

东北大学

硕士学位论文

3500四辊轧机自动厚度控制系统

姓名：于洪喜

申请学位级别：硕士

专业：控制工程

指导教师：毛志忠

20050801

3500 四辊轧机自动厚度控制系统

摘要

本文结合首钢中厚板厂工艺升级改造工程，首先阐述了工程改造的背景和意义以及改造前后工艺流程发生的变化。

本文的主要工作是研究了此次改造中新四辊轧机自动厚度控制系统，它是本工程改造的重点，也是技术含量最高的部分。论文首先阐述了中厚板轧制中自动厚度控制（AGC）的基本理论，以便更好地理解 AGC 在实际应用中的控制思想。根据此次改造的产品规格和性能指标以及新轧机的设备参数，并结合旧轧机系统存在的问题和国内各厂家改造经验，确定了四辊轧机自动化系统方案，并给出了轧线仪表配置和计算机系统拓扑结构。

本文重点是设计新四辊轧机垂直控制策略以及与其相关的水平控制策略。在垂直方向上（即辊缝控制方向），论述了自动位置控制（APC）和 AGC 闭环控制、轧机调零与刚度测试，并给出了 AGC 的各种补偿算法；在水平方向上（即轧线方向），结合辊道的分组与操作台面的布置，给出了各段辊道的控制思想以及高压水除鳞、推床、自动咬钢抛钢和换辊等辅助设备的控制。

最后本文给出此次工程改造取得效果及系统实际运行分析。

关键词 四辊轧机 中厚板 自动化系统 AGC APC

The Automatic Gauge Control System for 3500 Four-high Mill

ABSTRACT

Based on the revamp project of upgraded technology of Shougang Plate Plant, this dissertation firstly set forth the background and significance of the revamp project as well as the change before and after revamp in technology process.

The main task of this dissertation was to study the automatic gauge control system of the new four-high mill in the revamp. It was the key point of this project revamp and the highest technical level in this project. This dissertation firstly gave the basic AGC (Automatic Gauge Control) theory in plate rolling so that the AGC control idea in actual application could be better understood. According to product specification and quality performance and the new mill parameters as well as the exiting problems of the old mill and the revamp experience of local plants, the automatic system plan of the four-high mill was decided. The instrument configuration of rolling line and the topology structure of computer system were given.

This dissertation mainly designed the vertical control strategy and its interrelated horizontal control strategy of the new four-high mill. In vertical direction(i.e. the direction of gap control), it dissertated the loop control of AGC and APC(Automatic Position Control) as well as mill zeroing, mill strength test. Various compensation arithmetics of AGC were given. In horizontal direction(i.e. the direction of rolling line), based on the grouping of roller tables and the layout of control desks, the control ideas of various groups of roller tables as well as the auxiliary control of high pressure descaling, side guide, automatic biting and threading out and roll change were gave.

Finally, this dissertation gave the revamp effect of the project and the analysis of the actual system running.

Key words Four-high mill, Medium plate, Automation system, AGC, APC

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：于洪嘉

日期：2005.8.27

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

学位论文作者签名：于洪嘉

日期：2005.8.27

另外，如作者和导师不同意网上交流，请在下方签名；否则视为同意。

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

签字日期：

第一章 引言

1.1 课题背景

2002年首钢中厚板厂进行工艺升级改造,对厂房、轧机、精整线、控冷线、供配电、水系统以及高压水除鳞等都进行了技术改造。

改造之前,中板厂的主要生产设备是美国的40~50年代的二手设备。为了不断提高产品质量,中板厂也曾进行多次技术改造,包括主轧区、矫直机、冷床区及精整区等设备和设施的技术改造。特别是1999年,中板厂与东北大学合作对四辊精轧机进行了技术改造,增设了液压AGC装置,使产品质量有了很大提高。但是由于主体设备的陈旧,仍存在如下主要问题:

- (1) 精轧机综合性能偏低: 轧机刚度仅为 5000kN/mm, 对钢板厚度偏差影响很大。
- (2) 粗、精轧机规格不配套: 粗轧机辊身長仅为 2286mm, 而精轧机辊身为 3340mm, 限制了精轧机能力的发挥, 限制了产品的规格和产量。
- (3) 板坯高压水除鳞系统能力小: 除鳞压力仅为 12MPa, 氧化铁皮除不净, 严重影响了成品质量。
- (4) 精轧后水冷工艺落后: 水量不可控制, 无法实现钢板轧后控制冷却。
- (5) 冷床面积小, 冷却能力不足: 面积仅为 $26 \times 20.4\text{m}^2$, 给后部精整作业带来一系列问题, 例如: 由于钢板温度高, 工人无法检查钢板表面缺陷。
- (6) 剪切线能力偏低: 40%的产品不能切边交货。
- (7) 生产品种单一, 高附加值产品少: 只能生产普通板和 16Mn 等系列低合金板。
- (8) 成品库面积小: 成品存放和发运都不合理, 效率低。

除了上述中板厂自身问题外,我国加入WTO后,按照规定逐步将冶金产品的关税税率降到8.07%,平均每年降税0.35%,而且难以用行政手段控制钢材进口,国内市场竞争将更加激烈^[1]。另一方面,随着国民经济的不断发展,自2000年国内钢材市场的前景不断攀升,特别是在中厚板材方面,利润从每吨几百元迅速上升到一千多元。与此同时,市场也对中厚板产品的性能提出更高要求,专用板缺口逐渐加大,国内厂家普遍感到竞争压力,不断加大投资,纷纷进行设备改造^{[2][3]}。表1.1和1.2分别列出了近年来国内中板厂改造和即将新建情况。

从表1.1可以看出,2003年末建成中厚板轧机21套(未计入无锡锡金中板和昆钢中板),半数以上都进行了改造,产能1719万吨。其中:4米以上3套(320万吨),3500—3800轧机4套(305万吨),2800—3000轧机5套(360万吨),2300—2700轧机9套(734万吨)。

从表 1.2 可以看出, 在建 15 套中厚板轧机中, 总产能 1745 万吨。其中: 2 套 5 米宽厚板轧机 (宝钢, 沙钢), 年生产能力 290 万吨; 3 套炉卷轧机 (南京、安阳和韶关), 产能 310 万吨; 3500—3800 轧机 7 套 (新余、湘钢、淄博、铁本、永兴、北台、宁波建龙), 产能 880 万吨; 2500—2800 轧机 3 套, 能力 265 万吨。

可见, 无论是改造还是新建项目, 为增强市场竞争, 国内厂家普遍都提高了轧机能力和产量。

表 1.1 国内中厚板厂近年改造情况

Table 1.1 Revamp of local plate plants in recent years

序号	企业	粗轧机	精轧机	投产日期	年生产能力 (万吨)	改造日期	2003 年产量 (万吨)
1	舞阳钢铁公司厚板厂	—	4200 四辊	1978.9	80	2003	100
2	上海浦钢厚板厂	4200 四辊	3500 四辊	1991.1	100	2002	120
3	鞍钢新钢厚板厂	—	4300 四辊	1993.5	100	2003	100
4	太原钢铁公司五轧厂	2300 二辊	2300 四辊	1966.8	36		
5	秦皇岛首钢板材公司	—	3500 四辊	1993.3	50		
6	首钢中厚板厂	—	3500 四辊	1987.9	50	2003	65
7	武钢集团公司轧板厂	2800 二辊	3000 四辊	1966.8	57		80
8	重庆钢铁公司五轧厂	2350 二辊	2450 四辊	1965	80	2003	110
9	马鞍山中板厂	2350 二辊	2300 四辊	1975.4	35	1985	75
10	天津天盾有限公司	2400 四辊	2400 四辊	1960	32		40
11	上海浦钢中板厂	2350 三辊	2350 四辊	1959	47		70
12	济南钢铁公司中板厂	2400 三辊	2500 四辊	1960.7	60		60
13	济南中厚板厂	3200 四辊	3500 四辊	1998.2	80	2001	100
14	酒泉钢铁公司中板厂	—	3000 四辊	1998.9	50		50
15	五矿营口中板厂	2450 四辊	2700 四辊	1972.6	24	2003	94
16	邯郸钢铁公司中板厂	—	3000 四辊	1974.1	36	1991	70
17	鞍钢集团公司中板厂	二辊	3500 四辊	1936	48	2003	80
18	南京钢铁公司中板厂	2350 三辊	2500 四辊	1986	60		80
19	江西新余中板厂	2400 三辊	2500 四辊	1978	36		80
20	安阳钢铁公司中板厂	—	2800 四辊	1974.8	42		80
21	柳州钢铁公司中板厂	2300 三辊	2800 四辊	1974.9	54	2004	80 (135)
总计:							1719

表 1.2 国内中厚板厂近年即将新建情况
Table 1.2 New plants to be built of local plate plants in recent years

序号	企业	粗轧机	精轧机	投产日期	年产能力(万吨)
1	宝钢宽厚板轧机	—	5000 四辊	2005.4	140
2	沙钢宽厚板轧机	—	5000 四辊	2005.12	150
3	南钢炉卷轧机		3800 四辊	2004.9	100
4	安阳钢铁公司	—	3500 四辊	2005.5	110
5	韶钢炉卷轧机	—	3500 四辊	2005.1	100
6	新余钢铁公司	—	3800 四辊	2005.1	80
7	湘钢钢铁公司	—	3800 四辊	2005.12	150
8	淄博钢铁公司	—	3400 四辊	2005	100
9	铁本江苏国力	3500 四辊	3500 四辊	2005	150
10	河南安阳永兴	—	3500 四辊	2005	130
11	辽宁北台钢铁公司	—	3500 四辊	2004.11	150
12	宁波建龙	3500 四辊	3500 四辊	2005	120
13	福建福鼎地区龙安	2800 二辊	2350 四辊	2006.12	80
14	河北武安文峰	3000 四辊	2800 四辊	2004.5	120
15	河北霸州新利	2500 四辊	2500 四辊	2004	65
总计:					1745

首钢中板厂工艺升级改造恰逢在这种情势下进行的。经过首钢内外专家认真研究和讨论,最后确定了一种投资少、见效快的改造方案,即在停产前,利用日常检修时间先完成供配电、主电机基础及轧机和冷床的部分基础,停产后再拆除旧有的二、四辊轧机,新上一架四辊强力轧机(辊身 3500mm、轧制力 7000kN、同步电机 7000kW×2),新上高密直集管层流冷却和高压水除鳞系统,使控轧控冷实现总体自动化,并将精整线由两条线合并为一条线。改造后硬件装备已达国内领先,世界领先的水平。

1.2 首钢中厚板厂改造前后的工艺流程

改造前轧机为美国二手设备,年产 50 万吨,其工艺流程(如图 1.1)是:

上料→加热→高压水除鳞→二辊可逆式轧机开坯→四辊可逆式轧机精轧→中压水冷却→矫直机→分断剪、切头尾→滚盘式冷床→冷却辊道→翻板机
→<19mm(老线)→圆盘剪→切定尺→成品检查→喷标记→成品收集→计重→入库
→>19mm(新线)→圆盘剪→切定尺→

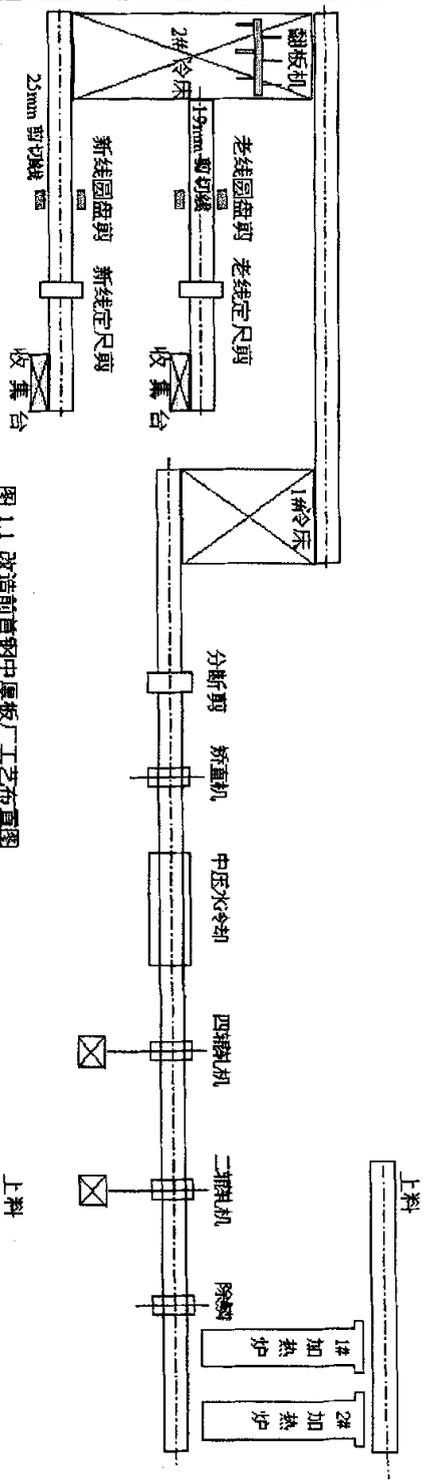


图 1.1 改造前首钢中厚板厂工艺布置图

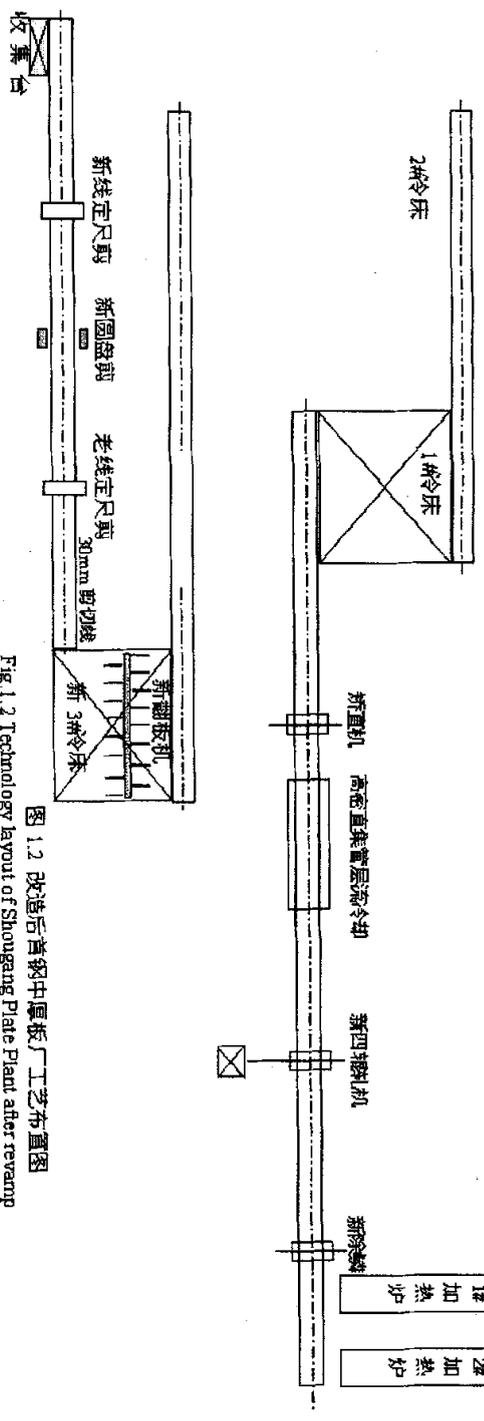


图 1.2 改造后首钢中厚板厂工艺布置图

改造后淘汰二、四辊轧机，新建一架四辊强力轧机，年产 60 万吨，其工艺流程（如图 1.2）是：

上料→加热→新高压水除鳞→新四辊强力轧机→层流冷却→矫直机→1[#]、2[#]、3[#]滚盘式冷床→上表面检查、翻板机→切头剪→圆盘剪→定尺剪→成品检查→喷标记→成品收集→计重→入库

1.3 本文的主要工作

本文依托这个改造工程，结合国内外近几年来在中厚板方面发展的新思想和新思路，同时结合作者本人对 3340 旧四辊轧机 AGC 控制系统运行特点的了解及 3 年多运行维护经验，主要做了如下工作：

- (1) 结合改造前后工艺流程特点，给出了系统的总体设计和通讯方案。
- (2) 通过对旧 AGC 系统的了解，为消除隐患和不足，对新系统进行了改进：
 - ① 提出了对关键仪表的选型要求；
 - ② 对系统的软硬件设计进行了改进；
 - ③ 改进了液压系统的设计；
 - ④ 提出了在系统设计和施工方面（屏蔽、电缆选型、防护等）的要求。
- (3) 给出了系统垂直方向上的控制策略。
- (4) 给出了系统水平方向上的控制策略。
- (5) 根据功能要求和操作的合理性，提出了操作元件选型要求，并设计了操作台。
- (6) 对系统实际运行进行了分析。

第二章 中厚板轧制中 AGC 的基本理论

在中厚板轧制过程中，自动厚度控制是基础自动化控制的核心内容，其控制水平直接影响产品质量，也是控轧控冷整个系统自动化的前提。AGC 是现代轧机的一个基本的控制手段，它使钢板延轧制方向上厚度均匀，减小同板差和异板差，从而改善产品质量，提高成材率^[4]。

在轧制过程中，由于辊缝中的轧件厚度至今尚无法实现实时直接测量，所以依据轧机弹跳方程、利用轧制力反馈信号及辊缝反馈信号间接测量厚度的压力 AGC 系统得以被广泛应用^[5]。压力 AGC 本身也从属于反馈控制，但它最显著的特点就是响应速度快，滞后小，因此被广泛地使用于中厚板轧机上^{[6][7]}。中厚板轧制具有来料短、道次变化频繁、空载压下速度快、咬钢承受冲击负荷大、扭振大以及产品品种规格多等特点^[8]，中厚板轧制的特点决定了其厚控系统以压力 AGC 为主体手段。

2.1 AGC 基本控制原理

中厚板轧制过程是轧机与轧件相互作用的过程，轧机受力产生弹性变形（曲线 A），轧件受力产生塑性变形（曲线 B），两者的状况可以用弹塑性曲线（P-H 图）来进行描述，如图 2.1。下面章节将对这两条曲线进行分析。

