



高效轧制国家工程研究中心先进技术丛书

# 热轧电气自动化与 计算机控制技术

Electrical Automation and Computer Control Technology of  
Hot Strip Rolling

张勇军 宋勇 郭强 刘华强 编著



冶金工业出版社  
[www.cnmip.com.cn](http://www.cnmip.com.cn)

高效轧制国家工程研究中心先进技术丛书

# 热轧电气自动化与 计算机控制技术

张勇军 宋勇 郭强 刘华强 编著



北京  
冶金工业出版社  
2016

## 内 容 简 介

热轧板带作为主要的钢铁产品在国民经济中具有重要的作用,本书主要介绍了与热轧板带生产相关的电气自动化、计算机控制关键技术,包括热轧生产线工艺装备、基础自动化、过程计算机控制、板形控制及电气传动系统等。

本书可供从事冶金自动化技术工作的科研、设计、生产技术人员使用,也可作为大专院校相关专业师生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

热轧电气自动化与计算机控制技术/张勇军等编著. —北京:  
冶金工业出版社, 2016. 10

(高效轧制国家工程研究中心先进技术丛书)

ISBN 978-7-5024-7321-1

I. ①热… II. ①张… III. ①热轧—电气化—自动化  
②热轧—计算机控制 IV. ①TG335.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第237713号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 李培禄 美术编辑 吕欣童 版式设计 杨帆 彭子赫

责任校对 石静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7321-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016年10月第1版,2016年10月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 20.75印张; 493千字; 314页

68.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 《高效轧制国家工程研究中心先进技术丛书》 编辑委员会

主任 唐 荻

副主任 张勇军 何安瑞 陈雨来

委员 (按姓氏笔画为序)

米振莉 杨 荃 余 伟 宋 勇 张 飞

邵 健 武会宾 周 鹏 徐 科 郭 强

崔 衡 程知松

顾问 刘文仲 王 京 蔡庆伍 侯建新

## — 序言 —

高效轧制国家工程研究中心（以下简称轧制中心）自1996年成立起，坚持机制创新与技术创新并举，采用跨学科的团队化科研队伍进行科研组织，努力打破高校科研体制中以单个团队与企业开展短期项目为主的科研合作模式。自成立之初，轧制中心坚持核心关键技术立足于自主研发的发展理念，在轧钢自动化、控轧控冷、钢种开发、质量检测等多项重要的核心技术上实现自主研发，拥有自主知识产权。

在立足于核心技术自主开发的前提下，借鉴国际上先进的成熟技术、器件、装备，进行集成创新，大大降低了国内企业在项目建设过程的风险与投资。以宽带钢热连轧电气自动化与计算机控制技术为例，先后实现了从无到有、从有到精的跨越，已经先后承担了国内几十条新建或改造升级的热连轧计算机系统，彻底改变了我国在这些关键技术方面完全依赖于国外引进的局面。

针对首都钢铁公司在搬迁重建后产品结构调整的需求，特别是对于高品质汽车用钢的迫切需求，轧制中心及时组织多学科研发力量，在2005年9月23日与首钢总公司共同成立了汽车用钢联合研发中心，积极探索该联合研发中心的运行与管理机制，建组同一个研发团队，采用同一个考核机制，完成同一项研发任务，使首钢在短时间内迅速成为国内主要的汽车板生产企业，这种崭新的合作模式也成为体制机制创新的典范。相关汽车钢的开发成果迅速实现在国内各大钢铁公司的应用推广，为企业创造了巨大的经济效益。

实践证明，轧制中心的科研组织模式有力地提升了学校在技术创新与服务创新方面的能力。回首轧制中心二十年的成长历程，有艰辛更有成绩。值此轧制中心成立二十周年之际，我衷心希望轧制中心在未来的发展中，着眼长远、立足优势，聚焦高端技术自主研发和集成创新，在国家技术创新体系中发挥应有的更大作用。

