

# 基于模糊多模型的堆芯功率控制

曾文杰<sup>1,2</sup>, 姜庆丰<sup>1</sup>, 谢金森<sup>1,2</sup>, 于涛<sup>1,2,\*</sup>

(1. 南华大学核科学技术学院, 湖南衡阳 421001;

2. 南华大学核燃料循环技术与装备湖南省协同创新中心, 湖南衡阳 421001)

**摘要:**传统的堆芯功率 PID 控制器是基于单一功率水平处的堆芯局部模型设计的, 难以准确描述整个堆芯功率水平范围的控制。因此, 本文基于 5 个不同功率水平下的传递函数模型, 通过三角隶属度函数加权, 建立堆芯模糊多模型, 并依据该模型设计堆芯功率模糊 PID 控制。以 TMI 型压水堆堆芯为对象, 开展不同初始功率水平下的堆芯功率跟踪、堆芯进口温度扰动的控制仿真。结果表明, 基于模糊多模型设计的堆芯功率模糊 PID 控制器可实现对堆芯功率的良好控制。

**关键词:**模糊多模型; 堆芯功率控制; 模糊 PID 控制器

中图分类号: TL36

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)03-0464-06

doi: 10. 7538/yzk. 2019. youxian. 0254

## Core Power Control Based on Fuzzy Multi-model

ZENG Wenjie<sup>1,2</sup>, JIANG Qingfeng<sup>1</sup>, XIE Jinsen<sup>1,2</sup>, YU Tao<sup>1,2,\*</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. Cooperative Innovation Center for Nuclear Fuel Cycle Technology and Equipment,

University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** The traditional core power PID controller is designed based on a local core model at a single power level. It is difficult to accurately describe the control of the whole core power level range. Therefore, based on five transfer function models at different power levels, the core fuzzy multi-model was established by weighting the triangular membership function. According to the model, the core power fuzzy PID control was designed. Taking TMI PWR core as the object of study, the control simulations of core power tracking and temperature disturbance at core inlet at different initial power levels were carried out. The results show that the core power fuzzy PID controller based on the fuzzy multi-model design can achieve good control of the core power.

**Key words:** fuzzy multi-model; core power control; fuzzy PID controller

收稿日期: 2019-01-27; 修回日期: 2019-06-20

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年项目资助(18B259); 南华大学核燃料循环技术与装备湖南省协同创新中心开放基金资助项目(2019KFY12)

作者简介: 曾文杰(1988—), 男, 湖南衡阳人, 讲师, 硕士, 从事核反应堆运行与控制研究

\* 通信作者: 于涛, E-mail: yutao29@sina.com

网络出版时间: 2019-10-31; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20191031.1323.010.html>

核反应堆堆芯具有非线性、参数时变性和各种扰动的不确定性等特点,基于单一功率水平处的堆芯局部模型难以准确描述扰动工况下的堆芯功率控制过程。目前,PID 控制器因简单直观、容易实现,广泛用于堆芯功率控制。然而,传统 PID 控制器不具备参数的自适应功能,其控制参数一经取定,在堆芯功率变化过程中将不再改变,因此控制效果往往不太理想<sup>[1]</sup>。为使 PID 控制器达到更好的控制效果,出现了模糊 PID、内模 PID 等多种交叉形式的 PID 控制方法<sup>[2-4]</sup>。

本文基于堆芯非线性模型,利用微扰理论对堆芯非线性模型进行线性化,建立堆芯传递函数模型。并基于堆芯局部模型和三角隶属度函数,建立堆芯模糊多模型,与模糊 PID 控制器相结合,设计堆芯功率控制系统,实现对 PID 控制器控制参数的在线修正。以三哩岛(Three Mile Island, TMI)型压水堆堆芯为对象,在不同初始稳态功率水平下开展堆芯功率控制的仿真及分析。

