

核电领域电动执行机构高可靠性调节系统设计与验证

胡 腾 王 凯 许 林

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘要: 本文聚焦核电领域电动执行机构高可靠性调节系统。先分析核电环境特点及调节系统需求,重点明确电动执行机构的机械特性、驱动性能与控制精度等核心指标。接着阐述系统设计,围绕电动执行机构的冗余配置、抗恶劣环境优化、精准控制策略展开,包括总体架构及适配执行机构的硬件与软件设计。随后通过“理论分析-仿真测试-实验验证”的递进式方法对系统进行验证,针对执行机构定位偏差、环境适应性不足等问题改进。最终结果表明,该系统使电动执行机构位移误差稳定在 $\pm 0.08\text{mm}$ 内,MTBF达11200小时,各项性能指标满足核电领域使用要求,为核电安全稳定运行提供有力保障。

关键词: 核电安全; 电动执行机构; 高可靠性; 定位精度; 抗辐射设计

引言: 核电作为清洁能源,安全至关重要。电动执行机构是核电设备精确控制的核心执行单元,其调节系统的可靠性直接决定阀门、挡板等关键部件的动作精度,进而影响核电机组运行安全。核电环境复杂,强辐射、高温高湿、振动频繁等特点,对电动执行机构的机械结构稳定性、驱动电机耐候性、传动系统精度保持性提出极高要求。为保障核电设备稳定运行,需设计以电动执行机构为核心的高可靠性调节系统。本文深入分析执行机构及调节系统需求,详细阐述适配执行机构的设计思路,并通过多种验证方法确保系统性能达标,为核电领域执行机构调节系统设计提供参考。

1 核电领域电动执行机构调节系统需求分析

1.1 核电环境特点与对调节系统的要求

核电环境具有强辐射、高温高湿、振动频繁且工况多变的特点,辐射会加速执行机构电子元件老化及金属部件氧化腐蚀,高温高湿易导致电机绝缘失效、传动机构卡涩,振动可能破坏齿轮啮合精度与传感器安装稳定性。基于这些特点,调节系统需适配电动执行机构的特殊需求:核心元件需选用耐辐射等级不低于 $1\text{E}15\text{ n/cm}^2$ (快中子注量)的核级产品,确保执行机构在 100Gy 辐射剂量下正常工作;执行机构需具备宽温湿度适应范围,电机绕组采用耐高低温绝缘材料,能在 -40°C 至 70°C 、相对湿度95%以上环境中稳定动作;传动系统需具备抗振动性能,振动频率 $10\text{-}2000\text{Hz}$ 时,齿轮啮合间隙波动不超过 0.02mm ,系统定位精度波动不超过5%;同时执行机构需具备防电磁干扰能力,电机驱动回路采用屏蔽设计,避免外部电磁信号影响动作精度,确保极端环境下精准执行控制指令。

1.2 调节系统功能需求

调节系统需实现电动执行机构的精准定位控制,通过优化传动比与控制算法,将执行机构位移误差控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 范围内,满足核电阀门开度、挡板角度的精确调节需求;具备执行机构全状态监测功能,采集电机电流、绕组温度、减速箱振动、输出轴扭矩等参数,采样频率不低于 10Hz ,重点监测执行机构机械磨损量与电机绝缘电阻,并通过数据传输模块实时上传至控制中心^[1]。拥有故障自诊断与报警功能,针对执行机构电机过载、齿轮卡涩、传感器失效、密封件泄漏等常见故障,诊断准确率不低于98%,故障发生后1秒内触发声光报警,并生成包含故障部位、原因及处理建议的报告;还需支持远程控制与手动操作双模式,远程控制下执行机构响应时间不超过0.5秒,手动操作时通过机械应急装置快速切换,确保特殊情况下仍可正常调节。

2 电动执行机构高可靠性调节系统设计

2.1 系统总体架构设计

系统总体架构采用分层分布式设计理念,以电动执行机构作为核心关键节点,自下而上划分为感知层、控制层、驱动层与监控层。(1)感知层作为系统的数据采集源头,集成位移传感器、温度传感器、扭矩传感器等多种类型传感器。这些传感器被直接部署于执行机构的电机、减速箱、输出轴等关键部位,能够实时、精准地获取执行机构的运行状态信息。为确保执行机构状态数据的绝对可靠,关键参数采用2路独立传感器冗余采集方式,即便某一传感器出现故障,另一路传感器仍能正常工作,保障数据的完整性。(2)控制层以抗辐射微处理器为核心,该微处理器专门针对执行机构控制需求进行算法优化。其运算速度不低于 1GHz ,能够快速处理执行机构动态响应数据,及时解析上层指令并生成精准的

