

炼油生产调度研究现状与挑战

陈远东¹, 丁进良^{1†}

(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)

摘要: 调度作为计划层和执行层的纽带, 是智能型工厂的主要组成部分。本文主要从炼油生产装置调度的角度, 对炼油调度问题进行综述与分析。首先对炼油生产调度建模问题的研究现状进行阐述, 介绍目前该领域建模方面考虑的因素; 其次, 对炼油生产调度的各种优化方法进行总结综述; 最后, 结合目前的信息技术、智能制造的发展趋势, 分析炼油生产调度面临的挑战和未来的研究方向。

关键词: 炼油; 调度; 智能工厂; 协同优化; 可视化

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0996

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



State-of-arts and Challenges on Production Scheduling of Refinery

Chen Yuandong¹, Ding Jinliang^{1†}

(1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: As the link between the planning layer and the execution layer, scheduling is the main component of the “Intelligent Refinery”. This article mainly summarizes and analyzes the refinery scheduling problem from the perspective of unit production scheduling. Firstly, the current research of refinery production scheduling model is described, and some factors considered in the current scheduling models are introduced; secondly, various optimization methods for refinery production scheduling are summarized; finally, combined with the development trends of information technology and intelligent manufacturing, the challenges and future research directions of refinery production scheduling are analyzed.

Keywords: refinery; scheduling; intelligent factory; collaborative optimization; visualization

0 引言

石油作为国家重要的战略储备物资和主要的交通运输能源, 其供应一直是国家严格监控的对象。据美国能源信息署对未来交通能源的预测, 到 2040 年, 石油将仍是主要的交通能源, 占比约为 88%^[1]。不仅如此, 炼油行业的产品是很多化工产品的重要原料来源, 涉及人类社会的方方面面, 如纺织物、肥料、塑料、碳素制品、医药化妆用品等。

然而, 目前我国炼油行业的技术水平与国外先进水平仍有一定差距。比如, 在轻油收率、能耗等方面。在资源利用效率和“三废”排放等方面与先进水平的差距更为明显^[2]。另一方面, “十四五”规划和 2035 年远景目标显示, 我国将继续坚定不移地贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念^[3]。面对新的社会发展要求, 我国炼油企业应进一步增强生产和管理能力, 优化产品结构, 提高生产效率^[4]。

炼油生产过程是一个由多工序、多装置组成的多层次信息流、物流和能流相互耦合的复杂系统, 要想实现生产过程的优化运行需要多个层次和多个系统间的协同运行^[5-6]。调度作为连接企业多个层次和多个系统间的纽带, 它用于协调企业有限的生产资源的高效利用, 优化企业的日常生产运营, 完成企业制定的计划。未来我国炼油行业将向炼化一体化、规模化、集群化方向发展^[7], 它虽然使企业具有更大的操作灵活性, 但要充分发挥一体化的优势需要更大范围的协同运行。特别是近年来发展的大型炼化基地以化工原料为主要产品, 其产品更为丰富, 且随市场需求波动更大, 给调度带来了更大的挑战; 另一方面, 随着人工智能、云计算、5G 和信息物理系统等信息技术的进步, 我国炼油行业将向“智能型炼油”的方向发展^[8-9], 由此也对炼油生产调度提出了更高的要求。

收稿日期: 2021-06-07; 修回日期: 2021-08-23.

基金项目: 国家重点研发计划项目 2018YFB1701104; 国家自然科学基金 61988101; 辽宁省兴辽计划 XLYC1808001; 辽宁省科技项目 2020JH2/10500001, 2020JH1/10100008.

†通讯作者. E-mail: jlding@mail.neu.edu.cn.

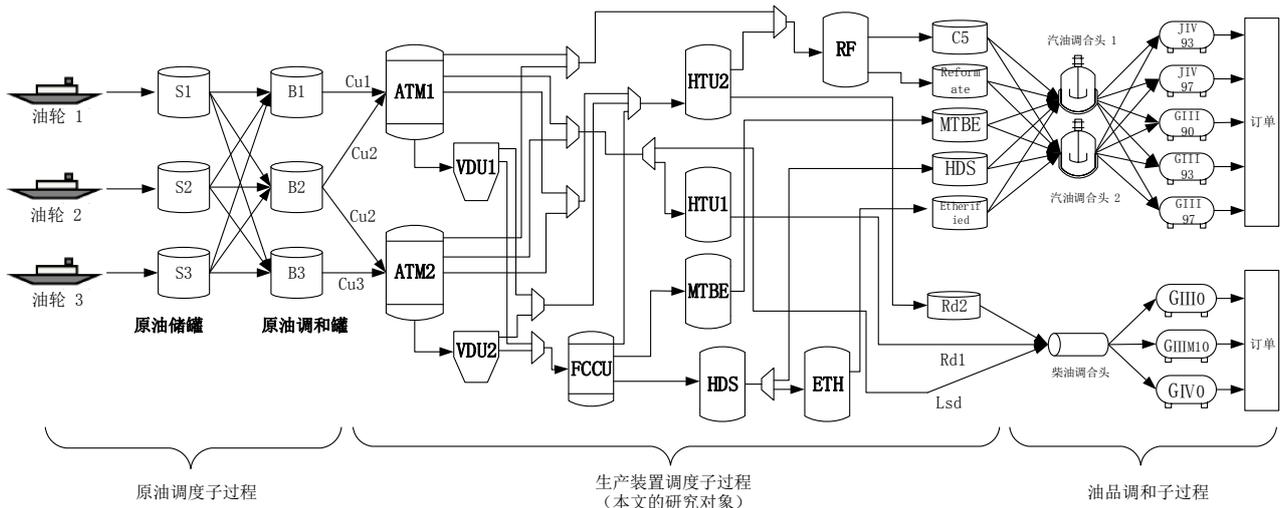


图1 炼油全流程生产过程简图

综上所述,在新的形势下,炼油生产调度面临着如下挑战:1)在日益深入的可持续发展和绿色发展理念的引领下,“三废”排放问题难以避免。如何更高效地利用生产过程中的热量,减少废气废水的排放,减少运输,都将是调度优化中需要考虑的因素;2)在集群化的发展背景下,炼油生产调度问题的规模将进一步变大,需要考虑如何在合理的时间内获得大规模调度问题的解。另一方面,由于产品的多样化导致炼油生产受市场波动影响更大,快速求解调度问题可使炼油及时响应市场变化;3)由于炼油生产系统具有强非线性、机理不清和时变特性,如何借助大数据、5G和信息物理系统等技术提供的大量实时数据为炼油构建更为精确的装置模型是当前面临的新挑战,在此基础上利用诸如强化学习等技术实现快速的智能调度。

炼油调度问题一般包含三部分:原油调度、生产装置调度和产品调合与运输调度,如图1所示。本文主要从生产装置调度方面对炼油的调度问题进行阐述,首先对炼油生产调度建模问题的研究现状进行阐述,介绍目前该领域建模方面考虑的一些因素;其次,对炼油生产调度的各种优化方法进行总结综述;最后,结合目前的信息技术、智能制造的发展趋势,分析炼油生产调度面临的挑战和未来的研究方向。

