

压水堆核岛关键系统可靠性提升与技改应用研究

申岳松

中国核动力研究设计院

DOI : 10.32629/jpm.v7i5.8925

[摘要] 压水堆核岛关键系统作为核电安全稳定运行的重要屏障，其运行可靠性直接影响核电安全水平和发电能力，因此，研究核电安全运行具有重要的现实意义。随着机组服役年限的增加，其关键设备面临着材料老化、腐蚀、磨损和性能劣化等共性问题，使其运行状态与管理模式面临严峻挑战。技改是提高装备可靠性的重要手段，需要通过对系统薄弱环节和失效模式的全面辨识，对改造的必要性和技术可行性进行科学论证。如何在保证核电安全的同时，系统地优化关键系统的运行状态，有效延缓其性能衰退，已成为核电运行领域持续关注的热点问题。

[关键词] 压水堆核岛；关键系统；可靠性提升；技改应用

Research on Reliability Enhancement and Technical Upgrading Applications for Key Systems of Pressurized Water Reactor Nuclear Islands

Shen Yuesong,

China Nuclear Power Research and Design Institute

[Abstract] As critical barriers for the safe and stable operation of nuclear power plants, the operational reliability of key systems in pressurized water reactor nuclear islands directly impacts nuclear safety levels and power generation capacity; thus, studying nuclear power safety operations holds significant practical importance. With increasing service life of units, key equipment faces common challenges such as material aging, corrosion, wear, and performance degradation, posing severe challenges to their operational status and management approaches. Technical upgrades are a vital means to enhance equipment reliability, requiring comprehensive identification of system vulnerabilities and failure modes, along with scientific evaluation of the necessity and technical feasibility of modifications. How to systematically optimize the operational state of key systems while ensuring nuclear safety and effectively delaying performance deterioration has become a persistent focus in the field of nuclear power operations.

[Key words] Pressurized water reactor nuclear island; Key systems; Reliability improvement; Technical renovation applications

核岛关键系统长期工作在高温、高压和辐射环境中，其失效机制复杂，单个失效极易导致系统功能退化。可靠性管理涉及设计、制造、运行和退役等各个阶段，因此在应用过程中进行性能监控和状态评估显得尤为重要。技改项目不是孤立的技术更新，涉及系统接口匹配、操作规程调整和人员能力调整等综合系统工程。在实际应用中，转型决策与可靠性需求动态关联尚未明晰，转型后的验证及效果追踪机制亟待完善。因此，

应以设备老化规律和运行经验反馈为基础，将技术先进和工程适用性相结合，形成可靠性保障逻辑贯穿全寿命周期。

一、核岛关键系统可靠性提升工程实施方法

(一) 冗余与裕度强化，提升运行可靠性

执行元件如主泵、上充泵、紧急泵、关键调节阀，采用N+1或者N+2的配置方式，保证单个元件出现故障时，系统不会失去功能。对主回路压力边界、稳压器、蒸汽发生器换热管道等

关键承载面进行强度和疲劳裕度复核，调整结构和支承结构参数，提高结构在极端瞬态工况下的完整性。对电气、仪表、液压等辅助系统进行单点故障诊断，对变频器、电源模块、逻辑通路等薄弱环节进行备份改造，减少故障的发生概率^[1]。将可靠性指标分解至设备、回路和子系统三个层次，并建立裕度日志，实现对关键参数的监控、验证和追溯。在工程实施过程中，严格按照核安全规范进行裕度验证和冗余功能试验，确保改造后的系统能承受多源干扰和设备退化风险，并在稳态和瞬态工况下保持功能稳定性。通过冗余结构和裕度提升同步推进，保证关键系统在非正常工况下的执行能力，为机组的安全稳定运行提供硬件保证。

