

基于 VMD 与 Hilbert 谱的旋转机械碰摩故障诊断方法*

赵 岩¹, 朱均超¹, 张宝峰¹, 邵 磊¹, 李 季¹, 代 煜²

(1. 天津理工大学天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室 天津, 300384)

(2. 南开大学机器人与信息自动化研究所 天津, 300071)

摘要 为了有效地诊断旋转机械中的碰摩故障,提出了基于变分模态分解(variational mode decomposition,简称 VMD)与 Hilbert 谱分析的故障诊断方法。首先,利用 VMD 将碰摩故障信号自适应地分解为若干个不同频率段的本征模态函数(intrinsic mode function,简称 IMF),并与集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition,简称 EEMD)的处理结果进行对比分析;然后,在 VMD 分解的基础上,利用 Hilbert 谱对故障信号的时频特性进行分析。实验结果表明:与传统的频谱分析相比,该方法不但可以准确反映故障信号的频率成分,而且可以反映频率随时间的变化情况;与 EEMD 相比,该方法可以有效抑制模态混叠,更加准确地反映故障信息,从而验证了该方法的可行性与有效性。

关键词 故障诊断; 旋转机械; Hilbert 谱; 变分模态分解

中图分类号 TH86; TP23

引 言

旋转机械已经广泛应用于电力、石油、航空等领域,对旋转机械的故障诊断也显得尤为重要。碰摩故障是旋转机械中常见的故障之一^[1],由于摩擦力、冲击力等作用,在碰摩过程中会存在一定程度的非线性振动,从而使碰摩故障信号呈现出非线性、非平稳特性^[2]。

非线性、非平稳信号的处理方法主要有 Wigner-Vile 分布^[3]、短时傅里叶变换^[4-5]、小波变换^[6]及经验模态分解(empirical mode decomposition,简称 EMD)^[7]等。其中,EMD 根据信号自身的时间尺度特征,自适应地将信号从高频到低频分解成若干个本征模态函数。EMD 具有自适应性、多尺度性,因此该方法适用于旋转机械故障信号的分析。但是,如果故障信号存在异常事件(如脉冲干扰等),EMD 分解过程会出现模态混叠现象^[8]。模态混叠是指一个 IMF 分量中出现差异较大的时间尺度特征,或者相近的时间尺度特征出现在不同的 IMF 分量中,从而影响信号的分解精度。

为了抑制模态混叠,文献^[9]对 EMD 进行了改

进,提出了集合经验模态分解。EEMD 利用白噪声平滑故障信号中的异常事件,将不同时间尺度特征的信号自适应地分解,然后利用多次平均的方法消除白噪声的影响。EEMD 可以有效抑制模态混叠,但是计算量很大^[10]。

文献^[11]提出了变分模态分解,该方法的核心是变分问题,使每个模态的估计带宽之和最小,通过迭代搜寻变分模型最优解来确定每个分量的频率中心及带宽,从而自适应地实现信号各个模态分量的有效分离。VMD 具有坚实的理论基础,而且噪声鲁棒性较强^[12]。

在对故障信号进行 VMD 分解之后,利用 Hilbert 变换计算各个 IMF 分量的包络信号、瞬时角频率,然后,根据这些瞬时参数计算故障信号的 Hilbert 谱,从而反映信号在时间-频率联合域的能量分布。

笔者提出一种基于 VMD 与 Hilbert 谱的旋转机械碰摩故障诊断方法。首先,在转子故障实验平台上,利用 VMD 处理碰摩故障信号,并与 EEMD 进行对比分析;然后,利用 Hilbert 谱分析故障信号的时频特性,从而验证该方法的有效性。

* 天津市教委科研计划资助项目(2017KJ253)

收稿日期:2017-02-06;修回日期:2017-05-04

1 碰摩故障的数学模型

假设转子以角速度 ω 进行转动,转子的径向位移为 u ,则转子碰摩故障的示意图如图 1 所示。其中: F_n 为径向压力; F_r 为切向摩擦力; φ 为碰摩点的法线与 x 轴的夹角。

