文章编号:1005－0523(2004)05－0120－03

小波分析在滚动轴承故障诊断中的应用

林凤涛,曹冲锋

(华东交通大学 机电工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:主要是针对故障滚动轴承的非平稳振动信号提出了一种应用小波函数的时－频分布分析方法,对故障特征进行提取,并借助 Matlab 语言编程实现对故障滚动轴承信号特征频率的仿真,与理论公式计算结果基本吻合.

关 键 词:滚动轴承;故障诊断;非平稳信号;小波分析;Matlab

中图分类号:TH133.33　　**文献标识码**:B

1 引 言

滚动轴承是机械设备中最常见的部件之一,它的运行状态直接影响整台机器的功能.据钢铁工业统计,在旋转机械中,由于滚动轴承损坏而引起的故障约占 30%[1].因此,对滚动轴承工作状态的监视及其故障诊断技术的研究工作越来越受到人们的重视,成为保障旋转机械良好工作性能的重要保障.时－频分布分析是一个有效的工具,它可以同时表达信号在时域和频域中的能量和密度,因此它能表达常规谱不能表达的时间依赖性,因而时－频分析成为滚动轴承故障诊断的必然发展方向.近年来迅速发展的非平稳信号处理方法,特别是小波理论及其相关技术[2],提供了正交小波变换和多分辨分析方法,对滚动轴承的运动状态进行监测和故障诊断具有十分重要的意义.

滚动轴承在使用过程中常常由于疲劳、磨损、变形过大、腐蚀、断裂、胶合等各种原因造成机器性能异常,以至无法工作,下面我们主要针对轴承故障中最常见的疲劳剥落损伤进行研究.本文将结合机械故障振声诊断演示仪,在进行轴承(内圈,外圈损伤)故障机理分析的基础上,就运行中常发性的故障通过振动信号分析处理提取征兆,总结出征兆与故障原因之间的对应关系,并利用小波分析方法解决故障发生的可能性问题.其中 f_a 为轴转动频率,D 为轴承节径,d 为滚动体直径,α 为接触角,z 为滚动体数.

表 1.1　通过频率计算公式[3]

表面剥落的位置	冲击振动发生的间隔频率
内圈	$f_i=0.5f_a(1+\frac{d}{D}\cos\alpha)z$
外圈	$f_o=0.5f_a(1-\frac{d}{D}\cos\alpha)z$
滚动体	$f_b=0.5f_a(1-\frac{d^2}{D^2}\cos^2\alpha)\frac{D}{d}$
保持架	$f_c=0.5f_a(1-\frac{d}{D}\cos\alpha)$

2 小波变换法及小波函数的选择

所谓小波,就是指具有零均值、在时域和频域内能量局部化的函数,其波形表现为两端衰减为零的小的波形.设基小波函数 $\Psi(t)\in L^2(C)$, $L^2(C)$ 为平方可积的复函数空间,则 $\Psi(t)$必须满足

$$C_\Psi=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|}d\omega<\infty \qquad (1)$$

式中:$\hat{\Psi}(\omega)$为 $\Psi(t)$的傅氏变换.式(1)称为容许条件,该条件蕴含着 $\hat{\Psi}(0)=0$,即函数具有零均

收稿日期:2003－05－27

作者简介:林凤涛(1978－),男,助教,在职研究生,研究方向:状态监测与故障诊断.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

值.基小波经尺度伸缩和时间平移便得到一个子波簇,其形式为

$$\omega_{(a,b)}(t)=\frac{1}{\sqrt{a}}\Psi\left[\frac{t-b}{a}\right] \qquad (2)$$

式中:a 为尺度参数;b 为时间位置参数.a 用来调整子波覆盖的频率范围,b 用来调整子波的时域位置,系数 $1/\sqrt{a}$ 用来实现子波能量的归一化.对一个时变信号 $x(t)$,其连续小波变换定义为

$$\omega_{(a,b)}=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_c \Psi_{(a,b)}x(t)\,dt \qquad (3)$$

式中:$\omega_{(a,b)}(t)$ 为 $\Psi_{a,b^{(t)}}$ 的复共轭;C 为复数域.时间位置参数 b 和尺度参数 a 在取值范围内连续变化.

