

基于紫外技术的绝缘子在线检测应用研究综述

侯 喆¹ 马宇坤² 戴志伟¹

(1. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所无锡分部 2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院)

摘要: 绝缘子的运行状态直接关系到高压电网的稳定性,因此绝缘子的在线检测对电网安全运行至关重要。随着紫外技术发展的日益成熟,其在绝缘子检测中的应用愈发广泛。为此,本文综述了基于紫外技术的绝缘子在线检测应用研究进展,介绍了紫外成像检测技术和紫外脉冲检测技术的相关原理,系统阐述了紫外技术在绝缘子放电、状态评估中的研究现状,并对其主要关键技术以及研究方法进行深入分析,为绝缘子在线检测技术提供了有力支撑。

关键词: 紫外成像; 紫外脉冲; 绝缘子; 在线检测

2024.08.DQGY
28

0 引言

电力系统绝缘子众多,且一般都在室外,绝缘子长期在强电场、高温、日晒、湿度、污秽以及机械应力等多方因素的作用下极易出现破损、老化等问题,在污湿条件下容易产生放电,对电力系统的安全稳定运行构成极大威胁。随着绝缘子的长时间运行,其内部晶体孔洞以及裂缝处极易吸附水分子,进而加强电离,绝缘子表面的污秽也将导致其绝缘程度大大降低^[1]。目前在线检测绝缘子状态的方法大致分为两种,即接触式电量检测法和非接触式电量检测法^[2-8],其各有其优缺点,如表1所示。

紫外检测技术是近年来发展起来的电气设备非接触式检测方法,电力设备故障的光学可视化示意图如图1所示。紫外技术具有检测结果直观、快速响应、高探测灵敏度等优点,能够方便地检测出绝缘子外部放电,找出能准确反映放电强弱及变化的紫外图像参

表1 绝缘子状态在线检测方法比较

分类	检测技术	优点	缺点
接触式电量检测	绝缘电阻测定法	检测零值和低值绝缘子有很高准确性	很难检测大量绝缘子且易误判
	分布电压法	方便快捷	依赖检测人员的经验且存在安全隐患
	泄漏电流法	直观,简便	受多种因素影响,如温度、污秽程度
非接触式电量检测	超声波检测法	可定量,不受气候影响,精度高,操作简单便捷	超声波存在耦合与衰减且无法远距离
	激光振动检测法	远距(50m)	成本高且无法定量
	红外热成像法	直观,及时(但是比紫外法差)	受气候条件影响大且阴雨天气无法检测
	紫外成像法	直观,快捷,可定量,及时	成本高

量，做到定量判断绝缘子的放电水平，同时用以评估绝缘子的运行状态，因此基于紫外技术的绝缘子在线检测应用研究对于学术和实际应用，都具有极其重要的科学意义和实用价值。

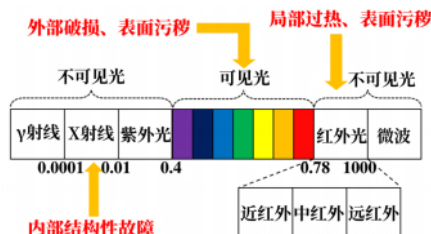


图1 电力设备故障的光学可视化示意图

本文从紫外成像检测技术和紫外脉冲检测技术的原理和优势着手，系统地介绍了紫外技术在绝缘子放电、状态评估中的发展现状，将该领域中的技术路线及研究方法进行分析，以迎接未来的挑战。

1 紫外成像法检测技术

1.1 紫外成像仪的发展

在高压设备进行电离放电的过程中，由于电场强度的不同，会导致电晕、闪络或者电弧的产生。电离过程中，空气中的电子在不断获得能量和释放能量的同时，会辐射出紫外光。紫外成像是利用紫外成像仪观察绝缘子的紫外成像特点来分析其放电特点进而判断其运行状态的，绝缘子紫外图谱以及紫外成像仪原理分别如图2和图3所示。20世纪90年代末，紫外成像仪（俄罗斯产波段300~400nm）开始在电力领域获得应用^[9]，但是受当时科技水平限制，无法屏蔽来自太阳的紫外信号干扰，因此无法在日间实现紫外检测。1999年，以色列和美国研制出Daycor I系列全日盲型紫外成像仪，解决了此前紫外成像设备无法在日间使用的缺点，随后南非也研制出了CoroCAM系列日盲紫外成像仪（日盲波段240~280nm），并投入市场^[10]。随后国内的高压实验室也开始进行紫外成像仪的实际应用试验，并初步取得了相应成效^[11]。



