

# 控制与决策

Control and Decision

## 客货混运下高铁运行图与货物配装方案协同优化

米雷, 卢亚菡, 杨立兴, 戚建国

引用本文:

米雷, 卢亚菡, 杨立兴, 等. 客货混运下高铁运行图与货物配装方案协同优化[J]. *控制与决策*, 2025, 40(1): 308–316.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1749>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [基于参数自适应蚁群算法的高速列车行车调度优化](#)

Optimization of high-speed train operation scheduling based on parameter adaptive improved ant colony algorithm  
*控制与决策*. 2021, 36(7): 1581–1591 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0992>

#### [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>

#### [基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题](#)

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system  
*控制与决策*. 2021, 36(2): 469–474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

#### [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>

#### [现货市场补充作用下基于总量折扣的运输服务采购问题研究](#)

Transportation service procurement based on total discount under complementary effect of spot market  
*控制与决策*. 2021, 36(11): 2794–2802 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0274>

# 客货混运下高铁运行图与货物配装方案协同优化

米雷, 卢亚菡, 杨立兴<sup>†</sup>, 戚建国

(北京交通大学 系统科学学院, 北京 100044)

**摘要:** 客货混运新模式为我国高速铁路运营管理带来了新的机遇和挑战. 鉴于此, 以最小化列车停站时间、货物滞留数量和运营成本为目标, 以列车到发时刻、动车组编组和货物配装计划为决策变量, 为客货混运下高铁运行图与货物配装方案协同优化问题构建一类整数线性规划模型. 为验证模型的有效性, 以京沪高速铁路为背景进行数值实验, 并调用CPLEX软件求解. 结果表明: 在尽可能减小对客运服务影响的前提下, 所提出方法能够通过灵活决策列车时刻表及增加列车编组, 提高列车运力; 与采用固定列车时刻表的货物配装优化方案相比, 协同优化方法能够在小幅增加列车停靠时间的情况下大幅提升货物运输量, 可为相关运营部门制定客货混运计划提供一定的理论支撑.

**关键词:** 铁路运输; 客货混运; 列车编组; 高铁快运; 列车运行图

中图分类号: U292.4

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1749

引用格式: 米雷, 卢亚菡, 杨立兴, 等. 客货混运下高铁运行图与货物配装方案协同优化[J]. 控制与决策, 2025, 40(1): 308-316.

## Integrated optimization of the train timetable and freight allocation on shared freight and passenger high-speed railway system

MI Lei, LU Ya-han, YANG Li-xing<sup>†</sup>, QI Jian-guo

(School of Systems Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The novel mixed passengers and freights transportation mode has brought both opportunities and challenges to the operation and management of high-speed railway in China. This paper proposes an integer linear programming model for the collaborative optimization problem of train schedules and freight allocation on a shared freight and passenger high-speed railway system to minimize the train dwell time, the number of detained freight, and operating costs, where the arrival and departure times of trains, the formation of trains, and the freight allocation are the decision variables. Then, extensive numerical experiments based on the operational data of the Beijing-Shanghai high-speed railway line are conducted to verify the effectiveness of the model, and the CPLEX optimization solver is used to solve the problem. The results show that the proposed method can improve the train capacity by flexibly deciding the train schedule and increasing the train composition while minimizing the impact on the quality of passenger service. Compared to the optimization method with fixed train timetables, the integrated optimization method can significantly improve the freight transportation capacity while only a slight increase in stopping time, providing theoretical support for the relevant operational departments to make mixed transportation plans.

**Keywords:** railway transportation; mixed passenger and freight mode; train formation; express delivery with high-speed railway; train timetable

## 0 引言

随着我国电子商务行业迅猛发展, 消费者对快递服务的需求日益增加. 2022年5月17日, 国务院发布《“十四五”现代物流发展规划》, 提出适应多样化物流需求, 发展多种形式的高铁快运, 推进铁路(高

铁)快运稳步发展<sup>[1]</sup>. 与传统公路运输方式相比, 高铁快运具有准时、快捷及环保等优势, 适合于运输高时效、高附加价值和高运输要求的快件货物<sup>[2]</sup>. 在非高峰出行期等情形下, 高铁客运列车运力通常未得到充分利用, 这为货运服务创造了有利条件. 因此, 发展高

收稿日期: 2023-12-16; 录用日期: 2024-04-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71825004, 72001019).

责任编委: 黄敏.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: lxyang@bjtu.edu.cn.

铁快运将有利于利用高铁剩余运力处理部分高价值快递货物运输需求,在减轻道路拥堵、改善社会物流服务质量的同时提高铁路部门营收。

近年来,高铁快运作为一种新兴的货物运输方式,已经成为工程和研究中的热点。作为客货混运组织的重要内容,合理的货物配装方案既有利于提高货物运输效率,也能充分利用高铁列车冗余运力。在现有文献中,一部分聚焦于分析运输模式的可行性或运营组织方案<sup>[2-3]</sup>;另一部分则关注客货混运环境下高铁快运的运输组织优化问题。由于实际运营中高铁快运的运输组织模式主要包括载客动车组捎带货物运输、高铁货运专列运输、载客动车组预留货运车厢运输等,相关文献通常以此为背景进行研究。Xu等<sup>[4]</sup>考虑在客运列车中提前预留货运车厢,为高铁客货协同运输问题分别构建了需求确定和不确定下的列车运力分配模型,并利用GROUBI进行求解。Li等<sup>[5]</sup>考虑客货共用车厢和分离车厢两种运输模式,为客货混运问题构建了一类基于弧的网络流模型,并设计了Benders分解算法进行求解。高如虎等<sup>[6]</sup>考虑动车组预留货运车厢和新增货运专列两类运输模式,构建了无新增货运专列和新增货运专列的货物配装模型,并利用CPLEX进行求解。考虑预留车厢运输模式,戚建国等<sup>[7]</sup>构建了一类货运配装方案优化模型,模型中同时考虑货运站的办理问题,以提高运输能力,增加铁路部门收益。以旅客列车捎带模式为对象,杨喜梅等<sup>[8]</sup>提出了高铁货物运输两阶段配装方案编制方法。其中第1阶段计算货运需求可行路径集,在此基础上,第2阶段决策货物的运输配装方案。姚玉莹等<sup>[9]</sup>以载客动车组捎带为背景,考虑列车容量及列车停站方案等约束,建立了货物配装方案优化模型,并利用匈牙利算法求解。同时考虑多种客货运输模式及不确定货运需求,Zhen等<sup>[10]</sup>以最大化高铁的预期净运营利润为目标,构建两阶段随机规划模型,并设计了元启发式算法进行求解。Zhen等<sup>[11]</sup>研究运输网络规划和货物配装协同优化问题,同样构建了两阶段随机规划模型以最小化运营部门的总运营成本。

