

炼油装置电气设备故障处理与预防策略研究

吴时孔

洛阳三隆安装检修有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524000

DOI:10.61369/ME.2025030011

摘 要： 炼油装置电气设备的稳定运行是保障炼油生产安全与效率的关键。本文系统分析了炼油装置中变压器、电动机及配电系统等核心设备的典型故障类型（如短路、过载、绝缘劣化），揭示了内部材料退化与外部环境腐蚀、振动等多因素耦合的故障机理。结合传统检测手段（红外热成像、绝缘电阻测试）与智能诊断技术（人工智能预测模型、物联网在线监测），提出了冗余设计、环境适应性改进、基于状态监测的预防性维护等多层次优化策略，并构建分级应急预案与快速修复技术以降低故障影响。研究成果为炼油企业电气设备的全生命周期管理提供理论支撑，推动智能化运维转型，提升生产可靠性与经济效益。

关 键 词： 炼油装置；电气设备故障诊断；预防优化策略

Research on Fault Handling and Prevention Strategies for Electrical Equipment in Oil Refining Units

Wu Shikong

Luoyang Sanlong Installation and Maintenance Co., Ltd. Zhanjiang Branch, Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract： The stable operation of electrical equipment in oil refining units is crucial for ensuring production safety and efficiency. This study systematically analyzes typical fault types (e.g., short circuits, overloads, and insulation degradation) in core equipment such as transformers, motors, and power distribution systems. It reveals the fault mechanisms caused by the coupling of internal material degradation and external environmental factors (e.g., corrosion and vibration). By integrating traditional detection methods (infrared thermography, insulation resistance testing) with intelligent diagnostic technologies (AI prediction models, IoT-based online monitoring), multi-level optimization strategies are proposed, including redundancy design, environmental adaptability improvements, and condition monitoring-based preventive maintenance. Hierarchical emergency plans and rapid repair technologies are established to mitigate fault impacts. The research outcomes provide theoretical support for the full lifecycle management of electrical equipment in refineries, promote intelligent operation and maintenance transformation, and enhance production reliability and economic benefits.

Keywords： oil refining units; electrical equipment fault diagnosis; prevention and optimization strategies

引言

《“十四五”全国清洁生产推行方案》强调石化行业绿色安全发展，炼油电气设备在恶劣环境下可靠性至关重要。本文分析设备故障类型与成因，结合传统检测与人工智能、物联网技术，构建多维度诊断方法。提出设计优化、运维管理、应急响应等策略，降低故障率，提升恢复能力，支撑炼油企业电气设备全生命周期管理，满足智能化生产需求。

一、炼油装置电气设备概述

（一）炼油装置电气设备组成与运行特点

炼油装置电气系统由变压器、电动机和配电系统等核心设备组成，保障工艺流程连续性和安全性。变压器适应高负荷波动和谐波干扰；电动机在恶劣环境中运行，要求高绝缘性能和散热效

率；配电系统需冗余设计和实时监测。这些设备高集成化、环境依赖性强、连续运行，稳定性和可靠性直接影响生产效率和安全性。事故信息，如电网故障引起的跳闸，是需实时监视并立即处理的重要信息。

（二）典型故障类型与危害分析

炼油装置电气设备的典型故障包括短路、过载、绝缘劣化

及接地故障等^[1]。短路故障多由设备绝缘击穿或线路接触异常引发，可导致瞬时电流激增，造成设备损毁甚至火灾；过载故障常因设计冗余不足或负载突变超出设备耐受极限，引发过热加速元件老化；绝缘劣化受环境腐蚀与热应力累积影响，降低设备耐压能力，诱发漏电风险；接地故障则可能破坏系统电位平衡，威胁操作人员安全并干扰控制信号传输^[2]。此类故障不仅造成非计划停产和经济损失，还可能引发连锁反应，加剧设备损坏与安全事故风险。



图 1.1 工业控制面板

二、电气设备故障机理分析

（一）内部因素导致的故障机理

电气设备故障通常由材料退化和结构缺陷引起，如老化、绝缘劣化、接触不良等，这些因素可能逐步削弱设备性能，最终导致突发性故障，威胁系统稳定性^[3]。事故信息，由于电网故障、设备软硬件故障等引起断路器跳闸（包括非人工操作的跳闸）、保护及安全自动装置出口信号以及影响安全运行的其他信号，是需实时监视、立即处理的重要信息，对保障供电系统的安全运行至关重要。

