

核电站仪控设备预防性维修策略研究

李传军

中国核电工程有限公司 北京 100840

【摘要】：核电站仪控设备承担参数监测、逻辑控制和安全保护任务，设备运行状态直接关系到机组安全稳定。当前部分仪控设备维修仍以固定周期为主，存在维修资源分配不均、隐患识别滞后、检修针对性不足等问题。通过设备重要度分级、运行状态监测、故障数据分析和维修周期动态优化，形成差异化预防性维修策略。该策略能够提升缺陷预判能力，降低突发故障概率，减少无效检修，提高维修效率和设备可靠性，为核电站安全运行提供保障。

【关键词】：核电站；仪控设备；预防性维修；状态监测；维修策略

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.013

引言

核电站仪控设备分布范围广、系统关联度高，既承担运行参数采集，又参与控制调节和安全保护。设备一旦出现性能漂移、信号异常或控制失准，可能影响机组运行稳定。传统定期维修方式虽然便于管理，但难以准确反映设备真实状态，容易造成维修不足或过度维修。预防性维修策略需要从设备重要程度、运行环境、历史故障和状态数据入手，建立更具针对性的维修方案，使维修活动从单一周期安排转向风险控制和状态判断结合，为正文中维修问题识别、策略制定和效果评价奠定基础。

1 核电站仪控设备运行特征分析

1.1 仪控设备功能分类

核电站仪控设备按照功能可分为参数测量类、逻辑控制类、安全保护类、执行反馈类和信息传输类。参数测量类设备主要采集温度、压力、流量、液位、中子通量等运行数据，是状态判断和控制调节的基础；逻辑控制类设备依据设定程序完成连锁、调节和自动控制，保持工艺过程稳定；安全保护类设备承担异常工况下的停堆、隔离、报警和保护动作，对响应速度和可靠性要求更高；执行反馈类设备连接控制指令和现场动作，直接影响控制闭环精度；信息传输类设备负责信号转换、数据通信和状态上传。不同类别设备的失效后果、维修重点和检测方法存在明显差异，预防性维修需要依据功能属性进行分类管理。

1.2 关键设备运行特性

核电站关键仪控设备具有连续运行时间长、精度稳定要求高、环境适应要求严和系统耦合程度深等特征。传感器、变送器、控制柜、保护逻辑组件和执行机构长期处于高温、湿度、电磁干扰及振动等复杂环境中，容易出现零点漂移、输出波动、接点老化、通信延迟和模块性能下降等现象^[1]。新发展理念强调安全、高效、绿色和智能协同，关键设备运行管理应从单纯定期检查转向状态感知、数据分析和风险预判结合。通过在线监测、趋势比对、阈值预警和健康评价，可及时识别性能劣化

过程，使维修安排更加贴近设备实际状态，避免正常设备频繁拆检，也减少潜在缺陷长期积累。

1.3 设备失效影响路径

仪控设备失效通常沿着“信号异常—判断偏差—控制失准—系统扰动”的路径逐步扩展。测量元件发生漂移时，控制系统接收的数据可能偏离真实工况，导致调节指令出现偏差；逻辑模块发生故障时，连锁条件可能误判，影响自动保护动作的准确性；通信链路不稳定时，关键参数上传延迟，运行状态识别和故障定位效率下降；执行机构反馈异常时，控制指令难以形成有效闭环，可能引发调节滞后或动作不到位。预防性维修策略需要针对失效路径设置分层防控措施，包括测量精度校验、逻辑功能试验、通信链路诊断、执行机构动作验证和故障记录追踪，使隐患在早期阶段被识别和处理，降低失效扩散风险。

2 仪控设备维修管理薄弱环节识别

2.1 固定周期维修适配不足

固定周期维修主要依据既定时间间隔安排检修，难以准确匹配仪控设备实际劣化速度。核电站不同仪控设备在功能等级、运行负荷、环境条件和失效后果方面存在差异，统一周期容易造成关键设备检查深度不足、低风险设备重复拆检频繁等问题。部分设备尚处于稳定运行阶段，却因周期到期被安排检修，增加接线松动、参数扰动和人为引入缺陷的概率；部分高敏感设备虽未到检修周期，内部元件老化、信号漂移和通信异常已逐步积累。预防性维修需要突破单一时间约束，将设备状态、风险等级、历史缺陷和运行工况纳入周期调整依据，提高维修计划适配性。

2.2 故障数据利用深度不够

故障数据利用不足主要表现为记录分散、分析层次浅和闭环反馈弱。仪控设备运行过程中形成的报警信息、检修记录、校验偏差、备件更换和故障处理数据，往往停留在事后归档层面，未能充分转化为维修策略调整依据。部分缺陷仅记录故障现象，缺少失效部位、诱发条件、持续时间和处置效果等关键

