

电气设备局部放电检测技术述评：2015—2025

李军浩¹, 韩旭涛¹, 王昊天¹, 周 阳¹, 陈 欢¹, 郭若琛², 司文荣³

(1. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学), 西安 710049; 2. 日立能源研究中心(瑞典), 韦斯特罗斯 72226; 3. 国网上海市电力公司, 上海 200437)

摘 要: 局部放电作为电气设备绝缘劣化与故障发展的重要前兆, 其检测与分析技术贯穿电气设备全生命周期, 是评价绝缘状态最为关键的参量。近十年来, 随着局部放电研究与实践的不断深入以及新兴技术的快速渗透, 局部放电检测与分析技术实现了快速发展。该文从局部放电检测技术、定位方法与模式识别算法 3 个方面, 系统综述了近十年来的重要研究成果。围绕局部放电检测中的误报漏报问题、现场缺陷模式识别准确性不足、局部放电动态诊断技术缺失、复杂工况下局放理论研究以及新型应用场景下检测与分析需求, 深入讨论了当前研究与应用中存在的主要挑战。进一步提出, 未来应加快多参量融合检测与新型传感技术的工程化应用, 提升人工智能算法在实际现场缺陷识别中的实用性, 加强局部放电动态诊断及复杂工况下局放演变机制研究, 并拓展局放检测与分析技术在新兴场景下的应用。

关键词: 局部放电; 检测技术; 定位方法; 诊断算法; 多参量融合; 光纤技术; 人工智能; 复杂工况

Review of Partial Discharge Detection Technology in Electrical Equipment: 2015—2025

LI Junhao¹, HAN Xutao¹, WANG Haotian¹, ZHOU Yang¹, CHEN Huan¹, GUO Ruochen², SI Wenrong³

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

2. Hitachi Energy Research, Vaesteras 72226, Sweden;

3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: Partial discharge (PD) is a critical early indicator of insulation degradation and fault development in electrical equipment. Its detection and analysis technologies are applied throughout the entire life cycle of electrical equipment and serve as essential parameters for evaluating insulation condition. Over the past decade, with the deepening of PD research and practice, as well as the rapid integration of emerging technologies, PD detection and analysis techniques have achieved significant advancements. This paper systematically reviews major research achievements over the past ten years from following three aspects: PD detection technologies, localization methods, and pattern recognition algorithms. Moreover, this paper discusses the current challenges in practical engineering applications, including false alarms and missed detection in PD monitoring, insufficient accuracy of on-site defect pattern recognition, lack of dynamic PD diagnostic technologies, limited understanding of PD mechanisms under complex operating conditions, and emerging needs for PD detection and analysis in new application scenarios. Furthermore, this paper proposes that future work should focus on accelerating the engineering application of multi-parameter fusion detection and emerging sensing technologies, enhancing the practical applicability of artificial intelligence algorithms for practical defect identification, promoting research on dynamic PD diagnostic, and expanding PD detection and analysis methods for new scenarios.

Key words: partial discharge; detection technology; localization method; diagnostic algorithm; multi-parameter fusion; optical fiber technology; artificial intelligence; complex operating conditions

0 引言

局部放电(partial discharge, PD, 简称局放)是导体间绝缘仅被部分桥接时发生的电气放电现象,

虽然未立即导致绝缘系统的完全击穿或闪络, 但是会引起绝缘介质性能的逐步劣化, 是导致绝缘系统最终失效的主要原因。局部放电的产生源于绝缘系统中局部电场的集中, 这些区域的电场强度率先达到绝缘介质的击穿阈值, 从而引发局部区域的放电过程。电气设备中局部电场集中可能出现于其设计、制造安装与运行等过程: 在设计阶段, 采用介电常

数或电导率差异显著的绝缘材料, 或不合理的绝缘结构布置, 容易引发电场分布的不均匀性; 在制造和现场安装阶段, 工艺控制不当或装配偏差可能引入尖刺、异物或气隙等典型的电场集中缺陷; 在运行阶段, 绝缘材料在电、热、机械应力的长期作用下可能发生裂纹、气泡、杂质或接触不良等劣化问题, 从而导致局部放电的发生。因此, 局部放电不仅是电气设备设计阶段需重点规避的风险因素, 也是制造安装完成后必须检测的关键绝缘性能指标, 更是运行维护过程中应长期监测的核心状态参量。局部放电的检测与分析贯穿电气设备全生命周期, 是评估电气设备绝缘性能最重要的参量, 能够有效识别设计缺陷、制造缺陷及运行过程中产生的潜伏性缺陷, 对保障电气设备的安全稳定运行具有不可替代的重要作用。

局部放电现象的研究已有超过 80 年的历史^[1], 其检测与分析技术始终朝着“准确检测、精准定位与模式识别”三大目标持续演进。近十年来, 随着对局部放电物理机制认知的不断深化以及新兴技术的快速渗透, 局部放电检测与分析技术不断发展和创新。在检测方面, 脉冲电流法、超声波法和特高频法作为工程实践中应用最为广泛的传统手段, 持续在灵敏度提升、抗干扰优化与标准化体系建设等方面取得进展。其中, 脉冲电流法作为最早建立国际标准的局放检测技术, 其 IEC 标准不断完善和修订^[2]; 特高频法和超声波法也相继形成了首个 IEC 国际标准与中国国家标准, 标志着其工程推广基础日益完善。与此同时, 传感器技术的革新极大地拓展了局放检测手段, 基于光学传感和隧道磁阻 (tunnel magnetoresistance, TMR) 等新型传感原理的检测技术不断涌现, 在高压密封、强电磁干扰、空间受限等极端工况下展现出良好的环境适应能力。局部放电的检测理念也正逐步由传统的单一物理量检测向多参量融合测量方向演化, 一系列面向工程应用场景的多参量检测技术持续发展, 通过对局部放电伴随的声、光、电等多种物理信号的融合获取, 显著提升了缺陷检测的灵敏性和全面性。在定位与诊断技术方面, 伴随着近十年来人工智能与数值计算方法的快速发展, 以数值仿真为基础的局部放电虚拟定位技术能够在复杂设备结构中实现源区的空间反演; 基于机器学习中深度神经网络的智能识别算法也已广泛应用于局部放电的模式识别等任务, 在提升检测结果处理效率与诊断准确性方面发挥了

重要作用。

笔者 2015 年曾经撰写过一篇局部放电检测的述评论文^[1], 该论文当前知网引用超过 600 次, 是局部放电领域引用量最高的论文, 获得了广大读者的认可。近十年来, 随着新型电力系统和智能电网的建设, 电力系统对供电可靠性与设备状态感知能力要求持续提升, 局部放电检测与分析的研究与工程实践不断深入, 传统检测技术不断发展, 新型技术不断涌现, 因此笔者认为有必要梳理自 2015 年到 2025 年期间局部放电检测领域的重要研究成果与关键技术演进, 深入探讨当前研究和应用中存在的主要问题及其可能的解决思路, 展望未来局部放电检测与分析技术的发展方向。

1 局部放电检测技术

局部放电检测是判断电气设备内部是否存在局部放电现象, 并获取与局部放电相关数据信息的基础性环节, 是后续开展局部放电定位与诊断的前提条件。检测通常通过测量局部放电过程中伴随产生的电流脉冲、电磁辐射、超声波、光辐射等物理信号实现。然而, 由于局部放电本身能量微弱, 其激发的各类信号也较弱, 且易受外部电磁干扰和环境噪声影响, 导致检测过程存在较大挑战。因此, 局部放电检测不仅是局部放电领域的关键技术难点, 也始终是国内外研究的重要热点方向。近十年来, 传统检测技术不断优化, 同时也涌现出多种新的检测手段, 为提升检测能力和适应复杂工况提供了有力支撑。

1.1 局部放电的电荷测量技术

采用电流脉冲进行局部放电测量是使用历史最为悠久、技术最为成熟的测量方法, 当前所采用的局部放电脉冲电流法检测标准是发布于 2000 年的 IEC 60270-2000: 高电压试验技术-局部放电测量 (IEC 60270: High-voltage test techniques: Partial discharge measurements-2000)。该标准自发布以来获得了广泛应用, 其修订工作不断进行, 2025 年 1 月份公布的 IEC 60270-ED4 草案将标准名称更名为“高电压试验技术-基于电荷的局部放电测量” (High-voltage test techniques: Charge-based measurement of partial discharges)^[2]。虽然检测方法本身未发生实质性变化, 但这一更名进一步明确了电荷这一参量在定量测量局部放电在放电量方面的核心作用。该方法通过在高压试验回路中串接检测阻

抗或布置 Rogowski 线圈来测量局部放电激发的电流脉冲^[3],是目前唯一能够测量视在放电量的局部放电检测方法。根据标准规定,电荷测量法主要针对频率 1 MHz 以下的电流脉冲信号进行放电检测。然而,低频段检测回路易受到空间电磁耦合、电晕放电、高压引线及接地引线等多路径干扰的影响,限制了该方法在小幅值局部放电信号检测中的有效性,通常检测灵敏度为 5 pC,在较好的环境条件下噪声水平可达到 1 pC。

针对高灵敏度局部放电电荷测量技术,文献[4-5]分别研究了高压端检测技术以及分布式测量方法,实现了气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中盆式绝缘子局部放电的高灵敏度测量,有效提升了局部放电起始阶段小信号的检测灵敏度与信噪比。高压端检测技术通过将高电位检测阻抗 Z_0 直接布置在 GIS 设备的高压导杆上,如图 1(a)所示,完全抑制了地线耦合干扰,并显著削弱了电源干扰,如图 1(b)所示,从而实现了 0.5 pC 的局放量检测。图中, Z_s 为保护阻抗, C_k 为耦合电容, Z_k 为常规检测阻抗。

分布式检测技术原理如图 2 所示,图中, C_1 为试品单元电容, C_2 为参考单元电容, C_0 为工装电容, Z_1 和 Z_2 为两个相同的检测阻抗, U 为外施高电压源, i_1 、 i_2 、 i_0 分别为流经各支路的放电脉冲电流。其原理是通过在试品(图 2 中 C_1)测量回路并联设置参考回路(图 2 中的 C_2 和 Z_2 回路),根据两个回路中检测到的信号幅值及极性特征,有效区分试品内部局部放电信号与外部干扰信号,从而显著提升局部放电检测的灵敏度。该方法最高可实现 0.02 pC 局放量的高灵敏测量。

上述高灵敏度检测技术对检测回路的要求较高,主要适用于实验室研究或设备出厂试验等受控环境。而对于现场运行设备,电荷测量技术通常通过利用设备中的杂散电容作为耦合路径,并结合安装测量电极的方式引入测量回路,从而实现现场电荷量检测。图 3(a)展示了通过在电缆接线端与接头处嵌入金属电极的检测技术,利用电缆与导体之间的杂散电容作为耦合电容,在嵌入电极与接地端之间连接检测阻抗,可实现电缆局部放电测量^[6-7]。类似地,文献[8]通过在变压器铁芯柱的不同位置利用漆包线绕制线圈,利用线圈与绕组之间的电容实现对变压器绕组中局部放电的耦合与测量,如图 3(b)所示。此外,还可以利用变压器套管抽头引出线连

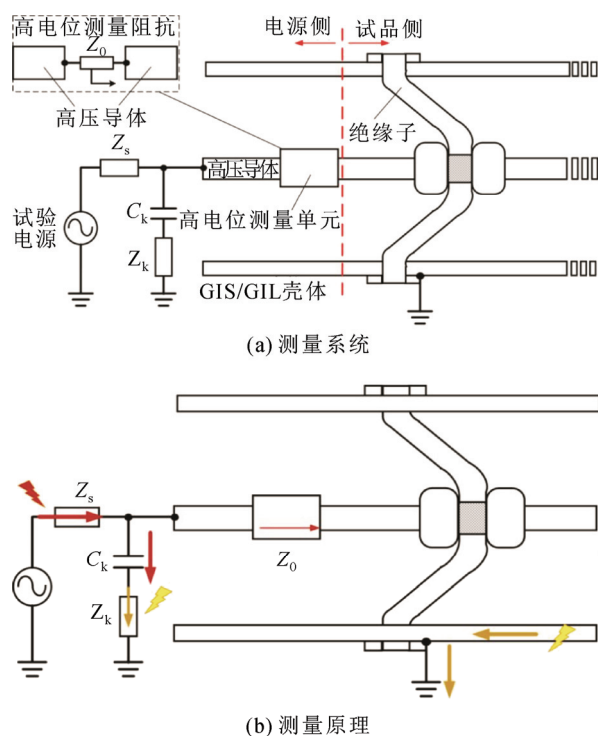


图 1 GIS 设备高压端局放电电荷检测技术

Fig.1 Local discharge charge detection technique for high-voltage end of GIS equipment

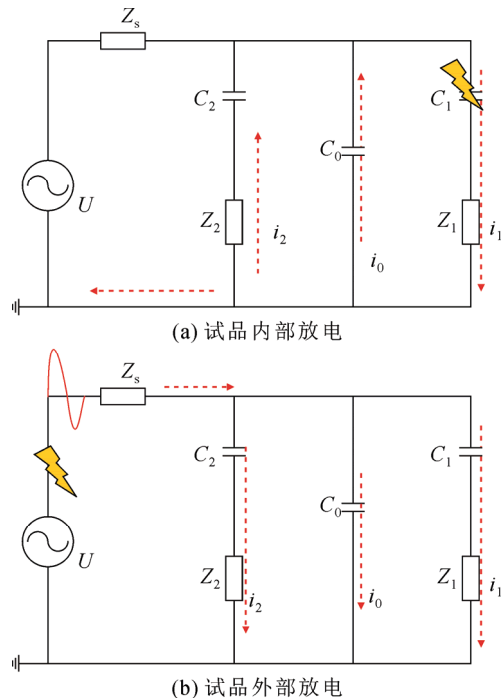


图 2 GIS 设备分布式局放电电荷检测技术

Fig.2 Distributed local discharge charge detection technology for GIS equipment

接检测装置,利用套管电容作为耦合电容对变压器内部的放电进行测量,如图 3(c)所示^[9-10]。

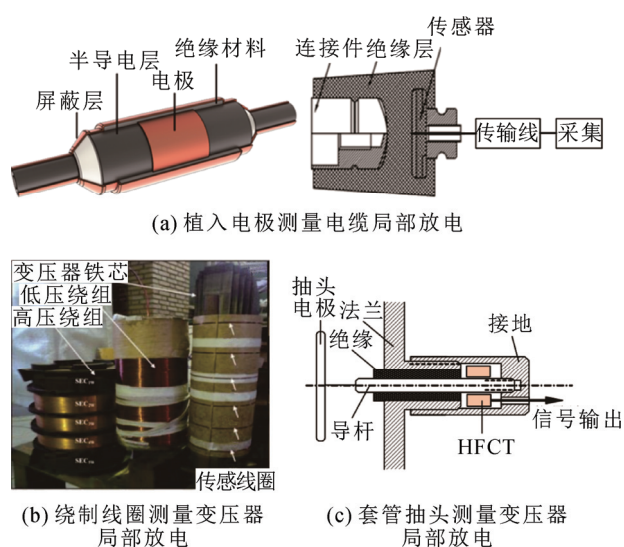


图3 实际设备中的局部放电电荷测量技术

Fig.3 Partial discharge charge measurement techniques in practical devices

上述测量技术通常需要对设备结构进行一定程度的改造, 对于现场在运电气设备, 往往难以调整回路或改动设备本体以安装常规检测装置。目前现场检测中广泛采用高频电流检测技术, 通过在电缆接头、终端、架空线或设备接地线上安装高频电流互感器(high-frequency current transformer, HFCT)测量局部放电脉冲的电流信号^[11-12]。HFCT 的典型测量频段覆盖几兆赫兹至数十兆赫兹, 相比传统低频段脉冲电流法, 具有更强的抗电磁干扰能力。需要注意的是, 由于 HFCT 技术难以保证在宽频带范围内传感器本体及测试仪器的线性响应, 标准中明确指出, 该检测方法无法直接用于定量测量设备内部的局部放电视在放电量, 现有的 IEC 60270 标准并不涵盖 1 MHz 以上的测试频段。

目前, 局部放电的电荷测量主要应用于实验室研究、电气设备的出厂试验、以及现场交接试验和停运状态下的故障诊断试验中。在设备停运期间, 该方法可作为标准化手段用于评估绝缘状态。然而, 由于测量阻抗难以直接接入设备运行回路, 且抗干扰能力有限, 易受到现场电晕等外部因素干扰, 因此在设备带电运行状态下的现场检测应用受到较大限制。但由于其是当前唯一能够获得放电量这一重要定量指标的方法, 以电荷测量为核心的脉冲电流法仍然是局部放电检测领域中最重要、最具权威性的定量测量手段。

1.2 局部放电的电磁检测技术

电气设备产生的局部放电脉冲具有极短的上升时间, 能激发并向外辐射出电磁辐射信号, 覆盖甚高频(very high frequency, VHF, 30~300 MHz)和特高频(ultra high frequency, UHF, 300 MHz~3 GHz)频段。辐射出的电磁信号以场的形式存在, 因而无需与设备主电气回路直接接触, 通过采用相应频段的检测技术测量电磁信号, 便可实现对现场运行设备局部放电的在线监测。近年来, 随着 IEC TS 62478^[13]和 GB/T 42287^[14]标准的发布, 针对包括电磁检测在内的非传统局部放电检测方法, 检测流程与应用要求得到了系统规范与技术指导。特别是标准中给出了特高频检测系统的 5 pC 灵敏度核查方法, 极大地提升了该技术在现场应用中的规范性与可操作性。

1.2.1 特高频检测

特高频检测主要利用传感器检测局部放电产生的 300~3 000 MHz 范围内的电磁波(实际中受硬件成本限制以及考虑通讯干扰, 主要采用的频段为 300~1 500 MHz), 能够有效规避电晕放电干扰以及噪声信号, 目前在 GIS/气体绝缘线路(gas insulated line, GIL)设备以及变压器的局部放电检测及在线监测中取得了十分广泛的应用。近年来, 围绕该检测技术的研究主要在于传感器方面的优化与改进。

