

用于局放声发射探测的 Sagnac 非平衡干涉超声传感技术

谢天喜¹, 陆云才², 石琦², 张语桐³

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏南京 210024; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏南京 211103; 3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西西安 710049)

摘要:局部放电信号的有效捕获对于电力设备绝缘状态感知与评估、故障预警与诊断具有重要意义。文中提出一种基于 Sagnac 非平衡干涉(Sagnac unbalanced interference, SUI)的超声传感技术, 可高效探测和捕获电力设备局部放电声发射信号。首先, 分析 SUI 的光路结构以及光路干涉过程, 明确其对外界超声的感知机理, 建立声波的传感方程。然后, 面向电力设备微弱超声信号探测需求, 分析 SUI 光路结构参数对超声传感特性的影响规律, 提出传感器最佳结构设计参数。最后, 实验测试结果表明, 文中所提 SUI 系统可有效探测 30~150 kHz 的超声信号, 并成功捕获针板电极放电声发射信号。文中所提 SUI 技术具有低成本、结构简单稳定等优势, 为电力设备局部放电光学探测提供全新的技术途径。

关键词:声传感; 局部放电; 光纤传感; 光纤干涉; 超声检测; 声发射

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)06-0211-07

0 引言

局部放电(partial discharge, PD)信号的有效捕获对于电力设备绝缘状态感知与评估、故障预警与诊断具有重要意义^[1-2]。PD 过程中会伴随声信号发射, 监测声波信号可实现 PD 异常事件判定以及故障点定位, 是目前电力设备 PD 监测领域的重要研究方向^[3-4]。

传统 PD 声发射普遍利用压电陶瓷(piezoelectric, PZT)声传感器进行检测。但是在实际设备中, 出于对电力设备绝缘安全性能的考虑, PZT 仅能铺设于电力设备外壳。PD 超声信号经多层介质衰减后, 传输到外壳上声压较小, 导致 PZT 对内部 PD 信号的灵敏度较低, 难以实现对设备内部微小缺陷的检出^[5]。此外, 电学类传感器还存在受电磁干扰影响问题, 信号可靠性与稳定性不足。

近年来, 光纤传感技术迅速发展, 光学超声传感器具有本质绝缘安全、抗电磁干扰、灵敏度高、可内置原位检测的优势, 在电力系统中受到了越来越多的关注^[6]。例如, 研究人员提出在光纤端面形成法布里珀罗(Fabry-Perot, F-P)腔, 利用声波作用下振膜的形变调制干涉光程, 实现对电力设备 PD 超声信号的捕获^[7-9]。光纤 F-P 腔超声传感器具有极高的声学灵敏度, 但其普遍需要高精度的光学

加工技术和精密的光路对准结构, 对环境的适应性不高, 易受环境干扰影响。光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)传感器在超声检测中应用较为广泛, 利用声波对光栅折射率、光栅常数的调制, 实现对外界声波的探测。光纤光栅声波传感器可实现多点超声复用感知, 形成分布式传感网络, 但受限于其敏感光路长度, 光纤光栅超声传感器普遍灵敏度不高, 且对于高频声振信号的解调复杂^[10-14]。文献[15]针对光纤 FBG 声固耦合系数小、超声探测灵敏度低等问题, 提出一种基于耦合锥的超声传感增敏结构, 通过仿真研究传感器响应灵敏度影响因素, 优化设计出 4 款性能优越的声耦合锥型光纤超声传感器, 大幅提升超声耦合效率, 但该结构稳定性较低, 在工程应用中的实用性尚需提升。

光纤干涉仪超声传感技术无需在光纤上附加敏感结构, 利用光纤自身的弹光效应进行声学传感, 具有结构简单、长期稳定性好的技术优势^[16-18]。通过增加干涉光纤的长度, 可实现超高灵敏度声学探测。如文献[19]成功构建迈克尔逊光纤干涉光路结构, 传感臂光纤长度为 50 m, 实现了从 80~200 kHz 的超声检测。文献[20]设计内径 30 mm、厚度 5 mm 的光纤环, 并搭建基于 Mach-Zehnder 干涉的超声传感系统, 能有效检测出变压器 PD 信号。然而, 迈克尔逊干涉结构由于传感光纤与参考光纤不共路, 当外界存在干扰时(温度、应力、振动等), 两路干涉光易引入额外干扰相位, 系统相位噪声较大。Sagnac 干涉结构广泛应用于光纤陀螺仪领域, 其干涉结构具有光路互易性, 能够有效抑制外界环

收稿日期: 2025-05-08; 修回日期: 2025-07-29

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“特高压大型充油设备全过程仿真和试验评估关键技术研究”(5500-202355354A-2-1-ZX)

