

基于小波包变换的滚动轴承故障诊断

王冬云^{1,2} 张王志¹

1. 燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 秦皇岛, 066004

2. 秦皇岛职业技术学院, 秦皇岛, 066100

摘要: 针对故障轴承振动信号能量集中与调制的特点, 提出了一种基于小波包能量法与 Hilbert 变换的滚动轴承故障诊断方法。使用小波包变换对振动信号进行分解、重构及能量计算, 并应用 Hilbert 变换对能量集中频段的重构信号进行解调和频谱分析, 提取故障特征频率。同时针对诊断过程中故障特征参数依靠人工计算的问题, 提出故障特征参数自动提取方法。实际的滚动轴承实验数据的处理和分析结果表明, 该诊断方法能够准确、快速地识别滚动轴承表面损伤的故障模式。

关键词: 滚动轴承; 小波包变换; Hilbert 变换; 故障诊断

中图分类号: TB123

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.03.010

Fault Diagnosis Study of Ball Bearing Based on Wavelet Packet Transform

Wang Dongyun^{1,2} Zhang Wenzhi¹

1. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Rolling Strip, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

2. Qinhuangdao Institute of Technology, Qinhuangdao, Hebei, 066100

Abstract: For the modulation and energy concentration feature of fault ball bearing vibration signals, a fault diagnosis study based on wavelet packet energy and Hilbert transform was put forward. The vibration signals of ball bearing were decomposed and reconstructed using wavelet packet transform. And energy of every frequency band was calculated, then the signals of the frequency band with maximal energy were analyzed by applying Hilbert transform. Finally, the characteristic frequency of fault signals was extracted. The computation of fault features was accomplished artificially. A new method which can select fault features automatically was presented herein. Through processing and analyzing the practical ball bearing experimental data, it is shown that the fault diagnosis study can diagnose different running states of ball bearings due to surface damage accurately and quickly.

Key words: ball bearing; wavelet packet transform; Hilbert transform; fault diagnosis

0 引言

滚动轴承在其运转过程中必然会产生振动, 当轴承元件表面出现局部损伤类故障时, 损伤点与轴承其他元件表面发生接触都会产生冲击作用, 这样就会使得振动加剧, 同时导致轴承系统的瞬时高频共振。故障诊断的首要任务就是要将共振信号中的故障特征提取出来^[1]。

小波包变换技术通过对振动信号进行小波包分解, 可以得到每一频带内振动信号的变化规律, 然后可以从中提取出能够真实反映轴承冲击振动现象的特征频带信号。近年来, 小波包变换技术被广泛应用于振动信号故障诊断中。Wu 等^[2]从振动信号中提取小波包节点能量并将其作为内燃机故障诊断的特征参数, 张军等^[3]应用该方法对

滚动轴承故障模式进行了有效识别; 万书亭等^[4]对滚动轴承的振动信号进行了小波包分解和重构, 对重构后的信号进行 Hilbert 变换得到了包络信号, 有效地提取出了能够表现故障特征的信息; Nikolaou 等^[5]则结合能量算法直接对重构信号进行 FFT 变换, 有效地诊断出了轴承元件的故障缺陷。

由于轴承出现故障会产生明显的冲击信号, 所以导致信号的能量会集中在某一频段内, 且该频段内包含着最丰富的低频故障信息, 将此处共振信号中的故障特征提取出来成为故障诊断的关键。本文在现有研究的基础上, 提出将小波包能量法与小波包络解调法相结合的滚动轴承故障诊断方法; 并针对目前故障特征提取无法自动完成的问题, 提出了滚动轴承故障特征参数自动提取方法。

该小波包能量法与小波包络解调法相结合的故障诊断方法应用步骤如下: ①根据轴承结构尺

收稿日期: 2011-03-10

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2007BAF02B11); 河北省科学技术研究与发展计划资助项目(11213583); 秦皇岛市科学技术研究与发展计划资助项目(201101A054)

