

文章编号: 1007-4627(2025)02-0377-09

考虑隐式效应的快堆敏感性与不确定性分析方法研究

刘莎¹, 马续波^{1,†}, 张辰¹, 王江宇², 王连杰²

(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 610041)

摘要: 作为第四代新型反应堆的快中子反应堆, 是未来核能发展的主要方向之一, 核数据的不确定性成为其反应堆物理计算结果不确定性的重要来源。以往的快堆不确定性研究中往往忽略隐式效应的影响, 针对此问题, 提出了考虑隐式效应的敏感性与不确定性计算方法, 并利用该方法分析了隐式效应对钠冷快堆 ZPR6/7 的 k_{eff} 的敏感性与不确定性的影响。研究表明: 少群截面相对于超细群截面的敏感性系数矩阵中, 主对角线起主导作用, 并且对某些核素某些反应道的敏感性系数, 隐式效应的影响可能超过 50%; 隐式效应对 ^{23}Na 以及 ^{56}Fe 的不确定度影响相对较大, 对 ^{56}Fe 的辐射俘获影响最大, 相对偏差达到了 -5.6%。

关键词: 隐式敏感性; k_{eff} ; 快中子反应堆; 不确定性

中图分类号: TL329 **文献标志码:** A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.42.2024040 **CSTR:** 32260.14.NuclPhysRev.42.2024040

0 引言

近年来随着核科学技术与计算机科学的发展, 反应堆的建模和数值模拟已经成为了当前先进反应堆设计、计算的有力工具。然而, 在进行反应堆的相关计算过程中, 每一步计算产生的不确定性都会传递到下一步的计算当中, 作为核电厂安全分析的重要方法, 最佳估计加不确定性 (BEPU) 方法要求核设计必须充分考虑不确定度的量化^[1]。快能谱反应堆 (快堆) 作为第四代新型反应堆, 是未来核能发展的重要方向, 了解其不确定性及来源对于提高总的最佳估计结果和确保适当的设计裕度以保证核反应堆的安全运行尤为重要。

由于快堆中的中子大多集中在中高能区, 而核数据在这些区域的截面数值较小, 导致测量误差相对较大, 从而导致核数据具有较大的不确定度^[2-3]。针对核数据引起的反应堆物理计算的不确定度, 国内外进行了大量研究^[4-8], 并开发了多种敏感性和不确定度分析程序, 包括 TSUNAMI-1D/3D、SUFR、SUACL、SCALE-SS、DINOSAUR、MCNP、SURE、UNICORN 等^[9-16]。SUFR 程序以 ISOTXS 格式的截面数据和多群协方差数据作为输入, 进行敏感性系数和不确定度计算。敏感性系数包括显式敏感性和隐式敏感性两部分, 其中显式敏感性相

对直接, 国内外已研究得较为明确, 而隐式敏感性体现了共振计算所带来的间接影响, 与共振自屏截面的处理方法相关, 导致计算相对复杂。尽管国内外开展了一系列快堆敏感性和不确定性分析的研究, 但考虑了隐式效应的影响研究仍旧很少^[17-21], 虽然已有文献指出, 敏感性系数的隐式效应对热中子反应堆影响较大^[22-23], 对快堆的影响不显著^[24-25], 然而对于 ^{23}Na 、 ^{56}Fe 等由于对中子具有明显的慢化效应, 进而导致中子能谱变化的隐式效应仍然比较显著, 需要深入研究。关于隐式效应的敏感性分析方法, 国内外也进行了一些研究, 如美国橡树岭国家实验室利用连续能量蒙特卡罗方法开发的 TSUNAMI-3D 程序使用名为 GEAR-MC 的方法, 基于窄共振近似, 实现了对于隐式效应的敏感性分析^[26]; 西安交通大学的 NECP-COLEUS 程序基于子群共振方法和窄共振近似, 考虑了隐式敏感性^[27]; 哈尔滨工程大学的 HNET 程序基于广义微扰理论, 利用子群共振计算方法研究了隐式效应的敏感性等^[28]。由于敏感性系数的隐式效应与共振自屏截面之间的复杂关系, 以往大多采用近似方法考虑敏感性系数的隐式效应。本文将提出一种超细群慢化方程求解方法考虑隐式效应的敏感性系数计算方法, 并采用美国阿贡国家实验室建造的零功率钠冷快堆临界基准 ZPR6/7^[29] 进行深入分析。

收稿日期: 2024-04-30; 修改日期: 2024-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11875128)

作者简介: 刘莎 (2000-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 从事反应堆敏感性与不确定性分析研究; E-mail: liusha_sasa@163.com

† 通信作者: 马续波, E-mail: maxb917@163.com

1 理论基础

根据反应率守恒, 多群截面的计算公式为

$$\sigma_{x,g}(T) = \frac{\int_{\Delta E_g} \sigma_x(E, T) \phi(E) dE}{\int_{\Delta E_g} \phi(E) dE}, \quad (1)$$

其中: $\sigma_{x,g}(T)$ 表示温度 T 的第 g 能群的反应类型为 x (x 可能是裂变、辐射俘获、弹性散射等) 的平均截面; $\sigma_x(E, T)$ 为反应类型为 x 的连续点截面; $\phi(E)$ 为连续能量中子能谱; E 为入射中子能量; ΔE_g 为 g 能群的能群宽度。对于非共振核素, 如果对连续点截面做扰动, 由于反应截面并不对能谱形状造成影响, 因此, 扰动后的截面和扰动之前的截面的关系为

$$\sigma'_x(E, T) = (1 + \delta_{x,g}) \sigma_x(E, T) \quad E_g \leq E \leq E_{g-1}, \quad (2)$$

$$\sigma'_{x,g}(T) = \frac{\int_{\Delta E_g} \sigma'_x(E, T) \phi(E) dE}{\int_{\Delta E_g} \phi(E) dE} = (1 + \delta_{x,g}) \sigma_{x,g}(T), \quad (3)$$