(二) 老化治理与在役维护，延缓性能衰减

以核岛关键系统的长期运行可靠性为目标，开展“老化机理控制—服役检验优化—预防维修”三位一体的治理研究。针对典型失效模式（疲劳、腐蚀、辐照脆化和密封老化），分别制定分级管控策略。对旋转设备进行振动、温度和润滑状态的在线监测，及早发现异常趋势，对易老化的零部件如密封件、垫片、电缆等建立“以旧换新”清单。优化在役检测工艺，提高超声波、涡流和渗透检测的覆盖率和检出率，对缺陷进行分级处理。推动基于状态监测的预防维修，将传统的定期维修转变为基于实际状态的预测维修，降低因非必要拆卸造成的二次风险，保持系统性能稳定性。同时，应进一步完善设备老化管理数据库，不断积累设备老化数据，对维修策略进行动态更新，使得设备的老化治理更有针对性和有效性。

(三) 工艺与接口优化，消除系统性隐患

采用系统工程的思想，对核岛关键系统进行工艺流程、操作逻辑和接口匹配的优化，消除设计、安装和运行过程中遗留的系统隐患。通过对冷却水、泄压、补水和化学控制流程的优

化，减小节流、扰流和死区，提高流量和压力的稳定性。本项目拟开展系统间接口一致性修正研究，实现信号范围、动作阈值、响应时间和联锁逻辑的统一，防止不同系统动作不同步引起保护误动或拒动。对管道支吊架、抗震支架和设备基础进行应力复核和加固，以提高机组抵御地震和撞击等外界事件的能力。通过对流程的简化、逻辑的固化和接口的规范化，减少操作的复杂性和人为的失败，提高总体的可靠性^[2]。在优化过程中，同步进行接口联调和工况仿真验证，保证系统在全工况下的启动、出力、降功、停堆等均能顺利运行。从流程、逻辑和结构多维度进行优化整改，从根源上消除隐患，提高机组的整体安全性和运行稳定性。

二、典型技改项目应用与工程落地

(一) 主泵供电备用技改，消除停堆风险

针对主泵变频器可靠性差，容易触发非计划停堆的问题，采用“四用一备”技术改造，在原有4台变频器的基础上，增加一台备用变频器和一台快速切换装置，实现故障单元的无扰切换，彻底解决单一故障的问题。改造内容包括增加变频器的备份柜、供电回路、开关逻辑、控制电缆及联锁保护，完成原控制程序的升级，实现故障的辨识、切除和投入全过程的自动化^[3]。通过现场联调，实现切换时刻、干扰阈值和保护阈值的切换，保证切换过程中冷却液流量的稳定性不受影响。在技术改造过程中，严格按照核安全的要求，对系统进行电磁兼容测试、断电恢复测试、干扰测试等测试，以保证改造后的系统具有较高的可靠性和抗干扰性。改造后，长时间跟踪监控主泵的运行情况，后备系统响应迅速，运行平稳，通过技术改造，显著提高主泵供电的可靠性，降低非计划停堆的风险，为机组的长期稳定运行提供重要的支持（如图1所示）。



图1 主泵供电备用技改项目流程图

(二) 仪控通道逻辑技改, 提升保护准确性

采用次高/次低选逻辑技术改造反应堆保护系统的测量逻辑, 取代原来的单阈值判定, 提高保护的精度和稳定性。采用多路信号优选逻辑对温度、压力、水位和流量等重要保护信道进行优化, 以防止单个信道的漂移和故障引起的误停。技术改造包括替换测量仪器和预处理模块, 重新配置逻辑控制柜和操作程序, 增加信道标定, 故障报警和闭锁等功能, 进行信道响应测试和联锁校验。改造完成后, 完成所有仪器控制信道的全量程标定和动态响应试验, 保证测量精度、动作时间和逻辑判断都符合设计要求。在技术改造完成后, 继续进行信道一致性校验和逻辑比对, 以保证保护系统长时间稳定可靠。通过技术改造, 使保护系统的拒动和误动概率大大降低, 使仪控系统的可靠性和健壮性大大提高, 为反应堆的安全运行提供可靠的保证。

(三) 水化学控制技改, 提升系统耐久性

针对停堆和发电运行过程中水质波动带来的腐蚀风险, 应对水化学控制过程进行技术改造, 优化体积控制系统净化流程、加药逻辑和采样监控方案, 实现一回路水质指标的稳定。技术改造包括对离子交换过滤装置进行升级改造, 提高脱盐能力和抗腐蚀性产品能力, 对硼酸锂盐的控制曲线进行优化, 使

