

基于RMC的接续面源功能开发验证

汇报人：苟元昊

2025年5月18日



清华大学
反应堆工程计算分析实验室

一. 背景介绍

二. 研究现状

三. 功能实现

四. 结果对比

五. 总结

一. 背景介绍

二. 研究现状

三. 功能实现

四. 结果对比

五. 总结

- 辐射屏蔽分析是核安全评价中的重要内容,精确的辐射屏蔽计算是核能系统设计和运行的重中之重。
- 目前,核工程常用的屏蔽计算方法有以下两种:以离散纵标(SN)为代表的确定论方法,以及蒙特卡罗(MC)非确定论方法。其中,离散纵标是通过数值方法求解描述中子平均行为的玻尔兹曼输运方程得到相关物理量,是最常用的确定论方法,因其在处理多维问题存在计算内存要求高和易产生影响计算精度的射线效应,多用于处理可简化为一维或二维的工程问题。而蒙特卡罗是利用计算机对中子行为随机模拟的一种计算方法,可模拟任意复杂几何,是最精确的三维屏蔽计算方法,但存在收敛速度慢不利于工程应用的问题。

- 基于核电厂结构复杂性和大尺度的特点，直接采用上述任一方法在平衡计算效率和计算精度问题上均难以满足工程应用的要求。对于大型复杂几何的中子屏蔽设计难题，国际上通常采用多维输运计算程序耦合的方式解决。现有耦合输运计算方法主要有：蒙特卡罗耦合蒙特卡罗方法(MC-MC)、蒙特卡罗耦合离散纵标方法(MC-SN)、离散纵标耦合蒙特卡罗方法(SN-MC)三种。
- 其中 MC-SN 和 SN-MC 方法中涉及不同求解方法的耦合，耦合过程复杂且在耦合面处存在降低计算精度的风险。目前已有的MC-SN耦合程序包括：MCNP4B/MCNPX-MAT-ANSIN、HETC96-ANISN、HERMES-ANISN等提供MC程序和一维SN的耦合；MCNP4B/MCNPX-MAD-DORT、MCNP-TRIDENT允许MC程序和二维SN的耦合。

- 综上，大部分 MC 和 SN 的耦合程序仅支持 MC 与一维或二维 SN 的耦合，几何简化与降维耦合都会影响计算精度，而少数的三维耦合程序都是针对具体问题开发的，只适用于直角坐标系下的模型计算，几何适应性存在一定限制。
- MC-MC 耦合方法是将一个计算模型进行分解实现分步接续，通过模拟并存储前一个问题中的穿过一个面的粒子径迹作为接续计算的源输入，该方法不存在接续面处的精度丧失且可降低计算机内存需求，具有较高的可信度，但模拟计算过程耗时。随着计算机硬件技术和高性能并行平台技术的不断提高，发展 MC-MC 多维耦合方法并应用于解决大型核设施的屏蔽计算已得到验证。

一. 背景介绍

二. 研究现状

三. 功能实现

四. 结果对比

五. 总结

- 中广核黄倩倩等利用MCNP的接续面源功能，选择了欧洲第三代压水堆技术方案核电站反应堆厂房堆坑主回路管道出口中子屏蔽设计结果为基准，计算模型如图所示。采用计算结果进行验证，最终验证结果表明MC-MC方法用于核电站工程设计是相对可靠的，具有较好的可行性和工程应用性。

