

Research on the application of digital instrument control system in real-time monitoring and control of reactor core reactivity

Peng Xiao Tao Gao Jing Liu Xing Chen

CGN Lufeng Nuclear Power Co., Ltd., Lufeng, Guangdong, 516500, China

Abstract

With the increasing integration of renewable energy into power grids, nuclear power plants are required to frequently handle load adjustments and transient operational conditions. In such scenarios, real-time monitoring and precise control of reactor core reactivity have become crucial for ensuring safe operations. However, traditional instrumentation and control systems, constrained by data processing delays and low integration capabilities, can no longer meet the demands of complex operational requirements. This paper focuses on digital instrumentation and control systems, analyzing their suitability for reactor reactivity management. It outlines application pathways for monitoring modules including multi-source data acquisition, real-time data analysis modeling, and visual interaction interfaces. Furthermore, it proposes a hierarchical control strategy tailored for various scenarios such as steady-state operation, load adjustment (including normal power fluctuations and transient surges), and emergency warning systems.

Keywords

digital instrument control system; core reactivity; real-time monitoring; accurate control;

数字化仪控系统在堆芯反应性实时监测与控制中的应用研究

肖鹏 高涛 刘静 陈兴

中广核陆丰核电有限公司, 中国·广东 陆丰 516500

摘要

随着新能源并网比例提升, 核电站需频繁地应对负荷调整与瞬态工况, 此时堆芯反应性的实时监测与精准控制成为了保障安全运行的核心。而传统的仪控系统因数据处理滞后、集成度低等局限, 已经无法满足复杂的工况需求。对此, 本文聚焦于数字化仪控系统, 分析了其在堆芯反应性管控中的适配性, 并梳理了多源数据采集、实时数据分析建模、可视化交互等监测模块的应用路径, 进而针对稳态运行、负荷调整(含正常升降功率与瞬态突变)、事故预警等场景, 提出了分层控制策略。

关键词

数字化仪控系统; 堆芯反应性; 实时监测; 精准控制

1 引言

由于“双碳”目标的推动, 新型电力系统中新能源发电的占比持续地攀升, 其间歇性与波动性特征要求核电站兼具基荷供电与灵活调荷能力, 堆芯反应性作为决定堆芯功率的关键参数, 它的管控效果便影响着核电站的安全性与经济性。以往常见的传统仪控系统基于模拟信号与分散控制架构, 使得数据的采集范围有限、处理速度慢, 此举在应对负荷频繁调整或瞬态工况时, 就容易出现反应滞后、控制偏差等问题, 难以满足堆芯反应性“实时监测、精准调控”的需求。跟随着数字化技术与智能控制理论的发展, 数字化仪控系统凭借自身数据高度集成、实时计算能力强、容错性高的

优势, 逐渐地成为了堆芯反应性管控的核心支撑。本文就从堆芯反应性管控的核心原理出发, 经由分析数字化仪控系统的适配优势, 系统地阐述了其在实时监测中的核心模块与应用路径, 并且针对不同运行场景提出了分层控制策略, 旨在为核电站堆芯反应性管控的数字化升级提供参考与方向。

2 堆芯反应性监测与控制的核心原理及数字化仪控系统适配性

2.1 堆芯反应性的核心概念与管控要求

堆芯反应性即描述堆芯内中子产生与消失平衡状态的物理量, 其数值变化决定着堆芯功率的升降。当反应性为正时, 表明中子的产生量大于消失量, 堆芯的功率处于上升状态; 为负时则功率下降; 趋近于零代表堆芯维持着稳态运行。实际堆芯的反应性管控需满足安全性、实时性和精准性三大核心要求。但堆芯反应性还受到燃料燃烧、冷却剂温度与流

【作者简介】肖鹏(1985—), 男, 中国湖北赤壁人, 本科, 工程师, 从事核电运行研究。

量、控制棒位置等多因素的耦合影响，所以管控过程需综合地考量多参数协同作用，因此对于仪控系统的多源数据处理与协同控制能力提出了更高的要求。

2.2 传统仪控系统在堆芯反应性管控中的局限性

传统仪控系统通常以模拟电路与分散式控制单元为核心，使得它在堆芯反应性管控中存在着明显的局限。其一是数据处理滞后，传统系统过于依赖独立的传感器与模拟信号传输，因此数据采集频率低、传输损耗大，尤其在多参数同时监测时，容易出现数据同步性差的问题，导致反应性的计算滞后，实践中难以应对瞬态负荷突变等快速变化的工况；其二是系统集成度低，虽然传统仪控系统按功能可划分为独立的子系统（如温度监测系统、控制棒驱动系统），但是子系统间的数据交互比较依赖人工或简单接口，并无法实现多源数据的集中分析与全局决策，那么在负荷调整的场景中，就易出现控制棒调整与冷却剂参数优化不同步的情况；其三是容错性与扩展性差，传统系统硬件的冗余设计不足，单一的设备故障出现将导致局部功能失效，且升级需更换硬件，也就难以兼容新型监测算法与控制策略，更无法适应核电站长期运行中的技术迭代需求；其四是人工干预依赖度高，传统系统的反应性控制需操作人员根据仪表盘的数据手动进行调整，可复杂工况下人工判断易受到经验局限，增加了操作误差的风险^[1]。