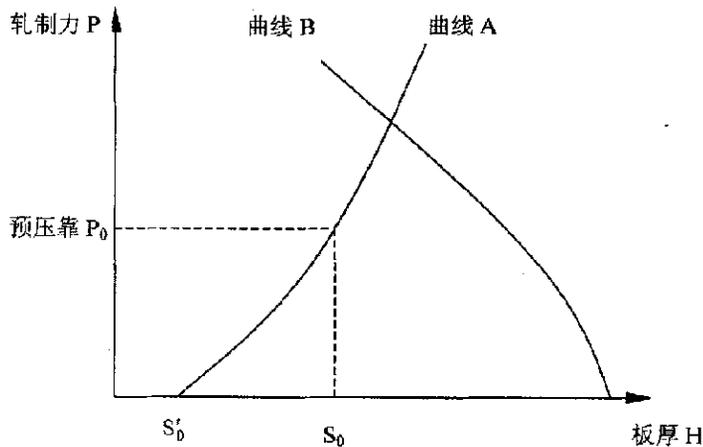


图 2.1 弹塑性曲线

Fig. 2.1 The curve of elasticity and yield

2.1.1 轧制状态下的弹塑性曲线

(1) 轧机的弹性曲线

轧机弹跳的物理意义是指在轧制过程中，由于受轧制力的作用，轧机的机架、轧辊、轴承等部分都会产生弹性变形，这些变形引起的辊缝变化的总和即称为轧机弹跳^[9]。轧机的弹跳曲线就是用来描述轧制力 P 与轧辊辊缝弹跳值（或轧件出口厚度）之间关系的曲线，如图 2.1 中曲线 A。从图中可以看出，两者之间的关系并非完全线性，特别是在低轧制力段，由于受轧机各部件存在的间隙和不均匀接触等不稳定因素的影响，轧制力与轧件出口厚度之间存在非线性关系^[10]。随着轧制力增大，曲线斜率趋于稳定，一般地把这条近似于直线部分的斜率 M 称为轧机的刚度系数，其表达式为：

$$M = \frac{\Delta P}{\Delta S} = \tan \alpha \quad (2.1)$$

其中：

ΔP —轧制力增量 ΔS —辊缝增量 α —曲线 A 的斜率角

刚度系数的物理意义是轧机产生单位辊缝弹跳量所需施加的载荷。在实际应用中，往往先加一个预压靠力 P_0 ，以消除上述不稳定的非线性区域^[11]。此时轧机的弹跳方程可以表示为：

$$h = S_0 + \frac{P - P_0}{M} \quad (2.2)$$

其中：

h —轧件出口厚度 S_0 —预压靠下的辊缝值
 P —轧制力 M —轧机刚度

(2) 轧件的塑性曲线

中厚板的塑性变形是在一定的轧制力作用下完成的。轧制力是轧件尺寸 (B, H, h) 、轧辊半径 R 、摩擦系数 μ 、轧制温度 T 及轧件变形抗力 σ 等因素的函数，即

$$P = f(B, R, H, h, \mu, T, \sigma) \quad (2.3)$$

当上式中除出口厚度 h 以外的变量都为一定值时，轧制力将只随 h 的变化而变化，这两者的关系如图 2.1 曲线 B 所示，一般地称之为轧件的塑性曲线。轧件的塑性曲线也是非线性的，但在较大的压下量范围内呈现为直线关系^[11]。

曲线 B 的斜率代表轧件塑性系数 Q ，由下式给出：

$$Q = \frac{\Delta P}{\Delta h} = \tan\beta \quad (2.4)$$

其中：

ΔP —轧制力的增量 Δh —轧件厚度的增量
 β —曲线 B 的斜率角

2.1.2 弹塑性曲线的应用

分析弹塑性曲线可以得出：弹塑性曲线的形状和位置的变化将会直接引起钢板厚度的波动。

曲线 A 与 B 的交点用 n 表示，该点的坐标便决定了轧制力 P 与轧件出口厚度 h 的值。可以很方便地利用方程 (2.2) 与图 2.2 中 a)、b)、c)、d) 来分析带钢厚度变化的原因^[12]。

初始辊缝设置的影响—增大辊缝，从而把曲线 A 向右平移，如图 a)。当轧机达到一个新的平衡点时，轧制力降低到 P' ，同时轧件出口厚度变为 h' 比原来稍大。

来料厚度的影响—增大来料厚度，从而把曲线 B 向右平移。如图 b)。当轧机达到新的平衡点时，轧制力上升到 P' ，同时也导致轧件的出口厚度增大到 h' 。

轧机刚度的影响—轧机刚度的变化相当于曲线 A 的斜率发生变化，如图 c)。增大轧机刚度如同增大曲线 A 的斜率，在轧机达到新的平衡点时轧制力增大至 P' ，而轧件出口厚度却降至 h' 。

轧件变形抗力的影响—如图 d) 所示，轧件变形抗力的变化相当于曲线 B 的斜率发生变化。降低轧件刚度如同减小了曲线 B 的斜率。当达到平衡状态时，轧制力降为 P' 而轧件出口厚度也减小为 h' 。

在实际轧制过程中，以上诸因素对板坯实际轧出厚度的影响不是孤立的，而往往是同时对轧出厚度产生作用。所以在厚度控制系统中应该考虑各因素的综合影响。

另外发现当轧机刚度大时，为保持轧出厚度不变所需的 ΔS 绝对值减小，在进行厚度控制时，调节机构（如液压缸）所需的行程小，这样轧机在有效行程内消除厚差能力得到提高，轧机可以实现大压下，从而提高产品的质量。行程短，也意味着调节时间小，滞后小，可以允许 AGC 的增益增大，从而消除厚差的水平能进一步提高^{[13][14]}。

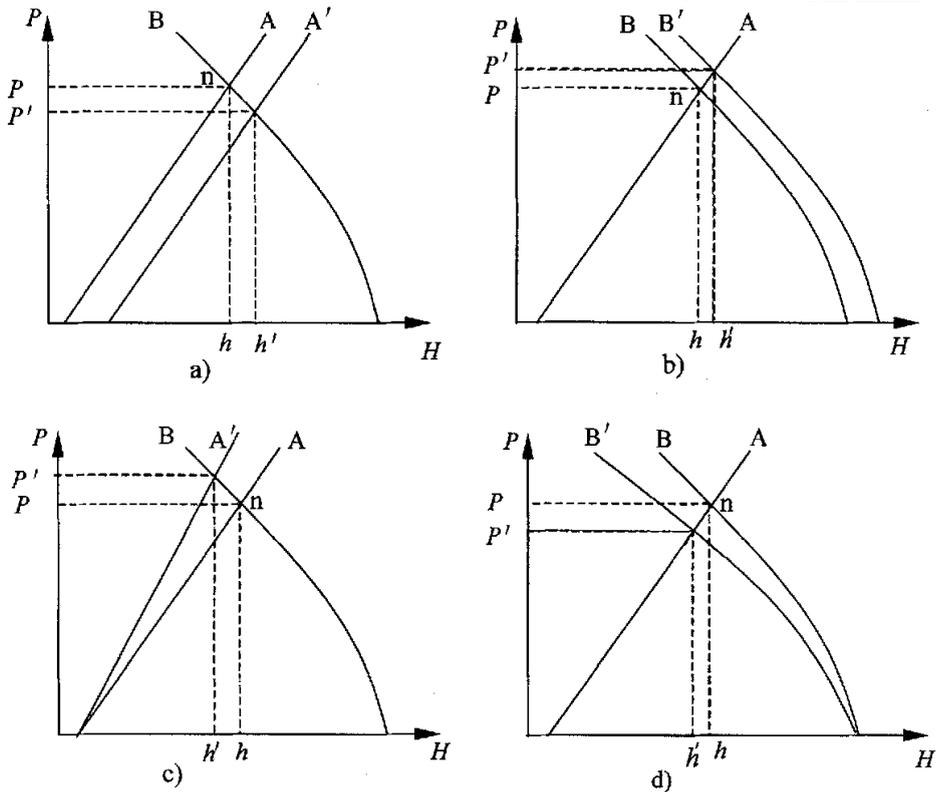


图 2.2 弹塑性曲线的应用
Fig.2.2 The application of the elasticity and yield curve

2.2 轧机刚度可变控制

由于液压压下具有快速响应的特点,所以它在厚度控制过程中对提高成品的精度具有很大的现实意义。借助液压压下系统还可以实现轧机刚度可调,这样不仅可以做到在轧制过程中的实际辊缝值固定不变,即“恒辊缝控制”,而且还可以根据实际生产情况的变化,相应地控制轧机刚度来获得所要求的轧出厚度。

液压 AGC 就是借助于轧机的液压系统,通过液压伺服阀调节液压缸的油量和压力来控制轧辊的位置,对板坯进行厚度自动控制的系统^[15]。

它是按照轧机刚度可变控制的原理来实现厚度的控制。当轧机不受外界干扰作用时,其给定的轧制压力为 P_1 。当轧机受到外来干扰作用时,如来料厚度发生变化,其轧制压力由 P_1 变为 P_2 , P_1 与 P_2 进行比较之后,便得到一定的轧制压力差 ΔP , 并根据此计算出相应的轧机弹跳量 Δh :

$$\Delta h = \frac{l}{M}(P_2 - P_1) = \frac{l}{M} \Delta P \quad (2.5)$$

其中： M —轧机刚度

为了消除此厚度偏差，可以通过调节液压缸的流量来控制轧辊位置，补偿干扰所引起的轧机弹跳变化量^[15]。此时液压缸所产生的轧辊位置修正量 Δx ，应与此弹跳变化量成正比，方向相反，为：

$$\Delta x = -C \frac{I}{M} \Delta P \quad (2.6)$$

其中： C —轧辊辊缝位置补偿系数

轧机经过此种补偿后，板坯的轧出厚度偏差变小了，变成：

$$\Delta h' = \Delta h - \Delta x = \frac{\Delta P}{M} - C \frac{\Delta P}{M} = \frac{\Delta P}{\frac{M}{1-C}} = \frac{\Delta P}{M_E} \quad (2.7)$$

其中：

$\Delta h'$ —补偿后的出口厚度偏差 C —轧辊辊缝位置补偿系数；

M_E —等效的轧机刚度 Δx —辊缝位置修正量。

式(2.7)是轧机刚度可变控制的基本方程，由此可知轧机刚度可变控制，实质也就是改变轧辊辊缝位置补偿系数 C ，即改变轧机等效刚度 M_E 来实现厚度自动控制^{[12][16]}。例如：当 $C=1$ 时， M_E 为无穷大，即可以完全消除厚差；当 $0 < C < 1$ 时， M_E 大于轧机本身刚度而小于无穷大，辊缝调整量只能对厚差进行部分补偿；当 $C=0$ 时， M_E 等于轧机的自然刚度，轧机对辊缝不调整； $C < 0$ 时， M_E 小于轧机刚度，辊缝调整方向与轧机弹跳变形量方向相同。

2.3 厚度控制方式

中厚板轧制的特点是轧件长度短，每道次的轧制时间短及两道次的间隙时间都短，对钢板头尾部分的厚度公差要求严格，所以厚控方式通常采用厚度计式 AGC 方式^[17]，如图 2.3 所示。

厚度计式 AGC 是一种厚度自动控制方式，即把整个轧机本身作为测量厚度的“厚度计”，利用位置和轧制力增量信号，依据轧机弹跳方程估计厚度偏差，然后考虑轧机压下效率补偿，对轧机压下系统进行调节以消除厚差。因为在轧制过程中，任何时刻的轧制压力 P 和辊缝 S 都可以检测到，这样可以利用弹跳方程 $h = S + P/M$ 计算出任何时刻的实际轧制厚度 h 。然后将该厚度值与设定值进行比较，再经 AGC 运算得消除厚度偏差 Δh 所需的辊缝调节量 ΔS ，通过 APC 改变压下位置，把厚度控制在允许偏差范围内。

这种厚度控制系统的优点是可以立即检测出轧制力变化引起的厚度变化，从而可进行快速调节，避免测厚仪反馈式厚度控制系统中厚差信号检测的时间滞后。但是，该系统对于轧制过程中引起辊缝值变化的因素，如轧辊磨损、轧辊热膨胀、轧制速度变化引起的支撑辊轴承油膜变化以及支撑辊偏心等是无能为力的。

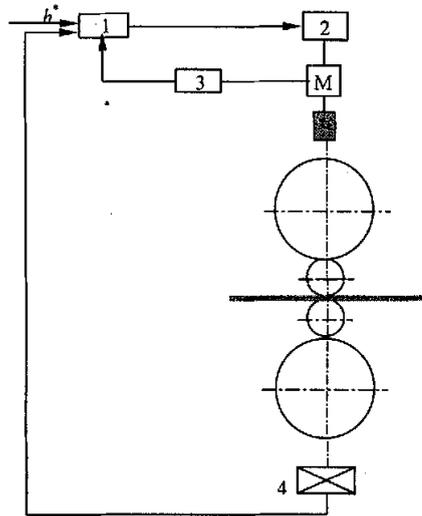


图 2.3 厚度计式厚度控制系统

1 压下控制 2 运算器 3 厚度位置检测 4 轧制力检测

Fig.2.3 Gauge control system of gauge meter type

1 Screw down 2 Arithmetic computation 3 Gauge position detect 4 Roll force detect

厚度计式 AGC 的工作方式有两种，即相对值 AGC 和绝对值 AGC 方式。

相对值 AGC 方式，也叫作头部锁定 AGC，它是实现同板差控制的有效方法。这种 AGC 控制是基于头部轧制力、辊缝设定锁定值，将轧机弹性刚度和轧件塑性刚度线性化，并考虑变刚度系统压下效率补偿因子来消除来料厚度波动、水印等因素的影响。在相对 AGC 模式下，不论板坯头部厚度是否符合目标值，厚度控制系统以头部的实际厚度为标准，作为给定厚度，带钢上的各点的厚度向此看齐，这样有利于得到均匀的带钢，确保同板差，但此带钢的厚度不一定符合所要求的设定值^[18]。

因为钢板沿长度方向厚度的均匀性比板厚的绝对值显得更重要。所以相对 AGC 是普遍采用的控制方式，随着对中厚板精度要求的提高以及为适应负公差轧制工艺的要求，中厚板的绝对厚度也受到很大的重视和发展，绝对值 AGC 方式，是实现绝对目标厚度命中的有效方法^[18]。绝对 AGC 以目标厚度（成品厚度）为基准，当轧件轧出后，以实测的轧制力 P 和实测的辊缝 S 计算出来的实际厚度，与

目标厚度相比较，然后消除厚度偏差。但这种模式如果由于空载辊缝设置不当，会造成系统负荷过大，同时亦将把带钢调成楔形厚差，反而不利于带钢质量。绝对值 AGC 的精度取决于精确的轧机弹跳方程和对轧件宽度、轧辊热膨胀与磨损、轴承油膜厚度、轧辊偏心等对辊缝影响因素的补偿。同时，轧制力预报模型精度仍然十分重要。根据每一轧制道次预报轧制力与实际轧制力的偏差，进行轧制力预报模型参数的在线智能修正，使最后道次 AGC 投入时有较好的轧制力预报精度。在该方式控制时，每个轧制道次的板厚设定值是通过上位机的预测轧制力计算出来的。

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^{[19][20]}。在中厚板轧制中，厚度偏差在前几道次主要来自于水印的影响，此时是 AGC 消除同板差的最好时机，采用相对 AGC 以获得比较准确的厚度信息。到后几道次，随着钢板的散热，温度逐渐趋于一致，适于控制异板差。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，选择绝对 AGC 还是相对 AGC。绝对 AGC 和相对 AGC 系统控制原理图如图 2.4 所示。这种将二者有机地结合的方法避免了由于空载辊缝设置不当而造成的压下系统过负荷的发生，同时避免了把钢板调成楔形厚差，有利于钢板板形质量的提高^[21]。

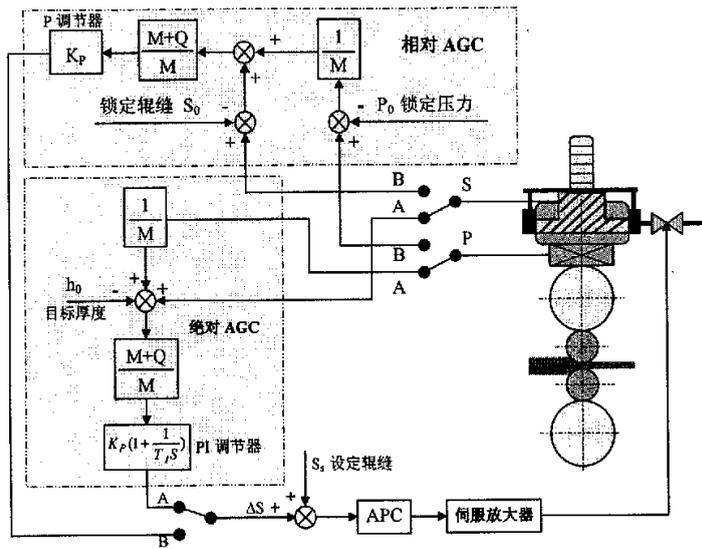


图 2.4 绝对 AGC 和相对 AGC 系统控制原理图

Fig.2.4 System control principle diagram of absolute and relative AGC

第三章 四辊轧机自动化系统方案的确定

3.1 产品规格及轧机设备参数

3.1.1 原料和产品规格

原料规格:

厚度: 150、180、220、250mm 宽度: 1200、1400、1600、1800mm

长度: 1800~3000mm 最大单重: 11.6 吨

产品规格:

钢板厚度: 6~50mm 钢板宽度: 1500~3200mm

钢板长度: Max 36000mm 成品板单重: Max 10.6 吨

生产规模: 60 万吨/年

改造后产品大纲见表 3.1

表 3.1 产品大纲及产品规格

Table 3.1 Product mix and product specification

序号	产品品种	代表钢种	产品规格
1	造船用钢板	A,B,D,AH32,AH36, DH32,DH36	8~40×1500~3200×25000~36000
2	管线用钢板	X60,X65,X70	8~25×1500~3200×25000~36000
3	汽车大梁板	09SiVL,16MnL, 16MnREL	8~12×1500~3200×25000~36000
4	桥梁板	16q,Q235q,16Mnq, 15MnVq	8~40×1500~3200×25000~36000
5	锅炉板	16Mng,22g,20g, 15MnVg	8~40×1500~3200×25000~36000
6	压力容器板	16MnR,15MnVR,20R	8~40×1500~3200×25000~36000
7	机械工程用板	KQ450,HJ58	8~40×1500~3200×25000~36000
8	Z 向板	Z15,Z25	8~40×1500~3200×25000~36000
9	普碳钢板	Q235A,Q235B,Q235C, Q235D	6~50×1500~3200×25000~36000
10	低合金钢板	Q345A,Q345B,Q345C, Q345D,Q345E,Q390A, Q390B,Q390C,Q390D, Q390E	6~50×1500~3200×25000~36000

3.1.2 四辊轧机设备参数

为提高轧机能力,新上的四辊轧机性能较旧轧机得到明显提高,具体参见表 3.2。

表 3.2 新旧四辊轧机设备参数

Table 3.2 The equipment parameters of new four-high mill and the old mill

名称	旧四辊轧机	新四辊轧机
工作辊尺寸(mm)	Φ886~920×3342	Φ950~Φ1050×3500
支撑辊尺寸(mm)	Φ1371~1307×3251	Φ1900~Φ2100×3300
最大轧制力(kN)	34000	70000
工作辊最大开口度(mm)	304.8(新辊时)	330(新辊时)
机架刚度(kN/mm)	5000	10000
机架断面(mm ²)	665321	997500
轧制速度(m/s)	0~3.84	0~6.6
最大轧制长度(mm)	26000	36000
主传动电机	DC 2574kW×2, 0/35/80rpm	AC 7000kW×2, 0/50/120rpm
压下电机	DC 2×75kW, 0~35mm/s	DC 2×450kW, 0~35mm/s
除磷压力(Mpa)	12	18

