

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311168

GIS 局部放电光学传感器仿真设计与试验研究^{*}

李 泽, 钱 勇, 赵九一, 盛戈峰, 江秀臣
(上海交通大学电气工程系 上海 200240)

摘 要:在气体绝缘开关设备(GIS)的光学局部放电检测中,光学传感器是检测系统的核心部件。该文针对导光柱光学局部放电传感器的设计开展了仿真和实验研究。首先,基于 TracePro 仿真软件,对导光柱的前置微结构和长度进行设计,提出了一种用于 GIS 局部放电检测的导光柱光学传感器。随后,搭建 GIS 光学局部放电实验平台,研究了不同前置微结构和长度的导光柱的实际检测效果。仿真与实验结果均表明:前置微结构为凹锥,长度与罐体内壁平齐的导光柱传感效果较好。仿真与实验结果一致,证明了设计的可行性和仿真模型的正确性。最后,在该仿真模型中设置了多个探测面和探测点,观察并分析了各探测面的总光辐射度分布图和各探测点的光辐射度值。不同探测点接收的光辐射度值与部件遮挡以及直射光强弱有关。以放电源 y-115 为例,P1 探测面上的光斑集中在 150°~210°附近,P2 探测面上的最优探测点主要位于在 30°和 330°附近。研究成果将为 GIS 光学局部放电传感器的研制提供参考依据。

关键词:局部放电;光学传感器;导光柱;辐射度

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4

Simulation design and experimental study of GIS partial discharge optical sensor

Li Ze, Qian Yong, Zhao Jiuyi, Sheng Gehao, Jiang Xiuchen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The optical sensor is the core part of the optical partial discharge (PD) detection system in gas insulated switchgear (GIS). In this article, simulation and experiment studies are implemented for the design of optical PD sensors based on the light guide rod. Firstly, based on the TracePro simulation software, the front microstructure and length of the light guide rod are designed, and an optical sensor for GIS PD detection is proposed. Then, the GIS optical PD experimental platform is established to study the actual PD detection effects of different front microstructures and lengths. Both the simulation and experiment results show that the light guide rod with its front microstructure being concave cone shape and the length being as long as the inner wall of the tank has better detection effect. The consistence between the simulation and experiment results demonstrates the feasibility of the design and the correctness of the simulation model. Finally, several detection surfaces and detection points are set up in this simulation model, and the total irradiance maps of each detection surface and the light irradiance value of each detection point are observed and analyzed. The light irradiance values received by different detection points are related to component occlusion and the intensity of direct ray. Taking the y-115 PD source as an example, the light spots on the P1 detection surface are concentrated around 150° to 210°, while the optimal detection points on the P2 detection surface are mainly located around 30° and 330°. The research results provide some basis for the development of optical PD sensors in GIS.

Keywords: partial discharge; optical sensor; light guide rod; irradiance

0 引 言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)是电网中的重要组成部分,其安全稳定运行直接关系到供电的可靠性^[1]。然而,GIS 在实际运行中由于材料缺陷、

制造工艺等问题会致使其内部产生局部放电(partial discharge, PD),进而引发设备故障。因此,局部放电的有效检测对设备状态评估与故障预警具有重要意义^[2-3]。

局部放电过程常伴随着声、光、电等物理现象,由此发展出了超声法、光测法、特高频法、脉冲电流法等局放检测手段^[4-6]。其中,脉冲电流法作为目前唯一具有国际标准

的局部放电定量检测方法,其无法应用于在线监测^[7],特高频法和超声法易受电磁及声振干扰影响。与其它检测方法相比,光测法具有较好的抗干扰性和检测置信度,近年来在高压开关设备和电缆的局部放电检测中受到广泛关注。文献[8]采用光纤探头进行局部放电检测,为远距离光纤传感检测直流电缆局部放电信号提供依据。然而该方法是通过采集超声波引起的光纤振动来反映设备内部放电情况,本质上不是检测局放光信号,且会受到噪声干扰。文献[9]将荧光光纤应用于环网柜的局部放电检测,研究了影响光学检测效果的多种因素。然而未考虑设备内部的遮挡。文献[10]研究了基于荧光光纤的光学局部放电信号传播特性及传感器布局方式,对 GIS 提出了 3 种传感器布局方法,然而所提出的侵入式检测方法未考虑对设备内部电场的影响。同时,荧光光纤材质柔软,其密封和安装问题有待解决。因此,有必要开发一种可用于 GIS 的安全可靠的新型光学传感器。导光柱具有透光率高、硬度大、易于密封的特点。目前针对 GIS 用导光柱光学传感器的仿真和实验研究相对较少。

基于上述分析,本文从导光柱局放传感器的仿真设计及试验等方面展开研究。首先,对影响导光柱局放检测效果的因素进行了仿真分析,设计了一种 GIS 用导光柱光学传感结构。随后,通过实验验证了设计方案的可行性和仿真模型的正确性。最后,基于该仿真模型,分析了 GIS 内的局部放电光学信号传播特性。

1 仿真设计

1.1 局部放电光信号

GIS 内部发生局部放电时,常伴随着光的产生。光辐射是放电的固有特性^[4-5]。当原子中的电子从高能级跃迁到低能级时,多余的能量将以光子的形式释放。受激原子会向外发出可见光、紫外光和红外光^[11]。

