

钢铁生产过程动态调度综述

赵梓焱^{1,2}, 李思怡², 刘士新^{1,2}, 刘硕², 赵亚峰^{3,4}

(1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
2. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 东北大学材料科学与
工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 4. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 钢铁制造是典型的流程工业, 其复杂生产流程中的多重不确定性为生产调度带来了巨大挑战。面向不确定事件扰动, 如何制定动态调度策略实现快速响应, 是钢铁企业亟需解决的实际问题。现有研究针对炼铁、炼钢-连铸、热轧、炼钢-连铸-热轧一体化调度等多种调度场景, 提出了基于 Petri 网、启发式算法、数学规划、动态约束满足、人机交互、案例推理、鲁棒和模糊优化等各类方法的大量动态调度方法。针对钢铁动态调度这一领域展开综述, 介绍钢铁生产的主要流程及其动态扰动因素, 回顾钢铁制造过程中各生产环节的动态调度研究, 总结现有的动态调度方法, 分析钢铁行业的实际需求与现有研究的局限, 提出知识和数据驱动的高性能动态调度算法、全流程多工序协同的动态调度问题及方法、可配置的决策支持系统等亟待解决的关键科学问题与待探索的研究方向。

关键词: 钢铁制造; 不确定性; 动态调度; 重调度; 知识和数据驱动; 多工序协同; 可配置

文献标志码: A **文章编号:** 1000-7059(2022)02-0065-15

A review of dynamic scheduling in iron and steel production process

ZHAO Ziyi^{1,2}, LI Siyi², LIU Shixin^{1,2}, LIU Shuo², ZHAO Yafeng^{3,4}

(1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
4. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Steel manufacturing is a typical process industry. Multiple uncertainties in its complicated production process bring huge challenges for production scheduling. Facing the disturbances caused by uncertain events, how to design dynamic scheduling strategies to achieve fast response is a key and practical issue to be solved in iron and steel enterprises. Existing work proposes many dynamic scheduling methods based on Petri net, heuristic algorithms, mathematical programming, dynamic constraint satisfaction, human-computer interaction, case-based reasoning, robust and fuzzy optimization to solve various dynamic scheduling problems in iron and steel production scheduling scenarios, such as iron-making, steelmaking-continuous casting, hot rolling, and steelmaking-continuous casting-hot rolling

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62073069); 国家重点研发计划项目(2021YFB3301203); 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC2002041)

作者简介: 赵梓焱(1992—), 男, 讲师, 博士; **收稿日期:** 2021-11-01

通信作者: 刘士新(1968—), 男, 教授, 博士。

processes. An overview of dynamic scheduling in iron and steel production systems is given. The main process of iron and steel production and its dynamic disturbance factors are introduced. Existing research on dynamic scheduling problems and their solution methods in iron and steel production systems are summarized. The desired demands of the iron and steel industry and the limitations of existing work are analyzed. Finally, the key scientific issues to be solved and future research directions to be explored are indicated, which include knowledge and data-driven high-performance dynamic scheduling algorithms, multi-process collaboration dynamic scheduling problems and their solution methods, and configurable decision support systems.

Keywords: steel manufacturing; uncertainty; dynamic scheduling; rescheduling; knowledge and data-driven; multi-process collaboration; configurable

0 引言

钢铁是国民经济和社会发展的基础材料,钢铁工业是国家经济水平和综合国力的重要标志^[1]。21 世纪以来,我国国民经济的迅猛发展带动了钢铁工业的发展繁荣^[2]。目前,我国是世界上最大的钢铁生产国和消费国。因此,我国钢铁工业的发展和进步将对世界钢铁行业的发展和进步起到至关重要的推动作用。但作为典型的流程工业,钢铁生产过程具有多工序、高动态、强耦合、多重不确定等特点,为生产调度带来了巨大的挑战。

生产调度是智能制造的重要环节,是降低运营成本、降低资源能源消耗、提高生产效率的关键环节。按照调度环境和是否存在不可预测的扰动为标准分类,生产调度问题可分为静态调度和动态调度两大类^[3]。静态调度关注于基于订单信息、设备信息、工艺约束等静态信息制定某一时段的生产调度方案。然而实际生产过程中,调度系统通常在高度动态和不确定的环境中运行^[4],存在诸如设备故障、紧急订单、交货期变更、加工时间不确定等动态因素,导致静态调度方案失效^[5]。早在 20 世纪初,不确定性带来的动态扰动便已经受到了人们的关注^[6],动态调度的概念最早由 Jackson J R 于 1957 年提出^[7],动态扰动下生产调度方案的制定与调整,总体上分为三类^[8]:(1) 完全反应式调度。完全反应式调度是一种实时响应调度,也叫在线调度,它事先

没有制定严格的调度计划,调度过程是实时的、局部的。由于钢铁企业生产调度是以批次为单位的,因此完全反应式调度通常不用于钢铁企业的生产调度过程^[9]。(2) 预测-反应式调度的制定与调整^[10-11]。预测-反应式调度即调度-重调度,也称响应调度^[12]。它预先生成不考虑任何干扰、调度目标值最优的静态调度方案,针对生产过程中的动态扰动,动态调整原始静态调度方案,形成新方案,进而指导后续的生产过程。(3) 鲁棒调度^[13]。鲁棒调度预先考虑生产过程中可能出现的不确定性因素,编制预测性的调度方案,以减少调度执行过程中的频繁修复和重调度,从而保证调度方案的鲁棒性。

目前,钢铁行业的生产调度水平较低,众多钢铁企业制定生产计划调度的过程主要依赖现场知识型工作者的人工经验,不规范、精度低^[14]。随着多品种、小批量的合同订单和大批量的生产组织过程之间的矛盾日益凸显^[15-16],钢铁企业对智能化要求的不断提高,尤其面对生产过程中的多重不确定扰动,依赖人工经验的调度模式已经无法满足钢铁企业的动态调度需求。现有的理论研究提供了大量的调度模型和优化方法,但理论研究成果还不能完全解决实际工业中的调度问题,甚至理论和应用的差距仍然较大,进而导致无法实现理论研究的工业应用转化。因此,目前钢铁生产过程的动态调度问题仍然是学术界和工业界共同研究并亟待解决的难

题。本文针对这一领域展开综述,对现有研究进行分类和总结,同时指出现有研究的不足与目前亟需解决的关键问题。

1 钢铁生产流程及其动态扰动因素

1.1 钢铁生产主要流程

钢铁生产的主要流程如图1所示,包括炼铁、炼钢、连铸、热轧等主要工序^[17]。在炼铁工序,焦炭、球团、烧结矿和石灰石等原料通过旋转布料机加入到高炉中,同时喷吹煤粉并鼓入热风,在高炉中炼制得到高温铁水。在炼钢工序,将高温铁水、废钢、造渣剂等加入到转炉中,同时吹入氧气,通过氧化还原反应去除碳、硅、锰等元素,得到成分初步合格的钢水。转炉得到的钢水有时还需要在精炼炉中精炼,进一步提高钢水质

量。在连铸工序,装有钢水的中间包将钢水连续不断地注入结晶器,水冷铜管不断带走结晶器中的热量,使钢水表面凝固成坯壳,凝固的坯壳以一定的速度不断拉出,经过水冷、矫直后切割成规定的长度得到连铸坯。热轧工序通过压力加工的方法使铸坯发生塑性变形,使其形成具有定制化规格的产品。在传统热轧工艺模式下,连铸坯存储于板坯库,有热轧任务需求时,经过加热炉加热后进入轧机;在连铸坯热直轧和直接热装轧制模式下,高温连铸坯直接或经补偿加热后进入轧机。轧制后带坯通过冷却和卷曲装置,形成热轧钢卷。热轧工序后,产品基本成型,经过后续一系列精整、质检、包装和入库等工序后交付订单。