3.2 设备选型及系统设计的改进

为了使改造后的系统运行更加稳定,针对旧轧机系统存在的问题,主要对以下几个方面进行了改进。

- (1) 利用现有激光测宽仪,不再新上测宽设备。安装位置从原四辊轧机前移至层流冷却出口,来料厚度利用新上的推床系统测量。
- (2) 测压头仍选用瑞典 ABB,量程由 18MN 变为 35MN。安装于轧机底平台上匹配单元箱采用双层防护,以隔热隔水。
- (3) 液压缸位移传感器用数字式 SONY 磁尺代替模拟式的 LVDT,避免了零漂和定期标定,同时提高测量精度和运行的稳定性。磁尺安装在液压缸中部,磁尺引出线采用插头连接,利于检修和维护。此外,在液压缸两侧增加 MTS,当 SONY 磁尺故障时作为备用。
- (4) 测量压下丝杠位置的 MTS 顶帽传感器量程考虑到最小辊径情况,留足裕量。其安装方式要考虑拆卸方便,引出线采用插头连接。为加强防护,引出线穿高压软管连接到端子箱。
- (5) 在轧机后增加一台美国 THI 公司的 X 射线测厚仪(C 型架可移动),以提高 AGC 控制精度。
- (6) 为得到更精确的温度, LAND 红外测温仪安装距离和角度要满足规定要求,同时加强防护和冷却。
- (7) 系统软件设计时考虑负载辊缝从最大到最小的压力变化对 AGC 系统的影响。在自动轧机调零时,同时将压头清零,防止压头的零漂过大。

- (8) 轧机牌坊上的信号电缆全部采用屏蔽、耐高温的阻燃电缆，线径在 1.0mm^2 以上，并做好充分防护，防止电缆的高温绝缘老化。
- (9) 液压系统所有阀件及关键接头采用进口件，保证无泄漏，且回油管路采取有效减震措施。液压缸采用活塞缸，并增加机械限位后备保护。液压缸与伺服阀之间的高压软管弯曲半径适度，避免因高压油的猛烈冲击造成高压软管的断裂。
- (10) 系统最终要实现在轧区内全自动轧钢。自动化系统采用二级计算机网络，过程控制级和基础自动化级，具有与加热炉区、矫直及精整区自动化系统联接的硬件和软件接口，能够与全厂生产管理计算机网联接。

3.3 液压 AGC 系统主要参数及产品控制指标

3.3.1 液压 AGC 系统主要参数

- (1) 额定轧制力 70000kN，最大轧制力 74000kN，系统供油压力 30Mpa；
- (2) 液压缸：活塞直径 1450mm，活塞杆直径 1350mm，行程 50mm；
- (3) 液压力下速度：29mm/s（带载），系统频响 $\geq 18\text{Hz}$ ；
- (4) 伺服阀：4 台，MOOG 三级阀，公称流量 786.5L/min。

3.3.2 产品控制指标

采用电液 APC 和液压 AGC，最终控制指标为：

- | | |
|-------------|--------------------------------|
| (1) 同板差 | |
| 6~10mm | $\sigma \leq 0.08\text{mm}$ |
| 10~20mm | $\sigma \leq 0.10\text{mm}$ |
| 20~30mm | $\sigma \leq 0.12\text{mm}$ |
| 30~50mm | $\sigma \leq 0.15\text{mm}$ |
| (2) 异板差 | |
| 6~10mm | $\sigma \leq 0.10\text{mm}$ |
| 10~20mm | $\sigma \leq 0.12\text{mm}$ |
| 20~30mm | $\sigma \leq 0.15\text{mm}$ |
| 30~50mm | $\sigma \leq 0.18\text{mm}$ |
| (3) 镰刀弯： | $\leq 5\text{mm}/10\text{m}$ |
| (4) 宽度偏差： | $\leq 15\text{mm}/10\text{m}$ |
| (5) 板凸度： | $\leq 0.15\text{mm}$ |
| (6) 终轧温度偏差： | $\sigma \leq 20^\circ\text{C}$ |
| (7) 系统投入率： | $\geq 99.9\%$ |

通过 Profibus DP 网与各自的传动设备以及 ET200 远程 I/O 相连。

本系统采用了 2 台 COMPAQ 服务器, 控轧控冷各用 1 台, 镜像磁盘阵列为 3*40GB; 过程计算机与基础自动化设备 (SIMADYN D 和 S7_400 PLC) 通过工业以太网相连, 同时连接有 6 台终端, 分别安装在加热炉上料操作台 1 台、加热炉出炉操作台 1 台、轧机操作台 4 台, 用于过程监视和控制。轧机 AGC 过程机系统的主要功能是轧件跟踪、轧制规程的设定计算和轧制规程设定模型的优化, 以及自适应。控制冷却过程机系统的主要功能是冷却方式的确定、阀门开闭的数量和分布以及控制冷却模型的优化和自适应。所有系统的操作员和监控界面均为西门子 WINCC。

从图 3.1 可以看出, 本系统核心环节是轧机基础自动化 SIMADYN D 控制器。SIMADYN D 西门子开发的全数字、多 CPU 控制系统, 它具有模块化硬件, 能够自由配置和简便扩展。在机架中可插装最多 8 块 32 位或 64 位 RISC CPU 模块^[22], 采样时间最快 0.1ms, 并有 5 种可选择的工作周期, 因此 SIMADYN D 特别适用于需要完成大量运算的自动控制系统, 有近 250 个高效的功能块^[23]。通讯可采用 PROFIBUS、MPI、SIMOLINK 及以太网等多种通讯方式^[24]。编程是在 Windows 环境下, 使用 SIMATIC 系统的工具软件 STEP7 和 CFC 及 D7-SYS 工具软件来实现^{[25][26]}。

SIMADYN D 除完成液压 AGC、控制轧制, 还要完成自动轧钢等逻辑、顺序控制, 集中了主轧区的检测仪表信号, 并和各设备都有联锁和通讯。在这个系统中, SIMADYN D 与各设备通信接口如下:

以太网: SIMADYN D (CSH11) <=>L2 级服务器 VC⁺⁺ (CP1613)
SIMADYN D (CSH11) <=>人机界面 WINCC (CP1613)
SIMADYN D (CSH11) <=>控冷 S7_400 (CP443-1)
DP 网: SIMADYN D (SS52) <=>主传动 SIMADYN D (SS52)
SIMADYN D (SS52) <=>液压系统 S7_200 (EM277)
SIMADYN D (SS52) <=>远程 ET200 (IM153-2)
SIMADYN D (SS52) <=>辊道传动装置 (CBP2、CB24)
SIMADYN D (SS52) <=>耦合器 (DP/DP Coupler)

控制冷却区基础自动化 S7-400PLC 的主要功能为水流量控制和辊道速度控制。

3.5 轧线仪表配置

根据产品大纲和工艺控制要求, 图 3.2 给出了整个主轧区轧线仪表配置, 主轧区仪表范围是从一次除鳞机入口到层流冷却区出口, 总长约 150m。设备

主要包括一次除鳞机、四辊轧机及其附属设备、层流冷却设备以及各区域辊道和相关检测设备（红外测温仪、热金属检测器等）。辊道按工艺又定义为除鳞辊道、待温辊道、轧机前后辊道、轧机输入输出辊道和层流冷却辊道。其中轧机前后辊道和输入输出辊道，即以轧机中心线为中心，轧机前 16950mm 区域和轧机后 15780mm 区域，在轧制中永远随主机同步运行。四段待温辊道（待温 1[#]~4[#]）按照规程要求，可分别进行手动或自动待温，相应辊道来回低速摆动。待温辊道与其他辊道之间分别用两个热金属检测器（热检）分开，间隔约 2000mm，在每个待温辊道中间又分别安装一台红外测温仪。

整个轧线布置了 13 个点式热检和 3 个扫描式热检、6 个点式红外测温仪和 1 个扫描式红外测温仪、1 台移出式 X 式测温仪和 1 台激光测宽仪（利旧）。表 3.3 列出了轧线主要检测仪表选型。以下将对各个区域的仪表配置和功能进行详细阐述。

表 3.3 轧线主要检测仪表选型
Table 3.3 The selected type of detect instruments

序号	仪表名称	产地	型号	数量
1	点式红外测温仪	英国 LAND	LAND M11SV1, 600/1600°C	6
2	扫描式红外测温仪	英国 LAND	LAND LS214, 300/900°C	1
3	点式热金属检测器	—	HMD-4ZC 1	13
4	扫描热金属检测器	—	MH-54-DC24V, 700/1500°C	3
5	X 射线测厚仪	美国 EMI	EMI PERFECTA-9600	1
6	四辊轧机压头	瑞典 ABB	PFVL 101C-35MN	2
7	顶帽传感器	美国 MTS	RH M 0500M P15 1 S2B6100	2
8	油压传感器	美国 LUCAS	SCHAEVITZ PS 10081 0002 350 B SG	2
9	液压缸位移传感器	日本 SONY	磁尺 MSS-976R-60, 60mm SONY 磁尺	2

3.5.1 待温区仪表布置

由于控轧工艺待温辊道摆动的需要，除鳞箱后 24650 mm (800+6000+6004+1900+5000+4946) 及控冷区前 24400 mm (2200+10000+2000+10200) 范围内的待温辊道，其辊道线速度要求能够达到 0.3m/s。

待温辊道摆动工作制度如图 3.3 所示：运行时间最短 4 秒，降速停车时间 1.5 秒，停 3 秒，启动升速时间 1.5 秒，反向运行时间最短 4 秒，以此类推。这样做的目的是保证辊道圆周方向均匀受热，避免受热不均引起辊道弯曲变形。

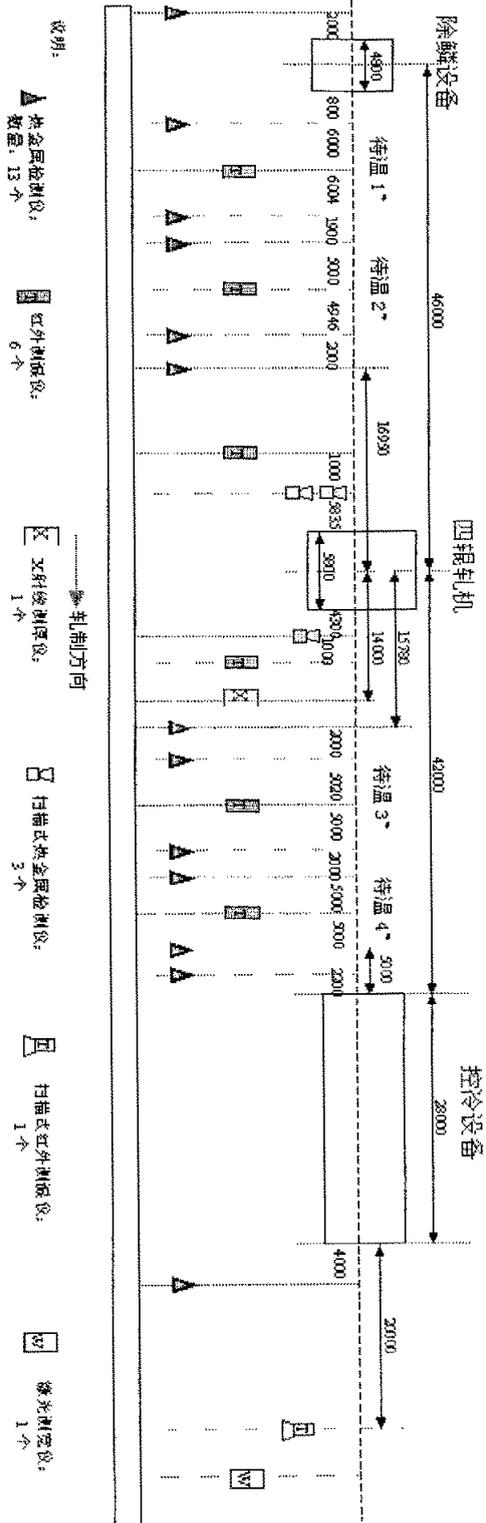


图 3.2 轧线仪表布置图
Fig. 3.2 Instrument layout of rolling line

待温区仪表布置参见图 3.2 所示, 每组待温区设置入口和出口热金属检测仪一台, 作为待温钢坯摆动的界限; 中间设置红外测温仪一台, 用于监测待温钢坯的温度; 2 号待温区后 2000mm 处和 3 号待温区前 2000mm 处各设置热金属检测仪一台, 以防止待温钢坯和正在轧制的钢坯之间的碰撞。两相邻待温区之间留有 2000mm 的中间区, 作为待温钢坯的停车区, 防止两待温钢坯之间的碰撞。

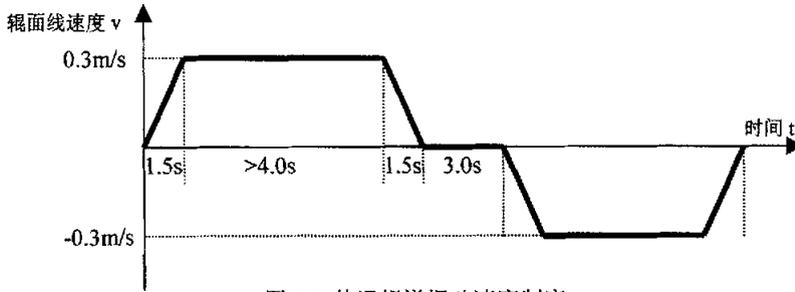


图 3.3 待温辊道摆动速度制度
Fig.3.3 The oscillation speed of delay roller table

根据轧机与辊道线速度同步的原则, 已知最高轧制速度 6.6m/s, 成品最长 36 米, 考虑抛钢距离 3 米, 故以轧机中心线为准, 前后各 39 米范围内的辊道线速度要求能够达到 6.6m/s。

3.5.2 高压水除鳞前后仪表布置

在高压水除鳞箱前 2000mm、后 800mm 处, 各设置一台热金属检测仪, 用于进行高压水除鳞的启动和停止控制, 后者同时作为 1 号待温辊道的界限。

3.5.3 控冷设备前后仪表布置

在控冷设备前 5000mm、后 4000m 处, 各设置一台热金属检测仪, 作为控冷设备入口和出口的界限。控冷设备后 20000mm 处设置一台扫描式热金属检测仪, 用于成品钢板宽度方向表面温度的检测和记录。3 号待温区和 4 号待温区中的红外测温仪, 同时向控冷系统提供所需要的钢板温度检测信号。3 号待温区和 4 号待温区中的热金属检测仪, 同时向控冷系统提供钢板头部位置跟踪信号。

3.5.4 轧机前后仪表布置

以轧机中心线为准, 轧机前 6835mm、后 5300mm 处各设置一台红外测温仪, 用于检测在轧钢坯的表面温度, 作为下一道次规程设定动态修正的依据。在轧机前 5835mm 处设置两台扫描式热金属检测仪, 安装角度分别与轧制方向相同和垂直, 用于钢坯尾部抛钢距离的检测、控制和实现自动转钢; 在轧机后 4300mm 处, 设置一台扫描式热金属检测仪, 用于钢坯尾部抛钢距离的检测、控制。

对于来料钢坯，1号和2号待温区中的红外测温仪测量的钢坯温度信号，用于轧制规程的计算。

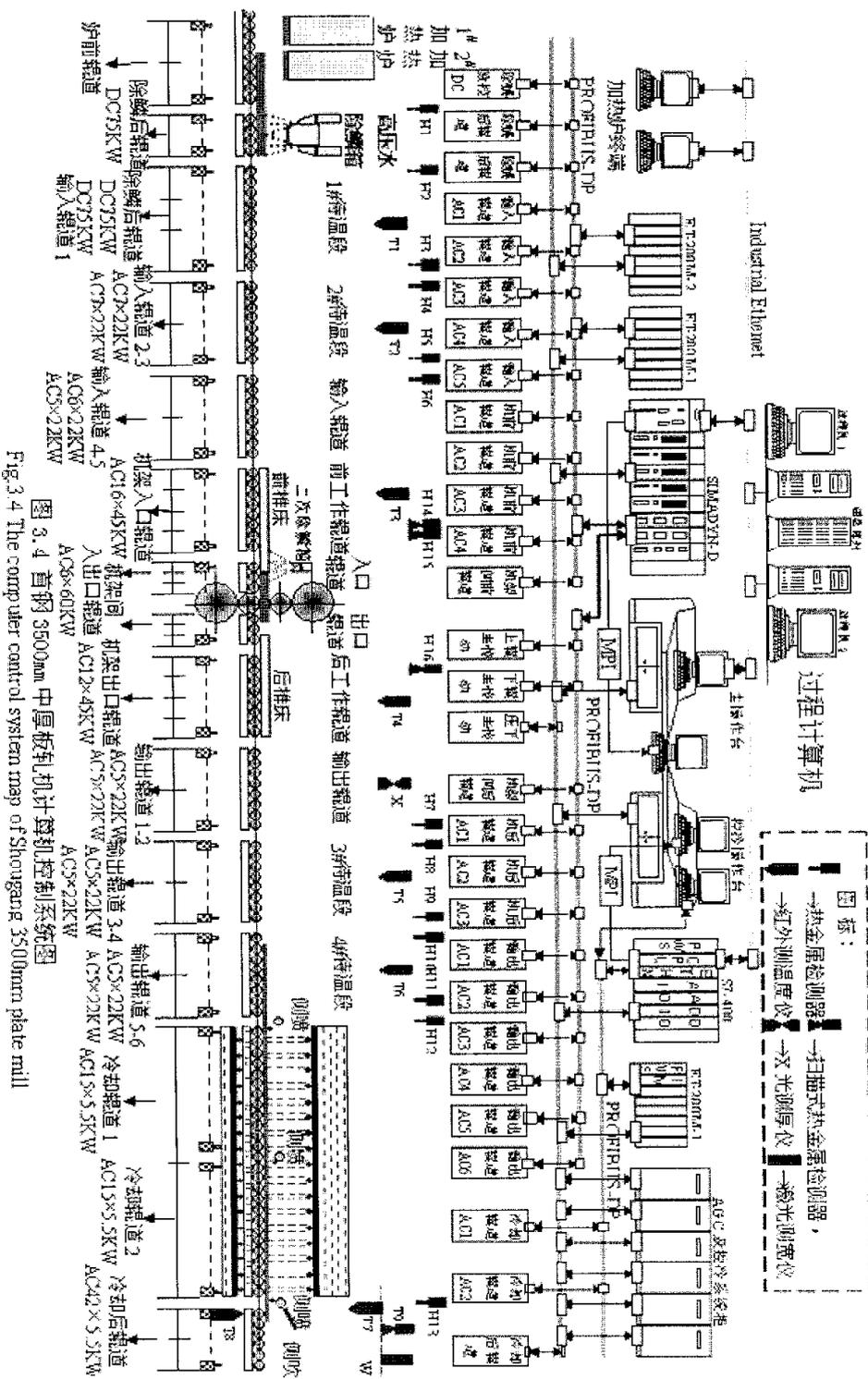
3.5.5 宽度和厚度检测仪表布置

在轧机后 14000mm 处设置 X 射线测厚仪，用于成品钢板以及较长钢坯中间轧制道次厚度的检测。

在控冷设备后某处设置测宽仪，用于成品钢板宽度的检测；使用轧机前后安装在液压推床上 MTS 线性位移传感器测量来料钢坯和中间轧制道次钢坯宽度的检测。

3.6 中厚板轧机计算机控制系统结构

图 3.2 主要给出了轧线仪表的配置详细情况，图 3.4 给出了中厚板轧机的计算机控制系统结构，包含网络信息、仪表配置、辊道定义及电机容量等详细信息。其中，待温 1 辊道包括 DC1、DC2 和 AC1，共 17 根辊道；待温 2 辊道包括 AC2 和 AC3，共 14 根辊道；输入辊道为 AC4+AC5，共 11 根辊道；前工作辊道为 AC1~4，共 11 根锥形辊道，当转钢时前工作的 AC1 与 AC3 组成一组，AC2 与 AC4 组成另一组，两组转向相反，形成力偶，从而实现转钢。轧机后的辊道分别与轧机前的辊道相对应，但机后辊道为平辊，不具备转钢功能。直流辊道的传动装置为西门子 6RA24，交流辊道传动装置为西门子 6SE70。



