

快堆系统分析程序 FASYS 堆芯分析模块验证

王 晋, 张东辉*

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:中国原子能科学研究院自主开发了快堆系统分析程序 FASYS, 已用于中国实验快堆的调试试验分析, 目前正用于中国示范快堆的事故分析。FASYS 程序包含堆芯分析模块、一二回路模块、事故余热排出系统模块等, 其中堆芯分析模块包括点堆、衰变热、反应性反馈、堆芯通道热工水力模型等。本文采用解析解、DINROS 程序、SAS4A/SASSYS-1 程序验证 FASYS 程序的点堆模型; 采用 SAS4A/SASSYS-1 程序验证 FASYS 程序的衰变热、反应性反馈和堆芯通道热工水力模型, 各模型的验证结果均符合良好。对 FASYS 程序堆芯分析模块各模型的计算偏差和整体计算偏差进行评估, 为中国示范快堆的事故分析提供参考。

关键词:快堆; 系统分析程序; 堆芯分析; 程序验证

中图分类号: TL364.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)02-0264-09

doi: 10. 7538/yzk. 2019. youxian. 0086

Verification of Core Analysis Module for Fast Reactor System Analysis Code FASYS

WANG Jin, ZHANG Donghui*

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Fast reactor system analysis code FASYS is developed by China Institute of Atomic Energy, which has been used for commissioning test analysis of China Experimental Fast Reactor and is currently being used for accident analysis of China Demonstration Fast Reactor. The FASYS code includes core analysis module, primary and secondary loop modules, and decay heat removal system module, etc. The core analysis module includes point reactor model, decay heat model, reactivity feedback model, and thermal-hydraulic model of core channel, etc. The point reactor model of FASYS code was validated by comparing with analytical solution result, DINROS code result and SAS4A/SASSYS-1 code result. And decay heat model, reactivity feedback model and core channel thermal-hydraulic model of FASYS code were validated by comparing with SAS4A/SASSYS-1 code result. The validation results of each model are in good agreement. The calculation deviation of each model for the core analysis module of FASYS

收稿日期: 2019-02-22; 修回日期: 2019-04-08

作者简介: 王 晋(1989—), 女, 重庆人, 助理研究员, 博士研究生, 从事快堆安全分析研究

* 通信作者: 张东辉, E-mail: zdh2008@139.com

网络出版时间: 2019-09-25; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190924.1135.004.html>

code was evaluated. And the proposal for China Demonstration Fast Reactor accident analysis deviation evaluation was given.

Key words: fast reactor; system analysis code; core analysis; code verification

快堆系统分析程序可分析快堆电厂在各种瞬态过程中系统的响应^[1],进行快堆研究的国家和机构开展了大量的快堆系统分析程序开发和验证。目前快堆系统分析程序主要有两大类:一类是由水堆系统分析程序经过模型升级和修改成为可适用于快堆分析的系统分析程序,如 RELAP5-3D^①[2]、TRACE^[3]、CATHARE^[4]、ATHLET^[5]等;另一类是专门为快堆系统分析而研发的系统分析程序,如 SSC-L^[6]、SSC-P^[7]、SAS4A/SASSYS-1^[8]、SAM^[9]、DINROS^[10]、OASIS^[11]、SSC-K^[12]、MARS-LMR^[13]等。

FASYS 程序是中国原子能科学研究院自主开发的快堆系统分析程序,包含堆芯分析模块、一二回路模块、事故余热排出系统模块等,已对 FASYS 程序的中子物理模型、水力模型、热工模型和整体模型进行了初步验证^[14-15]。目前 FASYS 程序正用于中国示范快堆反应性的意外变化类事故的分析,主要关注堆芯关键现象的分析计算。

DINROS 程序(俄罗斯快堆系统分析程序)曾用于 BH-600 和 BH-800 快中子反应堆的安全分析报告的编写及 BH-350 反应堆安全保护手段的研制,该程序已在 BH-350、BH-600、BP-10 等装置或反应堆上经过验证计算。中国实验快堆曾引进 DINROS 程序进行安全分析报告的编制。SAS4A/SASSYS-1 程序(以下简称 SAS 程序)由美国阿贡国家实验室开发,其中包括 SAS4A 程序和 SASSYS-1 程序。SAS4A 程序是严重事故程序,SASSYS-1 程序是快堆系统分析程序,可用于分析与系统相关的典型事故的序列,也是 EBR-II 仿真机的计算引擎,被广泛地用于快堆事故的分析中^[8]。

FASYS 程序堆芯分析模块包括点堆、衰变热、反应性反馈、堆芯通道热工水力模型等,本文通过点堆方程解析解算例、DINROS 程序超功率算例、SAS4A/SASSYS-1 程序点堆与衰变热算例、反应性反馈算例、燃料棒与冷却剂换热算例,进行 FASYS 程序堆芯分析模块的所有关键模型的验证,并对堆芯分析模块的计算偏

