

蒙特卡罗粒子输运计算中源可视化分析方法及应用

曹 佩^{1,2} 龙鹏程¹ 甘 仨¹ 吴 斌¹ 郝丽娟¹

1(中国科学院核能安全技术研究所 中子输运理论与辐射安全重点实验室 合肥 230031)

2(中国科学技术大学 合肥 230027)

摘要 精准合理的源粒子分布是实现核装置高保真粒子输运数值模拟计算的前提。为了更方便地检查和分析核装置内的源粒子分布特征,本文提出了一种基于自适应分段树的源粒子可视化分析方法,该方法通过预先构建几何分段库,提取几何以及渲染属性等特征,动态创建分段树结构,实现了百万级以上源粒子信息高效可视化。最后,本文将该方法应用在 VENUS-3 反应堆屏蔽分析的中子源建模与中子准直装置的设计之中。结果表明:本文方法可以辅助用户完成核装置源高保真建模以及相关设计优化等工作,在较大程度上提升了计算程序参数设置的正确性和便利性。

关键词 核装置, 输运计算, 源粒子可视化, 自适应分段树

中图分类号 TL329⁺.2

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.020502

Visual analysis of source particle and its application in Monte Carlo transport simulation

CAO Pei^{1,2} LONG Pengcheng¹ GAN Quan¹ WU Bin¹ HAO Lijuan¹

1(Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

2(University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract [Background] The high-fidelity particle transport numerical simulation for nuclear facility requires accurate and efficient source particles distribution. [Purpose] This study focuses on reviewing and analyzing the distribution feature of source particles intuitively in nuclear facility and presents a visual analysis method for source particles. [Methods] Based on self-adaptive segmented tree and pre-build geometry library, the features of geometry and rendering attributes were extracted to dynamically create the segmented trees. Then, over million source particles

国家自然科学基金(No.11605233, No.71671179)、中国科学院信息化专项(No.XXH13506-104)、国家磁约束核聚变能发展研究专项项目(No.2015GB116000)、中国科学院合肥物质研究院院长基金(No.YZJJ201618)、国家科技部国家科技基础条件平台项目“国家基础科学数据共享服务平台”(No.DKA2017-12-02-17)、中国科学院合肥物质科学研究院项目(No.KP-2017-19)、安徽省重大科技专项项目(No.18030801135)、中国科学院青年创新促进会专项项目、产业化基金资助

第一作者: 曹佩, 女, 1994年出生, 2016年毕业于山东大学, 现为硕士研究生, 研究领域为建模与可视化方法研究

通信作者: 甘仨, E-mail: quan.gan@fds.org.cn

收稿日期: 2018-11-14, 修回日期: 2018-12-10

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11605233, No.71671179), Information Project of Chinese Academy of Sciences (No.XXH13506-104), National Magnetic Confinement Fusion Program of China (No.2015GB116000), the President of Chinese Academy of Sciences Foundation for Young Project (No.YZJJ201618), National Fundamental Science Data Sharing Program (No.DKA2017-12-02-17), Project of Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences (No.KP-2017-19), Major Science and Technology Projects of Anhui Province (No.18030801135), Special Project of Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences, Industrialization Fund

First author: CAO Pei, female, born in 1994, graduated from Shandong University in 2016, master student, focusing on modeling and visualization

Corresponding author: GAN Quan, E-mail: quan.gan@fds.org.cn

Received date: 2018-11-14, revised date: 2018-12-10

were shown in the form of two-dimensional and three-dimensional visualization. Finally, this method was verified on neutron source modeling and neutron collimation device design for shielding analysis of VENUS-3 reactor. **[Results]** The results show that the proposed method is helpful for users to complete high fidelity modeling and the design and optimization of nuclear facilities. **[Conclusion]** To a certain extent, it can improve the efficiency and correctness of modeling during the procedure of calculation.

