

大型泵站水泵机组振动信号滤波方法

唐荣桂¹, 邵知宇², 樊锦川³, 张 炜², 唐鸿儒²

(1. 江苏省农村水利科技发展中心, 江苏 南京 210029;
2. 扬州大学电气与能源动力工程学院 江苏 扬州 225009; 3. 江苏泰州引江河管理处, 江苏 泰州 225321)

摘要:针对大型泵站水泵机组运行时振动信号易受多种因素影响产生随机误差、噪声干扰,进而影响机组健康状态评价结果的问题,对水泵机组振动信号滤波方法进行分析研究。以南水北调东线某泵站水泵机组运行时机泵联轴器处的振动信号为例,分别使用巴特沃斯滤波器、基于汉宁窗的 FIR 滤波器以及基于谐波小波的滤波器 3 种滤波方法对水泵机组振动信号进行滤波处理并进行对比分析。结果表明:巴特沃斯滤波器和基于汉宁窗的 FIR 滤波结果中存在时域波形的时延和轴心轨迹的连线,滤波不完全,而基于谐波小波的滤波几乎能够完全滤除干扰;对于特定频段的滤波,基于谐波小波的滤波在频段范围比较小的时候优势更加明显。

关键词:水泵机组;大型泵站;振动信号处理;滤波方法;谐波小波

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2022)03-0086-04

Vibration signal filtering method of pump unit in a large pumping station//TANG Ronggui¹, SHAO Zhiyu², FAN Jinchuan³, ZHANG Wei², TANG Hongru²(1. Rural Water Conservancy Development Center of Jiangsu, Nanjing 210029, China; 2. College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. Taizhou Yinyang Canal Administration of Jiangsu, Taizhou 225321, China)

Abstract: Aiming at the problem that the vibration signal of pump unit is susceptible to random error and noise interference caused by various factors, which affects the evaluation result of the health status of pump unit, the filtering methods of vibration signal of pump unit were analyzed and studied. Taking the vibration signal at the pump coupling of a pumping station from the East Route of the South-to-North Water Transfer Project as an example, filtering methods based on Batworth, Hanning window, and harmonic wavelet were used to filter the vibration signal of the pump unit. The comparative analysis results show that there are time delay and line of axis trajectory in the FIR results of filtering methods based on Batworth and Hanning window, indicating incomplete filtering, while the harmonic wavelet filtering can almost completely filter out the interference. The advantages of harmonic wavelet filtering are more obvious when the frequency range is smaller for a certain frequency band.

Key words: water pump unit; large pumping station; vibration signal processing; filtering method; harmonic wavelet

水泵机组是水利枢纽工程的核心设备,其运行时的振动信号是反映设备健康状态的核心指标。引起水泵机组振动的因素主要包括转子、主电机输出轴和水泵轴不对中、叶轮碰磨泵壳、水流紊乱、电磁不平衡等^[1],这些原因引起的振动可以反映在振动信号的波形、频谱、轴心轨迹上。但是,泵站现场的主电动机(通常是 10 kV 左右的高压电源)、交流电动机、变频设备等可能形成电磁干扰,从而对测量振动的传感器微弱信号造成干扰^[2],因此采用滤波方法对泵站机组振动测量的信号进行抗干扰处理是关

键步骤。在此基础上,振动信号的极值、均值、趋势等可用于设备状态评价和评估,为实现智能泵站建设中的水泵机组预测性检修奠定基础。

经典数字滤波器滤波是水泵机组振动信号处理中最常用、最基本的方法,包括无限脉冲响应数字滤波器(IIR)和有限脉冲响应数字滤波器(FIR)^[3]。经典数字滤波器各有特点,如巴特沃斯滤波器在带通范围内具有非常平稳的幅值响应曲线,切比雪夫滤波器幅值响应具有较快的衰减速度。早期的水泵振动信号采集与监测系统大多采用经典数字滤波器

基金项目:江苏省科技重点研发项目(BE2015734);江苏省水利科技项目(2015016,2019063)
作者简介:唐荣桂(1963—),男,高级工程师,主要从事水利工程信息化和技术管理工作。E-mail:30607632@qq.com
通信作者:邵知宇(1992—),男,讲师,博士,主要从事人机交互与虚拟现实研究工作。E-mail:zhishushao@yzu.edu.cn

