

【交通物流 / Transportation Logistics】

考虑柔性服务时限的地铁列车运行计划与货物装载优化

侯伟¹, 王松², 石俊刚², 肖起强², 朱炜³

1) 南昌轨道交通集团有限公司运营分公司, 江西南昌 330038; 2) 华东交通大学交通运输工程学院, 江西南昌 330013;
3) 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804

摘要: 利用城市轨道交通非高峰期富裕运能开展货物运输, 对于缓解城市道路拥堵, 减少碳排放, 提高地铁运营效益具有重要作用. 针对客货共运问题, 考虑两种货运形式满足线路不同货物对于不同装载和送到时限的需求, 构建以客运列车车厢配置、货运专列开行成本以及货物延迟送到成本最小化为目标的线性整数优化模型, 对车厢配置、列车编组方案、列车运行计划及货物分配方案进行协同优化决策. 以中国南昌地铁2号线为例进行实证研究, 借助CPLEX求解器求解验证模型. 算例结果表明, 增加配送延迟惩罚能够有效缩短货物平均延迟时间; 增开货运专列能够弥补线路运力不足, 相较于固定编组货运专列开展货物运输, 灵活编组模式可在满足所有货物组运输需求的条件下仅增加26 min总延迟, 降低总运营成本998元. 该方法可以更好地适应货运需求变化, 使得高时效性的大批量货物得到及时运输的同时减少列车运能浪费, 为进一步提升城市地铁线路运营效益提供理论支持.

关键词: 城市轨道交通; 地铁货运; 灵活编组; 装载优化; 增开列车; 服务时限

中图分类号: U121

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.05576

Optimisation of metro train operation planning and cargo loading considering flexible service time limit

HOU Wei¹, WANG Song², SHI Jungang², XIAO Qiqiang², and ZHU Wei³

1) Operation Branch, Nanchang Rail Transit Group Co. Ltd., Nanchang 330038, Jiangxi Province, P. R. China

2) School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi Province, P. R. China

3) School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China

Abstract: The utilization of surplus capacity of urban rail transit during off-peak hours for cargo transport is crucial for alleviating urban road congestion, minimizing carbon emissions, and enhancing the efficiency of metro operations. A linear integer optimization model is developed with the objective of minimizing passenger train car allocation costs, dedicated freight train operation costs, and cargo delivery delay penalties. The model jointly optimizes car allocation, train formation schemes, train operation schedules, and freight assignment plans. In order to validate the effectiveness of the model, an empirical study is carried out on Nanchang Metro Line 2, and the model is solved with the help of the optimized commercial solver CPLEX. The results of the example show that increasing penalties for delayed delivery can effectively reduce the average cargo delay time; deploying additional special freight

Received: 2024-07-24; **Accepted:** 2025-01-03; **Online (CNKI):** 2025-08-20

Foundation: National Natural Science Foundation of China (72361012, 72071147); Scientific Research Project of Jiangxi Education Department (2024BAB204123); Research Project of Humanities and Social Sciences in Colleges and Universities of Jiangxi Province (GL21232); Nanchang Rail Transit Scientific Research Plan Project (2021HGKYC005)

Corresponding author: Associate professor SHI Jungang (jgshi@ecjtu.edu.cn)

Citation: HOU Wei, WANG Song, SHI Jungang, et al. Optimisation of metro train operation planning and cargo loading considering flexible service time limit [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(5): 576-585. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<http://journal.szu.edu.cn>



trains can compensate for insufficient transport capacity, compared with the fixed grouping of special freight trains for freight transport, the flexible grouping mode can meet the transport demands of all cargo groups with only a 26 min increase in the total delay, while reducing the total operating costs by 998 yuan. This method adapts better to variations in freight demand, enables the timely transport of large volumes of time-sensitive goods, and reduces wasted train capacity. It provides theoretical support for further improving the operational efficiency of urban metro lines.

Key words: urban rail transit; metro-based freight transportation; flexible train composition mode; loading optimization; added trains; service time limit

城市物流需求的爆发式增长使得货运车辆占用城市道路资源的比例扩大、道路通行能力降低,妥善解决城市货运交通难题已在世界各国达成共识.地铁作为城市交通系统的重要组成,其线路遍布城市各个角落,利用这一庞大的网络和设施进行货物运输,有望解决城市物流难题.

随着智慧交通运输技术的发展,运用地铁开展客货协同运输的理念不断深入,地铁参与货物运输组织的相关研究主要体现在:①网络选址布局及路径配送优化方面,DAMPIER等^[1]通过综合考虑城市地下物流系统建设的多重要素,提出结合地铁网络,共创城市地铁物流体系,以优化物流效率和城市空间利用;王晓平等^[2]构建地铁货运系统的组合优化模型并设计自适应免疫克隆算法进行求解,结果表明,北京通州区内有13个地铁站点适宜开展货运业务;李润国^[3]建立基于城市轨道交通的物流配送系统、配送模式及节点联合规划优化策略,并以成都为例进行论证;ZHOU等^[4]从车站之间的车辆路线和调度层面出发,构建基于地铁-货运卡车多式联运的配送距离最小化卡车路线优化模型,以协调客货需求;ZHAO等^[5]提出具有两级枢纽结构的3阶段优化模型来建立城市内部的地铁物流网络;米雪丽^[6]从整体上对基于地铁的城市物流网络化模式进行设计.②含时间窗物流运营管理方面,ZHAO等^[7]构建考虑地铁列车班次限制条件下,含时间窗约束的路径优化模型,以缩减货物整体运输时长;GHILAS等^[8]考虑到时间窗的限制,设计自适应大邻域搜索启发式算法,用于解决地铁与其他交通方式协作时的拣货配送问题;周芳汀等^[9]考虑列车时刻表和顾客服务时间窗,构建模型实现了对列车服务班次及末端配送路径的综合优化.③货运服务下的列车运行计划优化方面,BEHIRI等^[10-11]分别就利用客运冗余运力和增设货运专列两种货物运输方式,对列车时刻表进行优化;肖雅玲等^[12]进一步研究双方向列车运行计划优化问题,对

