

改进的板形平直度板厚模型及其自抗扰解耦

张瑞成 王建超

(河北联合大学电气工程学院 唐山 063009)

摘要 以连续轧制过程中强耦合的板形板厚系统为研究对象,在对影响板形板厚控制的各种耦合因素进行系统分析的基础上,建立了加入油膜厚度影响的板厚和板形平直度耦合系统数学模型。在耦合关系上通过 matlab 仿真分析,可知改进模型板形与板厚的耦合关系明显。在此基础上利用自抗扰技术进行解耦设计,并以某厂五机架连轧机的实际参数采用计算机进行仿真,仿真结果表明设计的自抗扰解耦控制器可以有效消除板厚和板形平直度之间的耦合关系,解耦效果良好。

关键词 板形平直度,板厚,油膜厚度,自抗扰控制器,解耦控制

中图分类号 TP273 **文献标识码** A

Improved Model of Plate Glancing Flatness and Thickness and its Active Disturbance Rejection Decoupling

ZHANG Rui-cheng WANG Jian-chao

(College of Electrical Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

Abstract In AFC-AGC strong coupling continuous rolling process as the research object, analysis various coupling factors of the system of the thickness control and strip flatness control and establishing the thickness and shape glancing flatness coupling model after adding the effects of oil film thickness. Based on the use of ADRC technique for decoupling design, and used computer to carry on the simulation to actual parameters of a factory of five tandem rolling mill, the simulation results show that the design of the disturbance decoupling controller can basically eliminate the coupling relationship between the thickness of plates and plate glancing flatness, and can get a good decoupling effect.

Keywords Shape glancing flatness, Thickness, Oil film thickness, Auto-disturbance rejection controller, Decoupling control

1 引言

板形和板厚系统是一个复杂的多变量控制系统,它们的控制参数之间有很强的耦合关系。AGC(板厚控制系统)的调节必然影响到 AFC(板形控制系统)的控制,反之亦然。因此,必须综合考虑板形控制和板厚控制,即板形板厚综合控制(AFC-AGC)。文献[1]对板形板厚耦合模型进行了推导,设计了对角解耦控制器;文献[2]采用 ADRC 静态解耦技术和 ESO 动态解耦技术,建立板宽和板厚一体的多变量控制系统,实现对板宽和板厚的解耦控制;文献[3]应用模糊 PID 调节解决速度变化带来的厚度波动;文献[4]将模糊控制引入到六辊轧机板形控制中,利用模糊控制理论建立板形控制调节模型;文献[5]在以工作辊弯辊力和轧制力为控制手段对板形板厚综合系统进行了控制;文献[6]提出了一种基于前馈解耦的鲁棒控制策略来保证系统参数变化时的解耦效果。上述文献所应用的板形板厚数学模型都忽略了平均油膜厚度对系统的影响,而油膜厚度的变化对板厚有较大影响,因此在原有模型基础上加入油膜厚度的变化因素建立板形平直度与板厚系统的数学模型。而且文献中应用的解耦方法鲁棒性较差,利

用自抗扰控制器^[7,11]进行解耦设计,这种方法简化解耦过程,对模型要求不高,且误差较小,有更强的鲁棒性。

2 板形平直度板厚耦合数学模型

轧制过程中,板厚控制主要是液压下系统调节有载辊缝的开口度,以消除各种因素的变化对带材厚度的影响。考虑到板厚控制对板形平直度的影响,带材出口厚度的方程改进为:

$$h = S + \frac{P - P_0}{C_P} + \frac{F}{C_F} + O_F + G_M \quad (1)$$

式中, h 为带钢出口厚度, S 为轧机空载辊缝, P_0 为轧机轧辊预压靠力, C_P 为轧制力纵向刚度, O_F 为轧制条件下轧机轴承的油膜厚度, G_M 为由于轧辊热膨胀及磨损等引起的轧机中心线空载辊缝的漂移, C_F 为使机座开口度增加 1mm 所加的弯辊力, F 为实际弯辊力, P 为实际轧制力。

1886 年, Rynolds 提出了油膜厚度的计算模型^[9,10]:

$$O_F = \frac{a(V/P)}{(V/P) + b} \quad (2)$$

式中, V 为轧辊转速, r/mm ; P 为轧制力, kN ; a, b 为模型参数。

本文受河北省自然科学基金项目(F2010000972)资助。

张瑞成(1975-),男,博士,副教授,硕士生导师, E-mail: 906501518@qq.com; 王建超(1987-)男,硕士生,主要研究领域为复杂工业系统建模与控制。

