

应用 LabVIEW 软件开发的气体绝缘金属封闭 开关设备声振联合检测系统

王永泉^{1,2,3}, 杨朝旭^{1,2,3}, 周淳^{1,2,3}, 张涛^{1,2,3}, 陶思宇⁴

(1. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学陕西省先进飞行器服役环境与控制重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安;
4. 西安子国微科技有限公司, 710065, 西安)

摘要: 为在线采集气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)内部异物缺陷作用下的声发射、振动信号,并满足 GIS 检测工作需要数据采集、记录、异物缺陷分析和评估等对检测系统功能的要求,基于 LabVIEW 软件开发了一套 GIS 声振联合检测系统。首先,在分析系统功能需求的基础上,采用声发射、振动传感器和高速数据采集卡等搭建多通道便携式 GIS 声振信号采集装置;其次,运用模块化和功能化的设计思想,在软件设计中重点开发集声、振两路信号的采集与记录、分析与处理、存储与查看等功能模块,开发测试和评估界面;最后,利用环境类传感器搭建 GIS 检测场景环境变量检测模块,并调用 Matlab 软件对提取到的声振信号进行频谱分析和结果评估。实验结果表明,系统通过连接测量传感器可有效获得 GIS 异物缺陷产生的声振信号,实现 GIS 内部异物缺陷自由金属颗粒的三维动态仿真和飞行图图谱功能。所开发系统功能可扩展性强,软件界面简洁直观、易于操作,对 GIS 异物缺陷检测准确率高于 90%,为 GIS 检测工作带来了便利。

关键词: 气体绝缘封闭开关设备; LabVIEW; 声振联合; 异物缺陷检测

中图分类号: TP311.1; TM84 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202106016 **文章编号:** 0253-987X(2021)06-0131-10



OSID 码

A GIS Acoustic and Vibration Joint Detection System Developed via LabVIEW Software

WANG Yongquan^{1,2,3}, YANG Zhaoxu^{1,2,3}, ZHOU Chun^{1,2,3}, ZHANG Tao^{1,2,3}, TAO Siyu⁴

(1. State Key laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Environment and Control for Flight Vehicle, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
4. Xi'an Ziguo Micro Technology Co. Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: A GIS (gas insulated switchgear) acoustic vibration joint detection system based on LabVIEW software is developed for the purpose to collect the acoustic emission and vibration signals under the action of foreign body defects in GIS online, and to meet the requirements of system functions, such as data acquisition, recording, analysis and evaluation, of foreign body defects. Firstly, based on analyzing the functional requirements of the system, acoustic emission, vibration sensors and high-speed data acquisition cards are used to build a portable multi-channel GIS acoustic and vibration signal acquisition device. Secondly, using the design idea of modularization and functionalization, the software design focuses on the development of the

collection and recording, analysis and processing, storage and viewing of the two-way signal of acoustic and vibration, and the development of testing and evaluation interface. Finally, environmental sensors are used to build a detection module of environmental variables in GIS detection scene, and Matlab software is called to perform spectrum analysis and result evaluation of the extracted acoustic and vibration signals. Experimental results show that the system can effectively obtain the acoustic and vibration signals generated by foreign body defects in the GIS by connecting the measuring sensors and realize the 3D dynamic simulation and flight map function of the free metal particles of foreign body defects in the GIS. The developed system has strong functional extensibility, simple and intuitive software interface, and is easy to operate. The detection accuracy of GIS foreign body defects is greater than 90%, which brings convenience to GIS inspection work.

Keywords: gas insulated switchgear; LabVIEW; acoustic vibration union; foreign body defect detection

气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)由断路器、隔离开关、接地开关和母线等零部件组成,并且封装在充有 SF₆ 高压绝缘气体的金属外壳中^[1]。由于 GIS 设备具有结构紧凑、占地面积小和可靠性高等优点,因此在电力行业得到广泛应用^[2]。但是 GIS 设备在制造、运输和投入使用环节中容易产生异物等缺陷,一旦出现故障,将导致整个电力系统发生严重故障^[3]。为了降低 GIS 设备故障概率攀升而影响电网的稳定程度,需要定期开展检修工作。传统 GIS 设备检修工作繁杂,采用拆解 GIS 设备的检查方法会造成停电时间长等问题,而且效率较低^[4]。目前,国内外针对 GIS 内部缺陷的检测方法主要是局部放电检测法。该方法以检测 GIS 局部放电发生时产生的电脉冲、电磁波、超声波、光及 SF₆ 气体分解化学物质等为基础,可分为电学检测法、声学检测法、光学检测法和化学检测法等。

自 20 世纪 80 年代以来,国内外研究机构对常用的局部放电检测技术,如脉冲电流法、特高频(UHF)法和超声波测量法检测 GIS 缺陷开展了大量研究^[5-8]。脉冲电流法测量频率低、抗干扰能力较弱,不适宜在现场应用。特高频法的灵敏度依赖于传感器的可靠性。对 GIS 进行特高频局部放电检测的传感器分为内置式和外置式两种,内置式需要传感器内置传感耦合器以保证测量精度,外置式对测量环境要求较高。超声波测量法抗电磁干扰性强,并且对自由金属颗粒具有极高的检测灵敏度。声发射(AE)是材料局部能量快速释放过程中释放瞬态弹性波的现象^[9]。声发射检测技术属于超声波测量法,基本原理是利用传感器接收声发射源信号,经过信号放大和数据采集,对采集到的数据进行分

析处理,最后获得材料内部缺陷特性等信息。声发射检测技术具有适用高频段、动态特性好和信号源来自测量对象本身的特点。振动是 GIS 运行过程中出现缺陷状态而引发的现象。研究表明,振动现象会导致振动信号幅值增加、频域分量增多^[10]。振动检测技术通过对振动信号计算分析,可以有效实现 GIS 带电检测,具有抗电磁干扰性强和对低频信号灵敏度高的特点。

