

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

核数据引起的研究堆有效增殖因子计算不确定度量化

孙静宇 马纪敏

Quantification of calculated effective multiplication factor uncertainty caused by nuclear data in research reactor

Sun Jingyu, Ma Jimin

引用本文:

孙静宇, 马纪敏. 核数据引起的研究堆有效增殖因子计算不确定度量化[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36: 096001. doi: 10.11884/HPLPB202436.240024

Sun Jingyu, Ma Jimin. Quantification of calculated effective multiplication factor uncertainty caused by nuclear data in research reactor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36: 096001. doi: 10.11884/HPLPB202436.240024

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.240024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蒙卡程序计算临界基准题测试检验ENDF/B-VIII.0核数据库

Monte Carlo calculation of critical benchmarking models for testing ENDF/B-VIII.0 nuclear data

强激光与粒子束. 2022, 34: 026003-1-026003-5 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210366>

考虑参数不确定性的高空电磁脉冲E1分量环境计算及分析

Early-time high-altitude electromagnetic pulse simulation and analysis considering parameter uncertainty

强激光与粒子束. 2019, 31: 070002-1-070002-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.190140>

锕系核靶制备与应用

Actinide nuclear targets preparation and applications

强激光与粒子束. 2022, 34: 056001-1-056001-10 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210507>

基于QMU的高空电磁脉冲下电气电子设备易损性评估方法

Threat assessment method based on quantification of margins and uncertainties for electrical electronic equipment under high-altitude electromagnetic pulse

强激光与粒子束. 2021, 33: 123011-1-123011-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.210386>

基于Dakota的燃料棒设计验证不确定度研究

Uncertainty research of fuel rod design verification based on Dakota

强激光与粒子束. 2022, 34: 026012-1-026012-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210298>

基于双曲线截断混沌多项式展开的地磁感应电流敏感度分析

Sensitivity analysis of geomagnetically induced current based on hyperbolic scheme for truncating polynomial chaos expansion

强激光与粒子束. 2019, 31: 070010-1-070010-8 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.190106>



核数据引起的研究堆有效增殖因子 计算不确定度量化*

孙静宇, 马纪敏

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 为了深入研究核数据不确定度对 JRR-3M 研究堆有效增殖因子计算的影响, 建立了一套基于蒙特卡罗法的核数据不确定度量化流程。具体方法为: 使用核数据扰动软件 SANDY 扰动目标核素的重要反应道生成扰动文件, 再通过核数据加工软件 NJOY 对扰动文件进行处理, 最终利用核反应堆物理模拟软件 OpenMC 进行蒙特卡罗模拟。针对 JRR-3M 研究堆的控制棒全插、反应堆临界、控制棒全拔三种运行工况, 对多个关键核素 (如 ^{235}U 、 ^{238}U 、 Hf 等) 的核数据不确定度给有效增殖因子计算带来的影响进行了详细分析。研究结果表明, ^{177}Hf 、 ^{235}U 、 ^1H 、 ^{27}Al 的核数据不确定度对 JRR-3M 有效增殖因子具有显著影响。临界、控制棒全插和控制棒全提这 3 种工况下, 核数据不确定引起的有效增殖因子总不确定度分别为 660.8×10^{-5} 、 588.5×10^{-5} 、 708.4×10^{-5} 。在各个工况下, ^{235}U 的次级粒子能量分布的影响都是最大的。研究发现, 对以钆为主要组成材料的控制棒内, 只有 ^{177}Hf 的核数据不确定度起主要影响。

关键词: 核数据; 不确定度量化; 有效增殖因子; 抽样法; 研究堆

中图分类号: TL334

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.240024

Quantification of calculated effective multiplication factor uncertainty caused by nuclear data in research reactor

Sun Jingyu, Ma Jimin

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: To delve into the impact of nuclear data uncertainty on the effective multiplication factor calculation for the JRR-3M research reactor, this study established a nuclear data uncertainty quantification process based on SANDY. The specific methodology involved perturbing important reaction pathways of the target nuclides with SANDY to generate perturbation files, processing these files with NJOY, and ultimately utilizing OpenMC for Monte Carlo simulations. The influence on the effective multiplication factor due to several key nuclides (such as ^{235}U , ^{238}U , Hf , etc.) data uncertainty was calculated and analysed for three operational conditions of the JRR-3M research reactor. For critical, control rods fully inserted and control rods fully withdrawn conditions, total effective multiplication factor uncertainties are 660.8×10^{-5} , 588.5×10^{-5} and 708.4×10^{-5} , respectively. In all operational conditions, the impact of the fission release neutron energy distribution of ^{235}U is the most notable. The study reveals that within hafnium control rods only the nuclear data uncertainty of ^{177}Hf plays a major role.

