

火电厂电气设备红外热成像在线监测与故障诊断技术

范志伟

大唐内蒙古多伦煤化工有限责任公司 内蒙古锡林郭勒盟多伦县 027300

摘要：火电厂电气设备的安全稳定运行对电力系统至关重要。红外热成像技术作为一种高效的无损检测手段，能够实现电气设备运行状态的在线监测和故障诊断。本文研究了火电厂电气设备红外热成像在线监测与故障诊断技术。阐述了红外热成像的基本原理及其在电气设备状态监测中的应用优势，分析了典型电气设备（如变压器、开关设备、母线接头等）的发热机理和红外热像特征。探讨了红外图像的采集、处理、温度分析与缺陷识别方法，包括图像增强、特征提取、模式识别及智能化诊断技术。研究表明，利用红外热成像技术可及时发现电气设备的热缺陷，实现早期预警，有效预防故障发生，为火电厂电气设备的预防性维护和状态检修提供了重要的技术支持。

关键词：火电厂；电气设备；红外热成像；在线监测；故障诊断；热缺陷

引言

火电作为我国电力供应的重要支柱，其安全高效运行直接关系到国家能源安全 and 经济发展。电气设备是火电厂的核心组成部分，承担着发电、变电、输电和配电的关键任务。然而，电气设备在长期运行过程中，由于设计制造缺陷、材料老化、环境因素、安装维护不当等原因，容易出现各种故障，特别是过热类热缺陷，如连接点接触不良、绝缘劣化、负荷过载等。这些热缺陷往往是导致设备损坏、停电事故甚至火灾爆炸的根源。传统的电气设备检测方法（如定期停电试验、离线检测）存在效率低、成本高、无法实时反映设备运行状态等缺点。红外热成像技术作为一种非接触、实时、快速、直观的无损检测方法，能够捕捉电气设备运行中因电流效应（焦耳热）、电压效应（介质损耗）或故障状态产生的温度异常信息，从而为在线监测设备状态、早期发现潜在缺陷、及时进行故障诊断和预防性维护提供了强有力的技术手段。

一、火电行业在能源结构中的地位与安全运行的重要性

火电行业作为我国电力供应体系中的传统支柱，长期以来在保障国家能源安全、支撑经济社会发展方面发挥着不可替代的作用。其发电量占比较高，为工业生产、居民生活提供了稳定可靠的电力基础。同时，火电（尤其是燃煤发电）的安全稳定运行至关重要，直接关系到国家能源供应的连续性和可靠性，以及社会公共安全。

一旦发生重大安全事故，不仅会造成巨大的经济损失，还可能引发严重的环境污染和不良社会影响。因此，确保火电行业的安全、高效、清洁运行，不仅是满足当前能源需求的现实需要，也是维护社会稳定、保障人民生命财产安全、推动能源结构优化转型的关键环节。

二、红外热成像技术原理及电气设备热特征分析

（一）红外辐射基本原理

1. 黑体辐射定律（普朗克定律、斯蒂芬-玻尔兹曼定律、维恩位移定律）

黑体辐射定律是红外热成像技术的物理基础。普朗克定律描述了黑体在不同温度下辐射的光谱分布，指出其辐射能量密度随波长和温度变化的关系。斯蒂芬-玻尔兹曼定律表明，黑体的总辐射出射度与其绝对温度的四次方成正比，揭示了温度与辐射总功率的定量关系。维恩位移定律则指出，黑体辐射光谱中峰值波长与绝对温度成反比，表明温度越高，峰值波长越短。这三大定律共同奠定了红外辐射测量的理论基础，使得通过探测物体发出的红外辐射来推算其表面温度成为可能，为红外热成像技术提供了科学的依据。

2. 实际物体红外辐射特性（发射率、反射率、透射率）

实际工程中的电气设备并非理想黑体，其红外辐射特性更为复杂，通常用发射率、反射率和透射率来描述。发射率衡量物体自身发射红外辐射的能力，其值介于0到1之间，与物体材料、表面状态（颜色、粗糙度）、温度及发射角度有关，是红外测温中需要修正的关键参数。反

射率表示物体表面反射来自环境红外辐射的能力，对于表面光滑的设备，反射的环境辐射可能干扰测温。透射率则指红外辐射穿透物体的比例，对于大多数固体电气设备，透射率通常很低，可忽略不计。准确理解和修正这些特性，对于获取精确的温度数据和可靠的诊断结果至关重要。

