

# 船用堆自动棒动态反应性 Simulink 仿真模块设计

陈志云, 罗磊, 陈文振, 桂学文

(海军工程大学 核能科学与工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 船用堆运行中功率频繁、剧烈变化需要自动控制棒频繁调节。针对该特点及现有反应堆系统微机仿真程序存在的控制棒反应性描述不合理、不准确的问题, 设计了船用堆自动棒动态反应性 Simulink 仿真模块。该模块作为船用堆物理热工参数快速计算 Simulink 程序的子模块, 应用于船用堆典型动态过程仿真表明: 该模块能够模拟动态过程中的自动棒棒位和相应的动态反应性, 适用于船用堆物理热工参数快速计算, 对船用堆动态过程的仿真和物理热工参数快速计算有重要意义。

**关键词:** 船用堆; Simulink; 自动棒反应性; 仿真

中图分类号: TL942 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0317-04

## Design of Simulink Module for Dynamic Reactivity Simulation of Marine Reactor Automatic Control Rod

CHEN Zhi-yun, LUO Lei, CHEN Wen-zhen, GUI Xue-wen

(Department of Nuclear Energy Science and Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The power of marine reactor varies frequently and acutely, which induces the frequent and acute adjustment of the automatic control rod. According to the characteristics of marine reactor and the problem of improper control rod reactivity insertion in previous literatures, the Simulink module for dynamic reactivity simulation of automatic control rod was designed and adopted as a sub-module of Simulink program for the fast calculation of the physical and thermal parameters of marine reactor. A typical dynamic process of the marine reactor was used as the benchmark, which indicates that the designed Simulink module is capable of the dynamic simulation of automatic control rod position and reactivity, and is adequate to the fast calculation of physic and thermal parameters. The Simulink module is of significant meaning to the simulation of the dynamic process of marine reactor and the fast calculation of the operating parameters.

**Key words:** marine reactor; Simulink; automatic control rod reactivity; simulation

核电站反应堆为带恒定负荷运行, 运行参数变化很小, 而船用核动力装置为了满足船的机动性要求, 必须经常启动和停止、变负荷运行, 或

大幅甩负荷后又快速提升功率<sup>[1]</sup>。这种频繁剧烈的工况变化需要手工工况下人为不断干预, 而在自动情况下则需要功率调节系统快速、有效地调

节自动控制棒(以下简称自动棒),以跟踪功率并按照既定运行方案运行。本工作研究船用堆运行普遍采用的自动工况运行方式,对于船用堆只有1组控制棒作为自动棒,其它棒除人为干预外不动。因此,在自动控制工况下,自动棒反应性随功率需求而调节的反应性输入方法是反应堆实际运行中所使用的调节方式,但在国内外微机型仿真程序中鲜有提及<sup>[2-6]</sup>,有些文献将控制棒动作作为初始反应性引入,如引入阶跃反应性或线性引入反应性<sup>[7]</sup>,而在随后的动态过程中控制棒需要根据控制要求升降,从而导致控制棒反应性动态变化的情况则未考虑。文献[8]曾提到根据功率和慢化剂的温度设定调节控制棒,但未给出具体方案,文献[9]以控制棒总反应性和控制棒升降速度乘积的形式给出瞬时控制棒反应性引入,不符合实际。本工作针对这个问题,结合船用堆动态过程中物理热工参数快速计算程序对动态过程中自动棒输入反应性和自动棒棒位参数的实际需要,设计自动棒动态反应性 Simulink 仿真模块。由于 Simulink 在动态系统仿真中的优越性<sup>[7, 10]</sup>,已广泛应用于反应堆的动态仿真,本工作中的船用堆物理热工参数快速计算程序也采用 Simulink 模块实现,自动棒反应性仿真模块是其中的子模块。

## 1 物理热工模型及 Simulink 程序

仿真程序包括1个稳态参数初始化子程序和仿真计算程序。初始化程序用 Matlab 的 M 文件编写,用于设定动态仿真的初始状态,如堆功率、稳压器压力、初始自动棒棒位、堆芯冷却剂平均温度等。动态仿真从反应堆以一定功率稳定运行开始。

