

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.03.013

EEMD 方法在转子碰摩故障诊断中的研究*

巩晓赞 王宏超 杜文辽 丁丽丽

(郑州轻工业学院 机电工程学院 郑州 450002)

摘要:转子系统发生局部碰摩故障时,故障特征呈现出复杂的高倍频或分数倍频成分。为了实现多频率碰摩故障特征的有效提取,将集合经验模态分解方法(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)应用到转子局部碰摩故障诊断中。首先利用仿真碰摩信号,验证了 EEMD 时频分析方法在碰摩故障诊断的有效性,其次通过对转子系统水平方向碰摩、竖直方向碰摩、水平-竖直同时碰摩和正常 4 种不同振动状态的 EEMD 分解,计算基本模态分量(IMF)的振动强度,得出不同状态的振动强度趋势分布图。实验结果表明,EEMD 方法能够从强噪声背景信号中提取出微弱碰摩特征,实现转子系统的碰摩故障诊断。

关键词:故障诊断;转子碰摩;集合经验模态分解方法;故障特征

中图分类号: TN06;TH165 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Research on EEMD in rub-impact fault diagnosis of rotor system

Gong Xiaoyun Wang Hongchao Du Wenliao Ding Lili

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: For vibration signal generated by rubbing fault in rotary machinery including the single-point rubbing and the partial rubbing, multi-component harmonic frequencies are presented. An ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method was introduced to resolve the difficulty of multi-component fault feature extraction of rubbing fault. The rubbing fault signals created by simulation were decomposed clearly into different single frequency data by using EEMD method. The vibration signals from experiment rig of rub-impact rotor were then analyzed under different directions rubbing, which include in horizontal, in vertical, in horizontal and vertical at the same time. The vibration strength belonged to different fault frequency in the frequency spectrum was obtained from the intrinsic mode function (IMF) based on EEMD respectively. The analysis results of the rubbing signals indicate that the multiple features can be better extracted with the EEMD, and is effective in analysis and recognition of rubbing fault.

Keywords: fault diagnosis; rotor rubbing; EEMD; fault characteristic

1 引言

随着旋转机械速度和效率不断提升的趋势,转子与壳体、密封之间的间隙逐渐减小,转子系统的不平衡、不对中、转轴弯曲以及过大振动等都极易引起转子的碰摩故障,从而导致系统失稳及一系列不良后果^[1]。在设备的在线状态监测过程中,探究转子系统发生碰摩时的振动特征,并采用有效方法从强背景噪声信号设法检测出

早期碰摩故障特征,对于转子系统避免碰摩及耦合故障的发生具有现实意义^[2]。局部碰摩的故障试验及其振动特点不少学者已进行了深入的研究,马辉等人^[3]总结了旋转机械转定子局部碰摩故障的实验现象及其时、频域信号特征。在碰摩信号的拾取方面,声发射信号最敏感,加速度信号次之,振动位移信号最不敏感^[4]。褚福磊等人^[5]采用声发射技术对碰摩声信号进行监测,并通过小波分解确定出转子的碰摩位置;于洋等人^[6]也采用声发射信号和小波分析,对转子不同碰摩程度的特征参数进

收稿日期:2016-10 Received Date: 2016-10

* 基金项目:国家自然科学基金(51405453)、国家自然科学基金(51205371)、河南省高等学校重点科研项目(16A460012)资助

行了统计分析;陈果等人^[7-8]采用倒频谱对加速度传感器拾取的碰摩振动信号进行了诊断分析;雷亚国等人^[9-10]从实测数据分析可知,振动位移传感器拾取的碰摩信号比较微弱,常规分析方法不易有效检测。

