

光伏组件表面污染与热斑效应的动态监测与机理研究

陈仲国 熊磊 钱其峰 张宏候 肖凌超

浙江芯能光伏科技股份有限公司, 浙江省海宁市, 314000;

摘要: 光伏组件表面污染与热斑效应的关系是影响光伏系统性能的重要因素。污染物类型可分为物理性、化学性和生物性, 每种污染物对光伏组件的光学、电学和热学性能产生不同的影响。污染物的不均匀分布与局部遮挡效应常导致热斑现象, 进而引发电池片的温度升高和性能衰退。红外热成像技术和智能算法的结合为热斑的动态监测与分析提供了有效手段。通过深入研究污染物与热斑的关联性, 可为防治措施提供理论支持, 提高光伏系统的运行效率和安全性。

关键词: 光伏组件; 表面污染; 热斑效应; 红外热成像; 智能算法

DOI: 10.69979/3041-0673.24.7.041

引言

光伏组件是光伏发电系统的核心, 其性能直接影响发电效率和经济效益。在实际应用中, 光伏组件表面容易积累灰尘、鸟粪、树叶等污染物, 这些污染物会降低光线透过率, 并可能引起局部温度升高, 诱发热斑效应。热斑效应是指光伏组件中某部分因遮挡或污染导致温度过高, 超出正常工作温度范围, 严重时可能损坏组件甚至引发火灾。因此, 监测和研究光伏组件表面污染与热斑效应, 对于确保光伏系统安全高效运行至关重要。

1 光伏组件表面污染的类型与影响

1.1 污染类型

光伏组件表面的污染形态呈现多样化特征, 按照性质可划分为物理性、化学性及生物性三大类^[1]。物理性污染物主要包含大气中的灰尘颗粒、沙粒、积雪等固体颗粒物, 这些污染物通常以不均匀分布的形式覆盖在组件表面; 化学性污染则涉及工业废气、酸雨等造成的化学沉积物, 在组件表面形成难以去除的痕迹或薄膜, 与组件表面发生化学反应而导致永久性损伤; 生物性污染涵盖鸟类粪便、藻类、苔藓等有机物, 具有粘附性强且易滋生的特点。在不同环境条件下, 这些污染类型往往相互叠加、交互作用, 随时间推移形成复合型污染层。各类污染物的粒径分布、化学活性及覆盖方式存在显著差异, 对光伏组件的影响机制也各不相同, 需要采用针对性的检测和清洁方法。

1.2 影响分析

污染物对光伏组件性能的影响体现在多个层面, 光学特性方面, 污染物的存在显著降低组件表面的透光率, 造成入射光能量损失; 电学性能方面, 污染物遮挡导致电池片受光

不均, 引起局部电流密度下降, 串并联电路失配, 进而影响整体输出功率。污染物的聚集还会改变组件表面的热学性质, 增加热量积累, 降低散热效率, 在强光照条件下加剧温度升高。长期积累的污染物与环境因素共同作用, 能够加速封装材料老化, 引起粘结层剥离、玻璃表面微裂纹等不可逆损伤, 严重影响组件使用寿命。污染物分布不均匀性与局部遮挡效应的叠加, 极易诱发热斑效应, 对组件安全构成潜在威胁。

2 热斑效应的形成机理与危害

2.1 形成机理

热斑效应的形成涉及复杂的电热耦合过程, 其核心机理在于光伏组件局部区域受到遮挡或污染后产生的串并联失配现象。当光伏组件某一区域被遮挡时, 该区域的光生电流显著降低, 而未受遮挡区域持续产生正常电流, 导致受遮挡区域在串联电路中承受反向偏置电压, 转变为负载而消耗其他电池片产生的电能。在这一过程中, 电能转化为热能使局部温度持续升高, 形成温度远超正常工作范围的热点。随着温度升高, 电池片性能进一步恶化, 产生负反馈效应, 加剧局部温度攀升^[2]。局部高温区域的形成与发展受多重因素影响, 包括遮挡程度、环境温度、辐照强度、旁路二极管保护等, 这些因素的相互作用决定了热斑效应的严重程度。在实际运行环境中, 组件表面积累的不均匀污染物常与局部遮挡效应叠加, 加速热斑的形成与扩展, 而污染物的导热特性又会影响热量扩散路径, 使热斑效应呈现出更为复杂的动态演变特征。

