

在线堆芯监测系统的研究现状与建议

厉井钢, 李文淮, 张香菊, 王军令, 王婷, 卢皓亮, 彭思涛

(中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518026)

摘要: 在线堆芯监测系统(CMS)是核电站保障安全运行的重要系统,其主要功能是实时监测堆芯内部的关键参数变化,以便及时发现潜在的异常情况并提供后续操作建议。本文对在线CMS的主要功能进行了数学建模,明确了其核心的建模正问题以及监测、诊断和运行支持反问题。通过对国内外典型在线CMS的研究现状进行分析,明确了上述正反问题的求解思路,为后续在线CMS解决具体工程问题提供参考。其中,堆芯建模问题涉及高低保真度的机理模型、机器学习模型和降阶模型等。利用不同类型探测器和数据同化算法,解决探测器布置、物理场重构及不确定性量化问题是监测反问题的核心。诊断反问题则主要通过堆内外中子探测器信息,实现对棒失步、自给能中子探测器异常和振动异常等故障原因分析。运行支持反问题则主要利用堆芯跟随的理论模型,进行反应性或功率分布控制。最后,本文指出当前在线CMS技术研究中多源信息融合、不确定度量化和运行规程等方面存在的挑战。特别是在数字孪生及数值反应堆的框架下,考虑各种不确定性因素影响,实现机组运行能力提升,是在线CMS后续发展的重点方向之一。

关键词: 在线堆芯监测系统; SOPHORA; 反问题; 数字孪生

中图分类号: TL364.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)07-1393-13

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0147

Research Status and Suggestions of Nuclear Reactor Online Core Monitoring System

LI Jinggang, LI Wenhui, ZHANG Xiangju, WANG Junling, WANG Ting, LU Haoliang, PENG Sitao

(China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518026, China)

Abstract: The online core monitoring system (CMS) is a crucial system for ensuring the safe operation of nuclear power plants. Its primary function is to real-time monitor the key parameter changes within the reactor core, in order to timely detect potential abnormal conditions and provide subsequent operational recommendations. The mathematical modeling of the main functions of online CMS was conducted, and its core modeling forward problem was clearly defined as well as the inverse problems of monitoring, diagnosis, and operational control. Through analyzing the research status of typical online CMS systems, the solution approaches for the aforementioned forward and inverse problems were identified, providing references for resolving specific engineering issues of online CMS in the future. The reactor core modeling mainly involves high and low-fidelity mechanistic models, as well as various machine learning models and model order reduction techniques. Solving the detector placement, physical field reconstruction, and uncertainty quantification problems using diverse types of detectors and data assimilation algorithms is the core of the monitoring inverse problem. The diagnosis inverse problem primarily relies on in-core and ex-core neutron detector information to analyze the causes of

control rod drop, self-powered neutron detector anomalies, and vibration abnormalities. Utilizing the theoretical models of core tracking, various types of reactivity or power distribution control constitute the main tasks of the operational support inverse problem. Furthermore, this paper points out the existing issues in current online CMS technology research, such as multi-source information fusion, uncertainty quantification, and operational procedures. Particularly, considering the influence of various uncertainty factors within the framework of digital twins and numerical reactors, to enhance the plant operating capability, is one of the future development directions for online CMS and its underlying technologies.

Key words: online core monitoring system; SOPHORA; inverse problem; digital twin

在线堆芯监测系统(core monitoring system, CMS)是核电站运行安全的重要组成部分,可实时监测堆芯的物理状态和参数,以提高核电站的安全性和可靠性。从在线 CMS 在核电厂部署执行的功能看,其核心是为操作员提供实时的堆芯内状态参数变化,用于监测实际运行边际与预定堆芯安全限值之间的差距。这些状态参数包括热功率、燃料元件温度、放射性核素浓度等多个关键指标。通过监测这些指标的变化,可及时发现潜在的异常情况,提供核安全程度及后续操作建议。通常,在线 CMS 中堆芯和主回路参数包括总热功率、平均回路温度、燃料棒积分功率或线功率密度(LPD)、子通道出口温度和最小偏离泡核沸腾比(DNBR)。在线 CMS 从系统功能上应至少包括对堆芯当前状态的最佳测量、对堆芯后续状态的准确预测和给定运行目标下的最优控制操作。

国际上已有很多成熟的在线 CMS 系统部署在核电厂中,如美国 Westinghouse Electric Corporation 研发的 BEACON^[1]、美国 Combustion Engineering 公司研发的 CECOR 系统^[2]、瑞典 Studsvik 公司研发的 GARDEL^[3]、法国 AREVA 公司的 POWER-TRAX 系统^[4]等。国内也自主研发了一系列在线堆芯监测系统,如中广核研究院有限公司的 SOPHORA 系统^[5]、上海核工程研究设计院有限公司院的 SOMPAS 系统^[6]、西安交通大学的 NECP-ONION^[7]等。此外,中国核动力研究设计院^[8]、上海核星核电科技公司、哈尔滨工程大学等也推出了各自特色的在线 CMS 产品。本文旨在通过对国内外在线堆芯监测系统的研究现状进行梳理分析,提出建议,以促进该领域的进一步发展。

1 主要数学问题

给定 t 时刻下的核反应堆堆芯的状态场 \mathbf{X}_t ,

(如三维中子通量场、三维功率场、核素密度场、温度场等),因此 t 时刻下探测器的测量值 \mathbf{M}_t 可表示为:

$$\mathbf{M}_t = h(\mathbf{X}_t, \mathbf{W}_h) + \boldsymbol{\varepsilon}_h \quad (1)$$

其中: h 为探测器观测函数; \mathbf{W}_h 为与测量机制相关的未知或已知的参数; $\boldsymbol{\varepsilon}_h$ 为测量的随机误差。 $t+1$ 时刻的堆芯状态场 \mathbf{X}_{t+1} 如式(2)所示。其中, F 为状态转移方程; \mathbf{W}_F 为核反应堆堆芯“核-热-流-固-化”等物理场模拟相关的已知或未知的模型动力学参数; \mathbf{A}_t 为反应堆状态控制变量(如功率水平、硼浓度、控制棒位置等); $\boldsymbol{\varepsilon}_F$ 为模型误差。

$$\mathbf{X}_{t+1} = F(\mathbf{X}_t, \mathbf{A}_t, \mathbf{W}_F) + \boldsymbol{\varepsilon}_F \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tau_{1:T}^* = \arg \min_{\tau_t = (\mathbf{X}_t, \mathbf{A}_t)} & \sum_{t=1:T} (\mathbf{X}_t - \mathbf{X}_{t,\text{target}})^\top \times \\ & \begin{pmatrix} w_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & w_n \end{pmatrix} (\mathbf{X}_t - \mathbf{X}_{t,\text{target}}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_{\text{init}}, \quad \mathbf{X}_{t+1} = F(\mathbf{X}_t, \tau_t) + \boldsymbol{\varepsilon}_F$$

基于此,反应堆运行优化问题可定义为:给定时间区间 $(t, t+T)$ 中核反应堆运行的状态场目标轨迹,如 $\mathbf{X}_{t,\text{target}}, \dots, \mathbf{X}_{t+T,\text{target}}$, 寻找一组时间序列下反应堆状态和状态控制变量的最优解 $\tau_{1:T}^*$, 使实际状态场的时间序列与目标状态场的时间序列具有式(3)所示的最小偏差。其中, $\mathbf{w} = [w_1 \dots w_n]^\top$ 为不同物理场之间的权重系数。在堆芯运行操作参数不变的情况下,堆芯常处于稳定状态,即 $\mathbf{X}_{t+1} = \mathbf{X}_t$ 。

