

地铁物流系统运营组织研究综述： 从单线优化到网络协同的演进

朱宇婷¹, 魏 畅¹, 刘 路², 光志瑞³, 朱梦晨⁴

(1. 北京工商大学商学院, 北京 100048; 2. 扬州大学土木与交通学院, 江苏扬州 225127;
3. 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044; 4. 北京交通发展研究院, 北京 100161)

摘 要: 针对地铁物流系统运营组织问题, 基于国内外实践, 以 2016—2025 年 Web of Science 和 CNKI 等数据库中的文献为样本, 采用文献计量与内容分析结合的方法, 对该领域研究进展展开剖析。在此基础上, 从研究对象、利益主体、运输组织模式、列车调度、运力配置、货流分配、建模策略与求解算法等方面, 对运用量化分析方法的文献进行深入探讨。研究发现: 国外研究起步较早但未能持续推广, 国内关注度虽高却仍处于小规模探索阶段。现有研究在分析运输组织模式、列车调度、运力配置与货流分配等关键问题时, 缺乏系统性关联, 亟需构建多要素协同的一体化优化框架。研究对象需进一步从单线扩展至复杂网络, 以增强理论的实用性与适用性。在绿色低碳目标下, 将能耗指标纳入调度优化, 并融入再生制动能量利用等低碳策略, 具有重要意义。同时, 突破固定需求假设, 加强对不确定性与弹性需求的响应能力, 有助于提升研究与现实的契合度, 开发适用于大规模网络的优化算法依然是未来的关键方向。

关键词: 地铁; 城市物流; 运营组织; 文献计量; 建模与求解

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)03-0054-11

A Review of Operational Organization in Subway Logistics Systems: Evolution from Single-Line Optimization to Network Coordination

ZHU Yuting¹, WEI Chang¹, LIU Lu², GUANG Zhirui³, ZHU Mengchen⁴

(1. Business School, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048; 2. College of Civil Engineering and Transportation, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127; 3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; 4. Beijing Transport Institute, Beijing 100161)

Abstract: This paper focuses on the operational organization issues of metro logistics systems, drawing on domestic and international practices and taking literature from 2016 to 2025 in databases like Web of Science and CNKI as samples. By integrating bibliometric and content analysis methods, it examines research progress in this field. Subsequently, it provides an in-depth review of studies using quantitative analysis methods from perspectives such as research objects, stakeholders, transportation organization modes, train scheduling, capacity allocation, freight flow distribution, modeling strategies, and

收稿日期: 2025-07-09 修回日期: 2025-09-17

第一作者: 朱宇婷, 女, 博士, 讲师, 从事轨道交通运营管理、城市货运管理等方面研究, zhuyuting@btbu.edu.cn

通信作者: 刘路, 女, 博士, 讲师, 从事城市交通规划与管理研究, liulu@yzu.edu.cn

基金项目: 北京市生态环境科技项目(BJST20250212); 北京市教育委员会科研计划项目(SM202410011001); 江苏高校哲学社会科学
研究(2025SJYB1543)

引用格式: 朱宇婷, 魏畅, 刘路, 等. 地铁物流系统运营组织研究综述: 从单线优化到网络协同的演进[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(3): 54-64.

Zhu Yuting, Wei Chang, Liu Lu, et al. A review of operational organization in subway logistics systems: evolution from single-line optimization to network coordination[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(3): 54-64.

solution algorithms. The findings show that international practice and research started earlier but have not been continuously promoted, while domestic research, despite considerable attention, remains in a small-scale exploratory phase. Current research lacks systematic connections when analyzing key issues like transportation organization modes, train scheduling, capacity allocation, and freight flow distribution, highlighting the urgent need to construct an integrated optimization framework for multi-element collaboration. The research objects need to be further extended from single-line scenarios to complex networks to enhance the practicality and applicability of the theoretical findings. Under the green and low-carbon objective, incorporating energy consumption indicators into scheduling optimization and integrating low-carbon strategies such as regenerative braking energy utilization is of great significance. Meanwhile, moving beyond fixed demand assumptions and strengthening the ability to respond to uncertainty and elastic demand can improve the alignment between research and reality. Additionally, developing optimization algorithms suitable for large-scale networks remains a key direction for future research.

Keywords: subway; urban logistics; operational organization; bibliometric analysis; modeling and solution methods

城市物流是保障社会经济发展和居民生活的重要基础,近年来发展迅速。然而,以公路运输为主的传统物流系统带来了交通拥堵和环境污染等问题。研究显示,城市货运占用了30%~40%的道路资源,产生了16%~50%的空气污染和碳排放^[1-2]。为满足日益增长的物流需求,推动物流业绿色可持续发展,亟须探索高效、低碳的新型城市物流模式。

“地下物流系统”作为一种依托管道或隧道进行货物运输的新兴概念,为城市物流提供了新的思路^[3]。其中,地铁物流系统是一种依托城市地铁网络,实现客货协同运输的地下物流模式^[4]。近年来,该模式因可充分利用既有轨道资源、建设周期短、环境效益显著而受到学界和业界的广泛关注。我国也给予了明确的政策支持,《交通强国建设纲要》《交通领域科技创新中长期发展规划纲要(2021—2035年)》等文件均提出发展“地下物流配送系统”、“开发适用于地铁客运空档期专用的载运工具”。国内外学者也从设施设备、运营模式、经济效益、功能定位等方面探讨了其可行性^[2, 5-10]。

尽管相关研究表明地铁物流系统具有发展潜力,但运营组织问题始终是制约其大规模推广的关键。与仅服务客运的传统地铁系统不同,地铁物流运营需在保障客运服务的基础上,实现货运调度与资源优化,其核心在于构建高效的客货协同运营组织与调度方案。表面上看,地铁物流运营组织似乎仅是将传统地铁客运中的目标与约束替换为货运相关内容,其核心模型并无本质区别。但实际上,一方面,地铁物流需在保障客运优先的前提下运行;另一方面,客流和货流的生成机制亦存在显著差异,即客流是乘客自主选择的结果,而货物是运营企业统一规划的结果。因此,地铁物流运营组织不再是仅考虑乘客需求的列车运营调度问题,而是在保障客运服务基础上,兼顾货运需

