

## 利用 ITER 基准模型 对 MCAM4.2 进行检验 (I)

李莹, 曾勤, 卢磊, 郑善良, 丁爱平, 胡海敏, 张俊军, 吴宜灿, FDS 团队

(中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**利用 ITER 三维基准模型对蒙特卡罗方法粒子输运自动建模软件 MCAM4.2 进行了检验测试, 实现了 CAD 工程模型的预处理, 自动转换生成 MCNP 计算输入文件, 并完成测试要求的中子壁负载和偏滤器中子注量率与核热沉积的计算。ITER 模型的成功处理与计算表明 MCAM 能够正确和有效地处理大型复杂几何模型。

**关键词:**MCNP; ITER; MCAM; CAD; 中子学建模

**中图分类号:**TL32 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-0918(2008)01-0047-04

### Benchmarking of MCAM4.2 with ITER 3D CAD model

LI Ying, ZENG Qin, LU Lei, ZHENG Shan-liang, DING Ai-ping, HU Hai-min,  
ZHANG Jun-jun, WU Yi-can, FDS Team

(Institute of Plasma Physics, CAS, Hefei of Anhui Prov. 230031, China)

**Abstract:** MCAM (Monte-Carlo Automatic Modeling System) is an integrated tool, developed by FDS Team, for CAD model preprocessing, bi-directional conversion between CAD/Monte Carlo (MCNP/TRIPLO etc.) neutronics models. The ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) benchmark model is set by ITER International Team (IT) to compare the CAD/MCNP programs developed by different ITER participating teams. The benchmarking of MCAM4.2 has been carried out by using the ITER benchmark model. This paper introduces the benchmark procedure of MCAM4.2 and presents the nuclear response of neutron wall loading on the first wall and the neutron flux and nuclear heating in the divertor cassette. The results show that MCAM can correctly and effectively process the large scale and complex ITER three-dimensional model.

**Key words:** MCNP; ITER; MCAM; CAD; neutronics modeling

收稿日期: 2008-01-15; 修回日期: 2008-02-24

基金项目: ITER 国际合作协议项目

作者简介: 李莹 (1972—), 男, 河北人, 博士生, 现从事中子学自动建模研究

蒙特卡罗方法已广泛应用于核领域粒子输运模拟计算,而建模是其获得精确计算结果的关键环节。针对这一情况,国内外很多研究机构和大学针对以 MCNP<sup>[1]</sup> 为研究对象的蒙卡方法粒子输运计算的自动建模方法和软件进行研究和开发。

ITER 国际工作组为了测试不同建模方法和工具的可用性及其效率,发布了一个基于工程设计的 ITER 基准模型,并组织发起了一系列的国际合作项目来评估各个软件工具。参加测试评估的软件有中国科学院等离子体物理研究所(ASIPP) FDS 团队发展的 MCAM<sup>[2-5]</sup>,德国卡尔斯鲁厄研究中心(FZK)发展的 McCAD<sup>[6]</sup>,美国威斯康星大学(UW)发展的 DAG-MCNPX<sup>[7]</sup>,日本原子能研究所(JAEA)发展的 GEOMIT<sup>[8]</sup>。

本文介绍了 ITER 基准校核测试模型和测试内容,以及使用 MCAM (4.2 版本)完成校核测试的过程,给出中子壁负载和偏滤器上中子注量率与核热计算结果。

## 1 ITER 基准校核测试简介

ITER 基准校核测试提供了 ITER 基准 CAD 模型、计算所需中子源分布的描述、各部件的材料定义、测试的说明和需要计算的物理量的定义。

ITER 基准模型是 ITER 装置环向 40° 扇形段模型,在商用 CAD 软件 CATIA V5 平台下创建,输出为 STEP 格式。该模型由 ITER 装置的实际工程设计模型简化而来,包含包层、偏滤器、真空室、环向场线圈、极向场线圈、中心螺线管、上下窗口、赤道窗口等部件,涉及 ITER 装置中所有的重要组件,含有近 1 000 个实体和 3 000 个曲面,是一个几何结构复杂的 CAD 模型(图 1)。

该基准校核测试涵盖聚变堆中子学分析的主要内容,包括中子壁负载、不同位置中子注量率、不同部件核热沉积等。通过这一测试并得到正确的物理计算结果将标志着自动建模程序的正确性和适用性,而对基准模型的具体处理和转换将能够体现自动建模程序的成熟度和易

