

MNSR 控制系统仿真研究

洪景彦, 彭 旦, 郝 倩, 吴小波, 李义国, 王梦娇

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

摘要:通过对微型中子源反应堆(MNSR)控制系统理论分析,建立相应的 Simulink 模型,开展 MNSR 控制系统的仿真分析。为便于稳定性分析,对 MNSR 控制系统的数学模型进行了降阶和离散化,在降阶和离散化后的开环传递函数的基础上,利用 Matlab 工具的根轨迹分析工具箱,进行了稳定性分析,得到了不同采样时间下的临界增益。在反应堆稳态运行时引入正的阶跃反应性的情况下,进行了不同采样时间 T_s 下的 PID 控制器的比例系数 K_p 的整定,确定了两个 T_s 下的 K_p 的最佳整定值。随后,整定了不同 T_s 和 K_p 下的最佳微分系数 K_d 。 T_s 、 K_p 和 K_d 整定后,在 $T_s=60$ ms、 $K_p=2\ 500$ 和 $K_d=300$ 的情况下,分析了负阶跃反应性输入和斜坡反应性输入时的反应堆的中子通量密度、控制棒速度以及控制棒引入的反应性的响应。仿真分析的结果表明,有关 MNSR 控制系统的 Simulink 建模准确,分析数据可靠,为 MNSR 控制系统的软硬件设计提供了理论基础。

关键词:原型 MNSR; 研究堆控制系统; PID 控制器; Simulink 仿真

中图分类号: TL362.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2020)11-2188-06

doi: 10. 7538/yzk. 2020. youxian. 0309

Simulation Research on Control System of MNSR

HONG Jingyan, PENG Dan, HAO Qian, WU Xiaobo, LI Yiguo, WANG Mengjiao

(Division of Reactor Engineering Technology Research,
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: By the theoretical analysis of the Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) control system, the corresponding Simulink model was established and the simulation analysis of the MNSR control system was carried out. To facilitate the stability analysis, the mathematical model of the MNSR control system was reduced and discretized, based on the open-loop transfer function after reduction and discretization, the stability analysis was performed using the rltool analysis toolbox of the Matlab, and the critical gain for different sampling time was obtained. The calibration of the proportional coefficient K_p for the PID controller at different sampling time T_s was carried out with the introduction of positive step reactivity in the steady-state operation of the reactor, and the optimal calibration values of K_p at different sampling time were determined. The optimal differential coefficient K_d at different T_s and K_p was calibrated. After calibra-

tions of T_s , K_p and K_d , the reactor neutron flux density, control rod velocity and response to control rod introduction reactivity at negative step reactivity input and slope reactivity input were analyzed at $T_s=60$ ms, $K_p=2\ 500$ and $K_d=300$. The results of the simulation analysis show that the Simulink modeling about the MNSR control system is accurate and the analytical data are reliable, which provides a theoretical basis for software and hardware designs of the MNSR control system.

Key words: prototype MNSR; research reactor control system; PID controller; Simulink simulation

微型中子源反应堆(MNSR)是一种以低浓铀(部分未低浓化的 MNSR 使用高浓铀燃料)为燃料、轻水作慢化剂、铍作反射层的罐-池式结构的小型低功率反应堆,功率约 30 kW,最大热中子通量密度为 1×10^{12} $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着计算机运算速度的提高和计算机仿真技术的发展,控制系统的仿真变得越来越容易。对于研究堆这一具有一定不确定性的系统,应尽量减少在反应堆上进行热调试的时间。本文采用计算机仿真的方式对研究堆的控制系统进行研究,并对控制参数进行预整定。

1 数学描述及 Simulink 模型建立

通过对 MNSR 堆芯物理和 MNSR 闭环控制系统的研究,首先建立相关数学描述,在数学描述的基础上建立 Simulink 模型。主要包括描述 MNSR 堆芯物理的点堆动力学方程和闭环控制系统模型。

1.1 堆芯物理模型

描述 MNSR 堆芯物理的数学模型为点堆动力学方程^[1-2]:

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_n(t)}{\Lambda} + \sum_{i=1}^{15} \lambda_i C_i(t) \\ \frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, 15$

式中: $n(t)$ 为中子密度; $\rho(t)$ 为反应性; β 为缓发中子有效份额; Λ 为中子代时间; β_i 为第*i*组缓发中子有效份额; λ_i 为第*i*组缓发中子先驱核衰减系数; $C_i(t)$ 为第*i*组缓发中子先驱核浓度。由于 MNSR 使用铍作为反射层,一般采用 15 组缓发中子建立点堆动力学方程,其中 6 组为普通缓发中子,9 组为光致缓发中子。