Key words Nuclear devices, Transport simulation, Source particles visualization, Self-adaptive segmented tree

随着计算机技术的蓬勃发展,模拟计算已经成为解决各学科问题的重要手段,但模拟对象的复杂化为整个计算过程带来了前所未有的挑战。例如核能领域的高保真数值模拟计算^[1],需要对百万量级以上的源粒子进行模拟,源粒子有三种类型:中子、光子和电子,具有位置、能量以及飞行方向等分布特征。多而复杂的源粒子数据是制约计算结果准确性的关键^[2-4]。

可视化技术具有直观性、灵活性的优势,成为模拟计算中最常用的数据分析手段,已经在蒙特卡罗中子学计算领域广泛应用,由FDS 凤麟核能团队研发的中子输运设计与安全评价软件系统 SuperMC^[5-6] (Super Multi-functional Calculation Program for Nuclear Design and Safety Evaluation)能够实现大规模重复结构 CAD (Computer Aided Design)模型的快速截面可视化^[7]以及计算结果的可视化;美国洛斯阿拉莫斯国家实验室研发的蒙特卡罗粒子输运程序 MCNP^[8]实现了源粒子的可视化,但受二维视图的表现能力限制,仍无法直观地对源粒子分布特征进行分析。

为了更加直观地对源粒子分布特征进行检验,本文基于 SuperMC 的一体化中子输运计算建模,提出了一种基于自适应分段树的源粒子可视化分析方法,实现对源粒子信息的高效流畅可视化,通过精细的三维建模和粒子运行轨迹动画渲染,使用户直观感受源粒子的位置、能量和方向分布。不仅能够提高反应堆数值模拟计算的源建模效率和正确性,也可以检验某些指定核装置的设计是否符合标准。中子输运设计与安全评价软件系统 SuperMC 是由 FDS 凤麟核能团队研发的一款具有完全自主知识产权的通用、智能、精准的核设计与安全评价软件,并已广泛用于反应堆设计^[9-13]、材料研究^[14]、实验及核技术应用^[15-17]等不同的研究领域。其建模模块已经实现了一体化的中子输运计算建模,可以满足几何、源、材料、计数和输运物理过程的完整建模,为本文工作的开展提供了基础。

1 自适应分段树

基于蒙特卡罗方法的核装置粒子输运模型中,

源粒子信息具有数量多和源几何分布不均匀等特点。例如在 VENUS-3 反应堆模型中,模型中至少包含 7 000 个栅元以及 10^6 个源粒子,因此对核装置的源粒子信息进行可视化,需要花费大量时间对庞大的几何数据和粒子数据进行逐一渲染,将严重影响整个可视化过程的速度。

LOD (Level of Detail)是用来解决运行时流畅度的主流技术,采用的是空间换时间的方式。但是核装置模型中包含有成千上万个几何实体,纯粹用 LOD 技术在提高流畅度的同时,也产生了内存消耗的代价,效果并不理想;考虑从数据结构层面进行优化,层次数据模型的结构简单、清晰、明朗,很容易看到各个实体之间的联系,对一个节点属性进行修改可以实现对该节点下所有子节点属性的修改,利用层次数据模型的这一特性来组织几何数据,能够提高渲染速度。

在上述技术和数据结构的基础上,本研究提出了一种自适应分段树的结构,用来组织模型中的几何数据。分段是组织数据的基本结构,如图 1 所示,分段中包含实体的几何信息,属性信息以及子分段信息。其中子分段信息为空的分段称为叶分段。

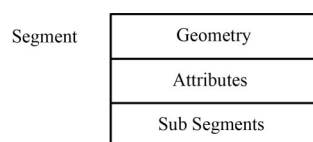


图1 分段结构图
Fig.1 Structure of segment

在分段树结构中,段和段之间的属性存在继承关系,通过对一个分段的渲染属性进行修改,可以高效实现该分段下所有模型渲染属性的修改,减少了单独对几何进行操作的次数。因此,构建合理的渲染分段树结构可以提高可视化效率。

在实际可视化过程中,不同应用环境下的分段树结构千变万化。本文根据几何特征和渲染属性,实现了一种自适应分段树的构建方法。

图 2 所示为分段树的自适应创建过程,分段库即当前模型中的所有叶分段的集合 $S=\{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$,首先提取叶分段的几何特征,几何特征相同的