式(1)、(2)对应于传统反应堆模拟与分析的正问题,也称核反应堆的建模问题。在线 CMS 涉及的主要反问题包括:1) 监测反问题:已知某时刻下探测器的测量值 \mathbf{M}_t , 求解此时堆芯的状态场 \mathbf{X}_t , 即根据测量的探测器信息,重建堆芯内物理场分布,实现堆芯状态的最佳估计;2) 诊断反问题:已

知某时刻下探测器的测量值 M_t , 求解此时堆芯的状态控制变量 A_t , 即根据测量的探测器信息, 获取堆芯运行操作条件, 识别潜在运行边界; 3) 运行支持反问题: 已知一组反应堆运行的状态场目标轨迹, 如 $X_{t,target}, \dots, X_{t+T,target}$, 求解一组堆芯状态控制变量 A_t, \dots, A_{t+T} , 即满足最优运行控制目标的一组最佳的时序操作动作。

2 主要技术现状

2.1 堆芯建模研究现状

核反应堆的物理过程涉及“核-热-力-化-材”等多个物理场。在工程实践中, 直接对反应堆堆芯的所有物理场进行全面监测较困难, 且带来的收益并不明显。堆芯的部分关键状态参数可反映其运行的安全程度。其中, 最重要的两个参数是堆芯的反应性和三维功率分布^[9]。反应性的变化表现为整体中子通量水平变化, 对临界安全性产生影响, 而空间功率分布的变化是影响热工安全分析的主要原因之一^[9]。

仿真建模通常涉及偏微分方程求解以近似预测堆芯内各种状态参数。目前, 主要有 6 种堆芯建模方法, 包括点堆建模、一维堆芯建模、多节点堆芯建模、三维堆芯建模、分数阶堆芯建模和基于智能学习的堆芯建模^[10]。特别是神经网络模型(如前向神经网络、递归神经网络、多层细胞神经网络等)已被用于压水堆或沸水堆的状态估计和预测^[11-17]。许多成熟的核反应堆堆芯分析软件均基于三维堆芯开展分析的, 如 COCO^[18]、TORCH^[19]、cosCORE^[20]、NECP-Bamboo^[21]、ANC^[22]、SIMULATE-5^[23] 等。然而, 上述这些基于单个物理场构建的独立软件可能会有一定程度的精度损失。为解决这个问题, 一些研究项目提出了整合这些独立软件并开发高保真多物理场耦合分析工具的目标, 如 CASL^[24]、NEAMS^[25]、NURESIM^[26] 等。美国 CASL 计划是美国能源部为解决当前核能产业面临的技术挑战而推出的计划, 旨在开发一种高保真的堆芯多物理场耦合模拟分析程序, 能快速、准确模拟核反应堆的多物理场耦合效应。

然而, 这些高保真堆芯模拟工具的计算效率较低, 通常只用于新型核反应堆设计的详细计算和验证^[27], 而不能用于实时堆芯监测和控制。为满足堆芯三维模型或高保真模型应用于在线监测

与控制, 降阶建模技术常被作为快速计算方法, 以实现计算精度和实时性的平衡。目前已提出了多种模型降阶技术, 如本征正交分解^[28]、高斯过程回归^[29]、动态模式分解^[30]、自编码器^[31]、利用缩减基有限元方法和本征正交分解-伽辽金投影方法、物理信息神经网络(PINN)^[32-33] 等。这些在工程设计领域(如新堆设计^[34]、换料设计^[35])中采用的降阶应用或人工智能应用, 具体可参考文献^[36-37]。

目前, 工业在线 CMS 中主要采用以三维堆芯节块法程序^[18] 为代表的核设计软件作为堆芯监测的理论模拟器。一些基于机器学习或模型降阶的新方法, 虽获得了广泛研究, 但目前工业应用仍较少, 需进一步补充进行大量的敏感性及不确定性分析工作。

2.2 堆芯监测反问题研究现状

反应堆堆芯通常部署各种传感器系统以测量堆芯功率分布, 如图 1 所示, 包括:

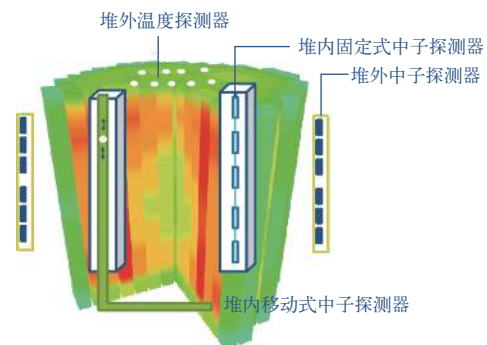


图 1 典型核反应堆堆芯内外主要探测器
Fig. 1 Various typical detectors inside or outside of reactor core

1) 堆芯可移动式探测器系统, 其通过传动装置将平时布置在堆外的探测器移动到堆内测量之后再移出堆芯, 是现有精度最高的测量技术^[38]。缺点是只能周期性离线测量而无法实时监测。

2) 堆内布置的固定式铪、钒、钴等自给能中子探测器(SPND)系统, 监测功率分布变化^[39]。

3) 堆芯入口及堆芯出口温度测量系统, 测量由功率分布引起的堆芯内流体温度场的变化^[40]。

4) 堆外固定中子探测器系统, 测量由堆芯边缘区域组件泄漏到压力容器外的中子的中子响应, 其轴向信息表征堆芯边缘组件的轴向功率信息^[41]。

由于探测器的反应机理具有随机性、灵敏度

的离散性、探测器物质的燃耗以及系统本身的漂移等特征,导致探测器在测量过程中会产生多种类型的误差。为监测反应堆状态,现有方法以最准确的探测器结果作为参考,并定期对其他测量设备进行校准^[38]。如尽管可移动式探测器无法实现对反应堆的在线监测,但在部署固定式探测器时,可通过可移动式探测器的结果对固定式探测器进行校准,从而实现对特定堆芯状态参数的连续监测。而在没有固定式探测器部署时,可通过校准堆外探测器^[42]和堆芯出口热电偶^[43]的方法来监测其他特定堆芯参数。以 SOPHORA 系统为例,通过堆外探测器和堆芯出口热电偶等堆外信号实现了堆芯三维功率分布的实时测量^[44],并已在二代加核电机组中部署应用。

由于布置的探测器只能覆盖堆芯的一部分区域,因此需进行全堆测量信息的重构。已有大量工作进行三维或二维的功率分布重构,采用的方法大致可分为3类。第1类方法是直接基于探测器读数,在最小二乘意义下耦合中子扩散及其高阶特征分解来实现重构^[45],如谐波展开法^[46-47]、谐波综合法^[48-49]、耦合系数法^[50]、本征正交分解法^[51]和中子截面修正法^[52]等。第2类方法是基于参考功率分布的最优空间插值法^[53-55],如多项式展开和薄板样条函数拟合方法^[55]、地理统计学的克里金插值方法^[56-57]、支持向量机插值^[58]以及径向基函数(RBF)插值方法^[59]、H1 正则化广义经验插值方法^[60]等。第3类方法是基于概率的方法,如三维变分方法^[61-62]及其变种方法^[63]、卡尔曼滤波^[64]、贝叶斯推断^[65-67]等。数据同化是一更广泛的概念,被认为是将理论模型与测量数据在概率框架下融合的方法^[68]。数据同化是上述几类方法的综合,如将本征正交分解与广义经验插值方法结合^[69]。尽管基于数据同化的堆芯监测方法得到广泛的前沿研究,但需指出,目前主流的商用在线 CMS 仍主要采用第1类和第2类方法。

