

· 资助成果 ·

钢铁生产线的多工序实时智能优化调度理论、方法及应用

宋士吉^{1*} 张鹏宇¹ 张玉利² 张瑞³
丁见亚¹ 牛晟盛¹ 常志琦¹ 吴澄¹

1. 清华大学 自动化系, 北京 100084
2. 北京理工大学 管理与经济学院, 北京 100081
3. 厦门理工学院 经济与管理学院, 厦门 361024

[摘要] 本文基于国家自然科学基金重点项目“钢铁生产线的多工序实时智能优化调度理论、方法及应用(U1660202)”, 针对钢铁企业生产过程中“炼铁高炉向炼钢炉的铁水输送匹配调度”和“炼钢—连铸—热轧过程动态调度”两个关键技术研究进展进行综述, 包括铁钢对应、铁水机车调度、组炉组浇、炼钢连铸、连铸热轧、加热炉群调度等生产工序随机环境下鲁棒优化模型的建立及转化方法、混合整数规划模型智能求解算法与智能决策软件模块开发等前沿领域创新性研究成果。本项目发表了一系列高水平论文, 获得多项发明专利授权及科技奖项, 培养了一批钢铁调度专业人才。项目研究成果已应用于新余钢铁集团生产线, 为提升生产方案质量, 节能减排提供了示范性的支持作用。

[关键词] 钢铁生产线; 节能降耗技术指标; 多工序优化调度; 随机鲁棒优化模型; 实时智能优化方法

钢铁制造业具有工序复杂, 工艺流程长, 生产周期长, 工序间强关联性, 物流配送多交叉等特点。铁矿石原料需经由烧结、高炉炼铁、炼钢、连铸、热轧、棒线、厚板、冷轧、钢管、型材加工等几十道工序, 方可完成其制造过程。与其他制造业行业相比, 钢铁生产行业具有加工制造过程复杂、能耗成本高、涉及多种能源介质输送配送、需要实时调整等特点。生产过程包含实时连续性约束, 同时也伴有离散性的特征, 这极大地提升了优化调度问题的难度。

我国的钢铁企业, 在钢铁加工的高端产品生产加工工艺、质量掌控水平、经营管理理念与管理方法等方面, 与国际先进水平还存在着较大的差距, 且绝大多数钢铁企业都存在资源、能源耗费高, 排污现象严重等问题。针对上述问题, 本项目针对钢铁企业复杂生产过程中亟待解决的核心技术难题, 面向“炼



宋士吉 清华大学自动化系长聘教授、教育部“长江学者奖励计划”特聘教授、博士生导师, 清华大学工业智能与系统研究所所长。长期从事复杂生产系统优化调度、鲁棒优化建模分析与求解、机器学习等模型算法研究, 发表国内外著名期刊论文 240 余篇, 其中收入 SCI 检索论文 140 余篇, 论文在 WOS 中被引用超过 4500 次。已授权国家发明专利近 20 项。担任 *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 等 4 个国际期刊编委, 曾任《中国科学—信息科学》与《自动化学报》等国内期刊编委。主持国家自然科学基金重点项目、面上项目、科技部新一代人工智能重大基础前沿项目、国家自然科学基金重大科学仪器研制项目、科技部先进制造领域 863 项目等 30 余项。

铁高炉向炼钢炉的铁水输送匹配调度”和“炼钢—连铸—热轧过程动态调度”两个钢铁生产过程的关键

收稿日期: 2021-06-22; 修回日期: 2021-09-01

* 通信作者, Email: shijis@mail.tsinghua.edu.cn

本文得到国家自然科学基金项目(U1660202)的资助。

技术开展研究,给出智能优化解决方案并进行示范应用。这对于提高钢铁企业对其生产过程的管控能力与产品质量,实现节能降耗并有效降低生产成本具有重要的学术意义与应用价值。

1 研究背景

钢铁企业生产流程是由一系列的物理、化学处理阶段形成的复杂过程,包括炼铁区域、炼钢区域、热轧区域和冷轧区域。项目以液态连续性生产方式为主的炼铁和炼钢区域为主要研究背景,铁钢区是整个钢铁企业内部生产线的源头,铁钢区生产运作管理的核心内容是生产计划与调度。按照生产物流的工序和功能特点,可将生产计划与调度分为三个层面:批量计划、生产调度、物流调度。

对铁钢区的生产过程进行实时优化调度,可确保铁钢区各工序稳定均衡生产,为热轧、冷轧工序及时提供生产原材料,提高整个钢铁生产线的效率。项目研究钢铁生产过程中面向节能的“炼铁高炉向炼钢炉的铁水输送匹配调度”和“炼钢—连铸—热轧过程动态调度”两个关键技术难题,给出复杂钢铁生产线的多工序智能优化与决策策略,为钢铁企业制造执行系统亟待解决的实时智能优化与决策等技术难题提供有效解决方案。本项目研究工作主要解决4个科学问题,包括6项研究内容,具体情况如下:

(1) 炼铁高炉向炼钢炉的铁水输送匹配调度问题研究

铁水输送匹配调度问题需要在铁区内连续的、无法按计划出铁的生产模式与钢区内按批次、按时、按需生产的需求模式之间建立对应关系。主要研究内容是:建立高炉产铁和炼钢需求的时间对应,鱼雷罐车与铁水之间的重量对应,铁水与钢水之间的成分对应,铁水倒罐后,铁水温度符合炼钢炉次的入炉铁水温度要求。即根据生产过程机器实时监视的物流和设备状态等信息,确定铁水的工艺路线和在各工序的时间表。

(2) 炼钢—连铸生产过程的动态调度问题研究

炼钢—连铸是在高温下由液态钢水向固态板坯的转化过程,是一个连续型与离散型混杂的高温生产过程。炼钢—连铸生产调度过程的建模需要在已有炉次计划与浇次计划的基础上考虑转炉,精炼炉和连铸机等主设备因素,钢包和行车等辅助设备,设备加工时间和运输时间以及工艺约束。主要研究内容是:首先编制炼钢—连铸生产过程的炉次计划与浇次计划,在已知炉次计划与浇次计划的基础上,开

展随机环境下炼钢—连铸过程动态调度问题研究。

(3) 连铸—热轧生产过程的动态调度问题研究

连铸—热轧生产过程是继炼钢—连铸生产过程后的一个高能离散生产过程。根据板坯温度和连铸机将铸坯提供给热轧机的方式,连铸和热轧工序可分为四种衔接方式:直接轧制、直接热坯装炉轧制、热坯装炉轧制与冷坯装炉轧制。主要研究内容包括“随机环境下连铸—热轧生产调度问题建模”和“随机环境下加热炉的装炉计划问题建模”两个方面。

(4) 随机鲁棒优化模型的分析与求解方法研究

理论上给出基于不同类型分布函数集的模型等价转换的理论与方法,将模型等价地转换为凸锥上的混合整数规划数学模型。并对转化后的混合整数规划模型给出精确求解算法或者高效、可靠的近似求解算法。

(5) 混合整数规划问题求解算法

建立钢铁生产线关键工序如炼钢—连铸和连铸—热轧过程的混合整数规划模型,给出模型的精确求解算法或者高效、智能近似求解算法。

(6) 项目理论成果的应用验证研究

项目结合新余钢厂目前使用的生产制造执行系统(MES)的实验条件与开发环境,开发基于钢铁节能调度算法的决策支持系统软件,对项目理论研究成果“铁水输送过程匹配调度”和“炼钢—连铸—热轧过程动态调度”的主要模型及算法编写软件程序,作为企业生产线生产制造执行系统(MES)的核心模块集成到该系统中,并以新余钢铁厂铁水、钢水和板坯运输过程动态调度问题的实际运行数据实施应用验证。

该重点支持项目负责人由清华大学自动化系宋士吉教授担任。相关研究团队通过实地调研,理论分析等方式,针对上述6项内容开展了一系列面向钢铁生产线的多工序实时智能优化调度理论、方法及应用的研究。

2 研究进展与成果

2.1 炼铁高炉向炼钢炉的铁水输送匹配调度问题研究

2.1.1 分布集鲁棒调度优化在铁钢对应问题中的应用

铁水运输是衔接炼铁区域与炼钢区域的关键环节,其调度水平直接影响钢铁的品质以及钢铁生产的效率与能耗。作为一类特殊的物流调度系统,铁

水运输系统具有以下特点:炼铁端需满足高炉出铁安全性;炼钢端需保证连铸生产连续性;运输过程中需进行铁水预处理作业以满足铁水在进入炼钢炉前的硫、硅、磷、锰等成分上的要求;在运输设备上,混铁车等运输载体数量有限,空罐、重罐将循环使用,而且生产工艺对罐内温度有较严格的要求。此外在实际铁水运输过程中存在多种随机不确定性,如随机波动的铁水成分、预处理时间、运输时间等因素。

项目针对随机环境下铁水供需能力动态匹配问题首先在不考虑随机性的情况下建立了包含铁水与炉次对应的离散决策变量与炉次冶炼完工时间的连续决策变量的混合整数规划模型。在确定性模型的基础上,进一步考虑铁水预处理时间不确定的情况,基于机会约束^[1]方法构建相应的分布集铁钢对应模型。利用已有的机会约束表示方法及项目在鲁棒优化模型求解算法相关研究中得到的 CVaR 相关结论,将机会约束等价转化为两类线性约束进行处理,最终将模型转化为混合整数线性规划模型进行处理。

2.1.2 释放时间不确定的鲁棒铁水机车调度问题建模与求解

针对钢铁调度过程中铁水机车在预处理站的调度问题,项目研究了机车释放时间不确定情况下的,加工工序排序方法,使得机车的最大等待时间最小。释放时间不确定的鲁棒铁水机车调度问题可以写作带有释放时间不确定性的鲁棒单机调度问题。项目首先建立了确定性的最小化最大等待时间单机调度问题的 0—1 整数规划模型,进而通过将释放时间视为不确定参数,建立鲁棒单机调度模型。项目对鲁棒模型特性进行分析,提出了将该鲁棒模型转化为等价可解模型的方法,并针对转化后的等价问题设计了改进约束生成算法^[2]。