2.3 数字化仪控系统的核心功能与适配优势

数字化仪控系统基于数字信号处理、分布式控制系统（DCS）与智能算法，其核心功能与堆芯反应性管控需求保持着高度的适配。它具备全场景数据集成功能，代表系统可接入堆芯内外部多类型的传感器（如中子通量传感器、温度压力传感器、控制棒位置传感器），随之通过高速以太网实现数据的实时传输与集中存储，有效地解决了传统系统的数据分散问题，为反应性计算提供全面、同步的参数支撑。同时它还拥有实时计算与动态建模能力，因为系统内置了高精度的计算模块，所以可基于采集数据实时计算堆芯反应性，并通过动态建模来模拟不同工况下反应性变化趋势，实现提前预判的管控风险，满足了反应性实时监测的需求。此外它还具备分层协同控制功能，由于系统按“设备层-系统层-决策层”构建了控制架构，其中设备层负责执行具体的控制指令（如控制棒移动、冷却剂流量调整），系统层能够实现子系统的协同（如反应性监测与功率控制协同），决策层则基于全局数据制定出优化策略，此结构避免了传统系统的局部控制局限。此外它的容错性与扩展性也更强，数字化系统通过硬件冗余（如双机热备）与软件容错算法，降低了设备故障影响，且支持软件升级与算法迭代，应用过程中可灵活融入新型的智能控制技术。最后是减少了人工的干预，系统基于自动化控制流程与异常报警机制，实现了反应性管控的半自主化，仅在极端工况下需要人工的介入，直接降低了操

作误差的风险。正是上述这些优势，使数字化仪控系统能有效地适配堆芯反应性在复杂工况下的管控需求，尤其在负荷调整与瞬态应对中的表现极其突出。

3 数字化仪控系统在堆芯反应性实时监测中的核心模块与应用路径

3.1 多源数据采集模块

数字化仪控系统实现堆芯反应性实时监测的基础就是多源数据采集模块，该模块的核心目标是全面、准确、同步地获取堆芯反应性计算所需的各类参数。实践中该模块通过两类核心组件实现功能：一是分布式传感器网络，即针对堆芯不同监测对象部署专用传感器，一般传感器要采用数字化设计，以确保能够直接输出数字信号，进而避免传统模拟传感器的信号衰减问题，同时还要具备抗辐射、耐高温特性，保证能够适配堆芯的恶劣运行环境。二是高速数据传输与预处理单元，因为传感器采集的数据通过冗余以太网传输至集中数据站，其传输速率可达毫秒级，确保了多参数的同步性；预处理单元则负责对数据进行实时地校验与清洗，经由异常值剔除算法直接排除了传感器故障或干扰导致的错误数据，再通过数据插值补全短暂信号中断时的参数空缺，便确保了输入后续模块的数据质量。

3.2 实时数据分析与建模模块

在数字化仪控系统当中，实时数据分析与建模模块是连接数据采集与监测决策的核心，其功能是基于采集数据计算出堆芯的实时反应性，并通过动态建模预判出反应性的变化趋势。具体来说，它的工作流程分为两步：第一步是反应性的实时计算，借助系统内置的多种反应性计算模型（如点堆动力学模型、三维堆芯物理模型），便能根据运行场景选择出适配的模型，然后在计算过程中，系统会自动地调用实时采集的参数进行修正，同时引入数据交叉验证机制，经由对比不同模型的计算结果，来保证反应性计算的准确性。第二步是动态建模与趋势预判，系统基于历史运行数据与实时参数，将构建堆芯反应性的动态模型，通过模拟不同的操作或外部扰动对反应性的影响，判断该情况是否存在安全风险^[2]。

3.3 数据可视化与交互模块

数据可视化与交互模块的核心呈现方式包括了以下三类。第一类是全局监测界面，以堆芯三维立体模型为基础，经由叠加实时反应性数值与分布热力图，操作人员可直观地查看堆芯整体与局部反应性状态；第二类是趋势预警界面，以时间轴为基础，能够展示反应性与关键参数的历史变化曲线，并叠加动态建模模块输出的未来趋势预测线；第三类是异常追溯界面，当监测到反应性异常波动时，界面将自动调取波动前后的详细数据（如传感器原始数据、模型计算过程），随之生成数据追溯报告，进而帮助操作人员定位异常的源头（如传感器故障、外部负荷突变）。

4 数字化仪控系统在堆芯反应性精准控制中的分层策略与场景适配

4.1 稳态运行场景

稳态运行场景下的堆芯反应性需维持在近临界状态，且功率要稳定在目标值，因此要求数字化仪控系统采用“基础控制+微调优化”的分层策略，以实现反应性的精准管控。从设备层入手而言，它负责的是基础控制，可以通过控制棒驱动系统与硼酸溶液调节系统执行组件来维持反应性的稳定。而决策层负责的是全局监控，以及监测堆芯热工参数（如冷却剂温度、压力）与反应性的关联关系^[1]。

