

东北大学
硕士学位论文
中厚板轧机过程机数学模型的研究与应用
姓名：邱红雷
申请学位级别：硕士
专业：材料加工工程
指导教师：王国栋;刘相华
2003. 3. 1

中厚板轧制过程机数学模型的研究与应用

摘 要

本文结合首钢四辊轧机液压 AGC 及控轧、控冷自动化控制系统技术改造项目, 根据理论分析和经验模型对首钢中厚板轧机过程机的数学模型及轧制压下规程进行了离线和在线的研究, 并编制了轧机过程机程序, 为全自动化轧钢的实现打下了良好的基础。本文主要包括如下内容:

- (1) 针对首钢和南钢的具体轧机的轧制情况, 提出和优化轧机过程机的核心模型并编制的过程机数学模型。
- (2) 根据现场实测数据进行回归分析, 得出轧机弹跳模型和轧制力函数等数学模型, 并计算出主要钢种变形抗力修正系数, 为制订压下规程提供理论基础, 并为轧制过程的自动控制打下基础。
- (3) 辊缝的设定精度将直接关系着最终产品的厚度精度。为了提高压下辊缝预报精度, 根据现场实际轧制情况提出相应的动态修正算法。利用轧制过程的实测轧制参数来修正后续道次的预设定值, 从而逐步降低模型预报精度误差。
- (4) 自适应算法可以修正模型参数, 提高模型的预设定精度, 本文采用自适应算法来提高本块钢和同规格产品的数学模型预报精度。

上述研究是为了实现中厚板压下规程的实时在线控制, 对国内其它中厚板厂的过程计算机控制有重要借鉴作用。

关键词: 中厚板 过程机 规程 弹跳 温度模型 动态修正 自适应

STUDY AND APPLICATION ON MATHEMATICAL MODEL OF ROLLING PROCESS COMPUTER FOR PLATE

ABSTRACT

Based on the modification project on hydraulic AGC of Shougang Medium Plate Mill, the author researched the schedule setup and math models after the investigations in the fields and programming the code of process computer. All these work is preparation for the on-line process control. Following are the works the author had accomplished:

- (1) According to different condition of shougang plate mill, the author perfered and optimized the key models of process computer, and programmed them.
- (2) The author got the accurate mill spring model considering the compensation of the variable plate width and improved the influence function model about the roll force after the regression analysis, and the compensate factor for the resistance of deformation for main steel types also was calculated. These models and factor are the theoretical basis and made preparations for auto control of rolling process.
- (3) The setting roll gap is relating to the size precision of the product and it is the basis of the undersize rolling. In order to improve the prediction accuracy of the roll gage, the author present the corresponding Dynamic Correcting Method. The method can modify the rear parameters by the actual measurement in the passes ahead, avoid the bad disturbance caused by model error.
- (4) Because the importance of the prediction accuracy of the main model in the plate rolling , adapting algorithm was adopted to serve for current and the next slab.

The studies mentioned above are aimed to on-line process control in the plate rolling. They are significant to process control of other plate mill.

Key word: plate process computer schedule spring curve temperature model
dynamic correcting adaption

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外，不包含其他人已经发表的或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其它学位而使用过的材料。与我一同工作过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感谢。

本人签名： 邱红雷

日 期： 2003.3.5

1 绪论

钢铁产品当中,中厚板是重要品类之一,目前全球中厚板年产量约为 9000 万吨左右,占世界钢材总产量的 13.8%左右。我国中厚板产品近年来也有很大发展,九五年全国中厚板产量为 830 万吨,九六年为 890 万吨,九七年为 950 万吨,据统计全国中厚板厂已形成近 1100 万吨的年生产能力,可见产量的增幅还是较快的。各国的中厚板轧机和生产技术都各有特色,钢板产量和各种经济指标也达到了较高的水平。中厚板的发展向高速化、自动化和精确化方向发展。

1.1 国内中厚板发展与现状

目前我国共有中厚板轧机 26 套,辊身长度 3000mm 以上的有 5 套,2800mm 轧机有 3 套,其余均为 2300mm 级中板轧机。其中双机架轧机有 13 套,单机架轧机有 13 套。

近十几年来,我国建造了几个大型厚板厂,其中鞍钢厚板厂于 1993 年投产的 4300mm 宽厚板轧机是国内最大的轧机。另外在新建轧机的同时,对老中厚板轧机的改造工作也在不断的进行。现已基本淘汰了落后的三辊劳特式轧机,形成了中厚板轧机以 2000~3000mm 四辊轧机为主的格局,并且在新改造或新建的四辊轧机上广泛采用一些先进技术,如液压 AGC、计算机自动轧制。其它如步进式加热炉、控轧控冷、滚切式剪切、自动喷字、热处理及淬火、自动火焰切割、在线检测、探伤等国外较先进技术和设备在部分厂家也得到应用和推广。有 15 个厂家连铸比达到或接近 100%^[1]。

经过 50 年的建设和生产,我国已形成较强的中厚板生产能力,但是,与国外先进的中厚板生产相比,归纳起来还有以下 4 条主要差距:

- (1) 轧机性能差。轧机规格尺寸小,轧机性能低、宽厚板轧机少,还缺少 5m 左右的特宽厚板轧机;
- (2) 板质量差,品种不全。主要是缺少炉外精炼,钢质差;
- (3) 工艺落后,操作与管理水平差,与日本相比,金属消耗高 10%,能耗多 2 倍;
- (4) 自动化水平低,辅助设备陈旧。至今还没有一套自动化操作的厚板轧机,也没有一条现代化剪切线。

1.2 国外中厚板生产发展与现状

前世界各国现有辊身长度 $\geq 3000\text{mm}$ 的厚板轧机有 77 套,其中辊身长度 $\geq 4700\text{mm}$ 的宽厚板轧机有 19 套,按国家分布,日本有 9 套,原苏联 3 套,美、德各两套,意、法、韩各一套;辊身长度 4700mm~4826mm 的轧机 6 套;5000~5500mm 轧机 13 套(日本 5 套、原苏联 3 套、美国 2 套、德国 2 套、法国 1 套)。

厚板轧机最重要的标志是轧机辊身长度,它体现一个国家制造船舶、舰艇和油气输

送管线的实力。1941 年第二次世界大战以前,美、德、前苏联、日本分别建造了 5230、5000、5300、5280mm 四辊特厚板轧机。主要用于生产航空母舰、大型军舰用宽厚钢板。50~60 年代美国建有 4064mm 厚板轧机 7 套。60 年代后期到 70 年代初期厚板轧机的领先地位转向日本,这个时期日本建有 4724mm 厚板轧机 5 套,意大利建有 1 套 4826mm 厚板轧机,韩国 1 套 4724mm 厚板轧机。1976~1977 年间日本建有 3 套 5500mm 特宽厚板轧机,1974 年住友鹿岛将 5335mm 粗轧机改造为 5450mm 轧机。建有这种特级厚板轧机主要是为生产 $\Phi 1626$ mm 大直径 UOE 钢管用宽钢板和宽幅面、长定尺的造船钢板。近年来国外新建的宽厚板轧机有 1997 年投产的韩国浦项 3 号 4300mm 单机架厚板轧机和东国公司的 4300mm 双机架厚板轧机。伊朗的 4800mm 单机架厚板轧机正在制造和建设中。国外厚板轧机发展主要有这几个特点:(1) 从扩大产量型转向提高尺寸精度及表面质量;(2) 对板形控制(平坦度及凸度)平面形状提出了更高的要求;(3) 普遍采用了厚板控制轧制技术和加速冷却技术, TMCP 工艺已成为当今国外厚板生产的主要工艺技术^[1]。

1.3 中厚板生产发展前景

各国的中厚板轧机和生产技术都各有其特色,钢板质量和各种经济指标也达到了较高的水平。总的说,日本的厚板轧机和生产技术在上居于领先地位。归纳起来,中厚板生产的发展趋势有以下几个方面^[4,5]。

(1) 轧机越建越大

与中厚板生产密切相关的是中厚板轧机。中厚板轧机是轧钢设备中的主力轧机之一,代表了一个国家钢铁工业发展的水平,世界上每个工业先进的国家都拥有若干套。

厚板轧机最重要的标志是轧机的辊身长度,它可体现一个国家制造船舶、舰艇和油气输送管线的实力。宽厚板轧机从 20 世纪 60 年代末以来辊身长度有很大的增加,不仅轧制钢板的宽度增大,而且钢板的成品宽度、长度、厚度、板坯单重、钢锭单重和成材率等技术指标都大大超过以往轧机。

(2) 轧制技术普遍提高

中厚板轧制技术的发展是比较快的,新建轧机的尺寸都在 5m 左右,而淘汰的都是 4m 以下的,因此,中厚板轧机的尺寸普遍加大。不论是新建的,还是改造的,轧机性能也都在普遍提高。首先是轧机的刚度系数已提高至 8000kN/mm 以上,辊身单位长度的轧制力由 10kN/mm 提高至 15kN~20kN/mm,轧制速度由 4m/s 提高至 7.5m/s,主电机功率也大大加大。液压 AGC,计算机控制以及测温、测压、测厚、测宽、测长及测板形等自动化检测手段已广泛使用,轧制钢板的最大长度已由 30m 提高至 60m,生产钢板的最大宽度已达到 5350mm。钢板尺寸的偏差也缩小了,厚度最小偏差已达 ± 0.055 mm,宽度最小偏差达 ± 3 mm,长度最小偏差为 ± 8 mm 以下,镰刀弯也减至 5mm/m 以下。切废量也减至很少,总切边量只有 50mm 以下,切头尾长不到 200mm,使成材

率达到 95% 以上。热装炉时, 能耗已降至 0.6GJ/t 以下。

(3) 厚板连铸比不断提高

目前, 世界上大多数中厚板轧机采用的原料都以连铸板坯为主, 厚板的连铸比逐年提高, 日本厚板连铸比已经达到 92% 以上, 大部分厂均已做到全连铸生产。50kg 级以下普通钢和管线钢均可用 100% 连铸板坯生产。非调质钢连铸比可达 60% 以上, 调质钢已达 40% 以上。

(4) 控轧控冷技术相结合

控轧控冷可细化晶粒, 提高强度和韧性, 降低合金元素含量和碳当量, 提高可焊性, 改善钢板性能, 降低生产成本, 节约贵重的合金元素。如日本神户制钢公司加古川厂用神户控轧控冷 KCL 法, 生产 APIX70 钢板, 性能稳定且很均匀。控轧终轧温度 740~780℃, 控冷速度为 9℃/s, 冷至 550℃, 抗拉强度可提高 20~50MPa, 屈服强度可提高 20~30MPa, 而韧性的变化很小, 碳当量可由 0.37% 降至 0.28%, 各种性能均满足 UOE 焊管的要求。

可以说, TMCP 工艺已成为当今厚板生产的主要工艺技术, 前一时期 TMCP 技术主要用于生产高强度造船钢板和长距离输送石油、天然气用管线钢板以及其它用途的高强度焊接结构钢板, 近年来该工艺技术又被开发用于储罐和运输船用钢板、高层建筑用厚壁钢板、海洋构造物等重要用途的钢板。日本约有 41% 的厚钢板采用 TMCP 技术生产。

(5) 板形动态系统控制

最近 10 多年, 国外宽厚板轧机的生产从扩大产量型转向提高尺寸精度及表面质量型, 并对板形控制 (平坦度及凸度)、平面形状控制提出了更高要求。目前日本有很多厂家的成材率达 95% 以上, 切头尾和切边量降至 4% 以下。中厚板轧机广泛采用液压 AGC、横向板形控制及计算机控制, 实现了自动化板形动态控制的要求。

中厚板实现板形控制后, 要求板坯单重与尺寸精度更加准确。采用计算机设计板坯, 来满足大量定尺板的生产, 避免了短尺钢板的出现。中厚板生产曾经出现过“立辊无用论”, 现在立辊又得到较好的利用。日本川崎公司水岛厂开发了不切边厚板 (TFP) 工艺, 即采用立辊轧机将不切边厚板的板宽精度控制在 10mm 以内, 消除了侧边的重叠层, 切边量只有过去的 16%, 并可以生产不切边的矩形钢板。

为提高钢板的板形和板凸度, 以往厚板轧制以辊形和弯辊装置作为凸度和平坦度的基本控制方法。现在各大钢铁公司研制和开发了许多新设备, 如日本住友金属公司和歌山厂开发了厚板轧机可变凸度辊, 用于直径 1800mm 的上支撑辊, 使钢板凸度控制能力达到 $16\mu m$ 。1985 年日本钢管公司福山厂与日本日立制造厂合作开发了一台 4700mmHCW 型厚板轧机, 并配以 HYROP-F 液压强压下装置和工作辊弯辊装置, 工作辊横移量为 0~1000mm, 不但取得优良的板形, 使压下量增大, 且可修正镰刀弯。1989 年日本新日铁公司君津厂厚板轧机改成成对交叉 (PC) 轧机, 不但板形较好, 而

且使轧机生产能力有所提高。另外,阶梯辊在厚板轧机上也取得了较好的效益。

除了开发一些板形控制装置以外,在工艺上也研究出许多新的轧制方法。由于厚钢板在初始轧制阶段厚度较大,宽厚比不大,不能认为是平面应变条件,因此,轧制过程中轧件横向也要发生变形,尤其是头尾部更为明显,这种不均匀的塑性变形,使轧制后的钢板偏离矩形,因而增加了切头、切尾和切边损失。

70 年代末日本川崎水岛厂开发了 MAS 平面形状控制方法,使钢板在轧制终了时的形状接近矩形,自 1978 年此项技术应用以来,可比传统方法提高成材率 4.4%。其特点是在轧制开始阶段给坯料厚度断面以不同的变化来控制其平板形, MAS 法现已发展成差厚宽展轧制法和异宽轧制法。1982 年左右“狗骨头轧制法”被成功开发出来。目前还有一种方法叫道次间自动调整法(ATLAS),用于调整钢板因轧机刚性左右偏差、正反转之差和板坯厚度偏差,而在轧制后产生的镰刀弯。该法以液压压下将预测到的轧制压力在道次间进行自动调整,可达到横向平整钢板的作用^{[4][5]}。

(6) 精整现代化

厚板精整线一般由热矫直机、步进式或盘辊式冷床、表面检查修磨装置、超声波探伤仪、双边剪或圆盘剪、定尺剪、打印标记机、收集装置及冷矫直机等设备所组成,一条现代化的精整线一年可处理钢板 150 万吨以上。

1.4 课题的研究背景

首钢中厚板厂原轧机是二辊+四辊形式,是引进的二手设备。其精轧机为四辊轧机,辊身为 3340mm,带有液压 AGC 系统,但是这套设备陈旧、落后,过程控制系统也一直未能完全投入使用,成品精度不高,范围不广,已不适应市场要求,造成大量企业资源浪费,使企业产品失去了市场竞争力。为了进一步降低生产成本,提高产品质量,将首钢的中厚板厂建成国际先进、国内一流的中厚板材生产基地。首钢和东北大学轧制技术连轧自动化国家重点实验室合作对其进行改造,轧机由中国二重制造,其辊身长度为 3500mm。这次改造将液压厚度自动控制系统(液压 AGC)应用到轧机上,并实现整个轧制生产线的全自动轧钢,从而提高成材率,减少同板差和异板差,降低企业的成本,增强市场竞争力。这次改造后轧机具有很多新的功能,具体如下:

- 具有弯辊
- 轧辊的分段冷却
- 液压 AGC
- TMCP
- 自动转钢
- MAS 轧制功能
- 轧制规程的自动设定、在线修正

➤ 轧制线的全自动跟踪（全自动轧钢）

这次改造项目已经获得国家经贸委资助。

1.5 本文研究内容

本文结合首钢 3500mm 轧机改造项目，进行如下几个方面的研究工作：

1. 查阅国内外文献的基础上，综述中厚板轧机的发展历程、现状及今后发展的方向；
2. 在熟悉相应的轧线设备及工艺流程的基础上，进行轧机过程机程序总体框架设计并进行过程机数学模型的选取与优化；
3. 使用 C++ 语言实现首钢中厚板轧机过程机程序代码的编制与现场调试。

2 中厚板轧机控制系统

随着经济的发展,用户对中厚板的需求量不断增加,对其质量的要求也越来越高。采用计算机控制系统,不仅可以帮助操作人员选择最优工艺和最佳操作参数,而且也可以实现用传统方法难以实现的控制规律,从而达到降低原料和能源消耗,降低成本,提高产品的产量和质量的目的。而且实现轧制过程自动化后,产品的轧制过程的稳定性和精度都会得到很大提高。

2.1 计算机控制系统

为了充分发挥二级机的过程控制和数据监控、管理功能。首钢中厚板四辊轧机中厚板的这套系统采用两级计算机进行控制,计算机控制系统结构图如图 2.1 所示。

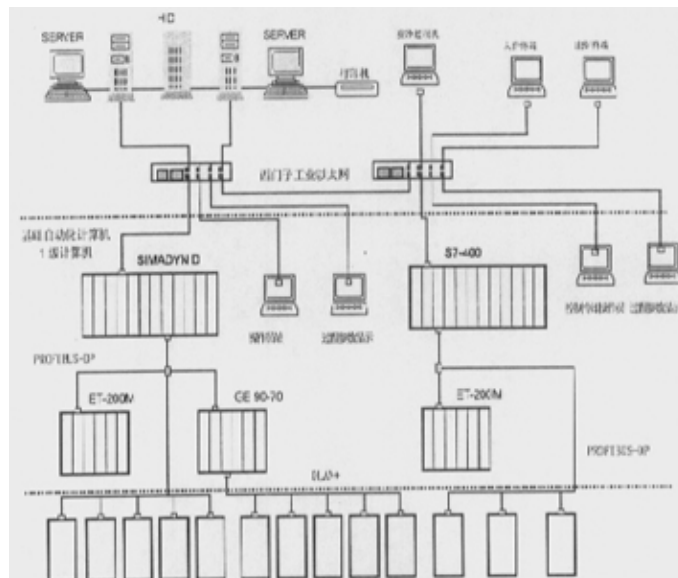


图 2.1 计算机控制系统结构图

Fig2.1 Structure diagram of control system

上位机实现管理功能,其核心是以 Siemens 监控软件 Win CC 为平台开

发出的一套中厚板轧机过程控制软件。该软件用来处理生产和过程自动化中的数据、图形显示和控制等任务的系统。Win CC 平台提供了在工业上用于数据、图形显示、信息处理、归档和报表的功能模块。Win CC 为用户提供了开放式接口, 这些接口方便用户根据实际需要来编制应用程序。Win CC 基于 32 位操作系统 MS WINDOWS 95、MS WINDOWS NT 或 MS WINDOWS2000, 具有多任务处理能力。

2.1.1 一级计算机系统

一级计算机系统即基础自动化系统, 包括轧制区的基础自动化和控制冷却区的基础自动化。轧制区基础自动化的主要功能是根据轧制区二级机设定的参数实现 AGC 和控制轧制。采用多 CPU 的西门子 SIMADYN D 及 PROFIBUS-DP 远程 I/O ET200 系统。控制冷却区基础自动化的主要功能是根据控制冷却过程机设定的参数实现水流量控制和辊道速度控制, 采用西门子的 S7-400PLC 及 PROFIBUS-DP 远程 I/O ET200 系统。系统通讯采用工业以太网, 系统的操作员和监控界面为 Siemens 监控软件 Win CC。

2.1.2 二级计算机系统

二级计算机系统即过程控制系统包括轧机 AGC 过程控制系统和控制冷却过程控制系统。过程计算机采用美国 COMPAQ PC Server ML570 系统 2 台, 1 用 1 备, 镜像磁盘阵列 3*40GB, 操作系统为 WINDOW 2000, 与基础自动化级 PLC 通过工业以太网相连, 同时连接有 6 台终端, 用于过程监视和控制。控制冷却计算机采用 1 台工业控制机 (IPC)。过程计算机系统包括服务器系统及用于过程控制和监视用的终端。服务器通过工业以太网与基础自动化级 PLC 相连, 同时与终端相连。轧机 AGC 过程机的主要功能主要是轧制规程的设定计算, 轧制模型的优化和自适应, 轧制过程轧件跟踪。控制冷却过程计算机系统的主要功能是确定冷却方式、集管开启组数、集管水流量、通板速度及模型的优化和自适应、冷却过程的轧件跟踪。

根据首钢二级机系统计算机的组成结构图, 可以得到首钢二级机的系统简图如 2.2 所示。

首钢二级计算机系统的功能主要分为这几个部分: ①人机界面; ②过程机; ③过程跟踪; ④计算机数据通讯; ⑤数据库。其程序的触发主要通过过

程跟踪来实现。过程跟踪依据轧制线采集的信息，对轧制线上的轧件进行跟踪，一方面为操作工显示正确的轧件位置和有关数据，另一方面依据实际轧件的位置，触发计算机中相应的程序，从数据库中调用相应的数据，进行计算，指挥轧制过程的进行。首钢二级机系统总体调用框图如图 2.3 所示。

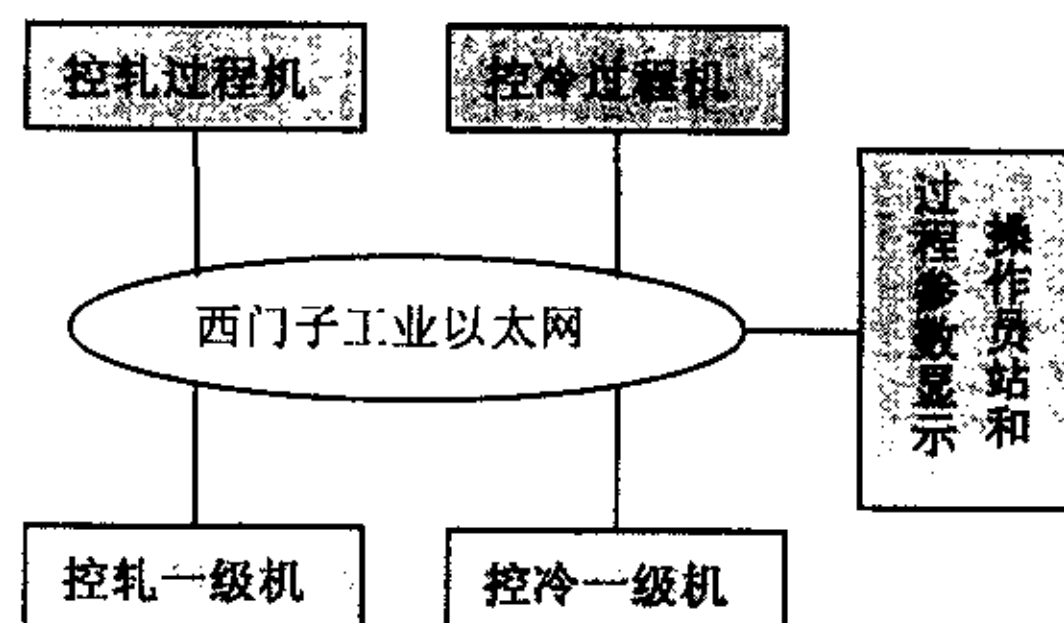


图 2.2 首钢二级机系统图

Fig. 2.2 Diagram of Shougang steel second class system

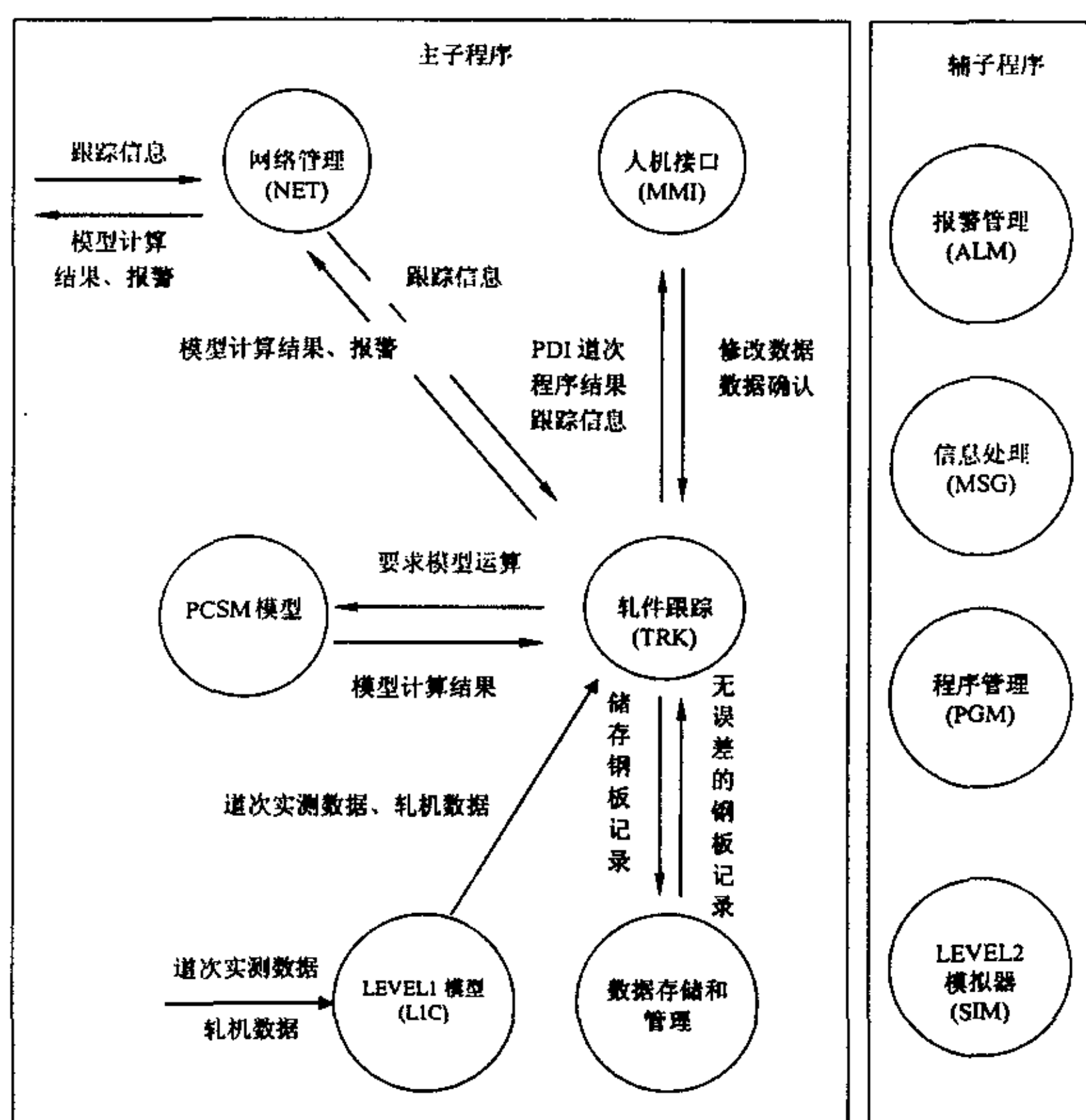


图 2.3 二级机系统总体调用框图

Fig.2.3 Diagram of Shougang steel second class

确定轧制过程中的工艺参数值。通过数学模型进行轧制工艺参数的设定计算及对板坯的跟踪控制,同时将设定值适时传给基础自动化。由基础自动化计算机进行设备的实时自动控制及板坯的自动化搬运控制,实现轧制过程的自动化。

2.2 轧制设备

根据首钢中厚板厂的具体情况,过程机系统控制范围是从高压水除磷箱输送辊道到轧机后加速冷却区出口为止。设备组成为:除磷箱输送辊道、轧机上/下辊、前/后输入辊道、前/后工作辊道、前/后机架辊道、前/后回转辊道、前/后推床、机架除磷装置、压下、冷却辊道、冷却设备。四辊轧机设备参数如下:工作辊尺寸: $\Phi 950/1050 \times 3500\text{mm}$;支撑辊尺寸: $\Phi 1900/2100 \times 3300\text{mm}$;最大开口度:300mm;机架刚度:10MN/mm;压下方式:电动/液压压下;电动压下速度:0~35mm/s;液压 AGC 最大压下速度:29mm/s;额定轧制力:70MN;最大轧制力:74MN;主传动:交流电机,速度 0/50/120r/min,功率 7000kW $\times 2$,最大轧制力矩 3070kNm $\times 2$;最大转钢长度:4500mm。改造后首钢中板厂轧机区域工艺布置如图 2.4。

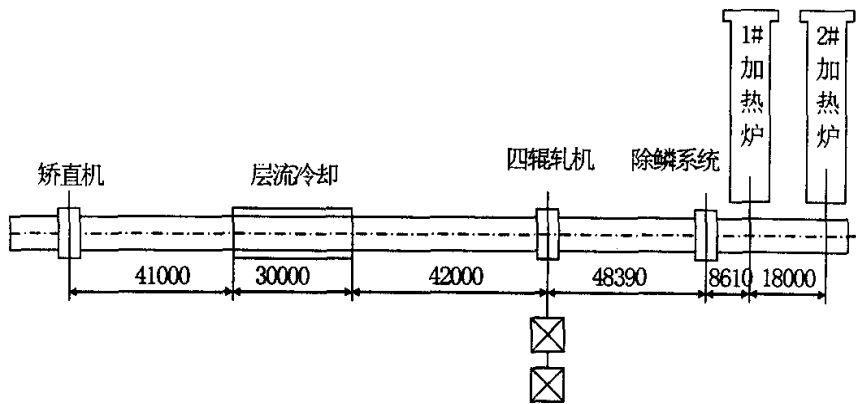


图 2.4 设备布置图

Fig2.4 Composition diagram of equipment

根据首钢设计院提供的首钢中板厂轧机改造工艺平面布置图,改造后轧机和矫直机中心线距离为 113000mm,轧机中心线到层流冷却入口处对距离为 42000mm;控制冷却设备长度 30000mm (直集管)。图 2.5 是改造后的首

钢新轧机现场实际图。

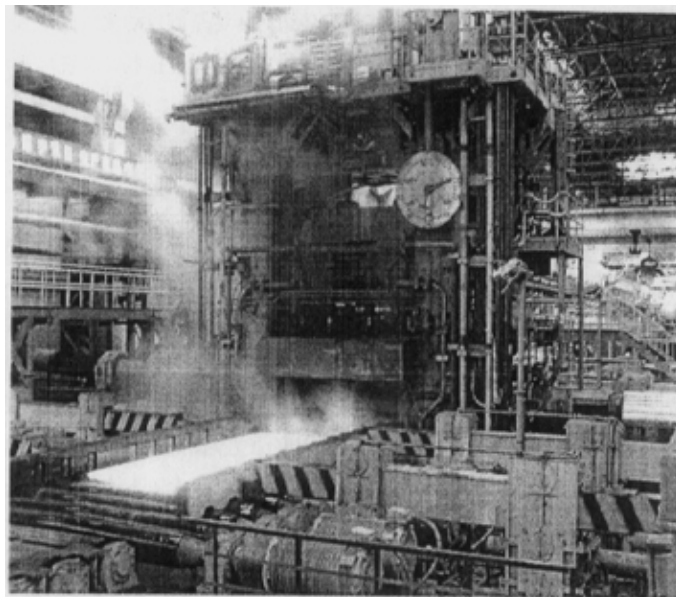


图 2.5 轧机现场图
Fig2.5 Spot picture of

2.3 过程机设计

过程机设计的基本框图如图 2.6

2.3.1 中厚板轧制工艺过程简介

首钢中厚板轧制工艺过程如下：坯料入炉加热至相应温度→出炉进行高压水除鳞→运送到轧机中进行成形轧制→转钢后进行展宽轧制→转钢后进行伸长轧制直至达到最终尺寸要求→运送至加速冷却系统进行冷却→矫直^[4,5]。

以上过程是针对常规轧制；对于控制轧制过程而言其伸长轧制过程分成两个阶段：待温前阶段和待温后阶段。在待温前阶段轧件被轧制到一定厚度后，运送到待温辊道进行待温，逐渐冷却到 PDI 所规定的再启动轧制温度，然后开始待温后阶段的轧制。根据上述轧制工艺，可以将轧制过程分成多个轧制阶段：成形阶段、展宽阶段、待温前阶段、待温后阶段。

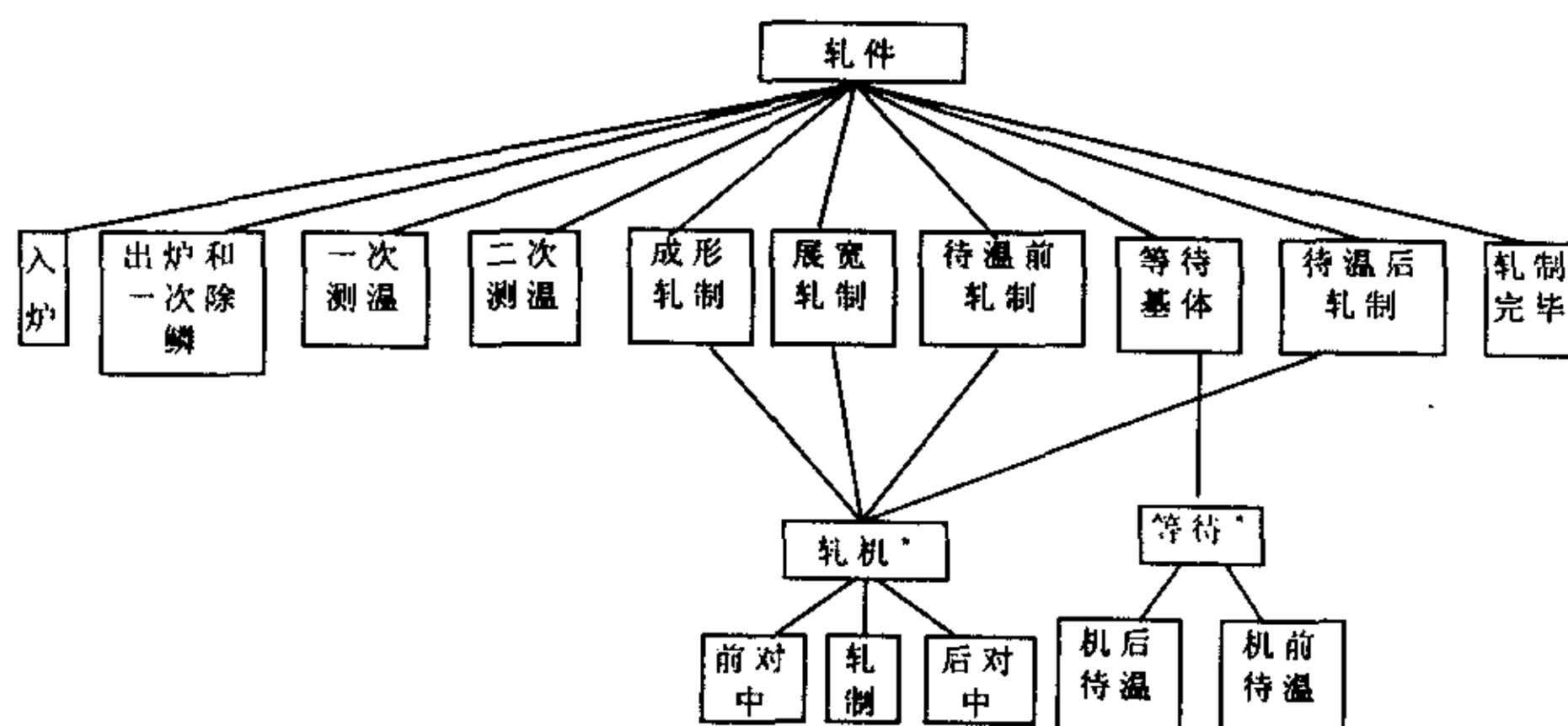


图 2.6 模型调用框图

Fig2.6 Diagram of model calling.

