

# 首钢京唐酸轧机组厚度控制策略分析与应用

郭剑飞<sup>1</sup>, 刘翠红<sup>1</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 孙杰<sup>2</sup>, 张浩宇<sup>2</sup>

(1. 唐钢微尔自动化有限公司, 河北唐山 063000; 2. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819)

**摘要:** 厚度精度是衡量带钢质量的重要指标. 本文通过对首钢京唐酸轧机组厚度控制系统进行了深入研究, 分析了包括 1#机架 FF-AGC、BISRA-AGC 和 GM-Smith AGC 以及 2#-5#机架 MF-AGC 的厚度控制策略. 实际应用效果表明, 成品厚度偏差小于  $\pm 1\%$ , 达到了较高的厚度控制精度.

**关键词:** 冷连轧; 厚度控制系统; 前馈控制; 秒流量控制

**中图分类号:** TP 273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-6620(2012)02-0141-05

## Analysis and application of gauge control strategy of shougang Jing - Tang PL - TCM

GUO Jian-fei<sup>1</sup>, LIU Cui-hong<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, SUN Jie<sup>2</sup>, ZHANG Hao-yu<sup>2</sup>

(1. Tang Gang Weier Automation Limited Cooperation, Tangshan 063000, China; 2. The State Key Laboratory of Rolling Technology and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** Thickness accuracy is an important index of strip quality. Based on the research of shougang Jing - Tang PL - TCM gauge control system, the gauge control strategy was analyzed, which included FF - AGC, BISRA - AGC, GM - Smith AGC in stand No. 1 and MF - AGC in stand No. 2 - No. 5. The application result indicated that the gauge error of product is within  $\pm 1\%$ , and a high gauge control accuracy has been achieved.

**Key words:** tandem cold rolling; gauge control system; feed forward control; mass flow control

厚度精度一直是衡量冷连轧产品质量的重要指标<sup>[1-2]</sup>, 如何提高产品的厚度控制精度一直是冷连轧领域的研究热点<sup>[3]</sup>. 冷连轧厚度控制具有多变量、非线性、多约束、时变性强、强耦合等特点<sup>[4-5]</sup>, 是一个极其复杂的过程.

首钢京唐的酸轧联合机组生产线从日本日立公司引进. 该机组采用了当今世界先进的技术. 酸洗工艺为日立公司的先进浅槽喷淋盐酸酸洗技术, 轧机为 UCM 形式, 5 个机架全部为 6 辊轧机, 其中中间辊具有横移功能, 并且工作辊和中间辊都具有正负弯辊能力, 轧机采用压上方式, 可提供最大 2 200 t 的轧制力. 基础自动化系统采用日立公司的 HISEC-04R700 系列 PLC, 软件为日立公司的 MICA 系统; L2 级系统采用 HIDIC - RS90 过程计算机.

轧机具有出色的厚度调控能力, 全线设有 5 组测厚仪, 分别设置在 1#机架前后以及 5#机架前

后; 考虑到轧线出口带钢厚度检测的重要性, 在 5#机架后设有两组测厚仪, 为一备一用. 另外, 在 3#机架前后以及 5#机架前后分别设有激光测速仪, 以实现带钢速度的精确测量.

## 1 厚度控制策略

根据该机组的特点以及实际的仪表配置情况, 本机组设计了一套包括 FF - AGC、BISRA - AGC、GM - Smith AGC 和 MF - AGC 等综合的厚度控制策略, 如图 1 所示.

在 1#机架的厚度控制环节中, FF - AGC 的输出附加于 PUC, 进而修正 1#机架的辊缝, 同样, GM - Smith AGC 经过与 BISRA - AGC 的相关性处理后, 作用于 PUC, 修正 1#机架的辊缝, 实现 1#机架的厚度控制.

在 2# - 5#机架的厚度控制环节中, 每个机架的 MF - AGC 的输出均附加于上游机架的 ASR,

收稿日期: 2011-10-18.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (N110307001).

作者简介: 郭剑飞 (1979-), 男, 唐山微尔自动化有限公司工程师, E-mail: guojianfei\_1979@163.com.

