

# 液压阀高精度振动信号采集分析系统设计

梅二召,魏新华,范景峰,李俊杰,范 帅

(河南应用技术职业学院 机电工程学院,河南 郑州 450042)

**摘要:**针对液压阀工况环境复杂、振动数据采集不精确、采集系统线路布置困难等问题,以 ARM 微处理为核心设计用于液压阀高精度振动采集系统,对大型液压设备进行数据采集与分析。首先,针对大型液压设备的工作环境,分析液压阀振动采集系统的总体设计方案,接着以液压阀的振动信号特征选择多轴加速度传感器,用于振动信号的采集,并根据采集系统在布置过程中的困境,选用无线传输模式进行下位机和上位机的数据传输;其次,为方便在采集现场进行快速数据分析,在上位机软件中设计基于功率谱和高阶谱的振动信号分析系统;最后,以先导式液压阀为例,完成液压阀高精度振动信号的采集与实时分析。测试结果表明,设计的振动信号采集系统能够完成复杂工况下振动信号的采集与现场分析,具有较好的工程应用价值。

**关键词:**液压阀;振动信号;振动传感器;微处理器;无线传输;高阶谱分析

**中图分类号:**TP216

**文章编号:**1000-0682(2024)05-0017-07

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.05.004

## Design of high precision vibration signal acquisition and analysis system for hydraulic valve

MEI Erzhuo, WEI Xinhua, FAN Jingfeng, LI Junjie, FAN Shuai

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Technical Institute, Henan Zhengzhou 450042, China)

**Abstract:** To address problems such as complex working environment of hydraulic valve, imprecise vibration data acquisition and difficult line layout of the acquisition system, ARM micro processing is used to design a high-precision vibration acquisition system for hydraulic valve for data acquisition and analysis of large hydraulic equipment. Firstly, the overall design scheme of the hydraulic valve vibration acquisition system is analyzed according to the working environment of large hydraulic equipment, and then the multi-axis acceleration sensor is selected for vibration signal acquisition according to the vibration signal characteristics of the hydraulic valve, and the wireless transmission mode is selected for data transmission between the lower computer and the upper computer according to the difficulties in the acquisition system layout. Secondly, the vibration signal analysis system based on power spectrum and high order spectrum is designed in the upper computer software in order to facilitate the rapid data analysis at the acquisition site. Finally, taking the pilot hydraulic valve as an example, the high-precision vibration signal of the hydraulic valve is collected and analyzed in real time. The test results show that the designed vibration signal acquisition system can complete the acquisition and field analysis of vibration signals under complex working conditions, and has good engineering application value.

**Keywords:** hydraulic valve; vibration signal; vibration transducer; microprocessor; wireless transmission; high-order spectral analysis

收稿日期:2024-04-09

**基金项目:**河南省高等学校重点科研项目计划支持(22A413006,23B460018,23A460031);河南省科技攻关项目(212102210623,232102320086,232102241022,232102110297);河南应用技术职业学院校级科研项目(2022-KJ-45);河南应用技术职业学院青年骨干教师资助项目(2022-GGJS-J003);河南应用技术职业学院首席技师资助项目(2023-SXJS-JDOI)

**第一作者:**梅二召(1989—),男,河南平顶山人,硕士,讲师,研究方向为信号采集与处理和液压阀故障诊断。E-mail: 573634085@qq.com

**通信作者:**魏新华(1969—),男,河南信阳人,硕士,教授,研究方向为信号处理。

## 0 引言

当液压系统出现异物或者液压元件丧失原有基本功能,会影响液压设备正常工作,从而造成液压设备故障<sup>[1-2]</sup>。液压系统故障具有隐蔽性强、早期不易发现、故障点难以确认等特点<sup>[3]</sup>。对液压设备进行故障诊断是从液压设备工作原理出发,分析液压系统工作过程中,各个元件对液压设备的影响。但在实际工作过程中,如何快速诊断故障发生的位置并提出相应的整改措施,是故障诊断的关键。

液压设备在工作过程中,主油路来油、控制油路和回油接通过程中,主油路压力过高、支撑回路电磁阀振动引起控制油路压力不稳造成支撑回路压力不稳等都会造成液压系统的振动,而正常工作的液压系统有其固有的振动频率<sup>[4-6]</sup>。因此当液压设备出现故障时,液压系统的振动信号将发生变化。通过电子信息技术采集液压系统的振动信号,并对振动

