

公共交通承载货运的建模框架与优化算法综述

杨颖

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2026年2月6日; 录用日期: 2026年2月26日; 发布日期: 2026年3月6日

摘要

随着城市末端物流配送需求规模的持续扩张与服务时效要求的不断提高, 传统以路面车辆为主的配送体系正面临运营成本攀升、交通拥堵加剧及环境负外部性显著等系统性挑战。在此背景下, 利用城市公共交通系统剩余运力进行货运(Freight on Transit, FoT)作为一种集约、可持续的协同配送模式受到广泛关注。然而, 现有研究在运输组织模式的界定与定量分析框架方面仍较为分散, 缺乏系统性整合与模式间的比较分析。为此, 本文对FoT领域的定量研究文献进行系统性梳理与整合。首先, 界定了FoT系统的三阶段流程与四类核心运营要素, 并据此归纳出五类典型运输组织模式, 系统比较各模式的流程结构、协同机制、优势、局限及适用场景。其次, 依据战略、战术与操作层级, 梳理并归类出现有研究聚焦的选址分配、列车调度与路径规划三类核心优化问题, 综述各类问题的数学建模方法、求解算法及其在不同模式中的研究侧重点。最后, 总结现有研究的共识与不足, 并展望未来研究方向, 包括多模式统一建模、多层次决策耦合建模, 以及不确定环境下动态调度机制的引入。研究结果为城市公共交通与末端物流系统的协同设计与优化提供了理论框架, 也为高效、低碳的城市货运方案设计提供了参考。

关键词

公共交通承载货运, 城市物流, 运输组织模式, 定量研究

A Review of Modeling Frameworks and Optimization Approaches for Freight on Transit in Public Transport

Ying Yang

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: February 6, 2026; accepted: February 26, 2026; published: March 6, 2026

Abstract

With the continuous expansion of urban last-mile logistics demand and increasingly stringent service time requirements, traditional delivery systems relying primarily on road vehicles face systemic challenges, including rising operational costs, worsening traffic congestion, and significant environmental externalities. In this context, utilizing the residual capacity of urban public transport systems for freight transport, known as Freight on Transit (FoT), has attracted widespread attention as an intensive and sustainable collaborative delivery mode. However, existing studies remain fragmented regarding the definition of transport organization patterns and quantitative analysis frameworks, lacking systematic integration and comparative evaluation across modes. This paper provides a systematic review and synthesis of quantitative research in the FoT domain. First, it delineates a three-stage process of FoT systems and identifies four core operational elements, based on which five typical transport organization patterns are summarized, with a systematic comparison of their process structures, coordination mechanisms, advantages, limitations, and applicable scenarios. Second, guided by strategic, tactical, and operational decision levels, the literature is classified into three core optimization problems: facility location and allocation, train scheduling, and routing. For each problem, the review summarizes existing mathematical modeling approaches, solution algorithms, and research emphases in different organizational patterns. Finally, the paper highlights consensus and gaps in current research and outlines future research directions, including unified multi-modal modeling, hierarchical decision coupling, and the incorporation of dynamic scheduling mechanisms under uncertainty. The findings provide a theoretical framework for the collaborative design and optimization of urban public transport and last-mile logistics systems, offering references for the development of efficient and low-carbon urban freight solutions.

Keywords

Freight on Transit in Public Transport, Urban Logistics, Transport Organization Patterns, Quantitative Research

Copyright © 2026 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

随着数字经济的渗透与消费模式的深刻变革,城市末端物流配送体系正经历一场多维度的压力测试。从需求规模看,传统电商与即时零售构成双引擎,共同驱动末端配送需求的结构性膨胀。一方面,电商驱动的快递业务量在2023年至2025年间从1200亿件迅速攀升至1800亿件[1],总量基础庞大且增势不减;另一方面,本地生活服务催生的即时零售市场呈现爆发式增长,其市场规模预计在2030年突破2万亿元[2]。从需求结构看,消费行为呈现出明显的“即时化”与“碎片化”转向。这不仅体现在即时零售的品类从餐饮急速扩展至生鲜、医药、数码等全场景[3],也体现在传统快递的需求特征中:订单更频繁、单票货重降低、家庭地址占比提升[4]。从时效要求看,配送效率已从“次日达”普遍升级为“小时达”,并在平台竞争中向“分钟达”跃进[5]。为响应即时需求,传统计划性的快递网络与即时性的本地配送网络边界日益模糊,传统电商体系正以前置仓、本地门店为节点,全面接入即时配送网络,履约时效已成为定义平台核心竞争力的关键标准。与此同时,城市居民对配送服务的期望已形成“更快、更准、更廉”的刚性三角。长期来看,传统以单纯叠加人力与燃油车运力的末端配送体系,已陷入难以调和的系统性困境:一方面,“最后一公里”成

本约占物流总成本的 30%~50% [6], 在单价下行趋势中, 企业面临巨大的降本增效压力; 另一方面, 庞大的配送车队加剧了道路资源竞争, 引发了拥堵、排放与噪音等一系列负外部性问题[7]。在此背景下, 探索一种系统性、可持续且与城市生态相容的新型物流范式, 已成为摆脱末端配送困境的迫切需求。

城市公共交通系统作为一种既有的、大规模的基础设施网络, 其潜在的物流价值吸引了学者们的关注。城市公共交通系统通常指由政府或特许经营者提供, 服务于公众日常出行的固定线路、按班次运行的客运服务体系, 主要包括地铁(城市轨道交通)、快速公交系统、常规公交巴士, 以及部分有轨电车等[8]。当前, 该系统普遍面临客流时空分布不均的问题[9], 在非高峰时段、反方向客流或车厢空间(如行李区)上存在大量可利用的剩余运力。研究表明, 地铁系统在日均超 60%的非高峰时段内, 车厢载客率常低于设计容量的 40%, 部分线路平峰期利用率仅为 25%~35%, 形成了可预测的周期性运力闲置[10]。与此同时, 该系统网络覆盖范围广泛、站点密集, 且依托固定时刻表或专用路权运行, 受交通拥堵影响小, 时间高度可预测[11]。这为在不干扰客运服务的前提下, 将其闲置运力转化为低成本、高可靠性的城市内部货物运输通道提供了物理与运营基础。

在此背景下, “公共交通承载货运”(Freight on Transit, FoT)作为一种创新的城市物流组织模式应运而生, 并已成为可持续城市货运研究的重要方向[11]。早期的相关实践多局限于利用夜间地铁停运后的轨道进行大宗货物运输[12], 而现代 FoT 概念则更为广义与系统。它被界定为: 系统性地利用公共交通网络(车辆、基础设施、时刻表)的时空剩余运力, 在城市内部运输货物, 旨在实现客货运的协同与资源共享, 而不影响其客运核心功能[11]。理论及初步实践表明, FoT 模式的核心优势在于对沉没基础设施成本的边际利用, 其运营的边际成本极低, 可直接优化末端配送体系中占比最高的干线环节成本[13]。同时, 它以集约化方式(如一班地铁可替代数十辆货车)规模化替代路面货车行驶, 直接降低碳排放、缓解拥堵与噪音。得益于专用路权与固定时刻表, FoT 能提供受干扰小的可靠运输通道, 从而增强整个城市配送网络的韧性, 并为“定时达”等高阶配送服务提供基础[11]。FoT 模式并非旨在替代现有即时配送网络, 而是作为其关键补充, 通过将传统上由货车承担的城市内区域集散运输整合进公共交通网络, 重构“城市分拨中心至社区节点”这一中间运输环节, 为应对末端配送面临的成本、环境与可靠性挑战, 提供一种经济、环保、高效的可持续解决方案。