Key words: nuclear data, uncertainty quantification, effective multiplication factor, sampling method, research reactor

在核反应堆的数值模拟计算中, 核数据是不可或缺的基础, 研究人员通过多种实验方法测量得到这些核数据, 经过评价后按照特定格式进行记录。记录的核数据通常服从某种概率分布, 属于 B 类不确定度。然而, 在传统的数值模拟过程中, 常常将分布的期望值作为核数据的确定值, 忽略了核数据不确定性的传播, 对核能系统的

* 收稿日期: 2024-01-18; 修订日期: 2024-05-13

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项资助(2022YFE03160003)

联系方式: 孙静宇, 2879408244@qq.com。

通信作者: 马纪敏, majm03@yeah.net。

安全性和经济性产生影响。在这一背景下,核数据不确定度量化研究迅速发展。核数据不确定度量化的方法有确定论方法与抽样法。近年来随着计算能力的不断提升,采用抽样法进行核数据不确定度量化的研究工作日益增多。2015年,朱婷建立了核数据不确定性量化程序 NUSS^[1]。2015年,万承辉等人研发了不确定度分析程序 UNICORN^[2]。2017年, Fiorito 等人研发了开源核数据扰动软件 SANDY^[3],该软件可以扰动评价核数据(ENDF)格式的核数据,实现对多种核截面数据的扰动与抽样。同年,同实验室的 Griseri 等人使用 SANDY 对钠冷快堆中的多种核素多组反应道截面进行了扰动^[4]。2017年,强胜龙等人对寿期初、中、末3个燃耗步以及3个温度点(293 K、600 K、900 K)共9个方案下的秦山二期堆芯进行了核数据敏感性分析^[5]。2018年,岩本弘木使用 SANDY 对 VENUS-F 反应堆进行了核数据导致的有效缓发中子数计算不确定度的量化^[6]。2021年, Park 等人使用 SANDY 及 BAKET 对两种聚变包层的氙产生率进行了核数据不确定度量化^[7]。这些不确定度研究主要关注商业堆,以提升其经济效益与安全性。

研究堆是一种实现堆物理实验、中子辐照、同位素生产等功能的特殊反应堆,对有效增殖因子(k_{eff})计算的准确度有着更高的要求。但是,针对研究堆进行核数据不确定度量化的工作较少,且研究堆使用的燃料、控制棒等与商业堆有较大不同,亟需开展相关研究。本文基于蒙特卡罗抽样法建立了一套核数据不确定度量化流程,使用自编批量处理脚程序和扰动软件 Sandy 组成了抽样模块;使用批处理脚本及核反应堆物理数值模拟软件 OpenMC 组成了预计算及计算模块;最后使用 Python 中的多个模块编辑了一套可以实现对 OpenMC 输出文件进行结果提取与统计程序的程序。

1 不确定度量化方法

抽样法^[8]通常称为蒙特卡罗方法或随机方法,直接对核数据进行抽样和传播来实现不确定度量化。假设核反应堆数值模拟系统与截面数据的关系为

$$Y = f(X) \quad (1)$$

式中: Y 为系统输出值组成的向量, X 为核数据值组成的向量。

通过抽样获得 N 个样本向量 $\{X_j, j = 1, \dots, N\}$, 代入计算模拟软件中, 可以得到对应的 N 个计算结果输出矩阵 $\{Y_j, j = 1, \dots, N\}$, 对输出矩阵进行统计分析可获得响应量的不确定度。

1.1 基本流程

如图1所示,采用抽样法对核反应堆数值模拟系统进行不确定度分析的过程主要可分为三步:(1)复现核数据的不确定度,形成样本空间,从样本空间中进行抽样并生成扰动文件;(2)使用扰动文件进行方差评估、收敛性评估及蒙卡计算;(3)对结果进行统计分析。

