

# Safety risk analysis and control in low voltage electrical equipment maintenance

Chao Liu Cheng Liu

Weinan operation area of Xi'an oil and gas transportation branch of Northwest Company of National Petroleum and natural gas pipeline network Group Co., Ltd., Weinan, Shaanxi, 710021, China

## Abstract

low voltage electrical equipment is the key component of industrial production, building electromechanical and public facilities power supply and distribution system. Its operation safety is affected by multi-source coupling factors, showing the characteristics of recessive degradation and sudden failure. The research shows that contact arc erosion, thermal fatigue of conductive path and damp heat attenuation of insulating medium are the main risk chains in low-voltage system, and their evolution is a cumulative process from micro interface degradation to macro fault. Under the traditional experiential maintenance mode, the degradation behavior is difficult to identify early, leading to major accidents such as protection failure, local carbonization, insulation penetration and even busbar flashover. Based on the perspective of failure mechanism, this paper analyzes the system attributes, environmental sensitivity and organizational misunderstandings in the maintenance of low-voltage equipment, and puts forward the risk control strategy based on parameter trend monitoring, digital twin prediction and condition based maintenance. It is expected to provide theoretical support and engineering path for the safety management of low-voltage electrical equipment.

## Keywords

low voltage electrical equipment; Maintenance; Safety risks; Contact degradation

# 低压电气设备维护中的安全风险分析与控制

刘超 刘程

国家石油天然气管网集团有限公司西北公司西安输油气分公司渭南作业区, 中国·陕西 渭南 710021

## 摘 要

低压电气设备是工业生产、建筑机电和公共设施供配电系统的关键组成, 其运行安全性受多源耦合因素影响, 呈现隐性退化与突发失效并存的特征。研究表明, 触点电弧灼蚀、导电路径热疲劳与绝缘介质湿热衰减是低压系统中最主要的风险链条, 其演化表现为从微观界面劣化到宏观故障的累积式过程。在传统经验式维保模式下, 退化行为难以早期识别, 导致保护拒动、局部碳化、绝缘穿透甚至母排闪络等重大事故。本文基于失效机理视角, 对低压设备维护中的系统属性、环境敏感性、组织性误区进行了剖析, 并提出基于参数趋势监测、数字孪生预测与状态维修的风险控制策略。期望能为低压电气设备安全治理提供理论支撑与工程路径。

## 关键词

低压电气设备; 维护; 安全风险; 触点退化

## 1 引言

低压电气设备广泛应用于工业生产、建筑机电系统以及公共基础设施, 其运行状态直接关系到供配电系统的安全连续性。但是实践中传统维护模式长期依赖人工经验, 对隐性危险识别能力不足, 导致维护行为呈现“发现故障—排除故障—恢复运行”的被动式特征。在高负荷、非均匀负载与多扰动环境中, 低压电气设备的绝缘衰退、电弧灼蚀、接触

疲劳与热积累逐步累积, 不易在早期暴露, 从而在运行过程中形成高概率的安全事故链条。

## 2 低压电气设备维护的体系特征与风险来源

### 2.1 低压电气设备的系统属性

低压电气设备具备典型的系统耦合特征, 其运行不是单一元件的功能表现, 而是由导体、开关电器、保护组件与环境介质共同构成的能量传递链<sup>[1]</sup>。设备在负载转移、瞬时冲击、环境波动与电磁扰动等诸多因素的作用下, 其电气性能呈现动态变化, 而这种变化在不同元件之间相互作用, 构成多级风险放大机制。以配电柜为例, 母排与断路器之间的电流分布并非静态, 随着相线不平衡、设备老化与导体截面变化, 其载流路径逐步向局部集中, 进而形成热应力集聚。