根据安装方式的不同, 特高频传感器可分为内置式传感器和外置式传感器。内置式传感器通常安装在 GIS 设备的手孔、变压器的介质窗或油阀等低电位和低电场区域, 借助设备金属外壳的良好屏蔽作用, 有效抑制外部电磁干扰, 因此具有较高的检测灵敏度和抗干扰能力。由于内置式传感器需要直接接触绝缘介质, 通常采用电极结构简单的传感结构设计^[15-16], 如图 4(a), 以提高其在设备内部长期运行的可靠性, 并避免对设备绝缘性能造成影响。在必要情况下, 传感电极还需通过小电感接地, 以抑制工频强电磁场在电极处可能引发的局部放电。

外置式特高频检测主要通过传感器在 GIS 绝缘子浇筑孔、变压器套管等位置测量放电产生的泄漏至设备外部的电磁波。外置式特高频传感器对设备绝缘不产生影响, 但由于绝缘件对于 UHF 信号的衰减以及结构的限制, 泄漏出的电磁波往往频率较高, 因而外置式特高频检测需要在高频段具有更高的灵敏度^[17]。如图 4(b)所示的阿基米德螺旋天线是一种典型的宽频天线^[18], 其在很宽的频率范围内具

有平坦的增益。螺旋天线的低频响应受到天线外径尺寸的限制,可以通过天线旋臂曲折化技术降低天线外径以实现螺旋天线的小型化^[19-20]。近年来研究人员还设计并改进了如图4(c)所示的蝶形、平面形、Vivaldi以及微带线等各式各样的贴片天线^[21-28],其基板可以替换为PI、PDMS、PET等材料实现柔性天线设计,以适应不同设备的应用场景^[29-30]。

除上述典型特高频检测技术外,针对GIS中的局部放电检测,科研人员提出了在GIS绝缘子中预埋环状金属电极的特高频检测技术^[31],其传感器安装方式如图5所示。相较于传统特高频传感器,该方法能够显著提升检测灵敏度,但需要对盆式绝缘子进行改造。

此外,针对变压器特高频检测需要将传感器植入设备内部的问题,文献[32-33]提出了利用变压器自身元器件作为特高频天线的特高频自感知技术,该方法通过将变压器铁芯、绕组、套管等部件作为特高频接收装置,并以接地引线作为馈线,构建局部放电特高频检测通道,实现了在不对投运变压器进行任何结构改动的前提下,仅利用简单装置直接获取特高频信号,如图6所示,适用于大型电力变压器和换流变的局部放电监测。

1.2.2 高频电磁场检测

除特高频外,针对局部放电产生的高频及甚高频电磁场的测量也是一种有效的检测方法。文献[34]通过将内置平板电极与电感线圈相组合得到图7(a)所示传感器,分别利用电感及电容耦合对GIS内部放电产生的甚高频范围内的电场、磁场进行测量,并依据GIS内信号传播的特征阻抗可对内部放电与外部干扰进行区分。文献[35]设计了如图7(b)所示的用于接收甚高频电磁信号的线圈传感器,可以通过非接触方式对放电产生的高频及甚高频电磁信号进行定向测量。相比特高频,由于局部放电能量分布的特点,高频及甚高频段内的电磁信号具有更高的幅值,但该频段内受到的电磁干扰也更严重,一定程度上阻碍了这一频段检测技术的应用。

除常规电极型传感器外,近年来研究人员也探索了磁阻传感等新型检测技术。磁阻传感器依靠铁磁材料电阻随外施磁场变化的特性实现磁场测量,因其检测灵敏度高、集成度高以及可实现非接触式测量等优点,在磁场测量领域受到了广泛关注^[36]。近年来,已有学者开始围绕磁阻传感器在局部放电检测领域的应用开展初步研究,利用TMR传感器

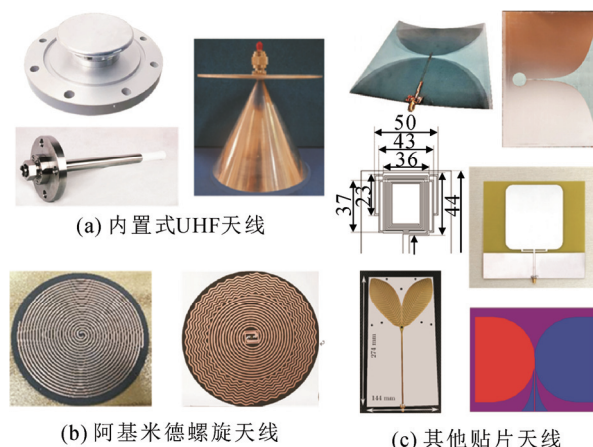


图4 典型的局部放电特高频传感器

Fig.4 Typical UHF sensors for PD detection

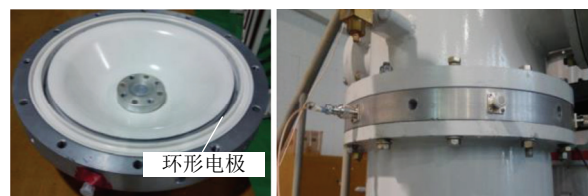


图5 GIS绝缘子预埋式特高频环形电极

Fig.5 Embedded UHF ring electrode in GIS insulator

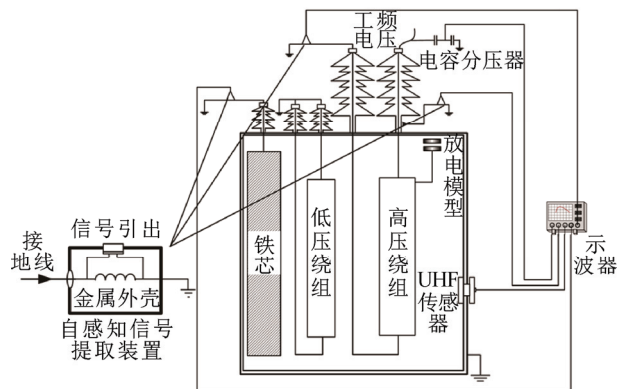


图6 变压器特高频自感知技术

Fig.6 UHF self-sensing technology for transformer

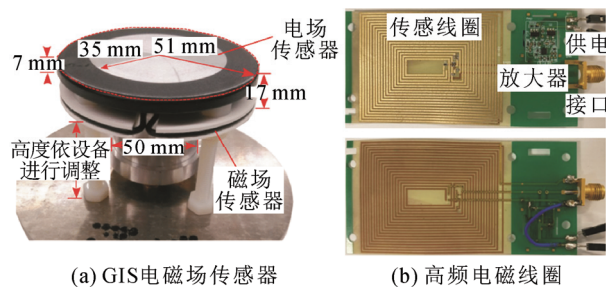


图7 高频电磁场传感器

Fig.7 High frequency electromagnetic field sensors

阵列成功实现了电晕放电的检测与定位^[37]; 文献[38-39]基于高灵敏度巨磁阻(giant magnetoresistance, GMR)传感器搭建了局部放电检测装置, 将检测带宽提升至兆赫兹量级, 并在实体 GIS 及电缆系统中进行了实验验证。作为局部放电检测手段, 磁阻传感器目前仍存在灵敏度不足、受空间位置影响显著、检测频段主要集中于兆赫兹量级以下等问题, 其在现场电气设备中的应用尚需进一步研究与优化。

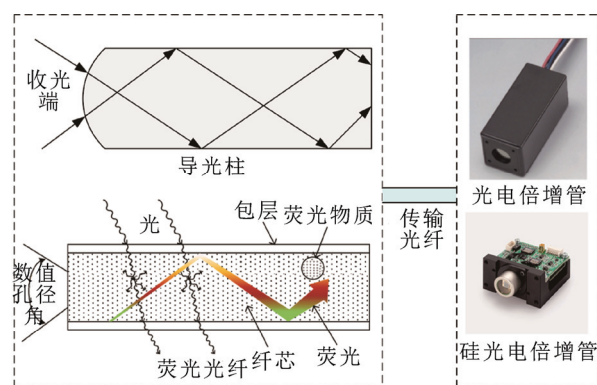
1.3 局部放电的光学检测技术

局部放电过程伴随着光辐射的产生, 通过测量放电过程中发出的光信号, 可以有效规避电磁干扰对检测结果的影响。然而, 光学传感器必须植入设备内部以实现信号采集, 给实际工程应用带来一定挑战。李军浩等人率先提出将光学传感器与特高频传感器融合的检测思路, 创新性地解决了光学传感器内部布设的难题^[40]。在此基础上, 近十年来, 基于光学检测的局部放电检测技术得到了快速发展, 并取得了丰富的研究成果。

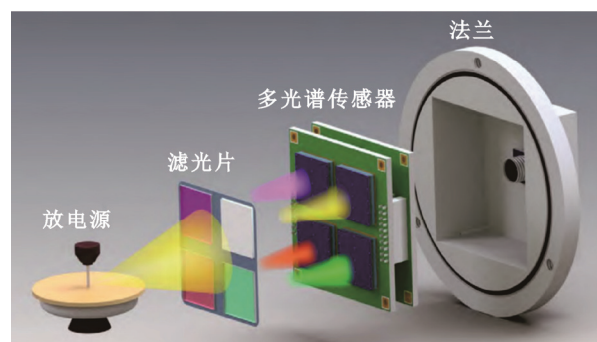
光学检测主要通过前端收光装置捕获放电的光子, 经传输后送入光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)或硅光电倍增管(silicon photomultiplier, SiPM)进行光电转换后输出。常规的方法是如图 8(a)所示的在设备内部安装导光柱, 将信号通过传输光纤送至光电转换器件^[41-43]。相比于导光柱, 荧光光纤可以接收侧向来光并由内部的荧光物质激发特定波长的光进行传输, 因而具有更大的收光范围^[44-46]。另外, 也可直接将光学检测模块安装至待测设备内部以获得更高的检测灵敏度与信噪比。

基于 SiPM 尺寸小、灵敏度高的特点, 任明等人将滤光片与 SiPM 结合, 设计了如图 8(b)所示的局部放电多光谱检测方法, 分析了不同类型放电光谱中紫外、可见、红外光的成分, 并验证了其应用于局部放电识别的可行性^[47-49]。文献[50]还利用光纤搭配光谱仪测量了 SF₆ 气体中不同放电类型的发射光谱。

尽管光学检测技术相比电磁检测更容易受到传播遮挡的影响^[51], 但由于其检测灵敏度高且对电磁干扰具有完全免疫特性, 在电气设备内部一定范围内能够实现优异的检测效果。目前, 光学检测技术已实现在实际电气设备上获得现场应用^[52], 作为一种具备广阔应用前景的局部放电检测手段, 正逐步获得更多关注与发展。



(a) 局部放电光学检测方法



(b) 局部放电多光谱检测

图 8 局部放电的光学检测

Fig.8 Optical measurement for partial discharge

1.4 局部放电的超声检测技术

局部放电过程还伴随声学信号的辐射, 其中超声频段的声波能够沿绝缘介质与设备外壳广泛传播, 因此基于超声信号的局部放电检测技术长期以来一直是国内外研究人员关注的热点方向。根据超声信号检测原理的不同, 超声检测技术可分为压电式超声检测与光纤超声检测等。近十年来, 传统压电陶瓷超声检测技术持续发展, 与此同时, 随着光学检测与微机电系统(micro electro mechanical systems, MEMS)检测技术的快速进步, 基于光纤传感的超声检测技术得到了迅猛发展。

压电陶瓷式超声传感器操作简便、成本较低, 是电气设备现场局部放电检测常用的方法^[53]。近年来, 有学者开发了基于柔性高钛酸铅(PZT)薄膜的压电式传感器, 将超声检测有效应用于电缆设备^[54]。也有研究将超声传感器中常用的 PZT 替换为铁电材料, 并设计了多谐振传感器, 改善了检测灵敏度及检测带宽^[55]。

传统压电超声技术较为成熟, 但由于超声信号在介质、设备部件的传播中衰减严重, 导致检测灵敏度有限。随着近年来光学器件的发展, 光纤超声

检测技术受到越来越广泛的关注。光纤布拉格光栅(fiber Bragg gating, FBG)是一种常见的超声光学检测方法,其工作原理如图 9(a)所示。光栅会对特定波长的入射波进行反射,而当超声作用于光栅时,所引发的微小形变会导致光栅反射光谱的偏移,从而可以解调出超声信号。基于此,有学者开发出相移光纤光栅(phase-shifted FBG, PS-FBG),在反射波段内引入一个狭窄的窗口,通过对这一波段内的反射光进行解调可以得到更高的灵敏度^[56]。由于 FBG 的反射波段狭窄,马国明等人设计了一种串联多个不同波段光栅的复用检测技术,实现了超声信号的多点定位^[57]。

干涉型光纤超声近年来受到广泛的关注与研究,根据干涉结构的差异可大致分为如图 9(b)所示的 4 种结构^[53]。当超声波作用于光纤上时,由于应力-应变效应及弹光效应,传感光纤和参考光纤之间会出现相位差,从而影响干涉光强的输出^[58-61]。传感光纤越长,干涉传感器的灵敏度越高,因此通常将光纤绕制成图 9(c)所示光纤环进行检测^[62-63],也有学者针对性地研究了光纤传感器本体结构对光纤传感器灵敏度的影响,设计了如图 9(d)所示的光纤传感器结构^[64-65]。

此外,随着近些年 MEMS 技术的发展,出现了小型化的 MEMS 超声传感器(micromachined ultrasound transducers, MUT),除压电式 MUT 和电容式 MUT 外,基于珐珀(Fabry-Perot)干涉的 MEMS 超声传感器也逐渐受到了研究人员的关注,其工作原理与结构如图 9(e)所示。将光纤末端嵌入空腔,并在空腔的末端安装膜片或另一光纤,入射光在光纤末端与膜片上发生反射,形成了珐珀干涉^[66-68]。当超声信号抵达并引起膜片的振动时,干涉信号随之发生改变。珐珀传感器的腔体长度会随环境温度的改变而改变,文献^[69]基于这一特点提出了基于珐珀传感器测量超声信号时监测油温,同时基于温度动态调整工作点以确保高监测灵敏度。

相比于传统的压电式超声传感器,光纤超声传感技术具有抗电磁干扰能力强、检测灵敏度高等优势,表现出巨大的应用潜力^[70]。近十年来,光纤超声传感器在传感原理与结构设计方面不断完善,技术体系逐渐成熟。然而,由于光纤传感器易受温度波动、机械振动等环境因素的影响,其在实际工程中的应用稳定性和可靠性仍有待进一步提升,实用化应用技术亟需持续深入研究与优化。

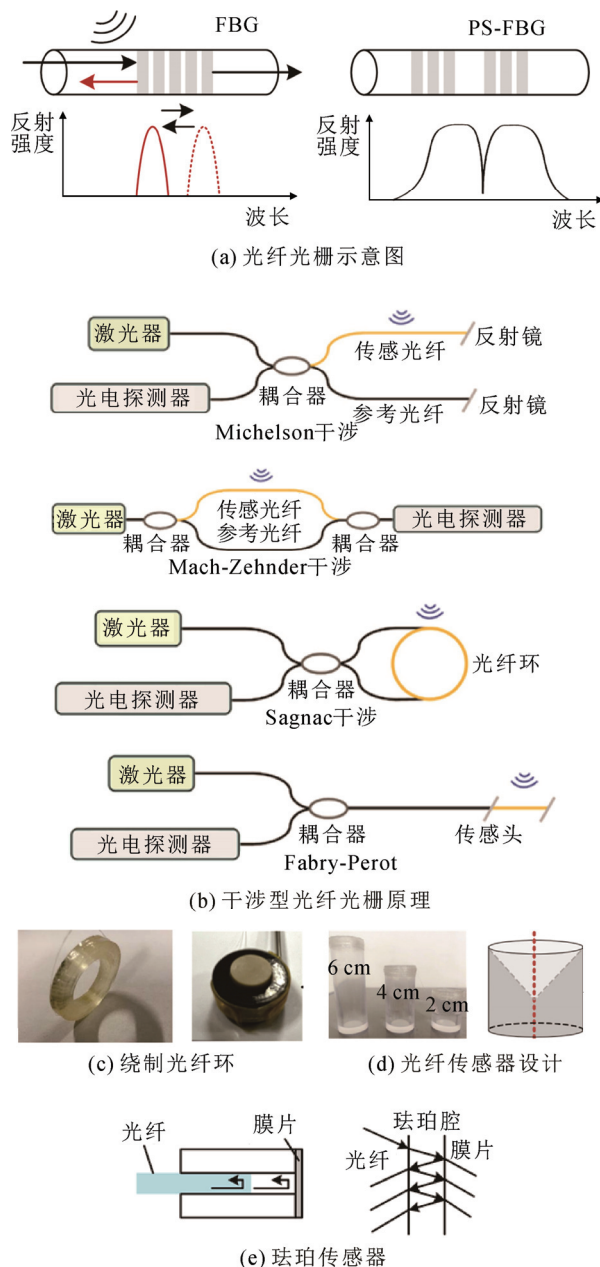


图9 局部放电的光纤超声检测

Fig.9 Fiber-based ultrasonic detection of partial discharge

1.5 多参量融合检测技术

多年来的局部放电检测研究与工程实践表明,不同检测方法对于不同类型缺陷的检测灵敏度和有效性存在显著差异。例如:对于绝缘子沿面放电缺陷,光学检测方法相比电磁检测和超声波检测展现出更高的灵敏度;而对于内部气隙放电缺陷,由于仅有电磁信号能够有效辐射至外部,电磁检测方法成为唯一可行的有效手段;此外,在金属微粒类缺陷检测中,超声波检测技术相比其他检测方式表现出更优的灵敏度。因此,通过对电气设备局部放电产生的电磁、声学与光学信号进行多参量同步测量,