尽管近年来 FoT 已获得学者们的广泛关注, 但现有研究仍呈现碎片化状态。不同学者往往基于差异化的运输结构和案例分析构建研究框架, 例如以公共交通组合地面车辆、公共交通组合自主配送工具或仅利用公交/地铁运输等不同范式开展分析, 这些研究缺乏一个系统的理论框架来整合、比较和评估各类模式[14]。此外, 大量研究聚焦于特定案例的可行性探讨或概念设计, 而对支撑系统运营的核心定量研究方法缺乏全面的梳理、分类与比较。

因此, 本综述旨在对利用公共交通进行城市货运的定量研究文献进行系统性整理与归纳, 从模型与算法的角度构建一个统一的分析框架。具体来说, 本文首先对 FoT 系统的运作流程与核心运营要素进行界定, 并据此提出一个统一的运输组织模式分类体系, 以系统比较不同模式的结构特征及其运作机制; 随后, 在该运输组织模式分类的基础上, 从战略、战术到操作层面对 FoT 系统中常见的核心优化问题类型进行梳理, 对相关定量研究文献进行系统归类, 综述各类问题中所采用的数学建模方法与优化算法, 并揭示不同运输组织模式在问题侧重点上的内在差异; 最后, 归纳现有研究在方法体系与应用层面的主要共识与不足, 并据此提出未来值得深入探索的研究方向。

2. 基于公共交通的城市货运配送模式

2.1. FoT 系统的三阶段流程

现有研究通常将基于公共交通的货运体系描述为由三个阶段构成的运输链条, 其核心思想是以公共

交通线路承担跨区主干运输,并通过多种接驳方式实现首末端货物流转。该三阶段流程包括:集货接驳、城市主干运输和散货接驳[11]。

在集货接驳阶段,货物由商家、仓库或城市微型配送中心输送至可接入公共交通系统的装载站点。执行该环节的方式多样,可使用整车集配车辆、无人机或配送机器人等接驳工具,具体方案因订单密度、货物特性、时效要求与成本约束等多重运营因素而异。

城市主干运输阶段是 FoT 模式的核心环节,由公共交通系统完成城市内部较长距离的运输。此阶段主要依赖具有固定班次和稳定运行频率的地铁、轻轨或公交快线,承担货物从接入站点向目标片区的集中运输任务。该阶段在 FoT 流程中具有强制性,是所有货物流转中不可省略的主干部分。

在散货接驳阶段,货物自卸货站点被进一步配送至最终目的地。此阶段可通过整车循环车辆、无人机/配送机器人或智能储物柜等工具实现,根据服务模式的不同,可分为直接交付给最终客户,或投递至末端配送点(如快递驿站或智能储物柜)由其暂存并完成最终交付。

三阶段流程有利于在不新增大规模基础设施的前提下,利用既有公共交通系统的剩余运力构建高效、跨区、可规模化的城市货运网络,同时,通过灵活设计集货与散货接驳方式,适配具体的城市物理空间约束与多样化的运营服务要求。

2.2. FoT 系统的四大核心运营要素

现有关于 FoT 系统的研究,对构成其运输流程的核心运营要素缺乏一致的概念界定,导致不同研究在模型设定与模式描述上存在差异。为建立本文后续模式分类与模型构建的统一基础,本节结合代表性文献,对 FoT 系统中最常被组合使用的四大核心运营要素进行明确界定,包括:定班公共运输线路、循环集配车辆、即时取送载具以及智能包裹柜。这些要素可视为构架各类 FoT 运输模式的基本单元。

(1) 定班公共运输线路(Scheduled Line, SL)

定班公共运输线路(Scheduled Line, SL)指按照固定线路与公开时刻表运行的城市公共交通服务,如地铁、轻轨、快速公交系统等。在 FoT 系统中,SL 承担利用公共交通剩余运力进行货物跨片区主干运输的核心职能,负责将货物从集货站点批量、准时地转运至目标区域的卸货站点[15]。SL 的网络布局与时刻表直接决定了城市主干运输阶段的空间可达性与时效基准。

(2) 循环集配车辆(Cycling Vehicle, CV)

循环集配车辆(Cycling Vehicle, CV)指从配送中心出发,沿优化后的闭环路径执行集货或配送任务,最后返回起点的地面货运车辆(如货运面包车、电动厢式货车等)。其功能是在集货或散货接驳阶段,负责中短距离、需求点相对集中的批量地面转运任务[16]。其运营模式具有服务区域稳定、路径固定化的特点。

(3) 即时取送载具(Pick-up & Delivery, PD)

即时取送载具(Pick-up & Delivery, PD)指由无人机、配送机器人等自主运载工具构成的,执行点对点取货与送货任务的机动单位。该单元通常具有独立的作业起点与回收点,单次运载能力有限,因此尤其适用于需求分布高度离散、订单批量小或时效要求苛刻的场景[17]。在 FoT 系统中,PD 可被灵活部署于集货或散货接驳阶段,其价值在于能够以高度的路径柔性弥补循环集配车辆在处理碎片化、随机性订单时的效率不足,从而提升系统整体的响应能力。

(4) 智能包裹柜(Parcel Locker, PL)

智能包裹柜(Parcel Locker, PL)指布设于公共交通站点、社区中心等节点,为用户提供自助存取服务的包裹暂存设施。作为 FoT 系统中的关键缓冲设施,PL 的核心功能在于解耦运输环节间的时空约束,即缓解公共交通固定班次与地面接驳单元灵活调度之间的时间冲突,从而延长末端配送的时间窗口,增强系统运行的稳定性和客户取件的灵活性[18]。

上述定班公共运输线路、循环集配车辆、即时取送载具与智能包裹柜，共同构成了设计与分析各类 FoT 运输模式的基础运营要素。后续章节将探讨的多种 FoT 运营方案，实质上均可视为这些要素在时空网络与功能上的不同组合形式。

2.3. FoT 系统的五类运输组织模式

基于前文提出的三阶段流程与四大核心运营要素，现有研究中的 FoT 运输组织方案可进一步归纳为五类典型模式，具体包括：(1) SL 模式；(2) SL + CV 模式；(3) SL + PD 模式；(4) SL + PL 模式；(5) SL + PL + CV 综合模式。本节将依此顺序，依次阐述每类模式的核心构成、运行逻辑、代表性研究及主要适用场景。