上述文献在探讨高铁快运货物配装问题时,仅在列车时刻表预先确定和动车组编组给定的前提下优化货物配装方案。随着高铁快运需求量的增加及货物需求的动态性的不断增强,仅依靠既有旅客列车时刻表可能会导致货物到达时间与列车发车时间无法有效衔接,进而引发货物积压和运力不足的问题。优化列车时刻表和编组是提高运力的常用方法,其中,面向乘客的时刻表优化方法已在文献中被证明可以

有效提高运力运量的匹配性<sup>[12-17]</sup>。然而,既有针对旅客列车时刻表的优化方法将可能不适用于客货混运模式。鉴于此,本文考虑列车到发时刻、动车组编组和货物配装方案之间的耦合、列车越行、严格容量限制等约束,构建一类客货混运模式下的列车时刻表和货物配装方案协同优化模型,旨在提高列车冗余运力的利用率,提升高铁的运输能力并增加铁路公司的运营收入。针对上述问题,本文做出以下贡献:

1) 提出一种新的高铁快运模式,对高铁运行图和货物配装方案进行协同优化,以提高高铁运输效率;

2) 针对协同优化问题,考虑灵活决策列车编组及列车停站时间等,构建一类整数线性规划模型。

## 1 问题描述

### 1.1 高铁运行图与货物配装方案协同优化问题

本文以双线高铁线路为研究对象,该线路上的列车在两个方向上独立运行,互不干扰,特选取其中一个方向进行研究。定义该方向上任一车站 $s \in \mathcal{S}$ , $\mathcal{S} = \{1, 2, \dots, |\mathcal{S}|\}$ 表示车站集合;线路上任一开行列车 $k \in \mathcal{K}$ , $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, |\mathcal{K}|\}$ 表示列车集合。本文将快运箱作为货物需求的统一装载和卸载单位,并将沿线货运需求定义为 $f \in \mathcal{F}$ ,其中 $\mathcal{F} = \{1, 2, \dots, |\mathcal{F}|\}$ 代表快运箱集合。为便于构建模型,将研究时域离散为若干个时间点,并使用 $t \in \mathcal{T}$ 进行索引,其中 $\mathcal{T} = \{0, 1, \dots, |\mathcal{T}|\}$ 代表离散时间点集合。

图1为列车时刻表固定情况下的货物配装问题示意图,其中列车 $k$ 与 $k+1$ 将按照给定的时刻表完成运输任务。可以看出,由于货物 $f$ 的到达时间稍晚于列车 $k$ 的发车时间,该货物将被滞留,直至列车 $k+1$ 出发。与之相反,货物 $f+1$ 在到达之后的短时间内即被装载至列车 $k+1$ 上,并随该列车出发。若能适当将列车 $k$ 的发车时间延后至图中虚线处,即可避免货物 $f$ 的滞留问题,快速将其送往目的地。然而,需要注意的是货物运输的加入将会对既有旅客运输组织方案产生一定影响,如货物的装卸过程可能造成额外的停站时间、增加旅客的总旅行时间等。此外,对列车时刻表进行调整也势必会对旅客出行产生影响。因此如何在两者间进行权衡,从而有效利用高铁冗余运力进行货物运输,是本文所研究问题的核心所在。特别地,考虑到极端情形可能导致货运需求量大幅增加(如“双十一”“六一八”等电商购物节),本文采用增加额外货运车厢编组的方式进一步增加运输能力。与增开高铁专列相比,上述措施能够避免由于增开列车对既有列车开行方案产生影响,利于企业运营管理。

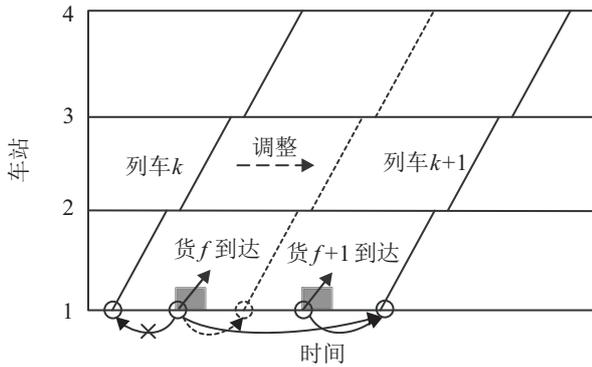


图1 货物配装示意图

1.2 问题假设

为简化问题,作出如下基本假设:

1) 列车开行方案不在本文研究范畴内,因此假设列车开行方案(包括列车停站方案和列车开行信息)已知.

2) 考虑到高速铁路以客运服务为主,必须确保服务所有旅客需求. 因此,假定每列车分配给旅客的车厢数量给定,该数值可通过OD间旅客出行需求计算得到.

3) 为避免客货混运模式存在的诸多安全隐患,采用旅客和货物分离车厢的运输模式,即假设旅客和货物必须被分配到不同车厢.

4) 根据高铁快运货物主要适合运输高价值小件的特性(如生鲜礼品、商业文件),假设以快运箱为单位进行货物的统一装卸、配送<sup>[5-7]</sup>.

5) 本文不考虑动车组的运用问题,因此假设列车仅在始发车站进行编组操作.

2 模型构建

2.1 符号定义及说明

建模过程中所涉及的集合、索引、参数及变量如表1所示.

2.2 约束条件

1) 列车编组约束.

通过对列车进行额外编组,以满足更多货物运输需求. 根据高铁实际运营特点,需要限制其最大编组以及最大备用动车组数量,即

$$c_k + c_k^{\text{add}} \leq c_k^{\text{max}}, \forall k \in \mathcal{K}; \quad (1)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} c_k^{\text{add}} \leq c^{\text{max}}. \quad (2)$$

其中式(1)和(2)分别表示列车的最大编组约束以及最大可用车厢数量约束. 对于列车  $k \in \mathcal{K}$  而言,式(1)表示增加额外的车厢后,其编组数不得超过最大上限. 同时,由于可供使用的车厢资源有限,式(2)规定了增加的总车厢数量不能超过最大备用车厢数.

