

# 运用BF-HHT的转子径向碰摩故障特征提取方法\*

熊 炘, 杨世锡, 甘春标

(浙江大学液压传动及控制国家重点实验室 杭州, 310027)

**摘要** 针对现有希尔伯特-黄变换(HHT)方法在进行特征提取时,估算部分多频固有模式函数(IMF)瞬时频率不准确的问题,提出了一种基于带通滤波的希尔伯特-黄变换算法(BF-HHT)。该算法首先确定信号主要能量所在频率;然后以这组主要能量所在频率为中心频率设计一组带通滤波器,对原信号进行滤波;最后用HHT方法提取信号的时频特征。转子试验台和实际机组的径向碰摩故障信号的试验与分析结果表明,BF-HHT算法不仅能准确提取到转子径向碰摩故障信号中出现的频率成分,而且能对故障特征频率出现或消失的时刻精确定位,其特征提取效果明显优于HHT方法。

**关键词** 带通滤波; 希尔伯特-黄变换; 旋转机械; 径向碰摩; 时频特征

**中图分类号** TN911.7; TH165.3

## 引 言

随着我国电力供应需求的加大和科技的进一步发展,新增的发电机组大部分是容量在600 MW以上的超临界、超超临界大型汽轮发电机组。为了提高运行效率,该类机组的密封和轴承间隙往往控制在较小范围内,因此比一般亚临界机组更易发生动静件间的碰摩。由于碰摩故障发生时振动信号具有明显的非线性、非平稳特征,其频率分布连续,成分丰富<sup>[1]</sup>,因此如何从振动信号中准确提取故障的特征频率,对于做出正确的诊断决策具有至关重要的作用。传统的基于傅里叶变换的汽轮发电机转子振动信号特征提取方法虽然应用广泛,但其反映的是振动信号的整体特性,因此只适用于平稳信号的分析<sup>[2-3]</sup>。对于非平稳信号,采用能够准确描述信号局部特征的时频特征提取方法则更为有益<sup>[3]</sup>。目前常用的时频分析方法有短时傅里叶变换(STFT)和小波变换(WT)等。由于这类方法均采用线性基函数<sup>[2-3]</sup>,因此对非线性、非平稳信号的分析效果并不理想。

HHT方法<sup>[2]</sup>本质上是一种基于经验模式分解(EMD)的非平稳信号分析方法。它将信号从高频至低频分解为有限个IMF振荡分量,然后对每个IMF做希尔伯特变换(HT),用以描述非平稳信号的时频特征。HHT方法一经提出,就已陆续应用于旋转机

械状态监测与故障诊断领域,并取得了一系列重要的成果<sup>[4-6]</sup>。由于经EMD得到的部分高阶IMF不是理想的单频率函数,而是由分布在某个频段内的多个频率成分组成。因此,通过HT很难保证信号瞬时频率提取的准确性,进而难以得到对信号频率结构的恰当物理解释<sup>[7]</sup>。将HHT用于提取频率分布连续、成分丰富信号的时频特征时,EMD的不足显得更为突出。

笔者根据转子径向碰摩故障发生时振动信号的典型特征,提出一种基于BF-HHT的转子径向碰摩故障特征提取方法。

## 1 HHT故障特征提取方法

### 1.1 HHT基本原理

HHT包括EMD和HT两个步骤。给定信号 $x(t)$ ,首先进行EMD分解,算法基本思想如下:

- 1) 利用三次样条曲线分别对 $x(t)$ 的所有极大值点和极小值点进行插值,获得 $x(t)$ 的上、下包络线;
- 2) 计算上、下包络的均值 $m(t)$ ;
- 3) 从信号中去除均值 $m(t)$ ,提取信号的细节成分 $d(t) = x(t) - m(t)$ ,并利用其提取第1阶IMF;
- 4) 将第1阶IMF从 $x(t)$ 中去除,余量作为新信号重复执行步骤1~3,从而陆续提取出各阶IMF。

