

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412569

GIS 缺陷检测用低功耗智能无线振动 加速度-声发射融合传感器*

史天一, 张昭宇, 张轩瑞, 韩旭涛, 李军浩

(西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室 西安 710049)

摘要:针对气体绝缘组合电器(GIS)机械和绝缘缺陷的同时同地感知,本文提出一种低功耗智能无线振动加速度-声发射融合传感器。进行了传感器融合结构设计和仿真验证,使用蓝牙低功耗(BLE)实现传感器与客户端通信。首次将伪随机M序列应用于压电传感器的阻抗响应自校准,单次校准仅需数毫秒和数毫瓦。测试结果表明,传感器100 Hz~2 kHz内平均振动灵敏度为511 mV/g,20~100 kHz内超声灵敏度稳定在70~90 dB之间,相对不确定度小于2%;工作距离小于8 m时,数据传输速率在1 Mbps以上。在设置金属颗粒缺陷的实际GIS设备上开展机械振动-局部放电联合试验,结果表明传感器可实现设备机械振动和超声波信号的同时同地测量,为电力设备运行状态的分布式检测提供了新型有效的方法和手段。

关键词: GIS 缺陷检测;低功耗;智能;无线;振动加速度-声发射融合传感器

中图分类号: TP212 TH70 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Low-power smart wireless vibration acceleration-acoustic emission combined sensor for GIS defect detection

Shi Tianyi, Zhang Zhaoyu, Zhang Xuanrui, Han Xutao, Li Junhao

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming to simultaneously detect mechanical and insulation defects in gas insulated switchgear (GIS), this paper proposes a low-power smart wireless vibration acceleration-acoustic emission combined sensor. The design and simulation verification of the sensor fusion structure are conducted, utilizing bluetooth low energy (BLE) to establish communication between the sensor and the client. For the first time, pseudo-random M-sequences are applied to the impedance response self-calibration of a piezoelectric sensor, requiring only milliseconds and milliwatts for a single calibration. The test results show that the average vibration sensitivity of the sensor is 511 mV/g within the frequency range of 100 Hz to 2 kHz, and the ultrasonic sensitivity is stabilized between 70 to 90 dB within the frequency range of 20 to 100 kHz, with a relative uncertainty of less than 2%. The data transmission rate exceeds 1 Mbps when the working distance is less than 8 m. A combined mechanical vibration-partial discharge test is conducted on the actual GIS equipment installed with metal particle defects. The results demonstrate that the sensor can achieve simultaneous and co-located measurement of mechanical vibration and ultrasonic signals from the equipment. This offers a novel and efficient approach for distributed detection of the operational status of power equipment.

Keywords: GIS defect detection; low power consumption; smart; wireless; vibration acceleration-acoustic emission combined sensor

0 引 言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)是电网中的关键设备,机械缺陷导致的机械振动和绝缘缺

陷导致的局部放电是造成GIS设备故障的两大重要原因,严重威胁电力系统的安全稳定运行^[1]。GIS内部结构复杂,设备类型众多,以隔离开关为例,在频繁的分合闸过程中,由于机械闭合力的冲击和应力作用等原因会导致其触头接触不良,进而产生持续性机械振动,最终引

发严重的设备放电故障^[24]。另外,触头磨损产生的金属颗粒散落在气室各处,会受电场和机械振动的持续作用跳动至高场强区域引发局部放电,对设备的绝缘状态构成潜在威胁,还可能扩散至绝缘子表面引发沿面闪络,加速绝缘劣化并由于热效应导致设备进一步变形,诱发更为严重的机械缺陷^[5-6]。

上述过程中,两种缺陷同时存在并相互关联,机械振动会产生振动加速度信号,而局部放电会产生超声波信号,由于传统检测方法无法实现机械振动和超声波信号的同时、同地测量,难以准确开展信号关联分析,因此,融合检测对于电力设备的故障诊断十分必要^[7]。另一方面,尽管GIS具有长距离、大尺度的结构特点,符合分布式检测的应用场景,但受制于传统有线传感器的线缆布置要求,现有缺陷检测方式仍以带电检测为主^[8],不仅耗费大量人力、物力,耗时的线缆布置和探头安装过程也限制了检测系统的工作效率^[9]。此外即使针对GIS关键部位采用基于多个有线传感器的在线监测系统,仍需要根据现场实际情况调整线缆敷设方式,再加上日常维护成本较高,难以实现经济运行的目标,且不利于传感器网络的后期升级与扩建^[10]。因此无线化是新型传感技术的重要发展方向。此外,传感器周期性校准的影响在检测系统的质量评价中往往被低估,实际上,受制于材料性能、器件封装、拓扑结构等,压电传感器在实际运行时存在显著的参数失稳现象^[11],人工校准逐渐难以适应复杂的GIS运行环境,是制约感知系统智能化的关键因素^[12],因此,随着电网建设的快速推进,亟需具备自我校正功能的新型智能传感装置。同时,与实时供电的有线传感系统相比,为了保证长时间部署运行需要,智能无线传感器需要尽可能降低耗能水平^[13]。

在多信号融合检测与综合分析方面,多位学者开展了算法设计和模型构建工作。Secic等^[14]综述了针对电力变压器的机械振动-超声波诊断方法,认为集成了5G和人工智能等新技术的融合检测方法具有广阔应用前景。Stief等^[15]基于电机在不同运行条件下的超声波、机械振动和电学信号设计融合算法,实现了感应电动机中电气和机械故障的综合诊断。Khazaei等^[16]以D-S理论为基础对行星齿轮的机械振动和超声波信号进行融合分析,大幅提升了缺陷检测的精确度。融合传感技术在理论层面的迅速发展,推动了适用于电力设备现场实际的新型融合传感器研制。特高频-光学^[17]、机械振动-超声波^[18]、超声波-特高频^[19]等融合传感器及相关联合检测方法不断出现,增强了对GIS不同缺陷的识别能力。然而,上述新型融合传感器的信号传输仍基于传统有线方式,限制了感知效能的进一步提升。

