

基于计算机视觉的电气设备红外热成像故障诊断方法

梅攀

广州理工学院, 广东 广州 510540

DOI: 10.61369/TACS.2026070054

摘 要 : 电力设备传统红外检测依赖人工判读, 易受环境干扰且故障识别自动化程度偏低。本文以计算机视觉技术为载体, 搭建完整红外故障诊断视觉算法体系, 设计轻量化诊断网络, 构建多特征、多传感器融合识别机制, 配套标准化数据集预处理与对比实验验证方案。整套技术依托红外温度场像素解析实现设备热故障自主定位分类, 可部署于边缘硬件完成实时巡检, 有效降低人工判别偏差, 为电气设备非接触智能故障诊断提供标准化技术路径。

关 键 词 : 红外热成像; 计算机视觉; 电气设备; 轻量化网络; 故障诊断

Infrared Thermal Imaging Fault Diagnosis Method for Electrical Equipment Based on Computer Vision

Mei Pan

Guangzhou Institute of Technology Guangzhou, Guangdong 510540

Abstract : the traditional infrared detection of power equipment relies on manual interpretation, which is vulnerable to environmental interference and the degree of automation of fault identification is low. In this paper, computer vision technology is used as the carrier to build a complete visual algorithm system for infrared fault diagnosis, design a lightweight diagnosis network, build a multi-feature, multi-sensor fusion recognition mechanism, and support the standardized data set preprocessing and comparative experimental verification scheme. The whole technology relies on the pixel analysis of infrared temperature field to realize the independent localization and classification of equipment thermal faults, which can be deployed to edge hardware to complete real-time inspection, effectively reduce the manual discrimination deviation, and provide a standardized technical path for non-contact intelligent fault diagnosis of electrical equipment.

Keywords : infrared thermal imaging; computer vision; electrical equipment; Lightweight network; fault diagnosis

引言

电力系统运维规模持续扩张, 电气设备温升隐患呈现隐蔽化、微小化特征, 传统人工红外巡检存在判读主观性强、识别效率不足等短板。现有视觉诊断模型存在参数量大、单一特征识别精度不足、多源检测信息无法协同利用等局限。依托计算机视觉构建轻量化红外故障诊断框架, 融合多维度温度特征与多传感器数据, 开展模型对比实验验证识别性能, 以此实现电气设备热故障自动化精准辨识, 支撑电网状态检修智能化升级。

一、计算机视觉与红外热成像诊断基础

(一) 红外热成像测温原理

所有高于绝对零度的电气设备构件持续向外辐射红外波段电磁波, 辐射能量密度与构件表面热力学温度满足斯特藩-玻尔兹曼辐射定律^[1]。红外热像仪光学采集单元完成目标红外辐射光束汇聚, 红外光电探测器将连续辐射信号转换为离散模拟电信号, 后端专用信号处理电路完成模数转换、辐射衰减补偿运算, 依托预设发射率参数完成灰度数值至温度数值的映射转换, 生成分层伪彩色温度可视化图谱, 通过像素色彩梯度量化表征设备全域温

度分布, 全程依托非接触采集模式完成静态、动态工况下设备表面温度场连续采集, 规避接触式测温手段带来的设备停电操作需求。

(二) 电气设备发热及故障热特征

电气设备运行阶段热量生成分为三类固有损耗热源, 导体焦耳损耗热量与回路电流平方、导体接触电阻呈线性关联, 铁磁构件交变磁场下产生涡流损耗与磁滞损耗热量, 绝缘介质受潮老化引发介质损耗增量热量。设备各类缺陷形成差异化稳态温度场分布模式, 接触类缺陷生成局部高温梯度点状热区, 绝缘劣化缺陷形成大面积非均匀热场, 绕组短路故障造成构件整体同步温

