等径双辊倾斜铸轧及其自适应模糊控制方法



张玉军 著

東北大學出版社
Northeastern University Press

等径双辊倾斜铸轧及其自适应模糊控制方法

张玉军　著

东北大学出版社
·沈　阳·

© 张玉军 2018

图书在版编目（CIP）数据

等径双辊倾斜铸轧及其自适应模糊控制方法 / 张玉军著. — 沈阳 : 东北大学出版社, 2018.12
ISBN 978-7-5517-2083-0

Ⅰ. ①等… Ⅱ. ①张… Ⅲ. ①铸造－自适应控制－研究 Ⅳ. ①TG2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 303354 号

出 版 者：东北大学出版社
地址：沈阳市和平区文化路三号巷 11 号
邮编：110819
电话：024－83683655(总编室) 83687331(营销部)
传真：024－83687332(总编室) 83680180(营销部)
网址：http://www.neupress.com
E-mail: neuph@neupress.com
印 刷 者：沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂
发 行 者：东北大学出版社
幅面尺寸：170mm×240mm
印 张：9
字 数：162 千字
出版时间：2018 年 12 月第 1 版
印刷时间：2019 年 1 月第 1 次印刷
责任编辑：朱 虹 董媛媛
责任校对：赵子旭
封面设计：潘正一

ISBN 978-7-5517-2083-0 定 价：30.00 元

前 言

双辊铸轧将铸造与轧制合为一体，具有降低成本、节约能源、节省空间等优势，双辊铸轧具有较高的冷却速度，能显著地改善金属的组织性能。双辊倾斜铸轧与水平式双辊铸轧相比，能减轻密度偏析，提高铸轧速度；与立式双辊铸轧相比，能减少弯曲应力，降低卷曲难度；与异径双辊铸轧相比，能降低控制难度。国内外很多专家、学者针对双辊铸轧开展了大量的研究工作，但是针对等径双辊倾斜铸轧尚未有系统研究。

著者近年来一直从事该领域的研究工作，深感有必要结合该领域的新成果撰写一本学术专著，对等径双辊倾斜铸轧及其自适应模糊控制方法进行系统的介绍，并希望本专著的出版能够对该领域的研究和应用起到一定的推动作用。

本专著针对开发双辊倾斜铸轧工艺的需要，从机械实现、理论模型、数值模拟和工艺控制四个方面进行了系统研究。主要内容包括：以辽宁科技大学镁合金铸轧中心自主研制的立式双辊铸轧机为基础，增加了倾斜铸轧子系统，为系统地研究双辊倾斜铸轧过程提供设备平台；针对等径双辊倾斜铸轧，建立了耦合倾角函数的关于熔池液位高度变化和铸轧力计算的数学模型；基于所建立的等径双辊倾斜铸轧熔池液位数学模型，对双辊倾斜铸轧熔池内部进行流热耦合模拟，建立不对称性分析模型，进一步地分析倾斜角度、熔池液位高度、铸轧速度、水口位置和冷却水供给方式等不同工艺条件对熔池内流场和温度场的影响，为调整控制策略提供依据；针对铸轧过程熔池液位高度变化，建立了一种单入单出的非仿射非线性数学模型，基于模糊逼近技术进行解耦，设计了一种新的自适应模糊控制器，实现了对液面高度进行合理控制的目标；在此基础上，针对铸轧过程熔池液位高度和辊缝开度同时变化，建立了一种多入多出的非仿射非线性数学模型，设计自适应模糊输出反馈控制器，保证了辊缝和熔池液位高度的输出跟踪误差能够收敛到理想控制范围；最后，采用所建立的自适

应模糊控制策略，成功地进行了铸轧实验，验证了模型的适用性。

在撰著过程中，主要参考了著者攻读博士学位期间的研究成果和巨东英教授科研团队多年的研究成果，著者还参阅了国内外许多专家、学者在双辊铸轧及自适应控制方面的理论与实践研究成果，在此深表谢意。