受益于无线传输技术的迅速发展,以蓝牙低功耗(bluetooth low energy, BLE)为代表的2.4 GHz频段短距

离通信技术由于功耗极低、连接简单、成本低廉、响应快速等优势,在电力设备分布式无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)领域应用广泛^[20]。针对低功耗无线传感器,Hughes等^[21]使用基于BLE的WSN系统进行噪声识别和定位,证明使用BLE组网具有现实可操作性。Tosi等^[22]提出了一种分析和表征WSN中传感器吞吐量性能的方法,认为与其他无线传输技术相比,BLE具有很强的竞争力。重庆大学Zhao等^[23-24]提出一种用于机械振动监测的低功耗无线通信系统,并基于MJO-PSATS方法降低网络节点能耗,与传统优化方法相比,传感器寿命提升了46.75%。上述成果为低功耗无线传感技术的探索提供了思路,但均缺少传感器原型构建与现场试验,其他相关工作也多处于理论验证阶段^[25-29],面向实际应用的低功耗无线传感器少有研究。

在传感器智能化方面,郭经红等^[30]对电力智能传感技术进行了综述,认为应重点关注复杂工况下具备长期稳定性的传感器技术。杨挺等^[12]基于人工智能在新型电力系统智能传感中的应用,提出自我校正功能是新型感知量测技术的特征之一。以需要定期灵敏度校准的压电传感器为例,由于其灵敏度曲线与自身阻抗有关^[31],而阻抗响应曲线通常使用阻抗分析仪测得,耗时的扫频过程难以适应现场的实际要求。因此,对于大规模部署的传感器网络,自校准技术能够减少人工干预,降低维护成本,在同时保证检测设备和被测设备安全运行的前提下及时应对非理想工况,提高系统可靠性。

基于上述问题,本文提出一种GIS缺陷检测用低功耗智能无线振动加速度-声发射融合传感器。通过理论分析和仿真相结合的方法提出传感器设计方案、技术框架和主要功能,使用伪随机M序列实现传感器阻抗响应自校准。在传感器原型上分别进行了振动-超声波灵敏度校准、不确定度测试、数据传输速率测试和功耗测试以验证其性能。在实际363 kV GIS设备上开展机械振动-局部放电联合试验,验证了传感器的现场应用效果。

1 传感器结构设计及研制

1.1 传感器结构设计

基于压电效应的振动加速度传感器和超声波传感器广泛应用于电力设备缺陷检测,具有相似的内部结构和能量转换路径,且机械振动信号和超声波信号本质上是频率范围不同的机械波,能够在一路信号中同时输出而互不干扰^[32]。根据上述特性,本文在原理层面将二者结合,设计能够同时检测2 kHz以下机械振动信号和20 kHz以上超声波信号的融合传感器。

传感器结构如图1(a)所示,匹配层能够实现压电陶瓷与被测物的声学匹配,从而提高超声波信号的检测效

率,同时作为基座传递机械振动信号、实现电磁屏蔽。PZT-5 具有优异且稳定的压电性能,用于实现机械信号和电学信号的转换。背衬使用由钨粉和环氧树脂制成的低密度吸声材料,能够减少回波干扰并拓宽响应频带,同时背衬嵌于高密度金属质量块中,并为机械振动测量提供惯性力^[32]。传感器内置的 PCB 集成有射频天线、匹配网络和载有 BLE 集成芯片的单片机等多个模块,以及具有 ADC 测量、DAC 自校准、数模信号处理、板载数据存储和射频数据传输等功能的信号处理电路。为验证传感器的响应参数,本文使用有限元分析 (finite elements analysis, FEA) 方法计算振动单元和超声单元的灵敏度,如图 1(b) 所示。

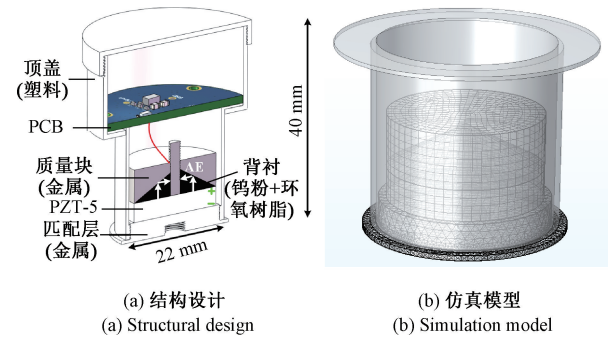


图 1 传感器结构
Fig. 1 The sensor structure

仿真中物理参数的设置均根据先前工作中的理论计算确定^[33],如表 1 所示。在扫频模式下向匹配层底部中央施加大小为 0.1 mV/g 的加速度激励,根据质量块上表面的响应电势得到传感器的振动灵敏度曲线。超声灵敏度曲线由式(1)得到,其中 $V(f)$ 为传感器检测面质点振动速度的频域幅值, $U(f)$ 为输出电压的频域幅值。

$$S(f) = 20 \times \lg \frac{U(f)}{V(f)}$$

(1)

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter settings			
结构	直径/mm	材料	相对介电常数
质量块	20	Copper	1
背衬	20	Filled epoxy resin (X238)	3
PZT-5	20	Lead Zirconate Titanate (PZT-5H)	{ 1 704. 4, 1 704. 4, 1 433. 6 }
匹配层	22	Copper	1

由于本文提出的传感器主要用于 GIS 设备的缺陷检测,因此将 100 Hz~2 kHz 和 20~100 kHz 作为考察频段^[33]。仿真结果如图 2(a) 和 (b) 所示,可以看出,振动

灵敏度稳定在 55 mV/g 左右,超声灵敏度在 43 kHz 谐振频率时达到峰值 84 dB,随后在 70 kHz 时降至 50 dB,并在 86 kHz 时取到最小值 44 dB。表明传感器能够实现机械振动和超声波信号的同时准确检测。

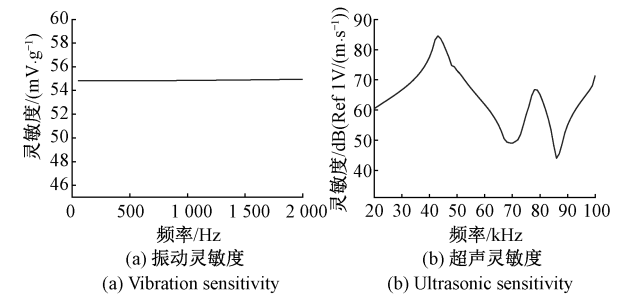


图 2 仿真结果
Fig. 2 The simulation results

传感器的技术框架如图 3 所示,BLE 集成芯片 (EFR32MG24, Silicon Labs) 是 PCB 的核心,具备信号采集、数据存储、自校准和边缘计算等功能,并根据 BLE5. 3 协议进行射频通信。

