

基于并行技术的人体外照射实时精确剂量评估方法

尚雷明 李廷 何桃 龙鹏程 胡丽琴 吴宜灿 FDS 团队

(中国科学院核能安全技术研究所 合肥 230031)

摘要 为了精确评估核辐射环境下人体及器官受照剂量, FDS 团队基于中国高精度辐射虚拟人模型 Rad-HUMAN 发展了体素级人体外照射剂量评估方法。但由于计算量巨大, 现有计算流程和计算方法难以满足虚拟仿真对剂量评估实时性的要求。为了解决这一问题, 本文借助 OpenMP 和 MPI 并行计算技术, 发展了基于并行计算的体素级人体外照射剂量评估方法, 实现了百万量级体素外照射剂量实时计算。以加速器驱动铅铋冷却反应堆堆顶包容小室内维修作业人体受照剂量评估为例的测试结果表明, 该方法满足了体素级剂量实时评估计算的需求, 对考虑到器官剂量限制的人体外照射剂量实时精确评估有重要意义。

关键词 体素模型, 实时剂量评估, 精确剂量评估, 并行计算, Rad-HUMAN

中图分类号 TL75+2.2, TL72

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2014.rj.32.040502

在核设施的运行阶段, 需要定期或不定期地对部件进行维修, 在核设施退役之后, 还需要对反应堆进行退役处理。活化部件产生的辐射, 会对现场工作人员的身体健康造成极大威胁。根据 ALARA (As low as reasonably achievable, 合理可行尽可能低) 原则^[1], 在人员进入辐射区域工作之前需要对人员的受照剂量进行预评估。为了精确评估辐射环境下人体及器官受照剂量情况, 中国科学院核能安全技术研究所 FDS 团队提出了基于体素模型的外照射剂量精确评估方法, 即利用中国高精度辐射虚拟人模型 Rad-HUMAN^[2-6], 分别计算组成每个器官的所有体素的吸收剂量, 从而转换为器官及人体受照剂量, 以得到更加精确的评估结果^[7-8], 并将该方法应用到核设施维修剂量评估中。但是, 由于 Rad-HUMAN 模型体素数量巨大(约 288 亿个), 加之辐射场网格数量众多(百万量级), 在计算单个时刻点人体受照剂量时十分耗时, 难以满足虚拟仿真过程中对人体受照剂量进行实时评估的需求。

随着计算机技术的不断发展, 多核系统和高性能计算标准的出现, 使得相互不受执行结果影响的串行代码有了并行的可能。其中, OpenMP(Open multiple processing)被认为是共享内存并行计算的理想方法, 而 MPI(Message passing interface)则是分

布式内存并行计算的主流编程模型。目前, 这两种并行模型已被广泛应用到各类高性能计算应用中^[9]。

本文在基于体素模型的人体辐射剂量精确评估方法的基础上, 对计算流程进行重新梳理, 并利用 OpenMP + MPI 混合同行模型实现了普通 PC 计算环境下体素级人体及器官受照剂量的实时评估, 满足了虚拟辐射环境下人员漫游仿真器官及人体受照剂量精确实时评估的需求。该方法初步应用到加速器驱动铅铋冷却反应堆堆顶包容小室内靶窗更换维修过程中人体受照剂量预评估中, 得到了良好的实验结果。

1 基于体素的人体剂量评估方法

本文采用的计算模型是 FDS 团队基于第三军医大学采集的“第二例中国数字化可视化人体数据集(Chinese visible human, CVH2)”, 通过分割高分辨率人体全身彩色切片, 利用三维重建技术构建而成的中国高精度辐射虚拟人模型 Rad-HUMAN。该模型体素大小 $0.15\text{ mm} \times 0.15\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, 体素数目~288 亿个, 共分割人体器官或组织 46 个^[10], 覆盖了 ICRP60 号出版物中规定的 30 个辐射敏感的器官或组织^[11]。为了满足器官或组织剂量评估要求, 本文采用 FDS 团队自主研发的多物理耦合分析自

基金资助: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA03040000)、国家自然科学基金(91026004)、国家 ITER 973 计划 2014GB1120001 和安徽省高校自然科学基金资助项目(KJ2013B248)资助

