

文章编号:1000-4653(2025)01-0084-09

# 港口集疏运体系下考虑作业模式异构性的 多车队联合调度优化

徐奇<sup>1,2</sup>, 陈星悦<sup>2</sup>, 钟咏梅<sup>3</sup>, 廉冠<sup>3</sup>, 殷翔宇<sup>4</sup>

- 广西智慧交通重点实验室, 广西 桂林 541004;
- 桂林电子科技大学 建筑与交通工程学院, 广西 桂林 541004;
- 桂林电子科技大学南宁研究院, 广西 南宁 541010;
- 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088)

**摘要:**在包含甩箱与甩挂两类作业模式存在异构性车队的公路港口集疏运体系内,需要开展集卡和甩挂车辆的联合调度,以实现运输结构与路径协同优化。提出考虑作业模式异构性的多车队联合调度混合整数规划模型,设计基于启发式规则的模拟退火算法进行求解,探讨不同运输需求特征对特定模式下运输总成本和作业车辆数的影响。结果显示,相较于单一集卡甩箱模式和单一甩挂货运模式,采用多车队组合模式在需求节点均匀分布的网络中执行任务,降低运输成本幅度约13.3%。此外,通过优化车队资源配置结构,多车队组合模式可减弱固成本权重系数变化和运输需求紧凑度对总运输成本的影响。

**关键词:**港口集疏运;多车队联合调度;甩挂运输;集卡运输;作业模式异构;模拟退火算法

中图分类号:U169.62 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.011

## Optimization of joint scheduling of multiple fleets considering the heterogeneity of operation modes under the port collection and distribution system

XU Qi<sup>1,2</sup>, CHEN Xingyue<sup>2</sup>, ZHONG Yongmei<sup>3</sup>, LIAN Guan<sup>3</sup>, YIN Xiangyu<sup>4</sup>

- Guangxi Key Laboratory of ITS, Guilin 541004, China; 2. College of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
- Nanning Research Institute, Guilin University of Electronic Technology, Nanning 541010, China;
- China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China)

**Abstract:** In a road transport port collection-distribution system involving container trucks and a drayage fleet, it is necessary to conduct joint scheduling of trucks, tractors, and semi-trailers to achieve coordinated optimization of transport structure and routing simultaneously. This paper proposes a joint scheduling optimization model for multi-fleet combined transport, formulated as a mixed integer programming model. A simulated annealing algorithm based on heuristic rules is designed to solve the proposed problem. The impacts of different transport demands on the total transport cost and the number of workable vehicles under different freight modes are explored. Results show that, compared with the single freight mode, the multi-fleet combined freight mode demonstrates significant advantages in effectively reducing transport costs by 13.3% for tasks uniformly distributed in the freight network. Additionally, by optimizing the allocation of its own vehicle

收稿日期:2024-01-09

基金项目:国家自然科学基金(52362055);广西科技基地和人才专项(2021AC19334)

作者简介:徐奇(1984—),女,博士,副教授,研究方向为港航物流系统优化。E-mail: xuqi@guet.edu.cn

通信作者:殷翔宇(1988—),男,博士,副研究员,研究方向为港航发展战略。E-mail: yxy730622@163.com

引用格式:徐奇,陈星悦,钟咏梅,等.港口集疏运体系下考虑作业模式异构性的多车队联合调度优化[J].中国航海,2025,48(1):84-92.

XU Q, CHEN X Y, ZHONG Y M, et al. Optimization of joint scheduling of multiple fleets considering the heterogeneity of operation modes under the port collection and distribution system[J]. Navigation of China, 2025, 48(1): 84-92. (in Chinese)

resources, the multi-fleet combined transport mode can mitigate the influence of fixed cost weight coefficient changes and transport demand compactness on the total transport cost.

**Key words:** port collection-distribution system; multi-fleet combined scheduling; drayage transport; container transportation; heterogeneity of operational mode; simulated annealing algorithm

港口集疏运体系是为港口货物提供集港与疏港服务的交通运输系统,是连接港口与经济腹地的重要纽带。在我国占据主导地位的公路集疏运体系中,具有甩挂作业模式的甩挂运输(牵引车与半挂车可独立进行各自作业,车队分有牵引车、半挂车两个车辆单位)与具有“甩箱不甩挂”作业模式的集卡运输(需要正面吊等起重设备进行甩箱作业)配合开展货运的现实需求将长期存在<sup>[1]</sup>。因此,研究考虑前述两类运输中车队的运输结构与路径协同优化,分析多车队联合调度问题,是实现体系高效运作管理、优化港口集疏运体系结构的必经之路。

在港口的公路运输领域,国内外学者针对甩挂、甩箱这两种作业模式下运输车队的车辆调度优化问题进行了细分研究,并取得了丰富的研究成果。在甩箱模式下集卡运输的车辆调度优化问题方面,相关学者考虑结合不同的车场特征、车辆容量限制和时间窗限制<sup>[2-3]</sup>对问题进行现实情境描述并建立相对应的数学模型,对于问题的数学模型的求解算法,通常可分为精确算法<sup>[4-5]</sup>或启发式算法<sup>[6-7]</sup>。其中,考虑不同车辆容量限制和成本的混合车队的车辆调度问题(Vehicle Routing Problem with a Heterogeneous Fleet, VRPHE)<sup>[8]</sup>与本文问题均存在车队异构性,但VRPHE问题中车队为不同容量和型号的车辆类型的组合,属于车辆异构,而本文问题为车辆作业模式异构。在甩挂运输的车辆调度优化问题方面,除在传统集卡调度问题条件设置的基础上,学者们还关注甩挂运输在特定场景应用的问题<sup>[9]</sup>和挂车调度问题<sup>[10]</sup>。其中,全挂式甩挂运输车辆调度问题(Truck and Trailer Routing Problem, TTRP)<sup>[11]</sup>与本文研究对象较为相似,其研究对象为集卡(车头部分)和全挂车,因此本质上仍属于单个车队的调度问题。而本文研究涉及集卡与甩挂两种运输车队的协调与配合,复杂度更高。

