

# 控制与决策

Control and Decision

## 大规模跨区域的成品油多式联运高效优化方法

廖绮, 涂仁福, 黄明月, 邱睿, 梁永图

引用本文:

廖绮, 涂仁福, 黄明月, 等. 大规模跨区域的成品油多式联运高效优化方法[J]. *控制与决策*, 2026, 41(1): 55-66.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0660>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 面向全局搜索的自适应领导者樽海鞘群算法

Global search-oriented adaptive leader salp swarm algorithm

控制与决策. 2021, 36(9): 2152-2160 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0090>

##### 带不相关并行机和有限缓冲MHFS调度的混合启发式算法

Hybrid heuristic algorithm for multi-stage hybrid flow shop scheduling with unrelated parallel machines and finite buffers

控制与决策. 2021, 36(3): 565-576 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0835>

##### 基于混合整数规划的智能网联车冲突区时序优化模型

Mixed integer programming model of scheduling for connected automated vehicles in a conflict zone

控制与决策. 2021, 36(3): 705-710 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0886>

##### 顺序依赖的调整时间和拖期的无缝钢管热轧批量调度算法

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

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

##### 基于多班教学优化的多目标分布式混合流水车间调度

Multi-class teaching-learning-based optimization for multi-objective distributed hybrid flow shop scheduling

控制与决策. 2021, 36(2): 303-313 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0549>

# 大规模跨区域的成品油多式联运高效优化方法

廖 绮<sup>1,2†</sup>, 涂仁福<sup>1,2</sup>, 黄明月<sup>1,2</sup>, 邱 睿<sup>1,2</sup>, 梁永图<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249;
2. 中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京重点实验室, 北京 102249;
3. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

**摘 要:** 针对大规模跨区域成品油的多式联运调度问题, 考虑管道连续顺序输送过程与铁路、水路、公路“集装箱”式运输的时空差异, 以“日”为时间尺度, 以运输成本最低为目标函数, 构建管道、铁路、水路、公路联运优化的混合整数线性规划 (MILP) 模型. 针对 MILP 模型在大规模、长周期、跨区域物流调度场景下求解效率低的瓶颈, 提出一种高效的“父-子问题”分层求解算法, 通过时间窗切割将原问题划分成若干组“父-子问题”, 利用父模型计算结果中的批次运移信息更新子模型中的动态批次集合. 当时间窗增加时, 可有效控制相关二元变量与约束条件增加幅度, 极大程度地削减原问题的变量搜索空间, 显著加速了寻优过程. 最后, 以我国西部某成品油物流体系为例, 验证所提出方法在计算效率和解质量方面的优越性. 与利用 Gurobi 求解器一次求解 MILP 模型相比, 所提出算法在迭代过程中能够将模型中的二元变量和约束条件数量平均减少 68.0%、60.4%, 在保证最优性的前提下平均减少 86.7% 的计算时间.

**关键词:** 成品油; 多式联运; 顺序输送; 管道; 高效优化; 混合整数线性规划

**中图分类号:** TE832 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2025.0660

**引用格式:** 廖绮, 涂仁福, 黄明月, 等. 大规模跨区域的成品油多式联运高效优化方法 [J]. 控制与决策, 2026, 41(1): 55-66.

## Efficient optimization methods for large-scale cross-regional multimodal transportation of refined products

LIAO Qi<sup>1,2†</sup>, TU Ren-fu<sup>1,2</sup>, HUANG Ming-yue<sup>1,2</sup>, QIU Rui<sup>1,2</sup>, LIANG Yong-tu<sup>1,2,3</sup>

- (1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** This paper addresses the large-scale cross-regional multimodal scheduling problem for refined products, and considers the spatiotemporal differences between the continuous sequential transportation process in pipelines and the containerized transportation modes of rail, waterway and highway. Using a daily time scale and with the objective of minimizing transportation costs, a mixed-integer linear programming (MILP) model is formulated for the coordinated optimization of pipeline-rail-water-road multimodal transportation. To overcome the computational inefficiency bottleneck when solving the MILP model for large-scale, long-term and cross-regional logistics scheduling scenarios, this paper innovatively proposes an efficient hierarchical "parent-child" problem decomposition algorithm. The approach divides the original problem into multiple sets of parent-child subproblems through time window segmentation, while utilizing batch movement information from parent model solutions to update dynamic batch sets in child models. As time windows expand, this method effectively controls the growth of related binary variables and constraint adjustments, significantly reducing the original problem's variable search space and remarkably accelerating the optimization process. Finally, using a refined petroleum product logistics system in western China as a case study, the results demonstrate the superior computational efficiency and solution quality of the proposed approach. Compared to directly solving the MILP model using Gurobi, the proposed algorithm reduces the number of binary variables and

收稿日期: 2025-06-22; 录用日期: 2025-10-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52202405); 中国石油大学(北京)校基金项目 (2462023BJRC026).

责任编辑: 巩敦卫.

†通信作者. E-mail: qliao@cup.edu.cn.

constraints by an average of 68.0% and 60.4% respectively during the iteration process, and also reduces the computation time by an average of 86.7% under the premise of maintaining optimality.

**Keywords:** refined products; multimodal transportation; batch transportation; pipeline; efficient optimization; mixed-integer linear programming

## 0 引言

成品油作为关系国计民生的重要基础性和战略性资源,其高效、稳定的物流运输体系关乎国家能源安全和经济发展。从国内供需格局来看,受到资源禀赋与消费区域错配影响,“西油东送、北油南运”的产业特征显著<sup>[1]</sup>,这不仅导致物流成本居高不下,更对现有储运基础设施的承载力与协调性形成持续性压力。面对这一严峻形势,国家层面连续出台《中长期油气管网规划》《有效降低全社会物流成本行动方案》等政策,指出要加快推进成品油多式联运体系建设,推动形成以管道为主干、多种运输方式有机衔接的新型物流格局,着力打造更具韧性和经济性的现代成品油物流体系。

成品油多式联运网络以管道为主干线,融合了铁路、水路、公路等多种运输方式,涉及供应、销售、运输、储存等不同业务环节。原油在炼厂经过加工后炼化为不同种类的成品油,然后通过管道、油轮、铁路或公路罐车输送到油库,最终主要由公路罐车运送到各个加油站销售<sup>[2-3]</sup>。其中,管道运输因成本低、损耗小、安全性高及全天候连续输送等优势,成为成品油运输的主导方式,承担国内35%以上的成品油输送任务<sup>[4]</sup>。考虑到下游的各种需求,炼厂将不同牌号的成品油按顺序注入管道中,沿线分输站需按时按量下载所需的油品批次<sup>[5-6]</sup>。此外,管道的经济流速一般控制在1~2 m/s,首站注入的成品油通常需数天才能到达下游站点,导致管道运输的耗时比其他运输方式更长。此外,管道建设投资巨大,不是所有炼厂和油库都具备管道运输的条件。相比之下,铁路和公路网络已逐步完善,并与大部分地区相连接。其中,铁路能够作为管道的有效补充,适合大规模、长距离的运输,而公路则更适合短途配送或“最后一公里”运输<sup>[7]</sup>。

成品油多式联运计划时间跨度通常为旬或月,涉及成品油供应品种与数量的决策、运输流向选择、成品油销售品种与数量的确定等方面<sup>[8]</sup>。21世纪初,中国石油、中国石化陆续引入了美国 AspenTech 公司开发的分销计划优化(DPO)软件并进行二次开发,实现了全国范围内的运输方案优化编制。DPO 软件的核心是建立以物流成本最低为目标函数的线性规划(LP)或者混合整数线性规划(MILP)模型,通过

单纯形法、分支定界法求解最优方案<sup>[9]</sup>。Jiao 等<sup>[10]</sup>针对成品油供需矛盾造成的物流优化模型约束冲突、无解的问题,考虑了供需侧油品结构调整规则,建立了基于 MILP 的供需协调优化模型,能够统一求解出成本最低的成品油供需调整计划和物流运输计划。Qiu 等<sup>[11]</sup>注意到优化目标单一造成物流计划实用性不高的问题,利用计划员偏好信息和凸函数插值方法构造满意度指标,合理表征成品油供需调整过程中不同区域间的模糊利益关系,建立了成品油一次物流多目标优化模型,并采用增广 $\epsilon$ -约束法获取帕累托解,平衡经济性与满意度,提高方案实用性。此外,部分学者将战术层的成品油运输计划与战略层的物流系统设计进行耦合优化<sup>[2]</sup>。

