

考虑客货混合运输的城市轨道交通列车时刻表优化模型

贾宇飞, 张小宁

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2023年3月2日; 录用日期: 2023年3月22日; 发布日期: 2023年3月31日

摘要

近年来城市交通网络负荷不断增加, 我国城市交通拥堵问题日趋严重, 城市地面物流运输效率低下, 而城市轨道交通具有覆盖面广、运输量大、运输速度快等特点, 可以利用剩余运力缓解城市物流配送的压力。基于城市轨道交通进行客货混合运输包括客货共车和客货分离等模式。在客货共车模式下, 本文在满足原有乘客运输需求基础上进行货物运输, 以货运成本最小化为目标, 将给定的货单需求与列车匹配, 分别考虑固定发车间隔与灵活发车间隔两种列车发车情况, 构建了混合整数线性规划模型。以上海地铁13号线一期工程线路为案例, 利用Cplex求解器进行数值实验, 结果表明, 本文建立的模型可以将客货需求与列车进行匹配, 通过改变列车的发车时间、发车数量和客货列车的车厢分配, 能够提高货运收益和客货运输效率, 为轨道交通运营方提供了客货混合运输的可行性方法。

关键词

轨道交通货运, 客货混合运输, 列车发车间隔, 混合整数线性规划, 列车时刻表优化

Optimization Model of Urban Rail Transit Train Schedule Considering Passenger-Freight Coordination Transportation

Yufei Jia, Xiaoning Zhang

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: Mar. 2nd, 2023; accepted: Mar. 22nd, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

In recent years, urban traffic load has been increasing, and the problems of urban traffic congestion

文章引用: 贾宇飞, 张小宁. 考虑客货混合运输的城市轨道交通列车时刻表优化模型[J]. 管理科学与工程, 2023, 12(2): 201-217. DOI: 10.12677/mse.2023.122023

have become increasingly serious in our country with Low efficiency of logistics and transportation, while urban rail transit has the characteristics of wide coverage, large transportation volume and fast transportation speed, etc. Therefore the surplus capacity of rail transit can be used to relieve the pressure of urban logistics distribution. The subway-based underground logistics system includes exclusive-train mode and train-sharing mode. Under the train-sharing mode, this paper carries out freight transportation on the basis of meeting the original passenger transportation demand, matches the given freight bill demand with the train aiming at minimizing the freight cost, considers two train departure situations, namely fixed departure interval and flexible departure interval, and presents a mixed integer linear programming model. In this study, the first phase of Shanghai Metro Line 13 is taken as an example, and the numerical experiments using solver Cplex show that the model can match the passenger and freight demand with the train. By changing the departure time and number of trains and the allocation of passenger and freight trains, the freight revenue and passenger and freight transportation efficiency can be improved, which provides a feasible method for rail transit operators to mix passenger and freight transportation.

Keywords

Rail Transit Freight, Mixed Passenger and Freight Transportation, Train Departure Interval, Mixed Integer linear Programming, Train Timetable Optimization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

进入新世纪以来,随着我国城市化进度加快,越来越多的人涌入城市,随之带来了城市土地资源紧缺,城市出行出现拥堵,出行成本增加。在有限的城市地面交通资源下,已经有许多城市采取“车牌号限行”的方式缓解城市交通拥堵,因而导致城市内部货物运输时效下降,物流成本节节攀升,城市地面运输方式似乎已到达难以优化的瓶颈阶段。据此,利用地下空间资源成为交通部门缓解交通问题的重要举措[1]。2018年,中国科协将未来城市地下交通及物流系统作为60个重大科学问题和重大工程技术难题之一[2]。因此,依托现有的城市地铁网络,在非高峰时段充分利用地铁线路的冗余运力,来发展地下物流网络与地铁协同运输,是当前更加可行的方案。忻剑鸣[3]针对现代物流发展的特点,提出了利用城市轨道交通网络发展物流业的设想,综合讨论了用轨道交通开展配送的优势及局限性。杨立春[4]从轨道交通客流在时间分布及空间分布的非均衡性出发,对轨道交通客运与货运的协同运行进行了探索性研究。谭寅亮等[5]提出了利用客运低谷实施物流快运的观点。乔俊杰等[6]提出了充分利用地铁的剩余运能来进行货物运输,并且探讨了地铁物流模式的发展优势和发展空间。Savelsbergh等[7]谈论了城市物流系统未来的机遇与挑战,并指出未来城市物流的最大机遇在于公共交通和城市货运的综合服务网络设计。Cochrane等[8]研究了公共交通货运服务在实际实施过程中的机遇与挑战。研究表明,客货共运系统将提升整个交通运输系统的效率,降低能源消耗和较少碳排放,但最关键的问题是如何在满足货运需求下仍然保障客运系统的服务水平。Ozturk [9]等针对单向地铁线路货运的问题,在已知既有客运列车时刻表的前提下,考虑在两列车间插入一趟货运列车的形式,利用既有客运站台装卸货物,以最小化货物送达延迟时间为目标,构建了货运列车时刻表的混合整数优化模型。Li等[10]考虑客货共载和货运专列两种形式,优化了列车的停站方案和时刻表。邸振等[11]基于地铁线路的客货协同运输问题,考虑了客货需求在时间窗上的不同,以客运硬时间窗与货运软时间窗设置了延迟惩罚,提出了客货两方面供给和需求匹配的协同运输优化策略。戚建国等[12]基于灵活编

组运营组织模式, 研究轨道交通客货协同运输方案优化问题, 建立了以乘客等待时间和运营公司运营成本最小化为目标的数学优化模型, 对列车编组方案、列车运行图和客货运输方案进行协同优化决策。李竹君等[13]针对机场线客货共运问题提出了列车编组、停站、时刻表和货物分配的综合优化方法, 对比了固定编组与灵活编组的客货混合运输情况, 在货物时效要求高时, 灵活编组的优势更加明显。

上述研究在城市轨道交通客货混合运输的可行性与运输策略方面提供了良好的理论支撑, 但大多从原有列车运行基础上进行货物运输, 改变列车发车时间的客货混合运输策略研究较少。鉴于此, 本文构建了客货混合运输下的城市轨道交通列车发车时刻模型, 在满足原有乘客运输需求的基础上, 以改变列车发车间隔的方式探讨城市轨道交通客货共车模式需求匹配的协同运输优化策略。

2. 问题描述

轨道交通参与货物运输, 其主要目的是利用列车非高峰时段的剩余运力缓解城市的货运压力。因此本文的研究时段为乘客非高峰时段, 考虑在原有客运列车基础上进行货物运输, 设定货运专用车厢, 通过改变列车的发车时间, 探讨固定发车间隔与灵活发车间隔情况下的发车情况, 同时满足乘客与货物的运输需求。本文考虑一条单向的轨道交通线路, 如图 1 所示, 此线路沿途共设 S 个车站, 列车由车站 1 出发, 经过车站 2、3、……、 $S-1$ 等车站, 最终到达终点站 S 。从第 1 个车站开始, 到第 $S-1$ 个车站为止, 均为可能的发货站点; 从第 2 个车站开始, 到第 S 个车站为止, 均为可能的收货站点。

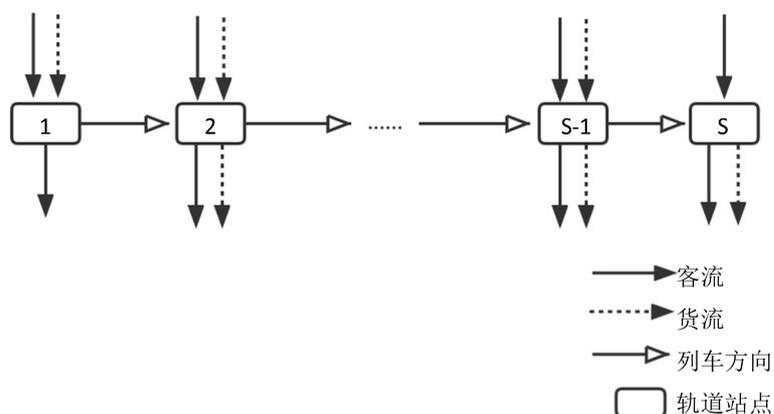


Figure 1. Train diagram of rail transit
图 1. 轨道交通列车运行图

为研究方便, 设当日货运需求集合为 D , 其发货站点与收货站点随机给出。设定起始时刻为 0, 研究时段 $[0, T]$ 并以 ε 为最小单位分成一系列间隔相等的时间点, 可表示为: $T = \{\varepsilon, 2\varepsilon, \dots, t\varepsilon, \dots, T\varepsilon\}$ 。设列车发车时刻必须为 ε 的整数倍, 为方便计算, 令 $\varepsilon = 60 \text{ s}$ 。列车在发车节点中的某个时刻出发, 从起点站 1 至终点站 S 完成货物运输任务, 在考虑各列车安全运行的前提下保证客货列车运行, 原始客运列车上行线路的时间运行如图 2 所示。

