

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222636

# 抽水蓄能机组状态在线监测中的振动信号积分方法

张 飞<sup>1</sup>, 梁廷婷<sup>2</sup>, 陈 刚<sup>3</sup>, 曾雪洋<sup>3</sup>

(1. 国网新源控股有限公司抽水蓄能技术经济研究院, 北京 100761;

2. 国网新源控股有限公司科技信息部, 北京 100052; 3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 抽水蓄能机组振动状态监测中常将速度信号积分成位移信号再计算特征值进行评价。以稳定工况下上机架水平振动速度信号为例, 研究了速度信号积分为位移信号的积分方法与滤波器参数设置, 并采用暂态工况进行验证。结果表明, 速度信号积分成位移信号时, 应采用高通滤波器对积分前速度信号或积分后位移信号进行高通滤波, 高通滤波器的截止频率可设置为 0.2 倍转频; 暂态工况下, 采用未滤波的位移信号计算特征值对机组安全性评估时, 存在高估机组振动的风险。

**关键词:** 振动信号; 积分方法; 高通滤波器; 截止频率

**中图分类号:** TK36; [TV734. 1]

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)10-0212-04

## 1 引言

抽水蓄能机组稳定性评价时主要通过振动、摆度及压力脉动的特征值实现, 其振动特征值主要包括振动位移峰峰值、振动速度有效值及加速度峰值等参数。国际上, 对抽水蓄能机组的振动主要采用振动有效值进行评判, 而我国由于水电机组振动测量与评价与国际接轨较晚, 普遍以位移峰峰值对机组进行评价, 因此常将速度传感器测量的速度信号积分成位移信号, 然后计算位移峰峰值, 再对机组安全性进行评价, 如水轮发电机组安装技术规范(GB/T 8564-2003)<sup>[1]</sup>、水力发电厂和蓄能泵站机组机械振动的评定(GB/T 32584-2016)<sup>[2]</sup>等标准。在对速度传感器获得的速度信号计算有效值时, 微小的偏置量变化并不会引起显著的偏差, 但是对速度信号进行积分以获得位移时, 由积分导致的累积误差将会使位移量产生不可预估的偏差。对此, 已进行了很多振动信号预处理的研究<sup>[3-7]</sup>, 综合已有研究, 从研究方法上可将积分方法划分为时域积分方法和频域积分方法两类。从研究目标上, 主要是地震信号、卫星遥测信号等, 极少涉及水电机组振动信号。抽水蓄能机组振动信号较其他类型信号有其自身特点, 主要体现在频谱成份丰富<sup>[8]</sup>、涉及工况多<sup>[9]</sup>, 这导致振动信号所包含的频率成份更加丰

富。同时, 除经典滤波器以外的时域方法及频域方法降低了实时性的要求, 均要求采集一定长度的信号, 然后再进行数据分析, 如经验模态分解、局域均值分解等方法需要采样点数达到一定量, 分解结果的趋势项提取依赖于分解层数, 有模态混叠等问题<sup>[10]</sup>, 因而仅应用于离线数据分析和故障诊断中, 难以在线应用。考虑抽水蓄能机组振动与其他类型振动信号的显著差异, 以及在线监测及振动保护系统对数据处理实时性方面的要求, 本文对抽水蓄能机组振动速度传感器所获得的速度信号特点进行分析, 研究了积分成位移后的信号特征, 从而给出推荐的积分方法, 以及积分所需考虑的关键因素。

## 2 测试简述与积分方法

### 2.1 测试简述

抽水蓄能机组稳态工况下的固定部件稳定性参数评价涉及上机架、下机架、顶盖等部位振动特征参数, 其中振动位移峰峰值是主要的评价参数。某机组额定转速 375 RPM, 额定负荷 375 MW, 转轮叶片数 9, 活动导叶数 20, 机组稳定性试验时对机组振动、摆度及压力脉动进行了测试, 其中上机架振动分别采用速度型速度传感器和位移型速度传感器进行测量。

采用 NI cDAQ9205 系统进行同步数据采

收稿日期: 2022-12-26, 修回日期: 2023-01-13

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5108-202218280A-2-251-XG)