由小波变换公式(3)可以看到,每个变换系数 W(a,b)是由信号与尺度为 a、时移为 b 的子小波的内积.它衡量着信号与该子波的相似性.$W(a,b)$越大,说明越相似.所以,为了能够有效地揭示出信号的特征成分,需要选择合适的基小波.根据本实验的特点我们采取 Daubechies(dbN)小波系[4],此小波系方便对信号的分解和重构,能提供更有效的分析和综合.分解函数采用多尺度一维小波分解 wavedec,可以用小波或分解滤波器完成对信号的一维多尺度分解.重构函数采用多尺度一维小波重构 waverec,用指定的小波函数或重构滤波器对小波分解结构[C,L]进行多尺度一维小波重构.

利用小波变换对采集到的数据进行编辑和处理需要进入到 zzMATLAB[5]环境下,MATLAB 是运行在 Windows 平台上的一种工具软件包,它面向科学计算,具有强大的矩阵数据计算功能,被广泛应用于许多工程设计领域.它主要采用命令行的操作方式,提供解释性编程语言,用户可以通过简洁的 MATLAB 语言编程非常灵活地实现多种工程计算功能并绘出分解后的时域图和功率谱图.

3　滚动轴承振动信号的实验系统简介及实验对象

本次实验的数据是在实验室里由机械故障振声诊断演示仪产生的振动信号,经过加速度传感器获取振动信号,传感器输出的信号连接到积分电荷放大器进行电荷放大,最后经动态信号进行信号采集.

表 1.2　所选轴承参数

轴承型号	207	304	204	206	102
滚珠个数 z	9	7	8	9	9
滚珠直径 d(mm)	11	8	7.94	9.5	6
内径 D_1(mm)	35	20	20	30	15
外径 D_2(mm)	72	52	47	62	32
内环安装直径 D_3(mm)	42	27	25	35	18
外环安装直径 D_4(mm)	65	46	42	56	29
轴承节径 D(mm)	53.5	36.5	33.9	45.5	23.5

表 1.2 中实验对象的接触角都为 0,该实验是用变频器进行调速,因为变频器显示的是频率,而我们实际要用到的是轴的转速,因此在做实验之前应把变频器的频率与轴的转速对应起来.本次实验均采用连续采集,采集块数为一块,采样频率为 5120Hz,变频器的频率分别为 15Hz,28Hz,40Hz,分别代表低速、中速、高速.

表 1.3　实验工况

变频器频率	正常轴承转速	外圈故障轴承转速	外圈故障轴承转速
15Hz	391r/min	385r/min	430r/min
28Hz	770r/min	770r/min	817r/min
40Hz	1124r/min	1125r/min	1173r/min

1) 低速情况　对于外圈故障特征频率经理论公式计算可得:$fo=\frac{D-d\cos\alpha}{120D}^{*}\ n^{*}\ z=22.94Hz$,很显然,从图 3、4 中无法反映 22.94Hz 的外圈振动响应信号.

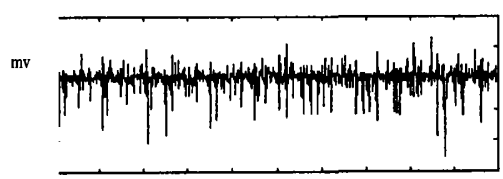

图 3　低速时外圈损伤轴承时域波形

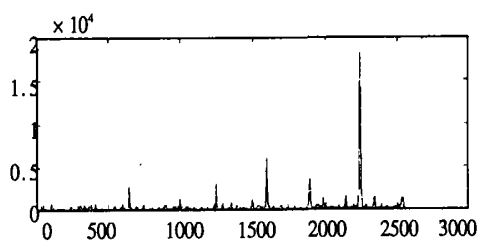

图 4　低速时外圈损伤轴承功率谱图

图 5、6 为使用小波函数的 Matlab 编程生成的第 6 级低频信号的时域和频域图,也就是低速情况下外圈故障特征频率所在频段,从图中的数据显示出了 fo=22.94Hz 的外圈振动频率.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