货运列车时刻表、列车编组、车底周转与货物运输方案进行决策;DI等^[13]研究客货共车运输模式下的车厢布置和流量控制协同优化问题,针对模型特点设计改进的Benders分解算法,并以北京地铁八通线为例验证所提方法的有效性;LI等^[14]研究客货混编和货运专列两种形式下列车的停站规划与时刻表协同优化问题,鉴于货运专列采用固定编组,其运能难以最大化利用;戚建国等^[15]考虑灵活编组模式下的列车时刻表和客货物运输方案协同优化,但并未考虑货物运到时效及车站装卸作业效率;李竹君等^[16]针对机场线硬时间窗货物需求,研究列车编组、停站方案和时刻表的协同优化问题;山湧泉等^[17]在列车车底周转时考虑可变编组作业,优化双方向城市轨道交通货运列车的运行计划.

考虑到城市轨道交通系统资源有限性以及货物配送复杂多样化需求,有必要进一步深入探讨高效、灵活的地下客货运协同运输组织方案,充分挖掘列车运输能力以满足多样化的货运需求,提升方案的可实施性.实际应用的不确定性使得严苛的时间窗难以更好地适应实际需求的变化,如交通拥堵或突发事件都可能导致货物运输和服务提供等无法在精确的时间点完成,进一步导致服务被拒绝.客户需求也可能在一定范围内变化,柔性时间窗允许一定程度的时间偏离,能够更好地适应这些动态环境变化,促进合作与协调,提高系统的灵活性和鲁棒性^[18].

鉴于此,本文考虑货物运输装卸作业能力及货物柔性时间窗运输需求,研究列车开行方案与货物运输方案协同优化问题,确定货运专列的编组计划、增开列车车次、客运列车的货物车厢配置数以及各服务列车的货物装载分配方案,为柔性时间窗口货流配置合适的运力资源,方便货物高效便捷运输.

1 问题描述

本研究采用客货共载和货运专列两种运输方式, 以满足地铁线路不同货物对于不同装载和送到时限的需求. 运输过程中为既有客运列车配置一定数量的货运车厢运输货物, 在既有运行图上开行的客运列车间插入少量灵活编组的货运专列来动态调整列车货运能力.

本研究主要考虑客运列车车厢配置数量、增开货运专列班次、货运专列编组类型以及货物在各列车班次中的分配情况. 图 1 为客运列车车厢配置与增开货运专列示意图. 其中, 在 0~19 时域内有 3 列客运列车和 2 列备选货运专列可用于安排货物运输, 客运列车最多可配置 2 节货运车厢, 货运专列可选择 3 节或 6 节编组. 假设货物送达每延迟 1 个单位时间惩罚 2 元/箱; 配置 1 节货运车厢可装载 100 箱货物, 费用为 1 600 元/节; 3 节编组货运专列的容量和费用分别为 300 箱/列和 4 900 元/列; 6 节编组货运专列的容量和费用分别为 600 箱/列和 9 900 元/列. 待运输货物需求为: 车站 A—E 货运量为 168 箱, 期望送达时刻不晚于第 20 个时刻, 装载时刻不得早于第 11 个时刻; 车站 A—D 货运量为 92 箱, 期望送到时刻不晚于第 10 个时刻, 装载时刻不得早于 0 时刻; 车站 B—E 货运量为 47 箱, 期望送到时刻不晚于第 11 个时刻, 装载时刻不得早于 0 时刻; 车站 C—E 货运量为 112 箱, 期望送到时刻不晚于第 9 个时刻, 装载时刻不得早于第 2 个时刻.

尝试制定 3 种运输方案以满足货物需求, 各方案的列车开行计划及货物装载计划如下:

1) 列车 5 配置 2 节货运车厢运载 A—E 间 168 箱货物; 列车 3 配置 2 节货运车厢运载 C—E 间 112 箱货物和 B—E 间 47 箱货物, 产生 6 个间隔延迟; 列车 1 配置 1 节货运车厢运载 A—D 间 92 箱货物.

2) 列车 5 配置 2 节货运车厢运载 A—E 间 168 箱货物; 列车 1 配置 2 节货运车厢运载 A—D 间 92 箱货物和 B—E 间 47 箱货物; 列车 3 配置 2 节货运车厢运载 C—E 间 112 箱货物, 产生 4 个间隔延迟.

3) 列车 5 配置 2 节货运车厢运载 A—E 间 168 箱货物; 增开货运专列列车 2 运载剩余 3 组所有货物, 产生 1 个间隔延迟.

3 种方案的客运列车车厢配置成本、增开

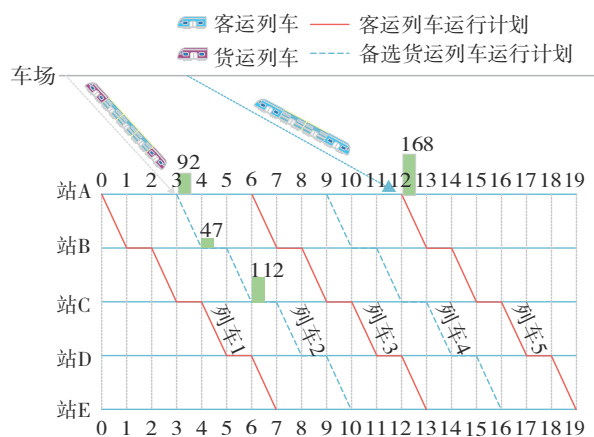


图 1 客运列车车厢配置与增开货运专列示意

Fig. 1 Passenger train freight compartment configuration and description of additional freight trains.

货运专列成本及送货延迟惩罚成本统计分别为 9 081、10 496 及 8 324 元.

