

智能电动执行机构驱动板件电路分析与维护实践

李佳荫 赵欣欣 高文磊 刘春宇 熊 康
中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘 要：智能电动执行机构驱动板件是整机控制系统的硬件中枢，电路运行状态直接决定执行精度与动作可靠性。本文从驱动板件模块化电路架构出发，逐层拆解主控处理、功率驱动、信号采集、通信交互及电源保护各功能电路的工作原理与信号链路逻辑。在此基础上，剖析功率器件老化、信号链路干扰、电源波动及主控异常等典型故障的成因与失效机理，并从常规检修流程、各模块专项维护、器件更换工艺、环境防护措施及常态化巡检五个维度，系统梳理驱动板件的维护实践方案，为现场运维提供可执行的技术参照。

关键词：智能电动执行机构；驱动板件；电路分析；故障机理；维护实践

引言：智能电动执行机构广泛应用于工业过程控制，驱动板件作为电气控制的硬件核心，承担信号运算、功率转换与状态监测等多重职能。板件内部主控、驱动、采样、通讯及保护电路协同配合，任何模块出现异常都会影响设备整体动作精度与运行安全。然而工业现场电磁环境复杂、工况负荷波动大，驱动板件面临多类电路失效风险。围绕各功能电路的工作原理与故障机理展开分析，并构建系统化维护体系，对保障执行机构长期可靠运行具有实际意义。

1 智能电动执行机构驱动板件硬件电路架构

1.1 驱动板件整体电路组成结构

智能电动执行机构驱动板件采用模块化电路布局设计，不同功能电路分区布设。标准化硬件排布划分独立功能区域，各区域承载专属电气作业，搭建完整电气控制链路^[1]。电路架构匹配执行机构驱动控制工况，完成电气信号接收传输、数据运算、动力输出及运行状态监测。板件内部电路单元规整布设，保障电气信号平稳传输，支撑执行机构调节与启闭电气作业。

1.2 主控处理电路模块构成

主控处理电路模块以可编程处理芯片为核心，搭配多类外围电气元件组成完整硬件电路。核心处理器件对接外部控制信号与设备内部反馈信号，完成电气数据的解析与运算。外围电气元件优化电路运行工况，保障核心芯片持续稳定运行。电路识别各类控制指令，结合实时电气参数输出调控信号，协调板件各功能电路的工作状态，保障执行机构控制逻辑精准运行。

1.3 功率驱动电路模块布局

功率驱动电路模块实现电气信号的功率转换，硬件布局适配大功率运行工况。电路区域集中布置功率开关器件、限流元件与输出接线端子，兼顾散热性能与线

路规整度。硬件布局沿动力传输路径规整规划，完成低压控制信号向大功率动力信号的层级转换。科学的布设方式削弱大功率运行产生的电气干扰，保障动力输出稳定，匹配执行机构各类作业工况的驱动需求。

1.4 信号采集与反馈电路组成

信号采集与反馈电路搭载传感适配元件、信号调理元件与专用传输线路，采集执行机构运行过程中的位置、电流及工况状态参数。电路对原始采集信号做滤波、放大等调理处理，转换为主控电路可识别的标准化电气信号。调理后的有效信号持续输送至主控处理模块，为设备电气闭环控制提供数据支撑。

1.5 电源适配与保护电路结构

电源适配与保护电路为驱动板件各功能模块提供供电支持，适配外部输入电压的动态波动。电路集成稳压、降压与滤波元器件，对外部输入电源做净化处理与电压转换，输出匹配各电路模块的额定工作电压。保护元器件内嵌于电源传输通路，针对电路异常电气状态做出阻断与调节处理，规避电压电流异常状态损坏板件元器件，保障电路整体运行安全。

2 智能电动执行机构驱动板件核心电路原理分析

2.1 主控单元电路工作原理

主控单元电路以嵌入式处理芯片为核心载体，完成电气数据运算与控制指令输出，承担驱动板件整体控制的核心职能。外部控制信号接入电路通路后导入芯片内部运算单元，内置程序自动完成各类信号指令的解析与甄别。外围配置的阻容元件与晶振器件，能够搭建稳定可靠的时钟运行体系，保障数据运算过程精准有序，维持设备整体运行节奏^[2]。电路持续接收前端调理模块输出的各类工况数据，依托内置控制程序完成逻辑推演，输出适配设备实时工况的控制指令，以此调节后端驱动电

路与通讯电路的整体运行状态。

2.2 电机驱动电路运行机制

电机驱动电路通过功率开关器件的通断切换,完成电能形态的转换与稳定输送,满足执行机构电机持续运转的供电需求。电路接收主控单元下发的脉冲控制信号,根据实时电平变化调整功率器件导通状态,灵活更改电机绕组的供电时序与通电时长。电路集成的限流结构能够规整供电波形,有效弱化电能传输过程中出现的波形畸变问题。电能经过电路多级转换后输出适配动力,匹配电机不同运行阶段的扭矩与转速需求,支撑执行机构灵活切换正向运转与反向运转的工作状态。

