

# Mathematical modeling and simulation verification of power distribution control during flexible refueling in reactor core

Zhenjiang Wen

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

## Abstract

Flexible core refueling is a critical technology for enhancing the operational economy and safety of nuclear reactors. The core challenges involve dynamic repositioning of fuel assemblies and neutron flux redistribution during refueling, which may lead to power distribution deviations exceeding safety limits. To address these issues, this study develops a multi-dimensional mathematical model for power distribution regulation based on the dynamic characteristics of flexible core refueling. To validate the model's effectiveness, simulation verification schemes were designed from three perspectives: static accuracy, dynamic response, and adaptability to extreme operating conditions, aiming to demonstrate its predictive capability for abnormal power regulation scenarios. Simulation results indicate that the model can accurately forecast power distribution trends during refueling processes, with control errors remaining within safe and controllable ranges.

## Keywords

flexible core refueling; power distribution control; mathematical modeling; multi-physical field coupling; dynamic boundary condition

## 堆芯灵活换料过程中功率分布调控的数学建模与仿真验证

闻振江

中广核核电运营有限公司, 中国·广东深圳 518000

## 摘要

堆芯灵活换料是提升核反应堆运行经济性与安全性的关键技术, 其核心挑战在于换料过程中堆芯燃料组件位置动态变化、中子通量分布重构, 该过程易导致功率分布偏移甚至超出安全限值。为此本文针对堆芯灵活换料的动态特性, 构建了功率分布调控的多维度数学模型。为了验证模型的有效性, 还从静态精度、动态响应、极端工况适应性三方面入手设计了仿真验证方案, 旨在验证模型对于异常工况的功率调控预测能力。最后仿真结果表明, 所建模型可精准地预测换料过程中功率分布变化趋势, 且调控误差处于安全可控区间。

## 关键词

堆芯灵活换料; 功率分布调控; 数学建模; 多物理场耦合; 动态边界条件

## 1 引言

目前随着核电技术向高经济性、高灵活性方向发展, 堆芯灵活换料技术因其可根据电网负荷需求、燃料消耗情况动态调整换料周期与燃料组件布置, 在实践中大幅度地提升了反应堆运行效率与燃料利用率, 且已成为了第三代及以上核反应堆的核心技术之一。与传统固定换料模式相比来看, 灵活换料过程中堆芯燃料组件的装卸顺序、新老燃料的混合比例、组件空间位置均处于动态变化的状态, 可直接导致堆

芯中子物理环境进行重构。可如今大多数研究堆芯功率分布调控模型均针对于稳态的运行工况, 忽略了换料过程的动态特性, 因此存在着“静态建模与动态换料不匹配”的局限。加之现有模型对燃料富集度制造偏差、冷却剂入口温度波动等不确定性因素的量化分析缺失, 所以难以评估极端工况下的功率调控风险。基于此, 本文聚焦于堆芯灵活换料的动态特征, 构建了功率分布调控的多维度数学模型, 再通过系统的仿真验证方案考核了模型性能, 旨在解决“动态换料场景下功率分布精准调控”的核心问题<sup>[1]</sup>。

## 2 堆芯灵活换料过程中功率分布调控的数学建模

堆芯灵活换料过程中功率分布调控的数学建模需覆盖

【作者简介】闻振江(1986-), 男, 中国广东深圳人, 硕士, 工程师, 从事核电厂堆芯灵活换料策略仿真技术与现场验证研究。

“多物理场交互、动态边界适配、分层调控逻辑、不确定性量化”四大核心要素。在准确地描述中子物理与热工水力耦合机制的同时,要适配换料操作的动态特性,并且还要兼顾调控过程的安全性与经济约束。

## 2.1 多维度物理场耦合建模—整合中子物理、热工水力与换料操作因素

堆芯功率的分布本质是中子物理场、热工水力场与换料操作场)相互作用的结果,因此需建立多物理场耦合方程此案实现定量描述。首先是构建中子物理核心方程,该环节应基于双群扩散理论,再考虑到换料过程中燃料组件位置变化对中子扩散系数的影响,建立起时空相关的中子通量方程,然后通过数值离散方法求解不同换料时刻的中子通量分布,进而计算出堆芯功率地分布。其次是建立热工水力耦合方程,此时要考虑功率分布对燃料温度与冷却剂状态的影响,以及反馈冷却剂参数变化对中子截面的修正作用。一般燃料温度方程采用集总参数法,主要描述着燃料芯块、包壳的温度动态变化;冷却剂流动与传热方程则基于漂移通量模型,结合冷却剂能量方程计算冷却剂温度与流量分布,再根据多普勒效应修正燃料的中子吸收截面,即可实现中子物理与热工水力的双向耦合。最后便是融入换料操作因素,通常需要将换料机械臂的组件装卸动作转化为数学约束,其中定义换料操作矩阵,再通过矩阵元素状态标识不同时刻的堆芯网格位置是否存在着燃料组件,同时根据换料顺序设计矩阵的时间演化规律,同步更新中子扩散方程中的燃料核密度分布,进而实现换料操作与多物理场的动态耦合。