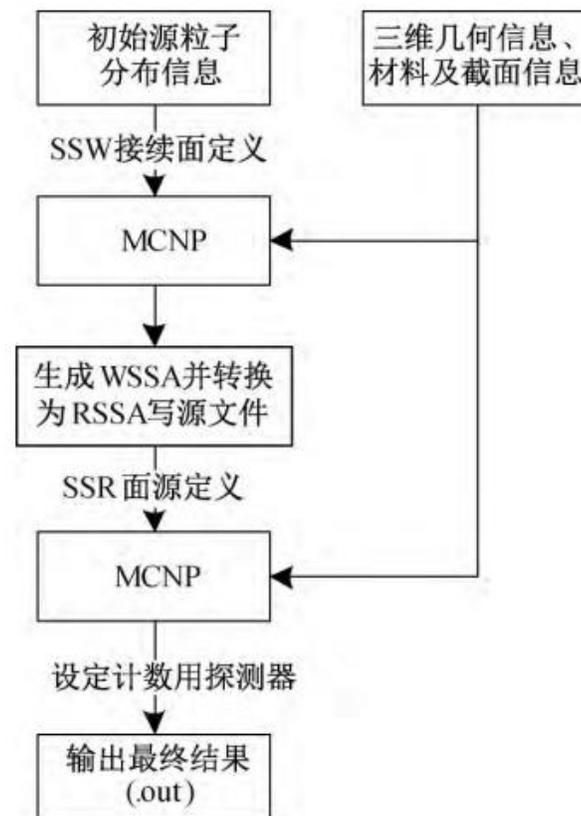


图1 接续计算流程

黄倩倩, 唐邵华, & 杨寿海. (2019). MC-MC耦合计算方法在核电站中子屏蔽设计中的应用. 辐射防护, 39(04), 309 - 313.

- 建立核电厂反应堆厂房堆坑主回路管道出口中子屏蔽计算模型，并将计算结果与设计结果进行比较。验证结果表明，基于MC-MC耦合接续方法分析所得结果与设计结果偏差为15%，结果列于下表。

剂量点位置	中子剂量率(Sv/h)		结果偏差
	CEPR 设计值	验算值	
一次屏蔽主管道出口处	1.8	1.529 5	15%

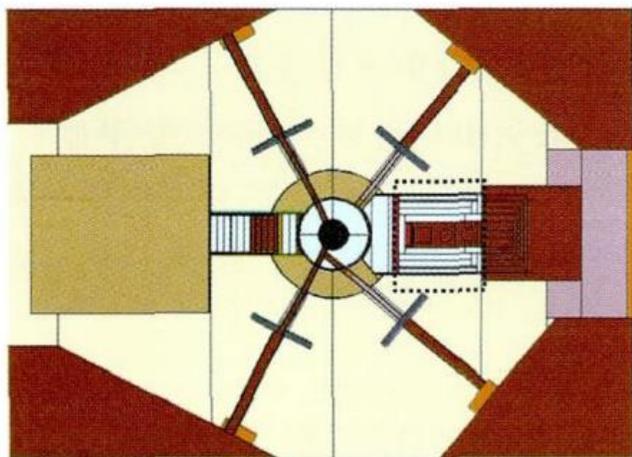
- 经分析，造成上述误差的原因可能有：1) 剂量点选点位置不完全一致。仅提供了剂量点示意图，无具体的选点位置信息；2) 剂量转换因子选取不一致；3) 配套截面库所基于的评价核截面数据库版本不一致。基于上述分析，从满足工程应用的角度认为该计算结果误差尚可接受，MC-MC方法应用于核电厂工程设计是相对可靠的。



