

冷带轧机厚控系统自适应鲁棒输出反馈动态控制器设计

赵琳琳¹, 方一鸣¹, 仲伟峰², 范志远¹

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 哈尔滨理工大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 冷带轧机厚控系统可被认为是一个受外界干扰的线性不确定时滞系统. 本文首先设计了标称系统下的鲁棒输出反馈动态控制器, 以改善闭环系统的动静态性能; 其次, 在系统不需要满足不确定性匹配条件的情况下, 将参数和外部扰动不确定性综合考虑, 应用Lyapunov稳定性理论设计了系统不确定性上界参数的自适应估计器和系统的自适应控制器, 保证了闭环系统的渐近稳定性, 减小了设计的保守性; 两者结合实现了板带出口厚度的有效控制. 最后通过一个仿真实例说明本文所提出的自适应鲁棒控制器的有效性.

关键词: 冷带轧机; 厚度控制系统; 鲁棒输出反馈动态控制; 自适应控制; 不确定系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design of adaptive robust output feedback dynamic controller for thickness control in a cold strip rolling mill

ZHAO Lin-lin¹, FANG Yi-ming¹, ZHONG Wei-feng², FAN Zhi-yuan¹

(1. College of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China;

2. College of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang 150080, China)

Abstract: The thickness control system of cold strip rolling mill can be considered a linear uncertainty time-delay system with external disturbance. Firstly, robust output feedback dynamic controller for nominal system is designed to improve the dynamic and static performance of closed-loop system. The uncertainty matching condition is not necessary, and the parameter adaptive estimator law for uncertainty upper bound and adaptive controller are then designed on the basis of Lyapunov stability theory by taking parameter and disturbance uncertainty into account together. So the asymptotic stability of closed-loop system is guaranteed, and design conservatism is reduced. Effective thickness control is also fulfilled for the exit strip by the robust output feedback dynamic controller and the adaptive controller. Finally, a simulation example is given to illustrate the efficacy of the proposed adaptive robust controller.

Key words: cold strip rolling mill; thickness control system; robust output feedback dynamic control; adaptive control; uncertain system

1 引言(Introduction)

轧机厚度控制系统是一个受外界干扰的线性不确定时滞系统, 近年来国内外学者针对这类线性不确定时滞系统作了大量的理论研究. CHOU CHIEN-HSIN等^[1]设计了不依赖于时滞的自适应变结构控制器, EUN TAE JEUNG等^[2]和Lee Y S等^[3]分别利用LMI工具进行鲁棒控制器的设计, Zheng Feng等^[4]设计了不确定时滞系统的鲁棒自适应控制器; 在上述文献的设计过程中, 一般都要求系统满足一定的不确定性匹配条件, 但不是所有系统都能够满足这些匹配条件; HU Jianbo等^[5]针对系统不确定性不满足匹配条件的情况进行了鲁棒自适应控制研究; 此外还有Smith预估控制^[6]等方法的研究.

考虑到有些系统状态不可测, 因此研究输出反馈动态控制器设计更具工程意义. 近年来, 一些学者对输出反馈动态控制进行研究并取得了一些成果^[7,8]. 本文将文献[1,5,7]进行有机结合, 在此基础上, 针对轧机厚控系统中存在的参数和外部扰动不确定性设计自适应鲁棒控制器. 设计过程中系统不确定性不需要满足匹配条件, 只需要满足范数有界条件; 采用鲁棒输出反馈动态控制方案, 仅使用可测的输出变量, 能够满足闭环系统的动静态性能指标要求.