表1 符号定义及说明

|         | 符号                                      | 符号定义  |
|---------|---|---|
| 集合      | $\mathcal{K}$                           | 列车集合  |
|         | $\mathcal{S}$                           | 车站集合  |
|         | $\mathcal{S}_k$                         | 列车 $k$ 途径车站集合   |
|         | $\bar{\mathcal{S}}_k$                   | 列车 $k$ 停站集合   |
|         | $\mathcal{F}$                           | 快运箱集合   |
|         | $\mathcal{T}$                           | 离散时间点集合   |
| 索引      | $k, l$                                  | 列车索引, $k \in \mathcal{K}$                             |
|         | $i, j$                                  | 车站索引, $i, j \in \mathcal{S}$                          |
|         | $t$                                     | 时间索引, $t \in \mathcal{T}$                             |
|         | $f$                                     | 快运箱索引, $f \in \mathcal{F}$                            |
|         |   |   |
| 参数      | $o_f$                                   | 快运箱 $f$ 起点站   |
|         | $d_f$                                   | 快运箱 $f$ 终点站   |
|         | $\rho_i$                                | 车站 $i$ 的平均装卸货物时间                                      |
|         | $\psi$                                  | 单位货物未被服务惩罚费用  |
|         | $c_k/c_k^{\text{max}}$                  | 列车最小/最大编组数  |
|         | $c^{\text{max}}$                        | 最大备用车厢数   |
|         | $\sigma$                                | 单节车厢编组费用  |
|         | $C^f$                                   | 单节车厢最多容纳快运箱数量   |
|         | $q_k^{ij}$                              | 列车 $k$ 分配给 OD $(i, j)$ 间旅客车厢数                         |
|         | $t_k^i$                                 | 列车 $k$ 在车站 $i$ 到 $i+1$ 区间运行时分                         |
|         | $o_k$                                   | 列车 $k$ 起始站  |
|         | $d_k$                                   | 列车 $k$ 终止站  |
|         | $[\underline{T}_k, \bar{T}_k]$          | 列车 $k$ 的始发时间窗   |
|         | $h^d$                                   | 最小出发间隔  |
|         | $h^a$                                   | 最小到达间隔  |
|         | $\delta$                                | 单位停站时间惩罚费用  |
|         | $\tau_{k,i}^{\min}/\tau_{k,i}^{\max}$   | 列车 $k$ 在车站 $i$ 最小/最大停站时间                              |
|         | $[t_f^e, t_f^l]$                        | 快运箱 $f$ 出发时限  |
| $v_k^i$ | 当列车 $k$ 在 $i$ 站停车时, $v_k^i = 1$ ; 否则为 0 |   |
| $M$     | 表示足够大的常数                                |   |
| 决策变量    | $\tau_{k,i}$                            | 列车 $k$ 在车站 $i$ 停站时间                                   |
|         | $ta_k^i$                                | 列车 $k$ 到达 $i$ 站时刻                                     |
|         | $td_k^i$                                | 列车 $k$ 从 $i$ 站出发时刻                                    |
|         | $c_k^{\text{add}}$                      | 列车 $k$ 额外增加的编组车厢数                                     |
|         | $y_{lk}^i$                              | 若列车 $l$ 先于列车 $k$ 在车站 $i$ 出发, 则 $y_{lk}^i = 1$ ; 否则为 0 |
|         | $x_k^f$                                 | 若快运箱 $f$ 分配给列车 $k$ 服务, $x_k^f = 1$ ; 否则为 0            |

2) 列车容量约束.

对任一列车而言,其向旅客和货物分配的运力资源(或车厢数)需要遵循如下容量约束:

$$c_k^{ij} = c_k + c_k^{\text{add}} - q_k^{ij}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, i, j \in \bar{\mathcal{S}}_k, j > i; \quad (3)$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}: d_f \geq j, o_f \leq i} x_k^f \leq C^f \cdot c_k^{ij}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, i, j \in \bar{\mathcal{S}}_k, j > i. \quad (4)$$

式(3)中变量  $c_k^{ij}$  表示列车  $k$  在 OD  $(i, j)$  间预留给货物的车厢数,由列车编组数减去提前分配给旅客的车厢数  $q_k^{ij}$  得到; 式(4)表示列车  $k$  所装运的快运箱数量需要满足其最大装运能力限制.

3) 货物配装约束.

为确保列车停站方案满足货物的起讫点要求,引入列车停站相关参数  $v_k^i, \forall k \in \mathcal{K}, i \in \bar{\mathcal{S}}_k$ . 货物配装相

关约束可表述如下:

$$x_k^f \leq v_k^{of} \cdot v_k^{df}, \forall k \in \mathcal{K}, f \in \mathcal{F}; \quad (5)$$

$$\text{td}_k^{of} \geq t_f^e - M(1 - x_k^f), \forall k \in \mathcal{K}, f \in \mathcal{F}; \quad (6)$$

$$\text{td}_k^{of} \leq t_f^l + M(1 - x_k^f), \forall k \in \mathcal{K}, f \in \mathcal{F}; \quad (7)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_k^f \leq 1, \forall f \in \mathcal{F}. \quad (8)$$

式(5)表示当列车在快运箱 $f$ 的起讫点 $o_f$ 和 $d_f$ 均停站的情况下,才能运输该货物.在实际运营过程中,高铁快运货物通常都有较高的货运时限要求,即铁路运营部门要求货物在到达车站后,必须在一定期限内出发(如3~4小时内).为满足这一要求,特引入货物到达时间参数 $t_f^e$ 和期望最晚出发时间参数 $t_f^l$ .式(6)和(7)进一步刻画了列车与货物之间的耦合关系,对任一列车 $k$ 而言,只有其始发时间在快运箱 $f$ 的规定出发期限内(即 $\text{td}_k^{of} \in [t_f^e, t_f^l]$ )才能承担该货物的运输任务.与现有文献不同,约束(6)和(7)能够保证即使所有快运箱的起讫点和出发时限均不同,其配装过程仍然能够完成.式(8)为货物分配的唯一性约束,限定每一个快运箱 $f \in \mathcal{F}$ 最多仅能被分配到一辆列车上.此外,引入辅助变量 $R_i^t$ 及下式,以计算每个车站各个离散时间点上的货物滞留数量:

$$R_i^t = \sum_{f \in \mathcal{F}: t_f^e < t, o_f = i} \left( 1 - \sum_{k \in \mathcal{K}: \text{td}_k^i < t} x_k^f \right), \quad \forall t \in \mathcal{T}, i \in \mathcal{S}. \quad (9)$$

#### 4) 停站时间约束.

一般而言,为满足旅客乘降需求,列车需要在指定车站进行停站作业.在客货混运问题相关文献中,一般假设在旅客列车时刻表规定的停站时间内能够完成车站的货物装卸需求<sup>[5,7]</sup>.考虑各车站的装卸能力不同等因素,为贴合实际运营过程,根据列车在车站实际装卸快运箱的数量灵活决策停站时间,即列车停站时间随装卸快运箱数量而变化,有

$$\tau_k^i \geq \tau_{k,i}^{\min}, \forall k \in \mathcal{K}, i \in \bar{\mathcal{S}}_k; \quad (10)$$

$$\tau_k^i \geq \rho_i \cdot \sum_{f \in \mathcal{F}: o_f = i || d_f = i} x_k^f, \forall k \in \mathcal{K}, i \in \bar{\mathcal{S}}_k. \quad (11)$$