叶分段将被放置在同一个父分段下,从而形成几何特征分段树;针对每一个几何特征分段,提取渲染属性,将渲染属性相同的叶分段放置在同一个分段下,最后形成分段树结构。

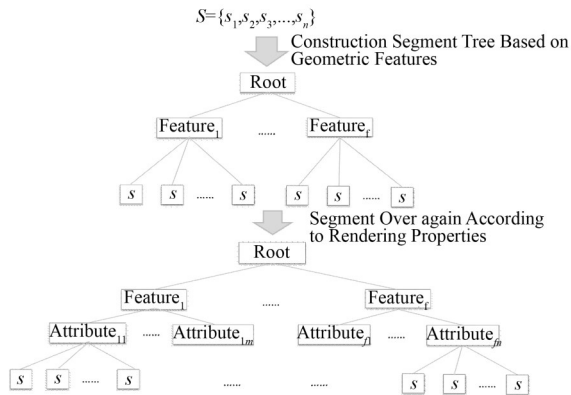


图2 自适应分段树的生成过程

Fig.2 The procedure for generating self-adapted segment tree

在本文中,分段树中将生成<Cell>和<Particle>等几何特征分段,<Cell>分段用来描述模型中的几何模型;<Particle>分段专门用来描述源粒子模型。而为了更高效地处理数量庞大的源粒子模型,将源粒子的属性分段划分为能量分段<Energy>、方向分段<Direction>和时间片分段<Time>。在大规模源粒子模型渲染过程中,<Particle>分段下不同的属性分段可以自由地组合,构建效率最高的渲染分段树结构,不仅提高了可视化效率,同时也方便了数据特征的快速提取。

为了实现源粒子与几何模型叠加可视化,使用<Cell>分段来描述几何模型。图3是特征为<Cell>的子分段树,对几何模型的位置特征进行提取,根据几何模型与源粒子的距离,对几何模型进行分类。距离特征代表着透明度特征,距离越远几何实体越透明。

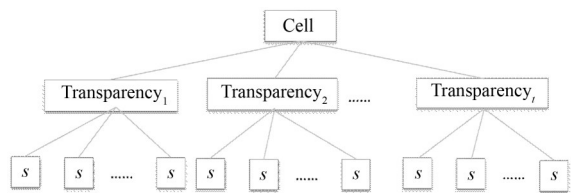


图3 <Cell>子分段树

Fig.3 <Cell> sub-segment tree

对源粒子能量进行可视化时,首先对源粒子能量分布特征进行提取,根据提取的特征对<Particle>进行分段,属于不同能量段的粒子将被渲染为不同的颜色,同一个能量段的粒子,只要对父节点的颜色属性进行渲染,就可以完成对该能量段所有粒子颜

色的渲染。形成如图4所示的分段树。

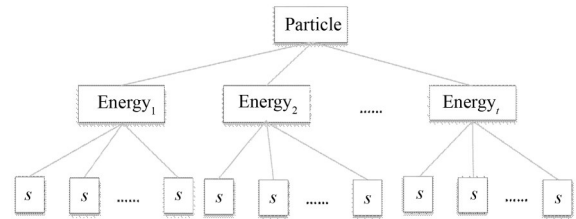


图4 能量特征分段树

Fig.4 Energy characteristic piecewise tree

在高保真数值模拟计算中需要模拟数百万以上的粒子的运动轨迹,并且单个粒子具有一定的含时特征,为了实现源粒子运动轨迹三维动画效果,采用了时间片分段结构,根据源粒子产生的时间和飞行时间对几何特征为<Particle>的分段进行分割,使得不同批次的源粒子在不同的时间段内进行动画绘制,从而降低单位时间内需要处理的源粒子模型数量,保证了三维动画的流畅性。在时间片分段下,还可以按照具体应用增加方向分段和能量分段,从而实现相同属性源粒子的快速绘制和数据提取。图5所示是对<Particle>分段按照时间进行分段的结构。

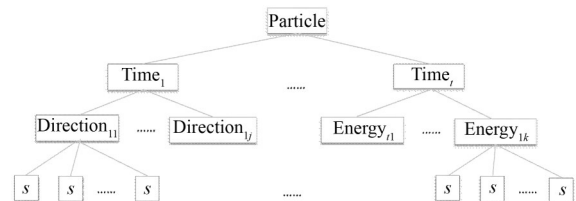


图5 使用时间片分段的渲染树结构

Fig.5 Structure of time-segmented rendering tree

2 可视化在VENUS-3屏蔽分析中的应用

在反应堆屏蔽分析中,需要在反应堆内部构建精准的裂变源粒子分布,其源粒子信息数量庞大,不可能采用逐一描述的方式进行建模,目前通常采用编写源子程序的方法进行建模,导致很难检查其正确性。因此在VENUS-3^[18]屏蔽基准例题建模阶段使用本研究的方法可视化反应堆中源粒子位置、能量和方向信息并进行分析。

