

压水堆功率跟踪自适应保性能控制器设计

王俊玲[†], 李翠莹, 栾秀春, 杨志达, 周杰

(哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对压水堆动态模型的高度非线性和不确定性特点, 本文提出一种自适应保性能跟踪控制器(adaptive guaranteed cost control, AGCC)设计方法. 首先以堆芯的点堆方程为基础, 引入功率跟踪误差的积分项, 构造反应堆的增广状态空间模型, 再结合线性参数变化(linear parameter varying, LPV)理论, 建立了堆芯系统的多胞LPV模型. 该控制器的控制输入由状态反馈控制和不确定性补偿组成, 结合保性能控制理论和多胞模型理论, 求解线性矩阵不等式得到变增益状态反馈矩阵, 确保闭环系统全局渐近稳定; 利用李亚普诺夫稳定理论得到不确定性参数的自适应律, 实现对系统不确定性的动态补偿. 仿真结果表明, 该控制器不仅对系统不确定项具有自适应性, 而且有良好的负荷跟踪性能.

关键词: 自适应控制; 保性能控制; 线性矩阵不等式; 多胞线性参数变化模型

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Load-following adaptive guaranteed cost control of pressurized water reactors

WANG Jun-ling[†], LI Cui-ying, LUAN Xiu-chun, YANG Zhi-da, ZHOU Jie

(Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory,
Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Due to the pressurized water reactor (PWR) has the features of highly nonlinearity and uncertainty, an adaptive guaranteed cost controller for load-following is proposed in this paper. At first, on the basis of the point reactor model and the introduction of an integral item of the power level error, the augmented state space model of the reactor system is derived. Then the polytopic linear parameter varying (LPV) model is established combining with the LPV theory. The control input generated by the proposed controller is constituted by the state feedback control and the uncertainty compensation. By polytopic model theory and linear matrix inequality techniques, a gain-scheduled state feedback controller which provides globally asymptotic closed-loop stability is designed. Utilizing the Lyapunov theory and guaranteed cost control theory, an adaptive control law for uncertainty is developed. Numerical simulation results illustrate the high control performance of the proposed method in load-following operation.

Key words: adaptive control; guaranteed cost control; linear matrix inequality; polytopic LPV model

1 引言(Introduction)

反应堆的功率控制是保证核电站安全运行的关键技术之一. 功率控制的目标是使堆芯输出功率渐近跟踪目标信号, 且跟踪误差有界. 堆芯系统具有参数不确定、高度非线性等特点, 且系统模型存在未建模动态及外界干扰等不确定性因素, 因此堆芯功率控制器的设计具有一定的难度. 在该领域, 已有多种控制策略被提出并得到验证. 文献[1-2]提出了一种经典状态反馈辅助控制方法, 控制输入为状态反馈信号与前馈信号之和, 仿真结果表明, 该控制器可以保证系统稳定且跟踪目标信号, 但是该控制方法以特定初始功

率点处的近似线性化模型为研究对象, 且未考虑系统不确定性, 无法适应不同的初始工况, 因此, 该方法具有一定的局限性. 文献[3]提出了基于自适应价值函数的最优控制, 该方法针对不同工况下对燃料温度及冷却剂温度的不同要求, 采用对初始工况自适应的可变价值函数, 提高了温度的控制性能. 这两种方法都未采用误差信号, 文献[4]提出了跟踪保性能控制器设计方法, 仿真结果表明, 该控制器可以实现目标跟踪, 但是该方法需要提供所有状态变量的目标信号, 不适用于堆芯功率控制领域. 文献[5]直接针对非线性的堆芯系统, 提出了自适应跟踪控制方法, 该方法利用Lyap-

unov函数设计控制律, 对系统不确定性干扰进行在线补偿, 不仅保证系统全局渐近稳定性, 且跟踪误差较小, 但是该控制律呈非线性, 包含的反馈信息复杂, 不利于实际应用. 文献[6]设计了自适应模糊控制器, 利用自适应控制理论设计模糊隶属度函数, 使其可以随跟踪误差进行实时在线调整, 从而保证系统的跟踪性能.

综合保性能控制和自适应控制的特点, 本文提出一种自适应保性能控制器的设计方法, 该方法基于保性能控制理论设计控制器, 该控制器的状态反馈矩阵可以实现随初始工况的变化而变化, 具有可变增益状态反馈矩阵, 从而实现负荷跟踪; 通过自适应控制对系统不确定性进行在线补偿, 使该控制器不仅保证系统全局渐近稳定性, 而且使输出功率渐近跟踪期望值.

