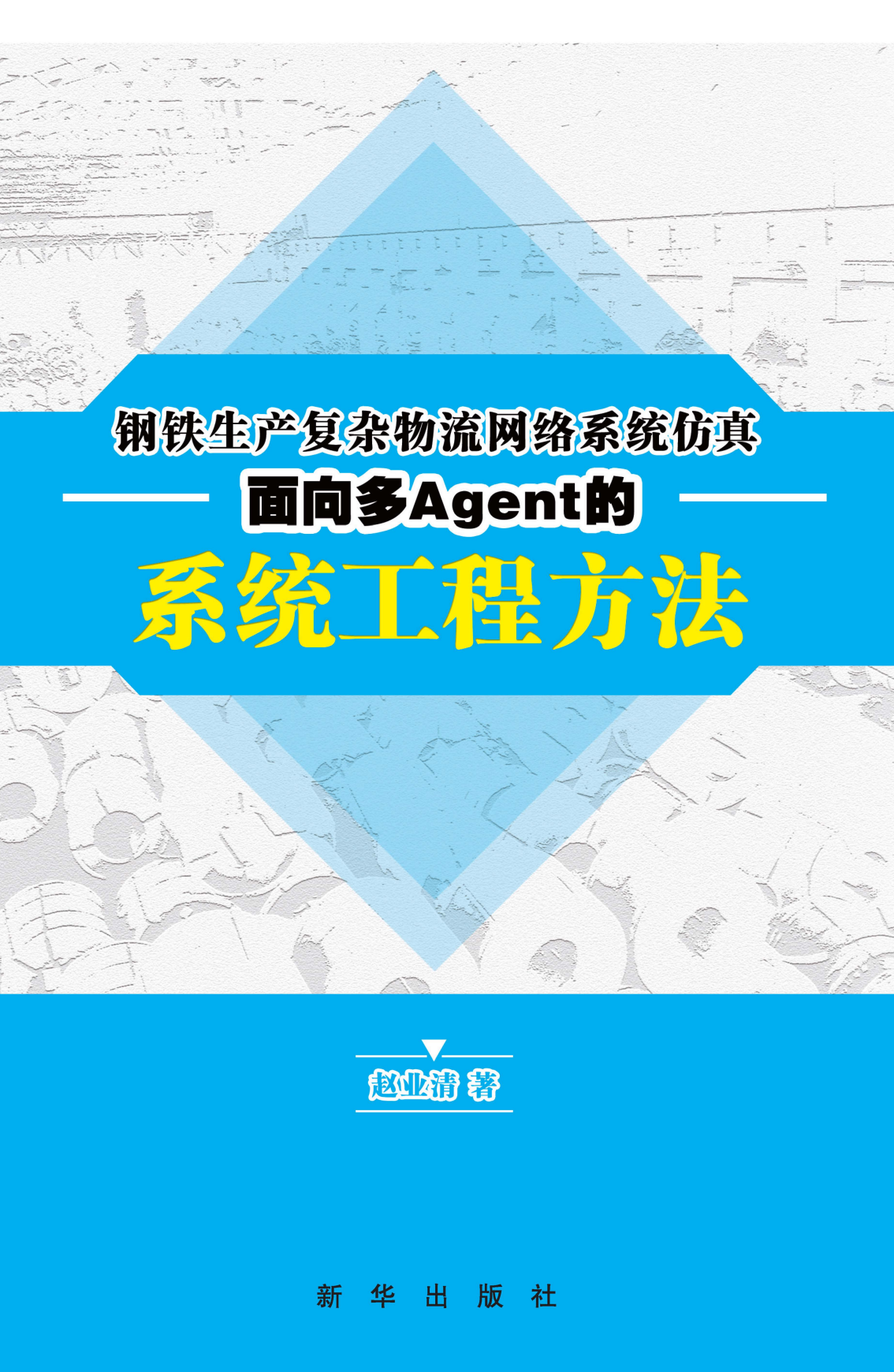




钢铁生产复杂物流网络系统仿真

—— 面向多Agent的 ——

系统工程方法

▼
赵业清 著

新 华 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢铁生产复杂物流网络系统仿真：面向多 Agent 的系统工程方法/赵业清著

