

# 电力设备中的变压器运行检修和维护研究

毛燕荣<sup>1</sup> 杜巍<sup>2</sup> 邢雅<sup>1</sup> 杜帅<sup>1</sup> 冯洋<sup>1</sup>

1. 国网宁夏电力有限公司培训中心 宁夏银川 750002

2. 国网宁夏电力有限公司超高压公司 宁夏银川 750011

**摘要：**本文聚焦电力设备核心元件变压器的运行检修与维护技术，目的在于让其运行的安全性以及可靠性得以提升。研究系统梳理了变压器结构原理与状态监测技术基础，随后针对当前面临的关键挑战进行了深入剖析，包括绝缘老化精准评估存在不足、多源监测数据融合分析欠缺以及检修策略优化方面的难题等。结果表明，将智能评估与科学运维管理相互融合，能够使变压器全寿命周期健康管理水平得到显著提升，进而为电网的稳定运行给予技术层面的有力支撑。

**关键词：**电力变压器；运行状态；状态检修；预防性维护；故障诊断

## 引言

作为电网能量转换与传输核心枢纽的电力变压器，供电安全与之运行状态直接相关。在电网规模不断扩大与设备老化加速的状况下，传统检修模式在精准性、经济性面临诸多挑战，探索更为智能高效的运维路径已成为当务之急。基于这样的背景，本文围绕变压器运行检修与维护体系展开研究，借助对电磁学、绝缘技术及智能监测理论的融合，针对设备状态表征与故障机理进行系统分析，着重在状态精准评估与预警技术瓶颈上实现突破，目的在于构建起科学化、数字化的运维决策框架，为电力系统本质安全水平的提升提供理论依据以及实践参考。

## 作者简介：

毛燕荣（1992.03--）女，汉族，甘肃白银人，硕士研究生，助理讲师，主要研究方向：电力系统及其自动化、变电站运行及维护。

杜巍（1992.02--）男，汉族，宁夏银川人，硕士研究生，工程师，主要研究方向：直流输电技术。

邢雅（1989.12--）女，回族，宁夏银川人，硕士研究生，高级讲师，主要研究方向：变电站运行及维护、电气设备带电检测及故障诊断。

杜帅（1992.01--）男，汉族，宁夏中宁人，本科，工程师、高级技师，主要研究方向：配电线路巡检、配网不停电、电力电缆。

冯洋（1987.02--）男，汉族，宁夏银川人，本科，工程师、高级技师，主要研究方向：输变电设备运维及状态检测故障诊断。

## 一、变压器运行、检修与维护的理论基础与技术依据

### （一）变压器基本结构与工作原理

变压器（Transformer）是利用电磁感应的原理来改变交流电压的装置，主要构件是初级线圈、次级线圈和铁芯（磁芯）；主要功能有：电压变换、电流变换、阻抗变换、隔离、稳压（磁饱和变压器）等。绝缘设计采取多层高阻材料如绝缘纸或变压器油，包裹导体防止电势差导致的击穿危险，维持稳定电场分布保障运行安全可靠。冷却系统通过散热片或油循环实现主动散热，持续移走铁损与铜损产生的热量保持适宜工作温度，确保变压器长期性能稳定不会因过热退化。内部结构精密配合电磁与热动力学规律，支撑电力设备的广泛应用场景无间断工作成为现代工业文明的坚实基础。

### （二）变压器运行状态表征参数与监测技术

变压器运行状态的表征与监测技术构成设备健康管理核心维度，电气量监测持续追踪电压、电流及功率因数的实时波动，直观反映绕组与铁芯的电磁负载状况，而油色谱分析则深入解析绝缘油中溶解气体的成分与浓度变化，如同解读设备内部故障的化学密码，揭示过热或放电等潜在隐患。局部放电监测通过捕捉绝缘材料内部微弱的放电信号，精准定位固体绝缘结构的早期缺陷。红外测温技术非接触式扫描设备表面温度场分布，有效识别套管接头过热或冷却系统异常引起的热失衡现象<sup>[1]</sup>。振动监测则持续记录变压器本体及附件在运行中产生的机械振动频谱，细微的振幅与频率偏移往往预示着铁芯松动、绕组变形或冷却风扇轴承磨损等机械状态变化。

## 二、变压器运行检修与维护面临的关键问题

### （一）变压器绝缘老化状态精准评估与剩余寿命预测难题

高分子绝缘材料复杂的劣化过程受电场、温度以及机械振动等多物理场耦合环境影响，老化初期微弱信号极易被常规试验方法忽略。绝缘纸脆化与绝缘油分解产物的累积具有渐进性和不可逆性特征，然而当前评估技术对材料微观结构变化的实时捕捉存在局限，离线试验的离散特性难以反映设备连续运行的真实状态。变压器内部绝缘缺陷的时空分布呈现出高度非均匀性，局部放电信号与油色谱分析数据的映射关系需要突破传统阈值判据的约束建立动态关联模型。剩余寿命预测则需克服劣化速率非线性跃迁的挑战，工程实际运行负荷的周期性波动叠加过电压瞬态冲击造成材料老化加速效应精确量化困难，单纯依赖时间序列数据导致预测结果偏离设备个体的差异化退化轨迹，迫切需要发展融合多源异构信息的状态参量解析体系。