进而修正上游机架的速度,实现厚度控制.

1#机架前的 ATR 作用于入口 S 辊的 ASR,修正入口 S 辊的速度保持入口张力的稳定控制;1#-5#机架间的 ATR 作用于下游机架的 PUC,修正下游机架的辊缝,保持机架间张力的稳定控制.机

架间的 ATL 在实际张力超出限幅值时,通过作用于上游机架的 ASR 以修正上游机架的速度,将实际张力快速稳定至限幅范围内.

经过以上环节的共同作用,构成了一套严谨且稳定的厚度控制系统.

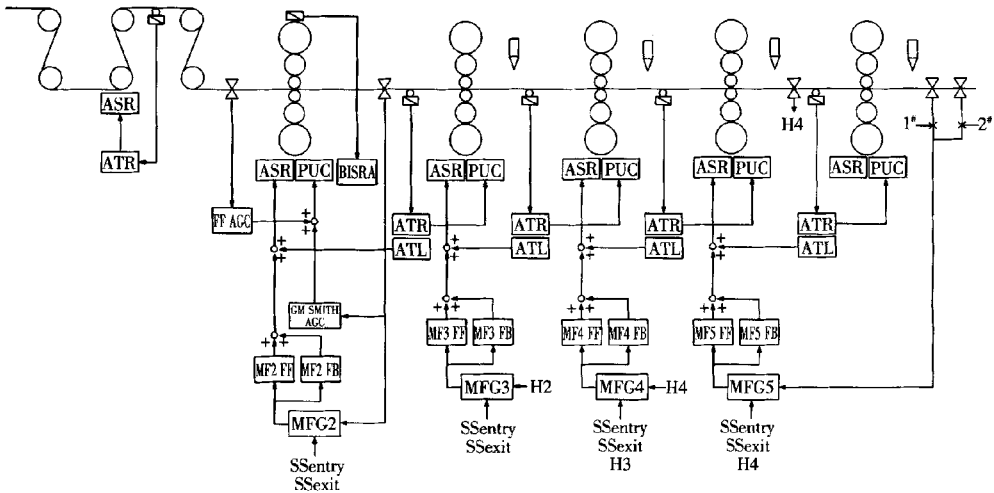


图 1 首钢京唐酸轧机组厚度控制策略

Fig. 1 Gauge control strategy of Shougang Jing-tang PL-TCM

ASR (Automatic Speed Regulator)—自动轧机速度控制器; PUC (Push Up Control)—压下控制; ATR (Automatic Tension Regulator)—自动张力控制器; ATL (Automatic Tension Limit Control)—自动张力限幅控制; FF AGC (Feed Forward AGC)—前馈 AGC; GM-Smith AGC (Gauge Meter Smith AGC)—厚度计-Smith 补偿 AGC; MFG (Mass Flow Gauge)—秒流量厚度计算; MF-FF (Mass Flow Feed Forward)—秒流量前馈控制; MF-FB (Mass Flow Feed Back)—秒流量反馈控制

1.1 1#机架 FF AGC

1#机架 FF-AGC 依据入口厚度偏差对辊缝进行修正,以消除热轧原料上尖峰型的厚度规格突变.机架前测厚仪的检测信号,经过移位寄存器由测厚仪检测点移至辊缝压上位置,并综合考虑测厚仪的响应时间以及压下系统的响应时间,实现辊缝修正点与测厚仪的监测点的一致. FF-AGC 的最终输出的辊缝修正量如式(1)所示.

$$\Delta S_{FF} = \Delta H \cdot (M/K') = \Delta H \cdot \frac{\alpha_{FF}}{K} \cdot M \quad (1)$$

式中,  $\Delta S_{FF}$  为 FF-AGC 输出的辊缝调节量;  $\Delta H$  为入口测厚仪检测的厚度偏差信号;  $M$  为材料塑性系数;  $K$  为轧机刚度系数;  $\alpha_{FF}$  为 FF AGC 控制增益;  $K'$  为理想状态下轧机刚度.