综上所述,已有研究成果主要集中在同构车队、

考虑车型容量等特征异构的车辆调度问题上。然而,集卡车队和甩挂车队,虽都属于集装箱运输的范畴,但在作业模式、车辆类型等方面存在明显的差异,分属不同的研究子领域,而尚未有研究考虑对这两类车队进行联合调度优化。本文的创新点在于,在港口集疏运体系中,首次提出甩挂模式车队与甩箱模式车队的联合调度问题;构建了多车队货运的车辆联合调度优化模型;设计了基于启发式规则的模拟退火算法对该问题模型进行求解。

## 1 多车队联合调度建模

### 1.1 问题描述

在港口集疏运体系中,港口、铁路货场、公路货场等不同运输方式的节点相互连接,形成了一个综合性的物流枢纽。该枢纽中,由于不同运输方式节点有不同的装卸方式、存储规定、运输时长限制等,需协同使用集卡车队和甩挂车队,整合港口集疏运网络中的运输资源,以便实现更高效的运输。因此,本文基于港口集疏运体系运输现状,提出具备不同运输形式作业特点的多车队组合运输联合调度问题,对应的路网包含车场、集卡客户点、混合客户点三类节点,如图1所示。

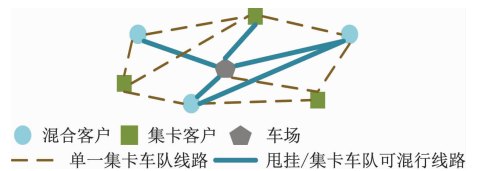


图1 多车队组合运输集疏运网络示意

Fig.1 Schematic diagram of multi-fleet transport with heterogeneity in a port collection-distribution network

图1中,集卡客户点使用集卡车队进行集装箱运输作业,混合客户点处的运输作业可由半挂式甩挂运输车队或集卡车队提供服务。此外,不同运输需求节点的取货任务与送货任务经由路径也存在明显差异,具体如表1所示。

表1 运输需求节点与任务特征对应关系

Tab.1 Correspondence between transport demand nodes and task characteristics

运输需求产生节点	运输车队	取货任务(O,D)	送货任务(O,D)
车场	集卡/甩挂车队	(车场,车场)	(车场,客户)
集卡客户	集卡车队	(车场/其他客户,集卡客户)	(集卡客户,车场/其他客户)
混合客户	集卡/甩挂车队	(车场/其他混合客户,混合客户)	(混合客户,车场/其他混合客户)

在作业单个运输需求时,集卡车队需将该需求的取货和送货作业连续完成后,才能执行其他运输需求。而甩挂车队作业运输需求时,取货和送货任务可以由不同的牵引车拖挂同一辆挂车完成。因此,甩挂车队的运输需求按照执行的先后顺序划分为取货、送货和返空挂任务。

## 1.2 假设条件

- 1) 所有牵引车、集卡、半挂车在决策初期从车场出发,在执行后所有运输任务后需返回车场;
- 2) 牵引车解/系挂的操作时间忽略;
- 3) 决策期内所有车辆的行驶速度相同且恒定;
- 4) 每个作业点处集卡、半挂车的装卸货时间相同且恒定;
- 5) 所有车辆均无使用时间限制,无需中途返回车场进行保养、维护等。

## 1.3 符号定义

定义所在运网采用有向图  $G = \langle V, A \rangle$  表示。其中,  $V$  为包含车场在内的所有顶点的集合,  $V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ,  $v_0$  代表车场节点。  $v \in V_d, V_d$  为可由集卡和甩挂运输车提供服务的混合客户点集合;  $v \in V_s, V_s$  为集卡客户点集合,两个集合的数学关系为  $V_d \cap V_s = \Phi, V_d \cup V_s = V$ 。  $A = \{ \langle v, v' \rangle \mid v, v' \in V \}$  表示弧的集合,  $v, v' \in \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\}$  为客户节点。

### 1.3.1 参数与集合

$k$ : 集卡编号,  $k \in K$ 。

$r$ : 牵引车编号,  $r \in R$ 。

$g$ : 半挂车编号,  $g \in G$ 。

$i, j$ : 运输任务编号。

$M_{1v}$ : 节点  $v$  处的取货任务集合。

$M_1$ : 所有节点的取货任务集合。

$M_{2v}$ : 节点  $v$  处的送货任务集合。

$M_2$ : 所有节点的送货任务集合。

$M_3$ : 混合客户节点的送空挂任务集合。

$M_0$ : 决策期结束, 车辆返回车场的虚拟任务集合,  $M_0 = \{i_{01}, i_{02}, i_{0k}, \dots, i_{0r}, \dots, i_{0K}, i_{0R}\} \cup M_3$ 。

