

包络-小波分析法用于滚动轴承故障诊断的研究^①

钟 掘 卓志红 扬 平

(中南工业大学机电工程学院, 长沙 410083)

摘 要 根据现有的小波理论和滚动轴承的振动特征, 提出了傅里叶分析与小波分析相结合的包络-小波分析法, 研究了其基本原理和在滚动轴承故障诊断中的实际应用, 并给出了诊断实例。

关键词 小波变换 故障诊断 模式识别

小波分析是近几年迅速发展起来的一种全新的时频局部化分析方法, 被认为是傅立叶分析的重大突破。它的小波函数的形状随尺度的不同而改变, 可同时满足反映高频信号用窄时间窗、低频信号用宽时间窗的要求, 从而在时域和频域内同时具有良好的局部化性质。本文根据现有的小波理论和滚动轴承振动信号的特征, 提出了傅里叶分析与小波分析相结合的包络-小波分析法, 并阐述了其基本原理和在诊断滚动轴承故障时的实际应用。

1 滚动轴承的振动特征

机械设备中由滚动轴承运转造成的振动, 原则上可以分为两类: 其一是与轴承的弹性有关的振动, 它不论轴承正常与否都会发生; 其二是与轴承滚动表面的状况有关的振动, 这是我们分析的对象。影响滚动表面状况的主要因素是轴承元件的损伤(包括外圈、内圈、滚动体和保持架的损伤)。当轴承的滚动体在受损伤的表面上滚动, 产生周期性的冲击力, 将激起轴承系统以某一阶固有频率的响应, 出现冲击频率对固有频率进行脉冲调制的调制信号(如图1所示)。而当轴承出现磨损类故障时,

振动信号的随机性很强, 无明显的周期信号存在, 可通过分析轴承的振动水平或铁谱分析诊断这类故障。

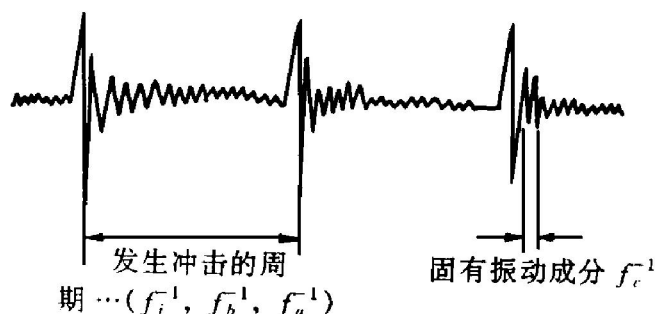


图1 滚动轴承产生的振动冲击信号

2 包络-小波分析法的基本原理

周期性的冲击振动信号是由轴承元件损伤产生的, 其冲击频率由轴承的几何尺寸、轴转速和异常发生的部位等因素决定。通常这种信号频率较低, 且会受到系统自由衰减振荡信号及各种随机干扰信号的幅值调制, 很难直接分析出来。而骑在高频调制波上的较平滑的包络线包含着丰富的故障特征信息, 对包络信号进行小波分析, 可以较有效地诊断出轴承的故障。该方法的原理和基本步骤如下。

① 收稿日期: 1995-09-21; 修回日期: 1995-12-19 钟 掘, 女, 59岁, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士

2.1 提取包络信息

为了增加提取包络信号的精度,应对确定的分析带域进行带通滤波,把不需要的频率成份剔除。带域设置可在对信号作傅里叶变换后进行,在频谱图上取一适当的高频峰作为中心频域,以略大于4倍信号特征频率为带宽。然后对带通信号进行希尔伯特变换或检波-滤波,便可得到包络信号。

2.2 离散小波变换

小波变换是将信号 $f(x)$ 与一个在时域和频域均有良好局部化性质的伸缩小波函数 $\Psi_s(x)$ (s 为尺度) 进行卷积。即:

$$W_s f(x) = f \cdot \Psi_s(x) \quad (1)$$

对于离散信号 $\{Co\}$, 由计算小波变换的 Mallat 算法^[1] 有如下的计算其变换的递推公式:

$$\begin{aligned} C_j &\xrightarrow{* H_j} C_{j+1} \\ &\xrightarrow{* G_j} D_{j+1} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 H_j 和 G_j 分别为伸缩小波函数 $\Psi_2(x)$ 所对应的低通和高通滤波器系数,它们由在小波基底 $\Psi(x)$ 所对应的 H 和 G 的各个系数之间添加 $2^j - 1$ 个零的方法得到。将包络信号代入式(2)可以算出各个尺度上的小波变换 D_j 。

2.3 提取小波变换的模量极大点

对提取的包络信号进行小波变换,此时各个尺度上的变换都与原始数据具有相同的数据量,难以抽取特征值。小波理论表明^[4]: 信号的二进小波变换模量极大点可以用来作为信号的特征描述,而根据这些模量极大点的值,由 Mallat 提出的重构算法^[1],可以恢复原始信号的一个逼近,该逼近与原始信号的误差主要集中在高频部分。对于信号特征为低频的包络信号完全可以由各个尺度上的模量极大点来描述其特征。

模量极大点一般对应着波形上的剧烈变化点,模量极大点的值沿尺度的演变状况反映了该点邻域的变化特点。需要保留的是具有一定的幅值且沿尺度传播的模量极大点,它们对应着轴承的某种故障信号在运转过程中不断重复

