DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)08-0020-05

基于日盲紫外光学探测技术局部放电目标的原理与模型验证

谢凌东[1]，沈科炬[1]，高 朋[1]，田 咪[2]，闫志学[2]

（1.国网浙江慈溪市供电有限公司，浙江 慈溪 315300；

2.上海谱视科技有限公司，上海 200434）

摘 要：日盲紫外光学探测技术是一种基于日盲紫外发射光谱的局部放电目标（电晕、电弧）的即时检测识别方法和手段。研究阐述局部放电目标模型和紫外光谱特性以及日盲紫外光学探测技术手段的原理、仪器结构和工作机制，探讨其在电力设备检测等领域的应用，并开展相关探测实验。实验结果表明，不同的日盲紫外探测系统成像效果不同，具有不同的弥散圆斑特性，紫外放电目标弥散斑大小（光子计数）随着距离的增加而变小。探讨一种紫外弥散圆斑图像的质心定位方法，为进一步展局部放电目标的紫外特性研究提供有力依据。

关键词：局部放电；日盲紫外；成像探测；质心定位

中图分类号：TP391.413 **文献标识码：**A **文章编号：**1003-7241（2025）08-0020-05

Principle and Model Verification of Partial Discharge Targets Based on Solar-Blind Ultraviolet Optical Detection Technology

XIE Lingdong[1], SHEN Keju[1], GAO Peng[1], TIAN Mi[2], YAN Zhixue[2]

(1. State Grid Zhejiang Cixi Power Supply Co., Ltd., Cixi 315300, China;

2. Shanghai PuShi Technology Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: Solar-blind ultraviolet optical detection technology is a real-time detection and identification method and means of partial discharge targets (includes corona and arc) based on the solar-blind ultraviolet emission spectrum, which has lots of advantages of high sensitivity, fast response, clear results and convenient application. This article elaborates on the partial discharge targets model and ultraviolet spectral characteristics, as well as the principle, instrument structure and working mechanism of the solar-blind ultraviolet optical detection technology. It explores the application of this technology in the filed of power equipment measurement and conducts relevant detection experiments. The experimental results show that different solar-blind ultraviolet (UV) detection systems have different imaging effects and different diffuse circular spot characteristics. The size of ultraviolet discharge target dispersion band (photon counts) decreases with increasing distance. In addition, this article explores a centroid positioning method for UV diffuse circular spot images. For conclusion, this article provides a strong basis for further research on the ultraviolet characteristics of partial discharge targets.

Keywords: partial discharge; solar-blind ultraviolet; imaging detection; centroid positioning

0 引言

随着国家电网建设规模逐年扩大、高压电力设备的普及，局部放电问题长期以来一直是人们非常关注的焦点问题。日盲紫外探测技术作为一种非接触、在线监测方法，能够准确、及时地检测到电晕放电现象，对于提高电力设备的可靠性和安全性具有重要意义[1]。

局部放电会产生肉眼不可见的电晕，比较强的时候甚至会有电弧信号，都属于空气击穿后的放电现象，导体表面电荷与空气游离电荷在复杂高强电场加持下高速运动，击穿空气。紫外探测技术手段被普及应用到电力系统，目前有南非、以色列等进口紫外产品，近几年我国在紫外成像仪上发展迅猛，正在逐步推广国产化和商业化[2]。

本文介绍了局部放电原理模型，日盲紫外探测技术的原理、仪器结构，搭建局部放电实验平台，对日盲紫外探测系统的成像效果进行了分析与实验研究。

1 局部放电探测原理

1.1 产生局部放电的原理模型

局部放电类似于尖端放电，是由于导体表面电荷聚集在尖端，局部超过空气耐受电场强度而导致空气击穿并放电。局部放电或因局部曲率过大，或因局部破损导致场强分布改变，和空气中的游离电荷相互作用并放电，从而产生电晕、电弧现象，还会伴随着产生光、声、臭氧、热和微量的化学物质等[3-4]。

收稿日期：2024-03-26

局部放电前的电场强度为 E_c，经验公式如式(1)所示：

$$E_c(\mathrm{V/m}) = 30.38\times10^5\times m\delta^n\left(1+\frac{0.298}{\sqrt{r}}\right) \tag{1}$$