表1 核岛关键系统技改后可靠性指标对比

技改项目	改造前年均故障次数	改造后年均故障次数	平均修复时间缩短	系统可用度提升
主泵变频器备用	4.2	0.3	78%	99.87%
仪控保护逻辑优化	3.5	0.5	65%	99.79%
水化学控制系统升级	2.8	0.4	59%	99.75%
数字化在线监测	5.1	0.6	82%	99.89%

(五) 技改落地保障与标准化推广

建立方案评审—施工控制—试运行—效果评价的全过程保障机制, 以保证技术改造成果的平稳落地。在技术改造前, 对设备进行安全性分析、接口冲击分析和概率风险评估, 确保改造过程中不会引入新的风险。在施工过程中严格执行核安全规范, 严格控制焊接、清洗、封口、接线等关键工序的质量, 实行全过程的质量监督和见证。在调试过程中, 对系统进行单次测试、联锁测试、瞬态测试和仿真事故验证, 保证系统的功能、性能和安全性能全面达标。从故障率、可用性、维修时间和维修工作量四个维度, 建立技改效果评价体系。对技术改造成熟可靠的技术改造成果, 形成标准化方案, 编制典型技术改造图集、工作指南和验收规范, 并推广到同类机组, 使其规模化、标准化落地。建立完善的保障体系和标准化提升机制, 不断提高高压水堆核电站核岛关键系统的整体运行可靠性, 为核电安全稳定长期运行提供技术支持。

结束语

综上所述, 提高高压水堆核岛关键系统的可靠性和技术改造, 是保障核电全寿命安全, 提高核电运行水平的重要技术支

pH值和电阻率保持稳定。增加在线监控节点, 对关键参数进行实时反馈; 建立全工况水质自适应调控逻辑, 改造完成后, 对机组进行长期稳态监测和瞬态波动验证, 保证机组在功率波动、负荷波动、启动停堆等情况下的水质稳定^[4]。通过技术改造, 实现一回路水质的全过程控制, 有效降低结构材料的腐蚀速度, 降低腐蚀产物的沉积和剂量累积。通过技术改造, 降低系统的腐蚀速度, 延缓设备的老化, 控制辐射剂量, 保证系统的长期可靠运行。

(四) 数字化监测技改, 实现状态可感知

开展核岛关键系统在线监测和状态评估技术改造, 增加振动、温、压、流、漏等传感器, 接入中央监控平台, 实现关键设备的状态可视化。技术改造包括: 布设监测测点, 铺设电缆, 布设采集设备, 建立诊断接口, 建立异常门限及趋势预警模型; 实现数据的存储、查询、报告和跟踪。改造后, 对系统进行精度校验、报警门限校验和数据传输稳定性试验, 保证监测数据的真实性和可靠性。通过对电网的数字化监控, 使运维人员能够及时掌握系统的健康状况, 及早处理异常情况, 防止事故扩大, 促进运维由事后处理向事前预防转变, 提高系统运行可靠性和精细化运维水平。

撑。深入理解核岛装备失效机理和衰退规律, 推进“状态监测—风险评估—技术改造”的协同融合, 有利于构建更加具有前瞻性的可靠性管理体系。未来, 随着材料学、智能制造和数字化运维技术的不断发展, 核岛关键系统的状态感知能力将进一步提升, 技改将更多地关注系统整体性能优化和全寿命成本控制, 为核电安全稳定运行提供更可靠的技术保证, 促进核电产业设备管理迈向更高层次, 促进清洁能源供应系统的持续优化。

[参考文献]

- [1]孙渊,熊廖强,唐剑锋.核岛主设备中磁力联轴器的设计与试验[J].机械设计与研究,2026,42(01):45-52.
- [2]尹国强.面向核岛厂房的混凝土裂缝智能自修复材料喷涂工艺优化研究[J].科技创新与应用,2026,16(03):86-89.
- [3]于江.基于 Revit 行进路径的核岛建筑最短疏散路径研究[J].建筑与文化,2026,(01):58-60.
- [4]邵拓,付霄华.基于寿命可靠性分析的核岛热工仪表质量鉴定方案探讨[J].自动化与仪器仪表,2025,(12):1-6.