2.3.2 轧机过程机计算机控制逻辑

由于轧制过程是一个非常复杂的工程，其中需要通过大量的计算和数据交换。为了确保轧制过程的顺利进行，需要对轧制过程进行分析，确定需要进行何种

计算及其触发机制。首钢轧机过程机计算机的触发时序如表 2.1。

(1) 入炉前的轧件 PDI 数据确认

在入炉前，原料的原始数据（PDI）被输入，并且在输入界面被确认。PDI 数据被输入后，首先通过人机界面对其上下限进行检查，如果超过上下限，需要报警。通过人机界面检查后，人机界面向过程控制系统（PCS）发出激活信号，PCS 系统读取 PDI 数据并根据 PDI 数据查询模型参数数据库和自学习数据，最后将 PDI、模型参数数据、自学习数据整合成一个公共指针变量，并激活模型控制系统（MCS）进行预计算，给出一个可行初始压下规程。计算完成后在数据库的原始数据区 CAST_PDI 分配一个新的记录空间，用于储存该块钢的所有数据。轧件的一套完整的轧制规程被送回过程控制系统（PCS）。如果 PDI 数据检查出错或者根据 PDI 数据无法计算轧制规程，模型将反馈一个错误信号。该信号反馈给人机界面。

表 2.1 过程控制逻辑表

Table 2.1 Process logical control

No	构成机能	启动时刻
1	入炉前的轧件 PDI 数据确认	PDI 输入时, 在人机界面进行“按键”触发。
2	等待出炉确认	操作工根据人机界面提示, 按键进行确认。PCS 给轧件分配相应的跟踪信息和内存区域。
3	一次测温计算	获取待温辊道区域 1 上测温仪的信号后进行温度校核, 但此时不对轧制规程作修改
4	二次测温计算	获取待温辊道区域 1 和 2 上测温仪的信号综合进行温度校核, 并对轧制规程作修改
5	阶段轧制前修正计算	获取每个阶段轧制前测温信号和宽度信号后进行阶段前修正计算。(由于轧机第一道次辊缝设定的实时性, 在二次测温计算后如果允许就应该预摆辊缝)
6	道次动态修正计算	PLC 获得道次实测参数后, 自动启动。
7	自学习计算	操作工输入终轧测量参数, 按键启动。

(2) 等待出炉确认

当板坯出炉前, 在所有情况下, 操作员必须根据人机界面提示进行板坯等待出炉确认, 然后 PCS 就可以分配跟踪号和相应的内存, 并调用 MCS 进行轧制规程的预计算, 同时该块钢的数据进入在线跟踪区域。

(3) 一次测温计算

当板坯加热完成后, 板坯表面覆盖着氧化铁皮。在板坯被轧制前, 氧化铁皮必须被清除。此项工作由除鳞箱来完成, 除鳞箱使用高压水来清除板坯顶部和底部的氧化铁皮。为了提高除鳞设备的除鳞效果, 喷嘴高度可按照板坯厚度进行调整。在高压水除鳞设备和轧机之间有 3 个红外测温仪和 5 个热金属检测仪。在获得第一个测温信号后, 一级机记录出口处的高温计读数并将其传送到 PCS 中, PCS 调用 MCS 进行温度校核。根据实测表面温度进行第一阶段的一次预计算, 其计算结果直接用于轧机第一道次辊缝的设置。

(4) 二次测温计算

在获得第二个测温信号后，一级机记录出口处的高温计读数并将其传送到 PCS 中，PCS 调用 MCS 进行温度校核。同时进行轧制规程的修正计算。其修正原则：首先根据测量温度计算其实际温度，将该温度与第一次预计算中的温度进行比较，如果差别大于 20 度，进行第二次预计算，并根据计算结果重新设定轧机第一道次辊缝设定值；否则不进行第二预计算。如需要根据修正规程进行辊缝的再次预设。

(5) 阶段轧制前修正计算

当获得第三个测温仪的信号后，轧件已经到达轧机前 4~5m 左右的地方，推床装置可以测出轧件的宽度，根据实测温度和宽度与上一次预计算采用的数值的偏差大小确定是否进行第 0 道次的修正计算。由于轧制过程是由多个轧制阶段组成，所以上述预计算都是针对第一个轧制阶段进行。在每个轧制阶段的最后一个道次的实测轧制数据传送到过程机后，过程机需要后续规程再次预计算。以修正轧机过程机的模型设定精度。

有一种特殊情况，就是控温轧制时，在待温前阶段轧制完毕后，轧件需要传送到待温辊道上进行空冷一段时间，如果这段时间足够长，则需要利用这段时间进行第二块钢甚至第三块钢的轧制，提高轧制节奏，即通常所说的两块钢控轧和三块钢控轧。为此在进行待温前阶段的轧制规程的预计算时，应该计算出相应的待温时间，并进行轧制节奏的计算判断是否可以进行下一块钢的轧制。如果轧件在轧制规程的最后一个轧制阶段完成后，操作人员认为其终轧厚度不满足要求，需要追加一个或两个道次，使之满足厚度精度。

(6) 道次动态修正计算

轧件在轧机中进行可逆轧制，由于轧制速度有限且两个道次之间存在一定间隙时间，所以 PLC 有足够的时间采集实际轧制数据并将其传递给过程机进行修正计算，后续所有道次设定值进行调整。每道次轧制时可以测到轧制力、辊缝、电流、轧辊转速、电压，这些信号在轧件中间 1/4 处被轧制后传送到 PCS。同时轧前的温度信号，测宽信号也在这个时候作为道次实测参数一并传给 PCS，PCS 调用 MCS 进行道次修正计算。

(7) 轧制終了自学习计算

轧件在轧制到最后一个道次后,需要根据总体轧制过程的数据进行分析,修正计算模型中的参数误差,并用于调整下一块钢的轧制过程,这个计算过程就是自学习计算。轧件轧制完成后,操作工输入相关的终轧厚度、终轧板形信号,并按下“规程复位”键确认。PCS 系统调用相应的自学习模块,进行模型参数的学习。学习计算通过中间层管理程序写入相应的模型数据库中。

2.3.3 轧机过程机数据流图

轧机过程机的总体数据流图如图 2.7。

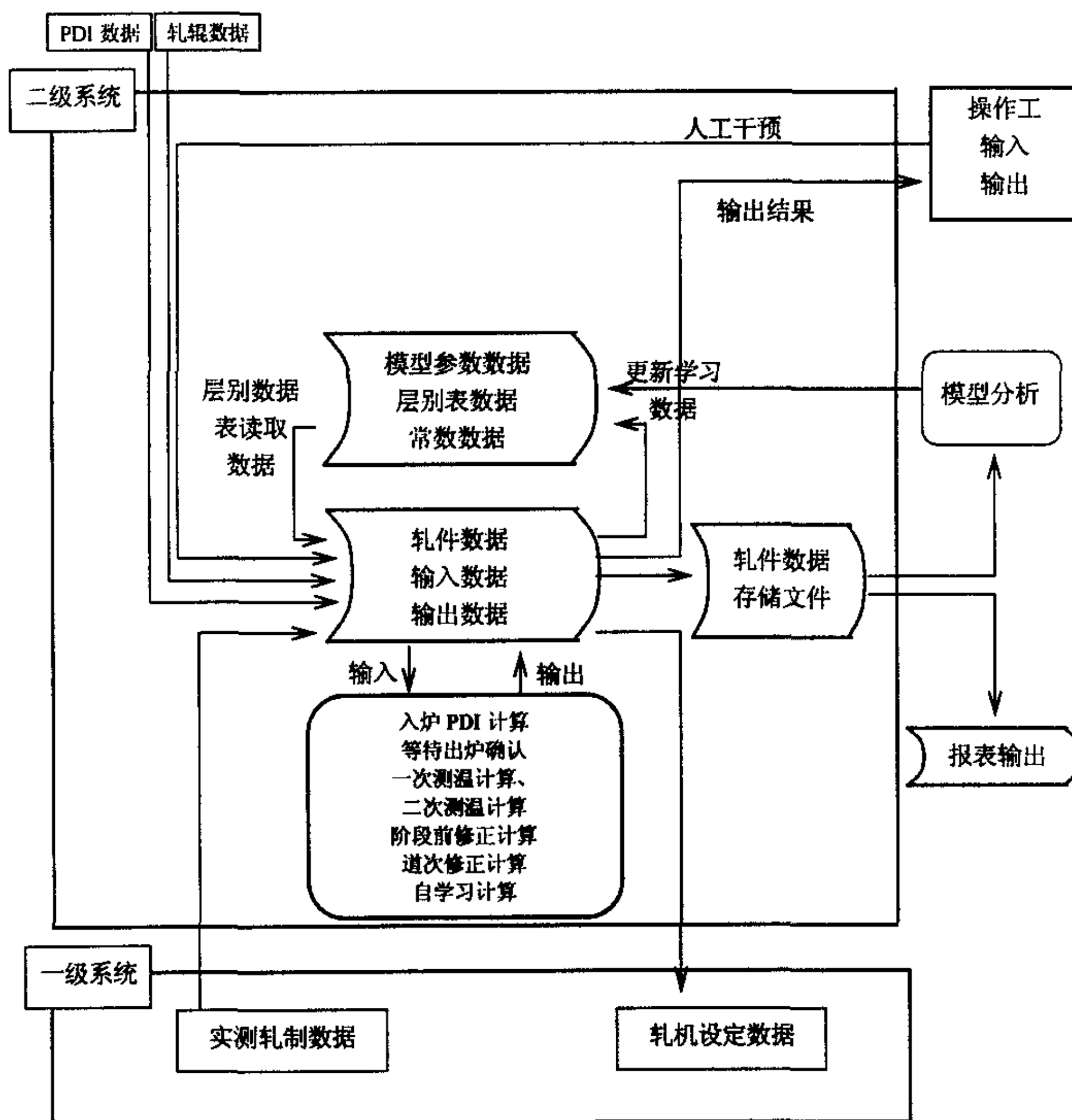


图 2.7 过程机数据流图

Fig2.7 Diagram of process system data stream

(1) 入炉前的 PDI 输入

入炉前的 PDI 输入数据流程图如图 2.8。

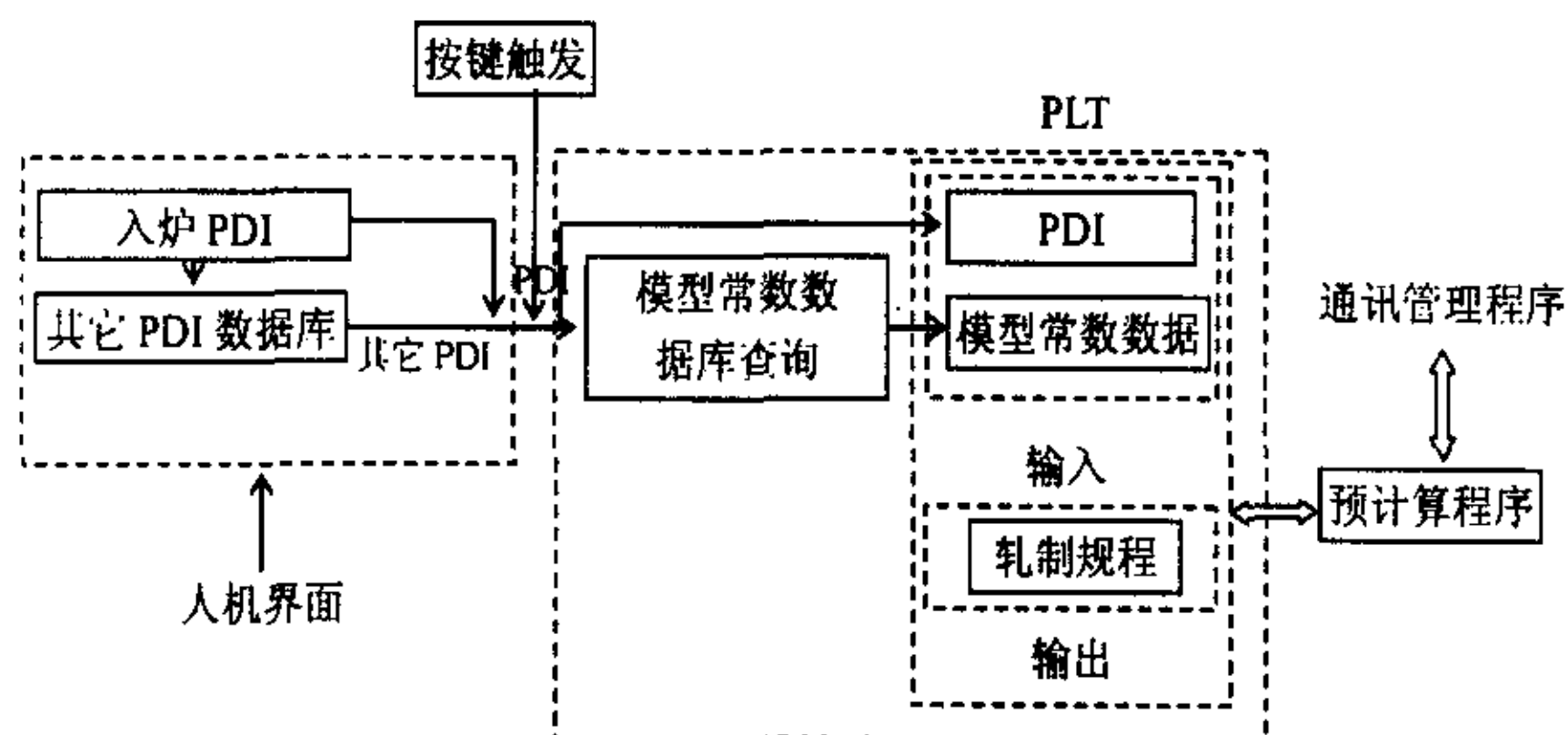


图 2.8 PDI 入炉确认数据流程图

Fig2.8 Data flowchart of PDI input when plate enter

(2) 等待出炉确认

等待出炉确认的流程图如图 2.9。

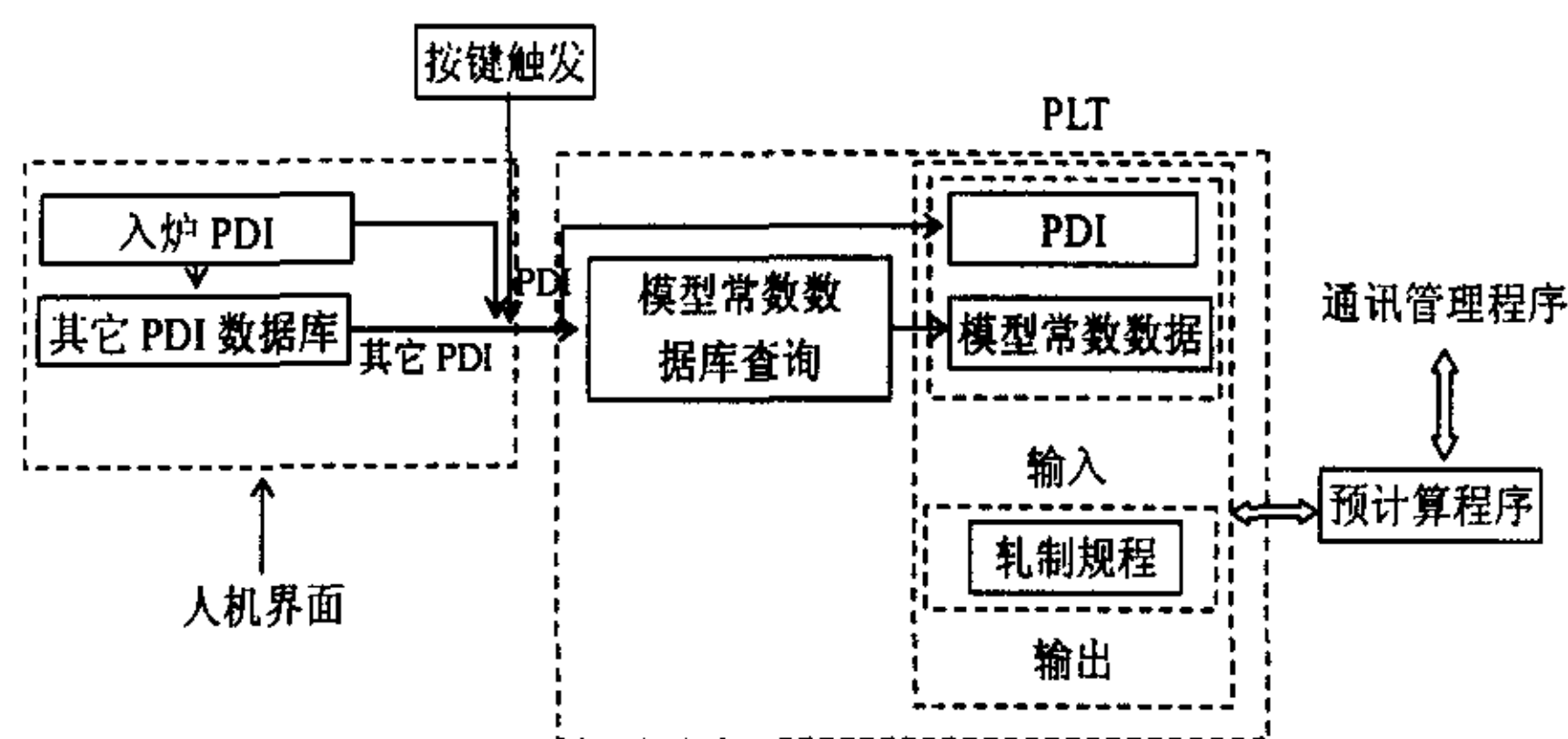


图 2.9 等待出炉确认数据流程图

Fig2.9 Data flowchart when plate wait for discharge confirm

(3) 一次测温计算

一次测温计算的数据流程图如图 2.10。

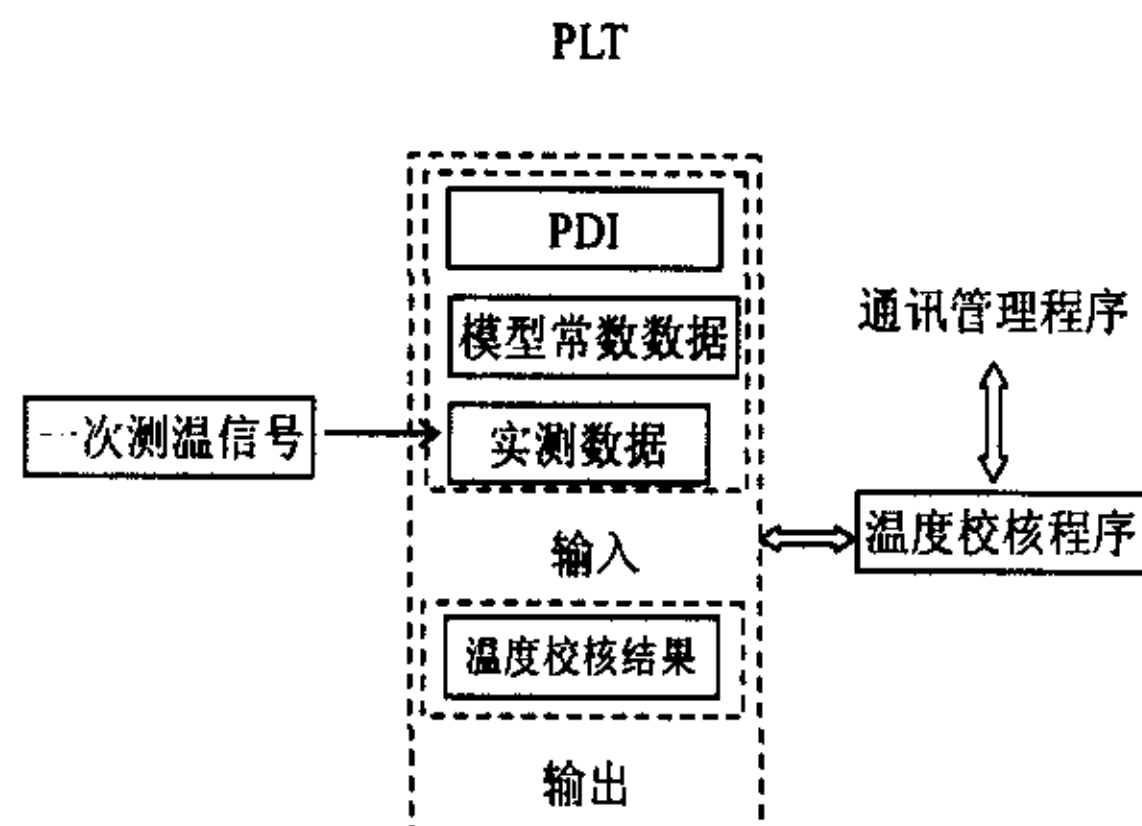


图 2.10 一次测温计算数据流程图

Fig2.10 Data flowchart of first temperature measure

(4) 二次测温计算

二次测温计算的流程图如图 2.11。

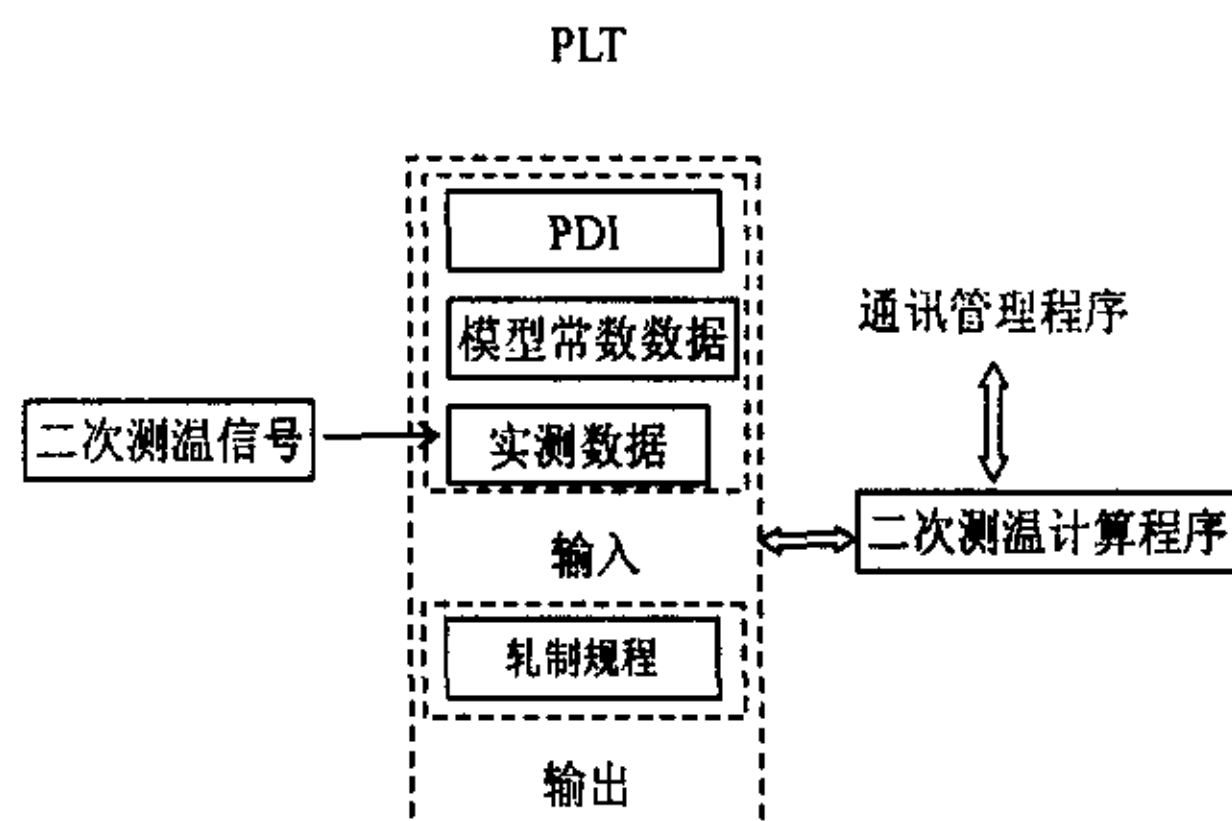


图 2.11 二次测温计算数据流程图

Fig2.11 Data flowchart of second temperature measure

(5) 阶段前修正计算

阶段前修正计算流程图如图 2.12。

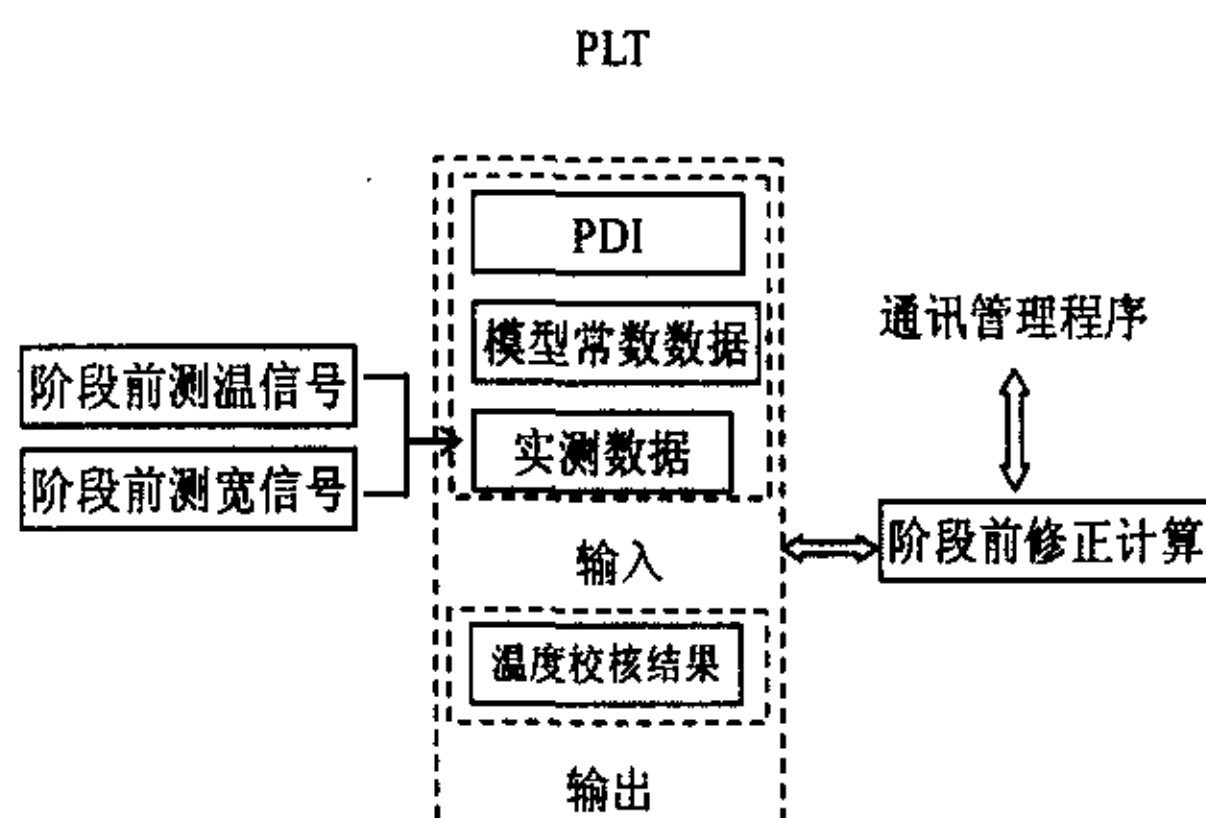


图 2.12 阶段前修正计算数据流程图

Fig2.12 Data flowchart of phase modify.

(6) 道次动态修正计算

道次动态修正计算流程图如图 2.13

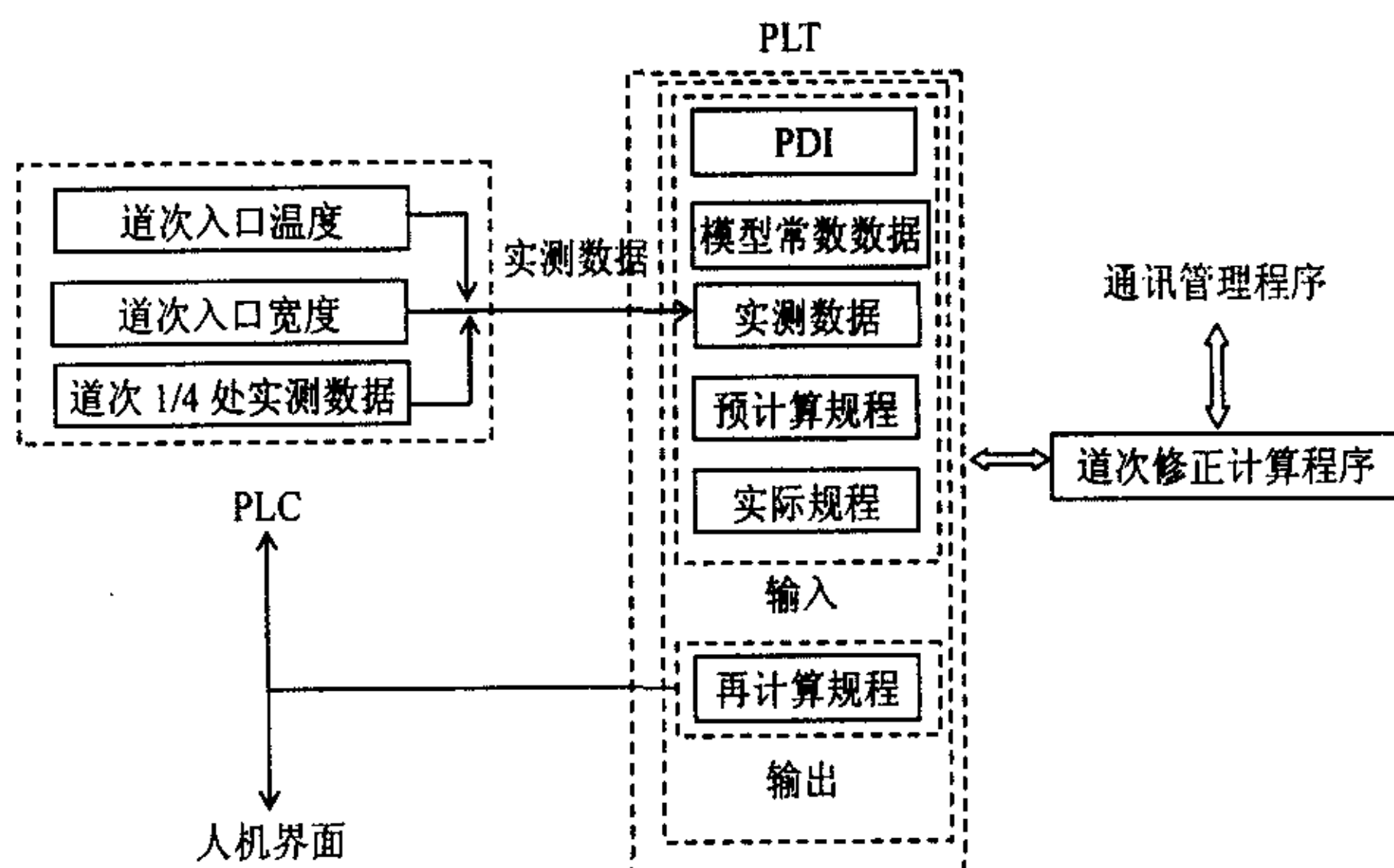


图 2.13 道次修正计算过程机数据流程图

Fig2.13 Data flowchart of pass modify

(7) 自学习计算

自学习计算的流程图如图 2.14。

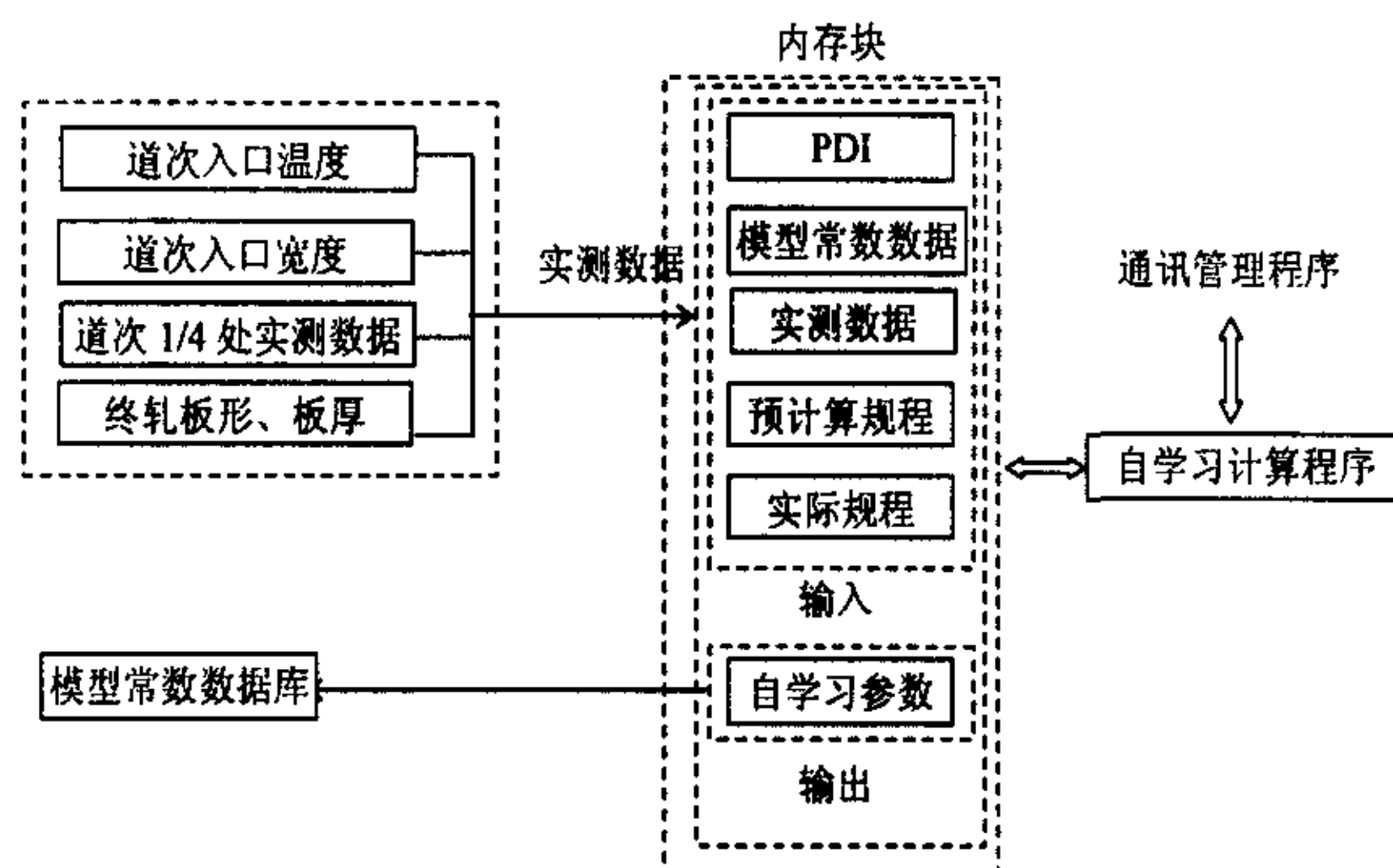


图 2.14 自学习计算过程机数据流程图

Fig2.14 Data flowchart of self adapting

2.4 本章小结

- (1) 对首钢中厚板采用的计算机控制系统作了简要说明；
- (2) 对于首钢过程机的程序框架设计和数据流做了详细的研究与设计。

3 轧制数学模型的建立与应用

中厚板轧机过程机的基本数学模型是轧机过程机的基础，其主过程机数学模型要分为四个部分，轧机弹跳模型，温度模型，力能模型，板形模型。

3.1 轧机弹跳模型

在轧钢生产中，轧辊和轧件的相互作用是通过轧制压力来体现的，轧辊对轧件施加压力使轧件发生塑性变形，从而使轧件的厚度变薄（由入口厚度 H ，压缩到出口厚度 h ，压下量为 $H-h$ ），这是轧制过程的主要目的之一。但与此同时轧件却给轧辊以同样大小、方向相反的反作用力，使机座各零件产生一定的弹性变形，而这些零件的弹性变形的累计后果，都反映在轧辊的辊缝上，使轧辊辊缝增大（由空载辊缝 S_0 增大到有载辊缝 S_p ，而 $S_p=h$ ），这称为弹跳或辊跳（如图 3.1）。同时由于轧辊产生弯曲变形，也导致辊缝沿宽度方向不均匀，这将引起板形变化^[7]。