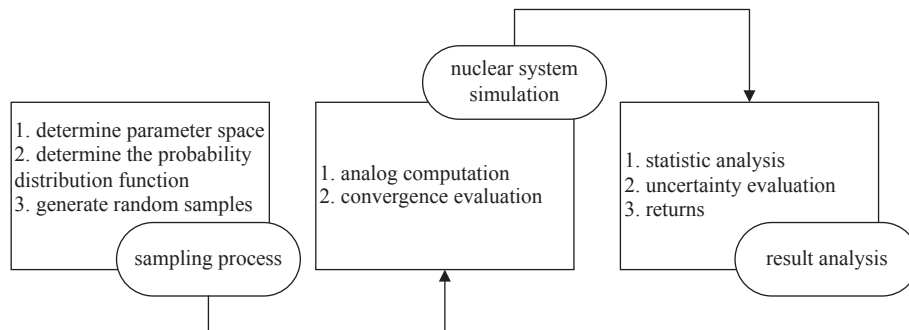


Fig. 1 Basic process of sampling method

图1 抽样法基本流程

具体处理流程如图2所示。首先,根据反应堆模型选择合适的、在临界计算中作用较大的核素及反应道作为研究对象,下载这些核素对应的 ENDF 格式文件。通过收敛性评估与方差评估平衡精确度与计算资源并确保蒙特卡软件本身的标准差不会对不确定度量化结果造成影响,使用核数据扰动抽样软件 SANDY 进行扰动并生成扰动核数据文件。使用核数据加工软件 NJOY 对这些文件加工^[9],代入蒙特卡罗计算软件。最后对获得的结果进行统计分析即可得到不确定度量化结果。在本流程中多处用到了自编脚本,包括核数据的批量处理、OpenMC 中核数据结果的提取,以及数据的统计分析 & 绘图。这些脚本文件以及自编统计代码都是由 Python 为基础进行编写的。

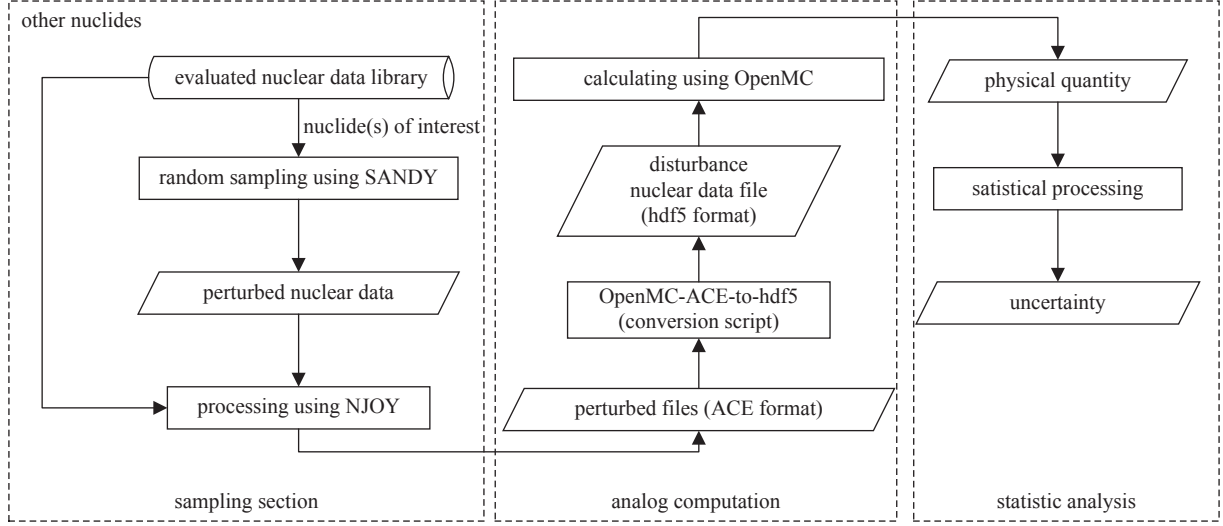


Fig. 2 Specific quantification process

图 2 具体流程

1.2 核数据抽样

在传统的反应堆数值模拟过程中核数据是以确定数值的形式代入计算模拟软件中。事实上,核数据是一组服从概率函数的数据,即存在着不确定度。 k_{eff} 计算涉及到裂变、弹性散射、非弹性散射、辐射俘获等反应、平均裂变释放中子数、次级粒子能量分布等数据。在 ENDF 核数据文件中,这些核数据的不确定度以协方差矩阵的形式保存在核数据文件的数个章节中,包括 33 节(记录中子截面协方差的章节)、31 节(记录瞬发中子协方差的章节)、34 节(记录角分布协方差的章节)、35 节(记录次级粒子能量分布协方差的章节)。其中第 33 节包含了弹性散射、非弹性散射、裂变、辐射俘获等反应的协方差矩阵。核数据抽样的目标就是从核数据文件中提取最佳估计值与协方差矩阵并构造样本向量 $\mathbf{X}$ 。本研究中使用 SANDY 程序实现核数据抽样,其基本原理如下^[3]。

