

蒙卡程序重复结构识别和展开方法研究

王娟娟, 张竞宇*, 雷星, 于虓, 倪王慕鸿

华北电力大学核科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2024年1月26日; 录用日期: 2024年2月22日; 发布日期: 2024年4月11日

摘要

重复结构给核反应堆蒙卡程序几何建模带来了极大便利,但在物理热工耦合、燃耗计算时需要对重复结构进行识别和展开处理。本文首先研究了对重复结构的识别方法;其次,研究了重复几何栅元展开为最底层的无重复几何独立栅元方法,并实现了相应的程序功能;最后,通过计算小型堆、大亚湾组件以及研究堆等一系列基准题和算例,比较了重复结构展开前后的反应堆有效增殖因子 k_{eff} 以及几何模型。结果表明:算例的计算结果的误差在36~187 pcm之间,重复结构展开前后计算结果吻合良好,几何模型结果也吻合良好,因此,证明了本文提出的重复结构展开方法具有较高的准确性和可靠性。

关键词

蒙卡程序, 重复结构, 识别方法, 展开方法

Research on the Method of Identifying and Unfolding Repeated Structures in Monte Carlo Program

Juanjuan Wang, Jingyu Zhang*, Xing Lei, Xiao Yu, Wangmuhong Ni

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Jan. 26th, 2024; accepted: Feb. 22nd, 2024; published: Apr. 11th, 2024

Abstract

The repeated structures bring great convenience to the geometrical modeling of nuclear reactor Monte Carlo program. However, in the physical thermal coupling and burnup calculation, it is neces-

*通讯作者。

文章引用: 王娟娟, 张竞宇, 雷星, 于虓, 倪王慕鸿. 蒙卡程序重复结构识别和展开方法研究[J]. 核科学与技术, 2024, 12(2): 92-103. DOI: 10.12677/nst.2024.122010

sary to identify and unfold repeated structures. Firstly, this paper studies the method of identifying repeated structures. Secondly, the method of unfolding repetitive geometric cells to the lowest level independent geometric cell without repetition is studied, and the corresponding program functions are realized. Finally, by calculating a series of benchmark problems and examples such as small reactors, Daya Bay components, and research reactors, the effective proliferation factor k_{eff} and the geometric model of the reactor before and after the unfolding of repeated structures were compared. The results show that the error of the calculation results of the example is between 36~187 pcm, the calculated results before and after the unfolding of repeated structures are in good agreement, and the results of the geometric model also agree well. Therefore, it is proved that the unfolding method of repeated structures proposed in this paper has high accuracy and reliability.

Keywords

Monte Carlo Program, Repeated Structures, Identification Method, Unfolding Method

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在核工程领域中，几何重复结构是普遍存在的，例如大亚湾核电站的堆芯几何结构就存在两个层级的六面体重复结构周期排列模式。在全堆芯几何中，几何体数量可达数十万，所以面对全堆芯计算的需求，势必要发展针对于几何重复结构的输入方式[1]。蒙特卡罗方法被广泛应用于反应堆数值模拟计算中，具有几何描述能力强、计算精度高等优势[2] [3]。在国内外开发的蒙特卡罗计算程序中，比如蒙特卡罗粒子输运程序 MCNP [4] [5]、开源蒙特卡罗输运程序 OpenMC [6] [7]、反应堆用蒙特卡罗中子模拟程序 RMC [8] [9] [10]、蒙特卡罗程序 Serpent 等[11] [12]，都具备重复结构建模功能，可以方便地描述核反应堆组件和堆芯的几何重复结构。但是，在堆芯物理热工耦合计算、堆芯燃耗计算时，需要将重复几何结构展开，便于对每个栅元进行计数与相关参数更新等，但是目前主流蒙卡程序均不具备重复结构自动展开功能[13] [14] [15] [16]。本文主要研究蒙卡程序对重复结构的识别，实现通用的重复几何建模功能。但是由于重复结构不便建立层级的反应率计数，也无法指定元件层级的材料温度，因此对于这些特定情况，本文研究蒙卡程序重复结构的展开方法并实现相关程序功能，最后选取典型堆芯和组件算例，将重复结构展开前后模型的反应堆有效增殖因子 k_{eff} 和几何模型进行对比，验证本文提出的蒙卡程序重复结构展开方法的正确性。

2. 重复结构的识别

2.1. 重复结构建模方式

重复结构是核工程领域常见的几何模式，在多种类型的反应堆中大量存在。反应堆中用多根相同燃料棒按一定周期模式构成组件，多个相同组件按一定模式布置在反应堆堆芯中。为了能够使用较为简便的方式描述全堆芯几何，国内外开发的一些蒙特卡罗程序具有重复结构建模功能。重复结构的实现是通过多层级结构建模的方式。在层级结构建模中，通过填充关系将几何模型划分为不同层级，每个层级表示一个几何空间，每个层级通过某种填充方式在空间中形成有限或者无限的周期重复，再在其上层增加一个边界限制以实现重复结构对有限空间的填充，这实际上就实现了重复结构功能[17] [18]。在以上的设计中，重复