2 堆芯多胞线性参数变化模型(Polytopic linear parameter-varying model of reactor core)

反应堆堆芯动态特性通过一组非线性方程来表述, 该方程组由中子动力学方程和热工水力学方程构成. 构建数学模型时, 考虑到由燃料温度变化和冷却剂温度变化所引入的温度反馈效应, 且用1组等价的缓发中子方程替代6组缓发中子方程, 得到堆芯非线性动态模型^[7]:

$$\begin{cases} \dot{n}_r = -\frac{\beta}{\Lambda}n_r + \frac{\beta}{\Lambda}c_r + \frac{n_r}{\Lambda}[\alpha_f T_f + \frac{\alpha_c}{2}T_o + \rho_r], \\ \dot{c}_r = \lambda(n_r - c_r), \\ \dot{T}_f = \frac{\varepsilon_f P_0}{\mu_f}n_r - \frac{\Omega}{\mu_f}T_f + \frac{\Omega}{2\mu_f}(T_o + T_e), \\ \dot{T}_o = \frac{(1-\varepsilon_f)P_0}{\mu_c}n_r + \frac{\Omega}{\mu_c}T_f - \frac{2M + \Omega}{2\mu_c}(T_o + T_e), \\ \dot{\rho}_r = G_r Z_r, \end{cases} \quad (1)$$

式中各变量的含义见表1.

定义变量的当前值与其初始稳态值的偏差如下:

$$\begin{aligned} \delta n_r &= n_r - n_{r0}, \quad \delta c_r = c_r - c_{r0}, \\ \delta T_f &= T_f - T_{f0}, \quad \delta T_o = T_o - T_{o0}, \\ \delta T_e &= T_e - T_{e0}, \end{aligned}$$

需要注意的是, 可将变量 δT_e 视为外界干扰项, 且堆芯模型中存在高阶小项以及未建模动态, 以上因素构成了堆芯动态方程的不确定性. 考虑到以上因素, 定义 $\sigma_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 代表系统的不确定性, 建立堆芯包含不确定性的状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 x + B_1 u + \sigma_z, \\ y = C_1 x, \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T = [\delta n_r \ \delta c_r \ \delta T_f \ \delta T_o \ \delta \rho_r]^T,$$

$$u = Z_r, \quad \sigma_z = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4 \ 0]^T,$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\beta}{\Lambda} & \frac{\beta}{\Lambda} & \frac{n_{r0}\alpha_f}{\Lambda} & \frac{n_{r0}\alpha_c}{2\Lambda} & \frac{n_{r0}}{\Lambda} \\ \lambda & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\varepsilon_f P_0}{\mu_f} & 0 & -\frac{\Omega}{\mu_f} & \frac{\Omega}{\mu_f} & 0 \\ \frac{(1-\varepsilon_f)P_0}{\mu_c} & \frac{\Omega}{\mu_c} & -\frac{2M + \Omega}{2\mu_c} & 0 & 0 \\ \mu_c & \mu_c & \mu_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ G_r]^T, \quad C_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

表1 参数的物理含义

Table 1 Nomenclature

参数	物理含义
n_r	$= n/n_{r0}$, 相对中子密度
n	堆芯中子密度
n_0	初始稳态下的中子密度
c_r	$= c/c_0$, 相对缓发中子先驱核浓度
c	堆芯缓发中子先驱核浓度
c_0	初始稳态下的缓发中子先驱核浓度
T_f	反应堆燃料平均温度(°C)
T_o	反应堆出口冷却剂温度(°C)
T_e	反应堆进口冷却剂温度(°C)
ρ_r	由控制棒引入的反应性
β	缓发中子裂变份额
λ	等效缓发中子先驱核放射性衰变常数
Λ	瞬发中子代时间(1/s)
α_f	燃料温度反馈系数(1/°C)
α_c	冷却剂温度反馈系数(1/°C)
ε_f	反应堆功率释放到燃料元件中的份额
P_0	反应堆热功率(MW)
μ_f	燃料元件的总热容(MWs/°C)
μ_c	冷却剂的总热容(MWs/°C)
Ω	燃料元件和冷却剂间的传热系数(MWs/°C)
M	冷却剂质量流量与热容的乘积(MW/°C)
G_r	控制棒的反应性微分价值
Z_r	控制棒棒速

本文引进跟踪变量:

$$l = \int_0^\infty (y_r - y)dt, \quad (3)$$

式中: y_r 为功率变化量的期望值; y 为系统功率输出值.