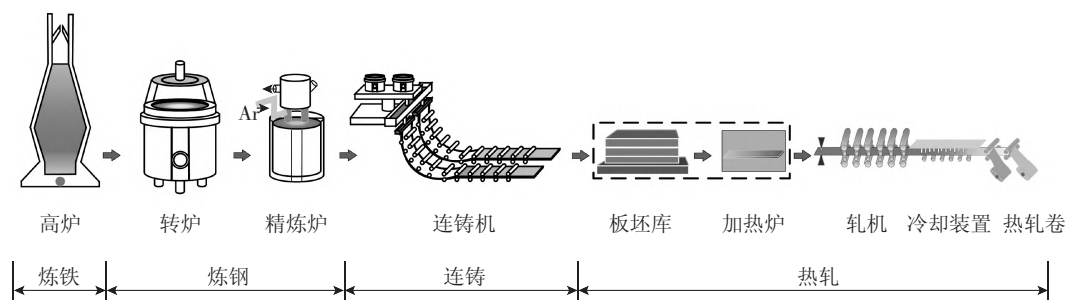


图1 钢铁生产流程

Fig. 1 Steel production process

1.2 钢铁生产过程动态扰动因素

由于钢铁生产流程复杂,其生产调度问题始终是困扰钢铁企业决策者的优化难题。尤其在工业环境中,诸多不确定扰动进一步提升了生产调度优化的难度。因此,如何应对生产过程的不确定扰动实现动态调度,是钢铁企业亟需解决的生产调度难题。钢铁生产过程中的动态扰动可以归纳为任务类扰动、设备类扰动、工艺类扰动、时间类扰动和质量类扰动^[18]:(1) 任务类扰动。任务类扰动包括新任务插入^[19-21]、紧急合同以及合同取消^[22-23]等,属于生产过程的外部扰动,其余四类扰动通常为生产过程的内部扰动。(2) 设备类扰动。设备类扰动主要指设备故障扰动,包括转炉^[24]、精炼炉^[24]、连铸机^[25]、加热炉^[26]和热轧机^[26]故障等。(3) 工艺类扰动。

工艺类扰动指生产工艺路线的变更或工艺参数的偏差,包括钢水的返送与改派^[27]、铁水供应波动^[28]、温度/重量/成分异常^[29-30]等。(4) 时间类扰动。时间类扰动是钢铁生产过程中最常见的扰动类型,很多动态时间扰动最终都可以转化为时间类扰动,包括加工时间不确定^[31]、转炉出钢延迟^[32]、开工时间延迟^[12]等扰动。(5) 质量类扰动。质量类扰动主要体现为产品或中间品质量不合格^[22,33],需重新组织生产或动态调整物料-订单匹配关系。

2 钢铁动态调度研究现状

现有的钢铁动态调度方法主要包括基于 Petri 网的动态调度模型、基于启发式算法的动态调度策略、基于数学规划的动态调度模型和算法、基于动态约束满足的动态调度模型及算法、基于

案例推理的动态调度系统、基于人机交互的动态调度系统、基于鲁棒和模糊优化的动态调度方法,以及集成多种调度方法的动态调度系统。由于炼钢-连铸环节的生产调度最为复杂,扰动因素最多^[27],现有研究大多针对炼钢-连铸阶段的动态调度问题展开,并设计了各类动态调度方法。因此,为了使读者全面了解各类钢铁动态调度方法,本章首先以炼钢-连铸动态调度为背景,介绍钢铁动态调度的现有方法,随后介绍各类方法在其他生产环节动态调度中的相关研究与应用。

2.1 炼钢-连铸动态调度

2.1.1 基于 Petri 网的动态调度模型

Petri 网模型早期被用于解决炼钢-连铸过程的动态调度问题。李霄峰等^[34]针对炼钢-连铸动态调度问题建立了基于赋时同步有色 Petri 网的动态调度模型。吴亚丽等^[35]针对加工时间不确定的炼钢-连铸批处理过程建立了赋色时间限制混合 Petri 网模型。

2.1.2 基于启发式算法的动态调度策略

启发式算法由于其高效性和易实施性被广泛用于解决钢铁动态调度问题。在现有研究中,庞新富等^[36]将炼钢-连铸重调度问题归结为混合流水车间调度问题^[37],建立了以最小化最大完成时间为目标的重调度模型,并设计了启发式规则和遗传算法相结合的求解算法。郑忠和龙建宇等^[18,38-39]提出了由遗传算法和时间推移策略结合的混合算法,以及遗传算法和广义变邻域搜索算法相结合的混合算法。熊伟等^[40-41]设计了基于免疫多 Agent 系统算法的动态调度方法。TANG L 等^[42]提出了改进差分进化算法。宁树实等^[22]提出了基于准时制思想的炼钢-连铸动态调度方法,设计了基于多个邻域结构和种群进化策略的进化迭代局部搜索算法。彭琨琨等^[43]提出了改进帝国竞争算法。针对设备故障下的炼钢-连铸动态调度问题,丁帅等^[44]设计了自适应遗传算法;LI Junqing 等^[45]设计了嵌入迭代贪婪算法的混合果蝇优化算法;彭琨琨等^[46]提

出了一种改进的人工蜂群算法。刘文涛等^[47]针对生产实绩偏离计划时间的动态调度问题,设计了面向整浇次和半浇次生产受阻重调度的启发式算法。钱强飞等^[48]针对废钢铁再制造的炼钢-连铸过程的电弧炉出钢延迟扰动,建立了冲突消除规则和断浇修复规则,设计了基于规则的时间推移策略和炉次重分配策略。王闯等^[49]针对特钢生产的炼钢-连铸阶段动态调度问题设计了基于启发式规则的作业时间调整方法。蒋胜龙等^[50]将炼钢-连铸动态调度问题分解为全局调度问题和局部调度问题,提出了一种基于分解的动态多目标差分进化算法。

2.1.3 基于数学规划的动态调度模型和算法

数学规划模型被广泛应用于描述钢铁动态调度问题,但由于问题的复杂性,涉及多变量多约束耦合,数学规划模型通常为混合整数规划模型或非线性模型,无法在有限时间内直接通过数学规划方法精确求解。因此,数学规划方法通常与启发式方法结合实现动态调度问题的高效求解。俞胜平等针对保持各炉次设备指派和加工顺序不变的动态调度问题,建立了在线调整非线性规划模型,并将其转化为线性规划模型进行求解^[51];针对开工时间延迟扰动下的炼钢-连铸重调度问题建立了混合整数规划模型,通过模型分解和启发式方法相结合,提出了由炉次加工设备指派和作业时间决策组成的启发式重调度方法^[12,52]。针对设备故障和加工时间变化下的炼钢-连铸动态调度问题,毛坤和孙亮亮等^[53-55]设计了基于拉格朗日松弛和动态规划的动态调度算法。庞新富等将具有多重精炼工序的炼钢-连铸重调度问题归结为混合车间作业重调度问题,针对开工时间延迟扰动,设计了启发式算法和数学规划相结合的动态调度方法,通过对未作业炉次的设备重指派和各炉次的时间重分配生成新的调度方案^[56];针对某一转炉或精炼炉故障扰动,设计了由未加工炉次的设备指派、未加工炉次的开工时间优化和浇铸时间调整三部分组成的重调度方法^[24]。王珊珊等^[57-58]针对时