高效轧制国家工程研究中心创始人

徐金松 教授

2016年9月

## — 序言二 —

高效轧制国家工程研究中心成立二十年了。如今她已经走过了一段艰苦创新的历程，取得了骄人的业绩。作为当初的参与者和见证人，回忆这段创业史，对启示后人也是有益的。

时间追溯到1992年。当时原国家计委为了尽快把科研成果转化为生产力（当时转化率不到30%），决定在全国成立30个工程中心。分配方案是中科院、部属研究院和高校各10个。于是，原国家教委组成了评审小组，组员单位有北京大学、清华大学、西安交通大学、天津大学、华中理工大学和北京科技大学。前5个单位均为教委直属，北京科技大学是唯一部属院校。经过两年的认真评审，最初评出9个，评审小组中前5个教委高校当然名列其中。最终北京科技大学凭借获得多项国家科技进步奖的实力和大家坚持不懈的努力，换来了评审的通过。这就是北京科技大学高效轧制国家工程研究中心的由来。

二十年来，在各级领导的支持和关怀下，轧制中心各任领导呕心沥血，带领全体员工，克服各种困难，不断创新，取得了预期的效果，并为科研成果转化做出了突出贡献。我认为取得这些成绩的原因主要有以下几点：

(1) 有一只过硬的团队，他们在中心领导的精心指挥下，不怕苦，连续工作在现场，有不完成任务不罢休的顽强精神，也赢得了企业的信任。

(2) 与北科大设计研究院（甲级设计资质）合为一体，在市场竞争中有资格参与投标并与北科大科研成果打包，有明显优势。

(3) 有自己的特色并有明显企业认知度。在某种意义上讲，生产关系也是生产力。

总之，二十年过去了，展望未来，竞争仍很激烈，只有总结经验，围绕国民经济主战场各阶段的关键问题，不断创新、攻关，才能取得更大成绩。

高效轧制国家工程研究中心轧机成套设备领域创始人

 教授

2016年9月

## 序言三

高效轧制国家工程研究中心走过了二十年的历程，在行业中取得了令人瞩目的业绩，在国内外具有较高的认知度。轧制中心起步于消化、吸收国外先进技术，发展到结合我国轧制生产过程的实际情况，研究、开发、集成出许多先进的、实用的、具有自主知识产权的技术成果，通过将相关核心技术成果在行业里推广和转移，实现了工程化和产业化，从而产生了巨大的经济效益和社会效益。

以热连轧自动化、高端金属材料研发、成套轧制工艺装备、先进检测与控制为代表的多项核心技术已取得了突出成果，得到冶金行业内的一致认可，同时也培养、锻炼了一支过硬的科技成果研发、转移转化队伍。

在中心成立二十周年的日子里，决定编辑出版一套技术丛书，这套书是二十年中心技术研发、技术推广工作的总结，有非常好的使用价值，也有较高的技术水准，相信对于企业技术人员的工作，对于推动企业技术进步是会有作用的。参加本丛书编写的人员，除了具有扎实的理论基础以外，更重要的是长期深入到生产第一线，发现问题、解决问题、提升技术、实施项目、服务企业，他们中的很多人以及他们所做的工作都可以称为是理论联系实际典范。

高效轧制国家工程研究中心轧钢自动化领域创始人

孙一康 教授

2016年9月

## — 序 言 四 —

我国在“八五”初期，借鉴美国工程研究中心的建设经验，由原国家计委牵头提出了建立国家级工程研究中心的计划，旨在加强工业界与学术界的合作，促进科技为生产服务。我从1989年开始，参与了高效轧制国家工程研究中心的申报准备工作，1989~1990年访问美国俄亥俄州立大学的工程中心、德国蒂森的研究中心，了解国外工程转化情况。后来几年时间里参加了多次专家论证、现场考察和答辩。1996年高效轧制国家工程研究中心终于获得正式批准。时隔二十年，回顾高效轧制国家工程研究中心从筹建到现在的发展之路，有几点感想：

(1) 轧制中心建设初期就确定的发展方向是正确的，而且具有前瞻性。以汽车板为例，北京科技大学不仅与鞍钢、武钢、宝钢等钢铁公司联合开发，而且与一汽、二汽等汽车厂密切联系，做到了科研、生产与应用的结合，促进了我国汽车板国产化进程。另外需要指出的是，把科学技术发展要适应社会和改善环境写入中心的发展思路，这个观点即使到了现在也具有一定的先进性。

