

文章编号:1006-1355(2009)05-0062-04

基于谐波小波滤波的旋转机械故障诊断新方法

王誉蓉¹, 张 波¹, 朱学军¹, 张文斌²

(1. 宁夏大学 机械工程学院, 银川 750021; 2. 浙江大学 机械与能源工程学院, 杭州 310027)

摘 要: 针对旋转机械非平稳信号的特点, 提出采用谐波小波滤波对现场采集的振动信号进行故障诊断的新方法。该方法基于谐波小波良好的盒形频谱特性, 将特定频率段的成分与信号的其它频率成分既不交叠又不遗漏地分解到相互独立的频带上, 再进行重构就可将特定频率成分提取出来。仿真计算及实例验证表明, 谐波小波滤波方法具有良好的滤波效果, 能将有用频率成分提取出来, 为初步故障诊断提供依据。该方法具有算法简单, 运算速度快的特点。

关键词: 振动与波; 谐波小波滤波; 旋转机械; 故障诊断; 谐波小波; 非平稳信号

中图分类号: TH165⁺.3 **文献标识码:** A

New Method for Fault Diagnosis of Rotating Machines Based on Harmonic Wavelet Filtering

WANG Yu-rong¹, ZHANG Bo¹, ZHU Xue-jun¹, ZHANG Wen-bin²

(1. College of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A new method of fault diagnosis of in-situ sampled vibration signals is introduced for the non-stationary signals of rotating machines by using the harmonic wavelet filtering. Based on the nice box-shaped characteristic of spectrum of harmonic wavelet, the components in prescribed frequency region and other frequency components are decomposed to independent frequency bands without any overlapping or leaking. Then the frequency components in the prescribed region can be extracted by data reconstruction. Simulation results and practical examples show that this method has good filtering effect. It can extract the valuable frequency components for elementary fault diagnosis. This method has the merits of simple algorithm and computer-time saving.

Key words: vibration and wave; harmonic wavelet filtering; rotating machines; fault diagnosis; harmonic wavelet; non-stationary signal

机械设备在运行过程中的振动是反映系统整体及其变化规律的主要信息。通过各种动态测试仪器拾取、记录和分析动态信号, 是进行系统状态监测和故障诊断的主要途径。传统的快速傅里叶变换(FFT)的频谱分析方法是振动信号处理中最重要的途径, 尤其是近代各种谱分析软件和谱分析仪器的推出, 使频谱分析方法得到了更为广泛的应

用。但是, 傅里叶分析存在着严重的不足, 它只适于分析平稳信号, 而不适于分析非平稳信号, 这一缺陷限制了它在设备故障诊断领域的应用^[1]。

小波分析将非平稳信号分解至时间-尺度平面, 其良好的正交性及多分辨率特性使得信号中的时间、频率局部化信息均能得到充分展示^[2]。由剑桥大学的 D. E. Newland 提出的谐波小波具有明确的表达式和准确的箱函数形式的谱图, 它对信号存在的奇异成分非常敏感, 并且算法实现简单^[3]。

根据旋转机械振动信号的特点, 采用谐波小波滤波方法来处理采集到的振动信号, 根据谐波小波时频图将特定频率段的成分提取出来, 再和常见故

收稿日期: 2009-03-26

基金项目: 宁夏高等学校科学研究项目(2007)

作者简介: 王誉蓉(1979-), 女, 陕西省咸阳市渭城区, 讲师。

E-mail: gxf1688@163.com

障的频率特征进行比较来推断信号中可能包含的故障,取得了较好的效果。

1 谐波小波的基本概念

1993 年,Newland 从小波的频谱出发,提出了一种新的小波构造形式—谐波小波^[4]。谐波小波是具有“盒形”(box-like)频谱的复小波,其在频域的广义表达式为

$$W(\omega) = \begin{cases} 1/2\pi(n-m) & \omega \in [2\pi m, 2\pi n] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中 m, n 决定了谐波小波变换的尺度(j),且 $n = 2m$ 。当 $m = 0$ 时, $n = 1$ 。此时相应的小波函数为

$$W(t) = \frac{\exp(in2pt) - \exp(im2pt)}{i2p(n-m)t} \quad (2)$$

可以看出,由于谐波小波具有相互成 90° 相差的实部偶小波和虚部奇小波,由数字信号处理基本知识^[5]可知,实部偶小波和虚部奇小波都是零相移滤波器,这就是说,谐波小波具有“锁定”信号相位的功能。

