

# 实用自抗扰控制在大时滞厚度自动监控系统中的应用

王丽君<sup>1,2</sup>, 童朝南<sup>1,2</sup>, 李擎<sup>1,2</sup>, 尹怡欣<sup>1,2</sup>, 高志强<sup>3</sup>, 郑勤玲<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学 自动化学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 钢铁流程先进控制教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 克里夫兰州立大学 先进控制技术中心, 美国 俄亥俄州 克里夫兰 44115)

**摘要:** 针对热连轧监控AGC(自动厚度控制)大时滞系统具有不确定和干扰因素多等特点, 采用线性降阶模型及参数优化设计, 提出一种实用自抗扰控制(ADRC)控制方案, 以满足简单、实用、好调、节能等工业界的要求. 通过对被控对象和状态观测器的降阶, 使得系统总扰动(内部不确定性、外部扰动)的实时估计由一个仅为一阶的扩张状态观测器就可实现. 为了把所设计的实用ADRC与常规ADRC、常规Smith预估器和PID控制器进行公平比较, 各控制器的最佳参数均采用变尺度混沌优化方法得到. 仿真结果表明, 两种ADRC的抗扰性和鲁棒性优于常规的Smith预估器和PID控制器. 与常规ADRC相比, 实用ADRC的可调参数大大减少, 能耗指标也明显降低, 为下一步的工程实现提供了途径.

**关键词:** 监控AGC; 时滞; 自抗扰控制; 扩张状态观测器

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Practical active disturbance rejection solution for monitoring automatic gauge control system with large time-delay

WANG Li-jun<sup>1,2</sup>, TONG Chao-nan<sup>1,2</sup>, LI Qing<sup>1,2</sup>,  
YIN Yi-xin<sup>1,2</sup>, GAO Zhi-qiang<sup>3</sup>, ZHENG Qin-ling<sup>3</sup>

(1. School of Automation & Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Advanced Control of Iron and Steel Process (Ministry of Education),  
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Center for Advanced Control Technologies, Cleveland State University, Cleveland Ohio 44115, USA)

**Abstract:** A practical active disturbance rejection control (ADRC) solution is proposed for the monitoring automatic gauge control (AGC) system with large time-delay in the hot strip mill. Employing a linear reduced-order model with optimized parameters, the practical ADRC is simple to use, easy to tune and energy-efficient in dealing with the uncertainties and disturbances in plant dynamics. Through the order reduction in both the plant model and the state observer, we develop a first order extended state observer for estimating in real-time the total value of the external and internal disturbances. Simulation results show that the proposed practical ADRC solution compares favorably to the existing solutions, including the standard ADRC, the Smith Predictor and the PID controller, which are all optimized using the mutative scale chaos optimization method to make the comparisons fair. Both the practical and standard ADRCs outperform the Smith Predictor and the PID controller in disturbance-rejection and robustness; however, the practical ADRC has fewer adjustable parameters and significantly smaller energy consumption than the standard ADRC, making it a viable candidate for industrial applications.

**Key words:** monitoring automatic gauge control; time-delay; active disturbance rejection control; extended state observer

## 1 引言(Introduction)

带钢热连轧生产中, 厚度精度是衡量产品最重要的质量指标之一, 对产品的成材率有决定性的影响, 需采用多种自动厚度控制(automatic gauge control, AGC)来保证. 间接测厚的AGC虽然考虑了各种补偿因素, 仍需X射线测厚仪直接测出的成品厚度值为基准, 对AGC系统进行监控(monitor AGC, MN-AGC), 用来纠正趋势性厚差以及厚度平均值偏

厚或偏薄<sup>[1]</sup>.

但由于各机架到测厚仪的距离较远, 而带钢出口速度却较快, 导致时滞与系统时间常数相比要大得多, 因此监控AGC属于大时滞过程; 另外轧制速度为一不确定量, 导致时滞还是不确定的. 由于时滞的存在, 系统的设计和控制难度增大, 而时滞的不确定性则使得问题更加复杂. 多年来, 人们相继将最优多变量控制<sup>[2]</sup>、模糊控制<sup>[3]</sup>、智能PID控

