

文章编号: 1000-8055(2009)08-1899-05

改进 Hilbert-Huang 变换在齿轮故障诊断中的应用

沈 路¹, 李俊生², 王鸿钧², 张文斌^{1,2}

(1. 浙江大学 现代制造工程研究所, 杭州 310027;

2. 红河学院 工学院, 云南 蒙自 661100)

摘 要: 针对 Hilbert-Huang 变换中齿轮故障信号经验模式分解的第一阶固有模态函数通常为非单一信号分量以及经验模式分解产生虚假低频分量的问题, 提出一种改进 Hilbert-Huang 变换方法. 首先在频谱中确定故障信息频率范围, 并依据该频率范围和二进小波分解的特点确定需提取的相应频带的二进小波系数, 然后采用相关系数筛选法剔除小波系数经验模式分解所产生的虚假分量, 最后通过局部瞬时能量提取故障特征, 实例表明改进的 Hilbert-Huang 变换可以有效的提取齿轮故障特征.

关 键 词: 航空发动机; 齿轮故障诊断; 改进 Hilbert-Huang 变换; 二进小波系数提取; 相关系数筛选法

中图分类号: TH165

文献标识码: A

Application of improved Hilbert-Huang transform method in gear fault diagnosis

SHEN Lu¹, LI Jun-sheng², WANG Hong-jun², ZHANG Wen-bin^{1,2}

(1. Institute of Modern Manufacturing Engineering,

Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Engineering College, Honghe University,
Yunnan Mengzi 661100, China)

Abstract: The first intrinsic mode function (IMF) is generally a multi-component as the result of the abundant frequency component in gear fault signal. Pseudocomponents in low frequency may be produced in empirical mode decomposition (EMD). An improved Hilbert-Huang transform (HHT) method was proposed to overcome these two problems. Frequency span of fault information has been achieved in frequency spectrum, so corresponding binary wavelet coefficient of narrow-band signal could be extracted. The method of correlation coefficient screening was used to remove pseudocomponent in EMD of wavelet coefficient. Local instant energy was used to extract gear fault feature. It is demonstrated that improved HHT method could diagnose the gear fault effectively.

Key words: aero-engine; gear fault diagnosis; improved Hilbert-Huang transform; binary wavelet coefficient extraction; correlation coefficient screening method

减速器是航空发动机动力涡轮功率输出环节 的关键设备, 由于其在工作当中转速比高且承受

收稿日期: 2008-07-31; 修订日期: 2009-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(50675194)

作者简介: 沈路(1982 -), 男, 江西宜春人, 博士生, 研究方向: 机械系统测试、信号分析、机械故障诊断.

载荷大因此容易发生故障,而减速器故障大多数是由齿轮故障引起的,所以齿轮故障诊断对于航空发动机的状态监测与故障诊断具有十分重要的意义^[1-3].近些年来新的齿轮故障诊断方法不断涌现出来,Hilbert-Huang transform (HHT)方法是N. E. Huang在1998年提出的一种全新的用于分析非平稳非线性信号的方法,它包括经验模态分解(empirical mode decomposition,简称EMD)和与之相应的Hilbert变换,HHT根据信号的局部时变特征进行自适应的时频分解,可得到较高的时频分辨率和良好的时频聚集性,非常适合对非平稳、非线性信号的分析^[4].

尽管HHT方法在提取非线性和非平稳振动信号特征方面有着优良的特性,但它在应用于齿轮故障诊断时仍然存在一些缺点.首先,齿轮故障信号频率成分都比较丰富,因此使得EMD分解的第一阶固有模态函数(intrinsic mode function,简称IMF)可能包含较宽的频带而难以得到单一信号分量;其次,EMD分解可能在低频范围产生虚假分量,这将对后续的分析产生不利的影响^[5].本文提出改进的HHT方法来解决上述问题,首先通过频谱分析确定信号故障信息频率范围并根据二进小波分解特点提取相应频段的窄带二进小波系数,对小波系数进行EMD分解并通过相关系数筛选法剔除虚假分量,对筛选出来的分量分析得到局部瞬时能量以提取齿轮故障特征.分析结果表明,改进的HHT方法可以有效的提取故障信息.