能够充分发挥各类检测技术的互补优势, 显著提升局部放电检测的全面性与准确性。在具体实现方面, 通过将不同检测方法的传感器进行融合设计, 在同一位置安装传感器或共享同一安装窗口, 实现多物理量信号的同步测量, 不仅提高了检测效率, 还有效解决了电气设备内部电场敏感空间中多传感器植入受限的问题。

近十年来, 研究人员开发了各式各样的局部放电多参量融合传感器, 如图 10 所示。李军浩、尹毅等人将荧光光纤与特高频天线进行融合, 实现了 GIS 特高频、光信号的同步测量^[71-73]。任明等人通过将阵列式 SiPM 和特高频天线进行集成, 能够对 GIS 内放电的特高频及光谱信号进行在线监测^[74]。文献^[75]研制了一款非接触式的电磁超声融合传感器, 实现了局部放电超声以及高频电磁场的测量。张国治和司文荣等人分别设计了用于 GIS 和变压器油阀的特高频-超声融合传感器^[76-78]。韩旭涛等人还在压电式超声传感器的基础上进行改进, 设计了面向开关柜局部放电检测的超声-暂态低电压 (transient earth voltage, TEV) 融合传感器^[79]。

除了局部放电本身之外, 电气设备绝缘状态的综合评估还需考虑对局部放电产生影响的工况条件与环境因素, 因此对局部放电及其影响因素的同步感知成为重要需求。在融合传感器的设计思路上, 李军浩等人基于内置式特高频传感器, 融合引入了分压电极和 MEMS 气体状态监测模块, 实现了对 GIS 设备局部放电、运行电压及气体状态的同步监测^[80-81], 如图 11(a)所示。此外, 该团队还开发了压电式超声-振动融合传感器, 面向电力设备实现了机械状态与电气状态的联合检测^[82], 如图 11(b)所示。这种既关注局部放电本体特性, 又同步感知其影响因素的多维多参量融合检测技术, 对于应对由环境或工况突变引发的突发性绝缘故障具有广阔的应用前景和重要的工程价值。

综上所述, 近十年来局部放电新型检测技术得到快速发展, 尤其在光学检测技术、基于光纤的超声检测技术以及多参量融合检测技术等方面取得了显著进展, 局部放电检测的有效性与可靠性均得到了持续提升。然而, 要进一步推动新型检测技术在实际工程中的广泛应用, 仍需科研机构、设备制造企业 with 电网运维单位的协同努力与持续推进。此外, 尽管检测技术在灵敏度、抗干扰能力和应用适应性方面不断优化, 局部放电检测的基本方法体系仍未

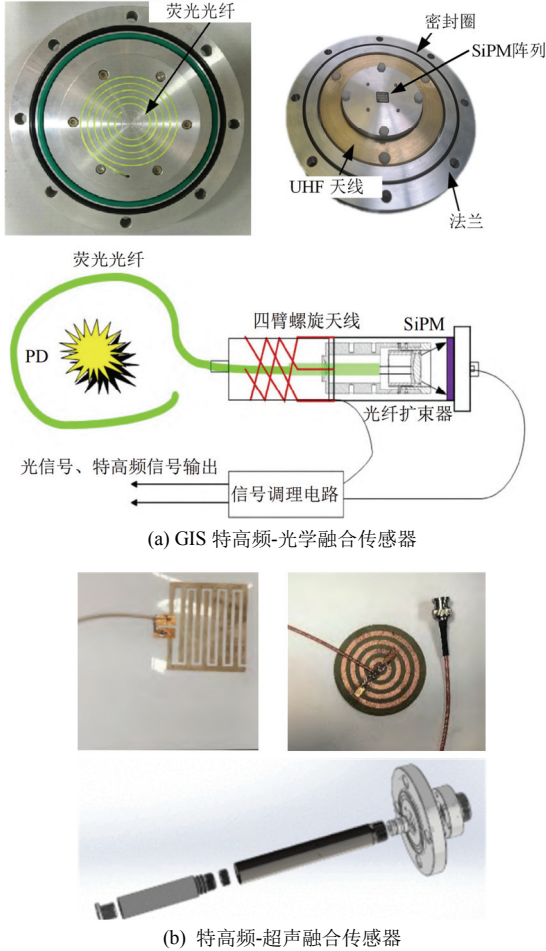


图 10 不同类型的局部放电多参量融合传感器
Fig.10 Different types of partial discharge multi-parametric fusion sensors

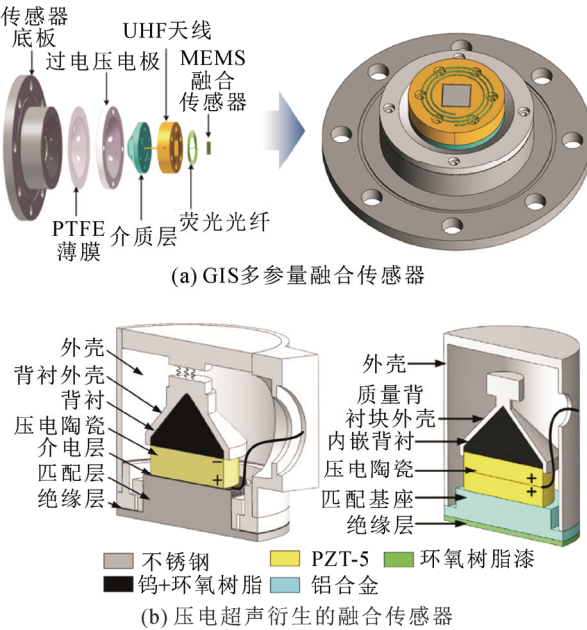


图 11 局部放电多维多参量融合传感器
Fig.11 Partial discharge multi-dimensional multi-parametric fusion sensors

发生根本性改变, 主要仍集中在声学信号、光学信号与电磁信号的检测上。探寻新的局部放电检测物理量与新型检测机制, 依然是当前局部放电检测领域研究人员追寻的重要方向。

2 局部放电定位技术

局部放电源的准确定位是电气设备运维管理的关键环节之一。传统定位方法主要基于放电脉冲信号的时间特征, 通过测量其在介质中传播所经历的时间变化, 或分析信号到达多个传感器之间的时间差, 结合已知的传播速度, 反推出局部放电源与各传感器之间的相对距离, 典型方法包括时域反射法(time domain reflectometry, TDR)和到达时间差法(time difference of arrival, TDOA)。尽管此类方法原理直观、实施简便, 但在实际工程应用中, 其定位精度易受到信号传播路径畸变和环境噪声干扰的影响, 且由于局放脉冲传播速度极快, 对数据采集系统的同步精度与采样率提出了较高要求。

针对上述传统方法的局限, 近十年来, 随着人工智能与数值仿真技术的迅猛发展, 局部放电定位技术呈现新的发展趋势。一方面, 深度学习在信号识别、特征提取与噪声抑制中的应用不断深入, 在低信噪比环境下提升了时延估计的准确性; 另一方面, 依托于高精度数值建模与仿真, 形成了一类不依赖高频采样的仿真辅助定位方法体系, 例如时间反演(time reversal, TR)和特征匹配方法, 在硬件资源受限条件下具备更高的空间分辨率与鲁棒性。

根据应用场景和空间定位维度的差异, 现有局部放电定位问题大致可划分为 3 类: 一是面向高压电缆、变压器绕组与 GIL 等线性结构的一维轴向定位; 二是针对敞开式变电站等开放空间场景的二维方向定位; 三是适用于变压器等封闭结构电气设备的三维空间精确定位。下文将从这 3 个维度出发, 系统梳理近十年来局部放电定位领域的研究进展与关键成果。

2.1 一维定位

2.1.1 时域反射法

时域发射法(TDR)是应用于电力电缆等线性设备局部放电源定位的主流技术, 如图 12 所示。当长度为 L 的电缆在 x 位置发生局部放电时, 放电电流脉冲将沿线路向两个方向传播并分别在时刻 t_1 、 t_2 到达检测端。根据传感器的布设方式, TDR 可分为单端 TDR 与双端 TDR 两类: 单端 TDR 通过分析

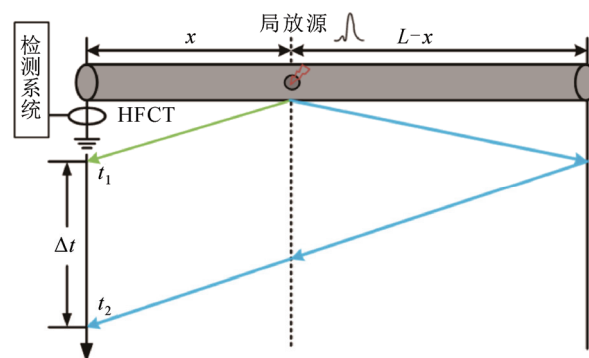


图 12 电缆局放单端时域反射法定位示意图

Fig.12 Schematic diagram of cable PD localization based on single-ended time domain reflectometry (TDR)

局放信号的直达波与首个反射波之间的到达时间差 Δt 进行定位; 而双端 TDR 则基于局放脉冲到达两端传感器的时间差进行定位。

TDR 定位方法实现相对简便, 其核心难点在于干扰环境中如何准确提取并匹配局放直达波与首个反射波信号(或双端测量中同时向两端传播的同一次局放脉冲)[83-85]。近年来, 随着信号处理技术与人工智能方法的不断发展, 研究人员陆续提出多种适用于强干扰背景下的脉冲信号提取与匹配算法。文献[86]首先结合经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)与 Teager 能量算子, 对放电脉冲信号进行有效分割与去噪处理; 随后, 引入动态时间规整(dynamic time warping, DTW)算法对直达脉冲与反射脉冲之间的相似度进行匹配分析。在相对误差小于 0.01 的条件下, 该方法的定位准确率可达 81%。文献[87]凭借深度学习对大规模数据的学习能力, 采用多输出卷积-循环神经网络结合特征提取的算法, 能够自动判别并输出局放信号的直达脉冲和首个反射脉冲。文献[88]提出了无偏欧式方向搜索算法, 通过重建代价函数实现单步定位和降噪一体化处理, 在较低的计算量下实现对多种缺陷亚米级别的定位精度。

利用时间差进行一维定位的 TDR 对信号时域峰值点辨识要求较高, 为此研究人员提出了相位差定位算法, 该算法借助局放信号频域中相位信息进行局部放电源定位, 不需要确定 PD 信号的波达时刻, 因此可以有效减少设备采样率对定位精度的影响[89]。近年来, 围绕提升相位差法定位准确性与抗干扰能力的改进型算法, 也是局部放电源定位研究中的热点方向之一。文献[90]针对传统相位差法定位未考虑实际传播过程中相速度的频率依赖特性,

提出了改进的相位差算法, 通过自适应提取 PD 信号的主导频带, 并在定位函数求解过程中引入频变相速度函数, 有效提高了相位展开的准确性与定位精度, 在 250 m 电缆的实验中定位误差仅 0.41 m。文献[91]提出基于多频拟合的改进型相位差定位模型, 同时引入了波速频率依赖的修正机制, 提升了低信噪比下的定位精度。

2.1.2 电磁时间反演(electromagnetic time reversal, EMTR)定位

基于局放脉冲反射实现定位, 通常依赖于对高分辨率时域波形的准确获取, 这不仅对测量仪器的采样能力提出较高要求, 也对后续信号处理过程带来挑战。近年来, 随着电磁建模技术的快速发展, 在已知设备参数条件下, 利用仿真手段辅助实现高精度局部放电定位的技术逐渐兴起, 其中时间反演(TR)电磁定位技术正是代表之一。

TR 技术最初源于声学领域, 随后被引入电磁领域, 用于电力线路的故障定位, 近年来进一步拓展至局部放电源的定位, 形成了 EMTR 定位技术。该技术基于 Maxwell 方程在时间反演下的不变性: 当某一接收点采集到放电源发出的电磁脉冲信号后, 若将其在时间域上反转并重新注入与原始环境一致的传播通道中, 信号将沿原路径逆向传播, 并在最初的发射源位置实现“能量聚焦”。通过评估信号聚焦的空间位置及聚焦程度, 可实现对局部放电源的准确定位, 基于 EMTR 方法的电气设备局部放电定位的一般流程如图 13 所示, 主要包括信号测量、信号时间反转、数值模型计算、寻找“聚焦”位置 4 个步骤, 理论上仅需要一个传感器就可实现局放源的定位。

文献[92]首次将 EMTR 技术应用于电缆局放的定位, 验证了其在不同传输距离、不同信噪比、不同量化误差以及不同采样率下对脉冲型 PD 和振荡型 PD 放电源的有效性, 定位误差均小于 0.25%。文献[93]在 3 条配电线路上测试了 TR 技术的定位精度, 定位误差在线路总长度的 0.5% 以内, 能够满足工程上对 PD 故障位置的需求。近年来, 该技术也逐步拓展至 GIS 和变压器绕组的局部放电定位应用中[94-95], 展现出良好的定位精度。

EMTR 定位技术无需对脉冲信号的到达时间进行估计, 且能够同时考虑相速度的频变特性及波形传播过程中的多种复杂效应, 理论上具备较高的定位精度。然而, 该方法高度依赖于设备结构和参数

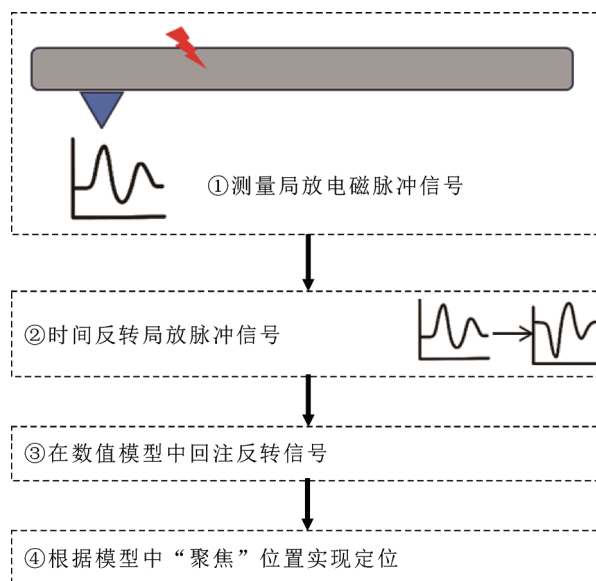


图 13 电气设备 EMTR 定位通用流程图

Fig.13 General flowchart of EMTR-based localization for electrical equipment

的精确建模, 对复杂结构设备而言, 模型精度的不足将直接影响定位准确性。同时, EMTR 技术在实际应用中计算量较大, 且每一种设备结构都需建立专属的高精度仿真模型, 这在一定程度上限制了其在工程中的推广与普适应用。

2.1.3 基于频谱特征的定位

低频段的放电脉冲波形大致相同, 对于一段均匀线路, 放电脉冲在传播过程中呈现的衰减和相移仅是关于长度的连续函数, 则根据测点的 PD 脉冲频谱特征, 可反推出脉冲在线路中的传播距离, 从而定位放电源。利用这种方法进行定位, 需要首先获取描述线路中局放脉冲传播特性的数学函数, 需要通过注入脉冲进行测试。如文献[96]针对电缆, 通过宽频线圈在接头屏蔽层注入脉冲信号, 采集下一个接头的响应, 从而计算出该段的幅频响应, 并根据这个幅频特性实现两个接头间电缆中局放的定位, 该方法无需断电、无需同步, 短距离定位精度平均定位误差在 1% 之内, 长距离线路误差保持在 10% 以内。文献[97]针对变压器绕组局放定位, 基于端口测量构建了变压器绕组梯形等效网络, 通过在等效网络模型中提取注入信号时的端口输出频率响应特征, 然后与实测 PD 信号的频谱进行特征匹配以定位放电源位置, 对于无内部测试抽头和详细设计细节的现场变压器较为适用[98]。

2.1.4 其他定位技术

对于 GIL 设备, 局部放电过程往往伴随着绝缘

气体介质的分解,利用分解产物的浓度变化可定位放电位置。文献[99]基于仿真和试验建立了 SF_6 气体分解物在 GIL 中的对流扩散过程模型,并进一步提出了基于浓度变化“扩散延迟”特征的 PD 轴向定位方法。在 100 m GIL 单元内按照 20 m 的间距在顶部布置气体传感器,放电发生 200 h 后可实现约 10% 的定位精度。该方法虽然需要时间较长且精度不高,但为定位提供了一种新的思路。

2.2 二维定位

对于敞开式变电站中的套管、断路器、隔离开关等非金属屏蔽设备,当其内部发生局部放电时,辐射的电磁波信号可泄漏至站内空间。通过测量站域内的电磁辐射信号,进而识别并定位具体放电设备,也是局部放电定位研究中的一个重要方向。鉴于变电站占地范围较大,电气设备高度有限,该类局放源定位问题通常可近似为二维空间定位问题。

2.2.1 平面到达时差定位法

如图 14 所示,对于二维空间中的局部放电定位问题,可在变电站内布设至少 3 个传感器构建传感阵列,放电位置与各个天线阵列之间的距离 $d_i (i=1,2,3,\dots)$ 的差值导致局放脉冲到达各传感器存在时间差(TDOA),通过建立并求解对应的非线性时差方程组,可解析出局放源在二维平面内的空间坐标。可以看出,基于 TDOA 的变电站局部放电定位主要包括时间差估计与非线性时差方程组求解两个关键步骤。

在时间差估计方面,近年来研究人员开始引入深度学习方法,以提升低信噪比环境下的时间差估计精度。例如,文献[100]提出采用双向长短时记忆神经网络(bidirectional long short-term memory, Bi-LSTM)对局放信号波形进行结构性分解识别,包括噪声段、首峰段、振荡段与缓冲段,从而实现复杂背景噪声下脉冲到达时间的精准识别。