$M$ : 车队所有货运任务集合,  $M = M_1 \cup M_2 \cup M_0$ 。

$q$ : 运输需求编号,  $q = \{i_1, i_2\}, i_1 \in M_1, i_2 \in M_2, q \in Q$ 。

$Q_i, D_i$ : 任务的起、止点。

$[T_{E0}, T_{L0}]$ : 决策期的时间段。

$[T_{Eq}, T_{Lq}]$ : 运输需求的期望时间窗。

$[T_{Sq}, T_{Zq}]$ : 运输需求可接受的最大时间窗。

$t_w$ : 集卡每次装/卸货所需时间(小时)。

$f_k$ : 决策期内使用集卡  $k$  所耗费的固定成本, 包

括集卡的停放和存储成本、折旧成本等。

$f_r$ : 决策期内使用牵引车  $r$  上所耗费的固定成本, 包括牵引车的停放、存储成本、折旧成本等。

$f_g$ : 决策期内使用一辆半挂车所耗费的固定成本, 包括半挂车的停放、存储成本、折旧成本等。

$\varphi_1$ : 固定成本的权重系数。

$\varphi_2$ : 变动成本的权重系数。

$s$ : 早/晚于期望时间窗的单位时间惩罚成本。

$w_k$ : 集卡每次装/卸货所耗费的等待时间成本。

$e_{vv'k}$ : 弧  $\langle v, v' \rangle$  对应的集卡  $k$  的空载运输成本。

$f_{vv'k}$ : 弧  $\langle v, v' \rangle$  对应的集卡  $k$  的满载运输成本。

$e_{vv'r}$ : 弧  $\langle v, v' \rangle$  对应的牵引车  $r$  的空驶/拖空挂的运输成本。

$f_{vv'r}$ : 弧  $\langle v, v' \rangle$  对应的牵引车  $r$  拖重挂的运输成本。

### 1.3.2 决策变量

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{任务 } i \text{ 由集卡 } k \text{ 执行} \\ 0 & \text{否则} \end{cases},$$

$$x_{ir} = \begin{cases} 1 & \text{任务 } i \text{ 由牵引车 } r \text{ 执行} \\ 0 & \text{否则} \end{cases},$$

$$x_{ig} = \begin{cases} 1 & \text{任务 } i \text{ 由半挂车 } g \text{ 执行} \\ 0 & \text{否则} \end{cases},$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{集卡 } k \text{ 连续执行任务 } i \text{ 和 } j (i \text{ 为 } j \text{ 的紧前任务)} \\ 0 & \text{否则} \end{cases},$$

$$x_{jir} = \begin{cases} 1 & \text{牵引车 } r \text{ 连续执行任务 } i \text{ 和 } j (i \text{ 为 } j \text{ 的紧前任务)} \\ 0 & \text{否则} \end{cases},$$

$$y_{vv'k} = \begin{cases} 1 & \text{集卡 } k \text{ 从节点 } v \text{ 直接行驶至 } v' \\ 0 & \text{否则} \end{cases},$$

$$z_{vv'r} = \begin{cases} 1 & \text{牵引车 } r \text{ 从节点 } v \text{ 直接行驶至 } v' \\ 0 & \text{否则} \end{cases}。$$

### 1.3.3 状态变量

$t_{vv'}$ : 车辆在弧  $\langle v, v' \rangle$  对应路径上的行驶时间。

$t_{ei}$ : 任务  $i$  可被执行的实际最早时刻。

$$\left| \sum_{k \in K} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M, j \neq i} x_{jik} - \sum_{r \in R} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M, j \neq i} x_{jir} \right| = 1,$$

$$t_{ei} = t_{ej}; \text{ 若 } \sum_{k \in K} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M, j \neq i} x_{jik} = \sum_{r \in R} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M, j \neq i} x_{jir} = 0,$$

$$t_{ei} = T_{Eq}。$$

$t_{\bar{i}}$ : 任务  $i$  的实际完成时刻。

若任务  $i$  由集卡车队执行, 有

$$t_{\bar{i}} = \begin{cases} t_{ei} + t_{O_i D_i} + t_w, \sum_{k \in K} x_{ik} = 1, i \in M_1 \cup M_2 \\ t_{ei} + t_{O_i D_i}, \sum_{k \in K} x_{ik} = 1, i \in M_0 \end{cases}$$

若任务  $i$  由甩挂车队执行, 有

$$t_{\bar{i}} = \begin{cases} t_{ei} + t_{O_i D_i}, \sum_{r \in R} x_{ir} = 1, i \in M_1 \cup M_0 \\ t_{ei} + t_{D_i O_i} + t_{O_i D_i}, \sum_{r \in R} \sum_{i \in M_2} \sum_{j \in M, j \neq i} x_{jir} = 1 \\ t_{ei} + t_{v_0 O_i} + t_{O_i D_i}, \sum_{r \in R, i \in M_2} (x_{ir} - \sum_{j \in M, j \neq i} x_{jir}) = 1 \end{cases}$$

$t_{ei}$ :任务可被执行的实际最早时刻。

若  $\left| \sum_{k \in K} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M, j \neq i} x_{jik} - \sum_{r \in R} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M, j \neq i} x_{jir} \right| = 1$ ,

$t_{ei} = t_{ij}$ ; 若  $\sum_{k \in K} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M, j \neq i} x_{jik} = \sum_{r \in R} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M, j \neq i} x_{jir} = 0$ ,

$t_{ei} = T_{Eq}$ 。

$p_i$ :任务的时间窗惩罚成本,当  $T_{Eq} \leq t_{ei} < t_{\bar{i}} \leq T_{Lq}$  时,  $p_i = 0$ ; 当  $t_{ei} < T_{Eq}$  或  $t_{\bar{i}} > T_{Lq}$  时,  $p_i = s(t_{ei} - T_{Zq}) + s(T_{Sq} - t_{\bar{i}})$ 。

