=1}^m A_j(t) \hat{g}(0) e^{i\varphi_j(t)} \quad (9)$$

因此,信号 $s(t)$ 可以被近似重建出

$$s(t) \approx \sum_{j=1}^m Te(t, \varphi'_j(t)) / \hat{g}(0) \quad (10)$$

每个模态通过一阶近似方式分解给出

$$s_j(t) \approx Te(t, \varphi'_j(t)) / \hat{g}(0) \quad (11)$$

1.3 自然环境激励技术

对于一个自由度为 M 的线性系统, c, d 为两个测点,当结构 c 点受到单位脉冲激励时,则得到系统 d 点的脉冲响应函数为

$$h_{dc}(t) = \sum_{r=1}^{2M} \varphi_{dr} a_{cr} e^{\lambda_r t} \quad (12)$$

其中: φ_{dr} 为第 r 阶阵型在 d 点的数值; a_{cr} 为仅同激励作用点 c 和模态阶数 r 有关的常数项。

结构在 c 点受近似白噪声的环境激励 $f_c(t)$ 时, $E[f_c(p)f_c(q)] = a_c \delta(p-q)$, 结构在 d 和 h 点的响应 $x_{dc}(t)$ 和 $x_{hc}(t)$ 的响应互相关函数为

$$\left\{ \begin{aligned} R_{dhc}(\tau) &= \sum_{r=1}^{2M} \sum_{s=1}^{2M} \varphi_{dr} \varphi_{hs} a_{cr} a_{cs} a_c \\ \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{t+\tau} e^{\lambda_r(t+\tau-p)} e^{\lambda_s(t-q)} \delta(p-q) dp dq &= \sum_{r=1}^{2M} b_{hr} \varphi_{dr} e^{\lambda_r \tau} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

其中: $b_{hr} = \sum_{s=1}^{2M} \varphi_{hs} a_{cr} a_{cs} a_c \left(\frac{-1}{\lambda_r + \lambda_s} \right)$, b_{hr} 为只与 h 点位置和模态阶数 r 有关的常数项。

对比式(12,13)可知,线性结构在近似白噪声的环境激励作用下,任意两点的响应互相关函数与脉冲响应函数在数学表达式的形式完全一致。各测点的同阶模态振型分别乘以常数 a_{cr} 和 b_{hr} , 不会改变阵型的形状和特性。因此,可以使用任意两点之间的响应互相关函数来代替结构的脉冲响应函数。

1.4 希伯特变换

对信号进行 Hilbert 变换可得到复数域的解析信号

$$z(t) = x(t) + iy(t) = A(t) e^{i\theta(t)} \quad (14)$$

其中: $A(t)$ 为瞬时幅值, $A(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}$; $\theta(t)$ 为瞬时相位, $\theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right)$, 而瞬时频率又可以通过瞬时相位函数求导得到。

1.5 曲线拟合求出阻尼比

对单分量响应信号进行处理,得到自由衰减响应信号 $f_{fdr}(t)$, 从而得到自由衰减信号的包络曲线。然后使用曲线拟合方法,将指数衰减曲线拟合到包络曲线上就可以估计出单模态信号阻尼比

$$\left\{ \begin{aligned} f_{fdr}(t) &= E e^{\eta t} \\ \eta &= -2\pi\omega r \end{aligned} \right. \quad (15)$$