\* 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(编号:2008AA04Z410);国家自然科学基金资助项目(编号:11072214,50675194)

收稿日期:2010-12-21;修改稿收到日期:2011-01-10

一般情况下,需要对步骤3中的 $d(t)$ 进行筛分运算才能提取出IMF。筛分运算终止条件是 $d(t)$ 同时满足IMF定义及迭代终止条件,具体内容参见文献[2]。经EMD分解后, $x(t)$ 可表示为各阶IMF与趋势项之和

$$x(t) = \sum_{k=1}^K d_k(t) \quad (1)$$

其中: $K$ 为IMF个数; $d_k(t)$ ( $k=1\sim(K-1)$ )为第 $k$ 阶IMF,而趋势项 $d_k(t)$ 记为第 $K$ 阶IMF。

对各阶IMF分别作HT

$$D_k(t) = \frac{1}{\pi} \text{PV} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d_k(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2)$$

其中:PV为柯西主分量。

将 $d_k(t)$ 和 $D_k(t)$ 组成第 $k$ 阶IMF的解析形式

$$Z_k(t) = a_k(t) \exp(i\theta_k(t)) \quad (3)$$

其中

$$a_k(t) = \sqrt{d_k^2(t) + D_k^2(t)} \quad (4)$$

$$\theta_k(t) = \arctan \left[ \frac{D_k(t)}{d_k(t)} \right] \quad (5)$$

其中: $a_k(t)$ 和 $\theta_k(t)$ 分别为信号的幅值和相位。

定义信号的瞬时频率为 $\theta_k(t)$ 的导数

$$\omega_k(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_k(t)}{dt} \quad (6)$$

从而原信号 $x(t)$ 表示为

$$x(t) = (\text{real}) \sum_{k=1}^{K-1} a_k(t) \exp\left(i \int \omega_k(t) dt\right) \quad (7)$$

作为时间 $t$ 的函数,由式(7)表示的信号 $x(t)$ ,其幅值 $a_k(t)$ 和瞬时频率 $\omega_k(t)$ 可以准确描述非线性、非平稳信号每个时刻包含的频率成分。

## 1.2 基于HHT的转子径向碰摩振动分析

由对信号瞬时频率的描述可知,理论上只有当瞬时频率是时间的单值函数时,瞬时频率才具有物理意义。Boashash<sup>[8]</sup>的研究结果表明,在实际应用过程中,HT对窄带信号的瞬时频率提取效果较好。然而,转子在发生径向碰摩故障时,振动信号连续分布,成分丰富。在大多数情况下,利用EMD分解该类信号所得的高阶IMF为宽频带函数,包含多个频率成分;因此,通过计算多个IMF瞬时频率以对信号瞬时频率进行拟合的方法很难准确描述转子径向碰摩故障的时频特征。

笔者以BENTLY RK4转子试验台上模拟的转子径向碰摩故障为例,说明HHT在提取转子径向碰摩故障信号时频特征时存在的不足。试验中,将铜棒位置固定于如图1所示的碰摩点附近并保持与转子间较小的径向间隙,利用键相脉冲反馈控制转子加速运行。转子在加速过程中,随着振动的增大,转子

将与铜棒发生径向碰摩。对径向碰摩时的振动信号进行采集,采样频率 $f_s=1.28$  kHz,采集时间持续11.2 s,采样点数共计14 336点。为了清晰表达信号时域波形的特征,取第4 097~5 121采样点区间内的数据进行分析,这段数据的时间跨度为0.8 s,其时域波形如图2(a)所示。

