

# 一种改进的小波包阈值去噪法在压缩机振动信号分析中的应用

刘 涛,李泽宇

(兰州理工大学机电学院,甘肃 兰州 730050)

An Improved Wavelet Packet Threshold De-noising Method in Application of Compressor Vibration Signal Analysis

LIU Tao, LI Ze-yu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**摘要:**结合变频涡旋压缩机振动小,噪声低的特点,利用一种改进阈值的小波包函数进行去噪处理,克服了硬阈值去噪不连续的缺点,同时还克服了软阈值函数去噪中的估计小波系数与分解小波系数之间存在着恒定偏差的缺陷。通过 Matlab 仿真分析比较了这 3 种去噪效果。

**关键词:**变频涡旋压缩机;振动信号;小波包分析;阈值函数;信噪比;均方根误差

中图分类号:TN911.71

文献标识码:A

文章编号:1001-2257(2012)03-0013-04

**Abstract:** An improved threshold of wavelet packet function is used to de-noise with consideration for small vibration and low level of noise in variable-frequency scroll compressors. It overcomes discontinuous faults occurred in the hard threshold de-noising. At the same time, it also overcomes the drawback that there is an invariable deviation between the estimated wavelet coefficients and the decomposed wavelet coefficients in the soft threshold de-noising method. Furthermore, three kinds of de-noising methods are compared through Matlab simulation analysis.

**Key words:** variable-frequency scroll compressor; vibration signal; wavelet packet analysis; threshold function; signal to noise ratio (SNR); root mean square error (RMSE)

收稿日期:2011-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50965011);甘肃省自然科学基金资助项目(1014RJZA025)

## 0 引言

在变频涡旋压缩机状态检测和故障诊断中,通常要对测得的信号进行分析处理,提取真实信号的特征,然而这些信号容易受到噪声信号的干扰,使得信号中有用的特征信息也常常淹没在噪声之中,从而给信号的特征提取带来了很大的困难,因此必须去除信号中叠加的噪声或干扰成分。

小波变换技术<sup>[1]</sup>是近 10 年来发展起来的一种新的信号处理工具,由于小波函数具有局部化特性、多尺度性和“数学显微(变焦)”的特性,使得小波变换很好地解决了非平稳信号分析的问题。目前,小波去噪方法中的阈值去噪方法<sup>[2-3]</sup>,由于处理方法简单、计算量小而引起广泛关注。此方法采用的主要有硬阈值和软阈值去噪,但由于硬阈值函数的不连续性,得到的估计小波系数值连续性差,因此它的处理效果远远不及软阈值去噪法,然而软阈值函数的导数不连续性以及由它估计的小波系数与被处理信号的小波系数之间存在恒定偏差,因而在信号重构时会损失一些有用的高频信息,造成重构信号的信噪比较低,均方根误差较大。基于上述考虑,国内外很多学者提出了一些解决方案和改进方法<sup>[4-5]</sup>,并进行了实验验证,进一步拓宽了小波阈值去噪的应用前景。

结合变频涡旋压缩机振动信号的特点,选择了小波包阈值去噪法对其进行降噪处理。小波包<sup>[6]</sup>分析能将频带进行多层次划分,对上一层的低频部分和低频部分同时进行细分,并能够根据被分析信号的特征,自适应地选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时频分辨率,因此小波包分解具有

更加精确的局部分析能力。

## 1 小波包分析

在小波变换中,从多尺度分析的角度看,是将  $L^2(R)$  空间逐层进行分解,  $V_0 = V_1 \oplus W_1 = V_2 \oplus W_2 \oplus W_1 = \dots = \bigoplus_{j \in Z^+} W_j$ , 只是对  $V_0$  空间(尺度函数空间)迭代进行分解,多尺度分析是按照不同的尺度因子  $j$  把 Hilbert 空间  $L^2(R)$  分解为所有子空间  $W_j (j \in Z)$  的正交和,其中  $W_j$  为小波函数的闭包(小波子空间)。小波包分析则进一步对小波子空间  $W_j$  按照二进制方式进行频率细分,从而达到提高分辨率的目的。由小波分析和小波包分析的空间剖分图对比可以看出二者的区别,如图 1 和图 2 所示。

