

首钢中厚板轧机 AGC 计算机控制系统

张殿华¹，王 君¹，李建平¹，张其生²，赵胜国²，刘仁辅^{2*}

(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 110006；
2. 首钢（集团）总公司中厚板厂，北京 100041)

摘 要：介绍了首钢中厚板轧钢厂 3340mm 中厚板轧机液压 AGC 系统工艺参数和计算机系统的硬件配置和传感器配置，给出了轧机弹跳模型和液压缸 HCC 的控制原理和液压缸的系统频率响应特性，描述了本系统所采用的头部锁定 AGC 和绝对 AGC 的控制策略，并对支撑辊偏心补偿、油膜厚度补偿等厚度控制补偿方法进行了说明。
关键词：中厚板轧机；AGC；APC；偏心补偿；计算机系统
中图分类号：TG333.7+1；TP273 文献标识码：A 文章编号：1003-9996(2001)01-0051-05

The AGC computer control system of a plate rolling mill

ZHANG Dian-hua¹, WANG Jun¹, LI Jian-ping¹, ZHANG Qi-sheng², ZHAO Sheng-guo², LIU Ren-fu²
(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110006, China;
2. Capital Iron and Steel Company, Beijing 100041, China)

Abstract :Based on the hydraulic AGC modernization project of the Capital Iron and Steel Company 3340mm plate mill, this paper presents the computers system and sensors configuration. The mill stiff model and mill hydraulic cylinder control(HCC)principle and its frequency response performance are given. The lockup AGC and absolute AGC are discussed. At end of this paper, the backup rolls eccentric compensation and oil film compensation and other compensations are presented.
Key words :plate mill; AGC; APC; eccentric compensation; computer control system

首钢中厚板轧钢厂 3340mm 四辊精轧机的压下装置原为电动压下、开环控制，成品精度较低，难以实现负偏差交货，造成资源浪费。为此，该厂决定对四辊精轧机进行液压 AGC 改造。东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室与该厂合作，承担项目系统设计和调试工作。新系统投入运行后，提高了产品厚度精度、减轻了工人劳动强度，减少了操作失误，增加了负偏差盈重量，降低了生产成本，提高了产品的市场竞争力，增加了企业效益。

1 轧制工艺参数

3340mm 四辊轧机主要设备参数见表 1。

2 计算机系统的硬件配置

整个计算机系统的构成如下：

表 1 3340mm 四辊轧机主要参数

项 目	参 数	项 目	参 数
工作辊直径 Φ/mm	914 ~ 866	压下方式	电动压下，液压微调
工作辊辊面宽度/mm	3340	压下速度/mm·s ⁻¹	0 ~ 5.19
支撑辊直径 Φ/mm	1371 ~ 1317	轧制速度/m·s ⁻¹	0 ~ 3.84
支撑辊辊面宽/mm	3251	空载压下速度/mm·s ⁻¹	2.50
开口度/mm	304.8	带载压下速度/mm·s ⁻¹	5.00
机架断面/mm ²	665321	最大轧制力/kN	34000

过程计算机站（IPC）：采用台湾研华工业 PC（IPC），其配置与通用个人计算机相当，内装有 WINDOWS NT 操作系统和 WIN CC 监控软件。该站主要用于钢材原始数据的录入，轧制规程的跟踪、设定计算、自适应、操作工规程的录入、修改、存储，以及各种过程变量的显示。

收稿日期：2000-10-31
作者简介：张殿华（1963-），男（汉族），内蒙古赤峰人，教授，国家重点实验室副主任，硕士。
本文作者还有：东北大学的牛文勇，杨 红，刘相华，王国栋；首钢总公司中厚板厂的陈建华，于洪喜，余 威。

它通过以太网与 S-400 PLC 相连,从 PLC 接收轧制状况数据和历史数据。其轧制过程的数据文件以炉号为文件名称,可进行查看和打印。

基础自动化站 (PLC):采用 S7-400 PLC 完成系统所有的逻辑控制,并负责液压缸和压下丝杠的位置自动控制 (APC) 和轧制力自动闭环控制 (AFC),利用 AGC 方法来消除轧制过程中每道次的厚度偏差。PLC 从 IPC 和 OP47 接收辊缝设定指令,进行轧制过程的辊缝自动设定,并把轧制过程的轧制力、液压缸油压、辊缝、主电机转速和电流、钢板温度传送到 IPC 和 OP47 中去。

