

文章编号: 1001-0920(2007)03-0304-05

## 板宽板厚多变量系统的自抗扰控制及混沌优化

王丽君, 童朝南, 彭开香, 张 飞  
(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 针对热连轧板宽板厚双输入双输出大时滞系统的复杂性, 给出了简化的数学模型, 并针对该模型设计了与静态解耦补偿器串联的多变量自抗扰控制(ADRC)系统. 为获得 ADRC 最佳参数, 引入了具有全局快速搜索能力的变尺度混沌优化方法. 仿真结果表明, ADRC 抗扰性和鲁棒性明显优于常规 PID.

**关键词:** 板宽; 板厚; 自抗扰控制; 解耦; 混沌优化

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

### Active disturbance rejection control and chaos optimization for strip width and gauge multivariable systems

WANG Li-jun, TONG Chaoran, PENG Kai-xiang, ZHANG Fei

(Information Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.  
Correspondent: WANG Li-jun, E-mail: lijunwangh@sina.com)

**Abstract:** In view of the complexity of double-input and double-output systems with large time-delay, a multivariable active disturbance rejection controller (ADRC) is proposed for strip width and gauge multivariable systems. It is constructed by the cascade of a static decoupling compensatory unit with the simplified model. With the high efficiency of global searching, the mutative scale chaos optimization method is introduced to optimize the parameters of ADRC. The simulation results show that the proposed ADRC produces better disturbances rejection and robustness than the conventional PID controller.

**Key words:** Width; Gauge; Active disturbance rejection control; Decoupling; Chaos optimization

### 1 引 言

随着用户对热连轧成材率要求的不断提高, 传统粗轧自动宽度控制(RAWC)技术已很难满足要求, 而利用机架间张力调宽的精轧自动宽度控制(FAWC)是近几年国外才发展起来的技术, 弥补了长期以来精轧机组不能直接对宽度进行控制的不足, 减少了成品的切边损耗<sup>[1]</sup>. 但张力的变化会造成板厚波动, 必须增加张力补偿功能. 另外, 板宽板厚多变量系统还存在其他难以控制的因素, 如不确定性、大时滞、干扰因素多、非线性、难以获得精确的数学模型等. 热连轧技术的不断发展, 不仅要求控制系统具有更高的动、静态品质指标, 还必须保证具有更好的鲁棒性和适应能力. 为此, 本文探讨将一种新型的控制方法——自抗扰控制(ADRC)技术应用于该系统, 以期取得更好的控制效果. ADRC 是一种不

依赖于模型的非线性控制器, 具有精度高、响应速度快、抗干扰能力强等特点<sup>[2]</sup>.

传统的 ADRC 参数一般采用试验加试凑的方法由人工整定. 多年来人们致力于研究 ADRC 参数的整定问题, 并提出了多种方法. 文献[3]给出了基于时间尺度的 ADRC 参数调整方法; 文献[4]利用自稳定域理论推导出二阶扩张状态观测器(ESO)参数选择规律; 文献[5]通过理论推导和仿真实验得出一阶 ADRC 参数整定规则; 文献[6]通过大量数值仿真对参数整定进行系统研究, 给出二阶 ADRC 参数整定原则.

近年来, 一种全新的智能优化算法——混沌优化方法受到广泛关注. 利用混沌特有的遍历性, 混沌优化方法更容易跳出局部最优解, 而且无需优化问题具有连续性和可微性, 并具有全局收敛能力、搜索

收稿日期: 2005-12-30; 修回日期: 2006-03-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60374032); 国家发改委高新技术项目(发改办高技[2005]1899).

作者简介: 王丽君(1971—), 女, 河北保定人, 博士生, 从事先进控制理论在轧钢中的应用、智能优化等研究; 童朝南(1955—), 男, 安徽无为, 教授, 博士生导师, 从事轧钢生产过程智能控制理论与应用等研究.

