

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.019

簸箕型流道泵站水泵振动信号消噪方法研究

李彦迪¹, 王昱²

(1. 宁夏固海扬水管理处, 宁夏 中宁 755199; 2. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:为解决水泵信号振源复杂、含噪量大,难以在信号内获得有效数据的问题,研究一种基于改进平移不变量小波阈值的振动信号消噪方法。将水泵振动信号划分为信号高频区域和低频区域,选取对应合适的小波范围,在小波分解层数作用下正交变换含噪信号。利用阈值限制小波系数完成滤波,通过设定噪声标准偏差值,求得振动信号小波系数中间值,实现信号重构。将振动信号含噪部分在时域空间完成循环平移,填补信号不连续缺陷部位,平移去噪后计算振动信号平均值,得到最终消噪振动信号。仿真分析结果显示:该方法在平移不变量的辅助下,可填补信号不连续缺陷点,从噪声中恢复出原始振动信号,波形的失真较小,信号信噪比较高,鲁棒性好,可完整地保存信号的轮廓和特征。为分析簸箕型进水流道内部流态提供新思路,保证水泵整体工作可靠性。

关键词:振动信号消噪;水泵振动;小波系数;正交变换;平移不变量

中图分类号:TH38 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)05-0092-05

Study on Noise Elimination Method of Pump Vibration Signal in Pumping Station with Dustpan Channel

LI Yandi¹, WANG Yu²

(1. Ningxia Guhai Water Pumping Management Office, Zhongning 755199, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To cope with the complexity of vibration sources, large quantity of noise content and difficulty in obtaining the effective data of pump signal, a vibration signal denoising method based on improved translation invariant Langmuir wavelet threshold is studied. The pump vibration signal is divided into high frequency region and low frequency region, the corresponding appropriate wavelet range is selected, and the noisy signal is transformed orthogonally under the effect of wavelet decomposition levels. The simulation results show that the method, with the help of translation invariants, can remedy the discontinuous defect points of the signal, recover the original vibration signal from the noise, and obtain small waveform distortion, high signal signal-to-noise ratio, good robustness and fully preserved contour and characteristics of the signal, which provides a new idea for analyzing the internal flow pattern of dustpan type inlet passage and ensures the overall working reliability of pump.

Keywords: vibration signal denoising; pump vibration; wavelet coefficient; orthogonal transform; translation invariant

0 引言

泵站进水流道主要功能是将进水池中的水引向进口处,流道的设计形态对进水速度及水利损失等因素均会产生影响,在流道中运动的水力性能最终会直接影响水泵的性能。簸箕型进水流道的点位较低,相对于其他形态的流道而言,线形简单更方便施工,不仅可以有效防止水流涡带的产生,同时可以使进水的水流流态保持良好状态,水流均匀分布在水泵叶轮处的断面上,保持水泵的高效运行状态,使之达到更高的工作效率。

由于水泵的结构相对复杂,一旦发生故障,维

修难度较大,因此通常需要对水泵的振动信号进行检测。引起水泵振动的因素和源头也相对较多,采集振动信号时很可能受到各类自然噪声的干扰,影响对水泵故障的准确判断。噪声严重时甚至无法分辨和诊断信号。因此采集到水泵的振动信号后,必须要进行相应的降噪处理。杨旭等^[1]研究出的小波熵粒子群优化算法,将未知的参数加入到小波阈值函数中,对小波阈值进行自适应优化,迭代求得最佳小波阈值,并对其进行了噪声分析,利用优化阈值将噪声从信号中去除掉;刘玉桥等^[2]研究了一种小波联合变分模态分解法,通过变分模态分解将振动信号中的高频信号

第一作者简介:李彦迪(1977—),女,宁夏中宁人,高级工程师,本科,研究方向为大型扬水工程泵站机电技术及运行管理等,dudui726483631@163.com。

和低频信号有效区分,得到各自对应的模态分量,先对高频噪声进行去噪处理,再将得出的去噪信号与低频信号实现信号重构,从而完成噪声的去除。但这两种方法并未考虑到信号经过去噪可能存在不连续的缺陷问题,因此去噪效果并不十分理想。

对小波阈值方法进行改进,结合软硬阈值的优点,有效保留了信号的边缘特征,增强信号形状特征。阈值去噪后,利用平移不变量原则针对信号中存在的不连续现象,继续完成信号缺陷填补,很好地保留了信号的完整性和连续性。