操作员控制站 (OP47):OP47 包括一个彩色液晶显示器和触摸键盘,配置有 P III, CPU 64M 内存,装有 WINDOWS NT 操作系统和 WIN CC 监控软件,为操作员提供 AGC 系统日常操作所需要的数据和界面,用于操作工进行轧钢规程的调用、设置、修改、存储,以及各种过程变量的实时监视、故障报警、记录等。OP47 通过 MPI 网与 PLC 进行通讯。

3 传感器及伺服阀的配置

(1) 顶帽传感器:采用美国的磁致伸缩数字式绝对位移传感器,测量丝杠位移量,操作侧 (OS) 和传动侧 (DS) 各 1 个,安装在压下丝杠的顶端,丝杠中心开孔,以非接触方式直接测量丝杠的静态、动态位移。此安装方式为东北大学国家重点实验室首创,见图 1。传感器的测量值通过串行接口 (SSI) 输出到 SSI-1016 板上,被转换成并行 24 位二进制数字信号,并送到 PLC 的数字输入板上。当时钟频率为 187kHz 时,传感器探头与 SSI-1016 板串行通讯最大距离为 200m。

(2) 液压缸位移传感器:采用法国线性差动变压器位移传感器,安装在液压缸的入口 (从

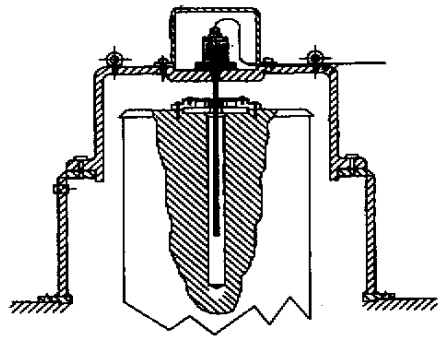


图 1 顶帽传感器安装方式

操作台看为轧机的左侧)和出口两端,可直接测量液压缸的静态、动态位移。

(3) 轧制力传感器:采用 ABB 的压磁式环型测力压头,安装在丝杠和液压缸之间,操作侧和传动侧各 1 个。

(4) 油压传感器:采用美国的油压传感器测量液压缸油压,主要用于对 APC 和 AFC 闭环控制放大倍数的补偿。当压头出现故障时,可替代测压头来测量轧制力。

(5) 钢温传感器:采用国产红外测温仪,测量二辊来料、精轧机入口和出口钢板的温度,并以 BCD 码的形式送入 PLC。

(6) 钢板宽度传感器:激光测宽仪 2 台,分别安装于二辊轧机和四辊轧机之间、成品测厚仪和矫直机之间,测量二辊来料以及成品宽度。

(7) 钢板成品厚度传感器:激光测厚仪 1 台,安装在四辊精轧机和测宽仪之间,测量成品的厚度。

(8) 伺服阀:采用 MOOG 72-383,通过控制阀门的开口度来控制液体的流量,进而控制液压缸的油柱高度,最终控制轧机辊缝。

图 2 为四辊精轧机轧线设备及传感器配置情况。

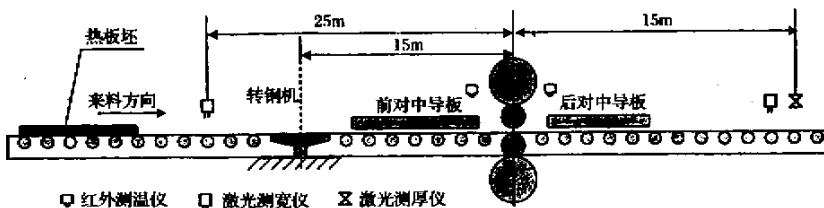


图 2 四辊精轧机轧线设备及传感器配置

4 轧机压靠弹跳方程

由于轧辊弹跳是许多零件变形的总和，因此用理论计算各零件变形的方法来求机座总刚度较困难，且不易保证精度。目前对具体轧机采用实际测量来确定轧机弹跳曲线。

针对首钢中厚板厂的实际情况，采用自压靠法求出轧机弹跳曲线。测量时先进行调平处理，再保持轧机空转一段时间，转速为 30r/s，使油膜轴承建立正常的油膜（厚度）。然后压靠轧辊，在压靠中，要使液压始终工作在正常范围内，确

