

文章编号: 1000-8152(2009)02-0156-05

控制量前具有不确定系数的电液伺服系统自适应控制

方一鸣, 韩永成, 赵琳琳, 李 强

(燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对控制输入前具有不确定系数的电液伺服位置系统精确跟踪控制问题, 提出了一种改进的自适应Backstepping控制器设计方法. 该方法通过对系统模型的等价变换和选择合适的Lyapunov函数, 有效解决了系统模型中控制输入前存在不确定系数而导致所设计的控制器存在参数自适应律, 而自适应律中存在控制量造成的嵌套难题. 以驱动连铸结晶器的电液伺服位置系统为例, 进行了控制器的设计和稳定性证明. 仿真研究结果表明, 所提出的改进设计方法是可行的, 设计的控制器具有较强的鲁棒性和良好的跟踪性能.

关键词: 自适应Backstepping控制; Lyapunov稳定; 不确定系数; 嵌套; 电液伺服系统
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive controller for electro-hydraulic servo system with uncertain coefficients in control input

FANG Yi-ming, HAN Yong-cheng, ZHAO Lin-lin, LI Qiang

(Provincial Key Laboratory of Industry Computer Control Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: To design an accurate tracking control for the electro-hydraulic servo position system with uncertain coefficient in control input, an improved adaptive Backstepping controller design method is presented. By using the equivalent model transformation and selecting a proper Lyapunov function, the nesting problem caused by the mutual inclusion of parameter adaptive law and control input is effectively solved. This method is also applied to design a hydraulic drive servo system for a continuous cast mold and validate the stability. Simulation results show that the designed controller works with high robustness and desirable tracking performance.

Key words: adaptive Backstepping control; Lyapunov stability; uncertain coefficient; nesting; electro-hydraulic servo system

1 引言(Introduction)

电液伺服系统因具有响应快, 功率体积比大等优点, 在工业生产中获得了广泛的应用. 但在实际应用中, 电液伺服系统存在内部参数和外部负载力的不确定性, 给控制系统的设计带来了很大的困难^[1]. 针对电液伺服位置系统的精确跟踪控制问题, 很多学者采用各种先进的控制算法进行了深入的研究, 比如鲁棒控制、最优控制、自适应控制、智能控制以及它们之间的综合应用.

Backstepping设计方法是一种将Lyapunov函数的选取与控制器的设计相结合的递推设计方法. 如果系统的参数具有不确定性, 可以通过选择合适的Lyapunov函数来得到参数自适应律. 很多学者在设计时都假设系统控制输入前面的系数为1或者一

个不变的量, 比如文献[2,3]. 然而, 这样的系统在实际中往往并不多见, 更多的是控制输入前含有不确定系数. 针对这种系统, 学者们也进行了一些研究, 但是还没有成熟. 文献[4~6]考虑了控制输入前面的系数为一个方向未知的量, 通过选择Nussbaum增益设计了自适应Backstepping控制器, 但这种方法比较繁琐且适用范围较小. 一些文献采用一般的自适应反推法来对此类系统设计控制器, 如文献[1,7], 但是在设计的控制器中含有参数自适应律, 参数自适应律中又含有控制量, 这样导致的循环嵌套会使系统性能下降或根本无法运行.

因此, 本文提出了一种改进的基于逐步递推方法的自适应Backstepping控制策略. 该方法通过对模型的等价变换和选择合适的Lyapunov函数, 有效解决

了控制量前具有不确定参数时, 所设计的控制器存在参数自适应律, 而自适应律中存在控制量造成的嵌套难题. 并以驱动连铸结晶器的电液伺服位置系统为例, 进行了控制器的设计和稳定性证明. 仿真研究结果表明, 所设计的控制器具有较强的鲁棒性和良好的跟踪效果.

2 电液伺服位置系统的数学模型及问题描述(Mathematical model of electro-hydraulic servo position system and problem description)

驱动连铸结晶器的电液伺服系统的结构如图1所示. 它由油源、电液伺服阀、对称液压缸和负载组成.

