

铝板带材板形和厚度解耦自适应控制策略

李 迅^{1,2}, 杨甫勇¹, 桂卫华¹, 喻寿益¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 西南铝业(集团)有限责任公司, 重庆 401326)

摘要: 铝板带材轧制生产过程是一个复杂的非线性控制对象, 其中自动板形控制(AFC)和自动板厚控制(AGC)又是一个相互耦合的复杂系统, 其参数在运行过程中会随时发生变化. 针对铝板带材轧制的特点提出了将自适应控制与板形板厚控制系统数学模型相结合, 自动调整解耦网络和控制器的参数. 现场实际数据的仿真结果表明, 该方法的应用消除了参数变化产生的影响, 使板形板厚控制系统具有良好的自适应跟随参数变化和抗干扰性能, 解耦控制效果良好, 提高了板形板厚的控制精度.

关键词: 铝板带材; 板形控制; 板厚控制; 解耦控制; 自适应控制

中图分类号: TP273.4 **文献标识码:** A

Self-adaptive decoupling control for flatness and gauge of aluminum plates and strips

LI Xun^{1,2}, YANG Fu-yong¹, GUI Wei-hua¹, YU Shou-yi¹

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. Southwest Aluminum (Group) Corporation, Ltd, Chongqing 401326, China)

Abstract: The rolling process of aluminum plates and strips is a very complicated nonlinear control object; and the automatic flatness control(AFC) and the automatic gauge control(AGC) are two coupling complex systems with varying parameters in operation. Based on the characteristics of the aluminum plate and strip in rolling, we propose an adaptive control method which combines the mathematical models of AFC and AGC to automatically adjust the parameters in the decoupling network and the controllers. The simulation of field data indicates that this method avoids the effects of parameter variations by letting AFC and AGC to adaptively track the parameters variations for reducing disturbances. It ensures a good performance in decoupling, and improves the precision of flatness and gauge control.

Key words: aluminous board and strip; flatness control; gauge control; decoupling control; self-adaptive control

1 引言(Introduction)

在铝板带材冷轧生产过程中, 板形和板厚是决定产品几何尺寸精度的两个主要指标^[1,2]. 板形板厚控制系统是一个多输入多输出、非线性、强耦合的复杂系统, 轧制过程是个快速过程, 很多解耦控制方法因算法复杂、计算量大等原因而无法实时在线适应过程的变化, 因此寻求一种有效的简单方法进行解耦控制已成为板形板厚综合控制发展的趋势^[3]. 目前国内也有很多关于钢板带材板形板厚控制方法的研究, 如反馈解耦控制^[4], 前馈解耦控制^[5]和基于模糊神经网络解耦控制^[6]等. 铝板带材板形板厚控制系统在运行过程中其参数会随时间在一定范围内变化, 按照固定参数设计的解耦网络和调节器的控制

性能变差, 由此会导致系统控制精度降低^[7]. 针对系统在运行过程中参数会发生变化的情况, 本文采用自适应解耦控制, 当对象参数发生变化时, 考虑将自适应算法和对象数学模型结合起来, 实现解耦网络和调节器参数随对象参数变化在线调节, 保证系统的解耦控制性能.

2 板形板厚数学模型的建立(Mathematical modeling of flatness and gauge)

铝板带材出口板形偏差和出口厚度偏差是生产过程中所关心的主要输出量, 调节二者的主要手段是调节弯辊力和调节辊缝, 因此可将板形板厚控制系统看成是双输入双输出多变量控制系统^[8,9]. 设 H_c , H_e 为来料中部和边部厚度, L_c , L_e 为来料中部

和边部长度, H, L 为来料平均厚度和长度, h_c, h_e 为出口中部和边部厚度, l_c, l_e 为出口中部和边部长度, h, l 为出口平均厚度和长度, H_d 为来料横向厚差, 即来料凸度, h_d 为出口横向厚差, 即出口凸度. 忽略金属横向宽展, 根据轧制延伸率相等和体积不变原理可得

$$\begin{cases} H_c L_c = h_c l_c, \\ H_e L_e = h_e l_e, \end{cases} \quad (1)$$

进行差分近似得到

$$\frac{H_c - H_e}{H} + \frac{L_c - L_e}{L} = \frac{h_c - h_e}{h} + \frac{l_c - l_e}{l}. \quad (2)$$

令

$$\begin{aligned} H_c - H_e &= H_d, L_c - L_e = \Delta L, \\ h_c - h_e &= h_d, l_c - l_e = \Delta l, \end{aligned}$$