其中 $\delta_{x,g}$ 为群截面的扰动量, 在直接数值扰动法中, 扰动量选取的过大或过小都会产生误差进而影响计算结果, 国内外通常选用的扰动量为 1%^[25]。由式(3)可见, 相当于直接对超细群截面的每个能群做扰动。由于温度在共振自屏处理之前已经处理完成, 为了叙述方便, 下面的公式推导都是在给定温度下进行, 不再标温度 T 的符号。如果对于共振核素, 在窄共振近似下, 中子能谱可以表示为

$$\phi(E, \sigma_0) = \frac{\sigma_p' + \sigma_0}{\sigma_t(E) + \sigma_0} \psi(E), \quad (4)$$

其中: σ_0 为本底截面; σ_p' 为核素的势散射截面; $\sigma_t(E)$ 为核素的总截面; $\psi(E)$ 为随能量缓慢变化的能谱。通过本底截面 σ_0 的大小可以调节核素共振自屏的强弱, 本底截面 σ_0 越小说明共振自屏效应越显著, 而越大则共振自屏效应越不显著。由于某一能群截面扰动, 会导致连续中子能谱发生变化, 该变化可以转化为本底截面的变化, 如式(5)所示:

$$\sigma'_{x,g}(\sigma_0) = \frac{\int_{\Delta E_g} \sigma'_x(E) \phi'(E, \sigma_0) dE}{\int_{\Delta E_g} \phi'(E, \sigma_0) dE} = (1 + \delta_{x,g}) \sigma_{x,g}(\sigma'_0), \quad (5)$$

其中 $\sigma'_0 = \frac{\sigma_0}{1 + \delta_{ig}}$ 。 δ_{ig} 表示由于反应截面 x 的扰动而造成总截面的扰动量。由式(5)可见, 与式(3)不同之处在于, 反应截面扰动 $\delta_{x,g}$ 后, 不仅引起了反应截面本身的变化, 同时也引起了本底截面 σ_0 的变化, 变为了 σ'_0 。本底截面的变化反映了中子能谱的改变, 进而引起共振自屏效应的变化, 这部分即为隐式敏感性系数的来源。

1.1 超细群扰动模型和中子通量密度矩求解

为消除对权重通量的近似带来的影响, 引入了基于超细群扰动模型的计算方法, 可比较精确考虑隐式效应的敏感性系数, 具体的理论如下:

$$\sigma'_{x,i} = (1 + \delta_{x,g}) \sigma_{x,i}, \quad (6)$$

其中 $\sigma_{x,i}$ 和 $\sigma'_{x,i}$ 分别为扰动前和扰动后的第 i 群超细群截面, x 为总截面 t 或散射截面 s , 第 i 群超细群的能量 $\Delta E_i \in \Delta E_g$ 。

将式(6)扰动后的截面代入多群形式的 P_N 中子输运方程中进行求解:

$$\begin{aligned} \frac{n}{2n+1} \frac{\partial \phi_{n-1,g}}{\partial z} + \frac{n+1}{2n+1} \frac{\partial \phi_{n+1,g}}{\partial z} + \Sigma_{mg} \phi_{ng} = \\ \delta_{0ng} \chi_g \psi + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{ng'g} \phi_{ng'}, \end{aligned} \quad (7)$$

上式中: G 为总能群数目; ϕ_{ng} 为 n 阶第 g 能群中子通量密度矩; n 为勒让德展开系数; Σ_{mg} 为第 g 能群 n 阶总截面; $\chi_g \psi$ 为裂变能谱乘以裂变源; $\Sigma_{ng'g}$ 为 n 阶 g 能群到第 g 能群的散射截面。通过对上述方程严格求解, 即可得到能精确衡量截面扰动对中子能谱的变化, 获得扰动后的中子通量密度和高阶矩, 然后对截面和散射矩阵进行并群, 并群后的截面为

$$\sigma'_{x,g} = \frac{\sum_{\Delta E_i \in \Delta E_g} \sigma'_{x,i} \phi'}{\sum_{\Delta E_i \in \Delta E_g} \phi'}. \quad (8)$$

1.2 考虑隐式效应的敏感性与不确定性分析方法

为了考虑敏感性系数的隐式效应, 将总的敏感性系数分成两个部分, 分别是少群截面相对于连续点截面的敏感性系数 $S_{\sigma_g, \sigma(E)}$ 和响应量 R 相对于少群截面的敏感性系数 S_{R, σ_g} 。总的敏感性系数 $S_{R, \sigma(E)}$ 计算公式为

$$\begin{aligned} S_{R, \sigma(E)} &= \frac{\sigma(E)}{R} \frac{dR}{d\sigma(E)} \\ &= \left[\frac{\sigma_g}{R} \frac{dR}{d\sigma_g} \right] \cdot \left[\frac{\sigma(E)}{\sigma_g} \frac{d\sigma_g}{d\sigma(E)} \right] \\ &= S_{R, \sigma_g} \cdot S_{\sigma_g, \sigma(E)}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $\sigma(E)$ 为连续点截面; R 为响应量; σ_g 为少群截面。

隐式敏感性系数即对应式(9)中的 $S_{\sigma_g, \sigma(E)}$, 从计算流程上讲, 响应量 R 相对于少群截面的敏感性系数 $S_{R, \sigma_g} = \frac{\sigma_g}{R} \frac{dR}{d\sigma_g}$ 可由堆芯物理计算完成; 而少群截面相对于连续点截面的敏感性系数 $S_{\sigma_g, \sigma(E)} = \frac{\sigma(E)}{\sigma_g} \frac{d\sigma_g}{d\sigma(E)}$ 可由组件计算完成, 从而实现了结合组件计算和堆芯计算流程的考虑隐式敏感性的计算方法。