光学信号的辐照度 E_e 表示单位面积接收到的光辐射^[12]。

$$E_e = \frac{dP_e}{dS} \quad (1)$$

其中, S 表示传感器的接收面积; P_e 表示接收到的光辐射通量。

由于局部放电只发生在绝缘缺陷附近极小的空间内,因此局部放电产生的光信号可以被视为点光源^[13]。本文在仿真中,将局部放电光源设置为球形点光源,假设其在空间各个方向发出的光线均匀分布且垂直于表面。设置 GIS 中 SF_6 的光折射率为 1.000 783, SF_6 的吸收光谱主要集中在中红外波段,对局部放电光信号的传播影响极小,可忽略不计^[14]。光 PD 信号的波长分布在 200~800 nm,集中在 300~500 nm^[15-16]。设置 PD 光辐射波长

为 500 nm。导光柱光信号响应波长范围 230~700 nm,辐射光波在导光柱的波长响应范围内。

1.2 材料设置及漫反射函数

光 PD 信号会在 GIS 设备内发生吸收和反射,罐体材料和表面性质的仿真参数设置对光信号的传播具有重要影响。

本文仿真采用的表面材料漫反射模型为双向反射光分布函数模型 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF)^[12]。

BRDF 模型的数学定义为:

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL(\theta_r, \phi_r)}{dE(\theta_i, \phi_i)} \quad (2)$$

式中: θ_i 表示入射光与 z 轴正方向的夹角; θ_r 表示反射光与 z 轴正方向的夹角; ϕ_i 表示入射光在 xy 平面的投影与 y 轴正方向的夹角; ϕ_r 表示反射光在 xy 平面的投影与 y 轴正方向的夹角; dL 为单位面积中某方向的反射光辐照度; dE 为单位面积中某方向的入射光辐照度。

除此之外,光信号在 GIS 中传播需要满足以下条件^[14]:

$$\alpha + R + T = 1 \quad (3)$$

式中: α 为吸收系数; R 为镜面反射系数; T 为漫反射系数。

本文仿真中 GIS 罐体材料设置为抛光并氧化的中等光滑铝材,其中 $\alpha = 30\%$, $R = 20\%$, $T = 50\%$ 。

1.3 GIS 仿真模型建立

根据实际的 GIS 尺寸并参照文献[12, 17],在 TracePro 中搭建 GIS 仿真模型,如图 1 所示。GIS 长度为 1 250 mm,高压导杆半径 45 mm,罐体内半径 190 mm,壁厚 8 mm。手孔深 50 mm,直径 200 mm,盖板上装有导光柱光学传感器。导光柱的材质为聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA),透光率为 93%。

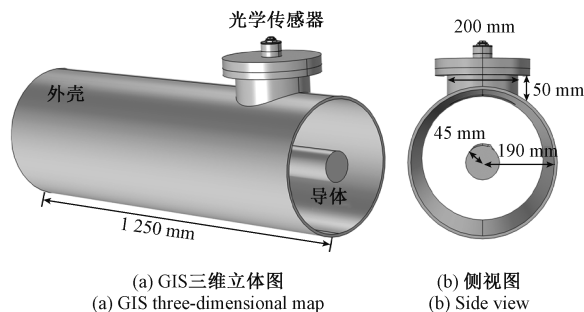


图 1 GIS 仿真模型示意图

Fig. 1 GIS simulation model diagram

光信号在表面上的吸收和反射特性不仅取决于罐体材料,还取决于光的入射角度,即 PD 源的位置^[14]。由于 PD 可能发生在腔体内的任何位置,因此除了设置 GIS 材料参数,还仿真了不同位置的放电源。本文共设置 4 个放电源平面,分别记为 I1、I2、I3、I4。每个平面上的 PD

源的位置如图2所示,其中 $y+45$ 、 $y+115$ 、 $y+185$ 分别代表 y 轴正方向45、115、185 mm, x 轴同理。共设置36个放电点,涵盖了导杆附近、壳体附近与腔体中间的位置。

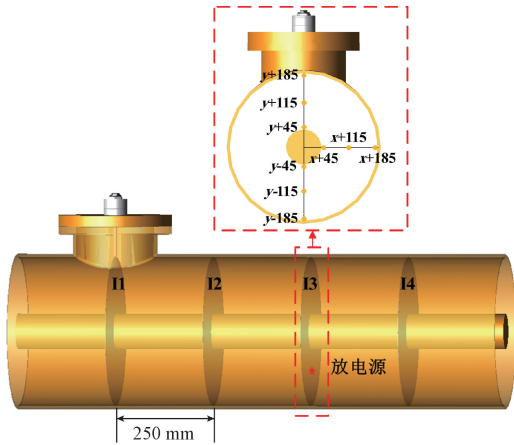


图2 局部放电源位置

Fig. 2 Locations of PDs

2 导光柱光学传感器结构优化设计

导光柱是基于光的全反射效应实现光信号的传输。光导系统的光测效果取决于导光柱的几何形状和元件的光学性质。影响导光柱光传输效率的因素包括结构、长度等^[18]。

2.1 导光柱传输效率数学模型建立

光在通过两种透明介质时会发生反射和折射,当光从折射率大于空气的透明介质中射向空气时,由于折射率的不同,入射角大于一定角度时,光将在界面上发生全内反射,不再有光射出介质,即光在介质内部传输。

