

DOI: 10.19666/j.rlfed.202208225

汽轮机试验欠采样信号的处理方法研究

梅益铭¹, 黄伟迪², 顾伟飞¹, 朱宝¹, 陈杰¹

(1.浙江省火力发电高效节能与污染物控制技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311100;

2.浙江大学机械工程学院, 浙江 杭州 310027)

[摘要] 在汽轮机数字电液控制 (DEH) 系统试验的信号采集过程中, 可能会碰到信号主要成分的频率过高, 仪器无法满足奈奎斯特采样定律的情况。针对这一问题, 通过希尔伯特变换构造解析信号的方法得到了信号的包络图, 并根据包络信号对阀门的关闭时间进行了计算。考虑到基于信号包络线的计算方法计算精度受峰值点的时间间隔影响, 为了提高计算精度, 对欠采样信号进行了重构, 通过快速傅里叶变换 (FFT) 对信号的主频率进行了分析, 根据频域周期性延拓的性质确定了信号的主频率。在此基础上, 根据信号初始值计算出了信号的初始相位, 结合信号频率与初始相位对欠采样信号进行了重构。根据重构信号与实际信号差值, 应用赤池信息 (AIC) 准则获取极值点的方法对阀门关闭时间进行了计算。比较 2 种方法的结果可知, 通过信号重构的方法计算精度明显优于希尔伯特变换求包络法, 该研究结果可用于各类单频率成分的欠采样信号的重构, 可以弥补 DEH 试验中硬件无法满足采样定理的不足。

[关键词] 欠采样信号; 频谱延拓; 信号重构; AIC; 希尔伯特变换

[引用本文格式] 梅益铭, 黄伟迪, 顾伟飞, 等. 汽轮机试验欠采样信号的处理方法研究[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 8-13.
MEI Yiming, HUANG Weidi, GU Weifei, et al. Research on processing method of undersampling signals in turbine tests[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 8-13.

Research on processing method of undersampling signals in turbine tests

MEI Yiming¹, HUANG Weidi², GU Weifei¹, ZHU Bao¹, CHEN Jie¹

(1. Zhejiang Key Laboratory of Energy Efficiency and Pollutant Control Technology for Thermal Power Generation, Hangzhou 311100, China;
2. Mechanical Engineering Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: During signal sampling process of steam turbine digital electric hydraulic control system (DEH) tests, situations that the instrument can not meet the requirements of Nyquist sampling due to the frequency of the primary components is over high may occur. To solve this problem, the envelope of the signal is calculated through Hilbert transform, and the valve closing time is calculated according to the envelope signal. However, the calculation accuracy is limited due to the time interval of the peak points. To improve the calculation accuracy, the undersampled signal is reconstructed, the primary frequency is analyzed by using fast Fourier transform (FFT), and the primary frequency of the signal is determined based on the nature of the frequency domain. On this basis, the initial phase of the AC signals is calculated using the initial value, and the undersampled signals is reconstructed according to the frequency and initial phase. The closing time is calculated according to the difference between the reconstructed and sampled signals based on Akaike information criterion (AIC). In comparison with the Hilbert transform method, the reconstruction method can improve the calculation accuracy. The reconstruction and analysis method can be used in all kinds of undersampled periodic signals, which can make up the shortcomings of hardware in DEH tests.

Key words: undersampling signals; spectrum extension; signal reconstruction; AIC; Hilbert transform

大容量汽轮机组的蒸汽参数高、流量大, 目前普遍采用数字电液控制 (DEH) 系统对机组进行调

节控制。随着电网峰谷差的增大, 大容量汽轮机组的调峰任务艰巨, 电站对汽轮机 DEH 系统的调节

收稿日期: 2022-08-19 网络首发日期: 2022-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52105075); 浙江省自然科学基金项目 (LQ21E050022)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52105075); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LQ21E050022)

第一作者简介: 梅益铭 (1990), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为汽轮机 DEH 系统及检测, zz8695@126.com。

性能要求也越来越高^[1]。为了提高 DEH 系统的控制性能,保证汽轮机组安全、稳定、经济运行,国内外学者在 DEH 系统控制策略、DEH 系统建模、DEH 系统性能试验及优化等方面开展了大量的研究。

