

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.04.002

COSINE 软件包堆芯物理分析程序(cosCORE)的初步验证

苑旭东^{1,2}, 周剑东^{1,2}, 谢金森^{1,2*}, 陈珍平^{1,2}, 郭倩^{1,2}, 于涛^{1,2}

(1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学湖南省数字化反应堆工程技术研究中心, 湖南 衡阳 421001)

摘要: COSINE 软件包堆芯物理分析程序(cosCORE)是一款基于节块展开法的堆芯扩散程序。为了验证 cosCORE 对轻水堆模型的临界计算能力与组件功率计算能力, 对三维两群压水堆问题 IAEA_3D 基准题与 BSS-14 基准题进行测试验证, 并与基准值进行比对。结果显示, 对于 IAEA_3D 基准题, cosCORE 与基准值 k_{eff} 的相对误差为 0.669%, 组件相对功率误差均小于 2.178%; 对于 BSS-14 基准题, 计算值与基准值 k_{eff} 的相对误差为 0.677%, 组件相对功率最大误差为 1.733 1%。

关键词: COSINE 软件包; IAEA_3D 基准题; BSS-14 基准题; 测试验证

中图分类号: TL503.6 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-0062(2020)04-0007-06

Preliminary Verification of COSINE Software Package Core Physical Analysis Program (cosCORE)

YUAN Xudong^{1,2}, ZHOU Jiandong^{1,2}, XIE Jinsen^{1,2*},
CHEN Zhenping^{1,2}, GUO Qian^{1,2}, YU Tao^{1,2}

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hunan Engineering & Technology Research Center for Virtual Nuclear Reactor, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Core physical analysis program (cosCORE) of COSINE software package is a core diffusion code based on the nodal method. In order to verify the ability of critical calculation and assembly-wised power distribution calculation of cosCORE for the light water reactor model, the three-dimensional two-group pressurized water reactor problem IAEA_3D benchmark and BSS-14 benchmark were tested and verified, and compared with

收稿日期: 2020-01-14

基金项目: 大型先进压水堆核电站国家科技重大专项项目(2017ZX06002002)

作者简介: 苑旭东(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事反应堆物理方面的研究。* 通信作者: 谢金森(1985-), 男, 副教授, 主要从事反应堆物理方面的研究。E-mail: xiejinsen@139.com

the benchmark value. The result shows that for the IAEA_3D benchmark, the relative error of k_{eff} between cosCORE and the reference value is 0.669%, and the error of relative assembly-wised power distribution is less than 2.178%; For BSS-14 benchmark, the relative error of k_{eff} between the calculated value and the reference is 0.677%, and the maximum error of the relative power density of the components is 1.733 1%.

key words: COSINE software package; IAEA_3D benchmark; BSS-14 benchmark; test and verification

0 引言

COSINE 软件包 (core and system integrated engine for design and analysis, COSINE) 是由中国国家核电软件开发中心 (SNPSDC) 正在开发的一套集成的基于确定论的核工程代码包^[1], 是大型压水堆国家重大专项软件自主化课题中的一部分^[2-3]。COSINE 软件包包含反应堆物理程序、热工水力学程序、严重事故分析程序、概率安全分析程序等, 其中反应堆物理程序部分包括组件参数计算程序 (cosLATC)、堆芯物理分析程序 (cosCORE)、中子动力学程序 (cosKIND) 以及反应堆屏蔽设计程序 (cosSHIELD) 等^[4]。在反应堆核设计的“两步法”计算流程中, 第一步由组件参数计算程序 cosLATC 产生堆芯扩散计算所需要的组件均匀化少群常数; 第二步由堆芯物理分析程序 cosCORE 进行堆芯计算, 得到堆芯有效增殖系数 k_{eff} 和功率分布等参数。

cosCORE 的主要功能是采用节块展开法 (nodal expansion method, NEM) 求解少群中子扩散方程, 适用于一维、二维以及三维几何模型的计算^[5-6]。cosCORE 功率重构采用多项式展开加功率形状因子的方法重构。截面处理以基本硼降下的截面为基准对燃料的温度、硼浓度、慢化剂密度、可燃毒物等进行截面修正。

为验证 COSINE 软件包的堆芯物理分析程序 cosCORE 的准确性, 本文使用 IAEA_3D 基准题和 BSS-14 基准题, 通过 cosCORE 的计算结果与基准题给出的参考有效增殖因数和归一化组件功率分布进行比对分析, 验证 cosCORE 程序的功能和计算精度。

