

压水堆核电厂棒控系统调试过程分析及改进研究

王文龙

国核示范电站有限责任公司

DOI:10.32629/pe.v4i1.19070

[摘要] 棒控系统属于压水堆核电厂反应堆控制与保护的关键系统,调试质量水平直接关系到机组运行的安全可靠程度,本文对棒控系统调试全过程的开展情况做了系统分析,归纳了设备校验,联动测试,参数验证等环节的工作要点,着重研究了信号传输异常,控制逻辑错误,机械执行偏差等典型问题的改进办法,通过优化调试流程方案,提升抗干扰性能,完善控制逻辑设计以及机械校准方法,显著提升了系统运行的可靠性指标,实践表明,预防性调试策略与跨专业协作机制能有效提高调试质量水平,为同类机组调试工作提供了重要参考依据和经验借鉴。

[关键词] 压水堆核电厂; 棒控系统; 调试过程; 问题分析; 改进措施; 系统优化

中图分类号: TM623 文献标识码: A

Analysis and Improvement of the Rod Control System Commissioning Process in PWR Nuclear Power Plant

Wenlong Wang

State Nuclear Demonstration Power Plant Co., LTD.

[Abstract] The rod control system, a critical component of pressurized water reactor (PWR) nuclear power plant control and protection systems, directly determines the operational safety and reliability of nuclear units. This study systematically analyzes the entire debugging process of the rod control system, outlining key tasks including equipment calibration, interlock testing, and parameter verification. It focuses on addressing typical issues such as signal transmission anomalies, control logic errors, and mechanical execution deviations. By optimizing debugging workflows, enhancing anti-interference capabilities, refining control logic design, and improving mechanical calibration methods, the system's operational reliability has been significantly enhanced. Practical evidence demonstrates that preventive debugging strategies and cross-disciplinary collaboration mechanisms effectively elevate debugging quality, providing valuable references and practical insights for similar unit debugging projects.

[Key words] Pressurized Water Reactor (PWR) nuclear power plant; Rod Control System (RCS); Commissioning process; Problem analysis; Improvement measures; System optimization

引言

棒控系统是核电厂反应堆控制的重要执行单元,担负着功率调节、紧急停堆、安全保护等功能,其调试过程繁杂且技术难度大,牵涉电气、机械、控制等多个专业。实际调试时,常由于系统集成度高、信号干扰、逻辑匹配等状况造成调试进度慢、质量差。所以,剖析调试进程中的典型问题并给出切实可行的改进办法,对改善调试成功率和系统可靠性很有意义。本文基于棒控系统调试的实际经验,从调试流程、关键环节、常见问题及改进措施等方面展开论述,以期对相关工程实践提供参考。

1 棒控系统调试概述

1.1 棒控系统的基本组成

棒控系统主要由控制棒驱动机构、电源子系统、控制逻辑单元以及信号反馈模块这几个部分组成,其中控制棒驱动机构包含提升线圈、保持线圈和移动线圈,借助电流控制来推动控制棒完成步进式的移动,电源子系统给驱动机构提供稳定且可调节的电力支撑,常常会采用冗余设计去提升可靠性,控制逻辑单元会接收到反应堆保护系统或者操作人员发出的指令,将其转变成具体的控制信号,信号反馈模块会持续检测控制棒的位置和状态,从而保证其动作准确且能够被监控到^[1]。这些部件形成了一个闭环控制系统,其性能好坏关乎反应堆的运行安全与调节精度,在调试期间要针对每一部分的硬件连接、电气特性以及功能实现进行逐个验证,保证符合设计标准。

1.2 调试的主要目标与内容

棒控系统调试的核心目的在于检验系统功能是否完整且可靠, 保证系统可以精确、迅速地执行控制命令, 在各类工况中持续稳定运作, 调试涉及设备单体校验、系统联动检测、参数调整以及故障模拟等诸多方面。具体来说, 调试工作包含对驱动机构动作特性展开测试, 对电源输出电压及电流加以测量, 还要对控制逻辑予以验证, 对信号采集与传输是否准确也需进行检查, 而且要模拟异常工况、电源切换、信号中断等情况, 从而考察系统的冗余能力以及应对故障的反应机制, 通过全面又细致的调试, 可以尽早察觉并解决问题, 进而优化系统的总体表现。

2 调试过程中的关键环节

2.1 设备单体检查与测试

设备单体检查属于调试工作的基础部分, 其质量好坏关乎后面系统调试是否顺利开展, 机械部分检查包含控制棒推动机构的安装精确度检测, 导向结构的灵活性测试以及密封性能验证工作, 对于推动机构和反应堆压力容器顶盖的对齐准确度应当予以重视, 务必符合设计需求, 电气检查方面涉及电缆接线是否正确, 绝缘电阻测量以及接地可靠性测试。通电测试阶段要对线圈电阻, 电感等参数展开精确测量, 判定驱动机构的工作状态是不是正常, 还要考察电源模块的输出稳定性和调节范围, 保证它能符合不同工况下的功率需求, 在这个环节中, 任何异常地发现都需要及时记录并处理, 避免问题积累到系统调试阶段。完善的单体检查可以为后续调试工作奠定良好基础。