由式(2)变形为

$$\frac{H_d}{H} + \frac{\Delta L}{L} = \frac{h_d}{h} + \frac{\Delta l}{l}. \quad (3)$$

式(3)表示板形良好的条件, 在轧制过程中要保证该条件成立需要考虑轧制力、弯辊力和辊形的影响, 轧件出口的横向厚差方程为

$$h_d = \frac{F_P}{K_P} + \frac{F_W}{K_W} + \theta, \quad (4)$$

式中: F_P 为轧机轧辊实际轧制力, K_P 为轧制力横向刚度, F_W 为实际弯辊力, K_W 为弯辊力横向刚度, θ 为轧机综合辊形. 对于厚度控制, 可根据广义弹跳方程^[10]

$$h = S + \frac{F_P - F_{P0}}{M_P} + \frac{2F_W}{M_W} + O_F + G_M, \quad (5)$$

式中: S 为轧机空载时的辊缝, F_{P0} 为轧辊预压靠力, M_P 为制力横向刚度系数, M_W 为弯辊力横向刚度系数, O_F 为轧制条件下轧辊轴承的油膜厚度, G_M 为轧辊热膨胀及磨损引起的空载辊缝漂移. 忽略 O_F 和 G_M 在轧制过程中的变化, 由式(5)取其增量形式为

$$\Delta h = \Delta S + \frac{\Delta F_P}{M_P} + \frac{2\Delta F_W}{M_W}. \quad (6)$$

由于板形是板带材内部存在横向张应力差所致, 因此板形控制本质上就是板带材内部横向残余应力分布的控制, 可以把板带材出口厚度和横向张应力差作为控制目标^[11]. 设来料和出口横向张应力差为 σ_0, σ_1 , 则有

$$\begin{cases} \sigma_0 = -E \frac{\Delta L}{L}, \\ \sigma_1 = -E \frac{\Delta l}{l}, \end{cases} \quad (7)$$

式中 E 为弹性模量. 铝板带材出口厚度 h 和来料厚度 H 与在轧制过程中受到的轧制力直接相关, 因此出口厚度可以用塑性变形表达式表示

$$h = H - \frac{F_P}{Q}, \quad (8)$$

式中 Q 为塑性刚度系数. 由式(1)~(8)联立求解可得轧制过程被控量的增量数学模型

$$\Delta h = \Delta S + \frac{\Delta F_P}{M_P} + \frac{2\Delta F_W}{M_W}, \quad (9)$$

$$\Delta \sigma_1 = \frac{E}{h} \left(\frac{\Delta F_P}{K_P} + \frac{\Delta F_W}{K_W} - \frac{h \Delta H_d}{H} + \frac{h \Delta \sigma_0}{E} \right), \quad (10)$$

$$\Delta F_P = \frac{M_P Q}{M_P + Q} (\Delta H - \Delta S - \frac{2F_W}{M_W}), \quad (11)$$

式(9)~(11)只是板形板厚的静态增量模型, 当有外来扰动如来料厚度、凸度等时, 需要调节弯辊力及压下系统保持板形和厚度不变, 每个单独的控制系统的改变到所要求的数值需要一定响应时间. 液压弯辊系统和液压压下系统均可等效为一阶惯性系统, 其传递函数分别为

$$G_F = \frac{K_1}{1 + T_1 s}, G_S = \frac{K_2}{1 + T_2 s}. \quad (12)$$

铝板带材的板形和厚度检测装置可以看作是一个延迟环节 $e^{-\tau s}$. 于是, 整个板形板厚综合控制系统可用矩阵方程表示

$$\begin{bmatrix} \Delta \sigma_1 \\ \Delta h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_W \\ \Delta S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1(s) \\ \eta_2(s) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中 $\eta_1(s), \eta_2(s)$ 为扰动信号, 从而可得板形板厚综合控制系统的传递函数为

$$\begin{cases} G_{11}(s) = \left(\frac{1}{K_W} - \frac{2M_P Q}{(M_P + Q)M_W K_P} \right) \frac{K_1 e^{-\tau s} E}{1 + T_1 s} \frac{1}{h}, \\ G_{12}(s) = -\frac{M_P Q}{(M_P + Q)K_P} \frac{K_2 e^{-\tau s} E}{1 + T_2 s} \frac{1}{h}, \\ G_{21}(s) = \frac{2M_P}{(M_P + Q)M_W} \frac{K_1 e^{-\tau s}}{1 + T_1 s}, \\ G_{22}(s) = \frac{M_P}{M_P + Q} \frac{K_2 e^{-\tau s}}{1 + T_2 s}. \end{cases} \quad (14)$$

