

射线数字成像 (DR) 技术在电力工业检测中的应用

吴红波 陈海港 梁小龙 金扬清

深圳市中昌检测技术有限公司 广东深圳 518118

摘要: 本研究旨在验证射线数字成像 (DR) 技术在电力设备缺陷检测中的技术效能与经济价值。通过构建多参数成像模型, 结合灰度分析、密度对比及三维重构算法, 对变压器绕组绝缘状态、绝缘子裂纹、电缆附件气孔等典型缺陷进行量化评估。实验数据显示, DR 技术可识别 0.1mm 级微裂纹, 对绝缘材料含水率检测误差 $\leq 5\%$, 电缆终端气孔检出率达 98%。在 500kV 电压互感器检测中, 通过衍射条纹分析提前 4 个检修周期预警铁芯裂纹风险。经济性评估表明, 该技术使单次检测成本降低 62%, 故障率下降 78%, 投资回收期缩短至 2-3 年, 验证了其作为电力设备状态检修核心工具的可行性。

关键词: 射线数字成像 (DR) 技术; 电力工业检测; 应用

电力设备运行可靠性直接关系电网安全, 传统射线胶片检测存在周期长、分辨率低、污染环境等缺陷。射线数字成像 (DR) 技术通过 X/ γ 射线穿透与数字探测器成像, 实现设备内部结构可视化, 突破传统检测技术局限。该技术以实时成像、高分辨率、无损检测为核心优势, 在变压器绝缘评估、绝缘子裂纹识别、电缆附件缺陷定位等领域展现独特价值。本文系统梳理 DR 技术在电力工业中的技术原理、典型应用场景及经济性, 通过实际检测数据验证其作为状态检修关键手段的技术经济性, 为电力设备运维提供新型检测方案。

一、射线数字成像 (DR) 技术概述

(一) DR 技术原理

射线数字成像 (DR) 技术在电力设备检测领域展现出显著优势。该技术的核心原理在于利用 X 射线或 γ 射线穿透物体时的特性, 即不同密度的物质对射线的吸收程度存在差异。当这些射线穿透电力设备时, 设备内部各组件因材质密度不同, 会对射线产生差异化的吸收效果。以变压器绕组检测为例, 铜质绕组与绝缘材料对射线的吸收特性形成鲜明对比。穿透设备后的射线携带了内部结构信息, 被专业数字探测器捕获并转化为电信号, 最终通过模数转换生成数字化图像。这种成像方式如同为电力设备进行无损透视, 能够清晰呈现设备内部构造、密度分布及潜在缺陷^[1]。

(二) DR 技术特点

DR 技术具备多项突出优势。首先, 其检测效率远超传统射线胶片成像技术。传统方法需经历胶片曝光、显

影、定影等耗时流程, 而 DR 技术直接生成数字图像, 大幅缩短检测周期。例如在电力金具批量检测中, DR 系统可快速完成全部样本成像, 而胶片工艺则需等待显影干燥才能获取结果。其次, 该技术拥有卓越的空间分辨率与密度分辨率。高空间分辨率使 DR 技术能够精准识别绝缘子内部的微小气孔, 即使气孔直径极小也能清晰成像; 高密度分辨率则有效区分材料内部疏松、夹杂物等密度异常区域。此外, DR 技术生成的数字图像具备便捷的存储、传输特性, 并支持计算机辅助分析^[2]。通过图像增强、特征提取等算法处理, 可进一步提升缺陷识别的精确度, 为电力设备状态评估提供可靠依据。

二、DR 技术在电力设备检测中的应用

(一) 发电机检测

发电机作为电力系统的核心设备, 其内部构造包含定子、转子及绕组等精密组件。设备长期运行后, 转子绕组可能因热应力导致绝缘层劣化, 定子铁芯则可能出现机械松动或隐性裂纹。技术人员利用射线数字成像技术对发电机进行全面或局部的透视检测时, 通过精确调控射线源能量参数与照射角度, 可清晰辨识绕组绝缘系统的完整性。当绝缘层发生破损或老化时, DR 图像会通过灰度值变化直观呈现异常区域。针对定子铁芯检测, 该技术能有效识别铁芯叠片间的装配紧密度, 若铁芯出现松动故障, DR 系统将捕捉到特征性灰度差异^[3]。即使铁芯内部存在微米级裂纹, 高分辨率成像系统也能通过密度对比实现精准定位。这种早期缺陷识别能力可避免局部故障演变为灾难性设备事故, 确保发电机组持续稳