2.3.1. SL 模式

SL 模式是结构最为基础的 FoT 运输组织形式，指在不引入 CV、PD 或 PL 等接驳要素的情况下，仅依托地铁、轻轨、BRT 等定班公共运输线路的剩余运力，实现货物在站点之间的运输。相关研究主要关注既有客运系统中货运服务的可嵌入性，其核心问题在于：在严格保障客运服务优先与运行稳定的前提下，如何为货物配置可行的运输容量。具体而言，研究重点集中于识别可参与货运的列车班次与站点区段，并在满足安全与装卸作业约束的条件下，为货物分配车厢或行李区等有限空间资源[19]。在此基础上，部分研究进一步从物理与设施层面探讨客货混载的实现条件，包括车厢内部布局的适配设计(如可移动隔断或专用货架)以及支持快速装卸的站台设施配置，以提升短停站时间内的货运作业效率[20]。

SL 模式的优势在于基础设施改造成本与运营复杂性最低[21]。然而，由于其完全受限于公共交通的站点、时刻与客运优先级，它本质上是一个“站到站”的批量运输方案，无法直接形成“门到门”的配送闭环。因此，该模式主要适用于点对点的批量货物转运(如分拨中心间的调拨)、或在特定时段(如夜间)进行的快件干线集散。其学术研究重点也自然聚焦于运力分配的优化算法与运营时刻的协同策略，而非完整的末端配送体系构建。

2.3.2. SL + CV 模式

SL + CV 模式是目前 FoT 研究领域中文献最为丰富、方法体系最为成熟的运输组织模式，其相关研究成果在数量上显著多于其他组合模式[14]。该模式的基本结构是：SL 承担城市内部跨片区的干线运输，CV 负责在干线两端的装载站与卸货站完成“集货 - 配送 - 返回”的循环式接驳任务，二者构成了一个典型的“主干 - 接驳”两级运输体系。该模式构建了端到端运输链条，且由于 CV 属于传统城市配送中常见的交通工具，其与现有物流基础设施与操作流程有较高的现实契合度，因此在 FoT 模式中更容易实现操作上的融合与初步验证，成为学者们关注的典型模式之一[14]。围绕该模式的协同优化，现有研究主要涉及以下三个方向：一是系统集成与网络设计，主要研究如何优化“主干 - 接驳”两级体系的整体架构，包括匹配 SL 的货运时刻表、车厢运力分配与 CV 的服务区域，以及中转枢纽的选址与功能布局[22]；二是时空协同与调度优化，其核心是建立可靠的时空同步机制，确保 CV 车辆能在 SL 班次限定的狭窄时间窗口内完成货物交接，从而保障物流链条在节点处的无缝衔接[23]；三是联合建模与算法求解，该方向致力于构建包含 SL 固定班次、容量等复杂约束的多模态联合路径规划模型，以实现循环取送货问题与公共交通运行图的一体化求解[14]。

总体来看，SL + CV 模式的优势在于能够融合公共交通的高频、稳定、跨区特性与地面集配车辆的灵活、可达优势，构建起“批量干线运输与分布式末端集配相结合”的高效分层物流体系。该模式适用于需求规模较大、空间分布较广的城市配送场景。然而，由于干线与支线在时空上存在协同作业，因此也面临衔接处容错率低、站点作业能力制约、车辆调度复杂等固有挑战，在客运高峰或站点空间受限的

场景下,系统的鲁棒性易受影响。因此,如何通过时空资源优化、节点能力升级或智能协同调度等手段提升系统的抗干扰能力与协调效率,是未来研究的关键方向。

2.3.3. SL + PD 模式

SL + PD 模式指由即时取送载具与定班公共运输线路协同完成货物运输的方案。根据 PD 工具与 SL 的交互方式,主要存在两种实现路径:一种是“PD 随货上车”,即装载货物的 PD 工具作为整体单元搭乘 SL 车厢,利用其完成主干运输,下车后继续执行配送[24],此模式旨在实现配送流程无缝化,但面临与客运共享运力的动态约束;另一种是“PD 站外接驳”,即 SL 负责运输货物本身,PD 工具仅在首末站点负责装卸与短驳,此模式将 PD 工具从 SL 的车厢空间中解放出来,提升了其流动性和利用率,但对站台自动化装卸设施、临时仓储空间以及 PD 与 SL 班次间的时间同步提出了更高的要求[25]。无论哪种路径,该模式的核心目标都是将 SL 的批量运输能力与 PD 的点对点柔性配送能力相结合,以应对高时效性的小包裹配送需求。围绕 SL + PD 模式,现有研究总体上以 PD 与 SL 的联合路径规划问题为核心研究主线。其基本出发点是将配送过程建模为带公共交通班次约束的取送货问题(The Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Scheduled Lines, PDPTW-SL),在优化 PD 载具路径的同时,严格满足其与 SL 固定班次之间的时空同步关系,从而实现干线运输与末端配送的高效协同[24]。在此基础上,部分研究进一步考虑了系统规模扩大与运行环境不确定性所带来的挑战,将联合路径规划问题拓展至大规模与动态调度场景,通过引入多智能体强化学习、在线重规划等方法,实现多 PD 载具的实时协同与路径协调[26]。

与 SL + CV 模式的“计划性批量衔接”不同,SL + PD 模式实现了“响应性单件衔接”,这要求 PD 工具的作业时间与 SL 班次的到站时刻必须实现更高精度的匹配[27]。其核心优势在于,一方面,利用轻型、电动化的 PD 工具替代部分传统货车,有助于减少短途道路货运交通量;另一方面,PD 工具能够直接从站点向用户进行点对点配送,省却了 CV 模式在末端所需的集货、分拨等中间环节,从而在结构上缩短了物流链条[28]。因此,该模式凭借 PD 工具的机动性与直接交付能力,能够实现分钟级的末端响应,尤其适用于城市高密度区域(如商业区、大型社区)的高时效、小包裹配送场景。然而,该模式的局限性也十分显著:首先,对时空同步精度的苛刻要求使得系统容错性低;其次,PD 工具自身的载重小、续航短,严格限制了单次作业半径与货物类型;再次,在站点周边多工具密集运行时,需解决路径冲突、空域/路权协调等运行安全挑战;最后,技术标准、空域监管、公共安全法规及社会接受度等外部环境条件,共同构成了其规模化部署的主要壁垒。未来研究需着力于开发强鲁棒性的实时协同算法、设计标准化的站台接驳流程,并积极探索与城市管理相适配的监管框架与商业模式。

2.3.4. SL + PL 模式

SL + PL 模式通过将智能包裹柜布设在 SL 站点或其周边,构建起干线批量集运、站点分拣入柜、用户自助取件的标准化链路。在此模式中,PL 作为固定的缓冲设施,其核心价值在于实现了运输环节间的时空解耦,即货物经 SL 运抵后,可存入 PL 暂存,而无需等待用户或配送员即时取走,从而解除了 SL 班次与末端交付在时间上的强耦合约束[18]。现有研究主要围绕以下三个层面展开:首先,在战略规划层面,关注 PL 网络的规划与静态配置,其核心是在 SL 站点网络中优化 PL 的选址、数量及格口容量,以匹配干线货运流量与周边社区的潜在需求,并权衡前期投资成本与长期服务覆盖范围[29]。在此基础上,运营优化层面的研究则聚焦于集成 SL 班次的动态补货与库存管理,将 PL 视为分布式“微仓库”,重点解决如何根据 SL 的固定到站时刻表,来协同规划补货车辆路径,以实现多个 PL 网点库存的高效补充,这本质上是带时间窗约束的车辆路径问题与库存策略的联合优化[30]。此外,在系统评估层面,研究关注 PL 在最后一公里配送中的整体效能,例如其对配送效率、服务可达性和成本节约的影响,这些工作有助于评估 PL 在城市货运网络中的综合表现[31]。

