

文章编号：0258-0926(2018)02-0133-04；doi: 10.13832/j.jnpe.2018.02.0133

基于 RMC 的蒙特卡罗燃耗计算 氙振荡抑制方法研究

李万林，余纲林，王侃，李耀东

清华大学工程物理系，北京，100084

摘要：蒙特卡罗燃耗计算模型为中子输运弱耦合系统时，计算结果会出现数值振荡，从而引入较大误差，甚至导致计算终止。蒙特卡罗燃耗计算中出现的数值振荡主要由堆内的裂变毒物氙驱动，所以如何有效抑制氙振荡是蒙特卡罗燃耗计算研究的内容之一。强制平衡氙方法在各燃耗步功率保持恒定时有很好的抑制效果，但在小步长变功率燃耗计算时，所得的计算结果存在显著偏差。目前，国际主流的反应堆基准题提出了变功率燃耗计算的需求，为抑制小步长变功率燃耗计算的氙振荡，在堆用蒙特卡罗程序 RMC 中开发了通用平衡氙方法。本文介绍 RMC 中主要采用的平衡氙方法，包括强制平衡氙方法和通用平衡氙方法。对数值验证的计算结果进行分析和比较，结果表明通用平衡氙方法能有效抑制功率及小步长变功率蒙特卡罗燃耗计算的氙振荡现象。

关键词：蒙特卡罗程序；氙振荡；平衡氙方法
中图分类号：TL364 文献标志码：A

Research on Preventing Xenon Oscillation in Monte Carlo Burnup Calculation Based on RMC

Li Wanlin, Yu Ganglin, Wang Kan, Li Yaodong

Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

Abstract: Monte Carlo burnup calculation suffers from numerical xenon oscillation when its model is huge geometry, refers as weakly coupled neutron transport system. Numerical xenon oscillation brings in error, even aborts burnup calculation. How to effectively prevent such oscillation is a significant topic in Monte Carlo burnup calculation. Forced equilibrium xenon method is effective when the power density used in each burnup step of the calculation keeps constant. This method has been researched and used in RMC, furthermore, some improvement has been complemented to extend range of burnup steps. Some popular international benchmarks, such as BEAVRS, VERA, require simulating burnup problem with variable power history. However, forced equilibrium xenon method inevitably brings error when power density changes by relative small burnup step. To research and develop advanced Monte Carlo simulating ability including high performance of burnup calculation, general equilibrium xenon method based on forced equilibrium method is researched and integrated to RMC. Numerical calculation result verifies that the general equilibrium xenon method is capable of effectively preventing xenon oscillation in Monte Carlo burnup calculation with constant or variable power density in each step.

Key words: Monte Carlo, Xenon oscillation, Equilibrium Xenon method

0 引言

蒙特卡罗（蒙卡）燃耗计算方法广泛应用于

模拟和分析反应堆中燃料成分的嬗变过程。由于蒙卡方法几何适用性强，可以直接使用连续能量

收稿日期：2017-09-04；修回日期：2018-01-20

作者简介：李万林（1987—），男，博士研究生，现从事反应堆物理研究

截面数据,能够在少做甚至不做几何模型近似的前提下给出精度很高的计算结果,因此蒙卡方法成为反应堆物理分析和工程设计的有效手段之一。目前,基于蒙卡方法的燃耗计算程序主要由输运程序和点燃耗程序耦合得到,已经从外耦合方式发展为内耦合方式,主流的燃耗计算程序现在都采用内耦合方式获得良好的燃耗计算能力。

随着计算机硬件水平提高和并行计算方法的发展,蒙卡燃耗计算方法已被广泛用于大规模燃耗计算,涉及的模型几何尺度大,结构复杂,燃耗区划分数量巨大。在进行该类模型的燃耗计算时,由于裂变产生的毒物氙造成的振荡现象会给计算结果引入显著误差,甚至中断计算过程,一直以来受到蒙卡燃耗方法研究者的关注。

蒙卡燃耗计算中的氙振荡问题由蒙卡方法本身的统计涨落和毒物对中子注量率的显著影响引起。根据计算时燃耗步长设定和振荡机制的不同,可以分为物理氙振荡和数值氙振荡。为抑制蒙卡燃耗计算氙振荡问题,Griesheimer D.P^[1]等人首先提出了强制平衡氙方法,该方法可以直接在蒙卡输运过程中求解与中子注量率水平相平衡的氙浓度,不显著增加时间成本,随后被应用于MC21^[1]和Serpent^[2]程序中。已发表的文献[3]中给出的计算结果表明,该方法有很好的抑制效果。陈宗欢等人^[4]在强制平衡氙基础上做了改进,并在RMC^[5]中开发了氙振荡抑制功能。