核数据的期望值组成向量 $\boldsymbol{\mu}$, 这些核数据组成的协方差矩阵为 $\boldsymbol{\Sigma}$, 假设每个核数据的数值都服从正态分布, 则有 $\mathbf{X} \sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ 。首先对 $\boldsymbol{\Sigma}$ 进行处理得到相关矩阵 $\mathbf{C}$, 其中 $\boldsymbol{\sigma}$ 为 $\mathbf{X}$ 分布的标准差组成的向量

$$\boldsymbol{\Sigma} = \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\sigma} \quad (2)$$

之后,对相关矩阵 $\mathbf{C}$ 进行 Cholesky 分解

$$\mathbf{C} = \mathbf{L} \mathbf{L}^T \quad (3)$$

得到的 $\mathbf{L}$ 称为线性算子。可以表示为

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{1,1} & 0 & \cdots & 0 \\ L_{2,1} & L_{2,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n,1} & L_{n,2} & \cdots & L_{n,n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设有一个矩阵 $\mathbf{Z}$, 其中包括 n 个服从于标准正态分布的 n 维随机变量 $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$ 。则第 j 组的相关样本可以表示为

$$\mathbf{L} \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} L_{1,1} z_1 \\ L_{2,1} z_1 + L_{2,2} z_2 \\ \vdots \\ L_{n,1} z_1 + \cdots + L_{n,n} z_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

最后,在需要多组抽样样本的情况下,将第 j 组抽样样本向量 $\mathbf{X}$ 中的元素表示为

$$x_i^{(j)} = \mu_i + (\mathbf{L} \mathbf{Z})_i^{(j)} \sigma_i \quad (6)$$

式中: i 为元素所在的维度, μ_i 、 σ_i 为核数据记录中的期望和标准差。如果协方差矩阵和标准差以相对值的形式给出,则元素可以表示为

$$x_i^{(j)} = \mu_i \left(1 + (\mathbf{L} \mathbf{Z})_i^{(j)} \sigma_{r,i} \right) \quad (7)$$

将抽样得到的核数据代入模拟计算中,并根据不同的计算需求对最终的计算结果进行统计分析,最普遍的即为计算其标准差,设得到的大量输出物理模拟计算量中的第 s 个计算量为 k_s , μ_k 为这些输出量的期望值, σ_k 为标准差。

$$\mu_k = E(k) = \frac{1}{n} \sum_s k_s \quad (8)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_s (k_s - \mu_k)^2} \quad (9)$$

1.3 方差分析与收敛性分析

在对扰动后的核数据进行蒙特卡罗计算时,所得结果的不确定度可以由两个主要因素构成,即核数据的不确定度引起的 k_{eff} 不确定度和蒙特卡罗计算软件本身带来的不确定度。当蒙特卡罗方法的标准差小于由数据产生的标准差 1 个数量级时,可以认为蒙特卡罗方差对结果的影响处于可接受的范围内。收敛性分析方法是不断增加扰动文件的数量直至计算结果不再出现大幅变化,即找到使计算结果稳定的扰动文件的数量。

2 方法验证

为了验证 SANDY 软件以及自编程序的正确性,设置了验证算例:对 ENDF/B-VII.1 核数据库和 JEFF-3.2 核数据库内的 ^{23}Na 的弹性散射截面进行了扰动,并将结果与 Fiorito L^[3]、MacFarlane^[10] 文献参考结果进行对比。使用核数据抽样扰动软件 SANDY 进行扰动,通过核数据加工软件 NJOY 加工并使用自编脚本进行数据分析并与其他人结果进行对比。得到的结果如表 1 所示(mean 为统计的期望值, stdev 为相对标准差)。对计算结果进行对比,表明文献^[3,10]的结果与本工作的计算结果之间存在显著的相似性,证明在本研究中使用的软件及流程是正确的。

表 1 钠的单群弹性散射截面扰动结果对比

Table 1 Comparison of disturbance results of single group elastic scattering cross section of sodium

	mean			stdev/%		
	Fiorito L ^[3]	MacFarlane ^[10]	this article	Fiorito L ^[3]	MacFarlane ^[10]	this article
ENDF/B-VII.1	7.94	7.94	7.95	2.44	2.46	2.52
JEFF-3.2	7.89	7.89	7.90	2.10	2.09	2.15

