

文章编号: 1005-0523(2012)04-0001-04

基于信号预处理和 Hilbert 变换的滚动轴承故障诊断

杨超, 李亦滔

(华东交通大学机电工程学院, 江西南昌 330013)

摘要: 针对滚动轴承振动信号复杂和非平稳的特点, 及故障信号常常淹没于各种噪声的情况, 先利用消除趋势项和小波降噪对包含故障信息的信号进行预处理, 再应用 Hilbert 变换对信号进行包络解调和频谱分析, 提取滚动轴承故障特征频率, 并判断其故障模式。对滚动轴承内圈、外圈和滚动体故障的诊断试验, 证明了信号预处理和希尔伯特(Hilbert)变换相结合的方法对滚动轴承内圈和外圈局部损伤故障的诊断是有效的和可行的, 但不能很好地检验出轴承滚动体的故障特征。

关键词: 滚动轴承; 故障诊断; 信号预处理; Hilbert 变换

中图分类号: TH165+.3; TP306+.3

文献标志码: A

滚动轴承是旋转机械中应用最为广泛的转动部件, 其运行状态往往直接影响整机的性能, 当其发生故障时, 轻则影响机器正常工作, 重则停工停产。滚动轴承运转状况的监测与诊断是保证整台机器正常运行的重要手段, 故研究滚动轴承的故障诊断有着重要的实际意义^[1]。

在滚动轴承故障诊断中, 由于早期轻微的轴承故障产生的信息往往淹没在背景噪声中, 很难被发现和提取出来, 因此必须采用有效的信号处理技术提高信噪比, 凸显故障特征。传统的故障诊断方法有时域、频域分析方法, 但是对于局部缺陷, 这些诊断方法的应用效果不太理想, 尤其在故障的初期^[2]。采用 Hilbert 变换, 进行解调和细化频谱分析, 可以比较精确地确定出故障发生的部位和故障模式。Hilbert 变换是一种将时域实信号变为时域解析信号的方法, 变换所得解析信号的实部是实信号本身, 虚部是实信号的 Hilbert 变换, 解析信号的幅值就是实信号的包络^[3]。

目前针对 Hilbert 变换的共振解调法, 国内外学者^[2-8]普遍采用滤波方法或小波分解取出信号固有高频信号成分, 再利用 Hilbert 变换做包络检波, 最后对包络信号进行傅里叶频谱分析得出故障信号特征频率, 取得了较好的诊断效果。但是, 这些方法都没有对信号进行预处理, 频谱分析时受到各种干扰信号的影响, 无法有效地识别包络谱的边频带, 特征频率夹杂其中没有凸显出来, 很可能造成错误的诊断。

利用消除趋势项和小波降噪方法对包含故障信息的信号进行预处理, 有效滤去各种干扰信号, 分离信号和噪声, 再应用 Hilbert 变换进行包络谱分析, 把轴承故障特征频率显示出来, 并判断故障发生的部位。

1 信号预处理

趋势项是指测试信号中存在的线性项或缓变的非线性项成分, 即信号整体的变化趋势。趋势项的存在会使数值积分的结果产生很大的误差, 严重背离真实情况。产生趋势项的原因是相当复杂的, 一般认为是仪器漂移所导致, 实际采集的数据中完全避免趋势项十分困难, 因此信号处理时需要先消除趋势项。本文使用最小二乘法拟合趋势项, 然后从原始数据中减去该趋势项。

传统的线性滤波方法存在着保护局部特征与抑制噪声之间的矛盾, 小波变换具有时-频局部化特点和带通滤波的特性以及小波函数选择的灵活性, 为解决这一问题提供了极为有用的工具^[9]。小波变换能将信号在多个尺度上进行小波分解, 由于信号和噪声在不同尺度下进行小波分解时, 存在一些不同的传递特性

收稿日期: 2012-05-23

作者简介: 杨超(1969-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为设备状态检测及故障诊断。

和特征表现,所以,采用小波分解就可以通过选择不同的基使得在相应坐标系内的信号和噪声的重叠尽可能小,从而使信、噪分离成为可能^[10]。本文采用 matlab 中的 wdencomp 函数作为消噪函数,选取 sym3 作为小波基函数对试验中的轴承信号进行降噪处理。

2 基于 Hilbert 变换的包络解调

设 $x(t)$ 为时域实信号,其傅里叶变换为 $X(\omega)$,构造解析信号 $z(t)=x(t)+jy(t)$, $y(t)$ 是 $x(t)$ 的 Hilbert 变换, $y(t)=x(t)*\frac{1}{\pi t}$, $x(t)=-y(t)*\frac{1}{\pi t}$; $z(t)$ 的傅里叶变换 $Z(\omega)$ 为

$$Z(\omega)=X(\omega)+jY(\omega) \quad (1)$$

式中: $Y(\omega)$ 为 $y(t)$ 的傅里叶变换; ω 为圆频率;单位虚数 $j=\sqrt{-1}$ 。

如果 $x(t)$ 只包含正频率,则由 Hilbert 变换构成的解析信号是原信号正频率分量的 2 倍,即^[11]

$$Z(\omega)=\begin{cases} 2X(\omega), & \omega \geq 0 \\ 0, & \omega < 0 \end{cases} \quad (2)$$