差进行初步评估。

1 FASYS 程序堆芯分析模块介绍

FASYS 程序堆芯分析模块包括点堆、衰变热、反应性反馈、堆芯通道热工水力模型等。FASYS 程序采用 3 阶 Hermite 插值多项式法^[16]求解点堆动态方程。在计算反应堆功率时,除考虑裂变功率外,还考虑裂变产物和铀系元素的衰变功率,并考虑了反应堆连续运行史对上述衰变功率的影响。FASYS 程序堆芯通道热工水力模型采用单通道模型,堆芯可划分为任意数目的通道来模拟燃料组件、屏蔽组件、不锈钢组件等。文献^[14]给出了 FASYS 程序点堆、衰变热、堆芯通道热工水力模型的具体方程。FASYS 程序可计算的反应性分项包括输入卡定义的引入反应性、控制棒引入的反应性、燃料多普勒反应性反馈、燃料和包壳轴向膨胀反应性反馈、冷却剂密度变化反应性反馈、堆芯径向膨胀反应性反馈。其中,燃料多普勒反应性反馈、燃料和包壳轴向膨胀反应性反馈、冷却剂密度变化反应性反馈提供集总参数模型和空间分布模型两个选项。

2 验证结果

2.1 点堆方程解析解算例

本算例将采用点堆方程解析解对 FASYS 程序的点堆模型进行验证,解析解的来源为公开发表的文献^[16],包括 3 种不同情况下解析解与 FASYS 程序数值解的比较。

情况 1:

$$\begin{aligned} M &= 1, \beta = 0.0065, \\ \lambda &= 0.08 \text{ s}^{-1}, \Lambda = 1.0 \times 10^{-8} \text{ s} \\ \rho(t) &= \begin{cases} 0 & t = 0^- \\ 0.002 & t \geq 0^+ \end{cases} \end{aligned}$$

式中: M 为缓发中子组数; β 为缓发中子有效份额; λ 为先驱核衰变常量; Λ 为瞬发中子寿命; ρ 为引入的外部反应性。

情况 2:

$$M = 15, \beta = 0.00733019,$$

$\Delta = 2.15 \times 10^{-4}$ s(动态参数见文献[16])

$$\rho(t) = \begin{cases} 0 & t = 0^- \\ 0.002 & t \geq 0^+ \end{cases}$$

情况 3:

$$M = 1, \beta = 0.0065,$$

$$\lambda = 0.08 \text{ s}^{-1}, \Delta = 1.0 \times 10^{-8} \text{ s}$$

$$\rho(t) = 0.003 \sin(\pi t / 10)$$

情况 1 和情况 2 均为 0 s 时刻引入 0.002 阶跃反应性,但中子动态参数不同,情况 1 仅有 1 组缓发中子,情况 2 有 15 组缓发中子。表 1 列出情况 1 解析解与 FASYS 程序计算值($N(t)/N(0)$)的对比,共计算时间步长分别为 0.1、0.01、0.001、0.000 1 和 0.000 01 s 等 5 种情况,由于 0 s 时刻引入的阶跃反应性较大,采用的时间步长不能满足程序设定的精度要求,程序中自动减小了时间步长,以上 5 种情况在 0 s

时刻的实际计算时间步长均为 10^{-6} s 量级,0 s 时刻之后采用原设置的时间步长。从表 1 可知,当时间步长为 0.1 s 时,相对偏差为 10^{-3} 量级,当时间步长减小 1 个量级,计算精度约提高 1 个量级。表 2 列出情况 2 解析解与 FASYS 程序计算值的对比,可看出当时间步长为 0.001 s 时,相对偏差为 10^{-5} 量级,时间步长越小,计算精度越高。情况 3 引入随时间变化的正弦反应性,中子动态参数与情况 1 相同。表 3 列出情况 3 解析解与 FASYS 程序计算值的对比,可看出当时间步长为 0.01 s 时,FASYS 程序计算值即可与解析解保持 6 位有效数字的一致。

通过情况 1、2、3 的计算对比可发现,FASYS 程序采用的 3 阶 Hermite 插值法计算的数值结果在一般情况下较为精确,对于引入较大阶跃反应性的情况需采取较小的时间步长

表 1 不同时间步长下情况 1 解析解与 FASYS 程序计算值的对比

Table 1 Comparison between analytical solution and FASYS code calculated value of case 1 at different time steps