3 数值结果

3.1 计算模型

JRR-3M 是典型的池式研究堆^[11]。以轻水作为冷却剂,重水为慢化剂^[12],以铪作为控制棒的主要材料。堆芯由 26 个标准燃料组件、6 个控制组件(4 个控制棒组件,两个安全棒组件)以及 5 个辐照孔组件组成。每个跟随燃料和控制组件由铪吸收器段和跟随燃料元件段组成。堆芯周围是铍反射层、重水箱和轻水池。燃料由铝和铀组成,铀的各同位素中 ^{235}U 的富集度为 19.75%。堆芯俯视图如图 3 所示,控制棒全插、临界、控制棒全拔三种工况下的纵截面如图 4 所示。

根据堆芯结构与燃料组件、冷却剂、反射层、控制棒的主要元素构成,可以确定对 JRR-3M 的不确定度量化目标核素为 ^1H 、 ^9Be 、 ^{16}O 、 ^{27}Al 、 ^{235}U 、 ^{238}U ,以及铪的所有同位素。考虑到研究堆运行过程,本研究主要针对堆芯临界、控制棒全插和控制棒全拔三种工况开展研究。采用 OpenMC 建立 JRR-3M 的分析模型,由于 ENDF/B-VII.1 库中缺少铪的所有同位素的协方差信息,所以铪的所有同位素的核数据源文件来自 TENDL-2021 核数据库,其余核素核数据源文件来自 ENDF/B-VII.1 库。控制棒临界高度为 20.78 cm,临界 k_{eff} 为 1.00457 ± 0.00008 ,控制棒全插工况 k_{eff} 为 0.88665 ± 0.00008 ,控制棒全拔工况为 1.24406 ± 0.00008 。

蒙特卡罗计算中,设定粒子代数为 2000,每代粒子数为 80000,蒙卡计算的标准差为 0.00008。核数据带来的标准差大于此数值一个数量级,以 ^{235}U 的吸收截面带来的标准差为例,约为 0.00154,远远大于蒙特卡罗计算本身的标准差。

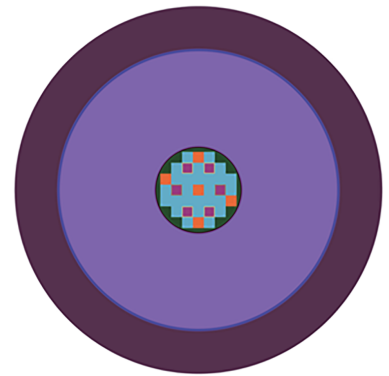


Fig. 3 Core structure

图 3 堆芯结构

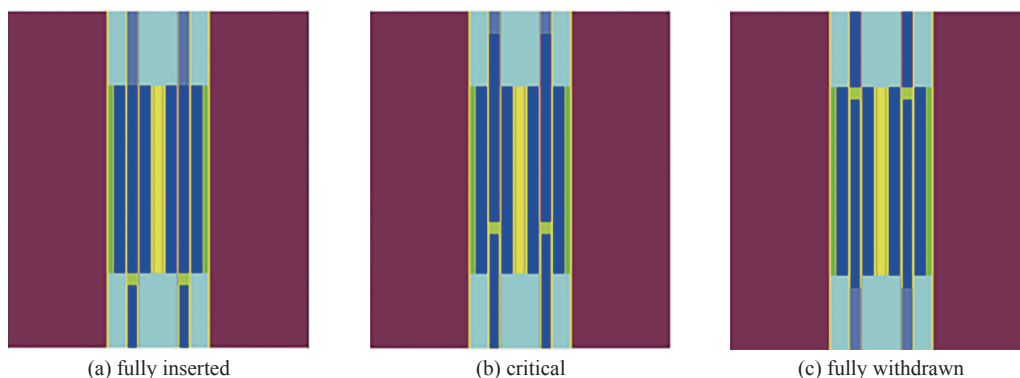


Fig. 4 Core cross-sections under three operating conditions of control rods

图4 三种工况下的堆芯示意图

在对反应堆模型进行核数据不确定度量化时,必须进行扰动文件数的收敛分析。当设置的扰动文件数过少时,不确定度结果不收敛;而增加扰动文件的数量会大量增加计算资源的消耗,因此选择合适的扰动文件数量十分重要。本算例中通过对扰动文件数的收敛性计算,得到如图5所示的收敛性结果。随着扰动文件数的增加,计算得到的标准差逐渐收敛于0.0015,在核数据文件数量约为250时,模拟计算的结果基本收敛,故设置扰动文件数为250。