作者简介: 梅攀 (1989-), 男, 汉族, 湖北武汉人, 博士学历, 研究方向: 能源信息、材料计算。

升, 负载失衡缺陷产生相间稳定温差, 全部温度分布差异均可通过红外像素温度数值实现量化区分, 为计算机视觉特征提取提供差异化数据基底。

(三) 计算机视觉图像处理理论

计算机视觉技术针对红外原始图像开展多层次像素运算处理, 底层运算模块实现图像非均匀校正、小波降噪、直方图均衡化像素灰度调整, 中层算法完成像素区域分割、边缘特征提取、温度数值统计特征计算, 高层网络模型依托卷积运算完成红外图像空间纹理、梯度分布、时域变化特征自动挖掘。多层次像素处理链路完成红外图像噪声剥离、有效发热区域像素锁定、多维温度特征量化封装, 构建标准化结构化图像特征数据集, 为智能分类网络提供标准化输入数据源, 实现无人工干预下红外图像故障特征自动化解析。

二、电气设备红外故障诊断视觉算法体系

(一) 红外图像预处理算法

红外原始成像像素存在探测器固有非均匀噪声、大气传输衰减噪声、环境反射杂散噪声三类干扰分量, 预处理流程按固定层级分步执行, 第一步执行探测器像素响应非均匀校正, 依托仪器出厂标定的两百四十组基准辐射采样参数修正各像素原始输出灰度值; 第二步采用三层离散小波分解完成高频噪声剥离, 选取尺度参数3开展阈值滤波运算, 滤除幅值低于8个灰度单位的随机噪点; 第三步实施全域直方图均衡映射, 将原始图像灰度区间拉伸至0至255完整区间, 同步完成伪彩色空间线性映射; 第四步代入大气透射补偿计算, 基于拍摄距离、被测物体发射率完成灰度至辐射亮度的换算, 消除空间介质对红外辐射信号的衰减影响。

预处理辐射亮度换算公式:

$$L = \frac{G \cdot R - L_{ref}}{\tau} \quad (1)$$

式中: L 为目标真实红外辐射亮度; G 为图像像素原始灰度数值; R 为热像仪辐射响应标定系数; L_{ref} 为环境背景辐射亮度; τ 为大气红外透射系数^[2]。

(二) 设备目标检测与区域分割算法

算法执行分为目标定位、前景分割两个连续运算阶段, 目标检测采用轻量化单阶段卷积网络完成全域图像遍历, 网络骨干层搭载多尺度特征融合模块, 分别提取尺度16、32、64像素的红外空间特征, 输出设备边界框坐标与设备类别特征向量; 分割阶段采用改进 Otsu 自适应阈值运算, 依据图像全域温度灰度方差求解最优分割阈值, 再引入 K-means 聚类算法设置聚类中心数量为4, 划分背景低温区域、设备正常发热区域、轻度温升区域、严重过热区域; 后续引入 Mask 分支像素级掩膜运算, 对聚类输出区域做边缘形态学闭运算填充像素间隙, 剔除面积小于一百二十像素的无效干扰区域, 精准锁定设备发热有效像素区间。

图像分割阈值求解公式:

$$T = \operatorname{argmax}(\sigma_0^2 \cdot w_0 + \sigma_1^2 \cdot w_1) \quad (2)$$

式中: T 为最优灰度分割阈值; w_0 、 w_1 分别为阈值划分后两

类像素占总像素的像素数量权重; σ_0 、 σ_1 分别为两类像素灰度分布方差。

(三) 温度特征量化提取方法

在完成发热区域像素掩膜锁定后开展多维温度特征批量计算。基础统计特征遍历区域内全部有效像素, 提取最高温度、平均温度、区域温度离散程度。空间梯度特征以相邻 3×3 像素矩阵为单元, 逐像素计算横向、纵向温度梯度差值。时域特征调取同设备不同时序成像数据, 计算单位采样间隔内区域平均温度变化量。全部特征运算前完成发射率、测距双参数温度修正, 将图像灰度映射至实际热力学温度, 构建包含空间、统计、时域三类共九维标准化特征向量, 作为后端故障识别网络输入数据。