时间/s	解析解	FASYS 程序计算值					相对偏差(绝对值)					
		0.1 s	0.01 s	0.001 s	0.000 1 s	0.000 01 s	0.1 s	0.01 s	0.001 s	0.000 1 s	0.000 01 s	
0.0	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00						
0.1	1.449 59	1.457 05	1.450 33	1.449 66	1.449 60	1.449 59	5.1×10^{-3}	5.1×10^{-4}	4.8×10^{-5}	4.8×10^{-6}	0	
0.5	1.470 35	1.477 92	1.471 11	1.470 43	1.470 36	1.470 35	5.1×10^{-3}	5.2×10^{-4}	5.4×10^{-5}	6.8×10^{-6}	0	
1.0	1.496 73	1.504 43	1.497 50	1.496 80	1.496 73	1.496 73	5.1×10^{-3}	5.1×10^{-4}	4.7×10^{-5}	2.7×10^{-6}	0	
2.0	1.550 90	1.558 88	1.551 70	1.550 98	1.550 91	1.550 90	5.1×10^{-3}	5.1×10^{-4}	5.2×10^{-5}	5.2×10^{-6}	0	
3.0	1.607 04	1.615 30	1.607 86	1.607 12	1.607 04	1.607 04	5.1×10^{-3}	5.1×10^{-4}	5.0×10^{-5}	2.5×10^{-6}	0	
4.0	1.665 20	1.673 77	1.666 06	1.665 29	1.665 21	1.665 20	5.1×10^{-3}	5.1×10^{-4}	5.4×10^{-5}	6.6×10^{-6}	0	
5.0	1.725 47	1.734 35	1.726 36	1.725 56	1.725 48	1.725 48	5.1×10^{-3}	5.2×10^{-4}	5.2×10^{-5}	8.1×10^{-6}	5.8×10^{-6}	

表 2 不同时间步长下情况 2 解析解与 FASYS 程序计算值的对比

Table 2 Comparison between analytical solution and FASYS code calculated value of case 2 at different time steps

时间/s	解析解	FASYS 程序计算值			相对偏差(绝对值)		
		0.001 s	0.000 1 s	0.000 01 s	0.001 s	0.000 1 s	0.000 01 s
0.0	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00			
0.1	1.350 37	1.350 83	1.350 50	1.350 38	3.4×10^{-4}	9.9×10^{-5}	8.1×10^{-6}
0.5	1.446 35	1.446 42	1.446 37	1.446 35	5.0×10^{-5}	1.2×10^{-5}	0
1.0	1.516 71	1.516 78	1.516 73	1.516 71	4.4×10^{-5}	1.3×10^{-5}	0
2.0	1.641 56	1.641 62	1.641 58	1.641 57	3.9×10^{-5}	1.3×10^{-5}	3.0×10^{-6}
3.0	1.759 92	1.759 98	1.759 94	1.759 92	3.5×10^{-5}	1.1×10^{-5}	0
4.0	1.877 17	1.877 23	1.877 19	1.877 17	3.1×10^{-5}	9.1×10^{-6}	0
5.0	1.995 32	1.995 38	1.995 34	1.995 33	3.2×10^{-5}	1.1×10^{-5}	5.0×10^{-6}

才能保证计算精度,在实际计算中应评估引入的反应性并进行时间步长影响分析,选取合适

的时间步长以保证计算精度。

表 3 情况 3 解析解与 FASYS 程序计算值的对比

Table 3 Comparison between analytical solution and FASYS code calculated value of case 3

时间/s	解析解	FASYS 程序计算值(0.01 s)	相对偏差
0.0	1.000 00	1.000 00	0
0.1	1.014 77	1.014 77	0
0.5	1.079 46	1.079 46	0
1.0	1.173 80	1.173 80	0
2.0	1.410 81	1.410 81	0
3.0	1.705 52	1.705 52	0
4.0	2.013 77	2.013 77	0
5.0	2.242 61	2.242 61	0

2.2 DINROS 程序超功率算例

本算例将采用中国实验快堆^[10]“在堆各种状态下补偿棒非规定位移”预计运行事件分析中对 0.1%额定功率运行工况的计算结果进行对比验证,原分析结果由 DINROS 程序计算。工况假设如下:1) 相对流量取 0.25;2) 堆芯冷却剂入口温度为 250 °C;3) 堆内无反馈;4) 棒价值取平衡态初期的值,引入反应性 $7.77 \times 10^{-4} \Delta k/k$,在 5 s 内线性引入。

表 4 列出了 FASYS 程序计算的主要事故序列与原事故序列的对比,可看出,FASYS 程序计算的达到堆相对功率保护参数和最大值的时间与 DINROS 程序计算值一致,堆相对功率最大值的相对偏差为 8.9×10^{-4} 。