2.1.3 分布式鲁棒最短路径算法

最短路径算法^[3]是铁水机车实时调度问题中的一项核心内容,在随机环境下寻找鲁棒的两点之间最短路径可以为铁水机车路线规划提供有力的支持。本项目分别采用基于 Wasserstein 距离^[4]与基于矩信息^[5]的分布函数集来构建随机鲁棒优化模型,并设计相应的模型转化与求解算法对其进行求解。

基于 Wasserstein 距离的分布式鲁棒最短路径算法^[6]:项目针对铁水机车实时调度问题中的核心内容路径规划问题,将旅行时间视为随机变量,通过

约束旅行时间随机变量的分布与经验分布之间的 Wasserstein 距离定义分布函数集,从而构建分布鲁棒优化模型。项目提出了一种基于拉格朗日对偶的模型转化方法,可将该问题转化为混合整数规划模型,并进行求解。

基于矩信息的分布式鲁棒最短路径算法^[7]:针对随机环境下的路径规划问题,项目给出了一种利用历史数据构造基于矩的概率分布函数集的方法,建立了基于矩信息的分布式鲁棒最短路径模型。项目通过对偶估计方法和原始估计方法得到原问题上界与下界的估计方法,从而对模型进行求解。

2.2 炼钢—连铸生产过程的动态调度问题研究

铁矿石等原材料经过炼铁高炉—炼钢高炉后以钢水的形态进入连铸机后被铸造成钢坯,即炼钢—连铸生产环节。此环节主要包括组炉—组浇与炼钢—连铸调度问题两个部分。

2.2.1 组炉—组浇环节

组炉—组浇流程如图 1 所示,需要根据工厂产销计划中待生产的板坯信息,编制相应的炉次计划与浇次计划。

炉次计划的编制:项目针对炉次计划的编制问题,首先根据炼钢工艺的要求、构成同一炉次的合同特征要求,利用聚类方法对可编制在同一炉次的合同进行初始分类;进而以合同之间的交货期差异、成材率、生产成本以及无委材比例为优化目标,以每个炉次的最低冶炼炉容要求为约束,建立混合整数线性规划模型,利用动态规划等算法解出最终的炉次方案。

浇次计划的编制:项目针对浇次计划的编制问题,以总成本(包括相邻炉次的钢级差异、宽度差异以及交货期差异等原因导致的额外成本,一个浇次的中间包和结晶器等固定成本)最小为优化目标,以相邻炉次钢级差、板坯宽度差、板坯厚度相等和中间包使用寿命为约束,建立混合整数规划模型,利用动态规划等算法解出最终的浇次方案。

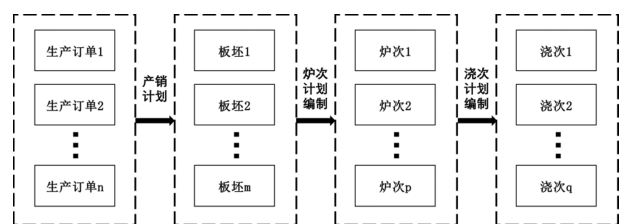


图 1 组炉—组浇流程示意图

2.2.2 炼钢—连铸环节

炼钢—连铸环节需要确定组炉—组浇之后的炉次在连铸机上的进行浇铸的先后顺序与开始浇铸时间。炼钢—连铸生产调度的具体定义为在保证连续浇铸的前提下、以炉次为最小计划单位,在某一给定的评价指标(如最小等待时间、最小提前/拖期费用或最小完成时间)最优的前提下的一类多工件、多阶段、多并行机的混合车间流水调度问题。其最终结果是确定在何时、何种设备上以何种顺序安排钢水从转炉到精炼炉、再到连铸机的生产过程。本项目研究过程中将加工时间视为不确定因素,采用机会约束的形式建立了如下两种鲁棒优化模型并提出了相应的转化与求解算法。

基于分布函数集的鲁棒机会约束模型研究^[8]:项目为炼钢—连铸工艺建立了基于鲁棒机会约束的炼钢连铸生产调度模型。研究考虑加工时间的不确定性但属于一个支撑集、一阶矩和二阶矩已知的分布函数集,建立了鲁棒独立约束模型与鲁棒联合机会约束模型,并提出了针对两种鲁棒模型的转化与求解方法。计算实验证明该模型与算法相比于传统静态模型可以有效提升调度方案的抗干扰能力。

基于分布函数集的改进多维独立鲁棒机会约束模型研究^[9]:项目通过进一步对实际生产过程进行调研,提出了一种改进的鲁棒炼钢—连铸模型。该模型中仅决策每个浇次的开工时间,每一个炉次的开工时间就等于所处浇次的开浇时间加上它之前炉次的实际加工时间。项目针对该模型提出了一种求解包含多维随机变量的鲁棒独立机会约束模型的近似转化方法,并为转化后的问题设计了一种包含新型邻域结构、禁忌表设计和加速策略的禁忌搜索算法。