2.3 采样信号调理电路原理

采样信号调理电路对接设备现场采集的原始电气信号,针对信号微弱、波形杂乱的问题开展标准化优化处理。电路设置多级滤波结构,有效滤除工业运行环境中滋生的高频干扰杂波,剔除信号中掺杂的无效电气分量。幅值偏低的原始信号可通过放大电路完成幅值提升,参数偏移的信号可借助校准电路完成精准修正。经过系列处理后的电气信号,能够匹配主控芯片的信号识别阈值,让控制单元精准读取各类工况数据,为设备电气闭环控制提供稳定可靠的数据支撑。

2.4 通讯交互电路工作逻辑

通讯交互电路构建驱动板件与上位控制系统之间的数据传输通道,实现设备运行参数与控制指令的双向互通。电路搭载专用通讯芯片,完成板件电气信号与工业总线信号的相互转换,契合主流工业总线的协议传输规范。上位系统下发的远程控制指令,可通过电路转换后输送至主控单元,板件采集整理的设备运行数据,也能通过电路编码后上传至控制系统。电路配备的隔离结构可以隔绝总线侧产生的电气干扰,保障数据传输过程纯净稳定,避免数据丢失或偏移。

2.5 硬件防护电路触发机制

硬件防护电路全程监测板件供电链路与动力输出链路的电气状态,针对各类异常电气参数做出高效防护响应。电路内置高精度检测元件,持续捕捉线路运行过程中的电压与电流波动,一旦运行参数脱离预设安全区间,即刻启动硬件闭锁防护动作。防护模块可直接切断异常工况对应的供电通路,阻止异常电能持续冲击后端电气负载。纯硬件触发机制无需依托程序运算,大幅缩短防护响应时长,有效降低过载、过压等异常工况对板件元器件与电机本体造成的损耗与损伤。

3 智能电动执行机构驱动板件故障成因与电路失效机理

3.1 功率电路器件老化与失效机理

功率电路长期承载大电流负载运转,器件内部半导体结构会产生持续性的性能衰减。高频次的通断作业会让功率器件内部晶格结构产生疲劳形变,造成导通损耗逐步上升。长期温升累积会加速封装材料与内部焊层的性能退化,引发导通效率持续下降^[3]。器件载流能力会随运行时长逐步衰减,导通压降出现持续性偏移,电路动力输出稳定性持续下降。老化进程持续推进后,功率器件会丧失正常开关能力,造成动力电路通路中断或持续性导通,引发电路功能性失效。

3.2 信号电路干扰与链路异常成因

工业现场复杂电磁环境会对微弱信号电路形成持续性电磁扰动,破坏信号传输的稳定性。空间弥散电磁能量会耦合进入信号传输线路,造成有效信号波形畸变、幅值偏移。线路布设间距不合理会引发线路间的串扰影响,打乱信号传输的完整节奏。长期运行积累的线路氧化与接触不良问题,会提升信号链路传输阻抗,造成信号传输衰减。干扰问题持续叠加会造成采样数据失真、指令传输错位,引发信号链路持续性的运行异常。

3.3 电源电路波动与器件损坏机制

工业供电网络的电压浮动与瞬态脉冲冲击,会持续作用于电源电路各类稳压与滤波器件。瞬时电压冲击会击穿器件内部微观结构,造成绝缘性能退化。持续性电压偏移会让器件长期偏离额定工作区间,加速电气性能损耗。滤波电容长期受电压波动影响会出现容量衰减、漏电流增大等问题,电源净化能力持续弱化。供电异常反复作用会彻底损毁电源核心器件,造成输出电压不稳、供电中断,引发整套板件供电体系运行瘫痪。

3.4 主控电路运行异常内在成因

主控电路依赖稳定的时钟频率与电气参数维持有序运行,电气参数偏移会直接扰乱运算逻辑。晶振器件性能衰减会造成运行时钟频率偏移,破坏数据运算与指令输出的时序精度。外围阻容参数出现漂移偏差后,会改变电路阈值标准,造成信号识别出现偏差。长期带电运行产生的微电流漏电,会干扰芯片内部运算单元工作状态。各类细微电气偏差不断累积,会造成指令解析错误、数据运算错乱,引发主控电路运行紊乱。

3.5 板件线路及接口故障机理

驱动板件长期处于工业工况环境,线路铜箔与插接接口会持续受环境因素影响。空气湿度与粉尘堆积会引发线路表面微腐蚀,逐步侵蚀板载线路导通层。设备持续振动会造成接口端子松动,降低电气接触的紧密程度。线路长期受热胀冷缩作用会出现隐性断裂,保留微弱导通状态。接口金属弹片疲劳形变会造成接触电阻增

