

核电站运行中的多物理场耦合分析与优化策略

赵浩然, 巢海平

台山核电合营有限公司, 广东 江门 529228

DOI:10.61369/EPTSM.2025030012

摘要： 本文深入探讨核电站运行过程中的多物理场耦合现象，详细分析其耦合机制，介绍常用的多物理场耦合分析方法。同时采用数值仿真与试验相结合的研究手段，进一步阐述基于多物理场耦合分析的核电站运行优化策略，涵盖运行参数、设备设计以及安全监测与预警系统等方面的优化，以提高核电站的安全、稳定和经济运行为目标，通过对多物理场耦合的深入研究与优化，为核电站的高效可靠运行提供有力支持。

关键词： 核电站；多物理场耦合；数值模拟；运行优化

Multi-Field Coupling Analysis and Optimization Strategy for Nuclear Power Plant Operation

Zhao Haoran, Chao Haiping

Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., LTD., Jiangmen, Guangdong 529228

Abstract： This paper delves into the multiphysics coupling phenomena during nuclear power plant operations, providing a detailed analysis of its coupling mechanisms and introducing commonly used methods for multiphysics coupling analysis. It also employs a combination of numerical simulation and experimental research to further elaborate on operational optimization strategies for nuclear power plants based on multiphysics coupling analysis. These strategies cover the optimization of operating parameters, equipment design, as well as safety monitoring and early warning systems, with the aim of enhancing the safety, stability, and economic operation of nuclear power plants. Through in-depth research and optimization of multiphysics coupling, this study aims to provide strong support for the efficient and reliable operation of nuclear power plants.

Keywords： nuclear power plant; multi-physical field coupling; numerical simulation; operation optimization

引言

核电是一种高效清洁的能源生产设备，在世界能源供给系统中占有举足轻重的位置。但是，核电站在运行过程中存在着传热、渗流、结构力学响应和中子物理等多个复杂的物理现象，这些个不同的物理过程并不是孤立的，而是相互影响和相互作用，构成了一个复杂的多场耦合体系。多物理场的耦合作用直接关系到核电站的运行性能、安全性和可靠性，因此开展核电运行过程中多场耦合机理的研究，对提升核电运行效率、降低运营成本以及保证核电安全，有着十分重要的现实意义。这不但可以帮助核电站更好地满足能源的需要，还能为核电站的可持续发展提供坚实的技术支撑。

一、核电站运行中的多物理场耦合机制

（一）热-流-结构耦合

在核电站，核燃料裂变时会产生巨大的热量，它先以热传导的方式传送到燃料棒上，冷却剂在冷却剂吸热后升温、密度减小，产生自然对流或强迫对流。冷却介质是由冷却剂驱动的，而冷却介质与燃料棒、堆内构件发生复杂的对流传热。

从结构力学的观点出发，在高温高压环境和冷却介质的作用

下，会发生材料的变形与应力，比如燃料棒在热膨胀过程中会产生轴向、径向的变形，当变形量太大会造成与周边结构件的直接接触，从而影响其工作性能，甚至引起安全隐患。同时构件的形变也将影响冷却剂在管道中的流动路径及速度分布，从而导致传热过程发生变化，因此热-流-固多场耦合作用对核电站的安全稳定运行具有重要影响。

（二）中子物理与热工水力耦合

在核电站的生产操作中，中子物理过程是一个重要的过程，

原子核在中子的轰击下会进行裂变反应，生成新的中子并释放出巨大的能量。中子的产生、传输、吸收等物理过程不仅与材料分布、温度分布有关，而且与冷却剂的流动状况也有很大关系^[1]。

此外，热工水力环境对中子的物理行为具有重要的影响，比如当冷却剂的温度、密度发生改变时，它对中子的氧化能力就会发生变化。随着冷却剂温度的提高，其密度减小，缓化中子的能力也随之下降，引起中子能谱的改变，从而影响到核反应的速度和反应活性。而在反应堆内部，由于中子的作用而生成的能量，也会影响到反应堆内部的热量分配，从而影响到整个反应堆的温度场与流场^[2]。这种中子物理与热工水力之间的强耦合关系，要求在核电站运行分析和设计中必须同时考虑这两个物理场的相互作用，由此确保反应堆的安全稳定运行和高效性能。

二、多物理场耦合分析方法

（一）数值模拟方法

1. 计算流体力学（CFD）与有限元方法（FEM）的结合

计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）是一种重要的数值方法，它可以准确地模拟冷却剂在反应器中的流动情况，包括速度、压力等。有限元法是一种适合于结构力学的数值模拟技术，能够精确地模拟不同载荷下燃料杆及反应堆等构件的应力、应变及变形情况^{[3][4]}。

因此可以采用 CFD 和有限元法相结合的方法对核电站进行多场耦合计算。采用 CFD 方法对冷却剂流动进行数值模拟，得到冷却剂流动速度、压强等物理量，并以此为荷载作用于构件，采用有限元方法对其进行数值求解。在此基础上，对 CFD 计算中的流动边界条件进行修正，以适应构件的变形，重新计算流场，如此反复迭代，直至流场和结构响应达到收敛。由此为核电装备的设计与运行分析提供精细化的数值计算依据，有助于深刻理解多场耦合作用机理，实现装备性能的优化^[5]。