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)是 Huang 等人提出的一种自适应的非线性信号处理方法^[11-12],根据信号自身的特点,能够将信号分解成从高到低不同频率的基本分量,克服以傅里叶变换为基础的时频分析方法的诸多不足。EMD 方法已分别在齿轮、轴承、转子裂纹以及碰摩等故障信号的特征提取中进行了研究^[13-14]。在振动信号的应用中,当有随机脉冲或噪声等干扰时,EMD 分解出的模态分量易产生模态混叠,产生严重错假的时频分布。对此 Wu 等人^[15]又提出了对信号加入白噪声的集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD),EEMD 方法能够很好地解决故障振动信号中的模态混叠现象。基于以上分析,本文采用 EEMD 方法提取转子碰摩故障信号,将微弱的碰摩故障信号从噪声信号中分离,从而有效识别转子局部碰摩故障。通过仿真和实验研究,得出 EEMD 分析方法能够有效地提取出微弱碰摩故障特征,为转子系统的耦合故障诊断提供了依据。

2 EEMD 分析方法

EEMD 是 Huang 等人^[15]在经验模态分解的基础上提出的一种噪声辅助的经验模态分解方法。其分解原理是利用白噪声具有频谱均匀分布的统计特性,将正态分布白噪声引入到待分析信号后,使混合后的信号具有相对均匀的极值点,保持了信号在时间尺度上的连续性,从而避免 EMD 分解中的模态混叠现象。

EEMD 方法的具体分析过程如下:

1) 为待分析信号 $x(t)$ 中加入正态分布的白噪声 ($j=1, 2, 3, \dots, M$), 得到混合信号

$$x_j(t) = x(t) + n_j(t) \quad (1)$$

2) 采用 EMD 分解方法对混合信号进行分析, 得到如下相应的各个 IMF 分量

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^{N_j} c_{i,j} + r_{N_j} \quad (2)$$

其中表示第 j 次的第 i 个 IMF 分量。

3) 加入新的幅值水平相同的随机高斯白噪声后, 重复步骤 1)、2), 重复 M 次, 得到 M 组不同的 IMF 分量。

4) 将每次分解得到的 IMF 分量进行集合平均, 由于加入的白噪声不相关, 其统计均值为 0, 所以最后得到的 IMF 分量

$$c_i = (\sum_{j=1}^m c_{i,j}) / M \quad (3)$$

由集合经验模态分解 EEMD 的分析过程可知, 一方

面通过对信号多次添加白噪声, 改变了信号的极值点分布, 从而减小信号极值点之间的距离比差异, 降低了模态混叠问题的影响。另一方面, 由于白噪声具有零均值特性, 经过多次平均, 得到综合后的集合经验模态分解的 IMF 分量中的白噪声成分被相互抵消, 实现被分析信号固有模态分量的有效分解。

3 碰摩仿真研究

3.1 转子碰摩的动力学模型

旋转机械转子可简化为单跨单圆盘转子, 简称 Jeffcott 转子, 如图 1 所示。在进行碰摩问题研究时, 为了简化计算, 由于碰摩发生的时间间隔很短, 假定转子与定子的碰撞为弹性碰撞, 形变为弹性形变, 转子与定子的摩擦符合库仑定律, 即摩擦力与接触面的正压力成正比。

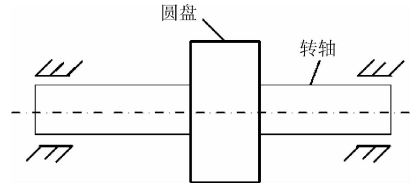


图 1 Jeffcott 转子系统简图

Fig. 1 Sketch of Jeffcott rotor

对于该转子系统, 不计转轴的质量, 令转轴的刚度系数为 k , 刚性圆盘的质量为 m , 偏心距为 e , 转子的角速度为 ω , 转子与定子的间隙为 δ , 转子受到外部阻尼的阻尼系数为 c 。建立如图 2 所示的坐标系 xoy , 其中为碰摩时的法向力, 为摩擦力。转子与定子间的摩擦因数为 f , 定子的径向刚度系数, 碰摩力公式为:

$$\begin{cases} F_n = K_c(e - \delta) \\ F_t = f \cdot F_n \end{cases} \quad (4)$$