1 改进平移不变量小波阈值法下振动信号降噪

1.1 振动噪声信号预处理

采集簸箕型流道泵上的振动信号,其包含的噪声属于不平稳信号,利用振动信号模型描述该噪声为

$$s(i) = f(i) + \sigma e(i) \quad (1)$$

式中: $f(i)$ 为流道泵的原始振动信号; $e(i)$ 为通常状态下的高斯白噪声; σ 为振动信号内噪声的标准偏差; $s(i)$ 为最终输出的含噪振动信号, $i = 0, 1, \dots, N-1, N$ 为信号长度。

在对簸箕型流道泵振动信号进行实际采集的过程中,通常情况下有用信号一般在信号的低频或是较为平稳的信号区域,噪声则是出现在信号的高频区域^[3]。为了能够从含噪信号 $s(i)$ 中提取出流道泵原始振动信号 $f(i)$, 需要进行信号处理。

1) 在对包含噪声的振动信号进行小波变换之前,首先选择适当的小波和相应的小波分解层数 j , 对噪声信号进行正交变换,再进行含噪信号的正交变换,函数计算过程如下:

$$\begin{cases} c_{j,k} = \sum_l c_{j-1,l} h_{l-2k} \\ d_{j,k} = \sum_l d_{j-1,l} g_{l-2k} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $c_{j,k}$ 为经过正交小波变换后得到的小波尺度系数; $d_{j,k}$ 为变换后得到的各层小波系数; h, g 为互相之间为正交滤波器的两个组件, $k = 0, 1, \dots, N-1$ 。

2) 对含噪信号每层中的小波系数 $d_{j,k}$ 进行阈值限制^[4-5], 在阈值约束下,小波系数被标记为 $\hat{d}_{j,k}$ 。

3) 利用振动信号小波分解后的第 j 层对应尺度系数,结合阈值限制处理剩余各层对应的小波

系数,重新构建含噪信号,这时可以得到降噪后的普通信号,此时含噪信号 $s(i)$ 的降噪处理过程如下:

$$c_{j-1,k} = \sum_l c_{j,l} h_{k-2l} + \sum_l d_{j,l} g_{k-2l} \quad (3)$$

式中 l 为普通信号噪声空间长度。

1.2 小波变换阈值函数改进算法

小波变换的阈值函数包含硬阈值和软阈值两种,它们的表达式分别为:

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} d_{j,k}, & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k}) (|d_{j,k}| - \lambda), & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N}$ 为函数变换阈值^[6], $i = 1, 2, \dots, j$, 具体的层数大小由小波阈值的真实降噪效果决定。振动信号内噪声的标准偏差 σ 利用第 i 层小波系数 $d_{i,k}$ 来估计,具体可表示为

$$\sigma = (\text{median } |d_{i,k}|) / 0.6745 \quad (6)$$

式中 $\text{median } |d_{i,k}|$ 为选择含噪振动信号第 i 层中所有小波系数 $d_{i,k}$ 幅值的中间值^[7]。

这两种函数有各自的优缺点,硬门限函数能较好地保留振动信号中的局部特征,但是在进行滤波消噪时会发生轻微的畸变现象,使滤波后的噪声信号变得比较平稳,同时若经过软门限函数滤波后的信号太平滑,会导致信号的边缘模糊性,从而影响信号的准确度。本文综合考虑这两种阈值函数的优缺点,研究出一种改进后的阈值函数,结合了上述两种函数优点,其表达式为

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} d_{j,k} - 0.5 \frac{\lambda^m k}{d_{j,k}^{m-1}} + (K-1)\lambda, & d_{j,k} > \lambda \\ 0.5 \frac{|d_{j,k}|^n K}{\lambda^{n-1}} \text{sign}(d_{j,k}), & |d_{j,k}| \leq \lambda \\ d_{j,k} + 0.5 \frac{(-\lambda)^m K}{d_{j,k}^{m-1}} - (K-1)\lambda, & d_{j,k} < -\lambda \end{cases} \quad (7)$$

式中 K, m, n 均为改进阈值函数的调节因子^[8], 可以有效地增强阈值函数的灵活性。其中 m, n 两个调节因子主要决定函数的具体形状, K 的取值范围在 $0 \sim 1$ 之间, 主要决定小波阈值的逼近程度^[9]。逼近于 0 时函数趋近于软阈值; 逼近于 1 时函数趋近于硬阈值。 K 值的具体取值变化根据振动信号的降噪效果来决定, 这样不仅可以结合软阈值函数和硬阈值函数的优点, 同时可以有效地减少二者的缺陷影响。