间类扰动事件,定义了多个柔性可调的缓冲时间,设计了多种时间类处理规则并建立了相应的数学规划模型。于港等^[9,59]针对转炉出钢延迟等扰动下的动态调度问题,设计了基于启发式规则和数学规划模型的动态调度方法,并通过设计的鲁棒性判断方法从多种动态调度方案中选择合适的方案。

2.1.4 基于动态约束满足的动态调度模型和算法

生产调度问题可视为约束满足问题,动态调度问题可视为动态约束满足问题,现有研究基于动态约束满足建立了动态调度模型并设计了相应的动态调度算法。针对设备故障下的炼钢-连铸动态调度问题,李铁克等^[60]将其归结为混合流水车间重调度问题并提出了基于局部修复的约束满足重调度算法;丁帅等^[21]将设备故障映射为资源约束,建立了动态约束满足的重调度模型,并设计了约束满足和邻域搜索相结合的混合算法进行求解;张春生等^[61]将设备故障扰动按影响程度分为3个层级,建立了故障扰动与约束满足调度模型间的映射关系,基于约束传播技术,通过调整开工时间和柔性加工时间分步消解时间约束冲突;王柏林等^[25]将连铸机故障下的动态调度问题转化为动态约束满足问题,并将模型分为连铸方案修复和炼钢精炼重调度两个子模型,针对连铸子模型设计了基于约束传播的方案修复方法,针对炼钢精炼子模型设计了基于约束传播、等待时间修复、前向修剪等方法的时间冲突消解策略。针对转炉出钢延迟^[62]和新任务插入^[19]扰动,侯东亮等构建了基于约束满足的重调度模型,并设计了基于变量-值选择冲突识别和消解规则的启发式算法。针对新炉次插入扰动,王晶等^[20]对新炉次插入扰动构建了基于动态约束满足的动态调度模型,对未开始加工的炉次设计了嵌入向前看策略和启发式规则的回溯算法进行求解。

2.1.5 基于人机交互的动态调度系统

为了发挥人工专家的经验,现有动态系统多

包含基于人机交互的动态调整模块,通过开发可拖动甘特图等可视化界面为人工专家提供交互功能。由于钢铁生产过程涉及多约束耦合和多工序协同,人工专家在甘特图中调整某一生产任务后往往对其余生产任务和生产环节造成影响,因而,人机交互方法多辅以基于约束和模型的自动调整功能。尽管如此,人机结合的方式对调度员的经验依赖也非常严重^[63]。在现有研究中,赵宁等^[63]开发了基于约束联动的人机交互动态调度仿真系统,由人工专家通过可视化界面调整调度方案来应对生产过程的不确定扰动,并通过约束联动保证动态调度方案的正确性。俞胜平等^[64]开发了基于图形化编辑平台的动态调度仿真系统,由优化模型对人工专家调整后的调度方案进行冲突消解和优化。王超等^[65]提出了人工专家拖动甘特图辅以消解冲突的约束满足算法的动态调度方法,实现动态扰动下的调度方案调整。

2.1.6 基于案例推理的动态调度系统

基于案例推理^[66]的动态调度方法是早期人工智能技术在钢铁动态调度中的体现,包括案例匹配、调整、评价等环节^[67]。姜鸿波等^[68]首先将案例推理方法应用于炼钢-连铸的动态调度,从案例表达、匹配、聚类、调整、修补、维护等方面介绍了案例推理在钢铁生产动态调度中的应用。庞新富等^[69]提出了基于案例推理和人机交互相结合的局部调整与基于分批规则的重调度的动态调度方法。常春光提出了嵌入调整模型的案例推理技术,通过案例推理对已经进入生产环节的炉次进行快速调整,保证动态调度的实时性,通过动态调整模型和算法对剩余炉次进行动态调整,提高动态调度的精确性^[70];提出了由动态调度策略案例库和具体调整案例库构成的两级案例推理技术,并设计了基于决策树的案例聚类方法和基于最近邻的案例检索方法^[71]。陈军鹏等^[72]探讨了案例推理和两级案例推理中案例的表示、检索、修正、方案评价与案例维护的基本方式及其在炼钢-连铸动态系统中的应用。

2.1.7 基于鲁棒和模糊优化的动态调度方法

基于鲁棒和模糊优化的动态调度方法预先考虑生产过程的不确定性,形成相对保守的调度方案,保证在动态扰动下的相对稳定性。俞胜平等^[31]针对加工时间不确定的炼钢-连铸生产调度问题,建立了基于非线性模糊规划和单目标非线性规划的数学模型,提出了基于模糊规划和遗传算法的求解策略。YE Yun 等^[73]针对需求不确定的场景,提出了鲁棒优化和随机规划的求解框架。Long J Y 等^[74]针对任务释放时间不确定的场景,提出了基于释放时间序列预测的两阶段鲁棒动态调度方法。Worapradya K 等^[75]针对设备故障的不确定扰动,提出了基于鲁棒优化和人工神经网络的动态调度方法。YANG Ye 等^[76]针对元素成分不确定和分时电价下的动态调度问题建立了鲁棒优化模型,并将其转化为两个确定性模型进行求解。

2.1.8 集成多种调度方法的动态调度系统

为了实现各类动态调度方法的优势互补,集成多种动态调度方法并开发动态调度系统更有助于解决实际钢铁企业的动态调度难题。现有研究中,庞新富等构建了两级案例推理-人机交互调整-基于规则的专家系统动态调整-重调度“四位一体”的炼钢-连铸动态调度系统^[77],并进一步开发了考虑钢包优化配备、行车和台车调度的炼钢-连铸动态调度子系统^[78],在此基础上,王秀英等^[79-80]开发了整合静态调度和动态调度的炼钢-连铸协同调度系统。芦永明等^[81]通过启发式规则、优化模型、智能优化算法和人机交互相结合的方法实现炼钢-连铸批量动态调度。

2.2 炼铁动态调度

高炉炼铁是钢铁生产过程的初期工序,在现有的动态调度研究中,黄辉等考虑铁水的生产、运输、处理及使用过程中的各类扰动,设计了基于两级案例推理的铁水动态调度系统^[82]、整合静态调度和动态调度的铁水调度系统^[83]以及基于人机可视化交互的铁水调度系统^[30];针对铁

水物流过程中的重调度问题,建立了混合整数非线性规划模型,并设计了两阶段求解算法^[84],其中,第一阶段通过设备指派和冲突解消对特殊类型铁水进行重调度,第二阶段采用基于先到先服务规则的启发式算法对普通类型铁水进行重调度。