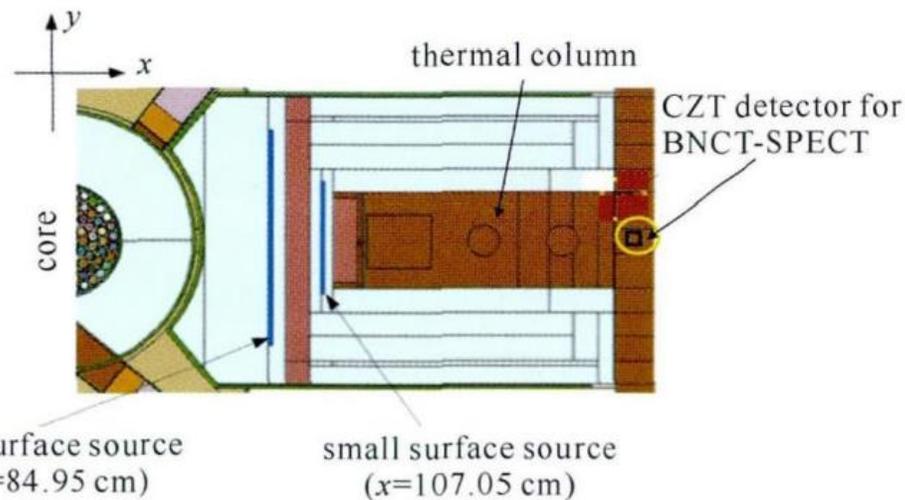
核电厂一次屏蔽主管道出口处中子屏蔽计算模型

研究现状

- TRIGA MarkII反应堆 MCNP模型如图所示，BNCT所使用的是图1(a)中虚线所标示的热柱部分结构。为了将中子源从反应堆向热柱移动，选取图1(b)中蓝色曲线所标注的曲面来记录MCNP模拟中穿过该曲面的所有粒子类型、能量、位置和方向，这些信息将存储在wssa格式的文件中，本文选取两个不同位置的曲面以互相验证。图1(b)中CZT探测器所在的位置为BNCT治疗室内，即进行BNCT-SPECT时探测器所在位置。



(a) horizontal section of the TRIGA reactor



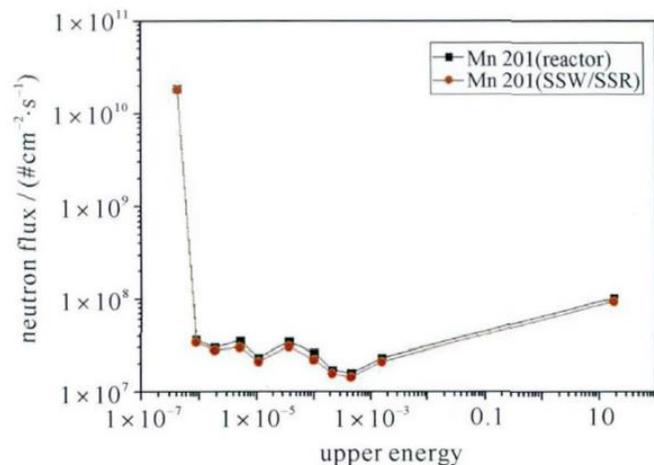
(b) detailed horizontal section of thermal column of TRIGA reactor

Fig. 1 MCNP model of TRIGA Mark II research reactor

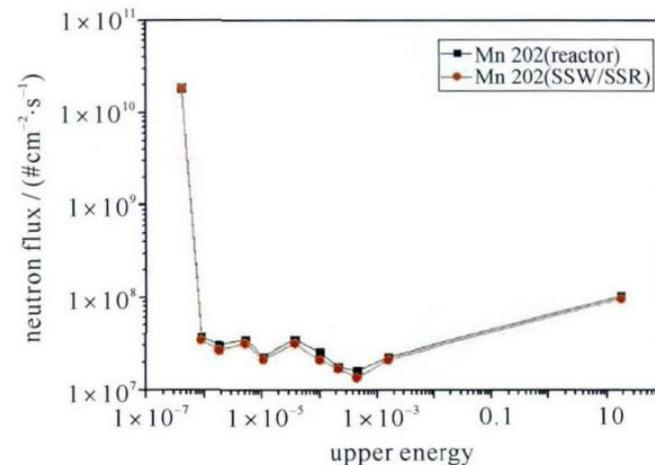
图1 TRIGA Mark II反应堆的MCNP模型图

龚春慧, Fatemi Setareh, Protti Nicoletta, 等. 用于BNCT-SPECT的帕维亚TRIGA MARK II反应堆热柱优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(12):7. DOI:10.11884/HPLPB201729.170238.

- 源文件写入成功后，使用 MCNP6的SSR卡读入 WSSA格式文件来验证写入源文件的正确性。在此步骤中，将 WSSA文件名字改为RSSA 文件，使用NONU卡关闭裂变，并使用SSR卡代替 KCODE卡。在此使用四种不同类型的热中子活化探测器 (Mn/Cu-201, Mn/Cu-202, Au-101c和 Au-102c) 来进行验证。通过对比结合使用SSW/SSR卡和直接使用反应堆为源项两种方法获得的热柱内放置热中子活化探测器处的中子能谱，来验证使用SSW/SSR卡的可靠性。四种不同探测器处的中子能谱如下图所示，对比分析可知两种方法获得的中子能谱几乎一致，从而验证了SSW/SSR方法的可靠性。