1 炼油生产与调度过程

1.1 炼油生产过程

炼油生产过程指利用原油炼制汽油、柴油、煤油等车用液体燃料,同时为化工产品的生产提供原料。原油通过原油调度子过程达到厂区,之后进入生产装置调度子过程。一般在炼油生产装置调度子问题

中,假设原油的物性及其供应是稳定的。原油首先进入常减压装置(ATM和VDU)根据温度范围进行初步的馏分切割。这一阶段为一次加工阶段。在一次加工完成后,由于原油中剩下较重的塔底油,为了增加轻质油的产量,二次加工装置(主要有热破坏加工、催化裂化(FCCU)、加氢裂化(HDS)等)将一次加工装置的部分重组分重新加工,使企业获得更多的汽油、柴油、气体等轻质产品;同时,一次加工阶段所获得的轻质馏分油物性相比于市场需要的成品油物性通常是偏低或偏高的。因此,炼油生产过程还具备后续的三次加工装置用于提高初始馏分油的物性或去除杂质,如提高汽油辛烷值、去除油品中的氧、硫、氮和金属元素等,包含催化重整(RF)、加氢精制(HTU)和醚化(ETH)等工序。组分油存储在储罐中,或是采用在线调和方式,直通调和头。在线调和较为高效,且无存储成本低。最后,油品调合装置则充分利用组分油,提高油品性能,增加产品品种,以满足市场需求。在生产装置调度子过程中,一般对调和操作进行简化,如,假设是瞬间完成的、不计调和头数量等。

1.2 炼油生产装置调度过程

炼油通过各类蒸馏装置、油品二次加工装置将原油连续不断地转化为石油产品。在这个过程中,为了提高经济效益,炼油需要根据原油性质和价格、产品物性和价格、炼油的设备运行情况等实际条件,通过对装置和储罐的调度操作,在保证生产稳定持续进行的前提下,使同等质量和数量的原油产生最优的经济效益。

炼油调度的目标可以是生产过程费用最小化或利润最大化^[10]。调度过程的约束主要可以归纳为以下几类:(1)物料平衡约束,主要包括罐和装置的进

出物料平衡; (2) 能力约束, 即罐的容量和装置的进出料流量上下限约束; (3) 操作约束, 主要指设备操作需要遵守的一些规则以及为了保障生产安全而制定的一些规则, 如切换约束、一个罐不能同时给两个设备进料、顺序约束等。流程生产存在生产次序, 以及操作模式切换存在着过渡过程。该过渡过程对产量、质量及能耗影响较大, 为了达到一定的经济效益, 在调度的时间轴上需要对装置上操作模式的顺序进行安排^[11]。(4) 需求约束, 即运输或市场约束。产品的供应具有时间区间和量的限制。

2 炼油生产调度模型的研究现状

炼油生产过程是一个十分复杂的物理化学反应过程, 难以对其过程模型进行精确的数学描述。最初对炼油生产装置模型普遍采用历史数据得到的经验公式进行描述^[12]。随着计算机技术的发展, 炼油调度建模方法结合了先进的建模和仿真技术, 如利用动态过程仿真软件 RSIM 获得过程数据, 然后用神经网络^[13]、分段线性化 (piecewise linear, PWL)^[14]等建模技术对过程建立数据模型。在调度模型方面, 国内外学者分别对以下几个主要的过程特性进行考虑。

2.1 国内研究现状

设备的操作模式为炼油生产的重要特征。在操作条件发生变化时, 生产装置内的平衡遭到破坏, 只有重新建立起平衡, 才能按照期望生产出满足要求的产品, 因此有必要对过渡过程进行建模。文献 [15] 建立考虑转换过程的装置模型, 当装置处于平稳装置时, 使用统计收率; 当装置处于过渡过程时, 可根据需要计算瞬时收率; 文献 [10] 中, 过渡过程不仅与目标模式有关, 而且与原始模式有关, 文中将每个过渡过程时间设为定值, 转换费用为由转换过程决定的常数。模式的转换使生产费用增加, 但频繁的模式转换能使生产的需求及时满足, 使得库存量减少, 因此模式转换和库存费用之间存在一个平衡的关系。

收率是装置最重要的参数, 然而由于其受多方面因素影响, 具有不稳定性。文献 [14] 首次将 PWL 建模方法应用于炼油行业。在传统的建模方法中, 各个操作模式的收率和操作成本都是一定的, 这和实际情况差距较大, 该文献通过网络线性化原来的非线性关系, 使变量关系更加精确。文献 [16] 用神经网络拟合收率和操作成本函数, 但带来非线性方程, 不易求解。文献 [17] 采用非线性模型细化装置收率用于炼油生产过程调度。

原油属性对炼油生产装置的性能和产品物性有着重要影响。文献 [18] 首次考虑了原油属性变化对装置收率、产品性质和操作成本的影响。提出了使用深度置信网络 (Deep Belief Network, DBN) 分类方法对催化裂化装置进行多模态建模。所谓的多模态建模是由于在确定操作的情况下, 不同原油性质会有不同的收率。将混合原油分为四类 (即四个模态), 根据原油的碳含量可以进行装置收率函数的建立。在实际中, 一般可以预先知道原油的性质及其配比, 从而实现根据不同原油进行相应设备操作模式的设定。

炼油生产具有高温高压易燃易爆有毒有害高腐蚀的特点, 因此其生产调度需要以稳定安全为前提。文献 [15] 的调度模型定义并结合了过程的平稳性、连续性和长期性。文献 [19] 的调度模型考虑了过程的平稳性。文献 [20] 考虑了减少气体排放的炼油生产调度模型。

集成优化可以为企业提供更灵活的灵活性, 为企业进一步创造利润空间。文献 [19] 中基于供应链的思想, 以满足客户和市场需求为目标, 从企业整体出发进行炼油调度问题研究。把炼油整体调度模型分解为调合调度模型、生产装置调度模型和原油调度模型, 将调合调度的解作为装置生产调度的约束, 而装置生产调度的解作为原油调度的约束, 运用基于启发式建模求解, 从而得到炼油整体的调度方案。文献 [21,22] 提出了集成原油调度的炼油生产过程调度模型。

炼化一体化可以使炼油和石化企业互通物料, 共享公共设施, 使企业提高灵活性和增强抵御市场干扰的能力, 同时节省运输和存储费用^[23-24]。文献 [25] 将炼油生产过程与乙烯装置调度模型集成, 并给出了裂解炉半机理非线性产率模型和能源产耗模型, 该集成策略使得生产成本得到了大幅下降。

2.2 国外研究现状

相比于炼钢和选矿等流程工业, 炼油生产过程的操作规则要复杂得多。要准确描述实际的生产过程, 具体的操作规则是必要的。文献 [11] 针对多种具体实际的情况给出调度描述方法, 如, 如何在离散时间描述下执行任意时间点上的操作; 如何描述考虑原料供应鲁棒性的调度模型等。文献 [26] 考虑了模式过渡过程, 且其只与目标模式相联系, 并将其过渡费用设为定值。文献 [27] 建立了带多种设备操作模式的炼油调度模型, 将模式转换过程的费用和时长设为与起始模式有关的定值, 建立了混合整数线性规划 (Mixed Integer Linear Programming, MILP)

