

基于统一计算架构的人体受照剂量实时仿真评估方法

杨子辉^{1,2} 王静² 何桃² 宋婧² 龙鹏程²

¹(中国科学技术大学 合肥 230027)

²(中国科学院核能安全技术研究所 中国科学院中子输运理论与辐射安全重点实验室 合肥 230031)

摘要 基于统一计算架构(Compute unified device architecture, CUDA), 利用 GPU 的流多处理器和共享显存实现了辐射环境中人体体素级受照剂量的并行计算。通过加速器驱动次临界系统散裂靶质子束窗的维修更换仿真例题的测试, 百万量级体素人体受照剂量计算时间降低到 10 ms 的量级, 能够保持与实时维修仿真同步。该方法能够满足维修仿真对维修人员的器官当量剂量和人体有效剂量计算的实时性要求, 可应用到维修方案的实时仿真推演, 对提高维修方案的设计与验证效率, 辅助优化方案和保障人员辐射安全具有重要意义。

关键词 受照剂量评估, 并行计算, 统一计算架构, 实时仿真

中图分类号 TL72

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rj.33.060501

Real-time absorbed dose simulation assessment method for the maintenance workers of nuclear facilities based on compute unified device architecture

YANG Zihui^{1,2} WANG Jing² HE Tao² SONG Jing² LONG Pengcheng²

¹(University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

²(Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

ABSTRACT The absorbed dose assessment method was developed based on compute unified device architecture parallel architecture and human voxel model, to realize the parallel computing of radiation dose for human body in the radiation environment using the GPU processors and shared memory. The maintenance strategy simulation dose assessment of the spallation target proton beam window for accelerator driven system was tested by this method. The results showed that the computing time can reach 10 ms level with millions of voxel and the dose calculation can synchronize with real-time simulation of maintenance process. This method could realize the requirement of organ equivalent dose and effective dose calculation for maintenance worker. In the simulation deduction of maintenance strategy, this method is of great significance in protecting personnel radiation safety and improving the efficiency for

基金资助: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA03040000)、国家 ITER973 计划(2014GB1120000)和国家自然科学基金(No.11305205)资助

第一作者: 杨子辉, 男, 1988 年 12 月出生, 2011 年毕业于安徽财经大学, 现为中国科学技术大学在读博士生, 从事辐射剂量评估与虚拟现实仿真研究, E-mail: zihui.yang@fds.org.cn

通讯作者: 龙鹏程, 博士, 副研究员, E-mail: pengcheng.long@fds.org.cn

收稿日期: 初稿 2015-08-31; 修回 2015-09-09

Supported by Strategic Priority Science & Technology Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA03040000), National Magnetic Confinement Fusion Science Program of China (2014GB1120000), and the National Natural Science Foundation of China (No. 11305205)

First author: YANG Zihui, male, was born in December 1988; graduated from Anhui University of Finance and Economics in 2011; now is a doctoral candidate in University of Science and Technology of China, majoring in the radiation dose assessment and virtual reality simulation. E-mail: zihui.yang@fds.org.cn

Corresponding author: Ph.D. LONG Pengcheng, associate professor, E-mail: pengcheng.long@fds.org.cn

Received 31 August 2015; accepted 09 September 2015

the design and validation of maintenance scheme.

KEYWORDS Absorbed dose assessment, Parallel computing, Compute unified device architecture, Real-time simulation

CLC TL72

辐射危害的存在导致核设施的维修工作不同于常规设施, 根据合理可行尽量低(As low as reasonably achievable, ALARA)原则, 如何高效地评估维修作业的安全性是核设计与分析人员普遍关心的问题。基于虚拟现实技术的涉核作业仿真推演的研究与应用在国内外的核能领域快速发展, 随着仿真技术的发展和核电安全标准的提高, 对核与辐射安全仿真提出更高的要求, 对人员受照剂量的计算速度和计算精度提出了更高的要求, 并要考虑人体不同器官对受照剂量的敏感性差异。为能够进行实时的受照剂量评估, 国内外的研究多采用计算速度较快的点核方法或简化的人体计算模型, 如韩国原子能研究所采用点核方法实现实时的三维辐射风险仿真评估^[1], 用以支持核环境下的实时作业模拟。在日本日立能源与工业研究实验室与挪威能源技术研究所联合开发的辐射场计算与可视化系统 VR-Dose 中^[2], 根据 MCNP 软件采用蒙特卡罗模拟粒子输运的方法计算空间辐射场分布的输出结果, 采用高 175 cm, 半径 20 cm 的圆柱型人体模型, 实现在核设施退役辐射环境中工作人员受照剂量的实时评估。使用虚拟现实技术进行实时仿真推演成为核设施维修方案设计与验证的一种重要手段。但上述的两种方法计算结果精度不高, 如何在保证精度的情况下达到实时的仿真评估成为核设施维修方案设计与验证仿真亟需解决的问题。

