

基于地铁与货车协同的城市物流配送路径优化研究

葛显龙[†], 孟祥雯, 王博, 刘俊麟

(重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400064)

摘要: 针对城市物流配送“最后一公里”痛点和轨道资源利用不足的双重困境, 结合商业住宅区人口密集引发的道路交通拥堵问题, 以及地铁客运存在显著时空分布不均的特征, 提出一种公路与城市轨道交通协同运输的立体化城市物流优化方案. 通过整合地下闲置空间与地铁低峰时段运力, 构建基于地铁与货车协同的城市物流网络选址-路径两阶段优化模型, 第一阶段聚焦地铁货运中转站布局与资源分配优化, 第二阶段基于现有线路设计地铁与货车协同配送路径. 考虑到轨道运输的特殊性, 设置包括客户服务时间窗、地铁剩余运能、车辆容量等约束条件, 以最小化总成本为目标, 并结合模型特点, 设计融合自适应遗传算法与改进蚁群算法的两阶段混合求解算法. 最后, 以重庆市中心城区货物配送为例验证模型和算法的有效性. 结果表明, 相比传统配送方案, 该模式可使配送距离显著缩短 56.35%, 网络运作成本降低 30.21%, 对于缓解城市物流运输难题具有积极意义.

关键词: 城市货运; 地下物流; 城市轨道交通; 协同配送; 客货协同; 选址-路径优化

中图分类号: F572.88; U231; U121 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0895

引用格式: 葛显龙, 孟祥雯, 王博, 等. 基于地铁与货车协同的城市物流配送路径优化研究 [J]. 控制与决策.

Research on the optimization of urban logistics distribution routes based on the synergy of metro and trucks

GE Xian-long[†], MENG Xiang-wen, WANG Bo, LIU Jun-lin

(School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400064, China)

Abstract: Aiming at the dual predicament of the ‘last mile’ pain point in urban logistics distribution and the insufficient utilization of rail resources, combined with the road traffic congestion problem caused by the dense population in commercial and residential areas, as well as the significant temporal and spatial uneven distribution characteristics of metro passenger transport, a three-dimensional urban logistics optimization scheme of coordinated transportation by road and urban rail is proposed. By integrating the underground idle space and the transportation capacity during the off-peak hours of the subway, a two-stage optimization model for the location and route of the urban logistics network based on the collaboration of subway and freight cars is constructed. The first stage focuses on the layout and resource allocation optimization of subway freight transfer stations, and the second stage designs the collaborative distribution routes of subway and freight cars based on the existing lines. Considering the particularity of rail transportation, constraints such as customer service time Windows, remaining metro transportation capacity, and vehicle capacity are set. With the goal of minimizing the total cost and in combination with the characteristics of the model, a two-stage hybrid solution algorithm integrating adaptive genetic algorithm and improved ant colony algorithm is designed. Finally, the validity of the model and algorithm is verified by taking the goods distribution in the central urban area of Chongqing as an example. The results show that, compared with the traditional distribution scheme, this model can significantly shorten the distribution distance by 56.35% and reduce the network operation cost by 30.21%, which is of positive significance for alleviating the problems of urban logistics transportation.

Keywords: urban freight transportation; underground logistics; urban rail transit; collaborative distribution; passenger and freight coordination; location-routing optimization

收稿日期: 2025-08-29; 录用日期: 2026-02-08.

基金项目: 国家社会科学基金后期项目 (23FGLB079); 重庆市教育委员会科学技术研究项目重点项目 (K202400705); 重庆市教育委员会科学技术研究重点项目 (KJZD-K202400705); 重庆市教育委员会人文社会科学研究项目 (25KGGH096).

责任编辑: 刘士新.

[†]通信作者. E-mail: gexianlong@cqjtu.edu.cn.

0 引言

目前,城市轨道交通平峰时段运力利用率低,如北京地铁非高峰载客率低于30%,过剩运力亟待利用.利用轨道通过剩运力开展货运,成为解决由于城市公路货运日益增长而引发交通拥堵常态化等现实困境的潜在解决方案.对于人口众多的超大型城市,其庞大的物流需求和完善的轨道交通网络及货场资源,为探索地上-地下协同运输模式提供了可能性.国家层面亦积极推动城市地下物流配送发展,《交通强国建设纲要》等一系列政策文件明确提出发展城市地下物流配送,完善城市综合交通运输网络^[1].在此政策导向与现实需求的双向驱动下,开展地铁与货车协同配送的城市物流网络选址-路径优化研究,利用城市地下富余空间和轨道交通低峰时段富余运能,拓展地铁业务新场景,进而同步实现城市物流配送效率提升与轨道运营商多元化盈利的目标.

国外研究较早开始关注城市地下物流配送,如欧洲一些国家对地下物流网络规划、货物运输技术等方面进行了研究.国内研究则主要集中在轨道交通货运模式探索、城市地下空间利用与物流配送协同等方面,并随着城市交通拥堵问题的加剧以及相关政策推动,相关研究不断深入,其发展呈现出从宏观架构设计到微观运营优化,再到系统规划的趋势.

早期研究更多地聚焦于运营模式的探索与系统可行性的论证.这一阶段的工作旨在从概念上回答“是否可行”与“如何构建”的问题,为后续研究奠定了基石.Li等^[2]提出地上-地下协同运输模式,通过将货运整合到地铁网络中,利用地铁非高峰时段的冗余运力实现客货共运.胡万杰等^[3]梳理客货混载、共线拖挂和共线分离三种地铁货运模式,提出将基于地铁的城市地下物流配送(M-ULS)嵌入城市物流配送,构建地上-地下一体化的新型城市物流体系.Hu等^[4]提出M-ULS原型的创新概念,描述需求流、等级和设施等特点,证明协同运输模式较传统运输模式的优势.王小林和赵瀚^[5]提出适用于地铁物流的分离式与结合式两种模式,并分析了地铁物流在施工技术、运营管理、经济建设等方面的可行性.Hu等^[6]提出离散事件仿真模型,并有效模拟南京地铁网络中“共线分离”(CDm)和“共线拖挂”(CTm)两种客货协同运输模式的动态性能.Hu等^[7]利用城市地铁网络在拥挤地带,侧重于研究重新配置地下车站空间和设备,以通过自动化的站内物流作来容纳到达的货物.Chen等^[8]探讨了基于多源数据收集和数学规划的M-ULS网络扩展的决策机制,提出一个具有三个相互关联的模块的模型,并将其应用于北京市.Zhang^[9]等重点关注基于地铁的城市配送网

络设计,涵盖节点选择与运行模式.Wei等^[10]基于M-ULS,通过“自提+”和“入户+”两种模式,构建了城市、区域和社区三级配送网络,为解决最后一公里问题提供了创新方案.从上述文献可以看出,当前学者们普遍聚焦于地上-地下协同运输模式的可行性验证运营模型构建及算法优化,但其侧重点在于宏观架构与定性分析.

在确立了基本模式之后,研究视线自然转向了系统内部的高效运营问题,即如何在既定模式下进行精细化的调度与资源分配.这一层面的研究将地铁网络与运行图视为静态环境,致力于优化列车服务设计、车厢空间利用、列车调度策略与货物流量控制等动态决策.Di等^[11]提出了客货共用地铁列车的概念,旨在通过优化车厢安排和流量分配.王强和何艺鸣^[12]聚焦客货共线地铁物流运输模式,以武汉市为案例开展方案设计与仿真分析,量化预测建设成本与节能效益.杨雯雯等^[13]针对多制式轨道交通协同运营系统负载不均衡等问题,提出一种基于“区间-全网”二维综合负载均衡的多编组列车开行方案.Li等^[14]总结地上-地下客货混载实际案例,构建混合整数线性规划模型优化列车服务设计,并设计迭代调度算法求解.Wang等^[15]聚焦地下物流系统中客货联合运输问题,构建空间-时间-状态网络模型,提出整数线性规划模型优化列车单元调度,设计约束间隙分支定界算法进行求解.An等^[16]针对M-ULS中的货运列车调度与货物分配问题,提出了一种基于Wasserstein分布鲁棒优化的方法,以应对货运需求的不确定性.周芳汀等^[17]着眼于地铁网络,针对城市内部的地铁网和道路交通网,构建依托地铁网络的城市配送系统多分配的转运点选址模型,实现物流企业总成本最小化.刘博宇等^[18]聚焦于特大型城市,提出建立深层隧道运输与浅层管廊运输相结合的多层级地下物流网络,将部分地面货流转移至地下从而释放地面运输能力.这些成果极大地提升了运营层面的效率,但其优化范式通常将基础设施网络视为固定不变的前提,缺乏与地上物流网络规划的深度协同.