(2) 轧制中心的发展需要平衡经济性与公益性。与其他国家直接投资的科研机构不同，轧制中心初期的主要建设资金来自于世行贷款，因此每年必须偿还100万元的本金和利息，这进一步促进轧制中心的科研开发不能停留在高校里，不能以出论文为最终目标，而是要加快推广，要出成果、出效益。但是同时作为国家级的研究机构，还要担负起一定的社会责任，不能以盈利作为唯一目的。

(3) 创新是轧制中心可持续发展的灵魂。在轧制中心建设初期，国内钢铁行业无论是在发展规模上还是技术水平上，普遍落后于发达国家，轧制中心的创新重点在于跟踪国际前沿技术，提高精品钢材的国产化率。经过了近二十年的发展，创新的中心要放在发挥多学科交叉优势、开发原创技术上面。

轧制中心成立二十年以来，不仅在科研和工程应用领域取得丰硕成果，而且培养了一批具有丰富实践经验的科研工作者，祝他们在未来继续运用新的机制和新的理念不断取得辉煌的成绩。

高效轧制国家工程研究中心汽车用钢研发领域创始人

王先进 教授

2016年9月



## — 序言五 —

1993年末，当时自己正在德国斯图加特大学作访问学者，北京科技大学压力加工系主任、自己的研究生导师王先进教授来信，希望我完成研究工作后返校，参加高效轧制国家工程研究中心的工作。那时正是改革开放初期，国家希望科研院所不要把写论文、获奖作为科技人员工作的终极目标，而是把科技成果转移和科研工作进入国家经济建设的主战场为己任，因此，国家在一些大学、科研院所和企业成立“国家工程研究中心”，通过机制创新，将科研成果经过进一步集成、工程化，转化为生产力。

二十多年过去了，中国钢铁工业有了天翻地覆的变化，粗钢产量从1993年的8900万吨发展到2014年的8.2亿吨；钢铁装备从全部国外引进，变成了完全自主建造，还能出口。中国的钢材品种从许多高性能钢材不能生产到几乎所有产品都能自给。

记得高效轧制国家工程研究中心创建时，我国热连轧宽带钢控制系统的技术完全掌握在德国的西门子，日本的东芝、三菱，美国的GE公司手里，一套热连轧带钢生产线要90亿元人民币，现在，国产化的热连轧带钢生产线仅十几亿元人民币，这几大国际厂商在中国只能成立一个合资公司，继续与我们竞争。那时国内中厚板生产线只有一套带有进口的控制冷却设备，而今80余套中厚板轧机上控制冷却设备已经是标准配置，并且几乎全部是国产化的。那时中国生产的汽车用钢板仅仅能用在卡车上，而且卡车上的几大难冲件用国外钢板才能制造，今天我国的汽车钢可满足几乎所有商用车、乘用车的需要……这次编写的7本技术丛书，就是我们二十年技术研发的总结，应当说工程中心成立二十年的历程，我们交出了一份合格的答卷。

总结二十年的经验，首先，科技发展一定要与生产实践密切结合，与国家经济建设密切结合，这些年我们坚持这一点才有今天的成绩；其次，机制创新是成功的保证，好的机制才能保证技术人员将技术转化为己任，国家二十年前提出的“工程中心”建设的思路和政策今天依然有非常重要的意义；第三，坚持团队建设是取得成功的基础，对于大工业的技术服务，必须要有队伍才能有成果。二十多年来自己也从一个创业者到了将要离开技术研发第一线的年纪了，自己真诚地希望，轧制中心的事业、轧制中心的模式能够继续发展，再创辉煌。

高效轧制国家工程研究中心原主任

 教授

2016年9月

# 前 言

带钢热连轧生产线具有生产效率高、轧制过程连续、对工艺设备与控制水平要求高等一系列特点。带钢热连轧电气自动化与计算机控制系统无论是从规模还是复杂性上都具有一定的代表性，汇集了控制系统快速性、实时性、强耦合等难点问题，冶金行业中多数各种先进的技术都竞相应用于连轧过程，大大促进了热轧过程自动化水平的提高。

在过去相当一段时期内，该技术仅有几家大型跨国电气公司所掌握，我国只能花费大量外汇反复引进，不但价格昂贵而且系统限制较多，给国内生产企业的运行使用和维护带来不便。国内的高校、科研院所及生产企业对带钢热连轧电气自动化与计算机控制技术进行了大量研究，先后经历了国外设备和技术引进、消化、改造和再创新的过程，目前已经完全可以提供具有完全自主知识产权的热连轧电气自动化与计算机控制系统，其主要控制指标和系统性能已达到国际先进水平，在大幅度降低系统造价的同时，大大提高了我国重要战略装备系统的自主配套能力。

