

变电站设备红外检测技术应用与数据分析

王立

国网山西省电力有限公司超高压变电分公司 山西 太原 030032

摘要：随着我国电力系统规模不断扩大、智能化水平持续提升，保障变电站设备安全稳定运行已成为电网运维工作的核心任务。红外检测技术作为一种非接触、实时、高效的设备状态监测手段，在变电站设备缺陷早期识别、故障预警及状态评估中发挥着不可替代的作用。本文系统阐述了红外检测技术的基本原理及其在变电站典型设备（如变压器、断路器、隔离开关、互感器、避雷器等）中的具体应用模式；深入分析了红外图像数据采集、预处理、特征提取与智能诊断的关键技术路径；探讨了当前红外检测在实际应用中面临的挑战，如环境干扰、设备发射率差异、图像分辨率限制等。研究表明，红外检测技术与先进数据分析方法的深度融合，将显著提升变电站设备状态感知能力与运维决策智能化水平，为构建安全、可靠、高效的现代智能电网提供坚实支撑。

关键词：变电站；红外检测；热成像；设备状态监测；数据分析；深度学习

引言

变电站是电力系统中电能传输分配的关键枢纽，其设备长期处于复杂运行环境，易因多种因素局部过热甚至故障。传统定期与事后检修模式滞后且盲目，难满足现代电网高可靠性要求，发展状态检修为核心的预测性维护策略成必然。红外检测技术能将物体辐射的红外能量转为可视化热图像，实现非接触式、全天候、大面积监测，具操作便捷等优势，在多领域广泛应用，在电力系统中可有效识别电气隐患。但变电站设备数量增、结构复杂，人工判读红外图像难满足海量数据处理与精准诊断需求，如何高效准确提取信息并综合分析成研究热点难点。

1 红外检测技术基本原理

1.1 红外辐射与热成像

任何温度高于绝对零度（-273.15℃）的物体都会持续向外辐射电磁波，其辐射强度和波长分布与物体自身的温度密切相关。根据普朗克黑体辐射定律，物体在特定波长下的辐射出射度与其温度呈指数关系。红外热像仪正是利用这一物理原理，通过高灵敏度的红外探测器（如微测辐射热计）接收目标物体发出的红外辐射，并将其转换为电信号，再经过信号处理和图像重建，最终形成一幅反映物体表面温度分布的伪彩色热图像。

1.2 关键性能参数

红外热像仪的性能主要由热灵敏度、空间分辨率、测温精度和光谱响应范围等关键参数决定。其中，热灵敏度（NETD）反映了设备分辨微小温差的能力，通常优于0.05℃，是探测早期微弱热异常的基础；空间分辨率（IFOV）决定了图像细节的清晰程度，直接影响对小型

部件或远距离目标的识别效果；测温精度则关乎诊断结论的可靠性，一般控制在±2℃或读数的±2%以内；而光谱响应范围方面，电力设备检测普遍采用8-14μm的大气窗口波段，以最大限度减少水汽和二氧化碳对红外辐射的吸收，确保测量结果的准确性。

1.3 影响测温准确性的因素

在实际应用中，红外测温的准确性受到多种复杂因素的干扰。首先，被测物体表面的发射率差异显著，例如抛光金属的发射率可能低至0.1，而氧化后的金属表面可高达0.8以上，若未正确设置，将导致测温值严重偏离真实温度。其次，环境中的高温物体（如阳光、邻近发热设备）会通过反射干扰被目标的红外辐射，造成虚假热点^[1]。此外，大气中的水汽、灰尘等成分会对红外辐射产生衰减作用，尤其在远距离检测时影响更为明显。最后，某些透明或半透明材料（如玻璃、塑料外壳）对红外线具有不同程度的透射或吸收特性，若不加以识别和规避，也会引入测量误差。因此，在开展红外检测前，必须对上述干扰因素进行系统性校正或采取有效规避措施，以确保所获数据的真实性和诊断结论的科学性。

2 红外检测在变电站典型设备中的应用

2.1 电力变压器

电力变压器作为变电站的核心设备，其运行状态直接关系到整个系统的安全。红外检测在变压器运维中具有广泛应用价值。例如，套管引线连接处若存在接触不良，会在热图像上表现为顶部或根部的局部高温点；散热器若因堵塞或油流不畅导致冷却效率下降，则各散热片之间会出现明显的温度梯度，正常情况下其温度分布应相对均匀；油枕、阀门等部位若发生渗漏或内部堵

塞,也可能引起局部温升异常。尽管绕组和铁芯等内部部件无法直接成像,但严重的匝间短路或铁芯多点接地故障往往会在箱体外壳上形成可被红外热像仪捕捉到的异常热区,从而为内部故障的早期预警提供重要线索。