基于上述思想, 提出的考虑隐式效应的敏感性计算流程如图1所示。

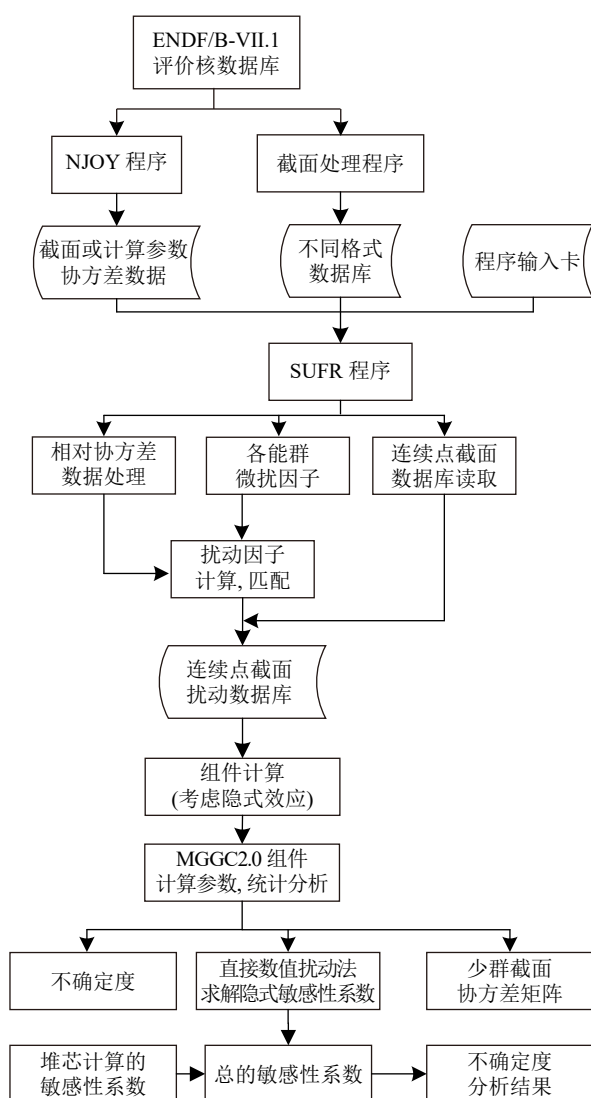


图1 考虑隐式效应的敏感性系数计算流程

通过组件计算得到隐式敏感性系数, 堆芯计算得到显式敏感性系数, 然后利用组件和堆芯计算的结果相乘得到总的敏感性系数, 最后利用总的敏感性系数进行不确定性分析。隐式敏感性系数可以通过扰动连续点截面或者扰动超细群截面(超细群截面如1968能群或者2082能群)来计算, 具体计算如下:

$$S_{\alpha, \sigma(E)} = \sum_{E \in G, or, g \in G} \frac{1}{\alpha} \frac{\alpha^+ - \alpha^-}{\delta_G^+ - \delta_G^-}, \quad (10)$$

其中: α 为少群截面; δ_G 为宽能群 G 中的所有连续点截面或者超细群截面的相对扰动量。

利用式(10)进行少群敏感性系数的计算需要求解中子输运方程, 能精确衡量截面扰动对中子能谱和少群截面变化的影响, 进而得到精确的少群截面的敏感性系数。

但如果采用该方法进行计算, 需要扰动的点比较多, 每扰动一次都要进行一次组件计算, 计算代价和计算成本比较高, 所以采用对所有属于宽群 G 群的所有细能群进行统一1%的扰动, 这样就能使得组件计算的次数由原来的超细群的能群数目降低到少群的数目。也就是说, 如果堆芯计算采用的是33群, 那么正反两次扰动只需组件输运计算66次就可以得到少群截面相对于连续点截面(或者相对于超细群截面)的敏感性系数。

基于敏感性系数的不确定度量化, 还需要结合协方差, 协方差信息存储在评价核数据库中。本文使用NJOY2016程序^[30]基于ENDF/B-VII.1评价核数据库^[31]制作了33群协方差数据库。利用此数据库进行了不确定度分析。

2 计算结果与分析

2.1 基准题介绍

利用上述给出的考虑隐式效应的敏感性与不确定度分析方法, 本文对美国阿贡国家实验室零功率基准实验ZPR-6/7(Zero Power Reactor-6/7)进行了分析, 验证理论方法的可行性。ZPR-6/7是阿贡国家实验室建造的零功率钠冷快堆临界基准题, 其均匀RZ模型由堆芯和两层反射区三大部分组成, 划分了9个区域。堆芯分为内堆芯和外堆芯两个部分, 主要的裂变材料为铀和钚, 反射层材料为贫化铀和不锈钢, 图2展示了ZPR-6/7的RZ模型^[32], 其包含的核素及核子密度在参考文献^[32]中给出。

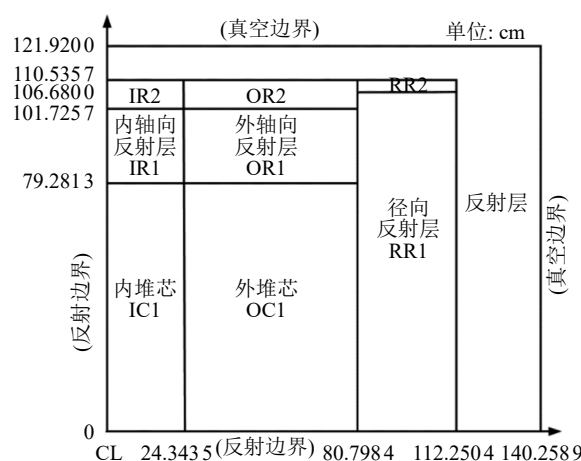


图2 ZPR-6/7基准题的RZ模型

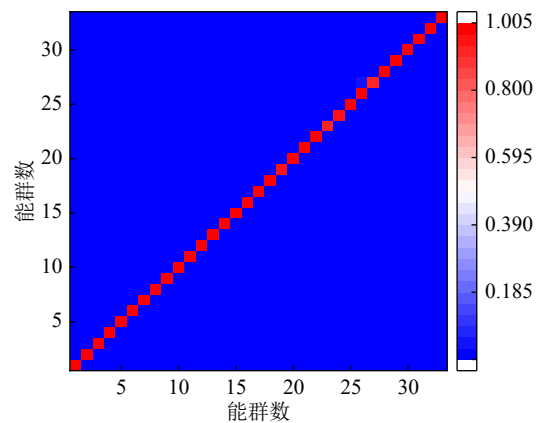
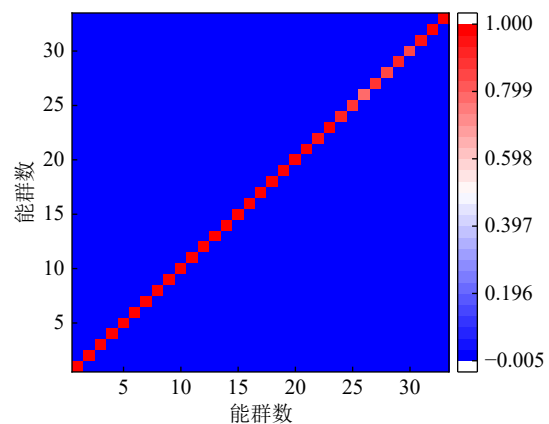
2.2 少群截面相对于超细群截面的敏感性系数

