



高 斌

一种滚动轴承故障特征的时频综合分析法

高 斌,陈 果

(南京航空航天大学 民航学院,南京 210016)

摘 要:针对滚动轴承故障诊断,综合运用小波分析和 Hilbert-Huang变换,提出了一种用于滚动轴承故障特征提取的时频综合分析方法。该方法首先对滚动轴承故障信号进行小波分解,得到故障产生的共振频带,并进行解调,然后用 Hilbert-Huang变换对所得到的解调信号进行 EMD分解(经验模态分解),得出各个本征模态函数 MF。最后对各 MF信号进行包络谱分析,从包络谱上可以清晰地观察到滚动轴承的故障特征频率。本文进行了实例分析,结果充分表明了该时频综合分析方法较单一的分析方法更加能突出故障特征。

关 键 词:滚动轴承;故障诊断;特征提取;时频分析;小波变换;Hilbert-Huang变换

中图分类号: TH165 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-8728(2009)04-0517-05

A Method for Time-frequency Comprehensive Analysis of Rolling Element Bearing Faults

Gao Bin, Chen Guo

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: Aiming at the rolling element bearing fault diagnosis, we propose a time-frequency comprehensive analysis method for rolling bearing fault feature extraction. It is a comprehensive application of wavelet analysis and Hilbert-Huang Transform (HHT). First, wavelet decomposition of rolling element bearing fault signal is carried out to obtain the resonance frequency band, which is the demodulated by Hilbert transform. After that, EMD (Empirical Mode Decomposition) is used to decompose the demodulated signal, and each intrinsic mode function (MF) is obtained. Finally, spectrum analysis is carried out to each MF signal, and the feature frequencies of rolling element bearing faults can be clearly observed. Examples are given to verify the new methods, and the result shows that this time-frequency comprehensive analysis method has stronger robustness and excellent accuracy.

Key words: rolling element bearing; fault diagnosis; feature extraction; time-frequency analysis; wavelet analysis; Hilbert-Huang transform (HHT)

滚动轴承的运行状态是否正常往往直接影响到整台机器的精度、可靠性及寿命等。因此,对滚动轴承的状态监测与故障诊断具有重要工程实际意义。滚动轴承故障信号具有信号微弱、调制性强以及频带

范围宽等特征,目前,小波变换已经被广泛应用于滚动轴承故障诊断^[1~4],然而小波基的选择对分析结果影响较大,一旦选择了某个小波基,则在整个分析过程中都无法更换,因此,小波变换对信号的局部并没有自适应性;Hilbert-Huang变换中的 EMD具有自适应性、正交性与完备性及 MF分量的调制特性等突出特点,可以很好的弥补小波方法的不足,目前已有许多研究者将 Hilbert-Huang变换应用于滚动轴承故障诊断^[5~9],然而,当故障信号共振频带较多时,EMD分解所得结果的准确性往往得不到很好的保证,且 Hilbert-Huang变换理论还处在发展阶段,在应用中尚

收稿日期:2008-06-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50705042)和航空科学基金项目(2007ZB52022)资助

作者简介:高 斌(1982-),硕士,研究方向为航空发动机状态监测与故障诊断、非线性转子动力学等,gb9813@sina.com;陈果(联系人),教授,博士生导师,cgzyx@263.net

存在模态混淆、MF的判据、端点效应以及欠包络和过包络等问题,当信号复杂时其问题更加突出。

本文在现有研究的基础上,充分利用小波变换和 Hilbert-Huang变换的优点,提出一种结合小波变换和 Hilbert-Huang变换的新技术,以期更加准确地提取滚动轴承的故障特征。最后利用实际的滚动轴承故障数据进行分析和验证。

1 基于小波变换及 Hilbert-Huang变换的时频综合分析方法的提出

小波变换通过采用不同的尺度因子,即可实现具有不同中心频率和带宽的带通滤波器,可以对振动信号在不同的频率范围内进行分析,因此可从中提取出能够真实反映轴承冲击振动现象的特征。但是,小波变换对信号的局部并没有自适应性,在变换中小波基的选择对分析结果影响较大。