2.3 热轧动态调度

热轧按生产模式主要分为热直轧、直接热装轧制、热装轧制和冷装轧制模式^[85]。吕志民等^[86-87]针对热直轧和直接热装轧制模式下的动态扰动,提出了基于启发式规则从策略库中选择合适的策略,在线修改原始静态调度方案的动态调度方法;针对热装轧制模式下的板坯库作业动态调度问题,构建了基于 Petri 网的动态调度模型,提出了辊道输送控制策略和天车动态调度策略,并以此为基础开发了板坯库动态调度系统^[88]。郭延欣等^[23]考虑板坯延迟到达、取消板坯、插入紧急板坯、板坯处理时间改变 4 种动态扰动,制定了相应的处理策略,并开发了基于人机交互的热轧动态调度系统。马艺骅等^[33]考虑了板坯质量不合格的情况,提出替换板坯快速搜索和轧制位重调度相结合的两阶段启发式算法。钱鹏等^[89]研究了考虑机器不可用约束的加热炉动态调度问题,设计了启发式算法进行加热炉静态调度模型的高效求解,利用滚动调度思路,通过部分复用已有决策结果,提升动态调度问题的求解效率。潘瑞林等^[26]考虑加热炉和热轧机故障的情况,通过设计局部重排策略,实现了加热炉-热轧区间的重调度。ZHANG Rui 等^[13]针对加工时间不确定的热轧动态调度问题,建立了鲁棒优化模型,并设计了蚁群算法与增强局部搜索相结合的混合元启发式算法。KONG Min 等^[90]针对加工时间不确定且具有恶化效应的炼钢-连铸-热轧动态调度问题,建立了基于鲁棒优化的协同优化模型,并设计了基于变邻域搜索的启发式求解算法。WANG Dujuan 等^[91]针对随机机器故障扰动和可控制的加工时间下的热轧调度问题,构建了鲁棒优化模型并设计了基于多目标

遗传算法的动态调度方法。

2.4 炼钢-连铸-热轧一体化动态调度

作为典型的流程工业,钢铁生产的各工序之间关联紧密,生产调度相关的工艺约束与优化目标高度耦合,因此,现有的动态调度需要关注于多个生产工序的协同优化。在炼钢-连铸-热轧一体化动态调度的现有研究中,刘寒等^[92]设计了基于可视化界面交互的炼钢-连铸-热轧一体化的调度系统,由人工专家依据经验调整生产节奏应对设备故障等动态扰动。于港等^[93]研究了棒线材炼钢-连铸-热轧环境下的调度与重调度问题,针对突发故障的场景,设计了基于启发式规则的动态调度方法。刘立钧等^[32]针对转炉出钢延迟扰动,建立了炼钢-连铸-热轧一体化动态调度模型,设计了基于启发式规则的动态调度方法。张春生等^[27]研究了设备故障下的炼钢-连铸-热轧一体化动态调度问题,将其分解为炼钢-连铸和热轧两个子问题分别建立动态调度模型并设计基于启发式方法的动态调度算法。芦永明和单多等^[28-29]提出了集成多种动态调度方法的炼钢-连铸-热轧一体化动态调度方法,并开发了仿真系统。

3 待解决的关键科学问题与待探索的研究方向

3.1 知识和数据驱动的高性能动态调度算法

动态调度强调实时性、在线性和自适应性^[94],要求能够对出现的随机扰动迅速做出反应,不影响生产的连续进行,对动态调度算法的性能要求极高。为了追求响应速度,现有的钢铁动态调度多基于人工专家经验知识、启发式规则或简单的启发式算法,难以保证优化精度。依赖人工专家经验手动调整调度方案难以实现动态扰动的快速响应,而人工经验通常难以形成公式化或逻辑化表述,无法直接嵌入调度算法与调度系统。随着新一代人工智能技术的发展,将专家知识、工业大数据、人工智能方法和物联网等相关技术相结合,预测不确定性事件的动态扰动,学习专家经验,开发高性能动态调度算法,将有

助于实现动态扰动下的高效高精度响应^[95]。现有的基于案例推理的动态调度方法是人工智能方法的初步体现,但其中案例库和动态调度策略库的构建、案例和策略的聚类 and 匹配以及匹配后调度方案的调整等环节均有较大的提升和改进空间。此外,新一代信息技术下基于数字孪生和信息物理系统的动态调度方法也是需要探索和研究的新课题。

3.2 全流程多工序协同的动态调度问题及方法

现有动态调度只考虑单一工序或短流程,缺乏对全流程多工序协同调度的研究。钢铁生产作为典型的流程工业,其动态调度需要综合考虑多工序的全局信息。现有的全流程协同决策主要依赖于知识工作者的经验^[96],难以实现全流程的优化运行,从而造成产品质量差、能耗高、资源消耗大等问题^[97]。全流程协同优化的难点在于全流程信息量巨大,工艺约束复杂,各变量耦合性强,综合考虑全流程信息实现不确定扰动的快速应对对算法性能和计算资源均有很高要求。利用云边端协同技术^[98]整合全流程信息和数据,分布式部署计算资源和算法,面向设备端反馈的动态扰动事件,基于边侧服务器的局部调整能力和云侧服务器的全局调整能力,实现全流程多工序协同调度,是动态调度值得探索的研究方向。

3.3 可配置的决策支持系统

虽然现有的理论研究提供了大量的调度模型和优化方法,但研究成果还不能完全解决实际工业中的动态调度问题,甚至理论和应用的差距仍然较大。产生这一现象的原因主要在于:(1) 理论研究通常基于大量抽象和假设,无法准确描述复杂的实际工业应用场景;(2) 现场知识型工作者欠缺优化调度相关的理论知识,无法实现理论研究的工业应用转化。因此,将理论研究的模型算法与具体流程工业生产过程相结合,形成面向工业企业生产调度方法,并以此为基础运用计算机软件技术开发决策支持系统,为现场知识型工作者架设从理论研究到实际应用的桥梁至

关重要。在此基础上,开发可配置的决策支持系统是钢铁企业乃至全行业的实际需求。动态调度模块在宝钢^[72]、武钢^[86]、唐钢^[93]、安钢^[99]、韶钢^[100]等钢铁企业的生产调度系统中均有体现。但由于钢铁企业的产品结构、工艺流程、技术水平、人员素质、管理方式、企业文化等的差异,钢铁企业的生产调度系统各异,系统通用性不好,灵活性低,导致产线调整、工艺变更、业务变动、企业整合等场景下调度系统失效,需要重新开发新的调度系统,造成大量人力、时间、成本的浪费^[101]。此外,虽然各钢铁企业的实际特点不同,但总体工艺流程与工艺约束具有高度的相似性,软件开发者针对各钢铁企业独立开发调度系统的过程进行了大量重复性工作,且由于系统架构和产品设计各异,各钢铁企业调度系统差异性大,各企业的优化升级难以实现全行业推广。整合各钢铁企业的共性特点和差异化特征,开发可配置的决策支持系统,允许各钢铁企业根据定制化需求进行个性化配置,将能够极大提升调度系统与生产管理的灵活性,极大节约系统开发成本,有利于全行业生产调度与管理水平的提升和发展,对提升我国钢铁工业的智能化水平,实现我国从工业大国向工业强国的转变具有重要意义。

4 结语

钢铁生产过程的多重不确定事件扰动使得静态调度方案难以精准实施,动态调度是钢铁企业正面临的巨大挑战。现有研究面向炼铁、炼钢、连铸、热轧等各个生产制造环节,针对各类不确定事件扰动,提出了基于 Petri 网、启发式算法、数学规划、动态约束满足、人机交互、案例推理、鲁棒和模糊优化等各类动态调度方法,以及多种方法相结合的动态方法。随着钢铁行业信息化水平的提升和新一代人工智能技术的发展,知识和数据驱动的高性能动态调度算法、全流程多工序协同的动态调度方法以及可配置的决策支持系统是钢铁企业的实际需求,数字孪生和信息物理系统应用也将对钢铁生产过程动态调度

环境产生深刻影响,在相关领域仍有较大理论和应用研究的空白,因此是未来研究中值得探索的关键问题。

参考文献:

- [1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009. (YIN Ruiyu. Metallurgical Process Engineering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.)
- [2] 薛晔, 李晶, 薛世润, 等. 我国钢铁工业发展现状分析和转型探讨 [J]. 钢铁研究, 2016(3) : 4. (XUE Ye, LI Jing, XUE Shirun, et al. Analysis of development situation and discussion of transformation for iron and steel industry in China [J]. Research on Iron and Steel, 2016(3) : 4.)
- [3] 丁进良, 杨翠娥, 陈远东, 等. 复杂工业过程智能优化决策系统的现状与展望 [J]. 自动化学报, 2018, 44(11) : 1931. (DING Jinliang, YANG Cuie, CHEN Yuandong, et al. Research progress and prospects of intelligent optimization decision making in complex industrial process [J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11) : 1931.)
- [4] Sabuncuoglu I, Goren S. Hedging production schedules against uncertainty in manufacturing environment with a review of robustness and stability research [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2009, 22(2) : 138.
- [5] Ouelhadj D, Petrovic S. A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems [J]. Journal of Scheduling, 2009, 12(4) : 417.
- [6] Aytug H, Lawley M A, McKay K, et al. Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 161(1) : 86.
- [7] Jackson J R. Simulation research on job shop production [J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1957, 4(4) : 287.
- [8] 赵月. 基于动态优化的动态调度问题研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2013. (ZHAO Yue. Research on Dynamic Scheduling Problems Based on Dynamic Optimization [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.)

- [9] 于港,田乃媛,徐安军. 炼钢-连铸区段生产调度与计算机仿真[J]. 北京科技大学学报,2009,31(9): 1183. (YU Gang, TIAN Naiyuan, XU Anjun. Computer-aided simulation of steelmaking-continuous casting production scheduling[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(9): 1183.)
- [10] Cowling P, Johansson M. Using real time information for effective dynamic scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 139(2): 230.
- [11] SUN J, XUE D. A dynamic reactive scheduling mechanism for responding to changes of production orders and manufacturing resources[J]. Computers in Industry, 2001, 46(2): 189.
- [12] 俞胜平,柴天佑. 开工时间延迟下的炼钢-连铸生产重调度方法[J]. 自动化学报,2016,42(3): 358. (YU Shengping, CHAI Tianyou. Rescheduling method for starting time delay in steelmaking and continuous casting production processes[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(3): 358.)
- [13] ZHANG Rui, SONG Shiji, WU Cheng. Robust scheduling of hot rolling production by local search enhanced ant colony optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(4): 2809.
- [14] 桂卫华,王成红,谢永芳,等. 流程工业实现跨越式发展的必由之路[J]. 中国科学基金,2015(5): 337. (GUI Weihua, WANG Chenghong, XIE Yongfang, et al. The necessary way to realize great-leap-forward development of process industries[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2015(5): 337.)
- [15] ZHAO Z, LIU S, ZHOU M, et al. Heuristic scheduling of batch production processes based on Petri nets and iterated greedy algorithms[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, doi: 10.1109/TASE.2020.3027532.
- [16] ZHAO Z, LIU S, ZHOU M, et al. Dual-objective mixed integer linear program and memetic algorithm for an industrial group scheduling problem[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 8(6): 1199.
- [17] ZHAO Z, LIU S, ZHOU M, et al. Decomposition method for new single-machine scheduling problems from steel production systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(3): 1376.
- [18] 郑忠,朱道飞,高小强. 钢厂炼钢连铸生产调度及重计划方法[J]. 重庆大学学报,2008(7): 820. (ZHENG Zhong, ZHU Daoifei, GAO Xiaoqiang. An approach of production scheduling and replanning in a steelmaking-continuous casting plant[J]. Journal of Chongqing University, 2008(7): 820.)
- [19] 侯东亮,李铁克. 考虑新任务插入的炼钢-连铸重调度模型与算法[J]. 工业工程,2012,15(5): 33. (HOU Dongliang, LI Tiek. Rescheduling model and algorithm for steelmaking and continuous casting with new tasks arrival[J]. Industrial Engineering Journal, 2012, 15(5): 33.)
- [20] 王晶,郑亚楠. 基于约束的炼钢连铸动态调度模型与算法设计[J]. 制造业自动化,2014,36(20): 10. (WANG Jing, ZHENG Yanan. Model and algorithm design on dynamic scheduling of steelmaking and continuous casting based on constraint[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(20): 10.)
- [21] 丁帅,李铁克,王海凤,等. 基于约束和邻域的炼钢连铸重调度算法[J]. 工业工程,2011,14(6): 84. (DING Shuai, LI Tiek, WANG Haifeng, et al. Rescheduling algorithm for steelmaking and continuous casting based on constraint and neighborhood[J]. Industrial Engineering Journal, 2011, 14(6): 84.)
- [22] 宁树实,王伟,潘学军. 基于准时制思想的炼钢-连铸生产动态调度算法[J]. 信息与控制,2007(1): 56. (NING Shushi, WANG Wei, PAN Xuejun. A dynamic scheduling algorithm based on just-in-time principle for steelmaking-continuous casting process[J]. Information and Control, 2007(1): 56.)
- [23] 郭延欣,李铁克,张文学. 基于人机交互的热轧动态调度[J]. 计算机工程与设计,2012,33(1): 367. (GUO Yanxin, LI Tiek, ZHANG Wenxue. Dynamic scheduling of hot rolling based on human-computer interaction[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(1): 367.)