2.2 高压断路器与隔离开关

高压断路器与隔离开关的故障多源于动静触头之间的接触问题。当断路器合闸不到位、触头磨损严重或弹簧压力不足时,接触电阻显著增大,在大电流通过时会产生异常焦耳热,导致触头区域温度明显升高。红外热像可直观显示三相触头的温度分布,若存在显著不平衡,则提示可能存在机械或电气缺陷。类似地,隔离开关的刀口与触指之间若因氧化、污秽或机械变形导致接触不良,也会在刀口处形成孤立的高温点,且其温升幅度通常随负荷电流的增大而加剧。通过定期红外巡检,可有效识别此类隐患,避免因接触过热引发的烧毁或拒动事故。

2.3 电流/电压互感器 (CT/PT)

电流互感器 (CT) 和电压互感器 (PT) 虽体积小,但其运行状态同样不容忽视。CT的一次绕组连接端子若松动,会导致接触电阻增大而发热;更为危险的是二次侧开路,虽在正常运行中罕见,但一旦发生将产生极高感应电压并伴随剧烈发热。此外,内部绝缘材料老化或受潮也可能引起介质损耗增加,表现为整体温升^[2]。正常运行状态下,CT本体温度应略高于环境温度,且三相之间温差不应过大。对于PT而言,内部受潮、匝间短路或末屏接地不良等问题均可能导致整体或局部温度异常升高,红外检测可作为辅助手段及时发现这些潜在风险。

2.4 避雷器

金属氧化物避雷器 (MOA) 在正常工频电压下仅有微安级的泄漏电流,发热量极小,表面温度接近环境温度。然而,当阀片因老化、受潮或制造缺陷导致性能劣化时,其阻性电流分量会显著增大,进而引起整体温升。这种“热崩溃”现象是避雷器失效的重要前兆。红外热像技术能够灵敏地捕捉到这种整体性温升趋势,尤其适用于对同组三相避雷器进行横向比较,若某一相明显高于其他两相,则高度提示存在内部缺陷,需及时安排停电试验或更换。

2.5 母线与连接金具

变电站内的母线系统及其连接金具 (如线夹、螺栓、接线端子等) 长期承受机械应力与电化学腐蚀,是接触不良和过热故障的高发区域。由于这些部件通常暴露在外,非常适合红外检测。正常情况下,各连接点温度应均匀且与负荷电流成正比。一旦出现螺栓松动、接

触面氧化或安装工艺不良,接触电阻将急剧上升,在大负荷时段形成明显热点。通过红外巡检,运维人员可快速筛查整条母线系统,精确定位潜在过热点,从而在故障发生前实施紧固或更换处理,有效防止因连接点熔断引发的短路事故。

3 红外检测数据的采集与预处理

3.1 数据采集规范

为确保红外检测数据的科学性与可比性,必须严格遵循标准化的采集流程。检测应在设备带电且负荷不低于额定值30%的工况下进行,以保证发热效应足够显著;同时应避免雨、雪、雾、强风或阳光直射等不利气象条件,理想环境为阴天、无风、相对湿度低于85%。拍摄时,热像仪应尽量垂直于被测设备表面,并保持适当距离,使目标充满视场,避免因视角偏差或距离过远导致测温失真。此外,操作人员需准确输入被测材料的发射率参数,并根据现场情况设置背景反射温度补偿。所有环境参数 (如环境温度、湿度、风速) 及设备运行参数 (如负荷电流、电压) 均应同步记录,为后续数据分析提供必要上下文。

3.2 图像预处理

原始红外图像常包含固定图案噪声、随机噪声、非均匀响应及几何畸变等问题,直接影响后续分析的准确性。因此,需进行系统化的预处理。首先,通过非均匀性校正 (NUC) 消除红外探测器阵列各像素响应不一致造成的固定噪声;其次,采用直方图均衡化或对比度自适应拉伸等图像增强技术,提升热图像的视觉清晰度和细节表现力;再次,应用中值滤波、小波去噪等算法抑制由电子干扰或环境扰动引起的随机噪声;最后,针对镜头畸变进行几何校正,确保图像空间坐标的准确性,为后续的区域分割、温度测量及多时相图像配准奠定基础。

