

基于ILMSST识别时变结构 非平稳响应信号瞬时频率

刘景良^{1,2}, 李宇祖¹, 苏杰龙¹, 骆勇鹏^{1,2}, 盛叶^{1,2}

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. “数字福建”智能交通技术物联网实验室, 福建 福州 350108)

摘要:为解决局部最大同步挤压变换算法识别的频率精度不足及频带能量发散的问题,提出一种改进算法并将之命名为改进局部最大同步挤压变换方法(improved local maximum synchrosqueezing transform, ILMSST)。该方法首先对瞬时频率(instantaneous frequency, IF)位置进行多次迭代,从而获得更高精度的瞬时频率位置。其次,搜索短时傅里叶系数模极大值的位置并上下平移该位置,得到初步估算的频带并将频带外的短时傅里叶系数归零。最后,搜索频率方向上短时傅里叶系数的局部最大值所对应的瞬时频率位置,根据这些位置对时频系数进行重排,进而得到细化的瞬时频带。通过2组数值算例、1个7层钢筋混凝土剪力墙振动台试验和1个时变拉索试验验证了所提新方法的有效性,研究表明:相比现有的局部最大同步挤压变换方法,改进算法不仅提高了瞬时频率的估算精度,而且改善了响应信号瞬时频带的时频聚集性。

关键词:时变;局部最大同步挤压变换;时频系数;瞬时频率;时频分析

中图分类号:TN911.6;TU311.3

文献标识码:A

Instantaneous frequency estimation of nonstationary response signals of time-varying structures based on ILMSST

LIU Jingliang^{1,2}, LI Yuzu¹, SU Jielong¹, LUO Yongpeng^{1,2}, SHENG Ye^{1,2}

(1. School of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China;

2. “Digital Fujian” Laboratory of Internet Things for Intelligent Transportation Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to get rid of the problems of inaccurate instantaneous frequency (IF) estimation and energy dissipation inside the local maximum synchrosqueezing transform algorithm, an improved method is proposed and named as local maximum synchrosqueezing transform (ILMSST). Firstly, multiple iterations are performed on the obtained IF positions to get more precise IF positions. Secondly, the IF positions where maximum values of STFT coefficients appear are searched and then moved up and down to pre-estimate IF bands. After that, the STFT coefficients outside the pre-determined IF bands are totally assigned to zero. Finally, the IF positions that correspond to local maximum values of STFT coefficients are found out and subsequently an operation of reassignment is performed on the obtained IF positions to get refined IF bands. To verify the effectiveness of the proposed method, two numerical cases and two tests on a seven-story reinforced concrete shear wall structure and a steel cable with time-varying tension forces are investigated. The results demonstrate that the proposed ILMSST method behaves better than current local maximum synchrosqueezing transform. Moreover, it not only enhances the accuracy of IF estimation but also improves time-frequency energy concentration.

收稿日期:2022-10-30; 修回日期:2022-12-30

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51608122);中央引导地方科技发展专项(202L3007);福建省自然科学基金面上项目(2020J01581, 2020J01579);福建农林大学优秀硕士学位论文基金项目(113/1122YS01005)

作者简介:刘景良(1983—),男,副教授,博士,主要从事结构健康监测和桥梁振动与稳定研究。E-mail:liujingliang@fafu.edu.cn

Key words: time-varying; local maximum synchrosqueezing transform; time frequency coefficient; instantaneous frequency; time frequency analysis

0 引言

服役期间的土木工程结构在承受环境侵蚀、材料老化和工作荷载等作用时本质上属于时变结构系统,其响应信号呈现非平稳特性^[1-3]。因此,从非平稳信号处理的角度来提取结构的时变模态参数更符合实际情况,对于深入理解结构动力灾变机理、损伤识别理论、振动控制和健康监测具有重要的理论意义和工程应用价值。时频分析方法是一种将一维时域信号映射到二维时频面的信号处理技术,非常适用于分析非平稳信号。作为经典的时频分析方法之一,小波变换(wavelet transform, WT)因具有形状可变的窗口而被广泛应用于结构参数识别领域^[4-6]。然而,WT 在分析结构低频响应信号时缺乏足够的频率精度,具体表现为小波量图中低频信号的频带较宽^[7]。为此,同步挤压小波变换^[8](synchrosqueezing wavelet transform, SWT)将小波变换后的小波系数压缩至中心频率附近,从而提升了瞬时频率(instantaneous frequency, IF)的识别精度。如 WANG 等^[9]将 SWT 与解析模态分解定理结合识别了 2 层剪切框架结构的瞬时频率。王超等^[10]利用 SWT 识别了移动车辆荷载作用下桥梁结构的瞬时频率。LIU 等^[11]提出了一种基于 SWT 的联合方法来识别悬臂梁结构的瞬时频率。虽然 SWT 改善了 WT 的不足,但是它在分析非渐进信号时误差较大。

