

DOI: 10.3901/JME.2015.18.064

基于预测函数算法的冷连轧边降滞后控制研究^{*}

刘洋 王晓晨 杨荃 周春

(北京科技大学国家板带生产先进装备工程技术研究中心 北京 100083)

摘要: 边降是冷轧带钢控制的重要板形参数之一,它直接影响着带钢的成材率和下游行业产品的质量。目前边降调节的闭环系统中存在严重的滞后问题,解决闭环系统时间滞后问题对于边降控制具有重要意义。传统的滞后控制方法对于高速轧制的冷连轧控制能力很弱,基于此,主要研究预测函数算法对边降闭环控制效果。分析边降板形闭环控制系统中引起反馈信息滞后的主要原因,采用预测函数算法对含有滞后环节的闭环系统进行控制,研究预测函数算法对边降闭环滞后控制的动态特性。仿真结果表明,预测函数算法对于控制模型是否精确具有良好的控制品质,对于外界干扰也具有良好的抗干扰性,除此之外,预测函数具有在线计算量小、适合于高速控制的特性,因而使用预测函数算法可以提高边降板形控制精度。

关键词: 边降板形; 闭环控制; 时间滞后; 预测函数控制

中图分类号: TP13

Research on Time-delay of the Edge Drop Control in Tandem Cold Mill Based on the Predictive Functional Control Algorithm

LIU Yang WANG Xiaochen YANG Quan ZHOU Chun

(National Engineering Research Center of Flat Rolling Equipment,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: One of the most important parameters of shape control of tandem cold mill is the edge drop, it affects both yield of the strip and the quality of the products. There is a large time-delay on the edge drop closed-loop control, it's necessary to solve this problem for improving the quality of the shape of tandem cold mill. It is difficult to obtain satisfactory results with the traditional control method. So, the main content of the article makes two key contributions. It analyses the main reason of the time-delay on the edge drop closed-loop control. The dynamic characteristics of the time-delay of the edge drop closed-loop control by using the predictive functional control (PFC) algorithm are studied. The simulation results show that the PFC algorithm has good control quality for both accurate control model and non-accurate control model, and the anti-interference ability is stable. Besides, the control accuracy of the edge drop is improved.

Key words: flat shape of the edge drop; closed-loop control; time-delay; predictive functional control

0 前言

冷轧带钢因其具有良好的工艺性能和力学性能,是电器、汽车、航天军工等行业和领域产品的基础材料,近年来,随着技术的发展和市场需求的变化,这些行业和领域对冷轧带钢质量的要求越来越高。在提高冷轧带钢表面质量和材料性能的同时,带钢横截面尺寸精度也是急需提高的重要指标之一。冷轧带钢轧制过程中,由于轧机辊系弹性变形

和带钢金属三维弹塑性变形的影响,带钢在边部一定区域会出现厚度减薄现象,即边降,其不仅直接影响带钢的成材率,增加企业的生产成本,更重要的是影响到下游产品的质量。

针对这一问题,很多技术人员通过改变轧辊辊形、使用交叉轧制等方法,使得边降控制取得了良好的效果,配合闭环控制,带钢横截面尺寸精度也越来越高。在五机架冷连轧边降控制系统中,边降调节一般由 S1~S3 机架完成,但是由于受到现场设备安装的限制,边降检测仪一般安装在机组出口处,这使得系统在闭环调节过程中存在较大的反馈滞后,严重影响了系统的稳定性和板形控制精度。

^{*} 国家科技支撑计划资助项目(2015BAF30B01)。20141226 收到初稿,20150624 收到修改稿

这一问题目前尚未得到很好的解决,生产中常用的方法是降低系统增益系数或降低轧制速度来保证轧制稳定性。

在轧钢控制领域,滞后问题并非只存在于冷连轧边降控制中,在冷热轧轧制及冷却控制过程中,均存在滞后问题,针对不同工艺环节的滞后控制也有诸多的研究,如文献[1]将最优 Smith 预估监控厚度自动控制(Automatic gauge control, AGC)算法应用到某冷连轧机组第一机架的厚度控制系统中;文献[2]在本钢四机架冷连轧机中,首架和末架均采用 Smith-AGC 系统;文献[3]在原有 Smith 预估器的基础上,加了一个中间微分反馈环节,用于冷连轧机末机架 AGC 调节;文献[4]将 Smith 预估控制方法用于热轧板带层流冷却系统,给出了调节器分别为比例和积分形式下的控制率。

