



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

轧制过程自动化

(第3版)

丁修堃 主编

ZHAZHI GUOCHENG

ZIDONGHUA



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

轧制过程自动化

(第3版)

丁修堃 主编

北 京
冶金工业出版社
2009

图书在版编目 (CIP) 数据

轧制过程自动化/丁修堃主编. —3 版. —北京: 冶金工业出版社, 2009. 10

ISBN 978-7-5024-5070-0

I. 轧… II. 丁… III. 轧制—过程控制: 自动控制
IV. TG334. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 174593 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 新 版式设计 张 青

责任校对 刘 倩 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5070-0

北京印刷一厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1986 年 10 月第 1 版, 2005 年 3 月第 2 版,

2009 年 10 月第 3 版, 2009 年 10 月第 6 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 29.5 印张; 789 千字; 451 页; 11991-14990 册

59.00 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)

第3版前言

《轧制过程自动化（第2版）》一书自从2005年出版以来，受到了金属压力加工和自动化等专业的师生与工程技术人员的欢迎和好评。该书反映了当今现代化轧制过程的最新技术和新成就；阐明了轧制过程自动化的原理和具体内容；打破了专业界限，实现了各相关专业学科的有机联系；适应了高等院校教学的要求和教改的趋势。该书的第1版在1986年出版的时候曾被认为是教材的创新，并于1992年荣获了全国优秀教材奖。本次第3版仍基本保留了原书的体系，力求积极反映当代轧制过程自动化技术的最新发展和新成就，在第2版内容的基础上，各主要章节都有一定程度的更新，并补充了一些必要的新技术和新知识，其中包括：更新和完善了计算机控制系统、轧件跟踪、带钢热连轧和冷连轧厚度自动控制、带钢板形自动控制、热轧板带钢宽度自动控制和厚板平面形状控制的内容；新增加了薄带材厚度自动控制和带钢全连续轧制时的动态变规格控制；在提高控制系统稳定性和厚度精度方面采取的一些新技术等，进一步充实和完善了教材内容。

本书主要是针对材料成型与控制工程专业本科教学使用编写的，部分内容可以供研究生选修或教学使用。本书也可作为自动控制类等有关专业本科生、研究生的教材或参考书。由于本书作者中包括了宝钢等先进企业的优秀工程技术人员参加编写，其数据、实例来自现场有代表性的先进控制设备，因此本书亦非常适合有关现场工程技术人员参考和使用。

本书由东北大学丁修堃主编。第1章和第4章中的第4.5节由王贞祥撰写；第2章、第9章由朱健勤撰写；第4章中的第4.4节由许健勇撰写；第5章由姜正连和李山青撰写；绪论、第3章、第4章中的4.1、4.2、4.3、4.6、4.7节、第6章、第7章、第8章、第10章、主要符号表以及主要英文缩写由丁修堃撰写。全书由丁修堃、王贞祥审阅。

本书曾得到东北大学、上海宝山钢铁股份有限公司、武汉钢铁股份有限公司、鞍山钢铁股份有限公司、本溪钢铁股份有限公司、北京钢铁研究总院、重庆钢铁设计研究院、北京钢铁设计研究总院、武汉钢铁设计研究院、天津电气传动设计研究所、鞍山钢铁设计研究院等单位的重视与热情支持。编者对上述单位具体业务部门的领导和工程技术人员所给予的帮助与支持深表感谢。此外，在本书的编写过程中，以下同志给予了热情支持和帮助，他们是孙洁廉、丁薇、李宏斌、张君茹、王思敬、施青、孙静、刘晓龙、张芳、沙玉辉、孙祝宾、田秀兰、李靖等，编者在此一并表示衷心的感谢。

