水泵微弱故障信号的检测

胡赤兵，张 玲，汪小云
（兰州理工大学 机电工程学院，甘肃 兰州 730050）

摘要：噪声是影响水泵早期故障诊断正确性的主要因素. 利用小波变换对水泵的噪声信号进行多层次分解，并根据相邻层小波系数相关性进行滤波，该法可以对信号进行良好的降噪，同时也不会弱化信号中的弱故障信号. 通过对水泵早期故障信号分析，结果表明，小波域相关滤波法对水泵早期故障诊断是有效的.

关键词：水泵；故障诊断；小波变换；相关滤波
中图分类号：TB53 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-6254(2006)03-0024-03

Measurement of faint vibration signal in water pump

HU Chi-bing, ZAHNG Ling, WANG Xiao-yun
(College of Mechano-Electronic Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Noise is the biggest obstacle that makes the incipient fault diagnosis results uncorrected. Using the wavelet transform, the noise of water pump is decomposed in many scales. And then be fileted according to the correlations of wavelet coefficients in close layer. By selecting the process parameters adaptively, WTDCF can de-noise signal efficiently. More important, the faint component in the signal will become stronger compared with the noise component. According to the analysis of the fault signal in water pump, results show that WTDCF method is effective for water pump incipient fault diagnosis.

Key words: water pump; fault diagnosis; wavelet transformation; correlation filtering

0 引 言

水泵作为排灌系统的主要设备在工业、农业、医疗卫生行业以及服务行业得到广泛的应用，甚至与人们的日常生活息息相关，因此对水泵运行状况进行动态监测和故障诊断，并尽可能早地把隐患予以排除显得尤为重要. 国内外研究资料[1]均表明水泵的振动信号能反映出水泵的运行状态，通过对水泵振动信号的分析能诊断出水泵的故障. 目前水泵振动信号的分析方法多采用傅立叶分析，然而傅立叶分析有其自身的缺点：①傅立叶分析的对象是平稳的周期性信号. 对频率分量随时间变化的非平稳信号则表现得不够理想，而实际生产中运行的水泵其振动信号又大多为非平稳成分；②傅立叶分析的对象其信噪比要求高. 实际生产中当水泵的某一部件发生早期故障时，缺陷动态信号极其微弱往往被其他零部件的运行振动信号和随机噪声所淹没. 正是由于傅立叶分析拥有这些缺点限制了其在信号分析中的应用特别是非平稳信号分析中的应用. 因此，寻求一种新的既能把故障信号同背景噪声进行分离，又能提高故障信号的信噪比的方法成为水泵故障诊断中的重要任务之一.

小波分析由于具有时频域局部化特性，能将信号分解成交织在一起的多种尺度成分，并对大小不同的尺度成分采用相应粗细的时域或空域采样步长，从而能不断地聚焦到被测对象的任意微小调节，故被称之为“数学显微镜”. 正是因为小波变换能不

收稿日期：2006-04-21
作者简介：胡赤兵（1952-），男，浙江东阳人，教授，主要从事数控加工与故障诊断的研究.

断地对被测信号进行聚焦,从而能从含有强噪声的振动信号中有效地识别出突变信号,故在设备的故障检测中获得了广泛的应用.

1　振动信号的采集

测试方案如图 1 所示.由磁电式速度传感器、信号采集器、微型计算机、测试分析软件构成水泵的微弱信号诊断系统[2].测试时,磁电式速度传感器作在线测试,将水泵的各振动信号采集并转换为数字信号,再输入计算机用信号分析软件作离线处理.这种“先在线测试,后离线处理”的测试方案,可以在水泵处于运行状况下无需拆卸机器就能对其故障进行早期诊断,还可大大减少现场检测设备,简化安装,灵活方便地改变各测试点,提高测量精度.

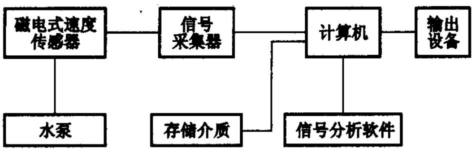


图 1　测试方案

因为实际运行中磁电式传感器会受到电磁辐射等的干扰,为减少或消除这些干扰,信号采集器在进行 A/D 转换前须经过预处理,信号分析时再进行滤波处理.

