

引用格式: 艾学忠, 袁天奇, 闫敏, 等. 时频分析法在锅炉承压管线泄漏检测中的应用研究[J]. 声学技术, 2022, 41(2): 282-287. [AI Xuezhong, YUAN Tianqi, YAN Min, et al. Application of time-frequency analysis in leakage detection of boiler pressure Pipeline[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(2): 282-287.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.02.020

时频分析法在锅炉承压管线泄漏检测中的应用研究

艾学忠¹, 袁天奇¹, 闫敏¹, 杨叶礼¹, 陈思宇²

(1. 吉林化工学院信息与控制工程学院, 吉林吉林 132000;
2. 东北电院开元科技有限公司, 吉林吉林 132000)

摘要: 准确检测锅炉承压管线泄漏是保障锅炉安全运行的关键技术, 音频分析法是检测承压管线泄漏故障的主要手段, 提出一种基于联合时频分析(Joint Time-Frequency Analysis, JTFA)研究锅炉背景声和承压管线泄漏声的时频特征, 判定泄漏故障的方法。设计了由前置放大、程控滤波、增益补偿处理的双通道音频信号采集电路; 采用快速傅里叶变换获取信号广义谱特征, 采用程控滤波对采集信号加动态频率窗, 再采用短时傅里叶变换对采集信号时间加窗, 多角度分析信号的时频特征, 以判定承压管线运行是否存在泄漏故障。相比于传统的 RC 滤波加快速傅里叶变换分析方法, 这种动态加双窗的时频分析法能够提高泄漏信号采集的灵敏度和泄漏故障判定的准确性。

关键词: 时频分析; 承压管线; 泄漏故障; 可编程滤波

中图分类号: TB53

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-02-0282-06

Application of time-frequency analysis in leakage detection of boiler pressure pipeline

AI Xuezhong¹, YUAN Tianqi¹, YAN Min¹, YANG Yeli¹, CHEN Siyu²

(1. School of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132000, Jilin, China;
2. Northeast Electric Power Research Institute Kaiyuan Technology Co., Ltd., Jilin 132000, Jilin, China)

Abstract: Accurate detection of pressure line leakage is the key to ensuring the safe operation of boiler, and the audio frequency analysis is the main detection method. A method based on joint time-frequency analysis (JTFA) is proposed to study the time-frequency characteristics of boiler background sound and pressure line leakage sound for leakage fault determination. A dual channel audio signal acquisition circuit composed of pre-amplification, program-controlled filtering and gain compensation is designed. Fast Fourier transform (FFT) is used to obtain the generalized spectrum characteristics of the signal, the program-controlled filter is used to set a dynamic frequency window for the acquisition signal, and the short-time Fourier transform (STFT) is used to set a time window for the acquisition signal. The time-frequency characteristics of the signal are analyzed from multiple perspectives to determine whether there is leakage fault in the operation of the pressure pipeline. Compared with the traditional RC filtering and fast Fourier transform analysis method, the time-frequency analysis method with dynamic double windows can improve the sensitivity of leakage signal acquisition and the accuracy of leakage fault determination.

Key words: time-frequency analysis; pressure pipeline; leakage fault; programmable filtering

0 引言

近年来, 我国的新能源发展速度很快, 风电、太阳能发电数量都是全球最高, 但火力发电量占比依然超过 70%, 处主导地位。锅炉是火力发电的主

要设备, 其安全稳定高效运行至关重要, 锅炉承压管线泄漏占火力发电锅炉运行故障的 67%^[1-3]。因此, 准确及时检测到锅炉承压管线泄漏故障, 对于妥善安排锅炉检修、缩短停炉时间以及降低维修费用具有重要意义^[4-5]。管道泄漏检测与定位方面, 学者们进行了大量的研究。朱艳等基于傅里叶变换对中低压输气管道两点泄漏动态压力波信号进行滤波及时域特征分析, 总结了管道发生两点泄漏的信号特征^[6]。吉霞等对管道泄漏噪声的数值进行仿真, 为噪声研究提供了新的途径^[7]。高松巍等提出输气管道泄漏点的相关算法, 不仅可以判断管道是否发

