

首钢 3 500 mm 中厚板轧机 AGC 基础自动化系统

牛文勇¹, 李建平¹, 王 君¹, 李 勃²

(1. 东北大学 轧制技术连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004; 2. 辽宁省机械设备成套局)

[摘 要]介绍了首钢 3 500 mm 中厚板轧机工艺参数和轧机检测仪表、以西门子 Simadyn D 系统为核心的 AGC 基础自动化控制系统、过程计算机系统和网络通信系统, 说明了轧机基础自动化系统的液压位置自动控制 (HAPC) 和轧制力自动控制 (AFC) 原理, 阐述了辊缝自动控制原理和电动-液压联合快速摆辊缝原理, 最后介绍了厚度自动控制 (AGC) 的控制方式、投入条件以及 AGC 系统的运行情况。

[关键词]中厚板轧机; 液压 AGC; 自动摆辊缝; 计算机控制系统

[中图分类号]TC334.9 **[文献标识码]**B **[文章编号]**1000-7059(2006)01-0025-05

AGC system for 3 500 mm plate mill in Shougang Group

NIU Wen-yong¹, Li Jian-ping¹, WANG Jun¹, Li Bo²

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Liaoning Machinery Equipment Complete Set Bureau)

Abstract: Technological parameters of 3 500 mm plate mill in Shougang are introduced. Measuring instruments installed in the mill, basic automatic control system based on Siemens Simadyn D system, process computer system and network communication system for automatic gauge control (AGC) are described. Principle of hydraulic automatic position control (HAPC), hydraulic automatic force control (HAFC), automatic roll gap control and electrohydraulic joint quick roll gap control is expounded respectively. Control mode, launch condition and operation performance of AGC system are given.

Key words: plate mill; hydraulic AGC; automatic roll gap control; computer control system

0 引言

首钢中厚板轧钢厂与东北大学合作在 2003 年对该厂中厚板轧机进行了大规模改造, 改造后的轧机取消了粗轧机, 由 1 台 3 500 mm 高刚度四辊轧机实现粗轧和精轧功能, 在轧机和矫直机之间增加了 28 组直集管控冷装置进行层流冷却, 以期开发出更具市场竞争力的产品。在控制系统方面, 采用了以西门子 Simadyn D 为核心的基础自动化系统, 并引入工业以太网和 Profibus-DP 现场总线组成二级计算机控制系统。网络通信系统的使用, 大大提高了过程计算机与控制计算机以及控制计算机与检测设备、传动设备与操作设备之间

数据通信的准确性和可靠性, 降低了维护强度, 提高了生产效率。

1 轧机及传动系统工艺参数

新轧机的工作辊尺寸为 $\Phi(950 \sim 1\,050 \text{ mm}) \times 3\,500 \text{ mm}$; 支撑辊尺寸为 $\Phi(1\,900 \sim 2\,100 \text{ mm}) \times 3\,300 \text{ mm}$, 工作辊最大开口度为 330 mm; 机架刚度为 10 000 kN/mm; 上、下辊主传动采用 2 台交流同步电动机, 电机转速为 0 ~ 120 r/min, 功率为 7 000 kW, 轧制速度为 0 ~ 6.6 m/s, 最大轧制力矩为 $2 \times 3\,070 \text{ kN} \cdot \text{m}$; 电动压下采用 2 台 400 kW 的直流电动机, 压下速度为 0 ~ 35 mm/s; 液压缸工作行程为 50 mm, 液压缸带载压下速度为 29 mm/s。

[收稿日期] 2005-03-28; [修改稿收到日期] 2005-06-21

[基金项目] 国家经贸委基金资助项目 (ZZ0113A040102)

[作者简介] 牛文勇 (1967-), 男, 甘肃泾川人, 高级工程师, 博士, 主要从事轧制过程计算机控制系统研究与设计工作。

2 轧机检测仪表

准确检测轧制过程中轧机系统的各种变量，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，以满足轧机控制需求，在轧机上安装的传感器列于表 1。