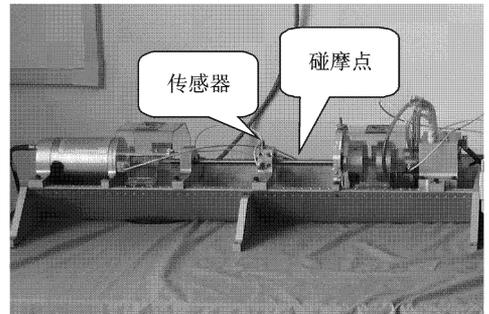


图1 BENTLY RK4 转子试验台

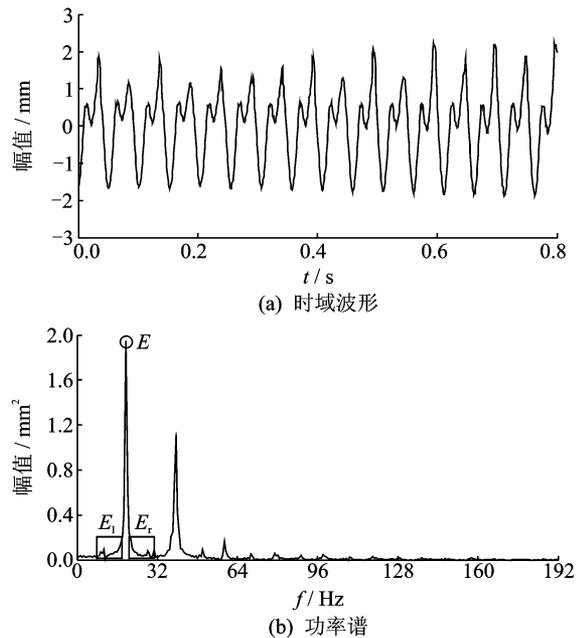


图2 转子径向碰摩故障信号的时域波形与功率谱

由图2(b)所示的信号功率谱图可发现,径向碰摩故障信号的频率呈连续分布,其中较为突出的频率成分有1~3倍频,也有大于4倍频的高频成分和0.4~0.5倍频的低频成分。鉴于径向碰摩过程的非线性、非平稳特性,以下利用HHT对碰摩信号进行时频分析。

首先对碰摩信号进行EMD分解,得到如图3所示的1~7阶IMF分量和信号趋势项。由图3可见,信号的高频成分没有被分离到不同的IMF当中,而大多分布于第1阶IMF中。由于第1阶IMF不满足Boashash的窄带IMF条件<sup>[8]</sup>,导致该IMF瞬时频率发生畸变,使得图4的时频谱很难准确描述转子径