统一计算架构(Compute unified device architecture, CUDA)^[3]是通用的 GPU 并行计算架构。使用 CUDA 处理复杂的计算问题, 方便高效的进行编程。传统的维修方案验证与剂量仿真评估方法只给出方案最终的整体受照剂量, 据此判断方案是否可行, 再根据以往的经验对方案进行改进与优化; 而实时仿真推演中能够快速定位维修方案中人体受照剂量高的区域, 给出固定区域内能够安全停留的作业时间等信息, 能够用于维修方案的快速优化并实时分区域分阶段来验证, 并可扩展用于工作人员的辐射安全培训中。

本研究在中国科学院核能安全技术研究所·FDS 团队研发的核与辐射安全仿真系统 Super MC/RVIS^[4-7]基础上, 基于 CUDA 架构发展了实时受照剂量评估方法, 利用 GPU 的流多处理器和共享显存实现了百万量级人体素受照剂量的实时计算, 并用于加速器驱动次临界系统散裂靶质子束窗的维修更换仿真。

1 方法

1.1 受照剂量评估理论方法

人员受照剂量计算流程如图 1 所示。人体模型主要特征信息如表 1 所示。在工作人员的辐射防护评估中, 外照射剂量计算主要是根据工作场所剂量率和工作时间来计算。

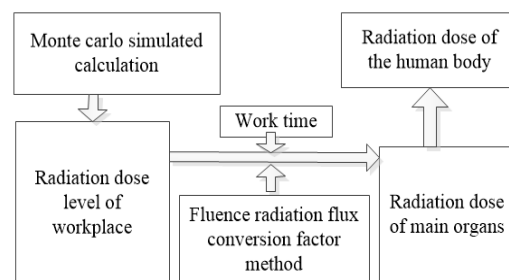


图 1 人体外照射受照剂量计算过程

Fig.1 External absorbed dose calculation process of human body

表 1 ICRP 人体模型主要特征
Table 1 Main characteristics of ICRP human model

属性 Attribute	男性 Male
高度 Height / m	1.76
质量 Weight / kg	73.0
体素数量 Voxel number	1,946,375
切片厚度 Slice thickness / mm	8.0
分辨率 Resolution / mm	2.137
体素大小 Voxel size / mm ³	36.54
切片数 Number of slices	220
主要器官数 Main organ number	27

针对外照射受照剂量的评估方法，采用国际辐射防护委员会 ICRP 116^[8-10]号报告中注量-剂量转化系数方法和 110 号报告中建议的体素人体模型实现人体器官级剂量计算，采用了较为精确的蒙特卡罗方法计算得到的停堆光子注量数据，再考虑作业时间计算器官及人体受照剂量。

1.2 受照剂量计算方法

受照剂量计算中，器官或组织的剂量当量是指人体在某一个特定条件下照射时一个深度适中处的器官或组织内的剂量当量。当量剂量值等于某一个器官或组织的平均吸收剂量乘以辐射对应的权重因子。当采用体素人体模型进行计算时，人体器官或组织的当量剂量是由该器官或组织的划分出的体素受照剂量值的均值，见公式 1。

$$H_T = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} D_i \times w_R \quad (1)$$

式中： N 表示器官划分体素的总数， D_i 表示当前体素所在位置的吸收剂量， w_R 表示该器官对应的辐射权重因子，且对光子而言 $w_R=1$ ，计算过程如图 2 所示。