2.3 连铸—热轧生产过程的动态调度问题研究

连铸—热轧生产过程是继炼钢—连铸生产过程后的一个高能耗离散生产过程,热轧板带的工艺流程如图2所示。根据板坯温度和连铸机将铸坯提供给热轧机的方式,连铸和热轧工序可分为四种衔接方式:直接轧制、直接热坯装炉轧制、热坯装炉轧制

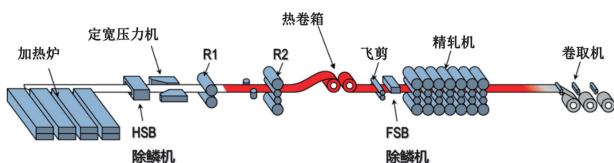


图2 热轧板带生产工艺流程图示意图

和冷坯装炉轧制。因此连铸—热轧生产过程调度方案的设计涉及到加热炉群调度与热轧生产调度两个方面。本项目针对上述两个关键技术问题及生产过程中可能具有的不确定性进行了“加热炉群节能调度模型”与“鲁棒热轧生产调度相关的研究”,具体内容如下。

2.3.1 综合考虑上下游实际加工状态的加热炉群节能调度模型

加热炉的装炉计划的主要任务是按照已编制好的热轧预计划板坯顺序的要求,即多个加热炉的板坯综合出炉顺序,将多来源的板坯分配到多个加热炉中,确定板坯在各加热炉中的顺序。在保证各板坯出炉温度、板坯加热质量的前提下,使得板坯的出炉节奏和轧制节奏相匹配,减少热能损耗,减少板坯过烧等质量问题。

项目综合考虑上下游实际加工状态,针对加热炉的装炉计划建模问题,建立了加热炉群节能调度模型。模型包括了板坯驻炉时长、加热炉额定容量及轧制顺序等约束,并综合考虑当前驻炉的、准备入炉(辊道上)的板坯以及板坯库和上游供货情况,以最大化生产质量和最小化能耗为优化目标,建立了加热炉装炉计划的混合整数规划模型,并在后续研究中设计了变邻域算法对其进行求解。

2.3.2 基于局部搜索增强蚁群优化算法的鲁棒热轧生产调度^[10]

连铸—热轧生产调度问题需要根据多种类型板坯的到达时间、加工时间、规格属性、合同交货期、装炉方式以及表面质量等要求,以惩罚费用最小或能量损失最小为目标,编制成若干个具有“双梯形结构”的轧制单元,确定板坯被分配到哪一个轧制单元、哪一条热轧产线以及板坯的加工顺序和开始加工时间。

在连铸—热轧生产调度问题方面,项目将每块板坯的轧制时间视为随机变量,定义加工时间的不确定集。考虑传统热轧工艺约束,如主体材板坯宽度递减、每个轧制单元的总长度限制等,并根据节能需要为每块板坯指定一个最晚开工时间。要求所生成的调度方案在不确定集覆盖的加工时间波动范围内都必须满足所有基本约束和最晚开工时间约束。在此基础上项目建立了鲁棒热轧调度模型并提出了一种基于局部搜索的增强蚁群优化算法^[11]对上述模型进行求解。计算实验证明该算法在大规模问题上相比较于其他算法显示出了明显的优势。

2.4 随机鲁棒优化模型的分析与求解方法研究

随机鲁棒优化技术假定不确定性参数属于某一给定的不确定集或者属于某一给定的随机变量分布函数集,在保证约束鲁棒可行的前提下,最优化鲁棒目标函数值。Soyster^[12]最早研究了鲁棒线性规划问题,但直到1998年EI Ghaoui等人^[13]和Ben-Tal等人^[14]提出鲁棒正定规划理论,鲁棒优化理论才迅速发展起来,至今已经成为发展极快的优化理论方法,目前已经在工业各领域得到广泛应用。鲁棒优化模型可以分为基于不确定性集的鲁棒优化模型^[15-18]和基于分布函数集的随机鲁棒优化模型^[19, 20]等。

随机鲁棒优化模型的一般形式如下:

$$\min_{\theta \in I} \max_{X \in \Pi} E[f(\theta, X)] \quad (1)$$

其中, I 表示不确定参数 θ 的可行域, Π 表示分布函数统计特性已知的随机变量 X 的集合。

解决随机优化问题,往往由于无法准确得到随机变量的分布函数,而使随机理论问题求解陷入困境。利用随机采样手段进行分析虽已成为研究随机优化问题的一个有效手段,然而缺点是随机采样分析计算的统计结果与现实发生的事件存在较大的误差。随机鲁棒优化模型可以很好克服这些缺陷,其主要优势在于:

- (1) 模型不需要已知不确定性随机变量的精确分布信息;
- (2) 模型的最优解依赖于严格的理论分析基础,优化计算结果的可靠性高;
- (3) 模型一般可等价转换为可有效计算的凸锥规划模型。