2.1 案例描述

VENUS装置是一座零功率临界装置,图6所示是VENUS-3反应堆堆芯的1/4区域模型,源粒子分布在图中所示的标号为②③区域,区域①和区域④将不会有源粒子分布。堆芯内源粒子方向近似为各向同性,源粒子能谱为Watt裂变谱分布:

$$P(E) = C \exp(-E/a) \sinh(bE)^{1/2} \quad (1)$$

式中： $C=0.453$ ； $a=0.965$ ； $b=2.29$ 。

2.2 可视化分析及效果

在本案例中,为了确定源建模的保真度,需要对源粒子位置、能量及其方向分布进行检验。

图7是对VENUS-3例题进行源参数可视化的结果。图7(a)为可视化结果在 $Z=0$ 处的剖面图;图7(b)为可视化结果在 $Z=25$ 处的剖面图;图7(c)为可视化结果的 XZ 截面图;图7(d)为源粒子三维可视化

效果。与图6进行对比,除区域①和区域④之外,区域②③已经被源粒子填充,证明模型中源粒子位置分布达到了预期效果。

图7中除了显示源粒子分布位置以外,不同颜色代表源粒子属于不同的能量分段。通过获取不同能量分段中源粒子信息,可以得到源粒子的能量分布特征。

图8中曲线①是标准的Watt裂变中子谱^[19],曲线②是根据从源粒子信息中提取的能量分布曲线,对比两曲线趋势吻合良好,证明源粒子的能量分布满足预定要求。

中粒子参数的设置是否合理。

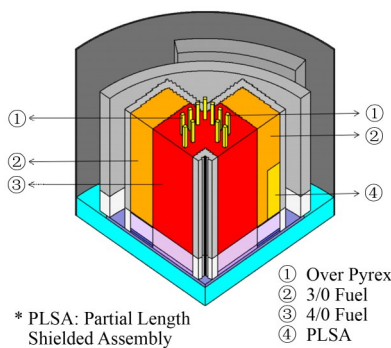


图6 VENUS-3堆芯区域模型
Fig.6 Core region model of VENUS-3 reactor

根据例题描述可知,粒子方向分布是各向同性的,因此应该呈现均匀分布特征。本文分别对不同的粒子个数进行了方向特征提取。从图9(a)、(b)可以看出,当源粒子数目设置为5 000时,抽样出来的粒子不满足各向同性的均匀分布,当源粒子数目设置为 10^6 时,抽样出的结果基本可以满足各向同性的均匀分布,说明只有设置足够多的粒子数,才能够得到正确的粒子方向分布。

在本案例中,还对自适应分段树对渲染性能的提升进行了测试。将构建源粒子模型到完成粒子动画渲染定义为延迟时间。表2是在表1所示的实验环境下,逐渐增大粒子规模,逐一渲染方法和基于自适应分段树的渲染方法在不同粒子规模下的时间对比。可以看出,在粒子数量大于5 000采用逐一渲染方法已经超出当前计算机性能处理能力,使用本文的自适应分段树绘制方法仅需要0.18 s。在本案例中,最终的粒子可视化规模为 10^6 ,如果采用逐一渲染方法,将无法在可以接受的延迟时间内获得流畅的动画效果,使用自适应分段树的渲染方法则可以避免这种情况发生。

