

· 系统与装置 ·

单机架可逆冷轧机自动控制系统

孙 杰¹, 张殿华¹, 曾玉清², 程平文², 李 旭¹

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004; 2. 新余钢铁公司特殊钢分公司)

摘要:介绍了450 mm单机架冷轧机自动控制系统的硬件配置和传感器配置,说明了轧机基础自动化系统的液压位置闭环控制和轧制力闭环控制原理,结合现场应用情况对厚度控制系统中的前馈厚度控制、Smith 预估监控厚度控制和加减速厚度补偿做了重点阐述,最后对速度张力控制也做了相应介绍。现场实际应用表明,成品相对厚度精度优于 $\pm 1\%$,满足了实际生产的要求。

关键词:单机架冷轧机;控制系统;APC;AGC;张力

中图分类号:TG334.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1000-7059(2008)01-0045-04

Automatic control system of reversible single stand cold rolling mill

SUN Jie¹, ZHANG Dian-hua¹, ZENG Yu-qing², CHENG Ping-wen², LI Xu¹

(1. The State Key Laboratory of Rolling Technology and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
2. Special Steel Branch, Xinyu Iron and Steel Co Ltd)

Abstract: Hardware and sensor configuration of automatic control system for 450 mm single stand cold rolling mill are introduced. Principles of hydraulic position close loop control and rolling force close loop control in basic automation system of rolling mill are explained. Combined with site application situation, feed forward gauge control, Smith prediction monitoring gauge control and gauge compensation during acceleration and deceleration in gauge control system are described in detail. In addition, velocity and tension control are introduced. Practical application shows that relative thickness accuracy of products is within $\pm 1\%$ and it meets the need of practical production.

Key words: single stand cold rolling mill; control system; APC; AGC; tension

0 前言

随着我国经济的迅速发展,对冷轧窄带钢的需求越来越大,质量要求也越来越高^[1]。据资料显示,我国目前冷轧窄带钢生产能力过剩,但是高精度产品依然供不应求。

新余钢铁公司特殊钢分公司冷轧带钢厂采用的四辊冷轧机大都是20世纪六七十年代的装备水平,产品质量较差。为了提高带钢产品的市场竞争力,该公司决定在2007年新上一套450 mm单机架可逆四辊冷轧机,控制系统采用西门子S7-400系列PLC和FM458功能模块,传动系统采用西门子6RA70系列直流调速装置,网络通信系统

采用Profibus-DP现场总线和工业以太网。本文主要介绍该轧机的自动控制系统及实际应用情况。

1 系统硬件和传感器配置

1.1 系统和网络配置

控制系统采用西门子公司S7-400 PLC加FM458功能模块结构实现轧机主要设备控制。S7-400主要完成主令速度控制、张力控制和系统逻辑控制等,FM458具有非常高的运算处理速度,主要完成液压系统自动控制和自动厚度控制,S7-400 CPU与FM458通过机架总线进行快速数据通信。S7-300主要完成AGC液压站、辅助液压站和工艺润滑站控制,S7-300 CPU与S7-400 CPU之间

