

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.008

基于 EMD 和峭度的 Hilbert 包络解调在滚动轴承故障诊断中的应用分析*

周 浩, 贾民平*

(东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:针对直接运用快速傅里叶变换(FFT)无法有效提取具有非线性非平稳特性的滚动轴承振动信号故障特征频率的问题,提出了一种基于经验模式分解和峭度指标的 Hilbert 包络解调方法。首先对滚动轴承的振动信号进行了经验模式分解(EMD),得到了包含轴承故障特征信息的各阶本征模态函数(IMF),再计算各阶 IMF 的峭度值,选取了峭度值较大的几阶 IMF 分量重构信号,并对重构信号进行了 Hilbert 包络解调分析,从而获得了滚动轴承的准确故障特征信息。分别对仿真模拟信号和实际滚动轴承发生内圈故障的振动信号进行了分析,清晰地得到了故障特征频率。研究表明,利用融合 EMD、峭度系数和 Hilbert 包络解调的诊断方法能够快速、准确地提取滚动轴承的故障特征频率,从而可以对滚动轴承进行有效地故障诊断。

关键词:故障诊断;滚动轴承;EMD;峭度指标;Hilbert 包络解调

中图分类号:TH17;TH133.33

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)09-1136-05

Analysis of rolling bearing fault diagnosis based on EMD and kurtosis Hilbert envelope demodulation

ZHOU Hao, JIA Min-ping

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Aiming at solving the problem that fast fourier transformation (FFT) is hardly applied to extract the characteristics frequency of the bearing's signal, a fault diagnosis method based on empirical mode decomposition (EMD), kurtosis and Hilbert demodulation was proposed. Firstly, EMD was used to decompose the vibration signal into the intrinsic mode function (IMF). Then, some of the IMFs selected by the rule of kurtosis were used to recombine the new vibration signal. At last, the Hilbert envelope demodulation was adopted with the new signal to detect the fault information. Through analyzing the simulation signal and the inner vibration signal of fault rolling bearing respectively, the characteristics frequency could be clearly extracted. The results indicate that the proposed method is effective in extracting the bearings' fault information and could be used in rolling bearings fault diagnosis.

Key words: fault diagnosis; rolling bearing; empirical mode decomposition(EMD); kurtosis coefficient; Hilbert envelope demodulation

0 引 言

据统计,旋转机械的故障有 30% 是由滚动轴承故障引起的,它的好坏对机器的工作状况影响极大。当滚动轴承局部存在损伤或缺陷时,其振动信号多表现为非平稳、非线性、调制等特征^[1]。利用传统单一的时域参数分析法或者频域分析法等方法很难从此类振

动信号中提取故障特征信息。

EMD 是将信号分解为有限个高频到低频的 IMF 的和,具有很多独特优点:基函数的自动产生;自适应的滤波特性;自适应的多分辨率;正交性和完备性;IMF 分量的调制特性等。上述优点使得 EMD 已经被应用到许多领域,它非常适合对非线性、非平稳信号进行分析^[2]。峭度系数是一个重要的数值统计量,它可

收稿日期:2014-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075070);高校博士学科点专项科研基金资助项目(20130092110003)

作者简介:周 浩(1990-),男,江苏淮安人,主要从事故障诊断和状态监测方面的研究. E-mail:zhouhao5519@163.com

通信联系人:贾民平,男,教授,博士生导师. E-mail:mpjia@seu.edu.cn

以用来描述信号图形顶峰的凸平度。当峭度为3时,分布曲线具有正常峰度(即零峭度);当峭度大于3时,分布曲线具有正峭度,表示信号中冲击成分较多。同时,Hilbert包络解调通过对故障轴承的振动信号进行幅值和频率解调,放大和分离了故障特征信息,极大地提高了信噪比^[3]。