2. 多物理场耦合求解器

近年来，数值模拟技术的进步使得多场耦合问题的求解方法应运而生，该算法可在多物理场中同步求解，并包含多物理场间的耦合项。比如商用的多物理场耦合求解器，可以实现对中子物理、热工水力、结构等多物理场的耦合模拟。

由于多物理场耦合求解方法具有统一的计算格式和数据结构，可以有效地求解复杂耦合问题。在此基础上，提出基于多物理场耦合的新方法能够在一定程度上解决多物理场间的交互作用问题，从而大大降低人工设定耦合边界及迭代次数的复杂程度。因此利用多物理场耦合方法不但能提高计算效率，还能保证多物理场耦合模拟的准确性和可靠性，为核电站运行中的多物理场耦合分析提供强大的工具，尤其适用于大规模、复杂的核电站系统模拟^[6]。

（二）实验研究方法

1. 模拟实验台架

仿真试验台是研究核电站多物理场耦合作用的一种重要试验方法，采用类似于核电站真实系统的试验模型，对核电站在不同

工况下的工作状态进行仿真。通过构建热流固多场耦合试验平台，实现对燃料棒-冷却剂的传热、冷却剂流动、温度场、流场等多场耦合的仿真^[7]。

在试验台架上，实现对冷却液流量、温度、压力、模拟构件材质、几何尺寸等多种试验参数的精确控制，通过对温度、速度、应力等多物理量的测试，获得多场耦合作用下的试验数据。同时通过对试验数据的分析证明数值计算的正确性，还能对数值模型的改进提供依据，有助于深入理解多物理场耦合的基本规律，进而为核电站的设计和运行优化提供实验支持。

2. 堆内测量技术

堆内测试是实现核能系统多物理场直接测量的一种重要手段，可以采用中子探测器、温度传感器和压力传感器等多种传感器对反应堆进行实时监测。堆内实测数据能较好地反映堆内多场耦合作用，比如通过对中子注量、温度等参数的测定，研究中子物性与工质水力学的耦合关系。试验结果对检验核电站的设计合理性、监控反应堆的工作状况，及时发现安全隐患都有着无可替代的意义。同时堆内测量数据也为核电站多物理场耦合数值模式的校验与校验提供更直观、更精确的依据，推动数值仿真在核电站操作过程中的应用与发展^[8]。

三、基于多物理场耦合分析的核电站运行优化策略

（一）运行参数优化

1. 冷却剂流量与温度的优化

冷却剂的流速与温度是决定核电站操作性能的重要因素，研究表明，工质流动对堆芯传热效率及各构件受力状态有重要影响，增大冷却剂流量可改善传热效果使燃料杆及各构件的温升下降，但也会使水泵功率消耗增大。为此，需对其进行优化分析，以求获得最优的冷却剂流量，以确保反应器的安全运行。

同时，冷却剂的温度对核电站的操作也有很大的影响，选择适当的冷却剂温度区间可以确保冷却剂在较好的中子缓化能力下，保持核反应的稳定性。在此过程中，冷却液温度的波动将导致构件的热应力发生改变，开展多物理场耦合仿真，并考虑核电站的运行目标与安全约束，实现对冷却剂进口及出口温度的优化，从而有效地提升核电站的工作效率与稳定性，并且减少设备的疲劳破坏风险。

2. 反应堆功率调节策略优化

在核电站的操作过程中，反应堆功率调整是一个非常重要的步骤，多场耦合计算结果显示，当堆功率改变时，堆内中子通量、温度以及冷却剂流场都将产生复杂的变化。传统的电力调控方法往往不能很好地考虑多物理场的耦合作用，从而造成电力系统失稳、设备使用寿命降低等问题。在此基础上，需要发展更先进的堆内能量调控方法，比如基于多物理场耦合的模型预测控制，对功率调控过程中各个物性参数的变化规律进行预测，并对其优化，从而实现更平稳、高效的功率调控。而所提出的最优功率调整策略既能保证电力系统的正常运行，又能保证系统的正常运行，最大限度地减少对反应堆内部多物理场的不利影

响,保障核电站的安全稳定运行,并且提高核电站的经济性和灵活性。

(二) 设备设计优化

1. 燃料棒结构优化

燃料棒作为核能发电装置的关键组成部分,其结构设计对核电站的工作性能及安全起着至关重要的作用。通过多物理场耦合方法,能够研究热、流、中子等多场耦合作用下燃料棒的力学行为,也可以运用理论分析和数值模拟相结合的方法,系统地研究不同几何尺寸、材料成分和内部结构等因素对传热效率、机械性能以及中子吸收性能的影响规律。