第一作者: 尚雷明, 1980 年 1 月, 2005 年 6 月于安徽理工大学获硕士学位, 现为中国科学院合肥物质科学研究院在读博士研究生

通讯作者: 胡丽琴, 博士, 副教授, E-mail: liqin.hu@fds.org.cn

收稿日期: 初稿 2014-04-21; 修回 2014-05-12

动建模软件 MCAM^[12-18], 采用全身体素填充及重复结构描述方式, 生成适合剂量计算的 Rad-HUMAN 计算模型, 模型体素大小为 3 mm × 3 mm × 3 mm, 共计 8,680,056 个体素。在进行器官及人体受照剂量计算时, 采用国际辐射防护委员会 ICRP 74 号报告建议的流量-剂量转化方法实现人体剂量计算, 即计算出自由空间的流量, 通过 ICRP 建议的流量-剂量转换因子直接估算器官及人体受照剂量。计算公式如式 1 所示。

$$D_T = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m D_{T,j} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m flux_j \times CF = \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m flux_j \right) \times CF \quad (1)$$

其中, D_T 为组织 T 的吸收剂量, $D_{T,j}$ 为该器官体素 j 的吸收剂量, $flux_j$ 为体素 j 处的流量, CF 为流量剂量转换因子, m 为该器官包含的体素数目^[19]。这里所使用的流量值, 采用了较为精确的蒙特卡洛数值模拟计算程序计算得到的停堆光子流量场数据。

在对人体器官受照剂量进行计算时, 首先读取各待计算器官的所有体素编号, 再查询该器官所有体素的流量值。具体计算流程如图 1 所示。

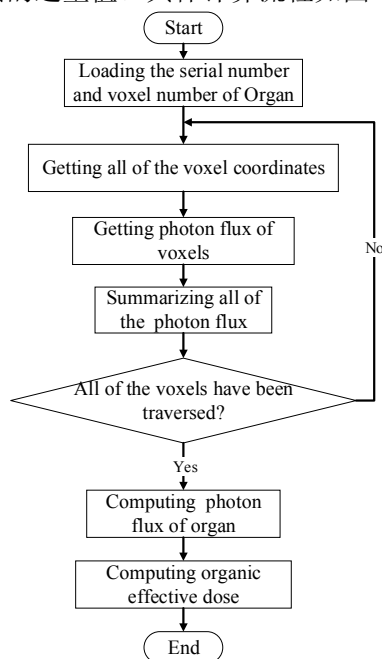


图 1 器官或组织当量剂量计算流程
Fig.1 Equivalent dose calculating process

2 人体剂量评估并行优化

随着科学计算需求的不断提高, 并行计算成为解决海量数据计算的重要手段。按照内存结构不同, 并行计算可分为共享内存结构并行和分布内存结构

并行两大类。OpenMP 被认为是共享内存结构并行计算的典型代表, MPI 并行计算则是分布内存结构并行的代表^[9]。本文利用上述 OpenMP 和 MPI 并行计算方法, 在较少的时间开销下解决大体量的计算。但是, 只有当问题可以并行求解, 相互之间没有依赖关系时, 并行计算才能实现。所以, 需要对以上算法流程进行分析, 提取出可并行的部分。本文从两个方面对以上剂量计算流程进行优化: (1) 单器官或组织剂量并行优化; (2) 多器官或组织整体剂量并行优化。

2.1 单器官或组织剂量并行优化

根据图 1 的计算流程可知, 在对单个器官或组织进行剂量计算时, 时间开销最大的任务是获取组成每个器官或组织的体素所处位置的流量值。通过 MCAM 转换描述的 Rad-HUMAN 计算模型, 记录了每个体素在人体坐标系中的坐标。为了获取各体素的流量值, 需要将各体素的坐标换算为对应的辐射场坐标系 (称之为世界坐标系), 再根据该体素的世界坐标系对应到由蒙特卡洛数值模拟计算程序计算得到的辐射场相应坐标范围, 从而读取该坐标范围内的流量值。考虑到组成单个器官或组织的体素数量庞大, 采用 MPI 集群并行处理会耗费大量的通信开销, 所以我们选用单机多核并行计算 OpenMP 来实现单个器官或组织的剂量并行计算, 利用 j 个核的计算机进行并行计算的流程如图 2 所示。

