

# 荧光光纤布置方式对局部放电信号检测的影响研究

秦少瑞<sup>1</sup>, 秦 硕<sup>2</sup>, 柯艳国<sup>3</sup>, 李宾宾<sup>1</sup>, 潘 超<sup>3,4</sup>, 秦金飞<sup>1</sup>, 潘 成<sup>2</sup>

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601; 2. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 3. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022; 4. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要:**局部放电(partial discharge, PD)光测法具有抗干扰能力强、灵敏度高等特点,是电气设备绝缘状态检测的重要和有效方法之一,其信号检出能力与荧光光纤传感器的布置方式息息相关。本文搭建了荧光光纤PD检测实验平台,研究了直线布置和阿基米德布置两种情况下传感器与绝缘缺陷相对距离的变化对PD检测效果的影响,并与常用的特高频法进行了对比。结果表明:阿基米德布置比直线布置具有更高的灵敏度;当荧光光纤与PD缺陷的距离小于45 cm时,这两种布置方式下光测法的灵敏度都高于特高频法。对于直线布置,水平距离增加比垂直距离增加对PD检测的不利影响更大。对于阿基米德布置,荧光光纤横向偏移对检测PD的影响大于水平距离。最后,根据两种布置方式的特点和开关柜容易出现PD的位置,给出了荧光光纤在开关柜布置的建议。

**关键词:** 荧光光纤; 布置方式; 光信号; 局部放电

中图分类号: TM835 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.08.010

## Influence of fluorescent fibers layout methods on detection of partial discharge signals

QIN Shaorui<sup>1</sup>, QIN Shuo<sup>2</sup>, KE Yanguo<sup>3</sup>, LI Bingbing<sup>1</sup>, PAN Chao<sup>3,4</sup>, QIN Jinfei<sup>1</sup>, PAN Cheng<sup>2</sup>

(1. State Grid Anhui Electric Power Corporation Research Institute, Hefei 230601, China;  
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;  
3. State Grid Anhui Electric Power Corporation, Hefei 230022, China;  
4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Partial discharge optical measurement method has strong anti-interference ability and high sensitivity, becoming one of the most important and effective methods to evaluate the insulation condition of electrical equipment, whose signal detection capability is closely related to the layout way of fluorescent fiber sensor. An experimental platform for fluorescent fiber PD detection was built in this paper. The influence of the relative distance between sensor and insulation defect on the PD detection effect was studied in linear layout and Archimedean layout, and then compared with the commonly used UHF method. The results show that the sensitivity of the Archimedes layout is better than the linear layout. When the distance between fluorescent fiber and PD defect is less than 45 cm, the two layout methods of fluorescent fiber sensors have higher detection sensitivity than that of the UHF sensors. For the linear layout, increasing horizontal distance has a more detrimental effect on PD detection than increasing vertical distance. For the Archimedean layout, the lateral offset of fluorescent fiber has a greater effect on the detection PD than the horizontal distance. Finally, according to the characteristics of the two layouts and the location of switchgear where PD is likely to occur, recommendations for placing fluorescent fibers in the switchgear were given.

**Key words:** fluorescent fiber; layout method; optical signal; partial discharge

## 0 引言

局部放电(partial discharge, PD)能反映设备绝缘破坏的严重程度<sup>[1-2]</sup>。光测法是通过检测PD过程中的光辐射来反映PD特性<sup>[3-4]</sup>的一种非电测量法,

基金项目: 国网安徽省电力有限公司科技项目(52120520005H)

具有抗电磁干扰<sup>[5]</sup>、高灵敏度<sup>[6-7]</sup>等优势。光测法所获得的光信号或经光学传感器转换的电信号<sup>[8-9]</sup>常用于PD光谱分析<sup>[10]</sup>、放电模式识别<sup>[11]</sup>、放电定位<sup>[12]</sup>等研究。荧光光纤是光测法中常用的传感器,具有绝缘性好、不易损坏、耐老化的特点,同时不会对运行设备产生干扰,具有较好的稳定性。

国内外学者对于局部放电光测法开展了大量

研究。魏念荣等<sup>[13]</sup>采用直线布置的荧光光纤检测了高压电机中的PD信号,通过实验验证了该方法可有效提高电机绝缘缺陷放电信号的检出有效性。唐炬等<sup>[14-16]</sup>分别在空气和变压器油中采用直线布置的荧光光纤进行局部放电检测实验,发现光信号的一次积分值与PD视在放电量成线性关系,表明光测法可获取PD视在放电量。韩旭涛等<sup>[17]</sup>利用阿基米德布置的荧光光纤检测电气绝缘开关设备(GIS)的PD,将光测法和特高频法结合,研制了光电复合传感器,为GIS的PD检测提供了一种更加可靠的检测方法。D SIEBLER等<sup>[18]</sup>利用直线布置的荧光光纤传感器进行高压电缆局部放电检测,结果表明荧光光纤传感器有能力检测到pC级的局部放电,信噪比及灵敏度高。朱旭亮等<sup>[19]</sup>采用直线布置的荧光光纤对绝缘子沿面放电光辐射特性进行了分析,为荧光光纤局部放电检测系统的开发、参数优化以及传感器融合提供了参考和依据。

以上学者利用荧光光纤进行局部放电检测时,光纤都按照直线或者阿基米德方式布置,但目前还缺少上述两种布置方式的对比研究。直线布置可以将荧光光纤深入电力设备内部,能更近距离地感知PD信号,以此提升检测灵敏度,但前期安装较困难且后期维护成本高;阿基米德布置通过获得更大的光通量来提升检测灵敏度,但其布置需要法兰支撑,法兰通常安装在电力设备内壁上,无法深入电力设备内部,这会降低阿基米德布置对设备内部PD信号的检测效果。因此,有必要针对两种布置方式下PD的检测特性进行对比研究,从而为选择具体的布置方式提供建议。