求,涵盖组织模式选择、列车调度、运力配置和货流分配的联合优化问题。具体而言,其核心要解决的问题有4个:①组织模式:提供何种类型的货运服务模式;②列车调度:如何组织列车运行等;③运力配置:哪些列车提供货运服务、提供多大规模的货运服务等;④货流分配:如何组织货物在地铁网络中有序流通等。

目前,在地铁物流运营调度领域已有一定数量的研究成果,并有学者对其进行总结。冯江红等^[10]系统梳理了地铁物流在实践、选址与运营中的问题,归纳国内外研究不足,并提出中长期发展规划、关键节点选址优化思路及运营信息化技术路径;Visser^[11]与Cavallaro等^[12]分别从历史演进视角与概念梳理层面,回顾了地下物流和客货协同运输的发展;王涓等^[13]综述了城市公共交通客货共运系统的可行性、中转站选址及线路选择等方面的研究成果;Elbert等^[14]和El等^[15]探讨了将城市货运整合进公共交通的潜力与障碍,强调该模式在城市可持续发展中的重要意义;He等^[16]基于2016-2021年468篇相关文献,通过交叉相关性分析揭示了客货协同研究中的交叉主题与研究空白;Zhang等^[17]采用科学计量学方法,梳理了地下物流系统的研究进展;Gong等^[18]梳理了基于地铁的地下物流系统的知识结构与发展趋势,肯定了其对城市可持续发展的积极作用;王月丽等^[19]从战略、战术和运营3个层面总结了国内外地铁货运系统的研究现状;王晓平等^[20]则从设施布局、路径优化及运行规划等多个维度开展系统回顾。

尽管已有研究对地下物流系统的现状进行了多维度总结,但鲜有文献深度融合建模与求解要素,针对地铁物流系统运营组织开展研究。本文从运营组织实践、文献计量特征以及建模与求解中的关键问题(包括研究对象、利益主体、运输组织模式、列车调度、运

力配置、货流分配、建模策略与求解算法)等方面进行总结分析, 以期为该领域后续的研究和实际应用提供参考和借鉴。

1 地铁物流系统运营组织实践

从全球范围来看, 地铁货运的实践探索已有近百年历史。早在 1927 年, 伦敦便通过“Mail Rail”系统实现了邮件运输, 尽管该项目已于后期停止运行, 但为后续地铁物流模式提供了早期经验^[21]。进入 21 世纪后, 欧洲城市在该领域进行了多样化的尝试, 如 2002 年纽约地铁通过“Garbage & Work Trains”实现城市垃圾运输^[22]; 2003 年苏黎世运行“Cargo Tram”以承担生活垃圾运输任务, 德国德累斯顿开始利用轨道交通为大众公司提供货运服务^[23-24]。此后, 法国、荷兰、奥地利等国家也陆续开展了客货混运、专列运行或共线拖挂等多种模式的探索。其中, 法国巴黎自 2007 年以来不断推进“Monoprix”等地铁物流项目, 并在 2018 年提出“Grand Paris”大规模地铁物流网络的研究方案^[25-26]。总体而言, 地铁货运经历了由早期试点探索拓展至多地实践应用的发展过程, 虽然部分项目因经济或技术原因中止, 但近年来随着城市交通拥堵和环境压力加剧, 其作为城市物流有效补充方式

的潜力正日益凸显并受到重视。

在我国, 随着城市物流需求持续增长及“绿色交通”发展理念深入推进, 以地铁物流为代表的新型物流模式进入探索阶段。2022 年 7 月, 广州依托地铁 18 号线闲时运力开设夜间物流专车专线^[27]。2023 年 8 月, 深圳深铁集团与顺丰合作, 以地铁 11 号线平峰时段专用车厢开展“空铁轨联运”^[28]; 9 月, 北京在地铁 4 号线、9 号线-房山线-燕房线试点客货混载运输^[29]; 11 月, 无锡以地铁 3 号线开展“空铁轨联运”^[30]; 12 月, 上海于地铁 1、2 号线平峰时段运输快递^[31]。2024 年 9 月, 杭州在地铁 6 号线试点运输顺丰半日达快递^[32]; 12 月, 北京进一步拓展使用大兴机场线运输航空文件^[33]。2025 年 7 月, 青岛地铁 8 号线以“地空联运”模式接驳快递集散点^[34]。

表 1 汇总了我国城市在地铁物流实践中的关键特征与应用概况。可以发现, 目前国内地铁物流实践多以快递、报刊等小件货物为主要货源, 普遍采取在既有客运列车中设置专用车厢或固定区域的模式, 设施改造需求较低, 运输设备以标准化箱、推车或笼车为主。综合来看, 现有实践仍处于以低成本灵活尝试为主的发展初期, 且缺乏面向实操的制度文件。

表 1 国内地铁物流实践

Table 1 Domestic Metro Logistics Practices

时间	城市	运营线路	运营主体	货源组织	运输组织模式	设施改造	集装箱选择
2022.07	广州	18 号线 (冼村-万顷沙)	湾区集拼公司、广东城际铁路运营有限公司	集拼货物	利用载客前轨道列车, 设货运专用车厢, 专人押运	未改造	专用运输箱
2023.08	深圳	11 号线	深圳深铁集团、顺丰集团	顺丰货物	设物流专用车厢	改造站内空间、设立货运专用通道	标准化推车
2023.09	北京	4 号线、9 号线-房山线-燕房线	顺丰速运、中国邮政、北京地铁	报纸刊物、顺丰同城快递	不调整既有列车开行方案、固定线路、专人押运	未改造	专用推车标准箱
2023.11	无锡	3 号线	无锡地铁集团、中国邮政、顺丰集团	快递包裹	不调整既有列车开行方案、固定线路、专人押运	未改造	专用笼车
2023.12	上海	1 号线、2 号线	上海邮政分公司、上海顺丰快递、上海申通地铁集团	报刊、快递包裹	不调整既有列车开行方案、固定线路、专人押运、客货混载	未改造	专用设备
2024.09	杭州	6 号线(桂花西路-伟业路)	杭州地铁、顺丰速运	同城半日达快件	不调整既有列车开行方案、固定人员、固定时间、固定容量、固定路线、固定停放区域	未改造	货物专用箱
2024.12	北京	大兴机场线	北京地铁、京东物流	航空文件类快递	客货分离、无人押运	未改造	专用运输箱
2025.07	青岛	8 号线	青岛地铁、顺丰速递	快递包裹	专人押运、固定停放区域	未改造	专用笼车