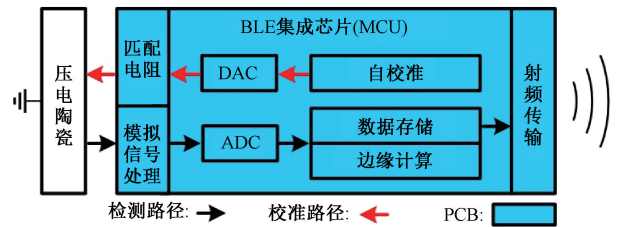


图 3 传感器技术框架
Fig. 3 Technical frame of the sensor

1.2 信号处理电路设计

在检测路径中,来自压电陶瓷的模拟信号经处理后由 ADC 模块转换为数字信号,在存储和计算后通过 BLE 收发器进行传输。在校准路径中,DAC 模块通过 50 Ω 匹配电阻将伪随机 M 序列作用于压电陶瓷,得到响应信号并重复上述检测路径以获得阻抗响应曲线。

圆形 PCB 如图 4(a) 所示,PC、平板电脑和智能手机等远程客户端通过 PCB 上的射频电路对传感器进行控制;SWD 通信接口用于烧录和调试程序;传感器由标称电压为 3 V 的纽扣电池供电。此外,PZT-5 的高阻抗转换为低阻抗以避免信号衰减。根据以上要求设计了如图 4(b) 所示的信号处理电路。

在信号处理电路中, R_0 和 C_1 用于稳定运算放大器 (OPA) 的供电电压, R_1 和 R_2 作为分压器产生约 $VCC/2$ 的中轨电压以实现 ADC 所需的直流偏置; C_2 用于隔离传感器输出的直流分量; R_3 和 R_4 决定了信号增益的大小 (本文为 5); R_5 是阻抗响应自校准的匹配电阻。图 4(b) 中的元器件和相应的值如表 2 所示。

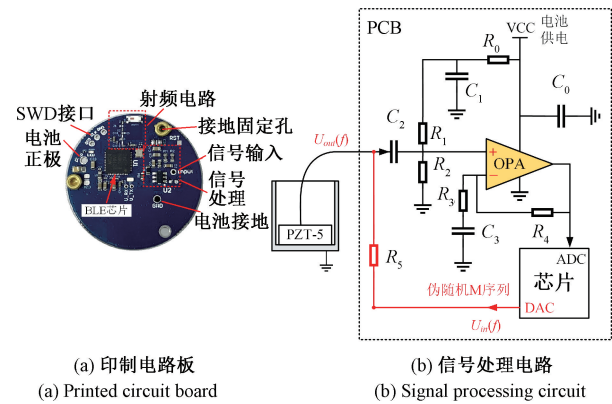


图 4 信号处理电路设计
Fig. 4 Signal processing circuit design

表 2 模拟信号处理电路参数

Table 2 Analog processing circuit parameters			
元件	值	元件	值
$R_0/\text{k}\Omega$	1	$C_0/\mu\text{F}$	200
$R_1/\text{M}\Omega$	10	$C_1/\mu\text{F}$	100
$R_2/\text{M}\Omega$	10	$C_2/\mu\text{F}$	10
$R_3/\text{k}\Omega$	50	$C_3/\mu\text{F}$	10
$R_4/\text{k}\Omega$	200	R_5/Ω	50

1.3 传感器阻抗响应自校准

伪随机 M 序列是一种与白噪声具有相似概率特性的周期序列,可用于代替白噪声作为激励信号,在不使用昂贵仪器的条件下快速获得传感器的阻抗响应曲线。自校准流程如图 4(b) 所示,伪随机 M 序列由 DAC 模块生成,并通过匹配电阻 R_5 作用于 PZT-5 以获得阻抗响应曲线。根据传感器的检测频率范围,校准频带设置为 100 Hz~100 kHz,由 M 序列带宽(f_{cp})公式^[34-35]:

$$f_m \approx \frac{f_{cp}}{3} \tag{2}$$

时钟频率(f_m)应调整为 300 kHz。

归一化后的输入和输出信号如图 5(a) 所示。阻抗响应曲线 $S(f)$ 可由式(3)计算得出,其中 f 为频率, $U_{out}(f)$ 和 $U_{in}(f)$ 分别表示输出和输入的电压幅值^[33]。

$$S(f) = 20 \times \lg \frac{U_{out}(f)}{U_{in}(f)} \tag{3}$$

M 序列法和扫频法得到的校准结果如图 5(b) 所示,可以看出,M 序列法可获得与扫频法一致的传感器阻抗响应曲线。

测试结果表明使用扫频法处理 120 个样本需要 1 min,而使用 M 序列法处理 500 个样本仅需 6.82 ms,且 M 序列法的耗能极少,因此该方法适用于 BLE 无线传感

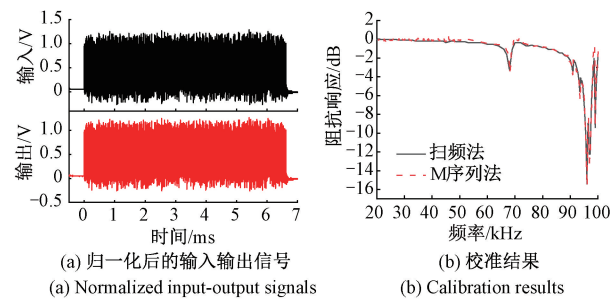


图 5 自校准结果
Fig. 5 Self-calibration results

器的自校准。试验得到的阻抗响应曲线可用于反映介电特性变化引起的输出响应变化^[36]。

1.4 数字信号处理与通信

传感器支持基于 32 位 ARM Cortex-M33 的边缘计算,编写算法并烧录在单片机中即可实现数据统计分析等信号处理功能。此外,作为描述存储传感器特性和参数的标准化格式,传感器电子数据表 (transducer electronic data sheet, TEDS) 是一项重要功能,由于与传感器相关的主要信息都直接保存在单片机的闪存中,因此可以在 BLE 连接下远程访问 TEDS,并用于采集数据的校正。测量到的数据暂时保存在 RAM 中,并在与上位机连接时传输至客户端。