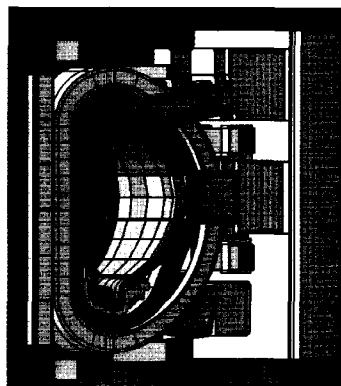


图 1 ITER 三维基准模型

Fig.1 ITER 3D benchmark model

用性。

## 2 模型处理过程

为了生成 MCNP 输入文件,ITER 基准模型被保存为 STEP 格式而后导入 MCAM 中,并进行了下列处理:

(1) 缩小模型:基准模型是采用 CATIA 以毫米作为尺寸单位创建,而 MCNP 计算时使用厘米作为尺寸单位,因此在导入到 MCAM 后需要将模型缩小 10 倍。

(2) 按照材料对模型分组:根据 ITER 工作组提供的各部件材料定义文档,将基准模型各部件分别按照系统和材料进行分组,将相同材料的部件分为一组,从而方便对该组内的所有的实体统一地赋予材料信息(材料号和密度)、重要性信息和其他的辅助信息。

(3) 分解模型:由于模型中包含很多几何结构复杂的部件,利用 MCAM 的分解功能,对模型进行自动的分解,一方面简化具有复杂结构的实体,一方面使得生成的 MCNP 栅元表达式更加符合蒙卡建模人员手工建模的习惯。

(4) 模型重整和干涉检查:由于 ITER 三维基准模型是一个工程模型,所以模型中会包含缝隙和重叠,而缝隙和重叠都会影响 MCNP 的计算过程。利用 MCAM 提供的模型重整和干涉检查功能消除模型中相邻栅元之间不严格

共面的情况,可以修正模型中微小的重叠和缝隙。

(5) 模型的转换和空腔生成:如图 1 所示, ITER 基准模型中只有零件实体的几何信息,而中子学计算则要求描述整个三维空间。如图 2 所示,MCAM 中的高效空腔生成算法可以在转换的同时自动生成对空腔部分的几何描述,避免了空腔部分的人工建模,生成完整而准确的 MCNP 输入文件。

(6) 反演生成的计算文件:利用反演功能,将生成的 MCNP 输入文件再转换为 CAD 模型,进行验证。

(7) 再次转换反演的 CAD 模型:将反演得到的 CAD 模型再次转换为 MCNP 输入文件。

为了检验计算输入文件的正确性,对于第(5)步和第(7)步的 MCNP 计算输入文件采用 MCNP/4C<sup>[1]</sup>分别进行了几何正确性验证,抽样的粒子数为  $2 \times 10^7$  个,没有粒子丢失。

第(6)步得到完整的三维中子学模型如图 2 所示,该模型以及几何正确性验证的结果展示了 MCAM 在预处理、转换和反演功能上的正确性。

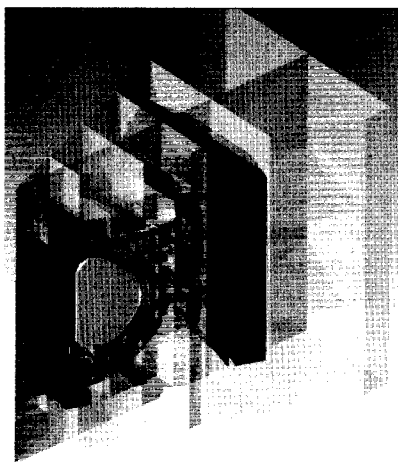


图 2 转换并反演得到的 CAD 模型  
Fig. 2 MCAM converted CAD model

ITER 基准模型的处理过程中,运行 MCAM4.2 的 PC 系统配置为 Intel 3.4 G P4 处理器,4 GB 内存,160 GB 硬盘,Windows 2003 操作系统,整个的模型处理过程(1~7 步)

耗时约为 20 h。

在使用 MCAM 对 ITER 基准模型的处理过程中,不需要人工对模型进行修改,而由程序自动高效地完成。相比之下,其他的自动建模工具,由于程序的不完善,为了满足 MCNP 计算的要求,需要手工对 ITER 基准模型中存在的一些错误进行修正,或者手工对模型进行适当的分解以得到能够被成功转换模型,而这一过程对于建立具有复杂几何结构的 ITER 基准模型的计算模型来说,仍然会耗费中子学分析人员的大量时间和精力。因此 MCAM 在建模的自动化程度和处理速度上有着突出的优势。

### 3 计算结果及分析

根据 MCAM 生成的 MCNP 输入文件,加入校核测试提供的材料卡、计数卡和源项定义,采用 MCNP/4C 和 FENDL2.1<sup>[9]</sup>数据库完成了各类计算<sup>[10]</sup>。本文给出 500MW 聚变功率下中子壁负载和偏滤器中子注量率与核热的结果以及和其他研究机构的结果<sup>[11]</sup>对比,更多更详细的 MCAM 测试结果将在后续文章中发表。