其中: E 为拟合包络的幅值; η 为衰减函数的指数。进而求得阻尼比为 $dr = -\eta/2\pi\omega$ 。

1.6 模态参数的识别过程

对于建筑物的实测加速度响应 $x(t)$, 首先采用 MUSIC 方法划分信号频谱的边界, 以此构建经验小波滤波器组, 从而对实测加速度响应信号进行经

验小波变换得到单分量信号, 其次利用 SET 对单分量信号进行去噪处理。再使用 NE_xT 对单分量信号进行处理得到自由衰减响应, 然后通过 Hilbert

变换得到瞬时幅值和瞬时频率, 最后通过曲线拟合的方式得到结构的阻尼比和自振频率。模态参数识别的过程如图 1 所示。



图 1 模态参数识别过程

Fig. 1 Modal parameter identification process

2 数值模拟验证

为了验证 MUSIC-EWT-SET 方法的有效性和准确性, 对一个 3 层的钢筋混凝土框架模型进行数值分析。模拟建筑物在脉冲荷载作用下结构的加速度响应, 并使用文中提出的方法对该加速度响应进行分析, 估计结构的模态参数(阻尼比, 自振频率)。建筑物的模型如图 2 所示, 该建筑物每层楼的质量为: $m_i = 10\ 000\ \text{kg}$ ($i = 1 \sim 3$); 刚度为: $k_1 = 39.6$, $k_2 = 29.7$, $k_3 = 19.8\ \text{kN/m}$; 阻尼为: $c_1 = c_2 = 0.362\ 8\ \text{kN} \cdot \text{s/m}$, $c_3 = 0.181\ 4\ \text{kN} \cdot \text{s/m}$ 。

在 2 楼用以下形式的矩形脉冲荷载持续作用 100 s。采用 Newmark- β 法可以求得结构第 2 层在矩形脉冲荷载作用下的加速度响应(如图 3(a)所示)。为了验证该方法的噪声鲁棒性, 将在该层加速度响应时程序列中加入白噪声, 噪声强度选为该层加速度响应均方根的 20%(如图 3(b)所示)。

$$F(t) = \begin{cases} 50\ \text{kN} & (0 \leq t \leq 100) \\ 0 & (t > 100) \end{cases} \quad (16)$$

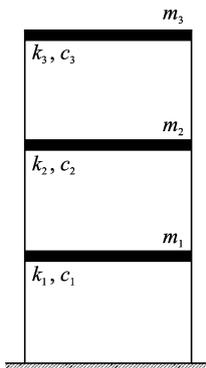


图 2 3 层框架结构模型

Fig. 2 Three-layer frame structure model

首先, 使用 MUSIC-EWT 对加入 20% 噪声的加速度响应进行分析, 得到 4 个分量, 前 3 个分量分别对应的是信号的前 3 阶模态, 最后一个分量为噪声信号; 其次, 使用 NE_xT 对每一阶模态信号进行处理, 得到信号的自由衰减响应; 然后, 通过 Hilbert 变换得到瞬时频率瞬时幅值; 最后, 使用曲线拟合的方法拟合得到对应的阻尼比和自振频率。按照笔者

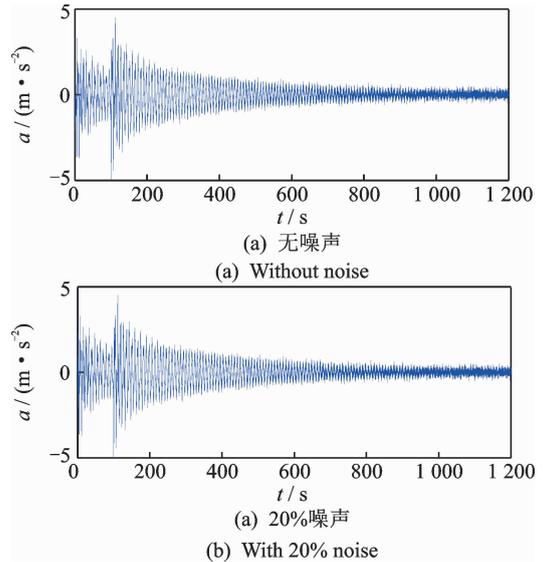


图 3 第 2 层的加速度响应

Fig. 3 Acceleration response at the second floor

提出的 MUSIC-EWT-SET 方法, 首先对单模态信号进行去噪处理, 然后按照上述流程, 通过 NE_xT、HT 和曲线拟合得到对应的阻尼比和自振频率。因为第 1 阶模态能量占比较高, 对噪声不敏感, 所以

