

文章编号: 1007-4627(2006)02-0138-04

## 蒙特卡罗粒子输运计算自动建模程序 MCAM 在 ITER 核分析建模中的应用\*

曾勤, 卢磊, 李莹, 丁爱平, 郑善良, 吴宜灿  
(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 国际热核试验堆(ITER)核分析的主要计算工具是三维蒙特卡罗输运程序 MCNP。MCAM (MCNP Auto-Modeling system) 作为 MCNP 自动建模与可视化软件, 其主要功能是 CAD 模型与 MCNP 计算模型之间的数据交互。一方面 MCAM 可将通用格式的 CAD 模型转换成 MCNP 计算模型, 另一方面作为一个可视化工具, 它可以以 CAD 模型的方式显示 MCNP 计算模型中几何及材料等相关信息。主要介绍利用 MCAM 对 ITER 三维 MCNP 模型的改进, 主要包括: 包层模块的重建和内包层几何细化; 模型环向角度从 20° 到 40° 的扩展。

**关键词:** 自动建模; MCAM; ITER; 核分析

**中图分类号:** TL61      **文献标识码:** A

### 1 引言

MCAM (MCNP Automatic Modeling system) 是中国科学院等离子体物理研究所 FDS 课题组自主开发的 MCNP 自动建模软件。MCAM 的开发始于 1998 年, 到目前为止, 已发展成为一个具有很强实用性的应用软件。

随着国际热核聚变实验堆 ITER 选址的最终落定, 建立 ITER 装置已成定局, 而对其进行核分析是决定装置可行性的重要内容之一。ITER 装置本身的复杂性, 限制了手工对 ITER 进行 MCNP 核分析建模的时效性与可靠性, 借助于 MCAM 的自动建模功能对装置进行核分析建模, 则大大提高了效率与可靠性。本文根据中国与 ITER 国际工作组签署的中子学分析研究合作协议(ITA 73-03-CN)内容, 基于 ITER 最新设计的 CAD 工程模型, 利用 MCAM 的正向转换功能对 ITER 核分析模型进行改进, 同时利用 MCAM 反向转换功能显示 MCNP 计算模型中几何及材料等相关信息, 检查 MCNP 计算模型中的错误。

### 2 MCAM 简介

MCAM 以 Spatial 公司的三维几何与可视化引擎 ACIS 作为建模及转换核心, 并提供可视化的操作界面, 在此基础上开发实现了 MCAM 5 大功能:

(1) 模型预处理: 主要实现对读入的 CAD 模型进行修复、简化、缝隙与重叠校正、空腔填充等, 为生成一个完整而正确的 MCNP 计算模型做准备。

(2) 正向转换: 主要实现 CAD→MCNP 输入文件的转换。MCAM 可以读取通用的 CAD 格式(STEP, SAT, IGES)的几何模型, 并将其转换为完整的 MCNP 输入文件。

(3) 反向转换: 主要实现 MCNP→CAD 模型的转换。支持 MCNP 中所有类型的几何数据描述卡, 包括重复结构的表达方式。例如, U, FILL, TRCL, LAT 和 LIKE m BUT 等输入卡。

(4) 模型分析: 以可视化方式实现模型属性显示和交互式编辑。MCAM 具备强大的三维可视化与交互能力, 可根据需要以不同的显示方式来观察模型; 可在图形环境中为单个或者一组栅元定义材

收稿日期: 2005-11-20; 修改日期: 2006-01-09

\* 基金项目: 中国和 ITER 国际合作组织签署的中子学分析研究合作协议资助项目(ITA 73-03-CN); 中国科学院知识创新工程资助项目

作者简介: 曾勤(1980-), 女(汉族), 湖北潜江人, 硕士研究生, 从事中子物理方面的研究; E-mail: qzeng@ipp.ac.cn

料、设置中子光子重要性、添加栅元注释信息等。

(5) 几何建模：主要实现基本 CAD 建模功能。可以绘制二维几何图形和创建三维几何实体，可以对实体进行交、并、差布尔运算功能，以及缩放、平移、旋转、镜像、复制、直角坐标阵列、极坐标阵列和分割等操作。

