



冶金反应工程学丛书

金属轧制过程 人工智能优化

王国栋 刘相华 等著

YEJIN FANYING
GONGCHENGXUE
CONGSHU

冶金工业出版社

463799

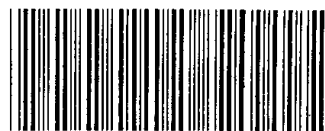
国家科学技术学术著作出版基金资助出版
国家自然科学基金资助

冶金反应工程丛书

金属轧制过程人工

智能优化

王国栋 刘相华 等著



00463799

北京
冶金工业出版社
2000

内 容 简 介

本书是关于人工智能及其在轧制中应用的专著,共分为5章,内容包括金属轧制过程中人工智能应用的综述,神经网络及其在轧制中的应用,专家系统及其在轧制中的应用,模糊逻辑与模糊控制及其在轧制中的应用,以及综合智能化方法在轧制中的应用等。书中反映了近年来该领域国内外的新进展及作者们所在课题组取得的最新成果。

本书可以作为高等院校材料加工工程专业的硕士生和博士生的参考教材,也可供从事轧钢及相关专业的教学、科研、生产、设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属轧制过程人工智能优化/王国栋等著. —北京:
冶金工业出版社,2000.3
(冶金反应工程学丛书)
ISBN 7-5024-2396-6

I. 金… II. 王… III. 人工智能-应用-轧制
IV. TG334.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 46680 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 李培禄 杨传福 美术编辑 王耀忠 责任校对 侯 瑁 责任印制 牛晓波
北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2000年3月第1版, 2000年3月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32; 14.75印张; 393千字; 453页; 1-2000册

36.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

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

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序 言

冶金学是研究人类从自然资源中提取有用金属和制造材料的科学。从人类最早使用金属到今天,已有数千年历史。在近一百多年的现代工业生产发展中,冶金工业作为一门基础材料工业,发挥了重大作用。本世纪上半叶以来,许多冶金学家应用化学热力学知识,对冶金过程中气体-熔渣-金属间的反应平衡和熔体的物理化学性质进行了大量的测定和研究,这些研究成果促进了现代冶金工艺的发展。冶金学也逐步完善为一门主要以热力学为理论基础的、独立的专业学科。

近几十年来,冶金学知识体系和结构,随着冶金技术的发展和相关学科的进步,也在发生变化。计算机技术的发展和广泛应用,使冶金学理论和工艺的研究方法、冶金生产及其控制技术发生了重大变革。由传统冶金学和传统冶金工艺学所构成的知识体系和结构,已不能完全满足现代冶金工艺发展和理论研究的需要。因此,诸如,对微观和宏观过程的认识、单元过程或现象的定量解析、反应过程的数学物理模拟、反应和生产速率的预测、反应器的仿真研究和设计、人工智能技术的应用以及反应器运行和整体生产过程的控制等等,均逐渐成为现代冶金学必须包括的内容。近二三十年中,许多冶金学学者努力学习相关学科,如现代化学工程学、计算流体力学(CFD)、传输理论等方面的知识,积极利用数学解析方

法和计算技术,来定量分析和解决冶金学理论和工艺方面的问题,并获得重要进展。日本学者鞭岩、濑川清等根据上述冶金学内容和研究方法的新发展,于70年代提出冶金反应工程学概念,并分别出版了《冶金反应工程学》和《铁冶金反应工程学》等专著。

我国在冶金学上述新兴内容方面的研究,起步于70年代末。近二十多年,国内许多冶金学者根据现代冶金学发展的趋势,吸收国外先进经验,注意促进多学科知识的交叉,逐步将传输理论、反应工程学的方法以及计算技术引入冶金学的理论研究和工艺开发中,并取得较大的进展。为及时总结冶金学近几十年的发展成果,增进国内外学术交流,改善专业教学、基础研究和工艺发展的条件,中国金属学会冶金反应工程学学术委员会决定组织我国冶金领域内的专家学者,并争取国外学者的参与或合作,编辑出版一套《冶金反应工程学丛书》。

本套丛书可大致划分为介绍冶金反应工程学理论的著作(一部分为高校教材或教学参考书)和介绍冶金反应工程学知识应用成果和经验的专著两类。第一批著作于1996年开始出版发行。欢迎国内外冶金学者参加《冶金反应工程学丛书》书目的著述。