2 地铁物流系统运营组织文献计量分析

2.1 文献采集与筛选

本研究以 Web of Science、CNKI 和 EI Village 为

数据源, 检索 2013 年 1 月至 2025 年 6 月的期刊和会议论文。检索式: 主题=((“地铁”或“轨道交通”)) 和((“客货混运”或“客货共运”或“客货一体化”或“客货协同”或“客货联运”)); TS=((“metro” OR

“subway” OR “urban rail” OR “underground”) AND (“freight” OR “goods” OR “cargo” OR “package” OR “parcel”) AND (“passenger”)), 共获得 479 篇文献。经三轮筛选, 最终确定 64 篇有效文献, 文献收集和筛选过程如图 1 所示。

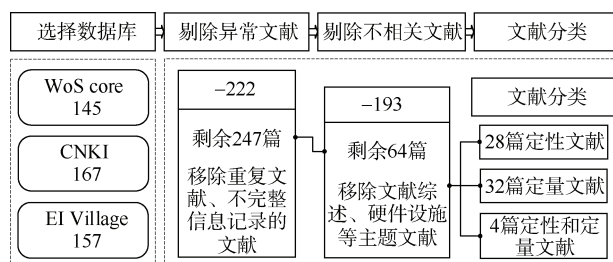


图 1 文献筛选过程

Figure 1 Literature Screening Process

2.2 可视化计量分析

2.2.1 发文量分析

该领域年发文量变化情况如图 2 所示。可以发现, 自 2016 年以来, 呈现逐渐上升趋势。尤其是 2019 年之后, 随着城市物流与地铁系统结合理念的深化及地下物流研究的推进, 地铁物流运营相关研究显著增多, 进入快速发展阶段。从出版数量的增长可以看出, 社会各界对地下物流系统的认知程度、市场接受度与实际应用需求均在稳步提升, 反映出该领域在理论探索与现实落地方面的关注度持续上升。

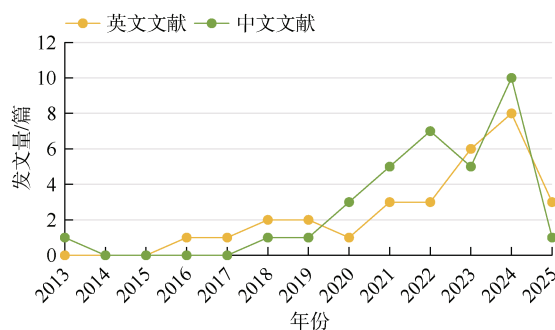


图 2 文献年发文量

Figure 2 Annual number of publications

2.2.2 作者来源国家分析

“国家”类别的可视化网络如图 3 所示, 共包含 10 个国家, 整体呈现出高度集中的地域分布特征。该领域研究主要集中于中国(49 篇), 加拿大仅 3 篇, 其余国家不超过 2 篇。研究高度集中于中国, 主要得益于其发达的地铁网络以及国家层面对低碳物流与城市可持续发展的政策支持。相比之下, 其他国家在该领

域的研究参与度较低, 文献分布较为零散。总体而言, 现阶段该领域的国际研究分区域差异较为显著。

2.2.3 研究内容及方法分析

表 2 总结了既有文献的研究内容及研究方法。可以看到, 2021 年及以前, 研究多采用定性方法, 侧重分析地铁物流系统现状与挑战, 并提出运营模式和方案, 如 Hoerl 等^[35]、Cochrane 等^[22]。自 2022 年起, 针对地铁物流系统的定量研究明显增多, 研究重点聚焦于运营组织模式、列车调度、运力配置与货流分配等关键问题中的一个或多个。例如, 石俊刚等^[36]、邸振等^[37]通过数学建模来联合优化列车调度与货流分配等问题, 实现多要素协同优化。

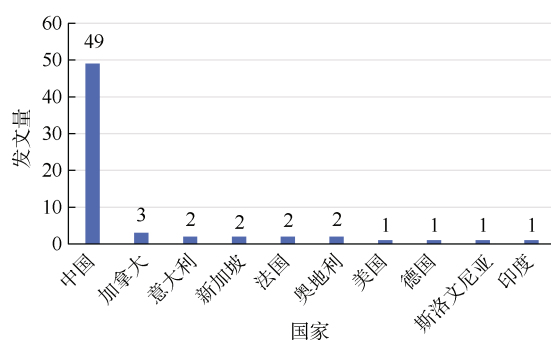


图 3 各国文献发文量分布

Figure 3 Distribution of publication by country

表 2 研究内容及方法汇总

Table 2 Summary of Research Content and Methods

作者(年份)	研究内容	研究方法
Shivaram 等(2025)	①	定性
Di 等(2025)	②③④	定量
Hu 等(2025)	③④	定量
王悦欣等(2025)	①	定性
何倩(2024)	①	定性
邸振等(2024)	②③④	定量
山湧泉等(2024)	②③④	定量
王晓平等(2024)	④	定量
贾国同等(2024)	①	定性
梁柯(2024)	①	定性
郭东军等(2024)	①	定性
石俊刚等(2024)	③④	定量
Bacher 等(2024)	②	定量
An 等(2024)	②④	定量
Hou 等(2024)	②③④	定量
Li 等(2024)	②③④	定量
Yao 等(2024)	②	定量
He 等(2024)	④	定量
Mo 等(2024)	②③④	定量
Di 等(2023)	②③④	定量