上述研究多是基于传统滞后控制算法的研究,但是在冷连轧边降闭环控制中,因其具有高轧制速度和快速响应的要求,同时存在工作辊横向移动的问题,传统滞后控制方法并不能满足其控制要求,并且关于边降滞后控制的研究内容也相对较少,因此本文研究的边降闭环系统中滞后环节控制具有一定的实用意义。在众多滞后控制方法中,因为预测控制具有适应性强、响应速度快、超调小、调节时间短及鲁棒性强等特点,被认为适用于时滞过程的控制。相对于其他同类控制算法,预测控制中的预测函数控制具有在线计算量小、对模型精度要求低等特点,更适合于高速控制,因而本文将其用于边降滞后控制,并研究其控制特性。

1 边降控制原理及滞后形成原因

边降是带钢轧制过程中轧机辊系弹性变形和带钢金属三维弹塑性变形共同作用的结果^[5-6]。轧辊压扁、带钢边部自由面金属的横向流动、板宽以外的轧辊有害接触、采用凹辊等都会引起带钢边部减薄。轧辊压扁引起的边降如图 1 所示。

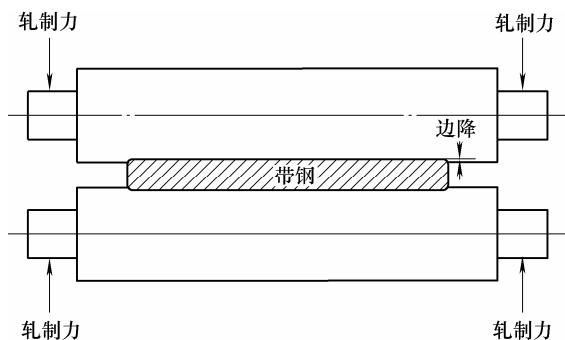


图 1 轧辊压扁不均产生的边降

为了控制板带在边部的厚度减薄量,常采用锥形辊、精细冷却、轧辊交叉等措施^[7]。目前大部分冷轧生产线采用带有锥形区域的工作辊来控制带钢边部减薄,通过控制工作辊的横向移动,改变锥形区域与带钢的有效接触长度,从而控制边部减薄量。其控制原理如图 2 所示。

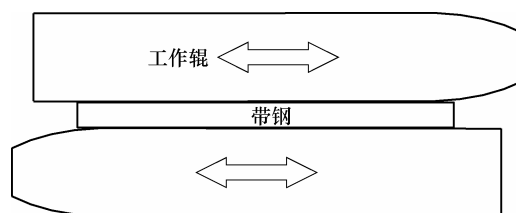


图 2 锥形辊控制边降示意图

为了满足在线调整工作辊锥形区域与带钢边部的有效接触长度,增加了工作辊横向移动机构,在机组出口侧安装有边降检测仪,检测带钢边降控制效果,将边降仪的检测信号引入边降控制系统构成闭环控制,以期实现最佳边降控制效果。

边降调节通常由上游机架来实现,常规五机架冷连轧边降控制由 S1~S3 机架配合实现^[8],如图 3 所示。

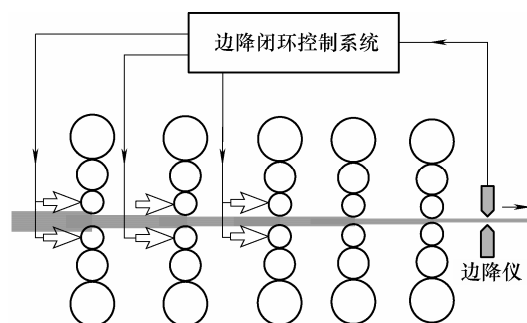


图 3 边降控制程序流程图

边降仪的安装位置与调节机架之间有一定的距离,经调节机架轧制后的带钢需要通过后续机架轧制,才能由出口边降检测仪检测到边降的实际控制效果,这在控制上存在一个滞后时间,并且在线窜辊时工作辊横向移动也需要时间,上述原因使得系统在给出一次边降控制量后无法在一个调节周期内获得调节后的边降信息,这对闭环控制是极其不利的,为了保证系统的稳定性,只能降低系统增益系数和轧制速度,这是以牺牲控制精度和企业效益为代价的,因此,研究边降闭环系统中滞后环节的控制就具有重要意义。

2 边降闭环控制策略

本文以国内某厂五机架冷连轧生产线为依托

进行研究,此冷连轧机组边降闭环控制系统采用两种控制策略,即边降随动控制策略和机架间配合控制策略。

2.1 边降随动控制策略

边降随动控制策略是以 S5 机架出口以单点定义的边降仪实测边降偏差信号为反馈信号,各机架以固定的比例关系进行调节,一个调节周期内,三个窜辊机架同时进行窜辊控制。

随动控制策略中,根据 S5 机架出口的边降仪实测边降偏差信号,由数学模型计算各机架窜辊插入量调整值,每个机架分别计算操作侧和传动侧插入量,各机架以固定的比例关系进行调节,一个调节周期内,同时进行窜辊控制。