收稿日期:2007-09-18;修改稿收到日期:2007-11-24

作者简介:孙 杰(1984-),男,山东曹县人,博士研究生,主要从事冷轧自动控制系统研究和应用方面的工作。

采用 Profibus-DP 现场总线主从通信方式。系统硬件配置和网络结构如图 1 所示。

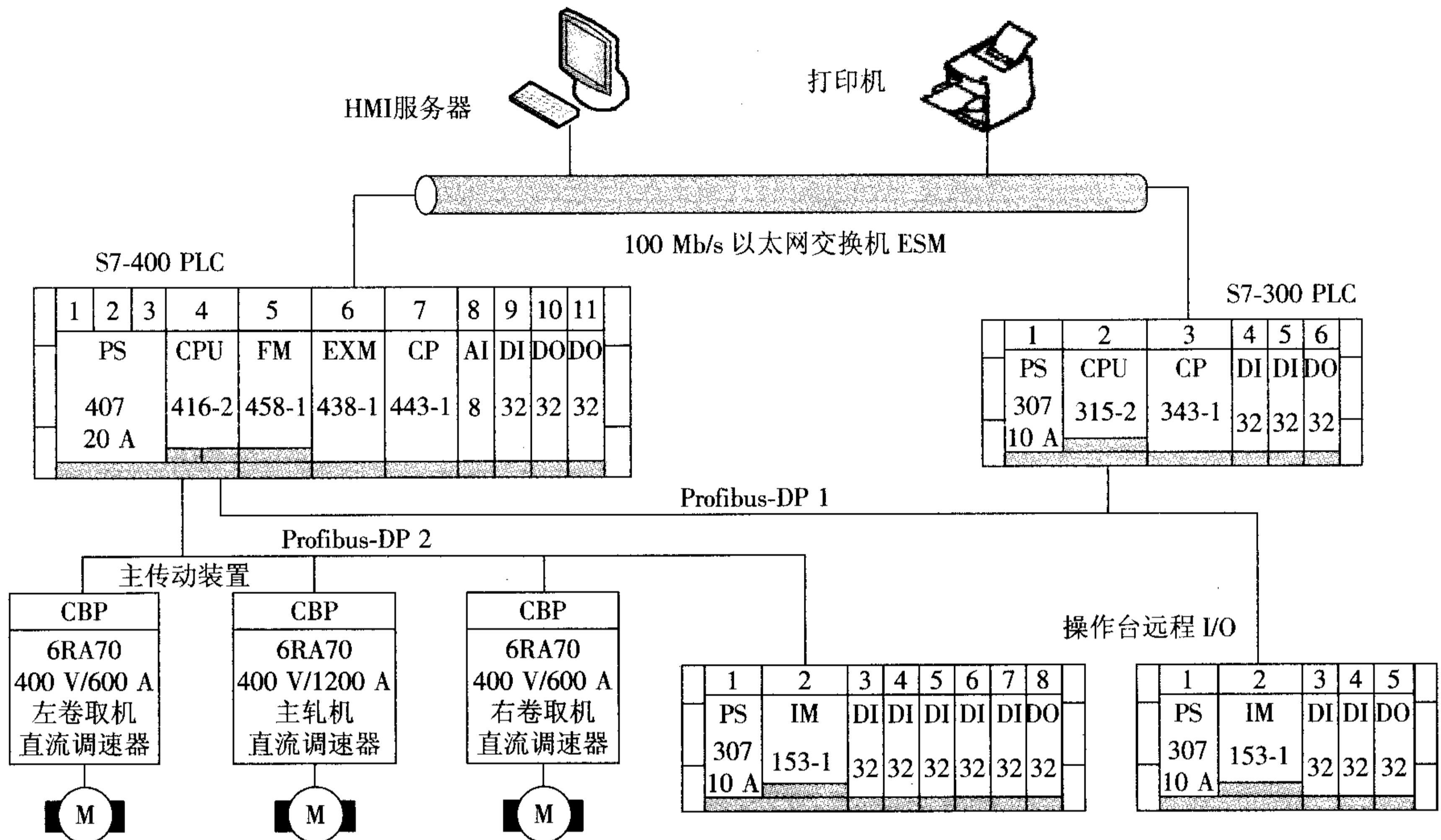


图 1 450 mm 冷轧机系统网络配置

Fig 1 Network configuration of 450 mm cold rolling mill

1.2 仪表及传感器配置

准确检测轧制过程中系统的各种变量,是提高轧机控制精度和产品质量的前提,本系统采用

了大量高精度的检测设备,以满足轧机控制的需求。

轧机上安装的传感器如表 1 所示。

表 1 轧机传感器

Tab 1 Sensors of the mill

名称	数据格式	量程	测量精度	数量
接触式测厚仪 (TALON)	增量式脉冲	5 mm	1 μm	2
液压缸位置传感器 (MTS)	绝对值脉冲	80 mm	1 μm	2
辊缝偏差测量仪 (TALON)	4 ~ 20 mA	± 1 mm	1 μm	2
液压缸油压传感器 (HYDAC)	4 ~ 20 mA	30 MPa	0.1 kPa	2
