

基于模型参考自适应Smith预估器的反馈式AGC厚度控制系统

李 迅^{1,2}, 宋东球¹, 喻寿益¹, 桂卫华¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 西南铝业(集团)有限责任公司, 四川 重庆 401326)

摘要: 针对具有纯时间延迟特性的反馈式AGC(automatic gauge control)系统, 利用Smith 预估器对纯时间延迟具有补偿作用的原理, 建立了模型参考自适应Smith 预估器反馈式AGC 控制系统模型, 给出了控制系统结构. 推导了自适应调节律和设计算法, 结合预估器模型, 计算得到轧件出口厚度偏差值的表达式. 仿真结果表明, 模型参考自适应Smith 预估器反馈式AGC 系统对铝薄板带材轧制出口厚度偏差控制具有很好的控制效果, 解决了反馈式AGC 厚度控制由于纯时间延迟特性对控制性能产生很大影响的问题, 消除了出口厚度波动现象, 响应速度加快, 可以满足高精度铝薄板带材轧制生产的控制要求.

关键词: 轧制; Smith预估器; 反馈式AGC; 模型参考自适应

中图分类号: TP273.6 **文献标识码:** A

Feedback automatic gauge control system using model reference adaptive Smith predictor

LI-Xun^{1,2}, SONG Dong-qiu¹, YU Shou-yi¹, GUI Wei-hua¹

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. Southwest Aluminum (Group) Co, Ltd, Chongqing Sichuan 401326, China)

Abstract: Based on the compensating principle of Smith predictor for the time-delay process, we build a model-reference-adaptive(MRA) Smith-predictor feedback control model for the automatic-gauge-control(AGC) system. The structure of the control system is determined, the design algorithm and the adaptive modulation principle are derived. Combining the MRA Smith-predictor feedback with the AGC control model, we can control the thickness-deviation at the output. Simulation results show that the AGC system with the MRA Smith-predictor feedback exhibits an excellent performance in controlling the thickness deviation of rolled aluminum strips. The limitation on the time-delay which originally affects the control performance is now eliminated, the thickness-variation at the output is removed, and the response rate is raised. In summary, the product specifications of aluminum strips are satisfied.

Key words: rolling; Smith predictor; feedback automatic gauge control; model reference adaptive

1 引言(Introduction)

现代单机架可逆式四重冷轧机厚度自动控制系统(AGC)具有前馈式AGC、秒流量式AGC及反馈式AGC等, 各种AGC方式的协调控制策略在轧制中的应用可使板带产品厚度及板形都获得更高的控制精度^[1]. 但反馈式AGC由于出口侧测厚仪检测点到辊缝有一定的距离, 使厚度控制产生纯时间延迟, 控制性能不理想. 减少控制过程的延迟时间, 有必要对反馈式AGC的纯时间延迟进行补偿. Smith预估器是克服纯延迟的一种有效控制方法, 通过预估对象的动态特性, 用一个预估模型来进行时间延迟补

偿, 补偿器与被控对象共同构成一个没有时间延迟的广义被控对象^[2], 从而有效地克服纯延迟的影响. 针对Smith预估器对被控对象数学模型的精确度有很强的依赖性, 文[3]提出自适应极点配置自校正方法, 文[4]提出自适应模糊控制器的方法. 含有纯时间延迟环节的闭环控制系统存在较大的超调量和较长的调节时间, 当被控对象受到干扰而引起被调量改变时, 控制器不能立即对干扰产生抑制作用^[5]. 本文基于模型参考自适应控制原理, 采用模型参考自适应Smith预估器使模型参数在自适应律的控制下保持与控制对象一致.