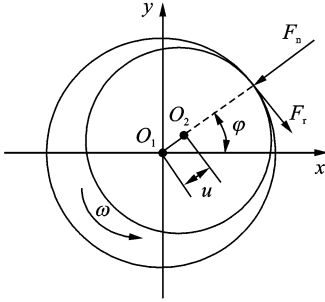


图 1 碰摩故障示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rub-impact fault

假设静子径向变形为线性变形,静子径向刚度系数为 k_c ,转子与静子之间的摩擦系数为 f ,转子与静子之间的初始间隙为 δ_0 ,则碰摩力数学模型为

$$F_n = \begin{cases} 0 & (u < \delta_0) \\ k_c(u - \delta_0) & (u \geq \delta_0) \end{cases} \quad (1a)$$

$$F_r = fF_n \quad (1b)$$

在 x - y 坐标系中,碰摩力表示为

$$\begin{cases} F_x = -F_n \cos\varphi + F_r \sin\varphi \\ F_y = -F_n \sin\varphi - F_r \cos\varphi \end{cases} \quad (2)$$

根据以上公式,可以推导碰摩故障的数学模型

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m\omega^2 \cos\omega t + F_x \\ m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = m\omega^2 \sin\omega t + F_y \end{cases} \quad (3)$$

其中: m 为转子处的等效集中质量; c 为等效阻尼系数; k 为转轴的刚度系数; e 为转子的偏心量; x, y 为转子在水平与垂直方向的振动位移。

2 VMD 与 Hilbert 谱分析

2.1 VMD 基本原理

在 VMD 算法中,本征模态函数 (IMF) 被定义为调频-调幅信号,表达式^[11]为

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\varphi_k(t)) \quad (4)$$

其中: $A_k(t)$ 为包络信号; $\varphi_k(t)$ 为瞬时相位。

假设原始信号可以分解为 K 个 IMF 分量,每个 IMF 分量 $u_k(t)$ 具有中心频率和有限带宽,对应的受约束的变分模型如下

$$\begin{aligned} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} & \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t.} & \sum_k u_k = f \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $\{u_k\} := \{u_1, \dots, u_K\}$ 为分解得到的 K 个 IMF 分量; $\{\omega_k\} := \{\omega_1, \dots, \omega_K\}$ 为各个 IMF 分量的频率中心。

引入扩展的 Lagrange 将约束性变分问题转化为非约束性变分问题,其表达式为

$$\begin{aligned} L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = & \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \\ & \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + [\lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

其中: α 为惩罚参数; λ 为 Lagrange 乘子。

利用乘法算子交替方向法交替更新 u_k^{n+1} , ω_k^{n+1} 和 λ^{n+1} ,更新公式^[11]如下

$$\begin{cases} \hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \\ \omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \\ \hat{\lambda}^{n+1} \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau(\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega)) \end{cases} \quad (7)$$

每个 IMF 分量的频率中心及带宽在迭代求解变分模型的过程中不断更新,直至满足迭代停止条件

$$\frac{\sum_k \|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n\|_2^2} < \epsilon \quad (8)$$

2.2 Hilbert 谱分析

实值信号 $\theta(t)$ 的 Hilbert 变换定义为

$$\tilde{\theta}(t) = H[\theta(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\theta(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (9)$$

与实值信号 $\theta(t)$ 对应的解析信号为

$$\beta = \theta(t) + j\tilde{\theta}(t) = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad (10)$$

包络信号 $A(t)$ 、瞬时相位 $\varphi(t)$ 、瞬时角频率 $\omega(t)$ 可以表示为

$$A(t) = \sqrt{\theta^2(t) + \tilde{\theta}^2(t)} \quad (11)$$

$$\varphi(t) = \arctan\left[\frac{\tilde{\theta}(t)}{\theta(t)}\right] \quad (12)$$

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt} \quad (13)$$

如果原始信号可以分解为 n 个 IMF 分量,则该信号的 Hilbert 谱可以表示为

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n A_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (14)$$

其中: Re 表示取实部; n 为本征模态函数的个数; $A_i(t)$ 为第 i 个 IMF 分量的包络信号; $\omega_i(t)$ 为第 i 个 IMF 分量的瞬时角频率。

3 实验系统

转子碰摩故障实验系统如图 2 所示。该系统包括转子、碰摩杆、电机、电机转速控制器、速度传感器、数据采集卡及电源。转子厚度为 15 mm, 半径为 80 mm, 转轴长度为 500 mm, 半径为 10 mm。信号的采样频率为 1 000 Hz, 电机转速为 2 400 r/min。利用碰摩杆实现转子的定点碰摩, 调节碰摩杆与转轴的初始间隙, 从而实现不同程度的碰摩故障。