为了考虑隐式效应的影响, 首先需要计算少群截面对超细群截面的敏感性系数。利用SUFR程序^[33]对超细群截面(2082×200能群)按照33群的能群结构进行截

面扰动,也就是对每个宽群中的所有细群截面统一按照 1% 的扰动量进行扰动,虽然是 2082 能群,但正反两次扰动只需要扰动 66 次即可得到某一反应道的所有扰动样本,组件计算采用华北电力大学自主开发的快堆截面处理程序 MGGC2.0 进行,利用该程序可以生成多个样本的少群截面,然后利用式(10)进行隐式敏感性系数计算。33 群能群结构如表 1 所列,根据参考文献[34]关于快中子、共振中子和热中子的定义可知,1~16 群($9.12 \times 10^3 \sim 1.42 \times 10^7$ eV)为快能区,16~32 群($5.32 \times 10^{-1} \sim 9.12 \times 10^3$ eV)为共振能区,32~33 群($1.00 \times 10^{-5} \sim 5.32 \times 10^{-1}$ eV)为热能区。从理论上讲,当扰动本能群的反应截面后,再求解中子输运方程时,由于散射截面影响,本能群的截面扰动不仅会影响本能群的中子能谱,也会同时影响其它能群的中子能谱,即少群截面对超细群的敏感性系数应该是一个矩阵的形式,而不是一个简单的向量形式。图 3 和图 4 以矩阵形式分别给出了 ^{238}U 的总散射截面以及 ^{239}Pu 的辐射俘获截面的少群截面对超细群截面的相对敏感性系数。由图 3 和图 4 可见,相对敏感性系数矩阵中的对角线项比较接近于 1.0,其它非对角项数值一般在 2.0×10^{-2} 以下。由此可见,少群截面对超细群的相对敏感性系数主要由主对角线决定,非主对角项影响很小。同时也发现,反应截面扰动不仅可以影响本核素的相关反应截面,同时也会对其它核素其它反应道带来变化,但由于其它核素其它反应道的变化较小,且不影响本文得到的相关结论,所以仅分析了对隐式敏感性系数主导因素的部分,即隐式敏感性系数矩阵的主对角线部分。取主对角线的意思是主要考虑宽群内的细群截面扰动对宽群截面本身的影响,而忽略本宽群内的细群截面扰动对非本宽群截面的影响。

表 1 33 群能群结构

能群编号	能量上限/eV	能群编号	能量上限/eV	能群编号	能量上限/eV
1	$1.419\ 10 \times 10^7$	12	$6.737\ 90 \times 10^4$	23	$2.753\ 60 \times 10^2$
2	$1.000\ 00 \times 10^7$	13	$4.086\ 80 \times 10^4$	24	$1.670\ 20 \times 10^2$
3	$6.065\ 30 \times 10^6$	14	$2.478\ 70 \times 10^4$	25	$1.013\ 00 \times 10^2$
4	$3.678\ 80 \times 10^6$	15	$1.503\ 40 \times 10^4$	26	$6.144\ 20 \times 10^1$
5	$2.231\ 30 \times 10^6$	16	$9.118\ 80 \times 10^3$	27	$3.726\ 70 \times 10^1$
6	$1.353\ 40 \times 10^6$	17	$5.530\ 80 \times 10^3$	28	$2.260\ 30 \times 10^1$
7	$8.208\ 50 \times 10^5$	18	$3.354\ 60 \times 10^3$	29	$1.371\ 00 \times 10^1$
8	$4.978\ 70 \times 10^5$	19	$2.034\ 70 \times 10^3$	30	$8.315\ 30 \times 10^0$
9	$3.019\ 70 \times 10^5$	20	$1.234\ 10 \times 10^3$	31	$3.927\ 90 \times 10^0$
10	$1.831\ 60 \times 10^5$	21	$7.485\ 20 \times 10^2$	32	$5.315\ 80 \times 10^{-1}$
11	$1.110\ 90 \times 10^5$	22	$4.540\ 00 \times 10^2$	33	$4.174\ 60 \times 10^{-1}$
					$1.000\ 00 \times 10^{-5}$

图 3 (在线彩图) ^{238}U - σ_s 的少群截面相对敏感性系数图 4 (在线彩图) ^{239}Pu - σ_r 的少群截面相对敏感性系数

对 ZPR-6/7 中的几种重要核素进行了敏感性分析,主要包括 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{23}Na 、 ^{56}Fe 。根据上述少群截面对超细群截面的敏感性系数矩阵分析,取每个核素的敏感性系数的主对角线,分别给出不同核素不同反应道的隐式敏感性系数的分布如图 5~9 所示。由图 5 可见, ^{238}U 核素辐射俘获反应道的和总散射反应道的隐式敏感性偏离 1 较远,特别是在能量范围 $8.32 \times 10^0 \sim 6.74 \times 10^4$ eV 之间,隐式效应比较显著,其中辐射俘获反应道个别能群,能量在 $3.93 \times 10^1 \sim 8.32 \times 10^1$ eV 之间,考虑隐式敏感性系数与不考虑隐式敏感性系数相差 50% 以上。但对于 ^{238}U 裂变和每次裂变释放的中子数这两个反应道,隐式效应几乎没有影响。同样对于 ^{235}U 和 ^{239}Pu ,主要在有共振峰的能区,能量在 $5.32 \times 10^{-1} \sim 6.74 \times 10^4$ eV 之间,隐式效应比较显著,其能量范围大多集中在共振能区,这部分共振较为明显,这跟隐式效应主要是由共振自屏蔽效应引起的这一理论是一致的。对于 ^{235}U 核素裂变反应和辐射俘获反应,由于燃料中 ^{235}U 核素的原子核密度较低,对 neutron 通量密度影响较小进而导致其隐式效应较弱。但 ^{56}Fe 和 ^{23}Na 核素的辐射俘获和总散射的隐式效应就非常明显,能量集中在 $4.09 \times 10^4 \sim 2.23 \times 10^6$ eV 之间,属于快能区,主要原因是