4.2 负荷调整场景

正常负荷调整（升降功率）场景：此场景的控制目标是实现反应性平稳变化，务必避免功率出现骤升骤降。那么设备层可采用渐进式调整的策略。在升功率时先通过控制棒缓慢地提升释放反应性，同时由冷却剂系统同步地增加冷却剂流量，目的是匹配功率上升带来的热量增加，控制棒的移动速度则根据功率提升幅度进行动态地调整（如小幅升功率采用低速，大幅升功率采用中速），避免反应性过度释放。在降功率时，需要先插入控制棒抑制反应性，并减少冷却剂流量，此时控制棒的插入深度要通过实时的反应性计算进行精准地控制，务必确保功率平稳地下降。系统层则负责多系统的协同，需要实时地协调反应性控制（控制棒、硼酸）与功率输出、冷却剂系统的动作。而决策层要基于负荷预测数据制定提前控制计划，如根据电网调度给出的升功率指令，提前通过动态建模来预判所需反应性增量，随后在负荷调整开始前就微调硼酸的浓度，为控制棒的调整预留空间。

瞬态负荷突变场景：瞬态负荷突变场景的控制目标是快速地抑制反应性异常变化，进而保障堆芯安全。面对甩负荷工况（电网突然切断负荷，堆芯功率需快速下降），设备层要采用紧急补偿+快速散热策略。展开来说，要立即插入安全棒与控制棒，且快速地注入高浓度硼酸溶液，以双重手段来抑制反应性，进而避免功率的骤升。同时系统层需要启动瞬态保护机制，经由切断非必要辅助设备电源，来优先保障反应性控制与冷却系统的运行，还要封锁其他的非紧急操作指令，避免系统之间的干扰。决策层则需要实时的评估甩负荷幅度。如果面对厂用电工况（外部供电中断，依赖厂内应急电源），设备层应该优先保障反应性控制设备供电；系统层则启动负荷优先级分配，要将应急电源功率集中分配给反应性监测、控制与冷却系统；而决策层实时地监测着应急电源容量与反应性变化。此外时跳机不跳堆工况（汽轮

发电机组跳闸，但堆芯未停堆，需维持低功率运行），设备层需要快速地调整控制棒插入深度，目的是抑制反应性，将堆芯功率降至安全的低功率水平；在系统层要切断堆芯与汽轮机组的关联信号，进而防止机组故障信号干扰反应性的控制；决策层则要评估机组的故障原因与修复时间。

4.3 事故预警与紧急停堆场景

处于事故预警与紧急停堆场景时，堆芯反应性面临着严重的异常风险（如燃料破损导致的反应性突降、冷却剂流失导致的反应性突升），此时数字化仪控系统需要采用“预警前置+分级停堆”的分层策略，才能保证最大限度的降低事故的影响。即设备层部署实时异常监测的组件，像燃料破损监测传感器、冷却剂泄漏探测器等等，一旦检测到异常信号（如燃料包壳破损产生的裂变气体、冷却剂压力骤降），能够立即将数据传输至系统层，同步启动局部保护动作（如关闭异常区域的冷却剂阀门）。系统层则需要快速地分析出异常对反应性的影响，基于动态建模计算出反应性的变化速率与趋势，若判断将引发反应性异常（如冷却剂流失导致慢化剂减少，反应性突升）就迅速触发分级预警。

5 结语

新型的电力系统对核电站灵活性与安全性要求不断提升的背景之下，数字化仪控系统因具有数据集成、实时计算、分层控制的优势，成为了堆芯反应性管控的核心技术支撑。本文则通过分析数字化仪控系统与堆芯反应性管控的适配性，梳理了其在实时监测中的多源数据采集、数据分析建模、可视化交互模块的应用路径，进而针对稳态、负荷调整（含正常与瞬态）、事故预警等场景提出了分层控制策略，以此明确了数字化系统在不同场景下的管控逻辑与优势。经实践表明，该系统可有效地解决传统仪控系统在反应性监测滞后、控制协同不足、瞬态应对能力弱等问题，尤其在负荷突变场景中，该系统能通过快速反应与精准控制保障堆芯的安全，同时提升了核电站适应电网波动的能力。

参考文献

- [1] 臧维乔,方金土,杨子华.数字化仪控系统临时方案在核电调试中的应用[J].电子技术应用,2022,(S1):219-225.
- [2] 王传辉.核电站数字化仪控系统改造研究[J].现代工业经济和信息化,2023,13(04):306-308.DOI:10.16525/j.cnki.14-1362/n.2023.04.115.
- [3] 朱高斌.核电站数字化仪控系统信息安全风险分析和应对[J].电工技术,2024,(07):223-225+229.