本文利用搭建的荧光光纤PD检测实验平台,开展不同布置方式下的荧光光纤PD检测实验,测试起始放电电压,并与特高频传感器检测结果进行对比;同时利用示波器收集到的光信号进行局部放电相位分布(phase resolved partial discharge, PRPD)图谱绘制,统计光信号的平均值和放电次数来反映不同条件下的灵敏度,研究距离对不同布置方式下荧光光纤检测PD的影响程度。最后,以开关柜为例,给出荧光光纤布置的建议。

## 1 实验

### 1.1 荧光光纤选择

当电气设备内部发生PD时,气体分子发生电离,产生大量的自由电子,自由电子在空间中运动与正离子复合并发射出许多光子,光子被荧光光纤探测并传输。荧光光纤是一种特殊的光纤,可以吸

收并传输任意方向的光信号,并且具有较好的绝缘性能,不受电磁信号的干扰。其主要参数有激发光谱、发射光谱和荧光量子产率。荧光光纤的激发光谱需和空气中PD光信号的光谱相匹配,空气中PD光信号主要位于300~500 nm;发射光谱应在光电倍增管的光谱响应范围内;荧光量子产率应大于50%。所以本文选用荧光光纤的激发光谱为300~500 nm,发射光谱为492~577 nm,荧光量子产率为70%的PMMA,其直径为1 mm。

当荧光光纤长度增加,由于传输损耗,荧光光纤获取光信号的能量会发生衰减。传输损耗引起的功率衰减定义如式(1)~(2)所示。

$$A(\lambda) = \alpha(\lambda) \cdot L = -10 \lg(P_0/P_i) \quad (1)$$

$$\eta = P_0/P_i \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $A(\lambda)$ 为传输效率; $\alpha(\lambda)$ 为衰减系数; $L$ 为光纤长度; $P_0$ 为输出功率; $P_i$ 为输入功率; $\eta$ 是传输效率。

本文选用的荧光光纤,衰减系数 $\alpha(\lambda)$ 为0.3,传输效率与长度的关系如图1所示。从图1可以看出,当光纤长度达到2 m时,其传输效率下降至87%。因此,在实际应用中,为保证传输效率高于87%,应使荧光光纤的长度小于2 m。

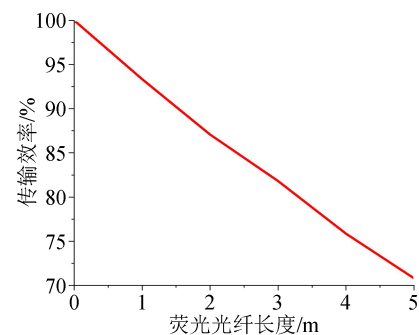


图1 荧光光纤长度与传输效率的关系

Fig.1 The relationship between optical fiber length and transmission efficiency

### 1.2 实验平台搭建

荧光光纤PD检测实验平台如图2所示,包括变压器(额定电压为100 kV,容量为50 kVA)、保护电阻(5 k $\Omega$ )、分压电容(1 000:1)、耦合电容(500 pF)、测量阻抗。针-板电极模拟PD缺陷,电极采用黄铜材料制作,高压端为针电极,曲率半径为1 mm,针板电极间距为10 mm,板电极直径为100 mm、厚度为7 mm。为获取PD的光信号,采用荧光光纤和传输光纤构成检测回路。传输光纤具有良好的传输能力,信号经传输光纤几乎不产生损耗。选用滨松H10723-20型光电倍增管(photomultiplier tube,

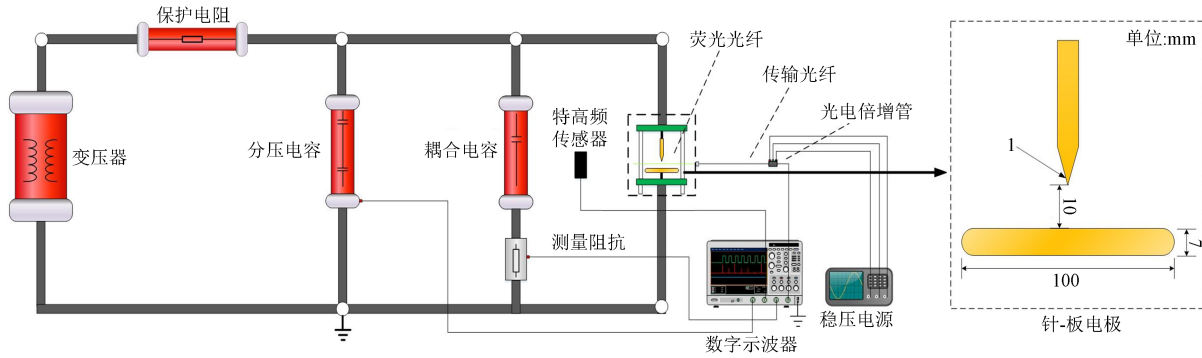


图2 荧光光纤PD检测实验平台

Fig.2 Optical fiber PD detection experiment platform

PMT)将光信号转换为电信号,其光谱响应范围为230~920 nm,可覆盖荧光光纤的发射光谱。

通过特高频传感器(PDU-S1型)采集PD过程中产生的特高频电磁波信号,其检测带宽为300~1 500 MHz,平均有效高度为10 mm,特高频传感器布置在距离PD缺陷20 cm处。将分压电容获得的电压信号、荧光光纤传感器获取的PD光信号、特高频传感器获取的电信号和脉冲电流信号接入数字示波器(Tektronix DPO5104B型)。