反射定律的矢量表达式如下:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - 2\mathbf{H}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{r}) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{r}'$ 表示反射光方向的单位向量; $\mathbf{r}$ 表示入射光方向的单位向量; $\mathbf{H}$ 为反射面的法向单位向量。

将入射光线 $\mathbf{r}$ 分解为导光柱径向的方向向量和轴向的方向向量,分别记为 $\mathbf{r}_j$ 和 $\mathbf{r}_z$ 。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_j + \mathbf{r}_z \quad (5)$$

由此,式(4)可以表示为:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r}_z - 2\mathbf{H}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{r}_z) + \mathbf{r}_j - 2\mathbf{H}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{r}_j) = \quad (6)$$

$$\mathbf{r}'_z + \mathbf{r}'_j$$

由于 $\mathbf{r}_z$ 与反射面的法向向量垂直,因此 $\mathbf{r}_z$ 在经过反射后不改变方向。

假设某一亮度为 F 的光进入导光柱时,入射角为 θ_i ,折射角 θ_t 。光线进入导光柱后,任意相邻两次反射之间的光线传播距离在导光柱轴向方向的投影 Δz 相等。示意图如图3所示。

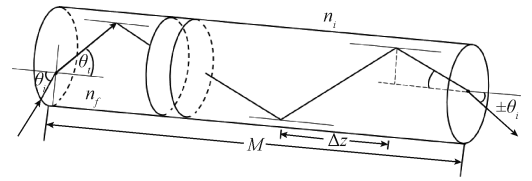


图3 导光柱中的光线示意图

Fig. 3 Diagram of light in the light guide rod

该光源在导光柱前端面的照度 E 为:

$$E = F \cos \theta_i \Delta \Omega \quad (7)$$

式中: $\Delta \Omega$ 为该光源的空间立体角。

若导光柱直径为 D ,长度为 M ,则光线走过的路程 m 为:

$$m = \frac{M}{\cos \theta_i} \quad (8)$$

光线在导光柱内经过 N_r 次反射后从导光柱后端面出射,反射次数 N_r 可由式(9)得到:

$$N_r = \frac{m}{D/\sin \theta_i} \pm 1 \quad (9)$$

则该光线在导光柱后端面出射时,光通量 $\Delta \Phi_o$ 如式(10)所示。

$$\Delta \Phi_o = \Delta \Phi_i \rho^{N_r} \quad (10)$$

式中: $\Delta \Phi_i$ 为光线在导光柱入口处的光通量; ρ 表示导光柱的反射比。

2.2 前置微结构

光线从导光柱前端面进入导光柱,经过多次反射后从其后端面射出,再通过传输光纤传输光信号。在导光柱的前端添加微结构可改变入射光线的原始传播路径,有利于提升导光柱对于光线的收集能力,提高出光效率^[19]。本节采用4种前置微结构的导光柱开展仿真对比研究,分别为凹锥、凹球、凸锥和凸球。导光柱整体结构如图4(a)所示,前置微结构如图4(b)所示。

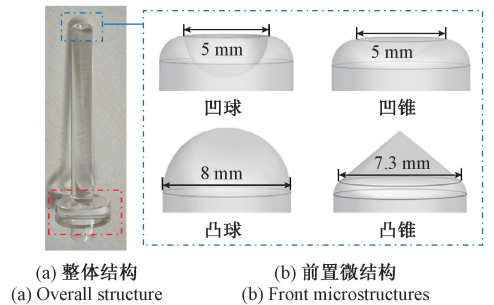


图4 导光柱结构

Fig. 4 The structures of light guide rods

仿真得到不同结构基于不同PD源位置的光辐射度值(light irradiance value, LIV),LIV可以反映放电释放的

能量。尽管该参数不能反映实际的 LIV 大小,但其变化趋势能反映出光信号在传播过程中的变化,有助于规律总结。为了便于统计,以平均光辐射度作为参考基准值,计算不同结构导光柱对同一放电源位置的相对光辐射度值(relative light irradiance value, RLIV)。导光柱前置微结构的 RLIV 统计结果如图 5 所示。

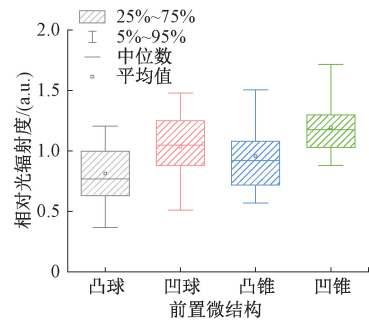


图 5 不同前置微结构的导光柱仿真箱线图
Fig. 5 Simulation box diagram of light guide rods with different front structures

由图 5 可知,前置微结构的导光效果由优至劣可排序为凹锥、凹球、凸锥、凸球。凹锥的平均值和中位数均最高,大于参考基准值,且其箱体矩形部分(25%~75%)和 5%~95%区间内的数据明显优于其它结构,这表明凹锥对罐体内大部分位置的放电源都具有较好的检测效果。凸锥和凹球在 5%~95%区间内的分布跨度基本相同,然而凹球的平均值和中位数均大于凸锥,且其箱体矩形部分位于凸锥之上。因此,凹球的检测效果优于凸锥。凸球的探测能力明显劣于其他 3 种结构,其平均值和中位数均小于参考基准值。

