

基于原油类型聚类泊位分配的港炼一体化调度模型

王天媛¹ 章立峰² 袁志宏³ 杨涛¹

摘要 针对炼油全流程调度中传统序贯优化方法因忽略港口作业与生产各环节耦合关系而导致的储罐频繁切换、库存成本增加及装置原料供应不连续等问题,采用按原油类型集中卸载的泊位分配策略,基于事件的混合时间建模方法,将泊位分配、原油卸载、储罐调度、蒸馏加工、二次加工和产品调配各环节集成,构建港炼一体化调度模型.模型综合刻画港口卸载与罐区库存的衔接约束、储罐切换与装置进料的时序关系及原油搭配与产品质量的耦合机制,并采用归一化多参数分解技术对模型进行求解.基于某炼化企业实际数据的案例研究结果表明,所提模型能够有效优化泊位分配与原油卸载顺序,显著改善罐区库存管理、常减压蒸馏装置进料连续性、二次加工装置运行及成品油调配等后续生产环节的运行状态.与传统序贯优化方法相比,该模型有效降低了总运行成本,提高了调度效率.

关键词 连续泊位分配;一体化调度;全流程优化;事件驱动建模;混合整数非线性规划

引用格式 王天媛,章立峰,袁志宏,杨涛.基于原油类型聚类泊位分配的港炼一体化调度模型.自动化学报,2026,52(6):1157-1172

DOI 10.16383/j.aas.c250631 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250631

Integrated Terminal-refinery Scheduling Model Based on Crude Oil Type Clustering Berth Allocation

WANG Tian-Yuan¹ ZHANG Li-Feng² YUAN Zhi-Hong³ YANG Tao¹

Abstract To address the problems of frequent tank switching, increased inventory costs, and discontinuous feed-stock supply to units caused by the neglect of the coupling relations among port operations and various production stages in traditional sequential optimization approaches for refinery-wide scheduling, a berth allocation strategy based on concentrated unloading by crude oil type and an event-based hybrid-time modeling approach are adopted to develop an integrated terminal-refinery scheduling model encompassing berth allocation, crude oil unloading, tank scheduling, distillation processing, secondary processing, and product blending. The model comprehensively characterizes the linking constraints between port unloading and tank inventory, the sequential relationships between tank switching and unit feeding, and the coupling mechanisms between crude oil blending and product quality, and a normalized multi-parametric disaggregation technique is employed for model solution. Case study results based on actual data from a refinery enterprise demonstrate that the proposed model effectively optimizes berth allocation and crude oil unloading sequences, and significantly improves the operational state of downstream production stages, including tank inventory management, crude distillation unit feed continuity, secondary processing unit operations, and finished product blending. Compared with traditional sequential optimization approaches, the model effectively reduces total operating costs and improves scheduling efficiency.

Keywords continuous berth allocation; integrated scheduling; enterprise-wide optimization; event-based formulation; mixed-integer nonlinear programming

Citation Wang Tian-Yuan, Zhang Li-Feng, Yuan Zhi-Hong, Yang Tao. Integrated terminal-refinery scheduling model based on crude oil type clustering berth allocation. *Acta Automatica Sinica*, 2026, 52(6): 1157-1172

收稿日期 2025-11-14 录用日期 2026-01-30

Manuscript received November 14, 2025; accepted January 30, 2026

国家科技重大专项(2025ZD1607701),国家重点研发计划(2022YFB3305904)资助

Supported by National Science and Technology Major Project (2025ZD1607701) and National Key Research and Development Program of China (2022YFB3305904)

本文责任编辑 罗彪

Recommended by Associate Editor LUO Biao

1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110819 中国 2. 帝国理工学院化工系萨金特过程系统工程中心 伦敦 SW7 2AZ 英国 3. 清华大学化学工程系化工与低碳技术国家重点实验室 北京 100084 中国

炼油工业作为典型的流程工业复杂系统,在能源供应和化工产品生产中占据着不可替代的地位^[1].实现从原油接卸到产品产出的全流程智能决策与协同优化,是提升炼油企业运营效率和市场竞争力的

1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China 2. The Sargent Centre for Process Systems Engineering, Department of Chemical Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, United Kingdom 3. State Key Laboratory of Chemical Engineering and Low-carbon Technology, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

关键^[2]. 炼油企业的生产运营涵盖原油采购、运输、卸载、储存、加工、产品分销等多个环节, 具有多层次、多约束、多目标和强耦合的特征. 随着全球经济的持续发展和能源需求的不断增长, 炼油企业的生产规模日益扩大, 原油进口量逐年攀升. 据中国石油集团经济技术研究院发布的《2024 年国内外油气行业发展报告》, 2024 年我国原油进口量为 5.53 亿吨, 石油对外依存度为 71.9%^[3]. 在这一背景下, 原油作为炼油企业最重要的生产原料, 其供应的稳定性和连续性直接影响炼油装置的正常运行和企业的经济效益. 港口泊位作为连接海上运输与陆地加工的关键节点, 其卸载效率和分配策略不仅影响油船在港等待时间和港口运营成本, 更是后续原油储运、加工生产等一系列环节的起点和源头. 泊位分配决策的合理性对整个炼油生产系统的运行效率具有全局性影响. 将港口原油接卸与炼厂生产纳入统一优化框架进行协同决策, 即港炼一体化调度优化, 成为提升炼油企业整体运营效率的关键. 然而, 实现港炼一体化调度优化面临诸多挑战.

传统的炼油企业生产调度往往采用序贯优化的方法, 即按时间或工艺顺序将各环节依次独立优化, 前一环节的输出作为后一环节的输入, 将港口作业、罐区调度、装置加工等环节分段独立处理, 忽视了各环节之间的物料流动、时序依赖和资源约束关系^[4-5]. 这种序贯优化方法在面对大规模、高复杂度的炼油系统时存在显著局限性: 不合理的泊位分配和卸载顺序会导致储罐频繁切换、库存成本增加; 储罐调度的不协调会造成蒸馏装置原料供应不连续、操作波动加剧^[6]; 蒸馏产物与二次加工装置需求的不匹配又会影响最终产品的质量和产量. 这种多层次、多环节的级联效应使得序贯优化难以实现系统整体最优, 甚至可能因环节间的不协调导致生产瓶颈、资源浪费和经济效益下降^[7-8]. 特别是在港口泊位分配环节, 若仅考虑“先到先服务”等简单规则而忽略后续生产需求, 可能引发下游生产的连锁反应. 因此, 有必要从文献角度系统考察现有炼油调度和泊位分配的研究现状, 分析其局限性和研究空白.

在炼油企业生产调度方面, 早期研究通常将原油接卸调度、储罐分配、蒸馏加工等环节独立建模优化, Li 等^[9] 提出针对原油处理与储存的短期调度 MINLP (mixed-integer nonlinear programming) 模型, Hou 等^[10] 研究给定炼厂计划下的原油储运调度多目标优化问题. 序贯优化方法虽然显著降低了问题复杂度, 但因环节间解耦决策可能导致次优解. 为克服这一局限, 近年来涌现多项一体化调度优化研究, Zhao 等^[11] 提出炼厂与乙烯装置耦合的多周期一体化规划模型, 实现企业级生产计划的协同优

化; Zheng 等^[12] 建立原油采购计划与调组合度的集成优化模型以稳定调合原油性质; He 等^[13] 针对大规模原油调度与生产计划集成问题提出知识辅助的混合优化策略; 高小永等^[7] 研究考虑调度操作安全平稳性的炼油化工生产过程调度优化问题; 董晓杨等^[14] 研究常减压蒸馏装置过程操作与生产计划的集成优化问题. 这些研究表明, 一体化调度优化能够更好地协调各环节关系、提升系统整体性能. 然而, 上述一体化优化研究虽然在炼厂内部实现不同生产环节的协同决策, 但仍将原油到港作为外生给定条件, 未将港口泊位分配纳入优化框架. 实际上, 港口泊位资源的有限性及卸载作业的时序安排直接影响炼厂的原油供应节奏, 进而对整个生产系统的运行效率产生深远影响. 因此, 有必要进一步考察港口泊位分配问题的研究现状, 分析其与炼厂生产的耦合关系.

现有泊位分配研究主要关注一般货运码头, 相关研究仍相对独立于炼油生产调度. 早期研究主要聚焦于集装箱码头和散货码头的泊位优化问题. Imai 等^[15] 开创性地提出连续泊位分配模型, 允许船舶在码头岸线的任意位置停靠, 更贴近实际作业场景. 在此基础上, Agra 等^[16] 建立集成泊位分配与岸桥分配的混合整数规划模型, Umang 等^[17] 将连续泊位分配方法扩展至散货码头, 开发求解大规模问题的精确与启发式算法. 然而, 上述研究主要关注集装箱码头或散货码头, 较少涉及流程工业码头特别是原油码头的特殊性. 原油码头与一般货运码头存在显著差异: 原油卸载后需按油种通过管道系统进入不同储罐, 不同油种之间存在严格分离要求以避免交叉污染, 储罐切换会产生清罐成本和时间损失, 这些特性要求泊位调度与下游储罐分配、炼厂生产进行协同优化.

鉴于原油码头与炼厂生产的紧密耦合关系, 实现两者的一体化优化需要在统一的建模框架下协调调度决策. 时间表示方法作为调度建模的核心要素, 直接影响模型的精确性和求解效率, 因此有必要回顾炼油调度领域的时间建模方法演进. 早期研究主要采用离散时间建模方法, 即将调度周期划分为若干等长时间段, 决策变量在每个时间段内保持不变. Lee 等^[18] 开发基于离散时间的混合整数线性规划模型求解原油调度问题, Shah^[19] 提出分解策略将炼油调度问题划分为上游港口作业和下游储罐及蒸馏单元操作的离散时间 MILP (mixed-integer linear programming) 模型. 随着建模技术的发展, 连续时间建模方法通过事件点表示操作的开始或结束时刻, 无需预先划分时间段, 能更精确地描述非周期性操作而受到广泛关注. Jia 等^[20] 提出的事件驱动

连续时间建模方法,即以船舶到港、卸载开始/结束等离散事件驱动时间点变化,为后续研究奠定重要基础. Moro 等^[21]开发基于连续时间表示的炼油调度模型. 韩彪等^[8]提出基于即时交货的离散时间模型及其在炼油过程调度优化中的应用. 近年来,研究者在混合整数非线性规划模型求解方面取得显著进展. Castro 等^[22]采用资源-任务网络建模技术并结合多参数分解方法处理原油调度中的双线性约束. Li 等^[9]开发基于单元特定事件的连续时间模型并采用分支定界全局优化算法求解包含原油混合、储罐调度和蒸馏单元进料等复杂操作的 MINLP 问题. 为实现更大规模的炼油企业一体化优化, Gao 等^[23]提出基于分段线性化的 MINLP 近似求解方法,将原 MINLP 问题转化为 MILP 问题以提高求解效率;张莞婷等^[24]提出基于多时间尺度协同的大规模原油调度进化算法;Yang 等^[25]建立集成原油调度与炼厂规划的多周期优化模型,采用混合连续-离散时间表示方法,其中原油调度采用连续时间建模而炼厂规划采用离散时间建模;Zimberg 等^[26]进一步扩展集成调度范围,提出涵盖原油接收、调合、管道输送及炼厂加工全流程的连续时间 MINLP 模型. 这些研究为炼油调度提供丰富的理论方法和建模技术,但大多聚焦于装置级别的短期调度或中长期生产计划优化,较少将港口原油卸载环节纳入整体优化框架.