向碰摩故障信号的高频故障特征。图中信号特征频率的能量大小以灰度深浅表示。

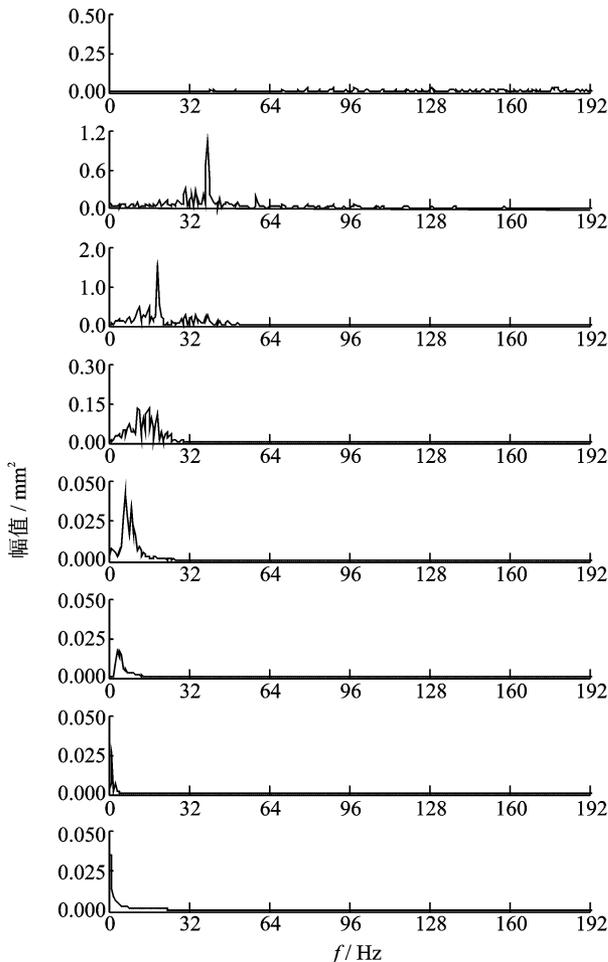


图3 1~7阶IMF和趋势项功率谱

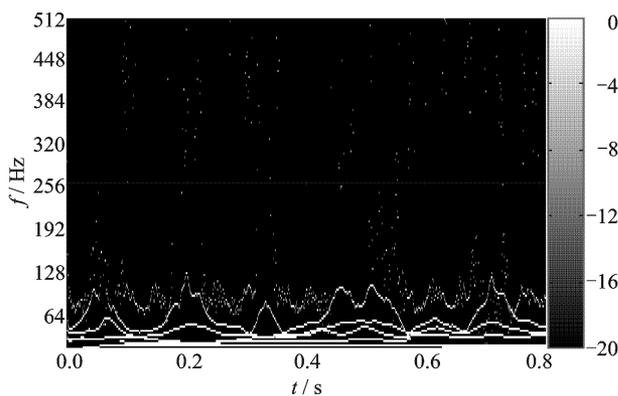


图4 转子径向碰摩故障信号的希尔伯特时频谱

## 2 基于BF-HHT的时频特征提取方法

针对现有HHT时频特征提取方法在提取转子径向碰摩故障信号时的不足,提出一种故障特征提取新方法——BF-HHT方法,其基本流程如图5所示。

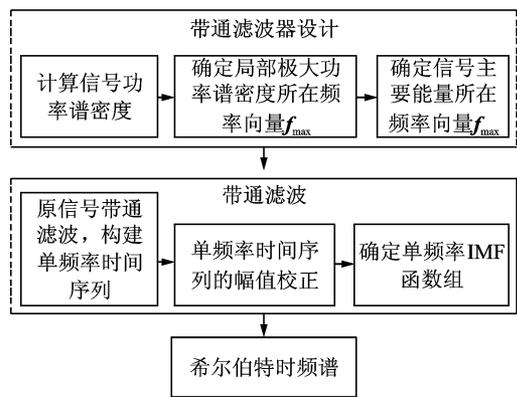


图5 BF-HHT方法流程图

通过对信号特定频率点功率谱密度的计算,确定局部极大功率谱密度所在的频率向量  $f_{\max}$ ,方法如图2(b)所示,图中“o”为频率点所在位置。在信号功率谱上定义两个长度相等且与频率点距离相等的矩形窗,分别计算左、右矩形窗内的平均功率谱密度  $E_l, E_r$  和该频率点的功率谱密度  $E$ 。如果功率谱密度之间满足条件

$$E/E_l \geq \alpha, \quad E/E_r \geq \alpha \quad (8)$$

则认为该频率点的功率谱密度为局部极大值,所在频率为向量  $f_{\max}$  的元素。式(8)中,  $\alpha$  为阈值系数,取值大小视信号噪声水平而定。按照条件(8)确定后的局部极大功率谱密度所在频率向量  $f_{\max}$  如图6中“\*”标记所示。

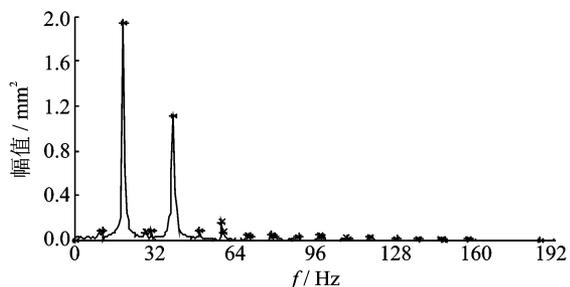


图6 0~192 Hz频段局部极大功率谱密度所在频率

定义能量因子

$$r_j = \sum_j P_j / P \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (9)$$