- [24] 庞新富,高亮,潘全科,等. 某一转炉或精炼炉故障下炼钢-连铸生产重调度方法及应用[J]. 控制与决策,2015,30(11):1921. (PANG Xinfu, GAO Liang, PAN Quanke, et al. Rescheduling method of steelmaking and continuous casting with breakdown of converter or refining furnace[J]. Control and Decision,2015,30(11):1921.)
- [25] 王柏琳,李铁克,张春生,等. 基于动态约束满足的考虑连铸机故障的炼钢连铸调度算法[J]. 计算机集成制造系统,2011,17(10):2185. (WANG Bailin, LI Tieke, ZHANG Chunsheng, et al. Dynamic CSP based scheduling algorithm for steelmaking and continuous casting with conticaster breakdown[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(10):2185.)
- [26] 潘瑞林,胡邦国,曹建华,等. 基于仿真优化的加热炉-热轧区间重调度[J]. 计算机集成制造系统,2014,20(6):1405. (PAN Ruilin, HU Bangguo, CAO Jianhua, et al. Heating furnace and hot rolling interval rescheduling based on simulation optimization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2014,20(6):1405.)
- [27] 张春生,李铁克. 炼钢与热轧调度方案动态协调方法研究[J]. 冶金自动化,2016,40(5):19. (ZHANG Chunsheng, LI Tieke. Study on the dynamic coordination between steelmaking-continuous casting scheduling and hot rolling scheduling[J]. Metallurgical Industry Automation,2016,40(5):19.)
- [28] 芦永明,贺东风,徐安军,等. 基于一体化生产的炼钢-连铸-热轧动态调度仿真系统[J]. 冶金自动化,2010,34(6):33. (LU Yongming, HE Dongfeng, XU Anjun, et al. Dynamic scheduling simulation system based on integrated production of SM-CC-HR[J]. Metallurgical Industry Automation, 2010, 34(6):33.)
- [29] 单多,芦永明,徐安军,等. 冶铸轧一体化生产下动态调度策略和方法研究[J]. 控制工程,2012,19(1):20. (SHAN Duo, LU Yongming, XU Anjun, et al. Study on strategies and methods of dynamic scheduling based on SM-CC-HR integrated production[J]. Control Engineering of China,2012,19(1):20.)
- [30] 黄辉,柴天佑,郑秉霖,等. 铁水调度仿真系统的设计与实现[J]. 系统仿真学报,2012,24(6):1192. (HUANG Hui, CHAI Tianyou, ZHENG Binglin, et al. Design and development of molten iron scheduling simulation system[J]. Journal of System Simulation, 2012,24(6):1192.)
- [31] 俞胜平,庞新富,柴天佑,等. 加工时间不确定的炼钢连铸生产调度问题研究[J]. 控制与决策,2009,24(10):1467. (YU Shengping, PANG Xinfu, CHAI Tianyou, et al. Research on production scheduling for steelmaking and continuous casting with processing time uncertainty[J]. Control and Decision, 2009,24(10):1467.)
- [32] 刘立钧,温治,苏福永,等. 冶铸轧混装一体化调度管理系统研究及应用[J]. 冶金自动化,2014,38(1):28. (LIU Lijun, WEN Zhi, SU Fuyong, et al. Research and application of hybrid integrated scheduling management system of steelmaking-casting-rolling[J]. Metallurgical Industry Automation,2014,38(1):28.)
- [33] 马艺骅,丁德军. 连铸-热轧生产动态调度方法[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版),2018,14(4):354. (MA Yihua, DING Dejun. Continuous casting-hot rolling process dynamic scheduling method[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2018,14(4):354.)
- [34] 李霄峰,徐立云,邵惠鹤,等. 炼钢连铸系统的动态调度模型和启发式调度算法[J]. 上海交通大学学报,2001(11):1658. (LI Xiaofeng, XU Liyun, SHAO Huihe, et al. Dynamic model of steel-making and continuous casting system and hierarchic algorithm of dynamic scheduling[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2001(11):1658.)
- [35] 吴亚丽,曾建潮,卫军胡,等. 一种基于混合 Petri 网的批过程动态调度算法[J]. 西安交通大学学报,2002(2):147. (WU Yali, ZENG Jianchao, WEI Junhu, et al. Dynamic scheduling algorithm for batch process systems based on hybrid Petri nets[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2002(2):147.)
- [36] 庞新富,俞胜平,张志宇,等. 炼钢-连铸生产优化

- 重调度方法[J]. 系统工程学报, 2010, 25(1): 98. (PANG Xinfu, YU Shengping, ZHANG Zhiyu, et al. Optimal rescheduling method for steelmaking-continuous casting [J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(1): 98.)
- [37] ZHAO Z, ZHOU M, LIU S. Iterated greedy algorithms for flow-shop scheduling problems: A tutorial [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, doi: 10.1109/TASE.2021.3062994.
- [38] 龙建宇, 郑忠, 高小强, 等. 基于遗传算法的炼钢-连铸重计划方法[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(1): 115. (LONG Jianyu, ZHENG Zhong, GAO Xiaoqiang, et al. Production re-planning based on genetic algorithm for steelmaking-continuous casting [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(1): 115.)
- [39] LONG J, ZHENG Z, GAO X. Dynamic scheduling in steelmaking-continuous casting production for continuous caster breakdown [J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(11): 3197.
- [40] 熊伟, 付冬梅, 谷学静, 等. 基于免疫多 Agent 系统求解炼钢连铸动态调度问题(待续) [J]. 冶金自动化, 2014, 38(3): 24. (XIONG Wei, FU Dongmei, GU Xuejing, et al. Based on immune multi-agent system to resolve dynamic scheduling problem of steel-making and continuous casting (to be continued) [J]. Metallurgical Industry Automation, 2014, 38(3): 24.)
- [41] 熊伟, 付冬梅, 谷学静, 等. 基于免疫多 Agent 系统求解炼钢连铸动态调度问题(续完) [J]. 冶金自动化, 2014, 38(4): 7. (XIONG Wei, FU Dongmei, GU Xuejing, et al. Based on immune multi-agent system to resolve dynamic scheduling problem of steel-making and continuous casting (end) [J]. Metallurgical Industry Automation, 2014, 38(4): 7.)
- [42] TANG L, ZHAO Y, LIU J. An improved differential evolution algorithm for practical dynamic scheduling in steelmaking-continuous casting production [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(2): 209.
- [43] PENG K K, DENG X, ZHANG C, et al. An improved imperialist competitive algorithm for hybrid flowshop rescheduling in steelmaking-refining-continuous casting process [J]. Measurement & Control, 2020, 53(9/10): 1920.
- [44] 丁帅, 李铁克, 施灿涛. 考虑机器故障的 HFS 重调度研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(23): 234. (DING Shuai, LI Tiek, SHI Cantao. Study of hybrid flow shop rescheduling with consideration of machine breakdown [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(23): 234.)
- [45] LI Junqing, PAN Quanke, MAO Kun. A hybrid fruit fly optimization algorithm for the realistic hybrid flowshop rescheduling problem in steelmaking systems [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(2): 932.
- [46] PENG K K, PAN Q, GAO L, et al. An improved artificial bee colony algorithm for real-world hybrid flowshop rescheduling in steelmaking-refining-continuous casting process [J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 122: 235.
- [47] 刘文涛, 张群, 孙肃清. 关于炼钢厂重调度问题的研究[J]. 冶金自动化, 2004, 28(6): 5. (LIU Wentao, ZHANG Qun, SUN Suqing. Research on rescheduling problem of steel factory [J]. Metallurgical Industry Automation, 2004, 28(6): 5.)
- [48] 钱强飞, 陈伟达. 考虑电弧炉出钢延迟废钢铁再制造重调度研究[J]. 工业工程与管理, 2016, 21(5): 28. (QIAN Qiangfei, CHEN Weida. Research on rescheduling model and algorithm in the iron and steel scrap remanufacturing taking the EAF's steel delay into considerations [J]. Industrial Engineering and Management, 2016, 21(5): 28.)
- [49] 王闯, 刘青, 王彬, 等. 特殊钢厂炼钢-连铸调度模型[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(3): 371. (WANG Chuang, LIU Qing, WANG Bin, et al. Scheduling model of steelmaking-continuous casting processes in special steel plants [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(3): 371.)
- [50] JIANG Shenglong, ZHENG Zhong, LIU Min. A multi-stage dynamic soft scheduling algorithm for the un-