基于此,本研究提出一种基于EMD和峭度指标的Hilbert包络解调分析的信号处理方法,通过对仿真信号和实际信号分析,表明该方法可以应用于滚动轴承的故障诊断。

1 EMD方法和Hilbert包络解调

1.1 EMD基本理论

经验模态分解法从本质上来讲就是通过对非平稳信号的分解,来获得一系列表征信号特征时间尺度本征模函数的一种信号平稳化处理方法^[4-5]。其中,每个IMF分量必须满足如下2个条件:

(1)本征模函数在整个时间范围内,局部极值点和过零点的个数必须相等,或最多相差1个;

(2)在时间范围内的任意时刻,由局部极大值点形成的上包络线和由局部极小值点形成的下包络线的平均值为零,即上、下包络线关于时间轴呈局部对称。

EMD方法的分解过程如下:

(1)找出原始信号 $x(t)$ 所有的极大值点和极小值点,并用三次样条插值函数分别拟合这些数据点,形成上下包络线。

(2)计算上包络线和下包络线的均值 m_1 ,将原始信号减去该平均包络得到一个新的数据序列 h_1 :

$$x(t) - m_1 = h_1 \tag{1}$$

如果 h_1 全部满足本征模函数的两个条件,则 h_1 就是原始信号 $x(t)$ 分解出来的第一个IMF分量 c_1 。否则说明 h_1 还不是一个本征模函数,还需将 h_1 作为一个原始信号重复步骤(1),继续进行筛选,直至产生第一个IMF分量 c_1 。

(3)计算

$$r_1 = x(t) - c_1 \tag{2}$$

再将 r_1 作为原始信号重复步骤(1)~(3),以该类推得原始信号 $x(t)$ 的 n 个满足条件的分量和一个不能再分解的单调函数,即残余分量 r_n 为止^[6],可得:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \tag{3}$$

式中: r_n —信号的平均趋势。

1.2 Hilbert包络解调

利用希尔伯特变换进行信号包络的原理是让测试

信号产生一个90°的相移,从而与原信号构成一个解析信号,此解析信号即构成包络信号^[7]。

一个实信号 $x(t)$ 的希尔伯特变换定义为:

$$\hat{x}(t) = H[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{\pi(t-\tau)} d\tau = x(t) \cdot \frac{1}{\pi t} \tag{4}$$

$\hat{x}(t)$ 可以看成是 $x(t)$ 通过滤波器的输出,则 $x(t)$ 的解析信号为:

$$Z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \tag{5}$$

希尔伯特变换的包络 $A(t)$ 定义为:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \tag{6}$$

瞬时相位 $\varphi(t)$ 定义为:

$$\varphi(t) = \arctan\left[\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}\right] \tag{7}$$

经过希尔伯特变换检波,除去高频的振动分量,然后用含有缺陷激振分量的 $A(t)$ 代替原始信号 $x(t)$ 进行频谱分析,便可以进行缺陷的故障诊断^[8]。

2 诊断方法

2.1 峭度指标

四阶中心矩也是一个重要的统计估计量。它可以用来表示样本的函数图形顶峰的凸平度,即峭度系数,其数学描述为:

$$K = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right]^4 \tag{8}$$

式中: K —原始信号 x 的峭度指标; N —信号的长度; μ —信号 x 的均值; σ —信号 x 的标准差。

当峭度值为3时,分布曲线具有正常峰度(即零峭度)。当标准差小于正常状态下的标准差,即观测值的分散程度较小冲击成分较多时,峭度值增大,此时曲线峰顶的高度高于正常正态分布曲线,称为正峭度。当标准差大于正常状态下的标准差,即观测值的分散程度较大时,峭度系数减小,此时曲线峰顶的高度低于正常正态分布曲线,称为负峭度。

2.2 融合EMD、峭度和Hilbert解调的诊断方法

滚动轴承故障振动信号中冲击成分所占比重较多,频率成分很丰富,在不同频带内所包含的轴承故障信息不同。当研究者分析滚动轴承振动信号时,经过EMD分解的各阶IMF分量会包含由故障引起的不同频段的固有振动成分^[9-10]。依据峭度系数理论,峭度值较大的IMF分量中周期性冲击成分较多,即包含滚动轴承的故障信息越多^[11]。因此,本研究选取原始振动信号经过EMD分解后峭度值较大几阶IMF分量重构信号,并将其作为Hilbert包络解调的对象,提取故