2.2 多器官或组织整体剂量并行优化

以上是对单个器官或组织多个体素剂量计算的并行优化, 本节将对多个器官或组织的剂量计算进行并行优化。在对整个人体进行剂量评估时, 需要对 46 个器官或组织的当量剂量进行计算。而且, 人体各器官或组织当量剂量的计算相互之间不产生依赖, 直接并行计算完成后, 汇总各器官的当量剂量即可。考虑到单台普通 PC 进行大规模计算时计算能力不足, 且时间开销比较大, 我们引入 MPI 集群并行计算的方式, 对多个器官或组织进行并行计算。即将各器官的剂量计算按器官依次分配到集群计算机上, 集群上的每台计算机则按 2.1 中描述的 OpenMP 多核并行方式并行计算单个器官的剂量。在集群并行计算时, 根据集群计算机计算处理的速度, 动态调整各计算单元的任务分配。集群并行计算流程如图 3 所示。

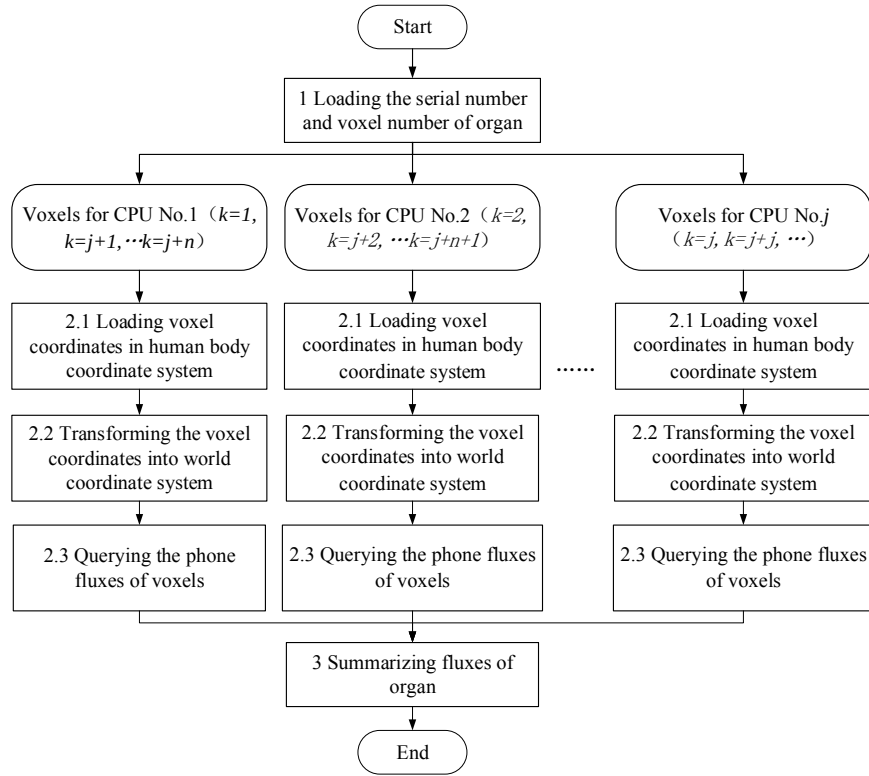


图2 基于 OpenMP 的单器官或组织剂量并行计算
Fig.2 Dose computing process of single organ or tissue based on OpenMP

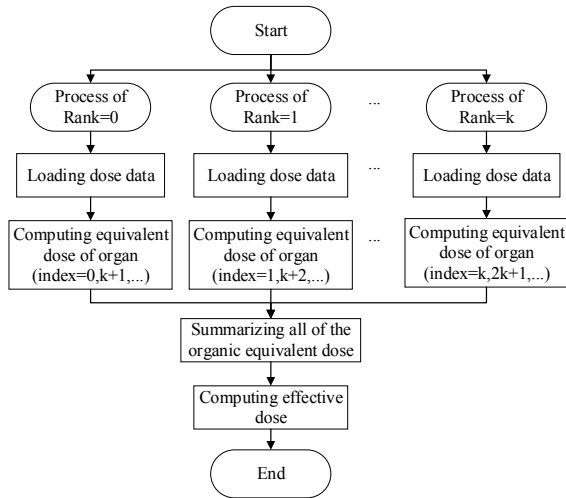


图3 多器官或组织剂量并行计算流程
Fig.3 Dose computing process of multi organ or tissue based on MPI