作者简介: 张飞(1983-), 男, 高级工程师, 研究方向为抽水蓄能机组现场测试技术研究与实践, E-mail: spiritgiant@126.com

集,模数转换位数为 16,数据采样率为 1 000 Hz。试验采用的传感器是目前状态监测系统中普遍采用的型号,速度型和位移型速度传感器均为豪瑞斯 MLV-9 型超低频振动速度传感器,灵敏度分别为 800 mV/g、8 mV/ $\mu\text{m} \pm 5\%$ ,频率范围为 0.5~200 Hz(-3 dB),幅值非线性度 $< \pm 3\%$ 。

## 2.2 积分方法

信号积分可以采用时域积分也可以采用频域积分方式,对于确定频率成分的信号两者之间并没有显著差异。考虑到抽水蓄能机组存在大量的工况转换及开停机过程,这些过程的振动信号属于暂态过程中的非稳态信号,其频谱并不稳定,不适用于频域积分,因此采用时域积分方法对速度信号进行处理。

由于振动信号为定时采样,每秒采样 1 000 个点数据,故采用牛顿-科特斯方法进行积分,其原理为被积函数  $f(x)$  在积分区间  $[a, b]$  上连续,将积分区间划分成  $n$  等份,步长为  $h = (b - a) / n$ ,选取等距节点  $x_k = a + kh$  构造出插值型求积分公式,即牛顿-科特斯(Newton-Cotes)公式:

$$I_n = (b - a) \sum_{k=0}^n C_k^n f(x_k) \quad (1)$$

式中,  $I_n$  为积分后的数值;  $C_k^n$  为科特斯系数。

对于  $n$  取不同的数值则有不同的求积公式,当  $n = 1$  时为梯形公式,当  $n = 2$  时为辛普森公式,  $n = 4$  时为科特斯公式。研究选用科特斯公式进行数值积分。

## 3 稳定工况积分

试验机组额定负荷工况下,采用振动速度传感器测量上机架水平振动波形及其频谱,见图 1。由图 1 可知,振动速度传感器测量的上机架水平振动时域波形平稳,有效值为 0.17 mm/s,在《水力发电厂和蓄能泵站机组机械振动的评定》(GB/T 32584-2016)<sup>[2]</sup> 中规定的 A 区范围内,机组表现出优异的性能;频谱以转频及其倍频为主,频谱中无明显 250 Hz 以上及 6.25 Hz 以下频率成分,其中前三阶主频幅值从大到小分别为转频、极频和

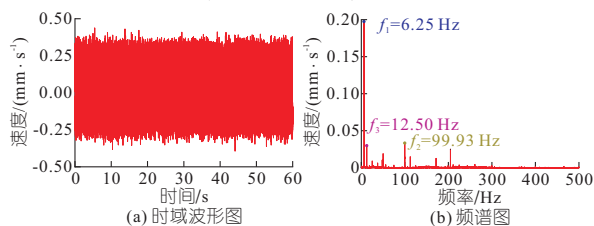


图 1 上机架水平振动速度波形图及频谱

Fig. 1 Velocity waveform and spectrum of upper guide bearing vibration

两倍转频。

采用牛顿-科特斯方法对图 1(a)所示的上机架水平振动速度波形进行积分以获得振动位移,见图 2。由图 2 可知,上机架水平振动速度积分后的振动位移中由于偏置量不稳定,导致积分获得振动位移中含有明显的趋势项,从而造成位移值随着时间的延长向一个方向逐渐累积。从趋势线中亦可看出,位移趋势线有逐渐增大的趋势。对上机架振动而言,振动位移是在周期激励下围绕平衡位置的振动,而产生趋势位移不符合上机架振动振源的特征,并不存在单一方向持续的作用力。因此,造成趋势项的唯一原因为偏置量的小幅不稳定性。

