

电子专用设备常见电气故障分析与预防性维护策略研究

霍玉珍

湖南省武冈市融媒体中心 湖南 邵阳 422400

摘要: 电子专用设备电气故障涉及电源、线路、开关及负载等多环节, 本文从电子专用设备常见电气故障入手, 分析了其故障成因, 涵盖环境侵蚀、操作不当及维护缺失, 并针对其预防性维护进行了讨论, 提出了以全生命周期管理为核心, 通过FMEA分析识别高风险部件, 结合振动分析、红外热成像及电气参数监测等技术手段实现状态感知的策略, 旨在为电子专用设备可靠性提升提供系统性解决方案。

关键词: 电子专用设备; 常见电气故障; 预防性维护; 策略

引言

电子专用设备作为工业生产的核心载体, 其电气系统稳定性直接影响生产效率与产品质量。传统“故障后维修”模式易引发非计划停机、安全风险及隐性成本累积, 而预防性维护通过全周期管控与技术预判, 可显著降低故障概率。因此, 深入对电子专用设备常见电气故障分析与预防性维护策略的研究基于这样的现实意义。

1 常见电气故障类型与机理分析

1.1 电源系统故障

(1) 输入电源质量是引发故障的首要因素。电网中存在大量非线性负载, 如变频器、中频炉等设备运行时产生的谐波电流会通过供电线路反向注入电源系统, 导致电压波形畸变, 使电源模块需承受远高于额定值的电压应力, 长期运行下电解电容等储能元件的等效串联电阻增大, 容量衰减加速, 最终失去滤波稳压功能。雷击过电压通过输电线路侵入电源系统时, 其瞬态高能量会直接击穿电源模块的防雷器件或输入整流桥堆, 即使未造成立即失效, 也会在半导体器件内部形成隐性损伤, 降低其耐压等级, 为后续故障埋下隐患。(2) 电源模块自身老化是故障的内在根源, 电解电容作为电源模块的核心元件, 其性能随使用时间延长逐渐退化, 电解液干涸导致电容值下降, 等效串联电阻增大, 在高频开关电源中无法有效滤除纹波电流, 引发输出电压波动。功率器件如IGBT、MOSFET等因长期承受高电压、大电流及开关损耗, 结温波动导致热应力疲劳, 焊点虚焊或键合线断裂风险上升, 最终表现为电源输出中断或过载保护频繁触发。散热设计缺陷会加剧模块老化进程, 若散热风扇转速下降、散热片积尘或导热硅脂失效, 会导致功率器件结温超过设计阈值, 加速半导体材料性能劣化, 形成恶性循环。(3) 接地系统缺陷是故障的隐蔽诱因, 共地干扰源于设备内不同电气模块的接地路径存在电位

差, 当高频开关电源的开关噪声通过接地线耦合至控制单元时, 可能引发PLC程序跑飞或传感器信号失真。地环路则因多点接地形成闭合回路, 在交变磁场作用下产生感应电流, 该电流叠加至电源输出端会形成低频纹波, 干扰电机驱动器的电流环控制, 导致电机运行抖动或定位偏差。

1.2 控制单元故障

(1) 电磁干扰是引发控制单元故障的首要外部因素, 静电放电(ESD)通过人体、设备或工具接触控制单元接口时, 瞬间释放的高压脉冲可能击穿芯片输入输出引脚的保护二极管, 导致逻辑电路状态翻转或存储器数据改写。射频干扰则源于周围无线通信设备、变频器或高频加热装置产生的电磁场, 通过空间辐射或电源线传导耦合至控制单元内部, 在高速数字电路中引发信号跳变, 使通信协议解析错误或程序执行流偏移。(2) 存储器数据丢失是控制单元的内在隐患, 控制单元中用于存储程序、参数及运行日志的存储器依赖电池供电维持数据, 当备用电池电压低于阈值时, RAM区数据会因掉电而清零, 导致设备启动后无法读取工艺参数或进入故障模式。强振动环境会加速存储器芯片与电路板的焊点疲劳, 在长期机械应力作用下形成微裂纹, 最终引发接触不良或数据传输错误, 尤其在移动式设备或振动工况中更为突出。(3) 散热设计缺陷会直接削弱控制单元的可靠性, 微处理器、FPGA等核心芯片在高速运算时产生大量热量, 若散热片导热效率不足、散热风扇转速下降或机箱通风口堵塞, 会导致芯片结温超过设计极限, 引发时钟信号漂移、逻辑门延迟增加或存储器读写错误。高温环境还会加速电解电容等元件的电解液挥发, 降低电源模块的滤波效果, 进一步加剧控制单元的供电波动, 形成热-电耦合失效模式。