通过上述文献回顾可以看出,泊位分配与炼油生产一体化优化的研究仍十分有限,近年来,炼厂内部调度^[27]和下游产品分销^[28]等研究通常将原油到港作为外生输入,未考虑泊位资源约束对炼油生产的影响,反映出该领域仍有进一步研究的空间. 现有泊位分配研究主要关注船舶服务时间、泊位利用率等港口侧指标^[29-30],未考虑炼厂对原油供应时序、油种配比的具体要求,可能导致港口“最优”方案在生产侧不可行;炼油调度研究将原油到港视为确定性输入^[9, 31],忽视港口泊位资源有限性和卸载作业约束,当船舶延迟或泊位紧张时,炼厂“最优”计划因原油供应中断而无法执行. 这种分离优化忽视港口与炼厂通过储罐形成的强耦合关系:储罐容量有限且不同油种需严格分离,港口卸载节奏必须与炼厂加工节奏高度协调,否则会造成储罐快速充满导致船舶滞港,或库存不足导致炼厂停产. 尽管 Assis 等^[32]提出集成原油供应运营管理的 MINLP 模型,涵盖码头平台与储罐之间的原油调度以及向蒸馏塔的供料调度,但该研究仍将船舶到港作为已知输入,未涉及泊位分配决策与炼厂生产的动态协同优化. Sahebi 等^[33]在 2014 年对原油供应链优化模型的全面综述中,系统梳理从油田开发、原

油运输、炼油加工到产品分销各环节的研究进展,但该综述亦未涉及港口泊位分配与炼油生产的集成优化问题,反映出该领域仍存在显著的研究空白. 因此,有必要建立港口泊位分配、储罐调度与炼厂生产的一体化调度优化模型,协同考虑泊位资源约束、储罐容量与油种分离要求、炼厂加工能力与原油配比需求,以克服序贯优化的次优性,实现系统整体效益最大化.

基于上述研究现状分析,本文针对港口泊位分配与炼厂生产一体化调度优化问题,构建涵盖泊位分配、原油卸载、储罐调度、蒸馏加工及产品调配的全流程优化模型,并发展相应的求解算法. 与已有研究相比,本文工作具有以下特点: 1) 在问题范围方面,实现港口到炼厂的端到端全流程一体化优化. 现有研究多将港口泊位分配与炼厂生产调度分离处理,这种分段优化虽降低了求解难度,却忽略了港口资源约束对炼厂生产的影响及炼厂需求对泊位分配的反馈,易陷入局部最优. 本文将船舶到港、泊位占用、储罐库存与炼厂生产在统一框架下协同决策,突破了环节分割局限. 2) 在建模策略方面,提出混合时间建模框架,即在同一模型中同时采用离散时间和连续时间两种时间表示方式,兼顾精度与效率. 针对原油码头大批量、长周期卸载及油种频繁切换的特点,本文提出按油种集中卸载的泊位分配策略,减少管道清洗和交叉污染. Floudas 等^[34]系统比较连续时间与离散时间方法的优缺点,指出基于事件的连续时间表示虽精确但模型规模随事件数增长,离散时间表示虽简化建模但难以刻画非周期性事件. 本文对港口侧的泊位分配与卸载采用连续时间表示,精确刻画离散事件时序;对炼厂侧的生产加工与产品调配采用离散时间表示,简化周期性操作建模. 该混合策略既保证关键事件的建模精度,又有效控制变量和约束数量. 3) 在求解方法方面,发展基于归一化多参数分解的全局优化算法. 所建模型为含双线性项的大规模 MINLP 问题,仅用求解器常因分支定界树过大而求解困难. 传统算法如外逼近法处理强非凸双线性约束时收敛慢且对初始点敏感. 本文采用归一化多参数分解技术,该方法通过对双线性项的变量进行归一化处理并引入多个离散化参数,将非凸 MINLP 问题分解为 MILP 主问题和 NLP (nonlinear programming) 子问题交替求解,通过多参数策略在迭代中同时生成多个割平面加速收敛,提高了计算效率并改善了解的质量.

1 问题描述

原油接卸与炼化生产集成过程是现代炼油企业

生产流程中的核心环节,其生产过程是将海运到港的液态原油经过泊位卸载、储罐暂存、常减压蒸馏和二次加工等工序的处理形成最终的成品油产品.不同种类的原油通过海运油轮运抵港口,经泊位卸载后通过输油管道输送至原油储罐 (storage tanks, ST) 进行分类储存.储罐中的原油根据生产计划按特定配比输送至调合罐 (charging tanks, CT) 进行调合,使其满足常减压蒸馏装置的进料要求.调合原油进入常减压蒸馏装置 (crude distillation unit, CDU) 根据沸点差异进行切割分离得到中间馏分产品,各馏分产品进一步分配至催化裂化、加氢裂化、催化重整等二次加工装置进行深度加工,最终经产品调合系统调合为符合质量标准的成品油.图 1 展示了炼油厂集成原油接卸、储运、加工及产品调合系统的简化流程示意图.左侧虚线框表示原油调度阶段,包括原油船 (marine vessel, MV)、进港、原油储罐存储、调合罐混合以及常减压蒸馏装置的进料管理;右侧虚线框表示炼油厂计划阶段,涵盖二次加工装置的操作和最终炼油产品的生产.在整个工艺流程中,泊位卸载作为原油从海运到陆地生产的第一个环节,其调度决策直接影响后续储罐管理和生产计划的执行效率,是实现全流程优化的关键起点.

在原油接卸过程中,油轮到达港口后需要在连续泊位上停靠并通过输油管道将原油卸载至岸上储罐.由于泊位沿码头岸线连续分布,油轮的停泊既要确定在岸线上的具体位置,又要确定开始卸载的时刻,因此可以通过构建时空图将泊位分配问题转化为二维装箱问题.图 2 展示了连续型泊位分配问题的空间-时间表示方法,其中横轴代表时间,纵轴代表泊位位置,每艘油轮在时空图中对应一个矩形区域, l_i 、 l_j 表示船舶的泊位占用长度, w_i 、 w_j 表示船舶卸载时间, (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 表示船舶的开始卸载时间和停泊位置.原油船 1 和原油船 2 装载相同

种类的原油,在时空维度上紧密衔接,实现了同品类货物的连续卸载作业;原油船 3、原油船 4 和原油船 5 则根据泊位空闲情况和到港时间依次安排靠泊.由于不同类型原油的物化性质差异显著,为便于储罐调度管理,原油储罐通常采用专用储存的管理模式,即每个原油储罐被指定用于接收和储存特定种类的原油,避免不同油种在同一储罐内的混存和交叉污染.这种策略要求载有相同类型原油的多艘油轮应尽可能紧凑地排布在时空图中,使其在时间上连续或空间上相邻地卸载,从而将同类原油集中卸载至同一组储罐.

这种基于原油类型聚类的泊位分配策略通过将同类原油油轮在时空维度上集中卸载,可显著提升港炼一体化系统的运行效率.首先,同类原油的集中卸载避免了储罐的频繁切换和管道的重复清洗,使储罐内原油的 API 度、含硫量等关键性质参数保持一致,确保了调合工序原料来源的稳定性和连续性;其次,聚类策略通过保证同类原油的集中供应,使调合罐中原油配比在较长时间段内维持相对稳定,减小了常减压蒸馏装置进料性质的波动幅度,降低了因原料切换导致的操作扰动;最后,原料性质的稳定使炼油装置能够在预设工况下长周期平稳运行,避免了频繁调整工艺参数带来的操作波动,降低了因原料适应性问题导致的非计划停车风险,同时减少了管道清洗和储罐切换的操作成本,从而提高了生产系统的操作稳定性和整体经济性.

1.1 问题定义

基于事件驱动的混合时间建模方法,即原油调度部分采用连续时间建模方法,炼油厂计划部分采用离散时间建模方法.本文构建了涵盖原油卸载、储运、加工及产品生产全流程的基于原油类型聚类的泊位分配与炼化生产集成调度模型 (integrated scheduling model of crude type-based berth alloc-

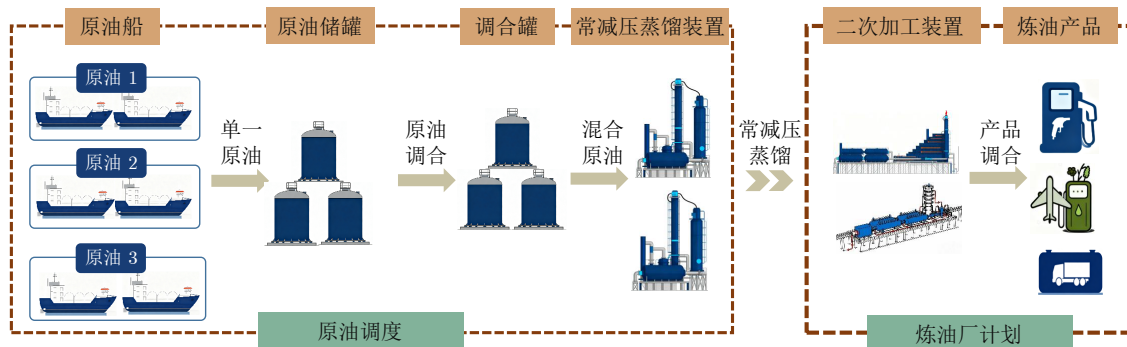


图 1 港口-炼厂集成调度优化框架

Fig.1 Terminal-refinery integrated scheduling optimization framework

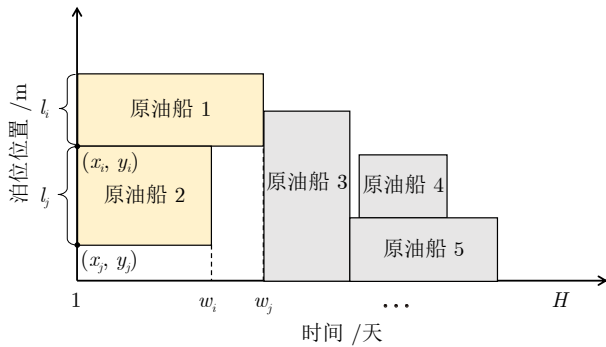


图 2 原油船连续泊位分配的时空表示

Fig.2 Space-time representation of continuous berth allocation for marine vessels

ation and refinery production, CTBA-RP). 模型考虑了原油船泊位分配、原油调度、常减压蒸馏装置操作及下游二次加工单元的协同优化. 为构建该集成优化模型, 给出如下已知条件、假设条件和决策变量:

已知条件.

1) 给定炼油厂集成生产系统的拓扑结构, 包含原油船 MV、原油储罐 ST、调合罐 CT、常减压蒸馏装置 CDU、二次加工单元以及各设备间的物流连接网络.

2) 给定各品种原油 c 的关键性质参数, 涵盖相对密度、硫含量及成品油质量控制所需的其他物性指标.

3) 给定连续泊位的长度.

4) 给定原油船 MV 的到港计划, 包含预计到港时刻、所载原油品种及装载量、码头的卸载速率约束以及油船本身的卸载时间和船舶长度.

