

基于新型绝缘介质夹层结构的 GIS PD 内置声磁集成传感技术

张国治¹, 陈欣荣¹, 麻守孝², 张磊³, 张晓星^{1*}

- (1. 新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心(湖北工业大学), 湖北省 武汉市 430068;
2. 新能源电力系统智慧运行教育部重点实验室(青海大学), 青海省 西宁市 810016;
3. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西壮族自治区 南宁市 530000)

Built-in Acoustic-magnetic Integrated Sensing Technology for GIS Partial Discharge Based on a New Type of Insulating Medium Sandwich Structure

ZHANG Guozhi¹, CHEN Xinrong¹, MA Shouxiao², ZHANG Lei³, ZHANG Xiaoxing^{1*}

- (1. Hubei Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment (Hubei University of Technology), Wuhan 430068, Hubei Province, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Operation of New Energy Power System, Ministry of Education (Qinghai University), Xining 810016, Qinghai Province, China; 3. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530000, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

ABSTRACT: To address the issues of insufficient ultrasonic sensing sensitivity and decreased radio frequency sensing performance of existing gas insulated switchgear (GIS) partial discharge (PD) acoustic-magnetic integrated sensors due to the influence of built-in near-field metal, this paper proposes a design method for an integrated acoustic-magnetic sensor based on a new type of insulating medium sandwich structure. The finite element method is used to construct and optimize a simulation model for the ultrasonic and high-frequency electromagnetic wave frequency response characteristics of the sensor, including the GIS metal flange, and to conduct actual measurements. The results indicate that: The insulating sandwich acoustic-magnetic integrated sensor achieves an average sensitivity of 61.2 dB and a maximum sensitivity of 64.5 dB in the ultrasonic frequency range of 20~80 kHz. Compared to non-sandwich sensors, the standing wave ratio in the high-frequency electromagnetic frequency range of 0.3~1.5 GHz is less than 4, with a bandwidth improvement of 355.6%. Under different degrees of metallic contamination and protrusion defects, the sensitivity of the ultrasonic sensing of the sandwich acoustic-magnetic integrated sensor exhibits performance comparable to that of commercial GIS PD

ultrasonic sensors for the first time. Its high-frequency electromagnetic wave sensing sensitivity is superior to that of non-sandwich integrated sensors under different test voltages, with an initial signal detection amplitude increased by approximately 82.9% and 41.9%, respectively. Additionally, the time difference between the PD electromagnetic wave and ultrasonic signals detected by the integrated sensor aligns with theoretical calculations. The research findings are of significant theoretical and practical importance for the development of acoustic-magnetic integrated sensing technology and the intelligent high-sensitivity diagnosis of GIS PD defects.

KEY WORDS: gas insulated switchgear (GIS); partial discharge; acoustic-magnetic integrated sensor; insulating layer

摘要: 针对现有气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)局部放电(partial discharge, PD)声磁集成传感器的超声波感知灵敏度不足和射频感知性能受内置近场金属影响而下降的问题, 该文提出基于新型绝缘介质夹层结构的内置声磁传感器设计方法, 采用有限元法构建优化包括 GIS 金属法兰盘在内的传感器超声和高频电磁波频响特性仿真模型, 并进行实测。结果表明: 绝缘夹层声磁集成传感器在 20~80 kHz 超声频带范围内平均和最大灵敏度可达 61.2 和 64.5 dB; 相对于非夹层传感器, 在 0.3~1.5 GHz 高频电磁频带范围内, 驻波比小于 4 带宽提升 355.6%; 不同严重程度金属污秽和突出物 PD 缺陷下, 夹层声磁集成传感器的超声波感知灵敏度则首次展现出和商用 GIS PD 超声波传感器相当的性能, 其在不同试验电压下的高频电磁波感知灵敏度均

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2021CFA025, 2023AFB895); 国家自然科学基金项目(52107144)。

Natural Science Foundation of Hubei Province (2021CFA025, 2023AFB895); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52107144).

优于非夹层集成传感器,且初始信号检测幅值分别提升约82.9%和41.9%;同时,集成传感器先后感知到的PD电磁波和超声波信号达到时间差和理论计算值相符。研究结果对声磁集成传感技术的发展和GIS PD缺陷的高灵敏智能化感知诊断具有一定的参考价值。

关键词: 气体绝缘开关设备;局部放电;声磁集成传感;绝缘夹层

0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)因其显著的绝缘性能、卓越的空间利用率及较低的维护需求,在变电站广泛应用^[1-5]。潜伏性局部放电(partial discharge, PD)绝缘缺陷是影响其长期可靠性的关键因素^[6-9]。为实现PD绝缘缺陷的有效感知,研究人员提出了包括声、电、光、磁、微量气体的一系列检测方法^[10-17],其中超声波法和特高频(ultra high frequency, UHF)法凭借其较高的可靠性已成为现场PD检测应用最广泛的方法。

超声波法是将传感器紧贴在GIS金属壳外表面,利用压电原理感知经SF₆绝缘气体和GIS金属壳体传导的PD声表面波(surface acoustic wave, SAW)。然而,受到“SF₆气-金属壳体-大气”界面不同材料之间阻抗失配的影响,从GIS内部向外传播的PD声学信号会遭受约3~5个数量级的能量衰减,严重影响超声波法的检测灵敏度^[18-19]。为克服超声波感知过程中阻抗失配的影响,提高PD超声感知能力,提出内置光学超声传感器技术^[20-25]。

2019年,华北电力大学马国明团队^[23]提出的干涉式光纤超声传感器的平均灵敏度相比传统超声传感器提升了18.7 dB;2023年,哈尔滨理工大学赵洪、张伟超团队^[24]提出非本征光纤法——珀(EFPI)传感器检测,灵敏度至少为传统超声传感器的3.75倍;2024年,中科院张国强团队^[24]设计的基于声敏感膜片纳米级振幅解调的EFPI超声传感器能实现13.86 pC的局放量检测。然而,光学超声感知技术存在运行稳定性易受环境震动和检测设备本身结构稳固性影响及光源等器件成本高昂等问题^[26],且其在内置GIS的过程中需对GIS金属外壳进行结构性改造,而出于GIS内高压SF₆气体密封和责任划分等因素的影响,现场运维人员一般不愿意对设备进行结构性改动。

相比之下,由于220 kV及以上的GIS均预留有UHF检测接口^[27],文献[28-30]提出一种解决新思路,即将压电式超声波传感功能融合于内置的

UHF传感器,借助已有的UHF检测接口,在无需对GIS外壳进行结构改造的情况下实现PD超声波感知功能的内置,且已初步研发了聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)基和锆钛酸铅(lead zirconate titanate, PZT)基的声磁集成传感器,并通过理论仿真分析和GIS PD实验证明了该方案的可行性。因此,如何在实现声磁集成传感器对PD超声波信号高灵敏感知的同时提高其内置过程中的射频感知能力是当下急需解决的难题。

因此,本文提出基于新型绝缘介质夹层结构的内置声磁传感器设计方法,建立内置“圆极化叉指电极-PVDF压电基底-FR₄绝缘介质”夹层结构的声磁集成传感器模型,采用有限元法构建包括GIS金属法兰盘在内的传感器超声频响特性和高频电磁波频响特性仿真模型并进行优化。最后,利用超声灵敏度校准平台、网分和220 kV真型GIS PD模拟实验平台对传感器的超声波和高频电磁波感知灵敏度进行实测。

1 声磁集成传感器设计

叉指型传感器(interdigital transducer, IDT)是一种广泛应用于固体SAW检测的超声波传感器,声磁集成传感器采用IDT电极,其结构及内置GIS法兰盘内表面效果如图1所示。

