第 52 卷 第 2 期：572-581 高电压技术 Vol.52, No.2: 572-581
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250403

高灵敏度 PMN-PT 压电薄膜传感器的研制与发电机定子绕组局放监测

任宗强[1]，赵一明[1]，张云飞[1]，黄　泽[2]，吴　明[1]，高景晖[1]，钟力生[1]
（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. 东方电气集团东方电机有限公司，德阳 618000）

摘　要：为了监测发电机定子绕组槽口附近的局部放电超声信号，提升绝缘体系状态评估能力，开发了一种可布置在绕组端部槽口的植入式高灵敏度 PMN-PT 压电薄膜传感器，并验证了该传感器的有效性。首先，采用溶胶凝胶法制备 PMN-PT 薄膜，并结合电极结构设计和声阻抗匹配材料优化了传感器性能。其次，通过针尖脉冲放电实验和聚乙烯板声发射断铅实验验证了该传感器具有较强的抗干扰能力、高灵敏度和良好的频响特性。最后，在真型定子绕组线棒上制造人工缺陷验证了 PMN-PT 压电薄膜传感器在放电监测上的有效性。实验结果表明，针对诱发的视在放电量为 3 746 pC 的局部放电事件，设计的 PMN-PT 传感器可检测到的最大输出电压为 0.4 V，其灵敏度相比传统陶瓷传感器提高了约 1.74 倍，频率响应范围扩展至 400 kHz。该文研究为发电机在线监测技术提供了一种创新的解决方案，不仅显著提升了绝缘状态的实时监测能力，也为电力设备的安全运行奠定了基础，具有重要的应用前景。

关键词：发电机定子绕组；局部放电；超声检测；PMN-PT 压电薄膜传感器；在线监测

Development of High-sensitivity PMN-PT Piezoelectric Film Sensor and Partial Discharge Monitoring of Generator Stator Windings

REN Zongqiang[1], ZHAO Yiming[1], ZHANG Yunfei[1], HUANG Ze[2], WU Ming[1], GAO Jinghui[1], ZHONG Lisheng[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: To monitor partial discharge ultrasonic signals near the stator winding slot of a generator and improve the insulation system state assessment capability, an implantable and highly sensitive PMN-PT piezoelectric thin-film sensor is developed for deployment at the end-winding slot. The effectiveness of this sensor is also validated. First, the PMN-PT thin film is fabricated using the sol-gel method, and the sensor performance is optimized through electrode structure design and acoustic impedance matching materials. Second, the sensor's strong anti-interference capability, high sensitivity, and excellent frequency response characteristics are validated through needle-tip-pulse discharge experiment and acoustic emission lead-breakage experiment on the polyethylene plate. Finally, an artificial defect is created on the prototype stator winding bar to verify the effectiveness of PMN-PT piezoelectric thin-film sensor in discharge monitoring. The experimental results show that, for the partial discharge event with an apparent discharge of 3 746 pC, the designed PMN-PT sensor can detect a maximum output voltage of 0.4 V, its sensitivity is about 1.74 times higher than that of the traditional ceramic sensor, and the frequency response range is extended to 400 kHz. This study provides an innovative solution for the online monitoring technology of generators, which not only significantly improves the real-time monitoring capability of insulation status, but also lays the foundation for the safe operation of power equipment, demonstrating important application prospects.

Key words: generator stator winding; partial discharge; ultrasonic testing; PMN-PT piezoelectric film sensor; online monitoring

基金资助项目：国家自然科学基金青年基金(52407026)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52407026).

0 引言

发电机定子绕组的绝缘故障是影响其长期稳定运行的主要因素之一[1]。随着现代电力系统对发电机的运行要求日益提高，如何确保发电机定子绕组的绝缘状态在整个使用寿命期间保持良好，成为一个至关重要的课题[2-3]。由于绕组在长期运行过程中承受高电压、高温及电磁振动等复杂工况，其内部固有绝缘缺陷可能引发局部放电，导致绝缘材料在局部区域产生微小放电现象[4-5]。此外，绕组端部等电场畸变严重的部位更容易积累电应力，加速绝缘老化和性能退化。长期作用下，绝缘性能的劣化会进一步增强局部放电强度，形成正反馈效应，最终引发绝缘击穿[6]，导致发电机系统性故障，甚至引发严重的电网事故。

为有效预防发电机绝缘事故的发生，传统的离线检测方法通常依赖于对发电机进行停机检查，通过测量绝缘电阻、介质损耗因子等参数来评估其绝缘状态[7-9]。尽管这些方法能够提供一定的参考，但其不能实时监测设备的运行状态，且可能错过故障发生的最佳时机。因此，随着技术的发展，在线监测技术逐渐成为一种重要的诊断手段[10-12]。相比于传统的离线检测方法，在线监测不仅能够在发电机运行状态下实时评估绝缘状态，还能在故障早期阶段识别潜在风险，为设备维护和故障预警提供关键数据支撑，从而有效提升发电机的安全性和使用寿命。因此，为了确保发电机及电力系统的长期可靠运行，开发高效、精准的在线局部放电检测技术至关重要。

目前，发电机局部放电(partial discharge, PD)在线监测主要依赖于高频和超高频等电学检测方法[13-18]，以识别绝缘缺陷及早期故障。然而，由于发电机内部复杂的电磁环境，这些电学测量方法在抗干扰能力方面存在显著挑战，极易受到外部噪声干扰，导致故障误判和漏检等问题[19-20]。近年来，为提高监测系统的准确性，人工神经网络、支持向量机等机器学习算法被引入局部放电信号的分类与故障诊断[21-23]，以期通过数据驱动方法提升识别精度。然而，由于局部放电信号受外部环境因素影响较大，且不同工况下信号模式存在较强的非线性和随机性，使得基于传统电学检测的机器学习方法难以实现高精度故障分类。

PD 诱发的超声波信号由于其机械波特性，能够避免电磁干扰的影响，为局部放电在线监测提供一种更可靠的手段。超声波检测可通过压电传感器或光纤传感器实现，其中，光纤传感器基于干涉效应或光栅特性，具有高灵敏度、小型化及耐高温等优势，在高压电气设备状态监测中表现出良好的应用前景[24]。文献[25]研究了一种基于光纤布拉格光栅传感器的在线监测技术，用于检测电机定子绕组中的初始短路故障。通过实时热特征监测，能够识别因故障引起的局部热激励，实现了电机定子绕组早期故障诊断。然而，光纤超声波系统的安装和维护较复杂，且成本较高，限制了其在大规模工业应用中的推广[26]。