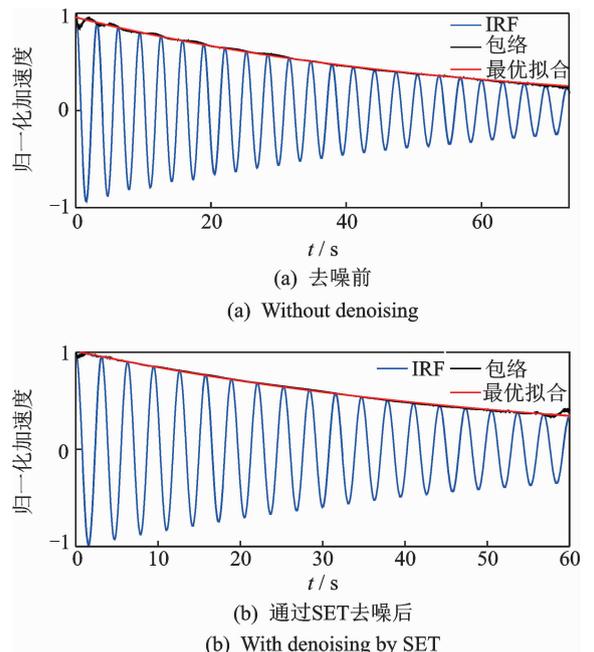


图 4 第 2 阶模态的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of the second mode

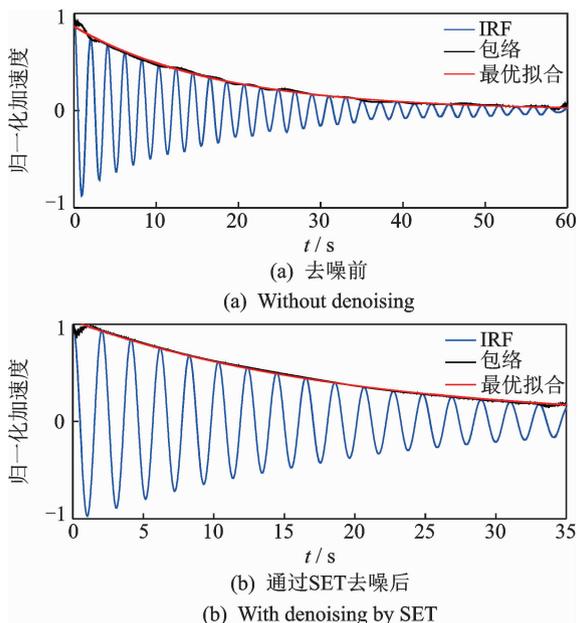


图5 第3阶模态的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of the third mode

图4,5中只给出第2阶、第3阶模态去噪前后的拟合结果对比。为了便于对比文中拟合曲线,均采用归一化的加速度,无量纲单位。

由图4,5可以看出,MUSIC-EWT方法的分析结果中,第2阶模态和第3阶模态自由衰减响应的包络曲线均出现波动现象,曲线拟合的效果不甚理想。而文中提出的MUSIC-EWT-SET方法得到的各阶模态的自由衰减响应的包络曲线均十分平滑,曲线拟合的效果都很良好。

表1中给出去噪前和去噪后的识别结果。从表1可以看出,MUSIC-EWT-SET技术识别的各阶模态参数中,识别的第1阶自振频率与理论值完全一致,第1阶阻尼比的估计误差在1%左右,识别的第2阶自振频率与理论值完全一致,第2阶阻尼比的估计误差不到1%,第3阶自振频率和阻尼比的估计误差均不到1%。通过与MUSIC-EWT方法估计的各阶模态参数对比可知,引入SET对单分量信号进行去噪处理后,识别的结果精度更高。分析结