液压缸油压传感器 (HYDAC)	4 ~ 20 mA	10 MPa	0.1 kPa	2
双通道光电编码器 (ELTRA)	增量式脉冲	1 024/r	0.351 6°	3
单通道光电编码器 (ELTRA)	增量式脉冲	1 024/r	0.351 6°	2

2 液压缸自动控制 (HCC)

液压缸自动控制 (HCC) 指液压缸的位置闭环控制 (HAPC)、压力闭环控制 (HAFC) 和相关的逻辑控制。图 2 为单侧 HAPC 和 HAFC 的工作原理。

伺服阀流量不仅受控制电流影响,而且与阀口两侧压力差有关,具有变增益特性,不利于参数整定。为改善控制系统性能,加入了非线性补偿环节。流量非线性补偿分为上行和下行两种情况:

上行时液压缸出油,压力差 $\Delta P = P$

下行时液压缸进油,压力差 $\Delta P = P_s - P$

式中, P 为液压缸无杆腔内油压; P_s 为系统油源压力。

变增益系数

$$K_p = \frac{K_n}{\sqrt{\Delta P}} \quad (1)$$

式中, K_n 为标称增益。

采用位置闭环控制方式时,预设位置基准、AGC 调节量和手动位置调节量之和作为位置基准,并与液压缸实际位置相比较,偏差值与变增益系数 K_p 相乘后送入位置控制器。位置控制器的