本书在参考和整理国内外最新技术发展情况的基础上，总结汇集了北京科技大学高效轧制国家工程研究中心科研人员过去二十多年来在热轧自动化控制领域的相关工作。

全书共分9章，其中第1章介绍了热轧生产主要工艺装备及检测仪表情况；第2章为热连轧自动化系统的软硬件结构与主要功能介绍，包括系统通信网络及人机接口配置；第3章与第4章主要介绍了热轧带钢的模型理论以及轧制模型和规程计算；第5~8章分别对温度模型与控制、主速度与张力控制、自动厚度与宽度控制、热轧板形模型与控制等技术的研发情况进行了总结；第9章重点介绍了用于带钢热连轧生产线的电气传动系统装备与主要技术。

本书主要由张勇军负责组织编写。第1章由刘华强博士编写；第2章由郭强编写；第3~5章由宋勇、荆丰伟、蔺凤琴编写；第6章由宗胜悦编写；第7章由张飞编写；第8章由邵健编写；第9章由张勇军编写。刘文仲研究员、王京教授对全书进行了审定和校对，苗磊、汪伟等研究生参加了本书的文字编辑工作，在此一并表示感谢。

本书努力做到理论与实践相结合，为使内容尽量充实，成为一本对相关专业技术人员有价值的参考书，本书在编写过程中也尽可能地收集整理了国内外在热轧电气自动化与计算机控制技术及工程应用领域近年来的相关研究成果与生产实践资料，在此也特别向本书各章所参考和引用的国内外专著或论文作者

表示感谢。

由于热轧生产线控制涉及多个学科的交叉融合，且电气自动化与计算机控制技术发展迅速，技术层面深远宽广，本书的编写偏重于展示北京科技大学高效轧制国家工程研究中心在该领域的部分技术内容，因此可能会有很多该领域的技术精华没有被录入。此外，由于作者专业知识有限，编写时间仓促，书中一定存在某些不妥和不足之处，诚恳希望读者批评指正。

