

控制与决策

Control and Decision

拉氏框架下不确定环境炼钢-连铸批量计划调度一体化方法综述

孙亮亮, 沙淑雅, 屈秋霞, 英宇, 于淼, 王娟

引用本文:

孙亮亮, 沙淑雅, 屈秋霞, 等. 拉氏框架下不确定环境炼钢-连铸批量计划调度一体化方法综述[J]. *控制与决策*, 2021, 36(8): 1793-1803.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0876>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法

Large-scale group DEMATEL decision making method under uncertain linguistic information

控制与决策. 2021, 36(8): 2023-2033 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1486>

两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型

Joint optimization model for condition-based maintenance and production scheduling of two-component systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1377-1386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1357>

工序加工时间不确定的可重入调度问题的求解

Solution of reentrant scheduling problem with uncertain processing time

控制与决策. 2021, 36(5): 1127-1136 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1036>

顺序依赖的调整时间和拖期的无缝钢管热轧批量调度算法

Hot-rolled batch scheduling algorithm for seamless steel tube with sequence-dependent setup times and tardiness

控制与决策. 2021, 36(2): 505-512 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0723>

可持续逆向物流网络设计研究进展及趋势

Progress and prospects of sustainable reverse logistics network design

控制与决策. 2020, 35(11): 2561-2577 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1175>

拉氏框架下不确定环境炼钢-连铸批量计划调度 一体化方法综述

孙亮亮[†], 沙淑雅, 屈秋霞, 英宇, 于淼, 王娟

(沈阳建筑大学 信息与控制工程学院, 沈阳 110168)

摘要: 炼钢-连铸批量计划与生产调度是实现钢铁生产降本增效的重要途径,传统“分而治之”的编制方法由于多种不确定因素的影响难以保证大规模钢铁生产物流资源与时间的动态平衡. 鉴于此,从数学建模和优化方法两个角度对国内研究状况进行综述,针对不确定环境下大规模炼钢-连铸批量计划与生产调度问题,论述基于拉氏松弛框架的一体化调度方法的研究现状,并对未来进行展望.

关键词: 炼钢-连铸; 批量计划; 生产调度; 不确定; 拉氏松弛

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0876

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 孙亮亮,沙淑雅,屈秋霞,等. 拉氏框架下不确定环境炼钢-连铸批量计划调度一体化方法综述[J]. 控制与决策, 2021, 36(8): 1793-1803.

A survey of integrated optimization method of batch planning and production scheduling for steelmaking-continuous casting process under uncertainties based on Lagrangian relaxation framework

SUN Liang-liang[†], SHA Shu-ya, QU Qiu-xia, YING Yu, YU Miao, WANG Juan

(College of Information Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Steelmaking-continuous casting batch planning and production scheduling are important ways to reduce costs and increase efficiency in steel production. The traditional “divide and conquer” compilation method is affected by many uncertain factors, and it is difficult to ensure the dynamic balance of logistics resources and time for large-scale steel production. Therefore, this article gives an overview of domestic research from the perspectives of mathematical modeling and optimization methods, mainly for large-scale steelmaking-continuous casting batch planning and production scheduling problems under uncertain environments. It also discusses the research status of integrated scheduling methods based on Lagrangian relaxation framework, and proposes the prospects of the future research.

Keywords: steelmaking-continuous casting; batch planning; production scheduling; uncertainty; Lagrangian relaxation

0 引言

钢铁制造业是工业生产的支柱,它能够为建筑、汽车和其他工业提供基本原材料. 典型的钢铁生产流程主要由3个部分组成,分别是轧制、炼铁以及炼钢-连铸. 钢铁生产流程中的短板环节是炼钢-连铸生产^[1],该生产过程包括炼钢、精炼和连铸3个阶段,精炼阶段由RH类、CAS类、KIP类和LF类等精炼位组成. 钢水由高炉出来的铁水经过转炉冶炼形成(1个炉次是指由1台转炉冶炼形成的钢水),会根据不

同的等级分别装载到相应等级容器,这类容器称为钢包. 由于钢水需求不同,由纵向行走的台车和横向行走的天车协作运载钢包到相应精炼位上进行一重或多重精炼(一重或多重精炼指一个炉次由单个精炼位加工或多个精炼位共同加工)^[2]. 装载精炼后钢水的钢包由台车和天车协作运输注入可以包容多炉钢水的容器,这类容器称为中间包(一种耐火材料容器),再通过连铸机炼造成板坯(一个浇次指同一台连铸机持续浇铸的炉次集合)^[3].

收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2020-11-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61873174, 71701137); 辽宁省自然科学基金项目(2020-KF-11-07, 2019-ZD-0679); 教育部合作协同育人项目(201902233028); 住房和城乡建设部科学技术项目(2017M611261).

责任编辑: 王凌.

[†]通讯作者. E-mail: swinburnsun@163.com.

在钢铁生产中,达成降本增效目的的重要途径是炼钢-连铸生产运行控制. 炼钢-连铸生产运行控制主要由4部分组成,分别为生产调度、批量计划、过程控制和合同计划^[4]. 在生产运行控制这一过程中,起到承上启下的是批量计划与生产调度. 图1为国内某大型钢铁厂炼钢-连铸生产运行控制流程,单位是天. 生产的批量计划接收由合同计划提供的待生产板坏的成份、尺寸等信息;批量计划根据后续轧制工序烫

辊材料、板坯属性和连铸机的属性,确定炉次批量计划、中间包批量计划和浇次批量计划;生产调度根据炼钢-连铸生产过程性能指标、约束条件,确定炉次在不同工序、运输阶段设备的选择以及设备的启停时间(即转炉、精炼和连铸生产调度);过程控制接收由生产调度提供的决策信息,执行生产指令,实时监测不确定环境下的生产运行状态,合同计划、生产调度及批量计划对接收到的信息进行调整^[5-6].