式(10)和(11)引入变量 $\tau_k^i$ 以反映列车 $k$ 在车站 $i$ 的实际停站时间.当快运箱数量较少时,停站时间仅需满足旅客乘降需求即可(对应式(10)).反之,当货运需求较大时,需要增大停站时间以满足快运箱的装卸(对应式(11)).另外,货运需求过大会导致列车停站过久,影响乘客出行时间.为此需要限制列车的最大停站时间,即

$$\tau_k^i \leq \tau_{k,i}^{\max}, \forall k \in \mathcal{K}, i \in \bar{\mathcal{S}}_k. \quad (12)$$

#### 5) 列车运行约束.

列车运行约束用于决策列车在各车站的到达和出发时刻,并反应列车在不同区间的运行时间.一般而言,由于需要在铁路线路上安排多种不同类型的列车,应预先确定每个列车在起始站的出发时间范围,以保证运营时间范围内的服务平衡,提高列车服务对乘客的吸引力.本文为保证客运服务水平,规定仅在给定时间窗内调整列车出发时间,从而提高列车发车与货物到达的可接续性,即

$$\underline{T}_k \leq \text{td}_k^{ok} \leq \bar{T}_k, \forall k \in \mathcal{K}. \quad (13)$$

其中:参数 $\underline{T}_k$ 为列车最早出发时间,参数 $\bar{T}_k$ 为列车最晚出发时间,区间 $[\underline{T}_k, \bar{T}_k]$ 的长度决定了列车可调整的出发时间范围(如 $\bar{T}_k - \underline{T}_k = 20 \text{ min}/30 \text{ min}$ 等).此外,为计算列车在各车站的到、发时刻,需要引入列车运行时间约束,即

$$\text{ta}_k^{i+1} = \text{td}_k^i + \text{tr}_k^i, \forall k \in \mathcal{K}, i \in \mathcal{S} \setminus \{\mathcal{S}\}; \quad (14)$$

$$\text{td}_k^i - \text{ta}_k^i = \tau_k^i, \forall k \in \mathcal{K}, i \in \bar{\mathcal{S}}_k \setminus \{\mathcal{S}\}. \quad (15)$$

#### 6) 列车安全间隔约束.

列车运行安全是高铁运营管理中的核心问题,现有相关文献一般假设列车运行速度一致,以避免列车越行.本文将问题推广至不同等级列车共线运行的一般运营情况,为保证列车时刻表可行,避免不同列车发生冲突,特引入如下约束:

$$\text{td}_k^i - \text{td}_l^i + M(1 - y_{lk}^i) \geq h^d, \quad \forall k, l \in \mathcal{K}, k \neq l, i \in \mathcal{S} \setminus \{\mathcal{S}\}; \quad (16)$$

$$\text{ta}_k^{i+1} - \text{ta}_l^{i+1} + M(1 - y_{lk}^i) \geq h^a, \quad \forall k, l \in \mathcal{K}, k \neq l, i \in \mathcal{S} \setminus \{\mathcal{S}\}; \quad (17)$$

$$y_{lk}^i + y_{kl}^i = 1, \forall k, l \in \mathcal{K}, k \neq l, i \in \mathcal{S} \setminus \{\mathcal{S}\}. \quad (18)$$

具体地,式(16)~(18)用于刻画列车间的越行约束以及列车间的安全间隔约束.式中所引入的列车出发顺序0-1变量 $y_{lk}^i$ 为现有文献的一般处理方式<sup>[15-16]</sup>,即如果列车 $l$ 先于列车 $k$ 在车站 $i$ 出发,则 $y_{lk}^i = 1$ ;否则 $y_{lk}^i = 0$ .

#### 7) 变量约束.

$$\text{td}_k^i, \text{ta}_k^i \in N, \forall k \in \mathcal{K}, i \in \mathcal{S}_k; \quad (19)$$

$$c_k^{\text{add}} \in N, \forall k \in \mathcal{K}; \quad (20)$$

$$x_k^f \in \{0, 1\}, \forall k \in \mathcal{K}, f \in \mathcal{F}; \quad (21)$$

$$y_{kl}^i \in \{0, 1\}, \forall k, l \in \mathcal{K}, k \neq l, i \in \mathcal{S} \setminus \{\mathcal{S}\}. \quad (22)$$

式(19)~(22)限定了决策变量的取值范围,其中列车到、发时刻变量 $\text{ta}_k^i$ 、 $\text{td}_k^i$ 和列车编组变量 $c_k^{\text{add}}$ 取值为非负整数;货物分配变量 $x_k^f$ 和列车出发顺序变量 $y_{kl}^i$ 取

值为0或1.

### 2.3 目标函数

为了在尽可能完成货运需求的同时,兼顾旅客运输服务质量和运营成本,本文将优化目标设置为最小化车厢编组费用、未被运输的快运箱惩罚费用和列车停站时间费用,即

$$\min \lambda_1 \cdot (\beta_1 + \beta_2) + \lambda_2 \cdot \beta_3;$$

$$\beta_1 = \sum_{k \in \mathcal{K}} \sigma \cdot c_k^{\text{add}}, \quad (23)$$

$$\beta_2 = \sum_{f \in \mathcal{F}} \psi \cdot \left(1 - \sum_{k \in \mathcal{K}} x_k^f\right), \quad (24)$$

$$\beta_3 = \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i \in \mathcal{S}_k} \delta \cdot (\text{td}_k^i - \text{ta}_k^i). \quad (25)$$

其中:  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为权重系数;目标函数中  $\beta_1$  和  $\beta_2$  为运营侧相关费用,分别表示增加车厢编组所产生的额外运营费用和未被服务货物的惩罚费用;  $\beta_3$  为服务侧相关费用,表示列车总停站时间惩罚(决定旅客总旅行时间).显然,通过调整  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的取值,决策结果可以在运营侧和服务侧之间取得平衡.