#### 1.4 模型建立

目标函数

$$\text{Min } C = \min(c_1 + c_2 + c_3 + c_4) \quad (1)$$

其中

$$c_1 = \varphi_1 \left( f_k \sum_{k \in K} \left| \frac{\sum_{i \in M} x_{ik}}{|M|} \right| + f_r \sum_{r \in R} \left| \frac{\sum_{i \in M} x_{ir}}{|M|} \right| + f_g \sum_{g \in G} \left| \frac{\sum_{i \in M} x_{ig}}{|M|} \right| \right) \quad (2)$$

$$c_2 = \varphi_2 \cdot \sum_{k \in K} \sum_{i \in M_1 \cup M_0} x_{ik} e_{O_i D_i}^k + \sum_{k \in K} \sum_{i \in M_2} x_{ik} f_{O_i D_i}^k \quad (3)$$

$$c_3 = \varphi_2 \cdot \sum_{r \in R} \left( \sum_{i \in M_1 \cup M} x_{ir} w e_{O_i D_i}^r + \sum_{i \in M_2, j \in M, i \neq j} x_{ir} x_{jr} w e_{D_j O_i}^r \right) +$$

$$\varphi_2 \cdot \sum_{r \in R} \left( \sum_{i \in M_2, j \in M, i \neq j} |x_{ir} - x_{jr}| w e_{v_0 O_i}^r + \sum_{i \in M_2, j \in M, i \neq j} x_{ir} w f_{O_i D_i} \right) \quad (4)$$

$$c_4 = \varphi_2 \cdot \sum_{k \in K} \sum_{i \in M} x_{ik} w_l + \varphi_2 \cdot \sum_{i \in M} p_i \quad (5)$$

s. t.

$$y_{vv'} = 1, \forall v \in V, v' \in \{V; v' \neq v\}, k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{v' \in V, v' \neq v} (z_{vv'} + z_{v'v}) = 0, \forall v \in V, r \in R \quad (7)$$

$$Q = |M_1| = |M_2| \quad (8)$$

$$t_{\bar{i}} < t_{i_2} < t_{\bar{i}} < t_{i_3}, q = \{i_1, i_2\}, \forall i_1 \in M_1, i_2 \in M_2, i_3 \in M_3 \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ik} + \sum_{r \in R} x_{ir} = 1, \forall i \in M \quad (10)$$

$$x_{i_1 k} = x_{i_2 k}, \forall k \in K, i_1 \in M, i_2 \in M \quad (11)$$

$$\sum_{r \in R} x_{i_1 r} = \sum_{r \in R} x_{i_2 r}, \forall i_1 \in M, i_2 \in M \quad (12)$$

$$\sum_{j \in M, j \neq i} x_{ijk} \leq 1, \forall k \in K, i \in M \quad (13)$$

$$\sum_{j \in M, j \neq i} x_{jik} \leq 1, \forall k \in K, i \in M \quad (14)$$

$$\sum_{j \in M, j \neq i} x_{jir} \leq 1, \forall r \in R, i \in M \quad (15)$$

$$\sum_{j \in M, j \neq i} x_{jir} \leq 1, \forall r \in R, i \in M \quad (16)$$

$$\sum_{i \in M_1 \cup M_2} x_{ik} = 1, \forall k \in K, v \in V_s \quad (17)$$

$$\sum_{i \in M_1 \cup M_2} (x_{ik} + x_{ir}) = 1, \forall k \in K, r \in R, v \in \{v_0, v_d\} \quad (18)$$

$$\sum_{i \in M} x_{ir} = \sum_{i \in M} x_{ig}, \forall r \in R, g \in G \quad (19)$$

$$\sum_{i, j \in M} x_{ijk} (t_{\bar{i}} - t_{\bar{j}}) \leq 0, \forall k \in K \quad (20)$$

$$\sum_{i, j \in M} x_{jir} (t_{\bar{i}} - t_{\bar{j}}) \leq 0, \forall r \in R \quad (21)$$

$$\sum_{i \in M} (x_{ik} + x_{ir}) = |M|, \forall k \in K, r \in R \quad (22)$$

$$T_{E0} \leq T_{Zq} \leq T_{Eq} \leq t_{ei} < t_{\bar{i}} \leq T_{Lq} \leq T_{Sq} \leq T_{L0}, \forall i \in (M_1 \cup M_2) \quad (23)$$

$$T_{E0} \leq t_{ei} < t_{\bar{i}} \leq T_{L0}, \forall i \in M_3 \quad (24)$$

$$x_{ik}, x_{ir}, x_{ijk}, x_{jir} \in \{0, 1\}, \forall i \in M, j \in \{M; j \neq i\}, k \in K, r \in R \quad (25)$$

$$y_{ll'}, z_{ll'} \in \{0, 1\}, \forall v \in V, l' \in \{V; l' \neq l\}, k \in K, r \in R \quad (26)$$

式(1)为总运输成本最小的目标函数;式(2)~(5)表示目标函数的子成本分别为运输车队的固定成本、集卡载货状态变化引发的可变成本、甩挂车队运输状态变化引发的可变成本、集卡车队的装卸货时间成本以及惩罚成本;式(6)表示甩挂车队的可行行驶路径;式(7)表示集卡车队的可行行驶路径;式(8)表示每个运输需求均对应着一个取货任务和一个送货任务;式(9)表示各运输需求的取货、送货、返空挂任务的作业顺序;式(10)表示每个任务只需由一辆牵引车或集卡执行;式(11)~(12)表示每个运输节点处驶入驶出的车辆数相同,同一运输需求取、送货任务由同一车队完成;式(13)~(16)表示每个任务最多只有一个紧前任务和一个紧后任务;式(17)~(18)为运输需求对运输车队的选择约束;式(19)表示牵引车和挂车的任务总数相同;式(20)~(21)表示同一车辆执行连续两个任务的时间顺序约束;式(22)~(24)为规划期内完成所有任务的时间约束;式(25)~(26)表示所有的决策变量均为0或1变量。

## 2 模拟退火算法设计

### 2.1 算法整体思路

本文提出的多车队组合运输车辆调度问题属于

NP-hard 问题,对于模拟退火算法在解决组合优化问题上的有效性已得到充分证明<sup>[12]</sup>。为求解该问题,模拟退火算法的整体步骤如下。

Step1:初始化。对初始解总数  $U$ 、Metropolis 准则的阈值  $T_{th}$ 和降温速度  $d_{speed}$ 进行信息输入。根据实际的车辆调度规则,生成初始解集合  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_k\}$ 。详见第 2.3 节。

