

分类号_____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

五机架冷连轧机厚度控制系统的应用

作 者 姓 名： 刘宝

指 导 教 师： 王安娜 教授 东北大学信息科学与工程学院

崔伦凯 高级工程师 首钢迁钢公司

申请学位级别： 硕士 学 科 类 别： 专业学位

学科专业名称： 控制工程

论文提交日期： 2012年6月 论文答辩日期： 2012年6月

学位授予日期： 答辩委员会主席： 高宪文

评 阅 人： 于洪喜 常玉清

东 北 大 学
2012年6月

A Thesis in Control Engineering



Five Stand Cold Rolling Mill Thickness Control System Research and Application

By Liu Bao

Supervisor: Professor Wang Anna

**Northeastern University
January 2012**

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：刘宝

日期：2012.6.26

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。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 ☐ 一年 ☐ 一年半 ☐ 两年 ☐

学位论文作者签名：刘宝

导师签名：王娜

签字日期：2012.6.26

签字日期：2012.6.26

五机架冷连轧机厚度控制系统的应用与研究

摘 要

厚度精度是板带产品的重要质量指标之一,随着轧制理论和控制理论的发展及其在轧制过程中的应用,板带产品的厚度精度有了很大的提高,但是实际系统应用过程中还有许多具体技术问题需要解决,因而寻找一种不依赖于系统模型、控制效果能够满足实际生产需要的新型控制方法是非常必要的。神经网络方法近年来在自动控制领域得到了广泛的应用,它不依赖于精确的系统模型,将神经网络同常规控制方法相结合是目前轧钢自动控制领域的研究热点。

本文首先阐述了冷轧薄板带的国内、外基本概况,结合冷轧薄板带轧制技术的需求和发展,分析研究了其核心技术—厚度自动控制技术(Automatic Gauge Control, AGC)讨论了现有的厚度自动控制系统的基本原理和控制方式。比较了几种典型的 AGC 控制模型,给出了减小及消除厚度波动的方案。

通过对新型的流量 AGC 系统的深入分析,结合首钢迁钢公司冷轧 1450mm 五机架酸洗冷连轧机项目的设计要求,研究了在扰动量和控制量的作用下整个机组运行状态的变化规律。通过综合分析冷连轧过程的静、动态特性,分别建立了五机架冷连轧的静态、动态模型,该模型综合考虑了入口来料厚度、辊缝、轧辊速度、摩擦系数、变形抗力对冷连轧机各机架出口板厚的影响。在此基础上,对由扰动量或控制量引起的成品厚度的变化进行了定量的分析。

板带在轧制过程中存在着许多不确定和慢时变的因素,对于控制参数不变的 PID 控制来说是无法适应这种变化的。针对这个问题,本文提出了基于 BP 神经网络的 PI 控制方法,应用 BP 神经网络在线调节控制器参数。对所提出的控制方法进行了仿真研究。同时设计并实现了五机架冷连轧机厚度控制系统。仿真实验及系统运行结果表明,可通过神经网络自适应调整控制器参数,所设计的厚度自动控制系统具有较满意的控制效果。

关键词: 冷连轧; 厚度自动控制; 动态特性; 神经网络; 自调整

Research and Application of Five Stand Cold Rolling Mill Thickness Control System

Abstract

Thickness accuracy is an important quality indicators of the strip products, with the rolling theory and control theory and its application in the rolling process, the strip thickness of the product accuracy has been greatly improved, But the actual system application process, there are many specific technical problems to be solved, Therefore looking for is not dependent on the system model, the control effect to meet the needs of the actual production of a new control method is necessary. The neural network method has been widely used in recent years in the field of automatic control, it does not rely on accurate system model, the neural network combining with the conventional control method is rolling hot research field of automatic control.

This paper first describes the cold-rolled sheet with domestic and foreign basic profiles, combined with the needs and development of cold-rolled sheet and strip rolling technology, and analysis of its core technology - AGC (Automatic Gauge Control AGC), discussed the existing thickness of the basic principles of automatic control systems and control. Several typical AGC control model, a program to reduce and eliminate the thickness fluctuations.

Through in-depth analysis of the new flow AGC systems, combined with the Shougang steel company moved to cold-rolled 1450mm cold rolling mill of the five-rack pickling project design requirements, changes in the disturbance and control the amount of the entire plant operation state the law. Tandem cold rolling process for a comprehensive analysis of static and dynamic characteristics, respectively, five-stand tandem cold rolling static, dynamic model, the model considers the entrance incoming thickness, roll gap, roll speed, friction coefficient, the deformation resistance cold rolling mill thickness of each rack export. On this basis, the injury caused by the disturbance or control the amount of finished thickness changes in the quantitative analysis.

Strip during the rolling process, there are many uncertainties and slow time-varying factors, for the same control parameters of PID control can not adapt to this change. Address

this issue, the PI control method based on BP neural network, BP neural network to adjust the controller parameters online. Of the proposed control method, a simulation study. Design and implement a five-stand cold rolling mill thickness control system. Simulation and system operation results show that, through adaptive neural network to adjust the controller parameters, the thickness of the automatic control system design with satisfactory control.

Key words: Cold rolling; AGC; dynamic characteristics; neural network; adaptive

目 录

独创性声明.....	I
摘 要.....	II
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 项目研究的背景及意义.....	1
1.2 厚度控制系统的分类.....	3
1.3 国内外板厚控制技术发展及现状.....	5
1.4 人工智能在轧制领域的应用.....	9
1.5 本文研究内容及所做的主要工作.....	10
第 2 章 冷连轧厚度控制系统.....	11
2.1 AGC 工作原理	11
2.1.1 轧机弹跳方程.....	11
2.1.2 轧件塑性曲线与 $F-h$ 图.....	12
2.1.3 厚度波动原因	13
2.1.4 消除厚差方法	14
2.2 AGC 系统组成	16
2.3 冷连轧 AGC	23
2.4 本章小结.....	24
第 3 章 五机架冷连轧厚度系统建模.....	25
3.1 首钢迁钢冷连轧机的主要技术规范.....	25
3.2 冷连轧静态分析.....	26
3.2.1 静态模型基本方程.....	27
3.2.2 基本方程的微量变化方程	28
3.2.3 冷轧影响系数法及稳态特性.....	29
3.3 五机架冷连轧动态模型.....	30
3.3.1 变形区及机架间冷轧动态模型.....	30

3.3.2 执行机构数学模型 32

3.4 本章小结 34

第 4 章 基于神经网络自调整控制算法研究 35

4.1 神经网络概述 35

4.2 BP 神经网络在冷连轧 AGC 系统中的应用 37

 4.2.1 厚度反馈 AGC 系统中的滞后问题 37

 4.2.2 基于 BP 神经网络整定的积分控制 40

4.3 本章小结 42

第 5 章 仿真实验及运行结果分析 43

5.1 五机架冷连轧动态模型的仿真分析 43

 5.1.1 轧制规程与设定计算 43

 5.1.2 五机架冷连轧动态模型的仿真分析 43

 5.1.3 五机架冷连轧 AGC 系统的仿真研究 47

5.2 基于 BP 神经网络整定的积分控制系统仿真分析 49

5.3 系统实际曲线 50

5.4 本章小结 55

第 6 章 结论及展望 57

6.1 结论 57

6.2 展望 57

参考文献 59

致谢 63

第1章 绪论

1.1 项目研究的背景及意义

冷轧薄板是重要的产品之一，是一种需求量极大的一种钢材，广泛用于汽车制造、食品包装、家用电器、机械、轻工、仪表等各个领域。国民经济的迅猛发展，需要尺寸精度非常高的板材产品，有的需用厚度为几个毫米，甚至零点几个毫米，而厚度偏差仅为几个微米的冷轧薄板。这样，如何提高带材产品的产量和质量历来是各个国家科研机构的一大课题^[1]，世界各国都力求对轧机的设备进行更新改革，控制上采用新的控制方案，以满足生产工艺的要求。而目前我国的板材生产水平相对世界先进水平来说还比较低，许多轧钢厂的设备落后，自动化程度低，板材产品质量精度不够，很难满足日益发展的国民经济需要。

就轧机设备的改造而言，它主要反应在轧机压下机构的改造上，因为压下机构的运动速度和精度直接影响着板材的纵向厚差和横向厚差，从原始的手动压下到电动压下，进而发展到机械反馈式液压压下以至今天的电液伺服阀压下装置，它走过了一条漫长而艰苦的道路^[2]。以往采用的手动压下和电动压下装置的主要缺点是运动惯性大、调整时间长，在辊缝调节过程中反应慢、精度低。随着航空技术的发展，液压伺服控制技术日益完善。六十年代以后，在轧机的液压辊缝控制系统中，采用了航空工业使用的反应灵敏、精度高的电液伺服阀，大大提高了轧机辊缝的调节速度和精度，使轧机的轧制速度大幅度的提高，轧制板材质量有了明显的提高，这是轧机设备发展史上的一个重要飞跃。

另外一个影响板材质量的很关键的因素就是轧机的控制精度跟不上。现有的控制方案有：测厚仪闭环反馈控制系统、缸位移闭环反馈控制系统、辊缝闭环反馈控制系统、压力闭环反馈控制系统等等，或者几种方法共同配合使用，而所有这些方法历来都是采用常规 PID 控制方法，而常规 PID 控制适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统，但是冷连轧过程是一个非线性、不确定和时变的复杂系统，要得到它精确的数学模型是相当困难的，甚至是不可能的，因为其中存在很多的不可预测因素，当应用常规 PID 控制方法时，不能达到理想的控制效果。所以寻找一种对系统模型要求精度较低而控制效果能够满足经济生产需要的新型控制方法是很有必要的。

神经网络是人工智能的重要研究课题，它是近年来发展起来的模拟人脑生物过程的具有人工智能的系统，是由大量的非线性单元连接而成的网络，擅长处理复杂的多维的

非线性问题，同时具有大规模的并行处理和分布的信息存储能力，良好的适应性，自组织性及很强的学习、联想、容错及较好的可靠性。神经网络可以根据给定的学习样本，不需要进行任何假设，建立系统的非线性输入输出映射关系。一般而言，神经网络与传统的计算方法相比并非优越，只有当常规方法解决不了或效果不佳时才能显示出其优越性，尤其是对问题的机理不甚了解或不能用数学模型表示的系统^[3]。

因此，将神经网络与传统的 PID 控制器相结合，既能发挥神经网络的自适应、自组织能力又能充分发挥传统 PID 的算法简单、实现简易、鲁棒性能良好和可靠性高的特点^[4]。神经网络 PID 控制器对于复杂对象，其控制效果远远超过了常规 PID 控制器，具有广阔的应用前景。

首钢迁钢冷轧部酸洗冷连轧机组(PL-TCM)设计生产能力为 96.04 万吨/年，主要产品为中低牌号无取向电工钢冷轧卷。冷连轧机组由五架 UCMW 轧机组成，可实现高刚度、大压下量轧制，配有极高的厚度、板廓和平直度控制功能，可以满足硅钢生产的需要。具有在有带钢和无带钢状态下自动换辊功能。主要工艺流程图如图 1.1 所示

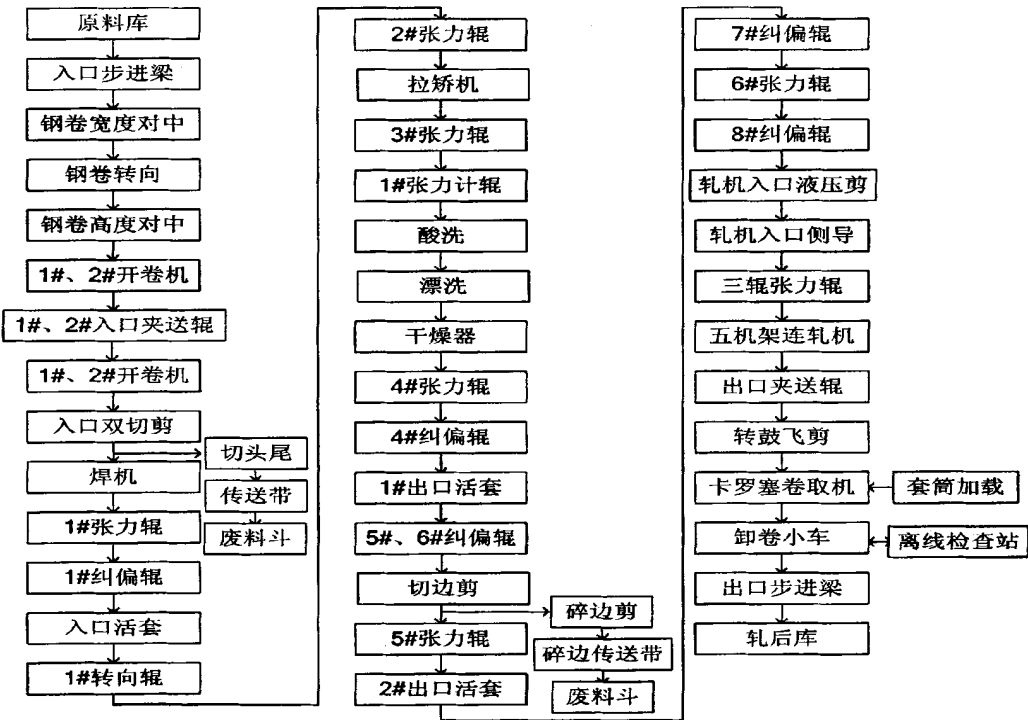


图 1.1 工艺流程图
Fig 1.1 Process Flow Diagram

PL-TCM 连续酸洗冷连轧机组有较高的生产率，能生产高质量的冷轧硅钢。在连续酸洗线的入口段，布置了热轧卷准备及运输系统，由步进梁式钢卷输送机、中间小车、

上卷小车和钢卷对中装置组成。

酸洗入口段由两组开卷机、直头机、双切剪和一台激光焊机组成。上下通道开卷可实现连续供卷。采用激光焊机焊接前一卷带钢的尾部和下一卷带钢的头部，焊缝质量良好，可以提高硅钢的产品质量。在酸洗线的酸洗入口段和酸洗段之间，布置了入口活套，目的是当激光焊机焊接时，可以连续不间断的供应带钢进入酸洗段，保证酸洗质量。在酸洗入口段布置了拉矫机，通过两弯一矫，破裂带钢表面的氧化铁皮提高酸洗效果，并改善热轧来料板形。为了除去热轧硅钢表面的氧化铁皮，酸洗段设计成 MH 浅槽酸洗。酸洗后的带钢经过漂洗段和干燥器后进入 1#出口活套后再进入切边段。

切边剪布置在酸洗段和连轧机段之间，通过 1#出口活套和 2#出口活套来确保切边剪剪刀间隙、重叠量调整或剪刀更换以及轧机换辊时酸洗段的连续运行。

在连轧机入口，布置了快速响应、高带钢张力装置以及双纠偏对中系统，使带钢中心线与轧制中心线重合，对中的目的是为了精确的控制卷取以及生产硅钢时工作辊的窜辊。

冷连轧机组由五架 UCMW 轧机组成，可实现高刚度、大压下量轧制，配有极高的厚度、板廓和平直度控制功能，可以满足硅钢生产的需要。具有在有带钢和无带钢状态下自动换辊功能。

在轧机出口布置了转鼓飞剪，皮带助卷器和卡罗塞张力卷取机，确保稳定的卷取，接着是卸卷小车、出口步进梁、钢卷称重和钢卷打捆机组成的出口钢卷运输系统。

如果轧制厚度小于 0.5mm 的产品时，将套筒装载到卷取机芯轴上以防止钢卷塌卷。离线检查站可以检查下机钢卷带头 20m 左右的上下表面质量。产品卷通过两个步进梁输送到轧后库，在传送过程中，自动称重并打捆。

1.2 厚度控制系统的分类

板厚是板带材质量的主要衡量指标之一，它直接关系到产品的质量和经济效益。厚度自动控制(AuotmatciGuageControl简称AGC)是提高板带材质量的重要方法之一，其目的是获得带钢纵向厚度的均匀性。多年来，围绕着如何提高板带材几何尺寸精度这一问题，国内外许多学者进行了大量而又深入地研究。在上世纪最后的十年，世界轧钢技术发展迅速，轧钢生产实现了高度的自动化、连续化和高精度化。回顾我国冷轧已应用的厚度控制系统，大致可以归纳为3种基本类型^[4]：

(1)用测厚仪信号反馈控制轧机压下或轧机入口侧带钢张力的 AGC 系统

上世纪 70 年代，冷轧带钢的厚度控制系统大多是用测厚仪信号反馈控制轧机压下或轧机入口侧带钢张力的 AGC 系统，而且采用模拟线路。按轧机出口侧测厚仪所测出的

带钢厚度实际偏差信号反馈控制, 在大偏差或被轧带钢厚度大于 0.4mm 时, 按偏差信号大小控制压下系统改变辊缝间距, 以减小厚度偏差, 称之为粗调; 在小偏差或被轧带钢厚度小于 0.4mm 时, 则调节轧机入口侧带钢张力, 进一步减小厚差, 称之为精调。早期调节轧机压下装置的机构是电动压下, 因为电动压下响应慢和非线性的缺点, 逐渐被液压压下机构所取代。测厚仪安装在两侧距轧辊中心约 1.5-2.5m 的位置, 故测厚仪信号产生滞后, 且随轧制速度而改变; 加上压下系统执行机构的响应时间较长, 使厚度控制的调节周期长, 为使系统稳定而降低了系统的控制性能。根据轧机的刚度, 系统所需修正次数不同, 通常需要修正 2-3 次才能把偏差控制到允许范围内。若 AGC 系统采用模拟线路, 通常在轧制速度升到一定值后方可投入 AGC。这就造成了带头带尾厚差变大降低了产品的成材率^[5]。这类 AGC 系统的主要缺点是: 1) 带钢头尾 AGC 功能不投入, 成材率降低, 尤其是在钢卷较小时, 损失尤为突出; 2) 消除带钢纵向厚度偏差能力低; 3) 冷轧轧制张力大, 故张力可调范围相对较小。4) AGC 调节周期长, 并且随轧制速度而改变, 为使系统稳定, 必须降低系统的控制性能。

(2) 采用前馈控制和测厚仪信号反馈控制轧机压下或轧机入口侧带钢张力的 AGC 系统。

将上述 AGC 系统数字化, 并增加前馈控制回路就构成此类 AGC 系统。前馈控制是当轧机入口侧有厚度偏差的带钢到达轧辊咬合处时, 立即调节被控机架压下位置, 将入口侧带钢厚度偏差消除的一种控制策略。方法是将轧机入口侧测厚仪到轧辊中心的距离分成若干段, 把经过入口侧的每段带钢厚度偏差信号存入先入先出(FIFO)寄存器中, 当寄存器输出的偏差信号所对应带钢段到达轧辊时, 系统根据此段带钢的厚度偏差信号调整压下装置, 消除进入轧机带钢的厚度偏差。这种控制方式消除了带钢纵向厚度不均或硬度变化所产生的厚差较大的缺点。

(3) 采用前馈控制、压力反馈控制和监控 AGC 系统

上世纪 80 年代, 在现代控制理论基础上, 利用电子技术与计算机技术相结合, 对上述 2 类 AGC 系统进一步加以改进, 形成了 GM-AGC 系统或 Bisar AGC 系统。其主要特点是使用轧机的弹跳方程计算轧后带钢厚度作为实测厚度, 与设定厚度或锁定厚度相减, 其差为检测的厚度差值, 经过转换后用于压下调节。这样就不存在轧辊中心到测厚仪的传输滞后时间了, 调节周期大大缩短, 从而提高了系统性能, 得到普遍应用。加上监控回路, 即用轧机出口测厚仪检测出的带钢实际厚度作为反馈控制, 消除低频干扰因素的影响, 如轧辊磨损、轧辊热膨胀等。数字化或计算机控制, 加上应用一些新的控制算法, 这类 AGC 系统性能获得进一步的提高, 其控制精度可达成品厚度的 5%-10%,

如成品厚度 0.08mm 的汽车板,其厚度偏差范围 0.04-0.08mm,称之为毫米级厚度偏差。如果要进一步把带钢厚度偏差减小到几个 μm ,用这类 AGC 系统是做不到的,因为 GM-AGC 计算带钢厚度是建立在各种补偿基础上按轧制压力计算的。要精确计算所有补偿参数是很难,甚至是不可能的。要补偿的变量主要有以下七种:

- (1)轧辊偏心;
- (2)油膜厚度;
- (3)轧机弹性系数(含带宽和轧辊辊径补偿);
- (4)摩擦力变化;
- (5)轧辊磨损及压扁;
- (6)轧件硬度;
- (7)轧辊热膨胀。

确定在各种轧制状态下所需各变量的补偿量,通常要用复杂的数学模型计算,或事先存入计算机内的表格数据(图形曲线表格化),精度不可能高,这是影响 GM-GC 控制精度的主要原因。要生产厚度偏差极小的带钢,必须采用控制精度更高的 AGC 系统,可控制带钢的厚度偏差达到成品厚度的 $\pm 1\%$ (几个 μm)之内.这种控制系统的核心技术是流量控制(MassFlowcontrol)。

随着计算机技术的发展和广泛应用,国外冷轧机 AGC 技术得到了迅速发展,功能不断完善,流量 AGC 也开始在冷轧机上应用,使厚度控制精度达到了相当高的水平。流量 AGC 国外早在上世纪 70 年代就开始成功应用在冷轧机上,流量 AGC 系统在设备结构及系统设计方面均较简单,无需设置任何诸如轧机偏心、油磨厚度等补偿系统。检测元件设置地点环境好,易于安装和维护。系统检测分辨率高,检测精度可达 0.001mm,最终成品控制精度可达 $\pm 10\mu\text{m}$ 以下,并能迅速逼近目标厚度,使成材率大幅度提高。

1.3 国内外板厚控制技术发展及现状

板带轧机厚度控制从轧机诞生起,直到由计算机完成各种复杂功能的控制,其发展过程是随着对板带材尺寸精度要求越来越高而相应发展起来的,板带轧机厚度控制的发展大致可分为以下几个阶段。

第一阶段是本世纪30年代以前的人工操作阶段。这一阶段的轧机装置水平较低,厚度控制是以手动压下或简单的电动压下移动辊缝方式为主。由于当时各种检测手段尚不完善,轧机的调整和过程的实时调节主要是凭操作人员的经验进行的。这一阶段中,轧制理论仅在后期才刚刚开始建立,远没有达到应用的程度;单回路调节的自动控制理论,尚未应用于控制轧机这类较复杂的机器,由于轧制过程是一个非常复杂的物理过程,轧