1 基准题介绍

1.1 IAEA_3D 基准题

IAEA_3D 基准题是由美国阿贡国家实验室

(Argonne National Laboratory, ANL) 发布的三维两群压水堆问题^[7-8], 目的是对粗网格方法和通量合成近似法 (使用预先计算好的形状函数, 进行线性组合逼近堆芯中子通量) 提供一个严格的测试。该基准题堆芯由 177 盒正方形组件组成, 组件中心距为 20 cm, 堆芯高度为 340 cm。IAEA_3D 基准题的 1/4 堆芯布置如图 1 所示, 组件少群均匀化截面见表 1。堆芯径向方向上采用内-外双区布置, 内区使用 2 型燃料组件, 外区使用 1 型燃料组件, 堆芯最外层使用一层厚度为 20 cm 的反射层组件包围。在 2 型燃料组件中还有 13 盒包含控制棒的组件, 选取全堆芯中心位置组件为原点, 位于 $(-4, -4)$ 、 $(0, -4)$ 、 $(4, -4)$ 、 $(-4, 0)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(4, 0)$ 、 $(-4, 4)$ 、 $(0, 4)$ 和 $(4, 4)$ 位置的组件, 控制棒全部下插; 位于 $(-2, -2)$ 、 $(2, -2)$ 、 $(-2, 2)$ 和 $(2, 2)$ 位置的组件, 控制棒仅下插 80 cm。轴向方向上, 堆芯上下均有 20 cm 反射层, 在布置有控制棒的组件中, 上部反射层中也要加入控制棒。整个模型在 x 和 y 方向上均为奇数盒组件, 即在 1/4 堆芯组件径向布置中 (图 1(a)), x 轴和 y 轴的组件为半盒组件。计算中反射层外边界为真空边界条件。

1.2 BSS-14 基准题

BSS-14 基准题^[7]是由美国阿贡国家实验室 (ANL) 发布的沸水堆 (boiled water reactor, BWR) 基准题, 目的是对二维、三维中子动力学求解方法, 特别是粗网格方法, 进行检验。该基准题堆芯布置如图 2 所示, 组件少群均匀化常数见表 2。该基准题 1/4 堆芯包含 78 盒燃料组件, 全堆芯共 312 盒燃料组件, 组件中心距 15 cm, 堆芯高度为 300 cm。在 x 方向和 y 方向均为偶数盒组件, 在径向堆芯布置图中 (图 2(a)), 位于 x 轴和 y 轴的组件为完整的单盒组件, 组件坐标见图 3; 堆芯上、下以及径向外围均有 30 cm 厚的反射层 (图 2(b)), 计算中反射层外边界为零通量边界条件。