模型进行求解。文献 [28] 采用连续时间建模方法建立具有炼油生产过程操作细节的调度模型, 所考虑的操作细节包含最短运行时间、静置要求、单输出调和头、进油切换、最小罐存量、混合油品物性; 文献 [29] 研究了在离散时间建模框架中依赖操作顺序的中间油品储罐的切换操作描述问题。所提方法相比于在状态任务网络 (State Task Network, STN) 框架中提出的方法具有更好的计算性能和扩展性能。

炼油的集成调度优化是未来的发展趋势^[30]。文献 [21] 考虑了原油调度和生产过程的集成模型。原油调度模型包含原油调和功能, 然而其生产装置模型不具有模式转换过程, 最终构成一个混合整数非线性规划 (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP) 模型, 利用 GAMS DICOPT 求解器求解; 文献 [31] 考虑了装置生产调度和成品油储运两个部分的集成模型。对于成品油储运模块, 模型考虑了较多的物流规则, 包含最小运行时间、调和器每次输出给一个罐、订单可以分多次完成、产品罐不能同时进料和出料等。但对于装置生产调度模块的考虑较为简单, 该模块中的装置不具有多模式操作方式, 主要确定其满足订单的顺序、持续时间、进料流量, 以及在线调和的流量。

时间段的描述方法是调度模型的关键, 它对模型的复杂度有这重要的影响。文献 [32] 在 STN 建模方法的基础上, 采用事件点概念构建了原油调度和生成装置调度的集成模型; 文献 [33] 针对炼厂全厂生产过程给出了一般性的模型表达。文献 [34] 介绍了一个建立带设备动态过程的调度模型的框架, 并提出了状态设备网络模型的表达方法, 该方法的主要作用就是将过程的各种可能性画出来, 以利于分析建立一般析取规划 (Generalized Disjunctive Programming, GDP) 模型。

随着环境的日益恶化, 可持续发展模型已是世界各国的共识。文献 [35] 考虑了减少气体排放的炼油生产调度模型。文献 [36] 考虑了炼厂生产调度的多目标问题, 另一个目标是环境因素。使用 ϵ -constraint 方法来处理多目标问题。其中, 环境目标用一个上限来限制, 即 $f(x) < \epsilon$, 使其化为单目标, 改变 ϵ , 求解多次单目标问题, 即可获得多目标问题的前沿面。文献 [37] 将环境指标用于模型约束中, 提出了 MINLP 模型, 用于协调经济和环境之间的矛盾。

在炼化一体化方面, 文献 [38] 描述了炼油生产过程与芳烃生产装置的集成模型, 该模型采用双线性项描述产品收率和物性, 混流过程以及调和过程。

文献 [39] 在文献 [38] 的基础上对炼油和乙烯厂的集成模型进行简化, 并采用变量的预算值拟合方程中的系数, 简化了模型的计算。文献 [40] 将炼油厂和乙烯厂集成进行协同优化, 可以提高各自的操作效率。

国内外针对炼油生产装置调度模型研究现状总结如表 1 所示。

表 1 国内外炼油生产装置调度模型研究现状总结

炼油生产装置调度模型研究现状	文献	
国内研究情况	考虑操作模式转换过程的调度模型	2010[15], 2015[10], 2014[41]
	考虑细化收率参数的调度模型	2011[16], 2015[14], 2017[17]
	考虑原油属性变化的调度模型	2014[18]
	考虑生产过程稳定和气体排放的调度模型	2005[19], 2010[15], 2018[20]
	集成原油、生产过程、产品调和的调度模型	2017[21], 2017[22], 2005[19]
国外研究情况	集成石油化工过程的炼化一体化模型	2020[23], 2017[25], 2020[24]
	考虑详细的生产操作的调度模型	2002[11], 2011[27], 2011[28], 2007[29], 1995[42]
	集成原油调度或油品储运的生产装置调度模型	2015[31]
	对调度模型时间段的处理方法研究	2004[32], 2004[33], 1999[34], 2012[43], 2014[44]
	考虑环境影响的炼油生产过程调度问题	2002[36], 2010[37], 2021[45]
集成石油化工过程的炼化一体化模型	2020[38], 2018[39], 2019[40]	

目前, 对关键因素的建模可以考虑利用数据。如何获得可靠的、及时的数据是一个困难。另外, 模型时间表达还存在大量离散变量和非线性等问题, 这些因素使得模型难以求解, 如何进行高效的模型表达使其线性化是调度建模的另一个难点。

3 炼油生产调度优化方法研究现状

炼油调度优化问题的主要困难在于求解时间长。目前, 各种优化方法的主要目的是为了在合适的时间内获得满意解。

3.1 国内研究现状

3.1.1 仿真方法

目前, 在仿真方法方面的工作主要是针对具体问题设计切合实际需求的仿真调度方法。文献 [46] 针对炼油调度问题, 利用启发式方法获得再调度规则后, 设计了仿真器对获得的规则进行仿真验证; 文献 [47] 提出基于仿真的优化框架, 将智能搜索算法

和仿真方法相结合, 通过仿真方法为智能搜索算法的适应度函数提供预估的方法, 迭代交互, 直至满足终止条件, 具体见图 2。其中, 随机产生的初始解在元启发式算法的优化下不断进化, 其终止条件可以是预先设定的迭代代数或当最优解连续代数未改进时停止。

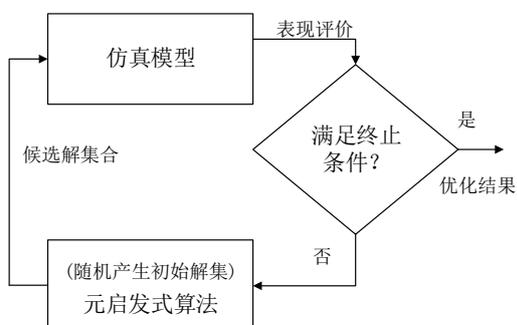


图 2 基于仿真的炼油生产装置调度优化框架

在仿真系统方面, 仿真方法可根据调度事件在仿真软件中的输入方式分为时间驱动和事件驱动。国内部分高校对生产流程模拟系统进行了多方面的研究, 文献 [48] 基于时间驱动方法, 在 MATLAB 软件上设计了炼油生产过程仿真系统。该方法利用 ASPEN PLUS 软件产生装置的动态数据, 通过 EXCEL 软件与 MATLAB 软件进行数据传递, 使仿真系统同时具备了装置静态模型和动态模型; 文献 [49] 在文献 [48] 的基础上, 设计了多生产方案和多周期运行的生产过程仿真系统; 文献 [50] 在文献 [48] 的基础上设计了基于事件的仿真优化系统; 文献 [51] 在考虑 MES 层描述的基础上, 运用 VISUAL 软件、数据库和面向对象技术设计了可视化的生产过程仿真系统, 该系统带有装置模型库, 方便用户建模。