5) 给定原油储罐 ST 与调合罐 CT 的运行参数, 包括储罐容量、物料输送流量上下限、期初库存水平及罐间输送网络. 其中, 每个原油储罐 ST 被预先指定用于储存特定种类的原油, 调合罐 CT 用于将不同原油储罐中的原油按配比混合.

6) 给定常减压蒸馏装置 CDU 的运行参数, 包含进料原油物性要求、出口馏分切割方案、各馏分产品的收率及质量特性.

7) 给定二次加工单元在各操作模式 m 下的运行特性, 涵盖产品收率分布、物流性质变化规律、处理能力上下限.

8) 给定最终产品的市场需求及质量技术规范.

9) 给定调度周期.

10) 给定经济评价参数, 涵盖油船卸载费用、滞期费用、CDU 原料切换损失、储罐及配料罐持液成本、二次加工单元各模式运行费用、成品油销售价格, 用于构建经济目标函数.

假设条件.

1) 不考虑原油船 MV 的混装运输, 各油船仅承载单一品种原油.

2) 调度周期内各原油船 MV 的卸载作业连续进行且不重复执行.

3) 原油储罐 ST 与调合罐 CT 的进料和出料操作不可同时进行.

4) 常减压蒸馏装置 CDU 在任意时刻的进料源于唯一调合罐 CT.

5) 忽略储罐内的原油静置沉降时间要求.

6) 调合罐中不同原油按配比混合的过程理想化, 混合瞬时完成且组成均匀, 混合后原油的性质通过各组分性质的加权平均计算.

7) 各加工装置在确定操作模式下的产品收率及物流性质为常数.

8) 忽略加工装置间物料输送的时间延迟.

9) 加工装置的运行成本与处理物料量成正比关系.

决策变量.

1) 确定原油船 MV 的卸载时间、泊位分配、靠港等待时长.

2) 确定储罐间的原油输送流量及传输时间安排.

3) 确定原油储罐 ST 与调合罐 CT 在各时刻的库存量.

4) 确定常减压蒸馏装置 CDU 的进料切换时刻、次数和进料顺序.

5) 确定常减压蒸馏装置 CDU 及二次加工单元的物料处理量.

6) 确定加工单元间物料传递的时间窗口.

7) 确定调度周期内各类成品油的总产量.

炼油厂原油调度与生产计划集成优化问题的目标是最大化总利润, 即最终产品销售收入扣除各项成本, 包括船舶滞期费和卸载费用、储罐库存管理成本、CDU 进料切换成本、CDU 加工成本以及二次加工装置运行费用.

2 一体化模型构建

2.1 目标函数

一体化模型的目标函数如式 (1) 所示, 以系统总成本最小化为准则, 综合考虑蒸馏单元切换成本、油船等待成本、库存持有成本、同类原油船的时空离散度惩罚、加工成本以及产品销售收益. 其中, 第四、五项为同类原油船的时空离散度惩罚项, 用于量化按油种集中卸载策略的实现程度. 第四项 $\sum_{c \in C} (\max_{mv \in G_c} \xi_{mv} - \min_{mv \in G_c} \xi_{mv})$ 表征各油种

组在时间维度的离散程度, 其中 G_c 表示装载油种 c 的油船集合, ξ_{mv} 表示油船 mv 的卸载起始时刻, 该项通过计算同组油船中最晚与最早卸载时刻之差来度量其时间跨度; 第五项 $\sum_{c \in C} (\max_{mv \in G_c} \eta_{mv} - \min_{mv \in G_c} \eta_{mv})$ 表征各油种组在空间维度的离散程度, 其中 η_{mv} 表示油船 mv 的停泊位置坐标, 该项通过计算同组油船占据的最大与最小泊位位置之差来度量其空间跨度. max-min 形式能够直接反映同类油船的时空聚集特性: 当时间跨度趋于零时表明同类油船实现连续卸载, 当空间跨度趋于零时表明同类油船实现相邻停泊. 通过在目标函数中最小化这两项, 驱使优化求解过程将同类油船在时空图中紧密排布, 使其在时间上连续或空间上相邻地完成卸载作业, 从而实现同类原油向同一储罐组的持续供料, 减少储罐切换频次和管道清洗操作, 保证储罐内原油性质的一致性. 该机制体现了泊位分配决策对下游储运和加工环节的协同影响, 是实现港炼一体化优化的关键要素.

$$\begin{aligned} \min TCT = & \sum_{cd \in CD} C^{chg}(NDR_{cd} - 1 + \\ & \sum_{mv \in MV} C^{wait} \omega_{mv} + \\ & H \sum_{\substack{k \in K, \\ c \in C, t \in T}} \frac{C_k^{inv} v_{c, k, t}}{|T| + 1} + \\ & \sum_{c \in C} (\max_{mv \in G_c} \xi_{mv} - \min_{mv \in G_c} \xi_{mv}) + \\ & \sum_{c \in C} (\max_{mv \in G_c} \eta_{mv} - \min_{mv \in G_c} \eta_{mv}) + \\ & \sum_{t \in T, cd \in CD, c \in C} C_{cd, c}^{cd} R_{t, cd} + \\ & \sum_{t \in T, u \in U, m \in M} C_{u, m}^{ref} fin_{t, u, m} - \\ & \sum_{t \in T, p \in P} P_p p_{t, p} \end{aligned} \quad (1)$$

相关约束如第 2.2 节所示, 模型中各符号的具体含义详见附录 A.

2.2 约束条件

2.2.1 泊位分配约束

泊位分配约束确保油船在时空维度上的合理布置和无冲突分配. 约束 (2) 规定任意两艘油船 mv 和 mv' 在时间或空间维度上必须具有明确的相对位置关系, 即要么一艘在另一艘之前停泊, 要么一艘在另一艘下方停泊. 约束 (3) ~ (4) 通过大 M 方

法确保当油船 mv 在油船 mv' 之前或下方时, 它们的时空坐标满足非重叠条件, 有效避免泊位冲突. 约束 (5) ~ (6) 建立了相邻关系与相对位置关系之间的逻辑联系, 即只有当两艘油船存在相对位置关系时, 才可能相邻. 约束 (7) ~ (8) 保证相对位置关系的单向性和互斥性, 防止出现矛盾的位置判断. 约束 (9) ~ (10) 确保同一原油类型组内的油船形成连通的空间结构, 其中约束 (9) 要求每组至少有 $|G_c| - 1$ 对相邻关系以保证整体连通性, 约束 (10) 确保每艘油船至少与组内一艘油船相邻. 约束 (11) ~ (13) 通过子回路消除约束防止组内油船形成不连通的子集, 确保所有载运相同原油的油船紧凑聚集, 从而便于后续的卸货和混合操作.

$$\alpha_{mv, mv'} + \alpha_{mv', mv} + \beta_{mv, mv'} + \beta_{mv', mv} \geq 1, \quad \forall mv, mv' \in G_c \quad (2)$$

$$\xi_{mv} - \xi_{mv'} + H\alpha_{mv, mv'} \leq H - \tau_{mv}, \quad \forall mv, mv' \in G_c \quad (3)$$

$$\eta_{mv} - \eta_{mv'} + L\beta_{mv, mv'} \leq L - l_{mv}, \quad \forall mv, mv' \in G_c \quad (4)$$

$$\alpha_{mv, mv'}^{adj} \leq \alpha_{mv, mv'}, \quad \forall mv, mv' \in G_c \quad (5)$$

$$\beta_{mv, mv'}^{adj} \leq \beta_{mv, mv'}, \quad \forall mv, mv' \in G_c \quad (6)$$

$$\alpha_{mv, mv'} + \alpha_{mv', mv} \leq 1, \quad \forall mv, mv' \in G_c \quad (7)$$

$$\beta_{mv, mv'} + \beta_{mv', mv} \leq 1, \quad \forall mv, mv' \in G_c \quad (8)$$

$$\sum_{mv \in G_c} \sum_{mv' \in G_c} (\alpha_{mv, mv'}^{adj} + \alpha_{mv', mv}^{adj} + \beta_{mv, mv'}^{adj} + \beta_{mv', mv}^{adj}) \geq |G_c| - 1, \quad \forall c \in C \quad (9)$$

$$\sum_{mv' \in G_c} (\alpha_{mv, mv'}^{adj} + \alpha_{mv', mv}^{adj} + \beta_{mv, mv'}^{adj} + \beta_{mv', mv}^{adj}) \geq 1, \quad \forall mv \in G_c \quad (10)$$

$$\sum_{(mv, mv') \in \delta(\varphi)} \delta_{mv, mv'} \geq 1, \quad \forall \varphi \subset G_c, \emptyset \neq \varphi \neq G_c, c \in C \quad (11)$$

$$\alpha_{mv, mv'}^{adj} + \alpha_{mv', mv}^{adj} + \beta_{mv, mv'}^{adj} + \beta_{mv', mv}^{adj} - 1 + \epsilon \leq \epsilon \delta_{mv, mv'}, \quad \forall mv, mv' \in G_c \quad (12)$$

$$\alpha_{mv, mv'}^{adj} + \alpha_{mv', mv}^{adj} + \beta_{mv, mv'}^{adj} + \beta_{mv', mv}^{adj} \geq \delta_{mv, mv'}, \quad \forall mv, mv' \in G_c \quad (13)$$

2.2.2 船舶相关约束

油船到港与卸货约束确保油船按照预定时间到

达并完成卸货作业. 约束 (14)(对应假设条件 1) 和 2)) 确保规划期结束时所有油船的原油已完全卸载, 库存为零. 由于假设条件 1) 规定各油船仅承载单一品种原油, 该约束保证了单一油种的完整卸载; 结合假设条件 2) 关于卸载作业连续进行且不重复的要求, 确保了卸货操作的完整性. 约束 (15) ~ (16) 建立油船卸货操作与到港、离港事件之间的逻辑关系, 规定油船只有在到港后且离港前的时间段内才能进行卸货作业. 约束 (17) 确保油船的实际到港时间不早于其预定到达时间, 约束 (18) 进一步保证离港时间至少为到港时间加上最小停泊时长. 约束 (19) 通过时间段序号的大小关系确保每艘油船的离港事件发生在到港事件之后, 维护事件的时序逻辑. 约束 (20) 计算油船在海上的等待时间, 即实际到港时间与预定到达时间之差. 约束 (21) 计算油船在港口的实际停泊时长, 确保其不小于规定的最小停泊时间, 该停泊时长取决于卸货量和卸货速率. 这些约束共同确保了油船调度的时间可行性和操作连续性.

$$\sum_{c \in C} v_{c, mv, |T|} = 0, \quad \forall mv \in MV \quad (14)$$

$$YF_{mv, st, t} \leq \sum_{t' \in T, t' \leq t} YI_{t', mv}, \quad \forall mv \in MV, st \in ST, t \in T \quad (15)$$

$$YF_{mv, st, t} \leq \sum_{t' \in T, t' > t} YO_{t', mv}, \quad \forall mv \in MV, st \in ST, t \in T \quad (16)$$

$$TT_t \geq \sum_{mv \in MV} Tr_{mv} YI_{t, mv}, \quad \forall t \in T \quad (17)$$

$$TT_t \geq \sum_{mv \in MV} (Tr_{mv} + Hb_{mv}) YO_{t, mv}, \quad \forall t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{t \in T} ord_t YI_{t, mv} + 1 \leq \sum_{t \in T} ord_t YO_{t, mv}, \quad \forall mv \in MV \quad (19)$$

$$\omega_{mv} \geq TT_t - Tr_{mv} - (H - Tr_{mv})(1 - YI_{t, mv}), \quad \forall mv \in MV, t \in T \quad (20)$$

$$Hb_{mv} \geq TT_{t'} - TT_t - (H - Hb_{mv})(2 - YI_{t, mv} - YO_{t', mv}), \quad \forall mv \in MV, t, t' \in T, t' > t \quad (21)$$