(a) neutron spectrum at position of Mn/Cu-201



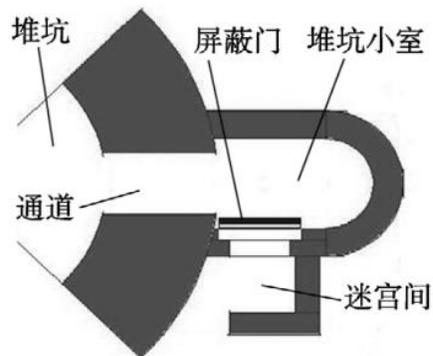
(b) neutron spectrum at position of Mn/Cu-202

龚春慧, Fatemi Setareh, Protti Nicoletta, 等. 用于BNCT-SPECT的帕维亚TRIGA MARK II 反应堆热柱优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(12):7. DOI:10.11884/HPLPB201729.170238.

- 建立基于离散纵标方法计算程序 DOT 以及蒙特卡罗方法计算程序 MCNP 的耦合方法。通过为 MCNP 程序 SSR 命令提供二进制源描述文件，实现在不重新编译 MCNP 程序条件下的离散纵标与蒙特卡罗耦合。在 600 MW 核电厂反应堆堆坑小室屏蔽计算中应用耦合方法的计算结果验证该方法的正确性。



a 侧视图



b 俯视图

图 2 反应堆堆坑小室结构图

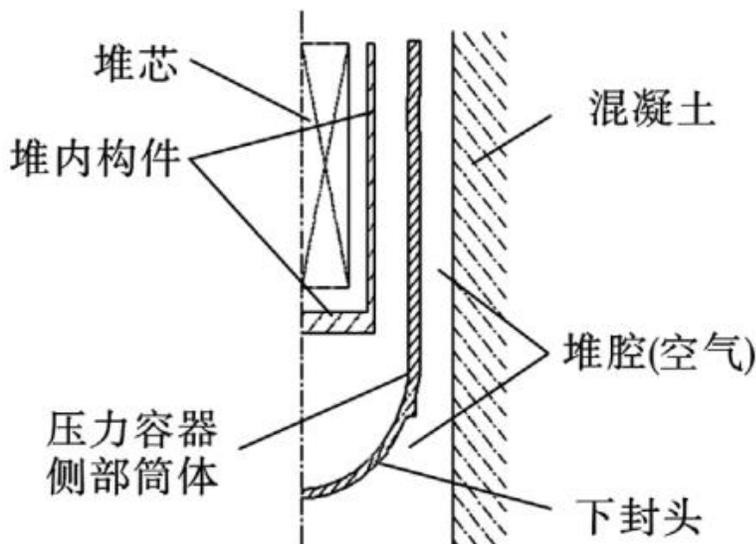


图 1 反应堆本体屏蔽结构

韩静茹,陈义学,袁龙军,等.基于蒙特卡罗-离散纵标双向耦合方法在堆坑屏蔽计算中的应用[C]//反应堆物理与核材料学术研讨会核能软件自主化研讨会.2013.DOI:ConferenceArticle/5af18b18c095d71bc8c5ea14.

从右表的计算结果验证了耦合方法的正确性。从不同计算策略的统计方差可以看出，考虑了源偏倚策略之后的计算策略，计算时间有所增长（因为中子的输运过程更长，耗费的计算时间更久），但反映统计精度的计算方差大幅度下降，中子剂量率的计算方差下降更为明显。表明了耦合面上中子对迷宫间外的剂量作出了主要贡献，实施源偏倚策略后，源粒子中的中子份额大幅增加，从而有效提高了计算精度。因此，在耦合计算中实施源偏倚策略有效的提高了计算效率。

表 1 A 点屏蔽计算结果

Table 1 Shielding Calculation Results of Point A

计算策略	中子剂量率 $/\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$	相对标准误差	γ 剂量率 $/\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$	相对标准误差	计算时间/min
策略 1	73.7	0.065	112.1	0.021	1972
策略 2	66.1	0.026	114.0	0.015	2601
实测值	60	—	130	—	—

策略 1: 投入 2×10^8 个源粒子，不使用源偏倚策略。
策略 2: 投入 2×10^8 个源粒子，使用源偏倚策略，中子重要度是 γ 射线的 4 倍。

韩静茹,陈义学,袁龙军,等.基于蒙特卡罗-离散纵标双向耦合方法在堆坑屏蔽计算中的应用[C]//反应堆物理与核材料学术研讨会核能软件自主化研讨会.2013.DOI:ConferenceArticle/5af18b18c095d71bc8c5ea14.