在非线性方程组求解方面,研究重点集中于将原始的非线性模型线性化处理,以提高解的稳定性和精度,避免因背景噪声与测量误差造成的方程组病态问题。文献[101]通过引入随机组合线性变换与截断奇异值分解(truncated singular value decomposition, TSVD)方法,显著降低了求解过程的计算复杂度,增强了数值鲁棒性,在时差误差高达 10% 的情况下仍可实现定位误差低于 1.5 m。文献[102]与文献[103]则分别提出了平面相交法与二次项直接消除法,将非线性时差方程转化为线性形式进行求解,

进一步提升了定位的收敛性与稳定性,其中平面相交法在单源场景下的定位精度可控制在 0.2 m 以内。

2.2.2 波达方向(direction of arrival, DOA)定位法

尽管 TDOA 方法具备较高的定位精度,但其对系统采样率与同步精度提出了较高要求,且过程复杂。一方面,该方法依赖多通道信号之间的高精度时间同步,采集系统需具备足够高的采样率;另一方面,在信噪比较低的实际工程环境中,脉冲到达时延的精确估计较困难,非线性时差方程组的求解计算复杂度高、数值不稳定,限制了其在现场的广泛应用。为此,实际应用中更倾向于采用基于测向的定位方法。该方法通过天线阵列获取局部放电信号的波达方向(DOA),利用两个天线阵列所测得的方向交点实现对局部放电源的二维定位。如图 15 所示,可分别利用天线 1-2-4 和天线 3-2-4 构成的阵列获取放电源的方向角 φ 及 φ' ,并据此解析出放电源的具体位置。

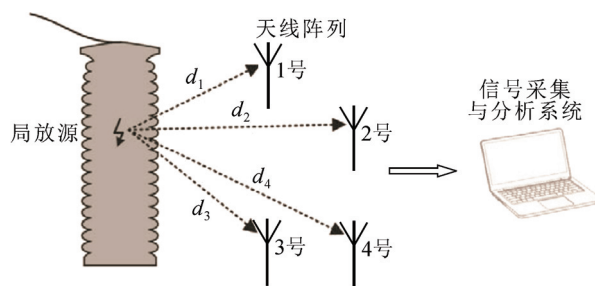


图 14 变电站局放定位系统示意图

Fig. 14 Diagram of partial discharge localization system for AIS

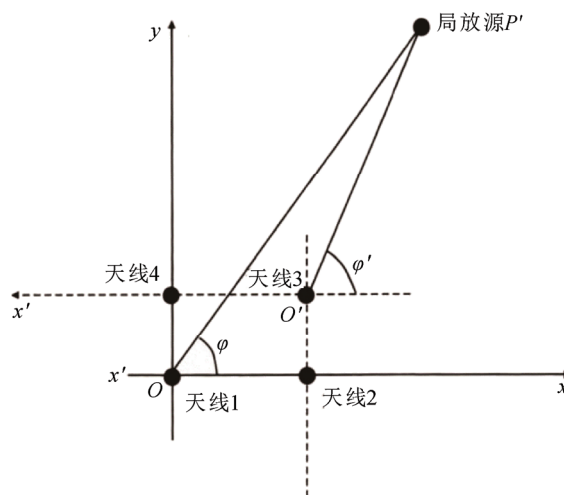


图 15 变电站 DOA 定位方法

Fig. 15 DOA-based partial discharge localization method in substation

在 DOA 定位方法中, 关键在于基于天线阵列的测量结果, 借助算法准确确定信号的波达方向。围绕 DOA 估计的计算方法, 一直是该领域研究的重点和热点方向。当前较为常用的方法为空间谱估计算法, 其原理是通过分析来自不同方向的信号强度或能量分布, 进而识别局放信号的来源方向。文献[104]系统地对比分析了在不同阵元数、信噪比和入射角条件下, 各类主流空间谱估计算法的测向精度, 为工程现场合理选择定位算法提供了有力支持。近年来, 为进一步提升在复杂噪声背景下的测向精度, 研究人员还提出了一系列改进算法。例如: 文献[105]借鉴相控阵聚焦原理, 采用双边相关算法对 UHF 信号进行处理, 将宽带局放信号聚焦压缩至较窄频带, 从而显著增强了抗干扰能力; 文献[106]则将局放信号测向问题转化为统计建模问题, 构建最大似然函数直接求解方向角, 在信噪比低至 -7.5 dB 的条件下仍能实现较高精度的放电源定位。

2.2.3 特征匹配定位法

在数值计算和人工智能算法快速发展下, 可以在离线阶段时通过数值计算提前建立完善的信号特征库, 将定位问题转变为特征匹配和空间回归求解问题, 形成了基于特征匹配的定位新方法, 这种方法能够很大程度上降低了对于硬件成本的需求。文献[107]提出基于接收信号强度(received signal strength indicator, RSSI)指纹的局放定位方法, 可实现平均定位误差为 1.86 m 的准确定位。除了信号强度特征外, 局放在不同空间点因多路径、遮挡、频率衰减等会产生波形上的特征差异, 利用这种差异也可进行定位。文献[108]基于这一思路, 直接针对信号本身的统计特征和空间分布规律进行 K 近邻算法(K-nearest neighbors, KNN)模式匹配, 特别适合信号复杂、多径传播严重的变电站环境。在此基础上, 文献[109]提出以小波包变换提取的放电脉冲频带能量作为信号特征, 然后利用机器学习回归模型实现高鲁棒性定位。

2.3 三维定位

对于变压器这类结构复杂、空间尺度较大的三维设备, 其内部局部放电源的定位属于典型的三维空间定位难题。当前, 变压器局部放电定位主要采用放电产生的超声信号。一方面, 超声波信号频率较低, 对采样系统的带宽和采样率要求相对较低; 另一方面, 超声信号在变压器油介质中的传播速度较慢, 有利于提升时延测量精度, 从而提高局放源

的定位精度。

通过在变压器外壳上安装多个传感器($S_1, S_2, \dots, S_n, n \geq 4$)、并利用不同传感器之间的局部放电脉冲到达时间差(TDOA)对放电源 P 进行定位, 是当前变压器内部放电定位的主流且为较成熟的方法, 其基本原理如图 16 所示。近年来, 相关研究重点围绕在复杂工况下进一步提升定位精度, 针对采样率限制、噪声干扰、传感器时间同步精度不足以及信号传播过程中的多路径折反射等关键问题, 提出了多种优化策略和改进算法, 有效增强了定位方法在工程应用中的适应性。

针对低采样率条件下的局部放电定位问题, 文献[110]提出了一种超分辨率广义互关算法, 通过对主要特征频段的信号进行频域乘方操作, 等效提高采样率, 然后结合迭代计算获得三维坐标, 实现了 1 MHz、 10 MHz 采样率条件下 0.16 m、 0.2 m 的平均定位误差。针对时延误差对定位精度的影响, 文献[111]提出了一种基于多样本全局搜索机制的逐次逼近定位方法, 通过多次独立定位结果的寻优迭代, 有效缓解了单次定位误差大、对高精度时延估计依赖强等问题, 相比传统的脉冲平均定位方法, 定位精度提升达 50% 。在噪声抑制方面, 传统方法通常需先对信号进行去噪处理后再进行时延估计, 但这一操作可能导致局放脉冲的原始波形发生畸变, 从而引入额外的误差。文献[112]将采集到的超声信号建模为放电源和传递函数的卷积系统, 通过提取预测残差作为放电源信号近似, 进而实现高精度的到达时间检测, 该方法无需预去噪、鲁棒性强。

此外, 变压器内部局部放电定位面临的另一核心挑战在于, 信号在传播过程中受到屏蔽、反射、畸变与衰减等因素影响, 如图 17 所示, 从而难以准

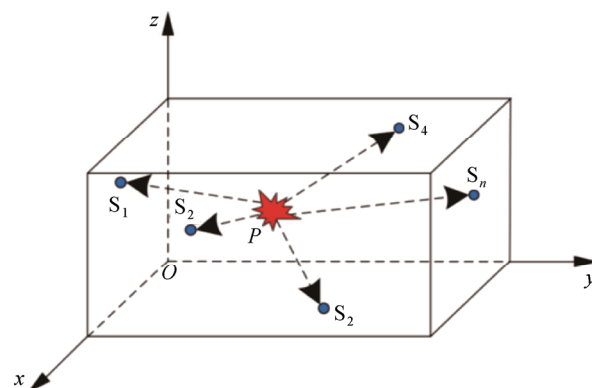


图 16 变压器内部局放定位示意图

Fig.16 Schematic diagram of partial discharge localization inside a transformer

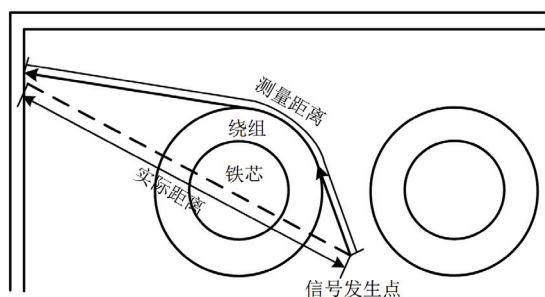


图 17 测量距离、实际距离关系示意图

Fig.17 Diagram of the relationship between measurement distance and real distance

确获取局放信号到达各传感器的实际时延。针对该问题,文献[113]提出一种适用于复杂多径传播条件下的变压器局部放电定位方法。该方法首先系统分析局放信号在变压器内部沿折射与绕射路径传播的物理过程,构建抗多径效应的局放定位模型,再通过凸优化算法求解,最终实现了小于 0.1 m 的定位误差,显著提升了复杂结构内部局放源的定位精度。

由于三维空间定位的复杂性,实际定位过程中也可联合不同类型传感器或不同算法进行分步定位。文献[114]融合 UHF 和超声复合阵列的分步定位算法,先利用 UHF 信号的高灵敏度和强穿透能力初步判断波达方向的大致方位,根据预测结果对超声信号使用旋转信号子空间算法精确定位,最后利用射线追迹法反演特高频信号进一步提高定位精度。文献[115]提出了基于多重多项式结果和二重网格搜索的定位方法,针对 TDOA 法构建的三元二次方程组构造两个二次方程的共根判别式,以快速解析获得初始坐标,然后以初始坐标为中心,在细化网格中采用最小二乘误差原则搜索最优解。

除了常规的 TDOA 定位方法,近年来随着数值计算和人工智能技术的发展,新的定位方法也逐步发展。三维空间定位也可以通过特征匹配和时间反演来进行放电源的空间定位。文献[116]在离线构建 RSSI 指纹数据库的基础上,先利用粒子群优化的反向传播(back propagation, BP)神经网络快速从大范围指纹图中得到粗略位置,然后使用压缩感知算法重构稀疏位置向量完成高精度放电源定位,其中 94% 以上的测试点误差小于 0.07 m。文献[117]将时间反转技术应用于变压器三维定位,仅利用单个传感器就可以实现放电源的三维空间定位,定位精度在毫米级。

综上所述,无论是电气设备中存在的一维、二维、三维定位问题,目前基于放电脉冲传播时间差的定位方法仍是现场工程应用中最为主流的局部放电定位手段。虽然该方法的定位精度易受采样率、信噪比及传播路径复杂性的影响,但在实际应用中依然能够实现一定程度的定位准确性。近年来,随着数值计算与智能算法的发展,基于特征匹配和时间反演的定位方法逐渐兴起。该类方法通过绕开对放电脉冲时刻信息的直接提取,在一定程度上减弱了对采样硬件等条件的依赖,具有更好的适应性潜力。然而,由于其依赖于对实际设备中局部放电信号传播过程的高精度数值建模,目前在结构复杂的电气设备中尚未实现现场应用,仍需在建模精度与工程可行性方面进一步突破。

3 局部放电类型的模式识别算法

放电类型(缺陷类型)与放电的危害程度密切相关,基于局部放电检测结果进行放电类型模式识别,一直是电气设备故障诊断领域的重要研究热点之一。局部放电模式识别的本质,是依据局部放电数据中提取的特征信息,通过基于规则的经验判据或基于数据驱动算法模型,实现缺陷类型在特征空间中的映射与判别。

围绕局放模式识别技术的研究主要集中于基于机器学习的局放模式识别技术,因此局放模式识别技术的发展伴随机器学习技术的发展而发展。早期研究中,人工神经网络(artificial neural network, ANN)、支持向量机(support vector machines, SVM)算法等传统机器学习算法^[118-121],已被广泛应用于局部放电模式识别任务中。在局部放电模式识别中,最常采用的数据形式为局部放电相位分布(phase resolved partial discharge, PRPD)谱图和相位分辨脉冲序列(phase resolved pulse sequence, PRPS)谱图,部分研究也基于单个局部放电波形或局部放电脉冲序列谱图^[122-123]。这些数据形式均属于图像类数据,因此,当以图像特征提取与分类为目标的深度学习(deep learning, DL)技术兴起时,自然成为局部放电模式识别研究的重要方向。近十年来,伴随深度学习技术的快速发展,局部放电模式识别的研究重心逐步转向基于深度学习算法的智能判别方法。

与传统机器学习方法相比,深度学习强调端到端特征学习,能够在大规模数据环境下自动提取局部放电信号中的高维特征,展现出优异的建模与识

别能力。文献[124]作为最早将 DL 应用于局部放电故障诊断的研究之一, 对油中 6 类局部放电缺陷进行分类, 与采用 S 型激活函数的浅层神经网络相比, DL 将诊断准确率从 72% 提升至 86%, 为局部放电故障诊断提供了新的思路和方法。近年来, 在电气设备局部放电故障诊断领域中, 应用最为广泛的深度学习模型包括卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)、循环神经网络(recurrent neural network, RNN)、自编码器(autoencoder, AE)和深度信念网络(deep belief network, DBN)等 4 类。

3.1 卷积神经网络

最先实现大规模应用并掀起深度学习革命的是 CNN, 其最初主要应用于图像识别任务, 因此也成为最早广泛应用于局部放电模式识别的深度学习架构之一。作为一种具备强大特征提取能力的深度学习结构, CNN 的典型网络结构包括输入层、多个卷积层、池化层以及全连接层, 如图 18 所示[125]。通过局部连接机制与权值共享策略, CNN 能够在保持网络参数规模相对较小的前提下, 有效捕捉输入数据中的空间局部特征, 显著提升训练效率并降低过拟合风险[126]。

目前 CNN 已在电缆、GIS、变压器等电气设备中得到广泛应用[125-129], 相比 SVM 和 BPNN 等传统机器学习算法, 其识别准确率得到一定提升。然而, CNN 在建模时序特性方面能力较弱, 且在训练过程中通常需要大量高质量样本, 以保证模型的性能与泛化能力。

3.2 循环神经网络

RNN 通过引入循环结构, 能够有效处理动态时间序列数据[130], 在局部放电模式识别中展现出重要潜力。然而, 传统 RNN 在处理长序列时存在梯度消失问题, 限制了其学习能力。为此, 长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)被提出, 通过门控机制有效缓解了梯度消失与爆炸问题, 能够同时捕捉时间序列中的长期与短期依赖[131-132]。在局部放电模式识别应用中, LSTM 被广泛采用。

虽然 LSTM 可单独用于故障诊断领域[123], 但是由于现场局部放电信号具有蕴含信息复杂和数据点数量庞大等特点, 目前单独将 LSTM 方法应用在局部放电信号识别中的研究有限[134]。为了提升局放识别的准确性, 研究人员将 LSTM 和 CNN 及其他算法相结合用于电气设备局部放电的模式识别中, 取得了良好的效果[135-139]。文献[136]设计了一

种结合 CNN 和 LSTM 的混合深度学习模型用于对电力变压器局部放电的模式识别, 该模型以 PRPD 和 PRPS 谱图联合构建的双通道图像作为输入, 模型中的 CNN 用于提取通道间的空间交互信息, 而 LSTM 用于提取频谱的时间信息, 所提模型与传统的机器学习相比具有较优的识别效果。文献[137]基于注意力机制的 CNN-LSTM 绝缘导线局部放电识别方法, 通过 FFT 降噪、CNN 提取特征、LSTM 建模时序关系并引入注意力机制强化关键信息提取。

3.3 自编码器

AE 也是一种常见的深度学习模型, 属于无监督学习模型, 可以看作一个 3 层神经网络, 能够完成对输入数据特征的有效提取, 其基本结构如图 19 所示[140]。AE 的目标输出更像是输入的复制品, 因此其输出通常也被称为重构, 重构过程包括编码和解码两个部分, 编码部分将输入转换为内部表征, 解码部分将此内部表征转换为输出。在这种架构中, 输出层的神经元数量必须等于输入数量[140]。

相较于直接应用于局部放电故障诊断, 基于自编码器的改进算法在局部放电信号的特征提取与噪声抑制方面展现出更大的应用潜力。包括去噪自编码(denoising autoencoder, DAE)[141-143]、稀疏自编码器(sparse autoencoder, SAE)[144]和变分贝叶斯自编码器(auto-encoding variational Bayes, AEVB)[145]等。