本次再版，尽管编者做了大量认真的工作，但由于编者业务水平所限，不妥之处，敬请读者和各位同仁批评指正。

编 者

2009年8月

第2版前言

《轧制过程自动化》一书从1986年出版以来,受到了金属压力加工和自动化等专业的师生与工程技术人员的欢迎和好评。该书反映了当时现代化轧制过程的最新技术和新成就;阐明了课程的基本原理和具体内容;打破了专业界限,实现了各相关专业学科的有机联系;适应了高等院校教学的要求和教改的趋势。该书当时曾被认为是教材的创新,并于1992年荣获了全国优秀教材奖。此次再版在基本保留了原书体系的同时力求积极反映当代轧制过程自动化技术新发展和新成就,在该书原版内容的基础上,各主要章节都有较大幅度的更新,补充了一些必要的新技术和新知识,并新增加了第6章、第8章、第9章等全新内容,进一步充实和完善了教材的内容。

本书大部分内容是针对材料成型与控制工程专业本科教学使用编写的,部分内容可供硕士研究生选修或教学使用。本书也可作为自动控制类等有关专业本科生、研究生的教材或参考书以及供有关现场的工程技术人员参考。

本书由东北大学丁修堃主编。第1章由王贞祥撰写;第2章、第9章由朱健勤撰写,丁修堃审阅;绪论、第3章、第4章、第6章、第7章、第8章、第10章以及索引由丁修堃撰写,其中4.4节由丁修堃和许健勇撰写;第5章由姜正连和李山青撰写,汪祥能审阅。

本书曾得到东北大学和上海宝山钢铁股份有限公司等单位的重视与支持。编者对上述单位具体业务部门的领导所给予的帮助和支持深表感谢。

本次再版,尽管编者做了大量认真的工作,但由于编者水平所限,书中还可能存在一些不足之处,敬请读者和各位同仁批评指正。

编者

2004年9月

第1版前言

《轧制过程自动化》一书是为了适应轧制过程技术发展的需要,根据1982年冶金部教材工作会议制订的教材规划,并在编者多年教学实践的基础上编写的。在内容上综合了一些国内外轧钢生产过程自动化的技术内容。力求反映国内外的新技术和新成就。本书除作为高等院校轧钢专业教学用书外,也可以供其他压力加工专业、工业企业电气化和生产过程自动化专业以及生产和设计部门的工程技术人员参考。

本书由东北工学院丁修堃主编。绪论、第一、二、三、四、六、七章和附录等由丁修堃编写;第五章由东北工学院汪祥能编写。第一、二、三章承蒙东北工学院顾兴源审阅;第四、五、六、七章请东北工学院杨自厚审阅;杨自厚和顾兴源对本书初稿和定稿提出了很多宝贵意见,编者对此表示衷心的感谢。为了更好地吸收各兄弟院校的经验,1985年5月在沈阳召开了冶金工业部所属部分高等院校有关教师参加的《轧制过程自动化》教材审稿会议,代表们认真地审查了原稿,并提出了很多宝贵的意见,编者在此一并表示感谢。

在本书编写过程中还得到了有关高等院校、冶金部自动化研究所、天津电气传动设计研究所、武汉钢铁公司热轧带钢厂和冷轧薄板厂、宝山钢铁总厂、北京钢铁设计研究总院、重庆钢铁设计研究院、武汉钢铁设计研究院、鞍山钢铁设计研究院和马鞍山钢铁设计研究院等许多单位的同志热情支持、帮助,并提出了许多宝贵意见,在此深表感谢。