由于著者水平有限，本专著中难免存在不妥之处，恳请广大读者不吝指正，对本专著提出宝贵的意见和建议。

著　者

2018 年 5 月于鞍山

目 录

第 1 章 绪 论 …… 1

1.1 双辊铸轧技术的发展概况及优点 …… 1
1.2 双辊不对称铸轧技术的发展概况 …… 2
1.3 双辊铸轧过程控制技术的研究状况 …… 5
1.3.1 双辊铸轧过程控制的发展状况 …… 5
1.3.2 双辊铸轧过程自适应控制的研究状况 …… 5
1.4 双辊倾斜铸轧过程的数值模拟研究 …… 7
1.5 双辊倾斜铸轧系统的设计要求 …… 10
1.6 问题的提出 …… 12
1.7 本专著的主要研究内容 …… 13

第 2 章 双辊倾斜铸轧系统 …… 14

2.1 引言 …… 14
2.2 原双辊铸轧系统 …… 14
2.2.1 设备组成 …… 14
2.2.2 控制策略 …… 17
2.3 双辊倾斜铸轧子系统的实现 …… 18
2.3.1 设备改进 …… 18
2.3.2 双辊倾斜铸轧实施过程 …… 22
2.3.3 在线监控系统升级 …… 22
2.4 实验与分析 …… 24
2.5 本章小结 …… 28

第3章　双辊倾斜铸轧过程建模 …… 29
3.1　引言 …… 29
3.2　双辊倾斜铸轧熔池液位模型 …… 29
3.2.1　模型边值条件分析 …… 30
3.2.2　熔池断面积求解 …… 32
3.2.3　熔池液位模型求解 …… 33
3.3　双辊倾斜铸轧铸轧力计算模型 …… 35
3.3.1　双辊倾斜铸轧铸轧力特征分析 …… 35
3.3.2　铸轧力计算模型求解 …… 36
3.4　本章小结 …… 38
第4章　双辊倾斜铸轧过程数值模拟研究 …… 39
4.1　引言 …… 39
4.2　双辊倾斜铸轧工艺过程 …… 39
4.3　双辊倾斜铸轧流热耦合模型的基本假设与控制方程 …… 40
4.3.1　模型的基本假设 …… 40
4.3.2　控制方程 …… 41
4.4　模拟过程中几个重要问题的处理 …… 43
4.4.1　固相率与温度关系模型 …… 43
4.4.2　凝固潜热的处理 …… 43
4.4.3　有效黏度的处理 …… 44
4.4.4　计算区域与网格划分 …… 44
4.4.5　边界条件的处理 …… 45
4.5　工艺参数对熔池内流场和温度场的影响 …… 46
4.5.1　倾斜角度对熔池内流场和温度场的影响 …… 46
4.5.2　熔池液位高度对熔池内流场和温度场的影响 …… 57
4.5.3　铸轧速度对熔池内流场和温度场的影响 …… 65
4.6　熔池内流场和温度场不对称性分析 …… 72
4.7　工艺参数调整对熔池内流场和温度场不对称性影响 …… 78
4.7.1　水口位置对熔池内流场和温度场的影响 …… 78
4.7.2　冷却水对熔池内流场和温度场的影响 …… 80

4.8 本章小结 …… 81
第5章 双辊倾斜铸轧熔池液位自适应模糊控制 …… 83
5.1 引言 …… 83
5.2 双辊倾斜铸轧熔池液位问题描述 …… 83
5.3 自适应模糊控制器设计及稳定性分析 …… 85
5.3.1 自适应模糊控制器设计 …… 85
5.3.2 稳定性分析 …… 87
5.4 仿真研究 …… 88
5.5 本章小结 …… 91
第6章 双辊倾斜铸轧系统鲁棒自适应模糊控制与实现 …… 92
6.1 引言 …… 92
6.2 板带铸轧工艺系统模型 …… 93
6.2.1 熔池液位方程 …… 93
6.2.2 模糊逻辑系统 …… 94
6.3 自适应控制器设计和稳定性分析 …… 95
6.3.1 自适应控制器设计 …… 95
6.3.2 稳定性分析 …… 97
6.4 仿真研究 …… 101
6.4.1 倾斜角度β =0°时仿真结果 …… 102
6.4.2 倾斜角度β =5°时仿真结果 …… 108
6.5 实验与分析 …… 113
6.6 本章小结 …… 119
第7章 结论与展望 …… 121
7.1 主要研究成果及结论 …… 121
7.2 进一步的研究方向 …… 122
参考文献 …… 124