综上所述,本文发展的基于自适应分段树的源粒子可视化分析方法,可以用于检验输运计算过程

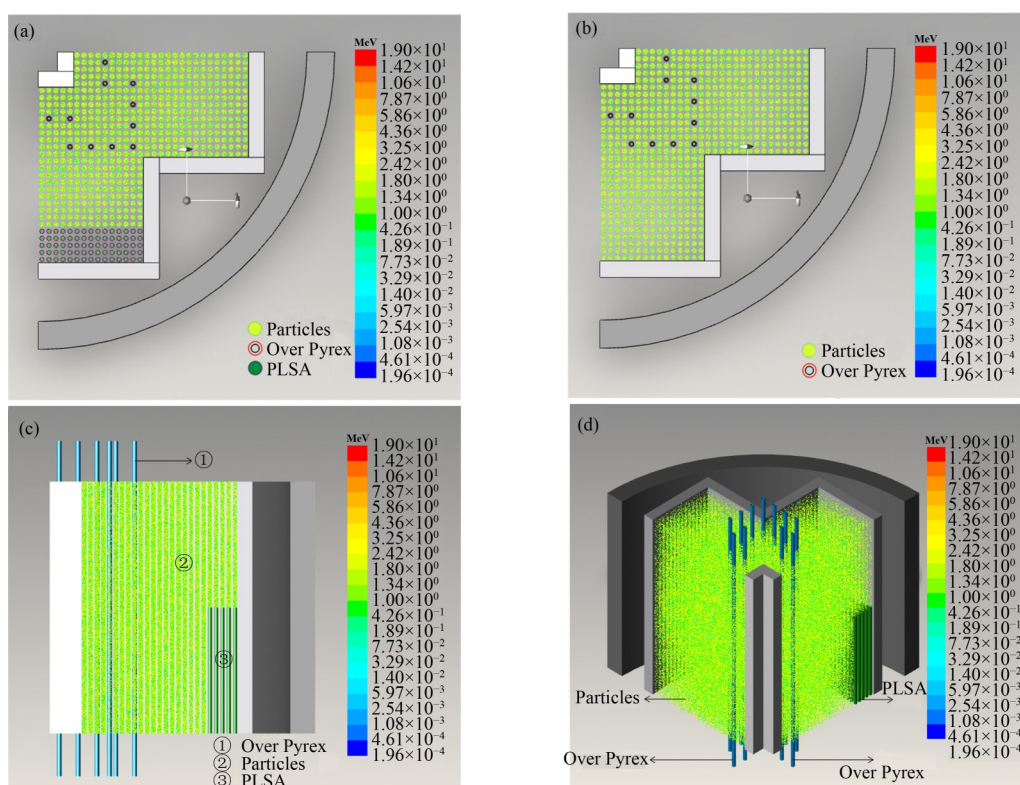


图7 VENUS-3 基准例题源粒子可视化 (a) $Z=0$ 轴向剖面图, (b) $Z=25$ 轴向剖面图, (c) XZ 平面截面图, (d) 三维可视化
Fig.7 The source particle visualization of VENUS-3 benchmark (a) The axial section in $Z=0$, (b) The axial section in $Z=25$, (c) The cross section in the (X,Z) plane, (d) 3D benchmark

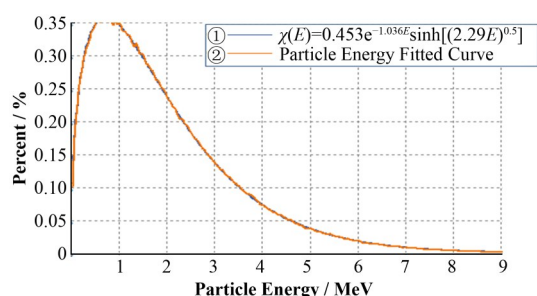


图8 VENUS-3 基准例题源粒子能量分布
Fig.8 The distribution of source particle energy of VENUS-3 benchmark

表1 实验环境

Table 1 Experiment environment

名称		
Name		
性能参数		
Performance parameter		
硬件 Hardware	Processor	Intel(R) Core(TM)i7-6700
	CPU	@3.40 GHz
	Memory	8.00 GB
	Network	Intel(R)Ethernet Connection (2) I219-LM
软件 Software	OS	Windows 64 bit
	Parallel running library	None