综上所述,本文所构建的列车时刻表与货物配装



图2 京沪高铁线路图

表2 列车开行方案

| 开行区段   | 列车数量 | 开行区段    | 列车数量 |
|--------|------|---------|------|
| 1 → 6  | 7    | 3 → 23  | 5    |
| 1 → 11 | 4    | 6 → 11  | 3    |
| 1 → 16 | 10   | 6 → 13  | 6    |
| 1 → 23 | 30   | 6 → 16  | 4    |
| 3 → 6  | 6    | 6 → 23  | 5    |
| 3 → 11 | 5    | 11 → 16 | 8    |
| 3 → 13 | 4    | 11 → 23 | 6    |
| 3 → 16 | 6    | 16 → 23 | 6    |

本文采用随机生成的旅客出行需求  $q_k^{ij}$  进行数值实验. 为确保列车运行安全,设列车最小到达间隔  $h^a$  和出发间隔  $h^d$  均为4 min. 为满足沿途旅客乘降需求,设最小停站时间  $t_{k,i}^{\min}$  为2 min,最大停站时间  $t_{k,i}^{\max}$  为15 min. 其他相关参数设置如下:单节车厢所能容纳快运箱数量  $C_f$  为40;列车最大编组数  $c_k^{\max}$  为16;最大备用车厢数量  $c^{\max}$  为10;车站平均装卸时间  $\rho_i$  为0.1;始发时间窗长度  $\bar{T}_k - \underline{T}_k$  为30 min.

所有实验均在CPU主频为3.50 GHz,内存为

方案协同优化模型可表述为

$$P_1: \min \lambda_1 \cdot (\beta_1 + \beta_2) + \lambda_2 \cdot \beta_3;$$

s.t. 约束(1) ~ (22). (26)

值得注意的是,模型(26)为整数线性规划模型,能够利用现有商用优化软件(如CPLEX、GROUBI等)直接进行求解.

## 3 算例分析

### 3.1 参数设置

为了验证所提方法的有效性,本文以京沪高铁线路为背景进行数值实验分析.该线路共设有23个车站(如图2所示,车站依次编号为1,2,...,23),全天运营时段为6:00~24:00.线路各区间的运行时间如表2所示,其中高速列车(运行速度为300 km/h)和低速列车(运行速度为250 km/h)由于速度等级不同,导致区间运行时间存在一定差异.实验数据中该线路上存在16个不同的列车开行区段,共开行115列车,包含86列高速列车和29列低速列车,列车开行方案见表2.

32.0GB的电脑上进行,并统一使用C#编程调用CPLEX优化软件对模型进行求解.

### 3.2 结果分析

数值实验所需要的货运需求量如表3所示,其中总的货运需求量为5 000个快运箱.预设CPLEX优化求解器最大求解时间为1 800 s,优化间隙Gap值为3.00%.令参数  $\psi = 50, \sigma = 1 200, \delta = 80$ .为测试模型所能提高货物运输量的潜力,令系数  $\lambda_1 = 0.9, \lambda_2 = 0.1$ (其余取值情形见下文灵敏度分析实验).利用C#编程调用CPLEX求解,经过1 795.31 s计算,返回目标值为17 181且Gap值为2.75%的解.其中,车厢编组额外增加7节,运输快运箱4 983个,完成率达99.66%,优化后的列车运行图如图3所示.从图3可以看出,由于高速列车和低速列车共线运行(蓝色实线代表低速列车运行线,红色实线代表高速列车运行线),线路上存在不可避免的列车越行现象.此外,列车在车站装、卸货物产生的额外停站时间势必会给制定有效越行方案带来一定的挑战.本文所构建

表3 区间运行时间及OD货运需求

| 区间      | 货运需求/箱 | 运行时间/min |    |
|---------|--------|----------|----|
|         |        | 高速       | 低速 |
| 1 → 2   | 656    | 12       | 14 |
| 2 → 3   | 628    | 14       | 17 |
| 3 → 4   | 1 236  | 18       | 21 |
| 4 → 5   | 1 160  | 22       | 26 |
| 5 → 6   | 1 620  | 18       | 22 |
| 6 → 7   | 2 032  | 9        | 10 |
| 7 → 8   | 1 922  | 14       | 17 |
| 8 → 9   | 2 224  | 11       | 13 |
| 9 → 10  | 2 092  | 7        | 9  |
| 10 → 11 | 1 941  | 13       | 15 |
| 11 → 12 | 2 171  | 16       | 19 |
| 12 → 13 | 2 317  | 15       | 18 |
| 13 → 14 | 2 386  | 11       | 13 |
| 14 → 15 | 2 407  | 12       | 15 |
| 15 → 16 | 2 378  | 12       | 14 |
| 16 → 17 | 2 252  | 14       | 17 |
| 17 → 18 | 2 076  | 5        | 6  |
| 18 → 19 | 1 835  | 6        | 8  |
| 19 → 20 | 1 520  | 11       | 14 |
| 20 → 21 | 1 156  | 5        | 6  |
| 21 → 22 | 743    | 6        | 8  |
| 22 → 23 | 247    | 9        | 10 |

的模型中,通过引入一组安全间隔约束(16)~(18)与停站时间约束(10)~(12),能够较好地解决这一问题.实际运营过程中,越行导致的列车额外停站时间

是对整个铁路运输系统时空资源的损失.然而,采用本文所构建模型得到的列车时刻表及货物配装方案中,部分被越行列车产生的额外停站时间能够被用于进行货物的装卸(如图3中椭圆虚线部分所示),减少了时空资源的浪费,这在一定程度上反应了本文所构建模型的有效性.

为直观表示各车站内货物滞留情况,图3以蓝色阴影的形式分别描述了各离散时间点的货物累积数量,其高度与滞留货物数量成正比.具体地,当无列车出发时,货物在车站因未被运输而积压(对应图3中阴影区域高度增加的情形);当列车装运快运箱出发后,货物滞留量逐渐减少(对应图3中阴影区域高度减少的情形),直至所有快运箱被运输.

### 3.2.1 协同优化模型结果对比

为体现本文构建的列车时刻表与货物配装方案协同优化模型的有效性,下面构建固定列车时刻表的货物配装优化模型,并与模型 $P_1$ 进行对比分析.首先,构建如下约束以引入既有列车时刻表:

$$td_k^{ok} = \kappa_k^{ok}, \forall k \in \mathcal{K}; \tag{27}$$

$$\tau_k^i = \bar{\tau}_{k,i}, \forall k \in \mathcal{K}, i \in \bar{\mathcal{S}}_k. \tag{28}$$

其中:式(27)为输入列车始发时间,参数 $\kappa_k^{ok}$ 表示每列车给定的始发时间;式(28)为输入列车停站时间,参数 $\bar{\tau}_{k,i}$ 表示列车在各车站规定的停站时间.结合模型 $P_1$ 中列车编组和货物配装相关约束,固定时刻表的货物配装优化模型可表述如下:

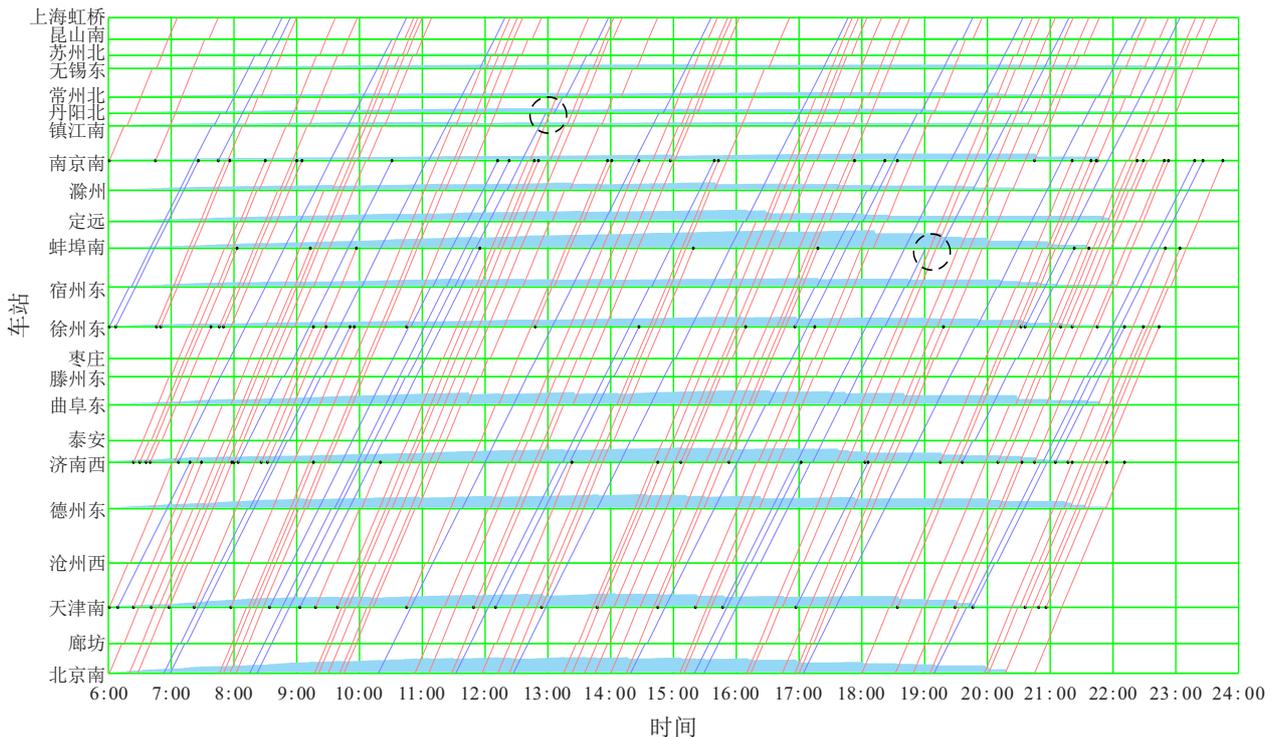


图3 模型 $P_1$ 求解所得列车运行图及货物滞留变化

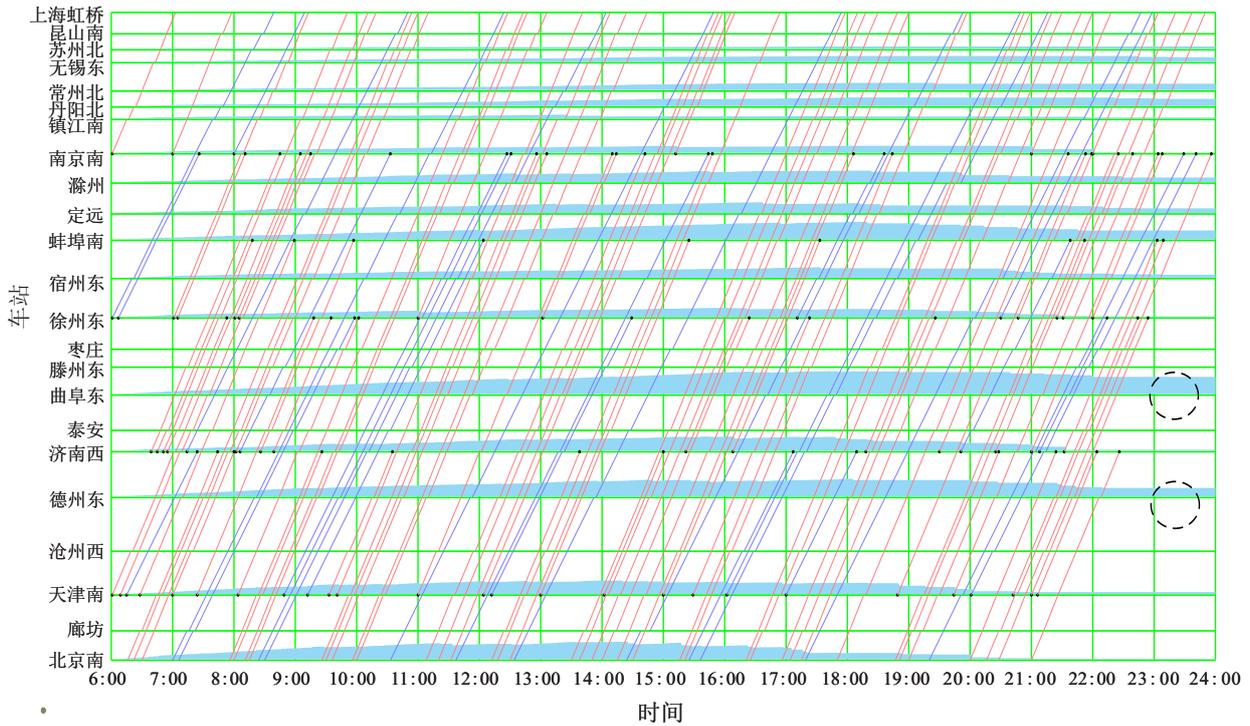


图4 模型  $P_2$  求解所得货物滞留变化

$$P_2 : \min \lambda_1 \cdot (\beta_1 + \beta_2) + \lambda_2 \cdot \beta_3;$$

$$\text{s.t. 约束(1) ~ (12)、(14) ~ (22)、(27)和(28).}$$

(29)

实验的参数设置与3.2节一致. 调用CPLEX求解模型  $P_2$ , 经过8.63 s计算, 返回目标值为56 539, Gap值为0.66%的解, 结果如图4所示. 从图4可以看出, 在列车编组和货物配装相关约束一致的情况下, 采用固定列车时刻表的优化方案将导致大量货物无法被及时运输(如图4中椭圆虚线部分所示), 其根本原因是列车发车时间无法与货物到达时间形成良好接续. 相比之下, 本文所提出的协同优化模型  $P_1$  能够在规定的列车出发范围内灵活调整列车始发时间及停站时间, 有利于货物到达与列车始发之间接续. 此外, 灵活运用车厢资源进行编组, 可进一步提升运力, 从而避免货物过度滞留的现象.