障特征频率,与滚动轴承各个部件的理论故障频率对比,找出故障部位。因此,本研究采用下述分析步骤对滚动轴承进行故障诊断:

- (1) 对滚动轴承故障信号进行 EMD 分解,得到多个频率从高到低排列的 IMF 分量;
- (2) 根据式(10)计算各阶 IMF 分量的峭度系数;
- (3) 选取峭度值较大的几阶 IMF 分量叠加重构信号;
- (4) 对重构信号进行 Hilbert 包络解调分析,得到包络信号;
- (5) 对包络信号进行 FFT,获得信号的包络谱;
- (6) 参照滚动轴承各个部件的理论故障特征频率,对包络谱进行分析,根据谱上特征频率来判断轴承故障类型。

3 仿真信号分析

滚动轴承运行时,当外圈、内圈或者滚动体上发生磨损、点蚀、剥落等局部损伤时会产生突变的冲击脉冲力,该冲击作用会诱发轴承系统的高频固有振动成分,如轴承内外圈的径向弯曲固有振动、滚动体的固有振动或者测振传感器的固有振动等,导致在时域表现为简洁的周期性冲击信号被各种高频信号调制,形成较为复杂的调制信号。因此,本研究对该类信号进行包络解调处理,分析其特征频率将能够准确地辨识出滚动轴承的故障。

可以用如下数学模型描述滚动轴承内圈点蚀故障:

$$x(t) = [A + B\cos(2\pi f_i t)] \cdot \cos(2\pi f_z t) \quad (9)$$

式中: f_i —滚动轴承的内圈故障特征频率; f_z —载波频率; $B\cos(2\pi f_i t)$ —测试信号; A —一个直流分量,使偏置后的信号 $[A + B\cos(2\pi f_i t)]$ 都具有正值; $\cos(2\pi f_z t)$ —载波信号。

仿真程序随机生成滚动轴承内圈的故障特征频率和对应的高频载波频率,考虑实际工况下振动信号含有噪声,此处添加高斯白噪声信号 $n(t)$ 。仿真形成滚动轴承内圈故障的振动信号为:

$$x(t) = [1 + \cos(2\pi \times 105 \times t)] \times \cos(2\pi \times 3\,000 \times t) + n(t) \quad (10)$$

本研究设置采样频率为 12 000 Hz,取持续 1 s 的仿真数据分析,对应的时域波形和频域波形如图 1 所示。由图 1 可以看出存在边频信号,虽然两者相减就是特征信号频率,但是在实际应用中,振动信号包含大量的干扰信号,其频谱图谱线较多,很难清晰地辨别出转频及其变频带,从而无法准确辨识出滚动轴承故障发生的部位。

本研究对 $x(t)$ 进行 EMD 分解,得到 12 阶 IMF 分量。由于高斯随机白噪声的存在,仿真信号每次模拟时都会变动,导致各阶 IMF 分量的峭度系数会发生变化。

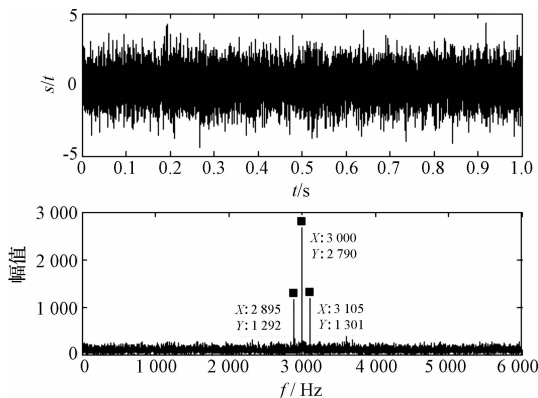


图 1 调幅仿真信号时域和频域波形图

但经过多次实验,发现前 4 阶高频 IMF 分量的峭度系数一直较大,现取前 4 阶 IMF 分量重构原信号,并对其进行 Hilbert 包络解调分析,解调后的谱图如图 2 所示。