然而,上述研究模型在底层设计上未能充分考虑运输方式的特定运行特征,将所有运输方式均简化为点对点并行运输过程。管道运输因其固定载具特性,成品油按照批次先后顺序连续地注入管道,管道的固定性导致油品批次的运移状态与上下游站点操作紧密相关<sup>[12]</sup>。而在其他运输方式中,油品与载具产生共同的空间位移,这种“集装箱”式运输极大削弱了不同节点的操作关联性,可以更灵活地简化为“点对点”的并行运输<sup>[13]</sup>。因此,现有优化模型得到的管输方案可能面临批次顺序输送不可行的挑战。针对此问题,许少新等<sup>[14]</sup>提出了一种融合管道运输工艺的管铁联运成品油物流优化迭代求解方法,旨在同时考虑物流计划与批次输送计划的耦合关系,以提高计划整体可行性和经济性,但迭代求解过程的衔接性表现不佳。

针对独立的管道系统调度优化问题,国外对该问题研究比较聚焦的有阿根廷的 Cafaro<sup>[15]</sup>、葡萄牙的 Castro<sup>[16]</sup> 学者团队,研究对象包括单点注入-单点分输管道、单点注入-多点分输管道以及多点注入-多点分输管道等。该类问题的复杂性与挑战性主要体现在其调度模型必须严格满足流量平衡约束、管段输运能力限制以及混油界面控制等关键工艺条件,同时优化结果还需兼具数学最优性和工程可行性,这对保障管道运行的经济性、安全性和可靠性具有决定性意义。然而,启发式算法由于难以系统化处理高维混合整数非线性约束,且无法提供解的最优性证明,可能导致调度方案存在技术缺陷甚至运行风险。

因此, 现有研究普遍采用混合整数线性规划 (MILP) 建模框架, 通过凸松弛或线性化技术将原问题转化为可严格求解形式, 并借助商业求解器 (如 CPLEX、Gurobi 等) 实现全局最优或近似全局最优的调度决策. 此类模型通常含有大量离散变量, 用以表征批次、站场、时间窗关系以及带有极大值的约束<sup>[17]</sup>. 随着跨区域管网复杂度的提升、运输批次规模的增加以及调度周期的增长, 模型变量和约束数量将进一步扩大, 导致商业求解器易陷入“维度灾难”<sup>[18-19]</sup>. 因此, 也有部分研究针对模型结构研发了高效的分解算法<sup>[20-21]</sup>、智能群体算法<sup>[22]</sup>、数据驱动方法<sup>[12,16,23]</sup>. 上述研究均聚焦于小时层级以下的单个管道精细调度问题, 未考虑管道与其他方式或不同管道间的运输衔接. 针对多式联运路径规划, 孙哲等<sup>[24]</sup>从群智能算法、进化算法和基于物理的仿生算法 3 个方面总结了现阶段的高效算法, 但仅考虑公、铁、空、海等运输模式, 无法适应管道顺序输送的特殊工艺. 何维<sup>[25]</sup>等设计出一种逻辑 Benders 分解算法框架处理集装箱多式联运的运输-接驳协同优化问题, 该模型以空箱资源充足为前提建立, 面对资源不足情况的适应性有待考量. 蔡近近<sup>[26]</sup>等针对第四方物流在多时段的多式联运问题构建联合优化模型并提出量子微进化算法, 通过与其他方法的对比验证了所提出方法的求解质量与效率.

综上所述, 尽管现有大量研究尝试开发高效算法解决大规模管道调度优化或者多式联运优化问题, 但因忽视多运输方式间的动态耦合机制难以应用于成品油多式联运优化模型的高效求解. 因此, 本文考虑了管道连续顺序输送过程与铁-水-公“集装箱”式运输的时空差异, 以“日”为时间尺度, 构建了大规模跨区域成品油多式联运优化的 MILP 模型, 并提出一种高效的“父-子问题”分层求解算法. 该算法对大规模计划的时间窗依次切割, 划分成若干组“父-子问题”, 利用父模型计算结果中的批次运移信息更新子模型中的动态批次集合, 当时间窗增加时较好地控制了相关二元变量与约束条件增加幅度, 最终大幅削减了原问题的变量搜索空间, 通过多轮父子问题结果的动态交互, 实现变量空间的智能降维, 显著加速寻优过程.

## 1 问题描述与建模

### 1.1 问题描述

成品油多式联运优化问题定义如下: 销售商所辖物流区域分布大量供应点 (炼厂) 和需求点 (油库), 各点间可采用管道、铁路、水路、公路输送多种

牌号的成品油.  $N^S$  表示供应点集合,  $N^D$  表示需求点集合, 所有节点集合  $N = N^S \cup N^D$ .  $o \in O$  表示成品油种类,  $O_n$  表示节点  $n$  供应或需求的成品油种类. 销售商根据供应点生产计划和需求点要货计划确定一段周期的调度方案, 在满足运输工艺要求和保证安全库存的前提下使物流成本最低. 调度方案包括供应点 (需求点) 在每一天内发出 (接收) 的成品油类型、量、运输方式及其库存量变化. 模型采用离散时间表示, 用  $t \in T$  表示时间点集合, 两个时间点之间间隙不能超过一天, 时间窗个数较时间节点个数少 1. 由于铁路、公路、水路采用“集装箱”式的运输模式, 与管道连续顺序输送工艺差距过大, 需针对管道运输和非管道运输方式分别建模. 引入集合  $z \in Z = \{\text{train, truck, ship}\}$  表示非管输的运输模式集合. 此外, 不同的运输方式依赖于节点之间的实际运输通道是否存在, 采用动态节点集合  $N_{n,z,o}$  表示供应点  $n$  能通过方式  $z$  输送成品油  $o$  的需求点集合.

用  $p \in P$  表示管道集合,  $N_p$ 、 $N_p^S$ 、 $N_p^D$  分别表示管道  $p$  的节点集合、供应点集合与需求点集合,  $N_p = N_p^S \cup N_p^D$ . 成品油会以批次的形式顺序注入管道, 沿线节点只有在批次流经站前时才能下载该批次. 批次编号是按照注入先后顺序从小到大编号, 用  $I$  表示批次集合.  $I_p$  表示在全周期内可能会经过管道  $p$  的动态批次集合,  $I_{p,n}$  表示在全周期内可能会经过管道  $p$  节点  $n$  的动态批次集合,  $I_{t,p,n}$  表示在第  $t$  个时间窗内  $p$  管道  $n$  节点可能注入/分输的动态批次集合. 在批次运移情况未知情况下, 可假设动态集合  $I_p$ 、 $I_{p,n}$  和  $I_{t,p,n}$  与完整批次集合  $I$  一致. 但实际上, 可根据特定条件对这些动态集合进行削减, 进而达到缩小模型规模的目的.

图 1 展示了管道顺序输送基本过程. 在初始时期 (第 1 行), 管内存在  $3\ 600\ \text{m}^3$  柴油批次 I1 和汽油批次 I2, 首站 N1 在两天内依次注入  $4\ 800\ \text{m}^3$  汽油批次 I2 和  $4\ 800\ \text{m}^3$  柴油批次 I3. 在第 1 天内, 批次 I1 和 I2 会依次流经 N2, N2 共下载  $1\ 200\ \text{m}^3$  批次 I1 和  $3\ 600\ \text{m}^3$  批次 I2. 到第 1 天结束时 (第 2 行), 批次 I2 的油头位置已到达 N2. 在第 2 天内, 随着批次 I3 的注入, 批次 I2 和 I3 的油头界面依次推至 N2 和 N3. 其中, N2 下载  $1\ 200\ \text{m}^3$  批次 I2, N3 下载  $2\ 400\ \text{m}^3$  批次 I1 和  $1\ 200\ \text{m}^3$  批次 I2. 具体而言, 管道顺序输送需满足以下条件:

1) 相邻油品之间在流动过程中会产生混油. 现场通常按照相邻输送油品的理化性质差异最小的原则对批次油品排序, 即油品批次排序是已知的.

