

日盲紫外成像技术检测绝缘子放电的研究进展^{*}

郭 盼, 杨宸杰

(重庆师范大学 物理与电子工程学院, 重庆 401331)

摘要:【目的】综述日盲紫外成像技术在绝缘子放电检测领域内的研究进展,指出当前研究的不足,为后续进一步研究提供参考。【方法】检索近些年来发表的相关文献,分析当前研究进展并归纳总结。【结果】介绍了日盲紫外成像技术在绝缘子放电检测、量化、评估 3 个方面的发展现状,分析了该领域内的部分研究方法与研究路线,总结了该技术目前面临的挑战,并提出了未来发展趋势。【结论】随着日盲紫外绝缘子放电检测技术的不断深入研究,搭载平台的多样化,将使得日盲紫外检测技术的应用场景得到扩展,相信日盲紫外绝缘子放电检测技术将会便捷、高效、安全、智能地服务于绝缘子放电检测工作,确保高压输电线路等电力系统的安全运行。

关键词: 日盲紫外; 紫外成像技术; 绝缘子放电; 放电检测

中图分类号: TN23

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2022)06-0118-11

当太阳光照射到地球表面时,地球的臭氧层会吸收大量紫外特定波段(240~280 nm)的太阳光,使该波段的太阳光难以到达地面和低空,因此该波段被称为“日盲”区,而对日盲波段内紫外光信号的检测被称为日盲紫外探测^[1-4]。近些年来,日盲紫外技术在紫外通信^[5-6]、紫外告警^[7-8]、紫外放电检测^[9-11]、紫外指纹检测^[12-13]、天文学^[14-15]等领域得到了极大的发展和应用。

长期在高压输电电路上工作的绝缘子,由于外部环境及内部结构原因,会导致绝缘子性能下降,从而产生电晕放电、电弧放电等异常放电现象^[16-18]。电晕放电不仅会导致大量电能的无意义损耗,而且产生的臭氧、二氧化氮等气体还会加速绝缘子绝缘性能老化、劣化以及金具腐蚀。同时,异常放电现象也可能是某些设备故障的早期征兆。因此,需要电力系统的操作人员和维护人员快速、准确地定位放电点和放电情况并进行处理。由于伴随异常放电所产生光信号的部分光谱分布在日盲紫外波段范围内,而紫外检测技术在日盲紫外波段具有独特优势,因此将该技术应用于绝缘子放电的检测,几乎不受太阳辐射的影响。该技术受干扰概率低,可直观、快速、准确地检测到绝缘子放电现象,为后续评估绝缘子的运行状况提供参考依据^[19-20]。

本文从日盲紫外成像技术的原理和优势入手,系统地介绍了近些年来该技术在绝缘子放电检测、量化、评估等 3 个方面的发展现状,分析了该领域内的部分研究方法与技术路线,总结了该技术目前面临的挑战,并提出了未来发展趋势。

1 日盲紫外检测绝缘子放电原理

1.1 日盲紫外光

太阳光按照图 1a 所示可分为波长 400 nm 以下的紫外光(UV)、400~750 nm 内的可见光(Vis)、750 nm 以上的红外光(IR)。美国空军地球物理实验室基于大气物理学、光学和人眼生理学又将紫外光分为 10~122 nm 的超紫外光(Extreme ultraviolet, EUV)、122~200 nm 的远紫外光(Far ultraviolet, FUV)、200~300 nm 的中紫外光(Middle ultraviolet, MUV)和 300~400 nm 的近紫外光(Near ultraviolet, NUV)4 部分^[21](图 1b)。不同波长的太阳光对地表的辐射能力不同,由于波长小于 220 nm 波段的紫外光被地球大气层中的氧原子强烈吸收,地面上几乎发现不了超紫外光和远紫外光,只有在地球外才存在该波段的紫外光,因此也称之为真空紫外光^[22-23]。

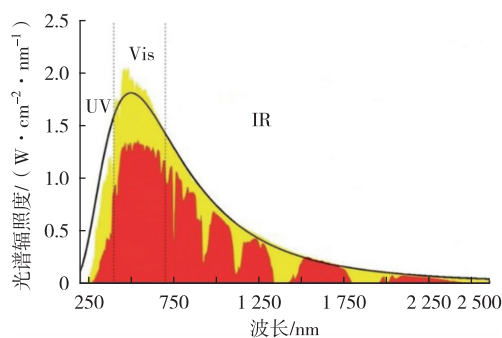
^{*} 收稿日期:2022-05-26 修回日期:2022-11-16 网络出版时间:2022-12-08 10:01

资助项目:国家自然科学基金(No. 51707028; No. 11647098);重庆市自然科学基金面上项目(No. cstc2021jcyj-msxmX0470);重庆市教育委员会科技项目(No. KJQN202100533)

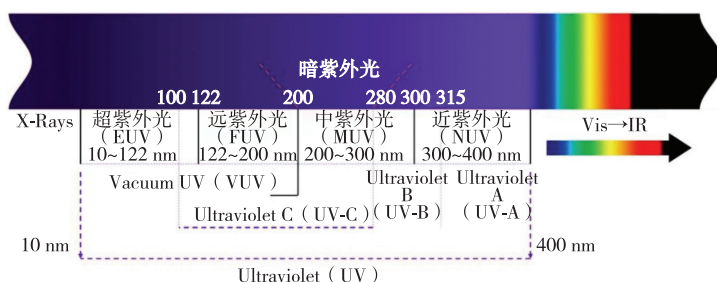
第一作者简介:郭盼,女,副教授,博士,研究方向为电磁无损检测技术的原理与应用, E-mail: guopan@cqnu.edu.cn

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//50.1165.N.20221207.1457.004.html>

