

智能化技术赋能核电高效调试

徐 徐

国核湛江核电有限公司 广东湛江 524000

摘 要：本文聚焦智能化技术在核电调试与运维领域的应用，深入探讨智能化技术如何突破传统核电调试的瓶颈。通过分析核电调试的关键环节与传统模式的局限性，阐述大数据、人工智能、物联网等智能化技术在核电调试过程参数监测、系统优化、故障诊断以及运维管理中的具体应用原理与实施路径，并结合实际案例验证其有效性。研究表明，智能化技术能够显著提升核电调试效率，降低调试成本，增强核电系统运行的安全性与稳定性，为核电行业高质量发展提供有力的技术支撑，对推动核电产业智能化升级具有重要的现实意义。

关键词：智能化技术；核电调试；运维管理；高效调试；安全稳定

引言

核电作为清洁高效的稳定能源，在全球能源格局中地位愈发重要。随着我国核电产业高速发展，核电站建设规模持续扩大，核电调试作为建设向商运过渡的关键，其质效直接关乎核电站安全运行与经济效益。核电调试涵盖核岛、常规岛及辅助系统的复杂工作，需全面检测设备性能、系统功能与安全保护。然而，传统依赖人工操作与经验判断的调试模式，存在效率低、精准度差、安全风险高的弊端，难以适应现代核电产业对高效安全调试的需求。

智能化技术的快速发展为核电调试带来了新的机遇。大数据、人工智能、物联网、云计算等先进技术能够实现对核电调试过程的实时监测、智能分析和精准控制，有效提升调试效率和质量，降低人为因素导致的安全风险。将智能化技术深度应用于核电调试与运维领域，是推动核电产业智能化升级、保障核电可持续发展的必然选择。本文旨在系统研究智能化技术在核电高效调试中的应用，分析其应用场景、技术优势及实施效果，为核电调试与运维的智能化发展提供理论参考和实践指导。

一、核电调试与运维现状及传统模式的局限性

（一）核电调试与运维现状

目前，我国核电调试采用分阶段分系统模式，包含安装检查、冷/热态功能试验及机组启动试验等核心环节。调试依赖技术人员手动操作设备，利用传统仪器采集数据并凭经验评估调整；运维则以定期巡检、预防性维护为主，按固定周期开展设备检查与维护。

当前核电调试虽已应用自动化设备与管理系统，但

仍面临信息碎片化、系统集成不足等问题。调试数据整合分析效率低，导致决策缺乏数据支撑；运维环节人工巡检效率欠佳，设备故障预判能力弱，难以保障核电安全可靠运行。

（二）传统模式的局限性

1. 调试效率低下：传统核电调试依赖人工逐一对设备和系统进行操作、检测和记录，数据采集和处理速度慢。在复杂系统调试中，人工操作容易出现流程衔接不畅、重复劳动等问题，导致调试周期过长。例如，在核岛主回路系统调试中，人工检测和调整各项参数需耗费大量时间，使得整个调试进度缓慢，增加了核电站建设成本。

2. 精准度不足：人工调试过程中，数据采集和分析受技术人员操作水平和主观判断的影响较大，存在测量误差和判断偏差。对于一些细微的设备性能变化和系统异常，传统检测手段难以准确捕捉，容易导致调试结果不准确，无法及时发现潜在的安全隐患。

3. 安全风险高：核电调试环境复杂，涉及高温、高压、放射性等危险因素。人工操作在面对突发情况时，响应速度较慢，且容易因人为失误引发安全事故。同时，传统运维模式下，设备故障的早期预警能力不足，一旦设备故障未能及时发现和处理，可能引发连锁反应，威胁核电站的安全运行。

4. 运维成本高：传统定期巡检和预防性维护模式，无论设备实际运行状况如何，均按照固定周期进行维护，容易造成过度维护或维护不足的情况。过度维护会增加不必要的维修成本和备件消耗，而维护不足则可能导致设备故障率上升，影响核电站的正常运行，进而增加整

体运维成本。

二、智能化技术赋能核电高效调试的理论基础

(一) 大数据技术

大数据技术可高效采集、存储和分析核电调试运维中的海量数据，如设备参数、环境监测及历史调试数据等。借助数据挖掘算法与机器学习模型，能提取有价值信息，挖掘设备运行规律和潜在故障特征。例如，分析核电站主泵长期运行数据，可总结其最佳运行参数范围，优化运行状态。在调试阶段，大数据综合分析各系统调试数据，能快速定位异常，为调试方案优化提供数据支撑。