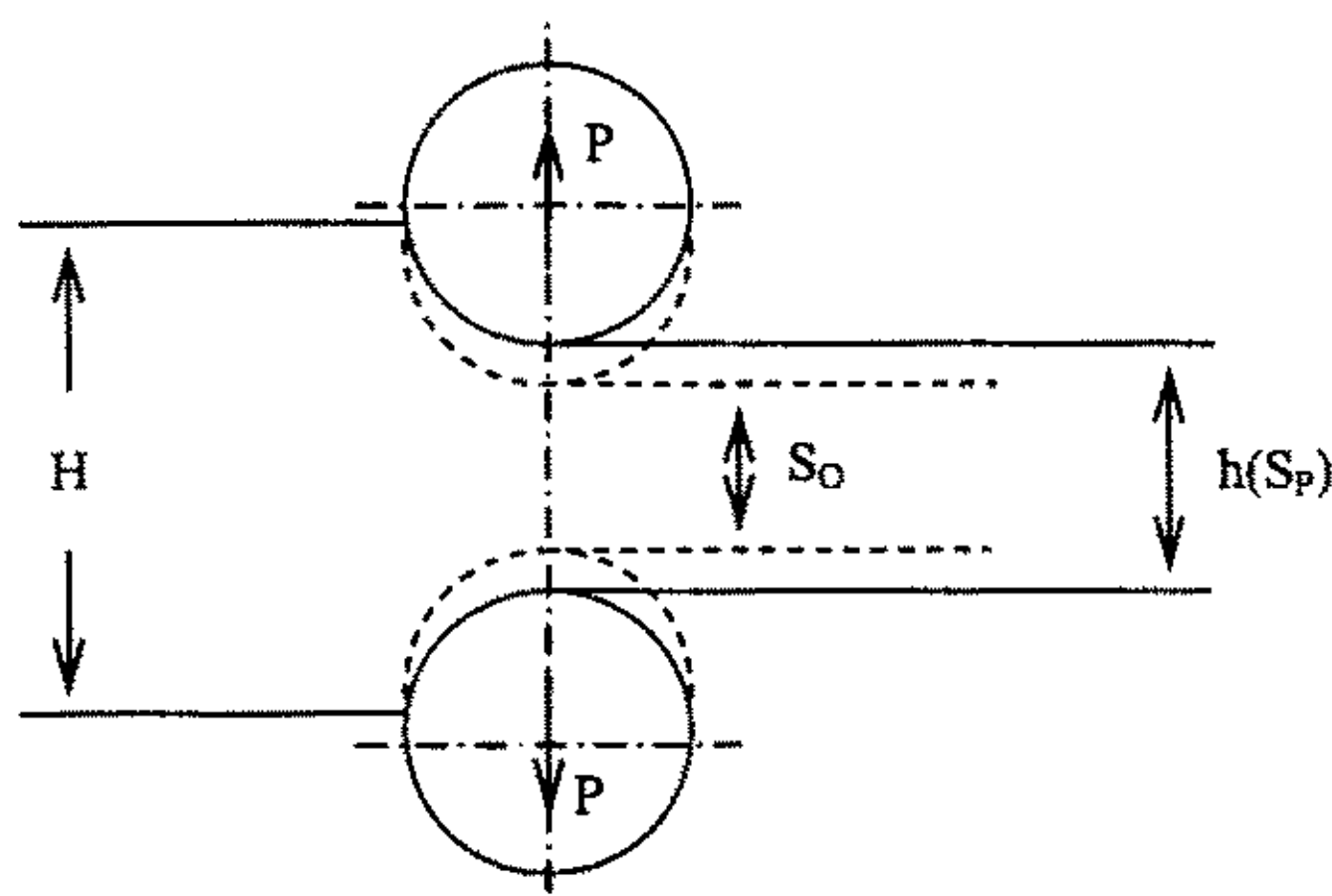


图 3.1 弹跳现象

Fig.3.1 Phenomenon of spring

轧机弹跳量一般可达 1~5mm，这对于中厚板轧制过程来说是不能忽略的，因为中厚板轧制的后几个道次的压下量仅为几个 mm，轧机的弹跳量与压下量属同一数量级，因此必须考虑弹跳影响，并需对弹跳进行精确计算，

这样才能得到符合公差要求的中厚板产品。

根据弹跳现象可写出以下关系式：

$$h = S_p = S_0 + S_F \quad (3-1)$$

式中：

h ：轧件出口厚度；

S_p ：有载辊缝； S_0 ：空载辊缝；

S_F ：轧制力为 F 时的弹跳量

根据实践，机座的弹跳变形与压力之间不是简单的线形关系，而是在低压力段为一曲线，当压力大到一定值后，压力和弹跳变形才近似呈线形关系。这一现象的产生主要是零件之间存在接触变形和轴承间隙。这一非线性区并不稳定，每次换辊后都有变化，特别是压力接近于零的变形很难精确确定，因此上面的关系式很难实际应用。

在现场实际操作中，为了消除上述不稳定的影响，都采用所谓的人工零位的方法，即先将轧辊预压靠一定的压力 P_0 ，此时将辊缝仪的指示清零（作为零位），这样可克服不稳定段的影响^[7]。

图 3.2 表示了压靠零位与轧制过程中轧辊位置和轧件的相互关系。曲线 C 为预压靠曲线，在 O 处轧辊受力开始变形，压靠力为 P_0 时变形（负值）为 ok ，此时将辊缝仪清零，然后抬辊，如抬到 g 点，此时辊缝仪指示为 $kg=S$ （ g 点不稳定，实际上不易确定），由于曲线 A 和曲线 C 完全对称，因此， $ok=gf$ ，所以 of 即为 S ，如此时轧入厚度为 H 的轧件产生轧制压力为 P （轧件的塑性曲线为曲线 B ），轧出厚度为 h 。

从图 3.2 可以得到如下关系：

$$h = S + (S_F - S_{F0}) \quad (3-2)$$

式中：

h ：轧件出口厚度； S_p ：有载辊缝；

S_0 ：空载辊缝； S_F ：轧制力为 F 时的弹跳量；

S_{F0} ：轧制力为 F_0 时的弹跳量。

由此式可知，当轧制力为预压靠 F_0 时， $h=S$ ，既轧件出口厚度和辊缝仪指示值吻合。此关系式是辊缝设定、板带钢厚度自动控制的基本依据，并可作为间接测厚的一种方式，用它来表示轧件厚度时虽然其精度不是很高，但

与用轧制力方程来表示厚度的方法比较,其精度还是较高的^[7]。

弹跳方程与另一个基本工艺方程—塑性方程联立可以解出轧机的工作点,在自适应系统中,弹跳方程也是基本依据。实践表明轧机的弹跳与轧制时的压力和轧机刚度有密切关系。弹跳方程的精度对绝对 AGC 厚度控制方式是否正常投入影响很大,下式是对各种补偿进行修正后的轧机弹跳方程的基本型式:

$$h = S + (S_F - S_{F0}) + C - \Delta + G \quad (3-3)$$

式中:

h : 轧件出口厚度; S : 初始设定辊缝;

S_{F0} : 辊缝调零时的轧制力; S_F : 实际轧制压力;

C : 宽度补偿; Δ : 油膜厚度的变化量;

G : 轧辊热膨胀和磨损补偿量及其弹跳自适应项。

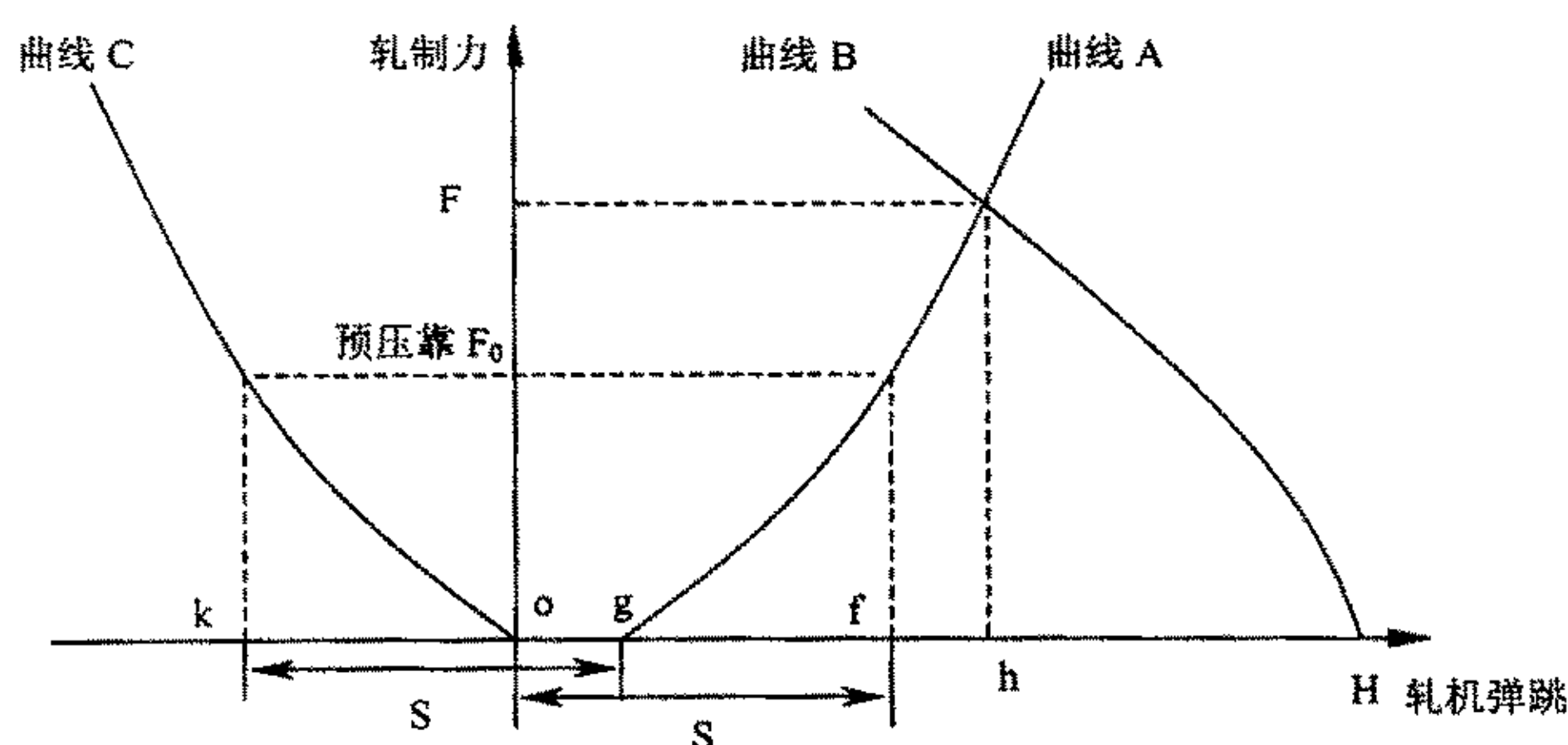


图 3.2 压靠零位和轧制时的弹性变形曲线
Fig.3.2 Kiss zero and spring curve of rolling process

3.1.1 弹跳影响因素及其模型建立

中厚板弹跳方程的精度受到下面几个主要因素的共同作用:(1) 轧机自然刚度;(2) 轧辊直径;(3) 轧辊凸度;(4) 轧制力;(5) 轧件宽度;(6) 油膜厚度的变化;(7) 两侧刚度的差异。

考虑上述因素及其弹跳自适应项,我们可以进一步写出弹跳模型的结构

$$h = S - S_0 + G(F) - G(F_0) + F \cdot \Delta K_F + \Delta_{oil} + \Delta_{adapt} \quad (3-4)$$

其中:

h : 轧件出口厚度 mm;

S : 无载辊缝 mm;

S_0 : 调零辊缝 mm;

$G(F_0)$: 轧辊压靠曲线函数 mm;

F : 轧制压力 kN;

F_0 : 调零压力 kN;

ΔK_F : 轧件宽度、辊径、轧辊凸度变化造成的辊缝设定弹性变形的系数变化, mm/kN;

Δ_{oil} : 油膜厚度补偿 (针对之间头部), mm;

Δ_{adapt} : 辊缝零点补偿, mm。

将轧机和轧辊看成一个整体进行受力分析。轧制过程中, 压下丝杠通过支撑辊轴承座将压力传递给轧件, 造成辊系发生挠曲变形和压扁变形; 同时由于反作用力的影响, 压下丝杠和轧机牌坊等发生弹性变形。这两部分的综合变形对轧机刚度有直接影响。

3.1.2 轧机自然刚度影响

轧机自然刚度是轧机本身自有的属性。轧机牌坊、压下丝杠和液压缸等是固定不变的系统, 如果轧辊直径和轧辊凸度一定的话, 则轧机自然刚度就是一个固定值。但是轧机自然刚度很难从理论计算得出。从某种意义上, 轧机自然刚度可以简化成轧辊 *Kiss* 刚度, 在这种状态下, 辊系也会发生挠曲和压扁 (*Kiss* 状态和轧件宽度等于辊身长状态下, 轧制力的分布是不一样的, 这会造成一定的差别, 根据计算表明, 这两种状态下的辊缝误差为 20um 左右)。

针对首钢中厚板厂的实际情况, 我们采用了自压靠法来求出轧机弹跳曲线。测量时先进行调平处理, 再保持轧机空转一段时间, 转速为 30 r/s, 使油膜轴承建立正常的油膜(厚度)。然后压靠轧辊, 在压靠过程中, 要使液压始终工作在正常范围内, 确保测量数据的精度。测量以轧制力为基准, 首先压靠至 500kN (单侧), 在该轧制力下, 工作辊转动三圈, 每圈测量 36 个辊缝值, 然后对这 108 个辊缝值取平均得出该轧制力下的辊缝值。之后 500kN 为

步进单元重复上面操作直至 10000kN。测量完之后就得到如表 3.1 中操作侧正转、操作侧反转、驱动侧正转和驱动侧反转等几条轧机弹跳数据。

为了有效的利用实际压靠数据，必须对它们进行回归和方差分析。借助常用的多项式回归方法，刚开始选定的模型型式为：

$$S_F = a_0 + a_1 \times F + a_2 \times F^2 + a_3 \times F^3 + a_4 \times F^4 \quad (3-5)$$

但是经过回归以后发现该形式得出的刚度曲线的拟合度不太好，为了消除高次项的不良影响，将模型的幂指数降低，得弹跳方程形式，如式 3-6：

$$S_F = a_1 \times F^{\frac{1}{2}} + a_2 \times F + a_3 \times F^{\frac{2}{3}} + a_4 \times F^2 \quad (3-6)$$

由于第一个测量点从 500kN 开始，通过坐标平移使 500kN 下的辊缝=0，为了保证弹跳曲线经过点 (500kN, 0mm)，将弹跳方程型式作了一变动，变动结果如下式：

$$S_F = a_1 \times (F - 500)^{\frac{1}{2}} + a_2 \times (F - 500) + a_3 \times (F - 500)^{\frac{2}{3}} + a_4 \times (F - 500)^2 \quad (3-7)$$

由于压力的最大值达到 35000，这样其平方值会很大，造成多项式不同系数之间的数量级差别太大，为此在多项式中将压力除以 500kN。

总结上述分析，可以得出弹跳曲线的最终形式为：

$$S_F = a_1 \times (F/500 - 1)^{\frac{1}{2}} + a_2 \times (F/500 - 1) + a_3 \times (F/500 - 1)^{\frac{2}{3}} + a_4 \times (F/500 - 1)^2 \quad (3-8)$$

表 3.1 中的数据是分别是操作侧正转、操作侧反转、驱动侧正转，驱动侧反转的轧机弹跳回归模型的回归系数。

表 3.1 模型参数回归系数表

Table 3.1 Spring regression parameter of spring model

	操作侧正转	操作侧反转	驱动侧正转	驱动侧反转
a1	-0.743300	-0.720072	-0.731502	-0.708994
a2	1.029037	0.996880	1.012704	0.981543
a3	-0.199953	-0.193705	-0.196780	-0.190725
a4	0.014059	0.013620	0.013836	0.013411

由于轧机在轧制前需要进行预压靠，并以预压靠力作为调零压力。调零

操作对轧机两侧是一样的，都是以调零压力对应的辊缝作为相对零点，如图 3.3 所示。但由于轧机两侧刚度存在差异，所以操作侧和驱动侧的轧机刚度曲线在除了调零压力以外的压力对应的辊缝值不重合，注意这里指的辊缝值是相对辊缝值。在数据处理时，首先取某一压力 F 对应的的操作侧和驱动侧实际辊缝 S_1 和 S_2 ，然后将这两个辊缝值进行求平均处理得平均辊缝值 S 。根据不同的坐标 (S, F) 进行曲线拟合，就可以得到设定用的轧机刚度曲线，如下图中操作侧和驱动侧实测刚度曲线之间的虚线。这也是我们实际所用的刚度曲线。

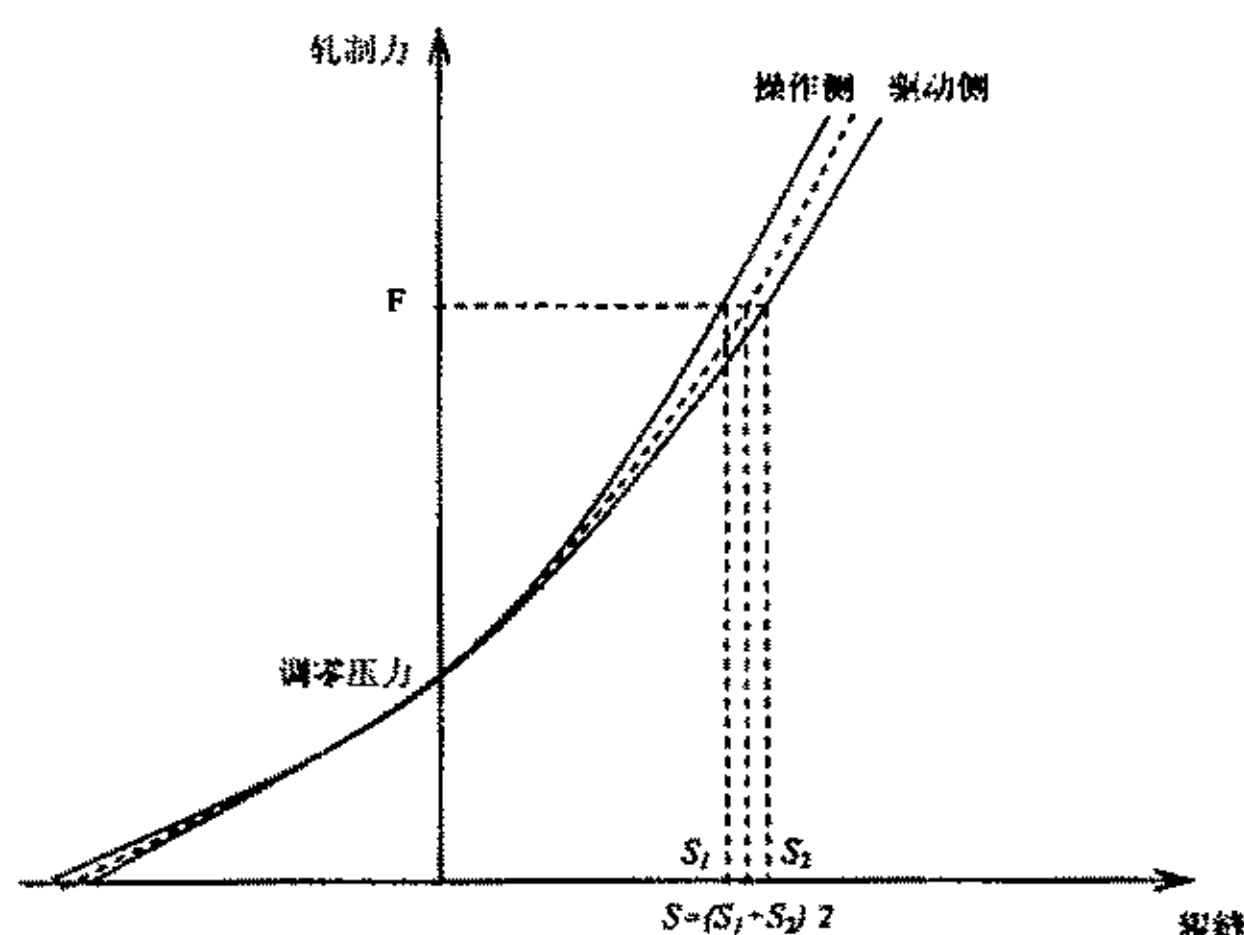


图 3.3 实测刚度曲线的数据处理

Fig.3.3 Data treatment of measure stiffness curve

对于刚度方程的回归应考虑以下几个因素的影响：

- (1) 因为弹跳 0 压力无法精确定位，所以以调零压力对应的点为初始零点，该零点对应的辊缝等于 0，各条实测曲线的零点统一；
- (2) 回归方程是一个多项式，为了避免 $a_1 \sim a_4$ 数量级差别太大，将压力值进行归一化处理。

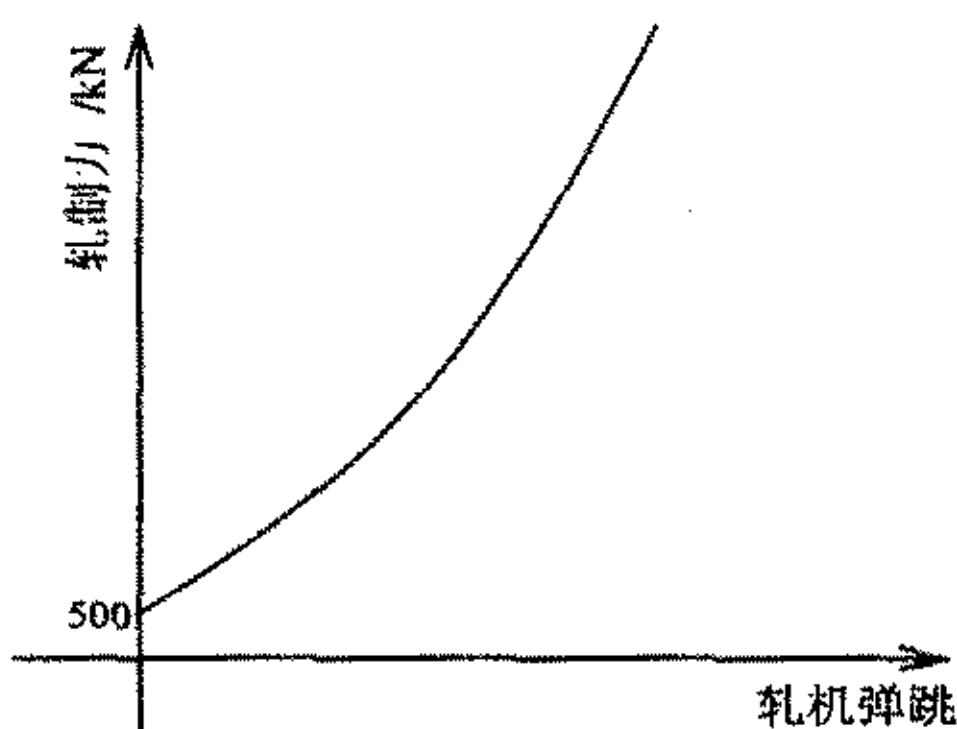
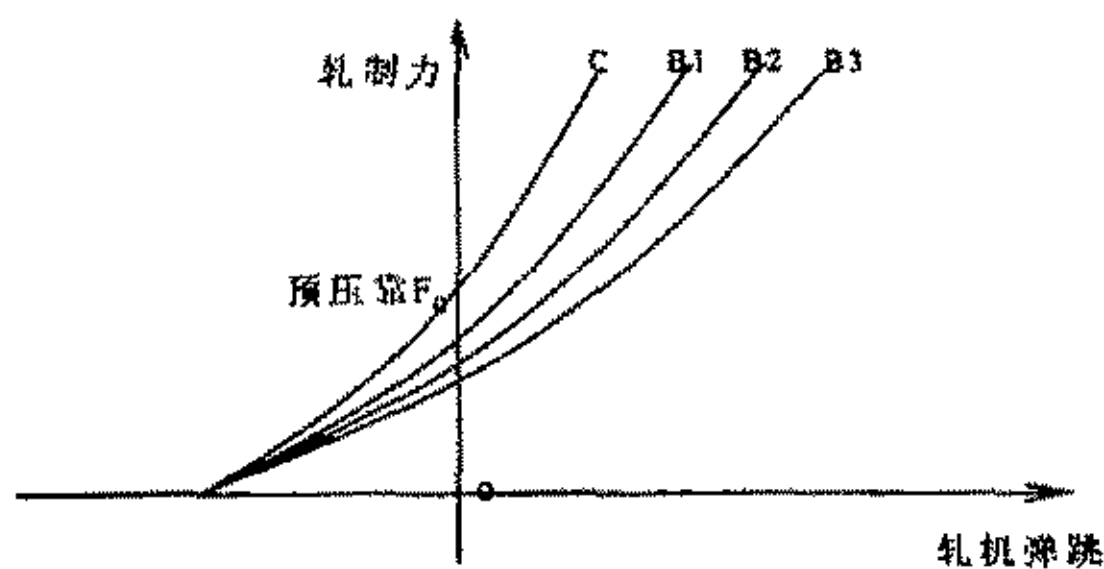


图 3.4 实测弹跳曲线的回归

Fig3.4 Regression of spring curve measurement

3.1.3 轧件宽度影响(宽度补偿)

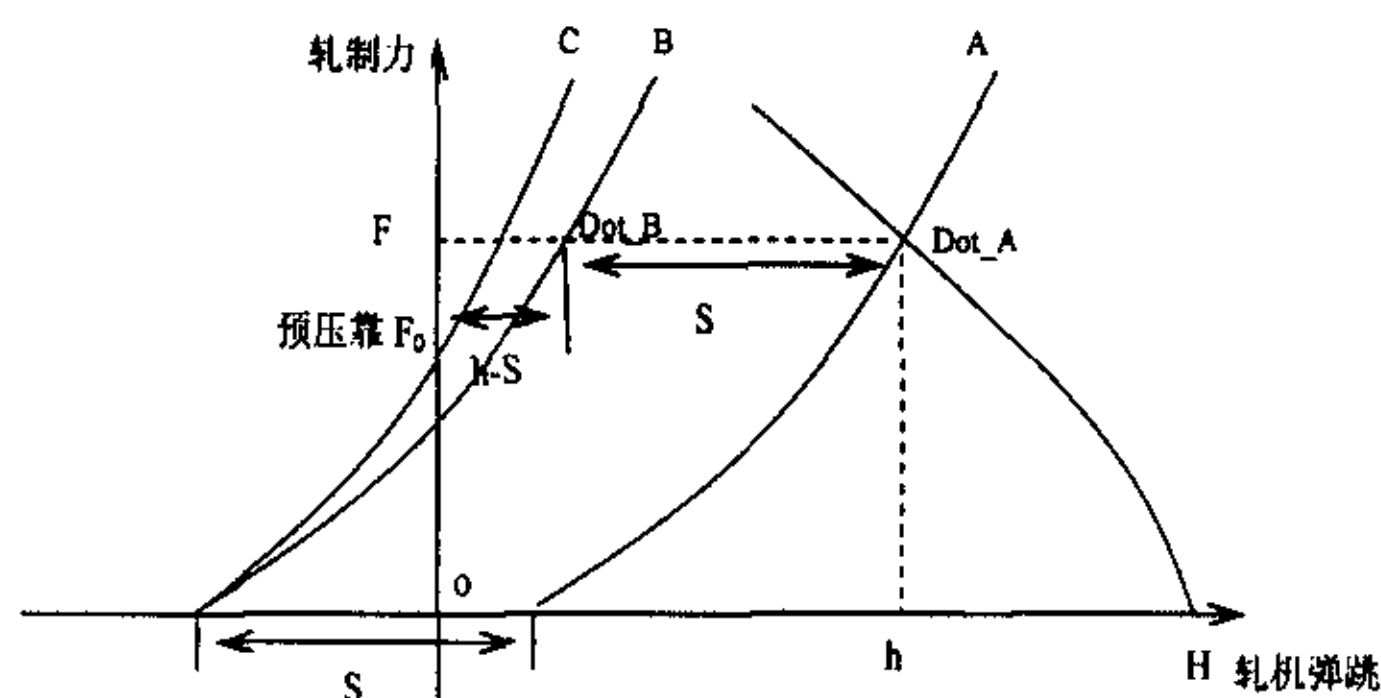
在实际的中厚板轧制过程中，由于轧件的宽度比轧辊辊身长短，轧辊边部有害弯矩使得轧辊挠曲增大，造成轧机实际刚度下降，所以我们在弹跳方程中必须考虑轧件宽度的影响。一般轧机的实际刚度曲线在低轧制力下表现为非线性，在高轧制力段表现为线性，而中厚板轧制过程的轧制力范围变化又较大。将轧制压力对宽度补偿的影响考虑成正比例关系。在上述过程中，针对全辊身长进行全长压靠弹跳曲线的求解，但在实际轧制过程中，所轧板坯的宽度比轧辊辊身长短，从而造成轧机刚度的降低，因而要求出不同轧件宽度下的弹跳曲线，如图 3.5。



C: 全长压靠弹跳曲线, $B1 > B2 > B3$

图 3.5 不同宽度下的弹跳曲线

Fig3.5 Spring curve of different width



A: 宽度<3340mm 弹跳曲线; C: 全长压靠弹跳曲线; B: 将曲线 A 平移辊缝 S 后的曲线;

图 3.6 宽度补偿的测量

Fig3.6 Theory of with compensation measure

将板宽与轧机模量的关系用下式表示。

$$\Delta w = a * F * \Delta B \quad (3-9)$$

其中: a 为回归系数。

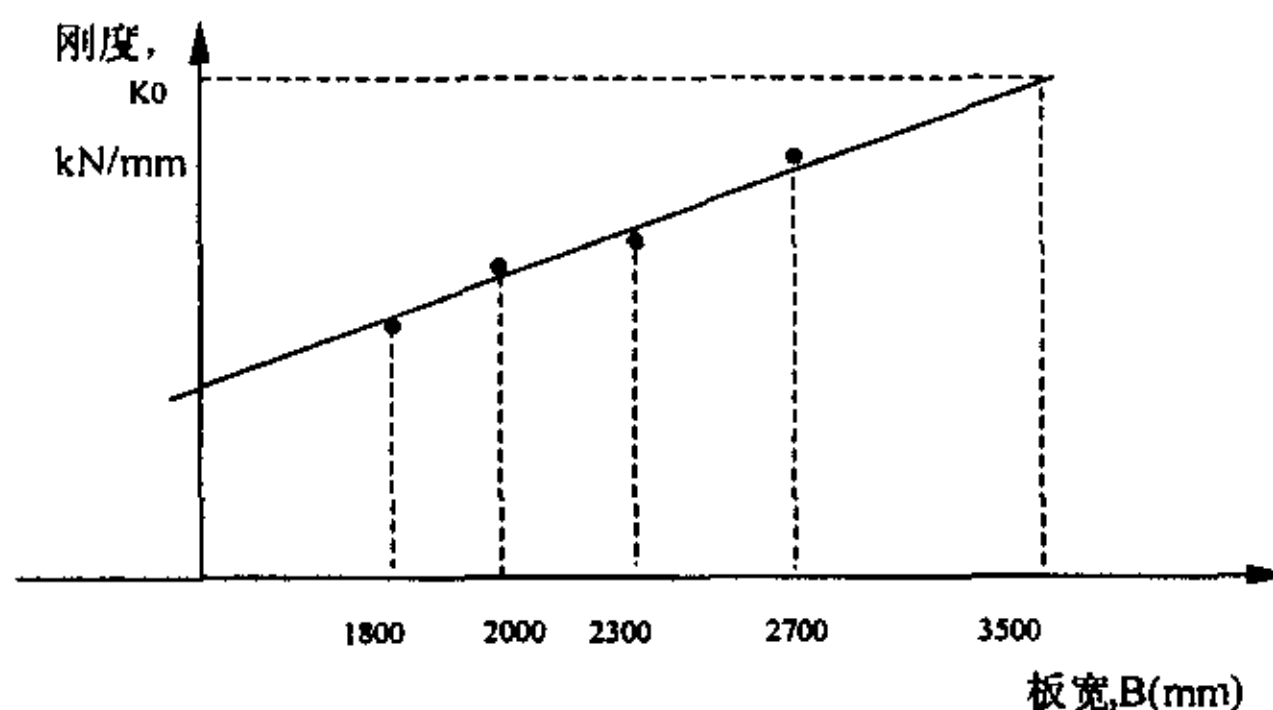


图 3.7 板宽与刚度的关系

Fig3.7 Relation of width and spring

关于宽度补偿模型的测量, 可以将不同宽度的轧材 (比如: $1800 \times 20\text{mm}$ 、 $2000 \times 20\text{mm}$ 、 $2300 \times 20\text{mm}$ 、 $2600 \times 20\text{mm}$ 、) 放在工作辊中进行轧制, 测出相应的轧机负荷、辊缝及出口厚度。由于某一宽度对应的轧制弹跳曲线是一定的 (轧辊辊径保持不变的前提下), 所以不同的弹跳曲线 A 和塑性曲线的交叉点 Dot_A 可以通过平移映射成下图中的曲线 B 上的 Dot_B , 而曲线 B 就是某宽度下的轧机弹跳曲线, 如果测量点足够多, 而且分布均匀, 就可以获得曲线 B 的具体形式。

另外对于宽度补偿的自学习, 对于南钢轧机, 由于机后没有测厚仪, 只

能依靠人工卡量，所以辊缝零点补偿自学习只能在最后一个道次进行，且其自学习系数可以适当取加大数值。而对于首钢中厚板轧机机后设有 $X-ray$ 测厚仪，其测厚仪距离轧机中心线为 $14m$ ，所以在轧制的后几个道次可以测到轧件厚度，为此辊缝零点补偿自学习可以多次进行。

3.1.4 弯辊力对弹跳的影响

首钢中板轧机配置了工作辊正弯装置，单侧弯辊力最大为 $2000kN$ ，所以需要分析弯辊力对轧辊弹性变形的分析。

弯辊力的添加在一定程度上会改变辊间压力的分布，从而使得总轧制力有微量变化。当弯辊力小于 $1000kN$ 时，影响辊缝设定的轧辊弹性变形变化量从 $0\sim 0.01mm$ 之间变化；当弯辊力在 $1500kN$ 左右时，影响辊缝设定的轧辊弹性变形变化量从 $0.00\sim 0.02mm$ 之间变化；当弯辊力在 $2000kN$ 左右时，影响辊缝设定的轧辊弹性变形变化量从 $0.01\sim 0.03mm$ 之间变化，所以可以认为弯辊力的大小对辊缝设定影响很小，在计算过程中可以用下表简单考虑。

表 3.2 弯辊力对辊缝的影响

Table 3.2 Bend force effect gap.