其中:  $P_j$  为功率谱密度降序排列后的第  $j$  个值;  $i$  为用于构建信号主要能量所在频率向量  $f_{\text{cen}}$  的频率个数;  $P$  为信号总的功率谱密度。

通过将前述  $f_{\max}$  中频率观测点对应的局部极大功率谱密度按照大小降序排列和设定能量因子  $r_j$ , 在信号总的功率谱密度  $P$  已知的条件下确定  $P_j$  的大小,进而确定  $j$  的数值。利用  $P_j$  所在频率组成频率向量  $f_{\text{cen}}$ ,最后根据信号最小频率间隔设定滤波器的

频带范围  $f_b$ 。

确定  $f_{cen}$  和  $f_b$  后,设计最小均方误差线性相位 FIR 滤波器,对信号进行带通滤波处理,共得到  $i$  个单频率时间序列。按照式(10)对这  $i$  个时间序列分别进行幅值校正

$$x_j = \hat{x}_j \sqrt{\hat{P}_j / \hat{P}_j} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (10)$$

其中:  $\hat{x}_j$  和  $x_j$  分别为校正前、后的第  $j$  个时间序列;  $\hat{P}_j$  为校正前第  $j$  个时间序列的功率谱密度。

式(10)的幅值校正使得校正前、后信号的能量保持一致。对幅值校正后的  $i$  个时间序列分别进行 EMD 分解,提取各自分离出来的  $i$  个 1 阶 IMF,利用这些 1 阶 IMF 作希尔伯特时频谱。

根据笔者提出的 BF-HHT 方法对图 2 所示转子径向碰摩故障信号进行时频特征提取。取阈值系数  $\alpha = 1.6$ , 能量因子  $r_j = 0.8$ , 则有  $j = 40$ , 即利用  $f_{max}$  中 40 个功率谱密度较大的频率观测点构建信号主要能量所在频率向量  $f_{cen}$ 。以下对原信号进行带通滤波,带通滤波器的频带范围设为  $f_b = 2$  Hz。

通过对碰摩振动信号的带通滤波,可获得 40 个单频率时间序列。图 7 为中心频率为 2 倍频的信号经频带范围为 2 Hz 的带通滤波器过滤后的功率谱。由图 7 可看出,经带通滤波后的信号是单频时间序列。对这些时间序列进行幅值校正并进行 EMD 分解,可得到 40 个 1 阶 IMF,信号的希尔伯特谱如图 8 所示。