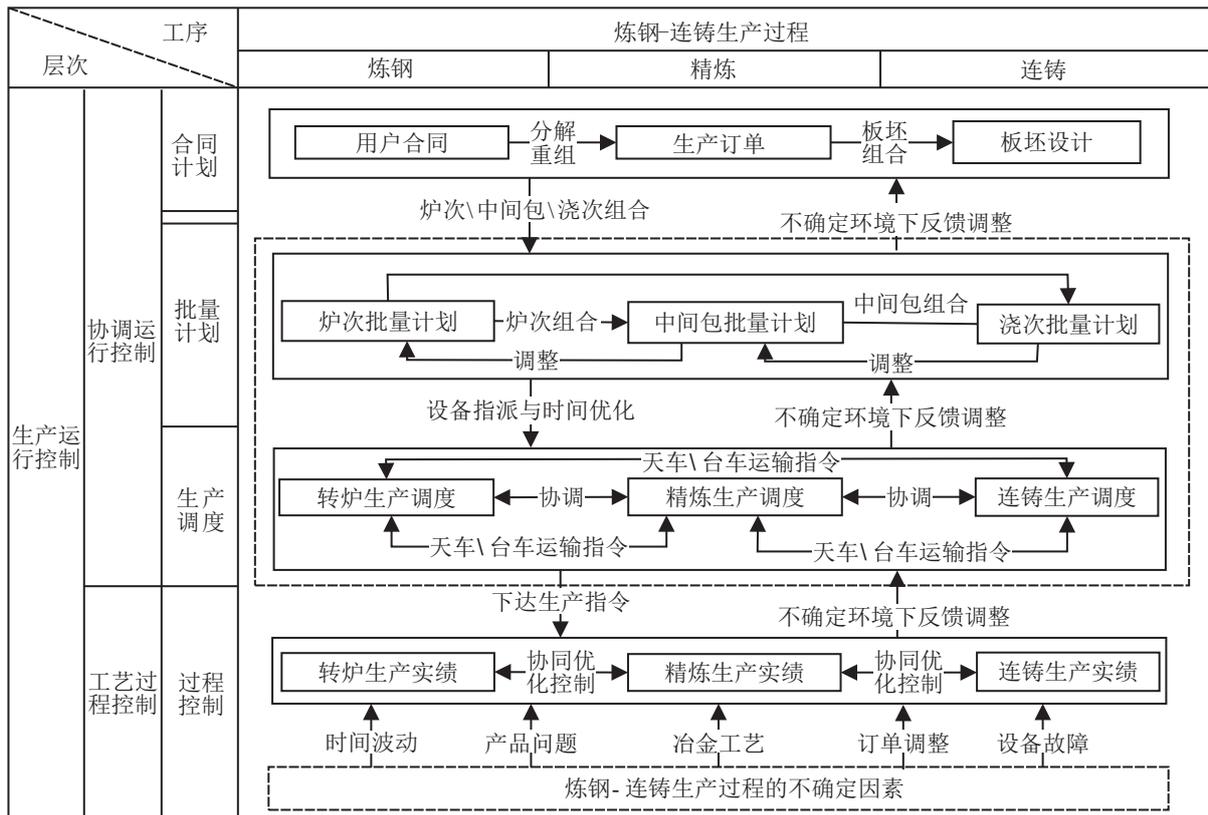


图1 国内某大型钢铁厂炼钢-连铸生产运行控制流程

钢铁市场化需求逐渐转为向少批量、准时交货、多品种方向发展,传统炼钢-连铸批量计划与生产调度编制方法由于多种不确定因素的影响,降低了已有方案的可执行性,时间与大范畴钢铁生产中炼钢-连铸以及轧制、炼铁过程中所需物流资源二者间无法保持动态平衡,产能柔性生产运行中的工艺过程控制以及协调运行控制中的产品结构无法匹配^[7],所以缩减工序等候时间、降低能耗和物耗、提升钢铁厂装备生产效率、增加产品本身竞争力的关键是制订出一套有效的不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化方案^[8].

1 常用不确定条件下生产批量计划调度集成方法

不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题属于不确定条件下生产批量计划调度

集成 NP(nondeterministic polynomial) 难题. 其中,不确定参数优化方法、集成建模方法以及优化求解方法是此类问题的核心内容. 不确定条件下生产批量计划调度集成优化问题基于不确定参数优化方法,考虑生产过程的多种不确定因素,结合生产过程的工艺和资源等相关约束条件,建立含有不确定参数的随机优化模型. 采用合适的优化求解方法,使得不确定环境下生产批量计划调度集成优化过程的多重性能指标达到优化.

1.1 生产批量计划调度集成优化问题不确定参数优化方法

生产批量计划调度集成优化问题 (integrated optimization of batch planning and scheduling, IOBPS) 的不确定参数优化方法包括以下3种:随机规划、模糊规划和鲁棒优化. 随机规划方法中不确定参数的

表达方式概率分布,目的是使生产批量计划调度集成模型的目标函数期望值达到最优或不小于某一给定值的概率达到最大,并将不确定参数引入生产批量计划调度集成数学模型中.由于变量随机,随机规划优化问题中模型的数学定义不明确,从而导致随机模型的求解不再是单纯的数学优化问题,而成为一种决策问题,如随机规划的原始模型

$$\begin{cases} \min f(x, \omega); \\ \text{s.t. } g_i(x, \omega) \leq 0, i = 1, 2, \dots, I, x \in X. \end{cases} \quad (1)$$

其中: ω 为随机变量, x 为决策变量, $f(x, \omega)$ 为目标函数, $g_i(x, \omega)$ 为约束函数, ω 的概率分布已知.

针对随机规划方法的研究主要包括3部分:机会约束规划方法、多阶段随机规划方法以及基于场景的随机规划方法.基于场景的数学规划方法将每个场景描述为概率服从正态分布的变量,采用抽样及场景削减得到具有一定概率的随机场景.基于场景的数学规划方法虽然对不确定参数的数量不设限制,但所建立的数学模型计算复杂度会随场景数的增加呈指数级增加,从而影响算法的求解效率^[9-12].基于机会约束的随机规划方法虽然可以将等价确定性的问题规模减小或者将传统的刚性约束条件变成柔性约束条件,但是该方法难以获得精确的概率分布,使得约束函数和梯度计算量较大^[13];基于多阶段的随机规划方法虽然可以通过有限离散值近似确定实际不确定因素,将原始不确定问题转化为线性确定性等价问题,但是由于确定性等价问题的大规模特性导致求解困难.模糊规划方法克服了随机规划方法针对不确定参数信息不完整而难以描述的问题,利用模糊理论描述不确定参数^[14-16].针对模糊规划方法的研究主要包括基于二维或者三维隶属度函数的1型模糊规划和2型模糊规划^[17-18].基于模糊规划方法虽然能够保证问题的运算规模并且不需要对不确定因素精确的描述,但是难以获得精确的隶属度函数,导致优化方案无法适用于不确定参数变化情况.鲁棒优化方法克服了随机规划方法无法精确描述不确定参数,以及模糊规划方法无法精确描述隶属度函数的问题,利用有界的数学集合描述不确定参数,但是难以克服因考虑所有不确定情况所产生的保守性问题,不适用多种不确定因素的大规模复杂IOBPS^[19-20].

可见,对于IOBPS,要依据不确定参数的特征和不确定参数的信息完整度进行不确定参数优化方法的选择.对于不确定参数信息不完整的情况或者参数本身特性模糊的问题,可以使用模糊规划方法进行处理.不确定参数本身带有随机性且信息完整,同时

可以提供概率分布函数,例如IOBPS处理时间的不确定、设备检修时间的不确定等,所以可以使用随机规划方法处理该类不确定参数.对于变化频繁的不确定因素,可以使用鲁棒优化的调度方案.

1.2 IOBPS建模方法

IOBPS的建模方法主要有数学规划方法、仿真方法和Petri网方法.基于数学规划方法建立的生产集成批决策与批调度混合整数规划模型、生产批量计划与调度一体化混合整数规划模型、生产批量计划和生产调度集成非线性规划模型以及生产批量计划和生产调度混合整数非线性规划模型,虽然能直观地反映IOBPS,以数学公式的形式直观表达生产计划调度过程中的性能指标以及约束条件,但是考虑到实际生产批量计划调度优化问题的复杂性,采用数学规划方法建立的模型对形式化描述过于复杂,导致所提模型难以反映实际IOBPS^[21-26].基于仿真方法建立的目标导向与自组织演化有机结合生产物流模型、面向对象的生产过程仿真模型,虽然在产生可行性计划调度集成方案和方案评估方面显现了优势,但是仿真方法的建模工作量较大,且模型正确性受人为因素影响较大,对于IOBPS的多种不确定因素难以准确描述,不适用于实时环境下大规模生产批量计划调度集成优化的编制^[27-31].基于Petri网方法建立的生产批量计划调度集成优化模型,虽然可以将大规模IOBPS很好地表征出来,但是由于所建立的模型过于复杂,导致基于Petri网模型所提出优化算法的求解效率难以满足实际生产需求,制约了该方法在复杂IOBPS中的应用^[32-35].