北京：新华出版社，2015.8

ISBN 978-7-5166-1935-3

I. ①钢… II. ①赵… III. ①钢铁工业—物流—网络系统—系统仿真—研究—

中国 IV. ①F426.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 183947 号

钢铁生产复杂物流网络系统仿真：面向多 Agent 的系统工程方法

作 者：赵业清

出 版 人：张百新

封面设计：李尘工作室

责任编辑：沈文娟

责任印制：廖成华

出版发行：新华出版社

地 址：北京石景山区京原路 8 号 邮 编：100040

网 址：<http://www.xinhupub.com> <http://press.xinhuanet.com>

经 销：新华书店

购书热线：010-63077122

中国新闻书店购书热线：010-63072012

照 排：新华出版社照排中心

印 刷：北京厚诚则铭印刷科技有限公司

成品尺寸：170mm×240mm

印 张：15

字 数：185 千字

版 次：2015 年 8 月第一版

印 次：2015 年 8 月第一次印刷

书 号：ISBN 978-7-5166-1935-3

定 价：32.00 元

图书如有印装问题，请与出版社联系调换：010-63077101

前 言

目前,我国自然资源严重短缺,生态环境严重恶化,环保政策日益严格的情况下,钢铁生产企业要实现节能减排目标,进一步提高自身适应性和国际竞争能力,实现资源循环利用和本身可持续发展,必须对企业生产物流系统进行深入研究、分析和进一步优化。

钢铁生产是一个多工序、多工位、空间跨度大、生产品种多的具有动态和不确定性的复杂物流系统。钢铁生产复杂物流系统是影响产品品种、质量和产量的关键因素,认识其生产物流规律,进行合理的生产计划及调度,是实现生产物流畅通的保障,是提高产品产量和降低生产成本的关键。

Agent 技术及 Agent 的自主性、社会性、反应性、主动性、移动性、理智性等特性可以用来实现动态的、不确定环境的、大规模的软件系统。多 Agent 系统把多个 Agent 有效组织起来,相互协作和交流,形成问题的求解环境,并根据环境和交流知识进行推理、学习等,能够有效实现系统整体性能的提高和适应系统的灵活性、柔性、开放性等要求。面向 Agent 的开发方法已经成为软件工程领域的新趋势,为复杂系统的理解、建模、开发提供了一种很自然的方法,它使分布式的结构变得更简单、智能化和具有鲁棒性。

本书利用多 Agent 技术探索一种既能描述钢铁生产过程复杂物流系统特性,又能反映物流系统的动态特征;该技术是对不同形式的钢铁生产流程具有广泛适应性的建模仿真方法和软件工程设计方法,在理论和实践方面均具有非常重要的意义。

针对钢铁生产过程灵活性、柔性和适应性的要求及其物流系统的复杂性特点,根据 Agent 技术优势及多 Agent 系统优点,其应用在钢铁生产复杂

物流仿真系统中时可有效克服已有建模方法的不足，提出基于多 Agent 的钢铁生产复杂物流仿真系统建模方法，把钢铁生产过程复杂的物流系统抽象为一个多 Agent 系统，基于通用性原则对仿真系统模型进行软件工程的分析、设计与实现技术研究。首先在对钢铁生产物流系统复杂性充分认识和把握的基础上，把多 Agent 技术引入到钢铁生产复杂物流系统的建模过程中，实现对基于多 Agent 的钢铁生产复杂物流仿真系统的系统功能分层抽象和定义；其次，通过分析仿真系统中 Agent 类型及结构，在对 Petri 网结构和功能进行扩展和 Agent 行为理论及 Agent 间交互行为理论拓展的基础上，建立了仿真系统中 Agent 的行为及其之间的交互模型，并借助形式化描述工具 Petri 网实现 Agent 内部动作和外部动作及其之间交互的形式化建模；另外，由于钢铁生产过程中物流系统灵活性和柔性的特殊要求，致使钢铁生产过程中的运输系统在整个物流系统中具有举足轻重的地位，本书就运输系统中天车运行机制进行详细分析和研究的基础上，实现了运输系统和物流仿真系统的有机结合；最后，为确保基于多 Agent 的钢铁生产复杂物流仿真系统模型的有效性和正确性，在对多 Agent 系统工程建模方法扩展的基础上实现对复杂物流仿真系统的分析设计，建立了相应的复杂物流仿真系统模型，并进一步借助 Agent 建模工具实现对整个仿真系统模型的分析设计和模型验证。

