

新型光伏组件热斑故障检测与智能防护技术研究

唐慰馨

点点云智能科技有限公司 浙江 宁波 315600

摘要：光伏组件热斑故障是制约光伏电站安全高效运行的核心问题，传统检测防护技术存在精度低、实时性差、抗干扰弱等缺陷。本文剖析热斑故障机理、类型及特征参数，构建改进YOLO深度学习智能检测模型，实现热斑精准定位与量化分级。设计感知-决策-执行闭环主动防护体系，通过实验验证该技术可快速抑制热斑温升、降低发电损耗，有效延长组件寿命，为光伏电站智能运维提供技术支持。

关键词：新型光伏组件；热斑故障检测；智能防护技术

引言：双碳目标推动光伏产业规模化发展，户外复杂工况下光伏组件易产生热斑故障，造成发电效率衰减、组件老化加速，严重时引发电气火灾，威胁电站运行安全。传统人工巡检、电气检测等方式难以适配规模化光伏电站精细化运维需求。针对现有技术短板，本文开展热斑故障智能检测与主动防护技术研究，通过算法优化与装置改良，攻克热斑检测滞后、防护被动等难题，助力光伏系统安全高效稳定运行。

1 光伏组件热斑故障机理与特性分析

1.1 光伏组件工作原理与结构特性

(1) 晶硅光伏组件核心结构为“玻璃-EVA-电池片-EVA-背板”组成的层压体，电池片基于PN结光生伏特效实现光能向电能的转换。其等效电路包含光生电流源、并联二极管、串联电阻与并联电阻，输出特性由PN结伏安特性决定。(2) 光伏电池串并联结构决定了组件的电压与电流输出能力：串联提升电压但电流受限于最小电池单元，并联提升电流但电压需保持一致。输出I-V曲线呈非线性，P-V曲线存在唯一最大功率点，最大功率点跟踪偏差将直接导致功率损失^[1]。(3) 户外运行中，环境温度升高导致开路电压下降、输出功率降低；辐照度变化直接影响短路电流；风场与湿度影响组件散热及封装可靠性，同时积尘与鸟粪等局部污染构成热斑隐患的外部触发条件。

1.2 热斑故障形成机理与诱发因素

(1) 热斑核心诱因包括：局部遮挡（树叶、鸟粪、积雪、积尘等）、组件老化（电池片隐裂、电极腐蚀、焊带脱焊）及制造工艺缺陷（碎片、虚焊、杂质污染）。被遮挡电池因光生电流不足而工作于反向偏置状态，由导通元件承受额外功率耗散。(2) 电学演变过程中，被遮挡电池进入反向击穿区，局部电流密度急剧升高，形成高阻发热源。能量损耗机制表现为受阻电池以

热量形式消耗正常电池产生的功率，损耗功率约等于遮挡面积占比与组件工作电流的乘积，温差随遮挡比增大呈非线性上升。(3) 热源通过封装材料（EVA、背板、玻璃）及电池片自身的热传导向周边扩散，形成以热斑为中心、温度向外递减的梯度场。导热系数差异导致热量积累与扩散速率不匹配，严重时引发局部温度急剧上升，加速材料热氧老化。

1.3 热斑故障类型与危害分级

(1) 暂时性热斑由可移除遮挡（如鸟粪、积尘、积雪）引起，遮挡消除后组件性能可恢复；永久性热斑由电池片裂片、电极老化、焊接缺陷等结构性损伤造成，故障不可逆且随运行时间持续恶化。(2) 依据IEC61215标准及相关研究，按温升幅度划分为三级：轻度热斑（温升 $<20^{\circ}\text{C}$ ），组件输出功率损失 $<5\%$ ；中度热斑（温升 $20^{\circ}\text{C}\sim40^{\circ}\text{C}$ ），功率损失 $5\%\sim20\%$ ；重度热斑（温升 $>40^{\circ}\text{C}$ ），功率损失 $>20\%$ 且伴随封装材料黄变、鼓泡等不可逆损伤^[2]。(3) 轻度热斑降低发电效率、缩短组件寿命；中度热斑导致该组串输出严重失衡，触发逆变器多峰寻优紊乱，降低系统整体发电量；重度热斑可造成玻璃炸裂、背板烧穿，极端情况下引发组件起火与电气火灾，威胁电站安全运行。

1.4 热斑故障特征参数提取与分析

(1) 红外图像特征表现为局部高温区域与周边正常区域形成明显温差亮斑；温度特征包括热点温度、温升速率及温差梯度；电学特征主要表现为串联电阻增大、并联电阻下降、填充因子降低及最大功率点偏移。(2) 正常工况下组件I-V曲线光滑、P-V曲线呈单峰形态；热斑故障工况下，I-V曲线在反向偏压区出现台阶状畸变，P-V曲线出现多峰特征，开路电压与短路电流均有不同程度下降，最大功率衰减幅度与热斑等级正相关。(3) 热斑温度特征与电学参数衰减量呈强关联：温升越高，填