制条件和状态不断发生变化,单凭经验操作很难达到较高要求,致使轧机的各项技术经济指标都比较低,相应该阶段的厚度控制尚未形成自动控制。

第二阶段是30年代到60年代的常规自动调整阶段。1925年卡尔门提出了轧制力微分方程^[8],1950年英国人发明了轧机弹跳方程,引入轧机刚度概念,使轧制理论和技术发生了一次飞跃。轧制理论从以力学为基础研究轧件变形规律,进入以力学和控制论为基础的轧件与轧机互相作用变形规律统一研究^[9]。该阶段中轧制理论的发展和完善为板带轧机的厚度控制奠定了基础,同时,随着自动调节理论和技术的发展,并逐步应用于轧制过程,使轧机的控制步入了常规模拟式调节的自动控制阶段。单回路的各种调节系统不断涌现。主要体现在速度调节系统,张力调节系统,位置调节系统等^[10]。这些自动调节系统的实现,为完善板带轧机的厚度控制提供了先决条件。

早期的厚度控制系统是根据测量出口板厚偏差而调节电动机压下实现的。这种装置应用不久就暴露出一系列的缺点:(1)压下位置改变比较慢;(2)传递时间滞后;(3)压下电动机容量增大等。

1952年,英国Hessenberg等,根据出口板厚决定于轧机弹性曲线与轧件塑性曲线交点而推导出的出口板厚表达式,奠定了板厚控制的理论基础。此后,基于该解析式的所谓“厚度计”式板厚自动控制方式,几乎被这一阶段所有新建轧机所采用。事实上这种厚度自动控制方式一直延用到60年代末,这种方式的厚度控制系统,在轧制过程中通过测量轧制压力和空载辊缝,利用弹跳方程计算出任何时刻的实际轧出厚度,这种情况下,就等于把整个机架作为测量厚度的“厚度计”。这种间接测量厚度的方法,克服了X射线测厚仪传递时间的滞后,使厚度控制的响应时间大为提高。这种厚度控制系统中仍保留着X射线测厚仪作为最终厚度的闭环控制^[11]。

以X射线测厚仪测厚和“厚度计”式测厚,以模拟量和逻辑量的组合进行执行机构的控制,是这一阶段厚度控制的特点,由此构成的自动调节系统可对轧制过程进行有效的实时调节,从而在改善轧制过程的稳定性,提高板带材产品质量以及简化操作等方面都取得了明显的效果^[12]。

第三阶段是60至80年代的计算机控制阶段。60年代起,随着计算机技术的发展及应用,计算机技术也逐步渗透到钢铁制造业,使板带产品的生产发生了变革,形成了60至80年代的计算机控制阶段。以弹跳方程为基础的厚度自动控制理论(AGC)得到广泛应用。

计算机在板厚控制中应用首先是在热连轧机设定上开始的^[13]。穿带过程中,根据被轧材的各种情况,要求快速、最优设定各机架的出口厚度值、辊缝值及轧制速度等,单凭经验及简单的计算已无能为力了,必须引入计算机运算才能完成。以厚度计式测厚实

现厚度控制,以计算机进行各机架设定,很好地解决了热连轧机的厚度控制问题。

带钢热连轧机采用厚度计式厚控方式主要在如下几个方面得到了好处(1)减少了带钢后段由于温降造成厚度偏差的影响;(2)带钢尾部失张造成厚度偏差有所改善;(3)轧机负载分配有所改善^[14];(4)借助于活套装置减少了需要校正的干扰;(5)带钢的板形和平直度有所改善;(6)即使有一个机架的厚度自动控制退出,还可以进行有效的厚度控制等。鉴于计算机设定与厚度计式厚控方案在带钢热轧机上应用的成功,60年代中期出现了热连轧机发展的鼎盛时期,各国相继改建和新建了一大批热连轧生产线。与此同时,计算机也逐步以DDC(直接数字控制)形式用于轧制过程,开始了以计算机设定和计算机控制为标志的新时期。这一阶段的热连轧机轧制速度可达2300m/min,出口厚度7mm,带材精度控制在50 μ m以内可达80%以上。热轧产品质量有了相当程度的提高,同时在节省人力、简化操作上都有很大的提高^[15]。

60年代后期,在板带轧机的控制上,逐步过渡到了以主计算机设定和以微机进行DDC过程控制阶段,并将这种控制方式大量应用于冷连轧机,使这一阶段冷连轧机发展很快。但在板厚控制方案上,试图将“厚度计”式厚控方案用于冷连轧机时遇到了困难。其主要原因是“厚度计”式控制方式与张力调节之间的矛盾,另一方面,冷轧过程中金属的变形抗力很大,而且随道次的增加而变大,仅测量轧制力偏差,由轧机刚度并考虑一些简单的情况决定出口厚度偏差已不可能准确。对板带厚度精度要求较高的冷连轧机来说,在厚控方案上必须寻求新的控制模式。

经过多年的研究,形成了这一阶段冷带连轧机典型厚控系统的基本思想是:在第一、二机架设置粗调AGC系统,保证坯料厚度差基本上得到消除;以后机架的精调AGC系统,由于压下效率低,而且保证良好的板形,故常采用调张力作为调厚手段,对带钢厚度再次进行精确控制^[15]。如果误差超出了精调系统的能力范围就改变第一机架的设定值,按金属秒流量相等的原则重新分配各架的压下量,以达到合格的厚度精度。如此实现的带钢冷连轧机厚度控制系统得到了成功。同时由于各种检测设备精度的提高,使这一阶段的冷轧机发展非常迅速。创世界轧制速度最高纪录(2500m/min)的日本君津制铁所第三号冷连轧机,就是1968年开始筹建,于1971年创造的。不仅如此,这一阶段的板厚控制精度在轧制出口厚度0.340mm带材时,可控制在 $\pm 10\mu$ m以内^[16]。

70年代起,液压厚控技术(液压AGC)的应用,使板厚控制技术产生了重大变革^[12]。液压AGC的响应速度比电动AGC快2个数量级以上,因此,使AGC的内环执行机构几乎可以近似为一个比例环节(相对于AGC的响应速度),以实现可变等效刚度的控制效果。由于液压技术与计算机技术的结合,使这一阶段的板厚控制技术大大地向前迈进了一步

[13-14]。这一阶段的大部分旧式控制方式的轧机都进行了新技术的改造^[15-16]。

第四阶段是80年代末至现在,板厚控制技术向着大型化、高速化、连续化的方向发展。这一阶段已将板厚板形控制的全部过程溶于计算机网络控制的过程自动化级和基础自动化级^[17]。在过程控制级的控制中,一方面采用最优控制,多变量控制,自适应控制,解耦控制, H^∞ 控制等控制理论的最新成果,以追求控制性能的更高水平^[18-19]。在监控层的设定计算中,一方面采用人工智能,模糊控制,神经网络等知识工程的手法,以追求系统的灵活性和多样性^[20]。以上两方面的不断追求融合在一起,开发出高精度、无人操作的厚度自动控制系统是这一阶段轧机的目标。

这一阶段中在板厚控制的单一技术方面的开发,已产生了相当多的成果。许多板带轧机的精轧机上装备有数字化的自动厚度控制器;如GM-AGC(Gauge Meter AGC),监控AGC^[21],张力AGC,前馈AGC,反馈AGC等。可根据工艺需要,选择其中几种组合形成某种轧机的AGC系统,以满足板带厚度控制之用。为了提高头部板厚控制精度,开发出绝对值AGC,这种形式的系统以GM-AGC为基础,采用液压压下,利用各种补偿功能和绝对值锁定方式,实现绝对值AGC^[24]。对于冷连轧机,已开发出MF-AGC(秒流量AGC)板厚控制系统^[25-27]。新开发的MF-AGC可使板厚精度达到0.1%以内,是当前AGC发展的一个方向^[28]。近年来,为进一步提高冷连轧产品质量,广泛采用成品带钢凸度测量仪(沿带宽多点X射线源及矩阵式接收,以获得沿宽度方向的厚度分布)和带钢激光测速仪^[29]。激光测速仪的使用为秒流量AGC的发展创造了条件。

在20世纪最后的十年,世界轧钢技术发展迅速,轧钢生产实现了高度的自动化、连续化和高精度化^[30]。由于对冷轧薄板质量的要求越来越严,因此计算机控制系统已是冷轧不可缺少的组成部分。随着液压控制系统的广泛应用加上全部控制都将作用于轧辊-轧件形成的变形区,因此冷轧自动控制系统需满足下列两个要求:一是高速控制,二是高速通讯。这个“二高”的特点决定了控制系统应是“快速”分布式计算机控制系统。目前能为冷连轧机提供计算机控制系统的仅有6-7家大电气公司(美国GE、德国西门子、法国ALSTOM、日本日立和三菱以及瑞典的ABB公司)^[31]。各钢铁企业都加快了薄板生产线改造和建设的步伐。人工智能技术在轧钢工艺中应用,在热轧带钢轧制中利用ANN与数学模型结合进行轧制力控制已经开始应用于工业生产。

1.4 人工智能在轧制领域的应用

人工智能是一种新的信息处理和控制技术,与传统轧制理论方法不同,它避开了过去那种对轧制过程深层规律的无止境的探求,转而模拟人脑来处理那些实实在在发生了的事情。它不是从基本原理出发,而是以事实和数据为依据,来实现对过程的优化控制

[32]。人工智能萌芽于20世纪40-50年代,80年代进入迅速发展时期,90年代以来,随着计算机硬件突飞猛进的发展,计算机速度的不断提高、存储容量的不断扩大、价格的不断降低以及网络技术的不断发展,人工智能的研究也就进入繁荣期^[33-34]。

人工智能进入轧制领域可以追溯到80年代。1984年小园东雄曾介绍了利用人工智能技术进行型钢的最优剪切控制^[35]。90年代以后,日本轧钢界学者和工程技术人员在人工智能应用方面作了大量的工作。

在模糊理论和模糊控制方面,有带钢板形的模糊控制^[36]、估计碳素钢的变形抗力^[37]、进行板厚—张力不相关控制^[38]、棒钢轧机的模糊设定、热带精轧机组的轧制规程设定、利用模糊推理进行冷连轧机组的智能操作指导等等。

在专家系统应用方面,有冷连轧机厚度精度诊断、热连轧负荷分配,H型钢孔型设计、型钢质量设计、棒钢出炉节奏控制、热轧在线传动系统诊断、热带钢轧机的板坯自动搬运、精整线板卷运输等等。

在神经网络方面,有冷连轧机组压下规程设定、多辊轧机板形控制、利用BP网络进行板形识别、综合利用神经网络和模糊逻辑进行板形控制、利用自组织模型进行操作数据分类等等。

与此同时德国的轧钢工作者在人工智能的实际应用方面下了很大功夫。据介绍,西门子公司(Simenes AGC)利用神经网络进行轧制过程自动控制,进行轧制力预报、带钢温度预报和自然宽展预报,使轧制力预报精度提高15%-40%,温度精度提高25%,宽展精度提高25%。这些成果已经应用于德国蒂森钢铁公司、赫施钢铁公司似等轧钢厂的6套轧机上。

1.5 本文研究内容及所做的主要工作

本文以首钢迁钢1450mm五机架冷连轧机为背景,设计了五机架冷连轧机厚度控制系统,所做的主要工作为:

(1)对五机架冷连轧机AGC系统进行了深入的研究:比较几种典型的AGC控制模型,分析了轧机厚度波动的原因,进而给出了减小及消除厚度波动的基本方法。

(2)依据连续轧制理论的基本方程对冷连轧的静态特性进行了研究,分析了入口来料厚度、辊缝、轧辊速度、摩擦系数、变形抗力对冷连轧机各机架出口板厚的影响,建立了静态模型。

(3)通过对冷连轧动态特性的分析,建立了五机架冷连轧机的动态数学模型,并对所建的模型进行了定量的仿真分析。为厚度控制系统的设计奠定了基础。

(4)提出了基于BP神经网络的厚度控制策略,在控制系统中引入BP神经网络,调

节优化控制器参数，以实现控制器参数的在线整定。

(5)对五机架冷连轧机厚度控制效果进行了仿真分析，比较了 BP 神经网络积分控制器和传统的控制器。仿真结果表明，BP 神经网络的引入优化了控制器的性能。

(6)设计了基于 BP 神经网络的 AGC 系统，实际运行结果表明，所设计的系统能很好的跟踪给定信号，控制效果良好。

第2章 冷连轧厚度控制系统

厚度是板带材最主要的质量标志之一，它直接关系到产品的质量和经济效益。厚度自动控制，是提高板带材质量的重要方法之一。厚度自动控制是现代板带材生产中不可缺少的重要组成部分。厚度自动控制系统是通过测厚仪或传感器对带材实际轧出厚度连续进行测量，并根据实测值与给定值比较后的偏差信号，借助于控制回路或计算机的功能程序，改变压下装置、张力或轧制速度，把带材出口厚度控制在允许的偏差范围内。实现厚度自动控制的系统称为 AGC 系统。本章主要进行 AGC 基础理论分析和连轧机的厚度控制策略研究。

2.1 AGC 工作原理

2.1.1 轧机弹跳方程

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，如图 2.1 所示。

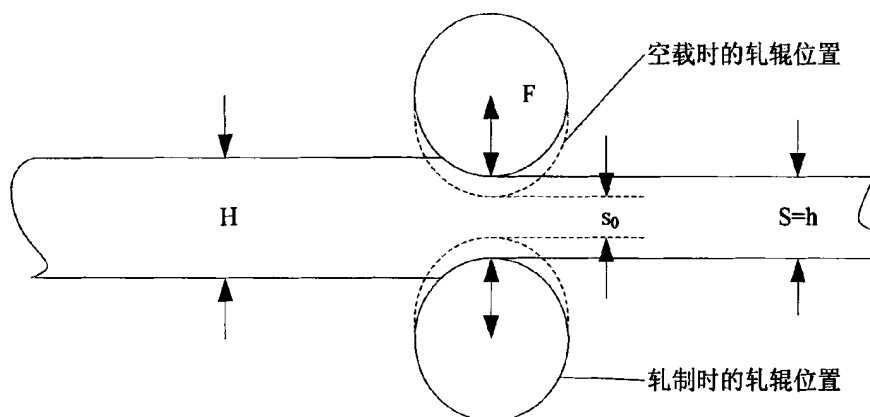


图 2.1 轧制时发生的基本现象

Fig. 2.1 The basic phenomena when strip is rolled

图 2.1 中 H ——入口厚度； h ——出口厚度； S_0 ——空载辊缝； S ——实际辊缝； F ——轧制力。

这些变形引起的辊缝变化的总和即称为轧机弹跳，它是轧机负载辊缝与空载辊缝的差值。轧机在外力 F 的作用下，产生弹性变形 $(h - S_0)$ ，依 HOOK 定律可得：

$$F = M(h - S_0) \quad (2.1)$$

式中， M ——轧机模数或轧机刚度系数。

由式(2.1)变形得：

$$h = S_0 + F/M \quad (2.2)$$

式(2.2) 这就是著名的轧机弹跳方程, 它由 Smis 等人创立, 是厚度计式 AGC 的基本数学模型, 也是实现厚度计式 AGC 的基础。由于轧机弹跳方程避免了测厚仪式 AGC 系统的纯滞后作用, 所以它的问世为 AGC 技术的发展作出巨大的贡献。由弹跳方程画出的 $h = f(F)$ 几何曲线就是轧机弹性曲线^[39]。

2.1.2 轧件塑性曲线与 $F-h$ 图

轧制时的轧制压力 F 是所轧带钢的宽度 B 、来料入口厚度 H 、出口厚度 h 、摩擦系数 μ 、轧辊半径 R 、温度 t 、入口张力(前张力) t_f 、出口张力(后张力) t_b 、以及变形抗力 σ 等的函数, 如式(2.3)所示:

$$F = f(B, H, h, \mu, R, t, t_f, t_b, \sigma) \quad (2.3)$$

式(2.3)为金属的轧制力方程(又称塑性变形方程)。在冷轧机中, 影响轧制力的主要因素是 H 、 h 、 t_f 、 t_b , 因此, 式(2.3)可以进一步简化为:

$$F = f(H, h, t_f, t_b) \quad (2.4)$$

对式(2.4)进行泰勒级数展开并只取一次项得到:

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial F}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial F}{\partial t_f} \Delta t_f + \frac{\partial F}{\partial t_b} \Delta t_b \quad (2.5)$$

式中 $\frac{\partial F}{\partial H}$, $\frac{\partial F}{\partial h}$, $\frac{\partial F}{\partial t_f}$, $\frac{\partial F}{\partial t_b}$ 为偏导数。

在实际应用中, 总是针对具体的主要扰动因素, 对式(2.4)进一步简化。如果除出口厚度 h 以外, 其他参数恒定不变, 则 F 只随 h 变化, 式(2.4)可简化为:

$$F = f(h) \quad (2.6)$$

在轧制力 F 和出口厚度 h 以外的各变量一定的情况下, 可画出 F 随 h 变化的曲线, 并称该曲线为轧件塑性曲线。

轧件的一个重要参数是轧件塑性系数, 它定义为: 使轧件产生单位压塑所需轧制力称为轧件塑性系数。用 Q 表示轧件塑性系数, 则:

$$Q = -\frac{\partial F}{\partial h} = -\frac{\partial f(H, h, \dots)}{\partial h} \quad (2.7)$$

可见, 轧件塑性系数为轧件塑性曲线的斜率。

把式(2.2)和(2.6)画一个几何图上, 如图 2.2 所示, 就得到 $F-h$ 图^[40]。两条曲线的交点的横坐标恰好是出口厚度 h 。它是分析和设计 AGC 系统的一个有效工具。

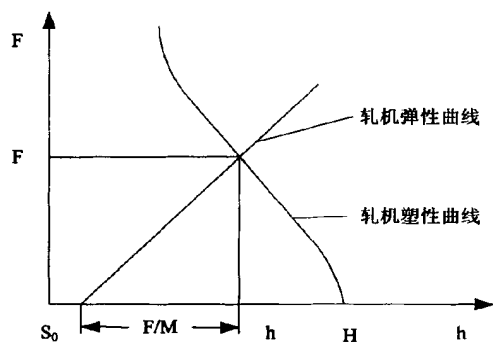
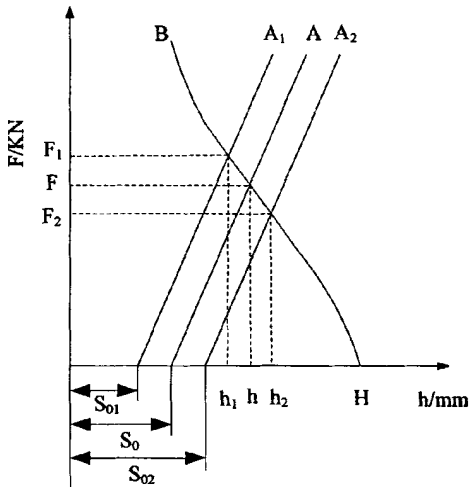


图 2.2 $F-h$ 图
Fig. 2.2 $F-h$ diagram

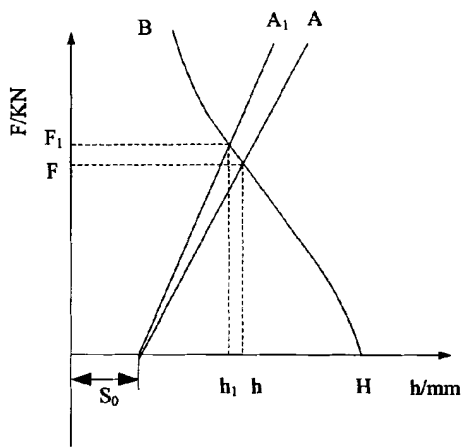
2.1.3 厚度波动原因

由轧机 $F-h$ 图可见，一切影响两条曲线交点位置的因素都将影响轧件的出口厚度。也就是说，轧件的出口厚度主要取决于空载辊缝、轧机刚度、轴承油膜厚度、轧件入口厚度、轧件变形抗力等因素^[41-43]。利用 $F-h$ 图可以形象地分析这些因素造成带材出口厚差的原因。

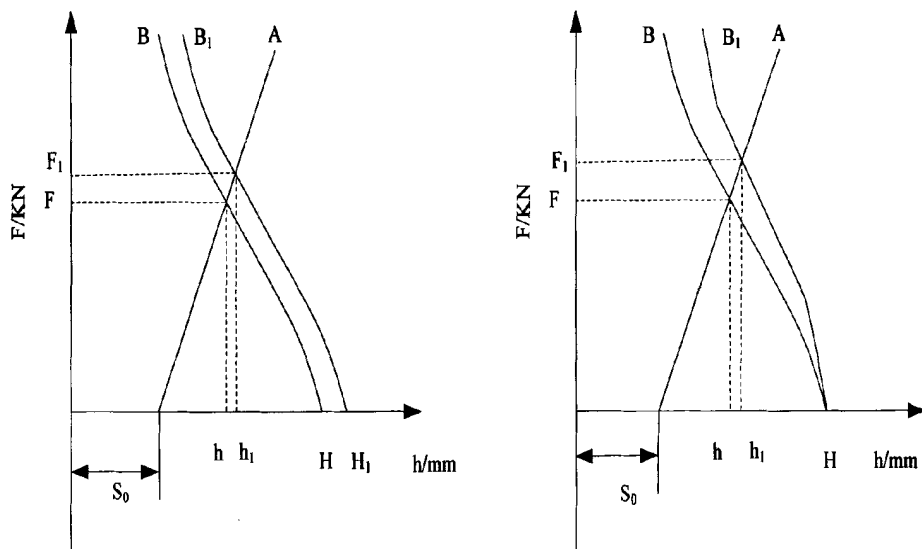
(1)空载辊缝设置的变化 轧辊的偏心、磨损和热膨胀等都会使实际空载辊缝 S_0 发生变化，使轧件出口厚度产生波动。如图2.3(a)所示，当空载辊缝 S_0 变化到 S_{01} 或 S_{02} 时，弹跳曲线位置将由 A 平移到 A_1 或 A_2 ，当轧机达到新的平衡时，轧制力增加到 F_1 或降低到 F_2 ，轧件的出口厚度变化到 h_1 或 h_2 。