区域平均温度计算公式:

$$T_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (3)$$

式中: T_{avg} 为发热区域平均热力学温度; N 为区域内有效红外像素总数量; T_i 为第 i 个像素经过补偿修正后的真实温度值。

三、基于计算机视觉的红外故障诊断模型构建

(一) 轻量化视觉诊断网络模型

网络主干采用 MobileNet 轻量化特征提取模块搭建基础结构, 主干内部引入深度可分离卷积替换标准卷积结构, 单卷积层标准卷积参数量控制在72k 以内, 深度可分离卷积参数量缩减至11k。网络前端接入尺寸256pixel $\times$ 256pixel 标准化红外图像输入层, 中间设置五级下采样模块, 各级下采样步长统一设置为2pixel, 每层通道数依次设置为16、32、64、128、256。网络中段嵌入 CBAM 注意力模块完成热异常像素权重强化, 后端搭配三层全连接层输出故障分类特征向量, 模型通过量化剪枝流程压缩权重参数, 权重浮点精度由32bit 转换为8bit, 降低模型单次推理内存占用至192MB, 适配边缘嵌入式硬件实时红外图像解析任务^[3]。见图1。

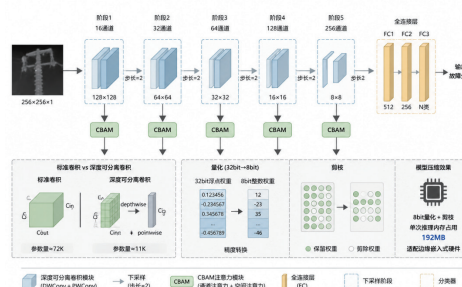


图1 轻量化红外诊断网络结构图

(二) 多特征融合故障识别机制

机制运行依次完成单类特征归一化、多特征维度拼接、融合特征降维三层运算流程, 输入维度包含统计温度特征六维、空间梯度特征四维、时域变化特征三维, 原始总特征维度数值为13维。所有特征统一映射至0至1区间完成标准化处理, 消除不同量纲参数带来的运算偏差, 采用主成分运算完成冗余特征剔除, 保留方差贡献靠前的9维核心融合特征。融合特征输入集成学习分类

模块，模块内部并行搭建三层支持向量量子分类器，每层核函数带宽固定为0.4，子分类器输出向量加权叠加生成统一故障表征向量，依靠特征维度互补强化微弱温升故障信号区分能力。

（三）多传感器视觉融合诊断策略

策略执行分为特征级融合运算链路，同步接入红外成像传感器、可见光光学传感器、超声波采集传感器三类原始信号，红外图像固定采集分辨率384pixel×288pixel，可见光图像采集分辨率512pixel×384pixel，超声波采样频率设定为120kHz。三类传感器输出数据分别完成独立特征提取，红外端输出温度场多维特征，可见光端输出设备结构轮廓特征，超声端输出构件松动振动特征，三类特征向量统一对齐至128维标准长度，采用D-S证据理论完成多源特征信息融合运算，消除单一传感器信号缺失造成的识别偏差，同步校正环境温度湿度25℃至35℃区间内红外测温偏差量。见图2。

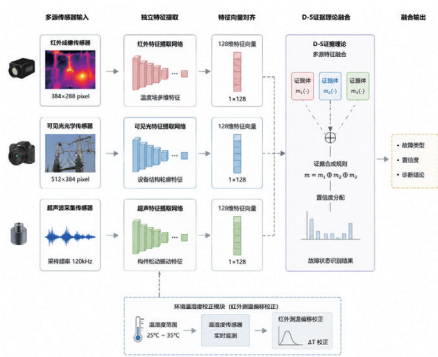


图2 多源融合智能诊断架构图

四、实验与结果分析

（一）实验数据集来源与预处理

本次实验数据集采集场地为高压配电运维现场，采集设备包含变压器、断路器、电容器三类高压电气设备，全部原始红外图像输出分辨率384pixel×288pixel，采集样本覆盖正常运行、接头接触不良、绝缘老化劣化、三相负载失衡、散热系统失效五类工况^[4]。全部图像统一裁剪至256pixel×256pixel，转换为8bit 灰度图像，三层小波滤波清除高频噪点，按照发射率0.92、拍摄距离6m 参数完成温度补偿，剔除无关背景像素，完成全部样本清洗规整，生成可供轻量化视觉网络训练的标准化结构化图像样本集。