由于时间延迟部分可计算得到, 忽略轧机及Smith预估器模型的补偿纯时间因子部分. 由式(7)取轧机的一阶环节为参考模型, 则其状态方

程为

$$\dot{C}(t) = -aC(t) + \kappa\Delta s(t), \quad (13)$$

则Smith预估器模型可调系统及其状态方程为

$$G_m(s) = \frac{\kappa_m}{s + a_m}, \quad (14)$$

$$\dot{C}_m(t) = -a_m C_m(t) + \kappa_m \Delta s'(t). \quad (15)$$

前馈调节器 $G(e, t)$ 和反馈调节器 $F(e, t)$ 的方程为

$$\Delta s'(t) = G(e, t)\Delta s(t) - F(e, t)C_m(t). \quad (16)$$

由式(15)和(16)得到可调系统方程

$$\dot{C}_m(t) = -[a_m + \kappa_m F(e, t)]C_m(t) + \kappa_m G(e, t)\Delta s(t). \quad (17)$$

设系统广义误差:

$$e = C(t) - C_m(t). \quad (18)$$

由式(13)和(17)得广义状态误差方程:

$$\dot{e} = -ae - \psi(t)C_m(t) + \varphi(t)\Delta s(t). \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} \psi(t) = a - a_m - \kappa_m F(e, t), \\ \varphi(t) = \kappa - \kappa_m G(e, t). \end{cases} \quad (20)$$

设计 $G(e, t)$, $F(e, t)$ 的自适应律, 使式(19)渐近稳定, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e(t) \rightarrow 0$, $\psi(t) \rightarrow 0$, $\varphi(t) \rightarrow 0$. 选取李雅普诺夫函数:

$$\nu(t) = \frac{1}{2}[\kappa_m e^2 + \frac{1}{\lambda_1} \psi^2(t) + \frac{1}{\lambda_2} \varphi^2(t)]. \quad (21)$$

式中: $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$, $\kappa_m > 0$ 则 $\nu(t) > 0$ 对所有的 $t \neq 0$ 均成立, 故

$$\begin{aligned} \dot{\nu}(t) = & -\kappa_m a e^2(t) + \psi(t) \left[\frac{1}{\lambda_1} \dot{\psi}(t) - \kappa_m e(t) C_m(t) \right] + \\ & \varphi(t) \left[\frac{1}{\lambda_2} \dot{\varphi}(t) + \kappa_m e(t) \Delta s(t) \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

令

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda_1} \dot{\psi}(t) - \kappa_m e(t) C_m(t) = 0, \\ \frac{1}{\lambda_2} \dot{\varphi}(t) + \kappa_m e(t) \Delta s(t) = 0 \end{cases} \quad (23)$$

则

$$\dot{\nu}(t) = -\kappa_m a e^2(t) \leq 0. \quad (24)$$

保证系统是渐近稳定, 对式(20)求导, 并代入式(23)得到系统的积分自适应调节律:

$$\begin{cases} F(e, t) = -\int \lambda_1 e(t) C_m(t) + F(e, 0), \\ G(e, t) = -\int \lambda_2 e(t) \Delta s(t) + G(e, 0). \end{cases} \quad (25)$$

3 模型参考自适应Smith预估器反馈式AGC系统(Feedback AGC system based on model reference adaptive Smith predictor)

3.1 反馈式AGC系统(Feedback AGC system)

根据反馈式AGC系统控制原理, 当来料厚度出现偏差 ΔH 时, 轧件出口厚度偏差^[11]:

$$\Delta h = \frac{Q}{C_p + Q} \Delta H. \quad (26)$$

式中: Q 为轧件的塑性刚度, C_p 为轧机的纵向刚度. 要消除出口厚度偏差值, 需调整的辊缝量为

$$\Delta S_{GMN} = \frac{C_p + Q}{C_p} \kappa_p \left(1 + \frac{\kappa_I}{s}\right) \Delta h. \quad (27)$$

设测厚仪到轧机辊缝的距离为 L , 轧制速度为 ν , 获得检测值的延迟时间为 $\tau_1 = L/\nu$. 测厚仪和压下装置都有一定的响应时间分别为 τ_m 和 τ_h , 反馈式AGC控制系统的总纯延迟时间为:

$$\tau = \tau_1 + \tau_m + \tau_h. \quad (28)$$

3.2 模型参考自适应Smith预估器反馈式AGC系统出口厚度偏差(Exit-thickness deviation of MRA-Smith predictor feedback AGC system)