(a) 空载辊缝对轧件厚度的影响
(a) Influence of roller gap



(b) 轧机刚度对轧件厚度的影响
(b) Influence of rolling mill rigidity



(c) 入口厚度对轧件厚度的影响
(c) Influence of enter thickness

(d) 变形抗力对轧件厚度的影响
(d) Influence of distortion defly

图2.3 各种因素对轧件厚度的影响
Fig. 2.3 Influence factors to strip thickness

(2)轧机刚度模数的变化 轧机刚度的变化相当于弹性曲线A的斜率发生了变化。如图2.3(b)所示,增大轧机刚度就如同增大弹性曲线A的斜率,使轧机的弹性变形量减少。而当轧机达到新的平衡点时,轧制力随之增大到 F_1 ,而轧件出口厚度却降至 h_1 。可见,提高轧机的刚度将有利于轧出更薄的板带材^[44]。

(3)轴承油膜厚度的变化 轧辊轴承油膜厚度随轧制速度的增大而增大,从而使得空载辊缝变小。因此,轧辊轴承油膜厚度对轧件厚度的影响机理与空载辊缝变化对轧件厚度的影响机理相同^[45]。

(4)轧件入口厚度的变化 增大来料厚度,则塑性曲线B向右平移,轧制压力增大,导致轧件的出口厚度增大到 h_1 ,如图2.3(c)所示。

(5)轧件变形抗力的波动 轧件变形抗力的变化相当于塑性曲线B的斜率发生变化。当变形抗力增大时,塑性曲线斜率增大,轧制压力增大,当达到平衡状态时,轧件的出口厚度变厚。如图2.3(d)所示。

2.1.4 消除厚差方法

根据厚度偏差的大小,计算出调节量,输出控制信号;其次,根据控制信号,完成调节过程。前者称为AGC运算,属于AGC系统;后者由电机、液压缸等执行机构执行,执行机构如何完成这一任务,由自动位置控制系统也称为APC(AutomaticPositionControl)系统来解决。APC不属于AGC系统,所以AGC的基本系统只包括两个环节,即厚度

偏差的检测和 AGC 运算。

常用的厚度控制方式有调整压下、调整张力和调整轧制速度等，其原理都可通过 $F-h$ 图加以说明。

(1)调整压下 调整压下是厚度控制的最主要和最有效的方式，它是通过改变空载辊缝的大小来消除各种因素的变化对轧件厚度的影响^[46]。

图 2.4(b)为消除张力、摩擦系数和变形抗力变化影响的厚控原理图。当由于这些因素的影响(单独作用或同时作用)，使塑性曲线由 B 变到 B_1 时，轧件厚度 h 就有一个增量 Δh 。为了消除这一厚度偏差 Δh ，调整压下使空载辊缝减小 ΔS_0 。弹跳曲线由 A 变到 A_1 ，就可使轧后轧件厚度恢复到 h 。

(2)调整张力 在连轧机上，除了调整压下进行厚控外，还可以通过改变前后张力来进行厚控。如图 2.5 所示，当来料厚度 H 有一偏差 ΔH 时，轧后轧件厚度 h 将产生的偏差为 Δh 。在空载辊缝不变的情况下，通过加大张力，使塑性曲线的斜率发生变化，由曲线 B_1 变为曲线 B_2 ，从而消除厚度偏差 Δh ，使轧后轧件厚度 h 保持不变。

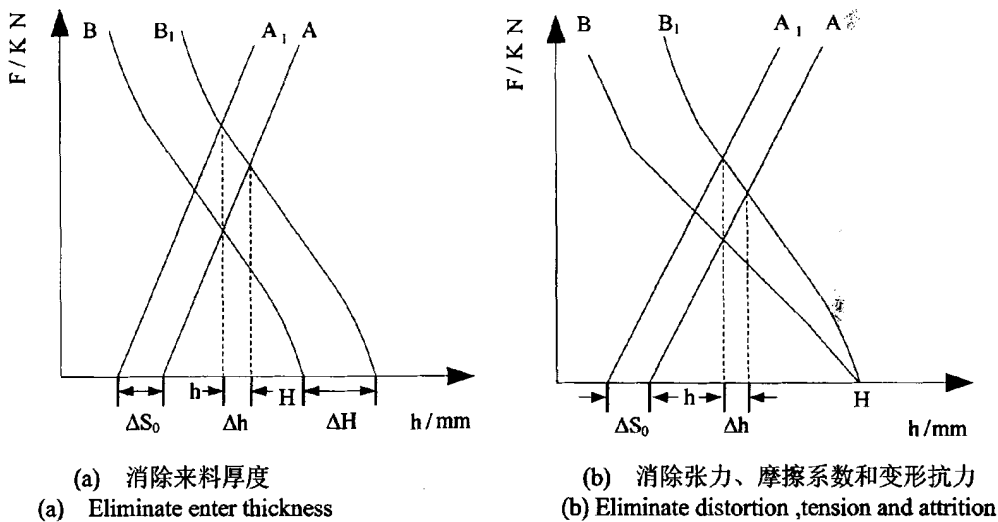


图 2.4 调整压下厚控原理图
Fig. 2.4 Principle diagram of gauge control through adjusting press

张力厚控的优点是反应速度快且易于稳定，可使厚度控制更精确。其缺点是对冷轧较薄的带材时，为防止拉断轧件，张力变化范围不能过大。冷轧时，往往把调压下厚控与张力厚控配合使用。当厚度偏差较小时，在张力允许范围内采用张力微调；当厚度偏差较大时，则采用调压下进行厚度控制。

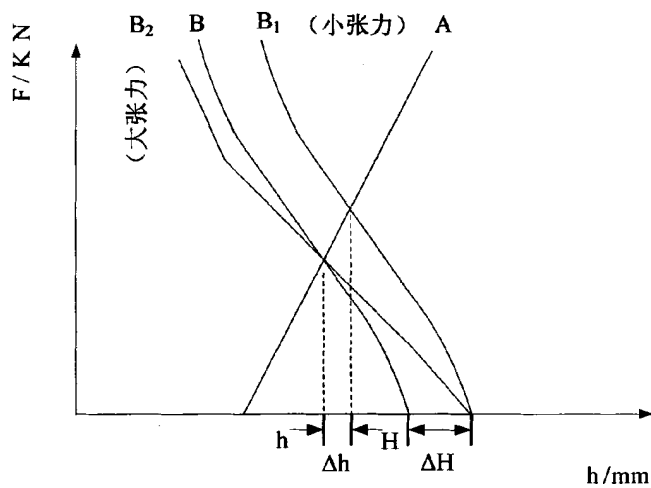


图 2.5 调整张力厚控原理图

Fig. 2.5 Principle diagram of gauge control through adjusting tension

(3)调整轧制速度 通过调整轧制速度可以起到调整轧制温度、张力和摩擦系数的作用，从而改变塑性曲线的斜率，达到厚度控制的目的。调速厚度控制的原理图如图 2.5 所示。

2.2 AGC 系统组成

一个完整的 AGC 系统由若干个厚度自动控制系统组成，其中最基本的是位置闭环控制系统(液压 AGC 系统)，还有测厚仪式 AGC 系统、厚度计式 AGC 系统、前馈式 AGC 系统、流量 AGC 系统和张力 AGC 系统等。

(1)位置闭环控制系统 为了轧出给定厚度的轧件，首先必须在轧件进入辊缝之前正确地设定空载辊缝。其次，在轧制的过程中，为了使轧出的轧件厚度均匀一致，还必须随着轧制条件的变化及时地调整空载辊缝的大小。这些都是通过正确地设定和控制液压缸位移(位置)来实现的。位置闭环控制系统的作用就是准确地控制液压缸位移，达到设定和控制空载辊缝的目的。它是整个厚度控制的基础。

在APC系统中，液压缸活塞相对缸体的位移由位移传感器检测。为了消除活塞相对缸体摆动的误差，通常在缸体的两侧对称位置安装两个位移传感器，取其平均值作为实测位移值。位移传感器检测出来的电压信号，负反馈到信号输入端，与给定电压信号相比较，如有偏差 Δu ，则通过调节器及功率放大器处理并转换为电流信号 Δi 送给电液伺服阀。伺服阀获得电流信号 Δi 后，转换成液压油的流量 ΔQ 送给压下油缸，再由油缸变为柱塞位移，一直到反馈值 S_{pc} (实测值)与给定值 S_{pg} 相等为止。这就是液压缸位置闭环控制的调节过程。图2.6为位置闭环控制原理图。

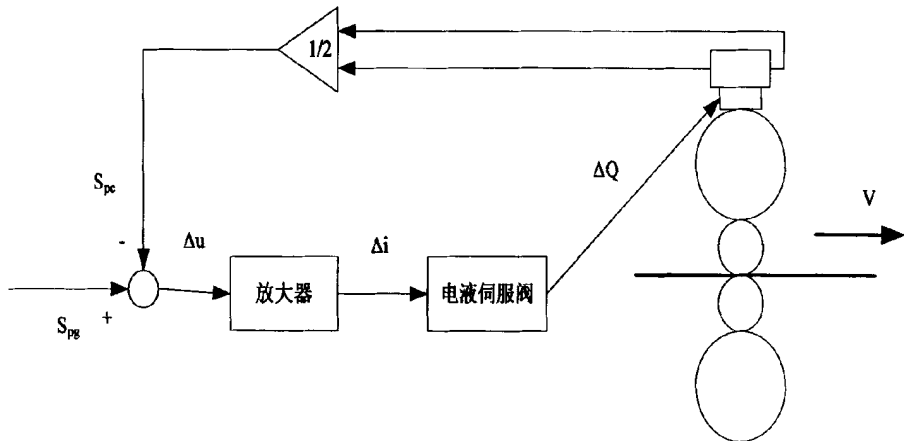


图2.6 位置闭环控制原理图
Fig. 2.6 Principle diagram of hydraulic cylinder position close-loop control

由于空载辊缝不仅受压下位移的影响，而且还受轧辊的磨损、热膨胀及偏心的影响，所以测量压下位移还不能准确的反映空载辊缝的大小。这是压下位置闭环的不足之处。

(2)测厚仪式AGC系统 测厚仪式AGC就是利用X射线测厚仪直接检测出实际轧出厚度并与给定厚度值相比较，得到厚度偏差 Δh ，当二者数值相等时， $\Delta h = 0$ 。若实测厚度值与给定厚度值相比较出现厚度偏差 Δh 时，反馈给厚度自动控制装置进行相应的调节，以消除此厚度偏差^[53]。测厚仪式AGC系统结构如图2.7所示。

测厚仪式 AGC 的控制算法为：

$$\Delta S = \frac{M+Q}{M} \cdot \Delta h = \left(1 + \frac{M}{Q}\right) \cdot \Delta h \tag{2.8}$$

式中 Δh ——出口厚度； ΔS ——辊缝调节量； M ——轧机模数； Q ——轧件塑性系数。

式(2-8)表示，为了消除带钢的厚度偏差 Δh ，则必须使辊缝移动 $\frac{M+Q}{M} \cdot \Delta h$ 的距离。当 $\frac{M}{Q}$ 为一定值时，即 $\frac{M+Q}{M} \cdot \Delta h$ 为常数，则 ΔS 与 Δh 便成正比关系，只要检测到厚度偏差 Δh ，便可以计算出为消除此偏差应作出的辊缝调节量 ΔS 。

测厚仪式AGC能准确地测出实际厚度进行反馈控制。但是由于轧机结构的限制、测厚仪的维修需要以及防止断带损坏测厚仪，因此测厚仪的安装点离辊缝有一段距离，所以存在一段大时间滞后，难以进行稳定控制，使测厚仪式AGC不适用于厚度快速变化情况。但由于射线式测厚仪可以满足高性能AGC对厚度检测精度的需要，所以测厚仪式AGC并没有消失，它被广泛用作监控AGC。因此常给厚度计式ACC、秒流量AGC作慢监控处理，保证轧出厚度不跑飞。

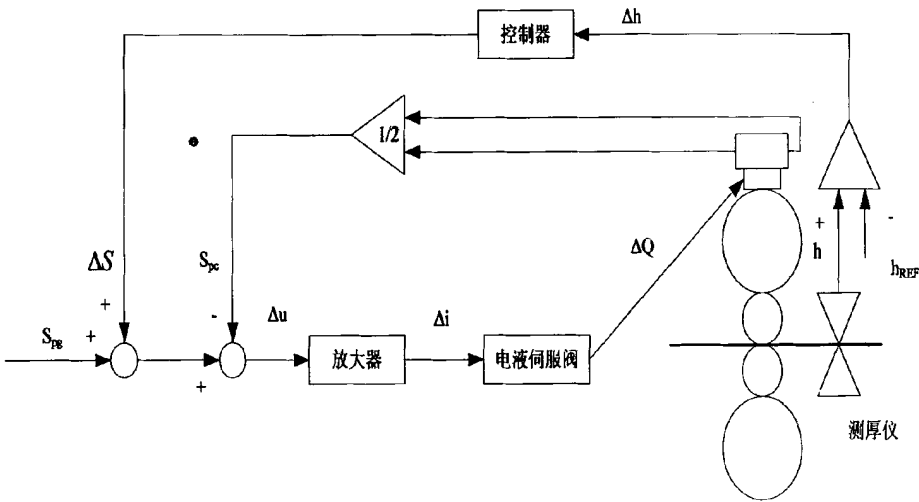


图 2.7 测厚仪式 AGC 系统原理图
Fig. 2.7 The schematic diagram of AGC system in Gauge mode

(3)厚度计式AGC系统 在轧制过程中，任何时刻的轧制力 F 和空载辊缝 S_0 都可以检测到，因此，可用弹跳方程 $h = S_0 + \frac{F}{M}$ ，计算出任何时刻的出口厚度 h 。在这种情况下，就等于把整个机架作为测量厚度的“厚度计”，这种检测厚度的方法称为厚度计或 GM(Guage Meter简称GM)方法。根据轧机弹跳方程测得的厚度和厚度偏差信号进行厚度自动控制的系统称为厚度计式AGC，简称GM-AGC^[54-56]。GM-AGC系统结构图如图2.8所示。厚度计式AGC系统控制算法：

$$\Delta S = \frac{M + Q}{M} \cdot \Delta h \tag{2.9}$$

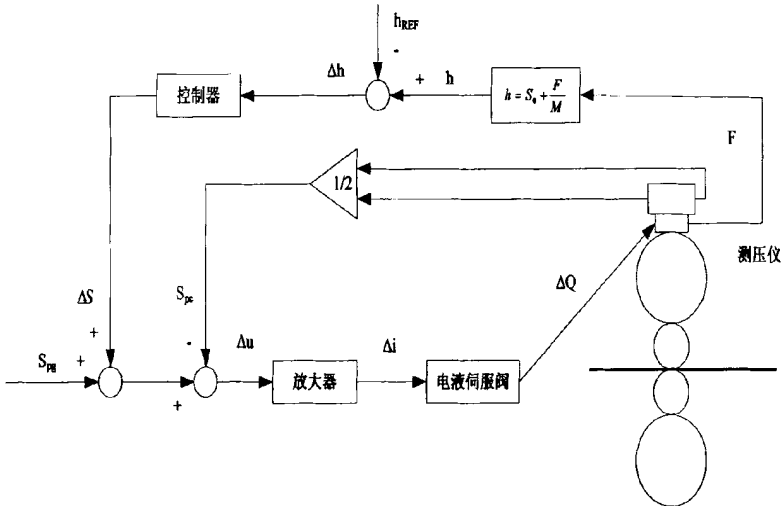


图 2.8 GM-AGC 系统原理
Fig. 2.8 The schematic diagram of GM-AGC system

GM-AGC 能在变形区出口处估计轧件厚度，快速性好，系统结构简单。目前在各

种轧机上都有广泛的应用，特别在厚板轧机的厚控系统中更是主流。

我国的 AGC 系统大部分是 GM-AGC 形式的。但是，GM-AGC 存在以下主要缺点，这也是限制它在高精度轧机上的成功应用的原因。

1) 辊系的数学模型复杂而且高度非线性，轧机模数很难准确知道，必须在每个静态和动态轧制过程中不断修正；

2) GM-AGC 不可能精确地测出轧件出口厚度，估计的精度决定于计算模型和方程中系数的准确程度；

3) GM-AGC 对辊缝波动引起的误差有扩大作用，实际应用中需要对引起辊缝波动的因素如轧辊偏心、热膨胀、轴承油膜厚度等进行补偿。然而这些因素的数学模型又很难准确知道，限制了 GM-AGC 的精度；

4) 压力传感器存在精度误差，这也是 GM-ACC 误差产生的原因之一。

(4) 前馈式 AGC 系统 由于反馈式 AGC 都避免不了控制上的传递滞后或过渡过程滞后，因而限制了控制精度的进一步提高。特别是当来料厚度波动较大时，更会影响带钢的实际轧出厚度的精度。为了克服此缺点，现代连轧机上广泛使用前馈式厚度自动控制系统，简称前馈式 AGC。

前馈式 AGC 的控制原理就是在带钢未进入本机架之前测量出其入口厚度 H 并与给定厚度值 H_{REF} 相比较，当有厚度偏差 ΔH 时，便预先估计出可能产生的轧出厚度偏差 Δh ，从而确定为消除此偏差所需要的辊缝调节量 ΔS ，然后根据检测点进入本机架的时间和移动 ΔS 所需的时间，提前对本机架进行厚度控制，使得厚度的控制点正好就是 ΔH 的检测点。前馈式 AGC 原理如图 2.9 所示。

图 2.9 中 0、1、2、3.....n-1、n——采样点； L_1 ——采样点与测厚仪之间的距离； L ——测厚仪与轧机之间的距离； H_{REF} ——入口厚度基准值； H ——入口厚度值； ΔH ——入口厚度厚差； ΔS ——辊缝调节量。

前馈 AGC 的控制算法为：

$$\Delta S = \frac{Q}{M} \cdot \Delta H \quad (2.10)$$

式中各变量对应为： ΔH ——入口厚度厚差； ΔS ——辊缝调节量； Q ——轧件塑性系数； M ——轧机模数。

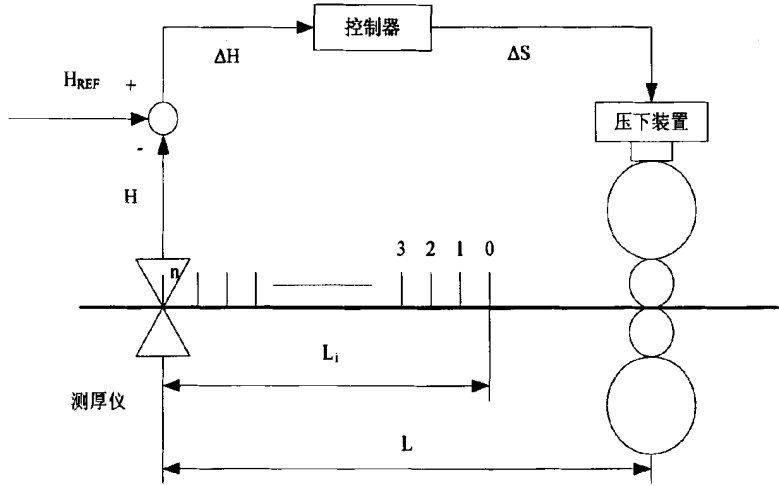


图 2.9 前馈式 AGC 系统原理图

Fig. 2.9 The principle diagram of feedforward AGC system

在前馈 AGC 中，对入口带钢厚差 ΔH 的检测点才是真正需要的厚度控制点。所以必须准确的计算出检测点达到本机架压下位置的时间和辊缝调整所需的时间，使得厚度的控制点正好就是 ΔH 的检测点。以下是对轧件从测厚仪焦点运行到一架辊缝所需要的时间计算：

(1)若带材入口速度代恒定，由图 2.9 可知，轧件从测厚仪焦点运行到一架辊缝所需要的时间 T_d 为：

$$T_d = \frac{L}{V_e} \quad (2.11)$$

式中 L ——测厚仪与轧机之间的距离； V_e ——轧件入口速度。

由于检测时间超前，检测到厚差后不能直接送到控制器，而要送到延时器，经适当延时后，再送到控制器。这相当于对检测点进行跟踪，当其到达辊缝时，再令压下动作。但是检测不能瞬时完成，压下执行机构也需要一定的动作时间，因此，如果延时时间恰好等于 T_d ，则不会得到良好的控制效果，应有相应的超前时间。

设由于液液压压下响应时间所需延时超前时间为 T_A ，测厚仪响应时间所需延时超前为 T_M ，则实际延时时间为：

$$T_D = T_d - \Delta T \quad (2.12)$$

式中 $\Delta T = T_A + T_M$ 。

(2)若带材速度不恒定，则可利用积分器计算带钢由入口测厚仪前进的距离 L_1 ：

$$L_1 = \int_0^t V_e(t) dt = \sum_{i=0}^{n-1} V_e(i) T_{sa} \quad (2.13)$$

式中 t ——采样点 0 从测厚仪前进 L_1 距离所需时间； T_{sa} ——采样周期； V_e ——轧件入口速度； L ——测厚仪与轧机之间的距离。

若 $L_1 \geq L - \Delta$ ，则压下机构动作；若 $L_1 < L - \Delta$ 则压下机构不动作。其中， Δ 为超前量。

前馈 AGC 在控制时间上优越，不存在延迟，适用于各种形式的轧机，结构简单，投资少，可提高系统的可控性。但是，前馈 AGC 属于开环控制，不能保证厚度控制精度，不能单独使用，需要与带有反馈式 ACC 系统混合使用。

(5)流量 AGC 系统 秒流量 AGC 是目前现代化冷连轧生产线上配备的一种先进厚度控制方法，可以在冷连轧机组任何一个机架上使用。按厚度控制调整手段可分为：辊缝秒流量 AGC 和张力秒流量 AGC。其基本原理是：稳态连轧过程中各机架间秒流量应保持恒定，即机架入口厚度与出口厚度之比应等于出口速度与入口速度之比。流量 AGC 的基本数学模型是秒体积流量恒定方程，所谓秒体积流量恒定就是单位时间流入机架入口和流出机架出口的轧件体积相等，即：

$$B_e V_e H = B_s V_s h \quad (2.14)$$

式中： B_e ——机架入口轧件宽度； B_s ——出口轧件宽度； H ——入口轧件厚度； h ——出口轧件厚度； V_e ——入口轧件速度； V_s ——出口轧件速度。