随着研究的不断深入,学者们逐渐认识到,将网络规划与运营决策相分离会限制系统效能的充分发挥,因此集成化的网络设计问题,特别是地铁配送网络选址-路径优化问题(MDN-LRP)研究受到广泛关注.当下成果主要集中在评估不同场景下选址的合理性、构建理想化的路径规划模型以及对部分关键算法进行改良.张得志等^[19]针对北京等超大型城市,构建了“外集内配”模式下的两阶段优化模型,为构建“地上集散-地下转运”的立体化城市物流系统奠

定了重要理论基础. 任睿等^[20]提出双层地铁配送网络, 以建设成本最小以及利用率最高为目标建立选址-分配-路径优化模型, 并通过实例探讨了地铁配送网络在不确定条件下的成本表现情况. 崔瑶等^[21]通过构建基于地铁和货车联运的动态配送选点-路径优化模型, 有效结合 Mark-Sweep 算法和蚁群算法, 提出一种两阶段启发式算法. Zhao 等^[22]通过 TOPSIS 等模型评估地铁站转运能力以划分枢纽与节点, 进一步采用熵权 TOPSIS 综合多指标优化节点分类, 构建双层枢纽辐射模型, 通过三阶段优化实现节点布局. 张宇昂等^[23]提出了融合客户属性的城市公铁联运物流选址-路径优化模型, 为地铁配送网络的优化研究贡献了新的视角. David 等^[24]提出了一个多属性两级位置路径问题 (2E-MALRPS), 针对地铁配送网络的选址和路径优化进行建模和优化. 舒达等^[25]在其研究中探讨了城市地铁多级配送选址-路径问题, 通过引入双边匹配理论, 构建多目标 0-1 整数规划模型, 并设计 NSGA-II 与 Gale-Shapley 算法相结合的混合算法来求解. 李慧芳等^[26]研究考虑碳排放的混合轴辐式多式联运网络枢纽扩增选址-路径问题, 为地铁配送网络优化提供了新思路. 然而, 现有模型在约束的集成度与现实性方面仍存在进一步提升的空间, 尤其是在同时刻画地铁运能的时空动态性、客户服务的软时间窗要求以及运输活动的环境成本等多维复杂因素方面, 尚有深入研究的必要, 而这正是本文试图着力解决的焦点.

纵观现有研究, 大多聚焦于地铁货运本身的运营调度, 如车厢分配、列车时刻表优化, 或仅将地铁视为传统物流网络中的一个孤立节点. 因此, 本文基于共享经济与绿色物流理念, 将地铁与货车协同配送模式引入城市物流体系进行系统研究. 本文的主要创新点可归纳为以下三个层面:

(1) 问题视角创新: 突破单一运输模式及孤立节点优化的局限, 系统耦合“最后一公里”配送、地面交通拥堵与地铁运能闲置三大难题, 构建地上-地下

一体化物流网络;

(2) 模型与算法集成创新: 在模型层面, 构建集成地铁时空动态运能、客户软时间窗、碳排放及网络拓扑约束的两阶段选址-路径优化模型, 增强了模型的现实刻画能力. 在求解算法上, 设计自适应遗传算法与改进蚁群算法相协同的混合优化策略, 从而契合本研究问题的复杂特性;

(3) 实证方法与决策机制创新: 实证验证协同配送模式相较于传统模式的经济与环境双重效益, 引入成本阈值分析, 定量识别协同配送的经济优势边界, 推动研究从技术验证向管理决策深化, 系统探讨地铁与货车协同配送的选址-路径优化问题.

为系统验证所提模型的有效性, 本文的结构安排如下: 第 1 章阐述研究背景, 界定地铁-货车协同配送系统的具体问题, 并通过图示说明其运行模式与网络架构; 第 2 章定义模型符号与假设, 分别构建货运中转站选址模型与末端协同配送路径优化模型, 并阐明两阶段模型间的关联性; 第 3 章详细介绍用于求解第一阶段选址问题的自适应遗传算法, 以及用于优化第二阶段配送路径的改进蚁群算法; 第 4 章基于重庆实例进行实证研究, 包括模型求解、算法性能对比、关键参数灵敏度分析及算子消融实验, 验证此模式的有效性与优越性; 第 5 章总结研究成果, 并展望未来方向.

1 问题描述

如图 1 所示, 相较于传统配送模式以货车直送客户导致的高成本、低效率和交通拥堵问题, 基于地铁-货车协同的城市物流配送模式通过货车集货至中转站-地铁干线运输-末端配送的联运模式, 可实现配送全流程优化. 该模式凭借地铁大运量、准点高效的特性, 可降低燃油消耗与运输成本, 提升配送时效性, 同时减少路面货运车辆通行, 从而有效缓解城市交通压力, 契合绿色物流与可持续发展理念.

为提高配送效率并减少环境污染, 本文旨在优化城市物流配送网络中的多条协同配送路径. 如图

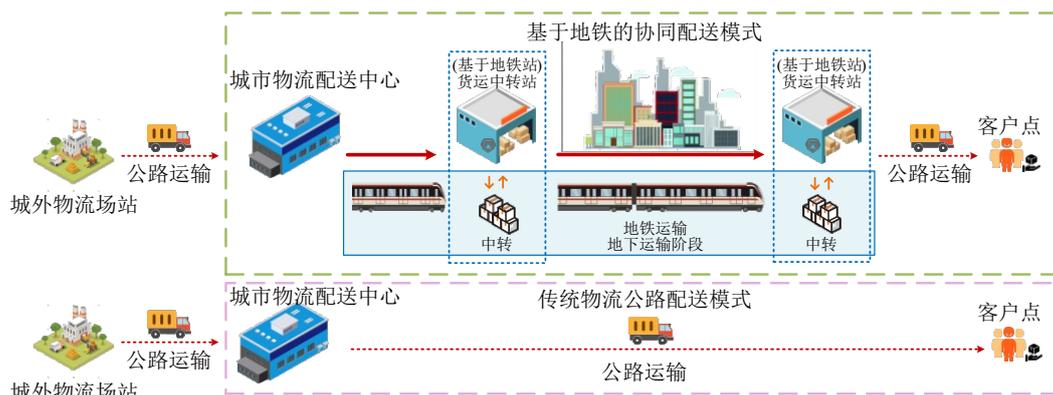


图1 基于地铁-货车协同的城市物流配送模式

2所示,可将该上述问题用完全有向图表述,首先从城市地铁网络中筛选出若干地铁换乘站作为备选客货中转站,进而通过优化模型,从中合理选定客货中转站的具体站点、数量与位置,如红色节点所示.在确定货运中转站位置的基础上,开展客货运服务.货物从临近地铁站的城市物流配送中心出发,根据每趟列车的剩余运力和客户时间窗安排运输,使货物通过轨道交通线路运至货运中转站.考虑到货物可能需要在货运中转站进行换乘,通过另一条地铁线路运输至末端货运中转枢纽站,最后通过地面道路运输送达至预定终端站点.在此过程中,为避免产生迂回线路、增加装卸次数和等待时间,建立混合轴辐式结构,兼顾直达运输与中转运输.同时,第三方物流公司按不同地铁车次载货量调配地面配送车辆,提前到达各地铁货运中转站进行接运,向城市中心区域内若干带时间窗的客户完成配送后返至起点.

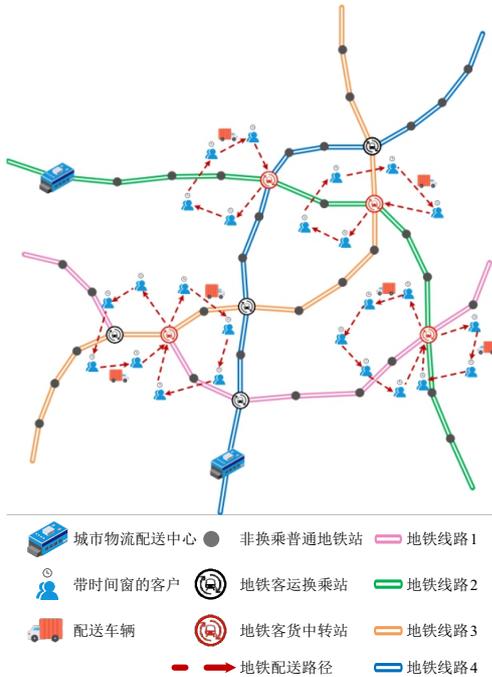


图2 地铁-货车协同配送网络示意图

2 数学模型

2.1 模型符号定义

模型参数和变量的符号及其含义如表1所示.