在太阳光入射地球的过程中,240~280 nm 波段内的中紫外光几乎完全被地球臭氧层所吸收,也不能到达地球表面,因而该波段范围内的紫外光被称为“日盲”紫外光^[24-25]。



a 紫外光谱波段范围



b 太阳光辐射波段

图1 日盲紫外光

Fig. 1 Solar blind ultraviolet light

1.2 绝缘子放电

绝缘子是安装在不同电位的导体或导体与接地构件之间的能够耐受电压和机械应力作用的器件,是一种特殊的绝缘控件,在架空输电线路中起到重要作用^[26]。按照不同的安装方式,可分为悬式和支柱绝缘子两类;按照不同的绝缘材料,可分为瓷、玻璃和复合绝缘子等3类^[27]。在裸露空气中长期运行时,绝缘子不可避免地会遇到不同的污染源,如酸雨、粉尘、雾霾、工业废气等环境因素的影响,绝缘性能会有不同程度的下降,从而发生局部放电现象,严重的情况下会导致闪络事故,造成输电线路故障和经济损失。电晕放电属于局部放电类型中的一种,是指在极不均匀电场中气体介质的局部自持放电现象,是最常见的一种气体放电形式^[16]。文献[28]给出了电晕放电的光谱分布(图2),电晕放电光谱包括主要3个范围:200~400 nm的紫外光范围,400~750 nm的可见光范围和750 nm附近的红外光范围,但主要波长集中在240~400 nm的紫外波段范围内。

1.3 日盲紫外检测系统的构成

日盲紫外检测系统主要由接收光学系统、日盲滤光片、日盲紫外成像模块、可见光成像模块、图像采集、处理模块等部分组成^[29]。图3展示了日盲紫外成像技术的流程图^[29]:接收光学系统将入射光信号分为两路,一路进入可见光通道,另一路进入紫外光通道;进入紫外光通道的光信号,240~280 nm波段外的光信号将被日盲滤光片滤除,仅让日盲紫外波段内的光信号通过,进入紫外成像模块。通过数字图像融合算法将紫外成像模块所输出的紫外成像与可见光成像模块所输出的可见光图像进行叠加融合,形成最终的紫外可见光融合图像。通过分析最终系统输出的紫外可见光融合图像,可以直观地观察到绝缘子的放电情况,确定放电位置及放电程度,为维修人员提供参考。

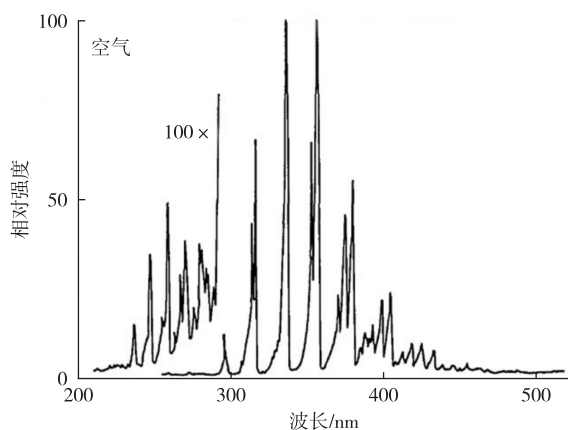
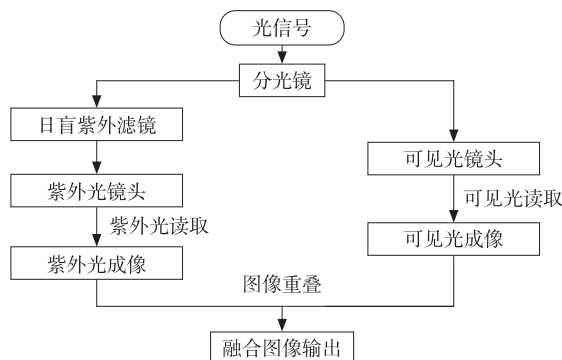
图2 电晕放电光谱图^[28]Fig. 2 Corona discharge spectrum^[28]

图3 日盲紫外成像技术流程图

Fig. 3 Flow chart of solar blind ultraviolet imaging technology

2 日盲紫外技术检测绝缘子放电现状

2.1 紫外绝缘子放电检测

作为一种新型检测技术,紫外成像法简单、高效、直观,不影响设备的正常运行,安全、便捷,对电力系统中输变电线路上绝缘子的早期故障检测和安全维护具有重要意义。1984年,西伯利亚电力研究所最先将这一技术应用于电力系统故障检测。新西伯利亚电力技术中心的专家们使用紫外线仪器检查了100多个俄罗斯电力系统变电站,对所有电气设备输入套管、悬挂式和柱式绝缘子等进行检查,共检查出1200处缺陷,这些缺陷包括柱式瓷绝缘子出现微裂纹、悬式母线绝缘子串出现零值绝缘子等^[30]。

目前,学者们使用日盲紫外成像技术来研究不同类型绝缘子放电并得到了一系列成果。迟殿林等人^[31]对瓷支柱绝缘子放电进行了研究,对如何利用紫外成像技术检测绝缘子放电的方法进行探讨。Kim等人^[32]利用紫外成像技术研究了聚合物绝缘子电晕放电。Hui等人^[33]使用多光谱检测技术,该技术融合了红外和紫外检测技术的优点,研究了复合绝缘子的异常放电现象。Urbaniec等人^[34]介绍了紫外技术在高压长棒绝缘子诊断中的可行性并指明它的应用范围。王鹏皓等人^[35]对盆式绝缘子建立了典型的绝缘缺陷模型,使用紫外技术对绝缘子表面放电进行了研究。通过科研人员的不断深入研究,验证了紫外成像技术检测绝缘子放电的可行性和优越性,使得该技术得到越来越多的应用。

绝缘子长期运行在输供电线路时,会遭受暴雨、大雪等恶劣天气,而不同的外界因素对绝缘子放电的影响也会有所不同。科研人员们针对不同外界因素以及不同设备因素对绝缘子放电的紫外检测进行研究。苏永祥^[36]研究了不同类型绝缘子放电(图4),对非设备故障缺陷因素对紫外检测的影响以及在复杂外绝缘环境条件下绝缘子放电紫外成像的特点,分析了在污秽、覆冰、淋雨时绝缘子的成像规律和放电机理。