结构模式可以是有限或无限，单一重复或者复合重复都可以支持。因此，重复结构是可以把同样的几何层级填充在多个位置上，也可以不同的几何层级按照特定顺序填充在同一位置[19]。但是从一般计算效率和实际需求来说，常见的重复结构填充方式可以是平行六面体重复、六棱柱重复或者有限圆周重复[20]，如图 1、图 2、图 3 所示。在填充过程中可以对用于填充的层级进行某种坐标变换、平移或是旋转。

$(-2,1,0)$	$(-1,1,0)$	$(0,1,0)$	$(1,1,0)$
$(-2,0,0)$	$(-1,0,0)$	3 $(0,0,0)$	1 $(1,0,0)$
$(-2,-1,0)$	$(-1,-1,0)$	4 $(0,-1,0)$	$(1,-1,0)$

Figure 1. Schematic diagram of the repeated structure of parallelepiped
图 1. 平行六面体重复结构示意图

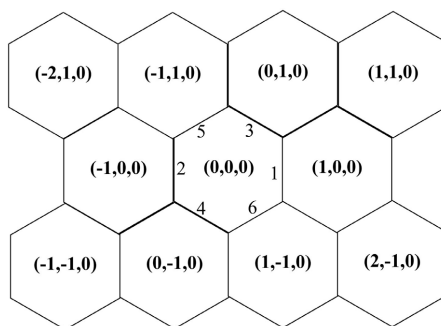


Figure 2. Schematic diagram of the repeated structure of hexagonal prism
图 2. 六棱柱重复结构示意图

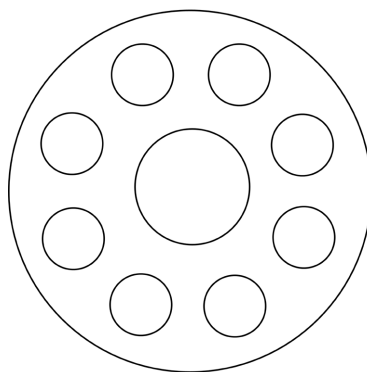


Figure 3. Schematic diagram of the repeated structure of finite circle
图 3. 有限圆周重复结构示意图

2.2. 重复结构识别方法

重复结构识别方法实际上是对重复结构相关信息的识别，并将其与输运计算模块衔接的过程。但对反应堆堆芯进行模拟计算时，从燃料棒到组件再到堆芯，从内向外进行建模。几何模型信息主要包括三部分：栅元部分、几何部分、材料部分[21] [22]。所以在这个过程中，不仅是对重复结构相关信息的识别，

还包括对于用户输入的几何模型的整体信息的识别。

重复结构识别方法主要包括两部分，第一部分是对栅元上的层级进行处理，第二部分是对每个层级进行处理。这样分别从栅元方面和层级方面对重复结构进行处理，能够更好地了解重复几何结构模型的整体情况。

从栅元方面对重复结构进行处理的具体流程图，如图 4 所示，主要是在已有几何信息的基础上，从栅元方面对重复结构的信息进行整合，主要包括：确定栅元所在层级，并确定是该层级的第几部分；确定栅元是 Lattice 阵列填充还是单独的 Fill 填充；如果是 Lattice 阵列填充的栅元，遍历所有 Cell，确定填充该重复结构的每个重复栅元所在的栅元。

