

钢铁生产调度智能 优化与应用

高慧敏 曾建潮 著

*Gangtie Shengchan
DiaoDu Zhineng
Youhua Yu Yingyong*

冶金工业出版社

钢铁生产调度智能优化与应用

高慧敏 曾建潮 著

北 京

冶金工业出版社

2006

内 容 提 要

钢铁工业作为基础产业,对整个国民经济的发展具有非常重要的战略意义。钢铁生产调度是钢铁生产管理的核心内容之一,对于降低产品成本、提高产品质量、缩短产品生产周期和增强企业市场竞争力具有重要意义。本书建立了钢铁生产过程的分层赋时着色 Petri 网模型及其调度的数学规划模型,对遗传算法、禁忌搜索算法和微粒群算法进行了系统研究,并应用于炼钢、连铸、热轧生产调度;最后,讨论了多智能体在冶铸轧一体化生产调度中的实现机制。

本书的工作对调度算法的研究和提高钢铁工业的生产管理水平以及实现钢铁工业 CIMS 具有一定的理论和应用价值。

本书可供冶金、信息类专业从事生产调度的管理人员、科技人员以及大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

钢铁生产调度智能优化与应用/高慧敏等著. —北京:
冶金工业出版社, 2006. 7

ISBN 7-5024-4027-5

I. 钢… II. 高… III. 钢铁工业—生产调度—
智能控制 IV. F407.362

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 062522 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 李培禄 美术编辑 李 心

责任校对 白 迅 李文彦 责任印制 丁小晶

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2006 年 7 月第 1 版, 2006 年 7 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 5.75 印张; 165 千字; 172 页; 1-2000 册

20.00 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

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

钢铁工业作为高能耗、资金密集型的基础产业，如何提高其生产管理水平，对于降低物耗和能耗、提高大型设备的生产效率、降低成本、提高产品质量、缩短产品生产周期和增强企业市场竞争力，具有重要的现实意义和应用价值。

炼钢、连铸、热轧生产过程的建模及优化调度问题是钢铁生产管理的核心内容之一。本书是作者在近 10 年来对实际项目所进行的研究与开发、对智能优化算法长期的研究与应用的基础上，总结提炼而成的。

钢铁生产过程的建模以及优化调度问题具有大规模、带有复杂约束、多目标、不确定性等特征，研究工作具有相当的难度，不仅是工业界亟待解决的控制优化关键问题之一，也是管理科学理论与优化理论研究中具有挑战性的科学问题。其理论在国际上也是一个热点研究课题。

钢铁生产过程是一个非常复杂的、由很多相互作用的子系统和子模块单元组成的系统，而 Petri 网对带有并发性、异步性、分布式、非确定性系统的描述能力很强，已成为目前最有前途的针对复杂系统的建模工具之一，特别适合于钢铁生产过程的建模。本书通过引入替代库所和端口变迁的概念，提出了分层赋时着色 Petri 网 (HTCPN) 的概念，并建立了炼钢、连铸、热轧生产的分层赋时着色 Petri 网 (HTCPN) 模型。在对炼钢、连铸、热轧生产工艺背景及工艺约束进行分析的基础上，建立了其生产调度问题的完整的数学规划模型。

调度算法的研究是调度问题的核心，在对遗传算法、禁忌搜索算法和微粒群算法进行深入的理论研究的基础上，将其研究成果成功应用于钢铁生产调度问题。基于协同进化的理念，进一步地讨论了人工智能的研究成果，特别是多智能体技术在钢铁生产调度中的应用。

调度系统是一个非常复杂的大系统，实际生产过程中的影响因素纷繁复杂，人的智能对调度系统的性能起着非常关键的作用。如何将人工智能和计算智能有机地结合起来，真正实现人机结合的集成化调度系统，将是未来非常有前途的研究方向。

本书专门介绍钢铁生产过程的建模以及调度的智能优化与应用。由于水平所限，书中有不足之处恳请读者批评指正。

本书第6章的6.2节、6.3节由曾建潮撰写，其余部分由高慧敏撰写。曾建潮教授对书稿进行了认真的修改；西安交通大学的孙国基教授审阅了全书，并提出了很好的建议；太原科技大学的崔志华、王丽芳两位老师，在仿真实例和遗传算法方面给予了指导和帮助；山西省自然科学基金委员会和太原科技大学对本书的出版给予了资助和支持，在此一并表示最诚挚的谢意。