《冶金反应工程学丛书》的编委会,由下列学者组成(按姓氏笔画排列,带*号者为执行小组成员):

干 勇(冶金部钢铁研究总院)

* 曲 英(北京科技大学)

任崇信(冶金工业出版社)

仲增墉(中国金属学会)

杨天钧(北京科技大学)

张丙怀(重庆大学)

李尚诣(冶金工业部科技司)

贺友多(包头钢铁学院)

柯家骏(中国科学院化工冶金研究所)

徐德龙(西安建筑科技大学)

梅 炽(中南工业大学)

* 萧泽强(东北大学)

赫冀成(东北大学)

* 蔡志鹏(中国科学院化工冶金研究所)

戴永年(昆明理工大学)

魏季和(上海大学)

由于《冶金反应工程学丛书》内容涉及面较宽,编写工作量大,且系初次组织,经验不足,错误和不足之处在所难免,请读者批评指正。

《冶金反应工程学丛书》编委会

1996年5月

前言

现代金属轧制过程特别是连轧过程的控制非常复杂,它涉及到压力、速度、流量、温度等大量物理参数,以及弹性变形、塑性变形、热-力耦合等复杂过程、工件内部组织结构与性能的变化等多方面的问题。从控制的角度来看,金属轧制过程具有典型的多变量、非线性、强耦合特征。控制好一条现代化的高精度连轧生产线的难度,绝不亚于控制一颗人造卫星的发射和运行。

另一方面,随着用户对钢铁产品质量、品种、性能等方面要求的日益提高,其质量指标已经达到了相当高的程度。例如在外形尺寸精度方面:成卷提供的宽幅冷轧带钢,厚度精度已经达到了0.002 mm,热轧板卷厚度精度已达0.025mm;在内部组织结构方面,已实现了对微米、亚微米级的组织进行控制,实验室中普通钢的晶粒尺寸已经可以控制在 $1\mu\text{m}$ 左右,工业规模生产中已经获得了晶粒尺寸在 $3\sim 4\mu\text{m}$ 左右的细晶结构钢;除此之外,有些专门用途的钢材还有深冲、超深冲、抗凹陷性、烘烤硬化性、可焊接性、耐温、耐压、耐磨、耐蚀等使用性能方面的严格要求。这就为轧制过程的控制进一步增加了难度。

虽然传统的轧制理论曾经在轧制技术的发展中起到了积极的

作用,但是它已经远远满足不了现代轧制技术发展的需要。例如利用传统轧制理论推导得出的轧制力公式计算最大偏差多在 20% 以上。而为了保证获得高精度的产品,现代连轧机控制系统轧制力数学模型的精度应在 10% 以内,目前最好水平已达 5%。这里自适应、自学习、人工智能等起到了非常关键的作用。

回顾轧制理论的发展历程,如果说 20 世纪 30 年代卡尔曼(Karman)理论及其后继的工程法(Slab Method)为轧制理论的发展树立了第一个里程碑,60 年代变分法、上下界法等一系列基于能量原理的近代解法标志着第二个里程碑,70~80 年代以有限元(FEM)为代表的现代数值模拟解析方法确立了第三个里程碑的话,那么 90 年代人工智能(AI, Artificial Intelligence)在轧制领域中的广泛应用可以说为轧制理论与技术的发展树立了第四个里程碑。

进入 90 年代以来,首先是在日本,然后是在德国,接着在全世界掀起了一个在轧制过程中应用人工智能的热潮。目前在轧制过程中的各个环节,从生产计划的编排、坯料的管理、加热中的优化燃烧控制、轧制中的设定计算及厚度和板形控制,到成品库的管理等都有人工智能方法成功应用的例子。人工智能已经成为现代化轧机实现高精度控制的一个非常有效的工具。

人工智能在轧制领域中的应用其意义是深远的。从某种意义上说,它引起了人们对轧制过程本质认识方法的一次革命。由于轧制过程多变量、非线性、强耦合的特征,利用传统方法,从几条基本假设出发,按照推理演绎的方法,导出某个或某些参数的计算公式,这条路已被实践证明不能满足现代化高精度轧制过程控制的要求。其原因是要么假设条件偏离实际情况太多,所得出的解已经反映不了实际过程;要么所列出的基本方程太复杂,得不出显式的解析解。轧制技术的发展,呼唤着新的、更加强有力的方法出现。

