

小波分析在故障诊断中的应用 Application of Wavelet Analysis in the Fault Diagnosis

梁 青
Liang Qing

(广西工业建筑设计研究院 南宁 530031)
(Guangxi Industrial Architecture Design Institute, Nanning, 530031)

摘要 简述小波分析的数学原理和小波分析在故障诊断中的应用机理,并以钻井泥浆泵为例,分析了小波分析在故障诊断中的应用。结果表明,用小波降噪的方法先对泵阀信号进行处理后再进行特征提取和故障诊断变得容易;用小波进行泵阀信号的消噪可很好地保存瞬态冲击信号中的尖峰和突变部分。

关键词 故障诊断 小波分析 傅里叶变换

中图分类号 O174.41; TB112 **A**

Abstract The mathematical principle of wavelets analysis is introduced. The slurry pumping is used to explain the application of wavelets in the fault diagnosis. The valve signals are recorded from the slurry pump, and treated by the wavelets before they are used in the fault diagnosis. The characteristics of sharp and jumping in the transient impact signals are more visible after the valve signals are treated by wavelets. It is suggested that the pick-up of characteristics and fault diagnosis could be easily conducted in the pretreatment of the valve signals with wavelets.

Key words fault diagnosis, wavelet analysis, Fourier transform

小波是目前许多学科和工程技术中的一个非常广泛的话题。可以说传统上使用傅里叶分析的地方,现在都可以用小波分析取代。在信号处理方面,傅里叶分析的一个不足之处在于它不能作局部分析,小波分析正好弥补了这一缺陷。小波分析从有限个具有正则性,局部性与振动性的小波函数出发,通过平移与展缩,为 L^2 空间提供了一类新的正交基——小波正交基。这类正交基,使得函数的分析在时域和频域两方面同时局部化,又使得调和分析中的Calderon-Zygmund算子^[1]在此基上的矩阵几乎对角化,因而构成了绝大多数常用的Banach空间的无条件基,为各类空间的分析提供了更有力的工具。

由于小波分析的优越性使得小波分析的应用范围包括数学领域本身的许多学科、信号分析、信号处理、图像处理、量子力学、量子场论、电子对抗、计算机识别、地震勘探数据处理、边缘检测、音乐与语言人工合成、音乐、雷达、CT成像、彩色复印、流体湍流、天体识别、机器视觉、分形、数字电视以及机械故障诊断与监控等许多科技领域。前人已在小波分

析的应用方面取得了可喜的成绩,目前,国内一些大学将小波分析作为一个研究热点。下面以小波分析在故障诊断中的应用加以说明。

1 小波分析的数学原理

小波分析的基本思想是用一族函数去表示或逼近一信号或函数^[2],这一族函数称为小波函数系,它是通过一基本小波函数的不同尺度的平移和伸缩构成的。小波函数系表示的特点是它的时宽带宽乘积很小,且在时间和频率轴上都很集中。小波具有良好的局域性和非正则过零特性,因此它可用于突变信号和奇异信号与图像的检测^[3~6]。

小波变换是一线性运算,它把一信号分解成不同尺度的分量;小波是一函数 $\Psi(t)$,且 $\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0$,进一步对函数 $f(t) \in L^2(R)$,且小波变换可表示为 $W_f(a,b) = f\Psi_{a,b}$,它可以看作是求函数 $f(t)$ 在的各种尺度平移信号上的投影,即求 $f(t)$ 与 $\Psi_{a,b}(t)$ 的相关性。Morlet和Grossmann已经证明^[7]:这一小波变换满足能量守恒方程。

2 小波分析在故障诊断中的应用机理

利用小波变换的多分辨率性质,基于信号和随机噪声在小波变换域中不同的模极大值系数特征,不但能提取信号和噪声在多尺度分辨空间中的波形特征,而且根据表征该特征的小波系数模极大值传播特性的不同,来实现对信号波形的有效检测。这样,既避免了矩阵运算,降低了运算量,又能在获得一定改善信噪比增益的同时,保持对信号波形细节有较好分辨率,并且对待检测信号形式不敏感。

