

文章编号 : 0258-0926(2014)S2-0231-04; doi: 10.13832/j. jnpe. 2014. S2. 0231

# 基于计数器数据分解的 RMC 全堆燃耗计算研究

梁金刚<sup>1</sup>, 丘意书<sup>1</sup>, 王侃<sup>1</sup>, 柴晓明<sup>2</sup>, 强胜龙<sup>2</sup>

1. 清华大学工程物理系, 北京, 100084; 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:** 内存不足是蒙特卡罗方法大规模输运模拟的关键问题。对于反应堆燃耗分析, 需在输运过程中统计大量反应截面数据, 计算机内存限制了燃耗计算规模。本文基于反应堆蒙特卡罗程序 (RMC), 利用数据分解方法对计数器数据并行存储, 并与点燃耗并行耦合, 实现计数器数据分解和燃耗数据分解的综合并行方法。对全堆基准题进行数值测试, 结果表明综合并行方法可明显降低计算内存, 验证了数据分解对蒙特卡罗大规模燃耗分析的有效性。

**关键词:** 内存问题; 数据分解; 反应堆蒙特卡罗程序 (RMC); 蒙特卡罗; 全堆燃耗

**中图分类号:** TL32 **文献标志码:** A

## Research of Full Core Burnup Calculations Based on Tally Data Decomposition in RMC

Liang Jingang<sup>1</sup>, Qiu Yishu<sup>1</sup>, Wang Kan<sup>1</sup>, Chai Xiaoming<sup>2</sup>, Qiang Shenglong<sup>2</sup>

1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;

2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

**Abstract:** Insufficient memory is the bottleneck problem for large scale transport simulation using Monte Carlo methods. When doing reactor burnup analysis, excessive reaction cross sections are required to be tallied in transport step, thereby the scale of depletion is restricted by the memory storage of computers. To address this problem, a combined parallel method is proposed and implemented in Reactor Monte Carlo code RMC. Tally data is distributed in parallel processes by using tally data decomposition algorithm, which is coupled with the parallel point depletion module. Full core benchmark tests are carried out. The results illustrate that the memory footprint are reduced evidently by using the combined parallel method. It is demonstrated that the data decomposition methods are effective to realize the full core burnup calculations.

**Key words:** Memory problem, Data decomposition, RMC, Monte Carlo, Full core burnup

## 0 引言

随着计算机技术特别是并行技术的发展, 蒙特卡罗方法全堆输运模拟成为新的研究方向<sup>[1]</sup>。然而, 大规模的模拟分析需要大量的数据存储, 内存问题成为扩大计算规模的新的瓶颈。

内存问题在蒙特卡罗燃耗计算中表现得更为明显。蒙特卡罗燃耗计算由蒙特卡罗临界模拟和点燃耗分析两个模块的相互耦合实现, 输运过程统计各燃耗区的功率和核素反应截面, 传递给点

燃耗模块, 后者计算特定时长后燃耗区的核素密度, 更新材料成分, 以进行下一步临界模拟。因而, 燃耗计算需要存储所有燃耗区的核素截面计数和核素密度, 数据容量与燃耗区数目成正比。以 100 万个燃耗区、每个燃耗区 150 个核素估计, 临界计算中统计核素截面的数据存储量约 24 GB, 点燃耗计算中核素密度的存储量 (按复杂核素系统 1500 种核素计) 约为 24 GB。可见, 提高燃耗计算规模, 必须解决内存问题。

收稿日期: 2014-10-20; 修回日期: 2014-12-25

作者简介: 梁金刚 (1989—), 男, 在读博士研究生, 现主要从事反应堆物理计算方法的研究工作

减小内存需要分解问题规模。在前期的研究中<sup>[2]</sup>, 针对蒙特卡罗输运中数据占用的主要部分——计数器数据, 基于自主反应堆用蒙特卡罗程序(RMC)<sup>[3]</sup>, 设计并实现了计数器数据分解算法, 节省蒙特卡罗输运模拟中计数器的内存, 同时保持较高的并行效率。RMC 燃耗模块具备点燃耗并行计算功能, 其中借鉴了数据分解的思想, 对燃耗区核素密度数据进行分解、并行存储<sup>[4]</sup>。

本文在前期研究基础上, 进一步将计数器数据分解与点燃耗并行模块结合, 实现输运计算与燃耗计算耦合的数据分解(称之为综合数据分解方法), 以提高燃耗计算规模, 研究全堆燃耗计算的可行性。

## 1 计数器与燃耗综合数据分解

### 1.1 综合数据分解策略

蒙特卡罗燃耗计算中, 输运过程的截面计数和燃耗过程的核素密度是最主要的两类数据, 将其分解并分别存储于并行的处理器中, 可以大大减小程序单核内存占用。为了避免输运和燃耗耦合阶段不同处理器之间进行数据传递, 应该确保分解后, 同一处理器上的计数器数据与核素密度数据互相符合, 即属于相同的燃耗区。因而, 按照燃耗区对计数器和核素密度数据进行划分, 其综合数据基本策略见图 1。