3. 红外热成像仪工作原理（光学系统、探测器、信号处理、图像显示）

红外热成像仪是一种将物体发出的不可见红外辐射转换为可见热像图的设备。其工作原理主要包括：光学系统负责收集并聚焦来自目标物体的红外辐射能量，并将其汇聚到红外探测器上；探测器（如微测辐射热计、InSb等）将接收到的红外辐射能转换为微弱的电信号；信号处理单元对探测器输出的微弱电信号进行放大、滤波、数字化等处理，并根据物体的发射率、环境温度等参数进行校正，计算出对应各像素点的温度值；最后，通过图像处理算法将温度数据转换为不同颜色或灰度等级的像素点，并在显示器上生成直观的热像图，从而可视化地呈现目标物体的温度分布状态。

（二）电气设备发热机理分析

1. 电流致热（焦耳定律、接触电阻发热）

电流致热是电气设备中最常见的一种发热机理，其基础是焦耳定律（ $P=I^2R$ ）。当电流 I 通过具有一定电阻 R 的导体时，电能会转化为热能，产生功率损耗 P 。对于电气设备内部的导体、绕组等，材料固有电阻和运行电流的大小直接决定了发热量。特别地，在电气连接部位，如母线接头、开关触头、电缆终端等，若存在接触不良、氧化、腐蚀或紧固不到位等问题，会导致接触电阻显著增大。根据焦耳定律，在电流不变的情况下，接触电阻的微小增加都会引起发热量的急剧上升（与电阻成正比），形成局部高温热点，这是导致许多电气故障的根源。

2. 电压致热（绝缘介质损耗发热）

电压致热主要与电气设备的绝缘系统有关。在交流电压作用下，绝缘材料（如变压器油、绝缘纸、套管介质等）内部会发生极化现象，能量在电场作用下转换过程中会有部分损耗，以热量形式释放，称为介质损耗。介质损耗功率通常与施加电压的平方、电源频率以及绝缘材料的介电损耗角正切值（ $\tan \delta$ ）成正比。当绝缘材料受潮、老化、含有杂质或存在缺陷时，其介电损耗会显著增大，导致在正常工作电压下产生异常发热。这种

发热通常发生在绝缘内部，热量需要传导至表面才能被检测到，且温升相对较低，但往往是绝缘性能劣化的重要标志。

3. 其他原因发热（环境因素、负荷变化、设计缺陷等）

电气设备的发热除了电流和电压直接导致外，还可能由其他因素引起。环境因素如高温环境会加剧设备自身发热和热量积聚。负荷的周期性或突然变化会导致设备温度随之波动，长期过载运行会使设备持续处于高温状态。设计或制造缺陷，例如设备选型不当（容量不足）、散热结构设计不合理、材料选用不当（导热性差）等，都可能导致设备在正常运行条件下产生异常温升。此外，设备运行状态的改变（如启动、停止）、自然老化过程、以及外部因素（如雷击、短路故障后的残余效应）等也可能引发临时性或持续性的发热现象。

三、火电厂电气设备红外热成像在线监测系统

（一）在线监测系统架构设计

火电厂电气设备红外热成像在线监测系统通常采用分层分布式架构。系统一般由前端感知层、数据传输层、平台服务层和用户应用层组成。前端感知层部署红外热像仪，安装于关键电气设备附近，负责实时采集设备表面的红外辐射数据。数据传输层通过有线或无线网络（如工业以太网、4G/5G、Wi-Fi）将采集到的图像及环境参数（温度、湿度）传输至监控中心。平台服务层是核心，包括数据存储服务器、应用服务器和数据库，负责数据的接收、存储、处理、分析及报警管理。用户应用层提供人机交互界面，供运维人员查看实时热像图、历史数据、温度趋势、接收报警信息并进行远程配置管理，实现对设备状态的全方位、自动化监控。

（二）数据采集与预处理

数据采集是系统的基础环节，红外热像仪按照预设周期或触发条件，对监测目标进行扫描成像，获取包含温度信息的红外图像序列。同时，需同步采集环境温度、相对湿度、设备运行工况（如负荷电流）等辅助数据，用于后续的温度校正和分析。采集到的原始红外图像数据包含噪声、几何畸变，且受发射率、环境反射等因素影响。因此，必须进行预处理，包括：几何校正以消除镜头畸变；辐射定标将探测器信号转换为准确的温度值；去噪处理（如中值滤波）以提升图像质量；发射率修正以减小材料发射率偏差对测温精度的影响。这些预处理步骤是保证后续分析准确性的关键。

