

文章编号: 1000-8055(2007)10-1779-06

改进 Hilbert-Huang 变换及其在转静子 碰摩仿真中的应用

何 田¹, 刘献栋², 单颖春², 李其汉¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083;

2. 北京航空航天大学 汽车工程系, 北京 100083)

摘 要: 针对 Hilbert-Huang 变换 (HHT) 的不足, 应用时间序列重构矩阵奇异值分解的能量分析方法改进了 HHT, 并提出了用来识别伪固有模态函数 (IMF) 的方法. 利用仿真信号检验了改进 HHT 的效果. 将改进后的 HHT 应用到某双转子航空发动机轻碰摩故障仿真试验结果的检测中, 并与改进前 HHT 和小波分析的结果进行了比较, 得出了改进后的 HHT 具有有效分离出微弱信号分量等优势, 且能比小波变换更好地确定碰摩的存在.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 改进 HHT; 碰摩; 经验模态分解 (EMD); 故障诊断
中图分类号: TH17 **文献标识码:** A

Improved Hilbert-Huang transform and its application in rotor-stator rub

HE Tian¹, LIU Xian-dong², SHAN Ying-chun², LI Qi-han¹

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Department of Automobile Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to overcome the shortages of Hilbert-Huang transform (HHT), an improved HHT was proposed by the energy analysis method based on the singularity value decomposition of the track matrix reconstructed by time series, and a method for judging the pseudo-IMFs by empirical mode decomposition (EMD) was also presented. The advantages of improved HHT were verified from simulation signals. Then, the improved HHT was applied to detect the slight rubbing simulation of dual-rotor aero engine. The simulation results were compared with previous HHT and wavelet transform, respectively, showing that the improved HHT has the advantage of separating efficiently the weak component of signals from other strong components, and also confirming the slight rubbing more easily. The analytical results provide a useful reference for diagnosing the fault of rubbing.

Key words: aerospace propulsion system; improved Hilbert-Huang transform (HHT); rub; empirical mode decomposition (EMD); fault diagnose

收稿日期: 2006-11-20; 修订日期: 2007-01-31

基金项目: 航空科学基金 (03151037)

作者简介: 何田 (1979-), 男, 四川广安人, 博士生, 主要从事机械系统动力学及故障诊断的研究.

在机械系统诊断领域,信号处理是一种重要的手段.机械设备在运行过程中当故障(例如转-静件碰摩)发生或发展时,将导致动态信号非平稳性的出现,其振动信号表现出非平稳特征,如何从非平稳振动信号中提取故障特征信息往往是故障诊断的关键.在非平稳信号处理方面,时-频分析,特别是小波分析用得非常广泛,但是小波变换也有着自身的缺陷,有时候效果难以满足诊断的需要^[1-2].

近年来,一种新的时频信号分析方法——HHT(Hilbert-Huang transform)在非平稳信号处理方面取得了重大进展^[3].该方法具有小波变换的多分辨的优势,同时克服了小波变换中需要选取小波基的困难;且从信号本身的尺度特征出发对信号进行分解,能尽快地分析出信号的特征,具有良好的局部适应性,从而在故障诊断领域有很大的应用前景^[4].但该方法作为一种新方法,在理论上还有待完善,在故障诊断领域的应用还存在一些不足:在低频范围产生不期望的 IMF^[2,5]、难以分辨频率成分接近的信号和有时难以分离微弱信号等^[3].这些缺点对故障诊断来说是不利的.因此利用 HHT 进行故障诊断时,往往根据实际情况进行必要的改进或处理.

从频率的方面着手对数据进行预处理是较为常用的方法,即对信号窄带化以增强经验模态分解的效果.例如文献^[2,5]先利用小波包对原始信号带通滤波得到一组窄带信号,然后分别对得到的各个信号进行经验模态分解.但是这样的预处理有两个不足:一是小波(包)变换这样的预处理会带来频率误差;二是经验模态分解也不一定能很好地分解窄带信号,例如 Huang 自己也指出,相隔很近的频率成分较难分离^[3].此外窄带信号不是经验模态分解的必须条件,例如文献^[6]指出,满足一定条件的多频信号能被很好地进行经验模态分解,这样的多频信号不需要是窄带信号.

一般来说,单分量信号满足不在同一频段或在同一频段但不具有相同的能量.因此本文从能量的观点出发,结合基于相空间重构的奇异值分解方法,对需要经验模态分解的数据进行了预处理,有效地解决了 EMD 原有的几个缺点,并引入到碰摩信号的处理中,取得了良好的效果.