【作者简介】刘超(1988—), 男, 中国陕西西安人, 本科, 电工技师, 从事天然气场站110kV变电所运行维护, 防爆电气技术应用与维护研究。

当局部温升超过材料耐限后,母排表面氧化膜发生物理剥落,表面导电性提高,使温度进一步提升,从而导致绝缘材料提前进入熔融或碳化区间,形成不可逆的热劣化。当机构弹簧预紧力下降时,触头闭合力不足,使接触区实际导电面积减少,即使电流不超过额定值,也可能产生高密度局部电弧,从而形成电蚀微坑并加速热退化。同样,接触器在频繁启停中承受高重复冲击,过渡电阻呈波动状态,其可靠性不再由设备铭牌参数决定,而由其实际运行环境、介质污染与操作频率共同决定<sup>[2]</sup>。因此,低压电气设备并非一个静态的功能载体,而是处于持续退化的动力演化体系,其维护策略必须围绕多物理场耦合机理与长期演化趋势展开,而不能停留于外观检查与单次测试。

## 2.2 维护行为的结构性缺陷

低压电气设备维护普遍存在结构性失效,这种失效不是单一操作错误,而是由知识结构、组织逻辑与维护工具的局限共同导致的系统性问题。从操作思维上看,维护人员习惯依赖静态、外显的事故征兆,而忽视隐性退化路径。然而在接触循环达到一定次数后,该膜层使电弧归一化路径偏移,会导致触点局部熔融,从而在短时间内形成灾难性失效。因此,基于“看得见的异常”进行的维护方式天然存在信息盲区,使退化演化在无干预条件下持续累积。

维护周期管理方式是另一项关键缺陷。传统维保采用时间驱动策略,将维护视为固定频次的强制性操作,却未考虑不同设备负载历史、使用频率与环境条件差异。结果导致高负载回路发生早期故障,而低负载回路持续被过度维护,造成资源浪费。状态不匹配的维护策略不仅降低安全性,也弱化运维人员对退化机理的敏感性,使设备行为被误解为偶发事件,而非系统性演化结果。

更深层的问题来自组织结构与信息链条断裂。许多工业企业维保执行由不同部门分段负责,检修记录分散在纸质档案、技师记忆或第三方维保报告中,缺乏统一数据平台。设备退化行为无法被横向比较,也无法形成纵向趋势分析,从而导致维护行为“原地踏步”。同一设备在多次维修后,实际退化曲线、微弧发生频次或端接温漂速率无法被再现与验证,使运维只能围绕“经验—故障—修复”的循环,在高风险环境中不断试错。甚至存在典型隐患,即外包维护团队目标偏向“短期恢复运行”,而非“长期降低失效风险”,其维护方案往往聚焦于症状,而对结构性退化因素视而不见,形成维护偏差<sup>[3]</sup>。

## 3 低压电气设备典型失效机理与危险链条

### 3.1 触点与导电路径的失效机制

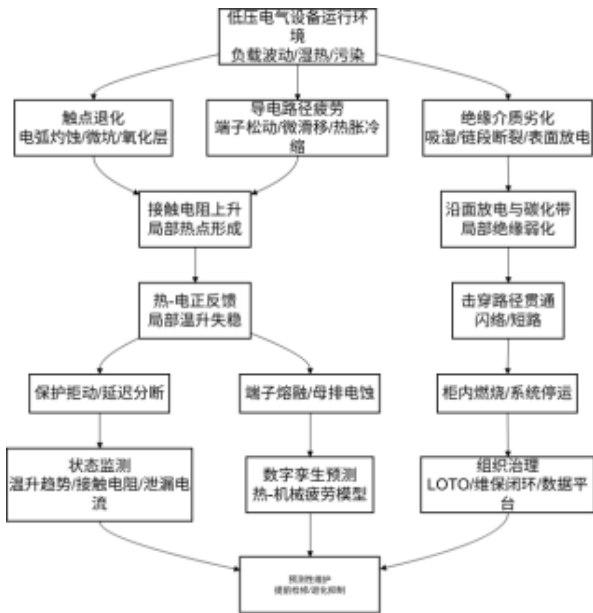
低压设备触点的失效是电弧能量冲击、机械疲劳与界面化学劣化的长期叠加结果,其演化过程呈现出从微观退化到宏观破坏的渐进路径。在断路器、接触器等控制设备的通断过程中,触头间的电弧可达到数千摄氏度高温,这种瞬态