驱动信号。(3)驱动层由功率驱动模块和电机控制器组成,与执行机构驱动电机实现精准匹配。同时,采用隔离设计有效避免外界干扰,确保驱动信号的稳定传输。

(4)监控层则实现对执行机构的集中管控,架构各层间采用冗余通信链路,保障执行机构控制指令与状态数据能够实时、准确地传输,为系统的高可靠性运行提供坚实支撑。该架构充分凸显电动执行机构的核心地位,各层功能紧密围绕提升执行机构可靠性展开设计。

2.2 关键硬件设计

2.2.1 控制器设计

控制器采用双CPU冗余设计,专门增加电动执行机构专用控制模块,主备CPU同步运算执行机构控制指令与状态反馈数据,对比偏差超阈值时触发切换,备用CPU可在0.1秒内无缝接管,保障执行机构动作连续性;核心电路采用抗辐射设计,电路板选用耐辐射基材,关键元器件采用核级产品,运算放大器输入失调电压低于 $10\mu\text{V}$ 、温漂低于 $0.1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,确保执行机构控制参数计算精准;内置非易失性存储器,存储10年以上执行机构运行数据与故障记录,容量不低于1GB;接口采用光电隔离设计,隔离电压不低于2500V;配备独立电源模块,输入电压85-265VAC,输出精度 $\pm 2\%$,具备完善保护功能,为执行机构稳定控制提供供电保障^[2]。

2.2.2 功率驱动模块设计

功率驱动模块与电动执行机构驱动电机参数精准匹配,采用IGBT作为开关元件,额定电流不低于50A、额定电压不低于1200V,开关频率达20kHz,满足执行机构电机快速启停与转速调节需求;模块内部设计过流、过压、过热保护电路,过流保护响应时间不超过 $1\mu\text{s}$,过热保护在 85°C 时触发,确保电机安全;采用模块化独立封装,外壳铝合金材质散热良好,内置温控风扇,使模块工作温度控制在 -20°C 至 70°C ,适配执行机构电机的散热需求;模块与控制器间采用光纤通信,避免电磁干扰影响电机控制信号,提升执行机构动作精度,同时增加电机转速反馈接口,实现闭环控制。

2.2.3 电动执行机构选型与设计优化

电动执行机构选用直流伺服电机作为驱动源,额定功率不低于1.5kW,额定转速不低于1500r/min,电机转子采用钕铁硼强磁材料,定子绕组采用耐辐射聚酰亚胺绝缘漆,耐辐射剂量达100Gy,效率不低于90%;电机轴承选用陶瓷材质,避免金属轴承在辐射环境下润滑失效,使用寿命提升至8万小时以上。减速机构采用行星齿轮减速箱,齿轮材质为高强度合金钢,渗碳淬火处理后表面硬度不低于HRC58,传动效率不低于95%,设置电磁制动

装置,响应时间不超过0.3秒,确保电机停止时快速锁死输出轴。执行机构外壳采用316L不锈钢材质,防护等级IP68,接缝处采用双重密封设计,适应核电潮湿多尘环境。机械结构优化方面,通过精密磨削加工将传动间隙控制在0.05mm以内,关键运动部位喷涂二硫化钼耐磨涂层,降低摩擦系数,减少机械磨损导致的定位偏差,维护周期延长至18个月。

2.3 关键软件设计

关键软件设计围绕电动执行机构功能实现与可靠性提升展开,采用模块化编程,分为执行机构控制、状态监测、故障诊断、通信等模块。控制程序采用PID+模糊控制算法,专门针对执行机构机械特性优化,通过电机转速反馈与输出轴位移监测实时调整参数,PID参数支持在线整定,确保不同负载下定位精度;监测程序重点采集执行机构电机电流、绕组温度、齿轮箱振动、扭矩等数据,通过卡尔曼滤波算法去除干扰,设置多级阈值预警;诊断程序基于故障树模型,将执行机构故障细分为电机类、机械类、传感器类,能快速定位故障部位;通信程序支持多协议,采用AES-128加密传输执行机构数据;软件具备自恢复功能,程序异常时1秒内重启,自动备份执行机构关键参数,防止数据丢失。

3 电动执行机构高可靠性调节系统验证

3.1 验证方法与平台搭建

验证采用“理论分析-仿真测试-实验验证”的递进式方法,核心围绕电动执行机构性能展开。理论分析建立执行机构机械动力学与电机驱动模型,计算关键参数;仿真测试利用MATLAB/Simulink搭建执行机构虚拟模型,模拟各类工况;实验验证在实物平台上开展。验证平台包括硬件测试平台、软件仿真平台与综合实验平台^[3]。硬件测试平台配备高精度扭矩传感器、激光位移测量仪等设备,专门测试执行机构定位精度、输出扭矩与机械寿命;软件仿真平台构建执行机构电机驱动、齿轮传动、负载响应等子模型;综合实验平台搭建与核电现场一致的工况,包含模拟阀门负载与执行机构安装基座,可测试执行机构整体性能,平台数据采集系统重点记录执行机构各项运行参数。