仿真计算程序是建立在一回路物理热工模型上的 Simulink 仿真模型。其中,物理模型采用考虑六组缓发中子的点堆中子动力学方程:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i + q_0 \quad (1)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l} n - \lambda_i c_i \quad (i=1 \sim 6) \quad (2)$$

其中: $\rho$ 为反应性;其他各参数意义同文献[7]。

$$\rho = r_1 + \rho_f + \rho_c + \Delta\rho$$

其中: $r_1$ 为本工作研究的动态过程中自动棒动态反应性输入,根据自动棒棒位变化计算得到; $\rho_f$ 为燃料反馈反应性, $\rho_f = f(\Delta T_f)$ , $\Delta T_f = T_f(t) - T_{f0}$ , $T_{f0}$ 为动态过程开始前的基准燃料

平均温度; $\rho_c$ 为冷却剂反馈反应性, $\rho_c = f(\Delta T_c)$ , $\Delta T_c = T_c(t) - T_{c0}$ , $T_{c0}$ 为动态过程开始前的基准冷却剂平均温度; $\Delta\rho$ 为反应性扰动。

燃料和冷却剂平均温度采用集总参数方法计算。堆芯热工计算采用双区集总参数模型,稳压器采用四区不平衡模型,将一回路管道划分成若干控制体,在每个控制体上建立质量和能量守恒方程,回路压力统一取稳压器压力。

根据物理热工模型建立的 Simulink 仿真程序模型界面如图1所示。包括物理模块、热工模块和参数显示模块。物理模块包括多个子模块,根据热工模块输入的堆芯平均温度 $T_c$ 和燃料芯块平均温度 $T_f$ 计算出反馈反应性,根据热工模块输入的功率差 $\Delta P$ 调节自动棒动作,计算出自动棒引入反应性,向热工模块输入核功率。热工模块计算出回路的所有热工参数,向物理模块输出 $T_c$ 、 $T_f$ 和 $\Delta P$ 。显示模块包含了所有需要的物理热工参数示波器,可实时察看仿真过程中各物理热工参数的动态变化,仿真结束后显示出仿真结果,并向 Matlab 工作空间输出仿真数据,便于进一步处理。显示模块中各参数的信号分别由物理、热工模块通过“Goto”和“From”模块“无线”输入,无需连线,使整个仿真模型十分简洁。

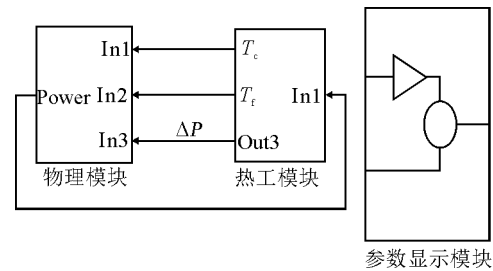


图1 Simulink 仿真模块

Fig. 1 Simulink simulation model

## 2 控制棒反应性仿真模块设计

自动棒反应性仿真模块是物理模块中的子模块,如图2所示。模块的核心是1个Fcn模块,内嵌有相应的计算函数程序。函数包括4个输入量和两个输出量。输入量 $\text{Detat}$ 是步长,由于整个程序的计算采用变步长的算法,因此需要计算每步的实际步长; $u$ 是自动棒驱动信号阈值参数, $u = \Delta n + k\Delta T_f$ , $\Delta n$ 为实际功率和需求功率差值, $\Delta T_f$ 为对应于需求功率的堆芯平均温度与当前平均温度的差值, $k$ 为常数,当 $u \geq c$ 时( $c$ 为

设定的调节死区数值), 控制信号 $xh=1$ 自动棒提升,  $u \leq -c$ 时, 控制信号 $xh=-1$ 自动棒降,  $u \in [-c, c]$ 为自动棒调节死区, 反应堆自稳自调;  $r_{o0}$ 是根据初始自动棒棒位的积分值得到的自动棒反应性基准值;  $y$ 为上一步计算得到的自动棒棒位, 由输出量 $bw$ 经 $memory$ 模块存储在当前计算步作为输入量。输出量 $bw$ 为自动棒棒位,  $bw=y+xh \times \text{Detat} \times s$ ,  $s$ 为设定的自动棒升降速度;  $r_i$ 为动态过程中自动棒的总反应性输出,  $r_i=r_o-r_{o0}$ ,  $r_o$ 是根据当前棒位 $bw$ 计算得到的自动棒积分价值。自动棒积分价值采用六次多项式拟合得到, 归一化曲线如图3所示。由图3可见, 六次多项式拟合值与实际值符合的很好。