文献[2]针对汽轮机 DEH 系统和机组协调控制系统在中低负荷段存在的非线性和时滞问题,提出了基于仿人智能控制算法的 330 MW 机组协调系统控制策略。文献[3]针对 DEH 系统中因负荷或汽压扰动引起的不稳定现象,通过 MATLAB 仿真平台构建了包含电液转换器、油动机、蒸汽容积和再热容积的串联模型,并基于此模型对模糊 PID 控制方法的优劣进行了研究。文献[4]对长期运行造成的汽轮机调节阀实际流量特性曲线偏离设计值问题进行了研究,基于历史数据分析提出了 2 种阀门流量特性曲线修正方法并进行了试验验证。文献[5]运用数字仿真技术对高参数、大容量汽轮机组的 DEH 系统控制策略进行了研究,通过免疫粒子群算法、公式法和动态参数法对控制器参数进行了整定和优化,并试验分析了不同控制算法的优劣。

无论是 DEH 系统建模、控制策略制定以及优化都要依赖 DEH 试验中的测试数据,因此数据本身的精度以及数据处理是否得当是汽轮机 DEH 系统模型构建、控制方法改进等工作的基础。但是,在对汽轮机进行 DEH 等其他相关试验的过程中,可能会存在信号主频率超过高速录波仪采样频率造成试验数据欠采样的情况^[6]。欠采样信号无法直接使用,为 DEH 系统相关试验结果的评估带来了很大的困难。这一问题不仅出现在 DEH 试验中,在对燃气轮机压气机叶片振动进行监测时,因为叶片振动频率远高于转子转频,叶端定时测量法也存在欠采样的问题。针对这一问题,陈仲生等^[7]基于余数定律,通过不同采样频率采集信号和离散傅里叶变换求解信号模值的方法估算实际信号频率。张继旺等^[8]提出了一种基于扩展离散傅里叶变换(EDFT)的叶尖定时信号欠采样分析方法,该方法可扩大分析频率范围并具有良好的抗干扰性。除电力行业外,在其他相关行业的数据采集领域也有此类问题^[9-10]。郭媛等^[11]对数字散斑干涉测量中相位解包裹欠采样问题进行了研究,利用加权离散余弦变换算法求解泊松方程,改进了横向剪切最小二乘相位解包裹算法。文献[12]对宽带跳频通信信号压缩采样后的重构方法进行了研究,通过设计输入层网络适应结构和构造生成式重构网络替代稀疏求

解,实现了迭代信号重构。针对 DEH 试验中存在的信号欠采样问题,本文以阀门关闭时间测试中欠采样交流为例,对信号的数据处理方法进行了研究。

1 DEH 试验中的信号欠采样

在某电站小型机组上进行阀门关闭试验时,由于该电站阀门信号未设置交流转直流的模块,所采集的阀位信号为 LVDT 输出的交流电压。图 1 为试验中采集到的阀位信号。从图 1 可以看到,所采集到的信号波形呈锯齿状。这是因为 LVDT 的初级线圈激励频率高于便携式高速数据记录仪的采样频率(1 000 Hz),在数字采样时信号发生了调制(因为采样频率小于被采集信号频率,实际是被采集信号对采样冲击信号的幅度调制)。从图 1 可以看出,很难根据其所示的欠采样信号去确定阀门关闭的开始时刻和结束时刻。如果单纯地依靠人为判断计算阀门关闭时间,会使得最终的计算结果存在较大误差,严重影响试验结果的计算精度和机组 DEH 系统安全性评估的可靠性。因此,需要对该信号进行相关处理,以获取可供直接用于计算的数据。