针对这一问题, OBERLIN 等^[12-13]提出了二阶同步挤压变换。该方法通过引入二阶相位来估算信号的二阶瞬时频率。在此基础上, PHAM 等^[14]借助递推算法提出了高阶同步挤压变换(high-order synchrosqueezing transform, HSST)。HSST 虽然提高了瞬时频率的估算精度,但是易受噪声干扰且计算效率不高。为此,同步提取变换(synchroextracting transform, SET)通过仅保留瞬时频率位置处的时频系数提升了 SWT 的时频聚集性^[15-16]。如唐蕾等^[2]将 SET 与变分模态分解定理相结合从而提取了时变拉索的瞬时频率。沈中祥等^[17]联合改进的 S 变换与 SET 识别了 7 层钢筋混凝土剪力墙结构的瞬时频率。李志农等^[18]提出一种基于非线性调频分解与 SET 的联合方法来提升 SET 处理频率相近多分量信号的能力。虽然 SET 可以有效地识别结构响应信号的瞬时频率,但是它在重构强调频信号时将产生较大误差^[19]。为此, YU 等^[19]提出了局部最大同步挤压变换(local maximum synchrosqueezing transform, LMSST)。该方法通过构造窗口来搜索频率方向上时频系数的局部最大值,从而获得了更高的时频精度和信号重构能力。然而,该方法估算的瞬时频率仅为一阶瞬时频率,这使得其在分析快变信号的瞬时频率时精度不足。此外, LMSST 在进行同步挤压时有可能将短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT)识别的频带外的干扰点重排至瞬时频率位置附近,进而使得识别的频带能量产生发散现象。

为解决上述问题,本文提出改进局部最大同步挤压变换(improved local maximum synchrosqueezing transform, ILMSSST)。该方法首先对信号进行 STFT,然后针对 STFT 变换后的系数求取时间的偏导,进而得到估算的瞬时频率位置。其次,对估算的瞬时频率位置进行多次迭代以获得精度更高的估算瞬时频率位置,再搜索时频图中 STFT 系数最大值所对应的迭代后瞬时频率位置。再次,上下平移这些瞬时频率位置,从而得到一条初步估算的瞬时频带并仅仅保留频带内的 STFT 系数。最后,搜索频率方向上 STFT 的局部最大值所对应的瞬时频率位置并根据这些位置对时频系数进行重排,进而得到细化的瞬时频带。由于 ILMSSST 方法提取的是瞬时频带而非瞬时频率曲线,采用时频系数模极大值法在限定的频带范围内提取瞬时频率曲线。通过 2 组数值算例、一个 7 层钢筋混凝土剪力墙振动台试验和一个时变拉索试验验证了所提新方法的有效性,研究表明:相比现有的 LMSST 方法, ILMSSST 不但提高了估算瞬时频率的精度,而且改善了 LMSST 的时频聚集性。

1 基本理论

设定如式(1)所示的单分量调幅调频信号为

$$s(t) = A(t)e^{i\varphi(t)} \quad (1)$$

式中, $A(t)$ 和 $\varphi(t)$ 分别为信号的幅值和相位。

若 ε 足够小且 $|A'(t)| \leq \varepsilon$ 和 $|\varphi'''(t)| \leq \varepsilon$ 。根据二阶泰勒展开公式, $A(u)$ 和 $\varphi(u)$ 在 t 时刻可表示为

$$A(u) = A(t) + O\{A'(t)\} \quad (2)$$

$$\varphi(u) = \varphi(t) + \varphi'(t)(u-t) + 0.5\varphi''(t)(u-t)^2 + O\{\varphi'''(t)\} \quad (3)$$

式中, $O\{A'(t)\}$ 和 $O\{\varphi'''(t)\}$ 分别为 $A'(t)$ 和 $\varphi'''(t)$ 的无穷小, 可忽略不计。

将式(2)和式(3)代入式(1)可得

$$s(u) = A(t) e^{i[\varphi(t) + \varphi'(t)(u-t) + 0.5\varphi''(t)(u-t)^2]} \quad (4)$$

以高斯窗函数 $g(t) = e^{-0.5t^2}$ 作为窗函数, 对式(4)进行 STFT 变换, 可得如式(5)所示的 STFT 系数 $G(t, \omega)$ 。所有的 $G(t, \omega)$ 可以组成一个 m 行 n 列的 STFT 系数矩阵 $\mathbf{G}_{m \times n}$ 。

$$\mathbf{G}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}\tau^2} A(t) e^{i\{\varphi(t) + \varphi'(t)\tau + \frac{1}{2}\varphi''(t)\tau^2\}} e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

式中: ω 为频率; $\tau = (u-t)$ 。

针对 STFT 系数求取关于时间 t 的偏导并乘以信号长度 L , 估算瞬时频率位置如式(6)所示:

$$\hat{\omega}(t, \omega) = \frac{\left\{ \varphi'(t) + \frac{\varphi''(t)[\omega - \varphi'(t)][\varphi''(t) - i]}{[i + \varphi(t)][\varphi(t) - i]} \right\} \cdot L}{2\pi} = \frac{\left\{ \varphi'(t) + \frac{\varphi''(t)[\omega - \varphi'(t)]}{\varphi''(t) + 1} - \frac{i\varphi''(t)[\omega - \varphi'(t)]}{1 + \varphi''(t)} \right\} \cdot L}{2\pi} \quad (6)$$

然而需要指出的是, 信号 $s(t)$ 的长度 L 应当大于 STFT 的窗长, 否则, ILMST 将无法对其进行有效的傅里叶变换。在此之后, 取式(6)的实部作为瞬时频率位置的估算值, 如式(7)所示:

$$\hat{\omega}(t, \omega) = \frac{\left\{ \varphi'(t) + \frac{\varphi''(t)}{1 + \varphi''(t)} [\omega - \varphi'(t)] \right\} \cdot L}{2\pi} \quad (7)$$

理论上, 信号估算的瞬时频率为相位的一阶导数。然而, 在实际求解过程中, 估算的瞬时频率与相位的一阶导数有可能产生偏差, 进而影响瞬时频率的识别精度^[8, 15]。由于估算的瞬时频率位置与估算的瞬时频率为——对应关系, 因此, 估算的瞬时频率中的误差也将影响瞬时频率位置的精度。为此, 根据式(8)对 $\hat{\omega}(t, \omega)$ 进行 N 次迭代, 即可得到更高精度的瞬时频率位置。

$$\hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega) = \frac{\left\{ \varphi'(t) + \left[\frac{\varphi''(t)}{1 + \varphi''(t)} \right]^N [\omega - \varphi'(t)] \right\} \cdot L}{2\pi} \quad (8)$$

