

# 热轧带钢自动厚度控制鲁棒预测模型与控制策略

杨斌虎<sup>1</sup>, 杨卫东<sup>2</sup>, 曲 蕾<sup>3</sup>

(1. 太原钢铁(集团)公司 自动化公司, 山西 太原 030003;

2. 北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083; 3. 东芝三菱电机工业系统(北京)有限公司, 北京 100098)

**摘要:** 研究了热轧带钢自动厚度控制(AGC)鲁棒预测模型与控制问题. 提出了一种全新的AGC动态鲁棒预测模型, 并给出了对应的控制策略. 首先通过弹跳方程, 分析了传统AGC控制模型的局限, 讨论了变刚度AGC与鲁棒控制的联系; 其次, 针对轧机机架间传递的扰动, 在AGC的前馈部分, 引入 $H_\infty$ 滤波器, 使得轧件在输送过程中传递的不确定性得到了有效的抑制. 同时, 利用预测控制(MPC)预测机理, 对轧制力进行动态预测, 使得轧制条件迅速优化; 最后用仿真结果表明所提控制策略的有效性与其可行性.

**关键词:** 自动厚度控制; 鲁棒控制; 预测控制; 热轧带钢;  $H_\infty$ 滤波器

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Robust predictive-model-control strategy for automatic gauge control in hot strip finishing milling

YANG Bin-hu<sup>1</sup>, YANG Wei-dong<sup>2</sup>, QU Lei<sup>3</sup>

(1. Automazation company, Taiyuan Iron and Steel(Group)Company LTD., Taiyuan Shanxi 030003, China;

2. School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial System Corp., Beijing 100098, China)

**Abstract:** A novel dynamic robust predictive-model-control strategy for the automatic gauge control(AGC) is proposed for the hot strip mill. Limitations of traditional AGC are analyzed based on the spring equation; and the relation between the variable stiffness AGC and the robust control is considered. An H-infinity filter is introduced into the forward-feedback loop of AGC to reject the disturbances caused by stand-vibrations in conveying strips. Meanwhile, the rolling force is predicted based on the prediction property of predictive-model-control(MPC) for optimizing the rolling conditions. Simulation results show the feasibility and validity of the proposed control strategy.

**Key words:** automatic gauge control; robust control; predictive control; hot strip mill; H-infinity filter

## 1 引言(Introduction)

厚度精度是带钢热连轧的重要质量指标, 自动厚度控制(automatic gauge control, AGC)系统作为热连轧精轧机组必不可少的组成部分, 在提高带钢厚度精度以及带钢整体质量方面起着重要作用. 目前, 热连轧机组轧制系统采用的厚度控制方式主要是厚度计式AGC(即GM-AGC), 它通过弹跳方程来间接控制每个机架的轧制厚度. 对于GM-AGC间接测厚引起的测量精度低的缺点, 一般通过前馈AGC(即FF-AGC)来进行补偿. 这种GM-AGC加上FF-AGC的组合控制方式, 构成了当前热连轧厚度控制系统的基础<sup>[1]</sup>. 此外, 还有其他一些AGC控制方式, 但从本质上来讲, 它们都属于经典控制理论体系的范畴, 即它们都是建立在精确数学模型基础之上的. 由于轧制过程分布着大量的随机不确定性扰动, 传统AGC的

控制精度受到很大限制, 因为从本质上说, 厚度控制系统是非线性的<sup>[2,3]</sup>.

基于 $H_\infty$ 的鲁棒控制近年来获得了广泛的应用, 这是因为这种理论模型充分考虑了系统中未建模扰动及其他的不确定性因素, 并对这些因素进行了有效的抑制<sup>[4,5]</sup>. 本文把鲁棒控制机理引入到AGC控制中, 充分考虑机架与机架间的作用, 建立了基于FF-AGC的 $H_\infty$ 滤波器模型, 对通过轧件传输的不确定性进行了有效地抑制. 同时引入预测控制(MPC)机理<sup>[6]</sup>, 使得轧制力不断在线优化, 从而逼近真实的轧制力模型.