表 1 轧机传感器
Tab 1 Sensors of the mill

名称	数据形式	量程	测量精度	数量
顶帽位置传感器(MTS)	SSI	880 mm	2 μm	2
液压缸位置传感器(MTS)	SSI	70 mm	2 μm	4
液压缸位移传感器(SONY 磁尺)	脉冲	55 mm	1 μm	2
液压缸油压传感器(HYDAC)	4 ~ 20 mA	40 kPa	0.1 kPa	2
轧制力传感器(ABB 压磁式环形压头)	0 ~ 5 V	35 MN	1 kN	2
支撑辊偏心检测传感器(EITRA 绝对值编码器)	SSI	2 048/r	0.175 7°	2

3 系统配置功能及通信

3.1 系统和网络配置^[1]

过程计算机系统包括 2 台 AGC 过程机和 1 台控冷过程机。AGC 过程机采用 PC 服务器，一用一备，镜像磁盘阵列 3 × 40 GB；控冷过程机采用工业 PC。AGC 过程机系统的主要功能是轧件跟踪、轧制规程设定计算和轧制规程设定模型的优化以及自适应；控冷过程机系统的主要功能是冷却方式的确定、阀门开闭数量和分布的确定以及控制冷却模型的优化和自适应。

轧制区基础自动化计算机为 Simadyn D 系统，为满足检测、控制和通信需求，系统采用 4 个 PM5

CPU 模板、1 个 MM4 内存模板、4 个 IT41 扩展模板、2 个 CS7 通信模块和 1 个 CSH11 以太网通信模板。Simadyn D 系统主要功能是实现轧机垂直方向的电动、液压辊缝控制和 AGC 控制及水平方向的钢坯运输控制等。

过程计算机系统、AGC 基础自动化系统、控冷基础自动化系统和 HMI 服务器系统通过工业以太网交换机(ESM)相互连接(HMI 服务器与各客户机之间也采用这种方式相连)，HMI 服务器连接有 5 台客户机(入炉终端、出炉终端、轧机监视终端、轧机操作终端和控冷操作终端)用于过程监控^[2]。

系统网络结构如图 1 所示。

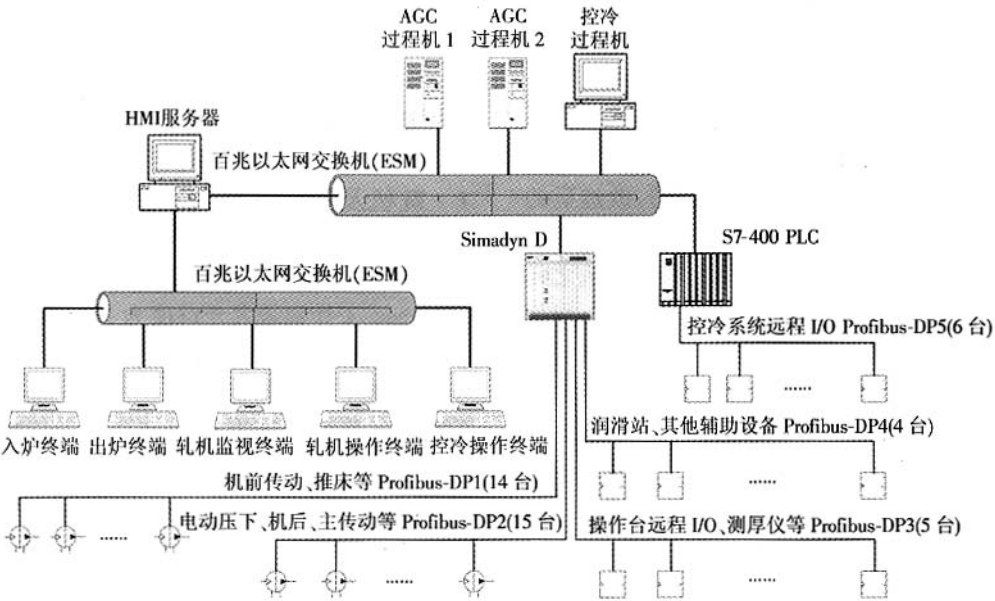


图 1 3 500 mm 轧机系统网络配置图

Fig 1 Network configuration for control system of 3 500 mm plate mill

3.2 Simadyn D 各 CPU 功能分配及数据通信

鉴于轧机控制系统对控制速度的要求和系统对绝对值编码器的输入通道的需求,考虑控制任务的不同,本套 Simadyn D 各个 CPU 分配了不同的控制功能,具体分配如下。