2 厚控系统数学模型及问题描述(Mathematical model of thickness control system and problem description)

冷带轧机厚控系统辊缝内环由伺服放大器、伺

服阀和液压缸组成,通过内环控制器的设计及控制参数的调整,可以整定成一个二阶振荡环节^[9]:

$$G_1(s) = \frac{G_f(s)}{u(s) + G_f^*(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}. \quad (1)$$

其中: $G_f(s)$ 为工作辊的辊缝(对应于液压缸活塞的位移); $G_f^*(s)$ 为辊缝给定值; $u(s)$ 为控制量,即厚度控制器的输出;参数 ω_n 和 ξ 随油温等变化有一定的参数不确定性。

从轧机工作辊辊缝 $G_f(s)$ 到板带出口厚度 $h(s)$ 为厚控外环的一部分,其传递函数可以近似表示为

$$G_2(s) = \frac{h(s)}{G_f(s)} = \frac{K_0}{T_i s + 1} e^{-\tau s}. \quad (2)$$

其中: T_i 为惯性时间常数,系数 K_0 随轧制道次、被轧带材的硬度、种类等具有一定的参数不确定性, τ 为检测滞后时间。

在实际工程中,系统还存在来料厚度和硬度变化、外负载力变化等外部扰动。

取状态 $\mathbf{x} = [G_f - G_f^*, \dot{G}_f - \dot{G}_f^*, h - h^*]^T$,其中 h^* 为厚度给定值,同时考虑系统中存在的参数不确定性和外部扰动,式(1)(2)可以写成如下的状态空间形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = [A + \Delta A(t)]\mathbf{x}(t) + [A_1 + \Delta A_1(t)]\mathbf{x}(t - \tau(t)) + [B + \Delta B(t)]\mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t), \\ \mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t), \\ \mathbf{x}(t) = \Psi(t), t \in [-\tau, 0]. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}$ 为厚度环被控对象的控制输入, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}$ 为可测输出,标称系统矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_i \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ K_0/T_i & 0 & 0 \end{bmatrix}, C = [0 \quad 0 \quad 1],$$

$\Delta A(t)$, $\Delta A_1(t)$, $\Delta B(t)$ 是相应维数的有界不确定时变系数矩阵; $\mathbf{w}(t) = \mathbf{w}_1(t) + \mathbf{w}_2(t)$,其中 $\mathbf{w}_1(t) \in \mathbb{R}^3$ 为外部扰动,

$$\mathbf{w}_2(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ -2\xi\omega_n \dot{G}_f^*(t) - \ddot{G}_f^*(t) \\ -\dot{h}^*(t) - \frac{h^*(t)}{T_i} + \frac{K_0}{T_i} G_f^*(t - \tau) \end{bmatrix};$$

初始条件 $\Psi(t)$ 为已知的连续状态矢量。

将参数和扰动不确定性统一考虑,状态空间方程(3)也可以写成如下形式:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + A_1\mathbf{x}(t - \tau) + B\mathbf{u}(t) + \mathbf{f}(t, \mathbf{x}). \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{f}(t, \mathbf{x}) = \Delta A(t)\mathbf{x}(t) + \Delta A_1(t)\mathbf{x}(t - \tau) + \Delta B(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t).$$

式(4)系统满足以下合理假设^[1]:

A1) 不确定时变矩阵 $\Delta A(t)$, $\Delta A_1(t)$, $\Delta B(t)$ 关于 $\mathbf{x}$ 是连续可微的,关于 t 是分段连续的;

A2) 存在正数 α_0, α_1 ,使得

$$\|\mathbf{x}(t - \tau)\| \leq \alpha_0 + \alpha_1 \|\mathbf{x}(t)\|. \quad (5)$$

A3) 在正数 β_0, β_1 ,使得

$$\begin{cases} \|\mathbf{f}(t, \mathbf{x})\| \leq \beta_0 + \beta_1 \|\mathbf{x}(t)\|, \\ \forall (t, \mathbf{x}) \in (-\tau, \infty) \times \mathbb{R}^3. \end{cases} \quad (6)$$

本文的目标是设计自适应鲁棒控制器,使轧机厚度闭环控制系统渐近稳定,被轧带材的出口厚度能够很好地跟踪给定值。

3 自适应鲁棒输出反馈动态控制器设计(Design of adaptive robust output feedback dynamic controller)