1.3 平移不变量小波阈值去噪法

为使振动信号在去除噪声后,节点依旧保持连续完整性,通过平移不变量小波去噪法,可以有效地避免信号去噪后的间断现象,减少原始振动信号和去噪估计信号之间存在的方均根误差值,通过提高振动信号的信噪比,达到更好的消除噪声效果。

将含有噪声的振动信号进行位置平移,使其定位发生变化,并根据平移后的噪声信号进行相应的阈值降噪,在降噪之后,将该信号反转,使该信号恢复到原来的状态。

设定 $s(i), i=0, 1, \dots, n-1$ 为输入的含噪振动信号,利用 S_h 表示振动信号 s 在时域空间循环完成平移距离 h 的对应算子,此时得到的平移信号可表示为

$$(S_h(x))_i = s_{(i+h) \bmod n} \quad (8)$$

T 为振动信号进行的小波阈值去噪处理过程,这时去噪后的振动信号表示为 $T(S_h(s))$,将去除噪声后的振动信号反向循环平移距离 h ,最终得到去除噪声后的原始振动信号 $S_{-h}(T(S_h(s)))$ 。上述操作建立在正交小波变换平移不变量的函数特性基础上。

以上描述的是信号中存在个别不连续的情况,若是在去噪过程中发现振动信号内包含若干个连续性位置缺陷点,这时可能出现一个缺陷点在经过最佳平移填补后,导致另外一个不连续的缺陷点位移到最差位置,为了避免这类问题的发生,本文在研究平移不变量去噪方法时,通过 n 次循环平移来弥补,并在每次完成平移去噪后,对得到的振动信号结果进行平均化处理,以此实现平移不变量小波阈值去噪法。

针对含噪振动信号 x ,经过 n 次循环平移填补去噪后,表示为

$$\bar{T}(s; (S_h)_{h \in H_n}) = \text{Ave}_{h \in H_n} S_{-h}(T(S_h(s))) \quad (9)$$

式中: $H_n = \{h | 0 \leq h < n\}$; Ave 表示平均算法。

基于改进阈值的平移不变量去噪法的流道水泵振动信号去噪流程如图 1 所示。

1.4 簸箕型流道泵站水泵振动信号消噪方法

为了更好地消除簸箕型流道泵的振动噪声信号,将改进后的小波阈值法与平移不变量法结合起来处理水泵振动信号,平移不变量法可以有效解决信号中包含断点的情况,而这一现象的产生与振动信号不连续缺陷点的所在位置有关,需要依靠小波基元素的信号特征能够精确对准,利用平

移不变量法将改进后的小波阈值去噪信号进行位置平移,改变信号中不连续点的具体位置,避免振动信号中产生伪吉布斯现象。

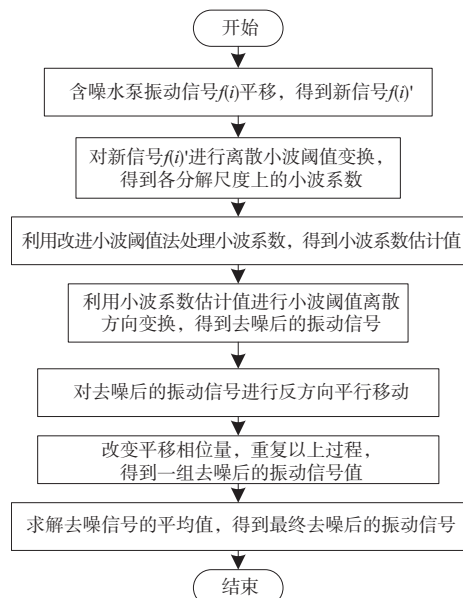


图 1 流道水泵振动信号去噪流程

具体信号消噪过程如下:

- 1) 对水泵含噪振动信号 $f(i)$ 进行向左或向右的 h 位统一循环平移;
- 2) 振动信号经过平行移动后,对其进行小波的离散阈值变换,通过函数计算可以得到各个尺度下的小波系数值^[10];
- 3) 通过改进后的小波阈值统一处理得到的小波系数;
- 4) 利用离散函数重新构建量化处理后的小波系数;
- 5) 将重构后的振动信号小波系数进行 h 位反方向平移,将其与平移后其他位置的重构信号结合求解平均值,最终获得水泵的去噪振动信号。