荧光光纤采用直线布置和阿基米德布置两种布置方式,如图3所示。直线布置的荧光光纤长度为32 cm。阿基米德布置时螺旋线最大直径为16 cm,光纤总长度为2 m,针电极与阿基米德螺旋线中心位于同一竖直面。对于直线布置的荧光光纤,分别调整光纤与电极的垂直与水平距离来研究距离对PD检测的影响。研究垂直距离的影响时,将荧光光纤和针电极的水平距离固定为15 cm,以经过针尖与板平行的平面为水平面,将光纤与针尖平面的垂直距离设置为0、3、6、9、12 cm;研究水平距离的影响时,将荧光光纤和水平面的垂直距离固定为0 cm,水平距离设置为7、15、25、35、45、55 cm。对于阿基米德布置的荧光光纤,比较了无横向偏移和有横向偏移两种情况下水平距离(荧光光纤与针电极的水平距离设置为7、15、25、35、45 cm)对PD检测的影响,其中无横向偏移指阿基米德螺旋线中心正对针电极,有横向偏移指针电极对齐阿基米德螺旋线最外侧,偏移8 cm。

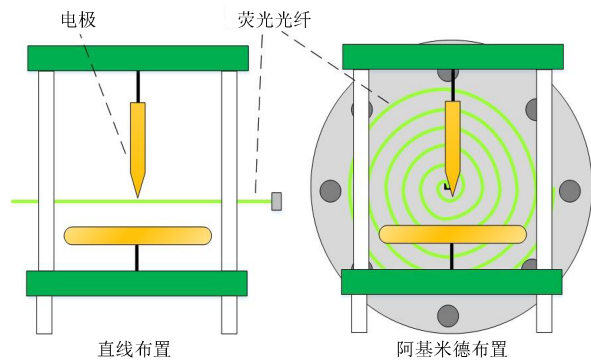


图3 荧光光纤的布置方式

Fig.3 Layouts of fluorescent fibers

纤能检测到的局部放电起始电压(partial discharge inception voltage, PDIV)。每组实验重复3次以排除偶然因素的影响,取3次实验的算术平均值作为最终的PDIV。

图4给出了直线布置和阿基米德布置两种情况下PDIV随荧光光纤与PD缺陷水平距离的变化关系。

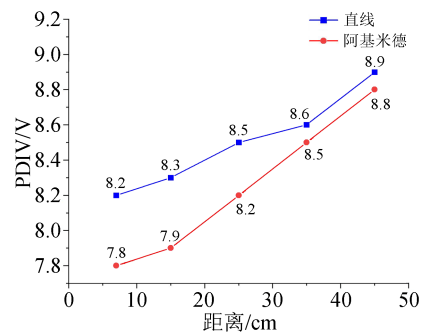


图4 不同布置方式检测到的PDIV随距离变化

Fig.4 Variation of PDIV with distance for different layouts

从图4可以看出,当距离从7 cm增加到45 cm时,直线布置检测到的PDIV从8.2 kV上升到8.9 kV;阿基米德布置检测到的PDIV从7.8 kV上升到8.8 kV。另外,直线布置检测到的PDIV总大于阿基米德布置检测到的PDIV。这说明当缺陷与光纤的

## 2 布置方式对起始放电电压检测的影响

每次实验开始前,用无水乙醇擦拭电极表面并待其表面干燥,目的是防止表面污秽干扰放电的稳定性。以100 V为步长,缓慢升高外施电压,每次加压后等待30 s,若没有检测到光信号则继续加压。当检测到光信号后,记录此时的放电电压为荧光光

距离相同时,阿基米德布置的荧光光纤相比于直线布置的荧光光纤更容易检测到PD。

为了进一步比较两种布置方式下PDIV的检测能力,记录了PD起始时的光信号和特高频信号,如图5所示。由于极不均匀电场存在极性效应,针电极为负极性时更容易发生PD,两种布置方式都是首先在负极性检测到PD信号,但PDIV有所不同。

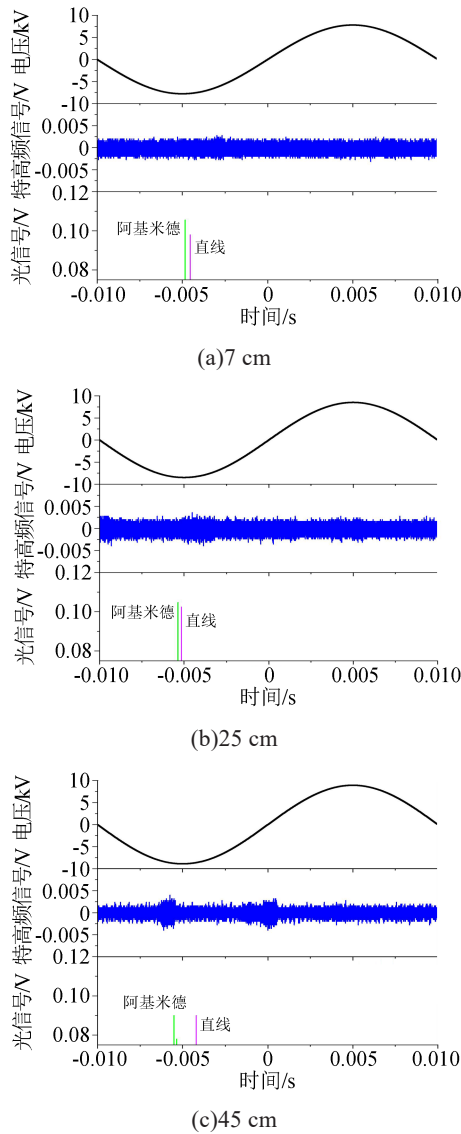


图5 光测法和特高频法PDIV的检测结果

Fig.5 Detection results of PDIV by optical and UHF method

从图5(a)可以看出,当距离为7 cm时,两种布置方式的光测法均有效检出了放电信号,而特高频传感器未检测到放电信号;此外,直线布置检测到的PDIV为8.2 kV,而阿基米德布置检测到的PDIV仅为7.8 kV,比直线布置低0.3 kV。从图5(b)可以看出,当距离为25 cm时,直线布置检测到的PDIV仍大于阿基米德布置检测到的PDIV,而特高频传感器仍没有检测到PD信号。从图5(c)可以看出,当

