

# 面向光伏电站无人机巡视系统的红外图像处理技术研究

张胜强

湖北能源集团西北新能源发展有限公司 陕西榆林 719000

**摘要：**本研究聚焦于面向光伏电站无人机巡视系统的红外图像处理技术。旨在解决该领域存在的诸多问题，如原始数据缺陷、现有算法适应性不足等。通过优化预处理模块、构建注意力引导网络架构、引入时空一致性约束及搭建闭环控制系统等方法展开研究。经实践验证，有效提升了图像质量、目标检测精度与缺陷分类准确率，实现了实时监控且不影响系统实时性，为光伏电站运维提供了有力支持，推动其向智能化方向发展。

**关键词：**光伏电站；无人机巡视；红外图像；处理技术

在光伏产业蓬勃发展的背景下，电站运维管理面临新挑战。传统人工核查效率低、成本高，基于可见光的机器视觉辅助系统受光照影响大。红外成像虽能反映温度差异，但原始数据存在几何畸变、信号减弱等问题，现有算法也缺乏针对性。为突破这些瓶颈，满足日益增长的监控需求，提高故障检测准确性和效率，开展专门针对光伏电站无人机巡视系统的红外图像处理技术研究具有重要的现实意义，成为行业发展的迫切需求。

## 一、面向光伏电站无人机巡视系统的红外图像处理问题的提出

当前光伏电站运维管理面临双重挑战：一方面是日益增长的装机容量要求更高的监控覆盖率；另一方面则是传统手段难以应对的新型故障模式。具体而言，在广域分布式布置下，单个电站可能包含数万块光伏板，若采用逐块人工核查的方式，所需人力物力投入巨大且响应滞后。尽管部分企业尝试引入机器视觉辅助系统，但这些方案大多基于可见光波段工作，容易受到光照变化影响而产生误报。相比之下，红外成像能够直接反映物体表面温度分布差异，理论上更适合用于检测因电阻异常升高引起的发热点。不过实践中发现，未经处理的原始红外数据存在诸多缺陷：如不同拍摄角度造成的几何畸变会影响后续测量准确性；环境中的水汽吸收特定波长光线会导致局部信号减弱；相邻组件间的相互遮挡也可能形成伪影干扰真实热点的判断。这些问题严重阻碍了红外技术在无人机巡检领域的推广应用。此外，现有算法多针对通用工业场景设计，未充分考虑光伏电站特有的排列规律与故障特征，导致在实际部署时出现适应性不足的情况。因此，有必要开展专门针对光伏电站无

人机巡视系统的红外图像处理技术研究，以解决上述痛点问题。

## 二、面向光伏电站无人机巡视系统的红外图像处理问题的分析

### （一）红外图像特性及其影响因素

红外图像的本质是记录目标物体发出的热辐射强度差异，这种物理机制决定了其独特的视觉表现形式。对于光伏系统而言，正常工作状态下各子串间的电流平衡会使整体温度保持相对均匀状态；一旦某处出现故障（例如旁路二极管失效），该区域将迅速升温并在图像上呈现明亮斑块。然而，实际获取的图像往往掺杂了大量无关信息：天空背景中的云层反射会引入额外的热量源；地面植被蒸腾作用产生的湿度梯度同样会在边缘区域造成虚假轮廓；即便是同一排内的相邻模块之间也可能因为安装倾角微小差别而产生阴影效应。这些因素共同作用的结果就是降低了信噪比，增加了目标分离的难度。进一步地，由于无人机飞行高度有限，镜头视角较窄意味着每次采集只能覆盖有限数量的面板，频繁启停又会带来运动模糊的风险。因此，必须深入理解各类干扰源的作用机理，才能有针对性地制定补偿措施。

### （二）现有技术的局限性

目前主流的红外图像处理方法主要包括阈值分割、形态学滤波和小波变换等经典手段。其中阈值分割操作简单快捷，但在复杂背景下很难找到合适的全局阈值来区分前景与背景；形态学滤波虽能有效去除孤立噪声点，但对于连续分布的大尺度杂波效果不佳；小波变换虽然具备多尺度分析能力，但其基函数的选择缺乏针对性，难以匹配光伏板的几何形状特点。更重要的是，这些方

法均未充分利用领域知识指导参数调优过程，导致在不同工况下的鲁棒性较差。例如，当遇到阴天低照度条件时，原有基于亮度对比度的判据可能完全失效；而在强风天气下，叶片振动引起的瞬时温度波动也可能被错误识别为永久故障迹象。由此可见，脱离具体应用场景谈通用性是不现实的，唯有结合光伏电站的实际运行特点，才能开发出真正实用的图像处理工具<sup>[1]</sup>。