综上,声振联合检测兼顾低频和高频两种测量方法的优点。本文采用声发射和振动联合检测的方法进行 GIS 内部异物缺陷检测,该方法可以在 GIS 运行或实验时应用,对 GIS 内部不会产生任何影响,是一种实时、动态、无损的检测方法。

目前,GIS 故障检测系统装置多为单一的声发射局部放电检测仪,而且商用系统成本普遍较高,存在体积大、可扩展性弱且不能二次开发的问题。为了满足 GIS 设备检测工作对检测装置便携式的要求以及检测系统对数据采集、存储、分析和可扩展性等功能的需求,开发一套便携式 GIS 设备检测系统具有较高的工程应用价值,可为设备缺陷状态评估和检修方案提供依据和指导。虚拟仪器技术可以利用计算机实现仪器管理、组织仪器系统,并通过软件实现部分硬件电路的目标,为测试测量系统提供了一种高效、灵活的开发方案^[11]。本文针对电网变电站检修人员在 GIS 检测工作中的实际需求,应用 LabVIEW 软件开发了一套适合工程现场应用的 GIS 设备声振联合检测系统。

1 系统方案设计

GIS 设备常见故障有自由金属颗粒、金属突起

物缺陷等,这些故障在 GIS 运行时形成高场强区从而导致发生局部放电现象^[12-13]。为了提高检测效率和抗干扰性,系统设计采用声发射和振动两款传感器同时测量局部放电信号,开发了一套 GIS 声振联合检测系统,包括硬件平台搭建和软件程序设计。考虑到变电站现场实际情况,硬件设计采用模块化并且全部封装在自制工控机中,软件设计采用 LabVIEW 和 Matlab 混合编程的方法实现,具有数据采集与显示、信号触发捕捉、数据分析与评估和数据管理等功能,是系统设计的重点。该设计的优点是:

- (1)系统硬件装置将各个模块单元全部封装在自制工控机中,可扩展性强,体积、质量适中,成本低,具有便携式优点;
- (2)声振联合检测法兼顾低频和高频两种测量方法,可检测频率范围宽,灵敏度高且抗干扰性强;
- (3)结合 GIS 异物缺陷识别算法,通过 LabVIEW 有效地展示了 GIS 声振信号时频图以及 GIS 内部自由金属颗粒飞行图谱,评估结果有意义;
- (4)系统软件功能全面,并可依据实验条件灵活设计,可进行二次开发,界面简洁美观,易于操作,适合工程现场应用。

2 系统硬件设计

GIS 声振联合检测系统硬件设计以工控机为核心,由声发射、振动、环境类传感器、信号供电分离单元、恒流电压单元、高速数据采集卡和供电单元组成。系统硬件结构框图如图 1 所示,其中,除传感器外其他部件封装在工控机内。工控机侧面板预留有信号输入接口,可以连接 8 路模拟量信号。侧面板模拟量信号输入接口通过低噪声线缆分别与声发射传感器、振动传感器和环境类传感器信号测量输出端连接。信号输入接口如图 2 所示。

(1)工控机采用 Intel® 酷睿 4 代高性能 i5 处理器,配置有信号输入接口、显示器、PCI 插槽、1 路千兆网口、2 路 USB 等输入/输出接口,具有体积小、功耗低的特点。作为 GIS 声振联合检测系统的硬

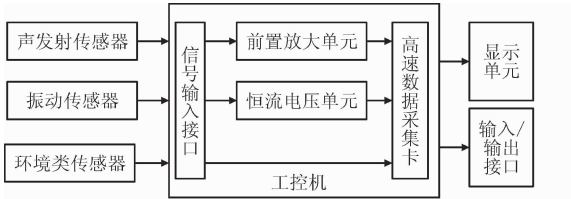


图 1 GIS 声振联合检测系统硬件结构图

Fig.1 Hardware structure of GIS acoustic vibration joint detection system



图 2 传感器信号输入接口

Fig.2 Sensor signal input interface

件平台满足体积、质量等要求。

(2)声发射和振动传感器分别用于检测 GIS 设备内部产生的声发射信号和低频振动信号。系统采用 30~140 kHz 的高灵敏度内置前放声发射传感器和频率带宽为 0.5~10 kHz 的低阻抗电压输出型振动传感器。本系统使用的声发射传感器和振动传感器如图 3 所示。其中,声发射传感器型号为 PXR04I,谐振频率为 40 kHz,10 dB 带宽为 30~140 kHz,灵敏度可达 120 dB,内置 40 dB 放大器;振动传感器型号为 13100,量程 5.1 mV/(m·s²),频率范围 0.5~10 kHz,谐振频率大于 32 kHz。

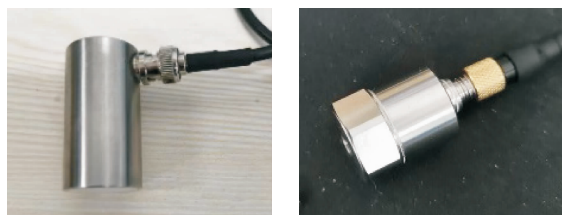
(3)环境类传感器用于检测大气压力、空气质量和温湿度等环境变量。

(4)信号供电分离单元主要是给声发射传感器供电并将信号分离以便数据采集。

(5)恒流电压单元主要是给振动传感器供电,同时采用交流耦合方式将传感器输出的直流偏置电压滤掉,从而保留振动测量信号,具有低噪声的优点。

(6)供电单元用于给整个系统供电,包括变压器、锂电池和降压单元。

(7)数据采集卡是外界采集信号进入计算机的枢纽,包括 A/D 转换、数字 I/O 输出等功能。根据奈奎斯特采样定理及 GIS 设备检测现场工程应用,为了真实还原模拟信号,取采样频率 f_s 为输入信号最高频率 f_{max} 的 5~8 倍,采用采样频率可达 800 kHz 的阿尔泰 PCI8757 高速数据采集卡作为声发射、振动等信号采集设备^[14]。PCI8757 高速数据采集卡转换精度为 16 位,输入量程 -10~+10 V,具备 8 kB 的 FIFO 存储器,支持 32 位 PCI 总线控制 DMA 数据传输方式,模拟量输入采用 4 路单端或差分方式。