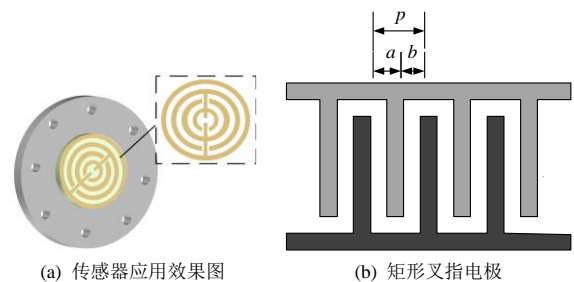


图1 传感器电极结构

Fig. 1 Sensor electrode structure

图1中: a 为电极宽度; b 为相邻电极的间隙宽度; p 为叉指间距。 $\eta=a/p$,表示金属化率,一般取0.5^[31]。当 p 等于波长 $\lambda_0/2$ 时,传感器输出的信号最强,此时IDT激励的SAW波长 λ_0 、波速 v_s 和中心谐振频率 f_0 满足如下关系^[32]:

$$f_0 = \frac{v_s}{\lambda_0} = \frac{v_s}{2 \times (a + b)} \quad (1)$$

根据Q/GDW 11304.9—2023^[33]可知,GIS PD超声波主频能量位于20~80 kHz范围内。当SAW在电力设备金属壳体中传播速率以1400 m/s计^[34]、传感器的共振频率 f_0 设定为50 kHz时,根据式(1)可

算电极宽度 a 和间距 b 均为 7mm。同时，为保证传感器良好的方向性，对矩形叉指电极进行圆极化处理。

其次进行压电基底材料的选择，常见的压电材料相关性能参数如表 1 所示^[35-36]。由表 1 可知，相对于常用的 PZT 压电材料，PVDF 具有低声阻抗、高机械柔韧性和良好的声电转化效率。因此本文选择 PVDF 作为集成传感器的压电基底材料。

表 1 压电材料性能参数

材料	介电常数/ (ϵ_{33}/ϵ_0)	弹性柔顺常数/ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)	压电电压常数/ ($\times 10^{-3} \text{ V m/N}$)	声阻抗/ MRayl
PVDF	12	320	330	3.5
PZT-4	1300	15.5	26.1	34.5
PZT-5	3400	20.7	19.7	34.2

另外，为解决声磁集成传感器内置过程中近场金属法兰盘导致其射频感知性能下降的问题，在法兰盘和压电基底之间引入绝缘介质层以减少金属对电磁波信号的屏蔽作用，如图 2(a)所示。并且为最大限度减少界面反射的影响，选择与 PVDF (2MRayls)和 GIS 外壳铝合金(14.3MRayls)声阻抗相近的 FR₄ 环氧玻璃板(3MRayls)作为绝缘介质层材料，对比分析有无绝缘介质层情况下包括 GIS 金属法兰盘在内的传感器高频电磁波频响，如图 2(b)所示。可知，在随意引入一定厚度的绝缘介质层后，传感器在 0.3~1.5GHz 高频电磁频带范围内驻波比 (voltage standing wave ratio, VSWR)小于 4 的带宽提升 44.8%，小于 5 的带宽提升 63.9%。

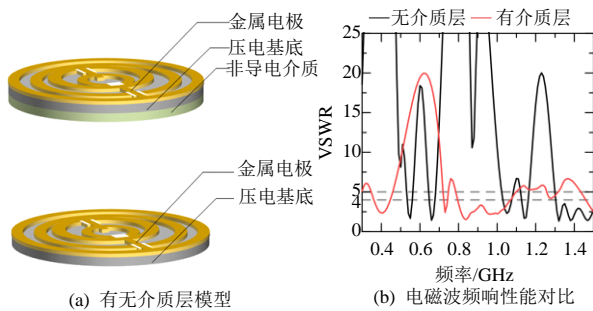


图 2 有无介质层模型性能对比

Fig. 2 Performance comparison with and without dielectric layer model

2 声磁集成传感器频响特性优化

由于本文所提集成传感器在设计过程中主要涉及压电基底厚度、电极馈线距离以及绝缘介质层厚度这 3 个变量，因此本节将深入探讨这 3 个关键设计变量对传感器在 20~80kHz 超声和 0.3~1.5 GHz

高频电磁波频带内频响特性的影响。

2.1 压电基底厚度对性能的影响分析

1) 超声谐振位移：利用压电效应的互易性，当电信号激励频率与传感器谐振频率一致时，传感器的表面位移和电声转换效率达到最大^[37]。通过测量不同频率下的位移响应可间接反映传感器的超声感知性能。本文使用 COMSOL 三维有限元仿真软件中压电力学模块对集成传感器超声频响性能进行分析。建立圆极化电极的仿真模型并施加交变电压激励，同时考虑到压电基底厚度在实际制造工艺中的可行性，分析其在 0.1~0.5 mm 区间内传感器的谐振位移变化，并提取不同基底厚度在谐振频率处的最大位移值，计算结果如图 3 所示。

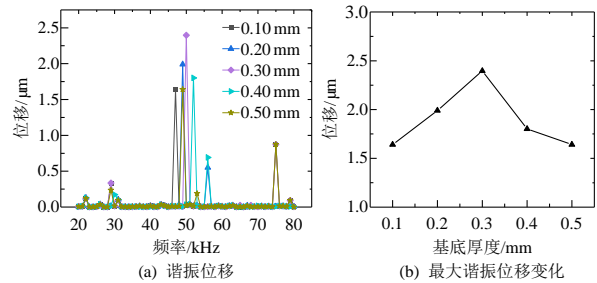


图 3 谐振位移计算结果

Fig. 3 Resonance displacement calculation results

由图 3 可知，对于 20~80kHz 内相同幅值的电压激励，不同基底厚度的传感器均能产生位移响应。随着基底厚度的增加，传感器的最大谐振位移先增加后减少并在 0.3mm 时达到峰值。这一趋势的出现可归因于压电材料单位面积下由压电效应产生的感应电荷量随基底厚度增加而增多，从而提高了声电转换效率。然而，一旦基底厚度超过某一临界值，所需的激励电压随之增高，激发材料内部振动所需的能量增加。在相同的激励条件下，这种能量需求的增加会降低传感器的信号输出强度，进而不利于 PD 超声信号的有效检测。

2) 超声灵敏度：传感器的超声灵敏度定义为传感器在特定声场条件下，输出端的开路电压与引入传感器之前在该位置的自由声场声压之间的比率。对于谐振式传感器，一般用速度来描述声场，其计算公式为

$$S = 20 \lg U / v \quad (2)$$

式中： S 为传感器超声灵敏度； U 为传感器表面金属电极输出电压； v 为传感器表面的质点速度^[38]。如图 4 所示，在不同基底厚度下传感器的平均和最大灵敏度变化趋势同谐振位移一样，随基底厚度的

增加先升高后降低并在 0.3mm 时达到峰值。

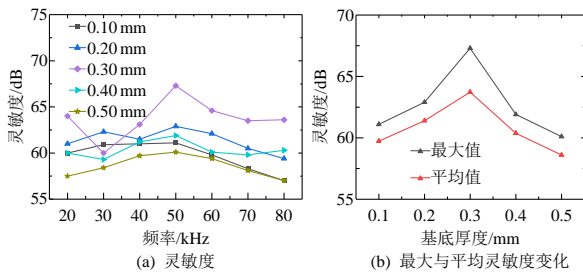


图 4 超声灵敏度计算结果

Fig. 4 Ultrasonic sensitivity calculation results

3) VSWR: 用以衡量传输线上能量传输效率和阻抗匹配的程度。理想情况下, 当系统阻抗完全匹配时, 所有的能量都被负载吸收, VSWR 达到最低值 1^[39]。本文使用 ANSYS HFSS 三维有限元仿真软件分析传感器 VSWR 随基底厚度的变化, 并提取不同基底厚度下传感器 VSWR 最值, 计算结果见图 5。