1 HHT基本原理

1.1 HHT简介

HHT首先采用EMD方法将信号分解为一组单分量信号,以适合Hilbert变换.EMD的具体过程可以参考文献[4].多分量信号经过EMD分解后可得到一组IMF($c_j(t)$, $j=1,2,\dots,n$)和一个残余分量 r_n 的和

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

对式(1)中的每个固有模态函数 $c_j(t)$ 作Hilbert变换后可将 $x(t)$ 展开为如下形式:

$$x(t) = \operatorname{Re} \sum_j a_j(t) \exp \left[i \int \omega_j(t) dt \right] \quad (2)$$

式中 Re 表示取实部; $a_j(t)$, $\omega_j(t)$ 为对每个固有模态函数 $c_j(t)$ 作Hilbert变换得到的幅值函数和瞬时频率.将式(2)的右边称为信号 $x(t)$ 的Hil-

bert时频表示,记作

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_j a_j(t) \exp \left[i \int \omega_j(t) dt \right] \quad (3)$$

式中 $H(\omega, t)$ 精确地描述了信号的幅值随时间和频率的变换规律.

1.2 局部瞬时能量

因为 $H(\omega, t)$ 反映了信号的幅值随时间和频率的变化情况,可将 $H^2(\omega, t)$ 称为Hilbert能量谱,由此可以定义

$$E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H^2(\omega, t) d\omega \quad (4)$$

式中 $E(t)$ 称为瞬时能量,描述了信号的能量随时间的分布情况.也可以只取式(1)中某几个分量 $c_j(t)$ 进行分析得到局部Hilbert谱

$$H'(\omega, t) = \operatorname{Re} \left\{ a_i(t) \exp \left[i \int \omega_i(t) dt \right] + \dots + a_k(t) \exp \left[i \int \omega_k(t) dt \right] \right\} \quad (5)$$

式中 $H'(\omega, t)$ 描述了信号在相应频率范围内随时间和频率的变化,则 $H'^2(\omega, t)$ 称为局部Hilbert能量谱,定义

$$E'(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H'^2(\omega, t) d\omega \quad (6)$$

式中 $E'(t)$ 为局部瞬时能量,它反映了信号在某个频率范围内的能量随时间的变化情况^[4].

2 改进HHT

在理想情况下,经过EMD分解得到的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.但在齿轮故障诊断中会碰到一些问题,首先,第一阶IMF往往包含了比较宽的频率范围而不是单一信号分量;其次,在EMD分解结果中可能会包含一些虚假的低频分量.针对以上问题提出一种改进HHT方法,它通过提取故障信息频段二进小波系数和相关系数筛选法来改进传统HHT方法.

2.1 二进小波系数提取

2.1.1 二进小波分解

在小波分解中若取尺度 $a=2^j$, $j \in \mathbb{Z}$,即成为二进小波分解,通常采用Mallat提出的塔式算法进行离散二进小波分解的计算^[6]

$$\begin{cases} x_k^{(j+1)} = \sum h_{0(n-2k)} x_k^{(j)} \\ d_k^{(j+1)} = \sum h_{1(n-2k)} d_k^{(j)} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $x_k^{(j)}$ 为 $x(t)$ 在分辨率 j 下的离散逼近; $d_k^{(j)}$ 为 $x(t)$ 在分辨率 j 下的离散细节; h_{0k} 和 h_{1k} 为小波函数确定的正交共轭滤波器系数. 原始信号可以看作是 $j = 0$ 时的近似值, 离散信号经过尺度 $j = 1, 2, 3, \cdots, J$ 的分解并进行重构, 就可以得到二进小波系数 $a^{(1)}, d^{(1)}, a^{(2)}, d^{(2)}, \cdots, a^{(J)}, d^{(J)}$, 如果信号最高分析频率为 f , 则分解结果对应的各频段分别为 $\left[0 \sim \frac{f}{2}\right], \left[\frac{f}{2} \sim f\right], \cdots, \left[0 \sim \frac{f}{2^J}\right], \left[\frac{f}{2^J} \sim \frac{f}{2^{J-1}}\right]$. 它们包含了从低频到高频的不同频段信息, 且各频段互不重叠.

2. 1. 2 小波系数提取

由理论分析可知齿轮振动信号是由多种频率成分的调制信号所组成的^[7], 而在 EMD 分解中如果被分析的信号含有丰富的频率成分将可能导致第一阶 IMF 为非单一信号分量, 因此可在频谱中初步确定故障信息频率范围, 得到该频率范围后根据上述二进小波分解的特点确定需提取的相应频段的二进小波系数, 再对窄带的二进小波系数进行 EMD 分解, 所以将对宽频带故障信号的 EMD 分解转换成了对窄频带二进小波系数的 EMD 分解, 这样可以有效的改善第一阶 IMF 为

非单一信号分量的问题.