1.2 1#机架 BISRA AGC

因为 FF AGC 为开环控制,其无法通过控制效果的反馈而全部完成厚度的修正,所以 1#机架设置了 BISRA-AGC. BISRA AGC 通过如式(2)所示的弹跳方程,控制 1#机架出口带钢厚度.

$$h = \frac{P}{K} + S \quad (2)$$

式中,  $h$  为出口带钢厚度;  $P$  为轧制力;  $S$  为当前辊缝.

设在 AGC 投入的初始状态时,如式(3)所示.

$$h_0 = \frac{P_0}{K} + S_0 \quad (3)$$

式中,  $P_0$  为初始轧制力;  $S_0$  为初始辊缝.

于是,为了使出口厚度偏差为零,辊缝  $S$  将如式(4)进行控制

$$\Delta h = h - h_0 = \frac{P - P_0}{K} + S - S_0 = 0 \quad (4)$$

由于 BISRA-AGC 几乎不存在控制上的滞后,其响应时间要优于基于出口测厚仪的反馈式 AGC. 所以,1#机架设置的 BISRA-AGC 可以有效、快速地改变厚度偏差.

1.3 1#机架 GM-Smith AGC

由于 BISRA-AGC 只是对出口厚度进行估算继而进行控制,为了确保在 1#机架获得良好的厚度控制效果,系统设置了基于 1#机架后测厚仪检测的实际带钢厚度作为反馈的 GM-Smith AGC. 由于出口测厚仪离机架有一段距离,于是在

GM - Smith AGC 的控制闭环中,存在一个轧机至测厚仪的延迟环节;由于这个延迟,直接将测厚仪检测信号作为控制闭环的反馈将很难得到稳定及高响应的控制效果<sup>[6]</sup>。于是设置了如图 2 所示的 GM - Smith AGC 控制算法。

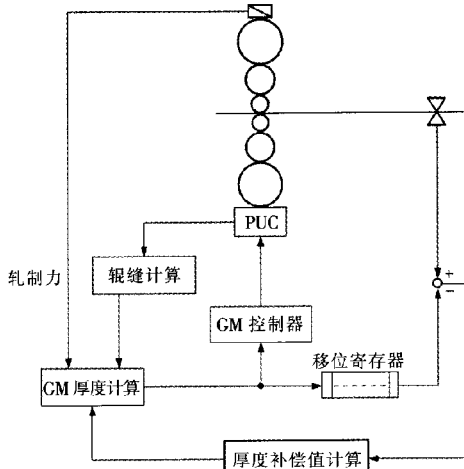


图 2 1#机架 GM - Smith AGC 原理图  
Fig. 2 Principle diagrams of GM - Smith AGC in stand No. 1

首先通过 1#机架轧制力与辊缝反馈,通过厚度计公式,如式(5)所示,计算 1#机架出口厚度。

$$h_{GMCl} = -S_{hl} + S_{actl} + \Delta\epsilon_{coml} \quad (5)$$

式中, $S_{hl}$ 为轧机弹跳量; $S_{actl}$ 为实际辊缝; $\Delta\epsilon_{coml}$ 为厚度补偿量。

将此厚度计算量通过移位寄存器跟踪至出口测厚仪,并综合考虑测厚仪的响应时间后,与测厚仪检测的实际厚度进行比较计算厚度补偿量 $\Delta\epsilon_{coml}$ ,如式(6)所示。

$$\Delta\epsilon_{coml} = \sum K_{el}(h_{lx} - h_{gmcl}(x)) \quad (6)$$

式中, $K_{el}$ 为补偿值积分增益; $h_{lx}$ 为 1#机架测厚仪检测实际出口厚度; $h_{gmcl}(x)$ 为跟踪至测厚仪检测点的厚度计算值。

GM - Smith AGC 主要用于消除剩余的带钢厚度偏差量,于是将控制器设计为 PI 控制器的形式。最终 GM - Smith AGC 输出的辊缝修正量如式(7)所示。

$$\Delta S_{GMl} = \sum K_{GMl-1} \times \frac{K_1 + \alpha_{GM} \frac{\partial P_1}{\partial h_1}}{K_1} \times (h_{GMCl} - h_{refl}) \Delta T_s + K_{GMl-P} \times \frac{K_1 + \alpha_{GM} \frac{\partial P_1}{\partial h_1}}{K_1} \times (h_{GMCl} - h_{refl}) \quad (7)$$