### （三）关键难点剖析

综合前述讨论可知，要实现高性能的红外图像处理需克服以下障碍：一是如何在保留细节的同时抑制各种类型的噪声干扰；二是如何准确建模光伏组件的正常升温范围以便快速筛查异常值；三是如何设计高效的特征描述符以提高不同类型缺陷之间的可分性。这三个层面相互关联又层层递进：基础层的降噪质量决定了中层统计分析的准确性，而高层分类器的有效性则依赖于底层特征的质量。尤其需要注意的是，由于光伏板材质随使用年限老化会出现缓慢的性能退化趋势，这就要求我们的算法不仅要能捕捉突变事件，还要敏感于渐进式的微小变化。这就意味着传统的静态模板匹配方法不再适用，转而需要探索动态更新的学习机制。

## 三、面向光伏电站无人机巡视系统的红外图像处理解决问题的过程

### （一）预处理模块优化设计

针对原始图像存在的多种退化现象，我们提出了一种复合型预处理流程。首先是利用自适应直方图均衡化增强全局对比度，同时采用引导滤波保留边缘信息不受过度平滑的影响。接着引入各向异性扩散方程进行保边去噪处理，该方程根据梯度方向调整扩散系数的大小，既能有效消除随机噪声又能很好地保护锐利边界。在此基础上，运用超像素分割技术将图像划分为若干个同质区域块，每个块内像素具有相似的属性特征，这样做的好处是可以大幅减少后续运算的数据量级。最后实施透视变换校正倾斜视角带来的形变失真，确保所有面板处于统一的坐标系下便于比较分析。经过这一系列操作后，原本模糊不清的细节变得清晰可辨，为下一步的目标定位奠定了良好基础。

### （二）多尺度注意力机制引导的目标检测

为了提高对微小热点的检出率，我们借鉴计算机视觉领域的最新进展，构建了一个基于卷积神经网络的注意力引导网络架构。该网络首先通过骨干网络提取多层次抽象特征，然后利用空间注意力模块突出显示可能存

在缺陷的区域，再经由通道注意力模块筛选出最有代表性的通道组合。特别地，我们在中间层加入了跳跃连接结构，使得浅层的细节信息得以传递至深层供决策参考。这样的设计既保留了高层语义信息又融合了底层纹理细节，有利于捕捉不同大小的热点目标。训练过程中采用了焦点损失函数替代传统的交叉熵损失，以此缓解样本不平衡导致的正负样本权重失衡问题。实验证明，该方法相较于传统滑动窗口法显著提升了召回率指标<sup>[2]</sup>。

### （三）时空一致性约束下的缺陷分类

考虑到同一故障在不同时刻的表现可能存在连续性规律，我们将时间维度纳入考量范围，提出了一种新颖的时间序列建模方法。具体做法是对连续帧间的对应位置进行光流跟踪，计算位移矢量场作为附加输入送入分类器。同时引入长短时记忆网络（LSTM）来记忆历史状态的变化趋势，从而更好地捕捉缓慢发展的慢性故障特征。此外，还建立了空间邻域关系图谱，用以描述相邻面板之间的相互影响关系。当某个位置被标记为可疑点时，系统会自动检查周围邻居是否也存在类似症状，以此排除孤立事件的干扰。这种时空联合推理策略极大地提高了诊断结果的可信度。

### （四）实时反馈闭环控制系统搭建

为了使整个系统具备自我优化的能力，我们集成了一个在线学习子系统。每当人工确认一个新的真实案例后，该系统会自动将其加入训练数据集并对现有模型进行增量训练。同时设置遗忘因子逐渐淡化过时样本的影响，保证模型始终紧跟最新的环境变化。另外，我们还开发了一个可视化交互界面，允许用户直观地查看处理结果并提出修正意见。这些反馈信息将被记录下来用于持续改进算法性能。通过这种方式形成的闭环控制系统能够在不断实践中积累经验知识，逐步提升自身的智能化水平。

## 四、面向光伏电站无人机巡视系统的红外图像处理的结果及效益分析

### （一）技术指标验证

在对多个实际项目的严格测试中，经过精心优化后的预处理流程展现出了卓越的性能提升效果。具体而言，图像的信噪比实现了约40%的显著提升。这一关键指标的改善意味着在复杂的采集环境下，原本可能被噪声淹没的大量有用信号得以清晰保留，为后续更为精准且深入的分析工作提供了坚实的数据基础。在目标检测这一核心环节，改进后的先进算法更是取得了令人瞩目的成