式中，δ为空气相对密度，n为空气密度指数，r为导体曲率半径，m为表面粗糙系数小于1[5]。

目前关于空气放电的研究主要分为汤森理论和流注理论[6]。经典的空气放电理论认为，电子击穿后不停碰撞发生电子雪崩。空气中电弧模型包括Habe-dank模型，Schwarz模型，Mayr和Cassie电弧模型方程式[7]。

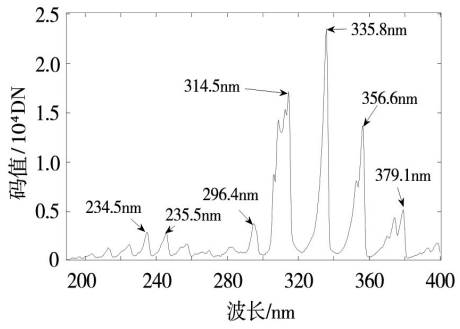
Mayr电弧模型方程式由热原理导出，如式(2)，适用于小电流模型[8]。

$$\frac{1}{g}\cdot\frac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(\ln g)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{f}\left(\frac{ui}{P}-1\right) \tag{2}$$

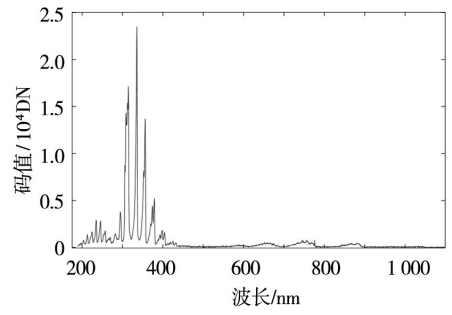
式中，g为电导，u为电压，i为电流，f为时间常数，P为电弧散热功率[9]。

1.2 检测放电光谱

击穿空气就会产生光、热，因为空气成分在等离子体会释放，需要对局部放电目标进行光谱测定，得到特征波长和主要能量波段分布。发射光谱曲线光谱如图1所示[4]，图上这些峰值波长的来源，主要与氮气N_2+离子发射光谱有关，也与氮、氧等有关，并且可以看出，能量分布主要集中在200~400 nm。根据太阳光谱辐照度曲线，小于280 nm被大气层和臭氧层吸收，形成“日盲紫外”波段，太阳光辐射小于10~13 W/m²。波长大于280 nm的区域，太阳光能量迅速上升，不利于紫外弱目标探测。



(a) 200~400 nm



(b) 200~1 000 nm

图1 局部放电光谱分布曲线

因此，结合局部放电目标的波长基础和大气层内紫外特性，日盲紫外可以作为局部放电探测系统的工作波段。

2 日盲紫外探测系统

日盲紫外光学探测技术利用局部放电产生的紫外光辐射信号，通过日盲紫外探测系统将光电传感器转换为电信号和图像，再进行处理分析，可以得到识别局部放电目标的准确位置和信号强弱。通过分析不同特征信号的变化趋势，来实现电晕/电弧放电的监测和诊断，可以诊断电力设备的放电状态和破损情况，有效提高电力高压设备的安全性与可靠性[10]。

(1) 紫外光学镜头。主要用于聚焦光源发出的光线，将其集中到焦距区域。设计合适的镜头可确保能获得清晰且MTF高的光线，同时为了扩大成像系统的检测范围，提升检测精度，考虑采用大视场高分辨率的定焦日盲紫外成像光学镜头。F数2.5，焦距50 mm，工作波段覆盖日盲紫外波段240~280 nm，匹配后端靶面的紫外探测器。

