第 52 卷 第 2 期：908-918 高电压技术 Vol.52, No.2: 908-918
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250980

气体绝缘开关柜多源局部放电荧光光纤检测及双端光耦合信号增强

程宏图[1]，冯 杰[1]，胡 启[2]，沈 洋[1]，蔡 磊[1]，方 志[1]
（1. 南京工业大学电气工程与控制科学学院，南京 211816；2. 南京开关厂股份有限公司，南京 211100）

摘 要：针对气体绝缘设备局部放电(partial discharge，PD)检测中传统单端输出构型光纤传感系统存在信号强度随传输距离的增加而衰减严重、灵敏度不足的问题。研究了单端输出光纤传感系统中感光点与放电源相对位置对信号强度的影响，在此基础上提出了双端光耦合型光纤传感系统设计方案，通过引入额外信号增量项优化传感性能，并对两种系统的信号强度特性进行对比分析。实验结果表明：相较于单端输出传感系统，双端光耦合传感系统因额外信号增量项的引入而在信号强度上呈现显著优势。具体而言，20 cm 荧光光纤所能检测到的 PD 脉冲数量提升了约 26.57%，平均放电幅值提高了约 27.55%，最大放电幅值增长了约 21.63%。对于长度为 3 m 的光纤，上述指标分别提升了约 735%、118.4%和 311.1%。此外，双端传输系统也展示出了 PD 源定位的良好潜力，测试数据与基准值的误差不超过 3%。该研究结果为气体绝缘设备 PD 光纤检测灵敏度优化提供了参考。

关键词：局部放电；光纤传感器；光耦合；双端信号增强；定位

Multi-source Partial Discharge Detection with Fluorescent Optical Fiber and Dual-ended Optical Coupling Signal Enhancement for Gas-insulated Switch Cabinet

CHENG Hongtu[1], FENG Jie[1], HU Qi[2], SHEN Yang[1], CAI Lei[1], FANG Zhi[1]
(1. College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;
2. Nanki Switchgear Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract：In the detection of partial discharge (PD) in gas-insulated equipment, the traditional fiber optic sensing system with a single-ended output configuration suffers from severe attenuation of signal intensity as the transmission distance increases, along with insufficient sensitivity. This paper investigates the influence of the relative position between the photosensitive point and the PD source on the signal intensity in a single-ended output fiber optic sensing system. On this basis, a design scheme for a dual-ended optical coupling fiber optic sensing system is proposed, where the sensing performance is optimized by introducing an additional signal increment term. Furthermore, a comparative analysis of the signal intensity characteristics of the two systems is conducted. Experimental results show that, compared with the single-ended output sensing system, the dual-end optical coupling sensing system exhibits significant advantages in signal intensity due to the introduction of the additional signal increment term. Specifically, for a 20 cm fluorescent optical fiber, the number of detectable PD pulses is increased by approximately 26.57%, the average discharge amplitude by about 27.55%, and the maximum discharge amplitude by roughly 21.63%. For an optical fiber with a length of 3 m, the above-mentioned indicators are increased by approximately 735%, 118.4%, and 311.1% respectively. In addition, the dual-end transmission system also demonstrates good potential for PD source localization, with the error between the test data and the reference value not exceeding 3%. The research results of this paper provide a reference for optimizing the PD optical fiber detection sensitivity of gas-insulated equipment.

Key words：partial discharge; optical fiber sensor; optical coupling; dual-end signal enhancement; localization

基金资助项目：国家资助博士后研究人员计划 B 档(GZB20240309)；江苏省卓越博士后计划(2024ZB788)；中国博士后科学基金(2024M751416)。
Project supported by Postdoctoral Fellowship Program(Grade B) of China Postdoctoral (GZB20240309), Jiangsu Funding Program for Excellent Postdoctoral Talent (2024ZB788), China Postdoctoral Science Foundation (2024M751416).

0　引言

局部放电(partial discharge，PD)检测是电力设备内部绝缘状态监测的有效手段[1-3]，在现有各类PD传感器中[4-5]，荧光光纤具有较强的抗电磁干扰能力、较高的检测灵敏度等优点，且其本体绝缘，几乎不影响电力设备内电场分布[6]。该领域的开创性研究始于Katsuoshi Muto团队，其于1989年成功研制出首套基于荧光光纤的PD检测系统[7]。1991年法国学者A.Beroul将荧光光纤法与脉冲电流法的PD检测性能进行对比[8]，结果表明光学方法具有更高灵敏度。2005年奥地利学者R.Schwarz等进一步指出，荧光光纤传感器较传统石英光纤具有更优的检测灵敏度[9]，自此荧光光纤作为PD传感器获得更多关注。

和特高频传感器[10-11]、暂态地电波传感器[12-13]和超声波传感器[14]相比，荧光光纤传感器的一大突出优势在于其绝缘特性，这赋予了荧光光纤可嵌入性及灵活布设性，为电力设备分布式PD检测提供了可能。近年来，基于荧光光纤的PD检测与故障诊断研究持续活跃[15-17]，主要包括荧光光纤传感器发光机理及设计理论研究和电力设备内部的应用研究。例如，Wu等将荧光光纤应用于气体绝缘开关设备和电力变压器的PD检测中，并发现当PD源被完全遮挡时，光信号强度衰减为60%以上[18]。Meng等在高压供电航天器的PD检测中应用荧光光纤作为传感器，同样发现在5 m的范围之内，每增加1 m，随着放电源与检测面距离增加，PD光信号脉冲幅值衰减15%~20%[19]。Amizhtan SK等以石英光纤为基底，通过改良荧光光纤的二维材料，显著提升了PD检测性能，其中关键指标线性响应度提升了约30%[20]。Hu等提出一种Ce/Tb共掺杂的新型荧光光纤传感器，以石英光纤为基底，从理论上研究了传感器的发光机理与PD检测原理，其灵敏度提升了约2.4倍[21]。上述研究均从不同的角度证实了荧光光纤传感器在多种电力设备中检测PD的可行性，同时发现荧光光纤的布置方式与PD源的相对位置会极大地影响PD信号质量。

研究表明对于气体绝缘设备，PD光信号强度与传感器至放电源的距离呈现出显著的反比关系[22-23]。这就使得若仅在设备局部区域布设单根荧光光纤，只能检测有限范围内的放电信号，难以实现全局检测，且面临信号强度不足、信噪比降低的挑战，限制了荧光光纤优势的充分发挥。因此，亟须提出可靠的分布式检测方案。然而，目前基于荧光光纤的分布式PD检测研究仍相对匮乏，PD光信号强度与荧光光纤相对于PD源的位置之间的关系尚未完全阐明。此外，研究表明，对于目前的荧光光纤检测系统，随着光纤长度的增加，PD检测灵敏度呈现出显著下降的趋势[24]，且尚未提出可靠的解决方案，这限制了荧光光纤传感系统在电力设备内PD检测的推广应用。

本研究聚焦荧光光纤PD分布式检测，以真实气体绝缘开关柜内典型绝缘缺陷所引发的PD为研究对象，在实际开关柜中布置了荧光光纤传感器。获得了PD光信号特征量与传感器感光位置的关联关系，并针对传统单端输出光纤感光区域与光转换区距离较远从而导致PD信号强度衰减过大的问题，开发了基于双端光耦合的荧光光纤PD传感系统，较传统方法展现出了更强的信号强度，且具备PD源定位的潜力。本文的研究成果为气体绝缘设备分布式PD检测提供了技术参考。