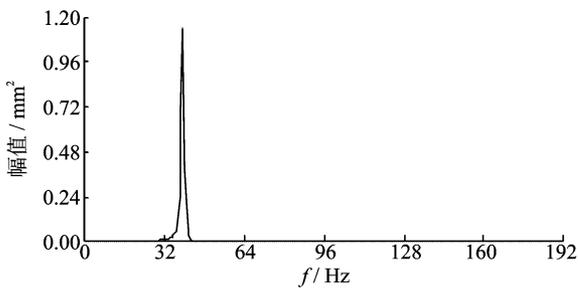


图 7 中心频率位于 2 倍转频的带通滤波器对转子径向碰摩故障信号滤波后的信号功率谱密度

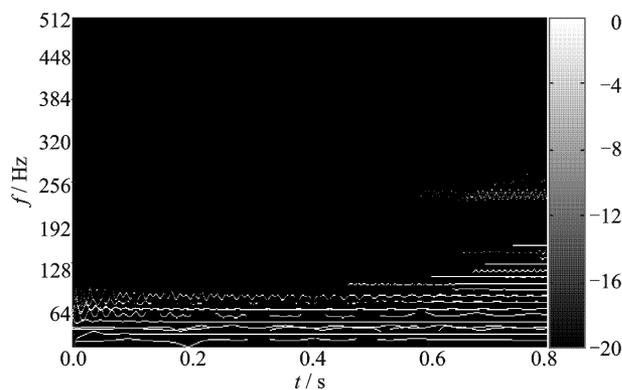


图 8 转子径向碰摩故障信号 BF 滤波后的希尔伯特谱

与图 4 中未经带通滤波的希尔伯特谱相比,图 8 中的谱线更准确地描述了转子径向碰摩故障的发展情况。在整个碰摩过程中,振动信号频率分布连续,成分丰富,其中 1~2 倍频的能量最强,在整个时间历程内都存在。随着碰摩程度的加剧,大于 3 倍频的高频成分和 0.4~0.5 倍频的低频成分逐渐增强。

### 3 BF-HHT 在旋转机械碰摩故障信号特征提取中的应用

为了进一步验证 BF-HHT 对转子径向碰摩故障信号特征提取的有效性,对某国产 600 MW 汽轮发电机在冷态启动过程中密封环与转子发生碰摩故障时的振动信号进行试验验证。该机组的测量转速为 2 226 r/min(转频为 37.11 Hz),振动测量方向与水平成 45°。

以 2 kHz 的采样频率对机组振动信号进行采样,取采样所得数据中长度为 0.2 s 的数据作为分析对象,其时域波形和功率谱如图 9 所示。图 9(b)的功率谱频率范围极宽,频率成分更加丰富,同时出现了 20 倍频的高频成分和约为 0.5 倍频的低频成分,这些都是转子碰摩的典型故障特征。

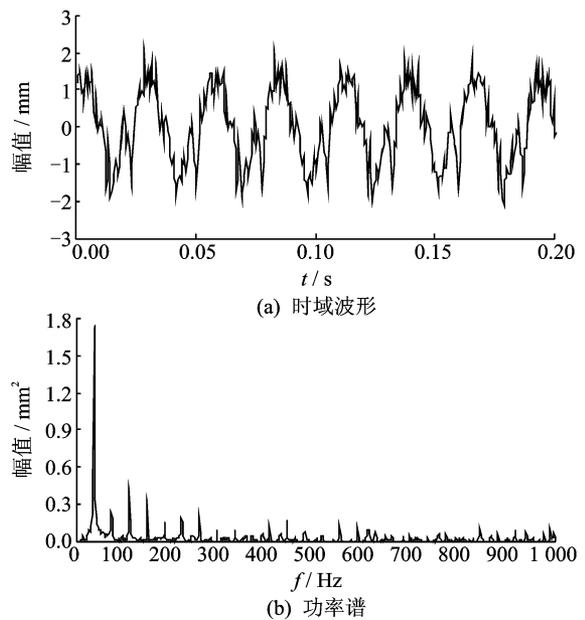


图 9 机组径向碰摩故障信号的时域波形与功率谱

以上故障特征在图 10(a)碰摩信号的希尔伯特谱中没有得到充分体现。除了能量最强的基频成分外,其余频率成分经 EMD 方法所得 IMF 不是单频时间序列,而是出现了谱线混叠现象,间接造成了谱线物理意义的模糊。

将 BF-HHT 方法应用于图 9(a)所示的碰摩信号的时频特征提取,其时频谱如图 10(b)所示。可以发现,碰摩故障发生时的特征频率可清晰地反映在希尔伯特谱的整个时间历程内,其中整数倍频的能量较强,分数倍频能量偏弱。基于 0.4~0.5 倍频和 20 倍频成分出现的判断,整个机组的碰摩程度已经比较严重,必须及时维修。