根据以上计算得到的器官吸收剂量，利用 ICRP103 号报告中发布的人体器官辐射剂量权重加得到人体有效剂量^[19]，如公式 2 所示。

$$E = \sum_i \omega_T H_{T,i} \quad (2)$$

其中， i 表示器官数量， ω_T 表示组织权重因子， $H_{T,i}$ 表示第 i 个器官当量剂量。

3 测试与讨论

3.1 例题描述

为了验证以上计算方法的正确性以及实时性进行测试，本文选用了加速器驱动铅铋冷却反应堆堆顶包容小室内散裂靶更换维修场景作为测试例题。

散裂靶是连接加速器和次临界堆的关键部件。散裂靶接受高能质子轰击，发生散裂反应产生中子，为次临界堆提供中子源。本例题选择液态铅铋有窗靶作为散裂靶件，散裂靶采用 T91 钢为靶窗材料。有窗靶件为现有液态靶件的主要设计形式。质子束与液态铅铋回路通过靶窗相互隔开，质子束穿透靶窗入射到液态铅铋中，轰击铅铋原子核，产生中子。由于受到高能强流质子轰击和强中子辐照，同时它上面沉积的大量核热也需要冷却，因而靶窗的寿命一般较短。靶窗设计更换周期为一年。在靶的更换过程中，除了遥操设备外，还需要必要的人工干预活动。在人工参与过程中的受照剂量必须在设计规定的剂量限制以下，同时必须保证维修工人受照剂量满足 ALARA 原则。根据维修方案，工人必须进入堆顶包容小室内，完成散裂靶更换前小室内遥操

设备滑轨、临时屏蔽等基础设施的搭建以及散裂靶更换完成之后相关设施的拆除工作。利用 FDS 团队自主研发的核与辐射安全仿真系统 RVIS^[20-21], 我们搭建了散裂靶更换维修虚拟场景。

该案例将通过 RVIS 仿真工作人员在进入堆顶包容小室内按照设计的路线和工序完成遥操设备的基础设施搭建, 以及靶更换完成后, 堆顶包容小室内剂量降低到人员允许进入水平以后基础设施拆除工作。在工人工作过程中, 需要实时评估工人有效剂量是否满足规定的限制, 同时考虑敏感器官的受照剂量。

为了评估人体及器官的辐射剂量, 本例题采用大型集成中子学计算分析系统 VisualBUS^[22-23]计算

得到光子通量场计算结果。

3.2 性能分析

该例题的实现采用普通 PC 作为硬件实验平台, 配置为: 操作系统 Windows 7 64 位, 处理器 Intel i5 双核四线程 2.4 GHz, 内存 2 GB。为了验证该方法的计算结果的正确性及实时性, 本文首先选择堆顶包容小室内靠近换热器 (坐标: 1000 cm, 1000 cm, 4000 cm) 的单个时刻点进行单机多线程、单机多线程和集群并行计算, 其中, 单机多核采用 OpenMP 模型进行计算, 集群并行采用的计算机配置与单机多核并行的计算机配置一致。结果如表 1 所示。

表 1 单时刻点计算结果及时间
Tab. 1 Dose results and elapsed time of signal time

算法类型 Type of algorithm	人体有效 剂量 / mSv·h ⁻¹ Effective dose rate	部分敏感器官当量剂量率/ mSv·h ⁻¹ Equivalent dose rate of individual sensitive organs or tissues				时间/s Time	加速比 Speed-up ratio	并行效率 Parallel computing efficiency
		胃 Stomach	性腺 Gonad	红骨髓 Red Mar- row	结肠 Colon			
单机多线程 Single thread	0.385	0.420	0.408	0.332	0.338	9.13	1	1.00
单机双线程 Parallel with 2 threads	0.385	0.420	0.408	0.332	0.338	4.60	1.98	0.99
单机 3 核 Parallel with 3 threads	0.385	0.420	0.408	0.332	0.338	3.13	2.92	0.97
单机 4 核 Parallel with 4 threads	0.385	0.420	0.408	0.332	0.338	2.57	3.55	0.89
2 节点集群 (8 线程) Parallel with 2 Nodes (8 threads)	0.385	0.420	0.408	0.332	0.338	1.47	6.21	0.78
3 节点集群 (12 线程) Parallel with 3 Nodes (12 threads)	0.385	0.420	0.408	0.332	0.338	0.91	10.03	0.84
4 节点集群 Parallel with 4 Nodes (16 threads)	0.385	0.420	0.408	0.332	0.338	0.80	11.41	0.71
5 节点集群 Parallel with 5 Nodes (20 threads)	0.385	0.420	0.408	0.332	0.338	0.66	13.83	0.70

