

文章编号:1006-1355(2009)05-0066-04

# 基于微分的经验模式方法在转子裂纹 和碰摩故障诊断中的应用

景蓓蓓, 李鸿光

(上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要:**介绍了基于微分的经验模式方法(DEMD),在Jeffcott裂纹转子模型和碰摩转子模型基础上,对裂纹和碰摩信号进行时间响应分析。结果表明,DEMD比传统的EMD方法呈现出更好的检测效果。研究工作为裂纹和碰摩转子故障诊断提供了一种工具。

**关键词:**振动与波; DEMD; 裂纹; 碰摩; 转子; 故障诊断

中图分类号: TH165<sup>+</sup>.3 文献标识码: A

## Fault Diagnoses of Cracked Rotor and Rub-Impact Rotor Based on DEMD Method

JING Bei-bei, LI Hong-guang

(State Key Laboratory of Mechanical system and Vibration,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The algorithm of DEMD is introduced. Then, the signals of cracked and/or rub-impact rotor are processed by using DEMD and EMD methods. The comparison of the results shows that DEMD method is better than the traditional EMD method for crack and/or rub-impact detection.

**Key words:** vibration and wave; DEMD; crack; rub-impact; rotor; fault diagnosis

小波变换、傅里叶变换等在处理非稳态非线性信号时效果不佳<sup>[1]</sup>。

Hilbert-Huang Transform (HHT)方法由N. E. Huang<sup>[2]</sup>于1998年提出,该方法的核心是经验模式分解方法(EMD)。经验证该方法在很多方面的应用效果都优于其它的信号处理方法,并通过实际应用获得了改进<sup>[3]</sup>。

本文将基于微分的多重经验模式分解方法(DEMD)<sup>[4]</sup>引入到转子裂纹碰摩故障诊断中,使用连续过渡的裂纹开闭函数并考虑了油膜力的影响,使故障系统更接近生产实际。通过对比使用EMD和DEMD两种方法对故障信号的处理结果,显示出

基于微分的多重经验模式分解方法在诊断此类故障中的优越性。研究工作为裂纹和碰摩转子故障诊断提供了一种有效的方法。

## 1 基于微分的经验模式

传统EMD分解步骤文献[5]中有详细描述。基于微分的经验模式分解方法(DEMD)计算步骤如下<sup>[4]</sup>:

- 1) 将原始信号 $x_0(t)$ 进行 $n$ 阶微分得到 $x_n(t)$ ;
- 2) 对 $x_n(t)$ 进行传统 $m$ 阶EMD分解得到各阶IMF: $c_{ni}(t)$ ;
- 3) 对各阶IMF进行一次积分: $\int c_{ni}(t) dt = b_{(n-1)i}(t) + b_{(n-1)i0}$ ;
- 4) 对各 $b_{(n-1)i}(t)$ 进行一阶EMD分解: $b_{(n-1)i}(t) = c_{(n-1)i}(t) + r_{(n-1)i}(t)$ ;
- 5)  $c_{(n-1)i}(t)$ 就为原始信号 $x_0(t)$ 微分( $n-1$ )次后信号的各阶IMF,残余分量 $r_{(n-1)0} = \sum_{i=1}^m r_{(n-1)i}$

收稿日期: 2009-02-19

基金项目: 科技部国际科技合作重点项目(2005DFA00110)

作者简介: 景蓓蓓,(1983-),女,河北省邢台市邢台县,硕士研究生,主要研究信号处理及转子故障诊断领域。

E-mail: j66@sjtu.edu.cn

$$(t) + \sum_{i=1}^m b_{(n-1)i};$$

6) 重复 3) ~ 5) 直至积分  $m$  次获得原始信号  $x_0(t)$  EMD 分解的各阶 IMF 和残余分量。

把任何一个信号  $x(t)$  分解为  $n$  个内在模态函数  $c_{ni}(t)$  和一个残量  $r_n(t)$  之和

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

由上述算法过程知,该方法是将原信号经过对时间多次求导,使新信号的能量尽可能的按频率从高到低递减,即提高了高频信号在信号中的比重。在转子故障诊断中,故障特征一般存在于信号的高频部分。经 DEMD 方法处理后的信号,符合能量按频率递减的规律,更符合经验模式分解的要求,可以使信号得到更有效的分解,因此有利于故障信号的诊断。

## 2 裂纹-碰摩耦合故障转子模型

具有碰摩和横向裂纹耦合故障的单盘轴系统如图 1 所示,考虑与裂纹相垂直方向的刚度变化,使用连续过渡型裂纹开闭函数<sup>[7]</sup>,并考虑了油膜力<sup>[8]</sup>的影响,得到系统运动微分方程如方程(2)所示,其中连续性裂纹开闭函数、碰摩力计算式和无量纲油膜力计算式见文献[7~9]。