作 者
2006年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 钢铁生产工艺流程的发展	1
1.1.1 钢铁生产基本工艺流程	1
1.1.2 钢铁生产工艺流程的演变	3
1.2 钢铁生产调度系统的特征和发展	5
1.3 钢铁生产调度中所采用的技术	9
1.3.1 优化算法	10
1.3.2 仿真技术	16
1.3.3 离散事件动态系统	17
1.3.4 人工智能	18
1.3.5 控制理论	19
2 钢铁生产调度的分层赋时着色 Petri 网模型	22
2.1 Petri 网基本理论	22
2.1.1 Petri 网的基本概念	22
2.1.2 着色 Petri 网的定义	27
2.1.3 赋时 Petri 网的定义	27
2.2 分层赋时着色 Petri 网模型	28
2.3 钢铁生产调度的 HTCPN 模型	30
2.3.1 转炉 TCPN 子网	31
2.3.2 台车 TCPN 子网	33
2.3.3 精炼 TCPN 子网	34

2.3.4 连铸机 TCPN 子网	34
2.3.5 板坯库 TCPN 子网	35
2.3.6 热轧生产 TCPN 子网	36
3 钢铁生产调度问题的数学规划模型	38
3.1 炼钢调度问题的数学模型	38
3.1.1 最优炉次计划问题的工艺背景及工艺 约束条件	38
3.1.2 最优炉次的数学模型	39
3.2 连铸调度问题的数学模型	41
3.2.1 浇次计划问题的工艺背景及工艺约束条件	41
3.2.2 最优浇次的数学模型	43
3.3 炼钢、连铸调度协调的数学模型	45
3.4 热轧带钢调度问题的数学规划模型	46
3.4.1 热轧带钢生产工艺简介及工艺约束条件	46
3.4.2 最优轧制单元的数学模型	48
3.5 连铸、连轧机调度协调的数学模型	49
4 遗传算法及其在钢铁生产调度中的应用	52
4.1 遗传算法概述	52
4.1.1 遗传算法的基本概念	52
4.1.2 遗传算法的原理	54
4.2 遗传算法分析	55
4.2.1 杂交算子	56
4.2.2 变异算子	59
4.3 一种新的求解 TSP 问题的遗传算法	60
4.3.1 求解 TSP 问题的杂交算子	61
4.3.2 实例仿真	64
4.4 炼钢生产调度问题的遗传算法	66

4.4.1 聚类算法	66
4.4.2 动态杂交算子	66
4.4.3 变异算子	67
4.4.4 实例仿真	67
4.5 连铸生产调度问题的遗传禁忌算法	88
4.5.1 聚类算法	88
4.5.2 基于禁忌搜索的杂交算子	88
4.5.3 基于禁忌搜索的变异算子	89
4.5.4 适应值的计算	90
4.5.5 实例仿真	90
5 禁忌搜索算法及其在钢铁生产调度中的应用	93
5.1 禁忌搜索算法概述	93
5.2 TSP 问题的基于禁忌搜索和遗传算法的混合算法	97
5.2.1 遗传算法设计	98
5.2.2 禁忌算法设计	101
5.2.3 仿真算例	101
5.3 热轧生产调度的禁忌搜索算法	104
5.3.1 混合并行策略	104
5.3.2 调度算法的实施	107
6 微粒群算法及其在钢铁生产调度中的应用	115
6.1 微粒群算法概述	115
6.2 求解约束优化问题的微粒群算法	117
6.2.1 约束优化问题的转换	117
6.2.2 基于双微粒群的 PSO 算法	119
6.2.3 仿真算例	120
6.3 求解整数规划问题的微粒群算法	121
6.3.1 求解整数规划的 PSO 算法	122

6.3.2 仿真算例	124
6.4 求解 0-1 整数规划问题的微粒群算法	126
6.4.1 $\{0,1\}$ 空间的 PSO 算法	127
6.4.2 0-1 整数规划问题的 PSO 算法	128
6.4.3 实例计算	130
6.5 微粒群算法在最优炉次求解中的应用	131
6.6 微粒群算法在最优轧制单元求解中的应用	133
7 冶铸轧一体化生产调度的多智能体实现机制	143
7.1 多智能体概述	144
7.2 基于算法集成的调度系统多智能体实现框架	145
7.2.1 调度系统中的算法集成	145
7.2.2 多智能体体系结构	149
7.3 冶铸轧一体化生产调度的多智能体实现机制	156
7.3.1 协同进化思想概述	157
7.3.2 冶铸轧一体化生产调度多智能体实现机制	159
8 结论与展望	162
参考文献	165

