

文章编号: 1007-4627(2006)02-0130-04

粒子输运计算模型 MCNP 模型的可视化实现*

丁爱平, 李莹, 卢磊, 曾勤, 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: MCAM (MCNP Automatic Modeling system) 是 MCNP 自动建模与可视化软件, 重点介绍 MCAM 中 MCNP 中子学模型可视化的原理、技术及实现。通过分析 MCNP 中子学模型文本描述和构造立体几何表示法的关系, 指出从构造立体几何表示法到 CAD 模型的转换是 MCNP 中子学模型可视化的关键所在。

关键词: MCNP; MCAM; 可视化; 模型

中图分类号: TP31 **文献标识码:** A

1 引言

MCNP 是由美国 Los Alamos 国家实验室研制的大型蒙特卡罗中子、光子和电子输运仿真程序输运计算的软件, 应用广泛。MCNP 模型的输入文件结构复杂, 几何模型的描述工作又极为抽象、不直观、容易出错, 这样使得描述工作费时、繁杂、效率低^[1]。且 MCNP 的绘图功能仅仅局限在二维剖面图, 常会遇到截面不适应的情况, 特别是复杂几何的描述极易出错, 这给用户在调试几何模型输入文件时带来不便。

科学可视化是 20 世纪 80 年代后期提出并发展起来的一个新的研究领域, 90 年代已从研究领域发展到应用阶段。科学可视化的基本思想是从准备数据、实施计算到表达结果都用图形或图像来完成或表现, 最后结果用具有真实感的动态图形模拟来描述。可视化作为一种工具, 将符号信息(数据)转换为视觉信息(图像), 将“不可见”变为“可见”^[2]。科学可视化涉及到计算机图形学、图形技术、计算机视觉、信号处理、用户界面研究、CAD 等。

中子学模型(MCNP 模型)的可视化是将中子学模型的文本符号信息所描述的模型以图像方式表现出来, 变“不可见”为“可见”, 便于更有效地观察和理解模型, 提高描述 MCNP 模型及检查其正确性的

效率。目前国际上 MCNP 模型相关的可视化工具主要包括 Visual Editor^[3], Sabrina^[3], Moritz^[3], 及中国科学院等离子体物理研究所 FDS 团队自主开发的自动建模可视化软件系统 MCAM^[4]。

Visual Editor 与 Sabrina 使用 MCNP 粒子跟踪程序的源码来生成 MCNP 模型的二维、三维图像, 应用的是光线跟踪技术。Moritz 是 MCNP 的几何编辑和可视化的工具, 可以生成二维剖面图和三维几何图形显示, 其三维显示是基于 OpenGL (Open Graphics Lib) 图形库。

MCAM 是中国科学院等离子体物理研究所 FDS 团队自主开发的大型 MCNP 自动建模与可视化软件。以 Spatial 公司的三维几何造型引擎 ACIS^[5] 为几何平台, 使用 Visual C++ 进行开发。主要功能包括: 预处理、几何建模、CAD 模型到 MCNP 模型的正向转换、MCNP 模型到 CAD 模型的反向转换即 MCNP 模型的可视化、MCNP 模型分析功能。关于 MCAM 这一软件系统的总体情况见文献[4]。

以上软件实现了 MCNP 模型的可视化, 但相对于 Visual Editor, Sabrina, Moritz 的光线跟踪法生成的模型图像, MCAM 生成的三维 CAD 模型更直观, 更容易地发现模型错误, 生成的 CAD 模型可继续在 MCAM 或其他 CAD 软件, 如 CATIA, UG 和 AutoCAD 等中对其进行编辑修改, 生成新的 CAD

收稿日期: 2005-11-20; 修改日期: 2006-01-12

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目; 中国科学院百人计划资助项目; 国家“973”计划资助项目; 中国和 ITER 国际合作组织签署的中子学合作协议(ITA 73-08-CN)