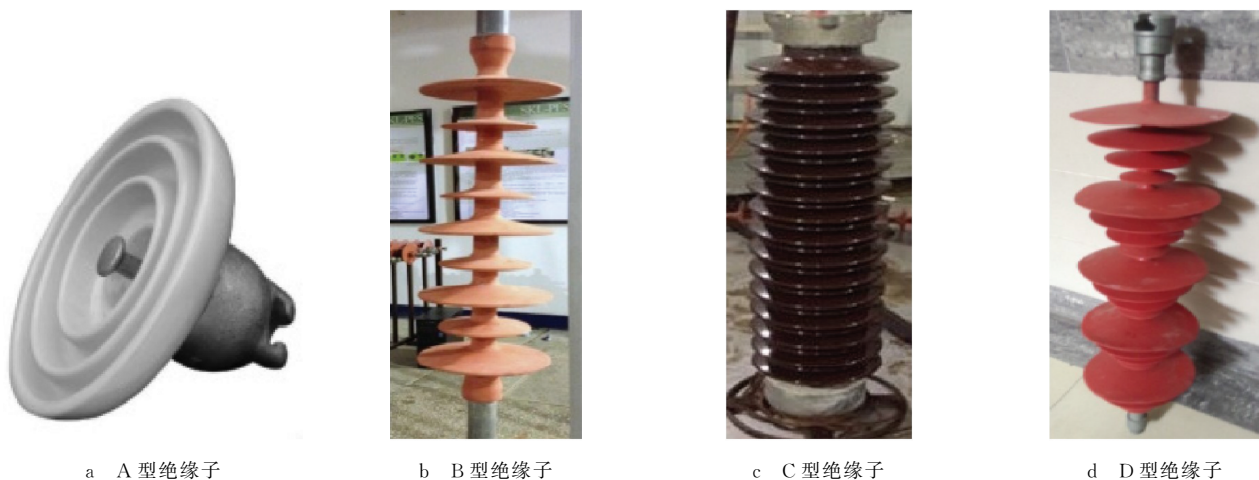
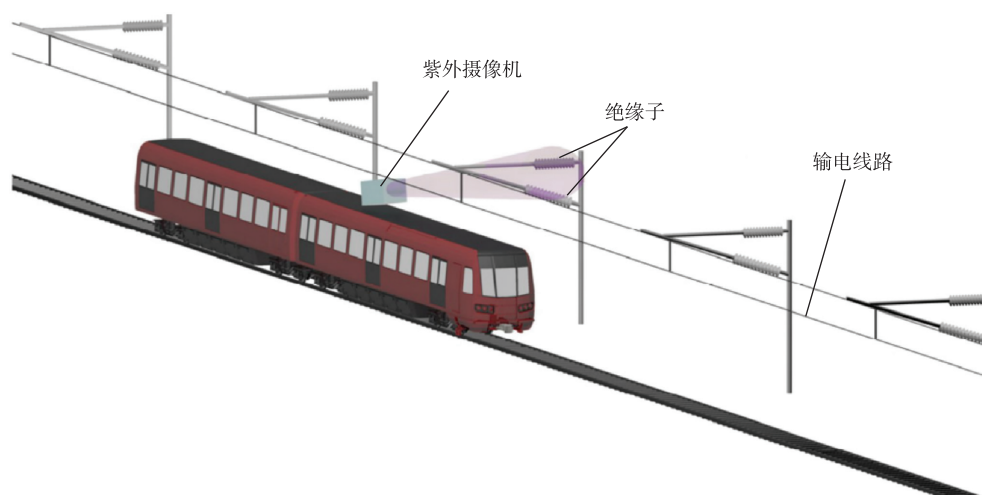


图4 不同类型绝缘子图^[36]

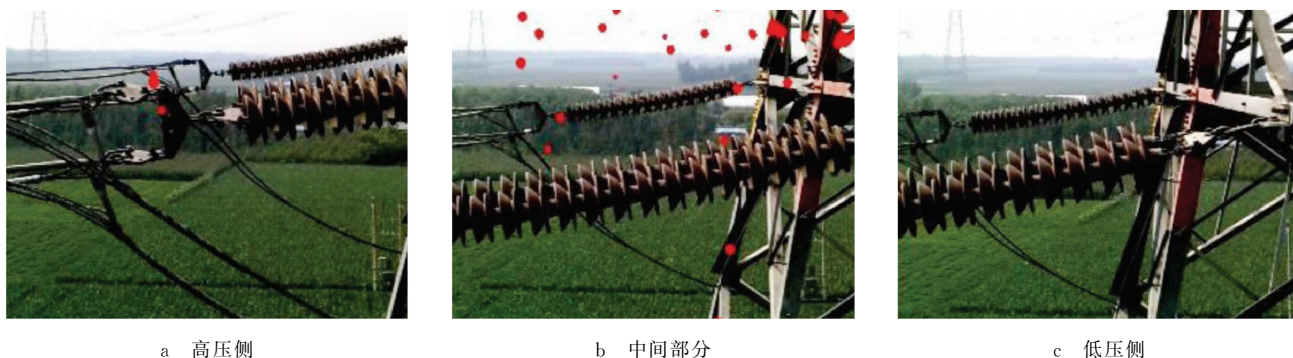
Fig. 4 Diagram of different types of insulators^[36]

黄荣辉等人^[37]检测了降雨、污染、均压环布置等不同试验条件下绝缘子的局部电晕放电程度,并统计了检测到的平均紫外光子数,然后分析了不同因素对绝缘子电晕放电的影响。Ai等人^[38]通过建立污化绝缘子等效电路模型,分析处理了绝缘子放电的原因及影响因素,通过分析增益、拍摄角度、距离等因素对紫外图像特征的影响,得出了不同增益、拍摄角度、距离下的换算公式,提出了紫外成像的标准。肖猛等人^[39]对不同盐密、不同观测距离的污秽绝缘子进行沿面放电试验,分析了复合绝缘子沿面放电的紫外成像特点。雷红才等人^[40]研究了运行在110 kV线路上的悬式瓷绝缘子串、支柱瓷绝缘子等支柱绝缘子人工模拟损伤缺陷实验,得到了在不同环境条件、不同损伤等级下的绝缘子放电的紫外图像。

近些年来,随着紫外探测器等关键技术发展,紫外探测系统体积越来越小也越来越便于携带。将紫外探测系统搭载在不同的平台上能够更准确的检测绝缘子的放电情况。Li等人^[41]提出了一种基于日盲紫外检测技术的自动铁路电晕放电检测系统(图5),将紫外摄像机安装在火车顶部,在火车快速巡航期间就可以检查铁路沿线的输电线路和绝缘子的状态。

图 5 铁路检验沿线绝缘子装置^[41]Fig. 5 Insulators along railway inspection lines^[41]