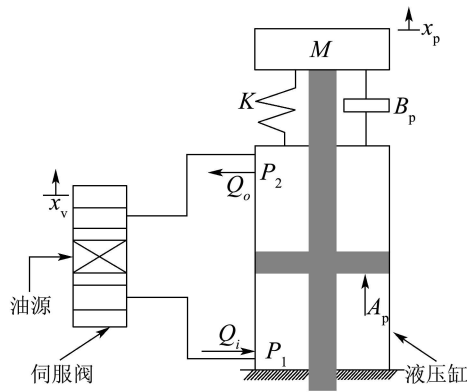


图1 电液伺服位置系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electro-hydraulic servo position system

根据图1, 定义负载压力 $P_L = P_1 - P_2$; 负载流量 $Q_L = (Q_i + Q_o)/2$. 忽略伺服阀的非线性, 则伺服阀流量方程可写成

$$Q_L = K_q x_v - K_c P_L. \quad (1)$$

式中: K_q 为流量增益; K_c 为压力增益; x_v 为伺服阀阀芯位移.

本文把伺服放大器和伺服阀都等效成比例环节, 因此有

$$K_p = \frac{i}{u}, \quad (2)$$

$$K_{sv} = \frac{x_v}{i}. \quad (3)$$

式中: u 为伺服放大器输入电压, i 为伺服阀输入电流, K_p 为伺服放大器放大系数; K_{sv} 为伺服阀增益; 定义 $K_{qsv} = K_q K_p K_{sv}$, 则式(1)可写成

$$Q_L = K_{qsv} u - K_c P_L. \quad (4)$$

流量连续方程为

$$Q_L = A_p \dot{x}_p + C_{tp} P_L + \frac{V}{4\beta_e} \dot{P}_L. \quad (5)$$

式中: A_p 为液压缸活塞有效面积; x_p 为活塞位移; C_{tp} 为液压缸外泄漏系数; V 为液压缸油腔总体积; β_e 为体积弹性模量.

活塞的力平衡方程为

$$A_p P_L = M \ddot{x}_p + B_p \dot{x}_p + K x_p + F_L. \quad (6)$$

式中: M 为活塞和负载的总质量; B_p 为活塞及负载的粘性阻尼系数; K 为弹簧弹性系数; F_L 为作用在活塞上的任意外负载力.

这是一个3阶系统, 根据工程实际取 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [x_p \ \dot{x}_p \ P_L]^T$ 系统的输出为液压缸活塞位移 x_p , 为了避免在所设计的控制器存在参数自适应律, 而自适应律中存在控制量造成的嵌套问题把式(4)~(6)中 x_3, u 前面的系数写成倒数的形式, 则系统的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\alpha_1 x_1 - \alpha_2 x_2 + (1/\alpha_3) x_3 - d, \\ \dot{x}_3 = -\beta_1 x_2 - \beta_2 x_3 + (1/b) u, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\alpha_1 = K/M$, $\alpha_2 = B_p/M$, $\alpha_3 = M/A_p$, $d = F_L/M$, $\beta_1 = 4\beta_e A_p/V$, $\beta_2 = 4\beta_e K_{ce}/V$, $b = V/(4\beta_e K_{qsv})$, u 为系统控制输入, y 为系统输出, 系统所有状态变量都是可测的.

在实际的系统中流量系数、泄漏系数、负载质量、体积弹性模量、弹簧弹性系数和外负载力都可能存在一定的不确定性. 本文设计的目的就是设计合适的控制器使系统的位置跟踪误差趋近于零, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y - x_d) = 0.$$

其中: x_d 为系统的期望输出, 是连续可微且有界的.

3 控制量前具有不确定系数的自适应 Backstepping 控制器设计(Design of adaptive Backstepping controller with uncertain coefficient of control input)

3.1 系统控制器设计(System controller design)

本文采用反推法对系统(7)进行自适应 Backstepping 控制器的设计, 并通过 Lyapunov 稳定性分析的方法, 导出自适应律. 下面的推导中 $x_i (i = 1, 2, 3)$ 为系统状态变量的实际值; $x_{id} (i = 2, 3)$ 为系统状态变量的期望值(部分对应于虚拟控制量); $k_i > 0 (i = 1, 2, 3)$ 为控制器参数.