其中扰动信号为

$$\eta_1(s) = \frac{M_P Q}{(M_P + Q)K_P} \Delta H + \frac{h}{E} \sigma_0 - \frac{h}{H} \Delta H_d, \quad (15)$$

$$\eta_2(s) = \frac{Q}{M_P + Q} \Delta H. \quad (16)$$

3 自适应解耦控制方法(Method of self-adaptive decoupling control)

设有 N 个输入 N 个输出的耦合对象为

$$Y(s) = G(s)R(s), \quad (17)$$

式中:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \cdots & G_{1n}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \cdots & G_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1}(s) & G_{n2}(s) & \cdots & G_{nn}(s) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$Y(s) = [y_1(s) \ y_2(s) \ \cdots \ y_n(s)]^T, \quad (19)$$

$$R(s) = [r_1(s) \ r_2(s) \ \cdots \ r_n(s)]^T, \quad (20)$$

$Y(s)$ 为对象输出拉式变换列向量, $R(s)$ 为对象输入拉式变换列向量, $G(s)$ 为传递函数矩阵, $G_{ii}(s)$ 称第 i 通道的传递函数, $G_{ij}(s) (i \neq j)$ 称第 i 通道输入至第 j 通道输出的传递函数, 即耦合通道传递函数. 解耦控制设计就是根据 $G(s)$ 设计出解耦网络 $D(s)$, 通过引入 $D(s)$ 使 $G(s)$ 成为对角阵, 耦合系统变成多个单回路, 然后再按照单回路控制系统设计各通道控制器. 为了维持解耦后主通道特性不变, 本文采用不变性原理进行解耦, 主通道控制器采用PID控制器. 为消除高频信号干扰, 在其后串接一阶低通滤波器, 实际系统中信号检测存在延迟环节, 因此还需要引入Smith预估器对延迟环节进行补偿. 设板形板厚耦合控制系统中各通道放大系数为 K_{ij} , 按照上述原理加入解耦网络后有:

$$G_{ij}(s) = -K_{D_{ij}} G_{ij}(s) / G_{ii}(s), \quad (21)$$

$$K_{D_{ij}} = K_{ij} / K_{ii}, \quad (22)$$

$$K_{C_{ii}} = m K_{ii}, \quad (23)$$

其中: $D_{ij}(s)$ 为解耦网络的传递函数, $K_{D_{ij}}$ 为解耦网络中第 i 个输入至第 j 个输出的支路放大系数, $K_{C_{ii}}$ 为解耦后第 i 个通道调节器的放大系数, m 是与 $G_{ii}(s)$ 时间常数有关的系数. 由式(22)和(23)可知, 原系统参数发生变化时, 会使各通道的放大系数发生缓慢变化, 将对 $K_{D_{ij}}$, $K_{C_{ii}}$ 产生影响. 如果 $K_{D_{ij}}$, $K_{C_{ii}}$ 保持不变, 系统的解耦质量和调节性能均要受到破坏, 因此, 引入模型参考解耦自适应控制, 在线调整 $K_{D_{ij}}$, $K_{C_{ii}}$. 设第 i 个通道控制系统的参考模型为 $G_{Di}(s)$, 参考模型的输出为 y_{Di} , 实际系统的输出为 y_i , 当系统参数变化时, $K_{D_{ij}}$, $K_{C_{ii}}$ 的自适应率为

$$K_{D_{ij}} = \mu_i \kappa, K_{C_{ii}} = \varphi_i \kappa, \quad (24)$$

其中: $\kappa = \int_0^t \theta_i \xi_i y_{Di} dt + K_0$, $\xi_i = y_{Di} - y_i$ 表示第 i 个参考模型输出与 i 个实际系统输出之差, K_0 为

初始化比例系数, θ_i 为系数, μ_i , φ_i 是与时间系统有关的常数, 可在调试中确定. 其中板形板厚系统解耦自适应控制结构图如图1所示.