由于时频重排时 $\hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega)$ 代表 STFT 系数所在的行号, 需对其进行四舍五入取整, 如式(9)所示:

$$\text{Round} \{ \hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega) \} = \begin{cases} [\hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega)] & \hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega) < Z + 0.5 \\ [\hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega) + 1] & \hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega) \geq Z + 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $Z = [\hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega)]$ 为 $\hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega)$ 的整数部分。Round $\{ \hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega) \}$ 表示对 $\hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega)$ 进行四舍五入取整。

在此之后, 搜索每一时刻 STFT 系数模极大值所对应的位置, 结果如式(10)所示:

$$r = \text{Find} \{ \max [|G(t, \omega)|] \} \quad 1 < \omega < n \quad (10)$$

式中: $\max [\cdot]$ 为求取括号内最大值; $|\cdot|$ 为求取模值; Find $\{ \cdot \}$ 为搜索括号内最大值对应的行号。

然后, 根据式(11)对得到的 STFT 系数最大位置进行上下平移并仅保留该范围内的 STFT 系数值, 从而得到一条初步估算的瞬时频带。

$$l = r \pm u \quad 1 < u < n \quad (11)$$

式中, u 为平移的范围, 其建议值为 r 的 0.1~0.2。若 u 过小, 可能会导致频带断裂; 反之, 若 u 值过大则频带外仍然存在干扰点。

在限定的频带范围内, 搜索频率方向上 STFT 系数的局部最大值所对应的位置并将其余位置归零, 结果如式(12)所示:

$$\gamma = \begin{cases} \text{argmax} [|G(t, \omega)|] & l_{\min} < \omega < l_{\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\gamma = \text{argmax} [|G(t, \omega)|]$ 表示求取 $G(t, \omega)$ 为极大值时所对应的估算瞬时频率位置; $l_{\max} = r + u$; $l_{\min} = r - u$ 。

最后, 通过式(13)保留与 γ 位置所对应的多次迭代后瞬时频率位置并以它们为行号对 STFT 系数进行

时频重排,结果如式(14)所示:

$$\hat{\omega}_p^{\{N\}}(t, \omega) = \begin{cases} \hat{\omega}^{\{N\}}(t, \omega) & \omega = \gamma \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$T_s(t, \eta_\alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(t, \omega) \delta\{\eta_\alpha - \hat{\omega}_p^{\{N\}}(t, \omega)\} d\eta_\alpha \quad (14)$$

式中: η_α 为被挤压区间 $\left[\eta_\alpha - \frac{\Delta\omega}{2}, \eta_\alpha + \frac{\Delta\omega}{2}\right]$ 的中心, $\Delta\omega = \eta_\alpha - \eta_{\alpha-1}$; $\delta\{\cdot\}$ 为克罗内克函数。

根据式(14)可得挤压后的 ILMSSST 系数 $T_s(t, \eta_\alpha)$, 然后, 寻找每一时刻 $T_s(t, \eta_\alpha)$ 所对应频率值并将其刻画至时频面, 即可得到 ILMSSST 识别的瞬时频带结果。由于 ILMSSST 提取的结果为瞬时频带而非瞬时频率曲线, 为此, 我们引入时频系数模极大值法来提取 ILMSSST 的瞬时频率曲线, 其具体理论如式(15)所示:

针对式(14)中的 $T_s(t, \eta_\alpha)$ 取模极大值, 可得

$$P(t, \eta_\alpha) = \max\{|T_s(t, \eta_\alpha)|\} \quad (15)$$

然后, 根据式(16)将所得的位置转换为对应的瞬时频率并将它们按时间顺序连成光滑的曲线, 即为所识别的瞬时频率曲线, 其表达式为

$$\text{IF}(t, \eta_\alpha) = \frac{P(t, \eta_\alpha) f_s}{2n} \quad (16)$$

式中 f_s 为采样频率。

2 数值算例验证

2.1 单分量调幅调频信号

考虑单分量调幅调频信号如式(17)所示:

$$x(t) = [3 + \cos(\pi t)] \cos[12\pi t + 2\sin(1.5\pi t)] \quad (17)$$

该信号的采样频率为 100 Hz, 采样时间设为 6 s。对信号 $x(t)$ 添加 10 dB 的高斯白噪声, 其时域波形如图 1(a) 所示。首先, 对信号进行 STFT 变换, 结果如图 1(b) 所示。然后, 再对 STFT 提取的频带分别进行 ILMSSST 及 LMSST 变换, 结果如图 2(a) 和 (b) 所示。