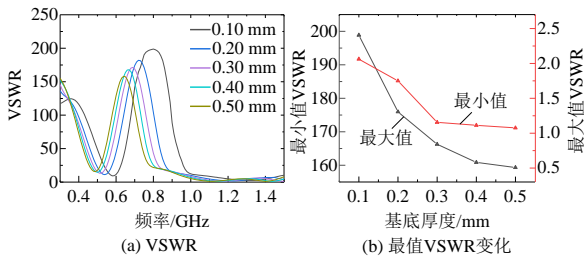


图 5 VSWR 计算结果

Fig. 5 VSWR calculation results

由图 5 可知, 在不同基底厚度下传感器的 VSWR 均随激励信号频率的增加呈现先降后增再降的变化趋势, 且 VSWR 最大及最小值均随基底厚度的增加而降低, 说明调整基底厚度可以优化传感器 VSWR 特性。

综上所述, 当厚度为 0.3mm 时, 集成传感器的声磁频响特性均达到最优状态。基于此, 本文选定 0.3mm 作为集成传感器的基底厚度。

2.2 电极馈线距离对性能的影响分析

1) 超声谐振位移: 基于电极馈线距离对传感器结构布局和加工工艺的影响, 分析其在 9~19mm 区间内传感器的谐振位移变化, 如图 6(a)所示。可以看出, 在不同的馈线距离下传感器的谐振频率仍保持在 50kHz 不变。

2) 超声灵敏度: 不同馈线距离下的最大与平均灵敏度结果如图 6(b)所示。可知, 馈线距离调整对其超声灵敏度性能影响相对较小。

3) VSWR: 结果如图 7 所示。随着馈线距离的增加, 传感器 VSWR 没有表现出明显的变化趋

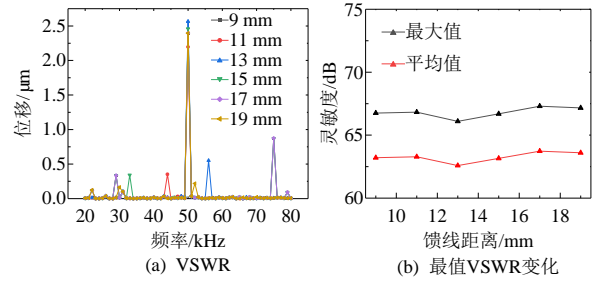


图 6 谐振位移和超声灵敏度计算结果

Fig. 6 Resonant displacement and ultrasonic sensitivity calculation results

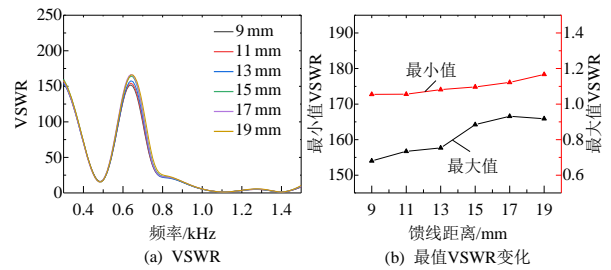


图 7 VSWR 计算结果

Fig. 7 VSWR calculation results

势, 其最值均却在逐步增加。

综上所述, 本文选择 13mm 作为集成传感器电极馈线距离的理想值。

2.3 绝缘介质层厚度对性能的影响分析

1) 谐振位移: 分析绝缘介质层厚度在 0~10mm 区间内传感器的谐振位移变化, 并提取不同绝缘介质层厚度下传感器谐振位移峰值, 结果如图 8 所示。可以观察到随着介质厚度的增加, 谐振位移的最大值呈现出递减趋势, 且下降速度随着厚度的增加而加快。说明过厚绝缘介质会削弱传感器在谐振频率下的位移响应。

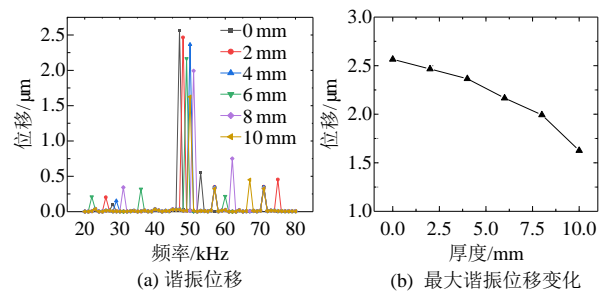


图 8 谐振位移计算结果

Fig. 8 Resonance displacement calculation results

2) 超声灵敏度: 不同绝缘介质层厚度下的最大与平均灵敏度结果如图 9(a)所示。可以观察到绝缘介质层的引入会降低传感器最大灵敏度及平均灵敏度值。

3) VSWR: 结果如图 9(b)所示。与未添加介质条件下相比, 引入 FR4 绝缘介质后传感器 VSWR

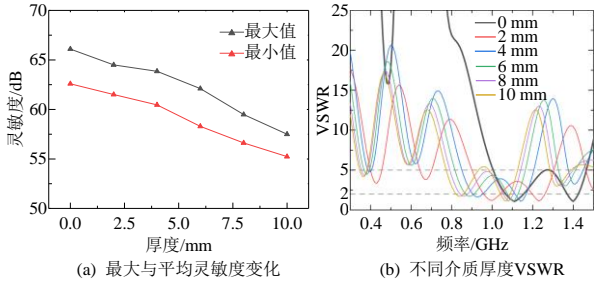


图 9 超声灵敏度与 VSWR 计算结果

Fig. 9 Ultrasonic sensitivity and VSWR calculation results
显著降低，当介质厚度进一步增大，VSWR < 5 的带宽反而减小。表明 FR₄ 介质的添加对于优化传感器的 VSWR 性能具有积极作用，过厚的 FR₄ 介质却可能导致 VSWR 优化效果的减弱，甚至逆转。

综上所述，本文选择 2mm 作为集成传感器绝缘介质厚度的理想值。

通过以上分析，可确定绝缘夹层集成传感器最优结构尺寸为：基底厚度为 0.3mm，电极馈线距离为 13mm，绝缘介质层厚度为 2mm。最优结构尺寸下传感器在 20~80kHz 超声和 0.3~1.5GHz 高频电磁波频带内的频响特性如图 10 所示。可以看出，传感器在 20~80kHz 超声频带范围内的平均和最大灵敏度分别为 61.2 和 64.5 dB，相较于优化前非夹层集成传感器，优化后绝缘夹层集成传感器在 0.3~1.5GHz 高频电磁频带范围内 VSWR 小于 4 带宽提升 355.6%，小于 5 带宽提升 171.4%。

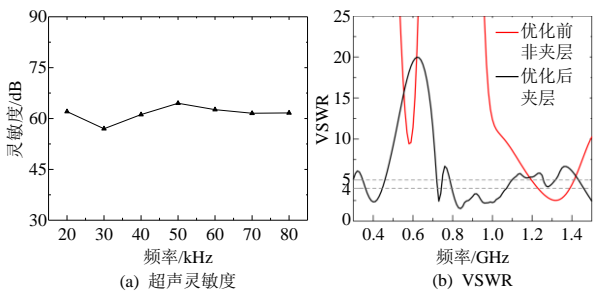


图 10 最优结构频响特性仿真结果

Fig. 10 Simulation results of the frequency response characteristics of the optimal structure

