

文章编号: 1005-0523(2005)02-0161-04

小波降噪影响因素的研究

邓懿波, 谭志洪, 黄媛

(南昌大学 环化学院过控专业, 江西 南昌 330029)

摘要: 信号降噪是回转机械故障诊断和信号处理中的重要课题, 其实现方法也多种多样, 小波降噪是近来才兴起的一种非常有潜力的降噪方法, 本文介绍了小波分析的基本理论和小波降噪机理及其主要步骤, 通过对回转机械典型故障信号的仿真分析, 讨论了小波降噪过程中的主要影响因素, 如母小波类型、阈值选取策略、分解层数等, 得出了一些有价值的规律和原则。

关键词: 信号降噪; 回转机械; 小波; 故障诊断

中图分类号: O157.5

文献标识码: A

1 引言

1) 在大型石化、化工、电力、冶金等行业, 回转类机械作为机械设备中的重要组成部分被广泛使用, 如透平机、鼓风机、压缩机和泵等都是典型的回转机械。这类设备以转子及其回转部件作为工作的主体, 在整个工艺系统中往往发挥着关键性作用, 一旦发生事故, 往往造成巨大经济损失。

2) 对于回转类机械设备, 振声诊断技术发展相对成熟, 应用时间较长, 且具有诊断操作成本低, 诊断周期短, 便于实现自动化处理等优点^[1]。然而回转类设备种类繁多, 零部件和故障类型各异, 信号往往非常复杂, 包含齿轮组、轴、轴承和其他部件的各种振动, 且常常夹杂着大量的噪声信号, 因此信号表现出极大的非平稳特性, 这使得诊断工作变得异常困难^[3]。尤其是在故障发展的初期, 故障特征信号幅度仍然非常微弱, 容易完全淹没在噪声中导致难以察觉, 传统的频谱分析方法往往难以将其提取出来, 这使得振声诊断技术目前还大多只能诊断故障的存在与否, 而对于工程上最关心的一些方面, 如故障缺陷的发展程度、残余寿命的估计以及

故障类型的自动识别始终未有大的突破。要解决这些问题, 首当其冲的就是要有效地从噪声信号中提取出我们感兴趣的特征信号, 即使当它们还非常微弱, 即我们将要讨论的降噪问题。

3) 为了能将初期故障的微弱信号从噪声中分离出来, 许多降噪方法被提出, 其中主要有时间平均法、基于 FFT 的信号降噪和小波降噪等。但是时间平均法由于需要用来保证同步的参考信号, 在实际应用中是难以实现的^[4]。FFT 方法是单纯对频域的滤波, 有“一刀切”的缺陷, 也就是把带通之外的频谱不加区分地过滤掉。它仅能处理稳态信号的降噪问题, 因为信号随时间的变化特征无法表现出来^[2]。

小波分析已经被成功地用于了非平稳振动信号与故障诊断。小波变换能够同时提供时域和频域的信息。不同的小波具有不同的时频结构, 为了更有效的识别不同的特征信号成分, 我们可以选择恰当的小波时频结构尽可能匹配待识别信号成分。同时小波分析在时域上的分辨率是可调的, 对高频分辨率大, 对低频分辨率小, 将信号分解为多尺度成分后, 可以在各个尺度选择不同阈值, 因而对噪声成分进行抑制的手段更加灵活。

收稿日期: 2004-11-17

作者简介: 邓懿波(1976-), 男, 江西南昌人, 助教。

文章结构如下:第一部分为背景概述;第二部分为小波降噪的主要原理及主要影响因素;第三部分,通过对回转机械典型故障信号的仿真分析,讨论了小波降噪过程中的主要影响因素,如母小波类型、阈值选取策略、分解层数,得出了一些有价值的规律和原则;文章的结论于第四部分给出。

2 小波降噪的主要原理

1) 小波分析的基本思想同傅里叶分析是一致的,都是用一族函数来表示一信号或函数.小波变换使用的小波函数系是通过一母小波的伸缩和平移构成的^[5].

令 $\Psi(t)$ 为母小波函数,则子小波为 $\Psi_{a, \tau}(t) = \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$, 其中 a 为尺度因子, τ 为平移因子.连续小波变换 CWT 即有限能量信号 $s(t)$ 与子小波函数族的内积(即卷积):

$$W(a, b) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} s \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

(1)“*”表示复共轭

早期的研究大多集中在正交小波上,因为对于正交小波重构逆变换更容易实现.但最近的研究对非正交小波给予了更多关注.依照小波变换的原始定义,如果基函数的 FFT 变换 $\Psi(\omega)$ 满足容许性条件:

$$C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (2)$$

$$\text{则存在通用重构公式: } f(x) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{R^2} \int WT_x(a, \tau) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \frac{1}{a^2} da d\tau, \quad (3)$$

假如将子小波视作一滤波器,小波变换其实仅为一滤波操作.