定义新增状态变量 $x_6 = l$, 构造方程(2)增广形式的状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = A\zeta + Bu + Dy_r + \sigma, \\ y = C\zeta, \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\zeta = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T, \quad \sigma = [\sigma_z \ 0]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ E & 0 \end{bmatrix}, \quad E = [-1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$B = [B_1 \ 0]^T, C = [C_1 \ 0], D = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

方程(4)的系数矩阵A中依赖于参数 n_{r0} 的非线性项有 $a_{13} = n_{r0}\alpha_f/\Lambda$, $a_{14} = n_{r0}\alpha_c/2\Lambda$, $a_{43} = \Omega/\mu_c$, $a_{41} = (1 - \varepsilon_f)P_0/\mu_c$, $a_{44} = -(2M + \Omega)/\mu_c$, 这对控制器的求解造成一定的困难, 本文结合线性参数变化(linear parameter-varying, LPV)理论和多胞模型理论, 可将非线性系统(4)转化为线性系统, 用于控制器的设计. 根据非线性参数随 n_{r0} 的变化趋势, 本文将堆芯初始功率 $n_{r0} \in (0, 1]$ 划分为5段:

$$\begin{aligned} 0.01 \leq n_{r0} \leq 0.25, & \quad 0.25 < n_{r0} \leq 0.35, \\ 0.35 < n_{r0} \leq 0.5, & \quad 0.5 < n_{r0} \leq 0.75, \\ 0.75 < n_{r0} \leq 1, & \end{aligned}$$

取各功率段的端点为多胞模型的顶点, 则各功率段内矩阵A的多胞形式为

$$A(n_{r0}) = \sum_{i=1}^2 \eta_i A_i, \tag{5}$$

式中: A_1, A_2 为端点处的系数矩阵,

$$\eta_i \geq 0 (i = 1, 2), \quad \eta_1 + \eta_2 = 1. \tag{6}$$

将式(5)-(6)代入式(4)中, 得到堆芯增广形式的多胞LPV模型:

$$\dot{\zeta} = A(n_{r0})\zeta + Bu + Dy_r + \sigma. \tag{7}$$

3 保性能控制律设计(Guaranteed cost control law design)

本文基于增广模型(7)设计控制器, 该控制器利用保性能控制理论与自适应控制理论分别设计控制律, 使得堆芯系统不仅对不确定性具有自适应性, 保证堆芯闭环系统渐进稳定, 且满足不同功率段内的负荷跟踪目标, 堆芯闭环系统控制框图如图1所示.

图1中, $K(n_{r0})$ 为适当维数的状态反馈矩阵, 且随参数 n_{r0} 变化; 控制输入 u 具有如下形式:

$$u = u_f + u_a, \tag{8}$$

式中: u_a 表示自适应控制输入, 实现对系统不确定性的补偿; $u_f = K(n_{r0})\zeta$ 是基于保性能控制理论设计的变增益状态反馈控制律, 使得闭环性能指标值满足 $J \leq J^*$, J^* 称为系统(7)的一个性能上界, J 为二次

型性能指标:

$$J = \int_0^\infty [\zeta^T(t)Q\zeta(t) + u^T(t)Ru(t)]dt, \tag{9}$$

其中: Q 和 R 是给定的对称正定加权矩阵, Q 的形式为 $Q = \text{diag}\{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\}$, R 为给定正常数.

假设方程(7)中 $y_r = 0$, 在不考虑系统不确定性的情况下, 得到如下方程:

$$\dot{\zeta} = A(n_{r0})\zeta + Bu. \tag{10}$$

本节基于线性矩阵不等式处理方法, 对系统(10)设计状态反馈保性能跟踪控制律, 实现对目标信号的跟踪.

引理 1^[8] 对系统(10)和性能指标(9), 如果存在矩阵 W 和对称正定矩阵 X , 使得矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} (AX + BW)_s & X & W^T \\ X & -Q^{-1} & 0 \\ W & 0 & -R^{-1} \end{bmatrix} < 0 \tag{11}$$

有解(W, X), 则 $u = WX^{-1}\zeta$ 是系统(10)的一个状态反馈保性能跟踪控制律.