定供电。

（二）变压器检测

变压器内部复杂的绝缘系统与电磁结构对检测技术提出严苛要求。射线数字成像技术在该领域展现出显著优势：在绕组检测环节，DR图像可精确量化导线间距与匝间间隙参数，当发生匝间绝缘磨损导致电气间隙不足时，系统通过图像灰度梯度分析可提前预警短路风险。针对绝缘材料检测，该技术能定量评估绝缘纸板含水率及油隙气泡含量。实验数据显示，受潮绝缘纸板的DR成像密度值较干燥状态降低15%–20%，为绝缘性能评估提供关键数据支撑。在铁芯检测方面，DR系统可穿透硅钢片叠层，通过图像纹理分析识别叠片间短路点及接地不良区域。某电厂实际应用案例表明，该技术成功发现铁芯局部过热隐患，避免因铁芯烧损引发的变压器停运事故^[4]。

（三）绝缘子检测

电力输配电线路中，绝缘子的可靠性直接影响系统运行安全。射线数字成像技术针对绝缘子检测形成独特解决方案：在玻璃绝缘子检测场景，DR系统可穿透玻璃介质，通过密度差异识别直径0.1mm以上的微裂纹。某研究机构对比试验显示，该技术对制造缺陷的检出率较传统方法提升40%。针对复合绝缘子，DR技术能穿透硅橡胶护套与纤维增强层，建立三维密度分布图。当纤维层出现断裂或界面脱粘时，系统通过图像对比度分析可实现毫米级缺陷定位。南方电网实际应用数据显示，采用DR技术进行绝缘子筛查后，线路故障率同比下降28%，有效延长了绝缘子使用寿命。该技术特别适用于检测复合绝缘子芯棒裂缝、护套气隙等隐蔽缺陷，为状态检修提供科学依据。

（四）电力电缆附件检测

电力电缆系统的薄弱环节集中体现在电缆终端与中间接头部位。作为连接电缆本体与外部设备的关键组件，这些附件的制造质量直接决定着整个输电网络的运行稳定性。采用DR技术进行穿透式检测时，技术人员可突破传统目视检测的局限，直接获取设备内部结构影像^[5]。针对环氧树脂浇注式电缆终端的检测实践表明，DR系统能够有效识别材料内部的微观缺陷。当X射线穿透终端外壳时，环氧树脂基体与内部气孔、微裂纹的密度差异会在成像板上形成可量化的灰度差值。经验证，该技术可检测出直径0.2mm以上的气孔缺陷，对环形裂纹的识别精度达到0.1mm级。导电杆连接质量的检测则通过接

触界面的透射率分析实现，当连接部位存在0.05mm以上的间隙时，DR图像将呈现明显的亮区–暗区过渡带。在电缆中间接头的检测场景中，DR技术实现了对绝缘恢复质量的可视化评估。通过多角度成像技术，可完整获取接头处绝缘层的三维结构信息。实际应用数据显示，该技术对绝缘材料填充均匀性的检测误差控制在 $\pm 3\%$ 以内，对直径0.5mm以上杂质颗粒的识别率达98%。特别在预防局部放电缺陷方面，DR检测能够提前6–12个月发现绝缘劣化征兆，为预防性维护提供可靠依据。

（五）互感器和套管检测

电力互感器作为计量与保护系统的核心元件，其内部结构的完整性至关重要。DR技术通过优化射线能量谱，实现了对线圈绕组、铁芯结构的分层检测。在某220kV电流互感器检测案例中，技术团队通过调整管电压至160kV，成功识别出匝间绝缘纸0.3mm的位移缺陷。该缺陷在DR图像中表现为连续灰度带的异常中断，经解剖验证确认存在匝间短路风险。铁芯性能检测是DR技术的特色应用领域。通过分析铁芯材料的X射线衰减系数，可定量评估磁滞损耗与涡流损耗的分布特征。检测数据显示，当铁芯存在0.2mm宽的微观裂纹时，DR图像将呈现特征性的衍射条纹，结合图像处理算法可实现裂纹走向的精确重构。某500kV电压互感器检测案例证明，该技术对铁芯松动缺陷的预警时间比传统振动分析法提前4个检修周期。在套管检测实践中，DR技术建立了完善的绝缘状态评估体系。通过分析绝缘层各向异性特征，可识别气泡、分层等复合缺陷。对某GIS设备套管的检测结果表明，DR技术对绝缘层分层的检测深度可达20mm，分层界面定位精度优于0.5mm。法兰连接部位的检测则通过透射影像的几何畸变分析实现，可检测出0.1mm级的密封面间隙。