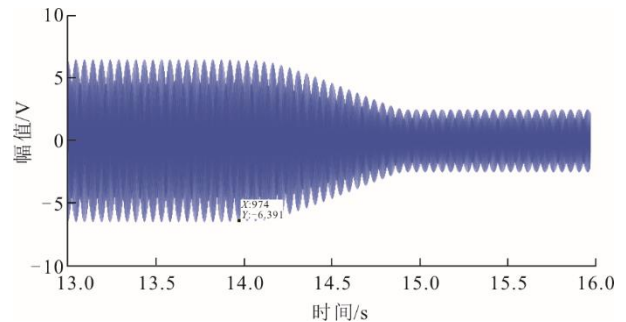


图 1 DEH 试验中的欠采样信号
Fig.1 The undersampling signals in DEH tests

对于本文中被调制的周期信号,常采用求包络的方法进行处理。在阀门发生关闭时,由于交流信号的幅值减小,峰值点也会发生变化,因此由信号峰值点构成的包络线能直接反映阀门位置的变化。采用希尔伯特变换^[13]构造解析信号,通过公式(1)将实信号转化为解析信号:

$$H(t) = x(t) \times \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为实测信号; $H(t)$ 为实测信号经希尔伯特变换的结果。

经转换后的解析信号如图 2 所示。根据希尔伯特变换的原理可知信号的峰值点幅值等于解析信号的模^[14],因此对 $H(t)$ 求模所得结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 信号经希尔伯特变换后的包络幅值近似于直流输出, 该包络幅值的求解结果可直接用于阀门关闭时间的计算, 根据信号包络线计算得到阀门关闭时间为 960 ms。但是, 因为希尔伯特变换求得的包络线等效于连接图 1 中信号的峰值点形成的, 各峰值点之间的间隔会在很大程度上影响计算结果的精度, 如本文的试验中引起的计算误差约 5 ms。因此, 需要一种更精确的信号处理方法来提取欠采样信号的信息。

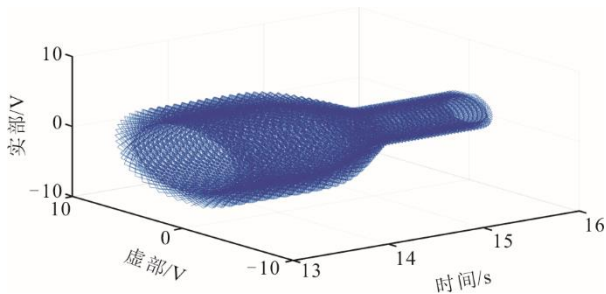


图 2 原始信号的希尔伯特变换结果

Fig.2 The Hilbert transform result of the original signals

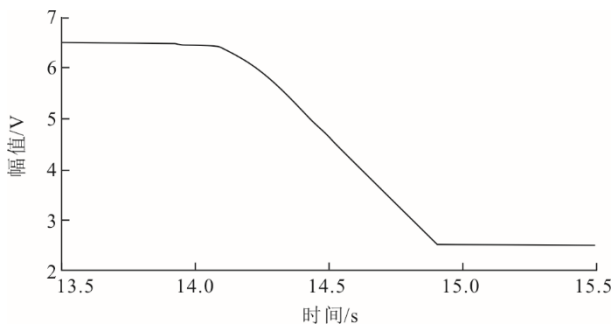


图 3 原始信号包络图

Fig.3 The envelope of the original signals

2 欠采样信号的重构与信号处理

为了提高信号的精度, 需对信号进行重构, 因为本文中所采集的信号为交流信号, 要复现该信号需对信号的频率和初始相位进行求解。对该信号作快速傅里叶变换 (FFT) 可得到阀门关闭信号的频谱, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 信号只包含 1 个主要频率, 在 255 Hz 附近。在进行数字采样时, 原始信号可表示为:

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t-nT) \quad (2)$$

式中: $y(t)$ 为采样信号; $x(t)$ 为原始信号; $\delta(t-nT)$ 为脉冲函数; T 为采样周期。

根据频域卷积定理, 2 个信号在时域上的乘积的频谱等于 2 个信号频谱乘积除以 2π , 另 $P(j\omega)$ 为冲击函数的频谱, 则采样信号的频谱可表示为:

$$Y(j\omega) = \frac{1}{2\pi} X(j\omega) * P(j\omega) \quad (3)$$

因为 $P(j\omega)$ 的傅里叶级数为 $1/T$, 故 $P(j\omega)$ 为:

$$P(j\omega) = \frac{2\pi}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - k\omega_0) \quad (4)$$

式中: ω_0 为信号的采样频率。

根据式(2)和式(3)可得:

$$Y(j\omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(j(\omega - k\omega_0)) \quad (5)$$