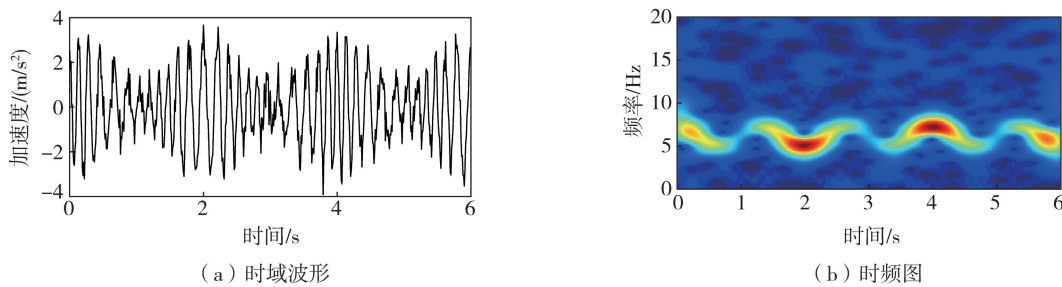


图 1 $x(t)$ 的时域波形及时频图

Fig. 1 Time domain waveform and time-frequency diagram of $x(t)$

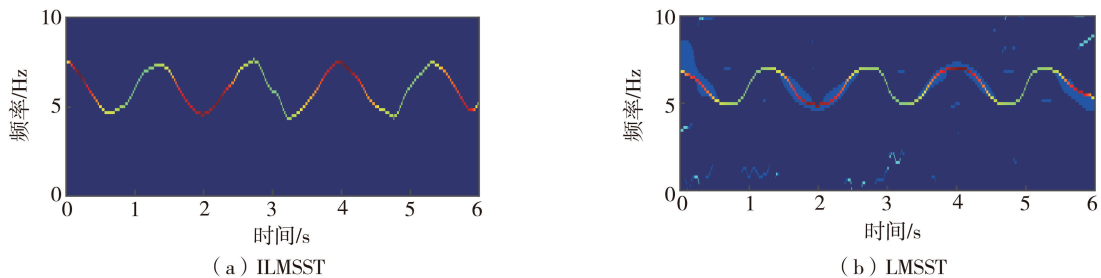


图 2 $x(t)$ 的瞬时频带识别结果

Fig. 2 The IF band identification results of $x(t)$

由图 2(b) 可知, LMSST 识别的频带外存在干扰点。此外, LMSST 识别的频带还存在能量发散的现象。相对而言, ILMSSST 识别的频带不仅不存在干扰点, 而且其时频能量聚集性也优于 LMSST。为进一步对比瞬时频率识别结果, 采用时频系数模极大值法对上述 2 种方法得到的频带进行瞬时频率曲线的提取, 结果如

图3(a)所示。其中,蓝色实线为理论值,红色菱形虚线为LMSST识别结果,黑色星形实线为ILMSST识别结果。为方便对比,对图3(a)进行局部放大,结果如图3(b)所示。由图3(b)可知,相比于LMSST,ILMSST识别的瞬时频率与理论值更加接近,其识别精度更佳。

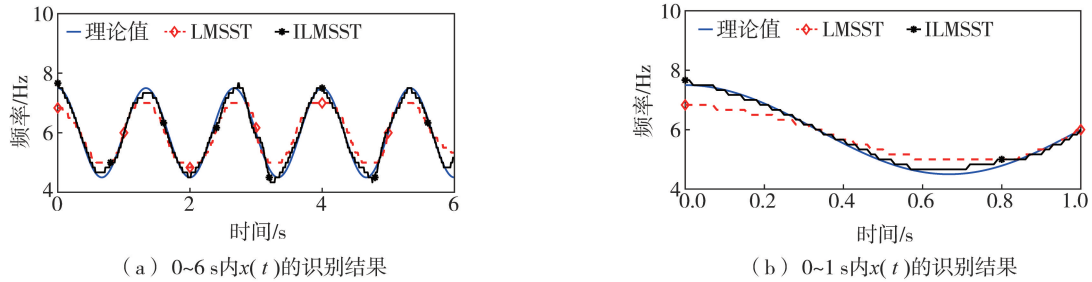


图3 $x(t)$ 的瞬时频率识别结果

Fig. 3 The IF identification results of $x(t)$

为更清楚地比较瞬时频率识别精度,以瞬时频率在整个时间历程内的均方根作为精度指标(index of accuracy, IA)来量化瞬时频率的识别精度,其表达式为

$$IA = \frac{\sqrt{\int_0^T [f_d(t) - f_e(t)]^2}}{\sqrt{\int_0^T [f_e(t)]^2}} \quad (18)$$

式中: $f_d(t)$ 为瞬时频率识别值; $f_e(t)$ 为瞬时频率理论值。

IA 值越小,说明识别值与理论值越接近,即精度更高。

2 种方法识别 $x(t)$ 的瞬时频率精度指标如表 1 所示。由表可知,相较于 LMSST,ILMSST 的 IA 值最小,这再一次说明了 ILMSST 具有更好的瞬时频率识别精度。

表 1 $x(t)$ 的瞬时频率识别精度指标

Table 1 Index of accuracy of IF identification of $x(t)$			%
方法	LMSST	ILMSST	
IA	6.11	2.35	

2.2 多分量调幅调频信号

考虑如式(19)所示的多分量调幅调频信号。该信号的采样频率为 100 Hz,采样时间设为 6 s。对信号 $y(t)$ 添加 10 dB 的高斯白噪声,其时域波形如图 4(a)所示。首先,对信号进行 STFT 变换,结果如图 4(b)所示。然后,再对 STFT 提取的频带分别进行 ILMSST 及 LMSST 变换,结果如图 5(a)和(b)所示。

$$y(t) = [2 + \cos(\pi t)] \cos[16\pi t + 2\sin(1.5\pi t)] + [3 + \cos(\pi t)] \cos[40\pi t + 2\cos(1.5\pi t)] \quad (19)$$

式中: $y_1(t) = [2 + \cos(\pi t)] \cos[16\pi t + 2\sin(1.5\pi t)]$; $y_2(t) = [3 + \cos(\pi t)] \cos[40\pi t + 2\cos(1.5\pi t)]$ 。