本项目针对为钢铁企业关键生产线建立的基于分布集的随机鲁棒优化模型展开研究,取得了如下五个方面的研究成果:

以总拖期为性能指标的单机随机鲁棒调度的模型分解技术与智能求解方法^[21]:该研究考虑加工时间为随机变量的鲁棒单机调度问题,设计基于矩信息的分布函数集从而建立随机鲁棒优化模型。通过上界近似方法,将该模型转化为MI-SOCP问题并设计分支定界算法与集束搜索算法对其进行求解。

以总流经时间为性能指标的并行机随机鲁棒调度的模型分解技术与智能求解方法^[22]:该研究进一步考虑加工时间为随机变量的并行机调度问题,在包含矩信息不确定性的情况下建立随机鲁棒优化模型。通过将内层最大化问题转化为凸优化问题并给

出该问题的最优解,将该模型转化为了易求解的问题。

具有风险厌恶特性的随机鲁棒模型转化方法^[23]:此部分研究内容针对具有参数不确定性的调度问题,研究基于分布函数集的鲁棒建模与模型转化方法。此研究中采用条件风险值(CVaR)作为分布集鲁棒模型的随机度量,构建调度问题的通用分布集鲁棒建模框架,并对模型进行深入分析与可解性转化,最终形成此类问题的通用分布集鲁棒建模与转化方法。

混合整数二阶锥规划问题的求解算法:项目研究了针对混合整数二阶锥规划问题的精确求解算法框架。首先基于对问题结构的分析,在保证最优等价性的前提下通过引入辅助变量松弛原问题的二阶锥部分,进而给出求解松弛问题的整体算法框架并严格证明算法的全局最优性。

针对处理不确定加工时间的 β -鲁棒调度模型的求解方法^[24]: β -鲁棒机器调度是一种规避不确定性的有效方法。针对现有 β -鲁棒调度模型依赖于不确定参数的正态性假设,且现有的求解方法均是基于分支定界,求解效率差等问题,本项目提出了一种处理不确定加工时间的分布式鲁棒调度(DRS)模型,同时设计了一种基于参数搜索的通用精确算法。

2.5 混合整数规划问题求解算法

在对钢铁生产关键工艺,如炼钢—连铸,连铸—热轧进行建模分析的过程中,项目建立了一系列混合整数规划模型以辅助得到高效、智能的调度方案。此外项目中建立的鲁棒优化模型通常会转化成为混合整数规划模型(Mixed Integer Programming, MIP)进行求解。MIP问题通常可使用商业求解器如CPLEX内置的分支定界^[25]等算法求得精确解,但由于MIP问题本身是NP难的性质,此方法难以在可接受的时间内得到大规模钢铁生产调度问题的最优解。因此项目针对钢铁生产流程中的典型MIP问题设计了多种智能求解算法,可在短时间内搜索到近似最优解。

2.5.1 综合考虑上下游实际加工状态的加热炉群节能调度模型变邻域求解方法

项目针对建立的“综合考虑上下游实际加工状态的加热炉群节能模型”提出了一种变邻域求解方法。项目在研究过程中基于模型分解与邻域结构分析的思路,将原问题转化为主问题与子问题的迭代求解。主问题决策板坯在加热炉上的分配方案,采

用变邻域搜索方法求解。子问题考虑给定板坯加热炉分配方案下的具体入炉、出炉时刻决策问题,采用线性规划求解。实验结果证明项目所设计的变邻域算法^[26]能够近似最优求解所有问题算例,且求解200板坯的小规模问题,通常可在100秒以内完成求解。

2.5.2 一种融合局部搜索的多目标粒子群算法 MOPSO-LS^[27]

项目考虑加工过程的总能耗,针对加工时间具有退化效应的制造过程JIT与节能双目标单机调度问题,提出了一种融合局部搜索的多目标粒子群算法MOPSO-LS,在迭代过程中利用k-opt邻域操作算子对选定个体进行改进。通过实验设计方法测试算法主要参数对优化性能的影响并决定其最佳取值。数值计算实验和结果(如图3所示)对比表明,所提算法显著优于不带局部搜索的多目标粒子群算法和通用多目标进化算法NSGA-II^[28]。

2.5.3 一种带有局部搜索功能的改进粒子群优化算法 PSO-LS^[29]

项目针对节能的单机调度问题,根据实际用电限制,将生产周期划分为长度相同(等于T)的时间窗口,规定每个时间窗口的能耗上限,在此约束下最小化单机调度的总加权拖期。由于能耗限制且不允许工件加工中断,加工过程可能出现等待时间,如