表4给出了两模型间运输量、停站时间、使用车厢数量及目标值对比. 可以发现, 模型  $P_1$  仅在额外增加每列车 1.53 min 总停站时间的情况下, 即可额外完成 959 件快运箱运输任务, 体现了模型的有效性.

表4 模型  $P_1$  和  $P_2$  计算结果对比

| 模型    | 总运输量/箱            | 停站时间/(min/车)      | 目标值                 | 增加车厢数 |
|-------|-------------------|-------------------|---------------------|-------|
| $P_1$ | 4983<br>(↑ 23.8%) | 9.62<br>(↑ 18.7%) | 17 181<br>(↓ 66.6%) | 7     |
| $P_2$ | 4 024             | 8.09              | 51 368              | 0     |

### 3.2.2 不同规模算例对比

为进一步验证模型  $P_1$  的性能和有效性, 对不同规模的算例进行对比分析. 为方便表示, 以“115(86, 29)-5000”为例对算例编号进行说明. 其中: 115代表总列车数量, 86代表高速列车数量, 29代表低速列车数量, 5 000代表快运箱数量. 设置 CPLEX 最大求解时间为1 800 s, Gap值为3.00%.

计算结果如表5所示, 首先分析协同优化模型  $P_1$  的性能表现. 共设计12个算例, 前11个算例均能快速找到Gap小于3%的满意解. 而针对第12个算例中列车和快运箱数量较多的极端场景, 虽然问题规模较大, 计算耗时较长, 但也能通过1 795.31 s计算找到Gap为2.75%的近似最优解.

第3.2.1节验证了大规模情形下协同优化模型的有效性(对应表5中第12个算例), 下面进一步测试模型  $P_1$  相比  $P_2$  在其他不同规模下的性能表现. 由表5可见, 除了算例“85(64, 21)-1 000”和“115(86, 29)-1 000”由于货物需求较少, 现有列车时刻表即可运输完所有货物外, 其余算例中协同优化模型  $P_2$  均能在合理计算时间范围内充分利用车厢资源运输更多货物, 进一步体现出所提出协同优化模型的有效性.

### 3.2.3 灵敏度分析

为进一步分析  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  对最终决策结果的影响, 下面以3.1节中大规模算例为基准对系数的取值进行灵敏度分析实验, 结果如表6所示. 随着  $\lambda_1$  取值增大,  $\lambda_2$  取值减小, 运输货物量也逐步增加, 反映了决策

表5 不同算例计算结果对比

| 算例编号 | 模型 $P_1$         |        |          |       | 模型 $P_2$ |        |       |       |      |
|------|------------------|--------|----------|-------|----------|--------|-------|-------|------|
|      | 运输量/箱            | 计算时间/s | 增加车厢数    | Gap/% | 运输量/箱    | 计算时间/s | 增加车厢数 | Gap/% |      |
| 1    | 25(19,6)-1 000   | 839    | 0.36     | 2     | 2.91     | 715    | 0.17  | 1     | 0.00 |
| 2    | 25(19,6)-3 000   | 1 399  | 0.57     | 10    | 0.37     | 958    | 0.23  | 4     | 2.71 |
| 3    | 25(19,6)-5 000   | 1 914  | 0.67     | 10    | 1.95     | 1 068  | 0.31  | 3     | 0.06 |
| 4    | 55(41,14)-1 000  | 1 000  | 1.14     | 0     | 0.35     | 978    | 0.28  | 0     | 0.00 |
| 5    | 55(41,14)-3 000  | 2 662  | 4.97     | 10    | 2.58     | 1 844  | 0.88  | 0     | 0.20 |
| 6    | 55(41,14)-5 000  | 4 314  | 20.99    | 10    | 0.96     | 2 629  | 1.06  | 3     | 0.24 |
| 7    | 85(64,21)-1 000  | 1 000  | 2.77     | 0     | 1.68     | 1 000  | 0.34  | 0     | 0.00 |
| 8    | 85(64,21)-3 000  | 2 993  | 8.41     | 3     | 2.99     | 2 586  | 1.13  | 0     | 0.46 |
| 9    | 85(64,21)-5 000  | 4 506  | 24.49    | 10    | 2.78     | 3 394  | 1.89  | 2     | 2.94 |
| 10   | 115(86,29)-1 000 | 1 000  | 5.88     | 0     | 2.83     | 1 000  | 1.39  | 0     | 0.00 |
| 11   | 115(86,29)-3 000 | 3 000  | 40.50    | 0     | 1.70     | 2 689  | 2.13  | 0     | 0.00 |
| 12   | 115(86,29)-5 000 | 4 983  | 1 795.31 | 7     | 2.75     | 4 024  | 8.63  | 0     | 0.66 |

结果更倾向于运营侧.相反,随着 $\lambda_2$ 取值增大, $\lambda_1$ 取值减小,运输货物量逐步减少,列车停站时间缩短,反映了决策结果更倾向于旅客服务侧.鉴于此,决策者可根据调整该系数取值以权衡运营成本和旅客服务质量.

表6 系数 $\lambda_1, \lambda_2$ 取值灵敏度分析

| $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | 目标值    | 总运输量/箱 | 总停站时间 | 增加车厢数 | Gap/% |
|-------------|-------------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 0.1         | 0.9         | 71 920 | 4 031  | 899   | 0     | 0.72  |
| 0.3         | 0.7         | 63 705 | 4 673  | 1 050 | 0     | 2.98  |
| 0.5         | 0.5         | 47 980 | 4 952  | 1 098 | 7     | 2.99  |
| 0.7         | 0.3         | 33 281 | 4 981  | 1 104 | 7     | 2.99  |
| 0.9         | 0.1         | 17 181 | 4 983  | 1 107 | 7     | 2.75  |

### 4 结论

本文综合考虑列车始发时间、停站时间、列车间越行及货物装配方案等因素,构建了高速铁路列车时刻表与货物配装方案协同优化模型.数值实验结果表明,所提出模型能够在尽量保持原客运水平的前提下,提高列车冗余运力的利用率.此外,针对货运需求较大等情形,可通过增加额外货运车厢编组以提高运输能力,为高铁快运服务运营商提供良好的辅助决策方案.主要结果总结如下:

1) 采用所提出的列车时刻表与货物配装方案协同优化模型  $P_1$ ,能够较好地完成货物运输需求.在货物运输量为5 000箱的极端情形下,通过灵活决策列车时刻表和增加货运车厢编组,能够运输99.66%的货物需求.此外,与固定列车时刻表模型  $P_2$  进行对比,协同优化模型在未对旅客运输服务产生较大影响的情况下(仅增加每车1.53 min的停站时间),可完成额外959件快运箱的运输需求(相比模型  $P_2$  提升

23.8%),从而减少货物滞留,提高了企业运营收入.