所设计的传感器如图 6(a) 和(b) 所示,传感器能够同时采集机械振动和超声波信号;供电系统采用基于 BLE 5.3 技术的电池供电系统;数据传输速率最高可达 2 Mbps;采用 32 位 ARM Cortex®-M33 内核和 MCU 外设以实现边缘计算和阻抗响应自校准。

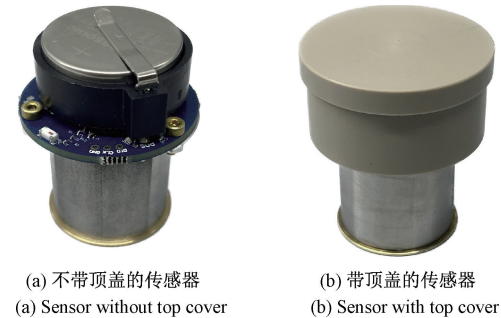


图 6 智能无线振动加速度-声发射融合传感器
Fig. 6 Smart wireless vibration acceleration-acoustic emission combined sensor

2 传感器性能测试

2.1 振动和超声波灵敏度校准

本文根据 GB/T 20485.21—2007 标准搭建了振动校准平台^[37],如图 7(a) 所示,待测传感器、参考传感器和

振动台通过紧固装置刚性连接,功率放大器用于为振动台供能并调整其输出模式;根据 GB/T 19801—2005 标准搭建超声校准平台^[38],如图 7(b)所示,使用标准推荐的断铅或玻璃毛细管断裂等方式在圆柱钢制试块正中心施加超声脉冲激励,在中心点两侧对称放置待测传感器和参考传感器进行对比校准。试验数据通过示波器采集并发送至上位机进行后处理。

校准结果如图 7(c)和(d)所示。由结果可知,在 100 Hz~2 kHz 内,振动灵敏度稳定在 511 mV/g 左右;在 20~100 kHz 内,超声灵敏度曲线整体趋势较为平缓,谐振频率为 61 kHz,响应幅值在 70~90 dB 之间波动,并在 95 kHz 时取到最小值 71.5 dB。由于实际校准时引入了放大电路,与仿真结果相比振动和超声灵敏度均有所提高。此外,实际校准时由于传感器材料的阻尼效应^[39],会显著降低谐振点附近的波动。而在仿真的理想情况下,施加的加速度激励会使得传感器的谐振点更为明显。

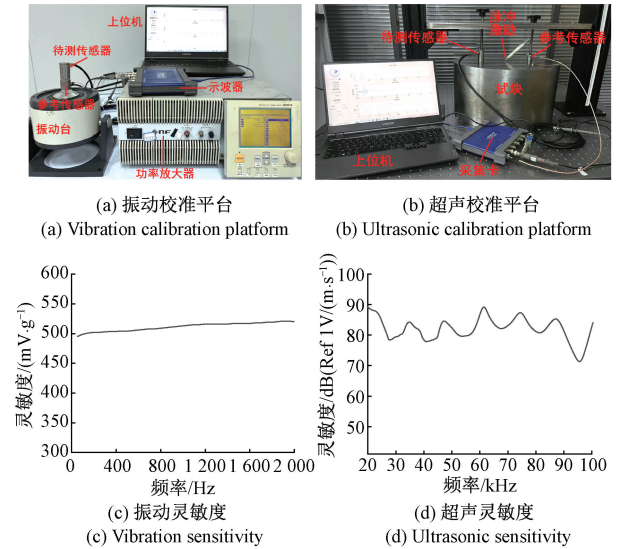


图 7 校准试验
Fig. 7 Calibration experiment

2.2 不确定度测试

本文采用二级校准方法,幅频响应数据的不确定度分为 A、B 两类。A 类来自传感器耦合和放大增益的偏差,以及传感器的温度和老化效应,可通过校准结果的统计分析得到^[38]。一次校准过程包括 n 次等精度测量,得到数据列 $X: x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

其算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{4}$$

使用 $\bar{x}$ 作为最佳估计值求得标准差为:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \tag{5}$$

将 $\bar{x}$ 的标准差 σ_x 作为测量结果 $\bar{x}$ 的 A 类可靠性估计:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n - 1)}} \tag{6}$$

B 类不确定度由电子噪声、数据采集、混叠不确定度和其他与瞬态采集过程有关的不确定度组成,这是由传感器后处理系统的个体特性差异引起的^[38]。由于数字仪表读数遵从均匀分布,数据列 X 的 B 类不确定度为:

$$\sigma_d = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{7}$$

其中, a 为概率分布置信区间的半宽,取单次校准过程中数据最大值的 3%^[38]。根据误差传播定律,二级校准的总不确定度 σ 由 A、B 两类不确定度合成得到^[38]:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\bar{x}}^2 + \sigma_d^2} \tag{8}$$

分别对传感器的振动和超声波二级校准过程进行不确定度核算。其中,振动加速度检测频段为 100 Hz~2 kHz,各频点灵敏度的不确定度最大为 9.09 mV/g,相对不确定度最大为 1.78 %;超声波检测频段为 20~100 kHz,各频点灵敏度的不确定度最大为 1.57 dB,相对不确定度最大为 1.92%。

2.3 数据传输速率测试

在现场实时测量时,数据传输速率是反映无线传感器性能的一个重要指标,决定了振动和超声波信号的采集效率。本文所设计的传感器采用 BLE 5.3 技术,支持 2 Mbps 调制速率,但由于外部干扰,其实际值会有所下降。在影响传感器实际传输速率的诸多因素中,环境和距离最为主要,因此本文将传感器置于不同环境中,测试其在不同距离下的数据传输速率。

选取空旷走廊和开阔户外作为两种典型试验环境,如图 8(a)和(b)所示,控制传感器和客户端之间的距离从 1 m 增加到 20 m,在每个位置进行相同的数据传输动作并记录传输速率,得到测试结果如表 3 所示。