由于在轧制过程中，带钢宽度变化很小，可以近视认为 $B_e = B_s$ ，所以：

$$V_e H = V_s h \quad (2.15)$$

式(2.15)即为常用的秒体积流量恒定方程，简称秒流量方程。

由式(2.15)得：

$$h = \frac{V_e}{V_s} \cdot H \quad (2.16)$$

可见，只要能直接检测机架入口、出口的带材速度和入口的带材厚度，即可间接测得机架出口厚度。用这种方法检测带材厚度而构成的 AGC 方式称为流量 AGC。流量 AGC 系统原理如图 2.10 所示。

图 2.10 中 H ——入口厚度； V_e ——入口速度； V_s ——出口速度； ΔS ——辊缝调节量； h_{REF} ——出口厚度基准值； Δh ——出口厚差。

秒流量 AGC 系统控制精度高，适应范围广，是目前微米级 AGC 中广泛使用的一种 AGC 方式。但是由式(2.16)可看出秒流量 AGC 系统要求精度很高的测速系统，这是保证其高精度的关键。

(6)张力 AGC 系统 张力 AGC 是利用改变轧机前后张力来改变轧件的塑性系数，以达到对带钢厚度进行控制，一般来说，张力 AGC 是用来调节小幅度厚度波动。随着轧件的厚度减薄，调压下的效果越来越弱，消除较小的厚度偏差需要很大的压下调节量；相反，张力 AGC 的调节效果则相应的提高，即使在总张力变化范围不变的情况下，控制范围也扩大了。另外，随着轧件的减薄，轧制速度相应升高，过大的压下调节会造成

板形不良，因此连轧机的最后机架也常采用张力调厚。

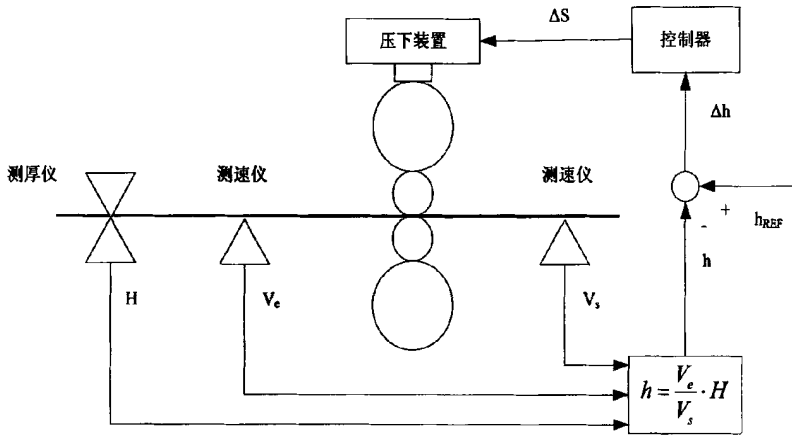


图 2.10 流量 AGC 原理图

Fig. 2.10 The schematic diagram of Mass Flow AGC system

张力 AGC 调整张力的方法有两种，即调节主传动速度和调节活套转矩。冷连轧机张力 AGC 系统结构如图 2.11 所示。图 2.11 中 ΔT ——张力调节量； S_0 ——任全载辊缝基准值； h_{REF} ——出口厚度基准值； F ——轧制力； M ——轧机模数； Δh ——出口厚差。

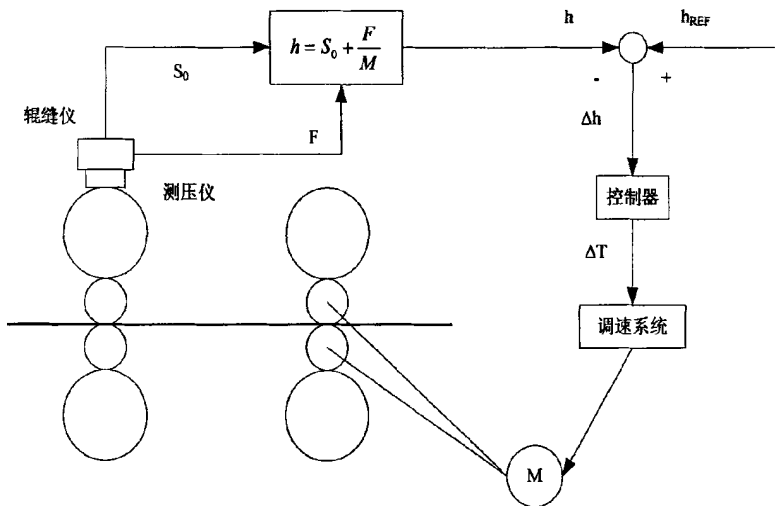


图 2.11 张力 AGC 系统结构

Fig. 2.11 The schematic diagram of AGC system with tension mode

张力 AGC 控制算法为：

$$\Delta T = \frac{M + Q}{\partial F / \partial T} \cdot \Delta h \quad (2.17)$$

张力 AGC 可有效地消除因塑性系数变化引起的厚度偏差和幅值小的厚度偏差，响应速度快，控制精度高，并可减小轧制力波动，有利于保持板形。

2.3 冷连轧 AGC

冷连轧厚度控制与热连轧厚度控制相比不利之处在于冷轧带钢较薄以及由于加工硬化使材料硬度加大,压下效率较低,因而增加了调节厚度的困难。加上由于机架间不存在活套,各机架的动作(压下控制或速度控制)都将会通过机架间张力影响到其他机架的参数使控制更为复杂。但冷连轧 AGC 系统在以下方面比热连轧有利:

(1)机架间不存在活套并采用大张力轧制,因此考虑张力影响的流量方程比较符合实际。

(2)仪表设置齐全,不仅设有测量成品厚度的测量仪,在机架间以及第一机架前设有测厚仪为精确获得各机架出口厚度创造了良好的条件。

(3)带速激光测速仪的应用使利用变形区内流量相等准则精确获得变形区瞬时出口厚度偏差。

以五机架冷连轧机组为例,冷轧 AGC 系统分为第一、第二机架的粗调 AGC 和第四、第五机架的精调 AGC,第三机架一般作为基机架。粗调 AGC 的主要目的是基本上消除来料厚度波动,减少偏心造成的厚度周期波动,而精调 AGC 则根据成品测厚信息进行成品精度的最终控制。由于冷连轧机架间采用张力轧制,在稳定状态下能较好地满足有张力影响的流量恒等法则,冷连轧 AGC 普遍采用以下原则。

(1)恒速度比控制,在轧制品种规格确定的条件下(厚度分配已确定后)严格控制各机架速度并使其保持恒定比例,由此保证各机架出口厚度。速度比固定的情况下一旦厚度有变动将会使张力波动。为此应提高各机架主传动的静态品质。特别是静态精度并使其具有较硬的特性。

(2)通过调节辊缝保持张力恒定。这与热轧不同,张力控制不是调节速度而是调节下一机架的辊缝,理由是破坏秒流量或张力恒定的原因主要来自厚度变动。

冷连轧 AGC 可有以下几种方案,这主要决定于仪表的配置。

(1)一般都在第一机架前和后以及第五机架后设置测厚仪,但也有些轧机在第二机架后以及第四、第五机架间设置测厚仪,甚至在每个机架的前后都设置测厚仪,因此可用于更多机架的前馈、监控控制。

(2)每个机架都设有测压仪,在传统 AGC 系统中第一机架往往采用压力 AGC(有载辊缝反馈控制),压力仪亦将用于各机架的压力内环闭环控制。

(3)液压缸位置传感器用于位置控制,冷连轧一般都同时设有位置内环和压力内环,供操作人员选用。位置环还将用于穿带前或变规格时的辊缝调节(液压 APC)以及轧机压

靠和轧辊调平等功能。穿带后在 AGC 系统投入前再决定是否切换到压力内环。

(4)各机架前后都设有测张力装置。通过调节下一机架的辊缝来保持张力恒定。

(5)带速激光测速仪是近年来推出的新仪表,随着激光测速仪的采用(与测厚仪配套设置)冷连轧 AGC 系统普遍采用流量 AGC 方案。

(6)第一机架设有轧辊角度测量,一般采用单脉冲或每转 60~120 脉冲的编码器,以对轧辊角度定位,这主要用于偏心控制(确定偏心信号的初相角)。

AGC 系统仅从厚度偏差出发来控制厚度是不完善的,应更多地从硬度变动出发来控制厚度,应该说造成成品厚差的主要原因是硬度波动,而不是来料厚度波动。另外,在设计冷连轧 AGC 系统时应该注意到它和其他质量控制的关系,特别是和板形控制的相互影响。

2.4 本章小结

本章内容是全文的理论基础,主要讨论了板带轧机厚度控制基本原理和基本方法。首先根据弹塑曲线分析了厚度波动的原因,并把这些因素的变化都反映到 $F-h$ 图的变化上,进而给出消除或减小厚度波动的方法,即厚度控制的方式,如位置闭环控制,测厚仪监控,厚度计式闭环控制,前馈控制,流量控制和张力控制。并分析了冷连轧 AGC 系统的基本原理和基本环节。

第3章 五机架冷连轧厚度系统建模

冷连轧过程是一个非线性、不确定和时变的复杂系统,由于轧件同时在两个以上顺序布置的轧机上进行轧制,从而把整个机组的机械、电气设备联成一个整体,使轧制过程的机械、电气设备参数和工艺参数形成相互联系、相互影响的关系。任何扰动(来料厚度、来料硬度以及轧辊偏心等),任何控制(辊缝、滚速等)都将通过机架间张力和出口厚度的变化,瞬时或延时地把这种变化的影响“顺流”与“逆流”地传递给前面和后面的机架,最终使成品厚度、凸度、平坦度等发生误差。为了精确地调整连轧机,使其在最优工况下工作,就必须综合分析各种参数之间的定量关系,特别是研究在扰动量和控制量的作用下整个机组运行状态的变化规律。本章结合首钢迁钢公司冷轧1450mm五机架酸洗冷连轧机项目的设计要求,研究了在扰动量和控制量的作用下整个机组运行状态的变化规律将在综合考虑入口来料厚度、辊缝、轧辊速度、摩擦系数、变形抗力对冷连轧机各机架出口板厚的影响基础上,分析首钢迁钢冷连轧过程的静、动态特性,建立五机架冷连轧的静态模型、动态模型,对由扰动量或控制量引起的成品厚度的变化进行定量的分。

3.1 首钢迁钢冷连轧机的主要技术规范

(1) 轧机速度:1号轧机的入口速度:最大 300 m/min; 5号机架出口的卷取速度:最大 1,260 m/min; 5号机架的轧制速度:最大 1,200 m/min, 带钢切分速度:最大 300 m/min; 加速度/减速度比: 60 mpm/sec, 停机时间, (1260-0 m/min), 正常停: 20 秒, 快停: 12 秒, 急停: 8-10 秒

(2) 尺寸:工作辊: $\phi 425 - \phi 385$ mm 直径 X 1,450 mm (排除155mm 斜面长度), 轧辊辊身硬度: 93°to 95°Shore D-scale, 中间辊: $\phi 490 - \phi 440$ mm 直径X 1,450 mm (排除50 mm斜面长度)轧辊辊身硬度: 80°to 82°Shore D-scale, 支撑辊: $\phi 1,300 - \phi 1,150$ mm直径X 1,420 mm, 轧辊辊身硬度: 64°to 68°Shore D-scale

(3) 轧制速度最大轧制速度: Max. 1,200 m/min (最小工作辊直径下), 最大卷曲速度: Max. 1,260 m/min 带钢分离速度: Max. 300 m/min, 穿带速度: 50 m/min

(4) 工艺流程如图 3.1 所示。

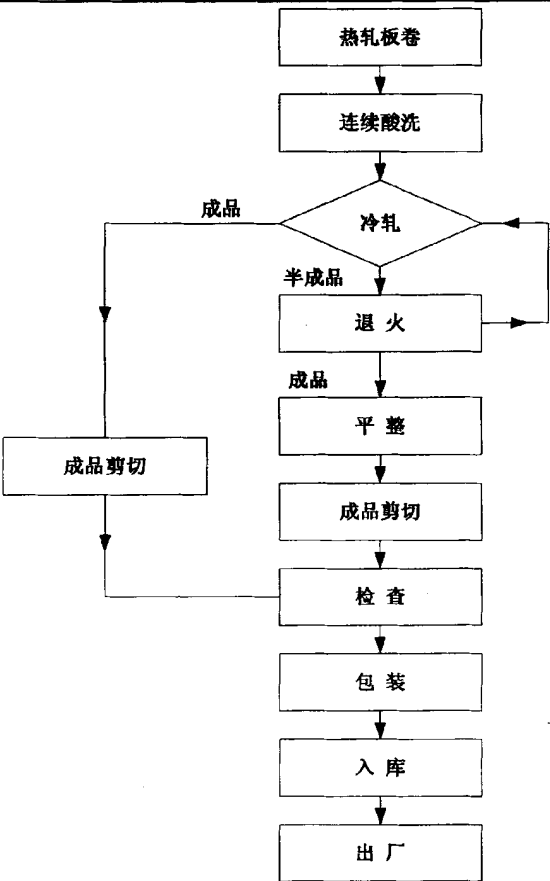


图 3.1 工艺流程图
Fig. 3.1 Process Flow Diagram

(5) 迁钢公司冷连轧厚度自动控制系统如图 3.2。

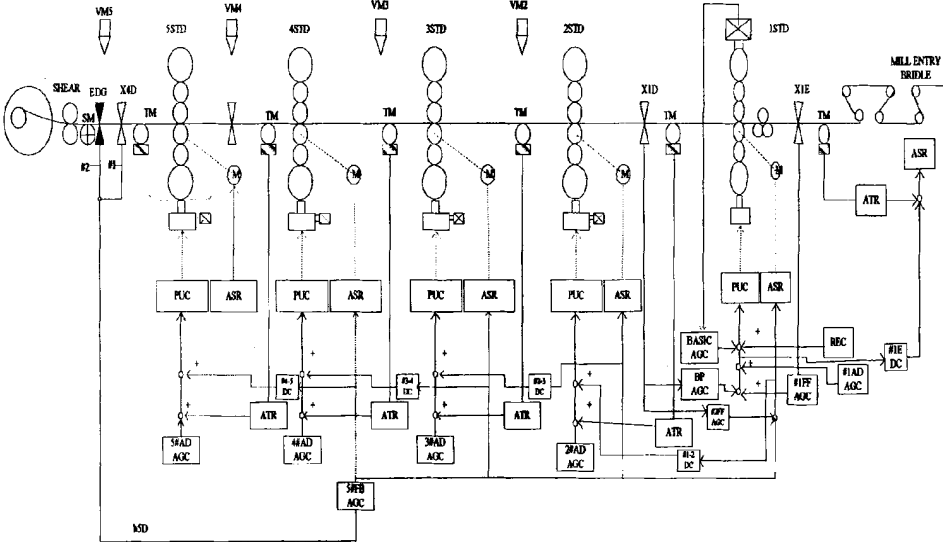


图 3.2 冷连轧厚度自动控制系统图
Fig. 3.2 Tandem Clod AGC System

3.2 冷连轧静态分析

所谓静态分析是指任何一个扰动或控制动作破坏原有的稳态,使各参数发生变化,当不再有新的扰动或控制动作时,所产生的各种变化经过一定时间后将结束其动态过程而使整个对象进入一个新的稳态。如果不研究其过渡过程,仅从原有稳态变动到新的稳态的结果进行分析,称为静态综合分析,常用的静态分析方法为影响系数法^[36]。

3.2.1 静态模型基本方程

(1)秒流量方程 连续轧制在稳定状态下进行时,轧件秒流量在通过所有机架时均为定值,该关系为(板带轧制时,由于冷连轧机各机架的板宽变化不太大,可假设轧件的宽度通过各机架是一定的):

$$v_i \cdot h_i \cdot B = U \quad (3.1)$$

式中: v_i ——第*i*机架轧机出口轧件的速度; h_i ——第*i*机架出口轧件的厚度; B ——轧件宽度; U ——秒流量; i ——表示机架序号的下标。

(2)速度方程 轧辊出口侧轧件的速度取决于前滑率和轧辊速度。

$$v_i = (1 + f_i) \cdot v_{Ri} \quad (3.2)$$

式中: f_i ——第*i*架轧机轧件的前滑率; v_i ——第*i*架轧机轧件的速度; v_{Ri} ——第*i*架轧机的轧辊速度。

$$f_i = f(H_1, H_i, h_i, t_{fi}, t_{bi}, \mu_i, \sigma_i) \quad (3.3)$$

式中: H_1 ——来料厚度; H_i ——各机架入口板厚; h_i ——各机架出口板厚; t_{fi} ——各机架前张力; t_{bi} ——各机架后张力; μ_i ——摩擦系数; σ_i ——变形抗力。

前滑率的具体理论公式采用 Bland 和 Ford 公式。轧辊速度采用考虑电机速度特性的表现形式,本文中用下列公式:

$$\left(\frac{\Delta v_R}{v_R}\right)_i = \frac{\Delta(R_i N_i)}{R_i N_i} + Z_i^* \Delta G_i \quad (3.4)$$

式中: R_i ——第*i*机架轧辊半径; N_i ——第*i*机架轧辊转数设定值; G_i ——第*i*机架轧制力矩; Z_i^* ——第*i*机架轧制力矩增加造成的电机速度下降系数。

(3)厚度方程

$$h_i = S_i + \frac{F_i}{M_i} \quad (3.5)$$

式中: S_i ——第*i*机架轧辊辊缝; F_i ——第*i*机架轧机的轧制力; M_i ——第*i*机架轧机的刚性系数。

一般常用 Hill 提出的轧制压力理论公式:

$$F_i = F(H_1, H_i, h_i, t_{fi}, t_{bi}, \sigma_i, \mu_i, B) \quad (3.6)$$

式中: H_1 ——来料厚度; H_i ——各机架入口轧件厚度; h_i ——出口轧件厚度; t_{fi} ——前张力; t_{bi} ——后张力; μ_i ——摩擦系数; σ_i ——变形抗力; B ——轧件宽度。

3.2.2 基本方程的微量变化方程

静态综合分析由于只对从一个稳态变到另一个稳态后的结果进行分析而不注意变化的过渡过程,可以不必考虑所有执行机构的动特性。加上我们感兴趣的是某一扰动量或控制变量变动后其他参数将发生的变动,因此可采用微量形式的代数方程组,避免了求解非线性方程组。下面分别求出三个基本方程的微量变化方程。

(1)由式(3.1)可得秒流量微量变化方程为:

$$\left(\frac{\Delta v}{v}\right)_i + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)_i + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)_i = \left(\frac{\Delta U}{U}\right)_i \quad (3.7)$$

(2)由式(3.2)、式(3.3)可得方程中各变量的微量方程为:

$$\left(\frac{\Delta v}{v}\right)_i = \frac{\Delta f_i}{1+f_i} + \frac{\Delta v_{Ri}}{v_{Ri}} \quad (3.8)$$

$$\Delta f_i = \left(\frac{\Delta f}{\Delta H_1}\right)_i \Delta H_1 + \left(\frac{\Delta f}{\Delta H}\right)_i \Delta H_i + \left(\frac{\Delta f}{\Delta h}\right)_i \Delta h_i + \left(\frac{\Delta f}{\Delta t_b}\right)_i \Delta t_{bi} + \left(\frac{\Delta f}{\Delta t_f}\right)_i \Delta t_{fi} + \left(\frac{\Delta f}{\Delta \mu}\right)_i \Delta \mu_i + \left(\frac{\Delta f}{\Delta \sigma}\right)_i \Delta \sigma_i \quad (3.9)$$

其中, $i=1$ 时没有 $\left(\frac{\Delta f}{\Delta H}\right)_i \Delta H_i$ 项(以后同上)。

轧辊速度特性由式(3-4)可得微量方程为:

$$\left(\frac{\Delta v_R}{v_R}\right)_i = \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i + Z_i^* \Delta G_i \quad (3.10)$$

上式中的的轧制力矩 G_i 是来料厚度 H_i 、各机架入口厚度 H_i 、出口厚度 h_i 、前张力 t_{fi} 、后张力 t_{bi} 、摩擦系数 μ_i 、变形抗力 σ_i 、板宽 B 的函数。其微量方程为:

$$\Delta G_i = \left(\frac{\Delta G}{\Delta H_1}\right)_i \Delta H_1 + \left(\frac{\Delta G}{\Delta H}\right)_i \Delta H_i + \left(\frac{\Delta G}{\Delta h}\right)_i \Delta h_i + \left(\frac{\Delta G}{\Delta t_b}\right)_i \Delta t_{bi} + \left(\frac{\Delta G}{\Delta t_f}\right)_i \Delta t_{fi} + \left(\frac{\Delta G}{\Delta \mu}\right)_i \Delta \mu_i + \left(\frac{\Delta G}{\Delta \sigma}\right)_i \Delta \sigma_i + \left(\frac{\Delta G}{\Delta B}\right)_i \Delta B \quad (3.11)$$

根据式(3.8)、式(3.9)、式(3.10)、式(3.11)可得轧件速度微量方程为:

$$\left(\frac{\Delta v}{v}\right)_i = \sum_A \left[\frac{1}{1+f_i} \times A_i \left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)_i + Z_i^* A_i \left(\frac{\partial G}{\partial A}\right)_i \right] \left(\frac{\Delta A}{A}\right)_i + Z_i^* B \left(\frac{\Delta G}{\Delta B}\right)_i \left(\frac{\Delta B}{B}\right)_i + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i \quad (3.12)$$

式中 A 代表 H 、 h 、 t_b 、 t_f 、 μ 、 σ 。

(3)由式(3.6)可得轧制力的微量变化方程为:

$$\Delta F_i = \left(\frac{\Delta F}{\Delta H_1}\right)_i \Delta H_1 + \left(\frac{\Delta F}{\Delta H}\right)_i \Delta H_i + \left(\frac{\Delta F}{\Delta h}\right)_i \Delta h_i + \left(\frac{\Delta F}{\Delta t_b}\right)_i \Delta t_{bi} + \left(\frac{\Delta F}{\Delta t_f}\right)_i \Delta t_{fi} + \left(\frac{\Delta F}{\Delta \mu}\right)_i \Delta \mu_i + \left(\frac{\Delta F}{\Delta \sigma}\right)_i \Delta \sigma_i + \left(\frac{\Delta F}{\Delta B}\right)_i \Delta B \quad (3.13)$$