1 绪 论

钢铁生产过程是高温、高压、快速、多变、复杂、连续的大系统，大多是复杂的动态高温冶金反应过程，参数繁多，各种因素变动频繁，机理复杂，具有显著的非线性、时变性、空间分布性和不确定性。

从本质上看，钢铁生产过程是物质状态转变、物质性质控制、物质流管制在时间、温度和空间上的融合、贯通、协调、控制，实际上是一种多维的过程物质流管制系统。各个物流之间的衔接、匹配很重要，应十分重视相邻工序之间的“柔性”调节作用^[1]。

1.1 钢铁生产工艺流程的发展

1.1.1 钢铁生产基本工艺流程

钢铁工业生产的基本工艺流程如图 1-1 所示。

钢铁企业的生产工艺流程，按各工序间的紧密衔接程度，大致可以分为三个主要区域：炼铁区域（ironmaking）、主炼钢区域（primary steelmaking）、精加工区域（finishing）。各个区域的生产任务和前后工序的物流衔接关系如下所述^[2]：

（1）炼铁区域。在炼铁区域，炼铁工序将铁矿石、焦炭和石灰石送入高炉（blast-furnace）进行冶炼，铁矿石被分解预熔化，生成生铁（hot iron），作为炼钢工序的原料，送往炼钢工序。

（2）主炼钢区域。主炼钢区域包括转炉（或电弧炉）炼钢、

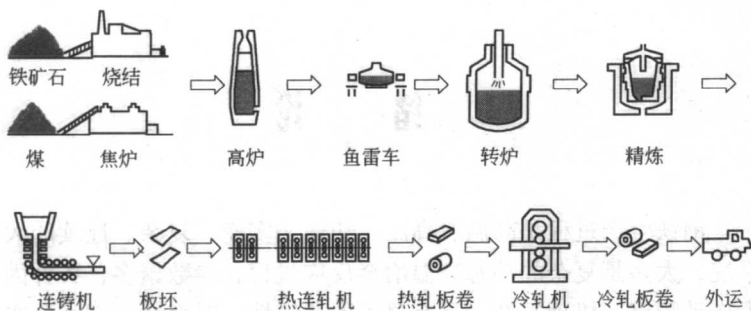


图 1-1 钢铁工业生产的基本工艺流程

连续铸坯（连铸）和热轧三个主要生产工序。随着热送热装工艺的发展，炼钢、连铸、热轧三个工序，无论是从一体化计划上，还是从一贯生产的物流紧密衔接上，都成为一个不可分割的整体。

主炼钢区域接受来自炼铁工序送来的生铁，与废钢一起投入转炉（或电弧炉）中，经吹氧并去除杂质，转化为钢水，出钢到钢包炉进行精炼（或脱气）。通常，一个满转炉炉容量的钢，称为炉次（heat）。达到钢种质量要求的钢水经连铸机固化、冷却、拉流、切割成各种长度的连铸坯。从连铸机拉出的板坯，经不同的加工路线送热轧机，在达到轧制所要求的温度下，轧成各种规格带钢卷（或其他轧材），完成了主炼钢工序的生产任务。主炼钢工序的产品可以直接作为产品卖给用户，也可经过下一深加工工序进行精加工。

（3）精加工区域。精加工区域主要对来自主炼钢区域的半成品，按照用户订货要求，有选择地进行冷轧（cold-rolling）、退火（annealing）、回火（tempering）、酸洗（picking）和喷涂（coating）等深加工作业，生产出满足用户要求的具有各种规格尺寸、表面等级、力学性能的产品。

在精加工区域中,由于许多精加工工序间的连接不是很紧,即使有连接,也比主炼钢工序间的组合约束条件简单,不涉及状态的改变,而且各个精加工工序的批量规模是固定的,因此,一般目的的离散制造业的调度方法和理论可以成功地应用于精加工区域中。而相同的调度方法却很难在主炼钢区域间取得成功。