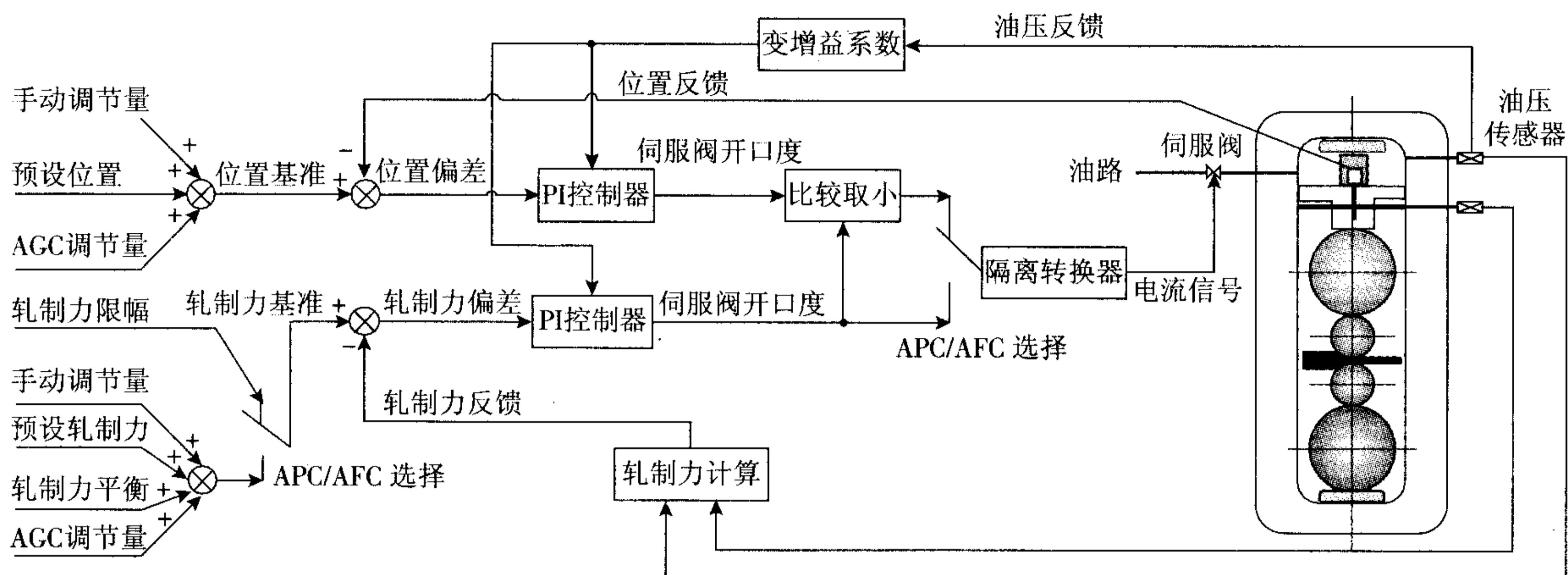


图2 450 mm 冷轧机 HAPC 与 HAFC 原理

Fig 2 Fundamental diagrams of HAPC and HAFC for 450 mm cold rolling mill

输出值与轧制力控制器的输出值比较,将二者之中较小的作为给定值输出到隔离转换器,进而驱动伺服阀,控制液压缸的动作以消除位置偏差。此时,将轧制力限幅值作为轧制力基准,当轧制力接近限幅值时限制液压缸动作,作为位置闭环下限制轧制力、保护液压缸及其他设备的一个环节,保证轧制过程正常进行^[2]。轧制力闭环和位置闭环的工作原理大致相同。在轧制过程中,可以实现位置闭环与轧制力闭环的无扰切换。

3 厚度自动控制 (AGC)

为了消除各种原因造成的厚差,运用轧制时的弹塑性曲线,可采用前馈 AGC、反馈 AGC、压力 AGC 等各种不同的厚度控制方法^[3-4]。该轧机机架前后各配有一个接触式测厚仪,采用前馈加 Smith 预估监控的厚度自动控制方式,在轧线速度升降时给出相应的辊缝补偿量。

3.1 前馈 AGC

采用传统的前馈厚度控制方法时,

$$\Delta S = \frac{K_M + Q}{K_M} \Delta h = \frac{K_M + Q}{K_M} \frac{Q}{K_M + Q} \Delta H = \frac{Q}{K_M} \Delta H \quad (2)$$

式中, ΔS 为辊缝调节量; K_M 为轧机刚度; Q 为轧件塑性系数; Δh 为出口厚度偏差; ΔH 为入口厚度偏差。

由于该轧机来料厚度波动较大,因此如果以设定来料厚度作为厚度基准,则会产生波动较大的辊缝调节量,在实际应用中对厚度控制产生不利影响。因而对来料分段跟踪一定长度,取各段来料的平均厚度,经自学习后作为厚度基准。这样只利用前馈厚度控制系统消除尖峰性的厚度波动,而趋势性的厚度变化由监控厚度控制系统来

消除。来料厚度基准为 H_{ref} 为:

$$H_{ref} = \theta H_1 + (1 - \theta) H_2 \quad (3)$$

式中, H_1, H_2 为当前段和上一段平均厚度; θ 为自学习系数。

3.2 Smith 预估监控 AGC

测厚仪一般安装在离辊缝较远的地方,使得整个厚度控制系统有一定时间 τ 的纯滞后。为了改善纯滞后对象的控制质量,参考文献[5]引入一个与对象并联的补偿器,即所谓 Smith 预估器,同时引入分段样本概念,将出口带钢按长度分段,计算每一段长度的平均厚度和辊缝调节量。图 3 为带 Smith 补偿的积分监控 AGC 控制系统方框图。