第1章 绪 论

1.1 双辊铸轧技术的发展概况及优点

英国学者 Henry Bessemer 在 1846 年首次提出了将熔化金属直接铸轧为金属薄带的设想，在 1857 年设计出双辊铸轧原型机并申请了专利[1]。双辊铸轧工艺思想自从提出以来，经历了 170 多年的研究与发展，尽管曾经因为各方面条件的限制而中断，双辊铸轧工艺还是凭借其潜在的技术优势和广阔的应用前景，得到了学者的广泛关注。尤其是 20 世纪 80 年代以来，受能源危机的影响，全世界金属材料加工领域一直围绕节约能源消耗、提高薄板生产效率、改善板材质量展开研究。作为近终形铸造技术的薄板铸轧技术受到冶金及材料专家的青睐，得到冶金行业的高度重视[2]。美、日、德、韩及中国等都投入了大量人力物力开展双辊铸轧理论、技术和实验等方面的研究，研制出双辊铸轧实验原型机、中试机达几十台，建成了可以生产不锈钢、碳钢、硅钢、镁、铝等多种产品的生产线[3-4]。

双辊铸轧机的结晶器是由两个相向转动、内部水冷的铸轧辊与两个侧封板构成的楔形熔池，金属熔液从中间包经过水口浇注到熔池中，并在铸辊表面凝结形成凝固壳，随着辊的转动，凝固壳逐渐变厚，并最终焊合在一起，在双辊出口处轧制成形，最终生产出金属薄板[5-8]。双辊铸轧工艺的最为显著特点是将铸造与轧制合为一体，液态金属在极短的时间内结晶凝固，并同时承受塑性变形，直接生成近终形金属薄板[9-10]。

双辊铸轧工艺与传统的连铸工艺相比，省去了初轧、加热、热轧等工序，缩短了生产流程，提高了生产速度、板材性能，减少了设备投资、环境污染，降低了能源消耗，生产出来的薄板的厚度更薄[11]，具体体现在以下方面[12-15]：

(1) 缩短了生产流程，减少了设备投资：传统的连铸工艺需要近千米的生产线，双辊铸轧工艺生产线只需 60～80m，缩短了生产流程，减少了占地面积；

双辊铸轧工艺的设备投资比传统连铸工艺设备投资减少约35%。

（2）降低了能源消耗：传统的连铸工艺需要多次加工、加热才能使板材由厚到薄；双辊铸轧工艺能够直接得到1～6mm薄板，这样必然极大地降低电、热、水的消耗，同比节能高达80%～90%。

（3）提高了板材性能：由于双辊铸轧过程时间短、冷却速度快、成分偏析少而有效改善了薄板微观组织结构，晶粒得到细化，微观偏析降低，可以生产高速钢、高硅钢和非晶带等特殊材料，这是传统连铸工艺难以做到的。

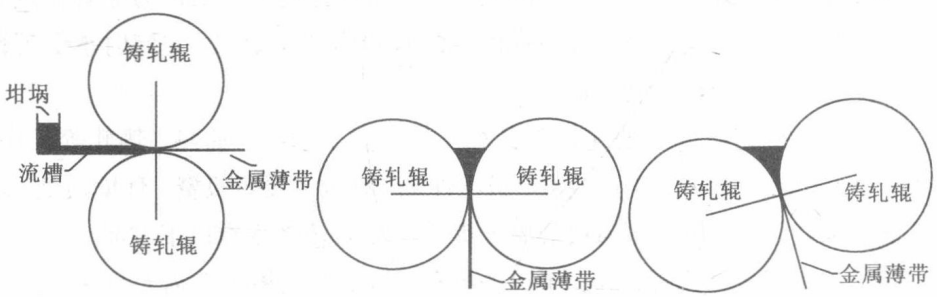
（4）减少了环境污染：双辊铸轧工艺在金属薄板的生产过程中，与传统的连铸工艺相比大大减少了SO_2、CO_2和NO_x的排放量，甚至能够减少70%～90%。