1.3 驱动系统故障

(1) 编码器信号干扰是引发驱动系统故障的关键外部因素,编码器作为电机位置反馈的核心元件,其输出的脉冲信号或串行通信数据需通过线缆传输至驱动器进行闭环控制^[1]。若编码器线缆未采用屏蔽双绞线或屏蔽层接地不良,周围电磁场会通过空间耦合在信号线上产生感应电动势,导致脉冲计数错误或通信数据丢帧。在长距离传输场景中,信号衰减与干扰叠加效应更为显著,驱动器接收到的位置信息与实际电机状态存在偏差,进而引发控制算法误调节,使电机输出转矩波动或定位超调,最终表现为抖动或位置偏差。(2) 功率器件过热是驱动系统故障的内在隐患,IGBT模块作为驱动系统的核心功率元件,在高频开关状态下需同时承受高电压、大电流及开关损耗,其结温直接决定器件寿命与系统可靠性。若散热系统设计存在缺陷,如散热片导热系数不足、散热风扇转速下降或热管内部工质挥发,会导致IGBT模块结温持续升高。(3) 参数设置错误会直接削弱驱动系统的适应能力,加速时间设置过短会使电机在短时间内达到目标转速,导致转矩需求骤增、电流过载,同时因机械惯性引发振动与冲击,加剧电机抖动与传动部件磨损。负载匹配不当则表现为驱动器额定功率与实际负载需求不匹配,若负载惯量远大于驱动器设计值,电机在启动、制动过程中需消耗更多能量克服惯性,易引发过流报警;若负载过轻,控制环路增益过高,系统对干扰的敏感度提升,易导致位置控制不稳定,产生超调或振荡。

2 预防性维护策略体系构建

2.1 基于风险的维护优先级划分

在电子专用设备维护管理中,基于风险的优先级划分是提升系统可靠性与维护效率的核心策略,其核心在于通过量化故障风险确定维护资源的分配方向。其中,FMEA分析作为风险识别的关键工具,通过系统化梳理设备各部件的潜在故障模式、分析其对设备功能及生产流程的影响程度,并综合评估故障发生的可能性与检测难度,最终以危害度RPN值作为风险量化指标,为维护优先级划分提供客观依据。RPN值的计算融合了故障严重程度、发生频度及可探测度三方面因素,其中严重程度反映故障对设备安全、产品质量或生产连续性的破坏程度,发生频度体现部件在既定工况下的失效概率,可探测度则衡量现有监测手段对故障早期征兆的识别能力,三者乘积越大表明风险越高,需优先投入维护资源。基于FMEA分析结果,维护等级划分为三个层级以实现差异化管理^[2]。A类部件对应高风险等级,其故障可能导致设备停机、产品报废或人员安全风险,需采用预防性维护策

略,通过每日点检实时监控运行状态,重点检查温度、振动、电流等关键参数,及时发现异常趋势。B类部件属于中风险等级,其故障通常引发设备性能下降或生产效率降低,但不会造成严重后果,维护策略以计划性检查与校准为主,每周检查侧重于外观完整性、润滑状态及简单功能测试,年度校准则针对控制参数、传动精度等核心指标进行精细化调整,恢复部件设计性能,延长使用寿命。C类部件为低风险等级,其故障对设备整体运行影响较小且易于修复,采用故障后维修模式,即仅在部件失效时进行更换或修复,避免过度维护导致的资源浪费,同时通过定期巡检确保故障可被及时察觉,防止风险扩散。

2.2 状态监测与预测性维护技术

一方面,在线监测技术以非接触或嵌入式方式持续采集设备状态信息,其中红外热成像通过检测电气接点、功率器件等部位的红外辐射能量分布,可直观定位局部过热异常,尤其适用于高压开关柜、驱动模块等封闭空间的温度监控,及时发现接触不良、过载或散热失效等故障前兆;局部放电监测针对高压电缆、变压器等绝缘系统,通过检测电晕放电、沿面放电产生的电磁脉冲或超声波信号,量化评估绝缘老化程度,在绝缘击穿前预警潜在风险;振动分析则聚焦电机、减速机等旋转部件,通过频谱分析提取特征频率成分,识别轴承磨损、齿轮啮合异常或转子不平衡等机械故障,结合时域波形分析可进一步判断故障严重程度与发展趋势。另一方面,离线检测技术作为在线监测的补充,通过定期或抽检方式获取设备深层状态信息。绝缘电阻测试通过施加直流高压测量电气绝缘材料的电阻值,评估绝缘性能是否因受潮、老化或污染而下降,是预防性试验的核心项目,尤其适用于电机绕组、电容器等对绝缘要求严苛的部件。接触电阻测量针对端子排、继电器触点等导电连接部位,通过微欧计检测接触面的电阻变化,识别氧化、松动或烧蚀导致的接触不良,避免因接触电阻增大引发局部过热或信号传输中断^[3]。参数漂移分析基于设备历史运行数据构建正常行为模型,通过机器学习算法持续比对实时参数与模型预测值的偏差,当偏差超过阈值时触发故障预警,尤其适用于控制单元、传感器等部件的隐性故障识别,可提前数周甚至数月预测元件性能退化趋势。