高能量导致触点表层熔融、喷溅与蒸发,在随后的冷却阶段形成疏松的金属层或微坑结构,逐步降低接触界面实际有效面积。随着开合次数增加,表层氧化膜与电弧碳化物积聚会显著提升接触电阻。电阻的增加并非线性增长,而是呈“若干循环—突跳式上升”的阈值特征,在热-电耦合下产生局部高温,使触点表面在短时间内被焊合或烧蚀。当这一过程发生在过载或短路分断期间,保护动作时间被拉长或拒动,导致下游回路暴露于无保护状态,从而放大设备运行风险。与触头类似,导体端子与母排连接处的失效往往源于微动疲劳与预紧力退化。频繁的电弧波动导致导体的周期性热胀冷缩,一旦螺栓或压接点未能保持稳定夹紧压力,接触面微距滑移将逐步减少实际载流截面,引发接触电阻指数增长。此类变化初期表现为轻微温升,外观与红外监测均难以捕捉,但随着局部热聚集强化,绝缘包覆进入热解阶段并产生导电碳化通道,最终从“热点”演化为火点。一旦热失稳触发生临界温度,导线端子处将产生连续氧化与碳化链式反应,进而演变为熔断、母排闪络甚至柜内燃烧事故。触点与导电路径的失效具有典型的延迟特征,退化过程多以亚表层积累方式存在,而最终破坏则表现为短周期内灾难性跳变。该危险链条通常从接触退化起始,经由局部电阻增长、温度非线性上升、绝缘局域击穿,最终演化为系统级故障,其风险具有极强隐蔽性与不可逆性<sup>[4]</sup>。

### 3.2 绝缘介质的退化与穿透风险

绝缘材料失效是一种缓慢、累积且与环境高度敏感的退化过程,其本质是绝缘介质的分子链、微孔结构与表面物理形态在热、电、湿三类外部应力下发生协同变化,从而导致绝缘能力持续衰减<sup>[5]</sup>。聚合物绝缘材料在长期热应力作用下发生链段断裂与交联结构失稳,其介电常数降低、击穿强度下降,而材料表面微裂缝与孔隙进一步扩大,使局部电场分布趋于集中。当环境湿度升高或存在温差凝露时,绝缘体微孔内形成水膜,该液膜显著降低绝缘表面电阻,使泄漏电流沿材料表层形成连续导电路径,降低 creepage distance 有效值,从而触发沿面放电行为。低压配电柜底部、潮湿管井或未安装加热除湿装置的电缆箱是典型高风险场景,绝缘劣化会先呈现为低密度表面放电,随后在微火花热侵蚀作用下形成粉末化碳化带。当碳化路径贯通并形成连续导电岛链时,材料击穿以突发形式发生,这种“累积—突穿”特征导致传统巡检难以提前捕捉危险信号。更为关键的是,绝缘介质失效往往与运行工况共同放大,特别是在负载波动、高频启停或局部发热条件下,绝缘体表面温度超过其玻璃化转变点后将进入加速退化区间,其内部分子结构退化与电弧侵蚀互为因果,加速形成贯穿性破坏。一旦穿透路径形成,局部放电将迅速演化为闪络甚至跨相短路,使系统进入爆炸式失效阶段,进而导致故障扩大为配电系统全面停运。因此,绝缘退化不是孤立的材料问题,而是介电性能衰减、湿热环境失控与运行应力叠加后的复杂物理过程,其危险链条