表 4 主要事故序列对比

Table 4 Comparison of main accident sequences

时间/s	原事故序列	FASYS 程序计算的事故序列
379.2	堆相对功率达保护参数整定值 0.112 2	堆相对功率达保护参数整定值 0.112 2
379.3	发出功率停堆保护信号(滞后 0.1 s,第一停堆信号)	发出功率停堆保护信号(滞后 0.1 s,第一停堆信号)
379.4	反应堆紧急停堆(滞后 0.1 s)	反应堆紧急停堆(滞后 0.1 s)
379.4	堆相对功率达最大值 0.112 6	堆相对功率达最大值 0.112 5

图 1、2 分别为反应堆相对功率和反应堆周期的 FASYS 程序计算值与 DINROS 程序计算值的对比,从结果可看出,FASYS 程序计算值与 DINROS 程序计算值符合很好。

FASYS 程序的点堆模型和衰变热模型进行验证,计算建模基于中国实验快堆,假设反应堆已满功率连续运行 80 d,0~6 s 向反应堆线性引入负反应性,反应性速率为 -728.68 pcm/s ,6 s 时负反应性引入结束,共引入负反应性 $-4 372.08 \text{ pcm}$ 。不考虑反应性反馈,计算停堆过程中的裂变功率和衰变功率。

2.3 SAS 程序点堆与衰变热计算算例

本算例将采用 SAS 程序作为校验程序对

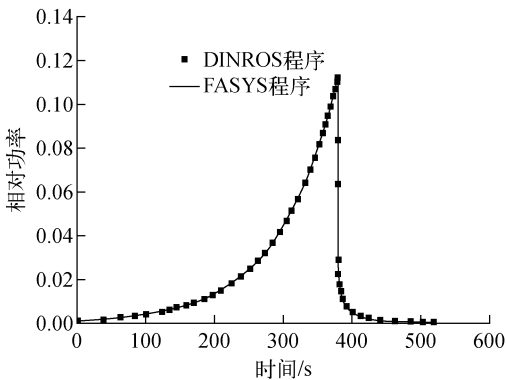


图 1 反应堆相对功率的结果对比

Fig. 1 Comparison of normalized power results

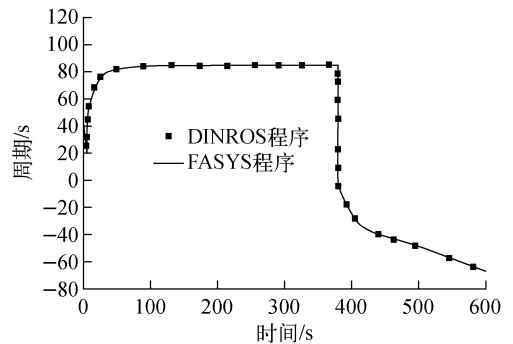


图 2 反应堆周期的结果对比

Fig. 2 Comparison of nuclear reactor period results

表5列出了衰变功率相对值、总功率相对值,可看出,衰变功率的最大相对偏差出现在0 s时刻,为 7.4×10^{-7} 。总功率的最大相对偏差出现在前期,主要来源于两个程序求解点堆方程的方法不同,后期由于衰变功率占总功率

的绝大部分,总功率的相对偏差也逐步减小。总体而言,本算例中FASYS程序与SAS程序的衰变功率最大相对偏差为 10^{-7} 量级,而总功率最大相对偏差为 10^{-6} 量级。

表5 衰变功率相对值、总功率相对值

Table 5 Normalized decay power results and normalized total power results

时间/s	衰变功率相对值		相对偏差 (绝对值)	总功率相对值		相对偏差 (绝对值)
	FASYS 程序	SAS 程序		FASYS 程序	SAS 程序	
0	0.067 711 55	0.067 711 60	7.4×10^{-7}	1.0	1.0	
1	0.065 230 46	0.065 230 47	1.5×10^{-7}	0.485 385 29	0.485 383 90	2.9×10^{-6}
10	0.050 858 60	0.050 858 61	2.0×10^{-7}	0.094 227 96	0.094 227 75	2.2×10^{-6}
20	0.045 626 32	0.045 626 33	2.2×10^{-7}	0.071 456 93	0.071 456 81	1.7×10^{-6}
50	0.038 834 45	0.038 834 45	0	0.049 159 98	0.049 159 93	1.0×10^{-6}
100	0.034 210 71	0.034 210 71	0	0.037 414 51	0.037 414 50	2.7×10^{-7}
200	0.028 982 94	0.028 982 94	0	0.029 529 36	0.029 529 35	3.4×10^{-7}
500	0.022 950 15	0.022 950 15	0	0.022 960 93	0.022 960 93	0
1 000	0.020 024 32	0.020 024 33	5.0×10^{-7}	0.020 024 35	0.020 024 35	0