2.2 危害评估

热斑效应对光伏组件造成的危害具有多层次性和累积性特征, 在电性能方面表现为局部温度升高引起的光电转换效率下降, 发电量损失可达 15% 以上, 同时热斑区域的高温会加

速电池片性能衰减。材料层面的损害主要体现在封装材料的加速老化,高温导致 EVA 胶膜黄变、气泡形成及剥离,背板材料出现变形和开裂,玻璃基板产生微裂纹等不可逆性破坏。系统安全性方面,持续存在的热斑可能引发组件内部电气故障,严重时导致电池片击穿,引起电弧放电乃至火灾隐患,对光伏电站整体安全构成重大威胁。热斑效应的危害程度与持续时间密切相关,长期存在的热斑会引起局部结构应力集中,降低组件的机械强度,影响使用寿命。在极端天气条件下,热斑效应的危害性更为显著,高温、强光照等环境因素会加剧热斑的破坏作用,增加系统故障风险。基于热斑效应的多重危害性,建立科学的评估体系和预警机制显得尤为重要。

3 动态监测技术与方法

3.1 红外热成像技术

红外热成像技术通过探测物体表面发射的红外辐射获取温度分布信息,在光伏组件热斑监测领域发挥核心作用。现代红外热像仪在温度分辨率方面取得显著突破,可实现 0.02°C 的精确测量,使热斑的早期识别成为可能,而图像分辨率的提升则为热斑形态特征分析提供了更为清晰的细节信息。在实际应用过程中,红外热成像系统配备的多光谱分析功能能够在不同波段范围内获取热图像,有效消除大气、反射等环境因素造成的干扰,提高测量精度。便携式红外热像仪的空间分辨率已达到 640×480 像素甚至更高水平,结合自动对焦和图像增强技术,极大改善了热斑检测的空间分辨能力。在大规模光伏电站运维中,搭载红外热像仪的无人机系统实现了快速、高效的热斑普查,通过预设的巡检路径自动完成组件温度数据采集,获取的热图像经过几何校正和温度定标后可用于热斑的定量分析。为保证监测数据的可靠性,红外热成像检测需在特定环境条件下进行,要求光照强度不低于 $600\text{W}/\text{m}^2$,避免阴天、大风等不利天气条件,同时考虑组件表面发射率、视场角等因素对测量结果的影响^[3]。在光伏组件运行过程中,红外热成像技术通过连续监测记录热斑的演变过程,所获得的温度场时空分布数据为热斑形成机理和发展规律研究奠定基础,也为组件健康状态评估提供重要依据。红外热成像技术与其他检测手段的协同应用进一步拓展了热斑监测的深度和广度,如与可见光成像的对比分析有助于确定热斑产生的外部因素,与 I-V 特性测试的结合则能揭示热斑对组件电性能的影响机制。