第1步 定义位置跟踪误差

$$e_1 = x_1 - x_d, \quad (8)$$

则

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d = x_2 - \dot{x}_d. \quad (9)$$

定义Lyapunov函数

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2. \quad (10)$$

对上式求导

$$\dot{V}_1 = e_1\dot{e}_1 = e_1(x_2 - \dot{x}_d). \quad (11)$$

选 x_{2d} 为虚拟控制量:

$$x_{2d} = \dot{x}_d - k_1 e_1. \quad (12)$$

定义误差 $e_2 = x_2 - x_{2d}$. 将上式代入式(11)得到

$$\dot{V}_1 = e_1 e_2 - k_1 e_1^2.$$

第2步 对 e_2 求导得

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2d} = \\ -\alpha_1 x_1 - \alpha_2 x_2 + (1/\alpha_3)x_3 - d - \dot{x}_{2d}. \end{aligned} \quad (13)$$

注1 为了避免在下面设计自适应律时 $\hat{\alpha}_3$ 和 \hat{b} 中出现虚拟控制量 x_{3d} 和控制量 u , 即避免产生循环嵌套. 在选择Lyapunov函数 V_2, V_3 时, e_2 和 e_3 前面加入了相应的系数.

定义Lyapunov函数

$$V_2 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}\alpha_3 e_2^2. \quad (14)$$

对式(14)求导, 并利用式(13)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = e_1 e_2 - k_1 e_1^2 + \alpha_3 e_2 \dot{e}_2 = \\ -k_1 e_1^2 + e_2(e_1 - \tau_1 x_1 - \tau_2 x_2 + \\ x_3 - \tau_3 - \alpha_3 \dot{x}_{2d}). \end{aligned} \quad (15)$$

其中: $\tau_1 = \alpha_1 \alpha_3, \tau_2 = \alpha_2 \alpha_3, \tau_3 = \alpha_3 d$.

注2 定义 $\hat{\tau}_1 = \tau_1 - \hat{\tau}_1; \hat{\tau}_2 = \tau_2 - \hat{\tau}_2; \hat{\tau}_3 = \tau_3 - \hat{\tau}_3; \hat{\alpha}_3 = \alpha_3 - \hat{\alpha}_3; \hat{b} = b - \hat{b}$. 其中 $\hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2, \hat{\tau}_3, \hat{\alpha}_3$ 和 \hat{b} 分别为 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \alpha_3$ 和 b 的估计值.

选 x_{3d} 为虚拟控制量:

$$x_{3d} = -e_1 + \hat{\tau}_1 x_1 + \hat{\tau}_2 x_2 + \hat{\tau}_3 + \hat{\alpha}_3 \dot{x}_{2d} - k_2 e_2. \quad (16)$$

定义误差 $e_3 = x_3 - x_{3d}$. 将式(16)代入式(15)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_2 e_3 + e_2(-\hat{\tau}_1 x_1 - \\ \hat{\tau}_2 x_2 - \hat{\tau}_3 - \hat{\alpha}_3 \dot{x}_{2d}). \end{aligned} \quad (17)$$

第3步 对误差 e_3 求导得

$$\dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{x}_{3d} = -\beta_1 x_2 - \beta_2 x_3 + (1/b)u - \dot{x}_{3d}. \quad (18)$$

定义Lyapunov函数

$$\begin{aligned} V_3 = \\ \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}\alpha_3 e_2^2 + \frac{1}{2}b e_3^2 + \frac{1}{2}\rho_1 \tilde{\tau}_1^2 + \\ \frac{1}{2}\rho_2 \tilde{\tau}_2^2 + \frac{1}{2}\rho_3 \tilde{\tau}_3^2 + \frac{1}{2}\rho_4 \tilde{\alpha}_3^2 + \frac{1}{2}\rho_5 \tilde{b}^2. \end{aligned} \quad (19)$$

