第 52 卷 第 7 期：3277-3286 高电压技术 Vol.52, No.7: 3277-3286
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241511

发电机定子线棒的局部放电光纤超声检测方法

胡建林，秦培宇，宋　展，刘怡杰，曾维毅，蒋兴良
（重庆大学雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站，重庆 400044）

摘　要：发电机定子绕组的局部放电检测有助于反映电机绝缘状况，保障发电机安全运行。传统的脉冲电流法在现场使用中极易受电磁干扰且无法反映定子绕组局部放电的位置，而光纤传感采用全绝缘结构，抗电磁干扰且容易内置，在局部放电检测中具有较高的应用潜力。因此，提出一种基于光纤传感的定子线棒局放检测方法，对传感单元进行了优化设计并测试相关性能，通过仿真和试验研究其对于线棒端部电场的影响。在此基础上，搭建发电机定子线棒局部放电检测试验平台，在不同缺陷的定子线棒上开展试验。结果表明：所设计的光纤超声传感系统对于定子线棒局部放电具有较好的检测效果，能够检测到 30 pC 的内部缺陷放电，对于 3 种不同表面缺陷引发的放电，其最低可测放电量为 20 pC，且均能在放电量 60 pC 以下时检测到有效信号，明显优于传统的压电传感器；不同缺陷类型超声信号的峰值频段具有一致性，但各频段分量具有明显差异。

关键词：定子线棒；局部放电；光纤超声传感；频谱分析；性能测试

Fiber Optic Ultrasonic Detection Method for Partial Discharge of Generator Stator Bars

HU Jianlin, QIN Peiyu, SONG Zhan, LIU Yijie, ZENG Weiyi, JIANG Xingliang
(Xuefeng Mountain Energy Equipment Safety National Observation and Research Station, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Partial discharge detection of generator stator winding helps to reflect the insulation condition of a motor and ensure the safe operation of a generator. The traditional pulse current method is susceptible to electromagnetic interference and cannot reflect the location of partial discharge in the stator winding in the field, while the fiber optic sensing adopts a fully insulated structure, which is resistant to electromagnetic interference and easy to be built-in, and has a high potential for application in partial discharge monitoring. Therefore, a detection method based on Michelson interference is proposed for stator bars, the sensing unit is optimized and tested, and its effect on the electric field at the end of the bars is investigated through simulation and experiment. On this basis, a test platform for partial discharge detection of generator stator bars is built, and tests are carried out on stator bars with different defects. The results show that the designed fiber-optic ultrasonic sensing system has a good detection effect on partial discharge at the stator bar end. The designed fiber optic ultrasonic sensing system has a good detection effect on the partial discharge of stator bars, and can detect the internal defect discharge of 30 pC. For discharges caused by three different surface defects, the lowest measurable discharge amount is 20 pC, and effective signals can be detected below a discharge amount of 60 pC, which is significantly better than traditional piezoelectric sensors. The peak frequency bands of ultrasonic signals of different defect types are consistent, but the components of each frequency band have obvious differences.

Key words: stator bar; partial discharge; fiber optic ultrasonic sensing; spectrum analysis; performance testing

0　引言

随着工业高速发展，用电量的持续攀升也使得发电机的额定容量与电压相应提高，对其绝缘等级和运行可靠性带来了更大的挑战[1]。发电机定子绕组在运行过程中长期受到电-热-机械应力联合作用，而其端部电场集中，是绝缘的薄弱环节，更易发生局部放电[2-3]。CIGRE 组织的研究显示，发电机绝缘故障中约 40%由定子绝缘劣化导致[4]，而局部放电加速了这一过程。因此，开展发电机定子的局部放电检测，实时监测绝缘状态变化趋势，可以及时发现异常，同时更为准确地评估绝缘状态，延长发电机的使用寿命。

目前，定子绕组绝缘在线监测手段仅有温度、振动和局部放电脉冲电流检测，而脉冲电流法在现场使用中极易受电磁干扰，可靠性低且不具备绝缘缺陷的定位能力。局部放电的产生伴随着声、光等物理现象[5]，而超声检测法即检测局部放电过程产

生的超声波[6]。传统的超声检测将压电陶瓷换能器(piezoelectric transducer，PZT)放置于设备外壳以接收声波，但大型发电机内部绕组结构复杂且体积庞大，超声信号传至外壳时衰减严重；而 PZT 本身带有金属部件，无法安全置于设备内部，且同样受强电磁干扰，传输距离有限[7]。近年来，光纤传感技术快速发展，相较于 PZT，其具有抗电磁干扰、布置方式灵活等优点[8]。

光纤声波检测技术在变压器、气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear，GIS)等设备中已经有了较多研究。光纤光栅型超声传感器在局部放电检测中表现出较高的灵敏度[9-10]，但其对温度变化极为敏感，很难满足电力设备的实际运行工况。基于不同结构的干涉型光纤超声传感系统受到研究人员的关注。Sanderson.E.U.Lima 提出了基于芯轴式传感臂的改进迈克尔逊干涉结构，将传感光纤绕制于聚碳酸酯塑料管并放置在变压器内壁上，实现了油中局部放电信号的有效检测，检测效果优于外部安装的 PZT 传感器[11]。Tongzhi Zhang 等人将单模光纤缠绕于直径为 3 cm、厚度为 2 cm 的硅橡胶圆柱体上制成传感单元，采用迈克尔逊干涉结构检测高压电缆附件局部放电，实现了高达 150 kHz 的高频响应[12]；Sagnac 光纤传感器系统在 20~130 kHz 范围内性能较好，Sen Qian 等人将环形干涉仪置于变压器油中对其绕组的局部放电进行检测，在低频范围内取得了较好的检测效果，但高频范围的灵敏度不如 PZT[13]；周宏扬等人采用 50 m 无芯轴光纤环对变压器油中的模型局部放电进行检测，证实其具有较高的峰值灵敏度[14]。此外，光纤法珀传感器也被用于电力设备的局部放电检测，但由于制作工艺的缘故，其在高场强中的应用可能受限制[15-18]。发电机定子线棒的绝缘结构特殊，其内部和表面均可能发生局部放电。光纤超声传感在发电机定子局部放电检测方面有较大应用潜力，但目前此方面的研究仍有待开展，同时也缺乏对线棒局部放电超声信号的进一步分析。

本文提出一种基于迈克尔逊干涉的发电机定子线棒局部放电超声检测方法，对其传感单元进行了优化设计并进行性能测试；通过仿真和试验分析了光纤单元对线棒端部电场的影响；开展不同绝缘缺陷定子线棒的局放检测试验并进行特征分析，为发电机定子绕组局部放电超声检测提供理论和实践依据。