效率高、算法简单易行等优点. 因此, 本文尝试将变尺度混沌优化方法<sup>[7]</sup>应用于 ADRC 参数的寻优设计.

### 2 热连轧板宽板厚多变量系统的数学模型

对于精轧机组, 板宽变化量主要包括变形区附近的自然宽展及机架间的蠕变板宽变化量两部分. 本文重点介绍监控 FAWC, 板宽变化量主要取决于机架间张应力(即后张应力), 但还受到温度、钢种及前张应力等的影响, 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. 另外, 精轧末机架中心线到测宽仪的距离较远, 传输延迟会造成较大的时滞. 因此, 根据现场实际情况, 热连轧板宽与机架间张应力的关系可近似为一阶惯性时滞环节, 即

$$w_i / w_{i-1} = K_{w_i} e^{-s \tau_i} / (T_{v_i} s + 1). \quad (1)$$

其中:  $w_i = L / v_i + L_m / v_m$ ,  $K_{w_i} = \partial w_i / \partial \sigma_{i-1}$ ,  $T_{v_i} = L / v_i \cdot w_i$  为出口板宽;  $\sigma_i$  为  $i \sim i + 1$  机架间张应力;  $i$  为机架号;  $\tau_i$  为与工作点偏差;  $L, L_m$  分别为机架间距离及末机架到测宽仪的距离;  $v_i, v_m$  分别为各机架及末机架出口带钢速度;  $K_{w_i}$  主要取决于成品板宽和板厚、各机架出口温度及钢材种类.

同理, 对于监控 AGC, 热连轧板厚与辊缝的关系也可近似为一阶惯性时滞环节

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

其中:  $K_{h_i} = C_{p_i} / (C_{p_i} + Q_i)$ ,  $Q_i = -\partial P_i / \partial h_i \cdot h_i$  为出口板厚;  $S_i$  为辊缝;  $P_i$  为轧制力;  $C_{p_i}$  为轧机纵向刚度;  $Q_i$  为轧件塑性刚度, 主要取决于轧件具体情况(温度、钢种及板厚等).

在利用机架间张力调宽时, 必然要引起板厚变化, 热连轧板厚与机架间张应力的关系也可近似为

$$h_i / \sigma_{i-1} = K_{h_i} e^{-s \tau_i} / (T_{v_i} s + 1), \quad (3)$$

其中  $K_{h_i} = \partial h_i / \partial \sigma_{i-1}$ .

液压活套张力控制系统是一个非常复杂的系统, 由于其大部分环节惯性很小, 可近似为一阶快速惯性环节

$$\sigma_i / R_i = 1 / (T_i s + 1). \quad (4)$$

其中:  $R_i$  为机架间张应力设定值,  $T_i$  为张力系统的时间常数.

液压位置控制(HAPC)系统也可近似为一阶快速惯性环节

$$S_i / S_{R_i} = 1 / (T_{S_i} s + 1). \quad (5)$$

其中:  $S_{R_i}$  为辊缝设定值,  $T_{S_i}$  为 HAPC 系统时间常数.

综合式(1) ~ (5), 则热连轧各机架板宽板厚系统在稳定工作点附近的传递函数矩阵为(省略下标

$i$ )

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中

$$G_{11}(s) = K_w e^{-s \tau} / (T_s s + 1) (T_v s + 1),$$

$$G_{12}(s) = 0,$$

$$G_{21}(s) = K_h e^{-s \tau} / (T_s s + 1) (T_v s + 1),$$

$$G_{22}(s) = K_{h_s} e^{-s \tau} / (T_s s + 1) (T_v s + 1).$$

其中: 被调量  $y_1, y_2$  分别表示板宽及板厚的变化量  $w$  和  $h$ ; 控制量  $u_1, u_2$  分别表示张应力和辊缝的设定值修正量  $R$  和  $S_R$ .