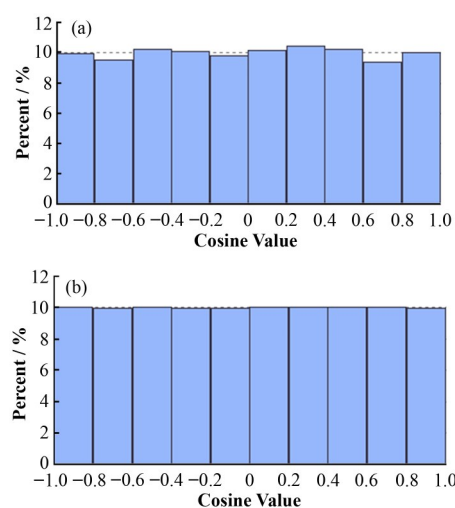


图9 VENUS-3 基准例题源粒子方向参数可视化
(a) 5 000 个粒子, (b) 10^6 个粒子
Fig.9 The particle direction visualization of VENUS-3 benchmark (a) 5 000 particles, (b) 10^6 particles

表2 源粒子动画效果延迟时间
Table 2 The delay time of source particle animation

粒子个数 Particles	逐一渲染 One by one	自适应分段树 Self-adapted
100	0.05	0.045
1 000	2	0.12
5 000	Timeout	0.18

3 可视化在中子准直器设计中的应用

在中子照相装置、硼中子俘获治癌装置中,准直器是实现高品质中子束流输出的关键设备,对后续成像与治疗效果有很大影响。使用本研究的可视化方法对准直器的中子源准直过程进行可视分析,校验准直器的设计。

3.1 案例描述

中子准直^[20-21]就是让准直孔周围的快热中子被慢化吸收,让中子只从准直孔中射出形成方向分布单一的中子束流。图10为准直器的模型,飞行方向分散的中子在准直器A口进入,经过准直后在B口形成飞行方向集中的中子束。

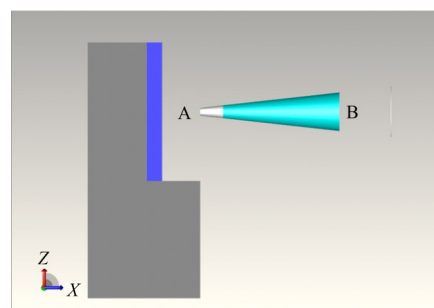


图10 准直器模型
Fig.10 The collimator model

3.2 中子时域特征可视化分析

中子飞行方向的分布能够检验准直器是否具有足够的准直效果。中子飞行方向在准直器中随时间不断变换,通过设定跟踪中子的时间范围,获得中子飞行方向的时域特征,对捕获到的时域特征进行可视化并加以分析。图11为中子束准直过程的动态三维可视化效果截图。分别对中子飞行到准直器截面①②③④4个位置时的方向分布进行统计并可视化。

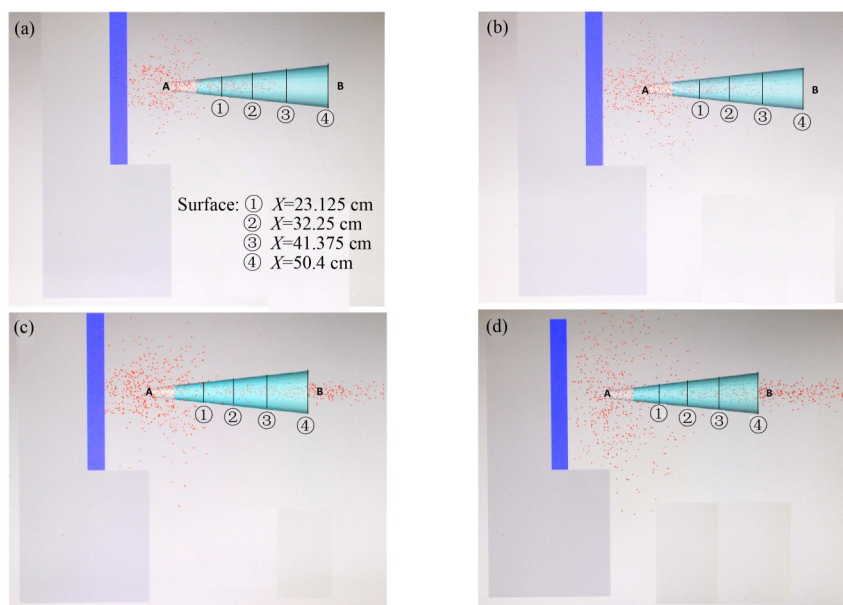


图11 准直器中子束三维可视化效果图
Fig.11 Three dimensional visualization of neutron beam in collimator