在综合数据分解算法中, 首先, 根据并行核数, 将全部燃耗区平均分配至不同处理器; 其次, 按照当前处理器的燃耗区, 初始化通量、截面计数器, 并在输运计算中正确统计; 最后, 根据当前处理器的燃耗区, 初始化燃耗核素密度, 逐个燃耗区进行点燃耗计算。

### 1.2 分配燃耗区

燃耗区按照顺序依次平均分配至处理器。假

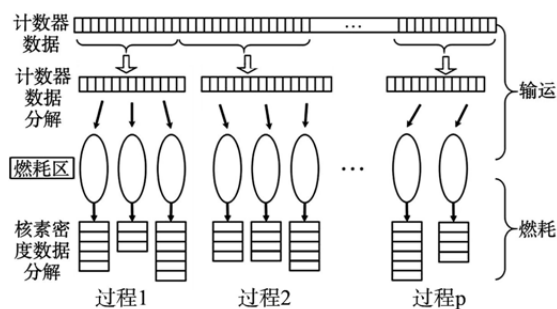


图 1 计数器与燃耗综合数据分解基本策略图

Fig. 1 Combined Tally and Burnup Data Decomposition

设全部燃耗区数目为  $M$ , 并行核数为  $N$ , 燃耗区不可分割, 则第  $j$  个处理器分配的燃耗区数目  $m_j$  可由如下确定: 当  $1 \leq j \leq N_{\text{rest}}$ ,  $m_j$  为  $m_{\text{ave}}+1$ ; 当  $N_{\text{rest}} < j \leq N$ ,  $m_j$  为  $m_{\text{ave}}$ , 其中:  $m_{\text{ave}}$  为进程平均燃耗区数目(对  $M/N$  向下取整);  $N_{\text{rest}}$  为  $M$  除以  $N$  的余数。

### 1.3 按燃耗区分解计数器数据及通信

确定当前处理器的燃耗区栅元, 逐个栅元建立通量、核素截面计数器。输运计算中, 粒子飞行径迹对计数器的贡献需要通过并行通信传递到建立相应计数器的处理器上。其中通信算法对性能并行性能有较大影响, 本文采用文献<sup>[2]</sup>中提出的异步通信算法。

### 1.4 核素密度数据分解及点燃耗并行

点燃耗求解中需要考虑的核素数目多达上千种(RMC 燃耗链核素为 1487 种), 每个燃耗区有单独的核素密度数据, 内存占用达 2.4 kB。如果采用预估-矫正策略, 需要 2 份数据存储。可见核素密度大量占用内存。核素密度数据分解指每个处理器, 只建立和保存所分配的燃耗区的核素密度数据, 如此, 可大量节省内存占用。

在综合数据分解方法中, 输运计算完成后, 计算燃耗区功率和中子通量密度, 从燃耗数据库和计数器中提取核素衰变参数、反应截面等作为燃耗方程系数, 然后调用点燃耗模块逐个计算燃耗区的新的核素密度。

## 2 数值测试

基于 RMC 实现计数器与燃耗综合数据分解算法。数据分解仅改变数据的存储方式, 对数据的操作不会产生影响, 因而数据分解后, 程序计算结果与不分解程序应保持一致。经测试, 综合数据分解方法的 RMC 程序满足一致性, 验证了程序的正确性。下面主要对综合数据分解程序的性能进行测试。

### 2.1 综合数据分解性能测试

为了对比综合数据分解程序的并行性能, 选取一个中度规模堆芯模型, 使用正常 RMC 程序和综合数据分解的 RMC 程序(分别标记为 RMC 和 Tally-decomposed, 下同)分别进行燃耗计算。

堆芯模型含有 37 个燃料组件, 组件内  $17 \times 17$  栅元布置(264 燃料棒), 以单个燃料棒为燃耗区进行燃耗计算, 共有 9768 个燃耗区。临界计

算参数设置为,每代模拟 10000 中子历史,共 200 个活跃代(100 个非活跃代)。燃耗计算步长数目为 20。

(1) 在单节点多核服务器上进行 8 核并行计算,记录程序内存占用随燃耗计算的变化情况(图 2)。其中,燃耗核素密度节省的内存约为 200 MB,计数器数据分解节省的内存约为 160 MB,估计值与测量值相符。表明综合数据分解大幅度减小了计数器和核素密度内存占用。