收稿日期: 2021-08-17; 修回日期: 2021-10-10

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目(20190302063GX)。

作者简介: 艾学忠(1970—), 男, 吉林榆树人, 博士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置、机电一体化测控技术。

通信作者: 袁天奇, E-mail: 215056347@qq.com

生泄漏,而且可以确定泄漏点的位置^[8]。陈琰等采用基于负压力波的方法采集压力数据对泄漏进行检测和定位,并用双压力传感器判断负压力波传播方向^[9]。目前针对管道泄漏,主要采用经过傅里叶分析后进行频谱分析滤波的检测方法,通过分析被测信号中是否含有敏感频段音频、振动、压力波等信号来判断有无泄漏故障^[10],且对于泄漏信号进行准确定位。然而由于自然界大量的信号是非平稳的,快速傅里叶变换对非平稳过程的分析有局限性,仅能获取一段信号总体上包含哪些频率成分,不能分析任意时刻信号的局部特征,不能对任意泄漏信号做出准确判断^[11-12]。时频分析法是20世纪90年代新兴的数字信号处理方法,具有能给出各个频率成分出现的时间,信号频率随时间变化情况,各个时刻瞬时频率及其幅值等优点,且近年来程控滤波器被广泛地应用于音频信号处理领域,具有低噪声、低功率、中心频率可控等优点。本文采用程控滤波放大处理与快速傅里叶变换、短时傅里叶变换相结合的时频分析方法,用时频图表征泄漏信号的时频特征,能够从杂乱的背景噪声中准确获取泄漏声,取得较好的应用效果^[13]。

1 锅炉承压管线泄漏声频信号采集原理

锅炉承压管线泄漏音频信号采集原理如图1所示。包括麦克拾音器、前置放大器、程控滤波器、增益补偿器以及嵌入式微处理器。嵌入式微处理器是核心部件,采用STM32F373VCT6,该芯片内置DSP处理器、32KB的RAM、16位ADC,适于音频信号采集分析处理;麦克拾音器将声音信号转换成mV级电信号;前置放大电路将mV级电信号放大至适于嵌入式微处理器A/D转换的信号ADC1;程控滤波器受STM32F373VCT6控制,对前置放大信号进行滤波处理,对采集信号加频率窗口;增益补偿放大器将程控滤波器输出信号放大为ADC2,提高采集电路对泄漏声的灵敏度。

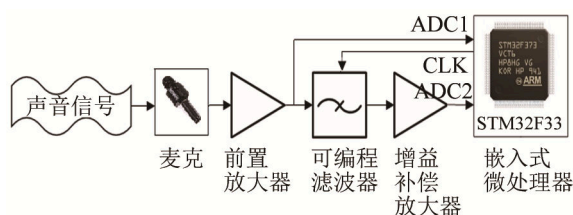


图1 锅炉承压管线泄漏产生的音频信号采集原理
Fig.1 Audio signal acquisition generated by boiler pressure pipeline leakage

2 改进时频分析方法

时频分析又叫时频联合域分析(Joint Time-Frequency Analysis, JTFA),是分析时变非平稳信号的新方法。短时傅立叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)是常用的时频分析方法,主要用于分析非平稳信号,通过对时间加窗使信号平稳化,再对加窗的分段信号进行FFT得到信号频谱^[14-15]。在数字信号处理中常常需要用到离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)^[12],FFT是DFT的一种快速实现算法^[6]。傅里叶变换可以定义为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

其逆变换为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2)$$

由式(2)可知,每一频率分量的信号 $F(\omega)$ 也是全部时间范围内 $f(t)$ 共同贡献的结果。全局性的变换对于实际信号 $f(t)$,能得到的仅是一个有限时间段内的信号,对于非平稳信号,经常关心的是在不同时间段内信号频谱的变化情况,这时便要使用短时傅里叶变换^[16]。短时傅里叶变换就是用一个窗函数与原始的时域信号作乘积的过程,使得相乘后的信号更好地满足傅里叶变换的周期性要求。信号 $x(t)$ 的短时傅里叶变换为

$$X(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(t-\tau) x(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau \quad (3)$$

其反变换为

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} w^{-1}(t) \int_{-\infty}^{+\infty} X(t, \omega) e^{j\omega t} d\omega, w(t) \neq 0 \quad (4)$$