Li 等人^[42]研发出了一套无人机劣化绝缘子紫外检测系统,在不同方向对绝缘子进行检测,通过采集绝缘子表面 3 个目标点的紫外光子信息,结合位置信息评估绝缘子串的绝缘性能(图 6)。该系统可准确检测劣化绝缘子的电晕放电现象,准确掌握绝缘子运行状态,提高电力巡检的安全性、高效性和自动化程度,对电网非接触运行维护具有现实意义。

图 6 输电线路绝缘子电晕放电^[42]Fig. 6 Corona discharge of transmission line insulator^[42]

2.2 紫外绝缘子放电量化

在使用日盲紫外技术对绝缘子放电进行检测过程中,对获取到的紫外图像中绝缘子放电程度如何进行量化是一个关键问题。传统的量化方法是利用紫外成像仪所采集到的“光子数”进行量化,而通过实验发现,光子数极易受到设备的增益、距离等外界因素的影响,难以确定绝缘子放电的真实程度,因此相关研究人员对如何准确量化绝缘子放电展开了研究。陈磊等人^[43]对绝缘子放电紫外图像中光斑面积量化参数进行了定义,研究了不同电压下复合绝缘子高压侧电晕放电时的紫外图像和放电量的变化特性。刘渝根等人^[44]根据喷水分级法选择了 5 个不同状态的同一种绝缘子,在 8、10 和 15 KV 的电压下进行实验,提取紫外图像中的绝缘子放电光斑面积和光斑直径的数值,并通过 Matlab 仿真得到不同绝缘状态下的变化趋势,为绝缘子的评估提供了量化的依据。林瑞聪等人^[45]以紫外光斑面积作为放电过程特征参量,研究了该方法的可行性,对 500 kV 绝缘子放电紫外图像数据进行 3 次傅里叶拟合处理,结果表明劣化绝缘子在放电过程中具有周期性闪烁的特点。

律方成等人^[46]以紫外图像中放电光斑面积作为量化参量,对比研究了绝缘子放电的紫外成像图像和电脉冲信号特征,以及可见光通道与紫外通道的图像参数随距离增加时的变化规律,提出了采用可见光通道的信息用于估计成像区域面积的方法,解决了不同距离下检测到的结果没有对比性的问题。贾志东等人^[47]从绝缘子放电紫外检测视频中提取了光子数、光斑面积和光斑数量等指标,分析了它们与绝缘子串放电强度的对应关系,试验研究发现,从视频中提取的指标与绝缘子串放电强度存在明显的正相关关系,紫外光子数和光斑总面积可作为

有效的特征量,可将放电分为电晕放电、间歇性电弧放电和持续性电弧放电 3 个等级以评估绝缘子串放电的严重程度,最大光斑面积占比和光斑数量可作为辅助评估指标(图 7)。

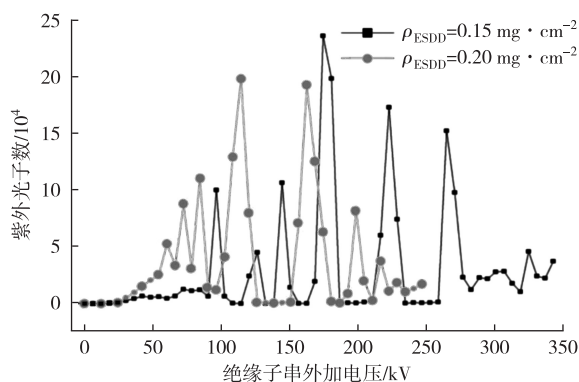


图 7 紫外光子数-电压曲线^[47]

Fig. 7 UV photon number and voltage curve^[47]

绝缘子与紫外成像设备间的距离变化对紫外光子数和光斑面积影响巨大,不同检测距离下难以统一定量地表征绝缘子放电。丁培等人^[48]提出紫外成像的相对光斑面积作为量化参数,在不同距离下对复合绝缘子和玻璃绝缘子放电进行实验,结果验证了紫外成像相对光斑面积不随检测距离变化,为量化绝缘子放电提供了一种新的方法(图 8)。

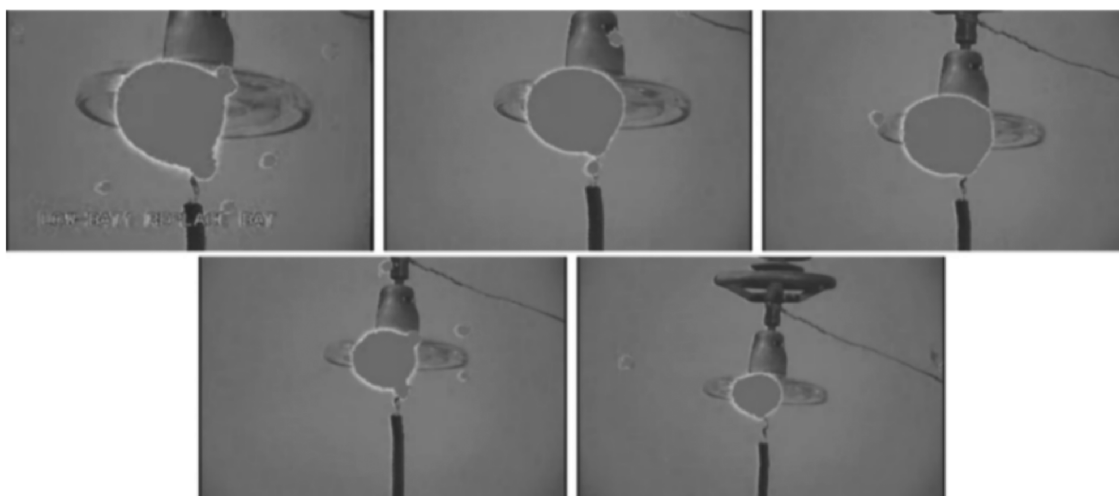


图 8 不同检测距离时玻璃绝缘子紫外图像^[48]

Fig. 8 UV image of glass insulator under different detection distance^[48]

Cai 等人^[49]定义了紫外光子数相对波动和光斑面积平均值两个指标来评价放电的严重程度,他们的研究发现紫外光子数和紫外光斑面积不能定量评价绝缘子放电的严重程度,但光子数的相对波动和光斑面积的阶段平均值可以定量评价绝缘子放电的严重程度。魏健春^[50]对绝缘子放电强度进行研究并提出的一种绝缘子放电量化方法,采用 Otsu 法对像的阈值进行分割,并进行数学形态学的二值开运算,采用 Canny 边缘检测算子实现紫外光斑的边缘检测与轮廓提取,将计算出的紫外光斑面积、等效直径等,作为绝缘子放电强度的特征参数和量化标准。