续表		
作者(年份)	研究内容	研究方法
陈晶晶等(2023)	①	定性
邱振等(2023)	③④	定量
肖雅玲等(2023)	②③④	定量
史福宁等(2023)	①	定性
潘寒川等(2023)	②③④	定量
郭小龙等(2023)	①	定性
户佐安等(2023)	①	定性
Hoersting 等(2023)	②④	定量
Hu 等(2023)	①②④	定性+定量
Di 等(2023)	②④	定量
Wang 等(2023)	②	定量
Zuo 等(2023)	②④	定量
潘欣维等(2022)	①③	定性+定量
李竹君等(2022)	①②③④	定量
冯佳等(2022)	①	定性
张涵等(2022)	①	定性
邱振等(2022)	③④	定量
胡万杰等(2022)	①	定性
戚建国等(2022)	①②③④	定量
Ye(2022)	②③④	定量
Di 等(2022)	③④	定量
Li 等(2022)	②④	定量
胡万杰等(2021)	①	定性
汪雨欣等(2021)	①	定性
王强等(2021)	①	定性
岳帅等(2021)	①	定性
徐行方等(2021)	①	定性
Hu 等(2021)	①	定性
Ye(2021)	①	定量
Li 等(2021)	②③④	定量
周晓晔等(2020)	④	定量
张梦霞等(2020)	①	定性
陈一村等(2020)	①	定性
Hu 等(2020)	①	定性
Zheng 等(2020)	①③④	定性
鲁斌等(2019)	①	定性
王小林等(2019)	①	定性+定量
He 等(2019)	①	定性
Zhou 等(2019)	①	定性
Ozturk 等(2018)	③④	定量
Behiri 等(2018)	①③④	定性+定量
周芳汀等(2018)	④	定量
Cochran 等(2016)	①	定性
Hoerl 等(2016)	①	定性

注：①为组织模式；②为列车调度；③为运力配置；④为货流分配。

3 地铁物流系统运营组织关键问题

本章主要从研究对象、利益主体、运输组织模式、列车调度、运力配置、货流分配、建模策略与求解算法等方面,对表 2 中 36 篇含量化研究的论文进行详细分析。

3.1 研究对象

按研究对象的不同,既有文献可分为单线与网络两类;并按运行方向,可进一步分为单向单线、双向单线、单向网络和双向网络 4 类,如图 4 所示。可以发现,针对单向单线的研究最为丰富(25 篇)。尽管近年来随着对实际运营情况的理解不断加深,学者开始逐步关注双向运行和网络协同等更具复杂性的研究情景,研究内容也呈现出从单向探索到双向关联、由单线优化向网络协同的发展趋势,但针对复杂情景的深入探索仍较为有限,以双向单线、单向网络和双向网络为研究对象的文献分别有 5 篇、1 篇和 5 篇。

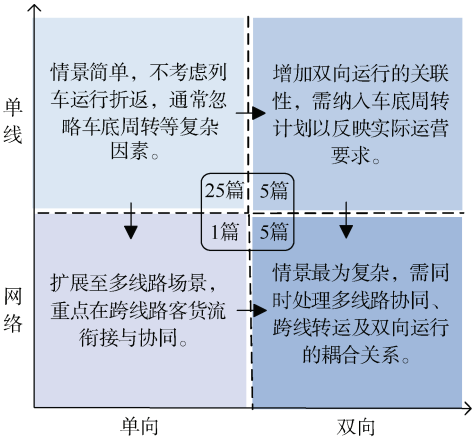


图 4 不同研究对象的发文量
Figure 4 Number of publications by different research subjects

此外,针对不同研究对象,既有文献的研究策略存在差异,且随着研究对象从单向到双向、单线向网络的变化,其建模复杂度递增。具体而言,针对单向单线,其通常忽略车底周转等复杂因素,决策变量集中于货运车厢配置与装载方案,如 An 等^[38]、Ye 等^[39]、Li 等^[40]和 Ozturk 和 Patrick^[41];针对双向单线,既有研究进一步考虑了双向列车运行的关联关系,即增加车底周转计划的相关变量,如 Hou 等^[42]、Yao 等^[43]和 Mo 等^[44];针对单向网络,研究涵盖了线路间客货流换乘衔接等复杂因素,并在决策变量中加入了线路协同运行及货物跨线转运策略相关的变量,如 Li 等^[45];而双向网络需要全面统筹全网络内的客流、货流与车

底运用情况，因而模型复杂度最高，如 Li 等^[46]、Zuo 等^[47]和 Ye 等^[48]。

3.2 利益主体

在地铁客货协同运输优化建模中，无论研究对象是单线还是网络，其决策目标均围绕乘客、货主和运营公司三类利益主体展开。但随着研究对象由单线向网络的演进，相应的优化目标也逐渐由部分侧重点转向更为综合的考量。

3.2.1 乘客

乘客作为地铁系统的核心服务对象，其最基本的诉求是缩短出行时间。在单线场景下，既有文献多以等待时间最小化为目标进行建模，将乘客在列车到站与实际发车之间的等待时长作为优化指标^[42, 49-50]；若存在需求未能满足的情况，则通过设定惩罚系数进行约束，其中惩罚系数通常被设为无穷大，以确保所有乘客需求得到满足^[37]。而在网络场景下，乘客的出行行为更为复杂，不仅包括单线直达，还涉及跨线路换乘。因此，建模时往往需要同时考虑乘客的多路径选择与换乘衔接，目标从单一的等待时间最小化变为涵盖等待时间、乘车时间与换乘时间的出行总时间优化，以更准确地反映网络条件下的服务水平。

3.2.2 货主

在单线条件下，货主的主要需求是确保货物能够在预设时间窗内准时交付。研究通常以延误成本与违约惩罚最小化为优化目标^[41, 44]。其中，延误成本根据列车到达时刻与预设时间窗的偏差，结合早到与晚到惩罚系数进行计算。在网络条件下，货运需求往往涉及跨线路运输，目标设计较单线更为复杂，不仅需要考察线路间的运输协同，还需考虑不同路径的运输成本，从而实现整体运输效率与收益的最大化^[39]。