## 2 问题的描述(Description of question)

### 2.1 基于弹跳方程的GM-AGC控制(GM-AGC control based spring equation)

弹跳方程反映了轧件出口时厚度变化的基本规

律,一般表达如下:

$$h = S_0 + \delta S = S_0 + \frac{F}{C_P}, \quad (1)$$

式中:  $h$ 是实际轧出厚度,  $S_0$ 是初始辊缝,  $\delta S$ 是轧机弹跳值,  $F$ 是轧制力,  $C_P$ 是轧机刚度.

在轧制过程中,某一时刻的轧制力 $F$ 和初始辊缝 $S_0$ 是可以检测到的,因此,可以通过弹跳方程(1)计算出该时刻的出口厚度 $h$ . 这种情况下,就等于把整个机架作为测量厚度的“厚度计”,这种间接检测厚度的方法称为厚度计AGC(Gaugemeter AGC, GM-AGC),由于GM-AGC可以克服直接测厚的时间滞后,在厚度控制中获得了广泛的应用,其一般控制系统方框图如图1所示.

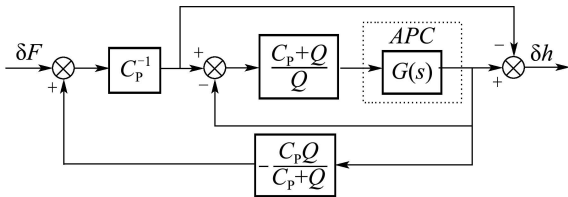


图1 厚度计式AGC系统原理图  
Fig.1 Schematics of GM-AGC system

图中:  $Q$ 是轧件塑性系数,  $G(s)$ 为压下系统(APC)的传递函数,  $\delta F$ 为轧制力变化量,  $\frac{C_P + Q}{C_P}$ 是轧机压下补偿.

### 2.2 GM-AGC 的改进与传统 AGC 的局限 (Improvement of GM-AGC and limit of traditional AGC)

不论是利用测厚仪还是通过“厚度计”来检测厚度,都避免不了控制过程的传递滞后或者过渡过程滞后,厚度控制精度的提高受到很大的限制,特别是当来料厚度波动较大时,这种限制尤为明显,为了克服这个缺点,在GM-AGC基础上所做的一个改进就是引入前馈信号,这种改进方式充分利用了轧制过程中信号在机架间的流动,把上一机架压力作为“厚度计”,在带钢未进入本机架之前测算出入口厚度,并与给定厚度比较,当有厚度偏差 $\delta H$ 存在时,在预定时间内,提前调整压下机构,以便保证得到需要的出口厚度<sup>[7]</sup>. 其基本的系统结构如图2所示.

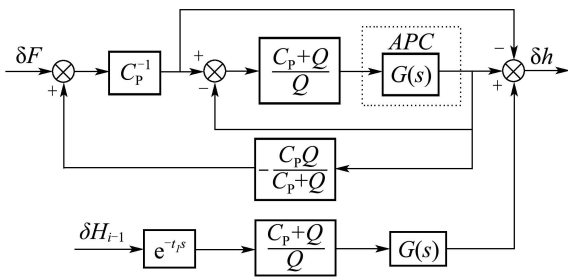


图2 加上前馈的GM-AGC系统原理图  
Fig.2 Schematics of GM-AGC system with FF-AGC

图中:  $\delta H_{i-1}$ 为利用上机架测算的厚度偏差,  $t_1$ 是利用上机架测算对应的滞后时间常数.

