

控制与决策

Control and Decision

集装箱多式联运全程运输路径与接驳集卡调度协同优化

何维, 何世伟, 迟居尚, 赵子琪, 赵日鑫, 蔡近近

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1042>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于粒子群算法的满载需求可拆分车辆路径规划](#)

Split vehicle route planning with full load demand based on particle swarm optimization

控制与决策. 2021, 36(6): 1397–1406 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1323>

[铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化](#)

[Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal](#)

控制与决策. 2021, 36(12): 3063–3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

[基于生成对抗网络的大规模路网交通流预测算法](#)

Traffic flow forecasting algorithm for large-scale road network based on GAN

控制与决策. 2021, 36(12): 2937–2945 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0333>

[基于微波无线传能的动态无线传能链路多目标规划问题](#)

Multi-objective planning of dynamic wireless energy transmission link based on microwave wireless energy transmission

控制与决策. 2021, 36(12): 3039–3048 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1187>

[一种自适应拟牛顿-状态转移混合智能优化算法及应用](#)

A hybrid state transition optimization algorithm based on adaptive quasinewton method and its application

控制与决策. 2021, 36(10): 2451–2458 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0214>

集装箱多式联运全程运输路径与接驳集卡调度协同优化

何 维, 何世伟[†], 迟居尚, 赵子琪, 赵日鑫, 蔡近近

(北京交通大学 综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044)

摘要: 随着客户对“门到门”运输服务需求的增长以及对于物流费用敏感度的提升, 多式联运经营人亟需提供高效经济的集装箱全程运输服务. 鉴于集装箱全程运输链涵盖多种运输资源和环节, 多式联运经营人面临如何合理调配运输资源和实现各环节间有效协同的挑战. 综合考虑集装箱干线运输和两端接驳环节, 研究集装箱多式联运全程运输路径与接驳集卡调度的协同优化问题. 首先, 基于集装箱运输时空网络, 构建以总运营费用最小为目标的混合整数线性规划模型; 然后, 通过逻辑 Benders 分解算法框架设计可有效处理实际规模问题的精确求解算法; 最后, 选取西部陆海新通道部分运输网络为实验场景进行算例分析. 实验验证分析结果表明: 相较于 Gurobi 商业求解器, 所提出算法在多种规模算例中求解效率更优; 与传统的独立决策方法相比, 所提出协同优化模型能够降低 5% ~ 7.5% 的总运营费用.

关键词: 多式联运; 门到门运输; 路径优化; 集装箱接驳; 协同优化; 逻辑 Benders 分解算法

中图分类号: U169.1 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.1042

引用格式: 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.

Collaborative optimization of door-to-door transport routes and drayage truck scheduling in container intermodal transport

HE Wei, HE Shi-wei[†], CHI Ju-shang, ZHAO Zi-qi, ZHAO Ri-xin, CAI Jin-jin

(Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the growing demand for door-to-door transportation services and the heightened sensitivity to logistics costs, intermodal transport operators urgently need to provide efficient and economical container transportation services. Given that the entire container transportation chain involves multiple transport resources and links, these operators face the challenge of how to reasonably allocate transport resources and achieve effective coordination among various links. This study addresses the integrated optimization of container transportation routes and drayage truck scheduling, considering both trunk-line transportation and first/last-mile drayage services. Based on the spatiotemporal network for container transportation, we develop a mixed-integer linear programming model with the objective of minimizing total operational costs. A logic-based Benders decomposition algorithm framework is adopted to design an exact algorithm capable of effectively solving real-world scale problems. The experimental scenario is selected from a partial transportation network of the new western land-sea corridor. The results show that compared to Gurobi, the proposed algorithm has better solution efficiency in various-sized instances. Compared with traditional independent decision-making methods, the collaborative optimization model can reduce total operating costs by 5% to 7.5%.

Keywords: intermodal transport; door to door transportation; route optimization; container drayage; collaborative optimization; logic-based Benders decomposition algorithm

0 引言

全球化贸易的不断扩张、“一带一路”倡议的深入推进和国家政策的有力支持, 为多式联运的发展

提供了良好条件. 在此背景下, 以集装箱为装载单元的多式联运已成为促进贸易流通的重要物流模式. 据统计, 2023 年我国通过港口铁水联运的集装箱量

收稿日期: 2024-08-31; 录用日期: 2025-02-24.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2024JBZX038).

责任编委: 龙建成.

[†]通信作者. E-mail: shwhe@bjtu.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

已达约 1170 万 TEU^[1]。

随着集装箱“门到门”运输需求的不断增长以及客户对物流成本的愈发关注,多式联运经营人(ITO)亟需提供高效且经济的集装箱全程运输服务。该服务涵盖前端接取、干线运输、场站中转以及末端配送等多个关键环节^[2-3]。这些环节不仅涉及多种运输资源,如铁路和水路运输的舱位资源,以及用于两端接驳运输的集卡资源,而且各环节的作业相互关联、紧密配合。因此,在制定集装箱全程运输方案时,ITO 面临的主要挑战是如何科学合理地调配各环节内部的运输资源,并实现关联环节间的有效协同^[4]。

在集装箱多式联运问题研究中,现有文献普遍聚焦于运输链中特定环节,尤其是干线运输环节。该环节指集装箱从发货地场站出发,经铁路、水路或公路中的一种或多种方式运输,以及在中转场站转运,最终抵达收货地场站。文献[5-8]研究了多式联运干线运输路径以及运输方式的决策方法;文献[9-10]研究了运输服务决策方法,采用时空网络表征集装箱运输服务网络,并将决策问题抽象为多商品网络流问题(MCNFP),构建了以最小化运输费用为目标的优化模型。然而,这些文献往往将干线运输环节费用视为整个运输链的费用,而忽略了接驳环节费用;或用客户点至多式联运场站的直达运输费用来近似估算接驳费用。

实际上,接驳环节运营费用与集卡调度方案密切相关。已有许多文献通过研究集装箱接驳运输问题(CDP)来制定集卡调度方案。文献[11-14]将 CDP 中所有接驳任务抽象为任务顶点,并将任务与任务间接续关系映射为确定活动在顶点上的图(DAOV)后,构建了基于 DAOV 的优化模型,以决策集卡的接驳任务分配方案和任务执行顺序。在解决 CDP 的过程中,研究者们通常以集卡完成任务总时间最小^[12,14]、集卡行驶里程最短^[15]、运营费用最小^[16-17]、收益最大^[18]为目标来构建优化模型,主要考虑了客户时间窗^[15-18]、集卡数量限制^[16,18]和集卡司机工作时限^[15,19]等约束条件。然而,将集装箱干线运输和接驳运输环节运输方案分离决策不仅可能会导致集装箱全程运输总运营费用增加,还可能因忽视运输链中各环节在空间、时间和能力维度上的相互依赖和制约关系而导致运输方案在实际操作中不可行。