#### 3.1 中子壁负载

ITER 装置第一壁的中子壁负载参数可为其他的计算结果提供重要参考。装置中面向等离子体的第一壁被按照包层的位置分解为 18 个模块,为了得到更精确的结果,每个模块再分为 4 块,然后计算每一块上的中子壁负载 ( $\text{MW}/\text{m}^2$ )。从图 3 可以看出,不同单位的计算结果非常一致。FZK 计算的是等离子体刮削层部分的负载而不是第一壁的负载,因此有一定的差异,但是平均误差在 6% 以内。

#### 3.2 偏滤器中子注量率与核热沉积

检验测试要求中定义了针对偏滤器表面和部件内的中子注量率,以及部件中核热沉积。因为偏滤器的形状复杂,部件表面由多个相切曲面组成,因此这些计算要求可以很好地检验各个建模工具的准确性和精度。

校核测试中偏滤器部分的计算结果有 33 个不同的量,前 19 个是总的中子注量率,后 14 个是核热,分别对应图 4 中不同区域。为了便于比较,图 5 显示其他三方结果相对于本文结

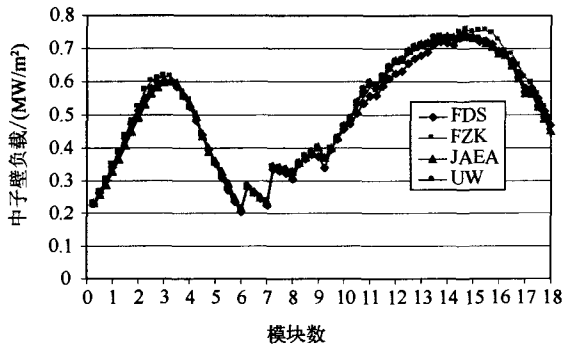


图 3 中子壁负载结果对比

Fig. 3 Comparison of neutron wall loading

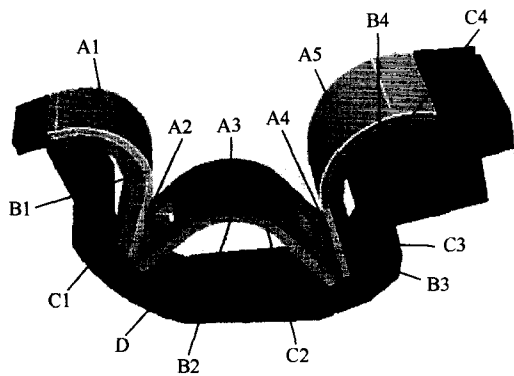


图 4 偏滤器核热沉积计数分布

Fig. 4 Tally contributions on divertor cassette

果的系数(其结果除以本文相应的计算结果)。

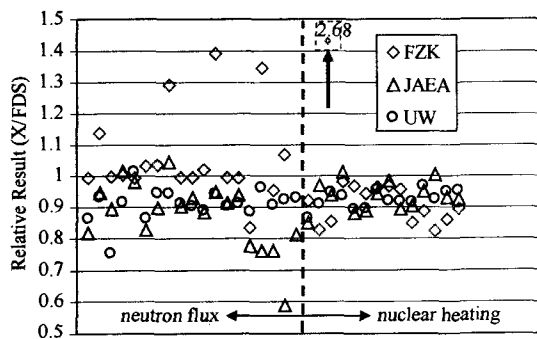


图 5 偏滤器结果对比

Fig. 5 Comparison of neutron flux and nuclear heating on divertor cassette

从图中可以看出,大部分结果的差异在 10%以内(相对于 FDS 的结果),FZK 部分结果差异较大(5 个)的原因是由于在转换时对偏滤器的区域进行了分割并分别计算,而没有对结果按照整个部件进行正确的加权平均。JAEA 的计算结果整体偏低,是因为 GEOMIT 生成的 MCNP 输入文件在计算时会丢失部分粒子,对结果有影响,JAEA 正在寻求修改 MCNP 以避免因粒子丢失对结果的影响。威斯康星大学的 DAG-MCNP 的计算结果和本文的比较一致,虽然整体偏小,但是误差基本都在 10%以内。

#### 4 总结

本文介绍了基于 ITER 基准模型检验测试 MCAM 4.2 的过程,并给出了中子壁负荷和偏滤器上的计算结果与国际上其他参与方结果的对比情况。测试结果表明 MCAM 已经发展到了较成熟的阶段,它完全可以胜任对真实的大型复杂三维核装置的中子学自动建模工作,可以极大地加速中子学分析的建模和计算工作。其他更多的测试结果和高级版本功能将在以后陆续发表。