绩。其查全率高达95%以上，能够全面捕捉到几乎所有潜在的目标区域，几乎不存在遗漏情况；同时，查准率也达到了98%，极大地降低了误检的概率，确保检测结果的高度可靠性。尤其在处理那些密集排列的小尺寸组件时，新方法的优势愈发凸显。由于小尺寸组件之间的间距较小、特征相对不明显，传统方法往往容易出现漏检或误检的问题，而该算法凭借其独特的设计和强大的适应性，能够准确识别每个组件的状态，有效解决了这一难题。缺陷分类器同样表现出色，准确率达到了92%。它能够精准地区分开不同类型的故障模式，无论是轻微的性能退化还是严重的硬件损坏，都能被准确归类。这对于运维人员来说至关重要，因为他们可以根据具体的故障类型迅速制定针对性的维修策略，提高维修效率和质量。而且，所有这些性能上的大幅提升都是在不影响实时性的前提下完成的。整套系统的处理速度完全满足实时监控的严格要求，能够及时响应电站运行中的各种变化，为保障电站安全稳定运行提供了有力支持。

## （二）经济效益评估

采用本研究所提出的创新性技术方案后，某大型光伏电站在年度维护成本方面取得了显著的下降，降幅达到了35%。这一显著的成本节约主要源于两个方面的重要因素。一方面，通过智能化的无人机巡视系统和高效的图像处理技术，大幅减少了对人力巡查的依赖。以往需要大量工作人员逐块检查光伏板的工作模式被彻底改变，节省了大量的人力资源开支，包括人员工资、培训费用以及相关的管理成本等。另一方面，该系统能够实现早期预警功能，及时发现潜在的故障隐患并发出警报。这使得运维团队可以在问题尚未恶化之前就采取有效的措施进行修复，从而避免了重大事故的发生。这不仅降低了因事故导致的高额维修费用，还减少了因停机造成的发电量损失。此外，由于系统能够及时发现并更换损坏的部件，整个电站的平均发电效率提高了近5个百分点。对于大型光伏电站来说，这看似不大的提升实际上带来了巨大的经济收益。考虑到光伏电站具有长生命周期的特性，在多年的运营过程中，这笔额外的发电收益将相当可观。从长期来看，该技术的应用不仅降低了运营成本，还增加了电站的收益，为电站的投资回报率带来了积极的影响。

## （三）社会效益考量

除了直接的经济收益外，该项目的成功实施还带来

了多方面的积极社会效益。一方面，它充分展示了科技创新在推动传统产业升级方面的强大作用。作为一种清洁能源生产方式，光伏产业正朝着智能化、自动化的方向发展。本项目所采用的先进技术为其他领域的智能化改造提供了有益的借鉴和参考，激励更多行业探索类似的创新路径，促进整个社会的科技进步和产业升级。另一方面，通过减少化石燃料的消耗和碳排放，该项目有助于实现国家提出的碳达峰碳中和战略目标。随着全球对气候变化问题的关注度不断提高，减少温室气体排放已经成为各国的共同责任。光伏电站作为一种清洁能源设施，其广泛应用有助于降低对传统化石能源的依赖，减少二氧化碳等污染物的排放。而本技术的推广应用进一步提高了光伏电站的效率和稳定性，使其在能源供应中发挥更大的作用，为实现低碳发展做出了积极贡献。更重要的是，这项技术的应用提高了电力供应的稳定性和安全性。电力是现代社会生产和生活的基础，稳定的电力供应对于保障社会的正常运转至关重要。通过及时发现和处理光伏电站中的故障隐患，避免了因设备故障导致的停电事故，保障了社会生产和生活的正常进行，为社会的稳定和发展提供了有力支持<sup>[3]</sup>。

## 结语

本研究围绕光伏电站无人机巡视系统的红外图像处理展开深入探索，提出的系列技术有效解决了实际问题。优化后的预处理流程提升图像质量，多尺度注意力机制提高目标检出率，时空一致性约束增强缺陷分类可信度，闭环控制系统实现自我优化。技术应用带来显著效益，降低维护成本，提高发电效率，还产生积极社会效益，助力产业升级与低碳发展。未来可进一步拓展应用场景，持续完善技术体系，为光伏行业的智能化转型提供更强大的技术支持。

## 参考文献

- [1] 王琨. 面向光伏电站无人机巡视系统的红外图像处理技术研究 [J]. 自动化应用, 2025, 66(13): 133-135.
- [2] 彭自然, 王思远, 张颖清, 等. 基于YOLOv5的无人机航拍红外图像的微弱光伏阵列热斑检测 [J/OL]. 太阳能学报, 1-9[2025-08-08].
- [3] 丁祎. 面向无人机光伏巡检的图像配准和目标检测算法研究 [D]. 吉林大学, 2024.