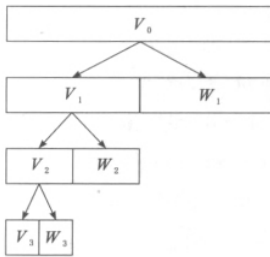


图 1 小波分析的空间剖分图

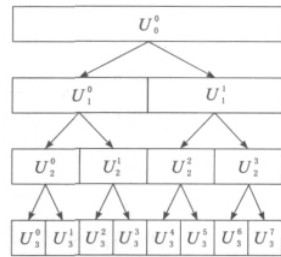


图 2 小波包分析的空间剖分图

由图 1,2 可以看出,小波包分析将频带进行多层次划分,正是因为它的多层次划分可以对多尺度分析中没有细分的高频部分作进一步分解。

## 2 小波包去噪

### 2.1 小波包去噪过程

设  $s(t)$  为含噪信号;  $f(t)$  为有用信号;  $\epsilon$  为噪声强度;  $e(t)$  为高斯白噪声。则一个含噪的一维信号模型可表示为:

$$s(t) = f(t) + \epsilon \cdot e(t) \quad (1)$$

$e(t)$  服从正态  $(0, \sigma^2)$  分布。在实际工程中,有用信号通常表现为低频信号或较平稳的信号,噪声信号则表现为高频信号,所以消噪过程可按以下步骤进行处理。

a. 一维信号的小波包分解。选择一个小波包母函数并确定一个小波包分解层次  $N$ , 对带噪信号  $s(t)$  作小波包变换,得到一组小波包系数  $w_{j,k}$ ; 它由 2 部分组成,一部分是信号  $f(t)$  对应的小波包系数,记为  $u_{j,k}$ ,另一部分是噪声  $e(t)$  对应的小波包系数,记为  $v_{j,k}$ 。

b. 计算最佳树(即确定最优小波包基)。因为不同的小波包基具有不同的性质,能够反映信号的不同特征,所以选择一个好的小波包基,能够充分表达信号的特点。信号  $f(t)$  的小波包分解,是将  $f(t)$  投影到小波包基上,获得一系列系数  $d_i^n$ ,要用这一系列系数刻画  $f(t)$  的特征,系数之间的差别越大越好,因为如果只有少数系数的  $d_i^n$  很大,那么用这少数几个系数就代表了  $f(t)$  的特征,显然这样的小波包基是较优的基。

c. 小波包分解系数的阈值量化。通过对  $w_{j,k}$  用软或硬阈值函数进行阈值处理,得出估计小波系数  $\bar{w}_{j,k}$ ; 使得  $\|\bar{w}_{j,k} - u_{j,k}\|$  尽量小。

d. 一维小波包的重构。利用  $\bar{w}_{j,k}$  进行小波包重构,得到估计信号  $f(t)$  即为去噪后的信号。

由于对压缩机振动信号采用小波包分析,因此压缩机振动信号的低频部分(有用信号)和低频部分(噪声成分)都可得到  $N$  次分解,对由此细化得出的小波包系数进行阈值处理,可很大程度上减少误将振动信号作为噪声去除的机率,又能分析到高频部分,进而作为压缩机故障提取的数据资料。

在上面步骤中,最关键的是如何选取阈值和阈值的量化处理,因为它们关系到能否在去噪过程保证振动信号的不失真。

### 2.2 小波包阈值函数的选取

常用的阈值函数<sup>[7]</sup>有:

a. 硬阈值函数。

$$\bar{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

b. 软阈值函数。

$$\bar{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \lambda), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

$\lambda$  为预置阈值或门限值。

c. 改进阈值函数。

基于上述考虑,本文选取了一种改进阈值的小波包函数<sup>[8]</sup>(如式(4))来对变频涡旋压缩机振动信号进行去噪。

$$\bar{w}_{j,k} = \begin{cases} \{ |w_{j,k}| - \alpha \cdot \exp[-(|w_{j,k}| - \lambda)^2] \lambda \} \cdot \text{sgn}(w_{j,k}), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ \frac{|w_{j,k}| - \alpha \lambda}{\mu} [(1 + \mu)^{|w_{j,k}|/\lambda} - 1], & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

$\mu^{[9]}$  为非线性的函数;  $\alpha$  为调节因子,  $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

当  $|\omega_{j,k}| = \lambda$  时,  $\bar{\omega}_{j,k} = (1 - \alpha)\lambda \operatorname{sgn}(\omega_{j,k})$ ; 当  $|\omega_{j,k}| \rightarrow \lambda$  时,  $\bar{\omega}_{j,k} \rightarrow (1 - \alpha)\lambda \operatorname{sgn}(\omega_{j,k})$ ; 即  $\bar{\omega}_{j,k}$  在  $|\omega_{j,k}| = \lambda$  是连接的。

又因为  $0 \leq \alpha \leq 1$ , 所以, 当  $|\omega_{j,k}| \geq \lambda$  时,  $0 \leq \alpha \cdot \exp[-(|\omega_{j,k}| - \lambda)^2] \leq 1$ ; 此时  $\bar{\omega}_{j,k}$  的范围为  $|\omega_{j,k}| \operatorname{sgn}(\omega_{j,k}) \leq \bar{\omega}_{j,k} \leq (|\omega_{j,k}| - \lambda) \operatorname{sgn}(\omega_{j,k})$ , 这样会使估计出来的小波包系数  $\bar{\omega}_{j,k}$  更接近于  $u_{j,k}$ , 从而达到比软、硬阈值更好的去噪效果。图 3 是产生一条定义在  $[-1, 1]$  上的直线, 分别采用软、硬阈值和改进的阈值去噪的效果图, 设定的门限值均为 0.4。由图 3 可以看出, 改进后的阈值函数在噪声(小波系数)与有用信号(小波系数)之间存在一个平滑的过渡区, 更符合自然信号的连续特性。