制<sup>[4]</sup>、Smith 预估器改进型<sup>[5]</sup>等应用于监控 AGC 系统, 提高了板厚的控制精度. 近年来, 随着对带钢成材率要求的不断提高, 钢铁流程中的各种扰动已成为制约带钢质量精确控制的瓶颈, 需要采用先进的控制技术进一步深入研究, 以满足节能减排、绿色制造的要求<sup>[6]</sup>. 而自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)技术由于具有抗干扰能力强、精度高、响应速度快等特点, 得到了广泛应用<sup>[7]</sup>. 对于时滞对象的控制, ADRC 在设计时一般把时滞环节近似成一阶惯性环节<sup>[8-9]</sup>, 文献<sup>[10]</sup>将这种方法改进后应用于监控 AGC 系统, 尽管取得了较好的控制效果, 但 ADRC 可调参数仍较多. 因此, 本文拟借鉴文献<sup>[7]</sup>将时滞环节近似成单位 1 的思想, 首先将被控对象降阶, 按无时滞模型设计 ADRC. 另外, 利用输出板厚可由测厚仪直接测量的优势, 拟借鉴文献<sup>[11]</sup>对常规扩张状态观测器(extended state observer, ESO)降阶, 即设计一阶 ESO 估计一阶惯性对象总扰动的思想, 推广到对不确定大时滞监控 AGC 系统的扰动估计. 为便于工程实现, 尝试将一种简单、实用的 ADRC 技术应用于该系统.

## 2 热连轧监控 AGC 系统的数学模型 (Mathematical model of monitor AGC for hot strip mill)

国内带钢热连轧监控 AGC 系统的结构一般如图 1 所示. 为安全起见, X 射线测厚仪安装在精轧机组出口, 与末机架 F7 有一定的距离, 因此造成较大的传输延迟. 前面的 F1-F4 机架检测滞后更大, 容易造成系统振荡. 因此监控 AGC 一般用于 F6-F7 机架, 必要时扩大到 F5. 故图 1 中未画 F1-F4 机架. 热轧带钢的厚度质量是通过采用多种 AGC 综合控制来保证的. 在这些 AGC 中, 只有监控 AGC 的反馈数据是通过 X 射线测厚仪实测得到, 而其他 AGC 均采用间接测厚方式. 本文只研究监控 AGC 系统, 因此图 1 中未画其他 AGC.

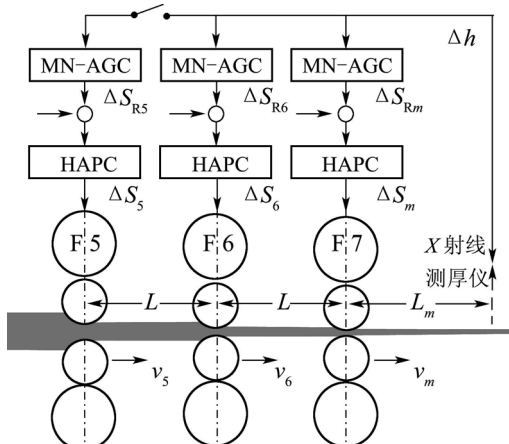


图 1 热连轧监控 AGC 系统的结构图

Fig. 1 Structure of Monitor AGC for hot strip mill

当测厚仪检测出实际轧出厚度后, 与给定值相比, 求得实际厚度偏差  $\Delta h$  后, 反馈到各机架的 MN-AGC 控制系统中, 修正各机架的液压自动位置控制 (hydraulic automatic position control, HAPC) 系统中的辊缝设定值, 进而调节轧机辊缝来消除厚差.

但监控 AGC 的主要缺点: 由于各机架到测厚仪的距离较远, 传输延迟造成大的时滞, 实际调厚的点不是所检测之处. 各机架的纯延迟时间<sup>[1]</sup>

$$\tau_i = \sum_{i=5}^{m-1} L/v_i + L_m/v_m, \quad (1)$$

式中:  $i$  为机架号; 共有  $m$  个机架;  $L, L_m$  分别为机架间距离、末机架中心线到测厚仪的距离;  $v_i, v_m$  分别为各机架及末架出口带钢速度.

由轧制理论的分析可知, 轧机变形区内的工艺参数表现为一系列的非线性函数关系. 为便于设计, 采用在工作点附近小的变化范围内将非线性函数线性化.

对于监控 AGC, 板厚变化量主要取决于轧机辊缝, 但还受到温度、钢种等多种因素的影响, 而且这些因素之间的相互作用非常复杂, 理论推导其数学模型相当困难. 因此, 根据现场实际情况, 热连轧板厚与辊缝的关系可近似为一阶惯性时滞环节<sup>[9]</sup>

$$\Delta h_i / \Delta S_i = K_{1i} e^{-\tau_i s} / (T_{1i} s + 1), \quad (2)$$

其中:  $\Delta$  表示与稳态工作点的偏差;  $h_i$  为  $i$  机架出口板厚;  $S_i$  为轧机辊缝; 模型增益 (或称压下效率系数)  $K_{1i} = M_i / (M_i + Q_i)$ ;  $M_i$  为轧机刚度, 在轧制过程中基本上为一常数, 只同板宽和支撑辊直径有关; 轧件塑性系数  $Q_i = -\frac{\partial P_i}{\partial h_i}$ ;  $P_i$  为轧制力;  $T_{1i}$  为时间常数.