## 1 堆芯模糊多模型建立

### 1.1 堆芯非线性模型

依据核反应堆点堆建模原理,不考虑碘氙等毒物效应,建立堆芯非线性模型。该模型包括点堆动力学模型、热工水力学模型和反应性模型<sup>[5-7]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dP_r}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} P_r + \frac{\beta}{\Lambda} c_r \\ \frac{dc_r}{dt} = \lambda P_r - \lambda c_r \\ \frac{dT_f}{dt} = \frac{f_i P_0 P_r}{\mu_f} - \frac{\Omega}{\mu_f} T_f + \frac{\Omega}{\mu_f} T_c \\ \frac{dT_c}{dt} = \frac{(1 - f_i) P_0 P_r}{\mu_c} + \frac{\Omega}{\mu_c} T_f - \frac{2M + \Omega}{\mu_c} T_c + \frac{2M}{\mu_c} T_{in} \\ \rho = \rho_{rod} + \alpha_f (T_f - T_{f0}) + \alpha_c (T_c - T_{c0}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_r$  为堆芯相对功率, $P_r = P/P_0$ , $P_0$  为堆芯稳态功率; $c_r$  为先驱核相对密度, $c_r = c/c_0$ , $c_0$  为稳态缓发中子先驱核密度; $\rho$  为引入堆芯的总反应性; $\beta$  为缓发中子总份额; $\lambda$  为缓发中子先驱核衰变常量; $\Lambda$  为堆内中子代时间;

$f_i$  为燃料产热总份额; $T_c$  为冷却剂平均温度; $T_f$  为燃料平均温度; $T_{in}$  为堆芯冷却剂进口温度; $\mu_f$  为燃料的总热容量; $\mu_c$  为冷却剂的总热容量; $\Omega$  为燃料和冷却剂间的换热系数; $M$  为质量流量热容量; $\alpha_f$  为燃料的多普勒系数; $\alpha_c$  为冷却剂温度反馈系数; $T_{f0}$ 、 $T_{c0}$  分别为稳态时刻堆芯燃料温度和堆芯冷却剂平均温度; $\rho_{rod}$  为控制棒引入的反应性。

### 1.2 堆芯传递函数模型

利用微扰理论<sup>[8-9]</sup>对堆芯非线性模型进行线性化处理,建立堆芯状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u} = [\delta\rho_{rod}, \delta T_{in}]^T$  为输入量; $\mathbf{y} = [\delta P_r, \delta T_c]^T$  为输出量; $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [\delta P_r, \delta c_r, \delta T_f, \delta T_c]^T$  为  $4 \times 1$  状态变量阵; $\mathbf{A}$  为  $4 \times 4$  系统矩阵; $\mathbf{B}$  为  $4 \times 2$  输入矩阵; $\mathbf{C}$  为  $2 \times 4$  输出矩阵; $\mathbf{D}$  为  $2 \times 2$  零矩阵。

$\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{D}$  的表达式为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\rho_0 - \beta}{\Lambda} & \frac{\beta}{\Lambda} & \frac{\alpha_f P_{r0}}{\Lambda} & \frac{\alpha_c P_{r0}}{\Lambda} \\ \lambda & -\lambda & 0 & 0 \\ \frac{f_i P_0}{\mu_f} & 0 & -\frac{\Omega}{\mu_f} & \frac{\Omega}{\mu_f} \\ \frac{(1 - f_i) P_0}{\mu_c} & 0 & \frac{\Omega}{\mu_c} & -\frac{2M + \Omega}{\mu_c} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{P_{r0}}{\Lambda} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2M}{\mu_c} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

利用状态空间与传递函数转换关系式,可得到传递函数矩阵(即双输入双输出系统)的表达式为:

$$\begin{bmatrix} \delta P_r \\ \delta T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{r,11} & G_{r,12} \\ G_{r,21} & G_{r,22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\rho_{rod} \\ \delta T_{in} \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 1.3 堆芯模糊多模型