1　PD荧光光纤传感系统信号强度影响因素分析

PD光信号的传输可分为2个主要部分：原始光信号在气体绝缘介质中的传播以及光信号在光纤中的传输。以下将分别对这两部分进行分析。

光在介质中传播过程中的衰减可以由式(1)来表示[15]。

$$I' = I\mathrm{e}^{-\mu d} \tag{1}$$

式中：d为光程长度；I'为光在介质中传输d距离后的强度；I为初始光强；μ为光在介质中的线性衰减系数。

当光源垂直向某一表面发射辐射时，该表面的辐照度与光源的发光强度呈正相关，而与光源至表面距离的平方呈反相关。因此，给定点的照度由2个主要参数决定，即辐射源的绝对发光强度以及辐射源与被照射表面之间的空间距离。这2个参数都起着至关重要的作用[25]，其关系可以用式(2)来表示。

$$E = \frac{\Delta f}{\Delta S} = \frac{I\Delta\omega}{\Delta S} = \frac{I\Delta S\cos\theta}{r^2/\Delta S} = \frac{I\cos\theta}{r^2} \tag{2}$$

式中：E为光照度；Δf为点光源发出的光通量；$\Delta\omega$为点光源发射辐射的立体角；ΔS为被照物体的表面积；θ为发射方向与被照物体表面法线之间的夹角；

r 为被照物体表面与光源间的距离。

结合上述理论可知，若要定量研究光纤感光点对 PD 信号强度的影响，需要控制 PD 源到光纤传感器的距离不变，且在实验过程中光纤布置方式也须不变。

荧光通过光纤传输不仅受到光纤自身材料特性的影响，还受到散射损耗的影响，而散射损耗主要由瑞利散射决定。瑞利散射损耗[26]可以用式(3)进行计算。

$$a_{\text{scat}} = \frac{1}{3}\cdot\frac{8\pi^3}{\lambda^4}\cdot\frac{n_{\text{s}}}{n_0^2}(1-\cos^2\xi) \tag{3}$$

式中：a_{scat} 为散射截面面积；λ 为光的波长；n_{s} 为光纤材料的折射率；n_0 为周围介质的折射率；散射角 ξ 描述了入射光方向与散射光方向之间的夹角。本文的研究对象始终是空气介质下的 PD，荧光光纤的材质也不进行更换，从而使得瑞利散射对实验结果的影响可几乎忽略不计。

荧光光纤传输过程中存在约 300 dB/km 的传输损耗，这种损耗导致的功率衰减可近似由式(4)表示[27]。

$$A(\lambda) = a(\lambda)L = -10\lg(P_0/P_{\text{i}}) \tag{4}$$

式中：$A(\lambda)$为总的光衰减系数；$\alpha(\lambda)$为单位长度荧光光纤的衰减系数；L 为荧光信号在荧光光纤中的传输长度；P_0 和 P_{i} 分别对应荧光光纤的输出光功率和输入光功率。本文中，将二者的比值定义为荧光光纤的传输效率 η，计算式如式(5)所示。

$$\eta = P_0/P_{\text{i}} \tag{5}$$

当光信号从荧光光纤耦合到横截面积相同的传输光纤时，其耦合效率可以用式(6)来表示。

$$\eta_{\text{coupling}} \propto \Delta P = \left(\frac{2n_{\text{fiber}}A_{\text{core}}}{D}\right)^2 \tag{6}$$

式中：η_{coupling} 为光纤转接的耦合效率；ΔP 为转接过程中的光损耗；n_{fiber} 为光纤的折射率；A_{core} 为纤芯的横截面积；D 为荧光光纤和传输光纤之间的等效距离。不难发现，较短的对准距离和较大的纤芯横截面积有助于提高耦合效率，从而减少光损耗并提升信号传输质量。

此外，荧光信号的衰减不仅受散射损耗和耦合效率的影响，还受激发源特性、光纤的光学响应特性以及探测器性能的影响。荧光信号的输出强度可由式(7)[28]近似表示。

$$f_i(t) = \int_0^t E_0(t')I_i(t-t')g_i(t')\mathrm{d}t' \tag{7}$$

式中：$f_i(t)$为在 t 时刻的最终输出信号强度；$E_0(t')$为激发源在时刻 t'的脉冲强度；$I_i(t-t')$为从激发时刻 t'产生的荧光信号；$g_i(t')$为探测器系统响应函数；下标 i 为不同的检测通道。

综上所述，为探究光纤与放电源相对位置对检测性能的影响，本文中维持外施电压等级不变，从而控制系统的初始光强 I 和光照度 E 保持不变。在此条件下，理论上对于单端输出传感系统，信号强度会随传播距离 L 的增加而衰减，二者关系的定量研究将在下文展示。

2 实验平台与实验结果

在本章中，首先搭建了以真实开关柜为放电腔体的 PD 实验平台，并采取控制变量法，开展多源多类型 PD 的分布式检测实验，分析不同条件下 PD 特性，继而深入探究感光点与 PD 源相对位置对输出信号的影响机制。最终，基于前期研究成果，创新性设计并开发了双端光耦合的检测系统，有效提升了 PD 信号检测强度。

2.1 实验平台

本文中搭建了如图 1 所示的 PD 实验平台。调压器通过电源滤波器向试验变压器供电，实验变压器通过保护电阻将高压施加于开关柜高压端。开关柜为 ESRAir 系列 10 kV 高压开关柜设备。将绝缘缺陷设置在开关柜的主气室当中，缺陷附近设置荧光光纤传感器。耦合电容器与测量阻抗共同组成了测量支路，用于测量 PD 脉冲电流信号，该信号输入到 PD 检测仪，经处理后由采集卡采集，并由计算机显示、存储和后续处理。PD 光信号由荧光光纤检测，并传输至传输光纤和光电倍增管(photomultiplier，PMT)进行光电转换，同样输入至采集卡。PMT 由开关电源经保护和分压电阻模块供电。

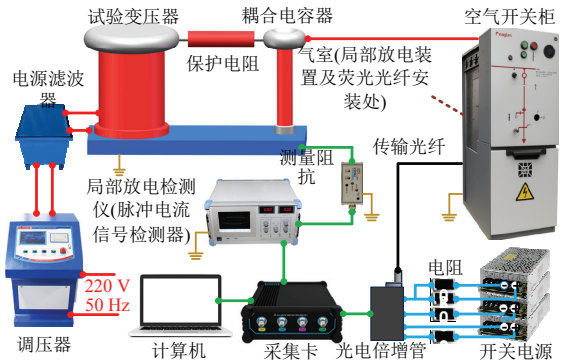


图 1 PD 实验平台

Fig.1 PD experimental setup

绝缘缺陷与荧光光纤传感器及传输光纤的布置图如图 2 所示。本文中，共设计了 3 种绝缘缺陷类型，分别采用针尖来模拟金属突出物缺陷引发的电晕放电，在开关柜上方母线附近的绝缘子上黏附金属片来模拟绝缘子表面污秽缺陷引发的沿面放电，在开关柜电缆室的对接处的载流线上设置金属碎屑用于模拟设备长时间服役状态下内部的金属微粒诱发的悬浮电位放电[29-30]。具体地，突出物缺陷采用铜针来进行模拟，针长约 7.5 cm，针尖曲率半径约 5 μm，铜针插入后与外壳之间的间距约 8 mm；污秽缺陷采用条状铜模拟，其长、宽分别近似为 10、5 cm，铜条贴附后与高压端、外壳的间距分别约为 5 cm 和 3 cm；悬浮颗粒缺陷通过将毫米级的铜粒黏附在高压极和接地端中间的线上来进行模拟。设备内部 3 类缺陷的局部放大图分别如图 2(b)—(d)所示。为探究荧光光纤传感器与传输光纤耦合处的位置对 PD 特征量是否有影响，荧光光纤与传输光纤的转接区分别设置在区域 I 和区域III。