目前,在BEAVRS^[6]基准题和VERA^[7]基准题中进行燃耗计算时,均需要采用变功率模式,各燃耗步之间的功率密度会发生变化。小步长变功率燃耗计算时使用强制平衡氙方法得到的结果存在明显偏差。为解决小步长变功率条件下的氙振荡抑制问题,在RMC中开发了通用平衡氙功能,并进行了数值验证。

1 平衡氙方法

1.1 强制平衡氙方法

强制平衡氙方法在蒙卡输运计算过程中,利用当前注量率迭代计算得到与注量率相平衡的氙浓度,替换由点燃耗计算模块计算所得的氙浓度,实现对氙振荡的抑制,该方法在定功率蒙卡燃耗计算中有显著的效果。强制平衡氙方法如式(1)及式(2)所示:

$$N_I(t_E) = \frac{\gamma_I \sum_f \phi}{\lambda_I} \quad (1)$$

$$N_{Xe}(t_E) = \frac{(\gamma_I + \gamma_{Xe}) \sum_f \phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_{a,Xe} \phi} \quad (2)$$

式中, N 为核密度; γ 为裂变产额; \sum_f 为裂变截面; ϕ 为中子注量率; λ 为衰变常数; $\sigma_{a,Xe}$ 为 ^{135}Xe 的微观中子吸收截面; t_E 为当前燃耗步结束时刻。强制平衡氙方法中, ^{135}I 和 ^{135}Xe 的浓度与当前注量率水平相平衡,经过反复迭代,得到平衡氙浓度,从而抑制燃耗过程中的氙振荡现象。但式(1)及式(2)没有考虑在单个燃耗步内碘、氙浓度随时间的衰减变化,当燃耗计算的时间步长划分较细时,起始若干步的氙浓度将跳过实际累积过程,直接达到饱和状态,使计算得到的有效增殖因子 k_{eff} 以及燃耗区内的注量率水平出现跳变。

1.2 改进的平衡氙方法

陈宗欢等人提出使用带时间衰减项的平衡氙式(3)、式(4),该平衡氙公式中,碘、氙浓度除了与当前注量率水平有关,还考虑了单个燃耗步内,碘、氙核密度随时间的衰减变化。实际应用中,长时间步长的燃耗计算(通常以天为单位)时,该方法与强制平衡氙方法效果相同,但在短步长燃耗计算时,该方法可以有效克服 k_{eff} 及燃耗区内的中子注量率在起始若干步跳变的现象。

$$N_I(t_E) = \frac{\gamma_I \sum_f \phi}{\lambda_I} (1 - e^{-\lambda_I \Delta t}) \quad (3)$$

$$N_{Xe}(t_E) = \frac{(\gamma_I + \gamma_{Xe}) \sum_f \phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_{a,Xe} \phi} \left[1 - e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_{a,Xe} \phi) \Delta t} \right] + \frac{\gamma_I \sum_f \phi}{-\lambda_I + \lambda_{Xe} + \sigma_{a,Xe} \phi} \left[e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_{a,Xe} \phi) \Delta t} - e^{-\lambda_I \Delta t} \right] \quad (4)$$

式中, Δt 为当前燃耗步步长。

1.3 通用平衡氙方法

上述平衡氙方法均未考虑前一步燃耗计算所得碘、氙浓度对当前燃耗步内碘氙浓度变化的影响。但是,在进行小步长变功率燃耗计算时,由于注量率水平在相邻燃耗步可能出现明显的起伏变化,仅使用上述平衡氙方法无法完整描述每个燃耗步中碘、氙浓度变化的全部因素。实际变功率燃耗计算表明,使用上述方法会使计算结果出现显著偏差。本文提出的通