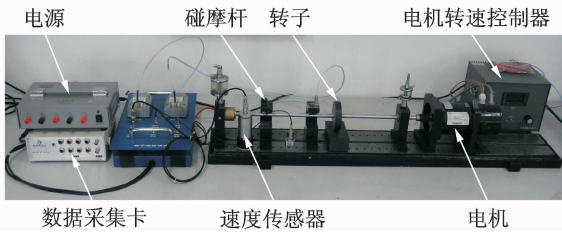


图 2 转子碰摩故障实验系统

Fig. 2 Experimental system of rotor with rub-impact fault

4 实验结果及分析

4.1 无碰摩故障实验

使碰摩杆与转轴保持较大的距离, 则转轴在转动过程中与碰摩杆没有接触。在无碰摩故障情况下, 转子振动的速度信号如图 3 所示。

利用 EEMD 对振动信号进行处理, 如图 4 所示, IMF₁ 分量为高频噪声, IMF₂ 分量为基频信号, IMF₃

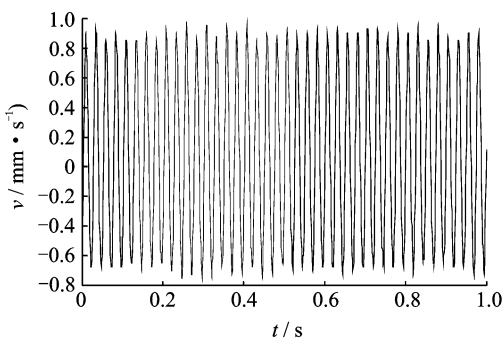


图 3 无碰摩故障情况下转子振动的速度信号

Fig. 3 Vibration signal of rotor without rub-impact fault

分量和 IMF₄ 分量为低频信号。但是, 一些 IMF 分量存在明显的模态混叠现象, 比如 IMF₃ 分量。

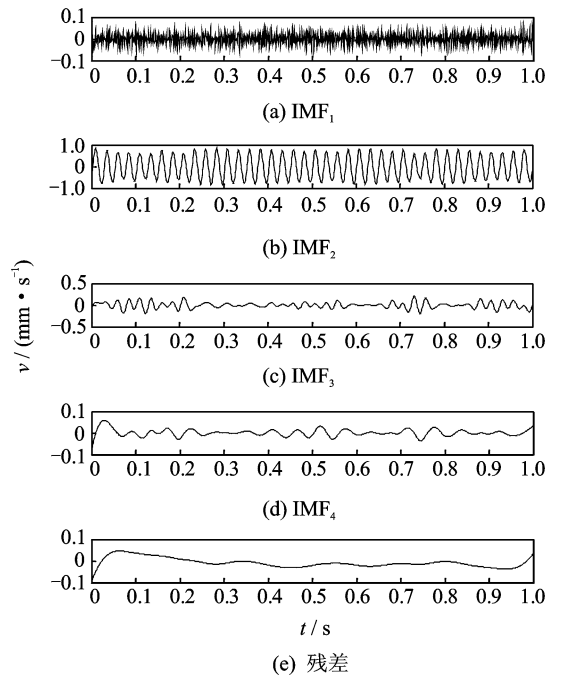


图 4 无碰摩故障情况下振动信号的 EEMD 分解结果
Fig. 4 EEMD result of vibration signal for rotor without rub-impact fault

在 EEMD 分解的基础上, 对振动信号进行 Hilbert 谱分析, 其结果如图 5 所示。振动信号的频率主要分布在 40 Hz 附近, 与电机的基频信号一致, 但是, 频率信号存在较大的波动。这是由于模态混叠影响了 Hilbert 谱的精度, 因此, 需要对模态混叠进行抑制。

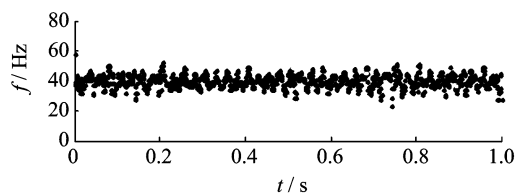


图 5 无碰摩故障情况下振动信号的 Hilbert 谱(EEMD)
Fig. 5 Hilbert spectrum of rotor without rub-impact fault(EEMD)