2　小波变换[3]

设 $\Psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 满足可容性条件

$$C_\Psi = \int_R |\Psi(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < +\infty \qquad (1)$$

则称 $\Psi(t)$ 为基本小波,式中 $\Psi(\omega)$ 为 $\Psi(t)$ 的傅立叶变换.将 $\Psi(t)$ 进行平移、伸缩后得到:

$$\Psi_{a,b}(t) = a^{-1/2}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \qquad (a > 0, b \in \mathbf{R}) \qquad (2)$$

式中:$\Psi_{a,b}(t)$ 为连续小波,其中 a 为尺度因子;b 为平移因子.

对于任意信号 $x(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 的连续小波变换定义为:

$$WT_x(a,b) = \langle x(t), \Psi_{a,b}(t)]\rangle = a^{-1/2}\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\,\overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}\,dt \qquad (3)$$

信号 $x(t)$ 由 $WT_x(a,b)$ 按其逆变换进行信号重构:

$$x(t) = \frac{1}{C_\Psi}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} WT_x(a,b)\Psi_{a,b}(t)\frac{da\,db}{a^2} \qquad (4)$$

在工程实际应用中,连续小波中的参数 a,b 必须进行离散化.目前使用最广泛的是二进离散小波 $\Psi_{j,k}(t)$,即

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\Psi(2^{-j}t - k) \qquad (j,k \in \mathbf{Z}) \qquad (5)$$

对于信号 $x(t) \in L^2(\mathbf{R})$,其二进离散小波变换为

$$WT_x(j,k) = \langle x(t), \Psi_{j,k}(t)\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\,\overline{\Psi_{j,k}(t)}\,dt \qquad (6)$$

相应的对 $x(t)$ 进行重构公式为

$$x(t) = \sum_{j\in \mathbf{Z}}\int_{-\infty}^{+\infty} WT_x(j,k)\Psi(t-\tau)\,dt \qquad (7)$$

3　小波域相关滤波法降噪[4]

小波域滤波是根据信号和噪声在不同尺度上小波变换的不同形态表现,构造出相应的规则,对信号和噪声的小波变换系数进行处理,处理的实质在于减小以至完全剔除由噪声产生的系数,同时最大限度地保留有效信号对应的小波系数.信号经小波变换之后,其小波系数在各尺度上有较强的相关性,尤其是在信号的边缘附近,其相关性更加明显,而噪声对应的小波系数在尺度间却没有这种明显的相关性.因此,可以考虑利用小波系数在水泵信号不同尺度上对应点处的相关性来区分系数的类别,从而进行取舍,通过这样滤波之后的小波系数基本上对应着奇异信号的边缘,达到水泵故障诊断的目的.

定义 1　在区域$[k-m, k+m]$上小波系数的和

$$N_{j,k} = \sum_{l=k-m}^{k+m} w_{j,l} \qquad (8)$$

称为局部区域和系数.

定义 2　设 $CN_{j,k} = N_{j,k}N_{j+1,k}$　(9)

则称由式(9)定义的 $CN_{j,k}$ 为尺度 j 上的区域相关系数.

区域相关系数用到了 k 点以及附近的一些信息,它对小波系数的偏移不敏感,可以真实地刻划出该点处的相关性.

定义 3　$\overline{N_{j,k}} = CN_{j,k}\sqrt{PN_j/PCN_j}$　(10)

则称由式(10)定义的 $\overline{N}_{j,k}$ 为归一化区域相关系数,其中

$$PN_j = \sum_k N_{j,k}^2, \quad CPN_j = \sum_k CN_{j,k}^2 \qquad (11)$$

定理1 归一化区域相关系数 $\overline{N}_{j,k}$ 与区域和系数 $N_{j,k}$ 具有相同的能量.

定理1保证了归一化区域相关系数 $\overline{N}_{j,k}$ 与区域和系数 $N_{j,k}$ 具有可比性. 在得到基于区域的以上概念之后,给出以下基于区域的小波域相关滤波算法.