^{56}Fe 和 ^{23}Na 在该处都具有较高的共振峰, 导致在共振峰处的隐式效应非常显著。除此之外, 其它能群的隐式效应不显著, 但两个核素的总散射的隐式效应都比较明显。

堆芯有效增殖因子 (k_{eff}) 相对各核素不同反应道的显式敏感性系数的计算方法如下: 首先使用多群截面产生程序 MGGC2.0 程序制作 ISOTXS 格式的截面库, 再利用 SUFR 程序对每个截面库文件分别进行扰动量为

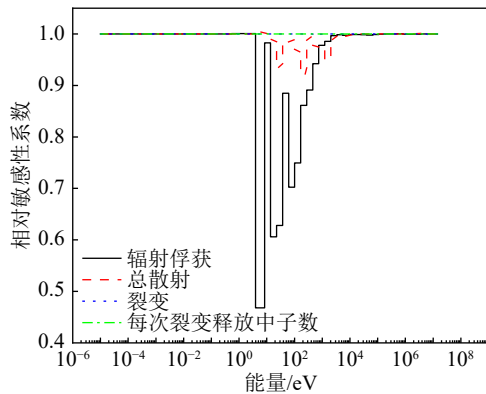


图5 (在线彩图) ^{238}U 少群截面相对于超细群截面的相对敏感性系数

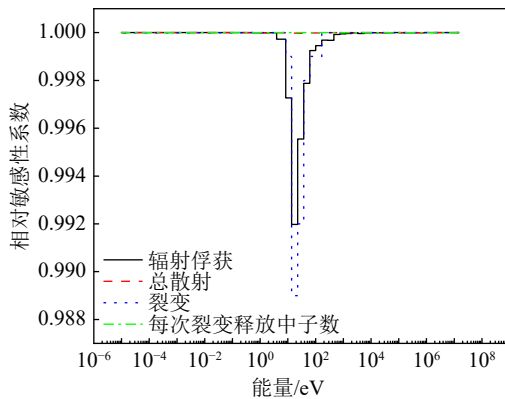


图6 (在线彩图) ^{235}U 少群截面相对于超细群截面的相对敏感性系数

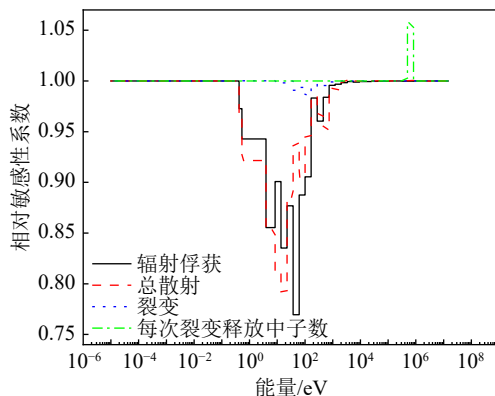


图7 (在线彩图) ^{239}Pu 少群截面相对于超细群截面的相对敏感性系数

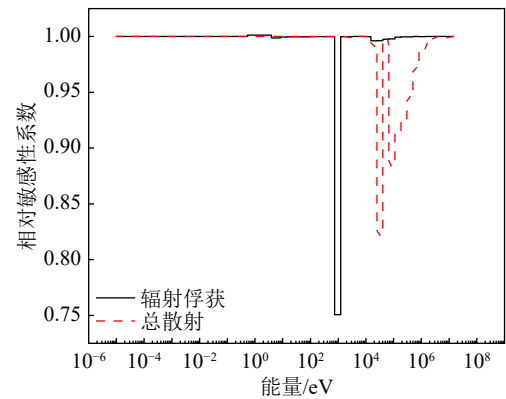


图8 (在线彩图) ^{56}Fe 少群截面相对于超细群截面的相对敏感性系数

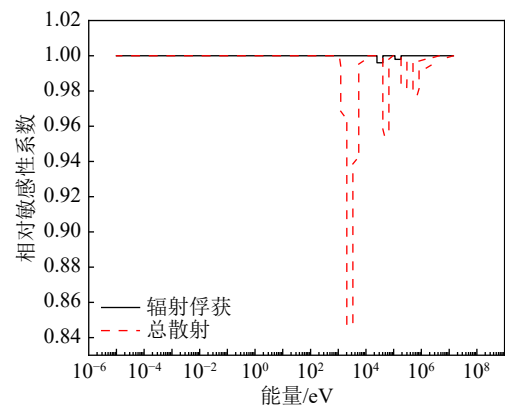


图9 (在线彩图) ^{23}Na 少群截面相对于超细群截面的相对敏感性系数

1% 的双向扰动, 将得到的微扰截面库样本导入堆芯计算程序中进行计算, 即可得到全堆 k_{eff} 的敏感性系数即显式敏感性系数。利用以上计算得到的 k_{eff} 的显式敏感性系数和少群截面相对于超细群截面的敏感性系数(隐式敏感性系数)代入式(1)即可得到 k_{eff} 考虑隐式效应的敏感性系数(以下称为总的敏感性系数)。表2对比了考虑和不考虑隐式效应的相对敏感性系数的积分敏感性并展示了相对偏差, 其定义为

$$\text{相对偏差} = \frac{\text{总的敏感性系数} - \text{显式敏感性系数}}{\text{显式敏感性系数}} \times 100\% \quad (11)$$

由于 ^{238}U 和 ^{239}Pu 的积分敏感性较大, 隐式效应的占比较小, 所以对于两者的影响不大。隐式效应对 $^{23}\text{Na}-\sigma_s$ 以及 ^{56}Fe 的敏感性影响相对较大, 对 $^{23}\text{Na}-\sigma_s$ 影响最大, 相对偏差达到了-15.56%, $^{56}\text{Fe}-\sigma_s$ 其次, 达到了-10.24%, 说明隐式效应对 ^{56}Fe 和 ^{23}Na 这类非裂变核素会产生较大的影响。显式敏感性系数与总的敏感性系数对比如图10~13。由图可见, 对于 ^{23}Na 和 ^{56}Fe , 隐式效应的影响主要集中在 10^3 eV 左右, 与少群截面相对于超细群截面的结果规律一致。这是由于 ^{23}Na 和

