反应堆蒙卡程序RMC

用户使用手册



清华大学工程物理系核能科学与工程管理研究所

反应堆工程计算分析实验室（REAL）

2014 年 8 月

# 前言

反应堆蒙卡分析程序RMC(Reactor Monte Carlo code)是由清华大学工程物理系核能科学与工程管理研究所反应堆工程计算分析实验室（REAL团队）自主研发的、用于反应堆堆芯计算分析的三维输运蒙卡程序。RMC的研发始于2001年，至今经历了三个阶段，已投入人力大于40人年。

RMC程序针对反应堆计算分析中的基本需求，同时结合先进与新概念反应堆设计时几何结构灵活、中子能谱复杂及材料组分多样、各向异性及泄漏强（某些特定情况）等特点进行研发，是多物理多尺寸耦合核能系统数值分析平台的物理计算核心。RMC能够处理复杂几何结构、采用连续能量点截面对复杂能谱和材料进行描述，并能够根据实际问题的需要对临界问题本征值、本征函数计算，精细核素链燃耗模拟，中子动力学与瞬态过程分析，在线核截面并行处理，均匀化与并群等进行计算。并针对蒙卡方法的特点，RMC中研发并应用了几何处理加速、核截面处理优化、输运过程模拟新方法（含混合蒙卡）、源收敛判断与加速、计数器优化、并行算法优化（含空间并行）等提高计算效率的方法和技巧。

自2012年9月发布RMC-Beta1.0版本以来，我们陆续收到了国内外兄弟高校、科研设计院所和其它单位同仁们的积极反馈，其中不乏颇具建设性的意见和建议。我们在此深表感谢。

鉴于RMC程序的研发进展，更得益于同仁们的支持鼓励，我们决定发布RMC-Beta2.0测试版。本次发布RMC-Beta2.0在原有的RMC-Beta1.0基础上增加了若干新功能，并修复了若干问题，例如几何画图、网格计数器、大规模燃耗计算，等。

由于时间仓促，疏漏之处在所难免，恳切希望各兄弟高校、科研设计院所和其它单位的同仁们不吝及时反馈你们的程序使用体验、建议和意见（可在REAL实验室网站进行，<http://reallab.ep.tsinghua.edu.cn>）。我们也将继续坚持自主研发的方向，为推进国内核电关键软件的自主化，略尽绵薄之力。

王侃

2013年8月于清华园

# 贡献人员名录

1、研发人员

反应堆蒙卡程序RMC的研发是清华大学反应堆工程计算分析实验室（REAL团队）协力攻关的代表体现。在王侃教授的指导下，参与RMC-Beta2.0程序研发工作的主要贡献人员包括：

RMC主要研发人员

|  |  |
| --- | --- |
| 研发人员 | 主要贡献 |
| 佘顶 | 输运-燃耗计算；源收敛；计数器；大规模并行 |
| 李泽光 | 连续介质模拟\*；混合蒙卡\*；微扰\*；临界搜索\* |
| 梁金刚 | 画图功能；区域/数据分解\*；百万级栅元燃耗\*；程序重构 |
| 徐琪 | 多群计算；固定源；动力学；异构平台并行\* |
| 孙嘉龙 | 复杂几何算法 |
| 范潇 | 中子-光子耦合输运\* |
| 丘意书 | S/U分析\* |
| 李松阳、余健开 | 温度相关在线截面处理\* |
| 李林森、叶辛欧文 | 物理-热工耦合\* |
| 张鹏、李满仓 | 蒙卡均匀化功能\* |

\* 本次发布版本未包含的功能

2、测试人员

参与RMC-Beta2.0测试工作的主要贡献人员包括：佘顶、徐琪、余健开、丘意书、范潇、吴高晨、李万林、蔡云、李权、陈宗欢，等。

3、手册撰写

参与用户手册撰写工作的主要贡献人员包括：佘顶、梁金刚、吴高晨，等。

目录

[前言 I](#_Toc400353788)

[贡献人员名录 II](#_Toc400353789)

[第1章 RMC安装与运行 1](#_Toc400353790)

[1.1 安装RMC程序 1](#_Toc400353791)

[1.1.1 版本分类 1](#_Toc400353792)

[1.1.2 安装配置 1](#_Toc400353793)

[1.2 运行RMC程序 2](#_Toc400353794)

[1.2.1 串行运行 2](#_Toc400353795)

[1.2.2 并行运行 3](#_Toc400353796)

[1.3 测试输入输出 3](#_Toc400353797)

[第2章 RMC输入概述 4](#_Toc400353798)

[2.1 输入模块 4](#_Toc400353799)

[2.2 输入卡 4](#_Toc400353800)

[2.3 输入格式 6](#_Toc400353801)

[第3章 几何 7](#_Toc400353802)

[3.1 曲面（surface） 7](#_Toc400353803)

[3.2 栅元（cell） 9](#_Toc400353804)

[3.2.1 栅元的曲面布尔定义 10](#_Toc400353805)

[3.2.2 栅元信息选项卡 11](#_Toc400353806)

[3.3 空间（universe） 12](#_Toc400353807)

[3.3.1 单层空间 12](#_Toc400353808)

[3.3.2 多层空间 12](#_Toc400353809)

[3.3.3 几何变换 13](#_Toc400353810)

[3.4 重复结构（lattice） 15](#_Toc400353811)

[3.4.1 四边形重复结构 15](#_Toc400353812)

[3.4.2 六边形重复结构 17](#_Toc400353813)

[3.5 几何模块输入示例 18](#_Toc400353814)

[3.5.1 PWR组件 18](#_Toc400353815)

[3.5.2 PWR堆芯 20](#_Toc400353816)

[3.5.3 六边形组件 22](#_Toc400353817)

[3.5.4 六边形堆芯 23](#_Toc400353818)

[第4章 材料 26](#_Toc400353819)

[4.1 材料输入卡 26](#_Toc400353820)

[4.2 连续能量ACE截面相关输入卡 27](#_Toc400353821)

[4.3 多群ACE截面相关输入卡 28](#_Toc400353822)

[4.4 材料模块输入示例 28](#_Toc400353823)

[4.4.1 使用连续能量ACE数据库的材料模块 28](#_Toc400353824)

[4.4.2 使用多群ACE数据库的材料模块 29](#_Toc400353825)

[第5章 临界计算 30](#_Toc400353826)

[5.1 源迭代参数 30](#_Toc400353827)

[5.2 初始裂变源 30](#_Toc400353828)

[5.3 随机数发生器 31](#_Toc400353829)

[5.4 并行临界计算模式 32](#_Toc400353830)

[5.5 临界计算模块输入示例 32](#_Toc400353831)

[第6章 计数器 33](#_Toc400353832)

[6.1 栅元计数器 33](#_Toc400353833)

[6.1.1 Cell选项卡 34](#_Toc400353834)

[6.1.2 Filter选项卡 35](#_Toc400353835)

[6.1.3 Integral选项卡 36](#_Toc400353836)

[6.2 网格计数器 37](#_Toc400353837)

[6.3 截面计数器 38](#_Toc400353838)

[6.4 计数器加速 40](#_Toc400353839)

[6.5 计数器模块输入示例 40](#_Toc400353840)

[6.5.1 PWR燃料棒轴向分段计数 40](#_Toc400353841)

[6.5.2 Hoogenboom全堆基准题大规模计数器 42](#_Toc400353842)

[第7章 源收敛诊断与加速 47](#_Toc400353843)

[7.1 香农熵统计 47](#_Toc400353844)

[7.2 裂变矩阵统计 48](#_Toc400353845)

[7.3 源收敛加速 49](#_Toc400353846)

[7.3.1 Factor选项卡 49](#_Toc400353847)

[7.3.2 AutoFactor选项卡 50](#_Toc400353848)

[7.3.3 源收敛加速的注意事项 50](#_Toc400353849)

[7.4 源收敛模块输入示例 51](#_Toc400353850)

[7.4.1 OECD基准题源收敛加速 51](#_Toc400353851)

[7.4.2 Hoogenboom全堆基准题源收敛加速 52](#_Toc400353852)

[第8章 燃耗计算 56](#_Toc400353853)

[8.1 蒙卡燃耗计算概述 56](#_Toc400353854)

[8.2 燃耗模块输入卡 56](#_Toc400353855)

[8.3 燃耗模块输入示例 59](#_Toc400353856)

[8.3.1 PWR栅元燃耗算例 59](#_Toc400353857)

[8.3.2 PWR组件燃耗算例 60](#_Toc400353858)

[8.3.3 PWR堆芯燃耗算例 62](#_Toc400353859)

[第9章 输出控制 67](#_Toc400353860)

[9.1 输出控制模块输入卡 67](#_Toc400353861)

[9.2 输出控制模块输入示例 68](#_Toc400353862)

[第10章 画图 69](#_Toc400353863)

[10.1 画图模块输入卡 70](#_Toc400353864)

[10.2 画图模块输入示例 72](#_Toc400353865)

[第11章 固定源计算 73](#_Toc400353866)

[11.1 固定源模块输入卡 73](#_Toc400353867)

[11.2 固定源模块输入示例 73](#_Toc400353868)

[第12章 时空动力学计算 74](#_Toc400353869)

[12.1 时空动力学模块输入卡 74](#_Toc400353870)

[12.1.1 时空动力学模块稳态计算输入卡 74](#_Toc400353871)

[12.1.2 时空动力学模块瞬态计算输入卡 75](#_Toc400353872)

[12.2 时空动力学模块输入示例 75](#_Toc400353873)

[12.2.1 时空动力学模块稳态计算输入示例 75](#_Toc400353874)

[12.2.2 时空动力学模块瞬态计算输入示例 76](#_Toc400353875)

[12.3 Python脚本说明 76](#_Toc400353876)

[12.4 输出文件说明 76](#_Toc400353877)

[附录 78](#_Toc400353878)

[附录1 输入输出文件清单 78](#_Toc400353879)

[附录2 连续能量ACE数据库 78](#_Toc400353880)

[附录3 燃耗数据库 82](#_Toc400353881)

# 第1章 RMC安装与运行

## 1.1 安装RMC程序

### 1.1.1 版本分类

本次发布的RMC程序包含多个版本，涵盖32/64位windows/Linux操作系统。具体包括：

（1）RMC\_windows：运行于Windows的RMC版本，支持32位和64位windows。建议运行环境为windows XP以上操作系统，并安装vc2010运行库。

（2）RMC\_linux32：运行于32位Linux的RMC版本。建议运行环境为32位Red Hat Enterprise Linux 5.6或以上版本，并安装gcc运行库。

（3）RMC\_linux64：运行于64位Linux的RMC版本。建议运行环境为64位Red Hat Enterprise Linux 5.6或以上版本，并安装gcc运行库。

以上版本都分别包括串行计算版本和并行计算版本，并行版本的文件名以“\_mpi”结尾。对于需要模拟大量粒子的大规模计算（如全堆、燃耗），建议在并行工作站上使用64位Linux并行版。

### 1.1.2 安装配置

本次发布的RMC程序为可执行程序，不含安装包。RMC目录下包括：

|  |
| --- |
| Bin文件夹：存放可执行文件和xsdir、DepthMainLib  Library文件夹：存放ACE数据库  Example文件：存放输入输出示例  用户使用说明书 |

在运行程序前，需要进行必要的配置，步骤如下：

（1）将程序发布包中的RMC文件夹下的Bin文件夹和Library文件夹分别复制到计算机。这两个文件夹可以存放在不同目录下，不影响RMC程序运行。

（2）用文本编辑器打开Bin文件下的xsdir文件，设置Library文件夹所在的完整目录。形如“DATAPATH = E:\ Library\endf7\_2\”（windows）或“DATAPATH = /home/ username/Library /endf7\_2”（Linux）。

（3）将输入文件置于RMC可执行程序的目录内，即可运行算例。注意应保证“xsdir”索引文件与RMC可执行程序在同一目录。执行燃耗计算之前，还需保证“DepthMainLib”燃耗数据库文件与RMC可执行程序置于同一目录。

（4）执行并行版RMC之前，需要先在操作系统中配置好MPI并行环境。mpich2，impi，openmpi和mvapich等软件都可以提供MPI并行环境，具体安装步骤请参考相应软件的说明文档。

## 1.2 运行RMC程序

### 1.2.1 串行运行

假定串行版RMC可执行程序文件名为“RMC”，串行运行RMC的方法是：通过windows命令控制台或Linux终端进入RMC可执行程序所在目录，输入以下命令：

|  |
| --- |
| Windows环境： **RMC(空格)输入文件名(空格)输出文件名**  Linux环境： **./RMC(空格)输入文件名(空格)输出文件名** |

注意：

1. 输入文件应与RMC可执行程序处于同一目录，否则应当使用完整的文件路径。
2. 输出文件名可省略，程序默认将输入文件名加上后缀“.out”作为输出文件名。对于燃耗计算，程序还将自动指定后缀“.nuc”和 “.power”作为附加输出文件，用户应避免输出文件名的冲突。
3. 输入文件名如果有后缀，应包含后缀。在windows系统下，不建议使用txt文本格式输入文件，推荐使用Ultraedit等软件将其转换为dos格式。

### 1.2.2 并行运行

并行调用RMC需要先在操作系统中配置好MPI并行环境，mpich、impi、openmpi和mvapich等软件都可以提供MPI并行环境。推荐一般用户使用mpich2，可在http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpich2/免费下载最新版。

以windows下的MPICH2-1.4.1p1为例，假定并行版RMC可执行程序为“RMC\_mpi”，则执行并行计算的命令为：

|  |
| --- |
| **mpiexec(空格)–n(空格)并行核数(空格)RMC\_mpi(空格)输入文件名(空格)输出文件名** |

例如“mpiexec –n 10 RMC\_mpi input output”表示使用10个进程计算，输入文件名为“input”，输出文件名为“output”。

## 1.3 测试输入输出

程序发布包中的Example文件夹下附带典型算例的输入文件和输出文件，用户可通过计算其中的某些算例（如“3\_1\_PWR\_assembly、8\_1\_Burn\_PWR\_Pin”），以检验程序是否正确安装。

# 第2章 RMC输入概述

## 2.1 输入模块

RMC的输入文件按照模块划分，各模块的名称及相应功能如下所示：

* SURFACE模块：定义曲面类型和曲面方程。
* UNIVERSE模块：描述某个完整的几何空间。RMC采用基于层级空间的几何描述，输入文件中可能存在多个UNIVERSE模块。
* MATERIAL模块：定义材料组成。
* CRITICALITY模块：定义临界计算参数，包括粒子数、初始源等。
* TALLY模块：定义计数器，包括通量、功率、反应率等。
* CONVERGENCE模块：定义源收敛诊断和加速参数。
* BURNUP模块：定义燃耗计算参数，包括燃耗栅元、功率、时间步长等。
* PRINT模块：定义输出内容。
* PLOT模块：定义画图参数。

## 2.2 输入卡

各个输入模块具有特定的输入卡：

表2-1 RMC输入卡总览表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 输入模块 | 输入卡 | 功能描述 | 说明书章节 |
| Surface | Surf | 定义一个曲面。包括曲面类型，曲面方程参数，曲面边界条件，等。 | [3.1](#_3.1__曲面（surface）) |
| Universe | Cell | 定义空间内的某个栅元。包括填充材料，几何形状，体积，温度，等。 | [3.2](#_3.2__栅元（cell）) |
| Universe | 定义某个完整的几何空间。包括坐标变换，重复网格，等。 | [3.3](#_3.3__空间（universe）) |
| Material | Mat | 定义一种材料。包括材料密度，核素组成，等。 | [4.1](#_4.1__材料输入卡) |
| Sab | 指定某种材料所使用的热化截面库。 | [4.1](#_4.1__材料输入卡) |
| CeAce | 指定与连续能量ACE截面相关的输入参数。 | [4.2](#_4.2__连续能量ACE截面相关输入卡) |
| MgAce | 指定与多群ACE截面相关的输入参数。 | [4.3](#_4.4__材料模块输入示例) |
| Criticality | PowerIter | 指定源迭代的初始keff和粒子数。 | [5.1](#_5.1__源迭代参数) |
| InitSrc | 指定源迭代计算的初始裂变源分布。 | [5.2](#_5.2__初始裂变源) |
| RNG | 指定随机数发生器的类型和参数。 | [5.3](#_5.3__随机数发生器) |
| ParallelBank | 指定并行临界计算裂变源中子库的处理模式。 | [5.4](#_5.4__并行临界计算模式) |
| Tally | CellTally | 定义栅元计数器。统计某个或多个栅元内的积分通量、功率、吸收反应率或裂变反应率。 | [6.1](#_6.1__栅元计数器) |
| MeshTally | 定义网格计数器。按照预先定义的网格，统计每个网格内的积分通量、功率、吸收反应率或裂变反应率。 | [6.2](#_6.2__网格计数器) |
| CsTally | 定义截面计数器。指定某个或多个反应类型，统计某个栅元内所有核素的反应截面。 | [6.3](#_6.3__截面计数器) |
| AcceTally | 指定是否使用计数器加速功能。 | [6.4](#_6.4__计数器加速) |
| Convergence | SeMesh | 定义香农熵网格。 | [7.1](#_7.1__香农熵统计) |
| FmMesh | 定义裂变矩阵网格。 | [7.2](#_7.2__裂变矩阵统计) |
| AcceFsc | 指定源收敛加速方法和相关参数。 | [7.3](#_7.3__源收敛加速) |
| Burnup | BurnCell | 指定燃耗区。 | [8.2](#_8.2__燃耗模块输入卡) |
| Power | 指定总功率。 |
| TimeStep | 指定时间步长。 |
| SubStep | 指定内燃耗步长。 |
| Inherent | 指定重要核素继承份额。 |
| AceLib | 指定重要核素所匹配的ACE截面数据库。 |
| Strategy | 指定是否使用预估-校正的燃耗步策略。 |
| Solver | 指定燃耗方程求解方法。 |
| Parallel | 指定是否使用并行燃耗计算。 |
| OutputCell | 指定需要输出核素密度的栅元。 |
| Print | Mat | 指定是否输出所有材料信息。 |
| Keff | 指定是否输出每代的有效增殖因子。 | [9.1](#_9.1__输出控制模块输入卡) |
| Source | 指定是否输出每次的裂变源信息。 |
| CellTally | 指定是否输出栅元计数器。 |
| MeshTally | 指定是否输出网格计数器。 |
| CsTally | 指定是否输出截面计数器。 |
| Plot | ColorScheme | 指定画图颜色方案 | [10.1](#_10.1__画图模块输入卡) |
| PlotID | 指定参数 |

## 2.3 输入格式

RMC输入文件的格式应注意以下几点：

（1）每个模块以相应的关键词标识，模块之间以空行隔开。形如：

|  |
| --- |
| Universe 0  ……  Universe 1  ……  Surface  ……  Material  ……  Criticality  …… |

（2）输入卡顶格写，输入卡中的选项卡以空格间隔。如果输入卡一行未写完，可换行后空格续写。例如：

|  |
| --- |
| CellTally 2 type = 1 filter = 1 0 1 energy = 6.25E-7 20.0  cell = 2 > 0 > 1:289 |

（3）注释符使用“//”（C++风格）[[1]](#footnote-1)。

（4）RMC输入文件不区分大小写。

（5）在windows下，不建议使用txt格式的文本文件作为输入文件。建议使用UltraEdit转换为Dos格式。

# 

# 第3章 几何

复杂几何描述是蒙卡程序相对于确定论程序的重要优势之一。与世界上其它绝大多数蒙卡程序一样，RMC采用基于层级空间的几何描述系统（universe-based geometry system）。

RMC的几何描述系统包括三类基本的几何描述单元，即，曲面（surface），栅元（cell）和空间（universe）。一般地，物理系统由多个或单个层级空间组成，每个空间由一定数量的栅元构成，栅元通过曲面方向（sense）的交并运算来定义。RMC几何输入模块的一般具有以下形式：

|  |
| --- |
| UNIVERSE 0 // 描述最顶层的Universe模块  Cell … // 描述Universe模块当中的第1个栅元  Cell … // 描述Universe模块当中的第2个栅元  ……  UNIVERSE 1 // 描述用于填充的Universe模块  ……  SURFACE // 描述曲面模块  Surf ... // 描述第1个曲面  Surf ... // 描述第2个曲面  …… |