表1 参数和变量及其含义

变量名	符号说明
N_I	城市物流配送中心节点集合
N_J	地铁货运中转站集合
N_G	换线节点集合
集合	N_K 客户点集合
	V 货车集合
	W 非高峰时段 α 的集合
	R 在非高峰时段 α 内地铁列车车次 r_α 的集合

表1(续)

变量名	符号说明
i	城市物流配送中心节点
j	地铁货运中转站
g	换线节点
k	客户点
S_i	城市物流配送中心 i 的货物供应量
C^s	地铁单位运输成本
C^v	货车单位运输成本
C_o	单位碳排放量惩罚成本
C_g	在换线点 g 处的单位货物换线成本
C_j^f	地铁货运中转站 j 的固定运营成本
C_j^h	地铁货运中转站 j 的单位日常装卸成本
d_{ij}^s	地铁列车从城市物流配送中心节点 i 到地铁货运中转站 j 的行驶距离
相关参数	d_{jk}^v 货车从地铁货运中转站 j 到客户点 k 的行驶距离
	e^v 货车行驶单位公里的碳排放量
	v_j 地铁货运中转站 j 拥有的车辆数
	cap_j 地铁货运中转站 j 的转运能力
	cap_{r_α} 非高峰时段,第 r_α 次地铁的剩余运能
	$[E_i, L_i]$ 客户点 i 的期望服务时间窗, $i \in N_I$
	$[AE_i, AL_i]$ 客户点 i 可以接受的服务时间窗, $i \in N_I$
	α, β 货物早或晚于期望服务时间窗的客户满意度系数
	φ_{ij} 货物从配送中心 i 出发到地铁货运中转枢纽节点 j 的换线次数,非负整数参数
	θ_1 货车早于客户期望时间窗到达的单位时间惩罚成本
	θ_2 货车晚于客户期望时间窗到达的单位时间惩罚成本
	$P_{i,max}$ 货车超出客户可接受时间窗的固定惩罚成本
	$\Delta T_{i,early}$ 早到时间偏差($E_i - T_i$),仅当 $T_i < E_i$ 时有效
	$\Delta T_{i,late}$ 晚到时间偏差($E_i - T_i$),仅当 $T_i > E_i$ 时有效
	x_{ij} 连续变量,从城市物流配送中心节点 i 运往地铁货运中转站 j 的货物量
	x_{jk} 连续变量,从地铁货运中转站 j 运往客户节点 k 的货物量
	x_{ik} 连续变量,从配送中心节点 i 运往客户点 k 的总货物量
	y_k^v 连续变量,表示货车 v 中装载客户 k 的货物量
	z_j 0-1变量,表示货运中转站 j 是否被选中,若货运中转站 j 被选中,则为1,否则为0
变量	z_{jk} 0-1变量,表示货运中转站 j 是否服务客户点 k ,若货运中转站 j 被选中,则为1,否则为0
	$z_{ik,j}$ 0-1变量,若货物从配送中心节点 i 经地铁货运节点 j 运输到客户点 k ,则为1,否则为0
	y_k^v 0-1变量,表示客户 k 是否由货车 v 进行服务,若客户 k 由车辆 v 服务,则为1,否则为0
	$y_{i,j}^{(k,r_\alpha)}$ 0-1变量,表示是否通过第 r_α 次列车将货物由城市配送中心节点 i 运输至地铁货运中转站 j ,若由第 r_α 次列车运输,则为1,否则为0
	T_i 货车到达需求点 i 的时刻, $i \in N_I$

2.2 模型构建

该问题本质上为选址路径优化问题(LRP),通过构建两阶段模型对问题进行简化的方式对问题进行求解,可分为第一阶段货运中转节点选址模型和第二阶段基于地铁的城市物流网络末端配送路径优

化模型两个子模型, 其中货运中转点选址成本表示为 Z , 基于地铁的城市物流协同配送成本表示为 U , 则全局目标函数值 F 可由下式表示.

$$F = Z + U. \quad (1)$$

2.2.1 货运中转站选址模型

第一阶段核心目标是确定地铁货运中转站的最佳布局, 即确定货运中转站的最佳位置及其所服务的客户点, 同时减少对正常客运交通的干扰, 并高效衔接城市公路货运交通枢纽. 关于具体的选址策略, 依据备选中转节点的选择原则, 选择中心城区地铁换乘站作为备选中转节点, 综合考虑运输成本、固定运营成本及选址成本等因素, 以总成本最小为目标, 建立货运中转节点选址模型. 为便于研究与构建模型, 做出如下假设:

(1) 在物流网络中, 城市物流配送中心与客户点固定, 仅考虑物流网络中地铁货运中转站的选择;

(2) 所有货物必须先由城市物流配送中心通过地铁运至地铁货运中转站, 再由货车配送至客户点;

(3) 每个地铁货运站的中转能力以及客户需求量已知;

(4) 每个客户点只能由一个地铁货运中转站进行服务;

(5) 不考虑货物种类对配送的影响.

$$\min Z = \sum_{i \in N_D} C^s d_{ij}^s x_{ij} + \sum_{k \in N_K} C^v d_{jk}^v x_{jk} z_{jk} + C_j^f z_j \\ \sum_{i \in N_I} \sum_{k \in N_K} \sum_{g \in N_G} C_g x_{ik} \varphi_{ij} z_{ik,j} + \sum_{k \in N_K} C_j^h x_{jk} z_{jk}. \quad (2)$$

s.t.

流量平衡约束:

$$\sum_{j \in N_J} z_{jk} = 1, \forall k \in N_K, \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N_J} X_{ij} = S_i, \forall i \in N_I, \quad (4)$$

$$\sum_{k \in N_K} x_{jk} = \sum_{i \in N_I} x_{ij}, \forall j \in N_J. \quad (5)$$

资源约束:

$$z_{jk} \leq z_j, \forall j \in N_I, k \in N_J, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_I} \sum_{j \in N_J} \sum_{k \in K} y_{i,j}^{(k,r_\alpha)} = 1, \forall r_\alpha \in R; \alpha \in W, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N_I} \sum_{j \in N_J} x_{ij} \cdot y_{i,j}^{(k,r_\alpha)} \leq \text{cap}_{r_\alpha} \cdot z_j, \forall r_\alpha \in R, \alpha \in W, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N_I} x_{ij} \leq z_j \cdot \text{cap}_j, \forall j \in N_J. \quad (9)$$

目标函数(1)表示总成本最小化, 由城市物流配

送中心到地铁货运中转站的轨道运输成本、地铁货运中转站到客户点的公路运输成本、货运中转站的固定运营成本、线路之间的换乘成本以及在货运中转站的装卸成本构成.

约束(3)表示客户点恰好由一个中转货运点进行服务; 约束(4)表示城市物流配送中心节点 i 的供给量与货运中转站 j 之间的货运量平衡; 约束(5)表示在每个货运中转节点间流量平衡; 约束(6)表示若客户点 k 由二级节点 j 负责服务, 则二级节点 j 必然被选中; 约束(7)表示每班次地铁 r_α 有且仅能服务一条路径; 约束(8)确保在非高峰时段每班次地铁 r_α 承载的货物总量不超过其剩余运能; 约束(9)保证每个货运中转节点处理的货物量不超过其运转能力.

2.2.2 基于地铁-货车协同的城市物流配送路径优化模型

第二阶段在确定货运中转站位置的基础上, 进一步优化地铁货运中转站与客户点之间货车的服务路径, 即确定城市末端最优配送路径. 在不改变地铁运行方案的前提下, 考虑地铁剩余运能、货车容量、客户服务软时间窗限制等为约束条件, 以配送过程中总成本最小为优化目标, 构建带时间窗的基于地铁的城市物流配送网络路径优化模型. 为便于研究与构建模型, 做出如下假设:

(1) 地铁线路支线运输路径和地铁干线中转路径固定;

(2) 所有客户点的需求已知, 且需求量稳定;

(3) 地下货运物流不会影响正常的地铁客运服务质量;

(4) 货车配送成后需返回货运中转站形成闭环;

(5) 每个地铁客货中转站均配备一个专属的、独立运作的货车配送车队.

$$\min U = \sum_{v \in V} \sum_{j \in N_T} \sum_{k \in N_L} c^v d_{jk}^v x_{jk} z_{jk}^v + \sum_{v \in V} F^v x^v + \\ \sum_{v \in V} \sum_{j \in N_T} \sum_{k \in N_L} c_o e^v d_{jk}^v z_{jk} + \sum_{k \in N_K} C(T_k). \quad (10)$$

s.t.

流量约束:

$$\sum_{v \in V} y_k^v = 1, \forall k \in N_k, \quad (11)$$

$$\sum_{j \in N_J} o_{jk}^v = \sum_{j \in N_J} o_{kj}^v. \quad (12)$$

资源约束:

$$\sum_{k \in N_K} q_k \cdot y_k^v \leq Q, \forall v \in V, \quad (13)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{k \in N_K} y_k^v \leq v_j, \forall j \in N_J. \quad (14)$$

时间窗与服务约束:

$$\mu_i(T_i) = \begin{cases} 0 & T_i < AE_i \\ \left(\frac{E_i - T_i}{E_i - AE_i}\right)^\alpha & AE_i < T_i < E_i \\ 1 & E_i < T_i < L_i \\ \left(\frac{T_i - L_i}{AL_i - L_i}\right)^\beta & L_i < T_i < AL_i \\ 0 & T_i > AL_i \end{cases}, \quad (15)$$

$$\frac{1}{|N_K|} \sum \mu_i(T_i) \geq 0.8, \forall k \in N_K. \quad (16)$$

变量取值约束:

$$z_{jk} \in \{0, 1\}, \forall j \in N_J, k \in N_K, \quad (17)$$

$$y_k^v \in \{0, 1\}, \forall k \in N_K, v \in V \sqrt{b^2 - 4ac}. \quad (18)$$

将末端配送路径优化建模为目标函数 (10), 该函数旨在综合最小化以下各项成本: 一是从货运中转站到客户点的公路运输成本: 二是货车开行的固定成本, 包括司机工资、维护保养费用等: 三是货车的碳排放惩罚成本: 四是时间窗惩罚成本, 实现成本最小化与服务质量达标的平衡。