压电陶瓷超声波传感器的性能虽然低于光纤传感器，但仍具有高灵敏度、宽频带响应和良好的稳定性，也可有效检测发电机定子绕组局部放电产生的超声信号，并具备较强的环境适应性，能够在复杂电磁环境下提供可靠的局部放电监测数据[27]。文献[28]通过使用压电传感器、主成分分析和小波变换对三相交流电动机中的瞬态绕组间短路问题进行诊断，利用声发射技术进行故障检测、相位识别和幅值分类，有效提高传统声发射系统的功能，准确识别了受影响的相位，并对故障演变进行综合分析。然而，传统的压电陶瓷超声波传感器因体积较大，通常仅能安装于发电机外壳的外部，而局部放电产生的超声信号在传播过程中受绝缘介质的频散效应、内部结构的多次反射及衰减影响[29]，使得信号在远距离传播后，其幅值显著降低、波形发生畸变，影响了传感器对局部放电源位置和放电强度的准确评估。

为提升局部放电监测的灵敏度和抗干扰能力并优化信号采集方式，本研究开发了一种可植入式高灵敏度 PMN-PT 压电薄膜超声波传感器。PMN-PT ($Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$)是一种铌镁酸铅-钛酸铅弛豫铁电体材料，具有优异的压电、电致伸缩和介电性能。与传统锆钛酸铅(PZT)压电材料相比，PMN-PT 材料具有约 2~4 倍的压电响应能力，能够实现更高灵敏度和更精确的机械能-电能转换。基于此材料，本研究在传感器设计中引入优化的电极结构和声阻抗匹配层，并结合电磁屏蔽技术，实现了高灵敏度、强抗干扰能力和小型化特性，能够精准获得发电机定子绕组局部放电相关的超声波信号，提高了检测信号的质量，增强了系统在复杂工况下的稳定性。研究结果表明，该传感器有助于实现对发电

机绝缘状态的精确评估，并提供早期故障预警，为提高电力设备的运行安全性与可靠性提供技术支持。

1 压电薄膜传感器的设计与制造

传感器的核心敏感元件为PMN-PT无机压电薄膜。为了使核心敏感元件呈现最佳的性能，本研究采用溶胶凝胶法[30]将 PMN-PT 材料沉积在 Pt/Si 衬底上进行制备。溶胶凝胶法不仅能够精确控制薄膜的成分和结构，还能确保薄膜的均匀性和致密性，从而提高其压电性能和稳定性。同时，为了使 PMN-PT 薄膜具有更高的压电响应和机械稳定性，薄膜的沉积厚度约为 1 μm。PMN-PT 薄膜的制备流程如图 1 所示。

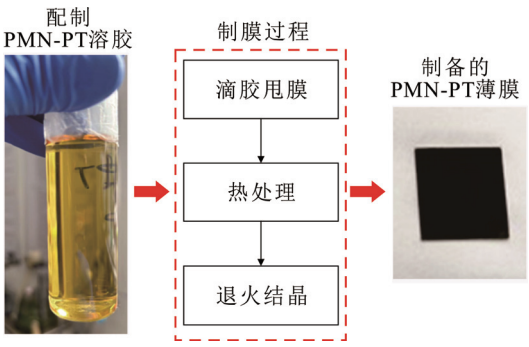


图 1 PMN-PT 压电薄膜的制备过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the preparation process of PMN-PT piezoelectric film

对于 PMN-PT 薄膜而言，为了能够更好地采集到超声波信号，电极类型和尺寸的选择至关重要。假设传播到PMN-PT薄膜中的超声波信号近似为均匀的压力波[31]，当超声波在薄膜中传播时，主要产生垂直于薄膜的应力，而产生的横向应力分量较弱，所以为了最大化利用超声波的垂直应力分量，设计了平行板电极结构，该结构下薄膜的声-电转换原理如图 2 所示。

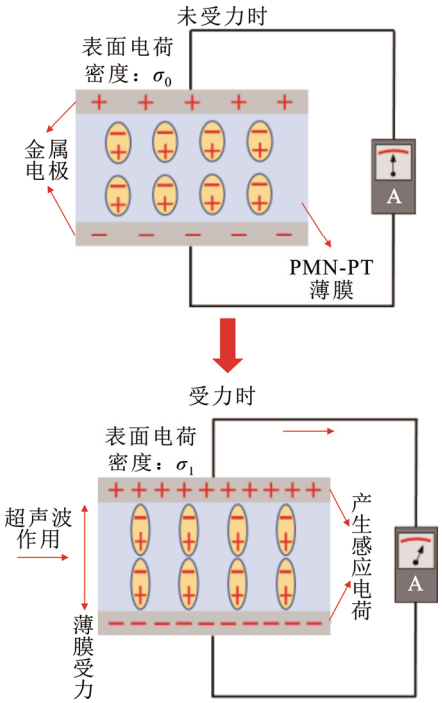


图 2 压电薄膜的声-电转换原理图

Fig.2 Schematic diagram of acoustic-electric conversion of piezoelectric film

当薄膜受到超声波力的作用时，输出的电荷量 Q 为：

$$Q = d_{33}F_z S \tag{1}$$

式中：d_{33} 为压电系数；F_z 为超声波的垂直应力分量；S 为电极面积。

考虑到超声波传播的协同效应及最大化的电极面积，对顶电极的尺寸和形状进行设计。由于电力设备产生的超声波频率 f 主要在 20~300 kHz 范围内，电力设备材质的声速 c 在 2 000 m/s 以上，则波长 λ 为：

$$\lambda = \frac{c}{f} \geq \frac{2\ 000}{300\ 000} = 6.67\ \text{mm} \tag{2}$$

假设传播到顶电极的超声波近似为平面波，为使顶电极的旋转对称性与声压的径向分布匹配，避免电极的角部响应畸变并抑制信号中杂散成分，提升信噪比，本文选用圆形电极。同时为避免检测到的信号间产生空间混叠，根据 Nyquist 采样定理，电极直径 D 应小于 $\lambda_{min}/2$，因此最终采用 3 mm 直径的圆形 Pt 顶电极，且敏感元件(含硅基底)整体大小约为 10 mm×10 mm×1 mm。