近年来,已有学者开始关注集装箱多式联运干线运输与接驳运输环节的相互关联性。Rivera 等^[20]协同优化集装箱前端接驳场站的选择、接驳集卡的运输路径以及运输需求与干线运输服务的匹配方案,并提出了数学启发式方法来求解优化模型,研究发

现协同决策相较于独立决策可节约 4%~24% 的运输费用;Heggen 等^[21]针对铁路运输服务分配问题和接驳集卡路径问题,分别构建了顺序决策和协同决策的优化模型,并设计了大邻域搜索启发式算法来求解协同决策优化模型,其研究结果表明,协同决策方法能够降低接驳运输费用和提升运输服务利用率。

可以发现,当前多数研究聚焦于决策集装箱干线运输或接驳运输的局部方案,而仅有的将两者协同优化的文献简化了全程运输过程,忽略了环节间能力关联,且所用启发式算法可能无法保证找到全局最优解。因此,有必要考虑集装箱多式联运全程运输链中关键环节及其相互关系,研究集装箱多式联运全程运输路径与两端接驳集卡调度的协同优化问题及其精确求解方法。本文主要内容如下。

1) 综合考虑前端和末端接驳与干线运输在空间、时间和能力维度上的相互关联性,将接驳集卡调度问题抽象为并行机调度问题,构建以最小化总运营费用为目标的协同决策集装箱全程运输路径和接驳集卡调度方案的混合整数线性规划模型。

2) 针对模型的可分解性,设计基于逻辑 Benders 分解(LBBD)的精确算法对其进行求解,将原问题分解为决策集装箱干线运输路径的主问题和决策接驳集卡调度方案的子问题后,基于问题特点设计最优割、可行割和有效不等式来提高算法求解效率。

3) 选取西部陆海新通道部分集装箱运输网络为实验场景,在多规模算例下验证协同优化模型的优势和所设计算法的有效性,并对模型关键参数开展敏感性分析。

1 问题描述

ITO 基于掌握的集装箱运输需求和运输网络信息,为集装箱匹配合适的干线运输服务资源。在干线运输服务无法直接满足“门到门”运输需求的情况下,需要调度多式联运场站内的集卡资源执行接驳任务,以确保提供全程运输服务。鉴于集装箱干线运输与两端接驳环节在时间、空间和能力维度上存在相互依赖性,需要对集装箱干线运输服务匹配方案和接驳任务执行方案进行综合协调,以合理规划集装箱的全程运输路径,并科学制定运输资源的调配方案。

运输需求信息包括集装箱数量、收/发货点、最早发货时间、期望收货时间和晚到惩罚系数,运输网络信息则包含多式联运场站和干线运输服务信息,多式联运场站信息包括集装箱装卸费用、免费堆存期、超期堆存费用、不同运输方式间的最少中转时

间、接驳范围以及可用于完成接驳任务的集卡资源, 干线运输服务信息则明确公路、铁路和海洋运输服务的出发/到达场站以及出发/到达时间. 基于集装箱的收/发货点和场站位置信息可确定各集装箱的候选始发/终到场站, 进而推导出所有潜在接驳任务及其对应的接驳里程和接驳时间信息. 接驳任务分为前端接取和末端配送任务. 前端接取任务是指从发货点将装有货物的重箱运输至始发场站的接驳任务, 其里程为发货点至始发场站的距离; 时间包括发货点处的空箱装货等待时间、发货点至始发场站的重箱运输时间以及场站处的重箱卸载时间. 末端配送任务是指从终到场站将重箱运输至收货点的接驳任务, 其里程为终到场站至收货点的距离; 时间包括终到场站处的重箱提取时间、终到场站至收货点的重箱运输时间和收货点处的重箱卸货等待时间.

基于上述信息, 本文构建以最小化总运营费用为目标的优化模型. 该模型考虑以下约束条件: 集装箱接驳任务与干线运输的时空关联性, 干线运输服务的承载能力限制, 集装箱在不同运输方式间中转的最少时间要求, 接驳集卡数量的限制以及集卡司机工作时间的限制. 模型旨在解决以下决策问题: 集装箱的干线运输路径、各多式联运场站在各时段分配到的接驳任务以及两端接驳集卡的调度方案.

2 模型构建

2.1 时空网络设计

鉴于集装箱运输需求和运输服务均具有时空特性, 本研究将物理运输网络与时间维度相结合构建出集装箱时空网络. 构建过程如下: 将规划期离散地划分为若干个时间点, 每个时间点对应一个固定时长的时段; 在每个时间点对物理节点进行复制, 形成时空节点集合; 建立包含干线运输服务弧和中转服务弧的时空弧集. 每条中转服务弧的起始和结束时空节点对应同一多式联运场站, 且结束时空节点的时段紧接着起始时空节点的时段. 在此基础上, 筛选

出各运输需求的备选时空弧集, 该集合由起始时段不早于货物最早发货时段的时空弧组成.

图 1 为在规划期 $t_1 \sim t_7$ 内, ITO 为运输需求 k_1 和 k_2 制定的运输方案以及场站 nt_3 内的集卡调度方案, 图 1 中使用接驳任务甘特图直观地展示集卡调度方案. 运输需求 k_1 和 k_2 的集装箱运输数量分别为 2 和 1. 以运输需求 k_1 为例, 其运输流程如下: 首先在 t_1 时段将重箱从发货点 nf_2 运输至始发场站 nt_1 ; 并在 t_2 时段通过铁路运输到达中转场站 nt_2 , 在 nt_2 处经过一个时段的中转后, 于 t_4 时段通过海运到达终到场站 nt_3 , 并完成末端接驳环节, 最终运抵收货点 nf_3 . 场站 nt_3 在 t_4 时段的集卡调度方案如下: 首先执行需求 k_1 的末端配送任务 ce_1 , 然后将卸货后的空箱从需求 k_1 的收货点运输至需求 k_2 的发货点, 并在完成需求 k_2 对应的前端接取任务 cp_1 后返回 nt_3 . 同时, 场站中另一集卡在执行需求 k_1 另一重箱的配送任务 ce_2 后返回场站. 因此, ce_1 和 cp_1 构成一个任务序列, ce_2 独立形成另一任务序列. 将 ce_1 称为 cp_1 的紧前任务, cp_1 称为 ce_1 的紧后任务. 由于同一时段内不同任务序列的接驳任务由不同集卡完成, 各场站在各时段的任务序列数量不能超过该场站内集卡数量. 此外, 确保任意任务序列的完成时间不超过集卡司机工作时限 mt .

引入虚拟任务概念来标识接驳任务是否为首任务或末任务. 若某接驳任务的紧前任务为虚拟任务, 则该接驳任务为所处任务序列的首任务; 若某接驳任务的紧后任务为虚拟任务, 则该接驳任务为所处任务序列的末任务.

2.2 模型假设与符号说明

为了简化研究问题, 本文提出以下假设.