3.2 理论验证

理论验证围绕电动执行机构核心指标展开。功能可行性方面,建立执行机构控制模型,通过传递函数分析验证控制算法稳定性,计算阶跃响应时间与超调量,确保精准定位;性能指标方面,根据执行机构电机参数计算驱动模块输出效率,分析不同负载下电机转速与扭矩特性,验证满足设计要求;可靠性方面,采用Telcordia标

准计算执行机构元器件失效率,结合机械磨损模型预计MTBF,通过故障树分析验证诊断覆盖率,确保理论上执行机构及调节系统满足需求。

3.3 仿真验证

仿真验证基于执行机构虚拟模型开展,正常工况下测试响应时间与定位精度,结果显示执行机构响应时间不超过0.5秒,定位误差 $\pm 0.1\text{mm}$ 内;异常工况下模拟辐射、高温、振动环境,测试执行机构参数变化,辐射干扰下核心元件参数波动不超过3%,电机转速波动小于1%;故障仿真模拟电机过载、齿轮卡涩等场景,系统1秒内识别故障并报警,诊断准确率99%;长周期仿真模拟执行机构连续运行1000小时,记录机械磨损模拟数据,显示传动间隙增加量小于 0.01mm ,性能稳定。通过仿真发现执行机构高频振动下定位精度下降问题,为后续改进提供依据^[4]。

3.4 实验验证

实验验证聚焦电动执行机构实际性能。功能实验中,控制中心发送阀门开度指令,执行机构位移误差平均值 $\pm 0.08\text{mm}$,状态参数实时上传,模拟传感器失效时1秒内报警;性能实验中,执行机构负载从额定值提升至120%,输出扭矩稳定,响应时间无延迟,电机效率92%;可靠性实验采用加速寿命试验,执行机构在高温高辐射环境下连续运行500小时,停机检测显示电机绝缘电阻无下降,齿轮磨损量 0.008mm ,制动响应时间保持0.3秒;环境适应性实验中, -40°C 至 70°C 温度、 $10\text{-}2000\text{Hz}$ 振动、 100Gy 辐射下,执行机构均稳定运行。实验充分验证执行机构及调节系统满足核电使用要求。

3.5 验证结果分析与改进

验证数据显示,系统使电动执行机构定位误差平均值 $\pm 0.08\text{mm}$,故障诊断准确率99.2%,额定负载下响应时

间0.45秒,功率驱动模块输出效率92%,加速寿命试验500小时无故障,MTBF预计11200小时。存在的问题:高频振动下执行机构定位精度轻微下降,最大误差达 $\pm 0.12\text{mm}$;大量数据传输时偶尔延迟。改进措施:在电动执行机构输出轴增加弹性缓冲装置,齿轮啮合面采用齿顶修缘工艺,降低振动影响;优化软件数据处理算法,采用执行机构状态数据分类传输策略,优先传输定位与故障数据^[5]。改进后再次验证,执行机构高频振动下最大误差降至 $\pm 0.09\text{mm}$,数据传输延迟消除,各项指标达标。

结束语

本文以电动执行机构为核心,成功设计并验证了核电领域高可靠性调节系统。通过优化执行机构机械结构、采用冗余驱动与控制策略、开发适配的软件算法,结合递进式验证方法,确保系统满足核电环境要求。针对验证中发现的执行机构问题,通过机械结构改进与软件优化有效解决。该系统为核电电动执行机构精准控制提供可靠方案,未来可进一步研发执行机构预测性维护算法,基于运行数据预判机械磨损与电机老化趋势,提升系统智能化水平,推动核电执行机构技术发展。

参考文献

- [1]牟杨. 浅析核电厂电动阀门监控技术应用[J]. 中国机械,2023,(30):84-87.
- [2]杨琦,朱涛涛,佟洁. 核电站智能型电动执行机构数据库探索与运用[J]. 仪器仪表用户,2023,30(11):33-36+25.
- [3]谭文治,黄一鸣,任学铭,等. 核安全级阀门电动装置补充验证方案研究[J]. 自动化仪表,2022,43(11):83-86.
- [4]向新明,朱星,刘文玉,等. 核电领域无线通信技术应用研究[J]. 中国新通信,2023,25(14):1-3.
- [5]王谦,刘洋. 智能技术在核电领域中的应用探究[J]. 中国设备工程,2021(17):148-149.