3.2.3 运营公司

对于运营公司而言，利润最大化始终是核心目标。单线研究多聚焦于列车调度与车厢分配，在保障客运需求的前提下，通过合理安排运力配置提升收益、降低成本^[43, 46, 49]。其成本主要包括列车购置、货运车厢改造、能耗与人力等，收益则来源于客运与货运的票务收入。网络条件下，运营公司需面对更为复杂的运力统筹与资源协调问题，除线路运营涉及的内容外，还需兼顾跨线货物流转与客流换乘，以实现全网综合利润最大。

3.3 运输组织模式

运输组织模式研究的核心在于确定客运与货运在

地铁系统中以何种方式实现协同运输。无论是单线场景还是网络场景，现有研究主要集中在专列模式、混编模式和混载模式三类。其中，混编模式研究最多(12篇)，其次为专列模式(10篇)，混载模式最少(7篇)。此外，还有7篇文献将混编与专列两种模式结合起来展开研究。不同模式具有差异化的运行特征与适用场景，因而其建模方法亦有所差异。

专列模式下，货运列车独立运行，承载能力强但调度灵活性不足。在该模式下，研究多将货运视为独立系统，在不干扰客运的前提下进行方案优化(如 Cochrane 等^[22]、Ozturk 和 Patrick^[41])，该方法虽降低了建模复杂度，却不利于客货深度融合。

与专列模式不同，混编模式通过接挂专用货运车厢来调整列车编组，以实现客货协同运输；而混载模式则直接利用客运列车的闲置空间装载货物。尽管混编与混载模式的资源利用率和客货融合度显著高于专列模式，但它们不可避免地会对客运服务质量产生干扰。例如，货运挤占客运空间可能导致乘客满意度下降，而为装卸货物延长停站时间则会增加乘客的出行时长。然而，为简化研究，部分学者仍假定客货运输间不存在相互影响，如周芳汀等^[51]、周晓晔等^[52]、Ye 等^[39]、李竹君等^[53]、肖雅玲等^[54]。但也有学者在进行建模时，将客货交互影响纳入考量。如 Di 等^[55]、邸振等^[56]将乘客延误时间最小化纳入优化目标，旨在维护乘客满意度；Li 等^[40, 45]在约束条件中增加了对乘客延误的限制，以尽量保障客运服务质量。

需要指出的是，运输组织模式虽然是地铁物流系统运营组织研究的关键内容，但为简化问题分析，研究者通常在建模阶段优先确定运营组织模式再开展列车调度、运力配置与货流分配等问题的研究，如肖雅玲等^[54]、Di 等^[55]；但也有少数文献将组织模式纳入决策，实现4类问题的联合优化，如戚建国等^[49]和李竹君等^[53]。

3.4 列车调度

列车调度的根本目标是在保障客运服务安全与准点的前提下，有效控制运输成本，并最大限度满足客货服务需求。

在单线场景下，成本层面主要体现在列车开行数量等决策变量上^[53, 57]，这些变量直接决定了列车运行与运力投放的成本；安全层面则依托运行图时空可行性、发车间隔及停站时间等约束条件，确保调度方案的安全与可行^[42]；服务层面则通过在安全约束下合理

安排运力配置,尽量降低延误与违约成本,从而保障乘客出行效率与货物准时交付^[37,55,56]。

在网络场景下,列车调度复杂性显著增加。其不仅需考虑单线范围内的列车开行,更须统筹多线路之间的协同运行,以避免因协同效率低下所导致的换乘乘客与中转货物大量滞留,进而引发服务水平下降与拥挤安全风险^[47]。

需要指出的是,地铁物流系统内的列车调度涉及客运和货运两类服务。但为简化问题,既有研究多以不调整客运列车服务为前提开展,因而忽视了客运与货运列车时刻表联调所能带来的协同增效潜力。为进一步挖掘客运与货运列车时刻表联调所能带来的协同增效潜力,Behiri等^[25]、戚建国等^[49]、潘寒川等^[50]考虑了客运服务和货运服务间的相互影响,在优化货运方案的同时,对客运列车时刻表进行协同优化。这种客货综合优化的方法有助于更好地平衡客货运输需求,提升整体运营效率。

3.5 运力配置

运力配置是指在运能条件与客运服务质量约束下,明确哪些列车可承担货运任务、分配多少车厢与容量,以最大化系统整体运力利用效率。

在单线场景下,研究通常聚焦于列车编组规模与车厢容量分配的优化^[53],即如何在固定运能条件下,通过合理确定车厢数量及其运输能力分配比例,以最大化能力利用率并避免对客运产生过大干扰。但为保障运营安全,其相关约束会涉及车厢及站台的容量限制。例如,潘寒川等^[50]将列车容量限制与车厢分配限制作为核心约束条件;肖雅玲等^[54]将站台仓储容量约束纳入建模。

与列车调度问题类似,网络场景下的运力配置问题也需考虑不同线路间的运力协同,以避免出现换乘乘客或中转货物滞留;同时,还需要考虑换乘站与中转站的容量限制,以避免因拥挤产生安全隐患^[58]。

3.6 货流分配

货流分配的核心问题在于如何在有限的运力约束下,将不同货运需求合理分配至具体的列车、车厢与运输路径,以最大化货运需求满足率,并兼顾运输效率与服务质量;其本质是需求与运力之间的匹配问题。

单线场景下,需求规模和线路结构均较为单一,货流分配主要集中在“货物—列车—车厢”的匹配问题上。即聚焦于将特定货物流量,在给定的时刻表和运能条件下,分配至某一列车或车厢,以降低运输与

延误成本^[41,46]。而网络场景下,不仅要解决“把货物放到哪趟列车、哪节车厢”的问题,更要解决“在全网络范围内,如何通过合理的路径分配与协调机制,实现系统整体优化”的问题^[58]。

3.7 建模策略与求解算法

从现有研究来看,地铁物流系统运营组织问题普遍在假定需求固定且已知的条件下,采用混合整数规划(MIP)方法进行建模。根据约束与目标函数的数学特征,模型可分为混合整数线性规划(MILP)与混合整数非线性规划(MINLP)两类。