对上式求导:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = \\ -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_2(-\tilde{\tau}_1 x_1 - \tilde{\tau}_2 x_2 - \\ \tilde{\tau}_3 - \tilde{\alpha}_3 \dot{x}_{2d}) + e_3(e_2 - b\beta_1 x_2 - \\ b\beta_2 x_3 + u - b\dot{x}_{3d}) - \rho_1 \tilde{\tau}_1 \dot{\tilde{\tau}}_1 - \\ \rho_2 \tilde{\tau}_2 \dot{\tilde{\tau}}_2 - \rho_3 \tilde{\tau}_3 \dot{\tilde{\tau}}_3 - \rho_4 \tilde{\alpha}_3 \dot{\tilde{\alpha}}_3 - \rho_5 \tilde{b} \dot{\tilde{b}}. \end{aligned} \quad (20)$$

注3 实际工况中一般考虑系统总质量、油液的体积弹性模量、活塞及负载的粘性阻尼系数、弹簧弹性系数存在变化, 因此 $b\beta_1, b\beta_2$ 是不变的常数.

根据式(20)设计控制器为

$$u = -e_2 + b\beta_1 x_2 + b\beta_2 x_3 + \hat{b}\dot{x}_{3d} - k_3 e_3. \quad (21)$$

设计的参数自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\tau}}_1 = -\frac{1}{\rho_1} e_2 x_1, \dot{\hat{\tau}}_2 = -\frac{1}{\rho_2} e_2 x_2, \dot{\hat{\tau}}_3 = -\frac{1}{\rho_3} e_2, \\ \dot{\hat{\alpha}}_3 = -\frac{1}{\rho_4} e_2 \dot{x}_{2d}, \dot{\hat{b}} = -\frac{1}{\rho_5} e_3 \dot{x}_{3d}. \end{cases} \quad (22)$$

3.2 系统稳定性分析(System stability analysis)

定理1 对于电液伺服系统(7), 设计控制器(21)和自适应律(22), 可以使系统达到全局渐近跟踪.

证 1) 先证明位置跟踪误差 $e_1 \rightarrow 0$.

把控制器(21)和参数自适应律(22)代入式(20)可得

$$\dot{V}_3 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \leq 0. \quad (23)$$

根据式(23), $\dot{V}_3 \leq -k_1 e_1^2$, 因此可得

$$\int_0^\infty k_1 e_1^2 dt \leq V_3(e_1(0), e_2(0), e_3(0)) - V_3(e_1(t), e_2(t), e_3(t)).$$

因为 e_1, e_2, e_3 及 $\tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2, \tilde{\tau}_3, \tilde{\alpha}_3, \tilde{b}$ 都是有界的, 所以 V_3 是有界的. 因此, 根据Barbalat定理^[8], 可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0.$$

2) 同理可证 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_2 = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_3 = 0$.

因此, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e_1 \rightarrow 0, e_2 \rightarrow 0, e_3 \rightarrow 0$, 即 $y \rightarrow x_d$, 所以整个控制系统的位置跟踪是渐近稳定的. 证毕.

4 仿真研究(Simulation)

结合工程实际, 给出电液伺服系统的主要标称参数如表1所示.

表 1 电液伺服系统主要参数标称值
Table 1 Main nominal parameter values of electro-hydraulic servo system

参数	标称值
活塞和负载的总质量 M_0 (kg)	1.5×10^4
弹簧弹性系数 K_0 (N/m)	1.6×10^7
活塞及负载的粘性阻尼系数 B_{p0} (N·s/m)	1.6×10^5
泄漏系数和压力增益的和 K_{ce} (m ² /N·s)	2.5×10^{-12}
油液的体积弹性模量 β_e (Pa)	7×10^8
液压缸活塞有效面积 A_p (m ²)	0.02
液压缸油腔总体积 V_1 (m ³)	6.0×10^{-4}
增益系数 K_{qsv}	1.25×10^{-4}