用平衡氙方法如式 (5) 及式 (6) 所示：

$$N_I(t_E) = \frac{\gamma_I \sum_f \phi}{\lambda_I} (1 - e^{-\lambda_I \Delta t}) + N_I(t_B) e^{-\lambda_I \Delta t} \quad (5)$$

$$N_{Xe}(t_E) = \frac{(\gamma_I + \gamma_{Xe}) \sum_f \phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_{a,Xe} \phi} \left[1 - e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_{a,Xe} \phi) \Delta t} \right] + \frac{\gamma_I \sum_f \phi - \lambda_I N_I(t_B)}{-\lambda_I + \lambda_{Xe} + \sigma_{a,Xe} \phi} \left[e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_{a,Xe} \phi) \Delta t} - e^{-\lambda_I \Delta t} \right] + N_{Xe}(t_B) e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_{a,Xe} \phi) \Delta t} \quad (6)$$

式中, t_B 为当前燃耗步初始时刻。该方法考虑了注量率水平、燃耗时间等衰减因素以及碘、氙浓度在前后 2 个燃耗步的传递和影响, 当相邻燃耗步的功率密度发生变化时, 可以完整描述碘、氙浓度的变化过程。需要说明的是, 该方法中使用公式直接从反应堆中碘、氙核密度平衡方程出发求解得到, 是完整解析解, 通过蒙特卡罗输运计算中的迭代计算, 可以得到与当前功率水平相应的碘、氙浓度, 抑制氙振荡。

2 数值验证

2.1 验证模型

为验证通用方法对蒙特卡罗燃耗计算中氙振荡的抑制效果, 选取了单栅元燃料棒模型, 该模型与 A.E. Isotalo^[3] 等人在研究和验证强制平衡氙方法时采用的单栅元燃料棒模型一致。该模型为 400 cm 长的燃料棒栅元, 径向半径 0.475 cm, 燃料区半径 0.4096 cm, 外部包裹锆合金, 燃料区与锆合金包壳之间留有气隙。燃料区含有质量密度为 10.196 g/cm³ 的 UO₂, ²³⁵U 富集度为 3.1%。输运计算使用基于 ENDF/BVII.0 评价数据库的连续能量截面数据, 燃耗计算采用基于 ENDF/BVII.0 评价数据库的衰变数据和裂变产额数据。进行比较时, 以轴向不分区单棒所得计算结果作为基准, 以轴向等距离分 8 段的单棒模型作为振荡模型, 验证氙振荡抑制效果。在分区模型中, 分别使用强制平衡氙方法、通用平衡氙方法以及不采取氙振荡抑制措施, 比较 k_{eff} 、中子注量率以及 ¹³⁵Xe 浓度。燃耗计算时, 该燃料棒模型 6 面均为全反射边界条件, 分定功率和变功率 2 种模式。定功率燃耗计算时, 以 10 d 作为一个燃耗步, 每步功率密度为 30 W/g(U), 共计算 30 步。变功率模式下, 燃耗时间步长和功率均可变。功率随时间

变化情况在稍后列出。输运计算共模拟 300 代, 100 非活跃代, 每代模拟 10000 个中子。

2.2 定功率燃耗计算

由于 6 面采用全反射边界条件, 该模型下轴向 8 段燃耗区内的中子注量率应当相等, 由于蒙特卡罗方法本身存在统计涨落, 各燃耗区内中子注量率存在偏差, 不采取抑制措施, 燃耗计算过程出现注量率和 ¹³⁵Xe 浓度振荡。在输运过程中加入抑制措施, 使用通用平衡氙方法, 中子注量率和 ¹³⁵Xe 浓度不再出现振荡, 各燃耗区的中子注量率和 ¹³⁵Xe 浓度相当, 符合全反射边界条件单栅元燃料棒模型在 8 个燃耗区内物理量分布的实际情况。

表 1 中列出了单棒不分区非振荡基准模型、单棒分区振荡模型、单棒分区振荡模型使用强制平衡氙方法以及单棒分区振荡模型使用通用平衡氙方法的最终步 k_{eff} 以及对应的蒙特卡罗标准差。燃耗步长为 10 d 时, 通用平衡氙方法所得结果偏差最小。

表 1 有效增殖因子及标准差

Table 1 Multiple Factor and Standard Variance

模型名称	非振荡模型	振荡模型无抑制	强制平衡氙方法	通用平衡氙方法
k_{eff}	1.223392	1.224818	1.225039	1.224168
标准差	0.000403	0.000431	0.000371	0.000384

定功率燃耗计算时, 强制平衡氙方法的抑制效果与通用平衡氙方法一致, 本文不再给出强制平衡氙方法在定功率燃耗计算时各燃耗区中子注量率和 ¹³⁵Xe 核密度随时间的变化趋势。