水平距离增加至45 cm时,直线布置检测到的PDIV为8.9 kV,阿基米德布置检测到的PDIV为8.8 kV,而此时特高频传感器仍未检测到明显的放电信号。以上结果进一步证实,当与PD缺陷距离相同时,直线布置的荧光光纤对PD的检出能力弱于阿基米德布置的荧光光纤;在距离不超过45 cm时,两种布置方式的荧光光纤传感器检测PD的灵敏度都强于特高频传感器。

### 3 布置方式对局部放电信号检测的影响

#### 3.1 直线布置

施加峰值为9.8 kV的电压到缺陷两端,连续采集50个工频周期的放电信号,为了保证实验结果的重复性,重复实验6次,将300个工频周期的PD信号绘制成PRPD谱图,得到PD缺陷与光纤的垂直距离和水平距离变化时的PRPD谱图分别如图6和图7所示。由图6~7可知,随着距离的增加,PD强度逐渐下降,PD次数也在减少,但相位分布范围基本保持不变,主要集中在270°附近。

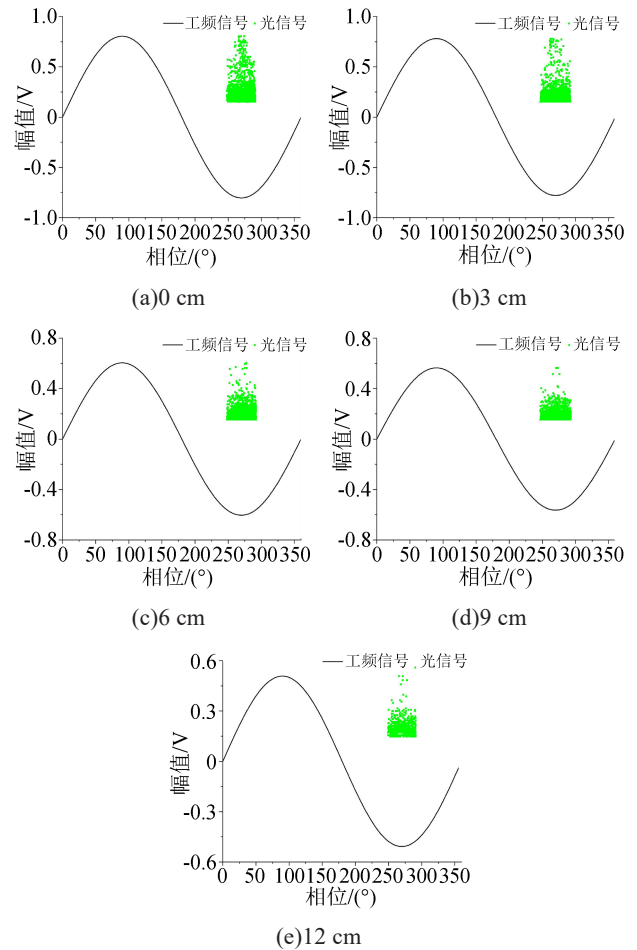


图6 不同垂直距离下直线布置光信号的PRPD图谱

Fig.6 PRPD of linearly placed optical signals at different vertical distances

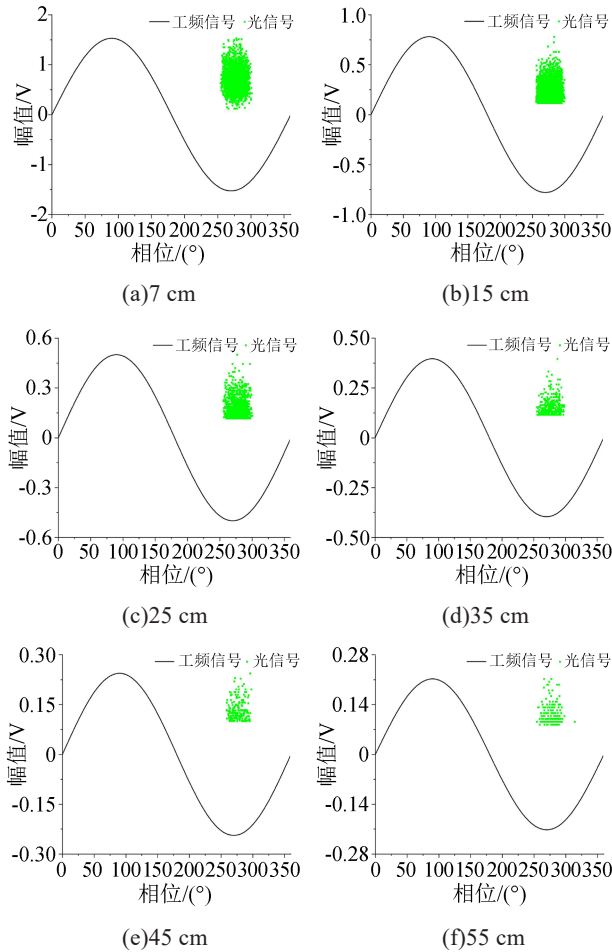


图7 不同水平距离下直线布置光信号的PRPD图谱  
Fig.7 PRPD of linearly placed optical signals at different horizontal distances