当振动信号满足 $f_i(0 \leq i \leq N)$,将平移位 h 设定为固定值 1,去噪的整体过程为

$$\bar{T}(f, S_h) = \text{Ave} S_{-k}(T(S_h(f))) \quad (10)$$

式中 $\bar{T}(f, S_h)$ 是振动信号经过平移—消噪—反方向平移—求平均值的过程,最终可以得到水泵振动信号消噪后的基础信号。

2 仿真实验

为了有效检验本文所研究的振动信号噪声消除方法的应用性能,与小波熵粒子群优化算法、小波联合变分模态分解法对比进行信号消噪实验。

在 virtual reality platform 环境中搭建理想的计算机仿真平台,并通过多次更改转差分系数的方式,对实验监测信号进行采样,得出多组实验数据。设置实验参数,如表 1 所示。

表 1 实验参数

参数名称	数值
背景环境	virtual reality platform
操作平台配置	Windows VM(硬件)+ VMware Workstation Pro(软件)
实验时间/min	10
转差分系数	0.40~0.44
理想噪声干扰量极值/dB	7.2×10^7
理想相位消除比特率极值/%	75~80

在实验过程中,利用数学模型高度模拟簸箕型流道水泵的振动信号,模拟出水泵不含噪声真实信号如图 2 所示。给实验模拟信号添加一定信噪比的高斯白噪声,将添加噪声信噪比设定在 10 dB,含噪声振动信号如图 3 所示。

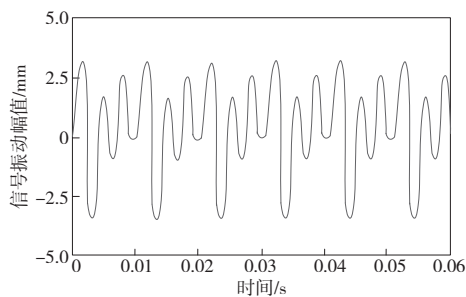


图 2 不含噪声真实信号

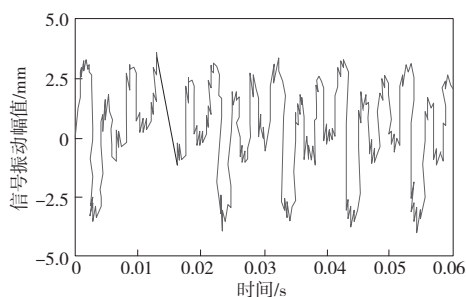


图 3 含噪声振动信号

从图 3 中可以看出,经过人为噪声影响后的振动信号,波形呈现不规则状态。

此时利用 3 种不同方法对含噪振动信号进行噪声去除处理,去噪后信号如图 4、图 5、图 6 所示。

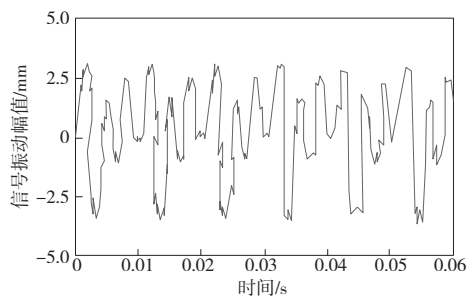


图 4 小波熵粒子群优化算法去噪后信号

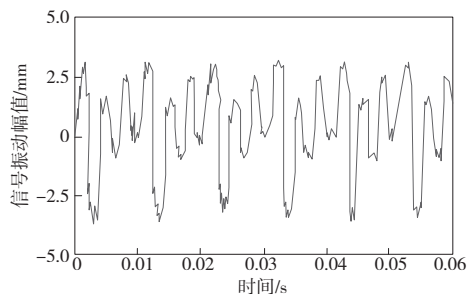


图 5 小波联合变分模态分解法去噪后信号

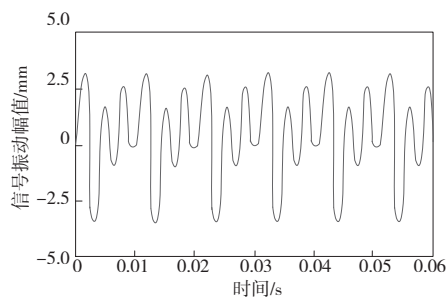


图 6 本文方法去噪后信号

从图 4 中利用小波熵粒子群优化算法进行信号降噪后的波形图来看,算法对振动信号的降噪效果并不理想,滤波后的波形图无法很好地反映出原始振动信号的震动频率和特征;从图 5 中可以看出,小波联合变分模态分解法进行信号降噪滤波后,消除了部分脉冲噪声,但高斯白噪声对信号产生的波形变动依然存在;根据图 6 可以看出,本文方法可以有效利用改进后的小波阈值变换法,完整地保存信号的轮廓和特征,在平移不变量的辅助下,填补信号不连续缺陷点,从噪声中恢复出原始振动信号,波形的失真情况较小。