4 红外图像数据分析与智能诊断

4.1 特征提取

从预处理后的热图像中提取具有判别性的特征是实现智能诊断的前提。这些特征既包括直观的温度指标,如最高温度、平均温度、相对于环境或同类设备的温升值,以及三相设备间的温度不平衡度;也包括反映热点形态的几何与纹理信息,如热点区域面积、形状规则性、边缘梯度变化等^[3]。此外,利用灰度共生矩阵 (GLCM) 等方法可量化温度分布的空间相关性,描述热场的均匀程度。这些多维度特征共同构成了设备热状态的综合表征,为后续分类与诊断提供数据支撑。

4.2 传统诊断方法

早期红外诊断主要依赖人工经验,并参照《带电设备红外诊断应用规范》(DL/T 664)等标准进行判断。该方法通过设定绝对温升阈值或相对温差限值来划分缺陷等级,操作简单、易于理解。然而,其主观性强,对复杂工况(如负荷波动、环境突变)适应性差,且难以量化评估缺陷发展趋势,已逐渐难以满足现代智能运维对精准化、自动化的需求。

4.3 基于机器学习的智能诊断

为克服传统方法的局限,研究者开始引入机器学习技术。通过将提取的温度、形态、纹理等特征向量输入支持向量机(SVM)、随机森林(RF)等分类模型,可实现对设备状态(正常、一般缺陷、严重缺陷)的自动判别。聚类分析方法如K-means则可用于无监督场景下发现异常运行模式。这类方法在一定程度上提升了诊断的客观性与效率,但仍高度依赖人工特征工程的质量,泛化能力有限。

4.4 基于深度学习的端到端识别

近年来,深度学习特别是卷积神经网络(CNN)的兴起,为红外图像分析带来了革命性突破。CNN能够直接从原始热图像中自动学习多层次、高抽象度的特征表示,实现端到端的故障识别。例如,基于YOLO或Faster R-CNN的目标检测模型可自动定位变电站中的各类设备及其部件,并识别其中的异常热点区域;而U-Net等语义分割网络则能对热图像进行像素级分类,精确勾勒故障区域边界^[4]。借助迁移学习策略,利用在大规模自然图像数据集上预训练的模型进行微调,可在有限的电力红外样本下快速构建高性能诊断系统。大量研究表明,深度学习方法在识别准确率、鲁棒性及对复杂背景的适应能力方面显著优于传统方法,代表了红外智能诊断的发展方向。

5 应用挑战与对策

尽管红外检测技术优势明显,但在实际推广中仍面临诸多挑战。环境与工况干扰是首要难题,阳光反射、风冷效应、负荷波动等因素会导致同一设备在不同时间点的热图像差异巨大,影响诊断一致性。对此,可建立动态基准,采用历史同期、同负荷条件下的热图像作为

比较依据,或结合日周期与负荷曲线进行多时段融合分析,以削弱瞬时干扰的影响。设备发射率的不确定性也是一个长期困扰,现场设备表面状况(如氧化、油漆、污秽)多变,难以精确设定。可探索自适应发射率估计算法,或结合可见光图像进行材质识别与发射率匹配,提高测温精度。此外,当前红外检测数据普遍存在“孤岛”现象,不同厂家设备、不同运维单位的数据格式不统一,缺乏共享机制,亟需制定统一的数据采集、存储与交换标准,并推动构建区域级红外检测数据库。最后,高质量的红外诊断仍高度依赖技术人员的经验,可通过开发智能辅助诊断系统降低人为误判率,并加强标准化培训与认证体系建设,提升整体队伍的专业水平。

6 结语

红外检测技术凭借其独特的优势,已成为变电站设备状态监测不可或缺的重要工具。本文系统论述了其基本原理、典型应用场景、数据处理流程及智能诊断方法,并指出了当前面临的挑战与未来发展方向。研究表明,单纯依靠红外图像的定性观察已无法满足现代智能电网的运维需求。唯有将红外检测与先进的数据分析技术——特别是人工智能、大数据、物联网等深度融合,构建智能化、平台化、标准化的红外检测体系,才能真正释放其在设备缺陷早期预警、状态精准评估与运维决策优化方面的巨大潜力。未来,随着相关技术的持续突破与标准体系的不断完善,红外检测必将在保障电网安全、提升运维效率、推动能源数字化转型中扮演更加关键的角色。

参考文献

- [1] 张晓华,蔡巍,武宇平,等.基于红外检测的变电站设备热状态诊断[J].智慧电力,2021,49(09):109-116.
- [2] 李长红,田芳芳.基于红外热成像的变电站设备异常检测方法[J].电气技术与经济,2024,(10):343-346.
- [3] 李玮.基于红外图像的变电站设备识别与故障诊断[D].辽宁工程技术大学,2024.
- [4] 王学玲.红外诊断技术在变电站设备维护中的应用[J].电子技术,2023,52(08):224-225.