（三）系统功能与特点

火电厂电气设备红外热成像在线监测系统主要功能包括：对指定电气设备进行24小时全天候、无人值守的实时/准实时温度监测与热像记录；自动提取关键测温点或区域的温度参数，生成温度数据库；支持设定多级温度或温差阈值，实现异常高温的自动报警（声光、短信、邮件等）；提供历史数据查询、回放以及温度趋势分析图表，辅助状态评估；具备数据导出与报表生成功能，满足管理需求。系统特点体现在：非接触、远距离、大范围快速检测，不干扰设备运行；实时性高，能及时发现早期热缺陷；自动化程度高，减轻人工巡检负担；数据连续性强，便于追踪缺陷发展过程；可与电厂其他监控系统（如SIS）集成，实现信息共享与联动。

四、电气设备红外图像分析与故障诊断技术

（一）图像温度分析与特征提取

电气设备红外图像分析的核心是温度信息的提取与特征化。首先，通过图像处理技术，如阈值分割、区域生长或边缘检测，从复杂的背景中准确分割出目标设备区域。然后，在目标区域内选取具有代表性的特征点（如最高温点、最低温点）或特征区域（如三相连接点、关键发热部件），精确测量其温度值。同时，计算并提取反映温度分布特征的特征参数，例如最高温度、最低温度、平均温度、最大温差、热像均匀性指数、温度梯度等。这些定量和半定量的温度特征是后续进行缺陷识别和故障诊断的基础，能够客观反映设备的热状态异常程度和分布特性。

（二）热缺陷类型识别与诊断方法

基于提取的温度特征和热像图特征，可对电气设备的热缺陷进行识别与诊断。根据DL/T 664等标准，结合同类比较法（比较三相设备或同类部件的温度差异）、表面温度判断法（比较温度是否超过阈值）、相对温差法（比较相似设备间温差）等方法，判断缺陷的存在及严重程度。常见的热缺陷类型包括：连接部位接触不良（表现为接触点局部高温）、绝缘劣化或缺陷（如套管、互感器，可能呈现整体温升或特定部位异常）、过载或过流（大面积发热）、缺相运行（特定相温升异常）等。通过分析热像特征与设备结构、运行状态的对应关系，可初步判断缺陷类型和位置，为后续处理提供依据。

（三）基于智能算法的故障诊断

随着人工智能技术的发展，基于智能算法的故障诊断方法在红外热像分析中应用日益广泛。这些方法利用机器学习或深度学习模型，自动识别复杂的热像图模式和细微的温度差异。例如，支持向量机（SVM）、决策树、随机森林等可用于分类识别不同类型的缺陷；卷积神经网络（CNN）能够自动提取热像图的空间特征，并通过训练实现对缺陷区域定位和缺陷类型判别的自动化。深度学习模型（如ResNet、LGC-Net等）在处理大规模红外图像数据、识别复杂背景下的微小温差、提高诊断准确率方面展现出显著优势。这些智能算法能够克服传统方法依赖人工经验、易受主观因素影响的缺点，实现更快速、更精准、更自动化的电气设备故障诊断。

结束语

综上所述，红外热成像技术作为一种先进的在线监测与故障诊断手段，在火电厂电气设备状态评估中展现出显著优势。通过对红外热像图的分析处理，能够有效识别电气设备运行中的热缺陷，为故障诊断和状态预测提供可靠依据。研究红外图像处理算法和智能化诊断模型的结合，有助于提高缺陷识别的准确性和自动化水平。未来，随着人工智能、大数据分析等技术的发展，红外热成像诊断技术将更加智能化、精准化，能够实现更早期的故障预警和更精细的状态评估。同时，红外监测数据的深度挖掘与设备全生命周期管理相结合，将进一步提升火电厂电气设备运维的智能化水平和可靠性，为保障电力系统安全稳定运行做出更大贡献。然而，该技术的应用仍需考虑环境因素干扰、标准规范的完善以及与其他检测手段的协同配合等问题，有待进一步研究和优化。

参考文献

- [1] 牛小玲, 刘勇. 探究红外热成像技术在电气设备故障诊断中的应用[J]. 电子测试, 2020(14): 91-92.
- [2] 王成, 刘先锋. 基于物联网技术的智能电气设备在线监测与故障诊断[J]. 信息记录材料, 2023, 24(09): 103-105+108.
- [3] 田少波, 张鹏飞. 红外热成像技术在发电厂大型电机中的应用研究[J]. 电力设备管理, 2024, (21): 195-197.