约束 (11) 表示每个客户点只能由一辆货车为其服务, 且客户需求不可拆分: 约束 (12) 表示货车从地铁货运中转站出发进行服务, 最终会返回至此: 约束 (13) 表示货车的最大装载容量限制: 约束 (14) 表示每个地铁货运中转站进行配送服务的货车不能超过其拥有的车辆数: 约束 (15) 表示用户满意度: 约束 (16) 表示客户满意度均值下限: 约束 (17)-(18) 是决策变量的取值范围。

其中, 软时间窗惩罚成本 $C(T_i)$ 根据配送车辆到达客户点 k 的时刻 T_i 与其期望服务时间窗 $[E_i, L_i]$ 的关系, 分为以下四种场景计算, 表达式如下:

$$C(T_i) = \begin{cases} 0 & E_i \leq T_i \leq L_i \\ \theta_1 \cdot \Delta T_{i, \text{early}} & AE_i \leq T_i < E_i \\ \theta_2 \cdot \Delta T_{i, \text{late}} & L_i < T_i \leq AL_i \\ P_{i, \text{max}} & T_i < AE_i \gg \delta T_i > AL_i \end{cases} \quad (19)$$

2.2.3 两阶段模型关联性分析

本文构建的两阶段优化模型构成了一个序列决策系统, 其前一阶段的优化问题是在前一阶段决策结果的基础上展开的. 两阶段之间通过决策变量与目标函数紧密耦合, 其关联性主要体现在以下两个方面:

(1) 决策变量的结构性关联

第一阶段模型的输出定义了第二阶段模型的决

策空间. 选址变量 z_j 与服务分配变量 z_{jk} 共同确定了物流网络的物理结构与任务划分:

$z_j = 1$, 表示被选中的货运中转站, 构成末端配送的物理节点集;

$z_{jk} = 1$, 建立客户点 k 与客货中转站 j 的服务从属关系, 形成客户集合的空间划分.

这一关联机制将复杂网络分解为多个独立的配送子区域. 第二阶段路径优化即转化为在既定网络结构 $\{z_j, z_{jk}\}$ 下, 对每个客货中转站 j 在其服务客户集上进行路径优化.

(2) 目标函数的功能性关联

第一阶段目标函数 Z 包含基于直线距离 d_{jk}^v 的公路运输成本项, 该项为选址决策提供空间成本导向, 确保方案在战略层面的经济性: 第二阶段目标函数 U 对第一阶段确定的网络布局进行精确运营成本核算, 其中公路运输成本基于实际路径距离计算, 并集成碳排放与时间窗惩罚等运营成本要素.

全局目标函数 $F = Z + U$ 通过成本计算的功能分离, 既保障了战略决策的合理性, 又实现了运营成本的准确计算, 形成完整的成本优化体系.

3 算法设计

本文算法整合了自适应遗传算法和改进的蚁群算法, 具体流程如图 3 所示, 其详细算法设计如下.

3.1 自适应遗传算法求解货运中转站位置

在货运中转站选址中, 需要考虑多个因素, 如地铁站点的分布、物流需求的覆盖范围以及成本等, 通过改进的遗传算法可在复杂的约束条件下快速找到较优解, 通过模拟自然选择和遗传机制, 高效进行全局搜索, 避免陷入局部最优解, 其详细算法设计如下.

step1: 染色体编码设计与种群初始化

本文采用简单的二进制编码方式来表示每个可能的选址方案, 以此提高算法的运行效率. 具体来说, 用“1”表示选中某个候选货运中转站, 而“0”则表示未选中.

为生成初始种群, 需要平衡可行解的质量与多样性, 随机从所有候选中转站中选择形成一系列个体. 种群大小为 N , 每个个体的长度与候选货运中转站的数量一致. 例如, 若有 5 个候选货运中转站, 一个个体可以表示为 $[1, 0, 1, 0, 1]$, 这表示选中第 1、3、5 个货运中转站.

step2: 适应度函数计算

第一阶段中, 目标为最小化成本. 鉴于遗传算法迭代过程中通常保留适应度值较高的个体 (此类个体性能更优且更趋近最优解), 为引导算法向成本最

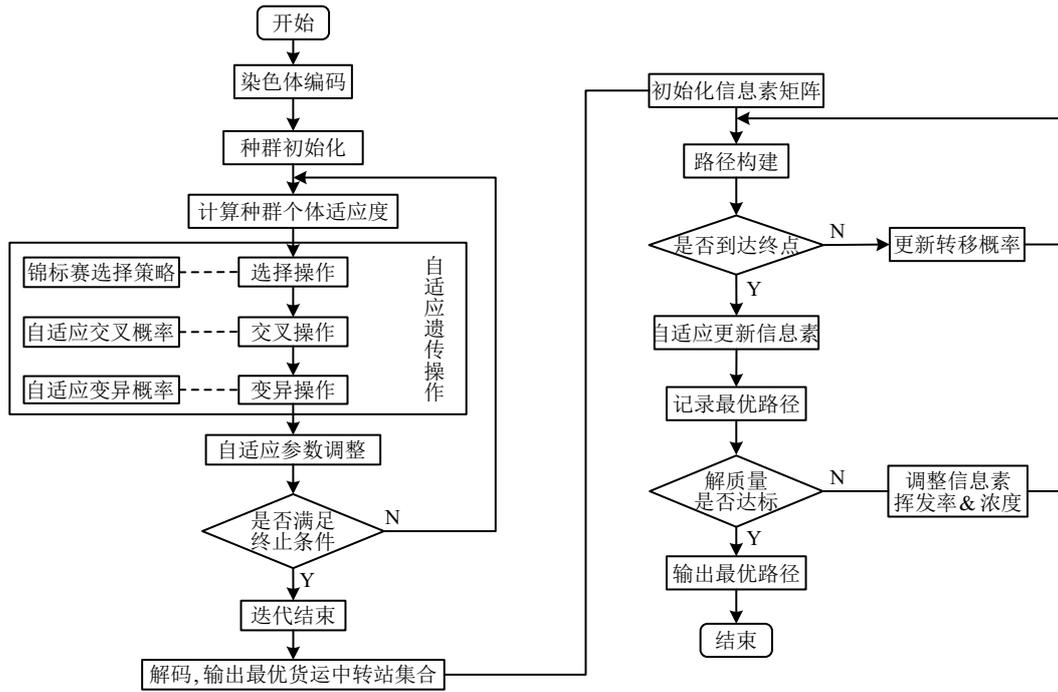


图3 算法框架图

小化方向优化, 本文将适应度函数定义为目标函数的倒数. 其中, Z 表示目标函数值, 对应个体的适应度值则通过如下倒数关系映射生成.

$$fit = \frac{1}{Z}. \quad (20)$$

step3: 设计遗传算子

选择算子: 采用锦标赛选择法, 从当前种群中随机选取部分个体, 再从中选出适应度最大的个体加入子代种群, 循环此步骤, 直至子代种群数量达到原来的种群规模. 接着, 选择父代种群中适应度最大的个体加入子代种群, 淘汰掉子代种群中适应度最小的个体, 对结果进行优化, 加速算法收敛.

交叉算子: 按照一定概率和两点交叉方式生成新个体, 在父代染色体中随机设置两个交叉点, 然后再进行部分基因交换.

变异算子: 本文采用两点交换突变方法, 依据预先设定的变异概率, 从子代个体中筛选出部分个体进行变异操作. 接着确定两个变异点, 随后将这两个变异点所对应的基因进行交换, 以此产生全新个体.

step4: 自适应参数调整

通过实时评估种群平均适应度并与预设目标对比, 动态调节交叉率和变异率: 若未达目标则增大参数值以增强全局搜索能力, 超过目标则减小参数值以强化局部搜索, 从而在优化过程中自适应平衡全局与局部搜索, 提升算法适应性与收敛速度.

step5: 终止准则

若连续 50 代最优适应度的改善幅度小于阈值

0.01%, 则算法停止运行. 若此条件未触发, 则以预先设定的最大迭代数作为终止准则, 达到最大迭代数时算法停止运行.