本文可视化方法通过合并和拆分时间片分段,构建一定的时域范围,并通过方向分段快速提取时域内源粒子飞行方向分布特征。图12为中子在准直孔道内飞行时域内部穿过不同截面处的方向分布特征,可以看出在远离准直器出口的位置,中子飞行方向的分布比较分散;在靠近准直器出口B处,中子飞行方向的分布已经集中在0.8~1.0,表明该准直器对中子束具有较好的准直作用。

评价准直后中子束流的质量还需要检验出射中子在出口截面上分布的均匀度。中子束的均匀度用来衡量准直后的中子束在某一平面上分布是否均匀,其计算公式为:

$$E = (\Phi_c - \Phi_b) / \Phi_c \quad (2)$$

式中: Φ_c 是截面中心点的通量值; Φ_b 是截面边缘点的通量值。只有均匀度E大于0%并小于5%时,准直器的设计才符合要求。本文方法可以通过增加虚

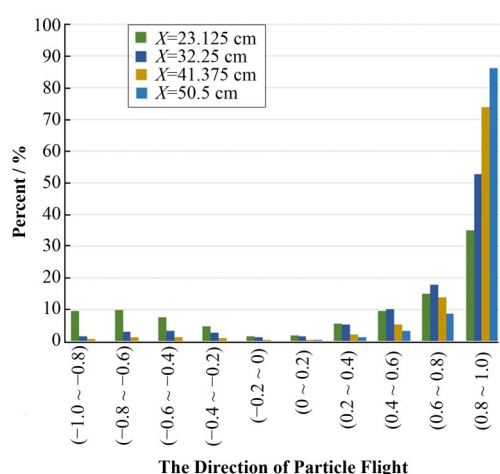


图12 中子飞行方向分布统计图
Fig.12 Statistical chart of neutron flight direction distribution

拟面方式,自动实现不同截面上的中子位置分布的特征提取,从而方便用户计算相应的均匀度。表3是分别对上述4个截面处的中子束均匀度进行分析。从中可以看出,4个截面的均匀度都不满足要求,可以判定当前准直器的设计不符合标准,需要进一步对设计进行优化。

表3 不同截面处中子束均匀度汇总

Table 3 The uniformity of neutron beam at different cross sections

位置 Position / cm	均匀度 Evenness
X=15	-0.043
X=25	-0.125 27
X=45	0.138 29
X=50.5	0.588 8

4 结语

本文提出了一种基于自适应分段树的源粒子可视化分析方法,该方法通过灵活的分段构建,可以实现源粒子信息的高效可视化和参数提取。通过两个典型案例的应用分析表明:本文可视化方法能够更好的保证蒙特卡罗粒子输运建模中源参数的保真度,避免源参数设置不合理导致的计算误差,极大地提高了建模效率;除此之外,能够对部分核装置的设计进行快速和直观的检验。本文方法通过计算机可视化技术的应用,有效地减轻了核能与核技术领域相关数值模拟计算工作的复杂性,具有较好的应用前景。

参考文献

1 吴宜灿. 聚变中子学[M]. 北京: 原子能出版社, 2016: 12.

WU Yican. Fusion neutronics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2016: 12