由于编者业务水平所限,肯定还会有一定的错误与不妥之处,我们诚恳地希望读者给予批评指正。

编 者

1985年6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、目标厚度偏差, mm;
 $\Delta h_{i,m}$ ——第 i 机架带钢平均厚度偏差, mm;
 h_{MF} 、 $h_{i,\text{MF}}$ ——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_H ——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;
 ΔB_{Rij} ——粗轧时各水平辊机架(i)各道次(j)宽展量, mm;
 ΔB_{Eit} ——各立辊机架(i)各道次(j)的侧压下量, mm;
 $\Delta B_{\text{E}\Sigma}$ ——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、预设定辊缝, 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_{zero} ——轧板调零时的辊缝, mm;
 S_L ——锁定时的辊缝值, mm;
 ΔS_A ——弹跳修正时辊缝补偿量, mm;
 ΔS_E ——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 ——线速度或轧制速度、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 或 mm/s;
 $\Delta v_{\text{en},i}$ ——第 i 机架入口处带钢速度增量, m/s 或 mm/s;
 $\Delta v_{\text{ex},i}$ ——第 i 机架出口处带钢速度增量, m/s 或 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;
 $\Delta T_{\text{en},i}$ ——第 i 机架轧辊入口处的张力偏差, MPa;
 $\Delta T_{\text{ex},i}$ ——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) 板形和平面形状参数

- C_{I} ——带材中心凸度或整体中心凸度, μm 或 mm;
 C_{J} ——带材局部凸度, μm 或 mm;
 C_{H}, Δ ——带材入口凸度, 带材变形前凸度, μm 或 mm;
 C_{h}, δ ——带材出口凸度, 带材变形后凸度, μm 或 mm;
 ΔC ——带材凸度变化量, μm 或 mm;
 C_{w} ——工作辊凸度, μm 或 mm;
 C_{b} ——支撑辊凸度, μm 或 mm;
 C_{c} ——轧制中心凸度, μm 或 mm;
 C'_{w} ——等效轧辊凸度, μm 或 mm;
 C_{r}^* ——目标辊缝凸度, μm 或 mm;
 C_{r} ——实际辊缝凸度, μm 或 mm;
 δC_{r} ——实际辊缝与目标辊缝凸度偏差值, μm 或 mm;
 C_{th} ——轧辊热凸度, μm 或 mm;
 C_{rub} ——轧辊磨损凸度, μm 或 mm;

ΔC_{th} ——轧辊热凸度变化量, μm 或 mm ;

ΔD_{rub} ——轧辊磨损量, μm 或 mm ;

R_B ——展宽比;

R_L ——长度方向轧制比;

ΔH_S ——成形轧制压下量, mm ;

ΔH_B ——展宽轧制压下量, mm ;

ΔH_F ——精轧压下量, mm 。

(7) 温度参数

t ——轧件的表面温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_S ——终轧(目标)温度设定值, $^{\circ}\text{C}$;

T_i —— i 机架带钢入口温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_{w_i} —— i 机架带钢变形功引起的带钢温升, $^{\circ}\text{C}$;

T_{li} —— i 机架中带钢与轧辊接触的传导温降, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{ir,i}$ —— i 机架与 $i+1$ 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, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{传}$ ——传导传热引起轧件的温度降, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{塑}$ ——金属塑性变形热使轧件的温度升高, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{摩}$ ——因接触摩擦引起的轧件温度升高, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{对}$ ——高压水除鳞时对流引起的温度降, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{辐}$ ——辐射温度降, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{水}$ ——高压冷却水的温度, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{v\lambda}$ ——精轧区入口温度, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{v出}$ ——精轧区出口温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_{vac} ——终轧实测温度, $^{\circ}\text{C}$;

T^* ——终轧目标温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

(8) 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, 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 ——带钢伸长率, %。

(9) 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_z ——总轧制压力, kN;
 K_{∞} ——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。

(10) 书中所用单位与常用工程单位间的关系

- 1kg (千克或公斤) = 10N;
 1t (吨) = 1000kg = 10kN;
 $1\text{kg/mm}^2 = 10\text{N/mm}^2 = 10\text{MPa}$;
 $1\text{t/mm} = 10\text{kN/mm}$ 。