假设 1 任意运输需求的货物均使用 20 ft 标准集装箱进行整箱运输, 不考虑拼箱运输的情形;

假设 2 多式联运场站内的空箱资源充足;

假设 3 卸货后的重箱转为空箱后, 可由集卡直

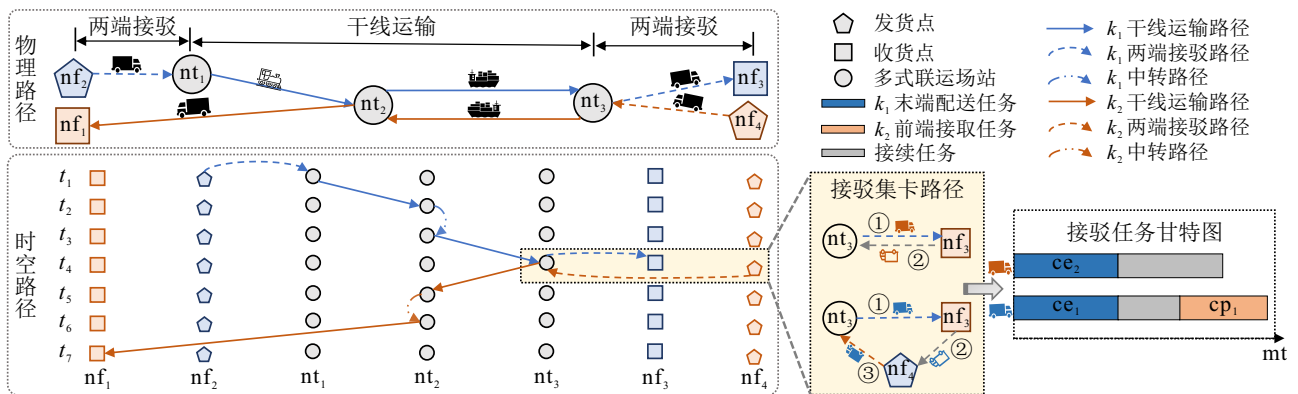


图1 集装箱运输路径和接驳集卡调度方案示意图

接运送至其他发货点装货;

假设 4 集卡仅可装载一个 20 ft 集装箱, 且仅执行所属场站的接驳任务, 任务完成后需要返回场站;

假设 5 同一运输需求对应的集装箱遵循相同的时空干线运输路径.

2.3 数学模型

基于上述分析, 构建集装箱全程运输路径与接驳集卡调度方案协同优化模型如下所示:

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5; \tag{1}$$

$$C_1 = \sum_{k \in K} \sum_{a \in A_k \cap TS} q_k \cdot clt_a \cdot x_a^k; \tag{2}$$

$$C_2 = \sum_{n \in NT} cm_n \cdot \left(\sum_{k \in K} \sum_{a \in TS_k | j_a = n} q_k \cdot x_a^k + \sum_{t \in T} \sum_{c \in CP \cap C_n} y_{n,t}^c \right); \tag{3}$$

$$C_3 = \sum_{n \in NT} \sum_{k \in K} \sum_{a \in ZS_n} q_k \cdot cs_n \cdot w_a^k; \tag{4}$$

$$C_4 = \sum_{k \in K} q_k \cdot cd_k \cdot dt_k; \tag{5}$$

$$C_5 = \sum_{n \in NT} \sum_{t \in T} cb_n \cdot zl_{n,t}. \tag{6}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{c \in C_k \cap CP} \sum_{n \in NT \cap N_c} \sum_{t \in T} y_{n,t}^c + \sum_{a \in A_k \cap TS | i_a = o_k} q_k \cdot x_a^k = q_k, \forall k \in K; \tag{7}$$

$$\sum_{c \in C_k \cap CE} \sum_{n \in NT \cap N_c} \sum_{t \in T} y_{n,t}^c + \sum_{a \in A_k \cap TS | j_a = d_k} q_k \cdot x_a^k = q_k, \forall k \in K; \tag{8}$$

$$\sum_{a \in A_k | i_a = n, st_a = t} q_k \cdot x_a^k + \sum_{c' \in C_k \cap CE \cap C_n} y_{n,t}^{c'} = \sum_{a \in A_k | j_a = n, et_a = t} q_k \cdot x_a^k + \sum_{c \in C_k \cap CP \cap C_n} y_{n,t}^c, \forall k \in K, t \in T, n \in NT; \tag{9}$$

$$\sum_{a \in A_k \cap TS | j_a = n} q_k \cdot x_a^k + \sum_{t \in T} \sum_{c \in C_k \cap CP \cap C_n} y_{n,t}^c \leq q_k, \forall k \in K, n \in NT; \tag{10}$$

$$\sum_{k \in K} q_k \cdot x_a^k \leq mc_a, \forall a \in TS; \tag{11}$$

$$\sum_{m \in M \setminus \{m1\}} \sum_{a \in A_k \cap TS | i_a = n} \lambda_{a,m} \times (st_a - lt_{n,m1,m}) \cdot x_a^k \geq \sum_{t \in T} (t + |T|) \cdot y_{n,t}^c - |T|,$$

$$\forall k \in K, n \in NT, c \in C_k \cap CP \cap C_n; \tag{12}$$

$$\sum_{m \in M \setminus \{m1\}} \sum_{a \in A_k \cap TS | j_a = n} \lambda_{a,m} \times (et_a + lt_{n,m,m1}) \cdot x_a^k \leq \sum_{t \in T} (t - |T|) \cdot y_{n,t}^c + |T|, \forall k \in K, n \in NT, c \in C_k \cap CE \cap C_n; \tag{13}$$

$$\sum_{a \in A_k \cap TS | j_a = n} \lambda_{a,m} \cdot (et_a + lt_{n,m,m'}) \cdot x_a^k \leq |T| + lt_{n,m,m'} + \sum_{a \in A_k \cap TS | i_a = n} \lambda_{a,m'} \cdot x_a^k \times (st_a - |T| - lt_{n,m,m'}), \forall k \in K, n \in NT, m \in M, m' \in M \setminus \{m\}; \tag{14}$$

$$w_a^k \leq x_a^k, \forall k \in K, n \in NT, a \in ZS_n; \tag{15}$$

$$w_a^k \leq x_{a'}^k, \forall k \in K, n \in NT, (a, a') \in A_k \cap ZS_n | st_a - st_{a'} = ft_n; \tag{16}$$

$$w_a^k \geq x_a^k + x_{a'}^k - 1, \forall k \in K, n \in NT, (a, a') \in A_k \cap ZS_n | st_a - st_{a'} = ft_n; \tag{17}$$

$$dt_k \geq \sum_{n \in NT} \sum_{t \in T} \sum_{c \in C_k \cap CE \cap C_n} t \cdot y_{n,t}^c / q_k + \sum_{a \in A_k \cap TS | j_a = d_k} et_a \cdot x_a^k - td_k, \forall k \in K; \tag{18}$$