SL + PL 模式的优势在于显著提升了系统的操作柔性及鲁棒性。PL 的缓冲作用降低了对 SL 与末端环节间时间同步精度的苛刻要求, 将站台从“即时装卸”的压力中解放出来, 转化为“可计划装卸”, 并能将用户取件行为在时间上分散, 从而有效平滑了运营峰值。该模式尤其适用于通勤走廊、大型居住区等需求稳定但交付时间窗灵活的场景, 并能通过用户自提有效降低“最后一公里”的配送成本与交通流量。然而, 该模式的局限性同样突出: 首先, PL 的固定资产投资与运维成本较高, 且其静态容量在“双十一”等高峰期间易出现瓶颈, 引发柜格短缺或需求溢出至邻近站点的问题。针对此, 学者们延伸出对智能包裹柜服务动态定价、容量共享等柔性管理策略的研究[32]。其次, 服务依赖用户自提, 难以满足高时效性要求。最后, 系统的效率高度依赖前瞻性规划的准确性, 对需求预测与网络优化算法提出了较高要求。

2.3.5. SL + PL + CV 模式

SL + PL + CV 模式在 SL + CV 的“主干-接驳”双层结构基础上, 于 SL 干线的首末两端关键站点引入了智能包裹柜作为中间缓冲与调度枢纽, 从而构成了“前端循环集货-枢纽缓冲暂存-固定班次干线运输-枢纽缓冲分拨-末端循环配送”的五段式协同网络。在此模式中, PL 并非单纯面向终端用户的自提设施, 而是作为服务于运营的中间节点, 承担货物流在不同运输层级之间的暂存、集并与分解功能。相关研究表明, 此类节点能够在系统层面协调地面配送车辆与公共交通干线之间的批量差异, 使零散需求得以以适合 SL 运力特征的批次形式组织, 同时也为下游 CV 的区域化配送提供集中取货点[33]。现有研究已从网络设计与运营协同两个层面验证了在 FoT 系统中引入站点级中间节点的潜在价值。在多层网络的整体规划问题上, 研究重点在于联合决定公共交通干线、站点级物流节点以及地面配送区域之间的空间配置关系, 典型决策包括节点选址、节点服务能力以及其与地面配送范围的匹配关系[22]; 在运营层面的跨模式协同问题上, 研究重点在于在既定网络结构下, 协调地面循环配送与公共交通干线运输之间的作业衔接关系, 通过联合优化地面车辆路径与货物在节点中的周转过程, 以降低系统运行成本并缓解干线班次约束带来的刚性影响[33]。

SL + PL + CV 模式的核心优势源于其结构化的分工与缓冲机制。与直接衔接的 SL + CV 模式相比, PL 节点的引入带来了关键改进: 它解除了 SL 班次对两侧 CV 作业计划的硬性约束。CV 车辆无需在狭窄时间窗内抵达站点进行“车等货”或“货等车”的高成本同步, 而是可以在更灵活的时间段内完成与 PL 的货物交接[34]。因此, 该模式特别适用于连接城市外围分拨中心与多个高密度居住区、且存在明显作业波峰波谷的电商快递场景。例如, 可在夜间或客流平峰期利用公共交通系统的富余运力将批量包裹运输至城市内部的站点级物流节点, 在此基础上再由地面配送车辆从这些节点出发完成区域配送, 从而在时间与空间上分离干线运输与末端作业[35]。这有效缓解了 SL + CV 模式在高峰时段面临的站点拥堵与调度压力。然而, 该模式在实践中也面临着一系列由系统固有复杂性衍生出的挑战。首先, 在模型与算法层面, 多层网络耦合导致的决策空间巨大, 使得联合优化问题规模呈指数级增长, 对求解算法的设计与效率提出了极高要求。其次, 在物理节点层面, PL 枢纽作为系统的关键缓冲, 其选址与容量配置若出现偏差, 极易从提升效率的杠杆退化为制约整体吞吐的瓶颈。最后, 在实施与协同层面, 高昂的初始基础设施投资以及多运营主体(公共交通、物流企业、末端服务商)间复杂的利益协调与成本分摊机制是其后期规模化推广的主要障碍。因此, 尽管该模式在理论上描绘出一个高度鲁棒的理想框架, 但其实际效能与落地可行性仍需在复杂网络优化、动态协同调度以及成本效益评估等方面取得进一步突破。

2.4. FoT 系统各运输组织模式的比较

前文提出的 FoT 系统的五类运输组织模式在系统构成、典型优化问题及适用场景上各具特点, 表 1 从流程实现、协同机制、核心问题和运输场景等维度对其进行系统性比较与总结。

Table 1. Comparison of transport organization modes in the FoT system
表 1. FoT 系统各运输组织模式的比较

维度	纯 SL 模式	SL + CV 模式	SL + PD 模式	SL + PL 模式	SL + PL + CV 模式	
流程实现	集货接驳	/	CV	PD	/	CV
	主干运输	SL	SL	SL	SL	SL
	散货接驳	/	CV	PD	/	CV
协同机制	/	时间同步	时间同步	时间解耦	时间解耦	
优势	系统改造小、成本低	覆盖范围广、规模效应高	末端响应迅速、连续性强	系统鲁棒性强、运营柔性高	效率、灵活性与可靠性兼备	
局限	服务链不完整	同步约束强、容错性有限	载重/续航受限、协调成本高	依赖自提、容量受限	系统复杂、投资与协调成本高	
典型优化问题	班次与运力配置	带时间窗的路径与调度	动态匹配与实时调度	设施选址与容量配置	多层网络设计与运营协同	
核心场景	夜间或平峰期站到站批量转运	站点至服务区的分层配送	高时效、小批量末端直送	时间窗灵活的自提型配送	多节点、多片区的稳定配送	

3. 数学模型与优化算法

本文遵循从长期网络布局到实时运营调度的逻辑,将现有研究提炼为三类核心优化问题:选址分配、列车调度与路径规划。本节将依此顺序,对上述三类问题的模型构建、算法求解及研究演进进行系统综述。表 2 对现有 FoT 相关研究进行了分类统计,为后续小节对具体问题的模型与算法讨论提供背景参考。

Table 2. Classification statistics of models in FoT-related literature
表 2. FoT 相关文献模型分类统计表

问题类别	运输模式	数量	文献
选址分配类	SL + PL + CV	2	[22] [33]
	SL + CV	4	[11] [37] [38] [39]
列车调度类	SL + PL	2	[40] [41]
	纯 SL	3	[35] [42] [43]
	SL + CV	4	[23] [44] [45] [46]
路径规划类	SL + PD	5	[24] [26] [28] [36] [47]
	SL + CV	11	[15]-[17] [48]-[55]