轨道交通列车引入货运服务可以提供货物运输新方式, 改善提升线路运营效益, 因而货运服务的目标为运营企业货运利润最大化。货运利润既包括服务货单需求所带来的收入, 也包括引入货运服务所额外增加的运营成本。与乘客不同, 货物需要人工协助进行搬运, 因而必须考虑货物装卸成本。装卸成本由被服务的货单货运量和单位箱装卸成本决定。另外, 在利用客运列车实现客货混载时, 货物在车站的装卸时间不能超过客车在车站的停靠时间。货物在车站等待装车的过程, 需暂存于车站内一段时间, 因而与仓储场地和人工管理相关的仓储成本不能忽视。

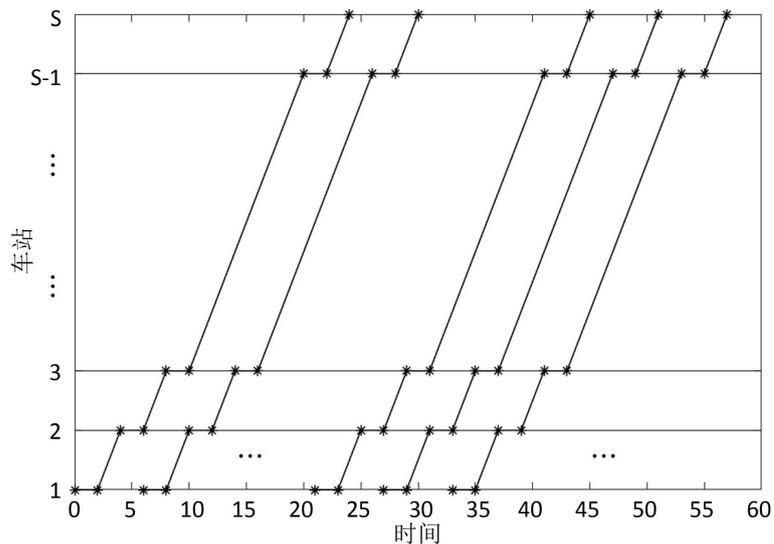


Figure 2. Train working diagram of up line
图 2. 列车上行线路运行时间图

为尽可能降低货运成本, 应尽量满足货运需求。由于线路富余能力有限, 较难满足所有货单需求, 应根据线路富余能力情况, 尽可能选择利润较大的货单, 放弃部分时效要求较高且利润较低的货单。为增加货运收入, 需根据不同时段货单起讫点和运输时效要求, 合理设计列车的发车间隔, 尽可能满足更多货单需求。为了降低车站仓储成本, 需制定合理的货单分配方案, 以避免所有大运量货单在车站集中仓储。此外, 为了节省列车运行成本, 需确定合适的列车编组数量与货运专用车厢数, 在保证乘客运输需求的同时更好匹配列车货运能力和需求。

3. 模型设计

3.1. 问题假设

针对上述列车运行的描述及要研究的问题, 提出如下假设:

- 1) 所有列车均由起点站运行至终点站, 仅考虑单向轨道交通路线, 不考虑列车折返情况。
- 2) 所有列车在不同区间的运行速度和时间均相同。
- 3) 轨道交通运营公司在一定时间段内开展货运服务, 收集的货单有限, 尽量满足货单需求。
- 4) 为方便计算, 将货物同一化, 不考虑货物间的区别, 货物按重量以标准化单元作为最小运输单位。
- 5) 轨道交通运营公司收集的货单规定了到站时间、和起讫点车站, 且各个站点的货物容量足够, 不会出现库存货物超额堆积情况。
- 6) 由轨道交通运营公司规定货单客户方的取货时间, 客户会在预计时间提走货物, 因此只考虑货单在等待装车过程中在车站存储产生的仓储成本, 不考虑运达车站后等待提取的仓储成本。
- 7) 货单的运输价格按距离计, 以每单位货物每公里运输价格为标准, 向客户货单收取运输费用。
- 8) 列车的总能力大于乘客总需求, 保证到达车站的旅客都能被服务, 在客流完全服务的基础上进行载货服务, 且货物需求与乘客需求可以在极限情况下满足。

3.2. 变量定义

本文模型涉及到的指代符号、参数及决策变量如下表 1。

Table 1. Description table of relevant parameters and variables of the model
表 1. 模型相关参数及变量说明表

| 表达形式 | 含义 |
|--------------------|--|
| T | 研究时段, $t \in [1, T]$ |
| S | 车站站点集合, $s, O, D \in [1, S]$ |
| O | 客、货运需求的起始站点 |
| D | 客、货运需求的目标站点 |
| G_{OD} | 由 O 站至 D 站的需求向量集合, $(O, D) \in G_{OD}$ |
| M | 一个足够大的正数 |
| K | 货单集合, $k \in [1, K]$ |
| t_k | 货单 k 运达站点时间 |
| O_k | 货单 k 的起始站点 |
| D_k | 货单 k 的目标站点 |
| d^{k, O_k, D_k} | 货单 k 产生的 O 站至 D 站的货运需求 |
| $rt^{O, D}$ | 列车进入 O 站与 D 站的时间差 |
| t_{open}^s | 列车在 s 站停留的时间 |
| t_{load} | 列车装卸 1 单位货物所需的时间 |
| $L^{O, D}$ | 列车由 O 站至 D 站的运输距离 |
| Cap | 列车每车厢额定载客容量 |
| f_0 | 列车编组数量 |
| f_1 | 供货使用的车厢数量 |
| gap | 列车运行的固定发车间隔时间 |
| gap_{\min} | 列车最小运行间隔时间, 为 ε 的整数倍 |
| gap_{\max} | 列车最大运行间隔时间, 为 ε 的整数倍 |
| C_{inv} | 每单位货物单位时间内存储在车站的仓储成本 |
| C_{load} | 每单位货物搬入搬出列车所需装卸成本 |
| C_h | 每开行 1 辆列车所需的运营成本 |
| p | 每单位货物收取的单位距离运价 |
| θ | 货物容量转换系数, 表示每单位箱货物与乘客的数量比例 |
| $n_i^{O, D}$ | $t + rt^{1, O}$ 时刻产生的 O 站至 D 站的乘客需求 |
| $d_i^{O, D}$ | $t + rt^{1, O}$ 时刻产生的 O 站至 D 站的货物需求 |
| x_t | 决策变量, 若在 t 时刻有列车发出则为 1, 否则为 0 |
| $d_{t, in}^{O, D}$ | 决策变量, t 时刻发出的列车满足的由 O 站至 D 站的货运量 |
| $n_{t, in}^{O, D}$ | 决策变量, t 时刻发出的列车满足的由 O 站至 D 站的客运量 |

3.3. 模型构建

考虑一条轨道交通线路的上行方向, 如图 3 所示, 在图示时间域内, t 时刻有一辆列车从站 1 发出, 称此列车为列车 t , 可知在 $t + rt^{1, O}$ 时刻进入 O 站的乘客与货物需求恰好可以被列车 t 运输, 为建模与计

算方便, 本文称 $t+rt^{1,O}$ 时刻进入 O 站的乘客与货物需求为 $n_t^{O,D}$ 、 $d_t^{O,D}$ 。此外, 由于货单数量有限, 与乘客需求不同, 货单只在某些特定时刻产生货物 OD 运输需求, 为建模与求解方便, 如式(1)(2), 将货单的货运量 d^{k,O_k,D_k} 匹配到 $d_t^{O,D}$ 中。

$$d_{t_k}^{O_k,D_k} = d^{k,O_k,D_k}, \quad \forall k, O, D \tag{1}$$

$$d_{t_k}^{O_k,D_k} = d^{k,O_k,D_k}, \quad \forall k, O, D \tag{2}$$

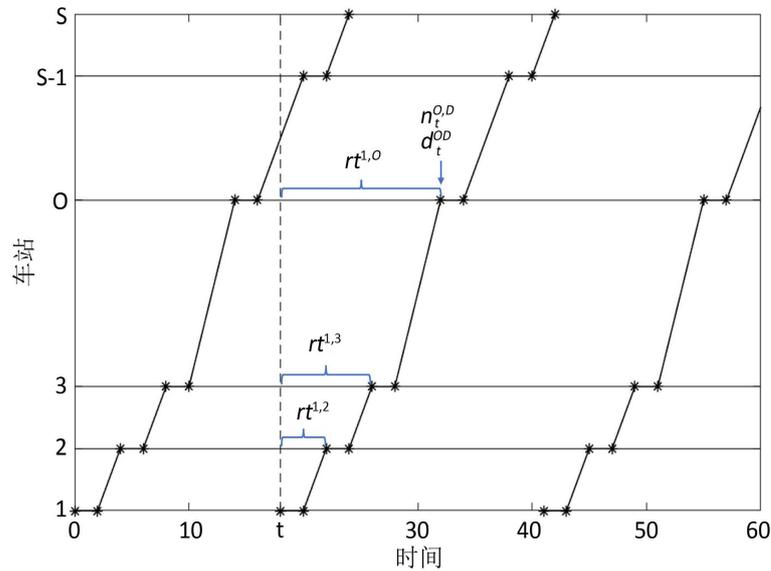


Figure 3. Description of train operation time and decision variables
图 3. 列车运行时间与决策变量说明