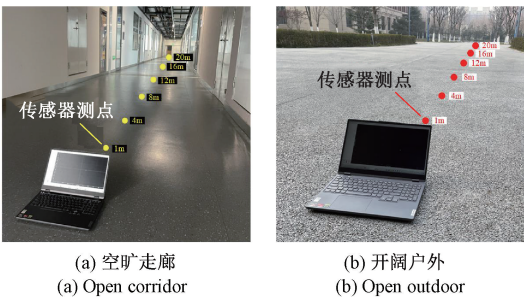


图 8 试验环境和测点选取
Fig. 8 Experimental environment and selection of measurement points

表 3 数据传输速率测试
Table 3 Data rate test

距离	数据传输速率	
	空旷走廊	开阔户外
1 m	1.35 Mbps	1.31 Mbps
4 m	1.17 Mbps	1.05 Mbps
8 m	1.1 Mbps	1.01 Mbps
12 m	1.058 Mbps	887.5 kbps
16 m	653.2 kbps	545.2 kbps
20 m	565.7 kbps	344.8 kbps

由测试结果知,在两种试验环境中,数据传输速率均随距离的增加而降低。在空旷走廊,数据传输速率在 1 m 时取到最大值 1.35 Mbps,当距离增加至 8 m 时下降至 1.1 Mbps 左右,并在距离增加至 20 m 时取到最小值 565.7 kbps。在开阔户外,数据传输速率的变化趋势类似,但由于缺少走廊四周建筑材料的屏蔽作用,受电磁环境的影响较大,其整体取值较空旷走廊略低。结果表明,当与客户端之间的距离小于 8 m 时,传感器能够以 1 Mbps 以上的数据传输速率工作,完全满足电力设备的现场检测需要。

尽管单片机可以在 PCB 上执行完整的数据处理过程,但大量信号的后处理是由客户端上的数据处理算法实现的。因此传感器需要通过 BLE 连接事件将采集到的所有原始数据发送至客户端。由于一个标准测量数据集包含约 50 000 个样本,每个样本大小为 16 bit,因此当以 1 Mbps 的速率传输时需要约 0.8 s,再加上约 0.1 s 的测量时间,在 2 s 以内即可执行一个完整测量过程,远远少于标准测量所需的时间。另外,在传统的信号采集过程中,还需要考虑线缆的布置以及传感器探头的定期部署,而本文设计的传感器由于无线化和低成本的特点,可以永久部署在电力设备上,需要时可在几秒内远程激活,迅速执行完整的测量过程。

2.4 功耗测试

传感器的功耗在很大程度上决定了电池的寿命,进而影响实际使用时的维护周期,是体现其工作性能的一个重要参数。本文所设计的传感器通过单片机集成了多种优化模式以降低功耗,此外,通过硬件设计使传感器在非活跃状态下处于睡眠模式,使得系统的默认电流保持在几微安。但当传感器处于广播状态时,由于芯片的动作会周期性出现幅值 10 mA 左右的短暂电流脉冲,而在射频传输等过程中则会消耗更多的能量。为了更加方便地进行功耗测试,本文设计了一种简单直接的电流测量方法,如图 9 所示,一个 1 Ω 分流电阻级联在纽扣电池和 PCB 之间,通过测量电阻两端的电压得到传感器在不同工作状态下的电流值。

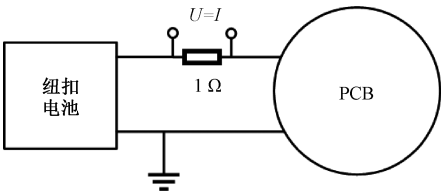


图 9 电流测量示意图
Fig. 9 The current measurement diagram

传感器的耗能过程包括广播、连接事件、ADC 测量、DAC 自校准和射频传输。广播时,测得电流信号为幅值为 12 mA 左右的脉冲波形,如图 10(a)所示。连接事件、ADC 测量和射频传输是一个连续的工作过程,测得电流如图 10(b)所示,可以看出射频传输的能量消耗占主要部分。DAC 自校准时芯片电流消耗极小,如图 10(c)所示。为了更加准确地对电池寿命进行估计,通过式(9)计算不同工作状态下的电荷量消耗:

$$Q = \int_0^t i dt \tag{9}$$

通过计算,单次广播功耗 Q_{adv} 、连接事件功耗 Q_{Con} 和射频传输功耗 Q_{RF} 的估计值分别为 24 μC、2 μC 和 17.25 mC,单次 ADC 测量功耗 Q_{adc} 和 DAC 自校准功耗 Q_{dac} 分别为 0.1 和 0.6 μC,可以忽略不计。

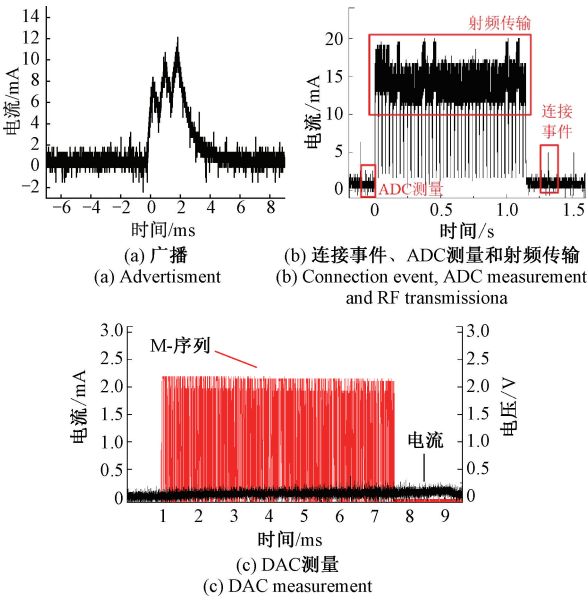


图 10 5 种主要工作状态
Fig. 10 Five main operations states

在最大数据传输速率下,如果传感器每 10 s 广播一次,并且每 10 min 进行一次测量,每小时的电荷量消耗估计值 Q_{1h} 为:

$$Q_{1h} = n_{adv} \cdot Q_{adv} + n_{Con} \cdot Q_{Con} + 6Q_{RF} \tag{10}$$

其中, n_{adv} 和 n_{com} 表示每小时的广播次数和连接事件次数。通过计算, Q_{th} 约为 112.26 mC。由于使用的纽扣电池容量为 1 A·h, 即 3 600 C, 因此理论上传感器的持续工作时间估计值为 4 年, 使其具有长时间免维护的特点。考虑到实际情况中由于自放电和环境因素影响而导致的