轧件出口厚度的微量变化方程为:

$$\left(\frac{\Delta h}{h}\right)_i = \left[\frac{1}{M_i - (\partial F / \partial h)_i} \right] \left[M_i \left(\frac{\partial S}{\partial h}\right)_i + \sum_A \left(\frac{\partial F}{\partial A}\right)_i \left(\frac{A}{h}\right)_i \left(\frac{\Delta A}{A}\right)_i \right] \quad (3-14)$$

式中 A 代表 H 、 h 、 t_b 、 t_f 、 μ 、 σ 。

3.2.3 冷轧影响系数法及稳态特性

式(3.7)、式(3.12)和式(3.14)对冷轧机的每个机架都成立, 因此对五机架冷连轧机而言可得到15个方程式。当稳定状态轧制受到外界因素影响时或是由人为的改变了轧制条件破坏了稳定状态, 其影响涉及到所有机架的轧机, 都经过过渡状态再到达下一个新的稳定状态。由于新旧稳定状态之间的关系能用式(3.7)、式(3.12)和式(3.14)描述, 求解该方程可以数值计算出由一个稳定状态到另一个稳定状态的关系。

关于轧制变量就冷连轧的性质有如是关系: $h_i = H_{i+1}$; $t_{fi} = t_{b,i+1}$ 。

对于五机架冷连轧机, 其轧制变量有: 各机架出口厚度的变化 $(\Delta h/h)_i$, $i=0\sim 5$, 其中 $i=0$ 表示来料厚度变化; 机架间张力的变化 $(\Delta t_f/t_f)_i$, $i=0\sim 5$, 其中 $i=0$ 表示轧件入口侧张力变化; 各机架轧件的变形抗力的变化 $(\Delta \sigma/\sigma)_i$, $i=1\sim 5$; 各机架摩擦系数的变化 $(\Delta \mu/\mu)_i$, $i=1\sim 5$; 各机架出口侧轧件的速度的变化 $(\Delta v/v)_i$, $i=1\sim 5$; 各机架轧机设定转速的变化 $(\Delta N/N)_i$, $i=1\sim 5$; 各机架辊缝的变化 $(\Delta S/h)_i$, $i=1\sim 5$; 板宽变化 $(\Delta B/B)$; 秒流量变化 $(\Delta U/U)$ 。

以上轧制变量的总数为39个, 由于一次方程有15个, 因此得到一个15次联立方程组。因轧制变量受到15维联立方程的约束, 在39个轧制变量中有24个变量可以独立变化, 剩下的15个变量根据15次联立方程组求解得出, 不能独立变化。因此在39个变量中有24个变量是独立变量, 15个变量是非独立变量。设非独立变量的矩阵为 X , 独立变量的矩阵为 B , 则式(3.7)、式(3.12)和式(3.14)可写成下方程:

$$AX = B \quad (3.15)$$

这时可以根据解析目的选择独立变量和非独立变量来计算各种轧制特性。例如, 当轧机各机架的辊缝、轧辊速度等变化时, 解析这时给轧件出口厚度、张力造成什么样的变化时, 首先设辊缝、轧辊速度等为独立变量, 设成品的厚度, 张力有关的变量为非独立变量, 求解式(3.15)即能得到要求的解。相反, 为求出改变产品厚度或机架间张力设定量所需的辊缝和轧辊速度等操作量时, 即可设产品厚度、机架间张力有关的轧制变量为独立变量, 轧制操作变量(辊缝、轧辊速度等)为非独立变量。

可以通过对影响系数的计算得到冷轧带钢轧机的各种轧制特性, 现将对轧机各机架出口板厚(产品板厚)的影响归纳如下。

(1)入口来料厚度的影响 入口来料厚度变化按比率影响各机架出口轧件厚度, 也就是如果入口侧来料厚度呈阶梯变化, 则第一机架出口轧件厚度将发生变化, 其比率也持续到后面机架。

(2) 辊缝的影响 辊缝变化对各机架轧件出口厚度的影响以第一机架最为显著, 而第二、第五机架的影响较小, 第三、第四机架几乎不受影响。因此通常采用改变第一机架辊缝的方法调节成品厚度。

(3) 轧辊速度的影响 轧辊速度对各机架轧件出口厚度的影响, 以第一机架、第五机架最为显著, 第二机架造成的影响很小, 第三、第四机架几乎不产生影响。

(4) 轧辊轧件间摩擦系数的影响 第一、第二机架的摩擦系数的变化对板带成品厚度造成的影响很大, 第三、第四、第五机架造成的影响小。

(5) 变形抗力的影响 第一机架轧件的变形抗力变化对板带产品厚度的影响大, 第二~第五机架的变形抗力变化对产品厚度影响不大。

3.3 五机架冷连轧动态模型

影响系数法仅是研究各参数从一个稳态变动到另一个稳态后的影响关系, 这对工艺方案的研究是十分有用的。但是, 当研究的问题涉及控制系统时, 例如不同方案的控制系统或不同的控制算法对成品质量的影响, 仅仅研究稳态是不够的, 更多的要集中到从一个稳态变动到另一个稳态的变动过程, 为此要引入时间, 建立各个环节的动特性, 必须考虑各个执行机构的动特性, 并应考虑各检测仪表的时间常数及测量误差, 因此需要采用动态仿真分析法。

3.3.1 变形区及机架间冷轧动态模型

动态连续轧制理论与静态连续轧制理论不同的是整个轧机中秒流量一定的关系在过渡阶段不成立, 而其他与静态特性分析几乎相同。在求解基本方程时有线性计算法和非线性计算法。线性计算法是对各轧制变量将基本方程式做泰勒级数展开, 取一次项进行计算的方法, 适合于计算稳定状态微小变化的情况^[57]。下面对冷连轧过程进行分析。

(1) 根据轧制力的辊缝弹计算性变化方程 作为轧制变量, 取入口板厚 H 、出口板厚 h 、前张力 t_f 、后张力 t_b 、辊缝 S , 将非线性方程式(3.5)线性化后得下列方程:

$$\Delta h_i = \frac{M}{(M - \partial F / \partial h)_i} \Delta S_i + \frac{(\partial F / \partial H)_i}{(M - \partial F / \partial h)_i} \Delta H_i + \frac{(\partial F / \partial t_f)_i}{(M - \partial F / \partial h)_i} \Delta t_{fi} + \frac{(\partial F / \partial t_b)_i}{(M - \partial F / \partial h)_i} \Delta t_{bi} \quad (3.16)$$

式中略去第一机架入口厚度对后边各参数的影响。

(2) 材料速度方程 轧件速度在轧辊入口最慢, 在轧辊咬入区随着板厚的减少被加速, 到轧机出口达到最快, 在中立点与轧辊速度 v_{Ri} 一致。以中立点速度为基准, 将轧辊出口速度的增加率表示为前滑率 f_i , 在轧机入口的速度降表示为后滑率 ε_i , 则轧辊入口和出口的轧件速度可用下式表示。

$$v_{out,i} = (1 + f_i) v_{Ri}$$

$$v_{in,i} = (1 + \varepsilon_i) v_{Ri} \quad (3.17)$$

将式(3-17)线性化后得到下述方程:

$$\begin{aligned} \Delta v_{out,i} &= v_{Ri} \left[\left(\frac{\partial f}{\partial H} \right)_i \Delta H_i + \left(\frac{\partial f}{\partial h} \right)_i \Delta h_i + \left(\frac{\partial f}{\partial q_b} \right)_i \Delta t_{bi} + \left(\frac{\partial f}{\partial q_f} \right)_i \Delta t_{fi} + D_i \right] + (1 + f_i) \Delta v_{Ri} \\ \Delta v_{in,i} &= v_{Ri} \left[\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial H} \right)_i \Delta H_i + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial h} \right)_i \Delta h_i + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q_b} \right)_i \Delta t_{bi} + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial q_f} \right)_i \Delta t_{fi} + D_i \right] + (1 + \varepsilon_i) \Delta v_{Ri} \end{aligned} \quad (3.18)$$

其中当 $i=1$ 时: $D_i=0$; 当 $i \neq 1$ 时: $D_i = \left(\frac{\partial f}{\partial H_i} \right)_i \Delta H_i$ 。

(3)机架间张力方程 机架间张力由该机架轧辊出口速度和前机架轧辊入口速度差的积分来求解, 入下式:

$$\Delta t_{fi} = \frac{E}{L_s} \int_0^t (\Delta v_{in,i+1} - \Delta v_{out,i}) dt \quad (3.19)$$

式中 E ——弹性模量、 L_s ——机架间距离。

(4)机架间的厚度延时方程 轧件从某轧机出来进入下一机架的时间取决于机架间的距离和轧件速度。对此采用拉普拉斯算子描述如下:

$$H_{i+1} = h_i e^{-s(L_s/v_{Ri+1})} \quad (3.20)$$

根据以上所得式(3.16)~(3.20)可以建立五机架变形区及机架间冷连轧动态模型如图3.3所示。

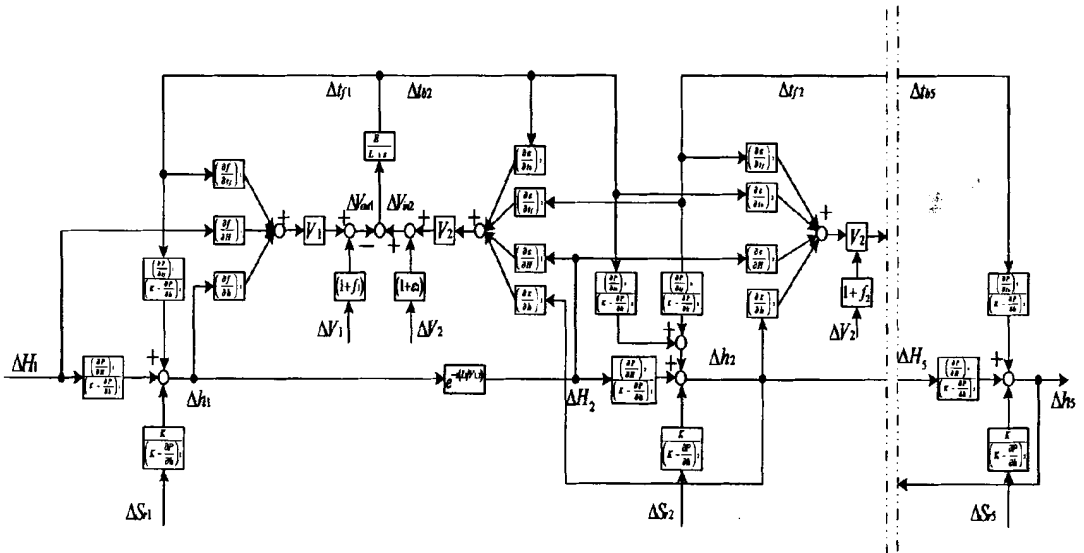


图 3.3 五机架变形区及机架间冷连轧动态模型
Fig. 3.3 Dynamic model of five stands cold continuous rolling

3.3.2 执行机构数学模型

AGC 系统由测厚仪测量带材的厚度构成反馈闭环控制系统。APC 系统由位移传感器测量液压缸位移量或测量轧辊辊缝的位移量构成反馈闭环控制。APC 系统作为 AGC

系统的内环，是一个高精度、高响应的液压位置闭环伺服系统，它的任务是接受厚控 AGC 的指令，进行压下缸的位置闭环控制，使压下缸实时准确地定位在指令所要求的位置。也就是说，液压 APC 是 AGC 的执行系统。其性能指标直接决定着 AGC 的指标，是 AGC 的核心。APC 系统的组成如图 3.4 所示下面通过机理分析建立液压 APC 的动态数学模型。

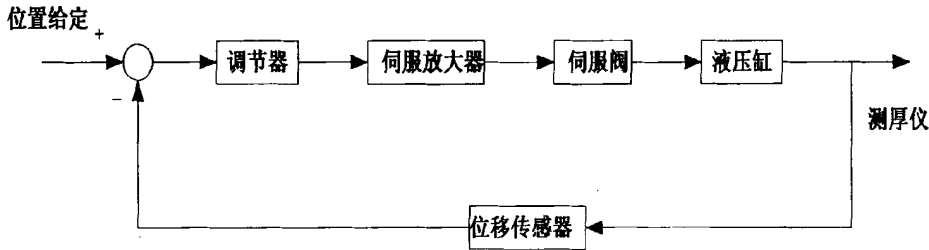


图 3.4 液压 APC 系统结构图

Fig. 3.4 Principle diagram of hydraulic cylinder position close-loop control

(1)伺服放大器 伺服放大器是将输入电压转化为电流，可视为比例放大环节，其传递函数为：

$$G_1(s) = K_f \quad (3.21)$$

式中： K_f ——伺服放大器增益，取 $2 \times 10^{-3} A/V$ 。

(2)伺服阀 电液伺服阀的类型和结构形式很多，但是都是由电气机械转换器和液压放大器所构成。电液伺服阀与普通的电磁阀或电磁比例阀不同，它的输入信号功率很小，一般只有几十 mw；能够对输出流量和压力进行连续的双向控制；具有极快的响应速度和很高的控制精度。所以可以用它来构成快速高精度的闭环控制系统。伺服阀的传递函数可以由理论分析得到，但更多的是由实际测试曲线求得。根据实测曲线，伺服阀的数学模型可简化为二阶系统，其传递函数为：

$$G_2(s) = \frac{K_{sv}}{\frac{s^2}{W_{sv}^2} + \frac{2\zeta_{sv}s}{W_{sv}} + 1} \quad (3.22)$$

式中： K_{sv} ——伺服阀的流量增益，取 $5.9 \times 10^{-2} m^3/As$ ； W_{sv} ——伺服阀的等效固有频率，取 $320 rad/s$ ； ζ_{sv} ——伺服阀的等效阻尼比，取 0.4。

(3)液压缸 液压缸的传递函数为：

$$G_3(s) = \frac{A_p / K_{ce} K}{(\frac{s}{W_r} + 1)(\frac{s^2}{W_0^2} + \frac{2\zeta_0 s}{W_0} + 1)} \quad (3.23)$$

式(3.23)中： A_p ——液压缸腔控制的有效面积，取 $1.02 \times 10^{-1} m^2$ ； K ——弹性负载综合刚度，取 $6 \times 10^8 N/m$ ； K_{ce} ——总流量压力系数，取 $4.5 \times 10^{-12} m^3/sP_a$ ； W_r ——惯性环节转折频率，取 $0.2228 rad/s$ ； W_0 ——液压缸固有频率，取 $325.62 rad/s$ ； ζ_0 ——阻尼比，

取0.0514。

(4)位移传感器 可以将其视为惯性环节,其传递函数为:

$$G_4(s) = K_s \quad (3.24)$$

式中: K_s ——位移传感器增益,取 $10^3 V/m$ 。

(5)调节器 采用PI调节器,其传递函数为:

$$G_5(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{K_i s}\right) \quad (3.25)$$

式中: K_p ——比例系数,取20; K_i ——积分系数,取5。

其中PI调节器参数 K_p , K_i 是对原液压位置闭环系统采用误差平方矩的积分最小为目标函数进行单纯形法PID参数寻优后所得的。

将上述各部分传递函数分别代入图3.4所示的结构图中就得到了液压APC系统的动态数学模型。液压位置闭环是一个五阶系统,如果按五阶系统分析,将给系统分析带来极大困难。所以要对上述五阶系统进行降阶处理。可以将其用一个典型二阶系统来近似。如式(3.26)。

$$\Phi(s) = \frac{28.8^2}{s^2 + 2 \times 0.9 \times 28.8s + 28.8^2} \quad (3.26)$$

将原五阶系统在最优PI参数下的单位阶跃响应曲线与上述典型二阶系统的单位阶跃响应曲线相比较(图3.5)可知,其阶跃响应过程基本相同。因此液压位置闭环系统可以用一个二阶系统 $\Phi(s)$ 来近似。图3.5中曲线1为原五阶系统的单位阶跃响应曲线,曲线2为简化后的二阶系统的单位阶跃响应曲线。

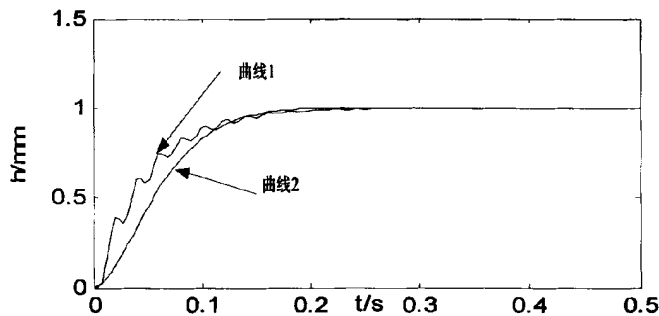


图 3.5 液压位置闭环数学模型单位阶跃响应

Fig. 3.5 Step response of hydraulic cylinder position close-loop control

3.4 本章小结

本章主要对五机架冷连轧机轧制过程进行建模。首先从连续轧制理论的基本方程出发对冷连轧的静态特性进行了分析,其次通过对冷连轧动态特性的分析建立了五机架冷连轧机的动态数学模型,为厚度控制方案的制定奠定了基础。

此页不缺内容

第4章 基于神经网络自调整控制算法研究

4.1 神经网络概述

人工神经网络(简称神经网络)具有复杂模式和进行联想、推理记忆的功能,它是解决某些传统方法所无法解决的问题的有力工具。目前,它日益受到重视,同时其他学科的发展,为其提供了更大的机会。1986年,Romelhart和McClelland提出了误差反向传播算法(Error Back Propagation Algorithm,简称BP算法),由于多层前馈网络的训练经常采用误差反向传播算法,人们也常把多层前馈网络称为BP网络。BP网络结构简单、可塑性强,并具有较强的非线性和鲁棒性等特点,成为神经网络模型中应用最广泛的一类网络。在神经网络中,大量的神经元组成庞大的神经网络,由于具有结构简单、工作状态稳定、易于硬件实现等优点,在众多的神经网络模型中,BP网络的应用最为广泛,尤其是在模式识别及分类、系统仿真、故障智能诊断、图像处理、函数拟合、最优预测等方面。

在人工神经网络中,大量的神经元组成庞大的神经网络,才能实现复杂信息的处理与存储,并表现出各种优越的特征。神经网络的强大功能与其大规模并行互联、非线性处理以及互联结构的可塑性密切相关。因此,必须按一定规则将神经元连接成神经网络,并使网络中各神经元的连接权按一定规则变化。按照网络内部的信息流向进行分类,可将神经网络分为前馈型网络和反馈型网络^[60-61]。

(1)前馈型网络 前馈是因网络信息处理的方向是从输入层到各隐层再到输出层逐层进行而得名。从信息处理能力看,网络中的节点可分为两种:一种是输入节点,只负责从外界引入信息后向前传递给第一隐层;另一种是具有处理能力的节点,包括各隐层节点和输出层节点。前馈型网络中前一层的输出是下一层的输入,信息的处理具有逐层传递进行的方向性,一般不存在反馈回路,因此,这类网络很容易串联起来建立多层前馈网络。如:感知机模型网络、多层网络的误差反传(Back-Propagation, BP)算法网络、RBF(Radial Basis Function, RBF)模型网络。

(2)反馈型网络 在反馈型网络中,所有节点都具有信息处理功能,而且每个节点既可以从外界接受输入,同时又可以向外界输出,并且可以细分为前馈全互联型,如:Hopfield神经网络,反馈局部互联型,如:Elman神经网络。BP网络是目前研究最多的神经网络模型^[62-63]。

神经网络主要通过两种学习方法进行训练^[60-61],即:有导师学习算法、无导师学习算法。

(1)有导师学习 有导师学习算法能够根据期望的和实际的网络输出间的差来调整

神经元间连接的权值。因此,有导师学习需要有导师来提供期望或目标输出信号,如:反向传播算法。并且,在有导师学习中,神经网络学习的外部指导信息越多,网络学会并掌握的知识越多,解决问题的能力也就越强。

(2)无导师学习 无导师学习算法不需要知道期望输出,在训练过程中,只要向神经网络提供输入模式,神经网络就能够自动地适应连接权,以便按相似特征把输入模式分组聚集,如:Kohonen算法和Carpenter-Grossberg自适应谐振理论。

神经网络的学习规则是网络的连接权值和阈值的调整规则^[64],其中应用于前馈神经网络的学习规则有 Hebbian 和 Delta 两种。

(1)Hebbian 学习规则 在这种学习规则中,学习信号简单地等于神经元的输出,即:

$$Y = f(W^T X) \quad (4.1)$$

式中, W ——权值矩阵; X ——神经元的输入向量; $f(\cdot)$ ——激活函数; Y ——输出向量。

权值向量的调整公式:

$$W \leftarrow W + \eta Y X^T \quad (4.2)$$

式中, η ——学习速率。

Hebbian 学习规则代表一种纯前馈、无导师学习。

(2)Delta 学习规则 这种学习规则也称为纠错学习或者 Widrow-Hoff 规则,是指通过反复调整权值使目标函数达到最小或使系统达到一个稳定状态。Delta 规则的学习信号规定为:

$$Y = d - f(W^T X) \quad (4.3)$$

式中, d ——期望输出向量,即导师信息。

权值的调整公式:

$$W \leftarrow W + \eta (d - Y) X^T \quad (4.4)$$

Delta 学习规则适用于连续激活函数,且只对有导师学习有效。

误差反向传播神经网络(Back-Propagation Networks,BP)是一种单向传播的多层前馈神经网络,采用了1986年 David Rumelhart等提出的BP算法,通过工作信号的正向传播和误差信号的反向传播实现网络的学习训练过程。由于BP网络结构简单、可塑性强,并具有较强的非线性和鲁棒性等特点,成为神经网络模型中应用最广泛的一类网络。

BP网络结构简单、可塑性强,并具有较强的非线性和鲁棒性等特点,成为神经网络模型中应用最广泛的一类网络。BP神经网络是一种单向传播的多层前馈神经网络,它的基本拓扑结构如图4.1所示。BP网络包含输入层、至少一层的隐含层及输出层,同层各节点之间没有任何耦合。