HAPC 系统由控制器、伺服放大器、伺服阀、液压缸及位置传感器等多个环节组成, 理论模型比较复杂, 不利于分析研究. 但由于其大部分环节惯性很小, 因此可将其简化为一阶惯性环节

$$\Delta S_i / \Delta S_{Ri} = 1 / (T_{2i} s + 1), \quad (3)$$

式中:  $S_{Ri}$  为辊缝设定值;  $T_{2i}$  为 HAPC 系统的响应时间.

本文只研究末机架, 故省略下标  $i$ . 对于其他机架, 可根据秒流量平衡方程进行一定的分配. 综合式 (1)-(3), 则末机架监控 AGC 系统在稳定工作点附近的传递函数可近似为二阶惯性时滞环节

$$y(s) / u(s) = K_1 e^{-\tau s} / (T_1 s + 1)(T_2 s + 1), \quad (4)$$

式中: 被调量  $y$  表示末架出口厚差  $\Delta h$ , 控制量  $u$  表示末架辊缝设定值的修正量  $\Delta S_R$ .

实际上, 监控 AGC 系统的数学模型是一个复杂的非线性慢时变大时滞模型, 而式 (4) 只是一个理想的标称模型, 忽略了许多次要因素: 1) 在轧钢过程中, 各机架出口速度波动导致时滞不确定; 2) 由

于 $Q$ 取决于轧件的厚度、轧件材料和轧制温度等,导致模型增益 $K_1$ 为一变量,需根据具体轧制情况来确定;3)系统的不确定性外扰可分为两类:一是轧件方面的扰动包括来料入口厚度的波动和轧件硬度的波动;二是轧机参数的扰动包括支撑辊偏心、轧辊热膨胀、轧辊磨损以及油膜轴承的油膜厚度变化等。

而ADRC将这些因素全部看作系统的总扰动,对其进行实时估计并予以补偿,使对象的不确定性和外扰在反馈中自动加以抵消。

### 3 大时滞监控AGC系统的实用ADRC设计 (Design of practical ADRC for monitor AGC with large time-delay)

对于时滞对象的控制,在设计ADRC时,一般把时滞环节近似成一阶惯性环节,但这样就人为地提高了被控对象的阶次,导致ADRC可调参数较多。为此,借鉴文献[7]控制一阶惯性加纯延迟系统时对模型简化的思想,把监控AGC系统(4)中的时滞环节近似成单位1,即忽略时滞环节,这样被控对象就简化成无时滞的二阶惯性环节。

另外,由于 $T_2$ 与 $T_1$ 相比很小可忽略不计,监控AGC系统(4)经过模型降阶,就可近似为无时滞的一阶惯性环节

$$y(s)/u(s) = K_1/(T_1s + 1). \quad (5)$$

为方便ADRC的设计,需将数学模型(5)转化为微分方程的描述

$$\dot{y} = \bar{f}(y, d, t) + b \cdot u(t), \quad (6)$$

其中:未知函数 $\bar{f}(\cdot) = d - ay$ ;  $d$ 为未知外扰;  $a = 1/T_1$ ;  $b = K_1/T_1$ 。

由于轧钢过程中 $K_1$ ,  $T_1$ 及 $d$ 均存在不确定性,导致 $\bar{f}(\cdot)$ 和 $b$ 等均不确定。

令监控AGC系统的总扰动

$$f(\cdot) = \bar{f}(\cdot) + (b - b_0)u(t), \quad (7)$$

式中:  $(b - b_0)u(t)$ 当作新的扰动项;时滞增益 $b_0$ 为可调参数。

则微分方程(6)可改写为

$$\dot{y} = f(y, d, t) + b_0u(t). \quad (8)$$

对于该系统,令状态变量

$$x_1 = y. \quad (9)$$

将总扰动 $f(\cdot)$ 视为系统的扩张状态变量 $x_2$ ,即令

$$x_2 = f(\cdot) = \dot{y} - b_0 \cdot u, \quad (10)$$

则数学模型由微分方程(8)转化为状态空间方程的描述

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + b_0 \cdot u, \\ \dot{x}_2 = \omega, \\ y = x_1, \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\omega = \dot{f}(\cdot)$ 。

常规的ADRC由跟踪微分器(tracking differentiator, TD)、扩张状态观测器(extended state observer, ESO)及状态误差反馈(state error feedback, SEF)控制律3部分组成。由于时滞对象反应迟缓,故考虑去掉TD,希望能借助一开始的大误差控制信号把对象“激励”起来,让输出尽快冲上去。

常规的ESO及SEF控制律在具体构成上均建议采用非线性函数,搭建模块较复杂。而监控AGC系统采样步长较小,因此可改用线性函数实现<sup>[10]</sup>,用普通的Simulink模块即可实现,更加简单直观,计算量小。下面分别介绍线性ESO(linear extended state observer, LESO)及线性SEF(linear state error feedback, LSEF)控制律这两部分的设计。