- CPU 1: 液压位置/轧制力自动控制(HAPC/AFC), AGC, 液压缸故障检测与记录。
- CPU 2: 电动自动/手动辊缝控制, 电动-液压联合摆辊缝, 轧机自动调零, 轧机自动刚度测试。
- CPU 3: 系统故障检测与记录, 与轧机过程机通信。
- CPU 4: 与 HMI 服务器通信, 现场总线设备通信及控制。

Simadyn D 系统的 CS7 通信模块上共安装 1 个 SS4 MPI 接口子模块和 4 个 SS52 通信子模块, 通过 SS4 实现对各 CPU 的编程和监控, 通过 SS52 连接 4 路 Profibus-DP 总线, Simadyn D 作为主站与主传动系统、电动压下传动系统、辊道传动系统、轧机操作台、AGC 液压站系统、推床控制系统、测厚仪以及其它现场总线系统和设备进行数据交换; 通过 CSH11 和以太网交换机与过程计算机、HMI 服务器和控冷 PLC 等设备进行数据交换。Simadyn D

各 CPU 之间通过背板的 L 总线/C 总线和通信缓冲器 MM4 交换数据。

4 液压位置自动控制(HAPC)和轧制力自动控制(AFC)

HAPC 是指调节伺服阀开口度, 以便在最大轧制力允许范围内将液压缸位置保持在某一设定值, 使控制后的位置与目标位置之差保持在允许的偏差范围内, 在轧钢过程中, 液压缸一般工作在 APC 方式。轧制力自动控制(AFC)是指调节伺服阀开口度, 以便在液压缸工作行程内将轧制力保持在某一设定值, 在轧机调零和刚度测试过程中, 液压缸一般工作在 AFC 方式。

图 2 给出了单侧液压 APC/AFC 原理^[3]。在 APC 方式, 位置基准、AGC 调节量、附加补偿和手动辊缝干预量的和与液压缸位置实际值相比较, 偏差值与一个和液压缸油压相关的变增益系数相乘后送入位置控制器(PI 调节器), 位置控制器的输出值和压力限幅控制器的输出值都送入一个比较器, 比较器将二者之中小者作为给定值输出到伺服放大器, 进而驱动伺服阀, 控制液压缸的动作以消除位置偏差。