其中: $w(t)$ 为窗函数,它能随着时间轴自由移动,能将信号切分成一个个小时单元,进而分析频谱随着时间的变换。

锅炉工作时的背景声强度很高,包括火焰燃烧、引送风、汽包沸腾、蒸汽传输等环节的噪声。承压管线泄漏初期音频信号相对于背景声来说很弱,很难准确采集和判断^[17]。为此,对传统的采集分析过程进行改进。在图1中,前置放大输出的信号ADC1为全谱系音频信号,包含背景声和泄漏声(如果存在泄漏故障);ADC1被嵌入式微处理器转换后做快速傅里叶变换(FFT)进行初步分析,嵌入式微处理器根据运算分析结果控制程控滤波器对前置放大信号加动态频率窗滤除背景声,再经过增益补偿放大器进行幅值放大输出信号ADC2(强化泄漏声);ADC2被嵌入式微处理器转换后,加时间窗做短时傅里叶变换(STFT)并生成时频图,通过时

频特征表征泄漏信号,实现锅炉承压管线泄漏故障的准确判断^[18-19]。

3 电路设计与建模

按照图 1 中锅炉承压管线泄漏音频信号采集原理搭建音频信号采集硬件电路,如图 2 所示。采用 ADI 公司的 LTspice 模拟电路仿真器进行仿真验证。前置放大器 U2 使用低失调、低噪声、单电源运放 OPA2335,反相放大方式,交流信号参考点平移至 1.25 V,增益可调整;程控滤波器使用开关电容滤波器 LTC1068-50,采用 3.3 V 单电源供电,工作于模式 2,按照图中元件参数滤波器通频在 $F_L=0.8 \times F_{\text{center}}$ 和 $F_H=1.2 \times F_{\text{center}}$ 之间,其中, F_L 为低通频率, F_H 为高通频率, F_{center} 为中心频点的频率。滤波器中心频点控制信号 Fclk 由嵌入式微处理器给出,为方便仿真实验该信号用信号源模拟;增益补偿放大器 U3 也使用 OPA2335,反相放大方式,交流信号参考点平移至 1.25 V,增益可调整。

文献[20]在针对管道泄漏喷流噪声频谱规律的实验研究中表明,在其余外界条件不变的情况下,当气体压力为 0.2 MPa,泄漏口径分别为 1、2、

4 mm 时,泄漏声峰值频率分别在 8、5、4 kHz 附近,即峰值频率随泄漏口径的增大而降低,但声压级随泄漏口径的增大而增大。当泄漏口径为 1 mm,气体压力分别为 0.3、0.4、0.5、0.7 MPa 时,泄漏声峰值频率在 7 kHz 附近,即泄漏声峰值频率随气体压力的增大变化不大,但声压级随着压力增大而明显增大,且泄漏峰值频率与喷流噪声速度成正比,范围在 3~15 kHz 之间。锅炉背景声频率在 1 500 Hz 以下,以 4 kHz 附近泄漏声为例进行仿真实验。电路调试步骤:

(1) 创建一个分段线性电压源,其中包含实际录制的某一音频信号的一系列电压及对应的时间,可将此数据直接读入 LTspice 中,以此来模拟麦克风传感器采集的信号。

(2) 调整电路工作参数:① 在信号输入端接入频率 4 kHz、峰峰值 50 mV 的交流信号,调整前置放大器电位器 U4 使输出 ADC1 的峰峰值为 2 V;② 程控增益放大器的中心频点控制信号 Fclk 设置为 160 kHz,此时中心频点的频率 $F_{\text{center}}=F_{\text{clk}}/40=4$ kHz,通频带在 3.2 kHz 和 4.8 kHz 之间;③ 调整增益补偿放大器的电位器, U3 使输出的 ADC2 的峰峰值为 2 V。使 ADC1、ADC2 的信号幅值满足嵌