由仿真结果可知,前置微结构的凹凸方式对导光柱的出光效率影响较大。凹结构能够改变光的入射角度,有助于光的汇聚,因此凹结构的整体光探测效果较好。在凹结构中,尽管凹球能够改变光线方向,但其作用是使得光线分布更加均匀,而凹锥能使光线更好地向中心聚集,因此凹锥的导光效果最好。

2.3 长度

导光柱长度影响传感器接收的光强。在考虑长度的同时,还需考虑传感器的安全性和可靠性,确保导光柱不会影响到 GIS 内部电场。本文基于 COMSOL 软件对不同长度的导光柱开展仿真分析^[17,20]。共设置 3 种情况,分别为:1)导光柱伸入 GIS 腔体内;2)导光柱与 GIS 内壁平齐;3)不装配导光柱。

向 GIS 导体施加 208 kV 的峰值相电压,外壳接地。当导光柱探入 GIS 腔体内时,GIS 内部仿真电场分布如图 6 所示。导光柱与罐体内壁平齐和不装配导光柱时,GIS 电场分布分别如图 7(a)、(b)所示。

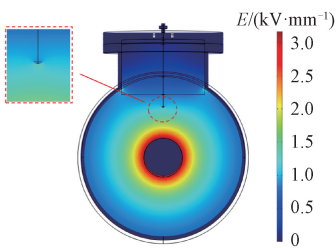


图 6 GIS 内部电场分布
Fig. 6 Electric field distribution in GIS

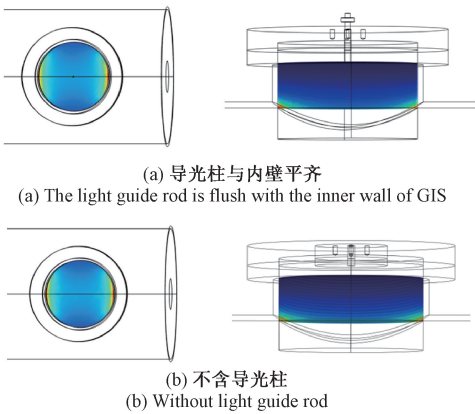


图 7 GIS 手孔附近的电场分布
Fig. 7 Electric field distribution in GIS near hand hole

由图 6 可知,导光柱的侵入使设备内部电场的不均匀度增加,导光柱附近的电场发生畸变。由图 7 可知,导光柱前端与罐体内壁平齐时,电场分布与不装配导光柱的电场分布基本一致。基于对设备安全的考虑,导光柱不可超过罐体内壁。

当设备内部产生局部放电时,导光柱主要由前端面接收信号,并通过介质传输。假设 PD 源位于 I1 平面 y+185 位置,以最大光辐射度为基准,模拟了不同长度导光柱对应的前端探测面的相对光辐射度变化,如表 1 所示。可以看出随着距离的增加,导光柱前端面探测到的信号减小,对光信号的探测能力减弱。同时,随着导光柱长度的减小,某些位置的局放光线无法直射进入导光柱,将会影响导光柱对光信号的接收。

表 1 不同探测面的相对光辐射度值(Q 为罐体内半径)
Table 1 The RLIV of different detection surfaces
(Q is the inner radius of the tank)

探测面与罐体中心的距离/mm	Q	$Q+15$	$Q+30$	$Q+45$	$Q+60$
相对光辐射度/(a. u.)	1.000	0.924	0.842	0.761	0.614

综合考虑电场和光探测效果,导光柱的长度与罐体内壁平齐时,既不影响设备内部电场分布,又能实现光信号的最优采集。

3 光学局部放电实验

3.1 接线图、缺陷、实验过程

在实验室环境下搭建了如图 8 所示的光学局部放电实验平台。设计了可用于实验室的模拟 GIS 罐体,罐体内部高度为 310 mm,内半径 90 mm,壁厚 10 mm,内导体半径 25 mm。罐体内装有针尖缺陷,针尖长 25 mm,针尖与极板间距 6 mm。针尖缺陷的高度、与轴心的径向距离、角度均可调节。

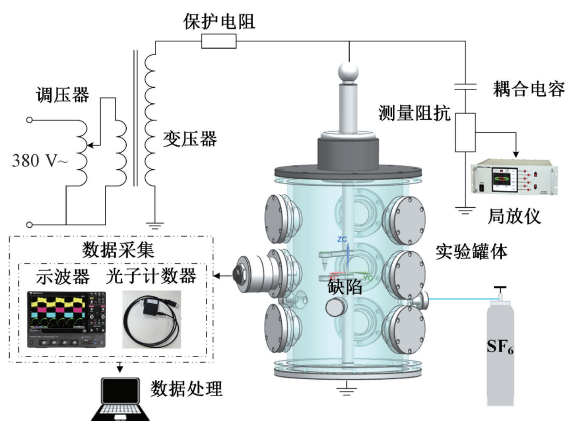


图 8 GIS 光学局部放电实验平台

Fig. 8 GIS optical PD experimental platform

导光柱光学传感器固定于盖板上,通过传输光纤与光子计数器相连。向 GIS 罐体内充入 0.1 MPa 的 SF_6 气体,逐步升高电压直至稳定放电并记录探测光子数。由于在电晕放电中仅采集瞬态光脉冲可能会失去连续光脉冲分布的一般性,而用相对较长时间的放电平均光子数代替瞬态光脉冲幅值更利于统计,同时可以降低实验难度^[11]。因此,记录了每 60 s 内光子计数器采集的平均值。