(a)声发射传感器

(b)振动传感器

图3 声发射与振动传感器

Fig. 3 Acoustic emission and vibration sensor

3 系统软件设计

系统软件开发是基于美国国家仪器公司(NI)推出的LabVIEW虚拟仪器以及采集卡接口库函数实现的。LabVIEW是一种基于图形开发、调试和运行程序的集成化开发环境,图像化编程G语言是测量、数据采集和处理系统的理想选择^[15]。本系统软件程序设计基于LabVIEW 2018编程环境开发,是GIS声振联合检测系统的重要部分。

系统软件功能模块如图4所示,包括参数设置、数据采集与显示、信号分析与评估和数据管理。其中,参数设置模块完成系统参数的初始化;数据采集与显示模块实现信号波形和结果输出;信号分析与评估模块通过后台数据运算和函数调用实现声振信号时域分析、频域分析、特征提取和缺陷评估;数据管理模块完成数据的存储和查看等任务。

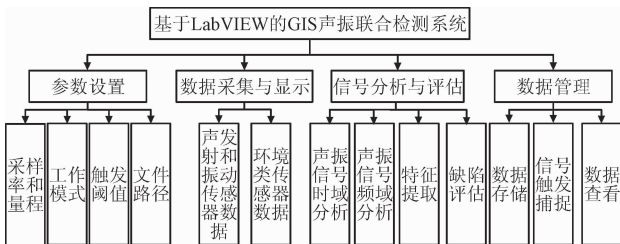


图4 系统软件功能模块组成框图

Fig. 4 Block diagram of system software functional modules

系统软件主要工作流程如图5所示。具体为:①启动程序进入操作界面;②系统初始化,如硬件参数设置和阈值设置等;③开始采集;④信号采集并记录,此时实现声振信号的连续测量、记录和显示;⑤信号触发捕捉,实时判断声振两路信号与触发阈值的大小,满足条件则捕捉当前信号;⑥对捕捉到的声振信号进行特征提取和时频分析等;⑦评估;⑧退出系统。

3.1 参数设置

参数设置模块包括量程设置、采样率设置、工作模式设置和文件路径设置等,通过弹出对话框的形

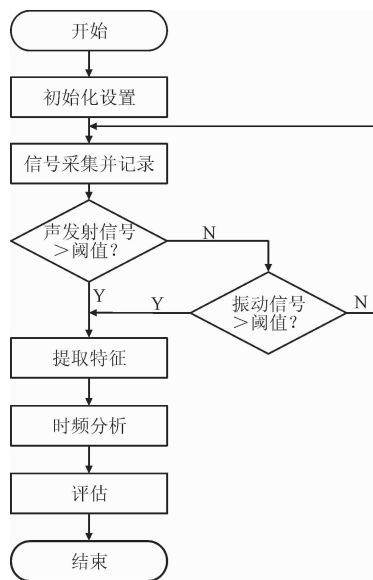


图5 软件主要工作流程图

Fig. 5 Main work flow chart of the software

式与系统界面共同完成系统采集量程、采样率、工作模式和文件存储路径的配置。参数设置界面中采样率的范围是3~800 kHz,输入量程有 ± 10 、 ± 5 、 ± 2.5 V,工作模式可配置为110、220、550 kV,文件存储路径自定义设置。

3.2 数据采集与处理

3.2.1 数据采集程序设计 数据采集程序主要由设备创建、采样设置和数据读取组成。其中设备创建使用逻辑号创建采集卡设备对象,实现软件系统与外部硬件通信;采样设置用于初始化配置AD硬件参数,如采集通道、触发模式、触发源和时钟源等,保证采样过程能够按照一定周期有序可控地进行;数据读取用于启动数据读取任务并将传感器采集到的信号转化为模拟电信号,同时将采集到的AD端口数据进行转换。本系统数据采集程序中设备创建对象使用的逻辑号取决于高速采集卡逻辑设备(ID)标识号,值为0;采样设置中触发模式配置为软件内触发,信号源为外部ATR触发源,触发类型为边沿触发,触发方向为负向触发,时钟源为内部时钟。

3.2.2 触发捕捉程序设计 信号触发捕捉程序的工作原理是系统在采集和记录声发射和振动两路传感器信号的同时,实时对比两路传感器信号的时域最大幅值和触发阈值的大小。触发捕捉程序如图6所示。如果声发射、振动信号最大幅值均未超过触发阈值,则系统继续采集和记录;反之,当声发射、振动信号其中任何一路信号达到触发阈值时,则捕捉该时刻声发射、振动信号波形,保存的信号波形用于