^{56}Fe 在 10^3 eV 附近存在共振峰, 对于 $^{238}\text{U}-\sigma_s$ 则在共振区影响较大。

表 2 重要核素各反应截面堆芯 k_{eff} 积分相对敏感性

核素名称	反应截面类型	显式积分敏感性 S	总积分敏感性 T	相对偏差/%
^{238}U	σ_s	2.7415×10^{-3}	2.6382×10^{-3}	-3.77
	σ_f	-2.4527×10^{-1}	-2.4382×10^{-1}	-0.59
	σ_f	7.8236×10^{-2}	7.8234×10^{-2}	0.00
	ν	1.2760×10^{-1}	1.2760×10^{-1}	0.00
^{235}U	σ_s	-3.6260×10^{-6}	-3.6258×10^{-6}	-0.01
	σ_f	-1.1992×10^{-3}	-1.1991×10^{-3}	-0.01
	σ_f	8.6969×10^{-3}	8.6967×10^{-3}	0.00
	ν	1.2729×10^{-2}	1.2729×10^{-2}	0.00
^{239}Pu	σ_s	-6.8535×10^{-5}	-6.9028×10^{-5}	0.72
	σ_f	-6.9083×10^{-2}	-6.8562×10^{-2}	-0.75
	σ_f	5.7602×10^{-1}	5.7428×10^{-1}	-0.30
	ν	8.0826×10^{-1}	8.0826×10^{-1}	0.00
^{23}Na	σ_s	3.3139×10^{-3}	2.7984×10^{-3}	-15.56
	σ_f	-1.9623×10^{-3}	-1.9616×10^{-3}	-0.04
^{56}Fe	σ_s	5.7024×10^{-3}	5.1184×10^{-3}	-10.24
	σ_f	-1.3278×10^{-2}	-1.2099×10^{-2}	-8.88

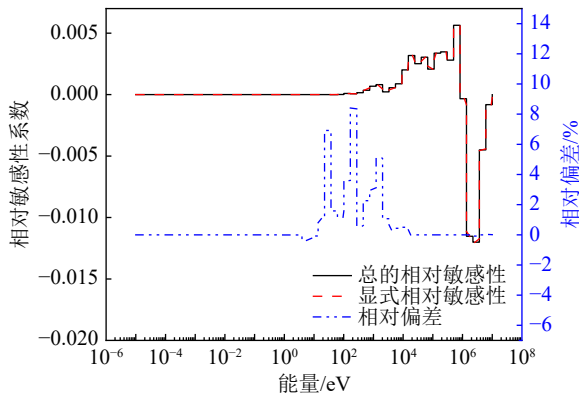


图 10 (在线彩图) $^{238}\text{U}-\sigma_s$ 相对敏感性系数

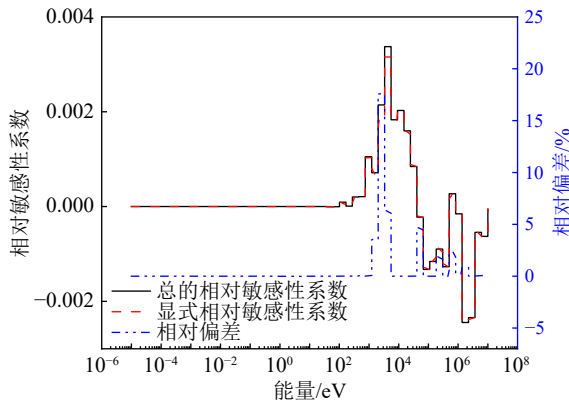


图 11 (在线彩图) $^{23}\text{Na}-\sigma_s$ 相对敏感性系数

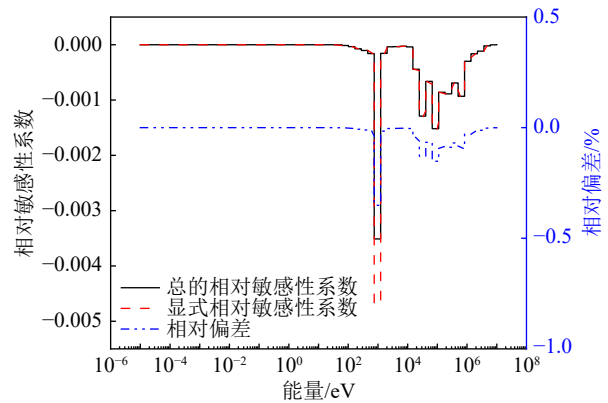


图 12 (在线彩图) $^{56}\text{Fe}-\sigma_f$ 相对敏感性系数

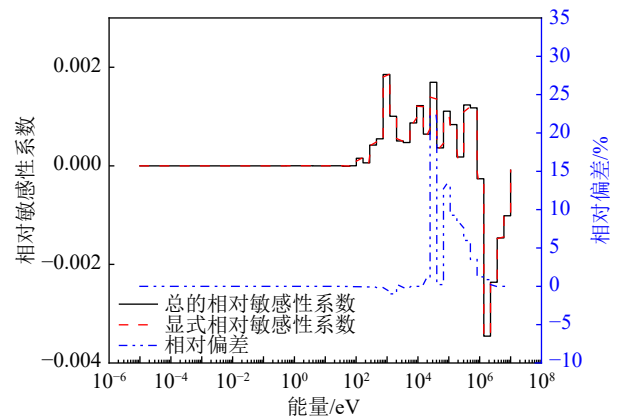


图 13 (在线彩图) $^{56}\text{Fe}-\sigma_s$ 相对敏感性系数

2.3 不确定度分析

本文采用三明治公式进行不确定度分析。首先基于 ENDF/B-VII.1 评价核数据库, 利用 NJOY2016 程序制作得到了不同核素不同反应道的协方差数据, 然后利用上述计算得到的敏感性系数进行了不确定度计算。由于敏感性系数包括两种情况, 分别是显式敏感性系数和考虑隐式效应的总的敏感性系数, 因此计算的 k_{eff} 的不确定度也分两种情况。不同核素不同反应道引起的 k_{eff} 的不确定度对比结果如表 3 所列, 其中的相对偏差的计算方法为

$$\text{相对偏差} = \frac{T - U}{U} \times 100\%, \quad (12)$$

其中: T 为考虑隐式效应后总的相对不确定度; U 为显式敏感性系数计算得到的相对不确定度。由表 3 可见, ^{238}U 和 ^{239}Pu 作为燃料的主要成分, 二者的相对不确定度较大, 占主导地位。隐式效应对 $^{23}\text{Na}-\sigma_s$ 、 $^{56}\text{Fe}-\sigma_s$ 和 $^{56}\text{Fe}-\sigma_f$ 的相对不确定度影响较大, 其中 $^{56}\text{Fe}-\sigma_f$ 考虑和不考虑隐式的相对偏差达到了 -5.59%。但隐式效应对总的不确定度分析的影响并不显著, 相对偏差仅为 -0.43%。