根据某钢厂炼钢厂的生产实际，建立相应的基于多 Agent 的钢铁生产物流仿真模型，并将仿真结果和实际数据相对比，结果表明：

1. 基于多 Agent 的钢铁生产复杂物流系统仿真模型是正确有效的，可以根据实际规模要求灵活搭建基于工序及工位的仿真模型。在相似的输入条件下，仿真结果与实际系统中转炉至连铸区间的物流平均流通时间进行对比分析进一步表明：基于多 Agent 的钢铁生产复杂物流系统仿真模型和实际系统没有明显差别，能正确反映炼钢厂的复杂物流实况。

2. 基于多 Agent 的钢铁生产复杂物流系统仿真模型可以根据不同生产流程特点构建相应的仿真模型，仿真可揭示不同生产流程在不同生产条件下的生产瓶颈，脱硫工序在有混铁炉和取消混铁炉的炼钢生产流程中均为生产瓶颈，对于取消混铁炉的炼钢生产流程，当铁水进厂节奏较慢时（3 罐/60min），脱硫工序为生产瓶颈，当铁水进厂节奏提高到一定程度（5 罐/

60min) 后, 转炉工序成为生产瓶颈。

3. 利用仿真模型可为不同钢铁生产流程下制定提高生产效率、多台连铸机同时实现连浇的策略提供决策支持。比较有混铁炉和取消混铁炉的炼钢生产流程, 当铁水进厂节奏比较慢时 (3 罐/60min), 加快铁水进厂节奏或加快转炉冶炼周期有利于生产效率和连浇百分比的提高, 而对于取消混铁炉的生产流程, 此时较长的转炉冶炼周期反而有利于生产效率的提高; 铁水进厂节奏达到一定程度后 (5 罐/60min), 铁水进厂节奏或转炉冶炼周期的加快对提高生产效率和连浇百分比均没有明显效果, 对于取消混铁炉的炼钢生产流程, 加快转炉冶炼周期有利于提高系统生产效率。

4. 基于多 Agent 的钢铁生产复杂物流系统仿真模型具有的通用性、实用性和灵活性, 能正确模拟炼钢生产的复杂物流特性, 可针对不同生产过程进行系统诊断和预演, 根据仿真模型的仿真结果, 可实现对钢铁生产组织和生产流程物流的优化管理, 为全连铸生产管理及物流控制的改进提供决策支持。

基于多 Agent 的钢铁生产复杂物流系统仿真模型建模方法在表达炼钢生产物流特性、揭示复杂物流系统运行机制方面更有效, 能更好地满足当前分布式复杂系统的建模需要, 具有对各种炼钢生产物流系统进行灵活建模且仿真适应性较强。该建模方法的提出和实现为复杂制造流程的建模与物流仿真研究提供了新的手段和方法。

目 录

前 言	1
第一章 绪 论	1
第一节 引言	1
第二节 钢铁生产物流系统	3
一、钢铁生产流程	3
二、钢铁生产流程特点	4
三、钢铁生产复杂物流系统	5
第三节 钢铁生产复杂物流系统研究现状	7
一、钢铁生产复杂物流与生产调度关系	7
二、钢铁生产复杂物流系统研究方法	8
三、钢铁生产复杂物流系统及生产调度系统研究现状	8
第四节 本书内容及架构	13
参考文献	14
第二章 基础理论与方法	19
第一节 复杂系统	19
第二节 Agent 技术	20
一、Agent 技术	21
二、多 Agent 系统	24
三、多 Agent 系统仿真	29
四、MaSE 方法	34