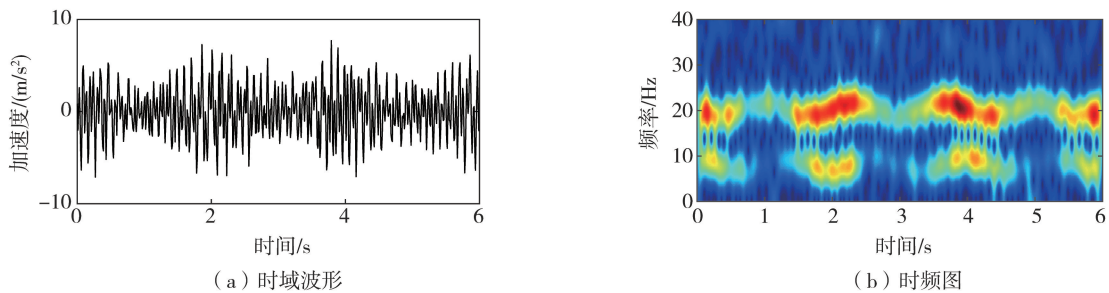


图 4 $y(t)$ 的时域波形及时频图

Fig. 4 Time domain waveform and time-frequency diagram of $y(t)$

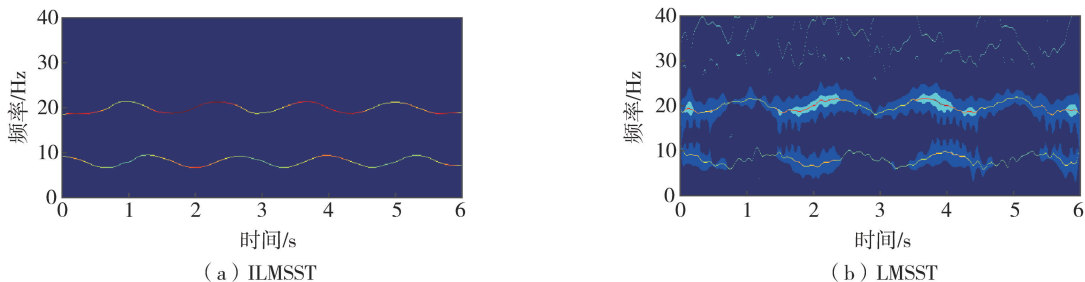


图 5 $y(t)$ 的瞬时频带识别结果

Fig. 5 The IF band identification results of $y(t)$

由图 5(b)可知,LMSST 识别的频带外存在干扰点。此外,LMSST 识别的频带还存在能量发散的现象。相对而言,ILMSST 识别的频带不仅不存在干扰点,而且其时频能量聚集性也优于 LMSST。为进一步对比瞬时频率识别结果,采用时频系数模极大值法对上述 2 种方法得到的频带进行瞬时频率曲线的提取,结果如图 6(a)所示。为方便对比,对图 6(a)进行局部放大,结果如图 6(b)和(c)所示。由图 6(b)和(c)可知,相比于 LMSST,ILMSST 识别的瞬时频率与理论值更加接近,其识别精度更佳。

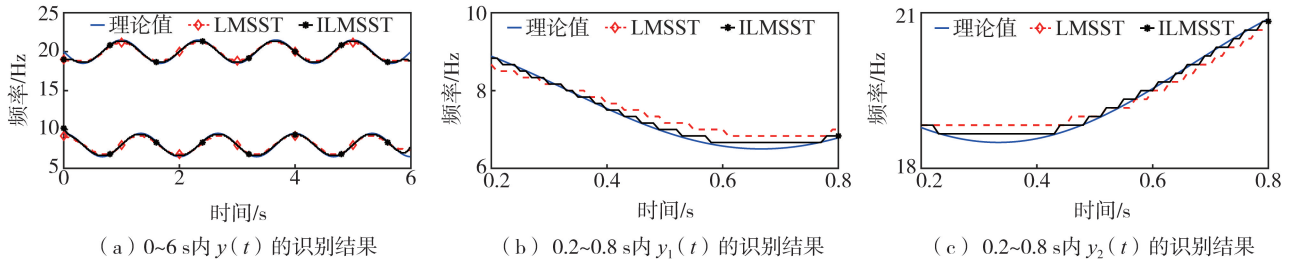


图 6 $y(t)$ 的瞬时频率识别结果

Fig. 6 The IF identification results of $y(t)$

为更好地对比 2 种方法的瞬时频率识别精度,仍然采用 2.1 节中的 IA 值进行比对,结果如表 2 所示。其中,IA₁和 IA₂分别为 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 的瞬时频率精度指标。由表 2 可知,相较于 LMSST、ILMSST 的 IA 值最小,这再一次说明了 ILMSST 具有更好的瞬时频率识别精度。

表 2 $y(t)$ 的瞬时频率识别精度指标

Table 2 Index of accuracy of IF identification of $y(t)$		%
方法	LMSST	ILMSST
IA ₁	6.62	2.41
IA ₂	1.65	1.09

3 试验验证

3.1 7 层钢筋混凝土剪力墙振动台试验

为进一步验证 ILMSST 方法的有效性,本节对 PANAGIOTOU 等^[20-21]设计完成的 7 层钢筋混凝土剪力墙振动台试验数据进行了分析。为获得剪力墙振动台结构的加速度响应,对整个结构布置了密集的传感器,其中包括 139 个单轴加速度传感器,88 个位移传感器和 139 个应变仪。传感器的采样频率设定为 240 Hz。更多关于该试验的细节可参考文献[20-21]。在试验过程中,他们对该振动台试验结构施加了 4 次不同的地震激励。矩震级为 6.7 级地震波激励的时域波形图如图 7 所示,该地震波激励下 7 层剪力墙振动台结构顶层的加速度响应信号如图 8 所示。