3.1.2 数学规划方法

大部分的调度问题可以采用 MINLP 问题描述。然而, MINLP 问题一般为 NP 难问题, 求解困难, 对初值选择依赖性大, 特别是当问题规模变大的时候, 难以在有效的时间内求得最优解, 甚至难以获得可行解。目前, 常用的 MINLP 商业求解器求解有 CONOPT、SBB、SNOPT 等, 求解时间长是限制其应用的主要障碍。文献 [52] 在炼油调度方面提出基于启发式规则的混合整数规划方法, 通过将逻辑规则转化不等式, 与原数学规划模型集成, 形成 MINLP 模型, 相当于在原来的解空间产生一个割平面。这样综合数学规划和规则两种方法的优点, 可以在较短的时间内生成符合实际生产过程的解^[53]。

由于 MILP 问题的求解方法相对容易, 因此, 对于某些 MINLP 问题可以将其线性化后, 利用 MILP

求解器进行求解。文献 [54] 通过引入新的变量将离散变量和连续变量、离散变量和离散变量的双线性项线性化, 并对非凸项凸化处理, 使原问题易于求解。文献 [55] 介绍了各类关于离散变量非线性的线性化方法。当然, 有时候可以通过建模技巧避免建立非线性方程或减少 0-1 变量的数量, 这些都是减少模型复杂度的有效途径。

对于大规模的调度问题, 可以使用分解的求解方法进行, 最后获得模型的次优解^[56]。文献 [57] 对一个考虑过渡过程的调度问题提出双层优化结构, 包含外层的离散粒子群 (Discrete Particle Swarm Optimization, DPSO) 算法和内层的线性规划 (Linear Programming, LP) 算法。外层决策装置的操作状态, 即装置上各模式的顺序和执行时长。在确定操作状态的情况下, 内层进行装置生产过程优化计算, 包含材料的产量、消耗和库存, 以及产品的运输量等。

文献 [58] 在离散时间建模的基础上提出两阶段 Lagrangian 分解方法。根据炼油生产流程结构, 将调度模型分为组分油生产阶段和调合阶段。在两个子模型中松弛与组分油产量相关的约束。通过判断两个子模型求出的组分油的量的大小关系来调整 Lagrangian 乘子, 使得两个子模型的组分油产量和需求量相等后即获得原问题的优化解。文献 [59] 在连续时间建模的基础上给出了两阶段 Lagrangian 分解方法。文献 [60] 中针对炼油企业全厂调度, 提出了一种分层建模与求解策略。上层模型仅仅考虑集合罐的存储能力, 采用松弛变量来反映每一集合罐所需的额外存储能力。下层系统试图消除上层模型所求得的额外存储需求。在下层系统, 通过启发式规则策略调整多用途罐, 以使所有罐都不存在额外存储需求。文献 [61] 在文献 [58] 的基础上为了提高求解效率, 将之前的两阶段拉格朗日分解方法改进为多阶段分解, 即把每一个生产装置作为单独的子问题。

另外, 模型重构可以有效地提高问题的求解速度。文献 [10] 利用有效不等式 (valid inequality)^[62] 对模型进行改写, 使模型可行域更紧致, 减少计算量。文献 [63] 使用约束规划产生一个更紧致的空间来求解 MINLP 问题。

3.1.3 进化搜索方法

由于炼油生产调度问题是非确定性多项式时间可解 (Non-deterministic Polynomial, NP) 的问题^[97], 当问题规模变大时, 解空间急剧增加, 使传统数学方法难以在有效时间内求得最优解, 且当前最好解

的更新变得缓慢, 因此转而通过智能搜索的方法来求解调度问题。文献 [57] 利用离散粒子群算法对炼油调度问题进行求解, 解被表达为设备的模式顺序和模式转换时刻两个数字序列。通过数学规划方法进行适应值计算, 即对确定了各设备操作模式的炼油物流分配的问题进行求解。文献 [15] 将生产方案与进料相联系, 通过对装置加入虚拟物料, 使物料切换顺序转换为旅行商问题表达, 提出两层粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法用来解决炼油调度问题, 以防止过早收敛。

3.1.4 基于规则的方法

由于调度问题的复杂性, 导致实际生产过程中的问题描述和求解存在困难, 基于规则的方法将生产经验转换为规则, 通过匹配和推理对问题进行求解。常见的基于规则的方法有专家系统和简单的启发式方法。

在基于专家系统的调度求解方面, 文献 [66] 以炼油企业为例, 研究了计算机集成处理系统 (Computer Integrated Process Systems, CIPS) 环境下生产调度专家系统的体系结构, 给出了面向对象的知识表达, 以利于同优化技术相结合; 文献 [67] 采用专家系统技术将生产中成功的经验和领域专家的知识组织起来, 协调并参与数学规划建模过程, 优化编排调度作业计划。

在基于启发式方法的调度求解方面, 文献 [68] 针对大规模炼油调度问题提出基于启发式的分解策略, 以快速获得大规模问题的满意解。文献 [69] 依据炼油调度室工作人员的经验, 开发了“人工智能化思维”调度计划系统, 与传统的线性规划方法相比, 具有切合实际、操作简便和实用性强等优点; 文献 [70] 将炼油生产调度和乙烯生产调度集成, 根据干扰, 实时选择启发式规则, 通过规则找到调度方案, 仿真验证该方案的可行性; 文献 [60] 在炼油生产调度中, 利用启发式方法调整多用途物理罐的操作方案, 以满足物料存储需求, 并减少整个模型的规模。

3.1.5 基于数据的方法

流程工业生产过程中存在着大量的数据。目前, 处理这些生产数据的方法有规则挖掘和决策建模^[72]。文献 [15] 把变精度粗集应用于炼油动态生产调度, 提高所获取的调度规则的求解精度。文献 [73] 通过数据驱动的全局调度优化方法使炼油的经济效益提升 37-65%。文献 [74] 针对大规模炼油生产调度问题求解时间长的问题, 采用从小规模案例中迁移

生产系统操作知识的方法, 使大规模炼油生产调度问题能在短时间内获得满意解。文献 [75] 通过离线收集有效数据, 训练一个决策树来对在线工况进行判断, 以选择在线工况对应的子模型, 并根据在线工况更新子模型参数, 求解子模型, 获得当前工况的调度方案。

3.2 国外研究现状

3.2.1 数学规划方法

目前, 针对于较大规模的 MILP 问题, 其求解时间较长。为解决该问题, 文献 [76] 通过模块结构 (block-structured) 线性规划方法进行求解。模块结构方法是对各个子问题进行单独建模, 然后用一般约束 (common constraint) 将它们连接起来。文献 [77] 针对炼油生产调度和油品储运调度集成模型提出了基于拉格朗日分解算法。文献 [78] 将协同优化建立的整体模型分解为多个子模型, 然后针对各子模型依次求解, 最后组合为一个整体的解。作者以存储罐为界将模型分解为子模型, 再对各个子模型增加连接约束。文献 [79] 针对最小化问题, 通过基于需求的反向传播算法生成收紧约束 (tightening constraints), 以增强问题的下界。文献 [80] 针对最大化问题, 通过基于时间和库存的前向传播算法生成收紧约束, 以加快模型求解速度。文献 [81] 通过 McCormick 松弛处理非凸双线性项问题。文献 [82] 介绍了一种求解炼油生产操作和原油操作调度的 MINLP 模型的方法。本文提出了一种混杂方法来更新拉格朗日乘子, 以加速原问题的收敛, 即用割平面法记录对偶问题信息、次梯度法确定梯度方向、box-step 法校正方向。