根据引理1, 在每一功率段内为系统(10)设计随参数 n_{r0} 变化的多胞状态反馈跟踪控制律:

$$u_f = K(n_{r0})\zeta, \tag{12}$$

式中: $K(n_{r0}) = \eta_1 K_1 + \eta_2 K_2$, K_1 和 K_2 为胞体顶点处的状态反馈增益矩阵. 由系统(10)与控制器(12)组成的闭环系统为

$$\dot{\zeta} = [A(n_{r0}) + BK(n_{r0})]\zeta. \tag{13}$$

定理 1 对系统(10), 若存在对称正定矩阵 X 和矩阵 W_i , 满足如下线性矩阵不等式组:

$$\begin{bmatrix} (A_i X + BW_i)_s & X & W_i^T \\ X & -Q^{-1} & 0 \\ W_i & 0 & -R^{-1} \end{bmatrix} < 0, \tag{14}$$

则存在形式如式(12)的状态反馈控制器, 使得闭环系统(13)渐进稳定. 其中: $i = 1, 2$, $K_i = W_i X^{-1}$, 为某一功率段上多胞顶点处的状态反馈矩阵.

证 令 $W = \eta_1 W_1 + \eta_2 W_2$, 代入矩阵不等式(11)中, 即得证.

对各功率段选取相同的矩阵 Q 和 R , 利用MATLAB/LMI工具箱中的mincx函数求解矩阵不等式(14).

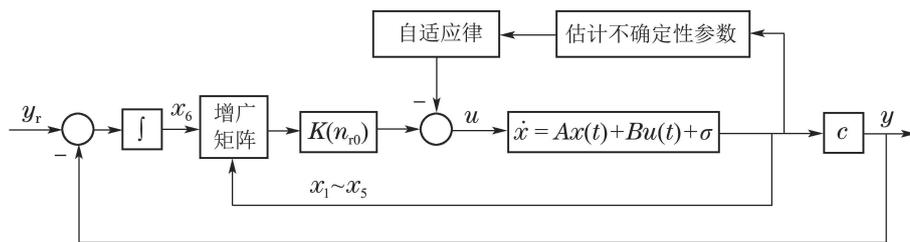


图1 堆芯自适应保性能控制系统框图

Fig. 1 Adaptive guaranteed cost control system for PWR

4 自适应控制律设计(Adaptive control law design)

本节在保性能状态反馈律已知的条件下, 推导自适应控制律, 自适应控制的目的是实现对系统不确定性的补偿, 使得堆芯系统具有鲁棒稳定性. 首先, 设计不确定参数的估计函数, 实现不确定参数的在线估计, 并确保估计误差渐进收敛; 其次, 设计自适应控制律, 实现不确定性在线补偿, 使得系统对规定范数的不确定干扰具有自适应性.

系统存在未建模动态、外界扰动等因素, 这造成了系统的不确定性. 假设系统的不确定性具有如下形式:

$$\sigma = \theta^T G(x), \quad (15)$$

式中:

$$\theta = \text{diag}\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6\},$$

$$G(x) = [g_1(x) \ g_2(x) \ g_3(x) \ g_4(x) \ g_5(x) \ g_6(x)]^T,$$

其中: $\theta_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 是未知常数, $g_i(x)$ 是已知缓慢变化的标量函数, 且满足 $\|g_i(x)\| \leq 1$. 将控制输入式(12)和式(15)代入系统(10), 设计控制器时, 由于信号 y_r 较小, 为简化系统模型, 可将模型(4)中的 y_r 视为零, 得闭环系统状态方程,

$$\dot{\zeta} = [A(n_{r0}) + BK(n_{r0})]\zeta - Bu_a + \theta^T G. \quad (16)$$

设未知参数 θ_i 的估计值为 $\hat{\theta}_i$, 估计值与实际值之间的误差为

$$\tilde{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (17)$$

选取Lyapunov候选函数

$$V(\zeta, \tilde{\theta}) = \zeta^T P \zeta + \sum_{i=1}^6 \frac{\gamma_i \tilde{\theta}_i^2}{2}, \quad (18)$$