1 光纤超声传感系统

1.1 迈克尔逊干涉基本原理

迈克尔逊光纤干涉仪的基本结构如图 1 所示：入射光经过耦合器后分别进入干涉仪的两臂；2 路光均在末端发生反射；反射光在耦合器处产生干涉并经耦合器传出。待测的超声信号将改变传感光纤中传输光的相位，从而导致干涉仪两臂中光信号的相位差发生变化，最终反映为干涉(反射)光强度的变化。

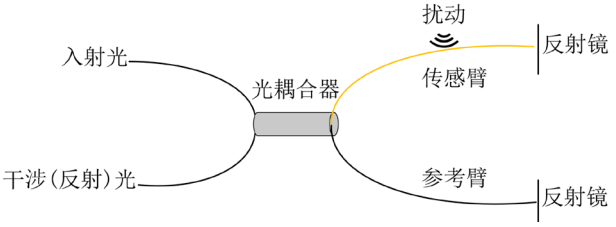


图 1 迈克尔逊干涉仪基本结构

Fig.1 Basic structure of Michelson interferometer

干涉光的相位[19]可表示为：

$$\varphi = \beta L_{\mathrm{D}} = \frac{2\pi n L_{\mathrm{D}}}{\lambda} \tag{1}$$

式中：β 为常数；n 为光纤折射率；L_{D} 为干涉仪臂长差；λ 为光的波长。

声波作用下光纤的相位变化量 $\Delta\varphi$为：

$$\Delta\varphi = \beta\Delta L + \Delta\beta L = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 \tag{2}$$

式中：$\Delta\varphi_1$ 由光纤长度变化 ΔL 造成；$\Delta\varphi_2$ 由传播常数变化 $\Delta\beta$ 造成。正常情况下，n 的变化和波长 λ 的波动极其微弱，则 $\Delta\varphi_2 << \Delta\varphi_1$，故 $\Delta\varphi_2$ 一般忽略不计。

1.2 光纤传感系统拓扑

基于上述原理，本文搭建的光纤传感系统如图 2 所示。光源为窄线宽 1 550 nm 激光器，光纤型号为 G657. A2，所有器件均为单模光纤器件。激光器发出的前向传输光首先通过光纤环形器进入耦合

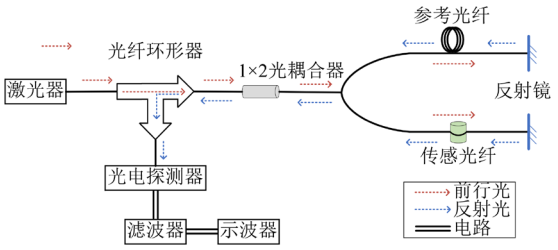


图 2 基于迈克尔逊干涉的光纤超声传感系统

Fig.2 Optical ultrasonic sensing system based on Michelson interferometer

器，被均分为功率相等的 2 束光；经干涉仪结构后，后向传输的干涉光返回至环形器；由于环形器的特殊结构，反射光不会进入激光器产生干扰，而全部进入光电探测器并完成光信号和电信号的转换，经滤波器后送入示波器显示。

2　芯轴式光纤传感单元

2.1　传感单元优化

考虑到线棒主绝缘为固体绝缘，直接将光纤环置于表面的超声耦合效果可能较差，因此本文选择芯轴式传感单元(高度和半径分别为 H 和 R，见图 3)以提高检测的灵敏度。

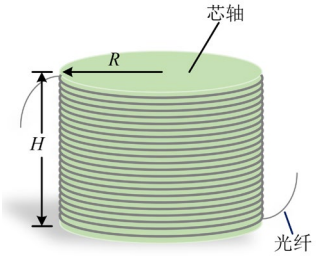


图 3　芯轴式传感单元

Fig.3　Core axis sensing unit

目前，对于发电机定子线棒局部放电所产生超声信号的频率范围仍有待研究。根据文献[20]的部分试验结果，发电机定子线棒局部放电所产生的超声信号能量集中在 20~100 kHz 之间，其特征峰主要分布于 40 kHz 和 90 kHz。然而 90 kHz 特征峰的出现可能是由于试验中采用的 PZT 谐振频率在 90 kHz 附近。此外，超声信号在介质中传播的衰减速度与频率正相关，因此本文传感系统的中心频率选择在 40 kHz 附近。

由式(1)可知，干涉光相位受传感光纤长度控制，主要受 2 部分影响[21-23]——声波直接作用导致的变化量 $\Delta\varphi_{11}$ 和芯轴径向形变间接作用导致的变化量 $\Delta\varphi_{12}$，在单位声压下分别为：

$$\begin{cases}\Delta\varphi_{11}=\dfrac{8\pi n\mu_{\mathrm{f}}Z_2Z_3L}{\lambda E_{\mathrm{f}}\left(Z_1+Z_2\right)\left(Z_2+Z_3\right)}\\ \Delta\varphi_{12}=D\dfrac{8\pi^2n\mu HR^2L}{\lambda(2\pi R^2EH-\mu E_{\mathrm{f}}S_{\mathrm{f}}L)}\end{cases}\tag{3}$$

式中：Z_1、Z_2、Z_3 分别为线棒表面、芯轴、光纤的声阻抗；E、μ 和 E_{f}、μ_{f} 分别为芯轴、光纤的弹性模量和泊松比；n 为光纤纤芯折射率；L 为传感光纤长度；不同信号频率 f 下的校正系数 D 表示为：

$$D=\frac{f_0^2}{\sqrt{\left(f^2-f_0^2\right)^2+\left(ff_0/Q\right)^2}}\tag{4}$$

式中：Q 为常数，取 1.1；f_0 为芯轴 1 阶固有频率，可按式(5)计算[24]。

$$\begin{cases}f_0=\dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{K_{\mathrm{eff}}}{m_{\mathrm{eff}}}}\\ m_{\mathrm{eff}}=\pi\rho_{\mathrm{m}}HR^2+\pi\rho_{\mathrm{f}}{R_{\mathrm{f}}}^2L\\ K_{\mathrm{eff}}=\dfrac{\pi ER^2(2\pi EHR^2-\mu E_{\mathrm{f}}S_{\mathrm{f}}L)}{H((\mu-1)\mu E_{\mathrm{f}}S_{\mathrm{f}}L-2\pi EHR^2)}\end{cases}\tag{5}$$

式中：ρ_{m}、ρ_{f} 分别为芯轴和光纤的密度；R_{f} 和 S_{f} 为光纤的半径和纤芯截面积；m_{eff}、K_{eff} 分别为传感单元的等效质量和等效劲度系数。