表1 模态参数估计值与理论值的对比

Tab. 1 Comparison between the estimated modal parameters and the theoretical values

模态	理论值		MUSIC-EWT		MUSIC-EWT-SET	
	频率/ Hz	阻尼 比/%	频率/ Hz	阻尼 比/%	频率/ Hz	阻尼 比/%
第1阶	0.126 8	0.41	0.126 8	0.402	0.126 8	0.405
第2阶	0.316 7	0.91	0.316 6	0.924	0.316 7	0.904
第3阶	0.484 5	1.68	0.485 4	1.860	0.484 1	1.670

果表明尽管选用了含有噪声的响应信号,但是利用MUSIC-EWT-SET方法仍然可以获得准确的模态参数识别结果。这也说明了该方法具有很好的准确性和鲁棒性。

3 超高层结构的模态参数识别

广州中信广场主楼为80层的商业写字楼(见图6(a)),建筑总高度为391 m(顶部有60 m高的避雷塔)。中信广场主楼采用筒中筒结构,建筑的第25,44和65层为结构加强层,结构的平面布置为正方形,边长46.8 m。结构高宽比为6.9,超过现行结构规范规定的高宽比要求,属于对风荷载比较敏感的结构。因此在主楼的顶部安装一套实时健康监测系统,包括机械式风速仪,超声风速仪和加速度传感器,用于监测风速和风致响应。加速度传感器的布置如图6(b)所示,1号加速度传感器用于监测结构南北(N-S)方向的加速度响应,2号加速度传感器用于监测结构东西(W-E)方向的加速度响应^[14-15]。使用20 Hz的采样频率对台风“达维”作用下中信广场风速特性和风致加速度响应进行了实时监测和记录。台风“达维”作用下中信广场(N-S)方向和(W-E)方向的加速度时程以及对应的傅里叶频谱如图7所示。

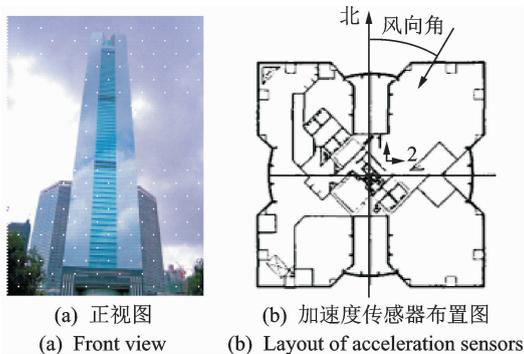


图6 中信广场

Fig. 6 CITIC Plaza

由图7(c,d)可知,原始的响应数据经过FFT变换后,可以看出自振频率的范围,N-S方向和W-E方向第1阶平动频率在0.17~0.18 Hz之间,第2阶平动频率在0.60~0.62 Hz之间。第1阶扭转频率在0.36~0.38 Hz之间,第2阶扭转频率在0.71~0.74 Hz之间。