处理水泵机组信息,如刘亚峰等^[4-5]基于 LabView 的监测系统,骆寅等^[6]的基于无线传感网络的监测系统等。然而随着泵站机组设备的智能化、复杂化,在实际工况中,经典数字滤波器滤波结果的相位时延、滤波不彻底等带来的问题在泵站机组状态监测中越来越突出。因此,随着滤波器的发展,其他研究领域的各种现代滤波器越来越多地被应用于水泵机组信号处理中,其中基于小波分析的方法应用最为广泛。张飞^[7]较早对小波分析在水电机组状态监测与故障诊断中的应用进行了详细研究,并给出不同应用场景下的最佳小波基和阈值策略;潘天航等^[8]研究小波分析应用于某机组机架振动去噪时的参数优选方法;胡道达等^[9]针对机组振动的非线性和非平稳特征,引入小波包分型技术对机组常见故障类型进行了分析。近年来,基于谐波小波分析的方法也越来越多应用在旋转类机械故障诊断中,该方法以小波为基底进行线性转换^[10],结合了短时距傅立叶变换和连续小波转换两者的优点,具有严格的盒型特性^[11-12],解决了传统傅里叶变换不能用于非平稳信号、不能同时进行时频局部化分析等难题^[13],被大量应用在信号处理、模式识别等领域^[14]。

综上,各种传统或者现代的滤波方法各有其优点和不足,如何根据具体的工况环境和应用场景下水泵机组的振动、摆度等信号的特点,选取合适的滤波方法尤为关键。为了进一步确定具体工况和应用场景下更为合适的滤波方法,本文以南水北调东线某站水泵机组运行时机泵联轴器处的振动信号为例,分别使用几种典型的滤波方法进行数据预处理并对结果进行对比分析。

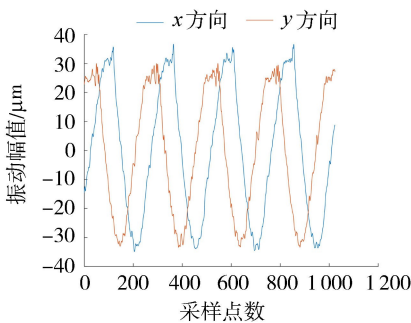
1 典型滤波器原理与设计

1.1 工程场景概况

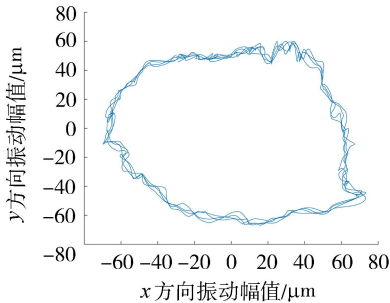
本文研究的泵站机组为立式全调节混流泵,10 kV同步电机功率为 3 400 kW,转速为 125 r/min,水泵叶轮直径为 2.95 m,设计扬程为 7.6 m,设计流量为 33.4 m³/s。已知水泵机组转速为 125 r/min,则机组振动信号的主频为 2.08 Hz,考虑叶轮、导叶等因素,水泵机组的主要振动信号的频率在 1~30 Hz 之间。干扰振动信号主要为电机电源的 50 Hz 交流电及其相关的谐波信号。机组状态监测系统采集的联轴器处 x 、 y 方向原始的振动信号波形和轴心轨迹见图 1,采样频率为 1 024 Hz。

1.2 滤波器原理与设计参数

分别采用巴特沃斯滤波器、基于汉宁窗的 FIR 滤波器、基于谐波小波滤波 3 种方法对同一组振动信号数据进行滤波处理,对比分析 3 种滤波方法的效果。



(a) x 、 y 方向振动信号



(b) 轴心轨迹

图1 联轴器处振动信号滤波前原始数据

1.2.1 基于巴特沃斯滤波器的信号滤波

IIR 数字滤波器的 N 阶差分方程如下^[3, 15]:

$$y(n) = \sum_{i=0}^M b_i x(n-i) + \sum_{i=1}^N a_i y(n-i) \quad (1)$$

式中: $x(n)$ 为巴特沃斯滤波器待滤波的序列; $y(n)$ 为巴特沃斯滤波器最终的滤波结果; a 、 b 为滤波器系数; M 为非递归滤波器的阶数; n 为序列长度。