但油膜厚度 O_F 不易直接测量, 只能用空压靠方法间接得出。因此缺少零油膜厚度参考点的情况下, 只能得出不同情况下油膜厚度的相对变化量, 不能求出的实际油膜厚度。但是可以在 AGC 系统中引进相对油膜厚度的概念。如下式:

$$\Delta O_F = \frac{a(V/P - V_0/P_0)}{(V/P - V_0/P_0) + b} \quad (3)$$

式中, V_0 为基本转速, r/mm; P_0 为基本轧制力, kN。

出口平均厚度 h 与平均厚度 H 满足方程:

$$h = H - \frac{P}{Q} \quad (4)$$

式中, Q 为轧件的塑性刚度系数, 表示轧件单位变形所需的轧制力, kN/mm。

设轧机的轧辊转速不变, 将式(4)代入式(3)进行整理, 设 $b - V_0/P_0$ 为 k_1 , 得:

$$\Delta O_F = \frac{aV_0/(HQ - hQ) - aV_0/P_0}{V_0/(HQ - hQ) + k_1} \quad (5)$$

板带材在进入机架的厚度为 H , 通过其中一个轧辊后的厚度变为 h , 在这个过程中, 取时间段很小, 则可以认为在这段时间内 $H - h = \Delta h$, 因此上式可以变为:

$$\Delta O_F = \frac{aV_0/\Delta hQ - aV_0/P_0}{V_0/\Delta hQ + k_1} \quad (6)$$

将上式整理为:

$$\Delta O_F = \frac{aV_0/+aV_0/P_0k_1 - k_2}{k_1\Delta hQ + V_0} \quad (7)$$

式中, $k_2 = aV_0/P_0k_1$, a/V_0 , k_1 , k_2 都是常数, 因 V_0 相对较小, 对分母影响不大, 故忽略不计, P_0 相对很大, a 与 b 为同一数量级, 故将 k_2 一起忽略(将产生的误差归结为系统的总误差设计到自抗扰控制器的扩张状态观测器中)。因此 ΔO_F 与 Δh 近似成反比关系。设这一比例关系为:

$$\Delta O_F = \frac{D_1}{\Delta h} \quad (8)$$

式中, D_1 为一常数, 单位 mm。

在此不考虑 G_M (轧辊热膨胀及磨损等引起的轧机中心线空载辊缝的漂移)对板厚的影响, 则可以把广义的弹跳方程改写为:

$$h = S + \frac{P - P_0}{C_P} + \frac{2F}{C_F} + O_F \quad (9)$$

带材板形控制实际上还是通过液压弯辊系统调整有载辊缝的形状(平直度)来实现的, 板形方程可以用下式来表示:

$$\sigma = \frac{\varphi_0 E}{(1 - \nu^2)} \left[\frac{P}{K_P} - \frac{F}{K_F} + \left(\frac{1}{K_W} - \frac{h}{H} \right) H_W + \frac{h\sigma_0}{E} (1 - \nu^2) \right] \quad (10)$$

式中, $\sigma_0 = -\frac{E}{1 - \nu^2} \left(\frac{\Delta L}{L} \right)$; σ_0 为出口横向张力差, 与带材平直度有关; E, ν 为轧件的杨氏模量和泊松比; φ_0 为考虑横向不均匀变形系数, 值小于 1; K_P 为轧机横向刚度系数, kN/mm; K_F 为横向弯辊刚度系数, kN/mm; H_W 为来料板带材的横向厚度差; K_W 为影响系数; H 为来料平均厚度; L 为来料平均长度; ΔL 为来料板材中部与边部长度差; h 为轧后板材平均厚度。

将式(10)化简并差分得:

$$\Delta\sigma = \frac{\varphi_0 E}{(1 - \nu^2)} \left[\frac{\Delta P}{K_P} - \frac{\Delta 2F}{K_F} + \left(\frac{1}{K_W} - \frac{h}{H} \right) \Delta H_W + \right.$$

$$\left. \frac{h\Delta\sigma_0}{E} (1 - \nu^2) \right] \quad (11)$$

对式(9)进行差分化得:

$$\Delta h = \Delta S + \frac{\Delta P}{C_P} + \frac{\Delta 2F}{C_F} + \Delta O_F \quad (12)$$