此外, 已有研究结果表明, 单一浅层自编码器在应对复杂局部放电信号特征提取时效果有限, 因

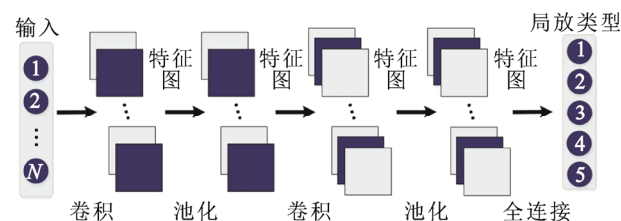


图 18 卷积神经网络的典型结构

Fig.18 Typical structure of a CNN

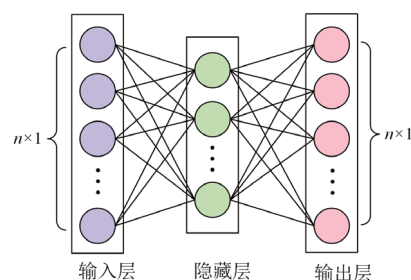


图 19 具有一个隐含层的自编码器架构

Fig.19 Architecture of an autoencoder with one hidden layer

此在实际应用中常采用多个自编码器堆叠构建深层网络^[146]，以提升特征学习与表示能力。

3.4 深度信念网络

深度信念网络(deep belief network, DBN)于2006 年提出^[147]，受限的玻耳兹曼机器(restricted Boltzmann machine, RBM)是 DBN 结构中一个常用的层训练模型^[148]，RBM 有两层神经元，可称为显层和隐层，分别用于输入训练数据和特征提取。DBN 通常采用多个 RBM 进行训练,当第 1 个 RBM 训练结束后，其学习到的特征结果可以作为第 2 个 RBM 的输入数据，通过这种方式，DBN 可以逐步提取输入数据的深层特征，图 20 展示了一个包含 3 层 RBM 和末尾 1 层逻辑回归(logistic regression, LR)的 DBN 架构^[149]。

DBN 更适合用于小样本局部放电的建模，但是其训练过程复杂，计算量大。DBN 作为近年来新兴的一种深度学习网络结构，围绕该算法及其改进的算法研究成为新兴热点之一。文献[150]提出了一种基于 DBN 的 GIS 设备内部局部放电模式识别方法。该方法通过 DBN 自主从原始数据中学习高阶特征，有效避免了特征选取过程中的主观性影响，在自由金属微粒类缺陷的识别任务中表现出良好的准确性。文献[151-153]围绕 DBN 的改进算法展开研究，有效提升了模型的稳定性和识别性能。

3.5 其他智能算法

除上述 4 类主流深度学习算法外，还有一些算法也可用于局部放电信号的模式识别，如深度残差网络(deep residual network, ResNet)^[154]、生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)^[155-157]、轻量级梯度提升机(light gradient boosting machine, LightGBM)、知识图网络^[158]、多尺度注意力自适应去噪网络(multi-scale attention adaptive denoising network, MAADNet)^[159]等。综合近十年来文献报道，主要深度学习算法在局部放电模式识别中的典型应用场景与识别准确率如表 1 所示。

综上所述，伴随着深度学习技术的快速发展，越来越多的深度学习算法被应用于局部放电模式识别中。相比传统的机器学习算法，深度学习依托于其强大的高维特征提取能力，显著提升了局部放电缺陷类型识别的准确率。尽管深度学习技术在电气设备局部放电故障诊断领域取得了重要进展，但算法层面的提升尚未根本解决实际有效样本不足的问题，导致其在复杂工程现场中的应用效果仍然存在

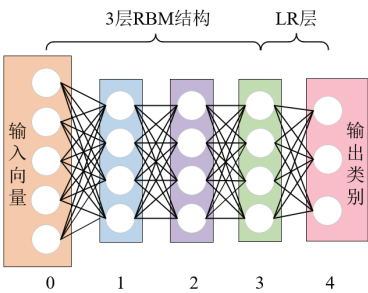


图 20 包含 3 层 RBM 和末尾 1 层 LR 的 DBN 架构
Fig.20 DBN architecture consisting of three RBM layers and a final LR layer

表 1 模式识别深度学习算法类型以及识别准确率
Table 1 Types of deep learning algorithms for pattern recognition and their recognition accuracy

文献序号	识别对象	输入信号	模式识别算法	平均识别准确率/%
[125]	电缆	脉冲电流脉冲数据	CNN	92.57
[126]	GIS	UHF 脉冲数据	CNN	95.60
[127]	GIS	PRPS 谱图	深度 CNN	95.60
[128]	变压器	脉冲电流	改进 CNN	99.50
[129]	GIS	UHF 脉冲数据	LCNN	98.80
[133]	GIS	PRPD 谱图	LSTM	96.74
[134]	GIS	超声脉冲数据	LMD 和 LSTM	99.26
[136]	变压器	PRPD+PRPS 谱图	CNN-LSTM	96.18
[137]	电气设备	ENET 数据集	CNN-LSTM	93.89
[138]	变压器	三维 PRPD 谱图	CNN-LSTM	93.50
[139]	电气设备	ENET 数据集	时间序列分解-LSTM	79.00
[141]	电缆	脉冲电流脉冲数据	SDAE	92.19
[146]	电气设备	脉冲电流脉冲数据	SSAE	97.00
[150]	GIS	三维 PRPD 谱图	DBN	96.40
[151]	GIS	PRPD 谱图	改进 DBN	96.70
[152]	电缆	脉冲电流脉冲数据	改进 DBN	93.80~98.40
[153]	高电缆	脉冲电流脉冲数据	IKHA-DBN	98.33
[154]	GIS	PRPD 谱图	ResNet	98.75
[155]	电气设备	UHF 脉冲数据	GAN	95.67
[156]	变压器	PRPD 谱图	AC-BEGAN	98.90
[157]	电气设备	PRPD 谱图	CWGAN-GP	99.20
[158]	GIS	PRPS 谱图	知识图网络	95.67
[159]	GIS	脉冲电流脉冲数据	MAADNet	94.34

较大差距。

4 存在的问题和未来的发展

近十年来, 局部放电检测与分析技术经历了系统性的发展与显著的技术进步。脉冲电流法、超声波法和特高频法在工程应用中持续成熟, 新型传感技术与人工智能技术不断渗透至局部放电领域, 光学检测和基于光纤的超声检测技术迅速发展, 数值计算驱动的局部放电定位方法快速形成, 基于深度神经网络的局部放电智能诊断技术也得到迅猛发展。更为重要的是, 近年来多参量融合检测理念逐步兴起, 通过同步测量电磁、声学及光学信号, 充分发挥多参量的互补优势, 显著提升了局部放电检测的全面性与准确性。然而, 局部放电作为复杂强干扰环境下的随机微弱现象, 依然是电气设备状态感知领域中最具挑战性的任务之一。除了以上提到的一些问题外, 局部放电的检测与分析技术依然存在诸多问题需要解决。

4.1 局部放电与设备故障的关系

电气设备在运行过程中发生的绝缘故障通常源于局部绝缘缺陷, 与局部放电直接相关, 局部放电作为绝缘故障早期预警的最直接状态量, 其在表征设备绝缘状态方面的重要性毋庸置疑。但是在实际中, 零局部放电的设备难以制造, 事实上对于大多数电气设备而言, 局部放电的存在在一定程度上是被允许的, 甚至可在设备整个运行周期内长期存在。这是因为局部放电导致设备故障的根本原因在于其持续作用会引起绝缘介质的劣化, 最终导致绝缘击穿。若局部放电引起的劣化速率低于其自恢复能力, 或者在设备的整个寿命周期内不发展至绝缘故障, 局部放电则可被允许存在。

由于不同电气设备采用的绝缘介质类型不同, 其介质的劣化特性及局部放电的发展速度存在差异, 因此各类设备对局部放电的允许标准也不尽相同。例如, 变压器采用的“油-纸”复合绝缘系统中, 变压器油具有良好的流动性, 且对受损纸绝缘具一定修复能力, 使得其对局部放电的容忍度相对较高, 标准通常允许其出厂局放量不超过 100 pC; 而在气体流动性较差的 GIS 中, 局放量需严格控制在整机 5 pC、绝缘件 3 pC 以下; 对于以固体绝缘为主的电缆本体, 因其绝缘介质一旦受损便无法自愈, 通常要求尽量避免局部放电的产生。

除绝缘介质类型外, 局部放电对设备的危害程

度亦与缺陷类型密切相关。某些缺陷如悬浮导体或内部气隙引发的局放, 其演化过程相对缓慢, 可在设备内部长期存在而不立即造成故障; 而一些会显著削弱介质耐电水平的缺陷类型则具有更高风险, 典型代表为“杂质型”缺陷, 例如变压器油中的异物颗粒、GIS 内部的金属微粒及绝缘表面的污秽沉积等。这类缺陷不仅显著降低原有绝缘系统的介电强度, 同时具有时空演变特征, 易在设备内部快速聚集并发展, 最终诱发绝缘击穿故障。

总的来说, 电气设备的绝缘故障与局部放电密切相关, 然而在实际运行中, 局部放电的存在在一定程度上是可以被容忍的。但这种容忍应建立在对局部放电状态充分掌握的基础之上。只有通过对局放强度、类型及其演化趋势等关键参数的准确检测与深入分析, 才能科学评估其对设备潜在风险的影响, 从而有的放矢的制定运维策略, 保障设备寿命周期内的安全稳定运行。

4.2 局部放电检测的“漏报误报”问题

随着电气设备数量的持续增长, 局部放电在线监测的需求日益迫切, 尤其是在使用量最多、对局部放电最为敏感的 GIS 中, 其在线监测的重要性尤为突出。然而, 在当前实际工程应用中, 局部放电在线监测仍普遍存在“漏报误报”严重问题, 给电网运维工作带来了极大困扰。造成该问题的原因, 既包括检测方法本身的局限性, 也涉及技术实现层面的不足。

对于“漏报”问题, 目前工程中仍普遍采用单一检测方法, 但是单一方法在局部放电检测的有效性方面存在明显局限, 难以实现对多类型缺陷的全面覆盖, 是造成漏报现象的主要原因之一。以 GIS 设备为例, 如表 2 所示, 不同检测方法对于不同类型缺陷的检测有效性存在差异。特高频法在检测悬浮导体、金属尖刺等缺陷具有较高灵敏度, 对明显的异物放电也具备一定检测能力; 而超声法则对自由金属微粒反应最为灵敏, 但受限于检测范围和传感器安装方式, 难以实现在线监测。当局部放电位于固体绝缘表面时, 两种方法的检测效果均显不足。具体而言, 环氧材料对超声波信号具有较强吸收作用, 导致超声波法难以识别绝缘表面放电; 而由于固体表面电荷泄漏使得放电脉冲前沿缓慢, 从而激发的特高频成分较弱, 也限制了特高频法对沿面放电的有效响应。即便是当前灵敏度较高的光学检测技术, 在多类型缺陷识别中展现出良好效果, 但由

表2 GIS 设备中不同检测方法对于缺陷检测的有效性

Table 2 Effectiveness of various detection methods for detecting defects in GIS equipment

方法	金属尖刺	悬浮电位	自由微粒	内部气隙	绝缘沿面
特高频	▲	▲	△	▲	×
超声波	▲	▲	▲	×	×
光测法	▲	▲	△	×	▲

注：▲表示检测很有效；△表示检测有效；×表示检测效果差/无效。

于光信号无法穿透固体介质，也难以实现对绝缘内部气隙类缺陷的有效检测。

针对这一方法层面限制的解决，不断探索新的物理量以实现全类型缺陷的感知是一种有效的手段，但目前常用的物理量类型(电、磁、声、光)均已被广泛研究，短期内实现物理机制层面的重大突破难度较大。在当前阶段，提升检测覆盖率最可行的技术路线是推动多参量融合检测技术的发展。通过融合不同检测手段的互补优势，可在一定程度上实现对各类放电缺陷的全面检测。目前，尽管多参量融合检测的传感技术在实验室已较成熟，且实验室条件下的有效性验证较充分，但实际工程推广仍较缓慢。一方面，光学检测等新型手段的长期服役性能与可靠性仍需进一步验证；另一方面，稳定可靠的多通道同步监测与集成装置尚未完善，基于多参量的局放异常信号识别与融合报警策略也需进一步明确。

除了前述检测方法的局限，局部放电“漏报”问题还与当前工程实践中对其发展过程的认知假设密切相关。如图 21 所示，现有局部放电在线监测装置普遍基于图中曲线①所示的局部放电发展过程，即认为局部放电演化呈现放电幅值逐步增大、重复率持续升高的趋势。在此假设基础上，为降低系统成本，局部放电监测装置常采用对特高频信号检波后的低采样率采集方案，并在多通道测量中，通过单个模数转换器(ADC)依次采集多个输入通道的信号，采用轮询采样策略实现多点信号获取。这种方式虽具一定工程实用性，但无法实现对局放全过程、全时段脉冲信号的完整捕捉。然而，实际运行中部分缺陷的局部放电演化过程如图中曲线②所示^[160]。以 GIS 中的绝缘子沿面缺陷为代表，此类缺陷在早期常呈现小幅值、低重复率的放电特征，维持时间较长，而一旦局放强度突增，往往直接导致绝缘闪络。这种突发性强、前期信号微弱的演化过程极易被传统轮询采样与低采样率的监测方式所

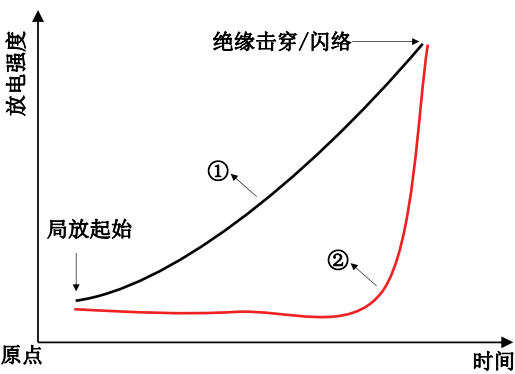


图 21 不同缺陷下的局部放电演变过程

Fig.21 Evolution processes of partial discharge under different types of defects

遗漏，成为“漏报”问题的重要根源。

针对该问题，近年来部分工程现场引入了局部放电全脉冲测量技术。该技术通过高采样率的连续记录手段，对所有时刻的局放脉冲信号进行采集与分析，避免因轮询采样或信号调理导致的脉冲丢失。通过分析完整脉冲序列，可有效识别低幅值、少脉冲等隐蔽性缺陷，显著提升对此类早期局部放电的检出率与识别准确性。

对于局部放电的“误报”问题，其主要根源在于现场复杂环境中干扰信号的影响。干扰来源主要包括两个方面：一是外部环境中的背景噪声；二是邻近设备放电信号对目标设备检测结果的干扰。针对外部噪声干扰，应尽可能提高局部放电信号的采样率，以获取更完整、更高保真度的脉冲信息，从而提高对放电事件真实性的识别能力。目前，部分装置在高频电流检测中已实现 500 MHz 采样率，特高频装置的采样率也已提升至 2 GHz，显著增强了对环境干扰信号的识别与抑制能力。而对于来自相邻设备的放电干扰，应充分利用局部放电信号在设备内部传播过程中的空间衰减规律和时频域传播特性。通过在目标设备上多点/多端布设传感器，并结合高采样率数据采集系统，综合分析各测点获得信号的幅值、极性、频谱特征及传播时延，实现对局放信号来源的有效判别与定位，从而准确区分本体放电缺陷与外部干扰。

总的来说，要解决局部放电在线监测的“漏报误报”问题，既需要检测方法的持续创新，也需依赖工程技术的不断提升。应加快推进多参量融合检测与高灵敏度检测方法的应用，实现局部放电信号前端测量的全覆盖。同时，应采用高采样率、全脉

冲、多点式的信号采集技术,全面提升局部放电脉冲信号的获取和辨识能力。然而,需要充分认识到,“漏报误报”问题的解决是一个长期而复杂的过程。在当前技术尚未完全成熟的阶段,部分现场技术人员提出可将局部放电在线监测系统视为“哨兵”,即通过初步监测实现故障预警,在报警信号出现后,结合更丰富的带电检测手段或更高精度的重症监测手段进行确认与分析。这一策略在一定程度上提升了现场局放问题的发现效率,为现阶段的电气设备局部放电有效检测提供了支撑。

4.3 现场缺陷模式识别准确性不足

近年来,基于深度学习的局部放电模式识别技术发展迅速,但在实际工程应用中此类方法尚鲜有落地。究其原因,目前的研究主要集中于探索新兴深度学习算法在局部放电识别领域的应用,虽然相比传统的浅层神经网络方法,其在缺陷诊断准确率方面取得了一定提升,但所有性能评估均基于实验室构建的局部放电数据库。尽管在实验室条件下识别准确率普遍可达到90%以上,但在实际现场应用中,识别准确率却显著下降,无法满足实际需求。究其原因,在于实际设备缺陷数据极为有限,且实验室条件下构建的缺陷模拟难以全面复现现场工况,无论是实际缺陷对应的电场分布特性,还是复杂环境条件对缺陷发展的影响,均无法完全再现。现有基于深度学习的局部放电模式识别方法,尚未从根本上突破局放模式识别在数据层面的局限,难以满足复杂工况下工程应用的需求。

针对这一问题,需要正视局部放电作为小样本事件的客观特性,也要重视现场实际数据的作用,就局部放电模式识别而言,算法固然重要,但数据才是根本。只有在正视这些关键特性的基础上,才能明确新兴人工智能技术在局部放电识别中需要解决的核心问题,避免陷入一味地追求算法性能而忽视工程实际需求的研究误区。未来,可从3个方向推动局部放电智能识别能力的本质提升。1)首先,虽然现场实际缺陷数据有限,但多年来已积累了一定数量的现场检测数据,如何通过新兴人工智能方法深度挖掘现场数据的隐含特征,并结合实验室典型缺陷数据,实现对实际缺陷的准确诊断,是一个重要方向。2)其次,尽管实际缺陷放电难以通过实验手段完全模拟,但随着生成式大模型技术的发展,利用人工智能生成与实际复杂工况更具一致性的局放数据,构建更丰富、更真实的数据样本库,成为

补充现场数据体系的全新可能。3)最后,局部放电领域的研究由来已久,长期以来积累了丰富的理论知识体系与工程经验,未来应探索融合物理机理、专家经验与数据驱动的综合智能模型,不仅依赖数据量提升性能,更通过引入局放本质规律,实现真正适用于复杂现场环境的高可靠智能识别体系。

