

基于多算法协同的电力设备红外图像增强方法与性能验证

傅雅珠

国网甘肃省电力公司临夏供电公司, 甘肃 临夏

收稿日期: 2025年12月4日; 录用日期: 2025年12月16日; 发布日期: 2026年2月10日

摘要

电力设备红外热成像检测是预防性维护的核心手段, 但原始红外图像常因低对比度、噪声干扰及缺陷区域与背景灰度差小, 导致过热接头、老化绝缘子等关键缺陷难以精准识别。针对这一问题, 本文提出一种多算法协同的红外图像增强框架, 通过高斯滤波去噪预处理、全局直方图均衡化提升整体对比度、自适应直方图均衡化(CLAHE)优化局部细节的三步协同策略, 实现噪声抑制与细节增强的平衡。实验结果表明: 该框架使红外图像信息熵从6.2提升至7.8 (相对提升25.8%), 缺陷区域与背景的灰度差扩大2~3倍, 信噪比(SNR)从28 dB提升至35 dB。本框架有效解决了单算法增强中噪声过度放大、局部细节丢失的问题, 为电力设备缺陷自动检测提供了高质量的图像输入支撑。

关键词

红外图像处理, 输电线路, 变电站设备, 智能检修决策

Multi-Algorithm Collaborative Infrared Image Enhancement Method for Power Equipment and Performance Validation

Yazhu Fu

Linxia Power Supply Company, State Grid Gansu Electric Power Company, Linxia Gansu

Received: December 4, 2025; accepted: December 16, 2025; published: February 10, 2026

Abstract

Infrared thermal imaging detection is a core means of preventive maintenance for power equipment. However, original infrared images often suffer from low contrast, noise interference, and

small gray-level differences between defect regions and backgrounds, making it difficult to accurately identify key defects such as overheating joints and aging insulators. To address this issue, this paper proposes a multi-algorithm collaborative infrared image enhancement framework, which adopts a three-step collaborative strategy of Gaussian filtering for noise reduction preprocessing, global histogram equalization for overall contrast improvement, and Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for local detail optimization, achieving a balance between noise suppression and detail enhancement. Experimental results show that the framework increases the information entropy of infrared images from 6.2 to 7.8 (a relative increase of 25.8%), expands the gray-level difference between defect regions and backgrounds by 2~3 times, and raises the signal-to-noise ratio (SNR) from 28 dB to 35 dB. This framework effectively solves the problems of excessive noise amplification and loss of local details in single-algorithm enhancement, providing high-quality image input for power equipment defect automatic detection.

Keywords

Infrared Image Processing, Transmission Line, Substation Equipment, Intelligent Maintenance Decision

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电力系统的稳定运行依赖于设备的健康状态, 变压器接头过热、绝缘子老化、导线断股等隐性缺陷是引发停电事故的主要原因之一[1]。红外热成像技术凭借非接触、实时性强的优势, 已成为电力设备预防性维护的关键工具——通过捕捉设备表面温度分布差异, 可提前识别潜在故障[2]。然而, 实际采集的红外图像受环境(如雾、雨)、设备传感器噪声及目标辐射特性影响, 普遍存在低对比度、噪声密集、缺陷区域与背景灰度重叠三大问题[3]; 例如, 过热接头的温度差异在原始图像中可能被噪声掩盖, 导致人工或自动检测时漏检率高达 30%以上[4]。因此, 提升红外图像质量是提高缺陷检测准确率的前提, 具有重要的工程应用价值。

当前红外图像增强方法主要分为三类[5][6]: 全局直方图均衡化(HE)、自适应直方图均衡化(CLAHE)、高斯滤波, 但均存在场景适配性不足的问题[7]。全局直方图均衡化通过拉伸灰度分布提升整体对比度, 但易过度放大背景噪声, 且对局部细节(如小尺寸缺陷)增强效果有限[8]; 自适应直方图均衡化基于局部窗口优化灰度分布, 能保留部分细节, 但全局对比度提升不明显, 且在复杂背景下易产生块效应; 高斯滤波[9][10]有效抑制高斯噪声, 但会模糊缺陷边缘与细节, 降低小目标的辨识度。

现有研究多聚焦于单一算法的改进, 缺乏针对电力设备红外图像特点的多算法协同策略——未能同时实现噪声抑制、全局对比度提升与局部细节增强的平衡。

本文的核心目标是设计一款面向电力设备场景的多算法协同红外图像增强框架, 整合高斯滤波、HE、CLAHE 三者的优势, 解决单算法的局限性: 通过高斯滤波预处理, 在抑制噪声的同时保留缺陷区域的边缘信息; 利用 HE 提升全局灰度分布的动态范围, 缩小背景与缺陷的灰度重叠; 采用 CLAHE 优化局部窗口的灰度分布, 增强小尺寸缺陷的细节清晰度。