式中, $\Delta S_{GMl}$ 为 GM - Smith AGC 的最终输出; $K_{GMl-1}$ 为控制器的积分增益; $K_{GMl-P}$ 为控制器的比例增益; $K_1$ 为 1#机架刚度; $\alpha_{GM}$ 为 GM - Smith AGC 控制增益; $\frac{\partial P_1}{\partial h_1}$ 为 1#机架轧制力对出口厚度的偏微分,即 1#机架压下有效增益; $h_{refl}$ 为 1#机架出口厚度设定; $\Delta T_s$ 为 AGC 控制周期的积分。

#### 1.4 2# - 5#机架 MF - AGC

2# - 5#机架的 MF - AGC 是应用秒流量恒定原理对出口带钢厚度进行计算,继而对上游机架速度进行修正以实现厚度控制。

即使秒流量计算存在非常高的准确性,由于它并不是对出口带钢厚度进行直接测量,出口带钢厚度的计算精度仍可能存在一定偏差。所以在 4#机架和 5#机架后设有测厚仪的情况下,在 4#和 5#MF - AGC 设置有厚度自适应修正环节,通过测厚仪检测的实际带钢厚度信号对秒流量计算值进行修正,以实现高精度的厚度控制,保证末机架出口带钢厚度指标。MF - AGC 的原理图如图 3 所示。

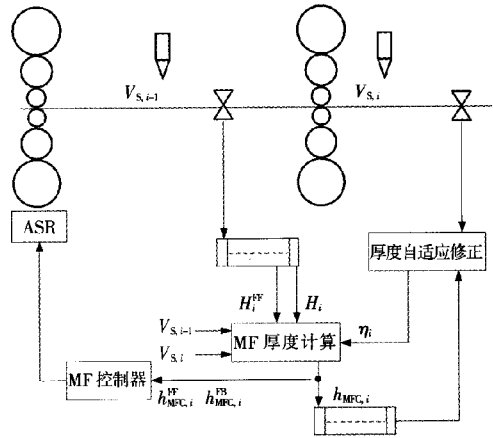


图 3 MF - AGC 原理图  
Fig. 3 Principle diagrams of MF - AGC

根据秒流量恒定原理, MF AGC 的出口厚度计算值如式(8)所示。

$$h_{MFC,i} = \frac{V_{S,i-1}}{V_{S,i}} \times H_i \times (1 + \eta_i) \quad (8)$$

式中, $h_{MFC,i}$ 为 MF - AGC 厚度计算值; $V_{S,i-1}$ 为入口带钢速度; $V_{S,i}$ 为出口带钢速度; $H_i$ 为入口带钢厚度; $\eta_i$ 为厚度自适应修正值,只应用于 4#机架和 5#机架。

厚度自适应修正环节中,修正值 $\eta_i$ 算法如式(9)所示。

$$\eta_i = \sum K_{\eta} \times \left( \frac{h_{x,i}}{h_{MFC,i}(x)} - 1 \right) \Delta T \quad (9)$$

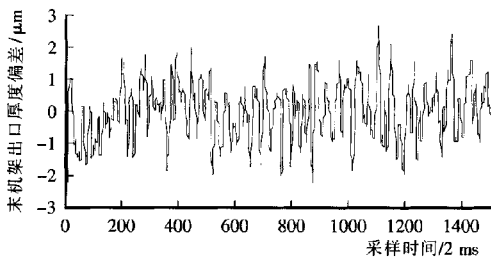
式中,  $K_{\eta}$  为自适应修正积系数;  $h_{x,i}$  为出口侧测厚仪检测到的实际厚度;  $h_{MFC,i}(x)$  为经移位寄存器跟踪至出口测厚仪的秒流量厚度计算值;  $\Delta T$  为跟踪时间。