公式(2)中  $m$  为质量,  $k$  为刚度,  $c$  为阻尼,  $\xi$ 、 $\delta$  是与裂纹深度有关的参数,  $F(\theta)$  为裂纹开闭函数,  $P_x$ 、 $P_y$  为碰摩力,  $f_x$ 、 $f_y$  为油膜力。

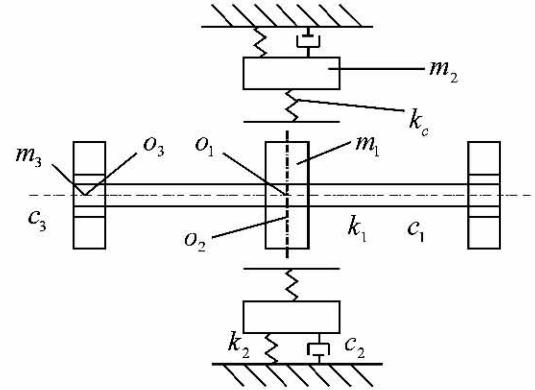


图 1 碰摩和横向裂纹耦合故障的单盘轴系统

Fig. 1 The sketch map of rotary system with one Rotor Mass Wheel with crack and friction faults

转轴出现裂纹,相当于转轴界面对称性破缺,在圆周方向存在最大和最小两个抗弯刚度。转子旋转一周,动挠度变化两次,故引起两倍于转速频率的振动。裂纹越大,二倍频的振动分量也越大,如图 2(a) 所示。这一特征可作为判断裂纹存在的依据。在实际测试转轴裂纹时可能出现更复杂的特征,如三倍频振动分量的出现等。

当出现局部碰摩时,在一个转动周期内转子和定子间只有部分弧段接触,作用在转子上的冲击和摩擦力造成转子阻尼、刚度等发生变化,这种参数的变化使振动信号出现非线性,频谱图上表现为  $2X$  分量的出现。复杂情况下,也会出现更高阶次的谐波。在本文中的研究中,碰摩在一个周期内发生三次,则在一个周期内看到信号发生三次变化。

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + 2k_1 \left[ 1 - \frac{\xi \delta}{2} F(\theta) \right] (x_1 - x_3) + \xi k_1 F(\theta) [(x_1 - x_3) \cos 2\omega t + (y_1 - y_3) \sin 2\omega t] \\ = P_x(x_1, y_1, x_2, y_2) + m_1 e \omega^2 \cos \omega t \\ m_1 \ddot{y}_1 + c_1 \dot{y}_1 + 2k_1 \left[ 1 - \frac{\xi \delta}{2} F(\theta) \right] (y_1 - y_3) + \xi k_1 F(\theta) [(x_1 - x_3) \sin 2\omega t + (y_1 - y_3) \cos 2\omega t] \\ = P_y(x_1, y_1, x_2, y_2) - m_1 e \omega^2 \sin \omega t - m_1 g \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 = -P_x(x_1, y_1, x_2, y_2) \\ m_2 \ddot{y}_2 + c_2 \dot{y}_2 + k_2 y_2 = -P_y(x_1, y_1, x_2, y_2) - m_2 g \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_3 \dot{x}_3 + k_1 \left[ 1 - \frac{\xi \delta}{2} F(\theta) \right] (x_3 - x_1) + \frac{k_1}{2} \xi F(\theta) [(x_3 - x_1) \cos 2\omega t + (y_3 - y_1) \sin 2\omega t] = f_x(x_3, \dot{x}_3, y_3, \dot{y}_3) \\ m_3 \ddot{y}_3 + c_3 \dot{y}_3 + k_1 \left[ 1 - \frac{\xi \delta}{2} F(\theta) \right] (y_3 - y_1) + \frac{k_1}{2} \xi F(\theta) [(x_3 - x_1) \sin 2\omega t + (y_3 - y_1) \cos 2\omega t] = f_y(x_3, \dot{x}_3, y_3, \dot{y}_3) - m_3 g \end{array} \right. \quad (2)$$

将相同工况下相同时间段内信号的 EMD 分解图和 DEMD 分解图进行了对比,如图 3。很显然,在两种分解方法的对比图中都能辨别出裂纹转子信号特征,即二倍频分量的存在。裂纹信号特征由分

解出的第一阶内在模函数 IMF1 显现出来。在二者的 HHT 谱图中,DEMD 分解方法比 EMD 方法的故障特征略为明显,如图 4。因此,在裂纹故障的诊断中,EMD 方法和 DEMD 方法具有相同的诊断效果。