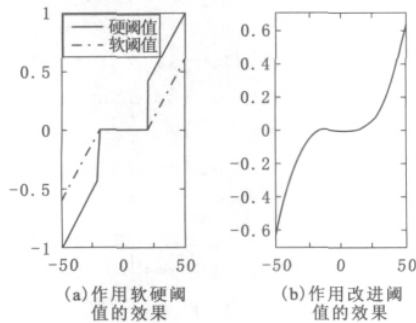


图 3 阈值函数的比较

### 3 仿真计算及分析

为了说明改进阈值函数在去噪算法中的有效性和优越性, 分别采用软、硬阈值函数和改进阈值函数, 对变频涡旋压缩机的轴向振动和周向振动进行了仿真分析。本研究的数据采集来自于基于 LabVIEW 的变频涡旋压缩机振动测试系统, 该系统由压电加速度传感器、数据采集卡、变频器和上位机远程控制软件 LabVIEW 组成。测试点的分布情况如图 4 所示, 本实验的采样频率为  $f_1 = 1\,024$  Hz, 电机的转速为 3 500 r/min。待涡旋压缩机运行平稳后, 通过加速度传感器获取振动信号, 各加速度传感器测得的信号由数据采集模块采集后传送至电脑存储, 并由数据采集分析处理后得出测试结果。

本试验是基于 Matlab 中小波工具箱中的小波包去噪分析, 软、硬阈值函数采用的是 Daubechies (dbN) 小波系中的 db6, 门限值设置为 0.4, 小波包分解层数为 4 层, 调节因子  $\alpha = 0.5$ 。选择小波系中

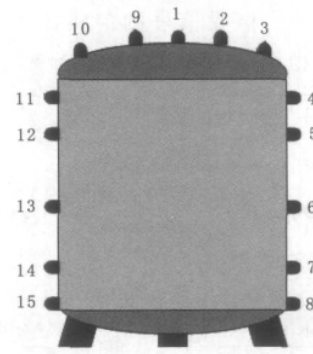


图 4 压缩机测试点选取

的 db6 是为了更好地对比 3 种去噪效果, 分解层数定为 4 层是为了保证不使一些有用的高频信号成分滤除掉, 并根据变频涡旋压缩机振动噪声微弱的情况, 加入白噪声 60 dB, 以贴近实际情况。

图 5 和图 6 比较了去噪效果, 横坐标是测试点的编号, 纵坐标是发生的应变, 应变用  $\epsilon$  表示, 单位为  $\mu\epsilon$ 。从图 5 和图 6 中可以看出, 软阈值去噪要比硬阈值平滑许多, 软硬阈值函数去噪有效地保存了振动信号中的噪声成分, 在去噪过程中剔除了一些毛刺, 去噪效果并不明显, 这也不利于故障信号的提取和判断; 而改进阈值函数的去噪效果更明显, 不仅能有效地去除了噪声信号, 而且对其中的高频成分(噪声信号)进行分析处理, 从而提取故障信号。为了从数据上分析它们之间的去噪差别, 分别列出 3 种去噪信号的信噪比和均方根误差<sup>[10]</sup>进行评价, 将原始信号作为标准信号  $s(n)$ , 消噪后的信号为  $\bar{s}(n)$ , 信噪比 SNR 定义为:

$$SNR = 10 \lg \left[ \frac{\sum_{n=1}^N s^2(n)}{\sum_{n=1}^N [s(n) - \bar{s}(n)]^2} \right] \quad (5)$$

原始信号与降噪信号之间的均方根误差 RMSE 定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [s(n) - \bar{s}(n)]^2} \quad (6)$$

信号去噪处理中, 信号的信噪比 SNR 越高, 原始信号与去噪后的信号均方根误差 RMSE 越小, 则消噪后的信号就越接近于原始信号, 降噪效果越好。计算结果如表 1 和表 2 所示, 从数据上看, 与软、硬阈值去噪方法相比, 基于改进的小波包阈值函数去噪方法提高了重构信号的信噪比, 能够得到较小的均方根误差。由定量比较得知, 改进的小波包