利用 VMD 对振动信号进行处理, 如图 6 所示, IMF₁ 分量为基频信号, IMF₂ 分量为二倍频信号。但是, IMF₂ 分量的幅值很小, IMF₃ 分量、IMF₄ 分量为高频信号, VMD 处理结果中的模态混叠得到了很好抑制。

经过 VMD 分解后, 对振动信号进行 Hilbert 谱分析, 如图 7 所示。振动信号的频率主要分布在

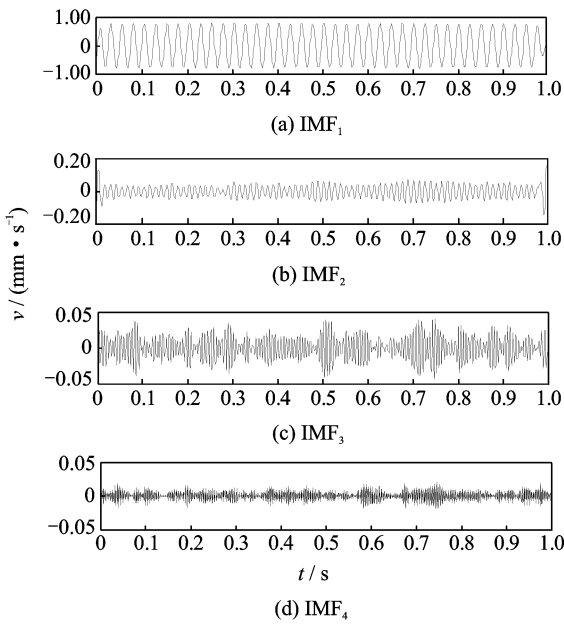


图 6 无碰摩故障情况下振动信号的 VMD 分解结果
Fig. 6 VMD result of vibration signal for rotor without rub-impact fault

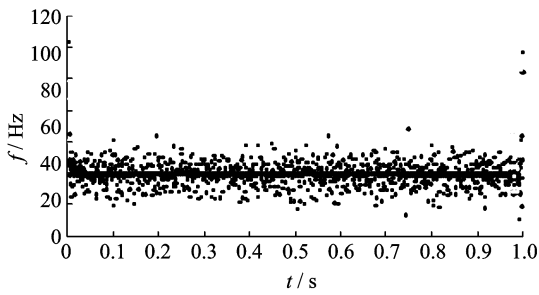


图 7 无碰摩故障情况下振动信号的 Hilbert 谱(VMD)
Fig. 7 Hilbert spectrum of rotor without rub-impact fault(VMD)