信号进行现代数字信号分析,在获得其固有振动频率基础上发掘振动信号中不易发现的故障信息,可以实现对液压设备进行故障诊断的目的。

## 1 系统整体方案设计

液压阀高精度振动信号采集分析系统主要由上位机和下位机两部分组成。上位机具有采集数据的收集、预处理、高阶谱分析、图形信息展示和历史数据存储等功能,主要由蓝牙无线模块、USB 转 TTL 模块、上位机供电模块和计算机组成。下位机具有振动信息的采集、振动上下限报警提示、下位机振动信号的数据存储和振动信息的无线传输等功能,主要有蓄电池供电模块、传感器数据采集模块、下位机参数调整的按键控制模块、OLED 显示模块、ARM 微处理器控制模块、蓝牙无线传输模块、声光报警模块和数据存储模块,其整体方案设计如图 1 所示。

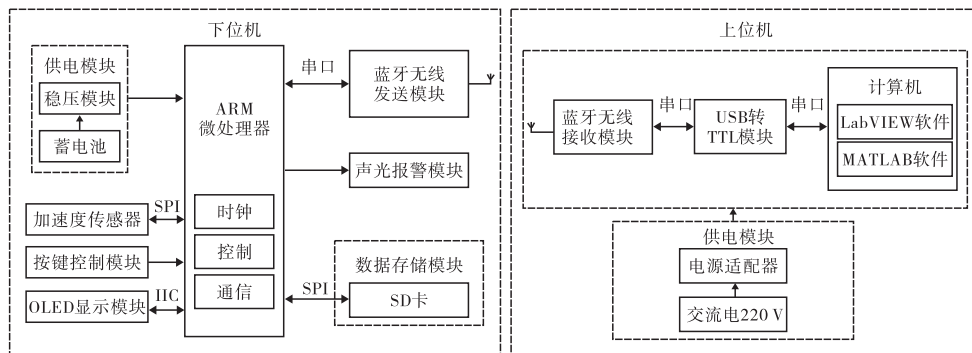


图1 液压阀高精度振动信号采集分析系统整体方案设计

加速度传感器采用三轴加速度测量传感器,通过 SPI 与 ARM 微处理器进行数据传输,获得的振动信号在下位机中经过与设定的极限报警值进行对比分析后,经蓝牙无线传输模块传到上位机软件中。在上位机 LabVIEW 软件中对获得的振动信号进行平滑滤波处理后,将振动信号的时域波形进行展示。利用 LabVIEW 软件强大的数据分析能力,调用 LabVIEW 软件中的 FFT. VI 可以方便地对振动信号进行快速傅里叶变换,将变换后的振动信号进行频域波形的展示,调用 LabVIEW 中的 MATLABScript Node,使用 ActiveX 调用 MATLAB 中运行的高阶谱分析进行振动信号的高阶谱分析。在系统设计过程中,考虑到实际振动信号采集过程的复杂性和采集现场的不确定性,振动信号采集下位机中还设计了用于本地存储的数据存储模块,在数据存储模块中利用 W25Q128 芯片存储振动系统设置值防止掉电后丢失,利用 SD 卡实时存储采集到的振动数据,防

止上位机与下位机无法数据通信时振动信息的丢失。

## 2 振动信号采集系统硬件设计

### 2.1 传感器数据采集电路设计

在整个液压系统中,液压泵是产生油压的关键,液压泵旋转运动过程中产生的流量脉动在管路传输过程中受其管路挤压后形成压力脉动现象,振动在液压油流动过程中传至整个液压系统<sup>[7-8]</sup>。因此,液压阀的机械振动跟液压泵的振动密切相关。以液压系统中常用的柱塞泵为例,其脉动频率可以根据液压泵的转速和柱塞数进行计算,表达式如式(1)所示:

$$f = \frac{nZ}{60} \quad (1)$$

式中: $Z$  为液压泵泵室的压力循环数; $n$  为液压泵的转速。

以某液压系统中液压泵实际工作情况和式(1)计算分析液压泵出口管道内液压脉动固有频率来看,慢车原始频率为 441 Hz、2 倍频 882 Hz、3 倍频 1323 Hz,最大原始频率为 630 Hz、2 倍频 1260 Hz、3 倍频 1890 Hz<sup>[9]</sup>。在液压系统振动信号分析过程中,振动信号采集系统的采样频率要覆盖到常用液压系统的振动频率范围。采用 ADXL357 三轴加速度传感器,最高采集频率可以达到 2000 Hz,能够满足常用液压采集系统的频率要求。另外,ADXL357 测量量程为  $\pm 200$  g,测量范围宽;工作电流为 0.04 A,工作电压为 3.3 ~ 5 V,适应于移动设备电池供电时长时间工作;具有串口 ASCII 输出、字符串输出以及 AT 指令控制功能,易于集成与应用。在传感器数据采集电路设计实际应用中,考虑到传感器布设过程中振动信号采集环境的复杂性,同时为防止安装位置受到尺寸限制,也为了让传感器能够紧贴采集系统和便于安装振动传感器,传感器数据采集电路以分离模块化为载体,振动信号采集单元通过杜邦线与控制板相连,在控制板上预留连接接口如图 2 所示。

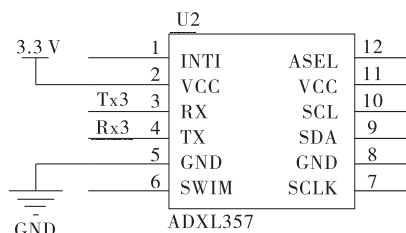


图 2 ADXL357 振动信号采集电路图

## 2.2 主控模块电路设计

从控制器的功能和稳定性上考虑,采用由 STM32F103C8T6 作为微处理器的主控板,能够完成对 ADXL357 采集振动信号的存储、分析和数据传输等功能,电路原理图如图 3 所示。该主控芯片使用高性能的 ARM<sup>®</sup> Cortex<sup>™</sup> - M3 的 32 位 RISC 内核的微处理,最高时钟频率可达 72 MHz,工作电压范围为 2.0 ~ 3.6 V。因此,在 STM32F103C8T6 最小系统模块中包含有 AMS1117 - 3.3 电压转换芯片,将外置的 5 V 电源适配器或者移动电源电压转化至 3.3 V 供主控芯片使用。

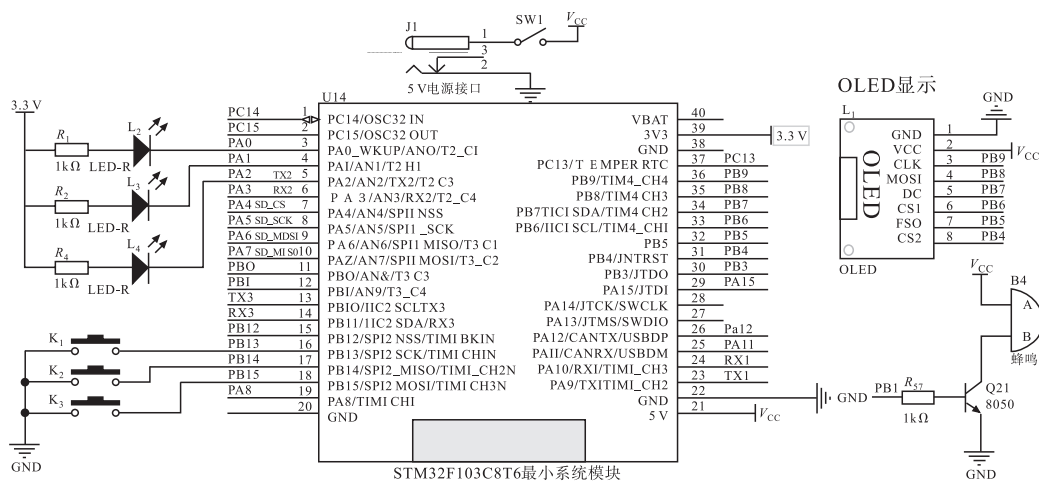


图 3 STM32F103C8T6 主控模块电路图

另外,在主控模块中还设计了用于调节振动信号阈值的独立按键电路,按动按键  $K_1$  一次用于设定 X 轴方向振动的阈值,按动按键  $K_1$  两次用于设定 Y 轴方向振动的阈值,按动按键  $K_1$  三次用于设定 Z 轴方向振动的阈值,当完成对应方向阈值调节后再按动按键  $K_1$  表示确定设定值。按键  $K_2$  用于加大阈值的调节,按键  $K_3$  用于减小阈值的调节。当振动值超过设定值以后进行声光报警, $L_2$ 、 $L_3$  和  $L_4$  所对应的 LED 灯分别用于 X 轴、Y 轴和 Z 轴的灯光预警,同时蜂鸣器进行报警。OLED 用于实时显示采集的振动信号值。