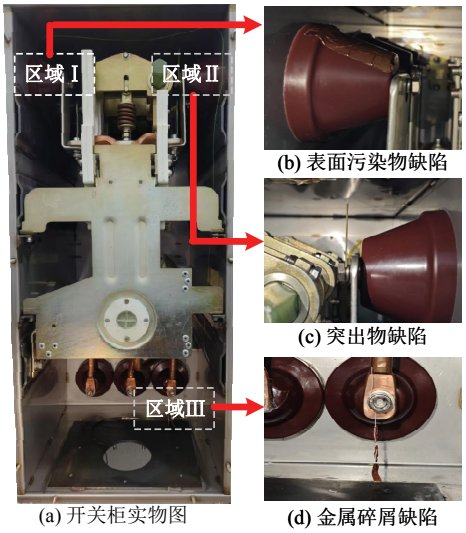


图 2　绝缘缺陷与光纤布置

Fig.2　Insulation defects and optical fiber arrangement

2.2　多源多类型 PD 的检测结果

本文中所使用的荧光光纤直径为 1 mm，感光波长范围为 300~500 nm，荧光量子产率约为 0.7，其具体使用长度在后文中提及。实验在区域 I 与区域 II 两处设置了转接传输光纤。考虑到实验过程中存在噪声干扰，本文首先对放电信号开展滤波预处理。以突出物缺陷的 PD 信号为例，通过傅里叶变换将时域信号转换至频域，并保留 1 000 Hz 以上(预实验结果表明 1 000 Hz 是较为合适的截止频率)的信号，再将滤波后的频域信号转换为时域信号。图 3(a)呈现了 10 个周期的原始时域信号，可清晰观察到原始放电信号中存在明显的凸起型背景噪声，其幅值约为 10 mV。而图 3(b)为滤波后的信号，可以看到噪声被大幅降低，幅值仅约为 0.5 mV。本文中，将幅值超过 0.5 mV 的脉冲信号界定为有效放电事件。

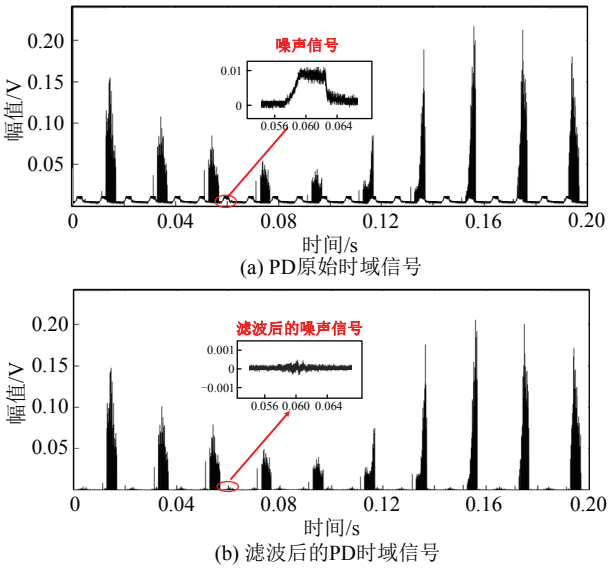


图 3　滤波前后信号对比

Fig.3　Comparison of signals before and after filtering

图 4(a)展示了单个 PD 脉冲信号而图 4(b)为单个工频周期内的信号。本文中，将脉冲上升沿起始点和下降沿终点分别标记为 Q_1 和 Q_3，其对应的时刻分别记为 T_{st} 和 T_{end}，而脉冲幅值点标记为 Q_2，其对应的时刻记为 T_{peak}。从 T_{st}~T_{peak} 时刻的时间定义为上升沿时间，而 T_{peak}~T_{end} 时刻定义为下降沿时间，Q_2 对应的纵坐标值记为脉冲幅值。

特征量的计算以 100 个交流周期作为统计窗口。放电次数为有效放电事件的总计；平均放电幅值通过对所有有效放电事件的幅值进行算术平均计算得出；最大放电幅值则直接选取有效放电事件中幅值的最大值，以此实现对放电过程强度特征的量化分析。图 5 展示了仅在开关柜中设置金属突出物缺陷时，荧光光纤与传输光纤的耦合处(以下简称耦合处)分别在区域 I 和III处的实验结果。在 2.2 节中，荧光光纤的长度为 100 cm。其中，图 5(a)为 PD 脉冲时域信号，而图 5(b)给出了 PD 脉冲数量、脉冲平均幅值和最大值。可以发现当耦合处位于区域 I 时的信号明显高于耦合处位于区域III的信号。具体来说，相较于耦合处在 I 区时，耦合处置于III区后，PD 脉冲数量减少了约 92.86%，平均幅值下降了约

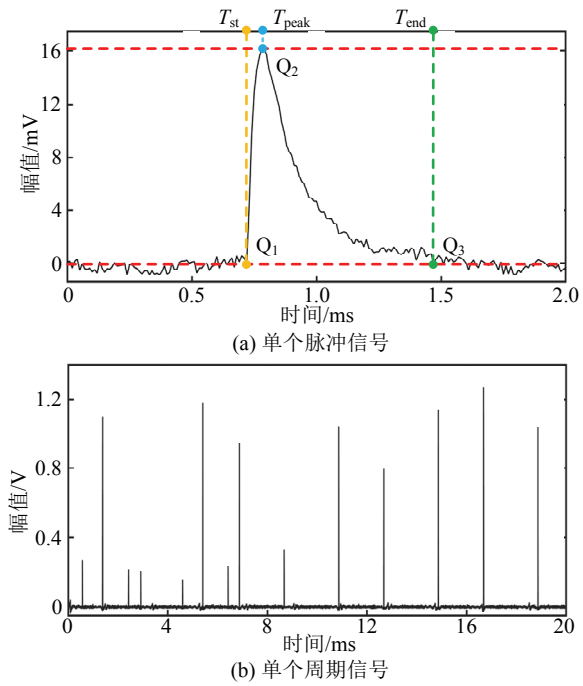


图 4 突出物缺陷 PD 信号

Fig.4 PD signals of protrusion defects

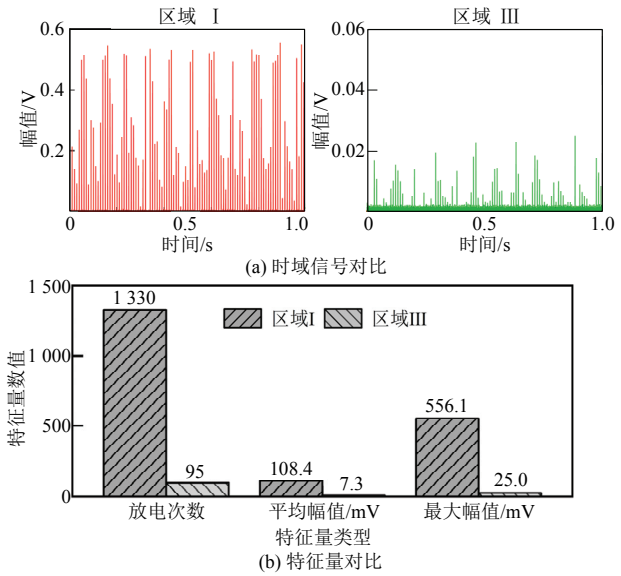


图 5 突出物缺陷的 PD 信号与特征量

Fig.5 PD signals and characteristic quantities of protrusion defect

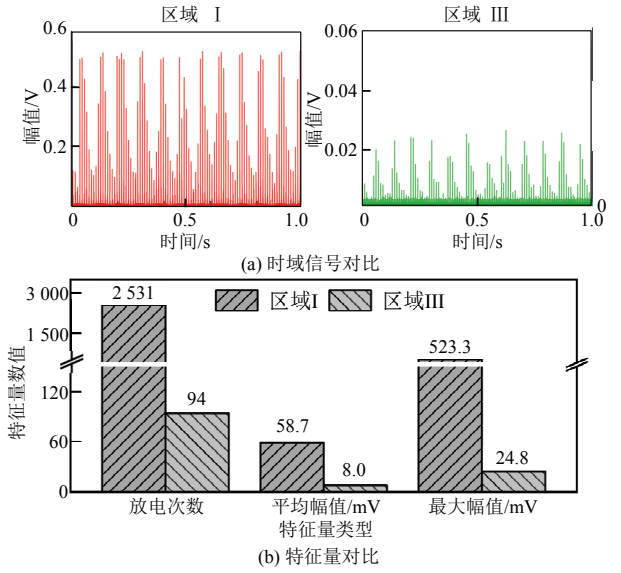


图 6 突出物缺陷和表面污秽缺陷的 PD 信号与特征量

Fig.6 PD signals and characteristic quantities of protrusion defect and surface contamination defect