对于碰撞故障,由上述分析知,一个周期内三次碰撞会引起信号一个周期内的三次波动。这一特征在传统EMD和DEMD分解方法的第一阶内在模函数IMF1中体现,如图3。显然,传统EMD方法的故障特征并没有DEMD方法明显,这是由于DEMD方法是在EMD分解之前对信号进行微分变换,这一变换使得微分后的新的信号频率不会改变,但其高阶部分的能量占总能量的比重变大,而故障信号一般存在于信号的高阶部分,因此,高阶部分比重的增大,使得经过EMD分解后的信号具有更加明显的故障特征。

碰撞-裂纹耦合故障的辨别相对困难。对于碰

摩故障的辨别,仍可以使用碰撞单一故障时的识别方法,即信号在周期内的波动。同样的,DEMD较传统EMD分解方法具有更加明显的故障特征,如图3所示。但是,要清楚地区分出碰撞单一故障和碰撞-裂纹耦合故障,还要借助HHT谱图的帮助。从图4两种不同分解方法得到的HHT对比谱图中看出,传统EMD方法所得HHT谱图中,碰撞信号和碰撞-裂纹耦合信号差别不大,很难辨别出是单一故障还是耦合故障;在DEMD方法得到的HHT谱图中,除了同样由碰撞信号引起的高频部分波动外,由于裂纹的存在使得低频部分也出现明显的波动。据此,可以将单一碰撞故障和碰撞-裂纹耦合故障加以有效区分。

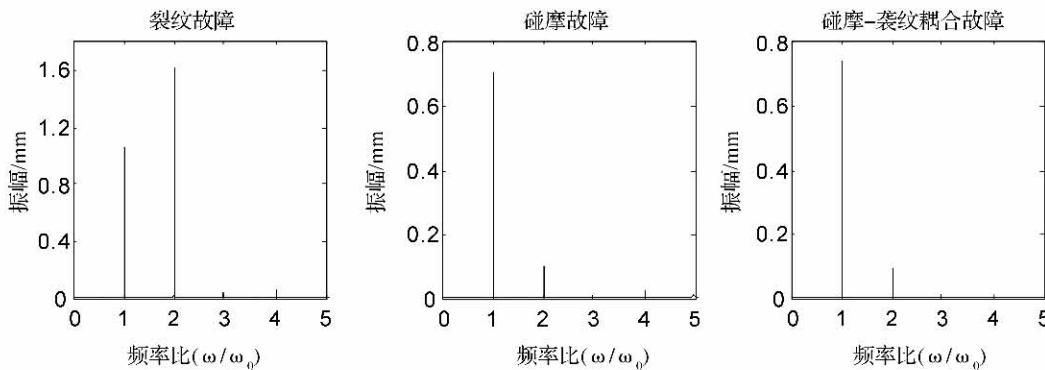


图2 故障信号幅频图: (a)裂纹;(b)碰撞;(c)碰撞-裂纹耦合

Fig. 2 The amplitude frequency diagram with fault of (a) Crack; (b) Friction; (c) Crack and friction