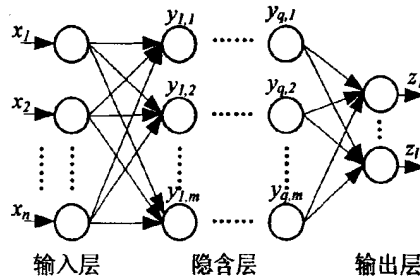


图4.1 BP神经网络拓扑结构

Fig. 4.1 Topological structure of BP neural network

BP算法是一种有导师学习算法，它的学习过程由信号的正向传播与误差的反向传播两个过程组成^[65]。在正向传播过程中，网络的输入信息从输入层向前传播到隐层节点，经过转移函数后，传向输出层，每一层神经元的输出只影响下一层神经元。若输出层的实际输出与期望输出(导师信号)不符，则转入误差的反向传播阶段，将误差信号沿原来的连接通路返回，通过修改各层神经元的权值，使得误差信号最小。权值不断调整的过程，也就是网络的学习训练过程，此过程一直进行到网络输出的误差减少到可接受的程度，或进行到预先设定的学习次数为止。

4.2 BP 神经网络在冷连轧 AGC 系统中的应用

4.2.1 厚度反馈 AGC 系统中的滞后问题

AGC 系统通常有很多种控制方法，其中最重要的就是厚度反馈控制。厚度反馈控制属于闭环控制，测厚仪检测的实际轧件出口厚度 h 经过延迟之后与厚度给定值 h_s 相比形成厚度偏差 e ，输入到厚度调节器后，调节器输出一个控制量 u_r 给液压位置内环，由液压位置内环调节轧机压下量 X_p ，最终实现轧件出口厚度的调节。厚度反馈控制使厚度越来越小，但由于存在滞后，因此效果将受到影响。其总体结构图如图 4.2 所示。

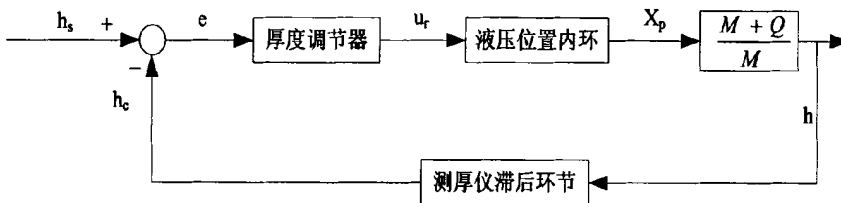


图 4.2 厚度反馈控制系统结构图

Fig. 4.2 Principle diagram of thickness feedback control

图 4.2 中：液压位置内环 $\Phi(s) = \frac{28.8^2}{s^2 + 2 \times 0.9 \times 28.8s + 28.8^2}$ (由第三章建立)；厚度调节器

$H(s) = \frac{k_i}{s}$ (k_i 为积分系数)；厚度仪滞后环节 $G(s) = \frac{e^{-\tau s}}{T_h s + 1}$ ，(τ 为测厚仪的时滞时间，

$\tau = L/v$ ， L 为轧机中心线到测厚仪的距离， v 为轧制速度； T_h 为测厚仪时间常数，取 0.05)。

由此得厚度反馈 AGC 系统的闭环传递函数为:

$$\Phi_h = \frac{M(T_h s + 1)H(s)\Phi(s)}{(M + Q)(T_h s + 1) + MH(s)\Phi(s)e^{-\tau s}} \quad (4.5)$$

要想使厚度闭环控制系统稳定, 应使

$$(M + Q)(T_h s + 1) + MH(s)\Phi(s)e^{-\tau s} = 0 \quad (4.6)$$

的根位于 s 平面左半部。式(4-6)为一超越方程。近似处理可将 $e^{-\tau s}$ 用两个多项式去逼近, 即:

$$e^{-\tau s} = \frac{P(s)}{W(s)} = \frac{1 - \frac{\tau s}{2} + \frac{(\tau s)^2}{8}}{1 + \frac{\tau s}{2} + \frac{(\tau s)^2}{8}} \quad (4.7)$$

将式(4.7)代入式(4.6)中, 得

$$(M + Q)(T_h s + 1)W(s) + MH(s)\Phi(s)P(s) = 0 \quad (4.8)$$

代入数值得:

$$5483.9(0.05s + 1)(s^2 + 51.84s + 829.44)sQ(s) + 3898368k_i P(s) = 0 \quad (4.9)$$

厚度反馈 AGC 系统限定, 当轧制速度较低时不投入闭环控制, 低速时的限定速度取 $v_0 = 0.4m/s$, 而最高轧制速度为 $v_m = 10m/s$, 所以 τ 取值范围为 $0.16s \sim 4s$ 。以 $\tau = 0.16$ 代入式(4.7), 并由式(4.8)确定 k_i 的稳定范围为 $k_i < 7.275$, 而当 $\tau = 4$ 时, 可确定 k_i 的稳定范

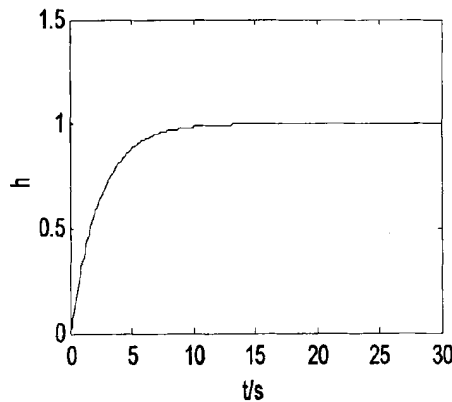


图 4.3 $k_i=0.45$ 时高速系统响应.

Fig. 4.3 Response when $k_i=0.45$

围为 $k_i < 0.45$ 。可见采用固定积分时间常数控制时, 为了保证在低速时系统稳定, k_i 不应大于 0.45, 如果保持 $k_i = 0.45$, 则在高速时厚度控制系统的响应又很慢。图 4.3 就是在 $k_i = 0.45$ 高速运行情况下, 厚度反馈控制系统单位阶跃响应的仿真曲线。由图 4.3 看出厚度反馈控制系统响应速度很慢。在高速情况下, 通过 PID 参数寻优可知 $k_i = 1.7$ 时响应曲线最好如图 4.4 所示。

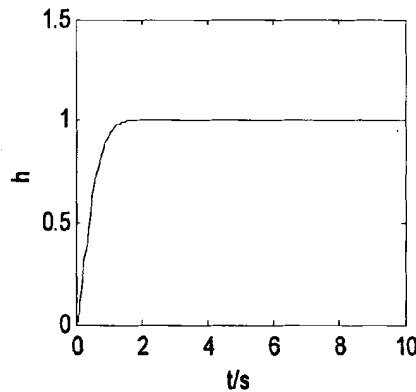


图 4.4 $k_i=1.7$ 时高速系统响应

Fig. 4.5 Response when $k_i=1.7$

但保持 $k_i=1.7$ 不变, 在低速情况下厚度反馈控制系统是不稳定的。因此对厚度反馈闭环控制系统来说, 要提高控制质量, 必须根据需要变积分控制。而神经网络所具有的自学习能力, 可以通过对系统性能的学习来实现积分时间常数的优化, 从而达到很好的控制效果。

冷连轧过程是一个非线性、不确定和时变的复杂系统, 要得到它精确的数学模型是相当困难的, 甚至是不可能的, 因为其中存在很多的不可预测因素, 当我们用常规 PID 控制方法时, 不能达到理想的控制效果。将神经网络与传统的 PID 控制器相结合, 既能发挥神经网络的自适应、自组织能力又能充分发挥传统 PID 的算法简单、实现简易、鲁棒性能良好和可靠性高的特点。

4.2.2 基于 BP 神经网络整定的积分控制

基于 BP 神经网络积分控制的系统结构如图 4.5 所示。控制器由两部分构成。

(1) 经典的积分控制器, 直接对被控对象进行闭环控制, 并且积分参数 k_i 为在线调整方式。

(2) 基于 BP 神经网络整定的积分控制, 根据系统的运行状态, 调节积分控制器的参数, 以期达到某种性能指标的最优化。使输出层神经元的输出状态对应于积分控制器的参数 k_i , 通过神经网络的自学习、加权系数调整, 使神经网络输出对应于某种最优控制律下的积分控制器参数^[68]。经典增量式数字积分控制器的控制算法为:

$$u(k) = u(k-1) + k_i e(k) \tag{4.10}$$

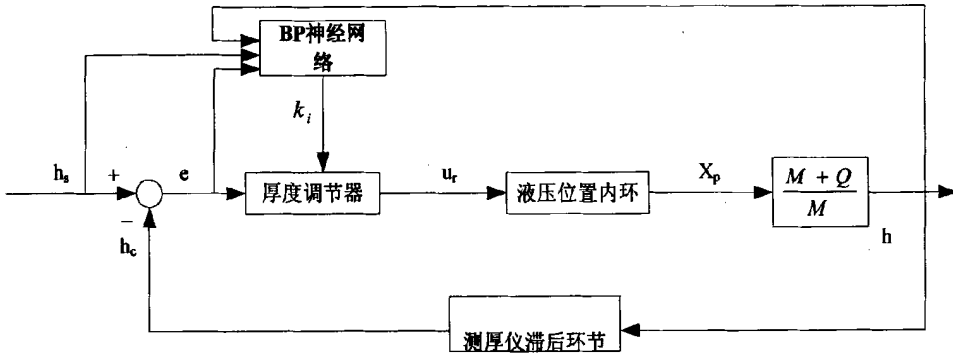


图 4.5 基于 BP 神经网络积分控制系统结构图
Fig. 4.5 Principle diagram of BP neural network control system

在三层 n - m - l 型BP网络中，设网络的输入向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)^T$ ，为隐层引入阈值 $x_0 = -1$ ；隐层的输出向量为 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m)^T$ ，为输出层引入阈值 $y_0 = -1$ ；输出层的输出向量为 $Z = (z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_l)^T$ ；期望输出向量为 $r = (r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_l)^T$ ；输入层到隐层之间的连接权值矩阵为 $V = (V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_m)$ ，其中列向量 V_j 为隐层第 j 个神经元对应的权向量；隐层到输出层之间的权值矩阵为 $W = (W_1, W_2, \dots, W_k, \dots, W_l)$ ，其中 W_k 为输出层第 k 个神经元对应的权向量。

对于隐层，有：

$$net_j(t) = \sum_{i=0}^n v_{ij} x_i \quad (4.11)$$

$$y_j(t) = f(net_j(t)) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.12)$$

转移函数取正负对称的Sigmoid函数： $f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$ 。

对于输出层，有：

$$net_k(t) = \sum_{j=0}^m w_{jk} y_j(t) \quad (4.13)$$

$$z_k(t) = f(net_k(t)) \quad (k = 1, 2, \dots, l) \quad (4.14)$$

$$z_k(t) = k_i \quad (4.15)$$

转移函数取非负的Sigmoid函数： $f(x) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}}$ 。

取性能指标函数为：

$$E(t) = \frac{1}{2} (r(t) - h(t))^2 \quad (4.16)$$

按照梯度下降法修正网络的权系数，即按 $E(t)$ 对加权系数的负梯度方向搜索调整，并附加一使搜索快速收敛全局极小的惯性项^[69]：

$$\Delta w_{jk}(t) = -\eta \frac{\partial E(t)}{\partial w_{jk}} + \alpha \Delta w_{jk}(t-1) \quad (4.17)$$

式中， η 为学习速率； α 为惯性系数。

$$\frac{\partial E(t)}{\partial w_{jk}} = \frac{\partial E(t)}{\partial h(t)} \cdot \frac{\partial h(t)}{\partial \Delta u(t)} \cdot \frac{\partial \Delta u(t)}{\partial z_k(t)} \cdot \frac{\partial z_k(t)}{\partial net_k(t)} \cdot \frac{\partial net_k(t)}{\partial w_{jk}} \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial net_k(t)}{\partial w_{jk}} = y_j(t) \quad (4.19)$$

由于 $\frac{\partial h(t)}{\partial \Delta u(t)}$ 未知, 所以近似用符号函数 $\text{sgn}(\frac{\partial h(t)}{\partial \Delta u(t)})$ 取代, 由此带来计算不精确的影响

可以通过调整学习速率 η 来补偿。

由式(4.10)和式(4.15), 可求得:

$$\frac{\partial \Delta u(t)}{\partial z_k(t)} = e(t) \quad (4.20)$$

上述分析可得网络输出层权值的学习算法为:

$$\Delta w_{jk}(t) = \eta \cdot e(t) \cdot \text{sgn}(\frac{\partial h(t)}{\partial \Delta u(t)}) \cdot e(t) \cdot f'(net_k) \cdot y_j(t) + \alpha \Delta w_{jk}(t-1) \quad (4.21)$$

同理可得隐含层加权系数的学习算法为:

$$\Delta v_{ij}(t) = \eta f'(net_j(t)) z_k w_{ij}(t) x_i + \alpha \Delta v_{ij}(t-1) \quad (4.22)$$

该控制器的控制算法归纳为:

(1)确定 BP 网络的结构, 即确定输入层节点数 n 和隐含层节点数 m 。输入 $X = [r(k), h(k), e(k), -1]$; 隐含层为 1 层即 $m=1$; 输出 $z_k = [k_i]$ 。

(2)赋初始值。初始化 w_{jk} , v_{ij} , 选定学习速率 η , 惯性系数 α , 此时 $t=1$ 。

(3)采样得到 $r(t)$ 和 $h(t)$, 计算该时刻误差 $e(t) = r(t) - h(t)$ 。

(4)计算神经网络各层的输入输出, 根据式(4.11)~式(4.14)。

(5)计算积分控制器的输出 $u(t)$, 根据式(4.10)。

(6)计算各层误差信号并调整各层权值。根据式(4.21)和式(4.22)在线调整加权系数 w_{jk} , v_{ij} , 实现积分控制参数的自适应调整。

(7)置 $t=t+1$ 返回步骤(2)。

4.3 本章小结

本章研究了 BP 神经网络算法原理, 针对冷轧机厚度反馈控制系统中存在的滞后环节, 为解决传统定积分控制不能取的满意控制效果的问题, 设计了 BP 神经网络积分控制器。用 BP 神经网络自适应调节、优化控制器参数。

此页不缺内容

第 5 章 仿真实验及运行结果分析

5.1 五机架冷连轧动态模型的仿真分析

5.1.1 轧制规程与设定计算

轧制规程计算是连轧机组在高速轧制条件下的参数计算，其中心问题是负荷分配。负荷分配是在原料和成品带钢厚度已知条件下，通过数学模型计算各机架的轧制工艺参数，合理分配各机架压下量，确定各机架目标轧制厚度。负荷分配方法主要有如下几种：

(1)经验法 经验法是依靠操作者的生产经验，根据带钢钢种、规格分配各机架轧制厚度，并将厚度代入变形抗力、轧制力、轧制力矩、电机功率模型中进行极限校核。若有机架负荷超限，则重新确定轧制厚度直到满足要求为止。

(2)能耗法 能耗法需要确定能量消耗与各机架带钢轧制厚度之间的数量关系。能耗关系由实际生产数据制定。通常通过实测轧制过程电机的电压和电流值，得到电机功率，按带钢钢种和规格整理成表格形式存储。使用时根据能耗曲线确定总的能耗，再按给定的各机架负荷分配比例系数确定出各机架带钢轧制厚度。

(3)单目标优化法 单目标优化法是将某一个轧制负荷作为目标函数，在对目标函数进行寻优的过程中确定各机架轧制厚度。单目标优化法包括比例负荷分配法及最小能耗分配法。带钢由原料厚度轧到成品厚度，有不同的压下制度选择。为了保证连轧机组的秒流量相同，各机架轧制速度会随着轧制厚度的变化而改变。轧制厚度和带钢速度确定后，由工艺参数模型计算各机架轧制能耗。在不同的压下制度中，必有一个能耗最小的方案。通过采用动态规划法进行寻优，最终确定能耗最小条件下的轧制厚度。

(4)多目标优化法 多目标优化法是综合考虑轧制过程中的轧制力、轧制力矩、电机功率、板形等因素条件下，建立起目标函数，在满足多个约束条件下，确定各机架带钢轧制厚。

5.1.2 五机架冷连轧动态模型的仿真分析

以首钢迁钢冷轧 1450mm 五机架冷连轧为例对五机架变形区及机架间冷连轧动态模型(第三章图 3.3)所示的动态模型进行仿真分析。

基本工艺参数为：板宽 $B=1000mm$ ；轧辊半径 $R=280mm$ ；预压靠力 $F_0=10000KN$ ；摩擦系数 $\mu=0.07$ ；机架间距离 $L_s=4750mm$ ；轧机刚性系数 $M=4700KN/mm$ ；机架的弹性模量 $E=205.8KN/mm$ 。轧制规程及变量偏微分系数如表 5.1 所示。

表 5.1 冷连轧轧制规程及变量偏微分系数
Tab 5.1 Rolling process and partial differential coefficient of cold continuous rolling mills

项目	第一机架	第二机架	第三机架	第四机架	第五机架
入口板厚 H/mm	3.5	2.55	1.81	1.37	1.08
出口板厚 h/mm	2.55	1.08	1.37	1.08	1.00
前张力 t_f/MPa	102	128	161	161	80
前滑率 $f/\%$	2.17	4.18	4.50	3.97	1.22
轧辊辊缝 S/mm	2.861	1.668	1.379	1.217	1.797
轧辊速度 $v_R/(\text{m/s})$	7.68	10.6	14.0	17.8	19.8
$\partial F / \partial H$	638.9	699.0	1055.6	1523.2	3019.6
$\partial F / \partial h$	-783.9	-975.1	-1434.5	-2029.7	-3338.5
$\partial F / \partial \sigma$	22.6	23.9	22.5	22.1	15.5
$\partial F / \partial t_b$	-11.3	-12	-11.3	-11.0	-7.74
$\partial F / \partial t_f$	-11.3	-12	-11.3	-11.0	-7.74
$\partial f / \partial H$	0.0029	0.0163	0.0504	0.0853	0.1404
$\partial f / \partial h$	-0.0125	-0.0366	-0.0778	-0.1209	-0.1575
$\partial f / \partial t_b$	-0.0063	-0.0023	-0.00168	-0.00128	-0.00051
$\partial f / \partial t_f$	0.00193	0.00188	0.00155	0.00114	0.0004

下面从轧机入口原料板厚、各机架轧辊速度、各机架辊缝阶梯变化时对各机架轧件出口厚度的影响来分析连续轧制的动态特性。

(1)若来料厚度阶梯性增厚，当来料厚度变化部分达到该机架时，该机架的出口厚度增加至最大，该厚度变化到达下一机架时，机架间的张力减少，带钢厚度因此而更增厚。如图 5.1。

(2)第一机架辊缝减小时，第一机架出口板厚减薄，板厚变更点在通过各机架的瞬间各机架出口板厚减小，并且板厚变更点即使通过了五机架也持续减薄，要经过一定时间的调整。这是机架间张力变化导致了轧制现象往前段机架逆向迁移的原因。如图 5.2。

(3)第一机架轧辊速度增加，则第一与第二机架间张力大幅度降低，第一机架、第二机架出口板厚增大，这一板厚变化最终传播到最后机架，结果第五机架出口板厚增大，同时各机架间张力减小。如图 5.3。

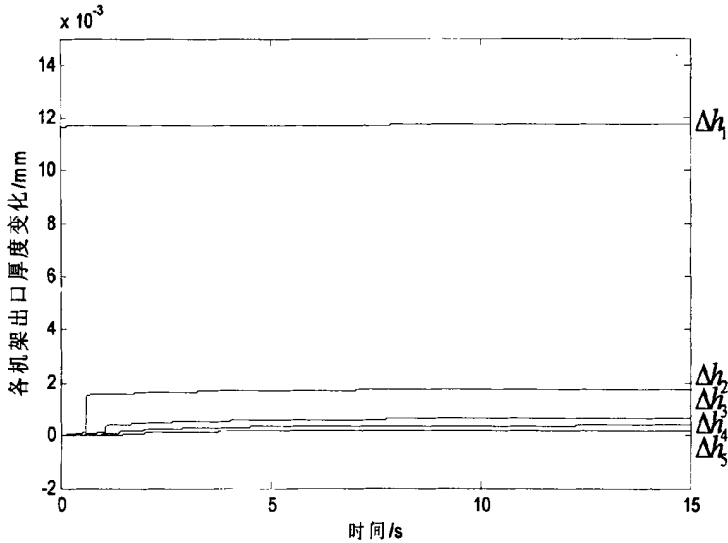


图 5.1 对应来料厚度阶梯变化时，各机架出口板厚变化
Fig. 5.1 Thickness changing of every stand when the enter thickness change

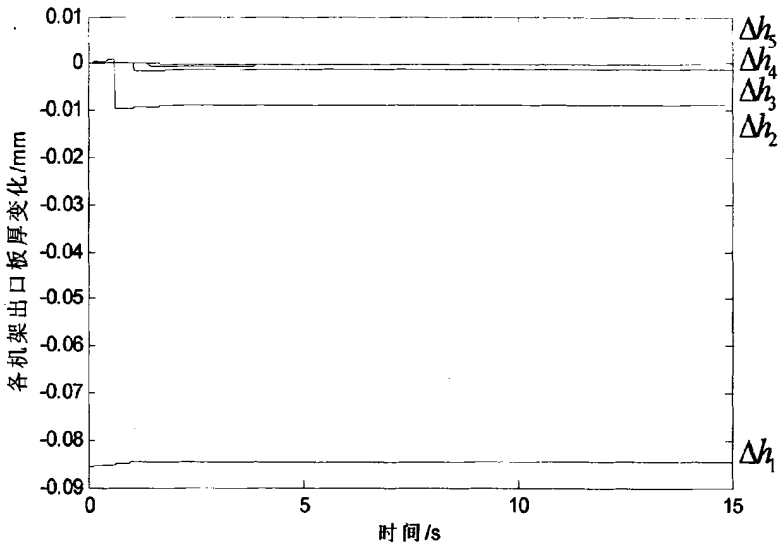


图 5.2 对应第一机架辊缝阶梯变化时，各机架出口板厚变化
Fig. 5.2 Thickness changing of every stand when the first roller gap change

(4)第五机架辊缝减小时，则瞬间产品带钢厚度减小。同时，由于第四与第五机架间张力减小，第四机架出口板厚增大，最终导致第五机架出口板厚几乎不减小。如图 5.4。

(5)第五机架轧辊速度增加时，第四与第五机架间张力增加，第五机架出口板厚减小，同时因为第四机架出口板厚减小，改变第五机架轧辊速度后，第四机架出口板厚的变化部分到达第五机架出口后，第五机架出口板厚发生调整。如图 5.5。