3.2.2 基于模型重构方法

这类方法主要通过改进时间段描述减少变量个数或通过添加收紧模型搜索空间的方法减少求解时间。文献 [83] 提出一种新的非一致离散时间表达方法, 有利于模型节省变量的使用。文献 [84] 描述了一个减少模型二进制变量个数的方法。该方法通过 Smoothing function, 利用连续变量来替代离散变量。文献 [85] 提出了一些紧致初始模型的方法。

3.2.3 仿真方法

文献 [86] 通过强化学习构建系统中各个对象的操作规则和其他特性, 以缩短构建仿真系统的时间。文献 [87] 提出了一种基于仿真的炼厂调度方法, 该模型包含调度过程和常压塔的温度切割管理。通过建立调度模型, 随机产生各个操作部分的离散变量, 通过仿真系统找到足够数量的可行解, 形成解池, 之后形成一颗调度模型的搜索树, 通过该树可以控制

求解的精度和求解时间。

3.2.4 进化搜索方法

目前, 国内外研究人员在这方面的的工作都较少, 主要是因为调度问题约束复杂, 搜索维数大, 往往难以找到可行解。文献 [88] 将 tabu 搜索方法用于炼油生产调度优化。国外研究人员关于启发式方法求解调度问题的研究可参考文献 [89]。国内外针对炼油生产装置调度优化方法现状总结如表 2 所示。

关于炼油调度在工业界方面的研究参见最近的综述文献 [90,91]。

以上所述的各种优化方法的优缺点总结见表 3。

4 炼油调度问题未来的发展方向

鉴于目前国内外炼油调度的研究现状和信息技术的发展, 我们认为还可以从以下几个方面展开研究。

4.1 炼油集成计划、调度和控制的协同优化

文献 [30] 指出一个中型的化工企业每天生产价值 500-1000 万美元的产品, 而其中原料和能源的成本大约为所生产的产品价值的 75%, 可见更好的调度管控将为企业创造巨大的价值。虽然集成生产管控存在经济效益, 但是要实现企业级优化 (Enterprise-wide Optimization, EWO) 管理还存在困难^[92]: (1) 建模问题。目前已有的建模方法状态任务网络和资源任务网络对某些实际问题的具体操作规则往往不能适用; (2) 多层次优化问题。集成问题自

然包含不同层次上的问题, 如何集成它们进行建模求解还是个有待解决的问题。(3) 不确定性问题。市场和实际生产过程都存在众多的不确定因素, 开发具有实时效应的调度优化算法是协同优化系统在实际中落实的必要条件。(4) 算法和计算问题。目前在模型求解时间性能上还需要进一步提高, 以满足实际需要。

表 2 国内外炼油生产装置调度优化方法现状总结

炼油生产装置调度优化方法研究现状		文献
国内研究情况	仿真方法	2005[48],2006[49], 2008[50],2011[51], 2016[46],2002[71], 2002[47]
		2009[52],1996[53], 2010[54],2015[58], 2015[59],2015[10], 2012[63],2007[60], 2015[61]
		2016[57],2010[15], 1999[66],2000[67], 2003[68],1999[69], 2014[70],2007[60], 2016[73],2010[15], 2021[74],2018[75]
	数学规划方法	2015[77],2018[76], 2009[78],2013[79], 2016[80],2011[82], 2015[81]
		2003[84],2013[83], 2016[62]
		2018[86],2005[87], 1999[88]
国外研究情况	基于模型重构方法	2018[86],2005[87], 1999[88]
	仿真方法	
	进化搜索方法	

4.2 动态优化问题

在实际生产过程中存在着各种不确定性因素, 如产品价格、原料物性、原料供应量和设备故障等。如何从计划层的指标出发, 结合具体的装置性能和生产动态, 在时间尺度上进行装置运行指标分解与协调, 实现全局优化, 是企业亟需解决的难题。

目前, 装置的运行指标由操作模式给定, 但这一固定不变的操作模式并不能适应运行工况的变化。虽然炼油加工过程在稳定的状态下运行, 但实际的

生产状态不能保证绝对的稳定。因此, 在保证相对稳定的前提下, 进行一定范围内的装置运行指标的调整有利于稳定收率, 提高调度方案的执行度。

装置运行指标和生产总指标之间的动态特性具有非线性、强耦合、原料性质波动、运行工况频繁变化、难以用精确数学模型描述的综合复杂性, 并且受市场环境和生产条件等动态变化因素的影响。如何进行生产指标分解转化是涉及到多目标、多约束的非线性动态优化难题^[93]。

表 3 国内外炼油生产装置调度优化方法现状总结

方法	优点	缺点
基于仿真的方法	易于实施, 具有较高的模型精度, 所得的调度方法容易落地实现。	人工生成调度方案, 优化性差。
基于数学规划的方法	具有强的方案优化能力。	模型精度低, 求解时间长, 实时性差。
基于进化优化的方法	可采用复杂的非线性模型, 具有全局最优搜索能力。	解具有随机性, 求解时间长, 约束难以处理。
基于规则的方法	易于实施, 具有一定的优化效果, 实时性好。	对具体的生产过程依赖性强, 优化性能不足。
基于数据的方法	具有较好的优化效果, 实时性好, 能适应复杂的模型。	及时有效的数据获取困难, 数据处理较为繁琐, 对具体的生产过程依赖性强。
基于模型重构方法	求解速度快, 具有强的方案优化能力。	问题针对性强, 实施困难。

4.3 生产过程可视化问题与在线监测

随着信息技术的发展,工业过程中收集了海量的监测数据和计算数据,如何将不可见的数据变成人眼可以感受的图像数据,实现无形数据的可视化,对人们更高效的认识对象有重要意义。在其他领域,如流体工程,利用计算流体动力学技术,通过动态画面,精确地呈现了流体在各个位置的压力、流速和方向等信息,帮助设计人员判断性能的瓶颈问题。在流程工业领域,目前已有部分的炼油生产过程可视化技术研究^[94],但对于调度决策的可视化技术还较少。另外,在生产过程中发生异常情况,需要及时掌握生产过程的运行情况,以判断异常波动对生产调度方案影响的大小。目前大部分的炼油都已实现信息化运行,在生产过程中记录大量的数据,可以通过对这些数据的分析和特征提取实现对异常波动的判断和分类^[95],以帮助企业快速做出更好的决策。

4.4 生产系统与其他系统的集成调度协同优化问题

“智能型炼油厂”需要炼油计划系统、调度系统、能量系统和公用系统等各方面的协调配合,原来对能量和公用系统的调度是在满足生产调度的后再进行这些系统的调度。随着环境问题的恶化,以及世界各国对环境问题的重视,石化企业这种粗放型的模式已经无法满足减排政策的需求。目前,已有进行各个子系统单独的调度研究和集成计划优化的研究^[96]。然而,多个调度子系统的集成研究还较少,当前被广泛研究的多智能体分布式优化方法将为其提供了一个较好的解决思路。

