

基于小波分析的故障系统在旋转机械中的应用

王侃伟, 方宗德, 钱学香

WANG Kan-wei, FANG Zong-de, QIAN Xue-xiang

西北工业大学 机电学院, 西安 710072

School of Mechatronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

WANG Kan-wei, FANG Zong-de, QIAN Xue-xiang. Study on application of wavelet transform technique to fault diagnosis of rotary machine. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(8): 207-209.

Abstract: The fault feature extraction based on wavelet transform technique is studied in depth, which is applied to fault diagnosis of rotary machine. A new fault feature extraction method based on singularity detection and the modular maximum using continuous wavelet transform analysis is put forward. Research on combining the resolution method and singularity theory can find that wavelet transform is very propitious to depict the whole and local signal. Utilizing the characteristics of wavelet transform resolving and constructing the signal, the information about frequency band pointedly can be chosen and the noise interference can be reduced. At the same time, the typical characteristics of crack faults can be effectively extracted through frequency spectrum analysis of constructing signals. The results show that it is effective to diagnose the non-steady of rotor by wavelet transform.

Key words: fault diagnosis; wavelet analysis; feature extraction; singularity detection

摘要:就小波分析技术在旋转机械故障诊断应用中的故障特征提取问题进行了深入研究,提出了基于小波奇异性及小波变换模极大值的故障特征提取方法,通过对故障信号与小波变换的多分辨率方法以及奇异性理论相结合进行研究,发现小波分析便于对信号的总体和局部进行刻画;利用小波变换对信号的分解和重构特性,可有针对性地选取有关频带的信息以及降低噪声干扰,通过对重构信号的频谱分析能更有效地提取裂纹故障的典型特征。结果表明,对于旋转机械的非平稳信号来说,利用小波变换方法进行故障诊断是行之有效的。

关键词:故障诊断;小波分析;特征提取;奇异性检测

文章编号:1002-8331(2008)08-0207-03 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP39

1 引言

电控自动变速箱是汽车电子上结构最复杂的核心部件,可以根据发动机的载荷、转速、车速、制动器工作状态及驾驶员所控制的各种参数,经过计算机的计算、判断后自动地改变变速杆的位置,从而实现变速器换挡的最佳控制,即可得到最佳挡位和最佳换挡时间。它的优点是加速性能好、灵敏度高、能准确地反映行驶负荷和道路条件等。传动系统的电子控制装置,能自动适应瞬时工况变化,保持发动机以尽可能低的转速工作。电子气动换挡装置是利用电子装置取代机械换挡杆及其与变速机构间的连接,并通过电磁阀及气动伺服阀汽缸来执行。它不仅明显地简化汽车操纵,而且能实现最佳的行驶动力性和安全性。

目前,绝大多数的汽车自动变速箱都采用了电子控制装置ECU对自动变速箱进行控制,这使得自动变速器更加的复杂,增加了对自动变速器的故障诊断的难度。目前对自动变速箱的电气部分故障诊断主要是采用对自动变速器的故障代码进行分析释义的方法;机械部分的检测还是采用人工的方法来判断,主要依赖检修工人的水平,增加了对自动变速器的故障诊

断的难度,变速箱的机械部分一旦出现故障,会造成及其严重的后果,因此有必要对变速箱的机械部分进行故障检测、故障预报,及早地发现故障,尽快消除故障,本文采用在变速箱加装传感器实现对旋转机械的故障进行检测。

机械故障诊断是通过研究故障与征兆之间的关系来判断设备故障的,旋转机械的故障形式多种多样,故障产生的机理和原因也非常复杂,加上实际因素的复杂性,故障与征兆之间表现出一种非常复杂的关系,即各种故障反映的特征参数并不完全相同,这种关系很难用精确的数学模型来表示,这给现场诊断带来了极大的困难。由于小波算法有着其优于傅立叶变换所不能比拟的优点,可以实现故障与征兆之间复杂的非线性映射关系,因此在机械故障诊断领域显示了很大的潜力。本文提出了基于小波奇异性及小波变换模极大值的故障特征提取方法,通过对故障信号与小波变换的多分辨率方法以及奇异性理论相结合进行研究,发现小波分析便于对信号的总体和局部进行刻画;利用小波变换对信号的分解和重构特性,可有针对性地选取有关频带的信息以及降低噪声干扰,通过对重构信号的频谱分析能更有效地提取裂纹故障的典型特征。结果表明,对