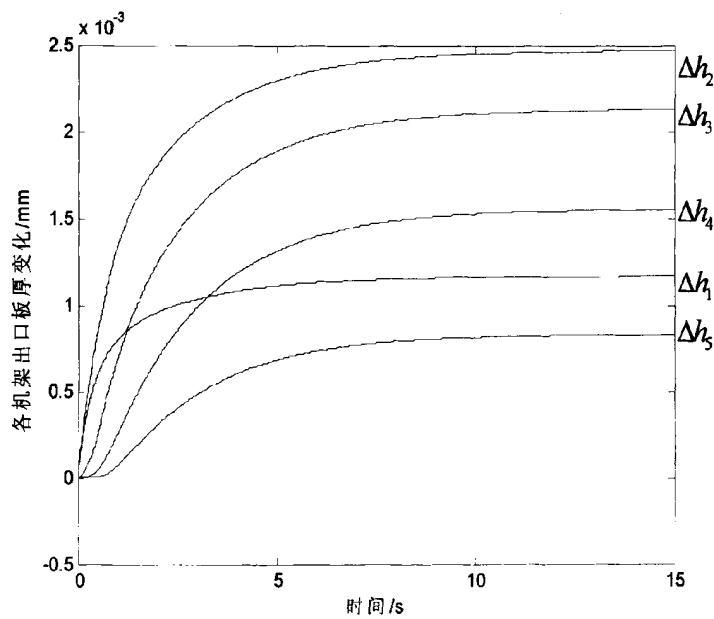


图 5.3 对应于第一机架辊速的阶梯变化，各机架出口板厚变化
Fig. 5.3 Thickness changing of every stand when the first roller speed change

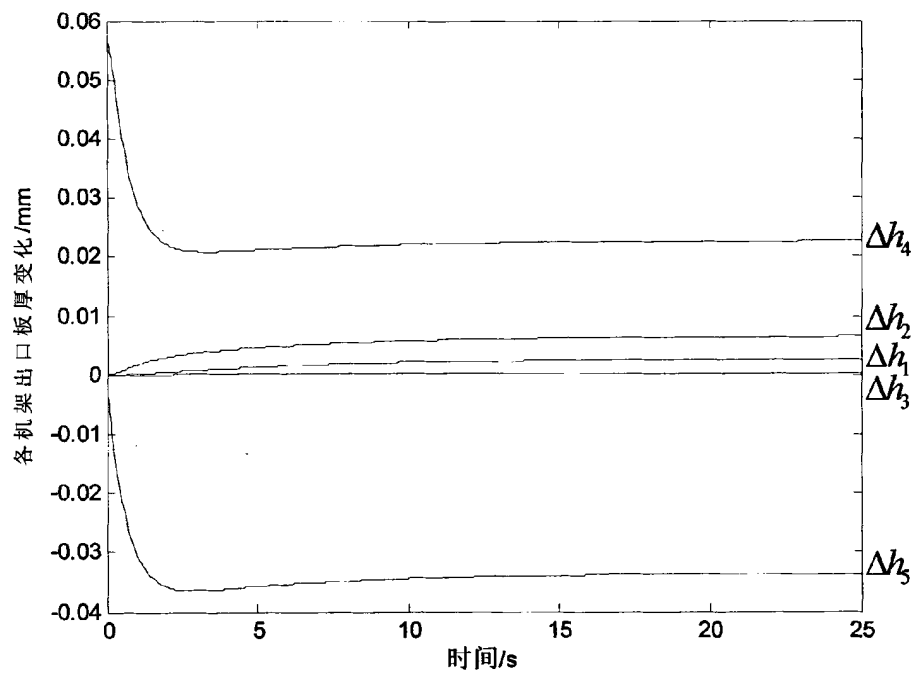


图 5.4 对应第五机架辊缝阶梯变化时，各机架出口板厚变化
Fig. 5.4 Thickness changing of every stand when the fifth roller gap change

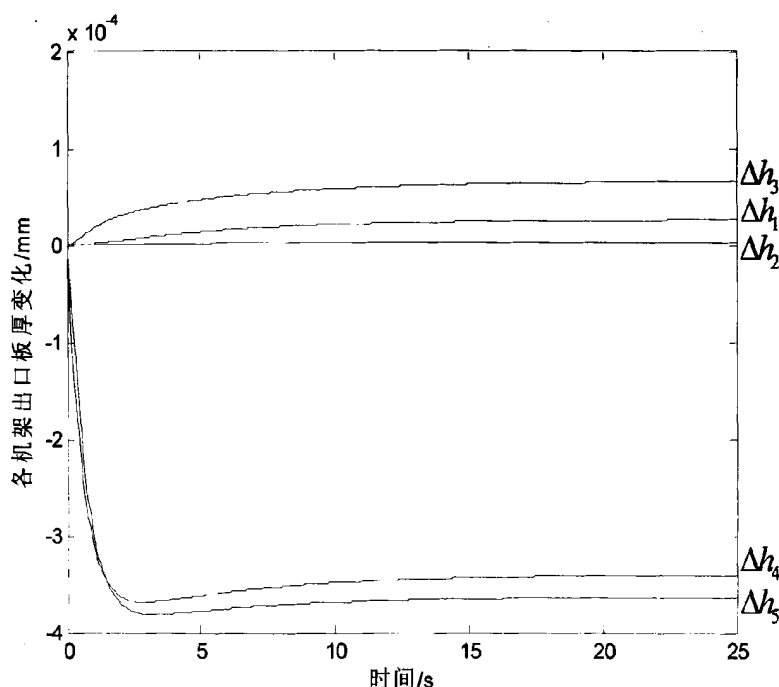


图 5.5 对应于第五机架辊速的阶梯变化, 各机架出口板厚变化
Fig. 5.5 Thickness changing of every stand when the fifth roller speed change

上述的动态仿真分析归纳如下: 轧制状态的变化通过机架间张力对前段机架板厚以及前段机架张力的影响仅限于前段相邻的一个机架, 该机架之前的机架几乎不受影响。因此影响第五机架出口板厚的因素是第一、第五机架的速度以及第一机架的辊缝变化, 虽然涉及到其他因素的过渡性影响, 但最终几乎不变。由动态特性分析的计算结果可知, 调整状态与前面讨论的静态特性分析结果一致。

5.1.3 五机架冷连轧 AGC 系统的仿真研究

AGC 系统原理图如图 5.6 所示:

图中: CH——测厚仪; ZH——张力仪; WK——位置自动控制回路; QK——前馈控制回路; FK——反馈控制回路; AS——速度调节器; M——直流电机; ZK——张力调节器; 1——液压压下系统; 2——第五机架对第一机架的反馈控制回路。

AGC 系统是由第一机架的前馈和反馈, 第二机架的前馈, 第五机架的反馈以及各机架的张力控制组成。下面以第一机架的反馈控制为例来进行 AGC 系统的仿真研究。

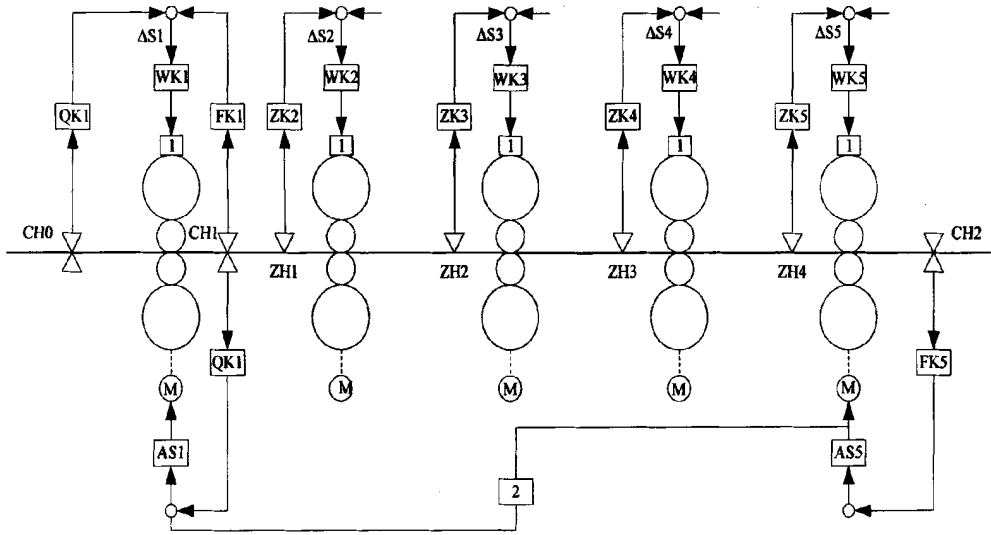


图 5.6 AGC 系统原理图
Fig. 5.6 Principle diagram of AGC

第一机架反馈控制的原理图如图 5.7。

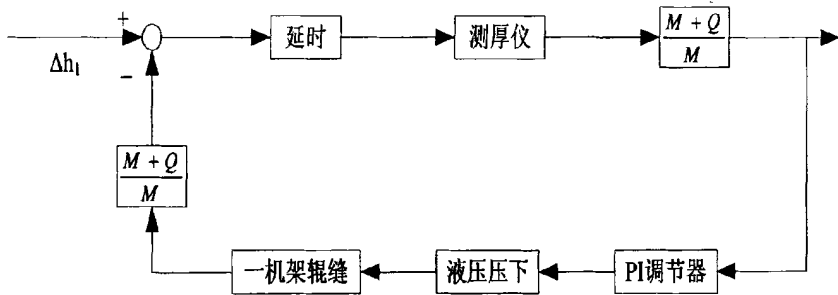


图 5.7 第一机架厚度反馈控制原理图
Fig. 5.7 Principle diagram of the first stand thickness feedback control

计算的参数同上一节。其中测厚仪的传递函数为： $\frac{1}{1+0.05s}$ ；PI 调节器采用以下函数： $G(s) = K_p(1 + \frac{1}{K_i s})$ ；对液压压下的控制： $K_p = 8$ 、 $K_i = 0.6$ 。

仿真结果如图 5.8 曲线所示。由图可知，当来料厚度发生 $\Delta h_1 = 0.1$ 的单位阶跃的波动时，第一机架 AGC 系统的控制曲线的超调量很小，调节时间很短，能够获得很好的控制效果。

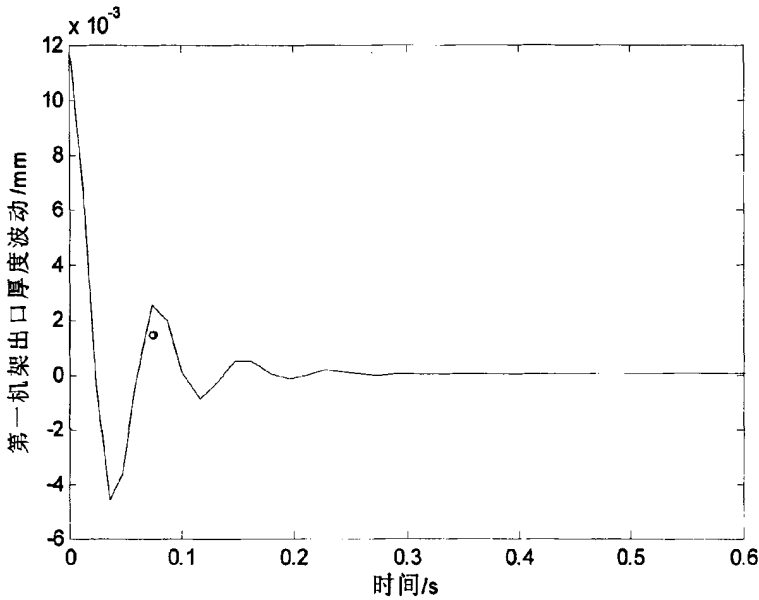


图 5.8 第一机架厚度响应曲线

Fig. 5.8 Response curve of the first stand thickness

5.2 基于 BP 神经网络整定的积分控制系统仿真分析

按照第四章所建立的基于 BP 神经网络积分控制的系统(图 4.5)所示的结构图,将被控对象的传递函数离散化后做为近似的数学模型,采样周期为 $T=0.001s$,输入单位阶跃信号既 $r(t)=1$,学习速率 $\eta=0.05$,惯性系数 $\alpha=0.05$ 。加权系数初始值取为 $[-1, 1]$ 之间的任意数。开始时的模型中的滞后环节设为 $\tau=2$,即轧制速度 $v_0=0.8m/s$ 。其仿真曲线图如图 5-10 所示:

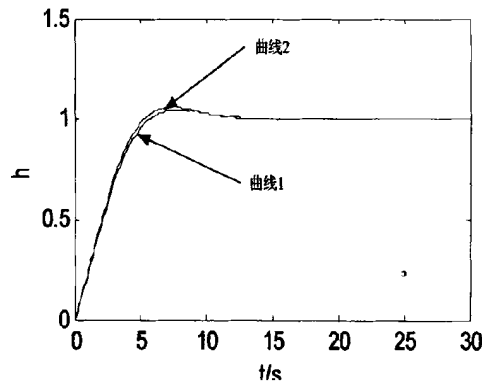


图 5.10 $\tau=2$ 时系统阶跃响应曲线

Fig. 5.10 Response of system when $\tau=2$

图 5.10 中常规积分控制器曲线 1(其中 $k_i=0.29$)与神经网络积分控制器曲线 2 基本相同。而当滞后环节设为 $\tau=0.16$,即轧制速度 $v_m=10m/s$ 时其仿真曲线如图 5.11 所示:

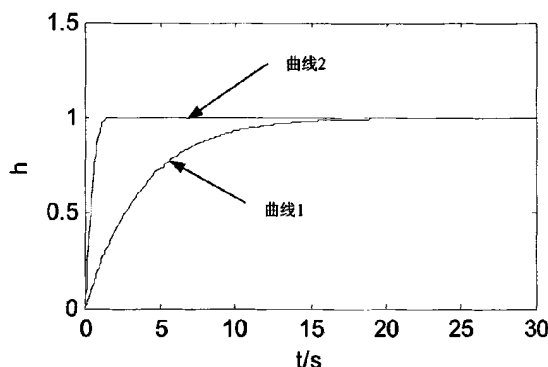


图 5.11 $\tau = 0.16$ 时系统阶跃响应曲线
Fig. 5.11 Response of system when $\tau = 0.16$

常规积分控制器的曲线 1 由于积分常数固定而使的系统厚度控制系统的响应速度很慢,而神经网络积分控制器的曲线 2 则通过自适应调整积分常数 k_i 使系统在高速时响应速度更快,效果更好。

从图 5.10、5.11 中可以看到,神经网络可以增强过程参数的自调整能力,有效地改善系统的动态性能,使系统超调小,调节时间短,从而达到很好的控制效果。

5.3 系统实际运行结果曲线

在分析了冷连轧动态特性及所有影响轧制厚度精度因素的基础上,设计 BP 神经网络积分控制方法,为了优化这些因素的干扰,AGC 的使用,机械设计,运行和轧机控制,良好的热卷是必要的因素。

对于厚度控制,需要考虑如下的因素。

- (1) 热轧卷厚度和硬度偏差;
- (2) 轧辊偏心和热膨胀;
- (3) 加速和减速度;
- (4) 设定值的丢失;
- (5) 机架间张力波动;

为了获得良好的精度,采用下列 AGC 功能。

- (1) No.2~No.5 机架物料流动 FB AGC (MFB2~MFB5 AGC)
- (2) 物料前滑 AGC (MFFi AGC)
- (3) No.1 机架 FB AGC (FB1 AGC 带有厚度补偿)
- (4) ACC/DEC 补偿
- (5) No.1 机架前滑 AGC (FF1 AGC)
- (6) No.1 机架 BISRA AGC (变刚度压力厚度自动控制系统)

(7) Decoupling Control (DC)

(8) No.2 机架前滑AGC (FF2 AGC)

2号~5号机架反馈AGC (轧制速度控制使用被估计的大数据流计算, MFB2~MFB5 AGC).通过检查出料侧的测量误差, MFB AGC控制除最后机架之外的轧制速度。通常有两个控制值,他们是辊速和辊缝, 用于对厚度和紧张的控制。在冷轧里, 因为张力的影响, 辊缝控制对规格控制不是太有效。以及一般根据大数据流恒定的理论, 输入速度与输出速度之比应该和输出厚度与输入厚度之比相一致.因此为了得到目标厚度, 把卷速度确定成合适的值是必要的.在我们的系统内, 基于上述概念, 辊速将被用于规格控制和辊缝将被用于张力控制。(应用退耦控制, 改变入带速度不影响带后张力。)因此在我们推荐的系统里, 为了改变带速度, 除最后一个机架之外全部机架速度同时控制, 这个AGC 被用于全部剩余扰动, 因为他们中的一些留下来不能被完全抑制。此外有些扰动以新的方式出现机架上。全部这些期望被这AGC 消除, 尽管他们通常是小的而不那么快。虽然从最后一机架到X射线计量器有传输时间延迟, 但是将用BP神经网络积分控制方法进行优化。

通过对 BP 神经网络积分控制方法进行的仿真研究。仿真结果表明, BP 神经网络能很好的跟踪给定信号, 能够实现希望的闭环系统性能, 控制效果良好。其最大的优点就是能跟踪系统参数的变化, 常规 PID 是不能随着模型的改变而改变控制器的调节参数的。BP 神经网络积分控制方法优化前后曲线如下:

(1)传统积分控制器下轧辊速度变化时出口厚度曲线如图 5.12。

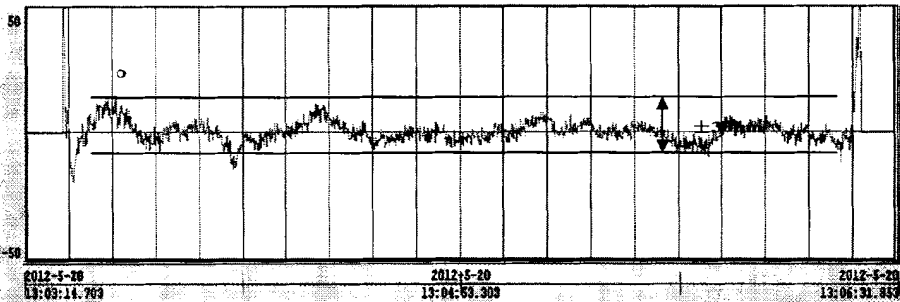


图 5.12 传统积分控制器下轧辊速度变化时出口厚度曲线

Fig. 5.12 Traditional integral controller roll speed changes under export thickness curve

(2) BP 神经网络积分控制器下轧辊速度变化时出口厚度曲线如图 5.13。

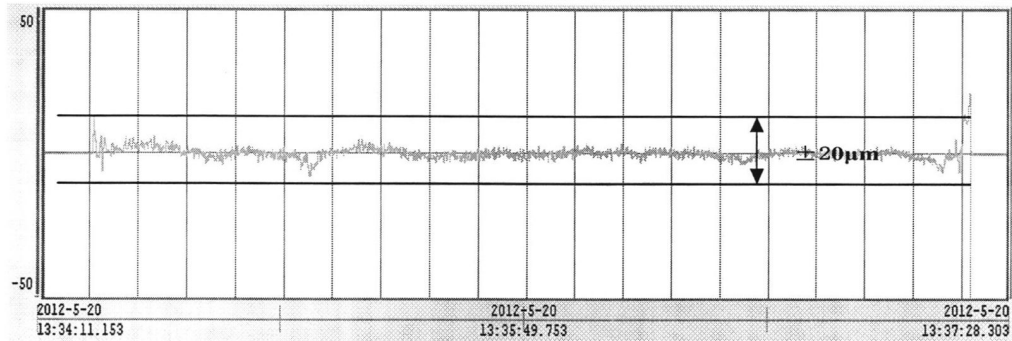


图 5.13BP 神经网络积分控制器下轧辊速度变化时出口厚度曲线

Fig. 5.13The BP neural network integral controller roll speed changes under export thickness curve

(3)传统积分控制器下辊缝变化时出口厚度曲线如图 5.14。

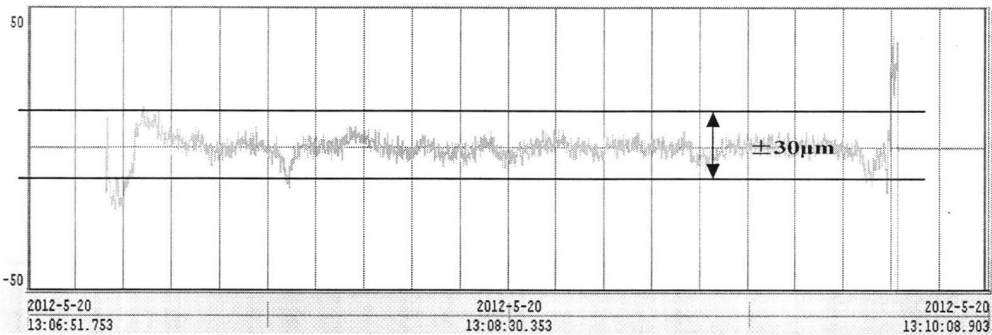


图 5.14 传统积分控制器下辊缝变化时出口厚度曲线

Fig. 5.14 Traditional integral controller roll gap change under export thickness curve

(4) BP 神经网络积分控制器下辊缝度变化时出口厚度曲线如图 5.15。

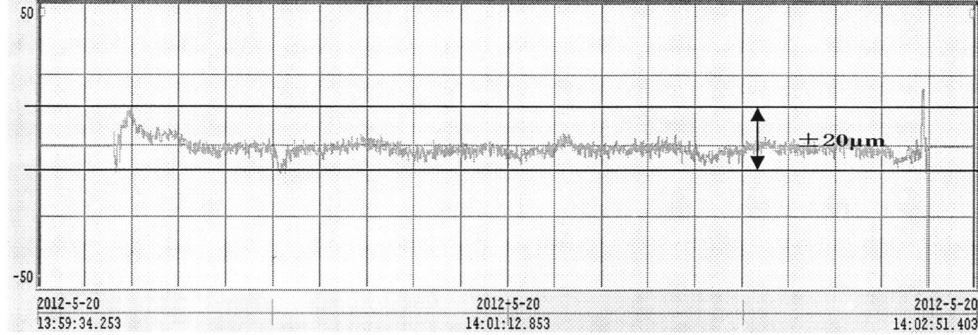


图 5.15BP 神经网络积分控制器下辊缝度变化时出口厚度曲线

Fig. 5.15The BP neural network controller integral under change of the roll gap when export thickness curve