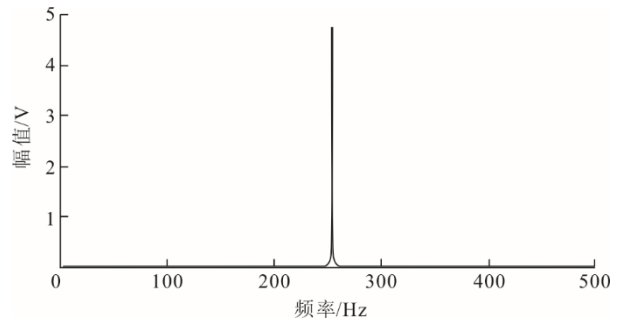


图 4 欠采样信号频谱

Fig.4 Spectrum of the undersampling signal

根据式(5)可知采样信号的频谱实际为原信号频谱周期性延拓的结果^[15], 其周期为采样频率。在本文的试验中, 原信号的频谱以录波仪的采样频率 1 000 Hz 为周期发生了延拓。因为采集对象为 LVDT 次级线圈的交流电流, 信号只有 1 个主频率, 因此频谱未发生混叠。而根据式(5)可知, 采样信号经 FFT 得到的主频率为信号实际频率除以采样频率的余数, 因为电站给出的电路原理图中 LVDT 的激励电流频率为 3 000 Hz, 因此可确定该信号的实际频率为 3 255 Hz 左右。在获取主频率的近似值后, 根据信号幅值对信号初始相位进行计算。首先对信号进行均值和归一化处理^[16], 将信号幅值转换到 [0,1]; 其次, 根据采样得到的第 1 个点的信号幅值求得交流信号的初始相位, 计算得到信号初始相位为 $0.016 2\pi$; 再次, 根据信号的初始相位和近似主频率对信号进行重构, 在重构时的时间步长为实际采样频率对应的时间间隔 0.001 s; 从次, 将重构信号的模拟采样结果减去试验采样数据, 得到一组差值时间序列。因为 3 255 Hz 为 FFT 得到的主频率近似结果, 所以模拟采样与实际采样的结果有一定差值且差值会逐渐发散, 根据最小二乘法原理调整主频率使得差值最小。最后, 得出该信号的实际频率为 3 255.356 Hz。模拟信号和实际信号对比结果如图 5 所示。因此该信号可表达为:

$$x(t) = \cos(6 510.712\pi t + 0.016 2\pi) \quad (6)$$

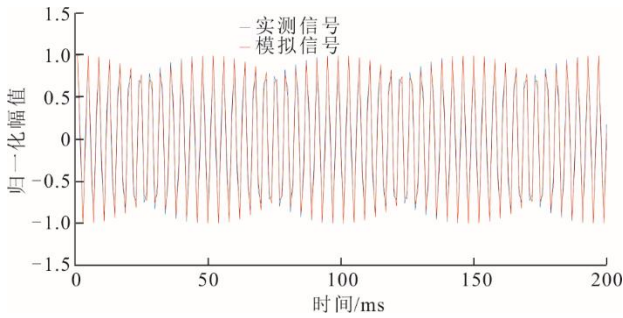


图 5 模拟信号与实测信号比对

Fig.5 Comparison between the simulated and real signals

用重构的信号序列减去归一化处理后的实际采集的信号，得到阀门关闭开始阶段的结果如图 6 所示。从图 6 可以看出：在阀门还未开始关闭时，因为模拟信号和实测信号相位始终一致，而归一化后的信号幅值与式(6)余弦函数的幅值基本相同，因此信号差值很小；当阀门开始关闭时，阀位输出交流信号的幅值变小，信号差值发生改变，改变的程度随阀门关闭逐渐增大。从图 6 可以看到，信号差值明显变大的点即为阀门开始关闭的时刻。