近年来,数据学习方法替代传统机理模型的方法引起了广泛的兴趣,尽管在在线 CMS 工业产品中应用仍相对较少。这些方法也被称为代理模型,通过大量的模拟条件下的堆芯状态数据进行监督学习,获得相关探测器信息与堆芯状态信息之间的映射关系。探测器信息可包括堆外和堆内多源异构探测器的一种或多种组合。如利用 EXCORE

和 RBF 神经网络实现三维功率分布估计^[70-73]、或通过 SPND 和卷积神经网络重构堆内物理场^[74]。如何充分利用三维物理场的流型特性,结合机器学习与模型降阶技术,实现数据驱动的监测反问题求解成为广泛研究的课题。其中一些方法包括:将 KNN 最近邻算法与 POD 降阶结合^[75-76]、将 RBF 神经网络与 POD 降阶结合^[77]、将贝叶斯神经网络与 POD 降阶结合^[78]、将 SVD 自编码器降阶模型与决策树结合^[79]等,更多相关研究见文献^[36]。但目前在线 CMS 工业应用中人工智能技术的应用仍相对较少。

探测器布置是堆芯监测的核心问题之一。常见方法包括基于功率分布重构算法或既定规则结合最优化算法实现探测器最佳布置,如普通克里金插值方法^[56]、基于棋盘跳马动作准则下的遗传算法与相关系数法^[80]、广义经验插值方法及贪婪算法^[81]、代理模型与贪婪算法^[82]等。还有一些研究者提出基于机器学习的方法,特别是针对堆内固定式探测器,包括 K-means 聚类分析^[83]、强化学习框架^[84]、随机森林^[80]、信息熵^[85]、压缩感知理论^[86]、数据驱动的降阶模型^[87]等。通常情况下,功率分布重构问题与探测器布置优化问题紧密相关。通过结合不同的堆芯功率分布重构算法与最优化算法,在满足一定约束条件和精度目标的前提下,可实现探测器的最佳布置。因此,在一些典型研究中,这两个问题可同时得到解决^[56]。

在工程领域中,评估不确定性对设计软件最终结果的影响非常重要。研究人员提出了一系列不确定度因素分析和量化方法,其中包括压水堆设计^[88]、高温堆设计^[89-90]、高保真数值反应堆模型^[91]、多物理场耦合计算模型^[92]、机器学习模型^[93]等。然而,与传统设计软件的不确定性评估不同,堆芯监测系统不确定性量化的核心关键是对测量(最佳估计)获得的物理场置信度区间进行量化。由于测量物理场大量依赖于测量值,对于理论模型的依赖相对较小(如仅利用不同探测器之间的耦合系数或特征关系等),因此,评估方法具有一些差异。通常,在工业部署的堆芯监测系统中,对于功率分布不确定性进行量化是最关键的。文献^[94]提出了一种量化监测的功率分布不确定度的方法。该方法将整体不确定度表示为模型不确定度与测量不确定度的线性组合,如式

(4)所示。其中, σ_c^2 为模型不确定度; σ_m^2 为测量不确定度; α 和 β 为加权系数。文献 [94] 提出华龙一号堆芯线功率密度在线监测系统误差分析的方法。文献 [95] 给出了基于堆内探测器的堆芯通量图功率峰值的总不确定度量化公式, 如式 (5) 所示。其中, $\sigma_c^2(P/\bar{P})$ 为模型计算的组件内功率重构不确定度; $\sigma_c^2(\bar{P}/C)$ 为探测器电流转为组件功率的比值的不确定度; $\sigma^2(f)$ 为功率重构算法的不确定度; $\sigma_m^2(C)$ 为测量电流本身的不确定度。不同在线 CMS 应用场景或系统采用的方法不尽相同, 以 SOPHORA 为例, 虽采用类似式 (5) 的方法, 但不同测量周期的功率分布不确定度评估方法也略有不同 [96]。

$$\sigma_r = \alpha\sigma_c^2 + \beta\sigma_m^2 \quad (4)$$

$$\sigma_r^2(P) = \sigma_c^2(P/\bar{P}) + \sigma_c^2(\bar{P}/C) + \sigma^2(f) + \sigma_m^2(C) \quad (5)$$

2.3 堆芯诊断反问题研究现状

在线 CMS 需具备指示运行异常的能力。如使用探测器信号来诊断控制棒的位置, 包括 Delaunay 三角剖分方法 [97]、主成分分析 [98]、模糊神经网络 [99]、卷积神经网络 [100] 等。作为在线 CMS 重要测量数据来源, 堆内 SPND 的故障可能导致整个在线 CMS 系统的较大误差。因此, 国内外学者也开展了与 SPND 故障检测与隔离相关的研究, 如采用随机森林回归算法 (RFR) [100]、主成分分析方法 (PCA) [101]、迭代主成分分析 (IPT) [102]、结合扩展卡尔曼滤波与 Kullback-Leibler 散度的方法 [103] 等。一些研究还提出了充分利用 SPND 空间位置坐标 [104] 等信息进一步提升异常检测准确性的方法, 如图卷积神经网络方法 [105]。另外, 利用神经网络结合数据同化 [106] 实现堆芯潜在运行参数的识别与估计也是常见的方法, 如用于对堆芯燃料组件弯曲的反演 [107] 等。目前, 实际工业应用在线 CMS 的诊断功能较少, 仅有少量的针对 SPND 本身故障的诊断应用。

利用堆内或堆外的中子探测器信号检测堆芯内各种频率的振动效应是堆芯诊断的重要内容。传统的 CMS 中, 这些中子探测器信号的采样频率通常较低 (如间隔约 1 s 取样 1 次), 无法进行中子噪声的诊断和应用, 需进行适当的现场工程改造。近年, 中子噪声研究引起了广泛关注, 特别是欧盟资助的 CORTEX (堆芯监测技术实验验证与演示) 项目 [108], 侧重于将中子噪声建模与机器学

习技术结合, 以检测和识别核反应堆中可能出现的异常情况。这些异常包括主泵运转或冷却剂流动激励堆内构件发生受迫振动; 控制棒的摩擦、磨损、松动、不平稳; 堆内部件脱落; 冷却剂温度、压力及流量等波动; 冷却剂泄漏、沸腾及流道阻塞等。这些异常源 [109] 会影响中子输运过程, 体现为中子测量值的波动。中子噪声建模通常可分为频域建模和时域建模 [110]。其中一些典型软件包括 SIMULATE-3K [111]、APOLLO3 [112]、NOISE-SN [113]、CORCA-NOISE [114]、CORE SIM+ [115] 等。许多研究已取得了一定的进展, 如文献 [116] 利用 CORE SIM+ 软件针对 CROCUS 中 COLIBRI 试验 (燃料棒振动) 数据进行了模型验证, 并成功复现了实验数据的主要趋势以及一些探测器的值。然而, 在实际工程应用中, 由于堆内的多物理场 (如核-热-力) 高度耦合的特性, 从宏观中子噪声中进行堆芯内各种异常的原因诊断仍面临挑战。