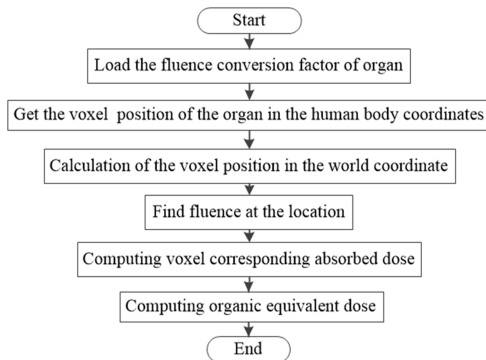


图 2 器官当量剂量流程图

Fig.2 Flow chart of organs equivalent dose

人体多个器官或组织受到辐射危害的总和即辐射对人体总体产生的危害，定义为有效剂量。人体各器官敏感度不同，人体有效剂量的计算与人体器官或组织权重系数密切相关。人体有效剂量 E 等于人体每一个组织或器官的当量剂量 H_T 乘以该器官或组织对应的组织权重因子 w 后进行累加得到的值，见公式 2，其中， M 表示计算机器官个数。

$$E = \sum_{i=0}^{M-1} H_{T_i} \times w_i \quad (2)$$

1.3 基于 CUDA 的受照剂量并行计算方法

通过对以上基于体素人体模型的剂量计算方法分析可知，该剂量评估方法中耗时较多的是人体百万量级体素受照剂量计算，且计算过程互相独立，符合并行计算的条件。在进行实时剂量评估中，根据人员所处位置和人体模型不同体素相对人体中心点的偏移位置，实时索引到的体素对应三维工作空间中辐射场剂量水平，根据注量-剂量转换因子计算方法，并行计算得出每个体素的实时受照剂量；根据每个器官的体素划分进行合并得到每个器官的受照剂量，结合不同器官的组织权重合并所有器官的受照剂量，即实现人体辐射实时评估。并行计算的步骤如下，流程图如图 3 所示。

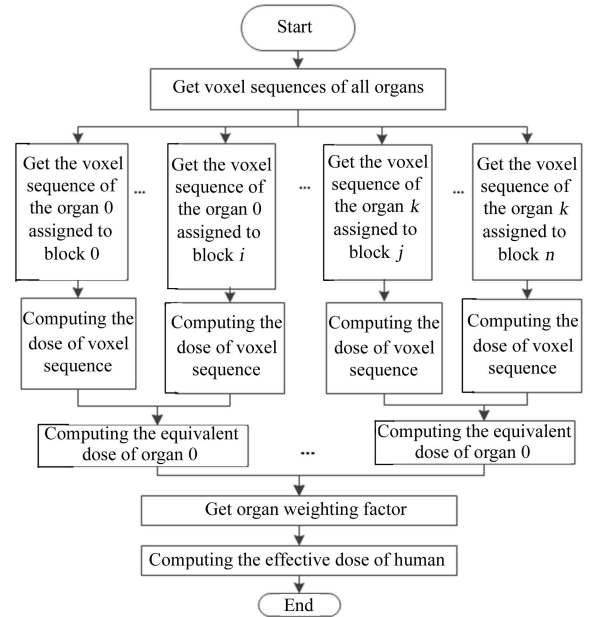


图 3 基于 CUDA 的受照剂量并行计算流程

Fig.3 Parallel computing process of absorbed dose based on CUDA

1.3.1 数据解析与存储优化

针对受照剂量评估中用到的 3 种不同的数据，根据 GPU 中不同存储器的存储空间和读取速度，将工作区域的空间辐射场分布和器官的注量剂量转换因子解析，放入共享显存中，以供同一个线程块 BLOCK 中不同线程计算单一体素受照

剂量时共享使用, 虚拟仿真场景中工作人员所处位置实时获取作为参数传入。

1.3.2 线程计算

该男性体素人体模型中包含 27 个主要敏感器官, 划分体素约为 100 万个, 为精确评估各器官的外照射剂量, 算法设计 $2^{20}=1\,048\,576$ 个线程进行并行计算, 采用线程块 BLOCK、线程块内 THREAD 个数的不同分配方案对比实验, 得到对应的计算时间如表 2 所示。其中分配方案采用 2 的倍数关系, 为在计算机采用位运算提高运算效率; 器官划分的体素个数多在 1000 到 10 000 个体素之间, 为满足同一线程块内每个线程所需的资源, 线程数递增, 也减少同一器官不同线程块计算结果的数据合并次数, 同时保证线程块内的线程满载, 线程数不宜过大, 优先采用每个 BLOCK 分配 256 个 THREAD, 整个 CUDA 架构网格 GIRD 中包含 4096 个线程块 BLOCK。

表 2 CUDA 不同分配方案计算实验
Table 2 Experiments of different CUDA assigning scheme

测试平台 Test platform	线程块数 BLOCK number	线程数 THREAD number	计算用时 Computing time / ms
普通计算机 PC	16384	64	45
	8192	128	32
	4096	256	28
	2048	512	37
惠普 Z800 工作站 HPZ800 workstation	16384	64	30
	8192	128	21
	4096	256	15
	2048	512	19