实际上, 板宽板厚系统的数学模型是一个复杂的慢时变大时滞非线性模型, 而式(6)是一个理想的标称模型, 忽略了许多次要因素, 如: 1) 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不确定, 因而时滞及时间常数不确定; 2) 各模型增益都存在不确定性, 需根据具体轧制情况(温度、钢种及板厚等)来决定; 3) 系统存在多种不确定性外扰, 各种工艺设备参数的变动以及带钢沿长度方向上尺寸、温度不同, 都会引起板宽变化. 而 ADRC 的最大优点在于将系统中的各种扰动因素(包括模型不确定性和未知外扰等)都归结为对系统的总扰动, 由 ESO 实时估计并予以动态补偿.

### 3 板宽板厚多变量系统的 ADRC 设计

ADRC 的原理详见文献[2].

#### 3.1 ADRC 静态解耦

按惯例<sup>[8]</sup>, 式(6)应设计三阶 ADRC, 但具体实现比较复杂, 由于  $T$  及  $T_s$  与  $T_v$  相比很小可忽略不计, 这样便可用常规的二阶 ADRC 来控制, 近似误差可归结为扰动量. 于是, 式(6)可简化为

$$Y(s) = \bar{G}(s) B U(s), \quad (7)$$

其中

$$\bar{G}(s) = \text{diag}(e^{-s \tau} / (s + a), e^{-s \tau} / (s + a)),$$

$$B = [b_w, 0; b_h, b_{h_s}], b_w = K_w / T_v,$$

$$b_h = K_h / T_v, b_{h_s} = K_{h_s} / T_v, a = 1 / T_v.$$

轧制过程中静态耦合矩阵  $B$  具有不确定性, 故在其变化范围内大致取一可逆常数矩阵  $B_0$  近似误差可归结为扰动量<sup>[2]</sup>.

根据单位矩阵法解耦原理, 利用串联静态解耦补偿器对被控对象进行解耦. 令

$$V(s) = B_0 U(s), \quad (8)$$

其中  $V = [v_1, v_2]^T$  为各通道的虚拟控制量, 则静态解耦补偿器为

$$N = B_0^{-1}. \quad (9)$$

ADRC 静态解耦后,各通道的模型变为

$$y_i(s) = e^{-s} / (s + a) \cdot v_i(s). \quad (10)$$

这样,一个复杂的 MIMO 系统(6)的设计就转换为两个相同的 SISO 一阶惯性时滞系统的设计,非常容易实现.

可见,ADRC 静态解耦技术突破了常规的矩阵求逆解耦方法的限制,它只需知道  $B$  阵的粗略估计值  $B_0$ ,而且不受  $B$  阵奇异性的限制.对于因  $B$  阵不确定或奇异造成的近似误差,ADRC 则当作新的扰动而自动估计并给予补偿.只要二者相差不甚大,即可很好地达到解耦目的.因此,ADRC 静态解耦方法适应范围更广,鲁棒性更强.

### 3.2 ADRC 结构设计

若应用 ADRC,需将模型(10)转化为 ADRC 常用的 FO 标准形.将式(10)中的时滞环节用一阶惯性环节代替,其近似误差可归结为扰动量<sup>[8]</sup>,则

$$\ddot{y}_i = f_i(y_i, \dot{y}_i, d_i, t) + b_{0i}v_i(t). \quad (11)$$

其中: $f_i(\cdot)$  为各通道的未知总扰动, $d_i$  为未知外扰, $b_{0i}$  为时滞系统可调参数.

常规 ADRC 由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)及非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)三部分组成.由于时滞对象反应迟缓,考虑去掉 TD,希望能借助一开始的大误差控制信号将对对象“激励”起来,让输出尽快冲上去.

ESO 和 NLSEF 通常采用非线性函数设计,本文的被控对象属于快速系统,采样步长较小,因此,可改用线性函数 LESO 和 LSEF 来实现.