境干扰,在电力现场复杂环境下具有重要的应用优势^[21-23]。

文中提出一种直线 Sagnac 非平衡干涉型(Sagnac unbalanced interference, SUI)超声传感技术,利用延迟光纤引入的非对称结构产生非平衡干涉,从而使两干涉光束对外界声波的感知具有相位差异,通过对干涉光谱的解调即可实现对外界声波的探测。在传统环形 Sagnac 干涉光路结构上,文中所提直线型干涉结构利用法拉第旋光镜(Faraday rotator mirror, FRM)完成端面反射,替代环路结构。该结构在保证传统环形 Sagnac 干涉高灵敏度的基础上,使参与传感的两束光束具有高度相位、偏振互易,从而能够有效消除电力设备实际工况下的环境干扰,提升系统信噪比。

文中详细分析所提直线 SUI 光路结构,明确其对外界超声感知的光学传感原理,建立声波传感方程。在此基础上,分析直线 SUI 光路结构参数对超声传感特性的影响规律,结合电力设备 PD 声发射探测需求,提出最佳的传感器结构参数。最后,测试 SUI 的超声传感性能,试验结果表明, SUI 可实现 20~120 kHz 的超声探测,具有优异的频率响应特性。基于 SUI 声传感系统,可成功实现对针板电极放电声发射信号的有效捕获。

1 SUI 干涉光路及其声学传感原理

1.1 SUI 干涉光路结构

在传统 Sagnac 干涉结构中引入 1×2 耦合器和 FRM, 将环路改进成为直线型非平衡干涉结构, 传感光路结构如图 1 所示。

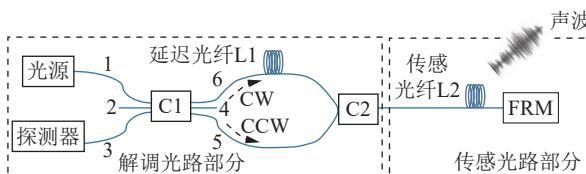


图 1 SUI 光路原理

Fig.1 Optical path principle of the SUI

宽带光源为超辐射发光二极管(supperluminescent diod, SLD),由耦合器 C1 输入后,在 C1 的 5 端口、6 端口输出两路等功率光束进入到干涉光路中进行传输,分别记为逆时针光束(counterclockwise, CCW)和顺时针光束(clockwise, CW)。CW 光与 CCW 光由耦合器 C2 合束并输入到传感光纤。光束经传感光纤后在末端被 FRM 反射,且光路的偏振态发生正交偏转。反射光束最终返回到 C1,在 C1 耦合器的 3 端口 CW 光和 CCW 光发生干涉,并由光电探测器探测。SUI 干涉光路结构中一共有

4 束光,具体如下。

路径 1: 1 端口—6 端口—L1—C2—L2—L2—C2—L1—6 端口—C1;

路径 2: 1 端口—6 端口—L1—C2—L2—L2—C2—5 端口—C1;

路径 3: 1 端口—5 端口—C2—L2—L2—C2—L1—6 端口—C1;

路径 4: 1 端口—5 端口—C2—L2—L2—C2—5 端口—C1。

其中,光束路径 1 与光束路径 4 分别具有最长和最短的传输光程。由于系统光源为宽带 SLD 光源,其相干长度较短,导致光束路径 1 与光束路径 4 无法与其他光束发生干涉。因此,最终在耦合器 C1 上仅路径 2 与路径 3 发生双光束干涉。可以看到,路径 2 与路径 3 实际为相同光路中的 CW 光和 CCW 光。根据波的干涉原理,在 3 端口处的干涉光强 I 可表示为:

$$I = \frac{1}{9} I_0 (1 + \cos(\phi + \Delta\varphi)) \quad (1)$$

式中: I_0 为由光源输入耦合器 C1 的光强; ϕ 为干涉光路的初始相位; $\Delta\varphi$ 为超声信号引入的 CW 与 CCW 光路的相位差。声波作用于光纤后将导致相位差 $\Delta\varphi$ 变化,进而导致输出干涉光强 I 变化。通过检测干涉光强即可实现对入射声波信息的获取。