目 录

0 绪论	1
0.1 轧制过程自动化的基本概念	1
0.2 轧制过程自动化的发展概况	1
0.3 轧制过程自动化的必要性	2
0.3.1 高精度轧制技术	2
0.3.2 轧制生产过程日趋连续化	3
0.3.3 自由程序轧制技术	3
0.3.4 智能化轧制技术	3
0.3.5 轧制速度不断提高	3
0.3.6 轧制生产的形式和规模日趋专业化和大型化	4
0.3.7 用户对产品精度和质量的要求日益提高	4
0.4 本课程的内容和要求	5
1 轧制过程自动化与计算机控制系统	6
1.1 自动控制系统的基本组成和对控制系统的基本要求	7
1.1.1 控制系统的基本形式	7
1.1.2 闭环控制系统的组成及其基本环节	9
1.1.3 对控制系统的基本要求	11
1.1.4 现代控制理论在轧制过程自动化中的应用	13
1.2 计算机控制系统的基本类型和其应具备的性能	14
1.2.1 计算机系统结构简介	14
1.2.2 计算机控制系统的发展	17
1.2.3 控制用计算机应具备的性能	20
1.3 轧制过程计算机控制系统实例（系统结构和任务分配）	21
1.3.1 热连轧（工艺）物料流程	21
1.3.2 热连轧计算机控制系统	22
1.3.3 热轧计算机控制系统的特点	34
2 轧件跟踪	36
2.1 轧制生产线上的数据区和数据流	36
2.1.1 原始数据区及其数据的输入	37
2.1.2 计算值数据区	38
2.1.3 实际值数据区	38

2.1.4 跟踪信号数据区	38
2.1.5 其他数据区	38
2.1.6 主要数据区中数据的流动	41
2.2 轧件跟踪的目的和方法	41
2.2.1 跟踪的目的	41
2.2.2 跟踪的方法	41
2.3 板带钢热连轧生产线上轧件的跟踪	43
2.3.1 跟踪区域的划分和跟踪功能	43
2.3.2 加热炉区域板坯的跟踪	43
2.3.3 粗轧区带钢的跟踪	44
2.3.4 精轧区带钢的跟踪	46
2.4 其他轧制过程中轧件的跟踪	48
2.4.1 冷连轧板带材轧制过程中轧件跟踪的特点	48
2.4.2 初轧轧制过程中轧件跟踪的特点	49
2.4.3 厚板轧制过程中轧件的跟踪	50
2.5 面向对象的轧件跟踪设计	50
2.5.1 跟踪单位的确定	50
2.5.2 轧件映像的建立	51
2.5.3 轧件跟踪的过程	52
3 位置自动控制	53
3.1 位置自动控制系统的基本组成和结构	53
3.2 位置控制的基本要求和控制的基本原理	54
3.2.1 位置控制的基本要求	54
3.2.2 理想定位过程的理论分析和控制算法	55
3.2.3 位置控制量的实际计算和控制方式	59
3.3 提高位置控制精度和可靠性的措施	62
3.3.1 间隙的消除	62
3.3.2 重复设定	62
3.3.3 启动联锁条件的检查	62
3.4 位置控制系统程序的公用性和程序的组成	63
3.4.1 程序的公用性	63
3.4.2 程序的组成	64
3.5 存储程序控制的位置自动控制 (SPC-APC)	65
3.5.1 存储程序控制的基本含义	65
3.5.2 SPC-APC 的构成和功能	65
3.6 具有可编程序控制器的位置自动控制 (PLC-APC)	68
3.6.1 可编程序控制器的基本含义和组成	68
3.6.2 飞剪机的 PLC-APC 的控制原理	69
3.7 轧钢车间中其他典型辅助设备的位置设定计算及其控制	75