作者简介: 丁爱平(1979-), 男(汉族), 山东寿光人, 硕士研究生, 从事中子学模型可视化的研究; E-mail: dap@ipp.ac.cn

模型, 利用 MCAM 的自动转换功能将其转换为新的 MCNP 模型, 过程如图 1。

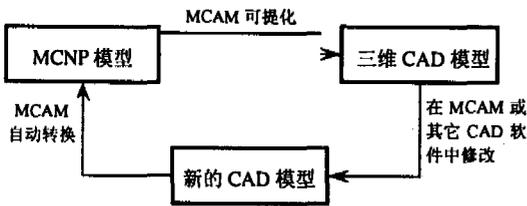


图 1 MCNP 模型在 MCAM 中修改过程

2 可视化的原理及实现^[4]

MCAM 的可视化模块实现的是中子学模型 MCNP 模块, 文本描述到三维 CAD 模型的转换。MCNP 计算模块对于几何实体的描述是建立在半空间表示的基础上。半空间表示法是一种特殊的构造立体几何 (CSG) 表示法。因此本质上, MCAM 可视化模型实现的是从 CSG 到 BRep (Boundary Representation) 的转换。

下面介绍 MCNP 模块中几何模型描述与 CSG 表示法的关系以及实现技术。

2.1 几何模型描述与 CSG 表示法的关系

在三维空间中, 任何空间曲面 (平面被看成曲面的特殊情况) 都可用方程 $f(x, y, z) = 0$ 表示, 且将整个空间分为如下两个部分: 曲面的“正半空间”和“负半空间”^[6]。正半空间是满足下列条件的点集: $H^+(f) = \{P(x, y, z) | f(x, y, z) > 0\}$; 负半空间是满足下列条件的点集: $H^-(f) = \{P(x, y, z) | f(x, y, z) < 0\}$; $P(x, y, z)$ 为三维空间中任意一点坐标。MCNP 几何模型采用的是半空间表示法, MCNP 计算输入文件中的“曲面卡”和“栅元卡”描述了 MCNP 模型三维几何空间。“栅元卡”中的每个栅元都是一个单独的实体, 有一定的形状、体积、材料等信息, MCNP 是通过一个或多个曲面的正半空间或负半空间的布尔运算 (交、并、减) 来描述一个几何栅元, 如: $(-2 \ 3): (4 \ -6)$ 的意义是: $(H^-(f_1) \cap H^+(f_2)) \cup (H^+(f_3) \cap H^-(f_4))$ 。“曲面卡”则记录了描述栅元的曲面信息, 每个曲面都有唯一的 ID 号。

“曲面卡”和“栅元卡”的格式比较有特色, 通过分析可知, MCNP 本质上采用的是 CSG 这种实体

描述方法。

CSG 表示法是使用表示集合操作的逻辑表达式表示实体的, 逻辑表达式由一组基本图元和几个运算符构成。不同系统预定义的图元会有所不同, 但通常都包括长方体、球、圆柱、圆锥等基本图形。CSG 表示法对物体几何形状的描述精确严格, 建立在这种表示法上的算法也比较稳定, 在科研领域广泛采用。

MCNP 输入文件的“曲面卡”中描述一组曲面, 从正 (负) 半空间的定义可以知道, 它们都是具有一定形状的空间实体, 因此和基本图元有着相同的功效——都表示一定的点集, 所以通过定义一组曲面的正半空间或 (和) 负半空间就能够构成一组预定义的基本图元。因此 MCNP 输入文件本质上是采用 CSG 方法来描述几何模型的。

2.2 MCNP 模型可视化的实现过程及显示

如何根据 MCNP 模型的几何描述正确显示出每个栅元和整个模型是 MCNP 模型可视化的关键。

Visual Editor 和 Sabrina 使用 MCNP 粒子跟踪的代码来生成 MCNP 模型的三维图像, 应用的是光线跟踪技术。光线跟踪是利用几何光学原理生成三维图像的方法, 简单地模仿光和物体的作用, 其渲染时间比较长, 特别是生成复杂模型的剖面图时需要耗费大量的时间, 交互性差。

Moritz 是 MCNP 的几何编辑和可视化的工具, 可生成二维剖面图和三维几何图形显示, 其三维显示是基于 OPENGL 图形库。Moritz 仅部分支持 MCNP 的几何模型, 并不能完全支持所有的 MCNP 模型几何描述。