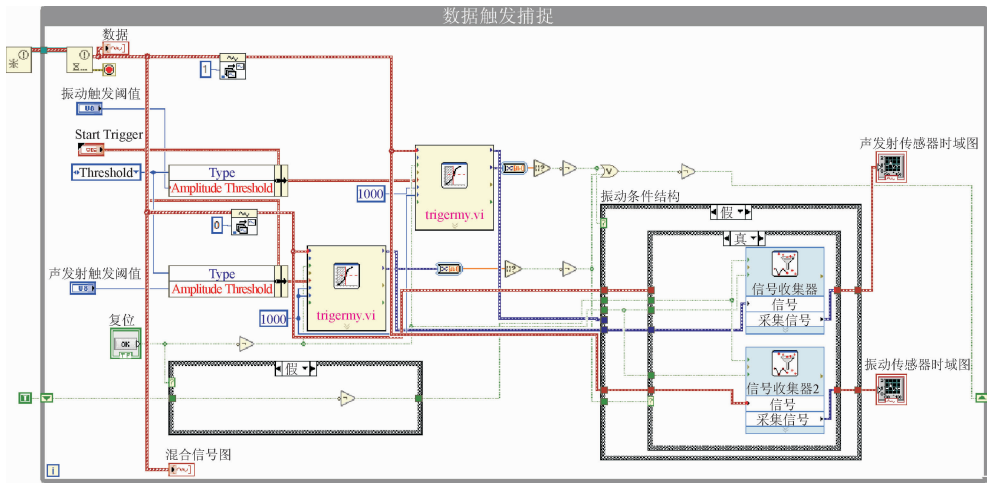


图 6 信号触发捕捉程序
Fig. 6 Signal trigger capture program

特征提取和频域分析等。

3.3 数据分析

系统数据分析程序的主要功能是对来源于数据采集卡的数据进行时域、频域分析。该部分程序采用 LabVIEW 和 Matlab 混合编程的方法,程序如图 7 所示。首先,读取声发射、振动信号并对其进行时域分析,时域参数分析用于得出信号各种统计参数,如信号的均值、有效值、最大值和最小值等有量纲特征参数;其次,通过 Matlab script 节点结合 Matlab 软件对其进行频域分析,频域分析将复杂的时间历程波形经过傅里叶计算分解为若干单一的谐波分量,分别绘制出两路信号的幅频图并得出信号幅度和峰值频率;然后,在 GIS 内部异物缺陷分类识别算法的基础上,将上一步提取出来的信号时频特征送给后台调用的 Matlab 程序实现 GIS 设备缺陷检测评估;最后,将评估结果显示出来。

3.4 数据管理

3.4.1 数据存储 数据存储程序是将时间点参数、

声发射、振动传感器采集到的信号波形数据等合并为数组,以数据形式存储至计算机中指定位置,可以在日后随时对其进行查看和相关分析。LabVIEW 中的 TDMS 文件是一种二进制记录文件,兼顾高速、易存取和方便等优势^[16]。因此,系统采用 TDMS 文件格式对采集到的声发射、振动信号进行存储。数据存储程序流程为:开启 TDMS,系统开始以流盘的方式将波形数据输入预先设定的磁盘内;当写完 TDMS 文件后,LabVIEW 会自动生成 *.tdms 文件和 *.tdms_index 文件,前者为数据文件,后者为索引文件。

3.4.2 数据查看 数据查看程序的主要功能是对系统运行过程中存储的声发射、振动信号波形进行查看,可以查看的历史数据包括系统后台连续采集的波形数据和触发捕捉的波形数据。

3.4.3 数据显示 数据显示程序是将系统运行状态、传感器信号强度、采集到的波形数据、数据分析

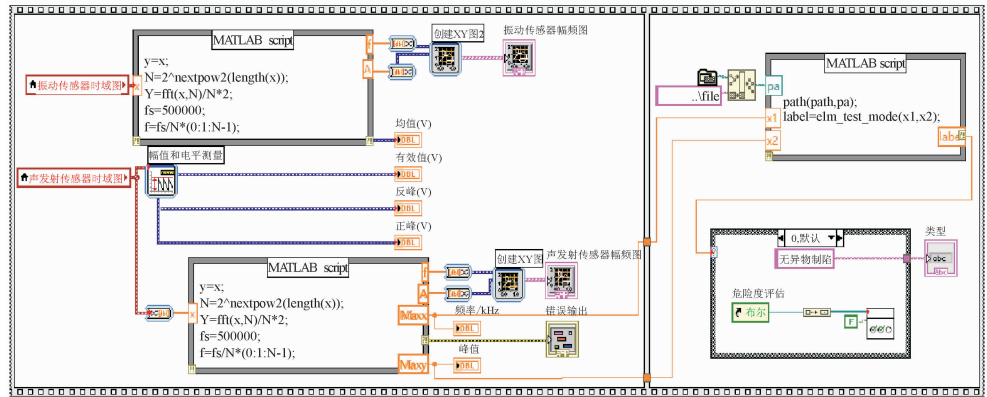


图 7 数据分析程序
Fig. 7 Data analysis program

结果等直观地展示在 LabVIEW 虚拟面板上。

(1)系统运行状态提示框。系统运行状态有:采集和记录、分析、加载波形、停止等。

(2)传感器信号强度。信号强度采用图形化水平进度条展示声发射、振动信号的大小。该部分显示控件如图 8 所示,将声振信号的最大幅值通过一系列的公式计算转化为信号强度显示在前面板。

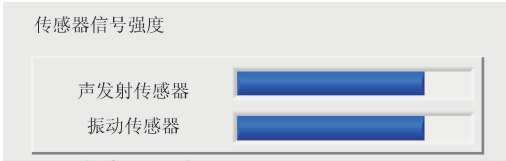


图 8 信号强度显示控件
Fig. 8 Signal strength display controls

(3)采集到的波形数据。系统前面板通过声发射、振动信号时域图展示采集到的波形数据。

(4)数据分析结果。结果包括声发射、振动信号幅频图、时域分析值、频域分析值、环境变量等。

3.5 环境变量检测模块

声发射和振动传感器通过接口为 BNC 或 SMA 的同轴电缆与系统测量信号输入接口连接。一方面传感器对工作环境参数范围有要求;另一方面信号传输受到环境温度的影响,如温度太低电缆芯子收缩造成拉断故障,如温度太高信号传输产生衰减。考虑到 GIS 声振联合检测系统经常在户外等环境恶劣的场景中工作,温度等环境参数变化较大,这些会对传感器信号传输产生衰减等,同时为了方便系统操作人员实时地掌握当前工作环境下的环境参数,设置环境变量检测模块。该部分程序用于实现系统实时监测温度、湿度等环境变量。为保证系统可靠运行,建议设备工作温度为 $-25\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,气压为 $67\sim 101\text{ kPa}$,湿度为 $0\sim 95\%$ 。通过连接内置探头的温湿度变送器、大气压力变送器和空气质量变送器,实时地采集和显示环境参数值。环境参数类型及测量范围如表 1 所示,输出信号为 $0\sim 5\text{ V}$ 电压。