2.3 维护标准化与流程优化

(1) 制定标准化操作程序(SOP)是维护标准化的基础,针对电源系统维护需明确电容更换的完整流程,包括断电、放电、电容状态检测、新旧电容参数匹配、

焊接或安装工艺要求及上电测试等关键步骤，同时规范接地电阻测试方法，涵盖测试点选择、仪器校准、接触电阻消除及结果判定标准，确保电源系统始终处于安全可靠的运行状态。（2）维护记录管理是流程优化的重要支撑，电子化维护日志通过数字化工具替代传统纸质记录，强制要求维护人员按预设模板填写故障现象描述、处理措施实施过程、更换部件型号及序列号等关键信息，并关联设备历史维护数据，形成完整的设备健康档案，既便于后续维护参考，也为故障根因分析提供数据基础^[4]。（3）故障知识库建设通过积累典型故障案例与解决方案，将隐性经验转化为显性知识，采用结构化存储方式对故障现象、触发条件、诊断方法、修复步骤及预防措施进行分类标注，支持按设备类型、故障模式或部件名称等多维度检索，使维护人员能够快速定位相似案例并借鉴成熟方案，缩短故障排除时间，同时通过定期更新知识库内容，持续优化维护策略，形成“实践-总结-提升”的良性循环。

2.4 环境控制与操作规范

（1）环境管理聚焦于设备运行所需的外部条件，温湿度控制通过在电气柜内加装工业空调或除湿机，将环境温度维持在设备允许的工作范围内，避免高温导致功率器件热老化加速或低温引发冷凝水短路，同时控制湿度防止金属部件锈蚀或绝缘材料吸潮后绝缘性能下降^[5]。防尘设计采用正压防尘技术，通过向电气柜内持续输送过滤后的洁净空气形成微正压环境，阻止外部灰尘侵入，同时定期检查并更换密封条，确保柜体密封性，减少灰尘在电路板、散热片等部位的沉积，降低因灰尘堆积引发的短路或散热不良风险。（2）操作规范则从人员行为层面规范设备使用与维护流程，禁止带电插拔是防止静电

放电（ESD）损伤的核心要求，操作人员在插拔电路板、连接器或传感器时必须先断开设备电源，并通过佩戴防静电手环、使用防静电工具等措施释放人体静电，避免因静电击穿导致集成电路或敏感元件失效。规范参数修改流程通过双人确认制确保关键参数调整的准确性，操作人员修改设备控制参数前需提交书面申请，经技术主管审核后由两名维护人员共同执行，修改过程中实时记录参数变化，修改完成后通过功能测试验证参数有效性，防止因参数错误引发设备运行异常或安全事故。

结语

综上所述，电子专用设备电气故障的预防性维护是技术集成与管理创新的结合体，其核心在于通过数据驱动实现维护策略的精准化与动态化。未来，随着物联网、边缘计算与数字孪生技术的融合应用，预防性维护将向智能化、预测性方向演进，通过构建设备健康指数模型与自适应维护阈值，实现从“经验驱动”到“数据驱动”的跨越。

参考文献

- [1]何义华,许仁安.超声技术在电子专用设备中的应用研究[J].电声技术,2022,46(04):116-118.
- [2]刘世刚.电气自动化设备的故障诊断与维护策略研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025,(1):053-056.
- [3]黄子沛.湖北省电子专用设备行业数字化转型路径探索[J].现代工业经济和信息化,2025,15(7):58-60.
- [4]杨龙鑫.人工智能驱动的电子设备故障诊断技术研究[J].中国电子商情,2026,(1):136-138.
- [5]贾博文,曾洁琪,史彦清,等.电子信息领域专用设备保障能力研究[J].今日科苑,2023,(6):43-51.