图2 绝缘子紫外图谱

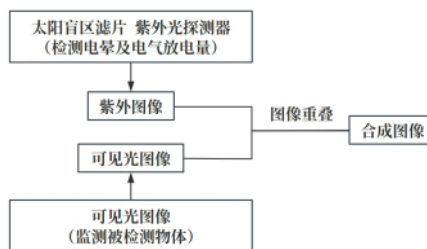


图3 紫外成像仪原理图

1.2 研究成果

目前，学者们利用紫外成像技术来研究绝缘子的在线检测取得了一系列成果。文献[12]在实验室条件下，利用紫外成像仪研究了10kV合成绝缘子在发生沿面放电的过程中，不同阶段紫外成像的光子数与泄露电流之间的对应关系。文献[13]研究分析了存在裂纹的绝缘子分别利用电场法和紫外成像法两种检测方法进行检测时的灵敏性。文献[14]对单片瓷绝缘子的击穿强度和紫外图像光斑直径之间的关系进行深入研究。与此同时，该论文以紫外图像光斑的实际尺寸为判断依据，将绝缘子的运行状态定义为以下四个等级，即良好、注意、加强观测以及更换，由于并未考虑距离对检测效果的影响，导致该结论难以在实际中得到有效运用。

2007年，刘云鹏等人^[15]利用紫外成像技术，依据光子技术和放电频率来判断绝缘子的绝缘状态。2010年，李和明等人^[16]通过对污秽程度不同的绝缘子放电特性进行分析，提出利用以下三个参数对污秽绝缘子的放电进行表征，即平稳紫外光斑面积、间歇性紫外光斑面积以及间歇性紫外光斑重复次数，并在此基础上，获得了典型污秽等级绝缘子的上述参数与湿度和污秽度之间的关系曲线，该研究结果为基于紫外成像技术对绝缘子污秽状态的评估奠定了基础。在文献[17]中，何爽等人通过试验研究得出，随着电压

的升高，绝缘子沿面放电时泄露电流的最大值以及与其对应时间段紫外光子数的最大值都相应增大，证实了紫外光子数的大小在一定程度上可以反映出绝缘子的污秽和受潮程度。2011年，王胜辉^[18]通过对绝缘子放电的光辐射特性进行分析，并结合紫外成像系统的工作原理及结构，提出了一种基于视频分析和数字图像法相结合处理紫外成像参量量化放电的方法并对“光斑面积”进行定义，通过对光斑面积和电脉冲信号幅值两者之间的关系进行分析研究得到了典型增益下两者的关系曲线。在文献[19]中，苏永祥通过试验依据绝缘子放电成像的特点以及光子数计量，将绝缘子的放电共分为四个阶段，即起晕、稳定电晕、刷状放电以及电弧放电，为完善紫外成像检测电晕章程提供了重要的参考价值。

2014年，金立军等人^[20]以Fisher准则为基础，提出了一种基于红外和紫外图像相融合的绝缘子污秽状态识别方法，发现与独自利用紫外特征进行识别相比，该融合技术能够充分发挥其信息互补特性，显著提高了绝缘子污秽状态检测的正确率，为污闪防治提供了新的思路。同年，张奇等人^[21]以沿面放电的紫外成像特征为研究对象，深入分析了离散液滴参数与绝缘子沿面放电之间的规律。研究发现，当表面存在液滴的绝缘子发生闪络时紫外成像的特征参数都显著出现最大值。随着液滴的增大，紫外成像的灰度值与熵值呈增大的趋势；随着液滴从低电极向高电极移动，紫外成像的灰度值与熵值呈减小的趋势。同年，林瑞聪等人^[22]通过利用紫外成像技术测量绝缘子劣化放电光斑面积，试验研究表明，现有的单幅“静态”紫外成像视频图像特征量及其量化对放电过程中存在闪烁效应的劣化绝缘子的检测具有很大的局限性。