1 HHT 简介

1.1 Hilbert 变换

作为一种著名的信号处理方法,Hilbert 变换定义为实值函数 $x(t)$ ($t \in (-\infty, +\infty)$) 与 $1/t$ 的

卷积

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\pi(t-\tau)} d\tau \quad (1)$$

$x(t)$ 与 $y(t)$ 形成一复共轭对,其解析信号为

$$z(t) = x(t) + jy(t) = a(t)e^{j\phi(t)} \quad (2)$$

式中 $a(t)$ 表示 $x(t)$ 的瞬时幅值,反映 $x(t)$ 的能量随时间的变化, $a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}$; $\phi(t)$ 表示 $x(t)$ 的瞬时相位, $\phi(t) = \arctan[y(t)/x(t)]$.

如果 $x(t)$ 是单分量信号,则其通过 Hilbert 变换得到的瞬时相位 $\phi(t)$ 对时间 t 的倒数就是 $x(t)$ 的具有物理意义的瞬时频率 $\omega(t)$,即

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (3)$$

1.2 HHT 简介

上一节提到,如果 $x(t)$ 是单分量信号,则其通过 Hilbert 变换得到的瞬时相位 $\phi(t)$ 对时间 t 的倒数就是 $x(t)$ 的具有物理意义的瞬时频率 $\omega(t)$.但是非常遗憾的是在实际绝大多数情况下,信号不是单分量形式的.这大大限制了瞬时频率的应用.因此 Huang 等^[3]提出了 EMD 来解决此问题,即利用 EMD 将原信号分解为一组称为固有模态函数(IMF)的单分量信号,以适合 Hilbert 变换. EMD 的具体过程可以参考文献^[3].多分量信号经过 EMD 后可以得到一组 IMF_s($c_i, i = 1, 2, \dots, n$) 和一个残余分量(r_n)的和

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (4)$$

对所得到的每一个 IMF(c_i) 进行 Hilbert 变换,根据式(2)和(3)计算出瞬时频率 $\omega(t)$.信号可以利用瞬时频率来表示

$$x(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \exp\left[j \int \omega_i(t) dt\right] \quad (5)$$

通过式(5)可以利用三维图或等高线图表示作为时间函数的瞬时幅值和瞬时频率,如果只需要分析某些分量的瞬时幅值或瞬时频率,也可以作时间-幅值图或时间-频率图等.基于 EMD 的 Hilbert 变换也被称为 Hilbert-Huang 变换,简称为 HHT.幅值的时频分布被称为 Hilbert-Huang 谱.

2 改进的 Hilbert-Huang 变换

2.1 HHT 改进的必要性和改进的出发点

在理想情况下,经过 EMD 得到的 IMF 是完备、自适应和几乎正交的,因此 HHT 非常适合非平稳、非线性的信号分析.但是在实际应用中,会

遇到一些问题,例如由于端点振荡的传播导致伪的 IMF、第一阶 IMF 覆盖很广的频率范围、无法较好分离相距较近的分量和微弱信号等等。这些问题的出现对于故障诊断的精确诊断显然是非常不利的。

故障诊断中,不同的分量一般具有不同的能量分布,只有白噪声在整个频率范围有相同的能量分布。可以通过能量分析的方法将原始信号能量不同的分量首先区分开来,然后再对得到的不同能量的信号进行 EMD。这样有几个好处:一是能预先分离出微弱信号;二是能区分能量不同的频率相隔较近的分量;三是由于同一能量区域分布的分量一般具有窄带性质,通过能量分解的信号往往就是窄带信号;四是通过能量的判断能有效地分辨出伪 IMF;五是在必要时能同时去除噪声。

2.2 SVD 信号分析介绍

假设具有某故障的机械系统测试信号为 x_1 , x_2 , x_3 , $\dots$; 则重构的吸引子轨迹矩阵可表示为

$$D_m = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{n+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_m & x_{m+1} & \cdots & x_{m+n-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 D_m 的奇异值分解是指存在矩阵 $U \in R^{m \times m}$, $U \cdot U^T = I$ 和 $V \in R^{n \times n}$, $V \cdot V^T = I$, 以及矩阵 $A = [\text{diag}\{\lambda_1 \ \lambda_2 \ \cdots \ \lambda_p\} : 0]$, 使得

$$D_m = U A V^T \quad (7)$$

式中: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \cdots \geq \lambda_p > 0$ 称为矩阵 D_m 的奇异值。矩阵 D_m 的秩为 p , 且 $p \leq \min(m, n)$ 。 U, V 分别称为矩阵 D_m 的左、右奇异矩阵。

