

电压致热红外检测在变电设备隐患识别中的精准性提升路径

张 明 薛力源

内蒙古电力（集团）有限责任公司鄂尔多斯供电分公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

【摘 要】：电压致热红外检测技术在变电设备隐患识别中的应用，能够有效提升潜在缺陷定位与诊断的精准性。通过将电压响应特性与热红外成像结合，可实现对局部发热点、绝缘劣化及接触不良等问题的快速识别。相比传统单一热成像方式，该方法在抗干扰性、成像分辨率和定量分析能力方面具有优势，为隐患检测提供更可靠的数据支撑。研究表明，该技术在早期诊断和故障预防中表现出较强适用性，对提升电网运行的安全性和稳定性具有现实意义。

【关键词】：电压致热红外检测；变电设备；隐患识别；精准性提升

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.039

引言

随着电网规模的不断扩展与负荷水平的逐步攀升，变电设备运行的安全与可靠性成为电力系统稳定的核心环节。隐患若未能在早期被识别，极易引发连锁故障，导致大范围供电风险。传统红外成像检测虽具备无损监测的优势，但在复杂电磁环境与多源干扰下，往往存在误判与定位精度不足的问题。电压致热红外检测技术的引入，为突破上述瓶颈提供了新的途径。通过电压刺激诱导设备局部热效应，并结合高分辨率红外成像，可更直观呈现潜在隐患特征，从而增强对异常部位的识别能力。

1 电压致热红外检测在变电设备隐患识别中的必要性

电力系统的稳定运行高度依赖于变电设备的安全可靠性，而设备隐患的早期识别是保障电网安全的关键环节。随着电网规模的扩大和负荷水平的提升，设备长期处于高压、大电流等复杂工况下，绝缘老化、局部放电、接触不良等问题逐渐显现，若未能在隐患阶段及时发现，将可能引发严重故障甚至系统性停电事故。传统热红外检测方法通过被动监测设备表面温度变化来识别异常点，但在多源干扰、电磁耦合等复杂环境中，热特征信号常常被掩盖，导致故障定位精度和诊断可靠性不足。随着变电设备智能化水平不断提升，对隐患识别技术的精度和稳定性提出了更高要求，亟需更先进的检测手段以适应复杂电力运行环境。

电压致热红外检测技术利用电压激励诱导设备内部局部热效应，再结合高分辨率红外成像实现隐患可视化，为突破传统方法的局限性提供了有效方案。通过对设备施加可控电压信号，可以在微弱热异常尚未扩散到设备表面的早期阶段，将潜在缺陷部位的热电响应特征放大并清晰呈现。该方法在抑制外界干扰方面具有优势，可显著提升对绝缘局部击穿、导体接触不良及封装缺陷等微小隐患的识别能力。同时，基于多波段红外数据的高精度成像算法，可在不同工况下实现温度场的动态重建，从而提高故障定位的空间分辨率和定量分析精度。与传统的被动监测相比，这一技术改变了检测模式，构建了从“热

异常被动发现”到“电压致热主动检测”的新体系，更契合电力设备状态检修和智能运维的发展趋势。

在变电设备隐患识别的实际应用中，电压致热红外检测表现出高度的适应性和精准性。对于处于高电磁噪声、强干扰背景的变电站环境，该方法能够有效分离出设备本体的真实热响应信号，避免由于外界温升或负载波动造成的误判。通过与状态监测系统、局放检测装置等多维数据融合，检测结果的可靠性进一步提升。工程实践表明，该技术可在设备出现明显热失衡之前，提前识别出潜在缺陷区域，为运维人员提供可量化、可溯源的诊断依据。随着算法优化和硬件性能的提升，电压致热红外检测将在高压电气设备健康评估、风险预警和精准检修中发挥更大价值，为保障电力系统安全稳定运行提供强有力的技术支撑。

2 传统热红外检测在复杂环境下的局限性分析

传统热红外检测技术在变电设备隐患识别中被广泛应用，其原理是通过监测设备表面热辐射特征来判断内部故障的可能性。然而，在复杂的变电站环境中，该技术存在显著局限。由于设备结构的多样性和运行工况的复杂性，设备表面温度分布往往受多种因素叠加影响，例如负载波动、环境温度变化以及风冷和油冷等散热方式。这些干扰使得表面温度异常并不完全等同于内部隐患，从而降低了基于单一热成像数据的判断准确性。在强电磁干扰和高压电场的背景下，红外信号可能被削弱或扭曲，导致部分热缺陷被掩盖，难以及时识别潜在故障点。

