

电动执行机构动力回路与控制回路故障检修研究

李佳荫

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘要: 电动执行机构动力回路与控制回路协同运作,任一环节故障均会经由耦合通道传导至对方,形成交叉传递。本文从回路结构与运行特征切入,剖析电动机绕组、减速机构、电源保护等动力回路典型故障的失效机理,并揭示信号传输、位置反馈、功率驱动等控制回路的异常成因。在此基础上,构建涵盖系统性诊断、信号追踪与联合调试的故障排查技术体系,提出动力与控制回路的标准化检修工艺及长效维护策略,为执行机构故障定位与可靠修复提供技术支撑。

关键词: 电动执行机构; 动力回路; 控制回路; 故障检修; 耦合诊断

引言: 电动执行机构广泛应用于工业自动化控制场景,动力回路负责能量转换与机械驱动,控制回路承担指令接收与闭环调控,二者通过功率驱动级紧密耦合。设备长期处于启停频繁、负载多变的工况下,电动机绕组绝缘老化、减速机构磨损、信号链路漂移等问题交替出现,故障类型涵盖电气与机械两大类。深入分析回路故障的失效机理并建立系统化的排查与检修方法,对保障执行机构稳定运行、降低非计划停机概率具有工程实用价值。

1 电动执行机构回路结构与运行特征

1.1 动力回路的组成与功能特性

电动执行机构动力回路作为设备动力输出的核心载体,承接整套装置的动力传输与机械驱动任务,所有机械动作的输出均依托该回路稳定工况实现。回路整体结构紧凑且联动性强,各部件协同配合保障动力输出的连续性与稳定性,是设备稳定作业的基础保障。动力回路承担电动执行机构的能量转换与机械驱动职能,由电动机、减速齿轮组、制动器及电源供电单元构成完整的动力传输链。电动机将电能转化为机械转矩,经多级减速机构放大后驱动阀杆或挡板完成开关动作^[1]。回路中的过载保护与限位开关配合工作,保障执行机构在额定工况范围内稳定运转。动力回路对供电电压的稳定性与电流的连续性有较高依赖,电源波动会直接影响输出转矩与动作速度。

1.2 控制回路的信号链路与逻辑关系

控制回路以接收上位指令信号为起点,经过信号调理、逻辑判断与功率放大环节,最终驱动动力回路执行相应动作。开度反馈信号与指令信号的比较构成闭环控制的基础,偏差信号经调节器运算后输出至功率驱动级。控制回路内部包含就地/远程切换逻辑、联锁保护逻

辑以及故障自诊断逻辑,各逻辑单元相互配合完成执行机构的精确位置控制与状态监控。

1.3 动力回路与控制回路的交互耦合关系

动力回路与控制回路并非独立运行,二者通过功率驱动级建立紧密的信号与能量耦合。控制回路输出的驱动信号直接决定动力回路的通断状态与运转方向,动力回路的负载变化又通过电流反馈影响控制回路的调节输出。任一回路出现异常都会经由耦合通道传导至另一回路,形成故障交叉传递。理解这种交互关系是开展故障定位与检修作业的前提条件。

1.4 回路运行中的典型应力与老化特征

电动执行机构长期处于启停频繁、负载多变的运行环境中,动力回路的电动机绕组绝缘持续承受热应力与电应力的交替作用,减速机构齿轮啮合面磨损逐步加深。控制回路中的电子元器件在温湿度交变环境下参数容易发生漂移,接插件触点因反复插拔产生氧化与松动。这些应力与老化特征构成故障萌生的物质基础,决定了检修工作需要重点关注的薄弱环节。

2 电动执行机构回路典型故障类型与失效机理

2.1 电动机绕组故障的形成与识别

电动机作为动力回路核心换能部件,长期持续运行会产生持续性热损耗,绝缘结构长期处于疲劳状态,极易逐步产生各类电气故障。绕组故障具备渐进发展特性,初期仅出现参数微弱偏移,持续恶化后会直接造成设备停机失效。电动机绕组长期过载运行或散热不良会导致绝缘层加速老化,绝缘电阻持续下降直至发生匝间短路或对地击穿^[2]。绕组局部过热会使漆包线绝缘碳化,碳化路径扩大后引发相间短路,电动机出现异常振动与噪声。诊断时通过测量三相绕组直流电阻的平衡性判断匝间短路,通过绝缘电阻测试仪检测对地绝缘状态,结