信号表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^m \lambda_i u_i v_i^T \quad (8)$$

选择不同的 λ 进行奇异值分解的逆过程和相空间重构的逆过程, 就能得到信号内不同能量的信号分量; 将相近大小的奇异值放在一起重构, 就得到能量相近的信号分量组成的信号。

这样, 通过奇异值分解, 能将能量差异较大的信号分量分离。然后可以对分离后的各信号进行经验模态分解。

2.3 伪 IMF 的识别

由于每个进行 EMD 的信号都是具有相近大小能量的信号分量组成的, 因此经过 EMD 得到的 IMF_{*i*} 也因该具有同等级的能量。因此, 在经过 EMD 后得到的能量相对较小的 IMF_{*i*} 可以认为

是伪 IMF_{*i*}。具体的方法可以是, 对每个 IMF 求其能量, 即

$$E_i = \sum_j^n \text{IMF}_i(j)^2 \quad (9)$$

然后将其归一化

$$e_i = \frac{E_i}{\max(E_i)} \quad (10)$$

对应较小的 e_i 的 IMF 可以认为是虚假的 IMF。 e_i 的门限可以根据实际情况选取。实际上, 虚假的 IMF_{*i*} 一般在能量上与真实的 IMF_{*i*} 相差较大, e_i 的门限选取不难。在本文中取门限值为 0.2。

2.4 改进的 HHT

通过前面的分析, 改进的 HHT 如图 1 所示。

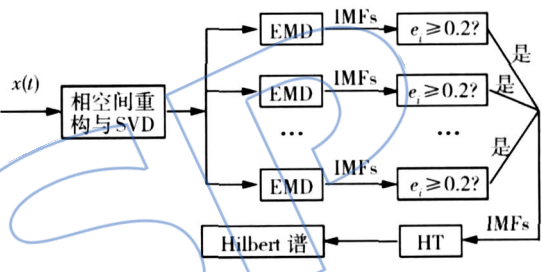


图 1 改进 HHT 示意图

Fig.1 Sketch of the improved HHT

3 仿真试验

为了说明该方法的优点, 利用数值仿真对改进前的 HHT 和改进后的 HHT 处理结果进行对比。

给定一个仿真信号的解析表达式如下

$$x(t) = 3\cos(70\pi t) + 1.1\cos(60\pi t) + \cos(130\pi t) + 0.05[1.5 + \cos(60\pi t)] \times \sin[400\pi t + 0.5\cos(200\pi)]$$

其时域波形和幅值谱如图 2 所示。该信号由 3 个余弦信号和一个非平稳信号组成。非平稳信号是基频为 200 Hz、调制频率为 100 Hz、调幅频率为 30 Hz 的低能量非线性信号。对该信号直接进行 EMD 得到如图 3 所示的 IMF_{*s*} 和残余分量, 图 4 是 IMF 的瞬时频率。可以看出直接 EMD 得到的是伪的 IMF_{*s*}, 也丢失了能量较小的分量; 且计算出来的瞬时频率也与事实相悖。

利用本文的方法, 取重构维数为 200 相空间矩阵, 其奇异值分布如图 5 所示。奇异值通过大小可以分为 3 部分: $\lambda_i (i = 1, 2)$, $\lambda_i (i = 3 \sim 6)$ 和 $\lambda_i (i = 7 \sim 200)$ 。将 3 段的奇异值分别重构信号得到如图 6 所示的 3 个信号分量。可见, 原信号能量最大的分量和能量较小的分量被分开了。对不同的

