

一种改进的形态-小波阈值降噪方法

杨正益 刘博文 任 山 衡桢男

(重庆大学软件学院 重庆 401331)

摘 要 现场采集的旋转机械振动信号中一般存在强脉冲干扰和白噪声,小波阈值滤波对白噪声的滤波效果好,但对脉冲干扰的滤除效果不佳,而形态滤波虽然可以有效地剔除脉冲干扰,但不易滤除白噪声。针对这些问题,提出了一种基于形态滤波和改进的小波阈值滤波相结合的综合滤波方法。该滤波方法结合了两种滤波方法的优点,能够同时有效地滤除旋转机械振动信号中的脉冲干扰和白噪声。通过仿真信号和现场采集的转子振动信号进行了实验验证,结果表明,形态滤波与改进的小波阈值滤波相结合的滤波方法很好地滤除了转子振动信号中的噪声成分,进而提取出淹没在噪声中的转子振动信号。

关键词 信号处理,形态滤波,小波阈值滤波,形态-小波滤波

中图分类号 TN911 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.05.052

Improved Morphological-wavelet Threshold De-noising Method

YANG Zheng-yi LIU Bo-wen REN Shan HENG Nan-nan

(School of Software, Chongqing University, Chongqing 401331, China)

Abstract Vibration signals of rotating machinery acquired on the field are usually accompanied with impulse and white noise. Wavelet threshold de-noising is effective for filtering white noise but ineffective in filtering impulse noise, and morphological filter can effectively remove impulse noise but it is difficult for filtering white noise. An integrated filter based on morphological de-noising and wavelet threshold de-noising was proposed to efficiently purify the corrupted vibration signals of rotating machinery. The proposed filter algorithm presents the combined advantages of both morphological and wavelet filters, and it can simultaneously filter both impulse and white noises in the rotor vibration signal. Based on the vibration signals of rotating machinery acquired in field and simulation results, the integrated filter which is composed of a morphological filter followed by an improved wavelet threshold filter presents a decent de-noising result, and extracts the rotor vibration signal submerged in the noise. The efficiency of the filter is experimentally demonstrated compared with the previously reported filters.

Keywords Signal processing, Morphological filter, Wavelet threshold filtering, Morphological-wavelet threshold filter

对旋转机械的振动信号进行分析,是对旋转机械故障进行诊断的常用、直接且有效的方法。在对振动信号进行进一步分析前,需要对振动信号进行降噪处理。经过长期的研究发现,旋转机械的振动信号的噪声干扰主要是脉冲噪声和白噪声。随着数字滤波技术的发展,数字滤波的方式多种多样,包括粒子滤波、小波滤波^[1]、数学形态滤波、PDE 滤波^[2]、希尔伯特—黄(Hilbert-Huang Transform, HHT)去噪^[3]等。常见的频带数字滤波是基于频域构建的,存在时滞、相移等缺点,可能会引起信号畸变,而且常用的频带滤波都是线性滤波器,对转子振动的非线性信号进行滤波时不能达到理想的效果。

在数学形态学的基础上,Matheron 和 Serra 等人^[4]于 20 世纪 80 年代初提出了形态滤波理论。数学形态滤波是一种

非线性滤波器,早期的研究主要用于图像信号处理,其可以对图像信号进行有效处理并保持信号的边缘轮廓。国内学者对形态滤波进行研究,对用于振动信号的滤波的研究取得了初步的成果。研究发现,其可以有效地提取信号的边缘轮廓以及信号的形状特征,特别是对脉冲信号的干扰处理有着很好的效果。小波分析是近年来发展得最快的一种信号分析方法,其在信号去噪中得到了很好的应用,小波阈值去噪对于高频信号抑制有着明显的效果,能够有效地滤除随机噪声,但对脉冲干扰的滤除效果不佳。

文献[5]在软硬阈值处理函数的基础上分别构造了一种改进的小波阈值处理函数并将其运用于转子系统降噪中;文献[6]提出了一种将小波降噪及固有模态函数的协方差矩

到稿日期:2017-02-13 返修日期:2017-04-20 本文受国家自然科学基金面上项目(11372364),国家自然科学基金青年基金(61602070)资助。

杨正益(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为软件工程、信号分析与处理、物联网,E-mail:zyyang@cqu.edu.cn(通信作者);刘博文(1992—),男,硕士生,主要研究方向为软件工程、信号分析与处理、专家系统,E-mail:q465124657@163.com;任 山(1993—),男,硕士生,主要研究方向为软件工程、信号分析与处理、内存数据库,E-mail:renshan456@qq.com;衡桢男(1994—),女,硕士生,主要研究方向为软件工程、信号分析与处理、内存数据库,E-mail:1838310042@qq.com。