电池容量降低, 传感器的实际使用寿命会下降, 但能保证 1 年以上的工作时长。另外, 在电池寿命耗尽后, 可以容易且方便地更换电池或传感器本身。

根据上述测试结果, 传感器的基本性能参数如表 4 所示。

表 4 传感器性能参数

Table 4 Sensor performance parameters

指标	平均灵敏度		相对不确定度		数据传输速率/Mbps	功耗(监测模式) Q_{th}/mC
	振动/(mV/g)	超声/dB	振动/%	超声/%		
参数	511.36	82.04	1.78	1.92	>1 (距离<8 m 时)	112.26

3 试验验证

为进一步验证传感器对实际 GIS 设备机械振动和超声波信号的检测效果, 本文基于可同时升压升流的 363 kV GIS 设备故障仿真试验平台开展机械振动-局部放电联合试验。

试验平台由升压部分、升流部分、试验腔体和测量系统等构成。如图 11(a) 所示, 交流电源经调压器和试验变压器后输出, 向导杆施加高电压; 穿心式升流器套在腔体外壳上, 通过电磁感应原理向导杆施加感生电流, 平台实物图如图 11(b) 所示。试验腔体是一段 GIS 水平母线, 如图 11(c) 所示, 在其外壳内壁底部设置绝缘缺陷, 并在涂抹耦合剂后使用具有弹性的紧固带将传感器可靠固定于其下表面。待上位机发送指令后, 无线传感器开始工作并将检测数据传回上位机。

试验中选取实际 GIS 高压导杆上切削下的铝合金线形颗粒模拟绝缘缺陷, 如图 12 所示, 不规则线形颗粒最大长度在 1 cm 左右。在接地外壳底部中央选取一个直径 2 cm 的圆形区域, 刮掉该处的绝缘漆并将颗粒聚拢在此处。为降低金属颗粒的起始放电电压, 向气室充入 0.2 MPa SF_6 气体。

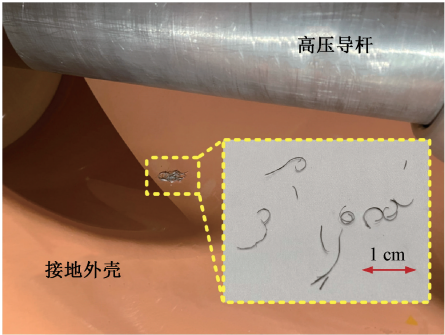


图 12 缺陷设置

Fig. 12 Defect settings

使用升流器向高压导杆分别施加 667.20、1 281.28、1 916.16 和 2 565.44 A 电流, 并在电流持续作用下, 采用阶梯式升压法逐步升高工频试验电压, 使腔体内的金属颗粒缺陷产生局部放电。每个试验电压保持 30 s 并记录 10 组时长为 100 ms 的波形, 不同电流下电压升至 20 kV 时的典型机械振动-超声波融合信号如图 13 所示。可以看出随着导杆施加电流逐渐增加, 测得的周期机械振动信号幅值逐渐增大, 并且传感器同时检出了金属颗粒引起的超声波脉冲信号。

为进一步验证传感器对设备缺陷的检测效果, 对如图 13 所示的检测信号进行频谱分析, 结果如图 14 所示。可以看出测得信号的频率范围包括振动和超声两个部分, 表明传感器能够同时检测到 100 Hz 及其倍频处的机械振动信号和频率范围集中在 20~30 kHz 的超声波信号, 进一步证明了本文提出的传感器能够获得更为丰富的缺陷信息。