## 3.1 曲面（surface）

曲面是RMC几何描述的最基本单元。考虑到MCNP用户的广泛性，RMC参考了MCNP的曲面定义方式。曲面输入卡的定义方式为：

|  |
| --- |
| Surf <id> <type> {params} [Bc = <flag>] |

其中，

* **Surf** 是曲面输入卡关键词。
* **id**是曲面编号。编号为正整数，且不允许重复。
* **type**是曲面类型所对应的关键词，**params**是曲面方程参数。表3-1给出了RMC支持的曲面类型及相应的曲面方程。
* **Bc**是曲面边界条件（boundary condition）。Bc = 0 （缺省值）表示真空边界条件，Bc = 1表示全反射边界条件。

表3-1 RMC支持的曲面类型

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 类型 | 关键词 | 说明 | 方程 | 曲面方程参数 |
| 平面 | **P** | 一般 |  |  |
| **PX** | 垂直X轴 |  |  |
| **PY** | 垂直Y轴 |  |  |
| **PZ** | 垂直Z轴 |  |  |
| 球面 | **SO** | 球心在原点 |  |  |
| **S** | 一般 |  |  |
| **SX** | 球心在X轴 |  |  |
| **SY** | 球心在Y轴 |  |  |
| **SZ** | 球心在Z轴 |  |  |
| 圆柱面 | **C/X** | 平行于X轴 |  |  |
| **C/Y** | 平行于Y轴 |  |  |
| **C/Z** | 平行于Z轴 |  |  |
| **CX** | 轴心在X轴 |  |  |
| **CY** | 轴心在Y轴 |  |  |
| **CZ** | 轴心在Z轴 |  |  |
| 圆锥面 | **K/X** | 平行于X轴 |  |  |
| **K/Y** | 平行于Y轴 |  |  |
| **K/Z** | 平行于Z轴 |  |  |
| **KX** | 轴心在X轴 |  |  |
| **KY** | 轴心在Y轴 |  |  |
| **KZ** | 轴心在Z轴 |  |  |
| 椭球面/双曲面/抛物面 | **SQ** | 轴平行于X、Y或Z轴 | 本次发布暂不支持 |  |
| 圆柱面/圆锥面/椭球面/双曲面/抛物面 | **GQ** | 轴不平行于X、Y或Z轴 | 本次发布暂不支持 |  |
| 椭圆或圆形的圆环面 | **TX** | 平行于X轴 | 本次发布暂不支持 |  |
| **TY** | 平行于Y轴 | 本次发布暂不支持 |  |
| **TZ** | 平行于Z轴 | 本次发布暂不支持 |  |

## 3.2 栅元（cell）

栅元输入卡的定义方式为：

|  |
| --- |
| Cell <id> {surf\_bool\_definition} {cell\_info} |

其中，

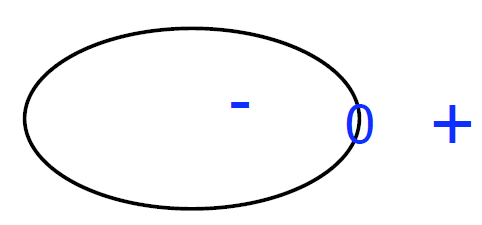
* **Cell** 是栅元输入卡关键词。
* **id**是栅元编号。编号为正整数，且不允许重复。
* **surf\_bool\_definition**指栅元的曲面布尔定义，由带方向的曲面和布尔运算符组成，用来定义栅元区域。**cell\_info**定义了该栅元的其它相关信息。下面将分别阐述。

### 3.2.1 栅元的曲面布尔定义

栅元的曲面布尔定义由一系列曲面和布尔运算符组成，形如：

|  |
| --- |
| **<±surf> <boolean> <±surf> <boolean> <±surf> …** |

曲面方向（sense）的定义为：如果点（x,y,z）在一个曲面方程*f* (*x,y,z*)的计算值为*f* (*x,y,z*) > 0，则称该点对于这个曲面是正向的；若计算值为*f* (*x,y,z*) < 0，则为负向；若计算值为*f* (*x,y,z*) = 0，则表明该点在曲面上。图3-1给出了某二次曲面的方向所对应的区域：



F(x,y,z) < 0

F(x,y,z) > 0

F(x,y,z) = 0

图3-1 曲面方向示意图

RMC的布尔运算符包括交集（&）、并集（:）和补集（!）两种，并支持用圆括号调整运算优先级。补集的优先级高于交集和并集；交集和并集的优先级相同，按照定义的先后顺序进行逻辑运算；圆括号的优先级最高，并且可以使用多层圆括号嵌套，类似于算术运算。假设栅元1和栅元2的几何描述分别为：

栅元1： (1 & -2) : 3

栅元2： 4 & -5 : !1

栅元1所表示的几何区域为：（曲面1的正向 ∩ 曲面2的负向） ∪ 曲面3的正向

栅元2所表示的区域为：（曲面4的正向 ∩ 曲面5的负向） ∪ 非栅元1。栅元2的另一种等价描述方式为：4 & 5 : !( (1 & -2) : 3)。需要注意的是，若“!”之后紧跟数字，则表示非栅元；若“!”之后为括号，则表示非曲面。

### 3.2.2 栅元信息选项卡

栅元信息选项卡由一系列选项卡组成，主要用于描述栅元的物理和几何参数，包括材料、体积、温度、层级填充信息，等。

|  |
| --- |
| Cell … [Mat = <id>] [Vol = <vol>] [Tmp = <tmp>]  **[Void = <flag>] [Fill = <id>] [Inner = <flag>]** |

其中，

* **Mat**选项卡定义该栅元的填充材料，缺省值为**Mat = 0（真空）**。
* V**ol** 选项卡定义该栅元的体积，单位为cm3，缺省值为**Vol = 1.0cm3**。
* **Tmp**选项卡定义该栅元的温度，单位为K，缺省值为**Tmp = 293.6（K）**。当栅元内填充的材料的温度与栅元温度不匹配时，将对核素截面进行多普勒展宽。
* **Void**选项卡指定中子进入该栅元后是否停止跟踪，主要用于描述真空边界以外的区域。**Void = 0**（缺省值），中子进入该区域继续跟踪；**Void = 1**，中子进入该区域停止跟踪；
* **Fill** 选项卡定义该栅元内部填充的空间，详见3.3.2节。
* **Inner**选项卡指定该栅元是否为内部栅元，即，在填充过程中未被外层边界分割。**Inner = 0**（缺省值）表示非内部栅元，**Inner = 1**表示内部栅元。指定内部栅元可以加速几何处理，但错误地指定内部栅元会导致几何跟踪出错，因此只建议高级用户使用。

## 3.3 空间（universe）

### 3.3.1 单层空间

空间由一系列栅元组合而成，且这些栅元之间不能存在重叠或未定义区域。单层空间输入卡的形式为：

|  |
| --- |
| UNIVERSE <id> [options] |

其中，**id**是空间编号。**options**是与空间几何变换、重复结构相关的选项，形式如下，后面将具体述及。

|  |
| --- |
| **[Move = <params>] [Rotate = <params>] [Lat = <params>]**  **[Pitch = <params>] [Scope = <params>] [Sita = <param>] [Fill = <params>]** |

对任意的物理系统，至少需要一个空间来描述，这在输入文件中定义为Universe 0。例如，以下输入文件是一个普通压水堆栅元的几何部分。

|  |
| --- |
| /////// PWR pin: defined in single universe /////////////  Universe 0  cell 1 -10 mat = 1 // Fuel Pin  cell 2 10 & -11 mat=2 // Air  cell 3 11 & -12 mat =3 // cladding  cell 4 12 & 13 & -14 & 15 & -16 mat= 4 // water  cell 5 -13 : 14 : -15 : 16 void = 1 // outside  Surface  surf 10 cz 0.4096  surf 11 cz 0.4178  surf 12 cz 0.4750  surf 13 px -0.63 bc = 1  surf 14 px 0.63 bc = 1  surf 15 py -0.63 bc = 1  surf 16 py 0.63 bc = 1 |

### 3.3.2 多层空间

对于复杂的物理系统，可能需要用到空间填充的描述方式，即，将某个空间填充到另一个空间的某个栅元当中。注意，填充空间应涵盖被填充的栅元区域，否则该栅元区将存在未定义的空白区域，造成粒子跟踪错误。

空间填充的选项卡内嵌在栅元输入卡中（参考3.2.2）：

|  |
| --- |
| **Cell ... [Fill = <universe>]** |

对上例中的压水堆栅元，我们可以使用空间填充的方式来等价地进行描述，如下所示。首先，定义了燃料棒及慢化剂区域（Universe 1），然后将其填充至栅元格（cell 102）。

|  |
| --- |
| /////// PWR pin: defined in multilevel universe /////////////  Universe 0  cell 101 13 & -14 & 15 & -16 Fill = 1 // define a cell filled by a universe  cell 102 -13 : 14 : -15 : 16 void = 1 // outside the box  Universe 1  cell 1 -10 mat = 1 // Fuel Pin  cell 2 10 & -11 mat = 2 // Air  cell 3 11 & -12 mat = 3 // cladding  cell 4 12 mat = 4 // water  Surface  surf 10 cz 0.4096  surf 11 cz 0.4178  surf 12 cz 0.4750  surf 13 px -0.63 bc = 1  surf 14 px 0.63 bc = 1  surf 15 py -0.63 bc = 1  surf 16 py 0.63 bc = 1 |

### 3.3.3 几何变换

RMC支持对空间（universe）的平移变换和旋转变换。几何变换选项卡内嵌在空间输入卡当中：

|  |
| --- |
| **Universe ... [Move = ]**  **[Rotate =** ] |

平移变换的表达式为：



其中，和分别为变换前和变换后的空间任意一点的位置坐标，为平移变换向量。

旋转变换可以绕任意轴，其表达式为：



其中，为旋转变换矩阵。RMC实际要求用户输入的是旋转变换矩阵的转置矩阵，其参数按照以下方式定义：给定某直角坐标系，它经过该旋转变换后得到新坐标系，则可表示为



表示和两个坐标轴之间的夹角余弦，以此类推。

注意，如果对某个空间同时做旋转变换和平移变换，应先旋转，再平移。对于多层空间，对某个空间的几何变换总是连同其内部填充结构做整体变换。此外，Universe 0是基准空间，因此不允许对Universe 0做几何变换。

使用几何变换的方式，我们重新定义上面的压水堆栅元，如下所示。燃料棒和慢化剂区域（Universe 1）定义为与x轴平行，通过平移（move = 0.5 0.5 0）和旋转（rotate = 0 0 -1 0 1 0 1 0 0），填充到栅元格（Cell 102）中。

|  |
| --- |
| //// PWR pin: defined in multilevel universe with coordinate transformation ////  Universe 0  cell 101 13 & -14 & 15 & -16 Fill = 1 // define a cell filled by a universe  cell 102 -13 : 14 : -15 : 16 void // outside the box  Universe 1 move = 0.5 0.5 0 rotate = 0 0 -1 0 1 0 1 0 0  cell 1 -10 mat = 1 // Fuel Pin  cell 2 10 & -11 mat = 2 // Air  cell 3 11 & -12 mat = 3 // cladding  cell 4 12 mat = 4 // water  Surface  surf 10 c/x -0.5 -0.5 0.4096  surf 11 c/x -0.5 -0.5 0.4178  surf 12 c/x -0.5 -0.5 0.4750  surf 13 px -0.63 bc = 1  surf 14 px 0.63 bc = 1  surf 15 py -0.63 bc = 1  surf 16 py 0.63 bc = 1 |

## 3.4 重复结构（lattice）

重复结构是一类特殊的空间，该空间由规则排列的网格组成。RMC支持常用的四边形重复结构和六边形重复结构，它们在反应堆堆芯计算分析时最为常见。四边形重复结构可以建立在1维、2维平面或3维空间，六边形重复结构建立在2维平面。重复结构选项卡内嵌在空间（universe）输入卡当中：

|  |
| --- |
| Universe … [Lat = <type>] |

其中，**Lat = 1**表示四边形重复结构，**Lat = 2**表示六边形重复结构。下面针对这两种重复结构类型分别阐述。

### 3.4.1 四边形重复结构

图3-2给出了四边形重复结构的示意图。四边形重复网格建立在xyz坐标系，坐标原点O建立在第一个网格（编号为1）的左下角点。

x

y

z

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

24

25

26

27

28

36

O

图3-2 四边形重复结构示意图

四边形重复结构的选项卡为：

|  |
| --- |
| Universe … [Lat = 1] [Scope = <xNum yNum zNum>]  [Pitch = <xLen yLen zLen>] [Fill = <U1 U2 … UM>] |

其中，

* **Lat = 1**表示重复结构类型为四边形。
* **Scope**选项卡定义重复网格在x，y，z方向的数量。特别地，参数为1表示该方向上只有一层网格。例如，2维PWR组件的重复网格表示为**Scope = 17 17 1**。需要指出的是，尽管程序支持直接定义3维四边形重复结构，但建议用户通过2维重复结构和1维重复结构的填充方式来生成3维重复结构。
* **Pitch**选项卡定义重复网格在x，y，z方向的宽度，参数必须为正。若某方向只有一层网格，**Pitch**选项卡中对应的参数没有实际意义。
* **Fill**选项卡依次定义网格内填充的空间（universe）的编号，一共有个编号。**Fill**选项卡的填充次序为：先按x方向填充，再按y方向填充，最后按照z方向填充。图3-2给出了四边形重复结构的索引下标的编号方式，对应**Fill**选项卡的填充顺序，同时也对应重复结构计数器的编号（见第5章）。

### 3.4.2 六边形重复结构

x

y

Sita

b1Len

b2Len

b1

b2

O

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

图3-3 六边形重复结构示意图

六边形重复网格的排列方式见图3-3。不难发现，各个六边形的中心按照平行四边形的方式排列。平行四边形的两条边所对应的方向向量b1和b2位于xy平面内，b1与x方向重合。

六边形重复结构的选项卡为：

|  |
| --- |
| Universe … [Lat = 2] [Scope = <b1Num b2Num>] [Sita = <sita>]  **[Pitch = <b1Len b2Len>] [Fill = <U1 U2 … UM>]** |

其中，

* **Lat = 2**表示重复结构类型为六边形。
* **Scope**选项卡定义重复网格在b1和b2方向的数量。
* **Pitch**选项卡定义重复网格在b1和b2方向的宽度。
* **Sita**选项卡定义六边形网格其中一对邻边的夹角（如图所示），单位为度°。
* **Fill**选项卡依次定义网格内填充的空间（universe）的编号，一共有个编号。**Fill**选项卡的填充次序为：先按b1方向（即x方向）填充，再按b2方向填充，具体次序见图3-3给出的编号。

需要指出的是，与四边形重复结构不同的是，六边形重复结构总是建立在xy平面，坐标原点O建立在第一个重复六边形（编号为1）的中心。通过平移和旋转变换，可以将其转换到其它平面。

## 3.5 几何模块输入示例

### 3.5.1 PWR组件

算例3-1是一个PWR17×17组件（图3-4）的输入示例。Universe 1和Universe 3分别为燃料栅元和管道栅元，中心坐标在（0, 0, 0）。Universe 8 为四边形重复结构。因为四边形重复结构的下角点总是建立在（0, 0, 0），所以Universe 8的第一个网格的中心点位置为（0.63, 0.63, 0）。将Universe 1和Universe 3按照向量（0.63, 0.63, 0）平移后，填充到Universe 8的第一个网格中，然后按照四边形重复结构排列展开。

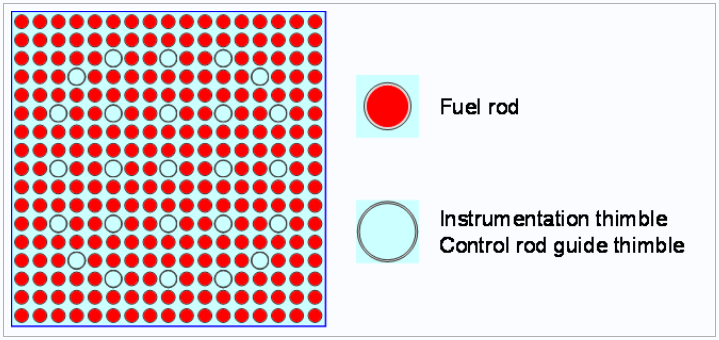


图3-4 PWR17×17组件

算例 3-1

|  |
| --- |
| // STANDARD WESTINGHOUSE 17\*17 ASSEMBLY MODEL. SHE DING : 2012-03-08 //  UNIVERSE 0  CELL 1 6 & -7 & 8 & -9 mat = 0 Fill = 8 // Assembly inside  CELL 2 -6 : 7 : -8 : 9 mat = 0 void = 1 // Assembly outside  UNIVERSE 8 lat = 1 pitch = 1.26 1.26 1 scope = 17 17 1 fill =  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 1 1 1  1 1 1 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1  1 1 1 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  UNIVERSE 1 move = 0.63 0.63 0 // Fuel rod  cell 3 -1 mat = 1 inner = 1 // Fuel  cell 4 1 & -2 mat = 3 inner = 1 // Air  cell 5 2 & -3 mat = 4 inner = 1 // Zr  cell 6 3 mat = 5 // water  UNIVERSE 3 move = 0.63 0.63 0 // Guide tube  cell 11 -4 mat = 5 inner = 1 // water  cell 12 4 & -5 mat = 4 inner = 1 // Air  cell 13 5 mat = 5 // water  SURFACE  surf 1 cz 0.4096  surf 2 cz 0.4178  surf 3 cz 0.4750  surf 4 cz 0.5690  surf 5 cz 0.6147  surf 6 px 0 bc = 1  surf 7 px 21.42 bc = 1  surf 8 py 0 bc = 1  surf 9 py 21.42 bc = 1  MATERIAL  mat 1 -10.196  92235.30c 6.9100E-03  92238.30c 2.2062E-01  8016.30c 4.5510E-01  mat 3 -0.001  8016.30c 3.76622E-5  mat 4 -6.550  40000.60c -98.2  mat 5 9.9977E-02  1001.30c 6.6643E-02  8016.30c 3.3334E-02  sab 5 lwtr.60t  CRITICALITY  PowerIter population = 10000 50 300 // keff0 = 1.0  InitSrc point = 0.63 0.63 0 |

### 3.5.2 PWR堆芯

算例3-2是一个PWR堆芯几何模块输入示例。简单起见，堆芯输入文件仅包含一种类型的组件。堆芯（Cell 1）被填充21×21的四边形重复结构（Universe 1），其中包括组件网格和反射层网格。组件（Universe 3）是17×17的四边形重复结构，填充有燃料栅元（Universe 6）和管道栅元（Universe 7）。

算例 3-2

|  |
| --- |
| ////////// PWR core. SHE Ding 2012-07-01 ////////////  UNIVERSE 0  CELL 1 -10 mat = 0 Fill = 1 // Core inside  CELL 2 10 mat = 0 void = 1 // Core outside  UNIVERSE 1 lat = 1 pitch = 21.42 21.42 1 scope = 21 21 1 Fill = // core lattice zone  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2  2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2  2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  UNIVERSE 2 // reflector  cell 21 1 mat = 5  cell 22 -1 mat = 5  UNIVERSE 3 lat = 1 pitch = 1.26 1.26 1 scope = 17 17 1 fill = // assembly  6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6  6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6  6 6 6 6 6 7 6 6 7 6 6 7 6 6 6 6 6  6 6 6 7 6 6 6 6 6 6 6 6 6 7 6 6 6  6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6  6 6 7 6 6 7 6 6 7 6 6 7 6 6 7 6 6  6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6  6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6  6 6 7 6 6 7 6 6 7 6 6 7 6 6 7 6 6  6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6  6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6  6 6 7 6 6 7 6 6 7 6 6 7 6 6 7 6 6  6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6  6 6 6 7 6 6 6 6 6 6 6 6 6 7 6 6 6  6 6 6 6 6 7 6 6 7 6 6 7 6 6 6 6 6  6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6  6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6  UNIVERSE 6 move = 0.63 0.63 0 // Fuel rod  cell 3 -1 mat = 1 inner = 1 // Fuel  cell 4 1 & -2 mat = 3 inner = 1 // Air  cell 5 2 & -3 mat = 4 inner = 1 // Zr  cell 6 3 mat = 5 // water  UNIVERSE 7 move = 0.63 0.63 0 // Guide tube  cell 11 -4 mat = 5 inner = 1 // water  cell 12 4 & -5 mat = 4 inner = 1 // Air  cell 13 5 mat = 5 // water  SURFACE  surf 1 cz 0.4096  surf 2 cz 0.4178  surf 3 cz 0.4750  surf 4 cz 0.5690  surf 5 cz 0.6147  surf 10 c/z 224.91 224.91 209 bc = 1 // container  MATERIAL  mat 1 -10.196  92235.30c 6.9100E-03  92238.30c 2.2062E-01  8016.30c 4.5510E-01  mat 3 -0.001  8016.30c 3.76622E-5  mat 4 -6.550  40000.60c -98.2  mat 5 9.9977E-02  1001.30c 6.6643E-02  8016.30c 3.3334E-02  sab 5 lwtr.60t  CRITICALITY  PowerIter population = 100000 250 500 // keff0 = 1.0  InitSrc point = 224.91 226.17 0 |