第四章 四辊轧机的垂直和水平控制

在第3章中主要论述了系统改造方案的确定、网络通讯配置、计算机系统结构以及轧线主要仪表和功能，目的是从总体上把握整个计算机系统的硬件配置，以便更好的理解本章中垂直方向控制以及与其协调的水平方向的控制。垂直方向上设备主要包括电动压下（压下电机）、液压压下（AGC 液压缸），水平方向上设备主要包括轧机主传动、轧机前后辊道、高压水除鳞机、推床等。本章将重点论述3500 轧机垂直控制原理，由于在轧钢中，轧线水平方向的设备与生产节奏联系紧密，它们根据轧制规程和过程跟踪，和垂直方向的辊缝调整进行联锁和协调动作，因此本章对这部分内容也进行了阐述。

4.1 轧钢方式定义

为操作灵活，适应调试和生产需要，系统共定义了五种轧钢方式：手动、半自动、自动、全自动和检修。

(1) 手动轧钢

手动方式下，液压系统工作方式又分为两种：一是液压系统不投入，液压缸落到底。这时由操作工控制电动压下进行轧钢，电动 APC 闭环不投入，AGC 不工作。在轧制过程中，过程机对辊缝设定值、轧制力、来料温度、轧制过程的出入口温度、轧制速度、轧制电流等进行采集，并对轧制过程进行跟踪。轧制完一个道次后，过程机记录本道次的设定数据和实测数据。在人机界面上，不显示与轧制道次相关的预设定数据，但显示轧制道次、实测轧制力、实际辊缝值等数据。另一种是液压系统投入，液压缸定位于中间位置。这种方式有利于保护液压缸，同时也防止了卡钢现象的发生，为手动轧钢时优选方式。

(2) 半自动轧钢

半自动下，液压系统必须正常投入。在操作工确认道次切换后，按设定的轧制规程自动摆辊缝，轧制过程中，允许操作工对未轧道次的辊缝设定进行调整和修正。主轧机由操作工手动控制运行。在人机界面上，显示各道次预设定数据和实际过程数据。

(3) 自动轧钢

同半自动一样，在自动下，液压系统也必须正常投入。在操作工确认道次切换后，按过程机设定的轧制规程自动摆辊缝，操作工控制主轧机的运行，允许操作工对辊缝进行微调。过程机从 SIMADYN D 中读取实测数据用于动态计算。在人机界面上，显示各道次预设定数据和实际过程数据。

(4) 全自动轧钢

全自动下，液压系统必须正常投入。按过程机设定的轧制规程自动摆辊缝，轧机运行由计算机根据轧件跟踪情况控制，操作工只允许进行辊缝微调。过程机从 SIMADYN D 中读取实测数据用于动态计算。在人机界面上，显示各道次预设数据 and 实际过程数据。

(5) 检修方式

在检修方式下，系统封锁轧线上设备（辊道、推床、除鳞机等），以保证人身安全。这时可进行换辊、轧机调零和刚度测试等操作，过程机记录相关的数据。但在检修未结束时，操作工通过在人机界面上单独激活轧线上已检修完毕的设备，然后可以操作台上手动控制相关的激活设备，达到分体试车，缩短恢复生产的时间。

4.2 轧机垂直方向上的自动控制

4.2.1 计算机系统功能分配和基础自动化系统配置

轧机控制基础自动化系统配置如图 4.1 所示，控制器采用西门子 SIMADYN D，系统硬件主要包含一个 24 槽机箱、4 块 PM5 CPU 板（采样时间可达 1ms）、4 块 IT41 扩展板（每块可连接 4AI/4AO,16DI/16DO 板）、1 块 CPU 之间通讯 MM4 内存缓冲板、1 块以太网通讯板 CSH11（与 L2 级服务器、操作终端、PLC 通讯）、1 块 PROFIBUS DP 通讯板 CS7（与传动、PLC、ET200M 等通讯），SIMADYN D 具体配置参见表 4.1。

表 4.1 SIMADYN D 系统主要硬件配置

Table 4.1 The main hardware configuration of SIMADYN D system

序号	名称	型号/规格	数量
1	机箱	SR24.3/24 槽机架, 230VAC, 附风扇	1
2	CPU	PM5/32 位 CPU, 带 2 个绝对值编码器	4
3	扩展板	IT41:4AI/4AO,16DI/16DO, 带 4 个增量编码器	4
4	存储卡	MS52 8M 存储卡	4
5	通讯缓冲板	MM4 通讯缓冲器内存板 2M	1
6	讯适配板	CS7 通讯适配板	1
7	USS/DUST 通讯板	SS4 USS/DUST 通讯板	1
8	ROFIBUS 通讯板	SS52 PROFIBUS-DP/MPI 通讯板	2
9	以太网通讯板	CSH11 工业以太网通讯板	1

SIMADYN-D 的 4 个 PM5 CPU 主要功能分配如下：

PM5 CPU 1:

- (1) 过程变量输入与标定
- (2) 液压位置 (HAPC) 自动控制

PM5-CPU 2:

- (1) 过程变量输入与标定
- (2) 液压 AGC 控制
- (3) 电动压下位置手动控制
- (4) 电动位置 (EAPC) 控制
- (5) 自动摆辊缝控制
- (6) AGC 控制补偿

PM5 CPU 3:

- (1) 过程变量输入与标定
- (2) 主传动、辊道传动控制
- (3) 轧机刚度测试
- (4) 轧机调零

PM5 CPU 4:

- (1) 过程变量输入与标定
- (2) 辅助设备控制
- (3) 故障诊断、响应与报警
- (4) 数据通信与变量指示

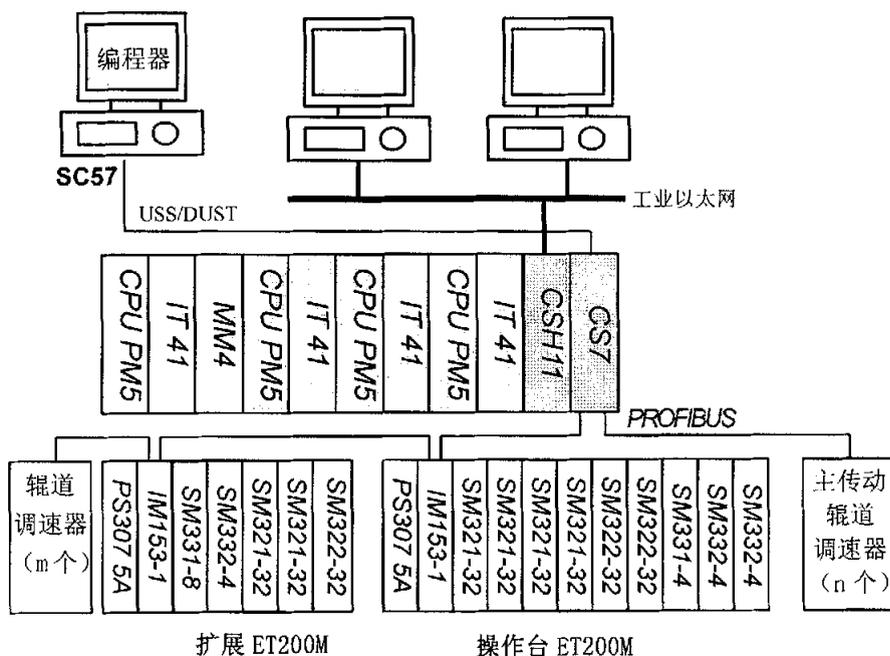


图 4.1 基础自动化系统配置
Fig. 4.1 The configuration of basic automation system

4.2.2 轧机压下控制系统概述

轧机压下控制系统的功能是在指定时刻,通过电动压下和液压压下将辊缝调节到给定的目标值上,使调节后的辊缝与目标值之差保持在允许的误差范围内。压下控制系统要完成两项工作,首先完成咬钢以前的预摆辊缝,另外,还要在轧制过程中以 AGC 的调整值为参照高速完成辊缝的动态调整。压下控制系统在 AGC 系统中的作用是最基础的。压下控制系统的定位精度及响应速度等指标直接影响整个控制系统的性能^[27]。

轧机压下系统包括电动 APC、液压 APC 两套 APC 系统。电动 APC 系统是由压下电机带动压下丝杠旋转来完成辊缝的定位,它的特点是有效行程长,但响应速度慢、定位精度较低、且无法在高载荷的情况下工作。而液压 APC 系统是由液压缸作为执行机构,定位精度高,响应速度快,能在高载荷的情况下正常工作,但它的行程短。

中厚板轧制的特点决定它不仅需要响应速度快、定位精度高的液压 APC,也不能缺少长行程的电动 APC。

根据以上分析,本套轧机的压下控制系统同时采用了电动 APC 和液压 APC。它有三种工作方式。第一种是电动/液压联合摆辊缝,在预摆辊缝时,当实际辊缝与预设辊缝相差较大时 ($\geq 5000\mu\text{m}$),调用电动 APC,在调整过程中,如果当实际辊缝与目标值相差小于 $500\mu\text{m}$,电动 APC 停止动作,由液压 APC 完成辊缝的精确;第二种是液压摆辊缝,用在两种情况下:一是轧制过程中的 AGC 动态微调,另一种情况是在预摆辊缝时,当实际辊缝与预设辊缝相差较小时 ($\leq 5000\mu\text{m}$),则直接调用液压 APC 完成预摆辊缝。第三种方式是电动摆辊缝,它只在液压系统出现故障时被采用。图 4.2 中明确地说明了这三种工作方式之间的关系。

4.2.3 电液联合摆辊缝和逻辑控制

液压 APC 具有压下速度快(约比电动 APC 快 5~10 倍,加速度快 20~100 倍),定位精度高等特点^[28]。正常情况下中,应设定轧机辊缝,使液压缸处于工作行程的中间点,以确保轧制中辊缝所有变化都可被用液压缸调整。各道次辊缝设定由液压缸或由液压缸和压下丝杠共同完成。当液压缸动作位移在其行程限制范围内时,辊缝设定由液压缸单独完成,当动作位移超出行程限制范围时,由液压缸和电动压下联合完成辊缝的设置(电液联合摆辊缝)。

电液联合摆辊缝要使液压缸处于其工作行程的中间点。因此,电液联合摆辊缝时,要使液压缸向其工作行程的中间点调整,同时压下丝杠向相反的方向运行;

当电动压下位置误差达到设定的偏差带内时停止，剩下的辊缝设定误差由液压缸补偿，使偏差减小为零。电动压下与液压压下相关规定参见表 4.2。

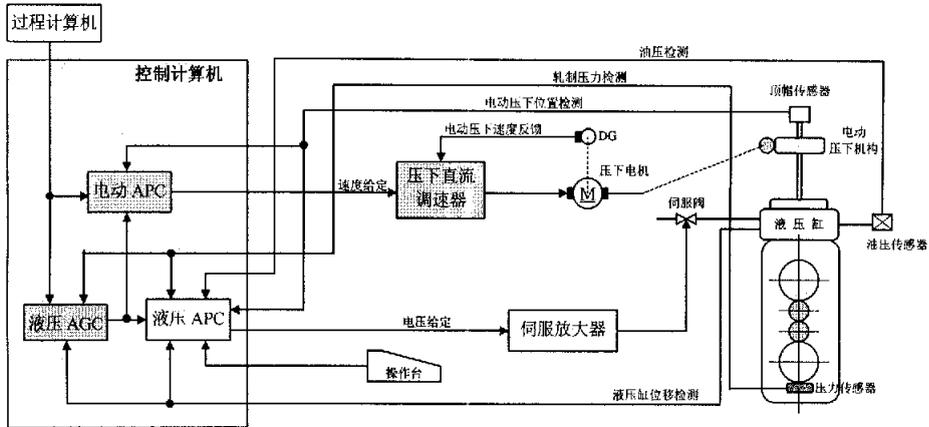


图 4.2 AGC 与 APC 系统构成

Fig. 4.2 The system constitution of AGC and APC

按照表 4.2 的约定，辊缝和位置的计算关系如下：

实际辊缝=电动实际位置－电动清零位置+液压清零位置－液压实际位置

设定辊缝=电动设定位置－电动清零位置+液压清零位置－液压设定位置

液压预置位置=电动实际位置－电动清零位置+液压清零位置（调零时位置）

－设定辊缝

液压设定位置=规程初始辊缝对应的液压位置+手动液压辊缝修正值－手动倾斜值

液压实际位置=液压预置位置+手动控制液压辊缝修正（包括倾斜值）

表 4.2 电动压下和液压压下有关约定

Table 4.2 Some regulations of mechanical and hydraulic screw down

压下类型	操作状态	传感器读数	辊缝变化	压力变化	补充说明
电动	抬起	增加	增大	—	位置设定值大于实际值，需抬起，速度给定为正值
电动	压下	减少	减小	—	位置设定值小于实际值，需压下，速度给定为负值
液压	出油	增加	增大	减小	位置设定值大于实际值时，位置读数需增大，伺服阀负向电流，负向开口
液压	进油	减少	减小	增大	位置设定值小于实际值时，位置读数需减少，伺服阀正向电流，正向开口

如果液压预置位置在上下限内，则

液压设定位置 = - 设定辊缝 + 电动实际位置 - 电动清零位置 + 液压清零位置。

(电动位置不变)

如果液压预置位置高于上限或低于低限，液压预置位置置于 0，

电动预置位置 = 设定辊缝 + 电动清零位置 - 液压清零位置。

电动压下完成后，

液压设定位置 = - 设定辊缝 + 电动实际位置 - 电动清零位置 + 液压清零位置。

当液压实际位置与设定位置偏差在允许范围内，液压调节停止，即完成辊缝设定过程。

在轧制过程中，启动动态辊缝设定并进行 AGC 控制，以使厚度偏差为零。

4.2.4 液压位置闭环控制

液压位置自动控制 HAPC (Hydraulic Automatic Position Control)，作为 AGC 控制的执行内环对 AGC 的性能有决定性的作用。HAPC 是液压压下系统工作在最底层的基本环节。控制系统对两液压缸（操作侧和传动侧）实际位置和给定值不断进行检测，利用二者之差通过调节器环节来控制伺服阀的流量，从而控制了液压缸的位置。它的定位精度主要取决于位置传感器的精度。HAPC 的功能是独立地控制每个液压缸在所期望的位置或压力上。HAPC 的控制原理可以抽象成图 4.3。图中 $K_{(p)}$ 为调节器控制参数， K_p 为伺服阀变增益系数（具体说明参见“伺服阀流量控制”）。

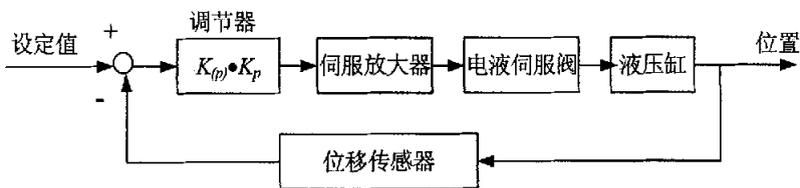


图 4.3 HAPC 结构框图

Fig.4.3 The structure diagram of HAPC

(1) 伺服阀流量控制

本套轧机在每个液压缸无杆腔上分别安装了一个油压传感器，这不仅可以监视油压变化情况，也可在压头有问题时，用它来提供轧制力的反馈信号。更重要的一点是，它可以被用来校正由压力信号引起的系统放大倍数的非线性^[31]，具体分析如下。

通过伺服阀阀口的油流量（活塞移动速度）不仅与伺服阀开口度有关，还与阀口压力差有关：

$$Q_L = K \times I \times \sqrt{\Delta P} = \frac{I}{I_N} Q_N \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta P_N}} \quad (4.1)$$

式中： Q_L —控制流量（负载流量）
 K —阀系数
 I —输入电流
 I_N —伺服阀额定电流
 Q_N —负载额定流量
 ΔP —伺服阀实际压力降
 ΔP_N —伺服阀额定压力降

从上式可以看出，伺服阀的控制流量不仅仅由给定电流来控制，还要受阀口的压力差的影响，即控制对象具有变增益特性，不利于整定参数，很难用计算机来对其进行精确控制。为此，加入非线性补偿环节，以改善系统性能。图 4.3 中的伺服阀变增益系数 K_p 就是为了解决这个问题。

(2) 操作侧、传动侧位置闭环控制

液压缸进油时，缸内压力增大，实际辊缝减少，位置读数增大。

液压缸出油时，缸内压力减小，实际辊缝增大，位置读数减小。

当设定位置大于反馈位置时，位置读数需要增大，需进油，伺服阀正向电流正向开口，实际辊缝减小。

当设定位置小于反馈位置时，位置读数需要减小，需出油，伺服阀负向电流负向开口，实际辊缝增大。

本次采用的的伺服阀为 MOOG 公司 79F2012B3-HR5 型伺服阀，其中： $Q_N=786.5\text{L/min}$ ， $\Delta P_N=7\text{Mpa}$ 。由于实际系统是将四通伺服阀的一个负载口堵住变成三通阀，故液压缸正负行程时，伺服阀的流量不对称^[29]。流量非线性补偿分上下运动两种情形，设 P_{sys} 为油源压力， P_{cyl} 为液压缸内油压，则当：

实际位移<基准位移，液压缸进油，柱塞下行： $\Delta P = P_{\text{sys}} - P_{\text{cyl}}$

实际位移>基准位移，液压缸出油，柱塞上行： $\Delta P = P_{\text{cyl}}$

实际使用时，作如下整定，变增益系数 K_p 由下式表示：

$$K_p = \sqrt{\frac{\Delta P_N}{\Delta P}} \quad (4.2)$$

这样在控制时乘以一个变增益系数后，伺服阀流量公式可写成：

$$Q_L = K \times K_p \times I \times \sqrt{\Delta P} = \frac{I}{I_N} Q_N \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta P_N}} \times \sqrt{\frac{\Delta P_N}{\Delta P}} = \frac{I}{I_N} Q_N \quad (4.3)$$

这样伺服阀的流量便与伺服阀电流成线性关系，从而可用程序对其进行精确的

控制。为保证计算 K_p 时 ΔP 太小或驱于 0 导致 K_p 过大，在计算过程中，当 $\Delta P < 100$ 时令 $\Delta P = C$ (C 为常数，调试时确定)。