3.2 不同前置微结构的导光柱实验研究

将 4 种前置微结构的导光柱,两两分组进行实验,其中凹锥和凹球一组,凸锥和凸球一组。同一组的两个光学传感器对称放置在罐体中间的手孔位置。放电源正对两个传感器的中间位置,分别与传感器呈 60° 和 120° 。共设置 6 个放电源,位置如图 9(a)、(b)所示。不同结构的导光柱如图 9(c)所示。

分别对两组实验数据进行归一化。基于同一放电源位置,以最大平均光子数为基准,将采集的平均光子数归一化至 $(0, 1]$ 区间内。实验与仿真对比结果如图 10 所示。

图 10 显示,实验结果与仿真结果相吻合,RLIV 的大小和变化趋势基本相似。凹锥与凹球相比,凹锥对光信

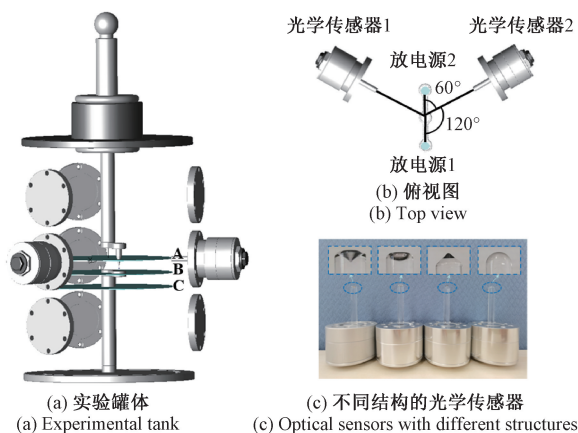


图 9 光学传感器与局部放电源的位置

Fig. 9 The position of optical sensors and PDs

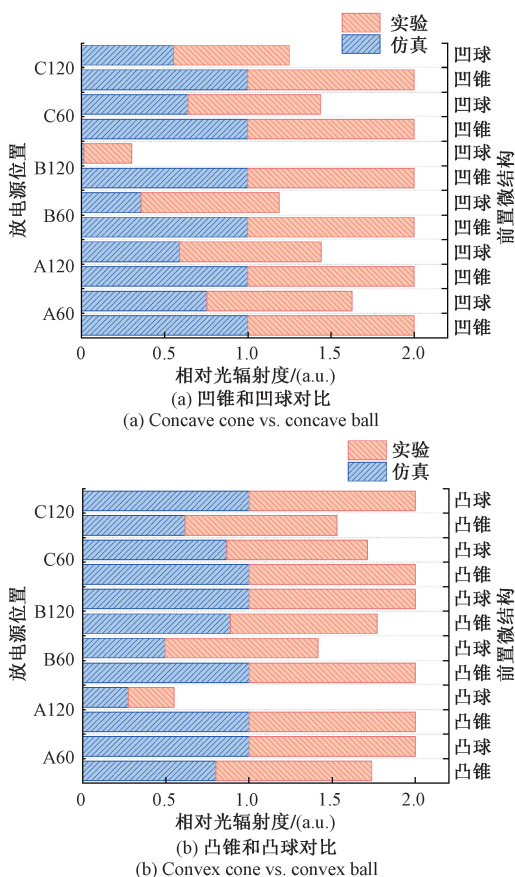


图 10 不同前置微结构的导光柱实验仿真对比

Fig. 10 Experiment and simulation comparison of light guide rod with different front microstructures

号的采集能力明显更优。凸锥和凸球相比,由于凸球对于某位置上的局部放电的检测能力较差,易造成漏判,因此凸锥略有优势。从光学局部放电整体检测效果来看,凹锥优于凹球,凸锥优于凸球。

实验与仿真结果存在一定差别,分析原因如下:1)实际制作的罐体在连接处会有毛刺,即在连接处是不均匀和不光滑的,且导光柱受制作工艺的限制;2)局部放电强度不稳定,信号采集过程存在一定误差。

综合来看,实验与仿真整体趋势基本一致。同时本节结论与 2.2 节实际尺寸 GIS 的仿真结论也相互吻合,由此可以看出,凹锥对局部放电光信号的检测效果最佳。

3.3 不同长度的导光柱实验研究

为了研究长度对导光柱传感特性的影响,制作了 3 种长度的导光柱。与罐体内壁平齐的导光柱长度记为 M (mm)。3 种长度分别为: M 、 $M-10$ 、 $M-20$ 。不同长度的导光柱如图 11(a)所示。将 3 个导光柱光学传感器分别安装在罐体中间的手孔位置。放电源分别位于 A、C 平面,放电源的位置与罐体轴心垂直。放电源与传感器的相对位置如图 11(b)所示。实验采集的平均光子数如表 2 所示。