2.3 紫外绝缘子放电评估

通过日盲紫外成像技术,可以准确的检测到绝缘子放电的现象并确定放电位置,学者们提出了许多量化放电的特征参数,但特征参数与绝缘性能、运行状态、放电程度等之间的关系仍需人工判断。美国电力研究所与当地电力公司花费多年时间,提出了一份架空线路电晕现象的评估指南^[42]。为了进一步实现输电线路绝缘子放电的自动化检测,近几年提出了大量关于绝缘子放电的评估研究,提高了检测的准确度,减少了人工误判等问题。

王胜辉等人^[51]研究了紫外图像中光斑面积与放电量、仪器增益和观测距离之间的关系,建立了自适应模糊

逻辑推理系统,提出了一种复合绝缘子视在放电量的估计方法,实现绝缘子放电量估计。冯宏恩^[52]以绝缘子放电紫外图像中光斑面积平均值、光斑面积均方差、大光斑面积频度作为特征参数,采用模糊聚类算法(Fuzzy C-means,FCM)获得了绝缘状态分别为“较好”、“较差”、“差”、“很差”等4种状态的聚类中心,基于最小距离准则对绝缘子的绝缘状态进行了评估。黎振宇^[53]通过实验研究覆冰绝缘子放电的紫外特性,提出了新的特征量:光子数稳定范围,光子数最大值以及光子数突变次数,通过这些特征量与模糊理论的结合,建立了绝缘子覆冰程度的评估模型,并验证了此模型的有效性。

针对目前对高压输供电线路中绝缘子的紫外检测所存在的问题,如图像故障特征不明显、诊断准确率低等,刘云鹏等人^[54]基于稀疏表示算法提出了一种紫外绝缘子图谱的放电状态分类评估方法(图9)。通过实验表明,该方法的检测准确率较高,最高可达98%,算法最快识别时间仅为0.0008s,与基于多分类支持向量机(Multi-class support vector machine,M-SVM)算法的绝缘子放电评估法相比,该算法性能更好,在绝缘子紫外检测领域内的潜力巨大,具有良好的应用前景。

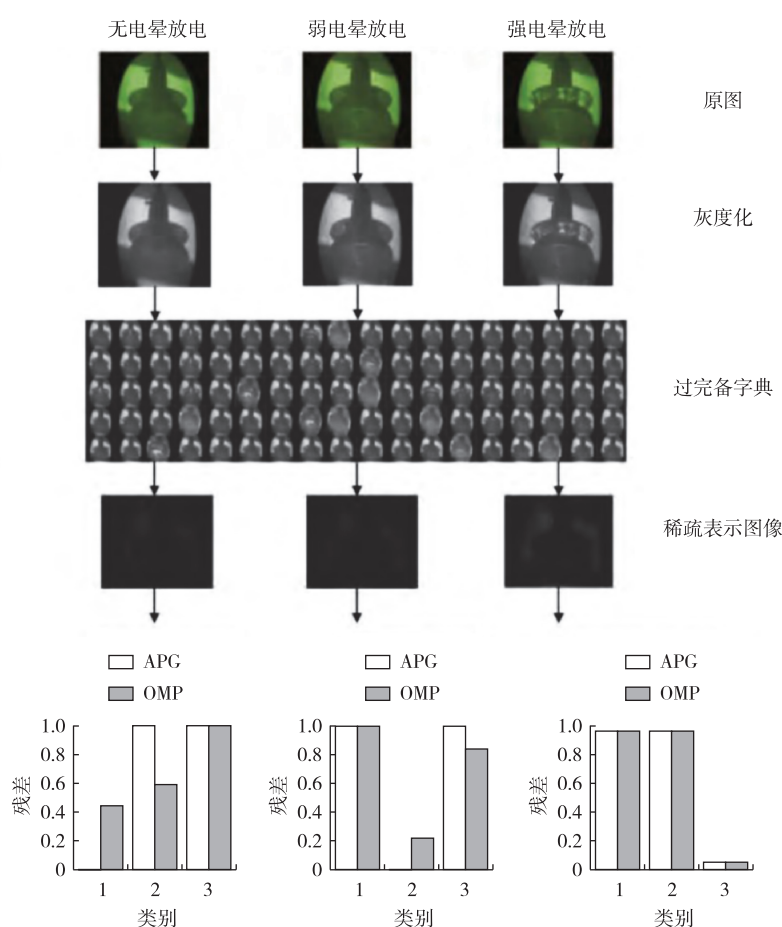
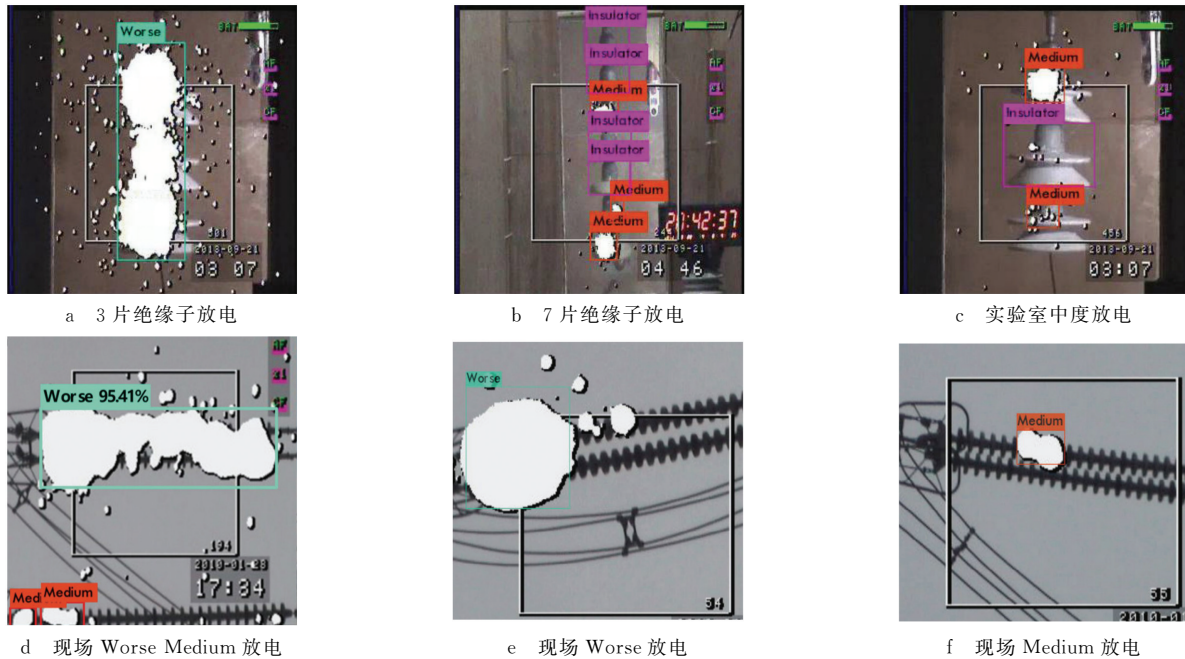