Hilbert-Huang变换中的 EMD 分解法将一个复杂的信号分解为若干个内禀模态函数(MF)之和,EMD的自适应性表现为基函数的自动产生,自适应

的滤波特性和自适应的分辨率;从 EMD的整个分解过程和结果可以说明它的完备性;分解得到的 MF分量可以是幅值或频率调制的,可变的瞬时幅值与瞬时频率不但很大程度地改变了信号分解的效率,而且非常适合处理非线性和非平稳信号。但是当故障信号共振频带较多时,EMD分解所得结果的准确性往往得不到很好的保证。

滚动轴承故障信号表现出典型的非平稳性、调制性和微弱性,特征信息常常被淹没在强大的背景噪声中,很难发现和提取^[10]。现有的研究往往都是单方面的应用小波变换或 EMD分解对其进行分析,而由上述研究我们可以发现这两种方法各有不足之处。有鉴于此,本文在现有研究的基础上,提出一种结合小波变换、Hilbert变换以及 EMD分解法的新技术,先运用小波变换得到我们需要的共振频带,再用希尔伯特变换进行包络解调,最后对所得信号进行 EMD分解,分析各个 MF分量的频谱图。此方法可以很好地应用于滚动轴承故障特征提取。综合分析方法示意图如图 1所示。

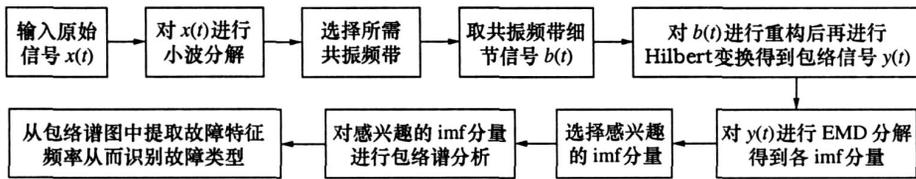


图 1 综合分析方法示意图

2 滚动轴承故障信号实例分析

2.1 实验数据

本文采用的原始数据来自于美国的 Case Western Reserve University 电气工程实验室的滚动轴承故障模拟实验台。该实验台由待检测轴承支撑着电动机的转轴,驱动端轴承型号为 SKF6205,风扇端轴承型号为 SKF6203。轴承损伤是用电火花加工的单点损伤。将加速度传感器安装在带有磁力基座的机架上,振动加速度信号由 16 通道数据记录仪采集得到。风扇端轴承故障采样频率为 12 kHz,驱动端轴承故障采样频率为 12 kHz 和 48 kHz。本文以 SKF6203 为例进行分析,表 1 和表 2 中分别列出了 SKF6203 的几何尺寸和各部件的故障频率。

表 1 SKF6203 滚动轴承主要计算参数

| 外圈直径 R (mm) | 内圈直径 r (mm) | 节径 D (mm) | 滚珠直径 d (mm) | 滚珠个数 Z | 接触角 |
|------------------|------------------|----------------|------------------|-------------|-----------|
| 39.9999 | 17.0002 | 28.4988 | 6.7462 | 8 | 0° |

表 2 SKF6203 滚动轴承故障特征频率

| 轴承元件 | 内圈 | 外圈 | 保持架 | 滚动体 |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 故障频率 | $4.9469f_r$ | $3.0530f_r$ | $0.3817f_r$ | $3.9874f_r$ |

2.2 基于时频综合法的滚动轴承故障特征提取

当实验转速为 1797 r/min 时,旋转频率 $f_r = 29.95$ Hz,代入表 2 可以得到滚动轴承各部件的理论特征频率分别为:外圈 91.4 Hz,内圈 148.2 Hz,滚动体 119.4 Hz,保持架 11.4 Hz。下面以内圈故障信号为例进行特征提取。