虽然GM-AGC考虑了轧机压下效率问题,并且引入了轧件塑性系数<sup>[7]</sup>,在一定程度上改善了AGC系统的动态响应性能,FF-AGC又可以提前对引起厚度的偏差进行抑制,厚度控制精度有了一些提高,但是厚度控制精度的提高还是有很大局限,因为它们所依赖的控制模型是线性轧机弹跳方程,即认为式(1)中,  $S_0$ ,  $F$ 是变化的,从而使得 $h$ 变化. 事实上,  $C_P$ 是变化的,设轧制条件为 $S_0$ ,  $F_1$ ,  $C_P$ , 来料厚度为 $H_0$ 的情况下,出口厚度为

$$h_1 = S_0 + \delta S = S_0 + \frac{F_1}{C_P}. \quad (2)$$

当来料厚度变为 $H_1$ 时,轧制条件变为 $S_0$ ,  $F_2$ ,  $C_P$ , 则有

$$h_2 = S_0 + \delta S = S_0 + \frac{F_2}{C_P}. \quad (3)$$

厚度偏差 $\delta h$ 为

$$\delta h = h_2 - h_1 = \frac{F_2 - F_1}{C_P}. \quad (4)$$

为消除此厚差,设 $k$ 为轧辊位置补偿系数,则轧辊液压缸所产生的轧辊位置修正量 $\delta x$ 为

$$\delta x = -k \frac{\delta F}{C_P}. \quad (5)$$

这样,带钢出口厚度偏差变为

$$\delta h' = \delta h - \delta x = \frac{\delta F}{C_P / (1 - k)} = \frac{\delta F}{C}. \quad (6)$$

根据上式,改变 $k$ ,就可以改变 $C$ ,也达到了变刚度AGC控制的目的. 此时,式(1)定义的刚度 $C_P$ 为标称刚度系数,式(6)中的 $C$ 为实时刚度系数. 变刚度AGC把影响厚度的因素归结成刚度的变化,从而使得弹跳方程非线性化,极大的提高了厚度控制精度,可是,这种控制方式仅仅把已知扰动因素归结到刚度的变化中,对于轧制过程中的未知扰动或未建模扰动并没有加以考虑,这就是传统AGC的主要局限之处.

### 2.3 问题的描述(Description of question)

根据上述分析,传统的AGC控制尽管作了很多改进,但其基本控制机理还是经典控制理论. 变刚度AGC控制把系统中的扰动因素归结为刚度的变化,使得其数学模型有了非线性的性质,从控制论上接近于鲁棒控制,也就是说,变刚度AGC与鲁棒控制在一定程度上是同一的. 为了从根本上抑制轧制系统中的扰动,必须引入新的控制方式,从式(1)可知,只要 $F/C_P$ 以最大的可能逼近系统,则控制精度就能得到根本提高,这样,AGC控制问题就成为 $F/C_P$ 的逼近问题. 本文中,对于 $F$ 的逼近,引入MPC预测控

制机理; 对于 $C_P$ 的逼近, 则通过引入鲁棒控制机理来实现.

### 3 AGC的鲁棒预测模型与控制策略(Robust predictive model and control strategy of AGC)

基于 $H_\infty$ 的鲁棒控制对于系统中由于外部干扰与未建模误差引起的不确定性具有很好的抑制作用, 对于AGC的 $H_\infty$ 控制<sup>[8]</sup>, 首要任务是进行系统的不确定性表示, 根据上面的讨论可知, 对于AGC的控制可以集中为对轧机刚度的控制, 也就是说, 影响厚度控制精度的因素是通过轧机刚度来起作用的, 因此, AGC鲁棒控制的不确定性表示可以通过轧机刚度来表达, 采用加法不确定性表示的AGC鲁棒控制系统图如图3所示.