3 声磁集成传感器性能测试

3.1 集成传感器性能实测

根据上文分析结果制得的绝缘夹层集成传感器实物如图 11 所示。

1) 超声波接收灵敏度。

为评估绝缘夹层集成传感器的超声波检测能力，本文首先对传感器的超声性能进行校准^[40]，校准平台见图 12(a)。对比用超声波传感器和发射传感

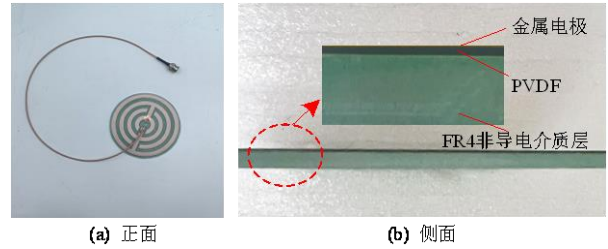
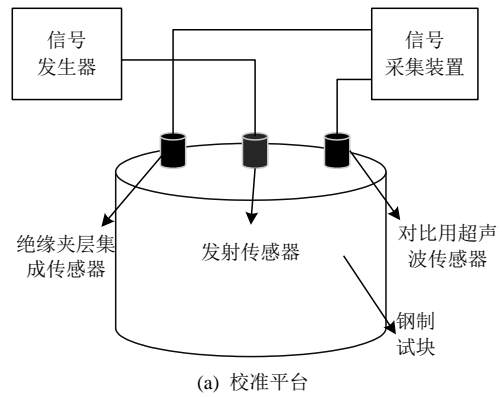
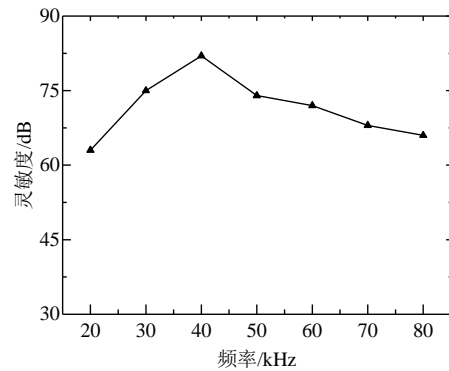


图 11 传感器实物

Fig. 11 Sensor physical



(a) 校准平台



(b) 超声频响曲线图

图 12 校准平台及传感器性能参数

Fig. 12 Calibration platform and sensor specifications

器采用相同型号超声探头 PX PXR 04，其性能参数如图 12(b)所示，符合国标 GB/T 42287-2022^[41]要求。

图 13(a)为绝缘夹层集成传感器在不同频率下的超声灵敏度实测与仿真计算结果，两者变化趋势保持一致，其实测最高和平均超声波接收灵敏度分别为 60.5 和 55.06 dB，与仿真计算结果相近。

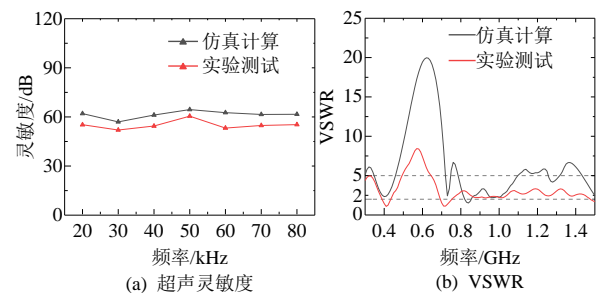


图 13 实测结果

Fig. 13 Results of actual measurements

2) 驻波比。

利用 E5080A ENA 矢量网络分析仪对绝缘夹层集成传感器 VSWR 参数进行测量, 结果如图 13(b) 所示。分析可知, 实测结果和仿真结果变化趋势基本一致, 实测 VSWR<5 带宽为 0.93 GHz。

3.2 集成传感器 PD 信号感知性能测试

3.2.1 GIS PD 试验平台

本文基于 220kV 真型 GIS 设备搭建了如图 14 所示的 PD 综合试验平台。其中: T₁ 为调压台; T₂ 为无 PD 变压器; R_r 为保护电阻; C₁ 为耦合电容; Z 为检测阻抗; 信号采集设备为泰克高性能数字示波器(Tektronix*MS044), 试验腔体充入 0.5MPa 的 SF₆ 气体。

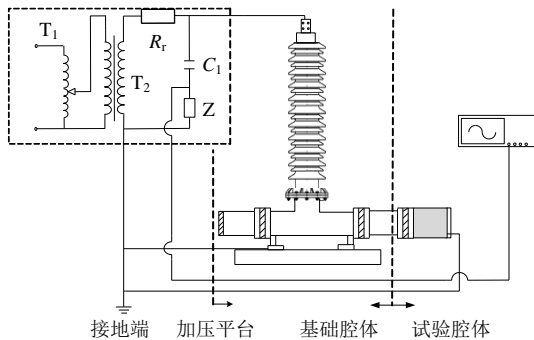


图 14 GIS PD 综合试验平台

Fig. 14 GIS PD integrated experimental platform

同时, 为验证传感器对 GIS PD 信号的感知性能, 本文搭建了如图 15 所示的 PD 检测测试平台。在进行对比 PD 超声信号感知实验时, 集成传感器与示波器间添加前置放大器且采用铜箔胶带作金属屏蔽层覆盖在集成传感器上, 以防止 PD 电磁波信号对其测量结果的干扰, 对比用超声传感器性能参数如图 12(b); 在进行对比 PD 高频电磁波信号感知实验, 绝缘夹层集成传感器和非夹层传感器直接连示波器; 在进行 PD 声磁信号联合感知性能测试时, 除天线直接连示波器外, 夹层集成传感器和对比用超声传感器输出信号均经前置放大器输入至示波器。

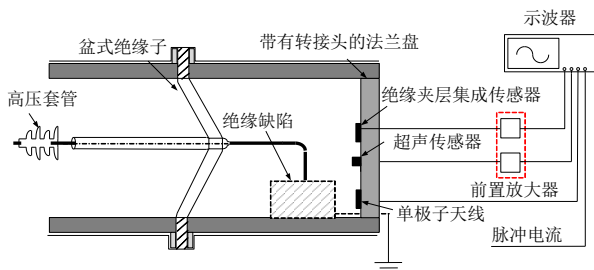


图 15 PD 检测试验平台

Fig. 15 PD test platform

试验开始前, 采用脉冲电流法对加压平台进行无缺陷加压测试, 当电压加至 50kV 时试验平台内部未观察到 PD 现象。并设置尖端半径 0.2mm 的悬浮针电极和长度 20mm, 直径 1mm 的铝丝分别模拟悬浮放电和尖端放电缺陷^[42-43], 如图 16 所示。此外, 对实验平台进行放电量标定, 测得 50pC 放电量对应的脉冲电流幅值约为 20mV。