为了进一步量化距离对直线布置的荧光光纤PD检测的影响,根据PRPD谱图计算了PD平均放电强度和放电次数随距离的变化,如图8所示。由图8可知,随着垂直距离从0 cm增加至12 cm,光信号的平均值从0.239 V降低至0.182 V,下降了24%;放电次数从2 307次下降到1 369次,下降了41%。当水平距离从7 cm增加到15 cm时,光信号的平均值从0.704 V迅速下降到0.243 V,下降了0.461 V;放电次数从2 859次下降至2 674次,仅下降6%。而水平距离由15 cm增加到55 cm时,平均值从0.243 V较为缓慢地下降到0.113 V,下降了0.130 V;放电次数从2 674次下降到189次,下降了93%。CHENG H等<sup>[20]</sup>采用直线布置的荧光光纤分别在25、50、75 mm的水平距离下进行了PD实验,研究发现距离增加,光脉冲数量减少,本文的实验结果与其相同。特别的,在水平距离为15 cm时,垂直距离增加9 cm,光信号的平均值下降了0.040 V,放电次数下降了816次;而水平距离增加10 cm,光信号的平均值下降了0.061 V,放电次数下降了1 333次。

无论是光信号的平均值还是放电次数,垂直距离增加带来的衰减明显小于水平距离,由此可以说明相比于垂直距离增加,水平距离增加对PD检测的不利影响更大。

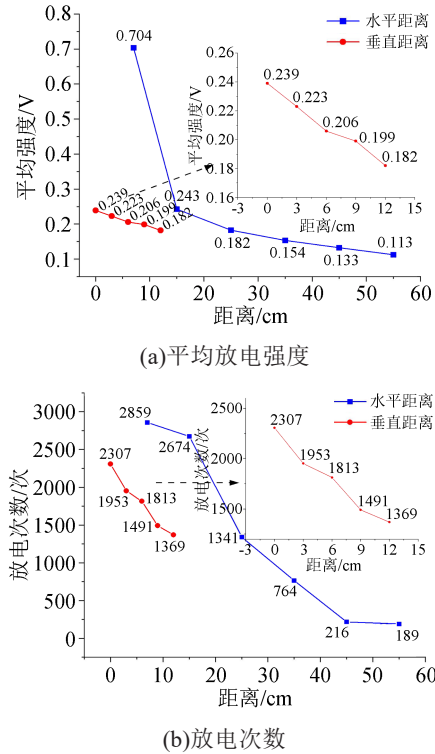


图8 直线布置下距离变化对PD信号的影响  
Fig.8 Effect of distance variation on the PD signal under linear layout

### 3.2 阿基米德布置

施加峰值为9.8 kV的交流电压到缺陷两端,采集300个工频周期的PD信号,绘制PRPD图谱如图9~10所示。由图9~10可知,与直线布置相似,不同水平距离下光信号的相位大多集中在270°附近。同样地,随着距离从7 cm增加至45 cm,光信号幅值发生下降,放电次数也在明显减少。

为了进一步量化水平距离和横向偏移对阿基米德布置的荧光光纤PD检测的影响,根据PRPD谱图计算了PD平均放电强度和放电次数随着距离的变化,如图11所示。由图11可知,对于阿基米德布置的荧光光纤,随着水平距离从7 cm增加至25 cm,光信号的平均值从1.222 V下降至0.362 V,下降了0.860 V;放电次数从3 031次下降到2 237次,下降了26%。水平距离从25 cm增加至45 cm,光信号的平均值从0.362 V下降至0.185 V,下降程度明显低于从7 cm增加至25 cm时的下降程度;放电次数从2 237次下降到312次,下降了86%。韩旭涛等<sup>[17]</sup>采用阿基米德布置的荧光光纤检测PD,发现光信号随

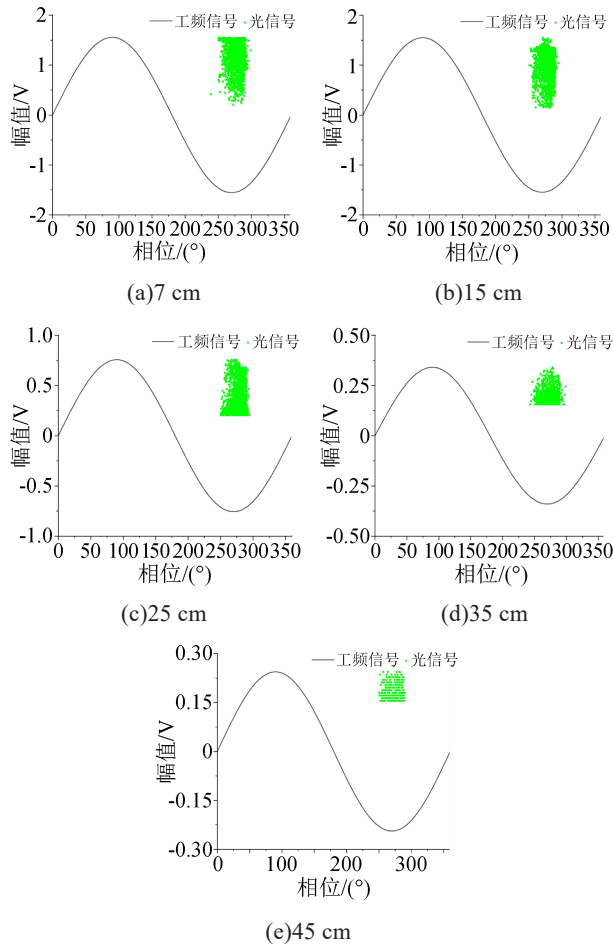


图9 无横向偏移时不同水平距离下得到的PRPD图谱  
Fig.9 PRPD at different horizontal distances without lateral offset