应运而生的人工智能适应了这种需要。首先,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

数据作根据,来实现对过程的优化控制。过去轧机自动控制系统的缺憾和不足,是靠操作工头脑的判断、通过人工干预来弥补的。有了人工智能参与之后,这部分工作有可能也通过计算机来实现。区别在于:操作工依赖的是经验,而这种经验与操作工个人的素质有很大的关系。面对同一工况,三个操作工完全有可能给出三种不同的操作量。而利用人工智能方法武装起来的计算机依靠的是数据,从这条生产线上所发生的过程中采集实际数据,经过处理后用于指导同一条生产线。这样针对性强,可靠性高,更有利于轧制过程的优化控制。况且计算机的反应速度快、计算精度高、存储容量大,这些方面的优点是不言而喻的。

正因如此,在世界范围内围绕人工智能在轧制中的应用,一轮新的竞争已经开始。标榜在自己的软件中使用了智能优化方法已成为轧机供应商提高身价的资本。

顺应轧制理论和轧制技术发展的这种新形势,作者所在的东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室近年来在轧制过程的智能优化方面开展了一系列开发研究工作。随着研究过程的深入,心得体会逐步深化。本书有机会能作为《冶金反应工程学丛书》之一把我们的认识、体会和经验介绍给大家,我们感到十分高兴。

本书在对金属轧制过程中人工智能应用的现状和发展进行综合评述的基础上,重点介绍了神经网络、专家系统、模糊逻辑等智能化方法在轧钢行业中应用方面国内外的最新进展及作者所在实验室在这方面取得的最新成果。全书共分为5章,内容包括绪论、人工神经网络及其在轧制中的应用、专家系统及其在轧制中的应用、模糊理论及其在轧制中的应用、轧制过程中智能化方法的综合运用等。各章中首先介绍所涉及智能化方法的基本理论和具体的实现方法,然后给出它们在轧制过程中应用的典型实例。有些章节还介绍了智能化工具软件的使用与开发维护方法。

作者希望本书的出版能够对我国轧制理论与轧制技术的进步起到推进作用,为我国实现从钢铁生产大国向钢铁强国的跨越作

出贡献。

本书所涉及的人工智能方面的研究工作,得到了国家计委、原冶金工业部、辽宁省科委的大力支持。我们正是在承担国家“九五”重点科技攻关项目、冶金部基础研究项目、辽宁省国际合作项目的过程中,开始进入人工智能研究领域的。国家、行业和地方政府的支持,不仅为我们提供了开展研究所需的经费,也为我们提供了施展的舞台。这在我们开展研究工作之初,是非常宝贵的。

宝山钢铁集团公司、本溪钢铁集团公司等兄弟单位对我们研究工作的理解和支持,也为我们创造了良好的条件。正是这些单位的领导和现场技术人员对我们所进行的人工智能研究工作所给予的支持、接受和认同,才使我们能够在现场中发现问题、分析问题、提出解决问题的思路。更为重要的是,有现场人员的密切配合,促使我们的研究工作在起步之初就避开了空泛的学院式窠臼,与现场应用结下了不解之缘。

一批曾在和正在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室就读的博士研究生、硕士研究生参加了与本书有关的一系列研究工作。本书所介绍的一些最新成果就是他们刻苦钻研与辛勤劳动的结晶。

近年来到东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室访问讲学的国外同行专家,如来自芬兰赫尔辛基工业大学的科霍恩(Korhonen)教授、来自德国阿亨大学的布莱克(Bleck)教授、来自日本东京都国立大学的西村尚教授和杨明博士、来自澳大利亚伍伦贡大学的铁乌(Tieu)教授等,在学术交流过程中给我们带来了新的思想和信息,使我们了解到国际前沿的动向和同行们取得的最新进展。这对本书的完成是颇有助益的。

作者在此向上述各位以及为本书出版筹划、编辑、审阅,以及曾经参加为本书打字、描图、整理等工作的各位表示诚挚的谢意。

本书第1章由王国栋、刘相华执笔,第2章、第4章由吕程执笔,第3章由邸洪双执笔,第5章由王国栋、刘相华执笔,周旭东参加了2.2.4、2.4.5、2.4.6节的编写工作,全书由王国栋、刘相华审