改进后的 ADRC 结构如图 1 所示,其中静态解耦补偿器 DC 采用式(9).LESO 的作用为根据系统的量测量  $y_i$  和控制量  $v_i$ ,估计出各通道总扰动的实时作用量  $f_i(\cdot)$ .

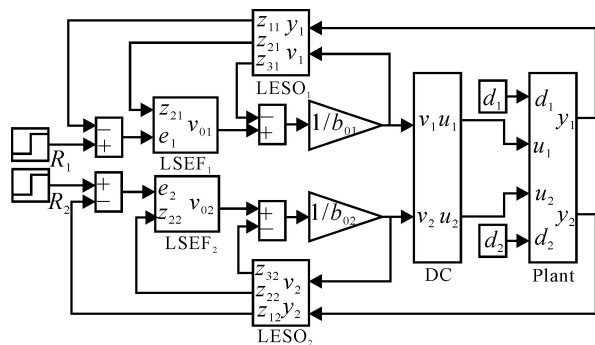


图 1 双入双出系统的 ADRC 结构

各时滞子系统(11)的三阶 LESO 可设计为

$$\begin{cases} \dot{z}_{1i} = z_{2i} - o_{1i} i, \\ \dot{z}_{2i} = z_{3i} - o_{2i} i + b_{0i}v_i, \\ \dot{z}_{3i} = -o_{3i} i. \end{cases} \quad (12)$$

其中:观测器误差  $i = z_{1i} - y_i$ ;  $z_{1i}$ ,  $z_{2i}$  和  $z_{3i}$  为状态

观测量;LESO 增益  $o_{ji}$  和时滞增益  $b_{0i}$  为可调参数,  $i = 1, 2, j = 1 \sim 3$ .

适当选取参数  $o_{ji}, b_{0i}$  使 LESO 快速收敛,  $z_{3i}$  即可跟踪  $f_i(\cdot)$ , 于是控制律 LSEF 可由下式生成:

$$v_i = (v_{0i} - z_{3i}) / b_{0i}. \quad (13)$$

其中: $v_{0i} = k_{pi}e_i - k_{di}z_{2i}$ ,  $e_i = R_i - z_{1i}$ .  $R_i$  为各回路定值; $k_{pi}$  和  $k_{di}$  为控制律增益,是可调参数.控制律组成类似 PID 的形式,不同的是将原来的积分项(作用是消除静差)换成了能够消除扰动的  $-z_{3i}/b_{0i}$ ,从而避免了积分反馈负作用<sup>[9]</sup>.

对于 MIMO 系统,不同通道的动态耦合以及模型摄动造成静态解耦不匹配同样可以看作是一种外扰,由 ESO 予以补偿,从而轻松实现解耦控制.

可见,对于 MIMO 系统的 ADRC 的设计,并不要求知道对象和外部扰动(包含动态耦合项)的精确模型,只需根据  $B$  阵的粗略估计值  $B_0$  设计静态解耦补偿器,并根据对象的可量测输入、输出选择适当的函数及其参数,即可实现对系统的控制.

### 4 基于混沌优化的多变量 ADRC 参数整定

按上述方案设计的双输入双输出系统的 ADRC,在设计静态解耦补偿器后,控制性能主要由 LESO 增益  $\{o_{1i} \sim o_{3i}\}$ , 控制器增益  $\{k_{pi}, k_{di}\}$  和时滞增益  $b_{0i} (i = 1, 2)$  共 12 个可调参数决定.

尽管 ADRC 参数具有很强的鲁棒性,但由于可调参数较多且相互影响、分布范围较大,把这 12 个参数有效地协调组合,以得到最优的控制效果,无疑是一项困难而繁杂工作.

由于 LESO 只依对象状态估计的要求进行设计,且与时滞增益无关,为降低优化难度,可分两步来优化 ADRC 的参数:首先按 2 个积分串联环节优化 LESO 增益,使其观测系统的总扰动最佳;然后把优化结果代入式(12),对控制律增益和时滞增益寻优,来实现对目标值最佳跟踪.这样,实现比较方便,而且这两部分的参数无需反复优化.