对式(4)与式(9)整理并差分处理得:

$$\Delta P = \frac{C_P Q}{C_P + Q} (\Delta H - \Delta S - \frac{\Delta 2F}{C_F} - \Delta O_F) \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)得:

$$\Delta h = \frac{C_P}{C_P + Q} \cdot \Delta S + \frac{C_P}{(C_P + Q)C_F} \cdot \Delta 2F + \frac{Q}{C_P + Q} \Delta H + \frac{Q}{C_P + Q} \frac{D_1}{\Delta h}$$

对上式进行整理得到:

$$\begin{aligned} \Delta h &= \frac{1}{2} \left(\frac{C_P}{C_P + Q} \cdot \Delta S + \frac{C_P}{(C_P + Q)C_F} \cdot \Delta 2F + \right. \\ &\quad \left. \frac{Q}{C_P + Q} \Delta H \right) - \frac{Q}{C_P + Q} \frac{D_1}{\Delta h} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{C_P}{C_P + Q} \cdot \Delta S + \frac{C_P}{(C_P + Q)C_F} \cdot \Delta 2F + \right. \\ &\quad \left. \frac{Q}{C_P + Q} \Delta H \right) \end{aligned}$$

将式(13)代入式(11)整理得:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma &= \frac{\varphi_0 E}{(1 - \nu^2)} \left[\frac{C_P^2 - 2C_P Q}{2K_P(C_P + Q)} \cdot \Delta S + \right. \\ &\quad \left. \frac{C_P^2 K_F - 2[K_F C_P Q + K_P C_F(C_P + Q)]}{2K_P C_F K_F(C_P + Q)} \Delta 2F + \right. \\ &\quad \left. \frac{3C_P Q}{K_P(C_P + Q)} + \left(\frac{1}{K_W} - \frac{h}{H} \right) \Delta H_W + \frac{h\Delta\sigma_0}{E} (1 - \nu^2) \right] \quad (14) \end{aligned}$$

由液压缸、伺服阀、伺服放大系统组成的工作辊液压弯辊系统可以等效为一阶惯性环节:

$$G_1(s) = \frac{K_1}{1 + T_1 s} \quad (15)$$

式中, K_1 为液压弯辊系统的比例系数; T_1 为液压弯辊系统的时间常数, 单位 s。

轧机辊缝调节是由轧机的压下装置完成的, 它是电气液压压下装置, 同样也可以等效为一阶惯性环:

$$G_2(s) = \frac{K_2}{1 + T_2 s} \quad (16)$$

式中, K_2 为液液压下系统的比例系数; T_2 为液液压下系统的时间常数, 单位 s。

而在通常情况下, 带钢的厚度和板形检测装置均可看作一个延时环节 e^{-s} 。

因此, 板形平直度板厚耦合系统可用如下的矩阵方程表示:

$$\begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta CR \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta S \\ \Delta 2F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$G_{11}(s) = \frac{C_P}{2(C_P + Q)} \cdot \frac{K_2}{1 + T_2 s} \cdot e^{-s}$$

$$G_{12}(s) = \frac{C_P}{2(C_P + Q)C_F} \cdot \frac{K_1}{1 + T_1 s} \cdot e^{-s}$$

$$G_{21}(s) = -\frac{\varphi_0 E}{(1 - \nu^2)h} \frac{C_P^2 - C_P Q}{2K_P(C_P + Q)} \cdot \frac{K_2}{1 + T_2 s} \cdot e^{-s}$$

$$G_{22}(s) = -\frac{\varphi_0 E}{(1 - \nu^2)h} \frac{C_P^2 K_F - 2[K_F C_P Q + K_P C_F(C_P + Q)]}{2K_P C_F K_F(C_P + Q)} \cdot$$

$$\frac{K_1}{1 + T_1 s} \cdot e^{-s}$$

式中, η_1, η_2 为扰动项。

可知板形板厚耦合传递关系如图 1 所示。

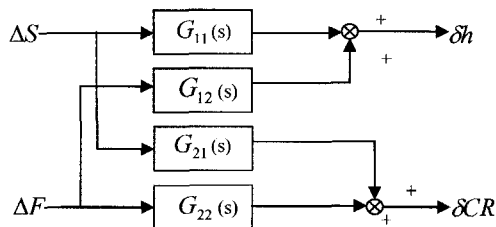
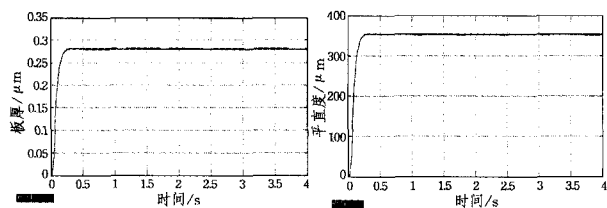