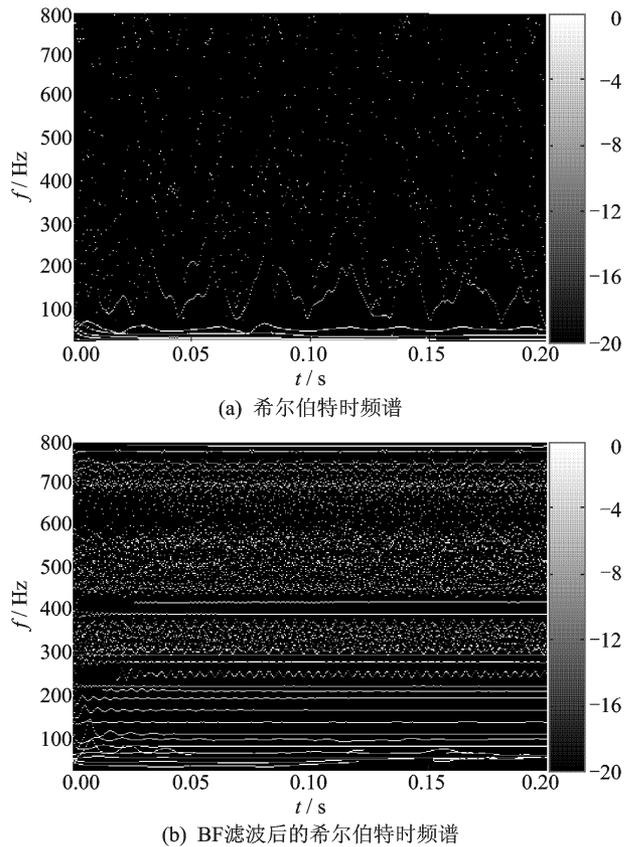


图 10 机组径向碰摩故障信号的希尔伯特时频谱

## 4 结束语

转子发生径向碰摩故障时振动信号频率分布连续,成分丰富。针对 EMD 在分解这类信号时存在的不足,提出了一种基于 BF-HHT 的转子径向碰摩故障信号时频特征提取新方法。该方法通过确定信号主要能量所在频率设计了一组带通滤波器,将其用于对原信号的滤波处理。滤波后原信号经 EMD 所得的 IMF 为单频率函数,利用单频率函数就能准确提取出原信号的瞬时频率特征。通过该方法与 HHT 方法的对比分析后发现,该方法能够准确地反映振动信号各个时刻的频率成分,并且随着转子碰摩程度的不断加剧,振动信号频率成分的变化情况也能在希尔伯特谱中得到精确反映。将该方法用于提取实际机组径向碰摩故障信号的时频特征,效果良好。

## 参 考 文 献

- [1] 李录平. 汽轮发电机组振动与处理[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] Huang N E, Shen Z, Steven R L, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis [C]// Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. United Kingdom: The Royal Society, 1998, 454(1971): 903-995.
- [3] Flandrin P. Time-frequency/time-scale analysis[M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- [4] Peng Zhike, Tse P W, Chu Fulei. A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(5): 974-988.
- [5] 李兵,张培林,任国权,等. 运用 EMD 和 GA-SVM 的齿轮箱故障特征提取与选择 [J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(4): 445-448.  
Li Bing, Zhang Peilin, Ren Guoquan, et al. Gear fault diagnosis using empirical mode decomposition, genetic algorithm and support vector machine [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(4): 445-458. (in Chinese)
- [6] 程军圣,张亢,杨宇. 局域均值分解方法在调制信号处理中的应用 [J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4): 362-366.  
Cheng Junsheng, Zhang Kang, Yang Yu. Application of local mean decomposition method of the processing of modulated signal [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4): 362-366. (in Chinese)
- [7] Kaslovsky D N, Meyer F G. Noise corruption of empirical mode decomposition and its effect on instantaneous frequency [J]. Advance in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(3): 373-396.
- [8] Boashash B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal, Part I: fundamentals [J]. Proceedings of IEEE, 1992, 80(4): 520-538.

第一作者简介:熊焱,男,1983 年 11 月生,博士研究生。主要研究方向为信号处理、大型旋转机械状态监测与故障诊断。

E-mail: xiongxin. zjume@gmail.com