经过软门限函数滤波后的实验信号如图 7 所示。图 7 中,处理后的振动信号平滑程度较低,不存在信号的边缘模糊性,说明结合软阈值函数和硬阈值函数的优点后,小波阈值的逼近程度合适,簸箕型流道泵站水泵振动信号分析过程较为完整

与稳定。

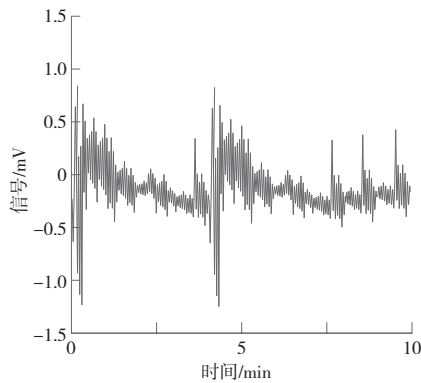


图7 振动信号的软门限函数滤波结果

通过具体的量化数值比较和评价3种不同方法具体的消噪水平,利用信噪比来评估方法的降噪效果,信噪比的具体计算过程如下:

$$R_{sn} = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n s^2(i)}{\sum_{i=1}^n (s(i) - \hat{s}(i))^2} \right) \quad (11)$$

式中 $\hat{s}(i)$ 为经过各方法滤波后输出的信号。此时3种方法去噪后信噪比如表2所示。

表2 3种方法去噪后信噪比 单位: dB

去噪方法	R_{sn}
小波熵粒子群优化算法	19.76
小波联合变分模态分解法	21.38
本文方法	26.87

从表2中可以看出,相较于小波熵粒子群优化算法和小波联合变分模态分解法,本文所提方法的信噪比更高。

综上所述,去噪后的振动信号依旧可以反映出原始振动信号的振动频率和特征,完整地保存信号的轮廓和特征,振动信号平滑程度较低,且信噪比更高,存在优势之处,关键在于在保证了增强阈值函数的灵活性情况下,应用硬阈值和软阈值减少了畸变现象,可以反复匹配时域空间,循环完成平移距离的对应算子,应用平移不变量小波阈值去噪法,避免另外一个不连续的缺陷点位移到最差位置,振动信号去噪效果更好。

3 结语

簸箕型流道泵站水泵振动信号消噪方法能够有效去除信号中掺杂的噪声。通过改进后的平移不变量小波阈值法,有效地将软阈值法和硬阈值法的优点结合,减少信号失真或是过于平滑的问题;在平移不变量方法的作用下,避免了振动信号出现不连续和信号缺陷的问题,滤波后的信号与原始振动信号相似度高,对真实信号的还原度较高。

参考文献:

- [1] 杨旭,邱明,陈立海,等. 基于 PSO-RWE 的自适应小波阈值函数滚动轴承振动信号去噪方法[J]. 航空动力学报,2020,35(11):2339-2347.
- [2] 刘玉桥,邓红卫,吴路波,等. 基于 VMD 联合小波阈值去噪法的微震监测信号去噪研究[J]. 矿业研究与开发,2020,40(2):98-103.
- [3] 赵斌,张闯,李隆,等. 电力变压器振动检测装置设计及振动信号去噪方法研究[J]. 电测与仪表,2021,58(8):118-124.
- [4] 郭震,李晓斌,于天洋,等. 基于改进 VMD 的高炉开口机振动信号降噪方法[J]. 机械设计与研究,2020,36(5):174-179.
- [5] 牟雪姣,李怀良,庾先国. 一种改进小波阈值降噪算法及其仿真研究[J]. 自动化仪表,2020,41(8):46-50.
- [6] 尚秋峰,巩彪. 基于 BOTDA 的海缆监测系统振动信号降噪方法研究[J]. 半导体光电,2021,42(5):760-766.
- [7] 党建,李骥,贾嵘,等. 基于 EMD 连续几何分布的水电机组振动信号降噪[J]. 水力发电学报,2020,39(4):46-54.
- [8] 纪俊卿,张亚靓,孟祥川,等. 自适应小波阈值滚动轴承故障振动信号降噪方法[J]. 哈尔滨理工大学学报,2021,26(2):124-130.
- [9] 杨秋玉,阮江军,庄志坚,等. 高压断路器机械振动信号的参数自适应降噪方法[J]. 高电压技术,2021,47(12):4274-4287.
- [10] 赵寿生,汪卫国,王丰华,等. 基于统计特征与 EMD 算法的有载分接开关振动信号去噪[J]. 电工电能新技术,2020,39(1):51-58.

收稿日期:2023-02-27