#### 3.1 一阶线性ESO的设计(Design of first order linear extended state observer)

对于化简后的模型(11),按常规应设计二阶ESO<sup>[7]</sup>,以便观测出系统的状态变量 $x_1$ 和 $x_2$ 。但由于输出变量板厚 $y$ 为测厚仪直接实测出的数据,所以状态变量 $x_1$ 无需进行观测,只需观测出系统的扩张状态变量 $x_2$ (系统的总扰动 $f(\cdot)$ )即可。因此,借鉴文献[11]利用一阶ESO估计一阶惯性对象总扰动的思想,对式(11)设计降阶LESO,用于估计热连轧监控AGC二阶惯性时滞系统的总扰动。

重构系统的扩张状态变量,则一阶LESO可设计为<sup>[11]</sup>

$$\dot{z}_2 = -\omega_0 \cdot z_2 - \omega_0 \cdot b_0 \cdot u + \omega_0 \cdot \dot{y}, \quad (12)$$

式中:  $z_2$ 为扩张状态观测量,是扩张状态变量 $x_2 = f(\cdot)$ 的观测估计值;观测器的带宽 $\omega_0 > 0$ ,可调参数,决定ESO的收敛程度。

为消掉式(12)中的 $\dot{y}$ ,令

$$z = z_2 - \omega_0 \cdot y, \quad (13)$$

则式(12)变为

$$\dot{z} = -\omega_0 \cdot z - \omega_0^2 \cdot y - \omega_0 \cdot b_0 \cdot u. \quad (14)$$

于是,就可得到系统的扩张状态观测量

$$z_2 = z + \omega_0 \cdot y. \quad (15)$$

可见,适当选择一阶LESO的可调参数 $\omega_0$ 和 $b_0$ ,就可快速准确地估计出系统的总扰动

$$z_2 \rightarrow f(\cdot). \quad (16)$$

与二阶LESO相比,所设计的LESO减少了1个可调参数。与常用的三阶LESO相比,可调参数减少了2个。

#### 3.2 线性SEF控制律的设计(Design of linear state error feedback control law)

既然LESO能够实时获得总扰动 $f(\cdot)$ 的估计值 $z_2$ ,如果能在控制律中予以补偿,则可实现自抗扰的功能。因此,控制律取

$$u = (u_0 - z_2)/b_0. \tag{17}$$

若忽略  $z_2$  对总扰动  $f(\cdot)$  的估计误差, 则系统(8)被线性化成“积分器串联型”

$$\dot{y} = f(\cdot) - z_2 + u_0 \approx u_0. \tag{18}$$

这样, 就易于用“状态误差反馈”来设计出理想的控制律.

在继承经典PID“基于误差来生成消除误差的控制策略”精髓的基础上, 控制分量  $u_0$  一般采用非线性配置<sup>[7]</sup>来模拟人的手动控制策略. 从某种意义上讲, 它具有“智能”功能. 但为提高大时滞系统的快速响应性能以及简易实现, 控制分量  $u_0$  改用线性配置. 由于ESO设计为一阶, 因此  $u_0$  只采用PID的比例控制即可:

$$u_0 = k_p e, \tag{19}$$

其中: 误差  $e = r - y$ ;  $r$  为设定值;  $k_p$  为控制律增益, 可调参数.

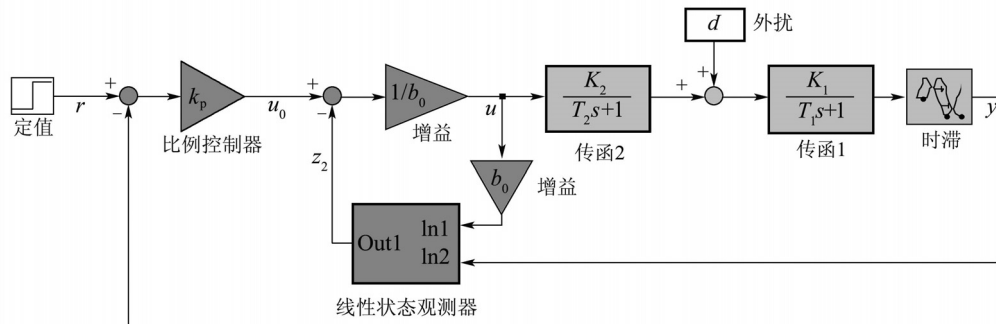


图 2 实用ADRC的方框图

Fig. 2 Block diagram of practical ADRC

可见, 这种实用的ADRC可调参数只有3个:  $b_0$ 、比例控制器参数  $k_p$  和一阶LESO参数  $\omega_0$ , 大大减少了控制器参数整定的麻烦.