第三节 Petri 网	38
一、Petri 网定义	38
二、Petri 网的激发规则	40
三、Petri 网的基本特征	40
四、Petri 网的分析方法	41
五、Petri 网的扩展	42
第四节 复杂网络	45
参考文献	48
第三章 钢铁生产复杂物流网络系统建模	54
第一节 钢铁生产流程分析	54
一、钢铁生产拓扑分析	54
二、钢铁生产网络系统分析	55
第二节 钢铁生产复杂物流系统多 Agent 仿真模型	62
一、钢铁生产复杂物流多 Agent 系统	63
二、钢铁生产复杂物流系统 Agent 类型和结构	66
第三节 钢铁生产复杂物流多 Agent 仿真模型关键技术	73
一、Agent 关系描述	73
二、Agent 通信描述	75
三、Agent 行为 Petri 网建模	78
四、Agent 交互行为 Petri 网建模	100
第四节 钢铁生产复杂物流多 Agent 运输系统	108
一、运输系统重要性分析	108
二、运输系统网络化描述	110
三、运输系统中工序和工位关系描述	118
参考文献	126
第四章 钢铁生产复杂物流网络系统设计	129
第一节 系统模型目标获取	129
一、系统模型目标识别	130

二、系统模型目标组织	130
第二节 系统应用用例设计	132
一、生成用例	132
二、生成序列图	132
第三节 系统角色提炼	133
第四节 系统 Agent 类创建	134
第五节 系统 Agent 间对话构建	136
第六节 系统 Agent 类设计与组装	139
第七节 系统设计	141
第五章 钢铁生产复杂物流网络系统实现	143
第一节 系统开发平台	143
一、基于 AnyLogic 平台的 Agent 的建模方法	144
二、基于 AnyLogic 平台的 Agent 交互	145
第二节 系统设计概述	146
一、系统设计背景	146
二、系统设计目标	149
第三节 系统总体设计	149
一、仿真模型结构功能设计	149
二、数据库设计	149
第四节 系统软件实现	151
一、仿真模型的程序实现	151
二、参数设定与模型仿真界面	180
三、模型运行结果表达	181
第六章 钢铁生产复杂物流网络系统仿真	183
第一节 仿真模型检验	183
一、数据分析	183
二、仿真条件	185
三、仿真结果	187

第二节 生产条件对生产过程的影响.....	188
一、仿真实验设计.....	188
二、生产模式 I 仿真分析	192
三、生产模式 II 仿真分析	199
参考文献.....	208
 第七章 总结与展望.....	 209
第一节 总结.....	209
第二节 展望.....	211
 附录一.....	 212
附录二.....	223

第一章 绪论

第一节 引言

钢铁生产是典型过程工业，在生产钢铁产品过程中，不仅消耗大量天然资源，同时排放大量废气、废水和固体废弃物。在当今钢铁工业规模不断扩大，产能持续高速增长情况下，钢铁工业发展受到铁矿资源、能源和水资源等生产要素的严重制约。要发展循环经济，建设资源节约型钢铁企业是缓解资源供需矛盾和减轻环境压力的根本出路。在建设资源节约型社会、实现社会和经济可持续发展历史大背景下，作为高能耗、高物耗、高水耗的钢铁工业，必须制定发展循环经济、创建资源节约型钢铁企业的发展规划，以求在节能降耗、节水和废弃物再生利用等方面取得显著成效。

创建资源节约型钢铁企业，必须从源头抓起，从控制铁矿资源消耗、能源消耗和水资源消耗入手，本着“源头削减，过程控制，污染物再资源化”的原则，把节能降耗、清洁生产贯穿到企业内部生产全过程。为实现在生产过程中提高铁资源、能源和水资源的利用效率，必须摸清整个生产系统内部全部物流和能流状况及生产系统和外部环境之间物流和能流交换状况。在此基础上，利用相关物流和能流理论对企业资源和能源利用状况进行评价，找出改善资源和能源利用效率的途径，指引企业向提高资源和能源利用效率的方向努力。

2010 年我国粗钢生产量为 6.26 亿吨，2011 年达到 6.83 亿吨，2012 年更是突破 7 亿吨而达到 7.17 亿吨，进入 2013 年以来，受全球经济影响整个钢铁行业处于低迷状态，但我国粗钢产量仍然达到 7.8 亿吨，2014 年以来增速更进一步放缓，但粗钢产量还是突破 8 亿吨而达到 8.22 亿吨，我国钢铁行业的飞速发展促使我国粗钢产量连续多年占据全球生产总量的一半，成