2.4 SAS 程序反应性反馈算例

本算例将采用SAS程序作为校验程序对FASYS程序的反应性反馈模型进行验证,将验证具有空间分布模型的燃料多普勒反应性反馈、燃料和包壳轴向膨胀反应性反馈、冷却剂密度变化反应性反馈。本算例中FASYS程序与SAS程序采用空间分布相同的钠空泡反应性系数、多普勒常数、燃料质量增加引入的反应性、包壳质量增加引入的反应性。

情况1堆芯零功率,其初始温度均为 $358\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\sim 50\text{ s}$ 时间内堆芯入口温度线性上升至 $458\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\sim 100\text{ s}$ 堆芯入口温度一直保持在 $458\text{ }^{\circ}\text{C}$;情况2堆芯零功率,堆芯初始温度均为 $358\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\sim 50\text{ s}$ 时间内堆芯入口温度线性下降至 $258\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\sim 100\text{ s}$ 堆芯入口温度一直保持在 $258\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表6列出了情况1在 100 s 时反应性反馈值的FASYS程序计算值与SAS程序计算值的对比。其中,钠密度变化引入的反应性反馈计算值相对偏差绝对值为 1.3×10^{-3} ,轴向膨胀引入的反应性反馈计算值相对偏差绝对值为 6.6×10^{-4} ,多普勒效应引入的反应性反馈计算值相对偏差绝对值为 1.1×10^{-3} 。表7列出了算例2在 100 s 时反应性反馈值的FASYS程序计算值与SAS程序计算值的对比。其中,钠密度变化引入的反应性反馈计算值相对偏差绝对值为 1.3×10^{-3} ,轴向膨胀引入的反应性反馈计算值相对偏差绝对值为 1.1×10^{-3} ,多普勒效应引入的反应性反馈计算值相对偏差绝对值为 1.1×10^{-3} 。总体来说,FASYS程序计算的反应性反馈与SAS程序相比,其相对偏差为 10^{-3} 量级。

表6 情况1反应性反馈计算值对比

Table 6 Comparison of reactivity feedback results for case 1

参量	FASYS 程序计算值/ $(\Delta k/k)$	SAS 程序计算值/ $(\Delta k/k)$	相对偏差(绝对值)
钠密度变化引入的反应性反馈	-1.086×10^{-4}	-1.088×10^{-4}	1.3×10^{-3}
轴向膨胀引入的反应性反馈	-1.576×10^{-4}	-1.577×10^{-4}	6.6×10^{-4}
多普勒效应引入的反应性反馈	-8.003×10^{-4}	-8.012×10^{-4}	1.1×10^{-3}

表 7 情况 2 反应性反馈计算值对比

Table 7 Comparison of reactivity feedback results for case 2

参量	FASYS 程序计算值/ $(\Delta k/k)$	SAS 程序计算值/ $(\Delta k/k)$	相对偏差(绝对值)
钠密度变化引入的反应性反馈	1.076×10^{-4}	1.077×10^{-4}	1.3×10^{-3}
轴向膨胀引入的反应性反馈	7.859×10^{-5}	7.867×10^{-5}	1.1×10^{-3}
多普勒效应引入的反应性反馈	9.386×10^{-4}	9.397×10^{-4}	1.1×10^{-3}

2.5 SAS 程序燃料棒与冷却剂换热计算算例

本算例将采用 SAS 程序作为校验程序对 FASYS 程序的堆芯通道热工水力模型进行验证,采用相同的燃料组件几何参数、节点划分、功率、流量、轴向功率分布、包壳物性、燃料物性。其中,燃料棒轴向共划分 24 个节点,芯块径向等距划分为 5 个节点,包壳径向划分为 3 个节点,冷却剂径向为 1 个节点。对 100% 功率稳态情况下和 100% 功率线性升功率到 110% 功率瞬态情况下 SAS 程序与 FASYS 程序计算的燃料温度、包壳温度、冷却剂温度进行结果对比。

图 3 为 100% 功率稳态情况下 SAS 程序与 FASYS 程序计算的燃料最高温度、包壳中壁温度、冷却剂温度的轴向分布结果对比。其中,燃料最高温度、包壳中壁温度、冷却剂温度的最大偏差绝对值均为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

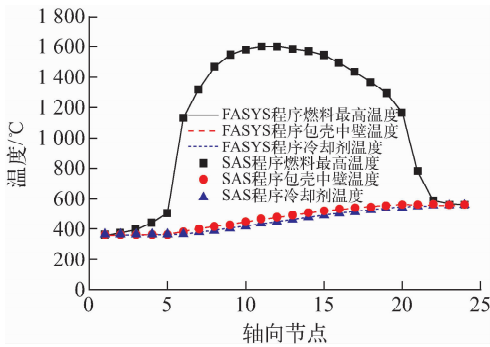


图 3 组件轴向温度的稳态结果对比
Fig. 3 Comparison of subassembly axial temperature steady state results