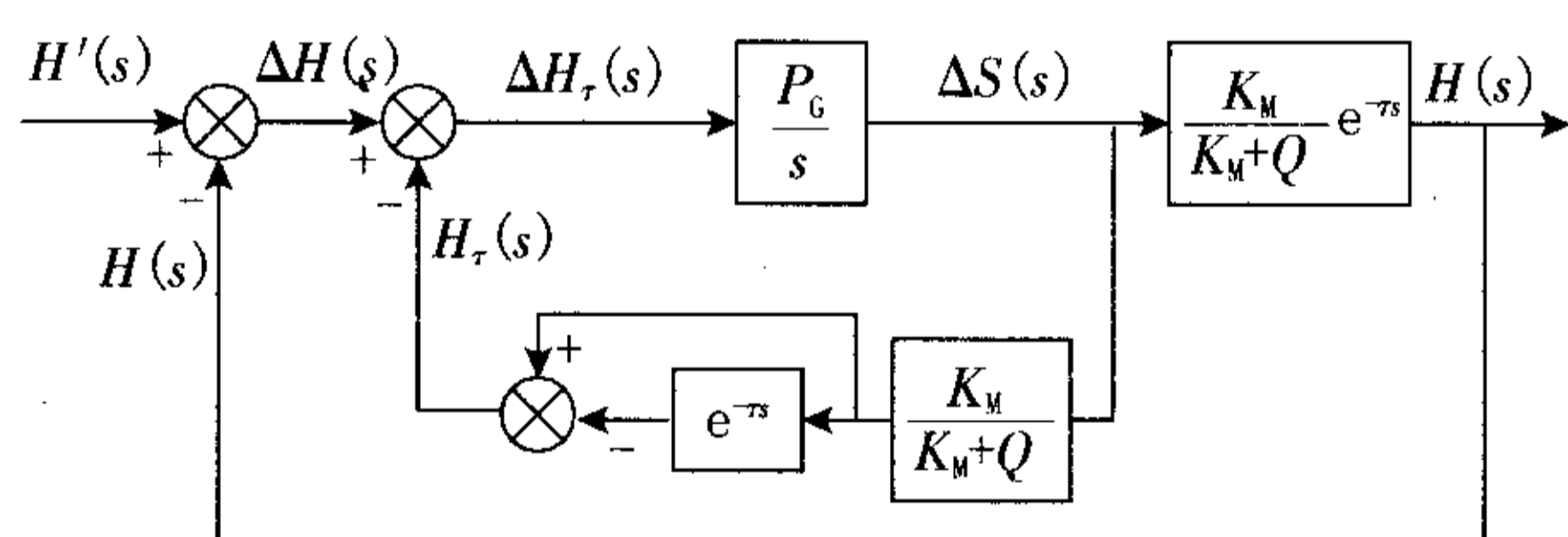


图3 带 Smith 补偿的积分监控 AGC 系统方框图

Fig 3 Fundamental diagram of integral monitor AGC system within Smith-compensation

$H'(s)$ —设定厚度的拉氏变换; $\Delta H(s)$ —出口厚度偏差的拉氏变换; $\Delta H_\tau(s)$ —系统理论偏差的拉氏变换; P_C —积分控制放大系数; $\Delta S(s)$ —辊缝调节量的拉氏变换; τ —系统滞后周期数; $H(s)$ —出口实际厚度的拉氏变换;

$H_\tau(s)$ —Smith 预补偿输出的拉氏变换

积分控制器的输入为:

$$\Delta H_\tau(s) = \Delta H(s) - \frac{K_M}{K_M + Q} \Delta S(s) + \frac{K_M}{K_M + Q} e^{-\tau s} \Delta S(s) \quad (4)$$

$$\text{又 } \Delta S(s) = \frac{P_G}{s} \Delta H_\tau(s)$$

从而可以得到:

$$\frac{s\Delta S(s)}{P_G} = \Delta H(s) - \frac{K_M}{K_M + Q} \Delta S(s) + \frac{K_M}{K_M + Q} e^{-\tau s} \Delta S(s) \quad (5)$$