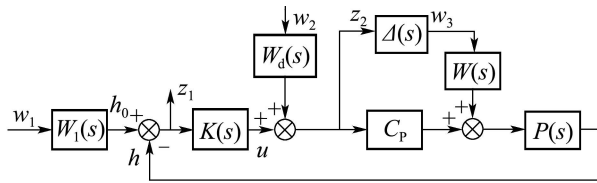


图 3 AGC鲁棒控制系统图

Fig. 3 Schematics of AGC robust control

图中:  $P(s)$ 为包含液压压下系统、轧件变形过程、轧制效率补偿后的传递函数,  $K(s)$ 为所设计的鲁棒控制器,  $W_1(s)$ 为反映厚度偏差的加权函数,  $W_d(s)$ 表示来料扰动等系统扰动的加权函数,  $W(s)$ 表示系统不确定性的加权函数,  $w = [w_1 \ w_2 \ w_3]^T$ 为系统外部扰动向量,  $z = [z_1 \ z_2]^T$ 为评价输出向量.

由于精轧机组涉及到7个机架, 机架间不仅有张力, 速度等信号的传递, 未知扰动也会通过轧件的

传动从上一机架流入到下一机架. 如果对本机架进行 $H_\infty$ 鲁棒控制, 则本机架的扰动可以得到有效抑制, 但是, 轧件在机架间通过时由于温降等引起的模型不确定性就难免会影响到后一机架的厚度控制精度, 为此, 这里采用基于 $H_\infty$ 滤波器的鲁棒控制, 把扰动输入到估计误差的传递函数的 $H_\infty$ 范数作为滤波器的性能指标, 通过使这一性能指标小于某个给定的值来进行AGC的鲁棒控制.

#### 3.1 $H_\infty$ 滤波器计算机理(Mechanism of $H_\infty$ filter)

设系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bw(t), \\ y(t) = Cx(t) + Dw(t), \\ z(t) = Lx(t), \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 是系统的状态向量,  $y(t) \in \mathbb{R}^r$ 是测量输出,  $w(t) \in \mathbb{R}^m$ ,  $z(t) \in \mathbb{R}^p$ 为待估计的信号向量,  $A, B, C, D, L$ 为适当维数的对应矩阵.

**定义 1** 对给定的常数 $\gamma > 0$ , 如果有一个渐近稳定的线性滤波器

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A_f \hat{x}(t) + B_f y(t), \\ \hat{z}(t) = C_f \hat{x}(t) + D_f y(t) \end{cases} \quad (8)$$

使得从扰动输入 $w$ 到估计误差 $\tilde{z} = z - \hat{z}$ 的传递函数的 $H_\infty$ 范数小于给定的 $\gamma$ , 则称具有这样性质的滤波器(8)为系统(7)的一个 $H_\infty$ 滤波器<sup>[9]</sup>.

式(8)中:  $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ 是滤波器的状态向量,  $A_f, B_f, C_f, D_f$ 是适当维数的对应矩阵.

**引理 1** 对于给定的常数 $\gamma > 0$ , 系统(7)存在一个 $\gamma$ -次优 $H_\infty$ 滤波器当且仅当存在对称矩阵 $R > 0$ ,  $X > 0$ 和矩阵 $M, N, Z, D_F$ , 使得线性矩阵不等式(9)(10)成立.

$$\begin{bmatrix} RA + A^T R & RA + A^T X + C^T Z^T & RB & L^T - C^T D_F^T - N^T \\ 0 & A^T X + XA + C^T Z^T + ZC & XB + ZD & L^T - C^T D_F^T \\ 0 & 0 & -I & -D^T D_F^T \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0. \quad (9)$$

$$P_{11} - S_{11}^{-1} = X - R > 0, \quad (10)$$

式中 $P_{11}, S_{11}$ 是使得以下线性矩阵不等式成立所对应的对称阵 $P$ 与其逆阵 $P^{-1}$ 的分块阵:

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}^T P + P \tilde{A} & P \tilde{B} & \tilde{C}^T \\ \tilde{B}^T & -I & \tilde{D}^T \\ \tilde{C} & \tilde{D} & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

其中 $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D}, P, P^{-1}$ 分别为:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ B_f C & A_f \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ B_f D \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\tilde{C} = [L - D_f C \quad -C_f], \quad (14)$$

$$\tilde{D} = [-D_f \quad D], \quad (15)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