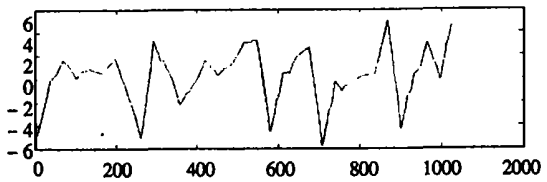

图 5 低速时外圈损伤轴承第 6 级低频信号的时域波形

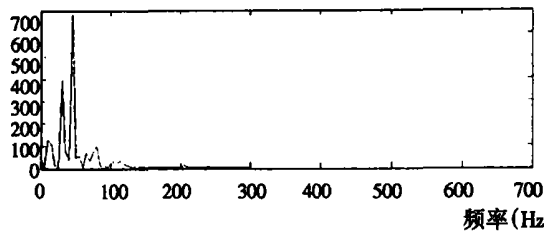

图 6 低速时外圈损伤轴承第 6 级低频信号的功率谱图(单位同上)

2) 高速情况

外圈损伤轴承特征频率 $fo=\frac{D-d\cos\alpha}{120D}n^{*}z=67.03Hz$,同样采用小波函数的 *Matlab* 语言编程生成图形,可知外圈损伤轴承特征频率在 $d5$ 频段,如下所示:

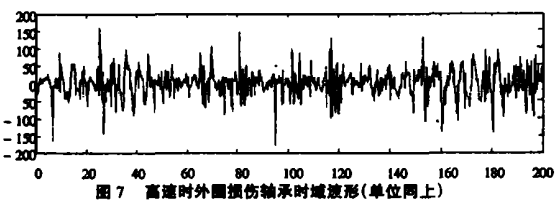

图 7 高速时外圈损伤轴承时域波形(单位同上)

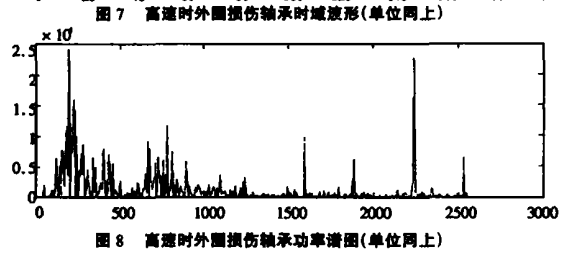

图 8 高速时外圈损伤轴承功率谱图(单位同上)

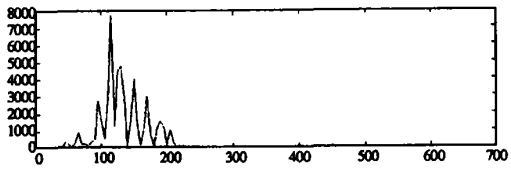

图 9 高速时外圈损伤轴承第 5 级高频信号的功率谱图(单位同上)

从我们用小波函数的 Matlab 语言编写程序仿真的部分结果可以看出轴承振动信号的故障特征频率和计算的故障特征频率基本一致.正常轴承的边频带较为均匀且较窄,且幅值较小;外圈故障轴承边频带不均匀且振幅较大.

4 小 结

滚动轴承出现故障时的振动信号是非平稳信号,且频带较宽,用常规傅立叶分析方法有时很难达到理想效果.本文中应用小波变换的方法,在对滚动轴承故障信号未作任何预处理的况下,对轴承的故障诊断结果是令人满意的,这说明小波分析确实能为滚动轴承的故障诊断提供新的强有力的分析手段.

参考文献:

[1] 郑玉珍.浅谈故障轴承的预防[C].1995 全国设备故障诊断技术学术会议论文集,716.

[2] 林京 .机械动态信号的小波处理技术 [D].西安交通大学 ,1999.

[3] 黄文虎,夏松波,等 设备故障诊断原理[M].技术及应用科学出版社 ,1997.

[4] 胡昌华,张军波,等 基于 MATLAB 的系统分析与设计[M].西安:西安电子科技大学出版社,1999.

[5] 陈亚勇,等,MATLAB 信号处理详解[M].北京:人民邮电出版社,2001.

The Application of Wavelet Analysis to the Rolling Bearing Failure Diagnosis

LIN Feng-tao, CAO Chong-feng

(East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper mainly presents a time-frequency analysis method, applying wavelet function to the unstable signals for the faulty bearing and extracts characteristics of the sigals, and simulates feature frequencies of failure rolling bearing signals using program with MATLAB, which generally accords with the theoretical results.

Key words: failure diagnosis; unstable signal; wavelet analysis; Matlab

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net