3.2 智能算法辅助分析

智能算法在光伏组件热斑监测领域的应用显著提升了数

据处理和分析效率,通过深度学习模型对大量热图像的训练,建立起热斑特征与故障类型之间的精确映射关系。基于卷积神经网络(CNN)的热斑识别算法充分利用了深度学习在图像特征提取方面的优势,多层卷积结构能够自动学习热斑的层次化特征表示,实现异常温度区域的精确定位和分割。递归神经网络(RNN)的引入赋予了系统时序分析能力,通过对热斑温度变化趋势的动态建模,准确预测潜在故障点的发展态势,为预防性维护提供决策支持。在特征工程方面,支持向量机(SVM)和随机森林等传统机器学习算法通过综合分析温度梯度、形状特征、纹理特征等多维信息,构建了稳健的热斑分类模型。迁移学习方法的应用有效解决了样本数据不足的问题,预训练模型经过针对性微调后表现出良好的泛化性能,可快速适应不同应用场景。多源信息融合框架的构建实现了环境参数、运行数据与热图像的协同分析,提供更为全面的故障诊断结果。边缘计算技术的发展推动了轻量化神经网络模型在现场检测设备上的部署,实现热斑数据的实时处理和告警,大幅提升了监测系统的响应速度。智能算法在热斑监测中的应用还涉及数据增强、噪声抑制、模型优化等关键技术,通过持续的算法改进和优化提高了热斑识别的准确性和可靠性。基于深度强化学习的智能巡检策略优化进一步提升了大规模光伏电站的热斑检测效率,实现了监测资源的合理分配。

3.3 环境污染监测传感器

环境污染监测传感器系统通过多维度数据采集为光伏组件的污染防控提供科学依据,集成的多参数在线监测设备实现了对空气质量指标的持续跟踪与记录。颗粒物传感器采用激光散射原理对 PM_{2.5}、PM₁₀ 等污染物浓度进行实时测量,配备的气象参数传感器组全天候监测温度、湿度、风速、风向等环境要素,降水量传感器则实现水汽条件变化的精确记录。这些传感器按照优化布局方案在光伏电站内形成密集监测网络,采集的数据经过标准化处理后统一上传至中央控制系统,形成完整的环境参数数据库。基于物联网技术的传感器管理平台支持远程数据采集和设备状态监控,通过实时通信协议确保监测系统的稳定运行和数据传输的可靠性。微型气象站的部署使环境参数监测更具针对性,通过对局部微气候特征的系统分析,建立起污染物沉积规律与气象条件的定量关联模型。高精度粉尘浓度检测仪和能见度仪为污染程度评估提供准确量化指标,结合图像采集装置记录的组件表面状态信息,构建了多层次的污染监测数据体系。在长期运行数据的支持下,环境污染监测系统能够准确预测污染物累积趋势,为组件清洗维护计划的制定提供有力决策支持,同时

也为研究不同环境因素对污染过程的影响机制提供可靠实验数据。传感器系统的智能化升级引入了自校准和故障诊断功能，保证了监测数据的长期稳定性和可靠性，而传感器网络的协同优化则提高了监测系统的空间覆盖效率，实现了对污染物分布特征的精确刻画。下图 1 为该章节思维导图。