2.2 机架间配合控制策略

机架间配合控制策略是以出口边降值为反馈信号,计算各机架窜辊插入量,各窜辊机架依次执行窜辊控制。相对于随动控制策略的三个机架同时调节,机架间配合策略是每个控制周期内只执行一次窜辊调节,各窜辊机架依次进行窜辊控制。

机架间配合控制策略相比较随动控制策略而言,每个控制周期只执行一次窜辊控制,经过多个周期的调节达到控制要求,控制相对容易。在处理好单个机架反馈控制的基础上,才能更好地实现多机架同时窜辊控制。因此本文重点研究配合控制策略下的滞后控制,后续工作中将继续研究随动控制策略下的边降闭环控制。

3 边降板形闭环控制模型

冷连轧边降板形控制系统中,通过改变工作辊锥形区域与带钢的有效长度来实现边降控制,为了能够实现对板形的精确控制,分别以工作辊位移和出口边降值为反馈信息构成双闭环控制系统,其中以工作辊位移为反馈信息构成位置内环控制,以出口边降值为反馈信息构成板形外环控制。

3.1 位置内环传递函数

改变液压缸有杆腔和无杆腔液压油的压力差,推动活塞杆产生移动,活塞杆与工作辊相连,活塞杆位移变化量即为工作辊横移量,液压缸位移传感器将采集到的活塞杆的位移值反馈给伺服阀的直接数字控制(Direct digital control, DDC)模块,由此构成了窜辊位移闭环系统。液压缸活塞杆与工作辊直接连接,活塞杆的位移量即为工作辊的窜辊量,所以认为从活塞杆位移到窜辊位置是开环控制的。综上所述可以画出电液窜辊伺服位置控制系统的原理图,如图 4 所示。

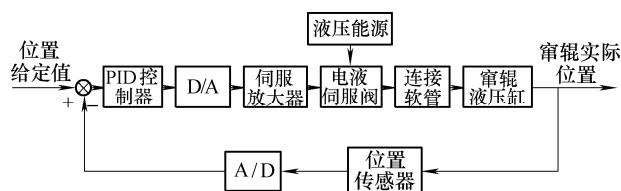


图 4 电液窜辊伺服位置控制系统原理图

窜辊液压缸是非对称液压缸,伺服阀是对称滑阀结构,所以其控制系统是典型的对称滑阀控制非对称液压缸系统^[9-10],示意图如图 5 所示。图中 p_s 为供油压力, p_0 为回油压力, Q_1 、 Q_2 为经过伺服阀口的流量, x_v 为伺服阀阀芯位移, p_1 、 p_2 为液压缸无杆腔和有杆腔的压力, p_L 为负载压力, V_1 、 V_2 为液压缸无杆腔和有杆腔的体积, y 为活塞位移, m 为液压缸负载折算质量, K 为负载弹簧刚度, F 为作用在活塞上的工作负载, B_c 为黏性阻尼系数。

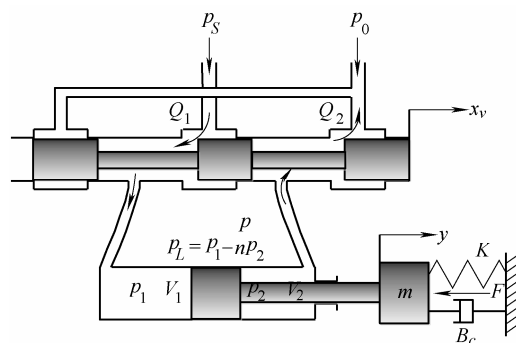


图 5 对称伺服阀控制非对称液压缸示意图

对上述系统进行分析,可得系统开环传递函数为

$$G_{fo}(s) = \frac{K_w \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\delta_v}{\omega_v} s + 1 \right) \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (1)$$