3.4. 固定发车间隔的混合运输时刻表优化模型

在城市轨道交通运营过程中, 列车在非高峰时段的运行间隔时间往往是固定的, 本节探讨固定发车间隔下的客货混合运输的发车情况。

$$\begin{aligned} \min Z = & C_{load} \sum_{t=1}^T \sum_{O=1}^{S-1} \sum_{D=O+1}^S d_{t,in}^{O,D} + C_h \sum_{t=1}^T x_t \\ & + C_{inv} \left(\sum_{O=1}^{S-1} \sum_{D=O+1}^S \sum_{t=1}^T (t+rt^{1,O}) d_{t,in}^{O,D} + \sum_{O=1}^{S-1} \sum_{D=O+1}^S \sum_{t=1}^T (T-t) \left(d_t^{O,D} - \sum_{t=1}^T d_{t,in}^{O,D} \right) \right) \\ & - p \sum_{t=1}^T \sum_{O=1}^{S-1} \sum_{D=O+1}^S L^{O,D} d_{t,in}^{O,D} \end{aligned} \tag{3}$$

式(1)的目标是使整个客货混合运输系统的成本最低。第一项是货物装卸成本, 第二项是列车运营成本, 第三项是货物在站点的仓储成本, 第四项是货物运输产生的收入。

约束条件:

$$t_{load} \left(\sum_{O=1}^s d_{t,in}^{O,s} + \sum_{D=s}^S d_{t,in}^{s,D} \right) \leq t_{open}^s, \quad \forall t, s \tag{4}$$

$$\sum_{i=t}^{t-gap+1} x_i = 1, \quad \forall t \in [gap, T] \tag{5}$$

$$\sum_{O=1}^s \sum_{D=s+1}^S n_{t,in}^{O,D} \leq Cap(f_0 - f_1), \forall t, s \quad (6)$$

$$\sum_{O=1}^s \sum_{D=s+1}^S \theta d_{t,in}^{O,D} \leq Cap \cdot f_1, \forall t, s \quad (7)$$

$$M \cdot (1 - x_t) + \sum_1^t d_{t,in}^{O,D} \geq \sum_1^t d_t^{O,D}, \forall t, (O, D) \quad (8)$$

$$\sum_1^t d_{t,in}^{O,D} \leq \sum_0^t d_t^{O,D}, \forall t, (O, D) \quad (9)$$

$$M \cdot (1 - x_t) + \sum_1^t n_{t,in}^{O,D} \geq \sum_1^t n_t^{O,D}, \forall t, (O, D) \quad (10)$$

$$\sum_1^t n_{t,in}^{O,D} \leq \sum_0^t n_t^{O,D}, \forall t, (O, D) \quad (11)$$

$$-d_t^{O,D} x_t + d_{t,in}^{O,D} \leq 0, \forall t, (O, D) \quad (12)$$

$$-M x_t + n_{t,in}^{O,D} \leq 0, \forall t, (O, D) \quad (13)$$

$$d_{t,in}^{O,D}, n_{t,in}^{O,D} \geq 0, \forall t, (O, D) \quad (14)$$

$$t, O, D \in Z, 0 \leq t \leq T, 1 \leq O \leq S-1, 2 \leq D \leq S \quad (15)$$

式(4)表示装卸作业时间约束, 表示列车在每站的装货、卸货行为要在列车停站时间内完成; 式(5)表示列车固定发车时间间隔约束; 式(6)、(7)为列车客、货运载容量约束; 式(8)、(9)、(10)、(11)为货物与乘客需求约束, 保证需求 $d_t^{O,D}, n_t^{O,D}$ 由列车 t 及后续列车完成; 式(12)、(13)、(14)为决策变量约束, 满足当 $x_t = 1$ 时, $d_t^{O,D}, n_{t,in}^{O,D} \geq 0$, 当 $x_t = 0$ 时, $d_t^{O,D}, n_{t,in}^{O,D} = 0$; 式(15)为其余参数取值范围。

3.5. 灵活发车间隔的混合运输时刻表优化模型

由于到达车站的 OD 客流存在不确定性, 因此以固定间隔发车会造成客流与货流的不均衡, 不一定能够满足客流与货物需求, 因此本节探讨灵活发车间隔下的客货混合运输的发车情况。

灵活发车间隔下, 将式 4 修正为

$$\sum_{i=t}^{t-gap_{min}+1} x_i \leq 1, \forall t \in [gap_{min}, T] \quad (16)$$

$$\sum_{i=t}^{t-gap_{max}+1} x_i \geq 1, \forall t \in [gap_{max}, T] \quad (17)$$

表示相邻列车的发车时间间隔在最小运行间隔和最大运行间隔之间。由此得灵活发车模式下的发车时刻表优化模型为:

目标函数: 式(3)

约束条件: 式(4), 式(6)~式(17)

4. 算例分析

为了测试上述模型设计的有效性, 本节设计了一个具体的算例, 并使用 Matlab2018a 软件调用 CPLEX12.6 求解器对其进行求解。实验在配置 AMD Ryzen 7 4800 处理器和 16 GB 机带 RAM 的笔记本电脑上进行。本采用上海地铁 13 号线一期工程金运路至长寿路段为研究对象[14], 数据来自 2015 年 4 月 1 日至 4 月 30 日上海轨道交通刷卡 AFC 数据集, 该线路共 10 个站点, 如图 4 所示。

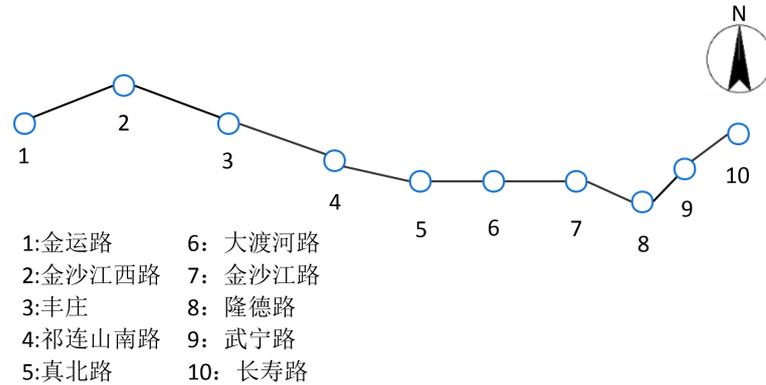
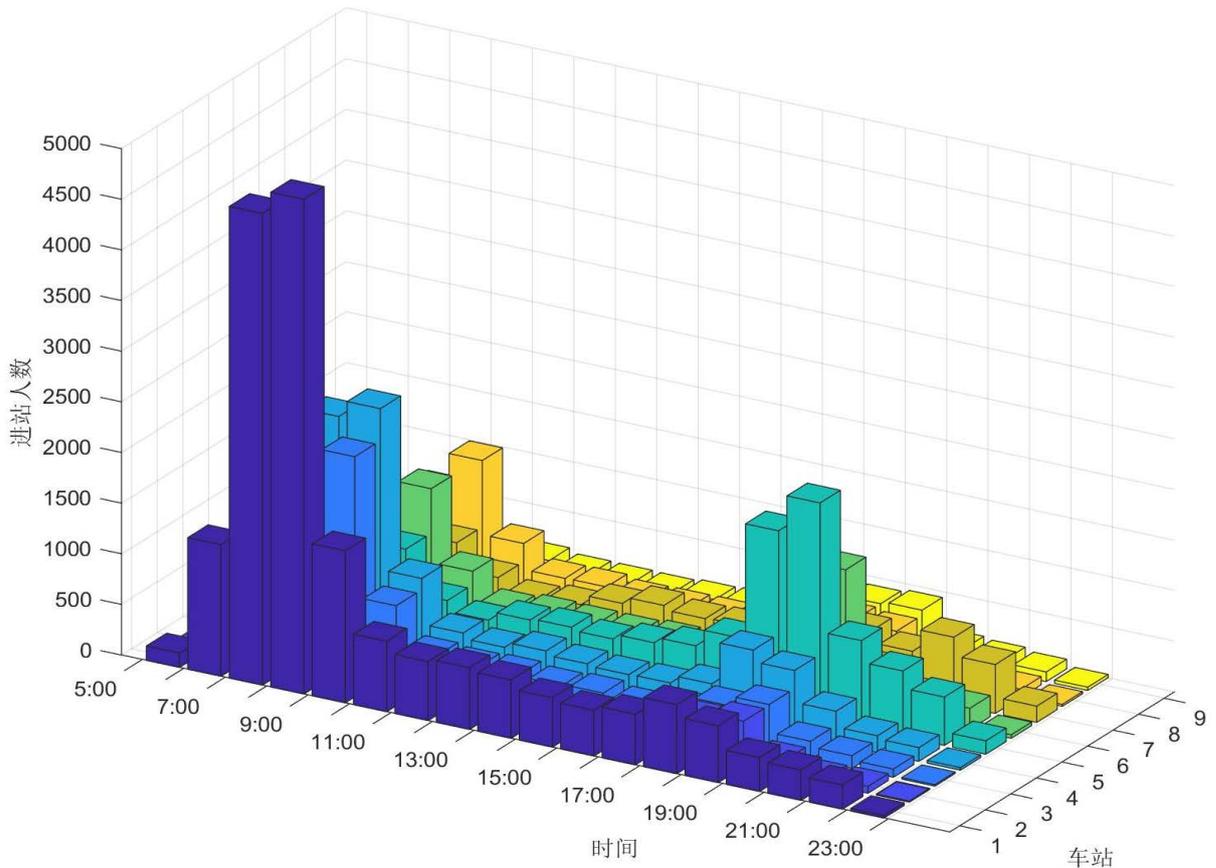