### 3.2 基于MPC的轧制力预决策(Predictive decision of rolling force based MPC)

目前普遍认为, 基于OROWAN变形区的力平衡理论的SIMS公式是最逼近轧制力模型的理论公式, 一般表达如下:

$$F = BL'_c Q_P K_C K_T, \quad (18)$$

式中:  $B$ 是带宽,  $L'_c$ 是压扁后轧辊与轧件接触的水平投影长度,  $Q_P$ 是考虑接触弧上摩擦力造成的影响系数,  $K_C$ 是由轧件决定的变形物理化学条件,  $K_T$ 是前后张力对轧制力的影响系数.

由于 $L'_c$ 是轧辊半径, 入口厚度 $H$ 与出口厚度 $h$ 的函数, 因此, 当 $B, Q_P, K_C, K_T$ 等变量一定时, 轧制力将只随轧出厚度变化. 为了提高轧制力预报精度, 传统的做法是利用指数平滑式进行学习, 具体方法是: 首先用实测轧制力 $F_i^*$ 计算出实际厚度 $h_i^*$ , 然后根据 $h_i^*$ 与 $h_{i-1}$ , 用原来模型重新计算轧制力, 得到 $F'$ , 比较 $F_i^*$ 与 $F'$ , 对轧制力进行自适应校正. 轧制力的这种自学习运算需要确定各机架的实际轧出厚度 $h_i^*$ , 而 $h_i^*$ 是间接测量的, 为了加快轧制力的学习速度与学习精度, 引入MPC机理, 以计算的轧制力作为输入数据, 以观测的轧制力作为输出数据, 建立基于最小二乘法的离散差分形式的受控自回归滑动平均模型, 具体算法如下:

$$\begin{aligned} \hat{A}(Z^{-1})\hat{F}_r(k) = \\ \hat{B}(Z^{-1})F_{rc}(k) + \hat{C}(Z^{-1})\zeta(k), \end{aligned} \quad (19)$$

式中:  $\hat{F}_r(k)$ 表示轧制力的观测值,  $F_{rc}(k)$ 表示轧制力计算值,  $\zeta(k)$ 表示未建模不可测的误差白噪声模型,  $\hat{A}(Z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^n \hat{a}_i Z^{-i}$ ,  $\hat{B}(Z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^n \hat{b}_i Z^{-i}$ ,  $\hat{C}(Z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^n \hat{c}_i Z^{-i}$ 分别表示通过辨识的已知实参数, 则轧制力预测模型如下:

$$\begin{aligned} F_{rp}(k+1) = \hat{g}_1 F_{rc}(k) + \hat{g}_2 F_{rc}(k-1) + \\ \cdots + \hat{g}_N F_{rc}(k+1-N), \end{aligned} \quad (20)$$

这里, 预测模型误差为

$$e(k) = \hat{F}_r(k) - F_{rp}(k), \quad (21)$$

式中 $\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_N$ 为模型预测系数. 通过上述非参数化预测模型, 建立基于模型的多步预测控制算法, 得到轧制力的预测值, 通过与实际的轧制力值比较, 建立输出轧制力预报误差和反映控制律约束的 $H_\infty$ 二次型性能指标, 定义为

$$\begin{aligned} J = \sum_{i=1}^{\infty} q_i (F_{rp}(k+i) - F_{rr}(k+1))^2 + \\ \sum_{j=1}^{\infty} \lambda_j (F_{rc}(k+j-1))^2, \end{aligned} \quad (22)$$

对于目标函数 $J$ , 通过滚动优化, 求出 $F_{rc}(k)$  s.t.  $\min J$ , 即求得最优轧制力, 其中

$$\begin{aligned} F_{rc}(k) = [1 \ 0 \ \cdots \ 0](G_1^T Q G_1 + R)^{-1} G_1^T Q (Y_r(k) - \\ G_2 U(k) - H e(k)), \end{aligned} \quad (23)$$