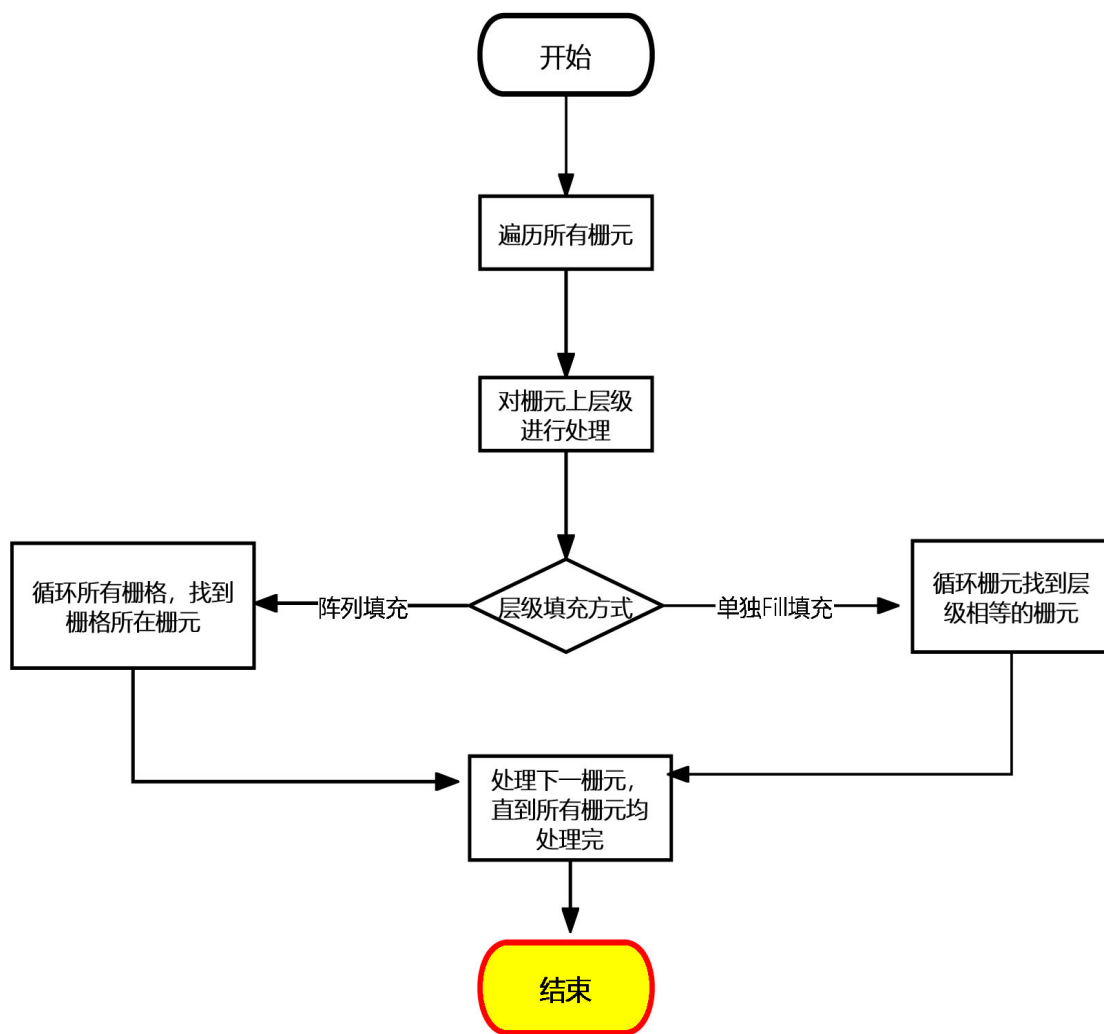


Figure 4. Flowchart of hierarchical processing on cell

图 4. 栅元上的层级处理流程图

从层级方面对重复结构进行处理的具体流程图，如图 5 所示，主要是从层级方面对重复结构的信息进行整合，主要包括：确定每一层级填充的重复栅元所在的栅元，使得用户可以更精确地指定某个层级位置上特定的 Cell；确定每个层级有多少栅元填充，并确定每个层级填充的最底层无重复几何栅元的数量，能够更好地验证重复结构展开为最底层无重复几何栅元的正确性。