2.2.3 储罐相关约束

储罐相关约束确保储罐的库存水平、混合质量和操作安全性. 定义 $v_{c, k, 0} = v_{c, k}^0$ 表示储罐 k 中油种 c 的初始库存, $F_{c, k', k, 0} = 0$ 表示调度周期开始

前无物料流动. 约束 (22) 为储罐库存平衡约束, 通过递推关系计算每个时间段储罐中各油种的库存量, 即当前库存等于上一时间段库存加上流入量减去流出量. 约束 (23) ~ (24) 分别限制储罐在任意时间段的最大和最小库存量, 防止溢出或空罐, 维持储罐的安全操作区间. 约束 (25) ~ (26) 控制储罐混合物的质量性质, 通过加权平均确保混合后的原油性质(如硫含量、比重等)满足规定的上下限要求, 保证后续加工的原料质量. 约束 (27)(对应假设条件 3)) 防止储罐同时进行进料和出料操作, 避免操作冲突和质量波动. 该约束通过限制二元变量 $YF_{mv, st, t}$ (表示油船 mv 向储罐 st 的进料) 和 $YF_{st, ct, t}$ (表示储罐 st 向调合罐 ct 的出料) 之和不大于 1, 确保储罐在任意时间段仅能执行进料或出料中的一种操作. 约束 (28) 确保充装罐不会同时向多个蒸馏单元供料, 保证单一出口操作, 维持进料的稳定性和可控性. 约束 (29) 建立混合罐的物料平衡关系, 规定从混合罐输出到下游单元的各原油组分流量与该组分在罐内的库存量成比例, 比例系数为体积分数 $\mu_{k, k', t}$, 确保混合比例的一致性和操作的连续性. 这些约束共同保障了储罐系统的安全、稳定 and 高质量运行. 需要说明的是, 由于原油储罐 ST 仅存储单一油种, 约束 (29) 中的体积分数 $v_{c, k, t}$ 恒为 1, 输出操作不涉及混合.

$$v_{c, k, t} = v_{c, k, t-1} + \sum_{k' \in K: (k', k) \in O^s} F_{c, k', k, t-1} - \sum_{k'' \in K: (k, k'') \in O^s} F_{c, k, k'', t-1}, \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T \quad (22)$$

$$\sum_{c \in C_k} v_{c, k, t} \leq C_k^{\max}, \quad \forall k \in K, t \in T \quad (23)$$

$$\sum_{c \in C_k} v_{c, k, t} \geq C_k^{\min}, \quad \forall k \in K, t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{c \in C_k} \phi_{c, \kappa} v_{c, k, t} \leq \sum_{c \in C_k} \phi_{c, \kappa}^{\max} v_{c, k, t}, \quad \forall k \in K, \kappa \in PR, t \in T \quad (25)$$

$$\sum_{c \in C_k} \phi_{c, \kappa} v_{c, k, t} \geq \sum_{c \in C_k} \phi_{c, \kappa}^{\min} v_{c, k, t}, \quad \forall k \in K, \kappa \in PR, t \in T \quad (26)$$

$$YF_{mv, st, t} + YF_{st, ct, t} \leq 1, \quad \forall st \in ST, ct \in CT, t \in T \quad (27)$$

$$YF_{st, ct, t} + \sum_{cd \in CD, (ct, cd) \in O^s} YF_{ct, cd, t} \leq 1, \quad \forall st \in ST, ct \in CT, t \in T \quad (28)$$

$$F_{c, k, k', t} = \mu_{k, k', t} v_{c, k, t},$$

$$\forall c \in C, k \in ST \cup CT, (k, k') \in O^s, t \in T \quad (29)$$

2.2.4 时间表示相关约束

时间表示相关约束确保各时间段的持续时长与物料传输操作相匹配. 约束 (30) 规定时间段的持续时长不小于物料从单元 k 传输到 k' 所需的最短时间, 该时间由总传输量除以最大流量确定. 约束 (31) 针对充装罐的出料操作, 要求时间段持续时长满足所有原油组分传输时间之和的下限. 约束 (32) ~ (33) 专门针对充装罐到蒸馏单元的物料传输, 分别从上下两个方向约束时间段长度: 约束 (32) 确保时间段足够长以完成基于最大流量的传输操作; 约束 (33) 限制时间段不超过基于最小流量的传输时间上限, 从而将蒸馏单元的进料时间控制在合理范围内. 约束 (34) 定义时间段持续时长为相邻累计时间点之差, 建立离散时间段与连续时间轴之间的映射关系. 这些约束共同确保了调度方案中时间分配的合理性和操作的可行性, 防止出现物理上不可实现的时间安排.

这种基于变长时间段的连续时间表示方法相较于传统的固定时间离散化方法具有显著优势. 首先, 该方法允许时间段长度根据实际操作需求动态调整, 避免了固定时间步长可能导致的过度离散化或时间精度不足问题; 其次, 通过约束 (30) ~ (33) 将时间段长度与物料传输量和流量直接关联, 确保了时间分配与物理操作的内在一致性, 使得每个时间段恰好对应一个完整的物料传输操作; 再次, 这种表示方法有效减少了模型中时间离散点的数量, 降低了问题规模和计算复杂度, 同时保持了对连续时间过程的精确描述; 最后, 变长时间段的灵活性使得模型能够更好地捕捉炼油调度中操作时间差异大的特点, 例如快速的罐间传输与耗时较长的蒸馏过程可以分别采用不同长度的时间段表示, 提高了模型的实用性和求解效率. 这些约束共同确保了调度方案中时间分配的合理性和操作的可行性, 防止出现物理上不可实现的时间安排.

$$TT_{t+1} - TT_t \geq \frac{\sum_{c \in C_k} F_{c, k, k', t}}{F_{k, k', t}^{\max}},$$

$$\forall k' \in K, (k, k') \in O^s, t \in T \quad (30)$$

$$TT_{t+1} - TT_t \geq \sum_{\substack{cd \in CD \\ (ct, cd) \in O^s}} \frac{\sum_{c \in C} F_{c, ct, cd, t}}{F_{ct, cd, t}^{\max}},$$

$$\forall ct \in CT, t \in T \quad (31)$$

$$TT_{t+1} - TT_t \geq \sum_{c \in C_k} \frac{F_{c, ct, cd, t}}{F_{ct, cd, t}^{\max}},$$

$$\forall ct \in CT, cd \in CD, (ct, cd) \in O^s, t \in T \quad (32)$$

$$TT_{t+1} - TT_t \leq \sum_{c \in C_k} \frac{F_{c, ct, cd, t}}{F_{ct, cd, t}^{\min}},$$

$$\forall ct \in CT, cd \in CD, (ct, cd) \in O^s, t \in T \quad (33)$$

$$DT_t = TT_{t+1} - TT_t, \quad \forall t \in T \quad (34)$$

2.2.5 其他约束

流量约束确保单元间物料传输满足流量上下限要求. 约束 (35) ~ (36) 通过大 M 方法将连续流量变量与离散连接决策变量耦合: 当 $YF_{k, k', t} = 1$ 时, 约束 (35) 限制总流量不超过单元 k 的最大容量或流量上限, 约束 (36) 确保总流量达到最小操作流量; 当 $YF_{k, k', t} = 0$ 时, 两约束自动满足, 总流量被强制为零. 该建模方式有效避免虚假流动和数值不稳定, 确保传输操作仅在连接激活时发生且流量处于设备有效工作区间, 保障系统稳定运行和能效优化.

$$\sum_{c \in C_k} F_{c, k, k', t} \leq C_k^{\max} YF_{k, k', t},$$

$$\forall k, k' \in MV \cup K \cup CD, (k, k') \in O^s, t \in T \quad (35)$$

$$\sum_{c \in C_k} F_{c, k, k', t} \geq C_k^{\min} YF_{k, k', t},$$

$$\forall k, k' \in MV \cup K \cup CD, (k, k') \in O^s, t \in T \quad (36)$$

2.2.6 常减压蒸馏装置约束

蒸馏单元约束确保 CDU 的切换操作、进料质量和产品产出满足工艺要求. 约束 (37) 通过逻辑蕴含关系检测 CDU 的原料切换: 当充装罐供料来源在相邻时间段发生变化时, 切换指示变量 $\chi_{cd, t}$ 被激活. 约束 (38) 统计 CDU 在整个规划期内的切换总次数. 约束 (39) (对应假设条件 4)) 确保充装罐在单个时间段内最多向一个 CDU 供料, 避免物料分流和质量波动. 该约束通过限制向同一 CDU 供料的充装罐数量不超过 1, 保证了 CDU 进料源的唯一性. 约束 (40) 限制所有 CDU 的切换次数总和不超过允许上限, 以减少频繁切换带来的过渡损失和操作成本. 约束 (41) 定义 CDU 的总进料量为所有上游充装罐输送的原油流量之和; 约束 (42) ~ (43) 将进料量限制在基于时间段长度的流量上下限范围内, 保证 CDU 在额定工况下运行. 约束 (44) ~ (45) 通过加权平均控制 CDU 进料的原油质量性质, 确保关键指标如硫含量、API 重度等满足工艺规范. 约束 (46) 根据原油切割收率系数计算 CDU 各馏分产品的产出量, 建立进料与产品之间的物料平衡关系. 这些约束综合保障了蒸馏单元的稳定操作和产品质量达标.

$$\chi_{cd,t} \geq YF_{ct,cd,t-1} + YF_{ct',cd,t-1}, \quad \forall cd \in CD, ct \in CT, t \in T \quad (37)$$

$$\sum_{t \in T} \chi_{cd,t+1} = NDR_{cd}, \quad \forall cd \in CD \quad (38)$$

$$\sum_{ct \in CT, (ct, cd) \in O^s} YF_{ct,cd,t} \leq 1, \quad \forall cd \in CD, t \in T \quad (39)$$

$$\sum_{cd \in CD} NDR_{cd} \leq ND \quad (40)$$

$$R_{t,cd} = \sum_{\substack{c \in C_{ct}, \\ ct \in CT, (ct, cd) \in O^s}} F_{c,ct,cd,t}, \quad \forall t \in T, cd \in CD \quad (41)$$

$$R_{t,cd} \geq C_{cd}^{\min} DT_t, \quad \forall t \in T, cd \in CD \quad (42)$$

$$R_{t,cd} \leq C_{cd}^{\max} DT_t, \quad \forall t \in T, cd \in CD \quad (43)$$

$$\sum_{c \in C} \phi_{c,\kappa} F_{c,k,cd,t} \leq \phi_{cd,\kappa}^{\max} R_{t,cd}, \quad \forall t \in T, cd \in CD, \kappa \in PR \quad (44)$$

$$\sum_{c \in C} \phi_{c,\kappa} F_{c,k,cd,t} \geq \phi_{cd,\kappa}^{\min} R_{t,cd}, \quad \forall t \in T, cd \in CD, \kappa \in PR \quad (45)$$

$$f_{out,t,cd,s} = \sum_{\substack{ct \in CT, (ct, cd) \in O^s, \\ c \in C, (c, s) \in C^s}} F_{c,ct,cd,t} SS_{c,s}, \quad \forall t \in T, cd \in CD, s \in S^{\text{out},cd} \quad (46)$$