式中:  $H = (h_1, \dots, h_r)^T$ 为误差加权系数,

$$Q = \text{diag}\{q_1, \dots, q_p\}, \quad (24)$$

$$R = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_p\}, \quad (25)$$

$G_1, G_2$ 为滚动优化权阵列,

$$\begin{aligned} U(k) = [F_{rc}(k-1) \ F_{rc}(k-2) \ \cdots \\ F_{rc}(k-N+1)]^T, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} Y_r(k) = [F_{rr}(k+1) \ F_{rr}(k+2) \\ \cdots \ F_{rr}(k+p)]^T. \end{aligned} \quad (27)$$

通过求解上述优化问题得到最优控制序列 $F_{rc}(k)$ , 取 $k$ 时刻控制量并作用于系统, 在 $k+1$ 时刻, 重新进行优化计算, 得到新的控制量序列.

### 3.3 AGC鲁棒预测模型与控制策略(Robust predictive model and control strategy of AGC)

设 $x(t) = [S \ V_R \ \sigma \ \theta \ \omega \ G_i]^T$ ,  $u(t) = [S_r \ V_r \ \omega_r]^T$ ,  $y(t) = [h]^T$ , 则系统(7)对应的状态向量 $A, B, C$ 分别为<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned} A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{Si}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{Vi}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_i}{L_i} \frac{\partial f_i}{\partial h_i} & 1+f_i & -\frac{E_i}{L_i} & 0 & \frac{\partial L_i}{\partial \theta_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial G_i}{\partial \theta_i} \frac{1}{J_i} & -\frac{1}{J_i} D_i & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial G_i}{\partial T_i} \frac{1}{J_i} & 0 & -\frac{1}{J_i} D_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{Gi}} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (28)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{Si}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{Vi}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{Gi}} & 0 \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$C = [\frac{C_P}{C_P+Q} \ 0 \ \frac{1}{C_P+Q} \ \frac{1}{T_{Si}} \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (30)$$

式中:  $S_r, V_r, \omega_r$ 分别为轧机辊缝、轧辊圆周速度和活套电机转速的设定值变化量, 它们作为系统输入向量, 输出为带钢出口厚度 $h$ . 对应的状态向量为: 辊缝 $S$ , 轧辊的圆周速度为 $V_R$ , 机架架间的张应力 $\sigma$ , 活套角的变化量为 $\theta$ , 活套电机的角速度 $\omega$ , 活

套力矩  $G_1$ .  $\frac{1}{T_{Si}}$  是轧机辊缝对应的积分环节,  $\frac{1}{T_{Vi}}$  是轧辊线速度对应的积分环节,  $\frac{1}{T_{Gi}}$  是活套力矩对应的积分环节, 其他未注明参数为轧制过程中对应环节的等效模型.

把上述  $A, B, C$  带入式 (7), 根据引理 1, 利用 MATLAB 中 LMI 工具箱构造  $H_\infty$  滤波器, 把该滤波器带入如图 3 所示系统, 进行 AGC 控制. 同时, 对轧制力  $F$  利用 3.2 节所述机理进行不断优化. 这样, 轧件在机架件传送过程中的扰动得到有效抑制, 实现了  $C_P$  的优化; 同时, 轧制力通过 MPC 不断在线优化, 这样就得到了最满意的  $F/C_P$ , 从而实现厚度控制精度的提高.

#### 4 仿真与讨论(Simulation and discussion)

取某热连轧厂精轧机组液压机构传递函数为

$$G(s) = \frac{4.37 \cdot 10^{16}(s + 16.67)}{s(s^2 + 1057.32s + 352836)} \cdot \frac{1}{(242.4s + 1)(s^2 + 222.4s + 310036.3)}, \quad (31)$$

再取其轧机弹跳特性为

$$W_R(s) = \frac{1}{0.0121s^2 + 0.1844s + 1}, \quad (32)$$

进行 AGC 系统仿真.