MCAM 采用 ACIS 作为几何造型引擎, 实现了从 CSG 表示法到三维 CAD 模型的转换。ACIS 是美国 STI 公司 (Spatial Technology Inc.) 推出的具有开放式软件体系结构的实体造型软件开发平台, 采用面向对象的软件技术, 支持线框、曲面、实体 3 种模型, 并允许它们同时共存。ACIS 采用边界表示 (B-rep) 的几何建模器, 相比较其他 Opensource 的三维几何造型引擎, ACIS 是一个相对成熟的造型平台, 提供了更多的交互式接口, 在布尔运算能力上也优于其他造型引擎。

MCAM 采用 CAD 内核作为模型三维显示的优点是成熟、稳定、高性能, 且可以在 MCAM 和其他

CAD 软件中对生成的 CAD 模型做进一步的修改或再设计。

MCAM 的可视化过程:

(1) 输入文件自动读取及几何信息解析

MCAM 读取 MCNP 模型的输入文件,按 MCNP 输入文件书写格式自动解析出面卡、栅元卡、转换卡等信息,为构造栅元实体提供相关信息。

(2) 生成单个栅元实体及整个几何模型

根据栅元卡对每个栅元的描述,先构造出单个曲面,按照栅元描述中列出的界定该栅元所有曲面的逻辑关系,进行布尔运算生成单个栅元实体,最终由所有栅元实体生成 MCNP 模型的整体三维模型。

目前,MCAM 全面支持 MCNP 中的各种形式的面卡描述,如:平面、圆柱面、圆锥面、圆环面、椭圆环面、轴不平行于 $x, y,$ 或 z 的柱、锥。除支持普通的面卡、栅元卡之外,MCAM 还完全支持 MCNP 模型中的“重复结构”表达方式。例如, U 卡、Fill 卡、TRCL 卡、LIKE_BUT 卡和 LAT 卡等,具备处理“重复结构”的能力。以 6 号栅元为例来演示构造过程,栅元描述如下: 6 1 8.80670 × 10⁻² (460:466#463) (-255 256), 6 为栅元号,1 为栅元材料号,8.80670 × 10⁻² 为材料密度,(460:466#463) (-255 256) 为栅元中面的逻辑表达式,其中“:”、“ ”(空格)、“#”分别表示布尔并、交、差运算,运算过程见图 2。

MCNP 模型是由栅元卡描述中的所有单个栅元组成的,通过构造单个栅元来生成总模型。

(3) 模型显示及属性编辑

MCAM 反向转换生成的实体模型可在 MCAM 中以多种方式显示,如线框图、多面体图、多面体

消隐图等,支持三维模型在多种方向下的投影视图:前视图、后视图、顶视图、底视图、左视图、右视图和等轴视图。用户可对三维模型进行平移、缩放和旋转操作,支持截面显示。从多个方向对模型做切面, x, y, z 或任意方向,以便更深入地观察模型的内部结构。可选择显示内容,对单个实体或整个组的实体进行隐藏和取消隐藏。对三维实体的显示属性进行修改,修改单个实体或整个组的实体的色彩和透明度,以便更直观地展示模型信息,观察特定栅元。

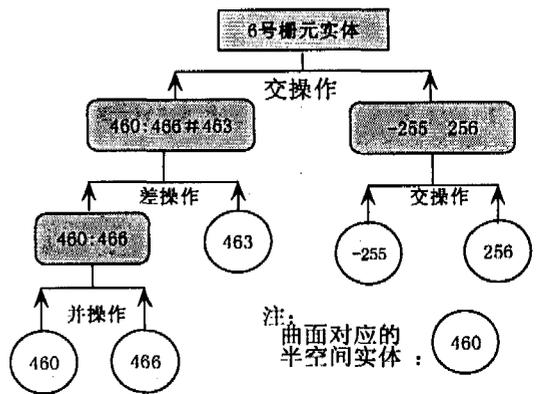


图 2 “栅元”对应的逻辑表达式的构造过程

MCAM 同时具备解析 MCNP 属性功能,从 MCNP 模型中识别栅元的材料信息、重要性信息和注解信息等,加入到生成的 CAD 模型中,并以图形的方式直观显示。