由式(1)可知, SUI 干涉光路中的初始相位 ϕ 即为干涉仪的工作点,决定了 SUI 输出干涉光强随入射声波变化的灵敏度,如图 2 所示。

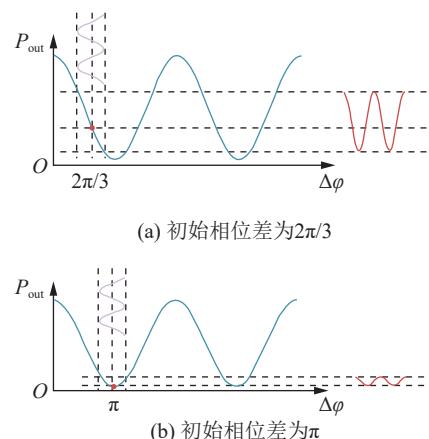


图 2 超声传感器静态工作点调节

Fig.2 The static operating point of the SUI ultrasonic sensor

图 2 中, P_{out} 为典型干涉仪结构输出光功率。若 C1 处采用常规 2×2 耦合器, CW 光与 CCW 光的初始相位差为 π ,此时干涉光路具有最小干涉灵敏度。文中系统采用 3×3 耦合器,此时 CW 光与 CCW 光引入 $2\pi/3$ 的初始相位差,使干涉仪工作于

其线性工作区内, 此时传感器输出光功率对声致相位信号 $\Delta\varphi$ 具有较高的响应灵敏度, 有利于微弱超声信号的探测。

1.2 SUI 超声敏感机理

超声对光纤的作用以声压的形式进行, 声压作用于光纤时, 光纤受应变效应、泊松效应以及弹性效应的共同作用^[24-25], 光束传输的相位可表示为:

$$\Delta\varphi(t) = KLP_a(t) \quad (2)$$

式中: K 为光纤对外界声压的敏感系数, 与光纤的结构、材质以及传输光波波长有关, 为一常数; L 为参与声传感的光纤的长度; $P_a(t)$ 为超声作用在光纤上的声压, 声波为机械波, 一般可表示为 $P_0\sin(2\pi ft)$, P_0 为超声振幅, f 为超声频率。

由于延迟光纤引入的非对称结构, CW 光和 CCW 光于不同时刻传输经过传感光纤, 因此外部声信号对 CW 光和 CCW 光产生的相位调制不同, 分别为:

$$\Delta\varphi_{\text{CW}}(t) = \int_0^{l_2} KP_0 \sin\left(2\pi f\left(t - \frac{nx}{c}\right)\right) dx \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_{\text{CCW}}(t) = \int_0^{l_2} KP_0 \sin\left(2\pi f\left(t - \frac{l_1 + l_2 - nx}{c}\right)\right) dx \quad (4)$$

式中: l_2 为传感光纤的长度; l_1 为延迟光纤的长度; n 为光纤的有效折射率; c 为光速。

可见, 在延迟光引入的非对称结构下, 在声波作用下, CW 光与 CCW 光产生相位差 $\Delta\varphi$, 表示为:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \Delta\varphi_{\text{CW}}(t) - \Delta\varphi_{\text{CCW}}(t) = \\ &= \frac{2Kc}{\pi fn} \sin\left(2\pi f \frac{nl_2}{2}\right) \sin\left(2\pi f \frac{nl_1}{2c}\right) \times \\ &\quad P_0 \cos\left(2\pi f\left(t - n \frac{l_1 + l_2}{2c}\right)\right) = \\ &= SP_0 \cos(2\pi f(t - \tau)) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: S 为 SUI 超声系统的相位响应灵敏度, 当 SUI 光路结构确定时, S 为一常数; τ 为系统延时系数, 光路结构确定时, τ 为一定值, 且由于光速极其大, τ 趋近于 0, 可以忽略。

可知, SUI 光路中 CW 光路与 CCW 光路的相位差 $\Delta\varphi$ 随外界超声信号变化。结合式(1)可知, 干涉光强 I 也将随超声信号变化。因此通过光电探测器检测干涉光强的变化, 即可实现外部超声信号的获取。

2 超声传感性能分析与结构优化

SUI 光路结构参数决定系统对超声检测的频率、灵敏度。为实现电力设备 PD 超声信号有效检测, 文中将研究 SUI 超声传感系统结构参数对系统

传感性能的影响规律。在此基础上, 结合电力设备对 PD 超声检测的需求, 提出传感器最佳结构参数。

2.1 干涉结构参数对检测灵敏度的影响规律

在 SUI 干涉结构中, 传感光束将 2 次经过传感光纤, 因此两光束的干涉相位差为 $2\Delta\varphi$, 根据式(5)可知, 干涉光束相位差对声波声强的灵敏度 S 为:

$$\begin{aligned} S &= \frac{4Kc}{\pi fn} \sin\left(2\pi f \frac{nl_2}{2c}\right) \sin\left(2\pi f \frac{nl_1}{2c}\right) \approx \\ &\quad 8Kl_2 \sin\left(\frac{n\pi l_1 f}{c}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