表 3 重要核素各反应截面堆芯 k_{eff} 相对不确定度

核素名称	反应截面类型	$U/\%$	$T/\%$	相对偏差/%
^{238}U	σ_s	0.349 670	0.349 870	0.057 2
	σ_γ	0.334 090	0.331 973	-0.633 4
	σ_f	0.041 070	0.041 070	-0.000 0
	ν	0.151 994	0.151 994	0.000 0
^{235}U	σ_s	0.000 160	0.000 160	-0.000 0
	σ_γ	0.023 780	0.023 780	-0.000 0
	σ_f	0.005 020	0.005 020	-0.000 0
	ν	0.007 980	0.007 980	-0.000 0
^{239}Pu	σ_s	0.015 600	0.015 600	0.000 0
	σ_γ	0.311 830	0.311 560	-0.088 5
	σ_f	0.238 420	0.237 620	-0.336 0
	ν	0.071 730	0.071 730	0.000 0
^{23}Na	σ_s	0.054 620	0.053 930	-1.259 3
	σ_γ	0.015 540	0.015 530	-0.036 7
^{56}Fe	σ_s	0.092 470	0.088 370	-4.437 9
	σ_γ	0.103 220	0.097 450	-5.593 8
总不确定度	/	0.664 250	0.661 390	-0.430 8

3 结论

本文首先提出了隐式敏感性系数的计算方法以及考虑隐式效应后的总的敏感性系数计算方法，基于此方法，分析了快能谱反应堆基准题 ZPR-6/7。研究了隐式效应对快中子反应堆的 k_{eff} 敏感性和不确定性的影响，得出结论如下：

1) 由少群截面相对于超细群截面的相对敏感性系数计算结果可知，隐式敏感性系数主要由敏感性系数的主对角线决定，其它非主对角线的数值很小，对隐式敏感性系数的贡献很小。

2) 通过对比显式敏感性系数与考虑隐式效应的总的敏感性系数发现，隐式效应对辐射俘获和总散射截面会产生较大的影响，对于每次裂变释放中子数的影响并不明显。从少群截面相对于超细群截面的相对敏感性系数来看，隐式效应对 $^{238}\text{U}-\sigma_\gamma$ 、 $^{239}\text{Pu}-\sigma_\gamma$ 、 $^{239}\text{Pu}-\sigma_f$ 、 $^{56}\text{Fe}-\sigma_\gamma$ 、 $^{56}\text{Fe}-\sigma_s$ 、 $^{23}\text{Na}-\sigma_s$ 的影响较大。隐式敏感性系数在某些能群(能量在 $8.32\times 10^1\text{ eV}\sim 3.93\times 10^1\text{ eV}$ 之间)会有超过 50% 的修正，隐式效应对 ^{23}Na 的总散射截面以及 ^{56}Fe 的影响相对较大，对 $^{23}\text{Na}-\sigma_s$ 影响最大，相对偏差达到了 -15.56%， $^{56}\text{Fe}-\sigma_s$ 其次，达到了 -10.24%。

3) 不确定性分析结果表明，反应截面的扰动对 k_{eff} 的不确定性主要来源于 ^{239}Pu 和 ^{238}U ，但隐式效应对其贡献较小，隐式效应对 $^{23}\text{Na}-\sigma_s$ 、 $^{56}\text{Fe}-\sigma_s$ 和 $^{56}\text{Fe}-\sigma_\gamma$ 的相对不确定度影响较大。

总的来说，隐式效应对快中子反应堆的某些核素某些能群会造成较大的影响，对于 ZPR6/7 隐式效应对 ^{23}Na 和 ^{56}Fe 的总散射具有较大影响，且影响多集中在高能区。 ^{56}Fe 的辐射俘获由于在 10^3 eV 附近能群的共振峰的存在，会造成采用显式敏感性系数高估不确定度 5.59%。

参考文献：

[1] SHI Lei. Research on Uncertainty Analysis Methods for Reactor Core Physics Calculations[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018: 1. (in Chinese)
(石磊. 堆芯物理计算不确定性分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018: 1.)

[2] YANG Jun, YU Hong, XU Li, et al. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(S2): 71. (in Chinese)
(杨军, 喻宏, 徐李, 等. 核动力工程, 2014, 35(S2): 71.)

[3] FOAD B, TAKEDA T. AIP Conference Proceedings, 2015, 1702(1): 040002.

[4] SELLAOUI N, ZIDI T, BELGAID M. Progress in Nuclear Energy, 2020, 130: 103557.

[5] AURES A, BERNNAT W, BOSTELMANN F, et al. Reactor Simulations with Nuclear Data Uncertainties[C]//BEPU-2018. 2018.

[6] WU Qu. Nuclear Data Sensitivity and Uncertainty Analysis Based on One-step Deterministic Procedure[D]. BeiJing: Tsinghua University, 2022: 1. (in Chinese)
(吴屈. 基于一方法确定论程序的核数据敏感性与不确定度分析[D]. 北京: 清华大学, 2022: 1.)

[7] WANG Xinzhe, YU Hong, WANG Wenming, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(9): 1627. (in Chinese).
(王新哲, 喻宏, 王文明, 等. 原子能科学技术, 2014, 48(9): 1627.)

[8] HU Kui, MA Xubo, ZHANG Chen, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2024, (3): 645. (in Chinese)
(胡隳, 马续波, 张辰, 等. 原子能科学技术, 2024, (3): 645.)