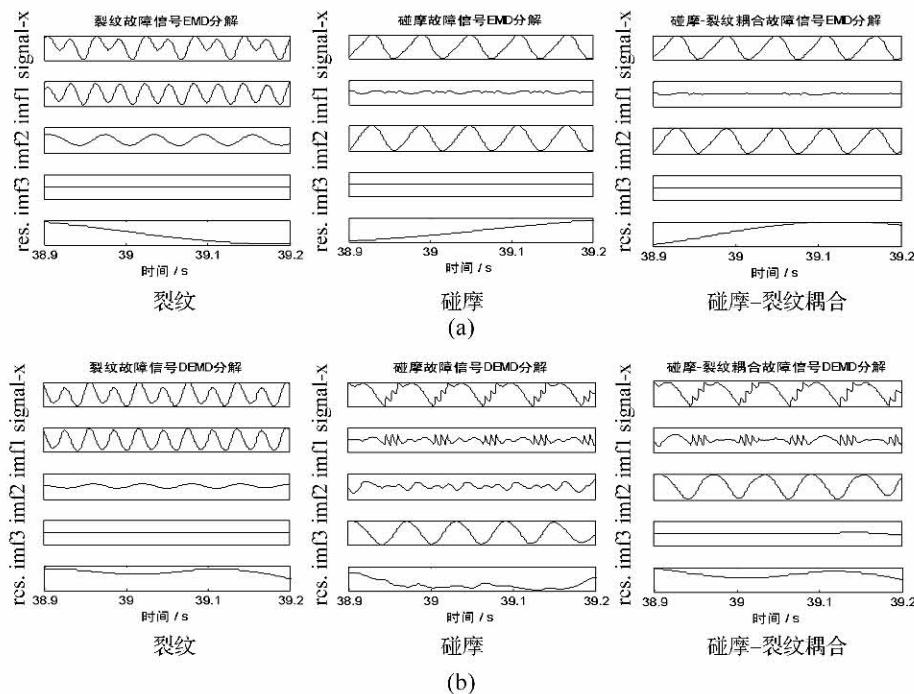


图3 故障信号处理结果: (a) EMD方法;(b) DEMD方法

Fig. 3 The diagram of signal processing by (a) EMD; (b) DEMD

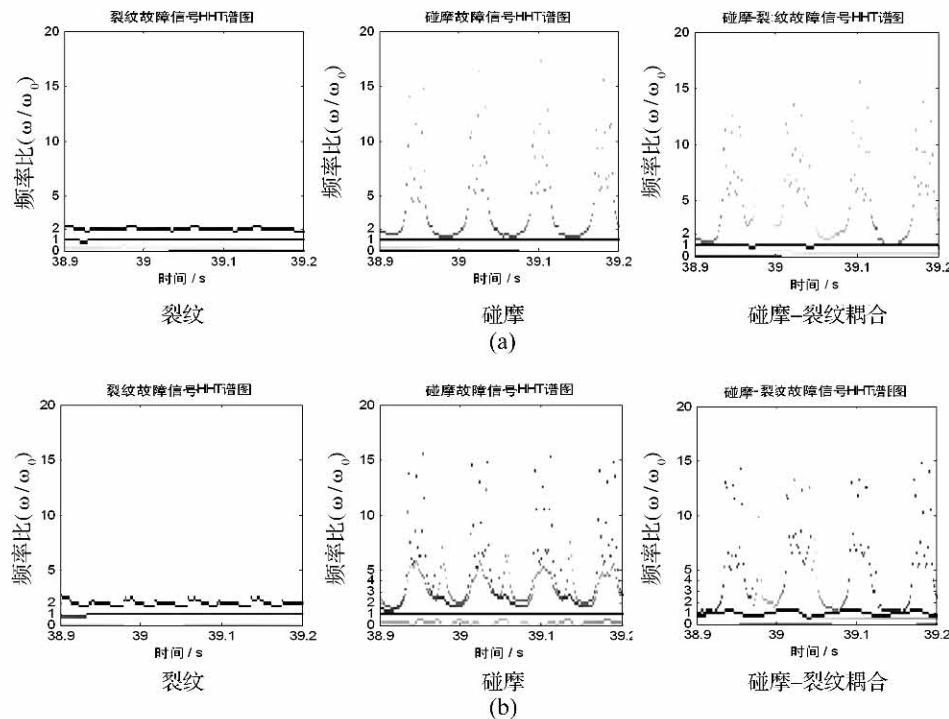


图 4 故障信号 HHT 谱图: (a) EMD 方法; (b) DEMD 方法

Fig. 4 The Hilbert-Huang spectrum diagram for fault - signals by (a) EMD; (b) DEMD

### 3 结语

本文将基于微分的经验模式分解引入到转子碰摩 - 裂纹耦合故障诊断中,并完善了故障模型。研究发现,基于微分的经验模式分解方法能够把信号中比重较小的高频成分分离显现出来,比传统经验模式分解方法具有更加明显的故障特征提取效果。在单一碰摩故障和碰摩 - 裂纹耦合故障中效果最好,为转子故障的诊断提供了一种工具。

### 参考文献:

- [1] 张 韧. 旋转机械故障特征提取技术及其系统研究 [D]. 浙江大学, 2004. 2:67 - 84.
- [2] Huang, N. E. , et al. , The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[ C ]. Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineer-

ing Sciences. 1998. 454 (1971) : 903 - 995.

- [3] 张郁山, 梁建文, 胡聿贤. 应用自回归模型处理 EMD 方法中的边界问题[J]. 自然科学进展, 2003:1054 - 1059.
- [4] 何 旭. 经验模式分解的研究及其在故障诊断中的应用[D]. 上海交通大学, 2004.
- [5] 胡爱军, 安连锁, 唐贵基. 转子碰摩故障振动时频特征的实验研究[J]. 动力工程, 2007:482 - 486.
- [6] 唐贵基, 王维珍, 胡爱军, 等. Hilbert-Huang 变换及其在旋转机械故障诊断中的应用 [J]. 矿山机械, 2005 (05):78 ~ 79.
- [7] 朱厚军, 赵 玮, 王德洋. JEFFCOTT 裂纹转子动力特性的研究[J]. 振动与冲击, 2001(01):1 - 4.
- [8] 李振平, 罗跃纲, 姚红良等. 具有裂纹-碰摩耦合故障转子-轴承系统的动力学研究[J]. 应用力学学报, 2003: 136 - 140.
- [9] 罗利军. 轴承-转子-机匣系统碰摩的非线性动力学特性研究 [D]. 河北工业大学, 2006:37 - 41.