由于车站 A—E 货物装载时间限制, 该组货物只能由列车 5 运载, 此外考虑车厢容量限制, 其他小组货物无法与该组货物拼车运输, 故列车 5 仅运载 1 组货物. 对比 3 种方案, 方案 1) 和方案 2) 均采用客运列车配置车厢的形式满足货物需求, 方案 2) 比方案 1) 额外多配置 1 节车厢, 在一定程度上减少了配送的总延迟时间, 但列车运力未得到充分利用, 也增加运营总成本; 方案 3) 基于灵活编组形式于客运列车间插入货运专列, 既保证运力的充分利用, 又降低了配送延迟与总运营成本. 综合对比, 方案 3) 效果更优. 可见, 在不同的货物服务时限需求下, 安排客货混运方案的同时, 适当运用货运专列能够更大程度满足货运需求, 提高线路运输利润.

2 模型建立

2.1 模型假设

为方便模型构建, 本研究针对列车开行计划与货物装载分配协同优化问题做如下假设: ① 货运专列与客运列车的运行速度相同, 各客货列车之间无越行行为; ② 货物按组进行装载, 每组货物必须装载在同一列车, 不可拆分配送; ③ 列车解编作业只能在始发站或终点站进行, 且所有营运车辆在给定的出发时刻前完成车厢配置和编组.

2.2 目标函数

本研究选取线路非高峰时段, 在既有客运列车

的基础上考虑增开货运专列的模式开展货物运输服务, 模型优化目标为最小化货物车厢配置成本、货运专列开行成本及货物送到延迟成本, 即

$$\min F = C^p \sum_{p \in P} n_p + \sum_{w \in W} Q_w f(t_w) + \sum_{f \in F} \sum_{m \in M} y^{f,m} C^m \quad (1)$$

其中, C^p 为客运列车 p 配置单节货物车厢的费用; n_p 为客运列车 p 实际配置的货物车厢数; Q_w 为 w 组货物的数量; t_w 为 w 组货物送到目的地的实际时刻; $f(t_w)$ 为 w 组货物在 t_w 时刻送到的单位时间惩罚成本; $y^{f,m}$ 为 0-1 变量, 当 m 编组类型的货运专列 f 被选择时, $y^{f,m} = 1$, 否则为 0; C^m 为开行 m 编组类型货运专列费用; P 为客运列车集合, $P = \{1, 2, \dots, p, \dots\}$; F 为货运专列集合, $F = \{1, 2, \dots, f, \dots\}$; W 为货物集合, $W = \{1, 2, \dots, w, \dots\}$; M 为货运专列编组类型集合, $M = \{1, 2, \dots, m, \dots\}$.

2.3 模型约束条件

货物需求约束为

$$\sum_{f \in F} y_w^f + \sum_{p \in P} x_w^p = 1 \quad (2)$$

$$T_{p,O_w} + (1 - x_w^p)M \geq T_w^{\text{ready}} \quad (3)$$

$$T_{f,O_w} + (1 - y_w^f)M \geq T_w^{\text{ready}} \quad (4)$$

其中, y_w^f 为 0-1 变量, 当 w 组货物由货运专列 f 运载时, $y_w^f = 1$, 否则为 0; x_w^p 为 0-1 变量, 当 w 组货物由客运列车 p 运载时, $x_w^p = 1$, 否则为 0; T_{p,O_w} 为客运列车 p 到达 w 组货物的始发站时刻; T_{f,O_w} 为货运专列 f 到达 w 组货物的始发站时刻; O_w 为 w 组货物的始发站; M 为 1 个极大值; T_w^{ready} 为 w 组货物在相应始发站允许的最早装载时刻.

式(2)表示 w 组货物只能选取某一客运列车 p 或货运专列 f 运输; 式(3)表示若 w 组货物由客运列车 p 运输, 则列车 p 到达货物起点站的时刻应不早于货物的准备装车时刻; 式(4)表示若 w 组货物由货运专列 f 运输, 则列车 f 到达货物起点站的时刻应不早于货物的准备装车时刻.

货运专列灵活编组约束为

$$\sum_{m \in M} y^{f,m} \leq 1 \quad (5)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{m \in M} y^{f,m} \leq |F| \quad (6)$$

为实现列车运能与货物需求之间的良好匹配, 避免出现运力不足和运力过渡浪费的情况, 考虑多种类型编组的货运专列, 并根据货运需求安排合适的编组类型货运专列. 其中, 式(5)确保每一货运

服务列车只选择 1 种编组类型; 式(6)表示投入运营的货运专列数不超过可供选择的货运专列总数.

货物装载约束为

$$n_p \leq S_p \quad (7)$$

$$U_{p,i} = \sum_{w \in \{w' \in W | O_{w'} \leq i, D_{w'} > i\}} x_w^p Q_w \quad (8)$$

$$U_{p,i} \leq n_p G_p \quad (9)$$

$$U_{f,i} = \sum_{w \in \{w' \in W | O_{w'} \leq i, D_{w'} > i\}} y_w^f Q_w \quad (10)$$

$$U_{f,i} \leq \sum_{m \in M} G_f f^m y^{f,m} \quad (11)$$

$$\sum_{w \in \{w' \in W | O_{w'} = i, D_{w'} > i\}} x_w^p Q_w \leq L_{p,i} R n_p \quad (12)$$

$$\sum_{w \in \{w' \in W | O_{w'} = i, D_{w'} > i\}} y_w^f Q_w \leq L_{f,i} R y_w^f f^m \quad (13)$$

$$\sum_{w \in \{w' \in W | O_{w'} < i, D_{w'} = i\}} x_w^p Q_w \leq L_{p,i} H n_p \quad (14)$$

$$\sum_{w \in \{w' \in W | O_{w'} < i, D_{w'} = i\}} y_w^f Q_w \leq L_{f,i} H y_w^f f^m \quad (15)$$

$$t_w = \sum_{p \in P} x_w^p T_{p,D_w} + \sum_{f \in F} y_w^f T_{f,D_w} \quad (16)$$

其中, S_p 为客运列车 p 可供配置的货运车厢数; $U_{p,i}$ 为客运列车 p 离开车站 i 时的载货量; $U_{f,i}$ 为货运专列 f 离开车站 i 时的载货量; G_p 客运列车单节车厢载货容量; G_f 货运专列单节车厢载货容量; f^m 为 m 编组类型货运专列车厢节数; $O_{w'}$ 和 $D_{w'}$ 分别表示 w' 组货物的起点和终点站; $L_{p,i}$ 为客运列车 p 在 i 车站的停站时间; $L_{f,i}$ 为货运专列 f 在 i 车站的停站时间; R 为车站单位时间装载作业量; H 为车站单位时间卸载作业量; T_{p,D_w} 和 T_{f,D_w} 分别为客运列车 p 和货运专列 f 到达 w 组货物终点站的时刻.