$$\sum_{c' \in C_n \cup \{0\} \setminus \{c\}} z_{n,t}^{c,c'} = y_{n,t}^c, \forall n \in NT, t \in T, c \in C_n; \tag{19}$$

$$\sum_{c' \in C_n \cup \{0\} \setminus \{c\}} z_{n,t}^{c',c} = y_{n,t}^c, \forall n \in NT, t \in T, c \in C_n; \tag{20}$$

$$z_{n,t}^{c,c'} + z_{n,t}^{c',c} \leq 1, \forall n \in NT, t \in T, c \in C_n, c' \in C_n \setminus \{c\}; \tag{21}$$

$$ct_0 = cl_0 = 0, \tag{22}$$

$$ct_{c'} \geq ct_c + dct_{n,c,c'} + det_{n,c'} + L \cdot (z_{n,t}^{c,c'} - 1), \forall n \in NT, t \in T, c \in C_n \cup \{0\}, c' \in C_n \setminus \{c\}; \tag{23}$$

$$ct_c + dct_{n,c,0} \leq mt + L \cdot \left(1 - \sum_{t \in T} z_{n,t}^{c,0} \right), \forall n \in NT, c \in C_n; \tag{24}$$

$$cl_{c'} \geq cl_c + dcl_{n,c,c'} + del_{n,c'} + L \cdot (z_{n,t}^{c,c'} - 1), \forall n \in NT, t \in T, c \in C_n \cup \{0\},$$

$$c' \in C_n \setminus \{c\}; \quad (25)$$

$$l_{n,t}^c \geq cl_c + (dcl_{n,c,0} + L) \cdot z_{n,t}^{c,0} - L, \quad \forall n \in N, t \in T, c \in C_n; \quad (26)$$

$$zl_{n,t} \geq \sum_{c \in C_n} l_{n,t}^c, \quad \forall n \in NT, t \in T; \quad (27)$$

$$\sum_{c \in C_n} z_{n,t}^{0,c} \leq Q_n, \quad \forall n \in NT, t \in T; \quad (28)$$

$$x_a^k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, a \in A_k; \quad (29)$$

$$w_a^k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, a \in A_k \cap ZS; \quad (30)$$

$$dt_k \in N, \quad \forall k \in K; \quad (31)$$

$$y_{n,t}^c \in \{0, 1\}, \quad \forall n \in NT, t \in T, c \in C_n; \quad (32)$$

$$z_{n,t}^{c,c'} \in \{0, 1\}, \quad \forall n \in NT, t \in T, c \in C_n \cup \{0\}, c' \in C_n \cup \{0\} \setminus \{c\}; \quad (33)$$

$$ct_c, cl_c \geq 0, \quad \forall c \in C; \quad (34)$$

$$l_{n,t}^c \geq 0, \quad \forall n \in NT, t \in T, c \in C_n; \quad (35)$$

$$zl_{n,t} \geq 0, \quad \forall n \in NT, t \in T. \quad (36)$$

其中: 式(1)为目标函数,表示完成所有集装箱运输需求的总运营费用最低;式(2)~式(6)分别为干线运输费用、中转费用、堆存费用、晚到惩罚费用和接驳费用的计算公式;式(7)表示从发货点由接驳集卡接取的集装箱数量与直接从发货点通过公路干线运输方式启程的集装箱数量的和,等于该运输需求对应的集装箱总数;式(8)表示由接驳集卡配送至收货点的集装箱数量与直接通过公路干线运输方式抵达收货点的集装箱数量的和,等于该运输需求对应的集装箱总数;式(9)表示集装箱在始发、中间和终到时空节点处的流平衡约束;式(10)可避免出现集装箱回流现象;式(11)为运输服务弧能力约束;式(12)~式(14)表示任意需求对应集装箱在多式联运场站于两种运输方式间中转时间不能少于该场站要求最少中转时间;式(15)~式(17)判断集装箱在多式联运场站处是否超过免费堆存期;式(18)计算集装箱抵达收货点的时段相比于期望收货时段的延误时段;式(19)和(20)将接驳任务时空节点分配变量与任务间接续关系变量进行耦合;式(21)表示任意两个接驳任务间最多存在一种接续关系;式(22)将虚拟任务完成时集卡累计运营时间和里程设置为0;式(23)表示不同接驳任务完成时其所处任务序列的累计运营时间;式(24)为集卡司机工作时限约束;式(25)表示不同接驳任务完成时其所处任务序列累计行驶里程的数值关系;式(26)用于计算集卡完成

任务序列中的末任务后,返回所属场站时累计行驶里程;式(27)用于计算每个多式联运场站中集卡在每个时段内的总计行驶里程;式(28)为任务序列数量限制约束;式(29)~式(36)用于定义各变量的取值范围.

2.4 模型分析

上述数学模型中的约束条件可被分为3部分:第1部分约束条件包含式(7)~式(18),该部分约束条件涉及的变量为 x_a^k 、 w_a^k 、 dt_k 和 $y_{n,t}^c$,目的是决策集装箱干线运输时空路径,其本质上属于多商品流问题.第2部分约束条件包含式(21)~式(28),目的是决策各场站在各时段内的接驳任务分组方案和组内排序方案,该部分问题涉及变量为 $zl_{n,t}^{c,c'}$ 、 ct_c 、 cl_c 、 $l_{n,t}^c$ 和 $zl_{n,t}$.本质上,这一问题可归类为并行机调度问题(PMSP).PMSP是在已知存在多台机器和待加工工件的情况下,为每个工件安排加工机器以及每台机器加工工件的顺序^[22].本文问题中集卡和接驳任务分别对应机器和工件,接驳任务的分组过程相当于将工件分配至机器的过程,而组内接驳任务排序相当于安排机器加工工件的顺序.第3部分约束条件包含式(19)和(20),作用是将变量 $y_{n,t}^c$ 与 $z_{n,t}^{c,c'}$ 耦合,从而协调集装箱干线运输时空路径与两端接驳集卡调度方案.

本文问题是MCNFP与PMSP的组合优化问题.这两类问题均属于NP-hard问题^[9-10, 22-23],因此,本文问题也属于NP-hard问题.问题的组合优化会极大地增加模型复杂度和求解难度,因此,需要设计高效算法来求解模型.已有研究表明,Benders分解算法能够有效求解这两类问题及其相关组合优化问题^[23-24].

3 算法设计

所提出模型为混合整数线性规划模型,且第2部分约束条件涉及变量包含整数和实数两种类型.经典Benders分解算法不能直接求解子问题含整数变量的模型.LBBD算法由经典Benders分解算法扩展形成,可以求解包含逻辑关系或子问题包含整数变量和非线性函数的优化模型^[25].LBBD算法通过将原问题分解为一个主问题(MP)以及一个或多个子问题(SP)后,利用子问题求解信息生成可行割或最优割,逐步缩减主问题解空间.