为进一步深入分析和理解ADRC, 式(12)改写为

$$z_2 = \omega_0(sy - b_0 \cdot u)/(s + \omega_0), \tag{20}$$

将上式及式(19)代入式(17), 经过整理后, 可得到实用ADRC的等效表达式

$$u = k_p(s + \omega_0)(r - y)/b_0s - \omega_0 \cdot y/b_0, \tag{21}$$

令PID控制器参数:

### 3.3 实用ADRC的仿真实现(Simulation realization of the practical ADRC)

对于不确定大时滞监控AGC系统, 所设计的实用ADRC结构如图2所示. 图中浅灰背景为被控对象,  $d$  为外部扰动. 对于二阶惯性加纯时滞对象(4), 一般在设计ADRC时把时滞环节近似成一阶惯性环节, 则对象近似为三阶惯性环节, 按常规应设计三阶ADRC(四阶ESO). 文献<sup>[10]</sup>根据系统特点, 忽略小的惯性环节, 设计了二阶ADRC(三阶ESO), 但可调参数仍较多. 为进一步简化ADRC的设计, 忽略时滞环节<sup>[7]</sup>及小惯性环节, 将该模型降阶为一阶惯性环节, 按理应设计一阶ADRC(二阶ESO)<sup>[7]</sup>. 但由于输出  $y$  可测, 无需估计该状态, 只需估计出总扰动这一个状态即可, 因此可把ESO再降低一阶<sup>[11]</sup>, 根据式(14)–(15)搭建一阶LESO子系统. 控制律利用比例控制(19)和扰动估计量的补偿来生成控制量(17). 如图中深灰色背景所示.

$$K_P = k_p/b_0, \quad K_I = k_p \cdot \omega_0/b_0,$$

则式(21)可写为

$$u = (K_P + K_I/s)(r - y) - \omega_0 \cdot y/b_0. \tag{22}$$

上式对应的方框图如图3所示. 对于常规PID, 若只有比例控制, 没有积分项, 则会造成静差. 值得注意的是, 尽管控制分量(19)中只有比例项, 但由于控制律(17)中包含扰动估计量的实时补偿项  $-z_2/b_0$ , 使得ADRC等效表达式(22)中出现了积分项. 因此, 若调好控制器参数, 系统则不会出现静差, 可以满足带钢的高精度轧制.

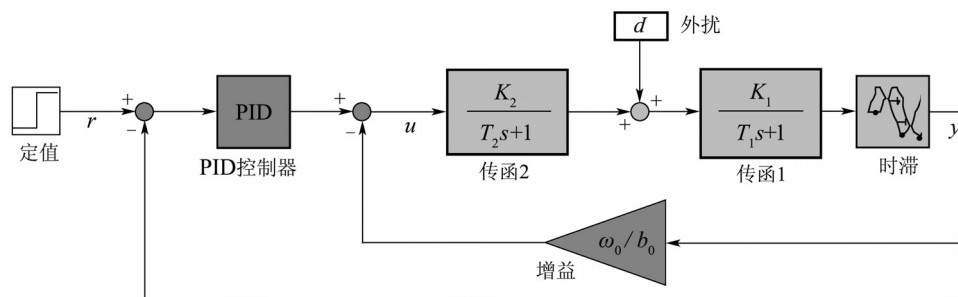


图 3 实用ADRC的等效方框图

Fig. 3 Equivalent block diagram of practical ADRC

总之,这种实用的ADRC并不要求知道对象和外部扰动的精确模型,只需根据对象的可量测输入、输出,并选择适当的非线性或线性函数及其参数,对总扰动进行实时估计并予以补偿,即可达到控制的目的。

#### 4 仿真研究(Simulation studies)

以某热连轧精轧机组末机架为例,监控AGC系统的标称参数:轧制钢种Q235,带钢宽度1200 mm,轧机刚度 $M = 5800 \text{ kN/mm}$ ,精轧机组来料厚度36 mm,末架出口厚度设定为2.0 mm,对应的轧件塑性系数 $Q \approx 31006 \text{ kN/mm}$ , $T_1 = 0.5 \text{ s}$ , $T_2 = 0.01 \text{ s}$ , $L_m = 6 \text{ m}$ , $v_m = 12 \text{ m/s}$ ,则纯滞后时间为0.5 s。

Simulink中.mdl仿真组态参数设置:固定步长为0.01 s,采用最简单的欧拉方程(Euler)ode1求解微分方程,近似误差可归结为扰动量。

尽管本文设计的一阶实用ADRC可调参数只有3个,但作为一种新技术,目前还缺乏相关的成熟理论,很难精确获得ADRC参数的稳定域,而且也不像PID控制器那样有许多工程的方法来确定参数初值。因此,利用混沌特有的遍历性和初值敏感性,采用变尺度混沌优化方法对ADRC参数寻优<sup>[12]</sup>。

