

GAOJINGDU BANDAIGANG HOUDU KONGZHI DE
LILUN YU SHIJIAN

高精度板带钢厚度控制的 理论与实践

丁修堃 张殿华 王贞祥 等编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高精度板带钢厚度控制的 理论与实践

丁修堃 张殿华 王贞祥 等编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

图书在版编目(CIP)数据

高精度板带钢厚度控制的理论与实践 / 丁修堃等编著.
—北京:冶金工业出版社,2009.3
ISBN 978-7-5024-4512-6

I. 高… II. 丁… III. 带钢—板材轧制—厚度—控制
IV. TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 016321 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 程志宏 美术编辑 李 心 版式设计 葛新霞

责任校对 侯 璐 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4512-6

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 3 月第 1 版,2009 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;25.5 印张;615 千字;386 页;1-2500 册

65.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序 言

板带钢轧制厚度控制是板带轧制生产最核心的控制环节,板带钢轧制厚度控制技术也是板带轧制过程最重要、最基础的控制技术。《高精度板带钢厚度控制的理论与实践》一书结合引进技术的消化、吸收和我国科技工作者的集成创新与自主创新,总结了国际、国内在厚度自动控制方面的最新进展,反映了厚度自动控制技术的发展趋势。本书不仅讲述了基本原理和典型控制方法,而且列举大量的国内外应用的实例,它的理论与实践相结合的特色将使广大从事轧制过程研究的读者受益。特别是,近年轧制技术及连轧自动化国家重点实验室承担了一批板带钢轧制过程自动化方面的工程项目,在厚度自动控制方面进行了系统创新,取得了一些重要成果,本书将这些理论研究和工程实践的经验总结出来,对我国轧制过程自动化技术的发展是一个重要贡献。

本书的作者有来自轧制工艺专业的,也有来自自动化专业的,他们汇聚在一起,密切合作,以控制数学模型、计算机控制系统以及高可靠性技术参数检测装置这三大控制要素为出发点,构筑本书的基本内容,实现了工艺与自动化的完美结合。通过轧制过程自动化的论述,集中体现了轧制过程对自动化的需求以及自动化对轧制过程的支撑二者之间的依存关系。因此,该书是一部有明显工艺色彩的自动化方面的著作,体现了学科交叉在技术发展方面的关键作用。本书的出版,不仅对从事轧制过程自动化的科研人员,而且对广大的轧钢工艺人员,都是一大福音。

《高精度板带钢厚度控制的理论与实践》一书凝聚着东北大学几代人研究及教学的经验,是他们多年心血的结晶,也是轧制技术及连轧自动化国家重点实验室团队以老带新、新老合作结出的丰硕成果。早在改革开放之初我国引进第一套冷热连轧机的1978年,东北大学(东北工学院)的教授和学者就投身于轧制过程自动化的教学和科研工作,长期在武钢现场为消化引进的冷热连轧机,潜心进行连轧过程自动化方面的研究,在厚度自动控制方面多有建树。随着我国现代化建设的迅猛发展,一大批年轻教授也陆续加入进来,他们转战南北,在冶金企业进行科学研究,并总结引进技术为我所用,取得了具有特色的研究成果;在宝钢等先进大型企业举办的轧制过程自动化培训班,培训了我国现代化急需的冶金自动化人才,为我国轧制过程自动化技术的发展和自主创新做出了突出贡献;先后出版和再版我国冶金院校本科生和研究生国家级重点教材《轧制过程自动化》,培育了我国一代轧制过程自动化的人才。近年来轧制技术

及连轧自动化国家重点实验室的年轻团队继承发扬了老一代专家严谨学风和与国家建设紧密结合的传统,活跃在国民经济主战场,增长了才干,积累了经验。本书的出版正体现了这个团队在老专家的率领下,深入现场,结合最先进的工艺和装备,通过现场数据采集、实验验证、反复斟酌,最终成书的良好学风。本书的撰写过程也促进了团队中年轻一代的迅速成长。

我深信,《高精度板带钢厚度控制的理论与实践》一书基本代表了该领域的先进水平,它的出版对于我国轧制过程技术人员的成长,促进轧制过程自动化的教学和科研工作,提高我国板带材厚度自动控制的水平,加强轧制过程自动化的创新,都具有重要的意义。

深深感谢本书的各位作者!

衷心祝贺《高精度板带钢厚度控制的理论与实践》一书的出版!