## 2.3 无线数据传输电路设计

根据采集系统对信息传递可靠性和便利性的要求,系统采用蓝牙模块进行数据传输。蓝牙作为一种低成本近距离的无线连接方式广泛应用于各类移动终端,这也为采集系统的适用性提供方便<sup>[10-11]</sup>。因此,采用蓝牙进行无线数据传输既可以满足数据传输的要求,又能够将上位机软件布设在各类智能设备中,降低了系统对上位机运行环境的限制。系统采用 HC - 05 无线蓝牙模块实现下位机与上位机的无线数据传输,其连接接口如图 4 所示。HC - 05 模块能够与搭载安卓操作系统的、具有蓝牙通信的

移动终端相连,也可以通过搭载 HC-05 无线蓝牙接收模块和转串口模块相连后与计算机进行串口通信。

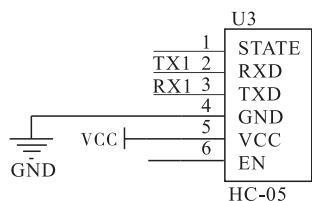


图4 HC-05 蓝牙模块电路图

## 2.4 数据存储电路设计

在实际应用过程中,因为采集数据现场的复杂性,会存在各种各样的问题,为了更加安全地存储实验数据,在数据采集电路中设计存储电路用于保存实时数据。数据存储电路在上位机突然掉电或者系统受到外界干扰无线数据传输出现问题时,可以在采集数据的本地获取采集数据。因此,在存储电路中采用能够高速数据存储并且便于数据转移的SD卡存储进行本地数据的实时存储。在SD卡中装载FatFS文件系统可以方便地对SD卡中的文件和数据进行读写<sup>[12-13]</sup>。另外,SD卡与主控板进行数据传输时支持两种工作模式:SD模式和SPI模式<sup>[14]</sup>,相较于SD模式而言,SPI模式速度没有SD模式快,但采用SPI模式时可以方便地使用STM32F103C8T6集成的SPI接口,传输速度在2 Mbps ~ 18 Mbps,能够满足系统数据存储要求,SD卡与STM32F103C8T6连接的电路图如图5所示。

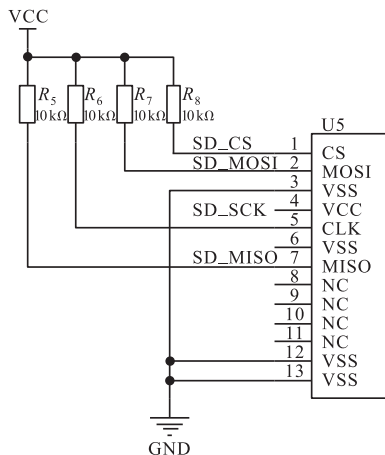


图5 SD卡与STM32F103C8T6连接的电路图

## 3 振动信号采集系统软件设计

### 3.1 下位机程序流程图

下位机程序主要完成数据的采集、预警、存储和传输,主程序流程图如图6所示。在程序设计中,通

过串口读取ADXL357获得三轴振动加速度信号,通过按键处理函数,对3个轴阈值的设定。当采集的振动信号大于3个轴设定的阈值时,调用声光报警函数进行报警,同时将采集到的振动信号显示到板载的OLED显示屏上,并对采集到的振动信号进行SD卡的数据存储。最后,将采集到的振动信号通过蓝牙无线通信的方式传送到上位机软件中。

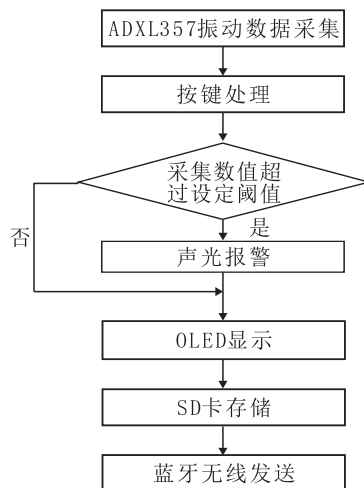


图6 主程序流程图

### 3.2 LabVIEW 数据采集模块

上位机与下位机通过串口进行数据传输时,首先要对数据格式进行确认,串口设置程序框图如图7所示。根据下位机对串口数据传输的设置,LabVIEW的波特率设置为9600 bps,数据位为8位,停止位为1位,不设置数据校验位。硬件流控制常用的是RTS/CTS流控<sup>[15]</sup>。RTS为输出信号,用于指示本设备准备好可接收数据,低电平有效,低电平说明本设备可以接收数据。CTS为输入信号,用于判断是否可以向对方发送数据,低电平有效,低电平说明本设备可以向对方发送数据。将参数设置好之后点击运行开始数据采集,系统就会自动进入采集程序。