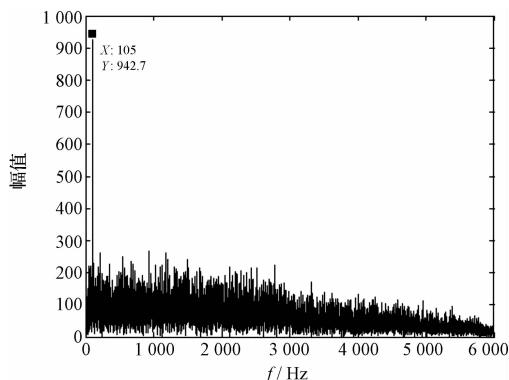


图 2 经 Hilbert 包络解调的重构信号频谱图

由图 2 可知,含有噪声的仿真信号经过 EMD 分解、选择性重组和 Hilbert 包络解调后,可以清晰地看出其频谱图有一条非常突出的谱线,且该谱线对应的频率刚好是滚动轴承内圈故障特征频率 105 Hz。可见,融合 EMD 分解、峭度指标和 Hilbert 包络解调的分析方法能够很好地提取滚动轴承的故障特征频率,具有一定的实际应用价值。

4 滚动轴承故障诊断实例分析

本次使用的故障数据取自美国 Western Reserve University 电气工程实验室的滚动轴承故障模拟实验台的滚动轴承数据。该实验台由一个 1.5 kW 的电动机,一个扭矩传感器/译码器,一个功率测试计,还有电子控制器构成。待检测的轴承支撑着电动机的转轴,驱动端轴承为 SKF6205 深沟球轴承。轴承的局部损伤为电火花加工的单点损伤。采样频率为 12 000 Hz,轴承转速为 $r = 1\,750 \text{ r/min}^{[12]}$ 。

查阅手册可得 SKF6205 深沟球轴承的标准参数,通过理论公式计算可得轴承内圈的理论故障特征频率为 157.9 Hz。驱动端滚动轴承内圈故障的时域波形如

图 3 所示,采样点数 12 000。

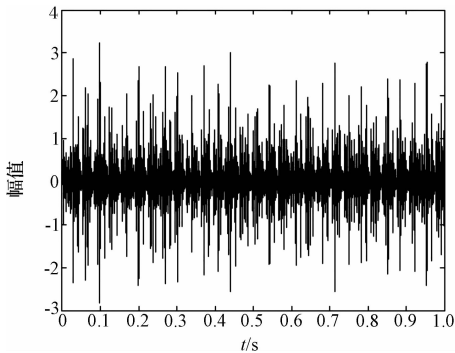


图 3 滚动轴承内圈故障的时域波形

本研究利用融合 EMD 分解、峭度指标和 Hilbert 包络解调的分析方法对原始振动信号进行处理。EMD 分解后得到的 12 阶 IMF 分量 $c_1 \sim c_{12}$ 和残余分量 res 如图 4 所示。

