



## 面向协方差矩阵抽样的快堆不确定性分析方法研究

朱润泽, 马续波, 王冬勇, 张斌, 彭星杰, 王连杰

### Study on Uncertainty Analysis Method of Fast Reactor Based on Covariance Matrix Sampling

Zhu Runze, Ma Xubo, Wang Dongyong, Zhang Bin, Peng Xingjie, and Wang Lianjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.05.0081>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 新型不确定性分析容忍限估计方法

A New Uncertainty Analysis Method for Tolerance Limit Evaluation

核动力工程. 2020, 41(6): 131-137

#### 核电软件NESTOR堆芯功率分布计算不确定性研究

Uncertainty Study of Core Power Distribution for Software NESTOR

核动力工程. 2018, 39(3): 23-28

#### 物性参数对氟盐球床堆传热模型不确定性和敏感性的影响分析

Effects of Physical Parameters on Uncertainty and Sensitivity Analysis of Heat Transfer Model of Fluoride Salt-Cooled Pebble-Bed Reactor

核动力工程. 2020, 41(1): 33-36

#### 反应堆系统地震载荷下动力响应计算的不确定性分析

Uncertainty Analysis of Reactor System Dynamical Response under Seismic Load

核动力工程. 2018, 39(5): 167-171

#### 钠冷快堆碎片床迁移判据模型适用性分析

Applicability Analysis of Onset Model for Debris Bed Relocation in Sodium-Cooled Fast Reactor

核动力工程. 2021, 42(1): 42-47

#### 压水堆大破口失水事故重要现象识别及数值计算不确定性量化分析研究

Study on Important Phenomenon Identification and Numerical Simulation Uncertainty Analysis for PWR Large Break LOCA

核动力工程. 2021, 42(1): 198-203



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)05-0081-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.05.0081

# 面向协方差矩阵抽样的快堆不确定性 分析方法研究

朱润泽<sup>1</sup>, 马续波<sup>1\*</sup>, 王冬勇<sup>2</sup>, 张 斌<sup>1</sup>, 彭星杰<sup>2</sup>, 王连杰<sup>2</sup>

1. 华北电力大学核科学与工程学院, 北京, 102206;  
2. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

**摘要:** 基于传统统计学抽样的不确定性分析方法由于算法简单、程序容易实现及同时考虑高阶效应受到国内外广泛关注, 但上述方法通常需要大量样本才能保证响应量计算精度。研究发现, 产生以上现象的原因是抽样样本质量不高。通过改进抽样方法, 面向协方差矩阵抽样时小样本量可以保证较高的计算精度。文中首先从理论上证明了面向协方差矩阵抽样方法的可行性, 用简单测试题对其进行验证。在此基础上, 使用自主开发的快能谱反应堆敏感性和不确定性分析程序 SUFR, 选取国际快堆基准装置 ZPR-6/7, 计算多个核素不同反应类型的核截面引起的有效增殖因子 ( $k_{\text{eff}}$ ) 的不确定度, 并与使用确定论方法计算的不确定度进行对比。结果表明, 使用面向协方差矩阵抽样的情况下, 样本量为 50 时, 2 种方法计算的不确定度偏差均低于 1.3%。由此说明, 面向协方差矩阵抽样方法可以很好地解决传统抽样方法计算不确定度时存在的问题, 且 SUFR 程序面向协方差矩阵抽样功能的开发是正确的, 该方法是对传统抽样方法的进一步发展。

**关键词:** 统计学抽样; 不确定性分析; 钠冷快堆; SUFR

**中图分类号:** TL329 **文献标志码:** A

## Study on Uncertainty Analysis Method of Fast Reactor Based on Covariance Matrix Sampling

Zhu Runze<sup>1</sup>, Ma Xubo<sup>1\*</sup>, Wang Dongyong<sup>2</sup>, Zhang Bin<sup>1</sup>, Peng Xingjie<sup>2</sup>, Wang Lianjie<sup>2</sup>