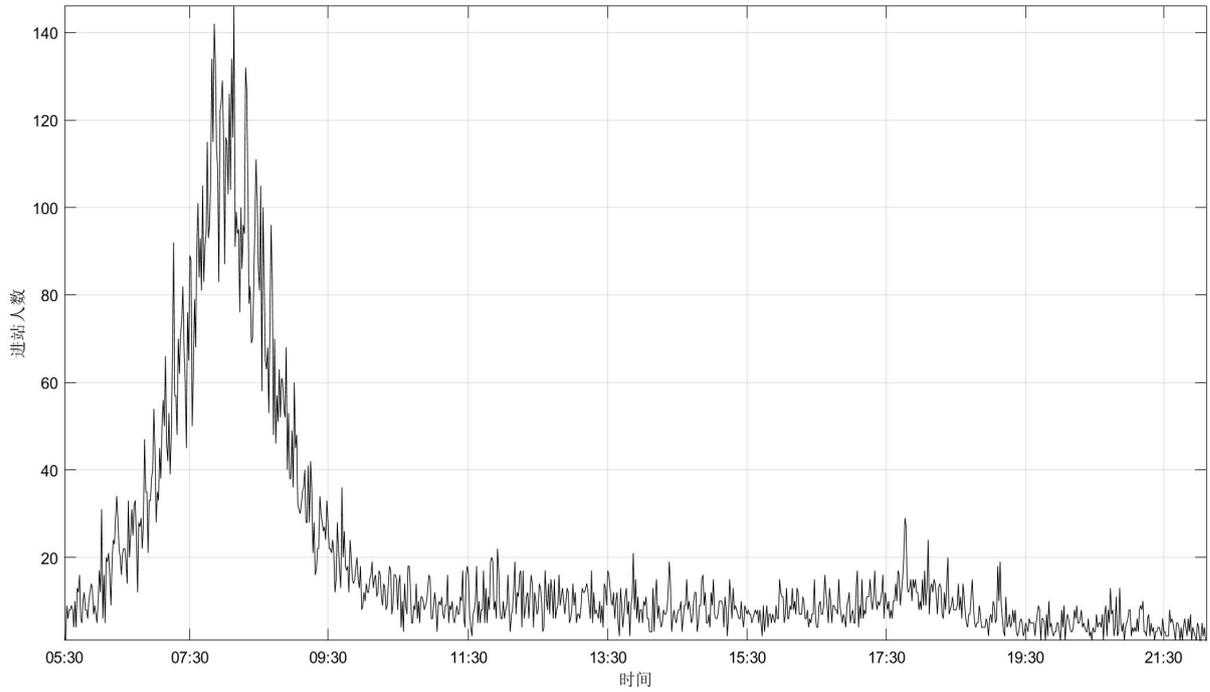
Figure 4. Schematic diagram of Shanghai Metro Line 13 Phase 1
 图4. 上海地铁13号线一期示意图

4.1. 算例概况与参数设置

在上海地铁13号线一期线路算例中, 地铁里程共15公里, 对该线路客流数据进行统计分析, 随机收集工作日十天上行方向的进站客流平均值, 分别以1h和1min为单位得到进站客流在时间上的分布情况, 如图5所示, 始发站金运路站的进站客流具有突出的早高峰与平峰特征, 祁连山南路站、真北路站的进站客流具有明显的早、晚高峰与平峰特征, 该地铁线路客流谷峰明显, 具有明显的通勤特征。



(a) 13号线小时进站客流变化情况



(b) 站 1(金运站)分钟进站客流变化情况

Figure 5. Inbound passenger flow in the upward direction of Line 13
图 5. 13 号线上行方向入站客流情况

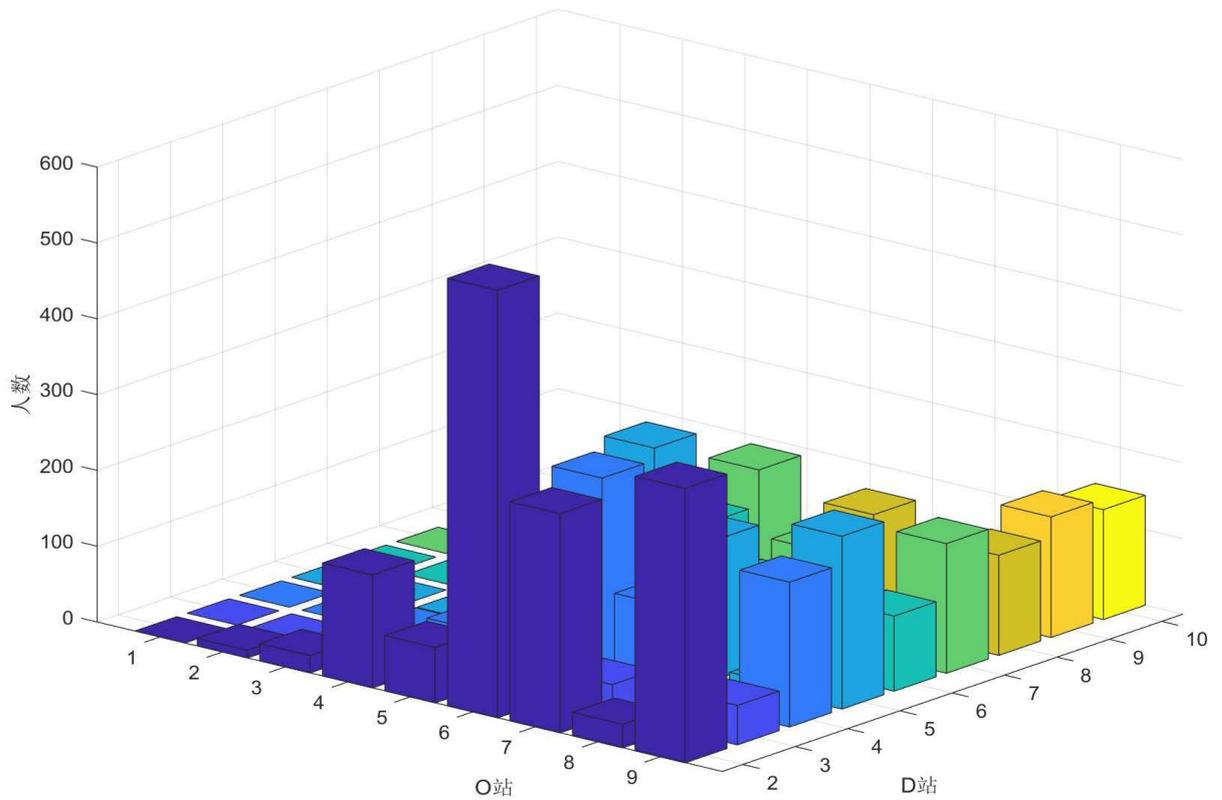


Figure 6. Hourly OD passenger flow distribution
图 6. 小时 OD 客流分布情况

13 号线在非高峰时期的列车运营间隔为 8~10 分钟, 本文考虑列车运行时段为早高峰结束后的 10:00 至 11:00, 为非高峰时间的 1 h, 该线路乘客数据取自票务系统内的 AFC 历史刷卡数据, 在考虑的时间段内包含了 52 个 OD 的乘客需求, 合计 4675 位乘客, 时段内不同 OD 客流需求的时空分布如图 6 所示。