双辊铸轧技术因其具有诸多优点而在近几十年来得到了广泛关注及快速发展，目前发展比较成熟的薄带铸轧技术包括美国纽柯钢铁公司的Castrip、欧洲的Eurostrip、浦项的PoStrip、宝钢的Baostrip以及东北大学的E2Strip。实践证明，双辊铸轧有望成为低成本、大规模、商业化生产的有效技术[16]。

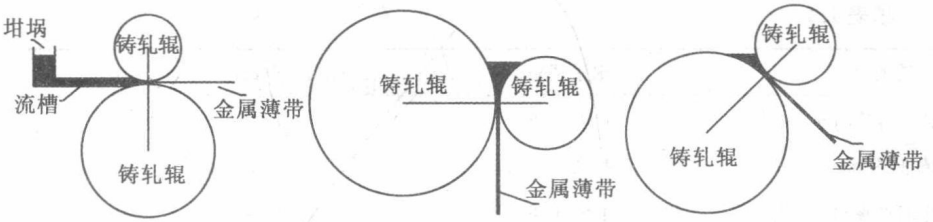
1.2 双辊不对称铸轧技术的发展概况

双辊铸轧按照辊径是否相等分为两种，即等径双辊铸轧和异径双辊铸轧；按照双辊布置的位置分为三种，即水平式双辊铸轧、立式双辊铸轧和倾斜式双辊铸轧。其中，等径水平式双辊铸轧技术已经接近产业化水平，立式双辊铸轧研究者较多。倾斜式双辊铸轧和异径双辊铸轧因为熔池形状的不对称性，均属于不对称双辊铸轧，与常规对称双辊铸轧相比更为复杂。关于异径双辊铸轧的研究不多，关于双辊倾斜铸轧的研究则更少。

不同铸轧类型比较如图1.1所示。



（a）等径水平式　　（b）等径立式　　（c）等径倾斜式

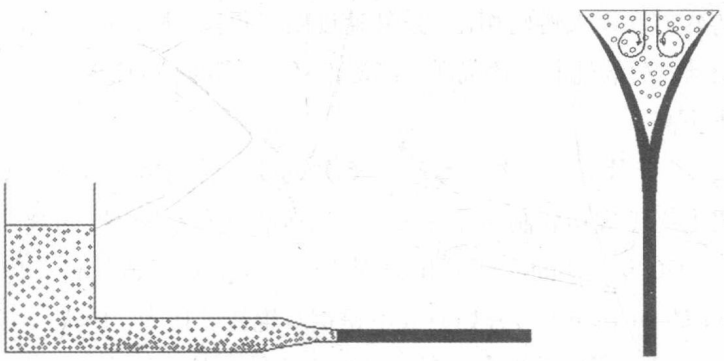


(d)异径水平式　　(e)异径立式　　(f)异径倾斜式

图 1.1 不同铸轧类型比较

Fig. 1.1 Comparison of various types oftwin-roll casting

水平式双辊铸轧、立式双辊铸轧凝固和比重偏析示意图如图 1.2 所示。



(a)等径水平式　　(b)等径立式

图 1.2 比重偏析示意图

Fig. 1.2 Schematic view of composition segregation

水平式铸轧的铸轧速度慢，在流槽内金属流速较低，形成层流，更容易产生比重偏析。而立式铸轧的驻扎速度较快，熔池内金属熔液形成湍流，再加上重力作用，比重偏析不明显。可见，在立式铸轧基础上进行倾斜铸轧对抑制比重偏析有利。