反馈式AGC控制中模型参考自适应Smith预估器可以补偿纯时间延迟因子 $e^{-\tau s}$. 由图1得到

$$\Delta S = \Delta h G_{C1}(s) - \Delta S G_m(s) G_{C2}(s), \quad (29)$$

$$C_m(s) = \Delta S G_m(s) e^{-\tau_m s}, \quad (30)$$

$$C(s) = \frac{\Delta S + d(s) - C_m(s)}{1 - G_d G_m(s) e^{-\tau_m s}} G(s) e^{-\tau s}, \quad (31)$$

$$\Delta h = h_r(s) - \Delta S G_m(s) - (C(s) - C_m(s)). \quad (32)$$

由式(29)得到厚度偏差到辊缝的传递函数:

$$\frac{\Delta S}{\Delta h} = \frac{G_{C1}(s)}{1 + G_m(s) G_{C2}(s)}. \quad (33)$$

若Smith预估器模型与轧机完全匹配: $G(s) e^{-\tau s} = G_m(s) e^{-\tau_m s}$, 将式(30)代入式(31)得到

$$C(s) - C_m(s) = \frac{d(s) G(s) e^{-\tau s}}{1 - G_d G_m(s) e^{-\tau_m s}}. \quad (34)$$

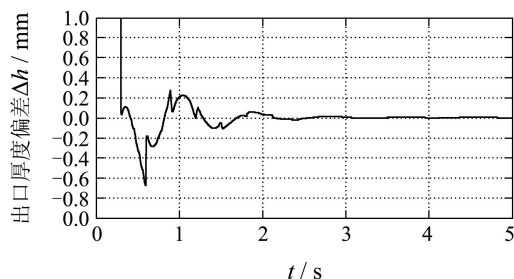
将式(33)和(34)代入式(32)中, 可以得到轧件出口厚度偏差值为

$$\begin{aligned} \Delta h = & \frac{1 + G_m(s) G_{C2}(s)}{1 + G_m(s) [G_{C1}(s) + G_{C2}(s)]} \cdot \\ & [h_r(s) - \frac{d(s) G(s) e^{-\tau s}}{1 - G_d G_m(s) e^{-\tau_m s}}]. \end{aligned} \quad (35)$$

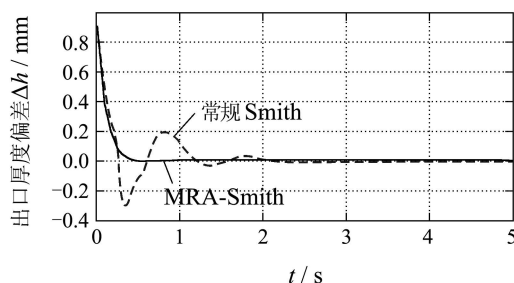
由式(35)可以看到在扰动输入很小, 甚至可以忽略时, 扰动控制器 G_d 取零, 将轧件出口厚度偏差值表达式简化为

$$\Delta h = \frac{1 + G_m(s) G_{C2}(s)}{1 + G_m(s) [G_{C1}(s) + G_{C2}(s)]} h_r(s). \quad (36)$$

AGC厚度控制系统能够根据自适应调节律启动前馈调节器和反馈调节器, 在线自适应调节Smith预估器模型参数趋于与轧机参数相匹配, 使轧出厚度误差逐渐达到设定误差范围内, 不仅补偿了反馈控制存在的纯时间延迟特性, 厚度偏差曲线不存在振荡现象, 系统的稳定性迅速提高, 收敛时间在0.5 s内, 自适应调节响应速度快, 能够满足铝薄板带材的生产精度要求。



(a) 传统PID控制器反馈式AGC控制系统出口厚度偏差



(b) MRA Smith预估器反馈式AGC控制系统出口厚度偏差

图3 铝薄板带材出口厚度偏差曲线

Fig. 3 The exit-thickness deviation of aluminum sheet strip

5 结论(Conclusion)