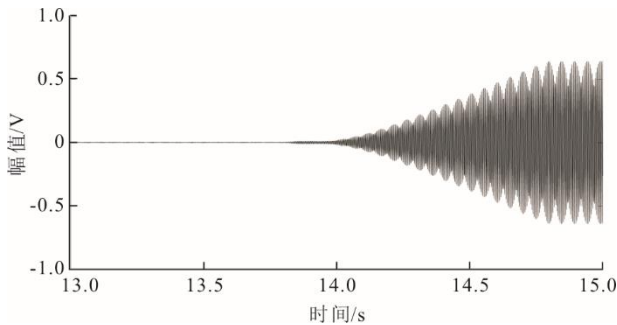


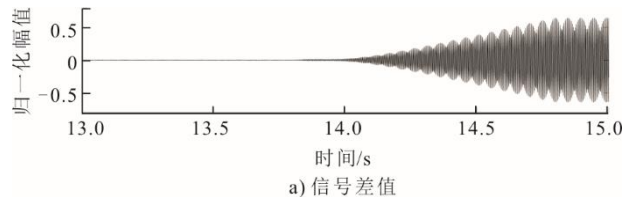
图 6 阀门关闭时开始阶段模拟信号与实际信号的差值
Fig.6 Difference between the simulated and real signals in the beginning time of valve closing

但是，由于采样时噪声信号的存在，模拟信号与实际采集得到的信号存在着微小偏差（图 6），采用人工分辨的方法不能很好地识别出阀门开始关闭的时刻点。针对这一问题，本文引入赤池信息（AIC）准则^[17]对阀门开始关闭的时刻点进行搜寻，将搜寻到的 AIC 函数极小值点作为阀门开始关闭的时刻点。AIC 函数为^[18]：

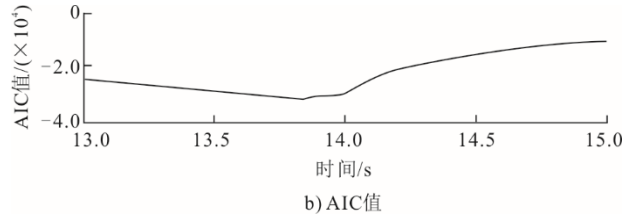
$$AIC(n) = n \times \lg\{\{\text{var}(x[1, n])\} + (N - n - 1) \times \lg\{\text{var}(x[n + 1, N])\}\} \quad (7)$$

式中： N 为整个信号采样序列的采样点数； n 为第 n 个采样点。

根据式(7)计算得到阀门开始关闭时间端内的 AIC 函数值如图 7 所示。根据 AIC 函数值可知阀门关闭发生在 13.929 s。



a) 信号差值

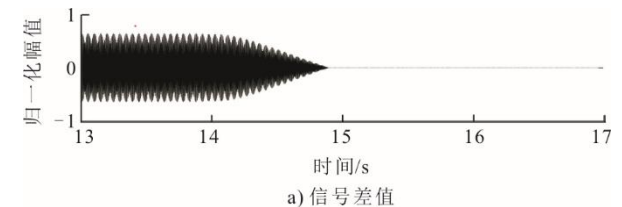


b) AIC值

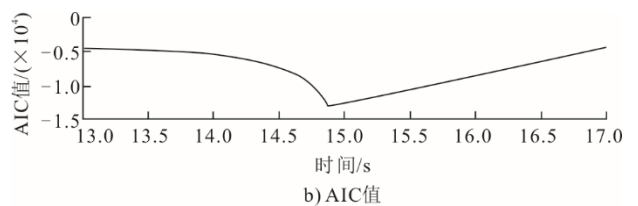
图 7 阀门开始关闭时段信号差值及 AIC 值

Fig.7 Signal difference and its AIC value in the beginning time of valve closing

用相同方法寻找阀门关闭的时刻。值得注意的是，因为阀门关闭后交流信号幅值减小，因此在确定阀门关闭时刻时模拟信号的幅值设为阀门完全关闭后交流信号的幅值，该幅值取归一化后信号幅值减小并稳定段的最大值。在本例中归一化后的信号幅值为 0.388，初始相位与式(6)相同。用新得到的模拟信号减去归一化处理后的实际采集信号，得到阀门关闭结束阶段的结果如图 8 所示。在阀门完全关闭时，因为采样信号和模拟信号的幅值、相位一致，因此信号差值接近于 0。而在阀门完全关闭前，因为全开信号和全关信号的幅值差异，信号差值较大，差值明显变小并趋近于 0 的点即为阀门关闭结束的时刻。根据 AIC 准则将 AIC 函数极小值点作为阀门的关闭时刻，结合前述的阀门关闭开始的时间点即可求出阀门完全关闭发生在 14.898 s。根据阀门开始关闭和关闭完全 2 个时间点可以得出本例中的阀门关闭时间为 969 ms。该计算结果的计算精度与采样频率一致，在本试验中为 1 ms。