一. 背景介绍

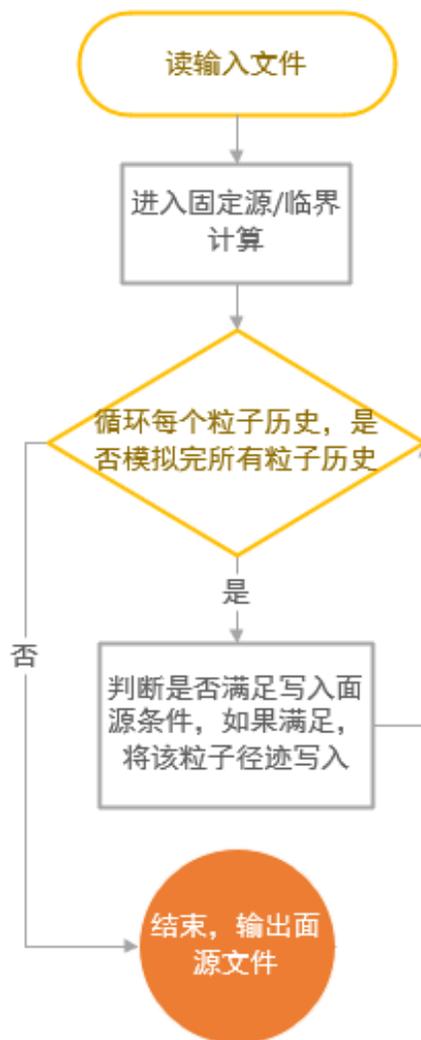
二. 研究现状

三. 功能实现

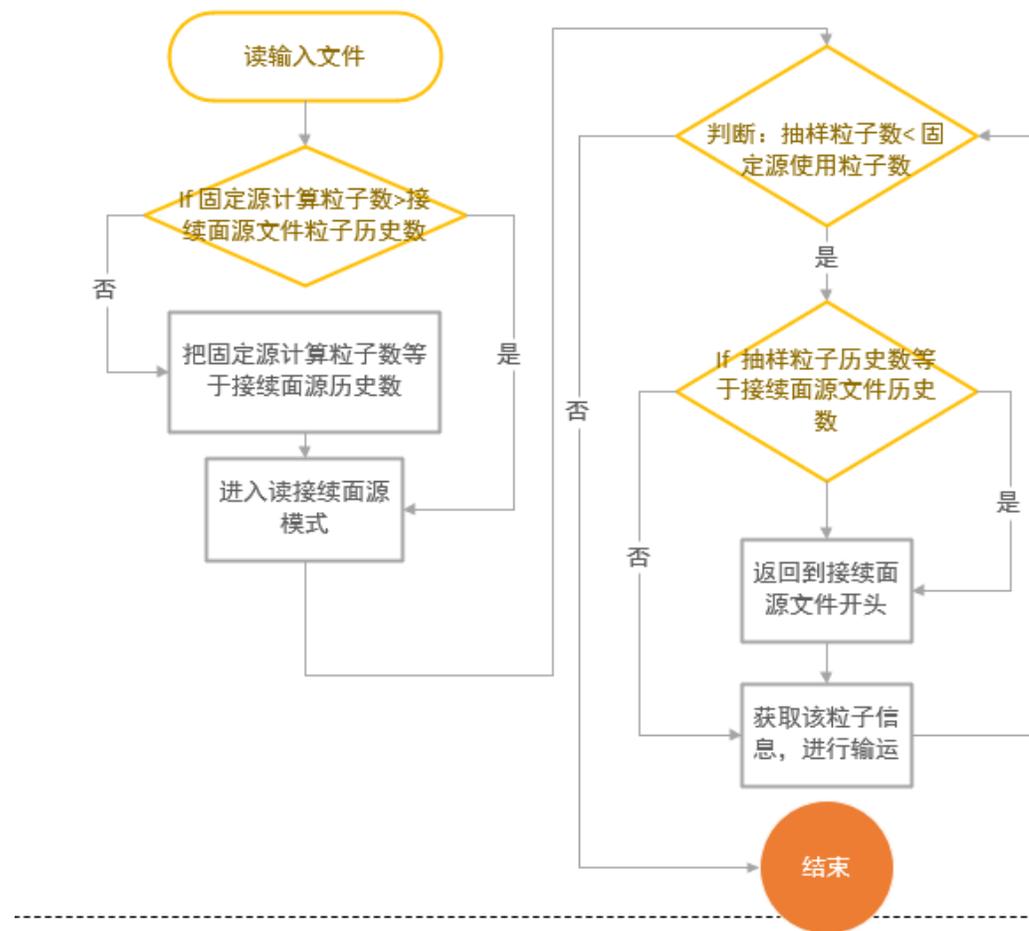
四. 结果对比

五. 总结

本研究基于清华大学工程物理系核能科学与工程管理所开发的堆用蒙特卡罗程序RMC，实现了RMC中的接续面源功能。



写面源功能实现流程



读面源功能实现流程

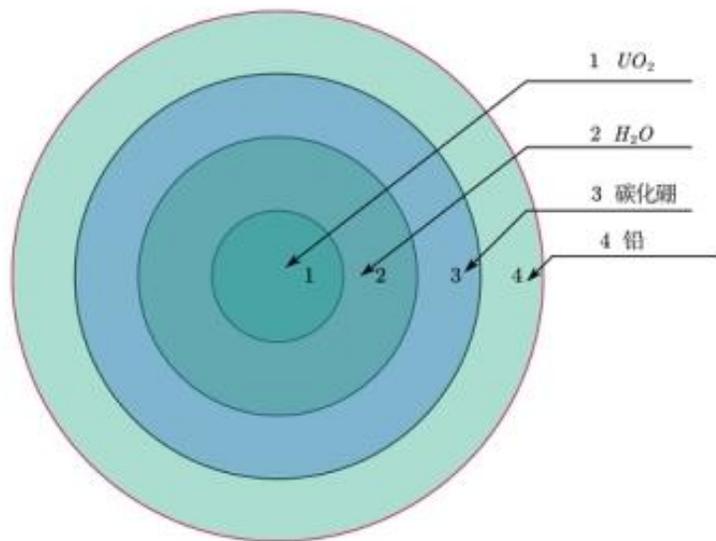
一. 背景介绍

二. 研究现状

三. 功能实现

四. 结果对比

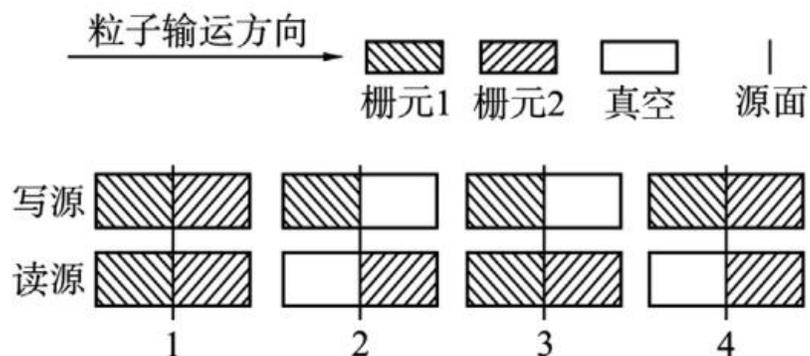
五. 总结



测试算例

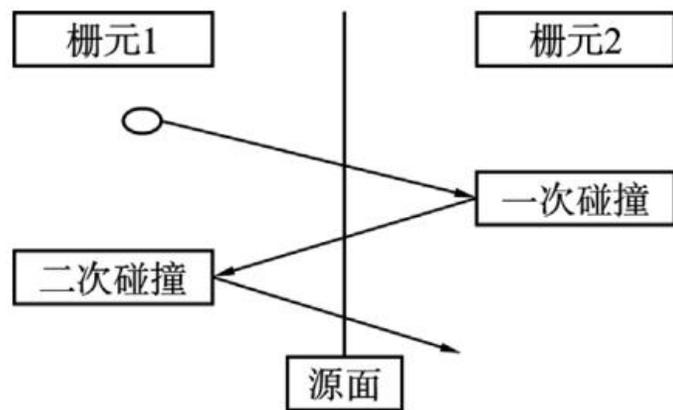
➤ 基于开发的接续面源功能，分析了不同边界条件选取对结果的影响。选取的算例如右图，是个单棒算例，从内到外半径分别为10, 20, 30, 40cm, 高度为10cm把粒子信息写到栅元1和2交界处的圆柱面，然后利用接续计算计算2、3和4栅元的中子体通量。中子能量4Mev,各向同性，位于1区域的中心，模拟5E6个中子，模拟方式采用固定源写-固定源读的方式进行。

➤ 在写、读面源时都涉及了外边界条件，即源面另一端的几何空间。边界条件选取方案包括4种。
 1——反射写源/反射读源； 2——真空写源/真空读源； 3——真空写源/反射读源； 4——反射写源/真空读源
 对上述4种边界条件都进行了简单验证。