### 3.5.3 六边形组件

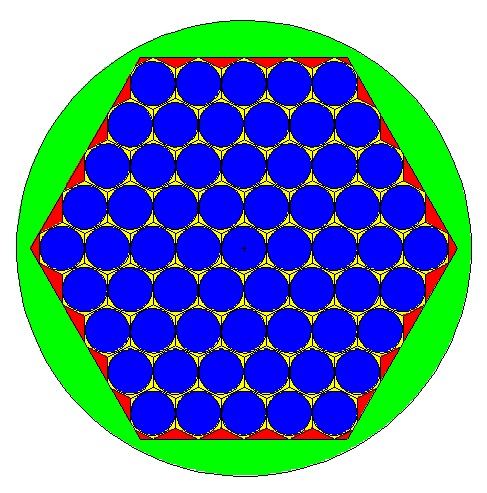


图3-5 六边形组件结构简化示意图

算例3-3是一个六边形组件的简化输入示例，包含61个六边形燃料栅元。图3-5中蓝色为燃料，黄色为绕线，红色为冷却剂，绿色为反射层。Universe1为六边形重复结构，其中Universe2和Universe3分别为冷却剂栅元和燃料栅元。由图3-3中六边形的排列结构可知，六边形重复结构的原点在左下角六边形的中心，所以Universe 1需要向x和y方向分别移动-15和-9.05，才能使得Universe 1的中心与Cell 1的中心重合。

算例 3-3

|  |
| --- |
| ///////////// MFR ASSEMBLY. FAN Xiao 2012-09-17 /////////////  Universe 0  cell 1 -1 & -2 & -3 & 4 & -5 & -6 & 7 & -8 mat = 0 fill = 1 //Assembly inside  cell 2 16 : -17 : 18 mat = 0 void = 1 //Assembly outside  cell 3 -16 & 17 & -18 & (1 : 2 : 3 : -4 : 5 : 6 : -7 : 8) mat = 5 //reflector  Universe 1 move=-15 -9.05 0 lat=2 pitch=2 2.06787 scope=11 11 sita=63.435 fill=  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 2  2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 2  2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2  2 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2  2 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  Universe 2  cell 21 -15 mat = 1  cell 22 15 mat = 1  Universe 3  cell 31 -15 mat = 2  cell 32 15 mat = 3  Surface  surf 1 py 8.4  surf 2 p 1.732 1 0 16.3  surf 3 p 1.732 -1 0 16.3  surf 4 py -8.4  surf 5 p -1.732 -1 0 16.3  surf 6 p -1.732 1 0 16.3  surf 7 pz -30  surf 8 pz 30  surf 15 cz 0.975  surf 16 cz 30  surf 17 pz -35  surf 18 pz 35  Material  mat 1 -0.8139 // Na  11023.30c 1.0  mat 2 -10.41 // UO2  92235.30c -56.5 92238.30c -31.1 8016.30c -12.3 13027.30c -0.02  20000.60c -0.02 12000.60c -0.02 26000.55c -0.02 14000.60c -0.02  mat 3 -0.8355 // wiry  11023.30c 2.132E+0 28000.50c 3.223E-3  24000.50c 4.759E-3 26000.55c 1.634E-2  mat 5 0.1236 // Be9  4009.30c 1  Criticality  PowerIter keff0 = 1.0 population = 2000 50 300  InitSrc point = 0 0 0 |

### 3.5.4 六边形堆芯

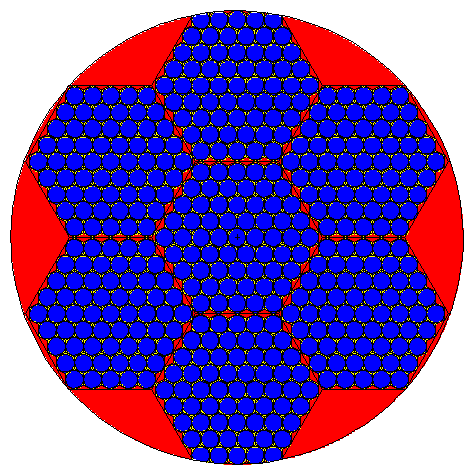


图3-6 六边形堆芯结构简化示意图

算例3-4是一个六边形堆芯几何模块的简化输入示例。图3-6中蓝色为燃料，黄色为绕线，红色为冷却剂。简单起见，堆芯输入文件仅包含同一类的7个燃料组件，真实堆芯可以自行增加组件，这里只重点介绍几何变换填充过程。Universe 1是六边形重复结构，其中Universe 2是冷却剂，Universe 3是六边形燃料组件。Universe 3本身又包含六边形重复结构排列的燃料栅元（类似于算例3-3中的描述），即，整个系统用到了两层嵌套的六边形重复结构。在描述该几何结构时，首先把燃料和冷却剂（Universe 4和Universe 5）填充到六边形栅元重复结构（Universe 3）中；接下来把六边形栅元重复结构（Universe 3）在x-y平面内逆时针旋转90°（rotate = 0 1 0 -1 0 0 0 0 1）并平移（move = 9.05, -15, 0），填充到六边形组件重复结构（Universe 1）；接下来再把六边形重复结构（Universe 1）平移（move = -50.4 -27.942 0）到堆芯（即Cell 1）的中心位置并填充。需要注意的是，用户在做几何变换时应先做旋转再做平移。

算例 3-4

|  |
| --- |
| //// MFR CORE.FAN Xiao 2012-09-17 ////  Universe 0  cell 1 -21&7&-8 mat=0 fill=1  cell 2 21:-7:8 mat=0 void=1  Universe 1 move=-50.4 -27.942 0 lat=2 pitch=16.8 16.302 scope=5 5 sita=60 fill=  2 2 2 2 2  2 2 3 3 2  2 3 3 3 2  2 3 3 2 2  2 2 2 2 2  Universe 2  cell 21 -15 mat=1  cell 22 15 mat=1  Universe 3 move=9.05 -15 0 rotate=0 1 0 -1 0 0 0 0 1  lat=2 pitch=2 2.06787 scope=11 11 sita=63.435 fill=  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 5 5 5 5 5 4  4 4 4 4 5 5 5 5 5 5 4  4 4 4 5 5 5 5 5 5 5 4  4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 4  4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 4  4 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4  4 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4  4 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4  4 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  Universe 4  cell 41 -15 mat=1  cell 42 15 mat=1  Universe 5  cell 51 -15 mat=2  cell 52 15 mat=3  Surface  surf 5 p 1 1.6632 0 46.474  surf 2 p 1 -1.6632 0 46.474  surf 3 p -1 -1.6632 0 46.474  surf 6 p -1 1.6632 0 46.474  surf 1 px 27.942  surf 4 px -27.942  surf 7 pz -30  surf 8 pz 30  surf 15 cz 0.975  surf 21 cz 25  Material  mat 1 -0.8139 // Na  11023.30c 1.0  mat 2 -10.41 // UO2  92235.30c -56.5 92238.30c -31.1 8016.30c -12.3 13027.30c -0.02  20000.60c -0.02 12000.60c -0.02 26000.55c -0.02 14000.60c -0.02  mat 3 -0.8355 // wiry  11023.30c 2.132 28000.50c 3.223E-3 24000.50c 4.759E-3 26000.55c 1.634E-2  Criticality  PowerIter keff0=1.0 population = 50000 200 1000  InitSrc point=0 0 0 |

# 

# 第4章 材料

材料输入模块描述材料组成，包括材料密度、核素截面数据库、核素份额，以及定义与连续能量或多群ACE截面数据库相关的参数选项。

## 4.1 材料输入卡

普通材料的输入卡为：

|  |
| --- |
| **Mat <mat\_id> <density>**  **<zaid.xxx> <fraction>**  **<zaid.xxx> <fraction>**  **……** |

其中，

* **Mat**为材料输入卡关键词。
* **mat\_id**为材料编号，与Cell输入卡当中的填充材料相对应。
* **density**为材料总密度。**density > 0**表示原子密度，单位为1024原子/cm3；**density < 0**表示质量密度，度单位为g/cm3。
* **zaid.xxx**指定核素所对应的ACE截面数据库，其中**zaid**为核素ID，后缀**.xxx**指定了截面数据库的类型。为便于区分，建议用户在生成数据库时使用后缀**.xxc**对应连续能量ACE数据库，使用后缀**.xxm**对应多群数据库。截面数据库具体对应的核素和类型可以查阅数据库索引文件xsdir。
* **fraction**为核素在材料中所占的比例。若**fraction > 0**，表示原子密度份额（相对值），若**fraction < 0**，表示质量密度份额（相对值）。同一种材料中的**fraction**必须具有相同符号。

除普通材料输入卡以外，RMC还提供热化材料输入卡，为连续能量ACE截面指定相应的热化数据库。

|  |
| --- |
| **Sab <mat\_id> <zaid.xxx>**  **<zaid.xxt>**  **……** |

其中，

* **Sab**为热化材料输入卡的关键词。
* **mat\_id**为材料编号，与**Mat**卡中的材料编号相匹配。
* **zaid.xxx**指定核素所使用的热化截面数据库，具体请查阅数据库索引文件xsdir。

## 4.2 连续能量ACE截面相关输入卡

若材料输入卡中的核素使用连续能量ACE截面，则可以通过以下输入卡为其设定相关参数选项。

|  |
| --- |
| **CeAce [ErgBinHash = <flag>] [pTable = <flag>]** |

其中，

* **CeAce**为连续能量ACE截面相关输入卡的关键词。
* **ErgBinHash**选项卡指定是否使用程序内置的哈希表方法加速能量格点查找速度。当核素较多时，使用加速方法能获得更高的计算效率，但也会消耗少量额外的内存。**ErgBinHash = 1**（缺省值），使用哈希表加速；**ErgBinHash = 0**，不使用哈希表加速。
* **pTable**选项卡指定是否对不可分辨共振区使用概率表。仅当核素使用的ACE截面数据库中包含UNR模块时，该选项才生效。**pTable = 1**（缺省值）表示使用概率表，**pTable = 0**表示不使用概率表。

## 4.3 多群ACE截面相关输入卡

若材料输入卡中的核素使用多群ACE截面，用户必须使用以下输入卡为多群截面指定相关参数选项。

|  |
| --- |
| **MgAce [ErgGrp = <grp>]** |

其中，

* **MgAce**为多群ACE截面相关输入卡的关键词。
* **ErgGrp**选项卡指定多群ACE截面的群数。

需要指出的是，多群截面数据库紧密依赖于实际物理问题。因此，本次发布的RMC程序包中不提供多群ACE数据库，用户可以使用其它数据库处理软件生成与实际问题相关的多群ACE截面数据库。

## 4.4 材料模块输入示例

### 4.4.1 使用连续能量ACE数据库的材料模块

在下面的材料模块中，首先通过**Mat**输入卡分别定义了UO2和H2O这两种材料。UO2的质量密度为-10.196 g/cm3，U235、U238和O16的原子比为0.03 : 0.97 : 2.0。H2O的原子密度为0.9997 bar-1cm-1，H1和O16的原子比为2 : 1。通过**Sab**输入卡，为H2O中的H1（1001.30c）指定了热化数据库（lwtr.60t）。 在**CeAce**输入卡中，**pTable = 0**表示不使用概率表，**ErgBinHash = 1**表示使用哈希表加速能量查找。

|  |
| --- |
| MATERIAL  mat 1 -10.196  92235.30c 0.03  92238.30c 0.97  8016.30c 2.0  mat 2 0.9997  1001.30c 2.0  8016.30c 1.0  Sab 2 lwtr.60t  CEACE pTable = 0 ErgBinHash = 1 |

### 4.4.2 使用多群ACE数据库的材料模块

|  |
| --- |
| MATERIAL  mat 1 -10.198  92235.50m 6.9100E-03  92238.50m 2.2062E-01  8016.50m 4.5510E-01  mat 2 -0.001  8016.50m 3.76622E-5  mat 3 -6.550  40000.50m -98.2  mat 4 -0.997  1001.50m 6.6643E-02  8016.50m 3.3334E-02  MgAce ErgGrp = 30 |

在上面的材料模块中，.50m为30群的多群ACE截面库。通过**ErgGrp**选项卡，指定了多群截面的能群数量。

# 第5章 临界计算

蒙卡临界计算采用裂变源迭代法，即，用当前代产生的裂变源作为下一代的初始源。用户需要在输入文件中指定用于源迭代的基本参数，包括初始有效增殖因子（keff）、每代中子数和中子代数，同时还需要指定初始裂变源分布。

在临界计算模块中，用户还可以选择随机数发生器的类型和参数，以及选择并行临界计算的并行模式。

## 5.1 源迭代参数

|  |
| --- |
| **PowerIter [Keff0 = <keff0>] [Population = <N Mi Mt>] [Batch = <Mb>]** |

其中，

* **PowerIter**为源迭代输入卡关键词。
* **Keff0**选项卡设置初始有效增殖系数，缺省值为**keff0 = 1**。程序要求用户输入的初始有效增殖系数0.1 < keff0 < 10。
* **Population**选项卡设置每代中子数（**N**），非活跃代代数（**Mi**）和总代数（**Mt**）。相应地，蒙卡临界计算的活跃代代数为**Ma** = **(Mt – Mi**)，总活跃中子数为 **M = N × Ma**。
* **Batch**选项卡用于减少并行临界计算中计数器的归并操作，将**Ma**个活跃代压缩为**Mb**组，每隔**Ma/Mb**活跃代进行一次数据归并。缺省值为**Mb = Ma**。

## 5.2 初始裂变源

|  |
| --- |
| **InitSrc [<type> = {params}]** |

其中，

* **InitSrc**为初始裂变源输入卡的关键词。
* **type**为裂变源类型的关键词，**params**为相应参数。RMC支持的初始裂变源分布包括点源和均匀体源两类，详见表5-1。

表5-1 RMC支持的初始裂变源分布

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 关键词 | 说明 | 参数 |
| **Point** | 孤立点源 | x1 y1 z1 x2 y2 z2 … |
| **Slab** | 平行于坐标轴方向的长方体均匀源 | xmin xmax ymin ymax zmin zmax |
| **Sph** | 球体均匀源 | x y z R |
| **Cyl/x** | 平行于x轴的圆柱体均匀源 | y z R xmin xmax |
| **Cyl/y** | 平行于y轴的圆柱体均匀源 | x z R ymin ymax |
| **Cyl/z** | 平行于z轴的圆柱体均匀源 | x y R zmin zmax |

## 5.3 随机数发生器

RMC含有三种不同类型的随机数发生器。对一般用户而言，建议使用默认的随机数发生器类型和参数。高级用户可能需要使用特定的随机数参数，例如，对同一算例使用不同的随机数种子来获得独立的计算结果。RMC提供了定制随机数发生器的输入卡：

|  |
| --- |
| **RNG [Type = <type>] [Seed = <seed>] [Stride = <stride>]** |

其中，

* **RNG**为随机数发生器输入卡的关键词。
* **Type**选项卡指定随机发生器的类型，**Type = 1**为48-bit乘法线性同余法随机数发生器， **Type = 2**（缺省值）为64-bit乘法线性同余法随机数发生器，**Type = 3**为64-bit混合线性同余法随机数发生器。
* **Seed**选项卡指定随机数发生器的初始化种子，可以是任意正奇数，缺省值为**Seed = 1**。
* **Stride**选项卡用于并行计算时为每个中子历史分配的分段随机数的长度，只建议高级用户使用。缺省值为**Stride = 10000**。

## 5.4 并行临界计算模式

在并行临界计算中，考虑到负载平衡，需要对各个进程上的裂变源中子进行收集并重新分配。传统的蒙卡程序一般采用主从（master-slave）模式，收集和分配的效率较低。RMC采用对等模式（slave-slave），提高了并行效率。选择并行临界计算模式的输入卡为：

|  |
| --- |
| **ParallelBank <flag>** |

其中，

* **ParallelBank**为并行临界计算模式输入卡的关键词。
* **flag**指定并行模式。**flag = 0**为主从模式，**flag = 1**（缺省值）为对等模式。

## 5.5 临界计算模块输入示例

|  |
| --- |
| CRITICALITY  PowerIter Population = 5000 30 100 // keff0 = 1.0  InitSrc point = 0.0 0.0 0.0  0.5 0.5 0.0  -0.5 -0.5 0.0  RNG type = 3 seed = 12345 stride = 10000  ParallelBank 1 |

在上面的临界计算模块中，**PowerIter**输入卡指定每代粒子数为5000，跳过30代，一共模拟100代；初始有效增殖系数为缺省值，即1.0。**InitSrc**输入卡指定了初始源的类型为点源，位置为（0，0，0）、（0.5，0.5，0）和（-0.5，-0.5，0），裂变源将在这三个位置随机产生。**RNG**输入卡指定了随机数类型为64-bit混合线性同余法随机数发生器，初始随机数种子为12345，为每个粒子分配的随机数长度为10000。**ParallelBank**输入卡表示在并行计算中使用对等模式收集和分配裂变源。

# 第6章 计数器

RMC包含三类计数器，分别是栅元计数器（cell tally）、网格计数器（mesh tally）和截面计数器（cross-section tally）。

栅元计数器用来统计栅元内的宏观物理量，包括积分通量、功率、裂变反应率和吸收反应率等。RMC采用Cell-Mapping方法，能够高效地处理大规模栅元计数器。网格计数器与栅元计数器类似，但它统计的宏观物理量不是基于栅元，而是基于预先划定的网格。截面计数器统计栅元内指定核素、指定反应类型的反应截面（微观反应率）。以上三种计数器都支持分能群统计，即，按照指定的能量区间分别计数。

## 6.1 栅元计数器

栅元计数器的输入卡为：

|  |
| --- |
| **CellTally <id> [Type = <type>] [Energy = <erg\_bin>] [Filter = <params>] [Integral = <params>] [Cell = <cell\_vector\_group>]** |

其中，

* **CellTally**为栅元计数器输入卡的关键词。
* **id**为栅元计数器的编号，便于查阅输出。
* **Type**卡指定计数类型。**Type = 1**表示栅元通量，**Type = 2**表示栅元功率，**Type = 3**表示栅元裂变反应率，**Type = 4**表示栅元吸收反应率。注意，这里所指的通量、功率、反应率都是对栅元体积的积分量。
* **Energy**选项卡指定分群计数的能量区间，参数为能量间隔点（Mev）。例如，“**Energy = 6.25E-7 20**”表示计数区间为0到0.625ev，0.625ev到20Mev，20Mev到正无穷，共3个区间；同时，程序还将给出总计数。特别地，对于多群临界计算，“**Energy = -1**”表示使用截面数据库的能群结构划分。若输入中没有**Energy**选项卡，则表示只统计总的计数率。
* **Cell、Filter、Integral**选项卡用于描述计数栅元，下面将具体介绍。