3.2 改进蚁群算法优化城市物流配送路径

在末端配送路径规划中, 配送点距离、交通状况和配送顺序等因素构成复杂约束. 蚁群算法模拟蚂蚁觅食, 能快速找出高效配送路径, 收敛速度快, 优势明显. 为提升算法性能, 从初始信息素设定、转移规则改良、信息素更新方式创新三方面进行优化, 以加快算法初始寻优速度, 提高搜索效能, 进一步优化末端配送路径, 提高算法搜索效率.

step1: 初始化信息素矩阵

传统蚁群算法常以逆欧几里得距离作为信息素初始值, 导致各路径信息素分布均匀, 蚂蚁随机选路时易产生无效路径. 为提升算法初期搜索效率、引导寻优方向, 本文基于地铁-货车协同运输问题特征优化信息素初始化方法: 结合路径实际长度、成本等多维约束动态调整信息素分布, 其数学表达如下:

$$\tau_{k_1 k_2}^{(0)} = \frac{1}{d_{k_1 k_2} + \alpha}. \quad (21)$$

其中, $\tau_{k_1 k_2}^{(0)}$ 是从客户节点 k_1 到 k_2 的初始信息素, $d_{k_1 k_2}$ 是客户节点 k_1 和 k_2 间的距离, α 为一个正调整因子, 以避免分母为零.

step2: 路径构建

路径构建模拟蚂蚁寻找食物的过程. 每只蚂蚁对应一辆货车, 从货运中转站出发, 按照如下规则进行移动, 根据当前路径上的信息素浓度来选择下一

步要访问的节点,逐步构建一条完整的配送路径.

$$P_{k_1 k_2} = \frac{(\tau_{k_1 k_2})^\beta \cdot (\eta_{k_1 k_2})^\alpha}{\sum_{n \in N} (\tau_{k_1 n})^\beta \cdot (\eta_{k_1 n})^\alpha}. \quad (22)$$

其中, $\tau_{k_1 k_2}$ 表示客户节点 k_1 和 k_2 间的信息素浓度, $\eta_{k_1 k_2}$ 表示从客户节点 k_1 到 k_2 的可取性, 参数 α 和 β 分别是 $\eta_{k_1 k_2}$ 和 $\tau_{k_1 k_2}$ 在移动概率中的影响程度, 集合 N 是蚂蚁在节点 k_1 时可选择下一节点的集合, 分母是所有可选节点 n 的相同表达式之和, 以此确保所有概率之和为 1.

step3: 信息素更新

本文采用自适应信息素更新机制来动态调整信息素的挥发率和强度, 根据蚂蚁表现和环境变化自适应调整信息素更新规则, 从而平衡全局搜索和局部搜索能力.

$$\tau_{k_1 k_2}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{k_1 k_2}(t) + \Delta\tau_{k_1 k_2}. \quad (23)$$

其中, $\tau_{k_1 k_2}(t)$ 为第 t 次迭代中, 客户需求点 k_1 和 k_2 之间的信息素浓度, ρ 表示每次迭代过后的信息素挥发率, $\Delta\tau_{k_1 k_2}$ 表示蚂蚁在路径上释放的信息素量.

step4: 迭代

所有蚂蚁完成循环后, 按照公式 (21) 更新信息素, 计算当前迭代得到的可行解, 并与前代所得到的可行解进行对比, 记录最优解.

step5: 终止条件

直到解的质量不再显著提高, 算法迭代结束, 输出最优解.

4 数值分析

为验证所提模型的有效性, 根据重庆市轨道交通一号线、三号线、十号线和某物流企业的数据设计实例, 并利用第 3 节算法对其求解. 使用 MATLAB R2021b 设计算法, 计算机配置为 Intel(R) Core(TM) i5-9300HF CPU、2.40GHz、8.00 GB, 在 Windows11 操作系统下运行. 本节对数值实验结果进行展示和必要分析.

截止至 2024 年, 重庆市轨道交通运营线路增至 13 条, 共设站点 193 个, 运营里程达 538 公里, 根据规划未来运营里程将达 1500 公里. 作为西部重要的工商业枢纽, 重庆市在工业原料输入和制成品输出上存在旺盛的物流需求, 对大运量、高效率运输模式的需求迫切. 同时, 其完善的轨道交通线网, 为开展地铁-货车联运提供了充分的基础实施条件.

4.1 实例分析

以重庆市 1、3、10 号线为例, 其工作日非高峰时间段为 5:00-6:00、10:00-16:00、20:00-22:00. 通过对

某日的历史客流数据进行深入分析, 获取这三条地铁线路上各车次的剩余空间, 具体数据详见图 4. 以这三条线路的地铁列车为例, 每车次在非高峰时段的平均客余运力为 3000kg.

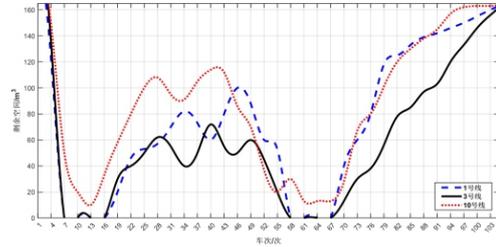


图4 某日地铁线路各车次剩余空间

4.1.1 货运中转站选址

(1) 货运中转站和客户需求点的确定

以重庆市地铁 1、3、10 号线为研究对象, 假定渝中区、渝北区、南岸区及江北区的城市配送中心, 即鱼洞地铁站、二塘地铁站及江新桥地铁站, 依次用 i_1, i_2, i_3 表示, 向各中心城区的客户配送货物. 从上述区域的现有地铁换乘站中选择 7 个备选货运中转站点, 即牛角沱、红旗河沟、曾家岩、两路口、七星岗、南坪、四公里, 依次编号为: $j_1, j_2, j_3 \dots j_7$, 再通过选址模型分析, 确定该区域内基于地铁的货运中转站.

以邮政公司作为需求点位置信息的来源. 邮政是涉及物流业务的企业中全国服务范围最广、业务最多的企业, 物流运输业务覆盖面积广, 在物流运输中占据特殊的地位, 因此非常具有代表性. 通过中国邮政集团公司公示的重庆市邮政网点分布地址, 中心城区数据 287 条, 从中选择 27 个具有代表性的邮政网点经纬度数据作为客户需求点, 编号为: $k_1, k_2, k_3 \dots k_{27}$.

(2) 数据选取

如图 5 所示, 图中标明了备选货运中转站点与客户点的空间分布情况. 备选货运中转站点的主要节点信息包括其经纬度坐标. 客户点的节点信息则涵盖经纬度位置、期望时间窗、可接受时间窗、需求量及服务时间.

本文在配送工具上选择小厢式货车, 设每辆车的行驶速度均为 30 km/h, 每辆车的固定使用成本 (包括司机工资、维护保养费用、折旧费等) 为 220 元/辆, 车辆额定载重量为 2000 kg, 单位运输成本为 0.03 元/kg/km; 地铁额定剩余运能为 3000 kg, 运行时速为 60 km/h, 单位运输成本为 0.012 元/kg/km; 货车行驶单位公里的碳排放量为 0.268kg/km, 单位碳排放量惩罚成本为 18.866 元/kg; 单位货物装卸成本为 0.13 元/kg, 货运中转站点的固定运营费用为 1300

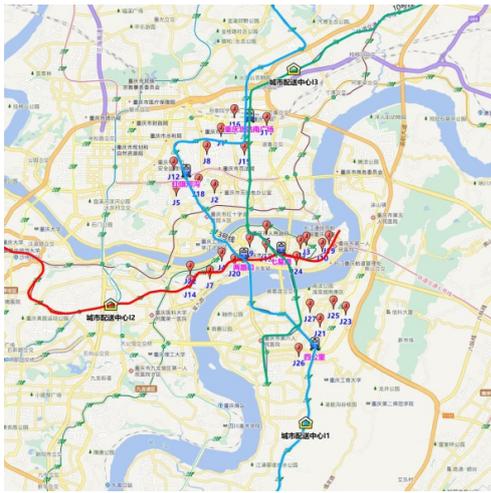


图5 某日地铁线路各车次剩余空间

元: 不同线路之间的换乘成本为 280 元。

(3) 求解结果

为验证模型及设计算法的有效性, 算法相关参数设置为: 最大迭代次数为 600, 初始种群规模为 230, 变异率为 0.05, 交叉概率为 0.7. 通过在 MATLAB 软件中编码并运行程序, 得到最优函数值为 26 762.231 元, 其中公路运输成本为 16 983.373 元, 轨道运输成本为 2 604.958 元, 换线成本为 280 元, 货运中转站固定运营成本为 5 200 元, 装卸成本为 1 693.9 元。

经迭代, 计算出决策变量的取值结果为: $y_2=y_4=y_5=y_7=1$, 此时最优的中转节点选址方案为 $j_2、j_4、j_5、j_7$, 即被选中的中转节点为红旗河沟地铁站、两路口地铁站、七星岗地铁站、四公里地铁站, 其最优选址及客户分配方案如图 6 所示。

(4) 结果分析

从求解结果和上述分析可以得出, 基于地铁的货运中转节点选址, 需综合考虑投资成本、运营成本、需求点分布和需求总量等因素, 以获得科学选址结果, 降低配送成本, 提高配送效率, 以实现效益最大化。

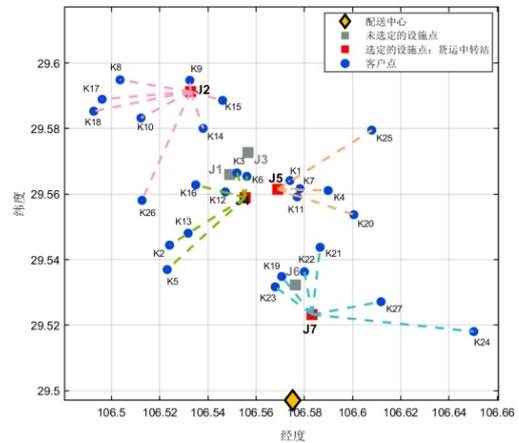


图6 货运中转站点最优选址与分配方案图

4.1.2 基于地铁-货车协同的城市物流配送路径优化

(1) 实例介绍

基于第一阶段货运中转站选址结果, 选取重庆市地铁 3 号线作为干线运输线路, 并筛选出该线路上三个货运中转站, 即红旗河沟地铁站、两路口地铁站、四公里地铁站, 编号分别为 $j_2、j_4、j_7$, 及其服务的 21 个客户需求点, 编号为 $k_2、k_3、k_5、k_6、k_8、k_9、k_{10}、k_{12}、k_{13}、k_{14}、k_{15}、k_{16}、k_{17}、k_{18}、k_{19}、k_{21}、k_{22}、k_{23}、k_{24}、k_{26}、k_{27}$. 各节点的空间位置、需求量、服务时间窗及服务时长等参数已知. 通过这一研究设计, 此阶段聚焦于单条地铁线路与多货运中转站场景下的末端配送路径优化问题。