#### 参考文献:

- [1] Briesmeister J F. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C[J]. Los Alamos National Laboratory.
- [2] Yican WU, George Xu X. The Need for Further Development of CAD/MCNP Interface Codes [R]. Invited presentation in the American Nuclear Society Annual Meeting, Boston, Massachusetts. June 24-28, 2007; Transactions of American Nuclear Society, Vol. 96, TRANSAO: 961-882 (2007), ISSN:0003-018X.
- [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[J].核科学与工程,2006,26(2): 12-20.
- [4] Li Y., Lu L, Ding A, et al. Benchmarking of MCAM 4.0 with the ITER 3D model[J]. Fusion Engineering and Design, 82 (2007): 2861-2866.
- [5] 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[J]. VisualBUS 的研究与发展,核科学与工程,2007,27(4).

(下转第 65 页)

## 参考文献:

- [1] 吴宜灿,刘萍,胡丽琴,等. 大型集成概率安全分析软件系统的研究与发展[J]. 核科学与工程,2007, 27(3): 270-276.
- [2] 王海涛,吴宜灿,刘萍,等. 概率截断对 PSA 中 RAW 重要度的影响研究[J]. 核科学与工程, 2006, 26(4): 358-362.
- [3] Martorell S, et al. Safety-related equipment prioritization for reliability centered maintenance purposes based on a plant specific level 1 PSA[J]. Reliability Engineering and System Safety,1996,27: 35-44.
- [4] Vesely W E, et al. PRA importance measures for maintenance prioritization applications. Reliability Engineering and System Safety[J], 1994,43: 307-318.
- [5] 王海涛,吴宜灿,李亚洲,等. 核电站实时风险管理系统的研究与发展[J]. 核安全, 2008(待发表).
- [6] 王海涛. 核电站实时风险管理系统关键技术研究与发展[D]. 安徽:中国科学院合肥物质科学研究院, 2008.
- [7] NRC. Official Transcript of Proceedings of ACRS Plant Operations and PRA Subcommittee, South Texas Project Exemption Requests[R], 2001.
- [8] NEI. 10 CFR 50. 69 SSC Categorization Guideline. NEI 00-04[Draft-Revision C][S], 2002.
- [9] NEI. 10 CFR 50. 69 SSC Categorization Guideline. NEI 00-04[Draft-Revision D][S], 2003.
- [10] Kilyoo Kim, et al. On the use of the Balancing Method for calculating component RAW involving CCFs in SSC categorization[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 87: 233-242.
- [11] Michael Cheok C, et al. Use of importance measures in risk-informed regulatory applications [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 60: 213-226.
- [12] Vesely W E. Supplemental viewpoints on the use of importance measures in risk-informed regulatory applications[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 60: 257-259.
- [13] Woo Sik Jung, et al. Development of measures to estimate truncation error in fault tree analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 90: 30-36.
- [14] Borgonovo E, Apostolakis G E. A new importance measure for risk-informed decision making[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 72: 193-212.
- [15] NRC. STP nuclear operating company exemption requests: proof-of-concept for risk-informed 10 CFR Part 50 Option 2 [R], safety evaluation. SECY-01-0103, 2001.
- [6] Tsige-Tamirat H, Fischer U. CAD Interface for Monte Carlo Particle Transport Codes[J]. The Monte Carlo Method; Versatility Unbounded in a Dynamic Computing World; Proc. of the Conf., Chattanooga, Tenn., April 17-21, 2005, La Grange Park, ANS, 2005.
- [7] Wang M, Tautges T, Henderson D, et al. Three-dimensional modeling of complex fusion devices using CAD-MCNPX interface[J]. Fusion Science and Technology, 47(2005): 1079-1083.
- [8] Hesham N, Fukuzo M, Noha S, et al. "GEOMIT", Presented at Review Meeting on Neutronics Analyses for ITER[R]. 26-27 March, 2007.
- [9] The IAEA Nuclear Data Section. FENDL-2. 1 Fusion Evaluated Nuclear Data Library. Vienna, Austria, INDC (NDS)-467, version December, 2004.
- [10] ITER ITA Task Agreement-N73TD04FP-Testing and Application of a CAD/MCNP Interface Programme for ITER Neutronics Design Calculations, ITA-73-08-CN (2005).
- [11] Wilson P P H, Fede R, Fischer U, et al. State-of-the-art 3-D Neutronics Analysis Methods for Fusion Energy Systems[J]. presented at the 8th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-8), Heidelberg, Germany. September 30-October 5, 2007. To be published in Fusion Engineering and Design.

(上接第 50 页)