以 AZ31 镁合金为例，水平式铸轧与立式铸轧特点与参数对比如表 1.1 所示。

表 1.1　　水平式铸轧与立式铸轧特点与参数对比

Tab. 1.1　　Comparison of cast rolling characteristics and parameters

比较项目	水平式铸轧	立式铸轧
熔化温度/℃	720	680
浇铸温度/℃	700	660

续表 1.1

比较项目	水平式铸轧	立式铸轧
铸轧速度/($m \cdot s^{-1}$)	1.0～1.4	8～20
铸坯厚/mm	4～6	2～3
小时产量/($t \cdot h^{-1}$)	0.6～0.8	3～4
后续轧制	轧制(2mm)—退火—轧制(0.8mm)—退火—成品	轧制(0.8mm)—退火—成品
能源及消耗	高	低
设备复杂程度与自动化要求	设备相对简单，稳定可靠	设备复杂，自动化要求高

立式铸轧与水平式铸轧相比，铸轧速度明显提高，所以小时产量显著增加，铸坯厚度更薄，后续轧制工序简单，能源消耗低，但是立式铸轧设备更加复杂，自动化要求更高。

20 世纪 50 年代后，日本学者草川隆次经过长时间努力和多次试验，在双辊倾斜轧机上终于成功轧制出多种带材，包括硅钢和不锈钢，带材具有很好的机械性能。1970 年，Hunter 研制出倾斜 15°的水平双辊铸轧机。1980 年日本 NMI(Nippon Metal Industry)开始研究不锈钢双辊铸轧技术，1987 年该公司和德国的 Krupp Stahl AG 公司合作研制出异径双辊铸轧机，其铸轧薄板厚度为 1～4mm，铸轧速度为 40m/min。

1983 年东北工学院研制出国内第一台异径双辊铸轧机[16]，1990 年 3 月又研制出第二台异径双辊铸轧机。东北工学院异径双辊薄带铸轧机的大辊半径为 250mm，小辊半径为 125mm，铸轧辊宽度为 210mm，驱动采用可调速的直流电机。经过长期的深入的理论探索和实验验证，摸索出轧制工艺中的合理参数，尤其是针对高速钢和硅钢薄带铸轧工艺参数，使其更有代表性。与此同时，还深入系统地研究了薄带的显微组织结构、合金元素分布、力学性能及后续加工处理方法，成功浇铸出 2.1mm×207mm 高速钢薄带，带坯长度可达 30m。铸出的薄带坯产品能够加工出合格的刀片、锯条等[17]。

综上所述，等径双辊倾斜铸轧与水平式双辊铸轧相比，能减轻比重偏析，提高铸轧速度，降低能源消耗；与立式双辊铸轧相比，能减少弯曲应力，降低卷曲难度；与异径双辊铸轧相比，能降低控制难度。但是，等径双辊倾斜铸轧与常规双辊铸轧相比更为复杂，而且研究又很少，非常有必要对其进行系统研究。

1.3 双辊铸轧过程控制技术的研究状况

1.3.1 双辊铸轧过程控制的发展状况

双辊铸轧过程为：金属在熔化炉中熔化直至温度达到开浇要求；液压系统启动，调节伺服阀开度使铸辊闭合，压下力保持恒定；调节中间包位置使其与铸辊中心对中；调节微伺服电机，使中间包塞棒完全堵塞水口；以一定压力将双向侧封板压于铸辊表面；调节冷却水流量，使其达到设定值；启动铸轧主电机并调节铸辊转速达到设定值；在中间包液面、熔池液面、油槽内通入保护气；熔化浇铸子系统的电磁泵启动，以预设流量向中间包供料；当金属熔液达到中间包液面设定下限后，中间包塞棒提高到预定值，熔液流入铸轧熔池，此时供料系统控制单元启动中间包高低限位开环控制；铸轧熔池内金属熔液与水冷系统进行热交换，开始凝固并随着辊的转动使辊缝逐渐撑开并进入稳态轧制阶段。

整个铸轧过程涉及温度控制、凝固结合点控制、铸轧速度控制、液面控制、辊缝控制、铸轧力控制等各个方面，单一的一般性的控制并不能达到理想的控制目标，因为双辊铸轧工艺具有强耦合特征，多个参数相互影响、相互干扰，自适应控制的发展使得双辊铸轧控制目标的实现成为可能。