3.1. 选址分配类问题

在 FoT 系统中,由于 SL 的线路与时刻表相对固定,为实现不同运输阶段之间高效的货物流转,必须在网络中科学设置能够承担货物集并、暂存、分拨等关键功能的节点。这些节点的布局与能力,直接决定了 SL 的干线运力能否被有效接入,以及末端配送资源能否被高效组织。选址分配类问题以公共交通站点、分拨型包裹柜等物流节点为决策对象,系统性地确定哪些节点被纳入货运体系,以及各类需求、货物流或运输任务应如何分配至这些节点。

现有文献中关于 FoT 系统的选址分配研究主要集中于 SL + CV 与 SL + PL + CV 两种模式, 其关键在于不同运输模式中, 需要建设改造的设施是否具备缓冲、集散或重构货物流的能力。具体而言, 在纯 SL 与 SL + PD 模式中, 站点主要承担直达运输或即时接驳功能, 货物流不经重新组织, 相关空间决策多为既定条件或嵌入实时调度模型[36]; 在 SL + PL 模式中, 智能包裹柜是面向用户的服务终端, 其布局核心是最大化覆盖与便利性, 属于服务设施选址问题, 与以物流效率为核心的网络设计目标也存在本质不同[33]。故这三类模式的研究重点均不在此。而 SL + CV 模式中的站点是干线运输与地面配送的关键换乘节点, 其位置决定了两种模式的衔接效率与服务范围, 构成了简单的双层网络选址问题[37]; SL + PL + CV 模式中的 PL 则进一步演化为具备时间缓冲与货流集散能力的微枢纽, 能够解耦干线班次与支线配送计划, 从而引发了最为复杂的、多层级网络下的联合选址、容量规划与流量分配问题[22]。

选址分配问题的优化目标通常以最小化系统总成本为核心, 包括设施的固定建设成本与网络的动态运营成本[22]。同时, 最大化系统的服务覆盖能力或需求满足率也是一个关键目标[37]。约束通常包含分配唯一性、设施能力约束[38]。分配唯一性约束确保每个客户需求点仅由一个被激活的服务节点覆盖; 设施能力约束则对节点的处理容量、建设数量上限及服务地理半径加以限制。此外, 在复杂的 SL + PL + CV 多层级问题中, 模型需要特别考虑不同层级设施之间的容量匹配与跨层级流量协调。例如, 作为中间缓冲的 PL 枢纽的容量, 必须与上游 SL 的批量到货节奏以及下游 CV 的集货配送能力相适应[22]。这种多层级、带缓冲的网络协调, 是此类模式比 SL + CV 更为复杂的关键所在, 也使模型更贴近实际的城市物流规划情景。

在求解方法上, 研究呈现出明显的由精确算法向启发式算法过渡、由单一策略向分层混合框架发展的趋势, 这一趋势与问题规模和复杂性的增加紧密相关。对于变量较少、结构相对简单的小规模早期模型, 研究通常直接采用混合整数规划结合商业求解器的精确算法以获取最优解[38]。然而, 面对实际城市尺度下候选站点众多、且需耦合路径决策的大规模复杂问题, 精确方法往往难以应对计算挑战, 学界普遍转向设计多阶段混合启发式求解框架[37]。该框架的典型流程是[39]: 首先, 利用 TOPSIS 等多准则决策方法对候选站点进行评价与初筛, 压缩解空间; 继而, 采用元启发式算法进行高效搜索与优化; 对于集成网络设计与路径规划的极端复杂问题, 则采用基于列生成的分解策略等高级方法, 将问题拆解迭代求解。这一方法论的演进轨迹, 清晰地反映了 FoT 选址分配研究为贴近现实应用而不断深化算法设计与提升求解能力的发展路径。

3.2. 列车调度类问题

在 FoT 系统中, 城市轨道交通的客运班次时刻表具有较强的刚性, 而列车的运行时刻、停站时间与可用车厢容量之间又存在操作层面的相互制约关系, 因此, 如何在既有的客运运行图骨架内, 高效、可行地嵌入货运服务, 是列车调度类研究的核心议题。该类研究的焦点在于时间维度上对各种有限资源的精密协调, 其决策对象包括列车运行图调整、货物装载计划制定、站点装卸资源分配, 以及与 PL 或 CV 等接驳工具的时间衔接。

现有关于 FoT 系统的列车调度问题的研究因 FoT 运输模式的不同而呈现出明显差异。在纯 SL 模式中, 调度决策核心是在不影响客运的前提下, 利用可预测的剩余运力或增设货运专列, 以确定货物的装载班次、车厢分配及到发时间。此类研究将问题严格限定于轨道交通系统内部的运力挖掘与班次组织[35]。相比之下, 拓展至 SL + PL 与 SL + CV 等多模式协同场景的研究则相对有限。在 SL + PL 模式中, 列车计划需与包裹柜节点的容量及货物暂存时长相匹配[40]; 在 SL + CV 模式中, 则需同步考虑列车时刻表与地面循环集配车辆的路径规划, 实现站点处的时间与空间接驳[45]。这种跨模式协同显著提升了时空耦合的复杂度, 研究挑战因而更大。至于 SL + PD 模式, 由于接驳载具具备实时响应性, 研究通常将列车

时刻表视为固定参数, 优化重心置于接驳载具的动态调度上, 列车调度本身被弱化处理。总体而言, 现有列车调度类研究仍主要聚焦于轨道交通系统内部的优化。

列车调度类问题的优化目标反映了公共交通运营商与货运服务商在效率、成本与服务之间的综合权衡。早期研究多侧重于提升服务效率, 以最小化货物在站点的总等待时间或交付延迟率为核心目标[35]。近期研究一方面更多地引入了经济性考量, 将目标函数扩展为最大化系统净收益[42], 即从货运收入中扣除列车开行、货物装卸、仓储等各项运营成本后的利润; 另一方面开始注重多维度考量, 多目标优化研究显著增加, 旨在同时权衡乘客服务、运营效率与货运表现[41]。更有研究尝试从公交运营商、物流服务商等多个利益相关者视角构建包含五个目标的综合权衡框架[44], 使模型能够更全面地评估方案的经济可行性与整体效益。在约束条件方面, 模型除需满足流量守恒、列车容量等基础约束外, 还需处理两类 FoT 特有的复杂约束。其一是高精度的时空匹配约束, 要求货物的准备与装卸作业时间必须完全落在列车停站时间窗内, 并与站点的瞬时仓储容量动态适应[43], 从而确保货运作业完全不干扰既定的客运服务。其二是面向运营的复杂规则约束, 包括列车运行图与车底周转计划约束[42]、货物运送的严格时间窗限制, 以及针对延迟交付的惩罚成本机制[46]。这些约束共同刻画了在刚性客运网络中嵌入弹性货运服务所面临的多层级资源竞争与协同挑战, 使得调度模型更贴近实际运营场景。