在设计完成传感器核心敏感元件之后，对 PMN-PT 薄膜进行了极化，使薄膜内的电偶极矩充分沿极化方向排列，从而表现出压电性。对 PMN-PT 薄膜进行结构设计，示意图如图 3 所示。使用聚酰亚胺(polyimide, PI)薄膜进行封装，表面覆盖一层薄的氧化铟锡(ITO)层进行电磁屏蔽；采用柔性印刷电路板(flexible printed circuit board, FPCB)固定 PMN-PT 薄膜，电路板与薄膜之间均匀涂抹 PXUAC 型声发射耦合剂以优化超声信号传输；将 PMN-PT 薄膜的电极连接并引出，并将薄膜顶部和底部电极分别与卡口螺母连接器(bayonet nut connector，BNC)信号电缆的核心导体和屏蔽层连接；最后，利用真空热压机将上述材料一体化粘合，制备得柔性压电薄膜传感器，如图 3 所示。

与传统的宽带陶瓷超声波传感器相比，这种超紧凑压电薄膜超声波传感器适合直接植入发电机定子绕组表面，允许在靠近声源的地方检测到局部放电的超声波信号。此功能提高了与发电机绝缘状态相关的评估准确性，为提高电力系统的可靠性和安全性提供了宝贵的工具。

2 压电薄膜传感器的性能分析

2.1 强电磁环境下传感器抗干扰性能分析

为提高抗干扰能力，陶瓷传感器通常采用金属外壳或多层电磁屏蔽结构，虽然能降低噪声，但增加了体积和重量，限制了其在轻量化、集成化应用中的适用性，尤其难以用于电机绕组的在线局放检测。相比之下，PMN-PT 压电薄膜传感器采用低介电常数的 PI 薄膜封装抑制容性耦合，并结合多层金属屏蔽层形成法拉第笼效应，阻断外部电磁干扰。其薄膜化结构降低了寄生电容，同时辅以高电阻率压电材料和柔性电路板设计，有效减少了漏电流并阻断电磁波传导路径。

针尖脉冲放电实验作为一种强电磁及机械冲击激励方法，放电瞬间会同时产生强烈的声信号和电磁信号。声信号可用于验证超声传感器的检测能力，而电磁信号会引起传感器信号畸变、背景噪声增强及系统可靠性劣化等负面效应，可用于验证超声传感器的抗电磁干扰能力。

基于该测试方法搭建了图 4 所示实验平台，验证 PMN-PT 压电薄膜传感器的电磁屏蔽效果。该平台的实验装置主要包括：宽频陶瓷传感器(REF-VL No.0764，下文简称为陶瓷传感器)、PVDF 传感器(Poly)、PMN-PT 压电薄膜传感器(下文简称为 PMN-PT 传感器)、J1206 型感应圈、高精度数据采集卡(PicoScope 4 000 A 系列，采样率 1 GHz，带宽 200 MHz，后文简称 Pico 数采卡)、测试平台和显示器等。

在实验过程中，首先向感应线圈施加电脉冲以触发瞬态放电，激发瞬态声信号和局部高频电磁信号，并实时测量 3 种传感器的输出电压波形，如图 5 所示。实验结果表明，在脉冲针尖放电产生的强电磁干扰环境下，陶瓷传感器和 PMN-PT 传感器均能正常检测到声信号，其输出波形完整且噪声幅值较低，表明其对外部电磁场的敏感性较低，具有优异的抗电磁干扰能力。相比之下，聚偏氟乙烯(POLYVINYLIDENE FLUORIDE, PVDF)传感器表现出显著的电磁耦合效应，输出信号受干扰严重，伴随高幅值噪声和异常脉冲响应，显示出较高的电磁场敏感性和较差的抗干扰性能。综合表明，PMN-PT 传感器在强电磁环境下展现出优异的电磁屏蔽特性，适用于高稳定性、强抗干扰要求的传感

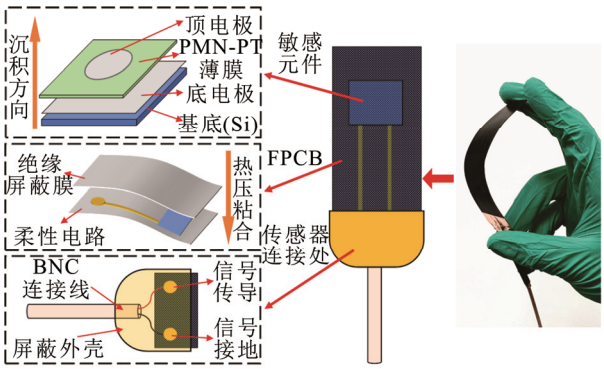


图 3 PMN-PT 柔性压电薄膜传感器及结构示意图

Fig.3 PMN-PT flexible piezoelectric film sensor and structural diagram

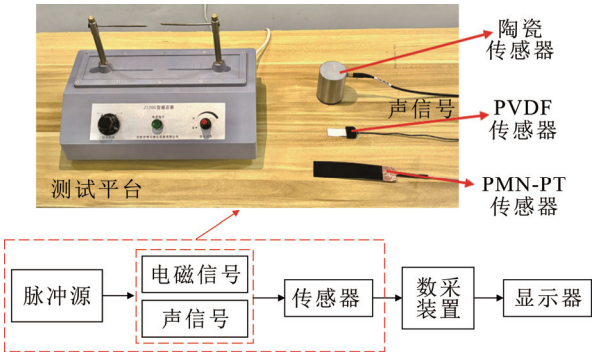


图 4 针尖脉冲放电实验装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the needle-tip-pulse discharge experimental device