为名副其实的全球最大的粗钢生产国。然而，钢铁行业能耗占全国总能耗的 15% 以上，且吨钢综合能耗比世界先进水平高 15%~20%。“粗放型发展”已成为制约我国钢铁工业由“钢铁大国”向“钢铁强国”迈进的“拦路虎”，同时也制约着国民经济健康运行和可持续发展。^[1]随着铁矿石资源和能源供应的日益紧张与价格上涨、节能减排等压力的增加，企业如何在一定生产规模下，进行资源合理配置与高效利用，保证生产物流通畅，有效提高生产运作效率必将成为企业可持续发展和提高市场竞争力的重要途径。

物流系统的研究方法主要分解析法和非解析法。解析法就是通过对物流系统对象进行抽象，并利用数学模型进行表达，通过求解表达式而找到系统的最优解。譬如运筹学中的线性规划和动态规划。而在非解析方法中，使用比较广泛的方法是系统仿真方法，通过对系统分析和历史数据研究的基础上建立仿真模型，通过运行仿真模型实现对系统行为的表达。

高效的钢铁生产流程仿真技术，是预测并揭示生产运行瓶颈及临界生产条件的有效手段；为优化生产作业计划和计划执行过程，改善生产组织方式，确保生产物流通畅和系统有序高效运转提供了保障。

在钢铁企业生产过程中，系统物流状况直接决定着系统中的能量消耗；物流系统的顺畅与否，直接决定着钢铁企业生产的效益和发展。目前，如何实现钢铁生产系统物流的全流程优化是当前研究的主要焦点；对钢铁生产复杂物流系统的研究有助于发现钢铁生产过程中的物流与需求平衡问题，找出生产系统中的瓶颈及关键路径，为进一步优化企业运作方案，提高设备利用率，提高产品产量和质量，实现节能降耗、降低成本、提高企业竞争力的目标提供理论基础和实践指导。

本书基于多 Agent 的钢铁生产复杂物流网络系统仿真建模与仿真优化新方法，通过对钢铁生产流程中的工位、工序、任务共、特性分析，将其分别抽象成工位、工序、任务 Agent，旨在研究并构建一种对复杂系统建模的通用方法，以更好实现钢铁生产流程网络的灵活搭建和任务的动态绑定，提高模型对各种不同炼钢生产流程进行建模和模拟的灵活性和适应性；利用扩展的形式化描述工具 Petri 网和面向 Agent 的软件开发方法实现对系统中 Agent 交互模型的形式化描述及系统软件的面向 Agent 的系统分析和设计，旨在提高建模过程的高效性和模型通用性及其与实际对象的一致性；利用动

态网络中各 Agent 间的协作与竞争，实现对钢铁生产流程的生产物流运行过程的动态仿真，来更好地表达生产流程中不确定性和突发异常事件对物流系统的影响，从而检验模型的正确性、适应性及有效性，为实现钢铁生产过程物流研究和优化提供一种新的手段和工具。

第二节 钢铁生产物流系统

一、钢铁生产流程

企业生产根据生产过程特点可分为离散型生产过程和连续型生产过程。离散型生产企业一般是指机械加工企业。其基本特征表现为机器实现对工件外形的加工，再将不同工件通过特定设备组装成具有特定功能的产品。在生产过程中，机器设备和工件都是独立的，故称之为离散型生产方式。譬如汽车生产、飞机制造、电子产品企业和服装企业等。连续型生产企业一般是指被加工对象不间断地通过生产设备，如化工企业、炼油厂、水泥厂、发电厂等，通过一系列的加工装置使原材料进行规定的化学反应或物理变化，最终得到所需产品。

现代钢铁联合企业生产流程是一个典型的离散和连续相混合的生产过程，各工序内连续，工序之间的衔接离散。典型的钢铁生产流程主要包括炼铁工序、炼钢工序、轧钢工序等，其生产流程如图 1-1 所示。