瞬态计算中,0 s 时刻燃料组件为 100% 功率然后线性升功率,8 s 时刻达到 110% 功率后保持不变,期间流量保持不变,时间步长为 0.001 s 。图 4 为 FASYS 程序与 SAS 程序的瞬态燃料最高温度结果对比,瞬态情况下最大

偏差绝对值为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 5 为 FASYS 程序与 SAS 程序的瞬态包壳中壁最高温度与冷却剂最高温度结果对比,瞬态情况下包壳中壁最高温度最大偏差绝对值为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却剂最高温度最大偏差绝对值为 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

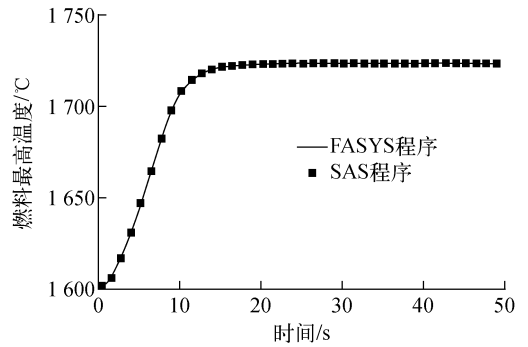


图 4 瞬态燃料最高温度的结果对比
Fig. 4 Comparison of fuel maximum temperature transient results

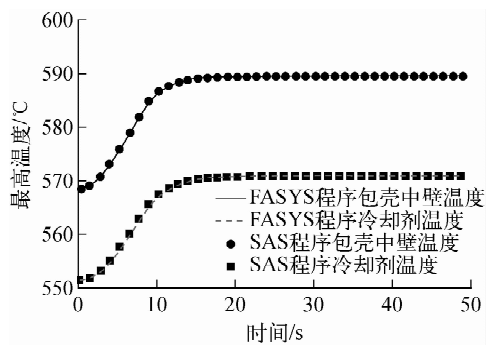


图 5 瞬态包壳中壁最高温度和冷却剂最高温度的结果对比
Fig. 5 Comparison of cladding middle wall maximum temperature and coolant maximum temperature transient results

分析时间步长对图 4、5 瞬态温度计算的影响,分别计算时间步长为 0.01 、 0.001 和 0.0001 s 等 3 种情况,如表 8 所列,时间步长 0.01 s 的

计算结果与时间步长 0.000 1 s 相比温度最大偏差为 0.07 °C, 时间步长 0.001 s 的计算结果与时间步长 0.000 1 s 相比温度最大偏差为 0.01 °C。

表 8 不同时间步长下瞬态温度偏差对比

Table 8 Comparison of transient temperature deviations at different time steps

时间步长/s	燃料温度最大偏差/°C	包壳温度最大偏差/°C	冷却剂温度最大偏差/°C
0.01	0.07	0.01	0.01
0.001	0.01	0.01	0.00

注:温度偏差指与时间步长为 0.000 1 s 的计算结果的偏差

分析网格划分对燃料棒温度计算的影响, 由于轴向节点划分方式来自物理专业给出的轴向功率分布, 此处仅分析芯块径向节点划分数目对计算的影响。分别计算芯块径向节点数目为 5、6、9、11、13、15、17、21、31、41 等 10 种情况, 对比前 9 种情况的燃料最高温度计算值与第 10 种情况计算值的偏差, 如图 6 所示, 可看出随着径向节点数目的增加, 燃料最高温度计算值减小, 偏差亦减小, 当径向节点大于 21 时, 燃料温度计算偏差小于 0.1 °C, 基本实现径向网格无关性。

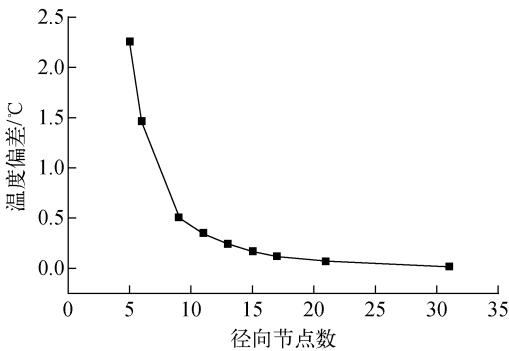


图 6 不同径向节点数的燃料温度偏差对比

Fig. 6 Deviation comparison of fuel temperature results with different numbers of radial nodes

分析功率和流量的偏差对图 4 和图 5 瞬态温度计算的影响, 分别计算瞬态最大功率增加 1%、增加 0.1%、瞬态流量减小 1%、减小 0.1% 等情况, 如表 9 所列, 功率增加 1% 和流