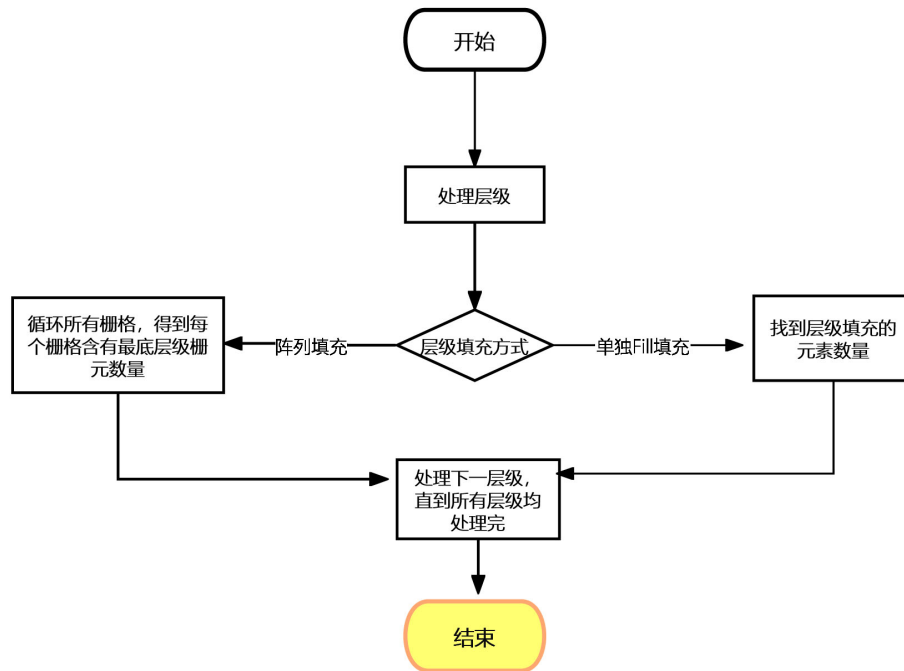


Figure 5. Hierarchical processing flowchart
图 5. 层级处理流程图

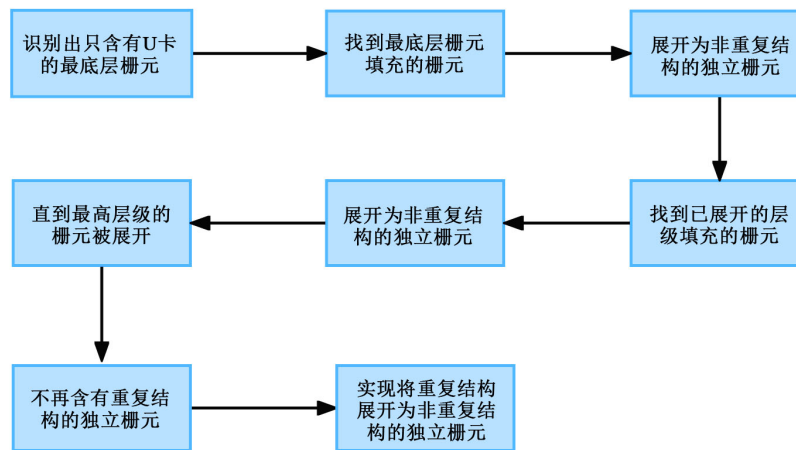


Figure 6. Flowchart of the unfolding of repeated structures
图 6. 重复结构展开流程图

3. 重复结构展开方法

由于在堆芯物理热工耦合计算、燃耗计算时，重复结构不便建立层级的反应率计数，也无法指定元件层级的材料温度，对于这些特定情况，需要研究蒙卡程序重复结构的展开方法。

重复结构展开方法是实现将模块阵列形式描述的重复几何栅元展开为最底层级的无重复几何独立栅元。这种方法主要采用“自下而上”的方式，如图 6 所示。首先根据重复结构识别方法了解的有关重复结构的信息，识别出最底层级包含的栅元，即没有被其他层级填充的栅元。遍历所有栅元，找到只由最低层级填充的栅元，将该栅元信息和最低层级信息进行整合后，将该栅元展开为无重复结构的独立栅元，这就是完成第一层级的展开。找到已展开层级填充的栅元，将其和已展开层级的信息进行整合，实现该

栅元的展开。按照这个方法，一层层往上展开，直到最高层级所在栅元均被展开为止。由于重复结构是可以把同样的几何层级填充在多个位置上，也可以不同的几何层级按照特定顺序填充在同一位置，这会使得展开过程会变得更加复杂，所以重复结构的识别方法是至关重要的。

3.1. 重复栅元的定位

重复栅元的定位是指确定重复结构中每个重复栅元的位置，就可以计算得到重复栅元在该重复结构中的相对坐标，从而确定该重复栅元的相对于中心重复栅元的平移距离。重复结构中，常见的重复模式有平行六面体重复、六棱柱重复、圆周等分有限重复。其中，前两种重复模式属于线性重复。

线性重复模式是指同一种栅元在空间中线性拓展，各个栅元之间通过平移可以重合。在图 7 中可以看到：如果以左下角这个栅元的中心为原点，那么栅元(1, 0)可以是栅元(0, 0)按向量 b_2 平移后的结果，同理有栅元(0, 1)。对于这样的线性重复模式，我们称 $\{b_1, b_2\}$ 是该线性模式的重复基，显然各个重复基底之间应该是线性无关的。有了重复基，就可以由重复栅元的位置 (k_1, k_2) 得到相对坐标 (x, y) ，从而得到平移的距离。

3.1.1. 平行六面体重复结构的相对坐标确定

对于六面体重复结构，确定重复结构中重复栅元(0, 0)的位置，确定六面体重复结构栅元的排列规律，如图 1 所示，从而确定每个重复栅元的位置 (k_1, k_2) 。对于六面体重复结构这种线性重复模式，其重复基向量 b_1 和 b_2 为栅格增加的方向如图 7 所示，其表达式为：

$$b_1 = \left(\frac{L_2}{\tan \theta}, L_2, 0 \right) \quad (1)$$

$$b_2 = \left(\frac{L_1}{\sin \theta}, 0, 0 \right) \quad (2)$$

式中， L_1 和 L_2 分别为相邻栅元之间的栅距， θ 为向量 b_1 和 b_2 之间的夹角。设定重复栅元(0, 0)的中心 A 点的坐标为(0, 0)，待确定的重复栅元中心 M 点的坐标为 (x, y) ，根据其重复基向量的表达式：

$$AM = k_1 b_1 + k_2 b_2 \quad (3)$$

从而得到 M 点的坐标的表达式：

$$x = k_1 \frac{L_2}{\tan \theta} + k_2 \frac{L_1}{\sin \theta} \quad (4)$$

$$y = k_1 L_2 \quad (5)$$

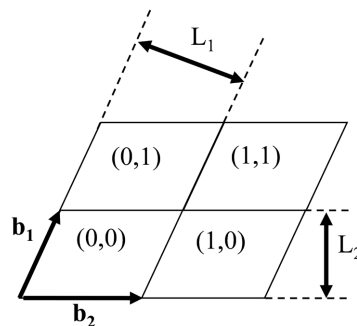


Figure 7. Schematic diagram of the repeated structures of parallelepiped
图 7. 平行六面体重复结构示意图