1.3.2 双辊铸轧过程自适应控制的研究状况

自适应控制的发展大体上经历了应用探索、应用开始和应用扩展三个阶段[18-22]。近些年来，自适应控制广泛应用在很多领域，都取得了很好的效果，包括工业电子领域[23]、导航制导领域[24]、航空航天领域[25]以及包括医学、社会、经济在内的非工业领域[26-28]。另外，神经网络[29-31]、模糊逻辑[32-34]、滑模变结构方法[35-37]等控制技术受到越来越多研究者的青睐。

双辊铸轧过程是一个非常复杂的变化过程，金属熔液在很短的时间内即可加工成薄板，金属熔液快速凝固，与此同时会发生塑性加工变形。由于双辊铸轧工艺是非线性的，而且具有大时滞、强干扰和强耦合等特征，为此，各国学者开展了大量深入的研究，在双辊铸轧的辊缝、熔池液位高度、铸轧力和铸轧速度等工艺参数以及多个工艺参数的解耦等方面，追求能够保证辊缝稳定，铸

轧力恒定，生产出具有良好的板型、均匀的微观组织、性能好的金属薄板的控制目标。

Chen H Y[38-40]等针对熔池液位控制中各过程变量之间的非线性、不确定性等特点，提出了基于滑模自适应神经网络设计方法，使得薄带铸造过程中的熔池液位高度得到有效控制。还提出了一个初始结构简单的基于自由模型的具有学习能力的自组织模糊控制策略，可自动实时地依据系统响应来调节模糊规则表。仿真结果显示该控制策略收敛时间快、稳态误差小，可以取得较好的控制效果。

D. Lee[41]等针对双辊铸轧工艺熔池液位高度控制设计了一个带有增益开关控制单元的自适应模糊控制器，使得模型的估计误差通过调整增益开关控制单元而得到有效调整。此外，为了能够消除铸轧速度和辊缝大小对熔池液位高度的影响，在系统中增加了补偿单元，而且是非线性补偿单元。通过仿真结果可知，设计的控制器具有较好的自适应能力，鲁棒性也较强，并且可以进一步扩展，用于控制双辊铸轧的铸轧力控制，也可以扩展到辊缝控制。

M. G. Joo[42]等提出了一个稳定的自适应模糊控制，用于铸轧中的熔池液面高度控制，根据李雅普诺夫稳定性分析，证明了该控制策略的有效性。为了有效解决浇铸非线性问题，开关控制器在该策略中被使用，从而有效处理了系统稳态误差，控制精度也得到提高。仿真结果表明，与传统的 PID(比例、积分、微分)控制相比，设计的自适应模糊控制策略在精度和鲁棒性方面是有优势的。

东北大学的曹光明[43,44]等建立了熔池液位被控对象模型，采用主副回路 PID 控制器，在主回路上给出一种适用于熔池液位控制的模糊自适应控制器，在副回路上采用微分先行 PID 控制器控制塞棒液压伺服系统以减少塞棒频繁移动，仿真结果表明，设计的控制系统具有响应时间短、鲁棒性较强和精度高等特性。

Youngjun Park[45]等提出，可以用一个模糊逻辑控制器来控制熔池液位高度，通过定义简化的设计参数，提出了解决多维模糊控制器在逻辑结构设计上过于复杂的方法，通过仿真验证了该控制器的控制效果。

朱丽业等[46]则充分研究分析了熔池液位控制非线性特征，考虑了熔池液位与其他参数的耦合性，进而提出一种具有监督控制功能的自适应模糊比例控制器，仿真结果表明这种控制器具有较强的稳定性和鲁棒性。

