

总变差降噪方法在轴承故障诊断中的应用*

隋文涛¹, 张丹²

(1. 山东理工大学机械工程学院 淄博, 255049) (2. 山东理工大学电气与电子工程学院 淄博, 255049)

摘要 为有效降低振动信号中的噪声,把图像处理中的总变差降噪方法引入振动信号处理。分析了降噪算法中主要参数 λ 的作用,提出了基于峭度和互相关系数的 λ 选择方法,从而在信号逼真度约束和降噪方面寻求平衡。对仿真信号和滚动轴承振动信号的降噪结果表明了该降噪方法的可行性和有效性。

关键词 总变差; 降噪; 逼真度约束; 振动信号

中图分类号 TN911.4; TH133

引言

振动信号中包含的噪声不仅降低了信号的质量,而且还严重影响着各种相关处理算法的有效性。能否有效地降低噪声、提高信噪比,是后续振动信号处理的关键。

最传统的降噪方法是根据实际信号频谱分布的特点,采用滤波器进行降噪,但是这种基于傅里叶变换的方法存在保护信号边缘和抑制噪声之间的矛盾。小波变换具有良好的时频局部化特性,可以克服这个矛盾。很多学者采用小波变换的方法进行信号降噪,但这种方法存在选择小波基和确定阈值等问题^[1-5]。经验模式分解(empirical mode decomposition,简称 EMD)是一种新的非平稳信号处理方法,有些学者将其应用到信号降噪中。该方法也存在一些不足,如模式混叠、端点效应、停止条件等^[6]。

总变差(total variation,简称 TV)概念首先由 Rudin 等^[7]在 1992 年提出,能够在抑制噪声的同时较好地保持图像的边缘,在图像处理中得到了广泛应用^[8]。目前,一些学者^[9-11]将总变差法应用在一维信号处理中。变差法对噪音比较敏感,能保留一定的边缘信息。基于此,笔者探索将该方法用于振动信号的降噪。

1 总变差降噪原理

假设 N 点信号表示如下

$$x = [x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}] \quad (1)$$

矩阵 $(N-1 \times N)$ 的一阶微分定义为

$$D_1 = \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & \\ & -1 & 1 & & \\ & & \vdots & \vdots & \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵 $(N-2 \times N)$ 的二阶微分定义为

$$D_2 = \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 & & & \\ & -1 & 2 & -1 & & \\ & & \vdots & \vdots & \vdots & \\ & & & -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

l_p 范数 ($p \geq 1$) 的表达如下

$$\|x\|_p = (\|x_1\|^p + \|x_2\|^p + \dots + \|x_N\|^p)^{\frac{1}{p}} \quad (4)$$

特殊情况下,当 $p=1$ 时,式(4)变为

$$\|x\|_1 = (|x_1| + |x_2| + \dots + |x_N|) \quad (5)$$

当 $p=2$ 时,式(4)变为

$$\|x\|_2 = \sqrt{|x_1|^2 + |x_2|^2 + \dots + |x_N|^2} \quad (6)$$

$$TV(x) = \|D_1 x\|_1 = \sum_{n=1}^{N-1} |x(n) - x(n-1)| \quad (7)$$

假设含有噪音信号 $y(n)$ 为

$$y(n) = x(n) + w(n) \quad (n=0, 1, \dots, N-1) \quad (8)$$

其中: $w(n)$ 为白高斯噪声; $x(n)$ 为信号。

总变差降噪可以归结为以下优化问题

$$\operatorname{argmin}_x \|y - x\|_2^2 + \lambda \|D_1 x\|_1 \quad (9)$$

式(9)中, λ 控制信号的平滑程度,增大 λ 使得第 2 项 $\|D_1 x\|_1$ 权重变大,第 2 项反映了信号的变化程度。

* 国家自然科学基金资助项目(50275089);山东省自然科学基金资助项目(ZR2012EEL06)
收稿日期:2013-10-09;修回日期:2013-12-09

式(9)也可表达为

$$\begin{aligned} & \operatorname{argmin}_x \|D_1 x\|_1 \\ & \text{subjected to: } \|y - x\|_2 \leq r \end{aligned} \quad (10)$$