在实际检测中，传统热红外成像依赖被动式热量获取，其信号强度与缺陷区域释放的热量成正比。当设备内部隐患处于早期阶段时，局部热量尚未有效传导至设备表面，热红外成像仪往往无法捕捉到微弱温升信息。对于绝缘劣化、局部放电或内部接触不良等缺陷，热量多在设备内部积聚，传统方法在缺陷未外显时难以实现早期预警。此外，热成像受探测器灵敏度、空间分辨率及热场均匀性的限制，在检测多层复合绝缘结构或金属封装设备时，存在温度梯度失真现象。这种局限性在高压GIS设备、油浸式变压器及环网柜等典型场景中尤为突出，容易导致误检或漏检，影响隐患识别的可靠性和完整性。

传统热红外检测的另一不足在于缺乏与其他状态量的深度关联分析能力。由于红外成像仅反映表面热场分布,无法单独判断温升的根本原因。例如,在相同负荷条件下,接触不良、绝缘老化或局部击穿均可能表现出类似的表面温升特征,而缺乏多维信号交叉验证易导致误判。此外,在现场环境中,背景热源、阳光直射、设备邻近热辐射等外部因素会叠加影响红外数据,降低诊断的准确性。随着变电设备复杂度不断提高,单纯依赖传统热红外检测已难以满足高精度隐患识别的需求,这也推动了更高分辨率、抗干扰性更强、与多源数据融合能力更高的新型检测技术的应用与发展。

3 电压致热红外检测在提升隐患定位精度中的作用机制

电压致热红外检测技术通过外加可控电压信号诱导设备局部热效应,再结合高分辨率红外成像实现隐患可视化,能够有效提升变电设备隐患定位的精度。通过对设备施加特定幅值与频率的电压激励,可以引发局部缺陷区域的电流密度变化,形成更显著的电热响应特征,使潜在隐患的热异常信号从背景噪声中被有效放大。这一过程能够在缺陷尚未引起大范围温度上升之前,对早期局部发热点进行定量识别。与传统热红外检测被动依赖自然温升不同,该技术利用主动激励方式突破了热扩散滞后性问题,使检测信号更加集中和可控,在复杂工况下仍能保持较高的空间分辨率和信噪比,从而提高对隐患部位的精确定位能力。

在隐患识别过程中,电压致热红外检测通过多波段热成像技术实现温度场的动态重建,使不同材料、不同绝缘结构及不同工作状态下的缺陷特征得以清晰呈现。利用红外探测器对热辐射的多维采集能力,可以同步获取目标设备的表面温度分布与局部热流密度变化,从而建立更精细的热响应模型。结合频域特性分析,对不同电压激励条件下的热量释放速率进行量化计算,可进一步区分导体接触不良、局部绝缘击穿及封装缺陷等不同类型隐患。此外,针对高压 GIS 设备、油浸式变压器等多层封装结构,利用电压致热效应实现内部缺陷的穿透式感知,可在传统热红外检测盲区内获得更高精度的热异常信息,有效解决深层隐患难以识别的技术瓶颈。

电压致热红外检测的高精度还依赖于其与先进信号处理算法的深度融合。通过引入时域反演、热场重构及噪声自适应滤波等方法,可实现对热响应信号的去噪、特征提取和数据增强,提升微弱隐患信号的可见度。结合多源状态量的交叉验证,例如局部放电监测、振动信号分析及电流波形检测,可进一步优化诊断模型,避免因单一热特征导致的误判。工程实践表明,该技术在复杂电磁环境、高噪声背景及高温工况下仍能保持较强的鲁棒性,能够精准锁定隐患位置并提供可量化的热异常参数,为变电设备的状态评估、精准检修和故障预防提供可靠的技术支撑。

4 电压响应特性与红外成像结合的关键技术路径

电压响应特性与红外成像的结合是实现高精度隐患识别的核心技术路径,通过在设备上施加可控电压信号,诱导局部缺陷区域产生特定的电热响应,再利用高分辨率红外成像技术对热场分布进行实时捕获和量化分析。这一方法能够显著提升变电设备隐患识别的灵敏度和分辨率。通过对电压激励参数进行优化,可在不同工况下实现对热响应特征的主动调节,避免因自然温升不足导致的信号丢失。高动态范围的红外成像技术结合多帧融合处理算法,可以准确分离出缺陷部位的真实热信号,提升热图像对比度和边缘清晰度,从而实现微小隐患的可视化与定量化表征,尤其在高压设备和复杂封装结构中展现出更高的适应性。