编著者

2016年8月30日

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1 热轧生产工艺装备 .....                 | 1  |
| 1.1 热轧带钢生产工艺简介 .....             | 1  |
| 1.1.1 国外热轧生产发展概况 .....           | 1  |
| 1.1.2 我国热轧生产发展概况 .....           | 3  |
| 1.1.3 热轧板带车间及轧机布置形式 .....        | 4  |
| 1.2 常规热连轧机组的布置形式 .....           | 5  |
| 1.2.1 全连续式布置 .....               | 5  |
| 1.2.2 3/4 连续式布置 .....            | 7  |
| 1.2.3 半连续式布置 .....               | 7  |
| 1.3 连铸连轧生产工艺 .....               | 8  |
| 1.3.1 薄板坯连铸连轧技术发展阶段 .....        | 8  |
| 1.3.2 薄板坯连铸连轧工艺技术特点 .....        | 10 |
| 1.3.3 薄板坯连铸连轧技术现状 .....          | 10 |
| 1.3.4 薄带连铸工艺布置及特点 .....          | 22 |
| 1.3.5 传统热连轧和连铸连轧不同工艺方案应用选型 ..... | 24 |
| 1.4 炉卷轧机生产工艺 .....               | 26 |
| 1.4.1 炉卷轧机的发展 .....              | 26 |
| 1.4.2 炉卷轧机的现状 .....              | 28 |
| 1.5 热轧带钢生产主要设备 .....             | 35 |
| 1.5.1 新建宽带钢常规热连轧机组所用设备主要特点 ..... | 36 |
| 1.5.2 加热炉区设备 .....               | 38 |
| 1.5.3 粗轧区设备 .....                | 41 |
| 1.5.4 精轧区设备 .....                | 45 |
| 1.5.5 层流冷却装置和卷取设备 .....          | 49 |
| 1.6 热连轧生产线常用检测仪表 .....           | 52 |
| 1.6.1 红外高温计 .....                | 53 |
| 1.6.2 测宽仪 .....                  | 53 |
| 1.6.3 轧制力压头 .....                | 54 |
| 1.6.4 多功能仪 .....                 | 54 |
| 1.6.5 带钢平直度仪 .....               | 58 |
| 1.6.6 带钢在线表面检测装置 .....           | 58 |
| 参考文献 .....                       | 61 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 2 热连轧电气自动化系统构成      | 63  |
| 2.1 热轧带钢控制系统的结构和功能  | 63  |
| 2.1.1 控制系统的结构       | 63  |
| 2.1.2 控制系统的特点       | 65  |
| 2.1.3 控制系统的功能       | 67  |
| 2.1.4 自动化控制系统配置     | 74  |
| 2.2 自动化控制系统的硬件      | 75  |
| 2.2.1 过程控制级系统的软硬件   | 75  |
| 2.2.2 基础自动化级的软硬件    | 77  |
| 2.3 自动化系统的通信        | 91  |
| 2.3.1 基础自动化级通信的主要特点 | 91  |
| 2.3.2 基于串行接口的通信     | 92  |
| 2.3.3 基于以太网的通信      | 93  |
| 2.3.4 基于现场总线的通信     | 95  |
| 2.3.5 超高速通信网络       | 99  |
| 2.4 人机界面 (HMI)      | 101 |
| 2.4.1 人机界面的基本功能     | 101 |
| 2.4.2 人机界面的组成和形式    | 102 |
| 2.4.3 人机界面的组态软件     | 102 |
| 参考文献                | 103 |
| 3 热轧带钢模型理论基础        | 104 |
| 3.1 轧制变形区理论         | 104 |
| 3.1.1 变形区几何参数       | 104 |
| 3.1.2 咬入条件          | 105 |
| 3.1.3 变形程度和变形速度     | 106 |
| 3.1.4 中性角、前滑和后滑     | 108 |
| 3.1.5 轧件宽展          | 109 |
| 3.1.6 变形区应力状态       | 110 |
| 3.2 传热学基础           | 113 |
| 3.2.1 辐射传热          | 113 |
| 3.2.2 热传导           | 114 |
| 3.2.3 对流传热          | 116 |
| 3.3 建模与计算方法         | 118 |
| 3.3.1 概述            | 118 |
| 3.3.2 回归分析          | 119 |
| 3.3.3 插值算法          | 124 |
| 3.3.4 有限差分法         | 128 |
| 3.3.5 神经元网络         | 131 |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 3.4 数据挖掘技术 .....         | 134        |
| 3.4.1 聚类分析 .....         | 135        |
| 3.4.2 决策树 .....          | 137        |
| 3.4.3 关联规则 .....         | 139        |
| 3.5 模型自学习方法 .....        | 140        |
| 3.5.1 增长记忆式递推最小二乘法 ..... | 140        |
| 3.5.2 指数平滑法 .....        | 143        |
| 3.5.3 模型短期及长期自学习 .....   | 144        |
| 参考文献 .....               | 146        |
| <b>4 轧制模型与规程计算 .....</b> | <b>147</b> |
| 4.1 轧制力模型 .....          | 147        |
| 4.1.1 接触弧水平投影长度 .....    | 147        |
| 4.1.2 外摩擦应力状态系数 .....    | 148        |
| 4.1.3 张力影响系数 .....       | 148        |
| 4.1.4 变形抗力计算 .....       | 149        |
| 4.2 轧制力矩及功率模型 .....      | 149        |
| 4.2.1 轧制力矩的计算 .....      | 149        |
| 4.2.2 电机功率的计算 .....      | 150        |
| 4.3 轧制规程的计算 .....        | 151        |
| 4.3.1 轧制策略 .....         | 151        |
| 4.3.2 负荷分配 .....         | 152        |
| 4.3.3 规程预计算 .....        | 153        |
| 4.3.4 粗轧道次修正 .....       | 156        |
| 4.3.5 精轧入口修正 .....       | 156        |
| 4.3.6 后计算与自学习 .....      | 157        |
| 参考文献 .....               | 158        |
| <b>5 温度模型与控制 .....</b>   | <b>159</b> |
| 5.1 概述 .....             | 159        |
| 5.2 温度模型 .....           | 159        |
| 5.2.1 轧件传送过程温降 .....     | 160        |
| 5.2.2 高压水除鳞温降 .....      | 161        |
| 5.2.3 低压喷水冷却温降 .....     | 161        |
| 5.2.4 轧制变形过程温度变化 .....   | 162        |
| 5.3 加热温度控制 .....         | 162        |
| 5.3.1 板坯温度预报 .....       | 163        |
| 5.3.2 炉温优化 .....         | 165        |
| 5.3.3 炉温设定 .....         | 166        |