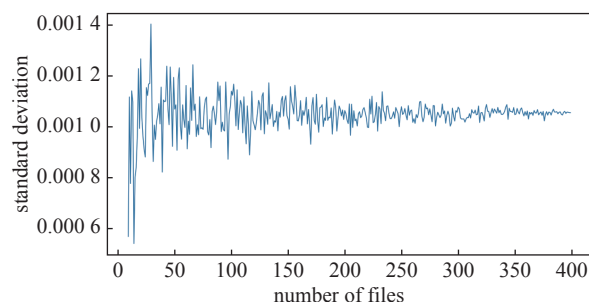


Fig. 5 Disturbance file number convergence image

图5 扰动文件数收敛图像

3.2 计算结果

JRR-3M 在控制棒全插、临界、控制棒全拔三种工况下 k_{eff} 计算值以及各个核素数据引起的不确定度结果见表2,按照核燃料、冷却剂和慢化剂、控制棒三类给出了各个分不确定度和总不确定度值。从表中可以看出,三种工况中全提出工况下的不确定度数值最大(708.4×10^{-5}),临界工况次之(660.8×10^{-5}),全插入工况下最小(588.5×10^{-5})。在三种工况中,燃料棒材料的核数据不确定度对 k_{eff} 的影响都大于燃料棒中的其他组成材料,对具体核素分析可以发现:虽然在燃料棒的组成核素中 ^{235}U 的富集度低于 ^{238}U ,但其不确定度贡献要远远大于 ^{238}U ,这主要是堆芯内 ^{235}U 的价值远高于 ^{238}U 。铪的不确定度与控制棒插入的程度有关,控制棒插入越多,铪带来的核数据不确定度越高(全插入工况下铪核数据的不确定度为 k_{eff} 计算带来的不确定度为 329.1×10^{-5} 、临界工况下为 159.5×10^{-5} 、全提出工况下为 33.7×10^{-5})。结构材料在各个工况下带来的不确定度都无法忽略,且与反应性呈正相关,特别是 ^1H 和 ^{27}Al 带来的影响。

表2 JRR-3M 三种工况下各核素对 k_{eff} 的不确定度贡献

Table 2 Contribution of uncertainty of each nuclide under three working conditions

working condition	k_{eff}	uncertainty caused by fuel nuclides/ 10^{-5}				uncertainty caused by coolant and moderator/ 10^{-5}					uncertainty caused by control rod material/ 10^{-5}							total/ 10^{-5}
		^{27}Al	^{238}U	^{235}U	total	^1H	^2H	^{16}O	^9Be	total	^{174}Hf	^{176}Hf	^{177}Hf	^{178}Hf	^{179}Hf	^{180}Hf	total	
critical condition	1.00457±0.00008	309.5	67.6	417.0	523.7	346.6	41.6	107.1	59.9	370.0	15.0	15.1	154.7	15.4	22.9	17.3	156.5	660.8
control rod fully inserted	1.00457±0.00008	247.5	57.5	309.8	400.7	250.0	46.1	96.4	60.2	278.5	13.9	17.3	324.7	17.6	40.1	20.9	329.1	588.5
control rod fully withdrawn	1.00457±0.00008	366.7	83.2	454.5	589.9	367.4	44.3	100.4	75.0	390.7	13.2	13.8	13.8	13.5	14.0	14.3	33.7	708.4

核素的各反应道对 k_{eff} 计算不确定度的贡献如表3所示。可以发现,在JRR-3M的各个工况下,裂变核素 ^{235}U 的不确定度贡献主要来自 ^{235}U 的次级粒子能量分布、辐射俘获截面和平均裂变释放中子数的核数据不确定性,该结论与文献[13]类似。 ^1H 和 ^{27}Al 在各工况下的不确定度贡献主要来源于吸收截面与非弹性散射截面。控制棒内铪的各类同位素在JRR-3M内的中子吸收截面较大^[14],弹性散射截面与非弹性散射截面较低,而各类同位素中又以 ^{177}Hf 的吸收截面为最高(如图6所示),这可能是控制棒插入工况下 k_{eff} 不确定度的主要来源。