可知, SUI 对超声检测的灵敏度与传感光纤长度 l_2 呈正比, 传感光纤越长, 超声传感灵敏度越高。

超声检测灵敏度随着延迟光纤长度 l_1 余弦变化, 且与被测超声的频率有关。传感光纤长度一定时, 延迟光纤长度 l_1 满足 $nl_1 f/c = 2k+1 (k \in \mathbb{N})$ 时, 系统具有最高的超声检测灵敏度; $nl_1 f/c = k$ 时, SUI 对超声响应灵敏度为 0。因此, 在实际检测中, 应根据被测超声的频率特性, 合理设计 SUI 结构参数。

传感光纤为定值时, SUI 对不同频率超声的响应灵敏度($k=1$ 时, 一阶情况下)如图 3 所示。仿真中, 传感光纤长度为 1 km, 光纤为 SM-28 单模光纤, 传感波长为 1 550 nm 波段。分别分析延迟光纤长度为 100、500、1 000、2 000、5 000 m 时 SUI 的超声频响曲线。由图 3 可知, 延迟光纤长度越长, SUI 传感器的一阶响应中心频率越低, 易在高频率范围出现零频点, 导致系统灵敏度极其不平坦; 延迟光纤长度越短, SUI 一阶响应中心频率越高, 此时系统在较大的超声频率范围内存在平坦的响应。

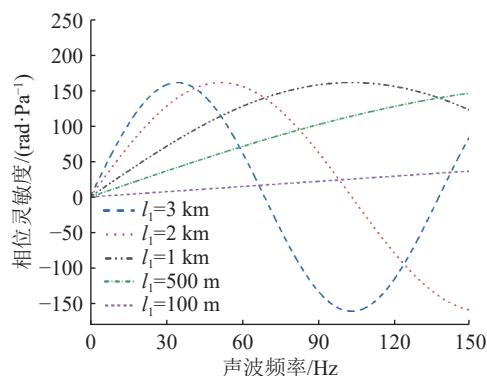


图 3 不同延迟光纤长度下 SUI 频响特性

Fig.3 SUI frequency response characteristics for different delay fibre lengths

可见, 延迟光纤的长度将影响 SUI 对超声的频率响应特性。因此须根据被测超声的频率范围, 合理设置延迟光纤长度。

图 4 为不同传感光纤长度下, SUI 对超声信号的频率响应曲线。由图 4 可见, 传感光纤的长度只影响传感器响应的幅值, 而不影响传感器的频率响

应特性。因此,在进行超声检测时,应尽量增加传感光纤的长度。

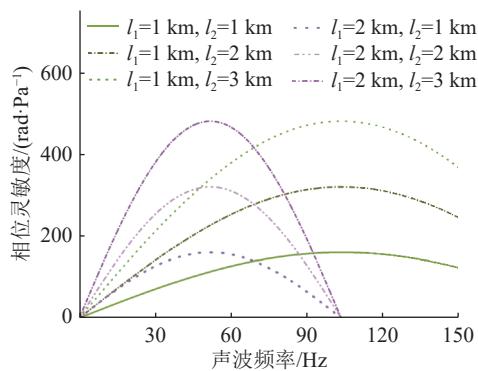


图 4 不同传感光纤长度下 SUI 频响特性

Fig.4 SUI frequency response characteristics for different sensing fibre lengths

2.2 适用于 PD 声发射检测的 SUI 最佳结构参数

电力设备 PD 声发射信号普遍在 30~120 kHz 频段内信号较强,有限探测该频段超声信号即可实现 PD 有限监测^[26]。为使传感器在该频段内具有较为平坦的幅频特性,根据 2.1 节理论分析,将延迟光纤 l_1 长度设置为 1 km。传感光纤越长,对超声探测的灵敏度越高,为实现对微弱 PD 信号的探测,传感光纤长度 l_2 设置为 2 km,所形成光纤传感头缠绕成为圆盘状,探头尺寸仅为 $\Phi 7 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 。