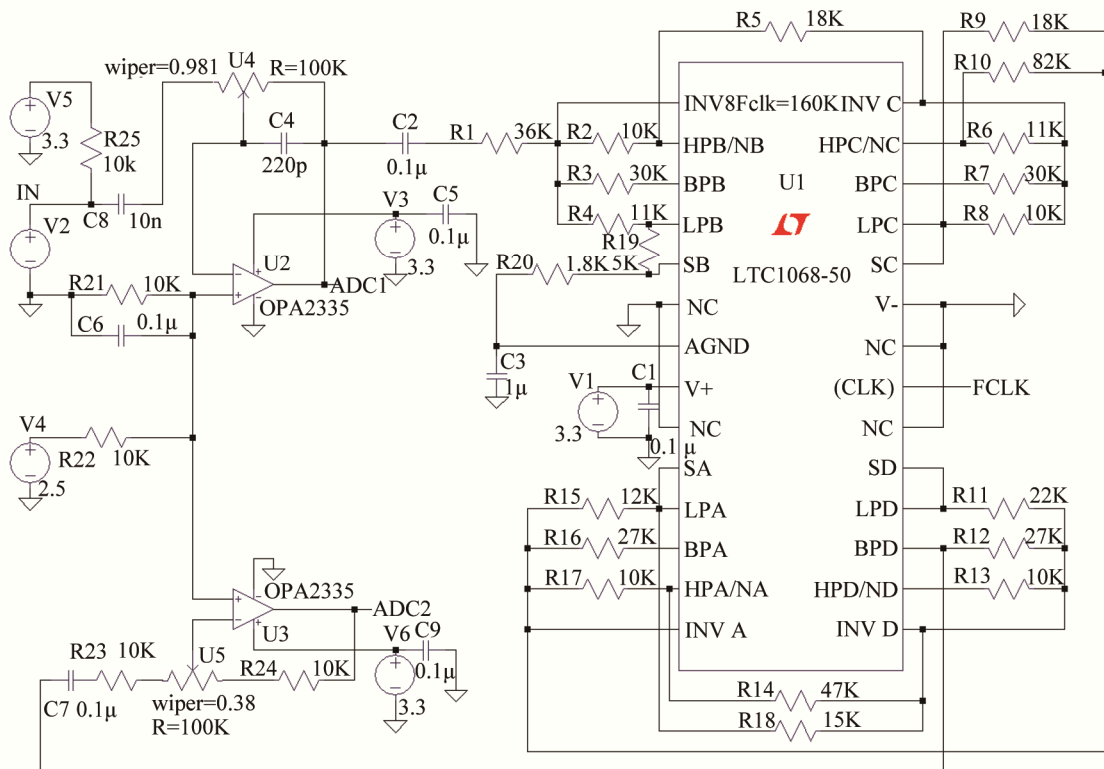


图 2 音频信号采集电路
Fig.2 Audio signal acquisition circuit

入式微处理器的 A/D 转换器对输入信号要求。

4 仿真实验测试

对图 2 所建电路进行仿真实验。共做 3 种情况分析:(1) 对录制的锅炉正常运行工况背景声文件分析;(2) 在背景声中叠加模拟泄漏声进行处理分析;(3) 将录制的锅炉运行中发生泄漏故障时的音频文件导入所建电路模型进行验证分析。

4.1 锅炉正常运行工况背景声文件分析

锅炉正常运行工况背景声频文件如图 3 所示,对该文件进行短时傅里叶分析,得出时频图如图 4 所示。可以看出正常运行工况下只有 1 500 Hz 以下的低频背景声,3 kHz 及以上的高频区间无信号。

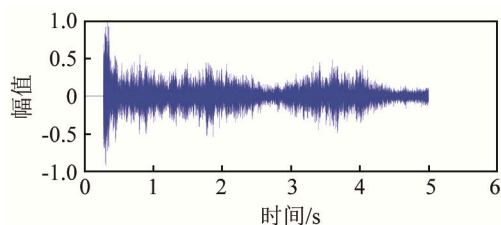


图 3 锅炉正常工况背景声信号

Fig.3 Signal waveform of boiler background sound in normal working condition

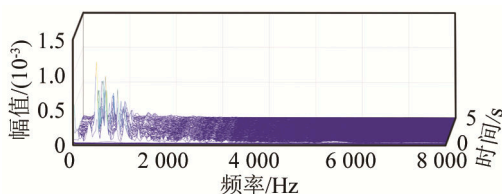


图 4 锅炉正常工况背景声信号时频图

Fig.4 Time-frequency diagram of boiler background sound in normal working condition

