

文章编号:1674-8190(2019)02-263-07

基于时频切片分解的时变系统参数识别

陈淇, 史治宇, 张杰

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘要: 系统参数识别分为时不变系统参数识别和时变系统参数识别两大研究方向, 其中时不变系统参数识别的研究已趋于成熟, 而时变系统参数识别的研究则仍然处于起步阶段。对于多自由度时变结构, 提出一种基于时频切片分解的时变系统参数识别方法。该方法采集结构的振动位移响应, 根据时频分解计算得到响应在整个时频段内的时频能量分布图; 依据结构的时频分布特性, 选择多个时频切片窗分解响应信号, 再对分解出的信号分别进行逆变换计算完成时域上的信号重构; 重构出来的信号对应于结构的各阶模态位移响应信号, 利用 Hilbert 变换提取信号瞬时频率, 从而识别出结构各阶频率。通过一个三自由度的弹簧阻尼质量仿真实验, 验证了该方法具有良好的识别精度和工程实用价值。

关键词: 时频切片分解; 参数识别; Hilbert 变换; 切片小波基; 时变系统

中图分类号: O321; TB123

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.02.017

Modal Parameter Identification of Time-varying System Based on Time Frequency Slice Decomposition

Chen Qi, Shi Zhiyu, Zhang Jie

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: System parameter identification can be divided into two research directions: time-invariant system parameter identification and time-varying system parameter identification. The research on time-invariant system parameter identification has become mature, while the research on time-varying system parameter identification is still in its infancy. For multi-degree-of-freedom time-varying structures, a method for parameter identification based on time frequency slice decomposition is proposed. The first step of this method is to collect the displacement response of the structure, and then obtain the time-frequency energy distribution of the response in the whole time-frequency band. According to the time-frequency distribution characteristics of the structure, multiple time-frequency window signals are sliced out, and the inverse transform of FSWT is performed to reconstruct the signals in time domain. The reconstructed signal corresponds to each order modal displacement response signal of the structure. The instantaneous frequency of the signal is extracted by Hilbert transform, and the modal frequencies of each order of the structure are identified. According to a simulation experiment of the three-degree-of-freedom mass spring damping system, the method is proved to have good identification accuracy and practical engineering value.

Key words: time frequency slice decomposition; modal parameter identification; Hilbert transform; slice wavelet basis; time-varying system

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-01-18

通信作者: 史治宇, zyshi@nuaa.edu.cn

引用格式: 陈淇, 史治宇, 张杰. 基于时频切片分解的时变系统参数识别[J]. 航空工程进展, 2019, 10(2): 263-269.

Chen Qi, Shi Zhiyu, Zhang Jie. Modal parameter identification of time-varying system based on time frequency slice decomposition[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(2): 263-269. (in Chinese)

0 引言

系统的时变问题指的是,因外部环境影响或自身结构特性,系统的动力学参数随时间变化的问题。随着人类社会的进步和科学技术的发展,工程结构的时变问题在包括土木工程、机械设计、航空航天等多个领域日渐突出。例如,高超声速飞行器在高速飞行过程中,因自身的气动布局和气动加热等问题导致的颤振现象^[1];汽车经过桥梁时,因为附加质量导致的车桥系统集中质量随汽车位置而改变;人工智能机械手臂在旋转过程中,因结构本身的改变,而导致的空间质量分布和刚度分布的改变等。因此,时变系统参数识别方法的研究有着重要的学术价值和工程价值。