传感单元相位灵敏度 S_φ 为：

$$S_\varphi=\Delta\varphi_{11}+\Delta\varphi_{12}\tag{6}$$

根据此灵敏度频域响应模型，本文考虑芯轴材料和尺寸对传感系统的影响，上文计算式中出现的基本参数取值如表 1 所示。单次仿真结果中取最大值为基准值，定义为 1 pu，其余频率点幅值均除以此基准值得到计算结果。

表 1　模型基本参数

Table 1　Basic parameters of the model

参数	数值	参数	取值
Z_1/(g·(cm·s)$^{-1}$)	4.6×10^6	Z_3/(g·(cm·s)$^{-1}$)	8.2×10^5
E_{f}/GPa	73	μ_{f}	0.17
R_{f}/m	1.25×10^{-4}	S_{f}/m^2	1.23×10^{-8}
n	1.456	L/m	10

1）芯轴材料

根据实际应用环境，芯轴必须采用非金属材料以防安全隐患。本节选取 3 种材料——环氧树脂、聚四氟乙烯、橡胶，参数如表 2 所示。

表 2　不同材料的力学参数

Table 2　Mechanical parameters of different materials

材料	泊松比	弹性模量/GPa	密度/(kg·m^{-3})
环氧树脂	0.35	6.00	1 200
聚四氟乙烯	0.42	0.6	2 200
橡胶	0.49	0.05	1 100

参照常见芯轴尺寸，暂定其半径为 15 mm，高为 20 mm，计算结果如图 4 所示。

由计算结果可见，环氧树脂材料在 40 kHz 附近

的灵敏度最高，聚四氟乙烯与之相近但略低。考虑到低频范围内的高灵敏度会使得信噪比降低，本文选择环氧树脂为芯轴制作材料。

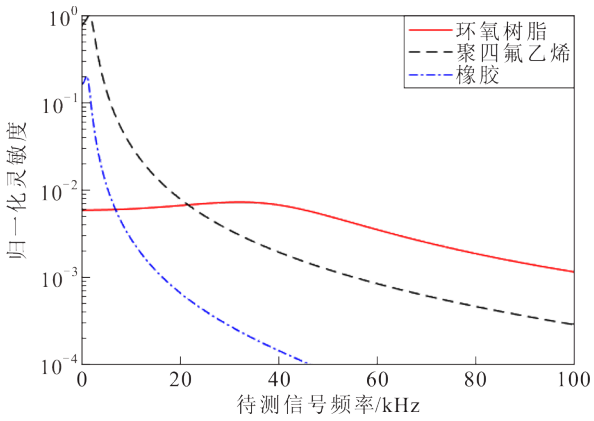


图 4 芯轴材料对传感单元灵敏度的影响

Fig.4 Influence of core shaft material on the sensitivity of sensing unit

2）芯轴尺寸

芯轴尺寸包括高度和半径这 2 个参数。确定芯轴材料为环氧树脂后，采用控制变量法计算分析二者对灵敏度的影响。

图 5 为芯轴半径为 20 mm 时不同芯轴高度下的灵敏度曲线。由计算结果可见，灵敏度幅值几乎不受芯轴高度的影响，但整体中心频率变化很大，在芯轴高度为 10 mm 和 15 mm 时的中心频率最接近 40 kHz。芯轴高度的增加有利于光纤环绕制，在光纤长度相同的情况下减少光纤之间相互挤压。因此最终确定芯轴高度为 15 mm。

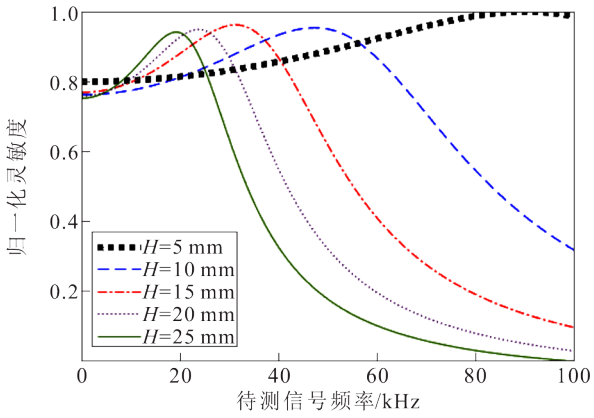


图 5 芯轴高度对传感单元灵敏度的影响

Fig.5 Influence of core shaft height on the sensitivity of sensing unit

图 6 为芯轴高度为 15 mm 时不同芯轴半径下的灵敏度曲线。由计算结果可见，中心频率的分散性较小，但在芯轴半径为 5 mm 时的灵敏度最高，其余半径下的灵敏度较为接近。传感系统工作波长为 1 550 nm，而 G657.A2 型号光纤在此工作波长下，弯曲半径为 7.5 mm 时每百圈损耗高达 50 dB，弯曲半径为 15 mm 时每百圈的损耗仅为 3 dB。损耗过大会导致传感系统在实际使用中的测量效果变差，而半径太大会增加传感单元的实际布置难度，因此确定芯轴半径为 15 mm。

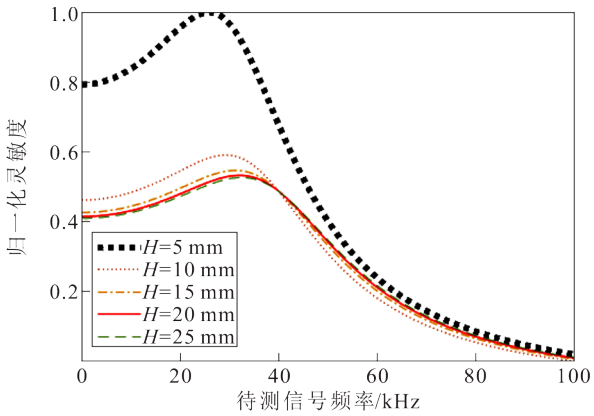


图 6 芯轴半径对传感单元灵敏度的影响

Fig.6 Influence of core axis radius on the sensitivity of sensing unit

最终设计出的传感单元芯轴为高度和半径均为 15 mm 的环氧树脂圆柱，光纤缠绕层数为 3 层，实际缠绕长度约为 5.65 m。

2.2 传感系统性能测试

2.2.1 频率响应

参考国家标准[25]搭建如图 7 所示的测试平台。

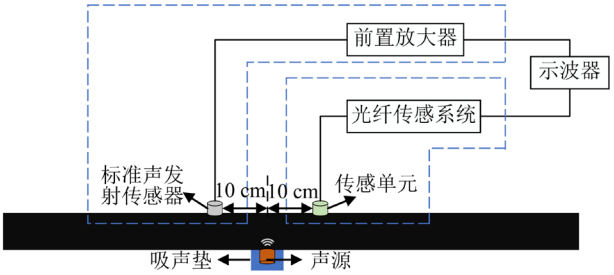


图 7 光纤超声传感系统测试平台

Fig.7 Optical ultrasonic sensor testing platform

平台声源为谐振式 PZT，由信号发生器驱动产生不同频率的声信号，从 20 kHz 至 120 kHz，步进 2 kHz；将光电探测器的带通设置为 10~300 kHz，增益倍数与标准声发射传感器接入的前置放大器放