该线总计运行时长约 25 min, 地铁列车在每一站的停站时间和至相邻车站的运行时间如表 2 所示。

Table 2. Stop time and operation time of metro line 13

表 2. 地铁 13 号线列车停站时间与运行时间

| 站 | 停站时间(秒) | 区间 | 运行时间(秒) |
|-------|---------|-------|---------|
| 金运路 | 40 | 金沙江西路 | 80 |
| 金沙江西路 | 30 | 丰庄 | 210 |
| 丰庄 | 30 | 祁连山南路 | 150 |
| 祁连山南路 | 30 | 真北路 | 90 |
| 真北路 | 30 | 大渡河路 | 150 |
| 大渡河路 | 30 | 金沙江路 | 210 |
| 金沙江路 | 60 | 隆德路 | 60 |
| 隆德路 | 60 | 武宁路 | 120 |
| 武宁路 | 30 | 长寿路 | 90 |
| 长寿路 | 60 | - | - |

地铁线路大多为 6 编组列车, 额定容量计每节 200 人, 则最大容量为 1200 人, 设其中 1 节车厢专门用于货物运输。为便于分析, 一个货运车厢的广义操作成本设置为 500 元, 轨道交通公司向货运需求方收取每单位箱每单位距离 50 元; 每单位箱每分钟产生的库存成本为 6 元, 其余具体的参数设置如表 3 所示。

Table 3. Example parameter setting

表 3. 算例参数设置

| 参数 | 值 |
|--------------|--------------------|
| C_{load} | 50/单位箱 |
| p | 50/单位箱·km |
| C_h | 800/货运列车 |
| C_{inv} | 6/单位箱·min |
| S | 10 |
| f_0 | 6 |
| f_1 | 1 |
| Cap | 200 |
| L | 共 15 km |
| T | 60 |
| t_{load} | 2 s/单位箱 |
| t_{open}^s | [30~60 s] |
| gap | [6~10] |
| gap_{min} | 5 min |
| gap_{max} | 10 min |
| K | 货单选取 10 个 OD, 数量随机 |
| θ | 6 |

由于现实中本线路没有开展货运业务, 因此本文设计了分时货单, 为保证货单在此时段内可以完成发货, 将发货站点设置在站 1~站 5 之间, 将收货站点设置在站 4~站 10 之间, 货单进站时间随机分布在 $[0,40]$ 之间。为模拟货单的分散与集中情况, 为发货站点 1 设置 4 组货单需求, 其余发货站点的货单需求不超过 2 组, 货单共 10 组 OD 货运需求, 总计 391 单位箱货物, 货单具体情况如表 4 所示。

Table 4. Goods order demand table
表 4. 货单需求表

| 货单 | 进站时间 | O 站 | D 站 | 需求量 |
|----|------|-----|-----|-----|
| 1 | 3 | 1 | 6 | 40 |
| 2 | 6 | 2 | 5 | 24 |
| 3 | 14 | 3 | 7 | 28 |
| 4 | 16 | 4 | 8 | 26 |
| 5 | 20 | 1 | 10 | 55 |
| 6 | 24 | 1 | 7 | 48 |
| 7 | 30 | 2 | 8 | 28 |
| 8 | 30 | 1 | 4 | 46 |
| 9 | 33 | 3 | 9 | 44 |
| 10 | 37 | 5 | 10 | 52 |

4.2. 优化结果分析

在上述参数设置下, 可以得到固定发车间隔下的发车情况和货单完成情况, 如表 5 所示。在原发车间隔 10 min 的情况和本文的货单需求情况下, 地铁运营方在 60 min 内可完成 252.5 单位货物运输需求, 收益为 37,853.8 元。当列车以固定时间间隔运行时, 改变运行的间隔时间, 在给定时段内会多发列车, 本文讨论了在最小运行间隔 5 min 与实际运行间隔 10 min 之间的运营情况分析, 可知在列车间隔时间 $gap \geq 6$ 时, 无法完成全部货物运输需求, 系统总收益随运行间隔的减小而增大, 列车随着运行间隔的减小能够运输更多的货物, 在接受订单后库存成本变动大的原因是本文设置未运输的货物会一直堆放直至时段结束, 产生的库存成本较大, 因此库存成本会随缺运量的增加而大幅提升。

Table 5. Completion of departure and goods order under fixed departure interval
表 5. 固定发车间隔下的发车与货单完成情况

| 发车间隔 | 发车数量 | 系统总收益 | 货运量/总需求 | 未完成货单 | 缺运量 |
|------|------|-------------|-----------|-------|--------|
| 10 | 6 | 37,853.8333 | 252.5/391 | 1 | 25 |
| | | | | 2 | 16 |
| | | | | 3 | 21.833 |
| | | | | 7 | 26.167 |
| | | | | 8 | 48 |
| | | | | 10 | 1.5 |

Continued

| | | | | | |
|---|----|-------------|-------------|----|--------|
| | | | | 1 | 10 |
| | | | | 2 | 1 |
| 9 | 7 | 54,498.8333 | 282.5/391 | 3 | 21.833 |
| | | | | 7 | 26.167 |
| | | | | 8 | 48 |
| | | | | 10 | 1.5 |
| 8 | 8 | 72,181.3333 | 316.3.5/391 | 1 | 10 |
| | | | | 3 | 21.333 |
| | | | | 8 | 41.333 |
| | | | | 10 | 2 |
| 7 | 9 | 86,399.3333 | 349/391 | 8 | 40.667 |
| | | | | 10 | 1.333 |
| 6 | 10 | 107,386 | 382/391 | 8 | 7 |
| | | | | 10 | 2 |
| 5 | 12 | 115,438 | 391/391 | - | - |

对于发车间隔 gap 为 5 和 6 分钟的发车情况进行分析, 得到的列车运行时刻表如图 7、图 8 所示, 图中货单的黑色实线表示货单到达发货站点的时间, 蓝色实线表示列车装载货物, 图中给出列车完成货单需求的情况。在 $gap = 6$ 情况下, 共发出 10 辆列车, 所有列车都参与了货物运输, 货单需求没有全部

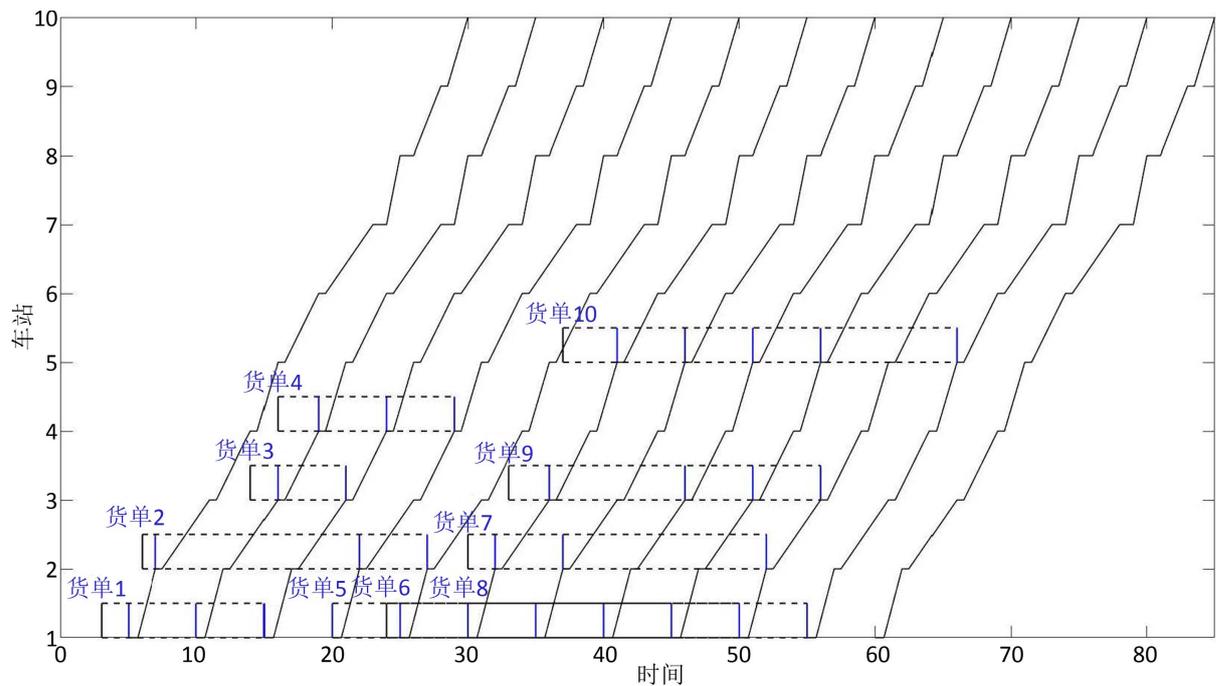


Figure 7. Train departure and cargo list with departure interval of 5
图 7. 发车间隔为 5 时的列车发车与货单情况