2) 小波降噪的基本原理:小波的多分辨率时频局部化分析特性可以在多个尺度下把信号中不同频率的成分分解到不同的子空间中去,如果对分解得到的小波系数作用阈值,将低于阈值的噪声成分所在频道的小波变换系数置零,保留我们关心的频带的小波变换系数,然后重新合成信号,就可以得到消除噪声的信号^[2].尤其对于从噪声中提取机器初期故障的微弱信号具有传统的频谱分析等方法无法比拟的优势.

信号降噪的准则有两条:1)光滑性 在大部分情况下,降噪后的信号应该至少和原信号具有同等的光滑性;2)相似性 降噪后的信号和原信号的方差估计应该是最坏情况下的方差的最小^[2].

从通常意义上,降噪的光滑性和相似性两个准则在时间和频率两个空间上体现的比重不同,从时域分析的角度,更容易体现信号的相似性,而不太处理好信号的光滑性,因为时域的分析可以很好的判断信号的动态性质,而在频域中,可以很方便地过滤掉高频的噪声信号,使得信号无限光滑,但是在原信号中能量比重很小的很多有用的信号成分也可能因此被过滤掉.

小波降噪的过程可分为以下步骤:

1) 分解过程:选定一种小波,对信号进行 N 层小波(小波包)分解;

2) 作用阈值:对分解得到的各层系数作用选择的阈值,可选择软、硬阈值处理方式;

3) 重建过程:将处理后的系数通过小波(小波包)重建恢复原始信号.

这个过程基于如下基本假设,即携带信息的原始信号在频域或小波域的能量相对集中,表现为能量密集区域的信号分解系数的绝对值比较大,而噪声信号的能量谱相对分散,所以其系数的绝对值小,这样我们就可以通过作用阈值的方法过滤掉绝对值小于一定阈值的小波系数,从而达到降噪的效果.

小波降噪效果的影响因素很多,如:小波分解层数,母小波类型,噪声类型,阈值选取方式和通阈方式,小波降噪和小波包降噪,不同信号的处理方法,不同种类故障振动信号降噪(调制效果、变频、脉冲信号、短时间历程、趋势信号).通常的阈值选取有四种方式:‘rigsure - Stein 无偏似然估计规则’、‘heursure - 启发式无偏似然估计规则’、‘sqtwolog - 对数长度统一阈值规则’和‘minimaxi - 最小极大值规则’^[6].

3 小波降噪的影响因素分析

1) 轴系零件(齿轮、轴、轴承等)的裂纹往往会引起严重的机械故障,裂纹的识别及其发展阶段的监测意义重大,其初期特征信号征兆通常表现为周期性脉冲,图 1 为叠加高斯白噪声前后的周期脉冲信号.

固定分解层数为 8, 阈值策略采用 ‘rigsure’, 分别选用 sym2、sym4、db2、db4、coif3、coif5 进行降噪,结果见图 2(只列出了其中一种情况的结果).

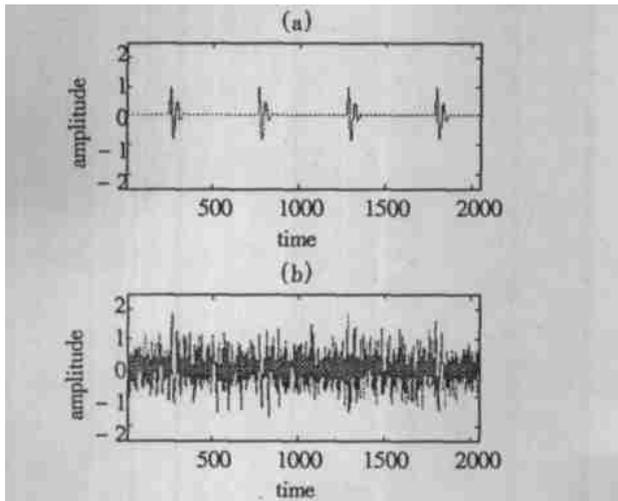


图 1 叠加高斯白噪声前后的周期脉冲信号

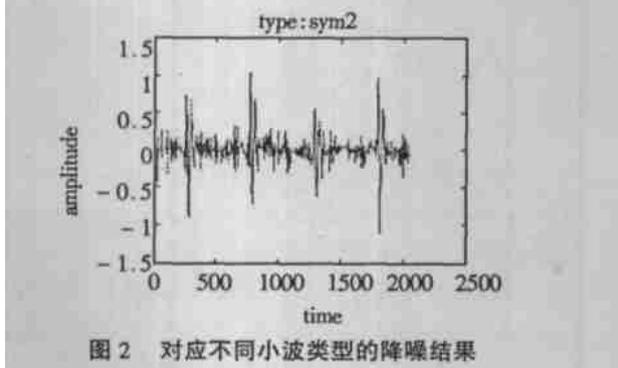


图 2 对应不同小波类型的降噪结果

为了衡量降噪结果与原信号的相似程度, 我们提出两个标准: (1) 降噪结果与原信号的能量比值: $perc = \frac{\sqrt{\sum_i xd_i^2}}{\sqrt{\sum_i s_i^2}}$; (2) 降噪信号与原信号间的标准差 $e = \sqrt{\sum_i (xd_i - s_i)^2}$