2.4 运行支持反问题研究现状

在线 CMS 的运行支持功能通常包括两个部分。以 SOPHORA 工业系统为例, 首先, 针对技术支持人员, 基于实际功率史跟踪历史数据, 提供堆芯的三维理论模型, 用于在线计算临界硼浓度、氙毒以及变功率运行图 (ΔI 控制) 方案等功能。其次, 面向操作员、安全工程师等反应堆控制相关岗位人员, 提供与反应性相关的功能, 包括慢化剂温度系数、硼微分价值、功率系数与控制棒微分积分价值的在线跟踪计算, 以及在过冷或过热工况下的反应性与补偿量计算, 控制棒插入和提出、硼浓度增减以及功率变化引起的反应性及补偿量计算等。

以运行图 ΔI 控制为例, 需给定后续的控制目标后, 预先确定一系列的操作建议 [117]。如在确定负荷变化目标 (如台风过境降功率过程) 后, 运行人员进行堆芯建模, 并根据不同的控制手段 (如调硼、调灰棒、调黑棒) [118] 生成 1 个满足运行技术规范的最优化控制策略 [119]。成功实现运行支持功能的关键是构建 1 个与实际运行状态高度吻合的理论模型 [120]。通过这个理论模型可准确预测反应堆的行为, 并结合优化算法为操作员提供指导, 以高效采取操作行动 [121-122]。SOPHORA 工业系统采用的具体方法见文献 [119, 123]。

由于存在各种不确定性因素, 堆芯跟随的理

论模型总存在误差。如何利用测量功率分布对理论模型参数(如宏观中子截面或扩散系数^[124])进行在线调整和修正,是模型在线标定的重要任务。利用贝叶斯方法实现模型参数的标定已得到了广泛研究,如针对堆芯物理及热工模型参数的标定^[125-126]、针对中子评价数据库截面的标定^[127-128]等。尽管在线模型参数的标定在研究领域得到了一定的关注,但在实际在线 CMS 的应用仍相对较少。

3 当前研究的不足与建议

当前,关于状态监测和运行支持技术存在一些典型挑战需解决。例如:1)监测方面,堆芯内外大量异构多源的探测信息(如中子探测器、热电偶)无法在统一框架下进行有效地融合,类似于地球科学中海-陆-空多类型测量信息的融合^[129],这可能导致信息利用的缺失;2)当前技术无法确定物理场空间任意点的置信程度^[78],且无法量化探测器失效或噪音水平增加对堆芯内三维物理场置信度的影响程度,这可能导致在不同燃耗之间或不同循环之间的不确定性累积问题;3)现有的运行规程主要基于可直接测量的状态参数(如 ΔI)进行控制,未考虑隐含的不可测量的重要安全状态变量(如 LPD 和 DNBR)的运行限制^[130],这可能导致运行裕量和灵活性的丧失。

解决上述挑战并在工程上构建 1 个具备监测、预测、诊断和智能自主控制能力的堆芯数字孪生体是未来在线 CMS 研究的发展方向。数字孪生是一种利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,反映实体反应堆的全生命周期过程的方法^[131]。其中耦合更多学科(如“核-热-力-化-材”),实现更高保真、多物理、多尺度的数值反应堆^[132-135],研究模型降阶技术以实现与实堆孪生运行^[136],进而解决在运机组关键运维问题的诊断与预测^[137],是其中研究的热点及重难点。此外,在贝叶斯框架下针对多概率的研究也相对较少^[138]。如何在考虑测量不确定度、模型不确定度、环境不确定度等条件下,基于概率论的视角对核反应堆在不同随机性因素影响下的不同操作状态及其置信度进行考虑也是当前研究的 1 个难点。

4 总结

本文详细介绍在线 CMS 的主要功能目标、定位以及国内外在线 CMS 在研究和应用方面的现状。特别关注在线 CMS 涉及的堆芯建模、状态估计、异常诊断和运行支持等核心数学问题,其中包括 1 个正问题和 3 个反问题。通过对国内外文献的调研,对现有技术为解决上述正反数学问题方面的技术现状进行了分析。尤其着重探讨了堆芯建模、状态监测、异常诊断和运行支持中采用的主要技术思路,为在线 CMS 解决实际工程问题奠定基础。

然而,目前的研究还存在一些不足之处,如多源探测器信息融合和不确定环境下的运行规划等方面。其中,核心问题是如何在数字孪生的技术框架下进一步优化在线 CMS 的监测、诊断和运行规划功能,以提升实际反应堆的运行水平。

参考文献:

- [1] BOYD W A, MILLER R W. The BEACON on-line core monitoring system: Functional upgrades and applications[C]//Proceedings of the Specialists' Meeting on In-core Instrumentation and Core Assessment. [S. l.]: [s. n.], 1996.
- [2] KARLSON C F. Continuing advancements in in-core power distribution measurement methods using SIMULATE-3 and CECOR 3.4[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1995, 121(1): 57-66.
- [3] DIGIOVINE A S, NOËL A. GARDEL-PWR: Studsvik's online monitoring and reactivity management system[C]//Proceedings of Advances in Nuclear Fuel Management. [S. l.]: [s. n.], 2003.
- [4] CAVES J, MOON H. Benchmark of POWERTRAX CMSS against PWR transient power measurements[J]. *Transactions of the American Nuclear Society*, 1996, 74: CONF-9606116.
- [5] LI W, ZHANG X, DANG Z. Development and preliminary verification of the PWR on-line core monitoring software system SOPHORA[R]. [S. l.]: [s. n.], 2015.
- [6] 杨伟焱, 汤春桃, 杨波, 等. 在线堆芯监测系统 SOMPAS 中子学计算核心测试验证[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(7): 1214-1220.
YANG Weiyan, TANG Chuntao, YANG Bo, et al. Test and verification of neutronics calculation kernel for core on-line monitoring system SOMPAS[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(7): 1214-1220(in