### 6.1.1 Cell选项卡

在层级几何系统中，任意一个栅元区域都是通过一系列的栅元编号及其层级关系来唯一地确定。我们以栅元向量（Cell vector）的形式来描述这种具有层级关系的栅元：

**Cell\_vector = C[1] > C[2] > … > C[n]**

其中，“>”表示上层对下层的包含关系，n为该栅元所处的层级，C[i]表示栅元编号或重复结构编号（当第i层为重复结构时）。在蒙卡跟踪过程，总是需要将粒子定位到底层栅元（即C[n]不被其它任何空间填充），然后获取相应的材料和温度等信息进行输运模拟。

与粒子定位的栅元描述类似（参考第3.5节），计数栅元采用也如下所示的向量描述：

**C[1] > C[2] > … > C[n]**

首先考虑C[n]为底层栅元的情形，即C[n]不再被下层结构填充。计数器的基本实现过程是：在蒙卡模拟过程中，检查粒子定位栅元是否与计数栅元匹配（二者都是底层栅元）；若是，则累加计数信息。值得指出的是，同一个**Cell**选项卡中给出的栅元列表不允许存在重复的栅元向量。

为提高计数栅元描述的灵活性，程序引入“：”和“\*”两种辅助表达符。

以某压水堆堆芯为例，假设全堆（栅元编号1）包括21×21=441个重复网格，每个网格为燃料组件或反射层；其中，燃料组件进一步划分为17×17=289个重复网格，每个网格内填充燃料棒（栅元编号35）和慢化剂（栅元编号36）。

为统计该堆芯中心组件（重复网格编号221）的中心栅元（重复网格编号145）燃料棒内的通量，计数栅元的输入为：

**1 > 221 > 145 > 35**

以此类推，若用户需要统计其它组件中心燃料棒内的通量，需要输入：

**1 > 1 > 145 > 35**

**1 > 2 > 145 > 35**

**1 > 3 > 145 > 35**

**…**

**1 > 441 > 145 > 35**

通过使用展开符“：”，上述输入方式可简写为：

**1 > 1:441 > 145 > 35**

RMC程序还支持形如“1 > 1:441 > 1:289 > 35”的多层展开输入方式，按照从右至左的方向逐层展开：

**1 > 1 > 1 > 35**

**…**

**1 > 1 > 289 > 35**

**1 > 2 > 1 > 35**

**…**

**1 > 2 > 289 > 35**

**…**

**1 > 441 > 1 > 35**

**…**

**1 > 441 > 289 > 35**

全局展开符“\*”是展开符“：”的一个特例，它会自动搜索所有底层栅元为特定编号的区域，分别予以计数。在上述算例中，用户输入：

**\*36**

即可分别统计各个组件内的各慢化剂区（栅元编号36）的通量。

### 6.1.2 Filter选项卡

6.1.1中的计数栅元描述“C[1] > C[2] > … > C[n]”只考虑了C[n]是底层栅元（即C[n]不再被下层结构填充）。但用户有时可能需要统计非底层栅元或复合栅元的通量分布，这时就需要用到**Filter**选项卡。

**Filter**选项卡的参数是由0和1组成的序列，序列长度等于计数栅元的层级。默认情况下，序列内的元素为1；若计数栅元中出现“0”通配符（见后面的示例），则Filter向量中相应位置用0代替。

**Filter**选项卡的功能之一是统计非底层栅元的通量。以6.1.1中的情形为例，通量统计的对象为组件，即，第一层重复结构当中的网格。栅元计数器的输入卡为：

|  |
| --- |
| CellTally 1 Type = 1 Filter = 1 1  Cell = 1 > 1:441 |

其中，1 > 1:441等同于输入“1 > 1 1 > 2 …… 1 > 441”，“Filter = 1 1”标识该计数器内的所有计数栅元都只有两层。该计数器将给出441个计数，分别对应441个组件层面的网格（包含反射层网格）的通量。

**Filter**选项卡的另一功能是用于统计复合栅元的计数，如下所示：

|  |
| --- |
| CellTally 1 Type = 1 Filter = 1 1 0 1  Cell = 1 > 1:441 > 0 > 35 |

注意到“1 > 1:441> 0 > 35”当中的0是一个通配符，表示在计数匹配过程中忽略该层级的栅元编号或网格编号。**Filter**选项卡中相应层的位置用0标识。该计数器将给出441个通量计数，其中第i个计数对应第i个组件内的所有燃料棒通量之和。

RMC采用Cell mapping方法快速处理大规模栅元计数。用户应尽量将相同类型（具有相同Filter）的计数栅元置于同一个CellTally中，减少CellTally总数（增加单个CellTally的计数规模），提高计数效率。

### 6.1.3 Integral选项卡

**Integral**选项卡的作用是将计数器内的计数栅元进行逐段合并，作为一个整体进行计数。例如：

|  |
| --- |
| CellTally 1 Type = 1 Filter = 1 1 0 1  Integral = 100\*3 141 （namely Integral = 100 100 100 141）  Cell = 1 > 1:441 > 0 > 35 |

该计数器将给出4个计数，分别是1 > 1:100 > 0 > 35计数之和，1 > 101:200 > 0 > 35计数之和，1 > 201:300 > 0 > 35计数之和，1 > 301:441 > 0 > 35计数之和。通过使用Integral选项卡，理论上可以将任意多个栅元当作一个整体进行计数（即使它们在物理上并不相邻）。

## 6.2 网格计数器

网格计数器的输入卡为：

|  |
| --- |
| **MeshTally <id> [Type = <type>] [Energy = <erg\_bin>]**  **[Scope = <params>] [Bound = <params>]** |

其中，

* **MeshTally**为网格计数器输入卡的关键词。
* **id**为网格计数器的编号，便于查阅输出。
* **Type**卡指定计数类型。**Type = 1**表示通量，**Type = 2**表示功率，**Type = 3**表示裂变反应率，**Type = 4**表示吸收反应率。
* **Energy**选项卡指定分群计数的能量区间，参数为能量间隔点（Mev）。例如，“**Energy = 6.25E-7 20**”表示计数区间为0到0.625ev，0.625ev到20Mev，20Mev到正无穷，共3个区间；同时，程序还将给出总计数。特别地，对于多群临界计算，“**Energy = -1**”表示使用截面数据库的能群结构划分。若输入中没有**Energy**选项卡，则表示只统计总的计数率。
* **Scope**选项卡指定网格在x，y，z方向的数量。特别地，参数为“-1”表示该方向上只有一层无限大网格[[2]](#footnote-2)。
* **Bound**选项卡指定网格在x，y，z方向的边界范围，形如“Bound = x\_min x\_max y\_min y\_max z\_min z\_max”。若某方向只有一层网格，**Bound**选项卡中对应的参数没有实际意义。

## 6.3 截面计数器

截面计数器统计指定栅元内、指定材料的所有核素、指定反应类型的单群截面或分群截面（本次发布的版本暂不支持分群截面计数器）。截面计数器的输入卡为：

|  |
| --- |
| CsTally <id> [Cell = <cell\_vector>] [Mat = <mat>] [Energy = <erg\_bin>]  [MT = <mt\_list\_1, mt\_list\_2, …>] |

其中，

* **CsTally**为截面计数器输入卡的关键词。
* **id**为计数器的编号。
* **Cell**卡指定被计数的栅元。注意与栅元计数器不同的是，截面计数器输入的是单个栅元向量，且必须是底层栅元。此外还需注意，在不同的**CsTally**卡当中，**Cell**卡不允许重复。
* **Mat**卡指定被计数的材料。该材料可以不同于计数器栅元中实际填充的材料。用户若需要统计同一个栅元中的不同核素的截面，可以将这些核素定义在同一种材料中即可。
* **Energy**选项卡指定分群计数的能量区间，参数为能量间隔点（Mev）。例如，“**Energy = 6.25E-7 20**”表示计数区间为0到0.625ev，0.625ev到20Mev，20Mev到正无穷；同时，程序还将给出总计数。特别地，对于多群临界计算，“**Energy = -1**”表示使用截面数据库的能群结构划分。若输入中没有**Energy**选项卡，则表示只统计总的计数率。本次发布的RMC版本暂不支持分能群统计功能，**Energy**选项卡被关闭。
* **MT**选项卡指定各个核素的反应类型。每个核素可以对应多个反应类型，核素之间以逗号间隔，例如“MT = 16 17 , 102, -6, 107”。反应类型与编号的对应关系可查阅ENDF/B手册，表6-1给出常见的一些反应类型编号。

表6-1 反应类型与编号的对应关系（仅列出部分ENDF反应类型）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| MT编号 | 反应类型 | 备注 |
| **-1** | 总截面 | 对于连续能量ACE截面，当截面温度与栅元温度不匹配时，采取多普勒展调整弹性散射截面和总截面。这里统计的是调整后的截面。 |
| **-2** | 吸收 | 不包含裂变 |
| **-3** | 弹性散射 |  |
| **-6** | 裂变 |  |
| **16** | （n，2n） | 仅限连续能量ACE截面 |
| **17** | （n，3n） |
| **102** | （n，γ） |
| **103** | （n，p） |
| **107** | （n，α） |

以下输入卡统计了某个栅元（1 > 221 > 145 > 35）当中的3种核素的单群截面，其中包括： U235的裂变截面，U238的吸收截面和裂变截面，O16的辐射俘获截面。

|  |
| --- |
| MATERIAL  mat 2 -10.196  92235.30c 0.03  92238.30c 0.97  8016.30c 2.0  CsTally 1 Cell = 1 > 221 > 145 > 35 Mat = 2 MT = -6 , -2 -6 , 102 |

## 6.4 计数器加速

针对含大量栅元的栅元计数器和含大量核素的截面计数器，RMC提供相应的加速功能。计数器加速的输入卡为：

|  |
| --- |
| **AcceTally [Map = <flag>] [Union = <flag>]** |

其中，

* **AcceTally**为计数器加速输入卡的关键词。
* **Map**选项卡指定是否使用栅元快速定位方法来处理栅元计数器。**Map = 1**（缺省值）表示使用快速定位方法，**Map = 0**表示不使用快速定位。当栅元计数器栅元含有大量栅元时，开启该选项能显著节省计算时间。
* **Union**选项卡指定是否使用统一能量框架方法来处理截面计数器。**Union= 1**表示使用统一能量框架方法，**Union= 0**（缺省值）表示不使用统一能量框架方法。当截面计数器栅元内含有大量核素时，使用统一能量框架方法能节省计算时间，但代价是丢失了方差信息以及消耗额外的内存。

## 6.5 计数器模块输入示例

### 6.5.1 PWR燃料棒轴向分段计数

算例6-1是一个PWR的燃料棒，轴向分为10段。计数器模块中分别定义了两个栅元计数器、一个网格计数器和一个截面计数器。

第一个栅元计数器（CellTally 1）统计轴向各段燃料区和慢化剂区的分能群通量，第二个栅元计数器（CellTally 2）统计轴向各段燃料区的裂变反应率之和。网格计数器（MeshTally 1）统计轴向100段的分能群通量分布。截面计数器（CsTally 1）统计第5段燃料区的各核素的单群截面：U235的裂变截面（-6）和辐射俘获截面（102），U238的裂变截面（-6）、n-2n截面（16）和辐射俘获截面（102），O16的n-a截面（107）。

算例 6-1

|  |
| --- |
| ///// PWR pin divided into 10 nodes in axial. Qiu Yishu 2012-09-15 //////  UNIVERSE 0  cell 1 6 & -7 & 8 & -9 & 10 & -11 Fill = 8 // Pin inside  cell 2 -6 : 7 : -8 : 9 : -10 : 11 void = 1 // Pin outside  UNIVERSE 8 lat = 1 pitch = 1 1 0.5 scope = 1 1 10  fill = 1 \* 10  UNIVERSE 1 move = 0.63 0.63 0 // Fuel rod  cell 3 -1 mat = 1 // Fuel  cell 4 1 & -2 mat = 3 // Air  cell 5 2 & -3 mat = 4 // Zr  cell 6 3 mat = 5 // water  SURFACE  surf 1 cz 0.4096  surf 2 cz 0.4178  surf 3 cz 0.4750  surf 6 px 0 bc = 1  surf 7 px 1.26 bc = 1  surf 8 py 0 bc = 1  surf 9 py 1.26 bc = 1  surf 10 pz 0 bc = 1  surf 11 pz 5 bc = 1  MATERIAL  mat 1 -10.196  92235.30c 6.9100E-03  92238.30c 2.2062E-01  8016.30c 4.5510E-01  mat 3 -0.001  8016.30c 3.76622E-5  mat 4 -6.550  40000.60c -98.2  mat 5 9.9977E-02  1001.30c 6.6643E-02  8016.30c 3.3334E-02  sab 5 lwtr.60t  CeAce ErgBinHash = 0 pTable = 0  CRITICALITY  PowerIter population = 1000 30 200 // keff0 = 1.0  InitSrc point = 0.63 0.63 2.75  Tally  CellTally 1 type = 1 energy = 6.25E-7 20  cell = 1 > 1: 10 > 3  1 > 1: 10 > 6  CellTally 2 type = 3 integral = 10  cell = 1 > 1: 10 > 3  MeshTally 1 type = 1 energy = 6.25E-7 20  Scope = 1 1 100  Bound = 0 1.26 0 1.26 0 5  CsTally 1 cell = 1 > 5 > 3  mat = 1  mt = -6 102 , -6 16 102, 102 |

### 6.5.2 Hoogenboom全堆基准题大规模计数器

该算例是一个压水堆全堆基准题。堆芯一共包含241个相同的燃料组件，每个燃料组件包含17×17个栅元，每个栅元的轴向分为100层。计数器模块中分别定义了五个栅元计数器和两个截面计数器。第一个栅元计数器统计全堆燃料区域的通量，第二个栅元计数器统计三个不同位置（0，0）、（3，2）、（-3，2）的燃料组件的通量。第三个栅元计数器统计三个不同位置（0，0）、（3，2）、（-3，2）的燃料组件的燃料区域的功率。第四个栅元计数器统计两根不同的燃料棒的裂变反应率。第五个栅元计数器统计某根燃料棒三个不同的轴向节块的分能群吸收反应率。第一个截面计数器统计某个轴向节块的各核素的单群截面：H1的弹性散射截面（-3），O16的总截面（-1）和吸收截面（-2），B10的弹性散射截面（-3）和B11和辐射俘获截面（102）。该材料为该问题实际用到的一种材料。第二个截面计数器统计某个轴向节块的各核素的单群截面：N14的总截面（-1）、吸收截面（-2）、弹性散射截面（-3）、裂变截面（-6）、n-2n截面（16）、辐射俘获截面（102）和n-a截面（107）。该材料为“虚拟的”材料，临界计算实际没有用到这种材料。