为了寻找到一种可靠的时变系统参数识别方法,国内外学者做过诸多努力。20 世纪 80 年代, A. Grossman 等^[2]为了研究地震波的时频特性首次提出了小波的概念;而后, W. J. Staszewski 等^[3]基于小波的各种改进方法被用于动力学参数识别领域。许鑫等^[4]在连续小波积分的基础上,把振动微分方程转化为以加速度项表达的小波变换式,并提出了基于加速度响应的连续小波变换的时变系统参数识别方法。N. E. Huang 等^[5-6]提出了经验模态分解法(即 EMD 法),该方法与 M. Feldman^[7-8]的 Hilbert 变换相结合,便是著名的 Hilbert-Huang 变换(HHT 变换),可用以识别时变系统参数。1997 年, K. Liu^[9]在状态子空间模型的基础上,引入了自由响应时变系统参数识别,并于两年后将该方法推广至受迫响应下的时变系统参数识别。状态空间的方法后续还经历了诸多发展^[10],例如庞世伟等^[11-12]引入的投影估计法、M. Raffy 等^[13]对渐进性统计误差的估计等。这些改进的方法都对状态空间方法的研究与发展做出了重要贡献。

上述识别方法在不同层面上均有一定的局限性。因为涉及小波基函数的选取,所以小波的方法需要有一定的信号先验信息,是非自适应的。而 HHT 变换尽管对所有信号都具有自适应性,但其本身是一种经验式的信号分解方法,存在模态混叠、缺乏正交性证明等缺陷^[14]。状态空间的方法涉及矩阵计算,存在计算量大等问题。

在吸取了短时傅里叶变换和连续小波变换的优点下, Yan Zhonghong 等^[15]提出了频率切片小波变换的方法;钟先友等^[16-17]将其用于处理爆破分析和故障诊断等信号分析方面的问题。本文则吸取切片小波基可在任意时频区间对信号进行切片的优点,提出基于时频切片分解的时变系统参数识别方法,用以识别时变系统随时间而变化的模态参数。

1 理论介绍

1.1 时变振动系统基本理论

假设系统为 n 自由度的时变系统,在第 k 个自由度上受到脉冲激励作用,则系统的振动微分方程为^[18]

$$\mathbf{M}(t) \ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}(t) \dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}(t) \mathbf{X}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}(t)$ 为系统所受到的第 k 个自由度上的脉冲激励; $\mathbf{M}(t)$ 、 $\mathbf{C}(t)$ 和 $\mathbf{K}(t)$ 分别为系统质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵,它们的数值都随着时间而改变。

设阻尼为比例阻尼,则可引入 $\mathbf{X}(t) = \mathbf{\Phi}(t) \mathbf{q}(t)$ 对系统进行模态解耦, $\mathbf{\Phi}(t) = [\phi_1(t), \phi_2(t), \dots, \phi_n(t)]$, 为固有阵型矩阵; $\mathbf{q}(t) = [q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]^T$, 为模态坐标矩阵。解耦结果为

$$\ddot{\mathbf{q}}_j(t) + 2\zeta_j(t)\omega_j(t)\dot{\mathbf{q}}_j(t) + \omega_j^2(t)\mathbf{q}_j(t) = \frac{\mathbf{\Phi}_j^T(t)\mathbf{F}(t)}{m_j(t)} \quad (2)$$

式中: $\omega_j(t) = \sqrt{\frac{k_j(t)}{m_j(t)}}$, 为结构第 j 阶阻尼频率,随时间而变化; $\zeta_j(t) = \frac{c_j(t)}{2\sqrt{k_j(t)m_j(t)}}$, 为结构第 j 阶阻尼比,随时间而变化。

在第 k 个自由度上施加脉冲激励,则 $\mathbf{F}(t) = f_0\delta(t)$, $\delta(t) = \begin{cases} 1 & (t=0) \\ 0 & (t>0) \end{cases}$ 。解得:

$$\mathbf{q}_j(t) = \frac{f_0\phi_{kj}(t)}{m_j(t)\omega_{dj}(t)} e^{-\zeta_j(t)\omega_{dj}(t)t} \cos\left[\omega_{dj}(t)t + \frac{\pi}{2}\right] \quad (3)$$

根据模态叠加法,第 p 自由度上的系统位移响应 $x_p(t)$ 为各阶模态位移响应 $x_{pj}(t)$ 的叠加,即

$$x_p(t) = \sum_{j=1}^n \phi_{pj}(t) \mathbf{q}_j(t) = \sum_{j=1}^n x_{pj}(t) \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 x_{pj}(t) &= \phi_{pj}(t)q_j(t) \\
 &= B_{pj,k}(t)e^{-\xi_j(t)\omega_j(t)t} \times \\
 &\quad \cos\left[\omega_{dj}(t)t + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k}(t)\right] \quad (5)
 \end{aligned}$$