目前的故障诊断技术大都基于傅里叶变换,因而必然面临傅里叶分析的一对基本矛盾:时域和频域局部化的矛盾,并且傅里叶分析是以信号平稳性假设为前提的,而绝大多数的控制系统的故障信号往往包含在瞬态信号及时变信号中。小波的时频分析方法不仅能够提供信号的全部信息,而且又能提供在任一局部时间内信号变化激烈程度的信息,即可提供时频同时局部化的信息。

小波分析是一种全新的信号的时间——尺度分析方法,它继承了傅里叶分析用简谐函数作为基函数来逼近任意信号思想,只不过小波分析的基函数是一系列尺度可变函数。这使得小波分析具有良好的时-频定位特性以及对信号的自适应能力,故而能够对各种时变信号进行有效的分解,为控制系统故障诊断提供了新的、强有力的分析手段。小波变换属线性变换,无干扰项,它具有多分辨率分析的特点,即时频分辨率可变,具有“变焦”特性,因此具有对非平稳信号局部化分析的突出优点,有良好的时-频定位功能,很适合探测正常信号中夹带的瞬态反常现象并展示其成分,因此,在机械设备及系统中,利用小波变换进行动态系统故障检测与诊断具有良好的效果。

在实际机械设备故障诊断系统中,尤其是冲击信号比较丰富的场合,比如,往复机械,磨合期的轴承等。信号在任意时刻附近的频率特征都很重要。对这类信号的处理,仅从频域和时域上来分析是不够的。必须要有一种新的方法能够将时域和频域结合起来描述观察信号的时频特征,而小波分析的优点使得小波分析能够很好地解决这类问题。

3 实例

以钻井往复泵为例,针对钻井往复泵工作的特点,通过对泵阀声信号采样数据进行小波

降噪处理,突出了泵阀的故障特征,对降噪后的时域信号进行功率谱分析,在时域和频域均能看出正常与故障信号的明显不同。

钻井泥浆泵工作环境和条件非常恶劣,受环境所限使用振动传感器测试信号较困难,所以是利用声信号检测故障(华东石油学院等编.石油矿场往复泵.兰州:兰州石油机械研究所,1975)。

3.1 分析方法

泵阀正常工作时所产生的声信号由周期性的冲击信号组成,冲击信号来自阀盘与阀座之间的冲击。当泵阀发生泄露故障时,在2个正常冲击信号之间会产生一附加的冲击信号,该信号是由导向杆撞击泵头和泥浆刺蚀泵头内腔产生的。由于在冲击信号间隔内含有较强的背景噪声,真实信号被噪声淹没,信噪比小。从时域波形中几乎看不出真实信号的特征。

对于一个含噪声的一维信号的模型可以表示成如下形式:

$$S(i) = f(i) + \sigma_e(i), i = 0, \dots, n-1,$$

式中, $f(i)$ 为真实信号; $\sigma_e(i)$ 为噪声; $S(i)$ 为含噪声的信号。

泵阀信号中含有脉冲和突变部分,对这种信号进行分析,首先需要对信号作预处理,将信号的噪声部分去除,提取有用信号。

由于小波分析能同时在时频域中对信号进行分析,所以它能有效地区分信号中的突变部分和噪声,因而非常适合对这种脉冲型的非平稳信号的消噪处理。

本实验采集数据来自某油田钻井现场,泵阀正常工作时,时域信号含有阀盘与阀座的冲击成分,泵阀失效时,时域信号除含有阀盘与阀座的冲击成分和较强的背景噪声外,还含有阀泄露,泥浆液冲刷阀面和冲击阀腔的背景噪声,以及导向杆和阀盘不对中碰撞阀座的噪声。

分别对正常、故障2种时域波形进行功率谱分析,从功率谱图中很难找出两者之间的差别,钻井泵工作转速为110 r/min左右,泵阀冲击频率为1.83 Hz。现采用如下方法对泵阀声信号降噪。

1) 分别对正常和故障信号进行小波分解,选用Daubechies3小波,分解层数5层;

2) 用阈值对小波系数进行量化处理,如何进行阈值的量化是至关重要的,从某种程度上说,它直接关系到信号的消噪质量,针对上述问题这里采用了软阈值消噪处理,在每个分解层上阈值尺度改变的比例采用非白噪声的基本模式,即在每个不同的小波分解层次上估计噪声的层次,即根据小波分解层次估计噪声的方差,并以此变换阈值尺度^[6];