算例 6-2

|  |
| --- |
| ///// Tally of MC full-core benchmark. Qiu Yishu 2012-09-15 /////  universe 0  cell 1 -11 : 19 : 9 mat = 0 void = 1 // outside core  cell 2 11 & -19 & 8 & -9 mat = 1 vol = 1.3575E+07 // reactor vessel  cell 3 12 & -18 & 7 & -8 mat = 2 vol = 1.1393E+07 // downcomer  cell 6 18 & -19 & -8 mat = 3 vol = 1.3180E+06 // upper core plate region  cell 7 11 & -12 & -8 mat = 4 vol = 4.9424E+06 // lower core plate region  cell 8 17 & -18 & -6 mat = 5 vol = 1.3268E+06 // top nozzle region  cell 9 12 & -13 & -6 mat = 6 vol = 6.6339E+05 // bottom nozzle region  cell 10 16 & -17 & -6 mat = 7 vol = 2.2113E+06 // top FA region  cell 11 13 & -14 & -6 mat = 8 vol = 1.1056E+06 // bottom FA region  cell 12 16 & -18 & 6 & -7 mat = 9 vol = 8.5323E+05 // radial hot water  cell 13 12 & -14 & 6 & -7 mat = 10 vol = 4.2662E+05 // radial cold water  cell 14 14 & -16 & -7 fill= 1 vol = 5.0225E+07  // assembly zone  universe 1 move = -224.91 -224.91 -183 lat = 1 pitch = 21.42 21.42 1 scope = 21 21 1 fill=  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2  2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2  2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  universe 2 fill = // single reflector lattice  cell 21 16 mat=9 // upper radial reflector  cell 22 -16 mat=10 // lower radial reflector  universe 3 lat = 1 pitch = 1.26 1.26 1 scope = 17 17 1 fill =  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 4 4 4  4 4 4 4 5 4 4 4 4 4 4 4 5 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 5 4 4 4 4 4 4 4 5 4 4 4 4  4 4 4 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  universe 4 lat=1 pitch = 1 1 3.66 scope = 1 1 100 fill =  6\*50 7\*50  universe 5 lat=1 pitch = 1 1 3.66 scope = 1 1 100 fill =  8\*50 9\*50  universe 6 move = 0.63 0.63 1.83  cell 100 -1 mat=11  cell 24 1 & -2 mat=12  cell 25 2 mat=2  universe 7 move = 0.63 0.63 1.83  cell 101 -1 mat =11  cell 27 1 & -2 mat =12  cell 28 2 mat =22  universe 8 move = 0.63 0.63 1.83  cell 29 -3 mat =2  cell 30 3 & -4 mat =12  cell 31 4 mat =2  universe 9 move = 0.63 0.63 1.83  cell 32 -3 mat =22  cell 33 3 & -4 mat =12  cell 34 4 mat =22  SURFACE  surf 1 cz 0.41  surf 2 cz 0.475  surf 3 cz 0.56  surf 4 cz 0.62  surf 5 cz 1.26  surf 6 cz 187.6  surf 7 cz 209  surf 8 cz 229  surf 9 cz 249 bc =1 // radial boundary  surf 11 pz -229 bc =1 // bottom boundary  surf 12 pz -199  surf 13 pz -193  surf 14 pz -183  surf 15 pz 0  surf 16 pz 183  surf 17 pz 203  surf 18 pz 215  surf 19 pz 223 bc =1 // upper boundary  MATERIAL  mat 1 -7.9 // reactor vessel  26054.30c -5.4371E-02 26056.30c -8.8501E-01 26057.30c -2.0801E-02  26058.30c -2.8216E-03 28058.30c -6.7198E-03 28060.30c -2.6776E-03  28061.30c -1.1830E-04 28062.30c -3.8350E-04 28064.30c -1.0080E-04  25055.30c -1.0000E-02 42000.60c -6.0000E-03 28058.30c -3.6746E-03  28060.30c -1.9336E-04 28061.30c -1.3200E-04 24050.30c -1.0435E-04  24052.30c -2.0925E-03 24053.30c -2.4185E-04 24054.30c -6.1325E-05  6000.30c -2.5000E-03 29063.30c -1.3696E-03 29065.30c -6.3040E-04  mat 2 -0.74 // Borated water below midplane  1001.30c 2.0000E+00 8016.30c 1.0000E+00 5010.30c 6.4900E-04  5011.30c 2.6890E-03  sab 2 lwtr.60t  mat 22 -0.66 // Borated water above midplane  1001.30c 2.0000E+00 8016.30c 1.0000E+00 5010.30c 6.4900E-04  5011.30c 2.6890E-03  sab 22 lwtr.60t  mat 3 -4.28 // top core plate region  1001.30c -8.6117E-03 8016.30c -6.8337E-02 5010.30c -2.7764E-05  5011.30c -1.2648E-04 26054.30c -3.5954E-02 26056.30c -5.8522E-01  26057.30c -1.3755E-02 26058.30c -1.8658E-03 28058.30c -5.5815E-02  28060.30c -2.2240E-02 28061.30c -9.8261E-04 28062.30c -3.1854E-03  28064.30c -8.3725E-04 25055.30c -1.8458E-02 28058.30c -8.4783E-03  28060.30c -4.4613E-04 28061.30c -3.0456E-04 24050.30c -7.3191E-03  24052.30c -1.4677E-01 24053.30c -1.6963E-02 24054.30c -4.3013E-03  mat 4 -7.184 // bottom plate region  1001.30c -1.1505E-03 8016.30c -9.1296E-03 5010.30c -3.7092E-06  5011.30c -1.6897E-05 26054.30c -3.8556E-02 26056.30c -6.2759E-01  26057.30c -1.4750E-02 26058.30c -2.0009E-03 28058.30c -5.9855E-02  28060.30c -2.3850E-02 28061.30c -1.0537E-03 28062.30c -3.4159E-03  28064.30c -8.9785E-04 25055.30c -1.9794E-02 28058.30c -9.0920E-03  28060.30c -4.7842E-04 28061.30c -3.2660E-04 24050.30c -7.8489E-03  24052.30c -1.5739E-01 24053.30c -1.8191E-02 24054.30c -4.6127E-03  mat 5 -1.746 // top nozzle region  1001.30c -3.5887E-02 8016.30c -2.8478E-01 5010.30c -1.1570E-04  5011.30c -5.2708E-04 26054.30c -2.6440E-02 26056.30c -4.3037E-01  26057.30c -1.0115E-02 26058.30c -1.3721E-03 28058.30c -4.1046E-02  28060.30c -1.6355E-02 28061.30c -7.2261E-04 28062.30c -2.3425E-03  28064.30c -6.1571E-04 25055.30c -1.3574E-02 28058.30c -6.2349E-03  28060.30c -3.2808E-04 28061.30c -2.2397E-04 24050.30c -5.3825E-03  24052.30c -1.0793E-01 24053.30c -1.2475E-02 24054.30c -3.1632E-03  mat 6 -2.53 // bottom nozzle region  1001.30c -2.4501E-02 8016.30c -1.9443E-01 5010.30c -7.8992E-05  5011.30c -3.5985E-04 26054.30c -3.0411E-02 26056.30c -4.9501E-01  26057.30c -1.1635E-02 26058.30c -1.5782E-03 28058.30c -4.7211E-02  28060.30c -1.8812E-02 28061.30c -8.3114E-04 28062.30c -2.6944E-03  28064.30c -7.0819E-04 25055.30c -1.5613E-02 28058.30c -7.1713E-03  28060.30c -3.7736E-04 28061.30c -2.5761E-04 24050.30c -6.1909E-03  24052.30c -1.2414E-01 24053.30c -1.4348E-02 24054.30c -3.6383E-03  mat 7 -1.762 // top FA region  1001.30c -2.9286E-02 8016.30c -2.3239E-01 5010.30c -9.4416E-05  5011.30c -4.3012E-04 40000.60c -7.3780E-01  mat 8 -3.044 // bottom FA region  1001.30c -1.6291E-02 8016.30c -1.2928E-01 5010.30c -5.2523E-05  5011.30c -2.3927E-04 40000.60c -7.3780E-01  mat 9 -4.28 // upper radial reflector  1001.30c -8.6117E-03 8016.30c -6.8337E-02 5010.30c -2.7764E-05  5011.30c -1.2648E-04 26054.30c -3.5954E-02 26056.30c -5.8522E-01  26057.30c -1.3755E-02 26058.30c -1.8658E-03 28058.30c -5.5815E-02  28060.30c -2.2240E-02 28061.30c -9.8261E-04 28062.30c -3.1854E-03  28064.30c -8.3725E-04 25055.30c -1.8458E-02 28058.30c -8.4783E-03  28060.30c -4.4613E-04 28061.30c -3.0456E-04 24050.30c -7.3191E-03  24052.30c -1.4677E-01 24053.30c -1.6963E-02 24054.30c -4.3013E-03  mat 10 -4.32 // lower radial reflector  1001.30c -9.5661E-03 8016.30c -7.5911E-02 5010.30c -3.0841E-05  5011.30c -1.4050E-04 26054.30c -3.5621E-02 26056.30c -5.7981E-01  26057.30c -1.3628E-02 26058.30c -1.8485E-03 28058.30c -5.5298E-02  28060.30c -2.2034E-02 28061.30c -9.7351E-04 28062.30c -3.1559E-03  28064.30c -8.2950E-04 25055.30c -1.8287E-02 28058.30c -8.3998E-03  28060.30c -4.4200E-04 28061.30c -3.0174E-04 24050.30c -7.2514E-03  24052.30c -1.4541E-01  24053.30c -1.6806E-02 24054.30c -4.2615E-03  mat 11 -10.062 // fuel  92234.30c 4.9476E-06 92235.30c 4.8218E-04 92236.30c 9.0402E-05  92238.30c 2.1504E-02 93237.30c 7.3733E-06 94238.30c 1.5148E-06  94239.30c 1.3955E-04 94240.30c 3.4405E-05 94241.30c 2.1439E-05  94242.30c 3.7422E-06 95241.30c 4.5041E-07 95242.30c 9.2300E-09  96243.30c 4.7878E-07 96242.30c 1.0485E-07 96243.30c 1.4300E-09  96244.30c 8.8760E-08 96245.30c 3.5300E-09 42095.30c 2.6497E-05  43099.30c 3.2772E-05 44101.30c 3.0742E-05 44103.30c 2.3505E-06  47109.30c 2.0009E-06 54135.30c 1.0800E-08 55133.30c 3.4612E-05  60143.30c 2.6078E-05 60145.30c 1.9898E-05 62147.30c 1.6128E-06  62149.30c 1.1627E-07 62150.30c 7.1727E-06 62151.30c 5.4947E-07  62152.30c 3.0221E-06 63153.30c 2.6209E-06 64155.30c 1.5400E-09  8016.30c 4.5737E-02  mat 12 -5.77 // cladding composition also the guide tube ma  40000.60c -7.3780E-01  mat 13 1.0 // a material which is not used in the problem  7014.30c 1.0  CRITICALITY  PowerIter population = 100000 250 1250 // keff0 = 1.0  InitSrc point = 1.26 0 0.1  ParallelBank 1  Tally  celltally 1 Type = 1 filter = 1 0 0 0 1 integral = 2  cell = 14 > 0 > 0 > 0 > 100:101  celltally 2 Type = 1 filter = 1 1  cell = 14 > 221  14 > 266  14 > 260  celltally 3 Type = 2 filter = 1 1 0 0 1 integral = 2\*3  cell = 14 > 221 > 0 > 0 > 100:101  14 > 266 > 0 > 0 > 100:101  14 > 260 > 0 > 0 > 100:101  celltally 4 Type = 3 filter = 1 1 1  Cell = 14 > 266 > 1  14 > 266 > 164  celltally 5 Type = 4 Energy=6.25E-07  Cell = 14 > 266 > 164 > 1 > 100  14 > 266 > 164 > 50 > 100  14 > 266 > 164 > 100 > 101  CsTally 6 Cell = 14 > 266 > 164 > 49 > 100  Mat = 2 MT = -3, -1 -2, -3, 102  csTally 7 Cell = 14 > 266 > 164 > 51 > 101  Mat = 13 MT = -1 -2 -3 -6 16 17 102 103 107 |

# 第7章 源收敛诊断与加速

蒙卡临界计算采用裂变源迭代法，裂变源分布的收敛速度取决于系统占优比。对于高占优比的系统（如全堆、乏燃料池），裂变源收敛可能需要数百代甚至上千代，从而导致大量计算时间耗费在对统计结果无直接贡献的非活跃代。

## 7.1 香农熵统计

RMC源收敛模块提供香农熵（Shannon Entropy）统计功能，定性地反映裂变源分布的收敛趋势，帮助用户选择合理的非活跃代中子数。

香农熵的定义为：



其中，为第i个网格的裂变源份额。

香农熵网格划分通过以下输入卡定义：

|  |
| --- |
| SeMesh [Scope = < xNum yNum zNum >]  [Bound = <xMin xMax yMin yMax zMin zMax>] |

其中，

* **SeMesh**为香农熵网格输入卡的关键词。
* **Scope**选项卡指定香农熵网格在x、y、z方向的网格划分数量。**xNum**、**yNum**、**zNum**为正整数。
* **Bound**选项卡指定香农熵网格在x、y、z方向的边界范围。若在**Scope**选项卡中指定某个方向的网格划分数量为-1，则默认网格边界为（-∞，+∞），此时**Bound**选项卡中相应方向的边界不产生实际意义。注意，用户应保证网格范围能够覆盖中子跟踪区域，否则会造成香农熵的统计结果错误。

## 7.2 裂变矩阵统计

RMC源收敛模块还提供裂变矩阵（Fission Matrix）统计功能。基于裂变矩阵，可以诊断蒙卡低抽样（undersampling），并计算占优比。除了使用裂变矩阵计算占优比以外，RMC还支持基于误差传递矩阵的占优比计算方法，本次发布版本暂不提供。

裂变矩阵的定义为：裂变矩阵*F*中的每个元素表示区域*j*中出生的中子在区域*i*中产生裂变中子的几率。



裂变矩阵统计卡的输入方式与香农熵统计卡类似：

|  |
| --- |
| FmMesh [Scope = < xNum yNum zNum >]  [Bound = <xMin xMax yMin yMax zMin zMax>] |

其中，

* **FmMesh**为裂变矩阵网格输入卡的关键词。
* **Scope**选项卡指定香农熵网格在x、y、z方向的网格划分数量。**xNum**、**yNum**、**zNum**为正整数。裂变矩阵规模 = (**xNum**\***yNum\*zNum**)2，过细的网格划分可能降低计算效率。
* **Bound**选项卡指定香农熵网格在x、y、z方向的边界范围。若在**Scope**选项卡中指定某个方向的网格划分数量为-1，则默认网格边界为（-∞，+∞），此时**Bound**选项卡中相应方向的边界不产生实际意义。注意，用户应保证网格范围能够覆盖中子跟踪区域，否则会造成裂变矩阵的统计结果错误。

## 7.3 源收敛加速

RMC使用渐近超历史方法和渐近维兰德方法加速源收敛，减少非活跃代代数。本次发布的版本只提供渐近超历史加速方法。

源收敛加速功能的输入卡为：

|  |
| --- |
| **AcceFsc [Factor = <f(1) p(1) f(2) p(2) …f(n) p(n)>]**  **[AutoFactor = <inactive\_cycle>]** |

其中，

* **AcceFsc**为香农熵网格输入卡的关键词。
* **Factor**选项卡和**AutoFactor**选项卡用来指定渐近超历史加速方法的参数，后面将单独予以讨论。

### 7.3.1 Factor选项卡

**Factor**选项卡用于自定义加速参数。输入卡中的f(i)称为加速因子，p(i)称为加速周期，其含义是：在最初的p(1)代，使用加速因子f(1)；在接下来的p(2)代，使用加速因子f(2)；依此类推。这里不详细介绍渐近超历史加速方法的原理，仅对加速因子和加速周期这两个参数介绍如下：

加速因子f(i)越大，加速效果越明显，但统计涨落也可能越大。用户需要定义的是一组渐近递减的加速因子{f(i)}，譬如“16 → 8 → 4 → 2”。注意，加速因子不宜过大（建议小于20），否则可能造成不稳定。

加速周期p(i > 1)一般设置为5-10代。第一个加速周期p(1)通常设置得较大，因为它所对应的加速因子最大，起主要的加速效果。

渐近超历史加速方法作用于最初的个非活跃代，它所产生的加速效果大致相当于未使用加速时的个非活跃代。例如，某个全堆临界计算在未使用加速时需要大约200个非活跃代，通过使用“factor = 16 10 8 5 4 5 2 5”加速最初的10+5+5+5=25个非活跃代，即可达到基本相当的收敛效果。

### 7.3.2 AutoFactor选项卡

作为**Factor**选项卡的替代功能，RMC程序提供了自动生成源收敛加速参数的**AutoFactor**选项卡。对于普通用户，推荐使用**AutoFactor**选项卡来代替**Factor**选项卡中的自定义输入。在该选项卡中，用户指定未使用加速方法时的非活跃代代数**inactive\_cycle**，程序内部将自动生成渐近超历史方法的参数序列。假设未使用加速方法时的非活跃代代数为N，那么使用**AutoFactor**选项卡后的所需非活跃代数约为：



例如，某全堆计算需要300代收敛，那么使用自动源收敛加速之后，所需的非活跃代可设置为：。若**AutoFactor**选项卡中指定的非活跃代代数N小于30，程序将关闭源收敛加速功能。

### 7.3.3 源收敛加速的注意事项

使用源收敛加速方法，应当在临界计算模块的PowerIter输入卡中使用合理的配套参数，包括：

1）在**Keff0**选项卡中指定合理的初始有效增殖系数，使其接近真实Keff。

2）在**Population**选项卡中指定足够大的每代粒子数。对于全堆临界计算，建议每代粒子数大于100,000。

3）在**Population**选项卡中指定合理的非活跃代代数。非活跃代代数应当大于等于源收敛加速代数。

## 7.4 源收敛模块输入示例

### 7.4.1 OECD基准题源收敛加速

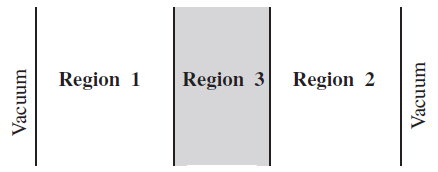


图7-1 OECD蒙卡源收敛基准题

图7-1描述的是OECD蒙卡源收敛问题研究的一个基准题。该基准题是由3块1维平板组成的弱耦合系统，两侧为20cm厚的燃料区，中间为30cm水层。初始源位置位于左侧燃料区中心，常规源迭代收敛所需的非活跃代约为1000代。通过RMC源收敛加速方法，非活跃代可减少至100代以内。在算例7-1的源收敛模块中，指定了香农熵网格数量为70，宽度为1.0cm。该算例需要模拟的粒子数较多，推荐使用并行机完成计算。

算例 7-1

|  |
| --- |
| ///// OECD MC convergence benchmark 3 . SHE Ding 2012-09-12 /////  UNIVERSE 0  cell 1 1 & -2 mat = 1  cell 2 2 & -3 mat = 2  cell 3 3 & -4 mat = 1  cell 4 -1 : 4 void = 1  SURFACE  surf 1 px 0  surf 2 px 20  surf 3 px 50  surf 4 px 70  MATERIAL  mat 1 9.9487E-02  92235.30c 7.6864E-05  92238.30c 6.8303E-04  8016.30c 3.7258E-02  1001.30c 5.9347E-02  7014.30c 2.1220E-03  mat 2 1.0006E-01  1001.30c 6.6706E-02  8016.30c 3.3353E-02  CRITICALITY  PowerIter population = 500000 100 1000  InitSrc point = 10 0 0  Tally  Celltally 1 type = 1 cell = 1 3  CONVERGENCE  SeMesh Scope = 70 -1 -1 Bound = 0 70 0 1 0 1  FmMesh Scope = 70 -1 -1 Bound = 0 70 0 1 0 1  AcceFsc Autofactor = 1000 |

### 7.4.2 Hoogenboom全堆基准题源收敛加速

算例7-2描述的是Hoogenboom蒙卡全堆基准题。常规源迭代收敛所需的非活跃代约为250代，通过使用自动源收敛加速参数，非活跃代代数设置为35代。在源收敛输入模块中，定义了建立在组件上的香农熵网格（21×21），用于帮助用户诊断源收敛趋势。该算例需要模拟的粒子数较多，推荐使用并行机完成计算。