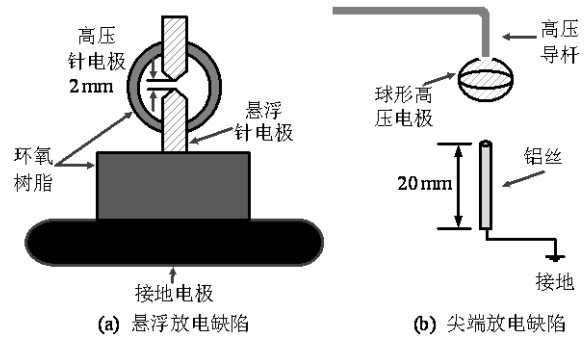


图 16 缺陷类型

Fig. 16 Defect types

3.2.2 PD 超声信号感知性能测试

1) 悬浮放电缺陷。

对实验平台加压, 当电压增至 5.7kV 时, 脉冲电流通道产生放电信号。信号幅值为 320mV, 对应的放电量为 800pC。示波器采样率为 5MS/s, 超声波前置放大器增益为 40dB, 检测到 PD 超声波信号时域波形和频谱分析分别如图 17(a)、图 18 所示。可以看出, 本文设计的绝缘夹层集成传感器响应速度与对比用超声传感器一致且两者所测超声信号能量均分布主要集中在 20~30kHz, 符合 GIS PD 超声波信号 20~80kHz 主频带范围。然后计算其信噪

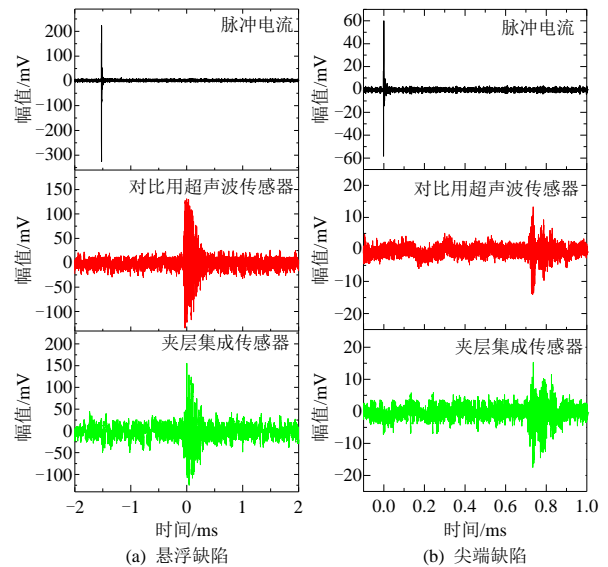


图 17 PD 超声信号时域波形

Fig. 17 Time-domain waveforms of PD ultrasound signals

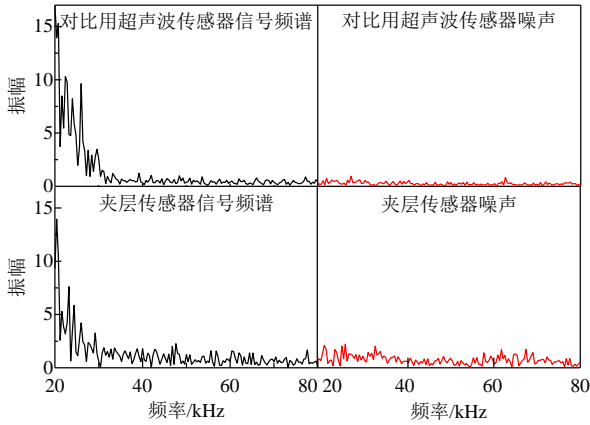


图 18 悬浮缺陷 PD 超声信号频谱

Fig. 18 Suspension defect PD ultrasonic signal spectrum

比^[44]，对比用超声传感器信噪比为 13.98 dB，绝缘夹层集成传感器信噪比为 9.54 dB，表明后者在信号检测能力上存在不足，易受到噪声干扰。

同时，考虑到实验数据的波动性，每次实验采集 10 次放电特征信号幅值并将每组数据进行均值和标准差的统计分析，如图 19(a)所示。可以看出，随着电压等级的增加，夹层集成传感器检测到的超声波信号幅值也相应升高，与对比用超声传感器变化趋势一致，表明传感器具有良好的 PD 超声波信号感知能力且能力和对比用超声传感器相当。

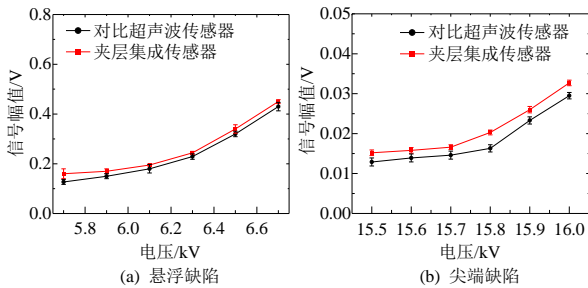


图 19 不同试验电压下 PD 超声波信号幅值

Fig. 19 PD ultrasonic signal amplitude at different test voltages

2) 尖端放电缺陷。

当升压至 15.5kV 时，脉冲电流通道产生放电信号，信号幅值为 60mV，对应的放电量为 150pC。记录下的 PD 超声波信号时域波形及其能量频谱如图 17(b)、图 20 所示。可以看出，本文设计的绝缘夹层集成传感器响应速度与对比用超声传感器一致且所测超声信号能量分布均集中在 20~50kHz 范围内。计算得到对比用超声波传感器信噪比为 8.94 dB，绝缘夹层集成传感器信噪比为 6.62 dB，表明后者存在易受到噪声干扰的不足，后续有必要进一步开展绝缘夹层集成传感器的优化研究。

实验获取的不同试验电压下绝缘夹层集成传

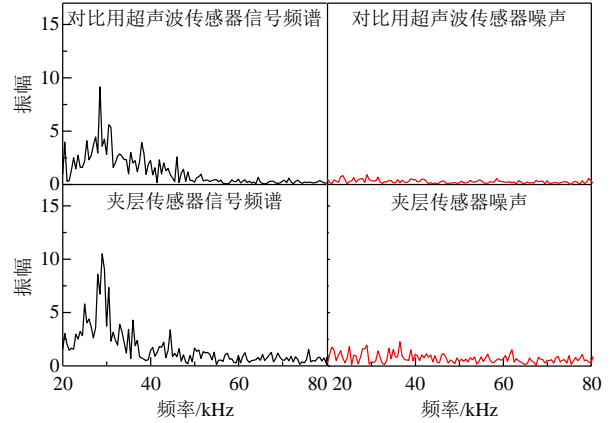


图 20 尖端缺陷 PD 超声信号频谱

Fig. 20 Spectrum of the tip defect PD ultrasonic signal

感器和对比用超声波传感器所检测到的 PD 超声波信号幅值均值和标准差的统计分析如图 19(b)。可以看出，传感器检测到的超声波信号峰值同样随着电压等级的增加而变大，与对比用超声波传感器变化趋势一致且感知能力相当。

3.2.3 PD 高频电磁波信号感知性能测试

1) 悬浮放电缺陷。

当升压至 5.5kV 时，脉冲电流通道产生放电信号，信号幅值为 320mV，对应的放电量为 800pC。示波器采样率设置为 6.25GS/s，检测到的 PD 高频电磁波信号时域波形如图 21(a)所示。可以看出，本文设计的绝缘夹层集成传感器可以有效检测 GID PD 高频电磁波信号且其计算得到的信噪比相较于非夹层集成传感器提高了 4.86 dB。