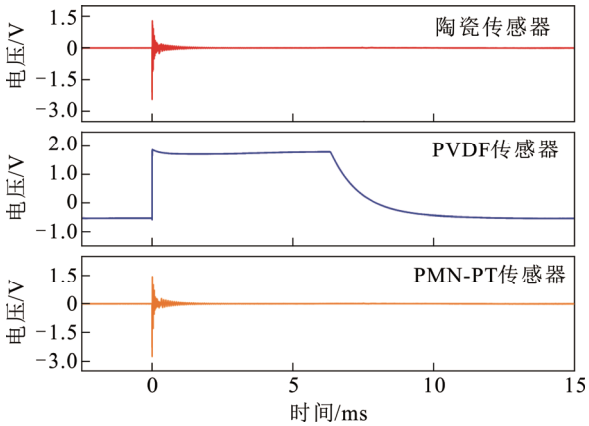


图 5 针尖脉冲放电实验结果图

Fig.5 Experimental results of needle-tip-pulse discharge

应用，尤其在电力设备等复杂环境的现场检测中具有显著优势。

2.2 超声环境下传感器灵敏度性能研究

声发射断铅实验作为一种宽频机械信号激励方法，被广泛应用于超声波传感器的灵敏度标定研究。传统方法通常采用钢锭作为断铅信号的传导介质对陶瓷传感器进行灵敏度标定。然而，该方法存在显著的声阻抗失配问题。钢锭的声阻抗 Z_{steel} (约 40 MRayl)远高于发电机定子绕组中云母/树脂复合材料的声阻抗(约 3 MRayl)，尤其对于设计的压电薄膜传感器(PI 薄膜封装，整体声阻抗 Z_{sensor} 约为 2 MRayl)，界面声阻抗差异($Z_{steel}/Z_{sensor}\approx20$)将导致高达 90%的声能反射损失，致使钢锭介质下的标定结果难以准确反映传感器在真实工况下的灵敏度特性。为消除声阻抗失配引入的系统误差，本研究采用声阻抗匹配介质聚乙烯板($Z_{PE}\approx2$ MRayl)替代钢锭，其与云母/树脂复合材料的声阻抗比仅为 0.67，显著降低了界面反射损耗，提高了标定结果的准确性和工程适用性。

基于此，进行了图 6 所示断铅实验，以验证 PMN-PT 传感器的灵敏度等性能。该实验的装置主要包括：上述 3 种传感器、电荷放大器(Vkinging VK100H-8，增益系数为 0.1 V/pC，后续实验中的超声传感器均默认采用该放大器进行信号放大)、LC 无源高通滤波器(频率大于 50 Hz，功率小于 100 mW)、Pico 数采卡、0.5 mm 自动铅笔、聚乙烯板和显示器等。

实验过程中，通过硅脂将 3 种传感器并列粘附于聚乙烯板表面，在距离传感器约 10 cm 的位置进行断铅(铅笔伸长量约 2.5 mm，与聚乙烯板平面呈 30°夹角)，重复 20 次实验。断铅实验测得输出电压的时域和归一化频域波形(归一化方法：对时域信号进行傅里叶变换得到频域幅值，并以最大幅值为基准归一化，使峰值为 1，即归一化幅值=频域幅值/最大频域幅值)，以及平均峰峰值和信噪比(SNR=20lg(平均信号峰-峰值/平均背景噪声信号峰-峰值))如图 7 所示。

根据图 7(a)所示的实时断铅信号可知，检测到的信号波形呈现明显的振荡衰减状态，并且信号均在 10 ms 内基本衰减消失，表明聚乙烯板对超声信号的传播具有显著的阻尼效应，其高效的声波能量

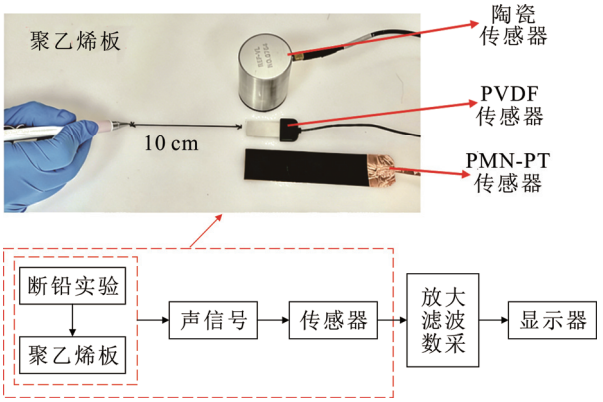


图 6 声发射断铅实验示意图

Fig.6 Schematic diagram of acoustic emission lead-breakage experiment

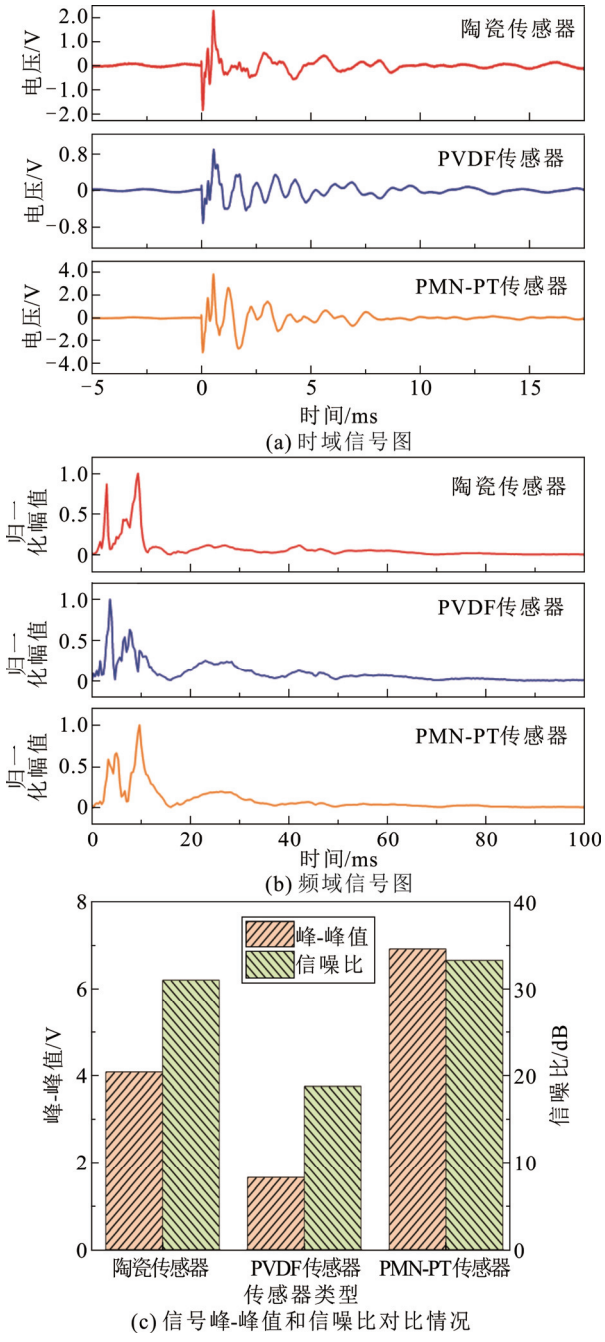


图 7 3 种传感器的声发射断铅实验结果对比

Fig.7 Comparison of acoustic emission lead breaking test results of three sensors