1.3.3 启动 GPU 核函数进行计算

每个线程单元内核函数计算一个体素的当量剂量, 并将结果保存为 BLOCK 计算结果存储表中, 计算过程如图 4 所示。

1.3.4 当量剂量计算

根据不同器官的体素划分情况, 合并对应 BLOCK 块的计算结果得到器官的当量剂量, 并写回主机端。

1.3.5 有效剂量计算

根据器官的当量剂量以及器官或组织的权重因子加权求和得到人体的有效剂量。

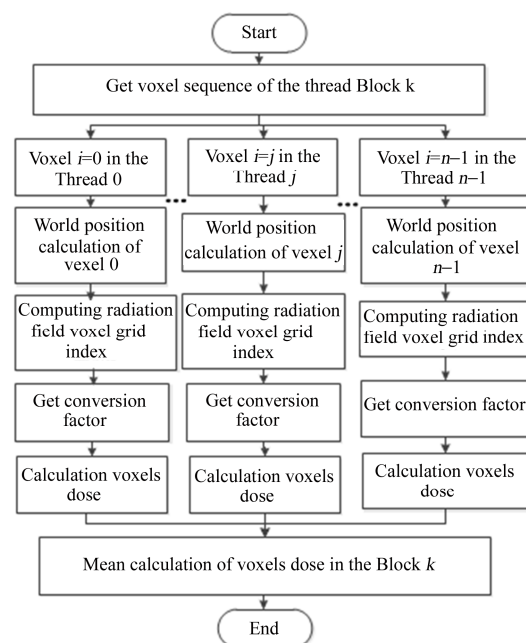


图 4 线程块内体素剂量计算流程

Fig.4 Voxel dose calculation flow chart in the thread block

2 应用与测试

2.1 例题背景

中国铅基反应堆^[11-13]被选为中科院战略先导科技专项加速器驱动次临界堆 ADS 项目的参考堆型, 用来测试 ADS^[14]嬗变系统和铅冷快堆技术, 也可用作基础科学和中子辐照的研究设施。散裂靶是连接加速器和次临界堆的关键部件, 液态铅铋有窗靶作为候选散裂靶件, 散裂靶^[15-17]由于受到高能强流质子轰击和强中子辐照, 靶窗上积聚了活化产物, 沉积大量核热, 因而靶窗的寿命一般较短, 需要定期更换。在靶窗的更换过程中, 除了使用遥操设备外, 还需要必要的人工干预活动, 如预先安装摇操设备和滑轨等, 因此人工参与过程中的受照剂量必须在设计规定的限值内。基于目前的 ADS 系统设计, 运行 10 a 后, 停堆 30 d 的设计工况下, 针对靶窗更换的流程进行分析, 实时仿真评估靶窗更换过程中的人体外照射剂量。

2.2 仿真与测试结果

基于 SuperMC/RVIS^[16-18]对加速器驱动次临界系统进行靶窗更换过程实时仿真, 采用 ICRP 男性模型, 体素大小为 36.54 mm^3 , 共包含约 195

万个体素。方法测试采用普通 PC 和惠普 Z800 图形工作站作为硬件实验平台，配置均为操作系统 Windows 7，PC 机配置 intel i5-2400 四核处理器，主频 3.1 GHz，英伟达 GT420 显卡，内

存 4 GB。惠普 Z800 图形工作站配置为 intel 16 核至强 E5-2620，英伟达 Quadro 5000 显卡，16 G 内存。图 5 展示的是 SuperMC/RVIS 软件仿真与剂量评估界面。

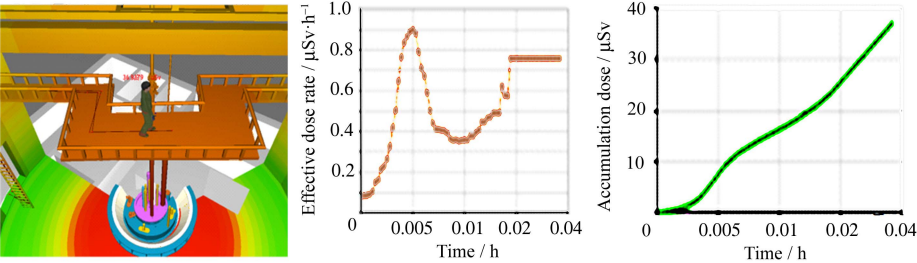


图 5 SuperMC/RVIS 软件仿真与剂量评估界面图
Fig.5 Interface of simulation software SuperMC/RVIS