从表 1 中可以看出, 采用单机多核与集群并行计算所得到的有效剂量和部分敏感器官当量剂量率结果一致, 验证了并行计算结果的正确性。

利用单机单核对单个时刻点人体受照剂量进行计算时, 时间开销为 9.13 s, 是实时仿真难以接受的计算时间; 采用 OpenMP 实现的单机 4 核并行计算时间为 2.57 s, 同样不能满足实时的要求。在采用 MPI 和 OpenMP 混合的集群并行计算中, 随着集

群计算机数量的增加, 计算时间明显下降, 当集群计算机达到 5 个节点 20 核时, 计算时间为 0.66 s, 满足了实时计算的要求。

从表 1 的加速比来看, 单机 4 核较之单机单核的加速比为 3.56, 并未达到理论上的 4 倍, 这是因为多核之间的通信开销会耗费计算时间; 而 2 个节点 4 核的集群并行加速比为 1.47; 从图 4 中可以看出, 随着节点和核数的增加, 并行效率趋缓, 其原

因随着节点的增多，节点之间的通信开销越大，从而导致并行效率降低。

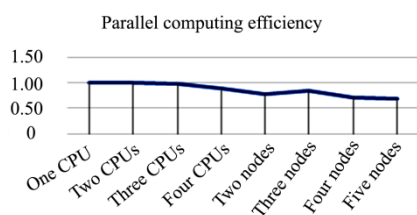


图4 并行效率变化趋势

Fig.4 Tendency of parallel computing efficiency

4 结论

本文在 FDS 团队基于中国高精度辐射虚拟人模型 Rad-HUMAN 发展的基于体素的人体外照射剂量评估方法的基础上，利用多核并行算法 OpenMP 和集群并行算法 MPI，实现了单机多核、集群并行等算法，并对并行计算的剂量计算结果和时间开销进行了比较分析。实验证明，利用集群并行算法计算得到的人体受照剂量与不采用并行计算剂量结果一致。同时，当节点数量达到 5 个时，满足了维修仿真对剂量计算实时性的要求。该算法目前已集成到 FDS 团队发展的核与辐射安全仿真系统 RVIS 中，并初步应用于加速器驱动铅铋冷却反应堆靶更换维修方案评估工作。

参考文献

- 1 Economides S, Hardeman F, Vermeersch F, *et al.* Developing ALARA culture [J]. Nuclear Engineering International, 2012, **57** (700): 20-21.
- 2 CHENG Mengyun, ZENG Qin, CAO Ruifen, *et al.* Construction a voxel model with physical properties derived from the CT numbers [J]. Progress in Nuclear Science and Technology (PNST), 2011, **2**: 237-241.
- 3 CHENG Mengyun, HUANG Shanqing, LI Jia, *et al.* Progress of HUMOP: human automatic modeling program [J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2011, **104**: 648-649.
- 4 ZHAO Kai, CHENG Mengyun, LONG Pengcheng, *et al.* A hybrid sampling method on construction of Rad-HUMAN phantom [J]. Nuclear Science and Technology, 2014, **25**: 205-210.
- 5 ZHAO Kai, CHENG Mengyun, LONG Pengcheng, *et al.* Human organ geometry construction from segmented images[C]. Proceedings of the 2013 International Conference on Innovative Computing and Cloud Computing, ICC2013, 2013.12, Wuhan.
- 6 赵凯, 王文, 范言昌, 等. 人体 MCNP 重复结构辐射计算模型可视化方法 [J]. 核科学与工程, 2013, **33**(4): 464-469.
ZHAO Kai, WANG Wen, FAN Yanchang, *et al.* Visualization of the human radiation computation phantom described by mcnp repeated structure [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2013, **33**(4): 464-469.
- 7 尚雷明, 李廷, 何桃, 等. 基于最小包围盒策略的人体外照射剂量评估方法研究 [J]. 核科学与工程, 2014, **34** (1): 80-85.
SHANG Leiming, LI Ting, HE Tao, *et al.* A method for radiation dose assessment of human body based on minimum bounding box [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2014, **34** (1): 80-85.
- 8 李廷, 尚雷明, 何桃, 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.
LI Ting, SHANG Leiming, HE Tao, *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.
- 9 潘卫, 陈燎原, 张锦华, 等. 基于 SMP 集群的 MPI + OpenMP 混合编程模型研究 [J]. 计算机应用研究, 2009, **26**(12): p 4592-4594.
PAN Wei, CHEN Liaoyuan, ZHANG Jinhua, *et al.* Research on MPI + OpenMP hybrid programming paradigm based on SMP cluster [J]. Application Research of Computers, 2009, **26**(12): 4592-4594.
- 10 程梦云. 蒙特卡罗人体计算建模方法及应用研究 [D]. 合肥. 中国科学院合肥物质科学研究院. 2012.
CHENG Mengyun. Study on Monte Carlo human computational modeling method and its application [D]. Hefei. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences. 2012.
- 11 ICRP. 1996 Recommendations of the international commission on radiological protection [R]. ICRP Publication 74. 1996.
- 12 吴宜灿, 胡丽琴, 龙鹏程, 等. 先进核能系统设计分析软件与数据库研发进展 [J]. 核科学与工程, 2010, **30**(1): 55-64.
WU Yican, HU Liqin, LONG Pengcheng, *et al.* Development of design and analysis software for advanced nuclear systems [J]. Chinese Journal of Nuclear