吸收特性导致信号在短时间内完全衰减。根据图 7(b)显示频域信号可知，断铅信号经过 10 cm 的聚乙烯板传播后，传感器接收到的信号频率成分主要集中在 50 kHz 以下，而 100 kHz 以上的高频成分已显著衰减。这是因为：聚乙烯本身是一种典型的黏弹性高分子材料，其声波衰减随频率呈非线性增长(衰减量$\propto\beta f^n L$，其中 β 为衰减系数，f 为声波频率，n 为无量纲的频率相关指数，L 为声波在介质中的传播路径长度)，高频超声(>100 kHz)在传播过程中因分子链弛豫和频散效应被显著耗散，信号湮没于背景噪声，而低频信号(<50 kHz)则相对保留。根据图 7(c)结果可知，PMN-PT 传感器在检测聚乙烯(PE)板断铅信号时的电压峰峰值达到约 6.92 V，背景噪声峰峰值约为 150 mV，信噪比(SNR)为 33.28 dB，其性能显著优越于其他传感器。相比之下，陶瓷传感器的电压峰峰值为 4.08 V，背景噪声峰峰值约为 115 mV，信噪比为 31 dB，虽然信噪比较接近 PMN-PT 传感器，但其灵敏度仅是其 0.59 倍。PVDF 传感器性能最弱，电压峰峰值仅为 1.65 V，背景噪声峰峰值约 191 mV，信噪比为 18.74 dB。综合表明，PMN-PT 传感器在灵敏度、信号强度及信噪比方面的综合性能优于陶瓷和 PVDF 传感器，适用于高精度超声检测应用。

3 利用 PMN-PT 压电薄膜传感器检测定子线棒局部放电

3.1 HFCT 传感器对视在放电量的标定实验研究

利用 HFCT 传感器可有效提取局部放电引起的瞬态电流信号，进而确定视在局放量和检测信号间的关系。基于此，进行了图 8 所示校准实验，以确定 HFCT 传感器对放电量的检测灵敏度。该实验装置主要包括：信号发生器、BYPD-7 000 多功能局部放电检测分析仪(下文简称局放仪)、HFCT 传感器、电压放大器(放大系数为 40 dB)、100 pF 标准电容、上位机、被测线棒等。

实验过程中，首先由信号发生器产生不同幅值的脉冲电压信号，通过接入 100 pF 标准无损电容，以模拟产生定量的视在放电量。其次，将上述相同的放电量注入到被试品两端，并将测量系统的灵敏度调节到合适状态，从而进行了 HFCT 传感器测量放电量的校准[32]，最终通过局放仪的采集分析软件获取该传感器对于被测线棒的检测灵敏度。

根据图 9 可知，HFCT 传感器标定的视在放电量与输出电压峰-峰值间呈线性关系，每 100 pC 视在放电量下的输出电压信号约为 264 mV，即 HFCT 传感器对局部放电视在放电量的检测灵敏度为 2.64 mV/pC。

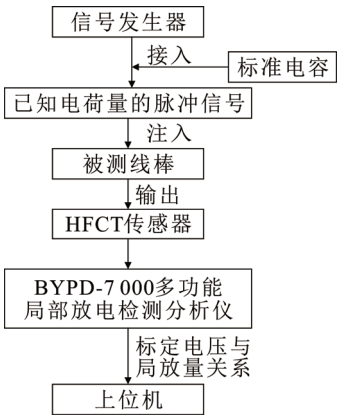


图 8 HFCT 传感器局放量检测灵敏度校准过程示意图

Fig.8 HFCT sensor partial discharge detection sensitivity calibration experiment

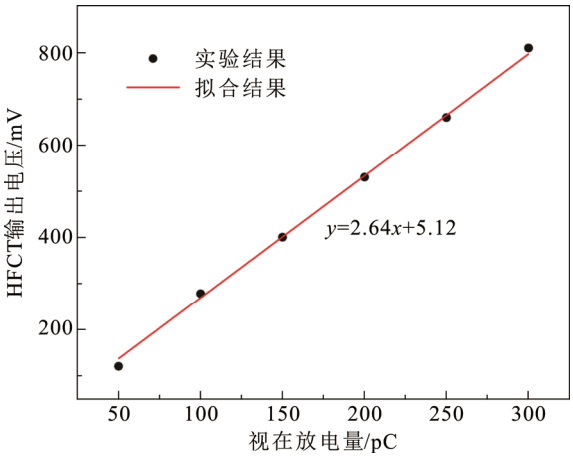


图 9 HFCT 输出电压与视在放电量的对应关系

Fig.9 Corresponding relationship between HFCT output voltage and apparent discharge amount

3.2 定子线棒人工缺陷局部放电的检测实验研究

利用超声传感器可实时获取局部放电激发的高频超声波，实现定子绕组绝缘状态的非侵入式检测。因此，为了证明 PMN-PT 压电薄膜传感器在检测发电机定子绕组局部放电超声波信号方面的优势，建立了 1 个全尺寸实验平台，实验装置主要包括：陶瓷传感器、PMN-PT 传感器、HFCT 传感器、工频信号探头、高压源、单根发电机定子线棒、均压环、集成数采装置等。

首先，为验证 PMN-PT 传感器检测定子线棒放电信号的有效性，将其粘附于发电机定子线棒红瓦

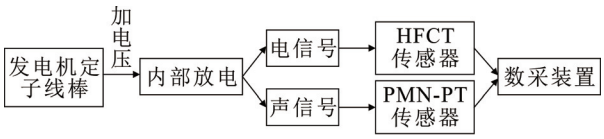
漆与低阻漆之间的界面过渡区域，同时将 HFCT 传感器耦合安装于接地回路。随后，对单根定子线棒施加 5 kV、50 Hz 的交流电压，以激发其内部放电现象，并同步采集加压前后 2 个传感器的输出响应，如图 10 所示。