1.2 闭环控制系统模型

MNSR 闭环控制系统的原理框图如图 1 所示。

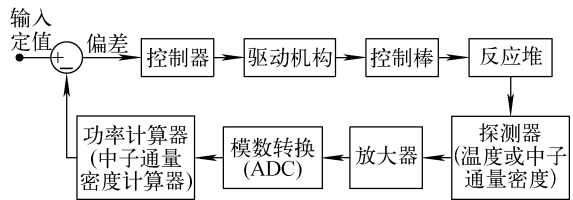


图 1 MNSR 闭环控制系统原理框图

Fig. 1 Diagram of MNSR close loop control system

系统主要由 PID 控制器、交流伺服电机、控制棒驱动机构和控制棒组成。

1) 中子通量密度测量模型

中子通量密度的测量可等效为测量和模数转换(ADC)两个部分。中子通量密度测量可等效为一惯性环节,即:

$$G_d(s) = 1/(T_c s + 1) \quad (2)$$

而对于 ADC 可等效为一零阶保持器,即:

$$G_{AD}(s) = (1 - e^{-T_s})/s \quad (3)$$

式中: $G_d(s)$ 为一阶惯性环节的传递函数; T_c 为时间常数; s 为拉普拉斯变换的自变量; $G_{AD}(s)$ 为 AD 转换器的传递函数; T_s 为采样时间。

2) PID 控制器模型

PID 控制器模型为控制算法中最为经典的算法,其数学表达式为:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t') dt' + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

式中: $e(t)$ 为偏差; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

对上式离散后,得到离散的 PID 控制器模型为:

$$u(z) = P + IT_i \frac{1}{z-1} + D \frac{1}{T_i} \frac{z-1}{z} \quad (5)$$

式中： P 、 I 和 D 分别为比例、积分和微分的系数； z 为离散传递函数的自变量。根据这一原理直接使用了 Simulink 中的离散 PID 控制器的仿真模型。

3) 交流伺服电机模型

交流伺服电机的运动方程^[3]为：

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em} + B\omega_m + T_l \quad (6)$$

式中： J 为电机转动惯量； T_{em} 为电磁转矩； B 为黏滞摩擦系数； ω_m 为电机转速； T_l 为负载转矩。

由于与电机的电磁转矩相比，负载转矩很小，可忽略，同时忽略摩擦带来的转矩损失，则可得：

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em} \quad (7)$$

因此，交流伺服电机可等效为一阶惯性环节，其传递函数为：

$$G_m = 1/(T_{em}s + 1) \quad (8)$$

4) 控制棒驱动机构模型

MNSR 的驱动机构主要采用减速箱，通过绳轮将交流伺服电机和控制棒连接，传动机构的数学模型为：

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\pi D \alpha}{60} n \quad (9)$$

式中： S 为控制棒位移； D 为绳轮直径； α 为减速箱减速比； n 为伺服电机转速。由上式可得，传动机构可等效为积分环节，其传递函数为：

$$G_{mc} = 1/s \quad (10)$$

5) 控制棒模型

由反应堆物理的基本原理可知，控制棒的反应性价值为一个 S 形曲线。MNSR 的控制棒价值通过零功率实验实际测量，并对测量值进行多项式拟合可得控制棒释放的反应性与控制棒位的关系为：

$$\rho(l) = -1 \times 10^{-9} l^4 + 2 \times 10^{-7} l^3 + 9 \times 10^{-5} l^2 + 2.6 \times 10^{-3} l + 0.1958 \quad (11)$$

综上分析，利用 Matlab 的 Simulink 工具箱，建立了 MNSR 控制系统仿真模型，如图 2 所示。

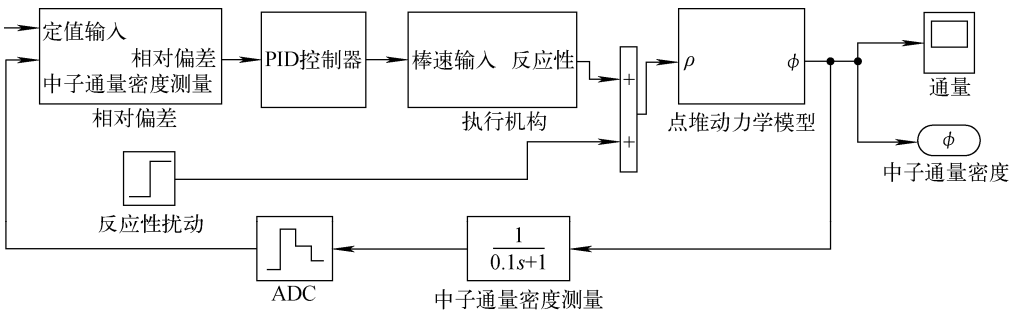


图 2 MNSR 闭环控制系统仿真模型

Fig. 2 Model of MNSR close loop control system

2 仿真分析

建立 Simulink 仿真模型后，对 MNSR 闭环控制系统进行了仿真分析^[4-6]，主要包括稳定性分析、PID 控制器参数整定分析和负阶跃反应性输入及斜坡反应性输入分析。