可见,对于IOBPS建模方法的选择,要依据不同IOBPS的规模属性、结构特征进行.如果批量计划调度集成优化问题的过程描述复杂度不高,则可以通过数学规划的方法进行描述,例如生产炉次批量计划优化问题、炼钢-连铸生产调度优化问题等.对于模型复杂度不高、生产可行性计划调度集成方案和方案评估方面的优化问题,可以通过仿真方法进行描述;对于完整表征生产批量计划调度特征属性的集成优化问题,可以考虑使用Petri网方法进行模型设计.

1.3 不确定环境下IOBPS优化求解方法

不确定条件下生产批量计划调度集成方法总结如图2所示.

系统仿真方法、邻域搜索方法、启发式方法和运筹学方法是不确定环境下生产批量计划调度集成优化问题的4种主要优化求解方法.运筹学方法的首要思路是进行精确求解,对以枚举思想为基础的正向动

不确定条件下生产批量计划调度集成方法			
不确定参数优化方法	随机规划方法	基于场景的随机规划方法	优点: 对不确定参数的数量不设限制 缺点: 计算复杂度会随着场景数的增加呈指数级增加, 从而影响求解效率
		机会约束规划方法	优点: 可缩小等价确定性问题的规模, 或将刚性约束条件变成柔性约束条件 缺点: 难以获得精准概率分布描述, 导致约束函数和梯度计算量大
		多阶段随机规划方法	优点: 可将原始不确定问题转化为线性确定性等价问题 缺点: 由于确定性等价问题的大规模特性导致求解困难
	模糊规划方法	1型模糊规划	优点: 利用模糊理论描述不确定参数, 能够保证问题的运算规模且不需要对不确定因素精准描述 缺点: 难以获得精确隶属度函数, 导致优化方案无法适用于不确定参数变化情况
		2型模糊规划	
鲁棒优化方法	优点: 利用有界的数学集合来描述不确定参数 缺点: 难以克服因考虑所有不确定情况所产生的保守性问题, 不适用于多种不确定因素的大规模复杂生产批量计划调度集成优化问题		
建模方法	数学规划方法	生产集成批决策与批调度混合整数规划模型	优点: 能直观地反映生产批量计划调度集成优化问题 缺点: 所提模型难以反映实际生产批量计划调度集成优化问题
		生产批量计划与调度一体化混合整数规划模型	
		生产批量计划和生产调度集成非线性规划模型	
		生产批量计划和生产调度混合整数非线性规划模型	
	仿真方法	目标导向与自组织演化有机结合生产物流模型	优点: 在产生可行性计划调度集成方案 方案评估方面具有优越性 缺点: 不适用于实时环境下大规模生产批量计划调度集成优化的编制
面向对象的生产过程仿真模型			
Petri 网方法	生产批量计划调度集成优化模型	优点: 可将大规模生产批量计划调度集成优化问题很好地表征出来 缺点: 模型过于复杂, 求解效率难以满足实际需求	
优化求解方法	运筹学方法	优点: 能够获得不确定环境下生产批量计划调度集成优化问题的近似最优解 缺点: 难以在短时间内得到高质量的优化方案, 具有局限性	
	启发式方法	优点: 描述简单、计算量小、响应快、适用于实际优化问题 缺点: 对于大规模优化问题, 难以对全局信息进行把握, 导致所提方案的优化效果不理想	
	邻域搜索方法	优点: 能够基于不同批量计划调度集成优化问题的特殊结构获取近似优化方案 缺点: 计算机难以克服实际优化问题结构不良的缺点, 导致求解速度慢	
	系统仿真方法	优点: 克服了大系统复杂性的特点 缺点: 很难从特定实验提炼出一般的规律性, 难以适用于不确定环境下大规模生产批量计划调度集成优化问题	

图2 不确定条件下生产批量计划调度集成方法总结

态规划、反向动态规划等传统数学方法,虽然方法数学逻辑严谨,能从理论角度出发得到全局优化方案,但是由于生产批量计划调度集成优化问题是多目标、多阶段、多任务组成的繁杂过程,且在数学建模中涉及到过多约束条件,导致该问题属于传统NP难题范畴.目前传统的数学方法无法在较短的时间内由迭代方式获得优化的全局最优解,因此在求解实际优化问题过程中会具有局限性^[36-37].启发式方法虽然具有描述简单、适用于实际优化问题、响应快、计算量小等优点,但这类方法只考虑了部分信息,对于全局信息无法把握,不适用于大规模优化问题,导致所提方案的优化效果不理想.

与此同时,规则要求不同导致所制定的优化结果截然不同,而不规范规则会使得到的调度结果为局部最优解或者无法求解,由一套统一的规则得到全局最优解的想法很难实现,尤其炼钢-连铸这种具有离散

加连续的混合作业过程,目标以及约束条件均具多样性,很难由人工经验制订出优化调度方案^[38-40].邻域搜索方法能够基于不同批量计划调度集成优化问题的特殊结构得到接近的优化方案,但是计算机很难发觉实际优化问题结构不良所造成的问题,这主要表现在系统知识不完备或不一致,从而导致求解速度慢^[41-42].依据仿真状态对系统动态性能测评是系统仿真方法的优点,能够及时调节系统动态结构的参数,达到满足实际生产需求的目标,虽然克服了大系统复杂性,但由于模型正确性受人为因素影响较大,过多依赖现场的规则和逻辑,很难将该方法提升到理论高度进行调度设计方法通用解析规划,导致难以从特定实验中总结出一般规律,仿真结果的可靠度以及价值过分依靠仿真方法、模型和仿真实验获得的输入数据,难以适用于不确定环境下大规模生产批量计划调度集成优化问题^[43-45].

可见,针对大规模、多耦合、多目标、多约束的复杂炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化过程,已有的集成优化求解方法难以克服问题规模大和计算时间慢的问题.不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题研究的热点是如何以提升问题求解效率以及降低问题求解难度为重点研究方向,找出更贴和现实的优化求解方法.