弯辊力 /kN	辊缝变化量 /mm
<1000	0
1500	0.01
2000	0.02

3.1.5 油膜厚度的影响

随着轧制速度和轧制力的变化，轴承油膜厚度会产生一定的变化，所以在厚度自动控制过程中要对油膜厚度进行补偿^[8]。压力 AGC 都是根据实时测量的轧制力 P 和辊缝 S ，按照某一模型来调整辊缝，最终达到钢板厚度延纵向一致的目的。由于压力 AGC 是压力正反馈，即实测压力增大，认为钢板在该部分变厚或温度偏低，AGC 系统压紧辊缝，以保证该部分钢板厚度不变，调整后压力进一步增大；反之，实测压力减小，AGC 调整后压力进一步减小。而对于油膜厚度的影响：当油膜变厚时，实际辊缝变小，钢板减薄 Δh_1 ，应当抬起辊缝使钢板厚度不变；但由于油膜变厚使轧制力变大，AGC 错误认为钢板厚度增加了 Δh_2 ，作减小辊缝调整，钢板进一步减薄。可见压力 AGC 不

但无法消除油膜厚度变化的影响,相反会使厚度精度变得更糟。首钢中厚板厂四辊轧机的支撑辊采用的是油膜轴承,所以应考虑油膜厚度的变化对弹跳方程的影响。油膜厚度是轧制速度和轧制力的函数,

$$h_{oil} = f(N, F) \quad (3-10)$$

油膜厚度计算模型通常采用 *Reynolds* 模型^[7]:

$$h_{oil} = \frac{a(N/F)}{(N/F)+b} \quad (h_{oil} = c\sqrt{N/F+d}, \text{ 武钢 1700}) \quad (3-11)$$

式中:

h_{oil} : 油膜厚度, mm; N : 轧机转速, rpm;

F : 轧制压力, kN; a, b : 模型系数, 根据试验得到, mm, r/m/kN

将 *Reynolds* 公式进行变形, 得到 $\frac{1}{h_{oil}} = \frac{1}{a} + \frac{b}{a} \left(\frac{F}{N} \right)$, 采取最小二乘法即可

求出模型系数 a, b 。油膜厚度测量过程可以采用如下方法: 在轧辊压靠状态(即没有轧件的情况下使上下辊压靠)施加载荷, 分别在加速、减速以及等速情况下进行测试, 但是轧辊的偏心会对加减速过程产生较大影响, 有效数据还是等速状态下的测量数据

为了回归出公式(3-11)的系数 a, b , 需要现场数据采集。其方法如下, 在轧机主传动为 10rpm 的速度下进行空压靠, 分别在 2000kN、4000kN、6000kN、8000kN、10000kN 的压力(单侧平均压力)下对辊缝读数进行采样并记录。之后, 分别在 20 rpm、30 rpm、40 rpm、50 rpm、60 rpm、70 rpm、80 rpm 的速度下, 重复上述过程, 并记录所采集的数据。令转速 $N=60$ r/m、单侧轧制力 $P=10000$ kN 时的油膜厚度为 $0\mu\text{m}$ 。因为油膜厚度是 (N/P) 的函数, 所以当 $N/P = N_0/P_0$, 油膜厚度相等。由此可以确定轧制力在 2000kN、4000kN、6000kN 时, 对应零点油膜厚度的位置。如图 3.8 所示, 横坐标等于 N_0/P_0 的点即对应着压力为 2000kN、4000kN、6000kN 时零点油膜厚度位置。现将 2000kN、4000kN、6000kN、10000kN 上的辊缝相对量采样位置减去各载荷上油膜厚度零点位置(即直线 $X = N_0/P_0$ 与各线段的交点的纵坐标)得到对应于实际应用中的相对油膜厚度, 以这个相对油膜厚度为纵坐标, 以 $(N/P - N_0/P_0) * 10000$ 为横坐标, 绘成曲线, 如图 3.9 中的曲线 1 所示。利用这数据按 3-12 式回归可得操作侧油膜厚度模型:

$$O_{fos} = \frac{-44927}{10000 * (N/P - N_0/P_0) + 112} + 384 \quad (3-12)$$

绘成曲线，如图 3.9 中的曲线 2 所示。

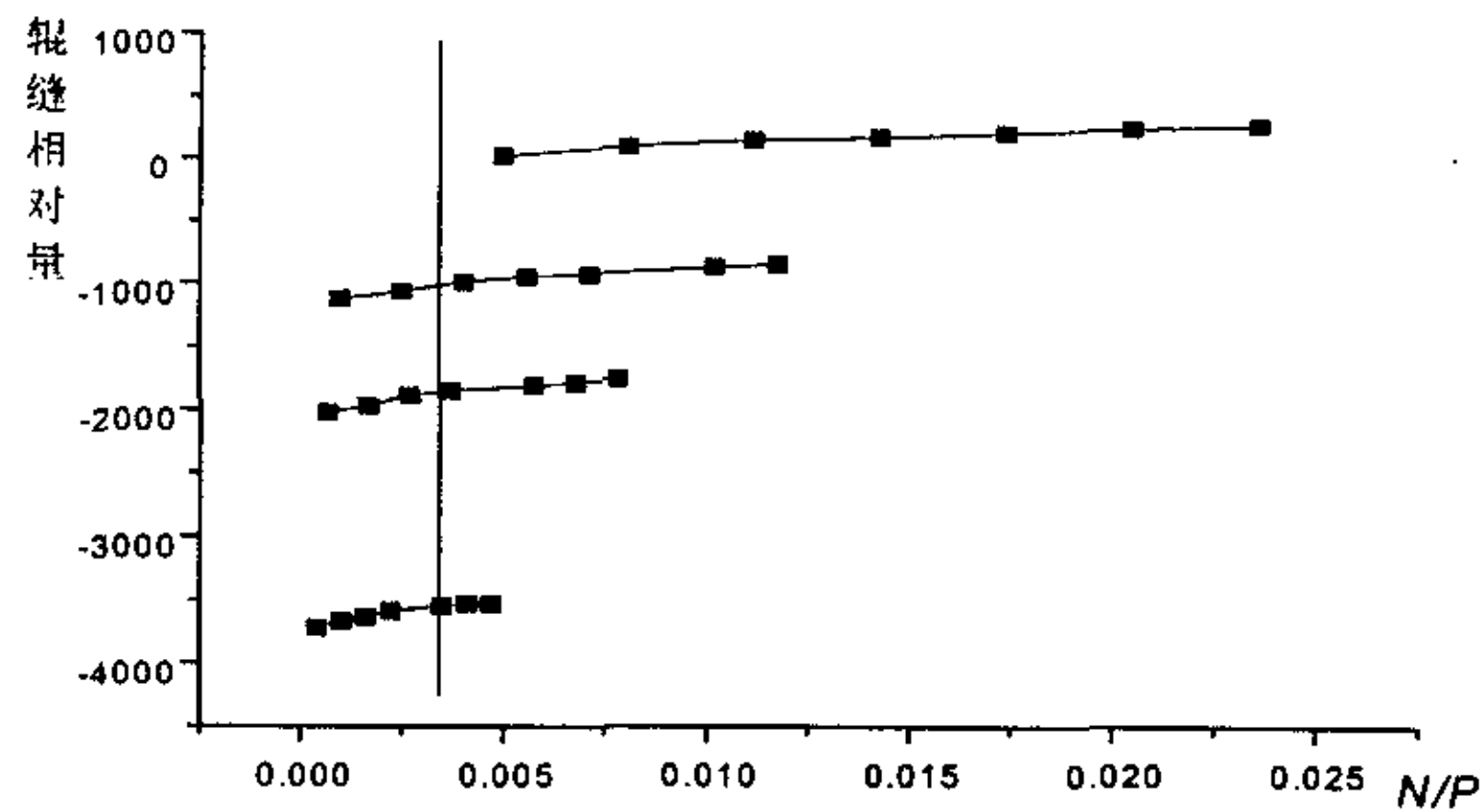


图 3.8 辊缝相对量与 N/P 之的关系
Fig3.8 Relation of relative gap and N/P

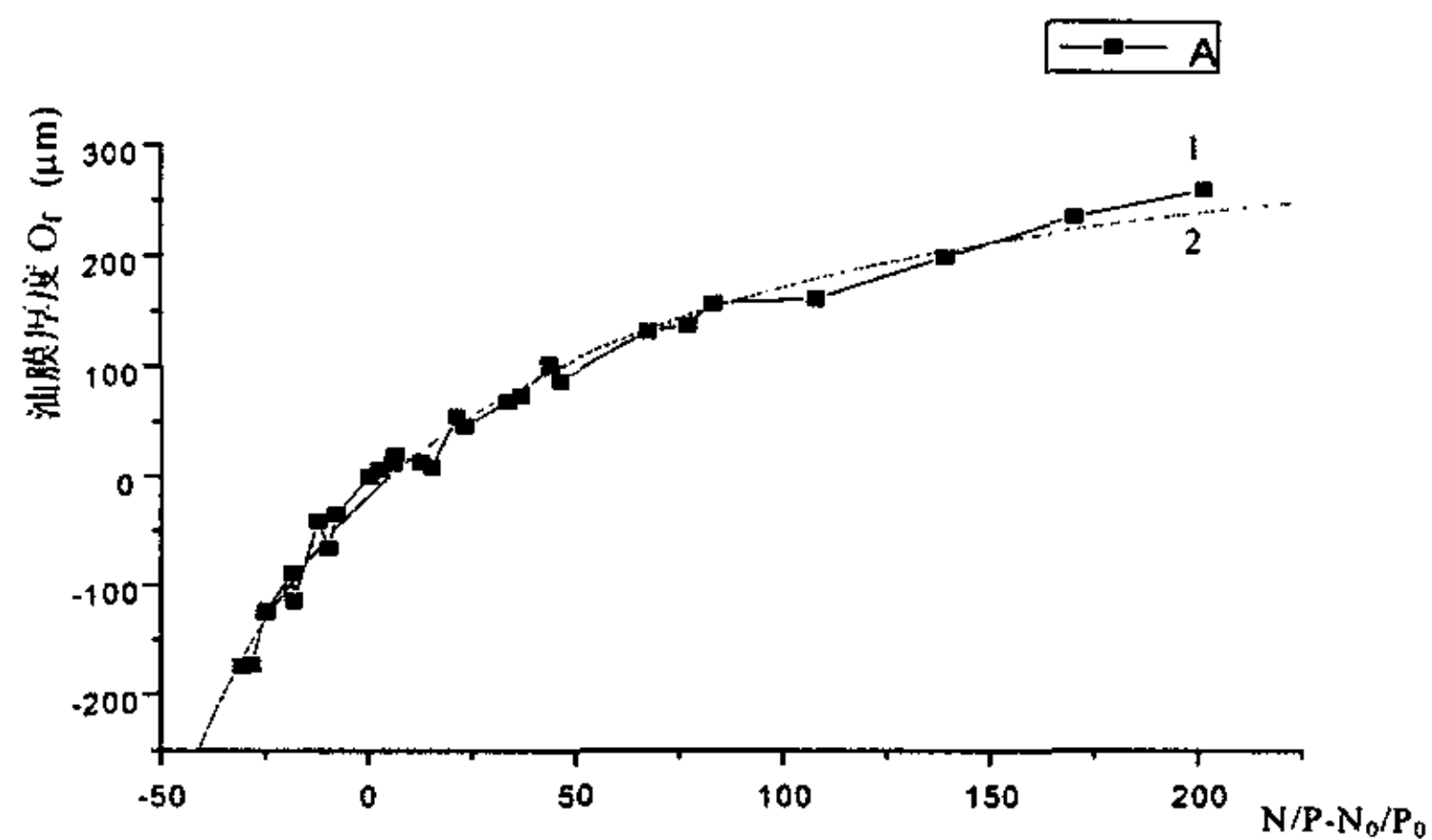


图 3.9 操作侧油膜厚度曲线实测值与理论值
Fig3.9 Measurement and theory point of oil thickness of operate side

同理可得传动侧的油膜厚度模型为：

$$O_{fds} = \frac{-179990}{10000 * (N/P - N_0/P_0) + 254} \quad (3-13)$$

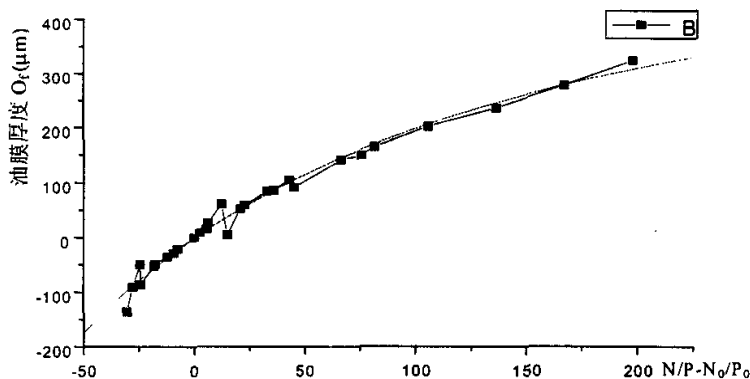


图 3.10 操作侧油膜厚度曲线实测值与理论值
Fig3.10 Measurement and theory point of oil thickness of drive side

该模型投入运行后, 经过实践应用, 其工作过程一直比较稳定, 为 HAGC 的正常使用打下良好的基础, 同时大幅度减少操作人员的操作压力。经对实物产品的测量检查、统计平均, 同板差为 0.044 mm, 命中率为 96.0%。异板差为 0.06 mm, 命中率为 95.71%, 板凸度为 0.123 mm。

3.1.5 磨损补偿

在轧制过程中, 轧辊的磨损会随着轧制吨数的增加而增加, 从而使辊缝发生“漂移”, 所以应考虑该磨损量的补偿。

由于每个道次轧辊都有一定的磨损, 轧辊磨损在每个道次后计算。轧辊磨损的设计思想就是对于轧辊进行一定的分割如下图 3.11 所示, 然后计算每一片轧辊的磨损; 而且只有与轧件之间接触的轧辊小片发生磨损。轧辊磨损与轧制力和轧制长度有关。

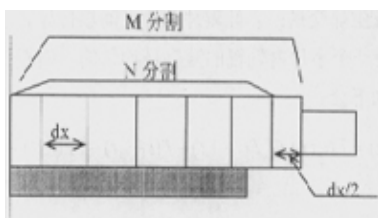


图 3.11 轧辊磨损示意图

Fig3.11 The wear of roll

计算轧辊磨损，采用如下模型：

$$U(i+1) = U(i) + \alpha * \frac{P_i}{W_i} * \frac{L_i}{\pi * D} * S_{i(j)} \quad (3-14)$$

式中：

$U(i)$ ：第 I 片在 i 道次的磨损量[mm]；

$U(i, t + \Delta t)$ ：第 I 片在 $i+1$ 道次的磨损量 [mm]；

$\alpha(i)$ ：磨损系数 [1]；

P_i ：第 i 道次轧制压力[kN]； W_i ：第 i 道次的轧件宽度 [mm]；

D ：轧辊直径 [mm]； L_i ：第 i 道次轧件的长度[mm]；

$S_{i(j)}$ ： $j \leq N$ 时为 1.0；

$j > N$ 时为 0.0。

3.1.6 温度补偿模型

在中厚板轧制过程中，轧辊的辊形随着轧制过程的进行而不断变化主要有两个方面的因素：由于和轧件接触而受热，于是轧件发生热膨胀和轧辊磨损。轧辊热膨胀对轧机的弹跳有一定的影响，另外轧辊的辊形对轧制过程中轧件的凸度和平直度影响较大，所以对轧辊的辊形应当给予足够的重视。为了研究方便，我们将轧辊延宽度方向分割成很多小片，取某个小片作为研究对象。轧辊热膨胀与以下几个因素有关①与轧辊辊身水之间产生的冷却；②

与轧件之间接触发生热交换；③轧辊片与片之间热传导。

我们假设：在一个小片内轧辊的温度是均匀的。则根据轧辊与轧辊辊身水之间热交换有如下公式：

$$T(i, t + \Delta t) = T(i, t) + C(T(i+1, t) + T(i-1, t) - 2T(i, t)) + R(T_{water} - T(i, t)) \quad (3-15)$$

式中：

$T(i, t)$ ：第 I 片在时刻 t 时的温度 [$^{\circ}\text{C}$];

$T(i, t + \Delta t)$ ：第 I 片在时刻 $t + \Delta t$ 时的温度 [$^{\circ}\text{C}$];

$T(i, t)$ ：第 I+1 片在时刻 t 时的温度 [$^{\circ}\text{C}$];

$T(i, t)$ ：第 I-1 片在时刻 t 时的温度 [$^{\circ}\text{C}$];

T_{water} ：辊身水温度 [$^{\circ}\text{C}$]; C ：热传导系数[1];

R ：轧辊与辊身水之间的热交换系数[J/K/s]。

轧辊与轧件之间有如下公式

$$T(i, t + \Delta t) = T(i, t) + \frac{\alpha(i) \cdot L \cdot \text{arc} \cdot (\beta(i) T_{INF} - T(i, t))}{\omega \cdot R \cdot b \cdot t_o} \quad (3-16)$$

式中：

$T(i, t)$ ：第 I 片在时刻 t 时的温度 [$^{\circ}\text{C}$];

$T(i, t + \Delta t)$ ：第 I 片在时刻 $t + \Delta t$ 时的温度 [$^{\circ}\text{C}$];

L ：轧件长度[mm]; arc ：接触弧长[mm];

T_{INF} ：轧辊渐进温 [$^{\circ}\text{C}$]; ω ：轧辊角速度[rad/s];

R ：轧辊半径[mm]; b ：小片宽度 [mm];

t_o ：时间系数[s]; $\alpha(i), \beta(i)$ ：系数[1]。

3.1.7 轧机弹跳方程的应用

(1) 道次出口厚度的计算

在中厚板自动化轧钢中，为了得到满足精度要求的产品，我们必须对每一个道次的辊缝尽可能的准确设定。另外当轧制零点确定以后，就可以根据各道次的实测轧制力和实测辊缝值，利用轧机弹跳方程估计出钢板的出口厚度，虽然其计算精度可能不如 *X-ray* 测厚仪高，但相对于轧制力预测模型来说，其值具有更高的可信度，更重要的是其估计值可用于轧制力自适应计算等。表 3.2 中针对钢种 Q235 取两种不同规格利用弹跳方程和实际数据计算出各道次的出口厚度。

表 3.3 利用弹跳方程计算各道次的出口厚度

Table 3.3 Calculate exit thickness of each pass by spring curve

道次	辊缝值 mm	出口厚 度 mm	轧制力 kN	道次	辊缝值 mm	出口厚 度 mm	轧制力 kN
1	45.175	46.63	23987	1	155.135	156.37	21753
2	38.125	39.45	22619	2	135.075	136.57	24340
3	32.225	33.72	24385	3	120.2	121.36	20943
4	26.105	27.87	27087	4	114.77	115.54	17250
5	21.08	23.17	30472	5	90.167	92.02	28021
6	16.675	19.05	33412	6	76.175	77.6	23622
7	14.105	16.09	29343	7	63.085	64.6	24591
8	11.65	13.79	31042	8	53.24	54.72	24203

(2) AGC 控制

AGC 控制目前采用的是厚度计式方式，它主要是利用弹跳方程算出任何时刻的轧制厚度 h ，然后将该厚度值与设定值进行比较，再经 AGC 算法运算出消除厚度偏差 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。

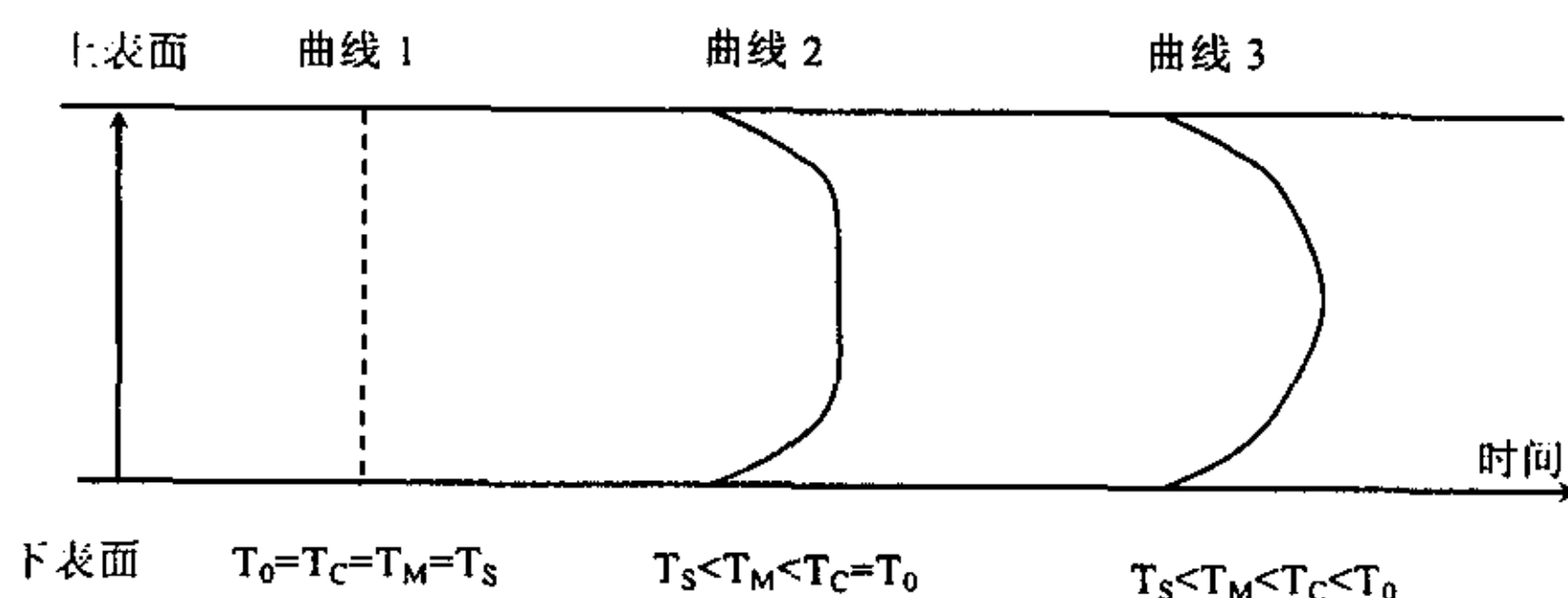
3.2 温度模型

温度模型是中厚板轧制实现计算机自动控制的极其重要的模型之一，其模型预报的精度将直接影响着轧制参数的确定和对产品组织性能的控制。因此随着中厚板轧制过程计算机控制技术的发展，现场要求提供更实用和更高精度的温度模型，以保证轧制力模型和组织性能模型的预报精度。

传统温度模型主要依靠一维差分法来计算和模拟中板轧制过程中的温度场。由于现场各种因素的千变万化和轧制节奏的要求，一维差分法做了一定程度的简化和假设^[1]。目前一维差分法的温度模型普遍运用在中厚板现场实际生产中，但是边界条件不易准确确定，有时迭代次数过多，甚至不收敛。本文在结合首钢中板厂四辊轧机液压 AGC 及控轧、控冷自动化改造的基础上，提出一种新的温度模型即二次曲线温度模型，现场实际生产结果表明，效果良好。

3.2.1 二次逼近法求解中厚板温度场

由中厚板现场的实际生产情况，可以认为钢板中心到表面的温度分布可以用一个二次曲线来拟合。同一维差分法一样，二次曲线温度模型也忽略沿轧件宽度和长度方向上的热传导影响而只考虑沿厚度方向上的热传导。二次曲线温度模型的所有热计算可以归结为二次温度曲线变化的计算。温度曲线的变化是由于轧件与环境之间存在热交换。温度曲线的变化过程如图 3.12 所示。从图 3.12 可以看出，在初始状态下，轧件内外温度是一致的（图 3.12 中的曲线 1），过了一小段时间以后，靠近轧件表面第一层由于热损失，会形成温度降，而此时轧件中心部分尚未冷却（图 3.12 中的曲线 2），当经过比较长的一段时间后，轧件中心部分也会得到有效冷却，自此轧件内外温度梯度近似于一个二次曲线（图 3.12 中的曲线 3）。这就本文提出的是二次曲线温度模型。



T_0 : 初始温度, T_C : 中心温度, T_M : 平均温度, T_S : 表面温度

曲线 1: 初始温度曲线 ($T_C=T_M=T_S=T_0$)

曲线 2: 混合温度曲线 ($T_C=T_0$, T_S 下降然后 T_M 开始下降)

曲线 3: 二次温度曲线 (T_C 开始下降, T_M 、 T_S 继续下降)

图 3.12 温度曲线

Fig.3.12 Temperature curve

1) 基本假设

二次曲线温度模型针对现场的实际生产情况进行如下假设: ①轧件侧表面产生的热交换近似为 0; ②轧件长度方向的温度变化很小, 基本上是均匀分布; ③只有厚度方向存在温差, 热流由厚度中心单向流向表面; ④轧件上下表面和宽度方向的温度分布是对称的。根据上面的假设, 现在轧件上取一个小单元体, 其厚度 (h) 等于轧件厚度的一半即 $H/2$ 。该单元体仅仅通过与其表面接触的外界进行热交换 (如图 2)。对于该单元体的热交换过程只考虑以下两个因素: 在单元体内的热传导和在单元体表面同外界产生的热交换。

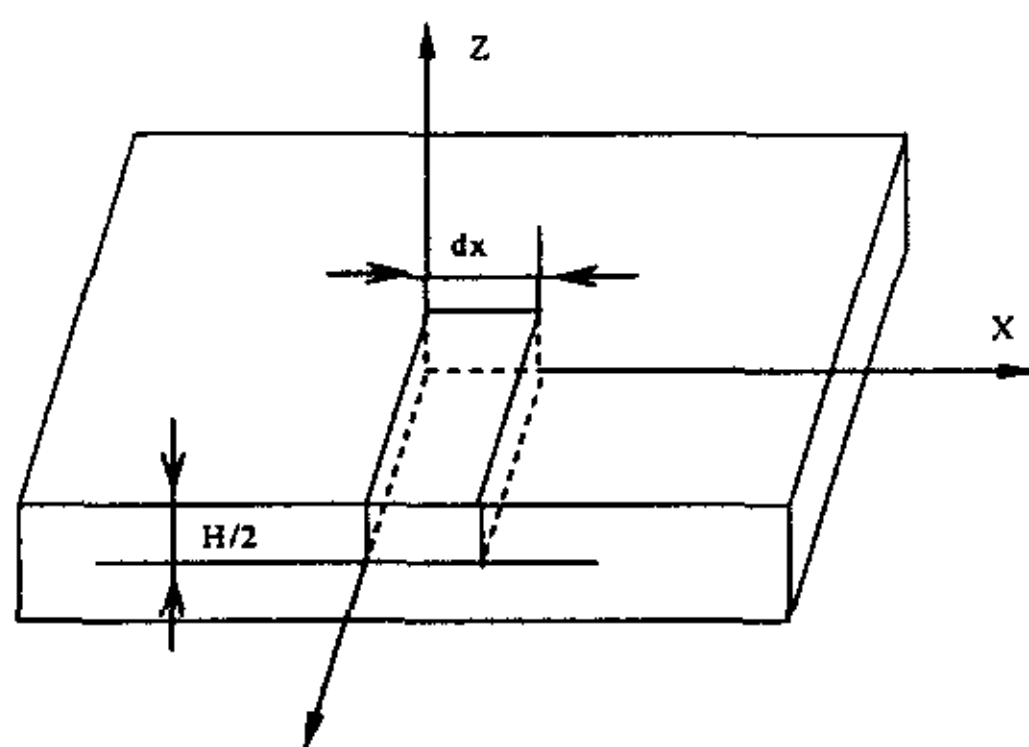


图 3.13 温度计算单元的选

Fig.3.13 The choice of temperature

2) 二次曲线模型的解析

中厚板轧制过程中的二次曲线温度模型按照轧件冷却时间的变化可以分为三个阶段，即初始温度曲线阶段、混合曲线阶段、二次曲线阶段。下面针对不同情况或阶段，阐述如何根据钢板温度曲线的变化建立温度场模型。

(1) 初始温度曲线（如图 3.14）

钢板在从初始 t 时间时轧件内外温度一致到 $t+dt$ 时，温度曲线变化如图 3.16 所示。

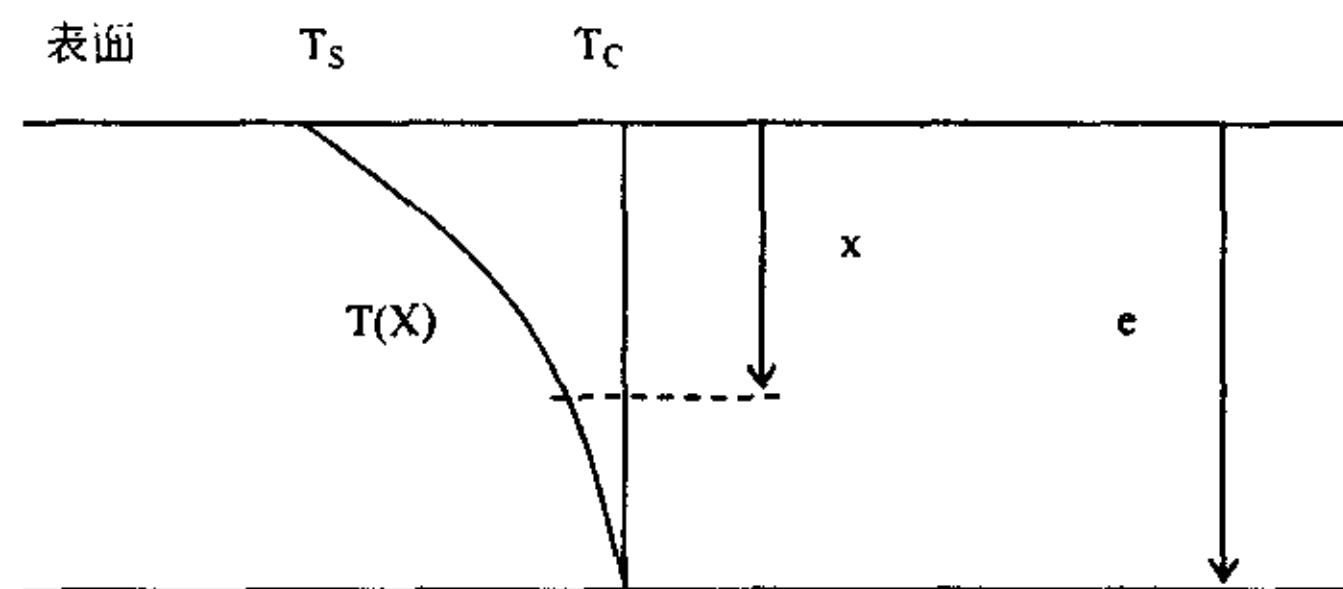


图 3.14 初始温度曲线在 dt 时间内的变化

Fig.3.14 The change of initial temperature at

根据二次曲线温度模型假设，可以得出如下等式：

$$T(x) = T_c + (T_s - T_c) \left(\frac{e-x}{e} \right)^2 \quad (3-17)$$

式中：

T_c 为轧件中心温度；

$T(x)$ 为距上表面 x 处的温度；

T_s 为轧件的表面温度；

e 为在时间 dt 内轧件发生温度变化的厚度层的厚度。

由傅立叶定律确定轧件表面的热流密度：

$$\phi_s = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{2\lambda}{e} (T_s - T_c) \quad (3-18)$$

式中：

ϕ_s 为轧件表面的热流密度； λ 为轧件热传导系数；

所以在时间 dt 内轧件表面的热损失为

$$q = \frac{1}{3}(T_c - T_s) \cdot e \cdot \rho \cdot c = \int_0^{dt} \phi_s dt \quad (3-19)$$

式中:

q 为 dt 时间内通过轧件表面损失的热量;

ρ 为轧件密度; c 为轧件的比热。

考虑轧件表面与空气的对流和辐射传热, 热流密度可以用下式来表示:

$$\phi_s = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_s^4 - T_a^4) + \eta_s \cdot (T_s - T_a) \quad (3-20)$$

式中:

ϕ_s — 热流密度; T_s — 钢板表面温度; T_a — 空气温度;

σ — Stephen-Boltzman 常数; ε — 辐射率; η — 对流系数。

如果 dt 很小, 则热流 ϕ_s 密度可以考虑成常数, 则由式 (3-18) 和 (3-19)

可得:

$$e = \sqrt{6} \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot dt}{\rho \cdot c}} \quad (3-21)$$

$$T_s - T_c = \Delta T_s = T'_s - T_s = \sqrt{\frac{3}{2}} \times \frac{\phi_s}{\sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}} \sqrt{dt} \quad (3-22)$$

$$T'_s = T_s + \Delta T_s \quad T'_c = T_c \quad T'_m = T_c \quad (3-23)$$

由以上诸式可以得到轧件的温度分布。

(2) 混合温度曲线

同(1), 可以得到混合温度曲线的温度模型。

其中:

$$e = \frac{2\lambda}{\phi_s} (T'_s - T_c) \quad (3-24)$$

$$T_m = T_c - \frac{e}{3h}(T_c - T_s') \quad (3-25)$$

可以推导出:

$$T_m = T_c - \frac{e}{3h}(T_c - T_s') = T_c + \frac{2\lambda}{3h} \frac{(T_s' - T_c)^2}{\varepsilon\sigma(T_s'^4 - T_a^4) + \eta(T_s' - T_a)} \quad (3-26)$$

式中:

T_s' 为混合温度曲线的轧件表面温度;

T_c 为初始轧件的中心温度;

h 为轧件的一半厚度。

将轧件的冷却时间划分为很多个小时时间段, 然后进行一系列的迭代计算, 就可以求出 T_s' 以及 T_m 。上述计算只有在 $e < h$ 时成立。当 $e \geq h$ 时, 则温度曲线变成纯二次曲线, 其中最后可得:

$$e = 3h \frac{(T_c - T_m)}{T_c - T_s'} \quad (3-27)$$

(3) 二次曲线温度曲线

当轧件经过一定时间以后, 其轧件内外温度梯度近似于一个二次曲线, 求在 dt 时间内的温度曲线变化, 令 $e = h$, 则由式 (3-24) 和式 (3-25) 可以推导出:

$$T_s' = \frac{h\phi_s}{3\lambda} + T_m \quad (3-28)$$

同样的, 将轧件的冷却时间划分为很多个小时时间段, 然后进行一系列迭代计算, 最终得到轧件的温度分布。

3) 二次曲线温度模型求解中厚板轧制过程中的温度场

中厚板在轧制时, 钢板温度变化主要受到下面几个因素的共同作用①热辐射和对流②高压水除鳞③与轧辊接触产生的热传导④塑性功产生的热量。下面仅就轧件空冷过程中热辐射和对流为例介绍一下二次曲线的迭代解法。

迭代解法的前提条件是时间间隔 dt 必须很小, 这样在该时间间隔内, 热

流密度才能看成是常数。每一迭代步都需要进行 e 值的计算。当 $e < h$ 时, 令 e 为时刻 t 的温度变化厚度深度, e' 为时刻 $t + dt$ 的温度变化厚度, 如图 4 所示。在 dt 时间间隔内轧件的热损失为

$$\Delta q = \phi \cdot dt = h \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T_m \quad (3-29)$$

$$\Delta T_m = \frac{\delta T_m}{\delta t} dt \quad (3-30)$$

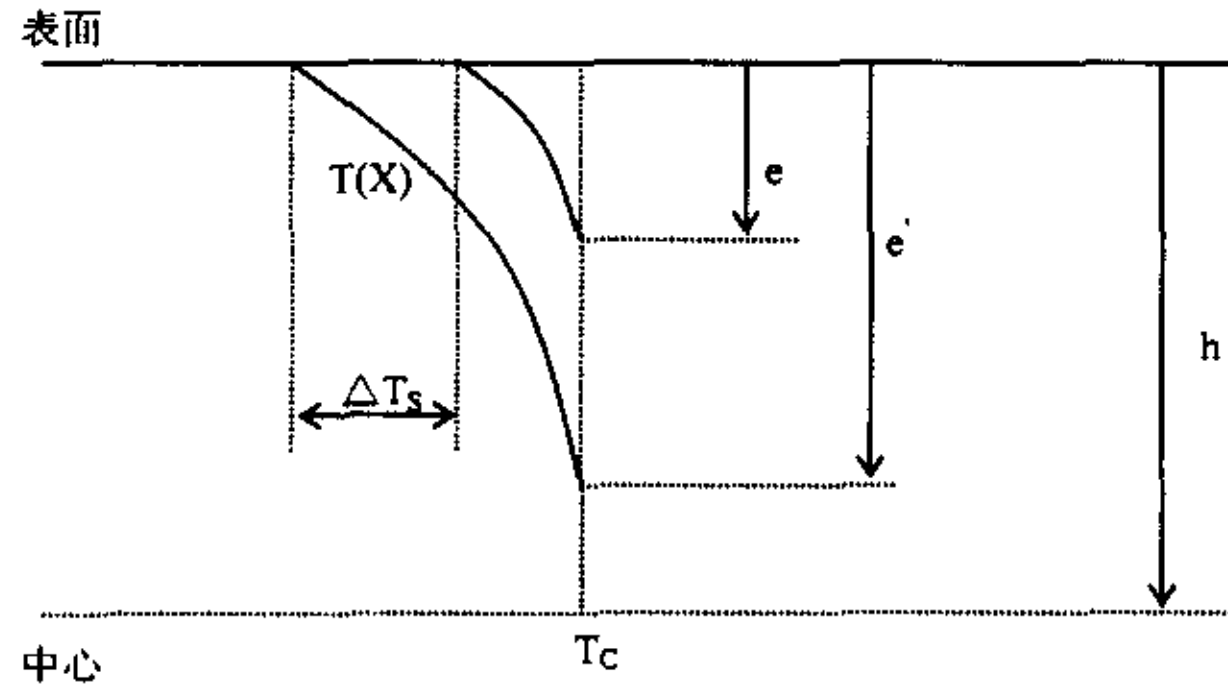


图 3.15 温度曲线在 dt 时间内的变化

Fig3.15 The change of temperature at dt

根据式 (3-24)、(3-25) 和式 (3-30) 可以得到:

$$\Delta T_m = \frac{2\lambda}{3h} \left[-\frac{(T_c - T_s)^2}{\phi_s} \cdot \frac{d\phi_s}{dT_s} \cdot \frac{dT_s}{dt} - \frac{2(T_c - T_s)}{\phi_s} \frac{d\phi_s}{dt} \right] \cdot dt \quad (3-31)$$

其中:

$$\frac{d\phi_s}{dT_s} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^3 + \eta \quad (3-32)$$

$$\Delta T_s = \frac{3\phi_s^3 \cdot dt}{2\lambda \cdot \rho \cdot C(T_s - T_c) [(T_s - T_c)(4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^3 + \eta) + 2\phi_s]} \quad (3-33)$$

则 $t + dt$ 时刻:

$$T'_m = T'_c - \frac{e}{3h} (T_c - T'_s) \quad (3-34)$$

$$e' = \frac{2\lambda}{\phi_s}(T'_s - T_c) \quad (3-35)$$

然后从 $t + dt$ 时刻再重复计算直至 $e = h$ ，这样就可以得到一个二次温度曲线。

当 $e = h$ 时

$$\phi_s = \frac{2\lambda}{h}(T_s - T_c) \quad (3-36)$$

$$T_m = T_c - \frac{1}{3}(T_c - T_s) = \frac{2T_c + T_s}{3} \quad (3-37)$$

因此：

$$T_m = T_s - \frac{h\phi_s}{3\lambda} \quad (3-38)$$

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{dT_s}{dt} + \frac{h}{3\lambda} \frac{\delta\phi_s}{\delta T_s} \frac{dT_s}{dt} \quad (3-39)$$

$$\frac{\delta\phi_s}{\delta T_s} = 4\varepsilon\delta T_s^3 + \eta \quad (3-40)$$

因此可以推导出：

$$\Delta T_s = \frac{3\lambda \cdot \phi_s \cdot dt}{\rho \cdot c \cdot h [3\lambda + h \cdot (4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^3 + \eta)]} \quad (3-41)$$

则 $t + dt$ 时刻

$$T'_m = \frac{2T'_c + T'_s}{3} \quad (3-42)$$

$$T'_c = T'_s - \frac{h}{2\lambda} \cdot \phi_s \quad (3-43)$$

轧制过程其它几种传热方式造成的热损失也可以类似地进行求解，然后将这几种传热方式造成的热损失进行叠加，就可以得到轧制过程的温度变化。

二次曲线温度场模型与有限差分法不同的是,它采用一种连续的二次曲线变化来近似代替轧件温度梯度的变化,而有限差分法是将轧件离散化,但两者都需要将时间进行分割,满足迭代计算的要求。

4) 二次曲线模型计算结果与实测结果的比较

上述二次曲线模型通过 VC++6.0 编程实现。为验证该二次曲线温度模型的精度,对首钢现场生产中某 16Mn R、80×2000×5000 钢板的轧制过程采用红外线辐射式测温仪进行了温度实测。为便于与实测值比较,模型的开轧温度取为实测开轧温度,道次的间隔时间采用实测值。模型计算结果及实测值列于表 3.4。可以看出,模型与实测值最大偏差为 20℃,计算结果与实测值偏差不超过 18℃的占 90%,不超过 7℃的占 70%,模型精度误差可以控制在 4%之内,结果证明二次曲线温度模型的计算精度较高。可以完全满足现场实际生产的需求。