2.1 稳定性分析

在 MNSR 运行过程中，仅考虑中子通量密度平稳运行的因素，因此仅需估计系统增益和采样时间的大致范围，因此，在稳定性分析之前，仅需建立 MNSR 控制系统的简化模型。图 3 为 MNSR 控制系统简化模型原

理图。

简化后的闭环传递函数为：

$$C(s) = G_r(s)N(s)/(1 + G_r(s)H(s)) \quad (12)$$

式中： $H(s) = K_p G_d(s) G_m(s) K$ ，为反馈传递函数。对开环传递函数进行 Z 变换后得到离散开环传递函数：

$$G(z) = Z[G_d(s)G_m(s)K_R G_r(s)] \quad (13)$$

由于 $G_r(s)$ 的阶次很高，为分析带来很大麻烦，需对其进行降阶处理。利用 Matlab 的模型降阶工具箱，对 $G_r(s)$ 进行降阶，降阶后的传递函数为：

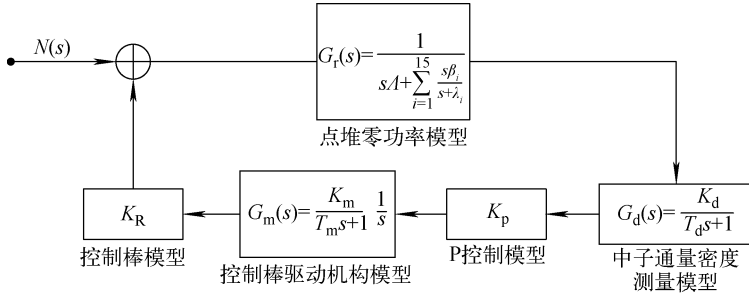


图3 MNSR 简化闭环控制系统原理图

Fig. 3 Diagram of simplified MNSR close loop control system

$$G'_r(s) =$$

$$\frac{1.533s^4 + 1.080s^3 + 479s^2 + 35.89s + 0.536}{s^4 + 61.02s^3 + 9.478s^2 - 0.1073s - 0.01072}$$

$$(14)$$

则离散后的传递函数为:

$$G'(z) = Z[G_d(s)G_m(s)K_R G'_r(s)] \quad (15)$$

对离散开环传递函数(式(15))使用 Matlab 的 rltool 工具后即可得到系统的根轨迹,如图 4 所示。

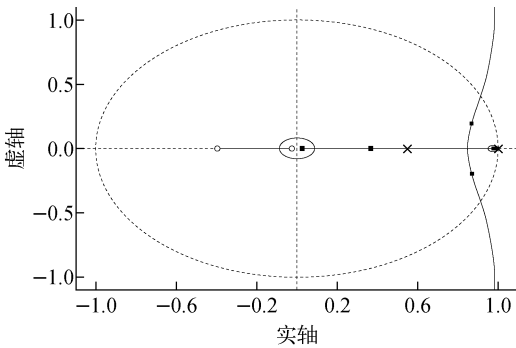


图4 采样时间为 60 ms 时 MNSR 离散系统的根轨迹
Fig. 4 Root locus of discrete system of MNSR at sampling time of 60 ms

利用根轨迹工具箱的编辑功能即可得到当前采样时间下的临界增益。表 1 列出不同采样时间下的临界增益。从表 1 可看到,随着采样时间的增加,临界增益减小,这说明,采样时间增加,增益的裕度越小,系统的稳定性越差。

2.2 PID 控制器参数整定

通过稳定性分析后,对系统的增益有了基本的认识,在此基础上,选取不同的采样时间 T_s ,对比例系数 K_p 进行整定^[7-10],整定的目标为 neutron flux density 的超调小于 8%,调整时间在