$$S_F = \begin{cases} a_1 \times (F - 500)^{1/2} + a_2 \times (F - 500) + a_3 \times (F - 500)^{3/2} + a_4 \times (F - 500)^2 & 500 \leq F < 5000 \\ b_1 \times (F - 500)^{1/2} + b_2 \times (F - 500) + b_3 \times (F - 500)^{3/2} + b_4 \times (F - 500)^2 & 500 \leq F < 5000 \\ c_0 + c_1 \times (F - 10000) & 10000 \leq F \end{cases} \quad (1)$$

式中， S_F 为轧机弹跳值，mm； F 为轧制力，kN； $a_1 \sim a_4$ ， $b_1 \sim b_4$ ， $c_0 \sim c_1$ 为回归系数，见表 2。

表 2 轧机弹跳方程回归系数

系数	操作侧正转	操作侧反转	驱动侧正转	驱动侧反转
a_1	-5.298 E-12	-9.520 E-12	1.325 E-12	-1.788 E-11
a_2	1.191 E-3	1.214 E-3	1.431 E-3	9.764 E-4
a_3	-8.284 E-6	-8.471 E-6	-2.284 E-5	-1.019 E-5
a_4	1.369 E-8	1.538 E-8	1.666 E-7	7.004 E-8
b_1	2.384 E-11	1.854 E-11	5.133 E-12	3.311 E-12
b_2	1.358 E-3	1.327 E-3	8.036 E-4	6360 E-4
b_3	-1.379 E-5	-1.240 E-5	-2.169 E-6	6.270 E-7
b_4	5.845 E-8	4.892 E-8	-1.678 E-9	-1.479 E-8
c_1	1/2196	1/2154	1/1963	1/1971

5 液压缸控制 HCC

5.1 HCC 控制功能概述

液压缸（HCC）控制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，控制周期为 3ms。HAPC 是指在指定时刻将液压缸的位置自动控制到预先给定的目标值上。HAPC 是液压压下系统的基本环节，可实现液压压下快速准确位置定位功能。

图 3 为操作侧（OS）HAPC 控制原理图^[1]，传动侧（DS）与其相同。HAPC 工作时，将位置基准值（由 AGC 模块、附加补偿和手动干预给出）与液压缸位移传感器反馈值相比较，所得的位置偏差信号与一个和液压缸负载油压相关的可变增益系数相乘后送入位置控制器（P 调节器），其输出值并不直接给伺服放大器，而是与一个与之并行的压力限幅控制器（P 调节器）的输出值相比较，二者的最小值作为伺服放大器的输入值

保测量数据的精度。测量以轧制力为基准，首先压靠至 500kN（单侧），在该轧制力下，工作辊转动 3 圈，每圈测量 36 个辊缝值，然后对这 108 个辊缝值取平均值得出该轧制力下的辊缝值。之后，以 500kN 为步进单元重复上面操作直至 10000kN。测量完毕后得到操作侧正转、反转及驱动侧正转、反转等轧机弹跳数据。

为了有效地利用实际压靠数据，必须对其进行回归和方差分析，得出弹跳曲线的最终形式为：

（开口度信号），通过伺服放大器驱动伺服阀，控制液压缸位置上下移动以消除辊缝误差。位置调节器与压力限幅调节器设有不同的放大倍数。这种 HCC 的控制策略，可使轧机在 HAPC 方式工作时，一旦达到最大允许轧制力，自动平滑切换到 HAFC 方式，有效地避免了轧制力超限。实际工作表明，在轧制 6mm 钢板时，显示了该控制策略的优越性。

