

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0239-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.S2.0239

# 基于 JMCT 的大亚湾核电站反应堆 精细建模与计算

付元光<sup>1,2</sup>, 马彦<sup>2</sup>, 上官丹骅<sup>2</sup>, 李刚<sup>2</sup>,  
李树<sup>2</sup>, 张宝印<sup>2</sup>, 邓力<sup>2</sup>

1. 中国工程物理研究院高性能数值模拟软件中心, 北京, 100088; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京, 100094

**摘要:** 基于通用型蒙特卡罗中子-光子耦合输运程序 JMCT 搭建了大亚湾核电站反应堆精细模型, 计算了有效增值因子 ( $k_{\text{eff}}$ ) 和部分局部计数量, 并和蒙特卡罗粒子输运程序 MCNP 的结果比对。结果显示, 计算量相对误差均小于  $10^{-3}$  量级, 吻合度较高, 验证了 JMCT 大规模精细几何建模和几何处理的能力。

**关键词:** JMCT 几何表示; GDML; JLAMT; 精细建模

**中图分类号:** TL48 **文献标志码:** A

## Sophisticated Modeling and Calculation of Daya Bay Nuclear Power Station Reactor Based on JMCT

Fu Yuanguang<sup>1,2</sup>, Ma Yan<sup>2</sup>, Shanguan Danhua<sup>2</sup>, Li Gang<sup>2</sup>, Li Shu<sup>2</sup>, Zhang Baoyin<sup>2</sup>, Deng Li<sup>2</sup>

1. CAEP Software Center for High Performance Numerical Simulation, Beijing, 100088, China;

2. Institute of Applied Physics and Computed Mathematics, Beijing, 100094, China

**Abstract:** Based on the general Monte Carlo neutron photon coupled transport code JMCT, the sophisticated model of Daya Bay Nuclear Power Station reactor was built. Meanwhile, the  $k_{\text{eff}}$  and some local tallies were calculated. The results were compared with the same models calculated by the Monte Carlo particle transport code MCNP, and it showed that relative errors were less than  $10^{-3}$ , which verifies the capability of JMCT in dealing with the large-scale complex geometry models.

**Key words:** Geometry description of JMCT, GDML, JLAMT, Sophisticated Modeling

### 0 引言

蒙特卡罗方法的计算规模和精度不断提高, 这对蒙特卡罗几何建模的精细度提出了更高的要求。北京应用物理与计算数学研究所开发的 JMCT<sup>[1]</sup> 是一款通用型蒙特卡罗中子-光子耦合输运软件, 具有强大的几何建模和处理能力。JMCT 采用构造实体几何表示法 (CSG), 组合几何以树形结构管理储存, 使其能够描述几何体形状任意、重复结构复杂、几何体数量庞大的模型。本工作使用 JMCT 搭建了大亚湾核电站反应堆精细模型, 该模型重复结构多, 几何体形状复杂, 几何体数量较大; 在蒙特卡罗粒子输运程序 MCNP 上建立了相同模型, 并同 JMCT 在建模操作、计算结果等方面进行比对, 以验证 JMCT 大规模精

细几何建模和几何处理的能力。

### 1 JMCT 几何描述方法

#### 1.1 CSG 简介

JMCT 采用补充 CSG 表示几何实体, 其基本思想是: 通过使用一系列基本体素 (如球、立方体、圆柱、锥等), 将基本体素进行布尔运算 (交、并、差), 实现复杂形状几何实体的描述。

#### 1.2 JMCT 物理模型描述

为进行输运模拟, 不仅需要构造几何体形状, 还需要描述计算模型中几何体的位置以及材料。JMCT 使用三层数据结构实现物理模型的完备描述。第一层是“实体”层, 通过 CSG 构造实体的形状; 第二层是“逻辑体”层, 给“实体”层中

收稿日期: 2014-09-20; 修回日期: 2014-10-20

基金项目: 国防科工局核能开发项目(科工技[2012]1523); 科技部 863 专项(2012AA01A303)

作者简介: 付元光 (1989—), 男, 研究实习生, 现主要从事蒙特卡罗方法研究工作

的体附上材料形成“逻辑体”；第三层是“物理体”层，给“逻辑体”指定空间位置和取向形成“物理体”。基于这种数据结构的几何描述方式，实现了几何体的形状、材料等固有属性和空间位置的分离描述，三层数据结构间的引用、复用方便了重复结构的搭建。