a) 信号差值



b) AIC值

图 8 阀门关闭结束时段信号差值及 AIC 值

Fig.8 Signal difference and its AIC value in the end time of valve closing

3 验证与分析

为了进一步验证本文方法的准确性,采集了该电站另一机组的阀门关闭时间信号,并对该信号进行了重构与计算分析。首先,对信号进行 FFT 得到该信号的频谱,其频谱在 500 Hz 单边谱上延拓后落在 199 Hz 附近。结合本例中电站方提供的电气接线图确定 LVDT 输出的交流信号频率为 3 199 Hz 附近。其次,对原始信号进行均值和归一化处理,并根据信号频率和信号初始值计算得到信号的初始相位为 $1.166 4\pi$ 。最后,根据信号的初始相位和近似主频率对信号进行重构,并基于最小二乘法调整信号主频率,使得重构信号与实测信号的差值最小,得出信号的实际频率为 3 199.336 Hz。重构的模拟信号与实测信号的对比如图 9 所示。从图 9 可以看出,重构信号与原信号基本一致。

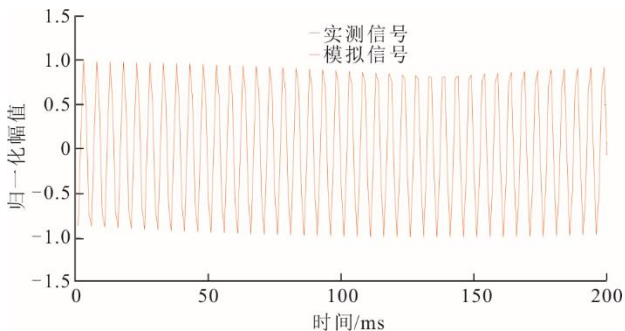


图 9 验证试验中的模拟与实测信号对比
Fig.9 Comparison of simulated and real signal in validation test

用重构的模拟信号减去归一化处理后的实际采集信号,得到阀门关闭开始阶段的结果如图 10 所示。采用 AIC 准则搜索阀门开始关闭的时刻点,根据 AIC 极值点位置得出阀门开始关闭发生在 5.863 s。利用相同的方法得到阀门关闭结束阶段的信号如图 11 所示。根据 AIC 极值点位置得出阀门完全关闭的时刻发生在 6.071 s,计算得到阀门的实际关闭时间为 208 ms。

对原始信号做希尔伯特变换得到信号包络如图 12 所示。根据图 12 包络波形对阀门关闭时间进行计算,得到阀门实际关闭时间为 215 ms。从 2 次试验可以发现,2 种方法计算结果基本一致。但是采用希尔伯特提取包络线的方法,其计算结果的精度取决于峰值点的时间间隔;而采用信号重构和基于 AIC 准则的极值点判断方法,其计算精度取决于采样频率,如本试验的采样频率为 1 000 Hz,计算结果误差为 1 ms,优于希尔伯特变换求包络法。

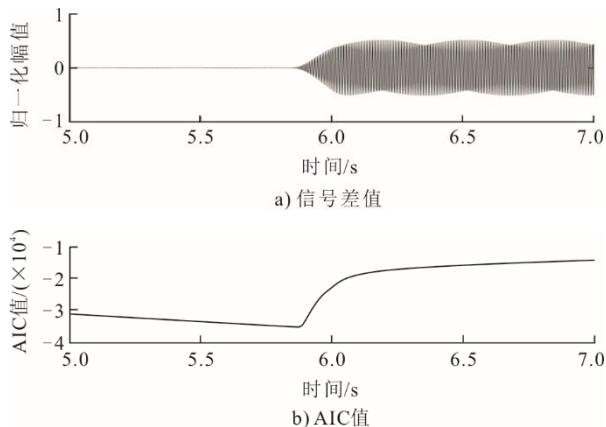


图 10 验证试验中阀门开始关闭时刻段信号差值及 AIC 值
Fig.10 Signal difference and its AIC value in the beginning time of valve closing in validation test