(3) 双侧位置同步控制

位移基准差 = OS 基准位移 - DS 基准位移；

实际位移差 = OS 实际位移 - DS 实际位移；

在计算 PI 调节器比例增益 $K_{balance_pid}$ 时，采用操作侧或传动侧的液压缸增益系数 K_p ，系数 $K_{balance_ratio}$ 可以人为改变。

$$K_{balance_pid} = K_{balance_ratio} \cdot K_p \quad (4.4)$$

调用 PI 控制子程序，计算修正值，调整双侧液压压下同步。双侧压下同步的 PI 调节结果分别与操作侧和传动侧的位置闭环调节器输出结果相加，经 DA 转换后送给两侧的伺服放大器。

(4) 辊缝微调和辊缝倾斜控制

辊缝倾斜亦即辊缝纠偏，本系统采用手动和自动两种控制。手动时由操作工根据轧制情况人工调整两侧辊缝的偏差。自动时，由计算机自动控制轧制过程中产生的镰刀弯，它的基本原理是在轧制过程中，如果发生镰刀弯，则在轧机入口处轧件偏离中线，其结果是轧机两侧的轧制力产生偏差。根据这个偏差值，将轧制力大的一侧辊缝变小，这样使轧件又回到轧制中线上来。

辊缝微调和辊缝倾斜只有在操作台“辊缝微调/倾斜允许”开关有效时起作用，并且是在 AGC 投入且轧机咬钢后微调和倾斜才有效。液压位置设定值的计算方法如下：

操作侧液压位置设定值 = 规程初始辊缝对应的液压位置 + 手动液压辊缝修正值 - 手动倾斜值；

传动侧液压位置设定值 = 规程初始辊缝对应的液压位置 + 手动液压辊缝修正值 + 手动倾斜值；

在改造前，3340mm 轧机 AGC 中，只有在液压系统位置设定值不大于 10mm，且手动修正辊缝值不大于 3mm 时，才可开辊缝，油柱缩回，长度减少，辊缝增大；液压系统位置设定值不小于 -10mm，且手动修正辊缝值不小于 -3mm。才可闭辊缝，油柱伸出，长度增大，辊缝减小。其目的是：给 AGC 控制和辊缝倾斜留出足够的调节余量（旧轧机液压缸行程为 $\pm 12.5\text{mm}$ ）。

改造后，系统也应当做类似的考虑，将液压缸位置设定值得范围定为 $\pm 20\text{mm}$ ，修正值范围定为 $\pm 5\text{mm}$ ，辊缝倾斜值范围定为 2.5mm。辊缝微调设定如下：

$$\text{开辊缝: } Gap_{man_trim_ref} = Gap_{man_trim_ref} - Step_{man_gap_trim} \quad (4.5)$$

$$\text{闭辊缝: } Gap_{man_trim_ref} = Gap_{man_trim_ref} + Step_{man_gap_trim} \quad (4.6)$$

其中: $Gap_{man_trim_ref}$ —手动微调参考值

$Step_{man_gap_trim}$ —手动微调每次增加量

4.2.5 操作侧、传动侧压力闭环控制

液压压力自动控制 HAFC (Hydraulic Automatic Force Control), 一般只在调零、刚度测试等测试过程中才单独使用这种工作方式。当工作在 HAFC 方式下时, 控制器根据压头测得的轧制力信号与轧制压力给定相比较, 根据其差值来控制伺服阀的流量, 最终完成压力定位。

当轧制力基准>实际轧制力时, 压力需要增大, 液压缸需要进油, 液压缸下移, 伺服阀正向电流、正向开口, $\Delta P = P_{sys} - P_{cyl}$ 。进油时, 实际辊缝减小, 位置读数增大。

当轧制力基准<实际轧制力时, 压力需要减小, 液压缸需要出油, 液压缸上移, 伺服阀负向电流、负向开口, $\Delta P = P_{cyl}$ 。出油时, 实际辊缝增大, 位置读数减小。

压力环 PI 控制器比例增益的确定与位置闭环控制类似, 设 K_p' 为压力环增益, 那么 PI 控制器比例增益系数的确定公式即为:

$$K_{balance_pid} = K_{balance_ratio} \cdot K_p' \quad (4.7)$$

4.2.6 自动电动位置控制

自动电动压下位置控制 EAPC (Electric Automatic Position Control), 是在轧机空载状态下, 用于电动粗调辊缝。本套轧机的电动压下 APC 模型框图如图 4.4 所示。即根据压下丝杆的检测位置与设定位置相较, 利用其差值进行反馈控制。图中方框中的曲线是轧机的最佳降速曲线。

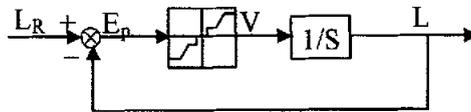


图 4.4 电动 APC 控制模型

Fig.4.4 The control model of electric mechanical APC

其中: L_R —压下位置设定值 L —实际位置值 E_p —位置偏差

V—电机速度

1/S—积分环节

(1) 自动电动压下逻辑控制

自动电动压下在半自动、自动和全自动控制方式下有效。在这三种控制方式下，程序检测当前道次的辊缝设定值，并计算当前道次的电动压下位置设定值，进行自动摆辊缝控制。

电动压下相关的逻辑控制如下：

位置报警或急停：当抬起位置大于设定的位置报警限时，激活相应的报警位（轻故障、重故障），并将报警数据送给过程机和监视系统；当压下位置到达或小于设定的报警位置时，激活相应的报警位（轻故障、重故障），并将报警数据送给过程机和监视系统；当轧机两侧顶帽位置差超过报警限时，激活顶帽位置差故障报警（轻故障、重故障）；如果位置达到急停限，则压下系统急停；

如果压下传动系统故障，激活相应的报警位并将相关信息送给过程机和操作员监视系统；

离合器和制动器控制：双侧同时压下时，离合器处于合状态，制动器打开，电动压下过程结束后制动器闭合（或者是电动压下设定速度为 0 后延时 1 秒）。

(2) 双侧自动电动位置控制

根据电动压下目标位置与实际位置的偏差，确定压下电机的给定速度，设定曲线见图 4.5。在实际控制中，计算公式和控制曲线作工程化处理：

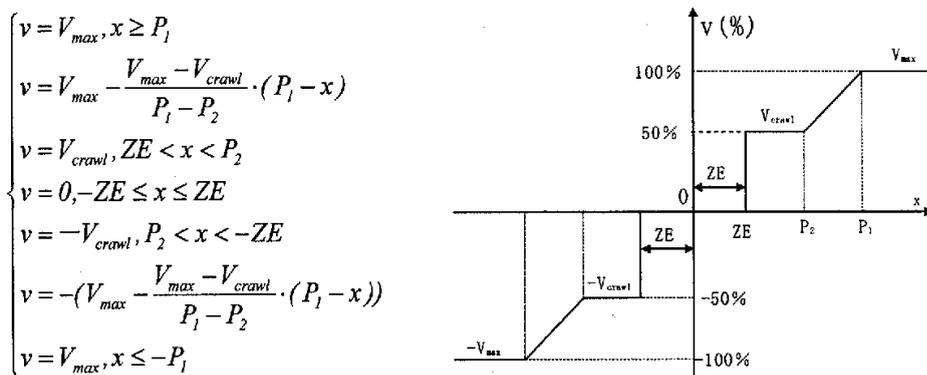


图 4.5 电动压下偏差与速度设定曲线

Fig. 4.5 The difference of mechanical screw down and speed setting curve

其中： v —压下实际速度 V_{max} —压下最大速度 V_{crawl} —压下爬行速度
 x —实际位置偏差 P_1 —位置偏差 1 P_2 —位置偏差 2
 ZE —死区

电动压下顶帽位置设定值和实际值的偏差取两侧设定位置与实际位置偏差值中的小者作为速度曲线输入，速度输出值两侧相同。速度给定为正压下，为负抬起。顶帽传感器读数在压下时读数减小，抬起时增大。

(3) 压力方式电动位置控制与限幅

压力方式电动压下位置控制用于轧机调零或刚度测试。在压下控制过程中，根据压力信号设定电动压下的速度：在轧辊没有压靠时（轧制力 ≤ 0 ），以较快的速度压下；在压靠后以较慢的速度压下，当实际轧制力 \geq 基准轧制力时，停止压下。程序流程如下图 4.6 所示。

压力方式电动压下位置控制只在调零或刚度测试时使用，而且压力基准值很小（不超过 100 吨），轧辊压靠获得稳定的压力值后，投入液压压力闭环进行调零和刚度测试。

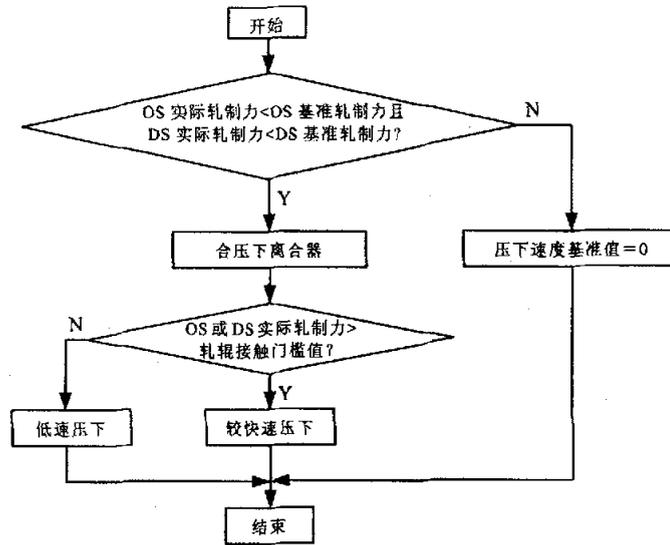


图 4.6 压力方式电动位置控制

Fig. 4.6 The position control of mechanical screw down under roll force mode

4.2.7 液压 AGC 控制

(1) 相对（锁定值）AGC

相对 AGC 锁定辊缝 S_0 和锁定压力 P_0 是轧机咬钢 Δt 时间后， n 次采样的算术平均值。不论钢板头部是否符合目标值，厚度控制系统都以头部的实际厚度为标准，作为给定厚度，钢板上的各点的厚度以锁定厚度为基准，这样有利于得到均

匀的钢板，确保同板差，防止压下较大造成板厚严重不均，给后几道次提高轧制精度造成困难。但相对 AGC 控制下轧出的钢板的厚度不一定符合所要求的目标厚度。

相对 AGC 的原理如图 4.7 所示，相对 AGC 可用如下描述：

$$\Delta h = (S - S_0) + \frac{P - P_0}{M} \tag{4.8}$$

其中： Δh —厚度偏差 S —实际辊缝 S_0 —锁定辊缝

M —为轧机刚度系数 P —实际轧制力 P_0 —锁定轧制力

$$\Delta S_{AGC} = K_p \left(\frac{Q + M}{M} \right) \cdot \Delta h \tag{4.9}$$

其中： Q —轧件塑性系数 ΔS_{AGC} —辊缝调节量 K_p —比例调节器系数

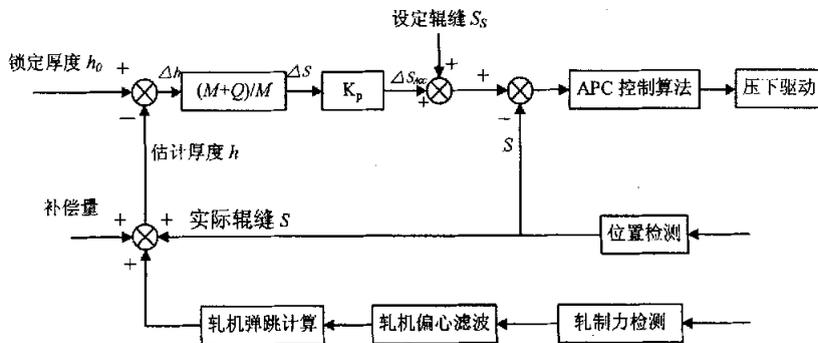


图 4.7 相对 AGC 系统方框图

Fig. 4.7 The diagram of relative AGC system

(2) 绝对值 AGC

绝对 AGC 是以厚度计模型为基础，在控制中实测出轧制力和辊缝信号，间接求出与目标厚度之差，再去改变辊缝值使出口厚度恒定。这种厚控策略是以目标厚度为基准值，而不是锁定厚度，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。这也是这种控制方式较相对 AGC 的优越之处。

设 S^* 为预设设定辊缝， h 为轧制厚度， P 为轧制力， S 为辊缝， M 为机架弹性模量， δ 为补偿项，根据 BISRA 厚度计公式 $h = S + \frac{P}{M} + \delta$ ，设目标厚度为 h^* ，由过程机计算出的预报轧制力为 P^* ， $h = S + \frac{P}{M} + \delta$ ，因为要求实际轧制厚度 $h = h^*$ ，则：

$$S^* + \frac{P^*}{M} = S + \frac{P}{M} \Leftrightarrow \frac{P^* - P}{M} = -(S^* - S) \quad (4.10)$$

经过程机计算后的 S^* 送到 APC 装置, 同时 P^* 、 M 送给 AGC。AGC 和 APC 配合完成轧机的调整后, 开始咬入。轧板咬入后, 虽然预报轧制力与实际轧制力存在误差, 但控制 S 可以保持板厚 h^* 不变。其控制模型如式(4.8)所示。

$$\begin{aligned} h &= S - S_0 - \frac{P_0}{M_0} + \frac{P}{M_0 \cdot k_b} - \Delta S_o - \Delta S_T + \Delta S_w \\ &= S - S_0 - \frac{P_0}{M_0} + \frac{P}{M} - \Delta S_o - \Delta S_T + \Delta S_w \end{aligned} \quad (4.11)$$

其中: S_0 —清零辊缝 P_0 —清零压力 M_0 —清零时轧机刚度

ΔS_o —油膜补偿量 ΔS_T —轧辊热膨胀补偿 ΔS_w —轧辊磨损补偿

k_b —影响轧机刚度的宽度系数

$$\Delta h = h^* - h = h^* - (S - S_0 - \frac{P_0}{M_0} + \frac{P}{M_0 \cdot k_b} - \Delta S_o - \Delta S_T + \Delta S_w) \quad (4.12)$$

$$= h^* - (S - S_0 - \frac{P_0}{M_0} + \frac{P}{M} - \Delta S_o - \Delta S_T + \Delta S_w)$$

$$M = M_0 \cdot k_b \quad (4.13)$$

$$\Delta S_{AGC} = K_p \left(\frac{Q+M}{M} \right) \cdot (\Delta h + \frac{1}{T_I} \int \Delta h dt) \quad (4.14)$$

绝对 AGC 的调节器采用 PI 方式。如图 4.8 所示。

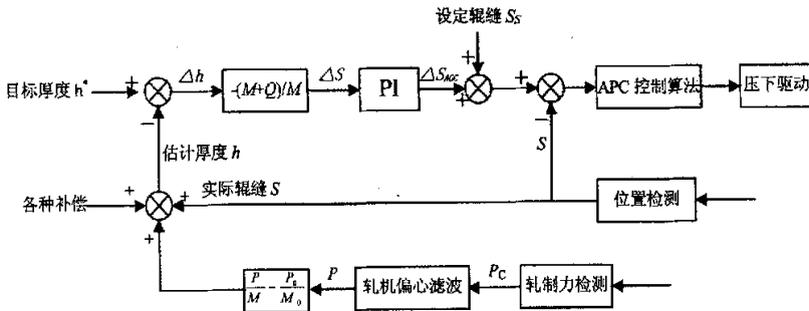


图 4.8 绝对 AGC 系统方框图

Fig. 4.8 The diagram of absolute AGC system

(3) AGC 投入方式

绝对值 AGC 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。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，并计算锁定值计算次数是否达到预定的次数（如 20 次），如果达到，则判断轧制力设定值和锁定值的偏差，决定是否投入绝对值 AGC。程序流程如图 4.9 所示。

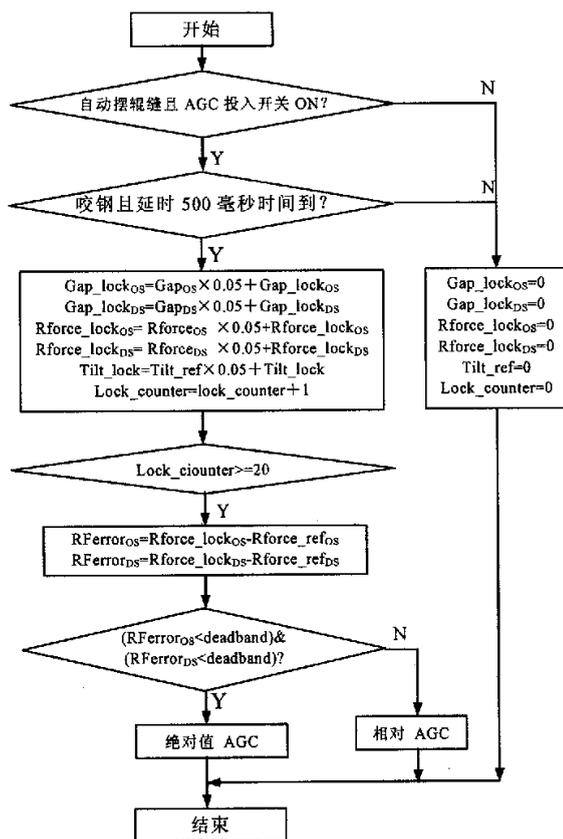


图 4.9 锁定值计算与 AGC 投入方式流程图

Fig. 4.9 The flow chart of absolute AGC computation and the selected mode AGC

其中：

Gap_lockOS—操作侧锁定辊缝	GapOS—操作侧实际辊缝
Gap_lockDS—传动侧锁定辊缝	GapDS—传动侧实际辊缝
Rforce_lockOS—操作侧锁定轧制力	RforceOS—操作侧实际轧制力
Rforce_lockDS—传动侧锁定轧制力	RforceDS—传动侧实际轧制力
Tilt_lock—倾斜锁定值	Tilt_ref—倾斜参考值
Lock_counter—计数器锁定值	deadband—死区

在投入 AGC 时, 还应计算设定值和锁定值的弹跳量, 弹跳量跟轧机旋转方向和轧制力锁定值有关, 每个旋转方向轧机两侧的弹跳量计算按照设定轧制力分 3 段 (小于 5000kN, 大于 5000kN 小于 10000kN, 大于 10000kN) 分别计算:

第 1 段和第 2 段计算公式相同 (系数不同, 用 i 区分):

$$Spring_i = a_{i0} + a_{i1}x^{\frac{1}{2}} + a_{i2}x + a_{i3}x^{\frac{3}{2}} + a_{i4}x^2, \quad i=1, 2 \quad (4.15)$$

式中 $x=|force-500|$ (单位: kN)

第 3 段计算公式为:

$$Spring_3 = a_{3,0} + a_{3,1}x \quad (4.16)$$

式中 $x=forcelock-10000$ (单位: kN)

设定值弹跳量和锁定值弹跳量的计算公式和系数相同, 不再重复写出。计算设定值弹跳量时, 式(4.12)、(4.13)中 x 计算的 $force$ 采用设定轧制力, 计算锁定值弹跳量时, 式(4.12)、(4.13)中 x 计算的 $force$ 采用锁定轧制力, 轧机正、反向运行时的设定值弹跳和锁定值弹跳分别计算。

(4) AGC 微调输出

AGC 控制的辊缝调节量 ΔS_{AGC} 附加到设定辊缝 S_S (包括辊缝手动微调量和倾斜控制量) 上, 对辊缝进行微调, 从而控制钢板的厚度, 使其尽量满足目标厚度。