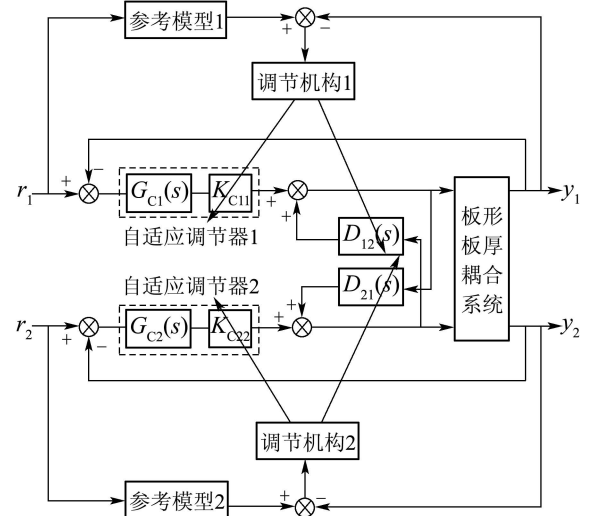


图1 解耦自适应控制结构图

Fig. 1 The structure chart of self-adaptive decoupling control

这样当原系统参数发生变化时, 通过调节调节器和解耦网络的参数实现变参数控制和解耦, 保证系统稳定运行和控制精度.

4 自适应解耦仿真(Simulation of self-adaptive decoupling)

根据上文对具体板形板厚控制系统进行仿真, 仿真数据取自四重冷轧机, 其主要特性参数如表1所示.

表1 轧机主要特性参数

Table 1 Main trait parameters of the rolling mill

M_P	M_W	K_W	K_P	Q
570	1500	100	5250	1350
K_1	T_1	K_2	T_2	τ
1	0.01	1	0.05	0.04

考虑来料厚度差 ΔH 、横向厚差 ΔH_d 和入口横向张力差 $\Delta \sigma_0$ 均为正弦波形式, 即

$$\begin{cases} \Delta H = 0.01 \sin(\omega t), \\ \Delta H_d = 0.01 \sin(\omega t), \\ \Delta \sigma_0 = 0.01 \sin(\omega t), \end{cases} \quad (25)$$

分别加入弯辊力和辊缝调节输入量, 输入均为1的阶跃信号, 调节弯辊力时辊缝设定不变, 调节辊缝时弯辊力设定不变, 板形和板厚响应曲线如图2所示. 可以清楚看到未加入控制器和解耦网络前, 弯辊力对板形起调节作用, 调节弯辊力时对板厚也产生了影

响,但未消除厚度偏差,而且还增加了约0.0075的厚度偏差;辊缝对板厚起调节作用,调节辊缝时对板形也产生了影响,但未消除板形偏差,而且还增加了约-0.8的板形偏差.可见板形板厚控制存在比较严重的耦合现象,尤其是液压压下变化量对横向张应力影响较大.

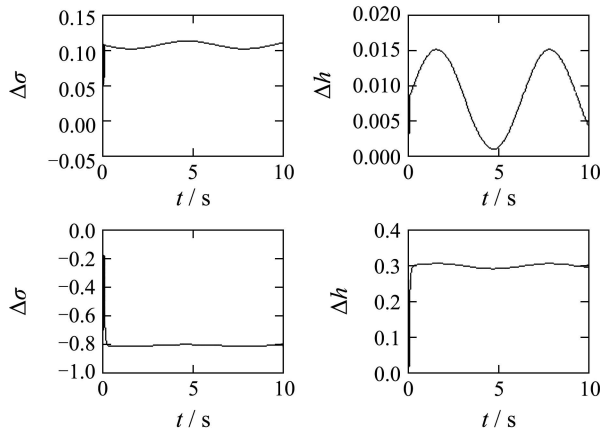


图 2 解耦前调节弯辊和辊缝对板形和板厚偏差影响

Fig. 2 The influence of warp of flatness and gauge when adjusting the roll bending force and gap before decoupling

按照不变性原理加入解耦网络,并加入控制器进行调节,再加入同样的输入信号进行调节,板形板厚响应曲线如图3所示.由图3可知板形板厚两条支路耦合程度大大减小,解耦效果良好.

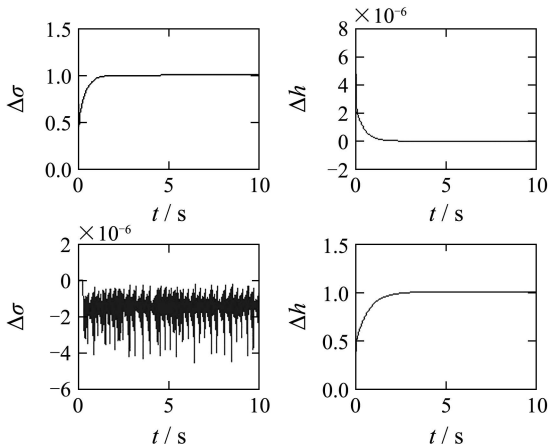


图 3 解耦后调节弯辊和辊缝对板形和板厚偏差影响

Fig. 3 The influence of warp of flatness and gauge when adjusting the roll bending force and gap after decoupling