算例 7-2

|  |
| --- |
| /// Convergence Acceleration of MC full core Benchmark. SHE Ding 2012-09-12 ///  Universe 0  cell 1 -11 : 19 : 9 mat = 0 void = 1 // outside core  cell 2 11 & -19 & 8 & -9 mat = 1 vol = 1.3575E+07 // reactor vessel  cell 3 12 & -18 & 7 & -8 mat = 2 vol = 1.1393E+07 // downcomer  cell 6 18 & -19 & -8 mat = 3 vol = 1.3180E+06 // upper core plate region  cell 7 11 & -12 & -8 mat = 4 vol = 4.9424E+06 // lower core plate region  cell 8 17 & -18 & -6 mat = 5 vol = 1.3268E+06 // top nozzle region  cell 9 12 & -13 & -6 mat = 6 vol = 6.6339E+05 // bottom nozzle region  cell 10 16 & -17 & -6 mat = 7 vol = 2.2113E+06 // top FA region  cell 11 13 & -14 & -6 mat = 8 vol = 1.1056E+06 // bottom FA region  cell 12 16 & -18 & 6 & -7 mat = 9 vol = 8.5323E+05 // radial hot water  cell 13 12 & -14 & 6 & -7 mat = 10 vol = 4.2662E+05 // radial cold water  cell 14 14 & -16 & -7 fill= 1 vol = 5.0225E+07  // assembly zone  Universe 1 move = -224.91 -224.91 -183 lat = 1 pitch = 21.42 21.42 1 scope = 21 21 1 fill=  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2  2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2  2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2  2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2  Universe 2 fill = // single reflector lattice  cell 21 16 mat=9 // upper radial reflector  cell 22 -16 mat=10 // lower radial reflector  Universe 3 lat = 1 pitch = 1.26 1.26 1 scope = 17 17 1 fill =  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 4 4 4  4 4 4 4 5 4 4 4 4 4 4 4 5 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 5 4 4 4 4 4 4 4 5 4 4 4 4  4 4 4 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4  Universe 4 lat=1 pitch = 1 1 3.66 scope = 1 1 100 fill =  6\*50 7\*50  Universe 5 lat=1 pitch = 1 1 3.66 scope = 1 1 100 fill =  8\*50 9\*50  Universe 6 move = 0.63 0.63 1.83  cell 100 -1 mat=11  cell 24 1 & -2 mat=12  cell 25 2 mat=2  Universe 7 move = 0.63 0.63 1.83  cell 101 -1 mat =11  cell 27 1 & -2 mat =12  cell 28 2 mat =22  Universe 8 move = 0.63 0.63 1.83  cell 29 -3 mat =2  cell 30 3 & -4 mat =12  cell 31 4 mat =2  Universe 9 move = 0.63 0.63 1.83  cell 32 -3 mat =22  cell 33 3 & -4 mat =12  cell 34 4 mat =22  SURFACE  surf 1 cz 0.41  surf 2 cz 0.475  surf 3 cz 0.56  surf 4 cz 0.62  surf 5 cz 1.26  surf 6 cz 187.6  surf 7 cz 209  surf 8 cz 229  surf 9 cz 249 bc =1 // radial boundary  surf 11 pz -229 bc =1 // bottom boundary  surf 12 pz -199  surf 13 pz -193  surf 14 pz -183  surf 15 pz 0  surf 16 pz 183  surf 17 pz 203  surf 18 pz 215  surf 19 pz 223 bc =1 // upper boundary  MATERIAL  mat 1 -7.9 // reactor vessel  26054.30c -5.4371E-02 26056.30c -8.8501E-01 26057.30c -2.0801E-02  26058.30c -2.8216E-03 28058.30c -6.7198E-03 28060.30c -2.6776E-03  28061.30c -1.1830E-04 28062.30c -3.8350E-04 28064.30c -1.0080E-04  25055.30c -1.0000E-02 42000.60c -6.0000E-03 28058.30c -3.6746E-03  28060.30c -1.9336E-04 28061.30c -1.3200E-04 24050.30c -1.0435E-04  24052.30c -2.0925E-03 24053.30c -2.4185E-04 24054.30c -6.1325E-05  6000.30c -2.5000E-03 29063.30c -1.3696E-03 29065.30c -6.3040E-04  mat 2 -0.74 // Borated water below midplane  1001.30c 2.0000E+00 8016.30c 1.0000E+00 5010.30c 6.4900E-04  5011.30c 2.6890E-03  sab 2 lwtr.60t  mat 22 -0.66 // Borated water above midplane  1001.30c 2.0000E+00 8016.30c 1.0000E+00 5010.30c 6.4900E-04  5011.30c 2.6890E-03  sab 22 lwtr.60t  mat 3 -4.28 // top core plate region  1001.30c -8.6117E-03 8016.30c -6.8337E-02 5010.30c -2.7764E-05  5011.30c -1.2648E-04 26054.30c -3.5954E-02 26056.30c -5.8522E-01  26057.30c -1.3755E-02 26058.30c -1.8658E-03 28058.30c -5.5815E-02  28060.30c -2.2240E-02 28061.30c -9.8261E-04 28062.30c -3.1854E-03  28064.30c -8.3725E-04 25055.30c -1.8458E-02 28058.30c -8.4783E-03  28060.30c -4.4613E-04 28061.30c -3.0456E-04 24050.30c -7.3191E-03  24052.30c -1.4677E-01 24053.30c -1.6963E-02 24054.30c -4.3013E-03  mat 4 -7.184 // bottom plate region  1001.30c -1.1505E-03 8016.30c -9.1296E-03 5010.30c -3.7092E-06  5011.30c -1.6897E-05 26054.30c -3.8556E-02 26056.30c -6.2759E-01  26057.30c -1.4750E-02 26058.30c -2.0009E-03 28058.30c -5.9855E-02  28060.30c -2.3850E-02 28061.30c -1.0537E-03 28062.30c -3.4159E-03  28064.30c -8.9785E-04 25055.30c -1.9794E-02 28058.30c -9.0920E-03  28060.30c -4.7842E-04 28061.30c -3.2660E-04 24050.30c -7.8489E-03  24052.30c -1.5739E-01 24053.30c -1.8191E-02 24054.30c -4.6127E-03  mat 5 -1.746 // top nozzle region  1001.30c -3.5887E-02 8016.30c -2.8478E-01 5010.30c -1.1570E-04  5011.30c -5.2708E-04 26054.30c -2.6440E-02 26056.30c -4.3037E-01  26057.30c -1.0115E-02 26058.30c -1.3721E-03 28058.30c -4.1046E-02  28060.30c -1.6355E-02 28061.30c -7.2261E-04 28062.30c -2.3425E-03  28064.30c -6.1571E-04 25055.30c -1.3574E-02 28058.30c -6.2349E-03  28060.30c -3.2808E-04 28061.30c -2.2397E-04 24050.30c -5.3825E-03  24052.30c -1.0793E-01 24053.30c -1.2475E-02 24054.30c -3.1632E-03  mat 6 -2.53 // bottom nozzle region  1001.30c -2.4501E-02 8016.30c -1.9443E-01 5010.30c -7.8992E-05  5011.30c -3.5985E-04 26054.30c -3.0411E-02 26056.30c -4.9501E-01  26057.30c -1.1635E-02 26058.30c -1.5782E-03 28058.30c -4.7211E-02  28060.30c -1.8812E-02 28061.30c -8.3114E-04 28062.30c -2.6944E-03  28064.30c -7.0819E-04 25055.30c -1.5613E-02 28058.30c -7.1713E-03  28060.30c -3.7736E-04 28061.30c -2.5761E-04 24050.30c -6.1909E-03  24052.30c -1.2414E-01 24053.30c -1.4348E-02 24054.30c -3.6383E-03  mat 7 -1.762 // top FA region  1001.30c -2.9286E-02 8016.30c -2.3239E-01 5010.30c -9.4416E-05  5011.30c -4.3012E-04 40000.60c -7.3780E-01  mat 8 -3.044 // bottom FA region  1001.30c -1.6291E-02 8016.30c -1.2928E-01 5010.30c -5.2523E-05  5011.30c -2.3927E-04 40000.60c -7.3780E-01  mat 9 -4.28 // upper radial reflector  1001.30c -8.6117E-03 8016.30c -6.8337E-02 5010.30c -2.7764E-05  5011.30c -1.2648E-04 26054.30c -3.5954E-02 26056.30c -5.8522E-01  26057.30c -1.3755E-02 26058.30c -1.8658E-03 28058.30c -5.5815E-02  28060.30c -2.2240E-02 28061.30c -9.8261E-04 28062.30c -3.1854E-03  28064.30c -8.3725E-04 25055.30c -1.8458E-02 28058.30c -8.4783E-03  28060.30c -4.4613E-04 28061.30c -3.0456E-04 24050.30c -7.3191E-03  24052.30c -1.4677E-01 24053.30c -1.6963E-02 24054.30c -4.3013E-03  mat 10 -4.32 // lower radial reflector  1001.30c -9.5661E-03 8016.30c -7.5911E-02 5010.30c -3.0841E-05  5011.30c -1.4050E-04 26054.30c -3.5621E-02 26056.30c -5.7981E-01  26057.30c -1.3628E-02 26058.30c -1.8485E-03 28058.30c -5.5298E-02  28060.30c -2.2034E-02 28061.30c -9.7351E-04 28062.30c -3.1559E-03  28064.30c -8.2950E-04 25055.30c -1.8287E-02 28058.30c -8.3998E-03  28060.30c -4.4200E-04 28061.30c -3.0174E-04 24050.30c -7.2514E-03  24052.30c -1.4541E-01  24053.30c -1.6806E-02 24054.30c -4.2615E-03  mat 11 -10.062 // fuel  92234.30c 4.9476E-06 92235.30c 4.8218E-04 92236.30c 9.0402E-05  92238.30c 2.1504E-02 93237.30c 7.3733E-06 94238.30c 1.5148E-06  94239.30c 1.3955E-04 94240.30c 3.4405E-05 94241.30c 2.1439E-05  94242.30c 3.7422E-06 95241.30c 4.5041E-07 95242.30c 9.2300E-09  96243.30c 4.7878E-07 96242.30c 1.0485E-07 96243.30c 1.4300E-09  96244.30c 8.8760E-08 96245.30c 3.5300E-09 42095.30c 2.6497E-05  43099.30c 3.2772E-05 44101.30c 3.0742E-05 44103.30c 2.3505E-06  47109.30c 2.0009E-06 54135.30c 1.0800E-08 55133.30c 3.4612E-05  60143.30c 2.6078E-05 60145.30c 1.9898E-05 62147.30c 1.6128E-06  62149.30c 1.1627E-07 62150.30c 7.1727E-06 62151.30c 5.4947E-07  62152.30c 3.0221E-06 63153.30c 2.6209E-06 64155.30c 1.5400E-09  8016.30c 4.5737E-02  mat 12 -5.77 // cladding composition also the guide tube ma  40000.60c -7.3780E-01  CRITICALITY  PowerIter population = 1000000 35 535 // keff0 = 1.0  InitSrc point = 1.26 0 0.1  ParallelBank 1  CONVERGENCE  SeMesh Scope = 21 21 1 Bound = -224.91 224.91 -224.91 224.91 -229 223  AcceFsc Autofactor = 250 |

# 第8章 燃耗计算

## 8.1 蒙卡燃耗计算概述

蒙卡燃耗计算是蒙卡临界计算和点燃耗计算的相互耦合。传统的蒙卡燃耗程序（如MCBurn、MCODE）一般采用第三方接口，通过外耦合的方式，循环调用蒙卡输运程序（如MCNP）和点燃耗程序（如ORIGEN-2）。

在RMC程序当中，内嵌有自主开发的点燃耗计算模块DEPTH。DEPTH采用矩阵指数法，能够精确、高效地处理含约1500种核素的精细燃耗链。RMC燃耗计算的基本流程是，首先通过临界计算（连续能量）模块，得到中子通量、单群反应截面等数据，传递给点燃耗模块DEPTH；DEPTH完成点燃耗计算，得到新的核素密度，传递给RMC临界计算模块。通过数据的往返传递，从而完成燃耗计算的全过程。

与传统的蒙卡燃耗程序（如MCBurn，MCODE）相比，RMC燃耗计算功能的基本特点包括：

（1）含内耦合燃耗计算模块，能够处理含约1500种核素的精细燃耗链；整合了ORIGEN-S和ORIGEN-2的最新点燃耗数据库。

（2）支持含重复结构的燃耗计算，无需用户为每个燃耗区指定不同的初始材料，大大减少了用户输入。

（3）支持对大规模燃耗区的“并行临界+并行点燃耗”计算。在并行点燃耗计算模式中，燃耗区被平均分配到各个进程，各自独立地完成点燃耗计算。

## 8.2 燃耗模块输入卡

燃耗模块的输入卡包括：

|  |
| --- |
| **BURNUP**  **BurnCell < cell\_1 cell\_2 cell\_3 … >**  **TimeStep <time\_1 time\_2 … time\_n>**  **Power <power\_1 power\_2 … power\_n>**  **SubStep <sub\_num>**  **Inherent <fraction>**  **AceLib <lib\_type>**  **Strategy <flag>**  **Solver <flag>**  **Parallel <flag>**  **OutputCell <cell\_vector>** |

其中，

* **BURNUP**为燃耗计算模块的关键词。
* **BurnCell**输入卡指定可燃耗的栅元，输入的参数为简单栅元编号cell\_i（而非层级栅元的向量形式）。程序将自动搜索所有底层栅元为cell\_i的栅元向量，将它们视为独立的燃耗区。即每个燃耗栅元将自动展开生成独立的填充材料，即使它们的初始材料相同。自动展开独立燃耗区的功能，对于含重复结构的燃耗计算十分重要，大大减少了用户的输入负担。
* **TimeStep**输入卡指定各个燃耗步的时间步长（天）。注意这里输入的是分步时间，而非累积时间。
* **Power**输入卡指定各个燃耗步的功率密度（W/gHM）。程序将根据初始重金属的总质量得到实际总功率，并在每个燃耗步当中根据各燃耗区的功率分布得到每个燃耗区的实际功率。为计算初始重金属总质量和功率分布，用户应为燃耗栅元指定正确的体积（见3.2节中的栅元输入卡）。
* **SubStep**输入卡指定点燃耗计算的步数（范围1 - 9999），缺省值为10步。对于一般用户，不推荐使用该输入卡修改默认参数。
* **Inherent**输入卡指定用于继承重要核素的吸收份额和质量份额，缺省值分别为0.99和0.999。点燃耗计算需要处理约1500种核素，临界计算显然只能（也只需）继承其中的一部分重要核素。继承的方式是：首先，材料卡中输入的核素始终被继承；然后根据其余核素在总吸收率和总质量当中所占的份额，从高到低继承，直至继承核素的总份额达到用户指定的份额。若用户需要特别关注某些重要核素，建议将其写在材料卡中，保证这些核素始终被继承。继承的核素越多，计算结果越准确，但时间和内存消耗也越大。
* **AceLib**输入卡指定继承的核素所采用的数据库，例如“AceLib = .30c”。对于在材料卡中输入的核素，继承其原来的数据库。为保证燃耗计算的精度，用户应当根据栅元温度指定与之匹配的ACE数据库，且该温度点的数据库应尽量包含完整的核素清单。在含多个温度值的燃耗计算中，RMC能够根据栅元温度自动匹配数据库，但本次发布暂不提供该功能。
* **Strategy**输入卡指定燃耗步策略。**Strategy = 0**（默认值）表示使用起点近似燃耗策略，**Strategy = 1**表示使用预估-修正燃耗步策略，**Strategy = 2**表示使用中点近似燃耗策略。通常只要设置合理的燃耗步长，起点燃耗策略能满足大多数燃耗计算需求。
* **Solver**输入卡指定点燃耗方程求解方法。**Solver = 1**表示线性子链法，**Solver = 2**（默认值）表示切比雪夫有理近似法，**Solver = 3**表示样条有理近似法，**Solver = 4**表示拉盖尔多项式近似法。对于一般用户，建议使用缺省参数。
* **Parallel**输入卡指定在并行临界计算时是否使用并行燃耗计算，该选项仅对RMC并行版本生效。**Parallel = 0**（默认值）表示不使用并行燃耗计算，**Parallel = 1**表示使用并行燃耗计算。在并行燃耗计算模式下，燃耗区被平均分配到各个进程，各自独立地完成点燃耗计算。对于大规模燃耗（含大量燃耗区）计算，使用并行燃耗计算能显著减少计算时间。
* **Outputcell**卡用于输出指定栅元的核素密度，存于后缀名为“.den”的文件中。此外，程序还将默认输出总原子密度，存于后缀名为“.den\_tot”的文件中。

需要指出的是，对于燃耗计算，蒙卡临界计算过程中统计大量的反应率，耗时较长；对于大规模燃耗计算（燃耗区多达上千甚至上万），点燃耗计算本身的耗时也很长。因此，推荐用户采用并行版本RMC计算燃耗问题，并在必要时开启并行燃耗模式（**Parallel = 1**）。

理论上，RMC燃耗计算支持任意数量的燃耗区，但实际上受限于计算机硬件。实测表明，含10000个燃耗区的燃耗计算大约需要耗费1.5G内存，在此基础上每增加10000个燃耗区约增加1G内存。

## 8.3 燃耗模块输入示例

### 8.3.1 PWR栅元燃耗算例

PWR栅元燃耗算例只包含一个燃耗区，即栅元3，温度为293.6K。燃耗历史总计包括72个燃耗步，每个燃耗步的功率密度为30W/gHM，燃耗步长分别为“3.333333 13.333333 16.666667 33.333333\*69”天，对应的累积燃耗深度为“0.1 0.5 1.0 2.0 … 70.0”MWD/KgHM。

算例 8-1

|  |
| --- |
| ////// Burnup calculation of PWR pin. SHE Ding 2012-07-01 //////  UNIVERSE 0  cell 3 -1 mat = 1 vol = 1.0 // Fuel  cell 4 1 & -2 mat = 3 // Air  cell 5 2 & -3 mat = 4 // Zr  cell 6 3 & 4 & -5 & 6 & -7 mat = 5 // water  SURFACE  surf 1 cz 0.4096  surf 2 cz 0.4178  surf 3 cz 0.4750  surf 4 px -0.63 bc = 1  surf 5 px 0.63 bc = 1  surf 6 py -0.63 bc = 1  surf 7 py 0.63 bc = 1  MATERIAL  mat 1 -10.196  92235.30c 6.9100E-03  92238.30c 2.2062E-01  8016.30c 4.5510E-01  34079.30c 1.0E-25 36083.30c 1.0E-25 36085.30c 1.0E-25  38089.30c 1.0E-25 38090.30c 1.0E-25 39091.30c 1.0E-25  40093.30c 1.0E-25 40094.30c 1.0E-25 40095.30c 1.0E-25  40096.30c 1.0E-25 42095.30c 1.0E-25 42098.30c 1.0E-25  42099.30c 1.0E-25 42100.30c 1.0E-25 43099.30c 1.0E-25  44101.30c 1.0E-25 44102.30c 1.0E-25 44103.30c 1.0E-25  44105.30c 1.0E-25 44106.30c 1.0E-25 45103.30c 1.0E-25  45105.30c 1.0E-25 47109.30c 1.0E-25 47510.30c 1.0E-25  47111.30c 1.0E-25 50126.30c 1.0E-25 51125.30c 1.0E-25  51126.30c 1.0E-25 52527.30c 1.0E-25 52529.30c 1.0E-25  53127.30c 1.0E-25 53129.30c 1.0E-25 53131.30c 1.0E-25  53135.30c 1.0E-25 54131.30c 1.0E-25 54133.30c 1.0E-25  54134.30c 1.0E-25 54135.30c 1.0E-25 54136.30c 1.0E-25  55133.30c 1.0E-25 55134.30c 1.0E-25 55135.30c 1.0E-25  55136.30c 1.0E-25 55137.30c 1.0E-25 56138.30c 1.0E-25  56140.30c 1.0E-25 57139.30c 1.0E-25 57140.30c 1.0E-25  58141.30c 1.0E-25 58142.30c 1.0E-25 58143.30c 1.0E-25  58144.30c 1.0E-25 59143.30c 1.0E-25 60143.30c 1.0E-25  60144.30c 1.0E-25 60145.30c 1.0E-25 60147.30c 1.0E-25  60148.30c 1.0E-25 61147.30c 1.0E-25 61148.30c 1.0E-25  61548.30c 1.0E-25 61149.30c 1.0E-25 62147.30c 1.0E-25  62148.30c 1.0E-25 62149.30c 1.0E-25 62150.30c 1.0E-25  62151.30c 1.0E-25 62152.30c 1.0E-25 63153.30c 1.0E-25  63154.30c 1.0E-25 63155.30c 1.0E-25 63156.30c 1.0E-25  64155.30c 1.0E-25 64157.30c 1.0E-25 92234.30c 1.0E-25  92236.30c 1.0E-25 92237.30c 1.0E-25 92239.30c 1.0E-25  92240.30c 1.0E-25 93236.30c 1.0E-25 93237.30c 1.0E-25  93238.30c 1.0E-25 93239.30c 1.0E-25 94238.30c 1.0E-25  94239.30c 1.0E-25 94240.30c 1.0E-25 94241.30c 1.0E-25  94242.30c 1.0E-25 94243.30c 1.0E-25 94244.30c 1.0E-25  95241.30c 1.0E-25 95242.30c 1.0E-25 95642.30c 1.0E-25  95243.30c 1.0E-25 95244.30c 1.0E-25 96242.30c 1.0E-25  96243.30c 1.0E-25 96244.30c 1.0E-25 96245.30c 1.0E-25  96246.30c 1.0E-25 96247.30c 1.0E-25 96248.30c 1.0E-25  96249.30c 1.0E-25 97249.30c 1.0E-25 97250.30c 1.0E-25  98249.30c 1.0E-25 98250.30c 1.0E-25 98251.30c 1.0E-25  mat 3 -0.001  8016.30c 3.76622E-5  mat 4 -6.550  40000.60c -98.2  50000.42c -1.5  26000.55c -0.12  24000.50c -0.1  28000.50c -0.05  8016.30c -0.13  mat 5 9.9977E-02  1001.30c 6.6643E-02  8016.30c 3.3334E-02  sab 5 lwtr.60t  CRITICALITY  PowerIter population = 5000 30 230 // keff0 = 1.0  InitSrc point = 0 0 0  BURNUP  BurnCell 3  TimeStep 3.333333 13.333333 16.666667 33.333333\*69  Power 30\*72  Substep 10  Inherent 0.9999  AceLib .30c  outputcell 3 |

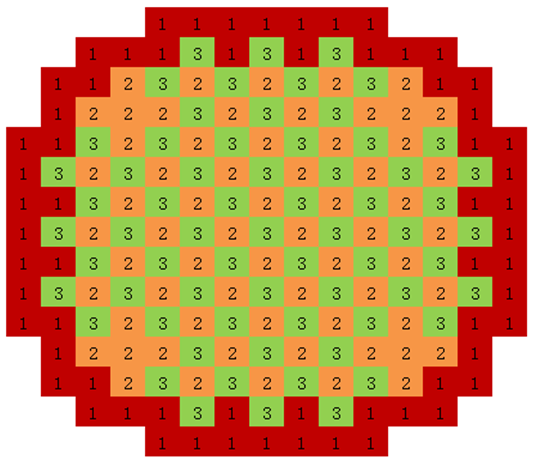
### 8.3.2 PWR组件燃耗算例

算例8-2是PWR17×17组件燃耗算例，包含264个燃耗区，采用并行燃耗计算模式（在并行调用情况下生效）。输出四个角点位置的燃料栅元内的核素密度。该算例需要的计算量较大，推荐使用并行机完成计算。