7 s 以内,最多出现 1 次振荡(这一要求比较适合 MNSR 的实际应用)。

表 1 采样时间与临界增益的关系

Table 1 Relationship between sampling time and critical gain

采样时间/ms	临界增益
100	1.031×10^5
60	1.215×10^5
50	1.275×10^5
10	1.602×10^5

综合考虑各种因素后,分别选择采样时间为 100 ms 和 60 ms 时,进行参数 K_p 和 K_d 的整定,经过多次的仿真整定后,确定了最佳的参数为 $T_s = 60$ ms、 $K_p = 2500$ 、 $K_d = 300$,该组参数兼顾了系统的快速性、超调量和电机寿命等因素。图 5 为稳态情况下 0.5 mk 阶跃反应性输入时 neutron flux density 的变化。

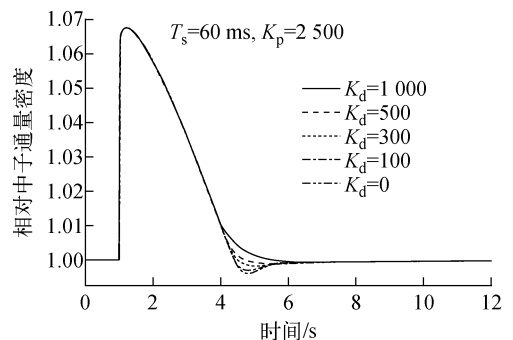


图5 0.5 mk 阶跃反应性输入时 neutron flux density 响应
Fig. 5 Neutron flux density response with 0.5 mk reactivity insertion

2.3 负阶跃反应性输入及斜坡反应性输入响应

系统整定完成后,分别进行了负阶跃反应性输入(这符合 MNSR 样品辐照时引入反应性的实际情况)和斜坡反应性输入(这符合 MN-SR 缓慢放入具有正反应性效应样品的实际情

况)响应^[11-15]。图 6 为 -0.5 mk 阶跃反应性输入的中子通量密度响应和 PID 控制器的输出及控制棒速度响应。

图 7 为斜坡反应性输入的中子通量密度响应和 PID 控制器的输出及控制棒速度响应。

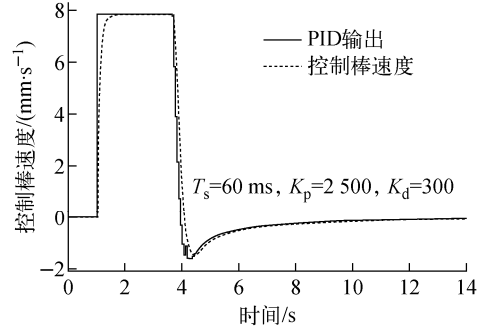
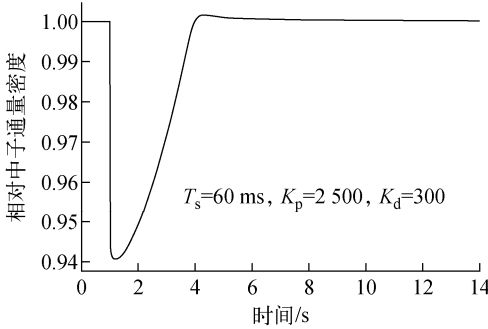


图 6 -0.5 mk 阶跃反应性输入时中子通量密度响应和 PID 控制器的输出及控制棒速度响应

Fig. 6 Responses of neutron flux density, PID controller output and control rod speed with -0.5 mk reactivity insertion

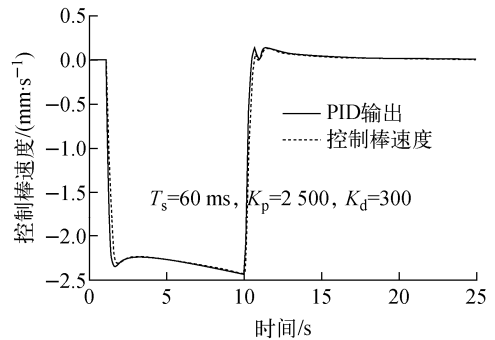
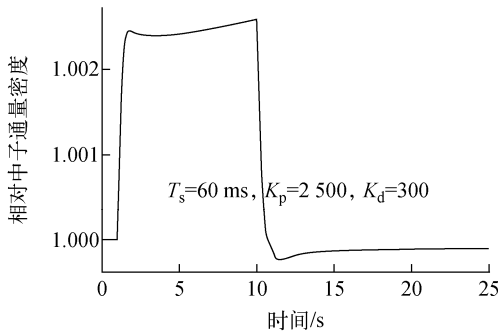


图 7 引入斜坡反应性时中子通量密度响应和 PID 控制器的输出及控制棒速度响应

Fig. 7 Responses of neutron flux density, PID controller output and control rod speed with ramp reactivity insertion