➤ 反射写/反射读

cell编号	接续面源计算结果	统计偏差	真值(直接计算结果)	统计偏差	相对偏差
1(中子)	2.56E+01	5.36E-04	1.76E+01	9.83E-04	4.54E-01
2(中子)	1.61E+00	6.33E-04	1.24E+00	1.61E-03	2.99E-01
3(中子)	2.31E-01	1.28E-03	1.82E-01	3.96E-03	2.67E-01
1(光子)	1.41E+01	6.23E-04	7.48E+00	1.31E-03	8.84E-01
2(光子)	5.61E+00	6.47E-04	3.22E+00	1.48E-03	7.41E-01
3(光子)	2.08E-01	9.40E-04	1.25E-01	2.79E-03	6.69E-01



通过分析，其原因是由于在输运过程中，粒子可能在源面两端的栅元内因多次碰撞而折返。在该算例条件下，假设只记录从左到右穿过源面的粒子，那么写源时同一个源粒子被记录了2次，而读源时2次记录的粒子会被当成2个独立的源粒子分别模拟并分别对计数做出贡献；考虑到初始的源粒子数不受上述变化影响（由输入文件设定），因而得到的探测点的归一化的中子注量率会比真实值偏大。

➤ 真空写/反射读

cell编号	接续面源计算结果	统计偏差	真值(直接计算结果)	统计偏差	相对偏差
1(中子)	1.76E+01	4.89E-04	1.76E+01	9.83E-04	-6.83E-04
2(中子)	1.24E+00	6.67E-04	1.24E+00	1.61E-03	-1.21E-03