|          |                        |            |
|----------|------------------------|------------|
| 5.4      | 粗轧温度控制 .....           | 168        |
| 5.5      | 精轧温度控制 .....           | 169        |
| 5.5.1    | 精轧速度设定 .....           | 169        |
| 5.5.2    | 头部终轧温度设定 .....         | 170        |
| 5.5.3    | 全长终轧温度控制 .....         | 171        |
| 5.6      | 卷取温度控制 .....           | 172        |
| 5.6.1    | 卷取温度预报模型 .....         | 172        |
| 5.6.2    | 卷取温度控制策略 .....         | 174        |
| 5.6.3    | 卷取温度控制系统 .....         | 175        |
|          | 参考文献 .....             | 177        |
| <b>6</b> | <b>主速度与张力控制 .....</b>  | <b>178</b> |
| 6.1      | 概述 .....               | 178        |
| 6.2      | 张力控制原理 .....           | 179        |
| 6.2.1    | 机架间带钢张力作用 .....        | 179        |
| 6.2.2    | 张力产生机理 .....           | 180        |
| 6.3      | 张力控制系统组成 .....         | 181        |
| 6.3.1    | 张力控制系统主要设备组成 .....     | 181        |
| 6.3.2    | 张力控制系统的基本公式 .....      | 183        |
| 6.3.3    | 张力控制传统 PI 控制器 .....    | 183        |
| 6.3.4    | 高频振荡检测及抑制控制器 .....     | 184        |
| 6.3.5    | 张力控制非线性趋近控制器 .....     | 184        |
| 6.3.6    | 位置速度力矩三环控制器 .....      | 186        |
| 6.3.7    | ILQ (逆线性二次型) 控制器 ..... | 186        |
| 6.4      | 张力控制技术优化 .....         | 188        |
| 6.4.1    | 控制算法优化 .....           | 188        |
| 6.4.2    | 控制结构优化 .....           | 189        |
| 6.4.3    | 工艺参数优化 .....           | 190        |
| 6.4.4    | 硬件设计优化 .....           | 191        |
|          | 参考文献 .....             | 192        |
| <b>7</b> | <b>厚度与宽度控制 .....</b>   | <b>193</b> |
| 7.1      | 自动位置控制 (APC) .....     | 193        |
| 7.1.1    | APC 的组成和机构 .....       | 193        |
| 7.1.2    | 电动 APC .....           | 194        |
| 7.1.3    | 液压 APC .....           | 195        |
| 7.2      | 辊缝零位标定 .....           | 196        |
| 7.2.1    | 轧机压下零位标定 .....         | 196        |
| 7.2.2    | 立辊零位标定 .....           | 197        |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 7.3 厚度与宽度波动的原因 .....     | 197        |
| 7.3.1 厚度波动的原因 .....      | 197        |
| 7.3.2 宽度波动的原因 .....      | 200        |
| 7.4 自动厚度控制 (AGC) .....   | 201        |
| 7.4.1 厚度控制的分析方法 .....    | 201        |
| 7.4.2 厚度设定计算 .....       | 202        |
| 7.4.3 厚度控制的锁定方式 .....    | 202        |
| 7.4.4 前馈 AGC .....       | 203        |
| 7.4.5 反馈 AGC .....       | 204        |
| 7.4.6 监控 AGC .....       | 206        |
| 7.4.7 张力 AGC .....       | 208        |
| 7.4.8 AGC 补偿功能 .....     | 209        |
| 7.4.9 AGC 调节时的速度补偿 ..... | 210        |
| 7.5 自动宽度控制 (AWC) .....   | 212        |
| 7.5.1 宽度控制的数学模型 .....    | 213        |
| 7.5.2 宽度设定计算 .....       | 214        |
| 7.5.3 短行程控制 (SSC) .....  | 215        |
| 7.5.4 前馈 AWC .....       | 216        |
| 7.5.5 反馈 AWC .....       | 217        |
| 7.5.6 缩颈补偿 (NEC) .....   | 217        |
| 7.5.7 动态设定 (DSU) .....   | 218        |
| 参考文献 .....               | 218        |
| <b>8 板形模型与控制</b> .....   | <b>219</b> |
| 8.1 板形控制概述 .....         | 219        |
| 8.2 板形基本概念 .....         | 219        |
| 8.2.1 横截面形状 .....        | 219        |
| 8.2.2 平坦度 .....          | 221        |
| 8.2.3 翘曲 .....           | 223        |
| 8.2.4 镰刀弯 .....          | 223        |
| 8.3 板形控制技术 .....         | 224        |
| 8.3.1 液压弯辊技术 .....       | 224        |
| 8.3.2 液压窜辊技术 .....       | 224        |
| 8.3.3 工作辊辊形技术 .....      | 225        |
| 8.3.4 支撑辊辊形技术 .....      | 228        |
| 8.4 凸度与平坦度转化关系 .....     | 231        |
| 8.5 板形控制的理论研究内容 .....    | 232        |
| 8.5.1 轧件三维弹塑性计算模型 .....  | 232        |
| 8.5.2 辊系弹性变形的研究方法 .....  | 233        |
| 8.6 板形检测技术研究 .....       | 233        |