上述所求得的堆芯传递函数模型,在整个堆芯运行范围内,均仅在一个小的功率区间内适用,当功率发生大范围变化时,适用性低。为建立适用整个功率运行范围内的模型,选择

20%FP(满功率)、40%FP、60%FP、80%FP、100%FP等5个功率水平下的线性模型  $G_{P_1}$ 、 $G_{P_2}$ 、 $G_{P_3}$ 、 $G_{P_4}$ 、 $G_{P_5}$  建立堆芯局部模型。利用三角形隶属函数求取在整个功率水平范围内的堆芯模糊多模型。在整个功率水平范围内的堆芯模糊多模型隶属函数如图1所示<sup>[10]</sup>。图1中,第*i*条规则的描述为: $Z_i$ :if  $P_r$  is  $M_i$  then  $y_{oi} = G_{P_i}$  ( $i=1, \dots, 5$ )。式中: $Z_i$ 为第*i*条模糊规则; $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ 和 $M_5$ 分别为功率水平20%FP、40%FP、60%FP、80%FP和100%FP处的模糊集; $G_{P_i}$ 为对应于模糊集 $M_i$ 的线性模型。 $\mu_{M_i}(P_r)$ 为 $P_r$ 隶属于 $M_i$ 时的隶属度,权重 $q_i$ 为:

$$q_i = \frac{\mu_{M_i}(P_r)}{\sum_{i=1}^5 \mu_{M_i}(P_r)} \quad P_r \in [0, 1], i = 1, \dots, 5 \quad (4)$$

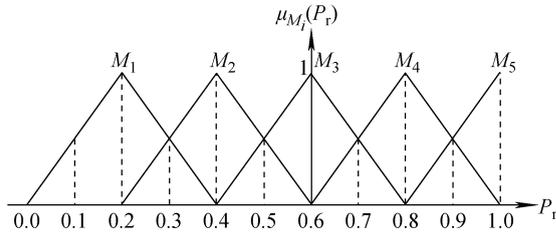


图1 三角隶属度函数

Fig. 1 Trigonometric membership function

因此,在整个功率水平范围内的堆芯模糊多模型表达式为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^5 q_i (\mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{y}(t) = \sum_{i=1}^5 q_i (\mathbf{C}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_i \mathbf{u}(t)) \end{cases} \quad (5)$$

## 2 堆芯功率控制

### 2.1 堆芯功率控制系统设计

1.2节中堆芯传递函数模型是双输入双输出的,虽然控制棒反应性和堆芯进口温度均是堆芯的输入量,但仅前者(即控制棒的反应性)为可控量,堆芯的进口温度不可控<sup>[11]</sup>。通过控制堆芯功率可实现对堆芯冷却剂平均温度的控制。因此可单独采用堆芯功率反馈控制,如图2所示。

### 2.2 堆芯功率控制系统开发

以TMI型压水堆堆芯为对象,其堆芯结构

参数列于表1<sup>[5-6]</sup>。

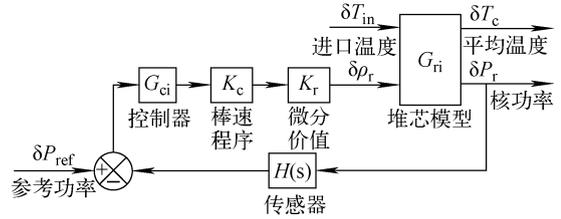


图2 基于核功率反馈控制的棒控系统

Fig. 2 Rod control system

based on nuclear power feedback control

表1 TMI型压水堆堆芯初始设计参数

Table 1 Initial design parameter for TMI PWR core

参数	初始设计值
额定热功率 $P$ , MW	2 500
堆芯冷却剂进口温度 $T_{in}$ , °C	290
堆芯燃料总热容量 $\mu_f$ , MW · s/°C	26.3
燃料产热总份额 $f_f$	0.92
缓发中子总份额 $\beta$	0.006 019
堆芯中子代时间 $\Lambda$ , s	0.000 02
缓发中子先驱核衰变常量 $\lambda$ , s <sup>-1</sup>	0.15