5) 结论

以传热学辐射、对流和传导 3 个基本定律为基础建立的二次曲线温度模型能够精确地模拟现场中厚板轧制过程中的温度变化,因此可以为轧制过程中力能参数预报模型和产品组织性能预报模型提供准确依据。

3.2.2 热辐射和对流模型

钢板表面热辐射产生的热流密度 q_r 与换热系数 h_r 分别为:

$$q_r = \varepsilon \cdot o \cdot \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (3-44)$$

$$h_r = \frac{q_r}{T_s - T_a} \quad (3-45)$$

式中:

ε : 钢板的黑度;

o : 热辐射常数;

T_s : 钢板表面温度;

T_a : 空气温度。

表 3.4 模型计算结果与实测值比较

Table 3.4 Compare the result of model with the measured data

道次	实测表面温度(℃)	计算表面温度(℃)	计算中心温度(℃)	计算平均温度 (℃)
1	1068	1072	1080	1076
2	1046	1049	1060	1055
3	1035	1042	1052	1047
4	1021	1026	1043	1039
5	968	972	1018	992
6	936	954	1002	974
7	934	941	992	974
8	926	938	985	971
9	945	950	987	966
10	925	945	978	962

温度。钢板黑度的准确设定对热辐射造成的温度变化起着决定性作用^[1]。

轧件的黑度与氧化铁皮、表面温度及表面的粗糙度有关。根据在热轧线上测定的结果是加热炉出炉后为 0.8 左右，粗轧机轧制后为 0.6，而精轧机轧制后为 0.58 左右，公式 (3-46) 将钢板黑度考虑成钢板厚度的关系[1,3]：

$$\varepsilon = 0.08 \times h - 0.2 \quad (3-46)$$

但是如果： $\varepsilon \leq 0.6$ 时，令 $\varepsilon = 0.6$ ； $\varepsilon \geq 0.8$ 时，令 $\varepsilon = 0.8$ 。

钢板表面对流产生的热流密度可用公式 (3-47) 表示

$$q_n = h_n \cdot (T_s - T_a) \quad (3-47)$$

对流换热系数与热辐射换热系数进行比较，可以看出对流换热基本上为热辐射换热的 7%~10% 左右。为了简化计算，可以将对流换热系数折合成钢板的热辐射换热系数后进行有限差分法的计算。

3.2.3 高压水除鳞

由于高压水的压力很大，钢板温度很高，高压水与钢板之间接触后会在钢板表面形成一个很薄的蒸汽膜，可以假定在轧件的被冲击区域，轧件表面温度在瞬间将到与高压水在钢板表面形成的水膜温度 (140℃) 相同。这种传热方式属于半无限大平板的瞬态热传导。

根据这些条件, 热流密度可以表示为

$$\phi = \frac{\lambda(T_m - T_{VAP})}{\sqrt{\pi \cdot \frac{\lambda}{\rho c}}} \cdot t^{-\frac{1}{2}} \quad (3-48)$$

单位面积的热量损失可以表示成

$$q = \int \phi \cdot dt = \frac{2 \cdot \lambda(T_m - T_{VAP})}{\sqrt{\pi \cdot \frac{\lambda}{\rho c}}} = h \rho c \cdot \Delta T_m \quad (3-49)$$

假定轧件速度等于 V , 高压水冲击宽度为 B , 有效率为 EFF , 则平均温度降可以表示成

$$\Delta T_m = \left[\frac{2(T_m - T_{VAP})}{h} \sqrt{\frac{\lambda \cdot B}{\pi \cdot \rho \cdot c \cdot V}} \right] \cdot EFF \quad (3-50)$$

式中:

ΔT_m : 轧件平均温度降 [K];

T_m : 轧件初始平均温度[K];

T_{VAP} : 高压水膜的温度=413K;

h : 轧件厚度的一半[mm];

λ : 轧件热传导率 [J/m/s/K]; ρ : 轧件密度 [kg/m³];

C : 轧件比热 [J/kg/K]; B : 冲击宽度 [mm];

V : 轧件速度 [mm/s]; EFF : 除鳞效率系数[1]。

从而除鳞后我们可以得到新的轧件温度:

$$T'_m = T_m - \Delta T_m \quad (3-51)$$

$$T'_c = T_c \quad (3-52)$$

$$T'_s = T_s - \Delta T_m \cdot \frac{(T_c - T_s)}{(T_c - T_m)} \quad (3-53)$$

假设初始温度为 1015 度, 则来料厚度与除鳞温降之间的关系如图 3.14

所示。

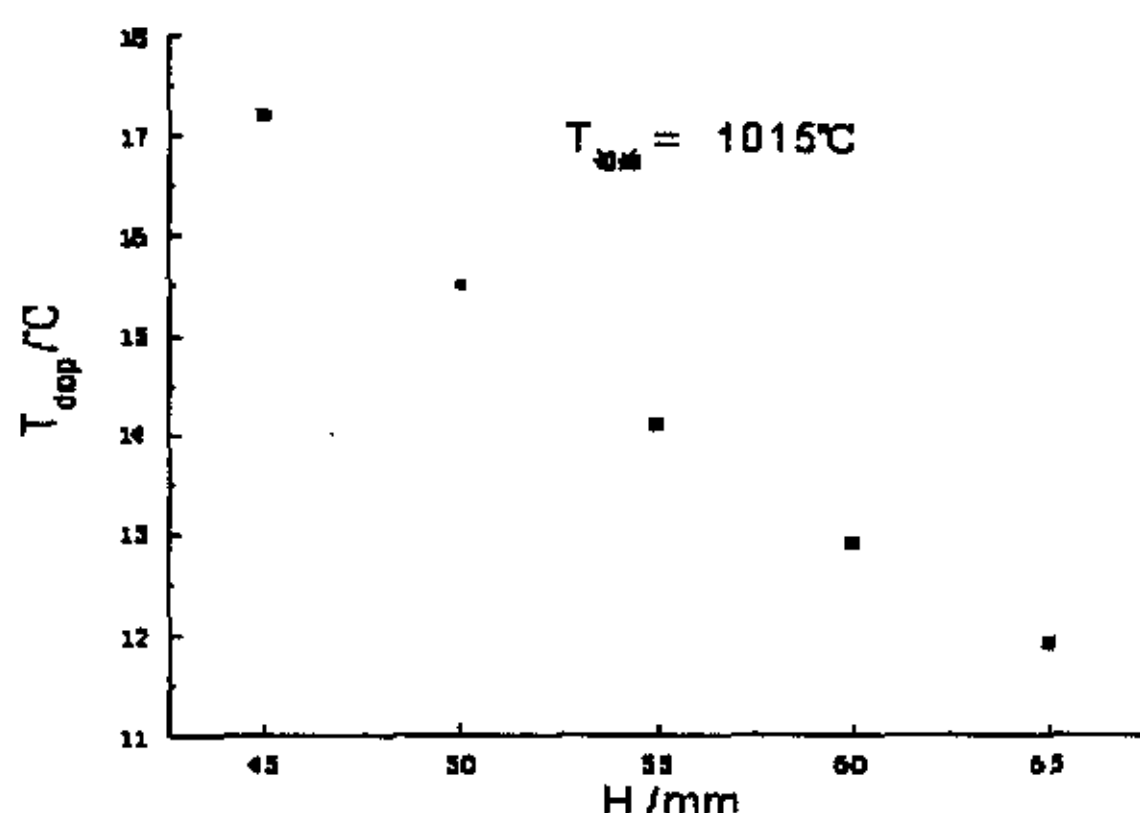


图 3.16 在初始温度为 1015℃ 时钢板厚度 H 与除鳞温降 T_{drop} 的关系图

Fig.3.16 Relation chart of plate thick and temperature drop by descaling at initial temperature is equal to 1015℃

3.2.4 与轧辊接触产生的热传导

轧制过程中，温度较高的钢板和温度较低的轧辊发生接触，钢板热量流向轧辊，使得钢板温度降低。一般的，钢板与轧辊的接触弧长与轧辊的半径相比很小，则这两者之间的热传导问题可以简化成两个半无限体之间的热传导过程^[18]。

半无限体之间的热传导方程可以求出解析解，则有如下结果，

$$T_m = \frac{\lambda_1 \cdot \alpha_1^{-1/2} \cdot T_0 + \lambda_2 \cdot \alpha_2^{-1/2} \cdot \theta_0}{\lambda_1 \cdot \alpha_1^{-1/2} + \lambda_2 \cdot \alpha_2^{-1/2}} \quad (3-54)$$

上述边界条件忽略了轧件与轧辊之间的热阻，为此需要将解析结果乘以小于 1 的系数^[1]，由此得出钢板与轧辊接触产生的平均温降 ΔT_R 为，

$$\Delta T_R = \frac{4 \cdot \eta \cdot \alpha_1 \cdot \sqrt{t} \cdot (T_0 - T_m)}{H_m \cdot \sqrt{\alpha_1 \pi}} \quad (3-55)$$

式中：

H_m ：钢板平均厚度；

η : 修正系数。

塑性功

变形区内单位体积产生的变形能为

$$E = \int_0^s K \cdot ds \approx K \cdot \ln \frac{H_k}{H_{k+1}} = \rho \cdot c \cdot \Delta T_E \quad (3-56)$$

$$\Delta T_E = k'_{\text{coff}} \cdot \frac{K \cdot \ln H_k / H_{k+1}}{\rho \cdot c} \quad (3-57)$$

式中:

K : 平均变形抗力;

H_k : 入口厚度;

H_{k+1} : 出口厚度;

ΔT_E : 塑性加工热产生的平均温度变化;

k'_{coff} : 热功转化有效系数。

以上不同因素造成的温度变化可以分别求解, 然后进行线性叠加即可得到钢板轧制过程中的温度变化。

3.2.4 首钢中板温度场的解析

(1) 温度与厚度、时间的关系

中板温度场的变化与对应轧件厚度, 以及时间有着一定的关系。当轧件厚度大于等于 60mm 时, 轧件的温度随待温时间的延长而线性变化。当轧件厚度小于 60mm 时, 轧件的温度随待温时间的延长而呈现抛物线变化。在同一厚度时, 不同初始温度条件下, 不同曲线的开口随着时间的变化逐渐见小。

一般的不同厚度, 不同初始温度条件下温度变化和时间的关系如表 3.5 可以看出轧件越厚, dT/dt 就越小 (小于 60mm 时, dT/dt 是根据 10~110s 的数据进行计算得到, 而大于 60mm 时, dT/dt 是根据 10~210s 的数据进行计算得到)。

表 3.5 温度与厚度、时间的关系

Table 3.5 The relation between thickness and temperature of time.

初始温 度/℃	轧件厚度/mm							
	100	90	80	70	60	50	40	30
1100	0.445	0.493	0.551	0.623	0.714	0.94	1.153	1.463
1050	0.392	0.434	0.485	0.549	0.63	0.827	1.013	1.291
1000	0.339	0.379	0.424	0.48	0.552	0.720	0.883	1.131
950	0.297	0.329	0.368	0.417	0.481	0.621	0.765	0.982
900	0.255	0.282	0.313	0.352	0.400	0.532	0.646	0.808
850	0.196	0.215	0.238	0.266	0.301	0.402	0.486	0.603

(2) 表面温度与平均温度之间的关系

轧件在轧线上实测的温度都是表面温度，而中厚板轧件厚度方向的温度梯度不能忽略，如轧制力的计算一般采用平均温度，这样必须研究表面温度和平均温度之间的关系。根据计算结果和相关的资料可以知道，轧件厚度方向的温度梯度在表面处最大，其温度曲线基本上呈抛物线分布。我们可以得出以下规律：(1) 坯料厚度范围是 180~250mm，而且轧件从加热炉出来运送到轧机前，考虑转钢时间，其总的时间基本不会超过 30s，考虑到一次除鳞水造成的表面急冷，其表面温度和平均温度差别基本上在 50℃ 以上。(2) 同一厚度下，随着初始温度的降低，轧件厚度方向的温度均匀性得到很好的改善。(3) 如果初始温度相同，当厚度大于等于 70mm 时，不同厚度的温度均匀性随时间的变化基本相同，由此可以知道虽然轧制过程中轧件的厚度是不断变化的，但是由于其温度和时间的变化关系基本相同，所以其平均温度和表面温度的差值看成不收厚度变化的影响。因为轧件尺寸精度主要在后几个道次，为简化考虑，轧件厚度大于 60mm 以上时，温度差值可以考虑成 60℃，轧件厚度大于 40mm 小于 60mm 时，温度差值可以考虑成 45℃。(4) 当轧件厚度小于等于 40mm 时，某一厚度的温度均匀性随时间的变化基本不变。所以可以将温度差和厚度之间的关系回归成一个数学函数进行计算。(5) 即使出炉温度存在一定的温度梯度，通过计算表明其对总体的温度差变化基本没有影响。

(3) 实测温度的处理策略

① 一次测温的处理

根据目前轧线的测温仪位置布置，坯料出炉后的温度测量是待温 1 辊道和待温 2 辊道上的测温。测温仪 1 距离一次高压水除鳞设备为 5800mm，由于一次高压水除鳞的影响，一次测温的效果可能不是很好。

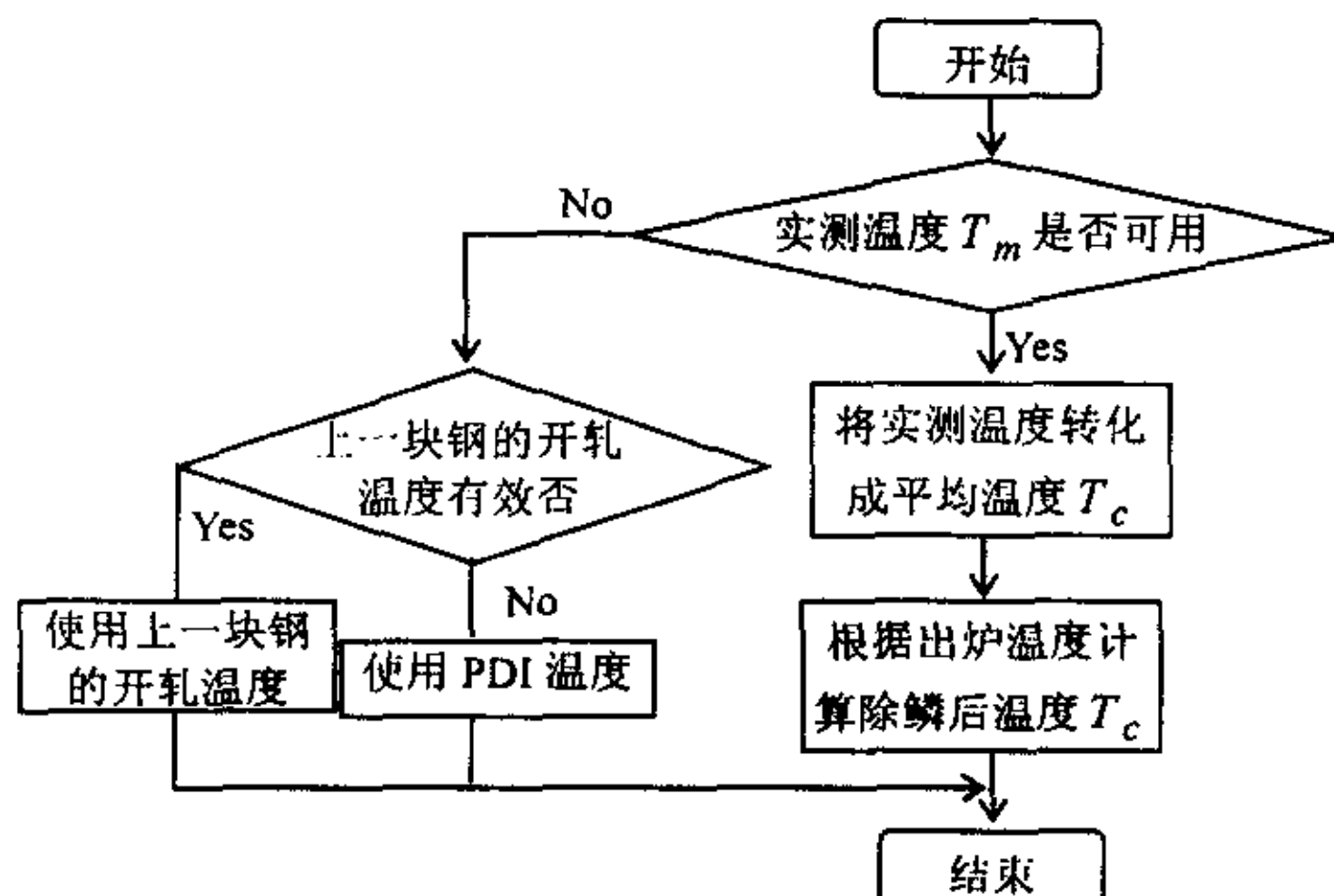


图 3.17 一次测温流程图

Fig3.17 Flowchart of first temperature measurement

② 二次测温的处理

二次测温可以不考虑高压水除鳞的影响。其可信度比较高，所以应该综合两次测温的结果进行开轧温度的计算。首先根据实测信号计算出坯料平均温度，然后对一次测温 and 二次测温进行综合处理。因为二次测温的实测温度可信度较高，所以采用加权平均的方法（其权值根据实际情况进行调整）。将加权后的温度进行自学习处理，即可得到开轧温度。

③ 待温测温的处理

由于控轧控冷的需求，轧件需要在辊道上待温，因为待温辊道上有测温仪，如何根据测温信号进行处理是必须考虑的事项待温时间的计算需要进行迭代处理，迭代方法采用二分法。实测温度需要转化为平均温度，然后进行校核。

3.3 力能模型

3.3.1 轧制力模型

轧制压力数学模型是轧制模型和设定计算中最基本的模型，是压下规程

计算和辊缝设定的依据，同时板形控制的计算也离不开它。好的轧制力模型具有两个特点：其一是具有一定的计算精度；其二是模型结构物理意义明确，开放性好，适于自适应学习和调整。根据轧制力模型的特点，制定模型的选择原则如下：选择通过其他厂家实践得到充分应用的轧制力模型；轧制力模型物理意义明确，容易扩充；各种影响因素能够在轧制力方程中得到体现^[8]。

中厚板轧制中使用最广泛的是 Sim's 计算公式。

$$F = W \times \sqrt{R' \times \Delta h} \times Q_p \times K_f \quad (3-58)$$

式中：

F ：轧制力[kN]； K_f ：平均变形抗力[MPa]；

W ：轧件宽度 [mm]；

R' ：考虑弹性压扁的轧辊半径[mm]；

Δh ：压下量 [mm]；

Q_p ：轧制力函数 [1]。

Sim's 公式在宝钢 1580、某中板厂中板厂、日本和歌山厚板厂等许多厂家得到广泛应用，它是目前轧制力模型的最佳方案。假设塑性系数=2 轧机刚度。如果轧制力的误差控制在 8%，终轧厚度偏差大于一定值时，就可能超差 0.1mm。该轧制力模型有三项影响计算精度：轧辊压扁半径、轧制力函数和变形抗力

A、轧辊压扁半径

当单位轧制压力较高时，处在变形区的轧钢表面将被压扁，使接触弧长度加大，导致单位轧制压力的增加。这一压扁所带来的影响，在计算精轧机组轧制力时必须考虑。计算弹性压扁时，采用 Hitchcock 公式的简化形式：

$$R' = R_0 \times \left(1 + \frac{C \times F}{\Delta h \times W}\right) \quad (3-59)$$

式中：

F ：轧制力[kN]；

R_0 ：轧辊半径[mm]；

Δh ：压下量[mm]；

$$C = \frac{16 \times (1 - \nu^2)}{\pi \times E};$$

W : 轧件宽度[mm];;

ν : 轧件波松比;

E : 轧件弹性模量。

但是在计算轧辊压扁半径时, 需要知道实际轧制力的大小, 而实际轧制力这是我们需要最终计算的结果, 为此可以通过迭代法来提高计算精度。

B、轧制力影响函数

$$Q_p = \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{R}{h}} \ln \frac{1}{1-\varepsilon} - \sqrt{\frac{R}{h}} \ln \frac{h_\gamma}{h} + \frac{\pi}{2} \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}} \right] - \frac{\pi}{4} \quad (3-60)$$

式中:

$$\frac{h_\gamma}{h} = 1 + \frac{R}{h} \gamma^2;$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{h}{R}} \operatorname{tg} \left[\frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}} + \frac{\pi}{8} \ln(1-\varepsilon) \sqrt{\frac{h}{R}} \right];$$

$$\varepsilon = \frac{H-h}{H};$$

R : 轧辊半径[mm]; H : 入口厚度[mm]; h : 出口厚度[mm]。

由于公式比较繁杂, 不便于计算机在线控制, 因此习惯上采用其简化回归公式。目前有许多回归公式:

$$\ln Q_p = 0.00806 + 0.218 \cdot \ln \left(\sqrt{\frac{R'}{h}} \cdot \sqrt{\varepsilon} \right) + 0.1318 \cdot \left\{ \ln \left(\sqrt{\frac{R'}{h}} \cdot \sqrt{\varepsilon} \right) \right\}^2 \quad (3-61)$$

$$Q_p = 0.8049 + 0.2488 \frac{l_c}{h_c} + 0.0393 \cdot \frac{l_c}{h_c} \cdot \varepsilon - 0.3393 \cdot \varepsilon + 0.0732 \cdot \frac{l_c}{h_c} \cdot \varepsilon^2 \quad (3-62)$$

式中:

$$\varepsilon = \frac{H-h}{H}; \quad l_c = \sqrt{R \cdot \Delta h}; \quad h_c = \frac{H+h}{2};$$

$$Q_p = 0.85 + 0.15 \cdot \text{ratio} + 1.68 \cdot \exp[-4.7 \cdot (\text{ratio} - 0.25)] \quad (3-63)$$

式中:

$$\text{ratio} = \frac{3 \cdot l_c}{H+2h}; \quad l_c = \sqrt{R \cdot \Delta h}$$

三个公式的计算结果基本相同。另外在轧制力模型中,残余应变模型中的时间常数计算误差造成轧制力模型的计算误差在 6%以内。但是如果不考虑残余应变,则累计残余应变带来的计算误差为 15%~40%。关于残余应变模型可参阅残余应变模型一节。

C、变形抗力模型

影响变形抗力模型的因素较多,从微观分析,加热制度造成的奥氏体晶粒的原始尺寸、开轧温度的大小、再结晶区的变形制度、部分再结晶区的变形制度、未再结晶区的变形制度、化学成分造成的强化效果都会影响变形抗力。从宏观看,某一钢种的温度制度和变形制度应该都是比较固定的工艺,但是化学成分是一个波动量,而且加热温度和开轧温度会根据现场情况允许波动。众多学者通过研究和分析提出了许多变形抗力模型,但是一个合理的变形抗力模型应该考虑下面因素:

(1) 变形率函数的影响

中厚板轧制过程中,轧件的道次变形率的大小在 0.10~0.35 之间变化。变形速率函数的表达形式也有很多,下面列出某中板厂、美坂(鞍钢)、志田茂的变形速率模型。变形率函数可以写成如下几种形式:

某中板厂:

$$f(\varepsilon) = 1.08 \times [1 - \exp(-7.5 \times (1.15 \times \varepsilon + 0.05))] \quad (3-64)$$

美坂公式(鞍钢):

$$f(\varepsilon) = \varepsilon^{0.21} \quad (3-65)$$

志田茂:

$$f(\varepsilon) = 1.3 \times \left(\frac{\varepsilon}{0.2} \right)^{0.5} - 0.3 \times \frac{\varepsilon}{0.2} \quad (3-66)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{H}{h} \quad (3-67)$$

式中:

H : 入口厚度[mm]; h : 出口厚度 [mm]。

表 3.6 变形率影响分析

Table 3.6 The analysis of distortion effect.

	某中板厂	美坂	志田茂	某厂 / 美坂	志田茂 / 美坂
$\varepsilon=0.10$	0.839	0.617	0.835	1.361	1.355
$\varepsilon=0.15$	0.943	0.671	0.934	1.404	1.391
$\varepsilon=0.20$	1.001	0.713	1.000	1.405	1.402
$\varepsilon=0.30$	1.055	0.777	1.046	1.358	1.390

中厚板轧制过程中, 轧件的道次变形率的大小在 0.10~0.35 之间变化。在该范围内比较三个公式的计算结果, 这三种公式基本上是等价的。

(2) 变形速率影响函数

变形速率函数的表达形式也有很多, 下面列出某中板厂、美坂(鞍钢)、志田茂的计算公式; 变形速率 $\dot{\varepsilon}$ 近似等于下面公式

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\omega \cdot ARC \cdot \ln \frac{H}{h}}{H - h} \quad (3-68)$$

式中:

ω : 轧辊角速度 [rad/s];

ARC : 接触弧长[mm];

H : 入口厚度[mm]; h : 出口厚度 [mm]。

某中板厂:

$$g(\dot{\varepsilon}) = \frac{\dot{\varepsilon}^{0.1 + 0.08 \times (1 - \exp(-0.25 \times \varepsilon))}}{4} \quad (3-69)$$

美坂(鞍钢):

$$g(\dot{\varepsilon}) = \dot{\varepsilon}^{0.13} \quad (3-70)$$

志田茂(刘玠):

$$g(\dot{\varepsilon}) = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10}\right)^m \quad (3-71)$$

表 3.7 变形速率影响分析

Table 3.7 The analysis of distortion speed effect.

	某中板厂	美坂	志田茂	美坂/酒钢
$\dot{\varepsilon}=6.94$	1.096	1.286	1.145	1.174
$\dot{\varepsilon}=11.73$	1.208	1.377	1.188	1.140
$\dot{\varepsilon}=15.99$	1.281	1.434	1.214	1.120
$\dot{\varepsilon}=19.71$	1.331	1.473	1.232	1.107

中厚板轧制过程中, 轧件的道次变形速率的大小在8~20之间变化。在该范围内比较三个公式的计算结果, 可以看出这三种公式基本上是等价的, 其差别通过处理可以控制在2~3%内。

综合考虑, 变形抗力计算公式中, 变形率函数和变形速率函数的结构形式采用美坂公式, 通过简单处理其计算结果和志田茂公式的结果可以控制在5~6%以内。如果温度函数的影响能够计算比较准的话, 变形抗力的的计算结果就比较理想。

(3) 温度影响函数

由于变形抗力公式可以分解为三个部分: 温度影响函数 $\exp(aT+b)$ 、变形率影响函数 ε^c 、。其中变形率影响函数和变形速率影响函数的指数项对于某一钢种是常数 (有的变形抗力公式将其表示为温度的函数, 实际上对大多数钢种来说温度对它们的影响很小), 所以轧制力过程模型参数的调整主要集中在温度影响函数上。

$$\exp(aT+b) = \exp(aT) \times \exp(b) = \exp(aT) \times k \quad (3-72)$$

公式(3-72)中将温度影响函数进行展开, 可以看出, 对于模型参数 b 的调整相当于在轧制力模型前面乘以一个比例系数项, 而这种方法在许多参考书上都有分析, 它属于一种比较成熟的方法, 而对参数 a 的调整涉及温度模型的计算。下面分析如何调整 a 和 b 来消除轧制力模型的误差。由公式(3-72)和实际测量数据可以计算出当前道次的温度影响函数的自然对数值。初始温度影响函数的自然对数值为 aT_1+b , 令

$$a'T_1' + b' = aT_1 + b + \Delta \quad (3-73)$$

由于中厚板轧制过程为多道次可逆轧制,每个道次都需要进行修正计算。上面介绍了某一个道次的修正计算方法,但是如何将前面所有道次的计算结果进行综合还需要分析。一般来说,如果当前道次数为 N ,则 $N-1$ 道次的修正结果对 N 道次影响最大,而前面道次的修正结果对 N 道次影响较小,所以需要 对 $1 \sim N-1$ 道次的结果进行加权处理。

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} 2^{-(N-i)} \cdot \Delta_i}{\sum_{i=1}^{N-1} 2^{-(N-i)}} \quad (3-74)$$

其中 Δ_i 是第 i 道次的修正结果。如果 Δ_i 的修正值波动偏大,说明模型参数 a 和 b 都需要修正。 b 变化 0.1,轧制力就变化 11%; b 变化 0.15,轧制力就变化 16%; b 变化 0.2,轧制力就变化 22%。初期 b 的调整范围为 0.2,待稳定后, b 的调整范围为 0.15。超过这个范围就离线回归 a 和 b 进行优化。

3.3.2 轧制力矩模型

首钢中厚板轧制时,轧制力矩模型直接从 SIM'S 模型中导出。轧制力矩是通过变形能来计算^[7]:

$$E = 10 \times K_f \times Q_c \times \varepsilon \quad (3-75)$$

式中:

E : 单位体积变形能[kN/mm]; K_f : 平均变形抗力[kN/mm];
 Q_c : 轧制力矩变形区影响函数[1]; ε : 变形率[1]。

轧制过程中的秒流量为

$$VOL = \omega \times R \times gl \times h \times W \quad (3-76)$$

式中:

VOL : 秒流量[mm³/s]; ω : 轧辊角速度[rad/s];
 R : 轧辊半径[mm]; gl : 1+前滑值[1];
 h : 出口厚度 [mm]; W : 轧件宽度[mm];

电机功率应等于变形功率

$$VOL \times E = C \times \omega \quad (3-77)$$

式中:

C : 轧制力矩 [kNm]; ω : 轧辊角速度 [rad/s];

得轧制力矩模型:

$$C = R \times gl \times h \times W \times Kf \times Qc \times \varepsilon \quad (3-78)$$

在该公式中加上自适应修正项, 则可以得到轧制力矩自适应模型

$$C = R \times gl \times h \times W \times Kf \times Qc \times \varepsilon \times ADATOR \quad (3-79)$$

式中:

$\varepsilon = 1.155 \times \ln \frac{h1}{h2}$; $h1$: 轧件的入口厚度;

$h2$: 轧件的出口厚度;

$ADATOR$: 轧制力矩自适应修正系数。

轧制力矩变形区影响函数 Qc 可以表示成

$$Qc = D1 + D2 \times Lc + D3 \times \exp(-D4 \times (Lc - D5)) \quad (3-80)$$

式中:

Lc : 形状比 $= \frac{3ARC}{H + 2h}$ [1];

$D1, D2, D3, D4, D5$: 根据 SIM'S 公式推倒出来的系数。

3.3.3 残余应变模型

对于某些合金钢 (如含 Nb 、 V 、 Ti 、 Mo 等), 其残余应变会导致硬度增加。在下一道次的轧制力计算中必须考虑到残余应变的影响。残余应变是道次间隔温度和轧件温度和道次变形率的函数。

下面给出残余应变简化模型:

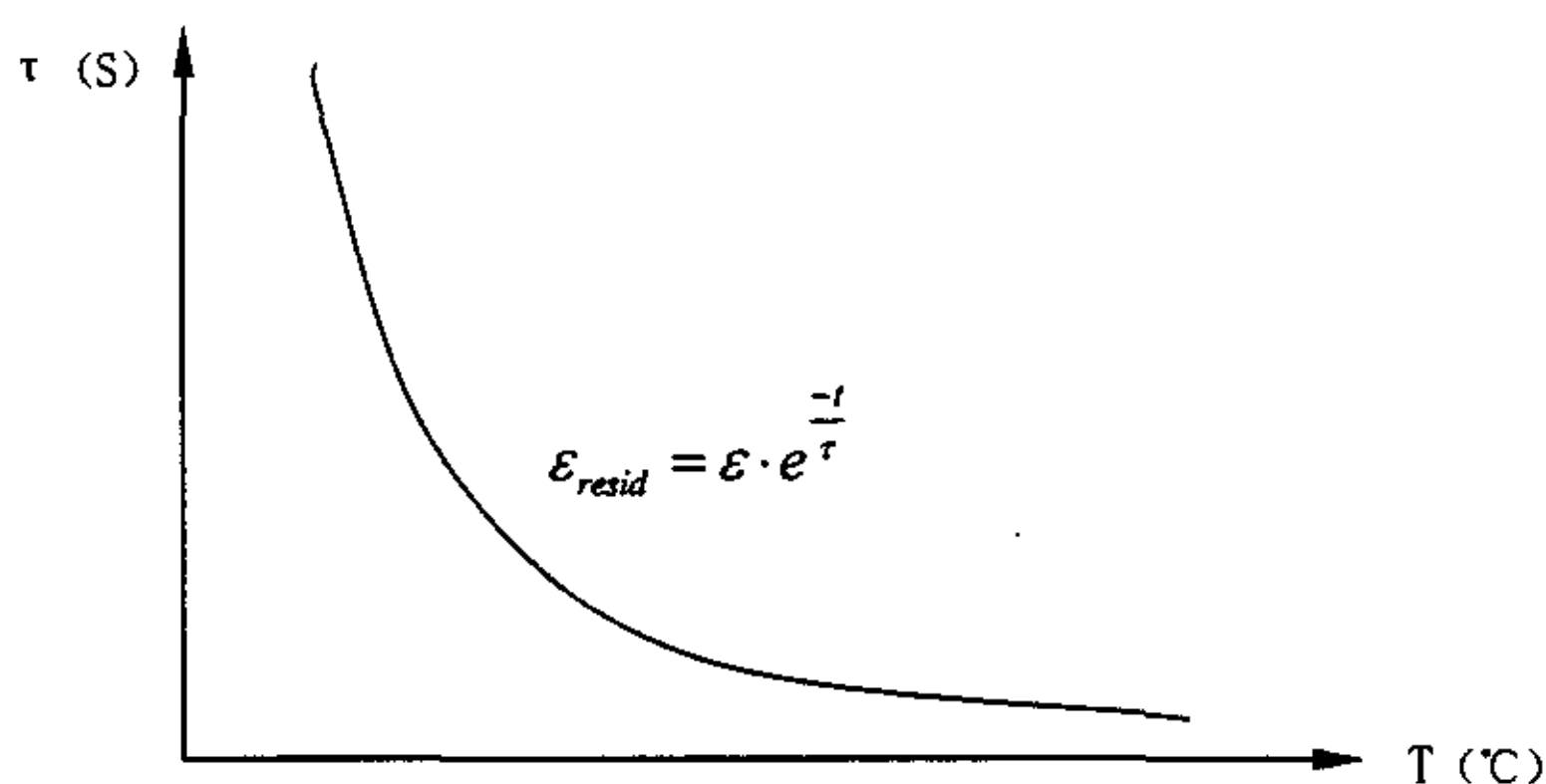


图 3.20 残余应变曲线图

Fig3.20 Diagram of residual strain

式中:

τ : 时间指数常数 (依赖与轧件温度) [s];

T : 轧件平均温度 [$^{\circ}\text{C}$];

ε : 道次变形率[1];

ε_{ref} : 残余应变[1]; t : 时间。

该模型功能主要是计算道次后 t 秒后的残余应变 (轧件温度为 T)

3.3.4 宽展模型

中厚板在轧制时不仅发生纵向变形, 而且要发生横向变形。中厚板在伸长轧制时, 轧件要发生横向变形, 而且在展宽轧制和成形轧制时也要发生横向变形而且横向变形在轧件的头尾处更为显著, 这样将成形轧制阶段和展宽轧制阶段产生的不均匀变形结合起来, 则轧后钢板的平面形状不再是矩形, 所以必须对中厚板轧件的展宽量进行预测, 用于轧件的平面形状控制^[20]。

(1) 展宽理论

展宽原理: 横向延伸使工件宽度增加, 通常称为宽展。宽展 ΔWS 的数学表达式如下:

$$\Delta WS = W2 - W1 \quad (3-81)$$

$W1$, $W2$ 分别为轧前、后轧件平均横断面宽度。

(2) 展宽的影响因素

展宽的变化与很多因素有关, 影响展宽的三个主要因素是压下率 ($\Delta h/H$,

H 为轧前厚度), 板宽比(轧前板宽/轧前板厚)和板厚比(轧辊半径/轧前板厚)。此外还与轧辊与轧件的摩擦系数、轧制温度、金属的化学成分、金属的机械性能、轧辊线速度和变形速度等有关。