遵循“介质弱化—表面导电—局部放电—碳化贯通—瞬时击穿”的演化逻辑，是低压系统中最具破坏性的潜在失效模式之一。



本图1从低压电气设备的运行环境入手，将触点退化、导电路径疲劳与绝缘介质劣化视为三条平行但可交叉放大的危险起点

## 4 低压电气设备维护中的安全风险识别方法与技术策略路径

### 4.1 低压电气设备维护中的安全风险识别方法

低压设备维护必须从单点检查转向参数趋势分析。在常规维保中，使用红外测温或接触测温只能识别显著温升，但热退化过程往往在温差不足 $10^{\circ}\text{C}$ 时已经发生。因此，应采用连续监测与相关分析的方法，将温度、接触电阻与负载波动关联起来，构成动态退化曲线。数字孪生技术通过建立设备几何结构、材料属性、负载行为与环境因素的多尺度模型，将设备状态映射为虚拟空间中的“健康指数”。在低压系统中，数字孪生模型包含三个核心子集：电气行为模型、热传导模型与机械疲劳模型。通过实时监测数据输入，可对设备内部退化行为进行预测。维护模式应从传统预防式转向状态维修与预测性维护。在状态维修策略中，维护决策依据设备实时状态指标，如接触电阻、温升指数与绝缘泄放值。

当指标超出预设范围时执行维修，可减少冗余维护并精确匹配设备实际退化阶段。预测性维护进一步利用退化模型，通过历史数据训练获得设备老化曲线，可在设备仍处于功能完好阶段进行干预，从而避免高成本的紧急停产。维护不应只关注电气安全，还应考虑人因风险与组织风险。例如在断电检修时存在残余电荷积累、误触带电部件或二次合闸风险。应在维护流程中引入锁定挂牌（LOTO）制度，确保操作链可追溯，可验证并具备第三方确认。

### 4.2 案例分析与工程验证

在某大型制造企业的配电系统中，低压断路器触点退化导致保护拒动，其退化过程经过6个月演化。企业引入在线监测系统后，通过历史温升曲线发现触点温差随负载增加呈非线性增长，且温升峰值随环境湿度变化呈现滞后特征。数字孪生模型推断触点氧化层厚度趋于临界值，最终在预警后24小时进行更换，避免了生产线停产与设备烧毁。某商业综合体弱电配电柜长期位于潮湿机房内，绝缘因凝露形成沿面放电路径。维护人员采用传统巡检未发现异常，直到一次夜间突发短路引发系统宕机。事故后对绝缘材料表面微观结构分析表明，局部放电在表面形成贯穿路径，呈粉末状碳化痕迹。通过增加除湿系统与表面防护涂层，绝缘失效率降低70%以上，验证了结构性防护的重要性。

## 5 结语

低压电气设备维护不是单纯的修理活动，而是涵盖设备机理、运行数据与维护组织的复杂系统工程。触点退化、绝缘老化与导电路径疲劳是导致低压设备失效的核心因素，其退化模式呈隐性积累与阈值突变特征。传统基于经验与周期的维保方式难以应对多源耦合风险，应以状态监测、退化建模与预测维护为核心构建现代化维护体系。

### 参考文献

- [1] 姜伟强,曲家奎,林宇.低压电气设备运行故障与维护研究[J/OL].中国科技期刊数据库 工业A,2025(3)[2025-03-25].
- [2] 黄光攀,张林鎔,任峰,等.基于单源性评估的低压电气设备红外与可见光图像配准[J].红外与激光工程,2025,54(6):337-350.
- [3] 黄文盼.低压电气设备运行故障与维护研究[C].人工智能与工程发展学术研讨会论文集,2025:278-281.
- [4] 何曦.浅谈“城轨低压电气设备维护”课程项目式教学改革[J].科技风,2023,(25):127-129.
- [5] 杨振杰.低压电气设备绝缘性能提升技术[J].电气时代,2025,(10):99-101.