首先,采用小波变换对滚动轴承内圈故障原始信号进行分解。由于轴承信号呈衰减振荡的形状,所以选用小波函数 db2 对原始信号进行分解,得到三层细节信号, d_1 、 d_2 和 d_3 。各层细节信号及其频谱图如图 2~图 4 所示。我们对各层细节信号进行 Hilbert 变换,得到其包络信号,然后再对包络信号进行频谱分析,其包络谱如图 5~图 7 所示。在这 3 个包络谱中我们能找到滚动轴承内圈故障特征频率

148.8 Hz的谱线和旋转频率 30 Hz的谱线,但是在其周围有干扰频率的存在,效果不明显。图中的

148.8 Hz和 30 Hz可以认为是特征频率和旋转频率。

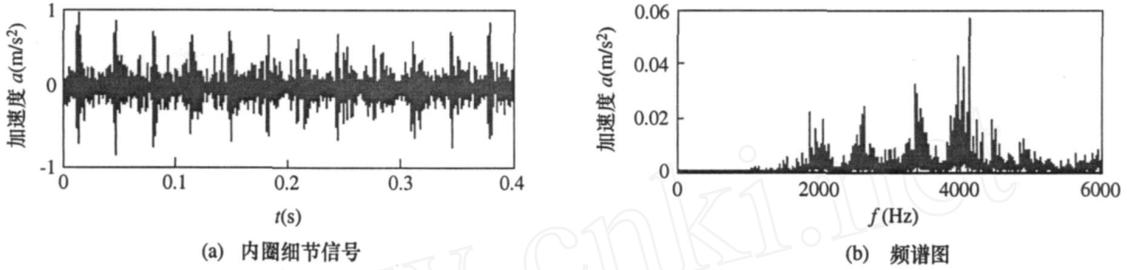


图 2 内圈细节信号 d_1 及其频谱图

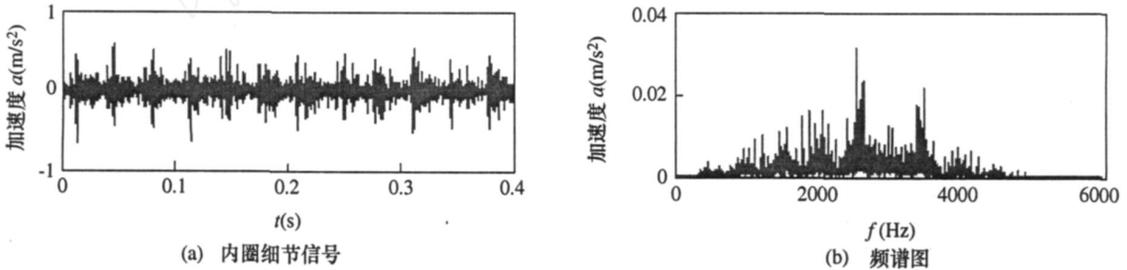


图 3 内圈细节信号 d_2 及其频谱图

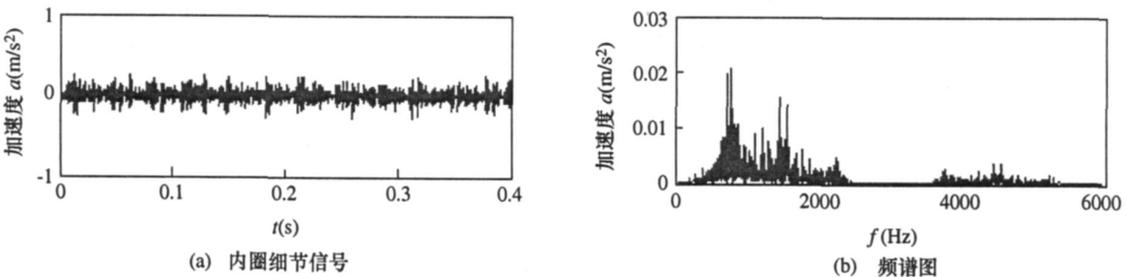


图 4 内圈细节信号 d_3 及其频谱图

由于在前面的包络谱中效果不好,所以我们对细节信号 d_1 、 d_2 和 d_3 所得的包络信号都进行 EMD 分解,得到每层对应的 MF 分量,每层对应的 MF 分量分别包含了从高到低的不同频率成分,最先由 EMD 分解出的几个 MF 分量包含了原序列最主要的信息,所以滚动轴承故障特征频率分布在前几个分量中,这几个分量是信号的高频成分。我们选取各层的第一个 MF 分量,对其进行包络谱分析,包络谱如图 8~图 10 所示,在 d_1 、 d_2 和 d_3 的图中我们都可以看到在内圈故障特征频率 148.8 Hz 处存在明显的谱线,而且还存在旋转频率 30 Hz,效果要明显好于小波分解后得到的包络谱(图 5~图 7)。考虑到误差原因,图中的 148.8 Hz 和 30 Hz 可以看作

是特征频率和旋转频率。

下面再对信号直接进行 EMD 分解,我们选取前 2 个 MF 分量,然后对这两个 MF 进行 Hilbert 变换,得到包络信号,最后对包络信号进行频谱分析,如图 11、图 12 所示。在图 11 和图 12 中,30 Hz 和 148.8 Hz 处各有一条谱线,但是其周围同样有干扰频率的存在,由此看出效果明显没有图 8 和图 9 中的好。

用综合法对滚动体和外圈故障信号进行分析,效果同样很明显,外圈故障 d_1 和 d_2 层细节信号的 MF 分量包络谱如图 13~图 14 所示,滚动体故障 d_1 和 d_2 层细节信号的 MF 分量包络谱如图 15,图 16 所示。