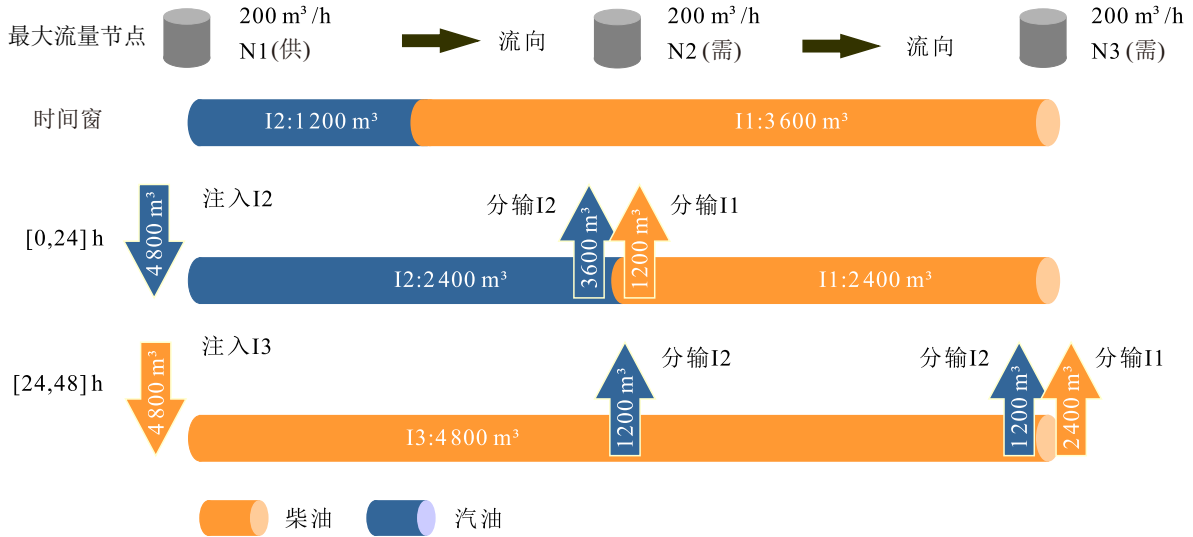


图1 管道顺序输送过程

2) 油品假设为不可压缩液体. 对于任意时间窗  $t$  而言, 管道沿线各节点的注入体积之和等于分输体积之和; 对于任意时间节点  $t$  而言, 批次在管道内的体积等于上一时间节点  $t-1$  的体积加上时间窗  $t-1$  内注入该批次体积之和再减去分输该批次体积之和; 管道内批次体积总和始终等于管道总容积.

3) 对于任意节点  $n$  在任意时间窗  $t$  内, 只有在满足特定条件时才能注入或分输批次  $i$ . 具体而言, 批次  $i$  的油尾在时间窗开始时间未超过该节点, 但结束时间油头超过该节点.

4) 任意时间窗内, 节点和管段的操作流量不能超过其上限.

## 1.2 数学模型

### 1) 目标函数.

多式联运优化的目标函数是运输成本  $C$  最低, 运输成本由管道、铁路、水路、公路运输成本组成, 总成本为单位成本与相应运输体积的乘积之和, 即

$$\min C = \sum_{t < |T|} \sum_p \sum_{n \in N_{p,n}^p} \sum_{i \in I_{t,p,n}} c_{p,n,i}^{\text{pipe}} F_{t,p,n,i}^N + \sum_{t < |T|} \sum_n \sum_o \sum_{n' \in N_{n,z,o}} c_{n,n',z,o} F_{t,n,n',z,o}^{\text{in}}. \quad (1)$$

其中: 第 1 项为管道运输成本, 第 2 项为非管道运输 (铁、水、公) 成本之和; 参数  $c_{p,n,i}^{\text{pipe}}$  为管输批次  $i$  到管道  $p$  节点  $n$  的单位运费 (CNY/m<sup>3</sup>); 参数  $c_{n,n',z,o}$  为供应点  $n$  通过方式  $z$  输送油品  $o$  到需求点  $n'$  的单位运费 (CNY/m<sup>3</sup>); 变量  $F_{t,p,n,i}^N$  为第  $t$  个时间窗内  $p$  管道节点注入/分输批次  $i$  体积 (m<sup>3</sup>); 变量  $F_{t,n,n',z,o}^{\text{in}}$  为节点  $n'$  在时间窗  $t$  内接收节点  $n$  用方式  $z$  输送油品  $o$  的体积 (m<sup>3</sup>). 管道批次输送顺序较为固定, 每个批次输送的成品油种类视为已知, 但批次量会随着供需变化

而调整, 需通过模型决策. 用  $c_{p,n,i}^{\text{pipe}}$ 、 $c_{n,n',z,o}$  代表管输和非管输方式的单位运费, 每种运输方式以实际接收体积计算运费, 可用需求点在各时间窗内接收量  $F_{t,p,n,i}^N$ 、 $F_{t,n,n',z,o}^{\text{in}}$  分别表示管输和非管输方式的运输体积.

### 2) 铁、水、公路运输约束.

相比于管道 1 ~ 2 m/s 的运输速度, 铁、水、公路点对点运输准时且高效. 令整数参数  $\Delta t_{n,n',z}$  表示通过方式  $z$  将油品从节点  $n$  运送到节点  $n'$  所需的时间窗数量, 即在途运输时间. 具体而言, 节点  $n$  在第  $t$  时间窗通过方式  $z$  输送了  $F_{t,n,n',z,o}^{\text{out}}$  油品  $o$  到节点  $n'$ , 则节点  $n'$  将在第  $t + \Delta t_{n,n',z}$  时间窗内接收同样体积的油品, 即

$$F_{t,n,n',z,o}^{\text{in}} = F_{t',n,n',z,o}^{\text{out}}, \quad \forall t < |T|, n, z, o, n' \in N_{n,z,o}, \\ t' = t + \Delta t_{n,n',z}, t > t_{n,n',z}. \quad (2)$$

式 (2) 仅对本调度周期内  $\Delta t_{n,n',z}$  之后时间窗生效, 而对于  $\Delta t_{n,n',z}$  之前时间窗, 节点  $n'$  接收的油品来自上个调度周期靠后时间点发出的油品, 为已知的在途计划, 即约束

$$F_{t,n,n',z,o}^{\text{in}} = f_{t,n,n',z,o}^{\text{in}}, \quad \forall t < |T|, n, z, o, n' \in N_{n,z,o}, \\ t \leq \Delta t_{n,n',z}^{\text{truck}}. \quad (3)$$

$$F_{t,n,n',z,o}^{\text{in}} \leq f_{n,n',z,o}^{\text{max}}, \quad \forall t < |T|, n, z, o, n' \in N_{n,z,o}. \quad (4)$$

其中: 参数  $\Delta t_{n,n',z}$  为通过方式  $z$  将油品从节点  $n$  运送到节点  $n'$  所需的时间窗数量; 变量  $F_{t,n,n',z,o}^{\text{out}}$  为节点  $n$  在时间窗  $t$  用方式  $z$  发给节点  $n'$  油品  $o$  的体积 (m<sup>3</sup>); 参数  $f_{t,n,n',z,o}^{\text{in}}$  为节点  $n'$  在时间窗  $t$  ( $t < \Delta t_{n,n',z}$ ) 以方式  $z$  接收节点  $n$  发出油品  $o$  的体积 (m<sup>3</sup>); 参数  $f_{n,n',z,o}^{\text{max}}$  为节点  $n$  用方式  $z$  发给节点  $n'$  油品  $o$  的最大能力 (m<sup>3</sup>).

式(4)限制了各运输通道的运输体积上限.

3) 管道运输约束.

用 $RC_{t,p,i}$ 和 $LC_{t,p,i}$ 表示在时间点 $t$ 管道 $p$ 内批次 $i$ 的油头(右体积坐标)和油尾(左体积坐标),有

$$V_{t,p,i} = RC_{t,p,i} - LC_{t,p,i}, \quad \forall t, p, i \in I_p. \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I_p} V_{t,p,i} = v_p^L, \quad \forall t, p; \quad (6)$$

$$RC_{t,p,i} = \sum_{i' \in I_p: i' \geq i} V_{t,p,i'}, \quad \forall t, p, i \in I_p; \quad (7)$$

$$V_{t,p,i} = v_{p,i}^{P,0}|_{t=1} + V_{t-1,p,i} + \sum_{n \in N_p^S: i \in I_{t-1,p,n}} F_{t-1,p,n,i}^N - \sum_{n \in N_p^D: i \in I_{t-1,p,n}} F_{t-1,p,n,i}^N, \quad \forall t, p, i \in I_p. \quad (8)$$

其中: 变量 $RC_{t,p,i}/LC_{t,p,i}$ 为时间点 $t$ 管道 $p$ 内批次 $i$ 的油头/油尾体积坐标( $m^3$ ); 变量 $V_{t,p,i}$ 为时间点 $t$ 管道 $p$ 内批次 $i$ 体积( $m^3$ ); 参数 $v_p^L$ 为管道 $p$ 管容( $m^3$ ); 参数 $v_{p,i}^{P,0}$ 为管道 $p$ 批次 $i$ 在调度初始时刻的体积( $m^3$ ). 式(5)表示管内批次体积 $V_{t,p,i}$ 等于同一时间节点油头和油尾体积坐标之差. 由于油品可压缩性可忽略不计, 油品总是充满整个管道. 式(6)表示管道 $p$ 所有批次 $i \in I_p$ 体积之和在任意时间节点等于管容 $v_p^L$ . 式(7)表示管道 $p$ 批次 $i$ 的油头坐标等于同一管道中该批次及后行批次( $i' \geq i$ )的体积总和. 式(8)为批次体积的质量守恒约束, 当时间点 $t$ 等于1时, 管道 $p$ 内批次 $i$ 在时间点 $t$ 的体积等于已知参数 $v_{p,i}^{P,0}$ ; 当时间点 $t$ 大于1时, 管道 $p$ 内批次 $i$ 在该时间点的体积等于上一时间点 $t-1$ 的体积加上该管道上所有供应点 $n \in N_p^S$ 注入批次 $i$ 的体积, 再减去所有需求点 $n \in N_p^D$ 分输批次 $i$ 的体积. 本模型通过动态集合 $I_{t-1,p,n}$ 控制变量 $F_{t-1,p,n,i}^N$ 的数量, 若批次 $i$ 不在动态集合 $I_{t-1,p,n}$ 内, 则变量 $F_{t-1,p,n,i}^N$ 不存在, 即为0.