1.1.2 钢铁生产工艺流程的演变

长期以来,钢铁生产工艺流程的基本原理没有明显改变,但是工艺过程的工程表现形式发生了巨大变化。不断的技术进步,使得钢厂总体模式不断改变。总的来说,钢铁生产工艺流程正处在从间歇/准连续向准连续/连续的方向演进之中^[1](如图1-2所示)。

在钢铁生产工艺流程中,无论是以铁矿石为原料,还是以废钢为原料,炼钢、连铸、热轧,都是不可缺少的三大工序。它们之间呈现顺序加工关系,不仅存在物流平衡和资源平衡问题,而且由于高温作业,还存在能量平衡和时间平衡问题。钢水要保质保量并按一定节奏送交连铸工序,以实现更多炉次的连铸,连铸高温坯的运送要与热轧的轧制计划有机结合,争取更高的装炉温度和热装比。这就要求将这三道工序视为一个整体,实现一体化管理,做到前后工序计划同步化,物流运行准时化,充分利用高温坯的潜热,取消或减少在制品库存,增加企业效益和市场竞争能力。

就炼钢与连铸工序的衔接问题,其核心是如何提高连铸的炉数。由于连铸对钢水的成分、温度和到达时间有着严格的要求,因此局部的一体化管理早就引起了人们的重视,各钢铁公司将炼钢车间与连铸车间放在一起,就从生产指挥和过程控制上为一体化管理创造了良好的条件。

连铸与热连轧工序间的连接问题,除包括物流的衔接外,还包括温度的衔接问题,一般有如下4种形式^[3]:

(1) CC—CCR, 连铸—冷坯装炉轧制, 简称冷送。连铸坯因种种原因无法在高温情况下送入热轧加热炉, 只好送到板坯库堆放, 根据轧制计划的需要, 一定时间后再由库中吊至炉前辊道, 装炉加热。装炉温度低于 400°C 的板坯均属此种方式。有些产品根据工艺要求只能放冷后再装炉也属于此种方式。

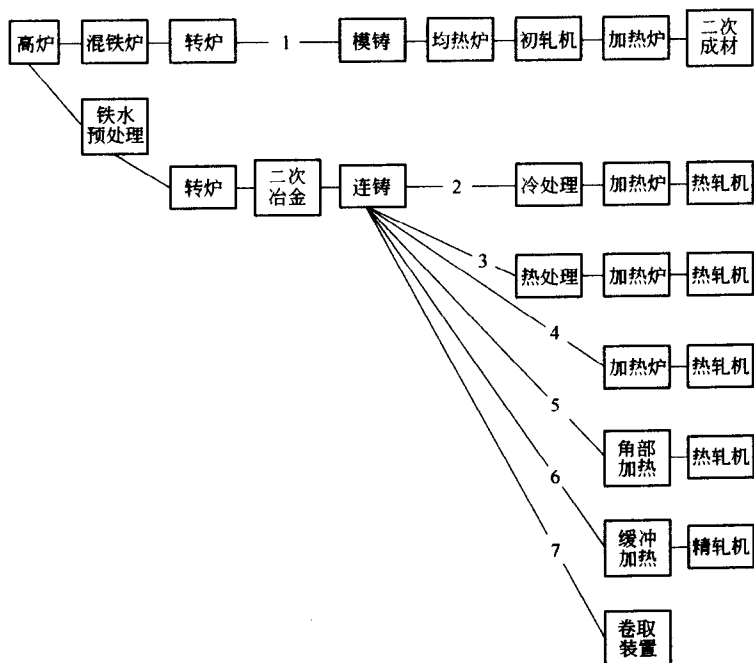


图 1-2 钢铁生产工艺流程的演进

- 1—模铸钢锭冷装轧制 (IC—CCR); 2—连铸—冷坯装炉轧制 (CC—CCR);
 3—连铸—热坯装炉轧制 (CC—HCR); 4—连铸—直接热坯装炉轧制
 (CC—DHCR); 5—连铸—直接热轧 (CC—HDR);
 6—薄板坯连铸连轧; 7—薄带连铸

(2) CC—HCR, 连铸—热坯装炉轧制, 装炉温度一般为 $400 \sim 700^{\circ}\text{C}$, 简称温装。当连铸生产计划与热轧轧制计划的衔接上存在一段时间差时, 高温连铸坯也无法直接装入加热炉。为了减少热能损失, 可以将热坯放到保温坑中存放一段时间, 需要时再吊出装炉, 这样既能使热能得到保存, 又在时间上得以缓冲。目前这种方式占有很大的比重。