1.2 切片小波基及其相关理论

对于任意信号 $f(t)$, 假设其傅里叶变换结果为 $\hat{f}(\omega)$, 即:

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{i\omega t} dt \quad (6)$$

那么, 可以利用切片小波基函数对 $f(t)$ 进行时频变换^[8], 变换结果为

$$W(t, \omega, \lambda, \sigma) = \frac{1}{2\pi\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(u) \hat{p}^H\left(\frac{u-\omega}{\sigma}\right) e^{iut} du \quad (7)$$

式中: λ 为能量放大系数, 可选为 1; σ 为变换尺度且 $\sigma \neq 0$; $p(t)$ 为切片小波基函数; $\hat{p}(\omega)$ 为切片小波基函数的傅里叶变换式; $\hat{p}^H(\omega)$ 则为 $\hat{p}(\omega)$ 的共轭式。

一般可选取高斯函数为切片小波基函数, 即 $\hat{p}(\omega) = e^{-\frac{1}{2}\omega^2}$ 。

取 $\lambda = 1$, 尺度因子 σ 表征频率切片函数的伸缩尺度, 设 $\sigma = \frac{\omega}{k}$ ($k > 0$), 则变换表达式可改写为

$$W(t, \omega, k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(u) \hat{p}^H\left(k \frac{u-\omega}{\omega}\right) e^{iut} du \quad (8)$$

式中: k 为与 ω, u 独立的变量, 定义为时频分辨率, 用以表征时频切片窗的时频伸缩尺度。

根据海森堡测不准原理, 时频切片窗口的频率边长和时间边长的乘积为一常数, 相对精准的时间分辨率将以牺牲频率分辨率为代价, 相对精准的频率分辨率将以牺牲时间分辨率为代价, 而时频分辨率系数 k 的数值将决定时频分解对频率或时间的敏感度。

对于时频分解的结果, 可利用逆变换进行信号还原, 得到原信号在任意时间区间和任意频率区间内的重构信号, 对于时间切片区间 (t_1, t_2) 和频率切片区间 (ω_1, ω_2) , 重构信号的表达式为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi\lambda} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \int_{t_1}^{t_2} W(\tau, \omega, \lambda, \sigma) e^{i\omega(t-\tau)} d\tau d\omega \quad (9)$$

综上, 利用切片小波基可在任意时频区间对信号进行切片和其逆变换重构还原快速便捷的特点, 本文引入针对时变系统的时频切片分解参数识别方法。

1.3 基于时频切片的时变系统参数识别

由时变系统基本理论可知, n 自由度的时变系统脉冲激励下第 k 自由度上的响应激励可表示为 n 个单模态信号的线性叠加, 而这 n 个单模态信号中分别包含了系统的 n 阶模态信息。因此, 时变响应信号的识别是解决时变问题的关键。传统的 EMD 方法利用经验模态分解算法处理响应信号, 经验式地将响应信号分解为多个本征模态函数进行识别, 尽管有较好的自适应性, 却存在本征模态函数正交性难以证明等问题。本文则引入时频切片分解的方法来解决响应信号的识别问题, 具体时频切片分解和后续识别过程如下:

对振动系统采集到的第 p 自由度上的时变位移响应 $x_p(t)$, 选择合适的切片小波进行整个时间域的时频分解, 可得到其时频分布能量图, 再根据信号的时频分布特性, 划分出 n 个时间频率区间, 接着依据这 n 个时间频率区间分别对位移响应 $x_p(t)$ 进行时频分解, 得到 n 个独立的时频分解后的信号, 分解出的这 n 个信号即为组成系统脉冲激励响应的 n 个单模态信号。