(2) 求解结果

为验证基于地铁与货车的城市物流协同配送路径优化模型及改进蚁群算法的有效性, 算法相关参数设置为: 蚂蚁数量为 80: 为提供充分收敛可能性, 避免过早终止, 最大迭代次数为 150: 调整因子 α 为 1.2: 启发式信息重要性 β 为 2.5: 为平衡信息素积累与挥发, 信息素挥发率 ρ 为 0.35: 信息素增量 Q 为 80. 在 MATLAB 软件中编码并运行程序, 得到最优配送路径, 如表 2 所示。

表2 基于地铁的城市物流协同配送最优路径

序号	配送路径	运输量(kg)	配送距离(km)	碳排放量(kg)
1	$I_1 \Rightarrow J_7 \rightarrow K_{21} \rightarrow K_{22} \rightarrow K_{19} \rightarrow K_{23} \rightarrow J_7$	1650	6.47	1.734
2	$J_7 \rightarrow K_{27} \rightarrow K_{24} \rightarrow J_7$	840	13.17	3.530
3	$J_7 \Rightarrow J_4 \rightarrow K_5 \rightarrow K_2 \rightarrow K_{13} \rightarrow J_4$	1630	8.23	2.206
4	$J_4 \rightarrow K_6 \rightarrow K_3 \rightarrow K_{16} \rightarrow K_{12} \rightarrow J_4$	1950	4.88	1.308
5	$J_4 \Rightarrow J_2 \rightarrow K_9 \rightarrow K_{15} \rightarrow K_{14} \rightarrow K_{26} \rightarrow J_2$	1950	10.73	2.876
6	$J_2 \rightarrow K_8 \rightarrow K_{17} \rightarrow K_{18} \rightarrow K_{10} \rightarrow J_2$	2000	8.45	2.265
总计		10020	51.93	13.917

由于启发式算法存在随机性, 多次运行算法并取结果的平均值或统计分析, 可以更好地估计问题的真实最优解. 运行算法 20 次并对结果求取平均值,

配送总成本最优值集中在 17 192.721 元, 其中, 货运中转站到客户点的公路运输成本为 15 609.91 元, 货车开行的固定成本为 1 320 元, 货车的碳排放惩罚成

本为 262.563 元, 运输总距离为 51.93km.

4.1.3 配送模式对比分析

基于以上实例数据, 对货车单独配送模式进行计算, 配送路径详见表 3: 不同客户依据距离远近进行着色区分, 配送方案路径如图 7 所示.

表3 传统货车配送最优路径

序号	配送路径
1	$I_1 \rightarrow K_{18} \rightarrow K_{17} \rightarrow K_8 \rightarrow K_{10} \rightarrow I_1$
2	$I_1 \rightarrow K_5 \rightarrow K_2 \rightarrow K_{13} \rightarrow I_1$
3	$I_1 \rightarrow K_{23} \rightarrow K_{19} \rightarrow K_{22} \rightarrow K_{21} \rightarrow I_1$
4	$I_1 \rightarrow K_6 \rightarrow K_3 \rightarrow K_{12} \rightarrow K_{16} \rightarrow I_1$
5	$I_1 \rightarrow K_{14} \rightarrow K_{15} \rightarrow K_9 \rightarrow K_{26} \rightarrow I_1$
6	$I_1 \rightarrow K_{27} \rightarrow K_{24} \rightarrow I_1$

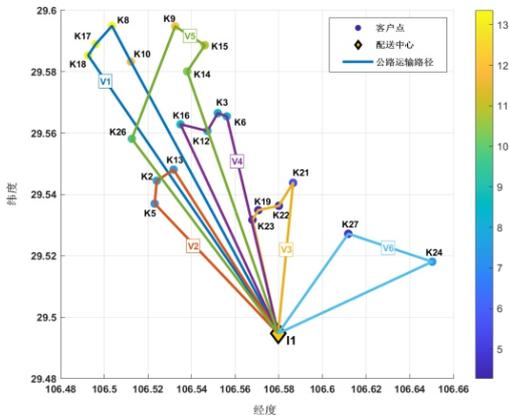


图7 传统货车配送最优路径

该模式下总成本为 37684.473 元, 其中公路运输总成本为 35762.94 元, 货车开行的固定成本为 1320 元, 碳排放惩罚成本为 601.53 元, 运输总距离为 118.97km.

将基于地铁-货车协同的城市物流配送路径优化方案与传统货车配送方案进行对比, 如表 4 所示. 此外, 在路径优化阶段的货运中转站 j_5 (七星岗) 因未纳入此阶段研究范围内, 故未参与实际配送, 但与其相关的固定运营成本 (1,300 元/站) 仍需计入总成本, 以反映基础设施的全局投入.

由上表可知, 与传统货车单独配送模式相比, 基于地铁-货车协同的城市物流配送模式在经济效益、环境效益和运营效率方面均展现出显著优势. 其核心在于将地铁纳入城市物流配送体系, 通过地铁网

络分担部分物流运输任务, 实现地铁运输与城市道路运输的协同, 从而有效降低公路运输的依赖程度, 缩短货车行驶距离及相关成本. 这一模式不仅符合物流配送行业高效、绿色的发展趋势, 还为城市可持续物流体系建设提供了可行的解决方案. 因此, 在地铁基础设施完善的城市区域, 推广该协同配送模式具有显著的实践价值.

4.2 算法性能分析

为讨论本文算法对基于地铁的城市物流协同配送模式下选址-路径优化问题的适用性, 从 Solomon 算例中选取三种不同分布的数据集来验证研究模型的有效性, 包括集群分布 C 类, 均匀布 R 类和集群均匀分布 RC 类, 分别从三类算例中选取 20、50、100 个数据进行实验, 并从中选取合适的数据作为地铁货运中转站, 共生成 9 个数据集进行实验, 其他参数均采用 Solomon 标准算例的默认值, 以确保结果的可比性, 使用遗传-蚁群混合算法进行求解分析. 针对不同规模 (小、中、大) 的数据集分别迭代 300、500、700 次对算例进行测算, 具体结果如表 5 所示.

由测试结果可知, 与传统货车配送相比, 基于地铁-货车协同的城市物流配送模式成本显著降低, 最多可节约 314843.82 元, 平均总成本节约 117599.51 元, 节约百分比为 66.60%, 该模式不仅能够有效降低全局成本, 而且随着客户点数量的增加, 其成本增加幅度较小, 显示出良好的规模效应. 此外, 不同客户点分布对成本节约的影响存在差异, 但总体上基于地铁-货车协同的城市物流配送模式表现出较高的成本节约效果, 验证了该模式的适用性和有效性.

为进一步验证研究算法的有效性, 引入遗传算法 (GA)、蚁群算法 (ACA) 和遗传模拟退火算法 (GA-SA) 与本文两阶段混合算法进行对比, 在其它参数不变的情况下, 只考虑协同配送的结果并随机运行各算例 10 次, 得到的平均解、最优解及平均改善率的详细数据, 结果如表 6 所示.

基于表 7 对比结果, 本文算法展现出全面的性能优势. 相较于经典 GA 与 ACA 算法, 其平均解与最优解在所有算例上均具有显著优势, 且优势随问题规模扩大而增加, 证明了改进策略的有效性与可扩展性. 与 GA-SA 算法相比, 本文算法在最优解质

表4 不同配送模式下城市物流配送方案对比

配送模式	总成本/元	运输成本/元		货运中转站 相关成本/元	货车开行 固定成本/元	碳排放 惩罚成本/元	参与配送 货车数量/辆	货车配送 总距离/km
		公路运输成本/元	轨道运输成本/元					
基于地铁的协同配送	26300.279	15609.91	2604.958	6502.6	1320	262.563	6	51.93
传统货车配送	37684.473	35762.94	—	—	1320	601.533	6	118.97
优化率	30.21%	56.35%	—	—	0%	56.35%	0%	56.35%

表5 算例测试结果

算例集	客户点	传统货车配送模式	基于地铁-货车协同的城市物流配送模式	成本节约	成本节约百分比
C101	20	8779.28	6635.40	2143.88	24.42%
C102	50	56790.28	23770.79	33019.49	58.14%
C103	100	310346.55	65942.28	244404.27	78.75%
R101	20	20133.02	8351.22	11781.80	58.52%
R102	50	108346.55	25927.41	82419.14	76.07%
R103	100	318231.11	68774.02	249457.09	78.39%
RC101	20	28372.02	9149.80	19222.22	67.75%
RC102	50	133706.53	32602.61	101103.92	75.62%
RC103	100	385131.40	70287.58	314843.82	81.75%
平均		152204.08	34604.57	117599.51	66.60%