4.2.8 轧机调零

为消除轧机的各种间隙及轧机弹性变形的不确定性, 必须进行轧机零点标定和机架弹性变形曲线测试, 这是 AGC 控制的基础。

关于轧机调零: 每次换完辊后, 轧机的零点已经不准了, 操作员必须进行“轧机调零”操作。操作员在每次换辊后都执行一套轧机调零操作程序。其步骤如下:

操作员通过操作员站的“调零”操作界面控制调零过程。基础自动化计算机将检测以下条件:

- | | | |
|-------------|------------|---------------|
| ①支撑辊平衡状态 OK | ②液压系统 OK | ③没有激活的泄油条件 |
| ④轧机中没有轧材 | ⑤电动压下系统 OK | ⑥上下辊主动传动系统 OK |
| ⑦轧辊停止 | ⑧所有传感器 OK | ⑨所有伺服阀 OK |

如果调零要求的条件都满足, 系统将开始进行调零工作, 这时显示屏上的液压缸状态显示“调零”。否则, 将给出操作失败的原因。

轧机调零程序流程如图 4.10 所示。

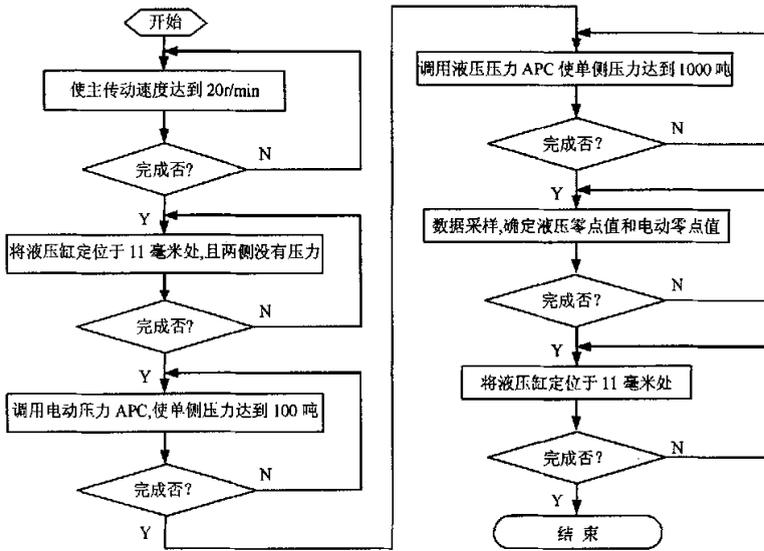


图 4.10 轧机调零程序流程图

Fig. 4.10 The flow chart of mill zeroing program

4.2.9 轧机刚度测试

操作员通过操作员站的“轧机刚度测试”操作界面控制刚度测试过程。基础自动化计算机将检测以下条件：

- ①有一个准确的零点值
- ②支撑辊平衡状态 OK
- ③液压系统 OK
- ④轧机中没有轧材
- ⑤没有激活的泄油条件
- ⑥电动压下电机 OK
- ⑦上、下辊主传动系统 OK
- ⑧轧辊不转
- ⑨所有传感器 OK
- ⑩伺服阀 OK

如果这些互锁得到满足，系统进入刚度测定模式（spring mode），并且在显示器上显示“自动轧机刚度测定”。轧机刚度测试的程序流程如图 4.11 所示。

图 4.12、图 4.13 分别根据现场实测数据，进行处理后，得到的操作侧和传动侧的轧机刚度曲线。由于数据量较大，这里省略了所测的具体数据。

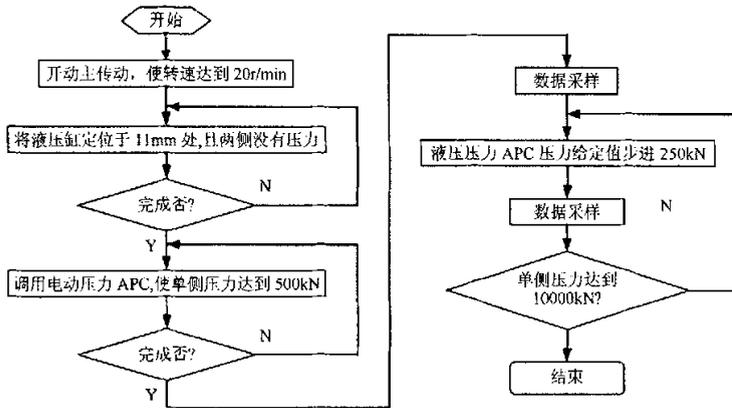


图 4.11 轧机刚度测试程序流程图

Fig. 4.11 The flow chart of mill spring test program

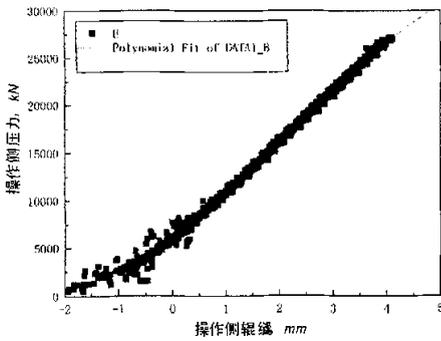


图 4.12 操作侧轧机刚度曲线

Fig. 4.12 The mill spring curve of operator side

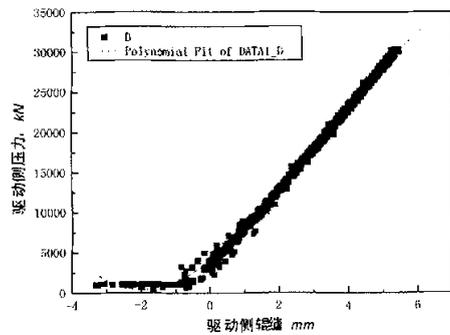


图 4.13 传动侧轧机刚度曲线

Fig. 4.13 The mill spring curve of drive side

4.2.10 AGC 控制补偿

各种压力 AGC 系统都是借助于测量轧制压力 P 和辊缝 S , 通过模型计算来调整辊缝, 以保持出口厚度不变, 是对压力的正反馈控制, 即随着实测压力增大, AGC 理解为是轧件入口厚度增加, 因此将进一步减少辊缝, 压力将进一步增大。同理当实测轧制力减小时, 调整后轧制力将进一步减小。对于轧机自身的干扰, 包括油膜厚度变化, 轧辊磨损, 轧辊热膨胀, 以及轧辊偏心等, 当实测压力变大时, 表明实际辊缝在减小, 出口厚度减薄, 应相应抬起辊缝, 使轧制力变小。而 AGC 系统仍然按轧件波动来处理, 则调节方向正好相反, 不但没有消除干扰, 反

而将干扰放大^[30]。因此，必须采取各种模型对这些干扰进行补偿^[37]。

(1) 偏心补偿

浮动死区法是一种典型的被动偏心控制方法，这种方法不是试图补偿轧辊对轧件厚度的影响，其主要目的是使辊缝控制系统对轧辊偏心引起的厚度干扰反应不灵敏，而不需要辊缝按照偏心函数的关系进行校正，排除了厚度变化增大的可能^[32]。

此法通常可消除由轧辊偏心所引起的轧制力的周期性波动。轧制力曲线的高频部分为轧辊偏心所引起轧制力波动，通常死区被设定为比偏心周期性分量的峰一峰稍大，死区上下限随着输入信号的变化而上下漂移，但死区的宽度始终保持不变。当输入信号超过上一次的死区最大值以后，则死区的最大值上移到新的最大值；当输入信号低于上一次的死区最小值以后，则死区的最小值下移到新的最小值。而实际的轧制力为浮动死区的平均值，如图 4.14 所示。

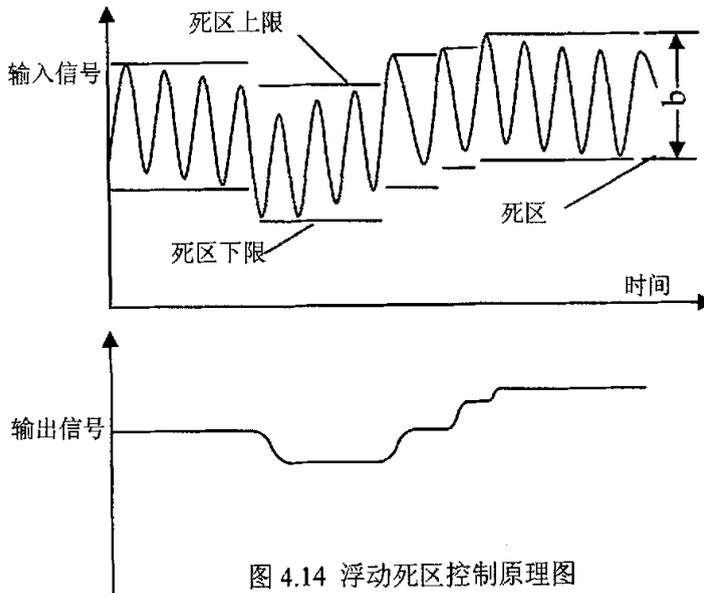


图 4.14 浮动死区控制原理图
Fig.4.14 The control principle sketch of floating dead zone

浮动死区法偏心滤波程序流程如图 4.15 所示。

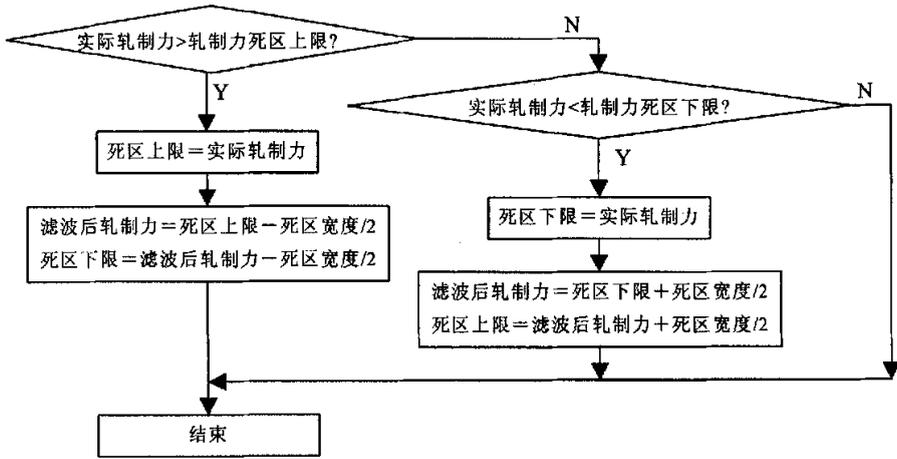


图 4.15 轧制力浮动死区滤波程序流程图

Fig. 4.15 The roll force program flow chart of floating dead zone

(2) 油膜厚度补偿

为了补偿因为油膜厚度发生变化而在出口厚度上产生的干扰，AGC系统利用在不同轧制力下转动速度和厚度构成的曲线来计算油膜厚度的变化，从而使液压缸动作来避免其对厚度产生影响。采样模型为^[33]：

$$\Delta s_o = \frac{a(V/P)}{(V/P) + b} \tag{4.17}$$

实际的油膜厚度曲线如图 4.16 和图 4.17 所示(由于数据量较大，这里省略了所测的具体数据)。

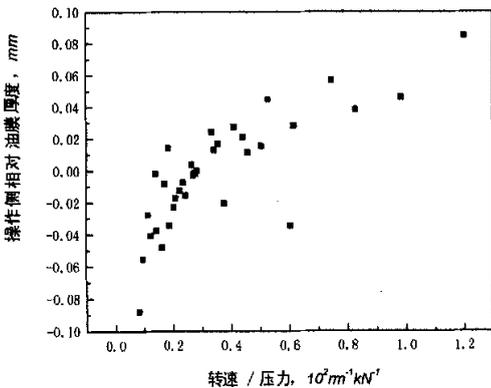


图 4.16 操作侧实际油膜厚度曲线

Fig. 4.16 The actual oil thickness curve of operator side

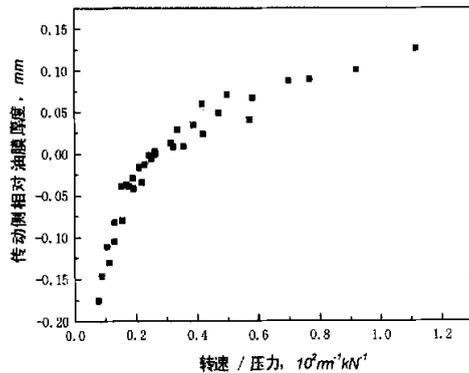


图 4.17 传动侧实际油膜厚度曲线

Fig. 4.17 The actual oil thickness curve of drive side

在厚板轧机上，来料咬入后，将会使轧制力产生一个阶跃变化。一般来说，油膜厚度补偿系统会检测到这个阶跃变化并且向液压缸输入一个阶跃信号使之消除因油膜厚度发生变化而产生的厚度偏差。这将在轧材的头部有一个阶跃变化。为了避免这种情况，可用锁定油膜厚度补偿。

锁定油膜厚度可工作在两种方式：

第一种是来自上位机的预测轧制力可被用来查表求得预测油膜厚度。当轧料进入轧机后，预测轧制力和实际轧制力之差可被用来动态调整液压缸的位置来消除预测和实际油膜厚度的差别。预测轧制力和实际轧制力之差，对应于绝对 AGC。

第二种是液压缸正常设置，不包含预测的油膜厚度。实际的头部轧制力可被采样，在头部轧制向平稳轧制过渡之际，被采样的头部轧制力和实际轧制力的差别可被用来计算油膜厚度的变化，然后运动液压缸补偿之。头部轧制力和实际轧制力的差别，对应于相对 AGC。

(3) 头尾温差辊缝补偿

钢板头尾由于散热面积大，使得钢板头尾部厚度偏厚，因此，好的 AGC 系统必须有头尾补偿功能。补偿方法有以下两种：

补偿方法 1：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。考虑的头尾低温的实际情况，实际补偿时，将顶帽传感器的偏差乘以一个系数 K_h ， $0 \leq K_h \leq 1.5$ 。这种补偿是一个渐变的过程，而不是一个方波。

补偿方法 2，规程设定的头尾补偿量与补偿长度按照三角形变化逐步叠加到辊缝设定值中去，参照图 4.18，设 S_{taper} 为每一采样周期的头部/尾部补偿量， L_{out} 为每一采样周期的钢板长度瞬时值，头、尾部补偿算法^[34]为：

$$\text{头部: } S_{taper} = (L_h - L_{out}) \frac{-S_h}{L_h} \quad (4.18)$$

$$\text{尾部: } S_{taper} = (L_{out} - L_{tail}) \frac{-S_t}{L_t} \quad (4.19)$$

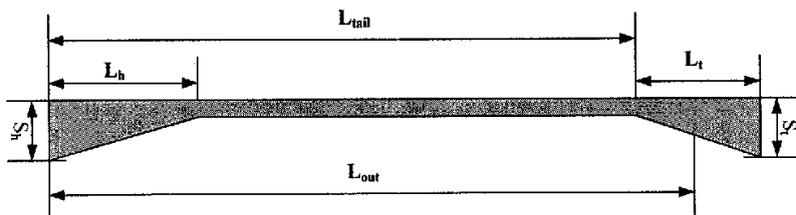


图 4.18 头尾三角形补偿示意

Fig. 4.18 The triangle compensation sketch of head and tail

(4) 冲击补偿

咬钢的瞬间，由于轧制力的冲击作用，辊缝有一个上升的尖峰。若不进行补偿，会使得轧件头部变厚，冲击尖峰如图 4.19 所示。

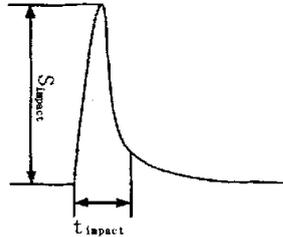


图 4.19 冲击尖峰示意

Fig. 4.19 The sketch of impact peak

为使辊缝保持平稳，在咬钢前预先使辊缝降低尖峰的高度，然后随着咬钢过程，按照冲击补偿的曲线使辊缝恢复到设定值。补偿算法^[35]如下：

$$S_{impact} = (S_0 - S_{cyl}) \left(1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{0.5Fh}{Gp^2 f M_{hyd}}\right)} \right) \quad (4.20)$$

$$t_{impact} = \frac{\sqrt{\Delta h_i R_w}}{V} N_{min_to_ms} N_{milli} \quad (4.21)$$

式(4.20)中： S_{impact} —冲击辊缝补偿量

S_0 —轧机标定时液压油缸的开口零点

S_{cyl} —液压油缸开口度设定值， $(S_0 - S_{cyl})$ 就是液压油柱的高度

$Gp^2 f$ —压力转换为轧制力的换算系数

M_{hyd} —液压油柱模数

式(4.21)中： t_{impact} —冲击补偿时间

Δh_i —第 i 道次的压下量

R_w —工作辊平均半径

V —轧制速度

$N_{min_to_ms}$ —分钟转换为毫秒

N_{milli} —毫米转换为米

按照两式计算出冲击高度和时间，进而对辊缝进行补偿。当咬钢时辊缝按照相反的方向逐渐恢复到设定值。

(5) 轧机刚度的轧件宽度补偿

轧机的刚度曲线是通过轧机进行空压靠测量出来的。

但在实际轧制中，轧件宽度不同，对应相同的轧制力，轧机弹跳也不同。高精度厚度计公式必须有高精度轧机刚度宽度修正模型。轧机刚度宽度修正模型可按

如下方法来获得。

当轧机中有宽度为 B 的轧件时, 有关系式:

$$f_B(P) = h - S \quad (4.22)$$

由式(4.22)可知, 根据辊缝 S 及对应的轧件厚度 h , 可求出此刻的轧机弹跳 $f_B(P)$ 。

制定数据采集方案如下:

a、步进空压靠, 从 1.0MN 开始, 压力每增加 1.0MN, 记录一次轧制力 P 和辊缝 S , 直到 20.0MN。

b、按步骤 a 分别对宽度为 1.8m、2.0m、2.3m 的铝板进行步进静压靠, 除了记录每步轧制力 P 和辊缝 S 外, 每步压力到位后, 抬起液压缸取出铝板, 用千分尺测量其厚度值 h (注意: 轧辊不能旋转)。

利用式(4-19)处理上述采集到的数据, 可以绘出轧件宽度为 1.8m、2.0m、2.3m 时的轧机弹跳曲线。更进一步, 将这三条弹跳曲线各点的轧机弹跳量减去空压靠时相同轧制力下的轧机弹跳量, 得出这三种轧件宽度对轧机弹跳量的影响值。

根据实测数据, 利用关于 P 、 B_0-B 的双变量二次多项式模型, 最后回归出轧机的弹跳量宽度修正模型^[36]:

$$\Delta f_B(P) = (a_0 + a_1P + a_2P^2)(B_0 - B)^2 + (b_0 + b_1P + b_2P^2)(B_0 - B) \quad (4.23)$$