为更切实际的刻画运输组织模式、列车调度、运力配置、货流分配等问题中复杂的关联关系,MINLP的使用更为广泛^[39,41,59]。然而,该模型在大规模问题中面临求解难度高、计算效率低等问题。为此,学者们通常采用引入0-1辅助变量等线性化技术^[55],将MINLP模型转化为MILP模型后,再进行求解,以降低计算复杂性。

针对地铁客货协同组织优化问题,学者们主要采用精确算法、启发式算法以及商业求解器3类方法(见图5)。

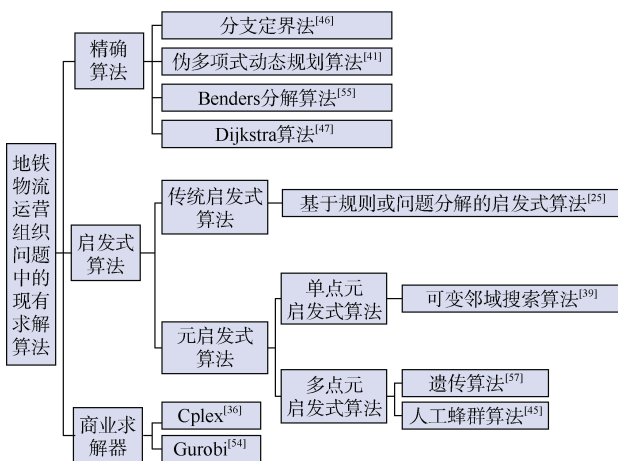


图5 算法求解总结

Figure 5 Algorithm Solution Summary

精确算法包括分支定界、伪多项式动态规划算法、Benders分解和Dijkstra算法等,如Di等^[55]利用Benders分解将复杂整数线性规划模型松弛为混合整数线性规划模型并分解求解,但仅适用于小规模问题;Zuo等^[47]将地铁物流系统的运营组织问题抽象为容量约束下的路径分配问题,并采用Dijkstra算法进行求解。启发式算法分为传统启发式和元启发式算法,传统启发式主要是基于规则或问题分解的启发式算法,如

Behiri 等^[25]设计了基于调度规则和列车分解的启发式算法。元启发式算法分单点和多点两类，单点算法主要包括邻域搜索算法，如 Ye 等^[39]采用可变邻域搜索扩大搜索范围提升解质量；多点算法则以遗传算法和人工蜂群算法为代表，如 Li 等^[45]通过改进人工蜂群算法加速复杂混合整数规划模型求解。此外，由于地铁物流优化问题多属于混合整数规划范畴，商业求解器(如 Cplex 和 Gurobi)凭借其对该类问题的高效求解能力，在既有研究中也占有一席之地，如石俊刚等^[36]、肖雅玲等^[54]。

4 结论与展望

本文聚焦地铁物流系统运营组织问题，在梳理国内外实践经验的基础上，分析了国内外相关研究的计量特征，并进一步总结了既有定量研究，在研究对象、利益主体、运输组织模式、列车调度、运力配置、货流分配、建模策略与求解算法等方面的研究进展。结果表明，国内外试点探索为该领域研究提供了实践支撑，相关学术成果也构建了基础理论体系，但仍存在一定的不足，主要表现在以下几方面。

1) 从运营实践来看，国外虽然起步较早并积累了一定经验，但受制于经济效益与政策支持不足等原因，相关探索未能实现持续推广；相比之下，国内近年来陆续开展了多地试点，展现出较强的发展潜力，但整体仍停留在小规模、低频次的探索阶段，且缺乏面相关实操的系统化制度保障。

2) 从研究内容来看，现有研究多聚焦于组织模式、列车调度、运力配置和货流分配 4 类问题中的部分展开，较少同时覆盖 4 类问题进行研究，尚未形成成熟的一体化优化方案，难以全面考虑系统中各要素之间的耦合关系与联动效应。未来研究可在一体化研究框架下，统筹优化上述四类问题，以最大限度发挥地铁系统富裕运力开展物流服务，并实现客货协同，提升综合优化效果。

3) 从研究对象来看，现有文献多集中于线路研究。尽管近年来已呈现出向网络演进的趋势，但对网络的探索仍显不足，难以充分发挥地铁网络的综合优势，限制了地铁物流的广泛应用。事实上，随着我国地铁运营里程逐年增加，各大城市形成了不同程度的网络化运营格局。统计数据显示，截至 2024 年底，全国共计 40 个城市拥有 2 条及以上运营线路。然而，网络化运营在提高地铁服务能力的同时，也对其运营组织提出了更高的要求。管理者不仅需要关注单线的运

营优化，还需要考虑线路间的协同运营优化，这一要求在客货混运的地铁网络中依然重要。因此，鉴于各大城市网络化运营格局的日趋成熟，以网络运营为视角，对地铁物流系统运营组织问题进行深入探究显得尤为迫切。

4) 从列车调度视角看，既有研究多以保障运输可行性及提升服务水平为核心目标，对能耗因素的考量仍显不足。在客运领域得到广泛探讨的节能举措(如列车再生制动回收与利用)，在地铁物流系统调度建模中鲜少考虑。这一局限使得现有研究成果难以充分响应地铁系统的节能减排需求。因而，在未来研究中，将能耗要素与运营效率、服务质量共同纳入列车调度优化方案，对提升方案综合效益、契合绿色低碳交通发展战略具有重要意义。

5) 从建模策略来看，现有研究主要围绕确定性需求进行建模，较少考虑需求的不确定性及其弹性特征。这一假设虽简化了建模与求解的复杂度，但难以反映实际运营中需求随时间和空间动态变化的特点。未来研究可以进一步将随机需求、弹性需求等不确定性因素纳入建模框架，以提高模型对现实情境的适用性与鲁棒性。

6) 从求解算法来看，客货协同运营组织优化问题属于典型的 NP 难问题，现有研究虽给出了众多求解策略，但在求解效率、收敛可靠性和解的质量等方面仍存在局限。这在一定程度上限制了模型在大规模复杂网络中的应用。未来研究还需进一步探索更高效的求解算法，以突破算力瓶颈，提升应用前景。