2 参数选择

从式(9)看,通过优化实现降噪共涉及两个分量,前者是逼真度约束,后者为总变差项。 λ 用来调整权重,若 λ 为0,则总变差项完全没有起到惩罚作用,求得的信号 x 等于原信号 y ;反之,若 λ 趋向无穷大,则完全是总变差惩罚项起主导作用,求得的信号 x 会尽可能地满足总变差项很小,但逼真度就会很差,可能偏离原先信号很远,甚至无法体现原信号 x 的基本结构,没法取得消除噪音的效果。所以 λ 参数选择对降噪结果影响非常大,但是却有很好的参数选择方法。

如图1所示,参数设置对降噪后信号的信噪比(SNR)影响很大。 λ 过大会造成过分降噪,降噪后信号峭度过大,信号细节被删掉。 λ 过小,会造成降噪不足。如何评价降噪效果,在信号逼真度约束和降噪方面达到平衡,进而指导参数 λ 选择是一个难题。

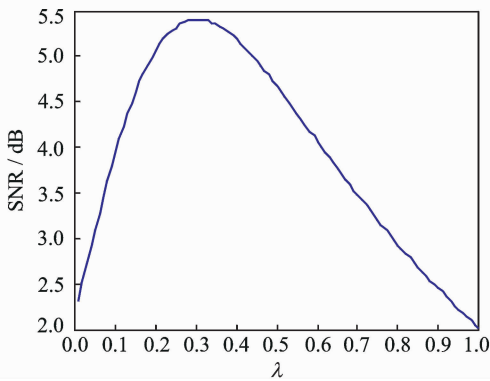


图1 降噪后信噪比随 λ 变化情况

Fig. 1 The SNR of denoised signal changes with λ

为了解决参数 λ 选择的难题,笔者提出基于峭度指标 K_index 和互相关系数 C_index 的加权峭度 $^{[9]}$ 指标 KC_index 作为降噪综合结果的衡量指标。峭度、互相关系数和加权峭度表达式分别如式(11)~式(13)所示。对于机械振动信号而言,尤其是用于故障检测而采集的带有冲击性振动信号,降噪后信号的峭度会增大。如果单纯用最大化 K_index 作为衡量降噪的指标,可能会过分降噪而造成只有尖峰没有其他信号成分的现象发生。 C_index 部分保证降噪前后的信号有一定的相似性,

以平衡过分追求峭度最大化。

笔者提出的参数选择方法,既保证降噪后信号峭度尽可能大,同时又要考虑降噪前后信号的相似性,从而在信号逼真度约束和降噪方面达到平衡。其具体方法如下:首先,预估计信号中噪声的标准差(σ);然后,在 $0.1\sigma \sim 10\sigma$ 的范围内,搜寻使得 C_index 最大的值,作为 λ 。这样选择的 λ ,可以在信号逼真度约束和降噪方面达到相对平衡。

$$K_index = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (xi - \bar{x})^4}{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (xi - \bar{x})^2)^2} \quad (11)$$

$$C_index = \frac{\operatorname{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E((x - \bar{x})(y - \bar{y}))}{\sigma_x \sigma_y} \quad (12)$$

$$KC_index = K_index \times |C_index|^r \quad (13)$$

其中: r 为可调整实数,用于在信号逼真度约束和降噪方面寻求平衡。

r 取高值会增大信号逼真度约束,从而保证信号与输入信号的相似性,可以避免过分降噪后信号峭度过大且不光滑。本研究中 r 取1.5。

3 仿真信号验证

为验证该降噪方法的有效性,构造一个仿真信号对其进行验证。仿真信号采用周期性的冲击信号与高斯白噪声的叠加,采样频率为12 kHz,数据点数为2 048。其中单个脉冲激励引起的衰减振动为

$$y(t) = y_0 e^{-\xi \omega_n t} \sin \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} t \quad (14)$$

其中: ω_n 为固有振动角频率; $y_0 = 5$; $\xi = 0.1$,模拟的是轴承外圈单个损伤点故障情况下的振动信号。

如图2(a)所示,采样点个数为1 024个。在纯仿真故障信号上分别再加上不同方差的高斯白噪声作为待分析的降噪前信号,如图2(b)~(d)所示。

为了测试加权峭度指标法对选择 λ 参数的有效性,在不同信号方差的噪声情况下,降噪性能如图3所示。黑色虚线为降噪前信噪比,红色粗点划线为总变差降噪方法所能达到的最佳信噪比,蓝色细实线为用笔者提出的 λ 参数选择法降噪后的信噪比。从图中可以看出加权峭度指标法对选择 λ 参数的有效性,能达到较理想的降噪效果。