引入二元变量 $X_{t,p,n,i}^N$ 表示管道 $p$ 节点 $n$ 在时间窗口 $t$ 内是否注入或者分输批次 $i$ . 如果 $X_{t,p,n,i}^N = 1$ , 则批次 $i$ 在时间节点 $t$ 时的油尾坐标未超过站场位置 $\sigma_{p,n}$ , 且在时间节点 $t+1$ 时的油头坐标已超过站场体积坐标 $\sigma_{p,n}$ , 即

$$LC_{t,p,i} - \sigma_{p,n} \leq (1 - X_{t,p,n,i}^N)(v_p^L - \sigma_{p,n}), \quad \forall t < |T|, p, n \in N_p, i \in I_{t,p,n}; \quad (9)$$

$$\sigma_{p,n} - RC_{t+1,p,i} \leq (1 - X_{t,p,n,i}^N)v_p^L, \quad \forall t < |T|, p, n \in N_p, i \in I_{t,p,n}; \quad (10)$$

$$F_{t,p,n,i}^N \leq X_{t,p,n,i}^N \tau \rho_{p,n}^{N,\max}, \quad \forall t < |T|, p, n \in N_p, i \in I_{t,p,n}; \quad (11)$$

$$F_{t,p,n,i}^N \leq \sigma_{p,n} - LC_{t,p,i} + \sum_{n' \in N_p^S: n' < n, i \in I_{t,p,n'}} F_{t,p,n',i}^N - \sum_{n' \in N_p^D: n' < n, i \in I_{t,p,n'}} F_{t,p,n',i}^N + (1 - X_{t,p,n,i}^N)v_p^L, \quad \forall t < |T|, p, n \in N_p^D, i \in I_{t,p,n}. \quad (12)$$

其中: 二元变量 $X_{t,p,n,i}^N$ 为管道 $p$ 节点 $n$ 在时间窗口 $t$ 内是否注入(分输)批次 $i$ ; 参数 $\sigma_{p,n}$ 为管道 $p$ 节点 $n$ 的体积坐标( $m^3$ ); 参数 $\tau$ 为时间窗口长度( $h$ ); 参数 $\rho_{p,n}^{N,\max}$ 为管道 $p$ 节点 $n$ 的最大注入/分输流量( $m^3/h$ ). 式(11)约束操作流量不能超过流量上限 $\rho_{p,n}^{\max}$ . 式(12)限制了时间窗口 $t$ 内节点 $n$ 分输批次 $i$ 的最大体积, 该体积不能超过站前批次总体积加上站场 $n$ 上游站场的注入总体积, 再减去分输总体积.

引入变量 $F_{t,p,n}^S$ 表示管道 $p$ 节点 $n$ 下游管段在时间窗口 $t$ 内的运输体积. 对于每一时间窗口, 管道 $p$ 节点 $n$ 下游管段运输体积等于该节点及上游节点 $n'$ ( $n' \in N_p^S, n' \leq n$ )的注入体积之和减去分输体积之和, 即

$$FS_{t,p,n} = \sum_{n' \in N_p^S: n' \leq n, i \in I_{t,p,n'}} F_{t,p,n',i}^N - \sum_{n' \in N_p^D: n' \leq n, i \in I_{t,p,n'}} F_{t,p,n',i}^N, \quad \forall t < |T|, p, n \in N_p; \quad (13)$$

$$FS_{t,p,n} \leq \tau \rho_{p,n}^{S,\max}, \quad \forall t < |T|, p, n \in N_p. \quad (14)$$

其中: 变量 $FS_{t,p,n}$ 为管道 $p$ 节点 $n$ 下游管段在时间窗口 $t$ 内的运输体积( $m^3$ ); 参数 $\rho_{p,n}^{S,\max}$ 为管道 $p$ 节点 $n$ 下游管段在时间窗口 $t$ 内的运输流量上限( $m^3/h$ ). 考虑到管道的运输技术能力, 式(14)限制了管道运输流量不能超过 $\rho_{p,n}^{S,\max}$ .

4) 节点库存约束.

$$V_{t,n,o}^N = v_{n,o}^{N,0}|_{t=1} + V_{t-1,n,o}^N + q_{t-1,n,o}\tau + \sum_{n \in N_p^D: i \in I_{t-1,p,n}} y_{p,i,o} F_{t-1,p,n,i}^N + \sum_{n': n \in N_{n',z,o}} F_{t,n,n',z,o}^{\text{in}} - \sum_{n \in N_p^S: i \in I_{t-1,p,n}} y_{p,i,o} F_{t-1,p,n,i}^N - \sum_{n' \in N_{n,z,o}} F_{t,n,n',z,o}^{\text{out}}, \quad \forall t, n, o \in O_n; \quad (15)$$

$$v_{n,o}^{N,\min} \leq V_{t,n,o}^N \leq v_{n,o}^{N,\max}, \quad \forall t, n, o \in O_n. \quad (16)$$

其中: 变量 $V_{t,n,o}^N$ 为节点 $n$ 油品 $o$ 在时间点 $t$ 的库存( $m^3$ ); 参数 $v_{n,o}^{N,0}$ 为节点 $n$ 油品 $o$ 初始库存( $m^3$ ); 参数 $q_{t,n,o}$ 为节点 $n$ 油品 $o$ 在时间窗口 $t$ 内变化率( $m^3/h$ ); 二元参数 $y_{p,i,o}$ 为管道 $p$ 批次 $i$ 是否为油品 $o$ ; 参数 $v_{n,o}^{N,\min}/v_{n,o}^{N,\max}$ 为节点 $n$ 油品 $o$ 库存下限/上限( $m^3$ ). 式(15)给出了所有节点在调度周期内的库存变化趋势. 参数

$v_{n,o}^{N,0}$ 表示节点 $n$ 油品 $o$ 的初始库存,  $q_{t,n,o}$ 是时间窗 $t-1$ 油品 $o$ 产量或消耗率 ( $m^3/h$ ). 时间点 $t$ 的库存等于上一个时间点的库存加上时间窗 $t-1$ 内管道、铁路、水路、公路的总接收量, 减去同一时间窗内的出库量. 式(16)约束了库存的合理范围.

## 2 算法设计

### 2.1 算法原理

由第1.2节可知, 本文所建的模型为MILP模型, 大量的二元变量(如管道批次相关的 $X_{t,p,n,i}^N$ )会导致求解复杂度显著增加, 特别是在时间跨度较长且管道节点和批次数量较多的情况下, 商业优化求解器可能面临收敛慢、长时间得不到最优解甚至可行解的情况. 实际上,  $X_{t,p,n,i}^N$ 及其相关约束的数量取决于动态集合 $I_{t,p,n}$ 的大小, 即与时间窗数量、管道数量以及批次数量密切相关. 为了在保证优化精度的同时大幅降低模型的计算复杂度, 本文提出一种“父-子问题”分层求解算法(图2), 通过时间窗逐步切割的思想将原问题划分成若干组“父-子问题”, 直至子模型时间窗长度满足精度要求终止. 在每一轮迭代过程中, 子模型将父模型时间窗划分至更细的时间窗, 并利用父模型计算结果中的批次运移信息更新子模型中的动态批次集合( $I_{p,n}$ 和 $I_{t,p,n}$ ), 使子模型二元变量和约束数量不会随时间窗数量呈线性增长. 具体步骤如下:

step 1: 针对一个周期为 $H$ 的物流计划, 用 $T_{max}^1$ 个时间节点将其拆分为 $T_{max}^1-1$ 个时间窗, 时间窗集合 $T^1 = \{1, 2, \dots, T_{max}^1-1\}$ , 每个时间窗长度为 $\tau = H/(T_{max}^1-1)$ , 用动态集合 $I_{t,p,n}$ 代表在第 $t$ 个时间窗内