式中, K_w 为开环放大系数; $K_w = \frac{1}{A_1} K_f K_v K_a K_p$, A_1 为液压缸活塞有效作用面积, K_f 为位移传感器的电压与位移转换系数, K_v 为伺服阀流量增益系数, K_a 为伺服放大器增益, K_p 为控制器比例系数; ω_h 为液压无阻尼固有频率; $\omega_h = \sqrt{\frac{4E_1 A_1^2}{V_t m}}$, E_1 为液压油体积模量, V_t 为液压缸等效总容积; ζ_h 为液压阻尼比; $\zeta_h = \frac{K_{ce}}{A_1} \sqrt{\frac{E_1 m}{V_t}} + \frac{B_c}{4A_1} \sqrt{\frac{V_t}{E_1 m}}$, K_{ce} 为总流量-压力系数; ω_v 为伺服阀固有频率; ζ_v 为伺服阀阻尼比; T_I 为 PID 控制器积分时间常数; T_D 为 PID 控制器微分时间常数。

可以得到系统闭环传递函数为

$$G_{fc}(s) = \frac{1}{K_f} \frac{G_{fo}(s)}{1 + G_{fo}(s)} \quad (2)$$

3.2 板形外环传递函数

在窜辊内环控制基础上, 以出口边降值为反馈, 构成系统外环控制模型, 其结构如图 6 所示。

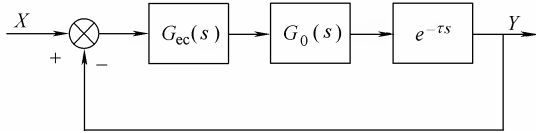


图 6 边降板形闭环控制系统框图

图 6 中, s 为拉普拉斯变换后的复参数, $G_{ec}(s)$ 为控制器, $G_0(s)$ 为等效窜辊位移控制系统传递函数, $e^{-\tau s}$ 为系统等效滞后环节, X 为边降设定值, Y 为边降实际值, 有

$$G_{ec}(s) = k_{PI} + \frac{k_I}{s} + k_D s \quad (3)$$

式中, k_{PI} 为边降闭环控制器比例系数; k_I 为控制器积分系数; k_D 为控制器微分系数。

$$G_0(s) = k_f G_{fc}(s) \quad (4)$$

式中, $G_{fc}(s)$ 为位移闭环传递函数; k_f 为压力传感器增益。

可得边降板形闭环传递函数为

$$G_f(s) = \frac{G_{ec}(s) G_0(s) e^{-\tau s}}{1 + G_{ec}(s) G_0(s) e^{-\tau s}} \quad (5)$$

滞后时间影响了闭环控制系统的动态品质, 因此需要对滞后时间进行精确的计算。

3.3 边降闭环滞后时间

设出口边降检测仪与 S5 机架的距离为 l , 边降控制系统从给出边降调节信号到接收边降仪反馈信息所用时间由两部分构成: 一是窜辊机构执行工作辊横移时间 τ_1 ; 二是窜辊到位后新板形经过后续机架轧制到达边降仪的时间 τ_2 。总滞后时间为

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (6)$$

为了得到准确的滞后时间, 对上述两部分时间分别进行分析。工作辊在线窜辊速度与工作辊圆周速度及轧制力有关, 如图 7 所示。

在有带钢的情况下, 窜辊速度和工作辊圆周速度的比值 λ 与轧制力 F 呈抛物线关系。根据当前轧制力和轧辊圆周速度(v_R), 通过查表和插值可以得到窜辊速度(v_{RS}), 进一步可求得窜辊时间为

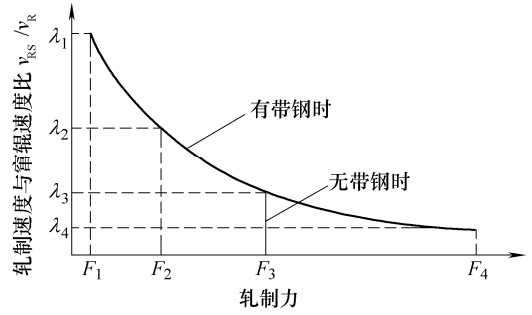


图 7 工作辊窜辊速度与轧辊圆周速度、轧制力关系

$$\tau_1 = \frac{l_c}{v_{RS}} \quad (7)$$

式中, l_c 为窜辊位移; v_{RS} 为窜辊速度。

带钢从调节机架到出口边降仪仍需要通过后续机架的轧制, 在此过程中, 带钢总体积不变, 因此带钢从调节机架的辊缝处到达边降仪检测点的时间可用体积相等原则来计算, 如图 8 所示。