93.26%，最大幅值下降了约 95.51%。结合式(4)和式(7)不难推测，当耦合处靠近绝缘缺陷部位时(如 2.1 节中所示，金属突出物缺陷设置在Ⅱ区，其到Ⅰ区的距离明显短于到Ⅲ区的距离，实际上，缺陷到二者的距离分别为 36 cm 和 64 cm)，这使得耦合位置处于Ⅲ区时，荧光信号在传输过程中产生的损耗更高。从而使得 PMT 的输入信号较弱，PD 信号各特征量水平较低。

图 6 展示了同时检测突出物缺陷和表面污秽缺陷放电信号时，荧光光纤与传输光纤的耦合处分别在区域Ⅰ和Ⅲ处的实验结果。其中，图 6(a)为 PD 脉冲时域信号，而图 6(b)给出了 PD 脉冲数量与脉冲平均幅值和最大值。可以发现当耦合处位于区域Ⅰ时的信号明显高于耦合处位于区域Ⅲ的信号。与耦合处于Ⅰ区的情况相比，当耦合处置于Ⅲ区后，PD 脉冲数量减少约 96.28%，平均幅值下降约 86.37%，最大幅值下降约 95.26%。

图 7 呈现了同时检测表面污秽缺陷和金属微粒缺陷的放电信号时，荧光光纤与传输光纤的耦合位置分别处于区域Ⅰ和Ⅲ的实验结果。其中，图 7(a)为 PD 脉冲时域信号，而图 7(b)给出了 PD 脉冲数量与脉冲平均幅值和最大值。可以发现当耦合处位于区域Ⅰ时的信号明显高于耦合处位于区域Ⅲ的信号。相较于耦合处在Ⅰ区时，耦合处置于Ⅲ区后，PD 脉冲数量减少了约 97.92%，平均幅值下降了约 91.77%，最大幅值下降了约 92.44%。

图 8 展示了同时检测到突出物缺陷、表面污秽缺陷和金属微粒缺陷的放电信号时，荧光光纤与传输光纤的耦合处分别在区域Ⅰ和Ⅲ处的实验结果。图 8(a)为 PD 脉冲时域信号，而图 8(b)给出了 PD 脉冲数量与脉冲平均幅值和最大值。可以发现当耦合处位于区域Ⅰ时的信号明显高于耦合处位于区域Ⅲ

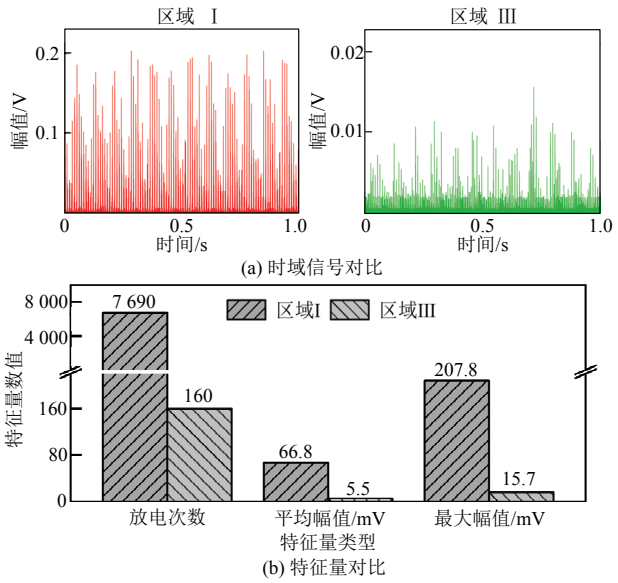


图 7　表面污秽缺陷和金属微粒缺陷的 PD 信号与特征量

Fig.7　PD signals and characteristic quantities of surface contamination defect and floating potential defect

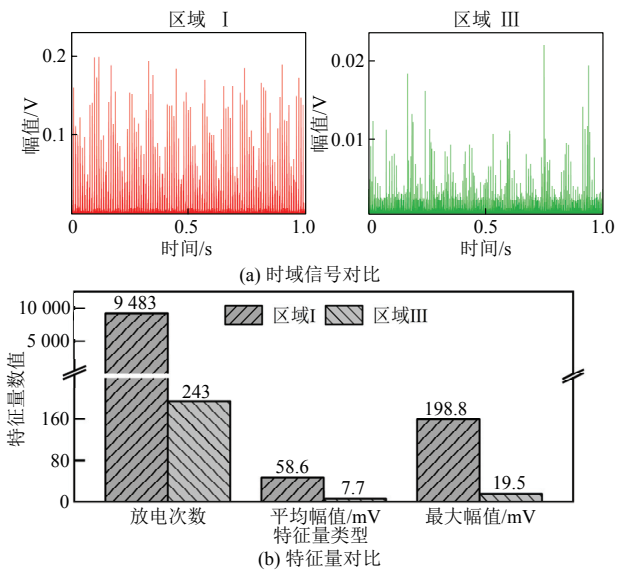


图 8　突出物缺陷、表面污秽缺陷和金属微粒缺陷的 PD 信号与特征量

Fig.8　PD signals and characteristic quantities of protrusion defect, surface contamination defect and metal particle defect

的信号。与耦合处于 I 区的情况相比，当耦合处置于III区后，PD 脉冲数量减少约 97.44%，平均放电幅值下降约 86.86%，最大放电幅值下降约 90.19%。

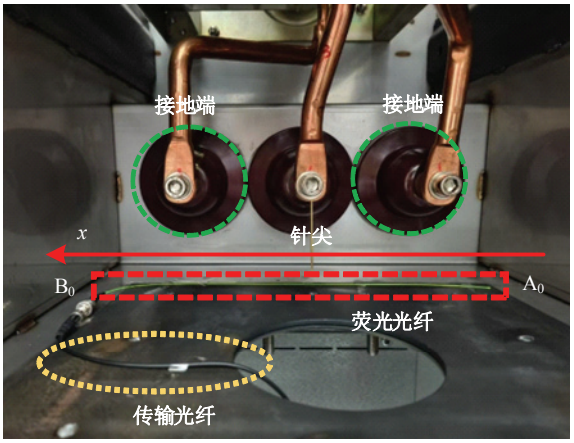
上述结果表明，耦合区域的变化对 PD 检测的信号强度有显著影响。这是因为在分布式 PD 检测系统中，荧光光纤上的每个位置都可作为 PD 光信号的潜在接收点，光信号在此处进行荧光转换和传输。然而，光在荧光光纤中的传输会因吸收、散射等效应产生不可忽视的损耗。该现象进一步印证了探究光接收点位置对分布式光纤传感器信号强度影响的重要性，并需要提出可行的解决方案，以确保即使传感器与 PD 源的相对位置发生变化，PD 检测系统仍能保持高信号强度。

从系统性能验证来看，荧光光纤传感系统成功实现了分布式 PD 检测功能，能够有效叠加并区分来自不同区域、不同类型的 PD 信号。现有研究已证实利用数学算法可实现放电模式的分类识别[31]，但鉴于本文核心研究内容聚焦于分布式检测系统的信号增强技术，因此受限于篇幅未进行基于算法的模式识别工作。