1. School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** The uncertainty analysis methods based on traditional statistical sampling have received widespread attention in China and other countries due to their simple algorithms, easy realization of codes, and consideration of high-order effects. However, these methods usually require a large number of samples to ensure the calculation accuracy of response variables. As found in the study, this phenomenon occurs because of the poor quality of the samples. After a covariance matrix sampling is used instead of the traditional sampling method, a small sample size can also ensure a high calculation accuracy. This paper firstly demonstrates theoretically the feasibility of the covariance matrix sampling method, and verifies it with simple tests. On this basis, this paper, using the self-developed fast spectrum reactor sensitivity and uncertainty analysis code - SUFR and the international reference configuration for fast reactor ZPR-6/7, calculates the uncertainty of effective multiplication factor ( $k_{\text{eff}}$ ) caused by the nuclear cross sections of different reaction types of multiple nuclides, and compares the calculation results with the uncertainty calculated using the deterministic method. As demonstrated by the results, if the covariance

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11875128); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2018MS044)

作者简介: 朱润泽 (1997—), 女, 硕士研究生, 从事反应堆物理核数据库不确定性研究, E-mail: runze\_z@139.com

\*通讯作者: 马续波, E-mail: maxb@ncepu.edu.cn

matrix sampling is used, with a sample size of 50, the uncertainty deviation calculated in the two methods each is below 1.3%. This indicates that the use of the covariance matrix sampling method can solve the problems present in the use of the traditional sampling method to calculate uncertainty, and that it is appropriate to develop the SUFR code function against the covariance matrix sampling. This method represents a further development of the traditional sampling method.

**Key words:** Statistical sampling, Uncertainty analysis, Sodium-cooled fast reactor, SUFR

## 0 引言

在反应堆物理计算中, 计算机功能的逐渐强大使得分析工具不断改进, 建立数学-物理模型和多群截面生成算法上的近似逐渐减少, 使得核截面在测量和评价中引入的不确定性成为堆芯物理参数不确定性的最主要来源<sup>[1-2]</sup>, 特别是对于第四代反应堆系统<sup>[3]</sup>。全面的敏感性和不确定性分析以评估核截面的不确定性研究越来越受到国际重视。国内外进行了大量的不确定度量化传递的研究工作, 主要集中在敏感性和不确定性分析方法的程序开发方面<sup>[4-10]</sup>, 国外代表程序有: TSUNAMI-3D、SUSD3D、XSUSA等; 国内有: COLEUS、UNICORN、SURE、CUSA、SUACL等。目前, 进行不确定度和敏感性系数计算的方法主要有2种, 分别是基于广义微扰理论的确定论方法和基于蒙特卡罗抽样的统计学方法。基于确定论方法广义微扰理论的程序开发已经逐渐完善。相比于确定论方法, 统计学抽样方法由于具有无近似处理、算法易实现、适用性强的优点, 也越来越受到重视。但统计学抽样方法也有明显的缺点, 即计算时间较长, 并且消耗的时间正比于样本容量、核素个数及反应类型数。文献[11]发现通过改进随机数抽样, 可以在小样本量下保证高计算精度, 并提出了面向协方差矩阵抽样方法。本文首先从理论上证明了上述方法实现的原理, 基于面向协方差矩阵方法开发了应用于快堆的不确定性和敏感性分析程序 SUFR。以快堆基准装置 ZPR-6/7 为研究对象, 量化了一些核素和反应类型截面引起的堆芯有效增殖因子 ( $k_{\text{eff}}$ ) 的不确定度, 对该方法和 SUFR 程序进行验证。

## 1 协方差矩阵抽样理论

在核数据的不确定性分析中, 多群截面样本的实质是多维相关正态分布随机样本。对于这种样本的产生, 传统统计学抽样的做法是分解协方差矩阵, 利用协方差方根矩阵对标准正态分布随

机样本进行线性变换。假设  $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n)_m$  是需要产生的  $m$  组  $n$  维的相关正态分布随机样本, 随机变量均值向量  $\boldsymbol{\mu} = (\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\mu}_2, \dots, \boldsymbol{\mu}_n)$ , 不同能群之间的绝对协方差矩阵为  $n \times n$  阶矩阵  $\mathbf{A}$ 。对  $\mathbf{A}$  进行矩阵分解如下:

$$\mathbf{A} = \boldsymbol{\Sigma} \boldsymbol{\Sigma}^T \quad (1)$$

式中,  $\boldsymbol{\Sigma}$  为用于产生多维相关正态分布随机样本的绝对协方差方根矩阵。假设  $\mathbf{Z} = (\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_n)_m$  为抽样产生的  $m$  组  $n$  维的标准正态分布随机样本,  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Z}$ 、 $\boldsymbol{\Sigma}$  之间符合线性变换关系如下:

$$\mathbf{X} = \mathbf{Z} \boldsymbol{\Sigma} + \boldsymbol{\mu} \quad (2)$$

$$\mathbf{V}[\mathbf{X}] = \boldsymbol{\Sigma} \boldsymbol{\Sigma}^T = \mathbf{A} \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{V}[\mathbf{X}]$  为  $\mathbf{X}$  的协方差矩阵<sup>[12]</sup>。