反馈式AGC厚度控制系统存在纯时间延迟特性制约着板带材产品质量的提高, 采用Smith预估器补偿纯时间延迟是一种在工程上行之有效的办法。但传统的Smith预估器对模型参数不确定性较敏感, 在模型不完全匹配时影响控制系统的性能。采用模型参考自适应Smith预估器能够解决此问题, 其关键是对补偿器模型的建立和纯延迟环节的实现以及自适应调节律的设计。本文研究模型参考自适应Smith预估器PI控制器反馈式AGC厚度控制系统在铝薄板带材轧制过程AGC控制的应用, 结果表明采用结构改进的Smith预估器并结合自适应调节律能够解决模型参数不完全匹配现象影响控制性能的问题, 使轧件出口厚度误差能够在较快的时间内达到允许的范围, 控制响应速度快, 并有效地补偿了传统PI厚度控制中的纯时间延迟特性, 轧件厚度控制精度高, 具有工程应用价值。

参考文献(References):

- [1] PIRES C T A, FERREIRA H C, SALES R M, et al. Set-up optimization for tandem cold mills: A case study[J]. *Materials Processing Technology*, 2006, 173(3): 368 – 375.
- [2] MATAUSEK M R, KVASCEV G S. A unified step response procedure for autotuning of PI controller and Smith predictor for stable processes[J]. *Journal of Process Control*, 2003, 13(6): 787 – 800.
- [3] 董秀成, 杨光, 雷霖. 自适应Smith预估极点配置自校正PI控制器[J]. 电子科技大学学报, 2000, 29(1): 69 – 72.
(DONG Xiucheng, YANG Guang, LEI Lin. Adaptive Smith predictor pole configuration self-modify PI controller[J]. *Journal of the Unit of Environmental Science and Technology of China*, 2000, 29(1): 69 – 72.)
- [4] 刘晓霞, 田兆福, 孙金根, 等. 时滞系统的自适应模糊控制器的研究[J]. 信息与控制, 2003, 32(3): 285 – 288.
(LIU Xiaoxia, TIAN Zhaofu, SUN Jingen, et al. Research on self-adaptive fuzzy controller for Time-delay system[J]. *Information and Control*, 2003, 32(3): 285 – 288.)
- [5] 宋仁杰, 王云宽, 范国梁. 一种改进的Smith预估控制器[J]. 控制工程, 2007, 14(1): 88 – 90.
(SONG Renjie, WANG Yunkuan, FAN Guoliang. Design of modified Smith predictive controller[J]. *Control Engineering of China*, 2007, 14(1): 88 – 90.)
- [6] TAN K K, LEE T H, LEU T H. Predictive PI versus Smith control for dead-time compensation[J]. *ISA Transactions*, 2001, 40(1): 17 – 29.
- [7] ZHOU H Q, WANG Q G, LIU M. Modified Smith predictor design for periodic disturbance rejection[J]. *ISA Transactions*, 2007, 46(4): 493 – 503.
- [8] TAN Y H, ACHIEL V C. Neural-network-based d-step-ahead predictors for nonlinear systems with time delay[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1999, 12(1): 21 – 35.
- [9] 于丽杰, 王京. 监控AGC系统的智能PID控制策略[J]. 北京科技大学学报, 2006, 27(1): 119 – 122.
(YU Lijie, WANG Jing. Intelligence PID control strategy of monitor AGC system[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2006, 27(1): 119 – 122.)
- [10] IBRAHIM K. A new Smith predictor and controller for control of processes with long dead time[J]. *ISA Transactions*, 2003, 42(1): 101 – 110.
- [11] HU X L, JIAO Z J, HE C Y, et al. Forward and backward slip models in MAS rolling process and its on-line application[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2007, 14(4): 15 – 19.
- [12] OSCAR C, FRANCISCO DE L C. Smith predictor based-sliding mode controller for integrating processes with elevated dead-time[J]. *ISA Transactions*, 2004, 43(2): 257 – 270.

作者简介:

李 迅 (1964—), 男, 博士研究生, 研究领域为轧机生产过程建模和优化控制, E-mail: a65814070@online.cq.cn;

宋东球 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究领域为生产过程计算机控制, E-mail: sdq22788@126.com;

喻寿益 (1940—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为自适应控制、计算机过程控制和进化计算理论等;

桂卫华 (1950—), 男, 教授, 博士生导师, 院长, 研究领域为大系统理论、鲁棒控制及复杂生产过程的建模及优化控制等。