40 Hz附近,与电机的基频信号一致。与图 5 相比,由于模式混叠的有效抑制,图 7 中 40 Hz 附近的能量分布更集中,波动较少。

4.2 碰摩故障实验

调节碰摩杆,使碰摩杆与转轴紧密接触,则转轴在转动过程中会出现碰摩故障。在碰摩故障情况下,转子振动的速度信号如图 8 所示。

分别对碰摩故障信号进行 EEMD 和 VMD 处理,处理结果分别如图 9、10 所示。EEMD 处理结果存在一定的模式混叠现象,如图 9 中的 IMF₂ 分量。

VMD 处理结果如图 10 所示,IMF₁ 分量为基频信号,IMF₂ 分量为二倍频信号,IMF₃ 分量为三倍频信号,但是,IMF₃ 分量的幅值很小,IMF₄ 分

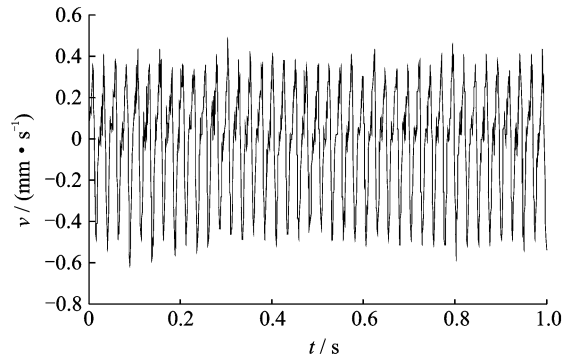


图 8 碰摩故障情况下转子振动的速度信号
Fig. 8 Vibration signal of rotor with rub-impact fault

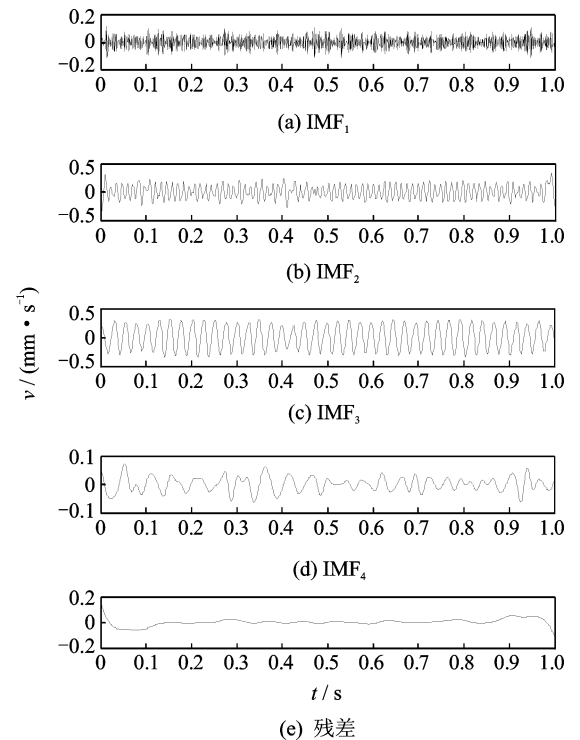


图 9 碰摩故障情况下振动信号的 EEMD 分解结果
Fig. 9 EEMD result of vibration signal for rotor with rub-impact fault

量、IMF₅ 分量为高频信号。由图 10 可知,在 VMD 处理结果中,模式混叠得到了很好的抑制,而且,不同频率段的模式分量自适应地分离出来。

分别计算 EEMD 和 VMD 处理结果中各个模式分量的频谱,结果如图 11、图 12 所示。由图 11 可知,虽然 EEMD 可以自适应地分解故障信号,但存在明显的模式混叠现象,这是由于该类方法是利用极值点计算包络,多次递归分解后包络估计误差被放大,从而不能准确地分离频率相近的模式分量。由图 12 可知,经过 VMD 处理,故障信号可以有效地分解为若干个窄带 IMF 分量,每个 IMF 分量具有不同的中心频率和有限带宽,从而有效地抑制了

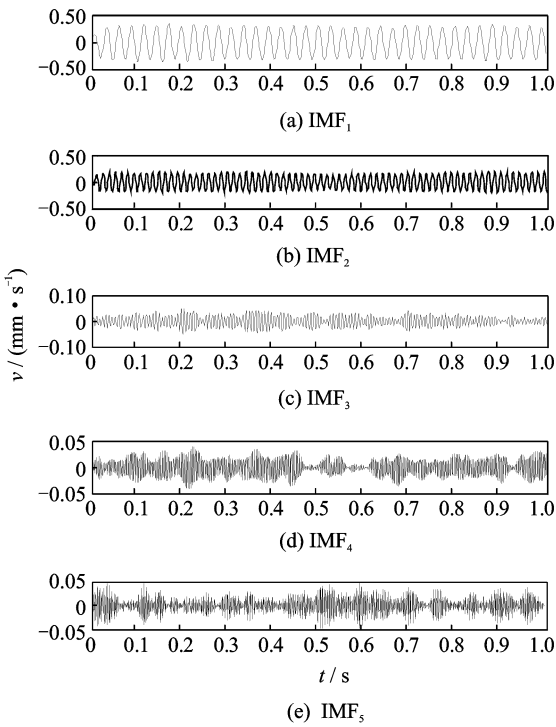


图 10 碰摩故障情况下振动信号的 VMD 分解结果
Fig. 10 VMD result of vibration signal for rotor with rub-impact fault