- Chinese).
- [7] LI Z, CAO L, WU H, et al. Sensitivity and uncertainty analysis for the PWR online power-distribution monitoring with NECP-ONION system[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2018, 114: 359-368.
- [8] 杨戴博, 田皓文, 周利明, 等. 三代核电堆芯中子通量密度测量系统软件架构设计[J]. *核动力工程*, 2021, 42(增刊 1): 139-142.
- YANG Daibo, TIAN Haowen, ZHOU Liming, et al. Software architecture design of neutron flux density measurement system for the third generation nuclear power core[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2021, 42(S1): 139-142(in Chinese).
- [9] 蔡杰进, 李文淮. 基于信息融合理论的反应堆三维功率概率分布监测方法: 中国, CN112509716A[P]. 2021-03-16.
- [10] LI G, WANG X, LIANG B, et al. Modeling and control of nuclear reactor cores for electricity generation: A review of advanced technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 116-128.
- [11] KIM H K, LEE S H, CHANG S H. Neural network model for estimating departure from nucleate boiling performance of a pressurized water reactor core[J]. *Nuclear Technology*, 1993, 101(2): 111-122.
- [12] ADALI T, BAKAL B, SÖNMEZ M K, et al. Modeling nuclear reactor core dynamics with recurrent neural networks[J]. *Neurocomputing*, 1997, 15(3/4): 363-381.
- [13] BOROUSHAKI M, GHOFRANI M B, LUCAS C. Identification of a nuclear reactor core (VVER) using recurrent neural networks[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2002, 29(10): 1225-1240.
- [14] CADINI F, ZIO E, PEDRONI N. Simulating the dynamics of the neutron flux in a nuclear reactor by locally recurrent neural networks[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2007, 34(6): 483-495.
- [15] ZIO E, PEDRONI N, BROGGI M, et al. Locally recurrent neural networks for nuclear dynamics modelling[R]. [S. l.]: [s. n.], 2008.
- [16] ZIO E, BROGGI M, PEDRONI N. Nuclear reactor dynamics on-line estimation by locally recurrent neural networks[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2009, 51(3): 573-581.
- [17] MIRVAKILI S M, FAGHIHI F, KHALAFI H. Developing a computational tool for predicting physical parameters of a typical VVER-1000 core based on artificial neural network[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2012, 50: 82-93.
- [18] LU H, MO K, LI W, et al. Development and preliminary verification of the 3D core neutronic code: COCO[R]. US: American Nuclear Society Inc., 2012.
- [19] 张斌, 李庆, 蔡云, 等. 压水堆堆芯核设计软件包 TORCH V_{2.0} 的验证与确认[J]. *原子能科学技术*, 2022, 56(11): 2415-2421.
- ZHANG Bin, LI Qing, CAI Yun, et al. Validation and verification for nuclear design software package TORCH V_{2.0} of pressurized water reactor[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(11): 2415-2421 (in Chinese).
- [20] 苑旭东, 周剑东, 谢金森, 等. COSINE 软件包堆芯物理分析程序 (cosCORE) 的初步验证[J]. *南华大学学报: 自然科学版*, 2020, 34(4): 7-12.
- YUAN Xudong, ZHOU Jiandong, XIE Jinsen, et al. Preliminary verification of COSINE software package core physical analysis program (cosCORE)[J]. *Journal of University of South China: Science and Technology*, 2020, 34(4): 7-12(in Chinese).
- [21] 梁毅琳, 李云召, 周原成, 等. 基于核电厂实测数据的 NECP-Bamboo 软件验证与确认[J]. *核动力工程*, 2024, 45(2): 24-34.
- LIANG Yilin, LI Yunzhao, ZHOU Yuancheng, et al. Verification and validation of NECP-Bamboo based on measurement data from nuclear power plants[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2024, 45(2): 24-34(in Chinese).
- [22] BOYD W A, MAYHUE L T, PENKROT V S, et al. The whiteStar development project: Westinghouse's next generation core design simulator and core monitoring software to power the nuclear renaissance[R]. [S. l.]: [s. n.], 2009.
- [23] BAHADIR T, LINDAHL S Ö. Studsvik's next generation nodal code SIMULATE-5[R]//Advances in Nuclear Fuel Management[R]. [S. l.]: [s. n.], 2009.
- [24] BROWN C S, ZHANG H. Uncertainty quantification and sensitivity analysis with casl core simulator VERA-CS[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 95: 188-201.
- [25] REARDEN B T, LEFEBVRE R A, LANGLEY B R, et al. Neams workbench 1.0 beta[R]: US: Oak Ridge National Lab., 2018.
- [26] CHAULIAC C, ARAGONÉS J M, BESTION D, et al. NURESIM—A European simulation platform for nuclear reactor safety: Multi-scale and multi-physics calculations, sensitivity and uncertainty analysis[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(9): 3416-3426.
- [27] KOCHUNAS B, COLLINS B, STIMPSON S, et al. VERA core simulator methodology for pressurized water

- reactor cycle depletion[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2017, 185(1): 217-231.
- [28] GONG H, YU Y, LI Q. Reactor power distribution detection and estimation via a stabilized gappy proper orthogonal decomposition method[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2020, 370: 110833.
- [29] CHEN W, YANG D, ZHANG J, et al. Study of non-intrusive model order reduction of neutron transport problems[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 162: 108495.
- [30] LI W, PENG S, LI J, et al. Prediction of state transitions in 3D core dynamics and xenon transients based on dynamic mode decomposition[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2024, 197: 110258.
- [31] PHILLIPS T R F, HEANEY C E, SMITH P N, et al. An autoencoder-based reduced-order model for eigenvalue problems with application to neutron diffusion[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2021, 122(15): 3780-3811.
- [32] 张纯禹, 吴家桦, 陈威林, 等. 参数化高保真模型的快速求解方法[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(11): 56-65.
ZHANG Chunyu, WU Jiahua, CHEN Weilin, et al. Fast solution methods of parameterized high-fidelity models[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(11): 56-65(in Chinese).
- [33] 刘东, 罗琦, 唐雷, 等. 基于 PINN 深度机器学习技术求解多维中子学扩散方程[J]. *核动力工程*, 2022, 43(2): 1-8.
LIU Dong, LUO Qi, TANG Lei, et al. Solving multi-dimensional neutron diffusion equation using deep machine learning technology based on PINN model[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2022, 43(2): 1-8(in Chinese).
- [34] 吴红. 基于自适应 RBF 神经网络的铅铋快堆堆芯热工参数预测方法研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2022.
- [35] 王健. 基于遗传算法与神经网络的可燃毒物优化方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [36] HUANG Q, PENG S, DENG J, et al. A review of the application of artificial intelligence to nuclear reactors: Where we are and what's next[J]. *Heliyon*, 2023, 9(3): e13883.
- [37] 张恒, 吕雪, 刘东, 等. 核电人工智能应用: 现状、挑战和机遇[J]. *核动力工程*, 2023, 44(1): 1-8.
ZHANG Heng, LYU Xue, LIU Dong, et al. Nuclear power AI applications: Status, challenges and opportunities[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2023, 44(1): 1-8(in Chinese).
- [38] 张洪. 大亚湾核电站堆芯功率分布测量及其处理[R]. 深圳: 大亚湾核电运营管理有限责任公司, 1997.
- [39] 王常辉, 吴宏春. 压水堆堆内中子探测器响应函数特性研究[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(7): 1248-1253.
WANG Changhui, WU Hongchun. Characteristic research of neutron detector response function in PWR[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(7): 1248-1253(in Chinese).
- [40] 李刚, 谢逸钦, 刘春明, 等. 压水堆核电厂堆芯冷却监测系统的数字化改造方案研究[J]. *核科学与工程*, 2012, 32(增刊 2): 206-211.
LI Gang, XIE Yiqin, LIU Chunming, et al. Research on digital reconstruction scheme of core cooling monitoring system in PWR nuclear power plant[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2012, 32(S2): 206-211(in Chinese).
- [41] 汤仲鸣, 何文灏, 李树成, 等. AP1000 与 VVER1000 堆外核测系统设计理念分析[J]. *核电子学与探测技术*, 2014, 34(5): 671-674.
TANG Zhongming, HE Wenhao, LI Shucheng, et al. Design conception analysis of ex-core nuclear instrumentation system between AP1000 and VVER1000[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2014, 34(5): 671-674(in Chinese).
- [42] 李文淮, 张香菊, 党珍, 等. 一种标定核反应堆堆外探测器的方法: 中国, 201510328694.6[P]. 2015-10-28.
- [43] 李文淮, 李晓, 张香菊, 等. 一种标定核反应堆堆芯出口热电偶的方法: 中国, 201510326215.7[P]. 2015-06-15.
- [44] 李文淮, 张香菊, 王军令, 等. 一种堆芯三维功率分布的在线测量方法: 中国, CN106128529B[P]. 2018-02-16.
- [45] LEE K, KIM C H. The least-squares method for three-dimensional core power distribution monitoring in pressurized water reactors[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2003, 143(3): 268-280.
- [46] LI Z, WU H, CAO L, et al. 3D PWR power distribution on-line monitoring based on harmonics expansion[C]// ICONE-23. Chiba, Japan: [s. n.], 2015.
- [47] WANG C, WU H, CAO L, et al. On-line reconstruction of in-core power distribution by harmonics expansion method[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(8): 3042-3050.
- [48] FAN K, LI F, ZHOU X, et al. Improved harmonics synthesis method and its application in reconstructing power distribution of HTR-PM[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2019, 355: 110351.
- [49] 李富. 重构堆芯通量分布的谐波综合法及其诊断应用