寸计算轴承故障的特征频率;②选择合适的小波函数和分解级数,对原始信号进行小波包分解和单支重构得到各节点的小波包系数;③计算小波包能量,选取能量集中的频段进行 Hilbert 变换,获得信号包络谱;④应用特征参数自动提取方法,计算各特征频率对应的包络谱值,并依此进行故障诊断。

1 小波包变换技术在滚动轴承故障分析中的应用

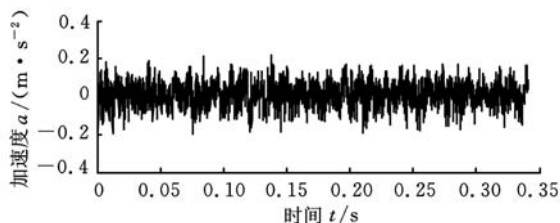
1.1 滚动轴承实验数据

本文用到的滚动轴承实验数据来自美国 Case Western Reserve University 电气工程实验室,实验轴承型号为 SKF6205,采样频率为 12kHz,采样点数为 8192,实验转速为 1730 r/min。故障轴承在受载运转过程中,损伤点同与之相互作用的部件表面接触时会产生一系列的冲击脉冲力,其频率可以根据轴承的几何尺寸以及轴承的旋转频率求出,该频率称为轴承部件的故障特征频率^[6]。通过计算可以得到滚动轴承的各部件的特征频率如表 1 所示。

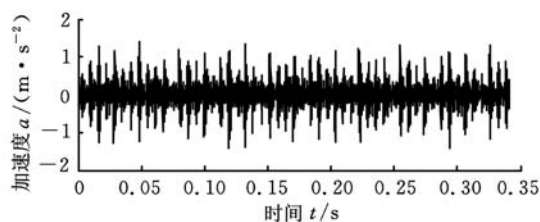
表 1 滚动轴承各部件特征频率 Hz

旋转频率	保持架 旋转频率	内圈 特征频率	外圈 特征频率	滚动体 特征频率
28.7	11.4	155.4	102.9	135.5

滚动轴承正常工况与内圈故障信号时域波形如图 1 所示。为突出时域信号特征只截取其中 4096 个采样点。从图 1 可以看出,滚动轴承出现故障时,产生了幅值很大的振动信号,并且可以看到信号中存在着明显的等间隔冲击成分,但无法直接根据时域信号判断出故障产生的原因和部位。



(a) 正常工况时域波形



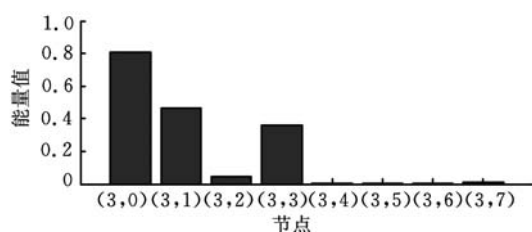
(b) 内圈故障时域波形

图 1 滚动轴承不同工况的信号时域波形

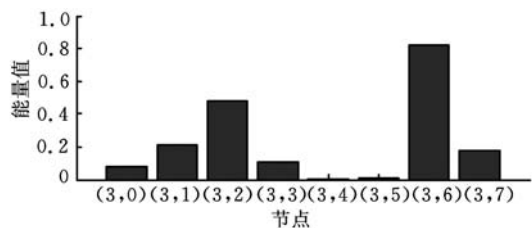
1.2 小波包分解与节点能量分析

将原始信号进行 3 层小波包分解,小波函数选择 db10^[7]。第 3 层中各节点重构信号的频带范围分别为:节点(3,0)——[0,750]Hz、节点(3,1)——(750,1500]Hz、节点(3,2)——(2250,3000]Hz、节点(3,3)——(1500,2250]Hz、节点(3,4)——(5250,6000]Hz、节点(3,5)——(4500,5250]Hz、节点(3,6)——(3000,3750]Hz、节点(3,7)——(3750,4500]Hz。