对两个方向实测加速度数据使用MUSIC-EWT进行分解,提取出信号各阶模态信号,对分解得到的各阶模态,首先使用SET对每一个单模态

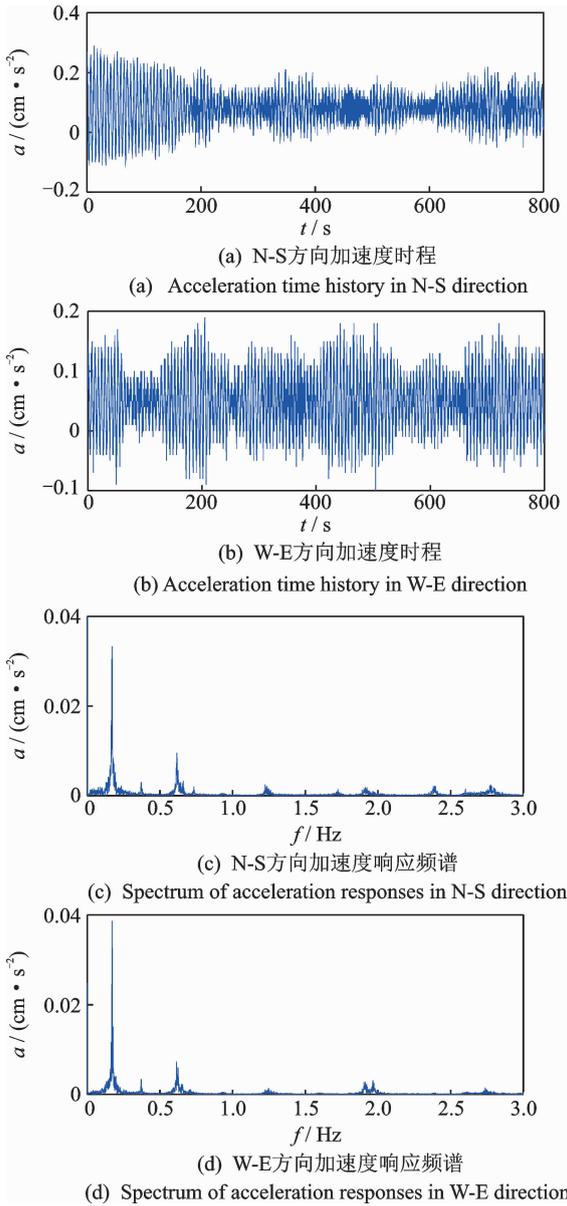


图 7 中信广场的实测加速度响应及对应的频谱
Fig. 7 Acceleration responses measured atop CITIC Plaza and their corresponding Fourier spectra

信号进行去噪处理,再利用 NEXT 得到自由衰减响应,然后对自由衰减响应使用 Hilbert 变换得到瞬时幅值和瞬时频率,最后通过曲线拟合的方法得到结构的阻尼比和自振频率。同数值模拟一样,图 8, 9 中也只给出两个方向第 2 阶、第 3 阶模态去噪前后的拟合结果对比(为了便于对比文中拟合曲线均采用归一化的加速度,无量纲单位)。

图 8 可以看出,方向 1 和方向 2 实测数据的 MUSIC-EWT 方法分析结果中,第 2 阶模态的自由衰减响应的包络曲线出现细微的波动现象,曲线拟合的效果不甚理想。第 3 阶模态自由衰减响应的包络曲线出现较大的波动现象,曲线拟合的效果较差。