在求解方法上, 研究呈现出从针对特定问题的启发式算法, 向精确算法、元启发式及智能优化算法并重的路径, 其方法选择与问题规模、模型结构和优化目标的复杂性紧密相关。早期研究针对结构相对简单的单线或网络调度问题, 常设计如最优调度规则启发式或基于最长路径的启发式等方法, 以快速构造可行解[35]。随着模型维度扩展且建模更规范化, Gurobi、CPLEX 等商业求解器被广泛用于求解中等规模的单目标优化问题, 以获取精确解或可靠上界[46]。当问题进一步扩展至包含跨模式联动、多目标及非线性特征的大规模复杂场景时, 计算复杂度呈指数级增长, 精确方法往往面临计算瓶颈, 因此, 研究转而采用元启发式与智能优化算法。遗传算法、人工蜂群算法等被用于处理单目标复杂调度[43]; 而面对需同时权衡多个冲突目标的问题, 多目标进化算法则成为主流求解框架[41]。此外, 多智能体强化学习等前沿方法也开始被探索, 以应对高度动态的协同调度环境[46]。这一方法论的变迁, 标志着 FoT 列车调度研究正从基础理论探索, 迈向能够支撑大规模、集成化决策的技术成熟期。

3.3. 路径规划类问题

在 FoT 系统中, 当货物借助固定班次、固定线路的公共交通(SL)完成主干运输后, 必须通过灵活的末端接驳工具(CV 或 PD)完成空间上的“门到门”配送。路径规划类问题关注的是在既定的运输网络结构与运行规则下, 如何为货物设计出一条从起始点经 SL 网络到最终需求点的完整运输路径, 其决策对象不仅包括末端接驳工具的行驶路径与客户访问序列, 更关键的是为其在 SL 网络上选择合适的换乘站点、班次以及精确的接驳时间[16]。在建模上, 路径规划类问题通常在经典车辆路径问题或取送货问题的框架上, 引入与固定班次、节点换乘等相关的复杂扩展。它直接决定了 FoT 系统在实操层面的配送效率、资源利用率与服务可靠性, 是将顶层模式构想转化为可执行运营方案的关键环节。

路径规划类研究高度集中于 SL + CV 与 SL + PD 两种模式, 其本质原因在于末端接驳工具的移动路径是系统效能的核心变量, 且其优化与 SL 的时空资源紧密耦合。在 SL + CV 模式中, 地面循环集配车辆需要在多个公共交通站点与分散的客户点之间执行循环配送。其访问顺序、行驶路径与 SL 班次的衔接直接决定了车辆使用效率、行驶成本与服务时效, 因此路径规划是无可回避的核心运营优化问题[50]。在 SL + PD 模式中, 尽管无人机或配送机器人机动性更高, 但其续航、载重、充电及空域管理等自身约束极为严格, 且必须与 SL 的固定班次精密同步, 这使得其路径决策成为一个受多重强约束驱动的复杂优化问题, 构成了系统可行性的关键瓶颈[26]。相比之下, 在其他模式中, 路径规划的核心地位被其他

决策所取代或简化。在纯 SL 模式中, 其核心优化任务是在固定的公共交通网络中进行运力分配、时刻表协同与货物批量调度, 这更多属于网络流优化或资源调度问题的范畴[56]。在 SL + PL 模式中, 智能包裹柜解耦了 SL 班次与末端交付的时间压力, 末端路径(从柜到客户)通常是客户自助完成的短距离移动, 无需系统优化。至于 SL + PL + CV 这类复合模式, 在给定 PL 位置与容量后, 其路径规划问题在逻辑上可分解为前端 CV 向 PL 枢纽的集货路径和末端 CV 从 PL 枢纽出发的配送路径, 其优化本质和方法与 SL + CV 模式有共通之处, 常被纳入后者的研究框架中讨论, 而较少作为全新的路径问题类别被单独大量研究[57]。

在优化目标方面, 路径规划类问题延续了经典车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)的基本目标结构, 但在 FoT 场景下呈现出更为多维的特征。早期研究多以最小化末端配送车辆使用数量或总行驶成本为主要目标, 通过减少城市货运车辆或自动配送设备的规模来提升系统经济性[16]。随着研究深入, 目标函数逐步扩展为综合成本最小化, 将路线成本、车辆固定成本以及使用轨道交通进行转运所产生的费用统一纳入考虑[51]。在 SL + PD 场景中, 时间绩效指标占据更为重要的位置, 诸如最小化总投递完成时间、最小化最大单任务完成时间等目标被频繁采用, 以应对即时配送与高时效性需求[47]。部分研究进一步引入多目标优化框架, 同时权衡配送成本、服务效率与系统公平性, 尤其在医疗物资或紧急配送场景下, 需求紧迫性与满足率被纳入目标函数进行综合考量[52]。在约束条件方面, 路径规划模型通常包含三类核心约束。第一类是基础路径与流量约束, 包括确保每个客户被唯一服务、车辆在路径网络中的流量平衡、载重容量以及单日最长作业时间等限制。第二类是 FoT 特有的多模式时空协同约束, 这是模型的核心难点, 要求末端接驳载具在公共交通站点的作业时间(到达、装卸、离开)必须与 SL 的到发时刻表相匹配, 并满足站点可能存在的并行作业能力限制[53]。第三类是针对特定载具的物理与运营约束, 例如针对无人机或配送机器人的续航里程限制、充放电规则、取送货的先后顺序以及严格的客户服务时间窗等[36]。这些约束共同刻画了 FoT 系统中末端配送在多运输方式协同条件下面临的高度受限且结构复杂的解空间, 使路径规划问题在求解难度上显著高于传统单一网络的 VRP。

在求解方法上, 路径规划类研究呈现出从元启发式主导, 向融合精确算法与智能优化方法的混合求解框架演进的趋势。早期研究主要采用成熟的元启发式, 如自适应大邻域搜索、迭代局部搜索或随机变邻域下降等, 通过设计定制化的破坏与修复算子, 高效处理路径与时间窗的耦合, 以构造高质量可行解[51]。随着问题规模扩大与约束结构日趋复杂, 单纯的启发式搜索难以保证解的质量。因此, 研究开始引入列生成、分支定价与割平面等精确或半精确方法, 旨在为大规模问题提供理论下界, 或精确求解其核心的子问题, 从而系统性地处理路径选择与资源分配之间的强耦合[54]。近年来, 为应对包含多运输模式同步、多目标权衡及动态不确定性的大规模现实场景, 求解策略进一步转向设计混合与分层求解框架。常见思路包括在外层采用遗传算法等进化算法进行宏观搜索, 内层嵌入蚁群算法、变邻域搜索等机制进行精细优化, 以平衡解的质量与求解效率[55]。在 SL + PD 这类对实时响应要求极高的场景中, 多智能体路径查找与强化学习等前沿方法也开始被探索, 以处理动态环境下的分散式协同决策[26]。总体而言, 求解方法的演进展现了该领域方法论的多元化与持续融合创新, 以应对大规模、高动态、强约束现实场景的挑战。

3.4. 不同优化算法的比较与适用性分析

现有 FoT 相关研究在算法选择上呈现出高度多样化的特征, 不同文献根据问题规模、模型结构与研究目标, 采用了从精确算法到元启发式乃至智能优化的多种求解策略。本文基于已有文献报告的算例规模、计算时间与求解表现, 对不同类别优化算法在 FoT 问题中的适用性进行系统归纳, 并将相关比较结果汇总于表 3 中。

Table 3. Comparison of optimization algorithms used in FoT-related studies
表 3. FoT 相关研究的优化算法比较