当板形板厚控制系统在运行过程中参数发生变化,模型出现失配状况时,实际系统变为

$$G'(s) = G(s)\Delta G, \quad (26)$$

式中: $G(s)$ 为系统原始模型, ΔG 为系统不确定干扰

模型. 假设在原始模型中加入干扰模型

$$\Delta G = \begin{bmatrix} \frac{1.25}{s+1} & 0 \\ 0 & \frac{1.4}{s+2} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

模拟实际系统参数发生缓慢变化的过程,当系统期望输出为下列设定值时,即

$$\begin{cases} \sigma_1 = 0.1 \text{ MPa}, \\ h = 1 \text{ mm}, \end{cases} \quad (28)$$

系统的响应曲线如图4所示.

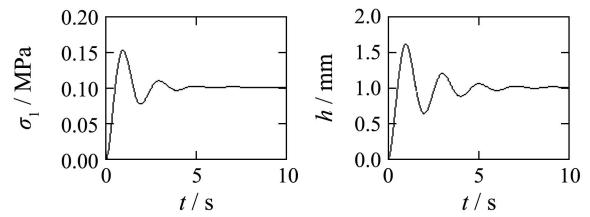


图 4 模型失配时板形和板厚输出量

Fig. 4 The output of flatness and gauge when model mismatched

由图4可知,上述按照原模型参数设计的解耦网络和控制性能变差,超调量增大,对板形板厚的输出量产生较大波动,当扰动严重时还会造成系统不稳定.根据自适应解耦控制方法,基于板形板厚控制系统的具体数学模型,理想情况下期望系统模型参数在实际运行过程中不发生变化,因此根据两个主通道传递函数在系统模型参数没有发生变化的情况下设计参考模型进行解耦控制,当实际运行过程中模型参数发生变化时,由自适应结构进行在线调节控制器和解耦网络放大系数,保证了系统解耦控制质量.参考模型如下式所示:

$$G_{D1}(s) = G_{C1}(s)G_{11}(s)/[1+G_{C1}(s)G_{11}(s)], \quad (29)$$

$$G_{D2}(s) = G_{C2}(s)G_{22}(s)/[1+G_{C2}(s)G_{22}(s)], \quad (30)$$

式中 $G_{C1}(s)$, $G_{C2}(s)$ 分别为两个主通道的控制器传递函数,它们是在系统模型参数没有发生变化的情况下加入的PID控制器,保证系统控制精度,减小误差.在实际现场控制时也是采用PID控制器,其中参数自适应律由式(24)确定.控制器和解耦网络的初始参数与前面设置相同,其系统响应曲线如图5所示.

由响应曲线知,当系统模型出现不确定变化时,在自适应机构的调节下,自动调整控制器和解耦网络的参数,使对象输出值维持在设定值附近,超调量明显减小,提高了控制精度.本文与文献[7]相比主要有以下优点:

1) 控制的具体对象是铝板带材冷轧机,轧机参

数取自某单机架四重冷轧机。建立板形板厚数学模型方法不一样;考虑了铝板带材板形和厚度的检测装置环节;同时也考虑了铝板带材来料的厚度、凸度和入口的张力差的偏差量,这样更接近现场实际轧机系统的生产情况。

2) 仿真结果及应用比文献[7]效果更好,超调量减小,控制精度有所提高,进一步地为此控制方法在实际中应用提供了理论指导。

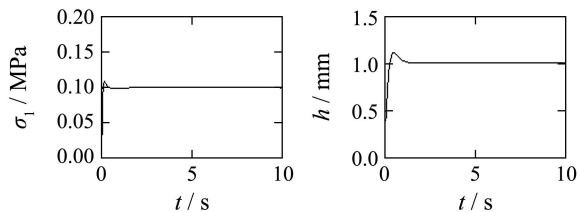


图5 自适应调整下板形和板厚输出量

Fig. 5 The output of flatness and gauge when automatic adjustment regulating

5 结论(Conclusion)

论文深入分析了铝板带材轧制生产过程中板形板厚的耦合关系,设计了多变量解耦自适应控制系统,仿真结果及现场应用表明,解耦自适应控制方法的引入有效解决了由于板形板厚控制系统具有强耦合、时变性而难以建立精确数学模型的问题;同时,自适应算法结合PID控制效果比单纯PID控制效果要好,自适应跟随对象参数变化和抗干扰性能增强,减小了系统的超调量,提高了系统的控制精度,有效地提高了铝板带材轧制生产质量。