阈值函数去噪比染噪信号的信噪比提高了 6%~10%，而均方根误差下降了 9%~16%。

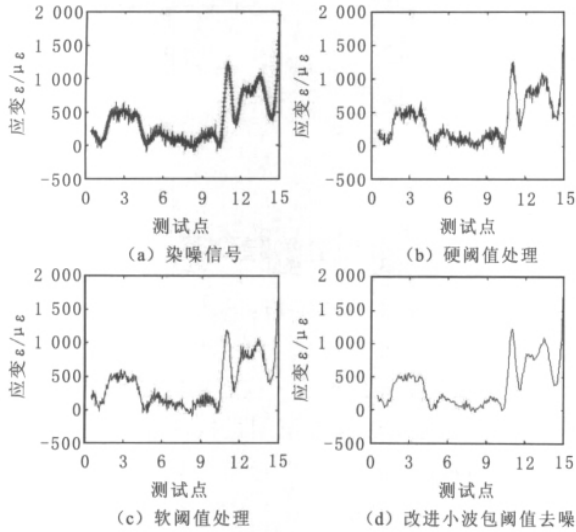


图 5 压缩机轴向振动去噪效果对比

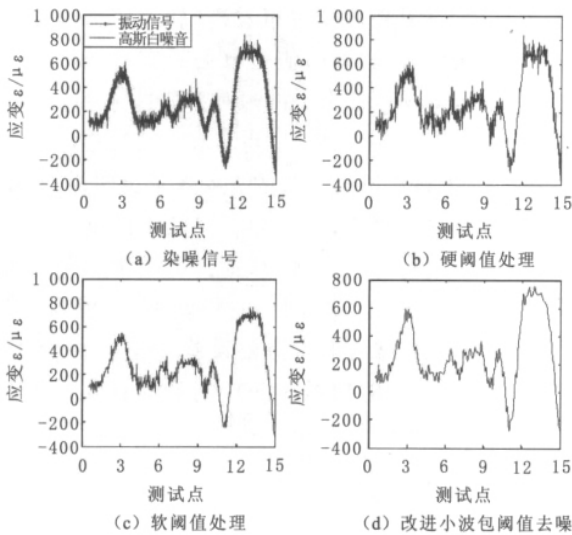


图 6 压缩机周向振动去噪效果对比

表 1 轴向振动特征参数比较

信号	信噪比(dB)	均方根误差
染噪信号	14.567 1	39.653 0
硬阈值去噪	14.851 6	38.603 0
软阈值去噪	14.743 0	37.614 4
改进阈值去噪	15.419 1	36.187 4

表 2 周向振动特征参数比较

信号	信噪比(dB)	均方根误差
染噪信号	10.810 7	41.312 6
硬阈值去噪	11.237 7	37.367 9
软阈值去噪	11.407 9	36.822 7
改进阈值去噪	11.936 4	34.690 9

## 4 结束语

介绍了一种新的阈值函数,与传统的软、硬阈值方法相比,去噪效果有了明显的改善,具有很好的稳定性。软、硬阈值虽然有效保存了原始的振动信号,但去噪效果不太理想,若选择一些其它函数可能去噪效果会更好,但是又会损失一部分高频成分,不易于故障的判断。而新小波包阈值函数具有无穷阶的连续性,并且能在一定程度上保留信号中的尖峰和突变部分,不仅对低频部分能有效去噪,而且还能保留高频成分,为下一步故障诊断提供数据上的支持。

### 参考文献:

- [1] 崔宝珍,潘宏侠.小波分析在信号处理中的应用[J].机械工程与自动化,2006,(4):97-102.
- [2] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE. Trans Inform Theory,1995,(41):613-627.
- [3] Donoho D L, Johnstone I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage[J]. Journal of American Statistical Association, 1995,(90):1200-1224.
- [4] 赵瑞珍,宋国乡,王 红.小波系数阈值估计的改进模型[J].西北工业大学学报,2001,19(4):625-628.
- [5] 赵继印,李先涛,赵静荣,等.基于半软阈值法的图像小波去噪方法[J].大庆石油学院学报,2004,28(1):63-66.
- [6] 范显峰,姜兴涓.基于小波包变换的信号去噪方法研究[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(7):809-811.
- [7] 张维强,宋国乡.基于一种新的阈值函数的小波域信号去噪[J].西安电子科技大学学报,2004,31(2):296-299.
- [8] 段其昌,邓玉娟,应泽贵.基于改进阈值的小波包语音增强算法的研究[J].通信技术,2009,42(5):86-88.
- [9] Chang Sungwook, Kwon Y, Yang Sung-il, et al. Speech enhancement for non-stationary noise environment by adaptive wavelet packet[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. 2002. 561-564.
- [10] 李 慧,蔺启忠,王钦军,等.基于小波包变换和数学形态学结合的光谱去噪方法研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(3):644-648.

作者简介:刘 涛 (1971-),女,甘肃兰州人,教授,研究方向为测试技术、自动控制及先进制造技术;李泽宇 (1986-),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向为测控技术及仪器。