算法类别	典型方法	适用问题规模	计算时间特征	解质量特征	主要适用问题	代表文献
精确算法	MIP, Branch-and-Bound, Branch-and-Cut	小规模	随规模指数增长	全局最优	选址分配、小规模列车调度	[38] [46]
基于分解的精确算法	Column Generation, Branch-and-Price	中等规模	偏高	最优或有理论下界	结构化路径规划、网络设计	[54]
启发式算法	构造启发式、规则调度	中 - 大规模	极低	可行但不保证最优	快速可行调度、初始解构造	[35]
元启发式	ALNS, GA, VNS	大规模	可控	高质量近似解	大规模路径规划与时空同步调度	[51] [55]
智能优化	多目标 EA, RL	动态/大规模	依赖训练	鲁棒/自适应	实时路径与调度决策、动态重规划	[26] [41]

4. 结论与未来研究方向

本文围绕利用公共交通系统开展城市货运(Freight on Transit, FoT)这一领域,对现有定量研究文献进行了系统综述与方法论层面的整合。不同于以往多从单一案例或技术路径出发的研究,本文从运输组织与优化建模的统一视角出发,构建了一套清晰的分析框架,以揭示 FoT 研究在模式设计、问题建模与算法选择上的内在逻辑。具体而言,本文首先界定了 FoT 系统的通用运营流程,并将其拆解为轨道干线运输(SL)、地面接驳运输(CV/PD)以及中继与缓冲设施(PL)等基本运营要素。在此基础上,通过不同要素的组合方式,系统归纳并比较了五类具有代表性的 FoT 运输组织模式,明确了各模式在系统边界假设、物流功能分工以及运营复杂度方面的差异。进一步地,本文依据战略、战术、操作的决策层级,对现有文献进行了重新梳理与归类。在此框架下,重点综述了选址分配、列车调度与路径规划这三类核心问题在不同 FoT 模式下的研究特征。总体而言,本文的主要贡献在于:从方法论层面整合了 FoT 领域中不同运输组织模式下的定量研究成果,澄清了研究对象与问题类型之间的对应关系,并为后续模型构建与算法设计提供了系统性的参考框架。

尽管近年来 FoT 相关研究的数量持续增长,但从整体来看,现有文献仍存在一些不足。首先,在系统层面,多数研究仍基于高度特定的应用场景或案例展开,不同研究在系统边界、服务对象与运营假设上的差异较大,导致研究结论的可比性与可迁移性有限。部分文献对“FoT 模式”的概念界定较为模糊,导致其模型结果难以在更广泛的运输组织情境下得到解读与应用。其次,在问题建模层面,现有研究往往聚焦于单一决策层级,缺乏对多层级决策之间关联性的系统刻画。例如,选址决策、列车调度与末端路径规划在现实中相互影响,但在模型中常被割裂处理,难以全面反映 FoT 系统中跨层级决策的联动效应。再次,在方法与数据层面,大量研究仍依赖静态、确定性的需求假设,对城市货运需求的时变性、不确定性以及与客运需求之间的相互作用考虑不足。同时,模型验证多基于理想化或中小规模算例,缺乏长期运营数据或真实系统运行数据的支撑。

基于上述不足, FoT 领域未来的研究可从以下几个方向进一步深化。首先,在系统建模层面,有必

要从单一模式分析走向多模式统一建模,在同一分析框架下比较不同 FoT 运输组织方案的适用条件与性能差异。进一步地,未来研究可考虑将城市客运需求的时空分布特征显式纳入 FoT 系统设计之中,例如基于历史与实时客流数据,构建客货协同的系统边界与服务规则,从而避免对公共交通系统可用运力的过度理想化假设。其次,在优化问题层面,未来研究可加强对多层级决策耦合问题的刻画,探索选址、调度与路径规划的一体化或分层协调建模方法,尤其关注缓冲设施(如包裹柜)在削弱时空耦合、提升系统柔性方面的作用机制。在此基础上,可进一步提出面向实时运营的动态决策问题,例如:基于列车实际载客率或站点拥挤程度的动态货运舱位分配机制,以及在班次延误或需求波动情况下,货运任务在不同 SL 班次之间的自适应重分配问题。此类问题将推动 FoT 研究从静态规划模型向在线决策与滚动优化框架演进,这一方向对于 SL + PD 等强调实时响应的运输组织模式尤为重要。此外,随着多源数据与智能调度技术的发展,未来研究可进一步结合真实运行数据、仿真平台与数字孪生技术,在更大规模和更接近实际运营条件的情境下验证模型与算法的有效性。与此同时,从制度与运营角度出发,亟需引入公共交通运营商与物流服务商之间的博弈与收益共享模型,系统分析不同合作机制下的激励相容性与长期稳定性。相关研究可为 FoT 在现实城市中的规模化落地提供决策支持,而不仅仅停留在技术可行性层面。

参考文献

- [1] 人民日报. 快递纪录里的经济新气象[N]. 人民日报, 2025-12-02(07).
- [2] 商务部研究院. 即时零售行业发展报告(2025) [R]. 北京: 商务部研究院, 2025.
- [3] 白元琪. 闪购模式快速发展激活服务消费新动能[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1837396463878025142&wfr=spider&for=pc>, 2025-07-12.
- [4] 每日经济新闻. “小包裹”跑出加速度快递市场呈现三大特征[N]. 每日经济新闻, 2025-12-04(01).
- [5] 新华网客户端. 分钟革命: 新型服务业电商如何重塑中国城市经济新基建[EB/OL]. <https://app.xinhuanet.com/news/article.html?articleId=b879c8d0a39921f5470f5678c389698d>, 2025-07-16.
- [6] 百度百科. 最后一公里配送[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/%E6%9C%80%E5%90%8E%E4%B8%80%E5%85%AC%E9%87%8C%E9%85%8D%E9%80%81>, 2025-12-20.
- [7] Jiménez, P., Garrido, L., Gomez, J. and Vassallo, J.M. (2025) Environmental and Operational Impact of Freight Urban Delivery: In-Store, Home and Locker. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **149**, Article ID: 105026. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.105026>
- [8] El Amrani, A.M., Fri, M., Benmoussa, O. and Rouky, N. (2024) The Integration of Urban Freight in Public Transportation: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, **16**, Article 5286. <https://doi.org/10.3390/su16135286>
- [9] International Association of Public Transport (UITP) (2022) Improving Passenger Flow and Crowd Management through Technology and Innovation. UITP.
- [10] Bacher, P., Klopp, J.M., Ortbauer, M. and Lackner, M. (2024) The Potential of Combining Passenger Rail with Freight: A New York City Case Study. *Journal of Public Transportation*, **26**, Article ID: 100093. <https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2024.100093>
- [11] Delle Donne, D., Alfandari, L., Archetti, C. and Ljubić, I. (2023) Freight-On-Transit for Urban Last-Mile Deliveries: A Strategic Planning Approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, **169**, 53-81. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2023.01.004>
- [12] Veliou, E., Kepaptsoglou, K. and Karlaftis, M. (2010) Night-Time Operations in Transit Systems: Evaluating the Athens Metro Owl Services. *Journal of Public Transportation*, **13**, 79-100. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.13.3.5>
- [13] Ghilas, V., Cordeau, J., Demir, E. and Woensel, T.V. (2018) Branch-And-Price for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Scheduled Lines. *Transportation Science*, **52**, 1191-1210. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0798>
- [14] Elbert, R. and Rentschler, J. (2022) Freight on Urban Public Transportation: A Systematic Literature Review. *Research in Transportation Business & Management*, **45**, Article ID: 100679. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100679>
- [15] Ghilas, V., Demir, E. and Van Woensel, T. (2016) An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Scheduled Lines. *Computers & Operations Research*, **72**, 12-30. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.01.018>