辽宁科技大学姚瑶、王仲初等建立了双辊铸轧移动辊液压 AGC 控制的数

学模型，并分别采用经典 PID 进行铸轧机辊缝控制[47]、基于铸轧力的双辊铸轧前馈反馈辊缝控制[48]、铸轧液压 AGC 系统的 Fuzzy-PID 控制[49]、基于粗糙集优化的 Fuzzy-PID 控制等[50]实现了恒辊缝控制策略，使得辊缝控制精度和响应速度提高。Zhang W Y 等[51]基于摄动法建立了铸轧力与辊缝解耦控制模型，并依据该模型提出铸轧力与辊缝的 PI 自适应控制策略。

Hong K S 等[52]对双辊铸轧全局控制策略进行了深入的研究，建立了熔池液位、金属凝固过程、铸轧力、辊缝、辊速等模型，并在此基础上提出了一个双层控制策略。尽管该策略未能实际应用，但仿真结果验证了该策略的有效性，对进一步解决双辊铸轧控制的复杂性、时变性、多控制目标下的变量耦合性等核心问题有很好的借鉴意义。

S. F. Graebe[53]提出了多变量非线性的连续铸轧模型，并且设计了相应的鲁棒控制器。Hesketh T 等人[54]提出了钢铁薄带连续铸轧中对熔池液位控制的自适应算法。张志柏、龚利华[55]建立了温度场分布反馈修正辊速优化模型及铸件/铸型界面温度反馈修正辊速优化模型，有效地提高了铸扎过程的稳定性。

应该指出，关于非线性系统的大部分结果，参数不确定性和扰动满足 Zhang Z Q 等[56-57]所用到的匹配条件。由于上述控制方法需要系统的所有的状态是可测的，它们不能应用到具有不可测量状态的非仿射非线性系统中。特别是对双辊铸轧工艺中的辊缝控制和熔池液位高度控制，很难使用合适的传感器来测量辊缝和熔池液位高度的变化率。Wu L B 等[58]基于自适应模糊滤波跟踪控制方法，研究了一类有不对称死区输入不确定非仿射非线性系统的输出跟踪控制问题。

由于倾斜铸轧带来的熔池流动和凝固不对称，进一步增大了铸轧过程控制的复杂性，以往的自适应控制模型能否适用于倾斜铸轧，如果不适用，需要进行哪些修正，这就成为必然要回答的问题。目前对于倾斜铸轧带来的影响，尚没有系统分析的报道，对其自适应控制模型的研究还是一个空白的领域。

1.4 双辊倾斜铸轧过程的数值模拟研究

双辊倾斜铸轧过程复杂，而且受到多种因素的影响。铸轧过程中，液态金属在熔池内的传热、流动和凝固等过程所用时间非常短，且有滞后性，因此很多重要的数据很难通过实验直接获取。铸轧过程同时也是金属由液态向固态转

变的过程，熔池内同时存在液相区、固相区和固液两相区，双辊铸轧的数值模拟通常采用有限元法和有限差分法建立起金属流动及凝固过程模型，获得熔池内部的温度场和流场的分布、预报凝固结合点等，从而优化工艺参数。近年来，随着数值模拟技术的发展，在预报应力场、裂纹倾向、铸轧板材内部组织等方面也取得了长足的进展。

吴卫平等[59]建立了双辊倾斜式薄带连铸传热过程的数学模型，数学计算采用有限差分法和三对角矩阵算法，结晶潜热采用移动节点法进行处理，计算了薄带连铸过程中铸轧区的温度场，与实测数据进行比对，通过对铸造速度、浇铸温度、熔池高度、辊缝等工艺参数对连铸过程的影响进行了模拟。

牛中生等[60]建立了双辊倾斜式连续铸轧铝板带热过程数学模型，较好地处理了边界条件、运动方向传热、变形热、金属静压力、氧化夹层等因素对传热过程的影响，计算出各区域的温度场。

欧阳向荣[61]推导出适合生产实践的铸轧力计算公式，能够帮助现场的操作人员根据合金品种不同选择合理的预应力，从而提高生产产品精度、降低能耗。

马少武等[62-63]采用有限差分法和二维非稳态凝固传热模型，应用边界适体坐标进行仿真研究，针对异径双辊薄带铸轧工艺中熔池中钢液在初始阶段的凝固传热性质，分析了铸轧起始阶段熔池内温度场的发展变化和辊面凝固壳的生长过程。采用二维稳态层流模型，对异径双辊薄带铸轧熔池中钢液的流动进行数值仿真，分析了铸辊转速、液面宽度、浇铸区宽度、浇铸位置等操作和设计参数对流场的影响。