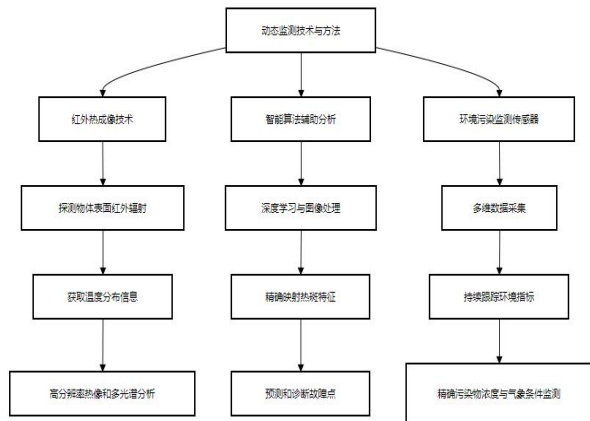


图 1：光伏组件表面污染与热斑效应的动态监测技术与方法

4 机理研究与防治策略

4.1 污染-热斑关联性分析

污染物与热斑效应之间的关联机理研究需要通过系统化的实验方法进行深入探究，通过控制变量实验揭示不同类型污染物对热斑形成的影响规律。在实验研究中，采用标准化的污染物沉积模拟方法，将不同粒径分布、化学组成的污染物按照预设覆盖率沉积在光伏组件表面，通过精密光学测量仪器记录组件透光率变化，结合电学性能测试系统获取 I-V 特性曲线，实现污染程度与发电性能的定量关联。红外热像仪对污染区域温度场演变的动态监测结果表明，污染物的分布不均匀性是诱发热斑的关键因素，局部高密度污染区域容易形成热量积累，导致温度急剧升高^[4]。在自然环境下的长期跟踪实验进一步验证了这一结论，不同类型污染物在组件表面的堆积模式与热斑形成位置存在显著相关性。通过建立多物理场耦合模型，对污染物导致的光学损失、电流分布不均匀以及热量传递过程进行定量描述，揭示了污染-热斑效应的作用机制。研究结果表明，污染物的导热特性和吸光特性对热斑的形成和发展具有决定性影响，而环境因素如温度、湿度、光照强度等则在热斑效应的加速或抑制方面起着重要作用。实验数据的统计分析为建立污染程度与热斑风险的评估模型提供了可靠依据，为光伏电站运维策略的优化指明方向。

4.2 防治策略建议

光伏组件污染与热斑效应的防治需要采取多层次、系统化的应对措施，从清洁维护、布局优化到材料创新等方面构

建完整的防治体系。针对性的清洁方案应根据污染物特性和环境条件制定，采用智能清洁设备结合高效清洗剂实现污染物的深度去除，清洗过程中严格控制水质和压力参数，避免对组件表面造成二次损伤。组件安装布局的优化设计需充分考虑区域气象特征和污染源分布，通过增加倾角、优化间距等措施提高组件的自清洁能力，同时设置防尘屏障减少污染物沉积^[5]。智能监控系统的部署实现了热斑的早期预警，基于大数据分析的预测模型能够评估潜在故障风险，及时启动预防性维护程序。在材料技术创新方面，开发具有疏水、疏油、抗静电等特性的功能性涂层，提升组件表面的防污能力，新型封装材料的应用则增强了组件的散热性能和抗热斑能力。运维管理制度的完善确保了防治措施的有效落实，包括制定科学的检测周期、建立标准化的清洁流程、完善应急响应机制等。通过技术创新与管理优化的协同，建立起全方位的污染-热斑防治体系，显著提升光伏系统的运行可靠性和发电效率。

5 结论

光伏组件表面污染与热斑效应的相互作用不仅影响光伏系统的电性能，还加速了组件的老化过程。污染物的种类、分布及其与环境因素的交互作用共同决定了热斑的形成与发展。通过多维度的动态监测技术，如红外热成像和智能算法，可以有效识别热斑的形成机制，并为光伏系统的运行管理提供科学依据。针对性清洁与优化布局设计、智能监控与材料创新等防治措施能够减少热斑效应的发生，延长组件使用寿命，提升系统整体性能。

参考文献

- [1] 梁红, 祝文伟, 梁晓瑜, 等. 一种基于深度学习的光伏组件表面污染物处理装置: CN202121801140.
 - [2] 张永伟. 纳米自清洁薄膜在光伏电站中的应用[J]. 太阳能, 2021(2): 25-26.
 - [3] 刘宇轩, 杜永英. 浅谈太阳能光伏发电技术[J]. 电大理工, 2022(4): 7-11.
 - [4] 张绘敏, 赵扬, 康会峰. 基于卷积神经网络算法的光伏组件热斑图像检测方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 57-63.
 - [5] 王道累, 姚从荣, 李超, 等. 光伏组件热斑效应智能化检测的综述及展望[J]. 太阳能学报, 2024(5): 45-46.
- 作者简介：陈仲国，男，汉族，1984 年 10 月出生，本科学历（2008 年 7 月毕业于汕头大学），广东省肇庆人，工程师职称，浙江芯能光伏科技股份有限公司研发总监，主要从事光伏并网技术研发工作。