- [D]. 北京: 清华大学, 1994.
- [50] JANG J W, LEE K, NA M G, et al. On-line generation of three-dimensional core power distribution using in-core detector signals to monitor safety limits[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2004, 36(6): 528-539.
- [51] LI Z, MA Y, CAO L, et al. Proper orthogonal decomposition based online power-distribution reconstruction method[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2019, 131: 417-424.
- [52] 贾健. 基于截面偏差的堆芯功率分布重构方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [53] LI W, DING P, DUAN C, et al. Comparison of spatial interpolation approaches for in-core power distribution reconstruction[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 337: 66-73.
- [54] 王洋洋, 孙晓晖, 石兴伟. 最优插值法在堆芯三维功率分布重构中的应用[J]. *科学技术创新*, 2023(26): 52-55.
WANG Yangyang, SUN Xiaohui, SHI Xingwei. Application of optimal interpolation method in reconstructing 3D power distribution of reactor core[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2023(26): 52-55(in Chinese).
- [55] 李文淮, 莫锟, 卢皓亮, 等. 堆芯功率分布重构方法分析[J]. *原子能科学技术*, 2013, 47(增刊): 280-282.
LI Wenhui, MO Kun, LU Haoliang, et al. Analysis of reconstruction method of core power distribution[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, 47(Suppl.): 280-282(in Chinese).
- [56] PENG X, WANG K, LI Q. A new power mapping method based on ordinary Kriging and determination of optimal detector location strategy[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 68: 118-123.
- [57] 彭星杰, 李庆, 王侃. 堆芯功率分布重构的两种空间统计性算法[J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(9): 1634-1639.
PENG Xingjie, LI Qing, WANG Kan. Two spatial statistical algorithms for core power distribution reconstruction[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, 48(9): 1634-1639(in Chinese).
- [58] 彭星杰, 李天涯, 李庆, 等. 最小二乘支持向量机在堆芯功率分布重构中的应用[J]. *原子能科学技术*, 2015, 49(6): 1026-1031.
PENG Xingjie, LI Tianya, LI Qing, et al. Application of least square support vector machine in core power distribution reconstruction[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2015, 49(6): 1026-1031(in Chinese).
- [59] PENG X, WU Q, CAI Y, et al. The application of radial basis function interpolation in reactor core power distribution on-line monitoring[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2019, 132: 752-762.
- [60] GONG H, CHEN Z, LI Q. Generalized empirical interpolation method with H1 regularization: Application to nuclear reactor physics[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 9: 804018.
- [61] MASSART S, BUIS S, ERHARD P, et al. Use of 3D-VAR and Kalman filter approaches for neutronic state and parameter estimation in nuclear reactors[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2007, 155(3): 409-424.
- [62] GONG H, YU Y, LI Q, et al. An inverse-distance-based fitting term for 3D-Var data assimilation in nuclear core simulation[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, 141: 107346.
- [63] 郭林, 万承辉, 李云召, 等. 基于三维变分和神经网络算法的压水堆堆芯燃料分布数据同化方法研究[J]. *原子能科学技术*, 2022, 56(11): 2408-2414.
GUO Lin, WAN Chenghui, LI Yunzhao, et al. Method research on data assimilation for burnup distribution of PWR based on three dimensional variation and neural network algorithm[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(11): 2408-2414(in Chinese).
- [64] BOURIQUET B, ARGAUD J P, ERHARD P, et al. Robustness of nuclear core activity reconstruction by data assimilation[J]. *Journal of Power and Energy Systems*, 2012, 6(2): 289-301.
- [65] PENG X, QING D, CAI Y, et al. Reactor core power mapping based on Bayesian inference[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2018, 119: 322-330.
- [66] 李松岭, 彭星杰, 蒋朱敏, 等. 基于贝叶斯推断的堆芯功率分布重构[J]. *核动力工程*, 2019, 40(2): 167-170.
LI Songling, PENG Xingjie, JIANG Zhumin, et al. Reactor core power mapping based on Bayesian inference[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2019, 40(2): 167-170(in Chinese).
- [67] ZHANG Q, LIU Z, ZHAO J. A new model of core inverse problems under a Bayesian framework[C]// ICONE. Chiba, Japan: The Japan Society of Mechanical Engineers, 2023.
- [68] 沈泽钊, 蔡远利, 赵彦博, 等. 数据同化方法在数字孪生中的应用综述[C]//第23届中国系统仿真技术及其应用学术年会)论文集. [出版地不详]: [出版者不详], 2022: 15-19.
- [69] GONG H. Data assimilation with reduced basis and noisy measurement: Applications to nuclear reactor cores[D]. Paris: Sorbonne University, 2018.