2 拉氏框架下模型优化方法以及迭代优化算法

2.1 拉氏松弛框架下模型优化方法

从模型优化角度分析,拉氏松弛方法利用炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化问题的可分离结构特征,建立基于数学规划方法的炼钢-连铸批量计划与生产调度优化数学模型^[46-48].从不同研究角度考虑批量计划与生产调度集成优化问题的工序、层次等独立属性,兼顾不同拉氏松弛迭代优化算法的特点,采用合适的松弛策略^[49-52]及单元分解方法^[53-55],通过拉氏乘子来松弛难以求解的同步性耦合约束、

机器能力耦合约束、加工顺序耦合约束、生产能力耦合约束,将松弛的耦合约束条件引入到目标函数中,得到以板坯、炉次、浇次为单位的拉氏松弛子问题数学模型.基于子问题凸包不变特性,通过对不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化子问题约束条件的模型变换以及引入辅助变量,得到一种更为简洁、紧凑的子问题优化数学模型^[56-57],从而达到降低模型求解难度的目的.然而,已有的拉氏松弛框架下,不同松弛策略及其子问题模型简化方法尚未考虑多种不确定因素对炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化编制过程的影响,同时缺少对批量计划与生产调度一体化优化问题拉氏松弛策略及其子问题模型简化方法系统的研究与分析比较,因此降低不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题求解难度的要点是,研究不确定因素对炼钢-连铸批量计划与生产调度过程基于拥有可分离结构特征一体化数学模型的结构特征的影响,提出科学有效的拉氏松弛策略及子问题模型简化方式.具体求解思想如图3所示.

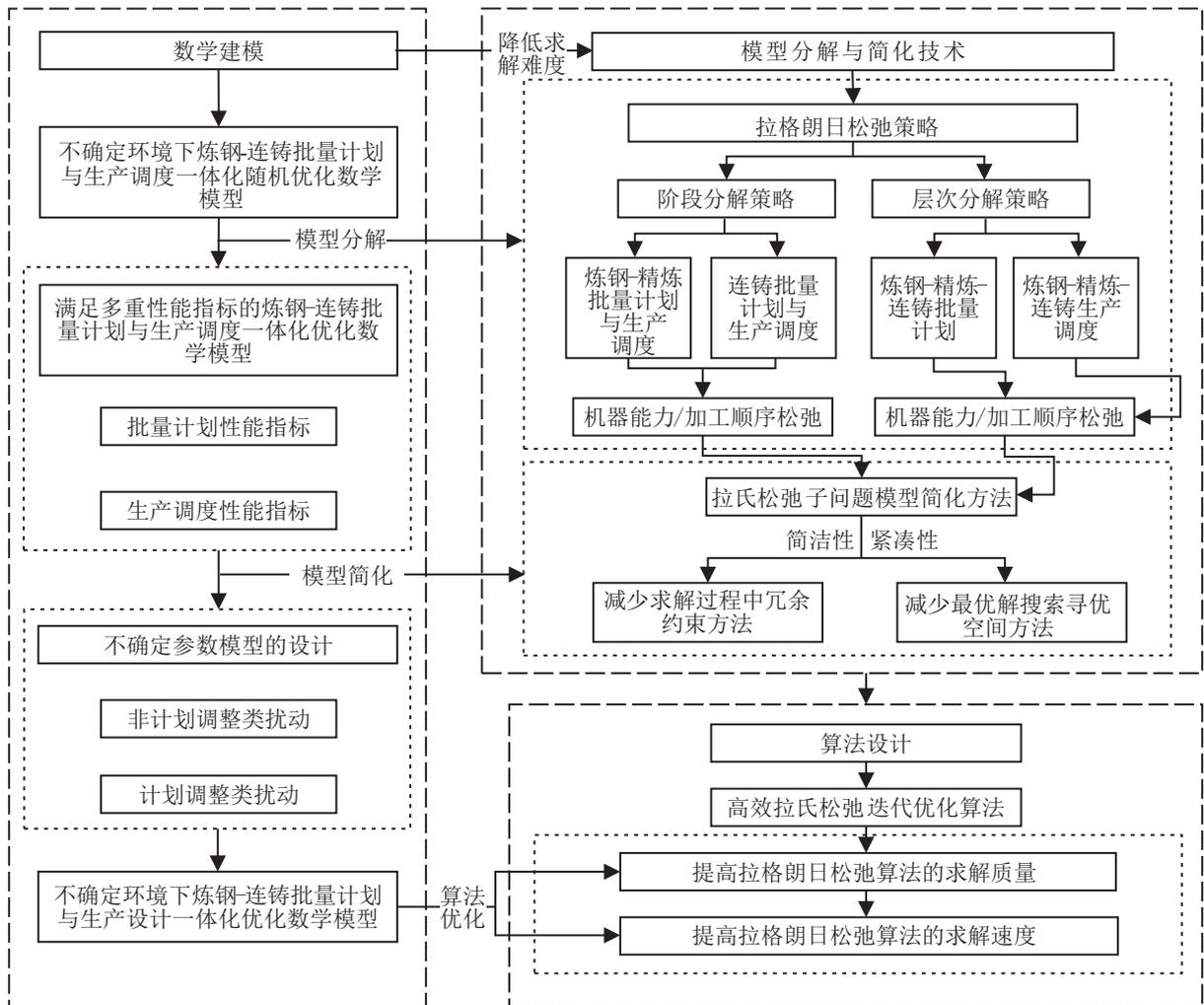


图3 拉氏框架下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化求解思想

2.2 拉氏松弛框架下迭代优化算法

从算法优化角度分析,传统的拉氏松弛算法采用基于序列求解、松弛策略调整和神经网络等求解协调方法寻求最优拉氏乘子^[58-61],采用基于切生成、逐步次梯度等方法^[62-65]求解对偶问题,得到原问题的一个下界;根据每次迭代得到的拉氏乘子信息构造原问题的可行解,并将最好的可行解作为原问题的近似优化方案.

传统拉氏松弛子问题迭代过程中会出现两种造成搜索效率降低的震荡现象,所以尽管传统拉氏松弛算法对原问题具有很好的松弛特性,但求解速度和求解质量仍然无法满足优化性能指标的要求.产生内部震荡现象的主要原因是相邻的两个次梯度方向的夹角是钝角,导致搜索效率低;产生边界震荡现象的主要原因是迭代过程中,次梯度方向是一个不可行方向,会将迭代点带到可行域之外.对产生震荡现象的原因分析可知,引入提高收敛速度的次梯度算法可以减弱次梯度算法产生的震荡,提高算法的求解效率^[66-68].不过,对于实际大规模计划调度一体化优化问题,由于收敛速度的限制以及求解优化问题的强凸有界条件,该方法对解决实际大规模复杂管理优化问题仍然具有局限性.增广拉氏松弛算法避开了二次惩罚项导致的病态性,解决了传统拉氏松弛迭代优化算法的短板,提升了算法的收敛速度^[69-70],对于因二次惩罚项的引入而导致增广拉氏松弛算法无法松弛

的问题,提出了基于辅助问题原理的分块坐标下降等解决方法^[71-72].同时,该算法基于绝对值函数线性化思想,考虑V型函数对称结构,设计V型变换函数,保证变换后的函数最小值不变,从而获取增广拉氏松弛线性函数^[73-75].不过,由于多种假设情况和约束条件的限制,上述方法并未对因精确优化松弛函数致使求解效率低的问题进行系统分析,导致所提方法的应用范围具有局部性.