转子系统在没有碰摩时的运动方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = mew^2 \cos\omega t \\ m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = mew^2 \sin\omega t \end{cases} \quad (5)$$

发生碰摩时, 必须考虑碰摩力的影响, 运动方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_x + mew^2 \cos\omega t \\ m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_y + mew^2 \sin\omega t + mg \end{cases} \quad (6)$$

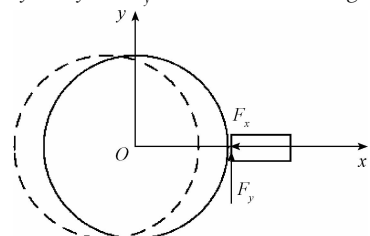


图 2 碰摩简图

Fig. 2 Sketch of rotor rub-impact

3.2 定点碰摩故障的仿真结果

仿真时系统的阻尼系数、碰摩刚度、碰摩摩擦系数等转子系统仿真结构参数如表 1 所示,转子转速设定大于一阶临界转速,通过 MATLAB 对式(5)和(6)进行数值仿真,得到转子在不同状态下的振动响应。

表 1 转子系统的结构参数
Table 1 Parameters of rotor system

参数	数值
转子的等效质量	4 kg
系统等效阻尼	1200 N · s/m
转子与定子间隙	0.15 mm
转子刚度系数	2.5×10^5 N/m
摩擦系数	0.2
偏心距	0.06 mm

通过式(5)对转子系统进行无碰摩状态下的仿真,得到如图 3(a)所示的的时域波形。通过式(6)对转子系统进行定点碰摩状态下的仿真,得到如图 3(b)所示的时域波形图。

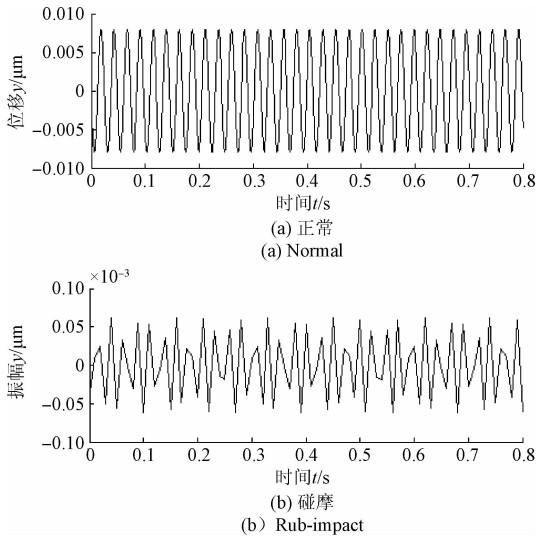


图 3 仿真信号的时域波形

Fig. 3 Time domain waveform of simulation signal

对无碰摩信号和碰摩信号分别进行 EEMD 分解,得到图 4 所示的不同频率信号的分解结果。从分解结果可知,当转子系统发生碰摩时,1 倍频处的振动能量减小,而分倍频的振动强度增大。