针对标称系统,即 $\mathbf{f}(t, \mathbf{x}) = 0$ 时,可设计输出反馈动态控制器:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_d(t) = A_d \mathbf{x}_d(t) + B_d \mathbf{y}(t), \\ \mathbf{u}_s(t) = S \mathbf{x}_d(t) + T \mathbf{y}(t), \\ \mathbf{x}_d(0) = \mathbf{x}_{d0}. \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\mathbf{x}_d$ 为控制器状态, $\mathbf{u}_s$ 为控制器输出.将式(7)代入式(4),得闭环方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \tilde{A} \tilde{\mathbf{x}}(t) + \tilde{A}_1 \tilde{\mathbf{x}}(t - \tau), \\ \mathbf{y}(t) = C \mathbf{x}(t), \\ \tilde{\mathbf{x}}(0) = [\mathbf{x}^T(0) \quad \mathbf{x}_d^T(0)]^T. \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}_d(t) \end{bmatrix}$, $\tilde{A} = \begin{bmatrix} A + BTC & BS \\ B_d C & A_d \end{bmatrix}$, $\tilde{A}_1 = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$.通过选择适当的控制参数矩阵 A_d , B_d , S , T ,可以实现任意的极点配置,改善闭环系统的动静态性能^[7].

当考虑系统的参数不确定和外部扰动时,所设计自适应鲁棒控制器为

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_{adp}. \quad (9)$$

其中: $\mathbf{u}_s$ 为鲁棒输出反馈动态控制器的输出,由上面的式(7)给出; $\mathbf{u}_{adp}$ 为式(14)所示的自适应控制器的输出,基本设计过程说明如下:

将式(9)代入式(4)系统, 获得增广的闭环方程:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}}(t) + \tilde{\mathbf{A}}_1\tilde{\mathbf{x}}(t - \tau) + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u}_{adp} + \tilde{\mathbf{f}}(t, x). \quad (10)$$

$$\text{其中: } \tilde{\mathbf{f}}(t, x) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}(t, x) \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

由式(5)(6)可得, 存在正数 q_0, q_1 和 g_0, g_1 满足

$$\|\tilde{\mathbf{x}}(t - \tau)\| \leq q_0 + q_1 \|\tilde{\mathbf{x}}(t)\|, \quad (11)$$

$$\|\tilde{\mathbf{f}}(t, x)\| \leq g_0 + g_1 \|\tilde{\mathbf{x}}(t)\|. \quad (12)$$

满足上式的 q_0, q_1, g_0, g_1 的最小值一般不易获得, 采用自适应算法获得估计参数 $\hat{q}_0(t), \hat{q}_1(t), \hat{g}_0(t), \hat{g}_1(t)$, 来逼近其最小值, 可以降低设计的保守性.

定义自适应估计误差:

$$\begin{cases} \tilde{q}_0 = \hat{q}_0 - q_0, \tilde{q}_1 = \hat{q}_1 - q_1, \\ \tilde{g}_0 = \hat{g}_0 - g_0, \tilde{g}_1 = \hat{g}_1 - g_1. \end{cases} \quad (13)$$

为保证整个系统渐近稳定, $\mathbf{u}_{adp}$ 可取为

$$\mathbf{u}_{adp} = -(\tilde{\mathbf{x}}^T P \tilde{\mathbf{B}})^{-1}[(\hat{q}_0 + \hat{q}_1 \|\tilde{\mathbf{x}}\|)\|\tilde{\mathbf{x}}^T P \tilde{\mathbf{A}}_1\| + (\hat{g}_0 + \hat{g}_1 \|\tilde{\mathbf{x}}\|)\|\tilde{\mathbf{x}}^T P\|]. \quad (14)$$

其中参数自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{q}}_0 = \frac{2}{k_0} \|\tilde{\mathbf{x}}^T P \tilde{\mathbf{A}}_1\|, \dot{\hat{q}}_1 = \frac{2}{k_1} \|\tilde{\mathbf{x}}^T P \tilde{\mathbf{A}}_1\| \|\tilde{\mathbf{x}}\|, \\ \dot{\hat{g}}_0 = \frac{2}{k_2} \|\tilde{\mathbf{x}}^T P\|, \dot{\hat{g}}_1 = \frac{2}{k_3} \|\tilde{\mathbf{x}}^T P\| \|\tilde{\mathbf{x}}\|, \end{cases} \quad (15)$$

其中系数 $k_0, k_1, k_2, k_3 > 0$.