式(7)保证客运列车实际配置的货物车厢数不超过最大可供配置货运车厢数; 式(8)表示客运列车 p 离开 i 车站时的载货量; 式(9)确保客运列车在途货运量不大于该列车的最大预留货物车厢容量; 式(10)用于计算货运专列 f 离开 i 车站时的载货量; 式(11)约束货运专列在途货运量不大于该列车的最大可用车厢容量; 式(12)表示客运列车 p 在 i 车站的载货量不大于该列车停站时间所允许的最大装载量; 式(13)表示货运专列 f 在 i 车站的载货量不大于该列车停站时间所允许的最大装载量; 式(14)表示客运列车 p 在 i 车站的卸货量不大于该列车停站时间所允许的最大卸载量; 式(15)表示货运专列 f 在 i 车站的卸货量不大于该列车停站时间所允许的最大卸载量; 式(16)用于推算 w 组货物到达目的站的时刻.

货物延迟配送产生的单位时间惩罚成本为

$$f(t_w) = \begin{cases} 0, & T_w^{\text{ready}} \leq t_w < E^{T,w} \\ \frac{N}{L^{T,w} - E^{T,w}} (t_w - E^{T,w}), & E^{T,w} \leq t_w < L^{T,w} \\ N, & L^{T,w} \leq t_w < T_D \end{cases} \quad (17)$$

其中, $E^{T,w}$ 为客户期望 w 组货物的送到时刻; $L^{T,w}$ 为晚于期望送到时刻一段时间的某个时刻; N 为延迟惩罚系数; T_D 为研究时段的终止时刻.

考虑实际情况, 在此根据货物延迟配送的时间长短设置弹性惩罚, 若货物在客户期望时间范围内送达, 则惩罚值为 0; 而当货物在晚于客户期望的最晚收货时刻的一段时间范围内送达, 延迟惩罚会随时间变化而变化; 当延迟达到一定程度后, 其惩罚达到延迟惩罚上限, 不再发生改变.

2.4 模型线性化

式(17)为分段线性函数, 属于非线性约束, 共分为 3 段, 包含 4 个分界点, 分别为 $(T_w^{\text{ready}}, 0)$, $(E^{T,w}, 0)$, $(L^{T,w}, N)$ 和 (T_D, N) . 为进行线性转换, 在此引入 3 个辅助的 0-1 变量 z_a^w ($a = 1, 2, 3$) 和 4 个权重系数 k_b^w ($b = 1, 2, 3, 4$). 其中, z_a^w 判断货物 w 的送到时间是否处于第 a 个时间段, 若满足 $z_a^w = 1$, 反之为 0. 权重系数 $k_b^w \in [0, 1]$ 表征货物送到时间靠近第 b 个分界点的程度, k_b^w 越大, 则越靠近分界点. 式(18)用于确保 z_a^w 和 k_b^w 取得正确的数值. 如当货物送到时间处于第 2 个时间段 $[E^{T,w}, L^{T,w}]$, 则 $z_2^w = 1$, 此时其他的分段标识变量为 0. 而权重系数仅在 k_2^w 和 k_3^w 处于 $[0, 1]$, 且 $k_2^w + k_3^w = 1$ 时, 其他系数均为 0.

$$\begin{cases} k_1^w \leq z_1^w \\ k_2^w \leq z_1^w + z_2^w \\ k_3^w \leq z_2^w + z_3^w \\ k_4^w \leq z_3^w \\ k_1^w + k_2^w + k_3^w + k_4^w = 1 \\ z_1^w + z_2^w + z_3^w = 1 \end{cases} \quad (18)$$

可利用式(18)来确保 t_w 和惩罚值 $f(t_w)$ 之间满足对应的分段线性关系. 若处于第 2 个分段, 则送到时间 $t_w = k_2^w E^{T,w} + k_3^w L^{T,w}$, 惩罚值 $f(t_w) = k_2^w \times 0 + k_3^w N$. 由于 $k_2^w + k_3^w = 1$, 根据介值定理可知, 货物送到时间处于第 2 个分段范围 $[E^{T,w}, L^{T,w}]$, 且惩罚值也处于第 2 个分段范围 $[0, N]$. 同时由于两式具有相同的权重系数, 则惩罚值与货物送到时间之间满足第 2 分段对应的线性关系. 则式(17)可等价转化为线性约束(18)和(19),

$$\begin{cases} t_w = k_1^w T_w^{\text{ready}} + k_2^w E^{T,w} + k_3^w L^{T,w} + k_4^w T_D \\ f(t_w) = k_3^w N + k_4^w N \end{cases} \quad (19)$$

本研究线性整数规划模型可借助 CPLEX 或 GUROBI 等商业优化软件进行求解, 即

$$\begin{cases} \min F = C^p \sum_{p \in P} n_p + \sum_{w \in W} Q_w f(t_w) + \sum_{f \in F} \sum_{m \in M} y^{f,m} C^m \\ \text{s. t. 式(2)—(16), 式(18)—(19)} \end{cases} \quad (20)$$