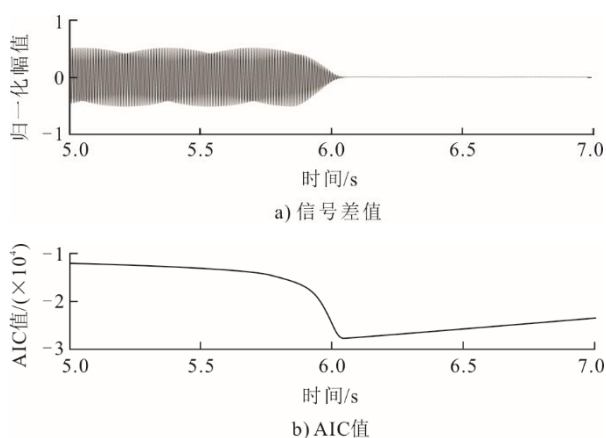


图 11 验证试验中阀门关闭结束时刻段信号差值及 AIC 值
Fig.11 Signal difference and its AIC value in the end time of valve closing in validation test

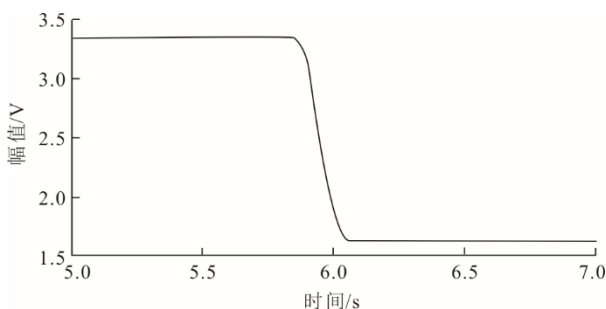


图 12 验证试验中信号希尔伯特变换结果
Fig.12 Hilbert transform of the signals in validation test

4 结 语

本文针对汽轮机 DEH 试验中出现的信号欠采样问题,以阀门关闭时间测定为例,对高频交流欠采样信号的处理方法行了研究,得到如下结论。

1) 采用希尔伯特变换对欠采样信号进行包络求解,根据求得的信号包络波形可直接计算阀门的关闭时间,但是该方法的计算精度欠佳,取决于构

成包络线峰值点的时间间隔。

2) 对欠采样交流信号的重构方法进行了研究, 基于 AIC 准则求信号极值点的方法确定阀门开始关闭和关闭结束的时刻。采用该方法得到的阀门关闭时间计算结果精度优于希尔伯特求包络法。

3) 本文研究结果适用于各类单频率周期信号欠采样的情形, 所述信号重构方法可较为准确地复现高频交流信号的实际波形并用于后续分析和计算。本文研究结果可弥补汽轮机 DEH 试验中硬件条件无法满足采样需求而出现信号欠采样的不足。