3 已有方法在不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题的局限

针对国内实际大规模炼钢-连铸生产过程间歇与连续作业方式多约束、多工序、多耦合相混合的流程式、多阶段生产特性,目前尚无较好的方法解决不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题.该问题的数学模型需要综合考虑批量计划中炉次计划与中间包计划炉次宽度跳跃约束、成份约束的一致性,以及中间包计划与浇次计划炉次宽度跳跃约束、成份约束的一致性,需要考虑生产调度过程中因多炉次产生的指数级路径组合出现多种“作业冲突”的可能性、任一浇次中不同炉次在连铸阶段生产过程中的连续浇铸性,以及多天车和多台车在运输过程空间上的相互制约组成的复杂生产特性,进而描述多种不确定因素对批量计划与生产调度一体化优化过程的关联影响,图4为钢铁厂炼钢-连铸生产过程不确定因素分类及其处理策略.

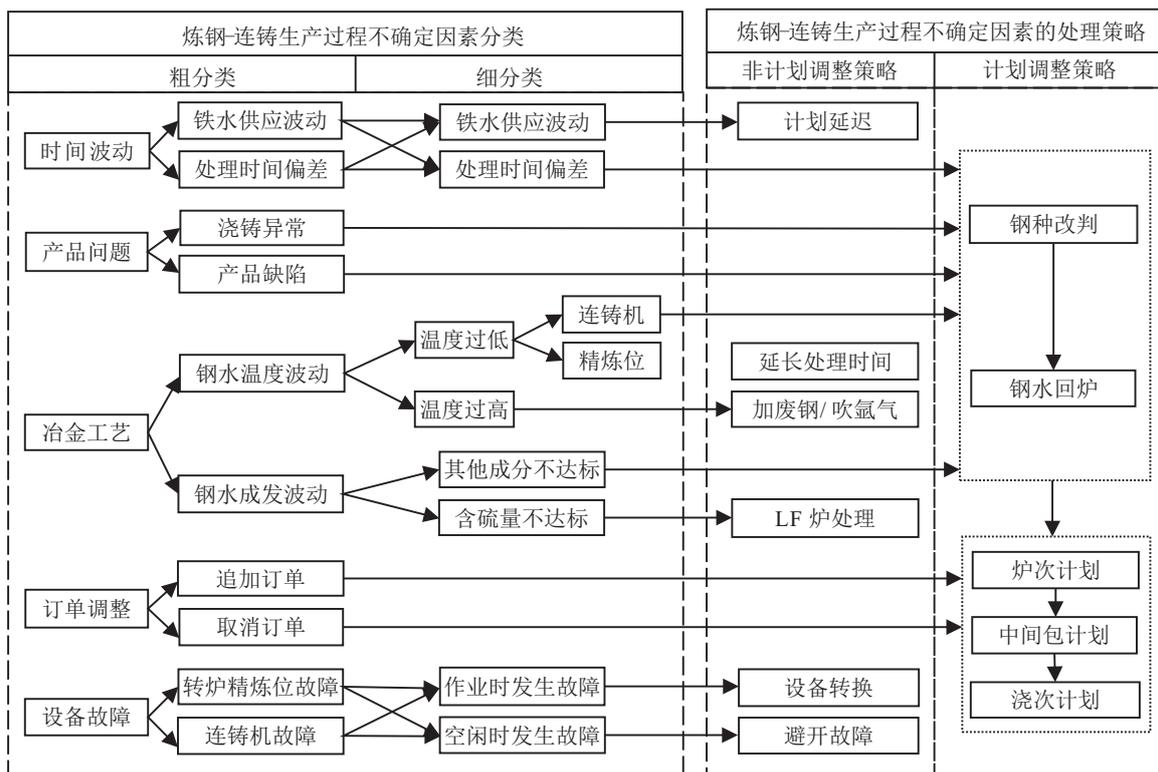


图4 钢铁厂炼钢-连铸生产过程不确定因素分类及其处理策略

传统的不确定参数优化方法无法建立不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化数学模型,该方法难以克服因考虑所有不确定情况所产生的模型保守性问题,同时也不能综合性地结合生产过程的多重性能指标.

不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题是指在时间和空间双重维度下,综合考虑炼钢-连铸生产过程批量计划中炉次计划、中间包计划与浇次计划之间宽度跳跃约束和成分差异耦合约束,考虑批量计划与生产调度二者生产能力互相耦合约束,研究不确定因素作用对炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化问题的相关影响,构建大规模一体

化随机优化数学模型. 这种模型会由于生产线设备数目的增长、不确定因素种类的多样化、订单数目增长而使求解难度呈指数倍增加. 基于分解-协调思想的拉氏松弛框架虽然能够显著降低优化问题的计算规模,但此类优化问题多工序、多耦合、多约束的特性会造成模型分解.

图5给出了基于阶段与层次的炼钢-连铸批量计划与生产调度分解策略. 可见,顾全算法特点,从模型系统分析角度出发,设计科学的拉氏松弛策略及其子问题模型简化手段,可以降低不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题的求解难度.

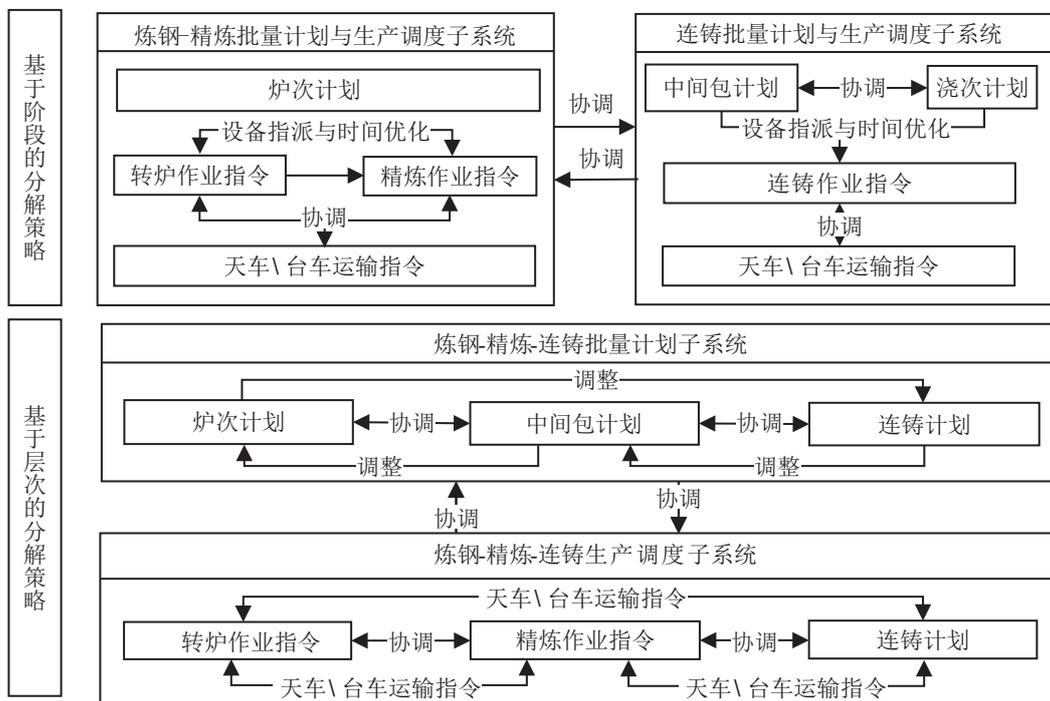


图5 基于阶段与层次的炼钢-连铸批量计划与生产调度分解策略

4 结论与展望

炼钢-连铸生产优化管理是钢铁企业生产的核心. 本文首先对具有可分离特征的大规模、多约束、多目标、多耦合不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题的不确定参数优化方法、集成建模方法以及优化求解方法进行了综述;然后,考虑已有集成优化求解方法难以克服规模大和计算时间慢的难点,对于寻求不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题的拉氏松弛方法进行了讨论;最后,剖析了现有方式在不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题方面的不全面性. 未来将对不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题从建模理论、优化方法以及工程应用等方面进行进一步研究和探讨:

1) 从数学建模角度看,如何克服不确定环境下批量计划调度集成优化问题模型的保守性,设计科学的拉氏松弛策略及其子问题模型简化方法,推动随机优化建模理论以及具有可分离特征数学模型分解与分析技术的发展一直是大规模工业生产管理优化数学建模的难点. 针对炼钢-连铸生产过程多种不确定因素对批量计划与生产调度一体化优化问题的分析与描述,研究不确定因素表述方法,建立适合不确定环境下大规模炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化随机优化数学模型,可以克服模型的保守性.

2) 从方法论角度看,拉格朗日松弛算法一直是解决大规模具有可分离特征数学优化问题的有效方法,如何有效克服传统增广拉氏松弛迭代优化算法不可分所致算法无法松弛的问题,以及每次迭代必须精

确优化松弛函数导致传统次梯度算法求解效率低的问题是下一步研究的重要方向. 针对不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化模型, 基于拉氏松弛框架优化方案, 分析不同松弛策略下的多种子问题模型简化方法对拉氏松弛方法求解难度的影响, 设计科学的拉氏松弛策略及其子问题模型简化方法, 可以降低模型的求解难度.

3) 从工业应用角度看, 不确定环境下炼钢-连铸批量计划与生产调度一体化优化问题一直是炼钢-连铸生产运行优化控制的核心, 如何建立一套更加符合实际生产需求的批量计划与生产调度一体化编制方法, 具有重要的学术意义和广泛的应用价值. 期望本文能够为读者提供探索不确定环境下多工序工业生产批量计划调度集成优化问题的随机优化建模理论依据, 为研究拥有可分离结构特征数学模型的分析分解与分解技术提供支持, 为批量计划调度集成优化方法的工业应用打下基础.

参考文献(References)

- [1] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production[J]. *European Journal of Operation Research*, 2000, 120(2): 423-435.
- [2] Jiang S L, Liu M, Lin J H, et al. A prediction-based online soft scheduling algorithm for the real-world steelmaking-continuous casting production[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 111: 159-172.
- [3] Pan Q K. An effective co-evolutionary artificial bee colony algorithm for steelmaking-continuous casting scheduling[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(3): 702-714.
- [4] 郑忠, 龙建宇, 高小强, 等. 钢铁企业以计划调度为核心的生产运行控制技术现状与展望[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(11): 2660-2674.
(Zheng Z, Long J Y, Gao X Q, et al. Present situation and prospect of production planning and scheduling in iron control technology focusing on and steel enterprise[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(11): 2660-2674.)
- [5] Sun L L, Jin H, Yu Y Q. Research on steelmaking-continuous casting production scheduling problem based on augmented lagrangian relaxation algorithm under multi-coupling constraints[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2019, 52(1): 820-825.
- [6] Yang J P, Zhang J S, Guan M. Fine description of multi-process operation behavior in steelmaking-continuous casting process by a simulation model with crane non-collision constraint[J]. *Metals*, 2019, 9(10): 1078.
- [7] 安玉伟, 严洪森. 柔性作业车间生产计划与调度集成优化求解策略[J]. *自动化学报*, 2013, 39(9): 1476-1491.
(An Y W, Yan H S. Solution strategy of integrated optimization of production planning and scheduling in a flexible job-shop[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(9): 1476-1491.)
- [8] 王彬, 王闯, 王宝, 等. 炼钢-连铸过程生产计划与调度问题综合优化研究[J]. *武汉科技大学学报*, 2014, 37(3): 161-166.
(Wang B, Wang C, Wang B, et al. Research on comprehensive optimization of production planning and scheduling in steelmaking-continuous casting process[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2014, 37(3): 161-166.)
- [9] Xu Z J, Zheng Z, Gao X Q. Energy-efficient steelmaking-continuous casting scheduling problem with temperature constraints and its solution using a multi-objective hybrid genetic algorithm with local search[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 95: 106554.
- [10] 张鹏, 徐文宝. 基于多场景随机规划的电热联合系统日前经济调度[J]. *电气工程学报*, 2020, 15(2): 85-91.
(Zhang P, Xu W B. Day-ahead economic dispatch of combined electro-thermal system based on multi-scenario stochastic programming[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2020, 15(2): 85-91.)
- [11] Bornapour M, Hooshmand R A. An efficient scenario-based stochastic programming for optimal of combined heat, power, and hydrogen production of molten carbonate fuel cell power plants[J]. *Energy*, 2015, 83: 734-748.
- [12] Xu B, Zhong P G, Zambon R C, et al. Scenario tree reduction in stochastic programming with recourse for hydropower operations[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 2197-2206.
- [13] 陈伟, 吴建虎, 裴喜平. 基于机会约束规划的农村配电网光伏电源极限准入容量计算方法[J]. *可再生能源*, 2019, 37(8): 1185-1191.
(Chen W, Wu J H, Pei X P. Calculation method of limit access capacity of photovoltaic power supply in rural distribution network based on opportunity constraint programming[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(8): 1185-1191.)
- [14] 王越. 不确定环境下生产计划和调度的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
(Wang Y. Research on production planning and scheduling under uncertainty[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.)
- [15] 王李龔, 许强, 黄开艺, 等. 计及新能源及负荷不确定性的多能微网系统两阶段随机规划方法[J]. *电力建设*, 2020, 41(4): 100-108.
(Wang L Y, Xu Q, Huang K Y, et al. A two-stage stochastic programming method for multi-energy microgrid system considering the uncertainty of new energy and load[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(4): 100-108.)
- [16] 王珂, 杨艳, 周建. 基于在险价值的物流网络规划模糊两阶段模型与精确求解方法[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(2): 88-96.