首先进行加权函数的选择, 由于加权函数实质上是干扰的模型, 对于轧件来料厚度波动, 其带有突发性与延迟性的特点, 表达为

$$w_1 = \frac{0.004(s + 20)}{s + 6}. \quad (33)$$

对于轧制过程中的摄动, 认为它是有界的, 取其突发性, 表达为

$$w_2 = 0.0005. \quad (34)$$

根据式 (28)~(30) 得到的状态空间方程, 利用 MATLAB 鲁棒控制工具箱, 得到  $H_\infty$  滤波器为

$$K(s) = \frac{2.1(s + 0.001)(s + 0.24)}{s(s^2 + 3.2s + 4.23)}. \quad (35)$$

把设计的滤波器带入式 (31)(32) 以及图 3 表示的轧制系统; 同时, 根据 3.2 节中的轧制力预测机理进行轧制力的优化做仿真实验, 设机架  $F_4$  出口厚度为 9.00 mm, 机架  $F_5$  出口厚度为 6.00 mm, 扰动信号如图 4 所示. 把如图 4 所示的噪声信号分别作用到传统 AGC 控制系统与 AGC 鲁棒预测控制模型中, 得到系统在机架  $F_4$  与机架  $F_5$  的响应曲线分别如图 5、图 6 所示.

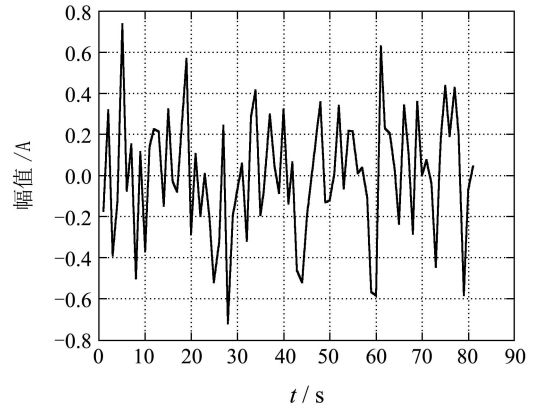
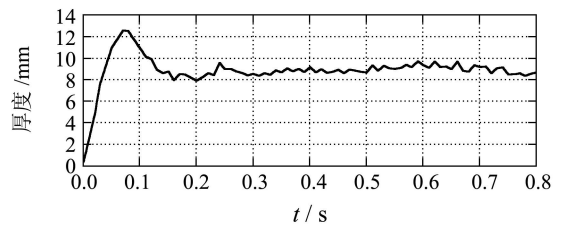
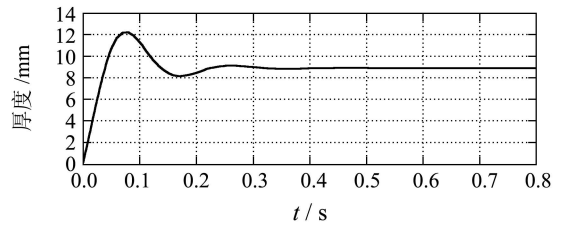


