

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0235-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.S2.0235

基于 BEAVRS 全堆基准题的 RMC 临界计算验证

唐 霄^{1,2}, 梁金刚¹, 王 侃¹, 葛攀和¹, 李万林¹

1. 清华大学工程物理系, 北京, 100084; 2. 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: BEAVRS 是基于 20 世纪 60 年代美国商用反应堆建立的基准题模型, 具有精细的堆芯配置参数和详细的运行测量数据, 是新型的反应堆分析工具验证基准题。本研究利用自主堆用蒙卡程序 (RMC) 对 BEAVRS 进行建模, 计算反应堆在不同硼浓度和控制棒步数条件下的临界有效增殖系数、控制棒价值、温度系数、仪表管里的 ²³⁵U 裂变率等一系列重要参数。结果与实测数据及同类软件结果在可接受范围, 验证了 RMC 进行反应堆临界分析的精确性和可靠性。

关键词: BEAVRS 基准题; 全堆临界计算; RMC

中图分类号: TL32 **文献标志码:** A

Verification on Criticality Calculation of RMC with BEAVRS Full-Core Benchmark

Tang Xiao^{1,2}, Liang Jinggang¹, Wang Kan¹, Ge Panhe¹, Li Wanlin¹

1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute China, Chengdu, 610041, China

Abstract: BEAVRS is a new benchmark based on 1960's the United States commercial reactor with detailed core construction parameters and operating measurement data for the verification of reactor analysis tool. In this paper, RMC, developed by the Department of Engineering Physics of Tsinghua University for reactor physics analysis, is adopted in the modeling of BEAVRS benchmark, to calculate a series important parameters such as the critical effective multiplication factor under different boron concentration and control rod step number, the control rod worth, the temperature coefficient and U235 fission rate in the instrument tube. The result goes on well with the measured data and the results from similar software, which verified the accuracy and reliability of RMC in the reactor criticality analysis.

Key words: BEAVRS benchmark, Full-core criticality calculation, RMC

0 前 言

以商用反应堆为基础的全堆基准题 BEAVRS, 主要用于对各项反应堆物理参数的验证, 涵盖临界有效增殖系数、控制棒价值、温度系数、²³⁵U 裂变率等一系列参数, 并且有实验数据和软件计算数据支持, 可以较好地验证自主堆用蒙卡程序 (RMC) 计算的精确性和可靠性^[1-2]。

1 BEAVRS 基准题

1.1 BEAVRS 模型简介

BEAVRS 压水堆模型的几何结构径向包括堆芯网格组件、堆芯围板、堆芯桶状隔板、中子屏蔽板和反应堆压力容器, 轴向包括支撑板、插孔板、铬镍合金隔板和锆合金隔板等。

堆芯网格组件由 193 个 17×17 的组件构成,

燃料棒中 ^{235}U 的富集度分为 3.1%、2.4% 和 1.6%，高富集度燃料排在边缘，中低富集度燃料呈棋盘状分布在中间。燃料棒模型径向有 2 种截面，轴向分为 25 层；导向管径向有 2 种截面，轴向分为 20 层，中心对称分布于组件；仪表管几何上与导向管近似，位于组件中心，含仪表管的组件分散摆放；可燃毒物棒径向分为 8 层，轴向分为 23 层，中心对称分布于组件和堆芯中。1 个组件中可燃毒物棒的数量为 6、12、15、16 或者 20 个。控制棒分为停堆用和调节用，径向分为 8 层，轴向分为 20 层，中心对称分布于组件，含控制棒组件在堆芯中心对称分布。

1.2 BEAVERS 临界数据简介

BEAVERS 的临界数据为反应堆热态零功率实验实测值，主要数据为有效增殖系数、控制棒价值、温度系数、 ^{235}U 裂变率等。

堆芯横截面简图如图 1 所示。在热态零功率实验的初始时刻所有控制棒处于提出状态，位于第 0 步，然后按照 D、C、B、A、 S_E 、 S_D 、 S_C 的顺序插入(SA 和 SB 仍保持提出状态)直到第 228 步。在 D、C、A、 S_C 插入时硼浓度发生变化。

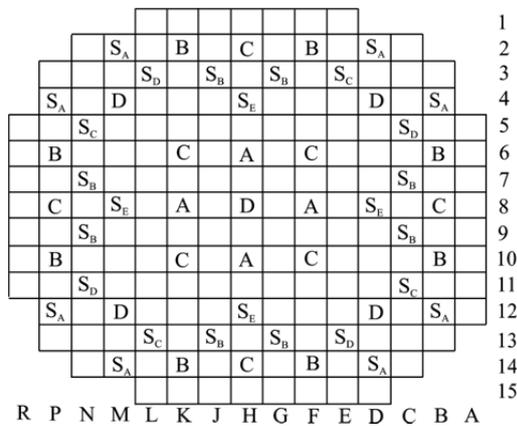


图 1 堆芯横截面简图

Fig. 1 Core Cross Section

注：A、B、C、D 表示不同位置上用于调节反应性的控制棒； S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 、 S_E 表示不同位置上用于安全停堆的控制棒