轧制力限幅环节是在 APC 方式下, 限制轧制

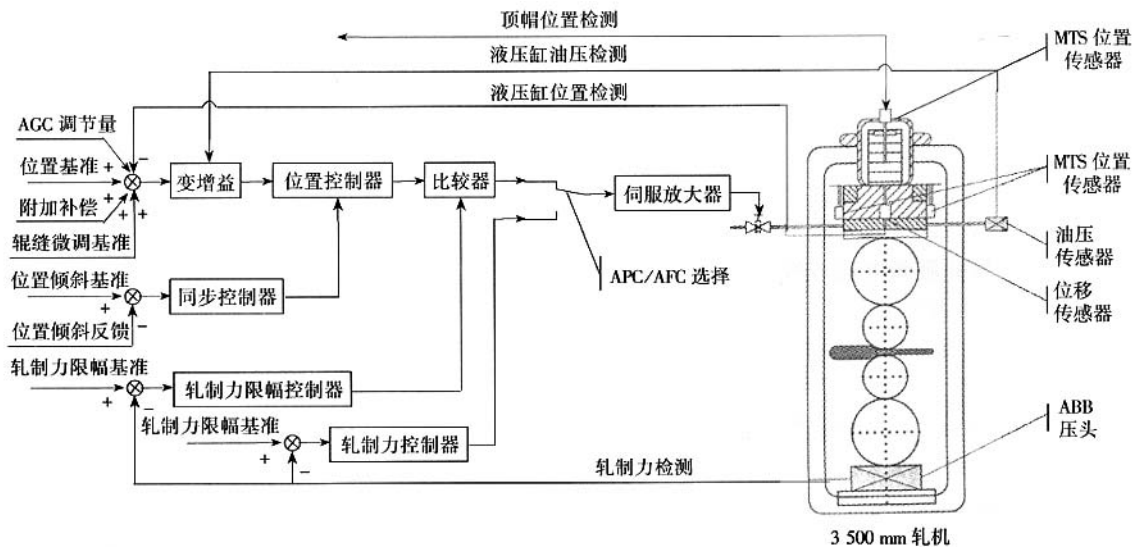


图 2 3 500 mm 轧机液压 APC 与 AFC 原理图

Fig 2 Schematic diagram of hydraulic APC and AFC for 3 500 mm plate mill

力、保护液压缸和其他设备的一个环节。当轧制力小于轧制力限幅值时, 液压缸工作在位置闭环方式, 输出到伺服放大器的值为位置控制器的输出值; 当轧制力超过限幅值时, 输出到伺服放大器

的给定值为轧制力限幅控制器的输出值。这样, 既能防止轧制力超限, 又能保证轧制过程的正常进行。另外, 当轧制力超过最大保护限幅值时, 液压缸快速泄油, 防止设备损坏。

为了控制钢板侧弯,需要进行轧机两侧辊缝倾斜调节,两侧液压缸在运行时需要保持同步,所以设置了双侧辊缝倾斜和同步控制器。

由于伺服阀的开口度与伺服阀线圈驱动电流成正比,因此,液压油通过伺服阀的流量 Q (正比于柱塞移动速度) 与伺服阀开口度和阀口压力差的关系可以表达为

$$Q = KI \sqrt{\Delta P} = \frac{I}{I_N} Q_N \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta P_N}} \quad (1)$$

式中, K 为伺服阀流量系数; I 为伺服阀驱动电流 (正比于伺服阀开口度), ΔP 为伺服阀两侧压力差; I_N 为伺服阀标称流量时的驱动电流; Q_N 为伺服阀标称流量; ΔP_N 为伺服阀标称流量时两侧额定压力差。

从式(1)可以看出,伺服阀的流量要受控制电流和阀两侧压力差的共同影响,具有变增益特性,不利于参数整定,为此,加入非线性补偿环节,以改善系统性能。流量非线性补偿分上下运动两种情形,设 P_s 为油源压力, P_L 为液压缸内油压,那么

$$\text{下行时, 液压缸进油 } \Delta P = P_s - P_L$$

$$\text{上行时, 液压缸出油 } \Delta P = P_L$$

实际使用时,变增益系数 K_p 整定为 $K_p = \sqrt{\frac{\Delta P_N}{\Delta P}}$ 这样,在乘以变增益系数后,伺服阀流量公式(1)可写成:

$$Q' = KK_p I \times \sqrt{\Delta P} =$$

$$\frac{I}{I_N} Q_N \sqrt{\frac{\Delta P_N}{\Delta P}} \times \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta P_N}} = \frac{I}{I_N} Q_N$$

则伺服阀流量与伺服阀电流成线性关系,可以通过程序对其进行精确控制。

在 AFC 方式,轧制力自动控制将轧制力基准值和反馈值的比较结果进行 PI 运算后,通过 APC/AFC 选择开关输出到伺服放大器 (参见图 2)。APC/AFC 方式由程序根据轧机状态控制。

5 自动摆辊缝控制

5.1 自动电动位置控制

在非手动轧钢方式,轧机需要自动摆辊缝,这时,电动压下系统需要进行自动位置控制,程序根据电动压下目标位置与实际位置的偏差,取两侧设定位置与实际位置偏差值中的绝对值小者作为速度曲线的输入偏差,按照如图 3 所示的曲线确定压下电机的给定速度,速度输出值两侧相同。