根据图 10 可知，在未施加电压条件下，HFCT 传感器受环境电磁干扰影响明显，输出波形中存在较强背景噪声。而 PMN-PT 传感器在相同条件下表现出良好的噪声抑制能力。当电机线棒施加 5 kV 激励电压后，HFCT 传感器输出的峰峰值信号约为 1.17 V。依据其标定灵敏度(2.64 mV/pC)，计算所得视在放电量约 443 pC。在此放电强度下，PMN-PT 传感器同步检测到峰峰值约 63.8 mV 的响应信号，显著超出噪声水平，具有清晰的识别特征。该实验结果表明，PMN-PT 传感器具备明确的局部放电信号响应能力，其检测灵敏度可满足电机线棒早期绝缘状态诊断工程应用需求。

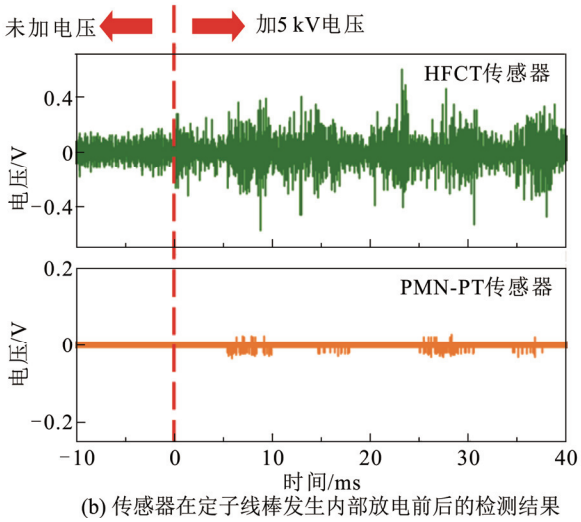
在发电机定子绕组中，低阻层交界处电位分布不均，长期受局部场强作用易腐蚀并产生局部放电[33]。为模拟该缺陷，在图 11 所示区域制造 50 mm×10 mm×0.5 mm 的人工缺陷，并在铜导体上施加 11 kV、50 Hz 交流电压以激发局部放电。

实验中，超声传感器依次粘附于人工缺陷的右侧，HFCT 传感器安装于地线处，工频信号探头(衰减系数为 1 000 倍)用于采集高压源信号，并通过集成数采装置实时获取检测信号，如图 12 所示。

根据图 12(a)检测到的定子线棒局放信号可知，陶瓷传感器和 PMN-PT 传感器的信号基线稳定在 ±20 mV 以内，表明其屏蔽设计能有效隔离实验环境中的电磁干扰。结合时域信号分析，PMN-PT 传感器的峰峰值约为 0.4 V，相较于陶瓷传感器的 0.23 V 提升了约 1.74 倍，具有更高的灵敏度。这主要归因于 PMN-PT 传感器与电机定子线棒在声阻抗上匹配更高，使得超声波的能量传输效率更高，减少了界面反射损耗，提高了信号的检测能力。陶瓷传感器和 PMN-PT 传感器检测到的超声信号和工频信号均表现出周期性变化，基本对应工频信号的第一和第三象限，但两者在超声信号区域内存在约 180°的相位差。施加正弦高压源时，电压峰值使线棒内部电场增强，更容易产生局部放电并生成强超声波信号，因此超声信号与工频信号呈周期性变化。在电压升高至正向峰值的过程中，放电通道稳定，压力波主要沿垂直方向传播；而在降低至负向峰值的过程



(a) 定子线棒放电检测过程示意图



(b) 传感器在定子线棒发生内部放电前后的检测结果

图 10 定子线棒内部放电实验及传感器检测结果图

Fig.10 Stator bar internal discharge experiment and sensor detection results

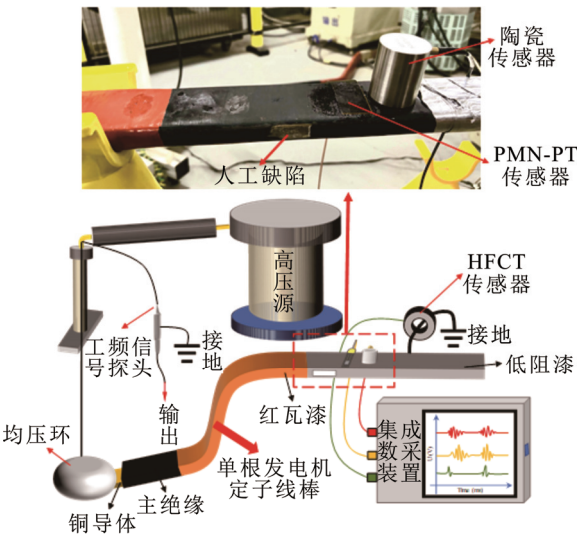
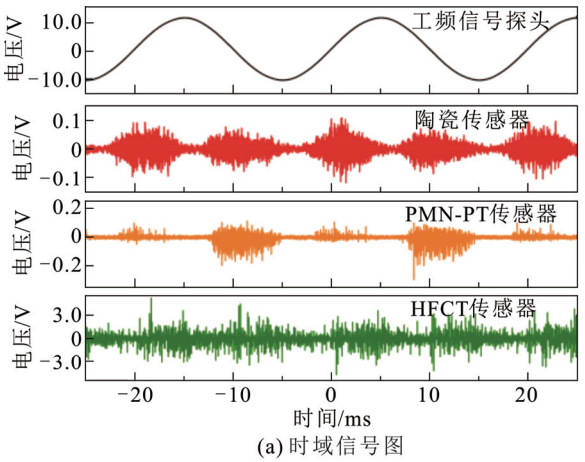