检测距离的增加衰减较大, 本文的实验结果与其类似。此外, 随着与PD源距离的增加, 荧光光纤获取的光信号强度呈现先迅速降低后缓慢降低的趋势。在水平距离为7 cm时, 横向偏移8 cm, 光信号平均值降低为0.800 V, 放电次数降低至2 539次; 而水平距离增加8 cm, 光信号平均值降低为1.016 V, 放电次数降低至2 715次, 横向偏移对信号的衰减影响大于水平距离。在相同水平距离下, 当阿基米德布置的荧光光纤横向偏移时, 无论是光信号的平均值还是放电次数都低于未发生偏移的荧光光纤, 但随着水平距离的增加, 未偏移和偏移的光信号平均值和放电次数的差值逐渐降低。

## 4 讨论

### 4.1 布置方式对比

通过不同距离下采取不同的布置方式对PDIV检测效果的影响实验可知: 距离小于45 cm, 两种布置方式的荧光光纤传感器的灵敏度均优于特高频传感器, 即光信号检出有效性更好。当发生PD时,

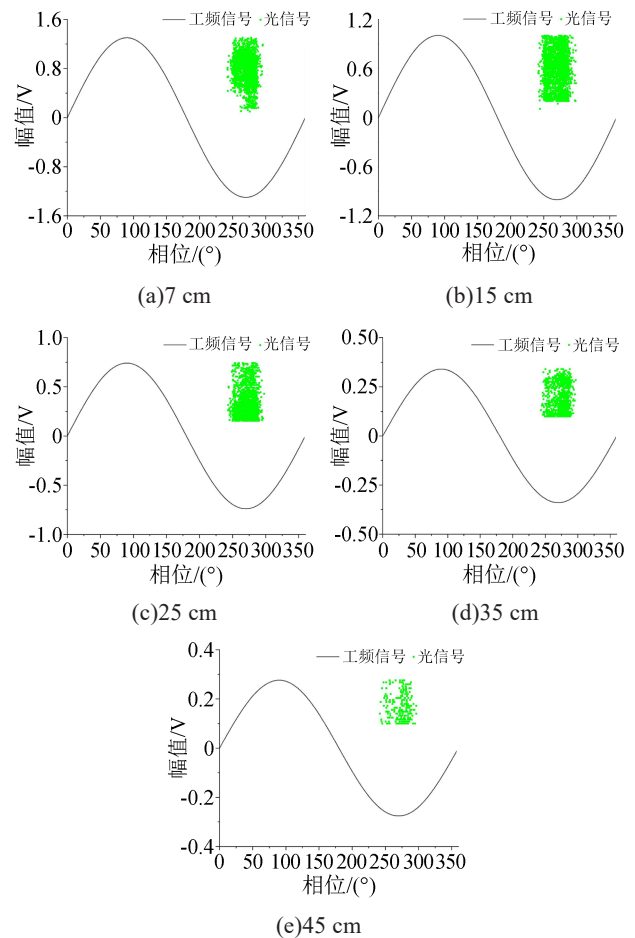


图10 有横向偏移时不同水平距离下得到的PRPD图谱  
Fig.10 PRPD at different horizontal distances with lateral offset

荧光光纤的检测原理是通过检测放电辐射的光子, 而特高频传感器只能检测到放电形成陡脉冲电流激发产生的电磁波, 后者比前者需要更大的放电能量, 因此荧光光纤传感器相比于特高频传感器具有更高的检测灵敏度。

直线布置的荧光光纤灵敏度低于阿基米德布置。例如, 当直线布置和阿基米德布置的荧光光纤距离PD缺陷为25 cm时, 阿基米德布置检测到的光信号的平均值是直线布置的平均值的1.5倍, 放电次数是直线布置的1.7倍。此外, 当距离小于15 cm时, 阿基米德布置的荧光光纤检测到的光信号衰减较少。如图12所示, 阿基米德布置的荧光光纤所形成的感光面积大, 在相同的距离下比直线布置能够吸收更多的光子, 并且阿基米德布置更易形成多点激发, 所以荧光光纤产生的响应更好。

直线布置的荧光光纤检测到的光信号随着水平距离变化衰减程度高于垂直距离。PD产生的光子抵达荧光光纤的检测范围被荧光光纤感知从而产生光信号。如图13所示, 当荧光光纤分别增加相