大倍数保持一致(试验中采用的前置放大器在所需带宽范围内偏差不超过 0.1 dB)；在每一个频率点下记录标准传感器的测量值 U_c 与光纤传感系统的测量值 U_f。标准声发射传感器在测量带宽内的灵敏度 S_c 为(57±3) dB，本文按 57 dB 进行校准，光纤传感系统的灵敏度可表示为：

$$S_f = \frac{U_f}{U_c} S_c \tag{7}$$

绘制频率响应曲线如图 8 所示。可以看出，迈克尔逊光纤超声传感系统在 38~66 kHz 频率范围内表现出较高的平均灵敏度，满足设计要求。

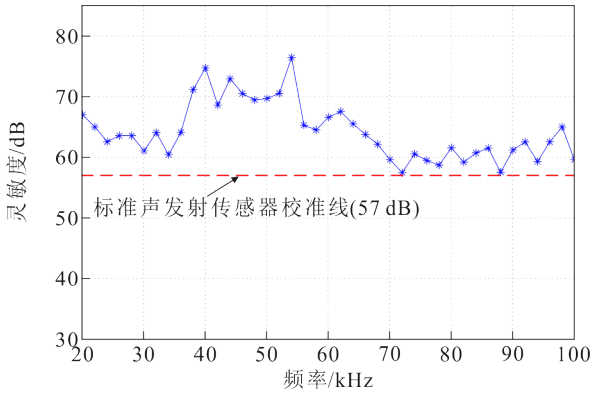


图 8　传感系统频率响应

Fig.8　Frequency response of the fiber optic ultrasonic system

2.2.2　温度特性

根据国家标准，大型发电机定子绕组空冷下运行温度可达 85 ℃[26]，须验证在此温度范围内传感系统的可靠性。温度特性试验平台如图 9 所示。将信号源与传感单元紧密贴合并一同放置于电热鼓风干燥箱内(信号源温度特性稳定，试验信号为 40 kHz)，试验以 10 ℃为步长，不同的温度环境须保持 15 min 后再进行测试。记录 30~90 ℃下系统的响应幅值。

前述频率响应试验在常温(20 ℃)下进行，因此以常温下的测量数据为基准值衡量本节试验数据与基准值的偏差情况。试验结果如图 10 所示，在 30~90 ℃的温度范围内传感系统测量结果略有波动，偏差绝对值不超过 3%。不计试验误差前提下的可能原因有环氧树脂工作温度为–50~130 ℃[27]，试验中的温度变化对其力学参数存在微弱影响。此外，G657. A2 型号光纤本体的工作温度为–60~85 ℃，在最高温度下老化 30 d，其所产生的附加衰减不超过 0.05 dB/km[28]，实际应用中需要考虑长期老化对光纤性能的影响。

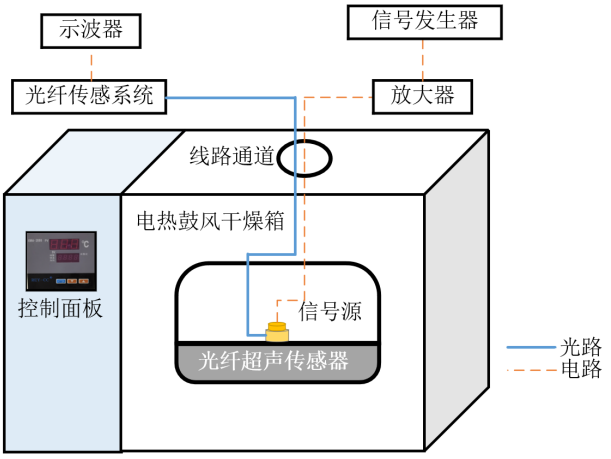


图 9　光纤超声传感器温度特性测试系统示意图

Fig.9　Schematic diagram of temperature characteristic testing system for optical ultrasonic sensor

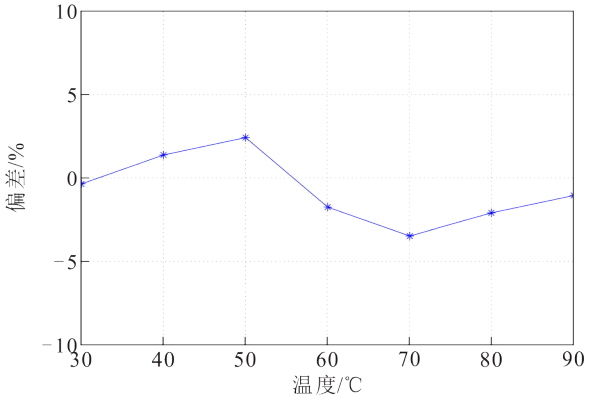


图 10　光纤超声传感系统温度响应偏差

Fig.10　Temperature response deviation of optical ultrasonic sensing system

2.3　传感单元对线棒端部表面电场的影响

传感单元的加入可能会对定子绕组端部电场产生影响，因此本节通过仿真对此进行分析。图 11 为线棒端部的绝缘结构，其中主绝缘为连续包绕的少胶云母带，采用真空压力浸渍(vacuum-pressure impregnating，VPI)树脂。仿真设置的结构参数见表 3。为了简化模型，将主绝缘做整体处理，以高 10 mm、长 30 mm 的矩形表示传感单元，绘制于高低阻搭接处，建立如图 12 所示的二维有限元仿真模型。



图 11　线棒端部结构

Fig.11　Structure diagram of stator bar end

表 3 端部结构参数

Table 3 Structural parameters

结构参数	数值
低阻区长度/mm	100
高阻区长度/mm	600
搭接区长度/mm	15
铜排厚度/mm	10
主绝缘厚度/mm	4.5
防晕层厚度/mm	0.6

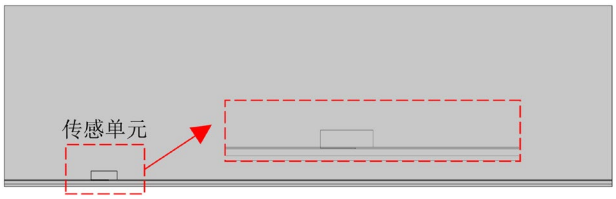


图 12 定子线棒电场仿真模型

Fig.12 Simulation model of electric field in bars

发电机定子线棒嵌置于定子槽，低阻防晕层部分完全位于槽内，而定子槽接地，因此将低阻防晕层上表面设置接地。铜排电压设置为 18 kV 工频电压。表面电场强度的大小及变化趋势如图 13 所示。