3 实验

3.1 SUI 超声传感性能测试与分析

为验证所提 SUI 结构对超声探测的有效性,组

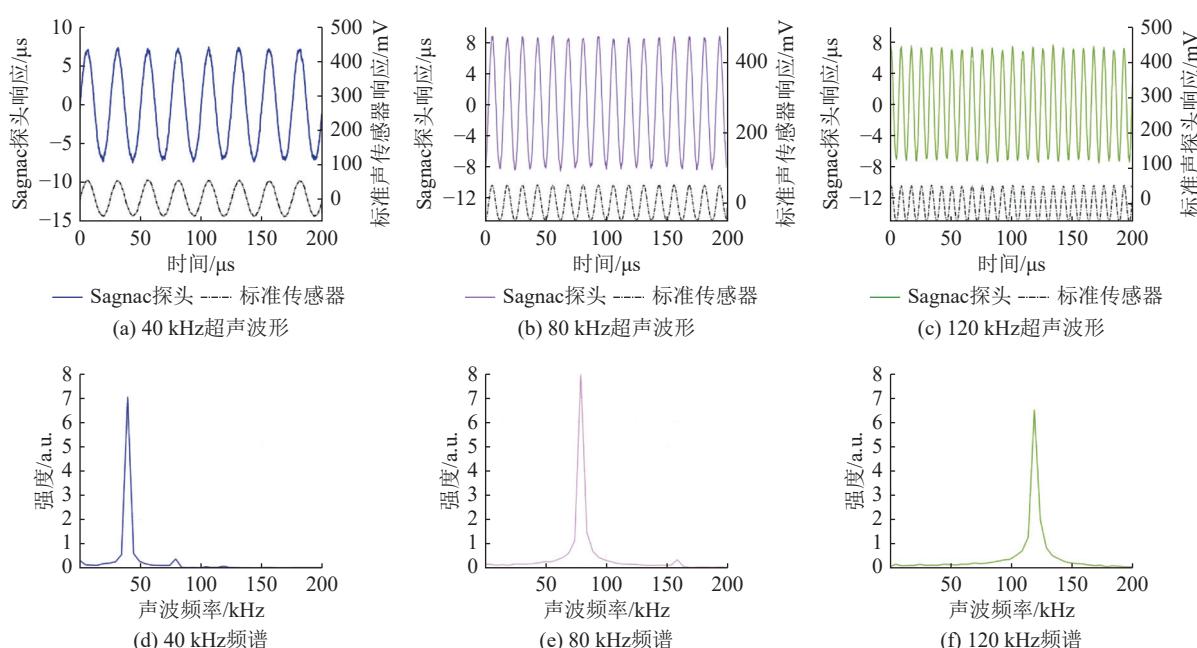


图 6 SUI 对不同频率超声的响应波形

Fig.6 The response of the SUI to ultrasonic wave at different frequencies

建如图 5 所示 SUI 超声传感系统,并对其性能进行分析测试。光源、探测器、以及 SUI 中的环路光路部分集成于仪器机箱内部,形成超声信号光学解调仪。直线段传感光纤为超声探头,需要测试时与解调仪器通过光纤法兰连接。

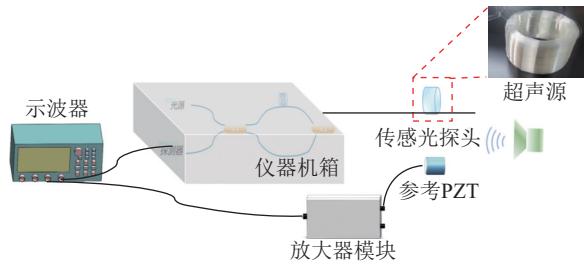


图 5 实验平台搭建

Fig.5 Experimental set-up

测试时,通过 PZT 施加不同频率超声信号,由 SUI 传感光探头进行接收,SUI 系统输出信号由示波器进行采集与显示。为保证施加超声源的声压一致性,采用标准声发射传感器(型号 REF-VL, 响应频带 30~600 kHz, 灵敏度 57 dB)对施加声压进行监测与校准。测试过程中,以 10 kHz 为阶梯,超声测量范围为 30~150 kHz。

实验结果表明,SUI 可有效捕获不同频率的超声信号。图 6 为传感器对 40 kHz、80 kHz 以及 120 kHz 的响应波形及其频谱。可见,所提 SUI 系统可以有效捕获不同频率超声的波形,捕获波形与参考 PZT 获取波形具有一致性,且通过频谱分析可见超声波频率特性未失真。

受 SUI 传感机理影响,该系统在不同频率超

声的响应灵敏度不同, 因此文中进一步分析了 SUI 系统的幅频响应特性, 如图 7 所示。由图 7 可见, 系统的幅频响应曲线在 90~100 kHz 范围内出现峰值, 与理论分析结果较为一致。SUI 系统在 30~150 kHz 范围内, 频谱相对较为平坦, 幅频特性变化在 50% 以内, 满足宽频超声的测量需求。

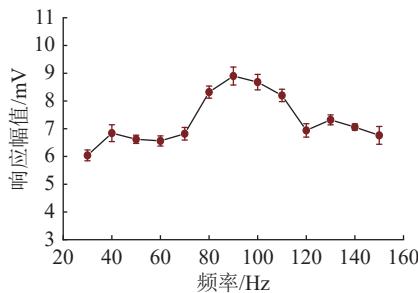


图 7 SUI 对不同频率超声的响应幅值

Fig.7 The amplitude response to different frequencies of ultrasound of SUI

需要说明的是, 图 7 所得到的 SUI 系统对超声的幅频特性结果略优于图 4 所得到的理论分析幅频特性。这是因为文中所采用传感光纤盘的直径为 7 cm, 卷制高度为 3 cm, 该尺寸与声波的波长相当。此时, 声波作用于传感光纤上各点的声压不同, 超声频率变化时, 声波的波长不同将导致声波对传感光纤的声光调制的累积效果存在差异^[27]。因此, 图 7 得到的实测结果与图 4 存在部分偏差。