2.2 系统功能联动试验

系统功能联动试验属于验证各个子系统协调工作能力的重要环节, 通过模仿实际运行指令, 来考察控制棒动作响应的准确度与时效性, 试验内容包含正常调节模式下的棒位控制, 紧急停堆信号触发后的响应情况, 还有电源切换过程中系统的反应表现。这个阶段需要关注的就是控制逻辑和机械执行之间匹配程度如何, 比如从发出指令到真正开始动作的延迟时间是不是在允许范围内, 多组控制棒是否能很好地同步工作等^[2]。还要通过反复测试来暴露出信号传递、逻辑处理或者执行机构当中潜藏的问题, 在联动试验做得是否充分完整, 这直接关系到系统投入运行之后的可靠程度, 要有具体的测试计划并认真执行。

2.3 实际运行参数验证

实际运行参数验证属于调试工作的最终环节, 目的在于接近真实运行状况下对系统展开检验, 通过在不同功率水平下开展控制棒移动试验, 从而得到控制棒的动作特性曲线并同设计值加以比较, 着重关注的参数包含控制棒的步进时间, 位置偏差, 电流波动范围以及振动噪声水平等。还要检测系统在长时间运行情况下的稳定性表现, 比如连续动作之后的温度上升状况, 机械磨损趋势等等, 这个阶段的测试数据将会成为后续运行维护的重要参照对象, 借助全面系统的参数验证, 就能比较客观地评价棒控系统的实际运行水平, 为机组的安全稳定运行提供可靠保障。

3 调试中的常见问题

3.1 信号传输异常

信号传输异常属于棒控系统调试过程中常见的一种技术问题, 信号失真、传输延迟或者通信中断之类的现象都包含在内, 产生这些情况大多与电磁干扰、电缆屏蔽不足、接地不当或者连接器接触问题等因素有关, 信号传输的可靠性直接关系到控制指令是否准确以及反馈信息是否真实, 这是调试阶段要着重关注的环节。干扰问题的定位要采用系统化方法, 通过分段测试, 频谱分析等手段逐步缩减范围, 解决办法包含改良电缆布线, 加强屏蔽措施, 改善接地系统, 增添信号滤波装置等等, 也要查看通信协议的配置参数, 保证信号格式相匹配并且传输稳定, 建立完善的信号质量监测机制, 可以在问题出现初期及时发出预警, 避免影响扩大。

3.2 控制逻辑错误

控制逻辑错误主要体现在指令执行出错、状态判定有误或者异常处理机制失灵等状况。其产生原因可能是程序编写时出现纰漏、参数设定不当或者逻辑条件之间存在矛盾等。由于这类错误通常是在某些特定条件或者复杂工况下才暴露出来, 所以具有较高的隐蔽性与查找难度。要想有效地防止和发觉逻辑错误, 就要在调试之前做好充分的仿真测试和代码审查工作, 在真正开始调试的时候, 我们采用分段验证, 条件触发测试之类的办法, 一步步地找出逻辑上的缺陷, 而且要创建起良好的版本管理和改变记载制度, 确保任何逻辑修改都可追溯、可验证。

3.3 机械执行偏差

机械执行偏差主要是指控制棒的实际动作与预期目标不一致, 包含位置偏差、动作不同步或者运行卡涩等状况, 这些问题大多由于机械安装偏差, 缺少润滑, 零件磨损或者配合间隙不当等缘故造成, 执行偏差既会影响到控制精确度, 还会促使设备老化, 乃至产生更为严重的故障。调试期间, 要依靠反复的动作测试和位置校准, 找出机械偏差的规律和特征, 对于安装问题, 要重新调整对中和紧固力; 针对磨损或者润滑问题, 就去实施维护或者替换部件, 创建起定时的检查和校准体系, 制定详细的守护规程, 有益于保证机械执行的长久稳定, 还要加大操作人员的培训力度, 提升他们对机械问题的识别和处理水平。

4 问题分析与改进措施

4.1 信号干扰排查与处理

信号干扰问题的处理需要采取系统性方法, 从干扰源抑制、传输路径隔离以及接收端防护等多个角度入手, 先对电缆敷设方案加以改善, 防止信号电缆与动力电缆平行走线, 使用双层屏蔽电缆且保证屏蔽层可靠接地, 在信号输入端加入滤波电路, 以消除高频噪声干扰。针对已有的干扰问题, 借助频谱分析仪来确定干扰的频率特性, 然后有针对性地实施干扰抑制措施, 定时对接地系统展开检查, 保证接地电阻数值一直符合规范要求, 创建起信号品质在线监测体系, 设立合适的报警阈值, 从而做到干扰问题的早期察觉与解决, 进一步完善电缆连接器的养护制度, 保证连接质量的稳定性。