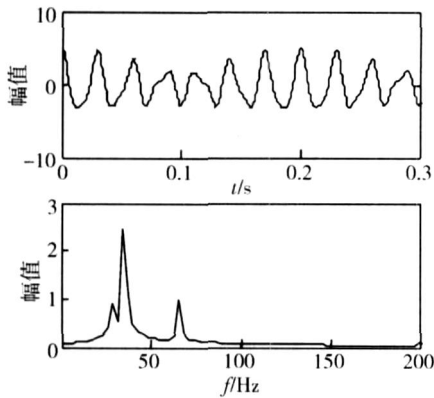


图 2 信号时域波形

Fig. 2 Time-domain curve and frequency domain curve

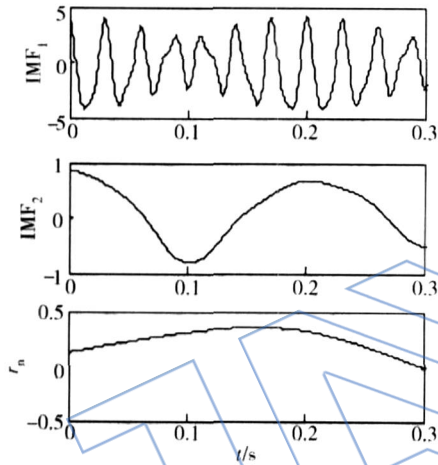


图 3 信号的 IMFs 和残余分量

Fig. 3 IMFs and final residue of the signal

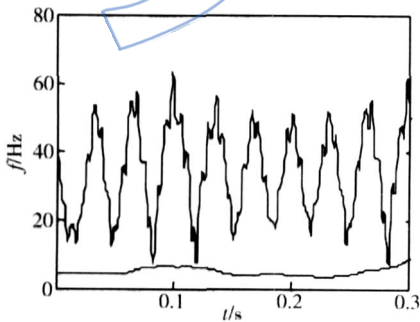


图 4 信号的时-频图

Fig. 4 Time-frequency curves of the signal

信号分量分别进行分解,并求出每个 IMF 的能量如表 1 所示.根据本文提出的伪 IMF 识别的方法,相对能量大于 0.2 的 IMFs 只有 4 个,如图 7 所示.通过 Hilbert 变换求出 4 个 IMFs 的瞬时频率如图 8 所示,可见这 4 个频率完全重现了原信号的特征.不管是频率接近的信号、还是能量较低

的信号都正确地重现出来了.

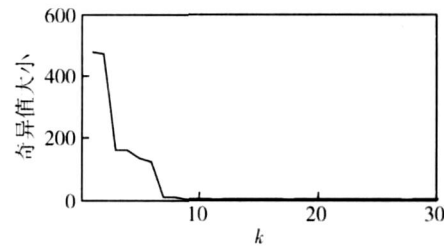


图 5 重构矩阵的奇异值

Fig. 5 Singularity value of the reconstructed matrix

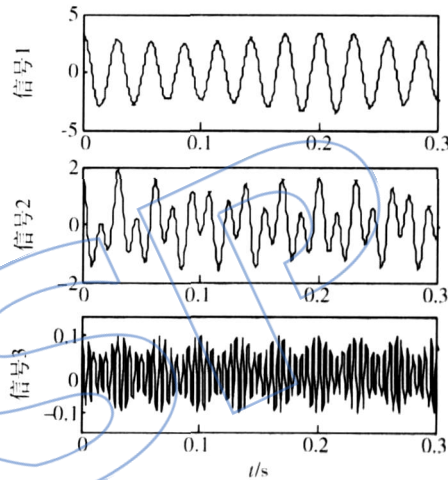


图 6 SVD 分解后的信号

Fig. 6 Time-domain curves of the signals obtained by SVD

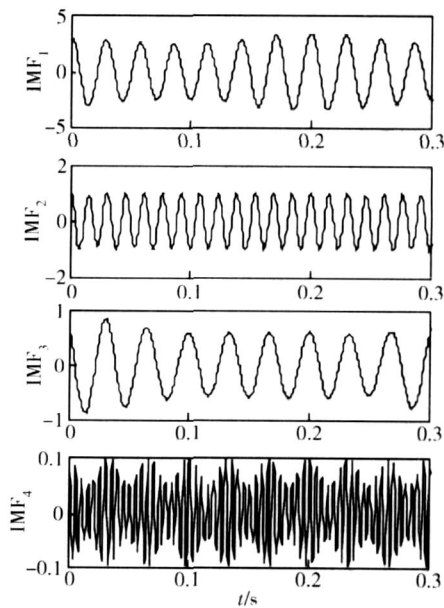


图 7 经过改进方法得到的 IMFs

Fig. 7 IMFs obtained by the improved method

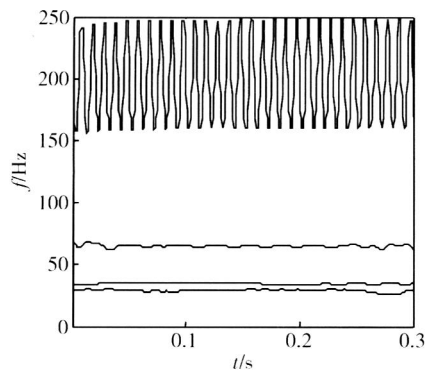


图 8 改进 HHT 得到的原信号的时-频图

Fig. 8 Time-frequency curves of the signal obtained by improved HHT

表 1 分解信号分量 EMD 得到的 IMFs 的归一化能量
Table 1 Normalized energy of the IMFs obtained by the EMD of decomposed signals