量减小 1% 引起的包壳温度、冷却剂温度偏差相当, 而功率增加 1% 引起的燃料温度偏差为 13.5 °C, 远大于流量减小 1% 引起的燃料温度偏差 1.0 °C。

表 9 功率、流量偏差对瞬态温度的影响

Table 9 Effect of power and flow deviations on transient temperature

情况	燃料温度最大偏差/°C	包壳温度最大偏差/°C	冷却剂温度最大偏差/°C
功率增加 1%	13.5	2.3	2.1
功率增加 0.1%	1.3	0.2	0.2
流量减小 1%	1.0	2.1	2.1
流量减小 0.1%	0.1	0.2	0.2

注:温度偏差指与 SAS 程序原瞬态计算结果的偏差

3 堆芯分析模块的计算偏差评估

以 FASYS 程序进行中国实验快堆的调节棒非规定位移事故分析为例, 对堆芯分析模块的整体计算偏差进行分析。首先给出调节棒非规定位移事故分析的事故描述和事故假设, 反应堆处于正常运行期间, 1 根调节棒从底部失控提升到顶, 1 根调节棒价值为 0.001 748 $\Delta k/k$, 假设反应性线性引入, 反应性引入速率为 11.66 pcm/s, 反应性引入时间从 0 s 开始到 15 s 结束。事故假设初始状态 100% 额定功率上叠加 2.5%, 堆芯冷却剂入口温度在额定值 360 °C 上叠加 3 °C, 紧急停堆共引入负反应性 -0.016 8 $\Delta k/k$, 停堆反应性在 1.4 s 内引入完成。表 10 列出计算时间步长取 0.001 s 时的主要事故序列。

表 10 主要事故序列

Table 10 Major accident sequences

事件	时间/s
1 根调节棒失控提升, 以 11.66 pcm/s 速率引入正反应性	0.0
堆相对功率达到保护参数整定值 1.138 8	6.8
反应堆紧急停堆(滞后 0.2 s), 一回路主泵开始惰转	7.0
堆相对功率达最大值 1.142 8	7.0
燃料中心最高温度达最大值 2 324.4 °C	7.1
燃料包壳最高温度达最大值 656.4 °C	7.3
堆芯出口钠最高温度达最大值 639.73 °C	7.4

分析计算时间步长 h 对结果的影响,图 7a 为时间步长取 0.01、0.001 s 的功率计算结果与时间步长 0.000 1 s 的功率计算结果的相对偏差,可看出在 7.0 s 时,由于紧急停堆短时间内(1.4 s)引入较大的负反应性,计算偏差急剧上升,时间步长取 0.01 s 的计算偏差从 1×10^{-4} 瞬间上升到 4×10^{-2} ,时间步长取 0.001 s 的计算偏差从 1×10^{-5} 瞬间上升到 1×10^{-3} ,紧急停堆结束后,由于不再引入较大的负反应性,时间步长取 0.01 s 的计算偏差降低到约 1×10^{-3} ,时间步长取 0.001 s 的计算偏差降低到约 1×10^{-4} 。图 7b 为时间步长取 0.01、0.001 s 的燃料最高温度计算结果与时间步长 0.000 1 s 的燃料最高温度计算结果的偏差,时间步长取 0.01 s 的燃料最高温度计算值偏差约 10°C ,时间步长取 0.001 s 的燃料最高温度计算值偏差约 0.2°C ,由表 8、9 和图 6 可知,不同时间步长的燃料最高温度计算值偏差主要来自功率的计算偏差。图 7c 为时间步长取 0.01、0.001 s 的

包壳、冷却剂最高温度计算结果与时间步长 0.000 1 s 的包壳、冷却剂最高温度计算结果的偏差,时间步长取 0.01 s 的包壳最高温度计算值偏差约 1°C 、冷却剂最高温度计算值偏差约 0.4°C ,时间步长取 0.001 s 的包壳最高温度计算值偏差约 0.1°C 、冷却剂最高温度计算值偏差约 0.1°C ,不同时间步长的包壳、冷却剂最高温度计算值偏差应来自燃料温度的计算偏差。

综合第 2 章对堆芯分析模块各模型的验证结果及本章结果可知,在引入较大反应性的情况下时间步长对点堆方程的求解精度有较大影响,对温度计算偏差的影响最大,径向节点的划分数目对燃料温度计算的影响次之,随着径向节点数目的增加,燃料最高温度计算值减小。在此类事故的分析中,应首先评估引入的外部反应性,然后进行时间独立性分析,选取合适的时间步长,进行网格无关性分析,得到满足计算偏差要求的径向节点数目。