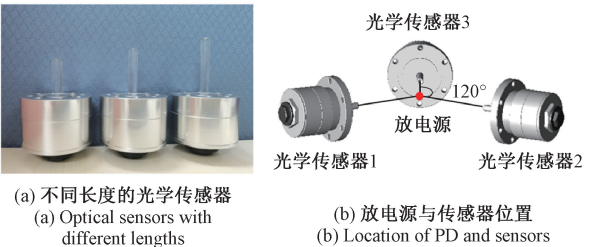


图 11 实验用光学传感器与放电源的位置
Fig. 11 The optical sensors for the experiment and the positions of PDs

表 2 不同长度的导光柱实验结果

Table 2 Experimental results of light guide rod with different lengths

导光柱长度 /mm	平均光子数	
	放电源位于 A 平面	放电源位于 C 平面
M	2 104	295
$M-10$	1 335	169
$M-20$	1 162	133

由表 2 可知,不同长度的导光柱对局放光信号的探测能力不同,与罐体内壁平齐的导光柱对局部放电光信号的检测能力最好。这与 2.3 节的仿真结果一致,即在满足电场要求的情况下,长度最长的导光柱的检测效果最好。

4 光学信号传播规律研究

第 3 节的实验验证了本文建立的仿真模型的正确性和导光柱光学传感器的有效性。利用本文仿真模型,分

析局部放电光信号在 GIS 内部的传播规律,为导光柱光学传感器的布局方式提供参考。

放电源位于图 2 所示的 I4 平面。在 I4 平面左侧 100 mm 设置第 1 个探测面,随后向左侧每隔 200 mm 设置 1 个探测面,共设置 4 个探测面,分别记为 P1、P2、P3、P4。在 4 个探测面上每隔 30 度设置 1 个探测点,共设置 48 个探测点。探测点是附在腔体内壁、半径为 10 mm 的圆形表面,其法线垂直于腔体内壁,且指向内导体轴心。探测面和探测点采用完全透射体模型。对于放电源发出的光线不产生任何的吸收或反射。本节讨论的对象是入射到探测面和探测点上的光线。

4.1 光信号与探测距离之间的关系

在 I4 平面,沿 y 轴负方向改变局放源位置,得到不同探测面的光辐射度分布图 (total irradiance map, TIM) 如图 12 所示。

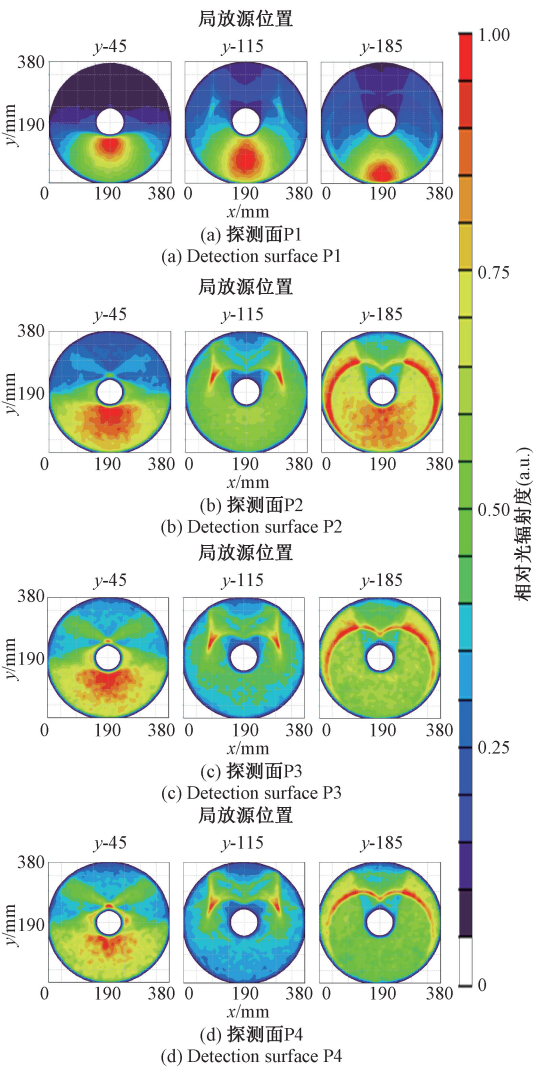


图 12 探测面光辐射度分布图
Fig. 12 TIM on the detection surfaces

由图 12 可以看出,随着 PD 源与探测面的距离增加,直射光的作用逐渐减弱,反射光成为主导因素,探测面的光强分布逐渐均匀。

PD 源的位置影响了探测面中光斑面积与整体光均匀程度。当 PD 源靠近内导体时,PD 源与导体柱相切的角度较大,致使探测面的下半部分光斑呈半圆形;由于内导体的遮挡,上半平面暗斑的颜色较深,光强较小。由 4 个探测面的 TIM 可以看出,放电源所在位置的光辐射强度最大,呈椭圆状,随着放电源与探测面的距离增加,探测面的整体光辐射度逐渐均匀。当 PD 源位于外壳与导体之间时,PD 源与导体柱相切的角度减小,光的辐射范围增大,暗斑面积减小,光线在壳体上部的反射导致内导体两侧出现两个三角状的光斑。随着放电源与探测面的距离增加,探测面上整体光辐照度降低。当 PD 源靠近外壳时,PD 源与导体柱相切的角度最小,暗斑面积最小。同时由于光的反射,在壳体左右两侧出现圆弧状的光斑,随着放电源与探测面的距离增加,两侧的圆弧长度逐渐减小,下半平面的光强减弱。