中国工程院院士



2008年6月19日

前 言

提高板带钢的厚度精度一直是人们不懈追求的目标,也是推动板带钢轧制技术进步和发展的动力。

提高板带钢厚度精度的关键,一是提高轧制参数的预设定精度,数学模型是预设定计算的核心,数学模型结构和系数对设定计算都有重要的影响,提高数学模型精度的有效措施是利用自适应、自学习来进一步提高预报值的精度;二是开发高性能的在线厚度自动控制系统。厚度自动控制系统的发展和不断开发,为板带钢厚度精度的提高做出了巨大的贡献。

本书力求较全面地反映国内外高精度板带钢厚度自动控制方面的最新成就。本书从控制用的数学模型、由数学模型生成的计算机控制系统以及高可靠性的技术参数检测装置及其系统等三大基本要素出发,对高精度板带钢厚度自动控制的控制方法、控制基本原理、控制系统结构、控制系统的具体应用、控制效果的水平、板带钢厚度测量和维护技术等方面都做了较系统的论述。本书反映了轧制技术及连轧自动化国家重点实验室近年来在热连轧、冷连轧、动态变规格控制和中厚板等厚度控制领域最新的研究和应用成果。

为了满足读者对高精度板带钢厚度自动控制技术的了解和需要、为了促进先进技术的推广应用和新发展、为了培训高精度板带钢厚度控制工程技术人员等的需要,根据国内外一些先进轧机所采用的高精度板带钢厚度自动控制技术,在认真学习国内外先进技术和经验的基础上,组织多年从事高精度板带钢厚度自动控制工作,对教学、科研、生产实践有丰富经验的专家编写了此书。

本书可以作为金属压力加工和自动化等专业的本科生、研究生的选修课教材,也可以作为相关工程技术人员的参考书。

本书共分13章,其中0章绪论、第1章、第3章、第5章、第9章、第10章、主要符号表和索引由丁修堃编写;第2章、第4章和第8章由王贞祥编写;第6章由张殿华编写;第7章由李旭编写;第11章由孙涛编写;第12章由李建平编写。全书由丁修堃、张殿华、王贞祥统稿。

本书得到中国工程院王国栋院士和东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室刘相华主任的热情支持和帮助,对此作者衷心感谢。在调研和编写过程中也曾得到宝钢、鞍钢、武钢、本钢、唐钢、首钢、舞钢、宁波永正精密不锈钢

厂和陕西钢铁研究所等单位的领导和工程技术人员的热情支持和帮助,作者在此一并深表感谢。此外,在本书的编写过程中,以下同志为本书的出版给予了热情支持和帮助,他们是郑秉霖教授、丁长江高级工程师以及孙洁廉、姜新、许云波、张春宇、付静文、孙杰、高扬等,作者在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中的错误与不妥之处,诚恳地希望广大读者给予批评指正。

作 者
2008 年 10 月

主要符号表

(1) 厚度

- H 、 h_{en} ——来料入口厚度、入口段带钢厚度, mm;
 h 、 h_{ex} ——实际轧出厚度、出口段带钢厚度, mm;
 ΔH ——来料厚度偏差、入口段带钢厚度偏差, mm;
 h_{SET} 、 $h_{i, \text{SET}}$ ——设定(给定)厚度、第 i 机架设定(给定)厚度, mm;
 h_{FAC} 、 $h_{i, \text{FAC}}$ ——实测(实际)厚度、第 i 机架实测(实际)厚度, mm;
 Δh ——厚度偏差($\Delta h = h_{\text{SET}} - h_{\text{FAC}}$), mm;
 h_{en} 、 $h_{\text{en}, i}$ ——机架入口、第 i 机架入口处带钢厚度, mm;
 h_{ex} 、 $h_{\text{ex}, i}$ ——机架出口、第 i 机架出口处带钢厚度, mm;
 Δh_{en} 、 $\Delta h_{\text{en}, i}$ ——机架入口、第 i 机架入口处带钢厚度偏差, mm;
 Δh_{ex} 、 $\Delta h_{\text{ex}, i}$ ——机架出口、第 i 机架出口处带钢厚度偏差, mm;
 Δh_{eff} 、 $\Delta h_{\text{eff}, i}$ ——带钢有效厚度偏差、第 i 机架带钢有效厚度偏差, mm;
 h^* 、 Δh^* ——目标板厚、目标厚度控制量, mm;
 $\Delta h_{i, \text{m}}$ ——第 i 机架带钢平均厚度偏差, mm;
 h_{MF} 、 $\Delta h_{i, \text{MF}}$ ——物质流板厚、第 i 机架物质流板厚偏差, mm;
 Δh_{X} ——X 射线测厚仪测出的板厚偏差, mm;
 Δh_{M} ——监控时板厚偏差, mm。