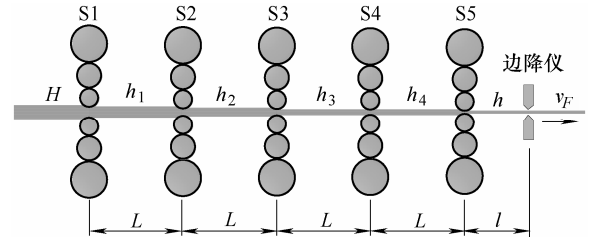


图 8 冷连轧厚度变化示意图

以第一机架出口为例, 第一机架辊缝处带钢到达边降仪检测点所需时间与第一机架辊缝处到边降仪之间带钢总体积通过边降仪所用的时间相等, 即

$$\tau_2 = \frac{Lh_1 + Lh_2 + Lh_3 + Lh_4 + lh}{hv_F} \quad (8)$$

式中, L 为机架间距离; l 为 S5 与边降仪的距离; h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 、 h 分别为 S1、S2、S3、S4、S5 机架出口厚度; v_F 为第五机架出口速度。

4 预测函数控制算法

预测函数控制(Predictive functional control, PFC)是第三代模型预测控制算法, 它是由 KUNTZE 等^[11]在 20 世纪 80 年代中后期提出, 但仍属于模型预测控制范畴, 但是, 预测函数控制也有自己的特点, 即把每一时刻的控制输入看成若干事先选定的基函数的线性组合, 从而保证了控制输入的规律性^[12-13]。

4.1 基函数

在预测函数控制中, 把控制输入规范为确保控制系统输出满足参考轨迹的关键。把预测函数控制

的输入表示已知基函数 f_n 的线性组合

$$u(k+i) = \sum_{n=1}^N \mu_n f_n(i) \quad i=0,1,\dots,P-1 \quad (9)$$

式中, $u(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻预测控制量; μ_n 为基函数的系数; N 为基函数的个数; P 为预测时域。

4.2 参考轨迹

通过优化得到的控制量将使模型的输出值沿着某个期望的轨迹(即参考轨迹)最终趋近于设定值。参考轨迹取决于预测控制的设计者对系统闭环响应的要求,对渐进稳定系统而言,通常选取为一阶指数函数,如图 9 所示。

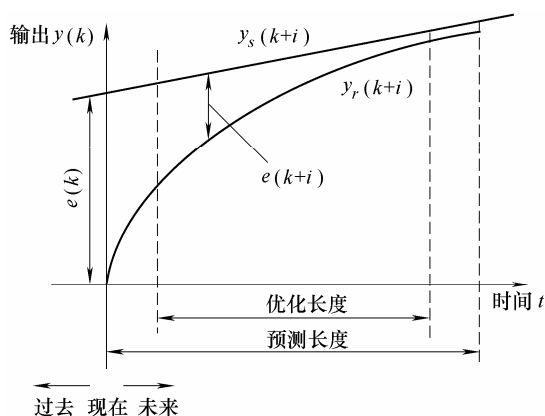


图 9 一阶指数函数参考轨迹

可以得到 $k+i$ 时刻输出的参考轨迹为

$$y_r(k+i) = y_s(k+i) - \alpha_r^i (y_s(k) - y(k)) \quad (10)$$

式中, k, i 为时间序列; $y_r(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻参考轨迹值; $y_s(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻设定值; $y(k)$ 为 k 时刻实际输出; α_r 为参考轨迹柔化因子。

4.3 预测误差与反馈校正

在实际控制时,由于模型失配、噪声等原因,模型输出与过程实际输出之间常存在一定误差,即

$$e(k+i) = e(k) = y(k) - y_m(k) \quad (11)$$

式中, $y_m(k)$ 为 k 时刻预测输出值; $e(k)$ 为 k 时刻预测误差。

校正后 $k+i$ 时刻的预测输出值为

$$y_p(k+i) = y_m(k+i) + e(k+i) \quad (12)$$

式中, $y_p(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻校正预测输出值。

4.4 滚动优化

在预测函数控制中,优化的目标就是要寻找式(9)中各个基函数的系数 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, 使优化时域内的预测输出 $y_p(k+i)$ 尽可能接近参考轨迹。在 PFC 的在线优化算法中,最常用的性能指标是二次型性能指标,即在优化时域内取参考轨迹和预测输出的误差平方和最小,即

$$\min J_p =$$

$$\sum_{i=H_1}^{H_2} q_i [y_p(k+i) - y_r(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^{H_u} r_i [\Delta u(k+i-1)]^2 \quad (13)$$