优化时采用的目标函数为调节时间 $t_s$ 最小,约束条件为超调量 $\sigma \leq 2\%$ ,以满足带钢高精度、高速度轧制。

为实现钢铁流程的节能减排、绿色生产需求,根据被控对象,考察能耗指标 $\int u^4$ 。

一阶ADRC参数优化结果: $b_0 = 1.6029$ ,LSEF参数 $k_p = 3.5$ ,一阶LESO参数 $\omega_0 = k_p$ 。

将一阶实用ADRC的控制效果分别与二阶常规ADRC<sup>[10]</sup>、常规Smith预估器、PID控制器进行比较。PID参数由改进的Z-N方法整定后超调仍较大,因此这3种控制器也采用上述混沌优化方法得到。为公平起见,优化时采用的目标函数与一阶ADRC的相同。

二阶常规ADRC参数、三阶LESO参数分别为: $\beta_{01} = 100$ , $\beta_{02} = 4000$ , $\beta_{03} = 60000$ ;  $b_0$ 和LSEF参数分别为: $b_0 = 90$ , $k_p = 15.2$ , $k_d = 8.81$ 。

常规Smith预估器中预估模型的参数均采用标称值,其中PID参数: $K_P = 8$ , $K_I = 20.4$ , $K_D = 0$ 。

PID参数: $K_P = 0.58$ , $K_I = 0.99$ , $K_D = 0$ 。

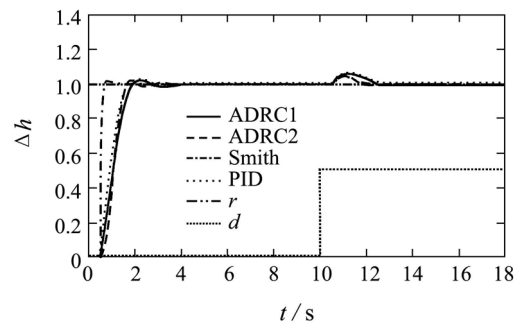
这三种控制器的主回路中都设有单位增益环节 $1/K_{10}$ 。 $K_{10}$ 为模型增益 $K_1$ 的标称值或估计值,需根据具体轧制情况来确定<sup>[10]</sup>。

首先在 $t = 0$ 加单位阶跃定值扰动 $r$ ,然后在10 s加幅值50%的阶跃外扰 $d$ 。

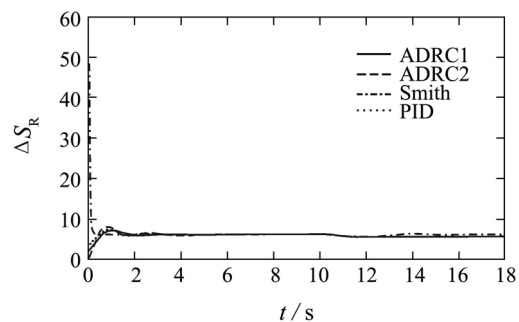
为了有所区别,下面仿真结果中,实线、虚线、点划线和点线分别代表一阶实用ADRC、二阶常规ADRC、常规Smith预估器和PID。

##### 1) 被控对象在标称状态下的控制效果。

对于标称状态,仿真结果如图4所示,在单位阶跃定值扰动时各性能指标见表1所示。因为各控制器参数按相同指标优化,在单位阶跃定值扰动时,3种方法都具有良好的定值跟踪能力且无静差,二阶ADRC的调节时间比一阶ADRC、PID稍快些。而Smith预估器由于预估完全补偿而提前动作,从而明显地加快了调节过程,大大减小了时间与绝对误差乘积积分(ITAE)指标,但是初始控制量过大,造成能耗指标是其他控制器的十多倍。与二阶ADRC和PID相比,一阶ADRC的能耗指标分别减少了5%,3%。



(a) 被调量



(b) 控制量

图4 标称状态的相应曲线

Fig. 4 Response of the nominal system

##### 2) 被控对象参数摄动时的控制效果。

考虑未建模动态的影响,被控对象标称模型与实际对象不完全匹配,例如模型增益 $K_1$ 。在轧制同种宽度的板材中,若支撑辊直径不变,尽管 $M$ 基本上为一常数,但由于温降和加工硬化现象的存在,特别是轧制薄材时,轧件塑性系数 $Q$ 将成倍加大,并数倍于 $M$ ,因此 $K_1$ 主要取决于 $Q$ 。但由于 $Q$

的计算误差较大, 导致 $K_1$ 的变化范围较大. 由于ADRC按最大增益设计, 因此将 $Q$ 增加80%, 则 $K_1$ 减小约30%. 控制器参数不变, 仿真结果如图5所示, 在单位阶跃定值扰动时各性能指标见表1所示. 与PID相比, 二阶ADRC的ITAE减小了11%; 尽管Smith预估器在标称状态时的调节时间要快得多, 但当模型增益变化较大时曲线出现抖动, 控制品质不太理想, 而且能耗指标是其他控制器的十多倍. 与二阶ADRC相比, 一阶ADRC的能耗指标减少了11%.