油压传感器用来校正由压力信号引起的系统放大倍数的非线性。同时，也可在压力传感器故障时，作为轧制力的反馈信号。

5.2 HCC 位置闭环的动态特性

在 20000kN 的轧制力下，PLC 置 APC 状态，在位置的给定端附加幅值为 100μm、宽度为 400mm、空比为 50% 的方波，用示波器观察位移传感器的反馈值，调整位置调节器的参数，可得到 HAPC 系统不同的阶跃响应波形。实际调整中，系统的上升时间 $t_r = 40ms$ ，超调量 $\sigma = 15\%$ 。由于已通过给定积分器来限制系统的超调量，因而当阶跃给定时，系统的超调量调整较大，以加快系统的响应速度。压力闭环的相应时间与位置环相当。液压系统的响应频率为 9Hz 左右。

6 AGC 系统

6.1 AGC 控制方式

中厚板轧机 AGC 有 2 种工作方式：
（1）绝对 AGC 方式，每个轧制道次的板厚设定值 h 为轧机咬钢 200ms 后的负载辊缝设定值（该值是通过过程计算机预测轧制力计算出来的），AGC 的控制功能也是在轧机咬钢 200ms 后参与辊缝调节；

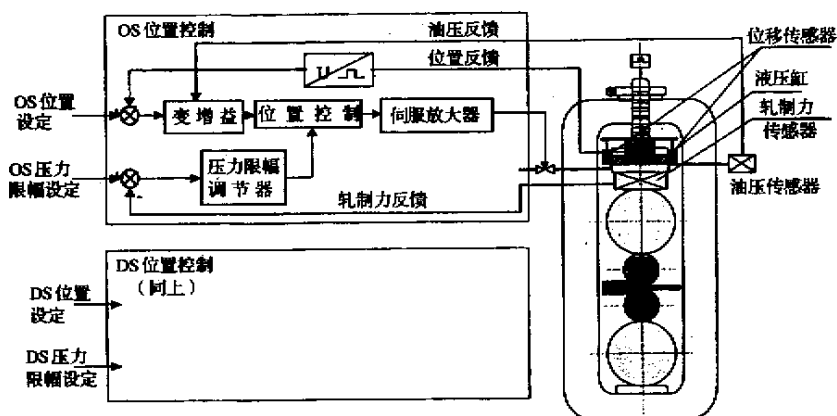


图3 HCC控制原理

(2) 相对 AGC 方式, 每个轧制道次的板厚设定值 h 为轧机咬钢 200ms 后, 10 次压力和位移采样后, 负载辊缝计算值的厚度平均值, 即 $h = (\sum h) / 4$, AGC 的控制功能也在轧机咬钢 200ms 后参与辊缝调节。

为了获得良好的异板差和同板差, AGC 控制方案如下: 在精轧第 1、第 2 道次采用相对 AGC, 以便获得较准确的厚度信息; 其余的几个道次, 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, 来选择绝对 AGC 或相对 AGC, 当偏差在给定限度内时, 采用绝对 AGC。绝对 AGC 以预报轧制力作为基准轧制力, 以目标厚度作为基准厚度设定。锁定值 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。采用绝对值 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。

6.2 AGC 系统各种补偿

6.2.1 偏心滤波及补偿

支撑辊的直径较大, 因而偏心严重。实测表明, 新换支撑辊时, 轧机的偏心量约为 $\pm 50\mu\text{m}$ 。

轧制力的变化包括很多不同的频率分量, 把基波分量看成是由轧辊偏心引起的, 用下列公式表示^[2]:

$$\Delta P = B \cos \omega t + C \sin \omega t \quad (2)$$

$$B = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n \Delta P_k \cos \left[\frac{2k\pi}{n} \right]$$

$$\text{万方数据} \quad C = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n \Delta P_k \sin \left[\frac{2k\pi}{n} \right]$$

式中, ΔP 为轧辊偏心引起的轧制力变化, ω 为支撑辊旋转角度; n 为轧制道次; k 为轧制道次。

实际系统中, 分别在上下支撑辊的操作侧安装了 36 齿的栅轮, 并使其中的一个栅齿比其他栅齿长出, 用它来确定支撑辊的零位。栅轮外面安装了 2 个接近开关, 分别检测支撑辊旋转的角度和相对零位。将这 4 个数字输入信号送入 PLC 后, 即可按模型 (2) 进行偏心滤波, 进而完成补偿工作。