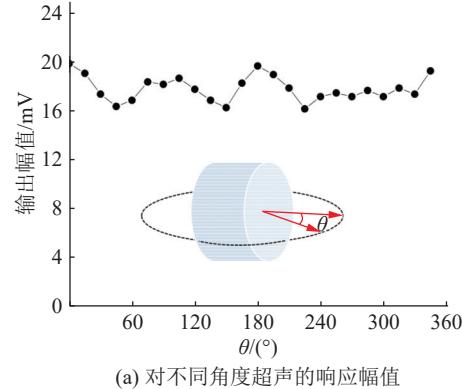
方向敏感性是声传感器的重要性能指标。所提 SUI 传感器在其径向平面内, 传感器具有完全圆对称结构, 因此在该平面内具有均匀的方向敏感性。在传感器轴向平面, 由于声波对光纤的调制路径具有差异, 因此响应灵敏度会具有一定的方向敏感性, 因此文中分析测试传感器在轴向平面的响应特性, 测试结果如图 8 所示。

由图 8 可见, 由于不同方向超声作用时对光路的调制效率不同, 因此传感器对不同方向的响应具有一定差异, 但整体方向性响应差异较小, 波动幅度小于 25%。其中, 传感器对于沿其轴向作用的超声具有最高的响应度。

3.2 PD 声发射信号检测

为进一步验证 SUI 系统对监测 PD 声发射信号的有效性, 文中在变压器油内放置针板电极, 以模拟产生 PD, 并通过所提出 SUI 系统对其 PD 过程的声发射信号进行监测, 实验装置如图 9 所示。针板电极间距为 2 cm, SUI 光纤传感探头浸没于变压器油中, 距离放电位置距离为 40 cm。

在 13.5 kV 下针板电极产生放电, SUI 系统能够有效捕获到该 PD 过程中所伴随的超声信号。通



(a) 对不同角度超声的响应幅值

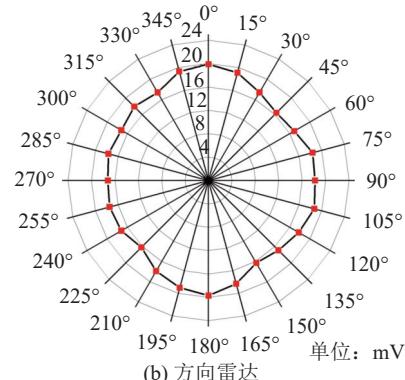


图 8 SUI 对超声的方向敏感性
Fig.8 Orientation sensitivity of SUI to ultrasound

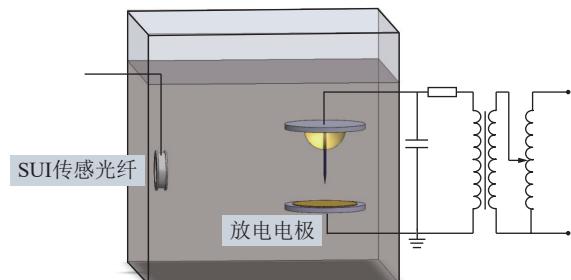
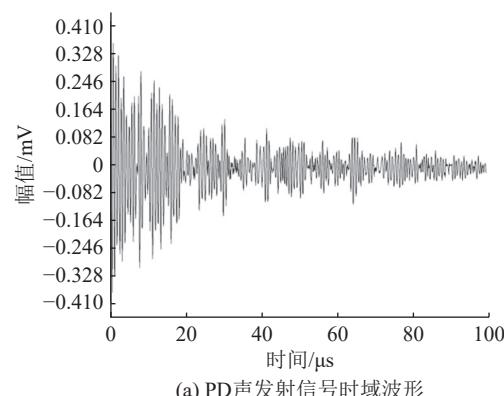


图 9 PD 超声探测系统
Fig.9 PD ultrasound detection system

过对捕获超声信号进行频谱分析可知, 本次放电产生的超声信号的主频为 150 kHz, 如图 10 所示。实验结果证明了所提出 SUI 对局放声发射信号探测的有效性可行性。