式中, H_1 为最小预测步长; H_2 为最大预测步长; H_u 为控制时域; q_i, r_i 为不小于零的权系数。

以上四部分构成了预测函数控制的本质特性。预测函数控制的基本结构如图 10 所示。

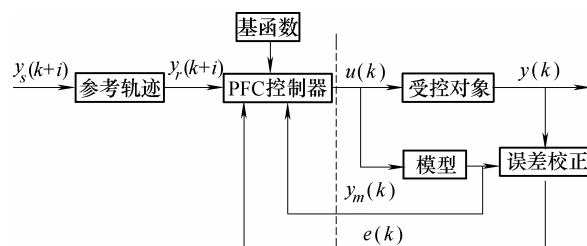


图 10 预测函数控制的基本结构

5 预测函数对时间滞后控制效果

某钢厂的一个轧制规格如表 1 所示。

表 1 冷轧轧制规程

机架	轧制厚度/mm	轧制速度/(m/s)
S0	2.500	4.106
S1	1.646	6.029
S2	1.178	8.428
S3	0.843	11.692
S4	0.603	16.346
S5	0.500	20.000

机架间距离 $L=5$ m, 边降仪与 S5 机架之间距离 $l=2$ m。出口速度 $v_F=20$ m/s 时, 根据第 3.3 节计算各机架的滞后时间如下。

以 S1 为基准调节时, $\tau_{2,S1} \approx 2.24$ s; 以 S2 为基准时, $\tau_{2,S2} \approx 1.41$ s; 以 S3 为基准时, $\tau_{2,S3} \approx 0.82$ s。

根据现场设备数据, 得到

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4E_1 A_1^2}{V_l m}} = 253 \text{ rad/s}$$

$$\zeta_h = \frac{K_{ce}}{A_1} \sqrt{\frac{E_1 m}{V_{10}}} + \frac{B_c}{4A_1} \sqrt{\frac{V_{10}}{E_1 m}} = 0.536 \text{ rad/s}$$

放大器增益系数 $K_a=0.1$ A/V; 位移转换系数 $K_f=20$ V/m; PID 调节器采用比例控制, 即 $K_P=1$; T_I 取一个无穷大的值; T_D 取 0 值; 伺服阀常数 $K_v=7.56 \times 10^{-2}$ m³/(s·A)。根据以上数据, 可得在此工况下的控制系统精确控制模型为

$$G_0(z^{-1}) = \frac{0.1631z^{-1} + 0.0316z^{-2} - 6.661 \times 10^{-6}z^{-3} - 3.564 \times 10^{-9}z^{-4} + 5.797 \times 10^{-13}z^{-5}}{1 - 0.8043z^{-1} - 0.001064z^{-2} - 9.131 \times 10^{-7}z^{-3} + 1.402 \times 10^{-11}z^{-4} - 3.723 \times 10^{-16}z^{-5}} \quad (14)$$

在实际控制系统中可以检测窜辊到位信号, 由窜辊横移引起的时间滞后可以在控制系统中回避, 这里主要研究对第二部分滞后时间的控制。采用式

(14)作为预测函数算法的控制模型, 根据表 1 的数据, 对 S1~S3 机架进行仿真分析, 效果见图 11。

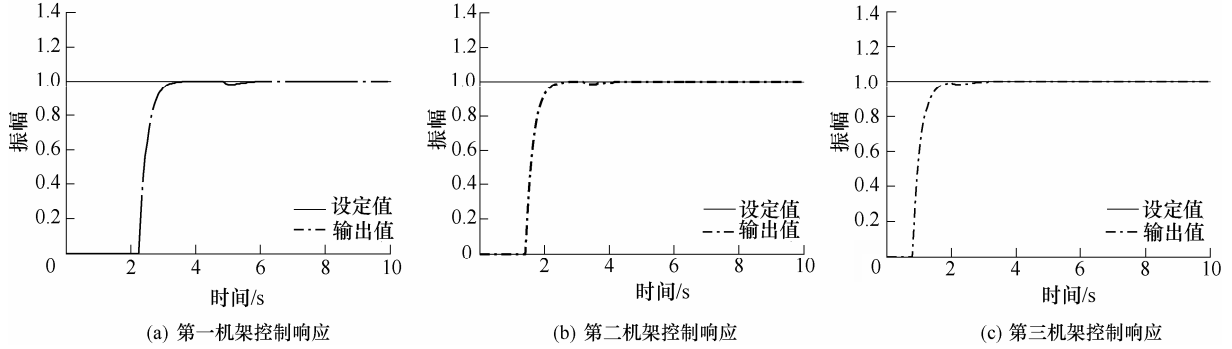


图 11 精确模型 PFC 控制板形闭环控制系统

使用精确模型作为预测函数控制系统模型时, S1~S3 机架调节都能够取得良好的控制效果, 系统响应快速平稳、无超调, 具有良好的动态特性。

但是, 在实际控制过程中很难获取控制对象的

精确模型, 为了进一步分析预测函数的控制效果, 采用最小二乘法对系统进行辨识, 将辨识系统模型作为预测函数的控制模型, 其他控制参数不变。辨识系统模型为

$$G_{ob}(z^{-1}) = \frac{0.1631z^{-1} + 0.03173z^{-2} + 6.966 \times 10^{-5}z^{-3} + 3.7433 \times 10^{-5}z^{-4} + 5.4534 \times 10^{-6}z^{-5}}{1 - 0.8035z^{-1} - 0.001364z^{-2} - 9.0372 \times 10^{-5}z^{-3} - 0.0001344z^{-4} - 9.754 \times 10^{-7}z^{-5}} \quad (15)$$