关于 MCAM 的详细内容，请见文献[1]。

### 3 ITER 模型简介

ITER CAD 工程模型以 CATIA 作为建模工具，其几何极其复杂，主体部件有包层、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、冷屏与生物屏蔽层等，而且设计时涉及到多种类型面方程(抛物面、双曲面、椭圆环面等)和多种复杂的三维几何。

ITER MCNP 输入文件 Brand 是目前 ITER 核分析的基准文件，由 ITER 工作组人员根据 CATIA 模型花费许多人年时间手工描述而成。此文件描述了 ITER 装置环向 20° 的所有主体部件，共有大约 2 900 个栅元和 2 500 个面。其中涉及到多种类型面方程，包括较为复杂的回旋曲面(GQ 面、TZ 面和 Z 面等)，并使用较多重复结构卡(U 卡)、坐标转换卡(TR 卡)等来描述几何模型。

依靠手工将如此复杂的 CAD 模型转换为 MCNP 输入文件，其时效性与可靠性都将受到很大限制，借助自动建模软件将 CAD 模型转换为 MCNP 输入文件，则能大大提高效率与正确性。

### 4 MCNP 模型可视化

MCAM 读取 Brand 文件后，利用反向转换功能自动将文件转换为三维 CAD 模型(图 1)。这是国际工作组人员第一次直观地看到 Brand 文件的三维模型，并了解到 Brand 模型完整的几何描述。

对于 ITER 这样一个复杂而又庞大的系统，手工建模难免会出错，而且很难发现。而根据 Brand 文件反向转换生成的 CAD 模型，基于 MCAM 强大的三维可视化功能，并参考 ITER CAD 工程模型可以检查原先手工描述的 Brand 文件中一些几何描述不合理或不正确的地方。如图 2 所示，Brand 文件中描述的旧包层冷却管道为不对称，而实际的 CAD 模型中冷却管道进水管和出水管在赤道口对称。

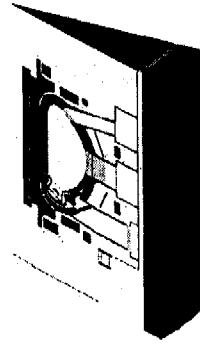


图 1 ITER Brand 三维模型(MCAM 反向转换)

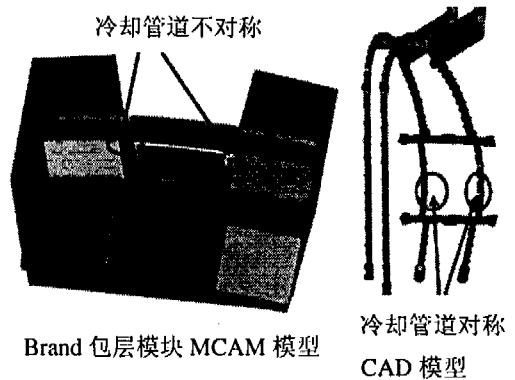


图 2 Brand 中几何描述不合理例图

### 5 中子学模型更新

随着工程设计的变化，ITER 核分析 MCNP 计算模型也要随之而变。本节利用 MCAM 的正向转换功能与几何建模功能，将更新后的 CAD 模型转换为 MCNP 输入文件，大大减低了模型更新的难度和工作的强度。具体内容如下：

(1) 包层分割更新及内包层几何描述细化。目前，ITER Brand 文件中，在极向上包层模块被分成 17 块(旧包层模块)，但现有工程设计将包层模块重新分割为 18 块(新包层模块)，因此需要在文件中对包层模块进行更新。内包层几何模块的细化，增加了内部水压连接器管道、电磁连接器的几何描述。