(二) 人工智能技术

人工智能技术在核电调试与运维中占据核心地位。借助神经网络、决策树等机器学习算法，可基于核电设备运行数据构建故障诊断与性能预测模型，精准识别异常模式，实现故障的快速诊断与预测。如通过神经网络分析核电机组振动数据，能及时定位异常振动故障并给出维修方案。此外，人工智能与专家系统结合，将行业知识经验融入决策流程，显著提升调试运维决策的科学性与准确性。

(三) 物联网技术

物联网技术通过在核电设备上部署大量传感器和智能终端，实现设备之间、设备与系统之间的互联互通。这些传感器实时采集设备的温度、压力、振动、电流等运行参数，并通过无线网络或有线网络将数据传输至数据中心或运维管理平台。物联网技术打破了信息孤岛，使运维人员能够实时获取设备运行状态信息，实现对设备的远程监测和控制。在核电调试过程中，物联网技术可实时监控调试设备的运行情况，及时发现设备异常并进行调整，提高调试效率和安全性。

(四) 云计算技术

云计算技术为智能化核电调试与运维提供了强大的计算和存储能力。通过云计算平台，可实现对海量调试和运维数据的分布式存储和并行计算，提高数据处理效率。同时，云计算技术支持远程访问和协同工作，不同地区的专家和技术人员可以通过云端平台共享数据和资源，共同参与核电调试方案的制定和优化，实现跨地域、跨部门的高效协作。

三、智能化技术在核电调试与运维中的具体应用

(一) 智能化技术在核电调试中的应用

1. 实时监测与数据采集：在核电调试阶段，于核岛、常规岛及辅助系统的关键设备部署压力、温度、振动、

流量等传感器，通过物联网网络将设备运行参数实时回传至数据中心。运维及调试人员可通过监控平台直观掌握设备状态，异常数据触发预警机制，为调试决策提供精准依据。

2. 智能故障诊断与预测：依托大数据和AI技术构建核电设备诊断预测模型，通过输入实时运行数据，结合历史故障案例学习，精准识别异常模式。如冷却剂泵振动数据异常时，系统可快速定位泵轴磨损、轴承损坏等故障，并提供维修建议。此外，预测模型还能预判设备运行状态，提前排查隐患，保障调试连续性与安全性。

3. 调试方案优化：运用大数据分析整合核电调试历史与实时数据，剖析设备及系统性能变化规律与影响因素，结合人工智能算法自动生成优化方案。如核岛主回路压力调试，通过分析数据精准优化压力上升速率、保压时间等参数，提升调试效率与准确性，保障一次达标。

4. 虚拟调试与仿真：依托VR和数字孪生技术构建核电站虚拟模型，模拟调试工况与故障场景，提前排查潜在问题，优化验证调试方案。以核电站控制系统调试为例，通过虚拟仿真测试功能与响应性能，及时修正设计缺陷，降低实际调试风险与成本，提高安全性与成功率。

(二) 智能化技术在核电运维中的应用

1. 智能巡检与状态监测：采用智能巡检机器人、无人机等设备替代人工巡检。智能巡检机器人搭载多传感器，可自主导航，全方位检测设备，实时采集外观、温振声等数据并上传运维平台；无人机则用于高空及人工难达区域巡检。运维平台借助大数据与AI技术分析数据，判断设备状态，预警潜在故障，自动生成巡检报告与维护建议。

2. 预测性维护：基于设备运行与历史维护数据，运用大数据分析及人工智能算法构建剩余寿命与维护决策模型。通过实时监测设备状态，精准预测使用寿命与故障概率，据此制定个性化维护计划。如系统预判核电机组发电机转子存在隐患、寿命不足时，自动生成维护方案，合理安排停机检修、更换部件，规避非计划停机与经济损失。该预测性维护模式推动运维从定期被动维护转向状态主动维护，显著降低成本、提升设备可靠性。

3. 安全风险预警与应急管理：利用智能化技术对核电站运行过程中的安全风险进行实时监测和预警。通过分析设备运行数据、环境监测数据、人员操作数据等信息，结合安全风险评估模型，识别潜在的安全风险因素，并对风险等级进行评估。当安全风险达到一定阈值时，系统自动发出预警信息，提醒运维人员采取相应的防范