【参考文献】

- [1] 俞葆青, 彭杏娜, 丛相州, 等. 超超临界机组疏水罐罐体泄漏原因分析及防治[J]. 中国电力, 2018, 51(9): 83-87.
YU Baoqing, PENG Xingna, CONG Xiangzhou, et al. Cause analysis and prevention of drainage-tank leakage in ultra-supercritical power plant[J]. Electric Power, 2018, 51(9): 83-87.
- [2] 刘桂生, 石卫兵, 高峥, 等. 基于仿人智能控制算法的 330 MW 机组深度调峰控制研究[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(5): 368-370.
LIU Guisheng, SHI Weibing, GAO Zheng, et al. Deep peak regulation of 300 MW unit based on human simulated intelligent control algorithm[J]. Turbine Technology, 2019, 61(5): 368-370.
- [3] 孙玉芬, 王再英. 汽轮机 DEH 系统建模及仿真研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 126-130.
SUN Yufen, WANG Zaiying. Modeling and simulation research of steam turbine digital electro-hydraulic control system[J]. Computer Simulation, 2013, 30(9): 126-130.
- [4] 王竹, 吴鹏, 张锐锋, 等. 基于历史数据的汽轮机调节阀流量特性优化[J]. 热力发电, 2019, 48(2): 39-44.
WANG Zhu, WU Peng, ZHANG Ruifeng, et al. Research on flow characteristics of steam turbine regulating valve based on historical data[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(2): 39-44.
- [5] 崔东亚. 基于改进型粒子群算法的汽轮机 DEH 控制系统建模仿真与参数优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 1.
CUI Dongya. Research on the turbine digital electric hydraulic control system modeling simulation and parameter optimization based on the method of modified particle swarm optimization[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016: 1.
- [6] 欧阳涛. 基于叶尖定时的旋转叶片振动检测及参数辨识技术[D]. 天津: 天津大学, 2011: 1.
OUYANG Tao. Rotating blade vibration detection and parameters identification technique using blade tip-timing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011: 1.
- [7] 陈仲生, 谢勇, 杨拥民, 等. 基于余数定理的叶端定时欠采样信号处理方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2013, 33(增刊 1): 128-131.
CHEN Zhongsheng, XIE Yong, YANG Yongmin, et al. Undersampling signal processing method based on remainder theory in tip timing[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(Suppl.1): 128-131.
- [8] 张继旺, 丁克勤. 基于 EDFT 的非均匀欠采样叶尖定时信号分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 39-45.
ZHANG Jiawang, DING Keqin. Analysis of nonuniform under-sampling blade tip timing signal based on EDFT[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 39-45.
- [9] 魏力, 张育平. 一种改进型的不平衡数据欠采样算法[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(5): 1094-1098.
WEI Li, ZHANG Yuping. Improved undersampling algorithm for imbalanced data[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(5): 1094-1098.
- [10] 管春, 陶勃宇. 一种应用于欠采样图像的自适应稀疏重建方法[J]. 电讯技术, 2017, 57(9): 981-985.
GUAN Chun, TAO Boyu. An adaptive sparse reconstruction method for undersampling images[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(9): 981-985.
- [11] 郭媛, 陈小天, 毛琦. 相位解包裹中欠采样问题的实验研究[J]. 激光技术, 2015, 39(3): 423-427.
GUO Yuan, CHEN Xiaotian, MAO Qi. Experimental study about undersampling phase unwrapping[J]. Laser Technology, 2015, 39(3): 423-427.
- [12] 齐佩汉, 李冰, 谢爱平, 等. 欠采样跳频通信信号深度学习重构方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2022, 49(4): 1-7
QI Peihan, LI Bing, XIE Aiping, et al. Deep learning reconstruction algorithm for incomplete samples of frequency hopping communication signals[J]. Journal of Xidian University, 2022, 49(4): 1-7.
- [13] THONG-UN N, WONGSAROJ W, TREENUSON W, et al. An experimental study of different signal processing methods on ultrasonic velocity profiles in a single phase flow[J]. Engineering Journal, 2018, 22(3): 123-142.
- [14] HSUE W L, CHANG W C. Real discrete fractional Fourier, Hartley, generalized Fourier and generalized Hartley transforms with many parameters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2015, 62(10): 2594-2605.
- [15] AKRAM J, DAVID W E. A review and appraisal of arrival-time picking methods for downhole microseismic data[J]. Geophysics Journal of the Society of Exploration Geophysicists, 2016, 81(2): 71-91.
- [16] KURZ J H, GROSSE C U, REINHARDT H W. Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete[J]. Ultrasonics, 2005, 43(7): 538-546.
- [17] 周小龙, 刘薇娜, 姜振海, 等. 改进的 HHT 方法及其在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2020, 39(7): 189-195.
ZHOU Xiaolong, LIU Weina, JIANG Zhenhai, et al. Improved HHT method and its application in rotating machinery fault diagnosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(7): 189-195.
- [18] 赵犁丰, 王振芬, 张晓亮. 基于经验模态分解的希尔伯特变换包络提取在机械故障诊断中的应用[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(6): 965-970.
ZHAO Lifeng, WANG Zhenfen, ZHANG Xiaoliang. Machine fault diagnosis by envelope capture based on the EMD and Hilbert transform[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(6): 965-970.

(责任编辑 刘永强)