仍采用轧制速度为 20 m/s 时的规程, 采用辨识系统模型作为预测函数控制模型, 对 S1~S3 机架

边降调节进行仿真分析, 控制效果如图 12 所示。

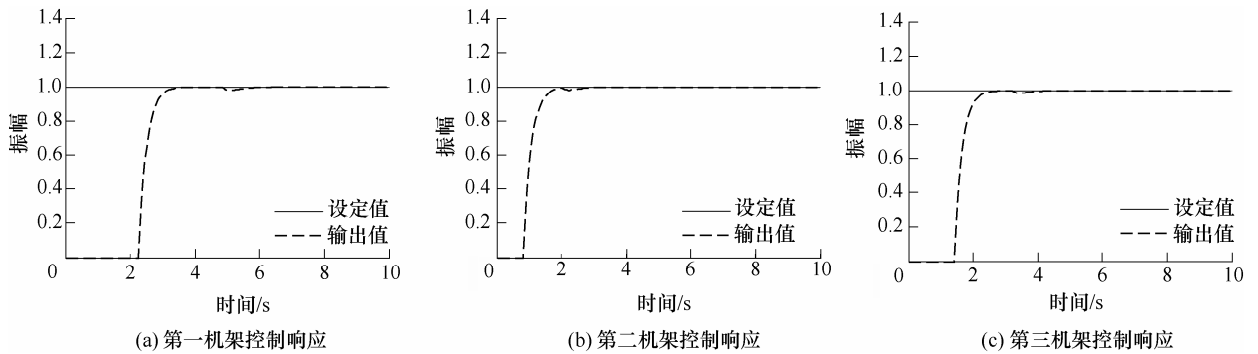


图 12 辨识系统模型预测函数控制

分析可知, 采用辨识系统模型作为预测函数的控制模型, 即在模型不完全匹配的情况下, S1~S3 机架边降调节的控制效果与精确模型控制效果相同, 系统响应快速稳定无超调, 由此可见预测函数对控制对象的数学模型要求并不苛刻。在线使用预测函数控制时, 可以采用在线系统辨识的方法, 获得动态变化的系统模型, 能够进一步提高系统控制精

度和稳定性。

在实际控制过程中, 存在一些不可控的干扰因素, 干扰因素对控制系统的影响反映到传递函数上就是系统参数的变化, 因此研究当系统参数发生变化时, 预测函数对于干扰系统的控制性能也很有必要。为此, 以精确模型为基础, 假设在 $t=4$ s 时刻系统参数发生变化, 变化后的系统模型为

$$G'_0(z^{-1}) = \frac{0.16785z^{-1} + 0.0316z^{-2} - 6.661 \times 10^{-6}z^{-3} - 3.564 \times 10^{-9}z^{-4} + 5.797 \times 10^{-13}z^{-5}}{1 - 0.8043z^{-1} - 0.0011z^{-2} - 9.131 \times 10^{-7}z^{-3} + 1.402 \times 10^{-11}z^{-4} - 3.723 \times 10^{-16}z^{-5}} \quad (16)$$