2. 2 相关系数筛选法

在 EMD 分解中可能会产生虚假低频分量, 为克服这个缺点采用原信号与各分量信号的相关系数对分量进行筛选, 即认为与原信号相关性好的分量是真实的分量, 相关性差的则被认为是虚假的分量. 相关系数筛选法可表述为: 若分量与原信号的相关系数大于阈值 λ 则保留该分量, 反之则认为是虚假分量予以剔除. 通常定义阈值 $\lambda = \max(r_i) / k, r_i (i = 1, \cdots, n)$ 为各分量与原信号的相关系数, k 为信号分解得到的 IMF 的个数.

对于只包含两种频率成分的仿真信号 $x(t) = \sin(2\pi \cdot 10 \cdot t) + \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t)$, 其 EMD 分解如图 1 所示. 从图中可以看出信号分解得到了 5 个 IMF 分量, 与实际情况不符合, 实际上只有分量 c_1, c_2 为真实分量, 其余均为虚假的低频分量. 如表 1 所示为各 IMF 分量与原信号的相关系数.

表 1 仿真信号各分量与原信号相关系数
Table 1 Correlation coefficient of simulation signal

分量	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
相关系数	0.7182	0.6713	0.1347	0.0738	0.0866

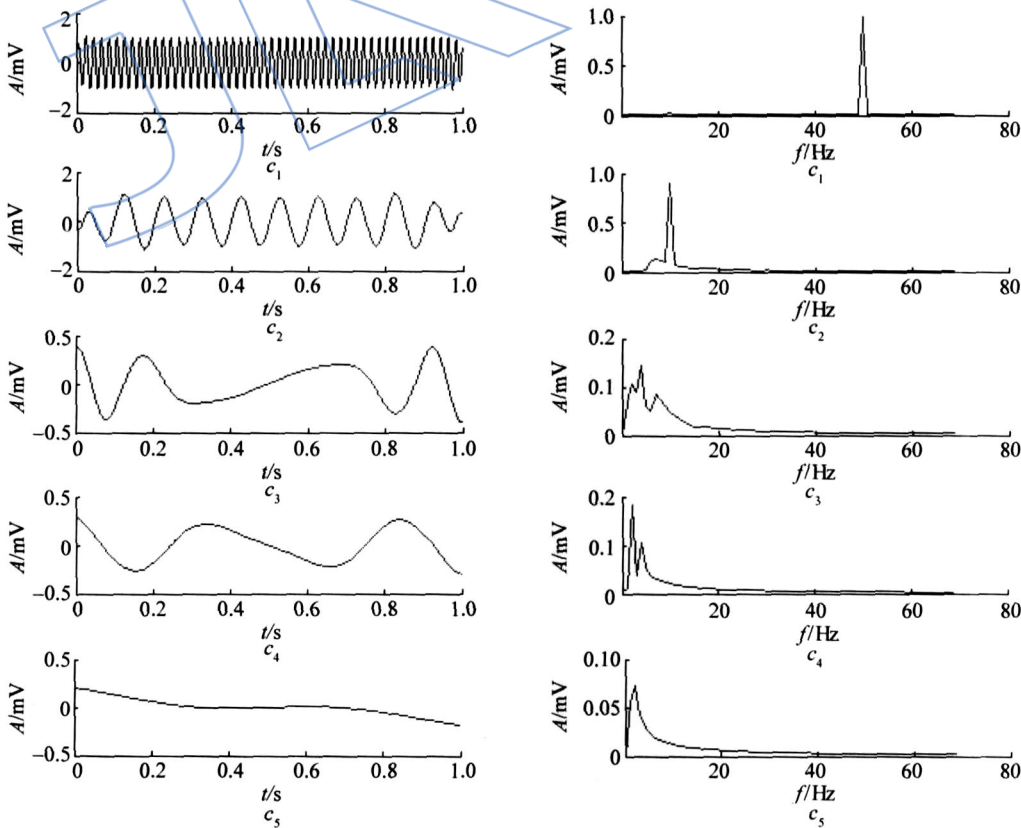


图 1 仿真信号的各 IMF 及相应 FFT

Fig. 1 IMFs and their FFT of simulation signal

依据相关系数筛选法 c_1, c_2 被认为是真实分量予以保留,这与实际情况相符.因此采用相关系数筛选法可以避免因为虚假分量而导致对后续分析结果的影响,从而有效的克服 EMD 分解产生虚假分量的缺点.