(3) CC—DHCR, 连铸—直接热坯装炉轧制, 简称热装。由于是通过输送辊道将连铸过来的高温坯直接送入加热炉, 装炉温度都在 700°C 以上。无疑这是目前连铸与热轧间的最佳衔接方式。

(4) CC—HDR, 连铸—直接热轧。当连铸机可以实现高温铸造时, 在板坯运送过程中采取必要的保温措施, 针对板坯边角部温降大等问题采取边部加热等措施, 就可将达到轧制温度 ($1150 \sim 1200^{\circ}\text{C}$) 的铸坯不经加热炉而直接送上轧线。显然这是最为理想的工艺路线, 但它对各个环节都提出十分严格的要求, 包括板带自由轧制工艺的实现。因此, 这一方式的实现尚需相当长一段时间。

1.2 钢铁生产调度系统的特征和发展

市场对钢铁产品的需求是多品种、小批量, 而钢铁企业组织生产要求是大批量的, 例如钢铁工业每份合同的钢材量可能是几吨或十余吨, 而大型的炼钢炉每炉可为数百吨, 冶炼时要把交货期相近的、牌号相同的钢材合同组合成同一炉次。在连铸时, 需要将钢种接近、规格相似的炉次组合成浇次计划, 在此基础上编制炼钢—连铸的调度计划。上述三种计划是炼钢—连铸生产管理的关键技术, 合理地制定炼钢—连铸生产计划与调度, 对于物流生产的直行, 提高成材率和设备利用率, 降低能耗有重要作用。因此, 国际上极为重视这一课题的研究。

奥地利 Gmbh 钢厂^[4]研究了炼钢—连铸生产调度的关键建模

因素,并给出了调度模式与结构;Numao等^[5]采用人工智能与人机交互方式给出了炼钢—连铸生产调度系统;Dorn等^[6]提出了采用模糊数学与启发式规则解决冶铸的生产调度问题;日本、英国、美国、德国、比利时等国家的一些钢铁企业以及学术机构针对钢铁生产计划与调度问题都进行了研究与开发工作,并在生产控制中得到了应用,如日本的鹿岛钢铁厂、韩国的光阳钢铁厂、芬兰的Raahe钢铁厂等。国内,东北大学唐立新^[7]研究了基于准时制的炼钢—连铸生产调度问题,建立了该类生产调度问题的数学规划模型并采用遗传算法进行求解。清华大学韩曾晋^[8]采用一种区段赋时弧有色 Petri 网,建立了一个电炉炼钢连铸过程的实时调度模型,基于这一模型,既可以仿真整个生产过程,又可以分析和综合实时调度策略。上海交大与宝钢联合开发了宝钢炼钢连铸物流仿真系统,该系统以分层有色 Petri 网为建模工具,采用 COM 技术实现了对物流状况的仿真,为用户决策提供支持,对待建的系统进行设计时提供辅助决策支持^[9]。孙福权^[10]结合济南钢铁总公司的生产实际,采用专家系统技术,建立了在线炼钢、连铸计算机生产调度系统。庞哈利^[11]基于炼钢—连铸生产过程研究了具有准时制工艺要求的混合 flow shop 调度问题,提出了求解最小化平均流程时间的两阶段启发式算法,并在分析了炼钢—连铸生产管理特点的基础上,给出分布式在线生产调度系统的总体结构,描述了专家系统、启发式算法和人机交互相结合的生产调度计划集成化编制方法^[12]。胡维新^[13]对电炉炼钢短流程连续生产线,探讨了理想调度管理模型的建立和实时仿真模型的运行情况。李英锦^[14]采用虚拟现实技术开发了炼钢、连铸生产调度系统,以辅助调度人员有效地制定调度计划。李霄峰^[15]针对炼钢—连铸系统对单元设备建立了动态调度模型,并利用基于该模型的赋时同步有色 Petri 网对整个系统建立了动态调度模型,提出了一种启发式调度算法解决动态调度问题。彭志刚^[16]对连铸生产调度问题,采用两阶段数学模型进行描述,