图 2 所示为轴承振动信号进行小波包分解、重构、能量计算、归一化后的各频段能量分布情况(纵坐标采用量纲一单位)。从图 2a 中可以看出,轴承正常运行时,振动加速度信号的能量主要分布在低频段节点(3,0)处,其频段为(0,750]Hz,这是由周期性振源引起的响应。如图 2b 所示,当轴承内圈出现故障时,振动加速度信号的能量主要分布在高频段节点(3,6)处,其频段为(3000,3750]Hz,这是由于轴承的振动信号具有明显的调制特点,因此轴承的故障信号被调制在频率较高的信号中;同时,轴承出现故障时振动信号中包含了相应的冲击成分,导致信号的能量会集中在某一频段内^[8-9]。以上分析表明,故障信号能量集中分布在 3000~3750Hz 之间,相应的故障冲击信号被调制在该频段中,为获取故障信号的频率特征,有必要对能量集中的频段信号进行进一步分析。



(a) 正常工况频段能量图



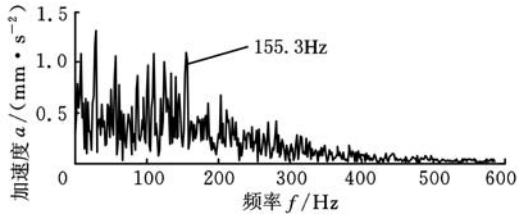
(b) 内圈故障频段能量图

图 2 滚动轴承不同工况的信号频段能量分布图

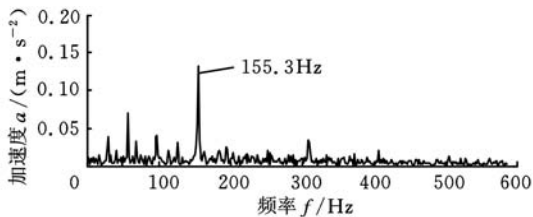
1.3 小波包络谱分析

通过解调能量集中频段的振动信号可得到反映故障特征频率的包络信号,对此包络信号进行分析,即可诊断出轴承的故障。为产生对比效果,将故障信号中能量分布相对少的(3,4)节点与能

量相对集中的(3,6)节点的重构信号同时进行包络谱分析,得到的包络谱如图3所示。从图3中可以看出,能量分布少的节点(3,4)处功率值小且故障频率处谱线不突出,相比之下能量相对集中的节点(3,6)处,其功率值是节点(3,4)的100倍左右,而且在155.3Hz附近有一条幅值明显的谱线,对比表1所示的轴承故障的特征频率值,可知是轴承内圈发生了故障。



(a)节点(3,4)的重构信号包络图



(b)节点(3,6)的重构信号包络图

图3 节点重构信号包络谱

2 基于小波包能量法与 Hilbert 变换的滚动轴承故障诊断方法

能量集中的小波包分解频段包含着滚动轴承的故障信息,故障部位不同,包络谱出现峰值的频率不同,可以提取此频段中各特征频率处的包络功率谱值并将其作为故障诊断特征参数。而在实际中,由于受轴承的制造装配误差、轴的转速不稳和滚子摇摆等很多其他因素的影响,轴承的实际特征频率会在一个小范围内波动甚至会有一个跳跃,计算出的故障特征频率与实际包络谱中的故障特征频率总是存在差异^[10],小波包络谱特征值需要进行人工提取,这给滚动轴承的故障诊断带来了较大的难度。