字段，导致同类问题难以进行趋势识别^[2]。数字化管理理念要求建立统一数据台账，对故障频次、劣化规律、重复缺陷和设备健康状态进行关联分析，形成可追溯、可量化、可更新的数据链条，为维修周期优化、备件储备和风险预警提供支撑。

2.3 维修资源配置精准性偏低

维修资源配置精准性不足会直接影响预防性维修质量。仪控设备数量多、系统分布广，若缺少基于重要度和健康状态的分级排序，检修人员、备件、工器具和停机窗口容易被平均分配，难以优先保障安全相关设备和高风险设备。部分维修任务存在项目设置粗放、技术准备不足和备件匹配滞后等情况，造成现场检修等待时间增加，关键缺陷处理效率下降。绿色高效理念要求减少无效维修和资源浪费，通过设备风险矩阵、状态评分、任务优先级和备件需求预测，对维修资源进行动态配置，使有限资源集中投向故障概率高、影响范围大、恢复要求严的仪控设备。

3 预防性维修策略构建方法

3.1 基于重要度的设备分级管理

基于重要度的设备分级管理需要从安全功能、工艺影响、失效后果、维修难度和可替代性等维度建立评价体系。安全保护相关仪表、关键控制模块、重要连锁回路和核心执行机构应划入高等级管理范围，设置更严格的巡检频次、校验标准和缺陷响应时限；一般监测设备和辅助控制设备可依据运行稳定性适当降低检修强度，避免维修资源被低风险项目占用。分级过程应引入风险矩阵和设备健康评分，将设备功能等级、历史故障率、环境暴露程度和备件供应周期转化为量化指标，形成动态排序结果。数字化平台可对设备状态、缺陷记录和检修任务进行联动更新，使分级结果不再停留于静态台账。该方法能够把预防性维修重点集中到失效后果严重、劣化趋势明显和恢复时间较长的仪控设备上，提升维修策略的针对性和可执行性。

3.2 基于状态参数的监测预警

基于状态参数的监测预警应以运行数据连续采集和趋势识别为核心，将测量精度、信号波动、响应时间、通信质量、电源稳定性、模块温升和执行反馈偏差纳入监测范围。传感器和变送器重点跟踪零点漂移、量程偏差和输出稳定性，控制模块重点关注逻辑响应、通道一致性和自诊断报警，通信设备重点分析丢包率、延迟时间和链路切换记录，执行机构重点监测动作时间、反馈偏差和重复定位精度^[3]。预警阈值不能只依赖固定限值，应结合历史基线、工况变化和老化趋势进行分级设置，形成正常、关注、异常和处置四类状态判定。智能化运维理念要求通过数据融合、趋势外推和异常识别，将单点报警转化为劣化过程判断，提前发现隐性缺陷，减少突发停运和盲目检修。

3.3 基于故障规律的周期优化

基于故障规律的周期优化需要对仪控设备故障频次、失效模式、发生部位、诱发条件和维修效果进行持续分析。对重复出现信号漂移、接点失灵、模块通信异常和执行反馈偏差的设备，应缩短校验周期、增加专项检查项目或调整备件更换节点；对长期运行稳定、故障率低且状态参数平稳的设备，可适度延长检修间隔，降低频繁拆装带来的二次风险。周期优化应区分安全相关设备、重要控制设备和一般监测设备，采用差异化维修窗口，避免统一周期造成资源挤占。数据驱动理念要求建立故障模式库和维修效果评价表，将缺陷处理后的复发情况纳入周期修正依据。通过可靠性分析、趋势统计和风险校验，可形成“状态变化触发调整、故障规律修正周期、维修结果反馈更新”的闭环机制，使预防性维修从经验安排转向精准控制。

4 预防性维修实施路径设计

4.1 检修项目细化配置

检修项目细化配置应按照设备类型、功能等级、失效模式和运行状态进行分层设计。测量类设备重点配置外观检查、回路绝缘测试、零点校准、量程核验和信号稳定性检查；控制逻辑设备重点配置通道切换试验、连锁条件核对、程序版本校验和自诊断状态确认；安全保护设备重点配置动作响应时间测试、保护定值核查、旁路管理核验和冗余通道一致性检查；执行机构重点配置行程反馈、动作时间、定位偏差和端子紧固检查。项目设置应避免笼统化和重复化，将状态异常、历史缺陷和风险等级转化为具体检修条目。数字化工单可嵌入标准步骤、验收限值、数据记录和缺陷触发条件，使现场检修从经验执行转向标准化、精细化和可追溯控制。