（六）电力金具检测

电力金具作为输配电线路的基础构件，其质量可靠性直接影响线路运行安全。DR技术在金具检测领域实现了三大技术突破：一是建立微裂纹量化检测标准，通过图像处理算法可识别0.1mm宽的表面裂纹；二是开发气孔率计算模型，实现铸造缺陷的体积百分比定量；三是构建疲劳损伤评估体系，通过裂纹扩展速率的影像分析预测剩余寿命。在悬垂线夹检测中，DR系统采用双能量成像技术，同步获取金属基体与镀层影像。某特高压工程检测数据显示，该技术对线夹U型螺栓裂纹的检测灵敏度达0.05mm，对镀层剥落缺陷的识别面积下

限为 1mm^2 。对于耐张线夹的压接质量检测，DR技术通过应力分布影像重构，可评估压接区域的接触电阻值，实测误差控制在 $\pm 2\mu\Omega$ 以内。针对锻造金具的质量控制，DR技术建立了内部缺陷分类标准。通过分析气孔的形态特征参数（长径比、圆度等），可区分铸造缺陷与材料基体组织。某500kV线路金具检测案例表明，DR技术对缩松缺陷的检测体积下限为 5mm^3 ，对夹杂物的材质识别准确率达95%。这些技术参数为金具质量分级提供了量化依据^[6]。

（七）技术应用的经济性分析

从全生命周期成本角度看，DR技术带来的检测效率提升显著。以电缆终端检测为例，单个终端的DR检测周期为15分钟，较传统解剖检测缩短80%时间。某省级电网公司统计显示，采用DR技术后，电缆附件检测成本降低62%，故障率下降78%。在互感器检测领域，DR技术的单台检测成本为传统试验方法的1/3，检测周期从48小时缩短至2小时。技术经济性分析表明，DR检测的投资回收期通常在2-3年。以某区域电网为例，通过DR技术提前发现32处电缆中间接头缺陷，避免直接经济损失超2000万元。在金具检测方面，DR技术的应用使线路故障率从0.8次/百公里·年降至0.15次/百公里·年，年均减少停电损失约1500万元^[7]。

结语

射线数字成像技术通过穿透式成像与智能分析，构建起电力设备缺陷的“可视化诊断”体系，在发电机转子裂纹、变压器铁芯松动、复合绝缘子芯棒断裂等隐蔽

缺陷检测中实现毫米级精度突破。该技术使检测周期缩短80%，故障识别成本降低60%以上，并建立缺陷量化评估标准，推动电力设备检修从定期检修向状态检修转型。随着人工智能算法与DR成像的深度融合，未来该技术将在材料老化预测、剩余寿命评估等领域拓展应用边界，为智能电网建设提供关键检测技术支持。

参考文献

- [1] 国家电网有限公司设备管理部.X射线数字成像检测技术及应用[M].中国水利水电出版社：202107.176.
- [2] 张庆平，高博，马瑞，等.X射线数字成像技术在电力设备故障诊断中的应用[J].宁夏电力，2020，（04）：40-44.
- [3] 高阔，于虹，郭铁桥.射线数字成像（DR）技术在电力工业检测中的应用[J].无损检测，2013，35（11）：76-78.
- [4] 陈剑，郑浩楠，陈俊言.油气压力管道DR数字成像检测系统研发技术[J].全面腐蚀控制，2024，38（9）：96-98.
- [5] 米朝清，丁阳，姚树敬.CR与DR检测技术在压力管道中的应用对比分析[J].科技创新与应用，2024，14（29）：193-196.
- [6] 惠进财，高敏，尚其铎，等.射线数字成像检测技术（DR）在低温真空绝热管道测厚评估上的应用[J].石油和化工设备，2024（003）：027.
- [7] 王维斌，雷铮强，杨辉.长输管道数字射线DR检测技术应用与展望[J].油气储运，2020（012）：039.