满足, 受列车运载能力和停站时间影响, 货单 8 与货单 10 产生了缺运现象, 以货单 9 为例, 第 6、8、9、10 辆列车完成了货单 9 的运输需求, 第 7 辆列车受容量限制, 在到达车站 3 时已经满载, 无法运输货单 9 的货物, 货单 2、7、9 均产生了类似的跨列车运输现象, 使货单的库存成本变大。产生跨列运输现象的原因是列车进站前货物容量已经满载或后续车站货单的运输收益更高使列车优先完成收益更高的货单。在 $gap = 5$ 情况下, 共发出 12 辆列车, 货单需求被全部满足, 第 12 辆列车没有参与货物运输, 货单 2、7、9、10 产生了跨列车运输现象, 但由于发车间隔的缩短, 货物的等待时间减小使库存成本减少, 货运量的增加使运输收益增加, 轨道交通运营方的总收益增大。

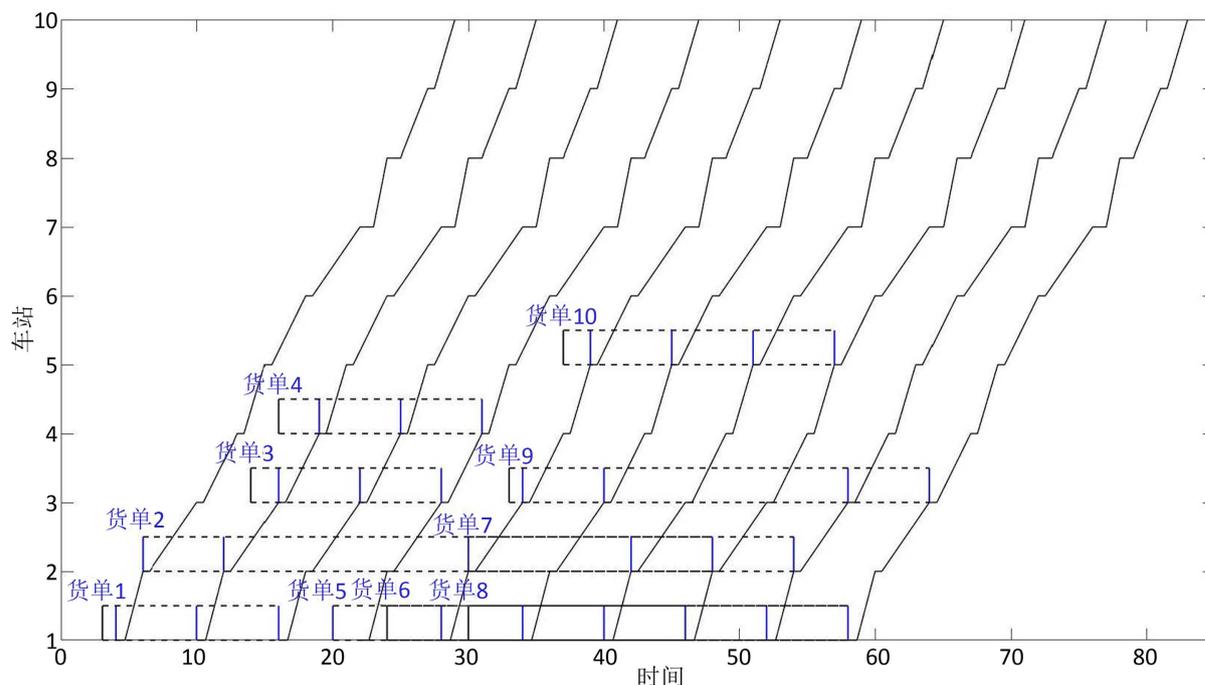


Figure 8. Train departure and cargo list with departure interval of 6

图 8. 发车间隔为 6 时的列车发车与货单情况

在上述参数设置下, 可以得到灵活发车间隔下的发车情况和货单完成情况, 如表 6 所示。在灵活发车间隔情况下, 列车间的发车间隔不定, 共发出 11 辆列车, 系统总收益为 116,818 元, 相比固定发车间隔 5 min 时的最优情况少开行 1 辆列车, 增加了 1380 元的收益, 发车成本减少 800 元, 库存成本减少了 580 元。货运车辆当货运车厢增开到 4 节时, 剩余 2 节客运车厢已无法满足原有的客流需求, 因此出现无解情况。轨道交通运营方可以根据实际情况调整列车的发车间隔与开行数量, 在本文的客货需求与成本等参数条件下, 固定发车间隔的最优收益与灵活发车间隔的最优收益差距不大。

Table 6. Departure and goods order completion under flexible departure interval

表 6. 灵活发车间隔下的发车与货单完成情况

| F_1 | 发车数量 | 系统总收益 | 货运量/总需求 | 未完成货单 | 缺运量 | 装载成本 | 运输收益 | 库存成本 | 发车成本 |
|-------|-------------|---------|---------|-------|-----|--------|----------|--------|------|
| 1 | 11 | 116,818 | 391/391 | - | - | 19,550 | -169,650 | 24,482 | 8800 |
| 2 | 11 | 121,968 | 391/391 | - | - | 19,550 | -169,650 | 19,332 | 8800 |
| 3 | 同 $f_1 = 2$ | | | | | | | | |
| 4 | 无解 | | | | | | | | |

对于灵活发车间隔的发车情况进行分析, 灵活间隔下最优的发车时刻为: 4、9、14、20、26、31、36、41、46、51、56, 其发车间隔均为 5 min 或 6 min。在灵活发车间隔情况下, 货单仍会产生跨列车运输现象, 因此改变货运车厢数以扩大列车货物容量, 得到的列车运行时刻表如图 9、图 10 所示。当货运

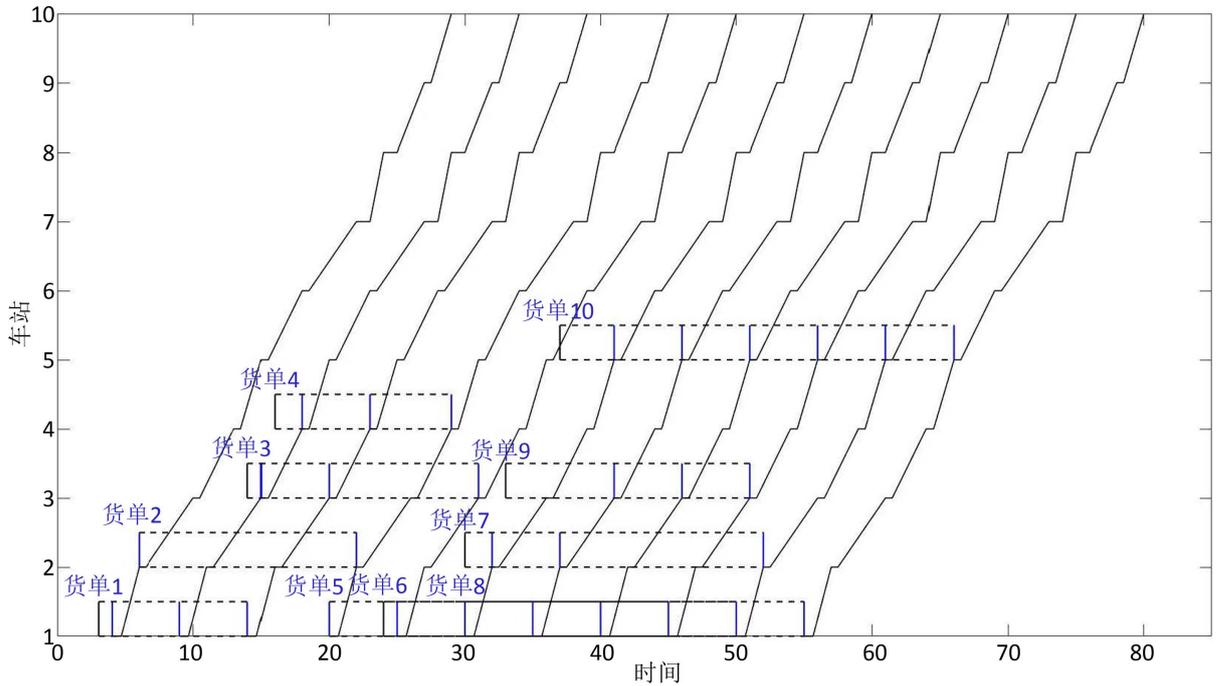


Figure 9. Condition of train departure and cargo list with flexible departure interval when $f_1=1$
 图 9. $f_1=1$ 时灵活发车间隔的列车发车与货单情况