式(3)严格成立的条件是: 每组随机样本中抽取的  $\mathbf{Z}_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) 变量相互独立, 即每一组随机样本的协方差矩阵为单位阵。实际抽样过程中, 需对  $\mathbf{Z}$  中每一维变量进行  $m$  次模拟抽样, 抽取的任意一组随机样本的协方差矩阵不一定为单位矩阵, 设其协方差矩阵为  $\tilde{\mathbf{I}}$ 。对  $\tilde{\mathbf{I}}$  分解如下:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \mathbf{B} \mathbf{B}^T \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{B}$  为由  $\tilde{\mathbf{I}}$  分解而来的一组标准正态分布随机样本的协方差方根矩阵。在式(3)的基础上求解这组随机样本进行线性变换后对应  $\mathbf{X}$  的协方差, 并进行协方差的分解如下:

$$\mathbf{V}[\mathbf{X}] = \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{V}[\mathbf{Z}] \boldsymbol{\Sigma}^T = \boldsymbol{\Sigma} \tilde{\mathbf{I}} \boldsymbol{\Sigma}^T = \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{B} (\mathbf{B} \boldsymbol{\Sigma})^T \quad (5)$$

抽取的多维相关正态分布随机样本的协方差受到标准正态分布随机样本的协方差影响, 不能充分反映原多维随机变量各维度的相关性。为了解决这一问题, 求解一组标准正态分布随机样本的协方差方根矩阵的逆矩阵进行如下修正:

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{Z} \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{Z}'$  为经过修正的标准正态分布随机样本, 对  $\mathbf{Z}'$  进行式(2)的线性变换得到  $\mathbf{X}$  并求解  $\mathbf{V}[\mathbf{X}]$  如下:

$$\mathbf{V}[\mathbf{X}] = \mathbf{E}[(\boldsymbol{\Sigma} \mathbf{Z}' + \boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\mu})(\boldsymbol{\Sigma} \mathbf{Z}' + \boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\mu})^T] = \boldsymbol{\Sigma} \boldsymbol{\Sigma}^T = \mathbf{A} \quad (7)$$

经过修正的标准正态分布随机样本经过线性变换后，所得多维相关正态分布随机样本的协方差能够保证抽样前后的一致。此时获取的多维相关正态分布随机样本能够尽量充分地表征不同维度变量间的相关性。若使用相对协方差矩阵产生样本，可以进行类似的修正。

## 2 数值结果验证

### 2.1 随机变量抽样示例

示例为： $U_1$  为服从均值为 1、方差为 4 的正态分布随机变量； $U_2$  为服从均值为 1、方差为 9 的正态分布随机变量，两变量相互独立。定义几种抽样方法，方法 1 为标准正态分布抽样，采用式 (8) 或者 (9) 产生随机数  $x_i$ ，如下：

$$x_i = \sqrt{-2\ln\xi_1} \cos(2\pi\xi_2) \quad (8)$$

$$x_i = \sqrt{-2\ln\xi_1} \sin(2\pi\xi_2) \quad (9)$$

式中， $\xi_1$  和  $\xi_2$  是采用 Fortran2003 语言的 RANDOM\_NUMBER 函数产生的服从 (0, 1) 均匀分布的随机数。方法 3 为拉丁超立方正态分布抽样，其原理为：根据样本总数  $N$ ，把概率区间等分为  $N$  个，使用 RANDOM\_NUMBER 函数抽取随机数作为概率值，根据标准正态分布概率密度函数与分布函数关系，计算标准正态分布随机数对应的概率，舍选抽样直到保证  $N$  个等概率区间都抽取到一个随机数，则抽样结束。方法 3 抽样的优点是：样本既能满足标准正态分布，又能满足抽取的随机数分布于等分的每个概率区间。上述方法 1 和方法 3 主要是针对一维随机变量的抽样方法，对多维随机变量抽样时，如何保证变量之间的相关性为 0 是前一节理论所述的内容。方法 2 在方法 1 的基础上，利用式 (6) 去掉多维变量之间的相关性。方法 4 在方法 3 的基础上，利用式 (6) 去掉多维变量之间的相关性。统计不同