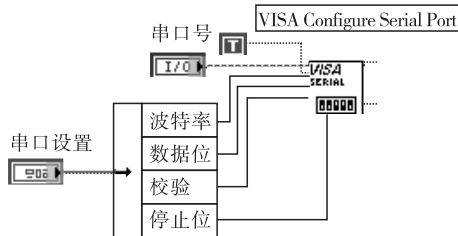


图7 串口设置程序框图

### 3.3 数据存储模块

为了方便对历史数据的查看,系统采用txt格式对采集数据进行存储。在数据存储程序中,通过连接字符串函数将x轴、y轴、z轴和采集经历时间连



接成一维字符串数据数组进行存储。通过调用写入字符串至文件子 VI 将采集到的振动信号存储到 txt 文档中, LabVIEW 数据存储程序框图如图 8 所示。

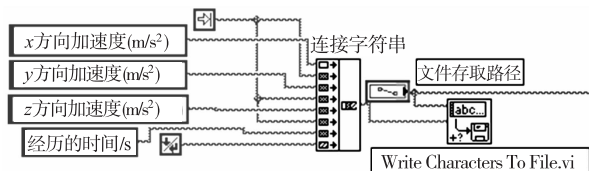


图 8 数据存储程序框图

### 3.4 FFT 数据处理模块

在振动信号处理前,需要对采集到的振动信号进行均值滤波处理,处理后的函数进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)分析<sup>[16]</sup>。由于离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)运算时工作量大,FFT 利用复数指数函数  $W_N^{nk} = e^{-j2\pi nk/N}$  的对称性和周期性特点,减小运算的量级<sup>[17]</sup>。将均值滤波处理后的各轴振动信号送入到功率谱分析处理子 VI 中进行 FFT 分析和展示,如图 9 所示。

### 3.5 高阶谱分析模块

传统功率谱分析的液压阀故障诊断系统

中,缺乏频率成分间的相位关系,不能够处理非最小相位系统和非高斯信号<sup>[18]</sup>。但实际液压阀工作过程中,振动信号中包含的故障信息成分复杂,为了能够对微弱的故障信息进行有效地识别,采用高阶谱分析模块<sup>[19]</sup>。LabVIEW 采用 ActiveX 技术调用 MATLAB script 脚本节点,利用 MATLAB 强大的数学运算能力对各个坐标轴的振动信号进行高阶谱分析,程序框图如图 10 所示。在实际应用中,考虑到数据运算和 LabVIEW 图形展示的便利性,选择高阶谱中最简单的双谱进行运算和图形展示,来发掘液压阀振动信号中的微弱故障信息。