作者简介:王侃伟(1975-),男,博士,讲师,主要研究方向:汽车电子,图像/图形处理;方宗德(1948-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:汽车工程;钱学香,女,主要研究方向:计算数学。

收稿日期:2007-07-04 **修回日期:**2007-10-15

于旋转机械的非平稳信号来说,利用小波变换方法进行故障诊断是行之有效的。

2 小波理论概述

20世纪80年代随着小波分析的出现,人们开始采用小波分析处理振动信号,取得了明显的效果^[1]。小波分析在时域和频域同时具有良好的局部化性质^[2],而且由于对高频成分采用逐步精细的时域或空域取样步长,从而可以聚焦到对象的任意细节,小波函数是一种具有快速衰减性和振动性的容许函数^[3],它通过平移和伸缩形成具有恒定带宽比带通滤波器特性的小波基,小波分析就是利用小波基的恒定带宽比带通滤波器的特性实现低分辨率分析信号的低频成分,用高分辨率分析信号的高频部分的变频率。而且小波变换适当离散化后能够构成标准正交系,在频域中能够实现互不相交的二进频带分割,可提取信号中待定的频率成分^[4]。

采用此方法的基本思想是对测得的振动信号进行小波分解,由分解结果直接提取故障特征进行诊断。但是如果环境噪声过大,效果并不理想。这是因为故障信号几乎在每个频段都被噪声淹没,直接进行小波分析无法提取出故障信息。为了解决这个问题,本文提出了一种基于小波包变换的故障诊断方法,即基于相关小波包奇异性检测的故障诊断法和基于互相关小波包消噪的旋转机械故障诊断法。仿真结果表明,这种方法均极大地增强了旋转机械的故障诊断能力,在强噪声背景下能够有效提取旋转机械的故障频率。

信号的非平稳性和突变性是反映设备状况和故障的重要信息,由于混杂着随机噪声,导致故障特征减弱。基于FFT和时序理论的经典信号处理方法,只能提供信号的整体统计平均结果,无法得出时域和频域中非平稳信号的局部化结果,难以精确地实现这种信噪分离。小波变化的时-频特性可以描述信号的频谱随时间变化的情况或信号在某时刻附近的频率分布,对设备的状态监测及早期故障诊断具有特别重要的意义。主要包括以下几点:

(1)利用观测信号的奇异性进行故障诊断。利用小波变换模极大值可以检出信号奇异点并展示其成分。利用连续小波变换的模极大值的传播特性可以区分噪声和信号边沿,有效地检测出强噪声背景下的信号边沿。对突发性故障有较好的定量诊断效果。

(2)利用观测信号频率结构的变化进行故障诊断。振动系统的故障通常会导致系统观测信号的频率结构发生变化,如能够采用一定的措施消除系统状态变化之外的因素对观测信号的影响,则利用离散小波变换分析观测信号的频率结构随时间的变化情况,就可以提取故障特征频率,检测系统的故障。

(3)故障信号的消噪。小波变换可以作为一种信号预处理方法用于故障特征信号的提取和信号去噪。适当地选取小波尺度,在这些尺度的小波基上对信号进行重构,去掉高频、工频噪声频率段内的小波尺度,只保留系统运行信息和故障特征信息,实现故障信号的消噪。

3 小波包特征提取

设小波函数 $\psi(t)$ 及其 Fourier 变换 $\Psi(\omega)$ 都满足窗口函数

的要求,它们的中心和窗宽分别记为 $E(\psi)$ 、 $\Delta(\psi)$ 与 $E(\Psi)$ 、 $\Delta(\Psi)$,对于任意的参数 (a,b) ,连续小波:

$$\psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

及其 Fourier 变换:

$$\Psi_{(a,b)}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) e^{-i\omega t} dt = \frac{a}{\sqrt{|a|}} e^{-i\omega b} \Psi(a\omega) \quad (2)$$

它们的中心和窗半径分别为:

$$\begin{cases} E(\psi(a,b)) = b + aE(\psi) \\ \Delta(\psi(a,b)) = |a|\Delta(\psi) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} E(\Psi(a,b)) = \frac{E(\Psi)}{a} \\ \Delta(\Psi(a,b)) = \frac{\Delta(\Psi)}{|a|} \end{cases} \quad (4)$$