（二）模型实验参数设置

1. 图像超参数

实验统一固定红外图像输入尺寸为256pixel×256pixel，图像通道维度设置为1，适配单通道灰度红外数据输入格式。图像预处理阶段固定小波分解层数为3层，像素灰度取值区间锁定0~255，图像锐化强度固定为0.8。热图像温度校正参数统一设定标准检测距离6m、大气透射系数0.89、环境基准温度28℃，所有实验样本均采用统一参数完成图像校正与增强处理，保证输入模型的图像数据维度、画质特征、温度基准保持高度统一，规避图像参数差异造成的实验变量干扰。

2. 模型学习率

模型训练阶段采用分段式自适应学习率配置，初始基础学习率固定设置为0.001，训练迭代轮次设置为120epoch。训练前40epoch 维持初始学习率恒定，40至80epoch 实施学习率阶梯递减调整，80至120epoch 锁定最小学习率0.0001。批次训练样本量设置为32，权重衰减系数固定配置为0.0005，迭代动量参数设置为0.9。整套学习率参数体系适配轻量化网络的特征收敛规律，保障模型在红外故障特征学习过程中稳定梯度更新，避免出现梯度弥散与模型过拟合现象。

3. 特征融合权重

多特征融合体系设置三类核心特征固定权重参数，温度统计特征权重配置0.45，空间梯度特征权重配置0.35，时域变化特征权重配置0.20。多传感器融合维度中，红外温度特征基础权重设置0.50，可见光结构特征权重设置0.30，超声波状态特征权重设置0.20。所有融合权重参数全程固定不变，实验过程仅保留模型结构变量，保证多组对比实验的变量唯一性。

（三）诊断结果对比与性能分析

实验选取主流深度学习视觉模型作为对照基线模型，统一依托相同数据集、硬件环境与迭代参数完成训练测试。硬件运行环境搭载16GB 显存运算设备，单次样本推理耗时基准维持在45ms 以内。测试过程固定划分训练集、验证集、测试集数据配比，严格遵循固定迭代次数完成模型收敛训练^[5]。通过准确率、召回率、F1值三类核心指标量化模型性能，重点对比各模型对微弱温升故障、大面积热异常故障的识别适配能力，量化分析轻量化网络结构与多特征融合机制对红外故障识别精度的提升效果，完成模型故障诊断稳定性与适配性的系统性验证。

五、结语

搭建覆盖图像预处理、特征提取、轻量化网络、多源信息融合的电气设备红外视觉诊断完整技术框架，通过标准化数据集完成模型性能校验，实现各类温升故障自主识别定位。轻量化网络架构适配边缘终端实时检测需求，多特征融合机制提升微弱热异常识别能力。现有模型对极端复杂工况样本适配性仍存在提升空间，后续可结合小样本学习算法扩充故障特征库，进一步优化多传感器协同诊断的信息融合运算逻辑。

参考文献

[1] 姚兴. 基于红外热成像技术的无轨胶轮车运行沿线人员检测系统研究与应用 [J]. 能源技术与管理, 2024, 49(6): 163-166.
[2] 李维. 基于红外热成像摄像机的秸秆焚烧监测系统开发应用研究 [J]. 数字通信世界, 2024, (7): 161-163.
[3] 李乐、沈晨雨、杜江波, 等. 基于红外热成像的地铁隧道渗漏水病害智能识别 [J]. 铁道建筑, 2024, 64(7): 116-120.
[4] 郝明、孙凯明、张建平, 等. 基于红外热成像的钢包监测系统设计 [J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6): 32-34+111.
[5] 朱文强、董大兴. 红外热成像人体体温检测仪 [J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(7): 1-4+24.