针对这一问题,提出一种从小波包络谱中自动计算特征参数的方法,其步骤如下。

(1)计算各频段信号能量。各频段能量 $E(3, i)$ 可表示为

$$E(3, i) = \sum_{k=1}^n d_{ik}^2 \quad (1)$$

式中, d_{ik} 为小波包节点(3, i)的各离散点的幅值($i = 0, 1, \dots, 7; k = 1, 2, \dots, n$)。

本例中采样点数为8192,分解到第3层离散点数 $n = 1024$ 。

(2)选择能量相对集中的节点(3, x)。节点(3, x)的能量为

$$E(3, x) = \max_{i=0}^7 E(3, i) \quad x \in \{0, 1, \dots, 7\} \quad (2)$$

(3)自动计算故障特征参数。对各种工况中能量集中的节点的重构信号进行 Hilbert 变换,获得小波包络谱。设包络谱为 $W(f)$,按特征频率从小到大顺序: F_1 为保持架频率包络谱值; F_2 为旋转频率包络谱值; F_3 为外圈频率包络谱值; F_4 为滚动体包络谱值; F_5 为内圈包络谱值。由于计算出的故障特征频率与实际包络谱中的故障特征频率总是存在差异,所以特征值需要在一定范围内寻找,设特征频率差异为 δf ,包络频谱间隔为 Δf ,令 $m = \delta f / \Delta f$ ^[11]。在能量集中的节点(3, x)的包络谱中自动计算旋转频率及各故障特征频率处的特征参数,计算公式为

$$F_j = \max_{b=-m}^m W(f + b\Delta f) \quad (3)$$

$$b \in \mathbf{Z} \quad j = 1, 2, 3, 4, 5$$

(4)特征参数归一化。为了增强各个模式下的样本的聚类性,进行特征参数归一化处理:

$$F_j = \frac{F_j}{\max_{l=1}^5 F_l} \quad (4)$$

表2所示为滚动轴承表面损伤故障诊断结果。当滚动轴承无故障时,小波包络谱上旋转频率处特征值 F_2 最大,所对应的滚动轴承元件故障特征频率处的取值 F_3 、 F_4 和 F_5 均较小;而当出现内圈故障时,小波包络谱表现出了内圈故障特征频率,此时,特征值 F_5 最大;其他故障类型同理。

表2 滚动轴承表面损伤故障诊断结果

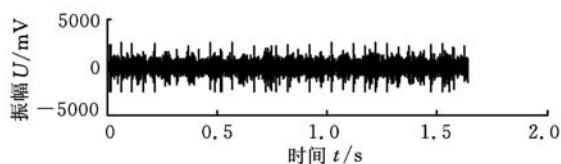
故障类型	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
正常工况	0.4429	1.0000	0.2427	0.2660	0.3526
	0.3510	1.0000	0.1957	0.1996	0.2082
	0.2295	1.0000	0.1792	0.4441	0.1125
内圈故障	0.0933	0.2464	0.2414	0.0654	1.0000
	0.0712	0.0906	0.0815	0.0786	1.0000
	0.1088	0.2463	0.0861	0.0736	1.0000
外圈故障	0.2479	0.2373	1.0000	0.1882	0.1953
	0.1683	0.3350	1.0000	0.2779	0.1656
	0.1612	0.2890	1.0000	0.1893	0.1154
滚动体故障	0.5572	0.5809	0.4028	1.0000	0.7370
	0.3201	0.2694	0.3609	1.0000	0.4125
	0.6851	0.8845	0.4360	1.0000	0.7553

3 实际诊断应用

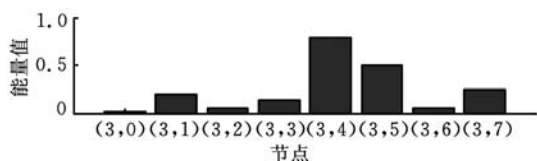
应用基于小波包变换的滚动轴承故障诊断方法,笔者在燕山大学轧机研究所的减速箱故障中