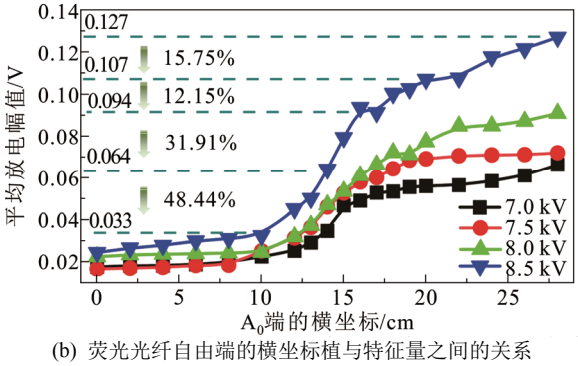
2.3　传感器与放电源相对位置对 PD 信号的影响

在本节中，选取突出物缺陷引发的电晕放电作为检测对象，探究了传感器与放电源相对位置对 PD 信号的影响。

本文的传感器与放电缺陷相对位置示意图如图 9(a)所示。具体而言，突出物缺陷位于开关柜气



(a) 传感器与放电缺陷相对位置示意图



(b) 荧光光纤自由端的横坐标植与特征量之间的关系

图 9　传感器感光点相对位置对 PD 信号的影响

Fig.9　Impact of the sensor's light sensing point relative position on PD signals

室区域内的中间相接头处，且在空间上垂直于光纤传感器。开关柜设备主气室尺寸约为 45 cm×40 cm×

36 cm(图 9(a)的左壁到右壁的距离约为 36 cm)，1 根 30 cm 荧光光纤传感器呈直线排列，荧光光纤的一端悬空(称为 A_0 端)，另一端(称为 B_0 端)通过 A 型微型(subminiature version A，SMA)连接器与传输光纤相连，然后将信号传输至光电转换器。通过调整传输光纤和荧光光纤的位置，可实现荧光光纤相对于 PD 源的相对位置改变。图 9(a)中 PD 源的横轴投影点坐标值为 15 cm。

图 9(b)展示了荧光光纤 A_0 端的横坐标值、施加的电压水平以及 100 个交流周期内 PD 脉冲平均幅值之间的关系(平均放电幅值的计算方法与 2.2 节所述一致)。显然，PD 平均放电幅值与施加的电压水平呈正相关，这可归因于电场强度增强导致的 PD 活动加剧。随着荧光光纤向左移动，其自由端先趋近后远离 PD 源，平均放电幅值呈现持续单调下降趋势，且在靠近放电源的区域下降斜率最为显著。具体来说，在外施电源等级为 8.5 kV 时，自由端坐标分别为 28、18、16、14 cm 和 10 cm 时，PD 信号平均幅值分别为 0.127、0.107、0.094、0.064 mV 和 0.033 mV，平均放电幅值衰减率依次为 15.75%、12.15%、31.91%和 48.44%。这体现了 PD 信号对放电源和传感器之间厘米级别的相对位置的灵敏性。由于目前所使用的传感系统的荧光光纤仅有一端进行光转接，而另一端自由，不进行光的有效传输和转接，因此，将上述构型的荧光光纤传感系统称为单端输出系统。

上述实验现象同样揭示了当前光纤传感系统存在的潜在局限性：结合本节实验结果和式(4)、式(7)可知，对于单端输出系统，当放电源远离耦合区域时，信号强度会显著下降，这限制了光纤分布式 PD 检测的灵敏度和应用。

2.4 双端光耦合构型 PD 光纤传感系统

针对上述问题，本节以突出物缺陷诱发的电晕放电为检测对象，提出了一种基于光耦合技术的双端传输新型传感系统，传统单端传输与本文提出的双端传输拓扑结构分别如图 10(a)和(b)所示。该系统在输入端子之间接入荧光光纤，其两端通过 SMA 连接器与传输光纤相连。然后，利用光耦合技术将传输光纤合并为单一的传输路径，从而形成一个双端光耦合系统。

对于双端光耦合系统，2 条光纤中的光经耦合器件被转接到同一光纤内，引入传输系数 η_1 来量化光纤间的功率传输效率，其表达式如式(8)所示[32]。

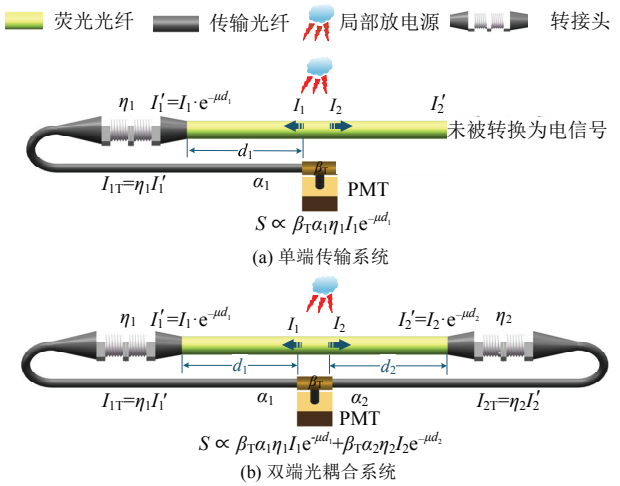


图 10 单端传输与双端光耦合系统光纤传感单元

Fig.10 Optical fiber sensing unit of single-end transmission and dual-end optical coupling system

$$\eta_1=\left(\frac{N_{A2}}{N_{A1}}\right)^2\cdot\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \tag{8}$$

式中：N_{A1} 与 N_{A2} 分别用以表示荧光光纤和传输光纤的数值孔径特性；D_1 和 D_2 分别为 2 类光纤的纤芯直径参数。此时，光通过光纤传输后的光强[33]可以用式(9)表示。

$$I_{1T}=\eta_1 I_1' \tag{9}$$

式中：I_1' 为抵达耦合区的光信号强度；I_{1T} 为传输至传输光纤中的光信号强度。在光电转换环节，引入耦合系数 α_1 以量化信号耦合效率，同时，PMT 的光电转换系数记为 β_T。基于上述物理量，单端输出系统输出信号 S_1 可近似由式(10)所示[34]。

$$S_1\propto\beta_T\alpha_1\eta_1 I_1 e^{-\mu d_1} \tag{10}$$

式中：d_1 为光信号在荧光光纤内的传播距离；I_1 为单端输出系统的初始光强。在双端光耦合系统架构下，另一端获取的信号同样通过荧光光纤进行传输，其传播距离为 d_2，对应端的初始光强强度为 I_2。定义 η_2 为荧光光纤至传输光纤的传输效率，α_2 为传输光纤与 PMT 之间的耦合系数。此时，双端光耦合系统总输出信号 S_2 可以用式(11)进行描述[35]。

$$S_2\propto\beta_T\alpha_1\eta_1 I_1 e^{-\mu d_1}+\beta_T\alpha_2\eta_2 I_2 e^{-\mu d_2} \tag{11}$$

可以看到，相较于单端输出系统，双端光耦合系统中引入了额外的贡献项($\beta_T\alpha_2\eta_2 I_2 e^{-\mu d_2}$)。因此理论上，双端光耦合架构的光纤传感系统具备更强的信号输出潜力。

对于双端系统，由于光纤转接端及光纤引出所需的弯曲部分相较于单端系统来说更长，因此当采用图 9(a)所示的直线型布置时，本节中首先对比了

荧光光纤长度为 20 cm 时的单端系统与双端系统检测结果，如图 11 所示。图 11(a)—(c)所对应的外施电压等级分别为 5.5、6.0 kV 和 6.5 kV。可以看到与单端输出系统相比，双端光耦合系统的信号强度有了显著提高。具体来说，当外施电压等级为 5.5 kV 时，当 A_0 的横坐标分别为 4、8 cm 和 12 cm 时，平均放电幅值分别提高了 29.14%、23.16%和 21.63%；6.0 kV 时，相应的提高幅度百分比分别为 27.45%、27.13%和 28.77%；6.5 kV 时，提高幅度百分比则分别为 40.40%、38.11%和 37.98%。