如果 $x(t)$ 为窄带调幅信号,其解析信号 $z(t)$ 可表示为

$$z(t)=x(t)+jy(t)=A(t)e^{j\omega_0 t} \quad (3)$$

式中: ω_0 为载波频率;瞬时振幅 $A(t)$ 即是调幅信号 $x(t)$ 的包络, $A(t)=\sqrt{x^2(t)+y^2(t)}$ 。

利用信号的希尔伯特变换,即可实现调幅信号的幅值解调。当轴承局部存在损伤或缺陷时,在受载运转过程中轴承的其他零件会周期性地撞击故障部位,产生冲击力,从而激起轴承的高频固有振动。该高频固有振动的振幅受轴承元件故障特征的调制,利用包络检波器解调可得反映故障的包络信号,对包络信号进行分析,即可诊断出滚动轴承的故障类型^[12]。

3 滚动轴承故障诊断试验验证

采用某电气工程实验室的试验数据^[13]。试验平台由一个 1.47 kW 的电机,一个转矩传感器,一个功率计和电子控制设备组成。实验中使用 3 个加速度传感器采集振动信号,分别安装在电机支承底盘、电机壳体的驱动端和风扇端的位置,并在轴承上布置了单点故障。转子转速为 $1\ 797\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,以采样频率 12 000 Hz 来获得底盘、驱动端和风扇端的 4 096 个点的故障数据(数据单位为电压 V),已知转动频率是 29.95 Hz,试验轴承型号为 6205-2RS,根据轴承故障特征频率公式,得轴承内圈、外圈和滚动体的故障特征频率分别为 162.18, 107.36 Hz 和 141.17 Hz。

以轴承内圈故障为例。对底盘传感器采集到的振动信号进行时频域分析,图 1 所示为原振动信号时域波形和频谱图,图 2 所示为该信号预处理后的时域波形和频谱图。可以看到,预处理后信号的信噪比有明显提高,且信号预处理前后的频谱图有很大的不同:信号预处理前的频谱图中高频谱线突出,在 1 475 Hz 和 1 250 Hz 附近有很大的峰值,而信号预处理后,其频谱在上述两个频率处的谱线已不突出,相反低频谱线突出,更符合实际情况。所以,是否对信号进行预处理,可能会得出不同甚至错误的结论。

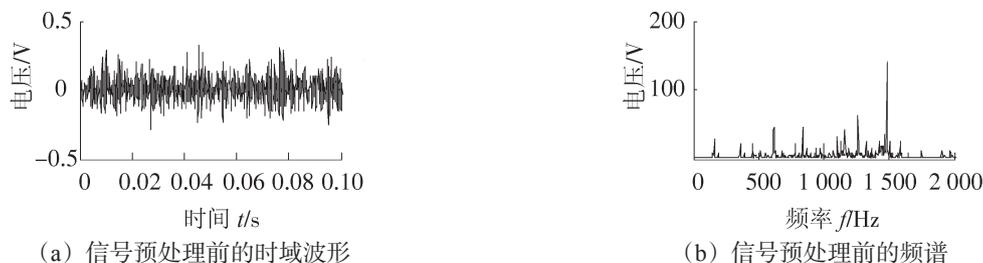


图 1 原振动信号时域波形和频谱图

Fig.1 Time-domain waveform and frequency spectrogram of original vibration signal

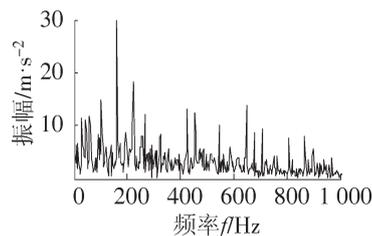
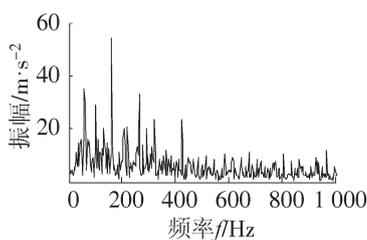
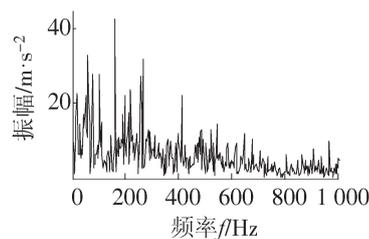


图2 振动信号预处理后的时域波形和频谱图

Fig.2 Time-domain waveform and frequency spectrum of preprocessed vibration signal

利用Hilbert变换分别对底盘、驱动端和风扇端预处理后的信号进行包络谱分析,图3所示为底盘信号预处理后的包络谱图,图4为驱动端信号预处理后的包络谱图,图5为风扇端信号预处理后的包络谱图。