然后对这 n 个在时频域上表示的单模态信号分别进行逆变换重构。重构后得到 n 个单模态时域信号 $x'_{pj}(t)$, 可认为其为调频调幅信号, 即 $x'_{pj}(t) = D_{pj}(t) \cos[\theta_{pj}(t)]$, 则

$$\begin{aligned}
 x_p(t) &= \sum_{j=1}^n x'_{pj}(t) + r(t) \\
 &= \sum_{j=1}^n D_{pj}(t) \cos[\theta_{pj}(t)] + r(t) \quad (10)
 \end{aligned}$$

式中: $r(t)$ 为时频切片分解的残差项。

对比式(10)与式(4)~式(5)可知, 时频切片分解后的重构信号与脉冲激励响应中所包含的单模态信号具有类似的表达形式, 可认为重构信号是单阶模态位移响应 $x_{pj}(t)$ 经过时频切片分解之后再经过逆变换得到的, 故 $x'_{pj}(t) = x_{pj}(t)$ 。

利用 Hilbert 变换来识别重构信号 $x'_{pj}(t), x'_{pj}(t)$ 的解析信号 $z(t)$ 的表达式为

$$z(t) = x'_{pj}(t) + iH[x'_{pj}(t)] = A_{pj}(t)\cos[\varphi_{pj}(t)] \quad (11)$$

式中： $A_{pj}(t)$ 为解析信号的幅值函数； $\varphi_{pj}(t)$ 为解析信号的相位函数。

根据 Hilbert 变换的性质， $A_{pj}(t)$ 、 $\varphi_{pj}(t)$ 与重构信号 $x'_{pj}(t)$ 亦即 $x_{pj}(t)$ 的对应关系为^[19]

$$\begin{cases} A_{pj}(t) = B_{pj,k}(t)e^{-\zeta_j(t)\omega_j(t)t} \\ \varphi_{pj}(t) = \omega_{dj}(t)t + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k}(t) \end{cases} \quad (12)$$

进一步可得：

$$\begin{cases} -\zeta_j\omega_j = \frac{d[\ln A_{pj}(t)]}{dt} \\ \omega_{dj} = \frac{d[\varphi_{pj}(t)]}{dt} \end{cases} \quad (13)$$

则解析信号幅值图 $\ln A_{pj}(t) - t$ 的斜率为单阶模态频率和阻尼比乘积的相反数 $-\zeta_j\omega_j$ ，解析信号相位图 $\varphi_{pj}(t) - t$ 的斜率为单阶模态阻尼率 ω_{dj} 。

基于时频切片分解的时变系统参数识别方法流程图如图 1 所示。

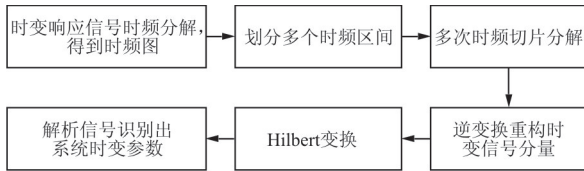


图 1 基于时频切片分解的时变系统参数识别方法流程图
Fig. 1 Flow chart of parameter identification method for time-varying system based on time-frequency slice decomposition

2 仿真分析

为了更直观地展现基于时频切片的时变系统参数识别方法，设计一个三自由度的弹簧—阻尼—质量块结构仿真实验，如图 2 所示。

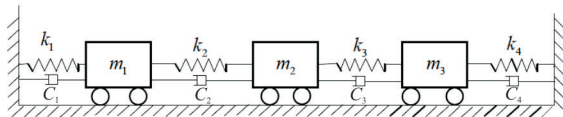


图 2 仿真结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simulation structure

初始位移、速度、加速皆为 0，结构初始参数为

$$\begin{cases} m_1 = 3 \text{ kg} \\ m_2 = 2 \text{ kg} \\ m_3 = 1 \text{ kg} \\ k_1 = 14\,000 \text{ N/m} \\ k_2 = 8\,000 \text{ N/m} \\ k_3 = 12\,000 \text{ N/m} \\ k_4 = 15\,000 \text{ N/m} \\ c_1 = 0.05 \text{ N} \cdot \text{s/m} \\ c_2 = 0.15 \text{ N} \cdot \text{s/m} \\ c_3 = 0.08 \text{ N} \cdot \text{s/m} \\ c_4 = 0.10 \text{ N} \cdot \text{s/m} \end{cases}$$