- [70] 夏虹, 李彬, 刘建新. 基于 RBF 神经网络的压水堆堆芯三维功率分布方法研究[J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(4): 698-702.
XIA Hong, LI Bin, LIU Jianxin. Research on 3D power distribution of PWR reactor core based on RBF neural network[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, 48(4): 698-702(in Chinese).
- [71] 彭星杰, 应栋川, 李庆, 等. 正则化径向基函数神经网络在堆芯轴向功率分布重构中的应用[J]. *核动力工程*, 2014, 35(增刊 2): 12-15.
PENG Xingjie, YING Dongchuan, LI Qing, et al. Application of regularized radial basis function neural network in reconstruction of axial power distribution of reactor shaft[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2014, 35(S2): 12-15(in Chinese).
- [72] 蔡宛睿, 夏虹, 杨波. 基于 BP 神经网络的堆芯三维功率重构方法研究[J]. *原子能科学技术*, 2018, 52(12): 2130-2135.
CAI Wanrui, XIA Hong, YANG Bo. Research on 3D power reconstruction of reactor core based on BP neural network[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(12): 2130-2135(in Chinese).
- [73] 曹佩. 反应堆堆芯中子场的非原位重构方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [74] GONG H L, LI H, XIAO D, et al. Reactor field reconstruction from sparse and movable sensors using Voronoi tessellation-assisted convolutional neural networks[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2024, 35(5): 43-49.
- [75] 龚禾林, 陈长, 李庆, 等. 基于物理指引和数据增强的反应堆物理运行数字孪生研究[J]. *核动力工程*, 2021, 42(增刊 2): 48-53.
GONG Helin, CHEN Chang, LI Qing, et al. Research on digital twin of reactor physical operation based on physical guidance and data enhancement[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2021, 42(S2): 48-53(in Chinese).
- [76] GONG H, CHENG S, CHEN Z, et al. Data-enabled physics-informed machine learning for reduced-order modeling digital twin: Application to nuclear reactor physics[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2022, 196(6): 668-693.
- [77] LI W, DING P, XIA W, et al. Artificial neural network reconstructs core power distribution[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2022, 54(2): 617-626.
- [78] LI W, CAI J, LU H, et al. Constructing a probability digital twin for reactor core with Bayesian network and reduced-order model[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2023, 193: 110016.
- [79] GONG H, CHENG S, CHEN Z, et al. An efficient digital twin based on machine learning SVD autoencoder and generalised latent assimilation for nuclear reactor physics[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2022, 179: 109431.
- [80] LI W, DING P, DUAN C, et al. Comparison of three methodologies for optimization of the layout of in-core detectors with a specific number of detectors[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2019, 126: 359-366.
- [81] ARGAUD J P, BOURIQUET B, de CASO F, et al. Sensor placement in nuclear reactors based on the generalized empirical interpolation method[J]. *Journal of Computational Physics*, 2018, 363: 354-370.
- [82] KARNIK N, ABDO M G, ESTRADA-PEREZ C E, et al. Constrained optimization of sensor placement for nuclear digital twins[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(9): 15501-15516.
- [83] ANUPREETHI B, GUPTA A, KANNAN U, et al. Optimization of flux mapping in-core detector locations in AHWR using clustering approach[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2020, 366: 110756.
- [84] TAN K, ZHANG F. Optimizing the fixed number detector placement for the nuclear reactor core using reinforcement learning[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2024: 1-23.
- [85] TERMAN M S, KOJOURI N M, KHALAFI H. Optimal placement of fixed in-core detectors for Tehran Research Reactor using information theory[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2018, 106: 300-315.
- [86] BAHUGUNA S K, MUKHOPADHYAY S, TIWARI A P. Sensor position optimization for flux mapping in a nuclear reactor using compressed sensing[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 159: 108298.
- [87] CAMMI A, RIVA S, INTROINI C, et al. Data-driven model order reduction for sensor positioning and indirect reconstruction with noisy data: Application to a circulating fuel reactor[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2024, 421: 113105.
- [88] 廖鸿宽, 李庆, 于颖锐, 等. 核电软件 NESTOR 堆芯功率分布计算不确定性研究[J]. *核动力工程*, 2018, 39(3): 23-28.
LIAO Hongkuan, LI Qing, YU Yingrui, et al. Uncertainty study of core power distribution for software NESTOR[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2018, 39(3): 23-28(in Chinese).
- [89] GUO J, WANG Y, ZHANG H, et al. Challenges and

- progress of uncertainty analysis for the pebble-bed high-temperature gas-cooled reactor[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, 138: 103827.
- [90] 郭炯, 李富, 王黎东, 等. 高温气冷堆不确定性分析的新进展[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(7): 1221-1229.
GUO Jiong, LI Fu, WANG Lidong, et al. Progress in uncertainty analysis for high-temperature gas-cooled reactor[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(7): 1221-1229(in Chinese).
- [91] 曹良志, 邹晓阳, 刘宙宇, 等. 高保真数值核反应堆不确定度量化方法研究进展[J]. *核动力工程*, 2021, 42(2): 1-15.
CAO Liangzhi, ZOU Xiaoyang, LIU Zhouyu, et al. Research progresses of uncertainty quantification methods for high fidelity numerical nuclear reactor[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2021, 42(2): 1-15(in Chinese).
- [92] 彭翠婷, 胡梦岩, 熊青文, 等. 反应堆多物理场耦合计算中的不确定性研究概述[J]. *核科学与技术*, 2024, 12(1): 36-51.
PENG Cuiting, HU Mengyan, XIONG Qingwen, et al. An overview of uncertainty research in reactor multi-physics coupling calculation[J]. *Nuclear Science and Technology*, 2024, 12 (1) : 36-51(in Chinese).
- [93] YANG Y, GONG H, HE Q, et al. On the uncertainty analysis of the data-enabled physics-informed neural network for solving neutron diffusion eigenvalue problem[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2024, 198(5): 1075-1096.
- [94] 彭星杰. 小型模块式反应堆在线监测方法研究及系统研制[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [95] 李文淮, 党珍, 张香菊, 等. 通量图处理软件 MAPLE 的不确定性分析[C]//CORPHY-2014. 成都: 中国核动力研究设计院, 2014.
- [96] 李文淮, 张香菊, 党珍, 等. 通量图时刻及连续时刻堆芯监测功率不确定分析方法: 中国, CN104036837A[P]. 2014-09-10.
- [97] SOUZA T J, MEDEIROS J A C C, GONÇALVES A C. Detection model of accidental control rod drop in PWR reactors with in-core and ex-core nuclear instrumentation using Delaunay triangulation[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2017, 109: 249-259.
- [98] PENG X, LI Q, WANG K. Fault detection and isolation for self powered neutron detectors based on principal component analysis[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 85: 213-219.
- [99] KOZMA R, SATO S, SAKUMA M, et al. Generalization of knowledge acquired by a reactor core monitoring system based on a neuro-fuzzy algorithm[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 1995, 29(3/4): 203-214.
- [100] TASAKOS T, IOANNOU G, VERMA V, et al. Deep learning-based anomaly detection in nuclear reactor cores[C]//Proceedings of the International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2021.
- [101] 陈静, 卢燕臻, 江灏, 等. 基于孪生模型的堆芯自给能中子探测器信号异常检测[J]. *核动力工程*, 2023, 44(3): 210-216.
CHEN Jing, LU Yanzhen, JIANG Hao, et al. Anomaly detection of core self-powered neutron detector based on twin model[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2023, 44(3): 210-216(in Chinese).
- [102] YELLAPU V S, TIWARI A P, DEGWEKER S B. Application of data reconciliation for fault detection and isolation of in-core self-powered neutron detectors using iterative principal component test[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2017, 100: 326-343.
- [103] GAUTAM S, TAMBOLI P K, ROY K, et al. Sensors incipient fault detection and isolation of nuclear power plant using extended Kalman filter and Kullback-Leibler divergence[J]. *ISA Transactions*, 2019, 92: 180-190.
- [104] 林蔚青, 缪希仁, 陈静, 等. 时空信息融合的堆芯自给能中子探测器故障检测与隔离方法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, doi:10.13334/j.0258-8013.pcsee.231307.
LIN Weiqing, MIAO Xiren, CHEN Jing, et al. Fault detection and isolation method of in-core self-powered neutron detector based on spatiotemporal information fusion[J]. *Proceedings of CSEE*, 2024, doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.231307(in Chinese).
- [105] LIN W, LU Y, MIAO X, et al. Fault identification method for in-core self-powered neutron detectors combing graph convolutional network and stacking ensemble learning[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2023, doi:10.1007/s12204-023-2684-x.
- [106] GONG H, ZHU T, CHEN Z, et al. Parameter identification and state estimation for nuclear reactor operation digital twin[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2023, 180: 109497.
- [107] 郭林, 张凯, 万承辉, 等. 基于实测数据融合的堆芯物理模型反演优化方法及工业验证研究[J]. *原子能科学技术*, 2024, doi: 10.7538/yzk.2024.youxian0022.
GUO Lin, ZHANG Kai, WAN Chenghui, et al. Research on inversion optimization method of core physical model based on fusion of measured data and industrial verification [J]. *Atomic Energy Science and Tech-*