### （二）多源异构监测数据融合分析及故障早期预警有效性不足

当前变压器状态监测已形成电气量、油色谱、局部放电等多维数据体系，但各类数据在采集频率、量纲及时空关联性方面存在显著差异，电气参数秒级变化的动态特性与油色谱数日周期的缓变趋势难以建立有效关联模型，局部放电脉冲信号与红外热像空间分布数据亦缺乏统一解析框架。不同监测手段产生的结构化与非结构化数据尚未形成标准化描述规范，导致特征提取与信息融合过程存在数据孤岛现象，例如振动频谱的机械状态特征难以与溶解气体分析结果进行因果匹配。传统阈值报警模式对跨维度数据协同演变的隐含规律捕捉能力有限，当电气异常、温升趋势与特定气体浓度变化同步出现时，现有系统难以构建多参数耦合的故障演进图谱，制约了复合型缺陷的早期辨识精度。

### （三）检修策略决策亟需优化

变压器检修策略优化的核心在于状态评估体系存在感知盲区，现有监测手段对内部绝缘劣化与机械松动的早期微弱信号辨识精度有限，难以支撑准确的状态检修启动时机判断。传统定期计划检修周期存在刚性约束，无法动态响应实际运行负荷与过电压冲击等变量因素导致的设备健康度波动变化，过度检修与维修不足现象难以避免。成本效益平衡的关键制约因素是设备停运损失估算具有高度场景依赖性，不同电压等级变压器对应的电网重要性差异显著，在有限维修资源约束下无法形成普适性优先级评估框架<sup>[2]</sup>。检修资源调配效率受到现场

试验数据与历史故障记录脱节影响，多源信息缺乏深度整合机制使得检修决策偏重经验直觉，与设备真实老化轨迹的契合度有待提升，最终制约电力设备资产管理精细化水平持续进步。

### （四）现场检修维护人员技能水平与标准化作业保障挑战

变压器检修现场存在人员技能梯度与知识结构差异，部分资深人员依赖传统经验判断而新一代技术人员更倾向数字化工具，这种认知代际差异导致对同一故障现象的诊断逻辑与处置方式可能产生分歧。标准化作业规程在实际执行中面临复杂工况适应性挑战，例如绝缘油处理工艺的温湿度控制要求与现场环境突变时的动态调整空间不足，规程条款的书面理解与实际操作中的经验判断需要更高层次的融合。随着智能诊断技术迭代加速，检修人员对新型监测设备数据解读能力与故障溯源分析方法的学习进度，难以完全匹配技术更新速度，特别是涉及局部放电图谱模式识别与振动频谱特征解析等专业领域时存在认知滞后。

## 三、提升变压器运行检修与维护效能的核心策略

### （一）深化基于多维度状态监测的智能诊断与评估技术应用

多维度状态监测系统构建为智能诊断体系的前置基础，整合嵌入式温度传感器网络、高频振动捕获装置及油色谱在线分析仪，实现对热点温度分布规律、机械松动频谱特征以及乙炔氢气浓度梯度的持续追踪，这些工具生成的海量时序数据在运行中揭示设备老化动态趋势。诊断算法框架依托深度卷积神经网络处理多元异构信号流，通过自适应特征提取学习异常模式关联性降低噪声干扰影响，模型训练样本包含历史故障案例数据增强泛化能力以适应不同服役环境下的特征漂移挑战<sup>[3]</sup>。健康状态评估引擎基于诊断输出解析劣化累积程度，量化绝缘脆性指数与机械疲劳度等关键指标阈值如表1所示驱动维护决策精准化，结合负载波动曲线动态更新评估结果支撑检修安排优化避免无效介入。维护行动调度模块整合评估数据与电网运行约束，制定基于风险优先级的现场检查任务清单协调资源分配，确保检修活动聚焦于高影响力部件如绕组连接点强化全生命周期管理连续性。

### （二）构建数据驱动的变压器健康状态画像与风险预警模型

构建数据驱动的变压器健康状态画像需整合电气量、油色谱、振动等多维监测数据流，设计基于时间序列关联的特征融合引擎，例如将绕组热点温度趋势与糠醛含量变化建立老化关联模型，同时耦合局部放电脉冲相位

表1 变压器智能诊断监测参数基准与创新监测手段

| 监测参数   | 正常范围基准                         | 创新监测手段            |
|--------|--------------------------------|-------------------|
| 热点温度分布 | 峰值值 $\leq 110^{\circ}\text{C}$ | 分布式光纤传感器实时多点扫描    |
| 乙炔气体浓度 | 体积分数 $\leq 10\ \mu\text{L/L}$  | 微流体芯片集成电化学检测单元    |
| 高频振动幅度 | 加速度 $\leq 0.5\ \text{m/s}^2$   | 纳米级MEMS振动阵列协同滤波分析 |
| 局部放电强度 | 脉冲数量 $\leq 50\ \text{pC}$      | 超高频天线组耦合模式识别算法    |
| 油中水分含量 | 饱和值 $\leq 30\ \text{ppm}$      | 微波谐振腔非侵入式吸湿监测技术   |