(3) 宽展的计算公式

由于影响宽展因素很多, 在现场中厚板实际生产中, 一般公式很难把所有的因素考虑进去。所以建立中厚板宽展模型时, 一般只考虑影响宽展的主要因素。

(4) 展宽模型的建立

3500mm 轧机在轧制时, 为了建立其宽展数学模型, 如图 3.18 所示, 3500 厚板轧机在轧制时, 轧件存在一定的宽展。在变形区内, 微分体系的力平衡条件确定了宽展区的分界, 并假定在由曲线三角形 ACB 围成的宽展区内。如图所示, 金属只产生横向变形。当距轧辊中心线 $(x + dx)$ 的 ac 截面移动 dx 时, 即位于 bd 截面时, 移动的体积保持相等, 即 $1/2 * h_x * dbx = -1/2 * z * dh_x / 2$ 所以

$$dbx = -2 \times z \times dh_x / h_x \quad (3-82)$$

式中:

dh_x : 高度; h_x : 减缩量; dbx : 当截面。

ac 移动 dx 时轧件宽度的增量从; z 为由轧件侧到 bd 截面上假定宽展区边界的距离。上式右边的负号表示左边的值, 随着 h_x 的减少而增加。以式(3-82)为基础经一系列数学推导和简化, 给出宽展系数的简化公式:

$$B_h = B_H * \left(\frac{h}{H}\right)^{-w} \quad (3-83)$$

$$W = 10^{-a * (h/D)^{b * (B_h/H)}} \quad (3-84)$$

a 、 b 为回归常数。

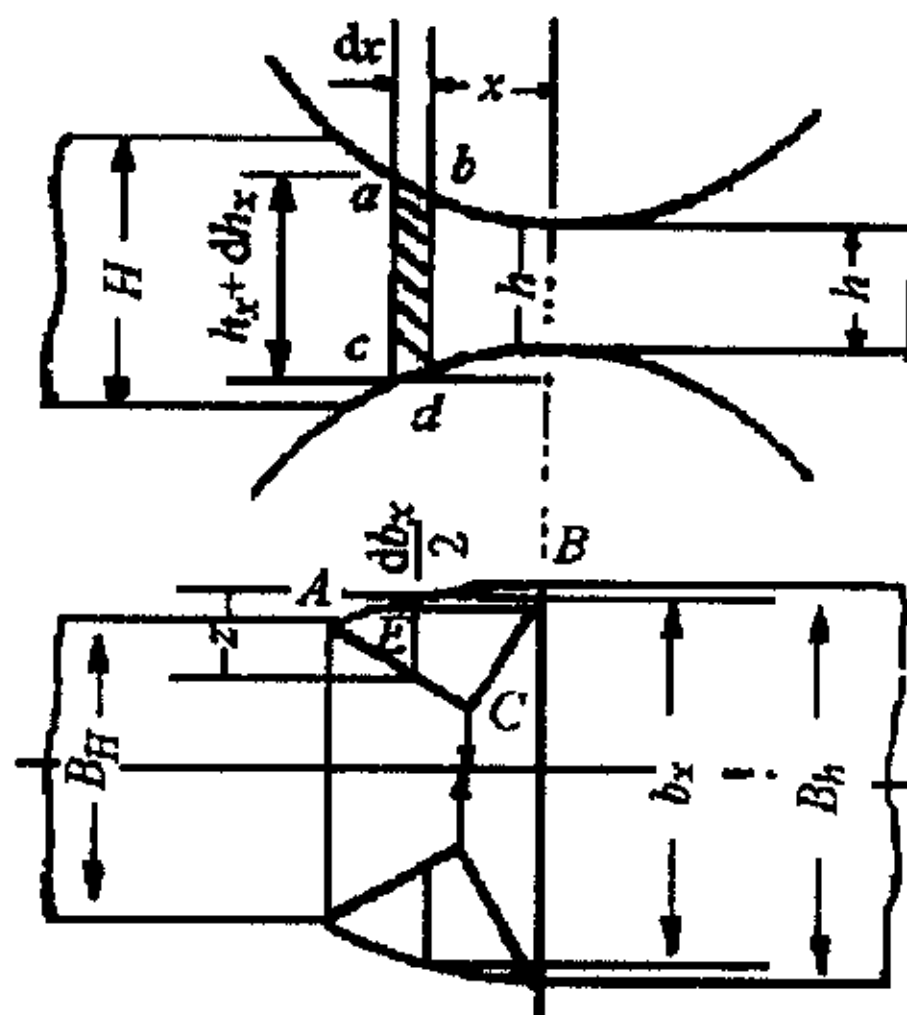


图 3.18 宽展原理图

Fig3.18 Schematic diagram of broadside

由于展宽系数与压下量有关,而中厚板轧制时,前几道次压下量比较大,因此对于中厚板轧制应分两种情况:对于前几道次(一般取 4~5 个道次)压下量大的,回归一套 a, b 系数,而对于后几道次,另外回归一套 a, b 系数。现场宽展模型的处理主要是对公式 (3-84) 进行处理。即由实测值可以求出 W 的值,对 (3-84) 式进行取对数可得出 a, b 的关系。最终由回归公式可求得宽展系数模型。

(5) 对该模型的讨论:

①压下量的影响:中厚板在轧制时,随着压下量的增加,宽展量也在增加,主要原因是压下量增加时,变形区长度增加,变形区形状参数 l/h (l 为变形区长度, h 为出口厚度) 增大,从而使纵向塑性流动阻力增加,纵向压缩主应力数值加大。

②轧制直径的影响:宽展量随着轧辊的直径 D 的增加而增加,主要原因是当 D 增加时,纵向阻力增加,金属更容易向宽度方向流动。但是中厚板在轧制时,延伸总是大于宽展。

此外,也可以用宽展模型的简化公式:

$$dw = 1.0 + 0.11 * \frac{h_1 - h_2}{W_1} \quad (3-85)$$

3.4 板形模型

随着中厚板厚度品质的不断提高,板形已经成为中厚板生产中的一个重要指标,很多废品都是由于板形品质过差造成的。为了能生产出合格的产品,规程制定过程中必须考虑板形的影响。板形好坏主要通过板凸度和平直度来评价。

3.4.1 板凸度模型

中厚板板凸度方程的主要受到下面几个因素的共同作用:轧辊直径;轧辊凸度;轧制力;弯辊力;轧件宽度

如图 3.19 所示,为了比较精确的计算轧件凸度,可以通过影响函数法进行计算^[18],然后对计算结果进行回归处理。

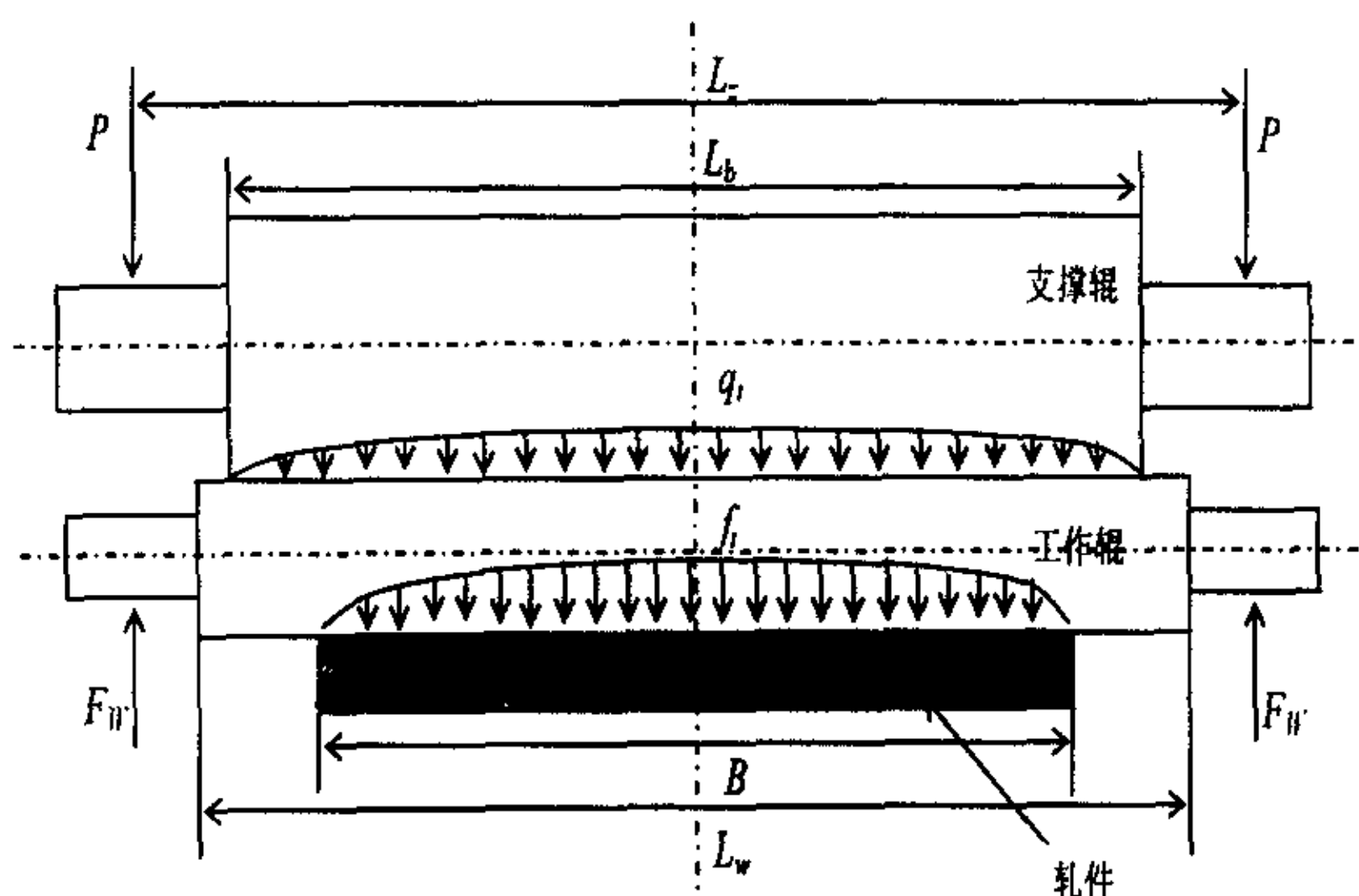


图 3.19 轧制过程的轧辊力学模型

Fig3.19 Mechanical model of roll for plate rolling process

板凸度模型的结构如式 (3-86)

$$C_0 = C_F - C_B + C_{XBT} \quad (3-86)$$

其中:

C_F : 轧制力影响项; C_B : 弯辊力影响项; C_{XBT} : 轧辊凸度影响项。

通过回归处理,可以得到如公式(3-87)的数学模型

$$C_{XBT} = K_{X0} + K_{X1} \cdot C_w \cdot \left(\frac{width}{length} \right)^2 + K_{X2} \cdot C_b \cdot \left(\frac{width}{length} \right)^2 \quad (3-87)$$

式中:

C_w : 工作辊原始凸度; C_b : 支撑辊原始凸度。

其中: $K_{X0} = 1.80556E-4, K_{X1} = -2.99673, K_{X2} = -1.14886$ 。

$$C_F = \frac{F \cdot K_{F-C}}{1000}, \text{ 轧制力的影响, 在计算轧制力的影响时, 需要剔}$$

除辊凸度和

弯辊力的影响, 为此假定 $F_w = 0, c_w = 0, c_b = 0$, 然后用式(3-87)进行回归。

$$K_{F-C} = K_{F-C1} + K_{F-C2} \cdot \left(\frac{Width}{2000} \right) + K_{F-C3} \cdot \left(\frac{Width}{2000} \right)^2 \quad (3-88)$$

$$K_{F-C1} = a_1 + a_2 \cdot \left(\frac{R_w}{500} \right) + a_3 \cdot \left(\frac{R_b}{1000} \right)$$

$$K_{F-C2} = a_4 + a_5 \cdot \left(\frac{R_w}{500} \right) + a_6 \cdot \left(\frac{R_b}{1000} \right)$$

$$K_{F-C3} = a_7 + a_8 \cdot \left(\frac{R_w}{500} \right) + a_9 \cdot \left(\frac{R_b}{1000} \right)$$

弯辊力的影响:

$$C_B = \frac{B \cdot K_{B-C}}{1000} \quad (3-89)$$

在计算弯辊力的影响时, 需要剔除辊凸度和轧制力的影响, 为此假定 $c_w = 0, c_b = 0$, 然后用公式(3-88)消除轧制力的影响, 然后用式(3-89)进行回归。

$$K_{B-C} = K_{B-C1} + K_{B-C2} \cdot \left(\frac{Width}{2000} \right) + K_{B-C3} \cdot \left(\frac{Width}{2000} \right)^2 \quad (3-90)$$

$$\begin{aligned} K_{B_C1} &= b_1 + b_2 \cdot \left(\frac{R_w}{500} \right) + b_3 \cdot \left(\frac{R_b}{1000} \right) \\ K_{B_C2} &= b_4 + b_5 \cdot \left(\frac{R_w}{500} \right) + b_6 \cdot \left(\frac{R_b}{1000} \right) \\ K_{B_C3} &= b_7 + b_8 \cdot \left(\frac{R_w}{500} \right) + b_9 \cdot \left(\frac{R_b}{1000} \right) \end{aligned}$$

注意，上述参数只适用于首钢 3500mm 轧机。而且这种方法忽略了轧件横向流动的影响。综合考虑轧件横向流动和板凸度遗传系数的影响，可以得出如式 (3-91) 的轧件出口凸度计算模型。

$$C_h = \xi \cdot C_0 + \bar{\eta} \cdot C_H \quad (3-91)$$

其中： $\xi = \frac{\Delta C_h}{\Delta C}$ ，为机械凸度转化系数； $\bar{\eta} = \frac{\Delta C_h}{\Delta C_H}$ ，板凸度遗传系数。

为了保证板形良好，必须使得轧制前后的比例凸度相等。考虑轧件宽度轧制力分布均匀的条件下，轧件入口凸度可以看成是 C ，则有公式 (3-92) 成立

$$C/h = C_H/H \quad (3-92)$$

由于轧件宽向轧制力分布不是均匀的，且轧件存在一定的横向流动，用系数 ξ 来表示轧件横向流动的影响效果，如公式 (3-93) 所示。

$$\frac{C_h}{h} - \frac{C_H}{H} = \xi \cdot \left(\frac{C_0}{h} - \frac{C_H}{H} \right) \quad (3-93)$$

从某种程度上来说，公式 (3-93) 的左边可以看成是轧件延伸率的变化量 $\Delta \lambda$ ，而公式 (3-93) 右边括号内的部分可以认为是板比例凸度差异 ΔC_p ，如果轧件越厚，宽度越窄，则轧件横向流动越大，轧件凸度变化引起的纵向延伸差异越小，轧件将公式 (3-93) 进行变形，得公式 (3-94)，

$$C_h = \xi \cdot C + (1 - \xi)(1 - r)C_H \quad (3-94)$$

其中： $1 - r = h/H$ 。令 $\bar{\eta} = (1 - \xi)(1 - r) = \eta(1 - r)$ ，则有

$$C_h = \xi \cdot C_0 + (1 - \xi) \cdot \frac{h}{H} \cdot C_H \quad (3-95)$$

式中:

C_h : 轧件出口凸度; C_H : 轧件入口凸度;

ξ : 轧制力均匀分布时的机械凸度对轧件出口凸度的影响。

令 $\eta = 1 - \xi$, 根据小川茂等人的试验结果有如公式 (3-96) 的关系,

$$\eta = 0.5 - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\ln \gamma + 8.1938}{1.1044} \right) \quad (3-96)$$

其中:

$$\gamma = \frac{D_w^{0.5} h^{1.5}}{\text{width}^2}。$$

根据以上分析, 根据轧制过程的实际情况, 可以很方便地计算出轧件的出口凸度值。

3.4.2 平直度模型

作为板形横向典型指标的板凸度和纵向典型指标的板平直度之间的关系密切, 板平直度的控制最终还要归结到板凸度的控制上。为获得良好板形, 要求带钢沿其横向有均一的延伸, 带钢的轧前与轧后断面各处尺寸比例恒定, 即良好板形条件为带材轧前比例凸度必须等于轧后比例凸度。但在中厚板生产中, 由于轧件存在一定的横向流动, 即使来料断面形状与承载辊缝不相匹配, 也有可能不会导致轧后的板形缺陷, 故而在实际轧制时可以根据产品凸度方面的要求进行轧件凸度的修正, 允许有一定程度的比例凸度变化。根据 Shohet K N 给出的板形良好判据为

$$-80 \left(\frac{h}{W} \right)^{1.86} = \varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_e = 40 \left(\frac{h}{W} \right)^{1.86} \quad (3-97)$$

下面是首钢中板厂的板形良好判据

$$-0.5 \left(\frac{h}{W} \right) = \varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_e = \left(\frac{h}{W} \right) \quad (3-98)$$

上面给出了板形的良好判据, 是轧制过程中, 轧件比例凸度的变化不是

100 % 地转化为延伸率的变化。为了评价轧件比例凸度变化量 $\Delta \bar{C} = c/h - C/H$ 和延伸率变化量 $\Delta \varepsilon = (le - lc)/lc - (Le - Lc)/Lc$ 之间的关系, 可以定义板形干扰因子 $\zeta = \Delta \bar{C} / \Delta \varepsilon$ 。假设轧件轧制过程中, 其体积为常数, 则根据相关资料可以得到如图所示的结果以及关系式 (3-99)

$$\zeta = -0.0108 + 4.95754 \times 10^{-5} \times \gamma^{-1} - 1.84756 \times 10^{-9} \times \gamma^{-2} \quad (3-99)$$

3.5 自适应模型

我们单纯依靠数学模型, 无法保证模型设定的精度。利用轧制过程中得到的实测数据, 通过对模型进行自学习计算, 得到最新的自学习系数, 用于下次模型计算, 以提高模型设定的精度。

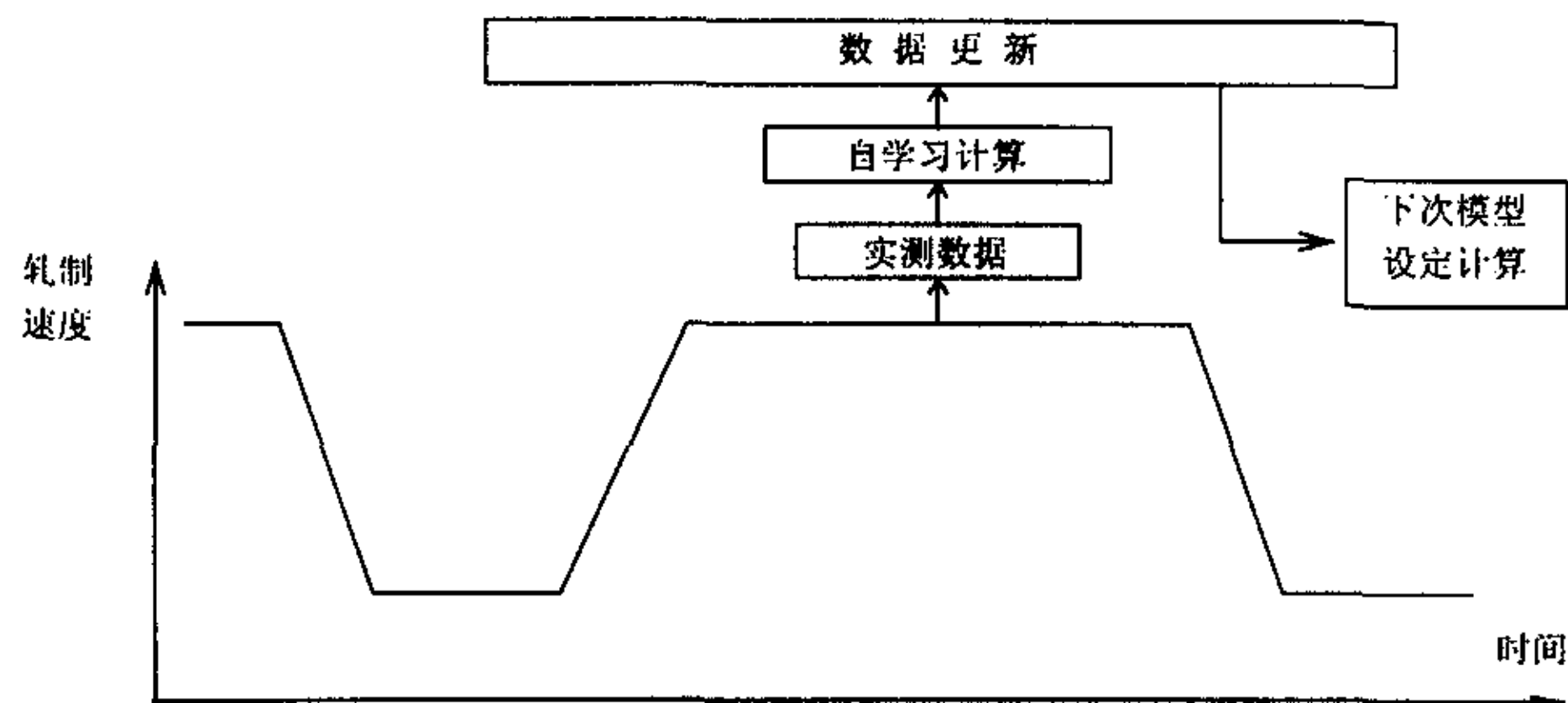


图 3.20 自适应示意图

Fig3.20 Diagrammatic sketch of self adaptation

在中板轧制中自适应功能的调用主要有: ①在每个轧制道次结束, 即, 得到轧件中心 1/4 处的测量数据时, 进行硬度模型的自适应, 得到 A13 和 A14; 进行力矩模型的自适应, 得到力矩自适应系数。这些自适应系数可以应用于下一道次的规程计算中, 以提高辊缝等设定精度。②在最后一个轧制道次结束, 进行硬度模型自适应、弹跳模型自适应、轧辊凸度模型自适应等等, 得到的自适应系数用于下一块钢的模型计算。下面将各自适应一一说明。

3.5.1 轧制力模型自学习

首钢中板轧制的轧制力公式:

$$F = W \times \sqrt{R' \times \Delta h} \times Q_p \times Kf$$

$$Kf = f(\varepsilon) \times g(\dot{\varepsilon}) \times Hard(TM)$$

$$Hard(TM) = e^{A13 \times TM + A14}$$

公式可以分解为三个部分: 温度影响函数 $\exp(A13 \times T + A14)$ 、变形率影响函数 ε' 、变形速率影响函数 $\dot{\varepsilon}^{dT}$ 。其中变形率影响函数和变形速率影响函数的指数项对于某一钢种是常数(有的变形抗力公式将其表示为温度的函数, 实际上对大多数钢种来说温度对它们的影响很小), 所以轧制力过程模型参数的调整主要集中在温度影响函数上。

$$\exp(A13 \times T + A14) = \exp(A13 \times T) \cdot \exp(A14) = \exp(A13 \times T) \times k \quad (3-100)$$

公式(3-121)中将温度影响函数进行展开, 可以看出, 对于模型参数 $A14$ 的调整相当于在轧制力模型前面乘以一个比例系数项, 而这种方法在许多参考书上都有分析, 它属于一种比较成熟的方法, 而对参数 $A13$ 的调整涉及温度模型的计算。下面分析如何调整 $A13$ 和 $A14$ 来消除轧制力模型的误差。

轧制力公式和实际测量数据可以计算出当前道次的温度影响函数的自然对数值。得到硬度的实测计算公式:

$$Hard_{\text{实测}} = \frac{F_{\text{实测}}}{W \times Q_p \times f(\varepsilon) \times g(\dot{\varepsilon}) \times \sqrt{R' \times \Delta h}} \quad (3-101)$$

$$Hard_{\text{实测}} = e^{A13 \times TM_{\text{实测}} + A14} \quad (3-102)$$

对式(3-102)两边取对数:

$$\ln(Hard_{\text{实测}}) = A13 \times TM_{\text{实测}} + A14 \quad (3-103)$$

令:

$$Y = \ln(Hard_{\text{实测}})$$

$$X = TM_{\text{实测}}$$

得到:

$$Y = A13 \times X + A14$$

根据一组实测的 $Hard_{\text{实测}}$ 和 $TM_{\text{实测}}$ 值, 得到一组 Y 和 X 线性回归得到 A13 和 A14。即:

$$A13 = \frac{\sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n}}{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}, \quad A14 = \frac{\sum Y_i - A13 \sum X_i}{n} \quad (3-104)$$

由于中厚板轧制过程为多道次可逆轧制, 每个道次都需要进行修正计算。上面介绍了某一个道次的修正计算方法, 但是如何将前面所有道次的计算结果进行综合还需要分析。一般来说, 如果当前道次数为 N , 则 $N-1$ 道次的修正结果对 N 道次影响最大, 而前面道次的修正结果对 N 道次影响较小, 所以需要 对 $1 \sim N-1$ 道次的结果进行加权处理。

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} 2^{-(N-i)} \cdot \Delta_i}{\sum_{i=1}^{N-1} 2^{-(N-i)}} \quad (3-105)$$

其中 Δ_i 是第 i 道次的修正结果。

如果 Δ_i 的修正值波动偏大, 说明模型参数 A13 和 A14 都需要修正。A14 变化 0.1, 轧制力就变化 11%; A14 变化 0.15, 轧制力就变化 16%; A14 变化 0.2, 轧制力就变化 22%。初期 A14 的调整范围为 0.2, 待稳定后, A14 的调整范围为 0.15。超过这个范围就离线回归 a 和 b 进行优化。首钢轧制力模型的学习主要分为短期自学习和长期自学习。

(1) 短期自学习

短期自学习是指在每道次结束时硬度模型的自学习。短期自学习的步骤如下: 首先进行是否自学习的判断: 一般首道次不进行自学习; 每道次实测

温度有效性检查,与模型计算温度进行比较,如果实测温度不可用,则该道次不进行硬度自学习;如果该道次硬度的再计算值超限,不进行自学习。可用于自学习计算的道次数超过 4,并且起始温度和终了温度差在 400 度以上, $A13$ 和 $A14$ 同时进行自学习;否则只对 $A14$ 进行自学习。只对 $A14$ 进行自学习:回归得到 $A13$ 进行上下限检查,如果回归得到的结果超过极限值,则取极限值。 $A13$ 值最终确定后再计算 $A14$ 。即,按照上面通过最小二乘法回归的公式,在回归得到 a 后,进行上下限判断,最终确定 a 值后,再根据后一公式计算 b 值。对 $A13$ 和 $A14$ 同时进行自学习:同时对 $A13$ 和 $A14$ 进行最小二乘法回归时,首先使用所有的实测值进行回归得到 $A13$ 和 $A14$,再利用回归得到的 $A13$ 和 $A14$ 计算得到每个实测点的硬度值与硬度的再计算值进行比较,误差在 5% 范围内作为有效点。利用有效点重新进行回归,得到最终的 $A13$ 和 $A14$ 值。同时对 $A13$ 和 $A14$ 进行最小二乘法回归时,首先使用所有的实测值进行回归得到 $A13$ 和 $A14$,再利用回归得到的 $A13$ 和 $A14$ 计算得到每个实测点的硬度值与硬度的再计算值进行比较,误差在 5% 范围内作为有效点。利用有效点重新进行回归,得到最终的 $A13$ 和 $A14$ 值。

(2) 长期自学习

当一块钢板轧制结束时,要进行硬度模型的长期自学习,由硬度模型回归出 $A13$ 和 $A14$ 系数,并把这两个系数保存到数据库中,用于下一块相同钢种的轧制。它的基本处理方法通短期自学习一样,只不过不同的是短期自学习的系数用于本块钢后续道次 $A13$ 和 $A14$ 的修正,不保存到数据库中去,而长期自学习的系数用于本钢种 $A13$ 和 $A14$ 的修正。

由于轧制力模型跟温度有着直接的关系,其温度的精度直接影响硬度模型的精度。处理过程如下:首先将轧制过程按照轧制特点分成相应的阶段,以阶段为单位进行 $A13$ 、 $A14$ 的自适应处理。下一个阶段 $A13$ 、 $A14$ 的初值等于上一个阶段自适应的结果。这样处理类似一种分段处理,可以提高温度函数的计算精度。下面详细分析某一个轧制阶段 $A13$ 、 $A14$ 的处理细节。如下图所示:图中直线表示温度函数的对数与温度的关系,该直线的斜率等于 $A13$,而直线的截距等于 $A14$ 。一般来说,要想得到精确的实际温度计算曲线比较困难,为此采用两种方案:以模型计算温度为基准。

采用温度实测值结合温度模型计算综合判断的方法:优先考虑实测温度,如果实测温度在合理范围之内,采用实测温度,如果实测温度超出误差范围,

根据上一道次的温度利用温度模型计算该道次的温度。得到温度以后就可以根据温度来回归 $A13$ 、 $A14$ 。考虑最小二乘法的特点，回归点应该不少于 4 个，而且温度变化区间不能太窄，所以阶段的道次少于或等于三个（或温度降小于 80），只对 $A14$ 进行处理，否则对 $A13$ 、 $A14$ 进行线性回归。每一个轧制阶段的 $A13$ 、 $A14$ 的初值等于上一阶段的终值，第一阶段的 $A13$ 、 $A14$ 等于长期自适应或短期自适应的结果。

$A13$ 、 $A14$ 的划分层别的确定：因为中厚板轧制过程是多道次可逆轧制，其道次之间有充分的时间用于道次修正计算，所以相对来说 $A13$ 、 $A14$ 的层别不需要划分很细。根据某中板厂的经验，其只对钢种划分层别，我们在开始阶段也采取这种方法，然后根据应用结果进行调整。

得到温度以后就可以根据温度来回归 $A13$ 、 $A14$ 。考虑最小二乘法的特点，回归点应该不少于 4 个，而且温度变化区间不能太窄，所以阶段的道次少于或等于三个（或温度降小于 80），只对 $A14$ 进行处理，否则对 $A13$ 、 $A14$ 进行线性回归。每一个轧制阶段的 $A13$ 、 $A14$ 的初值等于上一阶段的终值，第一阶段的 $A13$ 、 $A14$ 等于长期自适应或短期自适应的结果。

轧制力自学习模型的程序框图如图 3.20 所示。

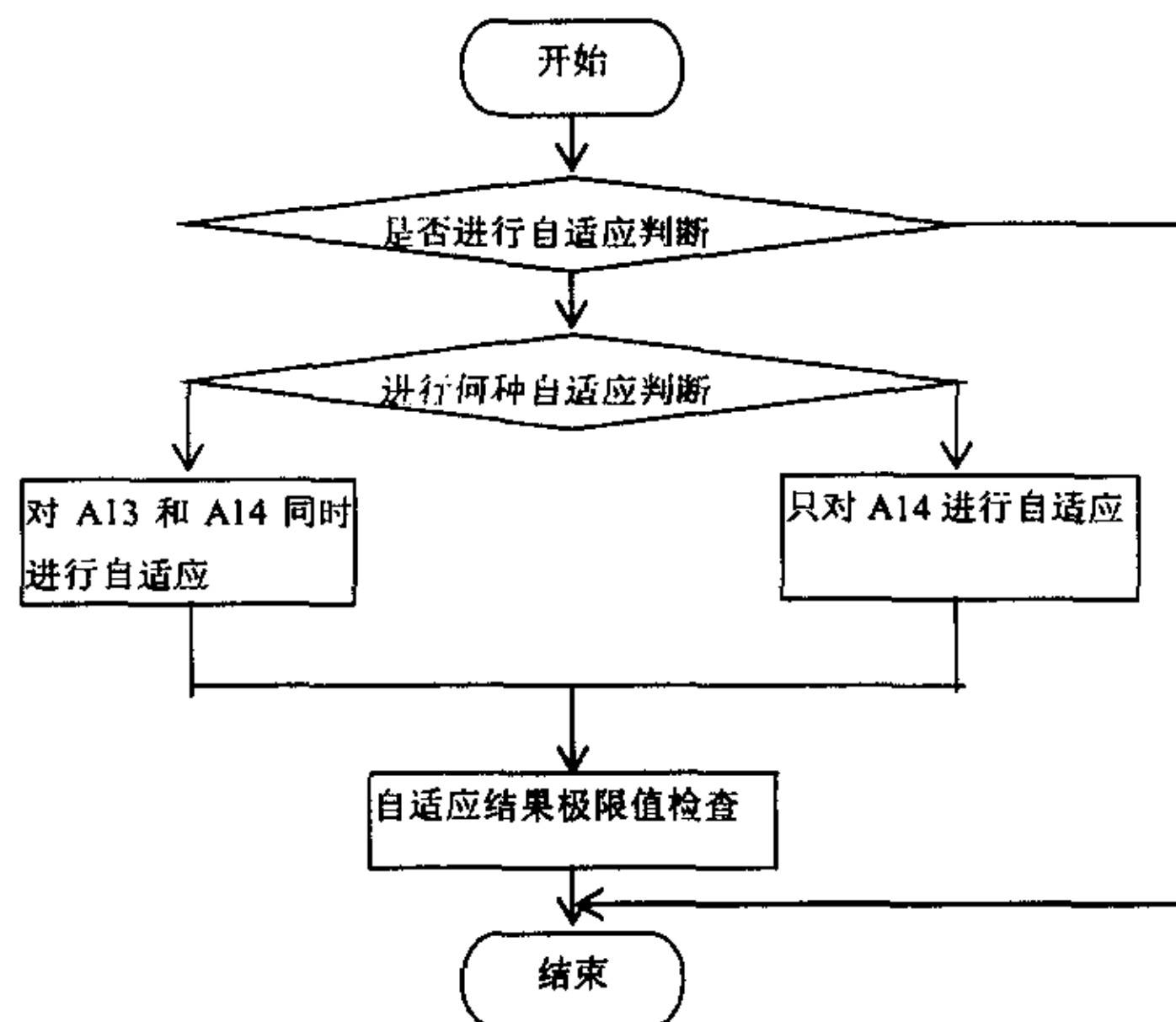


图 3.20 轧制力自适应流程图

Fig3.20 Flow chart of rolling force adapting

3.5.2 轧制力矩模型自学习

在每道次结束对轧制力矩模型进行自学习，根据实测的电机电流和速度计算得到轧制力矩的实测值，同时根据力矩模型，带入实测的参数，可以得到再计算的轧制力矩。

实测力矩计算：

$$M_{mea} = \frac{(U_{mea} - R \times I) \times I}{n_{mea}} \cdot e \quad (3-106)$$

式中：

M_{mea} ：实测力矩 (N.m)；

U_{mea} ：实测电压；

R ：感应线圈电阻；

I ：电流； n_{mea} ：实测电机转速 (rad/s)；

e ：主电机效率。

根据实测轧制力和其他实测参数，代入实测力矩计算模型得到再计算力矩 M_{recal} ，由实测轧制力矩和模型再计算轧制力矩可以通过指数平滑法公式回归出力矩自适应系数：

$$C_M(i) = \alpha_{CM} \times \frac{M_{mea}}{M_{recal}} + (1 - \alpha_{CM}) \times C_M \times (i-1) \quad (3-107)$$

式中：

$C_M(i)$ ：I 道次的力矩模型自学习系数；

$C_M(i-1)$ ：I-1 道次的力矩模型自学习系数；

α_{CM} ：指数平滑系数。

程序流程图如下：

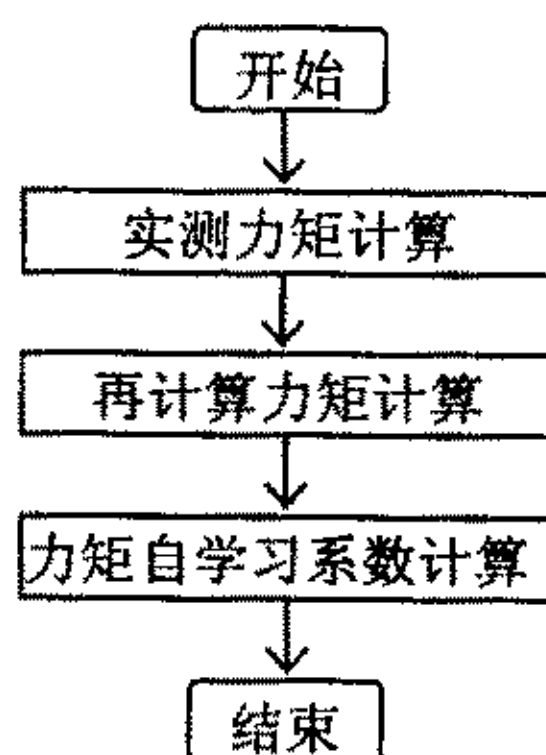


图 3.21 轧制力矩自适应流程图

Fig3.21 Flowchart of torque adapting

3.5.3 轧机弹跳模型自学习

在中板轧制过程中，第 n 块钢的轧机弹跳模型的自学习系数如下：

$$C_{sn} = h_{mea} - h_{recal} \quad (3-108)$$

式中：

C_{sn} ：第 n 块钢的弹跳模型自学习系数；

h_{mea} ：轧件实测出口厚度；

h_{recal} ：根据实测轧制力计算得到的再计算轧件出口厚度。

利用最后十块钢的弹跳自学习系数，根据时间给不同的权重系数，可以确定下一块钢计算使用的弹跳自学习系数。

3.5.4 温度自学习

假设上块板坯和下块板坯的加热温度变化过程比较缓慢，可以近似认为第 $N+1$ 块板坯的初始温度误差等于第 N 块板坯的初始温度误差。

$$T1 = T1 + C_T \quad (3-109)$$

式中：

$T1$: 坯料的初始温度;

C_T : 初始温度修正值。

$$C_T(n+1) = \alpha_{CT} \cdot (T1_{mea} - T1_{cal}) + (1 - \alpha_{CT}) \cdot C_T(n) \quad (3-110)$$

式中:

$T1_{mea}$: 轧件 n 的实测温度;

$T1_{cal}$: 轧件 n 的模型计算温度;

α_{CT} : 指数平滑系数。

当 $|T1_{mea} - T1_{cal}| > T1_{limit}$ 时使用上式计算得到 $n+1$ 块钢的初始温度修正值; 否则:

$$C_T(n+1) = C_T(n) \quad (3-111)$$

3.6 本章小结

- (1) 本章对轧机基本模型库中, 轧机弹跳模型、温度模型、力能模型、板形模型、自适应模型的建立了比较细致的分析和研究, 并提出了运用二次曲线逼近法求解中厚板温度场。
- (2) 借鉴其它中厚板厂的经验公式, 结合首钢现场情况, 在实际生产中运用上述模型, 效果良好, 并用轧机弹跳方程来计算各道次的出口厚度。

4 轧制规程的工艺设定

中厚板轧制的特点是尺寸规格、钢种规格繁多，对于不同中厚板生产必须确定合理的轧制工艺，以满足成品质量的要求。

4.1 中厚板轧制工艺简介

首钢中厚板轧制过程一般包括三个阶段：除鳞和成形阶段、展宽阶段、伸长阶段。

除鳞是指在轧制前利用高压水的强烈冲击作用去除板坯表面的一次氧化铁皮和在精轧前后用高压水去除二次氧化铁皮的过程。在高压水的喷射下，板坯表面激冷，氧化铁皮破裂，高压水沿着缝隙进入氧化铁皮内，氧化铁皮破碎并被吹除，达到保证钢板获得良好的表面质量的目的。除鳞后，为了消除其表面因清理缺陷而带来的缺肉和剪断时引起的端部压扁的影响，需沿板坯纵向进行 1~4 道次的成形轧制，使展宽轧制前获得准确的坯料厚度，为提高展宽轧制阶段的板厚精度和展宽精度打下良好的基础。

由于经过成形轧制后的钢板通常在宽度或长度满足不了成品钢板宽度的要求，因此需要将板坯在轧机前后的旋转辊道上回转某一定的角度后继续进行轧制，使其在宽度方向或长度方向得到展宽，直至达到成品钢板毛边宽度为止。展宽轧制的优点是板坯宽度和成品钢板宽度可以灵活配合，改善钢板横向性能，减少各向异性，尤其适合以连铸坯为原料轧制中厚板的生产方式；缺点是轧制的钢板易成桶形，增加切边损失。

展宽轧制后，轧件旋转 90° ，继续轧制而达到成品钢板的厚度、质量目标的这一阶段称为伸长轧制。其目的是轧件的延伸和成品质量控制，通过板形控制、厚度控制、性能控制及表面质量控制等手段生产出板厚精度高、同板差小、平坦度好及具有良好的综合性能的钢板。伸长轧制又可以分成在轧机和主电机能力允许的条件下，尽量采用较大道次压下量的延伸轧制与为了确保成品钢板板形和厚差，在末尾几个道次根据轧辊凸度、轧制力、板厚、板温来调整压下量的控制板形轧制两个轧制部分^[4]。

根据该中厚板厂的具体情况，其轧机布置情况如图 4.1。

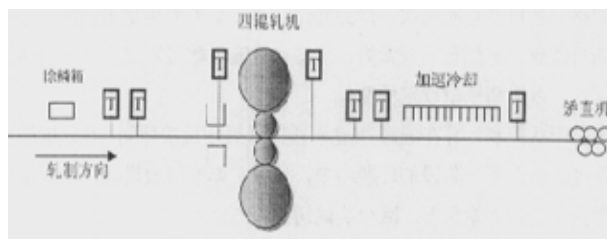


图 4.1 轧机布置图

Fig4.1 Diagram of roll arrangement.