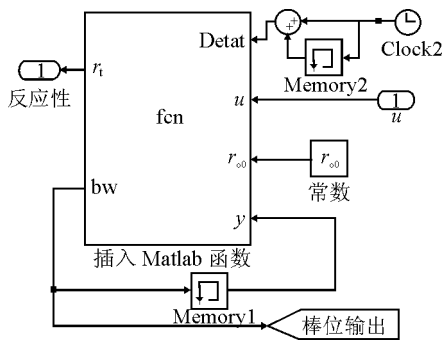


图2 控制棒自动控制 Simulink 模块

Fig. 2 Control rod self-control Simulink block

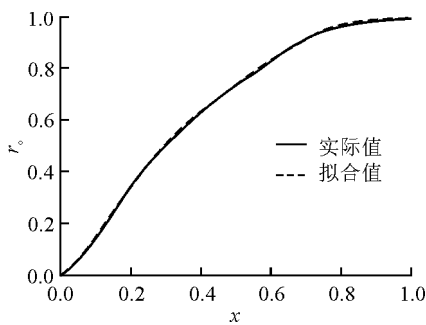


图3 自动棒积分价值

Fig. 3 Integral worth of automatic control rod

### 3 仿真结果

按照反应堆自动控制要求, 核动力装置一回路响应二回路负荷的动态变化。以船用堆二回路负荷典型变化过程为例, 给出仿真计算结果(图4)。反应堆功率变化如图5所示, 自动棒棒位如图6所示, 自动棒引入的反应性变化如图7所示。其中, 图6、7做了归一化处理。

由图4可见, 二回路从约90%额定负荷急

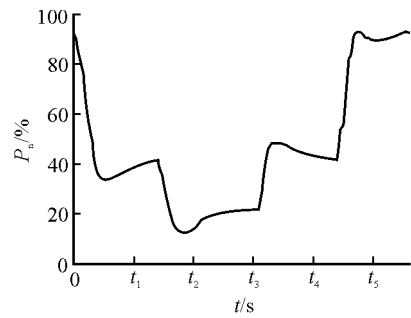


图4 二回路负荷变化

Fig. 4 Variation of load of secondary loop

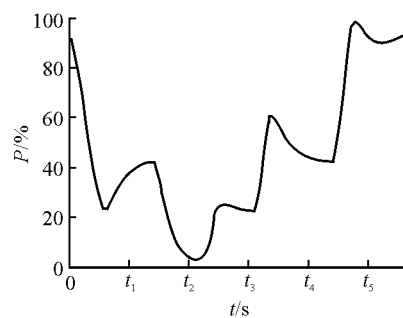


图5 反应堆功率变化

Fig. 5 Variation of reactor power

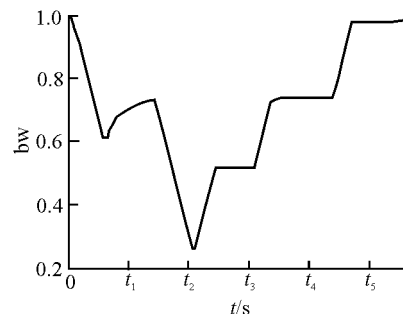


图6 自动棒棒位

Fig. 6 Position of automatic control rod

剧下降又急剧回升至约90%。由图5可见, 反应堆输出功率能够很好地跟踪二回路负荷的变化, 整个仿真系统的建模是正确的, 在Pentium(R) D 3.0 GHz普通微机上仿真运行时间约为实际时间的1/60, 达到了预期的快速计算效果, 说明该程序可用于船用堆运行现场的超实时计算。由图6、7可见, 在动态过程中自动棒根据控制信号升降, 并给出了棒位, 反映出动态过程中自动棒跟踪负荷的作用, 而不是以往文献中简单的初始棒位变化引入阶跃反应性或线性变化反应性等。这说明自动棒反应性

仿真模块设计正确合理的,能够满足动态过程中自动棒的棒位及反应性仿真,能够满足整个仿真程序对物理热工参数快速计算的需要。图8示出动态过程中堆芯总的反应性变化,包括自动棒引入反应性和燃料、冷却剂反馈反应性。