IMF 分量	信号 1	信号 2	信号 3
IMF ₁	1	1	1
IMF ₂	0.000 03	0.418 79	0.000 47
IMF ₃	无	0.011 39	0.000 03
IMF ₄	无	0.007 16	4.7×10^{-6}
IMF ₅	无	0.001 70	5.8×10^{-6}
IMF ₆	无	无	1.2×10^{-6}
IMF ₇	无	无	1.7×10^{-6}

4 HHT、改进 HHT 和小波变换在转静件轻碰摩故障诊断中的比较

为了验证改进 HHT 在故障诊断的优点和效果,本文利用改进前和改进后的 HHT 分析了文献[7]的轻碰摩故障数据,该轻碰摩数据的时域波形和幅值谱如图 9 所示.在碰摩信号中,高低速转子的频率成分较为接近,而轻碰摩引起的非平稳信息非常微弱.

直接进行 HHT 变换得到的时频图如图 10 所示.从图中可以看出,各 IMFs 的瞬时频率很难解释,不能与实际情况相吻合,可以认为 EMD 分解结果不适当.对信号进行相空间重构(重构维数 500),其奇异值如图 11 所示,同样,奇异值通过大小可以分为三部分: $\lambda(i=1,2)$, $\lambda(i=3,4)$ 和 $\lambda(i=5\sim 500)$.将 3 段奇异值分别重构信号得到如图 12 所示的 3 个信号分量.可见,原信号中能量最大的分量和能量较小的分量被分开了.

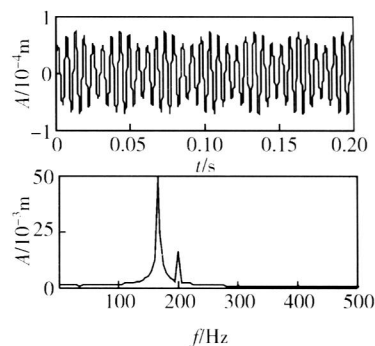


图 9 信号时域波形图与幅值谱

Fig. 9 Time-domain curve and frequency domain curve

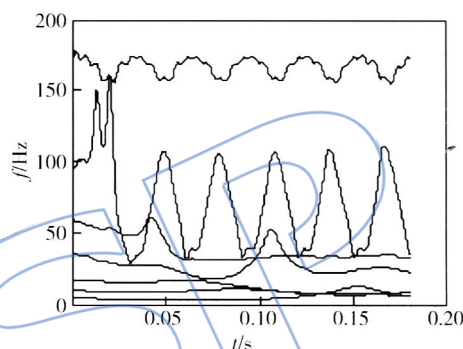


图 10 原信号的时-频图

Fig. 10 Time-frequency curves of the signal

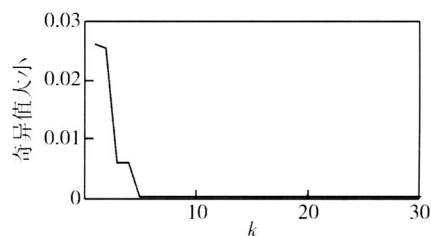


图 11 重构矩阵的奇异值

Fig. 11 Singularity values of the reconstructed matrix

对不同的信号分量分别 EMD,并求出每个 IMF 的能量如表 2 所示.根据本文提出的伪 IMF 识别的方法,相对能量大于 0.2 的 IMFs 只有 5 个.通过 Hilbert 变换求出 5 个 IMFs 的瞬时频率如图 13 所示.从图 13 可见,碰摩信号的瞬时频率不但包含高、低压转子的工作频率,而且包含低频成分和周期性突变的高频成分.而这正是反映碰摩的两个特征^[2].