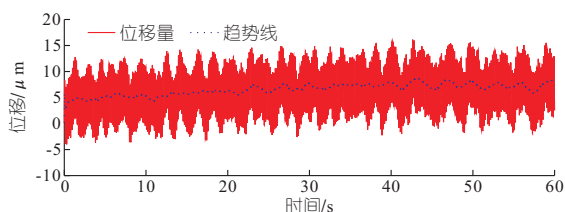


图 2 上机架水平振动位移与趋势项

Fig. 2 Integrated displacement and trend of upper guide bearing vibration

为抑制电压偏置造成的影响,对积分后的位移量进行高通滤波,或在积分前采用高通滤波方式抑制电压偏差影响。基于此,建立图 3 所示的信号采集与处理流程。图 3 中采集到的被积分信号涉及两个主要处理环节,积分与滤波。无论是积分还是滤波,由于采用的信号处理手段均是线性时不变因果系统的处理方法,而该类方法与子系统的级联顺序无关。因此,图 3 中积分与滤波的次序可以互换,不需要区分积分与滤波次序,其次序不影响最终获得的信号。



图 3 信号采集与处理流程简图

Fig. 3 Schematic diagram of signal acquisition and processing

图 3 所示环节中,需要确定高通滤波器的类型与截止频率。常用的滤波器有巴特沃斯、贝塞尔、切比雪夫等,其中巴特沃斯滤波器较其他型式滤波器通带平坦、阻带下降慢,是工程中应用较多的滤波器,因此选用巴特沃斯二阶高通滤波器。在高通截止频率上,根据传感器的低频响应特性,宜设置在 0.5 Hz 附近。对于水电机组而言,低频主要是尾水管中的低频涡带频率,大致在 0.2~0.4 倍转频,根据本案机组转速,其大致在 1.25~2.50 Hz 之间。因此,高通的截止频率亦应低于 1.25 Hz。分别设置截止频率为 0.05/0.10/0.15、

0.20 倍转频,为衡量截止频率的影响,同时适当将截止频率放大至 0.9 倍转频,以获得不同截止频率下的滤波效果。图 4 给出了高通截止频率为 0.05/0.15/0.30/0.60/0.90 倍转频下积分后位移信号的时域波形及其频谱,为了观察低频截止频率对低频成分的影响,频谱图中给出了 0~5 Hz 细部图。同时,由于积分造成高频成分衰减,幅值接近于零,为更清晰展示主要频率成分,频谱图中坐标最大调整至 200 Hz。

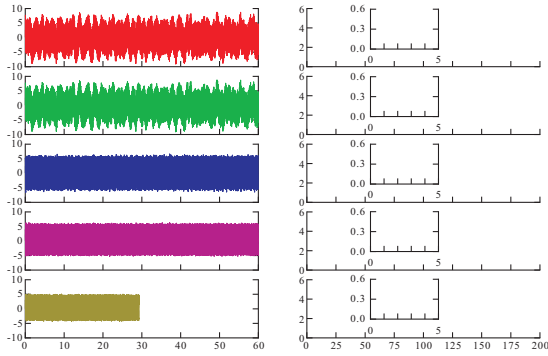


图 4 不同高通截止频率下的位移信号及其频谱

Fig. 4 Displacement signal and spectrums under high-pass filters with different cutoff frequencies

由图 4 可知,随着高通截止频率的增大,积分后的位移信号时域逐渐趋于稳定,时域波形显示出稳定的幅值变化;积分后的位移信号中,主频为转频,并含有幅值较低的倍频成分;频谱图中转频幅值有衰减的趋势,主要原因为随着滤波器截止频率增大,造成转频幅值不同程度衰减;随着截止频率的增大,频谱图中可以看到低于转频的频率成分逐渐衰减,实现了低频成分的有效抑制,使时域波形更加准确。

对高通滤波器而言,其滤波效果一是能有效抑制由传感器偏置量导致的积分偏差,二是不能对信号中的有效频率成分造成严重衰减。为确定最佳的截止频率,以转频幅值为基准,绘制不同截止频率下的转频分量随截止频率的变化规律,结果见图 5。由图 5 可知,截止频率增大后,造成转频幅值降低,且当截止频率超过 1.875 Hz(0.3 倍