4 碰摩故障试验研究

本文试验采用 QPZZ-II 旋转机械振动分析及故障诊断试验平台,如图 5 所示,采用碰摩杆模拟定子,实现转子系统转轴与定子之间的局部碰摩。该试验局部碰摩分

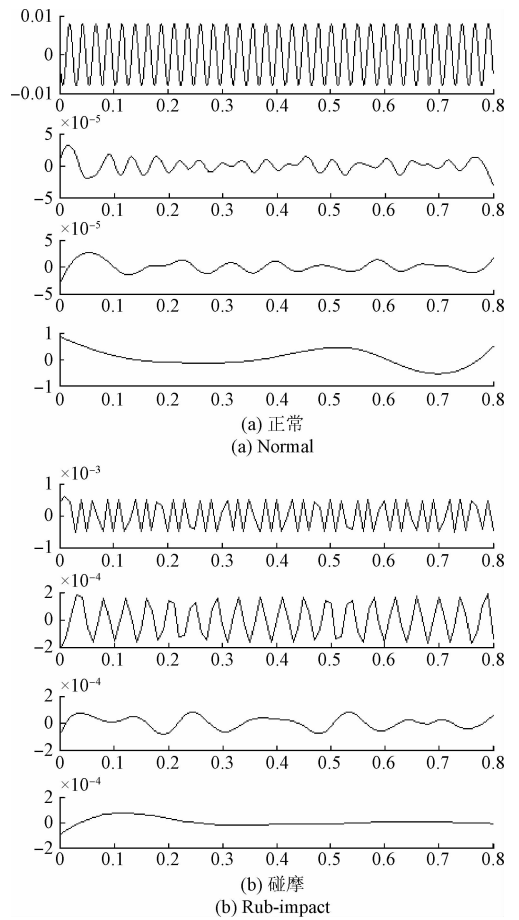


图 4 仿真信号的 EEMD 分解结果

Fig. 4 The results decomposed by EEMD of simulation signal

别从碰摩杆在水平方向进行单点碰摩、竖直方向进行单点碰摩和水平-竖直同时进行局部碰摩这 3 种碰摩形式进行试验研究分析。由文献[4]可知,针对具有冲击特征的碰摩故障信号,声发射信号最敏感,加速度信号次之,振动位移信号最不敏感,该试验目的是从微弱的振动位移信号中提取碰摩故障特征,故选用电涡流位移传感器拾取碰摩故障信号,电涡流位移传感器固定在试验平台支架的径向方向。

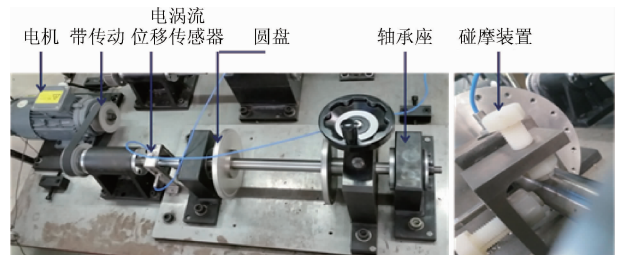


图 5 转子试验台及碰摩装置

Fig. 5 Rotor test rig with rubbing

试验中转轴转速设定为 19.8 Hz,采样频率为

128 Hz, 采用电涡流位移传感器分别对正常、单向碰摩和水平-竖直两个方向同时碰摩的振动信号进行采集, 得到如图 6 所示的时域波形图(由于在水平方向或竖直方向的单点碰摩结果基本一致, 所以本文单向碰摩图片示例以竖直方向碰摩为例), 其幅值谱如图 7 所示, 当转子系统无碰摩时, 其幅值谱主要以转轴的 1 倍频 (19.75 Hz) 为特征频率, 如图 7(a) 所示。图 7(b) 和 (c) 所示的幅