3.7.1 立辊开口度的设定计算	75
3.7.2 侧导板开口度的设定计算及其控制	77
3.7.3 推钢机行程的设定及其自动控制	79
3.7.4 板坯抽出机行程的设定及其自动控制	81
4 厚度自动控制	83
4.1 板带钢厚度波动的原因及其厚度的变化规律	83
4.1.1 板带钢厚度波动的原因	83
4.1.2 轧制过程中厚度变化的基本规律	83
4.2 厚度自动控制的基本形式及其控制原理	86
4.2.1 反馈式厚度自动控制的基本原理	86
4.2.2 前馈式厚度自动控制的基本原理	88
4.2.3 监控式厚度自动控制的基本原理	90
4.2.4 张力式厚度自动控制的基本原理	91
4.2.5 金属秒流量 AGC 控制的基本原理	92
4.2.6 液压式厚度自动控制的基本原理	95
4.2.7 轧制力 AGC (P-AGC) 控制系统的基本原理	101
4.2.8 相对值 AGC (锁定 AGC-LKON-AGC) 控制系统的基本原理	103
4.2.9 绝对值 AGC (ABS-AGC) 控制系统的基本原理	104
4.2.10 动态设定型 AGC (D-AGC) 控制系统的基本原理	109
4.3 带钢热连轧厚度自动控制系统	111
4.3.1 Siemens 的轧机模数控制 (MMC) 的压力 AGC	112
4.3.2 Smith 预估器在某热连轧厂热连轧厚度监控中的应用	119
4.3.3 自动扇形和前馈校正功能	123
4.3.4 BISRA-AGC 控制系统	125
4.3.5 带钢热连轧带钢头部厚度设定及其自适应控制	136
4.4 带钢冷连轧厚度自动控制系统	141
4.4.1 2030mm 冷连轧机的主要设备组成	141
4.4.2 2030mm 冷连轧机厚度自动控制系统功能组成	142
4.4.3 冷连轧机厚度自动控制效果的分析	156
4.4.4 1420mm 冷连轧机厚度自动控制系统的优点	159
4.5 带钢全连续轧制时的动态变规格控制	170
4.5.1 概述	170
4.5.2 动态变规格楔形过渡段主要参数的确定	170
4.5.3 现场应用的动态变规格楔形段参数确定方法讨论	175
4.5.4 动态变规格控制策略	177
4.5.5 动态变规格时的计算机自动控制过程分析	181
4.5.6 热连轧动态变规格轧制 (又称无头轧制)	182
4.6 厚度自动控制系统中的补偿控制原理和措施	185
4.6.1 支撑辊偏心的补偿控制	185

4.6.2	油膜厚度的补偿控制	195
4.6.3	板带钢宽度的补偿控制	197
4.6.4	压下补偿值的计算和控制	198
4.6.5	带钢尾部补偿值的计算和控制	200
4.6.6	加减速补偿	202
4.6.7	轧制效率补偿值的计算	203
4.7	薄带材轧制时的厚度自动控制	204
4.7.1	概述	204
4.7.2	二十辊轧机 AGC 系统的组成	206
4.7.3	二十辊轧机 AGC 系统控制特点	207
4.7.4	二十辊轧机 AGC 系统运行模式	211
4.7.5	二十辊轧机 AGC 控制系统	215
4.7.6	二十辊轧机辊形调整的液压控制系统	219
4.7.7	二十辊轧机 AGC 控制系统能达到的控制指标	221
5	带钢板形自动控制	223
5.1	带钢板形概念	223
5.1.1	何谓带钢板形	223
5.1.2	带钢板形缺陷的种类	225
5.1.3	用户对带钢板形的要求	226
5.1.4	板形控制方法的历史发展	227
5.2	带钢板形控制的基本理论	228
5.2.1	板形缺陷的表示方法	228
5.2.2	带钢平直条件	231
5.2.3	板形的改善方法	233
5.2.4	辊系弹性变形理论	235
5.2.5	轧辊的压扁变形	237
5.2.6	轧辊的热凸度及磨损	239
5.3	CVC 辊型及轧机变形解析	241
5.3.1	CVC 辊型理论	241
5.3.2	CVC 轧机辊系弹性变形模型	242
5.3.3	CVC 轧机辊系弹性变形解析	249
5.4	带钢板形的检测与控制	250
5.4.1	板形检测技术	250
5.4.2	板形目标曲线的确定	255
5.4.3	板形自动控制的实现	256
5.5	板形调控机构设定计算	259
5.5.1	设定计算的功能与特点	259
5.5.2	设定计算的控制策略	259
5.5.3	设定计算方法的分类	260