3 结论

在点堆动力学基础上建立反应堆堆芯物理的数学描述和闭环控制系统各部分数学描述,结合 Matlab/Simulink 仿真技术建立了 MNSR 堆芯物理的 Simulink 模型和 MNSR 闭环控制系统的模型。

对 MNSR 控制系统进行了线性化、降阶和离散化,建立了 MNSR 离散化的开环传递函数,并对传递函数采用根轨迹方法进行了稳定性分析,得到了不同采样时间下控制系统的临界增益。

在稳定性分析的基础上进行了 PID 控制

器参数的整定,得到了 1 组最佳整定参数 $T_s=60$ ms、 $K_p=2500$ 、 $K_d=300$ 时的仿真结果。在最佳整定参数下,分别仿真了负阶跃反应性输入和斜坡反应性输入响应。仿真结果表明,整定参数能满足 MNSR 运行要求。参数整定值及系统的仿真参数为 MNSR 控制系统的软硬件设计提供了理论基础和指导作用,能大幅降低 MNSR 控制系统的开发难度和减少开发周期,降低系统设计成本。

参考文献:

[1] 朱珈辰. 研究堆棒控系统数字化改造设计及仿

- 真研究[D]. 北京:中国原子能科学研究院, 2016.
- [2] 董化平,张建民,曾海,等. 中国先进研究堆功率调节系统的仿真研究及优化设计[J]. 核动力工程, 2007,27(5):106-110.
DONG Huaping, ZHANG Jianmin, ZENG Hai, et al. Simulation research and optimal design for digital power regulating system of China Advanced Research Reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 27(5): 106-110(in Chinese).
- [3] 刘冲. 核电站反应堆棒控棒位控制系统数字化软硬件设计及其可靠性研究[D]. 衡阳:南华大学, 2010.
- [4] 谢仲生,尹邦华,潘国品. 核反应堆物理分析[M]. 3版. 北京:原子能出版社,1994:34-37, 346-352.
- [5] 顾绳谷. 电机及拖动基础[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2000:201-208.
- [6] 王正林,王胜开,陈国顺,等. Matlab/Simulink 与控制系统仿真分析[M]. 4版. 北京:电子工业出版社,2017.
- [7] 于涛,邱小平,曹雷. 利用 SIMULINK 对反应堆堆芯控制系统动态仿真[J]. 南华大学学报:理工版, 2001,15(4):15-17.
YU Tao, QIU Xiaoping, CAO Lei. Dynamic simulation of reactor core control system using SIMULINK[J]. Journal of Nanhua University: Science & Engineering Edition, 2001, 15(4): 15-17(in Chinese).
- [8] 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[C]//北京核学会核技术应用学术交流会议. 北京:《原子能科学技术》编辑部,2008.
- [9] 何丽华,谢金森,刘紫静,等. PWR 堆芯动态特性的 SIMULINK 仿真计算及界面设计[J]. 新型工业化,2016, 6(7):17-21.
HE Lihua, XIE Jinsen, LIU Zijing, et al. The simulation calculation of PWR reactor core dynamic characteristics and interface design[J]. The Journal of New Industrialization, 2016, 6(7): 17-21(in Chinese).
- [10] 张倬,董化平,孙启航. 基于 Simulink 的核反应堆功率调节系统建模与仿真[J]. 科技视界,2014(6):28-30.
ZHANG Zhuo, DONG Huaping, SUN Qihang. Simulink-based modeling and simulation of nuclear reactor power regulation systems[J]. Science & Technology Vision, 2014(6): 28-30(in Chinese).
- [11] 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).
- [12] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 6版. 北京:科学出版社,2013:137-161.
- [13] 丁书灵,李富,李思凤,等. 反应堆系统数字化实时仿真的高效实现[J]. 原子能科学技术,2006, 40(4):424-428.
DING Shuling, LI Fu, LI Sifeng, et al. Real-time numerical simulation with high efficiency for an experimental reactor system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2006, 40(4): 424-428(in Chinese).
- [14] 谭金,黄岳峰,徐政. 基于 Matlab-Simulink 的详细核电机组数学模型研究[J]. 中国电力,2013(7):24-29.
TAN Jin, HUANG Yuefeng, XU Zheng. Study for a detailed nuclear power unit mathematical model based on Matlab-Simulink[J]. Electric Power, 2013(7): 24-29(in Chinese).
- [15] 张建民. 核反应堆控制[M]. 2版. 北京:中国原子能出版社,2016:11-33,77-81.