3(中子)	1.81E-01	1.47E-03	1.82E-01	3.96E-03	-4.23E-03
1(光子)	7.48E+00	5.97E-04	7.48E+00	1.31E-03	-1.34E-04
2(光子)	3.23E+00	6.46E-04	3.22E+00	1.48E-03	1.33E-03
3(光子)	1.25E-01	1.08E-03	1.25E-01	2.79E-03	1.85E-03

- 对于单个粒子，该边界条件模拟出的输运过程最接近于直接模拟的过程，计算的结果也应该与真值也很接近。但该方案也有难以解释的问题，即写源时用了真空外边界条件，这与 MCNP 程序说明书以及计算经验不符。

➤ 真空写/真空读

cell编号	接续面源计算结果	统计偏差	真值(直接计算结果)	统计偏差	相对偏差
1(中子)	1.25E+01	4.71E-04	1.76E+01	9.83E-04	-2.91E-01
2(中子)	1.00E+00	7.29E-04	1.24E+00	1.61E-03	-1.92E-01
3(中子)	1.50E-01	1.64E-03	1.82E-01	3.96E-03	-1.74E-01
1(光子)	3.29E+00	6.48E-04	7.48E+00	1.31E-03	-5.60E-01
2(光子)	1.71E+00	7.31E-04	3.22E+00	1.48E-03	-4.69E-01
3(光子)	7.22E-02	1.37E-03	1.25E-01	2.79E-03	-4.21E-01