分布谱图与红外热像空间梯度数据形成绝缘缺陷三维映射。健康画像的核心在于创建分层评估指标体系，底层特征层提取电流谐波畸变率、振动主频偏移量等原生参数，中间模型层运用图神经网络构建油中溶解气体比值与铁芯接地电流的隐性关系网络，顶层应用层生成包含机械稳定性指数与绝缘退化系数的综合健康度评分。风险预警模型开发需采用多模态深度学习架构，长短期记忆网络处理油色谱数据的缓变趋势，卷积神经网络分析局部放电脉冲序列的时频特征，通过注意力机制动态加权不同监测源的贡献度，当电气异常、温升加速与特定气体增长形成跨维度耦合事件时触发预警。预警阈值优化引入动态自适应机制，依据设备历史运行数据和家族缺陷案例持续修正报警临界值，例如结合环境湿度变化自动调整套管介损报警阈值，参考负荷波动周期优化绕组温度预警灵敏度。

### （三）优化检修策略与决策支持系统

检修策略转型的核心在于状态评估数据驱动维护时机选择，实时监测绕组热点温升曲线与局部放电量累积趋势指导检修窗口动态调整，当关键劣化指标跨越设定阈值时触发专项检查替代常规周期计划行动。风险优先级模型整合设备健康状态评分与电网运行影响因子构建量化决策矩阵，综合分析绝缘老化速率预测结果和高负荷季节分布制定差异化维护序列，推动资源集中于薄弱部位干预。预防性维护协同机制安排状态检修间隙的基础保养项目，例如散热器冲洗保养结合油枕硅胶更换作业在非高峰负荷期穿插进行，利用带电检测窗口避免设备停运损失。决策支持系统内嵌专家经验规则库校验状态评估结果可靠性，利用机器学习迭代优化不同电压等级变压器的基准阈值设置动态适应运行环境变迁，辅以三维可视化平台展示维护历史与风险热力图提高调度决策透明度<sup>[4]</sup>。动态策略引擎根据新录入的油色谱数据或振动频谱变化自动更新设备风险排序推动资源弹性调配，

持续验证决策有效性驱动资产管理精进，维持电力网络整体运行稳定局面形成良性运维闭环。

### （四）推进检修维护标准化、智能化装备应用与人员技能提升

推进检修维护标准化需建立覆盖全流程的动态知识库，该知识库集成设备技术规范、家族缺陷案例及现场处置经验，例如将绕组直流电阻测试的接线端子温度补偿方法编入标准化作业卡，同时规定不同容量变压器绝缘油微水含量测试的环境湿度修正系数。运维体系同步集成智能化装备应用，配置具备油色谱在线分析模块的移动式检修平台，该平台搭载0.1微米级颗粒过滤精度的真空滤油机组，结合实时介损监测功能自动调节油处理温度与真空度参数；部署智能红外诊断仪内置热像特征库，可自动识别套管将军帽过热或散热片堵塞导致的异常温升模式，其诊断逻辑基于设备结构热传导特性建模。人员技能提升机制构建三维培训体系，基础层强化标准化作业规程的虚拟现实演练，例如在模拟环境中训练有载分接开关触头更换的力矩控制精度；专业层开展智能装备深度应用培训，重点培养振动频谱时域分析与局部放电相位分辨图谱的联合诊断能。

### 结语

以多维度状态监测为基础的智能评估方法，能对绝缘劣化等潜在风险实现有效识别，健康画像凭借数据驱动为精准预测剩余寿命开拓了新视角。决策机制以状态检修为主导、预防性维护相协同，经优化后可使资源利用效率得到显著提升。电力企业宜加速推进智能诊断技术落地实施，强化检修标准化工作以及人员技能培训事宜，构建起人机协同的运维生态。未来应进一步对人工智能在故障溯源、寿命预测方面的深度应用展开探索，推动电力设备运维朝着全息感知与自主决策的方向不断演进。

### 参考文献

- [1] 陈湘安. 电力设备中的变压器运行检修和维护研究[J]. 中国设备工程, 2024, (S2): 224-226.
- [2] 刘情宏, 胡海涛, 伊力哈木·力提甫. 变电站一次设备检修及试验策略研究[J]. 电工技术, 2024, (S1): 287-289.
- [3] 梁颜武. 浅谈电力系统设备维护与检修应注意的问题[J]. 中国设备工程, 2024, (07): 53-55.
- [4] 任彦柳, 王泽阳. 10kV电力设备运维检修问题及对策探查[J]. 中国设备工程, 2024, (13): 158-160.