合空载电流的不平衡程度综合判定绕组损坏等级。

2.2 减速机构机械故障的检测手段

减速机构承担动力减速与转矩放大功能,长期承受交变负载冲击,机械磨损与结构损耗无法完全规避,是动力回路机械故障的高发区域。机械故障会直接削弱动力输出精度,引发设备动作偏差与运行不稳等问题。减速齿轮组承受持续交变载荷,齿轮齿面出现点蚀、剥落与断齿是最常见的机械故障形式。蜗轮蜗杆副因润滑不足会产生严重磨损,导致传动间隙增大、输出转矩下降。制动器弹簧疲劳或摩擦片磨损会造成制动失效,执行机构出现关不严或滑移现象。检测时依靠振动频谱分析捕捉齿轮啮合频率的异常分量,通过手动盘车感受传动间隙与卡滞点,结合开度反馈与实际阀位的偏差判断机械传动是否失效。

2.3 电源与过载保护回路的异常排查

电源与保护回路为动力设备提供稳定电能输入与安全防护屏障,回路运行状态直接决定整套动力系统的启停安全性与运行稳定性。各类电气器件性能衰减都会破坏供电与保护体系的完整性,诱发设备运行异常。供电电压偏低或缺相会导致电动机无法正常启动或运行中堵转,过载保护器频繁动作则说明回路存在过电流问题。熔断器熔断、接触器触点烧蚀、热继电器整定值漂移都会造成动力回路供电中断或保护失灵。排查时从电源侧逐级向负载侧测量电压与电流,确认各保护元件的动作状态与整定参数是否匹配,定位供电链路中的断点或异常节点。

2.4 动力回路故障的系统性诊断流程

动力回路故障类型涵盖电气故障与机械故障两大类,故障表象存在重叠特征,单一检测方式难以精准定位故障根源。标准化的系统性诊断流程可以规避排查疏漏,提升故障定位的精准度与检修效率。动力回路故障诊断遵循从电源到负载、从电气到机械的逐级排查逻辑。先确认供电电压与相序是否正常,再检测电动机绝缘与绕组状态,随后检查接触器、继电器等控制元件的动作可靠性,最后验证减速机构与制动器的机械性能。整个诊断过程需要借助万用表、绝缘电阻测试仪、振动检测仪等工具,将测量数据与正常运行参数进行比对,逐步缩小故障范围直至锁定故障点。

3 动力回路与控制回路故障排查技术体系

3.1 指令信号传输与调理环节故障

信号传输与调理环节是控制指令传递的核心通道,信号传输的完整性与精准度,直接决定执行机构的调控精度。工业环境的电磁干扰与器件老化,会持续影响信

号链路的运行状态,诱发各类信号异常问题。上位系统下发的控制指令经电缆传输至执行机构端子后,需要经过信号调理电路转换为控制回路可识别的信号格式^[3]。电缆芯线断裂、屏蔽层接地不良会引入电磁干扰,导致指令信号失真或丢失。调理电路中的运算放大器漂移、滤波电容老化会改变信号增益与带宽特性,使控制精度下降。诊断时通过示波器观测端子处信号波形的幅值与波形完整性,对比标准信号模板判断调理环节是否正常。

3.2 位置反馈与比较环节的偏差故障

位置反馈环节搭建设备动作状态的回传通道,为闭环调控提供精准数据支撑,是保障设备精准停位、稳定运行的关键单元。反馈链路出现偏差会直接造成调控失准,引发设备振荡、偏移等运行问题。开度反馈信号是控制回路实现闭环调节的关键输入,电位器磨损、反馈电缆接触不良或信号调理板故障都会导致反馈值偏离实际位置。指令信号与反馈信号的比较器输出偏差为零时执行机构应停止动作,若比较环节出现偏移,执行机构会出现振荡或停位不准。诊断时手动操作执行机构全程行程,记录各位置的反馈信号值与实际开度的对应关系,绘制偏差曲线定位反馈链路的故障区段。

3.3 功率驱动与逻辑控制环节的异常

功率驱动与逻辑控制环节承接信号运算与动力驱动的衔接工作,负责指令落地与动作管控,是控制回路的核心执行单元。该环节器件损坏或逻辑错乱,会直接导致设备拒动、误动等严重运行故障。功率驱动级将控制信号放大至足以驱动电动机运转的电流等级,驱动管或继电器损坏会导致电动机无法正转、反转或制动。逻辑控制板上的就地/远程切换继电器、联锁保护继电器触点粘连或释放不良会造成控制逻辑混乱,执行机构出现误动或拒动。诊断时逐一测试各逻辑继电器的吸合与释放状态,测量驱动级输出端的电压与电流波形,确认功率放大链路的通断与极性是否正确。

3.4 控制回路故障的信号追踪诊断策略

控制回路故障多体现为信号畸变、中断或偏移,多数隐性故障无明显外观特征,仅能通过信号参数变化判定异常状态。针对性的信号追踪策略可以精准排查隐蔽故障,解决常规检测难以识别的间歇性异常问题。控制回路故障诊断采用信号注入与逐级追踪相结合的方式。从指令输入端注入标准信号,沿信号链路逐级测量各节点的波形与电平,对比正常状态下的参数找出信号中断或畸变的位置。对于间歇性故障,借助数据记录仪捕捉故障发生瞬间的信号快照,分析异常波形的特征频率与持续时间。整个追踪过程需要熟悉控制回路的信号流向