(2) 模型环向角度从 20° 到 40° 的扩展。Brand 文件中的几何描述，目前在环向上为 20°(图 1)，各窗口几何只描述了 1/2。为了便于对装置中完整的窗口进行核分析，需要将模型从 20° 扩展到 40°。

#### 5.1 包层分割更新及内包层几何描述细化

包层分割更新是模型更新的重点。更新前后新

旧包层模块对比如二维平面图图 3 所示。可以看出,除了将包层重新分割为 18 块外,还做了以下一些改进:移除旧包层第一个模块处的三角形支撑块,同时移除第 6 块与第 7 块之间、第 7 块与第 8 块之间、第 10 块与第 11 块之间和第 16 块与第 17 块之间的屏蔽块。

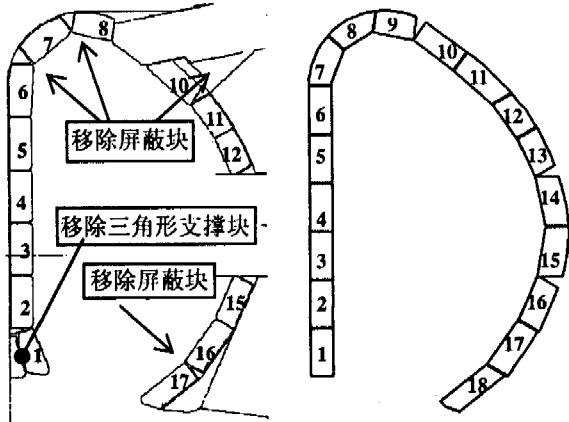


图 3 更新前包层极向分割为 17 块(赤道口径极向切图)(左)和更新后包层极向分割为 18 块(TF 线圈口径极向切图)(右)

Brand 文件中,内外包层采用材料混合简化,而模型简化的程度对周围部件(如 TF 线圈)的核分析有一定影响。细化内包层几何是为了分析 TF 线圈内部支架核热变化,细化部件主要有水压连接器管道和电磁连接器。图 4 显示的是更新后包层核分析模型图,即 MCAM 三维模型,其中内包层已细化。

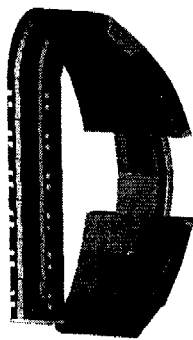


图 4 环向 20°包层核分析模型图(MCAM 画图)

更新后的包层与周围相邻部件的耦合会发生变化。新包层与周围部件之间会出现几何重叠或者产生缝隙的情况,那么相邻部件必须做相应的改动。本文对 Brand 中偏滤器、真空室和赤道口窗口填充

物进行了修改。

具体更新过程如下:(1)将每一包层模块的 CATIA 模型导入 MCAM,并在 MCAM 中简化模型;(2)利用 MCAM 将简化后的模型转换为 MCNP 输入文件;(3)将所有的模块描述完成后,用新包层模块替代 Brand 文件中的包层部分,同时适当改动与包层相接部件,用新的面卡替代 Brand 中旧面卡。ITER 新的 MCNP 输入文件完成。

### 5.2 模型环向从 20°扩展到 40°

模型从 20°扩展到 40°的过程中,首先利用 MCAM 的反向转换功能将 Brand 文件转换为三维 CAD 模型并保存为 SAT 格式文件。然后利用 MCAM 的镜像复制功能,沿着 20°模型的反射面 2 将模型镜像复制另外 20°,从而构成 40°模型图。然后利用模型分析功能定义栅元材料,设置中子光子重要性。最后利用正向转换将 40°三维 CAD 模型转换为完整的 MCNP 输入文件。图 5 所示为 20°模型在 MCAM 中径环向二维截面图,图 6 所示为 40°模型

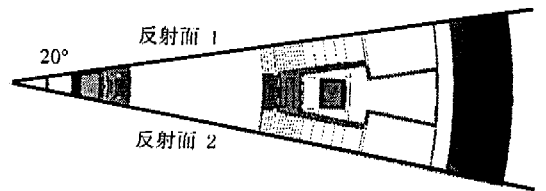


图 5 ITER Brand 20°模型,径环向二维截面图(MCAM 画图)