2015年，金立军等人^[23]利用湿度、盐密值以及紫外放电特征量三者建立最小二乘支持向量机回归模型，以粒子群算法为依靠进行参数优化，发现对绝缘

子污秽度的检测能力可达95%。同年，冯宏恩^[24]利用恒压加湿法，研究了单片、三片以及七片污秽绝缘子的表面放电紫外图像特征，结果表明，光斑面积序列因放电阶段的不同而存在着很大的差异。除此之外，在强放电条件下，大光斑的面积所出现的频度呈现出先增大后减小的趋势。文献[25]在实验室条件下通过对复合绝缘子常见的三种典型外部放电进行模拟，得到了表面凝露放电、表面污秽放电以及均压环破损放电的紫外图谱特征，为现场复合绝缘子外部放电的检测结果提供了有效指导。文献[26]为解决紫外成像图像处理过程中光子参数在实际检测中的不足，利用文献[18]中提出的基于视频分析以及数字图像处理算法的量化紫外图像方式，证实了放电量与光斑面积近似呈现线性关系，实现了对放电量的近似量化分析。同时针对海拔高度对紫外成像的影响也进行一定研究，结果表明，海拔越高，放电强度越大，在有无风条件下，吹弧效应对放电有着显著影响，无风比有风时检测到的放电强度大。文献[27]将紫外成像应用于GIS盆式绝缘子典型缺陷局部放电试验研究，分析放电电压与光子数之间的关系，结果表明，当缺陷尺寸增大时，表面放电光子数呈现增多的趋势；当缺陷与导杆之间的距离大于6cm时，相同电压条件下的放电量显著降低，随之产生的光子数呈现显著减少的趋势，该研究为盆式绝缘子表面电荷特性的深入研究提供了参考依据。

2019年，戈灏[28]通过对交/直流条件下不同污秽参数复合绝缘子放电特性进行试验研究，研究结果表明，相较于直流条件，在交流条件下污秽程度对闪络电压与紫外脉冲数的影响程度会更大。同年，王胜辉等人^[29]通过分析污秽绝缘子的放电紫外特性，将其放电过程量化为四个阶段，即电晕、火花、小电弧以及大电弧；同时，依据试验现象以及紫外成像特征，将绝缘子的绝缘状态分为四个等级，即正常、一

般、较差和很差。2022年，牛雷雷^[30]通过搭建绝缘子和紫外成像试验平台，利用紫外成像技术研究了不同污秽程度和润湿水平的湿污绝缘子放电特性，试验发现，随着润湿程度的提高，绝缘子的起晕电压和闪络电压分别降低了23%和25%。在此基础之上，提出基于时空卷积神经网络系统和放电紫外视频相结合的绝缘子放电严重程度诊断和绝缘状态危险系数智能评估方法，并进行现场应用。

紫外成像技术因其良好优势在不断应用的同时，其也会受到很多因素的影响，其影响因素以及影响结果如表2所示。2016年，张显^[31]在广州高压大厅使用以色列紫外成像仪对针-板电极和绝缘子电晕放电进行试验研究，详细分析了影响紫外成像检测技术光子技术率的外界因素，诸如风速、增益大小、检测距离和湿度等，并根据试验现象得到了影响该紫外设备光子计数率的主要因素是增益和检测距离，湿度和风速对其影响次之。文献[32]在得出相同结论的同时，通过将光子数相对标准差、阶段光斑面积脉冲数以及阶段光斑面积均值三个指标从紫外图像结果中进行提取，并以此为基础，将绝缘子放电分为三个等级，即微弱电晕放电、间歇性电弧放电以及持续性电弧放电，最终实现绝缘子串的闪污预警。

表2 紫外成像技术的影响因素

影响因素	影响结果
环境湿度	湿度的影响很复杂，一方面随着湿度增加，起晕场强和绝缘强度会降低，导致放电增加。另一方面温度对紫外辐射的吸收系数随湿度增加而增加，紫外成像仪接收到的信号会减弱
海拔	高海拔起晕场强低，故探测到的光斑面积大
气压与环境	主要影响放电过程
测量距离	影响巨大，紫外信号随检测距离的增加呈指数衰减
图像增益	小的增益无法检测到微小信号，大的增益会引起大的噪声

2 紫外脉冲法检测技术

污秽的绝缘子在湿度较大时常伴有放电的发生，而对于清洁的绝缘子而言放电却很少^[33]。基于紫外脉冲法的劣化绝缘子检测技术实质上就是当绝缘子电位分布发生变化时，对绝缘子表面放电脉冲能量变化的检测。目前，学者们利用紫外脉冲技术来研究绝缘子的在线检测取得了一系列成果。