管道 $p$ 站场 $n$ 可能注入/分输的批次集合. 由于第1次求解尚未知道批次的运移过程,  $I_{p,n}$ 和 $I_{t,p,n}$ 基本上包含了该站场在本月内注入的所有批次. 假设 $I_{max,p}$ 为管道 $p$ 的批次总数,  $I_{p,n} = I_{t,p,n} = \{1, 2, \dots, I_{max,p}\}$ . 在此基础上构建第1.2节的多式联运优化模型, 将此模型视作父模型. 利用求解器获得最优计划, 包括管道批次输送计划及铁路、水路、公路“点对点”输送计划. 管道批次输送计划包括每个时间窗内各管道注入、分输站场操作总体积, 以及管内批次在各时间点的油头坐标 $RC_{t,p,i}^1$ 和油尾坐标 $LC_{t,p,i}^1$ . 转至 step 2.

step 2: 将 step 1 中父模型的每个时间窗拆分为 $m(m \geq 2)$ 个, 则时间窗个数变为 $T_{max}^2 = m(T_{max}^1-1)$ , 时间窗集合 $T^2 = \{1, 2, \dots, T_{max}^2\}$ , 每个时间窗的长度为父模型的 $1/m$ 倍, 即 $\tau = H/(T_{max}^2-1)$ . 后续将基于细化后的时间窗构建“子模型”. 引入参数 $td_t$ 代表“父-子模型”的时间窗关系,  $td_t$ 表示子模型中第 $t$ 个时间窗对应的父模型中时间窗编号, 例如, 父模型第1个时间窗包含了子模型中的第 $1 \sim m$ 个时间窗,  $DT_1 = \{1, 2, \dots, m\}$ . 针对父模型各时间窗 $t \in T^1$ 的油头位置 $RC_{t,p,i}^1$ 和油尾位置 $LC_{t,p,i}^1$ , 判断子模型对应时间窗各站场的过站批次, 按照下式更新子模型的动态批次集合 $I_{p,n}$ 和 $I_{t,p,n}$ :

$$I_{p,n} = \{i : LC_{0,p,i}^1 \leq \sigma_{p,n} + \delta \ \& \ RC_{T_{max}^1,p,i}^1 \geq \sigma_{p,n} - \delta\}, \quad \forall p, n \in N_p; \tag{17}$$

$$I_{t,p,n} = \{i : LC_{td_t,p,i}^1 \leq \sigma_{p,n} + \delta \ \& \ RC_{td_t+1,p,i}^1 \geq \sigma_{p,n} - \delta\}, \quad t < |T^1|, p, n \in N_p. \tag{18}$$

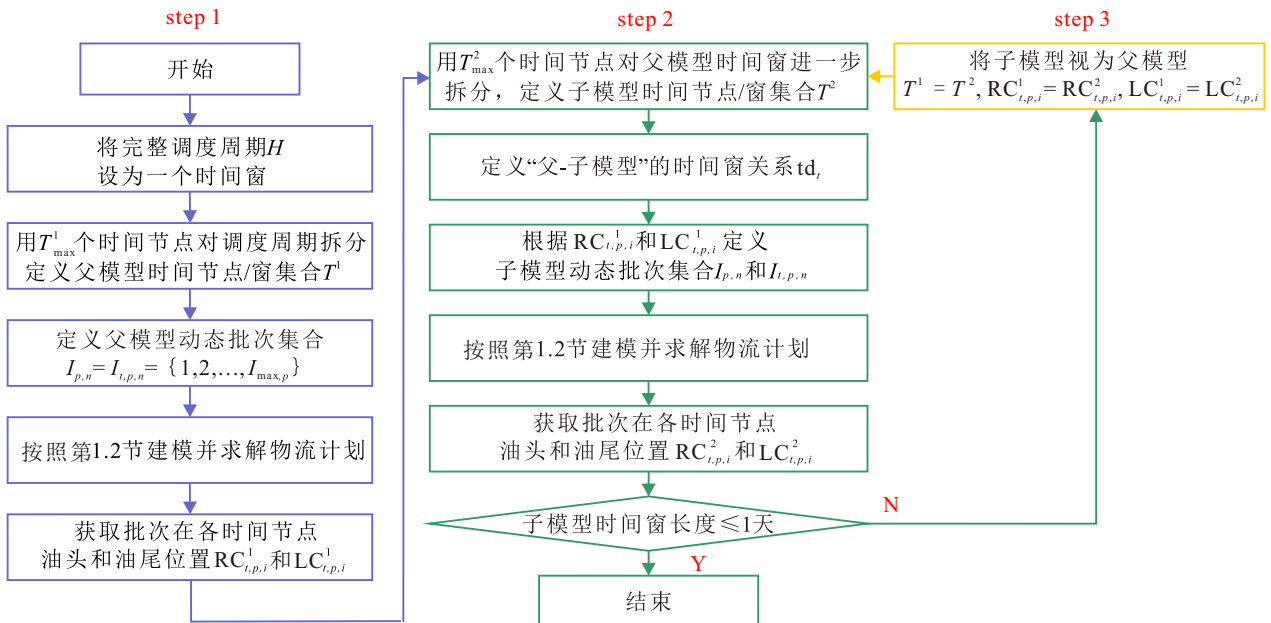


图2 “父-子问题”分层求解算法框架

在此基础上重构第 1.2 节的多式联运优化模型. 该模型被视为子模型, 其整体框架和变量定义与父模型一致, 区别在于时间窗集合  $T^2$  与动态批次集合的不同, 这些差异会导致与之相关的变量和约束数量发生变化. 利用求解器获得子模型的最优计划, 其中管内批次在各时间点的油头和油尾坐标记为  $RC_{t,p,i}^2$  和  $LC_{t,p,i}^2$ . 若子模型时间窗  $\tau > 24$  h, 则物流计划精度尚未满足日计划要求, 转至 step 3; 反之, 结束计算. 其中:  $\delta$  为允许误差, 用以适当扩大集合范围, 避免对最优解产生影响.

step 3: 将 step 2 构建的子模型转换为父模型, 转至 step 2 并对新的父模型时间窗进一步细分, 更新时间窗长度  $\tau$ , 利用子模型的时间窗将集合  $T^2$ 、油头和油尾坐标  $RC_{t,p,i}^2$ 、 $LC_{t,p,i}^2$  更新为父模型的  $T^1$ 、 $RC_{t,p,i}^1$ 、 $LC_{t,p,i}^1$ , 在此基础上构建新的子模型.

### 2.2 算法优势

图 3 以单个站场的过站批次为例, 展示了如何

实现二元变量空间的降维. 假设调度周期共 8 天, 有 5 个批次经过该站场, 时间窗个数为 8, 单个时间窗长度为 1 天. 在批次运移情况未知情况下, 传统方法是假设动态集合  $I_{t,p,n}$  与完整批次集合  $I$  一致, 即二元变量  $X_{t,p,n,i}^N$  数量等于 40(8 时间窗  $\times$  5 批次). 图 3 利用二分法对时间窗依次拆分, 并设误差  $\delta$  为 0. 初始计算时, 由于没有父模型提供信息, 各时间窗内均有 5 个批次经过, 初次计算的  $X_{t,p,n,i}^N$  数量等于 10(2 时间窗  $\times$  5 批次). 由第 1 次计算结果 (图 3 第 3 行) 可知, 每个时间窗内该站可能有 3 个批次经过, 但具体的过站时间未知, 第 2 次计算的  $X_{t,p,n,i}^N$  数量等于 12 (4 时间窗  $\times$  3 批次). 同理, 由第 2 次计算结果 (图 3 第 5 行) 可知, 倒数 2 个时间窗内只有紫色批次过站, 而剩余前 6 个时间窗内均可能流过 2 个批次, 第 3 次计算的  $X_{t,p,n,i}^N$  数量等于 14. 在每次迭代中, 当时时间窗数量增加 2 倍时, 二元变量  $X_{t,p,n,i}^N$  增幅小于 1.2 倍. 本文利用动态集合  $I_{t,p,n}$  剔除了各时间窗内的