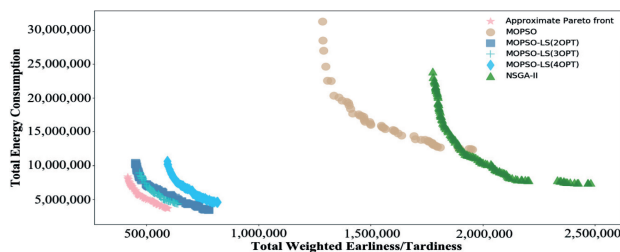


图3 MOPSO-LS算法(不同邻域)与对照算法求解50工件算例的结果

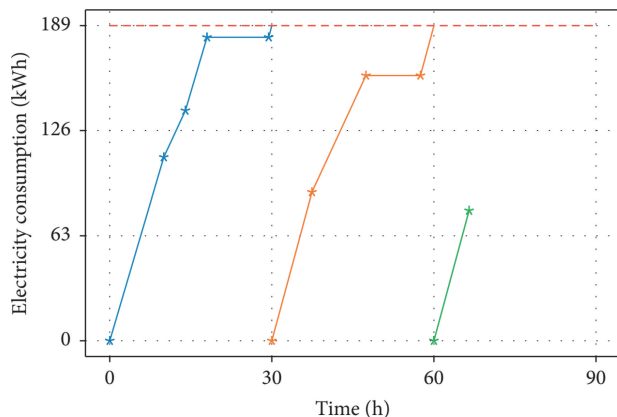


图4 时间窗口能耗约束下的生产调度示意图

图4所示。项目针对这一特点设计了有效的约束处理机制以获得可行解,并在此基础上提出一种带有局部搜索功能的改进粒子群^[30]优化算法PSO-LS,大量数值计算实验表明,此算法显著优于对照算法。

2.6 项目理论成果的应用研究

将项目提出的典型钢铁生产过程的相关数学模型与算法,采用python语言编制成为决策支持系统软件模块,与新余钢铁集团复杂生产过程中的制造执行系统(MES)进行嵌入式集成。该软件主要面向新余钢铁集团亟需智能调度方案的“组炉—组浇”,“炼钢—连铸”以及“连铸—热轧”三个钢铁生产关键环节,通过与原MES系统进行实时数据的交互为其提供稳定、高效和智能化的优化调度运行方案。

软件总体架构分为三个模块:“MES系统生产数据采集与调度方案可视化模块”“Web数据嵌入模块”和“核心调度算法模块”,如图5所示。“MES系统生产数据采集与调度方案可视化模块”主要由新余钢铁集团MES系统部分结合新添加数据接口构成。该模块可将“组炉—组浇”“炼钢—连铸”及“连铸—热轧”相关合同及机组信息导出至“Web数据嵌入模块”触发调度算法进行计算。“Web数据嵌入模块”介于新余钢铁集团MES系统与“核心调度算法模块”之间,负责通过web服务与MES系统进行数据交互。“核心调度算法模块”包含“组炉—组浇”“炼钢—连铸”和“连铸—热轧”三个算法部分。“组炉—组浇”部分包含了针对炉次与浇次计划的混合整数规划模型的动态规划算法;“炼钢—连铸”部

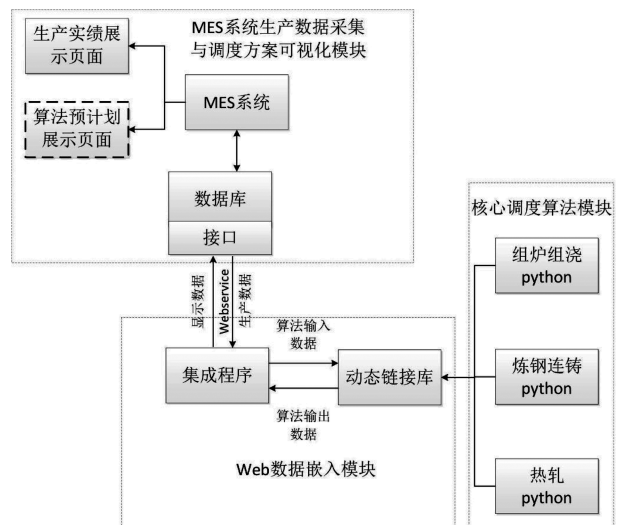


图5 算法与新余钢铁MES系统集成总体框架示意图

分包含了静态炼钢连铸模型与基于机会约束的鲁棒优化模型两种方法,分别针对生产平稳时期与波动较大时期提供传统静态调度方案与鲁棒抗干扰调度方案。“连铸—热轧”部分针对连铸—热轧加工环节使用智能启发式算法为实际生产提供调度方案。

实际生产数据验证结果表明本项目针对钢铁生产线建立的数学模型与理论方法应用于新余钢铁集团生产线后具有降本增效的效果:提升炼钢连铸生产效率 1.2%,降低能耗 1.3%,降低非计划钢坯 0.17%;提升连铸热轧生产效率 1.5%,降低能耗 2.1%,提高成材率 0.14%。