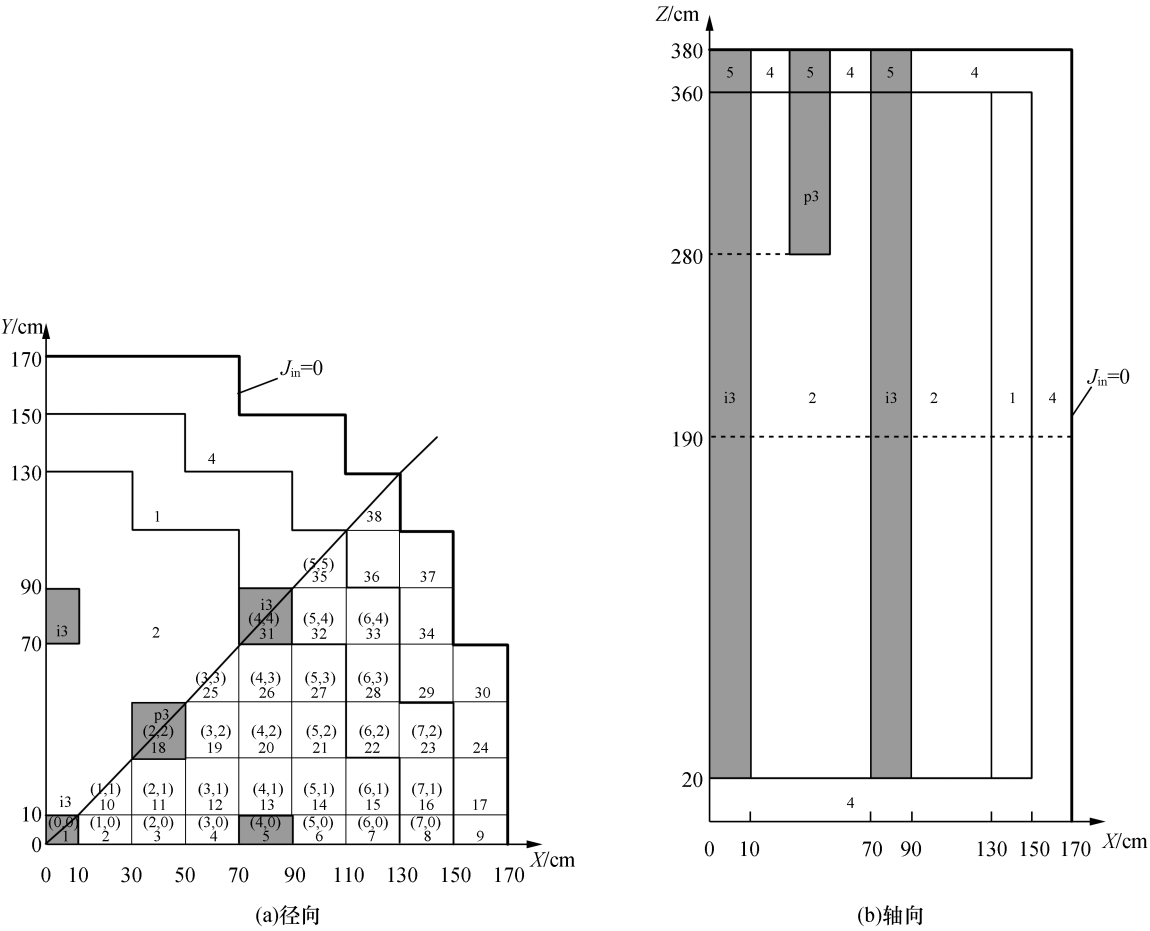


图 1 IAEA_3D 基准题 1/4 堆芯布置
Fig.1 Material map of IAEA_3D benchmark

表 1 IAEA_3D 基准题组件少群参数
Table 1 Few-group constants of IAEA_3D benchmark

材料	能群	D_g/cm	$\sum_{l,g}/\text{cm}^{-1}$	$\nu \sum_{l,g}/\text{cm}^{-1}$	χ	$\sum_{g,g'}/\text{cm}^{-1}$
1 (燃料 1)	1	1.50×10^0	$3.012\ 00 \times 10^{-2}$	0.00×10^0	1.00×10^0	0.20×10^{-1}
	2	4.00×10^{-1}	$8.003\ 20 \times 10^{-2}$	1.35×10^{-1}	0.00×10^0	
2 (燃料 2)	1	1.50×10^0	$3.012\ 00 \times 10^{-2}$	0.00×10^0	1.00×10^0	0.20×10^{-1}
	2	4.00×10^{-1}	$8.503\ 20 \times 10^{-2}$	1.35×10^{-1}	0.00×10^0	
3 (燃料 2+控制棒)	1	1.50×10^0	$3.012\ 00 \times 10^{-2}$	0.00×10^0	1.00×10^0	0.20×10^{-1}
	2	4.00×10^{-1}	$1.300\ 32 \times 10^{-1}$	1.35×10^{-1}	0.00×10^0	
4 (反射层)	1	2.00×10^0	$4.016\ 00 \times 10^{-2}$	0.00×10^0	1.00×10^0	0.40×10^{-1}
	2	3.00×10^{-1}	$1.002\ 40 \times 10^{-2}$	0.00×10^0	0.00×10^0	
5 (反射层+控制棒)	1	2.00×10^0	$4.016\ 00 \times 10^{-2}$	0.00×10^0	1.00×10^0	0.40×10^{-1}
	2	3.00×10^{-1}	$5.500\ 00 \times 10^{-2}$	0.00×10^0	0.00×10^0	