裂变率的获取是在 58 个仪表管中，通过探测器从燃料活性区的底部等速向上移动，直至燃料活性区的顶部进行测量得到的。而反应堆是中心对称的，根据对称性还可以得到 1/4 堆芯的径向裂变率分布。

2 RMC 计算结果

2.1 计算模型的建立

BEAVERS 组件中含有多种棒束，由于棒束的数量、摆放不同，形成了 30 多种组件，利用自主堆用蒙特卡罗程序 (RMC) 的重复几何结构和几何变换功能，用约 1500 行的描述完成模型的建立。

RMC 主要在清华大学工程物理系核能所的服务器上以并行计算的方式运行；使用的版本为 RMC2.0。

2.2 RMC 临界计算结果

RMC 临界计算结果主要通过修改输入文本中不同位置控制棒的步长和硼浓度得到。其中针对温度变化使用 300、560、570 K 的温度库。最终结果将与同类软件 OpenMC^[3] 的结果和反应堆实测结果对比。

2.2.1 临界有效增殖系数、控制棒价值和温度系数计算结果 共计算了 400 代，每代 200000 个粒子，跳过 200 代，每次计算时长约为 29 CPU 小时；临界有效增殖系数计算结果如表 1 所示。

控制棒价值根据前一步有效增殖系数的计算结果求得。在仅使用了 300 K 的温度库时，临界有效增殖系数的结果与 OpenMC 计算结果相当；使用相匹配的多温度点的温度库后，临界有效增殖系数减小，但控制棒价值计算结果更加接近于真实反应堆的实测值 (表 2)。

基准题中探测器是单温度点附近的温度系数，而 RMC 的温度系数计算是近似计算 560 K 到 570 K 的平均温度系数。功能更加完善后会用微扰进行计算 (表 3)。

2.2.2 ^{235}U 裂变率计算结果 为方便测量，在仪表管内镀了一层 $1\ \mu\text{m}$ 的 ^{235}U ，并使用 RMC 自带探测模块在 58 个仪表管内进行了相应燃料活性区间长度的 ^{235}U 裂变率测量，统计结果见表 4。

RMC 的裂变率测量值是仪表管中长度对应燃料活性区间的裂变率总和。然后按照文献中探测器的实测值进行归一化后得到，相对误差约为 4%。

临界计算总共进行了 600 代，每代 1000000 个粒子，跳过 300 代，时长约为 230 CPU 小时。

3 结束语

全堆芯压水堆基准题 BEAVERS 具有精细结

表1 临界有效增殖系数计算结果

Table 1 Calculation Results of Critical Effective Multiplication Factor

反应堆临界状态	有效增殖系数	
	RMC	OpenMC
控制棒均不插入, 硼浓度 975×10^{-6}	0.998207±0.000103	0.99920±0.00004
控制棒 D 插入, 硼浓度 902×10^{-6}	1.007292±0.000105	1.00080±0.00004
控制棒 C 和 D 插入, 硼浓度 810×10^{-6}	0.998560±0.000101	1.00023±0.00005
控制棒 B、C 和 D 插入, 硼浓度 810×10^{-6}	0.996633±0.000104	—
控制棒 A、B、C 和 D 插入, 硼浓度 686×10^{-6}	0.996633±0.000104	0.99884 ±0.00004
控制棒 A、B、C、D 和 S _E 插入, 硼浓度 686×10^{-6}	0.992346±0.000104	—
控制棒 A、B、C、D、S _D 和 S _E 插入, 硼浓度 686×10^{-6}	0.984497±0.000106	—
控制棒 A、B、C、D、S _C 、S _D 和 S _E 插入, 硼浓度 508×10^{-6}	0.994660±0.000107	0.99725±0.00004

表2 控制棒价值计算结果

Table 2 Calculation Results of Control Rod Worth

反应堆临界状态	RMC 计算的 控制棒价值	OpenMC 计算的 控制棒价值	探测器实测的 控制棒价值
控制棒 D 插入, 硼浓度 902×10^{-6}	$(794.1 \pm 20) \times 10^{-5}$	$(771 \pm 6) \times 10^{-5}$	788×10^{-5}
控制棒 C 和 D 插入, 硼浓度 810×10^{-6}	$(1228.9 \pm 20) \times 10^{-5}$	$(1234 \pm 7) \times 10^{-5}$	1203×10^{-5}
控制棒 B、C 和 D 插入, 硼浓度 810×10^{-6}	$(1280.4 \pm 20) \times 10^{-5}$	$(1197 \pm 7) \times 10^{-5}$	1171×10^{-5}
控制棒 A、B、C 和 D 插入, 硼浓度 686×10^{-6}	$(539.4 \pm 20) \times 10^{-5}$	$(556 \pm 6) \times 10^{-5}$	548×10^{-5}
控制棒 A、B、C、D 和 S _E 插入, 硼浓度 686×10^{-6}	$(433.5 \pm 21) \times 10^{-5}$	$(501 \pm 6) \times 10^{-5}$	471×10^{-5}
控制棒 A、B、C、D、S _D 和 S _E 插入, 硼浓度 686×10^{-6}	$(803.4 \pm 22) \times 10^{-5}$	$(844 \pm 6) \times 10^{-5}$	772×10^{-5}
控制棒 A、B、C、D、S _C 、S _D 和 S _E 插入, 硼浓度 508×10^{-6}	$(1118.3 \pm 21) \times 10^{-5}$	$(1049 \pm 6) \times 10^{-5}$	1099×10^{-5}