阵相结合的方法来进行轴承故障检测;文献[7]提出了一种使用形态梯度算子的改进形态滤波方法来对轴承故障检测过程进行降噪;文献[8]首先在电力系统超高速保护的应用中使用开-闭形态滤波进行降噪,然后使用小波检测故障行波,较好地保护了电力系统。

因此,为了同时有效地滤除旋转机械振动信号中的脉冲噪声和白噪声,本文采用先形态滤波再小波阈值滤波的综合滤波方法,该方法的去噪效果较好。

1 形态滤波器的基本原理

数学形态学有两种基本运算:腐蚀和膨胀。设 $f(n)$ 和 $g(n)$ 为 2 个离散函数,分别定义在 $F=\{0,1,\dots,N-1\}$ 和 $G=\{0,1,\dots,M-1\}$ 上,假定 $N>M$, $f(n)$ 为输入信号, $g(n)$ 为结构元素。则 $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的腐蚀(\ominus)和膨胀运算(\oplus)可分别定义为:

$$(f\ominus g)(n) = \min[f(n+m) - g(m)], \quad m \in 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

$$(f\oplus g)(n) = \max[f(n+m) + g(m)], \quad m \in 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

$f(n)$ 关于 $g(n)$ 的开运算和闭运算分别定义为:

$$(f\circ g)(n) = (f\ominus g\oplus g)(n) \quad (3)$$

$$(f\bullet g)(n) = (f\oplus g\ominus g)(n) \quad (4)$$

其中,符号 \circ 和 \bullet 分别表示对信号的开运算和闭运算。

开运算能够圆滑尖锐地转角,圆滑带噪信号中的突变可以去掉毛刺和孤立点,从而达到平滑信号的效果,抑制信号中的正脉冲噪声;闭运算可以填补信号的细缝并圆角,可以滤除信号中的负脉冲噪声。开、闭运算组合起来构成形态学滤波器。为了同时滤除信号中的正、负脉冲噪声,需要采用形态开、形态闭的级联形式,得到形态开-闭-开-闭-开滤波器。

$$Foc(f(n)) = (f\circ g\bullet g)(n) \quad (5)$$

$$Fco(f(n)) = (f\bullet g\circ g)(n) \quad (6)$$

由于滤波器各自的特性导致开-闭滤波器输出偏小,闭-开滤波器输出偏大,为了取得更好的滤波效果,可构造组合形态滤波器:

$$y(n) = \frac{1}{2}[Fco(f(n)) + Foc(f(n))] \quad (7)$$

元素的选择对信号滤波效果有较大影响,常用的结构元素有直线、曲线、三角形、圆形等。经过研究发现,对于旋转机械振动信号的处理,应尽量选择宽度较小的 L_s ,当结构元素的高度 A_s 约为波形幅值的 0.2 倍时滤波效果最佳。正弦型形状的结构元素可取得较好的滤波效果^[9],而三角形结构元素的滤波性能较差,对于振动信号的滤波应避免选择有尖顶的三角形结构元素。

形态滤波对于脉冲干扰的去除效果较好,对于高斯噪声的去噪效果稍差。

2 改进的小波阈值降噪函数

小波变换具有时频局部化和变分辨率特性,因此在处理非平稳信号时具有很好的效果。小波去噪的方法主要有:基于小波变换模极大值原理的去噪方法、基于小波变化系数相关性的去噪方法和阈值去噪方法^[10]。

2.1 传统的阈值函数

传统的小波阈值函数分为硬阈值函数和软阈值函数。硬阈值方法是将各子空间中低于阈值的小波系数置为 0,高于阈值的小波系数保持不变。软阈值方法是将小波系数小于或等于阈值的点置为 0,大于阈值的点变为该点值和阈值的差值。

硬阈值函数为:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq thr \\ 0, & |w_{j,k}| < thr \end{cases} \quad (8)$$

软阈值函数为:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} - thr, & w_{j,k} \geq thr \\ 0, & |w_{j,k}| < thr \\ w_{j,k} + thr, & w_{j,k} \leq -thr \end{cases} \quad (9)$$

其中, $w_{j,k}$ 为小波系数, thr 为门限, $\hat{w}_{j,k}$ 为估计所得的小波系数。

在硬阈值处理过程中,得到的估计小波系数值的连续性较差,可能会引起重构信号的振荡。经软阈值处理后,小波系数的数值的连续性较好,但是由于小波系数与原来的小波系数数值之间有固定的误差,因此会给重构信号带来不可避免的误差^[11]。