图 1 板形板厚耦合传递关系

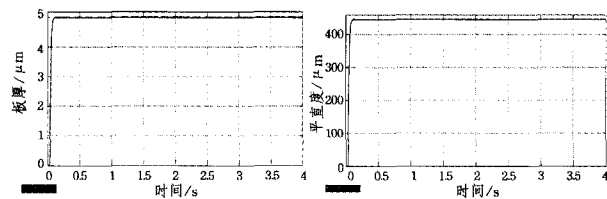
以国内某 1700mm 连轧机组为研究对象,从生产现场获取了一组 F6 机架的系统特性参数^[8], $k_1 = k_2 = 1$, $T_1 = 0.01$, $T_2 = 0.05$, $\tau = 0.04$, $E(\text{MPa}) = 2.1 \times 10^5$, $\mu = 0.07$, $\varphi_b = 0.5$, $\nu = 0.3$, $C_p = 5700 \text{ kN/mm}$, $C_f = 15000 \text{ kN/mm}$, $K_F = 10000 \text{ kN/mm}$, $K_P = 52600 \text{ kN/mm}$, $Q = 13480 \text{ kN/mm}$, $h = 1.35 \text{ mm}$ 。在这里 $\Delta S = 1.878 \text{ mm}$, $\Delta F = 500 \text{ kN}$ 。

对板形板厚耦合数学模型的仿真结果如图 2 所示。



(a) 辊缝变化对板厚的影响

(b) 辊缝变化对平直度的影响



(c) 弯辊力变化对板厚的影响

(d) 弯辊力变化对平直度的影响

图 2 改进模型控制仿真曲线

由图 2 可知,调节辊缝或弯辊力对出口带钢厚度、板形平直度都产生变化。图中只有辊缝发生变化时使板厚产生了 0.28mm 的变化值,而板形平直度也产生了 0.35mm 的变化值;只有弯辊力变化不仅使板形平直度产生 0.005mm 的值,也使板厚产生 0.45mm 的变化值。因此可知板形平直度与板厚之间存在着很强的耦合关系。为了提高连轧机组厚度控制精度和板形控制精度,在此选用自抗扰解耦控制器进行解耦设计。

3 板形板厚的自抗扰解耦控制器设计

对于 SISO 系统的 ADRC,可以把系统的扰动用 ESO 进行估计、补偿,使其变为线性系统的标准形:积分器串联型,从而实现系统的动态反馈线性化。这是用 ADRC 技术设计控制器时的灵活性,也是把复杂问题进行简化的手段。对于 MIMO 系统,不同通道的耦合同样可以看作是一种外扰,各通道用 ESO 各自独立地进行在线跟踪及补偿,从而实现解耦控制。

设 Δh 为 y_1 , ΔCR 为 y_2 , ΔS 为 u_1 , ΔF 为 u_2 ;时滞环节用一阶惯性环节代替(将机架的系统特性参数^[7]代入到式(17)

整理得到的 $G_{11}(s)G_{12}(s)G_{21}(s)G_{22}(s)$ 有:

$$y_1 = \frac{0.149}{1+0.09s+0.02s^2}u_1 + \frac{0.00001}{1+0.05s+0.0004s^2}u_2 \quad (18)$$

$$y_2 = \frac{187.85}{1+0.09s+0.02s^2}u_1 + \frac{0.89}{1+0.05s+0.0004s^2}u_2 \quad (19)$$

式(18)第二项分子太小故将其忽略,将式子变形代入式(19)并进行拉普拉斯变换为微分方程形式,可得:

$$y_1'' = 74.5u_1 - 4.5y_1' - 50y_1 \quad (20)$$

$$y_2'' = 2225u_2 + 93944.5u_1 - 2500y_2 - 125y_2' + 151950.5y_1' - 3089450y_1 \quad (21)$$