### 1.3 层次化几何树

在某运输问题几何模型中，会不可避免出现几何体之间的包含关系，为消除包含几何体的几何重叠歧义，引入“父子关系”的概念：如果体 a 完全包含体 b，则必须设置 b 体为 a 体的子体。这种关系多级嵌套就形成层次化的几何树。

JMCT 采用几何树的方式管理几何体，特点包括：子体的空间位置总是在父体的相对坐标系下定义。这样的好处是在运输过程中，粒子的位置、飞行方向等矢量总是能通过一系列旋转矩阵变换到几何算法最简的准直坐标系，提高了几何计算效率；简化了外围空间的描述。对于几何边界复杂的实体，用类似 MCNP 半空间方法描述这些体的外部空间是非常困难的，基于几何树的做法是设置一个足够大的体罩住所有的体，并设置前者为后者父体，程序会自动判断认为属于父体但不属于子体的那部分空间是外围空间，相当于作了隐式的“差”布尔运算，这种方式简化了外围空间的描述；易于描述大规模重复结构。当简单重复某个几何树的根节点时，该节点内部的所有几何体（包括形状、材质）全部被隐式重复，几何树隐式重复的概念如图 1。

由此，在构建压水堆 pin-by-pin 计算模型时，对于材料、几何相同的一系列燃料组件，只需要对其中一个组件进行 pin-by-pin 精细建模，其余组件可由简单重复 pin-by-pin 组件的最外围几何体实现隐式的 pin-by-pin 建模。

### 1.4 GDML 和前处理工具 JLAMT

JMCT 采用几何描述标记语言 GDML 格式作为几何输入文件，它是标准的 XML 格式文档，文档的各数据模块的设计完全基于 CSG、层次化几何树等思想，数据可被引用、复用，即使描述具有百万量级几何体的模型，只需数万行的语句。

由于 GDML 是文本文件，这就削弱了模型的显示度，增加了建模难度和出错率，为此研制 JMCT 前处理建模工具 JLAMT，负责三维可视化建模和转换生成 GDML 文件。JLAMT 基于商业

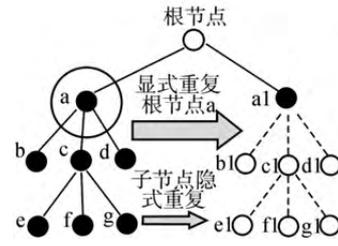


图 1 几何树隐式重复示意图

Fig. 1 Geometry Tree Repeating in Implicit Method

注：a、b、c、d、e、f、g 为左子树节点；a1、b1、c1、d1、e1、f1、g1 为右子树节点

CAD 软件 UG 二次开发，为用户提供了图形界面建模功能，用户能通过特定功能的按钮快速构造实体、设置材料，并可实时修改实体尺寸、位置。JLAMT 在转换时先获取 CAD 模型中的数据，再将其转换为 GDML 的数据结构，然后直接提供给 JMCT 进行运输计算。JMCT 能够检测 GDML 文件的正确性，任何线度大于  $10^{-9}$  mm 的几何交叠均视为几何错误。

## 2 大亚湾核电站反应堆精细建模与计算

大亚湾核电站反应堆精细模型的堆芯外围有大量不规则体，包括围板、径向反射层、辐照监督管等；在压力容器外有 30 个探测器，每个探测器的内部几何较复杂。使用前处理工具 JLAMT 建立模型。使用 MCNP 程序的半空间描述方式搭建了相同模型，同 JLAMT 建模细节的对比 JLAMT 列于表 1，初步证明了 JMCT 更高的建模效率。

为进一步验证 JMCT 的几何建模和几何处理能力，用 2 个模型进行了测试。

模型一是大亚湾核电站全堆 pin-by-pin 模型，堆芯的燃料组件具有 pin-by-pin 精细几何，每个组件有 289 个 pin，每个 pin 轴向分 16 层，该几何模型含有 2204180 个栅元。用 JMCT 和 MCNP 分别建模并对算了堆芯初始装料下的有效增值因子 ( $k_{\text{eff}}$ )，计算条件为每代统计 20000 个粒子，跳过 1000 代，共模拟 5000 代，计算结果见表 2，本工作没有对算 pin-by-pin 规模的计数，这是因为对于用重复结构描述的 MCNP 模型，在有限时间内无法给出 pin-by-pin 的计数结果<sup>[2]</sup>。计算结果显示， $k_{\text{eff}}$  的相对误差约为 0.03%。