Step2:对解集合  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_u\}$ 中的每个解进行邻域搜索,生成内循环次数  $Z$ 个新解,形成每个解的新解集合。详见第 2.4 节。

Step3:检验新解是否满足运输需求的时间窗要求,若不满足,保留原解;否则执行 Step4。

Step4:计算新解与原解的目标函数差值,若差值大于等于 0,按 Metropolis 准则判断是否接受新解,并将其存入接受集  $I'$ ;若差值小于 0,则将该新解存入可接受解集  $N$ 。

Step5:确定集合  $I'$ 中已有解的个数  $e$ ,将可接受解集  $N$ 中的目标函数值升序排列,取前  $U-e$ 个解添加至集合  $I'$ 中,令  $I = I'$ 。

Step6:设定降低退火温度  $T = T \times d_{speed}$ ,减少接受劣解的概率。若  $T < T_{th}$ ,返回至 Step2;若  $T \geq T_{th}$ ,退火过程结束,输出得到全局最优解,即为最优调度方案下的总运输成本值。

## 2.2 基于车队分类的整数编码与解码

采用整数编码形式表示解。设计集卡车队和甩挂车队两组作业序列的编码,如图 2 所示,其中,集卡车队作业 10 项运输需求;甩挂车队作业 6 项运输需求,由于该车队完成运输需求时,其取货、送货和送空挂任务可按顺序独立执行,因此其一个运输需求进行了三次表示。

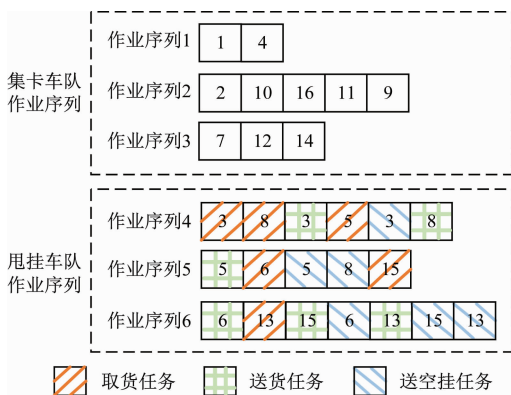


图 2 基于运输需求分类的整数形式编码

Fig. 2 Integer-coding by transportation demand classification

在解码中,考虑需求时间窗与车队作业顺序的限制,将可由同一辆车完成的作业序列合并为作业序列集。图 2 中各序列的作业时间、甩挂车队的作

业时间如表 2、表 3 所示,各车辆的调度方案示意如图 3。

表 2 各序列的作业时间

序列编号	序列作业开始时刻	序列作业结束时刻
1	0200	0800
2	0000	1600
3	1100	1800
4	0100	0600
5	0500	0900
6	0700	1500

表 3 甩挂车队序列中各运输需求的作业时间情况

运输需求编号	需求作业开始时刻	需求作业结束时刻
3	0100	0500
5	0400	0700
6	0600	1200
8	0200	0800
13	1000	1500
15	0900	1400

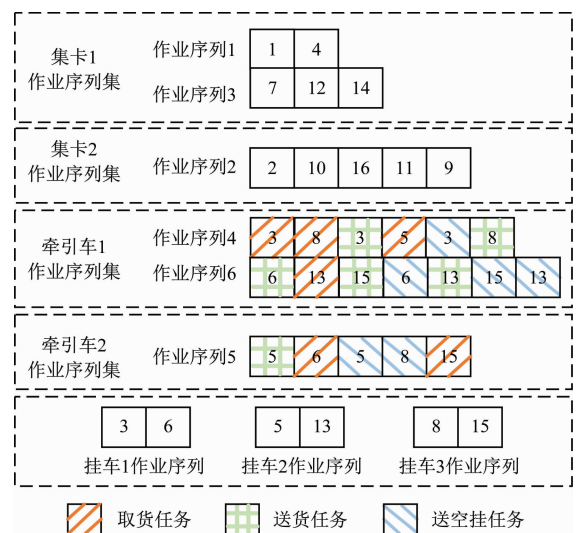


图 3 多车队组合运输的车辆调度方案

Fig. 3 Scheduling solutions for multi-fleet transport

## 2.3 启发式规则生成初始解操作步骤

Step1:输入所有运输需求的编号、时间窗、OD 信息和车辆的调度期限,将集卡运输需求与任意数量的混合运输需求合并,形成集卡车队的作业集合  $M_K$ ,剩余混合运输需求形成甩挂车队的作业集合  $M_R$ 。创建空数组  $S_K$  与  $S_R$ ,分别存储集卡车队和甩挂车队的作业序列。

Step2:初始化当前作业序列编号  $L_k = 1$  和已安排的需求数量  $d = 1$ 。

Step2.1:判断  $M_k$  是否为空集,若是,  $S_k$  即为初始解中集卡车队整体的作业序列,执行 Step3;否则执行 Step2.2。

Step2.2:从  $M_k$  中随机选择一项需求作为  $L_k$  中的第  $d$  项需求作业。

Step2.3:判断执行需求  $d$  的方案是否满足运输需求的时间窗约束和车辆的调度期限。若是,将其从  $M_k$  中移除,并令  $d = d + 1$ ,返回 Step2.1;若达到车辆的调度期限限制,令  $L_k = L_k + 1$ ,  $d = 1$ ,返回 Step2.2;若不满足时间窗约束,返回 Step2.2。

Step3:统计  $M_R$  中当前可作业的子任务完成情况,形成矩阵  $S = [$ 需求编号 可作业子任务号],初始化当前作业序列编号  $L_R = 1$  和已安排的需求数量  $p = 1$ 。

Step3.1:判断  $M_R$  是否为空集,若是,  $S_R$  即为初始解中甩挂车队整体的作业序列,输出  $S_k, S_R$ ,结束整个循环。否则,执行 Step3.2。