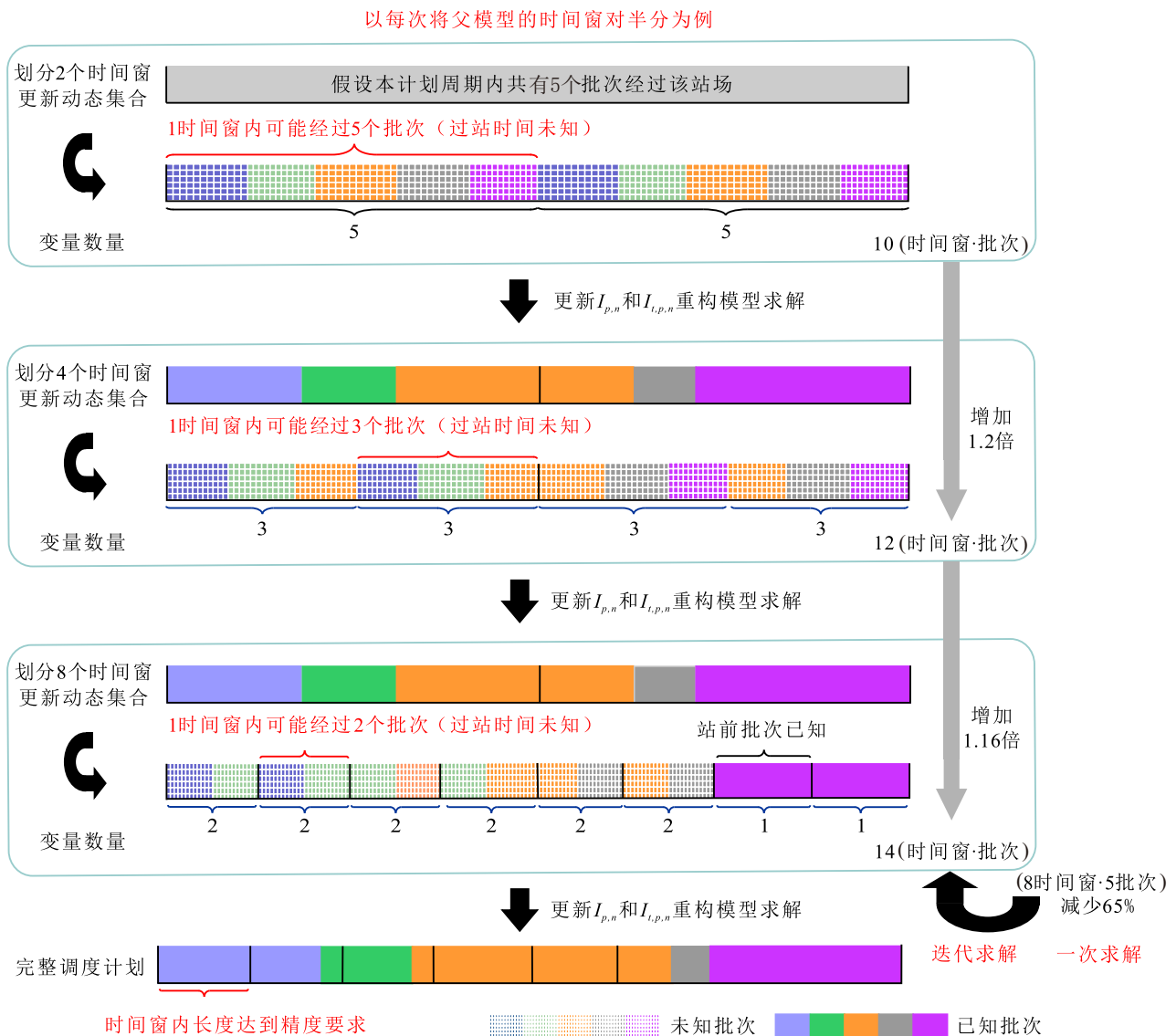


图3 通过“父子问题”分层求解算法削减变量

无效批次,  $X_{t,p,n,i}^N$  数量减少了 65%, 在保证解质量的前提下减去了不可行域内的二元变量, 达到高效寻优的效果.

### 3 实例分析

#### 3.1 基础数据

以国内西部 8 省(市、自治区)区域的某物流系统为对象, 进行算例分析. 该区域内有 42 个节点, 采用 5 条管道构成的管网以及铁路网、公路网完成

0#柴油、92#汽油、95#汽油的输送, 管道分布情况如图 4 所示(铁路网、公路网未展示). 所有节点均在管道上, 但管道仅限于输送 0#柴油和 92#汽油, 95#汽油则需通过铁路和公路运输. 管道、铁路和公路的平均运价分别为 0.2、0.5 和 1 CNY/(t·km), 参数  $c_{p,n,i}^{pipe}$  和  $c_{n,n',z,o}$  的赋值需根据路径里程进行换算调整(基础数据量过大, 不在正文中展示). 此外, 对于本文所构建的模型, 非管道运输方式被视为统一建模方式, 区别仅在于不同通道的输送能力.

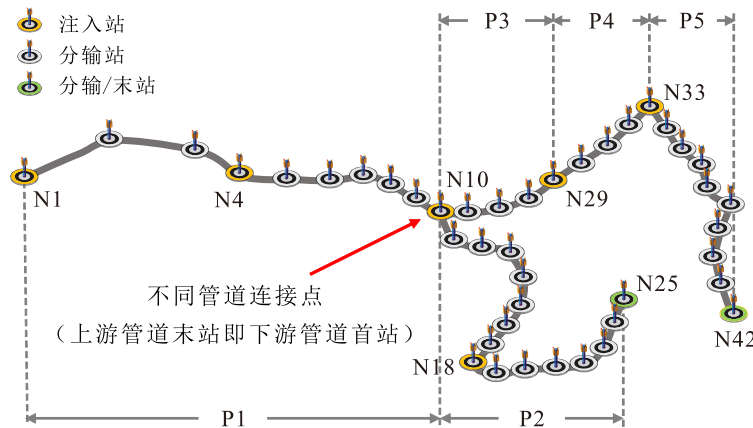


图4 中国西部物流系统结构

为了评估所提出方法的性能, 设计不同规模的 6 个测试实例, 具体依据调度周期长短和物流区域大小进行组合. 调度周期分为 2 周(14 天)和 4 周(28 天), 物流区域则分别按照 1 条管道(P1)、2 条管道(P1 和 P2)以及 5 条管道(P1 ~ P5)划分. 表 1 详细展示了测试实例的具体参数配置.

表1 测试实例规模

算例	调度周期/天	管道	节点	铁路/公路通道数量
1	14	P1	10	128
2	28			
3	14	P1、P2	25	273
4	28			
5	14	P1、P2、P3、P4、P5	42	462
6	28			

#### 3.2 模型与算法验证

本文采用 Python 3.12 编程, 并通过 Gurobi 9.5.2 求解, 终止准则设定为 MIPGap 小于  $10^{-4}$ . 为了验证所提出的模型与算法的有效性, 本文以规模最小的第 1 和第 2 个实例为例进行测试. 具体而言, 第 1 个实例经过两次迭代计算, 时间窗数量设置分别为 7 和 14; 第 2 个实例经过 3 次迭代计算, 时间窗数量分别为 7、14 和 28. 在最后 1 次迭代中, 时间窗长度均达到了 1 天的精度, 完全满足计划要求. 此外, 将所提出方法与利用求解器对 MILP 模型进行一次求

解进行对比. 表 2 详细展示了两种方法的模型规模和求解结果. 由于只有最后一次迭代精度达到要求, 本文仅对比该次迭代求解的目标函数. 结果表明, 所提出方法找到的最优解与一次求解完全一致, 但求解时间显著缩短. 2 个实例的计算时间分别在 1 s

表2 模型规模与求解对比

实例	参数	迭代方法			一次求解
		1	2	3	
1	时间点个数	8	15	—	15
	时间窗个数	7	14	—	14
	时间窗长度/h	48	24	—	24
	二元变量	583	366	—	1069
	连续变量	1153	1319	—	2232
	约束数目	1968	1564	—	3759
	计算耗时/s	<1	<1	—	5
目标函数/CNY	—	197792	—	197792	
2	时间点个数	8	15	29	29
	时间窗个数	7	14	28	28
	时间窗长度/h	96	48	24	24
	二元变量	702	399	821	2647
	连续变量	1324	1407	2919	5147
	约束数目	2355	1777	3702	9190
	计算耗时/s	1	<1	2	76
目标函数/CNY	—	—	956885	956885	

和 4 s 内, 相较于 1 次求解耗时缩短 80% 和 94.7%.

所提出方法的优势在于采用了分解法对大规模复杂计划的时间窗进行依次切割, 划分为若干组“父-子问题”, 其中子问题的时间窗数量是父问题的两倍, 利用父模型计算结果中的批次运移信息更新子模型中的批次动态集合. 这一策略有效地控制了随时间窗增加而带来的变量和约束数量增幅. 以第 2 个实例为例, 第 3 轮迭代的时间窗数量是第 1 轮的 4 倍, 但模型中的二元变量、连续变量和约束数分别增加了 1.17 倍、2.20 倍和 1.57 倍. 相较于一次求解的模型规模, 第 3 轮迭代的二元变量、连续变量和约束数分别仅为一次求解的 31.0%、56.7% 和 40.3%. 通过多轮“父-子问题”结果的动态交互, 该方法显著削减了模型的增长规模, 尤其是在减少二元变量数量方面, 实现了大规模问题的高效寻优.