4.2 逻辑优化与参数调整

控制逻辑的改进主要集中在提升系统的鲁棒性和适应性上,要加大状态判断条件和异常处理分支,从而让系统更好地应对边界工况,参数调整就要按照实际运行数据来,慢慢改善控制系数,延时设定以及动作阈值这些关键参数,让系统反应更准确可靠。采用先进的逻辑仿真测试平台,在不破坏实际系统的情况下检验逻辑修改的正确性,创建参数调整的规范流程,保证每次修改都有足够的理论支撑和实验验证,定期对控制程序执行版本复审和优化更新,保证它始终与实际运行需求高度契合,形成参数修改的记录和评价制度,实现修改效果的可追溯性。

4.3 机械维护与校准方法

核电项目是复杂的系统工程,其中,调试是关键环节,调试是使安装好的核电厂部件和系统运转并验证其性能是否符合设计要求和有关准则的过程,包括无核反应和带核反应的试验。调试是验证设计质量、安装质量的综合性过程,具有专业性高、综合性强、动态过程多、专业人员集中且配合度高等特点^[3]。机械执行问题的改进,要形成起预防性维修与定时校正相结合的工作机制,制定出详尽的维修规程,涵盖定时添加润滑剂,紧固件查验,磨损部件替换等事项,维持机械结构处于良好的状态,校准就要用精密测量仪器来探测控制棒的实际位置,把它同回馈值做比较然后加以调整。创建机械执行特性档案,记载每一次维护校准的数据,借助趋势分析预估潜在的问题,改进操作流程,防止频繁启动或者超负荷运转,从而延长设备的使用寿命,

5 改进效果与总结

5.1 改进前后的对比

通过实施系统化的改进措施,棒控系统的调试效率和运行可靠性得到了明显提升,信号传输的稳定性有所加强,干扰现象发生的频率明显下降,控制逻辑上的错误被大幅度缩减,系统响应的准确度有所提高,机械执行过程中的偏差被控制住,动作的一致性有所提升。改进后的系统在调试周期缩短的同时,问题复发率也大幅降低,这使得调试过程中的人力和时间成本得以降低,并且为机组长期稳定运行打下了基础,实际运行数据表明,在各种工况下,系统的性能都优于改进前,控制精度和可靠性指标均有明显提高,这些改进成果证明了所采取措施的有效性和必要性。

5.2 后续调试建议

为了进一步提高调试质量,在以后的工作中应该加强对前期的规划和预防性设计,在系统的设计阶段就考虑调试的需求,

选择合适的硬件和布线,制定详细的调试大纲和风险评估方案,确定各个阶段的目标和方法。引入自动化测试工具和智能数据分析平台,提升调试工作的准确性和效率。加强跨专业协作机制,保证电气、机械、控制团队的信息交流与协同合作。创建调试知识管理系统,收集典型问题解决方法,为后续项目提供参考。同时建议建立调试质量评价体系,实现调试过程的量化管理。

5.3 经验总结与应用展望

本次调试实践表明,系统的办法和细致的管理是保证调试成功的关键,早发现、早处理问题的理念和跨专业合作的工作方式在实际操作中发挥了重要作用,随着数字技术的发展,智能调试与预知性维修会成为改进调试水平的新方向。建议在同类项目上推广成熟调试模式和改进措施,持续完善工作流程和技术标准,加大人员培训和能力提升力度,打造多专业知识融合的调试团队,通过不断改善和更新,促使棒控系统调试工作迈向更高层次,未来可探索基于数字孪生的调试技术,实现虚实结合的调试新模式。

6 结语

棒控系统调试属于核电厂安全运行的关键部分,其品质好坏直接影响着机组控制精准度和运行可靠程度,经过系统化的调试流程优化,有针对性的问题改进措施以及完备的维护体制,有效地增强了系统的整体性能,这次实践显示,依靠预先性的调试策略,跨专业的协同工作方式,可以明显提升问题解决速度,缩减运行危险性,将来要继续推动调试技术朝智能化方向转变,加大数字工具的运用力度,重视经验和反馈的收集,还要重视专业人才的培育和技术标准的形成,从而给核电安全稳定运行提供更有力的技术支撑和保证。

[参考文献]

- [1]晁博,王起涛,徐胜峰,等.秦山二期扩建工程棒控系统调试浅析[J].中国设备工程,2017,(04):96-97.
- [2]何凡帆.棒控系统可控硅异常分析和处理[J].电子技术应用,2022,(S1):156-159.
- [3]张平.浅谈SAT在核电调试人员培训中的应用[J].科技视界,2018,(14):227-229+157.

作者简介:

王文龙(2000--),男,汉族,河南省长垣市人,大学本科,助理工程师,从事的研究方向或工作领域:压水堆棒空棒位。