出现,没有沿尺度传播的模量极大点和噪声所生的模量极大点显然不与确定的故障对应,需予以剔除。通过检测经小波变换的模量极大点沿尺度的演变规律,可以将噪声所产生的模量极大点与信号产生的模量极大点区分开。如果某模量极大点的幅值沿尺度的减小而显著增加,则可认为是由噪声产生的而予以剔除。为了考察模量极大点沿尺度的传播性,可以用一个简单的方法作初步判断,即:如果某一尺度上的一个模量极大点的位置非常接近下一个尺度的一个模量极大点,并且它们具有相同的符号,那么可以认为该模量极大点传播到了下一个尺度上,否则即为沿尺度不传播的模量极大点。经过筛选所保留下来的各个尺度上的模量极大点就反映了包络信号的主要特征。

2.4 波形模式识别

在提取信号的特征量后,为了识别故障的部位、严重程度等等,还需进行模式识别,即构造一个距离函数,给出两个模式之间的相似性度量。

为了便于识别,需要转换各模量极大点的表达形式,可采用插值法分别将各个尺度上的模量极大点连接成线。然后选用 Euclidean 距离函数,利用文档中建立的已知样板模式,考查全局的(对各尺度)或局部的(对某一尺度)待检模式与样本模式之相似程度来确定待检状态属于何种已知样板模式,从而诊断出故障发生的部位和严重程度。其中已知的样板模式建档十分重要,可根据计算机仿真模拟、理论计算结合现场实例积累给出。

3 诊断实例

对某一齿轮箱的 107 轴承进行振动信号测试,采样频率为 30 000 Hz,并用根据上述原理而开发的软件进行诊断。在应用中,以滚动轴承的正常工况和三种模拟严重故障的典型波形(外圈、内圈和滚动体)建立四类已知的样板模式(分别为 1, 2, 3, 4),另取一组具有相同故障模式但又不同于已知样本模式的测试样本来

计算它们的相似性度量。图 2 为待检模式, 图 3 为待检模式所从属的已知样板模式, 附表为自动诊断输出结果。

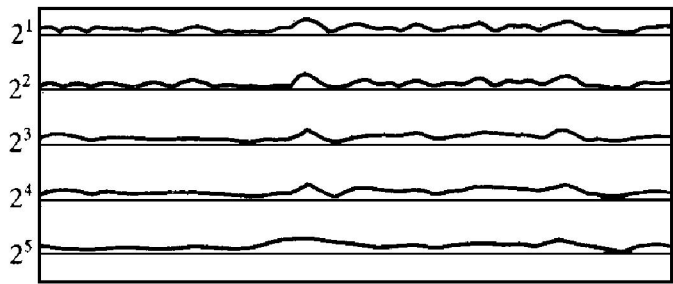


图 2 待检模式

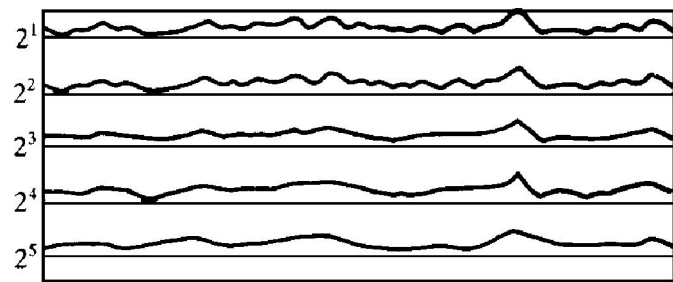


图 3 第 3 类已知样板模式
附表 自动诊断输出结果

该状态样本与各标准样本间的距离为	
1	115 640. 117 178 8
2	64 623. 343 750
3	19 141. 666 016
4	22 399. 978 516
该状态样本属于标准样本 3	

从附表可以看出: 该待检模式与已知样板模式中的第 3 种类型(内圈的失效) 最为相似, 但距离值较大, 可认为该轴承内圈存在轻度故障, 这与采用共振解调分析得出的结果相吻合。

4 结论

初步研究表明, 包络- 小波分析法是一种比较有效的诊断滚动轴承故障的分析方法, 由于进行多尺度分析和提取模量极大点时剔除了其它信号和噪声的干扰, 从而进一步提高了信噪比。可以预料, 随着小波理论的不断发展和日趋完善, 包络- 小波分析法将会得到广泛的应用。

参考文献

1 秦前清等. 实用小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.

2 吴 波等. 华中理工大学学报, 1993, (2): 77- 79.

3 雷继尧等. 轴承故障诊断. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.

4 Mallat S. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38 (2): 618- 643.

STUDY ON ENVELOPE-WAVELET ANALYSIS AND
ITS APPLICATION TO ROLLING BEARING DIAGNOSIS

Zhong Jue, Zhuo Zhihong, Yang Ping
*College of Mechanical and Electrical Engineering,
Central South University of Technology, Changsha 410083*

ABSTRACT According to wavelet theory and the vibration characteristics of rolling bearing, the envelope-wavelet analysis of combining Fourier analysis with wavelet analysis was put forward. Its basic principle and practical application to rolling bearing diagnosis have been studied, and a diagnostic example was given.

Key words wavelet transform fault diagnosis pattern recognition

(编辑 何学锋)