2) 与现有大多相关文献不同,所提出模型  $P_1$  同时考虑不同速度等级列车共线运行产生的越行情况,提高了模型的一般适用性(即使列车速度等级相同,模型  $P_1$  仍然适用).此外,根据以实际运营线路为背景的数值实验结果分析,列车间运行产生的越行可以与货物配装过程相结合,即列车可以在停站避让期间利用该时间完成货物装卸,以减少列车不必要停站造成的损失.

本文采取灵活增加列车编组的方式增加列车运力,满足更多货物运输需求.未来有必要进一步对新增货运专列的协同优化问题进行研究,并设计对应的高效求解算法.此外,对不确定货运需求情形进行研究,得到的货物配装方案将更加贴合实际.

### 参考文献(References)

[1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发“十四五”现代物流发展规划的通知[EB/OL]. (2022-12-15)[2023-11-25]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-12/15/content\\_5732092.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-12/15/content_5732092.htm).

[2] 李辰中, 孟凡栋, 周凌云. 我国高铁快运业务运营组织模式探讨[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(3): 48-52. (Li C Z, Meng F D, Zhou L Y. A tentative study on the operation organization mode of China's high-speed railway express business[J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(3): 48-52.)

[3] 王海志, 王荣辉. 我国发展高铁货运的可行性分析及方案选择[J]. 综合运输, 2012, 34(6): 56-60. (Wang H Z, Wang R H. Feasibility analysis and scheme selection of developing high-speed rail freight in China[J]. Comprehensive Transportation, 2012, 34(6): 56-60.)

[4] Xu G M, Zhong L H, Wu R F, et al. Optimize train

- capacity allocation for the high-speed railway mixed transportation of passenger and freight[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 174: 108788.
- [5] Li S Q, Zhu X N, Shang P, et al. Optimizing a shared freight and passenger high-speed railway system: A multi-commodity flow formulation with Benders decomposition solution approach[J]. *Transportation Research—Part B: Methodological*, 2023, 172: 1-31.
- [6] 高如虎, 牛惠民, 杨喜梅. 面向时变需求的高铁快运专列时刻表和配装方案综合优化研究[J]. *交通信息与安全*, 2020, 38(4): 122-131.  
(Gao R H, Niu H M, Yang X M. Coordinating train timetable and demand assignment for express delivery with high-speed railway with time-dependent-oriented demand[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2020, 38(4): 122-131.)
- [7] 戚建国, 周亚茹, 杨立兴, 等. 客货共运模式下高铁列车货运兼办方案优化[J]. *北京交通大学学报*, 2023, 47(4): 1-11.  
(Qi J G, Zhou Y R, Yang L X, et al. Optimization strategies for freight on high-speed railway trains under co-transportation of passenger and freight[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2023, 47(4): 1-11.)
- [8] 杨喜梅, 康柳江, 孙会君, 等. 旅客列车捎带模式下的高铁快运网络配装方案优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2024, 44(5): 1699-1713.  
(Yang X M, Kang L J, Sun H J, et al. Demand assignment for expressed livery in high-speed railway networks: A passenger train delivery mode[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2024, 44(5): 1699-1713.)
- [9] 姚玉莹, 张玉召. 客车捎带模式下高铁快捷货物输送方案研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(1): 31-38.  
(Yao Y Y, Zhang Y Z. Study on express freight transport scheme of high-speed rail in piggyback mode of passenger car[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(1): 31-38.)
- [10] Zhen L, Fan T Y, Li H L, et al. An optimization model for express delivery with high-speed railway[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 176: 103206.
- [11] Zhen L, Gao J J, Zhang N Z, et al. A decision model for high-speed railway express systems[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 177: 109087.
- [12] 周文梁, 史峰, 陈彦, 等. 客运专线网络列车开行方案与运行图综合优化方法[J]. *铁道学报*, 2011, 33(2): 1-7.  
(Zhou W L, Shi F, Chen Y, et al. Method of integrated optimization of train operation plan and diagram for network of dedicated passenger lines[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(2): 1-7.)
- [13] 黄鉴, 彭其渊. 基于分时客运需求的客运专线列车运行图优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2012, 9(6): 66-71.  
(Huang J, Peng Q Y. Train diagram optimization of passenger dedicated line based on passenger transport demand in different time[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2012, 9(6): 66-71.)
- [14] 廖正文, 苗建瑞, 孟令云, 等. 基于拉格朗日松弛的双线铁路列车运行图优化算法[J]. *铁道学报*, 2016, 38(9): 1-8.  
(Liao Z W, Miao J R, Meng L Y, et al. An optimization algorithm for double-track railway train timetabling based on Lagrangian relaxation[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(9): 1-8.)
- [15] Yang L X, Qi J G, Li S K, et al. Collaborative optimization for train scheduling and train stop planning on high-speed railways[J]. *Omega*, 2016, 64: 57-76.
- [16] 张春田, 戚建国, 杨凯, 等. 基于两阶段分布鲁棒优化的列车停站方案与时刻表协同研究[J]. *控制与决策*, 2023, 38(4): 1065-1073.  
(Zhang C T, Qi J G, Yang K, et al. Two-stage distributionally robust optimization for integrated train stop planning and timetabling[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(4): 1065-1073.)
- [17] 卢亚菡, 杨凯, 杨立兴, 等. 基于分布鲁棒优化的城市轨道交通网络末班车衔接研究[J]. *控制与决策*, 2023, 38(1): 248-256.  
(Lu Y H, Yang K, Yang L X, et al. Distributionally robust optimization for the last-train connection planning problem in urban rail transit networks[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(1): 248-256.)

## 作者简介

米雷(2001—), 男, 硕士生, 主要研究方向为轨道交通列车运行组织优化, E-mail: 23121857@bjtu.edu.cn;

卢亚菡(1997—), 女, 博士生, 主要研究方向为城市轨道交通列车运行组织优化, E-mail: 20114015@bjtu.edu.cn;

杨立兴(1976—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为交通运输规划与管理, E-mail: lxyang@bjtu.edu.cn;

戚建国(1990—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为铁路运输组织与运营管理, E-mail: qijianguo@bjtu.edu.cn.