考虑到方程组中,参数 $P_{r0}$ 随着功率的变化而改变。当功率变化时,参数 $\alpha_f$ 、 $\alpha_c$ 、 $\mu_f$ 、 $\mu_c$ 、 $\Omega$ 与 $M$ 均会随着堆内温度的变化而改变<sup>[5-6]</sup>。

$$\mu_c(P_r) = \left( \frac{160}{9} P_r + 54.022 \right) \times 10^6 \quad (6)$$

$$\Omega(P_r) = \left( \frac{5}{3} P_r + 4.933 \right) \times 10^6 \quad (7)$$

$$M(P_r) = (28.0 P_r + 74.0) \times 10^6 \quad (8)$$

$$\alpha_f(P_r) = P_r - 4.24 \quad (9)$$

$$\alpha_c(P_r) = -4.0 P_r - 17.3 \quad (10)$$

通过将20%FP、40%FP、60%FP、80%FP、100%FP等5个不同堆芯功率水平处的传递函数模型以及对应功率下所设计的控制器进行三角隶属度加权整合,基于MATLAB/Simulink<sup>[12]</sup>开发堆芯功率控制系统,如图3所示。仿真系统通过设计参考功率、模糊PID控制器,实现了堆芯实际功率与参考功率的对比输出。

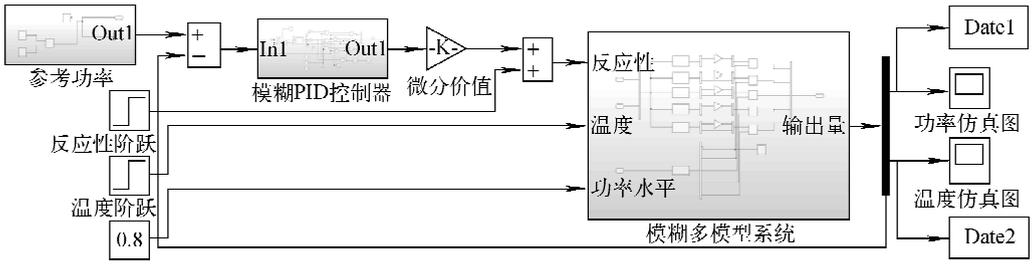


图3 基于模糊多模型的堆芯功率控制系统仿真框图

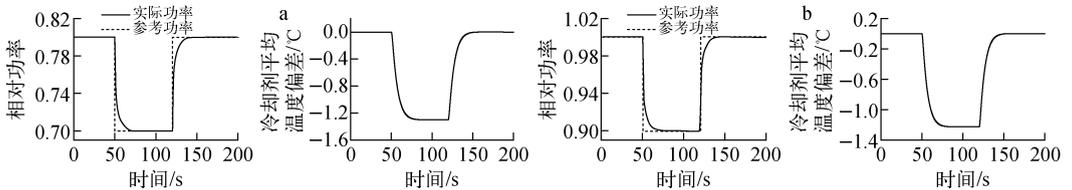
Fig. 3 Simulation block diagram of core power control system based on fuzzy multi-model

### 3 仿真结果及分析

在 80%FP、100%FP 两个初始稳态功率水平下,模拟在 50 s 以前,系统按初始稳态功率运行。在 50 s 时,堆芯功率水平阶跃下降 10%FP 并稳定运行 60 s 后阶跃恢复至原功率水平,仿真结果如图 4 所示。从图 4 可见,在不同初始功率水平下,堆芯功率发生 10%FP 的阶跃变化时,系统在模糊 PID 控制下可迅速做出反应,减小实际功率与参考功率之间的误差,此过程所消耗的时间较短。从温度变化图中可知,堆芯冷却剂平均温度偏差与堆芯相对功率同步变化,变化趋势相同,最大冷却剂平均温度

偏差均为  $-1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

在 30%FP 初始稳态功率水平下,模拟在 50 s 以前,系统按初始稳态功率运行。在 50 s 时,目标负荷以 5%FP/min 的速率线性上升 20%FP,然后,稳定运行 210 s 后,以 5%FP/min 的速率线性下降至稳态初始功率,仿真结果如图 5 所示。从图 5 可知,对系统进行堆芯功率追踪时,堆芯功率的运行参考值与堆芯功率模糊 PID 控制值相接近,未出现大的偏差。堆芯冷却剂平均温度偏差的变化与堆芯相对功率的变化同步。由此可见,模糊 PID 控制器可实现对堆芯功率的良好跟踪。



a——80%FP-70%FP-80%FP 功率变化 ;b——100%FP-90%FP-100%FP 功率变化

图4 80%FP、100%FP 堆芯功率水平下相对参考功率阶跃变化 10%FP 仿真结果

Fig. 4 Simulation result of relative reference power step change of 10%FP at 80%FP and 100%FP core power level