充因子下降越明显、串联电阻增量越大。红外热像温度与I-V曲线台阶位置可作为相互验证的双重识别依据,为热斑早期预警与运维决策提供可靠判据。

2 新型光伏组件热斑故障智能检测技术研究

2.1 传统热斑检测技术对比与缺陷分析

(1) 人工巡检依赖运维人员手持红外热像仪或目视检查,逐块组件扫描,原理直观但效率极低;电气参数检测通过监测I-V曲线畸变、功率衰减及旁路二极管导通状态间接判断热斑,属离线抽检手段;常规红外测温技术利用热像仪捕获组件表面温度分布,通过温差识别异常热点,是目前应用最广的现场检测手段。(2) 传统检测技术精度受环境因素干扰显著——太阳辐照度、环境温度及风速均影响红外测温准确性,且小面积热斑因空间分辨率不足常被漏检;实时性方面,人工巡检与电气参数检测均为离线方式,无法实现故障即时告警;漏检率方面,轻微温升或背板内侧热斑难以被红外有效捕捉,综合漏检率可达20%~30%。(3) 大型光伏电站地处戈壁、水面或屋顶等复杂地形,人工巡检难以全覆盖;多云天气下辐照度快速变化导致红外测温偏差增大;组件数量庞大时电气参数检测无法逐组件执行,抽检方式遗漏风险高,传统方法在规模化、精细化运维场景中适用性严重不足。

2.2 基于深度学习的热斑故障智能检测模型构建

(1) 红外图像数据集采集采用无人机或手持热像仪在不同辐照度、不同季节条件下获取含热斑与正常组件图像,经LabelImg标注热斑区域;预处理包括去噪、对比度增强及温度标定归一化;数据增强采用随机裁剪、旋转、翻转及Mosaic融合扩充样本,以提升模型泛化能力。(2) 改进YOLO网络采用轻量化骨干网络(如MobileNetV4)替代标准CSPDarknet以降低计算量,在颈部网络引入双向特征金字塔实现深浅层特征融合,检测头增加小目标检测层以捕捉微小热斑;CNN分支网络提取温度分布统计特征与空间纹理特征,双分支特征融合增强识别鲁棒性^[3]。(3) 多尺度特征提取采用空洞卷积与注意力机制(CBAM),增强热斑边缘与核心区响应;故障识别采用FocalLoss损失函数缓解正负样本不平衡,NMS优化减少重叠框误检,实现热斑位置与类别的端到端智能识别。

2.3 热斑故障定位与程度量化方法

(1) 基于图像像素匹配将红外图像与可见光图像配准,利用热斑检测框像素坐标映射至光伏组件物理布局,结合光伏阵列拓扑数据库实现组件级与电池片级故障定位。(2) 量化计算模型通过红外温度矩阵提取热斑

区域最高温度、平均温度、温升幅度及高温像素面积占比,结合正常工作温度基线计算热斑面积与过剩温度积分,建立温度-面积二维量化指标体系。(3) 故障严重程度智能判定依据分级标准,将量化参数输入轻量级分类网络或决策树模型,输出轻度、中度、重度三级告警及建议处置策略。

2.4 智能检测模型性能测试与对比分析

(1) 采用精确率、召回率、平均精度均值评价检测准确性,以FPS和推理延迟评价速度,AUC评价分级可靠性。实验在8000余张标注图像上进行,按8:1:1划分训练、验证与测试集。(2) 改进YOLO模型mAP达92.6%,较人工红外判读(约68%)和电气检测(约55%)显著提升;召回率91.2%,漏检率降低约15个百分点;推理速度达45FPS,较FasterR-CNN的mAP提升4.3%,参数量减少约40%。(3) 低辐照度(200W/m²)、高温(40℃)、大风等复杂条件下mAP仍保持87%以上;高斯噪声与运动模糊干扰后性能衰减小于5%;对不同遮挡类型(树叶、鸟粪、积尘)识别准确率均超88%,验证了模型强抗干扰能力与工程适用性。

3 新型光伏组件热斑故障智能防护技术与实验验证

3.1 热斑故障防护总体方案设计

(1) 被动防护依赖旁路二极管导通及组件自然散热,结构简单但动作滞后,无法抑制热斑初期温升,且二极管热击穿风险随动作频次累积;主动防护融合实时感知与动态执行,在故障演变早期主动干预,具备响应快、调控准、可恢复的显著优势,从根本上改变了传统“事后被动承受”的防护模式。(2) 动态防护整体架构采用“感知—决策—执行”三层闭环:感知层通过红外热像与IV采样实时获取组件温度、电流、电压等多维状态信息;决策层由边缘AI模型判定故障等级与位置,输出最优防护指令;执行层根据指令驱动旁路开关与散热装置,全流程闭环周期≤1秒,确保故障响应时效性。(3) 硬件配置包括红外热像传感器(分辨率≥640×512)、高精度电流电压采集模块、低导通电阻MOSFET开关阵列及半导体制冷散热单元,边缘计算终端搭载四核ARM处理器;软件集成轻量化检测模型、分级控制策略与远程监控平台,支持本地自动运行与云端数据交互。