结构参数随时间而变化，变化规律为

$$\begin{cases} dm_1 = 0.5\cos(0.5\pi t) \\ dk_1 = 80\cos(0.5\pi t) + 500t \\ dk_2 = 600\cos(0.5\pi t) + 80t + 40t^2 \end{cases} \quad (14)$$

激励为脉冲激励，作用在质量块 3(m_3)上，使用 Newmark β 算法计算 10 s 内结构各个自由度上的位移响应。选取第二个自由度上的位移响应进行时频切片分解，得到时频分布图如图 3 所示。

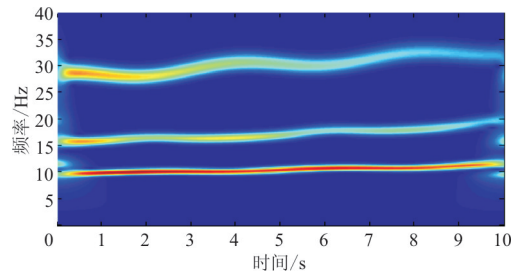


图 3 位移响应信号的时频分布能量图

Fig. 3 Time-frequency distribution energy diagram of displacement response signal

从图 3 可以看出：信号中主要包含了三阶能量分量，按照自然频率段 5~13、13~20、25~35 Hz 划分出三个频率切片段，时间切片长度皆为 10 s；这三个切片片段再次对响应信号分别进行三次时频切片分解，得到三段独立的时频信号，如果以时频图来展示这三段信号，将得到与图 3 类似的三幅各自频率段上的时频，故本文不再重复展示。

对于时频切片分解的结果，即三段独立的时频信号，分别通过逆变换算法进行信号重构，得到三段时域上的重构信号，也就是三阶单模态时域信号，如图 4 所示。

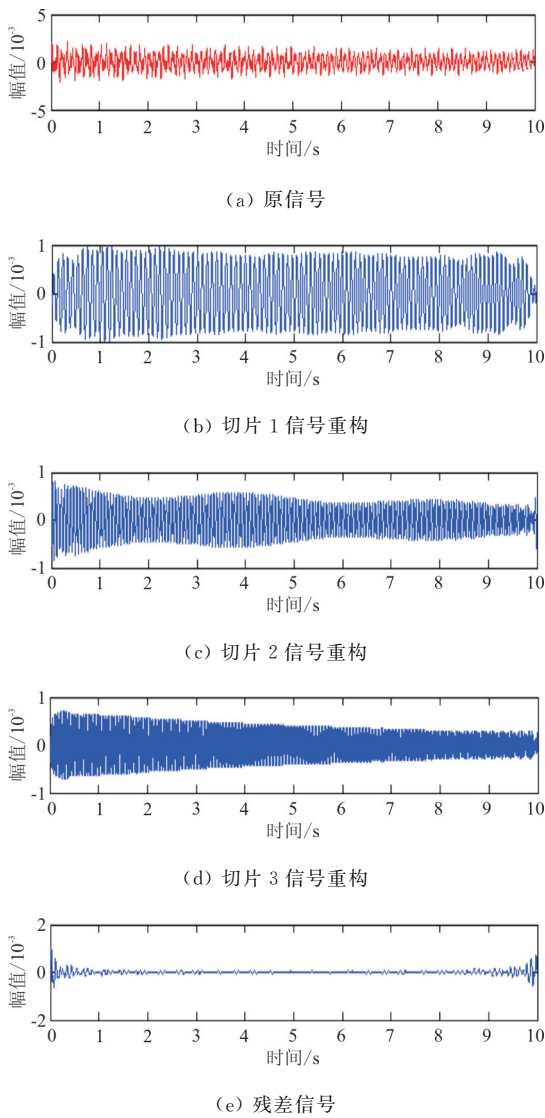


图 4 重构信号和残差信号时域图

Fig. 4 Time domain diagram of reconstructed signal and residual signal

从图 4 可以看出:响应能量在时间区域上分布较均匀,第一阶能量较强,第二、第三阶能量相对弱些,但和第一阶能量大致在数量级上不存在差异,表明本次仿真包括参数设置、激励点/响应点位置选取、激励方式的选择都较为合理,比较完整地激发了结构的三阶能量信息。残差信号为原信号减去重构分量信号所得。