从图3,4,5中可以发现,频谱幅值都是在162 Hz附近最大,存在较大的周期性冲击能量,说明轴承有内圈故障存在,与实际故障相符。同样地,对另外两种轴承故障类型的振动信号进行包络谱分析,外圈故障结果和内圈一样凸显,得到验证。但是滚动体故障结果不如内圈那样凸显,发生了少量偏移。滚动轴承的内圈一般和转轴固定一起,一旦内圈出现损伤,在传感器接收到周期性的故障信号中,含有瞬时脉冲力的冲击成分相对较大,故而振动信号频谱相对凸显,分析结果明显。一般情况下滚动轴承的外圈相对静止,当外圈出现损伤时,损伤点相对于传感器的位置不变,传感器感受到的脉冲力大小和方向也不变,因此振动信号频谱相对简单,容易进行提取和分析。当滚动体表面出现损伤,损伤点的位置相对传感器随轴承周期变化,此时传感器拾取的信号比较复杂,产生的包络信号和频谱也比较复杂^[14],导致分析结果不如内、外圈故障那样明显。

图3 底盘信号预处理后的包络谱图
Fig.3 Envelope frequency spectrum of preprocessed chassis signal图4 驱动端信号预处理后的包络谱图
Fig.4 Envelope frequency spectrum of preprocessed driving end signal图5 风扇端信号预处理后的包络谱图
Fig.5 Envelope frequency spectrum of preprocessed fan end signal

4 结束语

将信号预处理和Hilbert变换相结合的包络分析方法应用于滚动轴承故障诊断,分别对内圈、外圈和滚动体故障轴承的实测振动信号进行了故障分析。结果表明,该方法可简便有效地确定轴承内、外圈的故障及其类型,是诊断滚动轴承故障的一种有用工具,但不能很好地检验出轴承滚动体的故障特征,需要结合其它分析方法作进一步完善。

参考文献:

- [1] 杨超,李亦滔. 机械设备故障智能诊断技术的现状与发展[J]. 华东交通大学学报,2011,28(5):23-28.
- [2] 陈永会,姜旭,郭山国,等. 基于小波分析和Hilbert变换的滚动轴承故障诊断[J]. 机械设计,2010,27(8):91-94.
- [3] 马波,魏强,徐春林,等. 基于Hilbert变换的包络分析及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 北京化工大学学报,2004,31(6):95-97.
- [4] 王子玉,孔凡让. 基于共振解调和小波分析方法的轴承故障特征提取研究[J]. 现代制造工程,2012(1):117-121.
- [5] 卜伶俐,郭建英,蒋凤林. 小波分析与Hilbert分析在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报,2008,13(2):82-85.
- [6] 王平,廖明夫. 滚动轴承故障诊断的自适应共振解调技术[J]. 航空动力学报,2005,20(4):606-612.
- [7] 胡易平,安钢,王凯,等. 基于小波自适应包络解调技术的滚动轴承故障识别研究[J]. 煤矿机械,2010,31(2):214-217.
- [8] 张雄希,刘振兴. 共振解调与小波降噪在电机故障诊断中的应用[J]. 电机与控制学报,2010,14(6):66-70.
- [9] 袁运能,毛士艺. 基于离散小波标架的信号降噪[J]. 信号处理,1999,15(3):204-211.
- [3] 张涛,林承焰,张宪国,等. 基于希尔伯特变换的测井曲线高分辨率处理方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(1):68-72.
- [10] 刘娟花,李福德. 基于小波变换的信号去噪研究[J]. 西安理工大学学报,2004,20(3):289-292.
- [12] 杜秋华,杨曙年. 细化包络分析在滚动轴承缺陷诊断中的应用[J]. 轴承,2004(3):31-34.
- [13] CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY BEARING DATA CENTER. Download a Data File[DB/OL]. [2012-05-23] <http://www.eecs.case.edu/laboratory/bearing/download.htm>.
- [14] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断理论方法系统[M]. 北京:机械工业出版社,1995:65-98.

Fault Diagnosis of Rolling Bearings Based on Signal Preprocessing and Hilbert Transform

Yang Chao, Li Yitao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: According to the facts that rolling bearing vibration signal is complex and unstable, and fault signal is often submerged in various kinds of noise, measures for eliminating the trend term and wavelet de-noising are used to preprocess the signals with fault information, then Hilbert transform is applied to envelope demodulation and spectrum analysis. Thus fault characteristic frequencies of rolling bearings are extracted, and the mode of the bearing fault is decided. The diagnostic tests of the faulted inner ring, faulted outer ring and faulted rolling element of rolling bearings prove that the combination of signal preprocessing and Hilbert transform is effective and feasible to the partial damage fault diagnosis of the inner ring and outer ring of rolling bearings, but not effective to fault diagnosis of the bearing rollerst.

Key words: rolling bearing; fault diagnosis; signal preprocessing; Hilbert transform