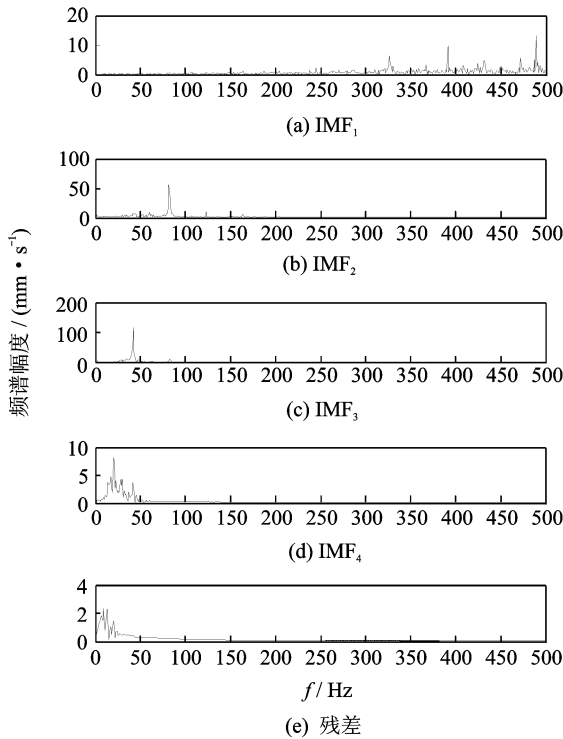


图 11 EEMD 处理结果中各个模式分量的频谱
Fig. 11 Frequency spectrum of IMFs with EEMD

模态混叠,为后续的 Hilbert 谱分析提供保证。

分别在 EEMD, VMD 处理的基础上,计算故障信号的 Hilbert 谱,处理结果分别如图 13、图 14 所

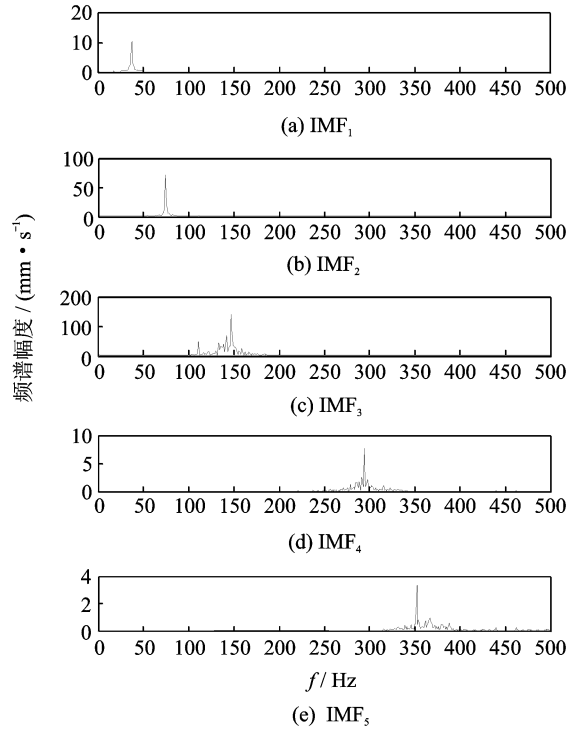


图 12 VMD 处理结果中各个模式分量的频谱
Fig. 12 Frequency spectrum of IMFs with VMD

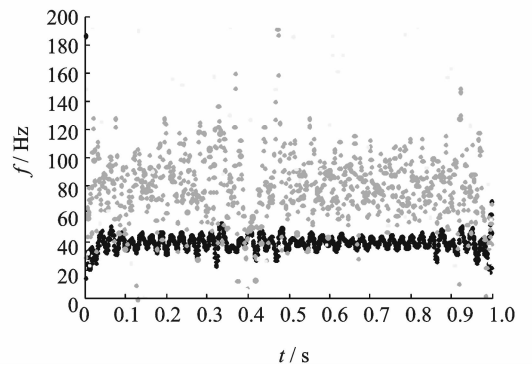


图 13 碰摩故障情况下振动信号的 Hilbert 谱(EEMD)
Fig. 13 Hilbert spectrum of rotor with rub-impact fault(EEMD)

示。在图 13 的 Hilbert 时频谱中,信号的振幅能量主要集中在 40Hz 附近,基本反映了基频信号的变化情况,但是,谱线的波动较大,这是由模态混叠引起的误差。而且图 13 的 Hilbert 时频谱无法准确反映二倍频成分,无法反映碰摩故障引起的倍频信号。

在图 14 的 Hilbert 时频谱中,基频信号 40 Hz 的谱线清晰而且波动较小,这是因为模态混叠得到了很好的抑制,而且可以准确反映二倍频信号。因此,笔者提出的方法,不但可以准确反映故障信号频率成分,而且可以反映频率随时间的变化情况。与 EEMD 相比,该方法可以有效抑制模态混叠,从而更加准确地反映故障信息。