2.2.7 二次加工装置约束

二次加工单元与产品约束确保下游加工装置的操作模式选择、物料平衡和最终产品质量达标. 约束 (47) 建立加工单元间的物料衔接关系, 规定下游单元的进料量等于上游单元相应馏分的产出量, 确保全流程物料守恒. 约束 (48) 要求每个加工单元在每个时间段必须且仅能选择一种操作模式, 体现操作的互斥性和确定性. 约束 (49) 通过大 M 方法将进料量与模式选择变量耦合, 确保仅被选中模式下的进料量非零. 约束 (50)(对应假设条件 7)) 根据各操作模式的产品收率系数 $yd_{u,m,s}$ 计算加工单元的产出量, 建立进料与产品之间的线性关系. 假设条件 7) 规定收率系数为常数, 确保了该线性关系在整个调度周期内的稳定性. 约束 (51) 将加工单元的进料量限制在基于时间段长度和处理能力的上下限范围内, 保证装置在合理负荷下运行. 约束 (52) 将各加工单元产出的中间产品汇总为最终产品, 约束

(53) 确保最终产品的总产量满足市场需求范围. 约束 (54) ~ (55) 通过加权平均控制最终产品的质量性质, 确保辛烷值、十六烷值等关键指标符合产品规格要求. 这些约束综合保障了二次加工系统的平稳运行和产品质量合格.

$$\sum_{m \in M} fin_{t,u,m} = \sum_{s \in SO^{u',u}} f_{out,t,u',s}, \quad \forall t \in T, u, u' \in U \quad (47)$$

$$\sum_{m \in M} x_{t,u,m} = 1, \quad \forall t \in T, u \in U \quad (48)$$

$$fin_{t,u,m} \leq Mx_{t,u,m}, \quad \forall t \in T, u \in U, m \in M \quad (49)$$

$$f_{out,t,u,s} = \sum_{m \in M} yd_{u,m,s} fin_{t,u,m}, \quad \forall t \in T, u \in U, s \in S^{\text{out},u} \quad (50)$$

$$C_u^{\min} DT_t \leq \sum_{m \in M} fin_{t,u,m} \leq C_u^{\max} DT_t, \quad \forall t \in T, u \in U \quad (51)$$

$$pft_{t,p} = \sum_{\substack{u \in U, \\ s \in S^{\text{out},u}, (u,s) \in SP}} f_{out,t,u,s}, \quad \forall t \in T, p \in P \quad (52)$$

$$D_p^{\min} \leq \sum_{t \in T} pft_{t,p} \leq D_p^{\max}, \quad \forall p \in P \quad (53)$$

$$\sum_{\substack{u \in U, \\ s \in S^{\text{out},u}, (u,s) \in SP}} f_{out,t,u,s} pr_{u,s,pe} \geq pp_{p,pe}^{\min} pft_{t,p}, \quad \forall t \in T, p \in P, pe \in PQ \quad (54)$$

$$\sum_{\substack{u \in U, \\ s \in S^{\text{out},u}, (u,s) \in SP}} f_{out,t,u,s} pr_{u,s,pe} \leq pp_{p,pe}^{\max} pft_{t,p}, \quad \forall t \in T, p \in P, pe \in PQ \quad (55)$$

3 模型求解

本文建立的一体化优化模型属于 MINLP 问题, 其非线性源于约束 (29) 中的双线性项 $F_{c,k,k',t} = \mu_{k,k',t} v_{c,k,t}$, 其中 $\mu_{k,k',t} \in [0, 1]$ 为储罐 k 在时间段 t 送往储罐 k' 的体积分, $v_{c,k,t}$ 为原油库存量. 大量非凸双线性项的存在使得模型难以在规定的时间内快速收敛到最优解.

3.1 NMDT 线性化方法

针对双线性项, 本文采用 NMDT (normalized multiparametric disaggregation technique) 松弛方

法^[35]进行线性化. NMDT 通过对归一化变量 $\mu_{k, k', t}$ 采用十进制离散化表示, 其数学原理为:

引入二元变量 $Z_{k, k', t, \ell, n}^{\mu} \in \{0, 1\}$ 选择十进制位置 $\ell \in \{\psi, \dots, -1\}$ 的数字 $n \in \{1, \dots, 9\}$, 其中 ψ 表示离散精度. 通过二元变量之和乘以相应的位权 10^{ℓ} , 可实现连续域 $[0, 1]$ 的离散值集表示, 并通过添加松弛变量 $\Delta\mu_{k, k', t} \in [0, 10^{\psi}]$ 来保证连续性, 见式 (56).

$$\mu_{k, k', t} = \sum_{\ell=\psi}^{-1} \sum_{n=1}^9 n \times 10^{\ell} \times Z_{k, k', t, \ell, n}^{\mu} + \Delta\mu_{k, k', t}, \quad \forall (k, k') \in O^s, t \in T \quad (56)$$

变量 $F_{c, k, k', t}$ 表示双线性项 $\mu_{k, k', t} v_{c, k, t}$, 通过式 (57) 关联到两个新的连续变量 $\hat{V}_{c, k, k', t, \ell, n}$ 和 $\Delta F_{c, k, k', t}$. 前者为分解的体积变量, 通过式 (58) 与原始库存量 $v_{c, k, t}$ 关联, 并通过式 (59) 限制其上界. 式 (60) 确保每个十进制位置 ℓ 只选择一个数字 n .

$$F_{c, k, k', t} = \sum_{\ell=\psi}^{-1} \sum_{n=1}^9 n \times 10^{\ell} \times \hat{V}_{c, k, k', t, \ell, n} + \Delta F_{c, k, k', t}, \quad \forall c \in C, (k, k') \in O^s, t \in T \quad (57)$$

$$v_{c, k, t} = \sum_{n=0}^9 \hat{V}_{c, k, k', t, \ell, n}, \quad \forall c \in C, (k, k') \in O^s, t \in T, \ell \in \mathcal{L} \quad (58)$$

$$\hat{V}_{c, k, k', t, \ell, n} \leq v_{c, k, t}^{\max} Z_{k, k', t, \ell, n}^{\mu}, \quad \forall c \in C, (k, k') \in O^s, t \in T, \ell \in \mathcal{L}, n \in \mathcal{N} \quad (59)$$

$$\sum_{n=0}^9 Z_{k, k', t, \ell, n}^{\mu} = 1, \quad \forall (k, k') \in O^s, t \in T, \ell \in \mathcal{L} \quad (60)$$

最后, 通过 McCormick 约束关联两组松弛变量 $\Delta F_{c, k, k', t}$ 和 $\Delta\mu_{k, k', t}$, 确保松弛的紧致性. 式 (61) 给出了松弛变量 $\Delta F_{c, k, k', t}$ 的上界约束, 式 (62) 则通过 McCormick 包络约束建立 $\Delta F_{c, k, k', t}$ 与 $v_{c, k, t}$ 和 $\Delta\mu_{k, k', t}$ 之间的关系.

$$\Delta F_{c, k, k', t} \leq v_{c, k, t}^{\max} \Delta\mu_{k, k', t}, \quad \forall c \in C, (k, k') \in O^s, t \in T \quad (61)$$

$$10^{\psi} (v_{c, k, t} - v_{c, k, t}^{\max}) + v_{c, k, t}^{\max} \Delta\mu_{k, k', t} \leq \Delta F_{c, k, k', t} \leq 10^{\psi} v_{c, k, t}, \quad \forall c \in C, (k, k') \in O^s, t \in T \quad (62)$$

需要说明的是, 式 (56) ~ (57) 中数字 n 的求和从 1 开始, 这是因为当某一十进制位的数字为 0 时, 其对 μ 和 F 的贡献为零 ($0 \times 10^{\ell} = 0$), 在加权和中无需显式表示. 而式 (58) 中求和从 0 开始是为了实现库存量 $v_{c, k, t}$ 的完整分解, 需要定义当 $Z_{k, k', t, \ell, 0}^{\mu} = 1$ 时

(即该位数字为 0) 对应的库存分配变量 $\hat{V}_{c, k, k', t, \ell, 0}$. 式 (60) 采用等式约束 $\sum_{n=0}^9 Z_{k, k', t, \ell, n}^{\mu} = 1$ 确保每个十进制位必须选择一个数字 (包括 0), 这与式 (58) 的完整分解逻辑相一致. 这种处理方式在保持 NMDT 标准形式的同时, 确保了库存平衡约束的完整性.

通过上述线性化松弛方法, 原双线性约束被转化为一组线性约束, 从而将 MINLP 问题转化为 MILP 问题, 显著提升了求解效率.

3.2 迭代优化策略

为获得高质量的全局最优解, 本文采用两阶段迭代优化策略. 算法在第 ν 次迭代中执行以下步骤:

步骤 1. 求解 NMDT 松弛 MILP 问题

采用 NMDT 方法对双线性项进行线性化处理, 求解 MILP 模型获得下界 LB^{ν} :

$$LB^{\nu} = \min\{TCT \mid \text{约束 (2) ~ (28), (30) ~ (62)}\} \quad (63)$$

在此模型中, 约束 (56) ~ (62) 为 NMDT 方法引入的线性化约束, 用于处理所构建的一体化模型中的双线性项. 由于双线性项已被线性化, 该子问题是一个混合整数线性规划问题, 可以高效求解并提供原 MINLP 问题的有效下界.

步骤 2. 求解整数变量固定的非线性规划问题

利用步骤 1 求解得到的变量值, 固定部分二元变量, 求解原始 MINLP 模型:

$$UB^{\nu} = \min\{TCT \mid \text{约束 (2) ~ (55), 二元变量固定}\} \quad (64)$$

由于二元变量被固定, 模型退化为非线性规划子问题. 若求解成功, 获得上界 UB^{ν} ; 否则设 $UB^{\nu} = +\infty$.

步骤 3. 收敛性判断

计算优化间隙:

$$GAP^{\nu} = \frac{|UB^{\nu} - LB^{\nu}|}{LB^{\nu}} \times 100\% \quad (65)$$

若 $GAP^{\nu} \leq \eta$ 或达到最大迭代次数, 算法终止, 输出当前最优解. 若不满足终止条件, 执行松弛收紧操作: NMDT 方法通过离散化精度参数 ψ 控制松弛的紧致程度. 在第 $\nu + 1$ 次迭代中, 通过以下方式收紧松弛:

$$\psi^{\nu+1} = \psi^{\nu} - 1 \quad (66)$$

即增加一位十进制精度. 更高的离散化精度使得 NMDT 松弛更接近原始双线性约束, 从而在下一轮迭代中获得更紧的下界.