式(4)和(9)构成的闭环控制系统渐近稳定的充分条件由下面的定理给出.

定理 1 对于式(4)系统, 设计鲁棒输出反馈动态控制器式(7)和自适应控制器式(14)(15), 选择控制参数 A_d, B_d, S 和 T , 对于 $\gamma > 0$, 如果存在正定对称矩阵 P 使得下面的Lyapunov方程成立:

$$\tilde{\mathbf{A}}^T P + P \tilde{\mathbf{A}} + \gamma I = 0, \quad (16)$$

则式(10)闭环系统是渐近稳定的.

证 构造如下的正定函数:

$$V(\tilde{\mathbf{x}}(t)) = \tilde{\mathbf{x}}^T(t) P \tilde{\mathbf{x}}(t) + \frac{1}{2}(k_0 \tilde{q}_0^2 + k_1 \tilde{q}_1^2 + k_2 \tilde{g}_0^2 + k_3 \tilde{g}_1^2).$$

沿式(10)闭环系统的运动轨迹, 计算其时间导数得

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{\mathbf{x}}) = & \tilde{\mathbf{x}}^T(P\tilde{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}^T P)\tilde{\mathbf{x}} + 2\tilde{\mathbf{x}}^T P \tilde{\mathbf{A}}_1 \tilde{\mathbf{x}}(t - \tau) + \\ & 2\tilde{\mathbf{x}}^T P \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{u}_{adp} + 2\tilde{\mathbf{x}}^T P \tilde{\mathbf{f}} + \\ & k_0(\hat{q}_0 - q_0)\dot{\hat{q}}_0 + k_1(\hat{q}_1 - q_1)\dot{\hat{q}}_1 + \\ & k_2(\hat{g}_0 - g_0)\dot{\hat{g}}_0 + k_3(\hat{g}_1 - g_1)\dot{\hat{g}}_1 \leq \\ & \tilde{\mathbf{x}}^T(P\tilde{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}^T P)\tilde{\mathbf{x}} + 2\tilde{\mathbf{x}}^T P \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{u}_{adp} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 2(q_0 + q_1 \|\tilde{\mathbf{x}}\|)\|\tilde{\mathbf{x}}^T P \tilde{\mathbf{A}}_1\| + \\ & 2(g_0 + g_1 \|\tilde{\mathbf{x}}\|)\|\tilde{\mathbf{x}}^T P\| + \\ & k_0(\hat{q}_0 - q_0)\dot{\hat{q}}_0 + k_1(\hat{q}_1 - q_1)\dot{\hat{q}}_1 + \\ & k_2(\hat{g}_0 - g_0)\dot{\hat{g}}_0 + k_3(\hat{g}_1 - g_1)\dot{\hat{g}}_1. \end{aligned}$$

将自适应控制器(14)(15)代入上式, 可以得到

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{x}}) \leq \tilde{\mathbf{x}}^T(P\tilde{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}^T P)\tilde{\mathbf{x}} = -\gamma \|\tilde{\mathbf{x}}\|^2 \leq 0.$$

当且仅当 $\|\tilde{\mathbf{x}}\| = 0$ 时, $\dot{V}(\tilde{\mathbf{x}}) = 0$, 根据Lyapunov稳定性理论, 该闭环系统是渐近稳定的. 证毕.

由上面的证明可以看到, 各未知参数的自适应误差最终将趋近于零, 系统的各状态最终也将稳定到系统的平衡点(坐标原点), 即输出能够完全跟踪系统的设定值.

4 仿真研究及结果(Simulation and results)

为了验证上述控制方法的可行性, 进行了仿真试验. 采用某钢厂650 mm冷带轧机厚控系统的标称参数如下: $\xi = 0.8, \omega_n = 28 \text{ rad/s}, K_0 = 1.2, T_i = 0.02 \text{ s}, \tau = 0.6 \text{ s}$.