（二）外部环境与操作因素影响

外部环境与操作因素显著加速电气设备失效。高温环境加剧绝缘材料热老化，缩短设备寿命；腐蚀性气体（如 H_2S 、 SO_2 ）侵蚀金属部件与密封结构，导致导体锈蚀或绝缘失效；机械振动引起接线松动或部件位移，破坏电气连接的可靠性；人为操作失误（如误触保护装置、超负荷运行）则直接干扰设备正常运行^[4]。环境与操作的协同作用往往诱发多重故障模式，例如高温与振动叠加可加速绝缘层开裂，而腐蚀与误操作结合可能触发连锁性系统崩溃。

三、电气设备故障诊断方法研究

（一）传统诊断技术

1. 感官检查与仪器检测法

感官检查通过人工观察、听觉和触觉判断设备状态，是故障

初筛的基础；仪器检测法利用红外热成像仪定位过热点，超声波探测器识别声发射信号，振动分析仪评估机械磨损^[5]。两者结合可弥补单一方法的不足，如红外发现肉眼不可见的绝缘劣化，振动数据验证机械隐性缺陷，形成多维度诊断依据。

2. 电气参数分析法

电气参数分析法通过量化检测关键指标评估设备健康状态。绝缘电阻测试通过阻值判断绝缘层完整性，阻值下降预示绝缘劣化；局部放电检测通过捕捉微放电信号识别早期绝缘缺陷；介质损耗角正切（ $\tan \delta$ ）测试反映绝缘材料能量损耗特性，其值升高表明绝缘老化或杂质侵入^[6-7]。这些方法通过量化参数建立故障阈值，为预防性维护提供精准判据。

（二）智能诊断技术

1. 基于人工智能的故障预测模型

人工智能技术通过构建数据驱动模型实现故障早期预警与分类。神经网络通过多层非线性映射提取设备运行数据的深层特征，自适应学习故障模式与正常状态的差异；支持向量机（SVM）基于统计学习理论构建高维空间超平面，有效区分复杂工况下的故障类别。此类模型利用历史数据（如电流波形、振动频谱）进行训练，结合特征工程与超参数优化，可预测设备剩余寿命或识别潜在故障类型，例如基于 LSTM 网络的电机绕组过热预测，或 SVM 分类器对局部放电模式的精准辨识。人工智能模型具备处理非线性关系与噪声干扰的优势，但需依赖高质量标注数据与算力支撑。

2. 物联网（IoT）与在线监测系统应用

物联网技术通过分布式传感器网络、边缘计算与云平台构建实时监测体系。传感器节点采集设备温度、振动、电流等参数，经边缘网关预处理后上传至云端；在线监测系统整合时序数据库与数字孪生模型，实现设备状态可视化与异常阈值动态调整。例如，无线温度传感器实时追踪变压器绕组热点，结合自适应滤波算法消除环境干扰；振动监测模块通过特征频率分析识别轴承磨损阶段。此类系统支持远程诊断与决策，减少人工巡检盲区，并通过历史数据挖掘优化维护周期，显著提升故障响应速度与诊断精度。

四、电气设备故障预防与优化策略

（一）设备设计与选型优化

1. 冗余设计与可靠性提升

冗余设计通过配置备用设备或并联回路降低单点故障风险，例如采用双电源供电的变压器组或分段母线结构，确保局部故障时系统持续供电。可靠性提升需结合可靠性工程理论，基于故障模式与影响分析（FMEA）优化设备选型，筛选高耐受性元件（如耐高温导线、低损耗铁芯），并通过智能切换逻辑实现故障回路的快速隔离与备用设备无缝投切。此类设计兼顾经济性与安全性，例如在炼油装置中，冗余配电网络可避免关键设备停机导致的连锁停产，而基于数字孪生的动态可靠性评估模型可实时优化冗余配置策略。

2. 环境适应性改进

对于长周期运行的电气设备，因无法按期执行预防性维护，企业设备管理部门需组织技术评估。结合环境适应性改进，如防腐和防爆设计，确保设备稳定运行。这有助于及时调整维护策略，保障设备性能，避免故障风险，从而维护生产安全和效率。

（二）运维管理策略

1. 基于状态监测的预防性维护

基于状态监测的预防性维护通过实时采集设备运行参数（如温度、振动、电流谐波）构建健康评估模型，结合历史数据趋势分析预测潜在故障窗口。传感器网络与边缘计算技术实现数据高频采集与初步特征提取，云端平台利用机器学习算法（如随机森林、聚类分析）识别异常模式并生成维护建议^[8-9]。例如，通过振动频谱特征预测电机轴承剩余寿命，或基于绝缘电阻变化率制定变压器检修周期。此类策略从定期维护转向按需维护，减少非必要停机，同时避免故障扩大化，显著提升维护效率与资源利用率。