混沌是存在于非线性动力学系统中的一种较为普遍的现象,混沌运动具有初值敏感性、内随机性等特点,某些混沌系统能在一定范围内按自身规律不重复地遍历所有状态.混沌优化方法利用混沌变量特有的遍历性进行迭代搜索,有利于找到全局最优解.混沌变量一般由 Logistic 映射产生

$$x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k), x_k \in (0, 1). \quad (14)$$

其中:当  $\mu = 4$  时系统处于混沌状态,  $\{x_k\}$  为混沌序列.利用混沌变量对初值的敏感性,赋予式(14)若干微小差异的初值(注意不能为映射的不动点 0.25, 0.5, 0.75),即可得到不同轨迹的混沌变量.

为提高搜索效率,将变尺度混沌优化方法<sup>[7]</sup>应

用于 LESO 和控制律参数的优化设计. 其基本思想是将参数的优化分两个阶段进行: 首先将混沌变量线性映射到寻优参数的取值区间, 根据选定的目标函数, 利用混沌变量进行全局粗搜索, 找到寻优参数的次优值; 然后进入混沌局部细搜索, 根据搜索进程, 不断缩小寻优参数搜索空间并不断提高搜索精度, 直至搜索出寻优参数的全局最优值.

变尺度混沌优化方法适合编制成一个通用的优化程序模块, 优化步骤详见文献 [7]. 但某些关键参数需根据具体的优化问题由用户选定. 因此, 根据板宽板厚生产过程的要求和 ADRC 参数特点, 本文重点介绍关键参数的选取方法和原则.

#### 4.1 目标函数

混沌优化方法无需目标函数连续、可微, 但对控制器参数进行优化时, 目标函数必须与系统的性能指标密切相关. 目前常用的有两类: 1) 过渡过程的时域性能指标, 如调节时间、超调量、稳态误差等; 2) 误差泛函积分综合指标, 包括 IE, ISE, IAE, ITAE 等.

通常目标函数选用上述某几个指标的权重组合, 但各权重需反复试凑, 工作量较大, 而且若选择不合适, 最终会影响优化效果.

由于 ADRC 存在一簇全局最优解都能满足给定的性能指标, 只要搜索到其中任何一组参数即可, 这就大大降低了参数优化的难度. 大量仿真结果表明, 选用下式即可满足系统设计的要求:

$$J = \min t_s (\% < 2\%). \quad (15)$$

其中: 调节时间  $t_s$  为目标函数, 超调量  $\%$  作为约束条件.

#### 4.2 参数初始化及参数范围

目前, 大部分优化方法 (包括混沌优化) 对控制器参数寻优时, 需预先确定保证闭环系统稳定的控制器参数稳定区域, 或由工程方法确定参数初值后分别向左右两边展开形成搜索空间.

目前, ADRC 还缺乏相关成熟理论及工程方法, 很难准确获得 ADRC 参数的可行范围, 因此在参数优化时, 只能根据经验采用多参数的大范围搜索策略. 由于混沌的遍历性, 势必会遍历到某组参数刚好使闭环系统发散, 必须引入适当的策略, 使算法能迅速自动识别并跳出不稳定区域. 为此, 系统的输出在设定值附近设定一个可行区间, 只要超出该区间, 则放弃该组参数, 继续迭代搜索. 混沌优化方法强大的全局搜索能力保证了这种处理的收敛性.

由于混沌的不可预测性, 优化结果与参数的初值无关, 初值可在 (0, 1) 内随机产生, 但各值需有微小差异且不能为映射的不动点. 这不仅克服了某些

优化方法由于初值选取不当, 易陷入局部最优解的弊端, 而且解决了 ADRC 参数初始解空间很难确定的难题.