3 成果总结

清华大学宋士吉教授课题组与厦门理工学院张瑞教授合作,针对钢铁生产线的多工序实时智能优化调度问题,在理论、方法与应用方面展开了深入系统研究工作,项目研究成果累计发表国内、外权威期刊(包括 *IEEE Transactions* 期刊论文 5 篇, *EJOR* 期刊论文 2 篇,管理科学与工程领域国际权威期刊 *Transportation Part B* 论文 1 篇, *INFORMS Journal of Computing* 论文 1 篇,其余国内外著名 SCI 论文 15 篇)与知名国际 EI 会议论文共计 32 篇,获得已授权国家发明专利 5 项,已受理发明专利 2 项,项目负责人早期研究成果获得 2018 年吴文俊人工智能学会自然科学一等奖“不确定非线性系统建模理论与智能学习方法”,排序 1。

参与项目研究的成员包括清华大学团队、厦门理工学院团队参加随机鲁棒优化、车间生产线调度等相关领域的国内外学术会议(如 *IEEE ICCA*, *IEEE SSCI*, *IEEE IEEM* 等)20 人次以上,并邀请了多名国内外优化调度领域专家汇报学术工作。项目进行期间共培养博士生 12 名,出站博士后 2 名与已毕业硕士生 4 名。

项目在研究中产生的相关论文、专利中的钢铁生产线鲁棒优化模型与求解算法以 MES 系统集成模块的形式应用于新余钢铁集团有限公司“组炉—组浇”“炼钢—连铸”与“连铸—热轧”三条钢铁生产线,并为相应生产线提供了效率更高,求解更快的高质量智能调度方案。在后续的研究中,项目将进一步对算法进行拓展,将现有 MES 智能决策模块拓展至宝钢、首钢等钢铁生产企业、更多类型的钢铁生产线中。该软件具有广泛的市场需求与推广应用价值,可产生极大的经济与社会效益。

4 结论与展望

钢铁制造是我国重要支柱性产业,钢铁生产线的调度方案对于工厂提高生产效率并降低成本有着重要意义。目前我国部分钢铁企业缺乏科学有效的钢铁生产线调度方案。这一方面是由于钢铁生产线的工序繁多,流程复杂,开发相关调度算法理论性强、难度大。另一方面则是基于常规静态调度理论得到的调度策略在受到实际生产过程中的干扰后,其性能出现明显下降。

本项目针对钢铁企业复杂生产过程中制造执行系统(MES)亟待解决的核心技术难题,面向“炼铁高炉向炼钢炉的铁水输送匹配调度”和“炼钢—连铸—热轧过程动态调度”两个钢铁生产的关键技术开展研究。针对炼铁高炉向炼钢炉的铁水输送匹配调度问题、炼钢—连铸生产过程的动态调度问题和连铸—热轧生产过程的动态调度问题,考察企业实际运行情况,将上述 3 个科学问题归纳为 6 项研究内容分别进行建模分析与求解,包括炼铁高炉向炼钢炉的铁水输送匹配调度问题研究、炼钢—连铸生产过程的动态调度问题研究、连铸—热轧生产过程的动态调度问题研究、随机鲁棒优化模型的分析与求解方法研究、混合整数规划问题求解算法研究与项目理论成果的应用验证研究。

项目在上述理论工作的基础上,将针对工厂生产线实际生产场景所建立的数学模型与求解算法编制成为决策支持系统软件。该软件面向新余钢铁集团“组炉—组浇”“炼钢—连铸”与“连铸—热轧”三个关键钢铁生产线,通过作为核心模块嵌入式集成至制造执行系统(MES),获取生产线实时生产数据,从而通过多种典型算法的智能分析与计算为相应生产线提供高效可靠且抗干扰的调度方案,并形成完全自主知识产权。项目成果对于提升我国钢铁企业生产效率、降低生产成本,实现节能减排具有重要的示范应用及推广价值。

参 考 文 献

- [1] Bruce LM, Harvey MW. Chance-constrained programming with joint constraints. *Operations Research*. 1965, 13(6): 930—945.
- [2] Fan Y, Song SJ, Zhang YL, et al. Robust single machine scheduling with uncertain release times for minimising the maximum waiting time. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(16): 5576—5592.
- [3] Yu G, Yang J, On the Robust Shortest Path Problem, *Computers & operations research*, 1998, 25(6): 457—468.