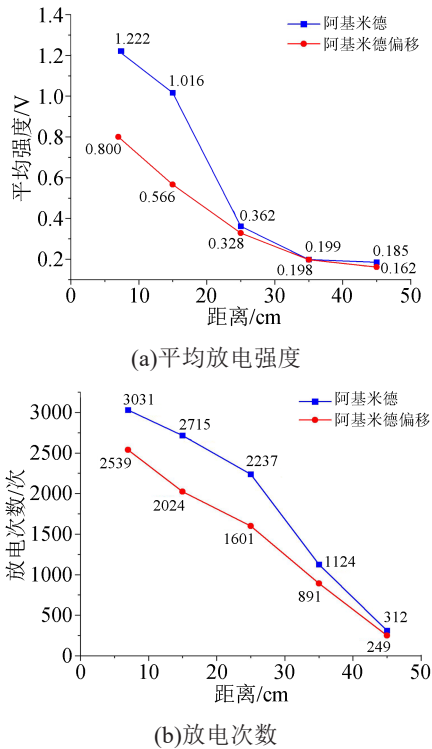


图 11 阿基米德布置与偏移布置对比

Fig.11 Comparison between Archimedes layout and offset layout

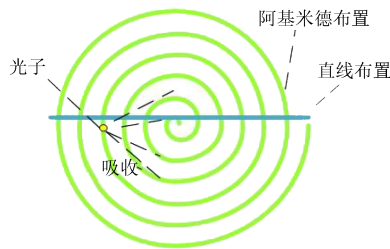


图 12 光子吸收比较

Fig.12 Photonic absorption comparison

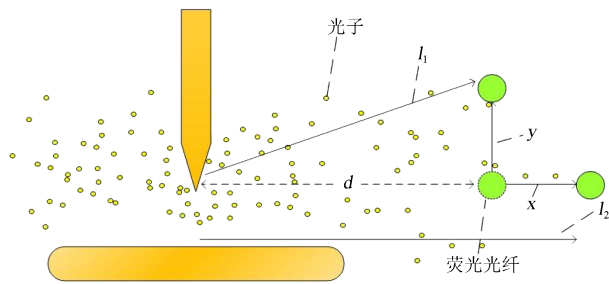


图 13 垂直距离和水平距离的影响

Fig.13 Effect of vertical and horizontal distance

同的垂直距离 $y$ 和水平距离 $x$ ,由三角形三边的关系可知,增加垂直距离后的总距离 $l_1$ 要小于水平距离 $l_2$ ,因此垂直距离对直线布置的荧光光纤检测PD的影响小于水平距离。

水平距离和横向偏移对阿基米德布置的荧光光纤的PD的检测影响不同。水平距离增加导致光

能量发生传播的衰减。当阿基米德与缺陷横向偏移时,如图 14 所示,获取的光信号衰减主要有以下两个原因:①偏移导致与PD缺陷的距离增加,造成光传播衰减;②阿基米德螺旋线外侧的荧光光纤比内侧的荧光光纤更易感知光子,光信号在荧光光纤传播会产生损耗。两种因素共同作用导致阿基米德偏移布置的检测能力下降。

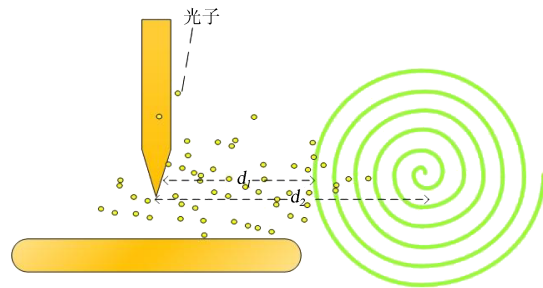


图 14 横向偏移的影响

Fig.14 Effect of lateral offset

### 4.2 布置建议

通过 3.1 中距离对直线布置的荧光光纤检测 PD 信号的实验可知,水平距离对直线布置的荧光光纤检测 PD 的影响大于垂直距离。随着荧光光纤与缺陷的距离增大,信号幅值降低趋势逐渐减缓。因此,应尽可能减小直线布置光纤到易发生 PD 的位置的水平距离和垂直距离,从而提升检测的灵敏度。相比于阿基米德布置,直线布置的最大优势在于能靠近易发生 PD 的位置。与此同时,建议荧光光纤直线布置与易发生 PD 位置尽可能小于 15 cm,以保证荧光光纤传感器检测的灵敏度。

通过 3.2 中距离对阿基米德布置的荧光光纤检测 PD 信号的实验可知,荧光光纤阿基米德布置可以降低距离对光信号衰减的影响。阿基米德布置主要的缺点在于无法调整与容易发生 PD 位置的距离。当易发生 PD 的位置与荧光光纤安装距离固定时,采用阿基米德布置具有较高的灵敏度。偏移会导致阿基米德布置检测信号有效性降低,阿基米德布置的安装法兰应尽可能地正对易发生故障的位置,使其具有较高的检测灵敏度。建议阿基米德布置荧光光纤与 PD 缺陷的距离小于 25 cm。

以开关柜为例,提出将荧光光纤直线布置与阿基米德布置合理运用来检测开关柜内发生的 PD,在保证绝缘安全的前提下尽可能地提升开关柜局部放电检测的有效性。开关柜主要由断路器室、母线室、电缆室、继电器仪表室构成。其中母线室和电缆室在运行过程中极易发生绝缘故障,导致 PD,危害开关柜的正常运行。例如:母线室开关柜穿柜套

管均压弹簧在长期运行的过程中容易接触不良导致悬浮放电; 母线触头支排易受潮导致放电; 电缆室电缆头屏蔽断口容易放电等。

对于母线室, 如图 15(a)所示, 穿柜套管易发生放电, 由于套管中母排的结构比较复杂, 母排连接处极易形成不均匀电场, 产生 PD 的概率大。为提高检测的灵敏度, 采用直线布置荧光光纤环绕套管。由于母线室侧壁为隔离挡板, 为确保开关柜及操作人员安全需保证其完整性, 出厂时侧壁以铆钉将隔离挡板固定, 所以荧光光纤难以安装在侧壁, 而母线室上壁盖板在现场安装时可拆卸, 可将荧光光纤安装在上壁, 不影响开关柜的绝缘结构。母排套管到荧光光纤的距离大约为 5 cm, 远小于 15 cm, 可保证荧光光纤传感器的检测效果。

对于电缆室, 如图 15(b)所示, 在长期运行过程中电缆触头极易发生 PD, 但电缆室内部设备较多, 直接布置荧光光纤难度较大, 由于开关柜下柜门可以打开, 荧光光纤可安装在此。由于柜门到电缆触头的距离大约为 15~25 cm, 电缆室进行荧光光纤安装时可采用阿基米德布置, 具体安装在开关柜下柜门内壁。此时, 电缆触头到荧光光纤的距离小于 25 cm, 可保证荧光光纤传感器的检测灵敏度。