表 1 环境类传感器主要参数

Table 1 Main parameters of environmental sensors

传感器	参数	测量范围
温湿度变送器	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$-40\sim +80$
	湿度/ $\%$	$0\sim 100$
大气压力变送器	气压/ kPa	$0\sim 120$
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$-40\sim +80$
空气质量变送器	PM2.5 的质量浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$0\sim 1\ 000$
	PM10 的质量浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$0\sim 1\ 000$

将测得的气压、温度等环境量显示在前面板上,环境参数值显示控件如图 9 所示。在某时刻,实验环境中测得温度为 $22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度为 60.7% ,大气压力为 97 kPa ,空气质量良好。

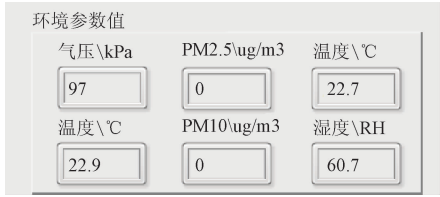


图 9 环境参数显示控件
Fig. 9 Environmental parameter display control

4 系统功能测试

为验证该系统对 GIS 设备的声振联合检测能力,搭建了 GIS 异物缺陷检测试验平台。该试验平台模仿了实际 GIS 运行时的环境状态,由试验电源、调压器、试验罐体(含高压电极)等组成。试验电源为有效值 220 V ,频率 50 Hz 的交流电;调压器实现升压作用,变比为 $1:50$;试验罐体上的高压导体电压可达 $\pm 110\text{ kV}$ 。测试时对 GIS 腔体充入一定压力的 SF_6 气体,将声发射、传感器接触面通过耦合剂与 GIS 腔体外壁黏接在一起,测量输出端通过低噪声线缆直接连接本系统的信号输入接口。具体布置方式示意图如图 10 所示。

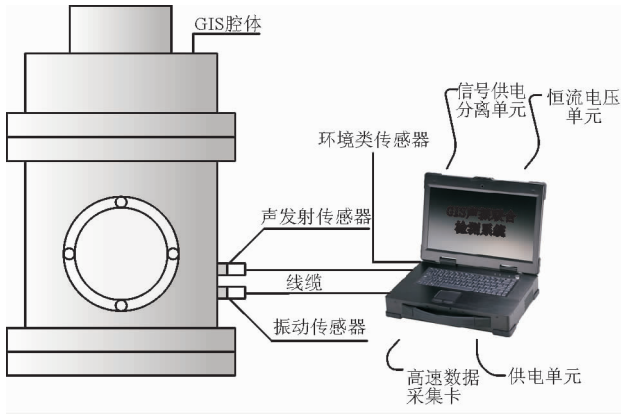


图 10 试验装置布置方式示意图
Fig. 10 Schematic diagram of the experimental device

系统硬件接口连接完成后,启动软件程序。GIS 声振联合检测系统软件界面由启动界面、测试界面和评估界面三部分组成。其中,启动界面实现登录系统和退出系统;测试界面包括数据可视化显示、信号分析、操作按钮和运行状态指示框等控件,直观地展示系统运行信息,确保系统各个模块有序进行;评估界面主要展示 GIS 内部异物缺陷自由金

属颗粒的三维动态仿真和飞行图图谱功能。运行系统程序后,首先进入启动界面,在该界面选择登录操作进入测试界面。系统测试界面如图 11 所示,由菜

单栏、状态栏、波形显示界面和文本显示界面组成,测试界面实时显示采集到的声振信号、信号强度以及环境参数,同时在后台连续记录波形数据。

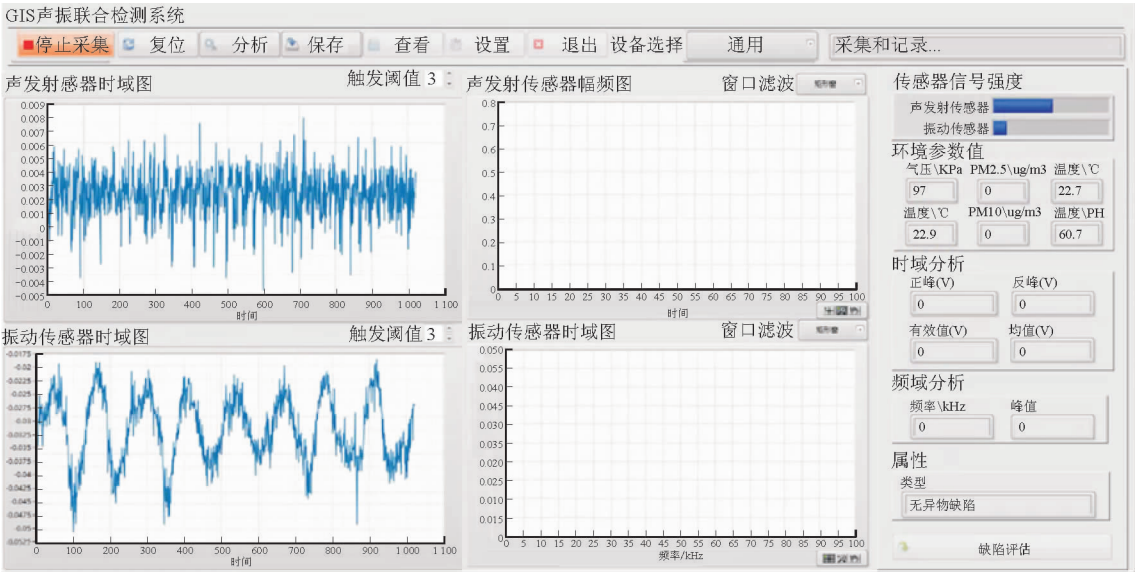


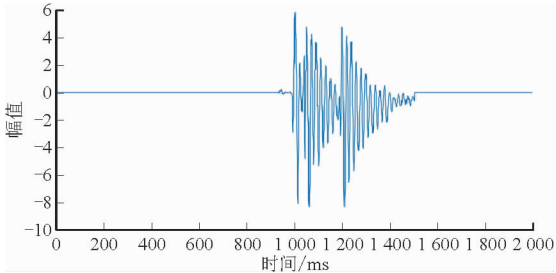
图 11 系统测试界面
Fig. 11 System test interface