(2) 高灵敏度的紫外探测器。选择具有高灵敏度和低噪声的探测器，是日盲紫外探测系统的核心，可以提高系统的灵敏度。常用的紫外探测器包括光电倍增管、紫外增强型电荷耦合器件(charge-coupled device，CCD)、紫外ICMOS等。光电倍增管一般用于火警告警、固定点位检测等，探测有无，没有图像，不直观；紫外增强型CCD虽有图像，但仅可以探测较强放电目标；采用紫外ICMOS集成了紫外像增强器和CMOS，既具备光子级灵敏度，又可以获得图像，方便定位和分析。其中，紫外像增强器的结构如图2所示，由紫外光电阴极、微通道板和荧光屏组成，能够将紫外弱信号转换为电子信号，再进行1-2级的倍增放大，达到十万倍到百万倍甚至更高的放大量级，形成增强的电信号，再转成增强可见图像信号到CMOS上成像。前端的深截止紫外滤光片，也特别重要，光谱透过率曲线如图3所示，主要波长通道覆盖250~280 nm日盲波段，当波长>350 nm，透过率达到OD10。综上，通过优化镜头设计，降低噪声干扰，使用日盲紫外像增强器，并进行有效的信号处理和数据分析，可以显著提高日盲紫外探测系统的光学性能和灵敏度。

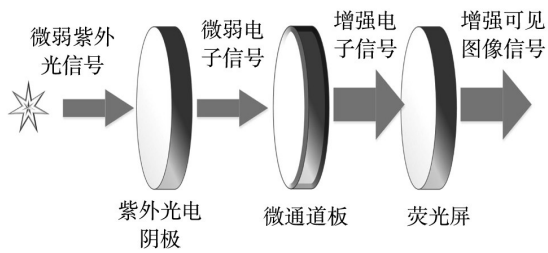


图2 紫外增强MCP结构及工作流程图

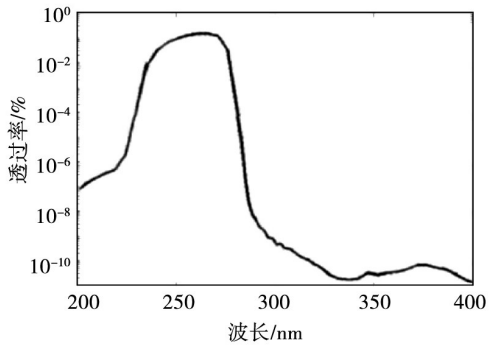


图3 紫外滤光片的透过率曲线

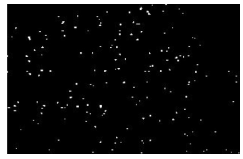
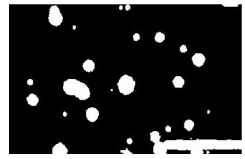
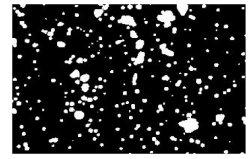
3 局部放电目标探测实验与分析

实验采用尖端放电来作为局部放电目标，因为是最容易产生的局部放电，采用kV量级高压电源，通过其转换线圈可在尖端和平板之间施加5 kV交流电，尖端和平板的间距为10 mm，观测距离在1.5~50 m之间。采用某进口产品、某国产产品和项目自研产品，进行带外抑制和局部放电的比对实验。

3.1 测试带外抑制

设备需要在外场和白天等其他严苛环境下展开实际测试，因此开展带外抑制测试具有重要的必要性。将设备调节不同增益调节下，将设备看向蓝天背景，观测得到的图像就是带外响应。随着增益的提高，图像上出现的椒盐噪点也就变多变密，这是由于带外响应所造成的，会影响设备在日光条件下对目标的探测。因此带外响应越低，设备在白天外场工作的环境适应性也就越强。带外抑制测试矩阵如表1所示。实验结果表明，3台产品在90%增益条件下几乎都是带外噪声信号，在50%增益下有一些噪声，30%增益几乎没有带外噪声，背景图像较好。此外，根据实验结果，推荐外场日光下实际测试时需尽量选择小于50%增益参数。