## 2.2 动态边界条件适配建模—随换料过程实时调整模型边界与参数

实际在堆芯灵活换料的过程中,燃料组件装卸顺序、新老燃料特性差异、冷却剂系统运行参数调整等因素均会导致模型的边界条件出现动态地变化,因此需设计参数实时地适配算法,以确保模型的准确性。第一步要针对燃料组件装卸顺序的动态边界,建立换料序列与边界参数的映射关系,就是根据换料方案确定每次换料的组件数量与位置,定义换料阶段函数划分换料过程,且每个阶段都对应着不同的燃料组件分布边界,再结合新老燃料核密度差异进行边界参数地修正,此时需考虑到新组件富集度差异对边界条件的影响。第二步是针对冷却剂系统运行参数的动态边界,设计出参数自适应调整模型,其中换料各阶段应根据堆芯功率水平动态调整冷却剂流量,而换料准备阶段应当维持较低流量以降低风险,组件移出阶段则随功率地降低按比例下调流量,功率回升阶段需要同步地增加流量避免冷却剂过热<sup>[2]</sup>。第三步是针对换料过程中堆芯几何边界的动态变化,建立网格自适应调整机制,建议采用非结构化网格技术,此技术能够根据换料操作矩阵实时地调整网格密度,在组件装卸关键区域加密网格以提高计算地精度,并在组件移出形成的“空穴”区域采用稀疏网格来降低计算量。

## 2.3 分层调控逻辑嵌入建模—按换料阶段设计功率调控目标与实现路径

因为堆芯灵活换料各阶段的功率分布特征与安全约束不同,所以需嵌入分层调控逻辑,经过明确各阶段调控目标、约束条件与实现路径,来确保功率分布始终处于安全范围。就换料准备阶段来说,调控目标为“平稳降功率至换料安全水平”,重点是要明确堆芯平均功率与径向功率不均匀系数的约束范围。对此可建立功率调控方程规划功率下降曲线,经由调整控制棒的插入深度来实现功率调控。针对于组件装卸阶段,调控目标是“抑制功率分布偏移与峰值超调”,核心在于明确局部功率峰值与轴向功率不均匀系数的约束要求。比如在组件移出阶段,要考虑老燃料组件移出引发的周边中子通量“再分配”,因而要建立功率补偿模型,保证相邻组件功率增长过快时能够及时地通过插入补偿控制棒与调整冷却剂流量,来抑制功率地升高。当处于功率回升阶段,调控目标则为“平稳提升功率至正常运行水平”,此时要求约束条件为功率回升速率与局部功率峰值均需符合安全标准。那么就需建立功率回升曲线模型,按预设速率逐步地提升堆芯平均功率,同时通过中子通量监测实时地跟踪功率分布变化。

## 2.4 不确定性因素量化建模—识别关键不确定因素并纳入模型计算

实际在堆芯灵活换料过程中,燃料制造偏差、运行参数波动等不确定性因素会影响到功率分布调控精度。对此需通过量化建模纳入模型计算,来提升模型对实际工况的适配能力。展开而言:第一步是识别关键不确定性因素,通常包括燃料富集度制造偏差、冷却剂流量波动、换料机械操作误差三类;第二步要针对上述因素构建量化模型,比如针对燃料富集度偏差,应该引入概率密度函数描述其分布特征,再通过随机抽样生成不同富集度的偏差场景,以此计算各场景下的堆芯核密度分布,进而分析其对于功率分布的影响;第三步为建立不确定性的影响评估机制,建议通过蒙特卡洛模拟方法生成大量的不确定性场景,然后计算各场景下的功率分布关键参数,再统计参数的概率分布范围,如此能够识别对于功率调控影响最大的不确定性因素。

## 3 堆芯灵活换料过程中功率分布调控模型的仿真验证思路

### 3.1 静态精度验证

静态精度验证聚焦于模型在稳态工况下的功率分布计算准确性,需要通过对比模型计算结果与实验堆芯实测数据,来检验模型对堆芯稳态功率分布的描述能力。本节选取了典型实验堆芯作为验证对象,而该堆芯需具备完整的换料后稳态运行实测数据,当中包括了不同径向与轴向位置的功率密度、功率不均匀系数等关键参数。在仿真验证的过程中,首先要根据实验堆芯的燃料组件布置、冷却剂运行参数、控

制棒位置等设计条件,设置模型的输入参数,结合模拟换料完成后的稳态运行工况,来计算堆芯功率分布;其次是提取模型计算的关键参数,将其与实验堆芯的实测数据进行对比分析,重点要关注径向与轴向功率分布曲线的吻合程度、局部功率峰值的计算误差、功率不均匀系数的偏差范围;最后需制定精度的评价标准,一般关键参数的计算误差均控制在预设范围内,且功率分布曲线趋势与实测数据保持一致,便表明模型静态精度满足了要求,其能够准确地描述稳态工况下的堆芯功率分布<sup>[1]</sup>。