探测面上的 LIV 如图 13 所示。随着放电源与探测面的距离的增加,探测面上的 LIV 减小。放电源位于导体与壳体中间时,探测面上的 LIV 较大,而靠近内导体或壳体时 LIV 较小。

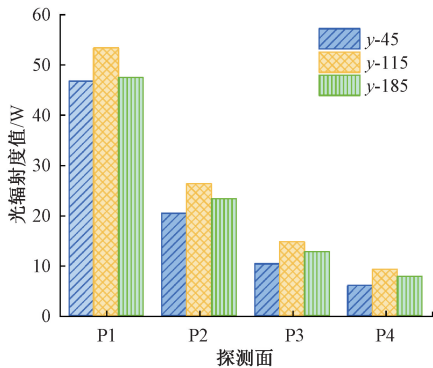


图 13 探测面的光辐射度值
Fig. 13 LIV of detection surfaces

4.2 光信号与探测角度之间的关系

沿 14 平面中的 y 轴负方向改变 PD 源位置,得到位于 4 个探测面上的不同角度探测点的 LIV,如图 14 所示。

由图 14 可知,探测点的 LIV 的连线具有一定的对称性。当 PD 源与探测面相距 100 mm 时,光斑的主要成因是直射光,放电源位置附近的 LIV 最大,主要集中在 150°~210°范围内。随着 PD 源与探测面的距离增大,反射光成为主要因素。当 PD 源与探测面的距离大于等于 300 mm 时,位于外壳与导体中间位置的 PD 更容易被检测到,各探测面上辐照度面积最大,最优探测点主要集中在 330°和 30°附近。当 PD 位于内导体附近时,由于内导

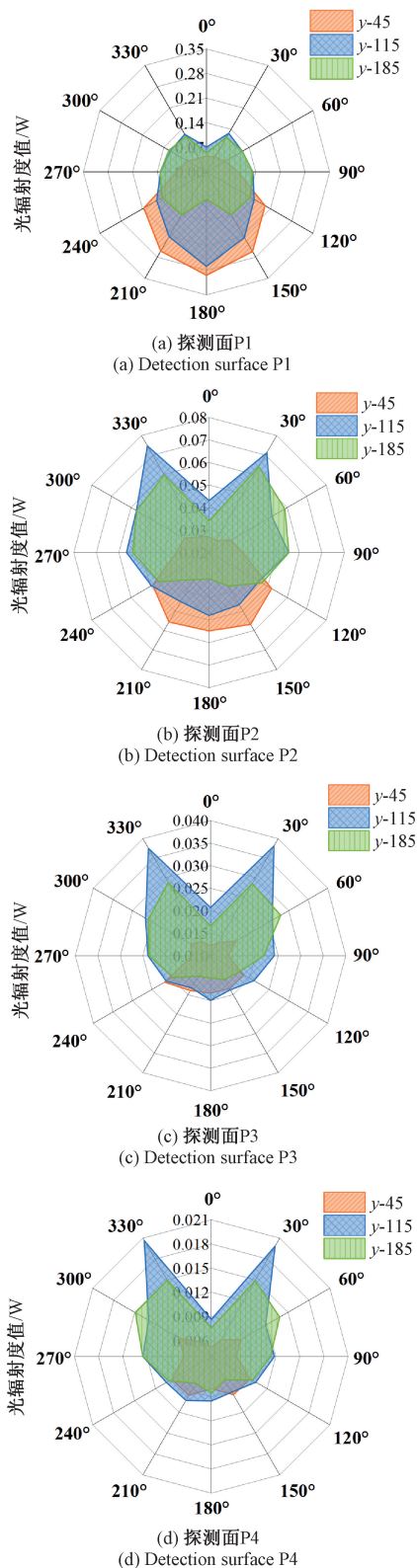


图 14 探测点的光辐射度值
Fig. 14 LIV of detection points

体的遮挡,光线主要集中在导体的下半部分。当 PD 源位于下壳体附近时,由于光的反射,在 270°~330°和

30°~90°附近的探测值较大。探测点的 LIV 分布与图 12 中探测面的 TIM 基本吻合。

5 结 论

本文设计了一种基于导光柱的局部放电光学传感器。对影响导光柱检测效果的前置微结构和长度两个因素进行了仿真分析,并在实验室模拟罐体中开展试验对仿真结果进行验证。同时,基于该仿真模型,研究了 GIS 内局部放电光信号的传播特性。得出如下结论:

1)前置微结构的“凹凸”方式对导光柱的光接收效率影响很大,“凹”结构相比于“凸”结构具有更好的聚光效果,凹锥对光信号的检测效果最佳。

2)在不影响电场分布的情况下,导光柱越长,光测效果越好。综合考虑电场与光测效果,导光柱长度应设置与 GIS 设备内壁平齐。

3)当探测面与 PD 源距离较近时,直射光影响了探测面的光斑形状。随着放电源与探测面的距离的增大,内导体的遮挡以及光在罐体内壁的反射成为了影响 PD 光信号传播的主要因素。当 PD 源靠近内导体时,各探测面下半部分的 LIV 较大;当 PD 源靠近罐体下壳体或位于导体和壳体之间时,随着 PD 源与探测面距离的增大,光线集中在探测面上半部分。