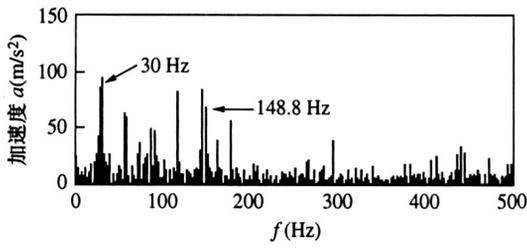


图 5 d_1 包络谱图

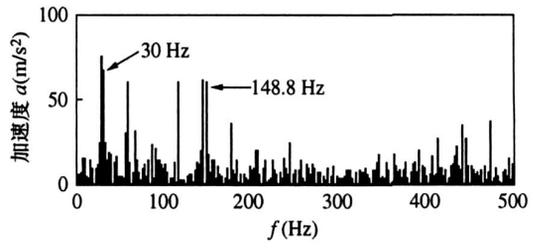


图 6 d_2 包络谱图

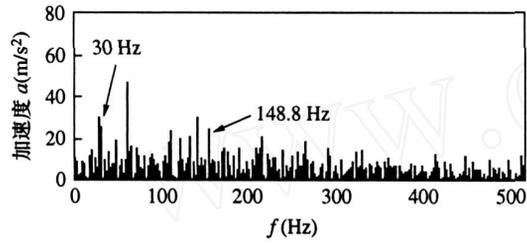


图 7 d_3 包络谱图

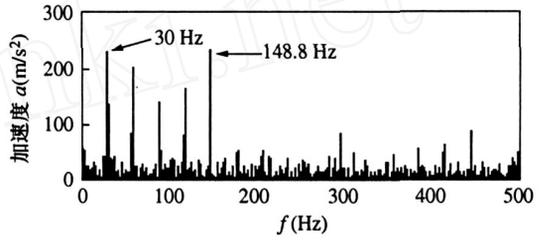


图 8 细节信号 d_1 的 imf1 分量包络谱图

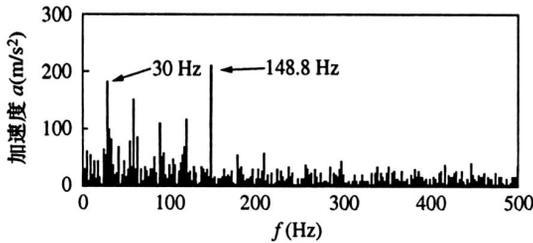


图 9 细节信号 d_2 的 imf1 分量包络谱图

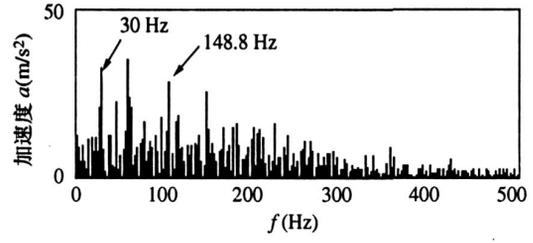


图 10 细节信号 d_3 的 imf1 分量包络谱图

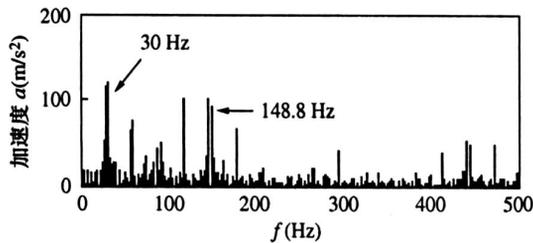


图 11 imf1 分量包络谱图

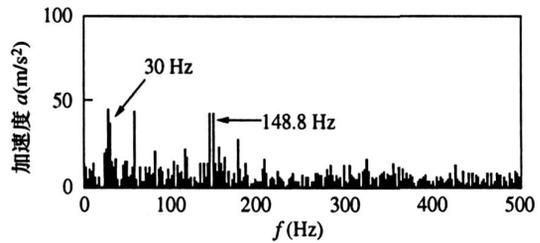


图 12 imf2 分量包络谱图

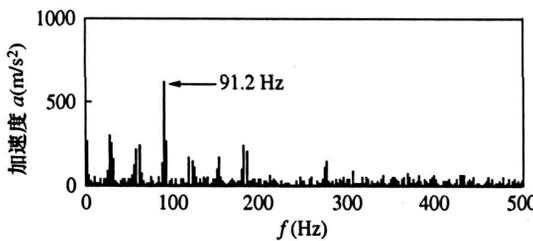