在实际工业生产中连铸结晶器广泛采用正弦或非正弦振动曲线, 本文以正弦曲线作为期望的输出来进行仿真. 实际系统中很多参数是随工作环境的变化而慢时变的, 这里主要考虑 M , B_p , K 和 F_L 存在不确定性. 假设

$$M = M_0 + 0.05M_0 \sin(\pi t),$$

$$B_p = B_{p0} + 0.05B_{p0} \sin(\pi t),$$

$$K = K_0 + 0.05K_0 \sin(\pi t),$$

外负载力 F_L 的变化情况比较复杂, 它主要包括重力和摩擦力. 其中, 结晶器和铸坯之间的摩擦力是随结晶器和铸坯间相对速度变化的, 对于电液伺服系统这种变化的摩擦力相当于外部负载干扰, 设计时不能忽略. 文献[9]针对液压振动下板坯连铸结晶器摩擦力进行了检测实验研究, 得到了摩擦力随相对速度变化的曲线. 根据文献[9]的摩擦力的计算和检测方法, 并结合本文的工程背景, 得到了不确定的外负载力为 $F_L = 50000[0.0942 \cos(10\pi t) + 0.033] + Mg$.

利用MATLAB软件平台并结合自己编程, 对本文设计的自适应Backstepping控制器和常规PID控制器进行了仿真比较分析, 如图2和图3所示. 图2是系统确定情况下两种控制器输出响应曲线的比较, 图3是系统不确定情况下两种控制器输出响应曲线的比较. 各图中的图(a)是位置跟踪曲线, 图(b)是位置跟踪误差曲线.

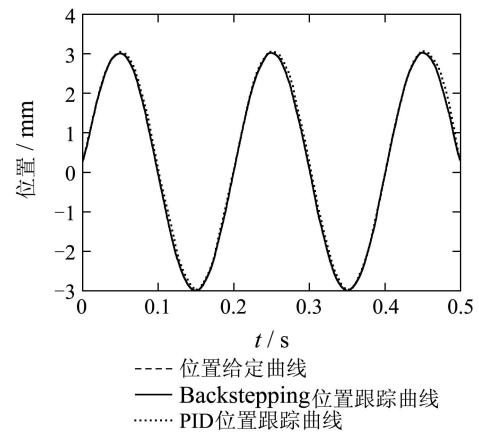
本文设计的控制器参数为

$$k_1 = 200, k_2 = 300, k_3 = 500.$$

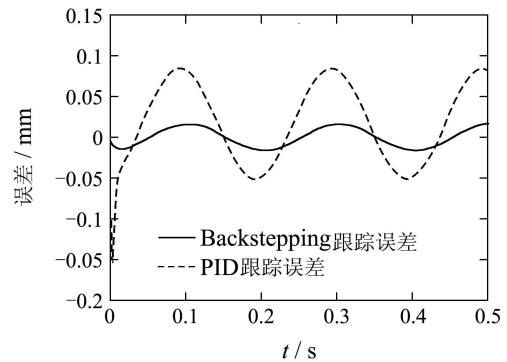
仿真时PID控制器的形式为

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt}.$$

其中: 比例系数 $K_P = 25$, 积分系数 $K_I = 25$, 微分系数 $K_D = 0.1$.