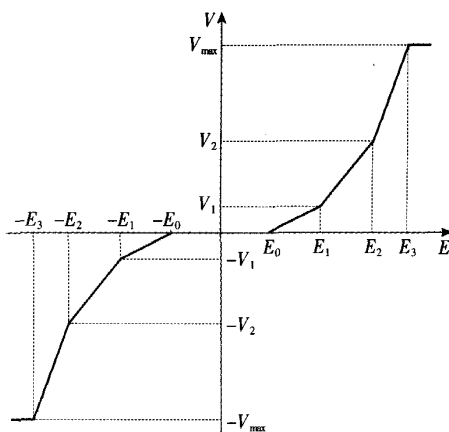


图 3 电动压下位置-设定速度曲线

Fig 3 Diagram of position-speed curve for electric screw down
E—位置偏差; V—压下速度

5.2 辊缝设定计算

在自动摆辊缝过程中,当前道次的辊缝设定值发生变化后,程序立即计算液压预置位置,如果计算结果在预定的上、下限幅范围内,则电动压下位置保持不变,液压缸按照预置值摆辊缝,到达预置位置后停止;如果计算结果超出预定的上、下限幅范围,则程序先将液压预置位置置于液压缸工作行程中点,计算电动预置位置,并进行电动粗摆辊缝,等电动摆辊缝完成后,重新计算液压预置位置,进行液压摆辊缝,到达预置位置后停止。电动、液压预置位置计算公式为

$$G_r = E_r - E_0 + H_r - H_0$$

$$E_r = G_r + E_0 - H_0$$

$$H_r = E_a - E_0 + H_0 - G_r$$

电液联合摆辊缝过程如图 4 所示。

5.3 快速摆辊缝

辊缝设定速度和精度是一对矛盾的因素,如果对辊缝设定精度要求高,则必然需要更多的时间进行辊缝调整。对于中厚板轧制过程而言,摆辊缝的速度直接影响轧制节奏,在不影响最终产品尺寸精度的前提下提高摆辊缝的速度,对于提高轧制节奏是至关重要的一环。

分析中厚板的轧制过程可知,其辊缝设定有以下几个特点:

- 在非特殊情况下,轧辊的开口度随着道次数的增加逐渐减小,这意味着电动压下丝杠是逐步下压,液压缸柱塞在工作行程内逐渐伸出。

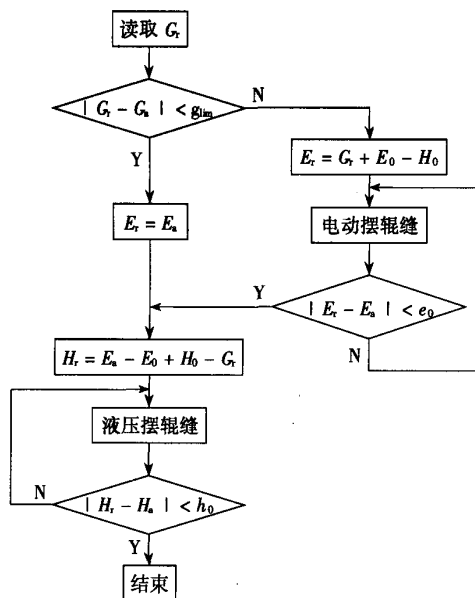


图 4 电液联合摆辊缝流程

Fig 4 Flowchart for electric-hydraulic associated gap manipulate

G_r —设定辊缝; G_a —实际辊缝; g_{lim} —摆辊缝偏差限; E_r —设定电动压下位置; E_a —实际电动压下位置; E_0 —电动压下清零位置; e_0 —电动位置最小偏差; H_r —设定液压缸位置; H_a —实际液压缸位置; H_0 —液压清零位置; h_0 —液压位置最小偏差