- certain steelmaking-continuous casting scheduling problem [J]. Applied Soft Computing, 2017, 60: 722.
- [51] 俞胜平, 王秀英, 郑秉霖, 等. 基于变约束规划模型的炼钢连铸动态调度 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(7): 771. (YU Shengping, WANG Xiuying, ZHENG Binglin, et al. Dynamic scheduling for steel-making and continuous casting based on the programming model with varying constraints [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(7): 771.)
- [52] YU Shengping, CHAI Tianyou, TANG Ying. An effective heuristic rescheduling method for steelmaking and continuous casting production process with multi-refining modes [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics: Systems, 2016, 46(12): 1675.
- [53] MAO Kun, PAN Quanke, PANG Xinfu, et al. An effective Lagrangian relaxation approach for rescheduling a steelmaking-continuous casting process [J]. Control Engineering Practice, 2014, 30: 67.
- [54] SUN Liangliang, YU Shengping. Scheduling a real-world hybrid flow shop with variable processing times using Lagrangian relaxation [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9/10/11/12): 1961.
- [55] SUN L L, LUAN F, YING Y, et al. Rescheduling optimization of steelmaking-continuous casting process based on the Lagrangian heuristic algorithm [J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2017, 13(3): 1431.
- [56] 庞新富, 俞胜平, 罗小川, 等. 混合 Jobshop 炼钢-连铸重调度方法及其应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(4): 826. (PANG Xinfu, YU Shengping, LUO Xiaochuan, et al. Hybrid job shop rescheduling method and its application for steelmaking-casting [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(4): 826.)
- [57] 王珊珊, 曾亮, 叶理德. 炼钢-连铸动态调度中基于规则的时间调整方法(待续) [J]. 冶金自动化, 2014, 38(4): 21. (WANG Shanshan, ZENG Liang, YE Lide. Time adjustment strategies based on rules for steelmaking and continuous casting dynamic scheduling (to be continued) [J]. Metallurgical Industry Automation, 2014, 38(4): 21.)
- [58] 王珊珊, 曾亮, 叶理德. 炼钢-连铸动态调度中基于规则的时间调整方法(续完) [J]. 冶金自动化, 2014, 38(5): 6. (WANG Shanshan, ZENG Liang, YE Lide. Time adjustment strategies based on rules for steelmaking and continuous casting dynamic scheduling (end) [J]. Metallurgical Industry Automation, 2014, 38(5): 6.)
- [59] 于港, 田乃媛, 徐安军, 等. 炼钢厂设备调整的动态调度和鲁棒性研究 [J]. 控制工程, 2010, 17(6): 861. (YU Gang, TIAN Naiyuan, XU Anjun, et al. Research on robustness and dynamic scheduling of equipment adjustment in steel plant [J]. Control Engineering of China, 2010, 17(6): 861.)
- [60] 李铁克, 肖拥军, 王柏琳. 基于局部性修复的 HFS 机器故障重调度 [J]. 管理工程学报, 2010, 24(3): 45. (LI Tiek, XIAO Yongjun, WANG Bailin. HFS rescheduling under machine failures based on local repair [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2010, 24(3): 45.)
- [61] 张春生, 李铁克, 王柏琳, 等. 炼钢机器故障下炼钢-连铸调度 DCSP 建模与算法 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(22): 226. (ZHANG Chunsheng, LI Tiek, WANG Bailin, et al. Dynamic CSP-based modeling and algorithm of scheduling problem for steelmaking-continuous casting under steelmaking machine failures [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(22): 226.)
- [62] 侯东亮, 李铁克. 基于动态约束满足的炼钢连铸重调度算法 [J]. 计算机应用, 2012, 32(12): 3553. (HOU Dongliang, LI Tiek. Rescheduling algorithm for steelmaking and continuous casting based on dynamic constraint satisfaction [J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(12): 3553.)
- [63] 赵宁, 丁文英, 董绍华, 等. 基于约束联动的炼钢-连铸动态调度 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(11): 2177. (ZHAO Ning, DING Wenying, DONG Shaohua, et al. Dynamic schedule of steel making-continuous casting based on group adjustment orienting restrict [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(11): 2177.)

- [64] 俞胜平,陈文明,庞新富,等. 基于图形化编辑平台的炼钢连铸动态调度仿真系统[J]. 系统仿真学报,2009,21(16):5145. (YU Shengping, CHEN Wenming, PANG Xinfu, et al. Simulating system of dynamic scheduling for steelmaking and continuous casting based on graphic edit platform[J]. Journal of System Simulation,2009,21(16):5145.)
- [65] 王超,李铁克,张文学. 基于人机交互的炼钢连铸动态调度[J]. 计算机应用研究,2011,28(4):4. (WANG Chao, LI Tieke, ZHANG Wenxue. Dynamic scheduling for steelmaking-continuous casting based on human-computer interaction[J]. Application Research of Computers,2011,28(4):4.)
- [66] Schank R C. Dynamic memory: A theory of learning in people and computers [Z]. Cambridge: Cambridge University Press,1982.
- [67] Szelke E, Markus G. A learning reactive scheduler using CBR/L [J]. Computers in Industry, 1997, 33(1):31.
- [68] 姜鸿波,常春光,胡琨元,等. 案例推理在钢铁生产动态调度中应用的研究[J]. 沈阳工业大学学报,2003(4):330. (JIANG Hongbo, CHANG Chunguang, HU Kunyuan, et al. Case-based reasoning application research on dynamic scheduling of steel production [J]. Journal of Shenyang University of Technology,2003(4):330.)
- [69] 庞新富,俞胜平,郑秉霖,等. 炼钢连铸动态调度方法及其应用[J]. 石油化工高等学校学报,2007,73(3):60. (PANG Xinfu, YU Shengping, ZHENG Binglin, et al. Dynamic scheduling method and its application for steelmaking and continuous casting [J]. Journal of Petrochemical Universities,2007,73(3):60.)
- [70] 常春光,汪定伟,胡琨元,等. 嵌入调整模型的CBR技术的炼钢调度系统[J]. 东北大学学报,2004(6):531. (CHANG Chunguang, WANG Dingwei, HU Kunyuan, et al. CBR system with embedded adaptation model for scheduling system in steel-making process [J]. Journal of Northeastern University,2004(6):531.)
- [71] 常春光,汪定伟,胡琨元,等. 基于两级CBR的钢铁企业动态调度系统研究[J]. 控制与决策,2004(10):1109. (CHANG Chunguang, WANG Dingwei, HU Kunyuan, et al. Research on two stage case-based reasoning for the dynamic scheduling system of iron and steel works [J]. Control and Decision,2004(10):1109.)
- [72] 陈军鹏,陈文明,罗首章,等. CBR在炼钢连铸动态调度系统中的应用研究[J]. 冶金自动化,2008,33(2):29. (CHEN Junpeng, CHEN Wenming, LUO Shouzhong, et al. Study on application of CBR in steelmaking and continuous casting dynamic scheduling system [J]. Metallurgical Industry Automation,2008,33(2):29.)
- [73] YE Yun, LI Jie, LI Zukui, et al. Robust optimization and stochastic programming approaches for medium-term production scheduling of a large-scale steelmaking continuous casting process under demand uncertainty [J]. Computers & Chemical Engineering, 2014,66:165.
- [74] Long J Y, Sun Z Z, Pardalos P M, et al. A robust dynamic scheduling approach based on release time series forecasting for the steelmaking-continuous casting production [J]. Applied Soft Computing, 2020, 92:106271.
- [75] Worapradya K, Thanakijkasem P. Proactive scheduling for steelmaking-continuous casting plant with uncertain machine breakdown using distribution-based robustness and decomposed artificial neural network [J]. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 2015,32(2):22.
- [76] YANG Ye, CHEN Weida, WEI Li, et al. Robust optimization for integrated scrap steel charge considering uncertain metal elements concentrations and production scheduling under time-of-use electricity tariff [J]. Journal of Cleaner Production,2018,176:800.
- [77] 庞新富,俞胜平,刘炜,等. 炼钢连铸动态智能调度系统的研究与开发[J]. 控制工程,2005(6):52. (PANG Xinfu, YU Shengping, LIU Wei, et al. Research and development of steelmaking and continuous casting dynamic intelligence scheduling system [J]. Control Engineering of China,2005(6):52.)