[9] REARDEN B T. TSUNAMI-3D: Control Module for Three-dimensional Cross-section Sensitivity and Uncertainty Analysis for Criticality[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 2009.

[10] MA Xubo, HUANG Yuqin, QU Wu, et al. Annals of Nuclear Energy, 2021, 161: 108457.

[11] ZHU Runze, MA Xubo, WANG Dongyong, et al. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(5): 81. (in Chinese).
(朱润泽, 马续波, 王冬勇, 等. 核动力工程, 2021, 42(5): 81.)

[12] XU Jiayi. Uncertainty Analysis of Cross Sections Considering Interference Effects of Different Nuclides[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 1. (in Chinese)
(徐佳意. 考虑不同核素干涉效应的截面不确定性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 1.)

[13] BALL M R. McMaster University Library, 2012, 40(1): 153.

[14] ROCHMAN D, KONING A J, VAN DER MARCK S C, et al. Journal Korean Physical Society, 2011, 59(2): 1236.

[15] HU Zehua, YE Tao, LIU Xiongguo, et al. Acta Physica Sinica, 2017, 66(1): 63. (in Chinese).
(胡泽华, 叶涛, 刘雄国, 等. 物理学报, 2017, 66(1): 63.)

[16] WAN Chenghui, CAO Liangzhi, WU Hongchun, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(11): 1954. (in Chinese)

- (万承辉, 曹良志, 吴宏春, 等. 原子能科学技术, 2015, 49(11): 1954.)
- [17] SHI Guanlin, JIA Conglong, CHENG Quan, et al. *Modern Applied Physics*, 2020, 11(1): 70. (in Chinese)
(施冠麟, 贾从龙, 程泉, 等. 现代应用物理, 2020, 11(1): 70.)
- [18] RONG Jian, LIU Guisheng. *Nuclear Physics Review*, 2002, 19(3): 352. (in Chinese)
(荣健, 刘桂生. 原子核物理评论, 2002, 19(3): 352.)
- [19] YU Qingyuan, QI Jingwen, ZHAO Pengcheng, et al. *Nuclear Science and Techniques*, 2022, 45(8): 080604. (in Chinese)
(余清远, 漆静雯, 赵鹏程, 等. 核技术, 2022, 45(8): 080604.)
- [20] HAN T Y, Lee H C, Noh J M. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 85: 501.
- [21] WANG Dongyong, MA Xubo, ZHU Runze, et al. *Nuclear Power Engineering*, 2021, 42(3): 48. (in Chinese)
(王冬勇, 马续波, 朱润泽, 等. 核动力工程, 2021, 42(3): 48.)
- [22] HURSIN M, LERAY O, PERRET G, et al. *EPJ Web of Conferences*, 2017, 146(1): 09034.
- [23] WILLIAMS M L, BROADHEAD B L, PARKS C V. *Nuclear Science & Engineering*, 2001, 138(2): 177.
- [24] WEISBIN C R, MARABLE J H, LUCIUS J L, et al. *Transactions of the American Nuclear Society*, 1976, 66(3): 304.
- [25] WAN Chenghui. Study on Sensitivity and Uncertainty Analysis of Nuclear Reactor Physics Calculation and Its Application in Code Validation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
(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.)
- [26] PERFETTI C, REARDEN B. Continuous-energy Monte Carlo Methods for Calculating Generalized Response Sensitivities Using TSUNAMI-3D[J]. 2014.
- [27] LIU Yong. Research on Sensitivity and Uncertainty Analysis Methods and Their Applications in Reactor Physics Calculations Based on Perturbation Theory[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
(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.)
- [28] MA J, HAO C, LIU G H, et al. *Front Energy Res*, 2021, 9: 743642.
- [29] LELL R M, SCHARFER R W, MCKNIGHT R D. ZPR-6 Assembly 7 high ^{240}Pu Core: A Cylindrical Assembly with Mixed (PU, U)-oxide Fuel and a Central High ^{240}Pu Zone[R]. United States: Office of Scientific & Technical Information Technical, 2007.
- [30] MACFARLANE R E, MUIR D W, BOICOURT R M, et al. The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2016[R]. New Mexico: Los Alamos National Lab(LANL), 2017.
- [31] BROWN D A. ENDF-6 Formats Manual: Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files[R]. New York: Brookhaven National Lab(BNL), 2023.
- [32] Methods and Issues for the Combined Use of Integral Experiments and Covariance Data: NEA/NSC/WPEC/DOC(2013)445[R]. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2013.
- [33] ZHU Runze. Study on Uncertainty Analysis of Fast Reactors Based on High-Precision Random Number Sampling of Correlated Variables[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021. (in Chinese)
(朱润泽. 基于高精度相关变量随机数抽样的快堆不确定性分析研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.)
- [34] XIE Zhongsheng. Physical Analysis of Nuclear Reactors[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004. (in Chinese)
(谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.)

Fast Reactor Sensitivity and Uncertainty Analysis Method with Considering Implicit Effect

LIU Sha¹, MA Xubo^{1,†}, ZHANG Chen¹, WANG Jiangyu², WANG Lianjie²

(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 610041, China)

Abstract: As a new type of fourth-generation reactor, fast neutron reactor is one of the main directions of future nuclear energy development, and the uncertainty of nuclear data has become an important source of uncertainty in the results of its reactor physics calculations. Previous fast reactor uncertainty studies have often ignored the influence of implicit effects. To address this problem, a sensitivity coefficient and uncertainty calculation method that takes implicit effects into account is proposed, and the method is used to analyze the influence of implicit effects on the sensitivity and uncertainty of the k_{eff} of the sodium-cooled fast reactor ZPR6/7. The results show that: the main diagonal plays a dominant role in the matrix of sensitivity coefficient of few-group cross-section to ultra-fine-group cross-section, and the effect of the implicit effect may be more than 50% for the sensitivity coefficients of certain reaction channels of some nuclides; Implicit effects have a relatively large impact on the uncertainties of ^{23}Na and ^{56}Fe , with the largest impact observed for the radiative capture of ^{56}Fe , reaching a relative deviation of -5.6%.

Key words: implicit sensitivity; k_{eff} ; fast reactor; uncertainty

Received date: 30 Apr. 2024; Revised date: 09 Jul. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11875128)

† Corresponding author: MA Xubo, E-mail: maxb917@163.com