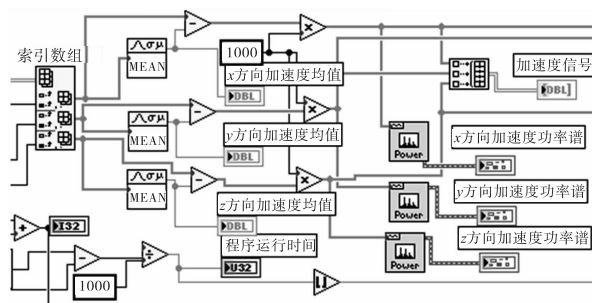


图 9 FFT 数据处理程序框图

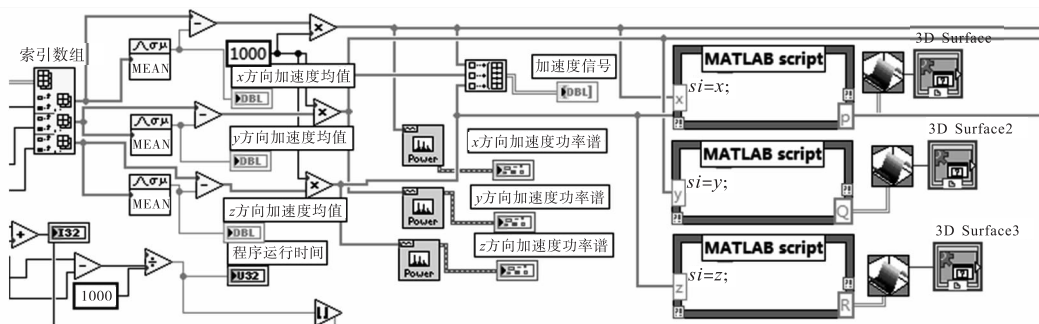


图 10 高阶谱分析程序框图

## 4 系统测试与验证

### 4.1 液压阀故障采集系统的测试对象

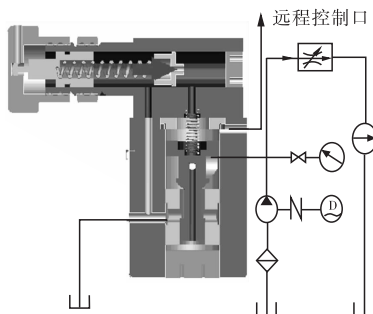


图 11 先导式溢流阀结构示意图

以先导式溢流阀为振动数据采集对象,模拟先导式溢流阀工作过程中存在的故障信息,对比正常

状态下采集到的振动信号和故障状态下采集的振动信号时域、FFT 功率谱和 AR 双谱的波形图来分析振动采集系统的有效性。先导式溢流阀在整个液压系统中起到控制系统压力、确保整个液压系统稳定运行的关键作用。因此,先导式溢流阀广泛应用于各种液压系统中,其结构示意图如图 11 所示。

在振动信号采集的系统测试过程中,根据先导式溢流阀在实际工作中常见故障设定人为故障信息。故障一,剪短主阀芯弹簧模拟溢流阀长时间工作主阀芯弹簧磨损;故障二,剪短先导式溢流阀的先导阀弹簧模拟先导阀长时间工作先导阀弹簧磨损。在正常工作、故障一和故障二测试过程中,控制油压回路压力为 1 MPa,设置串行口数据采集频率为 125 Hz,系统稳定后采集 2 min 振动信号。

