

文章编号: 0258-0926(2015)02-0006-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.02.0006

板型元件组件少群参数计算程序 PICM 研究

尹 强, 王家翀, 芦 韡

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610041

摘要: 针对板型元件组件少群参数计算问题, 对组件几何模型建立、燃料板共振计算、板型元件组件中子输运计算以及整个计算流程进行研究, 并以此为基础编制板型元件组件计算程序 PICM。通过对国际原子能机构 (IAEA) 板型基准问题的计算来验证 PICM 程序的计算正确性, 结果表明 PICM 程序能够准确进行板型元件组件少群参数的计算。

关键词: 板型元件组件; 少群参数计算; PICM; 数值验证

中图分类号: TL11 文献标志码: A

Research on Calculation Code PICM for Plate-Type Fuel Assembly Few Group Parameter

Yin Qiang, Wang Jiachong, Lu Wei

Science and technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: In order to solve the calculation problems for the plate-type fuel assembly few group parameter, the establishment of geometry configuration, the calculation of resonance of the fuel plate and the neutron transportation, and the whole calculation process are studied, and the calculation code PICM for the plate-type fuel assembly is established. IAEA benchmark problems are adopted to verify the PICM. The results indicated that PICM can accurately calculate the few group parameter for the plate-type fuel assembly.

Key words: Plate-type fuel assembly, Few group parameter calculation, PICM, Benchmark problem

0 引言

目前国际上许多机构进行了深入的研究并开发了板型燃料元件少群参数计算程序, 并广泛用于研究堆的堆芯核设计, 典型的有美国的 EPRI-CELL 程序、HAMMER 程序, 英国的 WIMS 程序, 日本的 SRAC 程序等。这些程序的物理模型都是在单位燃料栅元几何上求解多群中子输运方程, 采用通常的通量体积加权得到栅元均匀化的少群参数。对于非燃料栅元只能近似地附加一个燃料区进行计算, 都只近似地考虑了栅元间的相互作用。对于由燃料板和吸收体组成的非均匀

性很强的组件来说, 用栅元计算模型是不恰当的, 要得到组件内各材料区的精确中子能谱, 必须在组件几何中求解中子输运方程, 合理处理栅元间的相互影响。

本文研究了板型元件组件少群参数计算模型, 并编制了板型元件组件计算程序 PICM。对程序进行了基准问题验证, 其结果表明 PICM 程序对于板型元件组件计算是准确的。

1 PICM 程序简介

PICM 程序计算板型燃料组件模型参数时,

收稿日期: 2014-04-21; 修回日期: 2015-03-06

作者简介: 尹强 (1981—), 男, 工程师。现从事核反应堆物理堆芯计算程序的开发工作

主要步骤如下：

(1) 用几何模型描述模块对整个组件进行精确建模。这个过程类似计算机辅助设计 (CAD) 制图, 然后将图形信息转化为 PICM 程序可以识别的数据信息, 这与以往组件几何通过栅元定位的建模过程截然不同。

(2) 各种栅元的共振自屏计算：在进行板型栅元的共振自屏计算时, 在空间中将板型栅元当作一维无限平板近似考虑, 同时将板型栅元芯块划分为若干层, 主要用于考虑共振能群区间中 ^{238}U 和 ^{240}Pu 的截面随径向空间的变化。然后建立与界面上角通量密度相关的宏观区。宏观区内用碰撞概率法求解输运问题；在宏观区的界面上将中子角通量密度用分离的空间和角度特征函数展开, 求解输运问题中的泄漏几率与穿透几率, 通过耦合最终得到通量密度、反照率和截面, 并在临界状态下搜索曲率以及计算泄漏因子。

(3) 建立与二维和三维非结构网格几何对应的等价几何以便均匀化计算。在等价几何的基础上利用输运等效方法计算得到 6 群截面和泄漏因子。

(4) 通过离散纵标法计算得到与非结构网格几何对应的均匀化几何下的 6 群通量密度、宏观截面库、返照率和临界曲率。

PICM 燃料组件程序计算流程见图 1。

1.1 板元件组件几何建模

板元件燃料组件程序描述几何模型采用简单几何体拼接的方式, 构造精确的组件模型用于计算。在建模过程中为了使程序能够计算板元件几何结构的二维组件, 首先通过点、线 (直线和圆或圆环) 来描述简单的“基本结构”, 同时对这些结构进行网格划分; 其次将这些简单基本结构进行拼接, 从而形成“子系统”, 这些子系统也可以互相拼接, 最终形成整个几何系统; 最后将边界条件添加到几何系统边界上, 同时将材料或者截面对应到相应的几何网格内。