2.3 变功率燃耗计算

当蒙特卡罗燃耗计算的功率随燃耗步发生变化, 同时燃耗步较短(如几小时), 每一燃耗步的碘、氙浓度变化不仅和当前燃耗步的中子注量率水平相关, 还和上一燃耗步结束时的碘、氙浓度相关。进行变功率燃耗计算(图 1), 每步临界计算条件与定功率燃耗计算一致。

图 1 中, 起始燃耗步长为 6 h, 同时不考虑实际产热, 在末尾若干燃耗步, 功率水平提高到额定功率的 133%, 之后功率很快降低, 燃耗步长在小时量级。

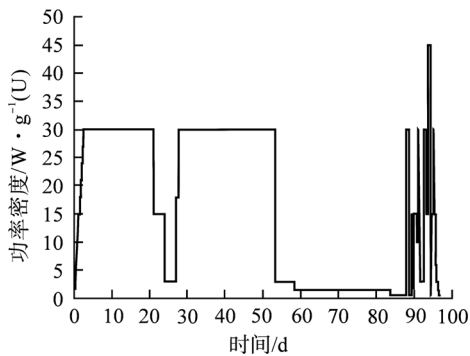


图 1 变功率燃耗计算功率历史

Fig. 1 Power History of Variable Power Burnup Calculation

图 2 给出了使用强制平衡氙、通用平衡氙方法与非振荡基准模型计算 k_{eff} 的比较结果。使用强制平衡氙方法计算所得结果与基准模型所得结果在功率发生显著变化时偏差很大，使用通用平衡氙方法所得结果与基准模型结果吻合良好。

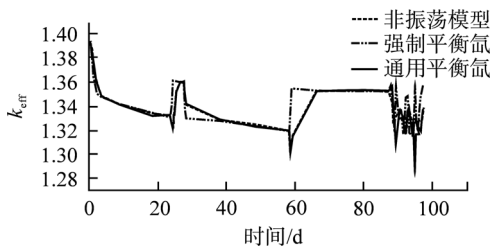


图 2 有效增殖因子

Fig. 2 Multiple Factor

另外，采用通用平衡氙方法后各燃耗区的中子注量率随功率水平密切变化，且在每个燃耗区内基本相等，未出现振荡现象。

3 结论

蒙卡燃耗计算涉及的模型为弱中子耦合系

统时会出现由裂变毒物氙驱动的空间振荡。为抑制氙振荡，在 RMC 中开发了强制平衡氙方法和通用平衡氙方法。强制平衡氙方法在定功率燃耗计算时可以有效抑制空间氙振荡，各燃耗区的中子注量率和氙浓度随着燃耗进行平稳变化。当蒙卡燃耗计算涉及步长较短的变功率问题时，使用强制平衡氙方法所得计算结果与基准模型结果存在显著偏差，使用通用平衡氙方法可以有效抑制氙振荡，计算结果与基准模型计算结果保持一致，而且通用平衡氙方法在定功率燃耗问题中具有和强制平衡氙方法同样有效的抑制效果。

参考文献：

- [1] Griesheimer D P, Gill D F, Nease B R. et al. MC21 v.6.0 – A continuous-energy Monte Carlo particle transport code with integrated reactor feedback capabilities[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 82: 29-40.
- [2] Leppänen J. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 82: 142-150.
- [3] Isotalo A E, Leppänen J, Dufek J. Preventing xenon oscillations in Monte Carlo burnup calculations by enforcing equilibrium xenon distribution[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, 60: 8.
- [4] Chen Zonghuan. Research of power correction methods in monte carlo burnup calculations based on equilibrium xenon[D]. Beijing: Department of Engineering Physics, Tsinghua University, 2015.
- [5] Wang K, Z Li, D She, et al. RMC – A Monte Carlo code for reactor core analysis[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 82: 121-129.
- [6] Horelik N, Herman B, Forget B, et al. Benchmark for evaluation and validation of reactor simulations (BEAVRS), v1. 0.1[C]. Proc. Int. Conf. Mathematics and Computational Methods Applied to Nuc. Sci. & Eng. 2013.
- [7] Godfrey A T. VERA core physics benchmark progression problem specifications[J]. Consortium for Advanced Simulation of LWRs, 2014.

(责任编辑：孙 凯)