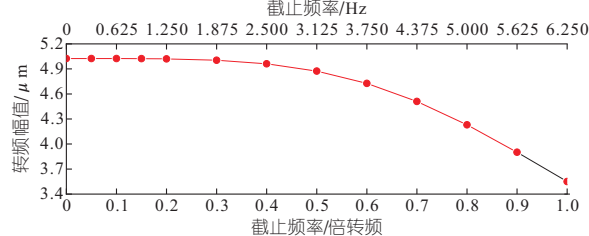


图 5 不同截止频率下转频幅值变化趋势

Fig. 5 Amplitude variation of rotational frequency for different cutoff frequencies

转频)后将造成转频幅值显著降低。当以前一个为基准值时,截止频率为 0.3 倍转频时变化率超过了 1%。截止频率低于 0.3 倍转频时,从转频成分上看不同截止频率对转频影响可以忽略不计。

截止频率也存在最低限制,由图 4 中 0~5 Hz 低频成分抑制效果而言,当采用 0.05、0.15 倍转频时并没有实现低频成分的有效抑制,造成时域波形中存在较严重的调制现象。考虑到部分负荷尾水管中的涡带频率大于 0.2 倍转频<sup>[8]</sup>,因此信号中的低频成分应是传感器固有特性所致,应予以抑制。综合以上稳态工况下高通滤波器截止频率分析可得,针对本案机组,高通滤波器截止频率应介于 0.2~0.3 倍转频之间。

### 4 暂态工况积分

根据稳态工况下建立的信号处理流程及滤波器参数,采用暂态工况下上机架水平振动进行验证,高通截止频率设置 0.2 倍转频 1.25 Hz。图 6 分别给出了该机组甩额定负荷后实测上机架水平振动速度录波曲线,以及上机架水平振动积分为位移后的未滤波、高通滤波数据和提取的趋势信息。图 6 中振动速度传感器信号在绘图前已将直流偏置电压归零。由图 6 可知,甩负荷前,振动速度信号积分成位移后未滤波时,位移信号中已存在由于偏置电压不稳定导致的积分位移误差,致使积分位移逐渐向正向偏差,这与低通滤波后所提取的低频趋势信号一致。由于采用了高通滤波,积分后高通滤波信号已明显抑制了低频趋势影响,因而该信号能够正确反映实际甩负荷前及整个甩负荷过程的振动位移情况。为获得整个甩负荷过程中机组振动位移的情况,采用文献[11]

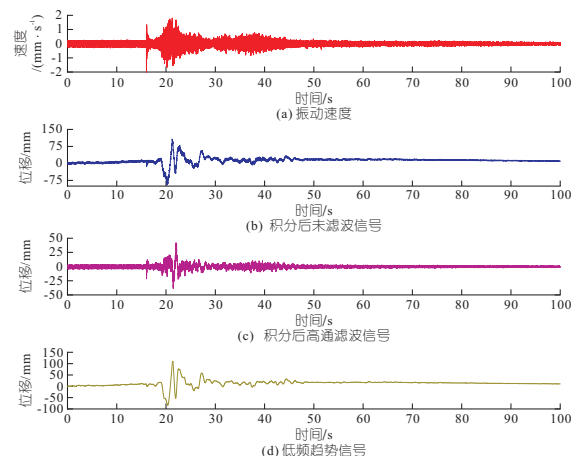


图 6 甩负荷过程中上机架水平振动速度与积分后的位移信号

Fig. 6 Integrated displacement signal and velocity signal of upper guide bearing vibration in load rejection process

中的方法分别对积分后滤波与未滤波位移信号进行处理,计算窗口长度为 0.4 s,步长为 0.2 s,获得甩负荷过程中上机架水平振动位移峰峰值趋势见图 7。由图 7 可知,在 16 s 甩前额定负荷运行及 50 s 甩后额定转速以下停机过程中,是否采用高通滤波器并不影响计算结果,主要原因为选用的时间段较短,该时段内积分的位移趋势量近似保持稳定,并不对位移峰峰值计算产生较大影响;但在甩负荷 16~50 s 过程中,由于甩负荷造成强烈的传感器振动,低频信号的存在将造成位移峰峰值的明显高估,在最大位置处,未滤波的峰峰值为 110  $\mu\text{m}$ ,滤波后的峰峰值为 58  $\mu\text{m}$ ,低频趋势项将造成接近 1 倍的误差。而实际上,对速度有效值的计算表明,速度有效值未滤波与滤波后的数值分别为 0.61、0.56 mm/s,数值较为接近,这表明本案中电压偏置所产生的误差未导致严重的速度有效值计算误差。