3 案例分析

3.1 基础数据

以中国南昌地铁 2 号线(南路—辛家庵)为案例研究对象, 对全线车站依次编号为 1—28. 假设每列客运列车最多可配置 2 节车厢用于运送货物, 每节货物车厢可容纳 20 个货运箱, 运营成本为 1 400 元, 选取研究时段为 09:00—12:00, 设置单位时间粒度为 1 min, 最小安全行车间隔为 3 min. 本研究考虑 21 列客运列车, 发车间隔为 6 min; 20 列灵活编组类型的备选货运专列穿插分布于两客运列车之间. 考虑实际作业和问题求解复杂程度, 设置两种编组类型, 分别为 3 节小编组和 6 节大编组, 假设两种编组对应的成本和货运量分别为 [4 600 元, 60 箱] 和 [9 000 元, 120 箱]. 货物配送单位小时延迟惩罚 $N = 20$ 元/(箱·kg), 车站单位时间装载作业量 $R = 12$ 箱/min, 车站单位时间卸载作业量 $H = 40$ 箱/min, $[E^{T,w}, L^{T,w}]$ 时间间隔为 6 min. 货运专列停站时间和区间运行时间与既有客运列车保持一致, 地铁线路沿线车站的部分货运需求如表 1, 包含起讫车站、货运量、货物最早装载时刻和期望送到目的站时刻. 实验均在处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-6300HQ、CPU 主频为 2.3 GHz 及内存为 8 Gbyte 的笔记本电脑上进行, 采用 IBM CPLEX 12.10 优化器进行模型求解, 设置上下界最优间隙为 1% 或计算时间达到 1 h 时终止计算.

3.2 结果分析

基于以上数据和参数设置, 经过 897 s 计算, 获得设置上下界最优间隙为 0.99% 的优化方案, 货物送到延迟的总时间为 813 min, 总运营成本为 45 709 元. 所得优化方案满足 50 组货物运输需求, 利用客运列车和货运专列分别服务 20 组和 30 组货物, 共计 904 个标准货运箱. 优化后的列车开行方案与货物装载方案如图 2, 货物装载分配计划通过货物组编号和涂色柱状快形式展示于图中列车运行线.

表1 南昌地铁2号线沿线货运需求

Table 1 Freight shipment demand of the Line 2 of Nanchang Metro

货物组号	运量/箱	起始车站	终到车站	期望送到时刻	最早装载时刻	货物组号	运量/箱	起始车站	终到车站	期望送到时刻	最早装载时刻
1	15	9	15	10:54	10:33	26	2	11	17	10:10	09:10
2	7	9	14	10:52	10:33	27	33	10	18	11:08	10:47
3	10	5	14	10:52	10:24	28	16	2	22	10:02	09:07
4	13	6	13	10:26	10:02	29	32	20	22	09:59	09:10
5	6	3	13	10:26	09:56	30	14	9	22	10:17	09:36
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	17	11	17	10:57	09:14	45	5	15	23	10:46	10:18
21	18	13	20	10:12	09:49	46	14	19	28	11:05	10:32
22	42	13	21	10:55	10:31	47	11	18	23	10:56	10:08
23	33	10	19	10:10	09:16	48	11	18	27	11:41	10:15
24	24	12	20	10:05	09:43	49	21	18	24	11:29	09:59
25	16	17	19	10:13	09:18	50	7	12	25	11:47	10:29

由图2可见,有5列客运列车配置了货运车厢,其中,列车3、5、14、15及20各配备了2节货运车厢;共增开了4个货运专列车次,即首发站时段的09:20—09:30插入1列、09:50—10:00插入1列及10:10—10:30插入2列,其中,第13列为3节编组,第4、10及14列为6节编组。图3为列车的在途运量,可见,各组货物均在不早于规定的最早时刻装载且各列车运力都得到较好利用。列车在

10:00—11:00时段配备了大量运力,这与货物需求多集中在该时段高度契合。在此期间也存在部分货物组延迟送到的情况,如由3节编组货运专列13承运的编号9、24及40货物,由客运列车14承运的编号21及45货物等。事实上,编号9及40货物可以选择发车时刻更早的客运列车通过配置2节货运车厢的形式来减缓延迟时间,然而在其他各列车上下游运力都得到充分利用的情况下,该方式会造成