以第 2 个实例为例, 对求解的物流计划进行展

示. 由于管道运输成本最低, 0#柴油和 92#汽油主要通过管道 P1 进行运输. 管道的日间批次输送计划如图 5 所示, 其中每一行代表了每一天批次在管道中的分布位置, 向下/向上的箭头分别表示注入与分输操作. 表 3 为铁路的运输计划表, 包括供应点及发运时间、需求点及接收时间、输送油品种类及运输量. 以第 1 条信息为例, 供应点 N4 在第 3 天通过铁路向需求点 N5 发送 1 652 m<sup>3</sup> 的 95#汽油, 而 N5 的收货时间为第 5 天. 由于 95#汽油仅能通过铁路和公路运输, 铁路的运输成本远低于公路, 选择通过 4 次铁路运输将 95#汽油从供应点 N4 和 N10 运输至需求点 N5 和 N6, 求解结果中未出现公路运输情况. 图 6 展示了部分节点的库存变化趋势, 蓝色、红色、绿色实线分别代表 92#汽油、95#汽油和 0#柴油库存, 虚线代表对应的库存上限. 所有油品均保持在安全库存范围内, 满足生产运行要求.

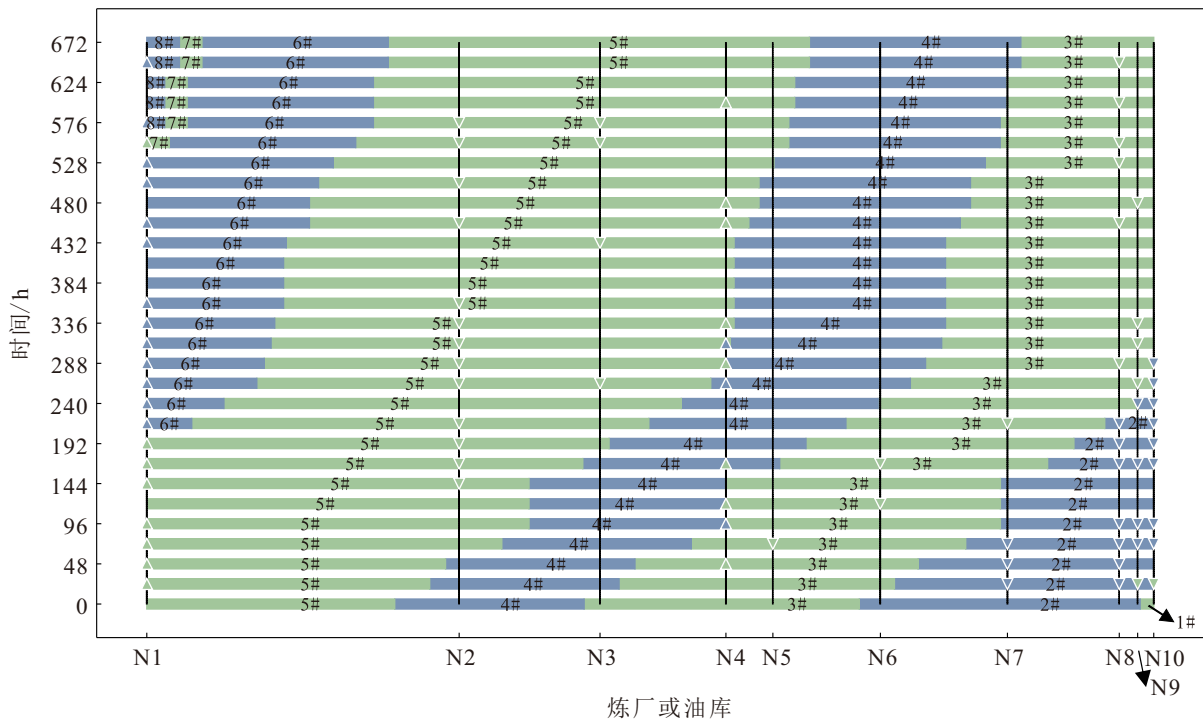


图5 实例 2 中 P1 管道的日间批次输送计划

表3 铁路运输计划

发运时间	接收时间	供应点	需求点	输送油品	运输量/m <sup>3</sup>
第3天	第5天	N4	N5	95#汽油	1652
第4天	第6天	N10	N6	95#汽油	2201
第19天	第21天	N10	N5	95#汽油	1373
第19天	第21天	N10	N6	95#汽油	2019

### 3.3 方法对比

表 4 展示了不同规模算例的实验结果. 结果显示: 在“相同物流区域内, 随着调度周期加倍”或“在

相同调度周期内, 随着物流区域的扩大”, 模型的计算耗时均呈现指数上升趋势, 特别是一次求解方法表现尤为明显. 具体而言, 随着调度周期的加倍, 一次求解方法在实例 1 和实例 2 中的求解耗时从 5 s 增至 76 s, 增幅达 15.2 倍; 对于 14 天的调度周期而言, 一次求解方法在实例 1、实例 3 和实例 5 中的求解耗时从 5 s 增至 1 002 s, 增幅达到 200 倍以上. 特别是对于长周期的大规模实例 4 和实例 6 而言, 一次求解方法耗时在半个小时以上, 进一步验证了大规模多式联运 MILP 模型所面临的求解瓶颈问题.

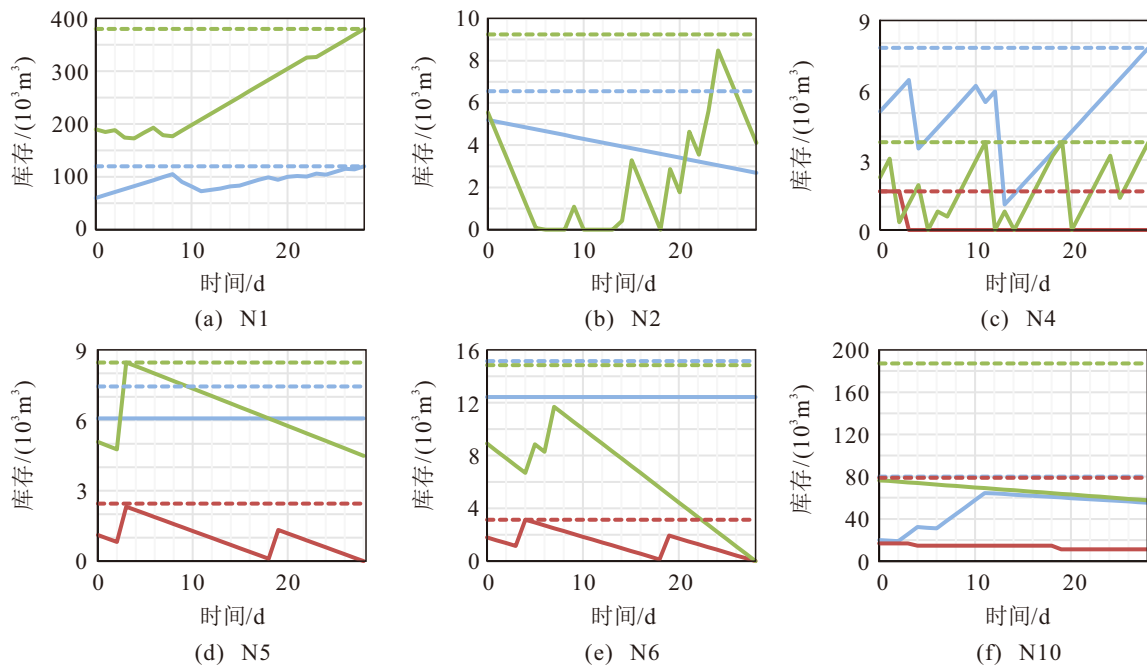


图6 实例2中部分节点库存变化曲线

表4 实例计算结果对比

实例	方法	二元变量	约束数量	计算耗时/s	目标函数/CNY	Gap/%
1	迭代方法 <sup>1</sup>	366	1564	< 1	197792	0
	一次求解	1069	3759	5	197792	0
2	迭代方法 <sup>1</sup>	821	3702	4	956885	0
	一次求解	2647	9190	76	956885	0
3	迭代方法 <sup>1</sup>	1067	4361	6	223283	0
	一次求解	3737	12468	20	223283	0
4	迭代方法 <sup>1</sup>	2420	10415	63	1152282	0
	一次求解	8342	27930	1931	1152282	0
5	迭代方法 <sup>1</sup>	1811	7221	160	274659	0
	一次求解	5241	17694	1002	274659	0
6	迭代方法 <sup>1</sup>	3997	16733	183	1431016	0
	一次求解	11640	39336	3527	1431016	0

注:<sup>1</sup>为模型规模、目标函数为最后一次模型迭代结果,计算耗时为所有迭代的计算时间之和。

相比之下,所提出方法在计算效率和解质量方面均表现出明显的优势,即使在物流区域扩大或调度周期增加的情况下,仍能够保持稳定的性能和较短的求解时间.核心在于本文方法的动态批次集合能够使模型在保证求解精度的前提下大幅减少模型规模.与一次求解方法相比,通过本文方法重构的模型二元变量和约束条件数量平均减少了68.0%和60.4%,能够找到所有实例的最优解,即Gap为0.本文方法在小规模实例1~实例3中的计算耗时在6s以内,而在大规模实例4~实例6中的计算耗时为63~183s.相比一次求解,所提出方法在保证最优性的前提下平均减少86.7%的计算时间,为大规模

物流调度问题提供了兼具工程实用性与理论创新性的高效解决方案.