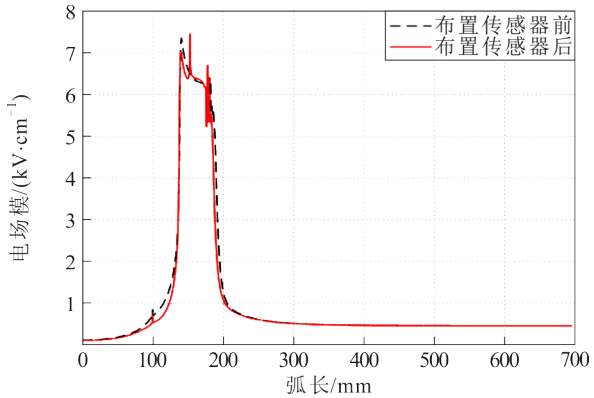


图 13 定子线棒沿面场强

Fig.13 Electric field intensity along the bar surface

仿真结果表明：线棒未布置传感单元时，高低阻搭接区末端场强最大，为 7.3 kV/cm；加入传感单元并未增大线棒表面的最高场强，而仅是在 5 cm 内改变了峰值的位置和数量，并未明显改变定子线棒表面场强分布情况。

3 定子线棒局部放电超声检测试验

3.1 定子线棒典型缺陷制作

定子线棒的实际放电位置可能出现在内部和表面，针对常见原因导致的局部放电制作了如下 4 种类型的发电机定子线棒典型缺陷。

1）内部绝缘缺陷：内部绝缘缺陷在线棒出厂前预先制作。

2）端部防晕层污染缺陷：沿高低阻搭接区向端部方向涂抹低阻防晕漆，并涂上机油与碳粉混合物以模拟低电阻率脏污。

3）端部磨损缺陷：磨去半导体防晕层搭接处防晕漆，磨损宽度为 1 cm，距离出槽口 7 cm。

4）槽部缺陷：磨去包裹在铝箔内的低阻防晕层，磨损宽度为 30 cm，磨损位置距出槽口 30 cm。

3.2 试验方法

在实验室中搭建发电机定子线棒局部放电检测平台，其中试验线棒均为不带 R 角的直线棒，整体接线如图 14 所示。

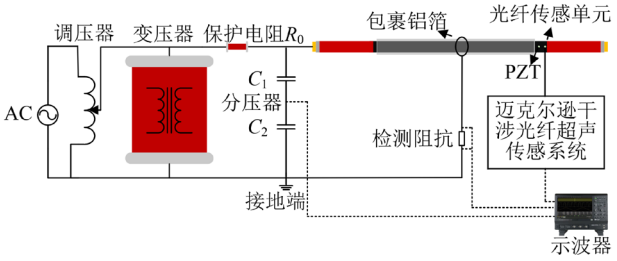


图 14 局部放电试验接线图

Fig.14 Wiring diagram for partial discharge test

线棒低阻防晕层部分包裹铝箔并经检测阻抗接地，将试验线棒的铜排引出线与高压端相接。传感单元布置在绝缘缺陷附近的接地一侧，PZT 传感器与其并列布置，2 路信号均接入示波器；检测阻抗信号端实际接入局部放电检测仪。试验采用阶梯法升压，每个电压等级保持 1 min。

3.3 表面电晕试验

2.3 节仿真分析了传感单元对线棒端部表面电场的影响，为验证仿真结果，本节在图 14 所示的平台上采用紫外成像仪观察线棒表面的电晕情况(见图 15)，观测距离为 3.5 m，当紫外光子数跃迁至 900 以上时停止加压并记录电压数值，2 种情况下均重复 5 次试验取平均值 U_{av}。结果表明，2 种情况下线棒在额定电压为 13.8 kV 时均没有发生电晕放电；未布置传感单元时 U_{av} 值为 22.7 kV，在布置传感单元后 U_{av} 值为 22.5 kV。2 种情况下的起晕位置均出现在高低阻防晕层搭接区，与 2.3 节中相符。因此，可以认为光纤单元不会影响定子线棒表面绝缘性能。

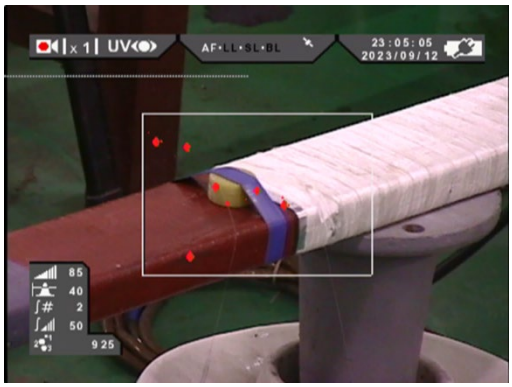


图 15　线棒表面电晕试验

Fig.15　Corona test on the surface of stator bar

3.4　局部放电超声时域检测结果

3.4.1　内部缺陷

内部缺陷的放电位置在主绝缘层间，其放电产生的超声信号经主绝缘内部传播至表面被接收。试验中升压至 15 kV 时，光纤系统能够检测到稳定的由局部放电产生的超声信号，其时域波形如图 16 所示，此时局部放电检测仪记录 10 s 内平均视在放电量约为 30 pC，而 PZT 传感器未检测到超声信号。

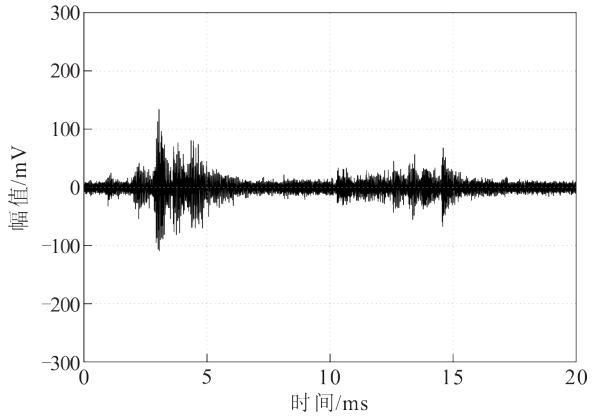


图 16　内部缺陷的检测结果

Fig.16　Detection results of internal defects

3.4.2　端部防晕层污染

端部污染区域的导电层会使得端部泄漏电荷集中，引发沿面放电，其放电产生的超声信号经主绝缘表面层传播被接收。试验中升压至 13 kV 时，光纤系统能够检测到稳定的由局部放电产生的超声信号，其时域波形如图 17 所示，此时局部放电检测仪记录 10 s 内平均视在放电量约为 20 pC，而 PZT 传感器未能检测到超声信号。