在本文中,使用LBBD算法将模型分解为一个主问题和一系列子问题.主问题优化集装箱干线运输时空路径.求解主问题后,可明确各场站在各时段分配的接驳任务.子问题针对每个场站和每个时段,

解决以最小化接驳费用为目标的 PMSp. 然后, 根据子问题求解结果, 向主问题添加 Benders 割. 后文将阐述主问题、子问题以及 Benders 割的具体表示.

3.1 主问题

在原问题基础上, 主问题松弛了与接驳任务分组和组内排序相关的约束条件, 未考虑执行接驳任务产生的具体费用. 这种松弛策略使得主问题能够提供原始问题目标函数值下界. 定义辅助变量 ψ 表示主问题求解得出的接驳任务分配方案对应的两端接驳费用的下界, 松弛后主问题如下所示:

$$\text{MP} : \min C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + \psi. \quad (37)$$

$$\text{s.t. 式(7) ~ 式(18)和式(29) ~ 式(32), } \psi \geq 0; \quad (38)$$

$$\text{CUTS.} \quad (39)$$

其中: 式 (37) 表示主问题优化目标为干线运输费用与两端接驳费用下界的和最小; 式 (38) 表示辅助变量取值范围; 式 (39) 为根据子问题求解结果添加的 Benders 割, 后续将对其详细表述.

3.2 子问题

根据主问题求解结果, 可得到各场站在各时段的接驳任务分配方案 $\bar{y} = (\bar{y}_{n,t}^c)_{n \in NT, t \in T, c \in C_n}$. 在此基础上, 需要进一步解决任务分组问题和组内任务排序问题. 将 $SP_{n,t}(\bar{y})$ 记作场站 n 与时段 t 对应的子问题, 用于制定场站 n 在时段 t 内分配到的接驳任务集合 $\{c \in C_n : \bar{y}_{n,t}^c = 1\}$ 的任务分组和组内任务排序方案. $SP_{n,t}(\bar{y})$ 对应的数学模型如下所示:

$$\min \sum_{c \in C_n} cb \cdot l_{n,t}^c. \quad (40)$$

$$\text{s.t. } \sum_{c' \in C_n \cup \{0\} \setminus \{c\}} z_{n,t}^{c,c'} = \bar{y}_{n,t}^c, \forall c \in C_n; \quad (41)$$

$$\sum_{c' \in C_n \cup \{0\} \setminus \{c\}} z_{n,t}^{c',c} = \bar{y}_{n,t}^c, \forall c \in C_n; \quad (42)$$

$$\text{式(21) ~ 式(28)和式(33) ~ 式(36).}$$

3.3 有效不等式

上述主问题完全未考虑子问题约束条件, 这可能会导致生成下界不够紧凑. 可通过在主问题中引入有效不等式来加强其约束力, 从而有助于生成更优下界并加快算法收敛速度^[24]. 将与任务序列数量和集卡运营时间相关约束引入至主问题中, 可能会减少算法迭代次数进而缩短求解时间. 定义连续变量 $\pi_{n,t}$ 表示场站 n 处集卡在时段 t 完成接驳任务至少产生的接驳费用. 向主问题中添加有效不等式, 如下所示:

$$\pi_{n,t} \geq cb \cdot \sum_{c \in C_n} (del_{n,c} + \min_{c' \in C_n \cup \{0\} \setminus \{c\}} dcl_{n,c,c'}) \cdot y_{n,t}^c, \quad \forall n \in NT, t \in T; \quad (43)$$

$$\sum_{c \in C_n} (det_{n,c} + \min_{c' \in C_n \cup \{0\} \setminus \{c\}} dct_{n,c,c'}) \cdot y_{n,t}^c \leq mt \cdot Q_n, \quad \forall n \in NT, t \in T; \quad (44)$$

$$\psi \geq \sum_{n \in NT} \sum_{t \in T} \pi_{n,t}. \quad (45)$$

其中: 式 (43) 右侧通过集卡单位公里行驶费率与最少行驶里程的乘积来表示场站 n 中集卡在时段 t 内的最小接驳运营费用, 这里最少行驶里程通过执行各任务的行驶里程与最小任务间接续里程的和表示; 式 (44) 左侧表示场站 n 中集卡完成时段 t 内分配接驳任务的至少运营时间, 通过各任务执行时间与最小任务间接续时间的和表示; 式 (44) 右侧限制了场站 n 中所有集卡最长运营时间; 式 (45) 表示所有场站在所有时段的最小接驳运营费用的和与主问题接驳费用下界间的关系.

定理 1 式 (43) 能够为主问题提供接驳费用的下界.

3.4 Benders 割集

模型上、下界和对应偏差的关系式如下所示:

$$\text{LB}^h = \text{CT}^h + \sum_{n \in NT} \sum_{h \in H} \pi_{n,t}^h, \quad (46)$$

$$\text{GAP}^h = \frac{\text{UB}^h - \text{LB}^h}{\text{UB}^h}. \quad (47)$$

若迭代第 h 次中, 所有子问题均可行, 则该次得到可行解对应总费用为 $\text{CT}^h + \sum_{n \in NT} \sum_{h \in H} \text{CD}_{n,t}^h$. 若该值小于之前迭代得到的整个问题的上界值, 则更新 $\text{UB}^h = \text{CT}^h + \sum_{n \in NT} \sum_{h \in H} \text{CD}_{n,t}^h$; 否则, UB^h 仍然等于上次迭代后整个模型的上界. 因此

$$\text{UB}^h \leq \text{CT}^h + \sum_{n \in NT} \sum_{h \in H} \text{CD}_{n,t}^h.$$

3.4.1 最优割

在迭代第 h 次中, 场站 $n \in NT$ 在时段 $t \in T$ 对应子问题在任务集 $S_{n,t}^h$ 下均可行, 向主问题添加以下最优割:

$$\pi_{n,t} \geq \text{CD}_{n,t}^h \cdot \left[1 + \sum_{c \in S_{n,t}^h} (y_{n,t}^c - 1) \right], \quad \forall n \in NT, t \in T. \quad (48)$$

定理 2 式 (48) 能够移除当前迭代求解主问题得到的非最优解.

定理 3 式 (48) 不会移除全局最优解.