2006年，何为等人^[34]利用放电强度和次数的变化，提出了基于紫外脉冲法的绝缘子污秽状态在线检测技术，并利用110kV线路试验进行证实，且与绝缘子的距离可达4m。2007年，Yang J等人^[35]针对绝缘子的污秽问题，设计了一套基于紫外脉冲法的绝缘子在线污秽检测系统，该系统包括紫外脉冲检测器、通信通道以及操作站。在试验条件下，证明了污秽绝缘子湿度对放电脉冲的影响，即湿度越高，放电频率越大。利用该系统通过对110kV输电线路下的绝缘子串进行连续监测，其可以正确预警，证实了其具有良好的现场适用性，且该系统已被当地供电系统采用。2008年，汪金刚等人^[36]以模糊逻辑为理论基础，利用紫外脉冲法建立了在考虑环境因素条件下用以评估绝缘子运行状态的模型。2009年，姚树友等人^[37]利用特定的传感器检测污秽绝缘子电晕放电时发出紫外光的方法，研制了绝缘子污秽紫外检测仪，并在实际工况下进行试验研究，发现当温湿度较高且脉冲数集中在4000左右时绝缘子污秽等级较为严重。2010年，杨照光^[38]通过对绝缘子沿面放电特点以及电晕放电的光谱特性进行研究，研制成功了基于日盲型光电倍增管的绝缘子放电紫外脉冲检测系统，该系统对绝缘子放电中微弱的紫外光信号具有高灵敏的检测能力。通过利用该检测系统对棒板间隙和不同污秽度的绝缘子进行试验得出，随着绝缘子湿度和污秽程度的增大，紫外脉冲的幅值逐渐上升；随着电压和湿度的升高，紫外脉冲数会出现跃变。

文献 [39] 为实现对绝缘子表面污秽的长期实时监测, 利用紫外传感器模块、温湿度模块、虚拟仪器等器件开发出了基于紫外脉冲法和 SMS 的绝缘子污秽监测系统, 能够实现对各个监测点的监测数据进行分析处理, 保证在各类天气环境下稳定运行的同时为线路绝缘子的污秽状态变化提供可靠信息。2016 年, 刘士波^[40]通过对绝缘子紫外脉冲数据统计特性进行分析, 并对比分析了傅里叶变换、周期图法功率谱估计和 Welch 法功率谱估计作为特征提取方法的优劣性, 同时利用支持向量机进行二分类, 最终结果得出, 采用 Welch 法功率谱估计作为特征向量提取方法用径向基核函数支持向量机分类效果最好。2019 年, 张曼曼^[41]针对常规污闪问题研究方法的局限性, 通过对绝缘子电晕放电的机理以及紫外光敏管的工作原理进行分析, 利用外围驱动、信号处理以及控制通信三种技术集一体, 搭建了基于紫外脉冲检测绝缘子放电的非接触测量装置, 利用混合可溶盐进行试验得出放电脉冲随 ESDD 的增加而呈现出升高的趋势, 进一步证实了紫外脉冲数对绝缘子放电的跟随性良好。通过对绝缘子污秽状态有影响的因素进行选取, 建立了基于模糊综合评判法评估绝缘子污秽状态的模型, 为绝缘子污秽状态的表征方法提供了一种新思路。

3 结束语

本文介绍了紫外成像检测技术和紫外脉冲检测技术的原理和优势, 系统地阐述了科研人员利用紫外技术在绝缘子放电、状态评估中的研究进展, 并将该领域中所涉及的技术路线及研究方法进行深入分析。紫外技术作为一门前景广阔的新兴非电量检测技术, 其具有巨大的潜力, 在电网中的普及应用具有无限可能。随着科技的发展, 不论是基础理论还是技术转化, 基于紫外技术的绝缘子在线检测在将来必定能够大放异彩。

参考文献

- [1] Pinnangudi B, Gorur R S, Kroese A J. Quantification of corona discharges on nonceramic insulators[J]. IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation: A publication of the IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, 2005, 12(3): 513-523.
- [2] 袁昌武. 基于紫外脉冲检测法的绝缘子放电实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [3] 买小飞. 绝缘子积污及电压分布特性的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [4] 李明, 舒乃秋, 彭旭东, 等. 基于声发射技术的绝缘子污秽放电监测[J]. 电力自动化设备, 2004(6): 98-100.
- [5] 汤浩征. 基于绝缘子污闪泄露电流的预警系统设计与实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [6] 刘云鹏, 张喆, 裴少通, 等. 基于深度学习的红外图像中劣化绝缘子片的分割方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9): 63-68, 118.
- [7] 卢明, 姚德贵, 张国民, 等. 劣化绝缘子检测方法的对比分析[J]. 电瓷避雷器, 2006(5): 9-13.
- [8] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T626—2005 劣化盘形悬式绝缘子检测规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [9] 黄欢. 基于泄漏电流特征量的绝缘子污闪预测的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [10] 郑军, 陈金祥. 新型紫外微放电监测仪检测绝缘子污秽状况的试验研究[J]. 福建电力与电工, 2006(1): 20-22.
- [11] 戴利波. 紫外成像技术在高压设备带电检测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003(20): 97-98.
- [12] 肖猛, 文曹. 一种新型绝缘子带电检测方法—紫外成像法[J]. 高电压技术, 2006(6): 42-44.