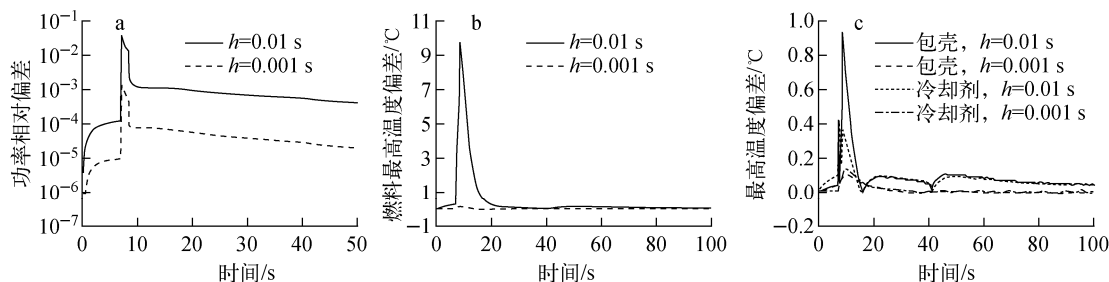


图 7 不同时间步长下功率、燃料最高温度以及包壳、冷却剂最高温度偏差对比

Fig. 7 Comparison of deviations for power, fuel maximum temperature, and cladding and coolant temperatures at different time steps

4 结论

通过点堆方程解析解算例、DINROS 程序超功率算例、SAS4A/SASSYS-1 程序点堆与衰变热算例、反应性反馈算例、燃料棒与冷却剂换热算例,对 FASYS 程序的堆芯分析模块的所有关键模型进行验证,结果均符合良好。对堆芯分析模块各关键模型和整体计算偏差进行了初步评估,在引入较大反应性的情况下点堆方程的求解精度依赖于时间步长,功率计算值的偏差直接影响温度计算的准确性,径向节点的划分数目对燃料温度计算的影响次之,随着径向节点数目的增加,燃料最高温度计算值减小,

为进行中国示范快堆反应性的意外变化类事故分析和计算偏差估计提供参考。

参考文献:

- [1] 朱继洲. 核反应堆安全分析[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.
- [2] The RELAP5-3D© Code Development Team. RELAP5-3D© code manual volume I: Code structure, system models and solution methods (Revision 2.3)[R]. US: INL, 2005.
- [3] SPORE J W. TRAC M FORTRAN 90 (Version 3.0) theory manual[R]. US: NRC, 2001.

- [4] GEFFRAYE G, ANTONI O, FARVACQUE M, et al. CATHARE 2 V2. 5 2; A single version for various applications[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241: 4 456-4 463.
- [5] FU S W, LIU X J, ZHOU C. Modification and application of the system analysis code ATHLET to trans-critical simulations[J]. Annals of Nuclear Energy, 2012(44): 40-49.
- [6] Brookhaven National Laboratory. An advanced thermohydraulic simulation code for transients in LMFBRs: SSC-L code[R]. US: BNL, 1978.
- [7] Brookhaven National Laboratory. An advanced thermohydraulic simulation code for pool-type LMFBRs: SSC-P code[R]. US: BNL, 1980.
- [8] CAHALAN J E, FANNING T H. The SAS4A/SASSYS-1 safety analysis code system[R]. US: ANL, 2012.
- [9] HU Rui. SAM theory manual[R]. US: Argonne National Laboratory, 2017.
- [10] 田和春, 黄汉芳, 唐志强, 等. 中国实验快堆最终安全分析报告[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2008.
- [11] 杨红义, 徐铄. OASIS 程序的开发与应用[J]. 核科学与工程, 2001, 21(4): 322-325.
YANG Hongyi, XU Mi. Development and application of OASIS code under the CEFBR project [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2001, 21(4): 322-325(in Chinese).
- [12] KWON Y M, LEE Y B. Development of a system analysis code, SSC-K, for inherent safety evaluation of the Korea Advanced Liquid Metal Reactor[J]. Journal of the Korean Nuclear Society, 2001(33): 209-224.
- [13] WOO S M, CHANG S H. Multi dimensional analysis of design basis events using MARS-LMR [J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 244: 83-91.
- [14] 王晋, 张东辉, 胡文军. 池式钠冷快堆系统分析程序开发[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(2): 198-203.
WANG Jin, ZHANG Donghui, HU Wenjun. Development of pool-type sodium-cooled fast reactor system analysis code[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(2): 198-203 (in Chinese).
- [15] WANG Jin, HU Wenjun. Sodium-cooled pool-type fast reactor system analysis code development and validation[C]//17th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics. Xi'an: [s. n.], 2017.
- [16] 田和春. 求解反应堆动态方程的插值多项式法[J]. 核动力工程, 1989, 10(6): 39-46.
TIAN Hechun. Interpolation polynomial approach to reactor kinetics equations[J]. Nuclear Power Engineering, 1989, 10(6): 39-46(in Chinese).