4.2 锅炉背景声叠加模拟泄漏声分析

在实录的背景声中叠加频率为 4 kHz、峰峰值为 50 mV 的模拟泄漏声,如图 5 所示。将叠加后的信号导入图 2 中的仿真电路,对前置放大输出的 ADC1 信号进行长时傅里叶分析,得到频域图如图 6 所示。从图 6 中可以看出信号呈分散状态,虽然

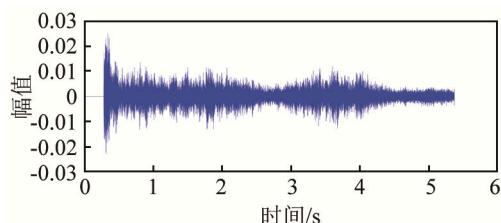


图 5 原始背景声叠加 4 kHz 和 50 mV 峰峰值模拟泄漏声的时域波形图

Fig.5 Time domain waveform of the original background sound plus the simulated leakage sound of 50 mV p-p at 4 kHz

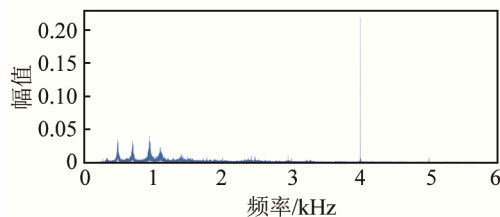


图 6 未加频率窗的原始背景声叠加模拟泄漏声的频域波形图

Fig.6 Time domain waveform of the original background sound plus the simulated leakage sound without frequency window

能看到叠加的 4 kHz 信号,但无法排除分析结果中存在短时高频噪声的可能。

对 ADC1 信号引入短时傅里叶算法进行时频分析,得到的时频图如图 7 所示。从图 7 中可以看出,4 kHz 附近存在持续的音频信号,能够排除突发高频噪声的可能。但时频图中存在较高的背景信号干扰,对泄漏故障判断影响较大。为此,根据图 6 中频谱数据动态调程控滤波器的频点,对 ADC1 输出信号进行滤波、放大得到 ADC2 信号,再对 ADC2 信号做短时傅里叶变换进行时频分析,得到图 8 所示的时频图。从图 8 中可以看出,由于动态加入频率窗和时间窗处理,时频图中能够清晰地表征出叠加的模拟泄漏声,既提高了测量的灵敏度,又能有效剔除偶发的高频噪声影响。

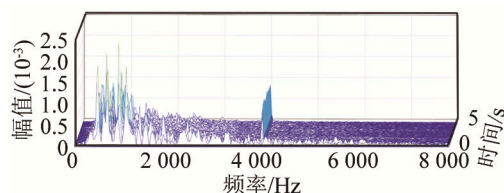


图 7 未加频率窗的原始背景声叠加模拟泄漏声的时频图

Fig.7 Time-frequency diagram of the original background sound plus the simulated leakage sound without frequency window

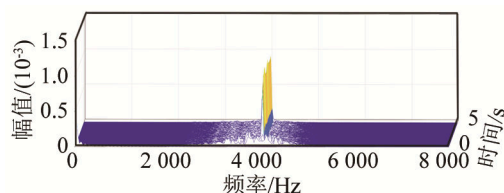


图 8 加频率窗的原始背景声叠加模拟泄漏声的时频图

Fig.8 Time-frequency diagram of the original background sound plus the simulated leakage sound with frequency window

4.3 导入录制的发生泄漏故障初期音频文件进行验证

现场录制发生泄漏故障初期的原始音频文件如图 9 所示。将信号导入图 2 中的仿真电路,对前置放大输出的 ADC1 信号做傅里叶分析,得到图 10 所示的频域图。根据对 ADC1 信号频域分析的结果,

动态调程控滤波器的频点,对信号进行滤波和放大,即动态加频率窗得到 ADC2 信号。为了验证该方法的有效性,对 ADC1 和 ADC2 做短时傅里叶分析得到如图 11 和图 12 所示的时频图。图 11 表明,未加频率窗的时频分析结果无法识别初期泄漏故障。图 12 表明,动态加频率窗的时频分析结果能够清楚判断初期的泄漏故障。