将式(5)离散化,并整理得到监控 AGC 积分调节器的控制率为:

$$\Delta S(i) = (1 - a) \Delta S(i-1) + a \Delta S(i-\tau) + a \frac{K_M + Q}{K_M} \Delta h(i) \quad (6)$$

式中, $\Delta S(i)$ 为第 i 周期辊缝调节量; $a = \frac{(\Delta h)^2}{K_a}$ 为控制系统消差率; i 为当前周期数; $\Delta h(i)$ 为第 i 周期出口厚度偏差; K_a 为常数。

3.3 加减速厚度补偿控制

当轧制速度变化时,轧辊和带钢之间的摩擦系数、变形抗力和轴承油膜厚度都会发生变化,从而影响轧制力和压下量。为了减小速度变化对出口厚度的影响,当速度大于低速基准 v_1 时,在设定速度增减时对辊缝做出相应调节。

$$\Delta S = \frac{\partial F}{\partial v} \frac{v - v_1}{K_M} \quad (7)$$

式中, $\frac{\partial F}{\partial v}$ 为速度变化 (v) 对轧制力 (F) 的影响系数。

4 卷取张力控制

控制卷取张力,实际就是通过限制电机电流控制卷取电机的转矩。该卷取系统采用最大转矩递变张力控制方式^[5],如图4所示张力 T 随带钢卷径 D 按一定斜度变化。

$$M = M_F + M_D + M_B + M_M$$

式中, M_F 为张力转矩; M_D 为加减速动态转矩; M_B 为弯曲转矩; M_M 为机械摩擦转矩。

$$\text{其中, } M_F = T \frac{D}{2} \quad (8)$$

$$M_D = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = \frac{GD_0^2 + GD_c^2}{375} \frac{dn}{dt} = \frac{GD_0^2 + \frac{\pi}{8} \rho W (D^4 - D_0^4)}{375} \frac{dn}{dt} \quad (9)$$