差分方程中的各个参数通过设计巴特沃斯低通滤波器进行确定。为了克服泵站机组 50 Hz 交流电的干扰,选用巴特沃斯二阶低通滤波,截止频率选为 40 Hz。利用 matlab 滤波器设计工具确定滤波器参数 $a_1 = -1.8268$ 、 $a_2 = 0.8407$ 、 $b_0 = 0.0035$ 、 $b_1 = 0.0069$ 、 $b_2 = 0.0035$ 。

1.2.2 基于汉宁窗的 FIR 信号滤波

针对 IIR 数字滤波器存在不稳定和非线性相位的缺点,可以采用 FIR 滤波器。但是,为了克服 FIR 的采样序列是无限的特点,采用时域加窗的设计方法,通过有限长的窗函数序列截断理想滤波器的无限长序列,得到所期望的有限长 FIR 滤波器单位冲激响应,常用的窗口函数有矩形窗、三角窗、汉宁窗等。其中汉宁窗相当于三部分矩形窗频谱相加,可以使旁瓣互相抵消。采用汉宁窗函数滤波,可以使信号集中在主瓣,减小水泵机组振动中高频干扰和漏能。

根据泵站水泵机组数据特点,本文设计了基于汉宁窗的 FIR 数字低通滤波器,通带和阻带截止频率分别为 20 Hz 和 40 Hz。通过调用滤波器设计工具箱以及查表可得滤波器过渡带宽为 $\frac{5\pi}{128}$ 。阶数为

159,理想通带截止频率为 $\frac{15\pi}{256}$ 。

1.2.3 基于谐波小波的振动信号滤波

除了巴特沃斯 IIR 滤波器具有非线性相位延迟和基于汉宁窗的 FIR 滤波器具有线性相位延迟外,2 种滤波器的频域都有过渡带,且存在频谱泄露的可能。因此,Newland^[16] 提出了基于谐波小波的滤波方法,具有严格的盒型特性,使其能够无限细分截取任意频段的信号,其频域表示为

$$W(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi B} & \omega \in [2\pi p, 2\pi(p+B)] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其时域表示为

$$\omega(n) = \int_{2\pi p}^{2\pi(p+B)} \frac{1}{2\pi B} e^{j\omega n} d\omega = \frac{1}{2\pi B} \frac{e^{j2\pi(p+B)n} - e^{j2\pi pn}}{jn} \quad (3)$$

式中: $W(\omega)$ 为信号在频域内傅里叶变换的结果; ω 为角频率; p 为频段的起始频率; B 为带宽。

实际应用过程中,其原理是将需要滤波的序列 $x(n)$ 与谐波小波 $\omega(n)$ 在时域内的结果进行卷积,保留想要获得的频段:

$$y(n) = x(n) * \omega(n) = \sum_{m=0}^{N-1} \omega(m) x(n-m) \quad (4)$$

式中: $x(n)$ 为谐波小波滤波待滤波的序列; $y(n)$ 为谐波小波滤波最终的滤波结果。

根据泵站工程场景特点,水泵机组主要振动信号的频率在 1~30 Hz 之间,且需要排除来源于电机电源 50 Hz 交流电及其相关的谐波信号的干扰。因此,谐波小波的目标是保留 0~40 Hz 的信号,据此滤波器设计中可取 $p=0$ Hz, $B=40$ Hz。

2 滤波结果对比分析

由图 2 和图 3 可知,巴特沃斯滤波器对于机组振动信号具有较好的低通滤波效果,40 Hz 以上的噪声基本被滤除。但从图 2 中不难看出,联轴器处 x 、 y 方向的滤波结果存在非线性相位延迟的问题,且轴心轨迹图中存在到中心区域的连线,影响后续对机组运行状态的评价。

由图 4 和图 5 可知,基于汉宁窗的 FIR 滤波对 40 Hz 以上的噪声具有较好的滤除效果,但是和巴特沃斯滤波器类似,同样带来了相位时延。不同的是,基于汉宁窗的 FIR 滤波造成的延时是线性的,可以通过平移进行补偿。然而,该滤波器的阶数很高,计算量大,不适合实际工程应用。