然而，鉴于实际的开关柜设备主气室尺寸约为 45 cm×40 cm×36 cm，仅 20 cm 的荧光光纤传感器不足以实现整个开关柜 PD 分布式检测。因此，选用 3 m 长的荧光光纤为传感器，对比不同荧光光纤长度的单端输出系统和双端光耦合系统检测结果。图 12 展示了外施电压为 5.5 kV 时的实验结果。其中，图 12(a)、(b)对应的荧光光纤长度为 20 cm，端子 A_0 的横坐标为 6 cm，而图 12(c)、(d)对应的荧光光纤长度为 3 m，荧光光纤两端的光程长度比为 24:1。可以发现，在荧光光纤长度为 20 cm 时，双端光耦合系统信号明显高于单端输出系统的信号。具体来说，PD 脉冲数量增加了约 26.57%，平均幅值增加了约 27.55%，最大幅值增加了约 21.63%。而相比于 20 cm 的荧光光纤，3 m 荧光光纤双端光耦合系统的信号强度提升效果更为显著。具体来说，PD 脉冲数量增加了约 735.9%，平均幅值增加了约 118.4%，最大幅值增加了约 311.1%。结合本节的实验结果与式(4)、(7)、(11)不难推知，荧光光纤长度

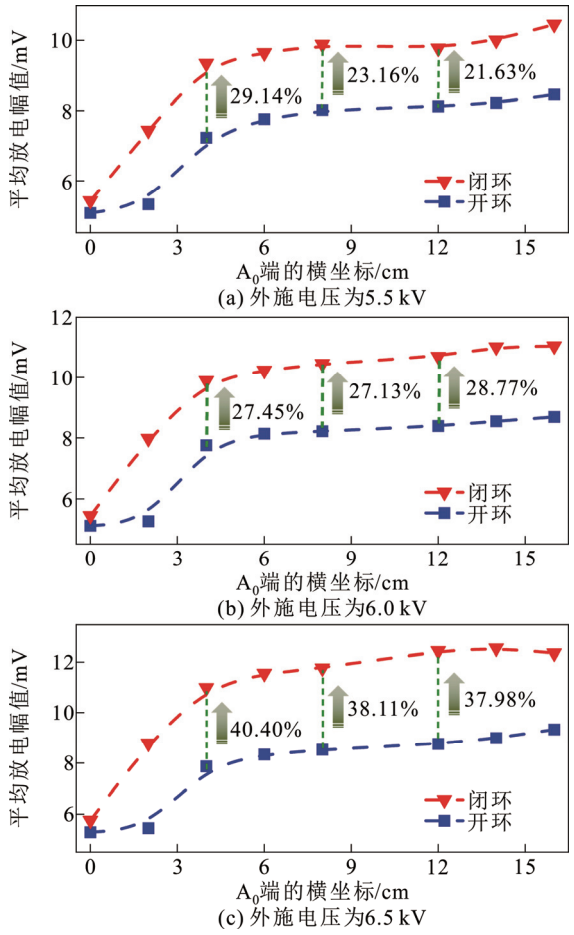


图 11　单端输出与双端光耦合系统的平均放电幅值对比

Fig.11　Comparison of average discharge amplitude between single-ended output and dual-end optical coupling systems

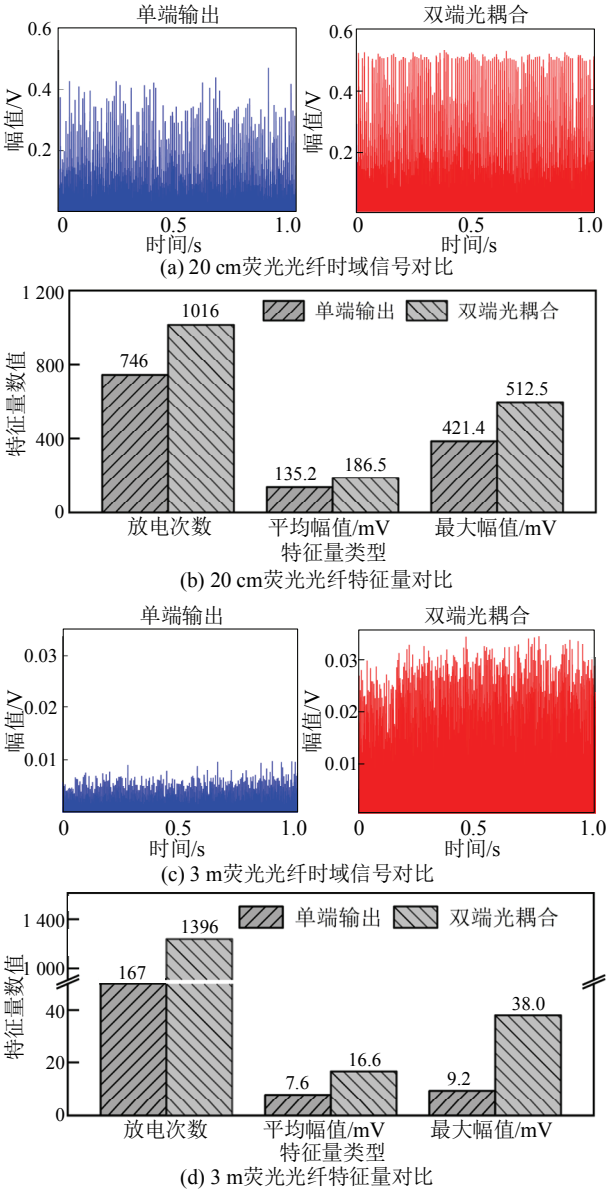


图 12　不同长度荧光光纤单端输出和双端光耦合系统 PD 信号与特征量对比

Fig.12　Comparison of PD signals and feature quantities between single-ended output and dual-end optical coupling systems for fluorescent optical fibers of different lengths

的增加会导致光纤内部光信号衰减量增加，而当光纤另一端具备信号输出能力时，双端光耦合架构通过双向传输可实现对衰减信号的补偿，且补偿百分数随光程长度的增加而显著提升。

2.5 荧光光纤定位能力分析

荧光光纤的定位能力来源于其感光位置不同时具有不同强度的响应幅度，这一特征可由图 9 所示的实验结果所证实。为了进一步验证该荧光光纤的定位性能，针对图 11(a)中 5.5 kV 工况下的单端输出系统，选取了横坐标值分别为 4、8 cm 和 16 cm 的点(分别记为 P_1、P_2 和 P_3)作为定位性能测试点，采集各点 50 个周期的信号计算其平均放电幅值，单端输出实验结果如图 13 所示，3 点平均放电幅值分别为 7.62、8.36 mV 和 8.76 mV。

类似地，也对双端光耦合系统定位准确性开展了验证。针对图 11(a)中 5.5 kV 工况下的双端光耦合系统，同样选取了横坐标值分别为 4、8 cm 和 16 cm 的点(分别记为 P_4、P_5 和 P_6)作为定位性能测试点，分别采集 50 个周期的信号计算其平均放电幅值，结果如图 14 所示，3 点平均放电幅值分别为 9.09、10.16 mV 和 10.52 mV。

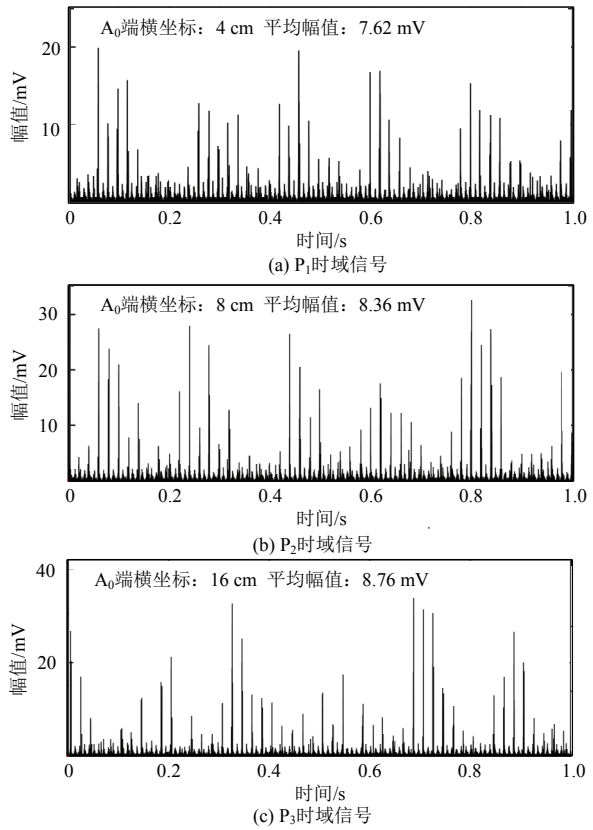


图 13 单端输出系统不同位置信号的平均幅值对比

Fig.13 Comparison of average amplitudes of signals at different positions in the single ended output system