3.4.2 可行割

若在迭代第 h 次中, 存在多式联运场站 n 在各时段 t 对应子问题在主问题分配的任务集 $S_{n,t}^h$ 下不可行, 则需要向主问题添加如下所示的可行割, 从而保证后续迭代中为该场站 n 在时段 t 分配的任务集与 $S_{n,t}^h$ 不同:

$$\sum_{c \in S_{n,t}^h} (1 - y_{n,t}^c) \geq 1. \quad (49)$$

3.5 LBBDD 算法计算流程

在 LBBDD 算法框架下模型的求解流程如下.

step 1: 根据输入参数, 构建主问题 MP, 初始时 Benders 割集为空, 设置迭代次数 $h = 0$, 设置整个问题初始上界 $UB^h = \infty$, 整个问题初始下界 $LB^h = 0$, 设置求解时限 T^{\max} 和容许偏差GAP, 转至 step 7.

step 2: 求解主问题, 为场站 n 在时段 t 分配任务集 $S_{n,t}^h$, 更新下界 $LB^h = CT^h + \sum_{n \in NT} \sum_{h \in H} \pi_{n,t}^h$.

step 3: 根据场站 n 在各时段 t 分配的任务集 $S_{n,t}^h$, 分别构建相应的子问题.

step 4: 求解各子问题, 判断子问题是否均可行, 若存在子问题不可行, 则 $UB^h = UB^{h-1}$, 转至 step 5; 若所有子问题均可行, 则 UB^h 替换为 UB^{h-1} 和 $CT^h + \sum_{n \in NT} \sum_{h \in H} \pi_{n,t}^h$ 两值间较小值, 可得到 $GAP^h = (UB^h - LB^h) / UB^h$, 转至 step 6.

step 5: 根据不可行子问题, 生成相应的可行割 (49) 加入主问题 MP 中, 转至 step 2.

step 6: 若 $GAP^h > GAP$, 且当前求解时间未超过求解时限 T^{\max} , 则生成相应的最优割 (48) 加入主问题 MP 中, 转至 step 7; 否则, 算法停止.

step 7: 迭代次数 $h \leftarrow h + 1$, 转至 step 2.

step 8: 输出最优解, 算法结束.

4 算例分析

4.1 算例描述

以西部陆海新通道部分集装箱运输网络作为实

验场景. 多式联运场站选取 15 个关键铁路集装箱办理站和港口; 客户点选取 28 个主要工业园区或物流园区. 集装箱运输网络如图 2 所示.

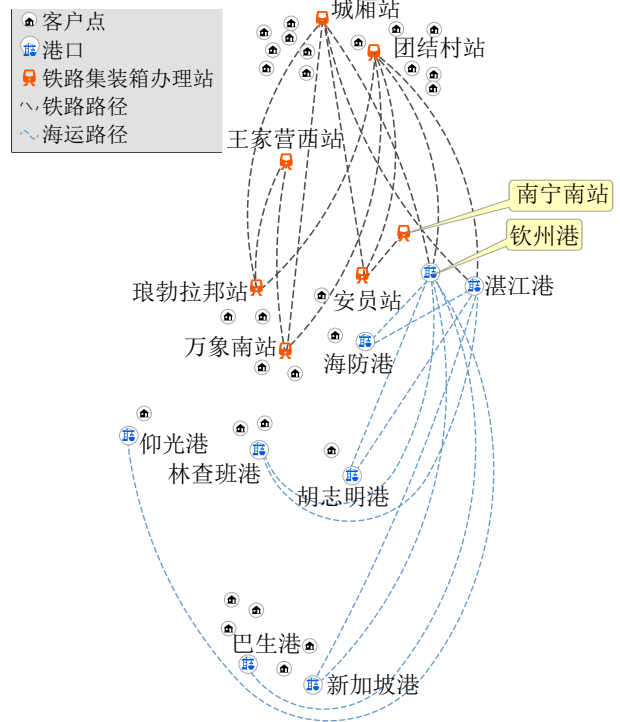


图2 实验算例集装箱运输网络示意图

4.2 算法有效性验证

算法采用 Python 语言编程, 利用 Gurobi 10.0.3 商业求解器来求解原模型、主问题和子问题. 实验环境为 Intel(R) Core(TM) i7-14700K CPU@ 3.40 GHz 处理器、32 GB RAM 和 Windows 11 操作系统. 为了验证算法的有效性, 随机生成 9 组运输需求数量为 10 ~ 170 的算例. 将 Gurobi 直接求解原模型与所提出算法求解重构模型的求解结果和求解效率进行对比测试, 求解时限设定为 2 h, 容许偏差 GAP 设为 0.1%. 测试过程中, 每个算例均重复计算 10 次, 选取各次测试求解结果平均值进行分析比较. 测试结果如表 1 所示. 其中: “需求数量”为运输订单总数, “Obj” “LB” 和 “Time” 分别为目标函数值、模型

表1 不同需求数量下本文 LBBDD 算法与 Gurobi 求解器的求解结果和求解效率对比

需求数量	Gurobi				LBBDD					
	Obj/\$	LB/\$	GAP/%	Time/s	Obj/\$	LB/\$	GAP/%	Time/s	%MP/%	%SP/%
10	40377	40337	0.0	23	40377	40377	0.0	1	90.94	9.06
30	133226	133226	0.0	25	133226	133226	0.0	9	81.31	18.69
50	212963	212730	0.1	3010	212963	212963	0.0	37	73.26	26.74
70	366911	366501	0.1	7200	366911	366549	0.1	1471	65.87	34.13
90	433271	428098	1.2	7200	433271	432854	0.1	1919	58.89	41.11
110	516654	498837	3.5	7200	511298	505759	1.1	7200	50.27	49.73
130	661920	642897	2.9	7200	656099	650518	0.9	7200	46.95	53.05
150	679302	660305	2.8	7200	673439	666045	1.1	7200	46.38	53.62
170	789810	762475	3.5	7200	781028	766708	1.8	7200	46.44	53.56

下界和计算时间的取整数值,“GAP”为目标函数值与下界之间的平均偏差,“%MP”和“%SP”分别为主问题和子问题求解时间占总计算时间的百分比。

由表1可见:Gurobi求解器和LBB算法均能够在给定求解时限内获得需求数量为10~50的小规模算例的最优解,但是,LBB算法求解时间明显小于Gurobi;在运输需求数量为70和90的算例中,两种求解方式目标函数值相同,但是,LBB算法展现出更优的模型下界逼近能力,因此收敛更快、计算时间更短;对于运输需求数量为110~170的大规模算例中,两种计算方式均难以在求解时限内求得最优解,但是,LBB算法解得的目标函数值更小,模型下界逼近效果更好,因此,其目标函数值与下界之间平均偏差更低。综合以上对比分析,LBB算法在求解小规模算例时具有明显的时间优越性,在求解中规模和大规模算例时,其计算性能更佳。

随着问题规模增加,子问题求解时间在总求解时间中所占比例逐渐上升,并最终稳定在约53%,表明随着问题规模增长,求解难度的增加在子问题上更为显著。运输需求数量超过110后,受集卡数量和司机工作时限限制,主问题传递给子问题的接驳任务数量开始趋于稳定,导致子问题求解难度也趋于平稳。

4.3 模型有效性验证

为了验证协同优化模型的有效性,对比分析协同与独立决策方式的求解结果。独立决策方式下的集装箱干线运输路径通过求解不含有效不等式的主问题得出;通过处理集装箱干线运输路径,可以得出各场站在各时段的接驳任务分配结果;将接驳任务

分配结果作为子问题的输入后,求解子问题得出独立决策方式下的集卡调度方案。由于主问题未考虑场站内集卡数量限制,可能会存在场站集卡资源不足以完成所有分配任务的情况。为此,进一步说明为了确保完成所有接驳任务至少需要增加的集卡数量。