表1 带外抑制测试矩阵

增益参数	某进口产品	某国产产品	自研产品
90%			
50%			
30%			

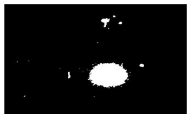
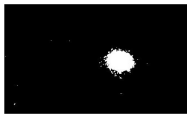
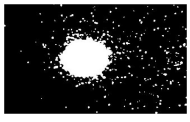
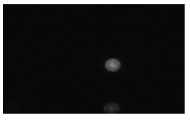
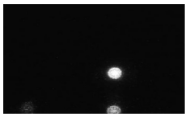
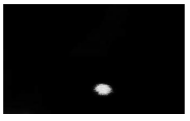
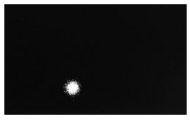
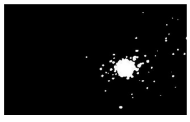
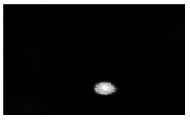
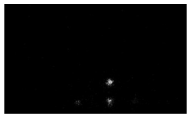
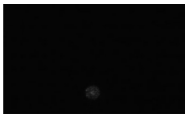
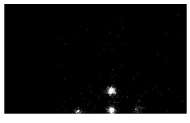
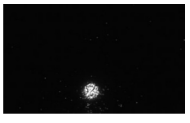
3.2 不同观测距离

在实验室内，选取了不同距离对局部放电目标进行观测，分别是1.5 m、6.5 m、10 m、20 m和50 m。通过实验和处理，得到在不同距离下探测到的局部放电产生的日盲紫外目标图像，局部放电目标探测矩阵如表2所示。实验结果表明，不同的日盲紫外探测系统成像效果不同，具有不同的弥散圆斑特性，紫外放电目标弥散斑大小(光子计数)随着距离的增加而变小。某进口产品的信噪比较高，图像质量高。自研产品和某国产产品的大致结果相当，噪点较少。

此外，可以进一步发现进口产品和国产产品的紫外图像，具有二值化特性，非0即1。自研产品的紫外图像也呈现弥散圆斑特性，但是圆斑则具有灰度区别，0~255，因此有利于进行质心定位(在下一节针对质心定位展开相关讨论和分析)，并有利于下一步针对紫外图像和可见光图像融合和定位。

根据局部放电目标的弥散圆斑，可计算得到光子计数，得到局部放电目标光子计数和距离的关系曲线，如图4所示。针对20%增益数据，得到拟合公式：$y=\frac{6.98\times10^{5}+3.79\times10^{5}x}{x^{3}}+154$，光子计数基本和距离呈三次反比关系。

表2 局部放电目标探测矩阵

距离	增益参数	某进口产品	某国产产品	自研产品
1.5 m	10%			
	20%			
6.5 m	20%			
	30%			
10 m	20%			
	30%			
20 m	20%			
	30%			
50 m	20%			
	30%			

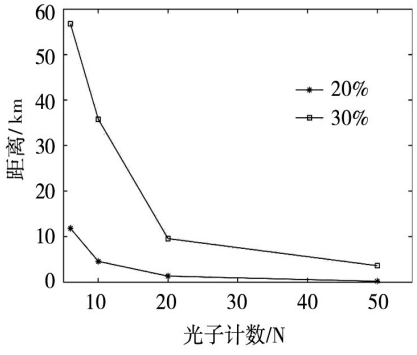


图4 局部放电目标光子计数与距离的关系曲线

4 关于放电目标弥散斑质心定位的讨论

基于紫外像增强器的特性，实验中放电图像呈现弥散圆斑的形态，然而目前市面上暂无相关的精准定位分析工具，可使用一种基于紫外图像针对弥散斑特性的质心定位算法，用于确定紫外放电目标（电晕、电弧等）的中心准确位置，更有利于后期维护人员定位具体分析。在实际使用中，需要将可见光和紫外图像融合使用，操作人员既可以解析场景，又能通过紫外获得放电强度和准确的位置[11]。因此紫外定位成为了紫外和可见光图像配准的关键。

常见的质心定位算法有二维重心法：

（1）图像预处理。首先对采集到的电晕放电图像进行预处理，包括降噪和增强等操作。可以使用滤波器（如高斯滤波器）降低噪声，并对图像进行平滑或者锐化，以提高后续的处理效果。