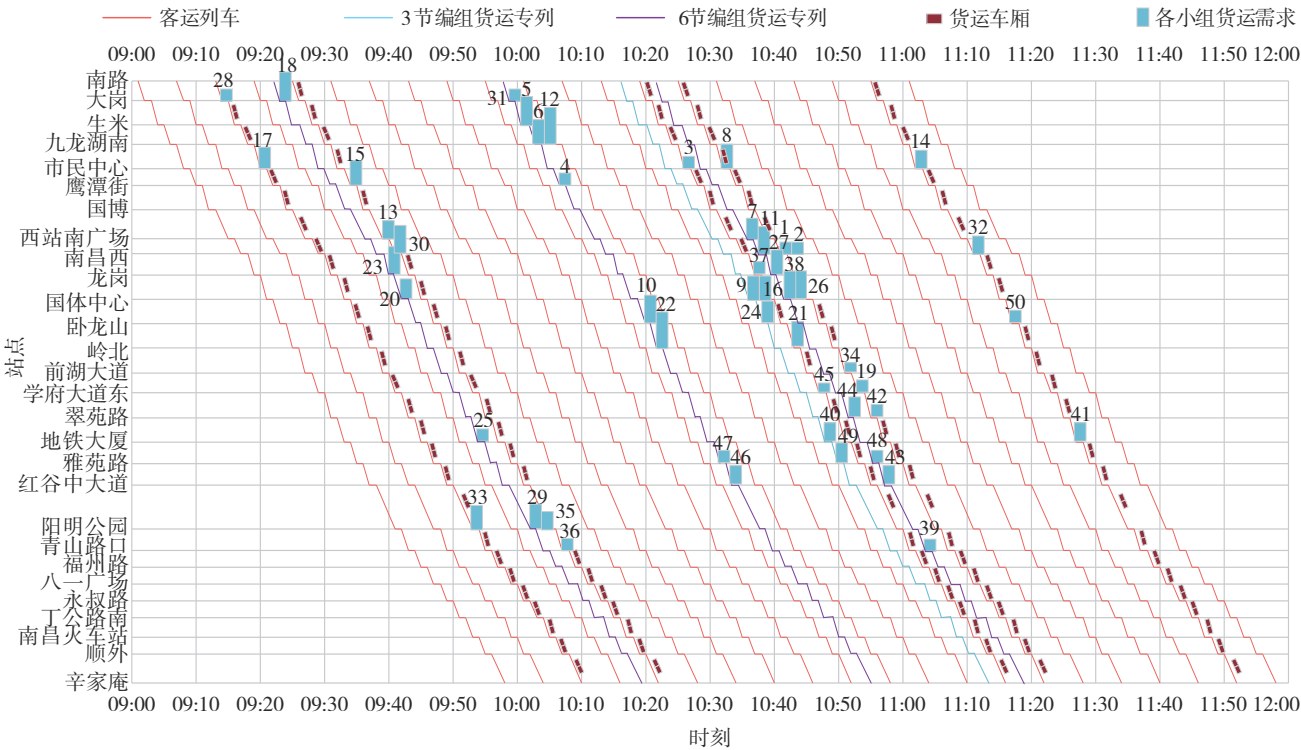


图2 列车开行与货物装载方案
Fig. 2 Train operation strategy and cargo allocation choice.

原本货运专列 13 的运力浪费, 并额外增加运营成本, 故相应的货物组会延迟送到. 编号 9、16、20、26 及 38 的 5 组货物具有相同的起始配送站点(国体中心站), 列车在此站停靠时间为 35 s, 车站允许最大装载作业量为 42 箱, 单个车次无法装载该站点所有货物, 且受到部分货物组最早装载时刻限制影响, 故需要安排多个车次运输, 势必造成部分货物组延迟运输或局部列车区间运力资源浪费. 对于编号 24 的货物, 其运量为 24 箱, 起始配送站为卧龙山站, 列车在此停站 40 s, 安排 3 节编组货运专列刚好满足装载作业量, 此时无法再继续承运其他货物组任务.

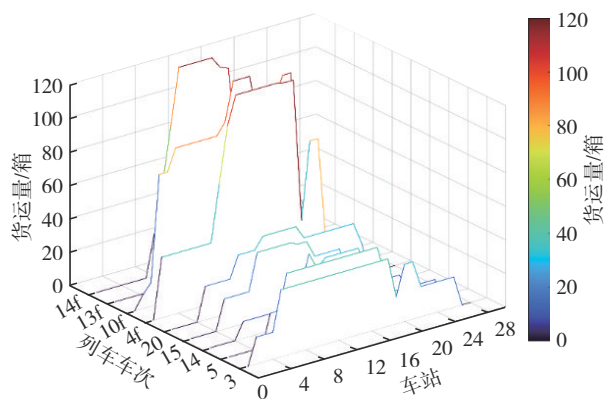


图3 列车在途运量

Fig. 3 The amount of commodities moved by train throughout the journey.

若编号 7 货物由其他列车运载, 可能需要额外配置运力且会造成既有开行的货运专列 14 部分运力浪费, 不能达到系统最优的目的. 若安排客运列车 6 运载编号 21 和 45 的货物, 可保证货物在规定的最晚时刻前送到, 由于编号 45 的货物相对较晚的装载时间限制导致该方案失效, 最终达不到系统最优的目的. 优化结果表明, 编组类型的灵活程度很好适应了货运需求, 进一步说明灵活编组模式能够更好地节约运输成本、利用轨道交通资源, 创造一定经济效益.

3.3 不同惩罚及装卸作业效率灵敏度分析

分别设置不同的惩罚系数 N , 探究延迟惩罚对列车开行方案与货物装载分配方案协同优化模型的影响, 计算结果见表 2. 可见, 当惩罚系数发生变化时, 模型均能在较短时间内计算出较优解. 随着惩罚系数增大, 货物送到的平均延迟时间不断减小, 运营总成本不断增加, 且货物配送的总延迟时间稳定在一定范围内波动. 这是由于随着惩罚系数

的增大, 部分运量较大的货物组会被优先安排在不延迟或延迟相对较短的车次开展运输; 针对部分大货流时间区段, 原本计划由客运列车配置货运车厢的形式转换为增开货运专列形式进行货物配送. 事实上, 随着惩罚系数的不断增大, 货物配送的延迟时间不可能一直减小. 因此, 在实际运营中可综合客户对于配送服务时效的满意度及企业运营成本, 制定合理的货物运输方案.

表2 不同延迟惩罚的总成本

Table 2 Total cost of different delay penalties

N	总延迟 时间/min	平均延迟 时间/min	计算时间/s	总成本/元
0	—	—	507	45 600
20	813	4.12	897	45 709
60	741	3.78	1 115	45 904
100	786	3.57	392	46 001
120	773	3.49	971	46 186
240	870	3.36	1 348	46 758

表 3 为不同装卸作业效率对优化模型结果的影响. 可见, 随着车站货物卸载作业效率增加, 货物配送的延迟时间有所缩短, 对应方案的总运营成本不断减小; 随着车站货物装载作业效率增加, 货物配送的延迟时间亦有所缩短, 对应的总运营成本亦减小. 在实际运营中可根据需要, 视货物类型及车站客流情况合理设定列车停站装卸作业效率.

表3 不同装卸作业效率的总成本

Table 3 Total cost of efficiency of different handling operations

$R/(\text{箱} \cdot \text{min}^{-1})$	$H/(\text{箱} \cdot \text{min}^{-1})$	总延迟 时间/min	平均延迟 时间/min	总成本/元
12	12	1 037	6.34	46 758
12	24	981	6.11	46 112
12	40	813	4.12	45 709
12	60	813	4.12	45 709
12	40	813	4.12	45 709
20	40	794	4.02	46 758
30	40	771	3.94	45 336
40	40	752	3.79	43 279

3.4 增开货运专列数量影响

以下分析允许增开不同货运专列的数量对列车开行方案与货物分配方案协同优化模型结果的影

响, 计算结果见表4. 可见, 在仅采用客运列车配置货运车厢形式下无法求得可行解, 这是由于货运需求总量超过各客运列车最大配置车厢容量, 需要增开货运专列以弥补运力不足. 由于货物在车站的装载量受列车停站时间限制, 允许额外增开1列货运专列时仍无可行方案. 随着开行货运专列车次的增加, 货物配送的平均延迟时间有所增加, 对应方案的总运营成本减小. 由于增开的大容量货运专列分担了原本由客运列车运载的部分货物, 使得客运列车对于单纯货物运输呈现出低频次发车状态, 故货物配送延迟时间亦符合实际. 实际运营中可考虑安排增开货运专列来缓解线路运力紧张问题, 制定合理的专列开行计划也有利于大幅度节约成本.