其中 xd_i 降噪结果信号, s_i 为原信号(染噪后).

六种母小波类型对应降噪结果的能量保留比例分别为 0.4624, 0.46607, 0.4624, 0.42777, 0.43105, 0.42413, 降噪信号与原信号间的标准差分别为 4.499, 3.1192, 4.499, 3.8429, 3.3175, 3.1918, 尽管 $sym4$ 小波降噪保留的能量比例是最大的, 同时从特征信号提取的角度出发, $sym4$ 小波也是最优的.

选择 $sym4$ 小波, 分解层数取 6, 分别选用 'rigsure', 'heursure', 'sqtwolog' 和 'minimaxi' 四种不同阈值策略, 降噪结果见图 3 (只列出了其中两种情况的结果).

四种阈值策略对应的小波降噪结果的能量保留比例分别为 0.46607, 0.46377, 0.34186, 0.3987, 降噪后信号与原信号间的标准差分别为 3.1192, 3.1346, 2.7721, 3.3834. 可以看到, 无论是从能量保留的角度还是从特征信号提取的角度出发, 'rigsure'

阈值策略都是最优的.

使用 $sym4$ 小波, 阈值策略采用 'rigsure', 分别分解至 2, 4, 6, 8, 10, 12 层, 结果见图 4 (只列出了其中两种情况的结果).

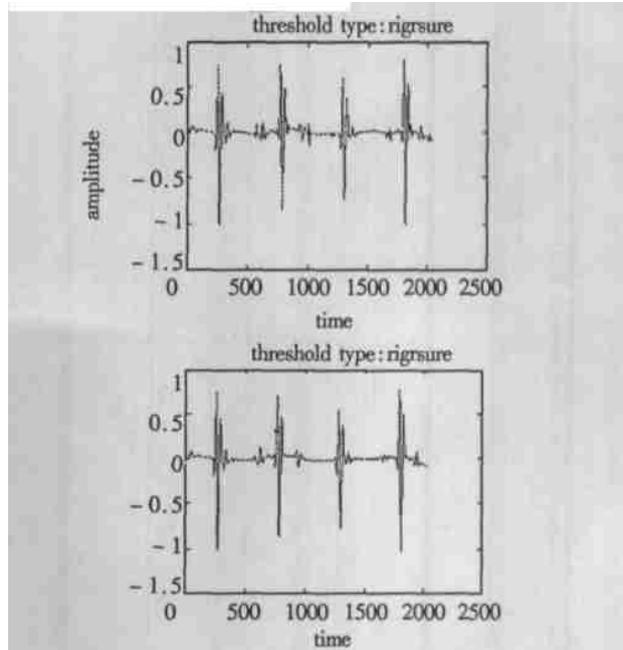


图 3 对应不同阈值选取方式的降噪结果

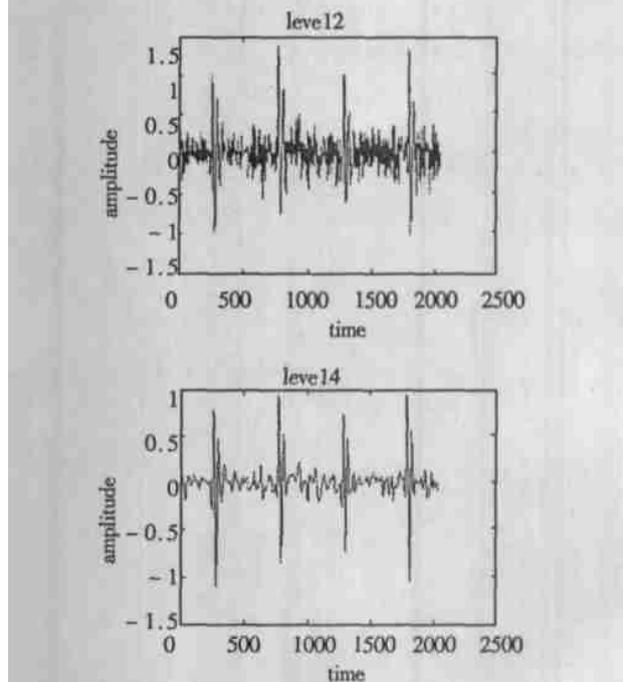


图 4 对应不同小波分解层数的降噪结果

六种不同分解层数对应降噪结果的能量保留比例分别为 0.65749, 0.53467, 0.47313, 0.46607, 0.46681, 0.46603, 降噪信号与原信号间的标准差分别为 6.6323, 4.083, 3.3258, 3.1192, 3.1461, 3.1176, 从结果可以看到, 降噪的效果随着分解层数的增加而变好, 但是当分解层数到达一定值时, 降噪效果不

在会有明显变化.