(6) 轧辊热膨胀与磨损补偿

随着轧制节奏的加快和轧制间歇的减小, 轧辊热膨胀增大; 随着轧制量的增加, 轧辊的磨损量增加。轧辊的热膨胀与磨损的两个物理过程作用于同一个对象上, 只需要计算两者综合影响并进行补偿即可。具体方法是采用测厚偏差来补偿^[34]:

$$S_{rtw} = (S_{offset} - h_{dev})G_{herr} + (1 - G_{herr})S_{rtw-last} \quad (4.24)$$

式中: S_{rtw} —轧辊热膨胀与磨损在本块钢的补偿量

S_{offset} —人工设定的厚度偏移量 (与测厚仪的目标厚度设定值的偏差)

$S_{rtw-last}$ —轧辊热膨胀与磨损在上块钢的补偿量

H_{dev} —实际厚度—设定厚度, 实测厚度偏差平均值, 正值表示偏厚

G_{herr} —厚度偏差补偿凸度组合系数

4.3 轧机水平方向上的控制

4.3.1 轧制工艺和控制对辊道的划分和定义

轧线水平方向上的辊道设备控制不象垂直方向辊缝控制那么复杂,主要是与生产实际和生产节奏联系紧密。根据轧制规程和过程跟踪,辊道和垂直方向的辊缝调整进行联锁和协调动作。由于设备设计和生产工艺对辊道名称的定义不尽相同,为避免产生歧义和误解,表 4.3 将辊道进行了详细定义和分组,辊道的工艺布置参见图 3.4。

表 4.3 辊道的定义和分组

Table 4.3 The define and grouping of roller tables

工艺辊道名称	设备辊道名称	辊子编号	控制柜号	DP 站号
除鳞辊道	除鳞辊道	1~7	AD01	8
1#待温辊道	除鳞输出辊道 1	1~7	AD02	9
	除鳞输出辊道 2	8~13	AD03	10
2#待温辊道	输入辊道 1	1~4	PB1-1	11
	输入辊道 2	5~11	PB1-2	12
	输入辊道 3	12~18	PB1-3	13
机前输入辊道	输入辊道 4	19~24	PB1-4	14
	输入辊道 5	25~29	PB1-5	15
机前工作辊道	机前工作辊道 1	1、3、5、7、	PB2-1	21
	机前工作辊道 2	2、4、6、8	PB2-2	22
	机前工作辊道 3	9、11、13、15	PB2-3	23
	机前工作辊道 4	10、12、14、16	PB2-4	24
机前机架辊	机前机架辊	1~3	PB4-1	41
机后机架辊	机后机架辊	1~3	PB3-1	31
机后工作辊道	机后工作辊道 1	1~4	PB3-2	32
	机后工作辊道 2	5~8	PB3-3	33
	机后工作辊道 3	9~12	PB3-4	34
机后输出辊道	输出辊道 1	1~4	PB1-6	16
	输出辊道 2	5~8	PB4-2	42
3#待温辊道	输出辊道 3	9~14	PB4-3	43
	输出辊道 4	15~19	PB4-4	44
4#待温辊道	输出辊道 5	20~25	PB4-5	45
	输出辊道 6	26~30	PB4-6	46

从本节开始,将按照工艺流程顺序,从除鳞辊道开始,到输出辊道结束,依次说明每段辊道各相关设备在不同运行状态下的受控情况。

在轧机操作台上设有各辊道控制的开关或按钮,参见附录 A 中图 A.1(操作室

布置图)、图 A.2 (L1 操作台面)、图 A.3 (L2 操作台面)、图 A.4 (R1 操作台面)。操作台设计采用了主辅原则,即当具备自动轧钢时,只需主操作台一个操作工即可控制从除鳞到层流冷却之间的所有设备。当自动轧钢不具备条件时,通过 L1 操作台上“主辅台”转换开关,可以由主操作台操作工和 L2 台操作工两个人完成轧钢。L1 台主要控制轧机前的设备, R1 台主要控制轧机后的设备, L2 操作台涵盖了 L1 和 R1 的所有辊道控制开关。主操作台为液压 AGC 控制部分, R2 台为层流冷却控制台,由于不涉及到辊道控制,本文未给出其具体台面布置。

4.3.2 辊道速度的标定

要准确控制辊道,必须对辊道的速度给定作统一标定。

辊道在单动状态下,系统在手动、半自动轧钢状态,操作工从 HMI 输入速度给定;在自动、半自动轧钢状态,由上位机输入给定。随动状态下,把主令开关的读入值转换为转速(27648 对应 120 转/分),转速再转换为线速度送到主传动,同时送给辊道。所有运输辊道接收的速度给定均为线速度。由 SIMADYN_D 程序将其转换为转速(变频器的 200%对应 32768,对应转速的最大值),再将此转速对应的 32768 的值由 DP 网送到变频器。

变频器返回的速度实际值为 32768 对应的数,由 SIMADYN_D 程序反算为辊道线速度,送到 HMI 显示。辊道相关参数参见表 4.4。

换算公式为:

$$\text{线速度} = \frac{\text{辊道电机转速} * \text{辊道直径} * \pi}{1000 * 60 * \text{转速比}} \text{ (m/s)}$$

$$\text{辊道电机转速} = \frac{\text{线速度} * 1000 * 60 * \text{转速比}}{\text{辊道直径} * \pi} \text{ (rpm)}$$

4.3.3 主传动和各辊道的控制

(1) 除鳞辊道运行控制

除鳞辊道的控制方式在操作台选择,正常情况下处于自动方式,在此方式下,除鳞辊道的运行由辊道控制 PLC 控制。在手动控制方式下(要求除鳞辊道运行允许为 1),主操作台操作员可以手动控制除鳞辊道的前进和后退。前进时速度设定为正,后退时速度设定值为负。与除鳞辊道相关的指示灯包括:除鳞辊道运行指示灯、除鳞辊道 OK 指示灯和除鳞辊道系统 OK 指示灯。在全自动轧钢时,除鳞辊道的运行由计算机自动控制。

表 4.4 辊道相关参数

Table 4.4 The appended parameters of roller tables

辊道名称	辊径(mm)	速比	电机最高转速(rpm)
除鳞辊道	Φ480	i=7.1	1140
1 [#] 待温辊道	Φ480	i=7.1	1140
	Φ480	i=7.1	1140
	Φ406.4	i=5.6	1244
2 [#] 待温辊道	Φ420	i=4	1244
机前输入辊道	Φ420	i=4	1244
机前工作辊道	Φ460	i=1	288
机前机架辊	Φ540	i=1	266
机后机架辊	Φ540	i=1	266
机后工作辊道	Φ460	i=1	288
机后输出辊道	Φ406.4	i=4	1244
3 [#] 待温辊道	Φ406.4	i=4	1244
4 [#] 待温辊道	Φ406.4	i=4	1200

(2) 待温辊道运行控制

在检修状态，1[#]~4[#]待温辊道各设备可单独调试；在手动、半自动和自动方式，1[#]~4[#]待温辊道的运行由操作工选择随动或单动，随动时，待温辊道随主传动的运行方向运行，单动时，操作工可选择正向/停/反向，可启动/停止辊道自动摆动；摆动是单动方式下的特殊情况，摆动时，要求相应待温辊道的单动控制开关处于“停止”位置，“待温”按钮使能辊道摆动状态，并在相应按钮灯上指示摆动状态（进入摆动状态要求轧件完全在待温段内时才能进入；要求待温段两端热检信号为0，待温段温度信号大于某一数值）。在摆动时，待温辊道先正向运行，当检测到本待温段出口热检上升沿信号时立即反向运行，检测到入口热检时再正向运行，如此反复直至摆动状态解除。在全自动轧钢方式，待温辊道的运行由计算机自动控制。

待温辊道的控制可以通过“辊道/转钢操作切换”开关选择在左侧主操作台或辅助操作台 L2 进行控制。所有待温辊道的运行都需要来自辊道控制 PLC 的运行允许信号。

(3) 主传动运行控制和机前、机架、机后辊道运行控制

在检修状态，上、下辊主传动和相关辊道（机前输入辊道、机前工作辊道、机架辊、机后工作辊道、机后输出辊道）都可以单独调试运行；在手动和半自动轧钢方式，上下辊主传动联合动作，操作员通过操作台上的主令开关控制主传动的运行方向和速度，机前输入辊道、机前工作辊道、机架辊、机后工作辊道、机后输出辊道的运行状态（随动或单动）由操作员在操作台上选择，随动时，辊道跟随主传动的速度和方向，单动时，操作员可控制每组辊道正反向运行或停止；在自动和全自动轧钢方式，主传动和相关辊道的运行由计算机根据程序控制。

4.3.4 辅助设备控制

(1) 推床控制

在“检修”状态，机前和机后推床都可以单独调试运行，在“手动轧钢”和“半自动轧钢”方式，操作工手动控制推床的开与合，因此，可以理解为，在“检修”、“手动轧钢”和“半自动轧钢”方式下，推床均由操作员手动控制。在“自动轧钢”和“全自动轧钢”方式，推床的控制由计算机完成，计算机设定推床的开口（或推床液压缸位移）。

(2) 高压水除鳞控制

高压水除鳞分为一次高压水除鳞和轧机高压水除鳞两个部分。

自动一次除鳞：钢坯从加热炉出来进入除鳞辊道，除鳞前热检 H1 检测到钢坯信号的上升沿时触发除鳞控制，打开高压水除鳞喷水阀，使水喷出，当除鳞后热检 H2 检测到钢坯信号的上升沿时，关闭喷水阀门，停止喷水。

手动一次除鳞：如果由于某些原因需要操作员手动控制高压除鳞喷水，操作员需要按操作台上“一次手动除鳞”按钮，按钮按下时水阀喷水，抬起时停止喷水。

无论手动还是自动除鳞，除鳞前要求“一次高压水运行”“和”一次除鳞系统 OK”，否则不能完成高压水除鳞动作。

轧机手动高压水除鳞：当钢坯到达轧机附近时，如果需要再一次除鳞，则按操作台上“轧机手动除鳞”按钮进行手动除鳞，按钮按下时水阀喷水，抬起时停止喷水。

(3) 手动、自动转钢控制

在检修、手动轧钢、半自动轧钢和自动轧钢方式下，机前转钢操作都由操作员手动控制。在全自动轧钢方式时由计算机自动控制转钢操作。

手动转钢：手动转钢可以在 L1 台和 L2 台上进行，有设在 L1 台上的“辊道/转钢操作切换”开关决定在哪个台上进行手动转钢。

自动转钢：基础自动化计算机根据过程机设定的数据，当某一道次前需要转钢时，设定转钢标志，当机前扫描式热检检测到转钢信号后，进行转钢操作，钢坯转动 90° 后停止，转钢完成后，操作员需要进行转钢确认。

(4) 自动咬钢、抛钢控制

自动抛钢和自动咬钢用于自动和全自动轧钢方式。

自动咬钢：就是在轧机咬入钢坯前，适当降低轧机和辊道的速度，以减小钢坯对轧机地碰撞。具体做法是，以低于轧制速度 25% 的速度咬入钢坯，咬钢后速度恢复到 100% 的轧制速度。可以用机前辊道热检上升沿信号时将轧机速度降低到轧制速度的 75%，轧机咬钢后（咬钢上升沿）将 25% 的附加速度去掉。

自动抛钢：就是在轧机快要抛钢时，适当降低轧机和辊道的速度，以减小钢坯对辊道或其他设备的碰撞。具体做法是，以低于轧制速度 25% 的速度抛钢，抛钢后轧机速度降低到爬行速度。自动抛钢需要根据模型计算钢坯的长度，从咬钢开始，不断计算已轧的钢坯长度，并与计算的钢坯总长度进行比较，当达到适当位置时，将轧机速度降低，实现自动抛钢。

(5) 辊身冷却水控制

辊身水冷的启动和停止使用同一个按钮，当辊身水按钮灯灭时，按下“辊身水冷启动”按钮，指示灯亮，各冷却水阀按照操作员在操作界面的设定值控制相应的模拟输出值，使冷却水阀达到预定开口。当辊身水按钮灯亮时，按下“辊身水冷启动”按钮，指示灯灭，辊身冷却水阀关闭。

(6) 换辊控制

换辊控制只有在“检修”方式下才有效，在换辊时，控制信号来自换辊控制 PLC。

换辊时，换辊操作台发出“换辊请求”指令，操作人员确认电动压下系统合闸后，在 HMI 点按“换辊允许”按钮后，如果满足换辊对电动压下的要求，系统向换辊操作台发出“换辊允许”指令，电动压下控制指令由换辊操作台发出（抬/降），接收到抬或降的指令后，系统送出 OS、DS 电动压下设定速度和 OS、DS 电动压下使能信号。在换辊方式，电动压下始终处于联动状态，R1 操作台的电动压下升降控制开关无效，必须条件与检修试车相同。

换辊结束后，换辊操作台给出换辊结束信号，复位换辊允许信号。换辊操作完成。

第五章 实际运行分析

5.1 产品性能指标和产量

首钢中厚板厂工艺升级改造共用 97 天, 2003 年 1 月中旬投产, 经过设备磨合和精调, 从 2003 年 5 月起, 机械设备和电气系统已经基本趋于稳定, AGC 系统在生产中的作用越发明。表 5.1 列出了中板厂从 2003 年 1 月到 2005 年 5 月产品各项指标情况, 从表中可以看出, 各项指标每年得到明显提高。

表 5.1 2003 年 1 月~2005 年 5 月产品指标列表

Table 5.1 List of product performance from Jan. 1, 2003 to Mar. 5, 2005

名称	2003.1~12 月	2004.1~12 月	2005.1~5 月
产量(万吨)	56.22	80.008	36.718(年计划 100)
专用板比例(%)	8.45	15.55	19.42
品种板比例(%)	72.39	72.92	73.24
出口板比例(%)	—	3.84	9.58
合格率(%)	99.34	99.46	99.69
成材率(%)	89.12	89.80	90.91
日历作业率(%)	79.50	81.47	81.84
机时产量(t/h)	83.95	111.807	123.09

图 5.1、图 5.2 是在轧制 32mm (Q345) 钢板时利用测厚仪采集的数据作成的厚度曲线, 经分析均满足产品允许的公差范围和合同要求。具体计算如下:

(1) 指标验收方法

a、成品厚差测试方法与计算方法: 采用测厚仪沿着钢板纵向直线测量, 共测量

n 点, 每点的厚度值计为 $x_i, i=1 \cdots n$, 则第 k 块钢的厚度平均值为 $\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$, 每点的

同板厚差为 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}_k$ 。计算 $-2\sigma \leq \Delta x_i \leq 2\sigma$ 的点数记为 m , 则 $m/n \times 100\% \geq 95\%$, 其中 σ 见 3.3 章节 (合同要求)。

b、对异板差而言, $\Delta x_i = \bar{x}_k - x_0$, 计算 $-2\sigma \leq \Delta x_i \leq 2\sigma$ 的钢板块数记为 m , 则 $m/k \times 100\% \geq 95\%$ 。其中 k 为测量的钢板总块数, x_0 为设定值, σ 见 3.3 章节 (合同要求)。

(2) 实际数据采集和计算结果

为简化，这里只以两块钢为例进行计算：

第 1 块： $x_{1max}=31.958, x_{1min}=31.796, \bar{x}_1=31.857;$

$$\Delta x_{1max} = x_{1max} - \bar{x}_1 = 31.958 - 31.857 = 0.101 < 2\sigma = 0.3 \text{ (满足合同要求)}$$

第 2 块： $x_{2max}=31.935, x_{2min}=31.590, \bar{x}_2=31.687;$

$$\Delta x_{2max} = x_{2max} - \bar{x}_2 = 31.935 - 31.687 = 0.248 < 2\sigma = 0.3 \text{ (满足合同要求)}$$

可见，这两块钢板的同板差满足合同要求。下面分析异板差情况：

$$\Delta x_1 = \bar{x}_1 - x_0 = 31.857 - 32 = -0.143 > -2\sigma = -0.36 \text{ (满足合同要求)}$$

$$\Delta x_2 = \bar{x}_2 - x_0 = 31.687 - 32 = -0.313 > -2\sigma = -0.36 \text{ (满足合同要求)}$$

可见，这两块钢板的以异板差也满足合同要求。

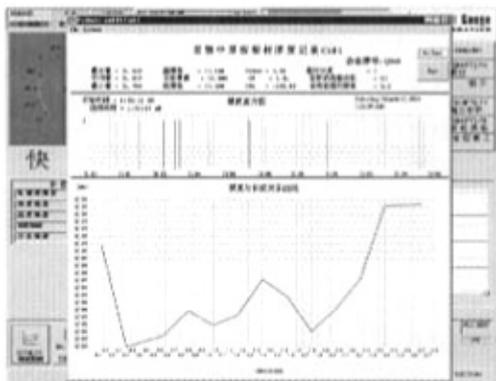


图 5.1 钢板厚度曲线 1 (32mm)
Fig.5.1 The first thickness curve of 32mm plate

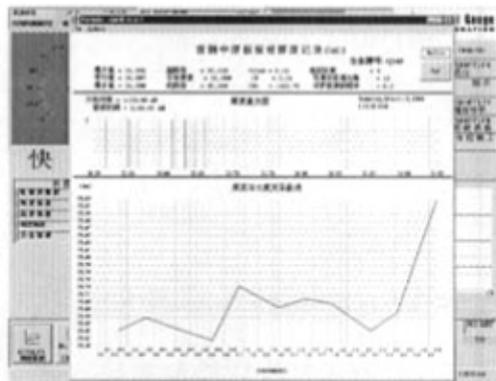


图 5.2 钢板厚度曲线 2 (32mm)
Fig.5.2 The second thickness curve of 32mm plate

5.2 AGC 系统故障停机时间

改造之前，旧 AGC 系统每周平均 3~4 小时故障停机时间，这些故障主要集中在液压缸位移传感器零点漂移以及轧机上信号电缆和控制电缆的绝缘老化上。其次是顶帽传感器、液压系统、伺服阀、压头等不确定性故障，但又时常发生的故障。另一方面，由于旧轧机刚度低，而且两侧刚度差较大，特别是换完支撑辊后更加刚度偏差更加明显，造成 AGC 在轧制中经常出现跑偏的故障发生。

新系统从根本上摒除了旧轧机系统的弊端，从传感器选型、软硬件设计到现场

施工都进行了改进,大大减少了 AGC 故障发生的来源。表 5.2 列出了中板厂从 2003 年 1 月到 2005 年 5 月,所有与 AGC 有关的电气和液压系统故障,可以看出故障停机时间明显减少,提高了生产效率。

表 5.2 2003 年 1 月~2005 年 5 月 AGC 系统故障停机时间列表
Table 5.2 List of fault stopping time of AGC system from January, 2003 to May, 2005

日期	故障停机时间	停机 (min)	故障原因	故障类型 (电气/液压)
2003.2.26	19:10-19:30	20	处理 AGC 故障	电气
2003.5.19	0:20-1:00	40	处理 AGC 液压油管漏油	液压
2003.7.13	12:40-13:00	20	四辊 AGC 液压油管漏油	液压
2003.7.13	13:10-13:30	20	四辊 AGC 泵启不来	液压
2003.9.8	9:15-9:30	15	处理四辊 AGC 泵故障	液压
2003.12.4	13:15-13:35	20	处理 AGC 泵跳	液压
2004.11.21	8:40-9:30	50	处理压下传感器故障	电气
2004.11.21	16:20-16:40	20	处理压下传感器故障	电气
2004.12.14	16:20-16:35	15	处理 AGC 油管漏油	液压
2005.01.28	16:30-17:00	30	处理 AGC 液压泵启不来	液压
2005.03.23	23:00-23:30	30	四辊跑偏	电气
总计:		280	其中: 电气 120min, 液压 160min。	