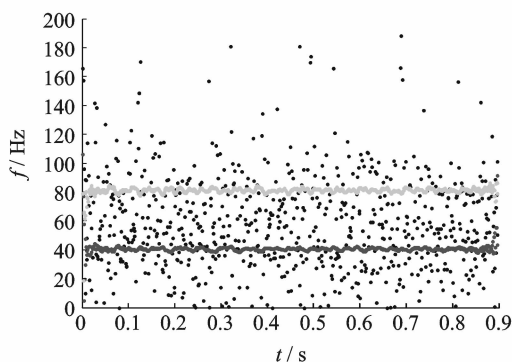


图 14 碰摩故障情况下振动信号的 Hilbert 谱(VMD)

Fig. 14 Hilbert spectrum of rotor with rub-impact fault(VMD)

5 结束语

笔者提出了基于 VMD 与 Hilbert 谱分析的旋转机械碰摩故障诊断方法。首先,利用 VMD 将故障信号自适应地分解为若干个不同频率段的本征模态函数;然后,利用 Hilbert 谱分析故障信号的时频特性。实验结果表明:相对于频谱分析法,该方法不但可以准确反映故障信号的频率成分,而且可以反映频率随时间的变化情况。与 EEMD 相比,该方法可以有效地抑制模态混叠,从而更加准确地反映故障信息,从而为碰摩故障诊断提供一种有效途径。在以后研究工作中,需要进行一步研究本方法在其它故障(不对中、松动等)中的诊断效果。

参 考 文 献

- [1] 马辉,杨健,宋溶泽,等.转子系统碰摩故障实验研究进展与展望[J]. 振动与冲击, 2014,33(6): 1-12.
Ma Hui, Yang Jian, Song Rongze, et al. Review and prospect on the research of rub-impact experiment of rotor systems[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6):1-12. (in Chinese)
- [2] 江俊,陈艳华. 转子与定子碰摩的非线性动力学研究[J]. 力学进展, 2013,43(1):132-148.
Jiang Jiu, Chen Yanhua. Advances in the research on nonlinear phenomena in rotor/stator rubbing systems[J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(1): 132-148. (in Chinese)
- [3] Igor D, Ljubisa S. An algorithm for the Wigner distribution based instantaneous frequency estimation in a high noise environment[J]. Signal Processing, 2004, 84(3): 631-643.
- [4] Avargel Y, Cohen I. Modeling and identification of nonlinear systems in the short-time Fourier transform domain[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(1): 291-304.
- [5] 乌建中,陶益.基于短时傅里叶变换的风机叶片裂纹

损伤检测[J]. 中国工程机械学报, 2014, 12(2):180-183.

Wu Jianzhong, Tao Yi. STFT-based crack detection on wind turbine blades[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2014, 12(2):180-183. (in Chinese)

- [6] 姜万录,李宁宁,朱勇. 基于小波脊线的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(14): 1-6.
Jiang Wanlu, Li Ningning, Zhu Yong. Wavelet ridges-based fault diagnosis for rolling bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34 (14):1-6. (in Chinese)
- [7] Huang N E, Shen Zheng, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceeding of the Royal Society of London Series A, 1998, 454: 903-995.
- [8] Huang N E, Shen Zheng, Long S R. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert Spectrum [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417-457.
- [9] Wu Zhaohua, 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] 陈虹屹,王小敏,郭进,等. 基于 EEMD 奇异熵的高速道岔裂纹损伤检测[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5):845-851.
Chen Hongyi, Wang Xiaomin, Guo Jin, et al. High-speed turnout flaw detection based on EEMD singular entropy[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5): 845-851. (in Chinese)
- [11] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [12] Xue Yajuan, Cao Junxing, Wang Daxing, et al. Application of the variational mode decomposition for seismic time-frequency analysis [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(8): 3821- 3831.



第一作者简介:赵岩,男,1984年3月生,博士、讲师。主要研究方向为非线性振动测试及机械故障诊断技术。曾发表《Measurement of moment of inertia based on Hilbert transform》(《Transactions of Tianjin University》2013, Vol. 19, No. 3)等论文。

E-mail: tjut_eric@163.com

通信作者简介:朱均超,男,1972年11月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为智能检测。

E-mail: zhujunchao_tjut@163.com