表3 温度系数计算结果

Table 3 Calculation Results of Temperature Coefficient

反应堆临界状态	RMC 计算的温度系数/ $10^{-5} \text{ } ^{-1}$	探测器实测的温度系数/ $10^{-5} \text{ } ^{-1}$
控制棒 D 插入, 硼浓度 902×10^{-6}	-2.75	-2.77

注： $T = 1.8 t + 32$ (t 为摄氏温度数, T 为华氏温度数)

表4 ^{235}U 裂变率计算结果Table 4 Calculation Results of ^{235}U Fission Rates

组件 位置	裂变率		相对 偏差	组件 位置	裂变率		相对 偏差	组件 位置	裂变率		相对 偏差
	RMC	实测值			RMC	实测值			RMC	实测值	
J1	0.809	0.777	0.0412	B6	1.31	1.239	0.0573	R11	0.583	0.5756	0.0129
F1	0.733	0.6993	0.0482	M7	0.887	0.9235	0.0395	L11	1.25	1.263	0.0103
N2	0.701	0.6447	0.0873	J7	0.945	1.008	0.0625	H11	0.906	0.9685	0.0645
K2	1.26	1.171	0.0760	F7	0.871	0.8919	0.0234	E11	1.27	1.33	0.0451
H2	1.26	1.223	0.0303	C7	1.24	1.204	0.0299	A11	0.607	0.6307	0.0376
H3	0.945	0.8978	0.0526	R8	0.735	0.7301	0.0067	K12	1.22	1.223	0.0025
F3	1.01	0.9653	0.0463	N8	0.919	0.8988	0.0225	G12	0.929	1.034	0.1015
D3	1.25	1.171	0.0675	L8	0.864	0.9176	0.0584	D12	1.38	1.438	0.0403
B3	0.725	0.6888	0.0526	J8	0.742	0.774	0.0413	N13	0.859	0.8574	0.0019
P4	0.973	0.875	0.1120	F8	1.05	1.088	0.0349	L13	1.38	1.339	0.0306
N4	1.21	1.115	0.0852	D8	1.14	1.175	0.0298	H13	0.943	0.9843	0.0420
H4	1.12	1.115	0.0045	C8	0.943	0.9657	0.0235	B13	0.74	0.7924	0.0661
L5	1.21	1.165	0.0386	B8	1.31	1.295	0.0116	N14	0.708	0.6998	0.0117
G5	1.13	1.129	0.0009	P9	0.859	0.8367	0.0267	J14	0.91	0.9194	0.0102
E5	1.28	1.247	0.0265	G9	0.967	1.017	0.0492	F14	1.31	1.357	0.0346
C5	1.43	1.32	0.0833	E9	1.13	1.175	0.0383	D14	0.98	1.05	0.0667
R6	0.708	0.6704	0.0561	A9	0.845	0.8455	0.0006	L15	0.62	0.6022	0.0296
N6	0.96	0.9196	0.0439	L10	0.945	0.9643	0.0200	H15	0.789	0.837	0.0573
K6	1.1	1.102	0.0018	J10	0.847	0.9199	0.0792	—	—	—	—
H6	1.02	1.042	0.0211	D10	1.23	1.291	0.0473	—	—	—	—

构,可以在高保真条件下验证反应堆物理分析工具的临界有效增殖系数、控制棒价值、温度系数、 ^{235}U 裂变率等参数的计算结果,并且包含真实反应堆实测数据。

RMC 计算结果基本优于 OpenMC 的计算结果,与真实反应堆的数据基本一致,在临界有效增殖系数、裂变率等参数的计算上具有计算精度高、可靠性好的特点。

参考文献:

[1] Wang K, Li Z G, She D, et al. RMC-A Monte Carlo

code for reactor physics analysis[C]. Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo. Paris, France 2013.

[2] 丘意书,余顶,范潇,等.堆用蒙特卡罗程序 RMC 的全堆计算研究[J].核动力工程,2013,34(S1):1-4.

[3] Horelik N, Herman B, Forget B, et al. Benchmark for evaluation and validation of reactor simulations (BEAVRS) [C]. International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering. Sun Valley, Idaho, USA. 2013.

(责任编辑:张祚豪)