并用不同的搜索算法加以解决。

热轧厂生产作业管理是钢铁企业生产管理系统的一个重要组成部分,而生产批量计划是热轧厂生产作业管理的关键技术,它包括编制生产轧制批量和确定轧制的生产顺序。如果编制计划不科学,将给生产造成重大损失。寻求定量的科学的制定热轧厂生产作业计划,对于提高实际生产效率、提高成材率、提高产品质量、降低成本、提高企业的经济效益将有重大的现实意义。

采用经济数学模型以及用电子计算机来综合解决热轧生产的作业管理问题是一项新的研究课题。从最新文献报道可以看出,国际上先进的钢铁公司已经对热轧车间生产作业管理问题进行了大量的研究,它已成为国际钢铁管理学术界的热点研究课题。加拿大的 Lopez^[17] 将其归结为 PCTSP 问题,并提出了相应的数学模型,采用禁忌搜索算法求解,已应用于实际生产。英国的 Cowling^[18] 采用启发式近优算法,解决热轧生产调度问题,并开发了称为 Betaplanner 的热轧生产调度决策支持系统商业软件包^[19]。美国 Daxus 公司^[20] 研究开发了用于热连轧生产系统分析、优化设计、生产调度等的仿真系统。IBM 公司^[21] 借鉴 A-Team 的思想,融合了数学模型、领域知识及启发式搜索算法实现了炼钢连铸及热轧的实时调度。澳大利亚的 Broner 公司^[22] 针对热轧生产线开发了生产计划与调度软件。I. Assaf^[23] 以加拿大 IPSCO 钢铁厂为背景,采用修正的分支剪枝算法 (Branch and Pruning) 在可行的计算时间内求解了热轧生产调度问题。东北大学唐立新^[24] 提出了热连轧生产调度问题的多旅行商模型,求解时仍转换为单旅行商模型,采用修正的遗传算法求解。陈雄^[2] 对能力约束和时间约束的热轧生产批量计划问题进行了研究;并将轧制批量计划归结为车辆调度问题,提出一种由启发式算法和模拟退火算法组成的两阶段算法^[25]。任勇^[26] 讨论了建立轧钢生产决策支持系统的必要性、决策支持类型及研究途径,并讨论了轧钢生产计划与调度物流管理系统的基本结构、模块的内

容及关系等。杨根科^[27]针对热连轧生产线建立了赋时变参数赋时混合 Petri 模型,给出了稳态调度策略,并在此基础上,基于生产系统的运行状态及可测参数,研究了动态调度策略,取得了满意的结果。

近年来,随着国际市场竞争的加剧和新的生产工艺的发展,从炼钢、连铸到热轧的各工序已出现高温直接连接,炼钢—连铸—热轧的集成生产管理方法即一体化调度成为新的研究热点。日本的五大钢铁公司(新日铁、川崎、住友、日本钢管、神钢)的各钢铁厂均建立了一体化计算机生产管理信息系统,并不断扩充其功能。韩国浦项钢铁公司的阳光钢铁厂,也开发了从铁水处理到轧制成材的一体化计算机管理系统。芬兰的 Raahe 钢铁厂为缩短交货期,简化生产流程,实现从原材料处理到热轧产品发送的连续化生产,开发了计算机生产管理系统,大量板坯实现了热装,取得了明显的经济效益。国内在此领域起步较晚,国家在“八五”期间向宝钢投资,使宝钢连铸坯热送热装的生产上了一个新台阶。

东北大学徐心和教授^[28]结合我国具体情况,对炼钢—连铸—热轧一体化管理的内容、意义、条件以及国外情况进行了系统的阐述,唐立新^[29]对炼钢—连铸—热轧的集成生产批量计划的问题特征进行了分析,为建立炼钢—连铸—热轧的集成生产批量计划的数学模型提供了基础;孙福权等^[30]对炼钢—连铸—热轧一体化管理的生产工艺、技术条件、两工程之间协调技术、生产管理系统以及国外的情况进行了阐述,并结合抚钢的实际,对一体化管理的生产问题进行了研究,采用模糊专家系统和运筹学模型相结合的混合算法,处理批量间匹配问题^[31];张彩霞等^[32]提出采用启发式搜索方法和离散事件仿真方法来解决冶铸轧一体化生产调度问题。作者^[33]将多智能体技术引入钢铁生产调度,提出了解决冶铸轧一体化生产调度的体系结构。朱宝琳^[34]基于一体化管理思想,建立了炼钢—连铸—热轧一体化生产调度模型,