定。

由于作者水平所限,书中难免存在不足甚至谬误之处,敬请读者给予批评指正。

作 者

1999 年 1 月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 人工智能进入轧制领域的背景	(1)
1.1.1 需求驱动	(1)
1.1.2 传统轧制过程分析方法的缺陷	(2)
1.1.3 相关外部条件	(5)
1.2 人工智能进入轧制领域的作用	(6)
1.2.1 人工智能与传统方法的比较	(6)
1.2.2 人工智能:轧制理论发展历史中一个新的里程碑	(7)
1.3 国内外发展状况	(8)
1.3.1 国外发展简况	(9)
1.3.2 国内发展概况	(10)
1.3.3 最新进展:智能化信息处理简介	(10)
参考文献	(12)
2 人工神经网络及其在轧制中的应用	(21)
2.1 人工神经网络的基本理论	(21)
2.1.1 人工神经网络的发展历史	(21)

2.1.2	人工神经网络的生物基础	(23)
2.1.3	人工神经网络的基本特征和通用性质	(27)
2.1.4	神经网络的学习方法	(32)
2.2	神经网络的主要模型	(34)
2.2.1	感知机	(35)
2.2.2	BP 神经网络	(40)
2.2.3	Hopfield 网络	(54)
2.2.4	小脑模型	(60)
2.3	神经网络的软件实现	(72)
2.3.1	使用通用计算机编程语言开发神经网络软件	(73)
2.3.2	神经网络软件开发环境	(81)
2.4	神经网络在轧制中的应用实例	(102)
2.4.1	神经网络在热带钢连轧机控制中的应用	(103)
2.4.2	冷轧轧制力的预测	(109)
2.4.3	热变形中屈服应力的预测	(113)
2.4.4	轧辊偏心的识别	(120)
2.4.5	小脑模型前馈反馈 AGC 学习控制	(125)
2.4.6	森吉米尔轧机板形小脑模型协调学习控制	(130)
	参考文献	(137)
3	专家系统及其在轧制中的应用	(140)
3.1	专家系统的基本知识	(140)
3.1.1	专家系统的定义	(140)
3.1.2	专家系统的基本结构与功能	(141)
3.1.3	专家系统的基本特征	(145)
3.1.4	专家系统开发的一般方法	(147)
3.2	专家系统开发工具	(159)
3.2.1	专家系统开发工具的选择原则	(159)
3.2.2	一些可供选用的专家系统开发工具	(161)
3.3	专家系统在轧制中的应用实例	(168)
3.3.1	不锈钢带钢轧机的轧制规程设定与	

控制专家系统	(168)
3.3.2 带材厚度精度诊断专家系统	(188)
3.3.3 板形控制专家系统	(197)
3.3.4 棒材生产线生产节奏控制专家系统	(201)
3.3.5 板坯管理专家系统	(209)
3.3.6 板卷传送专家系统	(214)
3.3.7 方坯精整线上路线选择专家系统	(222)
3.3.8 轨梁轧机轧辊调整专家系统	(228)
参考文献	(232)
4 模糊理论及其在轧制中的应用	(234)
4.1 模糊理论的起源及其发展	(234)
4.2 模糊逻辑基本理论	(236)
4.2.1 模糊集合及其运算	(236)
4.2.2 隶属函数	(240)
4.2.3 模糊关系及其合成	(244)
4.2.4 模糊逻辑和模糊推理	(246)
4.2.5 模糊量的精确化	(258)
4.3 模糊控制基础	(260)
4.3.1 模糊控制系统的组成	(261)
4.3.2 模糊控制规则的推理方法	(263)
4.3.3 简单模糊控制器的设计	(269)
4.4 模糊理论在轧制过程中的应用实例	(274)
4.4.1 利用模糊动态设定技术改进带钢头部厚度精度 ...	(274)
4.4.2 模糊理论在冷轧带钢板形控制中的应用	(283)
4.4.3 模糊理论在冷轧控制中的应用	(294)
4.4.4 模糊理论在铝带冷轧板形控制中的应用	(304)
4.4.5 模糊控制器在线材活套控制中的应用	(310)
参考文献	(314)
5 轧制过程中智能化方法的综合运用	(316)
5.1 轧制问题求解机制与求解方法的分类	(316)