MF-AGC 中包括两部分控制, 分别是 MF-FF 和 MF-FB, 即秒流量前馈控制与反馈控制。秒流量前馈控制通过跟踪上游机架的秒流量计算值, 并估算此入口厚度可能引起的出口厚度偏差, 继而修正上游机架的速度消除此偏差。秒流量反馈控制依据本机架的秒流量计算值, 修正上游机架的速度, 消除出口厚度偏差。MF-FF 与 MF-FB 控制闭环的反馈分别如式(10)与式(11)所示。

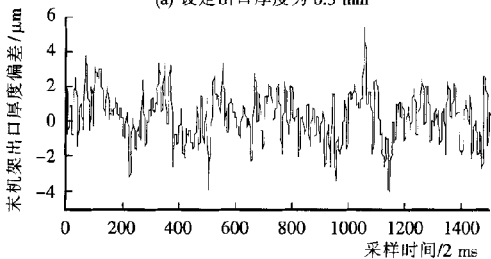
$$h_{MFC,i}^{FF} = \frac{V_{S,i-1}}{V_{S,i}} \times H_i^{FF} \times (1 + \eta_i) \quad (10)$$

$$h_{MFC,i}^{FB} = \frac{V_{S,i-1}}{V_{S,i}} \times H_i \times (1 + \eta_i) \quad (11)$$

式中,  $h_{MFC,i}^{FF}$  为 MF-FF 控制闭环的厚度反馈;  $h_{MFC,i}^{FB}$  为 MF-FB 控制闭环的厚度反馈;  $H_i^{FF}$  为考虑上游机架速度调节响应时间的本机架入口厚度跟踪值。



(a) 设定出口厚度为 0.3 mm



(c) 设定出口厚度为 0.7 mm

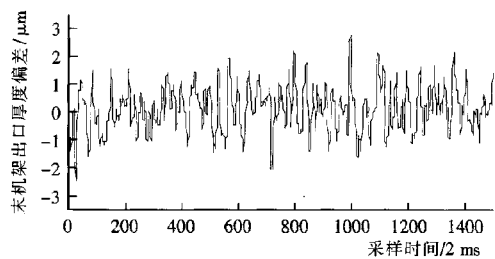
MF-FF 主要用于消除本机架入口厚度尖峰型厚度突变引起的出口厚度偏差, MF-FB 则主要负责消除趋势性的出口厚度偏差。针对以上特点, 控制器设计为比例积分控制器, 即 MF-FF 采用比例控制器, MF-FB 采用积分控制器。于是 MF-AGC 的最终输出的速度调节量如式(12)所示。

$$\Delta V_{MF} = \sum K_{MF,i} \times \left[ \left( \frac{h_{ref,i} - h_{MFC,i}}{h_{ref,i}} \right)^{FB} / h_{ref,i} \right] \Delta T_s + K_{MF,i} + K_{MF,p} \times \left[ \left( \frac{h_{ref,i} - h_{MFC,i}}{h_{ref,i}} \right)^{FF} / h_{ref,i} \right] \quad (12)$$

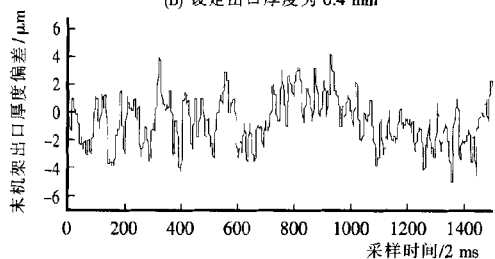
式中,  $\Delta V_{MF}$  为 MF-AGC 输出的速度修正量;  $K_{MF,i}$  为控制器积分增益;  $K_{MF,p}$  为控制器比例增益;  $h_{ref,i}$  为本机架出口厚度设定;  $\Delta T_s$  为 AGC 控制周期的积分。

## 2 应用效果

图 4 为在稳态轧制过程中, 轧制不同厚度规格产品时, 取得的末机架出口测厚仪检测的带钢成品厚度偏差曲线, 其中包括厚度为 0.3 mm、0.4 mm、0.7 mm 以及 1.0 mm 的成品厚度偏差。由图中可以看出, 产品的厚度精度均在  $\pm 1\%$  之内。