- [78] 庞新富,俞胜平,黄辉,等. 炼钢连铸动态调度子系统及其应用研究[J]. 冶金自动化,2006,30(3): 8. (PANG Xinfu, YU Shengping, HUANG Hui, et al. Engineering implement of dynamic subsystem in steelmaking and continuous casting scheduling system[J]. Metallurgical Industry Automation, 2006, 30(3): 8.)
- [79] 王秀英,郑秉霖,柴天佑. 面向 MES 的炼钢-连铸协同调度系统[J]. 控制工程, 2005(6): 72. (WANG Xiuying, ZHENG Bingling, CHAI Tianyou. Coordination scheduling system for steelmaking and continuous casting in MES[J]. Control Engineering of China, 2005(6): 72.)
- [80] 王秀英,柴天佑,郑秉霖. 炼钢-连铸智能调度软件的开发及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2006(8): 1220. (WANG Xiuying, CHAI Tianyou, ZHENG Binglin. Intelligent scheduling software & its application in steelmaking and continuous casting[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006(8): 1220.)
- [81] 芦永明,田乃媛,徐安军,等. 基于一体化生产的炼钢-连铸批量计划与调度[J]. 信息与控制, 2011, 40(5): 715. (LU Yongming, TIAN Naiyuan, XU Anjun, et al. Batch planning and scheduling of steelmaking-continuous casting based on integrated production[J]. Information and Control, 2011, 40(5): 715.)
- [82] 黄辉,柴天佑,郑秉霖,等. 面向铁钢对应的两级案例推理铁水动态调度系统[J]. 化工学报, 2010, 61(8): 2021. (HUANG Hui, CHAI Tianyou, ZHENG Binglin, et al. Two-stage case-based reasoning for molten iron dynamic scheduling system oriented iron-steel correspondence[J]. CIESC Journal, 2010, 61(8): 2021.)
- [83] 黄辉,柴天佑,郑秉霖,等. 面向铁钢对应的铁水调度系统研究及应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(11): 1525. (HUANG Hui, CHAI Tianyou, ZHENG Binglin, et al. Research on the molten iron scheduling system oriented to iron-steel correspondence and its application[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010, 31(11): 1525.)
- [84] 黄辉,罗小川,郑秉霖,等. 炼铁-炼钢区间铁水重调度方法及其应用[J]. 系统工程学报, 2013, 28(2): 234. (HUANG Hui, LUO Xiaochuan, ZHENG Binglin, et al. Hot metal rescheduling method and its application between the iron-making and steel-making stages[J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(2): 234.)
- [85] TANG L, LIU J, RONG A, et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 133(1): 1.
- [86] 吕志民,牟文恒,张学军,等. DHCR 一体化管理系统的开发和应用[J]. 轧钢, 2005(4): 24. (LÜ Zhimin, MU Wenheng, ZHANG Xuejun, et al. Development and application of integrated management system for DHCR[J]. Steel Rolling, 2005(4): 24.)
- [87] 许剑,吕志民,徐金梧,等. DHCR 和 DR 一体化计划调度的体系结构研究及应用[J]. 钢铁, 2005(12): 55. (XU Jian, LÜ Zhimin, XU Jinwu, et al. Research and application of integrated planning and scheduling framework for DHCR and DR[J]. Iron and Steel, 2005(12): 55.)
- [88] 吕志民,王帅,张学军. 热装模式下板坯库动态调度系统研究与应用[J]. 冶金自动化, 2012, 36(3): 24. (LÜ Zhimin, WANG Shuai, ZHANG Xuejun. Research and application of dynamic scheduling system of slab yard under hot charging rolling mode[J]. Metallurgical Industry Automation, 2012, 36(3): 24.)
- [89] 钱鹏,吴澄,宋士吉,等. 考虑机器不可用约束的钢铁加热炉调度[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(10): 1166. (QIAN Peng, WU Cheng, SONG Shiji, et al. Rolling scheduling of reheating furnaces in steel production when some furnaces may not be available at times[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(10): 1166.)
- [90] KONG Min, PEI Jun, XU Jin, et al. A robust optimization approach for integrated steel production and batch delivery scheduling with uncertain rolling times

- and deterioration effect [J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(17) : 5132.
- [91] WANG Dujuan, LIU Feng, JIN Yaochu. A proactive scheduling approach to steel rolling process with stochastic machine breakdown [J]. Natural Computing, 2019, 18(4) : 679.
- [92] 刘寒, 张文新, 张文学. 基于 UML 的钢轧衔接生产调度系统建模 [J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(3) : 186. (LIU Han, ZHANG Wenxin, ZHANG Wenxue. Modeling the production scheduling system for steel rolling linking based on UML [J]. Computer Engineering & Science, 2012, 34(3) : 186.)
- [93] 于港, 田乃媛, 徐安军, 等. 唐钢二钢轧厂生产流程的计算机仿真 [J]. 冶金自动化, 2008, 33(4) : 15. (YU Gang, TIAN Naiyuan, XU Anjun, et al. Computer-aided simulation of production process in the second steelmaking and rolling plant of Tangsteel [J]. Metallurgical Industry Automation, 2008, 33(4) : 15.)
- [94] 常春光, 胡琨元, 汪定伟, 等. 钢铁生产动态调度理论研究与应用综述 [J]. 信息与控制, 2003(6) : 531. (CHANG Chunguang, HU Kunyuan, WANG Dingwei, et al. Steel production dynamic scheduling theory and its engineering application: A review [J]. Information and Control, 2003(6) : 531.)
- [95] Iglesias-Escudero M, Villanueva-Balsera J, Ortega-Fernandez F, et al. Planning and scheduling with uncertainty in the steel sector: A review [J]. Applied Sciences-Basel, 2019, 9(13) : 2692.
- [96] 柴天佑, 丁进良. 流程工业智能优化制造 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(4) : 1. (CHAI Tianyou, DING Jinliang. Smart and optimal manufacturing for process industry [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(4) : 1.)
- [97] 钱锋, 桂卫华. 人工智能助力制造业优化升级 [J]. 中国科学基金, 2018(3) : 257. (QIAN Feng, GUI Weihua. Boosting optimization and upgrade for manufacturing industry by artificial intelligence [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2018(3) : 257.)
- [98] 丁凯, 陈东桑, 王岩, 等. 基于云-边协同的智能工厂工业物联网架构与自治生产管控技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12) : 3127. (DING Kai, CHAN Tungsun, WANG Yan, et al. Industrial Internet of things architecture and autonomous production control technologies for smart factories based on cloud-edge interplay [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(12) : 3127.)
- [99] 路天恩, 董尉民, 王海霞, 等. MES 环境下生产排程与调度模式浅析 [J]. 河南冶金, 2012, 20(5) : 21. (LU Tianen, DONG Weimin, WANG Haixia, et al. Brief analysis of production management mode in MES system [J]. Henan Metallurgy, 2012, 20(5) : 21.)
- [100] 陈杰, 吴怀宇. MES 系统在韶钢炼钢轧钢生产线的应用 [J]. 南方金属, 2008(1) : 44. (CHEN Jie, WU Huaiyu. R & D of MES at SISG [J]. Southern Metals, 2008(1) : 44.)
- [101] 刘青, 刘倩, 杨建平, 等. 炼钢-连铸生产调度的研究进展 [J]. 工程科学学报, 2020, 42(2) : 144. (LIU Qing, LIU Qian, YANG Jianping, et al. Progress of research on steelmaking-continuous casting production scheduling [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(2) : 144.)