给定步长 $k/(n-m)$, $k \in \mathbb{Z}$, 做平移变换,则式(2)变为

$$W\left(t - \frac{k}{n-m}\right) = \frac{\exp\left[in2\pi\left(t - \frac{k}{n-m}\right)\right] - \exp\left[im2\pi\left(t - \frac{k}{n-m}\right)\right]}{i2\pi(n-m)\left(t - \frac{k}{n-m}\right)} \quad (3)$$

即是分析频率带宽为 $2\pi(n-m)$, 分析时间中心在 $t = k/(n-m)$ 处的谐波小波的一般表达式。可以看出:不同频带在无交叠的情形下,其所对应的小波是相互正交的;相同频带但 k 为非零整数(步长不为零)时,其所对应的小波也是相互正交的。以谐波小波函数系 $W(t)$ 作为 $L^2(R)$ 的一组正交基,对信号 $f(t)$ 作谐波小波分解,就可以将信号既无交叠又无遗漏地分解到相互独立的频段,任何能量较弱的细节信号都可以被准确地显现出来,从而极其有利于信号特征的提取^[6]。

2 谐波小波滤波的实现

谐波小波具有良好的盒型频谱特性,可以将任何信号正交、无冗余、无遗漏地分解到相互独立的频段上。特定频段的成分与信号的其它频率成分通过谐波小波分解被分离了,从而消除了其它频段成分对该频率段的影响,使一些被淹没的较弱的信号得以突现出来,等于提高了信噪比。为了对信号的某一特定频段的成分进行研究,在对信号的谐波

小波分解进行重构时可将其余频段的谐波小波系数置为“0”,只保留该段的小波系数。重构过程如图 1 所示。重构的结果只包含信号该频段的成分,其它成分都被剔除了。达到了滤波的目的^[7]。

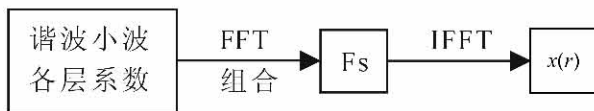


图 1 谐波小波重构算法

3 仿真信号的谐波小波滤波分析

为考察谐波小波滤波方法对振动信号的处理能力,设原始振动信号为

$$x(t) = \sin(2 \times \pi \times 100 \times t) \quad (4)$$

在原始信号中模拟不同类型的故障特征,进行仿真计算如下。

(1) 基线漂移信号的谐波小波滤波分析

在旋转机械振动信号的现场采集中有时会混入一些低频的基线漂移,为考察谐波小波滤波的效果,在原始振动信号中加入幅值 0.2 的基线漂移量,即

$$x(t) = \sin(2 \times \pi \times 100 \times t) + \frac{1}{5} \sin(2 \times \pi \times 2 \times t) \quad (5)$$

以频率 $f_s = 2\,048$ Hz, 点数 $N = 512$ 进行采样,然后对该信号进行谐波小波分解,其时域波形和谐波小波时频等高线图如图 2a、2b 所示。从时频等高线图上可知,信号在第 6 层(即频带 $[64 \sim 128]$ Hz)存在巨大能量分布。因此,对信号进行谐波小波滤