4.2 维修流程闭环控制

维修流程闭环控制应覆盖计划编制、风险确认、现场实施、质量验收、数据归档和策略修正全过程。计划阶段依据设备重要度、状态预警和故障记录确定任务优先级，明确检修窗口、隔离边界、备件需求和技术文件；实施阶段严格执行工作许可、参数核对、标识管理和防误操作要求，防止检修活动对控制回路造成扰动；验收阶段通过功能试验、信号比对、定值复核和运行观察确认维修效果；归档阶段记录缺陷原因、处理措施、测试数据和剩余风险^[4]。流程数据应回传至设备健康档案，用于修订维修周期、优化项目配置和更新风险等级，形成问题发现、措施执行、效果验证和策略调整的连续链条。

4.3 人员技术标准匹配

人员技术标准匹配应根据仪控设备复杂程度、风险等级和检修任务类型设置能力要求。高安全等级设备检修需要具备保护逻辑识别、定值核验、故障诊断和连锁试验能力；数字化控制系统维护需要掌握通信协议、软件版本管理、模块替换和网络安全隔离要求；现场测量回路检修需要熟悉校验仪器使用、

信号追踪、接线核对和误差判定方法。岗位能力评价不宜停留在资质审查层面，应结合典型缺陷处置、实操考核、风险辨识和标准执行情况进行动态评估。智能化运维条件下，还需强化数据分析、状态诊断和数字工单应用能力，使技术人员能力结构与预防性维修策略、设备更新水平和安全控制要求保持一致。

5 维修策略运行成效评价

5.1 设备可靠性提升评价

设备可靠性提升评价应从运行稳定性、参数准确性、功能可用性和缺陷复发率等方面展开。仪控设备实施预防性维修后，测量回路的漂移幅度、控制模块的异常报警次数、保护通道的试验合格率和执行机构的动作偏差均可作为评价依据。评价过程需要将维修前后的状态数据进行对比，重点观察关键设备平均无故障运行时间、校验合格率和在线监测稳定区间变化。新发展理念下，可靠性评价不能停留在故障数量统计层面，应引入设备健康指数、风险等级变化和趋势稳定性分析，使评价结果能够反映设备真实运行质量，为后续维修项目调整提供数据支撑。

5.2 突发故障率降低评价

突发故障率降低评价应重点关注无预警停运、信号中断、误报警、拒动误动和通信异常等事件变化。预防性维修策略通过状态监测、缺陷预判和周期优化，将潜在故障提前转化为计

划性处理事项，减少临时抢修对机组运行的干扰。评价时需要区分设备自身劣化、环境扰动、维护质量和备件性能等因素，避免单纯用故障次数判断策略效果^[5]。可通过异常事件发生频率、重复缺陷间隔时间、临时工单数量和故障处置时长等指标进行综合衡量。智能化管理要求对突发故障形成趋势跟踪和原因归类，使故障下降结果能够对应具体维修措施。

5.3 维修资源利用效率评价

维修资源利用效率评价应从人员投入、备件消耗、检修工时、停机窗口占用和任务完成质量等方面进行量化。预防性维修策略实施后，高风险设备获得优先保障，低风险设备减少不必要拆检，维修资源配置由平均投入转向精准投放。评价时可关注计划工单完成率、重复检修比例、备件周转周期、现场等待时间和缺陷一次处理成功率等指标。绿色高效理念要求在保证核安全要求的前提下，降低无效维修、重复维修和过度维修带来的资源消耗。通过资源投入和设备状态改善之间的关联分析，可判断维修策略是否真正提升管理效率。

6 结语

核电站仪控设备预防性维修策略能够有效提升设备运行可靠性，降低突发故障风险，优化维修资源配置。通过分级管理、状态监测和周期优化，实现维修活动精准化与高效化，为机组安全稳定运行提供技术保障，促进核电运维管理向智能化、数字化和精细化方向发展。

参考文献：

- [1] 续玥榕,孙兰飞,赵晓,等.核电站仪控设备间热管空调应用研究[J].暖通空调,2025,55(S2):551-553.
- [2] 许玉振.基于 GO-FLOW 法的核电站给水系统可靠性分析与预防性维修[D].大连理工大学,2025.
- [3] 赵慧敏.基于 GO 法的核电站棒控棒位系统可靠性分析与预防性维修[D].大连理工大学,2025.
- [4] 赵成兴,罗伟,苏传斌,等.核电站关键敏感设备仪控逻辑的脱敏研究[J].电子技术应用,2024,(S2):247-251.
- [5] 李亚楠,游洲,刘亚男,等.核电站仪控设备压力传感器的老化机理分析[J].自动化与仪器仪表,2022,(4):11-15+20.