图 5 左侧为人在堆顶包容小室上方时的沿维修路径漫游的三维虚拟仿真场景，右侧曲线图分别表示工作人员所处区域的有效剂量率、身体受照累积剂量和人体各器官的有效剂量随时间的增长曲线。针对人员维修路径上 10 个关键位置进行测试，统计辐射评估计算时间如图 6 所示。其中每个位置测试时间为多次计算取平均时间。本文还就基于 CUDA 的人体受照剂量仿真评估方法、串行计算算法^[19]和基于 CPU 并行计算算法^[20]进行了对比实验，统计结果如表 3 所示。

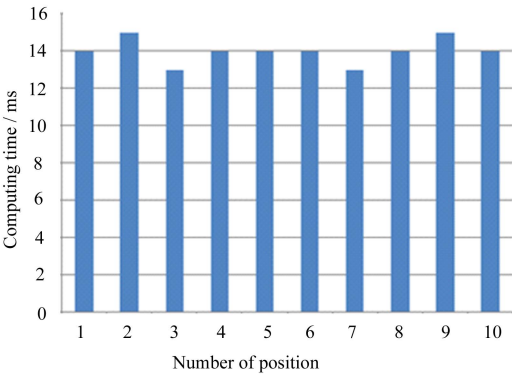


图 6 并行剂量计算耗时统计
Fig.6 Statistics of parallel dose calculation time

表 3 基于不同人体剂量仿真评估方法的计算时间对比实验

Table 3 Contrast experiments of calculation time based on different external radiation dose assessment methods

计算算法 Calculation algorithm	测试平台 Test platform	时间 Time / ms	加速比 Speedup ratio
1 串行计算 Serial calculation	个人计算机 PC	247	1
2 串行计算 Serial calculation	惠普 Z800 图形工作站 HP Z800 graphics workstations	225	1.1
3 CPU 并行计算 CPU parallel computing	个人计算机, 4 核 PC	66	3.7
4 CPU 并行计算 CPU parallel computing	惠普 Z800 图形工作站, 4 核 HP Z800 graphics workstations	63	3.9
5 CUDA 并行 CUDA parallel computing	个人计算机 PC	28	8.8
6 CUDA 并行 CUDA parallel computing	惠普 Z800 图形工作站 HP Z800 graphics workstations	15	16.5

2.3 结果对比与性能分析

在保证计算精度和准确度的同时,基于 CUDA 的人体有效剂量并行计算时间为 10 ms 量级,在图形工作站 Z800 上运行能够达到 15 ms,即每秒时间内能够进行 66 次的计算,远大于实时仿真画面刷新要求的 24 次/s,该方法能够较好的实现实时的受照剂量计算与维修作业仿真同步。与现有基于体素模型的串行计算方法相比,本文算法的计算速度提高,计算耗时降低了一个量级;本文算法与基于 CPU 并行的计算方法在速度上也有成倍的提高,且采用了体素人体模型与目前已有的基于质点模型、器官包围盒策略的方法相比,评估结果更加精确,减少了因人体器官形状不规则而引起的剂量计算误差。

3 结论

针对高精度辐射受照剂量评估方法效率低的问题,本文提出了基于 CUDA 加速的人员受照剂量实时仿真评估方法,实现了快速精确评估工作方案中人员外照射剂量,并能够保持与实时仿真推演同步,测试结果表明方法计算结果正确,有效减少了计算时间,可扩展应用到其他核设施的维修实时仿真中。