## 4.2 LabVIEW 实现数据的显示和分析

对先导式溢流阀振动信号进行采集,对比分析正常状态、故障一状态和故障二状态,统一选取

$x$  轴振动信号获得时域波形、FFT 变换后的功率谱以及高阶谱的波形进行分析,如图 12、图 13、图 14 所示。

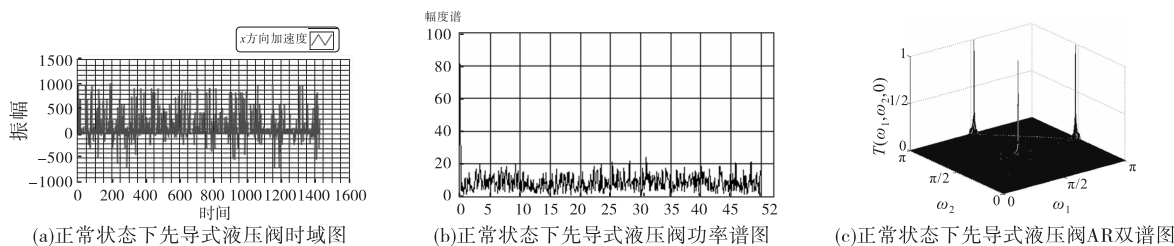


图 12 正常状态下先导式液压阀波形图

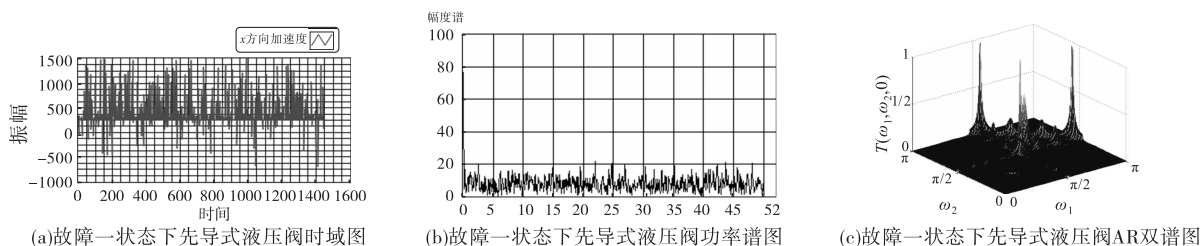


图 13 故障一状态下先导式液压阀波形图

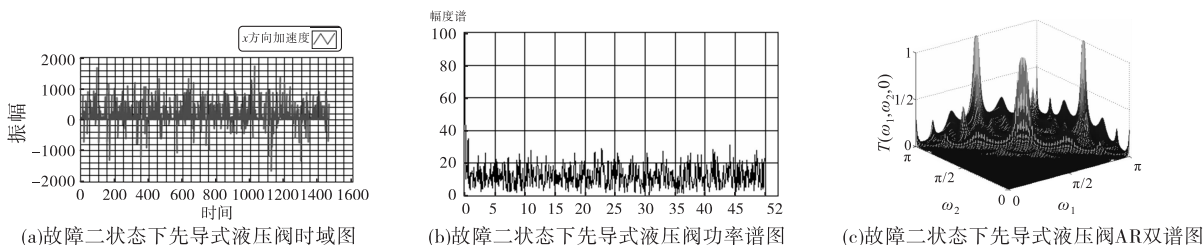


图 14 故障二状态下先导式液压阀波形图

经过对比正常、故障一和故障二状态下的时域波形、频谱图和 AR 双谱图可以看出,不同状态下时域波形图 12(a)、图 13(a)和图 14(a)波形虽然有差异,但是很难区分不同状态下波形的特征信息。经过 FFT 后的频谱图 12(b)、图 13(b)和图 14(b)都可以看出一个明显的谱峰值,但是差别也不大。经过高阶累积量分析后的 AR 双谱图 12(c)、图 13(c)和图 14(c)中可以清晰地看到三种状态下存在明显的三个谱峰,同时相较于正常状态下,故障状态中波峰数量明显变多,图像信息更加复杂,说明在故障状态下,不仅包含先导式液压阀的固有机机械频率还增添了故障状态信息。

## 5 结论

(1) 液压阀高精度振动信号采集分析系统是基

于 STM32 和 LabVIEW 开发的嵌入式专用设备,通过液压阀振动信号的频率确定了将三轴加速度传感器 ADXL357 用于液压阀故障分析系统的振动信息采集单元,考虑液压阀实际工作状态采用蓝牙通信

来拓宽振动采集系统应用场景,同时为了保障振动系统在采集过程中数据的可靠性,在下位机电路板中设计用于实时采集的 SD 卡存储采集的振动数据,在上位机软件中借助 LabVIEW 强大图像展示功能和 MATLAB 的数据处理能力,设计了一个便捷操作和展示的人机交互界面;

### 参考文献:

- [1] 周琪,孟利民,李强,等. 调速阀堵塞故障分析及数字化反馈系统设计[J]. 液压与气动, 2023, 47 (08): 117 - 123.
- [2] 胡晨,李志敏. 基于多特征阈值判据的航空液压柱塞泵故障诊断方法研究[J]. 现代制造工程, 2023(09): 145 - 151.
- [3] 吴文兵,梅二召,欧阳鑫,等. 基于复数信号的三阶累