• 轧制过程前几道次连续两个道次的辊缝差较大,需要电动压下参与摆辊缝;而后几个道次的辊缝差较小,可以由液压单独完成摆辊缝过程。

• 前几道次的辊缝设定精度对终轧尺寸精度影响不大,而后三个道次对终轧尺寸精度的影响较大,所以后三个道次必须用液压来保证设定精度。

• 对于空过道次,需要辊缝抬起到一定高度,这时的行程比较大,需要电动压下参与动作。

基于上述分析,采取了如下的快速摆辊缝措施:在辊缝设定精度对终轧尺寸精度影响不大的前几道次,液压缸油柱保持固定的高度,利用电动压下摆辊缝;在后三个道次,如果道次之间辊缝差较大,按照图 4 流程进行电液联合摆辊缝;如果道次之间辊缝差较小,则由液压一次摆到位。实际上,后三道次的摆辊缝过程基本上都是由液压单独完成的。

实测表明,采用电液联合摆辊缝,道次切换后辊缝摆到位的时间平均在 4 s 左右,采用快速摆辊缝后,摆辊缝的时间平均在 2 s 左右,电动压下单独摆辊缝偏差小于 0.02 mm,大大缩短了摆辊缝的

时间,提高了轧制节奏。

6 自动厚度控制(AGC)

为获得良好的异板差和同板差,必须进行基于高精度 AGC 模型的液压压下位置控制。具体做法是,在前几道次采用相对 AGC,以获得比较准确的厚度信息;其余道次在轧件咬入后,根据实际轧制力和预报轧制力的偏差程度及对异板差指标和同板差指标的偏重情况,确定选择绝对 AGC 或相对 AGC^[4]。

相对 AGC:每个轧制道次的板厚设定值 h^* 为轧机咬钢 Δt 时间后,经 n 次压力和位移采样后,负载辊缝计算值的厚度平均值,即 $h^* = (\sum h)/n$ 。AGC 的控制功能也在轧机咬钢 Δt 时间后参与辊缝调节。相对 AGC 以头部实际轧制力作为基准轧制力,以头部实际轧制厚度作为基准厚度设定,确保同板差良好。但相对 AGC 控制下轧出的钢板厚度不一定符合所要求的目标厚度。

绝对 AGC:每个轧制道次的板厚设定值 h^* 为轧机咬钢 Δt 时间后的负载辊缝设定值(由过程机预测轧制力计算出来),AGC 的控制功能也是在轧机咬钢 Δt 时间后参与辊缝调节。绝对 AGC 以预报轧制力作为基准轧制力,以目标厚度为基准,确保同板差和异板差良好。这种厚控策略是以目标厚度(而不是锁定厚度)为基准值,因此从理论上可以严格达到目标厚度,既可改善同板差又可改善异板差。这也是绝对 AGC 较相对 AGC 的优越之处。

绝对 AGC 需要在设定轧制力和锁定轧制力差距在某一限定范围内时才可使用,因此在 AGC 投入前,首先要判断轧制力设定值和锁定值之差是否在要求的范围内,如果在要求的范围内,则投入绝对值 AGC,否则投入相对值 AGC。采用绝对 AGC 时,需要对轴承油膜厚度、轧辊偏心、轧辊热膨胀及磨损、轧件宽度、轧件头部及尾部等项进行动态补偿。

实际使用情况是,在自动摆辊缝状态下,判断轧机是否咬钢,如果咬钢,则计算辊缝、轧制力和辊缝倾斜锁定值,并判断锁定值计算次数是否达到预定的采样次数,达到采样次数后,判断轧制力设定值和锁定值的偏差,决定是否投入绝对 AGC。

7 AGC 系统运行情况

3 500 mm 轧机 AGC 系统自 2003 年 1 月投入试
(下转第 37 页)

保护动作值如下:(1)当电流超过 48 kA 且维持 300 ms 以上;(2)当电流超过 40 kA 且维持 6 s 以上;(3)当电流超过 35 kA 且维持 12 s 以上^[1]。