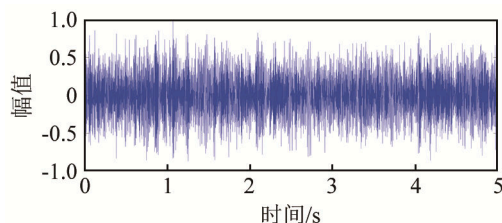


图 9 实录发生泄漏故障的音频信号时域波形图
Fig.9 Time domain waveform of the recorded audio signal for the leaking fault

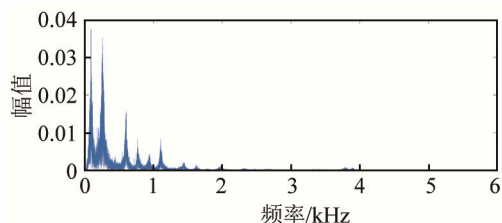


图 10 实录发生泄漏故障的音频信号频域波形图
Fig.10 Frequency domain waveform of the recorded audio signal for the leaking fault

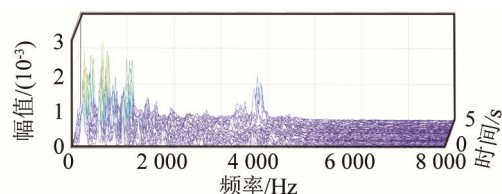


图 11 实录发生泄漏故障的音频信号未加频率窗的时频图
Fig.11 Time-frequency diagram of the recorded audio signal for the leaking fault without frequency window

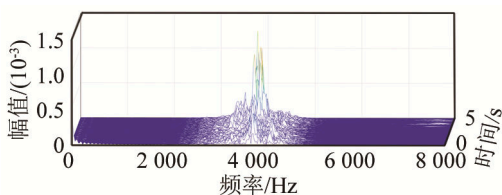


图 12 实录发生泄漏故障的音频信号加频率窗后的时频图
Fig.12 Time-frequency diagram of the recorded audio signal for the leaking fault with frequency window

5 结 论

本文介绍的锅炉承压管线泄漏声频信号采集方案,创新点在于通过双通道采集信号将传统傅里叶变换与可编程滤波技术相结合,使用 FFT 算法对前置放大信号进行粗略分析,根据粗略分析结果控制可编程滤波器,对前置放大信号加动态频率窗。

再通过短时傅里叶变换对被采集信号加时间窗,在此基础上分析出锅炉运行工况下音频信号的时频特征,及时准确判定承压管线是否存在泄漏故障。仿真与实验测试对比可以看出:采用可编程滤波器对被采集信号加频率窗之后,在泄漏声频率范围内能够有效提升检测承压管线泄漏声信号的灵敏度;采用短时傅里叶变换(STFT)对被采集信号加时间窗分析形成时频图,能够去除短时敏感频率的环境噪声影响,提高故障判断的准确性。