在仿真故障产生的冲击信号基础上,再加上不同方差(0.01~0.25)的高斯白噪声作为待分析的降噪前信号,通过总变差降噪方法和常用的小波阈值降噪(启发式阈值、固定阈值)方法,得到降噪后信噪

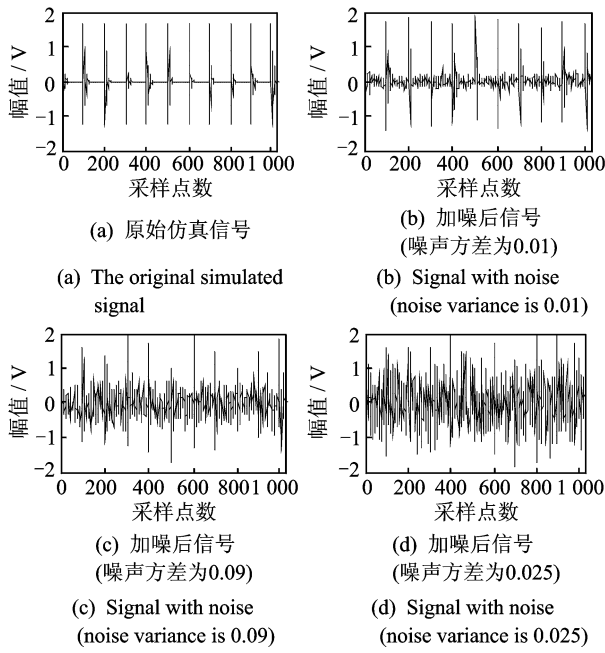


图 2 仿真信号及其加入噪声后的信号

Fig. 2 Simulated signal and signal after adding noise

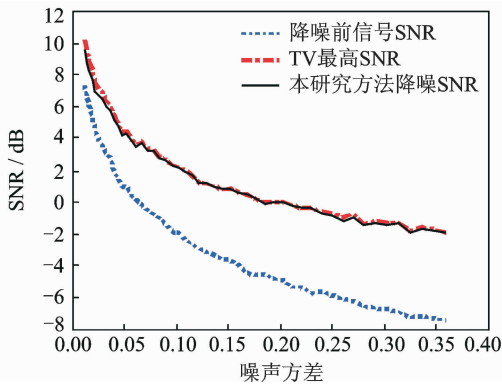


图 3 不同噪声方差信号降噪前后信噪比变化情况

Fig. 3 SNR of signal before and after denoising with different noise variance

比信息如表 1 所示。由表 1 可以看出,笔者提出的总变差降噪方法略优于小波阈值降噪方法。噪声方差为 0.04 时,经过不同方法得到降噪后信号如图 4 所示。

表 1 不同方法降噪后的信噪比

Tab. 1 The SNR of different methods of noise reduction

噪声方差	降噪前信噪比	不同方法降噪后信噪比		
		本研究方法	启发式阈值	固定阈值
0.01	8.083 4	10.740 8	9.593 0	4.050 0
0.04	2.103 0	5.537 9	5.123 4	2.089 9
0.09	-1.365 0	2.481 3	3.871 9	0.845 7
0.16	-4.050 4	0.445 8	-0.005 4	-0.142 0
0.25	-5.972 8	-0.062 5	-0.472 5	-0.540 1