仍以轧制速度为 20 m/s 时的规程进行仿真, 其结果如图 13 所示。

分析仿真结果可知, 存在外界扰动的情况下, 不同机架调节时系统都能够快速回到稳定状态, 并且超调量很小, 由此可知预测函数控制具有很好的

抗干扰能力,即有很强的鲁棒性。

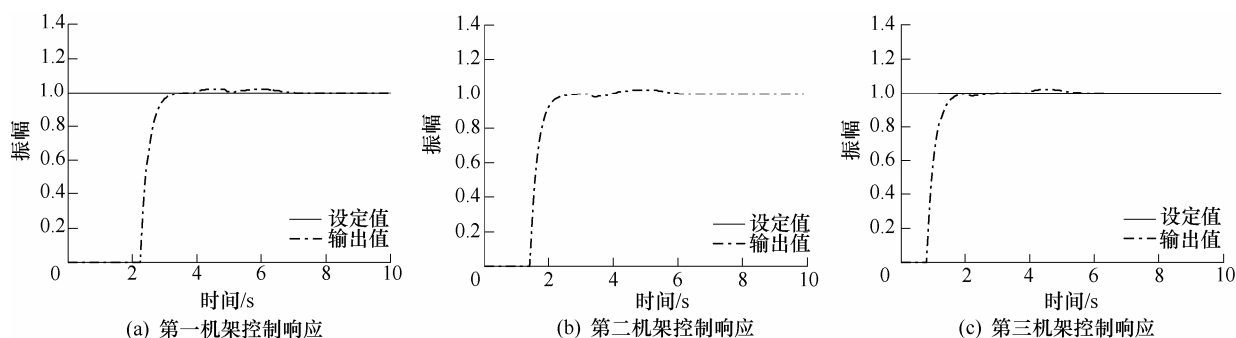


图 13 系统模型参数发生变化时系统响应

综上分析可知,预测函数算法对模型精确和不精确时的边降控制滞后环节都具有良好的控制能力,系统响应快速无超调,即使受外来扰动的影响,也能够迅速回到稳定状态,鲁棒性强。

6 结论

(1) 本文以某厂五机架冷连轧生产线为研究对象,分析了预测函数算法对边降闭环中时间滞后环节的控制效果,由研究结果可知,预测函数算法对边降闭环中时间滞后问题具有很好的动态控制品质,无论控制对象的模型是否精确,都能够在较短时间内使得系统输出快速稳定达到设定值并且没有超调量。

(2) 对于外界扰动,预测函数控制算法依然具有良好的鲁棒性,波动幅度很小,并且能在很短时间内恢复到稳定状态。预测函数本身具有计算量小,对控制模型要求不严格的特点,适合于要求快速响应的控制系统,符合冷连轧控制系统的要求,这对于复杂的实际控制系统中滞后问题的解决方法具有重要的指导意义和参考价值。

参 考 文 献

- [1] 张殿华,李旭,张浩,等. 辊缝型监控 AGC 纯滞后补偿控制器的算法设计及应用[J]. 钢铁, 2008, 43(6): 52-55.
ZHANG Dianhua, LI Xu, ZHANG Hao, et al. Algorithmic design and application of pure lag compensation controller for monitor AGC via gap[J]. Iron and Steel, 2008, 43(6): 52-55.
- [2] 刘建昌,顾树生,郑士富,等. Smith 预估控制策略在 AGC 系统中的应用[J]. 钢铁, 1998, 33(10): 40-43.
LIU Jianchang, GU Shusheng, ZHENG Shifu, et al. Application of Smith prediction control strategy to AGC system[J]. Iron and Steel, 1998, 33(10): 40-43.
- [3] 赵丽娟,徐涛,刘杰. Smith 预估器在冷轧机出口厚度控制系统中的应用[J]. 锻压技术, 2005(6): 58-61.
ZHAO Lijuan, XU Tao, LIU Jie. Application of Smith-prediction in exit-AGC for cold rolling mill[J]. Forging & Stamping Technology, 2005(6): 58-61.
- [4] 张蒙,张殿华. 一种快速高精度热轧带钢层流冷却控制策略[J]. 热处理技术与装备, 2009, 30(3): 60-64.
ZHANG Meng, ZHANG Dianhua. A kind of laminar flow cooling strategy with high response and steady precision for the hot strip rolling[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2009, 30(3): 60-64.
- [5] LENARD J G. The effect of lubricant additives on the coefficient of friction in cold rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80: 232-238.
- [6] 藤田文夫ほか. 薄板压延のエッジドロップ形成に関する理論的検討[J]. CAMP-ISIJ, 1992, 15: 455-458.
FUJITA Fumio. Mechanism analysis and discussion of the formation of edge drop in thin strip[J]. CAMP-ISIJ, 1992, 15: 455-458.
- [7] JIANG Z Y, LIU Y J, TIEU A K. Modeling of the cold rolling of thin strip with lubrication by finite element method[C]//44th MWSP Conference Proceeding. Warrendale, Pennsylvania: Iron and Steel Society, 2002: 15-23.
- [8] 张清东,张晓峰,文杰. 薄带钢冷连轧横向厚差控制理论及 DI 材横向厚差控制技术研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(24): 30-38.
ZHANG Qingdong, ZHANG Xiaofeng, WEN Jie. Theory and technology of transverse thickness deviation control DI tinplate during tandem cold rolling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(24): 30-38.
- [9] 吴振顺. 液压控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
WU Zhenshun. Hydraulic control system[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.

(下转第 82 页)