(2) 宽度

- B ——带钢宽度, mm;
 B_{S} ——板坯宽度, mm;
 B_{R} ——粗轧后板宽, mm;
 B_{E} ——立轧后板宽, mm;
 B_{F} ——精轧后成品带钢(目标)宽度, mm;
 B_{FB} ——成品带钢宽度反馈量, mm;
 ΔR_{Rij} ——粗轧时各水平辊机架(i)各道次(j)宽展量, mm;
 ΔR_{Eii} ——各立辊机架(i)各道次(j)的侧压下量, mm;
 $\Delta R_{\text{E}\Sigma}$ ——立辊总侧压下量, mm。

(3) 辊缝参数

- S ——位置偏差、辊缝值, mm;
 S_0 ——位置的初始偏差、空载辊缝、预设辊缝, mm;
 ΔS ——辊缝改变量、轧制时轧机的弹性变形量, mm;
 ΔS_K 、 ΔS_{K+1} —— K 时刻、 $K+1$ 时刻的辊缝改变量, mm;

- S_{ZER} —— 轧板调零时的辊缝, mm;
 S_L —— 锁定时的辊缝值, mm;
 ΔS_A —— 偏心滤波时辊缝补偿量, mm;
 ΔS_w —— 轧辊热膨胀引起的辊缝变化量, mm;
 ΔS_{CVC} —— 使用 CVC 功能时对辊缝的补偿量, mm;
 ΔS_{LA} —— 油膜补偿量, mm;
 ΔS_{OV} —— 考虑支持辊椭圆度后的辊缝调节量, mm;
 ΔS_{rev} —— 辊缝位置零点校正量, mm。

(4) 速度参数

- v, v_i —— 线速度、轧制速度、第 i 机架轧制速度, m/s 或 mm/s;
 v_H —— 轧件(带钢)入口速度, m/s;
 v_h —— 轧件(带钢)出口速度, m/s;
 v_m —— 轧件(带钢)最大线速度, m/s;
 v_{REF} —— 速度给定值, m/s;
 v_{SET} —— 速度设定值, m/s;
 v_{FAC} —— 速度实际值, m/s;
 v_{man} —— 人工干预速度, m/s;
 v_{con} —— 速度调节量, m/s, mm/s;
 $\Delta v_{en,i}$ —— 第 i 机架入口处带钢速度增量, m/s, mm/s;
 $\Delta v_{ex,i}$ —— 第 i 机架出口处带钢速度增量, m/s, mm/s。

(5) 张力参数

- T —— 作用于轧件截面上的张力, kN;
 T_{SET} —— 机架间张力设定值, kN;
 T_{FAC} —— 机架间张力实际值, kN;
 $\Delta T_{en,i}$ —— 第 i 机架轧辊入口处的张力偏差, MPa;
 $\Delta T_{ex,i}$ —— 第 i 机架轧辊出口处的张力偏差, MPa;
 $\Delta T_{i,(i+1)}$ —— 第 i 与 $i+1$ 机架之间带钢的张力偏差, MPa;
 σ_{Tm} —— 平均单位张力, MPa;
 T_f —— 前张力, kN;
 T_b —— 后张力, kN。

(6) 温度参数

- t —— 轧件的表面温度, °C;
 T_s —— 终轧(目标)温度设定值, °C;
 T_i —— 第 i 机架带钢入口温度, °C;
 T_{wi} —— 第 i 机架带钢变形功引起的带钢温升, °C;
 T_{li} —— 第 i 机架中带钢与轧辊接触的传导温降, °C;

- $T_{ir,i}$ ——第 i 机架与第 $i+1$ 机架间辐射和冷却引起的温降, $^{\circ}\text{C}$;
 T_m ——终轧温度平均值, $^{\circ}\text{C}$;
 $\Delta t_{\text{传}}$ ——传导传热引起轧件的温度降, $^{\circ}\text{C}$;
 $\Delta t_{\text{塑}}$ ——金属塑性变形热使轧件的温度升高, $^{\circ}\text{C}$;
 $\Delta t_{\text{摩}}$ ——因接触摩擦引起的轧件温度升高, $^{\circ}\text{C}$;
 $\Delta t_{\text{对}}$ ——高压水除鳞时对流引起的温度降, $^{\circ}\text{C}$;
 $\Delta t_{\text{辐}}$ ——辐射温度降, $^{\circ}\text{C}$;
 $\Delta t_{\text{水}}$ ——高压冷却水的温度降, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{F\text{入}}$ ——精轧区入口温度, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{F\text{出}}$ ——精轧区出口温度, $^{\circ}\text{C}$;
 T_{FAC} ——终轧实测温度, $^{\circ}\text{C}$;
 T^* ——终轧目标温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