4.5 基于大数据和机器学习的炼油生产过程建模和调度算法

在调度优化算法领域,机器学习的应用还存在着诸多的困难。首先,当前的机器学习算法要发挥出好的性能需要大量的数据,而在调度优化领域,其本身存在的主要困难是求解时间长,导致难以获得足够的高质量样本;其次,机器学习训练获得的模型结构是固定的,而在调度问题中,其不同的案例具有不同的形式结构,比如不同案例含有机器数量的不同、工序数量的不同、订单数量的不同以及调度时长的不同等。这些都导致难以用统一的机器学习模型来表达某一个调度系统的决策器;最后,机器学习所采用的网络模型的表达能力有限,虽然当前的神经网络模型几乎能拟合所有的连续函数,然而,在调度优化领域中,优化模型往往是组合优化问题,即含有离散决策变量,这导致其决策空间和目标空间不连续,且在目标空间中往往存在突变和

不可导的情况,使得机器学习算法训练时难以收敛。

生产调度问题属于 NP 难问题^[97],近年来,随着大数据的应用、计算机性能的提升和神经网络算法的发展,机器学习的预测能力得到了极大的提升,并在许多领域得到了成功的应用,特别是在图像识别^[98]、自然语言处理^[64]和人机博弈^[65]等领域。在这些领域,机器学习的性能已经超过了人类的水平,这不仅仅表示着性能的超越,而且标志着机器学习质的改变——从知识的模仿学习到知识的升华,为智能调度提供了可能。

5 结束语

不管是我国的“中国制造 2025”或是德国的“工业 4.0”所提出的工业前景,在炼油方面都需要完成调度的技术难题。炼油调度相比于其他的调度领域呈现出更大的模型规模和复杂性,随着大数据技术和智能制造技术的发展,以及炼油生产过程的大数据和分布式生产设备的特点,该领域将在未来工业技术的引领下快速发展。

参考文献 (References)

- [1] 李雪静, 乔明. 经济能源新形势下世界炼油工业发展动向 [J]. 石化技术与应用, 2016, 34(5): 357-364.
(Li X J, Qiao M. Development trend of world refining industry in new economic and energy situation [J]. Petrochemical Technology & Application, 2016, 34(5): 357-364.)
- [2] 钱锋, 杜文莉, 钟伟民, 唐漾. 石油和化工行业智能优化制造若干问题及挑战 [J]. 自动化学报, 2017, 43(6): 893-901.
(Qian F, Du W L, Zhong W M, Tang Y. Problems and Challenges of Smart Optimization Manufacturing in Petrochemical Industries [J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(6): 893-901.)
- [3] 柯晓明, 乞孟迪, 吕晓东, 王华. “双碳”目标下中国炼化行业“十四五”发展新特点分析与展望 [J]. 国际石油经济, 2021, 29(5): 33-38.
(Ke X, Qi M, Lv X, Wang H. Analysis of the new features and prospect on the 14th Five-Year Plan development of China's refinery and chemical industry under the "dual carbon" goal [J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(5): 33-38.)
- [4] 钱锋. 人工智能赋能流程制造 [J]. 科技导报, 2020, 38(22): 1-1.
(Qian F. AI empowers process manufacturing [J]. Science & Technology Review, 2020, 38(22): 1-1.)
- [5] 柴天佑. 工业过程控制系统现状与发展方向 [J]. 中国科学, 2016, 24(8): 1003-1015.
(Chai T Y. Industrial process control systems: research status and development direction [J]. Science in China, 2016, 24(8): 1003-1015.)
- [6] 丁进良, 杨翠娥, 陈远东, 柴天佑. 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):1931-1943.
(Ding J, Yang C, Chen Y, Chai T. Research Progress and Prospects of Intelligent Optimization Decision Making in Complex Industrial Process[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11):1931-1943.)
- [7] 柴天佑. 工业人工智能发展方向 [J]. 自动化学报, 2020, 46(10): 2005-2012.
(Chai T Y. Development Directions of Industrial Artificial Intelligence [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(10): 2003-2012.)
- [8] Joly M, Odloak D, Miyake M Y, Menezes B C, Kelly J D. Refinery production scheduling toward Industry 4.0. *Frontiers of Engineering Management*, 2018, 5(2): 202-213.
- [9] 黄德先, 江永亨, 金以慧. 炼油工业过程控制的研究现状、问题与展望 [J]. 自动化学报, 2017, 43(6): 902-916.
(Huang D X, Jiang Y H, Jin Y H. Present research situation, major bottlenecks, and prospect of refinery industry process control[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(6): 902-916.)
- [10] Zhang L, Jiang Y, Huang D. Alternative Formulations and Improvements with Valid Inequalities for the Refinery Production Scheduling Problem Involving Operational Transitions[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(32): 7871-7889.
- [11] Göthe-Lundgren M, Lundgren J T, Persson J A. An optimization model for refinery production scheduling[J]. *International Journal of Production Economics*, 2002, 78(3): 255-270.
- [12] Packie J W. Distillation equipment in the oil-refining industry[J]. *AIChE Transactions*, 1941, 37(51): 51-78.
- [13] Wang K, Shang C, Liu L, Jiang Y, Huang D, Yang F. Dynamic soft sensor development based on convolutional neural networks[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(26):11521-11531.
- [14] Gao X, Jiang Y, Chen T, Huang D. Optimizing scheduling of refinery operations based on piecewise linear models[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, 75: 105-119.
- [15] 郭庆强. 炼油过程动态优化调度研究 [D]. 山东大学, 2010.
(Guo Q Q. Research on Dynamic Optimal Scheduling of Refining Process[D]. Shandong University, 2010.)
- [16] Yan W, Hu S, Yang Y, Gao F, Chen T. Bayesian migration of Gaussian process regression for rapid process modeling and optimization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 166(3): 1095-1103.
- [17] Kelly J D, Zyngier D. Unit-operation nonlinear modeling for planning and scheduling applications[J]. *Optimization and Engineering*, 2017 18(1): 133-154.
- [18] Gao X, Shang C, Jiang Y, Huang D X. Refinery scheduling with varying crude: A deep belief network classification and multimodel approach[J]. *AIChE Journal*, 2014, 60(7): 2525-2532.
- [19] 赵小强. 炼厂生产调度问题研究 [D]. 浙江大学, 2005.
(Zhao X Q. Research on refinery production scheduling problem[D]. Zhejiang University, 2005.)
- [20] Hadidi L A, AlDosary A S, Al-Matar A K, Mudallah O A. An optimization model to improve gas emission mitigation in oil refineries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 118: 29-36.
- [21] Xu J, Zhang S, Zhang J, Wang S, Xu Q. Simultaneous Scheduling of Front-end Crude Transfer and Refinery Processing[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2017, 96: 212-236
- [22] Xu J, Qu H, Wang S, Xu Q. A new proactive scheduling methodology for front-end crude oil and refinery operations under uncertainty of shipping delay[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(28): 8041-8053.
- [23] Li F, Yang M, Du W, et al. Development and challenges of planning and scheduling for petroleum and petrochemical production[J]. *Frontiers of Engineering Management*. 2020, 7:373-383.
- [24] 刘亭亭, 赵旭涛. 智能炼化企业建设 I. 炼化一体化的智能化 [J]. 石化技术与应用, 2020, 38(2): 147-152.
(Liu T, Zhao X. Construction of intelligent refining and chemical enterprise I. Intellectualization of refining and chemical integration[J]. *Petrochemical Technology & Application*, 2020, 38(2): 147-152.)
- [25] Zhao H, Ierapetritou M G, Shah N K, Rong G. Integrated model of refining and petrochemical plant for enterprise-wide optimization[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2017, 97:194-207.
- [26] 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.
- [27] Mouret S, Grossmann I E, Pectiaux P. Time representations and mathematical models for process scheduling problems[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2011, 35(6): 1038-1063.
- [28] Shah N K, Ierapetritou M G. Short-term scheduling of a large-scale oil-refinery operations: Incorporating logis-tics details. *AIChE Journal*, 2011, 57(6):1570-1584.
- [29] Kelly J D, Zyngier D. An improved MILP modeling of sequence-dependent switchovers for discrete-time scheduling problems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(14):4964-4973.
- [30] Shobrys D E, White D C. Planning, scheduling and control systems: why can they not work together[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2000, 24(2): 163-173.
- [31] Luo C, Rong G. Hierarchical approach for short-term scheduling in refineries[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(11): 3656-3668.
- [32] Jia Z, Ierapetritou M. Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time