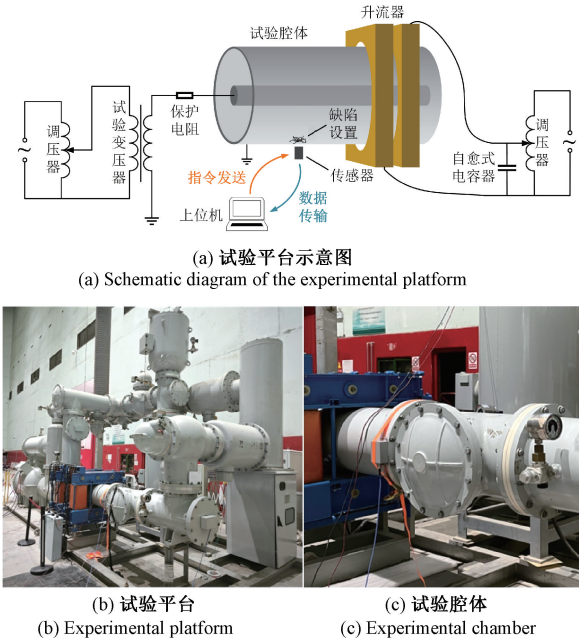


图 11 363 kV GIS 设备故障仿真试验平台

Fig. 11 363 kV GIS equipment fault simulation test platform

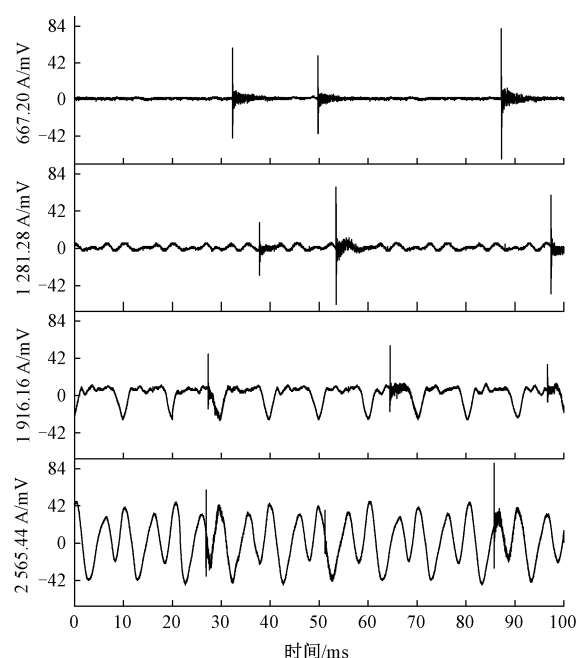


图13 升压升流模式下检测结果

Fig. 13 Detection results under voltage and current

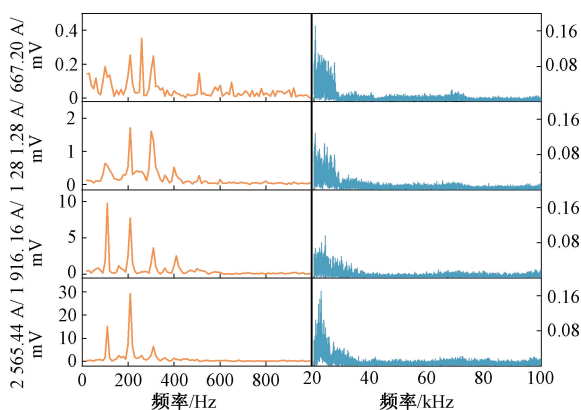


图14 升压升流模式下信号频谱

Fig. 14 Signal spectrum under voltage and current

上述试验表明,本文研制的传感器能够快速灵敏检出机械振动信号和局部放电引起的超声波信号,获取更为全面的设备状态信息。

4 结 论

本文研制了一种 GIS 缺陷检测用低功耗智能无线振动加速度-声发射融合传感器,主要结论如下:

1) 传感器由压电换能模块与专用采集电路耦合组成,主要功能包括融合信号采集、处理、存储、无线收发和设备自校准。首次将 M 序列法应用于压电传感器的阻

抗响应自校准,单次校准耗时极短且能耗极低。

2) 进行了多项测试以评估传感器的基本性能。振动和超声波校准结果表明,振动灵敏度为 511 mV/g,超声灵敏度在 70 dB 以上;不确定度测试结果表明,传感器的校准误差均在 2% 以下;数据传输速率测试结果表明,在空旷走廊和开阔户外,8 m 范围内速率均保持在 1 Mbps 以上;功耗测试结果表明,传感器的理论寿命为 4 年,且由于更换电池十分方便,可大幅延长维护周期。

3) 机械振动-局部放电联合试验证实了传感器的有效测量性能。传感器可快速灵敏检出机械振动信号和局部放电引起的超声波信号,获取更为全面的设备状态信息。

本文提出的传感器适用于 GIS 连续实时监测,可以在现场同时部署多个传感器形成无线传感器网络,用于分布式无损测试和融合分析。下一步将进行传感器优化和组网,引入人工智能算法开展融合数据分析,并选择更多缺陷进行工程检验。

参考文献

- [1] GAO K, TAN K, LI F, et al. PD pattern recognition for stator bar models with six kinds of characteristic vectors using BP network[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(3): 381-389.
- [2] 李佩宜, 王鹏, 张羲海, 等. 基于深度信念网络的变频电机局部放电起始电压预测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 121-130.
- LI P Y, WANG P, ZHANG X H, et al. Prediction of partial discharge initial voltage of variable frequency motor based on deep belief network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 121-130.
- [3] 吴玖汕, 赵壮民, 杨玥坪, 等. GIS 隔离开关接触状态振动-温度联合检测方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 207-214.
- WU J SH, ZHAO ZH M, YANG Y P, et al. Contact state vibration-temperature detection method of GIS isolation switch[J]. High Voltage Technology, 2023, 49(1): 207-214.
- [4] 吴邦. 基于振动信号的气体绝缘组合电器机械缺陷诊断技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- WU B. Research on diagnosis technology of GIS mechanical defects based on vibration signal[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2018.
- [5] JI H, LI C, PANG Z, et al. Moving behaviors and harmfulness analysis of multiple linear metal particles in

- GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(6): 3355-3363.
- [6] 李庆民,王健,李伯涛,等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 849-860.
- LI Q M, WANG J, LI B T, et al. Research progress on metal particle pollution in GIS/GIL[J]. High Voltage Technology, 2016, 42(3): 849-860.
- [7] 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 J H, HAN X T, LIU Z H, et al. A review of electrical equipment partial discharge detection technology[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [8] 陈宁,邢智杰,姜鑫鑫,等. 变电站 GIS 设备 SF₆ 压力在线监测装置应用分析[J]. 电力与能源, 2023, 44(3): 301-303.
- CHEN N, XING ZH J, JIANG X X, et al. Application analysis of SF₆ pressure online monitoring device for GIS equipment in substations[J]. Power and Energy, 2023, 44(3): 301-303.
- [9] 杨双华. 无线传感器网:原理、设计和应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.
- YANG SH H. Wireless sensor network: Principle, design and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [10] 逯遥. 基于特高频信号分析的 GIS 局部放电在线监测系统研究[D]. 南昌:南昌大学, 2023.
- LU Y. Research on GIS partial discharge online monitoring system based on UHF signal analysis[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [11] 姚睿丰,王妍,高景晖,等. 压电材料与器件在电气工程领域的应用[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1324-1337.
- YAO R F, WANG Y, GAO J H, et al. Application of piezoelectric materials and devices in the field of electrical engineering[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 36(7): 1324-1337.
- [12] 杨挺,耿毅男,郭经红,等. 人工智能在新型电力系统智能传感、通信与数据处理领域应用[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 19-29.
- YANG T, GENG Y N, GUO J H, et al. Application of artificial intelligence in intelligent sensing, communication, and data processing of new power systems[J]. High Voltage Technology, 2024, 50(1): 19-29.
- [13] 郭春明,程亮,田章超,等. 基于物联网的变电站在线监测系统[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(4): 110-114.
- WU CH M, CHENG L, TIAN ZH CH, et al. Online monitoring system for substations based on the Internet of Things[J]. New Technology of Electrical Energy, 2013, 32(4): 110-114.
- [14] SECIC A, KR PAN M, KUZLE I. Vibro-acoustic methods in the condition assessment of power transformers: A survey[J]. IEEE Access, 2019, 7: 83915-83931.
- [15] STIEF A, OTTEWILL J R, BARANOWSKI J, et al. A PCA and two-stage Bayesian sensor fusion approach for diagnosing electrical and mechanical faults in induction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12): 9510-9520.
- [16] KHAZAE M, AHMADI H, OMID M, et al. Classifier fusion of vibration and acoustic signals for fault diagnosis and classification of planetary gears based on Dempster-Shafer evidence theory[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2014, 228(1): 21-32.
- [17] HAN X, ZHANG X, GUO R, et al. Partial discharge detection in gas-insulated switchgears using sensors integrated with UHF and optical sensing methods[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 2026-2033.
- [18] ZHANG Z, LI J, SONG Y, et al. A novel ultrasound-vibration composite sensor for defects detection of electrical equipment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 4477-4480.
- [19] 张国治,田哈绿,张磊,等. 具备局部放电超声波感知功能的 PZT 基特高频传感技术[J/OL]. 电工技术学报, 1-13[2024-02-20].
- ZHANG G ZH, TIAN H L, ZHANG L, et al. PZT based ultra-high frequency sensing technology with partial discharge ultrasonic sensing function[J/OL]. Journal of Electrical Engineering Technology, 1-13[2024-02-20].
- [20] 钱志鸿,刘丹. 蓝牙技术数据传输综述[J]. 通信学报, 2012, 33(4): 143-151.
- QIAN ZH H, LIU D. Bluetooth technology data transmission review[J]. Journal on Communications, 2012, 33(4): 143-151.
- [21] HUGHES J, YAN J, SOGA K. Development of wireless