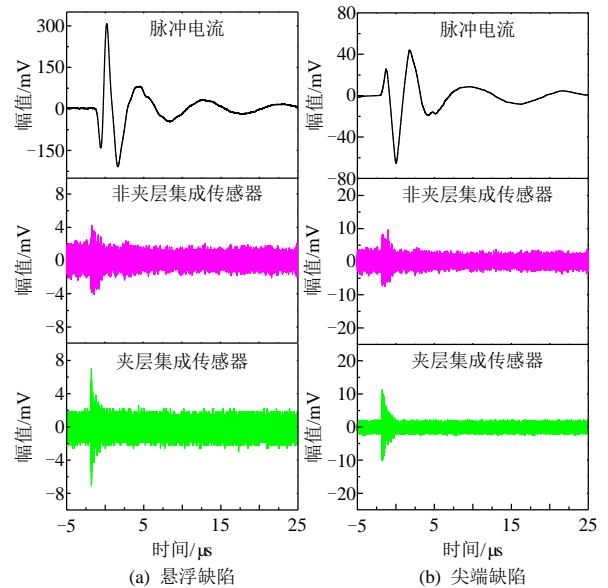


图 21 PD 高频电磁波信号时域波形

Fig. 21 Time-domain waveform of PD UHF signal

高频电磁波信号幅值均值和标准差的统计分析结果如图 22(a)。由图可知，随着电压等级的增加，

两种传感器检测到的高频电磁波信号幅值均相应升高,且夹层集成传感器在不同试验电压下的信号检测幅值均高于非夹层集成传感器。据此,夹层集成传感器的初始 PD 高频电磁波信号检测幅值性能提升率 ε 计算式为

$$\varepsilon = \frac{U_{10} - U_{20}}{U_{20}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 U_{10} 和 U_{20} 分别为起始 PD 试验电压下绝缘夹层集成传感器和非夹层集成传感器的高频电磁波信号检测幅值。由式(3)计算可得,相较于非夹层集成传感器,绝缘夹层集成传感器的初始检测信号幅值提升约 82.9%。

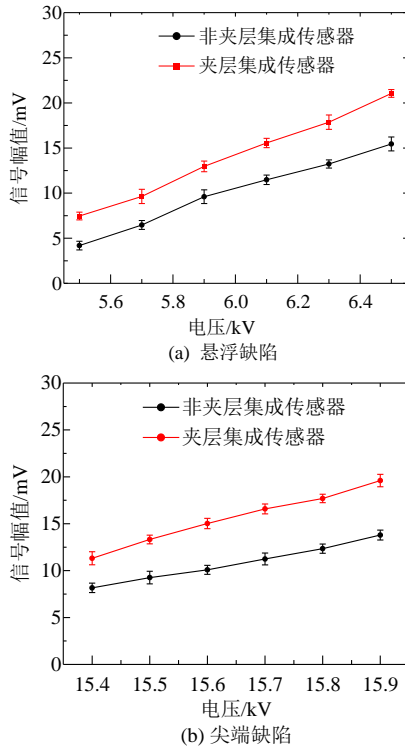


图 22 不同试验电压下 PD 高频电磁波信号幅值

Fig. 22 PD UHF signal amplitude at different test voltages

2) 尖端放电缺陷。

当升压至 15.4kV 时,脉冲电流通道产生放电信号,信号幅值为 60mV,对应的放电量为 150pC。记录的 PD 高频电磁波信号时域波形如图 21(b)所示。可以看出,本文所设计的传感器可以有效检测 PD 高频电磁波信号,且其计算得到的信噪比相较于非夹层结构提高了 7.95 dB。

不同试验电压下,绝缘夹层集成传感器和非夹层集成传感器所检测到的 PD 高频电磁波信号幅值和标准差的统计分析结果如图 22(b)所示。可以看出,两种传感器检测到的信号幅值均随试验电压的升高而增加,且由式(3)计算可得,相较于非夹层集

成传感器,绝缘夹层集成传感器的初始检测信号幅值提升约 41.9%。

3.2.4 PD 声磁信号联合感知性能测试

因非夹层集成传感器感知灵敏度不足、无法稳定检测到 PD 辐射高频电磁脉冲信号,且该试验主要测试集成传感器感知放电超声脉冲信号和电磁脉冲信号到达之间的时间差,所以本实验中将非夹层传感器替换成对比用单极子天线^[45]以提高实验可靠性。

1) 悬浮放电缺陷。

当升压至 5.6kV 时,脉冲电流通道产生放电信号,信号幅值为 320mV,对应的放电量为 800pC。考虑到 PD 声磁信号的时域长度差异及示波器存储深度限制,采样率设置为 5 MS/s。超声波前置放大器增益为 40 dB,记录下的脉冲信号波形如图 23(a)所示。其中,单极子天线的周期性噪声信号可能是源于周围电力线的工频干扰。

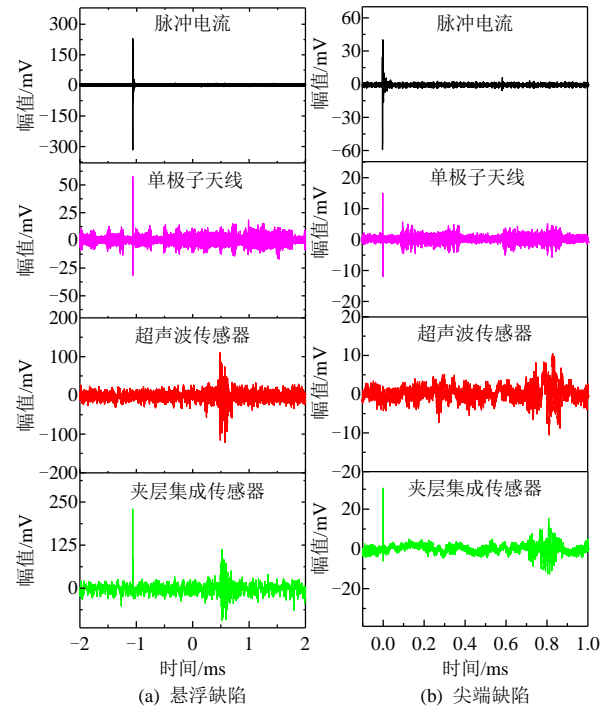


图 23 PD 声磁信号联合感知

Fig. 23 PD acousto-magnetic signal joint sensing

布置的传感器距离 PD 源 0.2m,声波在 SF₆ 气体中的传输速度为 140m/s^[46],则理论上 PD 超声波信号与高频电磁波信号到达传感器的时间差约为 1.5 ms。图 23(a)表明,本文设计的绝缘介质夹层结构的声磁集成传感器与对比用单极子天线几乎同时捕获到短暂的脉冲信号,之后与超声波传感器一同记录到一个持续时间更长且震荡衰减的脉冲信号。这表明传感器能够顺序感知 GIS PD 高频电磁

波和超声波信号。接着利用能量累计分析法^[47]计算得到两种信号之间的实际时间差为 1.6ms，与理论计算时间差(1.5ms)基本一致，验证了传感器在联合监测 GIS 悬浮放电缺陷产生的高频电磁波信号和超声波信号方面的有效性。

同样记录了不同电压等级下 PD 辐射超声波信号和高频电磁波信号到达集成传感器的时间差，实验结果如图 24(a)所示。可以看出，不同试验电压下高频电磁波信号和超声波信号到达绝缘夹层集成传感器的时间差基本保持在 1.5ms 左右，与理论分析一致。