- 积量微分性质研究及应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36 (08): 1073 - 1079.
- [4] STOSIAK M; KARPENKO M; DEPTUŁA A, et al. Research of vibration effects on a hydraulic valve in the pressure pulsation spectrum analysis[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(2): 301 - 301.
- [5] 唐宏宾, 王胜学, 谭建, 等. 基于信息融合的高压大流量柱塞泵故障诊断试验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32 (02): 9 - 17.
- [6] GAREEV A. M., SHAKHMATOV E. V., PROKOFEV A. B., et al. Machine learning method for predicting remaining useful life of hydraulic equipment [J]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2022, 51(3): 253 - 260.
- [7] 李永涛, 杨波, 木合塔尔·克力木. 液压系统流体脉动抑制方法综述[J]. 机械工程学报, 2022, 58 (16): 344 - 359.
- [8] 何庆飞, 王旭平, 李禹生. 基于 MCKD 和峭度的液压泵故障特征提取[J]. 机床与液压, 2023, 51 (01): 208 - 211.
- [9] 刘玉柱, 陆永华. 航空液压泵出口管路流固耦合固有频率计算分析与改进[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(05): 164 - 166 + 175.
- [10] 陈鸿海, 孙学良, 赵鹤鸣, 等. 高增益蓝牙天线的设计与应用[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42 (02): 197 - 206.
- [11] 朱林海, 洪晓芳, 高芳芳, 等. 基于蓝牙监控的智能循迹运输小车设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021 (03): 126 - 130.
- [12] 汤才刚, 刘京京, 沈瑞东. STM32 单片机的 SD 卡存储器读写模块设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20 (12): 75 - 78 + 83.
- [13] 谢星志, 孟祥涛, 刘宁, 等. 基于 FPGA 的可穿戴式步态测量系统 [J]. 电子设计工程, 2023, 31 (09): 181 - 185.
- [14] 王晨辉, 郭伟. 基于 STM32 的泥石流远程监测系统设计 [J]. 电子技术应用, 2018, 44 (05): 63 - 66.
- [15] 谢康康, 郭斌, 胡晓峰, 等. 基于视觉定位的四保阀开启压力自动调节系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32 (03): 9 - 17.
- [16] 钱曙杰, 柯尊高, 黄维纲, 等. 基于 FFT 算法的扶梯振动故障诊断研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2023 (10): 73 - 78.
- [17] 杨帆. 汽轮机叶片静态频率测量实验系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2019(05): 37 - 39 + 52.
- [18] 耿文飞, 梅二召, 吴文兵. 高阶谱在分流集流阀故障诊断中的应用 [J]. 煤矿机械, 2015, 36 (10): 306 - 309.
- [19] 梅二召, 范景峰, 肖玉玲, 等. 基于耦合双谱微分性质的微弱故障信息提取及应用[J]. 机床与液压, 2021, 49 (16): 198 - 203.

(上接第 8 页)

## 4 结语

随着新能源电力发展, 火电机组承担的深度调峰任务越来越多, 烟气脱硝系统的运行工况也更加复杂多变, 运行人员面临的监视调整任务更加艰巨。该文立足火电厂现有设备的功能潜力, 开发出成本较低、功能可靠、适应当前阶段的 SCR 系统智能辅助监盘服务。实际应用表明, 智能辅助监盘系统有效降低了人员工作强度, 提高了烟气脱硝系统的智能化水平, 具有良好的经济效益和社会效益。

### 参考文献:

- [1] 李志远. 基于大数据火电厂精确喷氨控制系统[J]. 绿色科技, 2022, 24(02): 178 - 180.
- [2] 张念. 电厂脱硝装置智能喷氨系统解决方案[J]. 流体测量与控制, 2021, 2(04): 35 - 41.
- [3] 许静姝. 基于集成学习和智能寻优的燃煤锅炉 SCR 脱硝控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2022: 107 - 122.
- [4] 尚桐, 朱仓海, 朱建宏, 等. SCR 脱硝系统深度调峰设

计及设备选型优化探讨[J]. 洁净煤技术, 2023, 29 (S2): 388 - 392.

- [5] 汪涛, 吴沛航, 胡高斌, 等. 660 MW 锅炉深度调峰工况下 SCR 装置运行分析[J]. 大众标准化, 2023 (03): 140 - 143.
- [6] 孔祥鹏, 吕金秋, 李阳, 等. SCR 脱硝热解炉同时具备热解尿素溶液和氨水的可行性研究[J]. 电站系统工程, 2023, 39(03): 81 - 82.
- [7] 张志良, 刘富强, 王海涛. 国内首台烟气热解尿素制氨脱硝工艺研究与应用[J]. 水电站机电技术, 2022, 45 (10): 136 - 138.
- [8] 祝宝营. 基于尿素热解炉的 SCR 脱硝系统控制研究与应用[J]. 山东电力技术, 2022, 49(08): 79 - 84.
- [9] 许子明, 姜浩, 赵文杰. 基于 IHHO - LSTM 的 SCR 脱硝反应器出口  $\text{NO}_x$  浓度预测[J]. 电力科学与工程, 2023, 39 (08): 71 - 78.
- [10] 刘建军, 赵旭, 张卫东, 等. 基于 CNN(1D) - LSTM 模型的电站锅炉 SCR 入口  $\text{NO}_x$  浓度预测[J]. 电子测量技术, 2023, 46 (13): 59 - 65.