4.4 局部放电的动态诊断

准确测量局部放电、精确定位局部放电源、准确判断局部放电类型,并不是局部放电检测技术的终极目标。更高层次的目标,应是在此基础上,能够定量评估当前局部放电对设备绝缘的危害程度,并进一步预估局部放电的发展趋势,即实现对局部放电状态的动态诊断,为电气设备状态评估与运维决策提供有力支撑。局部放电的动态诊断不仅需要当前状态进行准确评估,还需结合可能影响局部放电演变各类因素,包括所承受的机械、电气和热应力,以及绝缘介质状态的变化,综合推断局部放电的发展趋势。这不仅要求对局部放电物理机理具有更为深入的认识,也依赖于更加先进的智能分析方法与算法支撑。

尽管目前由于实际设备中局部放电检测、定位及模式识别等基础问题尚未充分解决,且多源局放并存等因素进一步加大了诊断难度,围绕局部放电危害程度的定量评估及其发展趋势预测的系统性研究仍相对薄弱。然而,随着设备智能化水平要求的不断提升,以及变压器等关键设备主动保护理念的提出,局部放电危害程度评估与动态诊断将成为未来局部放电领域的重要研究方向。

4.5 实际复杂工况下的局部放电理论研究

局部放电的检测与分析离不开基础理论研究的支撑。从本质上讲,局部放电检测与分析属于典型的工程应用问题,其最终目标是为实际工程中的绝缘缺陷识别与故障预警提供可靠手段。近年来,局部放电检测与分析技术在实验室条件下及部分工程应用中取得了明显进展,但在复杂工况下的实际应用效果仍存在一定差距。造成这一问题的重要原因之一,是对复杂工况下局部放电物理机理的理解尚不充分,这在一定程度上限制了局部放电检测与分析的准确性和有效性。无论是在检测还是分析方面,复杂工况下局部放电基础理论的深入研究都是不可或缺的。

在检测层面,实际工程中绝缘介质状态的复杂多变直接影响局部放电的物理过程^[161-166],进而改

变局部放电产生的电、磁、声、光等物理信号特性,因此检测技术设计与信号辨识过程中必须充分考虑绝缘状态的变化影响。在分析层面,若期望实现局部放电行为的动态诊断,同样需要对复杂工况作用下局部放电演变规律具备深入认识。

实际复杂工况下局部放电机理的研究,至少需要关注以下3个方面。1)首先是电气设备承受的电压应力的影响。实际设备中的电压应力通常并非单一的稳态交流或直流电压,而是稳态电压与各类暂态过电压叠加的复合作用,高幅值暂态电压对局部放电具有显著的激发和促进效应。例如,文献[167-170]研究了交流叠加冲击电压下GIS设备的局部放电特性,结果表明叠加电压能够显著激发金属微粒和沿面缺陷的放电行为。2)其次是绝缘介质物理状态变化对局部放电的影响。实际设备在运行过程中,受负载波动、外部环境变化等因素影响,绝缘介质的温度、湿度等状态参数动态变化,这种变化不仅影响局部放电的起始过程,还会显著改变局部放电信号特性及放电演变路径^[171]。3)最后是机械应力及其他非电气应力对局部放电的作用。在结构复杂、尺度较大的电气设备中,运行期间常伴随明显的机械振动等应力,这些因素与电气应力共同作用,可能引发局部放电行为的变化。例如,文献[172]研究了机械-电气联合作用下GIS设备中亚毫米级金属微粒缺陷的运动与放电特性,结果表明机械振动能够增强微粒的水平运动,从而显著影响局部放电的发展行为。

4.6 新场景下的局部放电研究

近年来,随着对绿色低碳设备需求的不断提升,压缩空气气体绝缘设备、聚丙烯绝缘电缆(PPL cable)、非矿物油变压器等新型环保型电气设备相继出现,并已在部分工程项目中实现应用。未来,随着此类设备的大规模部署,绝缘状态的检测与分析将成为其运维保障工作的核心问题,新型设备中的局部放电检测与分析技术研究将成为重要的发展方向^[173-174]。尽管新型设备在绝缘介质材料方面发生了变化,但局部放电作为绝缘劣化与故障的典型前兆信号,其基本物理机制仍具有一定的共通性。因此,针对新型环保电气设备的局部放电检测与分析,应在充分借鉴传统设备已有研究成果的基础上,通过必要的补充性基础研究,系统探讨局部放电检测与分析技术从传统设备向新型设备迁移与适配的可行性。

当前,电力电子技术正逐渐成为电能生产、输配电和新场景应用领域的重要参与者。但是目前对于新兴高压电力电子的绝缘诊断与局部放电测量尚无统一的国际标准。电力电子设备常承受复杂的高频、谐波、快速切换脉冲工况^[175-179],其内部绝缘材料电场分布和局部放电特性更加复杂。此外,高压电力电子设备普遍追求高功率密度与结构紧凑化,在复杂的电应力工况下,如何在减小绝缘距离设计与确保高效精准的局放测量间寻求平衡也是电力电子设备局放检测研究所面临的重要挑战之一。在HVDC变电站内,除了大量电力电子设备外,其他电力器件如干式电容器等的绝缘故障对站内设备的可靠运行至关重要,开展针对性的电力电子工况下的局部放电特性以及有效局放检测方法研究十分必要^[180-181]。

此外,高电压电气设备的应用场景已不再局限于传统电网领域。随着电动汽车、全电飞机等电气化进程的不断加速,其内部电压等级与功率水平持续提升,相应的绝缘问题也日益突出^[182-186]。在进行该类新场景局放检测技术研究时,需要考虑快速变化的温度、低气压以及不规则机械振动对于局放测量结果的影响^[187]。储能系统中的氢能源系统正逐步实现由低压(1 kV以下)向中压(10~20 kV)等级的功率与效率升级。电解器的进水口及氢气、氧气出口通常处于低电位,但需与中压系统进行电气连接,因此中间必须采用具备高绝缘性能的管道结构。该类管道内部为水气混合介质,在高流速、水位变化频繁等复杂工况下,对其绝缘结构设计提出较高要求,局放检测是必要的电气安全排查方法,在此应用场景下的局部放电测量缺乏考量^[188]。

综上所述,在这些新型场景中,由于电压应力特性、绝缘介质、绝缘结构及运行环境条件均与传统设备存在显著差异,常规的局部放电检测与分析技术的适应性面临新的挑战,相关研究也将成为未来的重要方向。

5 结论

1)局部放电检测技术体系不断丰富,尤其在高灵敏度电荷测量(脉冲电流)、光学检测、基于光纤的超声检测以及多参量融合检测等技术方向实现了快速发展,局放检测手段不断完善,检测灵敏度、抗干扰能力与应用适应性显著提升。

2)传统的传播时间差定位方法仍是工程实践

中应用最广泛的局部放电定位手段。近年来, 深度学习算法在脉冲特征提取与去噪方面展现出良好潜力, 有助于提升低信噪比条件下的定位精度; 同时, 随着数值建模技术的发展, 基于特征匹配与时间反演的新型定位方法不断涌现, 为复杂设备内部放电的高精度定位提供了新的技术路径。

3) 伴随着深度学习技术的迅猛发展, 基于深度学习的局部放电模式识别方法大量涌现, 依托强大的高维特征提取与建模能力, 深度学习提升了局部放电缺陷类型识别的准确率。

4) 尽管近十年来局部放电领域取得了丰硕的研究成果, 但仍存在若干值得深入探索的问题。当前, 现场局部放电监测中的“漏报误报”问题仍未完全解决, 应加快多参量融合检测与新型检测技术的工程应用。新兴人工智能技术在应对实际缺陷样本稀缺, 以及融合局部放电物理机理、专家经验与数据驱动算法等方面仍需进一步研究, 以提升对实际设备绝缘缺陷识别的准确率。随着设备智能化水平要求的提升及变压器等关键装备主动保护理念的提出, 基于局部放电状态定量评估绝缘危害程度并预测发展趋势的动态诊断方法亟需加强。同时, 应深化复杂工况下局部放电物理机理的研究, 为检测与分析技术提供坚实理论支撑。面向未来, 还需积极拓展局部放电检测与分析在新型环保电气设备及其他应用领域中的研究与工程实践。

参考文献 References

- [1] 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.
- [2] BEHRMANN G, GROSS D, MUHR M. Guide to changes made in edition 4 of IEC 60270, charge-based partial discharge measurements[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2024, 40(4): 27-39.
- [3] IEC. High-voltage test techniques – partial discharge measurements: IEC 60270[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2015.
- [4] 李星, 丁登伟, 张榆, 等. GIS/GIL 设备局部放电高电位脉冲电流测量方法[J/OL]. 高电压技术, 2025: 1-9[2025-05-11]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241401>.
LI Xing, DING Dengwei, ZHANG Yu, et al. High potential partial discharge pulse current detection method for GIS/GIL[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-9[2025-05-11]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241401>.
- [5] 许渊, 刘卫东, 陈维江, 等. GIS 绝缘子局部放电高灵敏测量方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1703-1712.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. High-sensitivity measurement method and application of GIS spacer partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1703-1712.
- [6] PASSOW D, BELTLE M, TENBOHLEN S, et al. Bandwidth and detection sensitivity analysis of integrated capacitive PD sensors for pre-molded cable joints[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 2156-2164.
- [7] LU B X, SUN X Y, YANG H S, et al. A new method for detecting partial discharge in T-type terminals of power cable[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(2): 2049-2059.
- [8] MOHAMMADI H, HAGHJOO F. Distributed capacitive sensors for partial discharge detection and defective region identification in power transformers[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6): 1626-1634.
- [9] CHENG J R, XU Y, DING D W, et al. Investigation of the uhf partial discharge detection characteristics of a novel bushing tap sensor for transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2748-2757.
- [10] SHARIFINIA S, ALLAHBAKHSI M, GHANBARI T, et al. Application of a Rogowski coil sensor for separating internal and external partial discharge pulses in power transformers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8): 8509-8516.
- [11] YAN Y, TAO J Q, TRINCHERO R, et al. A compact detector for flexible partial discharge monitoring of 10 kV overhead covered conductor lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5492-5495.
- [12] SIDDQUI B A, PAKONEN P, VERHO P. Novel inductive sensor solutions for on-line partial discharge and power quality monitoring[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 209-216.
- [13] BSI. High voltage test techniques – measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods: IEC TS 62478: 2016[S], 2016.
- [14] 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 Administration. High-voltage test techniques—measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods: GB/T 42287—2022[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2022.
- [15] XU Y, LIU W D, GAO W S. Investigation of disc-type sensors using the UHF method to detect partial discharge in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5), 3019-3027.
- [16] AZIRANI M A, ARIANNIK M, WERLE P, et al. Optimal frequency selection for detection of partial discharges in power transformers using the UHF measurement technique[J]. Measurement, 2021, 172: 108895.
- [17] 王亮, 郑书生, 李成榕, 等. GIS 浇注孔传播内部局部放电 UHF 电磁波的特性[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 3843-3849.
WANG Liang, ZHENG Shusheng, LI Chengrong, et al. Distribution of electric field strength and spectral characteristic of UHF signal of partial discharge inside GIS at resin sprue of metal ring[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 3843-3849.
- [18] WANG P, MA S J, AKRAM S, et al. Design of an effective antenna for partial discharge detection in insulation systems of inverter-fed motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 13727-13735.
- [19] 张国治, 韩景琦, 刘健桦, 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.
- [20] 王永强, 李建芳, 李长元, 等. 检测 GIS 局部放电的小型化平面螺旋天线研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1252-1258.
WANG Yongqiang, LI Jianfang, LI Changyuan, et al. Study on a miniaturized planar spiral antenna for partial discharge detection in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1252-1258.

- [21] ZHANG G Z, TIAN J W, ZHANG X X, 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.
- [22] SHU Z, WANG W S, YANG C S, et al. External partial discharge detection of gas-insulated switchgears using a low-noise and enhanced-sensitivity UHF sensor module[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 3518210.
- [23] PARTYKA M, BRIDGES G E, KORDI B. Online partial discharge measurements in an operating generator stator winding using UHF antennas[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024, 31(3): 1593-1602.
- [24] KONG X X, ZHANG C, HOU C Y, et al. UHF sensor for partial discharge detection based on coplanar waveguide feeding[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(17): 28119-28128.
- [25] KAMELI S M, REFAAT S S, ABU-RUB H, et al. Ultrawideband Vivaldi antenna with an integrated noise-rejecting parasitic notch filter for online partial discharge detection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 8001610.
- [26] 赵桂艺. 变压器局部放电柔性特高频传感器优化设计与试验研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
ZHAO Guiyi. Optimization design and experimental study of flexible ultra-high frequency sensor for partial discharge of transformer[D]. Chongqing, China: Chongqing University of Technology, 2023.
- [27] 张晓星, 张 骞, 肖 淞. 大型变压器外置式特高频局部放电传感器设计[J]. *高电压技术*, 2019, 45(2): 499-504.
ZHANG Xiaoxing, ZHANG Jian, XIAO Song. Design of external ultra-high frequency partial discharge sensor for large transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(2): 499-504.
- [28] 谭 巧, 唐 炬, 曾福平. 检测气体绝缘组合电器局部放电的四频段微带单极子特高频天线设计[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(10): 127-135, 144.
TAN Qiao, TANG Ju, ZENG Fuping. Design of fourfold-band micro-strip monopole antenna for partial discharge detection in gas insulated switchgear[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(10): 127-135, 144.
- [29] TAHER M A, OTHMAN M, ILLIAS H A, et al. Conformal and flexible antennas in ultra-high frequencies: prospects and challenges for partial discharge diagnostics[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 10139-10159.
- [30] SUN Y X, LI C H, LONG Y F, et al. Research on flexible antenna and distributed deep learning pattern recognition for partial discharge monitoring of transformer[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2024, 57(48): 485108.
- [31] 张西子. GIS 局部放电盆式绝缘子内置环形传感器的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
ZHANG Xizi. The loop-type sensor embedded in the insulator of GIS for partial discharge measurement[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2017.
- [32] 蔡 鋈, 袁文泽, 张轩瑞, 等. 基于特高频自感知的变压器局部放电检测方法[J]. *高电压技术*, 2021, 47(6): 2041-2050.
CAI Jun, YUAN Wenzhe, ZHANG Xuanrui, et al. Ultra-high frequency self-sensing detection method for transformer partial discharge[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(6): 2041-2050.
- [33] ZHANG X R, SHI M X, CAI J, et al. A novel partial discharge detection method for power transformers on site adopting its component as ultra-high frequency sensor[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(6): 2269-2271.
- [34] MIER C, MOR A R, LUO T M, et al. Partial discharge and interference discrimination in gas-insulated systems using electric and magnetic sensors[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, 158: 109911.
- [35] WANG W S, WANG Y G, SHU Z, et al. Coil antenna sensor-based measurement method to online detect partial discharge in distributed power networks[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1001008.
- [36] 胡 军, 赵 帅, 欧阳勇, 等. 基于巨磁阻效应的高性能电流传感器及其在智能电网的量测应用[J]. *高电压技术*, 2017, 43(7): 2278-2286.
HU Jun, ZHAO Shuai, OUYANG Yong, et al. High performance current sensors based on giant magnetoresistance effect and practical applications in smart grids[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(7): 2278-2286.
- [37] ZHAO G, HU J, OUYANG Y, et al. Tunneling magnetoresistive sensors for high-frequency corona discharge location[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(7): 4001804.
- [38] CHEN Y, HEREDIA L C, SMIT J, et al. Partial discharge detection on power equipment using a magneto-resistive sensor[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 152: 109270.
- [39] CHEN Y, HEREDIA L C, SMIT J J, et al. Giant magneto-resistive (GMR) sensors for non-contacting partial discharge detection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 6004411.
- [40] LI J H, HAN X T, LIU Z H, et al. A novel GIS partial discharge detection sensor with integrated optical and UHF methods[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(4): 2047-2049.
- [41] 李 泽, 钱 勇, 刘 伟, 等. GIS 局部放电光信号检测技术及光学图像诊断方法[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(1): 253-263.
LI Ze, QIAN Yong, LIU Wei, et al. Optical signal detection technology and optical image diagnostic method of partial discharge in GIS[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(1): 253-263.
- [42] 李 泽, 钱 勇, 赵九一, 等. GIS 局部放电光学传感器仿真设计与试验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(8): 249-257.
LI Ze, QIAN Yong, ZHAO Jiuyi, et al. Simulation design and experimental study of GIS partial discharge optical sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(8): 249-257.
- [43] 陈 跃, 任 明, 王 凯, 等. 局部放电探测光导结构参数的仿真优化[J]. *高电压技术*, 2023, 49(12): 5061-5072.
CHEN Yue, REN Ming, WANG Kai, et al. Simulation and optimization on light guide structure parameters for partial discharge detection[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(12): 5061-5072.
- [44] AMIZHTAN S K, SARATHI R, SRINIVASAN B, et al. Two-dimensional material-based fluorescent optical fiber for early detection of partial discharge[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(17): 27480-27488.
- [45] 臧奕茗, 钱 勇, 陈孝信, 等. 基于非下采样 Contourlet 变换的光电图像融合方法在 GIS 局放检测中的应用[J]. *高电压技术*, 2021, 47(2): 519-528.
ZANG Yiming, QIAN Yong, CHEN Xiaoxin, et al. Application of photoelectric image fusion method based on non-subsampled contourlet transform in GIS partial discharge detection[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(2): 519-528.
- [46] 马一鸣. 基于荧光光纤和 SiPM 的 GIS 微弱局部放电检测与示踪技术[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
MA Yiming. Detection and tracing technology of GIS weak partial discharge based on fluorescence fiber and SiPM[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2024.
- [47] REN M, ZHOU J R, YANG S J, et al. Optical partial discharge diagnosis in SF₆ gas-insulated system with SiPM-based sensor array[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(13): 5532-5540.
- [48] 李信哲, 任 明, 李 琛, 等. 基于单光子探测的局部放电多光谱诊断方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(17): 6511-6520.
LI Xinzhe, REN Ming, LI Chen, et al. Multispectral partial discharge diagnosis based on single photon detection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(17): 6511-6520.
- [49] 任 明, 余家赫, 王 凯, 等. 气体绝缘微粒放电多光谱脉冲检测及特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(增刊 1): 295-304.