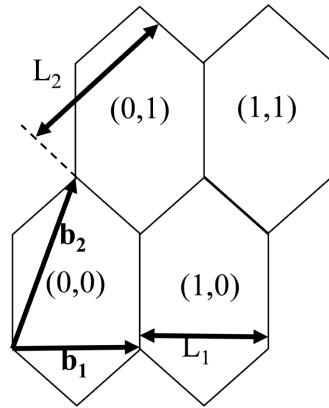


Figure 8. Schematic diagram of repeated structures of hexagonal prism
图 8. 六棱柱重复结构示意图

3.1.2. 平行六面体重复结构的相对坐标确定

对于六棱柱重复结构，确定重复结构中重复栅元(0, 0)的位置，确定六棱柱重复结构栅元的排列规律，如图 2 所示，从而确定每个重复栅元的位置 (k_1, k_2) 。对于六面体重复结构这种线性重复模式，其重复基向量 b_1 和 b_2 为栅格增加的方向如图 8 所示，其表达式为：

$$b_1 = (L_1, 0, 0) \tag{6}$$

$$b_2 = \left(\frac{L_1}{2}, \sqrt{L_2^2 - \left(\frac{L_1}{2}\right)^2}, 0 \right) \tag{7}$$

式中， L_1 和 L_2 分别为 b_1 和 b_2 方向的栅距。设定重复栅元(0, 0)的中心 A 点的坐标为(0, 0)，待确定的重复栅元中心 M 点的坐标为(x, y)，根据其于重复基向量的表达式：

$$AM = k_1 b_1 + k_2 b_2 \tag{8}$$

从而得到重复栅元中心位置坐标 M 点的表达式：

$$x = k_1 L_1 + k_2 \frac{L_1}{2} \tag{9}$$

$$y = k_2 \sqrt{L_2^2 - \left(\frac{L_1}{2}\right)^2} \tag{10}$$

3.2. 重复结构范围的确定

重复结构填充范围的确定是指用一种重复结构填充了某上层栅元后，如果对重复结构进行展开，需要知道上层栅元的边界范围，判断上层边界范围是否对下层的重复结构进行切割。但下层的重复结构并不知道被哪个上层栅元所引用，也不知道引用了多大的空间，这些都需要由上层栅元的边界来确定，这就用到重复结构识别功能，确定上层的栅元和下层的重复结构的关联。根据已知的重复结构中每个栅元的位置和上层栅元的边界范围，重复结构被上层栅元切割，重复栅元主要分为三种情况：① 该重复栅元在上层边界范围内，没有被切割，该重复栅元几何范围没有发生变化；② 该重复栅元被上层边界切割了部分几何，需要合并上下层级的边界关系，生成新的边界表达式，并尽可能地进行化简，如图 9 所示；③ 该重复栅元完全被上层边界切掉，在重复结构展开，这类是需要被剔除的冗余栅元，不需要生成新的栅元。

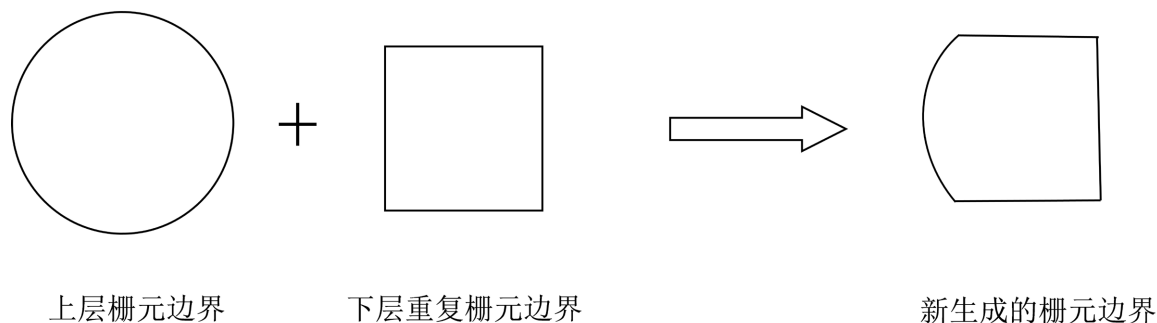


Figure 9. Schematic diagram of hierarchical boundary synthesis
图 9. 层级边界合成示意图

3.3. 重复栅元号的定义

将重复结构展开为无重复几何的独立栅元，在确定重复栅元在上层栅元范围内，需要对展开后的独立栅元生成栅元号。展开前，重复结构不便于直接指定每个重复栅元的栅元号。在展开过程中，对新生成的栅元按照一定的规律进行编号，使用户可以精确地指出重复结构中某个特定位置的栅元，便于指定该栅元材料温度以及对该栅元进行反应率计数。