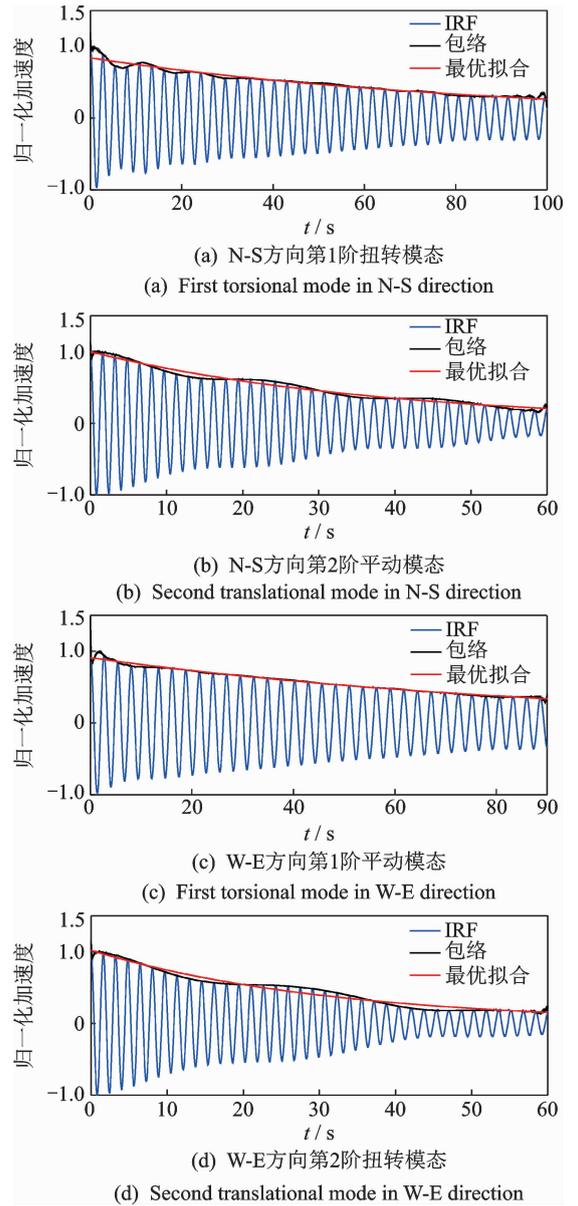


图 8 去噪前各阶模态拟合曲线
Fig. 8 Fitting curves of each mode without denoising

由图 9 看出,通过 SET 对单模态信号进行去噪处理后,MUSIC-EWT-SET 方法得到的方向 1 和方向 2 各阶模态的自由衰减响应的包络曲线均十分平滑,曲线拟合的效果都很良好。对比图 8,9 可以看出,使用 SET 对分解得到的单分量信号进行去噪处理后,得到的自由衰减响应的包络曲线更加平滑,从而使得曲线拟合得到的阻尼比、自振频率更加精确。

为了进一步对比 MUSIC-EWT-SET 的有效性和鲁棒性,文中又采用自适应无参经验小波变换对中信广场的实测加速度响应数据进行了模态参数识别,APEWT^[16-17]是一种经验小波变换的改进,它首先将 Fourier 谱转化成尺度空间表示,实现对频谱的自适应分割,然后通过经验小波变换得到一系列

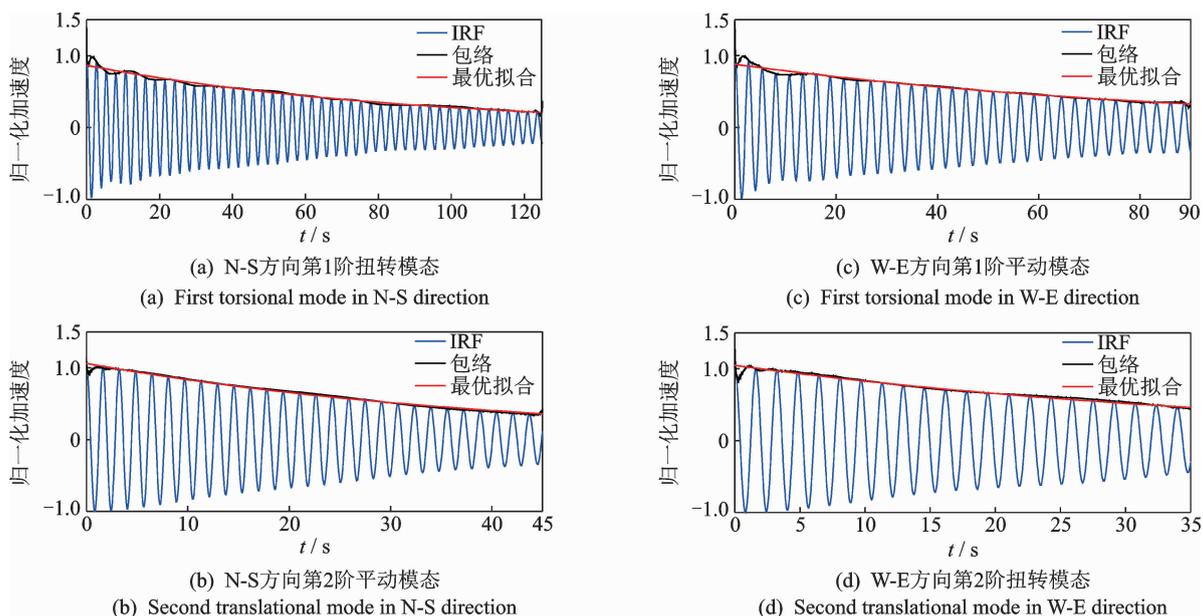


图9 使用 SET 去噪后各阶模态拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of each mode with denoising by SET