图 13 外圈细节信号 d_1 的 imf1 分量包络谱图

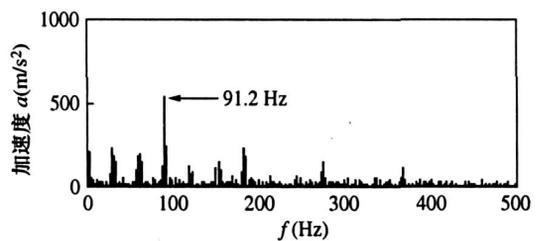


图 14 外圈细节信号 d_2 的 imf1 分量包络谱图

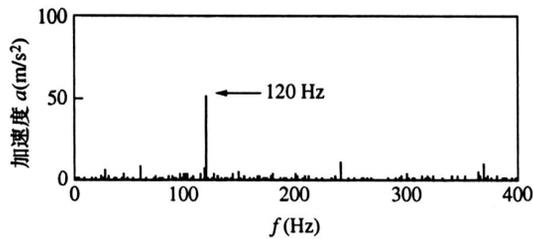


图 15 滚动体细节信号 d_1 的 imf1 分量包络谱图

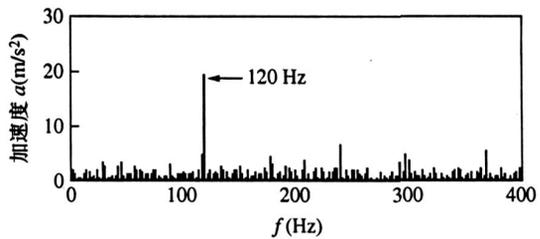


图 16 滚动体细节信号 d_2 的 imf1 分量包络谱图

3 结论

用小波变换对滚动轴承故障信号进行分解,由此可以找到我们感兴趣的共振频带。但是进一步对包络信号进行包络谱分析时比较难于发现其故障频率。如果对包络信号进行 EMD 分解,再对得到的前几个 MF 分量进行谱分析,这时,我们可以很明显的在各包络谱图中看到故障特征频率的谱线。诊断效果得到了显著的提高。如果直接对信号进行 EMD 分解,对各 MF 分量进行谱分析,由于 HHT 变换的虚假模态及其他原因影响,效果也不是很好。根据滚动轴承实验验证,本文所提出的结合小波变换和 Hilbert-Huang 变换的综合时频分析法较单一的方法具有更好的故障特征提取能力。