其中: $P = X^{-1}$ 为对称正定矩阵, γ_i 是给定的正常数, 将式(18)对时间求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \zeta^T [P(A + BK) + (A + BK)^T P] \zeta + \\ & 2(-Bu_a + \theta^T G)^T P \zeta + \sum_{i=1}^6 \gamma_i \tilde{\theta}_i \dot{\tilde{\theta}}_i, \end{aligned} \quad (19)$$

由于式(19)中 $\theta_5 = \theta_6 = 0$, $g_5 = g_6 = 0$, 式(19)可写为

$$\dot{V} = L + 2\omega P \zeta + \sum_{i=1}^4 \gamma_i \tilde{\theta}_i \dot{\tilde{\theta}}_i, \quad (20)$$

其中:

$$\begin{aligned} L = & [P(A + BK) + (A + BK)^T P] \zeta, \\ \omega = & [g_1 \theta_1 \ g_2 \theta_2 \ g_3 \theta_3 \ g_4 \theta_4 \ -G_r u_a \ 0]^T. \end{aligned}$$

定义 p_i 为矩阵 P 的第 i 行向量元素, 式(20)可写为

$$\dot{V} = L + 2 \sum_{i=1}^4 \theta_i g_i p_i \zeta - 2G_r u_a p_5 \zeta + \sum_{i=1}^4 \gamma_i \tilde{\theta}_i \dot{\tilde{\theta}}_i. \quad (21)$$

取自适应控制律为

$$u_a = \sum_{i=1}^4 g_i \hat{\theta}_i p_i \zeta (G_r p_5 \zeta)^{-1}. \quad (22)$$

将式(22)代入式(21), 得

$$\dot{V} = L + \sum_{i=1}^4 \tilde{\theta}_i (2g_i p_i \zeta + \gamma_i \dot{\tilde{\theta}}_i). \quad (23)$$

假设 $\dot{\theta}_i \approx 0$, 则 $\dot{\tilde{\theta}}_i \approx -\dot{\hat{\theta}}_i$, 若不确定性参数估计为

$$\dot{\hat{\theta}}_i = -2g_i p_i \zeta / \gamma_i. \quad (24)$$

将式(24)代入式(23), 得

$$\dot{V} = L < 0. \quad (25)$$

式(25)表明, 由式(24)和式(22)组成的自适应控制律可以实现对系统不确定性的补偿; 同时自适应控制律(22)和状态反馈控制律(12), 可以保证系统全局渐近稳定性. 不确定性参数的估计依赖于矩阵 P 和 γ_i 的取值, 矩阵 P 通过定理1求得, γ_i 是给定的适当常数.

5 仿真验证及分析(Simulation verification and analysis)

本文基于MATLAB/Simulink平台, 以包含不确定性的非线性点堆模型为研究对象, 分别在两种工况下, 将本文所设计的控制器与自适应模糊跟踪控制器(adaptive fuzzy controller)的控制性能进行对比, 仿真结果如图2-5所示.

工况A(阶跃输入): 初始功率为90%相对额定功率(relative full power, RFP), 在100 s开始功率跃迁至100%RFP, 随后稳定在该功率水平上, 仿真时间为300 s; 工况B(斜坡输入): 初始功率为90%RFP, 在100 s开始以5%RFP/min的速率提升功率至100%RFP, 随后稳定在该功率水平上, 仿真时间为300 s.

图2-3为工况A条件下, 自适应保性能控制器与自适应模糊控制器的控制性能对比. 仿真结果表明, 当目标功率为阶跃信号时, 自适应保性能控制器(adaptive guaranteed cost controller, AGCC)与自适应模糊控制器相比, 功率输出具有较长的调节时间, 不存在超调量, 且功率变化平缓, 在功率突变的过程中, AGCC的控制输入即控制棒速度远小于自适应模糊控制器的控制棒速度, 更符合控制棒驱动机构的运行规程^[9].