这样描述几何有两个好处：首先可以通过简单的几何体拼出复杂的几何结构, 简化输入; 其次在注量计算时, 可以在基本结构内部使用碰撞概率法, 基本结构之间通过流进行耦合。这样可以节省计算时间; 如果直接描述整个几何体, 就必须在全区域使用碰撞概率法求解, 这样会大大增加计算时间。

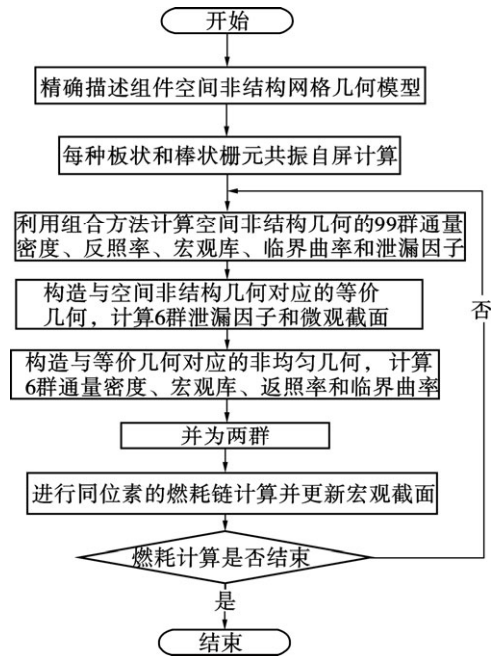


图1 PICM程序计算流程图

Fig. 1 Flow Chart for PICM Program Calculation

1.2 中子通量密度求解

对空间非结构网格几何输运问题采用积分输运方法中的碰撞概率与界面流组合的方法^[1]求解。界面流方法中每个子区界面流只和相邻子区互相耦合, 避免了碰撞概率方法中所有子区都互相耦合在一起的缺陷, 大大减少了计算时间与存储空间。但是, 在界面流方法中, 当子区分过大时, 必须对子区内的中子通量密度分布采用高阶及精细的考虑, 增加计算的复杂性。在子区内部输运求解采用碰撞概率法; 在子区的边界上分别定义出射和入射中子角通量密度, 并且将边界上的中子角通量密度用空间和角度的分离函数展开, 然后利用 Bickley-Naylor 函数库进行求解; 即中子流的连续性只与相邻的子区耦合, 在子区内可以求出该区内的精细通量密度。

2 计算结果验证

通过上述分析形成适合板型燃料组件参数的计算方法。为了验证方法的正确性, 本节通过国际原子能机构 (IAEA) 板型基准问题^[2]的计算, 验证 PICM 程序计算板型燃料组件的情况。

板型基准问题模型的芯体 U-Al 合金厚 0.051 cm, 包壳 Al 厚 0.038 cm, 板间水隙 0.223 cm, 边板 Al 厚 0.475 cm, 无效边 Al 厚 0.175 cm, 组

件外形尺寸 8.05 cm×7.60 cm。燃料富集度分别为 20%、45% 和 93%。Al 的密度 2.7 g/cm³。工况为：温度 20 ，压力 0.17 MPa。

标准燃料组件共 23 块燃料（图 2）。控制棒燃料组件与标准燃料组件基本相同，只是第 1、第 3、第 21 和第 23 块板是 Al 板，厚 0.127 cm，Al 板之间是水隙。

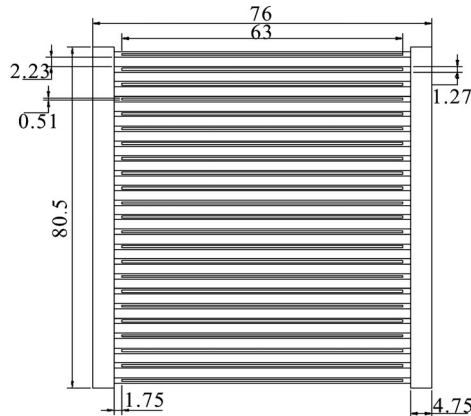


图2 标准燃料组件示意图（单位：mm）

Fig. 2 Schematic Diagram of Standard Fuel Assembly

用 PICM 程序进行富集度分别为 20%、45% 和 93% 标准燃料组件的燃耗计算，给出其无限增殖因子（ K_{inf} ）随燃耗的变化。表 1~表 3 给出了不同富集度组件的 K_{inf} 随燃耗的变化，其中能群 E_n 划分为 3 群： $E_n > 5.531$ keV； 0.625 eV $< E_n < 5.531$ keV； 0 eV $< E_n < 0.625$ keV。