对于重构的分量信号,依次进行 Hilbert 变换识别系统各个时间上的阻尼频率,以圆频率形式表示,并和理论计算的阻尼频率相比较,如图 5~图 7 所示。

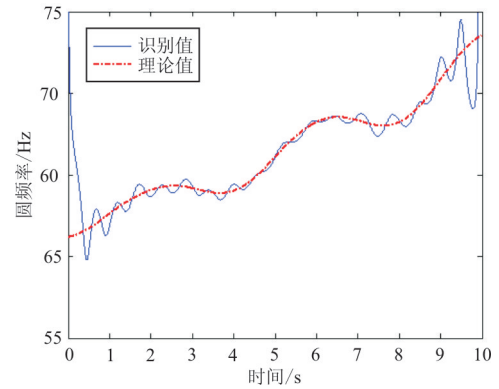


图 5 第一阶阻尼频率识别值和理论值对比图

Fig. 5 Comparison between identification value and theoretical value of the first-order damped frequency

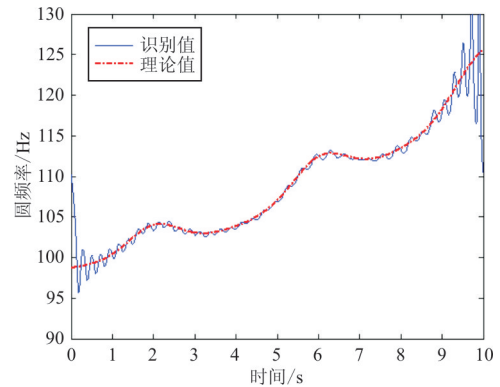


图 6 第二阶阻尼频率识别值和理论值对比图

Fig. 6 Comparison between identification value and theoretical value of the second-order damped frequency

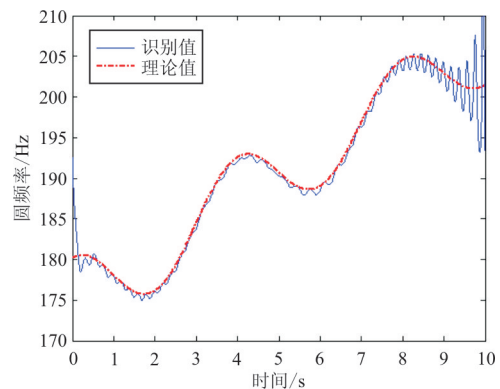


图 7 第三阶阻尼频率识别值和理论值对比图

Fig. 7 Comparison between identification value and theoretical value of the third-order damped frequency

从图 5~图 7 可以看出:除了无法避免的边界效应外,识别出的三阶阻尼频率和理论三阶阻尼频率随时间变换趋势一致,数值基本重合。

为了进一步展示识别误差,使用平均相对百分比误差 MAPE,计算公式为

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} \left| \frac{f_i - \tilde{f}_i}{f_i} \right| \times 100\% \quad (14)$$

式中: N_L 为用于计算误差的数据点总数; f_i 为第 i 个数据点的理论值; \tilde{f}_i 为第 i 个数据点的识别值。

本文识别出的一阶、二阶和三阶模态阻尼比的 MAPE 分别为 1.080%、0.740% 和 0.043%。考虑到不可避免的边界效应造成的误差在 MAPE 计算中的占比并不小,因此该识别方法在大部分时间域中的误差水平要比 MAPE 展示的误差水平还要低得多。可以认为基于时频切片分解的时变系统参数识别方法拥有非常好的识别精度和实用价值。