图9 稀疏表示法可视化分析过程^[54]

Fig. 9 Sparse representation visualization analysis process^[54]

Pei 等人^[55]基于卷积神经网络(Convolutional neural network,CNN)模型,提出了一种瓷绝缘子紫外放电闪络的评估方法。对瓷绝缘子芯片进行了工频闪络测试,并通过紫外成像仪采集了无放电、弱冠状放电、强火花放电等不同放电状态的紫外光谱,通过 Alexnet 深度卷积神经网络模型预测紫外光谱的放电状态,从而实现瓷绝缘子放电的鉴定评估。律方成等人^[56]以相对紫外光子数、相对光斑面积和相对漏电流作为紫外瓷绝缘子放电的量化参数,选择改进的 YOLOv3 算法对瓷悬式绝缘子放电严重程度状态进行评估,将平均网络损失、平均准确度均值和召回率受到网络超参数和激活函数的影响纳入考虑范围,优化了网络参数,他们的实验算法将瓷绝缘子放电的严重程度划分为“Insulator”、“Medium”、“Bad”、“Worse”等4种状态,从而为瓷绝缘子的污秽放电程度评估提供一种新的方法(图10)。

图 10 绝缘子放电评估结果^[56]Fig. 10 Discharge assessment results of the insulator^[56]

王胜辉等人^[57]基于紫外检测中的相对光斑面积等参数,采用优化的 SSD(Single shot multibox detector)模型,提出了悬式绝缘子放电严重程度评估方法。实验结果表明:优化后的 SSD 模型文件大小仅为 4.5 MB,网络结构得到了简化,具有良好的嵌入式检测性能;该算法将绝缘子的放电严重程度分为“slight”、“moderate”、“heavy”、“worse”等 4 个等级,为基于紫外成像技术的电力设备放电严重程度的实时评估提供了新参考(图 11)。

图 11 放电严重程度识别效果图^[57]Fig. 11 Recognition effect diagram of discharge severity^[57]

3 结论与展望

本文介绍了日盲紫外成像技术检测绝缘子放电的基本原理,接着从绝缘子放电检测、绝缘子放电量化、绝缘子放电评估等3个前沿研究方面进行探讨,并对本领域内的部分研究方法与技术路线进行了重点分析。在国内外科科研人员的共同努力下,日盲紫外绝缘子放电检测技术已经取得了一系列成果,然而这项技术的各个方面仍然存在挑战,例如现有的紫外检测器和紫外成像设备限制了紫外检测系统的性能提升。随着半导体技术的飞速发展,相信未来将会出现新的、更高性能的器件来打破其中的性能瓶颈。现有的绝缘子放电紫外检测法中的量化参数还没有全面涉及实际检测过程中各种恶劣因素的影响,精度仍然值得提高。现有的基于深度学习的绝缘子放电评估算法仍处于初级阶段,未来将探索新的机器学习算法,共同实现紫外绝缘子放电检测系统的智能化。

随着日盲紫外绝缘子放电检测技术的不断深入研究,搭载平台的多样化,将使得日盲紫外检测技术的应用场景得到扩展。相信日盲紫外绝缘子放电检测技术将会便捷、高效、安全、智能地服务于绝缘子放电检测工作,确保高压输电线路等电力系统的安全运行。

参考文献:

- [1] LINDNER M, ELSTEIN S, LINDNER P, et al. Daylight corona discharge imager[C]//1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. London: IET, 1999, 4: 349-352.
- [2] 靳贵平, 庞其昌. 紫外成像检测技术[J]. 光子学报, 2003, 32(3): 294-297.
JIN G P, PANG Q C. The key points of UV Imaging and detecting system[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(3): 294-297.
- [3] CHEN Q, YANG J W, OSINSKY A, et al. Schottky barrier detectors on GaN for visible-blind ultraviolet detection[J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(17): 2277-2279.
- [4] LUO L, YANG Q, GONG J L, et al. Corona discharge detection system based on ultraviolet sensor and optical lens[J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2019, 14(12): 1686-1692.
- [5] SHAW G A, SIEGEL A M, MODEL J, et al. Recent progress in short-range ultraviolet communication[J]. Unattended Ground Sensor Technologies and Applications, 2005, 5796: 214-225.
- [6] SHAW G A, NISCHAN M L, IYENGAR M A, et al. NLOS UV communication for distributed sensor systems[C]//International Symposium on Optical Science and Technology. San Diego: SPIE, 2000, 4126: 83-96.
- [7] 赵勋杰, 张英远, 高稚允. 紫外告警技术[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 5-9.
ZHAO X J, ZHANG Y Y, GAO Z Y. UV warning technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(1): 5-9.
- [8] CHEN Y, HUO F, ZHENG L. Solar-blind ultraviolet optical system design for missile warning[C]//Selected Papers from Conferences of the Photoelectronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics 2014, Part I. Beijing: SPIE, 2015, 9521: 217-222.
- [9] WANG S H, LÜ F C, LIU Y. Estimation of discharge magnitude of composite insulator surface corona discharge based on ultraviolet imaging method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1697-1704.
- [10] CHEN X, REN F, GU S, et al. Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. Photonics Research, 2019, 7(4): 381-415.
- [11] 王胜辉, 冯宏恩, 律方成. 基于日盲紫外成像检测的复合绝缘子电晕放电光子数变化特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2360-2366.
WANG S H, FENG H E, LÜ F C. Variation characteristics of composite insulator corona discharge photon count based on solar-blind ultraviolet imaging detection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2360-2366.
- [12] 吕晓峰, 许俊强. 用紫外观察照相系统提取现场指纹[J]. 刑事技术, 2004(4): 49.
LÜ X F, XU J Q. Fingerprints were extracted from the scene by UV observation photography system[J]. Forensic Science and Technology, 2004(4): 49.
- [13] 靳贵平, 庞其昌. 紫外指纹检测仪的研制[J]. 光学精密工程, 2003(2): 198-202.
JIN G P, PANG Q C. Development of UV fingerprint identification device[J]. Optics and Precision Engineering, 2003(2): 198-202.
- [14] BOWYER S, DRAKE J J, VENNES S. Extreme ultraviolet astronomy[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2000, 38(1): 231-288.
- [15] BLESS R C, CODE A D. Ultraviolet astronomy[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1972, 10(1): 197-226.