- Science and Engineering, 2010, **30**(1): 55-64.
- 13 王国忠. 支持多计算程序的辐射输运建模集成系统设计研究 [D]. 合肥. 中国科学技术大学. 2013.
WANG Guozhong. Design of integrated radiation transport simulation modeling system for multiple codes [D]. Hefei. University of Science and Technology of China. 2013.
- 14 WU Yican, FDS Team. CAD-based Interface Programs for Fusion Neutron Transport Simulation[J]. Fusion Engineering and Design, 2009, **84**: 1987-1992.
- 15 LU Lei, YK Lee, ZHANG Junjun, *et al*, Development of Monte Carlo automatic modeling functions of MCAM for TRIPOLI-ITER application [J], Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2009, **605**(3): 384-387.
- 16 LI Ying, LU Lei, DING Aiping, *et al*. Benchmarking of MCAM 4.0 with the ITER 3D model [J]. Fusion Engineering and Design, 2007, **82**(15): 2861-2866.
- 17 ZENG Qin, LU Lei, DING Aiping, *et al*. Update of ITER 3D basic neutronics model with MCAM [J]. Fusion Engineering and Design, 2006, **81**(23-24): 2773-2778.
- 18 LONG Pengcheng, ZOU Jun, HUANG Shanqing, *et al*. Development and application of SN Auto-modeling Tool SNAM 2.1 [J]. Fusion Engineering and Design, 2010, **85**(7): 1113-1116.
- 19 ICRP. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, Annual ICRP37: 256-268.
- 20 WU Yican, FDS Team. Conceptual design and testing strategy of a dual functional lithium-lead test blanket module in ITER and EAST [J]. Nuclear Fusion, 2007, **47**(11): 1533-1539.
- 21 WU Yican, FDS Team. Design status and development strategy of China liquid lithium-lead blankets and related material technology [J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, **367**: 1410-1415.
- 22 吴宜灿, 李静惊, 李莹, 等. 大型集成多功能中子学计算与分析系统 VisualBUS 的研究与发展 [J]. 核科学与工程, 2007, **27**(4): 365-373.
WU Yican, LI Jingjing, LI Ying, *et al*. An integrated multi-functional neutronics calculation and analysis code system: VisualBUS [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, **27** (4): 365-373.
- 23 WU Yican, FDS Team. CAD-based interface programs for fusion neutron transport simulation [J]. Fusion Engineering and Design, 2009, **84**(7): 1987-1992.

Dose assessment method for real-time external radiation based on parallel technology

SHANG Leiming LI Ting HE Tao LONG Pengcheng HU Liqin WU Yican FDS Team

(Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

ABSTRACT Based on the accurately whole-body computational phantom of Chinese adult (Rad-HUMAN), an accuracy external radiation dose assessment method was developed for the purpose of radiation protection. Due to the large amount of calculation, the existing computing method of the method mentioned above cannot meet the real-time requirement of virtual simulation. Based on parallel technology, a voxel model-based parallel external radiation dose assessment method has been developed. The method has been used in the dose assessment of accelerator driven lead-bismuth cooled reactor target's replace. The results showed that the proposed method could real-timely assess accurate radiation dose based on voxel model.

KEYWORDS Voxel model, Real-time dose assessment, Parallel computing, Rad-HUMAN

CLC TL7+2.2, TL72