表 1~表 3 中所列内容是 PICM 程序同美国、瑞士和阿根廷研究机构计算基准例题得到的不同富集度 K_{inf} 随燃耗变化数值结果。以美国阿贡国家实验室（ANL）计算 20% 富集度标准燃料组件 K_{inf} 结果为参考，PICM 程序与 ANL 计算结果在

表1 20%富集度 K_{inf} 随燃耗的变化

Table 1 Changes of K_{inf} with Burnup on 20% Enrichment

²³⁵ U 相对 燃耗/%	ANL	EIR	CNEA	PICM	PICM- ANL/%
0	1.65475	1.63565	1.65257	1.65551	0.046
5	1.56410	1.54505	1.56348	1.57579	0.747
10	1.54447	1.52553	1.54330	1.55572	0.728
15	1.52413	1.50518	1.52226	1.53461	0.688
20	1.50257	1.48411	1.50026	1.51239	0.654
25	1.47972	1.46322	1.47710	1.48894	0.623
30	1.45544	1.44027	1.45276	1.46416	0.599
35	1.42957	1.41806	1.42701	1.43787	0.581
40	1.40183	1.39245	1.39954	1.40969	0.561
45	1.37191	1.36581	1.37008	1.37960	0.561
50	1.33935	1.33859	1.33820	1.34704	0.574

表2 45%富集度 K_{inf} 随燃耗的变化

Table 2 Changes of K_{inf} with Burnup on 45% Enrichment

²³⁵ U 相对 燃耗/%	ANL	EIR	PICM	PICM- ANL/%
0	1.70442	1.70057	1.70631	0.111
5	1.60817	1.60706	1.62050	0.767
10	1.58845	1.58698	1.60039	0.752
15	1.56803	1.56640	1.57944	0.728
20	1.54633	1.54459	1.55734	0.712
25	1.52312	1.52286	1.53382	0.703
30	1.49812	1.49830	1.50845	0.690
35	1.47106	1.47370	1.48127	0.694
40	1.44153	1.44509	1.45175	0.709
45	1.40907	1.41523	1.41950	0.740
50	1.37305	1.38097	1.38392	0.792

表3 93%富集度 K_{inf} 随燃耗的变化

Table 3 Changes of K_{inf} with Burnup on 93% Enrichment

²³⁵ U 相对 燃耗/%	ANL	EIR	CNEA	PICM	PICM- EIR/%
0	1.73698	1.74966	1.74221	1.75707	0.424
5	1.63697	1.65295	1.64377	1.66585	0.780
10	1.61653	1.63160	1.62233	1.64477	0.807
15	1.59534	1.61012	1.60020	1.62293	0.796
20	1.57275	1.58678	1.57691	1.59988	0.826
25	1.54853	1.56347	1.55212	1.57507	0.742
30	1.52227	1.53674	1.52541	1.54845	0.762
35	1.49358	1.50935	1.49643	1.51947	0.670
40	1.46199	1.47767	1.46476	1.48764	0.675
45	1.42692	1.44457	1.42983	1.45239	0.541
50	1.38761	1.40562	1.39089	1.41299	0.524

整个燃耗内最大相对偏差为 0.747%，而瑞士联邦核反应堆研究所（EIR）与 ANL 计算结果的最大偏差为 -1.243%。同样，PICM 程序计算其他富集度的燃料组件计算结果与 ANL 的最大相对偏差也小于其他研究机构计算结果之间的最大相对偏差。

3 结论

本文介绍了 PICM 程序中主要模块的理论模型及计算流程，PICM 具有较为先进的组件几何建模、共振计算和中子输运计算模型。数值验证表明，PICM 程序各模块开发是正确的，对板元件组件的计算结果精度是可靠的。

参考文献：

- [1] 谢仲生. 反应堆物理分析[M]. 西安：西安交通大学出版社，2004.
- [2] Physics Section, IAEA. APPENDIX-F Benchmark Calculations[R]. IAEA-TECDOC-233,1980.

（责任编辑：刘胜吾）