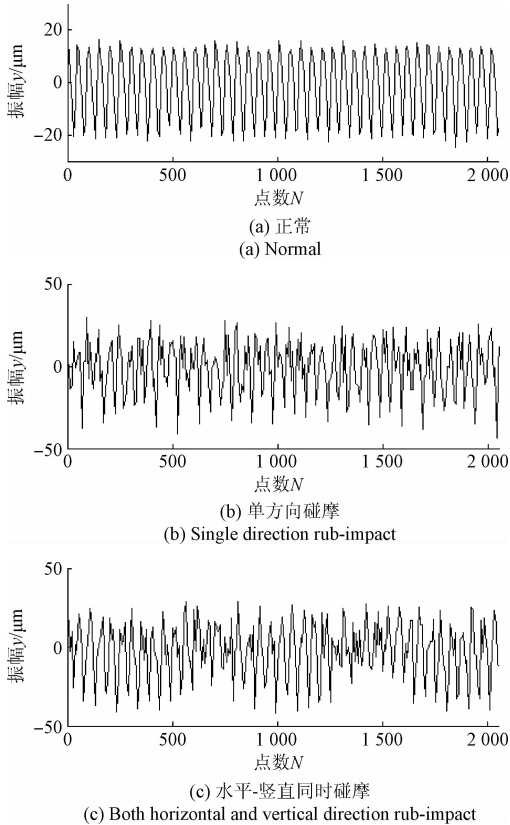


图 6 振动信号的时域波形

Fig. 6 Time domain waveform of vibration signal

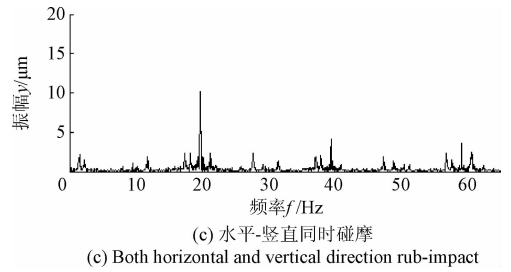
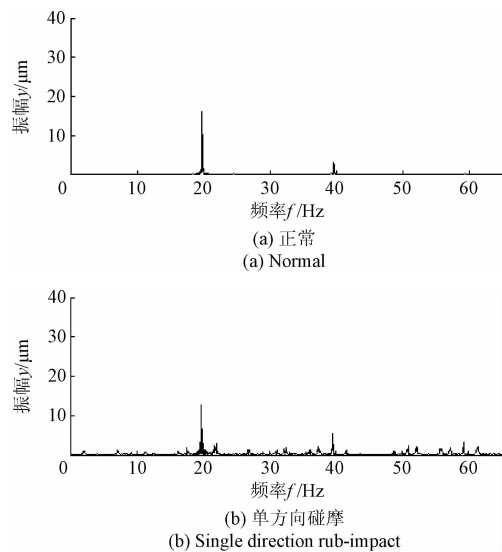
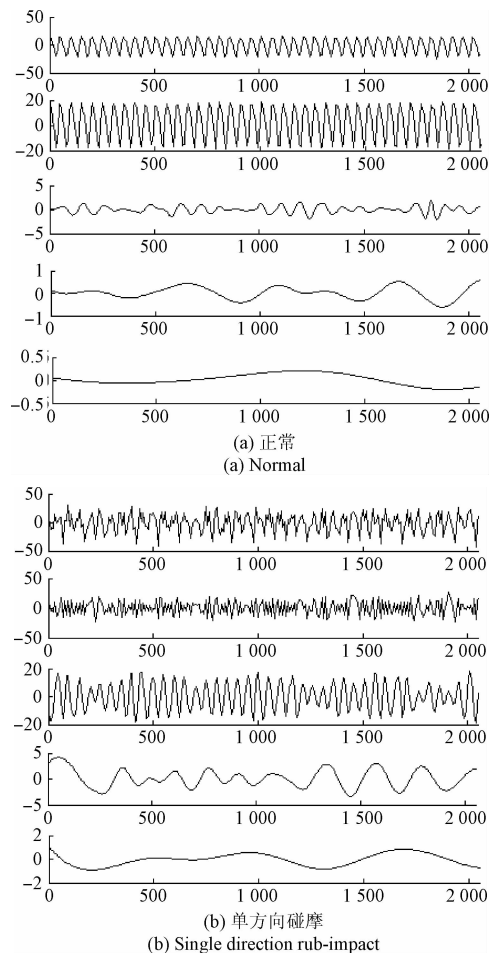