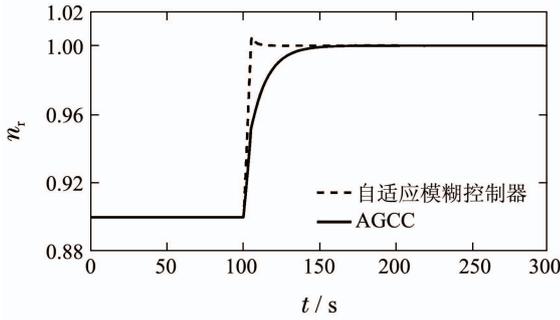


图2 工况A条件下堆芯功率响应

Fig. 2 Reactor power response for case A

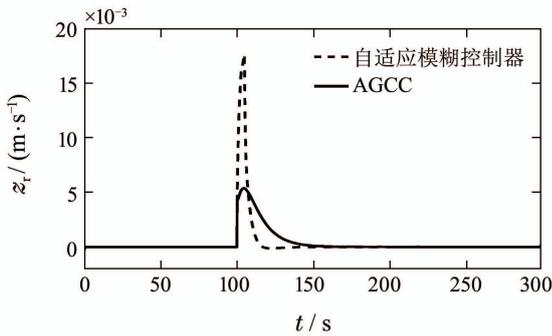


图3 工况A条件下控制棒速度响应

Fig. 3 Control rod speed response for case A

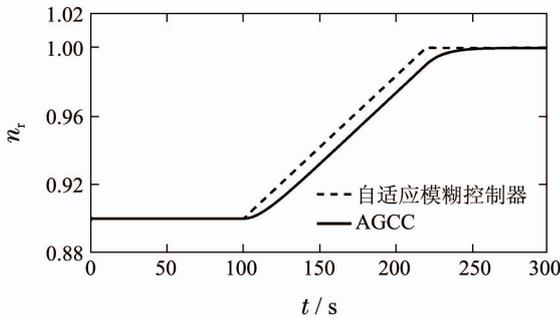


图4 工况B条件下堆芯功率响应

Fig. 4 Reactor power response for case B

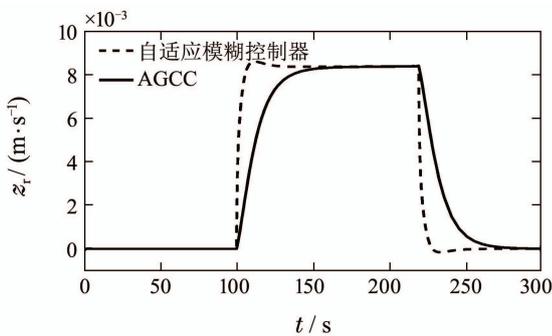


图5 工况B条件下控制棒速度响应

Fig. 5 Control rod speed response for case B

图4-5为工况B条件下,两种控制器的控制性能对比.该工况下系统输出功率的目标值与初始值处于同一功率段内,且系统输出稳定,这表明闭环系统有较好的稳定性,保证了同一功率段内的目标跟

踪性能.当系统处于稳态运行工况下时,由于系统中存在不确定项,对系统的稳态值有一定的扰动,控制器需要产生相应的控制输入来补偿这一扰动,这引起控制棒速度抖动.仿真过程中发现,权系数矩阵 Q 中 q_6 的取值影响功率输出曲线,而自适应控制律参数 γ_4 对控制棒速度的稳态值有较大影响,由于假设不确定性参数变化率 $\dot{\theta}_i$ 接近于零,其估计值 $\hat{\theta}_i$ 不宜过大,因此 γ_i 取值较大.

为了研究 Q , γ_4 值对控制性能的影响,本文取

$$R = 0.2, q_1 = 0.1, q_2 = 0.1, q_3 = 0.1, \\ q_4 = 20, q_5 = 200, \gamma_1 = 0.5 \times 10^5, \\ \gamma_2 = 0.5 \times 10^6, \gamma_3 = 1.0 \times 10^7.$$

分别选择3组 q_6 值和3组 γ_4 值,在工况C(初始功率为20%RFP,在100 s开始以5%RFP/min的速率提升功率至30%RFP)的条件下进行仿真,其结果见图6-8.