3.2 热斑故障主动防护关键技术研究

(1) 旁路智能调控采用SiCMOSFET有源开关替代传统肖特基二极管,通过PWM驱动信号实现电池串级精准旁路,依据热斑等级选择性隔离故障支路,响应时间≤100ms,发电损失较传统二极管旁路方式降低约

60%，同时消除二极管热击穿与反向漏电的长期可靠性隐患。（2）自适应散热优化设计基于温升速率与温度绝对值双参数动态调节半导体制冷功率，引入增量式PID控制算法使温升速率稳定在 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以内，防止急冷引发热应力微裂纹，智能启停策略较持续满功率运行综合节能约25%。（3）分级联动控制策略对接三级分类标准：轻度热斑（ $\Delta T < 20^{\circ}\text{C}$ ）仅启动自然对流散热并推送预警；中度热斑（ $\Delta T 20\sim 40^{\circ}\text{C}$ ）执行局部旁路与主动风冷联动；重度热斑（ $\Delta T > 40^{\circ}\text{C}$ ）同步实施故障支路全隔离、强制制冷及紧急上报，形成梯次化精准防护^[4]。

3.3 实验平台搭建与测试方案设计

（1）实验平台由可编程光伏模拟源（ $200\sim 1100\text{W}/\text{m}^2$ 可调）、两块 280W 单晶硅组件、步进电机驱动遮光幕布、FLIRA615红外热像仪、NI数据采集系统及防护执行机构组成，支持单组件与两串并联两种拓扑模式，测温精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。（2）设计三种代表性工况：高辐照稳态（ $1000\text{W}/\text{m}^2$ 恒定）、低辐照波动（ $300\text{W}/\text{m}^2 \pm 80\text{W}/\text{m}^2$ 正弦波动）及动态移动阴影；每项设置无防护、二极管被动防护和智能主动防护三组对照，各重复8次；遮挡面积设定5%、15%、30%，覆盖轻中重三级场景。（3）数据采集标准：红外图像 1Hz 采样，电气参数 200Hz 高频采集，背板均匀布置9个K型热电偶每10秒记录；单次实验持续30分钟，取稳定后10分钟均值，Grubbs准则剔除离群值（ $\alpha = 0.05$ ），结果以“均值 $\pm$ 标准差”表示，置信区间95%。

3.4 实验结果分析与技术优化

（1）智能防护系统在故障触发后平均7.2秒完成识别与动作，较传统旁路提前约40秒介入；重度热斑峰值温度由 112°C 降至 74°C ，降温幅度达 38°C ，热斑持续时长缩短至无防护组的 $1/3$ ，验证了主动防护的快速性与

有效性。（2）防护前后对比：轻度热斑发电效率恢复至正常值的97.3%，较无防护提升11.5%；中度热斑恢复至88.1%，提升21.8%；背板材料热氧老化速率降低约45%，旁路二极管导通频次减少70%，设备安全性显著改善，组件预期使用寿命延长约3~5年^[5]。（3）现存不足包括多热斑耦合时散热资源竞争导致分配不均、极端高温环境下半导体冷却效率下降约18%；改进方向为引入模糊逻辑优化多目标功率分配，辅以相变储能材料实现削峰填谷式辅助散热，并开发边缘模型动态量化技术以降低高温环境下计算负载，提升系统全天候持续防护能力。

结束语

本文完成光伏热斑故障机理分析、智能检测模型构建与主动防护系统研发，经实验证实该技术可显著提升热斑识别精度，快速干预故障、降低设备损耗与安全风险。同时研究发现多热斑耦合、极端高温环境下系统存在性能短板。后续将通过模糊逻辑算法优化功率分配、结合相变储能辅助散热，持续优化系统性能，推动光伏热斑防护技术智能化、工程化落地应用。

参考文献

- [1]王道累,姚从荣.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,2024,45(5):527-536.
- [2]张智勇.基于YOLOv8算法的光伏组件热斑故障智能检测方法[J].农村电气化,2025,17(8):45-49.
- [3]孙志超,郭晓磊,翟卓涛.基于改进YOLOv5s的光伏组件热斑快速检测技术[J].电工技术,2025,24(10):89-92.
- [4]王方政,刘喜泉,陈演斐.基于串联电阻估计的光伏阵列热斑故障诊断方法[J].水电能源科学,2022,40(10):212-216.
- [5]闫号,戴佳佳,龚小溪.基于多源图像融合的光伏面板缺陷及热斑检测方法[J].红外技术,2023,45(5):488-497.