2. 标准化操作与定期维护规程

标准化操作通过制定设备启停、负载调节等流程规范，约束操作行为以降低人为失误概率。定期维护规程明确清洁、紧固、润滑及校准等任务的周期与执行标准，例如每季度检测配电柜接触电阻，年度更换电机润滑脂。规程优化依赖故障统计与设备劣化规律分析，如通过绝缘老化曲线调整耐压测试频次，或依据环境腐蚀速率缩短密封件更换周期。文档化管理结合数字化工单系统确保规程执行可追溯，并通过操作人员培训强化规程依从性，系统性降低误操作与维护疏漏风险。

（三）应急处理与故障快速恢复

1. 分级应急预案制定

分级应急预案依据故障严重程度与影响范围构建差异化响应机制。一级预案针对全厂级故障（如主变压器爆炸），明确紧急停机、人员疏散与消防联动流程；二级预案聚焦区域级故障（如配电柜短路），设定故障隔离、备用电源切换与抢修优先级；三

级预案处理设备级故障（如电机过载），规范临时旁路运行与备件更换策略。预案动态更新依赖历史故障数据库与仿真推演，结合定期演练验证响应时效性。例如，炼油厂可通过数字孪生模拟变压器油温失控场景，优化冷却系统启动阈值与操作序列，确保应急措施与实时工况精准匹配。

2. 故障隔离与快速修复技术

故障隔离技术通过智能断路器、故障指示器与拓扑分析定位故障点，最小化停电范围。快速修复采用模块化设计（如插拔式母线槽）、预置冗余接口及带电作业工具，缩短维修时长^[10]。例如，配电系统短路时，基于差动保护的速断装置可瞬时切断故障支路，同时自动切换至备用线路；电机绕组烧损后，利用快速接线端子与预制绕组模块实现2小时内更换恢复。智能诊断终端（如便携式局放检测仪）辅助现场精准定位隐性缺陷，结合移动维修平台（如配备机械臂的工程车）提升高危环境下的抢修效率，显著降低非计划停机损失。

五、总结与展望

炼油装置电气设备的稳定运行是保障炼油生产安全与效率的核心。本研究系统分析了电气设备的故障类型、机理及诊断方法，并提出多层次预防与优化策略。故障机理研究表明，内部材料退化与外部环境腐蚀、振动等因素协同作用，导致设备性能劣化；诊断方法中，传统手段（如红外检测）与智能技术（AI模型、IoT监测）结合，显著提升故障识别精度。预防策略方面，冗余设计、环境适应性改进及基于状态的预防性维护可有效降低故障率，分级应急预案与快速修复技术则减少故障影响范围与恢复时间。然而，研究对实际复杂工况的适应性仍需验证，且智能技术的算力与数据依赖可能限制其推广。未来可深化数字孪生技术在动态可靠性评估中的应用，探索新型耐腐蚀材料与自修复技术，并推动多源数据融合与轻量化算法开发，以进一步提升炼油装置电气系统的智能化与抗风险能力。

参考文献

- [1] 陈让曲. 石油化工装置安全设计讨论——Ⅲ. 自动控制安全设计 [J]. 炼油技术与工程, 2016(7):3.
- [2] 袁冬胜. 工厂电气设备维护与管理要点分析 [J]. 轻松学电脑, 2020, 000(007):P.1-1.
- [3] 马智涛. 炼化企业电气管理及质量控制 [J]. 化工设计通讯, 2018, 44(2): 1.
- [4] 凌标灿. 电气设备故障谐波检测在矿山设备维护中的应用 [C]//2012中国矿山安全技术装备与管理大会论文集. 2012.
- [5] 史强, 朱文胜, 胡洋, 等. 红外热成像技术在炼油行业的应用 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2013(1):6.
- [6] 杨宁. 强化炼油厂电气设备管理的策略及落实 [J]. 中国化工贸易, 2015, 000(028):254-254.
- [7] 杨懋渠, 徐刚. 炼化建设项目电气专业常见问题分析与处理 [J]. 石油工程建设, 2014, 40(5):4.
- [8] 张磊, 陶媛, 李树生. ERP系统在电气设备管理中的应用 [J]. 炼油与化工, 2010(04):61-63.
- [9] 王开文. 石化企业电气设备管理中的电力故障分析 [J]. 装备维修技术, 2021(2):0336-0336.
- [10] 王金丹. 炼油厂设备腐蚀分析及维修处理方法 [J]. 中文科技期刊数据库(文摘版) 工程技术, 2022(1):107-110.