(b) 设定出口厚度为 0.4 mm



(d) 设定出口厚度为 1.0 mm

图 4 末机架出口厚度偏差曲线

Fig. 4 Curve of last stand exit gauge deviation

## 3 结语

经过 1#机架 FF-AGC、BISRA-AGC 和 GM-Smith AGC 以及 2#-5#机架 MF-AGC 的共同作用, 并辅以各机架 ATR 提供的稳定的张力控

制, 构成一套综合的冷连轧厚度控制策略。该机组自投产以来, 其厚度控制系统运行稳定, 在稳态轧制过程中带钢厚度偏差小于  $\pm 1\%$ , 带钢厚度控制精度达到国内先进水平。

## 参考文献:

- [1] 陈亚琛, 金晓宏, 黎友华. 1700 mm 冷连轧机 AGC 控制策略与算法[J]. 冶金丛刊, 2005, 1: 4-8.  
(Chen Yachen, Jin Xiaohong, Li youhua. Control strategy and algorithm for AGC system of 1 700 mm cold rolling mill[J]. Metallurgical Collections, 2005, 1: 4-8.)
- [2] 李仲德, 杨卫东. 冷连轧 AGC 系统的自适应 Smith 广义预测控制[J]. 信息与控制, 2009, 38(5): 575-579.  
(LI Zhong-de, YANG Wei-dong. Adaptive smith generalized predictive control for AGC system of tandem cold rolling[J]. Information and Control, 2009, 38(5): 575-579.)
- [3] 宋建新, 陆隽. 冷连轧机末机架 AGC 控制方式分析[J]. 轧钢, 2005, 22(5): 33-35.  
(Song Jianxin, Lu Jun. Analysis of the AGC control models of the last stand of tandem cold mill[J]. Steel Rolling, 2005, 22(5): 33-35.)
- [4] 周旭东, 王国栋. 五机架冷连轧 AGC 模糊小脑模型学习控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1997, 18(3): 279-283.  
(Zhou Xudong, Wang Guodong. Fuzzy CMAC learning control of five stand tandem AGC system[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1997, 18(3): 279-283.)
- [5] 王国栋, 刘相华, 王军生. 冷连轧厚度自动控制[J]. 轧钢, 2003, 20(3): 38-41.  
(WANG Guodong, LIU Xianghua, WANG Junsheng. Automatic gauge control for tandem cold rolling[J]. Steel Rolling, 2003, 20(3): 38-41.)
- [6] SUN Jie, ZHANG Dian-hua, LI Xu, et al. Smith prediction monitor AGC system based on fuzzy self-tuning PID control[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010, 17(2): 22-26.
- [3] 王四根, 花礼先, 王绪. 硅、锰系 TRIP 钢成分及热处理工艺的优化[J]. 北京科技大学学报, 1994, 16(4): 325-329.  
(Wang S G, Hua L X, Wang X. The optimization of chemical composition and heat treatment parameters for silicon-manganese TRIP steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1994, 16(4): 325-329.)
- [4] 刘强, 唐获, 江海涛, 等. 800 MPa 级冷轧相变诱发塑性钢的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2009, 33(10): 62-67.  
(Liu Q, Tang D, Jing H T, et al. Microstructure and properties of 800 MPa cold rolled TRIP steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 33(10): 62-67.)
- [5] 熊自柳, 蔡庆伍, 江海涛, 等. 超高强 TRIP 钢的热处理工艺对组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(9): 83-87.  
(Xiong Z L, Cai Q W, Jing H T, et al. Influence of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of super strength TRIP steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(9): 83-87.)
- [6] 米振莉, 李志超, 范东亮, 等. 高强度冷轧 TRIP 钢的工艺改进及组织性能[J]. 材料热处理学报, 2011, 23(10): 112-116.  
(Mi Z L, Li Z C, Fan D L, et al. Influence of heat treatment on microstructure and properties of a high strength cold-rolled TRIP steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 23(10): 112-116.)

(上接 135 页)