- (Wang K, Yang Y, Zhou J. Value-at-risk-based fuzzy two-stage model for logistics network planning and its accurate solution approach[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(2): 88-96.)
- [17] Zarandi M H F, Azad F K. A type 2 fuzzy modeling of wind power generation in genco's generation scheduling[C]. *Proceedings of the 2013 Joint Ifsa World Congress and Nafips Annual Meeting*. Piscataway: IEEE, 2013: 992-996.
- [18] Starkey A, Hagrass H, Shakya S. et al. A multi-objective genetic type-2 fuzzy logic based system for mobile field workforce area optimization[J]. *Information Sciences and International Journal*, 2016, 329: 390-411.
- [19] Rahmani D, Ramezani R, Fattahi P, et al. A robust optimization model for multi-product two-stage capacitated production planning under uncertainty[J]. *Applied Mathematical Modelin*, 2013, 7(20/21): 8957-8971.
- [20] Che P, Tang Z, Gong H. An improved lagrangian relaxation algorithm for the robust generation self-scheduling problem[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018(9): 1-12.
- [21] 曹策俊, 高学鸿. 基于数学规划的救援物资分配优化模型及其求解算法综述[J]. *计算机应用*, 2020, 40(8): 2398-2409.
(Cao C J, Gao X H. Overview of relief distribution optimization models based on mathematical programming and their solving algorithms[J]. *Journal of Computer Applications*, 2020, 40(8): 2398-2409.)
- [22] 许显杨, 陈璐. 考虑设备可靠性与能耗的平行机调度[J]. *上海交通大学学报*, 2020, 54(3): 247-255.
(Xu X Y, Chen L. Parallel machine scheduling problem considering machine reliability and energy consumption[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(3): 247-255.)
- [23] Fumero Y, Moreno M S, Corsano G, et al. A multiproduct batch plant design model incorporating production planning and scheduling decisions under a multiperiod scenario[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(5/6): 3498-3515.
- [24] Fanti M P, Rotunno G, Stecco G, et al. An integrated system for production scheduling in steelmaking and casting plants[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(2): 1112-1128.
- [25] Joly M, Moro L F L, Pinto J M. Planning and scheduling for petroleum refineries using mathematical programming[J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2002, 19(2): 207-228.
- [26] 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): 715-720.
(Lu Y M, Tian N Y, Xu A J, et al. Planning and scheduling of steelmaking-continuous casting based on integrated production[J]. *Information and Control*, 2011, 40(5): 715-720.)
- [27] 任宏德, 薛小燕. 复杂负载下数据缓冲区自适应调度方法仿真[J]. *计算机仿真*, 2020, 37(4): 380-384.
(Ren H D, Xue X Y. Simulation of adaptive scheduling method for data buffer under complex load[J]. *Computer Simulation*, 2020, 37(4): 380-384.)
- [28] 许壮源, 范文慧, 林廷宇, 等. 集束型装备生产线离散事件仿真方法研究[J]. *集成电路应用*, 2019, 36(6): 74-75.
(Xu Z Y, Fan W H, Lin T Y, et al. Study on discrete event simulation method for cluster equipment production line[J]. *Integrated Circuit Application*, 2019, 36(6): 74-75.)
- [29] 郑忠, 刘海玉, 高小强, 等. 炼钢-连铸生产计划调度一体化的仿真优化模型[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(3): 108-113.
(Zheng Z, Liu H Y, Gao X Q, et al. Optimal model on integrated production planning and scheduling of steelmaking and continuous casting process[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(3): 108-113.)
- [30] 李霄峰, 徐立云, 邵惠鹤, 等. 柔性炼钢连铸仿真调度系统及其关键技术[J]. *系统仿真学报*, 2002, 14(2): 207-211.
(Li X F, Xu L Y, Shao H H, et al. Flexible simulating and scheduling system for steel-making and continuous-casting process and critical problems[J]. *Journal of Systems Simulation*, 2002, 14(2): 207-211.)
- [31] 闫世昌, 李文宏. 基于Petri网与改进A*搜索算法的矿井机车调度优化[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(15): 5990-5996.
(Yan S C, Li W H. Optimization of mine locomotive scheduling based on petri net and improved a search algorithm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(15): 5990-5996.)
- [32] Arsovski S, Arsovski Z, Mirovic Z. The integrating role of simulation in modern manufacturing planning and scheduling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 55(1): 33-44.
- [33] 汪红兵, 徐安军, 姚琳, 等. 基于CPN炼钢连铸制造流程的建模与最优调度求解[J]. *北京科技大学学报*, 2010, 32(7): 938-945.
(Wang H B, Xu A J, Yao L, et al. Modeling of steelmaking continue casting manufacturing flow using colored petri nets and solution of optimized scheduling[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2010, 32(7): 938-945.)
- [34] 徐立云, 张春慨, 邵惠鹤. 基于Petri网的一种实时计划调度方法[J]. *上海交通大学学报*, 2001, 35(11): 1675-1678.
(Xu L Y, Zhang C K, Shao H H. An approach for planning and scheduling based on petri nets[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2001, 35(11): 1675-1678.)
- [35] Sreeramulu D, Sagar Y, Suman P, et al. Integration of process planning and scheduling of a manufacturing systems using petri nets and genetic algorithm[J]. *Indian Journal of Science & Technology*, 2016, 9(41): 1-8.
- [36] Chu Y F, You F Q. Integration of scheduling

- and dynamic optimization of batch processes under uncertainty: Two-stage stochastic programming approach and enhanced generalized benders decomposition algorithm[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(47): 16851-16869.
- [37] 田野, 董宏光, 邹熊, 等. 考虑需求不确定性的化工生产计划与调度集成[J]. *化工学报*, 2014, 65(9): 3552-3558.
(Tian Y, Dong H G, Zou X, et al. Chemical production planning and scheduling integration under demand uncertainty[J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(9): 3552-3558.)
- [38] 罗洪. 求解最小化总加权完工时间的差异工件批调度问题研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
(Luo H. Research on batch scheduling with non-identical jobs to minimizing total weighted completion time[D]. Hefei: Anhui university, 2020.)
- [39] 李铁克, 施灿涛. 冷轧生产批量计划与调度问题模型及算法[J]. *管理学报*, 2008, 5(1): 64-69.
(Li T K, Shi C T. Model and algorithm for lot sizing and scheduling problems of cold rolling production[J]. *Chinese Journal of Management*, 2008, 5(1): 64-69.)
- [40] Wang X P, Tang L X. Integrated of batching and scheduling for hot rolling production in the steel industry[J]. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 36(5/6): 431-441.
- [41] Liu X J, Ni Z H, Qiu X L. Application of ant colony optimization algorithm in integrated process planning and scheduling[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(1/2/3/4): 393-404.
- [42] Yu M R, Zhang Y J, Chen K, et al. Integration of process planning and scheduling using a hybrid GA/PSO algorithm[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(1/2/3/4): 583-592.
- [43] Patil R, Shukla N, Kirdena S. Simulation-based evaluation of an integrated planning and scheduling algorithm for maintenance projects[C]. *SMART Infrastructure Facility*. Trondheim: IEEE, 2016: 1-10.
- [44] 陆天, 王嘉珩, 夏裕东, 等. 自动引导车最优动态调度问题建模与仿真[J]. *计算机应用*, 2020, 40(S1): 28-31.
(Lu T, Wang J H, Xia Y D, et al. Modeling and simulation of RGV optimal dynamic scheduling problem[J]. *Journal of Computer Applications*, 2020, 40(S1): 28-31.)
- [45] 刘斯斌. 工业园区多能流系统动态分析与运行调度优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
(Liu S B. Dynamic analysis and operation scheduling optimization of multi-energy system in industrial park[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.)
- [46] Cui H, Luo X, Wang Y. Scheduling of steelmaking-continuous casting process using deflected surrogate Lagrangian relaxation approach and DC algorithm[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 140: 106271.
- [47] Grossmann I E, Heever S A V D, Harjunkoski I. Discrete optimization methods and their role in the integration of planning and scheduling[C]. *Chemical Engineering*. New York: Mcgraw Hill Incorporated Then Chemical Week Publishing LLC, 2001, 98: 1-29.
- [48] Baptiste P, Flamini M, Sourd F. Lagrangian bounds for just-in-time job-shop scheduling[J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(3): 906-915.
- [49] 蒋淑珺. 基于最优化的冶金生产批量计划及调度问题研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
(Jiang S J. Study on optimization-based methods for batching planning and scheduling problems in the metallurgical industry[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.)
- [50] 轩华, 王薛苑, 李冰. 带批和离散机柔性流水车间问题的混合异步次梯度优化的拉格朗日松弛算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(4): 1001-1010.
(Xuan H, Wang X Y, Li B. Lagrangian relaxation mixed with interleaved subgradient optimization for flexible flowshop problem with batch and discrete processors[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(4): 1001-1010.)
- [51] 黄辉, 马天牧, 郑秉霖, 等. 炼钢MES计划调度一体化[J]. *自动化仪表*, 2008(2): 9-12.
(Huang H, Ma T M, Zheng B L, et al. Integration of MES with planning & scheduling solutions[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2008(2): 9-12.)
- [52] Liu C Y, Chang S C. Scheduling flexible flow shop with sequence-dependent setup effects[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, 16(4): 408-419.
- [53] Tang L X, Xuan H. Lagrangian relaxation algorithms for real-time hybrid flowshop scheduling with finite intermediate buffers[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2006, 57(3): 316-324.
- [54] Xuan H, Tang L X. Scheduling a hybrid flowshop with batch production at the last stage[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(9): 2718-2733.
- [55] Li Z K, Ierapetritou M G. A new methodology for integrated planning and scheduling using multi-level optimization[C]. *Philadelphia*. New York: AICHE Annual Meeting, 2008: 150-168.
- [56] Knudsen B R, Grossmann I E, Foss B, et al. Lagrangian relaxation based decomposition for well scheduling in shale-gas systems[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2014, 63: 234-249.
- [57] 陈浩勋. Job shop调度的序列拉格朗日松弛法[J]. *控制理论与应用*, 1995, 12(6): 752-757.
(Chen H X. A sequential lagrangian relaxation approach to job shop scheduling[J]. *Control Theory & Applications*, 1995, 12(6): 752-757.)
- [58] Chen H, Chu C, Proth J M. An improvement of the Lagrangian relaxation approach for jobshop scheduling: A dynamic programming method[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(5): 786-795.
- [59] Luh P B, Zhao X, Wang Y, et al. Lagrangian relaxation neural networks for job shop scheduling[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, 16(1): 78-88.