与各节点的标准参数,避免因测量点选取不当而遗漏隐蔽故障。

4 回路故障修复工艺与长效检修维护策略

4.1 动力回路故障检修的操作规范

动力回路涵盖电气换能与机械传动多重结构,检修作业涉及电气拆装、机械拆解与复位装配多道工序,作业规范性直接决定修复质量与设备后续运行稳定性。严格遵循标准化操作规范可以规避二次损伤,保障检修后设备性能达标。电动机绕组故障需拆下电动机后进行绝缘处理或重绕作业,检修时严格控制绕线张力与绝缘包扎层数,确保修复后绝缘电阻与空载电流恢复至正常范围。减速机构检修需要整体拆卸齿轮箱,逐一检查齿面磨损程度,更换点蚀超限的齿轮与磨损超差的轴承,重新调整啮合间隙与接触斑点^[4]。制动器检修重点检查弹簧弹力与摩擦片厚度,弹力不足的弹簧整体更换,摩擦片磨损至铆钉头时必须成对更换。检修完成后进行空载与负载试运行,确认动作平稳、转矩充足、制动可靠。

4.2 控制回路故障检修的操作规范

控制回路以精密电子器件与信号链路为主,器件精度敏感度高,不规范操作极易造成板卡损伤、参数偏移等二次问题。检修作业需遵循精细化工序标准,保障信号链路完整、逻辑运算精准、调控参数合规。控制回路检修以板卡级更换与接插件级处理为主。信号调理板故障时整板更换并重新标定增益与零点,避免单点维修带来的参数不一致问题。电缆故障需整段更换,新电缆敷设时远离动力电缆并做好屏蔽接地。接插件触点氧化时用专用清洁剂处理,弹性不足的插针整组更换。逻辑继电器触点烧蚀严重时整只更换,更换后需验证联锁逻辑的正确性。检修后进行全行程开度校准,确认反馈信号与实际位置的偏差在允许范围内。

4.3 动力与控制回路联合调试方法

单一回路检修完成仅能保障独立工况正常,两套回路的耦合匹配状态会直接影响设备整体调控效果。联合调试可以排查回路间交互异常,修复检修后出现的匹配偏差,还原设备最优运行状态。单独检修完成后需要开展动力回路与控制回路的联合调试,验证两个回路之间的耦合关系是否恢复正常。联合调试从开度校准开始,逐步验证全行程控制精度、就地/远程切换功能、联锁

保护动作逻辑以及故障报警信号的正确性。调试过程中记录各测试点的参数数据,与检修前的故障数据进行对照,确认故障已彻底消除。对于修复后的执行机构需进行不少于三个完整启停循环的连续运行考核,观察有无异常振动、过热或误动现象。

4.4 检修质量控制与运行维护建议

检修质量管控是杜绝故障复发、延长设备服役周期的重要手段,完整的质控体系可以规范检修流程、统一作业标准,从源头降低故障复发概率。常态化维护则能够持续维持设备运行性能,弱化工况损耗带来的性能衰减。检修质量控制贯穿故障诊断、拆解修复、装配调试全过程,每一步骤均需填写检修记录并由专人签字确认。关键零部件的更换需使用与原装规格一致的备品,严禁以次充好或混用不同批次的配件。运行维护方面建议建立执行机构定期巡检制度,重点监测电动机电流、减速箱温度、控制回路信号质量等运行参数的变化趋势。对易损件设定更换周期,在故障发生前完成预防性更换,降低非计划停机的概率。

结束语

电动执行机构动力回路与控制回路的故障检修是一项系统性工作,故障诊断需遵循从电源到负载、从电气到机械的逐级排查逻辑,信号追踪与联合调试则是精准定位隐蔽故障的关键手段。动力回路检修侧重绕组绝缘处理与机械传动修复,控制回路检修强调板卡级更换与信号链路校准,两套回路的联合调试能够验证耦合关系是否恢复正常。持续完善检修工艺并落实预防性维护制度,可以有效延缓设备性能衰减,延长执行机构服役周期。

参考文献

- [1]乔磊.基于智能型嵌入式电动执行机构控制器设计[J].电工技术,2023(2):107-108,122.
- [2]林志.智能阀门电动执行机构控制系统建模及总体方案设计[J].科技创新,2024(11):37-40.
- [3]马文彬,王知明,周满福,等.基于R290的电动汽车二次回路热系统控制策略及能耗研究[J].制冷与空调,2025,25(11):69-75.
- [4]张存寿,张成海.炼化企业变频电动机控制回路技术改造[J].石油化工设备,2023,52(6):80-85.