实验过程中,通过软件测试界面阈值调节按钮将声发射和振动信号触发阈值均设置为 3 V,当其中任何一路信号达到触发阈值条件被触发后,声发射传感器和振动传感器时域图将显示捕捉到的触发信号。此时系统测试界面中触发捕捉的声振信号如图 12 所示。为了提高数据频谱分析精度,在 GIS

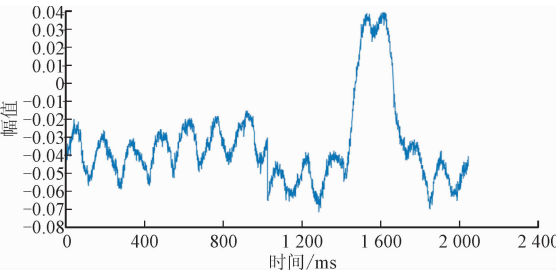
声振联合检测系统数据分析程序中添加窗口滤波函数选择设置功能,选择矩形窗、Hanning 窗或 Hamming 窗进行滤波处理。系统首先对声振信号采样序列选择窗口滤波函数进行滤波处理;其次进行快速傅里叶变换从而得到窗口滤波处理后的序列频谱;最后将频域分析后得到的频域图显示在声发射传感器和振动传感器幅频图上。图 13~图 15 分别为矩形窗、Hamming 窗和 Hanning 窗滤波处理后的频谱图。由于 Hanning 窗运算量适中,并且从图 15 中发现幅值精度较高,所以选用 Hanning 窗口滤波处理后提取频谱特征值。

自由金属颗粒在 GIS 罐体内部受电场力和重力影响做不规则跳跃运动,与罐体内壁碰撞后产生超声信号,信号传播介质只有 GIS 壳体,因此声发射检测对自由金属颗粒具有极高的灵敏度^[17]。通过时域和频域分析,得出声发射信号波形的时频特征值如表 2 所示。已有文献表明,当有效值和最大值均较大、频域相关性较差时,幅值图谱可用于判断自由颗粒放电缺陷^[17-18]。此时与背景值相比,信号变化较为明显,存在有效值、峰值较大,50 Hz 频率与 100 Hz 相关性低的明显特征,故判断 GIS 内部存在自由颗粒放电缺陷。

在声振信号其中任何一路最大幅值满足阈值条件的情况下,对该信号进行时频分析和特征提取,初



(a) 声发射传感器时域图



(b) 振动传感器时域图

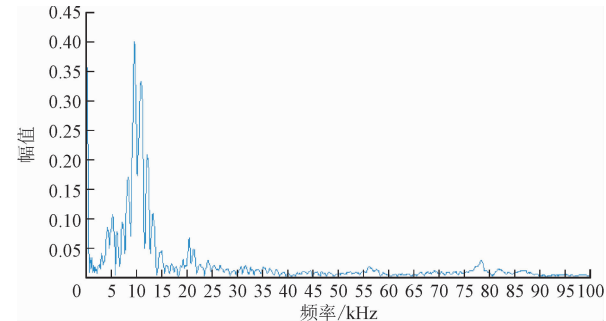
图 12 声振信号时域图

Fig. 12 Time domain diagrams of acoustic vibration signals

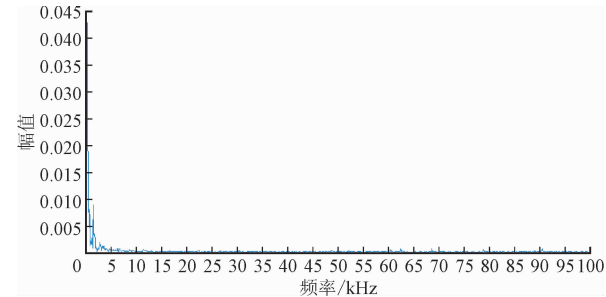
表 2 信号时域和频域特征值

Table 2 Time-domain and frequency-domain eigenvalues of signals

时域特征值				频域特征值(Hanning 窗滤波处理)					
均值/V	有效值/V	最大值/V	最小值/V	幅度	峰值频率 /kHz	50 Hz 幅值 (无异物)	50 Hz 幅值 (有异物)	100 Hz 幅值 (无异物)	100 Hz 幅值 (有异物)
-0.297 03	0.241 3	5.871 9	83 615	0.749 63	8 936	0.000 06	0.006	0.000 1	0.01



(a) 声发射传感器频域图

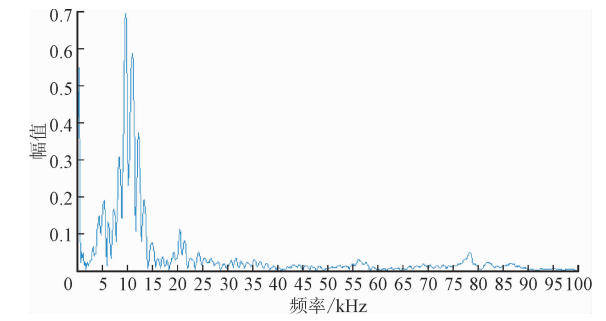


(b) 振动传感器频域图

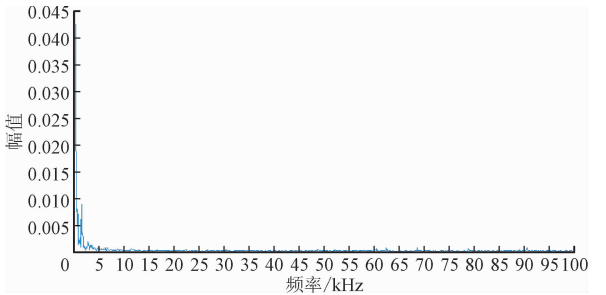
图 13 声振信号频域图(矩形窗滤波)