由图 6 和图 7 可知,与前 2 种滤波方法相比,谐波小波频带的滤波效果更好,噪声滤除效果更加明显, x 、 y 方向滤波结果几乎不存在相位延时,无须额

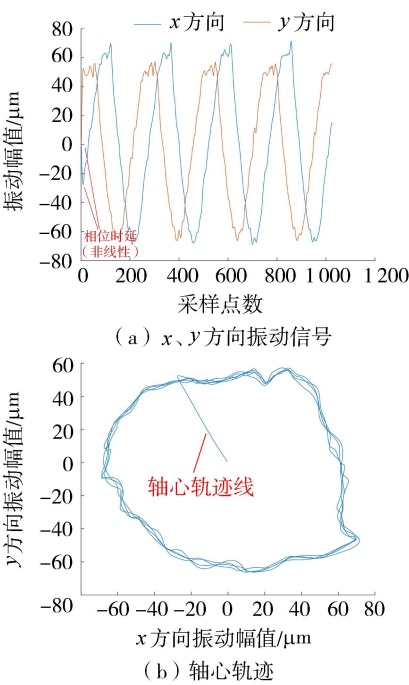


图 2 联轴器处振动信号巴特沃斯滤波结果

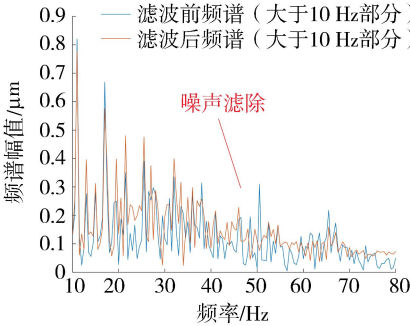


图 3 巴特沃斯滤波前后联轴器 y 方向频谱分析

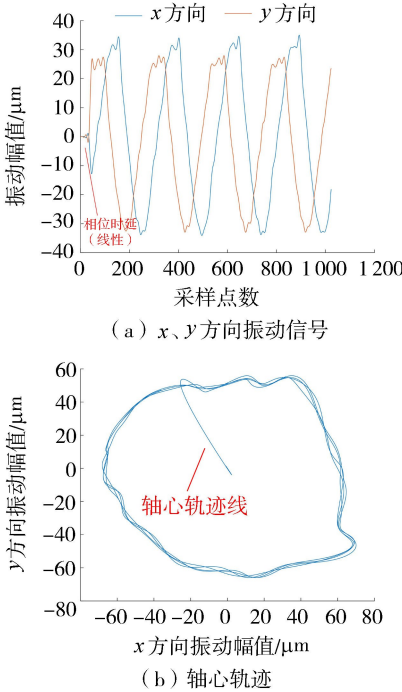


图 4 联轴器处振动信号基于汉宁窗的 FIR 滤波结果

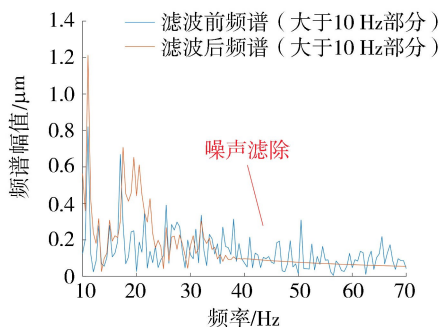


图5 基于汉宁窗的 FIR 滤波前后联轴器 y 方向频谱分析

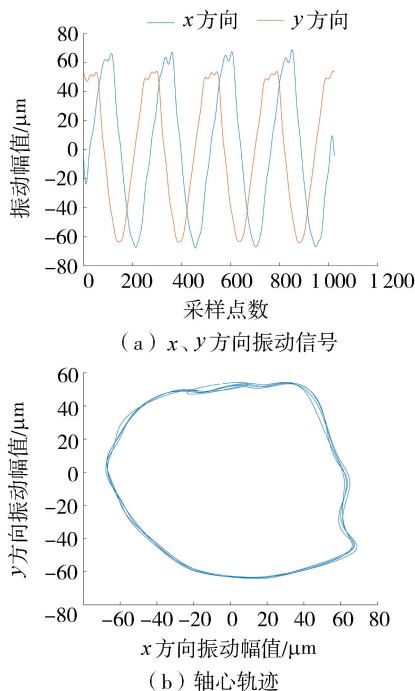


图6 联轴器处振动信号基于谐波小波滤波结果

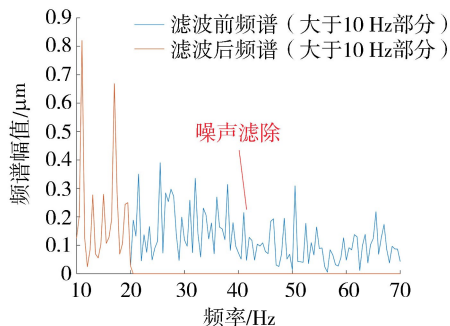


图7 基于谐波小波滤波前后联轴器 y 方向频谱分析

外矫正,轴心轨迹也不存在到中心区域的连线。频谱分析可知,谐波小波滤波的过渡带非常窄,几乎能够完全滤除噪声,保留有用信息。因此,基于谐波小波分析的滤波更加适合用来做水泵机组振动信号的预处理。

3 结 语

对巴特沃斯滤波器、基于汉宁窗的 FIR 滤波以及基于谐波小波 3 种滤波方法对水泵机组实际振动

信号滤波结果进行分析,发现二阶巴特沃斯低通滤波以及基于汉宁窗的 FIR 低通滤波结果中存在滤波前后的时域波形的时延和轴心轨迹的连线。而谐波小波滤波由于过渡带非常窄,相比于另外 2 种滤波方法滤波效果提升显著,几乎能够完全滤除干扰,且滤波结果中几乎不存在相位延时和轴心轨迹到中心区域的连线。从滤波前后信号的频谱分析来看,对于特定频段的滤波尤其是选定滤波频段范围比较小的时候,谐波小波的滤波优势更加明显。采用基于谐波小波滤波的方法对水泵机组运行振动信号滤波效果更好,有助于准确提取振动信号的特征。

参考文献:

- [1] 张飞,葛新峰,潘罗平,等. 稳态工况下水电机组主轴摆度峰峰值计算方法研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(21):170-174. (ZHANG Fei, GE Xinfeng, PAN Luoping, et al. Shaft run-out's peak-to-peak value calculation method for a hydraulic power unit under stable conditions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(21):170-174. (in Chinese))