3 实例分析

当齿轮存在裂纹故障时会产生冲击,冲击成分将对振动信号的幅值和频率产生不同程度的调制,所以故障齿轮的振动信号往往表现为一系列以齿轮各阶固有频率为载波频率、故障齿轮的转频及其倍频为调制频率的调制信号^[7]. 振动能量的变化也将对冲击成分有所反映,存在局部故障的齿轮在啮合时会产生比其它齿更大的动载荷,并且振动能量也会随着因为故障程度增加导致的动载荷增强而发生较大的变化.依据频谱确定的故障信息频带提取相应的二进小波系数,再采用相关系数筛选法剔除小波系数 EMD 分解时产生的虚假分量,符合条件的每个 IMF 则可认为是一个幅值或频率调制的信号^[8],最后根据局部瞬时能量提取齿轮故障特征.

为验证方法的正确性,首先采用激光切割方法在正常齿轮的齿根设置槽宽 0.1 mm,槽深为 0.8 mm 的凹槽裂纹,然后在齿轮试验台上对具有裂纹故障的齿轮进行试验.如图 2(a)所示为选用 TS1102 型加速度传感器测得的振动信号时域波形,被试齿轮为齿数 $z = 34$,模数 $m = 2$ mm 的标准斜齿轮,信号的采样频率为 10 kHz,采样点数为 10 240,齿轮转频 $f_r = 16.75$ Hz.由理论分析可知齿轮故障信息主要反映在信号的边频带,从图

2(b)所示的裂纹故障信号的频谱图中可以找到丰富的边频带成分,但边频带的间距不相等而且分布不规则,难以提取故障信息;但从图中可以看到信号的边频带主要分布在频率 1 250~2 500 Hz 的频率范围内,因此可以认为故障信息主要包含在该频段内,这也为下一步提取信号的二进小波系数提供了依据.采用 db5 小波对信号进行尺度为 2 的二进小波分解,由上述确定的故障频段范围与二进小波分解特点可知需提取反映信号故障频段的第二层二进小波细节系数 d_2 ,且由上述分析可知故障信息主要包含在窄带小波系数 d_2 中.

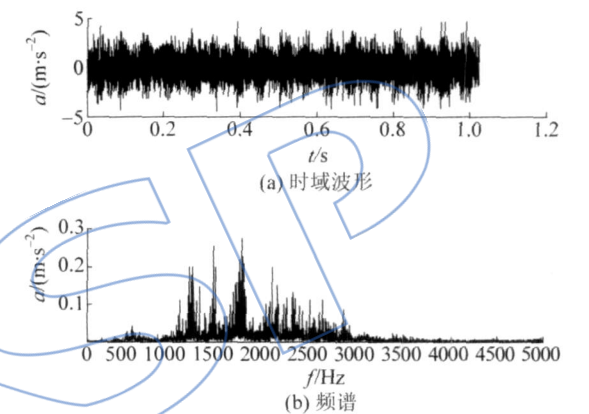


图 2 裂纹故障信号时域波形及其频谱
Fig 2 Time waveform and frequency spectrum of crack fault signal

如图 3 所示为对 d_2 进行 EMD 分解得到的 8 个 IMF 分量,采用相关系数筛选法对这些分量进行筛选,得到的相关系数如表 2 所示.

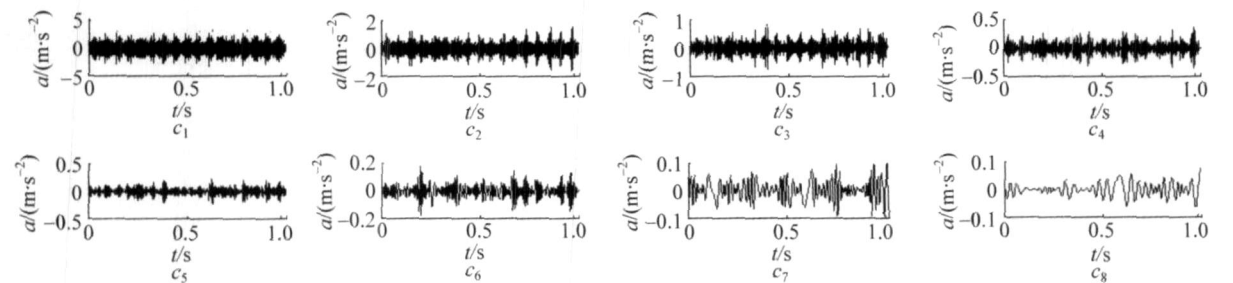


图 3 小波系数 d_2 的 EMD 分解
Fig 3 EMD of wavelet coefficient d_2

表 2 小波系数 d_2 各分量相关系数

分量	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8
相关系数	0.8809	0.223	0.0898	0.0058	0.0004	0.00022	0.0001	0.00005

依据上文所述筛选 IMF 的原则将保留分量 c_1, c_2 , 由于每个 IMF 可以认为是一个单分量调制信号, 所以分别对这两个分量信号进行包络解调. 如图 4(a), (b) 所示分别为对分量 c_1, c_2 进行解调得到的包络谱, 图中可以找到齿轮的转频及其二倍频, 由此可以判断转轴上的齿轮存在故障, 为确定故障类型还需要做进一步的分析.