|   |            |
|---|------------|
| 8.6.1 凸度(断面)检测 .....  | 233        |
| 8.6.2 平坦度检测 .....   | 234        |
| 8.7 板形控制系统 .....  | 235        |
| 8.7.1 板形控制功能配置 .....  | 235        |
| 8.7.2 硬件及网络结构 .....   | 235        |
| 8.7.3 板形设定控制模型 .....  | 237        |
| 8.7.4 板形保持功能 .....  | 238        |
| 8.7.5 凸度反馈控制 .....  | 239        |
| 8.7.6 平坦度反馈控制 .....   | 239        |
| 参考文献 .....  | 240        |
| <b>9 热轧生产线电气传动系统 .....</b>  | <b>243</b> |
| 9.1 电气传动系统的主要类型 .....   | 243        |
| 9.1.1 直流调速系统发展历史及其特点 .....  | 243        |
| 9.1.2 交流调速系统主要类型 .....  | 244        |
| 9.2 电力电子器件的发展 .....   | 247        |
| 9.2.1 二极管(Diode) .....  | 248        |
| 9.2.2 晶闸管(Thyristor) .....  | 248        |
| 9.2.3 门极可关断晶闸管GTO(Gate Turn-off Thyristor) .....                                | 249        |
| 9.2.4 电力晶体管GTR(Giant Transistor) .....  | 250        |
| 9.2.5 电力场效应晶体管Power MOSFET(Metal Oxide Semiconductor<br>Field Transistor) ..... | 250        |
| 9.2.6 绝缘门极双极型晶体管IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) .....                   | 251        |
| 9.2.7 集成门极换流晶闸管IGCT器件(Integrated Gate Commutated Thyristor) .....               | 253        |
| 9.2.8 电子注入式增强门极晶体管IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor) .....                | 254        |
| 9.3 直流电动机调速原理及控制方法 .....  | 255        |
| 9.3.1 闭环直流调速系统数学模型 .....  | 255        |
| 9.3.2 闭环控制的直流调速系统 .....   | 263        |
| 9.4 交流电动机主要控制策略 .....   | 269        |
| 9.4.1 标量控制 .....  | 269        |
| 9.4.2 矢量控制技术 .....  | 273        |
| 9.4.3 直接转矩控制 .....  | 281        |
| 9.4.4 定子磁链轨迹控制 .....  | 287        |
| 9.5 热轧生产线主要电气传动控制系统 .....   | 295        |
| 9.5.1 直流电机无环流可逆调速系统 .....   | 295        |
| 9.5.2 负载换流逆变器 .....   | 299        |
| 9.5.3 交交变频控制系统 .....  | 301        |
| 9.5.4 交直交变频控制系统 .....   | 303        |
| 9.5.5 热轧主传动电气系统的应用 .....  | 306        |
| 参考文献 .....  | 313        |