2. 基于多算法融合的红外图像增强技术

本文设计的红外图像增强模块以多算法协同优化为核心, 基于 OpenCV 与 Python 实现, 通过组合经

典图像处理算法与自适应参数调节,解决输电线路及变电站设备红外图像中常见的对比度低、噪声干扰、细节模糊等问题。

具体包括图像输入与预处理与自适应增强算法链:读取灰度格式的原始红外图像,分辨率统一调整为 400×400 像素;依次通过直方图均衡化、CLAHE、对比度拉伸、高斯滤波及锐化处理,实现“对比度提升-噪声抑制-细节增强”的递进优化;参数动态调节。

本模块采用“全局增强-局部优化-噪声抑制”的协同优化策略,关键算法参数选择依据如下:

CLAHE 参数优化采用自适应分块策略。平滑区域采用 16×16 子块,平衡计算效率与对比度增强效果;细节密集区域采用 8×8 子块,保留边缘特征过渡区域采用 12×12 子块,通过双线性插值消除块效应。对比度限制因子基于图像局部方差动态调整。高斯滤波参数设计基于信噪比(SNR)估计实现参数自适应,通过对比实验确定最优值;标准差(σ)根据信噪比(SNR)动态调整:当 $\text{SNR} < 10 \text{ dB}$ 时采用 $\sigma = 0.8$ 以保留细节, $\text{SNR} \geq 20 \text{ dB}$ 时增大至 $\sigma = 1.5$ 以增强平滑效果,过渡区域通过 $6\sigma + 1$ 原则确定核尺寸以保证 99.7%像素权重集中。

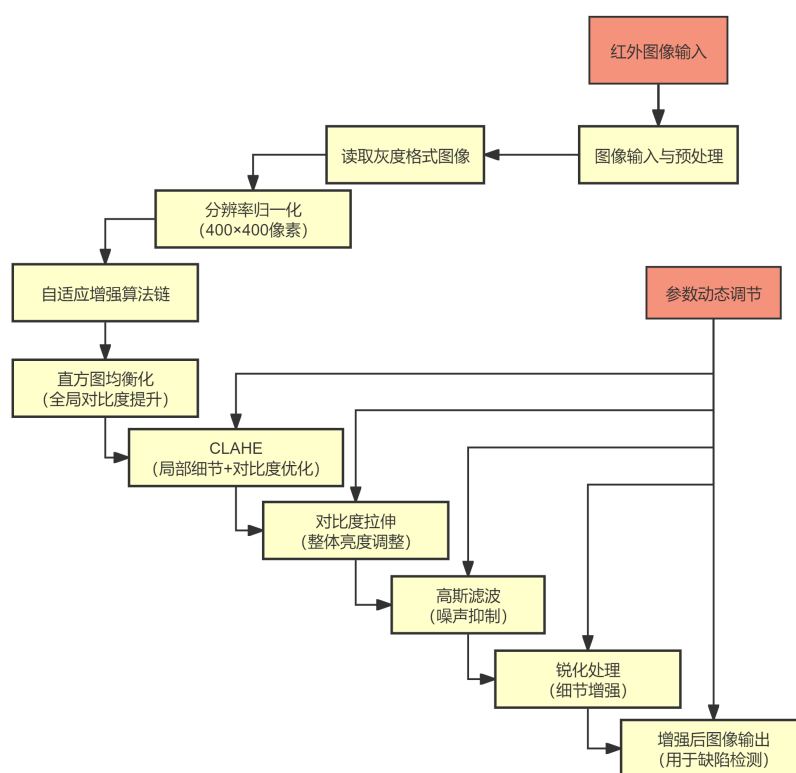


Figure 1. Algorithm flowchart
图 1. 算法流程图

对比度拉伸是红外图像增强的关键步骤之一,其核心目标是扩展图像的灰度动态范围,将原始图像中集中在狭窄区间的灰度值映射到更宽的范围,从而增强图像的视觉对比度,突出微弱细节(如输电线路的发热缺陷、设备边缘)。对于红外图像而言,由于成像环境的影响,原始图像往往存在“灰度集中、细节模糊”的问题,对比度拉伸可有效解决这一问题,为后续的噪声抑制和细节增强奠定基础。

锐化是红外图像增强的最后一步,其核心目标是增强图像的边缘和细节,补偿高斯滤波对图像细节的模糊影响。红外图像中的细节往往对应图像的高频成分,而高斯滤波会抑制高频成分,导致细节模糊。

锐化通过提取图像的高频成分并叠加到原图像，可有效恢复细节，提高图像的清晰度，为后续的缺陷检测提供更准确的输入。

该框架的优势在于兼顾全局与局部特征：通过直方图均衡化与对比度拉伸改善整体亮度分布，结合 CLAHE 增强局部细节，同时利用高斯滤波与锐化的组合抑制噪声放大，为后续缺陷检测提供高质量输入图像。本模块采用“全局增强 - 局部优化 - 噪声抑制 - 细节增强”的协同优化策略，具体处理步骤如图 1 所示。