信号中的奇异点及不规则的突变部分经常携带比较重要的信息,它是信号的重要特征之一。在故障诊断中,故障通常表现为输出信号发生突变,因此对突变信号的检测有着非常重要的意义,小波变换具有时域局部化的性质,利用小波变换来分析信号的奇异性即奇异度的大小是非常有效的。利用小波变换模的局部极大值和信号奇异点之间的关系,同样可以对信号的局部奇异性进行分析,并且具有较小的运算量,在数学上采用 Lipschitz 指数来刻画信号的奇异性。

若信号 $f(t)$ 在 t_0 附近满足: $|f(t_0+h-p_n(t_0-h))| \leq A|h|^n, n \leq \alpha < n+1$,则称 $f(t)$ 为在 t_0 处的 Lipschitz α 指数。Lipschitz 指数是刻画信号函数局部特征的一种度量,它表征了信号在该点的奇异性大小,Lipschitz 指数越大,该点的光滑程度越高,Lipschitz 指数越小,该点的奇异性越大。

设实函数 $\theta(t)$,满足 $\int_{-\infty}^{\infty} \theta(t) dt = 1$ 且 $\theta(t) = O\left(\frac{1}{1+x^2}\right)$,称之为光滑函数。选择小波函数为光滑函数的一阶导数,即 $\psi(t) = \frac{d\theta}{dt}$,这时小波变化:

$$W_f(s,t) = f(t) * \psi_s(t) = f(t) * \left(s \frac{d\theta}{dt}\right)_{t=s} = \frac{d}{dt} [f(t) * \theta_s(t)] \quad (5)$$

其中 $\theta'_s = \left(\frac{1}{s}\right)\theta\left(\frac{t}{s}\right)$ 。

小波变换能够通过多尺度分析提取信号的奇异点,基本原理是当信号在奇异点附近的 Lipschitz 指数 $\alpha > 0$ 时,其小波变换的模极大值随尺度的增大而增大;当 $\alpha < 0$ 时,则随尺度的增大而减小。噪声对应的 Lipschitz 指数远小于 0,而信号边缘对应的 Lipschitz 指数大于或者等于 0,因此,利用小波变换可以区分噪声和信号边沿。信号突变点在小波变换域常对应于小波变换系数模的极大点或过零点,并且信号奇异性的大小同小波变换系数的极值随尺度的变换规律相对应。

在尺度 s_0 下,若 $\frac{\partial W_f(s_0,t)}{\partial t}$ 在 $t=t_0$ 上有一过零点,称点 (s_0,t_0) 是局部极值点;若对属于 t_0 的某一邻域内的任意点 t ,有 $|W_f(s_0,t)| \leq |W_f(s_0,t_0)|$,称 (s_0,t_0) 为小波变换的模极大值点;尺度空间 (s,t) 中所有极大值点的连线称为模极大值线,如果小波变换在精细的尺度变换上没有模极大值,则该信号在该任何

领域中无奇异性。在尺度 2^j 下,若 $\frac{d}{dx} W_{2^j} f(x)$ 在 x_0 有一过零点,称 x_0 点是小波变换的局部极值点。若在 x_0 的某一领域 $\delta x_0'$ 内,对一切 $x \in \delta x_0'$,存在:

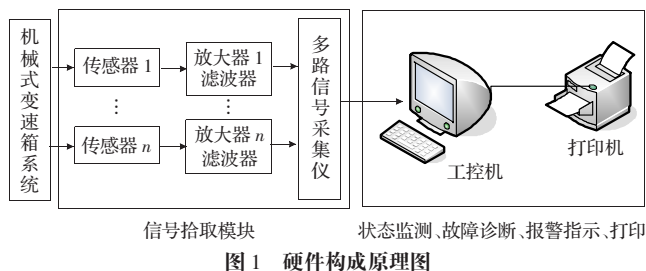
$$|W_{2^j} f(x)| \leq |W_{2^j} f(x_0)| \quad (6)$$

称 x_0 点是在尺度 α 下小波变换的模极大值点。

如果信号 $f(t)$ 在时间 t_0 点出现异常,那么在各个尺度上 t_0 点附近的 $|W_{2^j} f(x)|$ 都会产生一个局部极大值点,且随着尺度的减小,这些模的局部极大值点收敛于 t_0 点,因此,利用小波变换模极大值点检测出信号 $f(t)$ 的所有突变点,并且可以根据小波变换模与尺度的关系求出 Lipschitz 指数 α ,就是求出该点奇异性的大小。小波变换的模极大值都是出现在信号有突变的地方,并且突变点处的高频成分较多,所以函数的奇异点可以从小波变换的高频部分的模的极大值检测出来。