的样本量下，4 种抽样方法产生的二维随机样本协方差矩阵，结果如表 1 所示。

由表 1 可知，仅使用标准正态分布抽样（方法 1）或仅使用拉丁超立方抽样（方法 3）的情况下，抽取的 2 组随机序列间存在相关性。样本量较大，增加至  $10^4$  时，2 组随机序列间的协方差才能接近 0。而使用方法 2 和方法 4 抽样的 2 种情况，由于抽取的随机序列去除了相关性，样本量的增加对样本协方差的影响不大，随机序列间的协方差始终趋于 0。方法 2 虽然利用式 (6) 去掉了随机序列间的相关性，但样本的平均值跟真值并不完全一致，导致利用样本计算的协方差矩阵仍有部分偏差，但与不经过式 (6) 处理的方法 1 计算结果相比，计算精度还是有明显提高。同时方法 4 中，采用拉丁超立方抽样相比于标准正态分布抽样可以更好地保证随机序列平均值与真值保持一致，且随机序列间去掉了相关性，所以小样本量下也能实现协方差矩阵的完全一致。由此说明，传统的标准正态分布抽样（方法 1）或者拉丁超立方抽样（方法 3），都不能很好地解决抽样样本之间的相关性问题，而面协方差矩阵的抽样方法（方法 4）可以保证小样本量下样本之间的不相关性。

### 2.2 不确定度验证

ZPR-6/7 是美国阿贡国家实验室建立的零功率快堆临界装置之一，燃料为 Pu-U-Zr，反射区材料为贫化铀和不锈钢<sup>[13]</sup>。装置按照区域组分和体积构建均匀 RZ 模型<sup>[13]</sup>。堆芯在径向分为 2 部分：内堆芯和外堆芯。堆芯外围的第 1 层反射区分为轴向和径向 2 类，共划分为 6 部分；第 1 层反射区外围为第 2 层反射区，且第 2 层反射区为一个整体。外部为真空边界，临界测量温度为 20℃。

表 1 4 种情况下的二维随机样本协方差矩阵

Tab. 1 Two-Dimensional Random Sample Covariance Matrix in Four Cases

样本量	方法1	方法2	方法3	方法4
50	$\begin{pmatrix} 4.199 & -1.219 \\ -1.219 & 11.859 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.999 & 0.009 \\ 0.009 & 9.001 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.983 & -0.227 \\ -0.227 & 8.831 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 9 \end{pmatrix}$
200	$\begin{pmatrix} 3.301 & -0.422 \\ -0.422 & 9.259 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.995 & 0.050 \\ 0.050 & 9.011 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.965 & -0.211 \\ -0.211 & 8.858 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 9 \end{pmatrix}$
$10^3$	$\begin{pmatrix} 3.863 & -0.082 \\ -0.082 & 9.147 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4.000 & 0.001 \\ 0.001 & 9.000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.886 & -0.129 \\ -0.129 & 8.758 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 9 \end{pmatrix}$
$10^4$	$\begin{pmatrix} 3.957 & 0.077 \\ 0.077 & 8.963 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4.000 & -0.003 \\ -0.003 & 9.000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.884 & 0.004 \\ 0.004 & 8.739 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 9 \end{pmatrix}$

### 2.3 不确定度计算对比

本文采用均匀模型对临界状态下的 ZPR-6/7 进行计算。首先, 使用 MGGC-V2.0 程序得 ZPR-6/7 的 33 群二进制 ISOTXS 微观截面库。核素的协方差数据来自于 ENDF/B-VII.1 评价核数据库, 采用截面处理程序 NJOY<sup>[14]</sup> 制作核素 33 群相对协方差矩阵; SUFR 程序读入微观截面库和协方差数据, 生成一定数量的截面库样本, 将样本导入三维六角形节块法扩散计算程序 DIF3D<sup>[15]</sup> 中进行堆芯扩散计算, 最终统计分析。执行的计算流程如图 1 所示:

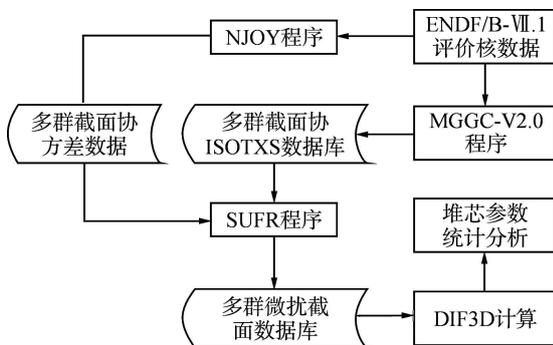


图 1 SUFR 程序计算流程

Fig. 1 Calculation Process of the SUFR Code

选取 ZPR-6/7 燃料、结构材料及冷却剂材料中的 5 种核素计算堆芯  $k_{eff}$  不确定度, 包括  $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{56}\text{Fe}$  和  $^{23}\text{Na}$ 。程序中使用面向协方差矩阵的抽样方法生成截面库样本, 采用的样本量为 50。分析的反应类型包括弹性散射、非弹性散射、裂变、辐射俘获和每次裂变释放中子数。

确定论方法计算较为简单, 可得到可靠的计算结果。因此, 使用确定论方法计算堆芯  $k_{eff}$  不确定度作为参考解, 与面向协方差矩阵抽样方法计算结果进行对比。通过 SUFR 程序, 采用直接数值扰动法求出多群相对敏感性系数, 计算不确定度的传递如下:

$$\Delta^2 = \mathbf{C} \mathbf{S} \mathbf{C}^T \quad (10)$$

式中,  $\Delta$  为  $k_{eff}$  相对不确定度;  $\mathbf{S}$  为相对敏感性系数向量;  $\mathbf{C}$  为不同反应类型截面的相对协方差矩阵。表 2 给出了 2 种方法计算的由不同核素和不同类型截面引起的  $k_{eff}$  不确定度。表中,  $\sigma_{elas}$  为弹性散射截面;  $\sigma_{inel}$  为非弹性散射截面;  $\sigma_f$  为裂变截面;  $\sigma_\gamma$  为辐射俘获截面;  $\nu$  为每次裂变释放中子数。

表 2 2 种方法计算的多群截面引起的  $k_{eff}$  不确定度

Tab. 2 Uncertainty of  $k_{eff}$  due to Multigroup Cross Section Calculated by Two Methods

核素	反应类型	面向协方差矩阵抽样方法/ $10^{-4}$	确定论方法/ $10^{-4}$	相对偏差/%
$^{235}\text{U}$	$\sigma_\gamma$	2.3783	2.3783	0
	$\sigma_{elas}$	0.01998	0.019980	0
	$\sigma_{inel}$	0.069764	0.069779	-0.02
	$\sigma_f$	0.50225	0.50224	0
	$\nu$	0.79784	0.79784	0
$^{238}\text{U}$	$\sigma_\gamma$	33.491	33.408	0.25
	$\sigma_{elas}$	9.8896	9.8097	0.81
	$\sigma_{inel}$	64.832	65.496	-1.01
	$\sigma_f$	4.0966	4.1066	-0.24
	$\nu$	15.201	15.199	0
$^{239}\text{Pu}$	$\sigma_\gamma$	31.183	31.183	0
	$\sigma_{elas}$	1.0731	1.0728	0.023
	$\sigma_{inel}$	5.6450	5.7155	-1.23
	$\sigma_f$	23.837	23.843	-0.02
	$\nu$	7.1727	7.1727	0
$^{56}\text{Fe}$	$\sigma_\gamma$	10.373	10.352	0.21
	$\sigma_{elas}$	9.4448	9.3937	0.54
	$\sigma_{inel}$	10.954	10.922	0.29
$^{23}\text{Na}$	$\sigma_\gamma$	1.5406	1.5540	-0.86
	$\sigma_{elas}$	4.1418	4.1332	0.21
	$\sigma_{inel}$	7.0291	7.0317	-0.04

由表 2 可知, 使用 2 种方法分别计算的  $k_{eff}$  不确定度, 不同反应类型截面的相对偏差均在 1.3% 以内, 表明 2 种计算方法的结果总体上符合较好。虽然确定论方法只考虑一阶效应, 而面向协方差矩阵抽样方法考虑了高阶效应, 但二者计算结果符合较好说明高阶效应对计算结果的影响较小。对比计算结果说明, 在使用面向协方差矩阵抽样方法时, 采用较少的样本量能够达到较好的计算精度。