相应的工艺流程为：

坯料经过高压水除鳞后，由辊道送到四辊轧机进行成形轧制。然后轧前锥形辊将钢坯旋转 90° 进行横轧，当板坯的宽度达到成品宽度要求时，转钢 90° 后，进行最终的延伸轧制，直到满足产品厚度要求。从四辊轧机轧后的钢板送至控冷设备进行控制冷却，并经矫直机矫直后，进行分段剪切^[4]。

4.2 轧制工艺规程计算

4.2.1 轧制工艺规程计算思想

轧制工艺规程计算包括 3 个部分，即轧制工艺规程的预设定计算、轧制工艺参数的动态修正计算和轧制工艺参数的自适应计算。

预设定计算就是在钢板在出炉时，操作工点击人机界面上的出炉确认按钮，此时轧机过程机自动调用预计算规程，排出各道次的辊缝值供下位机进行辊缝设定。

由于中厚板轧制是可逆式轧制过程，其各个道次之间存在一定的间隙时间，动态修正计算就是利用这个间隙时间，根据前几个道次的实测值与预测值的偏差量来修正后续道次的辊缝设定值。此外，由于首钢中厚板轧机还有一次测温校正，二次测温校正计算以及阶段校正计算。

轧制工艺参数的自适应计算分为短期自适应和长期自适应计算，长期自适应计算就是在在一块钢轧制完以后，记录其所有道次的实测数据和机前与机

后的测宽、测厚信号，利用相应的自适应算法来提高此类钢种数学模型计算精度，提高下块钢辊缝值设定精度的过程。短期自适应就是指对于一块正在轧制的钢，在每个轧制道次，得到轧件中心 1/4 处的测量数据时，进行相关模型的自适应，得到自适应参数。这些自适应系数可以应用于下一道次的规程计算中，以提高模型设定精度。

平面形状控制计算在成形/展宽阶段的最后一道次期间，在轧件端部形成超常厚度。当在下一阶段的轧制当中，该超常厚度将改进轧件的矩形度。它有利于提高轧件的矩形度，减少头尾切损量。

对压下轧制规程计算的要求大致有以下几点：①能满足成品厚度和板凸度的要求；②可以将轧辊凸度的变化在轧制规程中反映出来；③对控轧材，其待温厚度和控轧温度应在轧制规程中体现出来；④确保每道次的压下量不能超过机械、电气、轧制工艺限制；⑤在成品道次附近，轧制力和出口板厚之间应遵循恒比例凸度关系，所以，由成品道次开始反算压下量。上述要求用数学语言来描述的话，就是约束条件。

4.2.2 中厚板轧制规程的分配的约束条件

中厚板轧制规程的分配的约束条件可以给出上限和下限值。有两类约束条件：最大值约束（根据塑性变形曲线允许值所给处的压下量的上限）和最小值约束（根据塑性变形曲线允许值所给处的压下量的下限）。对于一个给定的初始厚度，塑性变形曲线给出了轧制力和压下量之间的关系。

如果约束条件 C 是一个最大约束条件，在塑性变形曲线上可能的压下量范围为： $H > H_0$ 和 $F < F_0$ 。如果约束条件 C 是一个最小约束条件，在塑性变形曲线上可能的压下量范围为： $H < H_0$ 和 $F > F_0$ 。

1. 轧辊及辊颈的强度条件（最大轧制力限制）

在中厚板轧制过程中，轧辊辊身强度经常是限制压下量的主要因素，一次道次压下量的分配要考虑轧辊辊身的强度条件。现代四辊中厚板轧机的支撑辊辊身强度一般比较大，所以支撑辊辊颈的弯曲强度可能成为限制道次压下量的主要因素^[4]。

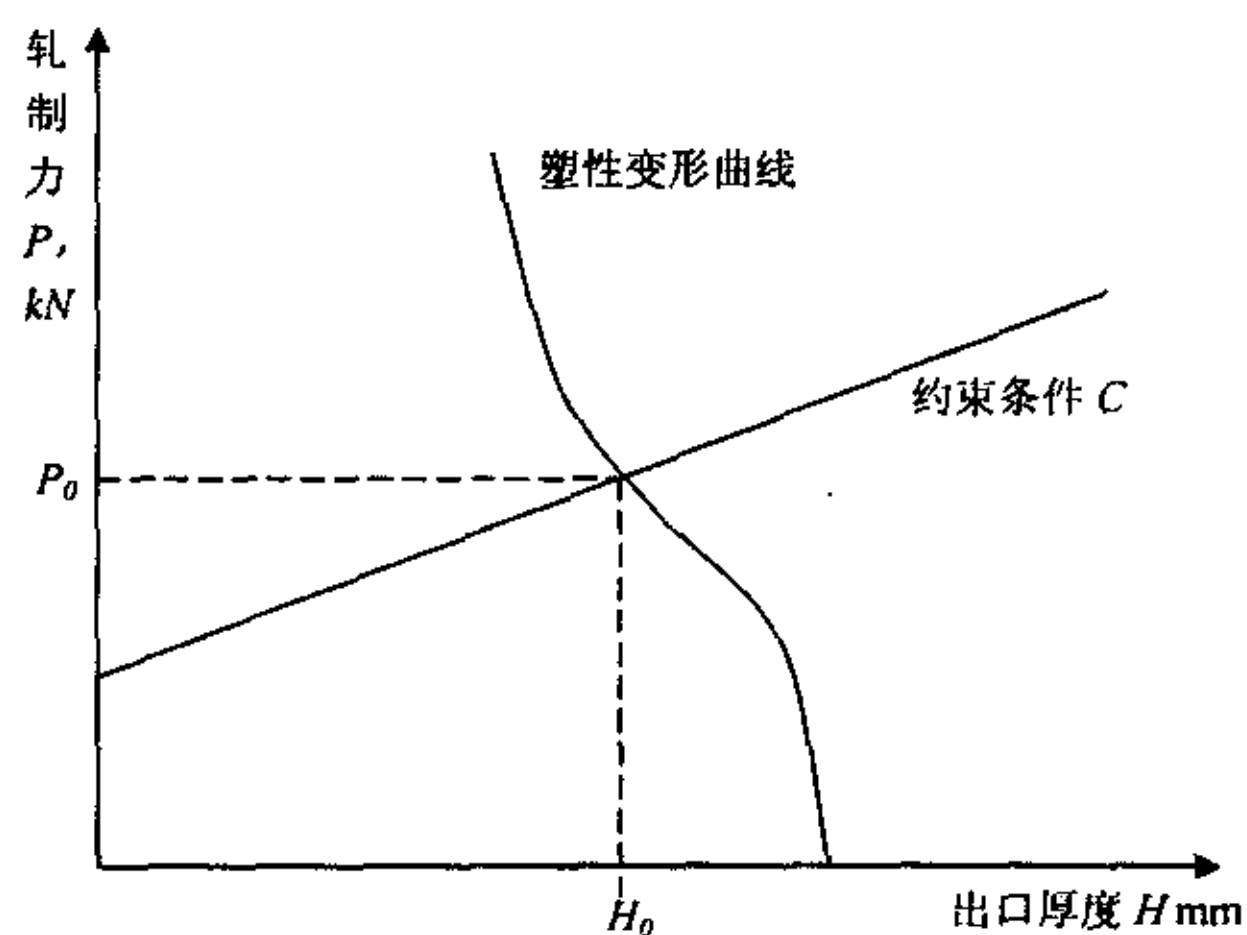


图 4.2 约束条件示意图

Fig4.2 Diagrammatic sketch of limitation

按照支撑辊辊颈强度计算的最大轧制力如下式：

$$P_{max} = \frac{0.4 \times R_b \times d^3}{l} \quad (4-1)$$

式中：

P_{max} ：支撑辊强度许用最大轧制力；

R_b ：轧辊材质许用弯曲应力；

d ：支撑辊辊颈的直径；

L ：支撑辊辊颈的长度。

确定道次压下量要注意不能让轧制力超过该极限值，要在最大轧制压力内进行轧制。

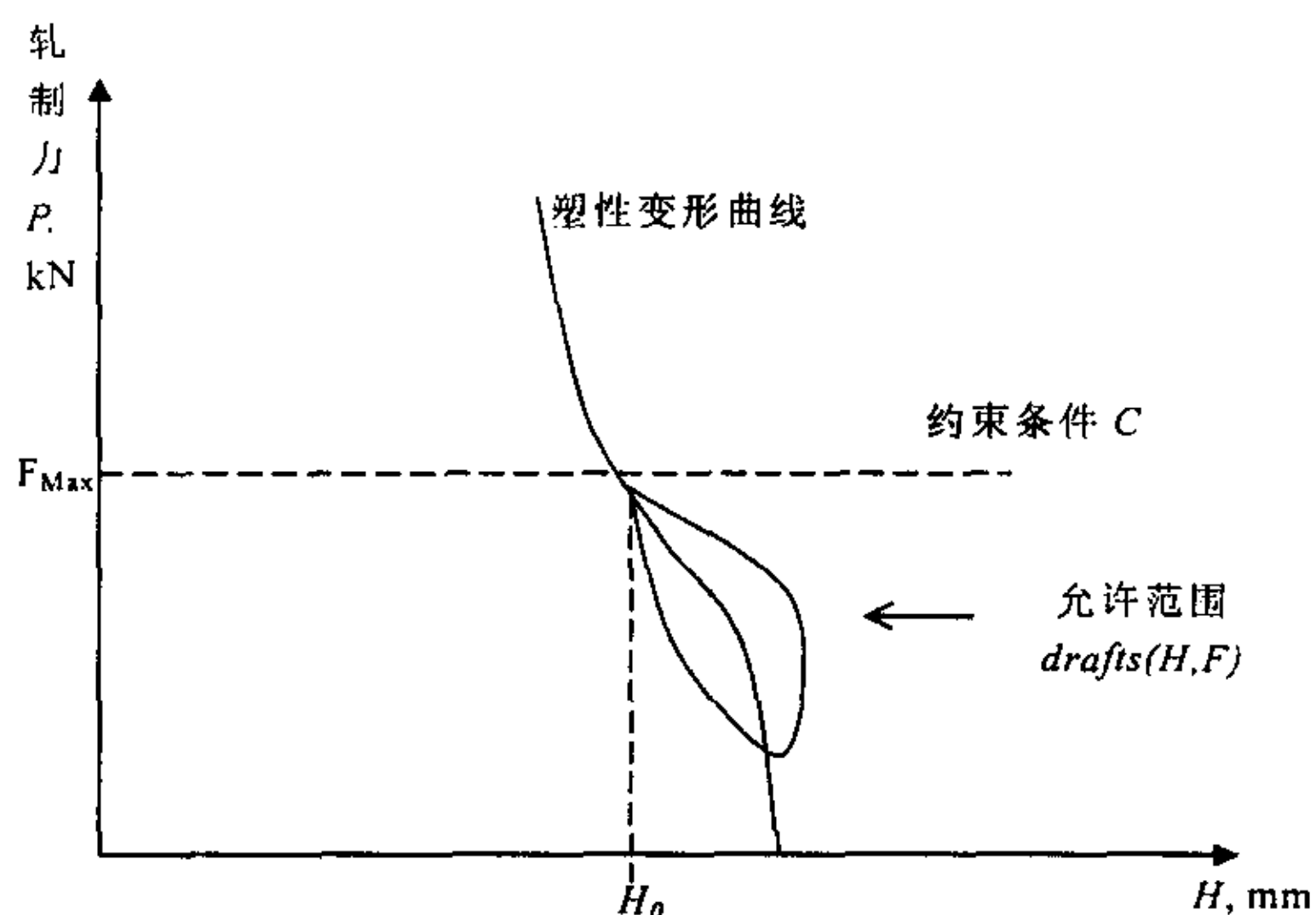


图 4.3 最大轧制力限制

Fig4.3 Diagram of max rolling force limit

2. 最大轧制力矩限制（轧机的物理限制）

在中厚板轧制中，最大允许轧制力矩是影响轧机最大压下量的一个重要因素。如果轧制力矩大于最大轧制力矩，将损害电机或连接轴。由于四辊轧机附加摩擦力矩较小，可以忽略不计，因此，从辊颈强度出发可计算出最大允许轧制力矩 M_{max} ：

$$M_{max} \approx P_{max} \times \sqrt{R \times \Delta h} \quad (4-2)$$

式中：

R ：工作辊半径；

Δh ：道次压下量

现场根据设备条件给出了 6140kNm 的限制值。

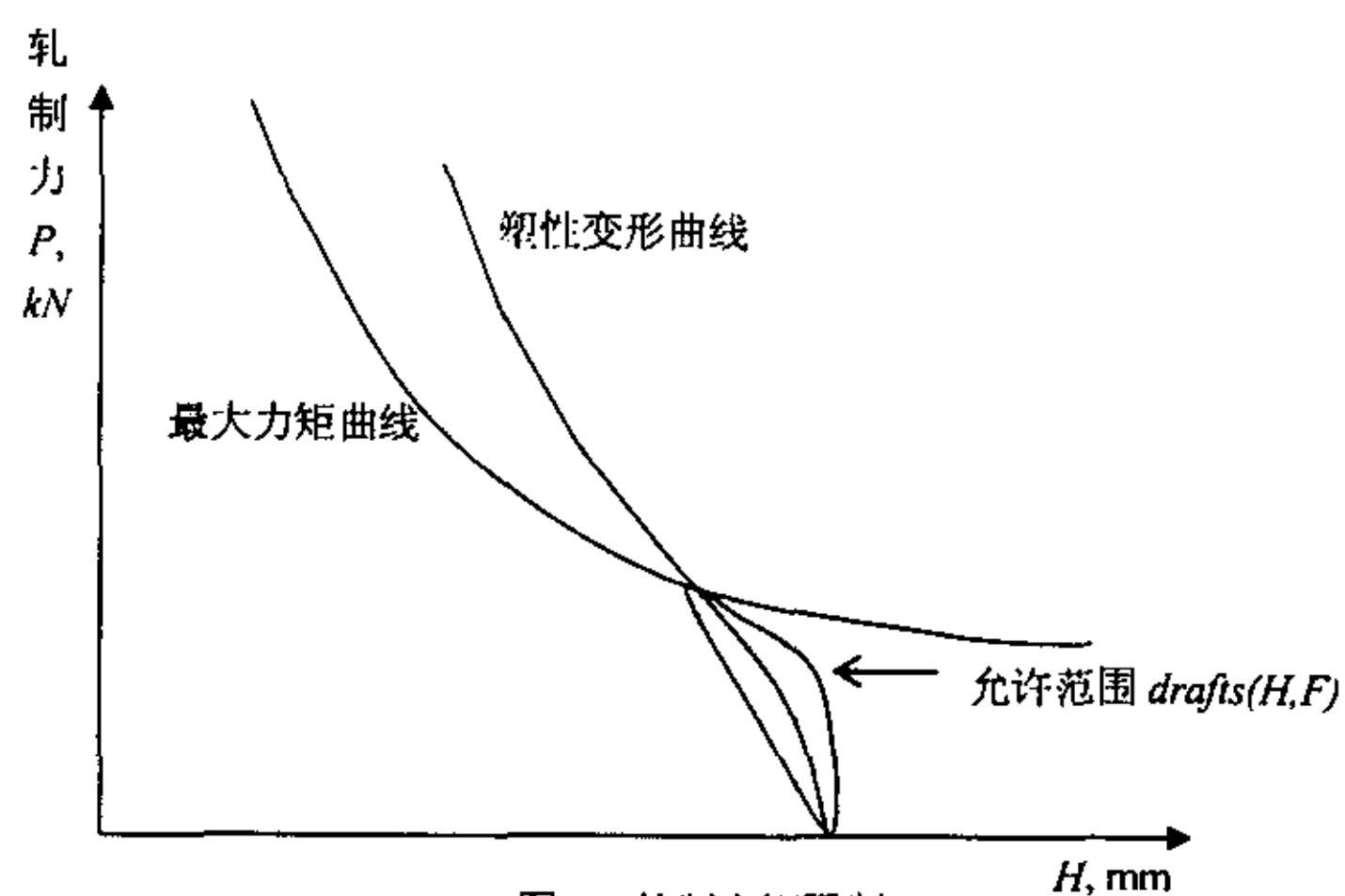


图 4.4 轧制力矩限制
Fig4.4 Diagram of max rolling torque limit

3. 板形限制（边浪(Wavy edge)和中浪约束条件（钢板平直度））

在中厚板轧制中，为了保证良好的板形，我们在确定中厚板轧制规程时必须考虑板形的限制，板形限制主要包括边浪限制和中浪限制。如果轧制力比给定轧制力高，边部波浪平直度超限；如果轧制力比给定轧制力低，中部波浪平直度超限；

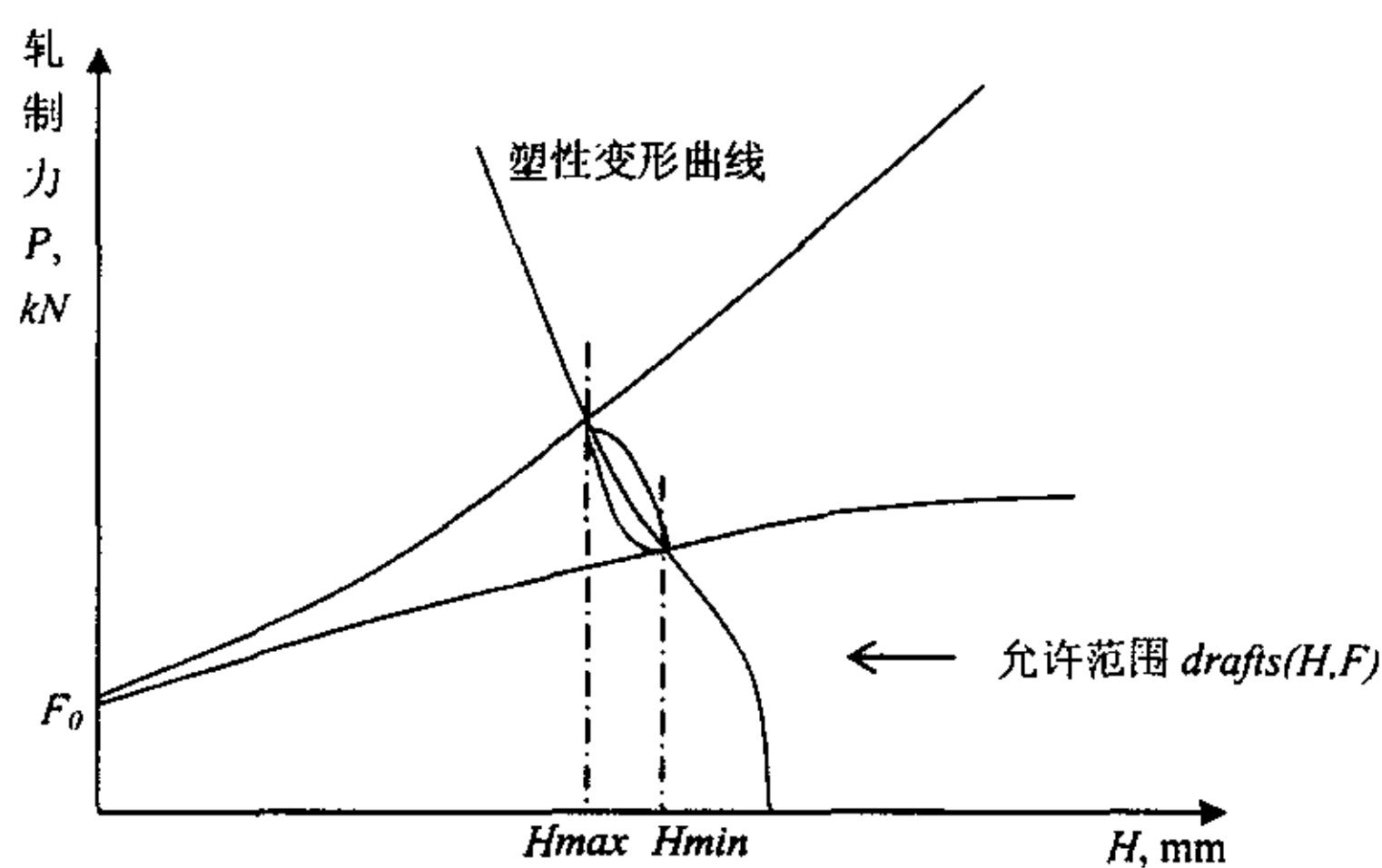


图 4.5 板形限制
Fig4.5 Diagram of profile limit arrangement.

4. 最小轧制力限制（生产率）

中厚板生产中, 为了保持一定的产量, 在确定规程时, 有一最小轧制力的限制。

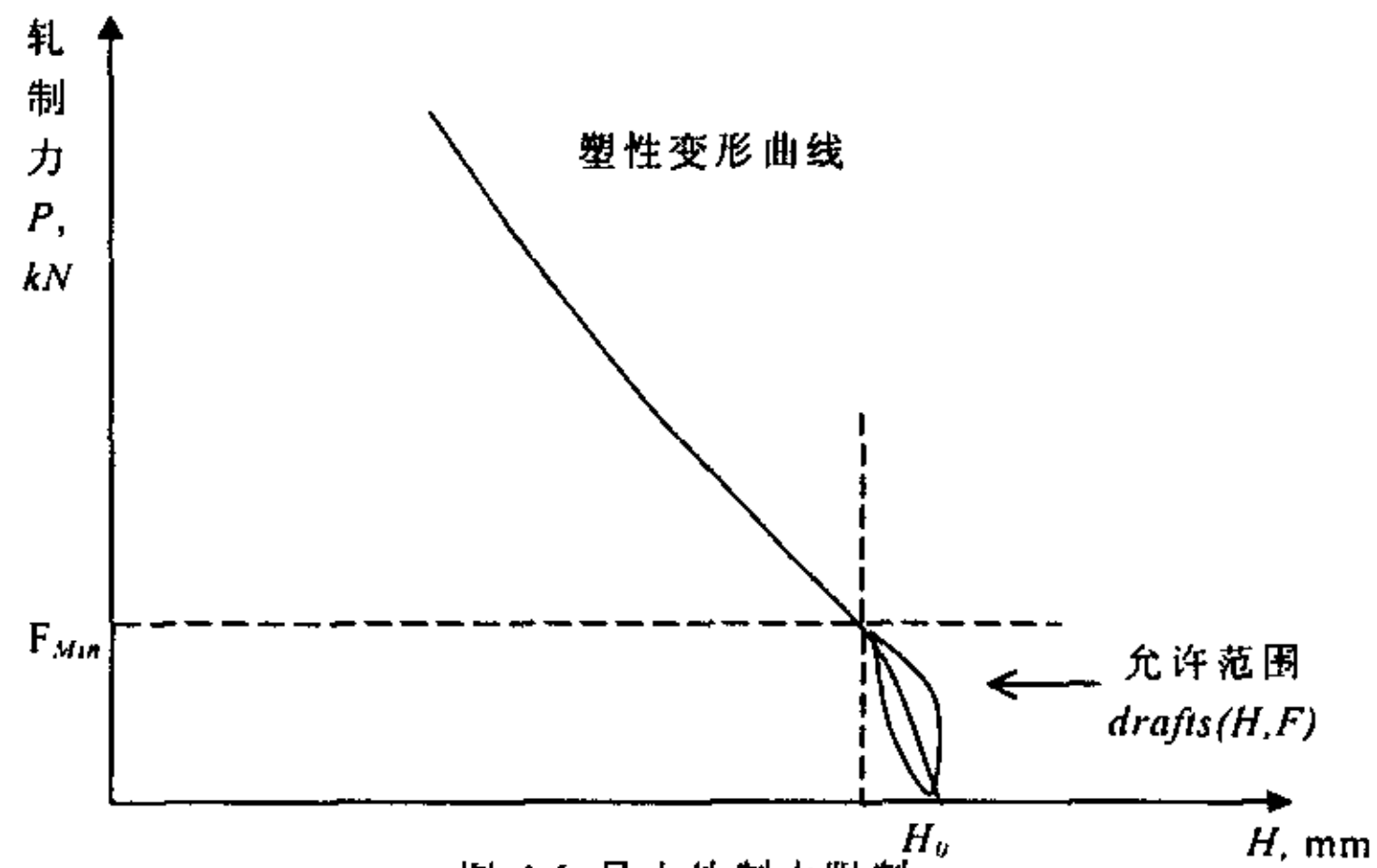


图 4.6 最小轧制力限制
Fig4.6 Diagram of min rolling force limit

5. 相对压下率限制

$$\varepsilon_{\min} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max}$$

6. 绝对压下量限制

$$\text{Draft} \leq \text{Draft}_{\max}$$

7. 最大板凸度约束条件 (钢板凸度)

如果轧制力大于给定轧制力极限, 板凸度将大于最大允许凸度。

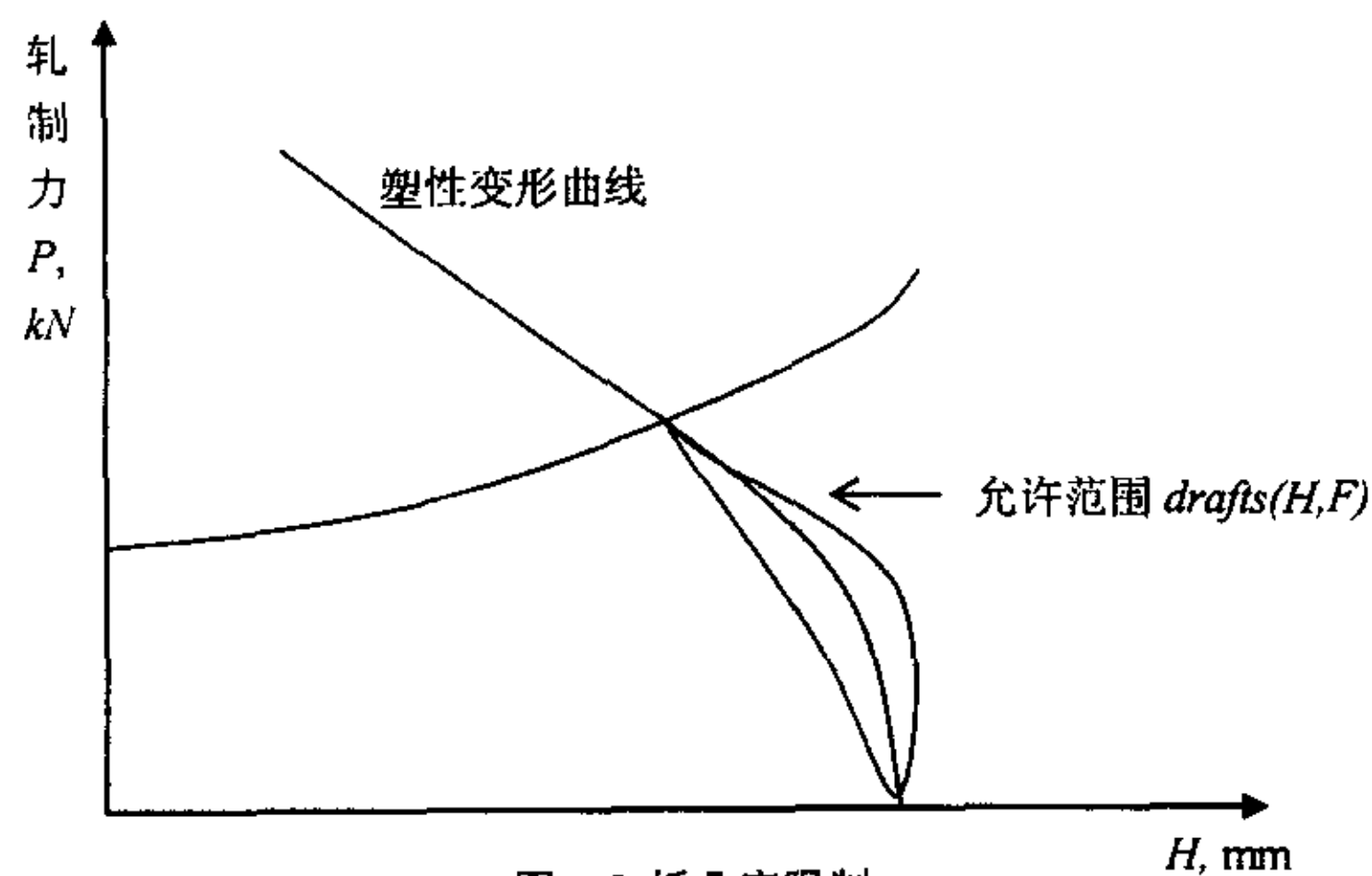


图 4.7 板凸度限制
Fig4.7 Diagram of plate crown limit

综合上述 7 点, 可以得出道次压下量的分配规律: 由于四辊中厚板轧机

轧制中厚板时不受咬入条件的限制,在四辊轧机前几个道次充分利用轧机设备能力,采用大压下量轧制,然后随着钢坯温度降低和厚度的减少,在最后三个道次采用恒比例凸度控制原则逐渐减小压下量,保证板形和厚度精度。按照上述则制订的压下规程必是接近于最大能力的规程,即在轧制的前几个道次它表现为轧机设备最大能力,如最大轧制力或最大轧制力矩;而在轧制的最后几个道次,它表现为钢板凸度限制条件。

4.2.3 规程计算

中厚板轧制规程预计算主要包括压下制度、速度制度和温度制度,轧制规程预计算就是根据钢板的技术要求、原料条件、温度条件和设备生产的实际情况,运用数学模型或图表进行人工计算或计算机计算,来确定各道次的实际压下量、空载辊缝、轧制速度和温度等参数,达到发挥设备潜力、提高产量、保证质量、操作方便、设备安全的目的。所有的轧机计算机在线控制,包括计算机 AGC 和轧制规程在线自适应修正,都应该建立在轧制规程的基础上,也就是说,制定轧制规程是实现更精确的在线控制的基础^{[31][32][36]}。

通常中厚板轧制规程设计的方法和步骤如下:(1)根据轧辊等轧机部件的强度和电机功率确定轧制道次的最大、最小压下量;(2)制定速度制度,估计各道次轧制时间并计算各道次温度;(3)根据最大、最小限制条件和板形条件合理分配各道次压下量,确定各道次压下量分配率;(4)进行在线轧制,根据实际情况调整各道次辊缝值并进行模型参数的学习。

根据实测数据统计,一般情况下中厚板的开轧温度在 $1000^{\circ}\text{C}\sim 1150^{\circ}\text{C}$ 之间,而终轧温度在 $830^{\circ}\text{C}\sim 900^{\circ}\text{C}$ 之间。为了充分利用钢板在高温下塑性系数比较小的特点,应该在轧制阶段的前几个道次保证轧制力和轧制力矩等不超限的情况下适当加大压下量,而此时钢板厚度较大,在变形过程中具有一定的横向流动,且钢板温度下降慢,其动态再结晶和恢复作用比较强,因此,钢板的板形不会象薄板一样发生恶化,即使是钢板产生些许浪形,也可以在精轧最后几个道次矫过来。

为了合理的分配各道次的压下量,使得轧机能力能够得到充分的发挥,而且保证轧件的尺寸精度和内部质量,本文将成形阶段、展宽阶段和伸长阶段的规程分开论述。

4.2.3.1 成形阶段规程设定

成形阶段压下量的分配, 由于成形阶段一般为两个道次, 首先认为每个道次都以最大压下量轧制的情况, 如果该阶段的最终出口厚度小于目标出口厚度, 则两个道次的压下量均分总压下量。其流程图如下:

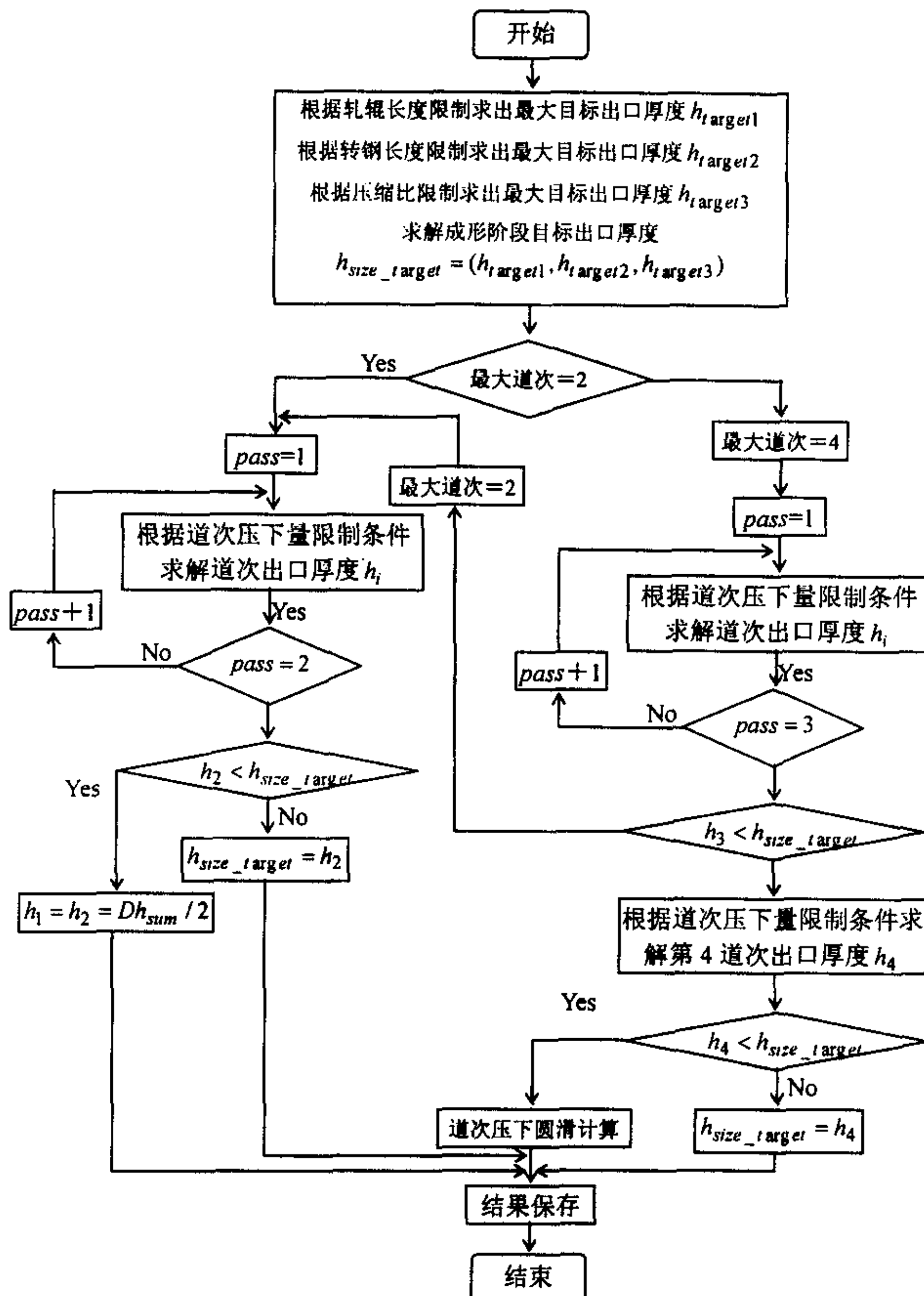


图 4.8 成形阶段轧制规程分配计算流程图

Fig 4.8 Flowchart of DBT schedule

延伸阶段的阶段目标厚度由以下几个因素的共同确定：

(1) 旋转辊道辊身长的限制

$$h_{turn} = H_{enter} \times L_{enter} / \sqrt{L_1^2 - W_{enter}^2} \quad (4-3)$$