## 4 结论

本文针对大规模跨区域成品油多式联运问题,提出了一种高效调度优化方法.该方法考虑了管道连续顺序输送过程与铁路、水路、公路“集装箱”式运输的时空差异,以“日”为时间尺度,构建了运输成本最低的管-铁-水-公多式联运优化MILP模型.针对MILP模型在大规模、长周期、跨区域调运场景下求解效率低的瓶颈,提出了一种高效的“父-子问题”分层求解算法,通过时间窗切割将原问题划分成若干组“父-子问题”,利用父模型计算结果中的批次运移信息更新子模型中的动态批次集合.当时间窗增加时,有效地控制了相关二元变量与约束调节增加幅度,极大削减了原问题的变量搜索空间,显著加速了寻优过程.通过6个不同规模的实例表明,所提出方法能够在保证求解精度的前提下将模型中的二元变量和约束条件数量平均减少68.0%、60.4%.相比一次求解,平均减少86.7%的计算时间.

本文在理论上解决了能够精细考虑管道批次顺序过程的多式联运调度问题,并提出了一类高效的分层求解算法,丰富了调度理论的研究内容;在工程实践上促进了管道、铁路、公路及水路的多式联运高效协同,为成品油物流行业提供了一套具有突破性意义的高效优化解决方案.未来将从以下研究方向进一步提升成品油多式联运的综合效率:

1) 可以考虑更多环境因素,如运输过程中的突发事件、下游市场需求波动等;

2) 可以拓展考虑更精细的铁路、公路、水路运输的载具调度, 如油轮调度等;

3) 可以进一步细化优化目标, 如在突发状况下以运输时间为主。

#### 参考文献 (References)

- [1] 涂仁福, 梁永图, 邵奇, 等. 绿氨-成品油综合运输系统适应性分析与规划[J]. 油气储运, 2024, 43(4): 361-372. (Tu R F, Liang Y T, Shao Q, et al. Adaptability analysis and planning of green ammonia and product oil integrated transmission system[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(4): 361-372.)
- [2] 涂仁福, 张雪琴, 邱睿, 等. 成品油一次物流优化与协调方法研究进展[J]. 油气储运, 2023, 42(11): 1228-1241. (Tu R F, Zhang X Q, Qiu R, et al. Research progress on optimization and coordination methods for primary distribution of refined oil[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(11): 1228-1241.)
- [3] 李珍萍, 周文峰, 张煜炜, 等. 考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2999-3005. (Li Z P, Zhou W F, Zhang Y W, et al. Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(12): 2999-3005.)
- [4] Tu R F, Jiao Y Q, Qiu R, et al. Energy saving and consumption reduction in the transportation of petroleum products: A pipeline pricing optimization perspective[J]. *Applied Energy*, 2023, 342: 121135.
- [5] 涂仁福, 徐宁, 刘静, 等. 考虑运行平稳性的成品油管道调度方法[J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 447-456. (Tu R F, Xu N, Liu J, et al. A scheduling method for products pipeline considering operation stability[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 7(3): 447-456.)
- [6] Li Z B, Liang Y T, Liao Q, et al. A review of multiproduct pipeline scheduling: From bibliometric analysis to research framework and future research directions[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2021, 1(4): 395-406.
- [7] Qiu R, Liang Y T, Liao Q, et al. Primary logistics planning of oil products under the imbalance of supply and demand[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(4): 1915-1925.
- [8] Qiu R, Zhang B, Zhao W, et al. An integrated MINLP model for multi-party coordination in downstream oil supply chain[J]. *Petroleum Science*, 2024, 21(3): 2066-2079.
- [9] 邱睿. 成品油一次物流优化及协调研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023. (Qiu R. Optimization and coordination of primary logistics of refined products[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.)
- [10] Jiao Y Q, Qiu R, Liang Y T, et al. Integration optimization of production and transportation of refined oil: A case study from China[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 188: 39-49.
- [11] Qiu R, Liang Y T, Liao Q, et al. A model-experience-driven method for the planning of refined product primary logistics[J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 254: 117607.
- [12] 廖绮. 成品油管道配泵批次计划耦合优化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021. (Liao Q. Multi-product pipeline scheduling optimization coupled with pump scheduling[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.)
- [13] 王小寒, 贾玉林, 蔡佳芯, 等. 铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化[J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 3063-3073. (Wang X H, Jia Y L, Cai J X, et al. Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(12): 3063-3073.)
- [14] 许少新, 涂仁福, 徐宁, 等. 成品油管铁联运物流优化[J]. 油气储运, 2022, 41(7): 859-868. (Xu S X, Tu R F, Xu N, et al. Optimization of refined oil logistics considering pipeline-rail combined transportation[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(7): 859-868.)
- [15] Camussi N B, Cerdá J, Cafaro D C. Mathematical formulations for the optimal sequencing and lot sizing in multiproduct synchronous assembly lines[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 152: 107006.
- [16] Baghban A, Castro P M, Oliveira F. Data-driven robust optimization for pipeline scheduling under flow rate uncertainty[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2025, 193: 108924.
- [17] Liao Q, Liang Y T, Xu N, et al. An MILP approach for detailed scheduling of multi-product pipeline in pressure control mode[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 136: 620-637.
- [18] 梁永图, 邱睿, 涂仁福, 等. 中国油气管网运行关键技术及展望[J]. 石油科学通报, 2024, 9(2): 213-223. (Liang Y T, Qiu R, Tu R F, et al. Key technologies and prospects for the operation of oil and gas pipeline networks in China[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2024, 9(2): 213-223.)
- [19] 梁永图, 廖绮, 邱睿, 等. 市场化改革背景下成品油管网运营关键技术及展望[J]. 油气储运, 2023, 42(9): 978-987. (Liang Y T, Liao Q, Qiu R, et al. Key operation technologies and prospects to product oil pipeline network under market-oriented reform[J]. *Oil & Gas*

- Storage and Transportation, 2023, 42(9): 978-987.)
- [20] Yan Y M, Castro P M, Liao Q, et al. An effective decomposition algorithm for scheduling branched multiproduct pipelines[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2021, 154: 107494.
- [21] Xu N, Liao Q, Li Z B, et al. An efficient decomposition approach for the low-energy scheduling of a straight multiproduct pipeline[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, 165: 341-360.
- [22] Zhang H R, Liang Y T, Liao Q, et al. A self-learning approach for optimal detailed scheduling of multiproduct pipeline[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2018, 327: 41-63.
- [23] Liao Q, Zhang H R, Xia T Q, et al. A data-driven method for pipeline scheduling optimization[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, 144: 79-94.
- [24] 孙哲, 马胜男, 解相朋, 等. 基于仿生算法的多式联运路径规划方法综述[J]. *控制与决策*, 2025, 40(2): 375-386.  
(Sun Z, Ma S N, Xie X P, et al. Bio-inspired optimization-based path planning algorithms in multimodal transportation: A survey[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(2): 375-386.)
- [25] 何维, 何世伟, 迟居尚, 等. 集装箱多式联运全程运输路径与接驳集卡调度协同优化[J]. *控制与决策*, 2025, 40(7): 2175-2184.  
(He W, He S W, Chi J S, et al. Collaborative optimization of door-to-door transport routes and drayage truck scheduling in container intermodal transport[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(7): 2175-2184.)
- [26] 蔡近近, 宋瑞, 何世伟, 等. 考虑多时段影响的第四方物流运营策略联合优化[J]. *控制与决策*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0445.  
(Cai J J, Song R, He S W, et al. Joint optimization of fourth-party logistics operation strategies considering multi-period effects[J]. *Control and Decision*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0445.)

### 作者简介

廖绮 (1994-), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为油气供应链智慧决策, E-mail: [qliao@cup.edu.cn](mailto:qliao@cup.edu.cn);

涂仁福 (1997-), 男, 博士生, 主要研究方向为油气供应链运行优化, E-mail: [turenfu@foxmail.com](mailto:turenfu@foxmail.com);

黄明月 (2002-), 女, 硕士生, 主要研究方向为油气物流优化, E-mail: [2020010963@student.cup.edu.cn](mailto:2020010963@student.cup.edu.cn);

邱睿 (1996-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为油气物流智慧管理, E-mail: [rqi@cup.edu.cn](mailto:rqi@cup.edu.cn);

梁永图 (1971-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为油气供应链系统优化, E-mail: [Liangyt21st@163.com](mailto:Liangyt21st@163.com).