3) 重构信号。根据小波分解的第 N 层的低频系数和经过量化处理后的第1层到第 N 层的高频系数对信号进行重构。

3.2 分析及讨论

通过对比2种降噪后的重构信号就可以很清楚地反映出2种信号的差别。经采用上述方法降噪后可得到重构信号,比较去噪前后的结果可以看出,降噪后正常声信号主要由阀盘与阀座的冲击脉冲信号构成,在2次冲击之间噪声基本被滤除干净,2个脉冲之间为0.55s左右的时间间隔,与往复泵110 r/min转速吻合。故障信号中在2次冲击之间,有一系列峰值很大的噪声信号,这些噪声信号即反映了泵阀的泄露故障。将重构信号再进行功率谱分析,可发现2个功率谱图已存在明显差别,用小波降噪的方法先对泵阀信号进行预处理后再进行特征提取和故障诊断已变得较容易。

可见用小波进行泵阀声信号的消噪可以很好地保存瞬态冲击信号中的尖峰和突变部分。

而用傅里叶分析进行滤波时,它不能将有用信号的高频部分和由噪声引起的高频干扰加以有效地区分,因此小波分析对非平稳信号的消噪有着傅里叶分析不可比拟的优点。

对信噪比小的机械声信号(或振动信号),若能选取合适的阈值,可以很好地将有用信号突出出来,而其中的故障信号仍能保留其中,该方法对于在线监测往复机器泵阀故障是非常有效的。

4 结语

根据小波分析的优点,应用小波分析技术能帮助我们解决在故障诊断中遇到的实际困难,有效地提取故障特征,及时发现故障及其产生的机理,使设备管理人员及时采取维修对策,确保设备的安全高效运行。在此基础上还可通过对重构信号的频谱分析或其它分析方法进行特征提取,为计算机自动识别或专家系统的建立奠定基础。

参考文献

- 1 Meyer Y. Wavelets and applications. Proceedings of the International Conference, France, Marseile, 1989.
- 2 Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets; variations on a theme. SIAM J MATH ANAL. 1993, 24 (2): 499~519.
- 3 李建平,唐远炎.小波分析方法的应用.重庆:重庆大学出版社,1999,10.
- 4 崔锦泰著.小波分析导论.程正兴译.白居宪审校.西安:西安交通大学出版社,1995,1.
- 5 秦前清,杨宗凯.实用小波分析.西安:西安电子科技大学出版社,1994,1.
- 6 胡昌华,张军波,夏军等.基于MATLAB的系统分析与设计—小波分析.西安:西安电子科技大学出版社,1999,12.
- 7 Grossmann A, Morlet J. Decomposition of hardy functions into square in tegrable wavelets of constant shape. SIAM J MATH. ANAL, 1984, 15 (4): 723~736.

(责任编辑:黎贞崇)

《广西科学院学报》2002年征订启事

《广西科学院学报》是广西科学院主办的自然科学综合性期刊,国内外公开发行,季刊。主要刊登广西科学院属各研究单位的科研成果报告、学术论文和科研工作动态,同时也刊载广西区内外自然科学的研究成果,选登一些新技术和新动向的报道、专项领域的综述、重要著作的评论、自然科学和社会科学交叉的软科学研究成果。读者对象是从事自然科学研究、开发的科技工作者,大专院校师生,教科文卫管理人员以及相关专业的技术干部和管理干部。

《广西科学院学报》1982年创刊,现已发行了52期;曾被评为广西第一、第二、第三届优秀期刊二、二、三等奖;中国学术期刊(光盘版)、中国学术期刊综合评价数据库收录期刊;已进入中国期刊网和万方数据库。

《广西科学院学报》为季刊,16开本,48页,国内定价(含邮费):每期2.5元,全年10元;国外定价:每期2.5美元,全年10美元。《广西科学院学报》1982年创刊,欢迎广大读者订阅。(《广西科学院学报》尚有部分过刊,每册工本费及邮费2元)。订阅《广西科学院学报》请将书款汇到:广西南宁市星湖路32号,广西科学院学报编辑部;收款人:邓大玉;邮编:530022;电话:(0771)5311061(转帐 开户名:广西科学编辑部;开户行:工行南宁市星湖路分理处;帐号:2102103109249070269)。

广西科学院学报编辑部

2002年2月6日

(如需交换赠阅,请来函说明。)