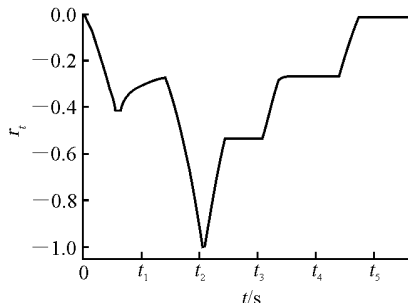


图7 自动棒反应性

Fig. 7 Reactivity of automatic control rod

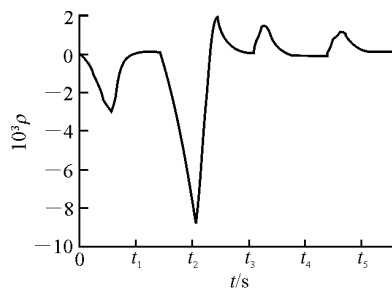


图8 总反应性变化

Fig. 8 Variation of total reactivity

#### 4 结论

针对船用堆控制棒自动调节的特点,设计了动态过程中自动棒棒位和动态反应性 Simulink 仿真模块,作为船用堆物理热工参数 Simulink 快速计算程序的子模块。经船用堆典型动态过程计算表明,动态过程中自动棒需根据功率和反应堆稳态运行方案调节,自动棒反应性动态变化,以往文献中的反应性输入方式如阶跃、线性输入等均不能反映动态过程中真实的控制棒升降和动态反应性。该 Simulink 仿真模块不仅实现了动态过程中准确的自动棒反应性输入,且得到了自动棒的实时棒位作为 1 个重要物理参数输出,解决了以往微机仿真程序中存在的控制棒反应性不能很好体现的问题。该 Simulink 仿真模块能够满足仿真程序对物理热工参数快速计算的需要,对船用堆动态过程的仿真和物理热工参数快速计算有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 黎浩峰. 反应堆运行中物理参数快速计算方法[D]. 武汉: 海军工程大学, 2009.
- [2] YEUNG M R, CHAN P L. Development of a four-equation reactor coolant system model for pressurized water reactor simulation[J]. Fission Reactors, 1988, 82: 251-257.
- [3] HAN G Y. A mathematical model for the thermal-hydraulic analysis of nuclear power plants[J]. Int Comm Heat Mass Transfer, 2000, 27(6): 795-805.
- [4] 崔震华. PWR核电站微机型安全分析程序的研制和应用[D]. 西安: 西安交通大学, 1992.
- [5] 张金玲. 压水堆核动力装置稳态及瞬态热工安全分析程序的研制和应用[D]. 西安: 西安交通大学, 1995.
- [6] 于涛, 罗璋琳, 龚学余, 等. 压水堆核电站运行堆芯物理过程的PC仿真[J]. 核动力工程, 2002, 23(4): 91-94, 101.  
YU Tao, LUO Zhanglin, GONG Xueyu, et al. PC-based simulation of the centrality parameter modeling for PWR nuclear power plant reactor core[J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(4): 91-94, 101(in Chinese).
- [7] 王乔, 黎浩峰, 陈文振, 等. 基于Simulink输入阶跃反应性时有温度和毒物反馈的反应堆动态响应仿真[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(9): 823-827.  
WANG Qiao, LI Haofeng, CHEN Wenzhen, et al. Dynamic simulation of response to step reactivity inserted in reactor with temperature and poison feedback based on Simulink[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(9): 823-827(in Chinese).
- [8] JAIN P K. A dynamic model for pressurized water reactor analysis on microcomputers[J]. Fission Reactor, 1985, 72: 301-311.
- [9] DONG Z, HUANG X J, FENG J T, et al. Dynamic model for control system design and simulation of a low temperature nuclear reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239: 2 141-2 151.
- [10] 陈志云, 陈文振, 罗磊, 等. Simulink 仿真软件在船用堆参数快速计算中的应用[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(增刊): 182-185.  
CHEN Zhiyun, CHEN Wenzhen, LUO Lei, et al. Application of Simulink in fast calculation for marine reactor parameters[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(Suppl.): 182-185(in Chinese).