4 运行情况

自 2003 年 7 月 1 日新系统投入运行以来,整流器运行正常可靠。彻底解决了原有控制系统运行不稳定、系统不开放、维护和故障分析处理困难

及备件供应困难等问题,提高了设备的可靠性,保证了电弧炉生产正常运行。图 4 是新系统的电压和电流波形。图中从上到下分别为整个冶炼炉次 3 台整流器的电压、电流反馈值。从图 4 可知,改造后,这台国内最大的直流电弧炉的生产能力已经超过原设计能力。这次改造的成功为直流电弧炉国产化改造闯出一条新路。

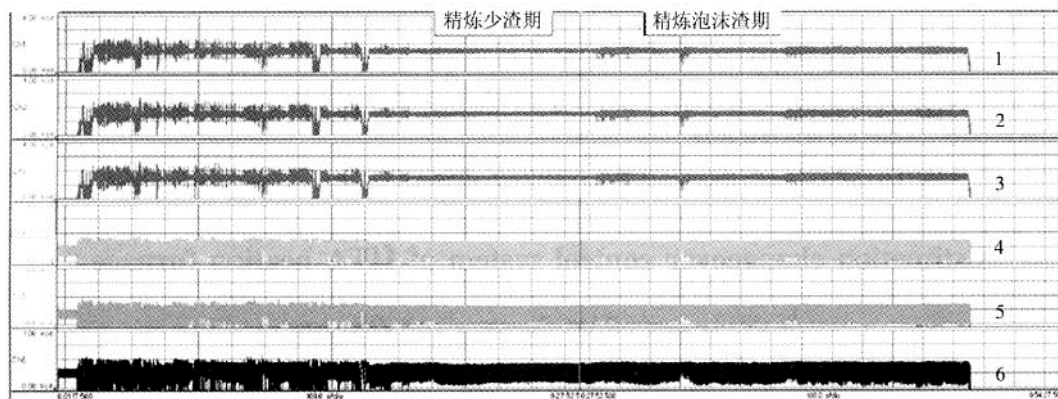


图 4 新系统的电流和电压波形

Fig 4 Current curves and voltage curves of the new control system

1~3—整流器 EB51、EB52、EB53 的电压波形;4~6—整流器 EB51、EB52、EB53 的电流波形

[参 考 文 献]

北京:冶金工业出版社,1997.

[编辑:魏 方]

[1]朱应波,宋东亮,曾昭生,等.直流电弧炉炼钢技术[M].

(上接第 29 页)

生产以来,一直稳定运行。实测表明,HAPC 的定位精度为 0.01 mm,100 μ m 的阶跃响应时间为 25 ms,动态响应频率超过 15 Hz,AGC 同板差 100 μ m 内命中率达到 95%。3 500 mm 轧机 AGC 系统改造项目 2004 年获冶金科学技术一等奖。

[参 考 文 献]

[1]王 君,王昭东,李建平,等.3 500 mm 中厚板轧机计算机控制系统[A].提高钢材的市场竞争力——2002 年全国轧钢生产技术会议暨中国金属学会第七届轧钢年会论文集[C].北京:冶金工业出版社,2002.598-603.

[2]牛文勇,王 君,李建平,等.基于工业 PC 和 PLC 的中厚板轧机监控系统[J].冶金自动化,2001,25(6): 33-36.

NIU Wen-yong, WANG Jun, LI Jian-ping, et al. Monitor and

control system of the plate mill based on industrial PC and PLC [J]. Metallurgical Industry Automation, 2001, 25(6): 33-36.

[3]张殿华,王 君,李建平,等.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.

[4]王 君,张殿华,李建平,等.中厚板轧机液压辊缝控制系统研究及其 PLC 实现[J].东北大学学报(自然科学版),2001,22(4): 435-438.

WANG Jun, ZHANG Dian-hua, LI Jian-ping, et al. Hydraulic roll gap control system of plate mill and its development in PLC [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2001, 22(4): 435-438.

[编辑:沈黎颖]