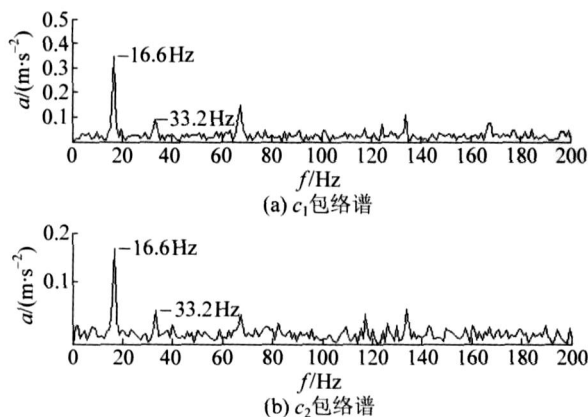


图 4 分量 c_1, c_2 包络谱

Fig. 4 Envelope spectrum of c_1, c_2

图 5 所示为由分量 c_1, c_2 计算得到的局部瞬时能量, 从图中可以看出振动信号具有明显的周期性冲击特征, 并通过计算得到其周期为 $T = 0.0596 \text{ s}$, 与齿轮旋转一周的时间相等, 这也与裂纹故障齿轮每旋转一周产生一次冲击的特征吻合.

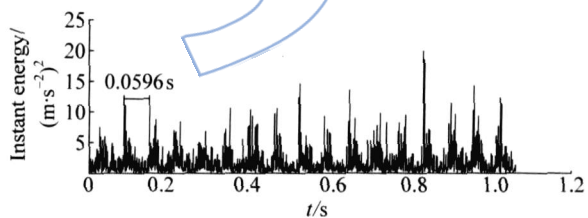


图 5 裂纹故障齿轮振动信号局部瞬时能量

Fig. 5 Local instantaneous energy of broken-tooth fault signal

4 结 论

针对 HHT 在齿轮故障诊断中存在的问题, 提出了一种改进方法. 通过仿真和实验, 可得到以下结论:

1) 针对齿轮故障信号因为包含多种频率成分而造成第一阶 IMF 分量往往为非单分量信号

的缺陷, 在频谱中预先确定故障信息频段并根据二进小波分解特点提取相应频段二进小波系数, 然后对窄带的二进小波系数进行 EMD 分解可以有效地改善上述问题;

2) 采用相关系数筛选法对 EMD 分解出来分量的进行筛选, 可有效的消除虚假分量;

3) 对筛选后的分量分析得到的局部瞬时能量可以有效地提取齿轮裂纹故障特征.

参考文献:

- [1] 何田, 刘献栋, 单颖春, 等. 改进 Hilbert-Huang 变换及其在转静子碰摩仿真中的应用[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1779-1783.
HE Tian, LIU Xiandong, SHAN Yingchun, et al. Improved Hilbert-Huang transform and its application in rotor-stator rub[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(10): 1779-1784. (in Chinese)
- [2] 孟涛, 廖明夫. 齿轮故障诊断中的单齿分析技术[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 444-449.
MENG Tao, LIAO Mingfu. Single gear analysis technique for the detection of gear faults[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6): 444-449. (in Chinese)
- [3] 孟涛, 廖明夫, 李辉. 齿轮故障诊断的时延相关解调法[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 109-113.
MENG Tao, LIAO Mingfu, LI Hui. Detection and diagnosis of the gear fault by the delayed correlation-envelope technique[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 109-113. (in Chinese)
- [4] Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]// Proceedings of the Royal Society Series A. London: The Royal Society, 1998, 454: 903-995.
- [5] Peng Z K, Tse P W, 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] Hong L. Multiresolutional estimation using wavelet transform[J]. IEEE Trans. On Aerospace and Electronic System, 1993, 29: 1244-1251.
- [7] 丁康, 李巍华, 朱小勇. 齿轮及齿轮箱故障诊断实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 13-14.
- [8] 于德介, 程军圣, 杨宇. Hilbert-Huang 变换在齿轮故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 102-106.
YU Dejie, CHENG Junsheng, YANG Yu. Application of Hilbert-Huang transform method to gear fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 102-106. (in Chinese)