在检测过程中,电压响应特性的多维数据为红外成像提供了更全面的热场信息,通过建立电压、电流与温度场之间的耦合模型,可实现对隐患特征的深度解析。基于频域分析和谐波响应特征,能够区分不同类型缺陷在相同电压激励条件下的热响应差异,从而提高隐患类型判定的准确性。对于局部放电、绝缘击穿、接触不良等问题,缺陷区域的电压响应特征具有高度可辨识度,将其与高分辨率红外图像融合后,可实现对隐患性质、范围及严重程度的综合分析。通过引入三维热场重构算法,可以在设备复杂结构内部形成空间可视化热分布图,进一步突破传统热红外检测仅限于表面温升监测的局限性,为深层缺陷识别提供可靠依据。

在工程应用中,电压响应特性与红外成像的结合还需要依托智能化信号处理和数据融合技术。通过时域反演、噪声自适应滤波和多波段特征增强等方法,可在强电磁干扰和高噪声背景下有效提升信噪比,保证检测结果的稳定性与一致性。同时,将电压响应数据与局放监测、超声检测、油色谱分析等多源状态量融合,可实现隐患诊断的多维验证,避免因单一热信号造成的误判。实际运行案例表明,该技术路径能够在隐患早期阶段准确捕捉局部热异常,并通过动态热场建模与精细图像分析,完成对隐患区域的精准锁定,为变电设备的预测性维护和状态检修提供坚实的技术支持。

5 电压致热红外检测在变电设备安全运行中的应用成效

电压致热红外检测技术在变电设备安全运行中的应用展现出显著的技术成效。通过施加可控电压激励诱导局部热效应,并结合高分辨率红外成像实时捕捉热场分布,可以在隐患早期阶段实现更高精度的故障定位与定量分析。该技术通过放大缺陷区域的电热响应信号,能够有效识别绝缘老化、局部放电、接触不良等潜在风险,即使在温升尚未明显扩散至设备表面的情况下,也能实现热异常的提前感知。在高压 GIS 设备、油浸式变压器、环网柜等典型复杂场景中,应用结果表明电压致热红外检测能够突破传统热成像方法受自然温升限制的局

限,为隐患早期诊断提供可靠的量化依据,大幅度提升设备健康状态评估的准确性。

在实际运行中,电压致热红外检测技术展现出较强的环境适应性和数据可靠性。通过优化电压激励参数与热成像采集策略,可在多源干扰、高电磁噪声背景下实现有效信号提取,避免传统方法因外界热源、负载波动等因素导致的误判。结合多波段红外成像与三维热场重构算法,可实现对缺陷区域的空间可视化分析,提升故障定位的精细化程度。该技术与局部放电监测、振动分析、油色谱诊断等多源数据融合后,能够形成多维度诊断模型,增强隐患识别的可信度与全面性。通过对多组运行设备的长期在线监测结果分析发现,该技术不仅能够精准捕捉早期微小热异常,还能对故障发展的动态趋势进行量化跟踪,为制定高效的状态检修策略和降低运维风险提供有力支撑。

工程实践证明,电压致热红外检测在提升变电设备安全运行水平方面具有显著成效。通过在不同类型设备上的应用验证,该技术能够实现隐患发现时间的显著提前,降低设备突发

故障率,延长关键部件使用寿命,并有效减少大面积停电事故的发生。配合智能化监测系统和大数据分析平台,可以将电压响应数据与热场特征进行深度建模,形成针对不同工况的隐患特征库和诊断规则,实现电力设备状态的精准评估与分级预警。在实际电网运行管理中,该技术已被逐步应用于超高压变电站、智能配电网和关键输变电环节,表现出高度的稳定性和可推广性,为构建安全、高效、智能的电力运维体系提供了坚实的技术支撑和数据保障。

6 结语

电压致热红外检测技术在变电设备隐患识别中的应用,有效提升了故障定位的精度与隐患诊断的可靠性。通过电压激励与高分辨率红外成像的结合,能够在缺陷早期阶段实现对潜在风险的快速识别,显著突破了传统热红外检测在复杂工况下的局限性。工程实践表明,该技术在高压 GIS 设备、油浸式变压器和环网柜等场景中表现出高度适应性,为电网运行安全和设备状态检修提供了坚实的技术保障和数据支持。

参考文献:

- [1] 王志强,刘建峰.电压激励下的热红外检测在电力设备故障诊断中的应用[J].电网技术,2022,46(8):2513-2522.
- [2] 李俊凯,陈伟东.基于电压响应特性的红外成像检测技术研究[J].高电压技术,2021,47(4):1285-1293.
- [3] 周海峰,王子明.变电设备热缺陷识别的新方法及应用分析[J].电力系统保护与控制,2020,48(12):98-105.
- [4] 赵立国,孙晓晨.红外热成像技术在变电设备隐患诊断中的应用研究[J].电力系统自动化,2021,45(17):152-160.
- [5] 韩鹏飞,罗志强.电压致热红外检测在高压 GIS 设备故障定位中的关键技术[J].电力设备管理,2023,41(5):33-41.