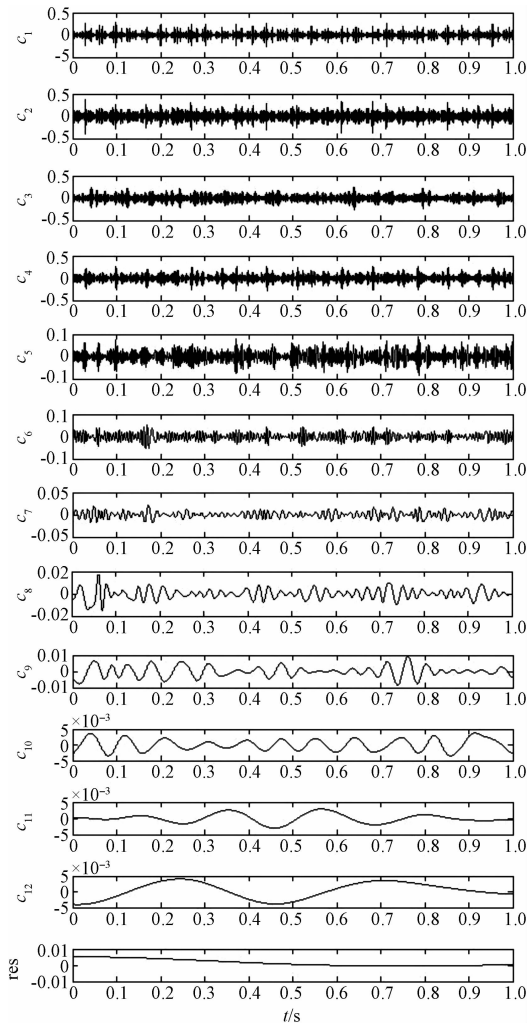


图 4 轴承故障振动信号的第 1~12 阶 IMF 和 res 分量

各阶 IMF 分量的峭度值如表 1 所示。

表 1 各阶 IMF 峭度值

IMF	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
K	7.853 7	4.742 0	3.832 9	4.109 5	3.078 8	2.968 5
	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}
	2.900 5	3.962 8	3.041 9	2.014 3	2.727 8	1.828 8

从表 1 中可以看出,前 4 阶 IMF 分量的峭度值较大,相对而言其包含的故障信息最大,对前 4 阶 IMF 分量进行叠加重构原信号,并对重构信号进行 Hilbert 包络解调处理,其包络谱如图 5 所示。从图 5 中可以看出,包络谱中出现了滚动轴承内圈故障特征频率的 1 倍频(158 Hz)、2 倍频(316 Hz)、3 倍频(473 Hz)等,其中谱线在频率 29 Hz 处为轴承的转频。从上述分析可以确认该滚动轴承内圈发生故障,与实际相符。因此,所提出的基于 EMD 和峭度指标的 Hilbert 包络解调分析方法能够应用在滚动轴承故障中。

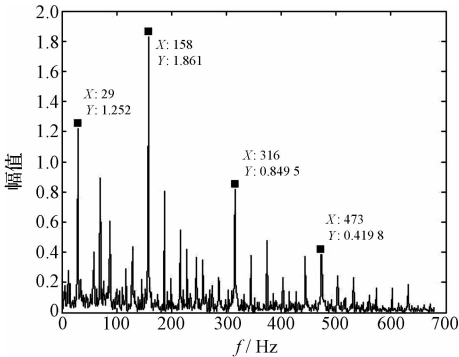


图 5 重构的包络谱(局部放大图)

4 结束语

EMD 分解能将非线性非平稳振动信号分解为多个能够反映原始信号局部特征的固有模态函数 IMF , 通过对部分 IMF 分量重构分析,能够清楚地揭示信号中包含的故障信息。Hilbert 包络解调能有效地将故障特征信息从复杂的调制信号中提取出来,有效地排除了各种高频干扰、提高信噪比。

本研究提出了基于 EMD 和峭度指标的 Hilbert 包络解调分析的信号处理方法,并将其应用于滚动轴承故障诊断。笔者通过对仿真信号与实测信号的应用,清晰而准确地得到了滚动轴承的故障特征信息,表明

(下转第 1167 页)

本文引用格式:

周浩,贾民平. 基于 EMD 和峭度的 Hilbert 包络解调在滚动轴承故障诊断中的应用分析[J]. 机电工程,2014,31(9):1136-1136,1167.
ZHOU Hao, JIA Min-ping. Analysis of rolling bearing fault diagnosis based on EMD and kurtosis Hilbert envelope demodulation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(9):1136-1136,1167.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