- [16] 张海峰,庞其昌,陈秀春. 高压电晕放电特征及其检测[J]. 电测与仪表,2006(2):6-8.
ZHANG H F,PANG Q C,CHEN X C. The characteristics of high-voltage corona and its detection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2006(2):6-8.
- [17] KIM Y S,SHONG K M,BANG S B,et al. Analysis of image and development of UV corona camera for high-voltage discharge detection[J]. Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers,2011,25(9):69-74.
- [18] ZANG C Y,HE J J,XIAO Y,et al. Status and application foreground of ultraviolet technology on fault detection of power devices[C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing:IEEE,2008:122-125.
- [19] COETZER C,GROENEWALD S,LEUSCHNER W. An analysis of the method for determining the lowest sensitivity of solar blind ultraviolet corona cameras[C]//2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference. Cape Town:IEEE,2020:1-6.
- [20] 王少华,梅冰笑,叶自强,等. 紫外成像检测技术及其在电气设备电晕放电检测中的应用[J]. 高压电器,2011,47(11):92-97.
WANG S H,MEI B X,YE Z Q,et al. Ultraviolet Imaging detection technology and application in corona discharge detection of electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(11):92-97.
- [21] RAZEGHI M. Short-wavelength solar-blind detectors-status,prospects,and markets[J]. Proceedings of the IEEE,2002,90(6):1006-1014.
- [22] 陈彦成. 氧化镓基日盲紫外光电探测器研究[D]. 郑州:郑州大学,2019.
CHEN Y C. Gallium oxide based solar-blind ultraviolet photodetectors[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2019.
- [23] XU J,ZHENG W,HUANG F. Gallium oxide solar-blind ultraviolet photodetectors;a review[J]. Journal of Materials Chemistry C,2019,7(29):8753-8770.
- [24] 康思睿. 用于电晕检测的日盲紫外变焦光学系统设计[D]. 长春:长春理工大学,2018.
KANG S R. Design of solar-blind ultraviolet zoom optical system for Corona detection [D]. Changchun:Changchun University of Science and Technology,2018.
- [25] CHEN X,REN F,GU S,et al. Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. Photonics Research,2019,7(4):381-415.
- [26] 王朝阳. 基于深度学习的输电线路绝缘子缺陷视觉检测技术研究[D]. 天津:天津理工大学,2021.
WANG C Y. Research on transmission Line insulator defect visual detection technology based on deep learning [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology,2021.
- [27] 罗鹏. 超高压变电站工频电磁场计算分析与应用[D]. 重庆:重庆大学,2015.
LUO P. Calculation analysis and Application of power frequency electromagnetic field in ultra-high voltage substation[D]. Chongqing:Chongqing University,2015.
- [28] GRUM F,COSTA L F. Spectral emission of corona discharges[J]. Applied Optics,1976,15(1):76-79.
- [29] 张玉波,黎大健,赵坚. 电晕紫外成像检测技术及其应用[J]. 量子电子学报,2014,31(5):622-627.
ZHANG Y B,LI D J,ZHAO J. Corona UV imaging detection technology and its application[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics,2014,31(5):622-627.
- [30] ZANG C Y,ZHAO X J,HE S,et al. Research on mechanism and ultraviolet imaging of corona discharge of electric device faults [C]//Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver:IEEE,2008:690-693.
- [31] 迟殿林,曾庆立,孙立时. 用紫外成像检测绝缘子[J]. 高电压技术,2006,32(2):115-116.
CHI D L,ZENG Q L,SUN L S. Detecting insulator by UV imaging[J]. High Voltage Engineering,2006,32(2):115-116.
- [32] KIM Y,SHONG K. The characteristics of UV strength according to corona discharge from polymer insulators using a UV sensor and optic lens[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(3):1579-1584.
- [33] HUI L,SHEN Q,YONG J,et al. Detection and processing for ± 660 composite insulator abnormal discharge[C]//International Conference on Power System Technology. Chengdu:IEEE,2014:14826139.
- [34] URBANIEC I,FRACZ P. Application of UV camera for PD detection on long rod HV insulator[J]. Pomiary Automatyka Kontrola,2015,61(3):64-67.
- [35] 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.
WANG P H,YAN J,WANG T Z. Research on partial discharge characteristics of GIS insulating spacers based on UV imaging method[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(9):34-38.
- [36] 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.
SU Y X. Research on Insulator discharge detection based on ultraviolet imaging method[D]. Chongqing:Chongqing University,2014.