#### 4.3 搜索的终止条件

混沌既有确定性, 又有内随机性, 不宜用搜索次数作为终止条件. 若用相邻两次目标函数之差的绝对值小于给定值作为终止条件, 需利用多次寻优结果不断改进.

对于式 (15), 只要寻优结果为全局最优, 则自动终止搜索. 若寻优结果不太理想, 可适当修改参数范围, 重新优化.

### 5 仿真研究

以某钢厂末机架为例, 被控对象的标称参数为:  $K_w = -1, T_v = 0.5, T = 0.02, K_h = -0.1, K_{hs} = 0.2, T_s = 0.01, \tau = 0.5$ .

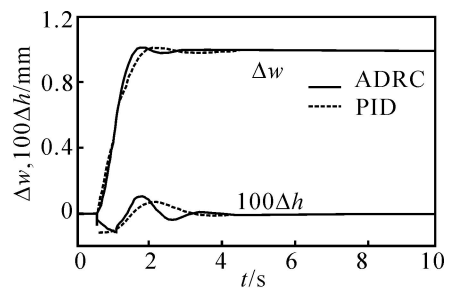
仿真参数设置: 步长取 0.01 s, 采用欧拉方程求解, 近似误差可归结为扰动量.

ADRC 可调参数采用上述混沌优化方法得到, 两个通道的 LESO, LSEF 参数相同. 首先优化 LESO 参数:  $\omega_1 = 100, \omega_2 = 4800, \omega_3 = 30000$ ; 然后对  $b_0$  和 LSEF 参数优化:  $b_0 = 50, k_p = 46.9, k_d = 23.3$ .

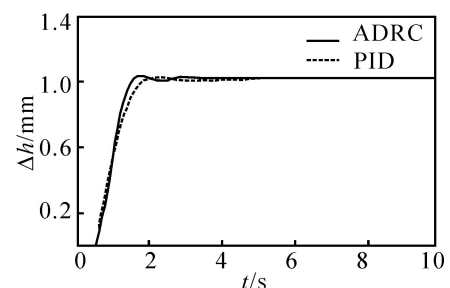
将 ADRC 的控制效果与常规 PID 进行比较, PID 参数由改进的 Z-N 方法整定后超调量太大, 因此也用混沌优化为:  $K_p = 0.57, K_i = 0.97, K_d = 0.002$ .

#### 5.1 被控对象的设定值跟踪能力及解耦效果

对于标称状态, 两通道分别施加单位阶跃定值



(a) 板宽设定值阶跃变化



(b) 板厚设定值阶跃变化

图 2 标称系统的单位阶跃定值响应曲线

扰动,仿真结果如图2所示. ADRC和PID参数按相同指标优化后,两种方法都具有良好的设定值跟踪能力,超调量均小于2%且无静差,ADRC的调节时间稍快些.为了能更清楚地看到解耦效果,特将板厚曲线放大100倍,如图2(a)所示.可见,当板宽设定值单位阶跃变化时,板厚波动峰值均小于0.001 mm,基本上消除了张力调宽对板厚的耦合,二者解耦效果都满足设计要求,但ADRC响应时间稍快一些.

### 5.2 被控对象抗干扰能力

板宽通道加入幅值20%,频率0.06 Hz的正弦负载干扰信号,仿真结果如图3所示.可见,由于ESO对扰动(包含动态耦合)的补偿,板宽及板厚受干扰影响的变化幅度均减小了50%,ADRC抗扰性明显优于PID,克服了PID无法使定值跟踪和干扰抑制同时达到最佳的缺点.