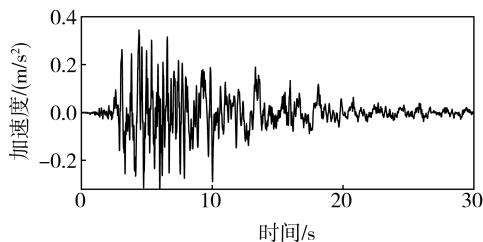


图 7 地震波时域波形

Fig. 7 Time domain waveform of the earthquake ground motion

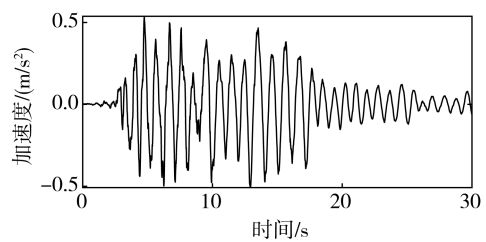


图 8 剪力墙结构的加速度响应

Fig. 8 Acceleration response of the shear wall

对图 8 所示的加速度响应信号进行 STFT 变换,结果如图 9(a)所示。然后,对 STFT 变换后的结果分别进行 ILSST 和 LMSST 变换,可得瞬时频带如图 9(b)和(c)所示。由图 9(b)和(c)可知,相对 LMSST 和 ILSST 识别的频带更加光滑,因此它具有较好的时频聚集性。为进一步对比瞬时频率的识别精度,采用时频系数模极大值法对 2 种方法识别的瞬时频带进行瞬时频率曲线的提取,结果如图 10(a)所示。为方便对比,对图 10(a)进行局部放大,其结果如图 10(b)所示。由图 10(b)可知,相比 LMSST,ILMSST 识别的瞬时频率曲线波动较小,因此其识别精度相对较好。

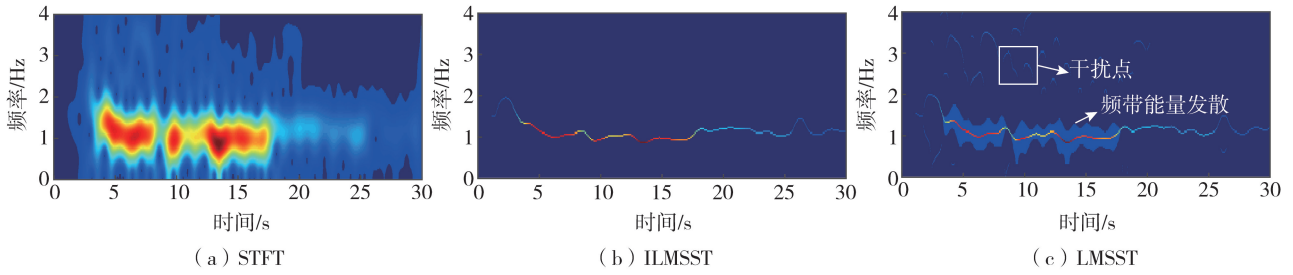


图9 剪力墙振动台结构响应信号的瞬时频带识别结果

Fig. 9 The IF band identification results of the structural response from the shear wall vibration

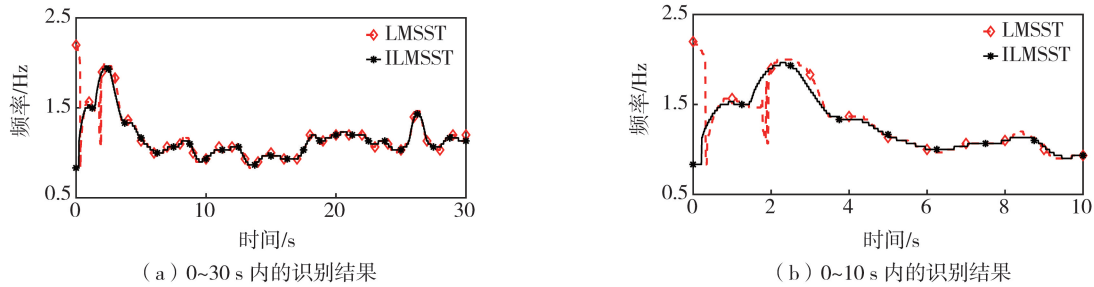


图10 剪力墙结构响应信号的瞬时频率识别结果

Fig. 10 The IF identification results of the structural response from the shear wall

3.2 时变拉索试验

本节采用文献[22]中的时变拉索结构试验数据来验证本文所提方法的有效性及准确性。时变拉索结构的试验装置如图11所示。该试验通过连续变更拉索的拉力来改变其刚度,从而实现结构的时变特性。

试验采用的拉索为一根 $7\Phi 5$ 钢绞线,索长为 4.55 m,弹性模量 $E=1.95\times 10^5$ MPa,截面积为 1.374×10^{-4} m^2 ,线密度为 1.1 kg/m。拉索的一端采用反力架锚固,另一端通过电液伺服加载系统(MTS)的作动器施加拉力,而索的中部则放置德国 HBM 公司生产的竖向加速度传感器并用于采集加速度响应。激励设备采用 LC-03 冲击力锤,信号的采集工作则通过德国 HBM 公司生产的动态信号采集仪来进行。试验开始前,对拉索施加 22 kN 的预拉力,然后通过 MTS 作动器来改变索的拉力,使其刚度随时间而发生变化。在改变索力的同时采用冲击力锤敲击拉索并通过动态信号采集系统和加速度传感器采集拉索的竖向加速度响应。

设定采集仪的采样频率为 600 Hz,采样时间为 6 s。拉索的拉力正弦变化及采集的加速度响应数据如图12和图13所示。对图13所采集到的加速度响应进行 STFT 变换,结果如图14(a)所示。然后,对 STFT 变换后的时频图分别进行 ILMSSST 和 LMSST 变换,结果如图14(b)和(c)所示。由图14(b)和(c)可知,LMSST 识别的频带存在能量发散现象,而 ILMSSST 则摆脱了这个限制。因此,ILMSSST 的时频聚集性优于 LMSST。