表5 增开不同编组类型货运专列优化结果

Table 5 Optimization results of adding freight special trains of different formation types

方案	客运列车车厢配置个数	客运列车数/列	编组类型	货运专列数/列	总成本/元
增开3节编组货运专列	1	1	3	8	47 115
	2	3	6	—	
增开6节编组货运专列	1	1	3	—	46 697
	2	6	6	3	
增开3或6节编组货运专列	1	0	3	1	45 709
	2	5	6	3	

由表5可见, 无论灵活编组还是固定编组, 客运列车配置的车厢数基本稳定在一定范围. 图4为各方案的列车装配比例, 可见, 客运列车的货运周转量也没有发生较大波动, 表明货物组会优先安排能够满足运量和时效要求、且费用相对更低的客运列车运输, 以达到节约成本的目的. 图5为各方案

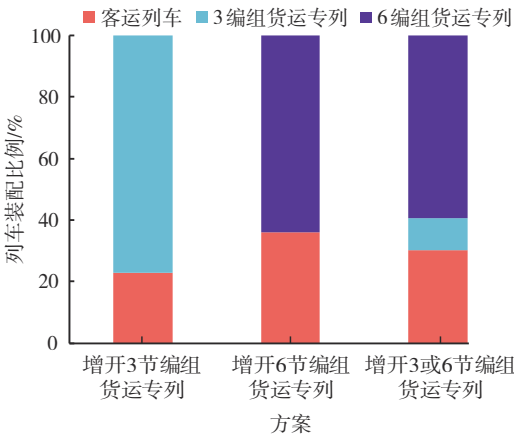


图4 增开不同编组类型货运专列下列车装配比例

Fig. 4 Increase the train assembly ratios for freight special trains of different formation types.

表4 开行不同货运专列数量的总成本

Table 4 Total cost of running different numbers of dedicated freight trains

货运专列个数	平均延迟时间/min	客运列车车厢配置个数	计算时间/s	总成本/元
0				无可行解
1				无可行解
2	3.13	26	564	47 136
3	3.67	13	304	46 595
4	4.12	10	897	45 709

3.5 不同编组模式分析

为评估灵活编组策略在货运装载优化中的适用性, 分别针对增开固定编组和灵活编组式货运专列展开讨论并求解对应模型, 优化结果如表5.

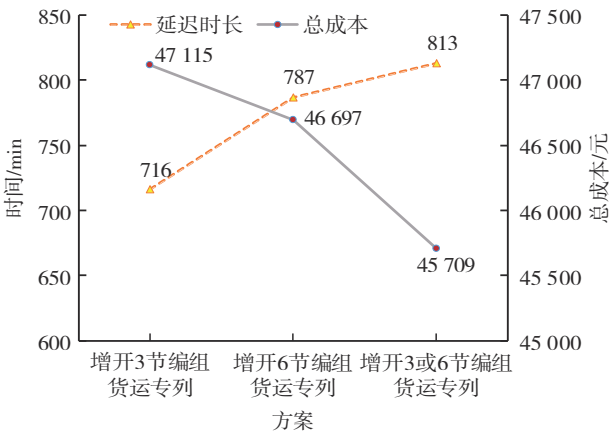


图5 不同编组类型方案延迟时长与运营总成本

Fig. 5 The delay duration and total operating cost of different grouping type schemes.

延迟时长与运营总成本, 可见, 相较于固定编组货运专列, 灵活编组模式在仅增加26 min的总延迟时间下, 就可降低998元的运营成本.

3.6 不同货运规模分析

为更深入说明增开灵活编组货运专列以满足货物柔性服务时限运输需求的优越性, 分别在不同货

运规模下采用灵活编组和固定编组模式运输进行求解, 其优化结果如表 6. 可见, 当货运量较小时, 无需增开货运专列, 采用客货混运方式即可满足需求; 随着货运量的增加, 需要配备的专列数量会相应增加. 相对于固定编组(3 节或 6 节), 采用灵活编组在一定情况下能够兼顾降低运营成本与减少延误, 如 M_2 和 M_3 方案. 当货运量过大时(如 M_4), 则会在成本和效益之间给出相对均衡的方案.

表 6 货运规模大小对列车编组和总成本的影响

Table 6 The influence of the scale of freight transportation on train formation and total cost

方案	编组类型	货运专列 数/列	总延长 时间/min	总成本/元
M_1	3 节编组	0	1 002	11 240
	6 节编组	0	1 002	11 240
	灵活编组	0	1 002	11 240
M_2	3 节编组	1	315	14 426
	6 节编组	1	602	14 638
	灵活编组	1	315	14 426
M_3	3 节编组	2	810	30 265
	6 节编组	1	810	30 077
	灵活编组	1	460	30 077
M_4	3 节编组	3	812	39 104
	6 节编组	2	1 034	39 216
	灵活编组	2	887	38 945

4 结 论

针对城市轨道交通客货共运问题, 考虑两种货运形式、货物装载时限及送到时效需求, 构建以客运列车车厢配置、货运专列开行成本以及货物延迟送到成本最小化为目标的优化模型, 对车厢配置、列车编组方案、列车运行计划及货物分配方案进行协同优化决策, 并以南昌地铁 2 号线进行实证研究, 所取得的研究结论如下:

1) 本模型所确定的列车运行计划和货物分配方案在延迟惩罚系数发生波动时具有较好稳定性, 能够充分反映货物对服务时限的要求. 在一定范围内, 随着惩罚系数的增大, 货物配送的总延迟时间和平均延迟时间均呈下降趋势, 总成本均有小幅增加, 与实际运营情况相符.