- [13] Ramiro Hernkndez-Corona, Isaias Ramirez-Vkzquez. Evaluation in Laboratory of the Visual Corona and Electric Field Measurement Techniques to Inspect Polymeric Insulators[A]. Dallas, TX, 2006.
- [14] Kil-Mok Shong, sun-Gu Kim, Woon-Ki Han, et al. Recognition and Detection of Corona discharge on porcelain insulator at 22.9kV distribution line using a UV-camera[J]. XVth international symposium on high voltage engineering, Slovenia, 2007.
- [15] 刘云鹏, 杨迎建, 等. 紫外成像检测技术在交流特高压试验基地的应用 [C]. 中国电机工程学会高压专委会 2007 年学术年会论文集, 2007.
- [16] 李和明, 王胜辉, 律方成, 等. 基于紫外成像的污秽绝缘子放电特性研究 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2010, 37 (3): 1-6.
- [17] 何爽, 臧春艳, 何俊佳, 等. 污秽绝缘子的紫外成像检测 [J]. 高压电器, 2010, 46 (9): 74-77.
- [18] 王胜辉. 基于紫外成像的污秽悬式绝缘子放电检测及评估 [D]. 保定: 华北电力大学, 2011.
- [19] 苏永祥. 基于紫外成像法的绝缘子放电检测研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [20] 金立军, 张达, 段绍辉, 等. 基于红外与紫外图像信息融合的绝缘子污秽状态识别 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (8): 309-318.
- [21] 张奇, 马全亮, 孙建刚, 等. 离散液滴诱发复合绝缘子沿面放电的紫外成像特征 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26 (10): 78-83.
- [22] 林瑞聪, 缪希仁, 郭谋发, 等. 基于紫外成像技术的劣化绝缘子放电动态特性分析 [J]. 绝缘材料, 2014, 47 (5): 87-91.
- [23] 金立军, 姜浩然, 杨帆, 等. 基于紫外成像技术的接触网绝缘子污秽状态检测 [J]. 高电压技术, 2015, 41 (11): 3561-3568.
- [24] 冯宏恩. 污湿瓷绝缘子放电紫外图像特征及闪络预警研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [25] 王博, 高原, 田禄, 等. 复合绝缘子外部放电紫外检测典型图谱分析 [J]. 陕西电力, 2015, 43 (2): 45-48.
- [26] 欧阳拳均. 绝缘子紫外成像法及其图像处理系统的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [27] 王鹏皓, 闫杰, 王天正. 紫外成像法的 GIS 盆式绝缘子局部放电研究 [J]. 高压电器, 2015, 51 (9): 34-38.
- [28] 戈灏. 基于紫外脉冲法的复合绝缘子放电检测研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [29] 王胜辉, 牛雷雷, 李浩, 等. 基于放电紫外成像特征的污秽线路盘形绝缘子绝缘状态评估 [J]. 高压电器, 2019, 55 (2): 201-207.
- [30] 牛雷雷. 复合绝缘子放电紫外图谱时空特性及智能诊断研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [31] 张显. 基于紫外检测技术的绝缘子电晕放电特性研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [32] 贾志东, 王林军, 尚晓光, 等. 基于紫外成像技术的瓷绝缘子串放电程度量化评估 [J]. 高电压技术, 2017, 43 (5): 1467-1475.
- [33] 戴克铭. 线路污秽绝缘子的在线监测 [J]. 供用电, 2004 (2): 33-34.
- [34] 何为, 陈涛, 刘晓明, 等. 基于紫外脉冲法的非接触式低值 (零值) 绝缘子在线监测系统 [J]. 电力系统自动化, 2006 (10): 69-74.
- [35] Yang J, Xu T, Tang J, et al. Online detection system for contaminated insulators based on ultra-violet pulse method [C]. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007.
- [36] 汪金刚. 高压设备放电紫外检测技术及其应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.

(下转第 48 页)

(上接第 33 页)

- [37] 姚树友, 熊兰, 王皓宇, 等. 基于紫外脉冲的污秽绝缘子电晕放电监测系统 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (4): 844-848.
- [38] 杨照光. 基于紫外脉冲法的绝缘子放电检测的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
- [39] 汪金刚, 林伟, 何为, 等. 基于紫外脉冲法与 SMS 的绝缘子污秽实时监测系统 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (3): 95-99.
- [40] 刘士波. 劣化绝缘子紫外脉冲检测法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [41] 张曼曼. 基于紫外脉冲参量的绝缘子污秽状态评估方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.

(收稿日期: 2024-03-11)