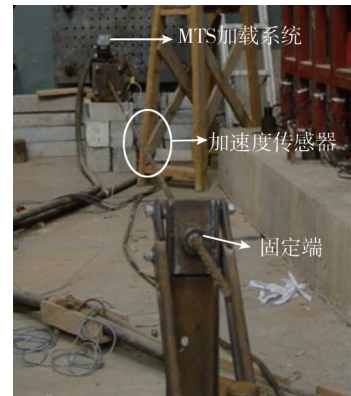


图11 拉索结构试验装置

Fig. 11 Test setup of cable structure

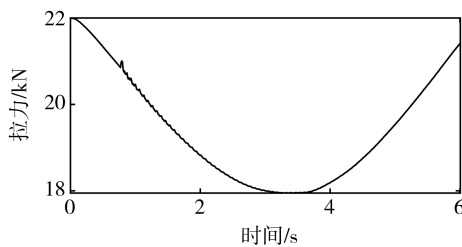


图12 实测正弦变化拉力

Fig. 12 Measured cable tension force with sinusoidally variation

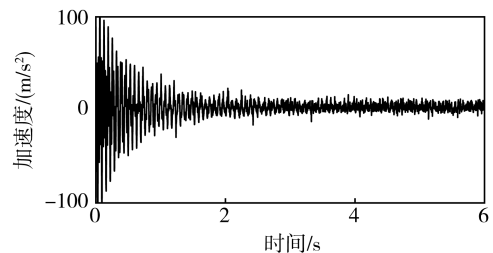


图13 拉索加速度响应

Fig. 13 Acceleration response of the cable

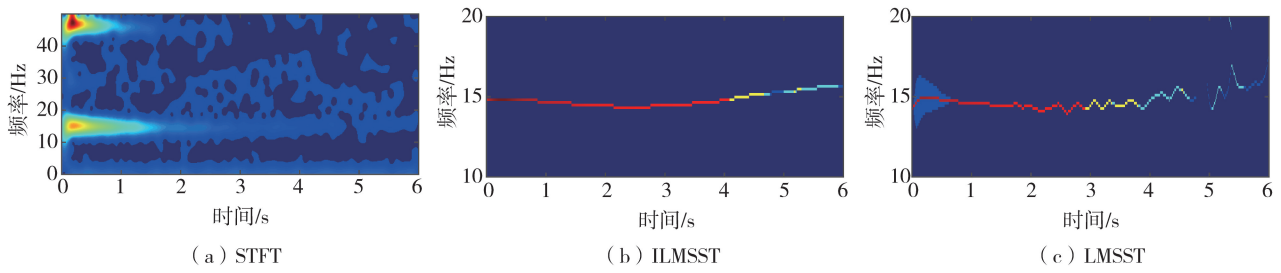


图 14 拉索响应信号的瞬时频带识别结果

Fig. 14 The IF band identification results of the response from the cable

为进一步对比瞬时频率的识别精度,采用时频系数模极大值法对 2 种方法得到的频带进行瞬时频率曲线的提取,结果如图 15 所示。由图可知,相对于 LMSST 和 ILMSSST 的瞬时频率识别结果更加接近理论值,因此 ILMSSST 的瞬时频率识别精度更佳。此外,为量化 2 种方法的瞬时频率识别精度,采用 2.1 节中的 IA 值进行对比,结果如表 3 所示。由表可知,与 LMSST 相比,ILMSSST 的 IA 值较小,因此 ILMSSST 具有更佳的瞬时频率识别精度。需要指出的是,ILMSSST 仅需时变结构的响应信号即可有效估计瞬时频率,因此它具备识别环境激励下实际结构瞬时频率的潜力,但是其在大尺寸结构的有效性还有待进一步验证。

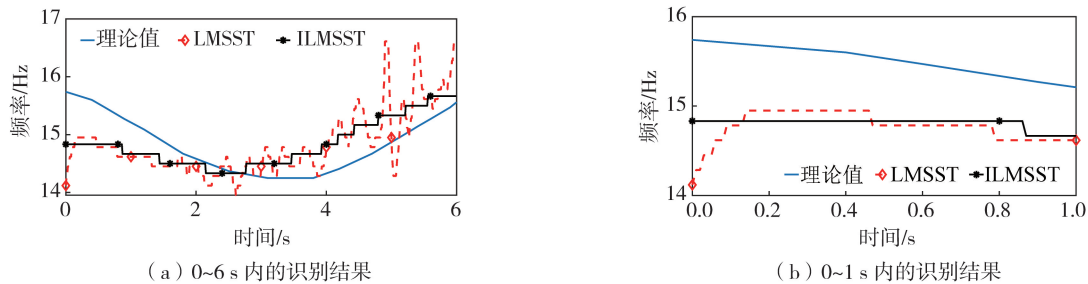


图 15 拉索响应信号的瞬时频率识别结果

Fig. 15 The IF identification results of the response from the cable extracted by various methods

表 3 拉索响应信号的瞬时频率识别精度指标 IA

Table 3 The IA of IF identification of the response from the cable %		
方法	LMSST	ILMSSST
IA	4.78	3.25

4 结论

提出基于 ILMSSST 的时变结构瞬时频率识别方法。以 2 组数值算例、一个 7 层钢筋混凝土剪力墙振动台试验以及一个时变拉索试验验证所提方法的有效性及其可行性,得到以下结论:

- 1) ILMSSST 通过仅保留估算瞬时频带内时频系数的方式不但消除了频带外干扰点,而且解决了瞬时频带能量发散这一问题。
- 2) ILMSSST 有效识别了 7 层钢筋混凝土剪力墙振动台结构和时变拉索结构的瞬时频率且其识别精度优于现有的 LMSST 方法。
- 3) ILMSSST 虽然具备识别环境激励下实际结构瞬时频率的潜力,但是其在大尺寸结构的有效性还有待进一步验证。

参考文献:

[1] WANG Z C, REN W X, CHEN G D. Time-varying linear and nonlinear structural identification with analytical mode decomposition and Hilbert transform[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(12): 1-5.