选择鲁棒输出反馈动态控制器参数:

$$\begin{aligned} A_d &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -20 & -20 \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.9 \end{bmatrix}, \\ S &= [-0.01 \quad -0.01], T = 0. \end{aligned}$$

因此 $\tilde{\mathbf{A}}$ 易于求得, 是稳定矩阵.

若选择 $\gamma = 1$, 解方程式(16), 可得唯一的正定对称矩阵 P . 根据定理1, 闭环系统(10)是渐近稳定的. 闭环系统的动态性能与矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}$ 的特征根有关.

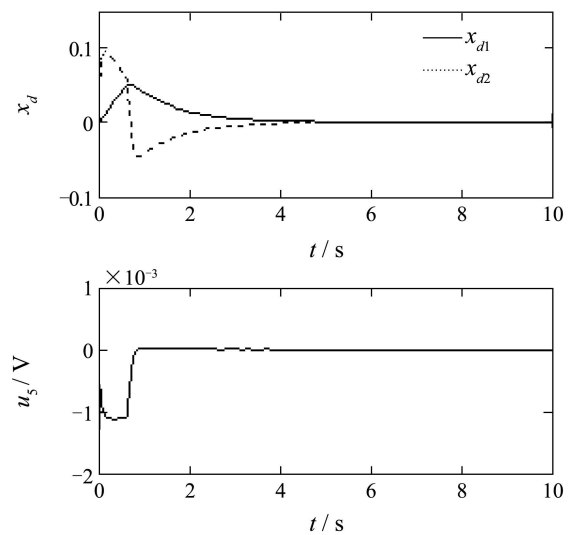


图1 鲁棒输出反馈动态控制器的状态和输出响应
Fig. 1 The state and output responses of robust output feedback dynamic controller

选择自适应系数 $k_0 = 1000, k_1 = 500, k_2 = 100, k_3 = 500$. 在系统给定 $G_f^* = 2 \text{ mm}, h^* = 2.4 \text{ mm}$,

并且存在一定的参数不确定性和外部扰动的情况下进行系统仿真研究. 鲁棒输出反馈动态控制器的各状态和控制输出的响应曲线如图1所示. 系统不确定性(包括参数不确定性和外部扰动)的上界参数的自适应估计结果和自适应控制器的输出响应如图2所示. 图3给出了轧机系统各状态的时间响应和厚度控制系统总的控制输入.

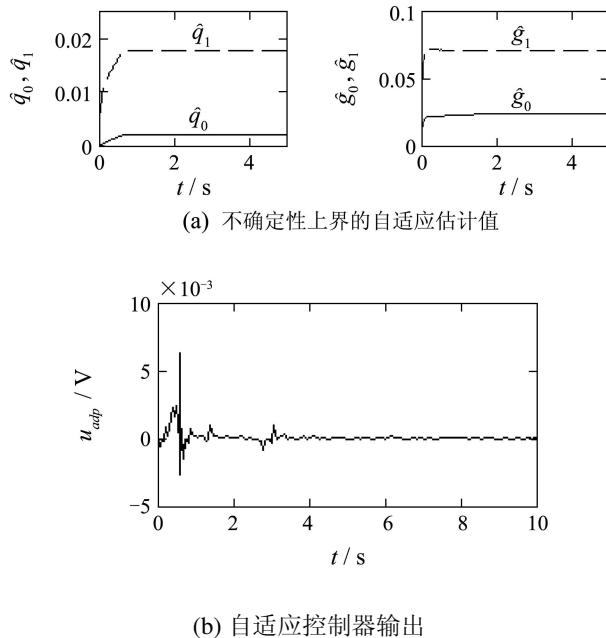


图2 不确定性上界的自适应估计值和自适应控制器输出

Fig. 2 Adaptive estimate value of the uncertainty upper bound and output of adaptive controller