参 考 文 献

- [1] 高宪波. 基于多元立体阵列的炉管泄漏声学监测及定位研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2014.
- [2] 冯强, 张志刚, 姜根山, 等. 基于 CFD 数据库的炉膛压力管道泄漏定位研究[J]. 热能动力工程, 2019, 34(5): 57-64.
FENG Qiang, ZHANG Zhigang, JIANG Genshan, et al. Leakage location determination of pressure pipe in furnace based on CFD database[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(5): 57-64.
- [3] 张成辉. 锅炉炉管泄漏检测系统的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.
- [4] 赵晓宇, 李艳萍, 付颜龙, 等. 几种时频分析方法的研究和对比[J]. 信息通信, 2019, 32(8): 99-100.
ZHAO Xiaoyu, LI Yanping, FU Yanlong, et al. Research and comparison of several time-frequency analysis methods[J]. Information Communication, 2019(8): 99-100.
- [5] 刘志东. 锅炉承压管线泄漏检测系统数字化采集终端的研制[D]. 吉林: 吉林化工学院, 2019.
- [6] 朱艳, 黎泉, 方丽萍. 基于傅里叶变换的管道两点泄漏动态压力信号特征研究[J]. 科学技术创新, 2021(18): 182-184.
ZHU Yan, LI Quan, FANG Liping. Study on the characteristics of dynamic pressure signal of pipeline two-point leakage based on Fourier transform[J]. Science and Technology Innovation, 2021(18): 182-184.
- [7] 吉霞, 吴亚锋, 杨浩. 管道泄漏噪声的数值仿真分析[J]. 计算机仿真, 2010, 27(12): 381-385.
JI Xia, WU Yafeng, YANG Hao. Numerical simulation of pipeline leak noise analysis[J]. Computer Simulation, 2010, 27(12): 381-385.
- [8] 高松巍, 丛迪娜, 杨理践. 输气管道泄漏点的定位算法[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(6): 691-694, 707.
GAO Songwei, CONG Dina, YANG Lijian. Locating algorithm for leakage point of gas pipeline[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2009, 31(6): 691-694, 707.
- [9] 陈琰. 输油管道泄漏检测信号处理方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [10] 桂志先, 黄宇迪, 许辉群. 基于 Gabor 变换的时频分析方法在高分辨率地震资料薄层识别中的应用[J/OL]. 长江大学学报(自然科学版): 1-6[2021-08-12]. <https://doi.org/10.16772/j.cnki.1673-1409.20210709.001>.
- [11] 艾学忠, 闫敏, 杨叶礼, 等. 信号复用传输技术在锅炉承压管线泄漏检测中的应用[J]. 吉林化工学院学报, 2021, 38(5): 1-6, 65.
AI Xuezhong, YAN Min, YANG Yeli, et al. Application of signal multiplexing transmission technology in leak detection of boiler pressure pipeline[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2021, 38(5): 1-6, 65.
- [12] 马君鹏, 亓彦珣, 吴晗, 等. 基于共形稀疏阵列传感器的局放超声检测方法研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 60-67.

- MA Junpeng, QI Yanxun, WU Han, et al. Study on ultrasonic method for partial discharge detection based on conformal sparse array sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 60-67.
- [13] 夏培涛. 数字信号处理技术在故障检测中的运用[J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(4): 105-106.
- XIA peitao. Application of digital signal processing technology in fault detection [J]. Electronic components and information technology, 2021, 5(4): 105-106.
- [14] 李帅, 李静. 基于 MATLAB 仿真分析频谱信号的误差[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(1): 86-87, 89.
- LI Shuai, LI Jing. Analyze error of spectrum signal based on MATLAB simulation[J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(1): 86-87, 89.
- [15] 董琪, 胡靓, 庄柳静, 等. 基于小波变换的时频图建模及其在嗅觉场电位分析中的应用[J]. 生物医学工程学杂志, 2014, 31(3): 481-486.
- DONG Qi, HU Liang, ZHUANG Liujing, et al. A wavelet-based time-frequency modeling method and its application in analysis of local field potentials in olfactory bulb[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2014, 31(3): 481-486.
- [16] 王新, 蔺莹, 江建虹, 等. 基于地震反演的深水无井区储层预测方法研究[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(4): 397-405.
- WANG Xin, LIN Ying, JIANG Jianhong, et al. Research on reservoir prediction method in deep water without well based on seismic inversion[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(4): 397-405.
- [17] 王琳, 姜根山, 安连锁. 炉内管道泄漏声检测与定位系统的研究现状[J]. 应用声学, 2010, 29(1): 1-10.
- WANG Lin, JIANG Genshan, AN Liansuo. Research status of the acoustic detection and location system for boiler tube leakage[J]. Applied Acoustics, 2010, 29(1): 1-10.
- [18] 张江东. 炉管泄漏报警装置在火力发电机组中的应用[J]. 国网技术学院学报, 2016, 19(6): 57-59.
- ZHANG Jiangdong. Application of boiler tube leakage alarm device in thermal power generating unit[J]. Journal of State Grid Technology College, 2016, 19(6): 57-59.
- [19] 熊杰, 刘彬, 于海波, 等. 快速机械开关机械特性和结构强度研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 68-75, 83.
- XIONG Jie, LIU Bin, YU Haibo, et al. Research on mechanical characteristics and structural strength of high-speed mechanical switch[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 68-75, 83.
- [20] 姜根山. 锅炉管道泄漏声行为特性研究[D]. 华北电力大学(河北), 2006.