(1) 令 $\tilde{w}_{j,k}$ 全为0,求观测数据序列的小波变换 $w_{j,k}$ 以及局部区域和 $N_{j,k}$;

(2) 由式(9) 计算相邻尺度间的区域相关系数 $CN_{j,k}$,得到增强的信号和变弱的噪声;

(3) 对 $CN_{j,k}$ 进行归一化处理,由式(10) 得到 $\overline{N}_{j,k}$;

(4) 若 $|\overline{N}_{j,k}| \geq |N_{j,k}|$,则将 $w_{j,k}$ 在 k 点的值赋给 $\tilde{w}_{j,k}$ 的相应位置,并将该点处的 $w_{j,k}$ 与 $N_{j,k}$ 置0,否则,认为点 k 处的小波变换由噪声控制,于是 $w_{j,k}$ 保留,$\tilde{w}_{j,k}$ 相应位置置0;

(5) 重复步骤(2) ~ (4),直到 $w_{j,k}$ 的方差小于阀值 TH_j 为止,其中

$$TH_j = E(v_{j,k}^2) = \|\Psi\|^2\sigma^2/j$$

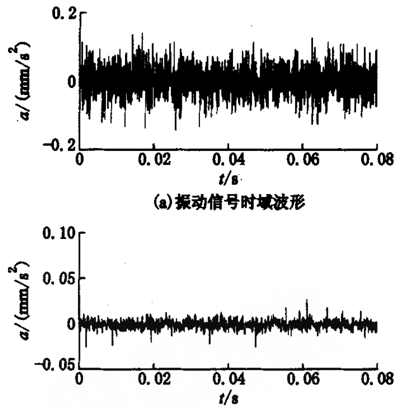
式中 $\|\Psi\|$ 为基本小波的范数. 此时,$\tilde{w}_{j,k}$ 中的点为有效信号对应的小波系数,$w_{j,k}$ 为完全由噪声控制的点.

4 水泵故障的小波检测

在现场测试时,选择了7个测试点,分别为水泵侧电机轴端、近电机侧水泵轴端、远电机侧水泵轴端、水泵中间、水泵进水口、水泵出水口. 当水泵存在早期故障时,水泵各测点提取的故障信号几乎被噪声淹没. 在应用小波域相关滤波法对近电机侧水泵轴端具有早期故障时的信号进行处理的过程中,当不平衡质量比较小的时候,振动的峰峰值增大量极为微弱.

图2为正常情况下振动信号分析结果,图3为当近电机侧水泵轴端存在微弱故障时用小波域相关滤波处理得到的结果. 仅仅从振动信号的时域波形无法看出它与水泵正常情况图2a波形的区别,而且振动的峰峰值也没有明显的增加.

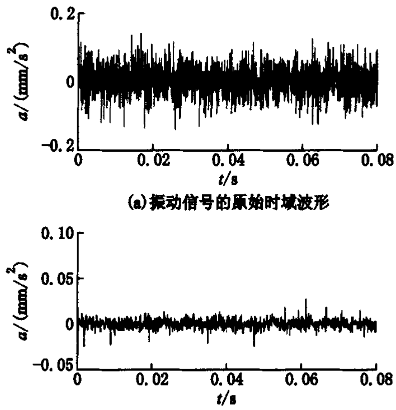
运用小波域相关滤波法降噪,可以很明显地发现水泵存在微弱不平衡故障时振动信号的差异:当水泵运行正常时,用小波域相关滤波法降噪结果是一条相对比较平坦的振动波形,不存在很明显的脉冲信号;当水泵存在微弱故障时,可以看到不等间隔的振动脉冲存在.



(a) 振动信号时域波形

(b) 小波域相关滤波法的振动信号分析结果

图2 正常情况下振动信号分析结果



(a) 振动信号的原始时域波形

(b) 用小波域相关滤波法降噪结果

图3 故障状态下振动信号分析结果

5 结 论

应用小波变换域相关滤波法解决了传统降噪方法对弱特征信号保留能力不足的缺陷. 通过对振动信号分析,表明这种方法不仅具有很强的噪声抑止能力,同时能保留原始信号中的弱特征信息.

参考文献(References)

[1] 郑颖玲. 排水泵站设备振动测试及分析[J]. 给水排水,2003,11(5):78-79.

[2] 廖 霞,陈 平,张国珍,等. 小波变换在水泵故障诊断中的应用[J]. 西南农业大学学报,2001,23(5):478-480.

[3] 徐 晨,等. 小波分析·应用算法[M]. 北京:科学出版社,2004:101-103.

[4] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005:157-159.

(责任编辑 侯素娟)