$$M_B = \frac{Wh^2 \delta_y}{4} \quad (10)$$

式中, n 为转速; GD_0^2 为系统飞轮矩; GD_c^2 为带钢飞

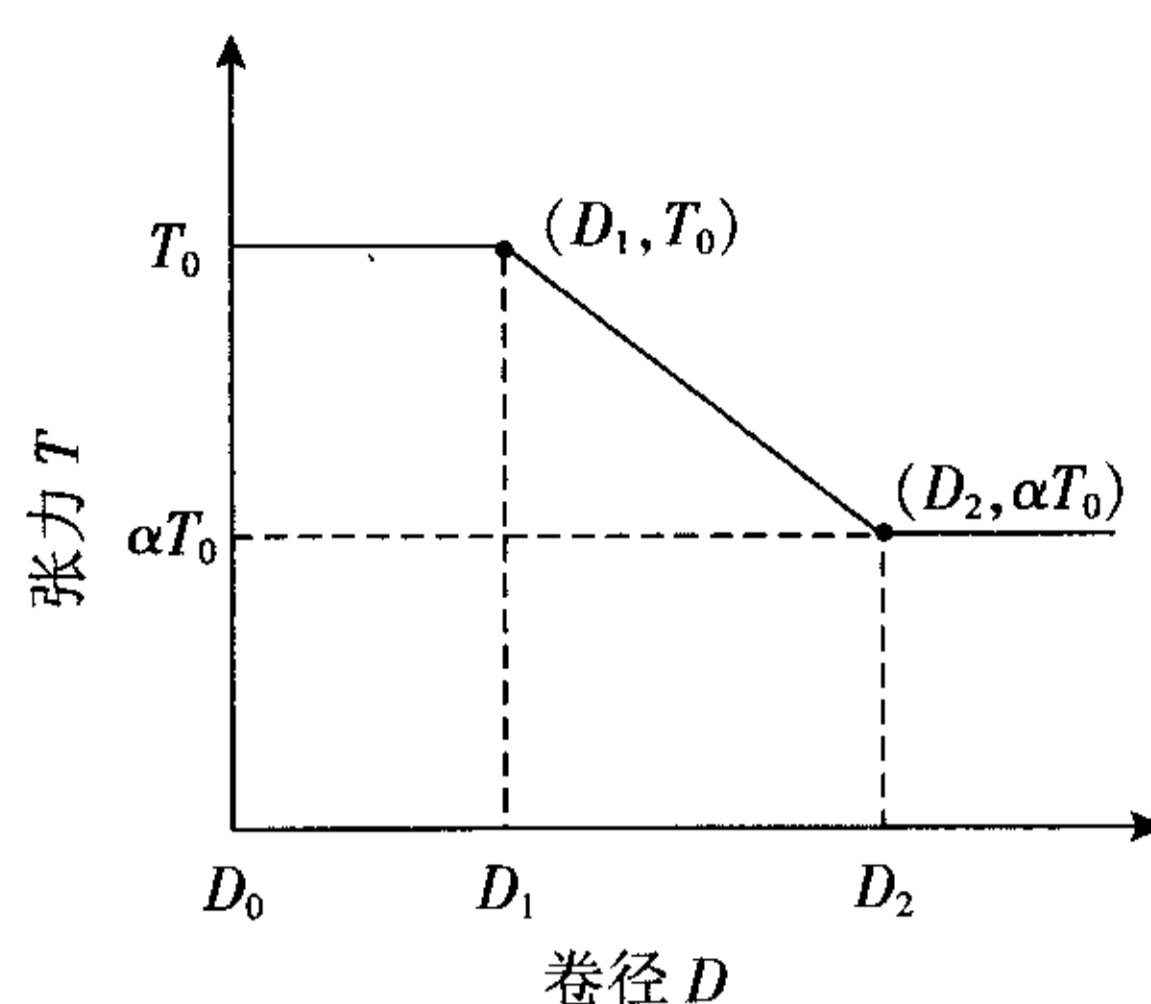


图4 递变张力曲线

Fig 4 Graded tension curve

T_0 —最大张力; α —张力递变系数; D_0 —卷筒卷径; D_1 —递变开始卷径; D_2 —递变结束卷径

轮矩; ρ 为带钢密度; W 为带钢宽度; h 为带钢厚度; δ_y 为带钢屈服强度。

产生转矩 M 需要的电流为:

$$I = \frac{M}{i_1} \frac{K_T}{\phi} \quad (11)$$

式中, K_T 为转矩电流系数; i_1 为传动比; ϕ 为磁场弱磁系数。

5 使用效果

该控制系统2007年7月在450 mm 单机架可逆式冷轧机上投入使用。在来料既有很大整体趋势性厚度偏差,又有很大高频厚度波动的情况下,经三道轧制之后,成品相对厚度精度能够控制在 $\pm 1\%$ 之内,优于设计要求的 $\pm 1.5\%$ 。

参考文献:

- [1] 冯培德. 我国窄带钢生产现状及发展设想[J]. 钢铁, 1994, 29(2): 75-80.
FENG Pei-de. Present status of narrow strip production in China and some ideas for its development [J]. Iron and Steel, 1994, 29(2): 75-80.
- [2] 张殿华, 王君, 李建平. 首钢中厚板轧机 AGC 计算机控制系统[J]. 轧钢, 2001, 18(1): 51-55.
ZHANG Dian-hua, WANG Jun, LI Jian-ping, et al. The AGC computer control system of a plate rolling mill [J]. Steel Rolling, 2001, 18(1): 51-55.
- [3] 丁修堃. 轧制过程自动化 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [4] Y Okamura, I Hoshino. State feedback control of the strip steering for aluminum hot rolling mills [J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(8): 1 035-1 042.
- [5] 王金章, 张殿华. 热连轧卷取机最大转矩递变张力 PLC 控制系统[J]. 冶金自动化, 1991, 15(3): 13-16.

[编辑: 沈黎颖]