该迭代策略的核心思想是利用 MILP 松弛的下界和 NLP 子问题的上界构成分支定界框架. 在

每次迭代中: MILP 子问题通过 NMDT 松弛提供下界 LB^v , 由于 NMDT 松弛的有效性始终保持, 该下界随迭代单调递增; NLP 子问题通过固定二元变量求解原始非线性模型提供上界 UB^v , 随着搜索到更优的可行解, 该上界单调递减. 若当前间隙不满足精度要求, 通过 $\psi^{v+1} = \psi^v - 1$ 增加离散化精度, 使 NMDT 松弛更接近原始双线性约束, 从而在下一轮迭代中获得更紧的下界. 上下界逐步收敛, 当间隙满足精度要求时算法终止.

4 案例分析

4.1 算例描述

为验证所构建模型的有效性, 本文以某炼油企业的原油码头及炼油生产系统为背景进行案例分析. 该系统包含连续型泊位供 12 艘原油船停靠卸载, 涉及 4 种不同类型的进口原油. 卸载后的原油通过管道输送至 4 个原油储罐, 随后进入 3 个调合罐进行原油混合与配比调整, 经 2 个常减压蒸馏装置初步加工后, 分别送往 10 个二次加工单元进行深度处理, 最终生产汽油、柴油、航空煤油和燃料油 4 类主要产品, 调度周期为 30 天. 表 1 ~ 表 4 给出了原油船接卸、原油调度和炼厂生产的主要参数, 其余参数采用文献 [36] 中的数据.

4.2 结果分析

模型采用 GAMS 44.4.0^[37] 建模, 调用全局优化求解器 Gurobi 12.0.3^[38] 求解, 最优性间隙设定为 6.0%, 最大运行时间 3 600 s. 计算实验在配置 AMD Ryzen 78845H 处理器 (3.80 GHz)、32.0 GB 内存的 HP 笔记本电脑上完成.

表 1 船舶到港信息

Table 1 Vessel arrival information

船舶编号	原油种类	到港时间 (天)	泊位占用长度 (m)	载油量 (kbbbl)	卸货时间 (天)
MV1	CR1	0	10	1 000	2
MV2	CR2	0	2	1 000	2
MV3	CR2	1	3	1 000	2
MV4	CR3	1	9	1 000	1
MV5	CR1	2	7	1 000	2
MV6	CR3	2	6	1 000	1
MV7	CR2	3	7	1 000	2
MV8	CR3	3	7	1 000	1
MV9	CR1	4	6	1 000	2
MV10	CR4	4	4	1 000	2
MV11	CR4	5	3	1 000	2
MV12	CR4	5	8	1 000	2

表 2 储罐和加工装置参数

Table 2 Parameters of tanks and processing units

类型	编号	初始库存 (kbbbl)	最小容量 (kbbbl)	最大容量 (kbbbl)	流量范围 (kbbbl/天)
ST	ST1、ST4	180	0	4 000	0 ~ 500
	ST2	180	0	4 000	0 ~ 200
	ST3	180	0	4 000	0 ~ 250
CT	CT1 ~ CT3	180	0	4 000	0 ~ 500
CDU	CD1、CD2	—	—	—	50 ~ 500
二次加工装置	HT1、HT2	—	0	3 000	—
	HDS1 ~ HDS3	—	0	3 000	—
	HC、CRU、FCC	—	0	3 000	—
	DC、VB	—	0	3 000	—

注: HT: 加氢处理; HDS: 加氢脱硫; HC: 加氢裂化; CRU: 催化重整; FCC: 催化裂化; DC: 延迟焦化; VB: 减粘裂化.

表 3 产品需求与价格

Table 3 Product demand and price

产品	需求量 (kbbbl)	价格 (k\$/kbbbl)
汽油	1 022.43	982.03
航煤	2 154.62	2 300.00
柴油	534.50	1 175.33
燃油	106.57	1 242.63

表 4 成本参数

Table 4 Parameters of cost

参数类别	取值	参数类别	取值
基础成本参数			
储罐切换	5 000 k\$/次	ST 库存	2 k\$/kbbbl/天
港口等待	200 k\$/天	CT 库存	3 k\$/kbbbl/天
泊位占用	800 k\$/天		
CDU 加工成本 (k\$/kbbbl)			
CR1-CD1	5	CR1-CD2	2
CR2-CD1	6	CR2-CD2	3
CR3-CD1	8	CR3-CD2	5
CR4-CD1	2	CR4-CD2	6
二次加工单元成本 (k\$/kbbbl, m1/m2)			
HT1	7.5/9.5	HC	13.5/15.5
HT2	5.0/7.0	CRU	14.0/16.0
HDS1	5.5/7.5	FCC	17.5/19.5
HDS2	8.0/10.0	DC	13.0/15.0
HDS3	8.5/10.5	VB	12.0/14.0

注: m1 和 m2 表示不同的加工模式下的成本.

表 5 和表 6 分别展示了两种模型的规模特征和求解性能对比, 为表述方便, 本文提出的基于原油类型聚类的泊位分配与炼化生产集成调度模型简称为 CTBA 模型, 将基于来船顺序的泊位分配与炼化生产集成调度模型 (integrated scheduling model

of first-come-first-served berth allocation refinery production, FCFS-RP) 简称为 FCFS 模型^[39]. CTBA 模型虽然在问题规模上略大于 FCFS 模型, 但通过引入原油类型聚类约束实现了更优的经济效益和调度效果.

表 5 模型规模比较
Table 5 Model scale comparison

模型统计量	FCFS 模型	CTBA 模型
约束数量	7 052	8 124
变量数量	4 304	4 928
0-1 变量数量	718	1 270

表 6 求解算法性能对比
Table 6 Comparison of solution algorithm performance

指标	CTBA 模型		FCFS 模型
	NMDT 算法	Gurobi 求解器	NMDT 算法
成本与收益 ($\times 10^4$ k\$)			
换油成本	4.50	5.50	2.50
等待停泊成本	3.27	5.58	3.24
库存成本	26.92	22.33	39.28
蒸馏成本	4.68	4.38	4.07
操作成本	10.06	10.49	10.29
总成本	49.43	48.28	59.38
产品收入	672.46	672.46	672.46
总收益	623.03	624.18	613.08
求解性能			
最优性间隙 (%)	0.60	4.32	0.53
求解时间 (s)	27.69	3 600.00	41.55

从经济性能来看, CTBA 模型结合 NMDT 算法的总收益为 6 230.3 百万美元, 较 FCFS 模型 (6 130.8 百万美元) 提升 99.5 百万美元, 相对提升幅度为 1.62%. 需要指出的是, 本文算例包含 12 艘船舶和 30 天调度周期, 属于中小规模问题. 在此规模下, 两种模型的总收益基数较大 (均超过 6 100 百万美元), 导致相对改善幅度看似有限. 然而, 从成本结构分析可见, CTBA 模型将库存成本从 392.8 百万美元降至 269.2 百万美元 (降幅 31.50%), 换油成本从 25.0 百万美元增至 45.0 百万美元 (增幅 80.00%), 等待停泊成本基本持平 (从 32.4 百万美元微增至 32.7 百万美元). 值得注意的是, 尽管换油成本有所上升, 但库存成本的大幅降低充分体现了协同优化泊位分配与生产计划的有效性. 随着实际应用中船舶数量和调度周期的扩大, 库存成本节约的累积效应将更加明显, 模型优势也将更加突出.

求解性能对比表明, NMDT 算法在保证求解质

量的同时显著提高了计算效率. 针对 CTBA 模型, NMDT 算法在 27.69 s 内求解完成, 最优性间隙为 0.60%; Gurobi 求解器在 3 600.00 s 时限内仅获得 4.32% 的最优性间隙, 由此可见, NMDT 算法能以显著更短的求解时间收敛至更小的最优性间隙, 在求解效率与收敛性上明显优于直接调用商用求解器. 针对 FCFS 模型, NMDT 算法的求解时间为 41.55 s, 最优性间隙为 0.53%, 进一步验证了算法的有效性. 综合分析, CTBA 模型结合 NMDT 求解算法为港口-炼厂一体化调度优化提供了有效的建模与求解框架.

图 3 和图 4 展示了两种泊位分配策略的对比. 图 3 为基于来船顺序的传统分配方案, 船舶严格按照到港时间先后依次停靠, 导致同类原油船舶在时间和空间上分散分布. 图 4 为基于原油类型聚类的优化分配方案, 通过合理调整船舶靠泊顺序, 实现了同类原油的集中卸货, 且卸油安排更紧凑. 从图 4 中可以明显看出, 优化方案将相同原油类型的船舶在时间上进行了聚类, 例如载有原油 1 的 MV1、MV5 和 MV9 被安排在相近时间段同时靠泊, 有效减少了储罐切换频率. 相比传统方案中同类船舶到港时间高度分散的情况, 聚类方案显著提升了港口作业

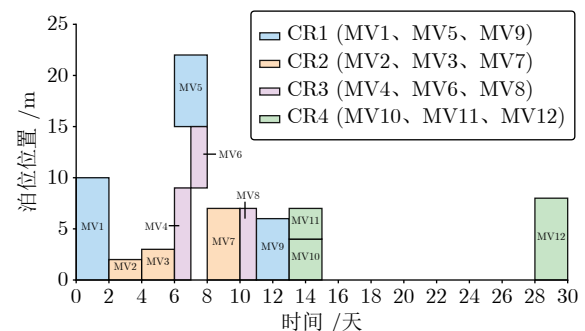


图 3 基于来船顺序的油船泊位分配方案

Fig. 3 Vessel berth allocation scheme based on arrival sequence

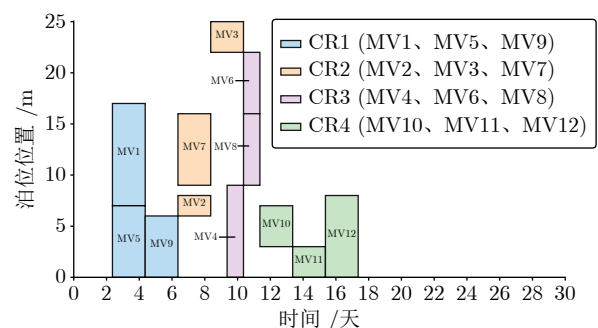


图 4 基于原油类型聚类的油船泊位分配方案

Fig. 4 Vessel berth allocation scheme based on crude type clustering

效率和泊位空间利用率, 为炼厂提供了更加连续稳定的原油供应。

图 5 和图 6 对比了两种泊位分配策略下的进料流量分布特征。结果表明, CTBA 模型在流量平稳性方面显著优于 FCFS 模型。

图 5 展示了两种模型在 CT3 储罐和 CD1 蒸馏装置层面的优化效果。FCFS 模型中 CT3 在 T10 时段(第 10~11 天)出现 1 998 kbbbl 的进料高峰, 虽未超过储罐容量上限(4 000 kbbbl), 但该进料量集中在 2 天内完成, 对应平均进料速率约 1 000 kbbbl/天, 而在此前后的多数时段进料量接近于 0。这种进料模式导致储罐液位和进料速率的剧烈波动, 不利于操作稳定性。相比之下, CTBA 模型将相近的总进料量分散在第 14~16 时段(共 6 天)完成, 单个时段进料量控制在约 1 000 kbbbl 以内, 平均进料速率约 333 kbbbl/天, 有效避免了瞬时高负荷对储罐操作的冲击, 使进料过程更加平稳。