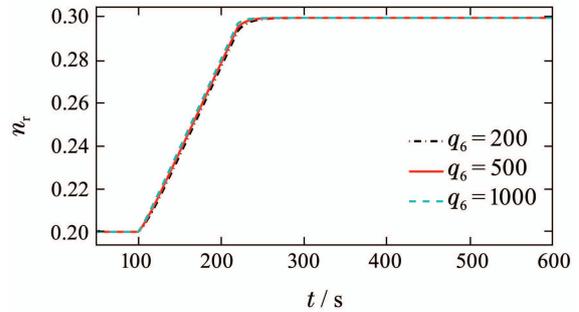


图6 Q取值对输出功率的影响全局图

Fig. 6 The global influence of parameter Q on output power

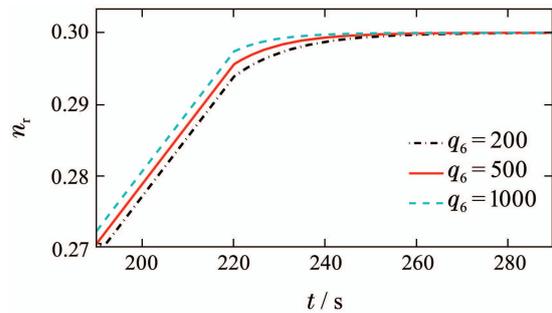


图7 Q取值对输出功率的影响局部放大图

Fig. 7 The detail influence of parameter Q on output power

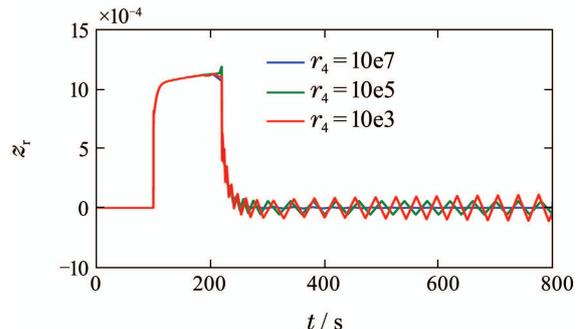


图8 γ_4 取值对控制棒速度的影响

Fig. 8 The influence of parameter γ_4 on control rod speed

图6-7表明 q_6 的取值越大, 系统输出响应时间越短、跟踪精度越高; 图8中 r_4 为参数 γ_4 , 图8表明 γ_4 值越大控制棒稳态值抖动幅度越小。

6 结论(Conclusions)

本文考虑到堆芯系统的不确定性, 以点堆模型为研究对象, 设计了自适应保性能控制器。利用线性矩阵不等式理论设计了保性能控制律, 满足性能指标最小, 确保闭环系统稳定性并实现负荷跟踪; 针对系统的不确定性干扰设计自适应控制律, 以补偿系统不确定性。仿真结果表明, 该控制器在高功率段和低功率段都有较好的负荷跟踪性能。

参考文献(References):

- [1] EDWARDS R M, LEE K Y, SCHLTZ M A. State feedback assisted classical control: an incremental approach to control modernization of existing and future nuclear reactors and power plants [J]. *Nuclear Technology*, 1990, 92(1): 167 – 185.
- [2] ZHAO W N. *Research on fuzzy optimal control system of the nuclear reactor power* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [3] ARAB-ALIBEIK H, SETAYESH S. An adaptive-cost-function optimal controller design for a PWR nuclear reactor [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2002, 30(2): 739 – 754.
- [4] XU J S, WANG Y J. Missile attitude tracking guaranteed cost control under input constrain [J]. *Modern Defence Technology*, 2007, 35(4): 1 – 5.
- [5] DONG Z. Nonlinear adaptive power-level control for modular high temperature gas-cooled reactors [J]. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 2013, 60(2): 1332 – 1342.
- [6] ERICK R R, JORGE B R. A stable adaptive fuzzy control scheme for tracking an optimal power profile in a research nuclear reactor [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, 58(8): 238 – 245.
- [7] ARAB-ALIBEIK H, SETAYESH S. Adaptive control of a PWR core power using neural networks [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2005, 32(6): 588 – 605.
- [8] YU Li. *Robust Control—Linear Matrix Inequality Approach* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
(俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.)
- [9] OUYANG Yu. *Qinshan Nuclear Power Engineering* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000.
(欧阳予. 秦山核电工程 [M]. 北京: 原子能出版社, 2000.)

作者简介:

王俊玲 (1968–), 女, 教授, 目前研究方向为核反应堆动力装置性能与测试, E-mail: wangjunling@hrbeu.edu.cn;

李翠莹 (1989–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为核反应堆动力装置性能与测试, E-mail: licuiying@hrbeu.edu.cn;

栾秀春 (1975–), 男, 副教授, 目前研究方向为核反应堆动力装置性能与测试, E-mail: luanxiuchun@hrbeu.edu.cn;

杨志达 (1978–), 男, 讲师, 目前研究方向为核反应堆动力装置性能与测试, E-mail: yangzhida@hrbeu.edu.cn;

周杰 (1973–), 男, 副教授, 目前研究方向为核反应堆动力装置性能与测试, E-mail: zhoujieheu@aliyun.com.