(7) 工艺参数

- Δh ——绝对压下量, mm;
 ε ——相对压下量(相对变形程度), %;
 M ——轧件的塑性刚度系数, kN/mm;
 D ——轧辊直径, mm;
 R ——轧辊半径, mm;
 R' ——轧辊压扁半径, mm;
 a ——力臂, mm;
 μ ——摩擦系数;
 λ_a ——力臂系数;
 f ——前滑值, %;
 b ——后滑值, %;
 l ——变形区长度, mm;
 δ ——带钢延长率, %。

(8) 力能参数

- P, P_{FAC} ——轧制压力、实际轧制压力, kN;
 ΔP ——轧制压力变化量, kN;
 P_{Σ} ——总轧制压力, kN;
 K_m ——轧机刚度系数, kN/mm;
 K_E ——轧机等效刚度系数, kN/mm;
 P_{add} ——附加轧制压力, kN/mm;
 P_{SET} ——轧制压力设定值, kN/mm;
 P_{int} ——负载辊缝调节积分部分轧制压力, kN;
 P_{enl} ——负载辊缝调节放大部分轧制压力, kN;
 P_M ——监控部分轧制压力附加值, kN;

- P_L ——锁定时轧制压力, kN;
 P_{SR} ——单机轧制时的轧制压力, kN;
 P_{CR} ——双机连轧时的轧制压力, kN;
 M_n ——额定力矩, kN · m;
 M_{CR} ——双机连轧时的轧制力矩, kN · m;
 M_{SR} ——单机轧制时的轧制力矩, kN · m;
 M_R ——轧制力矩, kN · m。

目 录

主要符号表

0 绪论	1
0.1 高精度板带钢厚度自动控制的基本概念	1
0.2 高精度板带钢厚度自动控制的发展概况	1
0.3 使用部门对板带钢厚度精度的要求	2
0.4 板带钢厚度的定义和表示厚度的基本方法	3
0.5 轧制厚度的确定	4
0.6 厚度自动控制技术发展的趋势和特点	5
1 板带钢轧制时厚度控制用工艺数学模型	8
1.1 弹跳模型	8
1.1.1 弹跳模型在计算机控制轧制过程中的重要性	8
1.1.2 弹跳模型的基本概念	9
1.1.3 弹跳模型的建立	9
1.1.4 轧机刚度的测定	10
1.1.5 弹跳模型精度分析及提高精度的措施	12
1.2 轧制压力模型	14
1.2.1 轧制压力模型在计算机控制中的作用	14
1.2.2 建立轧制压力模型的方法和模型主要影响因素的基本结构	15
1.2.3 在线使用的轧制压力模型	24
1.3 前滑模型	34
1.3.1 前滑模型在计算机控制连轧过程中的作用	34
1.3.2 前滑的理论模型	35
1.3.3 前滑的统计型模型	38
1.4 能耗模型	39
1.4.1 能耗模型在计算机控制轧制过程中的应用	39
1.4.2 能耗模型的理论基础	39
1.4.3 能耗模型的结构形式	41
1.4.4 建立能耗模型的步骤	44
1.5 温降模型	45
1.5.1 轧制过程中温降变化的基本规律	45