5.5.4	设定计算的流程	262
5.5.5	轧辊热凸度计算	264
5.5.6	轧辊磨损计算	265
5.6	板形前馈控制	266
5.6.1	板形前馈控制的功能	266
5.6.2	热轧的温度和轧制力前馈控制	266
5.6.3	冷轧的轧制力前馈控制	267
5.7	板形闭环反馈控制	268
5.7.1	闭环反馈控制的功能	268
5.7.2	反馈控制策略	268
5.7.3	反馈控制计算模型	269
5.7.4	反馈控制的计算流程	275
5.8	板形自动控制系统及实例	277
5.8.1	板形自动控制系统	277
5.8.2	板形自动控制系统实例	278
6	厚板平面形状自动控制	281
6.1	厚板平面形状控制的目的和控制方法	281
6.2	厚板轧制时平面形状变化量的描述	282
6.3	MAS 轧制法数学模型的建立	284
6.3.1	MAS 轧制法的原理	284
6.3.2	厚板平面形状预报模型	284
6.3.3	厚板平面形状控制的控制模型	286
6.3.4	MAS 轧制法计算机控制系统	287
6.4	立辊轧边法	292
6.4.1	厚板轧制的立辊轧边使用法	292
6.4.2	轧边效果与平面形状的数学模型	293
6.4.3	最佳轧边系统的确定	295
6.5	无切边厚板 (TFP) 轧制技术	299
6.5.1	概述	299
6.5.2	TFP 生产技术的必要条件和技术内容	299
6.5.3	TFP 制造技术	300
6.5.4	TFP 制造技术的应用效果	305
6.6	狗骨轧制法数学模型的建立	306
6.6.1	狗骨轧制法的原理	306
6.6.2	确定最佳 DB 量的方法	307
6.6.3	DBR 轧制法对宽度精度的影响	309
6.6.4	DB 形状不对称的影响	310
6.6.5	DB 部的压下方法与平面形状的关系	310
6.6.6	狗骨轧制法的计算机控制系统	311

6.6.7 差厚展宽轧制的过程和控制原理	312
7 连轧时的张力设定计算和张力的自动控制	314
7.1 轧制过程中张力的产生及其分析	314
7.1.1 张力的产生	314
7.1.2 张力的种类和作用	316
7.1.3 连轧过程中机架之间张力与其他工艺参数的关系	318
7.2 控制张力的基本方法及其原理	321
7.2.1 间接法控制张力的基本原理	321
7.2.2 直接法控制张力的基本原理	325
7.3 热连轧无张力自动控制	325
7.3.1 无张力自动控制的概要	325
7.3.2 双机连轧时控制张力的方法及其基本原理	327
7.3.3 型钢连轧时的微张力控制	335
7.3.4 棒材、线材轧制时的无张力控制	337
7.3.5 无张力控制展望	339
7.4 热连轧精轧机组连轧时的张力自动控制	339
7.4.1 精轧机组连轧的基本过程	339
7.4.2 机架间活套量的计算及其变化规律	343
7.4.3 控制活套所需的力矩	346
7.4.4 活套支持器的基本设定	348
7.4.5 连轧时活套支持器的自动控制系统	350
7.5 冷连轧机架间的张力控制	353
7.5.1 张力实际值的检测	353
7.5.2 静张力控制	354
7.5.3 动张力控制	356
7.5.4 第4~5机架间动张力控制(方式C)	358
7.6 张力卷取机控制	358
7.6.1 张力给定	359
7.6.2 硬芯控制	360
7.6.3 张力调节(转矩调节)	361
7.6.4 加速力矩(M_b)	362
7.6.5 弯曲力矩(M_{Bl})	364
7.6.6 摩擦力矩(M_f)	364
7.6.7 转矩综合及其输出	364
8 平整时带钢伸长率自动控制	366
8.1 平整伸长率的基本含义	366
8.2 平整伸长率自动控制的基本内容	367
8.3 伸长率的测量原理及其测量系统	368