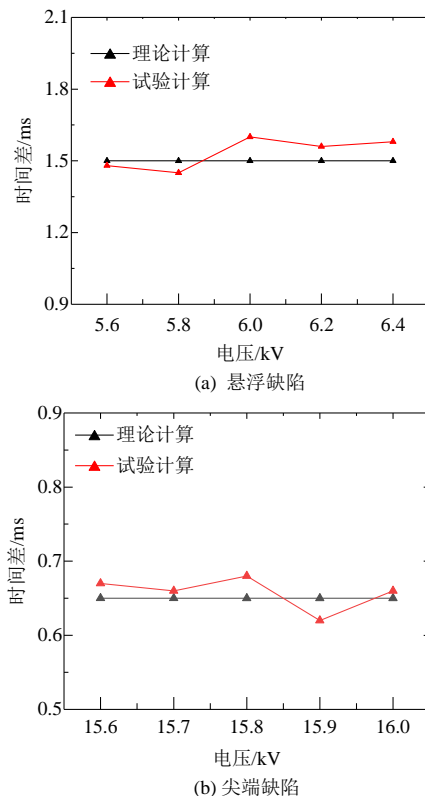


图 24 不同电压等级下的时间差

Fig. 24 Time difference at different voltage levels

2) 尖端放电缺陷。

升压至 15.5kV 时，脉冲电流通产生放电信号，信号幅值为 60mV，对应的放电量为 150pC。理论上 PD 超声波信号高频电磁波信号到达传感器的时间差约为 0.65ms，记录下的脉冲信号波形如图 23(b)所示，计算得到两种信号之间的实际时间差为 0.7ms，与理论计算值(0.65ms)接近，验证了传感器在联合监测 GIS 尖端放电缺陷产生的电磁波信号和超声波信号方面的有效性。记录不同电压等级下 PD 辐射超声波信号和高频电磁波信号到达集成传感器的时间差，如图 24(b)所示。可以看出，随着电压等级的升高，这两种信号到达夹层集成传

感器的时间差基本保持在 0.65ms 左右，与理论分析一致。

4 结论

本文设计构建了“圆极化叉指电极-PVDF 压电基底-FR4 绝缘介质”夹层结构的声磁集成传感器模型并进行优化测试分析，得到如下结论：

1) 绝缘夹层声磁集成传感器的超声波感知灵敏度首次展现出和商用超声波传感器性能相当的表现，在不同试验电压下的高频电磁波感知灵敏度均优于非夹层结构且初始信号检测幅值分别提升约 82.9%和 41.9%，同时集成传感器先后感知到的 PD 高频电磁波和超声波信号达到时间差和理论计算值相符；

2) 在实际现场应用时，传感器并不能只局限于 PD 缺陷特征信号的感知，还需要确保集成传感器长期内置 GIS 的安全性和 PD 缺陷的可靠预警。为此后续有必要进一步开展集成传感器与 SF₆ 及其热电故障分解特征气体相容性和基于集成传感器所输出特征信息的 PD 缺陷的多源可靠诊断研究。同时，考虑其广泛适用性，还可以应用于变压器等其他高压设备，用于实现多场景下的设备状态监测和故障诊断。

参考文献

- [1] ZHANG Guozhi, TIAN Jinwen, ZHANG Xiaoxing, et al. A flexible planarized biconical antenna for partial discharge detection in gas-insulated switchgear[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(12): 2432-2436.
- [2] TIAN Jinwen, ZHANG Guozhi, MING Chuan, et al. Design of a flexible UHF Hilbert antenna for partial discharge detection in gas-insulated switchgear[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(4): 794-798.
- [3] WANG Jian, HU Qi, CHANG Yanan, et al. Metal particle contamination in gas-insulated switchgears/gas-insulated transmission lines[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(5): 1011-1025.
- [4] WANG Jianxin, CHEN Weigen, WANG Pinyi, et al. Analysis of SF₆ decomposed products by fibre-enhanced Raman spectroscopy for gas-insulated switchgear diagnosis[J]. High Voltage, 2024, 9(1): 206-216.
- [5] 闫泽玉, 杨洋, 刘云鹏, 等. 基于神经监督决策树算法的多感知 GIS 局部放电识别[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5821-5832.

- YAN Zeyu, YANG Yang, LIU Yunpeng, et al. Multi-aware GIS partial discharge identification based on neural supervision decision tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5821-5832(in Chinese).
- [6] WANG Yanxin, YAN Jing, YANG Zhou, et al. Simultaneous partial discharge diagnosis and localization in gas-insulated switchgear via a dual-task learning network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(6): 4358-4370.
- [7] 董佳楠, 杜伯学, 梁虎成, 等. 高压 GIS 功能梯度绝缘子交/直流电场优化与沿面闪络抑制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3297-3305.
- DONG Jianan, DU Boxue, LIANG Hucheng, et al. Electric field relaxation and surface flashover suppression under AC/DC voltages by functionally graded spacer for HVDC GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3297-3305(in Chinese).
- [8] WANG Haotian, ZHANG Xuanrui, HAN Xutao, et al. A novel composite sensor for overvoltage and UHF partial discharge measurement in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5476-5479.
- [9] 雷志鹏, 彭川, 许子涵, 等. 基于改进 Deformable DETR 模型的多源局部放电识别方法及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6248-6260.
- LEI Zhipeng, PENG Chuan, XU Zihan, et al. Pattern recognition methods of multi-source partial discharge based on the improved Deformable DETR model and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6248-6260(in Chinese).
- [10] 胡方言, 丁登伟, 孙强, 等. 采用 GIS 局部放电 UHF 传感器的宽频带电压测量方法[J]. 高电压技术, 2025, 51(7): 3234-3244.
- HU Fangyan, DING Dengwei, SUN Qiang, et al. Wide-band voltage measurement method by using GIS partial discharge UHF sensor[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(7): 3234-3244(in Chinese).
- [11] CHENG Jiangrong, XU Yang, DING Dengwei, et al. Investigation of sensitivity of the ultra-high frequency partial-discharge detection technology for micro-crack in epoxy insulator in GIS[J]. High Voltage, 2020, 5(6): 697-703.
- [12] LIN Qingcheng, LYU Fuyong, YU Shiqi, et al. Optimized denoising method for weak acoustic emission signal in partial discharge detection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4): 1409-1416.
- [13] 张国治, 韩景琦, 刘健彝, 等. GIS 局部放电检测天线本体和巴伦共面柔性小型化特高频天线传感器研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 1064-1075.
- ZHANG Guozhi, HAN Jingqi, LIU Jianben, et al. Research on Gas insulated switchgear PD detection antenna body and Balun coplanar flexible miniaturized ultra-high frequency antenna sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 1064-1075(in Chinese).
- [14] LIU Baowen, MA Hongzhong, JU Ping. Partial discharge diagnosis by simultaneous observation of discharge pulses and vibration signal[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 288-295.
- [15] JIA Shuangrui, JIA Yunfei, BU Zewei, et al. Detection technology of partial discharge in transformer based on optical signal[J]. Energy Reports, 2023, 9(S1): 98-106.
- [16] ZENG Fuping, LEI Zhicheng, YANG Xu, et al. Evaluating DC partial discharge with SF₆ decomposition characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1383-1392.
- [17] 刘维, 江军, 沈志邦, 等. 高 dV/dt 电压下航空线缆局部放电仿真及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9897-9908.
- LIU Wei, JIANG Jun, SHEN Zhibang, et al. Partial discharge simulation and characteristic analysis of aviation cables under high dV/dt voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9897-9908(in Chinese).
- [18] 薛建议, 朱明晓, 邵先军, 等. 特高压 GIS 局部放电超声波传播特性仿真[J]. 高压电器, 2018, 54(9): 67-75.
- XUE Jianyi, ZHU Mingxiao, SHAO Xianjun, et al. Simulation on ultrasonic propagation characteristics of partial discharge in ultra-high voltage GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(9): 67-75(in Chinese).
- [19] TASKIN M, KIDO T, INOUE M, et al. Ultrasound propagation in two-layer gas flow[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(50): 27626-27634.
- [20] ZHOU Hongyang, MA Guoming, WANG Yuan, et al. Optical sensing in condition monitoring of gas insulated apparatus: a review[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 259-270.
- [21] 姚维强, 司文荣, 吕佳明, 等. EFPI 光纤超声传感器及其潜在局放检测应用综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1853-1866.
- YAO Weiqiang, SI Wenrong, LV Jiaming, et al. Review on EFPI fiber-based ultrasonic sensors and its potentially partial discharge detection application[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1853-1866(in Chinese).
- [22] WU Zhicheng, GUO Yiran, ZHOU Junjie, et al. Optical sensing technology for acoustic detection of partial discharges: a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(2): 591-606.
- [23] 周宏扬, 马国明, 张猛, 等. 基于 Michelson 光纤干涉的 GIS 局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6452-6459.

- ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in GIS based on the Michelson fiber optic interferometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6452-6459(in Chinese).
- [24] 陈起超, 李琪, 李中原, 等. 高灵敏度高一一致性非本征光纤法-珀局部放电声发射传感器[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4747-4756.
- CHEN Qichao, LI Qi, LI Zhongyuan, et al. High-sensitivity and high-consistency extrinsic fiber fabry-Perot partial discharge induced acoustic emission sensor[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4747-4756(in Chinese).
- [25] 周朕蕊, 张国强, 邱宗甲, 等. 基于EFPI膜片纳米级振幅识别的电晕放电检测[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4981-4989.
- ZHOU Zhenrui, ZHANG Guoqiang, QIU Zongjia, et al. Corona discharge detection based on extrinsic Fabry-Perot interferometric diaphragm Na-noscale amplitude recognition[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4981-4989(in Chinese).
- [26] 肖梦哲. 多参量无串扰型光纤传感器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- XIAO Mengzhe. Study on multi-parameter and cross-free fiber sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019(in Chinese).
- [27] 张国治, 胡栩焜, 邓广宇, 等. SF₆及SF₆故障分解气体与局部放电柔性特高频天线传感器基底相容性实验研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4050-4062.
- ZHANG Guozhi, HU Xukun, DENG Guangyu, et al. Experimental study on substrate compatibility of SF₆ and SF₆ fault-decomposing gases with partial discharge flexible UHF antenna sensors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4050-4062(in Chinese).
- [28] ZHANG Guozhi, CUI Zhaoran, WANG Jiangfan, et al. Research on integrated sensor technology of electrostatic discharge ultrasonic and high-frequency electromagnetic wave for spacecraft space equipment[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2024, 66(2): 370-381.
- [29] 张国治, 鲁昌悦, 周红, 等. 电力设备局部放电超声、特高频一体化传感技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 5090-5101.
- ZHANG Guozhi, LU Changyue, ZHOU Hong, et al. Integrated ultrasonic and UHF sensing technology for partial discharge of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5090-5101(in Chinese).
- [30] 张国治, 田晗绿, 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]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 6215-6227.
- ZHANG Guozhi, TIAN Hanlv, ZHANG Lei, et al. Research on PZT-based ultrasonic-ultra high frequency composite partial discharge sensing technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 6215-6227(in Chinese).
- [31] SAIKI T, TSUBOSAKA A, YAMAGUCHI A, et al. Interdigital transducer generated surface acoustic waves suitable for powder transport[J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28(2): 491-498.
- [32] DING Zhongjun, FENG Zhiliang, LI Hongyu, et al. Experimental study of deep submersible structure defect monitoring based on flexible interdigital transducer surface acoustic wave technology[J]. Sensors, 2023, 23(3): 1184.
- [33] 电力设备带电检测仪器技术规范 第9部分: 超声波局部放电检测仪: Q/GDW 11304.9—2023[S]. 北京: 国家电网有限公司, 2023.
- Electric Power Equipment Live Detection Instrument Technical Specification—Part 9: Ultrasonic Partial Discharge Detection Instrument: Q/GDW 11304.9—2023 [S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2023(in Chinese).
- [34] LUNDGAARD L E, RUNDE M, SKYBERG B. Acoustic diagnosis of gas insulated substations: a theoretical and experimental basis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4): 1751-1759.
- [35] YUAN Chongxiao, ZHANG Chao, XIAO Shibing, et al. Multilayer nanocomposite films with enhanced piezoelectric properties doping PZT nanofibers[J]. Ceramics International, 2023, 49(17): 28474-28483.
- [36] LIN Yongzhi, FENG Lukun, LI Yadong, et al. Dielectric constant calculation of poly(vinylidene fluoride) based on finite field and density functional theory[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2024, 42(5): 655-662.
- [37] YAO Qingkai, XIE Linfang, GUO Xing, et al. High-performance acoustic wave sensor based on PVDF-TrFE membrane combing the piezoelectric and Fabry - Pérot effects[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(14): 15660-15666.
- [38] GONG Yi, ZHANG Menglun, LIU Miaojie, et al. Ultrahigh-sensitivity coupled cantilever and dual-cavity piezoelectric micromachined ultrasonic transducers [J]. IEEE Electron Device Letters, 2024, 45(5): 897-900.
- [39] JOHNSON AD, ZHONG Jingni, VENKATAKRISHNAN S B, et al. Phased array with low-angle scanning and 46: 1 bandwidth[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(12): 7833-7841.
- [40] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 声发射传感器校准规范(比较法): JJF 1337—2012[S]. 北京: 中

- 国质检出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calibration specification for acoustic emission sensors (comparative method): JJF 1337—2012[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2012(in Chinese).
- [41] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 高电压试验技术 电磁和声学法测量局部放电: GB/T 42287—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Management Committee. High-voltage test techniques—measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods: GB/T 42287—2022[S]. Beijing: China Standard Press, 2022(in Chinese).
- [42] WANG Yanxin, YAN Jing, YANG Zhou, et al. A novel domain adversarial graph convolutional network for insulation defect diagnosis in gas-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 442-452.
- [43] 周宏扬. 基于 Michelson 光纤干涉仪的局部放电超声检测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
ZHOU Hongyang. Research on partial discharge ultrasonic detection technology based on Michelson optical fiber interferometer[D]. Beijing, China: North China Electric Power University(Beijing), 2020(in Chinese).
- [44] ZHANG Chao, JIANG Xuefeng, CHEN Dong. Signal-to-noise ratio improvement by vortex wave detection with a rotational antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(2): 1020-1029.
- [45] 张国治, 汪令仪, 张翰霆, 等. 航天器高压太阳能电池阵列 ESD 检测用柔性天线传感器[J]. 航天器环境工程, 2023, 40(5): 492-500.
ZHANG Guozhi, WANG Lingyi, ZHANG Hanting, et al. Flexible antenna sensor for ESD detection of spacecraft high voltage solar cell array[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(5): 492-500(in Chinese).
- [46] 陈敏, 白尧, 汪涛, 等. GIS 设备击穿放电定位技术研究与应用[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 81-90.
CHEN Min, BAI Yao, WANG Tao, et al. Technology research and field applications of GIS equipment breakdown discharge location[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 81-90(in Chinese).
- [47] 吴诗优, 郑书生, 钟爱旭, 等. 基于智能聚类算法的 UHF 法变电站空间多源局部放电定位方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4309-4318.
WU Shiyu, ZHENG Shusheng, ZHONG Aixu, et al. Location method of multiple partial discharges sources in substation space by UHF method based on intelligent clustering algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4309-4318(in Chinese).



张国治

在线出版日期: 2025-02-08。

收稿日期: 2024-10-15。

作者简介:

张国治(1990), 男, 博士后, 副教授, 博士生导师, 主要从事电力设备绝缘检测和评估方面的研究工作, youzgz@163.com;

*通信作者: 张晓星(1972), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事电气设备在线监测与故障诊断、SF₆替代气体及放电等离子体等研究, xiaoxing.zhang@outlook.com。

(责任编辑 胡琳琳)