1.5.2 热连轧过程中的温降模型	49
2 厚度自动控制系统数学模型的自适应控制与自学习控制	55
2.1 自适应控制与自学习控制的必要性	55
2.2 自适应回归算法介绍	56
2.2.1 增长记忆递推算法	56
2.2.2 渐消记忆递推回归法	60
2.2.3 指数平滑法	62
2.3 模型自适应应用举例	64
2.4 模型自学习	67
2.4.1 计算机控制系统中模型自学习的任务	68
2.4.2 模型因子自学习	68
2.4.3 模型中参数自学习	68
3 厚度自动控制的基本形式及其控制原理	72
3.1 板带钢厚度波动的原因及其厚度的变化规律	72
3.1.1 板带钢厚度波动的原因	72
3.1.2 轧制过程中厚度变化的基本规律	72
3.2 厚度自动控制的基本形式	75
3.3 厚度自动控制的基本原理	76
3.3.1 反馈式厚度自动控制的基本原理	76
3.3.2 前馈式厚度自动控制的基本原理	78
3.3.3 监控式厚度自动控制的基本原理	79
3.3.4 张力式厚度自动控制的基本原理	81
3.3.5 金属秒流量 AGC 控制的基本原理	82
3.3.6 液压式厚度自动控制的基本原理	85
3.3.7 轧制力 AGC(P-AGC)控制系统的基本原理	92
3.3.8 绝对值 AGC(ABS-AGC)控制系统的基本原理	95
3.3.9 动态设定型 AGC(D-AGC)控制系统的基本原理	100
4 板带钢轧机的计算机控制系统	103
4.1 概述	103
4.1.1 硬件的组成	104
4.1.2 软件的组成	105
4.2 计算机控制系统的发展	106
4.2.1 数据采集系统(巡回检测系统)	106
4.2.2 操作指导控制系统	107
4.2.3 直接数字控制系统	107
4.2.4 监督计算机控制系统	108

4.2.5 多级控制系统	108
4.2.6 分散控制系统	109
4.3 控制用计算机应具备的性能	109
4.4 带钢连轧计算机控制系统的任务	110
4.4.1 热连轧(工艺)物料流程	111
4.4.2 热连轧计算机控制系统	111
4.5 热轧计算机控制系统的特点	118
5 压下位置自动控制基本原理及其控制系统	120
5.1 概述	120
5.2 电动压下位置自动控制系统的基本原理及其控制系统	120
5.2.1 压下位置控制的基本要求和控制的基本原理	122
5.2.2 提高位置控制精度和可靠性的措施	129
5.2.3 位置控制系统程序的公用性和程序的组成	130
5.3 电动-液压压下位置自动控制系统	133
5.3.1 概述	133
5.3.2 2050mm 热连轧精轧机组的电动-液压压下机械结构和检测装置	133
5.3.3 电动-液压压下系统	134
5.3.4 2050mm 热连轧机的液压系统控制线路图	135
5.3.5 2050mm 热连轧机压下位置检测装置	136
5.3.6 2050mm 热连轧机压下系统的计算机控制系统	137
5.3.7 2050mm 热连轧机的初始辊缝设定	140
5.3.8 1700mm 热连轧机中的电动-液压压下位置控制特点	142
5.4 冷连轧机全液压压下位置自动控制系统	143
5.4.1 压下位置控制系统	143
5.4.2 压下位置零点校正	147
5.5 具有可编程序控制器的压下位置自动控制	148
5.5.1 可编程序控制器的基本含义和特点	148
5.5.2 可编程序控制器(PLC)与控制用计算机和控制装置关系	149
5.5.3 可编程序控制器(PLC)在压下位置控制中的应用	149
6 带钢热连轧厚度自动控制系统	152
6.1 热连轧 AGC 系统概述	152
6.2 GM-AGC	156
6.2.1 轧机变刚度控制的原理	157
6.2.2 动态设定型 AGC	158
6.2.3 GM-AGC 一般形式	158
6.2.4 GE 公司的 GM-AGC 控制策略	160
6.2.5 GM-AGC 的工作模式	161

6.2.6	GM-AGC 对操作侧和传动侧辊缝附加值的处理	163
6.3	MN-AGC	164
6.3.1	X 射线测厚仪的误差	165
6.3.2	MN-AGC 系统构成	165
6.3.3	根据产品厚度改变 MN-AGC 的增益	165
6.3.4	额外增益	167
6.3.5	传输延时的影响	167
6.3.6	自动扇形	168
6.3.7	超调量抑制	168
6.3.8	负荷平衡	169
6.3.9	穿带张力对厚度控制的影响	169
6.3.10	压下量补偿	170
6.3.11	最大修正值限幅	170
6.3.12	GM-AGC 与 MN-AGC 的相关性	170
6.3.13	MN-AGC 运行的相关条件	171
6.3.14	MN-AGC 操作模式	171
6.3.15	MN-AGC 的安装与调试	173
6.4	FF-AGC	180
6.4.1	功能描述	180
6.4.2	FF-AGC 的安装	182
6.5	辊缝补偿	183
6.5.1	油膜补偿	183
6.5.2	轧辊热膨胀和磨损	184
6.5.3	弯辊补偿	184
6.5.4	张力损失补偿	185
6.6	秒流量补偿	185
6.6.1	秒流量误差	186
6.6.2	秒流量计算误差	188
6.6.3	秒流量补偿安装	189
6.7	穿带自适应	189
6.7.1	功能描述	190
6.7.2	穿带自适应执行	190
6.7.3	穿带自适应的测量	190
6.7.4	下游机架穿带自适应运行	191
6.7.5	穿带自适应的安装与调试	192
6.8	负荷分配	194
6.8.1	功能描述	194
6.8.2	安装与调试	195
6.9	热连轧机 AGC 的功能总结	197