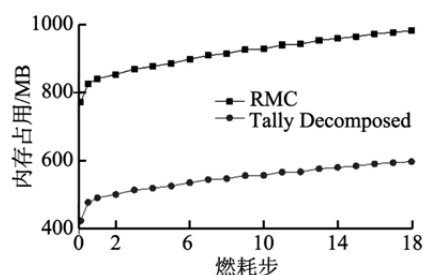


图 2 程序内存占用随燃耗计算的变化

Fig. 2 Code Memory Storage with Burnup Calculation

(2) 测试程序的计算时间。在多节点服务器上采用 72 核并行计算,表 1 为 2 个程序进行输运和燃耗计算的总时间对比。由表 1 可见,由于计数器数据分解,输运过程的计数统计需要通信使得计算时间增加,而燃耗过程不再需要计数器数据的同步而变得更快,总体上 Tally-decomposed 的并行性能较好。

表1 计算时间对比(72核并行)

Table 1 Comparison of Calculating Time (72 Processors in Parallel)

程序	RMC	Tally-decomposed
输运计算/min	141.2	153.3
燃耗计算/min	17.0	14.0
总时间/min	158.2	167.3

## 2.2 H-M 基准题全堆燃耗计算

选取 Hoogenboom-Martin (H-M) 蒙特卡罗性能基准题作为全堆燃耗计算模型,具体模型参数见文献[5],表 2 为主要燃耗计算参数。

对 H-M 堆芯全部 241 个组件的 264 个燃料棒栅元进行燃耗计算,每个栅元分为上下两段(温度不同),总燃耗区数目为 127248 个。使用 Tally-decomposed 在清华“探索 100”集群上用 120 核并行计算。测试表明 Tally-decomposed 可以完成计算,计算结果见表 3。图 3 和图 4 为不

表2 H-M基准题燃耗计算主要参数

Table 2 Main Parameters of H-M Benchmark Burnup

参数		数据
蒙特卡洛计算		1000000 粒子代 750代(250非活跃代)
燃耗计算	燃耗区数目	127248
	核素数目	1487
	时间步数	14
	时间步长	0.1、0.4、0.5、1×11
	内迭代步数	10
	燃耗策略	预测矫正法
功率密度/W·g <sup>-1</sup> (U)		30
并行核数		120

表3 H-M基准题燃耗计算时间和内存占用

Table 3 Calculating Time and Memory Storage in H-M Benchmark Burnup Calculation

程序	计算时间/min	内存占用/GB
输运	3899	~2
燃耗	152.9	
合计	4051.9	

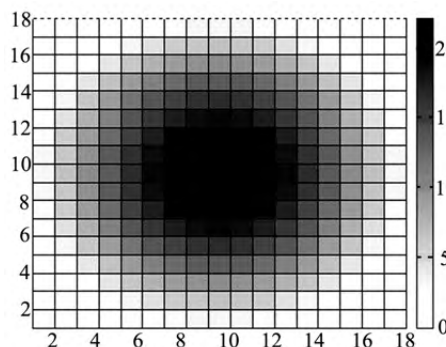


图 3 堆芯组件功率分布 MW

Fig. 3 Power Distribution of Assemblies MW  
注:燃耗深度为 0 MW·d/kg(u)

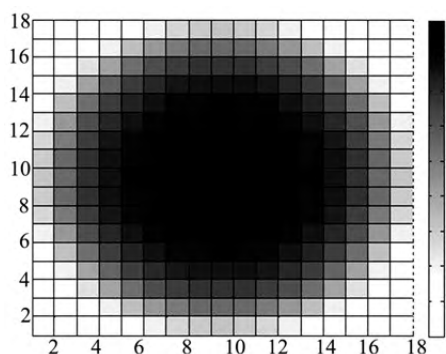


图 4 堆芯组件功率分布 MW

Fig. 4 Power Distribution of Assemblies MW  
注:燃耗深度为 6 MW·d/kg(u)

同燃耗深度下的堆芯组件功率分布。

### 3 总结

本文结合计数器数据分解算法和点燃耗并行算法,研究基于燃耗区的综合数据分解方法,即按照燃耗区对计数器和核素密度数据进行划分。基于反应堆蒙特卡罗程序 RMC,实现综合数据分解程序,并进行数值测试,验证了综合数据分解可明显降低蒙特卡罗燃耗内存占用,H-M 全堆基准题燃耗计算的成功执行证明了数据分解应用于全堆燃耗分析的可行性。

参考文献:

[1] 丘意书,余顶,范潇,等.堆用蒙特卡罗程序 RMC 的全堆计算研究[J].核动力工程,2013,34(S1):1-4.

[2] 梁金刚,王侃,余纲林,等.基于 RMC 的计数器数据分解方法研究[J].核动力工程,2014,35(4):142-146.

[3] Wang K, Li Z, She D, et al. RMC-A Monte Carlo code for reactor physics analysis[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 08:048-053.

[4] She D, Liang J, Wang K, et al. 2D full-core Monte Carlo pin-by-pin burnup calculations with the RMC code[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 64: 201-205.

[5] Hoogenboom J E, William R M, Bojan P. The Monte Carlo performance benchmark test - aims, specifications and first results[C]. International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering (M&C 2011), Rio de Janeiro, RJ, Brazil, May 8-12, 2011.

(责任编辑:刘君)