3 MCAM 测试示例

为了综合测试 MCAM 的功能特性及程序正确性,以 ITER Brand Model MCNP 模型为测试示例。

ITER(International Thermonuclear Experimen-

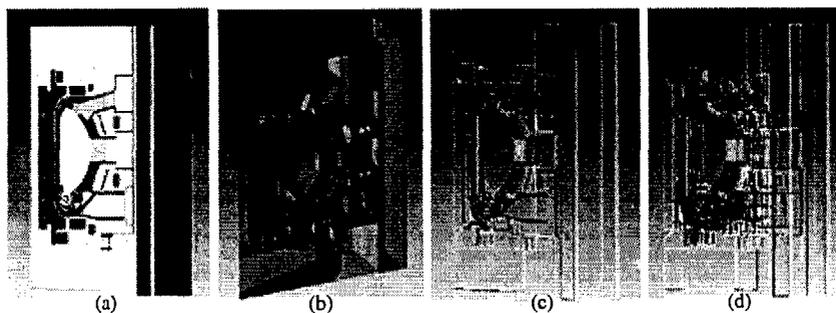


图 3 (a) 阴影视图显示, (b) 部分实体透明图, (c) 消隐线框图, (d) 三维线框图

tal Reactor) Brand Model 的 MCNP 输入文件是目前 ITER 核分析的基准文件, 由 ITER 工作组人员花费十几年来时间手工描述而成, 其几何结构十分复杂, 共有大约 2 900 个栅元和 2 500 个面。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、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。以其为示例可综合全面地测试 MCAM 的各项功能特性。

MCAM 将 ITER Brand MCNP 模型成功转换为 CAD 三维模型, 国际工作组人员第一次如此直观地看到 Brand MCNP 模型的真实三维模型, 第一次了解到 Brand 模型的整体几何描述。转换后的模型显示见图 3。

4 总结

MCAM 作为一 MCNP 辅助建模可视化工具, 不

仅有 CAD 模型到 MCNP 模型的正向转换, 也可进行 MCNP 模型到 CAD 模型的反向转换和可视化, 并可以直接对中子学模型进行编辑、修改和属性分析^[4]。这些功能相辅相成, 大大提高了中子学分析人员的工作效率。对比 Visual Editor, Sabrina, Moritz 的光线跟踪法生成的模型图像, MCAM 生成的三维 CAD 模型更直观、更容易发现模型的错误, 且可在 MCAM 或其他的 CAD 软件中对其进行编辑修改, 生成新的 CAD 模型。MCAM 的自动转换功能将新的 CAD 模型生成新的 MCNP 模型。这可使建模人员充分利用已有的 MCNP 模型生成新的 MCNP 模型, 大大提高生成新模型描述文件的效率。ITER Brand 文件成功转换表明 MCAM 是一实用的 MCNP 辅助建模与可视化工具, 具有广泛应用前景, MCAM 更高版本正在发展中。

参考文献:

- [1] Briesmeister J F (Ed). MCNP4C General Monte Carlo N-particle Transport Code. Los Alamos National Laboratory, LA-13709-M, 2000, 1—10.
- [2] 蔡青, 高光焘. CAD/CAM 系统的可视化集成化智能化网络化. 西安: 西北工业大学出版社, 1996, 34—40.
- [3] Schwarz R A, Carter L L. Current State of Monte Carlo Visualization Tools, Advanced Monte Carlo for Radiation Physics. Lisbon Portugal; Particle Transport Simulation & Applications, 2000, 815—819.
- [4] 吴宜灿, 李莹, 卢磊等. 核科学与工程, 2006, 26(1).
- [5] 3D ACIS Modeler, <http://www.spatial.com/components/acis/>.
- [6] 罗月童, 刘晓平, 黄群英. 系统仿真学报, 2002, 14(4): 470.

Visualizing Input Files of Neutronics Model for MCNP Calculation*

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

Abstract: MCAM is a software used for MCNP automatic modeling and visualization. This article presents the principle, approach and the implementation of MCNP neutronics model visualization. Analysis on the relationship between the text description of MCNP neutronics model and the CSG shows that the conversion from CSG to CAD model is the key issue of the visualization.

Key words: MCNP; MCAM; visualization; Model

* **Foundation item:** Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences; One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences; National "973" Program of China; ITER Contract (ITA 73-08-CN)