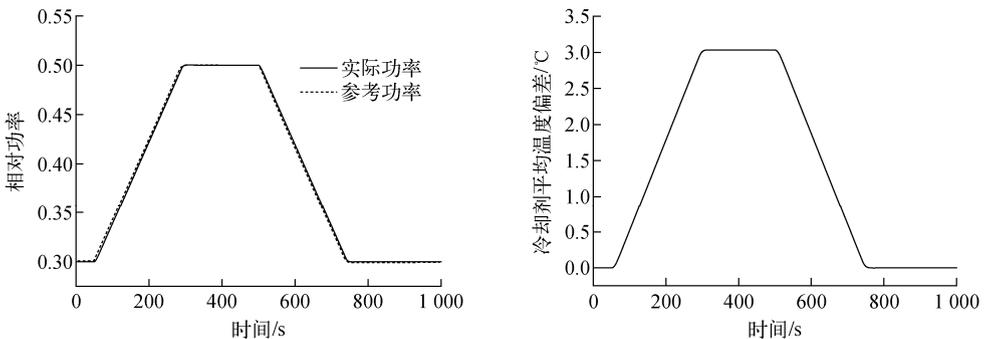


图5 30%FP 稳态初始功率水平下的功率跟踪响应

Fig. 5 Power tracking response at steady-state initial power level of 30%FP

在 100%FP 初始稳态功率水平下,模拟在 300 s 以前,系统按初始稳态功率运行。在 300 s 时,目标负荷以 15%FP/min 的速率线性下降 75%FP。然后,稳定运行。仿真结果如图 6 所示。从图 6 可知,即使加大功率线性变化速度,堆芯功率的运行参考值依旧与堆芯功率模糊 PID 控制值相接近,且堆芯冷却剂平均温度偏差与相对功率同步。由此可见,采用模糊 PID 进行不同初始稳态功率下的局部控制是可行的。

在 100%FP 功率水平下,引入堆芯冷却剂进口温度阶跃 2.5 °C 扰动时,得到如图 7 所示

的响应曲线。在 10 s 时刻,引入堆芯冷却剂进口温度阶跃扰动时,相对功率迅速下降,在模糊 PID 控制器作用下,堆芯相对功率缓慢上升,最后趋于稳定。从温度变化图中可知,温度变化趋势渐渐减小,最后趋于稳定。并且稳定值与引入堆芯冷却剂进口温度阶跃值相近。这是由于经过一段时间后,系统产生的反应性反馈抵消引入堆芯进口温度阶跃扰动对功率的影响,堆芯功率水平最终回到初始稳态水平,系统达到能量平衡。此时,堆芯冷却剂出口温度与堆芯冷却剂进口温度的变化相同。

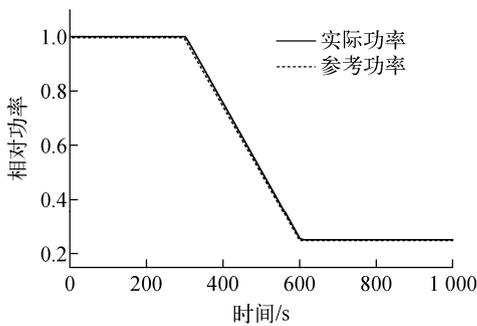
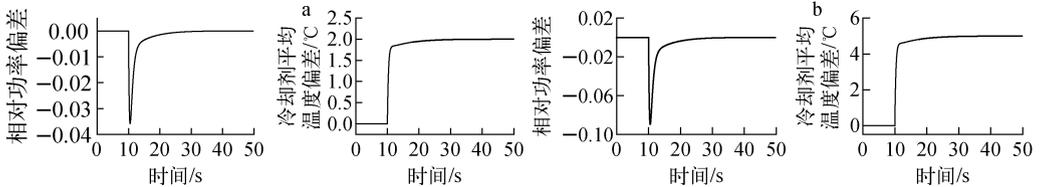
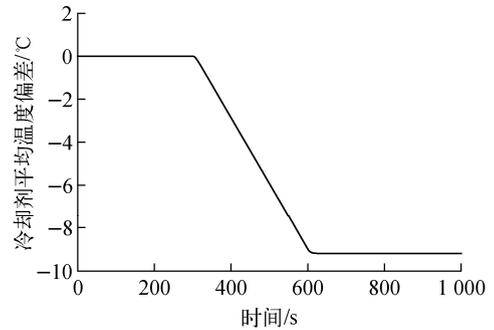