[参考文献]

- [1] 史东锋, 鲍明, 屈梁生. 小波包络分析在滚动轴承诊断中的应用 [J]. 中国机械工程, 2000, 11 (12): 1382 ~ 1385
- [2] 林京. 连续小波变换及其在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33 (11): 108 ~ 110
- [3] 傅勤毅, 章易程, 应力军, 李国顺. 滚动轴承故障特征的小波提取方法 [J]. 机械工程学报, 2001, 37 (2): 30 ~ 32
- [4] 程军圣, 于德介, 邓乾旺等. 连续小波变换在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. 中国机械工程, 2003, 14 (23): 2037 ~ 2040
- [5] 于德介, 程军圣, 杨宇. 机械故障诊断的 Hilbert-Huang 变换方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [6] 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]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454: 903 ~ 995
- [7] 任玥. 基于 Hilbert-Huang 变换的滚动轴承智能诊断方法研究 [D]. 西南交通大学, 2007
- [8] 邓拥军, 王伟, 钱成春等. EMD 方法及 Hilbert 变换中的边界问题的处理 [J]. 科学通报, 2001, 46 (3): 257 ~ 263
- [9] 罗奇峰, 石春香. Hilbert-Huang 变换理论及其计算中的问题 [J]. 同济大学学报, 2003, 31 (6): 637 ~ 640
- [10] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996

(上接第 516 页)

5 结束语

本文将压铆过程划分为 5 个阶段, 给出压铆过程的所需压铆力以及铆孔扩张量的计算方法, 经实例计算证明结果接近试验结果。本文只考虑了冲头、铆钉和铆接件三者的作用, 未考虑夹具的施加方式、夹具施加前后对于铆接件变形的影响。

[参考文献]

- [1] Markiewicz E, *et al* Analysis of the riveting process forming mechanisms [J]. *International Journal of Materials & Product Technology*, 1998, 13: 123 ~ 145
- [2] Langrand B. *Riveted Joints Embrittlement, Validation of Riveting Process FE Model* [R]. ONERA-Lille Report 98/01, 1998
- [3] Urban M R. Analysis of the fatigue life of riveted sheet metal helicopter airframe joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25: 1013 ~ 1026
- [4] Kelly B, Costello C. FEA modelling of setting and mechanical testing of aluminum blind rivets [J]. *Materials Processing Technology*, 2004, 153 ~ 154: 74 ~ 79
- [5] Blanchot V, Daidie A. Riveted assembly modelling: study and numerical characterisation of a riveting process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 18 (1 ~ 3): 201 ~ 209
- [6] 樊战亭, 曹增强等. 基于 PLC 的电磁铆接设备控制系统 [J]. 机床与液压, 2005, 11: 108 ~ 110
- [7] 曹增强, 余公藩. 新型应力波铆接设备研制中若干问题探讨 [J]. 机械设计, 1998, 15 (3): 13 ~ 14
- [8] 曹增强, 余公藩等. 不同加载速率下铆钉材料变形研究 [J]. 西北工业大学学报, 2000, 18 (1): 27 ~ 30
- [9] 葛建峰. 电磁铆接工艺研究 [D]. 西北工业大学, 2005
- [10] 杨军. 低电压电磁铆接过程数值模拟研究 [D]. 武汉理工大学, 2004
- [11] 俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理 [M]. 机械工业出版社, 2002
- [12] 赵学仁. 工程弹性力学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988