单模态信号,最后通过 NExT 处理和 Hilbert 变换去拟合结构的阻尼比和自振频率。表 2 给出了 3 种模态参数识别方法的计算结果,由表可知,3 种方法得到的各阶模态的自振频率均十分接近,第 1 阶平动模态阻尼比的识别结果也基本一致,第 1 阶扭转模态阻尼比的识别结果也相差较小,误差均不超过 4%。3 种方法获得的第 2 阶平动模态阻尼比差别

较大,究其原因主要是因为第 2 阶平动频率和第 2 阶扭转频率比较近,频谱的边界不易确定,这就导致 MUSIC-EWT 和 APEWT 的频谱划分有误差,并进而影响最终的识别结果。MUSIC-EWT-SET 方法中引入了 SET,只保留第 2 阶平动模态的固有频率对应的信号分量,所以识别的结果更为准确(见图 9)。

表 2 不同方法识别的模态参数结果

Tab. 2 Comparison of modal parameters predicted by different methods

方向	模态	APEWT		MUSIC-EWT		MUSIC-EWT-SET	
		频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
N-S 方向	第 1 阶平动	0.171 1	1.160	0.171 1	1.160	0.171 1	1.160
	第 2 阶平动	0.616 8	0.679	0.616 9	0.678	0.617 6	0.618
	第 1 阶扭转	0.371 5	0.505	0.371 7	0.493	0.371 8	0.485
W-E 方向	第 1 阶平动	0.171 6	1.040	0.172 2	1.010	0.172 2	1.010
	第 2 阶平动	0.615 3	0.820	0.616 3	0.816	0.617 8	0.606
	第 1 阶扭转	0.371 5	0.473	0.371 8	0.475	0.371 7	0.478

4 结束语

EWT 作为一种新的自适应信号分解方法,能够突出信号的局部特征,特别适用于分解非平稳、非线性、有噪声的实测信号。基于 MUSIC-EWT 并结合同步提取小波变换、自然环境激励技术和 Hilbert 变换,笔者提出了一种新的结构模态参数识别方法(MUSIC-EWT-SET)。新方法克服了频率混叠的缺陷,消除了信号中噪声的影响,能够得到更加平滑的包络曲线,进而可以准确地获取结构的自振频率

和阻尼比。通过 3 层框架结构的数值模拟和中信广场的现场实测验证了该方法是一种精度高,鲁棒性好的结构模态参数识别技术,可以利用低振幅环境振动数据有效的估计出建筑结构的模态参数,与已有方法(APEWT 和 MUSIC-EWT)相比,笔者提出的 MUSIC-EWT-SET 方法能够获得精度更高、更稳定的识别结果。

参 考 文 献

- [1] 续秀忠, 华宏星. 基于环境激励的模态参数辨识方法综述[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3):1-5.