Fig. 13 Frequency domain diagrams of acoustic vibration signals (rectangular window)

步判断 GIS 内部是否存在异物微粒。系统功能测试过程采用无异物缺陷、半径为 0.5 mm 的球体、半径为 1 mm 的球体、半径为 1 mm 的均分半球体和片状微粒为导电微粒,不同类型异物缺陷检测的实验结果如表 3 所示。可以看出,实验测试中系统对 GIS 异物缺陷检测的准确率大于 90%。在实际应



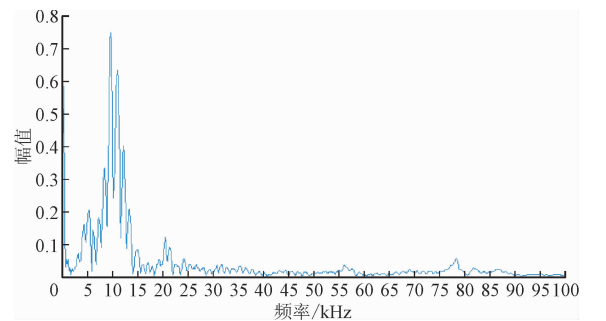
(a) 声发射传感器频域图



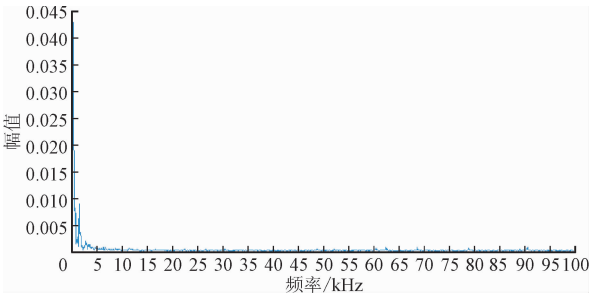
(b) 振动传感器频域图

图 14 声振信号频域图(Hamming 窗滤波)

Fig. 14 Frequency domain diagrams of acoustic vibration signals (Hamming window)



(a) 声发射传感器频域图



(b) 振动传感器频域图

图 15 声振信号频域图(Hanning 窗滤波)

Fig. 15 Frequency domain diagrams of acoustic vibration signals (Hanning window)

用中,使用某型号商用局部放电测试仪和该系统对多个变电站 110 kV GIS 设备区进行声振联合缺陷检测,检测结果一致,均未发现异物缺陷。

表 3 GIS 异物缺陷检测实验结果

Table 3 GIS foreign body defect detection experiment result

异物缺陷类型	实验次数	正确检测次数	检测准确率/%
无异物缺陷	15	15	100
半径 0.5 mm 的球体	15	12	80.00
半径 1 mm 的球体	15	13	86.67
半径 1 mm 的均分半球体	15	14	93.33
片状微粒	15	15	100
合计	75	69	92.00

飞行图表明相邻脉冲发生时间间隔 Δt 与上一脉冲幅值 u 之间的关系。研究表明,飞行图图谱的

特征可以作为 GIS 缺陷判断依据,在电力生产过程中可以利用该方法判断 GIS 缺陷类型及性质^[19]。实验对该 110 kV GIS 模型内部异物缺陷产生的声振信号图谱进行分析并建立图谱库特征,将声振信号时频分析提取的特征信息与图谱库进行对比,进而分析确定 GIS 检测评估结果。系统软件评估界面可实现 GIS 内部缺陷自由金属颗粒的三维动态仿真以及飞行图图谱功能。评估界面如图 16 所示,左侧是通过 LabVIEW 软件绘制的缺陷微粒在 GIS 内部运动的三维动态仿真图,右侧为飞行图图谱,横轴表示颗粒一次飞行的时间,纵轴表示颗粒飞行高度,通过包含大量数据的数组,统计 GIS 内部自由金属颗粒的活动状态。

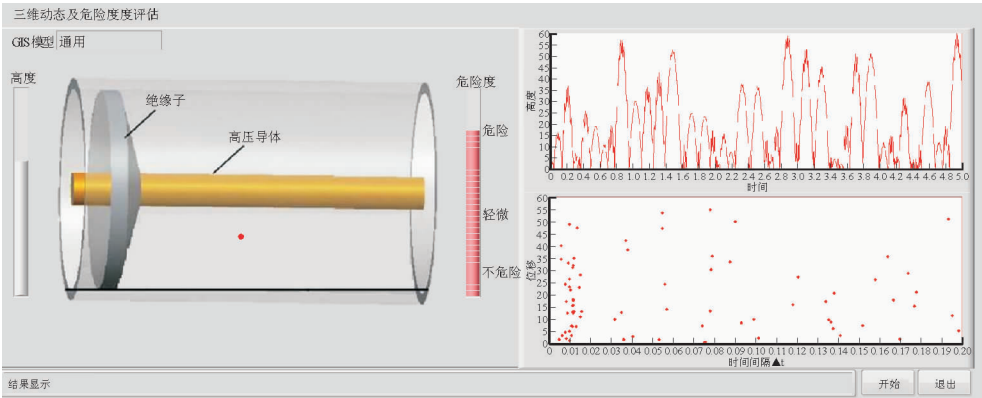


图 16 系统评估界面
Fig. 16 System evaluation interface

5 结 论

本文针对 GIS 在传统检测设备缺少可靠易用的在线数据采集、存储以及评估系统的问题,考虑到现场实际工程应用情况,应用 LabVIEW 软件开发了一款 GIS 声振联合检测系统。该系统可以较大程度省去 GIS 检测过程中复杂、繁琐的人力计算等流程,系统功能全面而强大。采用模块化硬件并封装在自制工控机中的设计方案,成本低,携带方便;软件可以方便地进行采样等硬件参数设置,直观地展示 GIS 运行过程中采集到的连续波形数据,同时结合 Matlab 软件快速地进行信号源的时域、频域分析,基于 LabVIEW 软件平台展示 GIS 异物微粒三维动态和飞行图图谱评估结果。通过系统功能测试,本文开发的系统能够实现声发射、振动信号的采集与记录、分析与处理和存储与查看等功能,总体上避免了商用 GIS 检测仪成本高、二次开发难度大的缺点。系统具有很好的适应性、简单易用性和可扩

展性,提高了 GIS 设备检测工作的便利性。

参考文献:

[1] 张天堃. GIS 变电站绝缘在线监测系统研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 1-5.