5.1.1	求解机制	(316)
5.1.2	综合求解的方式	(318)
5.2	几种智能方法相结合在轧制中的应用	(319)
5.2.1	板形控制的模糊-神经网络	(319)
5.2.2	基于神经网络的预警专家系统	(322)
5.3	人工智能与其他方法相结合在轧制中的应用 ...	(324)
5.3.1	神经网络与数学模型结合改进轧制力预设值	(324)
5.3.2	轧制力智能纠偏网络	(327)
5.3.3	神经网络与数学模型结合预测带钢卷取温度	(329)
5.3.4	神经网络与有限元结合用于在线参数预报	(333)
5.3.5	基于知识提取的厚差诊断专家系统	(334)
5.3.6	基于有限元数据库的 H 型钢孔型设计专家系统 ...	(342)
5.3.7	遗传算法与数学模型结合优化立辊短行程曲线 ...	(348)
5.4	UC 轧机板形智能预测控制	(353)
5.4.1	预测控制简介	(354)
5.4.2	神经网络建模	(358)
5.4.3	BP 网络板形预测模型的建立	(359)
5.4.4	板形在线控制律的导出	(360)
5.4.5	板形在线模型的实时反馈校正	(363)
5.4.6	UC 轧机板形在线预测与实时控制实验研究	(365)
5.4.7	液压弯辊系统的 FUZZY-PID 复合控制	(376)
5.5	协同人工智能技术在轧制中的应用	(385)
5.5.1	协同人工智能简介	(385)
5.5.2	SAIRS 系统构成	(387)
5.5.3	数据库的建立	(389)
5.5.4	模糊评价与模糊聚类分析	(390)
5.5.5	负荷分配的神经网络	(397)
5.5.6	利用遗传算法优化网络参数	(401)
5.5.7	负荷分配影响因素的仿真实验研究	(404)
5.5.8	负荷分配专家系统	(408)

5.6 智能化信息处理在轧制中的应用	(412)
5.6.1 轧制过程在线智能化信息处理系统	(413)
5.6.2 在线实时数据库	(414)
5.6.3 在线自组织诊断和分析系统	(415)
5.6.4 在线模拟优化系统	(424)
5.6.5 系统诊断与远程维修系统	(425)
5.6.6 进一步发展展望	(427)
参考文献	(428)
附录 一个 BP 网络 C 语言实现源程序	(431)
索引	(445)

1

绪 论

1.1 人工智能进入轧制领域的背景

近年来人工智能(Artificial Intelligence,简称 AI)在轧制中的应用引起了人们的广泛关注^[1,2],专家系统(Expert System,简称 ES)、神经网络(Artificial Neural Network,简称 ANN)、模糊逻辑与模糊控制(Fuzzy Logic/Fuzzy Control,简称 FL/FC)、遗传算法(Genetic Algorithm,简称 GA)等,已经成为轧制领域研究人员耳熟能详的新名词,一场人工智能热正在轧制领域悄然兴起。

人工智能是在什么背景下进入轧制领域的,它对轧制理论研究和轧制技术发展将产生什么影响呢?

1.1.1 需求驱动

作为一种典型的金属成形过程,轧制技术已有几百年的发展历史^[3]。纵观轧制技术发展史,可以发现人们一直在努力去认识轧制技术的特点,改进轧制工艺与设备,优化轧制过程,以满足用户日益增长的对产品质量、品种等方面的要求。

近年来随着社会发展与科学技术的进步,用户对钢铁产品质量、品种、性能的要求越来越高,钢材质量指标已经达到相当高的程度^[5]。例如在外形尺寸精度方面:成卷提供的宽幅冷轧带钢,厚度精度已经达到了 0.002 mm,热轧板卷厚度精度已达 0.025 mm;在内部组织结构方面,已实现了对微米亚微米级的组织进行控制,实验室中普通钢的晶粒尺寸已经可以控制在 1 μ m 左右,工业规模生产中已经获得了晶粒尺寸在 3~4 μ m 左右的细晶结构钢;除此之外,有些专门用途的钢材还有深冲、超深冲、抗凹陷性、烘烤硬化性、可焊接性、耐温、耐压、耐磨、耐蚀等使用性能方面的严格要求。这就为轧制过程的控制进一步增加了难度,用传统方法