致谢 感谢中国科学院核能安全技术研究所 FDS 团队其他成员对本工作的支持和帮助。

参考文献

- 1 Zoke S, Louka M N, Bryntesen T R, *et al.* Real time 3D radiation risk assessment supporting simulation of work in nuclear environment [J]. *Journal of Radiological Protection*, 2014, **34**: 389-416. DOI:10.1088/0952-4746/34/2/389.
- 2 Jeong K S, Choi B S, Moon J K, *et al.* Real-time assessment of exposure dose to workers in radiological environments during decommissioning of nuclear facilities [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, **73**: 441-445. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.07.027.
- 3 NVIDIA. Nvidia cuda getting started guide for microsoft windows [M]. America: NVIDIA company, 2014:1-10
- 4 Cao R, Wu Y, Hu L, *et al.* Multi-objective optimization of inverse planning for accurate radiotherapy [J]. *Chinese Physics C*, 2011, **35**(3): 313-317. DOI: 10.1088/1674-1137/35/3/019.
- 5 Wu Y, Song J, Zheng H, *et al.* CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, **82**: 161-168. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.08.058.
- 6 吴宜灿, 胡丽琴, 龙鹏程, 等. 先进核能软件发展与核信息学实践 [M]//中国科学院. 中国科研信息化蓝皮书 2013. 北京: 科学出版社, 2013: 232-244.
WU Yican, HU Liqin, HU Liqin, *et al.* advanced nuclear energy and nuclear informatics software development practice [M]//Chinese Academy of Science. Chinese research information blue book 2013. Beijing: Science Press, 2013: 232-244.
- 7 吴宜灿, 何桃, 胡丽琴, 等. 核与辐射安全仿真系统 SuperMC/RVIS2.3 研发与应用 [J]. *原子能科学技术*, 2015, **29**: 77-85. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2014.02.009.
WU Yican, HE Tao, HU Liqin, *et al.* Development of virtual reality-based simulation system for nuclear and radiation safety [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2015, **29**: 77-85. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.S0.0007.
- 8 ICRP. ICRP publication 51: data for use in protection against external radiation [M]. America: authors on behalf of ICRP, 1987: 50-100.
- 9 ICRP. ICRP publication 110: adult reference computational phantoms: annals of the ICRP volume [M]. America, authors on behalf of ICRP, 2010: 31-80.
- 10 ICRP. ICRP publication 116: conversion coefficients for radiological protection quantities [M]. America, authors on behalf of ICRP, 2012: 15-60.
- 11 吴宜灿, 柏云清, 宋勇, 等. 中国铅基研究反应堆概念设计研究[J]. *核科学与工程*, 2014, **34**: 201-208. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2014.02.009.
WU Yichan, BAI Yunqing, SONG Yong, *et al.* Conceptual design of china lead-based research reactor [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2014, **34**: 201-208. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2014.02.009.
- 12 WU Yican, JIANG Jieqiong, WANG Minghuang, *et al.* A fusion-driven subcritical system concept based on visible technology [J]. *Nuclear Fusion*, 2011, **51**(10): 103-106. DOI: 10.1088/0029-5515/51/10/103036.
- 13 Song J, Long P, FDS Team, *et al.* Benchmarking of CAD-based superMC with ITER benchmark model [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2014, **89**(11): 2499-503. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2014.05.003
- 14 WU Yican, ZHU X X, ZHENG S L, *et al.* Neutronics analysis of dual-cooled waste transmutation blanket for the FDS [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2002, **63-64**:

- 133-138. DOI: 10.1016/S0920-3796(02)00192-8
- 15 WU Yican, FDS Team. Design status and development strategy of china liquid lithium-lead blankets and related material technology [J]. Journal of Nuclear Material, 2007, **367-370**: 1410-1415. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2007.04.031
- 16 ZENG Meihua, SONG Yong, DING Xiaolei, *et al.* Kinematics analysis and verification of in-vessel fuel handling system for china lead-based research reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, **85**: 301-305. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.05.031
- 17 LI Y, LU L, WU Y, *et al.* Benchmarking of MCAM4.0 with the ITER 3D model [J]. Fusion Engineering and Design, 2007, **82**: 2861-2866. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2007.02.022
- 18 YANG Zihui, HE Tao, SHANG Leiming, *et al.* Development of high-immersive simulation system for designing maintenance strategy and its application to CLEAR-I [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, **83**: 309-315. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.03.004
- 19 李廷, 尚雷明, 龙鹏程, 等. 基于体素模型的外照射剂量精确评估方法研究[J]. 原子能科学技术, 2013, **47**(Suppl): 146-150. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2014.rrj.32.040502.
LI Ting, SHANG Leiming, LONG Pengcheng, *et al.* Study on accurate external radiation dose assessment method based on voxel model [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, **47**(Suppl): 146-150. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.S1.0526.
- 20 尚雷明, 李廷, 何桃, 等. 基于并行技术的人体外照射实时精确剂量评估方法 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2014, **34**(2): 040502. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2014.rrj.32.040502.
SHANG Leiming, LI Ting, HE Tao, *et al.* Dose assessment method for real-time external radiation based on parallel technology [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2014, **34**(2): 040502. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2014.rrj.32.040502.