- sensor network using bluetooth low energy (BLE) for construction noise monitoring[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2015, 8(2): 1379-1405.
- [22] TOSI J, TAFFONI F, SANTACATTERINA M, et al. Throughput analysis of BLE sensor network for motion tracking of human movements[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 19(1): 370-377.
- [23] ZHAO C, TANG B, HUANG Y, et al. Edge collaborative compressed sensing in wireless sensor networks for mechanical vibration monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 19(8): 8852-8864.
- [24] ZHAO C, TANG B, DENG L, et al. Multilevel adaptive near-lossless compression in edge collaborative wireless sensor networks for mechanical vibration monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(11): 11703-11713.
- [25] 冯笑晨, 邵壮, 文玉梅, 等. 利用 Wi-Fi 信道的超低功耗无线传感系统[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 131-140.
- FENG X CH, SHAO ZH, WEN Y M, et al. Ultra-low power wireless sensing system using Wi-Fi channel[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 131-140.
- [26] LI S, DA X, WANG X. Compressed sensing signal and data acquisition in wireless sensor networks and internet of things [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 9(4): 2177-2186.
- [27] GUNGOR V C, HANCKE G P. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4258-4265.
- [28] GUNGOR V C, LU B, HANCKE G P. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(10): 3557-3564.
- [29] 方子涵, 李旦, 蒋鹏, 等. 无线传感器网络中延迟补偿的分布式时钟同步算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 92-100.
- FANG Z H, LI D, JIANG P, et al. Distributed clock synchronization algorithm for delay compensation in wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 92-100.
- [30] 郭经红, 梁云, 陈川, 等. 电力智能传感技术挑战及应用展望[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 15-24.
- GUO J H, LIANG Y, CHEN CH, et al. Challenges and application prospects of electric power intelligent sensing technology [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 15-24.
- [31] 潘玉安, 曹荣祥, 曹良足, 等. 压电陶瓷传感器灵敏度的研究[J]. 压电与声光, 2005(2): 128-130.
- PAN Y AN, CAO R X, CAO L Z, et al. Research on the sensitivity of piezoelectric ceramic sensor [J]. Piezoelectric and Acousto-Optic, 2005(2): 128-130.
- [32] 张昭宇, 胡一丹, 宋颜峰, 等. 电力设备机械振动-超声波融合检测传感器研制及应用[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5713-5723.
- ZHANG ZH Y, HU Y D, SONG Y F, et al. Development and application of mechanical vibration-ultrasonic fusion detection sensor for power equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5713-5723.
- [33] ZHANG Z, WANG H, CHEN H, et al. A novel IEPE AE-vibration-temperature combined intelligent sensor for defect detection of power equipment [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, DOI: 10.1109/TIM.2023.3272046.
- [34] 高佳平, 沈煜, 陈鹏, 等. 用伪随机 M 序列激励的绕组变形试验方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5678-5687, 5745.
- GAO J P, SHEN Y, CHEN P, et al. Winding deformation test method excited by pseudo-random M sequence[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5678-5687, 5745.
- [35] LUO Y, GAO J, CHEN P, et al. A test method of winding deformation excited by pseudorandom M-sequences—Part I: Theory and simulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1605-1612.
- [36] JANU P, BAJER J, DYČKA P, et al. Precise experimental determination of electrical equivalent circuit parameters for ultrasonic piezoelectric ceramic transducers from their measured characteristics [J]. Ultrasonics, 2021, 112: 106341.

- [37] 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. 振动与冲击传感器校准方法第 21 部分: 振动比较法校准: GB/T 20485.21—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Methods for the calibration of vibration and shock transducers Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer: GB/T 20485.21—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007 (in Chinese).
- [38] 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. 无损检测声发射检测声发射传感器的二级校准: GB/T 19801—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Non-destructive testing acoustic emission inspection secondary calibration of acoustic emission sensors: GB/T 19801—2005 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).
- [39] LIAO Y B, SODANO H A. Piezoelectric damping of resistively shunted beams and optimal parameters for maximum damping[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 132(4): 1014-1020.

作者简介



史天一, 2022 年于西安交通大学获得学士学位, 现为西安交通大学硕士研究生, 主要研究方向为电力设备智能感知技术和状态评估。

E-mail: 945827377@qq.com

Shi Tianyi received his B. Sc. degree in 2022 from Xi'an Jiaotong University. He is currently a M. Sc candidate in Xi'an Jiaotong University. His main research interests include intelligent sensing technology and state evaluation for power equipment.



李军浩(通信作者), 2010 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能感知与先进测量、环保替代气体设备运维技术、电磁暂态及电磁安全和现场新型试验技术。

E-mail: junhaoli@mail.xjtu.edu.cn

Li Junhao (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2010 from Xi'an Jiaotong University. He is currently a professor and Ph. D. supervisor in Xi'an Jiaotong University. His main research interests include intelligent sensing and advanced measurement, operation and maintenance technology for environmentally friendly alternative gas equipment, electromagnetic transient and electromagnetic safety and field novel test technology.