3.4.3　端部磨损

端部半导体涂层磨损会使此处的电位抬升，且局部电阻的增大会使发热加剧，引发电晕放电。试验中升压至 11 kV 时，光纤系统能够检测到稳定的由局部放电产生的超声信号，其时域波形如图 18 所示，此时局部放电检测仪 10 s 内平均视在放电量约为 30 pC，而 PZT 没有检测到超声信号。

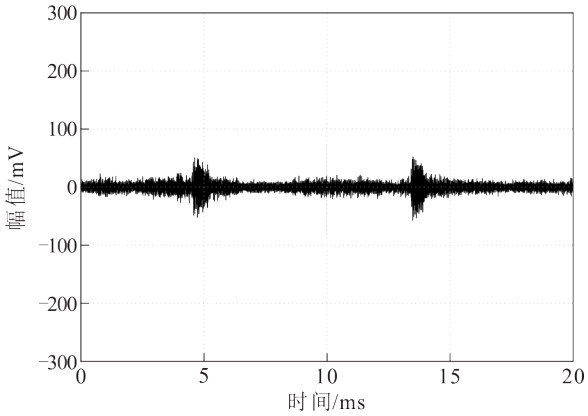


图 17　端部防晕层污染的检测结果

Fig.17　Detection results of end anti corona layer pollution

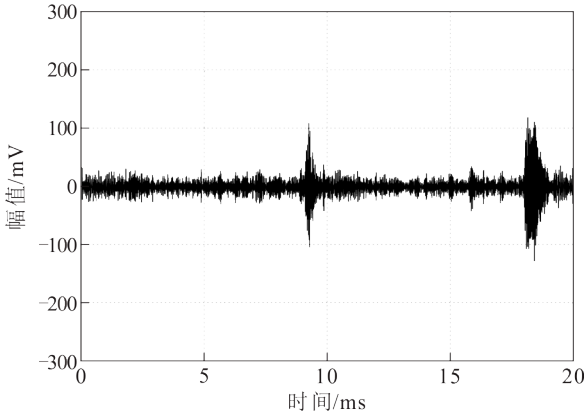


图 18　端部磨损的检测结果

Fig.18　Detection results of end wear

3.4.4　槽部磨损

槽部半导体涂层磨损会在其表面和接地铝箔间形成气隙，场强集中，引发局部放电。其放电产生的超声信号可同时经主绝缘表面层和接地铝箔传播。试验中升压至 14 kV 时，光纤系统能够检测到稳定的由局部放电产生的超声信号，其时域波形如图 19 所示，此时局部放电检测仪记录 10 s 内平均视在放电量约为 60 pC，而 PZT 传感器未能检测到超声信号。

3.5　超声信号频域特征

超声信号的频谱分析能够反映测量结果的准确性和有效性，同时有助于识别定子线棒局部放电

的类型；对于外部缺陷导致的放电，频谱特征还可以帮助判断放电发生的位置。试验中，在检测到初始局放信号后进行持续升压，记录了 6 个不同电压下的测量结果并进行频谱分析，以每一类缺陷下频谱最高幅值为归一化基准，如图 20 所示。

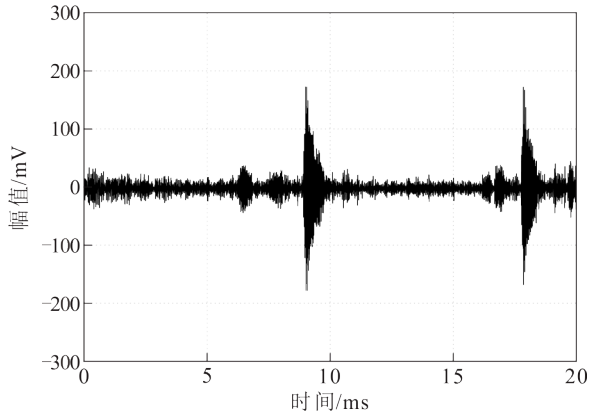


图 19 槽部磨损的检测结果

Fig.19 Detection results of slot wear

在外加电压不同的情况下，同一缺陷的线棒发生局部放电时的超声信号频谱存在一定差异，但整体偏差不大，且在 100 kHz 以上均无明显分布，与文献[20]的研究结果相符。在后续分析中，从 10 kHz 到 100 kHz，以 10 kHz 为频带宽度提取频谱分量，标号 1—9。按式(8)计算不同频带内幅值对总体幅值的贡献情况 P_i。

$$P_i=\frac{\sum_{k=f_{i\text{-min}}}^{f_{i\text{-max}}}A_k}{\sum_{k=10}^{100}A_k}\times 100\% \tag{8}$$

式中：i 为频带编号；$f_{i\text{-min}}$ 和 $f_{i\text{-max}}$ 分别为第 i 频带的最小值和最大值；A_k 为单点的幅值。图 21 为采用直方图形式绘制的计算结果。

不同缺陷线棒中局部放电产生的超声信号的频谱均在中心频率(30~50 kHz)附近有较大幅值，自 4 号频带(40~50 kHz)往后幅值均依次递减；不同缺陷下局部放电的超声频谱存在较明显的自身特征。

1）对于内部缺陷引起的局部放电，其超声频谱整体分布偏左，低频幅值(60 kHz 以下)占比超过 80%，且 20 kHz 以下幅值明显高于其余 3 种缺陷，整体呈现宽峰值。

2）对于端部污染引起的局部放电，其超声频谱的低频幅值仍占比最高，但 30 kHz 以下和 60 kHz 以上的部分明显减少，能量更加集中于中心频率附近，单频带幅值为 4 种缺陷中最高，呈现明显的频谱尖峰。