5.3 AGC 系统主要性能测试

5.3.1 液压缸位置控制系统测试

(1) 测试目的

液压缸位置控制系统是液压厚度控制系统的重要组成部分,其动静品质直接影响厚度控制精度。本测试的目的是测试 HAPC 的频率响应。

(2) 测试方法

液压位置控制系统采用 SIEMENS SIMADYND 控制系统,在 SIMADYND 中产生幅值 100 μ m、频率为 18Hz 的正弦波信号,加载到 HAPC 的位置设定端,将 HAPC 位置设定信号和反馈信号通过现场总线发送到工业计算机上,进行对比分析。

(3) 测试结果参见图 5.3 (由于数据庞大, 这里省略了实际采集的数据)

测试数据表明:

频率响应: 18 Hz

APC 定位精度: 0.01 mm

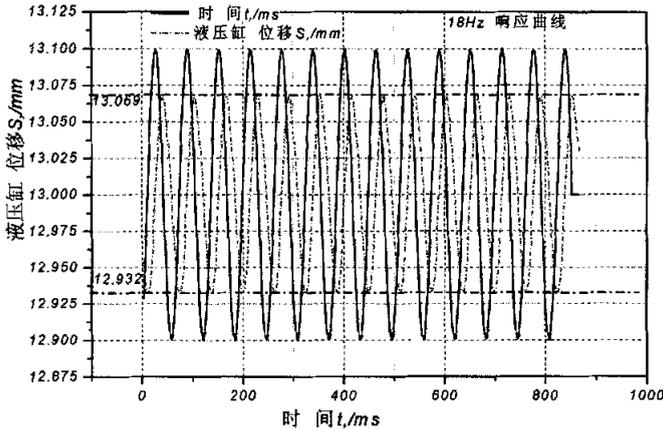


图 5.3 液压缸位置闭环系统 18Hz 响应曲线

Fig.5.3 The 18Hz response curve of hydraulic cylinder position loop system

5.3.2 液压缸最大速度测试

(1) 测试目的

液压缸最大速度是液压系统的重要技术指标, 液压缸位移的快速响应是轧件平面形状控制的必要条件。

(2) 测试方法

轧机过程计算机以 150ms 为周期, 不间断地通过工业以太网从基础自动化计算机 SIMADYND 采集重要过程数据, 并存储在过程计算机中, 作为系统分析的重要依据。

在轧机过程计算机采集数据中, 通过每隔 150ms 液压缸位移传感器 SONY 磁尺读数, 可以计算液压缸的运动速度。

(3) 测试结果

通过过程计算机实际数据采集(略), 可以看到, 液压缸在 150ms 内从 8.09mm 运动到 12.71mm, 位移 4.62mm, 平均速度 30.8mm/s。达到了合同 29mm/s 的要求。

结束语

本文的主要研究工作是结合首钢中厚板厂工艺升级改造,重点研究了 3500mm 四辊轧机垂直控制策略以及与其协调和联锁的水平控制。通过理论分析、现场调试和试验以及在生产实际中的运用,最后得出以下结论:

- (1) 四辊轧机控制器采用西门子 SIMADYN D 控制系统,通讯采用以太网和 PROFIBUS DP 二级网络,系统运行良好,完全能够满足中板生产的需要。
- (2) 系统采用手动轧钢、半自动轧钢、自动轧钢、全自动轧钢和检修共 5 种方式,根据现场设备情况,可以适应不同生产方式,减少了停产时间。
- (3) 系统采用锁定 AGC 和绝对 AGC 相结合的控制方式,在生产中得到成功应用。
- (4) 通过试验,产品的性能指标和系统参数均满足合同和设计要求。而且,其他指标,如:成材率、品种钢比例、机时产量等都逐年明显提高。
- (5) 仪表正确选型和安装使故障时间大大降低,仅为改造前的 10% 左右。
- (6) 轧线仪表配置、辊道的划分和功能定义满足生产实际要求,使轧钢操作更为灵活。
- (7) 主辅操作台切换设计为能够适应系统 5 种运行方式。
- (8) 在以后生产中,系统还需要对二级自动化和二级模型参数进一步优化,以实现全自动轧钢。

主要参考文献

1. 黄庆学等. 高精度轧制技术[M], 北京: 冶金工业出版社, 2002.2, 10—11
2. 王国栋等. 我国中厚板行业如何直面 WTO, 轧钢, 2002, 19(2): 3—5
3. 荆其臻, 陈瑛等. 中厚钢板技术的发展与进步, 宽厚板, 1997, 3(2): 3—5
4. 葛廷金. 中厚板轧机厚度自动控制装置的综述[J], 冶金自动化, 1984, 23(5): 30—35
5. 张进之. 压力 AGC 系统与其它厚控制系统共用的相关性分析[J], 冶金自动化, 1987, 11(6): 47—50
6. 郝付国等. 动态设定型 AGC 在中厚板轧机上的应用[J], 钢铁, 1995, 15(7): 32—36
7. 马竹稻, 葛廷金. 液压厚调技术的新发展[J], 冶金自动化, 1982, 19(4): 14—22
8. 邱松年, 霍锋. PLC 过程控制系统在中板四辊轧机上的应用[J], 轧钢, 1993, 15(1): 19—23
9. 丁修堃. 轧制过程自动化[M], 北京: 冶金工业出版社, 1986, 83—97
10. Michel More. Quality control and production optimization in plate mills using the HYDROPLATE system. Iron and Steel Engineer[J], 1984, 8(3): 48—53
11. Young, J. A. Automatic gauge control(AGC)[M], Sheffield: Inst of Metals, 1985, 209—212
12. 康永林. 轧制工程学[M], 北京: 冶金工业出版社, 2004, 135—137
13. 陈贻宏, 李虎兴. 轧机刚性与厚控制效果[J], 钢铁, 1991, 12(9): 41-44
14. 何宜业. 用 AGC 消除轧机刚度对板厚公差的影响[J], 冶金自动化, 1987, 22(5): 48—51
15. Davies, D. Alan. Application of hydraulic AGC and width control to a hot strip mill[J], Iron and Steel Engineer, 1989, 17(8): 39—44
16. 王君, 王国栋. 厚度计型变刚度控制系统研究[J], 轧钢, 2001, 18(12): 3—4
17. 孙海波等. 动态设定型变刚度厚控系统在 2400 中板轧机上的应用[J], 一重技术, 1995, 10(4): 59—61
18. 赵毅德. 中厚板轧机液压 AGC 的工作原理[J], 轧钢, 1996, 17(3): 17—19
19. 孙本荣, 王有铭, 陈瑛主编. 中厚板生产[M], 北京: 冶金工业出版社, 1995, 10—13
20. Johns Robert L, Reiner Van R, Mengel J D. Hydraulic AGC at bethlehem's burns harbor 160-in plate mill[J], Iron and Steel Engineer, 1994, 71(8): 52—57

21. 胡贤磊等.中厚板精轧轧制规程的负荷协调分配法及其动态调整[J],钢铁, 2003, 21(4): 36—37
22. SIEMENS. SIMADYN D hardware manual[M], SIEMENS AG, Edition 09.2000, 59—60
23. SIEMENS. SIMADYN D FUNCTION BLOCK Manual[M], SIEMENS AG, Edition 09.2000, 405—410
24. SIEMENS. SIMADYN D System-and communication configuring D7-SYS Manual[M],SIEMENS AG, Edition 03.2003, 52—88
25. SIEMENS. SIMATIC CFC for S7 Continuous Function Chart Manual[M], SIEMENS AG, Edition 01/2003, 105—106
26. SIEMENS. SIMADYN D step7 option packages for d7-sys Manual[M], SIEMENS AG, Edition 03.2003, 52—88
27. Huzyak P, Gerber T L. Design and application of hydraulic gap control system[J], Iron and Steel Engineer, 1984, 61(8): 13—15
28. 刘长治.太钢 1700 炉卷轧机液压压下厚度自动控制新系统[J], 冶金自动化, 1984, 5(2): 18—24
29. 张伟, 王益群, 高英杰.板带轧机液压压下系统的建模与仿真[J],液压与气动, 2004, 25(1): 21—22
30. 刘淑贞等.一种有效抑制偏心影响的预估式厚控方案[J], 冶金自动化, 1991, 13(3): 17—19
31. Vladimir B. Ginzburg. Dynamic characteristic of automatic gage control system with hydraulic actuators. Iron and Steel Engineer[J], 1984, 61(1): 25—28
32. 姜明东等译.高精度板带材轧制理论[M], 北京: 冶金工业出版社, 2002.3, 179—180
33. Ginzburg V B. High quality steel rolling theory and practice[M], New york: The United States of America, 1993, 166—169
34. 胡贤磊. 中厚板精轧机规程设定[D], 沈阳: 东北大学, 2000
35. 孙复森. 绝对 AGC 技术在中厚板生产中的应用[J], 轧钢, 2001, 18(5): 9—11
36. 陈建华. 轧机弹跳量宽度修正[J], 钢铁, 2003, 38(1): 31—33
37. Kuwano H, Miyano K, Minooura K. Fully digital control system for hydraulic rolling mill[J], IHI Engineer Review, 1996, 29(2): 67—71

致 谢

本论文是在导师东北大学信息科学与工程学院毛志忠教授和首钢中厚板轧钢厂李冰高级工程师的悉心指导下完成的。在作者攻读硕士学位期间，二位导师传授了丰富的知识和学习方法，使本人专业水平得到提高。毛老师和李厂长渊博的知识、严谨的治学态度、敏锐的洞察力和开拓精神，都给我留下了深刻的印象，成为我以后工作和生活的学习榜样。在这里，我向二位导师表示最衷心的感谢！

值得提出的是本论文之所以能够顺利完成，与东北大学信息科学与工程学院、东北大学国家重点实验室和首钢中厚板厂等单位的大力支持是分不开的，在此谨向各位老师、领导和同事表示最诚挚的感谢！

附录 A—轧机操作台面布置

附录 A 给出了四辊轧机操作台面的布置，是对本文 4.3 章节的补充，以便于理解 4.3 章节中相关内容，参见图 A.1、A.2、A.3 和 A.4。因主操作台和 R2 台与 4.3 章节中论述内容关系不大，这里未给出这两个操作台的布置。

操作台的设计原则是操作台上的所有仪表显示及按钮操作都可以在人机界面计算机上完成，因此可能根据其重要程度进行取舍以简化操作台，减少故障发生。其中在人机界面 HMI 上完成的功能有：检修下各设备单独启动、轧机自动校零和自动测刚度、轧机辊身冷却水的分段调节等。

操作台设计的另一个特点是主辅操作台的设计，即在自动、全自动状态下全部工作由主操作工（压下工）一个人在主控台前完成轧钢；在半自动和手动及检修状态下由主辅操作工两个人分别在主辅操作台完成轧钢控制。当将 L1 台上的“主台/辅台”开关打到“主台”位置时，主台操作工通过主操作台、L1 和 R1 上的开关即可完成轧钢。由一个人完成轧钢的前提是，辊道、除鳞、推床和转钢等辅助操作要全部实现自动。当打到“辅台”位置时，轧机前后的辅助设备（辊道、推床等）由 L2 台的操作工完成，主操作工只负责压下控制。

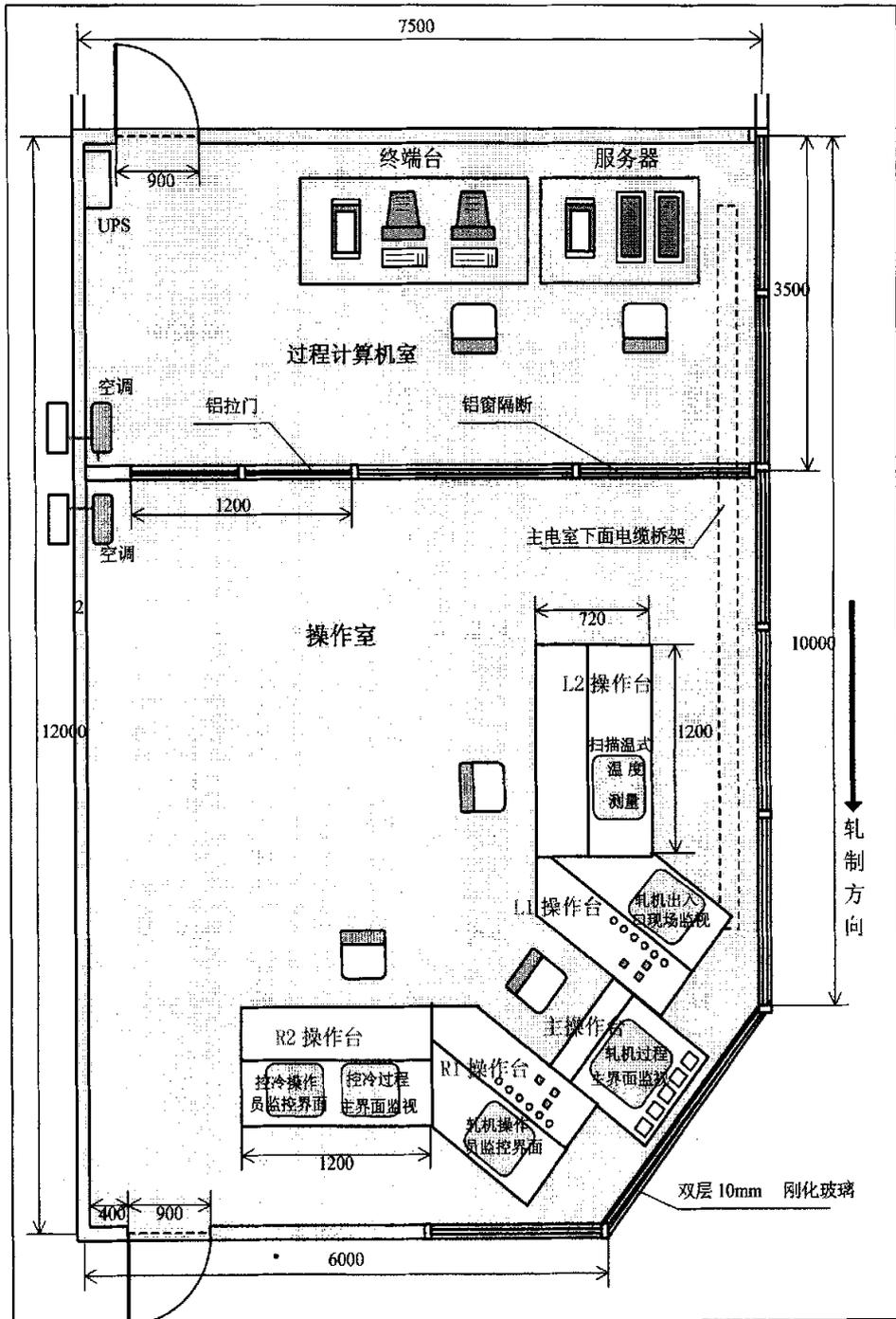


图 A.1 首钢 3500mm 轧机主操作室(5 号台)平面布置图
 Fig.A.1 The main pulpit(NO.5 control desk) plan layout of Shougang 3500mm mill

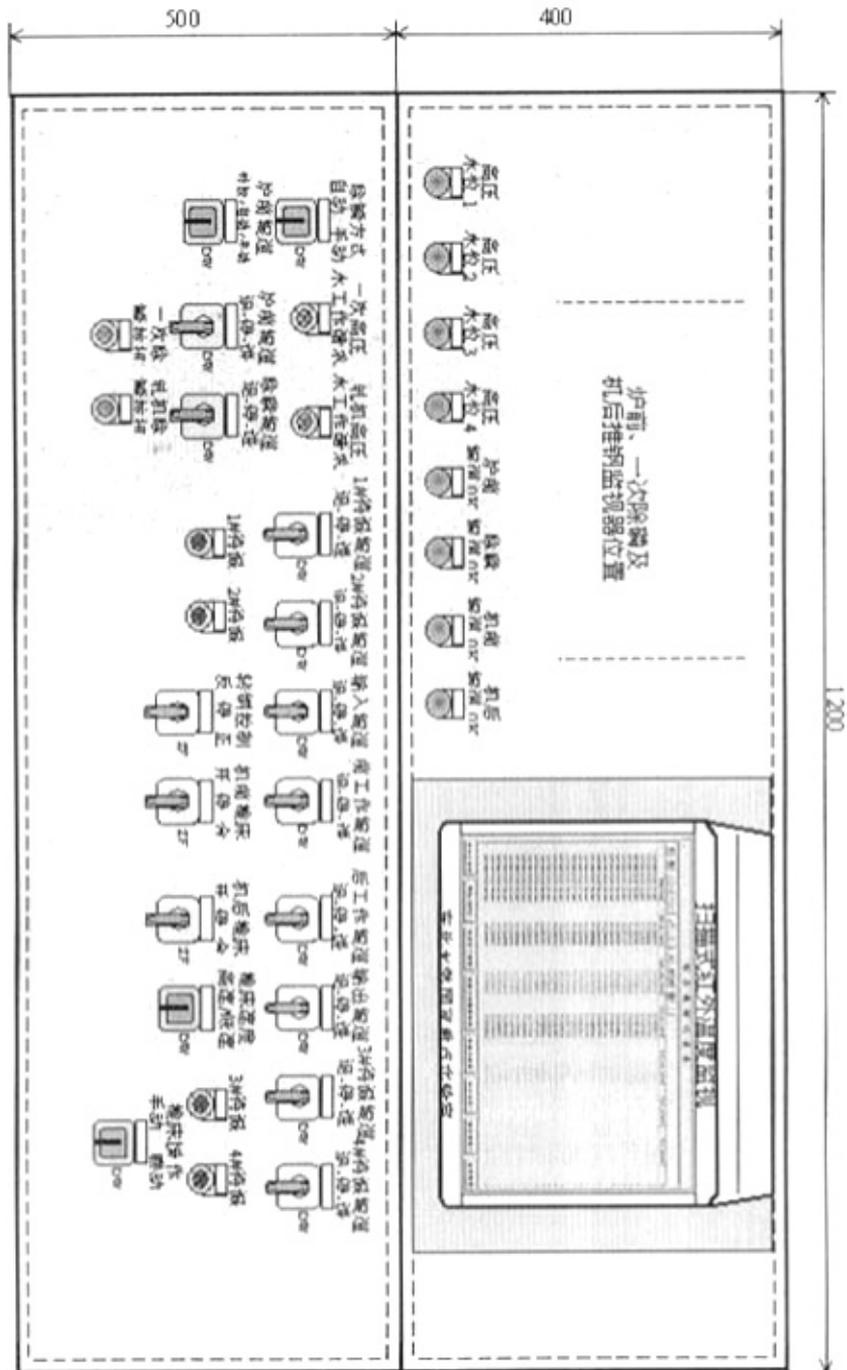


图 A.3 中厚轧机 AGC 系统 L2 主操作台盘面功能及布置图
 Fig. A.3 The L2 control desk layout and function of the plate mill AGC system