提取到了滚动轴承点蚀故障信息,并成功地对其进行了故障识别。故障轴承型号为 6406,转速为 900r/min,采样频率为 5000Hz,采样点数为 8192。经计算得出该轴承各种类型的故障特征频率:外圈故障特征频率为 37.9Hz,内圈故障特征频率为 67.1Hz,滚动体故障特征频率为 49.8Hz。图 4a 给出了该减速箱在故障运转状态下,减速箱底座上某点测得的振动信号的时域波形,时域波形中为突出信号特征,只截取了 4096 个采样点,故障信号被各种其他周期信号和噪声信号淹没,无法判断故障类型。

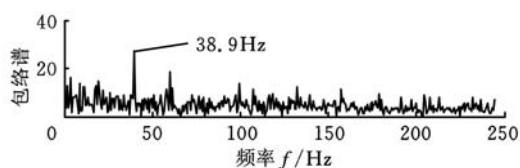
对时域信号进行小波包能量计算得到故障信号频段能量分布如图 4b 所示,可以看出故障信号在节点(3,4)处能量最大,其共振频段的频率范围为[2187.5,2500]Hz。对该频段的小波包重构信号进行 Hilbert 变换得到的小波包络谱如图 4c 所示,观察到该谱图在 38.9Hz 频率处有明显峰值,这与计算得出的外圈故障特征频率 37.9Hz 相近,初步推断该齿轮箱的故障类型为外圈故障。打开减速箱机盖后发现轴承外圈发生点蚀,与分析结果一致。



(a)故障信号时域波形



(b)故障信号频段能量分布图



(c)节点(3,4)的重构信号包络谱

图 4 实测故障轴承信号分析

4 结论

(1)滚动轴承出现表面损伤类故障时,轴承振动信号的能量会在一些频带内增强,故障信号被调制在了能量集中的频段中。

(2)选取小波包能量集中的频段,通过对该频段的小波包重构信号进行包络解调,能够得到只含故障信息的低频包络信号,其频谱为小波包络谱;从小波包络谱中可以观察滚动轴承特征故障。

(3)提出了滚动轴承特征参数提取无法自动完成的解决方案,实现了滚动轴承特征参数的自动提取。

(4)实际减速箱故障诊断结果表明,小波包能量法与小波包络解调法相结合可以有效识别滚动轴承表面损伤的故障模式。

参考文献:

- [1] 武和雷,朱善安,林瑞仲,等.基于能量算子解调法的滚动轴承故障诊断[J].农业机械学报,2003,34(1):45-47.
- [2] Wu Jianda, Liu Chihong. An Expert System for Fault Diagnosis in Internal Combustion Engines Using Wavelet Packet Transform and Neural Network [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3):4278-4286.
- [3] 张军,陆森林,和卫星,等.基于小波包能量法的滚动轴承故障诊断[J].农业机械学报,2007,38(10):178-181.
- [4] 万书亭,吕路勇.基于小波包和细化包络分析的滚动轴承故障诊断方法研究[J].中国工程机械学报,2008,3(6):349-353.
- [5] Nikolaou N G, Antoniadis I A. Rolling Element Bearing Fault Diagnosis Using Wavelet Packets[J]. NDT & E International, 2002, 35(3):197-205.
- [6] 虞和济,韩大庆,李沈,等.设备故障诊断工程[M].北京:冶金工业出版社,2001.
- [7] 杨建国.小波分解及其工程应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [8] 黄中华,尹泽勇,刘少军,等.基于小波包分解的滚动轴承故障诊断[J].湖南科技大学学报,2008,23(2):32-35.
- [9] 陈季云,陈晓平.基于小波分析的滚动轴承故障特征提取[J].微计算机信息,2007,23(1/2):192-194.
- [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,1995.
- [11] 陈果.滚动轴承表面损伤故障智能诊断新方法[J].仪器仪表学报,2009,30(1):44-49.

(编辑 王艳丽)

作者简介:王冬云,女,1980年生。燕山大学机械工程学院博士研究生,秦皇岛职业技术学院讲师。主要研究方向为机械设备故障诊断。发表论文 10 余篇。张文志,男,1942 年生。燕山大学机械工程学院教授、博士研究生导师。