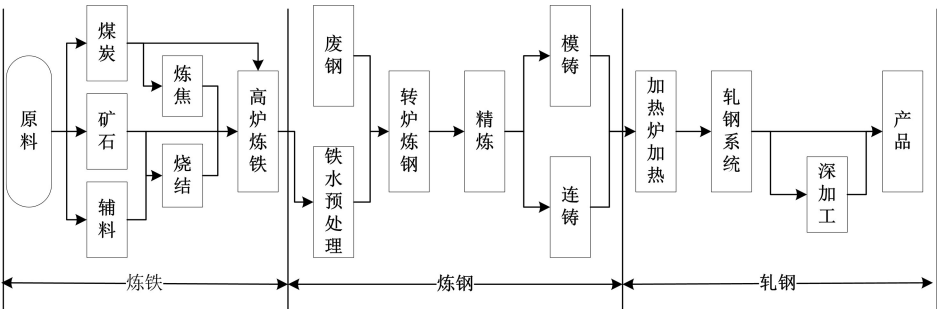


图 1-1 典型钢铁生产流程

炼铁主要是把铁矿石、焦炭及辅料等原材料按一定比例混合后以一定速

度送入高炉进行冶炼，生产出成分符合标准的铁水，作为下一道工序的原料，进入炼钢工序。企业为追求高产、稳产和降低成本的目标，结合高炉的结构特点，高炉炼铁的产品往往为单一的铁水，生产过程表现为典型的连续流程型生产方式。

炼钢就是把经过预处理的铁水和废钢等原料加入转炉进行升温、脱碳和脱氧处理，以除去铁水中各种杂质，达到钢水成分标准要求。对于特殊要求的钢种，钢水需要经过精炼，调整钢水各成分比例，达到要求的钢水经过模铸或连铸形成模坯或钢坯，作为下一道轧钢工序的原料。炼钢生产过程及其产品特点使炼钢过程表现为连续型生产方式。

轧钢过程是根据客户对产品的要求，钢坯经过加热炉加热，达到设定温度后，对钢坯进行轧制以生产出符合客户要求的各种型号钢材，对有特殊需求的特种钢材，还需经过进一步深加工等操作以满足客户特殊需求，生成最后产品，流入市场。轧钢生产过程根据产品种类不同，其生产过程既可表现为连续型生产方式也可表现为离散型生产方式。

二、钢铁生产流程特点

钢铁生产是一个典型离散和连续相混合的高温作业生产过程，其生产流程中生产线很长，工序繁多，设备繁杂。在钢铁生产过程中，各个阶段涉及的主要反应不尽相同，冶炼阶段以化学反应为主，轧制阶段则以物理变化为主，前后工序必须有效衔接，包括信息流、物质流及能量流的传递和转化，具有复杂性、突变性和不确定性等特性。钢铁生产流程是一类由不同功能但相互关联、相互支撑、相互制约的多种工序和多种装置及相关设施构成的、工序串联并集成运行的复杂过程系统^[2]：

1. 多组元、多相态、多层次、多尺度

钢铁企业生产过程中是多段生产、多段运输、多段存储，物流管理是分段式的，物流对象在流动过程中既有物理变化又有化学变换，处于不断的相变过程中；既有脱碳、脱氧和脱硫等单元操作，也有转炉和精炼炉等工序单体运动，更有多个跨内区段运动以及钢厂生产物流整体运动；钢铁生产所使用的都是大型生产和运输设备，且主要工艺路线和设备比较稳定。生产过程中涉及工序有原料的预处理、高炉冶炼、转炉吹炼、精炼炉真空冶炼、连铸

和连轧等；运输过程有火车和汽车实现原料运输、火车实现铁水到转炉的运输、台车实现转炉到精炼炉运输、天车实现精炼炉到连铸机的运输等。

2. 开放性、远离平衡、非线性、动态有序性

钢铁生产过程显然是一个开放系统，在生产中不断地有原料和能量流入，也不断地有产品和能量流出，外界环境和系统之间存在着物质、能量和信息交换。

钢铁企业整个生产工艺流程有很强的连续性或分段连续性，上下环节关联性强，后道工序受前道工序约束，前道工序也受后道工序牵制，而各工序的不同组合导致生产过程中的物质流量、温度、时间等参数的不均匀性，所以各工序、装置之间的相互作用关系表现为非线性性。