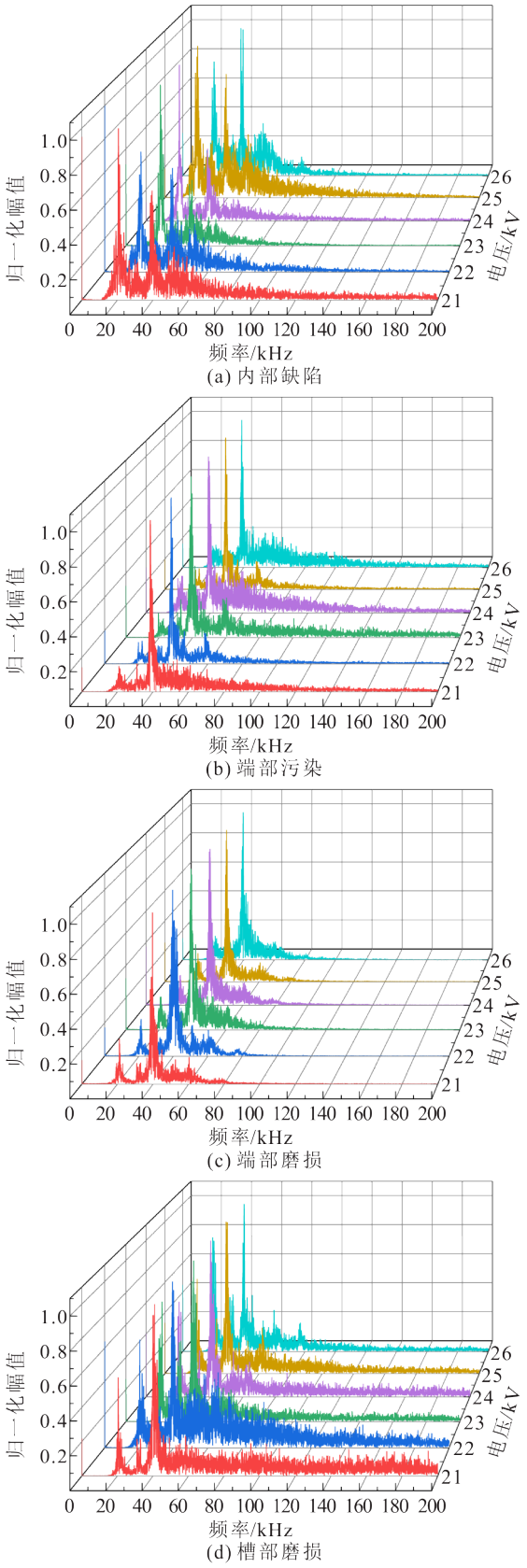


图 20 不同电压下测量信号的频谱

Fig.20 Spectrums of measured signals at different voltages

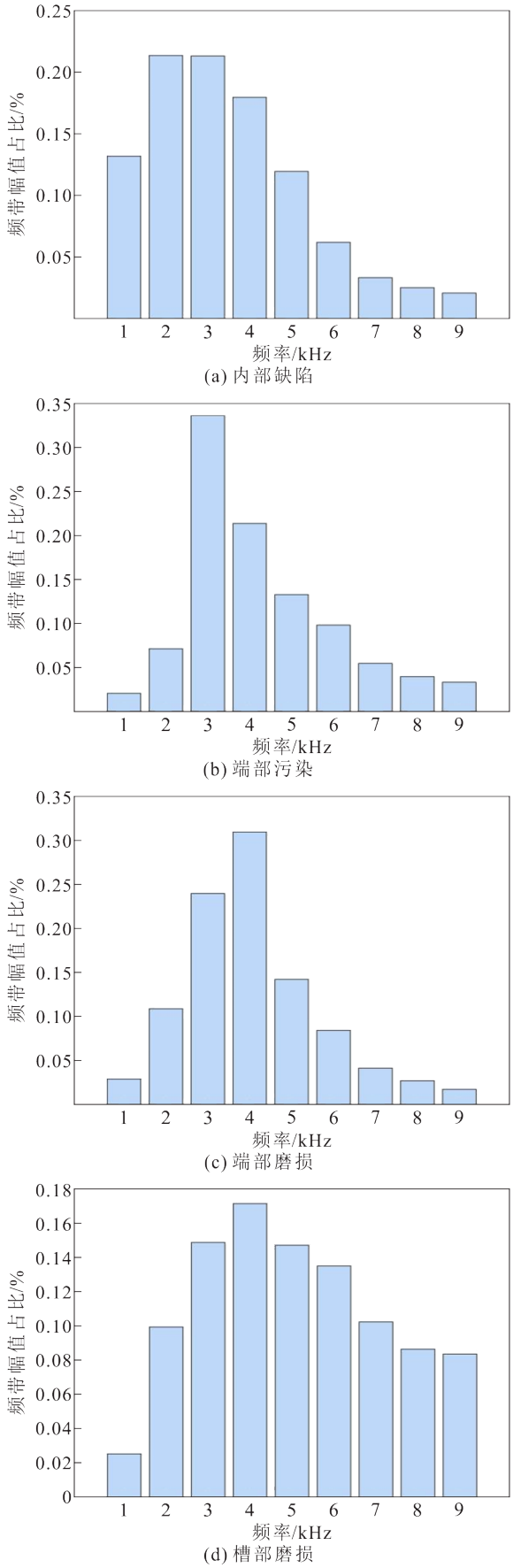


图 21　不同频率带占比情况

Fig.21　Proportions of different frequency bands

3）对于端部磨损引起的局部放电，其超声频谱与端部污染缺陷的超声频谱类似，但顶点略向右移动，且峰值频带左侧分量明显高于端部磨损，低频区域的过渡更加平缓。

4）对于槽部缺陷引起的局部放电，其超声频谱中高频分量明显增大，且高频区下降趋势缓慢，低频幅值占比降低至 50%，其中心频率附近的幅值占比仅为 32%，明显低于其余 3 种缺陷。

4　结论

1）搭建了干涉型光纤超声传感系统，从芯轴材料和尺寸角度对其传感单元进行优化，能够覆盖定子线棒局部放电所需的检测频带，同时具有较高的灵敏度，且对端部电场影响较小。

2）开展了定子线棒局部放电检测试验，结果表明：光线超声传感系统可以检测到 30 pC 的内部缺陷放电、20 pC 的端部污染放电、30 pC 的端部磨损放电、60 pC 的槽部磨损放电，且相同条件下 PZT 未能检测到局部放电超声信号。

3）内部缺陷下局部放电超声频谱存在更大的低频分量；端部污染下的超声频谱两侧部分明显减少，能量更加集中于中心频率附近，呈现明显的频谱尖峰；端部磨损下的频谱峰值较端部污染轻微向高频移动，且低频分量增加，由高频向低频过渡更加平缓；槽部缺陷下的超声频谱能量集中在高频范围内且高频区下降趋势缓慢，中心频率附近的幅值占比明显低于其余 3 种缺陷。

参考文献　References

[1] 孙永鑫. 高压电机定子线棒绝缘结构优化与电寿命快速评估方法[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2020.
SUN Yongxin. Insulation structure optimization and electrical life rapid evaluation method for stator bars of high voltage generator[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2020.

[2] LERCHBACHER M, IMAMOVIC D, LEMESCH G, et al. Investigation regarding corona free endwinding design of form wound high voltage stator windings[C]//2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. West Lafayette, USA: IEEE, 2010: 1-4.