模型二是大亚湾核电站燃料组件均匀化模型，该模型中组件作均匀化处理，每个组件轴向分 16 个结块，堆芯外围结构同模型一。计算问题

表1 建模细节对比  
Table 1 Comparison of Modeling Details

结构	JLAMT 建模	MCNP 建模
围板	建立十数个长方体，先并再求差，可得到围板几何	先解析给出 50 余个面的曲面参数，通过指定系列面的正反向圈出围板几何
径向反射层	建立圆柱体罩住堆芯内所有体，设置圆柱体为父体，圆柱体包围的堆芯外围空间即为径向反射层	解析给出 20 余个围板的边界面的曲面参数，连同外围的柱面圈出径向反射层
辐照监督管	建立广义圆柱体素，给出内外径、张角、高度，直接得到辐照监督管的几何片体	每个片体需要 6 个曲面圈出，即需给出 2 个柱面、4 个平面的曲面参数，参数计算耗时

表2  $k_{eff}$  计算结果  
Table 2 Calculation Result of  $k_{eff}$

参数	JMCT	MCNP
$k_{eff}$	1.18143	1.18104
标准差	0.00004	0.00006

为一个固定源问题，源位于G15内，是一个按 pin-by-pin功率分布重构出的空间分布的源，能量按裂变谱抽，方向按各向同性抽；统计量为图2标出的各栅元内快中子径迹长度计数；计算条件为统计 $1 \times 10^8$ 个粒子，截断0.1 MeV下的中子；所有参与计数的栅元的体积设为1。计算结果见表3。由表3可以看出，计数相对误差最大为0.114%。以上两个模型的对算结果说明，虽然采取了不同的几何描述方式，并不影响运输过程和计算结果，所有计算结果的相对偏差均在 $10^{-3}$ 量级。

表3 堆芯外围栅元径迹长度计数  
Table 3 Track Length Tally Result of Cells on Core Boundary

栅元	能量箱/MeV	MCNP		JMCT		计数相对误差/%
		计数值/ $10^{-1}$	相对误差/ $10^{-4}$	计数值/ $10^{-1}$	相对误差/ $10^{-4}$	
G1501	>0.1	6.26783	1	6.26611	2	0.027
	>1.0	5.53249	2	5.53053	2	0.035
G1502	>0.1	49.6974	0	0.496984	0	0.002
	>1.0	5.27515	0	5.27495	0	0.004
H1401	>0.1	0.575967	5	0.575654	6	0.054
	>1.0	0.532316	6	0.532228	7	0.017
围板	>0.1	1.57282	3	1.57441	4	0.101
	>1.0	1.38865	3	1.38794	4	0.051
水反射层	>0.1	8.43095	1	8.42424	1	0.080
	>1.0	7.16530	1	7.16028	2	0.070
吊篮	>0.1	3.47838	2	3.47571	3	0.077
	>1.0	2.10526	2	2.10446	3	0.038
隔热层	>0.1	2.42045	3	2.41812	4	0.096
	>1.0	0.993593	4	0.992898	5	0.070
下降区水 1	>0.1	0.546398	3	0.546051	4	0.064
	>1.0	0.273781	4	0.273489	5	0.107
下降区水 2	>0.1	0.611692	4	0.610992	4	0.114
	>1.0	0.276045	6	0.275982	8	0.023

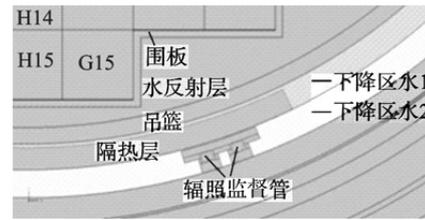


图2 计数栅元  
Fig. 2 Tally Cells

### 3 结束语

基于构造实体几何方法和层次化几何树管理的通用型蒙特卡罗程序JMCT，能够描述复杂几何体和大规模重复结构。JMCT前处理工具JLAMT提供的三维可视化的建模功能，使得几何建模效率和正确度较传统蒙特卡罗程序MCNP有一定提高。基于JMCT搭建了大亚湾核电站反应堆精细模型，采用2个测试算例和MCNP对算，系统量和局部体通量计数结果的相对偏差均在 $10^{-3}$ 量级，吻合度较高，验证了JMCT大规模精细几何建模和几何处理能力。

#### 参考文献：

- [1] 李刚, 张宝印, 邓力, 等. 蒙特卡罗粒子运输软件 JMCT 研制[J]. 强激光与粒子束. 2013, 25(1):158-162.
- [2] 上官丹骅, 李刚, 邓力, 等. 通用型 Monte Carlo 粒子运输模拟软件 JMCT 的计数功能设计[J]. 原子能科学技术. 2013, 47(S): 640-644.

(责任编辑：王中强)