### 3.2 动态响应验证

在动态响应验证当中,重点考核第三模型对换料过程中功率分布动态变化的捕捉能力,即需要模拟换料组件装卸瞬时过程与各阶段功率过渡过程,来检验模型计算的动态特性是否符合实际物理规律与安全要求。

**组件装卸瞬时过程:**验证时应选取换料过程中典型的组件移出与装入动作作为仿真场景,依次模拟组件开始操作、操作过程中、操作完成三个关键时间节点的功率分布变化。而在模拟过程当中,重点监测组件周边区域的功率密度动态响应,以此分析功率峰值的出现时间、过渡时间与超调量。如果模型计算的功率峰值超调量未超出安全限值,过渡时间也符合换料操作的时间要求,且功率变化趋势与物理预期一致(如组件移出后周边功率先降后稳、组件装入后局部功率先升后控),就表明模型能够准确地捕捉换料瞬时过程的功率动态变化。

**各换料阶段的功率过渡过程:**该阶段的验证需要模拟换料准备阶段的功率下降、组件装卸阶段的功率波动、功率回升阶段的功率上升全过程,再计算各个阶段功率分布的时间演化曲线,随后分析功率变化速率、各区域功率同步性是否满足了调控的要求。例如功率下降阶段需验证功率是否按预设曲线平稳地降低;功率回升阶段的关键是验证功率提升速率是否均匀,以及各区域功率地增长是否同步。

### 3.3 极端工况适应性验证

极端工况适应性验证旨在检验模型在异常与风险场景下的功率调控预测能力,目的是确保模型能够为换料过程中的应急处置提供有效支撑,其核心在于模拟“换料机械卡涩”“冷却剂流量骤降”“燃料组件安装偏差超标”等典型的极端工况,以此分析模型计算的功率分布变化与调控策略有效性。

**换料机械卡涩工况:**经由模拟换料过程中燃料组件被卡在堆芯半空或未完全装入/移出的场景,计算出该状态下的堆芯中子通量分布与功率分布,然后分析卡涩组件对于

周边区域功率的影响,即可评估是否出现了局部功率峰值超标。基于模型计算的结果,得以验证预设的应急调控策略(如插入应急控制棒、调整冷却剂流量)能否快速地将功率分布拉回安全区间。若模型计算显示应急策略实施之后,功率峰值在规定时间内降至安全限值以下,就表明模型能够为该极端工况的应急处置提供准确的指导。

**冷却剂流量骤降工况:**通过模拟换料过程中因泵组故障导致冷却剂流量短时间内大幅下降的场景,能够计算出流量骤降后燃料温度、冷却剂温度与功率分布的变化趋势,以此为基础分析热工水力场变化对功率分布的反馈影响,就能检验模型是否能够准确地捕捉“流量下降—温度升高—功率调整”的连锁反应。同时验证模型计算的功率调控措施(如紧急降功率、启动备用冷却系统)的有效性,可以确保即使在冷却剂流量异常的情况下,模型仍能准确地预测功率分布风险并给出可行的调控方案。

**燃料组件安装偏差超标工况:**针对该工况,需要模拟燃料组件实际安装位置与设计位置存在较大偏移的场景,计算出位置偏差引发的中子通量分布偏移与功率集中风险,进而评估模型对几何偏差的敏感性与计算准确性。

总之,通过极端工况适应性验证,可以全面地检验模型在复杂风险场景下的可靠性,以确保模型不仅能适用于正常换料工况,还能为极端工况的风险评估与应急处置提供技术支撑,有利于进一步地提升堆芯灵活换料过程的安全性。

## 4 结语

本文围绕着堆芯灵活换料过程中的功率分布调控问题,构建了涵盖多物理场耦合、动态边界适配、分层调控逻辑、不确定性量化的多维度数学模型,并且从静态精度、动态响应、极端工况适应性三个方面设计了系统的仿真验证思路,最终形成了一套完整的“建模—验证”体系。该模型通过整合中子物理、热工水力与换料操作因素,实现了对换料过程功率分布动态变化的精准描述;而通过动态边界适配与不确定性量化,提升了模型对实际复杂工况的适配能力;通过分层调控逻辑,直接明确了各换料阶段的调控目标与实现路径,进而为实际换料操作提供了清晰的指引。

### 参考文献

- [1] 刘婵云,杨波,毕光文,等.大型压水堆堆芯燃料管理策略灵活性研究[J].核科学与工程,2015,35(03):434-438.
- [2] 王丽华,曹泓,杨波,等.核电厂多种长周期换料策略研究及改进[J].核科学与工程,2019,39(06):922-927.
- [3] 李文海.核电厂18个月换料过渡循环灵活性论证及应用[J].中国新技术新产品,2021,(03):146-148.