(a) PD声发射信号时域波形

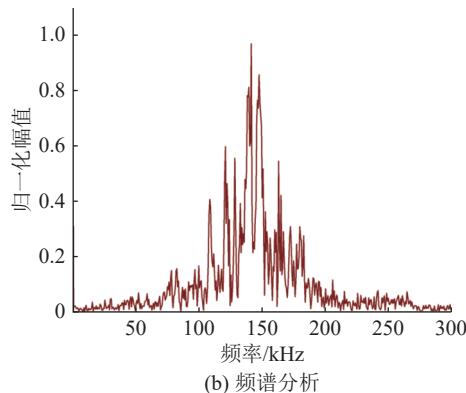


图 10 PD 声发射信号探测结果

Fig.10 Detection results of PD acoustic emission signals

4 结论

文中提出一种基于 SUI 的超声传感技术, 可实现电力设备 PD 声发射信号的高效探测与捕获。首先, 分析 SUI 光路结构, 明确其对外界超声的感知机理, 并建立 SUI 对声波的传感方程。理论分析结果表明, 通过控制 SUI 结构中传感光纤、延迟光纤参数, 可有效调制传感系统的响应灵敏度与频带。然后, 面向电力设备微弱超声信号探测需求, 提出传感器延迟光纤为 1 km, 传感光纤为 2 km 的 SUI 结构参数, 试验结果表明, 所提 SUI 超声传感系统具有较为平坦的幅频特性与方向特性, 可实现在 30~150 kHz 的频率范围内宽频、高灵敏度超声探测。最后, 所组建系统成功实现对针板电极放电声发射信号的有效捕获, 验证系统的有效性与应用潜力。文中研究为电力设备 PD 光学探测提供一种全新的技术途径。

此外, 文中研究表明, 由于声波波长与传感光纤头的尺寸相当, 超声波与传感光纤头的耦合作用也将影响系统的超声传感特性, 该部分工作将在下一步研究工作中深入开展。

参考文献:

- [1] 秦剑华, 刘洋, 杨景刚, 等. 电力电缆局放及温度的多维度检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 92-96.
QIN Jianhua, LIU Yang, YANG Jinggang, et al. Research on multi-dimensional detection method of partial discharge and temperature of power cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 92-96.
- [2] 罗海静, 柳贊. 10 kV XLPE 电缆中局部放电声波衰减规律研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 186-195.
LUO Haijing, LIU Yun. Study on the acoustic wave attenuation of partial discharge in 10 kV XLPE cable[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 186-195.
- [3] 李岩, 颖冠成, 宋浩源, 等. 绝缘层温度对 XLPE 局部放电的影响特性[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(6): 260-268.
LI Yan, ZHEN Guancheng, SONG Haoyuan, et al. Influence characteristics of insulation layer temperature on partial discharge of XLPE[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 260-268.
- [4] 张宇帅, 隋浩冉, 韩世杰, 等. 一种用于高压电气设备局放超声检测的新型 EFPI 传感器[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 204-209.
ZHANG Yushuai, SUI Haoran, HAN Shijie, et al. A novel type of EFPI sensor for partial discharge ultrasonic testing of high-voltage electrical equipment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 204-209.
- [5] MA G M, WANG Y, QIN W Q, et al. Optical sensors for power transformer monitoring: a review[J]. High Voltage, 2021, 6(3): 367-386.
- [6] GAO C F, YU L, XU Y, et al. Partial discharge localization inside transformer windings via fiber-optic acoustic sensor array[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1251-1260.
- [7] ZUO C, GANG T T, HU M L, et al. 3D imaging of mural model in air using sensitivity-improved ultrasonic sensor based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer[J]. Optik, 2019, 185: 1205-1212.
- [8] GANG T T, ZUO C, LIU X B, et al. High-sensitive ultrasonic sensor using fiber-tip PVC diaphragm Fabry-Perot interferometer and its imaging application[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279: 474-480.
- [9] 韩世杰, 吕泽钦, 隋浩冉, 等. 基于 EFPI 传感器的 GIS 局部放电模式识别研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 149-155.
HAN Shijie, LYU Zeqin, SUI Haoran, et al. Partial discharge pattern recognition in GIS based on EFPI sensor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 149-155.
- [10] WU Q, OKABE Y. Waveform reconstruction for an ultrasonic fiber Bragg grating sensor demodulated by an erbium fiber laser[J]. Applied Optics, 2015, 54(4): 694-698.
- [11] YU F M, OKABE Y. Optical fiber sensor for ultrasonic detection at high temperature[J]. Transactions of the JSME (in Japanese), 2018, 84(857): 17-00406.
- [12] ZHANG H Q, WU Q, XU W K, et al. Damage evaluation of complex composite structures using acousto-ultrasonic detection combined with phase-shifted fiber Bragg grating and dual-frequency based data processing[J]. Composite Structures, 2022, 281: 115000.
- [13] ZHANG Y M, ZHU L Q, LUO F, et al. Fabrication and characterization of metal-packaged fiber Bragg grating sensor by one-step ultrasonic welding[J]. Optical Engineering, 2016, 55(6): 067103.
- [14] LI C, PENG X B, ZHANG H, et al. A sensitivity-enhanced flexible acoustic sensor using side-polished fiber Bragg grating[J]. Measurement, 2018, 117: 252-257.
- [15] 邹子杰, 秦忠宝, 李易依, 等. 基于耦合锥结构的光纤超声传感器优化设计[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 45-53.
ZOU Zijie, QIN Zhongbao, LI Yiyi, et al. Optimization design