3 结 论

(1) 基于时频切片分解的时变系统参数识别方法可以将多自由度时变系统的响应信号进行切片分解,将原本的位移响应信号分解为多个单模态信号。再经过逆变换完成时域上的重构,对于重构后的各阶信号,通过 Hilbert 变换提取信号瞬时频率,从而识别出时变结构的各阶频率。

(2) 该方法时频切片分解的逆变换算法不依赖于切片小波基的选取,使得信号逆变换非常方便快捷,相较于传统的小波方法,具有计算效率高的优点。

(3) 尽管信号经过多次切片小波分解,但是每次切片分解和重构过程都是独立进行的,各阶误差不会相互影响,故抗噪能力强。

(4) 端点处的误差是小波类方法通有的端点效应造成的,可以通过延长采样时间,让端点效应产生在一个不关心的时间区域中来解决。

(5) 仿真算例展示了时频切片分解的时变系统参数识别方法的具体步骤和效果,验证了其可行性,表明其识别精度高。

参考文献

- [1] 杨超, 许赞, 谢长川. 高超声速飞行器气动弹性力学研究综述[J]. 航空学报, 2010, 31(1): 1-11.
Yang Chao, Xu Yun, Xie Changchuan. Review of studies on aeroelasticity of hypersonic vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 1-11. (in Chinese)
- [2] Grossman A, Morlet J. Decomposition of hardy function into square integrable wavelets of constant shape[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1984, 15(4): 736-783.
- [3] Staszewski W J, Cooper J E. Flutter data analysis using the wavelet transform[C]. Proceedings of International Congress on MV2: New Advances in Modal Synthesis of Large Structures, Non-linear, Damped and Non-Deterministic Cases, Lyon, France, 1995: 549-561.
- [4] 许鑫, 史治宇, Wieslaw J Staszewski, 等. 基于加速度响应的连续小波变换的线性时变结构瞬时频率识别[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 166-171.
Xu Xin, Shi Zhiyu, Wieslaw J Staszewski, et al. Instantaneous frequencies identification of a linear time-varying structure using continuous wavelet transformation of free decay acceleration response[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 166-171. (in Chinese)
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]. Proceedings of the Royal Society of London-Series A, 1998, 454: 903-995.
- [6] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417-457.
- [7] Feldman M. Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform-I: free vibration analysis method FREEVIB[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1994, 8(2): 119-127.
- [8] Feldman M. Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform-II: forced vibration analysis method FORCEVIB[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1994, 8(3): 309-318.
- [9] Liu K. Identification of linear time-varying systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 206(4): 487-505.
- [10] Liu K. Extension of modal analysis to linear time-varying systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226(1): 149-167.
- [11] 庞世伟, 于开平, 邹经湘. 用于时变系统辨识的自由响应递推子空间方法[J]. 振动工程学报, 2005, 18(2): 233-237.
Pang Shiwei, Yu Kaiping, Zou Jingxiang. Time-varying system identification using recursive subspace method based on free response data[J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(2): 233-237. (in Chinese)
- [12] 庞世伟, 于开平, 邹经湘. 识别时变结构模态参数的改进子空间方法[J]. 应用力学学报, 2005, 22(2): 184-188.
Pang Shiwei, Yu Kaiping, Zou Jingxiang. Improved subspace method with application in linear time varying structural modal parameter identification[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(2): 184-188. (in Chinese)
- [13] Raffy M, Gontier C. Statistical asymptotic error on modal parameters in combined deterministic-stochastic identification algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(4): 714-735.
- [14] 雷亚国. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的机械故障诊断[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 71-77.
Lei Yaguo. Machinery fault diagnosis based on improved Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 47(5): 71-77. (in Chinese)
- [15] Yan Zhonghong, Ayaho Miyamoto, Jiang Zhongwei. Frequency slice wavelet transform for transient vibration response analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(5): 1474-1489.