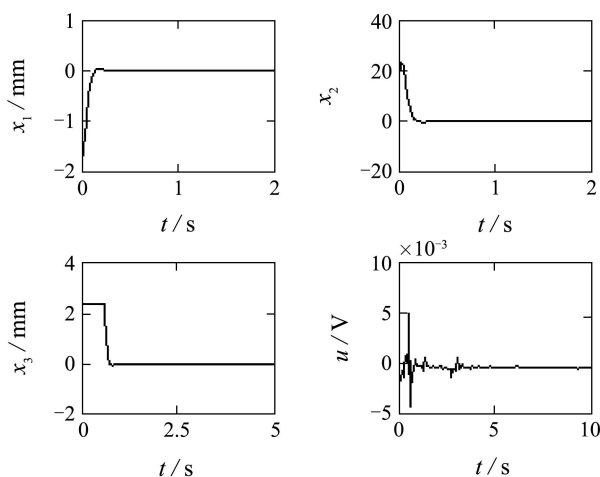


图3 轧机系统各状态和控制输入的响应曲线

Fig. 3 Time response of states and control input of rolling mill

仿真结果可以看出, 所设计的自适应鲁棒输出反馈动态控制器能够在有限时间内使系统状态趋近到原点(系统的平衡状态); 轧机被控对象的动态过程较好, 系统基本无超调, 稳态控制精度较高.

5 结论(Conclusion)

本文基于Lyapunov稳定性理论, 设计了自适应鲁棒控制器. 设计过程不需要满足不确定性匹配条件, 适用范围更广. 鲁棒输出反馈动态控制器用来改善闭环系统的动静态性能; 自适应控制器补偿系统不确定性带来的影响, 使系统达到鲁棒渐近稳定, 同时减小了系统设计的保守性. 仿真结果表明所设计的控制器的有效性.

参考文献(References):

- [1] CHOU C H, CHENG C C. Design of adaptive variable structure controllers for perturbed time-varying state delay systems[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2001, 338(1): 35 – 46.
- [2] EUN T J, DO C O, JONG H K, et al. Robust controller design for uncertain systems with time delays: LMI approach[J]. *Automatica*, 1996, 32(8): 1229 – 1231.
- [3] LEE Y S, MOON Y S, KWON W H, et al. Delay-dependent robust control for uncertain systems with a state-delay[J]. *Automatica*, 2004, 40(1): 65 – 72.
- [4] ZHENG F, WANG Q G, LEE T H. Adaptive robust control of uncertain time delay systems[J]. *Automatica*, 2005, 41(8): 1375 – 1383.
- [5] 胡剑波, 褚健. 不匹配不确定线性时滞系统的鲁棒自适应控制[J]. *控制理论与应用*, 2001, 18(3): 380 – 384.
(HU Jianbo, CHU Jian. Robust adaptive control for a class of uncertain time-delay systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(3): 380 – 384.
- [6] CHEN Y D, TUNG P C, FUH C C. Modified smith predictor scheme for periodic disturbance reduction in linear delay systems[J]. *Journal of Process Control*, 2007, 17(10): 799 – 804.
- [7] YAN J J, LIN J S, LIAO T L. Robust dynamic compensator for a class of time delay systems containing saturating control input [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2007, 31(5): 1223 – 1231
- [8] 贾新春, 郑南宁, 袁泽剑. 线性不确定系统经动态输出反馈的分层次控制策略[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(3): 449 – 453.
(JIA Xinchun, ZHENG Nanning, YUAN Zejian. Layered control strategy of robust stabilization for uncertain systems via dynamic output feedback[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(3): 449 – 453.)
- [9] 方一鸣, 焦晓红, 王益群. 极点配置自校正控制及其在冷带轧机厚度控制系统中的应用[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(2): 240 – 243.
(FANG Yiming, JIAO Xiaohong, WANG Yiqun. Pole assignment self-Tuning control and its application in gauge control system for cold-strip mill[J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(2): 240 – 243.)

作者简介:

赵琳琳 (1983—), 女, 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;

方一鸣 (1965—), 男, 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: fyming@ysu.edu.cn;

钟伟峰 (1965—), 男, 副教授, 主要研究方向为计算机过程控制理论及应用研究, E-mail: zwfhrb@sina.com;

范志远 (1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为多模型切换控制、自适应控制理论与应用, E-mail: fzy8508593@yahoo.com.cn.