图3为协同决策与独立决策下运营费用对比。由图3可以发现,协同决策在所有算例中均能够有效减少5%~7.5%的运营费用。进一步分析费用构成,协同决策得出的干线运输费用占比相对较高,接驳运输费用占比相对较低,揭示了协同优化模型主要通过减少接驳费用来实现总运营费用降低。此外,对于独立决策方式,在需求数量为70、90和170的算例中,分别需要增加11辆、1辆和9辆集卡才能完成分配的接驳任务。因此,协同决策集装箱干线运输路径和接驳集卡调度方案,不仅可降低5%~7.5%的总运营费用,还能避免集卡数量不足而可能导致的问题。

4.4 灵敏度分析

选择在需求数量为30、90和150的算例下,对比分析接驳集卡的单位公里行驶费率在不同取值下对模型目标函数值的影响。固定数学模型中其他参数,以1.60\$/km为基准值,将集卡单位公里行驶费率取值范围调整为基准值的0.25~2.5倍,每次调整步长设定为0.25倍。如图4所示:随着单位公里行驶费率增长,3个算例的总运营费用均呈现出上升趋势,接驳费用同样呈现增长态势。在需求数量为30的算例中,当单位公里行驶费率超过2.8\$/km时,接驳费用出现先降后升趋势,而总运营费用仍然持续增长。在单位公里行驶费率上升的情况下,接驳费用

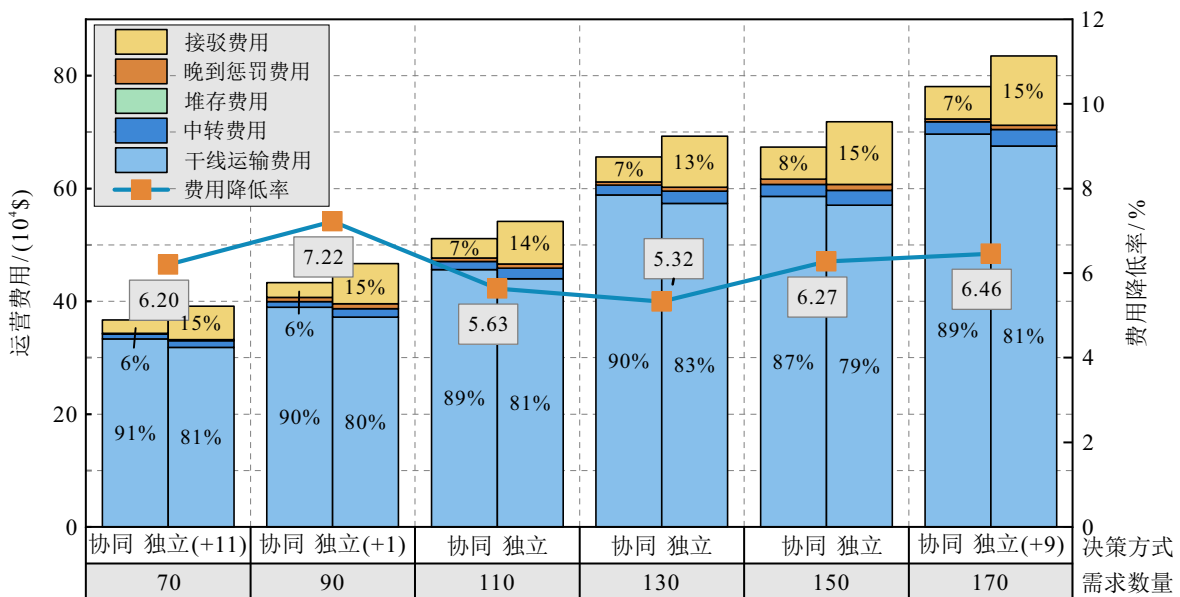


图3 协同决策与独立决策下运营费用对比

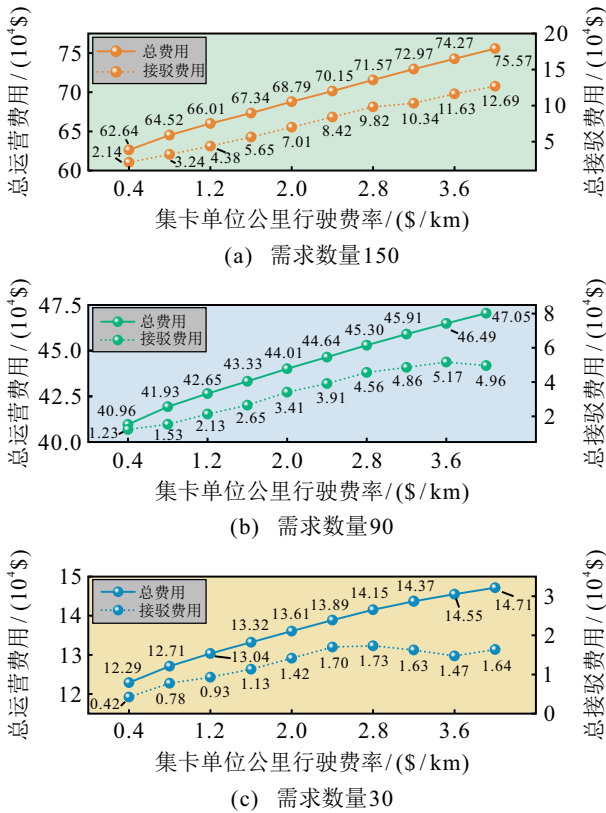


图4 集卡单位公里行驶费率灵敏度分析结果

降低主要是由于集卡执行接驳任务的行驶里程减少所致。鉴于各行驶费率下接驳任务执行方案均为最优,可以推断集卡行驶里程减少是由接驳任务执行数量减少引起的。

面对单位公里行驶费率增加,所提出模型通过减少接驳任务执行数量来降低接驳费用,从而控制总运营费用增长幅度。在此情况下,为了实现集装箱“门到门”运输,所提出模型倾向于选择公路干线运输服务来替代接驳服务。在需求数量为90的算例中,接驳费用在行驶费率增至4 \$/km时出现下降趋势,而在需求数量为150的算例中未发现类似现象。这表明集卡单位公里行驶费率是影响接驳费用和干线运输方式选择的关键因素,且小规模需求对于行驶费率增长更为敏感。

5 结 论

本文从协同决策角度出发,以总运营费用最小为优化目标,构建了集装箱干线运输路径和接驳集卡调度的协同优化模型。针对模型结构特性,设计了基于LBB D算法框架的精确算法。最后在西部陆海新通道部分集装箱运输网络中,开展了多规模算例下实验分析。实验结果表明:1)协同优化模型在测试算例中降低了5%~7.5%的总运营费用,考虑到集卡资源有限的情况,能够将接驳任务在不同场站和时段内合理分配;2)所设计算法能够在可接受时间