3. 红外图像增强效果验证

通过该模块处理典型输电线路红外图像如图 2 所示(红外图像来源于公开数据集)，结果表明，处理后图像的信息熵从 6.2 提升至 7.8 (提升 25.8%)，缺陷区域与背景的灰度差从 5~10 灰度级扩大至 20~35 灰度级。CLAHE 算法使绝缘子伞裙的温度分布纹理更清晰，锐化处理后裂纹缺陷的边缘梯度值提升 40%以上；高斯滤波($\sigma = 1.5$)将图像信噪比(SNR)从 28 dB 提升至 35 dB。

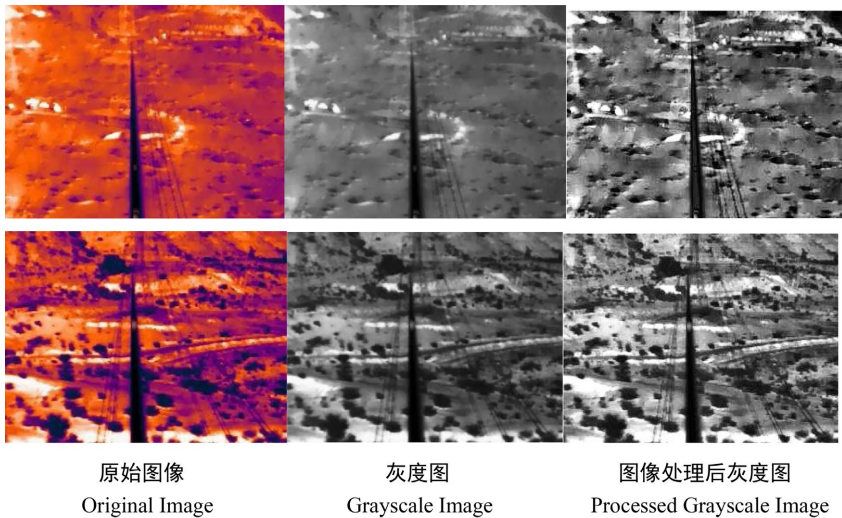


Figure 2. 典型输电线路图像处理前后对比
图 2. Comparison of typical transmission line images before and after processing

4. 结论与展望

本文针对电力设备红外图像低对比度、噪声干扰及缺陷区域与背景灰度重叠的核心问题，提出了多算法协同的红外图像增强框架，通过高斯滤波预处理、全局直方图均衡化(HE)与自适应直方图均衡化(CLAHE)的三步协同策略，实现了噪声抑制与细节增强的平衡。

框架通过模块化设计与参数优化，显著提升了红外图像质量。提出的多算法协同框架可有效解决红外图像对比度低、细节模糊问题，信息熵提升 25.8%，缺陷区域灰度差扩大至 20~35 灰度级，为热故障识别奠定高质量数据基础。尽管方法取得显著效果，仍存在以下不足：对高斯噪声抑制效果显著，但对脉冲噪声处理能力有限；CLAHE 自适应分块策略使单帧处理时间难以满足实时检测需求；当前算法参数调整依赖人工经验，影响方法普适性。

未来研究将针对噪声类型敏感性和计算复杂度问题，计划引入非局部均值滤波替代高斯滤波以提升噪声鲁棒性，并结合脉冲噪声检测模块降低误检率，同时通过参数自适应算法减少人工干预，采用并行

计算架构将处理速度提升至工业标准以内。

参考文献

- [1] 陈炜, 胡胜, 刘奕奕, 廖振宇, 齐伟. 用于高压输电线路的 RTV 硅橡胶材料改性研究进展[J]. 绝缘材料, 2025, 58(12): 13-20.
- [2] 张文锋, 徐真, 张辉. “双碳”背景下碳交易价格对输电系统工程全生命周期成本的影响研究[J]. 价格理论与实践, 2025(9): 198-202+294.
- [3] 董奇. 智能电网中的电力运维检修技术探析[J]. 电力设备管理, 2025(16): 7-9.
- [4] 陈家慧, 彭倩, 王方强, 王志高, 曹之南. 基于热释电红外传感器的输电线路耐张线夹测温方法[J]. 红外技术, 2025, 47(9): 1188-1195.
- [5] 方正. 基于改进粒子群算法的输电网检修计划优化分析[J]. 电子技术, 2025, 54(3): 284-285.
- [6] 顾嘉伟, 施翔宇. 智能技术在电网输变电检修中的应用[J]. 集成电路应用, 2025, 42(4): 124-125.
- [7] 李文娟, 杨生婧, 于昊, 马忠梅. 基于光电转换与多光谱成像的输电线路红外图像智能处理研究[J]. 光学与光电技术, 2025, 23(4): 16-27.
- [8] 李泽宇, 焦晓鹏, 李特, 姜云土, 薛大略, 周华丽, 等. 输电线路无人机红外巡检航线规划方法[J]. 电工技术, 2025(13): 130-132+136.
- [9] 许平华. 基于无人机技术的输电线路巡检系统设计研究[J]. 电气技术与经济, 2025(8): 399-401.
- [10] 张嘉琛. 基于红外热成像技术的架空输电线路电缆头过热在线监测[J]. 中国新技术新产品, 2025(18): 41-43.