总体而言，现有研究虽已取得了一定成果，但仍需在一体化优化方案构建、复杂网络场景拓展、绿色低碳要素引入、弹性需求分析及高效算法设计等方面进行深入探索，以推动地铁物流系统运营组织研究转化为可操作的工程实践，为缓解城市交通拥堵、降低碳排放和提升物流效率提供有力支撑。

参考文献

- [1] Muñoz-Villamizar A, Santos J, Montoya-Torres J R, et al. Measuring environmental performance of urban freight transport systems: a case study[J]. Sustainable cities and society, 2020, 52: 101844.
- [2] 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(5): 1273-1282.
Wang Xiaolin, Zhao Han. Discussion on urban underground logistics system based on metro[J]. Chinese journal of

- underground space and engineering, 2019(5): 1273-1282.
- [3] 钱七虎, 郭东军, 陈志龙. 关于缓解北京交通拥堵问题的探讨: 城市地下物流系统[C]//中国土木工程学会第十一届、隧道及地下工程分会第十三届年会论文集. 北京, 2004: 18-23.
- [4] He Ketai, Shao Juping, Liu Yubo, et al. Conceptual design of rail transit based urban logistics delivery system[C]//2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics. July 13-16, 2008, Daejeon, Korea. IEEE, 2008: 221-226.
- [5] 顾皓. 基于城市轨道交通的智能物流模式及其可行性探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3): 232.
- Gu Hao. Intelligent logistics mode based on urban rail transit and its feasibility[J]. Urban mass transit, 2022, 25(3): 232.
- [6] 雷梓. 利用城市轨道交通进行物流运输的可行性探究: 基于上海的案例研究[J]. 中国物流与采购, 2023(7): 112-113.
- Lei Zi. Feasibility study on logistics transportation by urban rail transit: a case study of Shanghai[J]. China logistics & purchasing, 2023(7): 112-113.
- [7] 冯佳, 刘剑锋, 金奕, 等. 城市轨道交通线路提供货运服务的理论研究与实践案例[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(3): 155-159.
- Feng Jia, Liu Jianfeng, Jin Yi, et al. Theoretical and practice study of freight service provided by urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(3): 155-159.
- [8] 张涵, 吕永波. 城市地铁集装运送模式设计构想[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(3): 724-732.
- Zhang Han, Lü Yongbo. Design conception of urban metro containerized freight mode[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2022, 18(3): 724-732.
- [9] Zhao Laijun, Li Huiyong, Li Meichen, et al. Location selection of intra-city distribution hubs in the metro-integrated logistics system[J]. Tunnelling and underground space technology, 2018, 80: 246-256.
- [10] 冯江红, 代存杰, 李海军, 等. 基于城市地铁网络的地下物流发展模式综述[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(4): 134-143.
- Feng Jianghong, Dai Cunjie, Li Haijun, et al. Development models for underground logistics based on urban metro networks: a review[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(4): 134-143.
- [11] Visser J G S N. The development of underground freight transport: an overview[J]. Tunnelling and underground space technology, 2018, 80: 123-127.
- [12] Cavallaro F, Nocera S. Integration of passenger and freight transport: a concept-centric literature review[J]. Research in transportation business & management, 2022, 43: 100718.
- [13] 王涓, 刘思琦, 李兴华, 等. 城市公共交通系统客货共运研究综述[J]. 综合运输, 2020, 42(11): 61-66.
- Wang Wei, Liu Siqi, Li Xinghua, et al. Review on the passenger-and-package sharing public transportation system[J]. China transportation review, 2020, 42(11): 61-66.
- [14] Elbert R, Rentschler J. Freight on urban public transportation: a systematic literature review[J]. Research in transportation business & management, 2022, 45: 100679.
- [15] El Amrani A M, Fri M, Benmoussa O, et al. The integration of urban freight in public transportation: a systematic literature review[J]. Sustainability, 2024, 16(13): 5286.
- [16] He Zhangyuan, Liu Qiyang, Zhao Pengjun. Challenges of passenger and freight transportation in mega-city regions: a systematic literature review[J]. Transportation research interdisciplinary perspectives, 2022, 16: 100730.
- [17] Zhang Han, Lv Yongbo, Guo Jianwei. New development direction of underground logistics from the perspective of public transport: a systematic review based on scientometrics[J]. Sustainability, 2022, 14(6): 3179.
- [18] Gong Dandan, Tian Jiajia, Hu Wanjie, et al. Sustainable design and operations management of metro-based underground logistics systems: a thematic literature review[J]. Buildings, 2023, 13(8): 1888.
- [19] 王月丽, 杨中华, 刘邹洲, 等. 国内外地铁货运系统的研究现状与进展[J]. 物流科技, 2023, 46(1): 96-100.
- Wang Yueli, Yang Zhonghua, Liu Zouzhou, et al. Metro-based underground logistics system: recent advances and future prospects[J]. Logistics sci-tech, 2023, 46(1): 96-100.
- [20] 王晓平, 鲁玮, 李睿麒, 等. 基于地下物流系统的地铁货运文献综述[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S2): 534-539.
- Wang Xiaoping, Lu Wei, Li Ruiqi, et al. Literature review of metro freight based on subway transportation system[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(S2): 534-539.
- [21] Cleophas C, Cottrill C, Ehmke J F, et al. Collaborative urban transportation: Recent advances in theory and practice[J]. European journal of operational research, 2019, 273(3): 801-816.
- [22] Cochrane K, Saxe S, Roorda M J, et al. Moving freight on public transit: Best practices, challenges, and opportunities[J]. International journal of sustainable transportation,