7 带钢冷连轧的厚度自动控制系统	198
7.1 冷连轧的工艺特点及设备性能	198
7.1.1 工艺特点	198
7.1.2 设备及其性能	198
7.2 冷连轧机的厚度自动控制	202
7.2.1 冷轧带钢厚差产生的原因	202
7.2.2 冷连轧厚度控制特点	203
7.2.3 冷连轧 AGC 计算机控制系统	203
7.2.4 冷连轧自动化仪表	203
7.2.5 厚度自动控制系统功能	205
7.2.6 张力自动控制系统功能	233
7.3 冷连轧厚度自动控制效果分析	238
7.3.1 第 1 机架各厚度控制策略典型控制效果分析	238
7.3.2 第 5 机架各厚度控制策略典型控制效果分析	238
7.3.3 机架间的恒张力控制效果分析	239
7.3.4 厚度-张力解耦控制效果分析	240
8 带钢全连续轧制时的动态变规格控制	242
8.1 概述	242
8.2 动态变规格楔形过渡段主要参数的确定	242
8.2.1 楔形段长度 L_{K_i}	242
8.2.2 楔形段起始位置 L_{CK_i} 和焊缝处厚度 h_{SN_i} 的确定	243
8.2.3 $F'(\alpha_i)$ 值的确定	245
8.3 现场应用的动态变规格楔形段参数确定方法讨论	247
8.3.1 楔形段长度 L_{K_i} 的确定	248
8.3.2 楔形起始位置 L_{CK_i} 的确定	248
8.4 动态变规格控制策略	250
8.4.1 楔形段的形成及压下增量的确定	250
8.4.2 楔形过渡段速度控制途径及其变化规律	251
8.4.3 动态变规格时张力变化规律	253
8.5 动态变规格时的计算机自动控制过程分析	253
8.6 动态变规格控制的实际效果分析	255
8.6.1 计算机控制系统的响应速度和精度分析	255
8.6.2 速度、压下和张力控制系统的响应速度和精度分析	256
8.6.3 动态变规格时的带钢超厚分析	258
8.7 热连轧动态变规格轧制	259
8.7.1 无头轧制主要工艺和设备	260
8.7.2 移动中带钢头、尾连接的控制技术	261

8.7.3 无头轧制接合区板厚控制技术	261
9 厚度自动控制系统中的补偿控制原理和措施	262
9.1 支撑辊偏心的补偿控制	262
9.1.1 支撑辊偏心对厚度精度的影响	262
9.1.2 轧辊系统跳动的概率分析	263
9.1.3 消除轧辊偏心的方法和措施	264
9.2 油膜厚度的补偿控制	273
9.3 板带钢宽度的补偿控制	275
9.4 压下补偿值的计算和控制	277
9.5 带钢尾部补偿值的计算和控制	278
9.6 轧辊热膨胀补偿	281
9.7 加减速补偿	282
9.7.1 概述	282
9.7.2 补偿原理	282
9.7.3 控制方式框图	282
9.8 轧制效率补偿值的计算	283
9.8.1 轧制效率 η 与轧制速度 v 的关系	283
9.8.2 轧制效率 η 与轧件塑性系数 M 的关系	283
10 薄带材轧制时的厚度自动控制	285
10.1 概述	285
10.2 二十辊轧机的结构形式和特点	286
10.2.1 二十辊轧机结构形式	287
10.2.2 森吉米尔二十辊轧机结构特点	289
10.2.3 森吉米尔二十辊轧机工作机座结构	289
10.3 森吉米尔二十辊轧机的调整机构	291
10.3.1 压下调整机构	291
10.3.2 辊形调整机构	293
10.3.3 辊径补偿调整机构	296
10.4 二十辊轧机 AGC 系统的组成	296
10.4.1 液压压下位置闭环	297
10.4.2 厚度和速度检测装置	298
10.4.3 AGC 计算机控制系统简介	298
10.5 二十辊轧机 AGC 系统控制特点	299
10.5.1 前馈控制特点	300
10.5.2 秒流量控制特点	301
10.5.3 反馈控制特点	302
10.6 二十辊轧机 AGC 系统运行模式	303