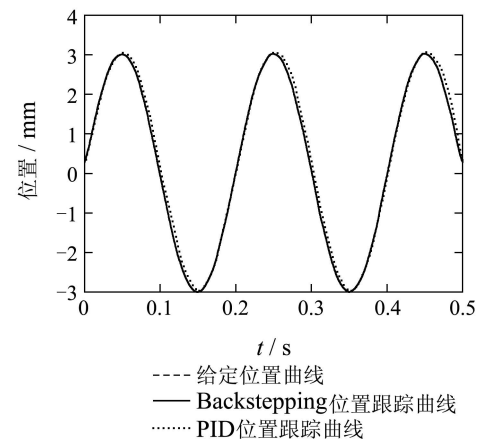
(a) 位置跟踪曲线比较



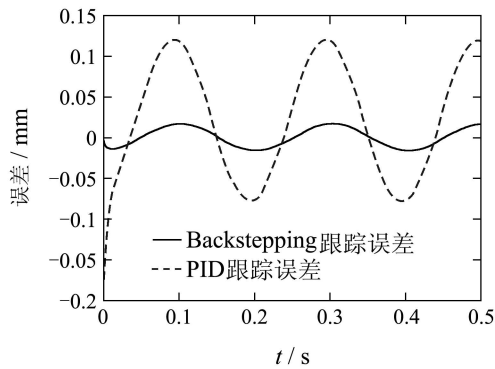
(b) 位置跟踪误差曲线比较

图 2 系统确定时自适应Backstepping控制器与PID控制器系统响应曲线比较

Fig. 2 Comparison of system response curves between the adaptive Backstepping controller and the PID controller for a deterministic system



(a) 位置跟踪曲线比较



(b) 位置跟踪误差曲线比较

图3 系统不确定时自适应Backstepping控制器与PID控制器系统响应曲线比较

Fig. 3 Comparison of system response curves between the adaptive Backstepping controller and the PID controller for an uncertain system

通过上面的仿真结果可以看出,无论系统确定还是不确定,本文设计的控制器都能比较好的跟踪给定的曲线。

5 结论(Conclusion)

本文针对控制输入前具有不确定系数的电液伺服系统,提出了一种改进的自适应Backstepping控制策略。该方法能避免采用一般自适应Backstepping方法设计的控制器存在参数自适应律,自适应律中存在控制量的嵌套难题。仿真结果表明,与采用PID控制方法相比,系统具有更好的控制性能及更强的鲁棒性。

参考文献(References):

- [1] 管成,朱善安.电液伺服系统的多滑模鲁棒自适应控制[J].控制理论与应用,2005,22(6):931-938.
(GUAN Cheng, ZHU Shan'an. Multiple sliding mode robust adaptive control of an electro-hydraulic servo system[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(6): 931-938.)
- [2] RUAN S Y, LI G J, JIAO X H, et al. Adaptive control design for VSC-HVDC systems based on Backstepping method[J]. *Electric Power Systems Research*, 2007, 77(5): 559-565.
- [3] HUA C C, FENG G, GUAN X P. Robust controller design of a class of nonlinear time delay systems via Backstepping method[J]. *Automatica*, 2008, 44(2): 567-573.
- [4] YE X D, JIANG J P. Adaptive nonlinear design without a priori knowledge of control directions[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(11): 1617-1621.
- [5] YE X D, DING Z T. Robust tracking control of uncertain nonlinear systems with unknown control directions[J]. *Systems & Control Letters*, 2001, 42(1): 1-10.
- [6] YE X D. Adaptive output-feedback control of nonlinear systems with unknown nonlinearities[J]. *Automatica*, 2005, 41(8): 1367-1374.
- [7] KARIMI A, FELIACHI A. Decentralized adaptive Backstepping control of electric power systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(3): 484-493.
- [8] SLOTINE J J E, LI W. *Applied Nonlinear Control*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.
- [9] 王旭东,臧欣阳,马勇,等.液压振动下板坯连铸结晶器摩擦力检测实验研究[J].钢铁,2006,41(11):23-25.
(WANG Xudong, ZANG Xinyang, MA Yong, et al. Mold friction monitoring on caster under hydraulic oscillation[J]. *Iron and Steel*, 2006, 41(11): 23-25.)

作者简介:

方一鸣 (1965—),男,燕山大学电气工程学院教授,博士生导师,主要研究方向为自适应鲁棒控制理论与应用、复杂系统建模仿真与控制、冶金自动化、系统集成与控制, E-mail: fyiming@ysu.edu.cn;

韩永成 (1980—),男,燕山大学电气工程学院硕士研究生,主要研究方向为自适应控制、工业计算机控制, E-mail: hanyongcheng888@163.com;

赵琳琳 (1983—),女,燕山大学电气工程学院硕士研究生,主要研究方向为轧机自动控制、鲁棒自适应控制理论与应用, E-mail: 0416zhaolin@163.com;

李强 (1982—),男,燕山大学电气工程学院硕士研究生,主要研究方向为冶金自动化、轧机轧制规程的优化算法研究及软件实现, E-mail: liq20@163.com.