钢铁企业生产过程中各工序不仅接受来自前道工序的物质流、信息流和能量流，而且也通过一定的作用使物质流的某些属性发生变化以使其适应外界环境并相互协调的过程导致生产过程远离平衡态而动态有序的不断发

展。因此，钢铁企业生产过程具有多元性、多层次、多尺度，以及开放性、非线性、远离平衡、动态有序等复杂系统特性，是一个开放的、远离平衡的、不可逆的、由不同结构和功能的单元设备组成的复杂生产过程。

三、钢铁生产复杂物流系统

物流^[3]就是物料从供应地到接收地之间的实体流动过程，根据生产过程实际需要，将装卸、运输、储存、搬运、包装、加工、配送和信息处理等基本功能有机结合。物流系统^[4]是指在一定时间空间内，将所需物料和有关设备、工具、仓储、人员等若干相互制约的要素构成具有特定功能的有机整体。生产物流是指在生产过程中，原材料、在制品、半成品、产成品等在企业内部的实体流动。现代钢铁生产物流活动是指在生产工艺中的物流活动。原料、燃料经过下料、发料工序，借助运输设备运送到各加工点及存储点，以半成品的形式，从一个生产工序进入而流入另一个生产工序，遵照规定的工艺过程实施加工、储存，完成在特定工位内流转，在满足要求后从工位内流出，始终以实体形态的形式实现流过程。

通过对典型钢铁企业生产流程分析，可以看出钢铁企业的生产活动中既有连续型特征，又有离散型特征，整个过程表现为一个多段生产、多段运

输、多段存储的离散和连续相混杂的大型高温生产过程，其生产物流具有多样性、复杂性和阶段性等特点^[5,6]：

1. 终端产品多样化。钢铁企业生产炼铁过程涉及铁矿石、焦炭和辅料等原材料物流，高温铁水、钢水因生产钢种不同而有不同生产工艺路径，不同生产工序的衔接设备和温度要求也不同。钢铁企业的原材料品种相对来说较少，但最终产品种类却可达数万余种，主要包括普通钢和特殊钢的各种板材、管材、线材、型材等。

2. 生产过程繁杂。典型钢铁企业基本生产流程主要涉及原材料处理（焦化、球团、烧结）、炼铁、炼钢、精炼、连铸、轧钢、再处理等工艺过程。其生产过程表现为连续与离散相混杂的生产工艺流程，产线长、工序多、工艺复杂，且每一道工序又有多组设备构成，整个生产过程呈现一种网状结构。

3. 生产过程阶段化。钢铁联合企业往往由多个分布在不同区域的厂组成，钢铁生产复杂物流在各个厂区按照一定时间、空间及顺序流动。在钢铁生产工序中，炼铁、炼钢工序以化学反应为主，重点是控制产品对象的化学成分；浇铸、轧钢和深加工阶段则以物理变化为主，主要是控制产品对象的相变及外形尺寸。从提高生产效益角度来看，在冶炼阶段易将制造标准、化学成分相同的产品合炉冶炼，而在轧钢阶段往往将轧制规格相同的产品进行合批轧制。

4. 生产过程设备繁多。钢铁生产过程中所使用的绝大部分都是大型生产和运输设备，且主要工艺路线和设备较稳定，整个工艺流程有很强的连续性或分段连续性，上下环节关联性紧密，上下游工序约束性强。各主要厂区之间生产联系密切，原料、半成品和成品库存量及运输设备停留时间等都对生产物流具有重要影响。

5. 生产过程信息流量大。钢铁企业生产过程是将铁矿石经过复杂工艺加工成钢材的过程，生产过程涉及环节多、流程长，且伴随着原料、燃料、辅料的各種信息变化，生产过程中各物流节点之间保持大量物流作业衔接的信息。因此，生产过程中信息量大且复杂。