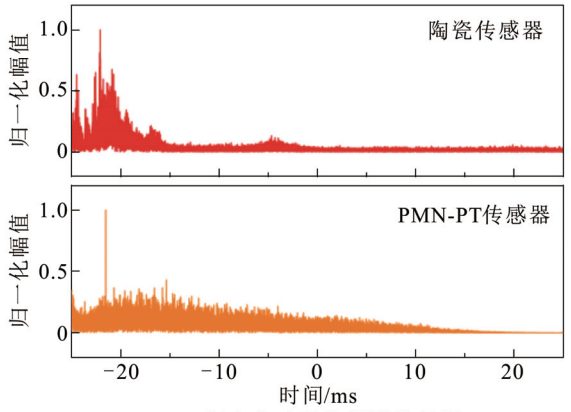
图 11 含缺陷的发电机定子线棒局部放电实验装置

Fig.11 Partial discharge experimental device for a single generator stator bar with the defect

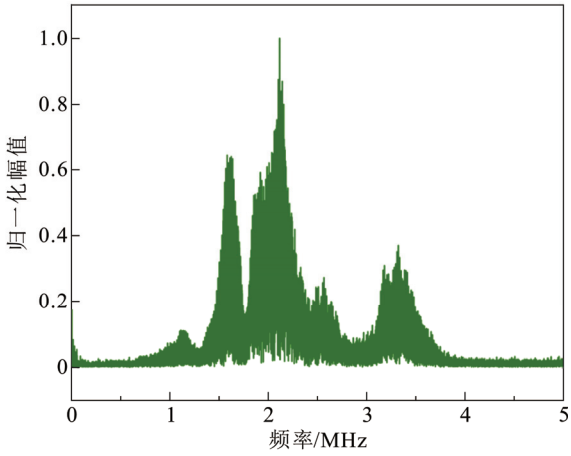
中，局部放电倾向于沿缺陷边缘或表面放电，更易激发剪切波。此外，由于陶瓷传感器与 PMN-PT 传感器的极化方式、结构和封装设计不同，导致两者对声波的响应强度不同，产生约 180°的相位差。根据图 12(b)频域信号可知，局部放电超声信号的频率集中于 400 kHz 以内，而陶瓷传感器难以完整反映超声信号的频率特征。



(a) 时域信号图



(b) 超声传感器的频域信号图



(c) HFCT传感器的频域信号图

图 12　定子线棒人工缺陷局部放电的实验结果图

Fig.12　Experimental results of partial discharge caused by the artificial defect in the stator bar

根据图 12 可知，HFCT 传感器能够检测到定子线棒人工缺陷产生的局部放电，其信号频域主要集中在 1~4 MHz 范围内。根据其监测到的局部放电峰-峰值 9.89 V 以及对局部放电视在放电量的灵敏度 2.64 mV/pC，可推算该实验产生的局放量大约为 3 746 pC。值得注意的是，由于超声信号在固体介质传播的过程中会迅速衰减，因此，超声传感器对局部放电监测的灵敏度并不能用单位放电量产生的电压这一概念来衡量。

综合表明，这种可植入的 PMN-PT 传感器在信号灵敏度和频域响应等方面均表现出明显优势，并且能够在复杂的电磁环境下实现稳定的在线监测，减少发电机定子绕组故障误判的可能性。

4　结论

本文研发了一种可植入的高灵敏度 PMN-PT 压电薄膜超声传感器，实现了对发电机定子绕组局部放电(PD)超声信号的监测，得到以下结论：

1）设计了一种基于 PMN-PT 材料的新型压电薄膜超声传感器，采用平行板电极结构、圆形面积设计和柔性化封装工艺，显著提高了对超声信号的捕获能力。

2）通过针尖脉冲放电实验验证可知，相较于陶瓷和 PVDF 传感器，开发的 PMN-PT 压电薄膜传感器具有较强的抗电磁干扰能力；通过聚乙烯板断铅实验验证可知，开发的 PMN-PT 传感器得益于更合理的声阻抗匹配，具有更高的声波能量传输效率和信号采集灵敏度，其灵敏度分别为陶瓷传感器和 PVDF 传感器的 1.7 倍和 4.2 倍。

3）在单根发电机定子线棒上制造人工缺陷诱发视在放电量为 3 746 pC 的局放事件，设计的 PMN-PT 传感器可以有效获取局部放电激发的高频声波信号，响应频率在 0~400 kHz 范围，且监测效果比传统宽频陶瓷传感器更好。

本文的研究不仅为发电机定子绕组绝缘状态的在线监测技术提供了一种新颖的解决方案，也为电力设备的安全运行奠定了基础。

参考文献　References

[1] KIM J, SHIN S, BATTULGA B, et al. Frequency response analysis for quality assurance testing of hairpin stator winding insulation for electric vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2025, 40(1): 690-693.

[2] ZHANG H J, ZHANG B W, CAO G W, et al. Fatigue propagation characteristics of insulation crack failure in stator end winding for large traction motor based on magnetic-thermal-mechanical coupling model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(4): 2111-2119.

[3] ZHENG D Y, LU G Y, ZHANG P J. A noninvasive interturn insulation condition monitoring method based on the common-mode impedance spectrum of inverter-fed machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(5): 4786-4795.

[4] 唐艳霞，刘学忠，王景娜，等. 重复脉冲电压下变频牵引电机绕组绝缘的电树枝特性[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2625-2633.

TANG Yanxia, LIU Xuezhong, WANG Jingna, et al. Electrical tree characteristics in winding insulation for inverter-fed traction motor under repetitive impulse voltages[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2625-2633.

[5] 杨增杰，赵显峰，张学明，等. 基于局部放电的水轮发电机定子绕组层间间隙放电的检测与分析[J]. 绝缘材料，2024，57(1)：94-100.
YANG Zengjie, ZHAO Xianfeng, ZHANG Xueming, et al. Detection and analysis of interlayer gap discharge in hydrogenerator stator winding based on partial discharge[J]. Insulating Materials, 2024, 57(1): 94-100.

[6] 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]. 高电压技术，2025，51(7)：3225-3233.
YAN Yu, YAO Lulu, WU Ming, et al. Highly sensitive flexible PZT piezoelectric ultrasonic sensor for cable partial discharge ultrasonic detection[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(7): 3225-3233.

[7] 武玉才，王逸仙，徐乾杰，等. 基于励磁阶跃法的汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断[J]. 电机与控制学报，2017，21(9)：22-30.
WU Yucai, WANG Yixian, XU Qianjie, et al. Diagnosis of inter-turn short circuit fault in rotor winding of turbo generator using excitation step method[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(9): 22-30.

[8] SHAIKH M F, KIM H J, BYUN N, et al. A simple offline test for detecting rotor faults in wound field synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(4): 2980-2983.