图 6 展示了储罐和蒸馏装置层面的改善效果。FCFS 模型中 FCC 和 CRU 装置分别在第 1 时段出现 324.12 kbbbl 和 24.68 kbbbl 的峰值, 随后在 14 个时段中的 11 个时段内呈现分散进料。相比之下, CTBA 模型将峰值分别降至 104.14 kbbbl 和 11.40 kbbbl, 降

幅达 67.9% 和 53.8%, 且进料完全集中在前 4 个时段, 第 5~13 时段流量为 0, 这种进料模式源于 CTBA 模型对原油到港时序的优化调整。从装置运行角度分析, CTBA 模型前 4 个时段的进料水平为 FCC 在 31.05~104.14 kbbbl 之间, CRU 在 5.73~11.40 kbbbl 之间, 而 FCFS 模型中, FCC 在 7.37~324.12 kbbbl 之间, CRU 在 1.18~24.68 kbbbl 之间。这种改善使装置能够在较为稳定的负荷范围内运行。此外, 两种模型在最后一个时间段均显示较高流量, 由于优化模型的边界效应, 该进料方式避免了规划周期末储罐库存耗尽, 模型倾向于在最后时段保持较高的原油进料和储罐库存水平, 以确保后续周期的物料供应连续性。

5 结束语

针对炼油企业从港口泊位分配到炼油装置生产的全流程协同调度问题, 本文基于事件驱动的混合时间建模方法构建了涵盖原油卸载、储运、加工全流程的一体化调度优化混合整数非线性规划模型, 突破了传统分段优化的局限性, 创新性地将原油码头泊位分配、罐区调度与炼油装置生产计划纳入统一的优化框架, 并采用归一化多参数分解技术进行求解。基于 12 艘船舶、4 种原油类型、30 天调度周期的中小规模算例, 验证了一体化模型的数学正确性和 NMDT 求解方法的计算可行性。本文所建立的一体化模型综合刻画了各环节的物料守恒、时序逻辑和资源约束, 实现了泊位分配、罐区调度与装置加工的全流程耦合优化, 能够在保证生产连续性的同时获得综合经济效益最优的调度方案。相比于传统的分段序贯优化方法, 本文提出的一体化模型通过消除环节间的决策耦合损失, 能够有效降低总运营成本、减少储罐切换频次、提高生产计划的连续性和稳定性, 案例计算结果表明, 一体化模型使总收益提升 1.62%, 库存成本降低 31.50%, NMDT 算法在 27.69 s 内求得最优性间隙为 0.60% 的解, 初步验证了一体化建模在该算例规模下的经济性优势和算法的计算效率。同时, 模型中引入的按油种集中卸载的泊位分配策略与后续生产环节形成良好衔接, 进一步提升了一体化优化的效果。需要指出的是, 本文算例规模相对有限, 模型在大规模复杂系统中的计算性能和鲁棒性尚需进一步验证。本文主要针对确定性条件下的一体化调度问题进行了研究, 在未来研究中, 拟从以下三个方面深化: 一是在大规模实际案例上系统测试模型的可扩展性, 量化评估模型规模增长对求解时间和最优性间隙的影响规律, 明确模型的适用边界; 二是针对原油到港时间波动和装置计划外停机等典型不确定性场景, 发展基于场景树的两阶段随机规划模型或鲁棒优化模

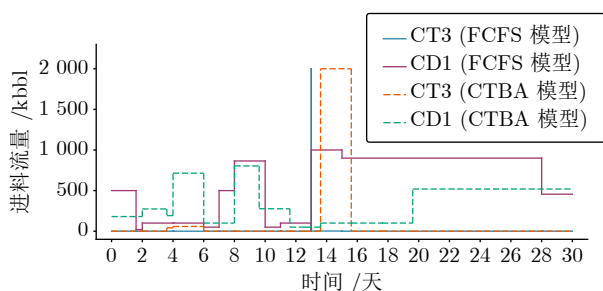


图 5 不同排船模式下调合罐和常减压蒸馏装置进料流量对比

Fig. 5 Comparison of feed flow rates for CT and CDU under different berth scheduling modes

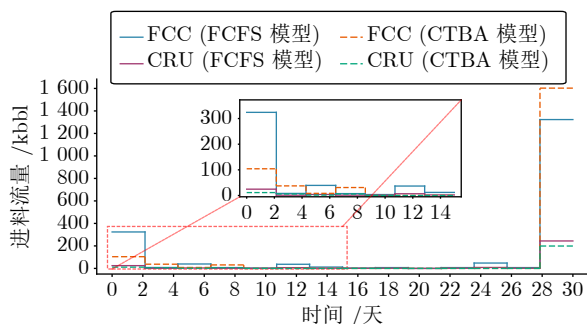


图 6 不同排船模式下 FCC 和 CRU 进料流量对比

Fig. 6 Comparison of feed flow rates for FCC and CRU under different berth scheduling modes

型,并设计滚动时域优化框架实现动态调整;三是针对模型规模扩大带来的计算挑战,探索变量选择性精度调整和 NMDT 与空间分支定界相结合的算法,以提升中大规模问题如更多船舶、更多原油类型、更长调度周期等的求解效率和解质量。

附录 A 符号说明

表 A1 索引与集合
Table A1 Indices and sets

符号	说明
$mv \in G_c$	载有原油 c 的油船集合
$c \in C$	原油种类集合
$mv \in MV$	油船集合
$t \in T$	时间段集合
$st \in ST$	原油储罐集合
$C_k \subseteq C$	可存储在储罐 k 中的原油类型子集
$\delta(\varphi)$	油船连接图中子集 $\varphi \subset G_c$ 的边割集
$k, k' \in K$	储罐集合 (包括原油储罐和调合罐)
$ct \in CT$	调合罐集合
$cd \in CD$	原油蒸馏单元集合
$\kappa \in PR$	原油性质集合
$(k, k') \in O^s$	单元间可行连接关系集合
$s \in S^{out, cd}$	蒸馏单元 cd 的出料产品集合
$(c, s) \in C^s$	原油到产品的映射关系集合
$u, u' \in U$	加工单元集合
$m \in M$	操作模式集合
$s \in S^{out, u}$	加工单元 u 的出料产品集合
$SO^{u', u}$	从加工单元 u' 到 u 的产品流集合
$p \in P$	最终产品集合
$pe \in PQ$	产品性质集合
$(u, s) \in SP$	加工单元产品到最终产品的映射关系集合
$\ell \in \mathcal{L}$	NMDT 十进制位置索引集合
$n \in \mathcal{N}$	NMDT 数字值集合
C^{chg}	单次储罐/蒸馏单元切换成本

表 A2 参数
Table A2 Parameters

符号	说明
C^{wait}	船舶单位时间等待成本
C_k^{inv}	储罐 k 库存单位时间持有成本
$C_{cd, c}^{cd}$	蒸馏单元 cd 处理原油 c 的单位加工成本
$C_{u, m}^{ref}$	加工单元 u 在操作模式 m 下的单位加工成本
P_p	最终产品 p 的单位售价
τ_{mv}	油船 mv 的停泊时长
l_{mv}	油船 mv 的船长
L	泊位总长度
H	调度周期长度
$ T $	时间段总数

表 A2 参数 (续表)

Table A2 Parameters (continued table)

符号	说明
$ C $	原油类型集合 C 的原油种类数量
ϵ	足够小的正数 (用于子回路消除约束)
Tr_{mv}	油船 mv 的预定到港时间
Hb_{mv}	油船 mv 的最小在港时间
ord_t	时间段 t 的序号
C_k^{max}	储罐 k 的最大容量
C_k^{min}	储罐 k 的最小容量
ϕ_c, κ	原油 c 中性质 κ 的浓度值
$\phi_{k, \kappa}^{max}$	储罐 k 中性质 κ 的允许上限
$\phi_{k, \kappa}^{min}$	储罐 k 中性质 κ 的允许下限
$F_{k, k', t}^{max}$	时间段 t 从单元 k 到 k' 的最大允许流量
$F_{k, k', t}^{min}$	时间段 t 从单元 k 到 k' 的最小允许流量
ND	最大切换次数
$ss_{c, s}$	原油 c 切割为产品 s 的收率系数
M	充分大的正数 (Big-M 常数)
$yd_{u, m, s}$	加工单元 u 在模式 m 下产品 s 的收率系数
C_u^{min}	加工单元 u 的最小处理能力
C_u^{max}	加工单元 u 的最大处理能力
D_p^{min}	最终产品 p 的最小需求量
D_p^{max}	最终产品 p 的最大需求量
$pr_{u, s, pe}$	加工单元 u 产出的产品 s 中性质 pe 的含量
$pp_{p, pe}^{min}$	最终产品 p 的性质 pe 的下限
$pp_{p, pe}^{max}$	最终产品 p 的性质 pe 的上限
ψ	NMDT 离散化精度参数 (负整数)
$v_{c, k}^0$	储罐 k 中原油 c 的初始库存量
$v_{c, k, t}^{max}$	储罐 k 中原油 c 在时间段 t 的最大可能库存量
η	两阶段迭代算法的收敛容差

表 A3 决策变量

Table A3 Decision variables

符号	说明
TCT	系统总成本 (目标函数值)
ξ_{mv}	油船 mv 的停泊时间
η_{mv}	油船 mv 的泊位位置
$\alpha_{mv, mv'}$	二元变量, 若 mv 在 mv' 之前停泊 (时间维度) 则为 1, 否则为 0
$\beta_{mv, mv'}$	二元变量, 若 mv 在 mv' 下方停泊 (泊位维度) 则为 1, 否则为 0
$\alpha_{mv, mv'}^{adj}$	二元变量, 若 mv 与 mv' 在时间维度上相邻则为 1, 否则为 0
$\beta_{mv, mv'}^{adj}$	二元变量, 若 mv 与 mv' 在泊位维度上相邻则为 1, 否则为 0
$\delta_{mv, mv'}$	二元变量, 若 mv 与 mv' 之间存在连接关系则为 1, 否则为 0
$YI_{t, mv}$	二元变量, 若船舶 mv 在时间段 t 到港则为 1, 否则为 0
$YO_{t, mv}$	二元变量, 若船舶 mv 在时间段 t 离港则为 1, 否则为 0
$YF_{k, k', t}$	连接激活二元变量, 若 t 时间段单元 k 到 k' 有物料流动则为 1, 否则为 0

表 A3 决策变量 (续表)

Table A3 Decision variables (continued table)