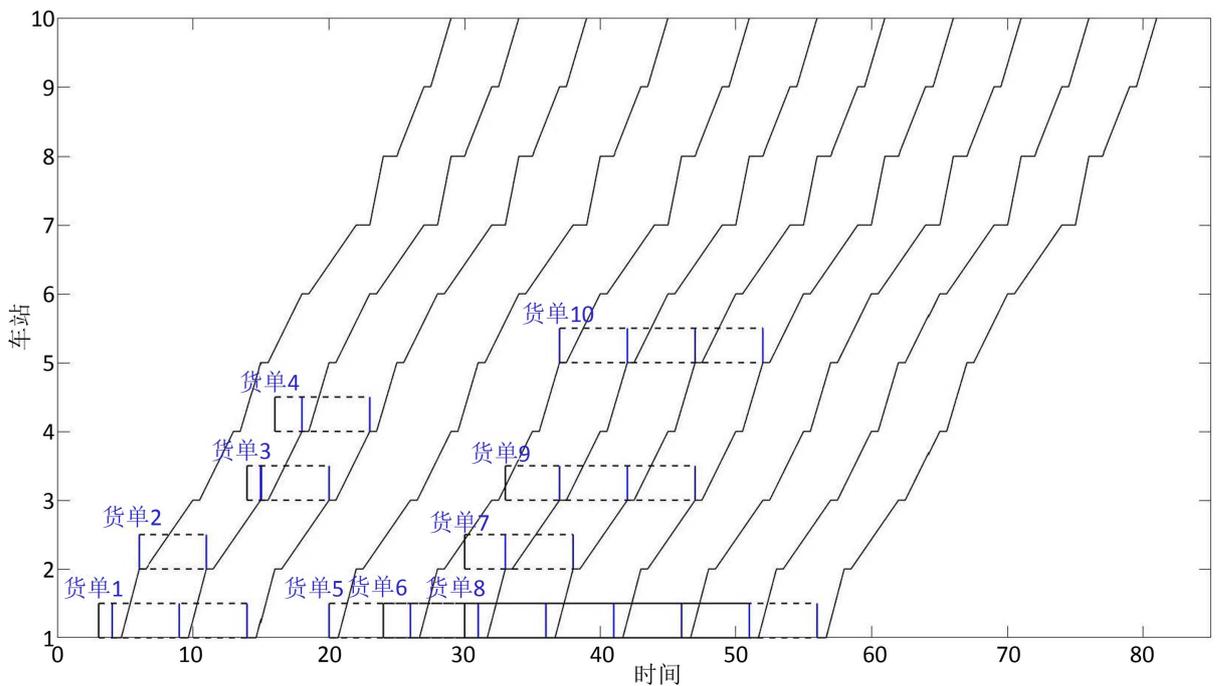


Figure 10. Condition of train departure and cargo list with flexible departure interval when $f_1=2$
 图 10. $f_1=2$ 时灵活发车间隔的列车发车与货单情况

车厢由 1 节扩大到 2 节时, 所有货单均未产生跨列车运输现象, 库存成本降低了 21%, 由 24,482 元降低到 199,332 元, 系统总收益扩大到 121,968 元。当货运车厢扩大到 4 节时, 优化模型无解, 原因是此时客运车厢减小到 2 节, 无法完成原有的客运需求。综合以上情况, 在本文的客货需求与参数设置情况下, 灵活发车间隔模式且货运车厢数为 2 时, 轨道运营方的总收益最大, 可以在完成原有乘客运输需求的同时完成给定的货单需求, 可以防止货物的跨列车运输现象, 为轨道交通的客货混合运输提供了新的思路与方法。

4.3. 货运灵敏度分析

为了对比固定发车间隔模式与灵活发车间隔模式在不同货物需求情况下的情况, 本节将分 2 组实验进行分析, 每组实验设置 10 个货运 OD, 设计 4 组货单需求如表 7 所示, 探讨货运量、货单 OD 聚集程度和客货车厢分配情况对整个系统的影响。第 1 组实验货运量服从 $N(20,64)$ 的正态分布, 表示货运量少少的情况; 第 2 组实验随机选取货运量服从 $N(40,64)$ 的正态分布, 表示货运量较多的情况; 两组实验将比较分析固定发车间隔与灵活发车间隔, 货运车厢不同情况的优化方案利润, 分析不同列车发车方案与货运需求和供给的关系。

Table 7. Goods order OD demand table

表 7. 货单 OD 需求表

| 货单序号 | 进站时间 | 货单集合 1 | | 货单集合 2 | | 货单集合 3 | | 货单集合 4 | | 货运量 | |
|------|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|------|
| | | <i>O</i> | <i>D</i> | <i>O</i> | <i>D</i> | <i>O</i> | <i>D</i> | <i>O</i> | <i>D</i> | 实验 1 | 实验 2 |
| 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 9 | 1 | 9 | 20 | 37 |
| 2 | 7 | 3 | 6 | 3 | 6 | 3 | 9 | 3 | 9 | 18 | 52 |
| 3 | 18 | 6 | 9 | 2 | 9 | 6 | 9 | 2 | 9 | 13 | 42 |
| 4 | 22 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 6 | 2 | 6 | 18 | 36 |
| 5 | 30 | 8 | 10 | 2 | 10 | 8 | 10 | 2 | 10 | 30 | 27 |
| 6 | 35 | 4 | 7 | 4 | 7 | 4 | 7 | 4 | 7 | 16 | 46 |
| 7 | 36 | 1 | 6 | 1 | 6 | 1 | 9 | 1 | 9 | 14 | 44 |
| 8 | 40 | 2 | 5 | 2 | 5 | 2 | 5 | 2 | 5 | 37 | 49 |
| 9 | 42 | 7 | 8 | 2 | 8 | 7 | 8 | 2 | 8 | 13 | 40 |
| 10 | 45 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 9 | 5 | 9 | 13 | 30 |

为了对货单 OD 的聚集程度进行模拟, 对货单需求表做如下设置。货单集合 1 的 OD 站点较均匀的分布在站点中, 模拟货单 *O* 点与 *D* 点均较为分散的情况; 货单 2 的 *O* 点集中分布在前 5 个站点, *D* 点较均匀分布, 模拟货单 *O* 点聚集 *D* 点分散的情况; 货单 3 的 *O* 较均匀分布, *D* 点集中分布在后 5 个站点, 模拟货单 *O* 点分散 *D* 点聚集的情况; 货单 4 的 *O* 点集中分布在前 5 个站点, *D* 点集中分布在后 5 个站点, 模拟货单 *O* 点与 *D* 点均较为聚集的情况。

分别对不同情况求最优解, 所有情况均能在 2min 内获取最优解, 最终收益状况如图 11、图 12 所示。

在图 11 中, 货单货运量较小, 所有情况均未产生货物缺货现象, 仅 1 节货运车厢可满足所有的货物需求。当货运车厢增加为 2 节时, 总运营收益未发生变化, 说明此时制约总收益的不是货运容量。随着货单 OD 的变化, 总运营收益随运输里程的增加而增加。对比图 11 与图 12, 货运量接近翻倍情况下, 货单集合 1 的运营收益也几乎增加了 1 倍。但由于货单集合 2、3、4 均有 OD 站点的聚集情况, 产生的不