[9] ZAMANI M, HAGHJOO F, SAMIMI M H, et al. A simple magnetic-flux-based method for localizing high-resistance stator ground faults in synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(5): 5253-5262.

[10] 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.

[11] TABARNIARAMI Z, GHODS M, FAIZ J, et al. Online diagnosis of short-circuit faults of permanent magnet synchronous generator by short-time analysis of the three phase amplitude-phase signal based on analytical modeling[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(4): 10029-10042.

[12] CHEN H, ZHANG N, GAO C X, et al. A novel online method for locating fault coil in direct-drive permanent magnet synchronous motor with inter-turn short-circuit fault using search coil array[J]. IET Electric Power Applications, 2023, 17(2): 232-244.

[13] ZANUSO G, KUMAR S L S, PERETTI L. Interturn fault detection in induction machines based on high-frequency injection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 10639-10647.

[14] HU R G, WANG J B, MILLS A R, et al. High-frequency voltage injection based stator interturn fault detection in permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 785-794.

[15] STONE G C, CHAN C, SEDDING H G. Relative ability of uhf antenna and vhf capacitor methods to detect partial discharge in turbine generator stator windings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3069-3078.

[16] 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.

[17] ZHOU Y X, CHEN B C, TIAN C H, et al. Parallel diode-clamped linear converter for withstand test and partial discharge measurement of electric equipment[J]. High Voltage, 2023, 8(1): 171-182.

[18] STOJCIC G, PASANBEGOVIC K, WOLBANK T M. Detecting faults in doubly fed induction generator by rotor side transient current measurement[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 3494-3502.

[19] 王栋悦，谷怀广，魏书荣，等. 基于机电信号融合的 DFIG 定子绕组匝间短路故障诊断[J]. 电力系统自动化，2020，44(9)：171-178.
WANG Dongyue, GU Huaiguang, WEI Shurong, et al. Diagnosis of inter-turn short-circuit fault in stator windings of DFIG based on mechanical and electrical signal fusion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 171-178.

[20] 李俊卿，康文强，沈亮印. 不平衡电压下基于负序电流法的双馈感应发电机定子绕组匝间短路故障仿真研究[J]. 电机与控制应用，2016，43(11)：80-85.
LI Junqing, KANG Wenqiang, SHEN Liangyin. Simulation research on stator winding inter turn short circuit fault of doubly fed induction generator based on negative sequence current method under unbalanced voltage[J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(11): 80-85.

[21] 王晓华. 基于机器学习的发电机定子绕组温度模型应用分析[J]. 能源工程，2022，42(5)：40-47.
WANG Xiaohua. Application analysis of generator stator winding temperature model based on machine learning[J]. Energy Engineering, 2022, 42(5): 40-47.

[22] 胡建林，张 翕，宋 展，等. 基于随机森林的发电机定子线棒局部放电图谱特征识别方法[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1272-1280.
HU Jianlin, ZHANG Xi, SONG Zhan, et al. Recognition method of partial discharge spectrum feature in generator stator bar based on random forest[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1272-1280.

[23] 朱永利，钱 涛. 基于强化学习的局部放电深度诊断模型的自动剪枝与轻量化部署[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5238-5247.
ZHU Yongli, QIAN Tao. Automatic pruning and lightweight deployment of reinforcement learning-based deep diagnostic model for partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5238-5247.

[24] 陈起超，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.

[25] MOHAMMED A, MELECIO J I, DJUROVIĆ S. STATOR winding fault thermal signature monitoring and analysis by in situ FBG sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 8082-8092.

[26] CHEN J, XU Q S, WANG K. Research and application of generator protection based on fiber optical current transformer[J]. IEEE Access, 2020, 8: 172405-172411.

[27] LI R H, LI H, HU B. Damage identification of large generator stator insulation based on PZT sensor systems and hybrid features of lamb waves[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2745.

[28] LUCAS G B, DE CASTRO B A, ARDILA-REY J A, et al. A novel approach applied to transient short-circuit diagnosis in TIMs by piezoelectric sensors, PCA, and wavelet transform[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(8): 8899-8908.

[29] 袁燕岭，高 岭，张占新，等. 电缆局放检测用柔性压电超声传感器的灵敏度优化[J]. 高电压技术，2025，51(2)：652-659.
YUAN Yanling, GAO Ling, ZHANG Zhanxin, et al. Sensitivity optimization of flexible piezoelectric ultrasonic sensor for cable partial discharge detection[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 652-659.

[30] YIN S J, LI H Y, QIAN W Q, et al. Non-contact intelligent sensor for

recognizing transparent and naked-eye indistinguishable materials based on ferroelectric $BiFeO_3$ thin films[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6(5): 055502.

[31] SUI Y Z, ALI ABDO A M, LIU L Y, et al. Ultrasonic propagation characteristics of partial discharge in transformer with complex structure[J]. AIP Advances, 2025, 15(3): 035104.

[32] 邱昌容，曹晓珑. 电气绝缘测试技术[M]. 3 版. 北京：机械工业出版社，2001：123-132.
QIU Changrong, CAO Xiaolong. Electrical insulation testing technology[M]. 3rd ed. Beijing, China: China Machine Press, 2001: 123-132.

[33] 孙永鑫，胡春秀. 大型电机线棒端部电场的有限元计算方法[J]. 黑龙江科技学院学报，2012，22(2)：182-186.
SUN Yongxin, HU Chunxiu. Finite element calculation of electric field of large generator stator end-winding[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2012, 22(2): 182-186.



任宗强
1997—，男，博士生
主要从事压电薄膜材料与智能传感技术研究工作
E-mail: renzongqiang@stu.xjtu.edu.cn

REN Zongqiang
Ph.D. candidate



高景晖
1984—，男，博士，教授，博导
主要从事电介质与电气绝缘技术方面研究
E-mail: jinghuigao@xjtu.edu.cn

GAO Jinghui
Ph.D., Professor



吴　明(通信作者)
1992—，男，博士，副教授，硕导
主要从事功能电介质与智能传感，高端电缆绝缘材料，高电压绝缘技术相关的研究工作
E-mail: wuming@xjtu.edu.cn

WU Ming
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2025-03-28　在线出版日期　2025-07-14　　编辑　卫李静