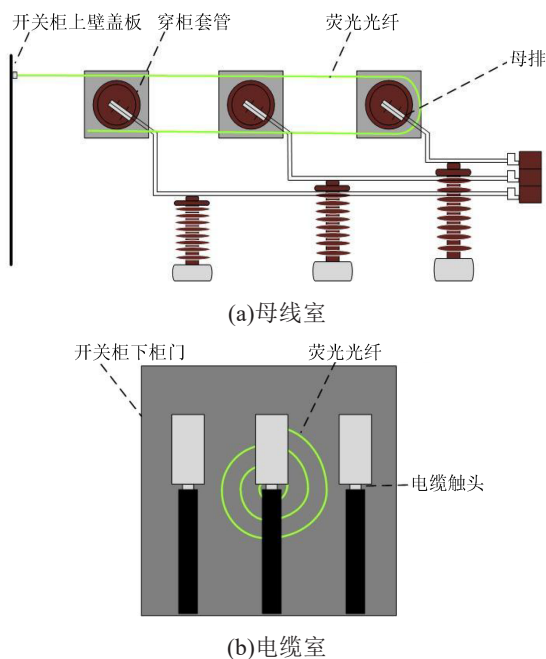


图 15 开关柜荧光光纤布置

Fig.15 Switchgear optical fiber layouts

## 5 结论

本文采用激发光谱为 300~500 nm、发射光谱为 492~577 nm、荧光量子产率为 70% 的荧光光纤, 研究了直线布置和阿基米德布置两种情况下的荧

光光纤传感器与绝缘缺陷相对距离的变化对检测 PD 信号的影响, 得出如下主要结论:

(1) 当荧光光纤与 PD 缺陷的距离相同时, 阿基米德布置的灵敏度优于直线布置; 当荧光光纤与 PD 缺陷的距离小于 45 cm 时, 两种布置方式的检测灵敏度都高于特高频传感器。

(2) 相比于垂直距离, 水平距离增加对 PD 检测的不利影响更大。直线布置的荧光光纤与放电缺陷的距离为 15 cm 时, 平均信号强度约衰减为距离为 7 cm 的 35%。

(3) 水平距离也是影响阿基米德布置的荧光光纤获取光信号的因素, 光信号随着距离的增加仍会衰减, 但相比于直线布置, 阿基米德布置能够削弱距离对光信号传播的衰减, 阿基米德布置的荧光光纤与缺陷的距离为 25 cm 时, 平均信号强度衰减为距离为 7 cm 的 30%。阿基米德布置的荧光光纤横向偏移对检测 PD 的影响大于水平距离。

(4) 开关柜母线室可采用直线布置的荧光光纤, 光纤应安装在母线室上壁; 电缆室采用阿基米德布置的荧光光纤, 光纤应安装在下柜门内壁。

## 参考文献:

- [1] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [2] 王晓文, 钟晓宇. 电气设备局部放电检测方法综述[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2017, 13(4): 331-339.
- [3] 黄超. 基于光信号特征的变压器局部放电检测技术研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2016.
- [4] WU S, ZHENG S, ZHONG A, et al. Study on the optical measurement of partial discharge under impulse voltage[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Beijing, China: IEEE, 2020: 1-4.
- [5] 郭少朋, 韩立, 徐鲁宁, 等. 光纤传感器在局部放电检测中的研究进展综述[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(3): 47-53, 80.
- [6] 彭兆裕, 岳丹, 颜冰, 等. 开关柜内沿面放电及电弧放电多光谱特征分析[J]. 绝缘材料, 2021, 54(1): 84-90.
- [7] 司文荣, 李军浩, 袁鹏, 等. 局部放电光测法的研究现状与发展[J]. 高压电器, 2008(3): 261-264, 279.
- [8] WU S, ZHENG S, ZHONG A, et al. Analysis of factors affect the sensitivity of fluorescent fiber optic sensor[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Beijing, China: IEEE, 2020: 1-4.
- [9] ROHWETTER P, KIELAU T, LOTHONGKAM C, et al. All fibre-optic simultaneous detection of optical and acoustic emission from partial discharges in silicone elastomer[C]//OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors. Beijing, China: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2012: 1719-1722.
- [10] 任明, 夏昌杰, 陈荣发, 等. 局部放电多光谱比值特征分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 809-818.

- [11] 刘永刚. 光测法检测局部放电的模式识别及放电量估计研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [12] 司文荣,李泽春,熊朝羽,等. 基于MEMS光纤超声传感器的局放定位系统研制[J]. 传感技术学报,2020,33(10):1522-1528.
- [13] 魏念荣,张旭东,曹海翔,等. 用荧光光纤技术检测局部放电信号传感器的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002(3):329-332.
- [14] 唐炬,刘永刚,裘吟君,等. 针-板电极局部放电光测法信号一次积分值与放电量的关系[J]. 高电压技术,2012,38(1):1-8.
- [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.
- [16] TAO J G, YANG J G, YE G X, et al. A system using fluorescent fiber for partial discharge detection in transformer[C]//2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chengdu, China: IEEE,2016:1-4.
- [17] 韩旭涛,刘泽辉,李军浩,等. 基于光电复合传感器的GIS局放检测方法研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(22):6760-6769.
- [18] SIEBLER D, ROHWETTER P, BRUSENBACH R, et al. Optical-only detection of partial discharge with fluorescent polymer optical fiber sensors[J]. Procedia Engineering,2015,120:845-848.
- [19] 朱旭亮,何金,张黎明,等. 绝缘子沿面局部放电的光电探测效率分析研究[J]. 绝缘材料,2022,55(7):104-111.
- [20] CHENG H, ZHANG X, TANG J, et al. The application of fluorescent optical fiber in partial discharge detection of ring main unit[J]. Measurement,2021,174:108979.

收稿日期:2022-10-24 修回日期:2022-12-05

作者简介:秦少瑞(1985-),男(汉族),陕西榆林人,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术。