- XU Xiuzhong, HUA Hongxing. Review of modal identification method based on ambient excitation[J]. Journal of Vibration & Shock, 2002, 21(3):1-5. (in Chinese)
- [2] 陈隽, 徐幼麟. HHT 方法在结构模态参数识别中的应用[J]. 振动工程学报, 2003, 16(3):383-388.
CHEN Juan, XU Youlin. Application of HHT for modal parameter identification to civil structures[J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(3):383-388. (in Chinese)
- [3] 汤宝平, 何启源, 蒋恒恒, 等. 利用小波去噪和 HHT 的模态参数识别[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(2):197-200.
TANG Baoping, HE Qiuyan, JIANG Hengheng, et al. Modal parameter identification based on Hilbert-Huang transform and wavelet de-noising[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(2):197-200. (in Chinese)
- [4] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(16):3999-4010.
- [5] AMEZQUITA-SANCHEZ J P, ADELI H. A new music-empirical wavelet transform methodology for time-frequency analysis of noisy nonlinear and non-stationary signals[J]. Digital Signal Processing, 2015, 45(C):55-68.
- [6] DAUBECHIES I, LU J F, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool[J]. Applied & Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2):243-261.
- [7] YU G, YU M J, Xu C Y. Synchroextracting transform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10):8042-8054.
- [8] JIANG X M, ADELI H. Pseudospectra, MUSIC, and dynamic wavelet neural network for damage detection of highrise buildings[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 71(5):606-629.
- [9] AMEZQUITA-SANCHEZ J P, PARK H S, ADELI H. A novel methodology for modal parameters identification of large smart structures using MUSIC, empirical wavelet transform, and Hilbert transform[J]. Engineering Structures, 2017, 147:148-159.
- [10] 向玲, 李媛媛. 经验小波变换在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 动力工程学报, 2015, 35(12):975-981.
XIANG Ling, LI Yuanyuan. Application of empirical wavelet transform in fault diagnosis of rotary mechanisms[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(12):975-981. (in Chinese)
- [11] 向玲, 高雪媛, 张力佳, 等. IEWT 和 FSK 在齿轮与滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(6):1256-1261.
XIANG Ling, GAO Xueyuan, ZHANG Lijia, et al. Gear and rolling bearing fault diagnosis based on improved EWT and fast spectral kurtosis filtering[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(6):1256-1261. (in Chinese)
- [12] 祝文颖, 冯志鹏. 基于改进经验小波变换的行星齿轮箱故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10):2193-2201.
ZHU Wenyong, FENG Zhipeng. Fault diagnosis of planetary gearbox based on improved empirical wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10):2193-2201. (in Chinese)
- [13] CHEN H, KANG J X, CHEN Y C, et al. An improved time-frequency analysis method for hydrocarbon detection based on EWT and SET[J]. Energies, 2017, 10(8):1090.
- [14] 鄧伦海. 城市中心边界层风特性及超高层建筑动力响应研究[D]. 长沙:湖南大学, 2011.
- [15] 李正农, 宋克, 李秋胜, 等. 广州中信广场台风特性与结构响应的相关性分析[J]. 实验流体力学, 2009, 23(4):21-27.
LI Zhengnong, SONG Ke, LI Qiusheng, et al. Correlation analysis of wind characteristic and wind-induced response of CITIC Plaza[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(4):21-27. (in Chinese)
- [16] ZHENG J D, PAN H Y, YANG S B, et al. Adaptive parameterless empirical wavelet transform based time-frequency analysis method and its application to rotor rubbing fault diagnosis[J]. Signal Processing, 2017, 130(C):305-314.
- [17] 郑近德, 潘海洋, 潘紫微, 等. 自适应无参经验小波变换及其在转子故障诊断中的应用[J]. 中国机械工程, 2016, 27(16):2218-2224.
ZHENG Jinde, PAN Haiyang, PAN Zihui, et al. Adaptive parameterless empirical wavelet transform (EWT) and its applications to fault diagnosis of rotor system[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(16):2218-2224. (in Chinese)



第一作者简介:孙猛猛,男,1995年3月生,博士生。主要研究方向为非平稳模态分析。曾发表《基于VMD的建筑结构模态参数识别》(《振动与冲击》2020年第39卷第1期)等论文。
E-mail:jiexiasunmeng@163.com

通信作者简介:鄧伦海,男,1979年2月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构风工程。
E-mail:zhilunhai1979@163.com