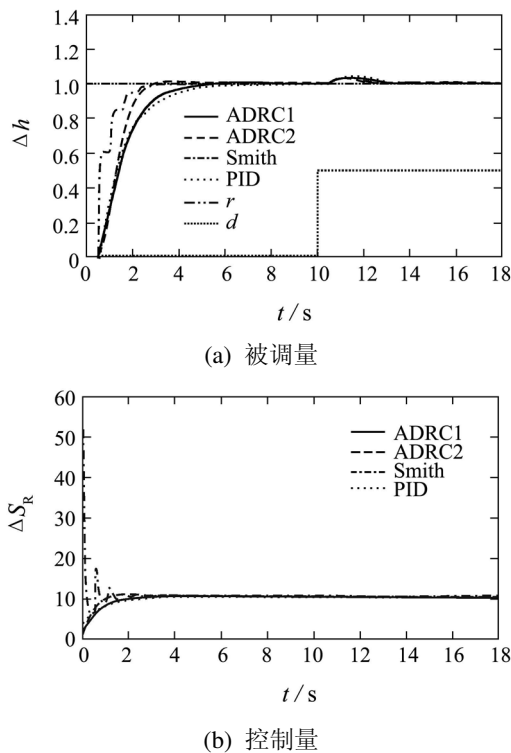


图5 模型增益减小约30%的相应曲线  
Fig. 5 Response of model gain decreased by about 30%

3) 被控对象时滞发生时变的控制效果.

由于X射线测厚仪的安装位置与精轧末机架之间的距离是一定的, 因此检测造成的纯滞后时间与末架出口速度成反比. 在轧钢过程中, 由于存在加、减速轧制以及随机速度干扰, 导致各机架出口速度波动, 因而造成纯滞后时间是变化的. 由于ADRC按最大时滞设计, 因此将 $v_m$ 增加15%, 则 $\tau$ 减小约13%. 控制器参数不变, 仿真结果如图6所示, 在单位阶跃定值扰动时各性能指标见表1所示. 当 $\tau$ 波动较大时, Smith预估器出现振荡, 导致能耗指标是其他控制器的十多倍. 若 $\tau$ 减小约15%, 会导致系统发散. 可见, Smith预估器对纯滞后时间极为敏感, 两种ADRC和PID对被控对象的不确定时滞均具有较好的鲁棒性, 而二阶ADRC的鲁棒性更强. 与二阶ADRC和PID相比, 一阶ADRC的能耗

指标分别减少了4%, 2%.

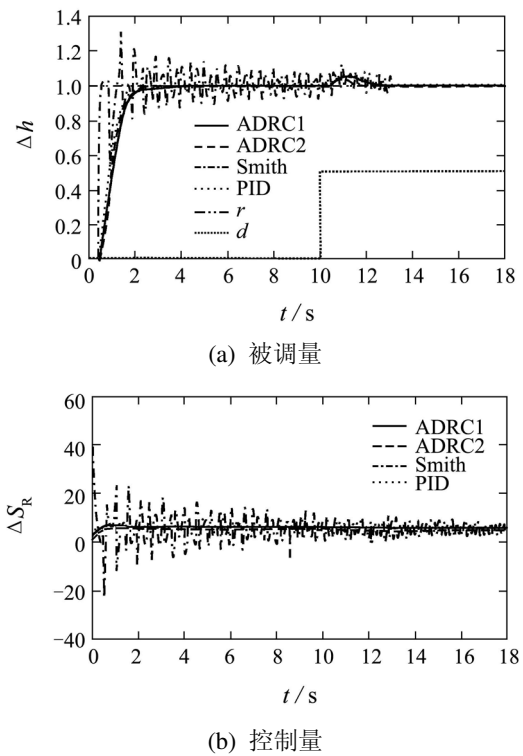


图6 时滞减小约13%的相应曲线  
Fig. 6 Response of time-delay decreased by about 13%

表1 4种控制器的性能指标对比

Table 1 Comparison of four performance controllers

		ADRC1	ADRC2	Smith	PID
标	$\sigma/\%$	2	1.98	2	1.91
称	$t_s/s$	1.82	1.57	0.65	1.7
状	ITAE	77	65	17	63
态	$\int u^4$	$1.62 \times 10^6$	$1.7 \times 10^6$	$2.42 \times 10^7$	$1.66 \times 10^6$
30%	$K_1$	0	0.74	0	0.02
减	$t_s/s$	4.44	2.66	2.72	5.23
约	ITAE	187	115	58	212
30%	$\int u^4$	$1.08 \times 10^7$	$1.2 \times 10^7$	$3.53 \times 10^7$	$1.05 \times 10^7$
$\tau$	$\sigma/\%$	0	0.79	31.44	0
减	$t_s/s$	2.95	2.15	10	2.53
约	ITAE	77	66	240	65
13%	$\int u^4$	$1.57 \times 10^6$	$1.63 \times 10^6$	$3.48 \times 10^7$	$1.6 \times 10^6$