- [4] Vallender SS. Calculation of the Wasserstein distance between probability distributions on the line. *Theory of Probability & Its Applications*. 1974, 18(4): 784—786.
- [5] Delage E, Ye Y. Distributionally robust optimization under moment uncertainty with application to data-driven problems. *Operations research*. 2010, 58(3): 595—612.
- [6] Wang ZL, You KY, Song SJ, et al. Wasserstein distributionally robust shortest path problem. *European Journal of Operational Research*, 2020, 284(1): 31—43.
- [7] Zhang, YL, Zuo J, Shen M, et al. Lagrangian relaxation for the reliable shortest path problem with correlated link travel times. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 104: 501—521.
- [8] Niu S, Song S, Ding JY. A distributionally robust chance constrained model to hedge against uncertainty in steelmaking-continuous casting production process// 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM): IEEE, 2018: 411—416.
- [9] Niu S, Song S, Chiong R. A Distributionally Robust Scheduling Approach for Uncertain Steelmaking and Continuous Casting Processes// *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. doi: 10.1109/TSMC.2021.3079133.
- [10] Zhang R, Song SJ, Cheng W, et al. Robust scheduling of hot rolling production by local search enhanced ant colony optimization algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 16(4): 2809—2819.
- [11] Dorigo M, Birattari M, Stutzle T. Ant colony optimization. *IEEE computational intelligence magazine*. 2006, 1(4): 28—39.
- [12] Soyster AL. Technical note—convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations research*, 1973, 21(5): 1154—1157.
- [13] El Ghaoui L, Oustry F, Lebret H. Robust solutions to uncertain semidefinite programs. *SIAM Journal on Optimization*, 1998, 9(1): 33—52.
- [14] Ben-Tal A, El Ghaoui L, Lebret H. Robust semidefinite programming. *Handbook on Semidefinite Programming*, 1998: 1—21.
- [15] Bertsimas D, Pachamanova D, Sim M. Robust linear optimization under general norms. *Operations Research Letters*, 2004, 32(6): 510—516.
- [16] Ben-Tal A, Nemirovski A, Roos C. Robust solutions of uncertain quadratic and conic quadratic problems. *SIAM Journal on Optimization*, 2002, 13(2): 535—560.
- [17] Ben-Tal A, Nemirovski A. Robust convex optimization. *Mathematics of Operations Research*, 1998, 23(4): 769—805.
- [18] Bertsimas D, Sim M. Robust discrete optimization and network flows. *Mathematical programming*, 2003, 98(1—3): 49—71.
- [19] Lagoa CM, Barmish BR. Distributionally robust Monte Carlo simulation: a tutorial survey. *Proceedings of IFAC world congress*, 2002: 1—12.
- [20] Delage E, Ye Y. Distributionally robust optimization under moment uncertainty with application to data-driven problems. *Operations Research*, 2010, 58(3): 595—612.
- [21] Niu SS, Song SJ, Ding JY, et al. Distributionally robust single machine scheduling with the total tardiness criterion. *Computers & Operations Research*, 2019, 101: 13—28.
- [22] Chang ZQ, Ding JY, Song SJ. Distributionally robust scheduling on parallel machines under moment uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 2019, 272(3): 832—846.
- [23] Chang ZQ, Song SJ, Zhang YL, et al. Distributionally robust single machine scheduling with risk aversion. *European Journal of Operational Research*, 2017, 256(1): 261—274.
- [24] Zhang YL, Zuo J, Shen M, et al. Exact algorithms for distributionally β -robust machine scheduling with uncertain processing times. *INFORMS Journal on Computing*, 2018, 30(4): 662—676.
- [25] Lawler EL, Wood DE. Branch-and-bound methods: a survey. *Operations Research*, 1966, 14(4): 699—719.
- [26] Mladenović N, Hansen P. Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 1997, 24(11): 1097—1100.
- [27] Liu YY, Liao XY, Zhang R. An enhanced MOPSO algorithm for energy-efficient single-machine production scheduling. *Sustainability*, 2019, 11(19): 5381.
- [28] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*. 2002, 6(2): 182—197.
- [29] Jiang QQ, Liao XY, Zhang R, et al. Energy-saving production scheduling in a single-machine manufacturing system by improved particle swarm optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020: 8870917.
- [30] Kennedy J, Eberhart R. “Particle swarm optimization,” *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*, 1995, 4: 1942—1948, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.

Theory, Method and Application of Multi-processes Real-time Intelligent Scheduling for Steel Production

Song Shiji^{1*} Zhang Pengyu¹ Zhang Yuli² Zhang Rui³
Ding Jianya¹ Niu Shengsheng¹ Chang Zhiqi¹ Wu Cheng¹

1. *Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084*

2. *School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*

3. *School of Economics and Management, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024*

Abstract This paper is based on the key project of the National Natural Science Foundation of China “Theory, method and application of Multi-process real-time intelligent scheduling for steel production (U1660202)”, and aims at providing a review of “transportation and batching process of molten iron” and “integrated Steelmaking - Continuous Casting - Hot Rolling production process”, two key technologies in steel production. We will introduce distributionally robust models for “iron and steel correspondence”, “hot metal locomotive scheduling”, “furnace group pouring”, “steelmaking and continuous casting”, “continuous casting and hot rolling”, “heating furnace group scheduling”, etc. Innovative research results in frontier fields such as the establishment and transformation of robust optimization models under the random environment of production processes, the intelligent solution algorithm of mixed integer programming models and the development of intelligent decision-making software modules will also be illustrated. The research group has published a series of high-level papers, obtained a number of invention patent authorizations and important awards, and trained a group of steel dispatching professionals. The research results of the project are applied to the production line of Xinyu Iron and Steel Group, which provides exemplary support for improving the quality of production plans, energy saving and emission reduction.

Keywords steel production line; energy-saving targets; multi-processes optimal scheduling; stochastic robust optimization models; real-time intelligent optimization methods

(责任编辑 刘敏)

* Corresponding Author, Email: shijis@mail.tsinghua.edu.cn