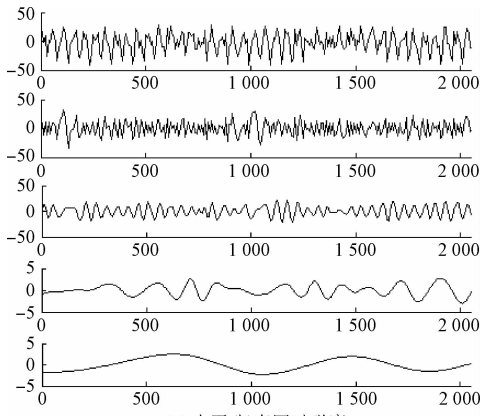
图 7 振动信号的幅值谱

Fig. 7 Amplitude spectrum of vibration signal

值谱图虽然出现了碰摩后的高频特征 (2 倍频和 3 倍频) 和次谐波成分, 但较 1 倍频处的振动能量, 其他谐波成分的振动能量显得非常微弱, 不易直接从幅值谱检测到碰摩信号的振动特征。

为了把高频碰摩信号从背景信号中提取出来, 对图 6 中的转子碰摩振动信号进行 EEMD 分解, 图 8(b) 所示为单向碰摩时的分解结果, 图 8(c) 所示为水平-竖直同时碰摩时的分解结果。比较无碰摩、单向碰摩和水平-竖直同时碰摩 3 种振动状态的分解结果: 单向碰摩时, 图 8(b) 第 1 个分量 IMF1 为以转频 (19.75 Hz) 为周期的削波信号, 第 2 个分量 IMF2 则由多个周期成分组成的调制





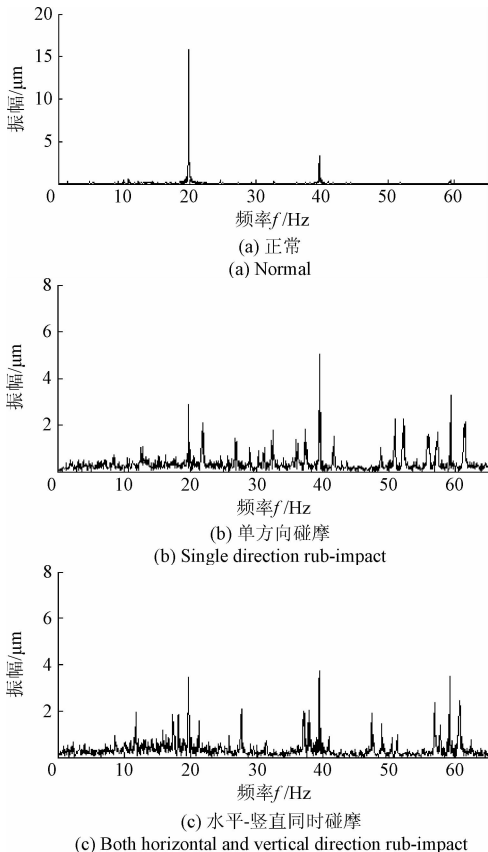
(c) Both horizontal and vertical direction rub-impact

图8 振动信号的 EEMD 分解结果

Fig. 8 The results decomposed by EEMD of vibration signal

信号;水平-竖直同时碰摩时,如图8(c)所示,第1个分量 IMF1 同周期的削波信号,第2个分量 IMF2 为多周期成分的复杂调制信号;而无碰摩状态时,第1个分量 IMF1 和第2个分量 IMF2 都是以周期为转频(19.75 Hz)的周期信号,如图8(a)的所示的分解结果。

对碰摩信号 EEMD 分解后的 IMF2 分量进行进一步幅值谱分析,如图9所示。结果表明,转子发生碰摩时,



(c) Both horizontal and vertical direction rub-impact

图9 分量 IMF2 的幅值谱

Fig. 9 Amplitude spectrum of 2th IMF

1 倍频振动能量减小,2 倍频和3 倍频振动能量增大, IMF2 分量的整个频谱成分较无碰摩时的更加复杂,出现碰摩后的次谐波成分,且与图9(b)单方向碰摩比较,图9(c)水平-竖直双向碰摩时的次谐波成分的振动能量增大。