钢铁生产过程是一个高温物流不断进行物理和化学变化的连续生产过程，物流在不同工序中所要求的环境温度、成分和气氛也不相同，而且在

同工序不同工位中加工处理的时间也截然不同。各工序间和工序内部实现物流衔接的运输工具由于物流状态不同而有不同的形式，天车运输、台车运输、汽车运输和火车运输等构成钢铁生产过程中复杂的运输系统网络，具有严格时间和空间限制。因此，钢铁生产物流系统在宏观上表现为多生产工序的串、并联物流网络；微观上则表现为多工位的连续和离散相混合的时序队列网络。所以钢铁生产物流系统是一个复杂系统，必须利用复杂系统有关理论和方法来实现对钢铁生产复杂物流系统的分析和研究，以更好地解决钢铁生产流程中各工序环节之间存在的时间平衡和温度平衡问题及资源能力和物流通过能力的平衡问题。

第三节 钢铁生产复杂物流系统研究现状

一、钢铁生产复杂物流与生产调度关系

钢铁生产调度是在批量生产计划的基础上，以炉次为最小单位，在寻求满足某一评价函数（最小等待时间、最少费用、最小物流时间等）最佳的情况下的一类多工序、多工件的多机特殊 Job-shop 问题。钢铁生产调度的目的是实现各炉次在各工序作业的开始及结束时刻，达到生产量最大化、设备利用率高且均衡化、工序之间紧密且无冲突。

研究钢铁生产过程中复杂物流系统的目的就是为了让在钢铁生产过程中实现对物流的有效管理。生产物流管理主要包括生产物流计划及其控制。在钢铁生产计划阶段，主要根据用户订单要求、生产标准及订货和交货时间等因素，协调好设备和生产的短期与长期效益关系，处理好高炉、炼钢及连铸等生产计划的一体化关系，更好地利用生产中的柔性环节避免生产过程的意外波动并制定均衡生产时刻表；在生产控制阶段，则及时动态搜集和更新各生产工序的生产实绩并与计划值对比分析，利用生产过程中的柔性环节，对生产工序进行实时调整，保证钢铁生产过程的顺利进行。

钢铁生产过程中，要实现物流通畅，不仅要依靠单个工序功能的优化、设备可靠性及可控性的提高，而且还要依靠各工序之间起运输和调节作用的物流运输系统硬件能力和功能提高及优化，实现工序之间物流匹配、衔接及有效控制等，而这些则依赖于有效的钢铁生产调度。

二、钢铁生产复杂物流系统研究方法

钢铁生产复杂物流系统建模方法主要包括面向过程的建模、基于网络的建模、面向对象及基于（面向）Agent 的建模。

1. 面向过程的建模

利用通用的物流系统建模软件平台，可以通过二次开发实现对钢铁生产复杂物流系统的建模与仿真分析^[7,8]。用于物流系统模拟建模的通用模拟软件如 GPSS, ARENA, MODSIMTAYLOR II, SIMPROCESS, ARIS 和 PROMODEL 等，都是采用面向过程的建模方法。

2. 基于网络的建模

Aalst 是最早将 Petri 网引入到物流模拟中的学者，他创建了基于 Petri 网的仿真建模工具 ExSpect (1988)，并使用该工具建立了一个产品族的供应链模型，用来分析该产品族的业务流程重组，比较不同的供应链方案，并在他的博士论文中系统性地阐述了分时着色 Petri 网在物流系统中的应用^[9,10]。

3. 面向对象的建模

面向对象技术是 80 年代发展起来的一种革命性的软件设计思想，由于它的数据抽象、继承和多态机制特别适合于描述大型的、内在机制复杂的对象，因而迅速在各行业中得到了广泛的应用。面向对象的思想是以数据（结构）为基础，用系统本身自然的结构来描述、构造整个系统结构，以结构的合理性提高系统的可维护性、可扩充性和灵活性，以对象之间的协作完成系统的功能^[11,12]。

4. 面向 Agent 的建模

钢铁企业由于市场化需求，规模不断扩大，业务种类不断增多，呈现出复杂性、分布式、数据传输量大、与其他系统数据交互的特点，利用面向对象技术的生产调度系统模型无法有效实现这些特性，而 Agent 技术的自主性、社会性、反应性、主动性、移动性、理智性等特性可以用来实现动态的、不确定环境的、大规模的软件系统^[13,14-25]。

三、钢铁生产复杂物流系统研究现状

从生产工艺、作业方式和过程控制等几个方面来看，钢铁生产为多工