2) 增开货运专列能够弥补线路运力不足, 虽

然货物配送的总延迟时间有所增加, 但其对应方案的总运营成本会大幅减少. 随着列车停站期间货物装卸作业效率的提升, 货物配送的延迟时间与对应的总运营成本均不断减小, 故在实际运营中可根据需要, 视货物类型及车站客流情况合理设定列车停站装卸作业效率.

3) 灵活编组模式能较好适应货运需求变化, 保证时效性高的大流量货物得到及时运输, 并减少列车运能浪费. 对于 6 节编组模式, 灵活编组模式能够在总延迟时间仅增加 26 min 的情况下, 减少 998 元的运营成本; 且时效要求越高, 灵活编组的优势越明显.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72361012, 72071147); 江西省自然科学基金资助项目(20242BAB204123); 江西省高校人文社会科学研究资助项目(GL21232); 南昌轨道交通科研计划资助项目(2021HGKYC005)

作者简介: 侯伟(634157893@qq.com), 南昌轨道交通集团有限公司工程师. 研究方向: 地铁交通运输行车组织效率提升与优化.

引 文: 侯伟, 王松, 石俊刚, 等. 考虑柔性服务时限的地铁列车运行计划与货物装载优化[J]. 深圳大学学报理工版, 2025, 42(5): 576-585.

参考文献 / References:

- [1] DAMPIER A, MANINOV M. A study of the feasibility and potential implementation of metro-based freight transportation in Newcastle upon Tyne [J]. Urban Rail Transit, 2015, 1: 164-182.
- [2] 王晓平, 张子宣. 客货“共线不共车”模式下地铁货运站点选择[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(4): 1062-1072.
WANG Xiaoping, ZHANG Zixuan. The selection of metro freight stations under the mode of "shared lines but not shared trains" [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(4): 1062-1072. (in Chinese)
- [3] 李润国. 基于城市轨道交通的物流配送系统及其节点研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
LI Runguo. Logistics distribution system based on urban rail transit and its application node research [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [4] ZHOU Xiaoye, CUI Yao, HE Liang, et al. Logistics distribution routing optimization based on subway-freight truck intermodal transportation [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(3): 111-117.
- [5] ZHAO Laijun, ZHOU Jinpeng, LI Huiyong, et al. Optimizing the design of an intra-city metro logistics system based

- on a hub-and-spoke network model [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 116: 104086.
- [6] 米雪丽. 基于地铁的城市物流配送网络规划研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- MI Xueli. Research on urban logistics distribution network planning based on subway [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [7] ZHAO Laijun, WANG Xiaoli, STOETER J, et al. Path optimization model for intra-city express delivery in combination with subway system and ground transportation [J]. *Sustainability*, 2019, 11(3): 758.
- [8] GHILAS V, DEMIR E, VAN WOENSEL T. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows and scheduled lines [J]. *Computers & Operations Research*, 2016, 72: 12-30.
- [9] 周芳汀, 张锦, 周国华. 带时间窗的地铁配送网络路径优化问题[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(5): 88-94.
- ZHOU Fangting, ZHANG Jin, ZHOU Guohua. Subway-based distribution network routing optimization problem with time windows [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(5): 88-94. (in Chinese)
- [10] BEHIRI W, BELMOKHTAR-BERRAF S, CHU Chengbin. Urban freight transport using passenger rail network: scientific issues and quantitative analysis [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 115: 227-245.
- [11] OZTURK O, PATRICK J. An optimization model for freight transport using urban rail transit [J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 267(3): 1110-1121.
- [12] 肖雅玲, 柏赞, 陈垚, 等. 考虑车底运用的城轨货运专列运行图与载货方案协同优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(6): 185-195.
- XIAO Yaling, BAI Yun, CHEN Yao, et al. Urban rail transit freight train service planning and shipment allocation considering rolling stock circulation [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2023, 23(6): 185-195. (in Chinese)
- [13] DI Zhen, YANG Lixing, SHI Jungang, et al. Joint optimization of carriage arrangement and flow control in a metro-based underground logistics system [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2022, 159: 1-23.
- [14] LI Zhujun, SHALABY A, ROORDA M J, et al. Urban rail service design for collaborative passenger and freight transport [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 147: 102205.
- [15] 戚建国, 周厚盛, 杨立兴, 等. 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.
- QI Jianguo, ZHOU Housheng, YANG Lixing, et al. Optimization methods of combined passenger and freight transportation based on flexible train composition mode [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(2): 197-205. (in Chinese)
- [16] 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.
- LI Zhujun, BAI Yun, CHEN Yao. Integrated optimization of train service planning and shipment allocation for airport expresses under mixed passenger and freight transportation [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(5): 154-163. (in Chinese)
- [17] 山湧泉, 陈垚, 冯旭杰, 等. 可变编组下城市轨道交通货运列车运行计划优化[J/OL]. *交通运输工程与信息学报*. (2024-09-06) [2024-12-06]. <https://doi.org/10.19961/j.cnki.1672-4747.2024.04.021>.
- SHAN Yongquan, CHEN Yao, FENG Xujie, et al. Optimization of freight train service planning for urban rail transit under variable composition mode [J/OL]. *Journal of Transportation Engineering and Information*. (2024-09-06) [2024-12-06]. <https://doi.org/10.19961/j.cnki.1672-4747.2024.04.021>. (in Chinese)
- [18] 石俊刚, 王松, 郭军华. 基于柔性时间窗的地铁货物车厢配置与装载优化[J]. *交通运输工程学报*, 2024, 24(2): 221-231.
- SHI Jungang, WANG Song, GUO Junhua. Optimization of subway freight compartment configuration and loading based on flexible time windows [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(2): 221-231. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】