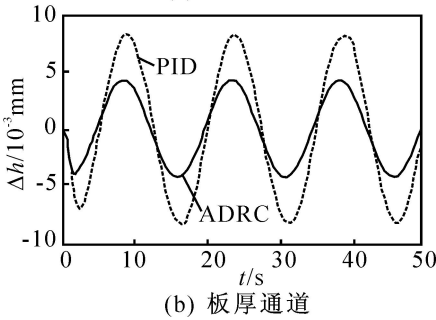
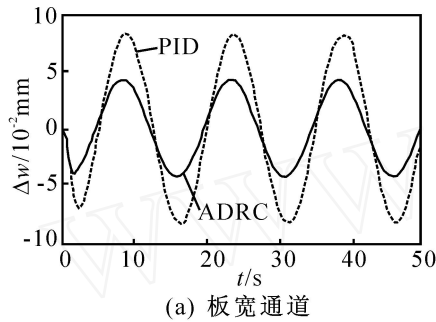


图3 抗扰性能曲线

### 5.3 被控对象的鲁棒性实验

采用Monte-Carlo方法<sup>[10]</sup>定量比较ADRC和

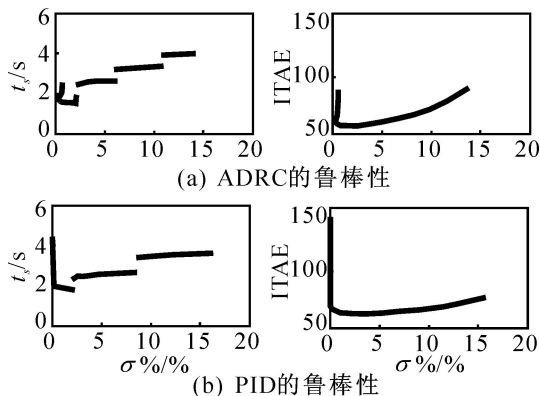


图4 板宽通道的鲁棒性能比较

表1 ADRC和PID性能指标比较表(以下标A和P区分)

	%A/%	%P/%	$t_{sA}/s$	$t_{sP}/s$	ITAE <sub>A</sub>	ITAE <sub>P</sub>
Min	0.40	0	1.50	1.72	58	64
Max	13.60	16.08	3.96	4.31	91	152
均值	3.59	5.18	2.56	2.97	68	83
均方差	3.16	5.15	0.65	0.71	9	24

PID的鲁棒性.轧制过程中各模型增益均存在不确定性,限于篇幅,只给出 $K_w$ 在标称参数上下30%范围内随机摄动.根据单位阶跃定值响应,计算 $t_s$ , %和ITAE.重复实验1000次,仿真结果如图4和表1所示.通过对比可知,ADRC各指标值的均值及与坐标原点的距离均比PID小,而且散布程度比较集中,ITAE指标最为明显.可见ADRC具有较强的鲁棒性.

## 6 结 语

本文将ADRC技术应用于热连轧板宽板厚双输入双输出大时滞系统,并采用变尺度混沌优化方法对ADRC参数进行了整定.仿真结果表明,采用混沌优化方法设计的ADRC简单易行,对模型的不确定性和外部扰动具有较强的鲁棒性和适应能力,因此具有潜在的应用前景.

## 参考文献(References)

- [1] Nakada T, Asada H, Nakajima S, et al. Automatic width control system for hot strip mills[J]. R & D Kobe Steel Engineering Reports, 1991, 41(3): 95-98.
- [2] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.  
(Han J Q. Auto-disturbance-rejection controller and its applications [J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.)
- [3] 韩京清, 王学军. 系统的时间尺度与非线性控制器[C]. 控制理论及应用94'年会. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 314-321.  
(Han J Q, Wang X J. The time scale of a system and nonlinear PID controller [C]. The Proc of Chinese Control Conf. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1994: 314-321.)
- [4] 黄一, 韩京清. 非线性连续二阶扩张状态观测器的分析与设计[J]. 科学通报, 2000, 45(13): 1373-1379.  
(Huang Y, Han J Q. Analysis and design for nonlinear continuous second order extended state observer [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(13): 1373-1379.)
- [5] Sun L M, Jiang X Z, Li D H. Tuning of auto-disturbance-rejection controller for a class of nonlinear plants [J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(2): 251-254.