姜广良等[64]给出了轧辊上一维传热的数学模型及其解析解，利用焓法建立了在薄带坯铸轧中钢液凝固传热过程的数学模型，并通过离散化和差分法给出各节点处温度及焓值的数学模型，通过模拟计算分析了传热系数对凝固场的影响。

Wang J D 等[65]利用商用软件 ProCAST 建立了从浇注到出钢这一时间段内的金属流动、传热和凝固的耦合模型，采用有限元方法求解质量、动能、能量平衡的控制偏微分耦合方程，用流体体积法处理金属流动的暂态自由表面问题，得到了金属薄板拉出的最佳工艺参数。

A. V. Kuznetsov[66]研究了双辊铸轧铝合金薄带过程，建立了流场和温度场的耦合模型，并进行了数值仿真，其结果表明在金属熔池的液相区和黏稠区存

在着强对流现象，这破坏了金属枝晶结构并使铸轧过程不稳定。

彭成章[67]以实验测得的辊、带接触换热系数作为边界条件，在拉格朗日坐标系下建立了双辊铸轧铝薄带暂态传热数学模型，并利用有限差分法进行了数值模拟，得出了铸轧辊套材质对金属凝固过程的定量影响规律。

张晓明[68]综合考虑了双辊铸轧过程中的金属湍流、传热和凝固，利用有限元分析理论建立了三维凝固过程流—热及铸辊热—力耦合模型，对铸轧过程的流场、温度场以及铸辊的温度场、应力、变形进行了数值模拟，给出了浇注温度、速度、铸轧力等过程参数对铸轧稳定性的影响规律。

潘丽萍等[69]以双辊铸轧布料系统及金属熔池为研究对象，采用 Fluent 软件建立了温度场、速度场的三维数学模型，并利用数值模拟方法定量分析了熔炼金属的流动及传热规律，用以指导铸轧机设计及优化铸轧过程参数。

Li Q 等[70]采用有限元法对双辊铸轧 304 不锈钢过程的温度场进行建模与仿真，显示了铸轧速度、开浇温度对凝固结合点的影响效果，并利用实测的出钢温度数据进行了验证。在此基础上结合实际铸轧板材的微观组织结构分析，得到铸轧 304 不锈钢的最佳速度及开浇温度。

Li J T 等[71]以镁合金 AZ61 为材料，使用有限元法对铸轧过程的温度场、流场、应力场进行了仿真，并分析了开浇温度、速度对铸轧效果的影响。同时进行一系列实验，得出铸轧镁合金 AZ61 时最优的开浇温度范围和最佳的铸轧速度范围。

Oldfield 于 1966 年在铸轧温度场模拟的基础上，利用传热方程潜热项构造出晶粒形核率和生长速度的函数，从而首次对铸轧薄带凝固组织结构进行了模拟。近些年来，国内外学者对此做了大量研究，已形成了近百种微观组织形核和生长模型。黄锋[72]、Chen M 等人[73]分别利用元胞自动机、相场法模拟了双辊铸轧镁合金薄带过程中金属枝晶形核与生长过程，并通过仿真与实验结果的比对，明晰了主要工艺参数对晶粒大小、取向的影响规律，为进一步优化工艺参数以提高薄带性能提供了相应理论依据。山东大学、燕山大学、山东理工大学等也在双辊铸轧有色金属薄板的性能及微观组织演变[74-75]、应力场数值模拟[76]、温度场和流场耦合分析[77]等方面进行了相关理论研究。

黄锋等[78]采用有限元法，应用 ANSYS 软件实现了双辊铸轧过程中熔池内温度场、速度场和凝固过程的三维耦合模拟，分析了浇注温度、铸轧速度等工艺参数对流场、温度场和凝固终了点的影响规律。