- 2017, 11(2): 120-132.
- [23] Van Duin R, Wiegman B, Tavasszy L, et al. Evaluating new participative city logistics concepts: The case of cargo hitching[J]. *Transportation research procedia*, 2019, 39: 565-575.
- [24] Kelly J, Marinov M. Innovative interior designs for urban freight distribution using light rail systems[J]. *Urban rail transit*, 2017, 3(4): 238-254.
- [25] 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.
- [26] 赵阳. 国外有轨电车网络货物运输及启示[J]. *都市快捷交通*, 2019, 32(1): 136-141.
Zhao Yang. Cargo transport of overseas tramway network and its enlightenment for Chinese tram development[J]. *Urban rapid rail transit*, 2019, 32(1): 136-141.
- [27] 珠海网. 利用闲时运力, 广州地铁 18 号线首开货运列车[EB/OL]. (2022-07-23)[2025-09-11]. <https://pub-zhtb.hizh.cn/s/202207/23/AP62db6555e4b0861bc0f87f37.html>.
- [28] 深圳地铁. 深铁集团与顺丰集团签署联运合作协议探索轨道物流新模式[EB/OL]. (2023-08-18)[2025-09-11]. <https://www.szmc.net/home/xinwenzhongxin/gongsixinwen/202308/103119.html>.
- [29] 北京日报. 北京试点地铁非高峰时段运快递[EB/OL]. (2023-09-24)[2025-09-11]. https://www.beijing.gov.cn/fuwu/bmfw/sy/jrts/202309/t20230924_3265092.html.
- [30] 顺丰速运. 更绿色更高效! 无锡顺丰开启地铁送快递模式[EB/OL]. (2023-11-9)[2025-09-11]. <https://www.sf-express.com/chn/sc/news/270>.
- [31] 澎湃新闻. 即日起上海地铁试行非高峰时段运快递, 1 号线、2 号线为试点线路[EB/OL]. (2023-12-29)[2025-09-11]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_25835340.
- [32] 杭州日报. 杭州地铁试点“送快递”了[EB/OL]. (2024-09-04)[2025-09-11]. https://www.hangzhou.gov.cn/art/2024/9/4/art_812268_59102075.html.
- [33] 北京日报. 今起大兴机场线试点非高峰时段运快递, 航空件儿坐地铁赶飞机[EB/OL]. (2024-12-02)[2025-09-11]. <https://xinwen.bjd.com.cn/content/s674d2b12e4b00bb8087b073d.html>.
- [34] 大众日报. 国内首例! 快递“坐”地铁, 开启轨道物流地空联运新模式[EB/OL]. (2025-07-06)[2025-09-11]. <https://news.qq.com/rain/a/20250706A066U300>.
- [35] Hörl B, Dörr H, Wanjek M, et al. METRO. FREIGHT. 2020—strategies for strengthening rail infrastructure for freight transport in urban regions[J]. *Transportation research procedia*, 2016, 14: 2776-2784.
- [36] 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.
- [37] 邸振, 曹楚悦, 肖妍星. 考虑货运方式和客运硬时间窗的地铁客货共车运输优化[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2024, 22(1): 150-159.
- Di Zhen, Cao Chuyue, Xiao Yanxing. Train-shared metro passenger and freight co-transportation optimization considering freight modes and passenger hard time windows[J]. *Journal of transportation engineering and information*, 2024, 22(1): 150-159.
- [38] An Ni, Yang Kai, Chen Yicun, 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.
- [39] Ye Yutao, Guo Junhua, Yan Lixin. A metro freight plan for mixed passenger and freight transportation[J]. *Journal of advanced transportation*, 2022, 2022: 6602387.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] HOU Z Z, HE R C, LIU C N, et al. Optimization of Passenger and Freight Collaborative Transportation for Urban Rail Transit under Virtual Coupling Condition[J]. *Engineering Letters*, 2024, 32: 179-192.
- [43] Yao Yu, Li Pei, Mo Pengli, et al. Bi-objective optimization of timetable and rolling stock schedule for an urban rail passenger and freight line[J]. *Computers & industrial engineering*, 2024, 194: 110394.
- [44] Mo Pengli, Yao Yu, Li Pei, et al. Synergising urban freight transportation in passenger-oriented transit corridors: an efficient Mixed-Integer Linear Programming approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 163: 104644.
- [45] Li Feng, Guo Xin, Zhou Li, et al. A capacity matching

- model in a collaborative urban public transport system: integrating passenger and freight transportation[J]. International journal of production research, 2022, 60(20): 6303-6328.
- [46] Li Siqiao, Zhu Xiaoning, Shang Pan, et al. Scheduling shared passenger and freight transport for an underground logistics system[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2024, 183: 102907.
- [47] Zuo Tong, Li Bozhi, Zhang Fan, et al. Analysis of a collaborative transport model mixing passengers with freights in metro system[J]. Journal of rail transport planning & management, 2023, 25: 100358.
- [48] Ye Yutao, Guo Junhua, Yan Lixin. A mixed decision strategy for freight and passenger transportation in metro systems[J]. Computational intelligence and neuroscience, 2021, 2021: 5412016.
- [49] 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.
- [50] 潘寒川, 陆俊波, 胡华, 等. 客货混运下的城轨时刻表与流量控制协同优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(2): 187-196.
- Pan Hanchuan, Lu Junbo, Hu Hua, et al. Collaborative optimization of urban rail timetable and flow control under mixed passenger and freight transportation[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2023, 23(2): 187-196.
- [51] 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.
- [52] 周晓晔, 崔瑶, 何亮, 等. 基于地铁—货车联运的物流配送路径优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(3): 111-117.
- 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.
- [53] 李竹君, 柏赞, 陈焱. 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.
- [54] 肖雅玲, 柏赞, 陈焱, 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.
- [55] 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.
- [56] 邱振, 肖妍星, 戚建国, 等. 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): 3569-3580.
- Di Zhen, Xiao Yanxing, Qi Jianguo, et al. Passenger-freight coordination transportation optimization with considering time windows[J]. Journal of railway science and engineering, 2022, 19(12): 3569-3580.
- [57] 潘欣维, 董建军, 陈志龙. 地铁货运系统运作的列车调度方式建模[J]. 陆军工程大学学报, 2022, 1(5): 59-65.
- Pan Xinwei, Dong Jianjun, Chen Zhilong. On modeling train scheduling mode of metro freight transportation system[J]. Journal of army engineering university of PLA, 2022, 1(5): 59-65.
- [58] Hu Wanjie, Dong Jianjun, Yang Kai, 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.
- [59] Hörsting L, Cleophas C. Scheduling shared passenger and freight transport on a fixed infrastructure[J]. European journal of operational research, 2023, 306(3): 1158-1169.

(编辑: 王艳菊)