对式(20)、式(21)进行 ESO 的分步设计,依据上述自抗扰解耦控制方法,基于板形板厚的具体数学模型,分别按两个主通道的传递函数设计参考模型,由此可以将上面两式整理成:

$$\begin{cases} \dot{x}_{11} = x_{12} \\ \dot{x}_{12} = 74.5u_1 - f_1(x_{11}, x_{12}, t, \omega(t)) \\ y_1 = x_{11} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{21} = x_{22} \\ \dot{x}_{22} = 2225u_2 + 93944.5u_1 - f_2(x_{21}, x_{22}, t, \omega(t)) \\ y_2 = x_{21} \end{cases} \quad (23)$$

式(22)的跟踪微分器(即它的安排过渡过程)为:

$$\begin{aligned} fh &= fhan(v_{11} - y_1^*, v_{12}, r_0, h) \\ v_{11} &= v_{11} + h v_{12} \\ v_{12} &= v_{12} + h fh \end{aligned} \quad (24)$$

式中, $fhan(v_{11} - y_1^*, v_{12}, r_0, h)$ 为离散最速控制系统函数:

$$\begin{aligned} fhan(x_1, x_2, r, h) &= \begin{cases} d = rh \\ d_0 = hd \\ y = x_1 + hx_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r \sqrt{|y|}} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{(a_0 - d)}{2} \text{sign}(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ fhan = \begin{cases} r \text{sign}(a), & |a| > d \\ r \frac{a}{d}, & |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

扩张状态观测器为:

$$\begin{cases} e_1 = z_{11} - y_1, fe = |e|^{1/2} \text{sign}(e), fe_1 = |e|^{1/4} \text{sign}(e) \\ z_{11} = z_{11} + h(z_{12} - \beta_{01}e) \\ z_{12} = z_{12} + h(z_{13} - \beta_{02}fe + 74.5u_1) \\ z_{13} = z_{13} + h(-\beta_{03}fe_1) \end{cases} \quad (26)$$

式中, $fe = fal(e, 0.5, h) = |e|^{1/2} \text{sign}(e)$ 。

状态误差反馈律为:

$$\begin{cases} e_1 = v_{11} - z_{11}, e_2 = v_{12} - z_{12} \\ u_1 = \beta_1 fal(e_1, a_1, \delta) + \beta_2 fal(e_2, a_2, \delta) \end{cases} \quad (27)$$

扰动补偿为:

$$U_1 = u_1 - z_{13} \quad (28)$$

式(23)的跟踪微分器(即它的安排过渡过程)为:

$$\begin{aligned} fh &= fhan(v_{21} - y_2^*, v_{22}, r_0, h) \\ v_{21} &= v_{21} + h v_{22} \\ v_{22} &= v_{22} + h fh \end{aligned} \quad (29)$$

(下转第 420 页)

的生态环境:QQ空间、农场、牧场、餐厅等。这些应用大部分是由第三方开发的,它们需要腾讯的授权才能连接进来,但另一方面,也正是它们才捧红了腾讯QQ。校园信息化系统首先要自己做大做强,才能吸引足够的第三方开发商,也只有吸引了足够的第三方开发商,才步入了一个良性循环的轨道。

参考文献

[1] (美)Amalo V. 思科网络技术学院教程[M]. 北京:人民邮电出版社,2008
 [2] (美)Levinc J R. Inlernel 核心技术精解[M]. 北京:人民邮电出版社,2009
 [3] 王竹林. 校园网组建与管理[M]. 北京:清华大学出版社,2010

[4] 余胜泉,曹晓明. 明确规定教育信息化[J]. 回顾与展望——探求可持续发展之路,2011
 [5] 李志民. 我国教育信息化建设面临的问题及思考
 [6] 赵天寿. 校园网建设以应用为本[N]. 中国教育报
 [7] 李烁,冯秀琪. 关于教育资源库建设的几点思考[J]. 中国电化教育工作者,2011
 [8] 杨国权,吴政新. 教育信息化——搭建教育创新的战略平台[J]. 辽宁教育研究,2011
 [9] 蔡少优. 试论校园信息化建设[J]. 福建成人教育,2009
 [10] 王伯建. 网络时代:面临挑战的校园传统媒体[J]. 景德镇高专学报,2009
 [11] 蒋磊宏. 美国大学教育信息化的考察[J]. 教育信息化,2010

(上接第394页)