3.4. 重复栅元曲面的生成

将重复结构展开为无重复几何的独立栅元，在确定重复栅元在上层栅元范围内，就需要对展开的栅元生成新的曲面。确定栅格元素中心坐标的位置后，由用户输入的曲面方程和中心坐标平移的距离，对每个重复栅元生成新的曲面方程，其中需要对新生成曲面系数取一个合适的精度，不同栅格之间必须能够精确连接起来，使模型达到合理的结构，不能出现未定义的区域，也不能有重叠区域，否则在运行文件时会出现粒子丢失的错误从而导致运行失败。由于相邻的重复栅元会生成相同的曲面方程，就会产生重复面。首先，通过手动删除重复面的方式，验证了重复面对计算结果没有影响。现在在合并新生成曲面中重复面的工作，已经将曲面卡中的重复面删除，正在进行栅元卡中已删除曲面的曲面号的替换工作。

4. 算例验证与结果分析

本文算例计算使用的截面数据为 ENDF/B-VII 数据库的连续能量截面数据。计算条件是每代 15,000 个粒子，计算 200 代，统计后 150 代，初始源取为几何中心位置的点源。

为了测试重复结构展开后结果的正确性，将对 k_{eff} 进行比较来验证结果的正确性，结合统计误差(σ)用来确定结果是否在统计上具有一致性，当差异在 $\pm 3\sigma$ 间内(置信度为 99.6%)时，可以认为结果在统计上是相同的。 σ 定义为：

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2} \quad (11)$$

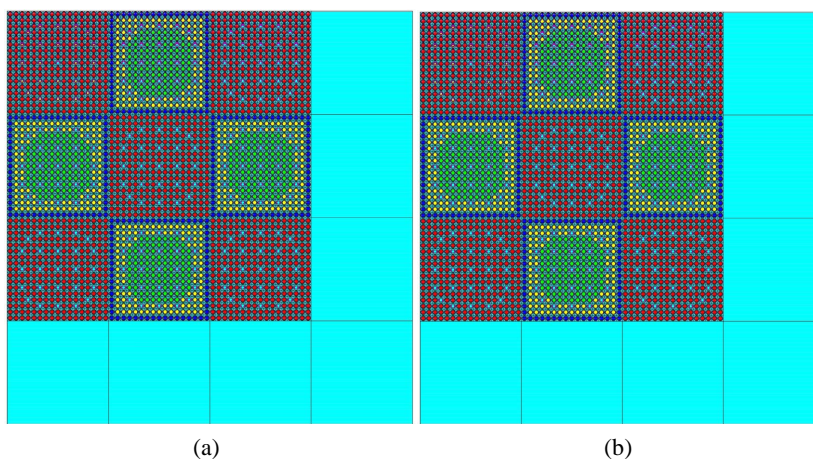
式中， σ_1 和 σ_2 分别为重复结构展开前和展开后的 k_{eff} 标准偏差。

4.1. 小型堆算例

该小型堆算例含有三层重复结构，且重复结构是六面体填充。小型堆堆芯由 9 个燃料组件排列成正方形栅格，每个燃料组件的截面为 $21.4215 \times 21.4215 \text{ cm}^2$ 的正方形栅格，其燃料组件根据填充不同分为三种不同类型，整个堆芯被一层反射层组件包围。每个燃料组件包含 17×17 个燃料棒，每个燃料棒的截面为 $1.26015 \times 1.26015 \text{ cm}^2$ 的正方形栅格。

Table 1. k_{eff} value before and after the unfolding of the repeated structures in example 1**表 1.** 算例 1 重复结构展开前后的 k_{eff}

	Final k_{eff}	Standard Deviation	Δk_{eff}	3σ
展开前	1.15546	0.00048		
展开后	1.15510	0.00049	0.00036	0.002058

**Figure 10.** Schematic diagrams of core before and after the unfolding of the repeated structures in example 1: (a) Before unfolding; (b) After unfolding**图 10.** 算例 1 重复结构展开前后堆芯示意图: (a) 展开前; (b) 展开后

该算例展开了三层重复结构, 展开了 4624 个燃料棒, 展开后 7858 个栅元、20,933 个曲面。表 1 展示了算例 1 中重复结构展开前和展开后的计算结果, 包括有效增值因数 k_{eff} 、标准偏差、展开前后 k_{eff} 的偏差和 3σ 。从表中计算结果中可以看出, 展开前和展开后的 k_{eff} 之间的偏差为 36 pcm, 在 $\pm 3\sigma$ 以内, 说明对于 k_{eff} 的计算, 展开前后的结果吻合得比较好。

图 10 分别是重复结构展开前和展开后堆芯示意图, 可以看出展开后几何模型并未变化, 说明重复结构展开前后在几何模型方面吻合得比较好。

4.2. 大亚湾组件算例

该算例含有两层重复结构, 且重复结构是六面体填充。该算例是大亚湾其中的一个燃料组件, 该组件由 17×17 个燃料棒排列成正方形栅格, 每个燃料棒的截面为 $1.26 \times 1.26 \text{ cm}^2$ 的正方形栅格。