参考文献(References):

- [1] 卢秉林. 板形板厚综合控制方法的探讨[J]. 冶金设备, 2002, 8(4): 9-12.
(LU Binglin. Discussion on the method of synthetic controlling the shape and thickness of plates[J]. *Metallurgy Equipment*, 2002, 8(4): 9-12.)
- [2] PIRES C T A, FERREIRA H C, SALES R M, et al. Set-up optimization for tandem cold mills: A case study[J]. *Materials Processing Technology*, 2006, 173(6): 368-375.
- [3] 王粉花, 孙一康, 陈占英. 基于模糊神经网络的板形板厚综合控制系统[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(2): 182-184.
(WANG Fenhua, SUN Yikang, CHEN Zhanying. Strip flatness and gauge composite control system based on fuzzy neural networks[J]. *Transaction of Beijing University of Science and Technology*, 2003, 25(2): 182-184.)
- [4] 令狐克志, 何安瑞, 杨荃, 等. 热轧带板形板厚反馈解耦控制[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(3): 338-341.
(LINGHU Kezhi, HE Anrui, YANG Quan, et al. Feedback-decoupling for a combined shape and gauge control system in hot strip rolling[J]. *Transaction of Beijing University of Science and Technology*, 2007, 29(3): 338-341.)
- [5] 曹建国, 张杰, 陈先霖, 等. 宽带钢热连轧机板形板厚增益调度解耦控制[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(4): 358-361.
(CAO Jianguo, ZHANG Jie, CHEN Xianlin, et al. Scheduling decoupling control for the combined shape and gauge control system in hot strip mills[J]. *Transaction of Beijing University of Science and Technology*, 2003, 25(4): 358-361.)
- [6] 王莉, 葛平, 孙一康. 基于模糊RBF神经网络的冷连轧板形板厚多变量控制[J]. 北京科技大学学报, 2002, 10(5): 556-559.
(WANG Li, GE Ping, SUN Yikang. Strip flatness and gauge multivariable control at a cold tandem mill based on fuzzy RBF neural network[J]. *Transaction of Beijing University of Science and Technology*, 2002, 10(5): 556-559.)
- [7] 彭开香, 童朝南, 王路. 板形板厚的自适应解耦控制[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(2): 177-180.
(PENG Kaixiang, TONG Chaonan, WANG Lu. Self-adaptive decoupling in a shape and gauge control system[J]. *Transaction of Beijing University of Science and Technology*, 2004, 26(2): 177-180.)
- [8] 彭鹏, 杨荃. 冷连轧机板形板厚综合解耦控制系统[J]. 钢铁, 2007, 42(8): 15-18.
(PENG Peng, YANG Quan. Shape and gauge complex decoupling control system for tandem cold mill[J]. *Iron and Steel*, 2007, 42(8): 15-18.)
- [9] 曹建国, 张杰. 热轧带钢板形板厚综合控制系统的耦合关系[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(6): 551-554.
(CAO Jianguo, ZHANG Jie. Application of the relative gain matrix to combined shape and gauge control system of hot strip mills[J]. *Transaction of Beijing University of Science and Technology*, 2000, 22(6): 551-554.)
- [10] 陈志旺, 杨景明, 王洪瑞. 冷连轧机板形板厚解耦设定补偿研究[J]. 冶金设备, 2005, 6(3): 11-15.
(CHEN Zhiwang, YANG Jingming, WANG Hongrui. Study of compensating of setting on decoupling strips flatness and gauge in tandem cold mill[J]. *Metallurgy Equipment*, 2005, 6(3): 11-15.)
- [11] 孙一康. 带钢冷连轧计算机控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
(SUN Yikang. *Computer Control of in Cold Strip Mills*[M]. Beijing: The Publishing Company of Metallurgy Technology, 2002.)

作者简介:

李迅 (1964—), 男, 博士研究生, 研究领域为轧机生产过程建模和优化控制;

杨甫勇 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究领域为生产过程计算机控制, E-mail: sdq22788@126.com;

桂卫华 (1950—), 男, 教授, 博士生导师, 信息学院院长, 研究领域为大系统理论、鲁棒控制及复杂生产过程的建模及优化控制, E-mail: gwh@csu.edu.cn;

喻寿益 (1940—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为自适应控制、计算机过程控制和进化计算理论等。