算例 8-2

|  |
| --- |
| ////// Burnup calculation of PWR 17\*17 assembly. SHE Ding 2012-07-01 //////  UNIVERSE 0  CELL 1 6 & -7 & 8 & -9 mat = 0 Fill = 8 // Assembly inside  CELL 2 -6 : 7 : -8 : 9 mat = 0 void = 1 // Assembly outside  UNIVERSE 8 lat = 1 pitch = 1.26 1.26 1 scope = 17 17 1 fill =  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 5 1 1 5 1 1 5 1 1 1 1 1  1 1 1 5 1 1 1 1 1 1 1 1 1 5 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 5 1 1 5 1 1 5 1 1 5 1 1 5 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 5 1 1 5 1 1 5 1 1 5 1 1 5 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 5 1 1 5 1 1 5 1 1 5 1 1 5 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 5 1 1 1 1 1 1 1 1 1 5 1 1 1  1 1 1 1 1 5 1 1 5 1 1 5 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  UNIVERSE 1 move = 0.63 0.63 0 // Fuel rod  cell 3 -1 mat = 1 inner = 1 tmp = 300 // Fuel  cell 4 1 & -2 mat = 3 inner = 1 // Air  cell 5 2 & -3 mat = 4 inner = 1 // Zr  cell 6 3 mat = 5 // water  UNIVERSE 5 move = 0.63 0.63 0 // Guide tube  cell 7 -4 mat = 5 inner = 1 // water  cell 8 4 & -5 mat = 4 inner = 1 // Air  cell 9 5 mat = 5 // water  SURFACE  surf 1 cz 0.4096  surf 2 cz 0.4178  surf 3 cz 0.4750  surf 4 cz 0.5690  surf 5 cz 0.6147  surf 6 px 0 bc = 1  surf 7 px 21.42 bc = 1  surf 8 py 0 bc = 1  surf 9 py 21.42 bc = 1  MATERIAL  mat 1 -10.196  92235.30c 6.9100E-03  92238.30c 2.2062E-01  8016.30c 4.5510E-01  34079.30c 1.0E-25 36083.30c 1.0E-25 36085.30c 1.0E-25  38089.30c 1.0E-25 38090.30c 1.0E-25 39091.30c 1.0E-25  40093.30c 1.0E-25 40094.30c 1.0E-25 40095.30c 1.0E-25  40096.30c 1.0E-25 42095.30c 1.0E-25 42098.30c 1.0E-25  42099.30c 1.0E-25 42100.30c 1.0E-25 43099.30c 1.0E-25  44101.30c 1.0E-25 44102.30c 1.0E-25 44103.30c 1.0E-25  44105.30c 1.0E-25 44106.30c 1.0E-25 45103.30c 1.0E-25  45105.30c 1.0E-25 47109.30c 1.0E-25 47510.30c 1.0E-25  47111.30c 1.0E-25 50126.30c 1.0E-25 51125.30c 1.0E-25  51126.30c 1.0E-25 52527.30c 1.0E-25 52529.30c 1.0E-25  53127.30c 1.0E-25 53129.30c 1.0E-25 53131.30c 1.0E-25  53135.30c 1.0E-25 54131.30c 1.0E-25 54133.30c 1.0E-25  54134.30c 1.0E-25 54135.30c 1.0E-25 54136.30c 1.0E-25  55133.30c 1.0E-25 55134.30c 1.0E-25 55135.30c 1.0E-25  55136.30c 1.0E-25 55137.30c 1.0E-25 56138.30c 1.0E-25  56140.30c 1.0E-25 57139.30c 1.0E-25 57140.30c 1.0E-25  58141.30c 1.0E-25 58142.30c 1.0E-25 58143.30c 1.0E-25  58144.30c 1.0E-25 59143.30c 1.0E-25 60143.30c 1.0E-25  60144.30c 1.0E-25 60145.30c 1.0E-25 60147.30c 1.0E-25  60148.30c 1.0E-25 61147.30c 1.0E-25 61148.30c 1.0E-25  61548.30c 1.0E-25 61149.30c 1.0E-25 62147.30c 1.0E-25  62148.30c 1.0E-25 62149.30c 1.0E-25 62150.30c 1.0E-25  62151.30c 1.0E-25 62152.30c 1.0E-25 63153.30c 1.0E-25  63154.30c 1.0E-25 63155.30c 1.0E-25 63156.30c 1.0E-25  64155.30c 1.0E-25 64157.30c 1.0E-25 92234.30c 1.0E-25  92236.30c 1.0E-25 92237.30c 1.0E-25 92239.30c 1.0E-25  92240.30c 1.0E-25 93236.30c 1.0E-25 93237.30c 1.0E-25  93238.30c 1.0E-25 93239.30c 1.0E-25 94238.30c 1.0E-25  94239.30c 1.0E-25 94240.30c 1.0E-25 94241.30c 1.0E-25  94242.30c 1.0E-25 94243.30c 1.0E-25 94244.30c 1.0E-25  95241.30c 1.0E-25 95242.30c 1.0E-25 95642.30c 1.0E-25  95243.30c 1.0E-25 95244.30c 1.0E-25 96242.30c 1.0E-25  96243.30c 1.0E-25 96244.30c 1.0E-25 96245.30c 1.0E-25  96246.30c 1.0E-25 96247.30c 1.0E-25 96248.30c 1.0E-25  96249.30c 1.0E-25 97249.30c 1.0E-25 97250.30c 1.0E-25  98249.30c 1.0E-25 98250.30c 1.0E-25 98251.30c 1.0E-25  mat 3 -0.001  8016.30c 3.76622E-5  mat 4 -6.550  40000.60c -98.2  mat 5 9.9977E-02  1001.30c 6.6643E-02  8016.30c 3.3334E-02  sab 5 lwtr.60t  CRITICALITY  PowerIter population = 2000 50 300 // keff0 = 1.0  InitSrc point = 0.63 0.63 0  BURNUP  BurnCell 3  TimeStep 3.333333 13.333333 16.666667 33.333333\*69  Power 30\*72  Substep 10  Inherent 0.9999  AceLib .30c  Strategy 0  Parallel 1  Solver 2  outputcell 1 > 1 > 3  1 > 17 > 3  1 > 273 > 3  1 > 289 > 3  PRINT  mat 0  csTally 0 |

### 8.3.3 PWR堆芯燃耗算例



|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 3.1%富集度组件 | 2 | 2.6%富集度组件 | 3 | 2.1%富集度组件 |

图 8-1 PWR堆芯布置图

压水堆二维堆芯包括193个燃料组件，组件外围为水反射层，堆芯半径（含反射层）为187.6 cm。燃料组件为17×17结构，含264根燃料棒和25个水通道。根据UO2燃料富集度的不同，燃料组件分为3.1%、2.6%和2.1%三种不同类型。堆芯内的燃料组件按照对称方式布置，如图8-1所示。燃耗历史总计包括41个燃耗步，每个燃耗步的功率密度为30W/gHM，累积燃耗深度为20 MWD/KgHM。

算例 8-3

|  |
| --- |
| /////// PWR core burnup calculation SHE Ding 2013-07-01 /////////////  Universe 0  cell 1 -9 fill = 11 //core inside  cell 2 9 mat=0 void = 1 //core outside  UNIVERSE 11 move= -224.91 -224.91 0 lat=1 pitch=21.42 21.42 1 scope=21 21 1 fill=  8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8  8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8  8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8  8 8 8 8 8 8 8 1 1 1 1 1 1 1 8 8 8 8 8 8 8  8 8 8 8 8 1 1 1 3 1 3 1 3 1 1 1 8 8 8 8 8  8 8 8 8 1 1 2 3 2 3 2 3 2 3 2 1 1 8 8 8 8  8 8 8 8 1 2 2 2 3 2 3 2 3 2 2 2 1 8 8 8 8  8 8 8 1 1 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 1 1 8 8 8  8 8 8 1 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 1 8 8 8  8 8 8 1 1 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 1 1 8 8 8  8 8 8 1 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 1 8 8 8  8 8 8 1 1 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 1 1 8 8 8  8 8 8 1 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 1 8 8 8  8 8 8 1 1 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 1 1 8 8 8  8 8 8 8 1 2 2 2 3 2 3 2 3 2 2 2 1 8 8 8 8  8 8 8 8 1 1 2 3 2 3 2 3 2 3 2 1 1 8 8 8 8  8 8 8 8 8 1 1 1 3 1 3 1 3 1 1 1 8 8 8 8 8  8 8 8 8 8 8 8 1 1 1 1 1 1 1 8 8 8 8 8 8 8  8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8  8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8  8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8    UNIVERSE 1 lat=1 pitch=1.26 1.26 1 scope=17 17 1 fill=  10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10  10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10  10 10 10 10 10 40 10 10 40 10 10 40 10 10 10 10 10  10 10 10 40 10 10 10 10 10 10 10 10 10 40 10 10 10  10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10  10 10 40 10 10 40 10 10 40 10 10 40 10 10 40 10 10  10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10  10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10  10 10 40 10 10 40 10 10 40 10 10 40 10 10 40 10 10  10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10  10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10  10 10 40 10 10 40 10 10 40 10 10 40 10 10 40 10 10  10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10  10 10 10 40 10 10 10 10 10 10 10 10 10 40 10 10 10  10 10 10 10 10 40 10 10 40 10 10 40 10 10 10 10 10  10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10  10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10      UNIVERSE 2 lat=1 pitch=1.26 1.26 1 scope=17 17 1 fill=  20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20  20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20  20 20 20 20 20 40 20 20 40 20 20 40 20 20 20 20 20  20 20 20 40 20 20 20 20 20 20 20 20 20 40 20 20 20  20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20  20 20 40 20 20 40 20 20 40 20 20 40 20 20 40 20 20  20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20  20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20  20 20 40 20 20 40 20 20 40 20 20 40 20 20 40 20 20  20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20  20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20  20 20 40 20 20 40 20 20 40 20 20 40 20 20 40 20 20  20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20  20 20 20 40 20 20 20 20 20 20 20 20 20 40 20 20 20  20 20 20 20 20 40 20 20 40 20 20 40 20 20 20 20 20  20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20  20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20  UNIVERSE 3 lat=1 pitch=1.26 1.26 1 scope=17 17 1 fill=  30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30  30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30  30 30 30 30 30 40 30 30 40 30 30 40 30 30 30 30 30  30 30 30 40 30 30 30 30 30 30 30 30 30 40 30 30 30  30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30  30 30 40 30 30 40 30 30 40 30 30 40 30 30 40 30 30  30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30  30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30  30 30 40 30 30 40 30 30 40 30 30 40 30 30 40 30 30  30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30  30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30  30 30 40 30 30 40 30 30 40 30 30 40 30 30 40 30 30  30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30  30 30 30 40 30 30 30 30 30 30 30 30 30 40 30 30 30  30 30 30 30 30 40 30 30 40 30 30 40 30 30 30 30 30  30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30  30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30  UNIVERSE 8  cell 3 -6 mat = 5 tmp = 300  cell 4 6 mat = 5 tmp = 300  UNIVERSE 10 move = 0.63 0.63 0 // 3.1% Fuel rod  cell 13 -1 mat = 10 inner = 1 tmp = 300 // Fuel  cell 14 1 & -2 mat = 3 inner = 1 // Air  cell 15 2 & -3 mat = 4 inner = 1 // Zr  cell 16 3 mat = 5 tmp = 300 // water  UNIVERSE 20 move = 0.63 0.63 0 // 2.6% Fuel rod  cell 23 -1 mat = 20 inner = 1 tmp = 300 // Fuel  cell 24 1 & -2 mat = 3 inner = 1 // Air  cell 25 2 & -3 mat = 4 inner = 1 // Zr  cell 26 3 mat = 5 tmp = 300 // water  UNIVERSE 30 move = 0.63 0.63 0 // 2.1% Fuel rod  cell 33 -1 mat = 30 inner = 1 tmp = 300 // Fuel  cell 34 1 & -2 mat = 3 inner = 1 // Air  cell 35 2 & -3 mat = 4 inner = 1 // Zr  cell 36 3 mat = 5 tmp = 300 // water  UNIVERSE 40 move = 0.63 0.63 0 // Guide tube  cell 7 -4 mat = 5 inner = 1 tmp = 300 // water  cell 8 4 & -5 mat = 4 inner = 1 // Air  cell 9 5 mat = 5 tmp = 300 // water  Surface  surf 1 cz 0.4096  surf 2 cz 0.4178  surf 3 cz 0.4750  surf 4 cz 0.5690  surf 5 cz 0.6147  surf 6 cz 900  surf 9 cz 187.6 bc = 1  Material  mat 10 -10.2 // 3.1%  92235.30c 7.1421E-04  92238.30c 2.2044E-02  8016.30c 4.5515E-02  54134.30c 1.0E-25  54135.30c 1.0E-25  54136.30c 1.0E-25  mat 20 -10.2 // 2.6%  92235.30c 5.9902E-04  92238.30c 2.2157E-02  8016.30c 4.5513E-02  54134.30c 1.0E-25  54135.30c 1.0E-25  54136.30c 1.0E-25  mat 30 -10.2 // 2.1 %  92235.30c 4.8383E-04  92238.30c 2.2271E-02  8016.30c 4.5510E-02  54134.30c 1.0E-25  54135.30c 1.0E-25  54136.30c 1.0E-25  mat 3 -0.001  8016.30c 3.76622E-5  mat 4 -6.550  40000.60c -98.2  mat 5 -1.0034  1001.30c 6.66E-02  8016.30c 3.33E-02  sab 5 lwtr.60t  Criticality  poweriter keff0=1.0 population = 500000 200 500 batch = 10  initsrc cyl/z = 0 0 166 -1 1  BURNUP  BurnCell 13 23 33  TimeStep 3.333333 13.333333 16.666667\*39  Power 30 \*41  Substep 2  Inherent 0.999 0.999  AceLib .30c  Strategy 1  Parallel 1  Solver 2  PRINT  cstally 0  mat 0 |

# 第9章 输出控制

RMC输出控制模块用来自定义输出内容。尤其是在大规模燃耗计算中，可能产生大量的输出信息，通过输出控制模块可以有效地减小输出文件的体积。

## 9.1 输出控制模块输入卡

输出控制模块的输入方式为：

|  |
| --- |
| **PRINT**  **Mat <flag>**  **Keff <flag>**  **Source <flag>**  **CellTally <flag>**  **MeshTally <flag>**  **CsTally <flag>** |

其中，

* **PRINT**输出控制模块的关键词。
* **Mat**、**Keff**等输入卡指定是否输出相关内容（见表9-1）。**flag = 0**表示不输出指定内容，**flag = 1**表示输出指定内容。

表9-1 输出控制模块的输入卡

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 输入卡 | 输出内容 | 默认选项 |
| **Mat** | 所有材料的核素密度列表 | flag = 1，输出 |
| **Keff** | 每代的Keff | flag = 1，输出 |
| **Source** | 每代的裂变源信息 | flag = 0，不输出 |
| **CellTally** | 栅元计数器的结果 | flag = 1，输出 |
| **MeshTally** | 网格计数器的结果 | flag = 1，输出 |
| **CsTally** | 截面计数器的结果，包括燃耗计算过程中的单群截面统计结果。 | flag = 1，输出 |

## 9.2 输出控制模块输入示例

对于含大量燃耗区的燃耗计算，建议通过以下输入卡屏蔽材料和单群截面的输出信息，以免产生庞大的数据文件。

|  |
| --- |
| PRINT  Mat 0  CsTally 0 |

# 第10章 画图

RMC支持模型的二维及三维可视化显示——画图功能。二维画图指显示模型某一个切面的几何/材料信息，程序根据用户指定的矩形位置/范围和图像尺寸，生成显示几何/材料信息的图像（png格式，可由常用图像软件可以查看）。三维画图指显示指定长方体范围内的模型信息（vti格式文件，可由VTK、ParaView、VisIt等三维可视化软件查看）。

两种画图模式均采用像素格式，将画图区域划分为均匀像素网格，每个网格的颜色由所在几何位置的材料/栅元涂色。用户指定图像的像素尺寸，如二维图像包括长度和高度两个方向的像素值，三维图像包括长、宽和高三个方向的像素值。像素尺寸越大，图像越精细，但图像文件也越大。

对画图区域的指定采用顶点法，即由顶点确定画图范围。对于二维画图，指定左上角（P1）、右上角（P2）及右下角（P3）顶点来确定矩形画图范围（**若图像垂直于坐标轴，可只输入P1和P3两个顶点**），如图10-1所示；而对于三维画图，由4个顶点确定长方体画图范围，如10-2所示，其中P1为参考点，P2、P3、P4分别为沿长、宽、高三个向量方向延伸的顶点。

**P1(x1,y1,z1)**

**P3(x3,y3,z3)**

***P2(x2,y2,z2)***

图10-1 二维画图-三个顶点（P1、P2、P3，或两个顶点P1、P3）确定矩形画图范围

**P1(x1,y1,z1)**

**P2(x2,y2,z2)**

**P3(x3,y3,z3)**

**P4(x4,y4,z4)**

图10-2 三维画图-四个顶点（P1、P2、P3、P4）确定长方体画图范围

## 10.1 画图模块输入卡

画图模块的输入方式为：

|  |
| --- |
| **PLOT**  **[ColorScheme = <scheme number>] [Continue-calculation = <flag>]**  **PlotID <id> Type=<type> Color=<color> Pixels= <pixel\_sizes > Vertexes= < vertexes >** |

其中，

* **PLOT** 画图模块的关键词。
* **ColorScheme**选项卡设置画图颜色方案（对彩色填充材料有效），**scheme number**可为任意正整数，数值不同，则图像材料-色彩搭配随机变化。通过此卡可以调整图像颜色对比度。缺省值为**1**。
* **Continue-calculation**选项卡用来控制画图后是否继续执行计算。**0**表示跳过计算，画图后程序退出；**1**表示画图后继续执行计算。缺省值为**0**。
* **PlotID**选项卡指定画图参数，**<id>**选项卡指定画图编号，用于图像标识，对应的输出图像文件名为*inputfilename*\_plot\_*id*（png或vti格式）。
* **Type**选项卡指定图像类型，可选值为**Slice**、**Box**，其中**Slice**表示输出二维图像；**Box**表示输出三维图像。该选项与**ColorType**、 **Pixels、Vertexes**的一致性见表10-1**。**
* **Color** 设置画图色彩样式，指对模型信息的涂色方式，包括对材料涂色及栅元涂色，以及根据是否画出栅元边界组合形成共五种样式：材料色彩样式（**Mat**）、栅元色彩样式（**Cell**）、边界面样式（**Surf**）以及材料色彩栅元边界样式（**MatSurf**）和栅元色彩栅元边界样式（**CellSurf**）。其中材料/栅元色彩指同样栅元/材料填充相同颜色（色彩方案由**ColorScheme**确定），**Surf**指用黑色线条（1个像素宽度）画出栅元边界。
* **Pixels**指定图像像素尺寸，即对画图区域显示的分辨率。二维图像（**Slice**）由长×宽两个像素值确定，三维图像（**Box**）由长×宽×高三个像素值确定，像素值为正整数。像素尺寸越大，图像越精细，但同时占用内存越大。建议图像尺寸与画图矩形尺寸相对应，以免图像变形。
* **Vertexes**指定画图区域的顶点。每个顶点均由x/y/z三个浮点数值表示。对于二维图像（**Slice**），需要两个顶点（**P1**和**P3**，所在面垂直于坐标轴，即**x1与x2、y1与y2、z1与z2**必须有一组相同）或三个顶点（**P1**、**P2**、**P3**，**P1→P2**与**P2→P3**垂直）。比如**Vertexes**= -15 70 20 65 10 20表示矩形为垂直于z轴（在z=20平面上）。注意画图平面不应与用户定义的曲面重合，因为在平面处无法判断几何特征（程序具有一定的自动调整位置以避免与面重合的功能，但对于重复结构交界面等虚拟面无法判断，不能处理可能会出错）。

对于三维图像（**Box**），需要四个顶点（**P1**、**P2**、**P3、P4**）确定画图区域，其中向量**P1→P2**、**P2→P3、P3→P4**必须两两垂直。如**Vertexes** = 0 0 0 10 0 0 10 5 0 10 5 8。

图10-2 画图参数一致性关系

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Type** | **Color** | **Pixels** | **Vertexes** |
| **Slice** | Mat / Cell / Surf / MatSurf / CellSurf | 2 integer | 6 / 9 double |
| **Box** | Mat / Cell / Surf \* / MatSurf \* / CellSurf \* | 3 integer | 12 double |

\*注：暂不支持。

## 10.2 画图模块输入示例

一次运行可以画多幅图像，与图像一同输出的*inputfilename*.plot文件保存图像尺寸及色彩等相关信息。

|  |
| --- |
| PLOT ColorScheme=9  PlotID 1 Type = slice Color = Mat Pixels=900 900 Vertexes=0 20 0 20 0 0  PlotID 2 Type = Slice Color = Cell Pixels= 1800 1265 Vertexes= 0 0 20 90 0 20 90 60 0  PlotID 6 type = box color = Mat Pixels=100 100 200 vertexes = 0 0 0 10 0 0 10 10 0 10 10 20 |

# 第11章 固定源计算

RMC支持固定源计算功能。固定源功能用于已知外中子源的情况下，计算系统内中子分布随空间、能量和时间的变化。固定源计算可分为稳态计算和含时计算两种，目前的RMC版本仅支持稳态计算功能。与此同时，RMC固定源功能可以使用多群和连续能量的ACE格式的中子截面数据。需要注意的是，稳态固定源计算仅适用于不含裂变核素的系统或者次临界的增殖系统。