图 6 100%FP 稳态初始功率水平下的功率跟踪响应

Fig. 6 Power tracking response at steady-state initial power level of 100%FP



a——2 °C 堆芯进口温度阶跃扰动;b——5 °C 堆芯进口温度阶跃扰动

图 7 100%FP 稳态初始功率下的堆芯进口温度扰动响应

Fig. 7 Response of core inlet temperature perturbation at steady-state initial power of 100%FP

## 4 结语

基于堆芯模糊多模型设计堆芯功率模糊 PID 控制器,在 MATLAB/Simulink 中建立了堆芯功率控制系统,实现了堆芯功率局部变化及大范围变化下的控制。以 TMI 型压水堆堆芯为对象,开展了堆芯功率跟踪、堆芯进口温度扰动仿真分析,表明采用模糊 PID 控制器可很好地实现堆芯功率控制。

## 参考文献:

[1] 王国旭. 压水堆核电站负荷跟踪控制[D]. 广东:

华南理工大学,2018.

[2] 吴萍,刘涤尘,赵洁,等. 基于模糊自适应 PID 控制的压水堆负荷跟踪[J]. 电网技术,2011,35(4):76-81.

WU Ping, LIU Dichen, ZHAO Jie, et al. Fuzzy adaptive PID control-based load following of pressurized water reactor[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 76-81(in Chinese).

[3] 朱雪耀,赵福宇,万百五. 压水堆负荷跟踪的模糊控制系统[J]. 核动力工程,1998,19(5):456-460.

ZHU Xueyao, ZHAO Fuyu, WAN Baiwu.

- Fuzzy logic control for PWR load-follow[J]. Nuclear Power Engineering, 1998, 19(5): 456-460 (in Chinese).
- [4] 王佳伟,杨亚非,钱玉恒,等. 基于内模控制的工业控制系统仿真器鲁棒PID控制器设计[J]. 实验技术与管理,2015,32(1):120-123.  
WANG Jiawei, YANG Yafei, QIAN Yuheng, et al. Design of robust PID controller for industrial control system emulator based on internal model control[J]. Experimental Technology and Management, 2015, 32(1): 120-123(in Chinese).
- [5] KHAJAVI M N, MENHAJ M B, SURATGAR A A. A neural network controller for load following operation of nuclear reactors[J]. Annals of Nuclear Energy, 2002, 29: 751-760.
- [6] SIMA S K, MEHRDAD B, CARO L. Emotional learning based intelligent controller for a PWR nuclear reactor core during load following operation[J]. Annals of Nuclear Energy, 2008, 35: 2 051-2 058.
- [7] 袁建东. 一体化压水堆功率控制系统建模与控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2004.
- [8] 张建民,姜晶. 核反应堆控制[M]. 北京:原子能出版社,2009.
- [9] 王立军. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [10] 李罡,赵福宇,刘洋. 压水堆堆芯非线性系统的全局稳定性分析[J]. 原子能科学技术,2013,47(2):271-276.  
LI Gang, ZHAO Fuyu, LIU Yang. Global stability analysis of pressurized water reactor core nonlinear system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(2): 271-276(in Chinese).
- [11] 廖龙涛,王鹏飞. 小型压水堆功率多模型内模鲁棒控制研究[J]. 自动化与仪表,2018,33(11): 76-79.  
LIAO Longtao, WANG Pengfei. Study of multi-model internal model robust control for a small pressurized water reactor core[J]. Automation & Instrumentation, 2018, 33(11): 76-79(in Chinese).
- [12] 薛定宇,陈阳泉. 基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2011.