大,电气传输稳定性持续降低。各类物理损耗会逐步破坏线路与接口的导通性能,引发电路通路断续、电气传输失效等故障问题。

4 智能电动执行机构驱动板件系统化维护实践

4.1 驱动板件常规检修流程规范

驱动板件检修工作依照标准化作业流程推进,夯实设备长期稳定运行的硬件基础。设备断电后等待内部残余电能完全释放,杜绝带电操作引发的电气损伤。细致检查板面物理状态,排查板面烧灼痕迹、线路氧化变色、焊点脱落等典型硬件缺陷。利用专业电气检测设备采集关键电路参数,对比行业通用标准判定电路运行状态是否正常^[4]。逐段排查板载线路与接线点位,深挖隐蔽性电气隐患。结合硬件实际状态完成参数校准与缺陷整改,让每一次检修工序都具备规范的执行标准。

4.2 各电路模块专项维护操作

不同功能电路模块依据运行属性开展针对性维护作业。功率驱动模块重点检查功率器件导通特性与焊接牢固程度,清理散热结构积聚杂物,保障热量正常散发。信号调理模块校验信号传输精度,清理信号端口附着杂质,减少传输过程中的信号损耗。电源模块持续监测稳压与滤波器件工作状态,修正供电链路出现的参数偏移,维持输出电压稳定。主控模块核查外围配套电路工况与时钟运行精度,保障数据运算与指令输出稳定。通讯模块检查总线连接状态与隔离结构性能,保障数据传输通道始终保持通畅。

4.3 板件器件更换与电路复原工艺

失效元器件更换需要依托精细的焊接工艺完成施工。拆除故障器件时合理控制焊接温度与作业时长,规避高温损伤周边完好线路与元器件。彻底清除焊盘表面老化焊锡与杂质,修整平整焊盘基础结构。选用参数规格匹配的全新元器件完成对位焊接,保证焊点平整饱满,杜绝虚焊与脱焊问题。焊接作业结束后清理板面残留杂物,对改造区域电路开展多维度参数检测。微调局部电气参数至标准范围,还原板件原始电气工作性能,适配设备正常运行工况。

4.4 板件防尘、防潮、抗干扰维护措施

定期清理板面积聚的粉尘与固体颗粒物,避免杂质

堆积降低板面绝缘性能。依托设备密闭结构阻隔外界污染物侵入板件核心区域,减少杂质吸附对电气运行的负面影响。采用专业防潮防护手段处理板件表层与线路区域,缓解环境湿度变化带来的线路氧化与微漏电问题。控制设备运行环境湿度水平,避免凝露现象侵蚀精密电气元件。优化板件线路排布方式,加固电气隔离结构,削弱工业现场电磁环境对微弱信号线路的干扰作用,提升硬件运行稳定性。

4.5 长期运行状态下的常态化维护方式

驱动板件长期连续运行会产生缓慢的电气性能衰减,常态化维护可以有效延缓硬件老化进程。按照固定周期开展外观巡检与电气参数采集,及时捕捉低速演变的性能劣化问题。定期紧固各类接线端子,削弱设备持续振动造成的接触松动问题。阶段性校验电路基准参数,修正长期运行累积产生的参数漂移。根据设备运行负荷与运行时长调整检测频次,重点关注高负载、高损耗的电路区域与元器件。持续将电气参数维持在标准工作区间,压缩故障发生概率,延长驱动板件整体使用周期。

结束语

驱动板件的电路分析与维护实践是一项贯穿设备全生命周期的系统性工作。从模块化电路架构的逐层拆解,到功率驱动、信号调理、通信交互等核心电路原理的深度剖析,再到器件老化、干扰侵入、参数漂移等故障机理的精准定位,各环节相互关联、缺一不可。规范化的检修流程、针对性的模块维护、精细的器件更换工艺与常态化的环境防护措施共同构成完整的维护链条,能够有效延缓硬件性能衰减、压缩故障发生概率,持续保障智能电动执行机构驱动板件的稳定运行。

参考文献

- [1]李琴,汤建明,张博远,等.分布式驱动电动汽车多执行器容错控制研究[J].汽车工程,2023,45(12):2251-2259.
- [2]智晋宁,靳峰,闫文志,等.分布式驱动电动汽车执行器失效容错控制研究[J].汽车实用技术,2024,49(17):1-7.
- [3]付翔,肖帅,徐超.轮毂电动机驱动车辆并联式复合制动策略[J].江苏大学学报(自然科学版),2025,46(1):9-17.
- [4]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].科学技术创新,2024(11):37-40.