- [37] 黄荣辉,张宏钊,李勋,等.基于紫外成像法的绝缘子电晕放电影响因素试验研究[J].水电能源科学,2015,33(11):180-182.
HUANG R H,ZHANG H Z,LI X,et al. Test study on factors influencing insulator corona discharge with ultraviolet imagery method[J]. Water Resources and Power,2015,33(11):180-182.
- [38] AI J,JIN L,ZHANG Y,et al. Detecting partial discharge of polluted insulators based on ultraviolet imaging[C]//2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials Properties & Applications of Dielectric Materials. Sydney:IEEE,2015:15522784.
- [39] 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,2006,32(6):42-44.
XIAO M,WEN C. New method to detect insulation on line ultraviolet image method[J]. High Voltage Engineering,2006,32(6):42-44.
- [40] 雷红才,臧春艳,蒋正龙,等.紫外成像法检测支柱绝缘子的破损缺陷[J].高压电器,2009,45(5):87-91.
LEI H C,ZANG C Y,JIANG Z L,et al. Detecting breakage defect of post insulator with ultraviolet imaging method [J]. High Voltage Apparatus,2009,45(5):87-91.
- [41] LI J,ZHOU Y,YI X,et al. An automatic corona-discharge detection system for railways based on solar-blind ultraviolet detection[J]. Current Optics and Photonics,2017,1(3):196-202.
- [42] LI Z S,DING L K,LIU J. UV detection technology of insulator discharge based on UAV platform [C]//2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering,Big Data and Algorithms (EEBDA). Changchun:IEEE,2022:261-265.
- [43] 陈磊,周仿荣,马仪,等.悬式复合绝缘子电晕放电紫外图像光斑面积[J].高压电器,2013,49(8):60-67.
CHEN L,ZHOU F R,MA Y,et al. Ultraviolet image facular area vary characteristic and apparent discharge estimation of suspension composite insulator corona[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(8):60-67.
- [44] 刘渝根,柴艳莉.两种紫外成像参数在绝缘子故障诊断中的比较[J].高压电器,2012,48(10):22-26.
LIU Y,CHAI Y L. Comparison between two ultraviolet imaging parameters for insulator fault diagnosis[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(10):22-26.
- [45] 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.
LIN R C,MIAO X R,GUO M F,et al. Analysis on discharge dynamic characteristics of faulty insulator based on UV imaging technology[J]. Insulating Materials,2014,47(5):87-91.
- [46] 律方成,戴日俊,王胜辉,等.基于紫外成像图像信息的绝缘子表面放电量化方法[J].电工技术学报,2012,27(2):261-268.
LÜ F C,DAI R J,WANG S H,et al. Study of insulator surface discharge quantification method based on ultraviolet imaging image information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(2):261-268.
- [47] 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.
JIA Z D,WANG L J,SHANG X G,et al. Quantitative assessment of porcelain insulator string discharge degree based on UV imaging technology[J]. High Voltage Technology,2017,43(5):1467-1475.
- [48] 丁培,马飞越,高原,等.基于紫外图像相对光斑面积的绝缘子表面放电量化评估方法研究[J].电瓷避雷器,2015(2):5-9.
DING P,MA F Y,GAO Y,et al. Study of insulator surface discharge quantitative evaluation method based on ultraviolet imaging relative spot area[J]. Insulators and Surge Arresters,2015(2):5-9.
- [49] CAI J,ZHANG N,MA Z,et al. The quantitative indicators of 750 kV Porcelain Insulator in UV detection based on artificial contamination test[C]//2016 IEEE International Conference on Dielectrics. Montpellier:IEEE,2016:16250964.
- [50] 魏健春.故障绝缘子紫外图像诊断方法及其影响因素研究[D].济南:山东大学,2018.
WEI J C. Study on ultraviolet image diagnosis method of fault insulator and its influencing factors[D]. Jinan: Shandong University,2018.
- [51] 王胜辉,律方成,刘云鹏.复合绝缘子电晕放电紫外图像参数的变化特性及放电量估计[J].中国电机工程学报,2013,33(34):233-240.
WANG S H,LÜ F C,LIU Y P. Variation characteristic of composite insulator corona discharge ultraviolet image parameter and estimation of discharge magnitude[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(34):233-240.
- [52] 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].北京:华北电力大学,2015.
FENG H E. Study on characteristics of discharge UV image and flashover warning of soil-wet porcelain insulator [D]. Beijing: North China Electric Power University,2015.
- [53] 黎振宇.输变电设备外绝缘放电紫外成像检测方法研究[D].重庆:重庆大学,2016.
LI Z Y. Research on detection method of external insulation of power transmission and transformation equipment by ultraviolet imaging[D]. Chongqing:Chongqing University,2016.

- [54] 刘云鹏,纪欣欣,裴少通,等. 基于稀疏表示的绝缘子紫外图谱闪络状态分类评估方法[J]. 高电压技术,2018,44(10):3352-3358.
- LIU Y P, JI X X, PEI S T, et al. Method for evaluating flashover state of insulator ultraviolet image based on sparse representation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3352-3358.
- [55] PEI S, LIU Y, JI X, et al. UV-flashover evaluation of porcelain insulators based on deep learning[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12(6): 770-776.
- [56] 律方成,牛雷,王胜辉,等. 基于紫外成像和改进 YOLOv3 的瓷悬式绝缘子放电严重程度评估[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 377-386.
- LÜ F C, NIU L L, WANG S H, et al. Discharge severity assessment of porcelain suspension insulators based on UV images and improved YOLOv3[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 377-386.
- [57] 王胜辉,董兴浩,王玺铭,等. 基于改进 SSD 算法和紫外成像的悬式绝缘子放电严重程度评估[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版):1-10. (2022-03-02)[2022-05-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20220228.1933.002.html>.
- WANG S H, DONG X H, WANG X M, et al. Suspension insulator based on improved SSD algorithm and UV imaging discharge severity assessment[J/OL]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition):1-10. (2022-03-02)[2022-05-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20220228.1933.002.html>.

Advances in the Detection of Insulator Discharges by Solar Blind UV Imaging

GUO Pan, YANG Chenjie

(College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Purposes] It reviews the research progress of solar-blind ultraviolet imaging technology in the field of insulator discharge detection, points out the shortcomings of the current research, and provides reference for further research directions. [Methods] Related literature published in recent years was searched, current research progress was analyzed and summarized. [Findings] It introduces the development status of solar-blind ultraviolet imaging technology in three aspects of insulator discharge detection, quantification and evaluation, analyzes some research methods and research routes in this field, summarizes the current challenges of this technology, and puts forward its future development trend. [Conclusions] With the continuous in-depth research on solar-blind ultraviolet insulator discharge detection technology, the diversification of carrying platforms will expand the application scenarios of solar-blind ultraviolet detection technology. It is believed that the solar-blind ultraviolet insulator discharge detection technology will serve the insulator discharge detection work conveniently, efficiently, safely and intelligently, and ensure the safe operation of power systems such as high-voltage transmission lines.

Keywords: solar blind ultraviolet; ultraviolet imaging technology; insulator discharge; discharge detection

(责任编辑 许 甲)