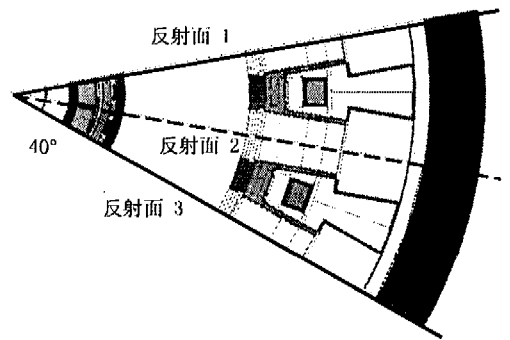


图 6 ITER Brand 40°模型,径环向二维截面图(MCAM 画图)

在 MCAM 中径环向二维截面图。模型扩展如果不借助于 MCAM,不借助于任何自动建模软件,而是靠手工来完成,又将花费许多人年的时间。正是因为 MCAM 的使用,才使得这项工作短短两三个

月内便能够完成。

## 6 结束语

粒子输运计算自动建模程序 MCAM 是本文工作的基础。对于 ITER 这样一个具有复杂几何结构的装置,完全依靠手工去建立 MCNP 计算模型是一项非常费时且极易出错的工作。本文以 MCAM 为建模平台,克服了手工建模的繁琐与耗时,提高了工作效率与可靠性,且成功获得 MCNP 输入文件并对新模型进行核分析,得到了部分物理结果,如包层核热沉积、第一壁中子负载分布和 TF 线圈核热

沉积。MCAM 强大的建模功能与可视化功能是工作得以顺利完成的基本保障,也为核分析后续工作搭建了更为可靠的平台。

**致谢** 本工作得到了日本 ITER Joint Work Site JAERI Naka 研究所的 Hiromasa Iida 博士的指导,以及德国 ITER IT Garching 研究所的 Filippo ELIO 博士的大力支持,还有 ITER 国际工作组其他工作人员如 Gianfranco Federici 博士的帮助,在此表示由衷的感谢。

### 参考文献:

- [1] 吴宜灿,李莹,卢磊等.核科学与工程,2006,26:(1).
- [2] Iida H. Re-assessment of Nuclear Heat in the TF Coils for Design Specification. Internal ITER Report, 16.01.2004.
- [3] Ruvutuso G, Iida H. Three-dimensional Nuclear Analysis of the First Wall of ITER-FEAT (MCNP 3D Model Vers. 1), Internal ITER Report, ITER Garching JWS, March 3, 2000.
- [4] Pashshenko A B. Completion of FENDL-1 and Start of FENDL-2. IAEA Report INDC(NDS)-352, 1996.
- [5] Briesmeister J F (Ed). MCNP4C General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Los Alamos National Laboratory, LA-13709-M, 2000.

## Application of Automatic Modeling Code for Monte Carlo Particle Transport for ITER Nuclear Analysis\*

ZENG Qin, LU Lei, LI Ying, DING Ai-ping, ZHENG Shan-liang, WU Yi-can  
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In order to conduct nuclear analyses on neutronics issues for ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), a standard three-dimensional model of the ITER reactor is being developed. The complex nuclear analyses are conducted by MCNP/4C in three dimensions. MCAM (MCNP Auto-Modeling system), as an implementation of the interface code between modern CAD system and MCNP, is a modeling and visualization tool which can convert a CAD model to neutronics model for MCNP and vice versa. This paper presents the application of MCAM to modify ITER 3-D neutronics model, which include blanket segmentation update, incorporation of fine structures of inboard blanket and the model extension from 20° to 40° in toroidal direction.

**Key words:** automatic modeling; MCAM; ITER; nuclear analysis

\* **Foundation item:** Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences; ITER Contract (ITA T3-03-CN)