从表2能够看出4种振动状态经 EEMD 分解后分量 IMF2 的能量分布,正常时,1×振动能量最大,为15.8,3×振动能量最小,为0.46。当发生碰摩时,1X 处的振动能量大幅减小,分别减小为4.803、2.889和3.463(水平、竖直和水平-竖直碰摩),减小幅度为69.7%、81.8%和78.1%;2×处的振动能量比正常时增大了76%、113%和32%;3×处的振动能量则大幅增大,分别增大了5~7倍。碰摩时倍频成分的振动强度变化趋势如图10所示,正常信号的振动强度以1倍频振动特征为主,振动强度的曲线呈线性递减趋势;而发生碰摩后,1倍频的振动强度介于2倍频和3倍频之间,振动强度的曲线表现出平稳趋势。故从图10的趋势曲线图中可以清晰地区分正常信号和碰摩信号特征。

表2 在4种状态下 EEMD 分解后的 IMF2 的振动强度分析
Table 2 Vibration intensity analysis of 2th IMF with rubbing and normal

频率(倍频)	正常	水平碰摩	竖直碰摩	水平-竖直碰摩
1×	15.8	4.803	2.889	3.463
2×	2.365	4.159	5.027	3.123
3×	0.46	2.575	3.282	3.481

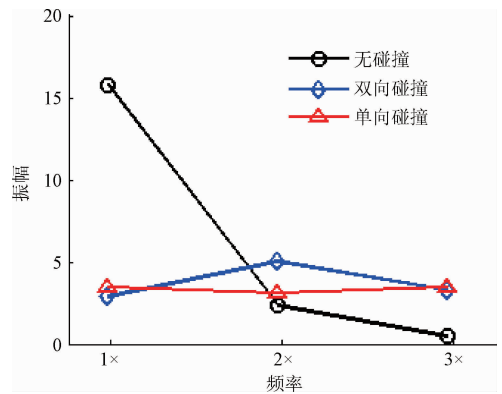


图10 IMF2 分量振动强度分布曲线

Fig. 10 Curve of vibration intensity distribution of 2th IMF

对比直接对碰摩信号进行幅值谱分析后得到振动特征,如表3和图11所示。可以看出,正常、单向碰摩、双向同时碰摩时都呈现出随着倍频成分振动能量逐渐衰减,由于不同状态下1倍频、2倍频成分变化不明显,碰摩状态的曲线趋势与正常状态的曲线趋势基本一致,诊断结果不明确。综上所述,EEMD 方法更有利于从复杂

的背景信号中提取碰摩特征。

表 3 在 4 种状态下原信号的振动强度分析

Table 3 Vibration intensity analysis of original signal with rubbing and normal

频率(倍频)	正常	水平碰摩	竖直碰摩	水平-竖直碰摩
1 ×	15.95	16.66	12.82	10.15
2 ×	3.253	4.246	5.384	4.069
3 ×	0.460	2.607	3.306	3.497