5 结论(Conclusions)

本文将一种实用ADRC技术应用于热连轧大时滞监控AGC系统, 并与常规的ADRC、Smith预估器和PID进行了比较. 为公平起见, 控制器的最佳参数均采用变尺度混沌优化方法得到. 仿真结果表明, 尽管常规的Smith预估器在模型匹配时定值跟踪能力要快得多, 但对过程模型特别是纯滞后时间极为敏感; PID在模型匹配时定值跟踪能力

和ADRC相差不大,但抗扰性和鲁棒性不如ADRC强.另外,与常规的二阶ADRC相比,尽管两种ADRC的抗扰性和鲁棒性相差不大,但一阶实用ADRC的可调参数大大减少,能耗指标也明显降低,为下一步的工程实现提供了途径,对于实现钢铁行业的节能减排、绿色生产具有重要的意义.

### 参考文献(References):

- [1] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.  
(SUN Yikang. *Model and Control for Hot Strip Mill*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.)
- [2] TEZUKA T, YAMASHITA T, SATO T, et al. Application of a new automatic gauge control system for the tandem cold mill[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, 38(2): 553 – 558.
- [3] 童朝南, 孙一康, 陈百红, 等. 热连轧综合AGC系统的智能化控制[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(5): 553 – 555.  
(TONG Chaonan, SUN Yikang, CHEN Baihong, et al. Intelligent control of a multi-function AGC system in hot strip mills[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2002, 24(5): 553 – 555.)
- [4] 曲蕾, 王京. 多变量非线性厚度-活套系统的鲁棒逆控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(5): 562 – 566.  
(QU Lei, WANG Jing. Robust inverse control for the multivariable nonlinear automatic-gauge-control and looper (AGC - LP) system[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(5): 562 – 566.)
- [5] 李迅, 宋东球, 喻寿益, 等. 基于模型参考自适应Smith预估器的反馈式AGC厚度控制系统[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(9): 999 – 1003.  
(LI Xun, SONG Dongqiu, YU Shouyi, et al. Feedback automatic gauge control system using model reference adaptive Smith predictor[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(9): 999 – 1003.)
- [6] WANG Lijun, TONG Chaonan, LI Qing, et al. Disturbance rejection in iron and steel process: problems and current solutions[C] // *Proceedings of the 2011 30th Chinese Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 6356 – 6361.
- [7] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.  
(HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique — the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [8] XIA Y, SHI P, LIU G P, et al. Active disturbance rejection control for uncertain multivariable systems with time-delay[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2007, 1(1): 75 – 81.
- [9] HAN Jingqing. From PID to active disturbance rejection control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [10] WANG Lijun, TONG Chaonan, YIN Yixin, et al. Active disturbance rejection controller for monitor AGC system with large time delay[C] // *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 590 – 594.
- [11] YANG Ruiguang, SUN Mingwei, CHEN Zengqiang. Active disturbance rejection control on first-order plant[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(1): 95 – 102.
- [12] 王丽君, 童朝南, 彭开香, 等. 板宽板厚多变量系统的自抗扰控制及混沌优化[J]. 控制与决策, 2007, 22(3): 304 – 308.  
(WANG Lijun, TONG Chaonan, PENG Kaixiang, et al. Active disturbance rejection control and chaos optimization for strip width and gauge multivariable systems[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(3): 304 – 308.)

### 作者简介:

王丽君 (1971—), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为流程工业生产自动化、生产过程智能控制、智能优化等, E-mail: wanglj@ustb.edu.cn;

童朝南 (1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为流程工业生产自动化、生产过程智能控制、鲁棒控制理论及应用等, E-mail: tcn@ies.ustb.edu.cn;

李擎 (1971—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为智能控制理论及其在交流调速系统、混沌控制中的应用, E-mail: liqing@ies.ustb.edu.cn;

尹怡欣 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂系统的建模与控制、智能控制与智能管理、流程工业自动化, E-mail: yyx@ies.ustb.edu.cn;

高志强 (1960—), 男, 终身副教授, 博士生导师, 主要研究方向为ADRC技术的研发、推广、普及, 控制理论与工程实际的知行合一, E-mail: z.gao@ieee.org;

郑勤玲 (1984—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为ADRC技术、预测控制等的理论研究、过程控制自动化, E-mail: qinlingzheng@gmail.com.