表 3 各工况下各反应道的不确定度量化结果

Table 3 Quantitative results of uncertainty for each reaction channel under different operating conditions (10⁻⁵)

nuclide	reaction channel	critical condition	control rod fully inserted	control rod fully withdrawn
²³⁵ U	capture	181.5	154.4	237.0
	fission	115.9	99.5	132.4
	inelastic scattering	8.3	7.2	8.9
	elastic scattering	8.9	8.7	8.2
	prompt multiplicity	131.6	116.8	163.9
	energy distribution	331.8	220.1	325.4
²³⁸ U	capture	51.9	46.2	68.8
	fission	8.3	7.8	8.2
	inelastic scattering	36.9	27.1	39.7
	elastic scattering	17.0	15.0	20.0
	prompt multiplicity	10.1	9.6	9.4
	energy distribution	7.8	8.0	8.0
²⁷ Al	capture	168.3	143.6	219.0
	elastic scattering	130.9	98.3	127.1
	inelastic scattering	224.3	176.0	265.3
⁹ Be	elastic scattering	42.5	42.8	52.8
	inelastic scattering	42.2	42.3	53.2
¹⁶ O	elastic scattering	106.7	96.1	100.0
	capture	8.8	7.6	8.8
¹ H	elastic scattering	188.2	136.6	184.3
	capture	291.1	209.4	317.8
² H	elastic scattering	40.6	45.2	43.6
	capture	9.2	9.0	7.9
¹⁷⁴ Hf	capture	8.8	8.3	7.6
	elastic scattering	8.2	7.5	7.7
	inelastic scattering	8.9	8.2	7.6
¹⁷⁶ Hf	capture	9.5	13.3	8.0
	elastic scattering	8.4	7.8	8.0
	inelastic scattering	8.2	7.8	7.8
¹⁷⁷ Hf	capture	154.0	323.9	8.3
	elastic scattering	12.1	21.6	7.7
	inelastic scattering	8.4	7.7	7.9
¹⁷⁸ Hf	capture	9.2	13.4	7.6
	elastic scattering	8.9	8.1	8.0
	inelastic scattering	8.6	8.0	7.8
¹⁷⁹ Hf	capture	19.6	38.3	8.3
	elastic scattering	8.4	9.2	8.0
	inelastic scattering	8.3	7.4	7.9
¹⁸⁰ Hf	capture	12.3	17.0	8.3
	elastic scattering	8.9	8.8	8.4
	inelastic scattering	8.3	8.4	8.1

4 结 论

本文建立了核数据引起的反应堆 k_{eff} 计算不确定度的量化流程, 并利用开源软件 SANDY 和自编程序实现了流程的计算过程, 并进行了验证。使用 OpenMC 建立了池式研究堆 JRR-3M 的研究模型, 并在堆芯临界、控制棒全插和全拔 3 种工况下进行了核数据引起的 k_{eff} 不确定度量化研究。

研究结果表明: 控制棒全插、临界、控制棒全拔三种工况中全提出工况下的不确定度数值最大 (708.4×10^{-5}),

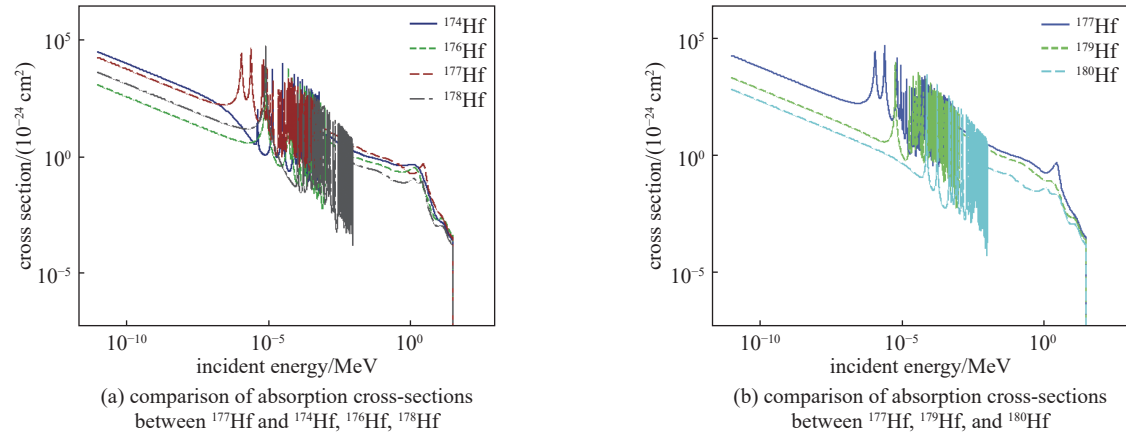


Fig. 6 Comparison of absorption cross-sections of hafnium in TENDL-2021 library

图 6 TENDL-2021 库中铪的吸收截面对比

临界工况次之(660.8×10^{-5}), 全插入工况下最小(588.5×10^{-5})。三种工况中燃料棒材料的核数据不确定度对 k_{eff} 的影响大于其他材料, 燃料棒材料中又以 ^{235}U 对不确定度的贡献最大。核素反应道方面, ^{235}U 的次级粒子能量分布影响最大。另外, 其余核素如 ^{27}Al 、 ^1H 以及控制棒插入时的 ^{177}Hf 对不确定度的贡献不可忽略。