措施。在应急管理方面,智能化系统可根据事故类型和严重程度,快速制定应急处置方案,指导应急救援工作的开展。例如,在发生放射性物质泄漏事故时,系统能够迅速确定泄漏源和影响范围,提供人员疏散路线、设备隔离措施、辐射防护方案等应急方案,提高核电站应对突发事件的能力,最大限度减少事故损失。

4. 运维管理数字化与智能化:构建智能化运维管理平台,将核电设备的设计信息、运行数据、维护记录等进行集成管理,实现运维管理的数字化。利用大数据分析和人工智能技术对运维数据进行深度挖掘和分析,为运维决策提供支持。例如,通过分析设备维护历史数据,优化备件库存管理,减少备件积压和短缺情况;通过对运维人员工作数据的分析,评估运维人员的工作绩效,优化人员配置和培训计划。智能化运维管理平台还可实现与核电站其他系统的信息共享和交互,提高核电站整体管理效率和协同性。

四、智能化技术赋能核电高效调试的案例分析

(一) 案例背景

某新建核电站在调试过程中,面临调试周期紧张、系统复杂、安全风险高等挑战。为提高调试效率和质量,确保核电站安全稳定运行,该核电站引入智能化技术,对核电调试和运维工作进行全面升级改造。

(二) 智能化技术实施过程

1. 智能化监测系统部署:在核电站各关键设备和系统上安装大量高精度传感器,构建全方位的智能化监测网络。传感器实时采集设备运行参数,并通过5G无线网络将数据传输至数据中心。同时,部署智能巡检机器人和无人机,实现对核电站设备和区域的自动巡检。

2. 智能分析与决策平台建设:基于大数据和人工智能技术,建设智能分析与决策平台。平台集成了设备故障诊断模型、性能预测模型、调试方案优化模型等多个功能模块。通过对采集到的海量数据进行分析 and 处理,为调试和运维决策提供科学依据。

3. 虚拟调试与仿真应用:利用数字孪生技术构建核电站的虚拟模型,对核电调试过程进行虚拟仿真。在虚拟环境中模拟各种调试工况和故障场景,提前发现调试过程中可能出现的问题,并对调试方案进行优化和验证。

4. 智能化运维管理系统应用:引入智能化运维管理系统,实现对核电设备的全生命周期管理。系统涵盖设备巡检、维护计划制定、备件管理、人员管理等功能模块,通过大数据分析和人工智能算法,实现运维管理的

智能化和自动化。

(三) 实施效果

经过智能化技术应用,该核电站调试周期缩短20%,成本显著降低。智能故障诊断系统精准预测并处置多起设备隐患,避免调试中断与安全事故。运维层面,智能巡检与预测性维护使设备故障率下降30%,运维成本减少15%;智能化安全预警系统也大幅提升应急能力,保障电站稳定运行。此案例为核电智能化发展提供了可复制的实践经验。

五、结论与展望

(一) 研究结论

本文研究智能化技术对核电高效调试的赋能作用,分析其在核电调试与运维中的应用原理、场景及效果。研究显示,大数据、人工智能等技术可解决传统核电调试运维效率低、精准度差、安全风险高及成本高等问题。调试时,智能化技术通过实时监测、智能分析与精准控制,提升调试质效;运维管理中,借助智能巡检、预测性维护和安全预警,增强系统安全性与稳定性,降低运维成本。该技术为核电高质量发展提供支撑,对推动产业智能化升级意义重大。

(二) 研究展望

尽管智能化技术在核电调试运维中成果显著,但仍存在提升空间。未来,随着技术发展,其应用将更深入广泛。技术层面需提升传感器精度可靠性,开发适配极端环境的新型传感器,优化人工智能算法以提高故障诊断效率;工程层面要深化与核电设计建设的融合,构建全生命周期智能化体系;安全层面则需重视数据与网络安全,完善防护保障机制,确保核电智能化安全发展。

参考文献

- [1] 叶奇蓁. 核电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [2] 韩英铎, 梅生伟. 能源互联网与人工智能[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [3] 王侃夫. 核电厂设备管理[M]. 北京: 原子能出版社, 2018.
- [4] 蔡美峰, 乔兰, 罗沅. 人工智能与智慧矿山[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [5] 李伯虎, 柴旭东, 张霖等. 云制造——面向服务的网络化智能制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 1-10.