[2] 唐蕾, 黄天立, 万熹. 基于变分模态分解和同步提取变换识别时变结构瞬时频率[J]. 振动与冲击, 2022, 41(6): 197-205.

TANG Lei, HUANG Tianli, WAN Xi. Instantaneous frequency identification of time-varying structures using variational mode decomposition and synchroextracting transform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(6): 197-205. (in Chinese)

- [3] 裴强, 王丽, 全厚辉. 钢筋混凝土框架结构参数时变特性的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(1): 40-46.
PEI Qiang, WANG Li, QUAN Houhui. Study on characteristics of time-varying parameters of reinforced concrete frame structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(1): 40-46. (in Chinese)
- [4] 万熹, 黄天立, 陈华鹏. 环境激励下基于改进经验小波变换的土木工程结构模态参数识别[J]. 振动工程学报, 2020, 33(2): 219-230.
WAN Xi, HUANG Tianli, CHEN Huapeng. Improved empirical wavelet transform for modal parameters identification of civil engineering structures under ambient excitations[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(2): 219-230. (in Chinese)
- [5] 陈淮, 万拥军, 孙增寿. 基于第二代小波变换的结构损伤识别[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(1): 24-28.
CHEN Huai, WAN Yongjun, SUN Zengshou. Research of structural damage identification based on the second generation wavelet transform[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(1): 24-28. (in Chinese)
- [6] 张宁, 张福学, 张增平. 基于小波变换的无驱动结构微机械陀螺信号自旋频率的提取[J]. 传感技术学报, 2014, 27(7): 876-880.
ZHANG Ning, ZHANG Fuxue, ZHANG Zengping. Spin frequency extraction of non-driven micro-machined gyroscope signal via wavelet transform[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(7): 876-880. (in Chinese)
- [7] KIJEWski T, KAREEM A. Wavelet transforms for system identification in civil engineering[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2003, 18(5): 339-355.
- [8] DAUBECHIES I, LU J F, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2): 243-261.
- [9] WANG Z C, REN W X, LIU J L. A synchrosqueezed wavelet transform enhanced by extended analytical mode decomposition method for dynamic signal reconstruction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(22): 6016-6028.
- [10] 王超, 朱宏平, 艾德米. 基于同步挤压小波变换的结构时变参数识别[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 46-50.
WANG Chao, ZHU Hongping, AI Demi. Structural time-varying parameter identification based on synchrosqueezed wavelet transform[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(11): 46-50. (in Chinese)
- [11] LIU J L, ZHENG J Y, WEI X J, et al. A combined method for instantaneous frequency identification in low frequency structures[J]. Engineering Structures, 2019, 194: 370-383.
- [12] OBERLIN T, MEIGNEN S, PERRIER V. Second-order synchrosqueezing transform or invertible reassignment? Towards ideal time-frequency representations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(5): 1335-1344.
- [13] BEHERA R, MEIGNEN S, OBERLIN T. Theoretical analysis of the second-order synchrosqueezing transform[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2018, 45(2): 379-404.
- [14] PHAM D H, MEIGNEN S. High-order synchrosqueezing transform for multicomponent signals analysis: With an application to gravitational-wave signal[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(12): 3168-3178.
- [15] YU G, YU M J, XU C Y. Synchroextracting transform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8042-8054.
- [16] XIN Y, HAO H, LI J. Time-varying system identification by enhanced empirical wavelet transform based on synchroextracting transform[J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109313.
- [17] 沈中祥, 袁平平, 刘义. ISEGST 在非线形 RC 结构瞬时频率识别中的应用[J]. 振动与冲击, 2021, 40(22): 283-288.
SHEN Zhongxiang, YUAN Pingping, LIU Yi. Application of ISEGST in instantaneous frequency identification of nonlinear RC structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(22): 283-288. (in Chinese)
- [18] 李志农, 胡志峰, 毛清华, 等. 非线性调频模态分解-同步提取变换方法及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 兵工学报, 2021, 42(6): 1324-1330.
LI Zhinong, HU Zhifeng, MAO Qinghua, et al. Variational nonlinear chirp mode decomposition-synchroextracting transform method and its application in fault diagnosis of rolling bearing[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(6): 1324-1330. (in Chinese)
- [19] YU G, WANG Z H, ZHAO P, et al. Local maximum synchrosqueezing transform: An energy-concentrated time-frequency analysis tool[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 537-552.
- [20] PANAGIOTOU M, RESTREPO J I. Displacement-based method of analysis for regular reinforced-concrete wall buildings: Application to a full-scale 7-story building slice tested at UC-San Diego[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(6): 677-690.
- [21] PANAGIOTOU M, RESTREPO J I, CONTE J P. Shake-table test of a full-scale 7-story building slice. phase I: Rectangular wall[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(6): 691-704.
- [22] WANG C, REN W X, WANG Z C, et al. Instantaneous frequency identification of time-varying structures by continuous wavelet transform[J]. Engineering Structures, 2013, 52(9): 17-25.