- Gan Q, Wu B, Yu S P, *et al.* CAD-based hierarchical geometry conversion method for modeling of fission reactor cores[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, **94**: 369–375. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.03.013.
- 甘仨, 吴斌, 宋婧, 等. 基于参数的可视化裂变堆芯蒙特卡罗自动建模方法[J]. *核技术*, 2016, **39**(6): 060501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.060501.
- GAN Quan, WU Bin, SONG Jing, *et al.* Rapid parameter-based and visual Monte Carlo modeling method of fission reactor core[J]. *Nuclear Techniques*, 2016, **39**(6): 060501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.060501.
- Wu Y C. Multi-functional neutronics calculation methodology and program for nuclear design and radiation safety evaluation[J]. *Fusion Science and Technology*, 2018, **74**(4): 321 – 329. DOI: 10.1080/15361055.2018.1475162.
- Wu Y C, Song J, Zhang H Q, *et al.* CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, **82**: 161 – 168. DOI: 10.1051/snmc/201406022.
- 吴宜灿, 宋婧, 胡丽琴, 等. 超级蒙特卡罗核计算仿真软件系统 SuperMC[J]. *核科学与工程*, 2016, **36**(01): 62–71. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.009.
- WU Yican, SONG Jing, HU Liqin, *et al.* Super Monte Carlo program for nuclear and radiation simulation SuperMC[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2016, **36**(01): 62–71. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.009.
- 罗月童, 周俊, 甘仨, 等. 面向大规模重复结构CAD模型的快速截面可视化方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2017, **29**(3): 528–536. DOI: 10.3969/j.issn.1003-9775.2017.03.016.
- LUO Yuetong, ZHOU Jun, GAN Quan, *et al.* Rapid cross-section visualization method for large-scale CAD model with repeated structure[J]. *Journal of Computer – Aided Design & Computer Graphics*, 2017, **29**(3): 528 – 536. DOI: 10.3969/j.issn.1003-9775.2017.03.016.
- The visual editor for MCNP. The visual editor online training[EB/OL]. 2018. <https://www.mcnpvise.com/visualeditor.html>.
- Wu Y C, FDS Team. Design and R&D progress of China lead-based reactor for ADS research facility[J]. *Engineering*, 2016, **2**(1): 124–131. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.01.023.
- Wu Y C. Conceptual design of the China fusion power plant FDS-II[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2008, **83**(10 – 12): 1683 – 1689. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2008.

- 06.048.
- 11 Wu Y C, Jiang J Q, Wang M H, *et al.* A fusion-driven subcritical system concept based on viable technologies[J]. Nuclear Fusion, 2011, **51**(10): 103036. DOI: 10.1088/0029-5515/51/10/103036.
- 12 Wu Y C, Bai Y Q, Song Y. Development strategy and conceptual design of China lead-based research reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, **87**: 511 – 516. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.08.015.
- 13 Wu Y C, Chen Z B, Hu L Q, *et al.* Identification of safety gaps for fusion demonstration reactors[J]. Nature Energy, 2016, **1**(12): 16154. DOI: 10.1038/nenergy.2016.154.
- 14 Wu Y C. Design status and development strategy of China liquid lithium-lead blankets and related material technology[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, **367**: 1410–1415. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2007.04.031.
- 15 Wu Y C. Development of high intensity D-T fusion neutron generator HINEG[J]. International Journal of Energy Research, 2018, **42**(2): 68 – 72. DOI: 10.1051/epjconf/201715303006.
- 16 吴宜灿, 宋婧, 胡丽琴, 等. 强流氦氖聚变中子源 HINGE 设计研究[J]. 核科学与工程, 2016, **36**(01): 77–83. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.011.
WU Yican, SONG Jing, HU Liqin, *et al.* Design and research of high intensity D-T fusion neutron generator[J]. Nuclear Science and Engineering, 2016, **36**(01): 77–83. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.011.
- 17 Wu Y C, FDS Team. CAD-based interface programs for fusion neutron transport simulation[J]. Fusion Engineering & Design, 2009, **84**(7–11): 1987–1992. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2008.12.041.
- 18 Pescarini M, Orsi R, Borgia M G, *et al.* ENEA neutron transport analysis of the VENUS-3 shielding benchmark experiment-preliminary report[R]. Centro Ricerche Bologna, 2000.
- 19 谢仲生, 吴宏春, 张少泓. 核反应堆物理分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
XIE Zhongsheng, WU Hongchun, ZHANG Shaohong. Nuclear reactor physics analysis[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004.
- 20 蒋诗平, 陈亮, 陈阳, 等. 快中子照相的实验研究[J]. 核技术, 2005, **28**(2): 151–154.
JIANG Shiping, CHEN Liang, CHEN Yang, *et al.* Experimental study on fast neutron radiography[J]. Nuclear Techniques, 2005, **28**(2): 151–154.
- 21 魏国海, 韩松柏, 陈东风, 等. 中子照相技术在核燃料元件无损检测中的应用[J]. 核技术, 2012, **35**(11): 821–826.
WEI Guohai, HAN Songbai, CHEN Dongfeng, *et al.* Application of neutron radiography for non-destructive testing nuclear fuel elements[J]. Nuclear Techniques, 2012, **35**(11): 821–826.