Step3.2:从  $M_R$  中随机选择一项需求,查找  $S$  中该需求对应可作业的任务信息,作为序列  $L_R$  中的第  $p$  项需求作业。

Step3.3:判断完成该项需求是否满足运输需求的时间窗和车辆的调度期限限制,若达到车辆的调度期限限制,令  $L_R = L_R + 1$ ,  $p = 1$ ,并返回 Step3.2;若仅不满足需求的时间窗约束,返回 Step3.2。

Step3.4:判断该项需求任务是否为送空挂任务,若是,将其从  $M_R$  中移除,令  $p = p + 1$ ,返回 Step3.1;否则,更新  $S$  中该需求可作业任务信息,返回 Step3.2。

## 2.4 邻域搜索方式

参考杨珍花等<sup>[13]</sup>的多邻域搜索策略,设计了两种邻域搜索方式以改进解的质量,具体如下。

1)运输需求插入:随机选择单个解的两条作业序列,在每条序列中各随机选择一项运输需求,将一条序列的运输需求插入到另一条序列的运输需求对应的点之前。

2)运输需求互换:随机选择单个解的两条作业序列,在每条序列中各随机选择一项运输需求,交换这两个需求在其对应序列中的位置。

其中,集卡序列插入至甩挂序列中的运输需求应为混合运输需求。此外,因甩挂序列的各运输需求进行了三次编码表示,该需求所对应的三个任务应同时进行插入或互换操作。

## 3 算例求解与分析

### 3.1 算例设置

在车辆调度优化问题的研究中,Solomon 经典 VRPTW 算例数据集被广泛用于验证和评估算法和模型的有效性<sup>[14]</sup>。因此,本文利用该数据集中客户的位置坐标信息,生成了 40 个适合本问题现实情境的算例。算例分别考虑了运输网络的节点分布、不同类型的节点比例和运输需求的时间窗紧凑度特征。

1)路网大小与连通类型。设定两节点连通的阈值为 150 km,C 类算例 50 个客户节点中,任意两节点间的距离为 5 ~ 280 km;R 类算例中 50 个客户节点,任意两节点间的距离为 25 ~ 415 km。

2)路网节点特征。为每一类算例设置 4 组包含不同比例混合客户(取 20%、50%、80% 和 100%)的算例。

3)运输需求数量与时间窗特征。每组算例随机两个节点间生成 50 个运输需求,各运输需求的时间窗长度  $\tau_2 = T_{Lq} - T_{Eq}$  相同。根据两节点间的最长行驶时间  $\tau_1$  与时间窗长度  $\tau_2$ ,为运输需求间的时间窗间隔  $\theta$ (下称“需求紧凑度”)取值, $\theta$  的取值范围如表 4 所示。

两类算例信息见表 5。参考文献[15]设置问题的相关参数,如表 6。设置初始温度  $T_0 = 1000$ ,降温速度  $T_{\text{speed}} = 0.8$ ,终止温度  $T_{\text{th}} = 1$ ,链长为  $L = 60$ ,初始解集的个体数  $U = 50$ 。

表 4 运输需求紧凑度范围

Tab.4 Range of compactness of transport demand

算例编号	需求紧凑度 $\theta$
$\alpha_1$	$\theta_1 \in (0, \tau_1)$
$\alpha_2$	$\theta_2 \in (\tau_1, \tau_2)$
$\alpha_3$	$\theta_3 \in (\tau_1, \tau_2), \theta_3 > \theta_2$
$\alpha_4$	$\theta_4 \in (\tau_2, \tau_2 + \tau_1)$
$\alpha_5$	$\theta_5 = \tau_1 + \tau_2$

### 3.2 求解结果分析

使用 Matlab R2021a 编程求解,固定成本与变动成本的权重系数  $\varphi_1, \varphi_2$  分别设为  $(0, 1)$ 、 $(0.2, 0.8)$ 、 $(0.4, 0.6)$ 、 $(0.6, 0.4)$ 、 $(0.8, 0.2)$ 、 $(1, 0)$ ,以算例  $\alpha_1$  为例,应用  $1-\alpha_1, 2-\alpha_1, 3-\alpha_1$  等表示不同固变权重下的计算结果。采用相似的模拟退火算法设计思路,在相同算例中获得单一车队货运模式的算法求解结果。

表5 算例信息  
Tab.5 Case information

算例路网类型	算例编号	混合客户占比/%	混合客户数/个	甩挂车队路网中任意两节点间的距离/km	
				最小	最大
C类	$\alpha_1 \sim \alpha_5$	20	10	25	195
	$\alpha_6 \sim \alpha_{10}$	50	25	5	275
	$\alpha_{11} \sim \alpha_{15}$	80	40	5	280
	$\alpha_{16} \sim \alpha_{20}$	100	50	5	280
R类	$\beta_1 \sim \beta_5$	20	10	45	450
	$\beta_6 \sim \beta_{10}$	50	25	35	465
	$\beta_{11} \sim \beta_{15}$	80	40	30	415
	$\beta_{16} \sim \beta_{20}$	100	50	25	415

表6 各车队运输参数取值

Tab.6 Values of transport parameters for each fleet

参数	取值
车队行驶速度/(km/h)	60
期望与最大可接受的时间窗差值: $T_{Eq} - T_{Sq}, T_{Zq} - T_{Lq}$	2
集卡的装/卸货时间 $t_w/h$	2
单位时间惩罚成本 $s/(万元 \cdot h^{-1})$	5
集卡装/卸货时间成本 $w_k/(万元 \cdot h^{-1})$	2
集卡空载行驶成本 $e_{w'k}/(元 \cdot km^{-1})$	2.4
牵引车空驶/空挂行驶成本 $e_{w'r}/(元 \cdot km^{-1})$	1.7
集卡重载行驶成本 $f_{w'k}/(元 \cdot km^{-1})$	2.8
牵引车重挂行驶成本 $f_{w'r}/(元 \cdot km^{-1})$	2.4
集卡的固定成本 $f_k/(万元 \cdot 辆^{-1})$	20
牵引车的固定成本 $f_r/(万元 \cdot 辆^{-1})$	16
挂车的固定成本 $f_g/(万元 \cdot 辆^{-1})$	8
调度期 $[T_{E0}, T_{L0}]/h$	[0,144]