建立如下扩张状态观测器:

$$\begin{cases} e_2 = z_{21} - y_2, fe = |e|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(e), fe_1 = |e|^{\frac{1}{4}} \text{sign}(e) \\ z_{21} = z_{21} + h(z_{22} - \beta_{01}e) \\ z_{22} = z_{22} + h(z_{23} - \beta_{02}fe + 2225u_2 + 93944.5u_1) \\ z_{23} = z_{23} + h(-\beta_{03}fe_1) \end{cases} \quad (30)$$

状态误差反馈律为:

$$\begin{cases} e_1' = v_{21} - z_{21}, e_2' = v_{22} - z_{22} \\ u_2 = \beta_1 \text{fal}(e_1, a_1, \delta) + \beta_2 \text{fal}(e_2, a_2, \delta) \end{cases} \quad (31)$$

扰动补偿为:

$$U_2 = u_2 - z_{23} \quad (32)$$

确定出虚拟控制量 U_1, U_2 以后,所需的实际控制量为:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = B^{-1} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

把这个控制量送入对象式(20)和式(21)中,采用的TD参数为 $h=0.24, r=20, \delta=0.01$;扩张状态观测器的参数为 $\beta_{01}=100, \beta_{02}=300, \beta_{03}=500, a_1=0.05, a_2=0.1, d=1$ 。仿真结果如图3所示。

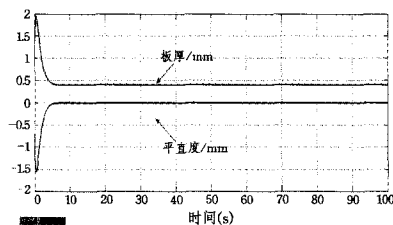


图3 加入辊缝扰动后解耦关系曲线

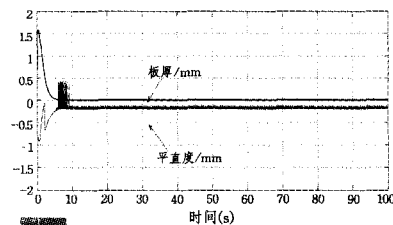


图4 加入弯辊力扰动后解耦关系曲线

由图3可知,用自抗扰控制器解耦控制后,板厚产生了0.4mm左右的变化,而此时的平直度变化为0;图4中板形平

直度产生了0.2mm左右的变化量,而这时的板厚变化量为0。由图及数据说明板形平直度和板厚间的耦合已经基本消失,即自抗扰控制器能很好地将前面的数学模型进行解耦控制。

结束语 (1)在原有板形板厚综合数学模型的基础上加入油膜厚度这个影响因素,对原模型整理得到新的板形平直度板厚数学模型,再应用 matlab/simulink 进行仿真分析,分析得出板形平直度与板厚之间存在很强的耦合关系。

(2)采用自抗扰控制方法,设计改进后数学模型的自抗扰解耦控制器,应用计算机仿真,结果表明自抗扰控制器能很好地对板形板厚耦合系统进行解耦控制,而且解耦效果明显。

参考文献

[1] 杨景明,张林浩,车海军,等. 基于MMAS-PID的板型板厚综合控制[J]. 轧钢,2009,26(4):45-49
 [2] 王丽君,童朝南,孙一康. 板宽板厚多变量系统的自抗扰解耦控制. [J]. 北京科技大学学报,2006,28(11):1068-1072
 [3] Sharma U, et al. Application of fuzzy logic technology to tandem mill transitional gauge variaion [J]. Iron and Steel Engineer, 1998,75(6):40-43
 [4] Jung J Y, et al. Fuzzy-control simulation of cross-sectional shape in six-high cold-rolling mills [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996,62(1):61-69
 [5] Tarokh M. Development Of a combined shaped and gauge control scheme in strip rolling [C] // Proc. Conf. On Measurement and Control, London, 1972:42-46
 [6] 景鹏,童朝南. 基于解耦的板形板厚系统鲁棒控制策略[J]. 信息与控制,2011,40(4):467-471
 [7] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008
 [8] 张楠. 神经网络在板形板厚解耦控制系统中的应用研究 [D]. 沈阳:东北大学,2005
 [9] 张其生,等. 中厚板轧机相对油膜厚度模型的建立[J]. 东北大学学报,2007,28(1):68
 [10] 陈东宁,姜万录. 冷连轧机相对油膜厚度的测试与建模[J]. 润滑与密封,2007,32(9):77-78
 [11] 李壮举,刘贺平,王允建. 一种改进的自抗扰解耦方法及其仿真应用[J]. 计算机仿真,2010,27(4):344-348