- formulation [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, 28(6): 1001-1019.
- [33] Neuro S M, Pinto J M. A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, 28(6-7): 871-896.
- [34] Yeomans H, Grossmann I E. A systematic modeling framework of superstructure optimization in process synthesis[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1999, 23(6): 709-731.
- [35] Hadidi L A, AlDosary A S, Al-Matar A K, Mudallah O A. An optimization model to improve gas emission mitigation in oil refineries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 118: 29-36.
- [36] Song J, Park H, Lee D Y, et al. Scheduling of actual size refinery processes considering environmental impacts with multiobjective optimization[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41(19): 4794-4806.
- [37] Al-Mutairi E M, El-Halwagi M M. Environmental-impact reduction through simultaneous design, scheduling, and operation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2010, 12(5): 537-545.
- [38] Uribe-Rodriguez A, Castro PM, Gonzalo GG, Chachuat B. Global optimization of large-scale MIQCQPs via cluster decomposition: Application to short-term planning of an integrated refinery-petrochemical complex[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, 140(2): 106883.
- [39] Ketabchi E, Mechleri E, Gu S, Arellano-Garcia H. Modelling and Optimisation Approach of an Integrated Oil Refinery and a Petrochemical Plant[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2018, 44:1081-1086.
- [40] Ketabchi E, Mechleri E H, Arellano-Garcia. Increasing operational efficiency through the integration of an oil refinery and an ethylene production plant[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, 152:85-94.
- [41] Shi, L., Jiang, Y., Wang, L., & Huang, D. Refinery production scheduling involving operational transitions of mode switching under predictive control system[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(19), 8155-8170.
- [42] Alkhamis T M, Yellen J. Refinery units maintenance scheduling using integer programming[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1995, 19(9): 543-549.
- [43] Maravelias C T. General framework and modeling approach classification for chemical production scheduling[J]. *AIChE Journal*, 2012, 58(6): 1812-1828.
- [44] Velez S, Maravelias C T. Theoretical framework for formulating MIP scheduling models with multiple and non-uniform discrete-time grids. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, 72(0):233-254.
- [45] Abdussalam O, Trochu J, Fello N, Chaabane A. Recent advances and opportunities in planning green petroleum supply chains: a model-oriented review[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2021.
- [46] Wang Z, Li Z, Feng Y, Rong G. Crude Oil Operations under Uncertainty: A Continuous-time Rescheduling Framework and a Simulation Environment for Validation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(43): 11383-11401.
- [47] Fu M C. Optimization for simulation: Theory vs Practice[J]. *Inform Journal on Computing*, 2002, 14(3): 192-215.
- [48] 裴瑞凌, 荣冈. 炼油过程的智能工厂流程模拟仿真平台 [J]. *化工自动化及仪表*, 2005, 32(2): 43-46. (Pei R L, Rong G. Flowsheet Simulation Platform of Intelligent Plant in Oil Refinery[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2005, 32(2): 43-46.)
- [49] 吴婕. 多生产方案炼油过程物流仿真系统 [D]. 浙江大学, 2006. (Wu J. Logistics Simulation System for Refining Process with Multiple Production Schemes[D]. Zhejiang University, 2006.)
- [50] 郑丽钰, 荣冈, 吴婕. 调度事件驱动的石化物流仿真模型的建模方法 [J]. *化工自动化及仪表*, 2008, 35(4): 11-15. (Zheng L Y, Rong G, Wu J. Scheduling-event Driven Modeling and Simulation of Material Flow Process for Petrochemical Industries[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2008, 35(4): 11-15.)
- [51] 潘照杰. 面向炼油过程调试的建模与仿真 [D]. 浙江大学, 2011. (Pan Z J. Modeling and simulation for debugging of oil refining process[D]. Zhejiang University, 2011.)
- [52] Li M, Li Q, Guo Q, Ding R, Xin T. Scheduling optimization of refinery operations based on production continuity[C]. *Proc of the 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics*. Shenyang, China: IEEE, 2009: 1807-1811.
- [53] Gao J, Penlidis A. A comprehensive simulator/database package for reviewing free-radical homopolymerizations[J]. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 1996, 36(2): 199-404.
- [54] You, F Q, Grossmann, I E. Integrated Multi-Echelon Supply Chain Design with Inventories under Uncertainty: MINLP Models, Computational Strategies[J]. *AIChE January*. 2010, 56 (2): 419-440.
- [55] Williams H P. Model building in mathematical programming[M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [56] Zhang N, Zhu X X. A novel modelling and decomposition strategy for overall refinery optimization[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2000, 24(2): 1543-1548.
- [57] Zhang L, Jiang Y, Gao X, Huang D X. Efficient Two-Level Hybrid Algorithm for the Refinery Production Scheduling Problem Involving Operational Transitions[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(28): 7768-7781.