表6 算法性能对比

算例集	GA		ACA		GA-SA		GA_ACA		平均改善率	
	平均解	最优解	平均解	最优解	平均解	最优解	平均解	最优解	GA	ACA
C101	8285.62	7432.18	8443.29	7818.47	7580.33	7110.45	7270.47	6537.54	12.25%	13.89%
C102	31438.27	28875.64	32192.43	27741.85	26950.16	24100.73	23701.19	21278.02	24.61%	26.38%
C103	112247.83	93825.61	113624.79	100893.42	91506.23	88352.33	82015.91	67263.70	26.93%	27.82%
R101	9524.81	8372.35	9941.73	8896.28	8729.22	8280.68	8090.73	7925.97	15.06%	18.62%
R102	35239.82	31367.15	35648.62	30325.79	28934.75	24626.98	25872.34	22717.03	26.58%	27.42%
R103	91982.64	88934.27	93653.18	90925.84	89278.89	79500.60	69123.43	63342.98	24.85%	26.19%
RC101	13037.45	12468.33	13324.61	12921.74	12259.37	10800.03	10646.41	8939.22	18.34%	20.10%
RC102	62525.36	58482.17	64393.24	61267.35	49372.45	40136.88	45316.03	31708.73	27.52%	29.63%
RC103	119732.56	11345.39	125988.74	121753.62	90152.15	80336.86	87055.43	74072.96	27.29%	30.90%

表7 算子级消融实验

实验组	启用算子说明	实例	平均解	最优解	标准差
Base	标准SGA+SACO	C101	8567.42	8112.35	328.7
		R101	10789.33	10201.58	356.4
		RC101	14102.87	13456.21	412.5
Exp-GA	+改进遗传算子	C101	8203.17	7846.61	295.4
		R101	10312.47	9845.32	320.8
		RC101	13653.39	13012.74	385.2
Exp-ACO	+改进蚁群算子	C101	8345.27	7902.34	310.3
		R101	10403.66	9901.85	338.9
		RC101	13275.21	12997.56	398.1
Exp-Hybrid	+改进全部算子(无协同)	C101	7946.62	7523.47	280.1
		R101	9968.74	9513.36	305.7
		RC101	13113.45	12267.89	365.4
Proposed	本文完整算法	C101	7236.63	6537.54	245.2
		R101	8126.68	7925.97	268.3
		RC101	10623.16	8927.22	310.5

量上更具竞争力, 在平均解稳定性上亦表现相当. 这表明, 针对本研究, 本文算法相比 GA-SA 单一混合搜索范式, 能通过问题分解与阶段引导更高效地探索解空间, 从而在求解质量与稳定性上取得更优均衡.

4.3 算子级创新性消融实验

为验证本文所提出的自适应交叉与变异算子、精英保留选择算子、基于反距离加权的初始信息素以及自适应信息素更新算子的有效性, 设计

算子级消融实验. 以标准遗传算法 (SGA) 与标准蚁群算法 (SACO) 的简单串联作为基准模型 (Base), 通过依次叠加本文提出的改进算子, 构建四个对比实验组: 1) Exp-GA: 在 Base 基础上, 仅启用改进的遗传算子; 2) Exp-ACO: 在 Base 基础上, 仅启用改进的蚁群算子; 3) Exp-Hybrid: 在 Base 基础上, 同时启用四个改进算子但不嵌入两阶段协同优化机制; 4) Proposed: 完整集成本文所有创新模块的算法模型,

即同时启用全部改进算子, 并采用第3章所述的两阶段协同优化框架。

实验选用代表性算例, 并随机运行各算例10次, 统计其最优成本、平均成本及标准差, 详细结果如表7所示。

通过分析可知, 改进的遗传算子 (Exp-GA) 与蚁群算子 (Exp-ACO) 均独立有效, 相比于基准模型 (Base) 的平均成本分别降低约4.5%与3.8%, 验证了各算子改进策略的有效性: 全部改进算子的叠加 (Exp-Hybrid) 表现出协同效应, 性能进一步提升: 引入两阶段协同框架的完整算法 (Proposed) 则实现了显著突破, 在最优成本上较 Exp-Hybrid 进一步降低约13.5%, 且结果最为稳定. 这表明, 本文算法不仅聚焦于底层算子改进, 更关键的是在于通过两阶段协同框架进行整合, 从而在求解地铁-货车协同配送问题上取得系统性性能提升。

4.4 灵敏度分析

4.4.1 货运中转站数量

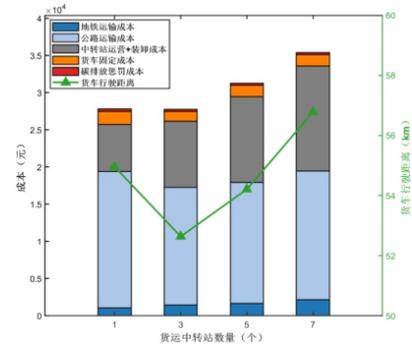
货运中转站是不同运输模式的衔接节点, 其数量直接影响协同效率. 增加中转站数量, 虽然会使中转站固定成本上升, 但可缩短运输距离, 进而降低公路运输成本以及货车碳排放惩罚成本, 因此在实际决策中需要进行权衡. 分析中转站数量变化对总成本的影响, 有助于确定最优中转站数量, 有效避免资源浪费。

本研究分别设置货运中转站数量为1、3、5和7的四种情景, 计算具体结果如图8(a)所示。

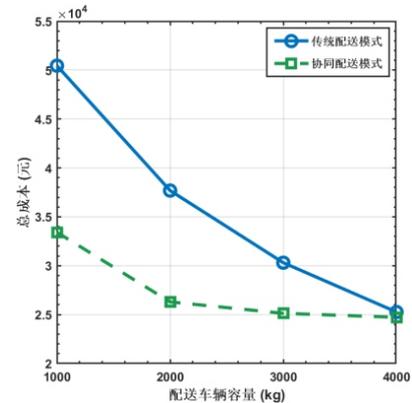
结果显示, 货运中转站的数量存在一个明确的最优决策区间. 当数量从1增至3时, 末端配送距离的缩短主导了成本变化, 所带来的公路运输与碳排放成本的节约, 显著超过了中转站固定成本的增加, 实现了显著的规模经济效益. 然而, 当数量增至5个时, 固定成本的边际增加已无法被运输效率的边际提升所抵消, 出现了规模不经济现象. 因此, 从成本控制维度来看, 设置3个中转站为本案例中的最优策略. 该点即为基础设施投资的成本效益阈值, 为管理者的枢纽网络布局提供了关键的定量依据。

4.4.2 配送车辆容量

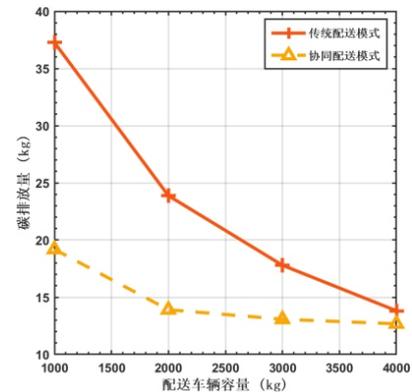
为验证当前优化结果在环境政策变化下的鲁棒性, 帮助企业理解碳排放相关政策变动对运营成本的影响, 并指导企业在减少碳足迹和提高经济效益之间做出平衡. 本研究分别设置配送车辆容量为1000 kg、2000 kg、3000 kg和4000 kg的四种情景, 并对算例进行求解, 具体结果如图8(b)所示。



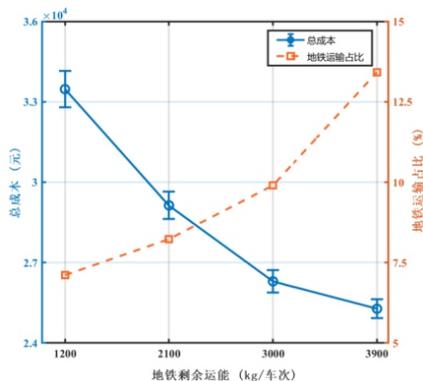
(a) 货运中转站数量灵敏度分析



(b) 不同配送模式下配送车辆容量灵敏度分析



(b) 不同配送模式下配送车辆容量灵敏度分析



(c) 地铁剩余运能灵敏度分析

图8 灵敏度分析

结果显示, 随车辆容量增大, 两种模式均因装载率提升而受到规模经济效益, 单位成本显著降低. 然而, 成本的边际节约率随容量增加而递减. 值得注意的是, 协同配送模式在任一容量下均保持成本优势,

这证明了该模式在车队技术路线选择上具有更强的鲁棒性。对于决策者而言, 此结论指出了策略权衡点: 当车辆容量超过 2000 kg 后, 车队配置策略应从追求单一车辆的规模经济, 转向根据实际业务量波动优化车辆调度与组合, 以避免投资回报率的下降。