- [2] 余良旺. 水泵机组运行振动的原因及其对策[J]. 通用机械, 2006(2):27-28. (YU Liangwang. Reasons of operation vibration of water pump set & countermeasures [J]. General Machinery, 2006(2):27-28. (in Chinese))
- [3] 丁玉美. 数字信号处理[M]. 第2版. 西安:西安电子科技大学出版社, 2005.
- [4] 刘亚峰,刘敬国,郝全明. 水泵振动信号的采集与监测系统[J]. 包钢科技, 2013, 39(2):70-71. (LIU Yafeng, LIU Jingguo, HAO Quanming. Acquisition and monitoring system for vibration signals of water pumps[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2013, 39(2):70-71. (in Chinese))
- [5] 殷海双. 注水泵工况诊断监测系统研究[D]. 大庆:大庆石油学院, 2009.
- [6] 骆寅,董健,韩岳江. 基于无线传感网络的水泵振动状态监测系统设计[J]. 现代电子技术, 2020, 43(12):30-34. (LUO Yin, DONG Jian, HAN Yuejiang. Design of pump vibration state monitoring system based on wireless sensor network [J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(12):30-34. (in Chinese))
- [7] 张飞. 小波分析在大中型泵机组状态监测与故障诊断中的应用[D]. 南京:河海大学, 2007.
- [8] 潘天航,冯源,葛新峰,等. 水电机组振动信号小波去噪参数优选方法研究[J]. 陕西水利, 2014(5):137-139. (PAN Tianhang, FENG Yuan, GE Xinfeng, et al. Research on optimization method of wavelet denoising parameters for vibration signal of hydropower unit [J]. Shaanxi Water Resources, 2014(5):137-139. (in Chinese))

(下转第 111 页)