- nology, 2024, doi: [10.7538/yzk.2024.youxian0022](https://doi.org/10.7538/yzk.2024.youxian0022)(in Chinese).
- [108] DEMAZIÈRE C, VINAI P, HURSIN M, et al. Noise-based core monitoring and diagnostics: Overview of the cortex project[R]. [S. l.]: [s. n.], 2017.
- [109] 刘才学, 罗能, 何攀, 等. 反应堆关键设备健康监测与故障诊断技术研究进展[J]. *核动力工程*, 2023, 44(3): 8-20.
LIU Caixue, LUO Neng, HE Pan, et al. Research progress of hearth monitoring and fault diagnosis for reactor critical equipment[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2023, 44(3): 8-20(in Chinese).
- [110] OLMO-JUAN N, DEMAZIÈRE C, BARRACHINA T, et al. Fluctuations PARCS vs CORE SIM neutron noise simulations[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2019, 115: 169-180.
- [111] CHIONIS D, DOKHANE A, BELBLIDIA L, et al. SIMULATE-3K analyses of neutron noise response to fuel assembly vibrations and thermal-hydraulics parameters fluctuations[C]//Proceedings of the Int Conf Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering (M&C 2017). Jeju, Korea: [s. n.], 2017.
- [112] SCHNEIDER D, DOLCI F, GABRIEL F, et al. APOLLO3® CEA/DEN deterministic multi-purpose code for reactor physics analysis[C]//Proceedings of the PHYSOR 2016. [S. l.]: [s. n.], 2016.
- [113] YI H, VINAI P, DEMAZIÈRE C. On the simulation of neutron noise using a discrete ordinates method[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 164: 108570.
- [114] 龚禾林, 陈长, 赵文博, 等. 基于 SP3 方法的动力堆中子噪声分析程序研究[J]. *核科学与工程*, 2021, 41(3): 491-499.
GONG Helin, CHEN Zhang, ZHAO Wenbo, et al. Development of a neutron noise simulator with SP3 approximation[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2021, 41(3): 491-499(in Chinese).
- [115] MYLONAKIS A, VINAI P, DEMAZIÈRE C. CORE SIM+: A flexible diffusion-based solver for neutron noise simulations[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 155: 108149.
- [116] MYLONAKIS A G, DEMAZIÈRE C, VINAI P, et al. Core sim+ simulations of colibri fuel rods oscillation experiments and comparison with measurements[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2021, 247: 21006.
- [117] 余文奇, 彭波, 郑秀波. 压水堆核电机组负荷跟踪能力综述[D]. 深圳: 大亚湾核电运营管理有限责任公司, 2011.
- [118] 蔡杰进, 李文淮. 面向反应堆状态转移概率估计分布的功率负荷控制方法: 中国, CN112380776A[P]. 2021-02-19.
- [119] 李文淮, 郭远熊, 张香菊, 等. 一种堆芯机组变功率运行策略优化方案的自动搜索方法: 中国, CN107065556B[P]. 2020-04-24.
- [120] MOON H, BECZKOWIAK M, CAVES J. Operating strategy generator method and utilization in POWER-TRAX PWR core monitoring system[C]//Proceedings of the ANS Int Topical Meeting on Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millennium. [S. l.]: [s. n.], 2000.
- [121] DESWANDRI, SHIMAZU Y. Application of three axial offsets trajectory method for load follow operation control in PWRs[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2001, 38(10): 809-818.
- [122] YE J, TURINSKY P J. Pressurized water reactor core maneuvering utilizing optimal control theory[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1998, 129(2): 97-123.
- [123] 王军令, 田巍, 周明, 等. 核反应堆堆芯反应性与补偿量参数生成方法与装置: 中国, CN114462231A[P]. 2022-05-10.
- [124] Dall'OSSO A. A data identification method for the improvement of a cross-section model[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2006, 154(2): 241-246.
- [125] KHUWAILEH B A, TURINSKY P J. Surrogate based model calibration for pressurized water reactor physics calculations[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2017, 49(6): 1219-1225.
- [126] BADEA M C, CACUCI D G, BADEA A F. Best-estimate predictions and model calibration for reactor thermal hydraulics[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2012, 172(1): 1-19.
- [127] ROMOJARO P, ÁLVAREZ-VELARDE F, CABELLOS O, et al. On the importance of target accuracy assessments and data assimilation for the co-development of nuclear data and fast reactors: MYRRHA and ESFR[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 161: 108416.
- [128] JIMÉNEZ-CARRASCOSA A, GARCÍA-HERRANZ N, CHÁFER F, et al. Nuclear data assimilation for Sodium-cooled Fast Reactors using integral experiments[C]//Proceedings of the Spanish Nuclear Society Annual Meeting. [S. l.]: [s. n.], 2022.
- [129] 郝斌, 李琦, 朱沁玲. 多源异构数据融合的水利数字地球研究[J]. *水利技术监督*, 2024, 32(3): 28-32, 37.
HAO Bin, LI Qi, ZHU Qinling. Research on water re-

- sources digital earth based on multi source heterogeneous data fusion[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2024, 32(3): 28-32, 37(in Chinese).
- [130] 姚进国, 杨晓强, 李载鹏, 等. 线功率密度和 DNBR 保护在田湾核电站的应用[J]. *核动力工程*, 2012, 33(增刊 1): 119-122.
YAO Jinguo, YANG Xiaoqiang, LI Zaipeng, et al. Application of line power density and DNBR protection in tianwan nuclear power station[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2012, 33(S1): 119-122(in Chinese).
- [131] 于勇, 范胜廷, 彭关伟, 等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(7): 41-45.
YU Yong, FAN Shengting, PENG Guanwei, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(7): 41-45(in Chinese).
- [132] 曹良志, 邓力, 杨波, 等. CAP1400 数值反应堆系统关键技术研究及示范应用[J]. *原子能科学技术*, 2022, 56(2): 213-225.
CAO Liangzhi, DENG Li, YANG Bo, et al. Development and application of CAP1400 numerical reactor system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(2): 213-225(in Chinese).
- [133] 吴宏春, 刘宙宇, 周欣宇, 等. 数值反应堆的研究现状与发展建议[J]. *原子能科学技术*, 2022, 56(2): 193-212.
WU Hongchun, LIU Zhouyu, ZHOU Xinyu, et al. Research status and development suggestion of numerical reactor[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(2): 193-212(in Chinese).
- [134] 杨文, 胡长军, 刘天才, 等. 数值反应堆原型系统开发及示范应用研究进展[J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(9): 1537-1546.
YANG Wen, HU Changjun, LIU Tiancai, et al. Research progress of virtual reactor system development and demonstration application[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, 55(9): 1537-1546(in Chinese).
- [135] 邓力, 史敦福, 李刚. 数值反应堆多物理耦合关键技术[J]. *计算物理*, 2016, 33(6): 631-638.
DENG Li, SHI Dunfu, LI Gang. Key technologies of coupling for multiphysics in numerical reactor[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2016, 33(6): 631-638(in Chinese).
- [136] ES-HAGHI M S, ANITESCU C, RABCZUK T. Methods for enabling real-time analysis in digital twins: A literature review[J]. *Computers & Structures*, 2024, 297: 107342.
- [137] van DINTER R, TEKINERDOGAN B, CATAL C. Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review[J]. *Information and Software Technology*, 2022, 151: 107008.
- [138] YANG J, LANGLEY R S, ANDRADE L. Digital twins for design in the presence of uncertainties[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 179: 109338.