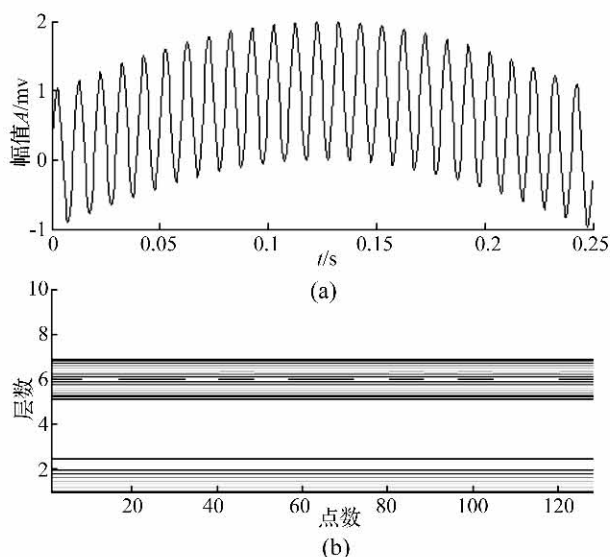


图 2 基线漂移信号的时域波形及其谐波小波时频等高线图
Figure2 the time-domain waveform of baseline drift signal and its Harmonic Wavelet time-frequency contour map

波,可以将基线漂移消除,进行傅里叶逆变换后信号在时域的重构波形如图 3 所示。

可见经过谐波小波滤波处理后,频率为 100Hz 的振动信号得以从原始信号中分离出来,而且信号在处理过程中点数不发生变化,这就是谐波小波优于其它小波之处。

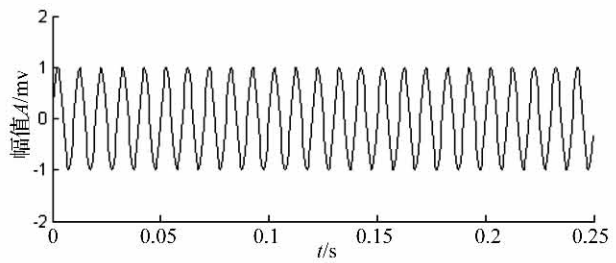


图 3 谐波小波滤波处理后的信号时域波形
Figure3 the time-domain waveform of the signal processed by Harmonic Wavelet filtering

(2) 随机噪声的谐波小波滤波分析
在原始振动信号中加入均值为 0, 标准差为 0.6 的均匀分布的白噪声, 然后以频率 $f_s = 2\,048\text{ Hz}$, 点数 $N = 512$ 进行采样, 对该信号进行谐波小波分解, 其时域波形和谐波小波时频等高线图如图 4a、4b 所示。从时频等高线图上可知, 信号在第 6 层 (即频带 $[64 \sim 128]\text{ Hz}$) 存在巨大能量分布, 在 8、9 层也存在能量分布, 但相比小得多。因此, 对信号进行谐波小波滤波, 可以将这个主要的频率成分提取出来, 进行傅里叶逆变换后信号在时域的波形如图 5 所示。

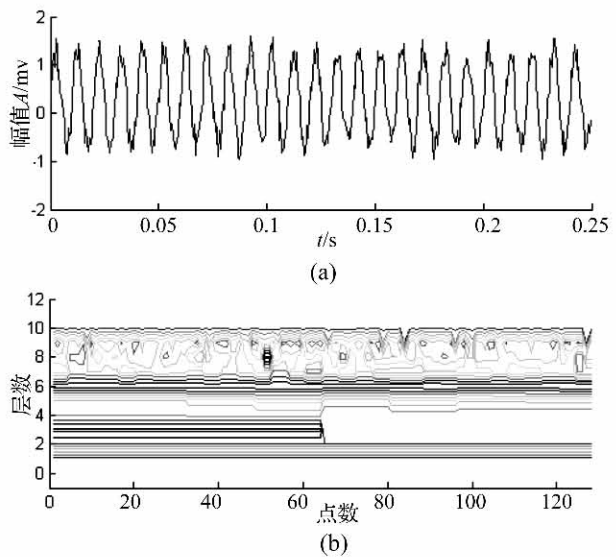


图 4 白噪声信号的时域波形及其谐波小波时频等高线图
Figure4 the time-domain waveform of white noise signal and its Harmonic Wavelet time - frequency contour map