## 11.1 固定源模块输入卡

|  |
| --- |
| **FixedSource**  **neutron population=<N> type=<params> erg= < source energy >** |

其中，

* **FixedSource**为固定源模块的关键词；
* **neutron**表示固定源计算中的输运粒子为中子，该选项卡可为后续添加光子输运做铺垫；
* **population**指定固定源计算中使用的初始粒子数，N表示初始粒子数；
* **type**指定固定源的空间分布，**type**和**params**的具体取值可参见表5-1；
* **erg**指定固定源释放的中子能量，单位为MeV，目前RMC仅支持单能固定源中子；

## 11.2 固定源模块输入示例

固定源释放10000个源中子，固定源为点源，位于坐标原点，源中子能量为0.1 MeV。

|  |
| --- |
| **FixedSource**  **neutron population=10000 point=0 0 0 erg= 0.1** |

# 第12章 时空动力学计算

RMC支持时空动力学计算功能，该功能用于模拟稳态反应堆在受到反应性扰动后，系统内中子通量随时间和空间的变化情况。RMC时空动力学计算功能采用预估修正准静态方法，计算过程中，将中子时空动力学方程拆解成具有刚性的关于幅度函数的点堆方程，以及关于预估通量的形状函数方程。点堆方程采用常微分方程组的数值解法求解，形状函数方程采用蒙卡方法求解，其中点堆方程中的点堆参数由蒙卡方法直接统计得到。RMC时空动力学计算模块可使用多群和连续能量的中子核反应截面。

## 12.1 时空动力学模块输入卡

由于时空动力学计算的对象包含反应堆的两种状态，即扰动前的稳态和扰动后的瞬态，因此相应地需要两种输入文件来描述反应堆的状态。第一种输入文件对应于反应堆稳态，其中的动力学模块输入卡用于引导RMC进行相应动力学稳态计算；第二种输入文件对应于反应堆瞬态，其中的动力学模块输入卡用于引导RMC进行相应的动力学瞬态计算。需要注意的是，稳态计算输入卡与瞬态计算输入卡中的population参数应保持一致。时空动力学计算模块支持并行计算功能，但是目前输入文件中不可指定并行计算模式，其强制采用主从并行模式。由于反应堆反应性引入方式的复杂性，RMC时空动力学计算功能的实现还需借助Python脚本来描述随时间变化的反应性扰动。

### 12.1.1 时空动力学模块稳态计算输入卡

|  |
| --- |
| **QUASISTATIC\_S**  **PowerIter Population = <N Mi Mt> Keff0=1.0**  **InitSrc type=<params>**  **Timestep deltat=<data>** |

其中，

* **QUASISTATIC\_S**为稳态时空动力学计算关键词，后缀S表示Static；
* **PowerIter**指定源迭代参数，卡中参数意义参见说明书5.1节。由于反应堆处于稳态，因此Keff0参数强制指定为1；
* **InitSrc**指定初始裂变源，卡中参数意义参见说明书5.2节；
* **Timestep**指定瞬态第一个形状时间步的步长，单位为秒；

### 12.1.2 时空动力学模块瞬态计算输入卡

|  |
| --- |
| **QUASISTATIC\_D**  **PowerIter Population = <N Mi Mt> Keff0=1.0**  **Timestep deltat=<data>** |

其中，

* **QUASISTATIC\_D**为瞬态时空动力学计算关键词，后缀D表示Dynamic；
* **PowerIter**指定源迭代参数，卡中参数意义参见说明书5.1节。由于反应堆处于稳态，因此Keff0参数强制指定为1。参数population应与稳态计算输入卡保持一致；
* **Timestep**指定瞬态下一个形状时间步的步长，单位为秒。RMC支持变步长计算。

## 12.2 时空动力学模块输入示例

### 12.2.1 时空动力学模块稳态计算输入示例

|  |
| --- |
| **QUASISTATIC\_S**  **PowerIter population=500000 200 800 Keff0=1.0**  **InitSrc point=12.5 5.5 6.5 11.5 5.5 6.5**  **Timestep deltat=2.0E+00** |

### 12.2.2 时空动力学模块瞬态计算输入示例

|  |
| --- |
| **QUASISTATIC\_D**  **PowerIter population=500000 200 800 Keff0=1.0**  **Timestep deltat=2.0E+00** |

## 12.3 Python脚本说明

RMC时空动力学计算功能用于模拟反应堆瞬态变化过程。RMC将瞬态过程离散成若干个时间步，每个时间步对应于反应堆不同的状态，因此模拟过程中，每个时间步的模拟需要一个更新的输入文件。瞬态过程中，反应性的引入方式十分复杂，包括几何变化、温度变化、密度变化以及控制棒移动等。所以，很难将整个瞬态过程描述在一个单一的输入文件中。为方便起见，RMC时空动力学模拟需要借助Python脚本，用于辅助描述反应堆状态随时间的变化情况。与此同时，Python脚本也用于计算结果的提取。

共有三种脚本，包括step.py、fetch.py以及tally.py。step.py用于描述瞬态过程中反应堆状态随时间的变化以及用于引导整个瞬态计算过程；fetch.py用于提取各个不同时间步对应的反应堆功率和幅度函数；tally.py用于提取各个不同时间步对应的反应堆通量或者功率分布形状函数（未归一化）。

脚本具体可参见时空动力学计算功能算例。

## 12.4 输出文件说明

RMC时空动力学计算产生两类重要的结果输出文件，用户只需关心此两类输出文件。第一类结果输出文件包含各个时间步对应的反应堆功率、通量幅度、点堆参数以及若干中间结果等信息；第二类结果输出文件包含各个时间步对应的未经过归一化处理的通量形状或者功率空间分布信息。第一类文件以inp.innerproduct#命名，第二类文件以inp.tally#命名，其中“#”表示第#个时间步。

由于RMC一次时空动力学模拟会分别产生多个inp.innerproduct#和inp.tally#文件，因此用户可以借助fetch.py脚本提取反应堆功率和中子通量幅度变化等信息；借助tally.py提取反应堆功率空间分布或中子通量形状变化等信息。

需要注意的是，inp.tally#文件中的反应堆功率空间分布或中子通量形状未经过归一化，若要得到归一化的功率分布或通量形状，方法如下：



其中，表示inp.tally#中的未经归一化的通量形状，表示输入文件中指定的每代模拟中子数，即**PowerIter**参数中的参数N，分母的值即为inp.innerproduct#文件中最后一代的NeuPopu(sec)参数。归一化的功率分布或者通量形状与通量幅度的乘积即为反应堆实际的功率或通量分布。

# 附录

## 附录1 输入输出文件清单

RMC程序发布包中附带典型算例的输入文件（详见表附录-1）及输出结果，所有算例均在清华大学“探索100”百万亿次集群系统（Red Hat Enterprise Linux 5.6）中运行通过，部分算例采用大规模并行计算。

表附录-1 输入文件清单

|  |  |
| --- | --- |
| 输入文件 | 算例描述 |
| 3\_1\_PWR\_assembly | 几何重复结构示例，PWR组件 |
| 3\_2\_PWR\_core | 几何重复结构示例，PWR堆芯 |
| 3\_3\_MFR\_assembly | 几何重复结构示例，六边形组件 |
| 3\_4\_MFR\_core | 几何重复结构示例，六边形堆芯 |
| 6\_1\_Tally\_PWR\_pin | 计数器示例，轴向分段的PWR燃料棒 |
| 6\_2\_Tally\_Hoogenboom\_core | 计数器示例，蒙卡全堆基准题 |
| 7\_1\_FSC\_slab | 源收敛加速示例，OECD源收敛基准题 |
| 7\_2\_FSC\_Hoogenboom\_core | 源收敛加速示例，蒙卡全堆基准题 |
| 8\_1\_Burn\_PWR\_pin | 燃耗示例，PWR燃料棒 |
| 8\_2\_Burn\_PWR\_assembly | 燃耗示例，PWR组件 |

## 附录2 连续能量ACE数据库

RMC程序发布包中附带一套基于ENDF7.0制作的300K温度下的连续能量ACE数据库（后缀为.30c），包括近400个核素，见表附录-2。此外，发布包中还附带有部分热化数据库，以及天然元素数据库（见表附录-3）。具体信息请参阅xdir文件。

表附录-2 连续能量ACE数据库清单

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ZAID | Nuclide | ZAID | Nuclide | ZAID | Nuclide | ZAID | Nuclide |
| 1001 | H1 | 1002 | H2 | 1003 | H3 | 2003 | He3 |
| 2004 | He4 | 3006 | Li6 | 3007 | Li7 | 4007 | Be7 |
| 4009 | Be9 | 5010 | B10 | 5011 | B11 | 6000 | C |
| 7014 | N14 | 7015 | N15 | 8016 | O16 | 8017 | O17 |
| 9019 | F19 | 11022 | Na22 | 11023 | Na23 | 12024 | Mg24 |
| 12025 | Mg25 | 12026 | Mg26 | 13027 | Al27 | 14028 | Si28 |
| 14029 | Si29 | 14030 | Si30 | 15031 | P31 | 16032 | S32 |
| 16033 | S33 | 16034 | S34 | 16036 | S36 | 17035 | Cl35 |
| 17037 | Cl37 | 18036 | Ar36 | 18038 | Ar38 | 18040 | Ar40 |
| 19039 | K39 | 19040 | K40 | 19041 | K41 | 20040 | Ca40 |
| 20042 | Ca42 | 20043 | Ca43 | 20044 | Ca44 | 20046 | Ca46 |
| 20048 | Ca48 | 21045 | Sc45 | 22046 | Ti46 | 22047 | Ti47 |
| 22048 | Ti48 | 22049 | Ti49 | 22050 | Ti50 | 23000 | V |
| 24050 | Cr50 | 24052 | Cr52 | 24053 | Cr53 | 24054 | Cr54 |
| 25055 | Mn55 | 26054 | Fe54 | 26056 | Fe56 | 26057 | Fe57 |
| 26058 | Fe58 | 27058 | Co58 | 27458 | Co58m1 | 27059 | Co59 |
| 28058 | Ni58 | 28059 | Ni59 | 28060 | Ni60 | 28061 | Ni61 |
| 28062 | Ni62 | 28064 | Ni64 | 29063 | Cu63 | 29065 | Cu65 |
| 30000 | Zn | 31069 | Ga69 | 31071 | Ga71 | 32070 | Ge70 |
| 32072 | Ge72 | 32073 | Ge73 | 32074 | Ge74 | 32076 | Ge76 |
| 33074 | As74 | 33075 | As75 | 34074 | Se74 | 34076 | Se76 |
| 34077 | Se77 | 34078 | Se78 | 34079 | Se79 | 34080 | Se80 |
| 34082 | Se82 | 35079 | Br79 | 35081 | Br81 | 36078 | Kr78 |
| 36080 | Kr80 | 36082 | Kr82 | 36083 | Kr83 | 36084 | Kr84 |
| 36085 | Kr85 | 36086 | Kr86 | 37085 | Rb85 | 37086 | Rb86 |
| 37087 | Rb87 | 38084 | Sr84 | 38086 | Sr86 | 38087 | Sr87 |
| 38088 | Sr88 | 38089 | Sr89 | 38090 | Sr90 | 39089 | Y89 |
| 39090 | Y90 | 39091 | Y91 | 40090 | Zr90 | 40091 | Zr91 |
| 40092 | Zr92 | 40093 | Zr93 | 40094 | Zr94 | 40095 | Zr95 |
| 40096 | Zr96 | 41093 | Nb93 | 41094 | Nb94 | 41095 | Nb95 |
| 42092 | Mo92 | 42094 | Mo94 | 42095 | Mo95 | 42096 | Mo96 |
| 42097 | Mo97 | 42098 | Mo98 | 42099 | Mo99 | 42100 | Mo100 |
| 43099 | Tc99 | 44096 | Ru96 | 44098 | Ru98 | 44099 | Ru99 |
| 44100 | Ru100 | 44101 | Ru101 | 44102 | Ru102 | 44103 | Ru103 |
| 44104 | Ru104 | 44105 | Ru105 | 44106 | Ru106 | 45103 | Rh103 |
| 45105 | Rh105 | 46102 | Pd102 | 46104 | Pd104 | 46105 | Pd105 |
| 46106 | Pd106 | 46107 | Pd107 | 46108 | Pd108 | 46110 | Pd110 |
| 47107 | Ag107 | 47109 | Ag109 | 47510 | Ag110m1 | 47111 | Ag111 |
| 48106 | Cd106 | 48108 | Cd108 | 48110 | Cd110 | 48111 | Cd111 |
| 48112 | Cd112 | 48113 | Cd113 | 48114 | Cd114 | 48515 | Cd115m1 |
| 48116 | Cd116 | 49113 | In113 | 49115 | In115 | 50112 | Sn112 |
| 50113 | Sn113 | 50114 | Sn114 | 50115 | Sn115 | 50116 | Sn116 |
| 50117 | Sn117 | 50118 | Sn118 | 50119 | Sn119 | 50120 | Sn120 |
| 50122 | Sn122 | 50123 | Sn123 | 50124 | Sn124 | 50125 | Sn125 |
| 50126 | Sn126 | 51121 | Sb121 | 51123 | Sb123 | 51124 | Sb124 |
| 51125 | Sb125 | 51126 | Sb126 | 52120 | Te120 | 52122 | Te122 |
| 52123 | Te123 | 52124 | Te124 | 52125 | Te125 | 52126 | Te126 |
| 52527 | Te127m1 | 52128 | Te128 | 52529 | Te129m1 | 52130 | Te130 |
| 52132 | Te132 | 53127 | I127 | 53129 | I129 | 53130 | I130 |
| 53131 | I131 | 53135 | I135 | 54123 | Xe123 | 54124 | Xe124 |
| 54126 | Xe126 | 54128 | Xe128 | 54129 | Xe129 | 54130 | Xe130 |
| 54131 | Xe131 | 54132 | Xe132 | 54133 | Xe133 | 54134 | Xe134 |
| 54135 | Xe135 | 54136 | Xe136 | 55133 | Cs133 | 55134 | Cs134 |
| 55135 | Cs135 | 55136 | Cs136 | 55137 | Cs137 | 56130 | Ba130 |
| 56132 | Ba132 | 56133 | Ba133 | 56134 | Ba134 | 56135 | Ba135 |
| 56136 | Ba136 | 56137 | Ba137 | 56138 | Ba138 | 56140 | Ba140 |
| 57138 | La138 | 57139 | La139 | 57140 | La140 | 58136 | Ce136 |
| 58138 | Ce138 | 58139 | Ce139 | 58140 | Ce140 | 58141 | Ce141 |
| 58142 | Ce142 | 58143 | Ce143 | 58144 | Ce144 | 59141 | Pr141 |
| 59142 | Pr142 | 59143 | Pr143 | 60142 | Nd142 | 60143 | Nd143 |
| 60144 | Nd144 | 60145 | Nd145 | 60146 | Nd146 | 60147 | Nd147 |
| 60148 | Nd148 | 60150 | Nd150 | 61147 | Pm147 | 61148 | Pm148 |
| 61548 | Pm148m1 | 61149 | Pm149 | 61151 | Pm151 | 62144 | Sm144 |
| 62147 | Sm147 | 62148 | Sm148 | 62149 | Sm149 | 62150 | Sm150 |
| 62151 | Sm151 | 62152 | Sm152 | 62153 | Sm153 | 62154 | Sm154 |
| 63151 | Eu151 | 63152 | Eu152 | 63153 | Eu153 | 63154 | Eu154 |
| 63155 | Eu155 | 63156 | Eu156 | 63157 | Eu157 | 64152 | Gd152 |
| 64153 | Gd153 | 64154 | Gd154 | 64155 | Gd155 | 64156 | Gd156 |
| 64157 | Gd157 | 64158 | Gd158 | 64160 | Gd160 | 65159 | Tb159 |
| 65160 | Tb160 | 66156 | Dy156 | 66158 | Dy158 | 66160 | Dy160 |
| 66161 | Dy161 | 66162 | Dy162 | 66163 | Dy163 | 66164 | Dy164 |
| 67165 | Ho165 | 67566 | Ho166m1 | 68162 | Er162 | 68164 | Er164 |
| 68166 | Er166 | 68167 | Er167 | 68168 | Er168 | 68170 | Er170 |
| 71175 | Lu175 | 71176 | Lu176 | 72174 | Hf174 | 72176 | Hf176 |
| 72177 | Hf177 | 72178 | Hf178 | 72179 | Hf179 | 72180 | Hf180 |
| 73181 | Ta181 | 73182 | Ta182 | 74182 | W182 | 74183 | W183 |
| 74184 | W184 | 74186 | W186 | 75185 | Re185 | 75187 | Re187 |
| 77191 | Ir191 | 77193 | Ir193 | 79197 | Au197 | 80196 | Hg196 |
| 80198 | Hg198 | 80199 | Hg199 | 80200 | Hg200 | 80201 | Hg201 |
| 80202 | Hg202 | 80204 | Hg204 | 82204 | Pb204 | 82206 | Pb206 |
| 82207 | Pb207 | 82208 | Pb208 | 83209 | Bi209 | 88223 | Ra223 |
| 88224 | Ra224 | 88225 | Ra225 | 88226 | Ra226 | 89225 | Ac225 |
| 89226 | Ac226 | 89227 | Ac227 | 90227 | Th227 | 90228 | Th228 |
| 90229 | Th229 | 90230 | Th230 | 90232 | Th232 | 90233 | Th233 |
| 90234 | Th234 | 91231 | Pa231 | 91232 | Pa232 | 91233 | Pa233 |
| 92232 | U232 | 92233 | U233 | 92234 | U234 | 92235 | U235 |
| 92236 | U236 | 92237 | U237 | 92238 | U238 | 92239 | U239 |
| 92240 | U240 | 92241 | U241 | 93235 | Np235 | 93236 | Np236 |
| 93237 | Np237 | 93238 | Np238 | 93239 | Np239 | 94236 | Pu236 |
| 94237 | Pu237 | 94238 | Pu238 | 94239 | Pu239 | 94240 | Pu240 |
| 94241 | Pu241 | 94242 | Pu242 | 94243 | Pu243 | 94244 | Pu244 |
| 94246 | Pu246 | 95241 | Am241 | 95242 | Am242 | 95642 | Am242m1 |
| 95243 | Am243 | 95244 | Am244 | 95644 | Am244m1 | 96241 | Cm241 |
| 96242 | Cm242 | 96243 | Cm243 | 96244 | Cm244 | 96245 | Cm245 |
| 96246 | Cm246 | 96247 | Cm247 | 96248 | Cm248 | 96249 | Cm249 |
| 96250 | Cm250 | 97249 | Bk249 | 97250 | Bk250 | 98249 | Cf249 |
| 98250 | Cf250 | 98251 | Cf251 | 98252 | Cf252 | 98253 | Cf253 |
| 98254 | Cf254 | 99253 | Es253 | 99254 | Es254 | 99255 | Es255 |
| 100255 | Fm255 |  |  |  |  |  |  |

表附录-3 天然元素数据库清单

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 6000.60c | 12000.60c | 14000.60c | 16000.60c |
| 17000.60c | 18000.59c | 19000.60c | 20000.60c |
| 22000.60c | 23000.60c | 24000.50c | 26000.55c |
| 28000.50c | 29000.50c | 30000.42c | 31000.60c |
| 40000.60c | 42000.60c | 47000.55c | 48000.51c |
| 49000.60c | 50000.42c | 51000.42c | 54000.42c |
| 63000.42c | 64000.35c | 72000.60c | 74000.55c |
| 77000.55c | 78000.42c | 82000.50c |  |

## 附录3 燃耗数据库

发布包中附带适用于压水堆的燃耗数据库，含有1487个核素的单群截面及30个核素的裂变产额。

1. 注：在RMC-Beta1.0版本中，可以使用“!”作为注释符。RMC-Beta2.0及其后续版本使用“!”作为栅元几何曲面布尔表达式当中的“非”，不再用作注释符。 [↑](#footnote-ref-1)
2. 注：在Universe（重复几何）中的Scope选项卡当中，参数为1表示该方向上只有一层无限大网格。 [↑](#footnote-ref-2)