4 实验结果与讨论

机械设备故障特征的提取,应由硬件设备和软件分析共同完成,故障诊断系统硬件的配置包括4个部分:(1)传感器、放大器;(2)数据采集仪;(3)工业PC计算机;(4)电源、电缆。硬件系统构成原理图如图1。

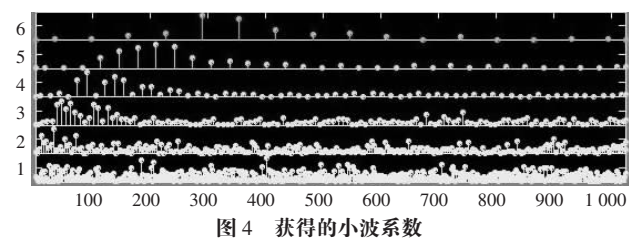
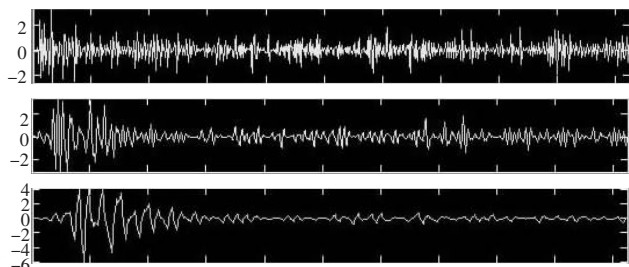
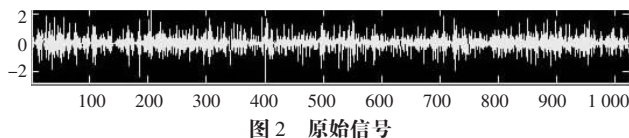


传感器的配置应重点放在齿轮减速机上。由于齿轮减速机是由齿轮、传动轴和轴承等传动部件及箱体、箱盖等支撑部件组成,传动部件在发生故障时,故障振动频率可以覆盖几 Hz 到几 KHz 的范围。因此,齿轮减速机的振动信号不能采用位移和速度传感器来拾取。通常加速度传感器一般采用电荷输出型的压电加速度计,和电荷放大器配合使用,输出电压信号至 A/D 采集仪。

在对发电机轴承、牵引电机轴承和轴箱轴承信号进行采集的时候,考虑转轴故障振动频率,设转子每分钟转速为 n ,则转轴转动频率为: $f_n = \frac{n}{60}$ Hz, 当转轴和电机主轴连接不对中时,振动频率为 $2f_n$; 当转轴有质量偏心,或者当转轴上出现裂纹时,振动频率为 $f_n, 2f_n, 3f_n$ 。

图2为原始振动信号,故障频率为220 Hz。从图中可以看出,故障信号已经被噪声完全淹没。图3为对信号进行小波包分解所得系数的频谱,可以看到频谱图存在着220 Hz的故障频率及其高次谐波。在已知故障频率的情况下,可以采用基

于小波奇异性及小波变换模极大值方法对故障进行诊断,并计算小波包系数进行变换处理,从图4中可以看到,频谱图存在着故障频率及其高次谐波。



5 结论

本文介绍了一种基于小波分析的机械式变速箱的故障诊断系统,诊断方法采用基于小波奇异性及小波变换模极大值的故障特征提取方法。通过对故障信号进行多尺度分解,在分析各小波系数时,发现故障信号的能量在各个不同的尺度层上,同时信号所带的有用信息主要集中在这些对应的小波系数上,根据小波变换的系数模值和信号突变的关系,检测出系统故障的突变信号,利用小波变换模极大值的特性对故障信息进行分析,从而可以有效地去除噪声,并准确地检查出故障的典型特征。结果表明,小波变换在对旋转机械的故障信号的多分辨率分析、突变点检测以及信号特征的提取上,有非常好的使用效果。

参考文献:

- [1] 毛彬,周国荣,蒋复岱.基于小波变换的轧辊磨床振动信号分析研究[J].噪声与振动控制,2006(8):49-52.
- [2] 李邦清,刘辉,刘峰,等.一种基于小波变换的故障诊断改进算法[J].中国惯性技术学报,2007(1):1-4.
- [3] 王步宇.结构损伤的小波形神经网络检测[J].工业控制计算机,2006(12):46-48.
- [4] 孟彦杰,丁锐.一种新型双正交小波滤波器的设计[J].微机计算机信息,2007(4):12-14.