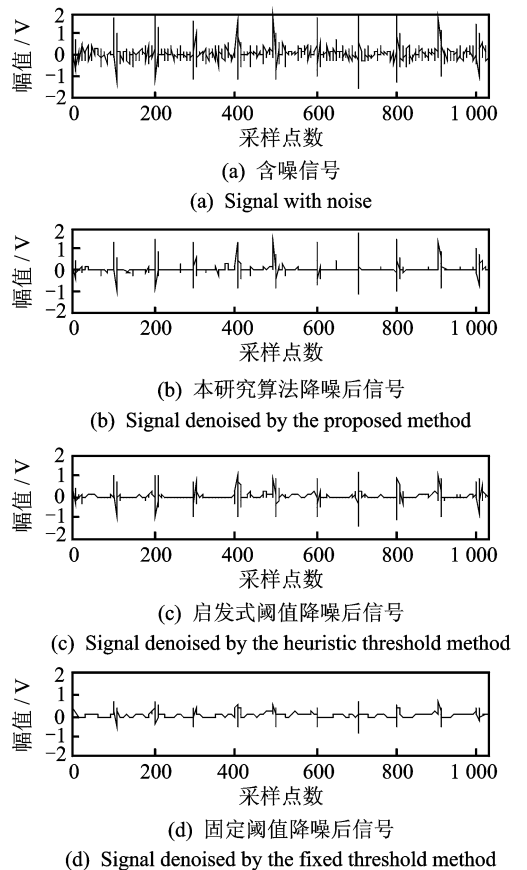


图 4 不同方法降噪结果对比

Fig. 4 The de-noised results by different methods

4 实测信号验证

本实验数据来源于电机实验台采集的振动信号,实验台如图 5 所示。传感器采用 IMI(industrial monitoring instrumentation)公司的加速度传感器(型号为 603C01),灵敏度为 100 mV/g,采样频率为 10 kHz,选取 8 192 个采样数据进行分析。电机中滚动轴承的型号为 NSK 6203 型深沟球轴承,轴承的内径为 17 mm,外径为 40 mm,厚度为 12 mm,节径为 29 mm,滚动体直径为 6.7 mm,滚动体数目为 8 个,接触角为 0°。在滚动轴承内外圈用电火花加工出小槽模拟轴承外圈裂纹故障。轴承转频为 30 Hz,经计算外圈故障频率约为 91 Hz。

图 6(a)为外圈故障下所测振动信号,故障信号非常微弱,已经基本上被噪声所淹没,时域图无法区分故障的存在和故障模式。图 6(c),(d)分别为启发式、固定式小波阈值降噪后的信号,从直观上看已经扭曲,丢失了很多故障引起的冲击信息。图 6(b)采用本研究总变差降噪(TVD)方法,降噪效果相对较好。

对图 6(b)~(d) 分别进行平方包络分析,如



图5 电机故障实验台

Fig. 5 Experimental setup for motor fault

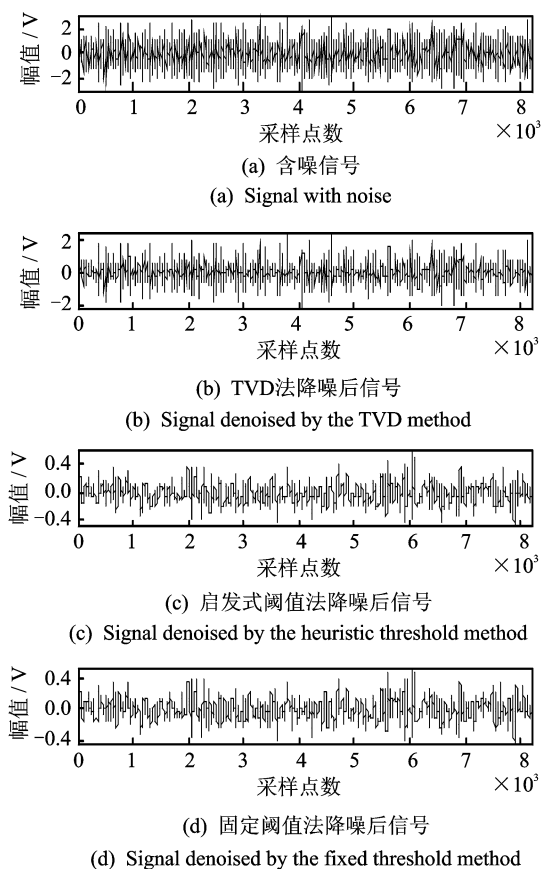


图6 外圈故障振动信号去噪结果对比

Fig. 6 Signal with outer race fault and the denoised signal by different methods

图7(a)~(c)所示。从小波阈值降噪后的信号包络图7(b)、图7(c)无法得到故障信息。图7(a)为采用总变差降噪(TVD)后信号的包络频谱,图中清楚地显示出91 Hz和182 Hz处存在峰值,正好对应1倍和2倍的电机的轴承外圈故障特征频率,意味着外圈存在缺陷。