（2）二值化。将预处理后的图像转化为二值图像，将电晕放电的区域从背景分离出来。可以使用阈值分割方法，根据像素灰度值与设定阈值的大小关系来决定像素的二值化状态。

（3）轮廓提取。对二值图像进行轮廓提取，将电晕放电的轮廓从背景中提取出来。可以使用边缘检测算法（如Canny边缘检测算法）来检测图像中的边缘信息。

（4）重心计算。基于提取到的电晕放电轮廓，计算电晕放电的质心位置。重心是对轮廓内所有像素位置的加权平均值，其计算公式如式（3）、（4）：

$$X_c = \frac{\sum X_i \bullet I_i}{\sum I_i} \tag{3}$$

$$Y_c = \frac{\sum Y_i \bullet I_i}{\sum I_i} \tag{4}$$

式中，X_i和Y_i分别表示像素的横纵坐标，I_i表示像素的灰度值或亮度值。根据计算得到的质心位置（X_c，Y_c），可以确定局部放电的中心位置。

放电目标质心定位算法的准确性和精度受到图像质量、噪声、阈值选择等因素的影响。在实际应用中，可以对定位算法进行参数调优，考虑特征模板匹配，比如高斯分布等添加权重的方式，以提高质心定位的准确性和可靠性。由于需要在系统上实时处理得到，因此还需考虑实时性要求，算法上优化计算效率，根据具体场景选择适合的算法策略。

5 结束语

局部放电日盲紫外探测技术作为一种高灵敏度、快速响应、精确定位的局部放电检测方法，在环境监测、电力设备检测和火灾预警等领域具有广泛应用前景。本文详细介绍了局部放电目标原理和模型，根据光谱特性阐述了日盲紫外探测技术的原理、系统框架和工作机制，并开展了相关探测实验。实验结果表明，不同的日盲紫外探测系统成像效果不同，具有不同的弥散圆斑特性，紫外放电目标弥散斑大小（光子计数）随着距离的增加而变小。此外，还探讨了一种紫外弥散圆斑图像的质心定位方法。然而，当前仍然存在技术挑战和问题，比如紫外电晕图像和可见光图像融合的定位方法，硬件加速应用深度学习方法等，需要进一步研究和解决。未来，日盲紫外探测技术将有望在更多领域发挥重要作用。

参考文献：

[1] 梁坡，何宁，廖欣. 电弧放电紫外光辐射探测系统研制[J]. 激光与光电子学进展，2011，48(2)：1-5.

[2] 匡蕾，顾燕. 紫外像增强器用于电力安全检测的研究[J]. 红外技术，2015，37(11)：986-990.

[3] KIL-MOK SHONG，et al. Images detect ion and diagnosis of corona discharge on porcelain insulators at 22.9 kV D/L[J]. IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines，Power Electronics and Drives，2007，2(7)：462-466.

[4] 房陈岩. 空气高压放电紫外特性及多光谱成像技术研究[D]. 北京：中国科学院大学，2016：105-108.

[5] 房陈岩，李清灵，庾金涛，等. 室内高压电弧/电晕的紫外特性分析和测量研究[J]. 光谱学与光谱分析，2018，38(4)：1178-1183.

[6] 庾金涛，房陈岩，李清灵，等. 尖端放电紫外光谱特性仿真分析及验证[J]. 光谱学与光谱分析，2018，38(10)：2989-2997.

[7] TERZIJA V V，KOGLIN H J，et al. Long arc in free air：laboratory testing，modeling，simulation and model-parameters estimation[J]. IEE Proceedings of Generator Transmission and Distribution，2002，149 (3)：319-325.

[8] 吴迪，李红江，毕坤，等. 基于EMTDC/PSC AD的熔断器仿真模型[J]. 船电技术，2011，31(6)：14-17.

[9] 黄绍平，杨青，李靖. 基于MATLAB的电弧模型仿真[J]. 电力系统及其自动化学报，2005，17(5)：64-70.

[10] 谢沈阳. 紫外光和可见光图像融合方法的研究[D]. 北京：华北电力大学，2019：59-61.

[11] 陈锦龙，陈俊全，张旭，等. 一种放电检测中紫外和可见光图像配准方法[J]. 测绘科学，2019，44(8)：70-74.

作者简介：谢凌东（1986—），男，博士，副高，研究方向：电气工程及其自动化。

通信作者：高朋（1979—），男，本科，高级工程师，研究方向：配网自动化。