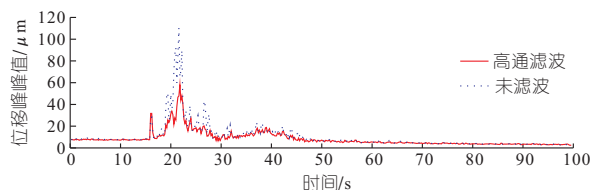


图 7 甩负荷过程中上机架水平振动位移峰峰值趋势

Fig. 7 Peak-to-peak value trend of upper guide bearing vibration in load rejection process

## 5 结论

a. 振动速度采集过程中存在由于电压偏置不稳定导致的基线小幅偏移,当采用速度有效值评价时,传感器正常时,偏移量基本不影响机组振动的的评价。

b. 振动速度积分成位移时,应采用高通滤波器对积分后的位移信号进行滤波,或采用高通滤波器对速度信号滤波后再进行积分,高通滤波器的截止频率可以按 0.2 倍转频设置。

## Integration Method of Pumped-storage Unit Vibration Signal for Online Monitoring System

ZHANG Fei<sup>1</sup>, LIANG Ting-ting<sup>2</sup>, CHEN Gang<sup>3</sup>, ZENG Xue-yang<sup>3</sup>

(1. Pumped Storage Technological & Economic Research Institute of State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing 100761, China; 2. Department of Technology and Information, State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing 100052, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In the condition monitoring of pumped storage units, vibration velocity signal is often integrated into the displacement signal, and then calculate characteristic values for unit evaluation. Taking the horizontal vibration velocity signal of upper bracket of a case unit under stable working condition as an example, the method of integrating velocity signal into displacement signal and the setting of filter parameters are studied. Furthermore, vibration signal in transient working condition is adopted for verification. The results indicate that a high-pass filter shall be used when the vibration velocity signal is integrated into the displacement signal under stable conditions, and the cut-off frequency of the high-pass filter can be set as per 0.2 times of the rotational frequency. Under transient conditions, there is a risk of over estimating unit vibration when using unfiltered displacement signals integrated from velocity signals to calculate characteristic values for unit safety assessment.

**Key words:** vibration signal; integration method; high-pass filter; cut-off frequency

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水轮发电机组安装技术规范:GB/T8564-2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 水力发电厂和蓄能泵站机组机械振动的评定:GB/T 32584-2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [3] 郭政彤,候嫣茹,章艺,等. 基于时频域的振动加速度信号积分算法[J]. 船舶工程,2022,44(7):14-20,29.
- [4] 王万金,张志国,徐洪洲. 含零漂的遥测加速度振动信号时域积分方法研究[J]. 计算机测量与控制,2018,26(9):255-258.
- [5] TEZCAN JALE, MARIN-ARTIEDA CLAUDIA C. Least square support vector machine-based approach to obtain displacement from measured acceleration [J]. Advances in engineering software, 2018, 115: 357-362.
- [6] DAI ZHIJUN, LI XIAOJUN, CHEN SU, et al. Baseline correction based on L1-Norm optimization and its verification by a computer vision method [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2020, 131: 106047.
- [7] 张军,潘泽鑫,郑玉新,等. 振动信号趋势项提取方法研究[J]. 电子学报,2017,45(1):22-28.
- [8] DORFLER P, SICK M, COUTU A. Flow-induced pulsation and vibration in hydroelectric machinery [M]. Springer London, Heidelberg New York, 2013.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 抽水蓄能机组工况转换技术导则:GB/T 32894-2016[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [10] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in adaptive data analysis, 2009, 1 (1): 1-41.
- [11] 张飞,王宪平. 抽水蓄能机组甩负荷试验时尾水锥管压力[J]. 农业工程学报,2020,36(20):93-101.