- 真空读源消除了边界以外材料的反射影响；但考虑到写源过程中会有更少粒子径迹通过面以及读源时会有粒子直接被杀死，会导致结果偏小。

➤ 反射写/真空读

cell编号	接续面源计算结果	统计偏差	真值(直接计算结果)	统计偏差	相对偏差
1(中子)	1.76E+01	5.17E-04	1.76E+01	9.83E-04	-2.84E-04
2(中子)	1.24E+00	6.84E-04	1.24E+00	1.61E-03	-3.23E-04
3(中子)	1.82E-01	1.47E-03	1.82E-01	3.96E-03	-2.31E-03
1(光子)	7.47E+00	6.69E-04	7.48E+00	1.31E-03	-3.61E-04
2(光子)	3.22E+00	7.04E-04	3.22E+00	1.48E-03	4.34E-04
3(光子)	1.25E-01	1.14E-03	1.25E-01	2.79E-03	1.77E-03

➤ 以上图中的情况为例，写源时一个粒子被记录2次，读源时2个“独立”的面源粒子分别向无反射层的栅元2运动，最终分别在探测点形成计数，这可能会导致结果偏大。不过，上述分析是针对单个粒子的，RMC程序的计算结果是模拟大量粒子后得到的统计平均值，被栅元2反射回源面外逃逸的粒子权重与多记录的粒子权重相互抵消，最终结果应该与真值接近。这种方式也是实际工程应用的方式。

一. 背景介绍

二. 研究现状

三. 功能实现

四. 结果对比

五. 总结

- 本文基于自主开发的堆用蒙特卡罗程序RMC,开发了接续面源功能，开发了写面源和读面源的功能，同时对四种不同边界条件的选取进行了分析，证明了在反射写-真空读的情况下计算得到的值是接近于真值的。
- 未来将该功能运用到反应堆屏蔽减方差计算当中，将该功能运用到实际工程当中去。

- [1]黄倩倩,唐邵华,杨寿海.MC-MC耦合计算方法在核电厂中子屏蔽设计中的应用[J].辐射防护,2019,39(04):309-313.
- [2]杨德锋,程和平.MCNP程序分段-衔接计算方法研究[C]// 反应堆数值计算与粒子输运学术会议暨反应堆物理会议.中国核学会,2010.
- [3]韩静茹,陈义学,袁龙军,等.基于蒙特卡罗-离散纵标双向耦合方法在堆坑屏蔽计算中的应用[C]// 第六届反应堆物理与核材料学术研讨会第三届核能软件自主化研讨会会议摘要集.2013.
- [4]王育威,杨永伟,崔鹏飞.加速器驱动系统的靶物理计算分析[J].原子能科学技术,2011.
- [5]肖锋,应栋川,章春伟,等.离散纵标与蒙特卡罗耦合方法在反应堆屏蔽计算中的应用[J].核动力工程,2014,35(5):4.
- [6]龚春慧.硼中子俘获治疗中硼浓度在线实时监测系统关键技术研究[D].南京航空航天大学.
- [7]钟兆鹏,施工,胡永明.用MCNP程序计算水平辐照孔道屏蔽[J].清华大学学报(自然科学版),2001(12):16-18.DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2001.12.005.
- [8]龚春慧,Fatemi Setareh,Protti Nicoletta,Postuma Ian,Bortolussi Silva,耿长冉,汤晓斌,Altieri Saverio.用于BNCT-SPECT的帕维亚TRIGA MARK II反应堆热柱优化设计[J].强激光与粒子束,2017,29(12):93-99.
- [9]石秀安,刘志宏,胡永明.中国先进研究堆水平孔道屏蔽设计优化研究[J].核动力工程,2006(05):87-90+93.
- [10]C.J. Werner (editor), "MCNP Users Manual - Code Version 6.2", LA-UR-17-29981 (2017).
- [11] C.J. Werner, J.S. Bull, C.J. Solomon, et al., "MCNP6.2 Release Notes", LA-UR-18-20808 (2018).

请各位专家批评指正