后续可开展不同数据库的不确定度影响对比研究, 例如将核数据库替换为 JENDL、JEFF 以及我国自主的核数据库 CENDL^[15] 等, 以及研究堆运行过程不同堆芯布置下的不确定度量化研究。

参考文献:

- [1] Zhu Ting, Vasiliev A, Ferroukhi H, et al. Testing the sampling-based NUSS-RF tool for the nuclear data-related global sensitivity analysis with Monte Carlo neutronics calculations[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2016, 184(1): 69-83.
- [2] 万承辉, 曹良志, 吴宏春, 等. 基于抽样方法的特征值不确定度分析[J]. *原子能科学技术*, 2015, 49(11): 1954-1960. (Wan Chenghui, Cao Liangzhi, Wu Hongchun, et al. Eigenvalue uncertainty analysis based on statistical sampling method[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2015, 49(11): 1954-1960)
- [3] Fiorito L, Žerovnik G, Stankovskiy A, et al. Nuclear data uncertainty propagation to integral responses using SANDY[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2017, 101: 359-366.
- [4] Griseri M, Fiorito L, Stankovskiy A, et al. Nuclear data uncertainty propagation on a sodium fast reactor[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, 324: 122-130.
- [5] 强胜龙, 尹强, 芦韡, 等. 秦山二期堆芯临界计算中核数据的敏感性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 036004. (Qiang Shenglong, Yin Qiang, Lu Wei, et al. Sensitivity analysis of nuclear data in core critical calculation of Qinshan II [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 036004)
- [6] Iwamoto H, Stankovskiy A, Fiorito L, et al. Monte Carlo uncertainty quantification of the effective delayed neutron fraction[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2018, 55(5): 539-547.
- [7] Park J H, Pereslavytsev P, Konobeev A, et al. Statistical analysis of tritium breeding ratio deviations in the DEMO due to nuclear data uncertainties[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11: 5234.
- [8] 胡泽华, 叶涛, 刘雄国, 等. 抽样法与灵敏度法 k_{eff} 不确定度量化[J]. *物理学报*, 2017, 66: 012801. (Hu Zehua, Ye Tao, Liu Xiongguo, et al. Uncertainty quantification in the calculation of k_{eff} using sensitivity and stochastic sampling method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66: 012801)
- [9] 吴屈, 余健开, 李万林, 等. 基于不同 ENDF/B 的 ACE 格式库参数制作与初步检验 (英文)[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 026004. (Wu Qu, Yu Jiankai, Li Wanlin, et al. Parameter making and preliminary test of ACE format libraries based on different ENDF/B [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 026004)
- [10] MacFarlane R E, Muir D W. The NJOY nuclear data processing system Version 91 [R]. Los Alamos: Los Alamos National Lab, 1994.
- [11] Ma Jimin, Wang Guanbo, Yuan Shu, et al. An improved assembly homogenization approach for plate-type research reactor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 85: 1003-1013.
- [12] 戴涛, 黄洪文, 马纪敏. 基于 RELAP5 的池式研究堆自然循环瞬态计算[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 086001. (Dai Tao, Huang Hongwen, Ma Jimin. Transient calculation of natural circulation for pool-type research reactor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 086001)
- [13] 胡继峰, 王小鹤, 李文江, 等. 熔盐实验堆核数据引起反应性参数不确定度分析[J]. *核技术*, 2019, 42: 030601. (Hu Jifeng, Wang Xiaohe, Li Wenjiang, et al. Uncertainties analysis of reactivity parameters caused by nuclear data of molten salt experiment reactor[J]. *Nuclear Techniques*, 2019, 42: 030601)
- [14] 黄洪文, 武宇, 叶林, 等. 反应堆控制棒铪板性能研究[J]. *原子能科学技术*, 2009, 43(s2): 316-318. (Huang Hongwen, Wu Yu, Ye Lin, et al. Research of hafnium characteristic for control rod of reactor[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009, 43(s2): 316-318)
- [15] 阮锡超. 我国核数据实验研究进展[J]. *核技术*, 2023, 46: 080003. (Ruan Xichao. Nuclear data measurement progress in China [J]. *Nuclear Techniques*, 2023, 46: 080003)