在此基础上,研究多场耦合作用下的燃料棒结构优化问题,比如使用新的燃料棒外壳来增强导热系数,增强耐辐射能力。通过对燃料棒内部结构进行改进,在其上加装散热翅片或改变其布置形式,提高传热性能并且降低其运行温度。优化后的燃料棒结构能够提高核电站的功率输出能力,延长其工作寿命、减少核燃料消耗量,并提升核电站的安全可靠运行。

2. 反应堆压力容器设计优化

反应堆压力容器作为承载堆芯的核心装置,承受着高温、高压和复杂的机械载荷,多物理场耦合分析对于反应堆压力容器的设计优化至关重要,通过对反应器内温度场、压力场和结构应力的数值模拟,可以对各种工作状态下的压力容器进行分析。在此基础上,结合实验数据对堆芯材料的选取、几何尺寸及结构的优化进行研究,例如在生产压力容器时,应选用强度高、韧性好、抗辐射能力好的材料;对压力容器的壁厚进行优化设计,使其在保证强度的同时实现轻量化、低成本的目的。同时通过添加肋条、优化焊接等方法提升其承受复杂荷载的能力,保证其运行过程中的安全性和可靠性。

(三) 安全监测与预警系统优化

1. 多物理场参数融合监测

传统的核电站安全监控体系通常是对各物理场参数进行单独监控,很难全面地反映反应堆在多物理场耦合作用下的真实工作状态。因此需要基于多物理场耦合分析,构建多物理场参量融合监控体系,实现对反应堆运行状态的准确全面评估^[9]。

比如通过对中子流与冷却剂温度的耦合变化规律的研究,可以更早期地检测到反应堆内部可能存在的诸如局部功率脉动、冷却剂流动等异常现象。多物理场参数融合监测系统能够提高安全监测的灵敏度和可靠性,及时捕捉到反应堆运行过程中的细微变化,为保障核电站安全运行提供更加有效的监测手段。

2. 故障预警模型建立

利用多物理场耦合分析得到的大量数据,采用机器学习与人工智能相结合的方法,可以构建核电站事故早期预警模型。在此基础上,通过对典型工况及多种故障状态下的多物理场参量进行特征提取与分析,建立基于多场耦合的多物理场参量学习方法。在系统监控系统中,若发现系统的运行参数与常规工况发生偏差,则能及时给出故障报警,并对可能发生的故障类型及发展趋势进行预测。比如通过温度-流动-固多场多场耦合作用下,燃料棒有没有发生变形破坏的危险,反应堆压力容器内会不会产生由应力集中引起的裂纹扩展等。而故障预警模型的建立可以提前发现潜在的安全隐患,为核电站运行人员采取相应的预防措施提供充足的时间,进而有效提高核电站的安全性和可靠性,降低事故发生的概率。

四、结语

综上所述,核电站运行中的多物理场耦合是一个极为复杂且关键的研究领域,研究人员通过深入分析热-流-结构耦合、中子物理与热工水力耦合等多物理场耦合机制,运用数值模拟和实验研究等先进分析方法,能够全面准确地了解核电站运行过程中的物理现象和内在规律。由此制定基于多物理场耦合分析的运行参数优化、设备设计优化以及安全监测与预警系统优化等一系列策略,对于提升核电站运行的安全性、稳定性和经济性具有不可估量的作用。

未来,随着科学技术的不断进步,多物理场耦合分析技术将在核电站领域得到更广泛、更深入的应用,进而为全球核能事业的可持续发展提供坚实的技术保障,助力实现能源的高效、清洁生产与供应。

参考文献

[1] 唐琪,蔡杰进,徐伟峰,等.高性能轻水堆中子物理-热工水力耦合行为分析[J].原子能科学技术,2014,48(S1):227-232.
[2] 齐飞鹏,刘振海,尹春雨,等.燃料元件多物理场耦合分析平台MCAT开发及初步验证[J].核动力工程,2024,45(03):28-36.
[3] 安雨晨,解家春.核热推进燃料形式演变及现状分析[J].科技视界,2023,(16):125-127.
[4] 王兴春,张焰.美启动首座先进燃料商业制造厂建设[J].国外核新闻,2022,(11):17.
[5] 王卫杰,刘燕楠,赵振国.基于谐波分析的封装-电路多物理场耦合仿真方法[J].电子学报,2024,52(08):2718-2725.
[6] 邹晓阳,万承辉,曹良志.堆芯多物理耦合的不确定性分析方法研究及应用[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(12):2400-2407.
[7] 郭高志.核电站离相封闭母线的多场耦合分析及结构优化设计[D].青岛科技大学,2023.
[8] 王胜辉,许育帅,孙凯旋,等.多物理场耦合下不同短路与接地故障对变压器绕组状态影响的仿真研究[J].高电压技术,2023,49(06):2397-2408.
[9] 文宇轩.物理-数据融合的锂离子电池多物理参数退化预测方法研究[D].哈尔滨工程大学,2024.
[10] 张帅涛,蒋品群,宋树祥,等.基于注意力机制和CNN-LSTM融合模型的锂电池SOC预测[J].电源学报,2024,22(05):269-277.