- [60] 冯汉平, 管晓宏, 何踊跃. 一种获得电力系统发电调度可行解的系统方法[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(2): 67-72.
(Feng H P, Guan X H, He Y Y. A systematic method for obtaining feasible hydrothermal generation scheduling[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(2): 67-72.)
- [61] Munoz E, Capon-Garcia E, Lainez J M, et al. Supply chain planning and scheduling integration using Lagrangian decomposition in a knowledge management environment[J]. Computers and Chemical Engineering, 2015, 72: 52-67.
- [62] Nesterov Y. Barrier subgradient method[J]. Mathematical Programming, 2011, 127(1): 31-56.
- [63] Bertsekas D P. Incremental gradient, subgradient, and proximal methods for convex optimization: A survey[M]. Cambridge: MIT Press, 2011: 4.
- [64] Gustavsson E, Patriksson M, Strömberg A B. Primal convergence from dual subgradient methods for convex optimization[J]. Mathematical Programming, 2014, 150(2): 365-390.
- [65] Mao K, Pan Q K, Pang X, et al. An effective Lagrangian relaxation approach for rescheduling a steelmaking-continuous casting process[J]. Control Engineering Practice, 2014, 30(9): 67-77.
- [66] Mao K, Pan Q K, Pang X, et al. A novel Lagrangian relaxation approach for a hybrid flowshop scheduling problem in the steelmaking-continuous casting process[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 236(1): 51-60.
- [67] 韩大勇, 唐秋华, 张利平, 等. 基于拉格朗日下界求解的炼钢-连铸生产调度方法[J]. 武汉科技大学学报, 2016, 39(5): 353-360.
(Han D Y, Tang Q H, Zhang L P, et al. Steelmaking-continuous casting production scheduling method based on solving Lagrangian lower bound[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2016, 39(5): 353-360.)
- [68] 黎蕾. 增广拉格朗日函数的两种分解方法比较[J]. 重庆科技学院学报, 2012, 14(6): 190-193.
(Li L. Comparison of two decomposition methods of augmented Lagrangian function[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology, 2012, 14(6): 190-193.)
- [69] 覃亚梅, 刘倩. 修正的增广拉格朗日算法的收敛性[J]. 周口师范学院学报, 2013, 30(5): 34-38.
(Qin Y M, Liu Q. Convergence of modified augmented Lagrangian algorithm[J]. Journal of Zhoukou Normal University, 2013, 30(5): 34-38.)
- [70] 管晓宏, 翟桥柱. 基于拉氏松弛的生产系统序贯调整工艺方法[P]. 中国: CN02114410, 2004-09-15.
- [71] Bragin M A, Luh P B, Yan J H, et al. An efficient approach for solving mixed-integer programming problems under the monotonic condition[J]. Journal of Control and Decision, 2016, 3(1): 44-67.
- [72] Bragin M A, Luh P B. Distributed and asynchronous unit commitment and economic dispatch[C]. Power and Energy Society General Meeting. Piscataway: IEEE, 2017: 1-5.
- [73] Sun X R, Luh P B, Bragin M A, et al. An efficient approach for solving mixed-integer programming problems under the monotonic condition[C]. Transactions on Power Systems. IEEE, 2018: 1.
- [74] 熊锐, 陈浩勋, 胡保生. 一种生产计划与车间调度的集成模型及其拉氏松弛求解法[J]. 西安电子科技大学学报, 1996, 23(4): 509-516.
(Xiong R, Chen H X, Hu B S. An integrated model of production planning and shop scheduling and its Lagrangian relaxation solution method[J]. Journal of Xidian University, 1996, 23(4): 509-516.)
- [75] 马天牧. 炼钢-连铸批量计划智能优化编制方法[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
(Ma T M. Intelligent optimization methods for steelmaking-continuous casting batch planning[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.)

作者简介

孙亮亮(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 从事光纤传感技术、结构健康监测等研究, E-mail: swinburnsun@163.com;

沙淑雅(1997—), 女, 硕士生, 从事光纤传感技术、结构健康监测等研究, E-mail: 13610809353@163.com;

屈秋霞(1988—), 女, 讲师, 博士生, 从事基于自适应动态规划与神经网络的非线性系统优化控制、跟踪控制等研究, E-mail: quqiu Xia@sjzu.edu.cn;

英宇(1983—), 男, 副教授, 博士生, 从事光纤传感技术、结构健康监测等研究, E-mail: yingyu0427@163.com;

于淼(1987—), 女, 副教授, 博士生, 从事服务运作管理、排队系统优化调度等研究, E-mail: yumiao1213@126.com;

王娟(1984—), 女, 副教授, 博士生, 从事多模态切换控制、自适应神经网络等研究, E-mail: wangjuanneu@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)