### 3.2.1 模型与算法有效性验证

为验证本文所构建的模型与算法的有效性,本文将所设计的模拟退火算法与遗传算法进行了对照试验。以固定成本与变动成本的权重系数  $\varphi_1, \varphi_2$  分别设为(0.4,0.6)的  $\alpha_{16}$ 算例,采用两种算法求解多车队联合调度问题的试验结果进行分析,结果如图4所示。从图4可以看出,模拟退火算法在获得更优的运输成本方面取得了较为显著的优势,其结果优于遗传算法。这表明在本文问题背景下,采用模拟退火算法更适用。

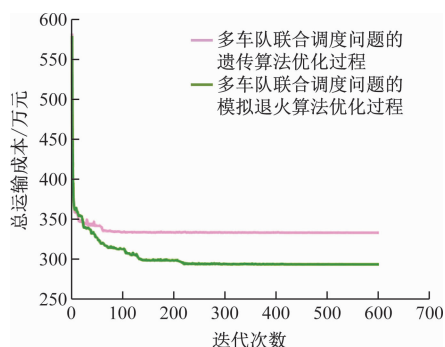


图4 模拟退火算法与遗传算法求解本文模型对比

Fig.4 Comparative analysis of the Simulated Algorithm and Genetic Algorithm for solving the proposed model

### 3.2.2 路网、混合运输需求占比不同对多车队组

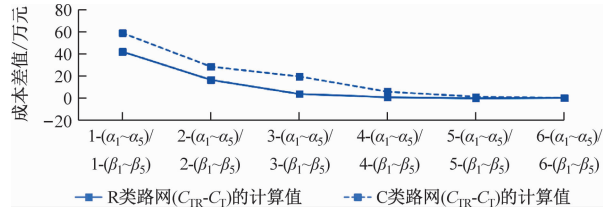
混合货运和单一车队货运的运输成本影响分析以相同混合客户占比的算例组为基础,制图5a~5d,以展示各模式不同固变权重下的总成本情况。其中,  $C_T, C_R, C_{TR}$ 分别表示单一集卡车队、单一甩挂车队、多车队货运模式的总运输成本。

从图5各子图中曲线取值分布看,可以发现,随着固定成本权重系数增大,各子图中多车队货运模式与单一集卡货运模式总成本差值均逐渐趋于零。这说明若车辆调度决策时更关注降低变动成本,多车队货运模式更具显著优势。其原因在于,多车队货运模式中甩挂车队货运的变动成本相对较低,符合甩挂运输作业模式带来的成本优势,验证了模型和算法的有效性。同时,图5a~5c中曲线均呈现出相同趋势。这也证明了本文算法的稳定性。

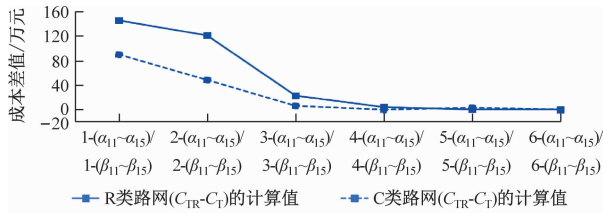
此外,对比图5各子图中R类与C类的算例结果,即在相同混合客户占比、不同路网类型下,可以观察到多车队货运模式在R类算例中,相比单一集卡货运模式具有更低的运输成本。在R类路网中,

多车队货运模式与单一货运模式下成本降低幅度均值为 13.3%。这说明在路网节点呈均匀性分布时,多车队组合运输模式更精确的实现任务的合理分配,提高车辆的利用率。同时,当固定成本权重系数小于 0.6 h,从图 5a~5d,观察在相同 R 类路网、不

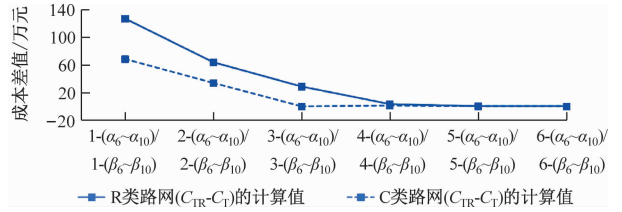
同混合客户占比下,多车队组合货运模式与单一货运模式总成本差值逐渐增加。这表明当混合客户需求占比较高时,多车队组合货运模式能更大发挥该项优势,进一步降低整体运输成本。



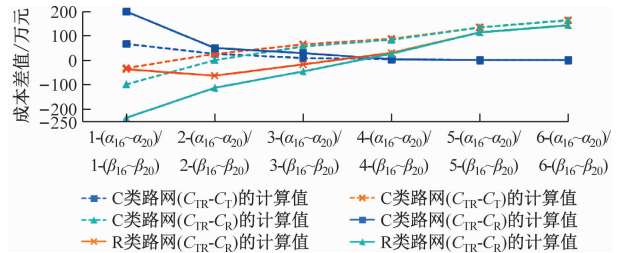
(a) 20% 混合客户占比下各模式的总成本差值



(c) 80% 混合客户占比下各模式的总成本差值



(b) 50% 混合客户占比下各模式的总成本差值



(d) 100% 混合客户占比下各模式的总成本差值

图 5 不同混合客户占比下各模式的不同固变权重系数总成本差值

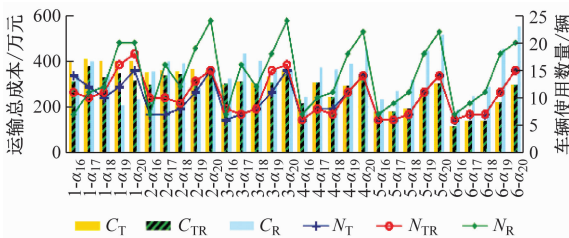
Fig. 5 Transport cost differentials across modes with different fixed-variable weighting factors for mixed customer shares