- of fiber optic ultrasonic sensor based on coupling cone structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 45-53.
- [16] GANG T T, HU M L, QIAO X G, et al. Fiber-optic Michelson interferometer fixed in a tilted tube for direction-dependent ultrasonic detection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 88: 60-64.
- [17] 杨志, 黄雯利, 赵丽娟. 光纤传感技术在油浸式电力变压器状态监测应用的研究进展[J]. *高压电器*, 2023, 59(6): 137-146. YANG Zhi, HUANG Wenli, ZHAO Lijuan. Research progress of fiber-optic sensing technology in condition monitoring and application in oil-immersed power transformer[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(6): 137-146.
- [18] ZHANG Y, ZOU J, HE J J. Temperature sensor with enhanced sensitivity based on silicon Mach-Zehnder interferometer with waveguide group index engineering[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26057-26064.
- [19] 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.
- [20] POSADA-ROMAN J, GARCIA-SOUTO J A, RUBIO-SERRANO J. Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems[J]. *Sensors*, 2012, 12(4): 4793-4802.
- [21] SONG B B, ZHANG H, MIAO Y P, et al. Highly sensitive twist sensor employing Sagnac interferometer based on PM-elliptical core fibers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15372-15379.
- [22] SU H, GAO L X, ZHANG Z R, et al. Optical fiber temperature sensor with Vernier effect formed by Mach-Zehnder interferometer cascaded Sagnac interferometer based on Hollow-core
- photonic crystal fiber[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2022, 52: 101085.
- [23] XU D Q, DOU L Y, CAO D Z, et al. Displacement measurement in a Sagnac interferometer with thermal light second-order correlation[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(18): 5576-5580.
- [24] 马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1978. BORN M, WOLF E. *Principles of optics*[M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [25] YUAN W, PANG B, BO J, et al. Fiber-optic sensor for acoustic localization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(10): 1892-1898.
- [26] ZHANG Zhixian, LEI Jiali, CHEN Weigen. Oil-paper insulation partial discharge ultrasonic multifrequency sensing array based on fibre, ptic Fabry-Perot sensor[J]. *High Voltage*, 2021, 7(2): 325-335.
- [27] ZHOU Hongyang, MA Guoming, LI Chengrong, 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: 24-32.

作者简介:



谢天喜

谢天喜(1983),男,博士,高级工程师,从事电力设备绝缘结构优化与电力系统过电压工作(E-mail: spone@foxmail.com);

陆云才(1982),男,硕士,高级工程师,从事高电压技术研究及设备状态评价工作;

石琦(1994),男,硕士,工程师,从事高电压技术研究及设备状态评价工作。

Sagnac unbalanced interferometric ultrasound sensing for localised acoustic emission detection

XIE Tianxi¹, LU Yuncai², SHI Qi², ZHANG Yutong³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The detection and capture of partial discharge (PD) signals are crucial for sensing and assessing the insulation state of power equipment, as well as for fault warning and diagnosis. An ultrasonic sensing technology based on Sagnac unbalanced interference (SUI) is proposed to effectively detect and capture PD acoustic emission signals from power equipment. The structure of the SUI optical path and the process of optical path interference are analyzed. It clarifies the mechanism by which the SUI perceives external ultrasound and establishes the sensing equations for acoustic waves. In order to meet the demand for detecting weak ultrasound signals in power equipment, the research also analyzes the influence of SUI optical path structure parameters on ultrasonic sensing characteristics and proposes optimal structural design parameters for the sensor. Experimental test results demonstrate that the proposed SUI system can detect ultrasound in the frequency range of 30 kHz to 150 kHz, exhibiting wide frequency coverage and high sensitivity. Moreover, it successfully captures the acoustic emission signals of needle plate electrode discharge. The proposed SUI shows the advantages of low cost, simple and stable structure, which paves the way for the optical detection of partial discharges in power equipment.

Keywords: acoustic sensing; partial discharge; fibre optic sensing; fibre optic interference; ultrasound detection; acoustic emission

(编辑 方晶)