可见是轻碰摩导致高、低频成分的产生,且在碰摩的开始和结束时瞬时高频成分增加而在碰摩过程的中反而抑制了高频的振动,导致高频成分

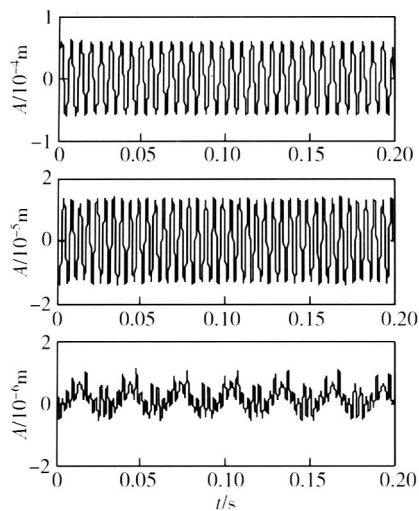


图 12 SVD 分解后的信号

Fig. 12 Time-domain curves of the signals obtained by SVD

表 2 分解信号分量 EMD 得到的 IMF 的归一化能量
Table 2 Normalized energy of the IMF s obtained by the EMD of decomposed signals

IMF 分量	信号 1	信号 2	信号 3
IMF ₁	1	1	1
IMF ₂	0.000 16	4.2×10^{-6}	0.158 91
IMF ₃	0.000 17	1.3×10^{-7}	0.236 52
IMF ₄	0.000 05	3.9×10^{-8}	0.403 60
IMF ₅	5.0×10^{-7}	2.1×10^{-8}	0.005 59
IMF ₆	无	5.7×10^{-8}	0.002 11
IMF ₇	无	0.8×10^{-8}	无

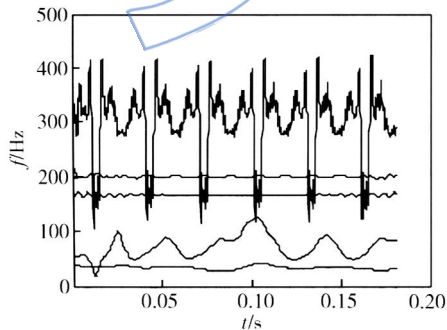


图 13 原信号的时-频图

Fig. 13 Time-frequency curves of the signal

周期性地突变.因此该频率具有非常实际的物理意义.而对于文献[7]中的小波变换结果来说,虽然能在小尺度上看出碰摩信号,但是不能分辨碰摩引起的低频成分.而且 HHT 的瞬时频率比小波变换的尺度更加直观.因此,改进后的 HHT 比小波变换在轻碰摩故障诊断中有一定的优势.

5 结 论

本文结合基于相空间重构矩阵奇异值分解的能量分析方法,改进了 Hilbert- Huang 变换.并与改进前的 HHT 和小波变换分析结果进行了比较,得到了以下结论:(1)改进后的 HHT 能有效地检测出微弱能量的信号;(2)改进后的 HHT 能有效地分开频率相近但能量不同的信号分量;(3)改进的 HHT 更能得到正确的 IMF 和有意义的瞬时频率;(4)改进的 HHT 对于小波变换在轻微碰摩故障诊断中具有一定的优势.

参考文献:

[1] Peng Z K,Chu F L,He Y Y. Vibration signal analysis and feature extraction based on reassigned wavelet scalogram [J].Journal of Sound and Vibration,2002,253(5):1087-1100.

[2] Peng Z K,Peter W T,Chu F L. A comparison study of improved Hilbert- Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2005,19:974-988.

[3] Huang N E,Shen Z,Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc R Soc Lond A , 1998,454:903-995.

[4] 胡劲松,杨世锡,吴昭同,等. 基于 EMD 和 HT 的旋转机械振动信号时频分析[J]. 振动、测试与诊断,2004,24(2):106-110.

HU Jingsong, YANG Shixi, WU Zhaotong, et al. Time-frequency analysis of vibration signals in rotating machinery [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2004,24(2):106-110.

[5] Peng Z K,Peter W T,Chu F L. An improved Hilbert- Huang transform and its application in vibration signal analysis[J].Journal of Sound and Vibration,2005,286:187-205.

[6] 沈国际,陶利民,陈仲生. 多频信号经验模态分解的理论研究及应用[J]. 振动工程学报,2005,18(1):97-94.

SHEN Guoji,TAO Limin,CHEN Zhongsheng. Theoretical research on empirical mode decomposition of multi-frequency signal and its application[J]. Journal of Vibration Engineering,2005,18(1):97-94.

[7] 单颖春,刘献栋,何田,等. 双转子系统碰摩有限元接触分析模型及故障诊断[J]. 航空动力学报,2005,20(5):789-794.

SHAN Yingchun,LIU Xiandong,HE Tian,et al. Research on the finite element impact-contact analytical model of dual-rotor system and its diagnosis method[J]. Journal of Aerospace Power,2005,20(5):789-794.