5 结论

1) 对机械故障诊断和运行状态监控而言,振动

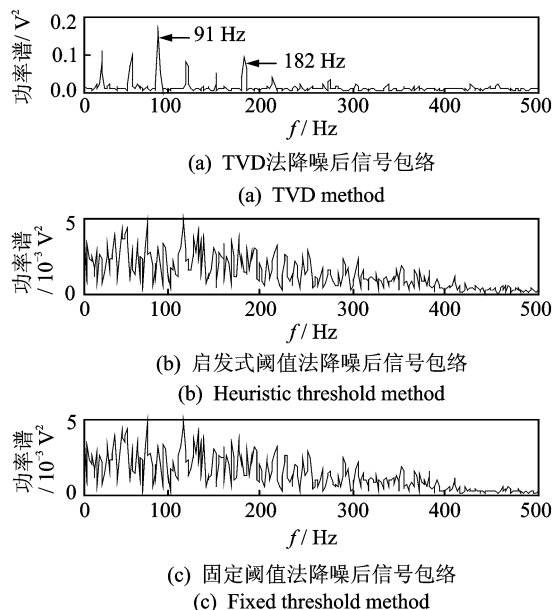


图7 去噪后外圈信号的包络分析结果对比

Fig. 7 The envelopes analysis of the de-noised signals with outer race fault

信号的降噪对表征故障信息非常重要,特别是早期故障或强噪声背景下弱信号的分析。

2) 笔者把图像处理中的总变差降噪方法引入振动信号处理,提出了基于峭度和互相关系数的 λ 选择方法,该方法可以很好地提高信噪比,为正确识别故障特征提供了有力的保证。

3) 通过仿真实验和轴承振动信号降噪实验说明所提出的总变差降噪方法略优于小波阈值降噪方法。

4) 总变差方法在图像处理中的应用非常广泛、成功,但是在一维信号下的研究刚刚开始,如何选择 λ 参数,怎样利用高阶微分信息优化降噪算法都是需要进一步研究的内容。

参 考 文 献

- [1] 周晓峰,杨世锡,甘春标. 一种旋转机械振动信号的盲源分离消噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(5): 714-717.
Zhou Xiaofeng, Yang Shixi, Gan Chunbiao. Denoising vibration signal of rotating machinery [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(5): 714-717. (in Chinese)
- [2] 严鹏,李乔,单德山. 斜拉桥健康监测信号改进小波相关降噪[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2): 317-322.
Yan Peng, Li Qiao, Shan Deshan. Improved wavelet

- correlation de-noising on cable-stayed bridge health monitoring signal [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(2): 317-322. (in Chinese)
- [3] 姜宏伟,袁朝辉,邱雷. 运用小波变换的飞机管路振动信号降噪方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32(5): 827-830.
Jiang Hongwei, Yuan Zhaohui, Qiu Lei. Wavelet transform based de-noising method on pipe vibration signals of aircraft [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(5): 827-830. (in Chinese)
- [4] 刘文艺,汤宝平,蒋永华. 一种自适应小波消噪方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(1): 74-77.
Liu Wenyi, Tang Baoping, Jiang Yonghua. Research on an adaptive wavelet denoising method [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(1): 74-77. (in Chinese)
- [5] 隋文涛,张丹. 基于峭度的阈值降噪方法及在振动信号分析中应用[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(7): 155-158.
Sui Wentao, Zhang Dan. Kurtosis-based threshold denoising method and its application in vibration signal analysis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(7): 155-158. (in Chinese)
- [6] 陈仁祥,汤宝平,吕中亮. 基于相关系数的 EEMD 转子振动信号降噪方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32(4): 542-546.
Chen Renxiang, Tang Baoping, Lü Zhongliang. Rotor vibration signal denoising method based on correlation coefficient [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(4): 542-546. (in Chinese)
- [7] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. *Physica D*, 1992, 60: 259-268.
- [8] 王丽艳,韦志辉,罗守华. 总变差正则化断层图像重建的解耦 Bregman 迭代算法[J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(3): 357-363.
Wang Liyan, Wei Zhihui, Luo Shouhua. Impact signal detection method with adaptive stochastic resonance [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(3): 357-363. (in Chinese)
- [9] Ning Xiaoran, Selesnick I W. ECG enhancement and QRS detection based on sparse derivatives [J]. *Bio-medical Signal Processing and Control*, 2013, 8: 713-723.
- [10] Laurent C, A direct algorithm for 1d total variation denoising [J]. *Signal Processing Letters*, 2013, 20(11): 1054-1057.
- [11] 谭继勇,陈雪峰,何正嘉. 冲击信号的随机共振自适应检测方法[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(23): 61-67.
Tan Jiyong, Chen Xuefeng, He Zhengjia. Impact signal detection method with adaptive stochastic resonance [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(23): 61-67. (in Chinese)



第一作者简介:隋文涛,男,1977年8月生,博士、副教授。主要研究方向为故障诊断和信号处理。曾发表《基于模拟退火与LSSVM的轴承故障诊断》(《振动、测试与诊断》2010年第30卷第2期)等论文。

E-mail: suiwt@163.com