- REN Ming, YU Jiahe, WANG Kai, et al. Multispectral pulse detection and characteristic analysis of gas insulated particle discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(Supplement 1): 295-304.
- [50] 李彦飞, 汤贝贝, 韩冬, 等. SF₆ 放电的发射光谱特性分析与放电识别[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1866-1874.
- LI Yanfei, TANG Beibei, HAN Dong, et al. Spectroscopy analysis of emission spectrum characteristics and discharge recognition of SF₆ gas discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1866-1874.
- [51] 韩旭涛, 刘泽辉, 张亮, 等. GIS 中局部放电光信号传播特性仿真研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(6): 128-134.
- HAN Xutao, LIU Zehui, ZHANG Liang, et al. Simulation for propagation characteristics of optical signals excited by partial discharge in GIS[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(6): 128-134.
- [52] 庞彦娟, 师文通, 要亚忠. “光-电-场”融合传感检测系统投用[N]. 科技日报, 2024-09-18(03).
- PANG Yanjuan, SHI Wentong, YAO Yazhong. Integrated sensing and detection system combining optical, electrical, and field signals put into operation[N]. Science and Technology Daily, 2024-09-18(03).
- [53] 马国明, 周宏扬, 刘云鹏, 等. 变压器局部放电光纤超声检测技术及新复用方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1768-1780.
- MA Guoming, ZHOU Hongyang, LIU Yunpeng, et al. Optical fiber ultrasonic detection technology for partial discharge in power transformer and new multiplexing method[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1768-1780.
- [54] 颜育, 姚露露, 吴明, 等. 电缆局部放电超声检测用高灵敏度柔性 PZT 压电超声传感器[J/OL]. 高电压技术, 2025: 1-9[2025-05-11]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240538>.
- YAN Yu, YAO Lulu, WU Ming, et al. Highly sensitive flexible PZT piezoelectric ultrasonic sensor for cable partial discharge ultrasonic detection[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-9[2025-05-11]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240538>.
- [55] SONG Y, TANG Z K, SHI R C, et al. Design of PMN-PT-based dual-resonance acoustic emission sensor for partial discharge detection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 373: 115432.
- [56] 郑晴. 基于光纤传感的变压器局部放电超声检测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- ZHENG Qing. Ultrasonic detection for partial discharge in transformer by using fiber optic sensing[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2016.
- [57] 石城, 马国明, 毛乃强, 等. 基于波分时分复用技术的变压器局部放电光纤超声定位技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4873-4879.
- SHI Cheng, MA Guoming, MAO Naiqiang, et al. Study on fiber ultrasonic location technology of partial discharge in transformer based on wavelength division multiplexing/time-division multiplexing technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4873-4879.
- [58] MA G M, ZHOU H Y, ZHANG M, et al. A high sensitivity optical fiber sensor for GIS partial discharge detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(20): 9235-9243.
- [59] WANG H H, XIAO G C, WANG L L, et al. A novel approach to partial discharge detection under repetitive unipolar impulsive voltage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(11): 11681-11691.
- [60] JIANG J, HE Y Q, SONG Y, et al. Partial discharge ultrasonic detection based on Sagnac optical interference technique[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(22): 27382-27389.
- [61] 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.
- [62] ZHOU H Y, MA G M, ZHANG M, et al. A high sensitivity optical fiber interferometer sensor for acoustic emission detection of partial discharge in power transformer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(1): 24-32.
- [63] JIANG J, HE Y Q, SONG Y, et al. Optical ultrasonic detection for partial discharge under pulsed high voltage[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 3541408.
- [64] ZHANG P, HAO Y P, SHEN Z K, et al. Fiber optic Mach-Zehnder interferometer sensor with acoustic enhancement for partial discharge acoustic emission detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(24): 40873-40882.
- [65] 史荣斌, 王思涵, 马国明, 等. 基于声聚焦结构的局部放电光纤超声传感技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8518-8526.
- SHI Rongbin, WANG Sihan, MA Guoming, et al. Optical fiber ultrasonic sensing for partial discharge based on acoustic focusing structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8518-8526.
- [66] 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, LÜ 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.
- [67] ZHANG W C, YU Q, CHEN Q C, et al. Single arm optical fiber interferometer technology for partial discharge acoustic detection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(6): 3083-3091.
- [68] 陈超超, 李琪, 李中原, 等. 高灵敏度高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.
- [69] 张知先, 雷嘉丽, 陈伟根, 等. 基于多参量光纤 F-P 传感的变压器局部放电与油温传感方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 58-65.
- ZHANG Zhixian, LEI Jiali, CHEN Weigen, et al. Transformer's partial discharge and oil temperature sensing method based on multi-parameter fiber optic F-P sensing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 58-65.
- [70] 谯继贤, 张伟超, 邵启兵, 等. 基于线型腔光纤激光器的变压器局部放电长距离检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 6145-6154.
- QIAO Jixian, ZHANG Weichao, SHAO Qibing, et al. Power transformer partial discharge long-distance detection technology based on linear cavity fiber laser[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6145-6154.
- [71] 韩旭涛, 刘泽辉, 李军浩, 等. 基于光电复合传感器的 GIS 局放检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6760-6768.
- HAN Xutao, LIU Zehui, LI Junhao, et al. Study on PD detection method in GIS based on the optical and UHF integrated sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6760-6768.
- [72] HAN X T, LI J H, ZHANG L, et al. A novel PD detection technique for use in GIS based on a combination of UHF and optical sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(8): 2890-2897.
- [73] 芮逸凡, 王亚林, 周明瑜, 等. 基于柔性馈电螺旋天线和硅光电倍增管的 GIS 局部放电联合传感技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3610-3620.
- RUI Yifan, WANG Yalin, ZHOU Mingyu, et al. Partial discharge optoelectric integrated sensing technology based on helical antenna attached flexible feeding network and silicon photomultiplier in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3610-3620.
- [74] REN M, ZHOU J R, MIAO J. Adopting spectral analysis in partial

- discharge fault diagnosis of GIS with a micro built-in optical sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 1237-1240.
- [75] HONG K D, WANG X X, WANG W S, et al. Noncontacting electromagnetic-acoustic measurement technique for partial discharge detection and localization[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2025, 73(3): 1632-1644.
- [76] SI W R, FU C Z, YUAN P. An integrated sensor with AE and UHF methods for partial discharges detection in transformers based on oil valve[J]. IEEE Sensors Letters, 2019, 3(10): 3502003.
- [77] 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.
- [78] 张国治, 陈欣荣, 麻守孝, 等. 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[J/OL]. 中国电机工程学报, 2025: 1-12[2025-05-11]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242378>.
ZHANG Guozhi, CHEN Xinrong, MA Shouxiao, et al. Built-in acoustic-magnetic integrated sensing technology for GIS partial discharge based on a new type of insulating medium sandwich structure[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025: 1-12[2025-05-11]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242378>.
- [79] HAN X T, WANG H T, SUN Y, et al. Partial discharge detection, diagnosis, and location technology based on a novel transient earth voltage-ultrasonic integrated sensor used for switchgear equipment[J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(8): 084705.
- [80] WANG H T, ZHANG X R, HAN X T, 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.
- [81] CHEN H, WANG H T, ZHANG Z Y, et al. A novel composite sensor for UHF partial discharge and gas state measurement in GIS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1501410.
- [82] 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 Zhaoyu, HU Yidan, SONG Yanfeng, et al. Development and application of mechanical vibration-ultrasound combined sensor for power equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5713-5723.
- [83] KREUGER F H, WEZELENBURG M G, WIEMER A G, et al. Partial discharge. XVIII. Errors in the location of partial discharges in high voltage solid dielectric cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1993, 9(6): 15-22.
- [84] 唐炬, 陈娇, 张晓星, 等. 用于局部放电信号定位的多样本能量相关搜索提取时间差算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 125-130.
TANG Ju, CHEN Jiao, ZHANG Xiaoxing, et al. Time difference algorithm based on energy relevant search of multi-sample applied in PD location[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 125-130.
- [85] 刘卫东, 刘尚合, 胡小锋, 等. 基于互相关信息积累的非周期微弱局部放电源探测方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 966-972.
LIU Weidong, LIU Shanghe, HU Xiaofeng, et al. Aperiodic weak partial discharge source detection based on accumulation of cross-correlation estimation information[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 966-972.
- [86] 张若兵, 金森, 杜钢. 基于 EMD 与 DTW 算法的振荡波下电缆局部放电定位方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 273-281.
ZHANG Ruobing, JIN Sen, DU Gang. Method of partial discharge localization for cable under oscillatory wave voltage conditions based on EMD and DTW algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 273-281.
- [87] YEO J, JIN H F, MOR A R, et al. Localisation of partial discharge in power cables through multi-output convolutional recurrent neural network and feature extraction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 177-188.
- [88] WANG J, LU L, ZHU G Y, et al. Unbiased euclidean direction search algorithm for partial discharge location in cable systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 9000713.
- [89] MARDIANA R, SU C Q. Partial discharge location in power cables using a phase difference method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6): 1738-1746.
- [90] 饶显杰, 周凯, 黄永禄, 等. 考虑相速度频变特性的改进相位差算法局部放电定位[J]. 电工技术学报, 2021, 36(20): 4379-4388.
RAO Xianjie, ZHOU Kai, HUANG Yonglu, et al. Partial discharge location using improved phase difference method considering frequency-dependent characteristic of phase velocity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(20): 4379-4388.
- [91] LAN S, HU Y Q, KUO C C. Partial discharge location of power cables based on an improved phase difference method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(5): 1612-1619.
- [92] 谢敏, 周凯, 何珉, 等. 基于时间反演技术的电力电缆局部放电定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3402-3409.
XIE Min, ZHOU Kai, HE Min, et al. Partial discharge location for power cable based on the time reversal technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3402-3409.
- [93] RAGUS A, SASSE H G, DUFFY A, et al. Application to real power networks of a method to locate partial discharges based on electromagnetic time reversal[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 2738-2746.
- [94] ZOHREVAND J, KARAMI H, RUBINSTEIN M, et al. Partial discharge localization using time reversal: application to gas insulated switchgear[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 212: 108655.
- [95] RATHOD V B, KUMBHAR G B, BHALLA B R. An experimental validation of electromagnetic time reversal technique for localization of partial discharge inside transformer winding[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 3521210.
- [96] MAHDIPOUR M, AKBARI A, WERLE P, et al. Partial discharge localization on power cables using on-line transfer function[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1490-1498.
- [97] MONDAL M, KUMBHAR G B, KULKARNI S V. Localization of partial discharges inside a transformer winding using a ladder network constructed from terminal measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1035-1043.
- [98] MOHAMMADIRAD A, AKMAL A A S, SAMIMI M H. A novel method to enhance partial discharge localization accuracy using sectional winding analysis and a neural network-based learning vector quantization model[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 241: 111292.
- [99] QIU R, ZHOU W J, BRAULT P, et al. A method to localize the axial position of partial discharges in GIL by gas sensors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(1): 263-270.
- [100] BHUKYA A, KOLEY C. Bi-long short-term memory networks for radio frequency based arrival time detection of partial discharge signals[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 2024-2031.
- [101] 宁曙光, 何怡刚, 刘倩倩, 等. 基于截断奇异值分解与 K-medians 的局部放电源定位方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3441-3452.
NING Shuguang, HE Yigang, LIU Qianqian, et al. A location method of partial discharge based on truncated singular value decomposition and K-medians[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3441-3452.
- [102] 朱明晓, 刘青, 王彦博, 等. 基于平面相交法的敞开式变电站多源局部放电定位方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2970-2976.
ZHU Mingxiao, LIU Qing, WANG Yanbo, et al. Localization method

- for multiple partial discharge sources in air-insulated substation by using plane intersection method[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(9): 2970-2976.
- [103] 王署东, 尹柏强, 何怡刚, 等. 基于正则化的变电站局部放电定位方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(6): 1825-1833.
WANG Shudong, YIN Boqiang, HE Yigang, et al. A partial discharge location method in substations based on regularization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(6): 1825-1833.
- [104] 刘 青, 常丁戈, 邓军波. 用于变电站站域局部放电特高频测向的空间谱估计算法优化选择[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(16): 3551-3560.
LIU Qing, CHANG Dingge, DENG Junbo. Optimal selection on spatial spectrum estimation algorithms for UHF direction finding of partial discharge in substation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(16): 3551-3560.
- [105] 刘 青, 朱明晓, 王彦博, 等. 基于特高频相控阵原理的变电站站域局部放电测向方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(20): 6126-6135.
LIU Qing, ZHU Mingxiao, WANG Yanbo, et al. Partial discharge orientation method in substation based on ultra-high frequency phased array theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(20): 6126-6135.
- [106] 周 南, 罗林根, 宋 辉, 等. 基于最大似然估计的变电站特高频局部放电定向方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(15): 3285-3292.
ZHOU Nan, LUO Lingen, SONG Hui, et al. A substation UHF partial discharge directional of arrival estimation method based on maximum likelihood estimation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(15): 3285-3292.
- [107] 李 臻, 罗林根, 陈敬德, 等. 基于特高频无线传感阵列的新型局部放电定位方法[J]. *高电压技术*, 2019, 45(2): 418-425.
LI Zhen, LUO Lingen, CHEN Jingde, et al. Novel localization method for partial discharge based on ultra-high frequency wireless sensor array[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(2): 418-425.
- [108] IORKYASE E T, TACHTATZIS C, GLOVER I A, et al. RF-based location of partial discharge sources using received signal features[J]. *High Voltage*, 2019, 4(1): 28-32.
- [109] IORKYASE E T, TACHTATZIS C, GLOVER I A, et al. Improving RF-based partial discharge localization via machine learning ensemble method[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(4): 1478-1489.
- [110] 关 宇, 董 明, 王 昊, 等. 基于超分辨率广义互相关算法的局部放电超声定位技术[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(11): 1-11.
GUAN Yu, DONG Ming, WANG Hao, et al. Partial discharge ultrasound localization based on super-resolution generalized cross-correlation estimation algorithm[J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(11): 1-11.
- [111] 唐 炬, 黄 亮, 曾福平, 等. 一种多样本信息的局部放电源逐次逼近定位方法[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(10): 119-126.
TANG Ju, HUANG Liang, ZENG Fuping, et al. A positioning approach based on successive approximation of multi-samples for partial discharge source[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(10): 119-126.
- [112] GHOSH R, CHATTERJEE B, DALAI S. A method for the localization of partial discharge sources using partial discharge pulse information from acoustic emissions[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(1): 237-245.
- [113] JIA J, HU C B, YANG Q, et al. Localization of partial discharge in electrical transformer considering multimedia refraction and diffraction[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(8): 5260-5269.
- [114] 张 阳, 杜 非, 罗勇芬. 基于复合阵列传感器的应用射线追迹反推变压器中局部放电源[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(19): 5887-5896.
ZHANG Yang, DU Fei, LUO Yongfen. Applying ray tracing to back-
- step partial discharge sources in transformers based on combined arrays[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(19): 5887-5896.
- [115] 苏志雄, 于瑞冬, 张周胜. 基于多重多项式结果-二重网格搜索的变压器局部放电定位[J]. *高电压技术*, 2024, 50(4): 1538-1547.
SU Zhixiong, YU Ruidong, ZHANG Zhousheng. Partial discharge location of transformers based on multi-polynomial resultants approach and 2-lattice search[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(4): 1538-1547.
- [116] 冯晓泽, 寇 鹏, 梁得亮, 等. 基于压缩感知和指纹图谱的变压器局部放电空间定位方法[J]. *高压电器*, 2023, 59(12): 160-167.
FENG Xiaozhe, KOU Peng, LIANG Deliang, et al. Spatial location method of partial discharge in power transformer using compressed sensing and fingerprinting[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(12): 160-167.
- [117] KARAMI H, AVIOLAT F Q, AZADIFAR M, et al. Partial discharge localization in power transformers using acoustic time reversal[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 206: 107801.
- [118] WANG X K, GUAN S Y, HUA L, et al. Classification of spot-welded joint strength using ultrasonic signal time-frequency features and PSO-SVM method[J]. *Ultrasonics*, 2019, 91: 161-169.
- [119] GOVINDARAJAN S, ARDILA-REY J A, KRITHIVASAN K, et al. Development of hypergraph based improved random forest algorithm for partial discharge pattern classification[J]. *IEEE Access*, 2020, 9: 96-109.
- [120] PALHARES P H D S, RIBEIRO C D J, BRITO L D C, et al. Bayesian network and compact genetic algorithm approach for classifying partial discharges in power transformers[J]. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2018, 29(5): 605-613.
- [121] XIN W C, YAO S J, CHEN H M, et al. Pattern recognition of UHF signals in partial discharge considering electromagnetic model[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(6): 108-115.
- [122] 王刘旺, 朱永利, 贾亚飞, 等. 局部放大数据的并行 PRPD 分析与模式识别[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(5): 1236-1244.
WANG Liuwang, ZHU Yongli, JIA Yafei, et al. Parallel phase resolved partial discharge analysis for pattern recognition on massive PD data[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(5): 1236-1244.
- [123] 王艳新, 闫 静, 耿英三, 等. 多任务元学习网络的气体绝缘组合电器局部放电同时诊断与定位[J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(7): 105-115.
WANG Yanxin, YAN Jing, GENG Yingsan, et al. Research on gas-insulated switchgear partial discharge diagnosis and location method based on multi-task meta-learning[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(7): 105-115.
- [124] CATTERSON V M, SHENG B. Deep neural networks for understanding and diagnosing partial discharge data[C]//*Proceedings of the 2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. Seattle, USA: IEEE, 2015: 218-221.
- [125] PENG X S, YANG F, WANG G J, et al. A convolutional neural network-based deep learning methodology for recognition of partial discharge patterns from high-voltage cables[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(4): 1460-1469.
- [126] 杨 为, 朱太云, 张国宝, 等. 电力物联网下基于卷积神经网络和迁移学习的 GIS 局部放电模式识别分类方法研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(9): 20-25, 32.
YANG Wei, ZHU Taiyun, ZHANG Guobao, et al. Research on partial discharge pattern recognition and classification in GIS based on convolutional neural network and transfer learning in power internet of things[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(9): 20-25, 32.
- [127] SONG H, DAI J J, SHENG G H, et al. GIS partial discharge pattern recognition via deep convolutional neural network under complex data source[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(2): 678-685.