2) 轴承或轴系不对中通常会引起的调制现象, 图5为叠加高斯白噪声前后具有调制特征的信号.

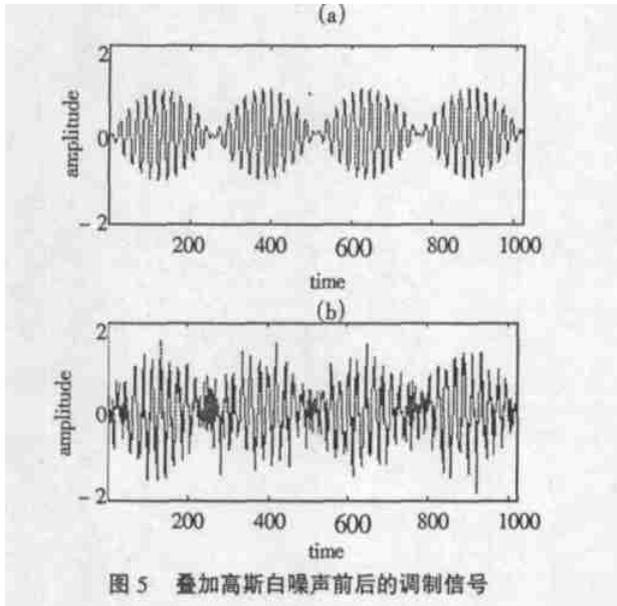


图5 叠加高斯白噪声前后的调制信号

固定分解层数为8, 阈值策略采用 'rigrsure', 分别选用 sym2、sym4、db2、db4、coif3、coif5 进行降噪, 六种母小波类型对应降噪结果的能量保留比例分别为 0.82818, 0.83924, 0.82818, 0.86465, 0.84436, 0.85493, 降噪信号与原信号间的标准差分别为 5.2497, 4.4388, 5.2497, 4.6509, 4.3516, 3.9427, 从特征信号提取的角度出发, coif5 小波是最优的.

选择 coif5 小波, 分解层数取 6, 分别选用 'rigrsure'、'heursure'、'sqtwolog' 和 'minimaxi' 四种不同阈值策略, 其对应的小波降噪结果的能量保留比例分别为 0.85493, 0.83225, 0.53846, 0.65804, 降噪后信号与原信号间的标准差分别为 3.9427, 4.0219, 6.953, 5.1484, 从特征信号提取的角度出发, 'rigrsure' 阈值策略是最优的.

使用 coif5 小波, 阈值策略采用 'rigrsure', 分别分解至 2、4、6、8、10、12 层, 其情况与上一例的分析完全相同, 为了避免不必要的计算时间, 显然分解层数不宜太大.

参考文献:

- [1] 陈大喜, 朱铁光. 大型回转机械诊断现场实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 董长虹. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 国防工业出版社, 2004.
- [3] J. Lin and L. Qu. Feature extraction based on Morlet wavelet, its application for mechanical fault diagnosis[J]. Journal of Sound, Vibration 2000, (234): 135~148.
- [4] D. Boulahbal, M. F. Golnaraghi and F. Ismail 1999 Mechanical Systems and Signal Processing 13, 423-436. Amplitude and phase wavelet maps for the detection of cracks in geared systems.
- [5] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [6] Matlab User manual version 6.5 Release 13.

A Study about the Influencing Factors for Wavelet De-noising

DENG Yi-bo, TAN Zi-hong, HUANG Yuan

(Process Equipment and Controlling Engineering Department, Nanchang University, Nanchang 330029, China)

Abstract: Signal de-noising is one of the most important project in fault diagnosis and signal processing for rotating machinery. It could be carried out in a lot of ways. Wavelet de-noising, which is becoming popular recently, is a very promising method for this purpose. This article mainly introduced basis of wavelet theory and wavelet de-noising and its application. There are a lot of factors which will affect the de-noising efficacy, such as wavelet type, threshold strategy, decomposition level and so on. Some valuable rules was discovered by the analysis of simulated typical fault signals of rotating machinery.

Key words: signal de-noise; rotating machinery; wavelet; fault diagnosis