图 4 噪声信号

Fig. 4 Noise signal



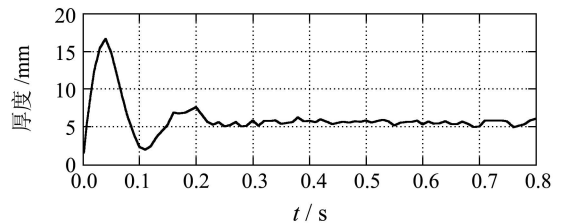
(a) 传统 AGC 在机架  $F_4$  的阶跃响应



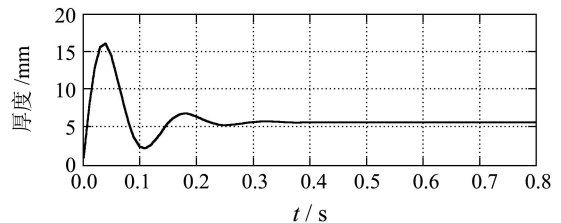
(b) 鲁棒预测控制在机架  $F_4$  的阶跃响应

图 5 AGC 系统鲁棒预测控制在机架  $F_4$  的响应

Fig. 5 Response of robust predictive control system of AGC in stand  $F_4$



(a) 传统 AGC 在机架  $F_5$  的阶跃响应



(b) 鲁棒预测控制在机架  $F_5$  的阶跃响应

图 6 AGC 系统鲁棒预测控制在机架  $F_5$  的响应

Fig. 6 Response of robust predictive control system of AGC in stand  $F_5$

在图5中,噪声信号会使得传统AGC的响应曲线不光滑,而通过AGC鲁棒预测模型处理,系统的响应明显得到了改善.图6表示的是同样的仿真效果.从图5与图6可知AGC鲁棒预测模型在不同机架有扰动的前提下都可以使系统性能得到显著改善.

## 5 结论(Results)

本文研究了热连轧带钢控制的鲁棒预测控制问题,首先在传统AGC的基础上,从不确定性的角度讨论了AGC的扰动抑制问题.得到了传统AGC控制与鲁棒控制的内在联系.其次,针对影响弹跳方程精度的不确定性引入了基于 $H_\infty$ 的鲁棒控制机理,设计了 $H_\infty$ 滤波器,使得包括轧件在机架间传递过程中的不确定性也得到抑制.同时,针对影响弹跳方程精度的另一个重要因素,即轧制力,引入了预测控制机理进行小范围的优化,进而达到全局最优.仿真结果表明所提控制策略是有效的,可行的.

## 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, 2007.  
(SUN Yikang. *Model and Control of Hot Strip Mill*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2007.)
- [2] KAZUYA A, KAZUHIRO Y, TAKASHI K. Hot strip mill tension-looper control based on decentralization and coordination[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(3): 337 – 344.
- [3] OKADA M, MURAYAMA K, URANO A, et al. Optimal control system for hot strip finishing mill[J]. *Control Engineering Practice*, 1998, 6(8): 1029 – 1034.
- [4] HEARNS G, Grimble M J. Robust multivariable control for hot strip mills[J]. *ISIJ International*, 2000, 40(10): 995 – 1002.
- [5] DE NICOLAO G, MAGNI L, SCOTTOLINI R. Robust predictive control of systems with uncertain impulse response[J]. *Automatica*, 1996, 32(10): 1475 – 1479.
- [6] 李亚东, 李少远. 基于LMI的多模型鲁棒预测控制[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(5): 627 – 632.  
(LI Yadong, LI Shaoyuan. LMI based multi-model robust predictive control[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(5): 627 – 632.)
- [7] 郑申白, 曾庆亮, 李之林. 轧制过程自动化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.  
(ZHENG Shenbai, ZENG Qingliang, LI Zhilin. *Automatic of Rolling Process*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2005.)
- [8] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
(MEI Shengwei, SHEN Tielong, LIU Kangzhi. *Modern Robust Control Theory and Application*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)
- [9] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
(YU Li. *Robust Control-Linear Matrix Inequalities Method*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)
- [10] 杨斌虎, 杨卫东, 陈连贵. 基于 $H_\infty/H_2$ 的多变量约束热轧带钢AGC鲁棒控制[J]. 信息与控制, 2007, 36(4): 514 – 518.  
(YANG Binhu, YANG Weidong, CHEN Liangui. Multivariable constrained agc robust control based on  $H_\infty/H_2$  for hot rolling strip[J]. *Information and Control*, 2007, 36(4): 514 – 518.)

## 作者简介:

- 杨斌虎** (1971—), 男, 博士, 目前研究方向为鲁棒控制、钢铁流程建模, E-mail: yangbinhu@sina.com;
- 杨卫东** (1952—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为轧制控制, E-mail: ywd1952@126.com;
- 曲蕾** (1979—), 女, 博士, 目前研究方向为自适应逆控制、鲁棒控制、轧制控制.