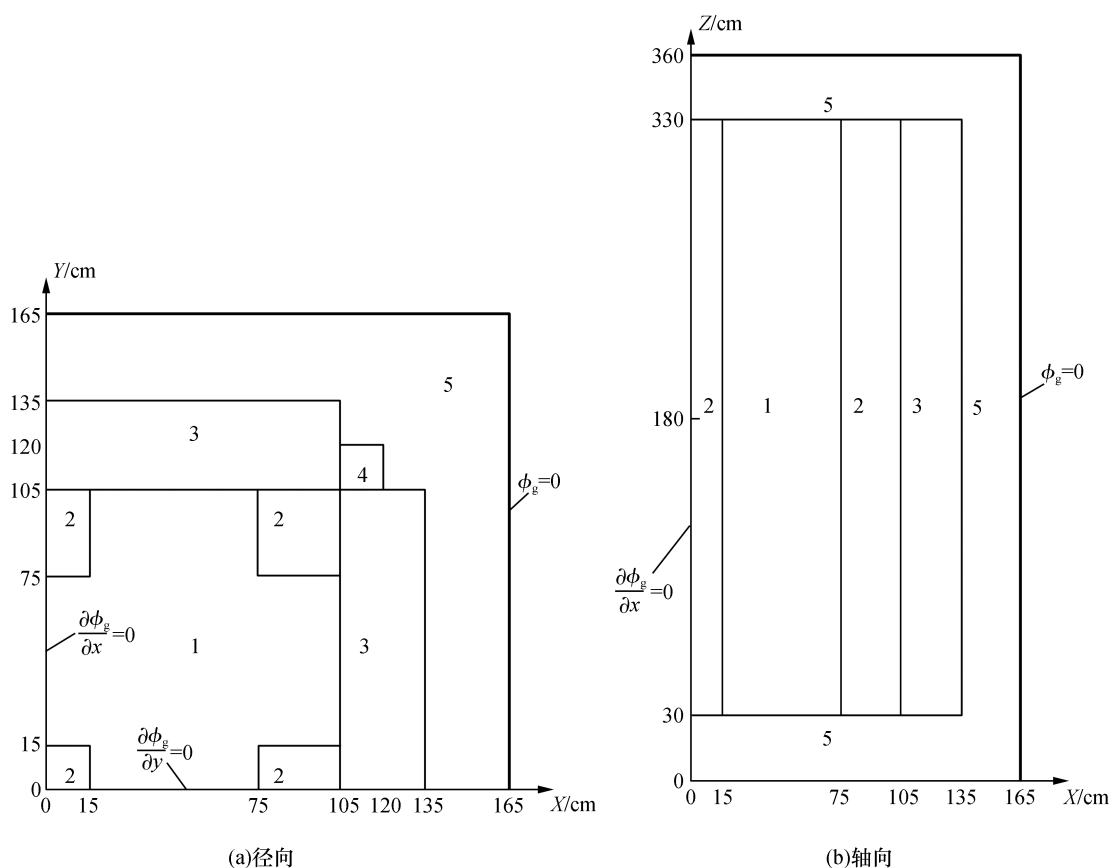


图 2 BSS-14 基准题 1/4 堆芯布置

Fig. 2 Material map of BSS-14 benchmark

表 2 BSS-14 基准题组件少群参数

Table 2 Few-group constants of BSS-14 benchmark

材料	能群	D_{g}/cm	$\sum_{a,g}/\text{cm}^{-1}$	$\nu \sum_{f,g}/\text{cm}^{-1}$	$\sum_{g,g'}/\text{cm}^{-1}$
1	1	1.255 0	0.008 252 0	0.004 602	0.025 33
	2	0.211 0	0.100 300 0	0.109 100	
2	1	1.268 0	0.007 181 0	0.004 609	0.027 67
	2	0.190 2	0.070 470 0	0.086 750	
3	1	1.259 0	0.008 002 0	0.004 663	0.026 17
	2	0.209 1	0.083 440 0	0.102 100	
4	1	1.259 0	0.008 002 0	0.004 663	0.026 17
	2	0.209 1	0.073 324 0	0.102 100	
5	1	1.257 0	0.000 603 4	0.000 000	0.047 54
	2	0.159 2	0.019 110 0	0.000 000	

$$\chi^1 = 1.0, \chi^2 = 0.0, \nu = 2.5$$

2 计算过程

2.1 IAEA_3D 基准题计算过程

堆芯物理计算程序 cosCORE 为 COSINE 软件包中的一部分,计算时使用文件输入模型参数,计算结果输出到指定文件中。其输入文件采用数据

块的形式分层输入。各个数据块彼此相互独立,不存在先后顺序,不存在相互的依赖。在每个数据块由不同的关键字和该关键字的数据组成。在对 IAEA_3D 基准题进行输运计算时,影响结果的主要是系统参数数据块、轴向高度数据块、堆芯布置数据块、组件定义数据块和材料类型数据块。