该算例展开了两层重复结构, 展开了 289 个燃料棒, 展开后 1275 个栅元、1884 个曲面。表 2 展示了算例 2 中重复结构展开前和展开后的计算结果, 包括有效增值因数 k_{eff} 、标准偏差、展开前后 k_{eff} 的偏差和 3σ 。从表中计算结果中可以看出, 展开前和展开后的 k_{eff} 之间的偏差为 187 pcm, 在 $\pm 3\sigma$ 以内, 说明对于 k_{eff} 的计算, 展开前后的结果吻合得比较好。

图 11 分别是重复结构展开前和展开后组件示意图, 可以看出展开后几何模型并未变化, 说明重复结构展开前后在几何模型方面吻合得比较好。

Table 2. k_{eff} value before and after the unfolding of the repeated structures in example 2**表 2.** 算例 2 重复结构展开前后的 k_{eff}

	Final k_{eff}	Standard Deviation	Δk_{eff}	3σ
展开前	0.93746	0.00058		
展开后	0.93559	0.00063	0.00187	0.002569

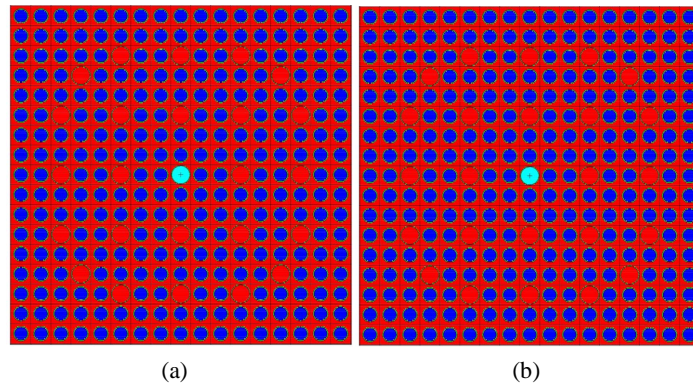


Figure 11. Schematic diagrams of core before and after the unfolding of the repeated structures in example 2: (a) Before unfolding; (b) After unfolding

图 11. 算例 2 重复结构展开前后堆芯示意图: (a) 展开前; (b) 展开后

4.3. 研究堆算例

该算例含有五层重复结构，且重复结构是六棱柱填充。该研究堆堆芯是由 7×7 组件排列成六棱柱栅格，每个燃料组件由 15×15 个燃料棒构成，堆芯还包括控制棒组件。

该算例展开了五层重复结构，展开了 19 个燃料组件和 12 个控制棒组件，展开了 5491 个燃料棒，展开后 26,482 个栅元、95,293 个曲面。表 3 展示了算例 3 中重复结构展开前和展开后的计算结果，包括有效增值因数 k_{eff} 、标准偏差、展开前后 k_{eff} 的偏差和 3σ 。从表中计算结果中可以看出，展开前和展开后的 k_{eff} 之间的偏差为 95 pcm，在 $\pm 3\sigma$ 以内，对于 k_{eff} 的计算，展开前后的结果吻合得比较好。验证了重复结构展开模块的可靠性。

图 12 分别是重复结构展开前和展开后堆芯示意图，可以看出展开后几何模型并未变化，说明重复结构展开前后在几何模型方面吻合得比较好。

Table 3. k_{eff} value before and after the unfolding of the repeated structures in example 3

表 3. 算例 3 重复结构展开前后的 k_{eff}

	Final k_{eff}	Standard Deviation	Δk_{eff}	3σ
展开前	0.80529	0.00057		
展开后	0.80434	0.00054	0.00095	0.002356

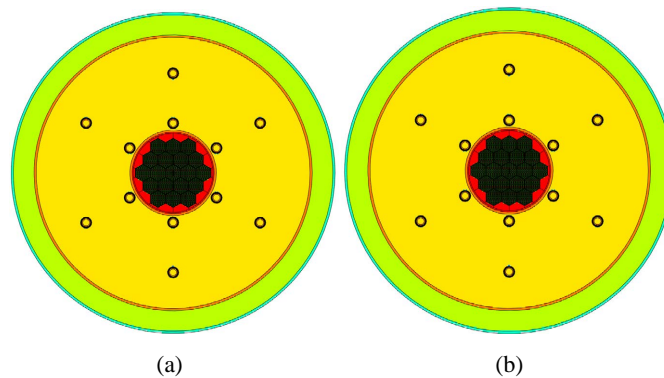


Figure 12. Schematic diagrams of core before and after the unfolding of the repeated structures in example 3: (a) Before unfolding; (b) After unfolding

图 12. 算例 3 重复结构展开前后堆芯示意图: (a) 展开前; (b) 展开后

为了验证蒙卡程序重复结构展开方法的正确性, 首先利用上述三个算例对比了重复结构展开前后的 k_{eff} 的误差, 然后利用上述三个算例对比了重复结构展开前后几何模型的变化, 对比结果符合良好, 验证了蒙卡程序重复结构展开方法的正确性。