4.4.3 地铁剩余运能

地铁非高峰时段的闲置运能是协同配送的核心资源, 其波动性会显著影响运输成本结构。本研究分别设置地铁剩余运能为 1200 kg、2100 kg、3000 kg、3900 kg 四种情景, 并对算例进行求解, 求解结果如图 8(c) 所示。

当运能从基准 3000 kg 降低 30% 至 2100 kg 时, 总成本显著上升 9.73%; 而提升 30% 至 3900 kg 则可降低成本 3.89%, 呈现明显的成本弹性特征。基于此, 实施差异化管理策略: 在运能充裕 (>3000 kg) 时优先采用地铁运输大宗货物并扩展服务网络, 最大化成本节约; 临界区间 ($2100 \text{ kg} \leq \text{运能} \leq 3000 \text{ kg}$) 时启动动态管理策略, 如实行货运优先级分配, 并准备备用配送方案; 运能紧张 ($< 2100 \text{ kg}$) 时启动动态定价和备用车队机制, 分流非紧急订单, 集中资源保障高优先级客户, 长期则应优化货运排班, 并在轨道规划中预留专用货运容量。此“阈值-策略”联动机制, 为应对地铁客运波动、保障物流系统韧性提供了决策框架。

5 结论

本文针对城市轨道交通与货车协同配送下的物流网络优化问题, 构建了一种基于地铁的地下物流选址-路径两阶段优化模型。该模型第一阶段优化货运中转站布局及其服务分配, 第二阶段在既有地铁线网基础上优化配送路径, 重点聚焦于最后一公里城市末端配送路径优化。结合模型特征, 设计由自适应遗传算法与改进蚁群算法构成的两阶段混合求解算法, 并依托某物流企业的实际配送案例进行验证, 对比传统货车配送模式下的总成本与路径优化效果。研究表明: 1) 基于地铁的城市物流协同配送模式可有效提升城市物流配送效率, 降低配送成本; 2) 货运中转站的合理布局与服务分配对优化全网运作成本影响显著; 3) 末端配送路径的优化对于提升客户满意度与减少碳排放具有重要作用。

未来值得进一步研究的问题: 1) 考虑动态变化, 如客户需求波动和交通拥堵; 2) 碳排放计算进一步考虑载重量变化对油耗的影响; 3) 动态调整优化模型参数, 实际运营中地铁剩余运能受客流波动、临时

调度等影响, 运能呈现时变特征, 如重庆地铁 1 号线平峰期运能波动达 $\pm 15\%$ 。

参考文献 (References)

- [1] 中共中央国务院. 交通强国建设纲要[EB/OL]. (2019-09-19)[2025-08-16]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.
- [2] Li S Q, Zhu X N, Shang P, et al. Scheduling shared passenger and freight transport for an underground logistics system[J]. *Transportation Research — Part B: Methodological*, 2024, 183: 102907.
- [3] 胡万杰, 董建军, 任睿, 等. 基于客货协同的地铁货运系统设施规划研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(5): 1351-1361.
(Hu W J, Dong J J, Ren R, et al. Planning for the metro-based underground logistics system facility based on passenger-freight collaboration[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(5): 1351-1361.)
- [4] Hu W J, Dong J J, Yang K, et al. Network planning of metro-based underground logistics system against mixed uncertainties: A multi-objective cooperative co-evolutionary optimization approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 217: 119554.
- [5] 王小林, 赵瀚. 基于地铁的城市地下物流系统探讨[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(5): 1273-1282.
(Wang X L, Zhao H, Discussion on urban underground logistics system based on metro[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(5): 1273-1282.)
- [6] Hu W J, Dong J J, Yang K, et al. Modeling real-time operations of metro-based urban underground logistics system network: A discrete event simulation approach[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 132: 104896.
- [7] Hu W J, Ren R, Yang J P. Unequal-area facility layout optimization for a freight-passenger integrated metro station considering logistics functional partitioning and device allotment: A bi-level programming method[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2025, 206: 111189.
- [8] Chen Z L, Hu W J, Xu Y X, et al. Exploring decision-making mechanisms for the metro-based underground logistics system network expansion: An example of Beijing[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 139: 105240.
- [9] Zhang H Y, Zhang J, Zheng C J, et al. Node location of bi-level urban metro-based ground-underground logistics distribution[J]. *Multimodal Transportation*, 2024, 3(1): 100119.
- [10] Wei L X, Chen Y F, Guo D J, et al. A last-mile delivery system for underground logistics with “self-pickup +” and “home-entry +” modes[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 147: 105678.
- [11] Di Z, Yang L X, Shi J G, 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.
- [12] 王强, 何艺鸣. 基于地铁物流的结合式客货共线运输模式探讨[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(4): 998-1007.
(Wang Q, He Y M. Discussion on contacted passenger and freight mode based on metro logistics[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(4): 998-1007.)
- [13] 杨雯雯, 孟学雷, 韩立刚, 等. 综合负载均衡下市域-城轨贯通运营开行方案优化[J]. *控制与决策*, 2026, 41(2): 351-361.
(Yang W W, Meng X L, Han L G, et al. Optimization of train operation plans for suburban and urban rail integration based on comprehensive load balancing[J]. *Control and Decision*, 2026, 41(2): 351-361.)
- [14] Li Z J, 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] Wang Z, Wei Y G, Shang P. Freight transport using additional railcars attached to intercity passenger trains with transshipment and railcar circulation: Tabu-search-based Lagrangian heuristic[J]. *Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 178: 103287.
- [16] An N, Yang K, Chen Y C, et al. Wasserstein distributionally robust optimization for train operation and freight assignment in a metro-based underground logistics system[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 192: 110228.
- [17] 周芳汀, 周国华, 张锦. 基于地铁开展城市配送的选点-路径问题[J]. *控制与决策*, 2018, 33(7): 1247-1254.
(Zhou F T, Zhou G H, Z J. Point-routing problem of urban distribution based on subway[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(7): 1247-1254.)
- [18] 刘博宇, 梁承姬, 王钰. 特大型城市地下物流多层次网络优化研究[J]. *计算机工程*, 2023, 49(12): 311-320.
(Liu B Y, Liang C J, Wang Y. Research on multilevel network optimization of urban underground logistics in megalopolis[J]. *Computer Engineering*, 2023, 49(12): 311-320.)
- [19] 张得志, 张湘鹏, 王润泽, 等. 基于两阶段的超大型城市物流网络选址与服务路径优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(4): 1270-1279.
(Zhang D Z, Zhang X P, Wang R Z, et al. Network layout and route optimization of logistics network in megacities based on two-echelon method[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(4): 1270-1279.)
- [20] 任睿, 胡万杰, 董建军, 等. 轴辐式城市地铁-货运系统网络布局优化[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(7): 1699-1712.
(Ren R, Hu W J, Dong J J, et al. Optimization of urban metro-based underground logistics system network with hub-and-spoke layout[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(7): 1699-1712.)
- [21] 崔瑶, 周晓晔, 何亮. 基于地铁-货车联运的动态配送选点-路径问题[J]. *铁道学报*, 2023, 45(1): 9-19.
(Cui Y, Zhou X Y, He L. Point-routing problem of dynamic distribution based on subway-freight truck intermodal transportation[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(1): 9-19.)
- [22] Zhao L J, Zhou J P, Li H Y, 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.
- [23] 张宇昂, 陈静怡, 张肖飞, 等. 考虑客户属性的城市公铁联运物流选址-路径优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2025, 22(4): 1554-1565.
(Zhang Y A, Chen J Y, Zhang X F, et al. Locating-routing optimization of urban road-rail intermodal transportation network with consideration of customer attributes[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2025, 22(4): 1554-1565.)
- [24] Escobar-Vargas D, Crainic T G. Multi-attribute two-echelon location routing: Formulation and dynamic discretization discovery approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 314(1): 66-78.
- [25] 舒达, 梁承姬, 王钰, 等. 基于双边匹配的城市地铁多级配送选址-路径研究[J]. *计算机工程*, 2024, 50(11): 369-379.
(Shu D, Liang C J, Wang Y, et al. Research on multi-level distribution location-route of urban subway based on bilateral matching[J]. *Computer Engineering*, 2024, 50(11): 369-379.)
- [26] 李慧芳, 胡大伟, 陈希琼, 等. 考虑碳排放的混合轴辐式多式联运网络枢纽扩增选址-路径问题[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(4): 306-321.
(Li H F, Hu D W, Chen X Q, et al. Expanding hub location-routing problem for hybrid hub-and-spoke multimodal transport network considering carbon emissions[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(4): 306-321.)

作者简介

葛显龙 (1984-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为城市交通网络优化、车辆路径优化、智能算法, E-mail: gexianlong@cqjtu.edu.cn;

孟祥雯 (2001-), 女, 硕士生, 主要研究方向为城市交通网络优化, E-mail: 15110863575@163.com;

王博 (1993-), 男, 博士生, 主要研究方向为城市交通网络优化, E-mail: 250388951@qq.com;

刘俊麟 (2002-), 男, 硕士生, 主要研究方向为城市网络优化, E-mail: 622240910080@mails.cqjtu.edu.cn.