- [128] GAO A R, ZHU Y L, CAI W H, et al. Pattern recognition of partial discharge based on VMD-CWD spectrum and optimized CNN with cross-layer feature fusion[J]. IEEE Access, 2020, 8: 151296-151306.
- [129] WANG Y X, YAN J, YANG Z, et al. GIS partial discharge pattern recognition via lightweight convolutional neural network in the ubiquitous power internet of things context[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(8): 864-871.
- [130] GRAVES A. Generating sequences with recurrent neural networks[EB/OL]. 2014[2014-06-05]. <https://arxiv.org/pdf/1308.0850.pdf>.
- [131] 陈振宇, 刘金波, 李晨, 等. 基于 LSTM 与 XGBoost 组合模型的超短期电力负荷预测[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 614-620.
- CHEN Zhenyu, LIU Jinbo, LI Chen, et al. Ultra short-term power load forecasting based on combined LSTM-XGBoost model[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 614-620.
- [132] ZHANG C F, CHEN M L, ZHANG Y J, et al. Partial discharge pattern recognition algorithm of overhead covered conductors based on feature optimization and bidirectional LSTM-GRU[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2024, 18(4): 680-693.
- [133] NGUYEN M T, NGUYEN V H, YUN S J, et al. Recurrent neural network for partial discharge diagnosis in gas-insulated switchgear[J]. Energies, 2018, 11(5): 1202.
- [134] 郭建鑫, 赵玉顺, 王志宇, 等. 基于 LMD 和 LSTM 的盆式绝缘子典型缺陷局部放电模式识别方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(8): 95-105.
- GUO Jianxin, ZHAO Yushun, WANG Zhiyu, et al. Partial discharge pattern recognition method of typical defects in basin insulator based on LMD and LSTM[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(8): 95-105.
- [135] LIU T L, YAN J, WANG Y X, et al. GIS partial discharge pattern recognition based on a novel convolutional neural networks and long short-term memory[J]. Entropy, 2021, 23(6): 774.
- [136] ZHENG Q H, WANG R Y, TIAN X Y, et al. A real-time transformer discharge pattern recognition method based on CNN-LSTM driven by few-shot learning[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 219: 109241.
- [137] LI Z Z, QU N, LI X X, et al. Partial discharge detection of insulated conductors based on CNN-LSTM of attention mechanisms[J]. Journal of Power Electronics, 2021, 21(7): 1030-1040.
- [138] ZHOU X, WU X T, DING P, et al. Research on transformer partial discharge UHF pattern recognition based on CNN-LSTM[J]. Energies, 2020, 13(1): 61.
- [139] DONG M, SUN J. Partial discharge detection on aerial covered conductors using time-series decomposition and long short-term memory network[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 184: 106318.
- [140] BARRIOS S, BULDAIN D, COMECH M P, et al. Partial discharge classification using deep learning methods-survey of recent progress[J]. Energies, 2019, 12(13): 2485.
- [141] WANG G J, YANG F, PENG X S, et al. Partial discharge pattern recognition of high voltage cables based on the stacked denoising auto-encoder method[C]//Proceedings of the 2018 International Conference on Power System Technology(POWERCON). Guangzhou, China: IEEE, 2018: 3778-3792.
- [142] CHAUDHURI S, GHOSH S, DEY D, et al. Denoising of partial discharge signal using a hybrid framework of total variation denoising-autoencoder[J]. Measurement, 2023, 223: 113674.
- [143] 关宇, 董明, 王腾腾, 等. 基于改进降噪自编码器与稠密连接网络的局部放电声信号模式识别[J]. 高电压技术, 2025, 51(1): 478-487.
- GUAN Yu, DONG Ming, WANG Tengting, et al. Partial discharge acoustic pattern recognition based on improved denoising autoencoder and DenseNet[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 478-487.
- [144] DUAN L, HU J, ZHAO G, et al. Identification of partial discharge defects based on deep learning method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1557-1568.
- [145] 宋辉, 代杰杰, 张卫东, 等. 基于变分贝叶斯自编码器的局部放电数据匹配方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5869-5877.
- SONG Hui, DAI Jiejie, ZHANG Weidong, et al. A data matching method of partial discharge data based on auto-encoding variational bayes[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5869-5877.
- [146] 高佳程, 朱永利, 郑艳艳, 等. 基于 VMD-WVD 分布与堆栈稀疏自编码网络的局放类型识别[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4118-4128.
- GAO Jiacheng, ZHU Yongli, ZHENG Yanyan, et al. Pattern recognition of partial discharge based on VMD-WVD and SSAE[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4118-4128.
- [147] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2006, 313(5786): 504-507.
- [148] LU S B, CHAI H, SAHOO A, et al. Condition monitoring based on partial discharge diagnostics using machine learning methods: a comprehensive state-of-the-art review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 1861-1888.
- [149] CHEN Y S, ZHAO X, JIA X P. Spectral-spatial classification of hyperspectral data based on deep belief network[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(6): 2381-2392.
- [150] 张新伯, 唐炬, 潘成, 等. 用于局部放电模式识别的深度置信网络方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3272-3278.
- ZHANG Xinbo, TANG Ju, PAN Cheng, et al. Research of partial discharge recognition based on deep belief nets[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3272-3278.
- [151] YUAN F, MA P R, ZHANG X Y, et al. Research on UHF PD detection method based on improved DBN[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 983(1): 012005.
- [152] 黄光磊, 李喆, 许永鹏, 等. 基于改进深度信念网络的直流 XLPE 电缆局部放电模式识别[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 327-334.
- HUANG Guanglei, LI Zhe, XU Yongpeng, et al. Partial discharge pattern recognition of XLPE DC cable based on improved deep belief networks[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 327-334.
- [153] 武雍烨, 朱光亚, 徐忠林, 等. 基于 VMD-IKHA-DBN 的高压输电电缆局部放电模式识别方法[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(8): 56-68.
- WU Yongye, ZHU Guangya, XU Zhonglin, et al. Partial discharge pattern recognition method for high voltage transmission cables based on VMD-IKHA-DBN[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(8): 56-68.
- [154] 许辰航, 陈继明, 刘伟楠, 等. 基于深度残差网络的 GIS 局部放电 PRPD 谱图模式识别[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1113-1123.
- XU Chenhang, CHEN Jiming, LIU Weinan, et al. Pattern recognition of partial discharge PRPD spectrum in GIS based on deep residual network[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1113-1123.
- [155] WANG X H, HUANG H Y, HU Y, et al. Partial discharge pattern recognition with data augmentation based on generative adversarial networks[C]//Proceedings of the 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Perth, Australia: IEEE, 2018: 1-4.
- [156] 朱永利, 张翼, 蔡炜豪, 等. 基于辅助分类-边界平衡生成对抗网络的局部放电数据增强与多源放电识别[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 5044-5053.
- ZHU Yongli, ZHANG Yi, CAI Weihao, et al. Data augmentation and pattern recognition for multi-sources partial discharge based on boundary equilibrium generative adversarial network with auxiliary classifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 5044-5053.
- [157] 谢庆, 王春鑫, 张雨桐, 等. 基于选择性标注与样本平衡的局部放电模式识别在线学习方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 45(2): 778-790.
- XIE Qing, WANG Chunxin, ZHANG Yutong, et al. An online learning

- method for pattern recognition of partial discharge based on selective labeling and sample balancing[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 45(2): 778-790.
- [158] TIAN J P, SONG H, SHENG G H, et al. Knowledge-driven recognition methodology of partial discharge patterns in GIS[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(4): 3335-3344.
- [159] 郑尚坡, 刘俊峰, 曾 君, 等. 基于多尺度注意力自适应去噪网络的局部放电模式识别[J]. *高电压技术*, 2025, 51(4): 1958-1968.
- ZHENG Shangpo, LIU Junfeng, ZENG Jun, et al. Partial discharge pattern recognition based on multi-scale attention adaptive denoising network[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(4): 1958-1968.
- [160] 张乔根, 李晓昂, 刘 琳, 等. GIS 中 SF₆ 绝缘系统缺陷放电的“0-1”现象[J]. *高电压技术*, 2019, 45(9): 2689-2698.
- ZHANG Qiaogen, LI Xiaolang, LIU Lin, et al. “One-Zero” phenomenon of discharge induced by defects in SF₆ insulation systems in GIS[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(9): 2689-2698.
- [161] LI H, ZHENG Y, ZHANG P F, et al. Effect of temperature on insulation properties of SF₆/N₂ mixed gas under AC voltage[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(4): 914-920.
- [162] 李军浩, 史心悦, 韩旭涛, 等. 气体状态对 SF₆ 气体中局部放电的影响研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(11): 15-23.
- LI Junhao, SHI Xinyue, HAN Xutao, et al. Influence of gas state on partial discharge in SF₆ gas[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(11): 15-23.
- [163] 李 星, 许 渊, 丁登伟, 等. 温度对 GIS 绝缘子表面金属异物局部放电及闪络特性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(1): 406-414.
- LI Xing, XU Yuan, DING Dengwei, et al. Influence of temperature on partial discharge and flashover characteristics of metal particle on GIS insulator surface[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(1): 406-414.
- [164] 马径坦, 张乔根, 游浩洋, 等. SF₆ 电气设备中微水对固体绝缘材料闪络电压的影响[J]. *高电压技术*, 2018, 44(6): 1822-1827.
- MA Jingtian, ZHANG Qiaogen, YOU Haoyang, et al. Influence of moisture on flashover voltage of solid insulating materials in SF₆ electrical equipment[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(6): 1822-1827.
- [165] ZHANG X X, XIAO S, ZHANG J, et al. Influence of humidity on the decomposition products and insulating characteristics of CF₃[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(2): 819-828.
- [166] 杨 哲, 胡刚正, 石秉恒, 等. SF₆ 气体绝缘变压器有载开关仓室密度计异常分析及处理[J]. *农村电气化*, 2021(11): 72-73.
- YANG Zhe, HU Gangzheng, SHI Bingheng, et al. Analysis and management of densitometer abnormality in OLTC (on load tap changer) bunker of SF₆ gas insulated transformer[J]. *Rural Electrification*, 2021(11): 72-73.
- [167] 树 婷, 杨玥坪, 郭若琛, 等. 交流与负极性雷电冲击叠加电压下 SF₆ 中自由金属颗粒局部放电激发特性[J]. *高电压技术*, 2022, 48(8): 3305-3315.
- SHU Ting, YANG Yueping, GUO Ruochen, et al. Partial discharge excitation characteristics of free metal particles in SF₆ gas under AC and negative lightning impulse superposition voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(8): 3305-3315.
- [168] ZHOU Y, HAN X T, WANG Y X, et al. Partial discharge characteristics of epoxy insulation surface under AC/LI superimposed voltages in SF₆/N₂ gas mixtures[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024, 31(6): 3074-3082.
- [169] 韩旭涛, 吴旭涛, 赵莹莹, 等. 交流叠加雷电冲击电压下 SF₆ 中线形金属微粒局部放电和运动特性[J]. *高电压技术*, 2024, 50(12): 5406-5414.
- HAN Xutao, WU Xutao, ZHAO Yingying, et al. Partial discharge and motion characteristics of linear metal particles in SF₆ under AC superimposed lightning impulse voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(12): 5406-5414.
- [170] WAN H T, HAN X T, WU X T, et al. Surface partial discharge characteristics of GIS under AC and superimposed switching impulse voltage[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2025: 1.
- [171] WANG H T, SHI X Y, QIN Y, et al. Effect of temperature on characteristics of surface partial discharge induced by metal particles in GIS[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2025: 1.
- [172] SHI T Y, ZHANG Z Y, LI L, et al. Movement behavior and discharge characteristics of submillimeter metal particles under AC voltages superimposed mechanical vibration[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024: 1.
- [173] 全殿杰, 赵秋琳, 曹人杰, 等. C₄F₇N/CO₂/O₂ 混合气体局部放电起始电压的试验研究[J]. *高电压技术*, 2023, 49(3): 1007-1014.
- TONG Dianjie, ZHAO Qiulin, CAO Renjie, et al. Experimental study on partial discharge initial voltage of C₄F₇N/CO₂/O₂ mixed gas[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(3): 1007-1014.
- [174] LIN Lin, CHEN Q G, WANG X Y, et al. Decomposition mechanism of environmentally friendly insulating medium HFO1234zeE/N₂ gas mixture under partial discharge[J]. *High Voltage*, 2022, 7(6): 1069-1079.
- [175] WANG Y W, ZHANG L, AYUBI B I, et al. Experimental methods for power frequency high frequency equivalency based on dielectric strength and partial discharge characteristics of insulation materials[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2025: 1.
- [176] ZHAO J N, ZHANG W Q, JIANG J. Effect of superimposed harmonics on partial discharge characteristics of insulation in power electronic transformers[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium (PEAS)*. Guangzhou, China: IEEE, 2023, 749-754.
- [177] DRECHSEL J, BARTH H, REBENKLAU L. Partial discharge behaviour analysis of silicon nitride ceramics[C]//*Proceedings of the 2023 46th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. Timisoara, Romania: IEEE, 2023, 1-6.
- [178] 尚星宇, 庞 磊, 卜钦浩, 等. 温度对方波电压下环氧树脂局部放电及击穿特性的影响[J]. *高电压技术*, 2023, 49(8): 3286-3295.
- SHANG Xingyu, PANG Lei, BU Qin hao, et al. Effect of temperature on partial discharge and breakdown characteristics of epoxy resin under square wave voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(8): 3286-3295.
- [179] AKRAM S, WANG P, MENG P F, et al. Pulse width modulation voltage source deadtime effect on partial discharge and lifetime of inverter-fed motor insulation[J]. *High Voltage*, 2022, 7(6): 1185-1193.
- [180] RAMOS R. Film capacitors in power applications: choices and particular characteristics needed[J]. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2018, 5(1): 45-50.
- [181] XIAO M, ZHANG L T, DU X D, et al. Study on partial discharge characteristics of metallized film following self-healing in power capacitors[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2024, 34(8): 8801104.
- [182] BORGHEI M, GHASSEMI M. Insulation materials and systems for more- and all-electric aircraft: a review identifying challenges and future research needs[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(3): 1930-1953.
- [183] XING Y Q, CHEN Y Y, YANG Y, et al. Fluorinated PEEK and XLPE as promising insulation candidates for the propulsion system of all-electric aircraft[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022, 29(2): 362-369.
- [184] 江 军, 李 治, 张本栋, 等. 航空线缆的绝缘性能与检测综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(10): 4005-4021.
- JIANG Jun, LI Zhi, ZHANG Bendong, et al. A review on insulation performance and detection for aeronautical cables[J]. *Proceedings of*

the CSEE, 2023, 43(10): 4005-40221.

- [185] 程驰宙, 王 鹏, 黄文冬, 等. 重复脉冲下多电飞机驱动电机相间绝缘测试改进方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 5115-5124.
CHENG Chizhou, WANG Peng, HUANG Wendong, et al. Insulation test improved method of more-electric aircraft drive motor hairpin winding motor under repeated pulse[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 5115-5124.
- [186] 孙 浩, 王亚林, 范 路, 等. 低气压方波电压下多电飞机电机绝缘局部放电研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 565-576.
SUN Hao, WANG Yalin, FAN Lu, et al. Research on partial discharge

of more electric aircraft propulsion motor insulation under low pressure and square wave voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 565-576.

- [187] GUO R C, DONG J N, WOLLESWINKEL R E, et al. Electrical architecture of 90-seater electric aircraft: a cable perspective[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(2): 6854-6865.
- [188] ZHANG H C, ZHOU H Y, DA SILVA F F, et al. Feasibility analysis and design of gas-electricity integrated transmission system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2025, 11(2): 595-606.



李军浩(通信作者)

1980—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事电气设备试验技术及状态感知技术研究
E-mail: junhaoli@mail.xjtu.edu.cn

LI Junhao
Ph.D., Professor
Corresponding author



韩旭涛

1991—, 男, 博士, 副教授
主要从事电气设备局部放电检测和诊断技术研究
E-mail: xutaohan@xjtu.edu.cn

HAN Xutao
Ph.D.
Associate professor



王昊天

1999—, 男, 博士生
主要从事气体绝缘设备状态检测及诊断技术研究
E-mail: 617358096@qq.com

WANG Haotian
Ph.D. candidate



周 阳

1994—, 男, 博士生
主要从事电气设备局部放电检测方面的研究工作
E-mail: zhouyangtjxa@163.com

ZHOU Yang
Ph.D. candidate



陈 欢

1999—, 男, 博士生
主要从事气体绝缘设备状态在线监测及诊断技术的研究
E-mail: chenhuan0616@stu.xjtu.edu.cn

CHEN Huan
Ph.D. candidate



郭若琛

1994—, 男, 博士, Hitachi Energy 研究中心研究科学家
主要从事高压设备绝缘设计及复杂工况下绝缘系统失效机理的研究
E-mail: ruochen.guo@hitachienergy.com

GUO Ruochen
Ph.D.



司文荣

1981—, 男, 博士, 高工
主要从事高压试验技术、电力设备状态智能感知与诊断技术方面的研究
E-mail: siwenrong@126.com

SI Wenrong
Ph.D.
Senior engineer

收稿日期 2025-05-17 修回日期 2025-06-08 编辑 卫李静