[3] 胡海涛. 大型水轮发电机定子绝缘电场分布的数值仿真与结构优化[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2019.
HU Haitao. Numerical simulation of electric field distribution and structural optimization for stator insulation of large hydrogenerator[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2019.

[4] STONE G C, SEDDING H G. In-service evaluation of motor and generator stator windings using partial discharge tests[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(2): 299-303.

[5] CHEN L J, TSAO T P, LIN Y H. New diagnosis approach to epoxy resin transformer partial discharge using acoustic technology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2501-2508.

[6] 龚馨. 基于压力波的电缆接头缺陷局部放电检测技术研究[D]. 重庆：重庆大学，2021.

GONG Xin. Research on partial discharge detection technology of cable joint defects based on pressure wave[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2021.
[7] 雷嘉丽. 典型油纸绝缘局部放电超声信号特征及多频光纤F-P传感检测研究[D]. 重庆：重庆大学，2021.
LEI Jiali. Study on typical oil-paper insulation partial discharge ultrasonic signal characteristics and multi-frequency optical fiber F-P sensing detection[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2021.
[8] 樊卓杨，吴超，王霞. 光纤传感技术在电力设备监测领域的研究进展[J]. 绝缘材料，2021，54(10)：1-12.
FAN Zhuoyang, WU Chao, WANG Xia. Research progress of optical fiber sensing technology in power equipment monitoring[J]. Insulating Materials, 2021, 54(10): 1-12.
[9] 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]. 保定：华北电力大学，2016.
ZHENG Qing. Ultrasonic detection for partial discharge in transformer by using fiber optic sensing[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2016.
[10] MA G M, ZHOU H Y, SHI C, et al. Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted FBG[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(7): 2788-2795.
[11] LIMA S E U, FRAZAO O, FARIAS R G, et al. Mandrel-based fiber-optic sensors for acoustic detection of partial discharges-a proof of concept[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2526-2534.
[12] ZHANG T Z, PANG F F, LIU H H, et al. A fiber-optic sensor for acoustic emission detection in a high voltage cable system[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2026.
[13] QIAN S, CHEN H, XU Y, et al. High sensitivity detection of partial discharge acoustic emission within power transformer by Sagnac fiber optic sensor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2313-2320.
[14] 周宏扬，马国明，张猛，等. 基于迈克尔逊光纤干涉的变压器局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报，2022，42(21)：8016-8024.
ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in power transformer based on the Michelson optical fiber interferometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 8016-8024.
[15] DENG J D, XIAO H, HUO W, et al. Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers[J]. Optics & Laser Technology, 2001, 33(5): 305-311.
[16] WANG X D, LI B Q, XIAO Z X, et al. An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15(3): 521-527.
[17] 赵洪，李敏，王萍萍，等. 用于液体介质中局放声测的非本征光纤法珀传感器[J]. 中国电机工程学报，2008，28(22)：59-63.
ZHAO Hong, LI Min, WANG Pingping, et al. Extrinsic fiber fabry-Perot sensors for PD-induced acoustic emission detection in liquid dielectrics[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 59-63.
[18] 张伟超，董青青，赵洪，等. 液-固复合介质对光纤法-珀局部放电超声响应强度影响分析[J]. 电工技术学报，2019，34(10)：2230-2238.
ZHANG Weichao, DONG Qingqing, ZHAO Hong, et al. Impact of liquid-solid composite medium on fiber fabry-Perot response induced by ultrasound from partial discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2230-2238.
[19] 宋雨轩，陈伟根，张知先，等. 基于光纤迈克尔逊干涉仪的GIS内置局部放电超声传感技术[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3088-3097.
SONG Yuxuan, CHEN Weigen, ZHANG Zhixian, et al. Ultrasonic sensing technology of partial discharge built into GIS based on fiber optic Michelson interferometry[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3088-3097.
[20] 杨永明，陈学军，陈民铀，等. 电机局部放电超声特性[J]. 电机与控制学报，2011，15(10)：63-68.
YANG Yongming, CHEN Xuejun, CHEN Minyou, et al. Ultrasonic characteristics of motor partial discharge[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(10): 63-68.
[21] PECHSTEDT R D, JACKSON D A. Design of a compliant-cylinder-type fiber-optic accelerometer: theory and experiment[J]. Applied Optics, 1995, 34(16): 3009-3017.
[22] LANDAU L D, LIFSHTZ E M. Theory of elasticity[M]. SYKES J B, REID W H, translated. London, USA: Pergamon Press, 1959.
[23] 殷锴，张敏，王立威，等. 芯轴型光纤水听器频率特性研究[J]. 光子学报，2008，37(11)：2180-2185.
YIN Kai, ZHANG Min, WANG Liwei, et al. Frequency characters of the air-backed mandrel fiber-optic hydrophone[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(11): 2180-2185.
[24] 周宏扬. 基于Michelson光纤干涉仪的局部放电超声检测技术研究[D]. 北京：华北电力大学，2020.
ZHOU Hongyang. Research on partial discharge ultrasonic detection technology based on Michelson optical fiber interferometer[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2020.
[25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 声发射传感器校准规范(比较法)：JJF 1337—2012[S]. 北京：中国质检出版社，2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calibration specification for acoustic emission sensors(comparative method): JJF 1337—2012[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2012.
[26] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 水轮发电机基本技术要求：GB/T 7894—2023[S]. 北京：中国标准出版社，2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Fundamental technical requirements for hydrogenerators: GB/T 7894—2023[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2023.
[27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 电气用热固性树脂工业硬质层压板 第4部分：环氧树脂硬质层压板：GB/T 1303.4—2009[S]. 北京：中国标准出版社，2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Industrial rigid laminated sheets based on thermosetting resins for electrical purposes-part 4: requirements for rigid laminated sheets based on epoxy resins: GB/T 1303.4—2009[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2009.
[28] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 通信用单模光纤 第7部分：弯曲损耗不敏感单模光纤特性：GB/T 9771.7—2022[S]. 北京：中国标准出版社，2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Single-mode optical fibres for telecommunication-part 7: characteristics of a bending loss insensitive single-mode optical fibre: GB/T 9771.7—2022[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2022.



胡建林(通信作者)
1978—，男，博士，教授，博导
主要从事输变电设备外绝缘放电特性、输电线路覆冰与防护方面的研究
E-mail: hujianlin@cqu.edu.cn

HU Jianlin
Ph.D., Professor
Corresponding author



秦培宇
2000—，男，硕士
主要从事高电压与绝缘技术、局部放电检测等方面的研究
E-mail: 202211021108t@cqu.edu.cn

QIN Peiyu

收稿日期 2024-09-18 修回日期 2025-11-04 编辑 曾文君