5. 结论

由于蒙卡程序在物理热工耦合、燃耗计算时需要重复结构的识别和展开进行处理, 本文首先研究了蒙卡程序对重复结构的识别方法; 其次, 研究了蒙卡程序重复结构的展开方法, 将重复几何栅元展开为最底层无重复几何的独立栅元。最后, 选取小型堆、大亚湾组件以及研究堆为算例验证结果的正确性, 小型堆展开了三层重复结构, 展开了 4624 个燃料棒, 展开后 7858 个栅元、20,933 个曲面; 大亚湾组件算例展开了两层重复结构, 展开了 289 个燃料棒, 展开后 1275 个栅元、1884 个曲面; 研究堆算例展开了五层重复结构, 展开了 19 个燃料组件和 12 个控制棒组件, 展开了 5491 个燃料棒, 展开后 26,482 个栅元、95,293 个曲面。并将重复结构展开前后的 k_{eff} 和几何模型进行对比, 验证了蒙卡程序重复结构展开方法和功能的正确性。

基金项目

国家磁约束核聚变能发展研究专项(2019YFE03110000, 2019YFE03110003)。

参考文献

- [1] 孙嘉龙, 余纲林, 余顶, 等. 堆用蒙特卡罗程序几何重复结构功能开发[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(1): 219-222.
- [2] 李耀东. 基于蒙特卡罗方法角度离散均匀化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2018.
- [3] 吴宜灿, 李莹, 卢磊, 等. 蒙特卡罗粒子输运计算自动建模程序系统的研究与发展[C]//中国核学会, 计算机物理学会, 反应堆数值计算与粒子输运专业委员会. 第十二届反应堆数值计算与粒子输运学术会议论文集. 合肥: 中科院等离子体物理研究所, 2008: 9.
- [4] 苏统, 刘建全, 胡伟晨, 等. 基于 MCNP 的 AP1000 压水堆栅元反应性模拟[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(4): 347-351.
- [5] 钟兆鹏, 施工, 胡永明. MCNP 程序在反应堆临界计算中的应用[J]. 核动力工程, 2003, 24(1): 8-11.
- [6] Romano, K.P. and Forget, B. (2013) The OpenMC Monte Carlo Particle Transport Code. *Annals of Nuclear Energy*, **51**, 274-281. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.06.040>
- [7] 郝鹏飞, 杨波, 秦凯文, 等. 基于 BEAVRS 基准例题的 OpenMC 程序建模及计算验证[J]. 能源研究与管理, 2021(4): 80-84, 95.
- [8] 李泽光, 王侃, 余顶, 等. 自主堆用蒙卡模拟程序 RMC 2.0 开发(英文) [J]. 核动力工程, 2010, 31(S2): 43-47.
- [9] 徐海坤, 匡邓晖, 刘杰, 等. 基于 RMC 的蒙特卡罗程序性能优化[J]. 计算机工程与科学, 2021, 43(4): 634-640.
- [10] 丘意书, 余顶, 范潇, 等. 堆用蒙特卡罗程序 RMC 的全堆计算研究[J]. 核动力工程, 2013, 34(z1): 1-4, 23.
- [11] Jaakko, L. (2022) Methodology, Applications and Performance of the CAD-Based Geometry Type in the Serpent 2 Monte Carlo Code. *Annals of Nuclear Energy*, **176**, Article ID: 109259. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109259>
- [12] Eric, D. (2023) Validation of the Serpent 2 Monte Carlo Code for Reactor Dosimetry Applications. *EPJ Web of Conferences*, **278**, Article No. 02002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202327802002>
- [13] 刘伟, 白宁, 单建强, 等. PT-SCWR 燃料组件的物理热工耦合分析[J]. 核动力工程, 2013, 34(6): 5-9.
- [14] 刘鹏, 史敦福, 李瑞, 等. 基于蒙特卡罗程序 JMCT 模拟计算堆芯物理基准题 VERA [J]. 原子能科学技术, 2023, 57(6): 1131-1139.
- [15] 余顶, 王侃, 余纲林. 堆用蒙卡程序燃耗计算功能开发[J]. 核动力工程, 2012, 33(3): 1-5, 11.
- [16] 韩立会, 张华阳, 袁斌, 等. NPTS 程序质子输运蒙特卡罗模拟方法研究[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(7): 1281-1291.
- [17] 梁金刚, 葛攀和, 吴高晨, 蔡云, 王侃. 反应堆蒙特卡罗程序 RMC 模型可视化功能开发[J]. 原子能科学技术,

2014, 48(S1): 599-603.

- [18] 邓小杰. 堆用蒙卡程序 RMC 几何模型转换方法的研究和实现[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [19] 孙嘉龙, 余顶, 余纲林, 等. RMC 复杂几何功能设计[C]//核反应堆系统设计技术重点实验室 2011 年会. 成都: 核反应堆系统设计技术重点实验室年报, 2011: 63-68.
- [20] 孙嘉龙. RMC 重复结构功能开发[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2011.
- [21] 樊睿辰. 基于 MCNP 和 SuperMC 的压水堆堆芯建模方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 东华理工大学, 2018.
- [22] 张晓敏, 张文仲, 骆亿生. MCNP 程序在反应堆堆芯建模中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(2): 219-221.