6.2.2 油膜轴承油膜厚度补偿

在轧制中加减速时, 油膜轴承的油膜厚度将发生变化; 当轧制力变化时, 油膜厚度也会发生变化, 这些干扰将反映在中厚板的出口厚度上。Reynolds 模型^[2]计算了油膜厚度变化, 从而可通过液压缸动作来避免其对中厚板出口厚度的影响。

$$\Delta S_0 = \frac{a(N/P)}{(N/P) + b} \quad (3)$$

式中, ΔS_0 为油膜厚度变化; a 、 b 为系数; N 为轧机转速; P 为轧制力。

在轧机主传动为 10r/min 的速度下进行空压靠, 分别在 2000、4000、6000、8000、10000kN 的载荷下对辊缝值进行采样并记录。然后再分别以 20、30、40、50、60、70、80r/min 的速度下重复上述过程, 并记录数据。以确定轧机零点时 (转速 $N_0 = 60\text{r/min}$ 、单侧轧制力 $P_0 = 10000\text{kN}$) 的油膜厚度为基准, 对 Reynolds 公式进行变换, 经数据处理, 最终油膜厚度模型如下:

$$\Delta S_{\text{os}} = \frac{-44927}{10000 \times (N/P - N_0/P_0) + 112} + 384 \text{ 轧机操作侧} \quad (4)$$

$$\Delta S_{\text{ods}} = \frac{-179990}{10000 \times (N/P - N_0/P_0) + 254 + 707 \text{ 轧机操作侧}} \quad (5)$$

6.2.3 头部补偿和压下丝杠窜动补偿

轧机咬钢时，由于以下 3 种原因使厚差增大：

①液压缸及管路中有空气泡存在；②板头温度低、硬度大；③压下丝杠在有轧制力情况下窜动。实际测量表明，第②和第③个因素影响最大。在咬钢瞬间需要增大一定的压下量，作为沉入补偿，沉入补偿量及补偿时间由过程机设定。

由于顶帽传感器的特殊设计方式，因而可以对不同轧制力情况下的丝杠窜动量进行实时补偿。实际补偿方法如下：空载摆辊缝完成之后，记下顶帽传感器的位置，轧制过程中，顶帽所发生的任何变化，均通过液压缸来进行动态补偿。补偿时，将顶帽传感器与轧制前的偏差乘以一个系数 K_s ， $0 \leq K_s \leq 1.5$ 。

6.2.4 轧辊热膨胀及轧辊磨损

在一个道次中，轧辊将受热膨胀而影响中厚板出口厚度，在道次之间，轧辊被冷却而收缩。

可利用简单的膨胀/收缩模型来调整液压缸，从而消除热胀对中厚板出口厚度的影响。轧辊磨损可简化成一条近似直线模型，通过调整液压缸可补偿轧辊磨损对中厚板出口厚度造成的影响。当选取零点时，轧辊磨损模式应使它的调整量复位。

！ 使用效果

该项目 1998 年 8 月正式启动，1999 年 11 月投入运行，2000 年 4 月验收。经考核，HAPC 定位精度为 0.01mm，同板差 $\leq \pm 0.1\text{mm}$ 的命中率 $\geq 95\%$ ，异板差 $\leq \pm 0.15\text{mm}$ 的命中率 $\geq 95\%$ 。板凸度 $\leq 0.15\text{mm}$ ，每 10m 钢板侧弯量 $\leq 40\text{mm}$ 。各项指标均达到了设计要求，成品指标达到国内先进水平。

参考文献：

- [1] 张殿华，王 君，褚恩辉，等．东北大学国家重点实验室冷连轧机厚度控制 [J]．冶金自动化，1999，23 (1)：24 - 27.
- [2] Ginzburg V B. High - quality steel rolling : theory and practice , 1993 , New York , the united states of America , 166 - 169 , 289 - 292 .