符号	说明
$x_{cd, t}$	二元变量, 若蒸馏单元 cd 在 t 时间段发生切换则为 1, 否则为 0
$x_{t, u, m}$	二元变量, 若 t 时段加工单元 u 采用模式 m 则为 1, 否则为 0
$Z_{k, k', t, \ell, n}^{\mu}$	NMDT 二元变量, 若 $\mu_{k, k', t}$ 在位置 ℓ 选择数字 n 则为 1
$v_{c, mv, t}$	时间段 t 内船舶 mv 中原油 c 的库存量
$v_{c, k, t}$	时间段 t 储罐 k 中原油 c 的库存体积
$F_{c, k, k', t}$	时间段 t 从单元 k 到 k' 的原油 c 流量
$\mu_{k, k', t}$	混合罐 k 在时间段 t 送往单元 k' 的体积分数
TT_t	时间段 t 的开始时间
DT_t	连续时间段 t 的持续时长
ω_{mv}	船舶 mv 在海上的等待时间
NDR_{cd}	蒸馏单元 cd 的切换次数
$R_{t, cd}$	时间段 t 蒸馏单元 cd 的总进料量
$f_{int, u, m}$	时间段 t 加工单元 u 在模式 m 下的进料量
$f_{out, u, s}$	时间段 t 加工单元 u 产出的产品 s 数量
$pf_{t, p}$	时间段 t 最终产品 p 的产量
$\Delta\mu_{k, k', t}$	归一化变量 μ 的连续松弛变量
$\Delta F_{c, k, k', t}$	流量 F 的连续松弛变量
$\hat{V}_{c, k, k', t, \ell, n}$	NMDT 分解的库存体积变量
LB^{ν}	第 ν 次迭代获得的目标函数全局下界
UB^{ν}	第 ν 次迭代获得的目标函数全局上界
GAP^{ν}	第 ν 次迭代的相对优化间隙

参考文献

- Qian Feng, Du Wen-Li, Zhong Wei-Min, Tang Yang. Problems and challenges of smart optimization manufacturing in petrochemical industries. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(6): 893–901
(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. 自动化学报, 2017, **43**(6): 893–901)
- Ding Jin-Liang, Yang Cui-E, Chen Yuan-Dong, Chai Tian-You. Research progress and prospects of intelligent optimization decision making in complex industrial process. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(11): 1931–1943
(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. 自动化学报, 2018, **44**(11): 1931–1943)
- Qian Xing-Kun, Lu Ru-Quan. *2024 Report on Oil and Gas Industry Development*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2025.
(钱兴坤, 陆如泉. 2024 年国内外油气行业发展报告. 北京: 石油工业出版社, 2025.)
- Huang De-Xian, Jiang Yong-Heng, Jin Yi-Hui. Present research situation, major bottlenecks, and prospect of refinery industry process control. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(6): 902–916
(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. 自动化学报, 2017, **43**(6): 902–916)
- Chen Yuan-Dong, Ding Jin-Liang. State-of-arts and challenges on production scheduling of refinery. *Control and Decision*, 2022, **37**(9): 2177–2188
(陈远东, 丁进良. 炼油生产调度研究现状与挑战. 控制与决策, 2022, **37**(9): 2177–2188)
- Gao Kai-Lai, Ding Jin-Liang. A constrained multi-objective on-line operation optimization method of collaborative distillation

- and heat exchanger network. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(9): 1679–1690
(高开来, 丁进良. 蒸馏与换热协同的约束多目标在线操作优化方法. 自动化学报, 2019, **45**(9): 1679–1690)
- Gao Xiao-Yong, Huang Fu-Yu, Zheng Wan-Peng, Peng Diao, Yang Yi-Xu, Huang De-Xian. Scheduling optimization of refinery and chemical production process considering the safety and stability of scheduling operation. *CIESC Journal*, 2023, **74**(4): 1619–1629
(高小永, 黄付宇, 郑万鹏, 彭雕, 杨一旭, 黄德先. 考虑调度操作安全平稳性的炼油化工生产过程调度优化. 化工学报, 2023, **74**(4): 1619–1629)
 - Han Biao, Jiang Yong-Heng, Wang Ling, Huang De-Xian. Instant delivery based discrete-time model and its application in refinery process scheduling optimization. *Control and Decision*, 2020, **35**(6): 1361–1368
(韩彪, 江永亨, 王凌, 黄德先. 基于即时交货的离散时间模型及其在炼油过程调度优化中的应用. 控制与决策, 2020, **35**(6): 1361–1368)
 - Li J, Misener R, Floudas C A. Continuous-time modeling and global optimization approach for scheduling of crude oil operations. *AIChE Journal*, 2012, **58**(1): 205–226
 - Hou Y, Wu N Q, Zhou M C, Li Z W. Pareto-optimization for scheduling of crude oil operations in refinery via genetic algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, **47**(3): 517–530
 - Zhao H, Ierapetritou M G, Shah N K, Rong G. Integrated model of refining and petrochemical plant for enterprise-wide optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 2017, **97**: 194–207
 - Zheng W P, Gao X Y, Huang F Y, Zuo X, Chen X Z. Integrated optimization of crude oil procurement planning and blending scheduling for property stabilization. *Computers & Chemical Engineering*, 2024, **186**: Article No. 108716
 - He R C, Xie Y H, Zhang S W, Xu F, Long J. Knowledge-assisted hybrid optimization strategy of large-scale crude oil scheduling integrated production planning. *Computers & Chemical Engineering*, 2025, **192**: Article No. 108904
 - Dong Xiao-Yang, Zhao Hao, Feng Yi-Ping, Rong Gang. Integrated optimization of CDU operation and production planning based on process simulation. *CIESC Journal*, 2015, **66**(1): 237–243
(董晓杨, 赵浩, 冯毅萍, 荣冈. 基于流程模拟的常减压蒸馏装置过程操作与生产计划集成优化. 化工学报, 2015, **66**(1): 237–243)
 - Imai A, Sun X, Nishimura E, Papadimitriou S. Berth allocation in a container port: Using a continuous location space approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2005, **39**(3): 199–221
 - Agra A, Oliveira M. MIP approaches for the integrated berth allocation and quay crane assignment and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 2018, **264**(1): 138–148
 - Umang N, Bierlaire M, Vacca I. Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2013, **54**: 14–31
 - Lee H, Pinto J M, Grossmann I E, Park S. Mixed-integer linear programming model for refinery short-term scheduling of crude oil unloading with inventory management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1996, **35**(5): 1630–1641
 - Shah N. Mathematical programming techniques for crude oil scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, 1996, **20** Suppl 2: S1227–S1232
 - Jia Z Y, Ierapetritou M. Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, **28**(6–7): 1001–1019
 - Moro L F L, Pinto J M. Mixed-integer programming approach for short-term crude oil scheduling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004, **43**(1): 85–94

- 22 Castro P M, Grossmann I E. Global optimal scheduling of crude oil blending operations with RTN continuous-time and multiparametric disaggregation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, **53**(39): 15127–15145
- 23 Gao X Y, Ding J L, Feng Z H, Wang Y H, Huang X H, Huang D X, et al. Piecewise linear approximation based MILP method for PVC plant planning optimization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, **57**(4): 1233–1244
- 24 Zhang Wan-Ting, Du Wen-Li, Du Wei. Multi-timescale cooperative evolutionary algorithm for large-scale crude oil scheduling. *Journal of Computer Applications*, 2024, **44**(5): 1355–1363 (张莞婷, 杜文莉, 堵威. 基于多时间尺度协同的大规模原油调度进化算法. *计算机应用*, 2024, **44**(5): 1355–1363)
- 25 Yang H K, Bernal D E, Franzoi R E, Engineer F G, Kwon K, Lee S, et al. Integration of crude-oil scheduling and refinery planning by Lagrangean decomposition. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, **138**: Article No. 106812
- 26 Zimberg B, Ferreira E, Camponogara E. A continuous-time formulation for scheduling crude oil operations in a terminal with a refinery pipeline. *Computers & Chemical Engineering*, 2023, **178**: Article No. 08354
- 27 Shah N K, Li Z K, Ierapetritou M G. Petroleum refining operations: Key issues, advances, and opportunities. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, **50**(3): 1161–1170
- 28 Fernandes L J, Relvas S, Barbosa-Póvoa A P. Strategic network design of downstream petroleum supply chains: Single versus multi-entity participation. *Chemical Engineering Research and Design*, 2013, **91**(8): 1557–1587
- 29 Bierwirth C, Meisel F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 2010, **202**(3): 615–627
- 30 Correcher J F, Alvarez-Valdes R, Tamarit J M. New exact methods for the time-invariant berth allocation and quay crane assignment problem. *European Journal of Operational Research*, 2019, **275**(1): 80–92
- 31 Mouret S, Grossmann I E, Pectiaux P. A novel priority-slot based continuous-time formulation for crude-oil scheduling problems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, **48**(18): 8515–8528
- 32 Assis L S, Camponogara E, Menezes B C, Grossmann I E. An MINLP formulation for integrating the operational management of crude oil supply. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, **123**: 110–125
- 33 Sahebi H, Nickel S, Ashayeri J. Strategic and tactical mathematical programming models within the crude oil supply chain context—A review. *Computers & Chemical Engineering*, 2014, **68**: 56–77
- 34 Floudas C A, Lin X X. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: A review. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, **28**(11): 2109–2129
- 35 Castro P M. Normalized multiparametric disaggregation: An efficient relaxation for mixed-integer bilinear problems. *Journal of Global Optimization*, 2016, **64**(4): 765–784
- 36 Zhang L F, Yuan Z H, Chen B Z. Refinery-wide planning operations under uncertainty via robust optimization approach coupled with global optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 2021, **146**: Article No. 107205
- 37 GAMS Development Corporation. General Algebraic Modeling System (GAMS) Release 44.4.0, GAMS Development Corporation, Fairfax, VA, USA, 2024.
- 38 Gurobi Optimization, LLC. Gurobi Optimizer Reference Manual, Version 12.0, Gurobi Optimization, LLC, 2024.
- 39 Eisen H E, van der lei J E, Zuidema J, Koch T, Dugundji E R. An evaluation of first-come, first-served scheduling in a geometrically-constrained wet bulk terminal. *Frontiers in Future Trans-*

portation, 2021, **2**: Article No. 709822



王天媛 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室博士研究生. 主要研究方向为炼油过程生产计划与调度优化的理论、方法及应用.

E-mail: 2210367@stu.neu.edu.cn

(WANG Tian-Yuan Ph.D. candidate at the State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University. Her research interests include theory, methods and applications of production planning and scheduling optimization in refinery processes.)



章立峰 帝国理工学院化工系萨金特过程系统工程中心博士后. 主要研究方向为化工过程系统工程, 人工智能辅助分子设计与过程优化.

E-mail: lifeng.zhang@imperial.ac.uk

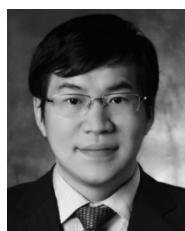
(ZHANG Li-Feng Postdoctor at The Sargent Centre for Process Systems Engineering, Department of Chemical Engineering, Imperial College London. His research interests include chemical process systems engineering, AI aided molecular design and process optimization.)



袁志宏 清华大学化学工程系化工与低碳技术国家重点实验室长聘副教授. 主要研究方向为过程系统工程与智能自主决策基础理论和应用技术.

E-mail: zhihongyuan@mail.tsinghua.edu.cn

(YUAN Zhi-Hong Tenured associate professor at the State Key Laboratory of Chemical Engineering and Low-carbon Technology, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University. His research interests include fundamental theory and applied technology of process systems engineering and intelligent autonomous decision-making.)



杨涛 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室教授. 主要研究方向为工业人工智能, 信息物理系统和分布式优化. 本文通信作者.

E-mail: yangtao@mail.neu.edu.cn

(YANG Tao Professor at the State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University. His research interests include industrial artificial intelligence, cyber physical system, and distributed optimization. Corresponding author of this paper.)