### 3 结论

针对传统统计学抽样计算不确定度所需样本量大且计算偏差较大的问题, 文中分析了具体原因, 即抽取的样本不能充分反映截面本身的相关性, 样本质量不高。为此, 文中采用面向协方差矩阵的抽样方法解决以上问题。自设随机变量抽样例题统计的样本协方差矩阵说明该方法能够有效地去除样本相关性。将该抽样方法应用在自主

开发的快堆不确定性分析程序 SUFR 中, 选用快堆基准题 ZPR-6/7, 采用较小样本量计算关键核素和反应类型截面引起的  $k_{\text{eff}}$  不确定度, 与使用确定论方法的计算结果进行对比。对比的结果表明, 计算的所有反应类型截面的偏差在 1.3% 以下, 说明应用面向协方差矩阵抽样方法进行不确定性分析能够在保证计算精度的同时有效缩小样本量, 提高计算效率, 同时 SUFR 程序对于这一功能的开发是正确的。总的来看, 这一方法是对传统统计学抽样的进一步发展。

#### 参考文献:

- [1] SALVATORES M, JACQMIN R. International evaluation co-operation volume 26: Uncertainty and target accuracy assessment for innovative systems using recent covariance data evaluations: NEA/WPEC-26, ISBN 978-92-64-99053-1[R]. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2008.
- [2] OECD. International evaluation co-operation volume 33: methods and issues for the combined use of integral experiments and covariance data: NEA/WPEC-33, NEA/NSC/WPEC/DOC(2013)445[R]. Paris: OECD, 2013.
- [3] RIMPAULT G, BUIRON L, STAUFF N E, et al. Objectives and status of the OECD/NEA sub-group on uncertainty analysis in modelling (UAM) for design, operation and safety analysis of SFRs (SFR-UAM)[C]//International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17). 2017.
- [4] PERFETTI C, REARDEN B. CE TSUNAMI-3D algorithm improvements in SCALE 6.2[J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2016, 114(6): 948.
- [5] KODELI I. The SUS3D code for cross-section sensitivity and uncertainty analysis - recent development, invited[J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2011, 104: 791-793.
- [6] WILLIAMS M L, ILAS G, JESSEE M A, et al. A statistical sampling method for uncertainty analysis with SCALE and XSUSA[J]. Nuclear Technology, 2013, 183(3): 515-526.
- [7] 刘勇. 基于微扰理论的反应堆物理计算敏感性与不确定性分析方法及应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2017.
- [8] 万承辉. 核反应堆物理计算敏感性和不确定性分析及其在程序确认中的应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- [9] 胡泽华, 王佳, 孙伟力, 等. 基准模型  $k_{\text{eff}}$  对核数据的灵敏度分析及不确定度量化[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(S1): 312-317.
- [10] 胡泽华, 叶涛, 刘雄国, 等. 抽样法与灵敏度法  $k_{\text{eff}}$  不确定度量化[J]. 物理学报, 2017, 66(1): 012801.
- [11] SUI Z J, CAO L Z, WAN C H, et al. Covariance-oriented sample transformation: a new sampling method for reactor-physics uncertainty analysis[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 134: 452-463.
- [12] 马续波, 刘佳艺, 徐佳意, 等. 相关变量随机数序列产生方法[J]. 物理学报, 2017, 66(16): 160201.
- [13] SIMTH M A, LELL R M, MONEO P, et al. ZPR-6 ASSEMBLY 7: A cylindrical assembly with mixed (pu-u)-oxide fuel and sodium with a thick depleted-uranium reflector: NEA/NSC/DOC(95)03/VI[R]. Argonne National Laboratory, 2003.
- [14] MACFARLANE R E, MUIR D W, BOICOURT R M, et al. The NJOY nuclear data processing system version 2012: LA-UR-12-27079[R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2012.
- [15] DERSTINE K L. DIF3D: A code to solve one-, two-, and three-dimensional finite-difference diffusion theory problems: ANL-SF-12-048[R]. Argonne: Argonne National Laboratory, 1984.

(责任编辑: 王中强)