2.2 改进的阈值函数

由于硬阈值估计在阈值点处不连续,而软阈值估计在估计时总存在一定的偏差,因此去噪效果不理想。为了避免这两个缺点,本文设计一种改进的阈值方案,该方案使估计出的小波系数在阈值点处连续,而对于 $|w_{j,k}| > thr$, 估计所得小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ 与 $w_{j,k}$ 无偏差。利用模平方插值的方法改进的阈值函数为:

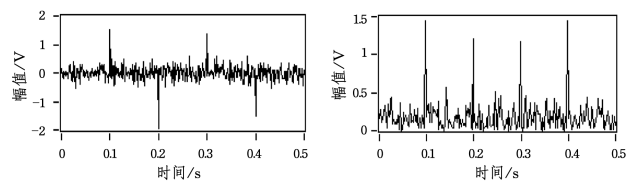
$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \sqrt{w_{j,k}^2 - thr^2}, & |w_{j,k}| \geq thr \\ 0, & |w_{j,k}| < thr \end{cases} \quad (10)$$

当 $|w_{j,k}| \geq thr$ 时,有:

$$|w_{j,k}| - thr \leq \sqrt{w_{j,k}^2 - thr^2} \leq |w_{j,k}| \quad (11)$$

式(10)、式(11)阈值函数估计出的数据 $\hat{w}_{j,k}$ 的大小在软、硬阈值方法之间, $\hat{w}_{j,k}$ 为非线性函数,随着 $|w_{j,k}|$ 的增大, $\hat{w}_{j,k}$ 与 $w_{j,k}$ 之间的偏差也逐渐减小。

为验证小波阈值去噪对高斯噪声和脉冲干扰的去噪效果,图 1(a)给出了由高斯噪声与脉冲干扰混合而成的信号,对噪声信号进行小波变换,其中单一尺度的小波系数的绝对值如图 1(b)所示。



(a) 高斯噪声与脉冲干扰信号 (b) 对噪声进行小波变换后的小波系数

图 1 小波阈值去噪对高斯噪声和脉冲干扰的去噪效果

Fig. 1 Wavelet threshold's de-noising effect for Gauss noise and impluse

从图 1 可以清楚地看到,对高斯噪声进行小波变换后其

小波系数很小,通过阈值去噪可以很好地将其去除;但是对于脉冲干扰的小波系数很大,在阈值去噪过程中噪声会被当作有用信号而被保留,因此脉冲干扰没有得到有效的去除。

采用小波对具有脉冲干扰的仿真信号进行滤波,小波基选用 db04,分解为 3 层,滤波后的波形如图 2 所示。

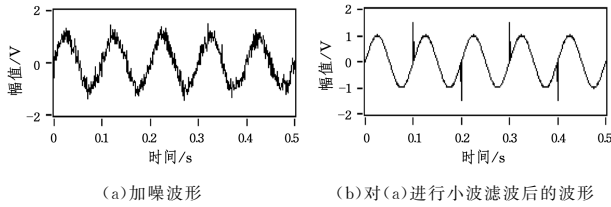


图 2 小波滤波范例

Fig. 2 Example of wavelet filtering

从图 2 可以看出,小波滤波对脉冲干扰的去噪效果较差。

3 仿真分析

根据旋转机械振动信号的特点,将频率为 f 的正弦信号作为转子振动的实际信号,在正弦信号中加入白噪声 $\sigma(t)$ 与脉冲噪声 $m(t)$ 和 $n(t)$,得到仿真信号:

$$x(t) = \sin(2\pi ft) + \sigma(t) + m(t) + n(t) \quad (12)$$

其中, $\sigma(t)$ 是标准差为 0.8 的高斯白噪声, $m(t)$ 是幅值为 4 的正脉冲, $n(t)$ 是幅值为 4 的负脉冲。图 3(a) 为原始信号,其中 f 为 10 Hz。分别对仿真信号进行小波滤波、形态滤波和本文所提的形态滤波与小波滤波相结合的综合滤波,其效果分别如图 3(b)、图 3(c)、图 3(d)、图 3(e) 所示,其中图 3(d) 是在图 3(b) 所示的波形上进行小波阈值滤波得到的,图 3(e) 是在图 3(c) 所示的波形上进行形态滤波得到的。在形态-小波滤波中,形态滤波的结构元素选用正弦型,长度 L_s 为 6,结构元素的高度 A_s 为 0.22,小波去噪为阈值去噪,阈值函数选用改进的阈值函数。