- [58] Shi L, Jiang Y, Wang L, Huang D. A novel two-stage Lagrangian decomposition approach for refinery production scheduling with operational transitions in mode switching[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(11): 1793-1800.
- [59] 施磊, 江永亨, 王凌, 黄德先. 一种求解炼油厂连续时间调度模型的 Lagrange 分解算法 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2016, 56(4):437-447.
(Shi L, Jiang Y, Wang L, Huang D. Lagrangian decomposition approach for solving continuous-time scheduling models of refinery production problems[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2016, 56(4):437-447.)
- [60] Luo C, Rong G. Hierarchical approach for short-term scheduling in refineries[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(11): 3656-3668.
- [61] Shi L, Jiang Y, Wang L, Huang D. Efficient lagrangian decomposition approach for solving refinery production scheduling problems involving operational transitions of mode switching[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(25): 6508-6526.
- [62] Pochet Y, Wolsey A. Production planning by mixed integer programming[M]. Springer Science & Business Media, 2006.
- [63] Bai L, Jiang Y, Huang D. A novel two-level optimization framework based on constrained ordinal optimization and evolutionary algorithms for scheduling of multipipeline crude oil blending[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(26): 9078-9093.
- [64] Wolf T, Debut L, Sanh V, Chaumond J, Delangue C, Moi A, et al. Transformers: State-of-the-art natural language processing[C]. Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations. Online, 2020, 38-45.
- [65] Silver D, Schrittwieser J, Simonyan K, et al. Mastering the game of go without human knowledge[J]. Nature, 2017, 550(7676):354-359.
- [66] 杜江, 蒋白桦. CIPS 环境下的生产调度专家系统研究 [J]. 计算机工程与设计, 1999, 20(4): 29-33.
(Du J, Jiang B. A study of production scheduling expert system in the environment of computer integrated process systems[J]. Computer Engineering and Design, 1999, 20(4): 29-33.)
- [67] 姚建初, 刘伯龙. 炼油生产调度专家系统的应用研究 [J]. 计算机工程与应用, 2000, 36(10): 174-176.
(Yao J, Liu B. Research on Application of Refining Production Scheduling Expert System[J]. Computer Engineering and Applications, 2000, 36(10): 174-176.)
- [68] Wu D, Ierapetritou M G. Decomposition approaches for the efficient solution of short-term scheduling problems[J]. Computers & Chemical Engineering, 2003, 27(8): 1261-1276.
- [69] 苏志同, 蒲红斌. 炼油厂生产调度计划模型的研究 [J]. 北方工业大学学报, 1999, 11(1): 1-4.
(Su Z, Pu H. Study of Production Management Model in Oil Refineries[J]. Journal of North China University of Technology, 1999, 11(1): 1-4.)
- [70] Wang Z, Feng Y, Rong G. Synchronized Scheduling Approach of Ethylene Plant Production and Naphtha Oil Inventory Management[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(15): 6477-6499.
- [71] 李霄峰, 徐立云, 邵惠鹤, 任德祥. 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): 207-210.
(Li X F, Xu L Y, Shao H H, Ren D X. Flexible Simulating and Scheduling System for Steel-making and Continuous-casting Process and Critical Problems [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(2): 207-210.)
- [72] Lee J H, Shin J, Realff M J. Machine learning: Overview of the recent progresses and implications for the process systems engineering field[J]. Computers & Chemical Engineering, 2018, 114: 111-121.
- [73] Li J, Xiao X, Boukouvala ., Floudas C A, Zhao B, Du G, et al. Data-driven mathematical modeling and global optimization framework for entire petrochemical planning operations[J]. AIChE Journal, 2016, 62(9): 3020-3040.
- [74] Chen Y, Ding J, Chai T. A Knowledge Transfer Based Scheduling Algorithm for Large-Scale Refinery Production[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021, to be publish.
- [75] Gao X, Huang D, Jiang Y, Chen T. A decision tree based decomposition method for oil refinery scheduling[J]. Chinese journal of chemical engineering, 2018, 26(8): 1605-1612.
- [76] Ojarikre H I. Production Scheduling and Distribution in Downstream Sector Using Block-Structured Linear Programming Solution Technique: A Comparative Analysis[J]. Journal of Mathematics and System Science, 2018, 8:65-73.
- [77] Shah N K, Sahay N, Ierapetritou M G. Efficient Decomposition Approach for Large-Scale Refinery Scheduling[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(41): 9964-9991.
- [78] Shah N, Saharidis G K D, Jia Z, et al. Centralized-decentralized optimization for refinery scheduling[J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(12): 2091-2105.
- [79] Velez S, Maravelias, C T. Mixed-integer programming model and tightening methods for scheduling in general chemical production environments[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013. 52(9):3407-3423.
- [80] Merchan A F, Maravelias C T. Preprocessing and tightening methods for time-indexed MIP chemical production scheduling models[J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 84:516-535.
- [81] Castro P M. Tightening piecewise McCormick relaxations for bilinear problems[J]. Computers & Chemical Engineering, 2015, 72:300-311.

- [82] Mouret S, Grossmann I E, Pectiaux P. A new Lagrangian decomposition approach applied to the integration of refinery planning and crude-oil scheduling[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2011, 35(12): 2750-2766.
- [83] Velez S, Maravelias C T. Multiple and nonuniform time grids in discrete-time MIP models for chemical production scheduling[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2013, 53: 70-85.
- [84] Kelly J D. Smooth-and-dive accelerator: a pre-MILP primal heuristic applied to scheduling[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2003, 27(6): 827-832.
- [85] Castro P M. Tightening piecewise McCormick relaxations for bilinear problems[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, 72:300-311.
- [86] Fuller D B, Ferreira Filho V J M, de Arruda E F. Oil industry value chain simulation with learning agents[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2018, 111: 199-209.
- [87] Chryssolouris G, Papakostas N, Mourtzis D. Refinery short-term scheduling with tank farm, inventory and distillation management: An integrated simulation-based approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 166(3): 812-827.
- [88] Persson J. Production planning and scheduling in refinery industry[D]. Linköping University, Sweden, 1999.
- [89] Harjunkoski I, Bauer R. Industrial scheduling solution based on flexible heuristics[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2017, 106: 883-891.
- [90] Khor C S, Varvarezos D. Petroleum refinery optimization[J]. *Optimization and Engineering*, 2017, 18(4): 943-989.
- [91] Petukhov, M. Yu. On the Relevance of Implementation of the Automated System of Production and Supply Sheduling at Oil Refinery[J]. *Automation and Remote Control* 79.6 (2018): 1168-1174.
- [92] Grossmann I. Enterprise-wide optimization: A new frontier in process systems engineering[J]. *AIChE Journal*, 2005, 51(7): 1846-1857.
- [93] Ding J, Chai T, Wang H. Offline modeling for product quality prediction of mineral processing using modeling error PDF shaping and entropy minimization[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2011, 22(3): 408-419.
- [94] Zhou Z, Feng Y, Zhu F, et al. Virtual factory integrated manufacturing system for process simulation and monitoring[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, 44(1): 5219-5224.
- [95] Qin S J. Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis[J]. *Annual Reviews in Control*, 2012, 36(2): 220-234.
- [96] Liao C J, Chen W J. Scheduling under machine breakdown in a continuous process industry[J]. *Computers & Operations Research*, 2004, 31(3): 415-428.
- [97] Bengio Y, Lodi A, Prouvost A. Machine learning for combinatorial optimization: a methodological tour d' horizon[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 290(2):405-421
- [98] Anant M, Lee G. Image analysis and machine learning in digital pathology: Challenges and opportunities[J]. *Medical image analysis* 2016, 33: 170-175.

作者简介

陈远东(1986—),男,博士研究生,从事炼油生产调度优化、机器学习等方面的研究, E-mail: chenyd49@qq.com;

丁进良(1976—),男,教授,博士,从事复杂工业过程智能建模与优化控制,生产全流程运行优化等方面的研究, E-mail: jlding@mail.neu.edu.cn;