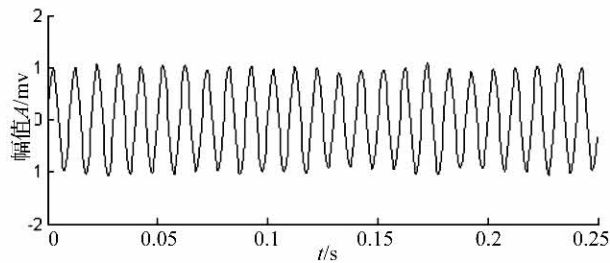


图 5 谐波小波滤波处理后的信号时域波形
Figure5 the time-domain waveform of the signal processed by Harmonic Wavelet filtering

从上图可知, 由于白噪声信号属于宽频信号, 因此在该频带内的部分白噪声能量渗入到所提取的 100 Hz 的信号中, 导致傅里叶逆变换后得到的时域波形的幅值有所变化, 但并不影响对信号特征的识别。

4 应用实例

图 6 为小型转子试验台振动信号, 转子运转在 $2\,940\text{ r/min}$ 附近, 采样频率 $f_s = 512\text{ Hz}$, 采样点数为 $N = 1\,024$ 。对信号进行谐波小波分解, 其小波时频等高线图如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 信号能量主要集中在第 7、8 两层 (对应频带 $[32 \sim 64]\text{ Hz}$ 、 $[64 \sim 128]\text{ Hz}$) 上。采用谐波小波滤波方法, 将信号处于这两层的频率成分提取出来, 如图 8a、8b、8c、8d 所示。

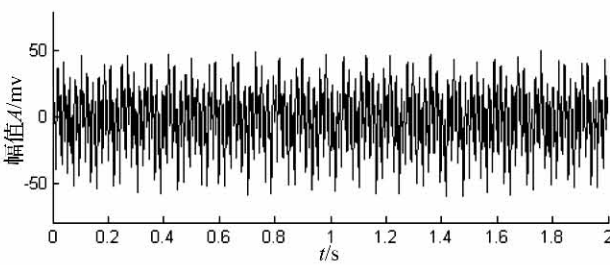


图 6 现场采集信号的时域波形
Figure6 the time-domain signal waveform collected at the scene

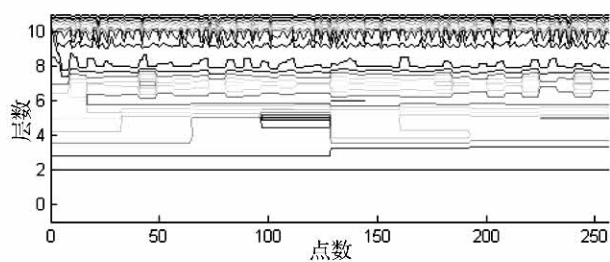


图 7 现场采集信号的谐波小波时频等高线图
Figure7 the Harmonic Wavelet time-frequency contour map of signal collected at the scene