式中：

h_{turn} ：成形阶段出口厚度（因旋转辊道长度限制）；

H_{enter} ：成形阶段的轧件入口厚度；

L_{enter} ：成形阶段的轧件入口长度；

L_1 ：旋转辊道的辊身长； W_{enter} ：成形阶段的轧件入口宽度

(2) 轧辊辊身长的限制

$$h_1 = H_{enter} \times L_{enter} / L_{roll} \quad (4-4)$$

式中：

h_1 ：成形阶段出口厚度（因轧辊辊道长度限制）；

L_{roll} ：轧辊的辊身长；

(3) 展宽阶段的转钢限制

$$h_2 = H_{enter} \times L_{enter} / \sqrt{L_1^2 - W_{target}^2} \quad (4-5)$$

式中：

h_2 ：延伸阶段的出口厚度（展宽阶段转钢限制）

W_{target} ：轧件的目标宽度；

(4) 轧件宽长之比限制

$$h_3 = H_{enter} \times L_{enter} / (3.5 \times W_{enter}) \quad (4-6)$$

式中： h_3 ：延伸阶段的出口厚度（展宽比限制）

延伸阶段目标厚度由上述（1）～（4）共同决定，为其中最大值，即：

$$h_{exit} = \text{MAX} (h_{turn}, h_1, h_2, h_3)$$

4.2.3.2 展宽阶段规程设定

展宽阶段压下量分配优先考虑的是最大限度地利用轧机能力, 在不超过设备限制条件下来确定各道次的最大压下量, 尽量减少轧制道次。其计算步骤如图 4.2:

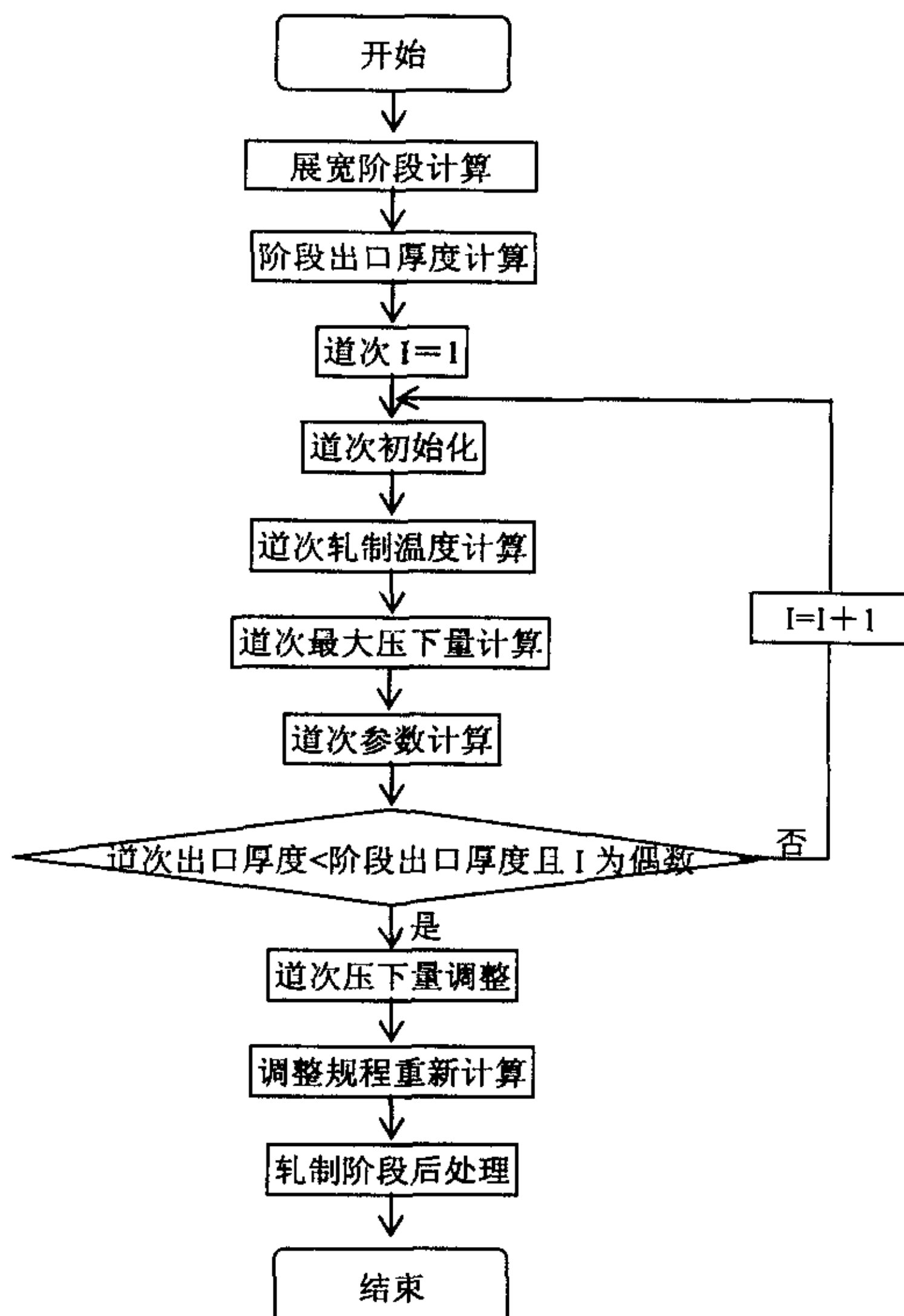


图 4.9 展宽轧制规程分配计算流程图

Fig 4.9 Flowchart of DW schedule

其中有几点需要说明:

(1) 展宽阶段目标厚度的确定

依据成品厚度的厚度、宽度及来料的厚度、宽度、长度就可以确定展宽

阶段的出口厚度:

$$H = \sqrt{\frac{PLATE.H \times PLATE.B \times PLATE.L}{B \times L}} \quad (4-7)$$

式中:

H : 展宽阶段的目标出口厚度 mm;

B : 展宽阶段的目标出口宽度 mm;

L : 展宽阶段的目标出口长度 mm;

$PLATE.H$: 终轧产品的厚度 mm;

$PLATE.B$: 终轧产品的宽度 mm;

$PLATE.L$: 终轧产品的长度, mm。

实际上展宽阶段的目标出口长度与终轧产品的宽度是基本相等的, 所以展宽阶段的目标出口厚度也就相应的确定下来。

(2) 各道次出口厚度的计算

下述四式计算出的最大值作为各道次的出口厚度。

$$h_p = H(1 - \varepsilon_p) \quad \text{轧制力限制} \quad (4-8)$$

$$h_g = H(1 - \varepsilon_g) \quad \text{轧制力矩限制} \quad (4-9)$$

$$h_{r1} = H - \Delta h_1 \quad \text{最大绝对压下量限制} \quad (4-10)$$

$$h_{r2} = H - \Delta h_2 \quad \text{最大相对压下量限制} \quad (4-11)$$

式中:

$\varepsilon_p, \varepsilon_g, \Delta h_1, \Delta h_2$ 分别为轧制力、轧制扭矩、最大绝对压下量和最大相对压下量允许的值。

(3) 轧制道次的分配和圆滑

在计算各道次的出口厚度之后, 判断其出口厚度是否小于或等于展宽阶段的目标厚度, 若没有达到, 则增加一个道次进行下一步计算。若是已经达到, 还需要判断其轧制道次数是否为偶数, 因为展宽阶段之后轧件要进行转钢处理以利于伸长轧制。现场的实际情况是四辊轧机前部有转钢设备, 后面则没有, 所以轧件必须在机前转钢, 这就要求轧制道次数为偶数, 以免轧件空道次过轧机。所以在轧制道次数为奇数且道次出口厚度已经小于阶段目标

厚度的情况下, 还需要增加一个道次进行下一步计算, 从而达到转钢要求。

在满足转钢和出口厚度小于目标厚度这两点要求之后, 应该对超过目标厚度的部分进行道次厚度的圆滑处理。处理方法的基本思想就是: 把超过目标厚度的部分对展宽阶段的全部道次按照各道次厚度的绝对压下量等比例缩小压下量。其处理逻辑如下所示:

a) 首先求出各道次的压下量和出口厚度, 直到某一道次的出口厚度超过目标厚度为止, 设第 I 道次的出口厚度小于目标厚度 HDW , 展宽阶段的初始厚度为 $H(0)$ 。

b) 求出加权系数 W , $W = \frac{HDW - H(I)}{H(0) - H(I)}$ 。

c) 设各道次的压下量为 $\Delta H(I)$, 则各道次的修正后的压下量 $\delta H(I)$ 为

$$\delta H(I) = \Delta H(I) \times (1 - W)。$$

d) 最后求出各道次的出口厚度 $H(I + 1) = H(I) - \delta H(I)$ 。

(4) 轧制参数再计算

因为圆滑后的压下量与圆滑前不同, 所以需要从第一道次开始循环计算温度、轧制力、轧制力矩、轧制时间等工艺参数。

4.2.3.3 伸长阶段轧制规程设计

中厚板轧制中伸长阶段关系着最后产品的厚度精度和板形, 首钢中厚板厂四辊中厚板轧机没有板形控制、测量设备, 如果延伸阶段压下规程分配不合理, 就会导致终轧板形不良甚至出现废品, 所以伸长阶段最佳压下量的分配选择是至关重要的。一般的其规程分配应符合采用恒比例凸度轧制理论。简要叙述一下恒比例凸度理论^[4,18]。

板凸度的定义是钢板横截面中心处厚度 h_c 与边部代表点处厚度 h_e 之差, 用 C_R 表示为:

$$C_R = h_c - h_e \quad (4-13)$$

比例凸度 C_P 定义为板凸度 C_R 与钢板平均厚度 h' 之比, 即:

$$C_P = \frac{C_R}{h'} \quad (4-14)$$

钢板轧制时获得良好板形的条件是 C_P 为一恒定值。恒比例凸度轧制就是控制各道次压下量，使各道次轧后钢板比例凸度 C_P 恒定，即：

$$\frac{(C_R)_{i-1}}{h_{i-1}} = \frac{(C_R)_i}{h_i} = \dots = C_P \quad (4-15)$$

式中：

$(C_R)_i$ ：第 I 道次所要求的板凸度； h_i ：第 I 道次的出口厚度。

根据对四辊轧机轧辊弹性变形分析，各道次轧后钢板实际凸度可以简单表示为：

$$(C_R)_i = \alpha_{Pi} P_i - X_i \quad (4-16)$$

$$X_i = \alpha_{CB} R_{CB} + \alpha_{CW} R_{CW} + \alpha_B B \quad (4-17)$$

式中：

P_i —第 I 道次的轧制力； B —板宽；

R_{CW} 、 R_{CB} —分别为工作辊和支持辊的凸度；

α_P 、 α_{CW} 、 α_{CB} 、 α_B —由 P_i 、 R_{CW} 、 R_{CB} 、 B 所确定的系数

从板形要求来看， C_R 应与 C_R' 相等，从而进一步推导出：

$$P_i = \frac{P_n - X_n / \alpha_{Pn}}{h_n} h_i + \frac{X_i}{\alpha_{Pi}} \quad (4-18)$$

式中：

n —为总轧制道次数。

严格按照恒比例凸度曲线可以获得良好的板形，但是由于中厚板轧制时，钢板的厚度较厚，金属存在一定的横向变形；另一方面，热轧温度较高，金属存在一定的回复和再结晶，这些在一定程度上缓和了板凸度变化引起的板形变化。所以在压下规程设计时应该允许后几道次适当偏离恒比例凸度曲线。Shohet K N 给出的板形良好判据为

$$-80\left(\frac{h}{W}\right)^{1.86} = \varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_e = 40\left(\frac{h}{W}\right)^{1.86} \quad (4-19)$$

下面是首钢中板厂的板形良好判据

$$-0.5\left(\frac{h}{W}\right) = \varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_e = \left(\frac{h}{W}\right) \quad (4-20)$$

为了将在最后几个道次按照恒比例凸度曲线控制规程分配, 特采用如图 4.10 计算流程。

在伸长阶段的后三个道次为保证板形良好, 各道次的轧制力应符合板形良好的原则, 即最后三个道次保持板形良好对应的最大轧制力, 该轧制力对应一个压下量。

以板形控制板厚度开始计算, 根据预设定压下量向后计算道次轧制力, 若计算结果位于恒比例凸度控制曲线附近, 则进入下一道次; 否则调整压下量, 再计算轧制力, 直至满足恒比例凸度条件。板形控制道次只安排三个道次, 以便轧制总道次数为偶数, 另外, 在分配最后两个道次压下量的过程中, 应该使它们的辊缝值尽量接近。如果按照恒比例凸度曲线分配压下量以后, 其道次出口厚度与终轧厚度有偏差, 则按照圆滑方法进行处理, 圆滑后对伸长阶段的轧制参数还要进行重新计算。

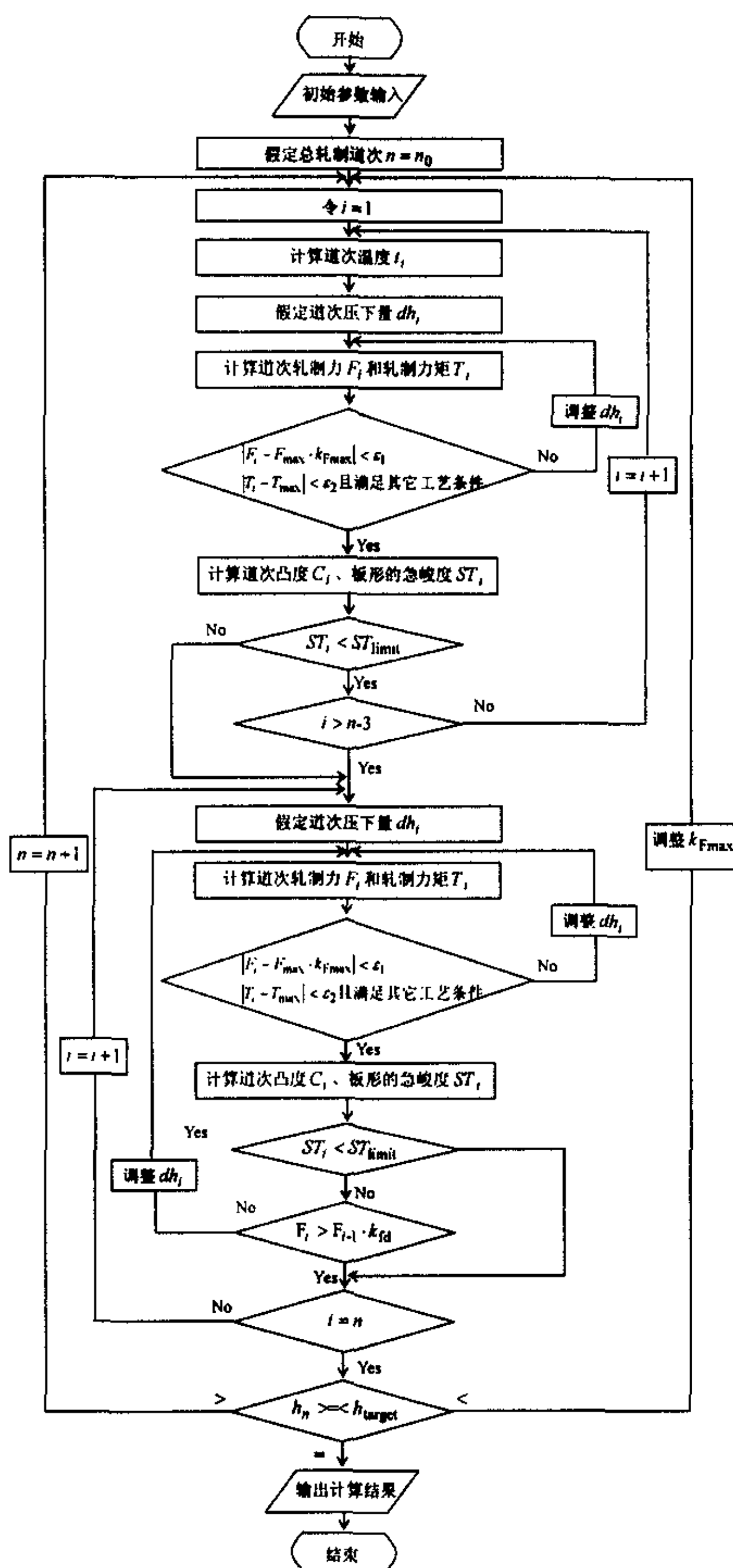


图 4.10 延伸阶段轧制规程分配计算流程图

Fig 4.10 Flowchart of DF schedule

4.2.3.4 动态修正规程计算

动态修正计算的任务是在轧制过程根据实际测量数据与预测数据的偏差来重新计算设定最后几个道次的辊缝设定值。

一个轧制阶段由一组连续的轧制道次组成，这些轧制道次之间有一定时间间隔，每一轧制阶段都是从初始轧件尺寸开始到目标尺寸结束。轧制一块钢可能由许多上面所定义的轧制过程所组成。转钢、轧机轧制状态的改变、待温等都会导致轧制阶段规程的改变。动态修正分为道次修正和阶段修正

(1) 阶段修正

由于首钢中厚板轧制是多阶段轧制，当一个阶段轧制结束时，进入下一轧制阶段前，轧机过程机，获得基础自动化传过来的轧件宽度以及温度实测值，此时过程机由跟踪程序触发相关阶段修正计算，进行模型常数再计算以及优化后续轧制规程。

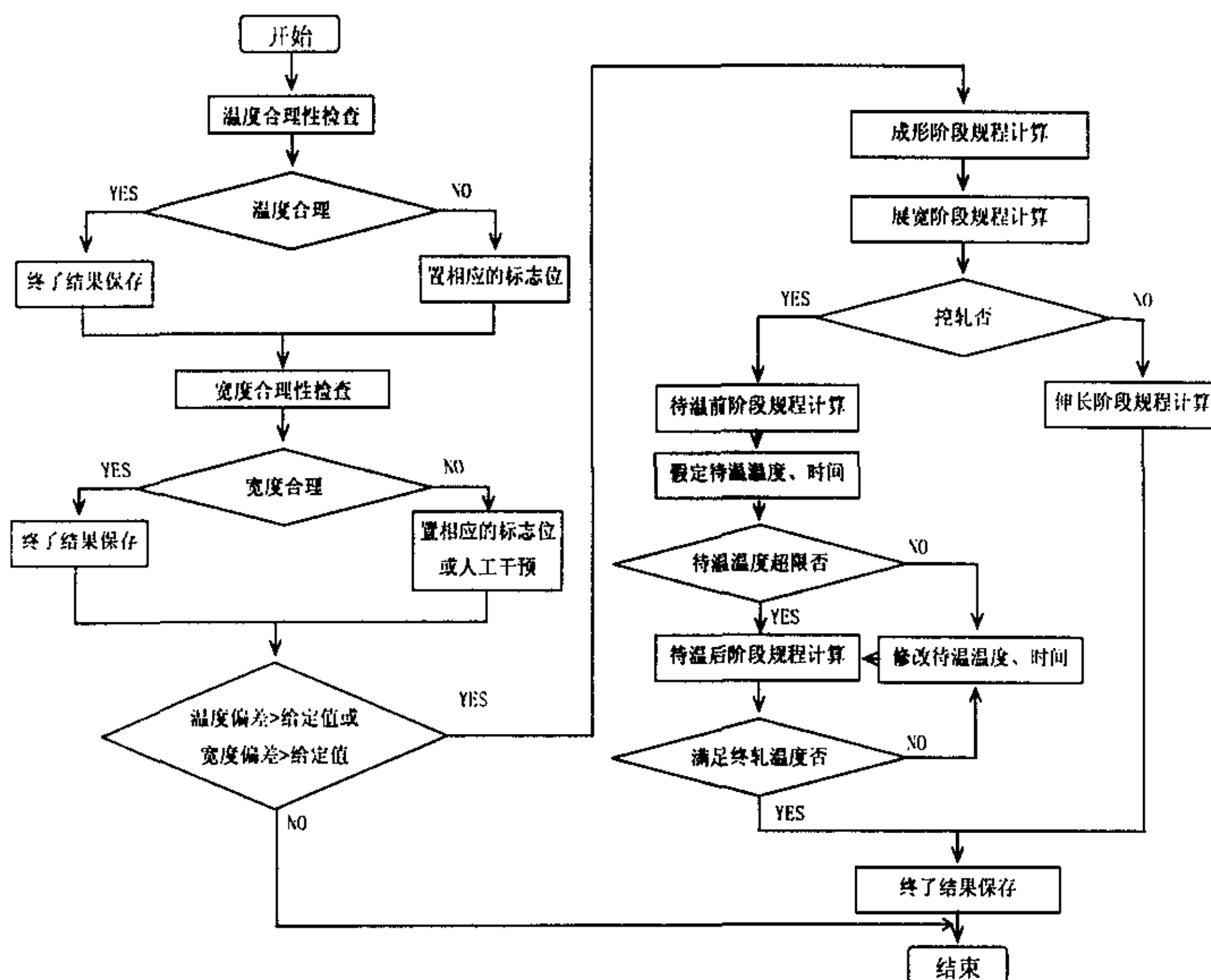


图 4.11 阶段修正轧制规程分配计算流程图

Fig 4.11 Flowchart of phase modify schedule

(2) 道次修正

由于中厚板轧制的速度不很快,而且道次之间存在一定的间隔时间,这为实时采集数据并利用这些数据进行修正计算提供了非常好的条件。一个道次轧制完毕,在轧件中心 1/4 处即轧件的中心部分,可以得到轧制过程的实测轧制参数(厚度、轧制力、温度等)。由于各种原因,道次的最终轧制结果与模型所预计的是有所不同的,通过道次修正模型可以不断提高模型参数的精度,可以进行温度,轧件厚度的适时校正,提高了最终轧制规程的精度,有时还要调用规程优化算法,重新计算新的后续轧制规程。

道次修正的流程图如下:

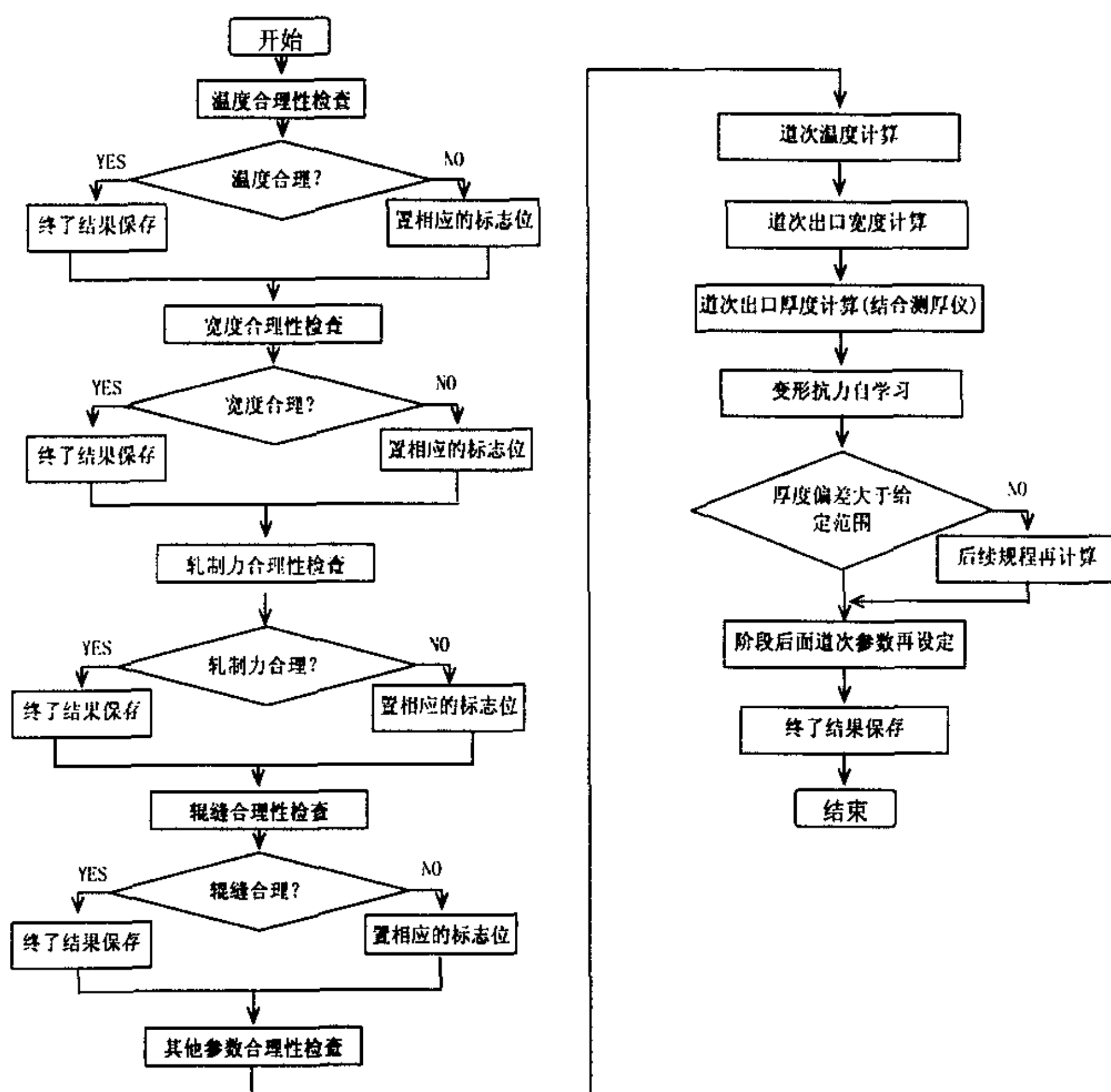


图 4.11 道次修正轧制规程分配计算流程图

Fig 4.11 Flowchart of pass modify schedule

为了获得道次出口的目标值(厚度、凸度、温度),主要对轧机的辊缝、弯

辊力、轧制速度和轧件的冷却过程进行反复动态修正设定值。基本上每个道次都要进行道次修正计算。

4.3 本章小结

- (1) 本章主要研究了中厚板的轧制工艺过程,对首钢中板厂的具体轧制工艺进行了比较详细的研究,并提出各个阶段轧制规程算法。
- (2) 结合现场情况,将动态修正计算和自适应计算嵌入到过程控制中,从而提高了模型预测精度。

5 结 论

本文以国内首钢中厚板厂 3500mm 中厚板轧机液压 AGC 改造工程项目为背景, 通过理论分析与经验模型, 对中厚板轧机过程机的数学模型及轧制规程的设计与实时控制进行了比较深入的理论和现场实际应用研究, 取得了如下成果和结论:

(1) 通过对首钢现场轧制工艺的特点和问题进行分析, 对于不同轧制阶段提出相应压下规程分配的方法, 使之能够既能符合现场轧制需要, 又能够进行实时计算机控制; 并提出相应的阶段修正规程和道次修正规程, 为保证终轧产品精度打下了基础;

(2) 建立相应的过程机数学计算和控制模型, 对中厚板温度场模型、力能模型做了详细的解析和研究。提出了运用二次曲线逼近法求解中厚板温度场, 能够比较精确地模拟现场中厚板轧制过程中的温度变化, 可以为轧制过程中力能参数预报模型和产品组织性能预报模型提供准确的依据;

(3) 通过现场测量仪器采集大量数据, 对弹跳模型、轧制力影响函数及钢种系数进行了回归解析, 并将回归出来的模型和系数用于压下规程分配中, 在提高产品产量的同时, 也保证了产品的终轧板形、尺寸精度和性能;

(4) 在对有关自适应模型分析研究的基础上, 根据现场实际生产特点, 采用相应的自适应算法模型来提高轧制力、辊缝等模型预测精度, 为钢板厚度自动控制提供良好的基础;

(5) 目前, 运用 VC++ 语言开发的过程机主体程序已经在首钢现场生产中投入使用, 运行稳定, 效果良好。

首钢中板的轧机过程机系统的创新工作确保了整个控制轧制系统的先进性, 使控制系统的响应速度、控制精度和产品合格率达到或超过了国内外同类装备的技术指标, 使该中板厂轧后产品质量和成材率得到大幅度提高, 成本不断降低, 同时也使中板厂具备了不断开发高附加值产品的能力。

首钢中板轧机过程机的成功应用为我国中厚板改造提供了一个成功的范例。

发表文章

1. 邱红雷 王昭东 刘相华 王国栋. 神经网络在中厚板轧机轧制力预报中的运用, 材料冶金学报 (已发表)
2. 邱红雷 矫志杰 胡贤磊 刘相华 王国栋. 中厚板轧制过程中温度场的研究 (已投)

参考文献

- [1]. 俞昌铭编著. 热传导及其数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1981.
- [2]. 徐申. 中厚板轧制过程中的温度模型[J]. 甘肃冶金, 2000. 6 (2) :13-19.
- [3]. 胡建伟, 汤怀民著. 微分方程数值方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4]. 孙本荣, 王有铭, 陈瑛. 中厚钢板生产[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [5]. 于世果, 李宏图. 国外厚板轧机及轧制技术的发展 [J]. 北京: 轧钢, 1999.5, 11-15.
- [6]. 丁修坤, 于九明. 中厚板平面形状数学模型的建立[J]. 钢铁, 1998(2), 20-24.
- [7]. 孙一康. 带钢热连轧数学模型基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979.
- [8]. 刘阶, 孙一康. 带钢热连轧计算机控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [9]. 丁修坤. 轧制过程自动化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.
- [10]. 姜明东, 王国栋等译. 高精度轧制理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [11]. 孙庆新. 数值分析[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1990.
- [12]. 杨节. 轧制过程数学模型[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [13]. 汪详能, 丁修坤. 现代带钢连轧机控制[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1996.
- [14]. 王国栋, 吴国良等译. 板带轧制理论与实践[M]. 北京: 中国铁道工业出版社, 1990.
- [15]. 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [16]. 张迪生. 动态规划在轧制规程最优化中的应用[J]. 信息与控制, 1984(4), 1-6.
- [17]. 黄 波. 热轧宽带钢轧机板形控制技术及应用[J]. 北京: 轧钢, 1999(5), 24-26.
- [18]. 王国栋. 板形控制和板形理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.
- [19]. 金以慧. 过程控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [20]. 黄 波. 热轧宽带钢轧机板形控制技术及应用[J]. 北京: 轧钢, 1999(5), 24-26.
- [21]. 殷瑞钰. 钢的质量现代进展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [22]. 连家创. 轧钢设备及工艺·钢板轧机[M]. 沈阳: 东北重型机械学院出版社, 1985.
- [23]. 孙林. 2800 四辊轧机“逆宽”轧制中的凸度控制[J]. 北京: 北京科技大学学报, 2001, 23(3) :238-241.
- [24]. 王延薄. 板带轧制理论与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [25]. 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [26]. 孙晓光. 精轧机组负荷分配的人工神经网络识别[J]. 北京: 钢铁, 1995 (11) :26-29.
- [27]. 朱伟勇. 最优设计的计算机证明与构造[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1987.
- [28]. 梁国平. 关于轧机的最佳负荷分配问题[J]. 北京: 钢铁[J], 1980 ,(1) ;42-48.
- [29]. 白埃民, 郝付国, 张进之. 综合等负荷函数法在轧钢生产中的应用[J]. 北京: 钢铁, 1993.6(4):35-38.
- [30]. 胡侃. 基于大型数据仓库的数据挖掘: 研究综述[J]. 软件学报, 1998.9(1):53-63.
- [31]. 程岩, 黄梯云. 最小归纳依赖关系在采掘聚类关联规则中的应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2000.7:105-108.

- [32]. 张进之,郝付国,白埃民. 控冷生产线的控轧数学模型及其实现[J], 钢铁工业的自动化,北京:冶金工业出版社,1993.8:48-53.
- [33]. 张进之. 压力 AGC 系统参数方程及变刚度轧机分析[J], 北京: 冶金自动化,1984. 1:24-30
- [34]. 周方,张进之. 太钢八辊轧机计算机控制系统[J], 北京:冶金自动化, 1999. 1:28-32.
- [35]. Zheng W.P. Extraction of Transient Signal from Nonperiodic Dynamic Response[J]. Journal of Dynamic System Measurement and Control, Vol 117 1995.
- [36]. Agrawal R:Srikant R. Fast algorithms for mining association rules[C]. Proceedings of the 20th international conference on Very Large Data Base, Santiago, Chile, Sept 1994-1998. 9(11):801-805
- [37]. Mrozek A. Rough sets and dependency analysis among attributes in computer implementation of expert's inference models[J]. International Journal of Man-Machine studies, 1989.30:457-473.
- [38]. Vladimir B G. High-quality steel rolling[M]. New York:Marcel Dekker, Inc. , 1993 .
- [39]. CHEN Xianlin. A Specialized Finite Element model for Investigating Controlling Factors Affecting Behavior of Rolls and Strip Flatness[C]. Proceedings of the 4th Int. Steel Rolling Conf. Deauville, France. 1987. E4.1-7.
- [40]. Remn- Min Guo. Computer Model Simulation of Strip Crown and Shape Control[J]. Iron and Steel Engineer, 1986 ,(11) :35-42 .
- [41]. Vladimir B G. High-quality steel rolling[M]. New York:Marcel Dekker, Inc. , 1993 .2
- [42]. SUN Xiaoguang, WANG Guodong. Application of Synergetic Artificial Intelligence to the Scheduling in Finishing Train of Hot Strip Mills[J]. Journal of Materials Processing Tech. , 1996, Volume PR0060/1- 4, 405-408.
- [43]. Kazuya Asano. Neural Network Model for the Recognition of Characters Stenciled on Continuously Cast Slabs[C]. Kawasaki Steel Technical Report, 1992 (26) :38.
- [44]. Sotsuo Iwabuchi. Development of Material Design Support System by the Neural Networks[C]. Hitachi Review, 1993, 75. (2) :37.
- [45]. T.Ozawa. Temperature Control Modes in Thermal Analysis[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2001, 64 (2):109-126.

致 谢

本文是在导师王国栋教授、刘相华教授的悉心指导下完成的。无论是在学习、工作和生活方面，导师都给予了作者父母般无微不至的关怀、爱护、支持和帮助，导师们渊博的学识、严谨踏实的治学作风和忘我的工作精神将使作者受益终生；导师敏锐的洞察力、勇于开拓的精神以及对事业的热爱与不懈追求，一直并将继续深深地启迪、激励着我。值此论文完成之际，谨向导师致以最崇高的敬意和最衷心的感谢，导师崇高的品质与谆谆教诲，作者将永远铭记。

在首钢南钢项目期间，王君副教授、王昭东副教授、胡贤磊老师给予了作者大量倾心的指导和帮助，作者表示衷心的感谢。在整个项目期间，李建平高工、刘策工程师、杨红工程师、牛文勇工程师、何纯玉博士、矫志杰博士、蔡晓辉博士都给予了作者耐心帮助和指导，在此予以最诚挚的谢意；龚彩军博士，魏世政硕士、赵忠硕士、也在日常的生活中给予了大量的支持与帮助，作者十分感谢。

作者感谢吴迪教授、张殿华教授、赵德文教授、朱伏先教授、邸洪双教授在学习生活中以及本文的完成过程中曾给予的大量指导。

办公室的杨子琴老师、张颖老师、李钊老师和沈馨老师在学习、工作中同样给予了作者诸多的帮助，在此深表谢意。

对东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室的全体老师和工作人员以及支持与帮助过我的所有同学和朋友表示以深深的谢意。