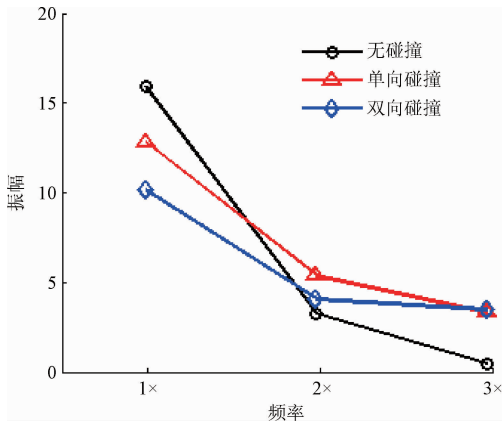


图 11 原信号振动强度分布曲线

Fig. 11 Curve of vibration intensity distribution of original signal

5 结 论

为了从复杂信号中提取碰摩故障特征信息,本文首先通过对大于一阶临界转速的仿真碰摩信号进行 EEMD 分解,获得无模式混淆的次谐波分量;然后采用 EEMD 方法分别对转子试验台水平方向碰摩、竖直方向碰摩、水平-竖直同时碰摩和正常四种状态下的振动信号进行了分解,获得的主要频带的振动强度分布图表明其能够明确地反映转子振动信号的碰摩状态。仿真和实验不同碰摩状态的分析结果表明,EEMD 方法能够将碰摩故障信息有效地从复杂的背景噪声信号中提取出来,实现转子碰摩故障的有效检测。

参考文献

[1] 王红军,汪亮. 基于多域空间状态特征的高端装备运行可靠性评价[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 804-810.
WANG H J, WANG L. High-end equipment operating reliability assessment based on multi-domain status space[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 804-810.

[2] ABUZAIID M A, ELESKAKY M E, ZEDAN M G. Effect

of partial rotor-to-stator rub on shaft vibration[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(1): 170-182.

[3] 马辉,杨建,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 H, YANG J, SONG R Z, 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.

[4] 胡葛庆. 转子碰摩非线性行为与故障辨识的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2001.
HU N Q. Research on identification of nonlinear behavior and fault of rub-impact in rotors [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2001.

[5] 褚福磊,王庆禹,卢文秀. 用声发射技术与小波包分解确定转子系统的碰摩位置[J]. 机械工程学报, 2002, 38(3): 139-143.
CHU F L, WANG Q Y, LU W X. Detection of the rub location in a rotor system with AE sensors and wavelet analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(3): 139-143.

[6] 于洋,杨平,杨理践. 基于小波变换与统计分析的转子碰摩声发射特性研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(9): 130-134.
YU Y, YANG P, YANG L J. Acoustic emission characteristics of rotor rubbing based on wavelet transform and statistical analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(9): 130-134.

[7] 陈果,于明月,刘永泉等. 基于倒频谱分析的航空发动机转静碰摩部位识别[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7):32-38.
CHEN G, YU M Y, LIU Y Q, et al. Identifying rotor-stator rubbing positions using the cepstrum analysis technique [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(7): 32-38.

[8] CHEN G. Study on the recognition of aero-engine blade-casing rubbing fault based on the casing vibration acceleration[C]. Measurement, 2015, 65: 71-80.

[9] 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 Y G. Machinery fault diagnosis based on improved Hilbert-Huang transform [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5):71-77.

[10] WANG Y X, MARKERT R, XIANG J W, et al. Research on variational mode decomposition and its application in detecting rub-impact fault of the rotor system[C]. Mechanical System and Signal Processing, 2015(60-61): 243-251.

- [11] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]. Proceedings of Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903-995.
- [12] 苗晟, 王威廉, 姚绍文. Hilbert-Huang 变换发展历程及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8): 812-818.
MIAO CH, WANG W L, YAO SH W. Historic development of HTT and its application [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(8): 812-818.
- [13] RAI V K, MOHANTY A R. Bearing fault diagnosis using FFT of intrinsic mode functions in Hilbert-Huang transform [C]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007(21): 2607- 2615.
- [14] 李志农, 朱明, 褚福磊, 等. 基于经验小波变换的机械故障诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11):2423-2432.

LI ZH N, ZHU M, CHU F L, et al. Mechanical fault diagnosis method based on empirical wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2423-2432.

- [15] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1):1-41.

作者简介



巩晓贇, 1981 年出生, 工学博士, 郑州轻工业学院讲师, 硕士研究生导师, 研究方向为机械状态监测与故障诊断, 智能检测与信号处理。

E-mail: gxyun2008@sohu.com

Gong Xiaoyun was born in 1981, Ph. D. She is now a lecturer and M. Sc. tutor in Zhengzhou University of Light Industry. Her main research interests are monitoring and fault diagnosis of machinery, intelligent detection and signal processing.