4 带轮安装定位应注意的几个问题

- (1)电机带轮与空压机带轮轴线应平行,两轮槽对称中心面应重合,偏角误差要小于 20 分。否则,会发生偏磨,影响传递功率,降低带的使用寿命。
- (2)V 带张紧程度要合适。以大拇指在带中间部位按下 15 mm 为合适。
- (3)V 带传动要安装防护装置,避免 V 带接触腐蚀性物质。
- (4)带传动要设张紧装置。

5 结束语

本研究对空压机进行电机驱动改装后,利用船上原有空气瓶并连接相关管路和阀件,然后作空压机充气试验。试验表明,空压机充气能力完全满足工作需要,充气时间完全符合船检规范,起动主机次数完全满足船方使用要求。为船东解决了棘手问题,保障了船舶的起动换向和安全运营,为船东创造了可观的经济效益,获得了船东的高度评价和充分肯定。

参考文献(References):

[1] 中国船级社. 钢质海船入级与建造规范[M]. 北京:人民交通出版社,2006.

[2] 崔朗然. 舰船柴油机动力装置[M]北京:国防工业出版社,1986.

[3] 沈维道,蒋智敏,童钧耕. 工程热力学[M]. 北京:高等教育出版社,2005.

[4] 岳丹婷. 工程热力学和传热学[M]. 北京:人民交通出版社,1985.

[5] 杨可桢,程光蕴. 机械设计基础[M]. 北京:高等教育出版社,1990.

[6] 濮良贵,纪名刚,陈国定,等. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2009.

[7] 徐 灏. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

[8] 王邦勤. 船舶液压系统故障研究[J]. 液压气动与密封, 21012(7):68-71.

[9] 唐育民,金志鸿,许运秀,等. 船舶检验[M]. 北京:人民交通出版社,1987.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

张庆举,张保中,祝红思. 空压机电驱动改装的研究及设计[J]. 机电工程,2014,31(9):1163-1167.

ZHANG Qing-ju, ZHANG Bao-zhong, ZHU Hong-si. Research and design of air compressor electric drive modification[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(9):1163-1167.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>

(上接第 1139 页)

了该方法可以较好地用于滚动轴承故障信号处理,为滚动轴承的故障诊断提供了一种有效的方法。

参考文献(References):

[1] 钟秉林,黄 仁. 机械故障诊断学[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社,2007.

[2] 李 力. 机械信号处理及其应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2007.

[3] 胡清忠,褚福磊. 基于 Hilbert 解调的滚动轴承故障诊断分析[J]. 振动与冲击,2010,29(S):1-3.

[4] 焦卫东,朱有剑. 基于 EMD 与倒谱分析的轴承故障诊断[J]. 机电工程,2009,26(2):18-21.

[5] 张梅军,曹 勤,王 闯. EMD 分解,分形理论和 RBF 神经网络相结合的轴承智能故障诊断研究[J]. 机械,2012(11):16-21.

[6] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear non-stationary time series analysis[J]. **Proceedings of the Royal Society**, 1998(454):903-995.

[7] 宋晓美,孟繁超,张 玉. 基于包络解调分析的滚动轴承故障诊断研究[J]. 仪表仪器与分析监测,2012(1):1-4.

[8] LI Hui, ZHANG Yu-ping, ZHENG Hai-qi. Hilbert-Huang transform and maginal spectrum for detection and diagnosis of localized defects in roller bearing[J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2009;23(2):291-301.

[9] 朱 瑜,王 殿,王海洋. 基于 EMD 和信息熵的滚动轴承故障诊断[J]. 轴承,2012,15(6):50-53.

[10] 施国友. 滚动轴承对螺杆压缩机运行的影响[J]. 流体机械,2012,40(7):35-36.

[11] YANG YU. Roller bearing fault diagnosis method based on EMD [J]. **China Mechanical Engineering**, 2004, 15(10):908-920.

[12] The Case Westren Reserve University Bearing Data Center Website. Bearing data center seeded fault test data[EB/OL]. [2007-01-01]. <http://www.eecs.case.edu/laboratory/bearing>.

[编辑:张 豪]