[2] 孙泽明, 庞培川, 张芊, 等. 基于可听声波的 GIS 击穿点定位方法 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52 (10): 88-94, 109.

SUN Zeming, PANG Peichuan, ZHANG Qian, et al. Location method of breakdown points in GIS based on audible sound waves [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(10): 88-94, 109.

[3] 孟庆振, 杨金伟, 徐学伟, 等. 基于放电脉冲波形匹配的局部放电类型识别 [J]. 现代电子技术, 2017, 40 (19): 164-168, 172.

MENG Qingzhen, YANG Jinwei, XU Xuewei, et al. Partial discharge type identification method based on discharge pulse waveform matching [J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(19): 164-168, 172.

[4] 赵洪山, 高玉峰. 基于振动特征估计的 GIS 设备故障

- 检测与分析 [J]. 高压电器, 2020, 56(6): 114-120.
- ZHAO Hongshan, GAO Yufeng. Fault detection and analysis of GIS based on vibration characteristic estimation [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 114-120.
- [5] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评 [J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
- LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [6] XIONG Jun, WANG Yuan, MA Guoming, et al. Field applications of ultra high frequency techniques for defect detection in GIS [J]. Sensors, 2018, 18(8): 2425.
- [7] YANG Yuan, BI Jiangang, WANG Hongjie, et al. Study of the ultrasonic characteristics of typical partial discharge on GIS [J]. Advanced Materials Research, 2013, 753/754/755: 2200-2207.
- [8] 刘君华, 姚明, 黄成军, 等. 采用声电联合法的 GIS 局部放电定位试验研究 [J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2458-2463.
- LIU Junhua, YAO Ming, HUANG Chengjun, et al. Experimental research on partial discharge localization in GIS using ultrasonic associated with electromagnetic wave method [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2458-2463.
- [9] 马鹏飞, 史腾飞, 刘荣海, 等. 声发射技术检测 GIS 气体泄漏方法研究 [J]. 高压电器, 2018, 54(8): 55-59, 64.
- MA Pengfei, SHI Tengfei, LIU Ronghai, et al. Research on the method of GIS gas leak detection with acoustic emission technique [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 55-59, 64.
- [10] 马波, 吴旭涛, 李秀广, 等. 基于振动信号的 GIS 隔离开关接触状态带电检测技术研究 [J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 73-77.
- MA Bo, WU Xutao, LI Xiuguang, et al. Contact status live detection of GIS disconnecter based on vibration signal [J]. Smart Power, 2019, 47(12): 73-77.
- [11] 王亢, 马松龄. LabVIEW 软件在主变压器检修中的应用 [J]. 现代电子技术, 2019, 42(3): 143-147.
- WANG Kang, MA Songling. Application of LabVIEW software in maintenance of main transformer [J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(3): 143-147.
- [12] 黎大健, 杨景刚, 梁基重, 等. 气体绝缘开关内自由运动金属颗粒的超声波信号特性 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(2): 101-105.
- LI Dajian, YANG Jinggang, LIANG Jichong, et al. Characteristics of acoustic signal from free moving metallic particles in gas insulated switchgear [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(2): 101-105.
- [13] 邵涛, 周文俊, 朱宜飞, 等. 特高频法检测 GIS 局部放电的试验研究 [J]. 高电压技术, 2001(3): 15-16, 30.
- SHAO Tao, ZHOU Wenjun, ZHU Yifei, et al. Experimental research of UHF method for the detection of partial discharge in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2001(3): 15-16, 30.
- [14] HAMEL M, MOHELLEBI H. A LabVIEW-based real-time acquisition system for crack detection in conductive materials [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2020, 167: 381-388.
- [15] 崔志国. GIS 局部放电特高频信号检测系统研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 25-27.
- [16] 熊刚, 凌必利. 基于 LabVIEW 的多通道数据采集系统 [J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(1): 19-22.
- XIONG Gang, LING Bili. Multi-channel data acquisition system based on LabVIEW [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(1): 19-22.
- [17] 李松原, 王永宁, 宋晓博, 等. 声-电-化联合检测在判别 GIS 自由金属颗粒放电缺陷上的应用 [J]. 高压电器, 2016, 52(9): 78-82, 90.
- LI Songyuan, WANG Yongning, SONG Xiaobo, et al. Application of combined acoustic-electric-chemical detection to GIS partial discharge defect caused by free metal particles [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 78-82, 90.
- [18] 刘佳鑫, 毕海涛, 郎业兴, 等. GIS 自由颗粒放电缺陷的联合检测与分析 [J]. 高压电器, 2020, 56(1): 175-180.
- LIU Jiaxin, BI Haitao, LANG Yexing, et al. Joint detection and analysis for free particle discharge defect in GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 175-180.
- [19] 谭向宇, 杨卓, 赵现平, 等. 基于飞行图模式的 GIS 内金属性缺陷超声信号特性研究 [J]. 高压电器, 2013, 49(5): 90-94.
- TAN Xiangyu, YANG Zhuo, ZHAO Xianping, et al. Ultrasonic signal characteristics research of metallic defects in GIS based on the flight graph mode [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5): 90-94.

(编辑 亢列梅)