同程度的货物缺运现象, 可以明显的看出, 相同货运量水平情况下, 货物在发货站点聚集更容易造成货物缺运现象, 且货单 2 中所有缺运情况均相同, 货运容量扩大仍不能改善缺运现象, 原因是在货运量较大且发货聚集在同一站点情况下, 制约轨道交通货物运输能力的是停站时间, 有限的停站时间不能满足聚集的货物需求。在货单集合 3 高货运量的固定发车间隔模式下, 增加货运车厢使货物缺运量由 30 下降到 19, 说明此时货运容量与停站时间都对货物运输能力产生了影响。

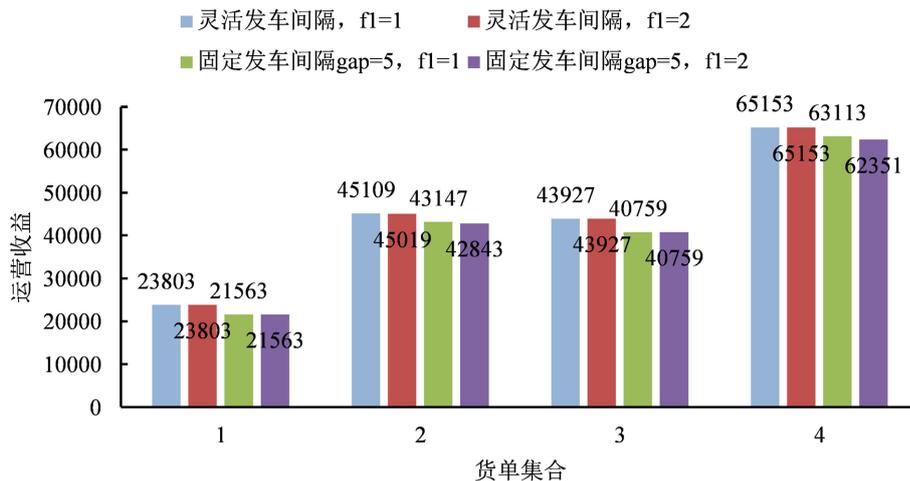


Figure 11. Revenue comparison under different cargo orders (freight volume follows $N(20,64)$ distribution)

图 11. 不同货单情况下的收益对比(货运量服从 $N(20,64)$ 分布)

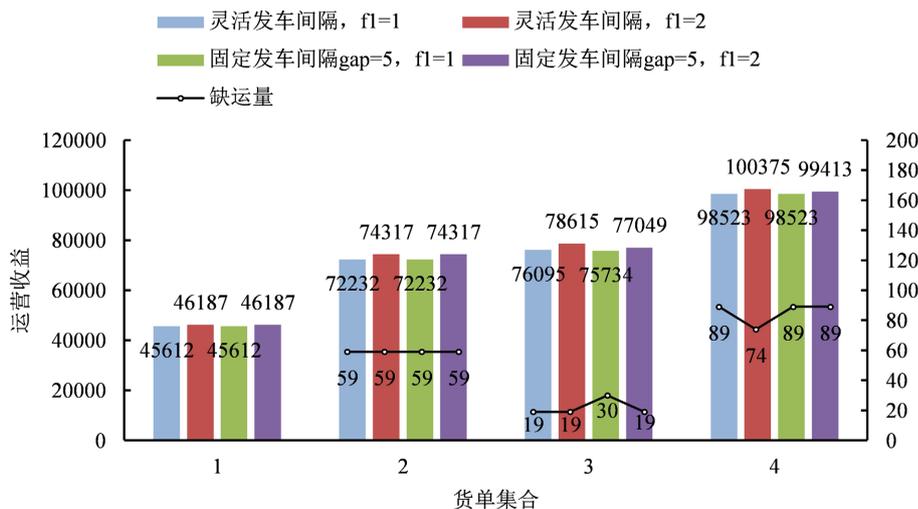


Figure 12. Revenue comparison under different cargo orders (freight volume follows $N(40,64)$ distribution)

图 12. 不同货单情况下的收益对比(货运量服从 $N(40,64)$ 分布)

通过以上的分析可以看出, 在低运量货单情况下, 列车的运输能力足够富余, 不同聚集程度的货运 OD 需求均可以被满足。而在高运力货单情况下, 货运 O 点聚集程度高的货单集合更容易产生缺运现象, 改变货运容量对改善运营情况的收益不显著, 列车的停站时间是制约运输能力的关键因素。由于本节以最小发车间隔 $gap = 5 \text{ min}$ 为固定发车间隔, 灵活发车间隔模式虽具有更高的总运营收益, 但与固定发车间隔模式的发车数与货物库存时间相差不大, 两种模式的运营收益差距较小, 但对比不同聚集程度的货

单集合, 灵活发车间隔模式的发车数量少, 产生的缺运量更小。

5. 结论

本文针对固定发车间隔与灵活发车间隔两种列车运行条件, 探讨了城市轨道交通客货混合运输的可行性方案, 构建了混合整数线性规划模型。以上海地铁 13 号线一期线路为例, 使用 Matlab 语言调用 Cplex 求解器进行了数值实验。实验结果表明: 1) 本文提出的方法能够实现轨道交通线路对客货混合运输的需求匹配, 在满足原有乘客需求的基础上最大限度完成给定货单的货物需求; 2) 通过固定发车间隔与灵活发车间隔两种发车策略, 确定不同条件下列车开行的数量与发车时间, 实现货单与列车的匹配; 3) 对客货运输中的货运车厢数进行控制, 改变列车的客、货运容量, 尽可能减少跨列车运输现象, 可以得到系统总成本最低的最优解, 为轨道交通客货混合运输提供了新方法。

当前, 国内外对于城市轨道交通客货协同优化方面的研究仍处于初步阶段, 还有许多相关问题需要进一步研究。本文仅仅着眼于地铁客货运输线路上综合成本最小化, 对于不同部分成本的度量仍有不足之处: 本文的乘客需求是由数据集给定的, 而实际的乘客需求是动态变化的; 本文只考虑了单向列车线路, 实际列车运行是下行线路与上行线路并存的, 改变上行线路的列车数量与发车时间, 对应的下行线路也会发生变化; 在本文研究过程中发现, 停站时间对车站装载货物的限制十分明显, 对停站时间进行优化是未来研究的一个新方向; 另外, 本文假设的运输条件较为苛刻, 整个运输系统的鲁棒性也是值得进一步研究的问题。

基金项目

国家自然科学基金项目(72021002)。

参考文献

- [1] 钱七虎. 科学利用城市地下空间, 建设和谐宜居、美丽城市[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(1): 1-7.
- [2] 中国科协发布 12 个领域的 60 个重大科学问题和工程技术难题[J]. 铁道学报, 2018, 40(12): 92+100+114+129.
- [3] 忻剑鸣. 利用城市轨道交通发展现代物流的设想及探讨[J]. 地下工程与隧道, 2009(2): 42-43.
- [4] 杨立春. 重庆利用轨道交通开展城市配送的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆工商大学, 2011.
- [5] 谭寅亮, 孙有望. 利用轨道交通客流低谷实施物流快运的探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(6): 5-8.
- [6] 乔俊杰, 姜天羿, 谷松原, 等. 利用客运轨道交通开展快运物流的设想[J]. 运输与物流, 2012(20): 102-104.
- [7] Savelsbergh, M. and Van Woensel, T. (2016) 50th Anniversary Invited Article—City Logistics: Challenges and Opportunities. *Transportation Science*, **50**, 579-590. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0675>
- [8] Cochrane, K., Saxe, S., Roorda, M. J., et al. (2017) Moving Freight on Public Transit: Best Practices, Challenges, and Opportunities. *International Journal of Sustainable Transportation*, **11**, 120-132. <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1197349>
- [9] Ozturk, O. and Patrick, J. (2018) An Optimization Model for Freight Transport Using Urban Rail Transit. *European Journal of Operational Research*, **267**, 1110-1121. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.12.010>
- [10] Li, Z., Shalaby, A., Roorda, M.J., et al. (2021) Urban Rail Service Design for Collaborative Passenger and Freight Transport. *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*, **147**, 102205. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102205>
- [11] 邸振, 肖妍星, 戚建国, 石俊刚. 考虑时间窗的地铁客货协同运输优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12), 1-14.
- [12] 戚建国, 周厚盛, 杨立兴, 周亚茹, 张春田. 灵活编组条件下轨道交通客货协同运输方案优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 197-205.
- [13] 李竹君, 柏赞, 陈垚. 客货共运下机场线列车运行计划与货运分配方案协同优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(5): 154-163. <https://doi.org/10.16097/j.cnki.1009-6744.2022.05.016>
- [14] 一宣. 上海轨道交通 13 号线概况[J]. 交通与运输, 2008, 24(5): 17.