表 1 展示了本节所测到的信号平均幅值及其与图 11(a)中 2 种检测系统的信号平均幅值的误差绝对值与百分比。在图 11(a)中，单端输出系统的数据作为单端输出的基准值，而双端光耦合系统的数据则作为双端输出的基准值。误差绝对值的计算方法如下：分别以上述图中所测到的数据为基准值，提取相应坐标下信号平均幅值，并计算其与本节中对应坐标下的平均幅值差值的绝对值，该值定义为误差绝对值，误差绝对值与基准值的比值为误差百分比。由表 1 可知，无论是单端输出系统还是双端光耦合系统，定位性能都得到了良好的验证，尤其是双端

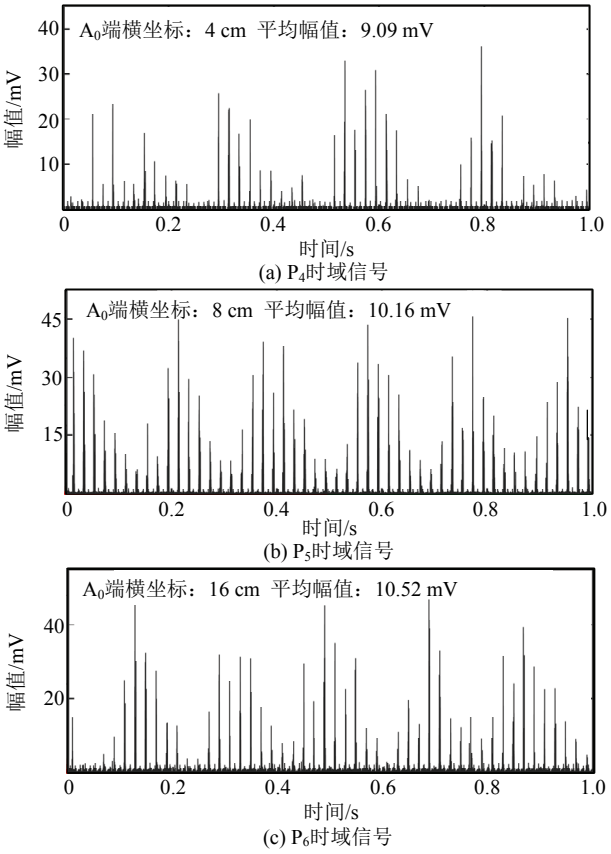


图 14 双端光耦合系统不同位置信号的平均幅值对比

Fig.14 Comparison of average amplitudes of signals at different positions in the double-ended optical coupling system

表 1 测试值与基准值之间的误差

Table 1 Errors between test values and reference values

系统类型	A_0 端的横坐标/cm	平均幅值/mV	误差绝对值/mV	误差百分比/%
单端输出	4	7.62	0.38	5.24
	8	8.36	0.33	4.11
	16	8.76	0.29	3.42
双端输出	4	9.09	0.26	2..88
	8	10.16	0.27	2.73
	16	10.52	0.06	0.57

光耦合系统，信号误差百分比均不超过 3%。

需要注意的是，在图 10(b)中，假设 η_1 与 η_2、α_1 与 α_2 等系数在完全相等的情况下，也即若系统具备理论上的严格对称性，则光纤沿中线对称点(如 20 cm 的光纤的 4 cm 处和 16 cm 处)的测试误差和定位性能各指标也应基本一致。然而实际上，受限于加工精度导致的误差等原因，双端传输光纤系统难以保持绝对的对称性，这也是定位误差的其中一来源。

2.6　讨论与分析

上述研究结果表明，无论是单端输出还是双端光耦合构型的光纤传感系统，均能实现 PD 的分布式检测。这是因为荧光光纤沿线各点都能够成为潜在的 PD 光捕捉点，并激发出荧光信号。然而，如图 9—图 11 和式(4)—式(7)所描述的，当 PD 源与光纤传感器的相对位置发生变化时，所检测到的 PD 信号特征量会随之改变。这是由于当光纤内的荧光物质被激发时，其所产生的荧光信号传输方向不定，这就使得传输到光纤端部并被光电转换的光信号功率也随传播距离的改变而改变。本文的结果表明，对于单端输出式的光纤传感系统，厘米级别的传播距离增加也会导致 PD 信号幅值的明显衰减(见图 9)，这一现象限制了 PD 分布式检测的应用。而对于双端光耦合构型，信号则明显提高。基于荧光光纤的 PD 检测系统信号质量一定程度上取决于光纤端部的积分发光强度 F_{L}，可以由式(12)表达[8]。

$$F_{\mathrm{L}}=\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} I_{\mathrm{L}}(\delta,Z)T(\delta,Z)E_{\mathrm{L}}\left(1-K(Z)\right)\mathrm{d}\delta\mathrm{d}z \tag{12}$$

式中：I_{L} 为由放电现象引发的光发射在荧光光纤表面所产生的入射辐射通量；T 为荧光光纤的表面透射系数；E_{L} 为放电辐射经折射后转换为光纤芯内传播光通量的量子效率；K 为光纤的固有传输损耗系数；δ 为光在光纤中传播时的入射角；Z 为沿着光纤轴向的位置坐标。由该计算式可知，光纤长度对积分上限和产生的辐射通量都有至关重要的影响，进而影响 F_{L} 值并最终决定检测精度。基于式(12)，可以证明 PD 检测性能与 3 个基本参数——光纤的有效光敏长度、光传输距离和荧光材料的量子转换效率呈正相关。具体而言，通过增加有效光敏长度、缩短传输距离和提高光转换效率，可以提高 PD 检测性能。这一理论分析结果与图 4—图 11 所示的实验结果保持一致。而双端光耦合构型的光纤传感系统则通过增加($\beta_{\mathrm{T}}\alpha_2\eta_2 I_2\mathrm{e}^{-\mu d_2}$)这一项增加了光纤端口的 F_{L}，从而增强了 PD 信号的强度。

3　结论

本文研究了荧光光纤分布式 PD 检测技术在开关柜中的应用，并探究了感光点位置对 PD 信号的影响，提出了一种用于信号强度增强的双端光耦合型荧光光纤 PD 检测系统，主要得到了以下结论：

1）单端输出式光纤传感系统在分布式 PD 检测时，其信号质量显著受传感器与 PD 源相对位置影响，随荧光信号传输距离的增加而衰减。具体来说，相较于耦合区在Ⅰ区域，耦合区在Ⅲ区域时的 PD 脉冲数量、幅值最大值与幅值平均值约下降了 90%。

2）PD 信号特征量对传感器和 PD 源的相对位置具有厘米级别的灵敏性。对于单端输出构型光纤传感系统，荧光光纤的自由端坐标从 28 cm 依次变化至 18、16、14 cm 和 10 cm 时，平均放电幅值逐渐下降 15.75%、12.15%、31.91%和 48.44%，这体现了该构型传感系统在探测远离耦合区的 PD 源放电信号时存在不足。

3）相较于单端输出系统，双端光耦合系统显著增强了信号强度。对于 20 cm 荧光光纤，在相同的放电强度下，系统能够测到的放电脉冲数量、平均放电幅值和最大放电幅值分别提升了 26.57%、26.55%和 21.63%。而在接入 3 m 荧光光纤时，上述指标更是分别提升了 735%、118.4%和 311.1%。

4）不同传感器与局放源相对位置的信号测试误差分析结果显示，双端光耦合系统测试数据与基准值的误差百分比均小于 3%，这体现了所开发的检测系统具有良好的 PD 定位潜力。

参考文献　References

[1] 郭　俊，吴广宁，张血琴，等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报，2005，20(2)：29-35.
GUO Jun, WU Guangning, ZHANG Xueqin, et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 29-35.