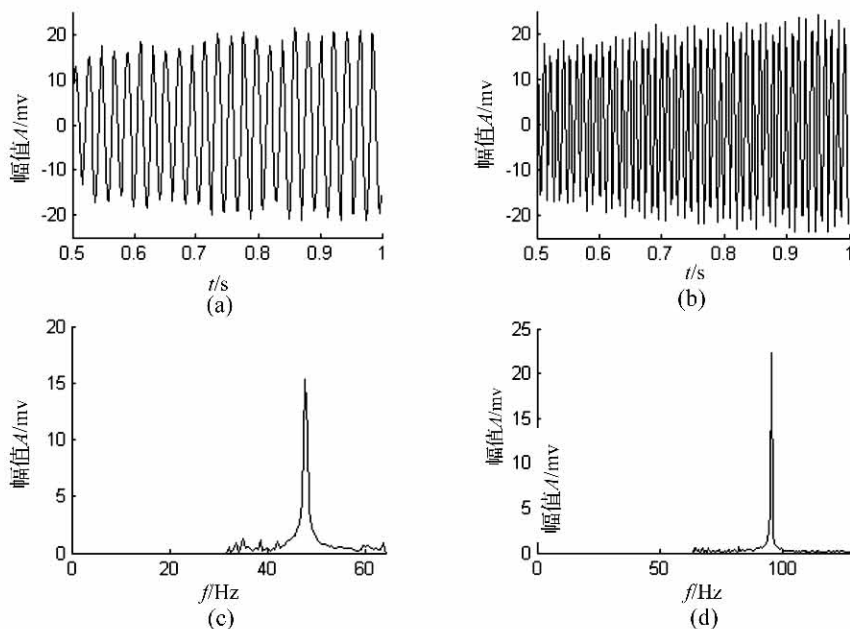


图8 谐波小波滤波后所提取出的时域波形及其频谱

Figure 8 the extracted time-domain waveform and its spectrum after Harmonic Wavelet filtering

从图 8c、8d 中可以看出,所采集的现场振动信号包含转子的基频和二倍频分量,根据旋转机械常见的频谱特征,可以初步判断该转子产生了不对中故障,因为振动成分中二倍频分量非常大,二倍频分量的幅值与基频的幅值之比明显大于 1。从图 8a、8b 中可以看出信号经过谐波小波滤波后,将时频等高线图中出现的频段所包含的频率成分分别提取出来,然后经过傅里叶逆变换就可以得到相应的时域波形,而且不损失数据点,说明谐波小波滤波取得了良好的效果。

5 结 语

针对旋转机械振动信号数据采集的特点,提出了采用谐波小波滤波的方法来对振动信号进行故障诊断,研究了谐波小波滤波方法对不同故障信号的处理能力,仿真计算及实例表明谐波小波滤波方法在旋转机械故障诊断方面具有良好的效果。谐波小波与传统的小波相比具有良好的盒形频谱特性,故应用谐波小波进行数字信号滤波更具有优越性。谐波小波滤波实际上是谐波小波重构算法的延伸。由于在计算过程中并未采用基于隔二抽取的 Mallat 算法,因此保证了信号各频段成分点数不变,采样频率不变。这样就能把信号中有用的频率成分提取出来,进行故障诊断。

参考文献:

[1] 徐玉秀,原培新,杨文平. 复杂机械故障诊断的分形与小波方法[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

[2] 肖忠会. 谐波小波分析及其在旋转机械信号分析中的应用[J]. 风机技术,2001,1:43-46.

[3] 唐贵基,张文斌,王维珍,等. 谐波小波滤波在旋转机械信号分析中的应用[J]. 噪声与振动控制,2005,5:29-30.

[4] Newland D E. Harmonic Wavelet Analysis. Proc. R. Soc. Lond. A (1993) 443:203-205.

[5] 斯特恩. 数字信号处理[M]. 高顺泉译. 北京:人民邮电出版社,1983.

[6] 肖忠会. 谐波小波分析在转子系统动力参数识别中的应用[D]. 西安:西安交通大学,2000:32-54.

[7] 何正嘉,曾艳阳,孟庆丰,等. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用[M]. 北京:高等教育出版社,2001.

[8] 唐贵基,张文斌,田丽洁,等. 谐波小波分析在旋转机械故障诊断信号处理中的应用[J]. 矿山机械,2005,33(8):84-85.

[9] 赵玉成,肖忠会,许庆余. 谐波小波在数字滤波器中的应用及其功效分析[J]. 机械工程学,2000,10:9-12.

[10] Newland D E. Harmonic Wavelet Analysis of Vibration, Part I: Theory[J]. Journal of vibration and Acoustics, 1994,116:417-425.

[11] Newland D E. Harmonic Wavelet Analysis of Vibration, Part II: Wavelet Maps[J]. Journal of vibration and Acoustics, 1994,116:417-425.

[12] 胡爱军,向玲,唐贵基. 谐波小波在旋转机械振动故障信号检测中的应用[J]. 东北大学学报,2004,增刊1:15-18.

[13] 高 强,何正嘉. 谐波小波及其时频剖面图在旋转机械诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报,2000,34(9):62-66.

[14] 张 铮,杨文平,石博强,等. MATLAB 程序设计与实例应用[M]. 北京:中国铁道出版社,2003.