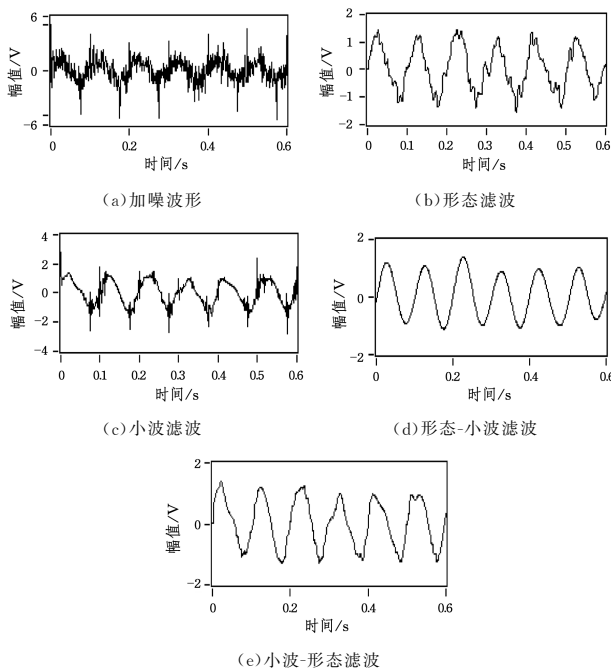


图 3 仿真信号滤波分析

Fig. 3 Filtering analysis of simulation signal

如图 3(b) 所示,形态滤波后,虽然脉冲干扰完全得到了抑制,但是波形中的白噪声干扰依然很明显。从图 3(c) 可以看出,仿真信号小波滤波后,脉冲干扰未能完全滤除,波形严重变形,去噪效果差。

形态滤波与小波阈值滤波相结合的综合滤波方法能够结合两种滤波的优势,脉冲干扰和白噪声都能得到很好的抑制。图 3(d) 所示为先进进行形态滤波再进行小波阈值滤波后的波形,形态滤波后得到图 3(b) 所示的波形,脉冲干扰被去除,留下了残余的白噪声,再经小波去噪进行后期的细节处理,得到了比单独进行小波滤波和形态滤波更好的去噪效果;图 3(e) 为先进进行小波阈值滤波再进行形态滤波后的波形,原始正弦波形大致被恢复,虽然在图 3(c) 的基础上去除了脉冲干扰,但是对波形的平滑、波形细节部分的处理没有达到很好的效果,因此根据目前的研究来看,形态滤波不适合做波形最终的处理。

从实验可以看出,在强噪声下(白噪声 $\sigma(t)$ 的标准差为 0.8),先进进行形态滤波再进行小波阈值滤波比先进进行小波阈值滤波再进行形态滤波能取得更好的去噪效果。因此在结合形态滤波与小波滤波的工程处理中,可以采用形态滤波进行初期处理,以消除脉冲干扰,再由小波滤波进行后期波形细节部分的处理,去噪效果好。

4 轴承故障振动信号消噪分析

为验证形态小波滤波方法的实际应用效果,在如图 4 所示的双跨单圆盘转子实验台上进行了现场实验,转子的转速为 2700r/min。转子振动信号滤波分析如图 5 所示。



图 4 实验与采集装置

Fig. 4 Experiment and acquisition devices

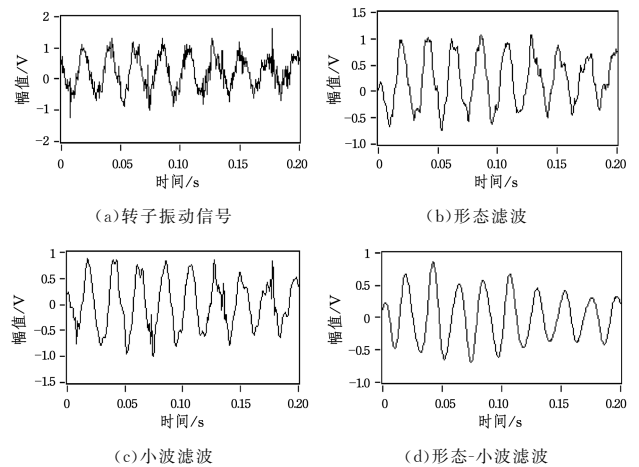


图 5 转子振动信号滤波分析

Fig. 5 Filtering analysis of rotor vibration signal