(5)传统积分控制器下入口来料厚度变化时出口厚度曲线如图 5.16。

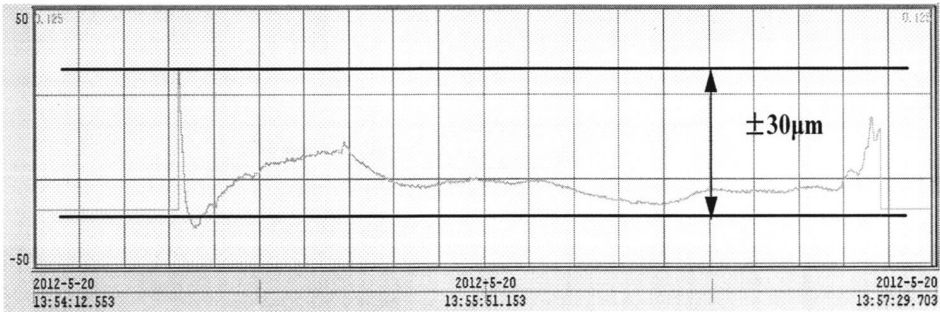


图 5.16 传统积分控制器下入口来料厚度变化时出口厚度曲线

Fig. 5.16 Traditional integral controller the incoming thickness thickness curve when exports

(6) BP 神经网络积分控制器下入口来料厚度变化时出口厚度曲线如图 5.17。

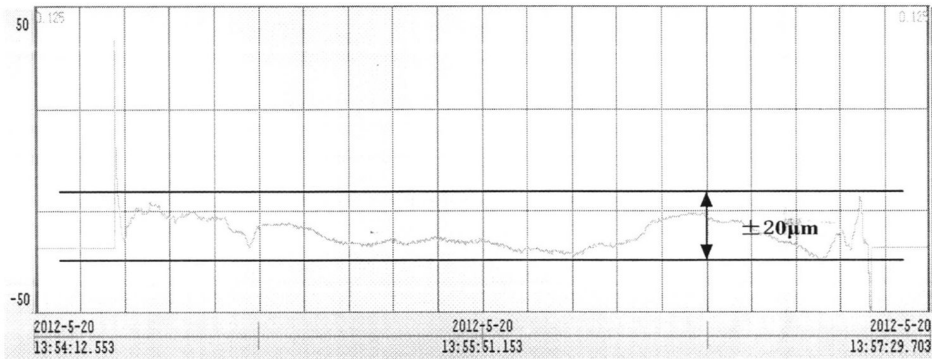


图 5.17 BP 神经网络积分控制器下入口来料厚度变化时出口厚度曲线

Fig. 5.17The BP neural network controller entry points under the incoming thickness changes export thickness curve

(7)传统积分控制器下轧辊轧件间摩擦系数的影响下出口厚度曲线如图 5.18。

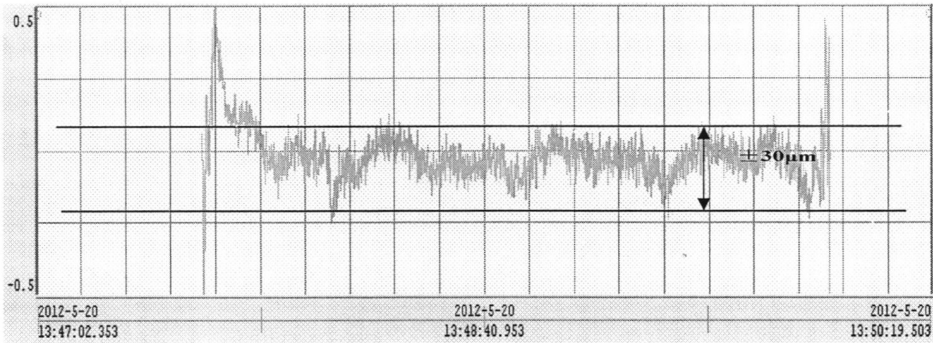


图 5.18 传统积分控制器下轧辊轧件间摩擦系数的影响下出口厚度曲线

Fig. 5.18 Traditional integral controller roll rolled piece under friction coefficients between export under the influence of the thickness of the curve

(8) BP 神经网络积分控制器下轧辊轧件间摩擦系数的影响下出口厚度曲线如图 5.19。

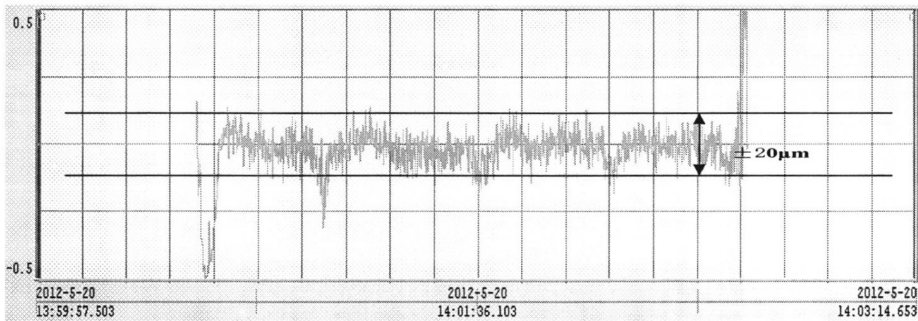


图 5.19 BP 神经网络积分控制器下轧辊轧件间摩擦系数的影响下出口厚度曲线

Fig. 5.19 The BP neural network controller roll rolled piece the integration between the friction coefficient under the influence of the export thickness curve

(9)传统积分控制器下变形抗力的影响下出口厚度曲线如图 5.20。

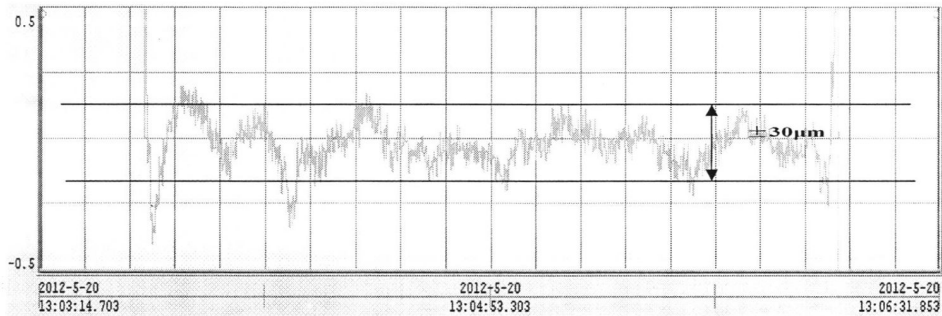


图 5.20 传统积分控制器下变形抗力的影响下出口厚度曲线

Fig. 5.20 Traditional integral controller under the influence of the deformation resistance under export thickness curve

(10) BP 神经网络积分控制器下变形抗力的影响下出口厚度曲线图 5.21。

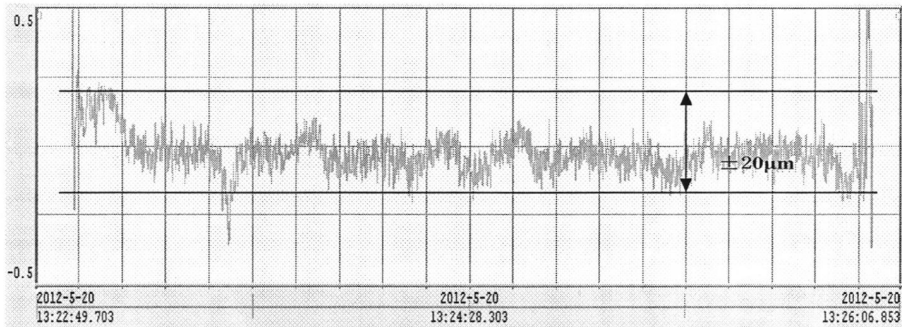


图 5.21 BP 神经网络积分控制器下变形抗力的影响下出口厚度曲线

Fig. 5.21 The BP neural network controller the deformation resistance points under the influence of the export under the thickness of the curve

通过对比现场曲线，在入口来料厚度、辊缝、轧辊速度、摩擦系数、变形抗力等因素对冷连轧机各机架出口板厚的影响，实际运行结果表明，所设计 BP 神经网络积分控制器能够调节优化控制器参数，实现了控制器参数的在线整定，能很好的跟踪给定信号，

具有较高的动态响应性能，控制精度较高。

5.4 本章小结

本章主要进行了五机架冷连轧机的动态特性仿真分析以及对 BP 神经网络积分控制器的仿真分析。仿真结果表明，积分控制参数 k_i 可以在线调整，BP 神经网络的引入优化了控制器的性能，提高了系统的动态响应性能，获得很好的控制效果。并通过分析了系统实际运行结果表明，BP 神经网络能很好的跟踪给定信号，实现希望的闭环系统性能，控制效果良好，其最大的优点就是能跟踪系统参数的变化。

此页不缺内容

第6章 结论及展望

6.1 结论

本文以首钢迁钢冷轧 1450mm 五机架冷连轧机为研究背景,以板带轧机厚度控制基本原理为理论依据,建立了五机架冷连轧机的动态数学模型,并对 BP 神经网络自适应控制进行了深入的研究。

(1) 深入研究了板带产品厚度自动控制系统原理和控制方式。比较了几种典型的控制模型,给出了减小及消除厚度波动的方法,所给出消除或减小厚度波动的方法可有效改善各种因素的变化对轧件厚度的影响,提高了产品质量。

(2) 从连续轧制理论的基本方程出发对冷连轧的静态特性进行了分析,所建立的静态模型综合考虑了入口来料厚度、辊缝、轧辊速度、摩擦系数、变形抗力对冷连轧机各机架出口板厚的影响。

(3) 在系统分析对冷连轧动态特性基础上重点研究了变形区和、机架间冷轧过程以及执行机构动态特性,建立了系统动态模型,建立了五机架冷连轧机的动态数学模型,并对所建的模型进行了定量的仿真分析。由动态特性分析的计算结果可知,动态分析计算结果与前面讨论的静态特性分析结果一致。

(4) 针对被控对象的非线性、时变性及控制系统的滞后性等特点提出了 BP 神经网络积分控制器。对 BP 神经网络积分控制方法进行了仿真研究。仿真结果表明, BP 神经网络能很好的跟踪给定信号,实现所希望的闭环系统性能,其最大的优点就是能跟踪系统参数的变化。而常规 PI 控制器是不能随着模型的变化改变其参数, BP 神经网络的引入优化了控制器的性能,提高了系统的动态响应性能,获得很好的控制效果。

(5) 所设计的基于 BP 神经网络的 AGC 系统实际运行结果表明,神经网络可以增强过程参数的自适应能力,有效地改善系统的动态性能,使系统超调小,调节时间短,能很好的跟踪给定信号,控制精度较高系统动态性能得到了改善,控制效果较理想。

6.2 展望

冷连轧机控制系统非常庞大、复杂,而本文的研究只是其中的一小部分,尚存在一些方面有待于进一步的研究和开发:

(1) 在建立五机架冷连轧机的动态数学模型时,由于只针对某些因素的影响而忽略了一些因素的影响而且存在计算误差和一些非线性的线性化等方面的问题,所以有待于进一步完善。

(2) 对于神经网络积分控制方法只作了仿真研究,通过仿真图比较了其与普通 PID 的

控制效果，为了提高网络的运算速度和进一步提高控制精度，尚需引入其它信息处理技术的相关理论，才能更好的应用神经网络控制方法。

参考文献

1. 许健勇. 薄板冷轧厚度与板形高精度控制技术[J], 冶金自动化, 2002, 17: 507-511.
2. 孙蓟泉,张娟. 浅谈轧钢生产中的新技术应用[J], 山东冶金, 2005, 27(6): 1-4.
3. 董德元,贺毓辛. 轧钢论文集[M], 北京:冶金工业出版社, 2008:32-38.
4. 张进之. 板带轧制工艺控制理论概要[J], 中国工程科学, 2009, 4(3): 46-55.
5. Paul Huzyak, L. Terry, Gerber. Design and Application of Hydraulic Gap Control System[J]. Iron and Steel Engineer. 2000,2(8):13-20.
6. G. Hearn, P. Reeve. Hot Strip Mill Multivariable Mass Flow Control[J]. IEE Proc. Control Theory. 2004,151(4):386-394.
7. 宋加. 纵谈我国冷轧板生产[J], 冶金自动化, 2010, 18(4): 36-40.
8. V. Salganik. Mathematical Modelling of Roll Load and Deformation in a Four-highStrip Mill[J]. Materials Processing Technology. 2011,(125):695-699.
9. 王彤,刘相华. 热轧带钢精轧机组的厚度设定与控制新技术[J], 轧钢, 2000, (5): 57-62
10. T. Okamoto. Advanced Gauge and Tension Control of Tandem Cold Mill with Hydraulic Screwdown System. Transaction of Iron and Steel Institute of Japan. 1976,161(5):614-622.
11. T. Araki, M. Iwamoto. Computer Integrated Manufacturing in No.3 Clod Strip Mill at Fukuyama Works. Mini and Microcomputer and their Applications. 2008,(5):402-409.
12. 张进之, 吴增强. 板带轧制技术创新工程概论[J], 钢铁研究学报, 2007, 5(6) : 10-14.
13. I. Imai. IHI New Type Hydraulic Looper. IHI Engineering Review. 1978,11(1):29-37.
14. M. Morel. Quality Control and Production Optimization in Plate Mills Using Hydroplate System. Iron and Steel Engineer. 2003,(5):48-53.
15. R. M. Guo. Evaluation of Dynamic Characteristics of HAGC System. Iron and Steel Engineer. 2002,(7):52-61.
16. 魏衡江. 轧钢过程自动化技术的新进展(下) [J], 冶金自动化, 1996, 20(3): 1-4.
17. Ken Dutton, N. Christopher, Groves. Self-tuning Control of a Cold Mill AutomaticGauge Control System. International Journal of Control. 2010,65(4):573-588.
18. C. J. Harris, S. A. Billings. Self-tuning and Adaptive Control. Theory and Application. 1999,34(3):120-125.
19. D. Sbarbar-Hofer, D. Neumerkel, K. Hunt. Neural Control of Steel Rolling Mill[J]. IEEE Control System. 1993,21(6):69-75.
20. 徐建国. 板带轧机厚控模型基点预控-监控AGC[J], 冶金自动化, 2000, 3(1): 26-28.

21. Yoshiharu Anbe. Tension control of a hot strip mill. IFAC 13th Triennial World Congress[J]. 1996:439-444.
22. Zeng Suisan. Computerized feed-forward AGC system used on high precision strip cold rolling mill[J]. Metallurgical automation Msgn. 1991,2(7)4-5.
23. 孙复森, 刘先礼, 耿庆波等. 绝对AGC技术在中厚板生产中的应用[J], 轧钢, 2010, 18(5): 9-11.
24. J. Schuurmans, T. Jones. Control of Mass Flow in a Hot Strip Mill using Model Predictive Control[J]. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications. 2002,34(18):379-384.
25. S. Wright. Applying New Optimization Algorithms to Model Predictive Control. Proceedings of Chemical Process Control. 1997,93(316):147-155.
26. G. Hearn. Hot Strip Mill Mass Flow Control. Steel Industry. 2009,44(43):223-227.
27. Shigeru Hishikawa, Hideki Maeda, Hiroshi Nagakura, *et al.* New Control Techniques for Cold Rolling Mills –Applications to Aluminum Rolling. Hitachi Review. 1990,39(4):221-230
28. 周晶. 脉冲式半导体激光测速仪的研究[J], 长春大学学报, 2005, 15(2): 80-83.
29. 马永强, 霍振宇, 杨珠. 一种采用增加动量项的改进BP算法实现[J], 科技情报开发与经济, 2006, 16(8): 157-158.
30. B. lang, T. Poppe. Current and Future Development in Neural Computation in Steel Processing Control[J]. Engineering Practice. 2001,65(9):975-986.
31. Z. J. Viharos, Z. Kemeny. AI techniques in modelling, assignment, problem solving and optimization[J]. Artificial Intelligence, 2007, 20(5): 691-698.
32. 黄毅. 人工智能控制理论现状分析与发展探讨[J], 电脑与电信, 2008, (13): 12-14.
33. 李红霞. 人工智能的发展综述[J], 信息技术, 2007, 36(5): 17-18.
34. 李凤翔. 冷轧薄板技术新发展[J], 鞍钢技术, 2009, (12): 1-8.
35. 杨节. 轧制过程数学模型[M], 北京: 冶金工业出版社, 2008.
36. 柴天佑, 王晓波. RBF神经网络在加速冷却控制系统中的作用[J], 自动化学报, 2010, 26: 150-155.
37. 崔建江, 吴胜昔. 仿真技术在冷连轧系统的应用及发展[J], 系统仿真学报, 2001, 13: 201-205.
38. 连家创, 刘宏民. 板厚板形控制[M], 北京: 兵器工业出版社, 2000: 5-10.
39. J. Larkiola, P. Myllykoski. Prediction of Rolling Force in Cold Rolling by Using Physical

Models and Neural Computing[J]. Materials Processing Technology. 1996,60:381-386.

40. 张进之. 动态设定型变刚度厚控方法的效果分析[J], 重型机械, 1998, 1: 30-34.

41. 刘涛,王益群. 冷轧AGC 静-动压轴承油膜厚度的分析与补偿[J], 机床与液压, 2009, 5(8): 62-65.

42. 刘战英,周满春,王涛. IF 钢铁素体区轧制的变形抗力模型[J], 塑性工程学报, 2005, 12(5): 92-95.

43. 王君, 李建平, 王国栋. 压力闭环下的轧机变刚度控制[J], 控制与决策, 2002, 17(1): 126-128.

44. 杜晓钟. 油膜轴承的油膜厚度计算及其对板带材轧制精度的影响[J], 太原重型机械学院学报, 2004, 25(1): 47-49.

45. 汪洪峰, 汪峰, 沈国强. 板坯连铸机辊缝控制技术中的应用[J], 炼钢, 2009, 20(5): 27-29.

46. 王贤琳. 冷轧带钢轧机液压自动辊缝控制系统设计和计算[J], 液压与传动, 2004, (1): 6-8.

47. 祝晓东. 连轧过程中轧机之间的小张力控制[J], 钢铁研究学报, 2005, 17(6): 75-78.

48. 安世奇, 孙一康. 双机架可逆冷轧机恒张力简单自适应控制[J], 西南交通大学学报, 2005, 40(2): 142-146.

49. 刘安平. 热带轧机精轧压下液压缸位置控制[J], 武钢技术, 2009, 43(5): 38-42.

50. 孙时建, 田敬刚, 石明. 液压缸结构设计探讨[J], 山东冶金, 2010, 23(3): 15-17.

51. 彭熙伟, 赵洪刚, 耿庆波. 轧机液压压下动力执行装置的设计[J], 液压与气动, 2004, (7): 3-5.

52. 冉亚斌, 陈福亮. X 光测厚仪在轧制过程中的应用[J], 云南冶金, 2004, 33(5): 59-60.

53. 杨卫东. 基于弹跳方程的GM-AGC 的局限性[J], 冶金自动化, 2005, 29(4): 59-61.

54. H. Johanter. The Success of Renovations in Cold Rolling Mills[J]. Iron and SteelEngineer. 1990,(11):35-38.

55. 徐申. 中厚板轧制过程中的轧制力和轧制力矩数学模型[M], 宽厚板, 2005, 11(5): 7-11.

56. 镰田正诚. 板带连续轧制[M], 北京: 冶金工业出版社, 2002.

57. 杨景明. IGC650HCW冷带轧机控制系统关键技术研究[J], 燕山大学学报, 2000.

58. 杨景明, 宋维公. 冷带轧机液压厚控系统动态数学模型分析与测试[J], 燕山大学学报, 1998, (1): 82-85.

59. 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用[M], 北京: 化学工业出版社, 2002: 17-23.
60. 焦李成. 神经网络系统理论[M], 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000: 10-13.
61. J. S. Son, D. M. Lee, I. S. Kim, et al. A study on on-line learning neural network for prediction for rolling force in hot-rolling mill[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 164: 1612-1617.
62. P. W, Z. E. Huang, M. Y. Zhang, et al. Mechanical property prediction of strip model based on PSO-BP neural network[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 15(3): 87-91.
63. Y. Hu, G. Wu. Modified RLS training algorithm for multi-layer feedforward neural networks[J]. System Engineering and Electronics Technology, 2002, 22(1): 77-80.
64. 周政. BP神经网络的发展现状综述[J], 山西电子技术, 2008, (2): 90-92.
65. 刘建昌, 王建辉, 顾数生, 周瀛. AGC系统的神经网络自适应控制[J], 控制与决策, 1998, 13: 438-442.
66. 耿小庆, 和金生, 于宝琴. 几种改进BP算法及其在应用中的比较分析[J], 计算机工程与应用, 2007, 43(33): 243-245.

致 谢

在研究生学习生活即将结束之际，我要对在这三年的硕士研究生学习、科研和生活中给予我支持和鼓励的人们表示深深的感谢。

首先，我要感谢我的导师——王安娜教授。本论文的研究工作一直得到了王老师的悉心指导。王老师不仅为本论文的研究指出了方向，而且提出了许多方向性的指导意见，使我受益匪浅。在日常的学习和生活中，王老师也给予了我很多宝贵意见和帮助。导师深厚的基本功、严谨求实的治学态度、孜孜不倦的工作精神及博大精深的知识体系使我受益终身；导师对新知识的浓厚兴趣，敏锐把握，更给予我极大的启迪，是我在今后的学习和工作中的榜样。我不仅学到了宽广的专业知识，打下了扎实的基础，而且也学会了很多为人处世的道理。在论文完成之际，谨向尊敬的导师王安娜教授致以深深的谢意和最诚挚的祝福。

此外，感谢在论文期间给予我支持、帮助和鼓励的武振威、范建新、薛常亮同学。他们热心、无私、只求付出、不求回报的精神让我深受感动，愿我们彼此的友谊天长地久。还要感谢迁钢公司各级领导对我们的支持、鼓励，我会用自己的毕生所学回报迁钢领导对我们的栽培。

最后，我还要感谢我的父母亲人这么多年来对我的悉心照顾，一如既往的支持我完成学业。并祝你们身体健康、生活幸福！

在这两年的时间中，我得到了太多人的帮助，我很难在此一一列出他们的姓名。但是，我会将所有美好的回忆都永远留在心中。大家曾经给予我的鼓励、帮助和支持将会激励着我勇敢地迈向新的人生历程。