内求解模型,且在求解质量和速度方面均展现出了优于Gurobi商业求解器的性能;3)当集卡的单位公里行驶费率达到一定阈值时,会减少接驳任务执行数量,促使集装箱运输方式从多式联运转向公路直达运输,特别是运输需求数量越小,行驶费率阈值越低。

未来可研究空箱资源有限情况下的空重箱协同运输问题和集卡跨场站执行任务的调度问题。此外,可以针对子问题设计求解算法,并将其嵌入LBB D算法框架中,以提高整体算法的求解效率。

参考文献 (References)

- [1] 吕同舟. 中国集装箱行业与多式联运发展报告(2023年度)[EB/OL]. (2024-5-22)[2024-06-30]. https://info.chineseshipping.com.cn/cninfo/News/202405/t20240522_1390591.shtml.
- [2] 简文良,何艺,胡永仕,等. 集装箱公铁联运“门到门”运输时间可靠性分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21(4): 14-24. (Jian W L, He Y, Hu Y S, et al. Analysis of “door-to-door” transportation time reliability for container road-rail intermodal transportation[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2023, 21(4): 14-24.)
- [3] Alaei S, Durán-Micco J, Macharis C. Synchronomodal transport re-planning: An agent-based simulation approach[J]. European Transport Research Review, 2024, 16(1): 1.
- [4] Sakti S, Zhang L L, Thompson R G. Synchronization in synchronomodality[J]. Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 179: 103321.
- [5] 刘杰,何世伟,宋瑞,等. 基于运输方式备选集的多式联运动态路径优化研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(10): 1-6. (Liu J, He S W, Song R, et al. Study on optimization of dynamic paths of intermodal transportation network based on alternative set of transport modes[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(10): 1-6.)
- [6] 蒋洋,张星臣,王永亮. 多式联运运输方案选择的交叉熵方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(5): 20-25. (Jiang Y, Zhang X C, Wang Y L. A cross-entropy method for solving selection of multimodal transportation scheme[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(5): 20-25.)
- [7] 刘杰,彭其渊,殷勇. 低碳背景下的多式联运路径规划[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(6): 243-249. (Liu J, Peng Q Y, Yin Y. Multimodal transportation route planning under low carbon emissions background[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(6):

- 243-249.)
- [8] Li Z J, Chen H X, Liu Y, et al. A Lagrangian relaxation heuristic for a bi-objective multimodal transportation planning problem[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(1): 382-399.
- [9] Akyüz M H, Dekker R, Azadeh S S. Partial and complete replanning of an intermodal logistic system under disruptions[J]. *Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 169: 102968.
- [10] Giusti R, Manerba D, Crainic T G, et al. The synchronized multi-commodity multi-service transshipment-hub location problem with cyclic schedules[J]. *Computers & Operations Research*, 2023, 158: 106282.
- [11] 张瑞友, 汪定伟, 尹原永. 集装箱卡车运输问题的基于图的建模方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(8): 1539-1545.
(Zhang R Y, Wang D W, Yin Y Y. Graph-based modeling method for container truck transportation problems[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2011, 31(8): 1539-1545.)
- [12] Zhang R Y, Lu J C, Wang D W. Container drayage problem with flexible orders and its near real-time solution strategies[J]. *Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 61: 235-251.
- [13] 张瑞友, 张辉, 黄敏. 以低碳为目标的集装箱拖车运输问题及其时间窗离散化算法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(4): 717-722.
(Zhang R Y, Zhang H, Huang M. Container drayage transportation problem with objective of low carbons and its time window discretization based solution method[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(4): 717-722.)
- [14] Song Y J, Zhang J T, Liang Z, et al. An exact algorithm for the container drayage problem under a separation mode[J]. *Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 106: 231-254.
- [15] Bruglieri M, Mancini S, Peruzzini R, et al. The multi-period multi-trip container drayage problem with release and due dates[J]. *Computers & Operations Research*, 2021, 125: 105102.
- [16] Jia S, Cui H P, Chen R, et al. Dynamic container drayage with uncertain request arrival times and service time windows[J]. *Transportation Research — Part B: Methodological*, 2022, 166: 237-258.
- [17] Wang N Y, Meng Q, Zhang C R. A branch-price-and-cut algorithm for the local container drayage problem with controllable vehicle interference[J]. *Transportation Research — Part B: Methodological*, 2023, 178: 102835.
- [18] Chen R, Jia S, Meng Q. Dynamic container drayage booking and routing decision support approach for E-commerce platforms[J]. *Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 177: 103220.
- [19] Wang D C, Zhang R Y, Qiu B, et al. Drop-and-pull container drayage with flexible assignment of work break for vehicle drivers[J]. *Computers & Operations Research*, 2024, 162: 106475.
- [20] Rivera A E P, Mes M R K. Integrated scheduling of drayage and long-haul operations in synchromodal transport[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2019, 31(3): 763-806.
- [21] Heggen H, Molenbruch Y, Caris A, et al. Intermodal container routing: Integrating long-haul routing and local drayage decisions[J]. *Sustainability*, 2019, 11(6): 1634.
- [22] 孙鑫伟, 钱斌, 胡蓉, 等. 启发式列生成算法求解带恶化效应的同构并行机调度问题[J]. *控制与决策*, 2024, 39(5): 1636-1644.
(Sun X W, Qian B, Hu R, et al. Heuristic column generation algorithm for identical parallel machine scheduling problem with deterioration effect[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(5): 1636-1644.)
- [23] Zhang C, Li Y T, Cao J H, et al. Exact and matheuristic methods for the parallel machine scheduling and location problem with delivery time and due date[J]. *Computers & Operations Research*, 2022, 147: 105936.
- [24] Chi J S, He S W. Improved benders-and-price algorithm for the multi-product assembly routing problem with time windows: A domain decomposition strategy for the benders-master model[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 186: 109751.
- [25] Hooker J N, Ottosson G. Logic-based benders decomposition[J]. *Mathematical Programming*, 2003, 96(1): 33-60.

作者简介

何维 (1999-), 女, 博士生, 主要研究方向为运输与物流理论与技术, E-mail: 21114048@bjtu.edu.cn;

何世伟 (1969-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为铁路运输组织理论与技术、运输与物流理论与技术, E-mail: shwhe@bjtu.edu.cn;

迟居尚 (1997-), 男, 博士生, 主要研究方向为运输与物流理论与技术, E-mail: 20114029@bjtu.edu.cn;

赵子琪 (1997-), 男, 博士生, 主要研究方向为铁路运输组织理论与技术, E-mail: 21114055@bjtu.edu.cn;

赵日鑫 (1999-), 男, 博士生, 主要研究方向为铁路运输组织理论与技术, E-mail: 22110260@bjtu.edu.cn;

蔡近近 (1999-), 男, 博士生, 主要研究方向为运输与物流理论与技术, E-mail: 23111268@bjtu.edu.cn.