(下转第317页)

- flight-path control using online function approximation [J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 2003, 26(6): 885-897.
- [5] Xu H J, Mirmirani M, Ioannou P A. Robust neural adaptive control of a hypersonic aircraft [C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit*. Austin: AIAA, 2003: 1-8.
- [6] Xu H J, Mirmirani M. Robust adaptive sliding control for a class of MIMO nonlinear systems [C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit*. Montreal: AIAA, 2001: 1-10.
- [7] Xu H J, Ioannou P A, Mirmirani M. Adaptive sliding mode control design for a hypersonic flight vehicle[J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 2004, 27(5): 829-838.
- [8] Wang Q, Stengel R F. Robust nonlinear control of a hypersonic aircraft [C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit*. Portland: AIAA, 1999: 413-423.
- [9] Marrison C I, Stengel R F. Design of robust control systems for a hypersonic aircraft [J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 1998, 21(1): 58-63.
- [10] Wang Q, Stengel R F. Robust nonlinear control of a hypersonic aircraft [J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 2000, 23(4): 577-584.
- [11] Lian B H, Bang H, Hurtado J E. Adaptive backstepping control based autopilot design for reentry vehicle[C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit*. Providence: AIAA, 2004: 1-10.
- [12] Singh S N, Steinberg M. Adaptive control of feedback linearizable nonlinear systems with application to flight control[J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 1996, 19(4): 871-877.
- [13] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
(Hu Y M. Nonlinear control systems theory and applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.)

## (上接第 308 页)

- [6] 刘鸣, 邵诚. 异步电动机的自抗扰控制器及其参数整定 [J]. *控制与决策*, 2003, 18(5): 540-544.  
(Liu M, Shao C. Auto-disturbances-rejection controller and its parameter adjusting for asynchronous motor [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(5): 540-544.)
- [7] 张彤, 王宏伟, 王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用 [J]. *控制与决策*, 1999, 14(3): 285-288.  
(Zhang T, Wang H W, Wang Z C. Mutative scale chaos optimization algorithm and its application [J]. *Control and Decision*, 1999, 14(3): 285-288.)
- [8] 韩京清, 张文革. 大时滞系统的自抗扰控制器[J]. *控制与决策*, 1995, 10(3): 221-225.  
(Han J Q, Zhang W E. ADRC control for large time-delay systems[J]. *Control and Decision*, 1995, 10(3): 221-225.)
- [9] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. *控制工程*, 2002, 9(3): 13-18.  
(Han J Q. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(3): 13-18.)
- [10] 徐峰, 李东海, 姜学智, 等. 基于 Monte-Carlo 试验的 PID 参数整定比较方法[J]. *清华大学学报*, 2002, 42(12): 1651-1654.  
(Xu F, Li D H, Jiang X Z, et al. Monte-Carlo simulation of PID tuning methods [J]. *J of Tsinghua University*, 2002, 42(12): 1651-1654.)

## (上接第 312 页)

- [8] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
(Lin C. Stochastic Petri nets and system performance evaluation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)
- [9] 江志斌. Petri 网及其在制造系统建模控制中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
(Jiang Z B. Petri nets and its application in manufacture systematic modeling and control [M]. Beijing: China Mechanic Industrial Press, 2004.)
- [10] Martorell S. Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1999, 64(1): 19-31.
- [11] 肖刚, 李天柁. 系统可靠性分析中的蒙特卡罗方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
(Xiao G, Li T T. Monte carlo methods in systematic reliability analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.)
- [12] 王芳, 侯朝桢. 用蒙特卡罗和 Petri 网方法估计随机流网络的可靠性[J]. *北京理工大学学报*, 2004, 24(7): 604-608.  
(Wang F, Hou C Z. Evaluation of the reliability of stochastic flow network using monte carlo method and the petri net[J]. *J of Beijing Institute of Technology*, 2004, 24(7): 604-608.)