- [16] 钟先友. 旋转机械故障诊断的时频分析方法及其应用研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
Zhong Xianyou. Time-frequency analysis method for fault diagnosis of rotating machinery and its application[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [17] 钟先友, 赵春华, 陈保家, 等. 基于形态自相关和时频切片分析的轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2014, 33(4): 11-16.
Zhong Xianyou, Zhao Chunhua, Chen Baojia, et al. Bearing fault diagnosis method based on morphological filtering and time-delayed autocorrelation and time-frequency slice analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(4): 11-16. (in Chinese)
- [18] 胡海岩, 孙久厚, 陈怀海. 机械振动与冲击[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
Hu Haiyan, Sun Jiuhou, Chen Huaihai. Mechanical vibration and shock [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [19] 钟佑明, 秦树人, 汤宝平. Hilbert-Huang 变换中的理论研究[J]. 振动与冲击, 2002, 21(4): 13-17.
Zhong Youming, Qin Shuren, Tang Baoping. Study on the theory of Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(4): 13-17. (in Chinese)

作者简介:

陈 淇(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:模态参数识别。

史治宇(1967—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:结构动力学与参数识别、声振耦合分析与控制、结构健康监测和损伤识别、有限元模型修正和动态载荷识别等。

张 杰(1988—),男,博士研究生。主要研究方向:动态信号分析和参数识别。

(编辑:马文静)

(上接第 240 页)

- Xu Yelin, Zhu Chunlin, Zhang Chong, et al. Simulation analysis and experimental study of titanium alloy milling[J]. Electrical and Mechanical Engineering, 2012, 28(4): 53-59. (in Chinese)
- [12] 王明海, 李世永, 王京刚, 等. 航空钛合金 Ti6Al4V 的三维铣削加工有限元仿真[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(7): 1036-1039.
Wang Minghai, Li Shiyong, Wang Jinggang, et al. Finite element simulation of three-dimensional milling machining of Ti6Al4V[J]. Mechanical Science and Technology, 2014, 33(7): 1036-1039. (in Chinese)
- [13] 姜彬. 高速面铣刀切削稳定性及其结构化设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008.
Jiang Bin. Study on cutting stability and structural design methods of high-speed surface milling cutters[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [14] 窦炜, 袁胜万, 何晓聪. 一种改进的螺旋齿铣刀立铣切削力计算方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 181-186, 207.
Dou Wei, Yuan Shengwan, He Xiacong. An improved calculation method for the cutting force of end milling cutters with spiral teeth[J]. Vibration and Impact, 2008, 37(10): 181-186, 207. (in Chinese)
- [15] 王明强, 朱永梅, 刘文欣. 有限元网格划分方法应用研究[J]. 机械设计与制造, 2004(1): 22-24.
Wang Mingqiang, Zhu Yongmei, Liu Wenxin. Study on the application of finite element mesh generation[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2004(1): 22-24. (in Chinese)

作者简介:

周 欣(1989—),男,博士研究生,讲师。主要研究方向:机械结构设计与 CAE 行为分析。

张宇琨(1990—),男,博士研究生。主要研究方向:现代设计方法与先进制造技术。

(编辑:赵毓梅)

(上接第 254 页)

- papers of the third national conference on fatigue, 1986: 295-302. (in Chinese)
- [35] Schive J. The stress intensity factor of small cracks at notches[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1982, 5(1): 77-99.
- [36] Schive J. Stress gradients around notches[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1980, 3(4): 325-338.
- [37] Lankford J. The effect of environment on the growth of small fatigue cracks[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1983, 6(1): 15-31.
- [38] 王德强, 朱明亮, 轩福贞. 疲劳短裂纹扩展的闭合效应与裂尖塑性区[J]. 中国科技论文在线, 2017, 10(1): 63-68.
Wang Deqiang, Zhu Mingliang, Xuan Fuzhen. Closure and crack-tip plasticity of short fatigue growing cracks[J]. Highlights of Science Paper Online, 2017, 10(1): 63-68. (in Chinese)
- [39] Lankford J. The growth of small fatigue cracks in 7075-76 Al[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1982, 5(3): 233-248.

作者简介:

秦建兵(1986—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构疲劳强度设计与分析。

(编辑:马文静)