参考文献

- [1] ZANG Y M, QIAN Y, WANG H, et al. A novel optical localization method for partial discharge source using ANFIS virtual sensors and simulation fingerprint in GIL[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [2] 李佩宜, 王鹏, 张羲海, 等. 基于深度信念网络的变频电机局部放电起始电压预测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 121-130.
- LI P Y, WANG P, ZHANG X H, et al. Prediction of partial discharge inception voltage for inverter-fed motor based on deep belief network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 121-130.
- [3] 王利福, 刘屹江泽, 王焱增. 基于 EEMD 能量矩与 ISSA-SVM 算法的 GIS 局部放电类型识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 204-212.
- WANG L F, LIU Y J Z, WANG Y Z. Partial discharge identification method in GIS based on EEMD energy moment and ISSA-SVM algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 204-212.
- [4] ZHOU H Y, MA G M, YUAN W, et al. Optical sensing in condition monitoring of gas insulated apparatus: A

review[J]. High Voltage, 2019, 4: 259-270.

- [5] CHEN W G, WANG J X, WAN F, et al. Review of optical fibre sensors for electrical equipment characteristic state parameters detection[J]. High Voltage, 2019, 4: 271-281.
- [6] 陈起超, 张伟超, 白仕光, 等. 非本征光纤法-珀传感器局部放电检测研究进展[J]. 电工技术学报, 2022, 37(5): 1305-1320.
- CHEN Q CH, ZHANG W CH, BAI SH G, et al. Research progress of extrinsic fiber Fabry-Perot interferometer sensor in partial discharge detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(5): 1305-1320.
- [7] IEC International Standard 60270. High voltage test techniques-partial discharge measurements :GB/T 7354-2003 [S]. Inter-national Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 3rd edition, 2000.
- [8] LIU Z H, WANG Y Q, CHEN X, et al. An optical fiber sensing method for partial discharge in the HVDC cable system [J]. International Journal of Electrical Power Energy Systems, 2021, 128: 106749.
- [9] 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.
- [10] 吴诗优, 郑书生, 钟爱旭. GIS 内光信号传播及传感器布局方式研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 337-347.
- WU SH Y, ZHENG SH SH, ZHONG AI X. Research on optical propagation and sensor layout in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 337-347.
- [11] REN M, SONG B, ZHUANG T X, et al. Optical partial discharge diagnostic in SF₆ gas insulated system via multi-spectral detection [J]. ISA Transactions, 2018, 75: 247-257.
- [12] XU Y P, QIAN Y, SHENG G H, et al. Simulation analysis on the propagation of the optical partial discharge signal in I-shaped and L-shaped GILs [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1421-1428.
- [13] 韩旭涛, 刘泽辉, 张亮, 等. GIS 中局部放电光信号传播特性仿真研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(6): 128-134.

- HAN X T, LIU Z H, ZHANG L, et al. Simulation for propagation characteristics of optical signals excited by partial discharge in GIS[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2018, 52(6): 128-134.
- [14] 臧奕茗, 王辉, 钱勇, 等. 基于三维光学指纹和 NPSO-KELM 的 GIL 局部放电定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6754-6764.
- ZANG Y M, WANG H, QIAN Y, et al. GIL partial discharge localization method based on 3D optical fingerprint and NPSO-KELM [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6754-6764.
- [15] FUJII K, YATNADA M, TANAKA A, et al. Emission spectrum of partial discharge light in SF₆ gas [J]. Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1992: 332-335.
- [16] MANGERET R, FARENC J, AI B, et al. Optical detection of partial discharges using fluorescent fiber[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(4): 783-789.
- [17] HAN X T, LI J H, ZHANG L, et al. A novel PD detection technique for use in GIS based on a combination of UHF and optical sensors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68 (8): 2890-2897.
- [18] 吴新汶, 王春苑, 欧阳金龙. 利用 TracePro 模拟分析导光管的传输效率[J]. 照明工程学报, 2020, 31(2): 145-150.
- WU X W, WANG CH Y, OUYANG J L. Analysis of transmission tube efficiency of light pipe based on TracePro [J]. Zhaoming Gongcheng Xuebao, 2020, 31(2): 145-150.
- [19] 王佳佳, 贺建芸, 谢鹏程, 等. 基于光学仿真 Tracepro 软件对多面微结构导光板光学性能的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2021, 48(2): 68-74.
- WANG J J, HE J Y, XIE P CH, et al. Optical performance of a multi-faceted microstructure light guide plate based on optical simulation Tracepro software [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2021, 48(2): 68-74.
- [20] 谈克雄, 薛家麟. 高压静电场数值计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- TAN K X, XUE J L. Numerical calculation of high voltage electrostatic field[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990.

作者简介



李泽, 2019 年于华北电力大学获得学士学位, 现为上海交通大学电气工程系博士研究生, 主要研究方向为局部放电光学检测与模式识别。

E-mail: lize123@sjtu.edu.cn

Li Ze received her B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2019. She is currently pursuing her Ph. D. degree in electrical engineering at Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests include optical detection and fault diagnosis of partial discharge.



钱勇(通信作者), 2007 年于上海交通大学获得博士学位, 现为上海交通大学副教授, 主要研究方向为电力设备局部放电检测与诊断。

E-mail: qian_yong@sjtu.edu.cn

Qian Yong (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2007. He is currently an associate professor at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include partial discharge detection and diagnosis of power equipment.