[2] 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.

[3] 朱煜峰，许永鹏，陈孝信，等. 基于卷积神经网络的直流 XLPE 电缆局部放电模式识别技术[J]. 电工技术学报，2020，35(3)：659-668.
ZHU Yufeng, XU Yongpeng, CHEN Xiaoxin, et al. Pattern recognition of partial discharges in DC XLPE cables based on convolutional neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 659-668.

[4] HABIB B, AL ZAABI O, HARID N, et al. Condition monitoring based on partial discharge diagnostics using UHF sensors: a comprehensive state-of-the-art review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(6): 2860-2873.

[5] MIER C, MOR A R, VAESSEN P. A directional coupler for partial discharge measurements in gas-insulated substations[J]. Measurement,

2024, 225: 113996.
[6] CHENG Y K, WANG T Q, XU C, et al. Measurement and simulation of partial discharge using optical signal based on crystal fluorescent fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 82: 103626.
[7] MUTO K. Electric-discharge sensor utilizing fluorescent optical fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(7): 1029-1032.
[8] BEROUAL A, BURET F. Optical detector of electrical discharges[J]. IEE Proceedings G (Circuits, Devices and Systems), 1991, 138(5): 620-622.
[9] SCHWARZ R, MUHR M, PACK S. Partial discharge detection in oil with optical methods[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Coimbra, Portugal: IEEE, 2005: 245-248.
[10] 陈孝信，钱 勇，盛戈皞，等. 基于时域参数的局部放电特高频传感器性能表征方法[J]. 中国电机工程学报，2015，35(21)：5641-5647.
CHEN Xiaoxin, QIAN Yong, SHENG Gehao, et al. Performance characterization method of partial discharge UHF sensor based on time domain parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5641-5647.
[11] 李 沐，冯新岩，蔺晓琨. 基于 TDOA 和 TS-PSO 的变压器特高频局部放电空间定位方法[J]. 中国电机工程学报，2019，39(6)：1834-1842.
LI Mu, FENG Xinyan, MAN Xiaokun. A transformer partial discharge UHF localization method based on TDOA and TS-PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1834-1842.
[12] GUASTAVINO F, GIOVANNA L D, GALLESI F, et al. Transient earth voltage sensor measurements as a nonintrusive tool for partial discharge analysis in switchgears[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(6): 2930-2937.
[13] 孙 源，宋颜峰，王昊天，等. 开关柜局部放电超声-TEV 融合检测技术[J]. 高电压技术，2023，49(12)：5052-5060.
SUN Yuan, SONG Yanfeng, WANG Haotian, et al. Ultrasonic-TEV combined detection technology of partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5052-5060.
[14] 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.
[15] 唐 炬，欧阳有鹏，范 敏，等. 用于检测变压器局部放电的荧光光纤传感系统研制[J]. 高电压技术，2011，37(5)：1129-1135.
TANG Ju, OUYANG Youpeng, FAN Min, et al. System using fluorescent fiber for partial discharge detection in transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1129-1135.
[16] 唐 炬，曾福平，范庆涛，等. 基于荧光光纤检测 GIS 局部放电的多重分形谱识别[J]. 高电压技术，2014，40(2)：465-473.
TANG Ju, ZENG Fuping, FAN Qingtao, et al. Multifractal spectrum identification of partial discharge in GIS based on fluorescence optical fiber detection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 465-473.
[17] 史荣斌，林仲钦，秦炜淇，等. 基于有源光纤光栅阵列的局部放电声发射检测与定位技术[J]. 中国电机工程学报，2023，43(1)：358-367.
SHI Rongbin, LIN Zhongqin, QIN Weiqi, et al. Partial discharge acoustic emission detection and localization based on active fiber grating array[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 358-367.
[18] WU S Y, ZHENG S S. Detection of partial discharge in GIS and transformer under impulse voltage by fluorescent optical fiber sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10675-10684.
[19] MENG Z, HE C, LIU J B, et al. Detection and propagation characteristics of partial discharge optical signal based on fluorescent fiber sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(19): 30004-30013.
[20] 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.
[21] HU C Y, HUANG Y, DENG C L, et al. An innovative fluorescent fiber sensor based on Ce/Tb co-doped silica fiber for partial discharge detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 6939-6947.
[22] CHENG H T, ZHANG X X, TANG J, et al. The application of fluorescent optical fiber in partial discharge detection of Ring Main Unit[J]. Measurement, 2021, 174: 108979.
[23] CHENG H T, HAO W D, ZHU X, et al. Optical signals measurement of discharge plasma in air switch cabinet using a fluorescent optical fiber as the sensor[J]. Physica Scripta, 2024, 99(8): 085019.
[24] KOMIVES C, SCHULTZ J S. Fiber-optic fluorometer signal enhancement and application to biosensor design[J]. Talanta, 1992, 39(4): 429-441.
[25] HU Z G, ZHANG P C, HUANG Y Y, et al. The impact of melanopic illuminance and CCT on spatial brightness perception of illuminated interiors and energy-saving implications[J]. Building and Environment, 2022, 223: 109524.
[26] DYRE J C. Rayleigh scattering revisited[J]. Nature Materials, 2016, 15(11): 1150-1151.
[27] HANSRYD J, ANDREKSON P A, WESTLUND M, et al. Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(3): 506-520.
[28] APANASOVICH V V, NOVIKOV E G. The method of fluorescence decays simultaneous analysis[J]. Review of Scientific Instruments, 1996, 67(1): 48-54.
[29] ZHANG X X, YAO Y, TANG J. Partial discharge pattern recognition based on optimal uncorrelated discriminant vectors in GIS[J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(8): 1098-1108.
[30] TANG J, LIU F, ZHANG X X, et al. Partial discharge recognition through an analysis of SF_6 decomposition products part 1: decomposition characteristics of SF_6 under four different partial discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 29-36.
[31] JAVANDEL V, VAKILIAN M, FIRUZI K. Multiple partial discharge sources separation using a method based on Laplacian score and correlation coefficient techniques[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 210: 108070.
[32] MOON W, KIM H. Standard deviation of fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence[J]. IEEE Photonics Journal, 2023, 15(3): 1-7.
[33] FEUERMANN D, GORDON J M, HULEIHIL M. Light leakage in optical fibers: experimental results, modeling and the consequences for solar concentrators[J]. Solar Energy, 2002, 72(3): 195-204.
[34] FARUKI M J, BERA K, PARTHIBAN R, et al. Fluorescent fiber based optical antenna for visible light communication applications[J]. IEEE Access, 2024, 12: 165582-165590.
[35] QUINLAN F. The photodetection of ultrashort optical pulse trains for low noise microwave signal generation[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(12): 2200773.



CHENG Hongtu
Ph.D.

程宏图
1996—，男，博士
主要从事电力设备在线监测与故障诊断、等离子体材料改性及能源转化的研究工作
E-mail: chenghongtu96@163.com



FANG Zhi
Ph.D., Professor
Corresponding author

方 志(通信作者)
1975—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压绝缘、气体放电等离子体技术及应用、新型电工材料等方面的研究工作
E-mail: myfz@263.net

收稿日期 2025-07-01 在线出版日期 2025-12-04 编辑 曾文君