### 3.2.3 运输需求紧凑度不同对多车队货运和单一车队货运的使用车辆数影响分析

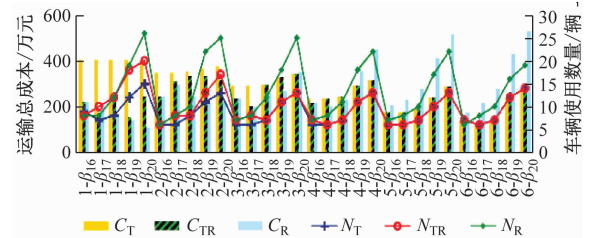
以混合需求数占 100% 的算例结果为基础,分析不同模式的总成本和使用车辆数情况如图 6 所示。其中,  $N_T$ 、 $N_R$ 、 $N_{TR}$  分别表示单一集卡、单一甩挂、多车队货运模式下的集卡/牵引车使用数。由图 6 可知,不同固变权重系数下三种模式所需车辆数均随紧凑度的减小而增加。

随着固定成本权重的增大,多车队货运模式采用的车辆数逐渐减少,直至转变为单一集卡货运模式。这说明多车队货运模式具备较强的运输情境适应性,当集卡或甩挂运输占据成本优势时,多车队货运模式会选择相应车队进行调度优化。

采用不同货运模式完成相同的运输需求时,单一甩挂模式需要增派更多的作业车辆。这说明该模式对运输需求紧凑度更为敏感。



(a) C 类算例组中各模式总成本和车辆数量



(b) R 类算例组中各模式总成本和车辆数量

图 6 不同算例中各模式的不同固变权重系数总成本和车辆数量

Fig. 6 The total costs and number of vehicles with different fixed-variable weight coefficients in various examples

## 4 结束语

本文构建了考虑不同作业模式异构性的多车队联合调度优化模型,并采用基于启发式规则的模拟退火算法求解,通过改进 Solomon 算例验证了模型和算法的有效性。分析表明,对于不同的运输需求

紧凑度和路网条件,多车队货运模式具有更好的灵活性和适用性,可有效降低变动成本、提高运输效益。尤其是当甩挂车队可作业的需求数较大、路网节点均匀分布时,多车队货运模式能大幅优化车辆资源配置,实现港口集疏运体系结构调整。

本文研究较符合港口集疏运的实际作业场景,

但未考虑不确定因素对多车队货运作业效率和成本的影响。未来的研究将关注运输需求的波动性、行驶路况变化等不确定因素,以提高港口集疏运的效率和可持续性。

### 参 考 文 献

- [1] 徐亚华,谢家举,谭小平. 美国卡车货运及甩挂运输发展的经验与启示[J]. 交通建设与管理, 2011(3): 36-40.  
XU Y H, XIE J J, TAN X P. Experience and implications of truck freight and trailer transportation development in the United States [J]. Transportation Construction & Management, 2011 (3): 36-40. (in Chinese)
- [2] KHODASHENAS M, NAJAFI S E, KAZEMIPOOR H, et al. Providing an integrated multi-depot vehicle routing problem model with simultaneous pickup and delivery and package layout under uncertainty with fuzzy-robust box optimization method [J]. Decision Making: Applications in Management and Engineering, 2023, 6 (2): 372-403.
- [3] YANG X, DAHAM H A, SALHI A. Combined strip and discharge delivery of containers in heterogeneous fleets with time windows[J]. Computers & Operations Research, 2021, 127: 105141.
- [4] YAN X, XU M, XIE C. Local container drayage problem with improved truck platooning operations[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 169: 102992.
- [5] YOU J, WANG Y, XUE Z. An exact algorithm for the multi-trip container drayage problem with truck platooning [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 175: 103138.
- [6] SONG Y, ZHANG J, 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.
- [7] CUI H, CHEN S, CHEN R, et al. A two-stage hybrid heuristic solution for the container drayage problem with trailer reposition [J]. European Journal of Operational Research, 2022, 299(2): 468-482.
- [8] GOLDEN B, ASSAD A, LEVY L, et al. The fleet size and mix vehicle routing problem [J]. Computers & Operations Research, 1984, 11(1): 49-66.
- [9] GUO H. Tractor and semitrailer routing problem of highway port networks under unbalanced demand [J]. Tehnicki vjesnik, 2021, 28(3): 939-947.
- [10] 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.
- [11] CHAO I. A tabu search method for the truck and trailer routing problem [J]. Computers & Operations Research, 2002, 29(1): 33-51.
- [12] VINCENT F Y, REDI A P, HIDAYAT Y A, et al. A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem [J]. Applied Soft Computing, 2017, 53: 119-132.
- [13] 杨珍花,靳志宏. 带中途脱挂的干/支线两级运输网络牵引车调度优化[J]. 中国管理科学, 2021, 29 (7): 181-191.  
YANG Z H, JIN Z H. Scheduling optimization of tractors in the mainline/subline transport network with midway trailer-uncoupling [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29 (7): 181-191. (in Chinese)
- [14] ZHANG D, CAI S, YE F, et al. A hybrid algorithm for a vehicle routing problem with realistic constraints [J]. Information Sciences, 2017, 394: 167-182.
- [15] 薛亮,马健霄,余伟. 甩挂运输具体应用分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(5): 200-205.  
XUE L, MA J X, YU W. Application analysis drop and pull transport [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(5): 200-205. (in Chinese)