- [16] Trentini, A., Masson, R., Lehuédé, F., *et al.* (2012) A Shared “Passengers and Goods” City Logistics System. *4th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, Quebec, August 2012, 10 p.
- [17] Ghilas, V., Demir, E. and Woensel, T.V. (2016) A Scenario-Based Planning for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows, Scheduled Lines and Stochastic Demands. *Transportation Research Part B: Methodological*, **91**, 34-51. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.04.015>
- [18] Zhang, Q. and Demir, E. (2025) Parcel Locker Solutions for Last Mile Delivery: A Systematic Literature Review and Future Research Directions. *Frontiers in Future Transportation*, **6**, Article 1654621. <https://doi.org/10.3389/ffutr.2025.1654621>
- [19] 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]. 交通运输工程与信息学报, 2025, 23(3): 185-196.
- [20] 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.
- [21] 胡万杰, 董建军, 陈志龙. 基于地铁货运系统的城市物流发展模式探讨[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(2): 8-15.
- [22] Zhang, H., Zhang, J., Zheng, C., Wang, B. and Chen, J. (2024) Node Location of Bi-Level Urban Metro-Based Ground-Underground Logistics Distribution. *Multimodal Transportation*, **3**, Article ID: 100119. <https://doi.org/10.1016/j.multra.2023.100119>
- [23] Ye, Y., Guo, J. and Yan, L. (2021) A Mixed Decision Strategy for Freight and Passenger Transportation in Metro Systems. *Computational Intelligence and Neuroscience*, **2021**, Article ID: 5412016. <https://doi.org/10.1155/2021/5412016>
- [24] Mourad, A., Puchinger, J. and Van Woensel, T. (2020) Integrating Autonomous Delivery Service into a Passenger Transportation System. *International Journal of Production Research*, **59**, 2116-2139. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1746850>
- [25] Ghiani, G., Guerriero, E., Manni, E. and Pareo, D. (2025) Combining Autonomous Delivery Robots and Traditional Vehicles with Public Transportation Infrastructure in Last-Mile Distribution. *Computers & Industrial Engineering*, **203**, Article ID: 111001. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111001>
- [26] Choudhury, S., Solovey, K., Kochenderfer, M.J. and Pavone, M. (2021) Efficient Large-Scale Multi-Drone Delivery Using Transit Networks. *Journal of Artificial Intelligence Research*, **70**, 757-788. <https://doi.org/10.1613/jair.1.12450>
- [27] Alverhed, E., Hellgren, S., Isaksson, H., Olsson, L., Palmqvist, H. and Flodén, J. (2024) Autonomous Last-Mile Delivery Robots: A Literature Review. *European Transport Research Review*, **16**, Article No. 4. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00629-7>
- [28] Huang, H., Savkin, A.V. and Huang, C. (2020) Scheduling of a Parcel Delivery System Consisting of an Aerial Drone Interacting with Public Transportation Vehicles. *Sensors*, **20**, Article 2045. <https://doi.org/10.3390/s20072045>
- [29] Zang, X., Jiang, L. and Meng, Q. (2025) Urban Last-Mile Delivery Services with Time Windows and Parcel Lockers: Model Formulation and Branch-And-Price Algorithm. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **179**, Article ID: 105280. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105280>
- [30] Campisi, T. and Di Ruocco, I. (2025) Accessibility and Spatial Location of Parcel Lockers in Last-Mile Delivery: A Literature Review. *The Open Transportation Journal*, **19**, e26671212391037. <https://doi.org/10.2174/0126671212391037250827100344>
- [31] Liu, Y. and Wang, Y. (2025) Solving the Multi-Objective Vehicle Routing Problem with Parcel Lockers. 2025 *5th International Conference on Smart City Engineering and Public Transportation (SCEPT2025)*, Beijing, 28-30 March 2025. <https://doi.org/10.4271/2025-99-0050>
- [32] Pang, K., Xu, J., Jiang, R. and Liu, R. (2024) Parcel-Locker-Sharing Model for E-Commerce Logistics Service Providers. *Mathematics*, **12**, Article 2802. <https://doi.org/10.3390/math12182802>
- [33] Azcuy, I., Agatz, N. and Giesen, R. (2021) Designing Integrated Urban Delivery Systems Using Public Transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **156**, Article ID: 102525. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102525>
- [34] Liu, S. and Hassini, E. (2023) Operating Smart Mobile Lockers with City Buses for E-Commerce. <https://ssrn.com/abstract=4536628>
- [35] Behiri, W., Belmokhtar-Berraf, S. and Chu, C. (2018) Urban Freight Transport Using Passenger Rail Network: Scientific Issues and Quantitative Analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **115**, 227-245. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.05.002>
- [36] De Maio, A., Ghiani, G., Laganà, D. and Manni, E. (2024) Sustainable Last-Mile Distribution with Autonomous Delivery Robots and Public Transportation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **163**, Article ID: 104615. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104615>
- [37] Zhao, L., Zhou, J., Li, H., Yang, P. and Zhou, L. (2021) Optimizing the Design of an Intra-City Metro Logistics System

- Based on a Hub-And-Spoke Network Model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **116**, Article ID: 104086. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104086>
- [38] Zhao, L., Li, H., Li, M., Sun, Y., Hu, Q., Mao, S., et al. (2018) Location Selection of Intra-City Distribution Hubs in the Metro-Integrated Logistics System. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **80**, 246-256. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.024>
- [39] Hu, W., Dong, J., Yang, K., Hwang, B., Ren, R. and Chen, Z. (2023) Reliable Design of Urban Surface-Underground Integrated Logistics System Network with Stochastic Demand and Social-Environmental Concern. *Computers & Industrial Engineering*, **181**, Article ID: 109331. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109331>
- [40] Li, Z., Shalaby, A., Roorda, M.J. and Mao, B. (2021) Urban Rail Service Design for Collaborative Passenger and Freight Transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **147**, Article ID: 102205. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102205>
- [41] Hou, Z., He, R., Liu, C., et al. (2024) Optimization of Passenger and Freight Collaborative Transportation for Urban Rail Transit under Virtual Coupling Condition. *Engineering Letters*, **32**, 179-192.
- [42] 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.
- [43] Sahli, A., Behiri, W., Belmokhtar-Berraf, S. and Chu, C. (2022) An Effective and Robust Genetic Algorithm for Urban Freight Transport Scheduling Using Passenger Rail Network. *Computers & Industrial Engineering*, **173**, Article ID: 108645. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108645>
- [44] Machado, B., de Sousa, A. and Pimentel, C. (2023) Operational Planning of Integrated Urban Freight Logistics Combining Passenger and Freight Flows through Mathematical Programming. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, **29**, 453-468. <https://doi.org/10.1080/15472450.2023.2270409>
- [45] Li, F., Guo, X., Zhou, L., Wu, J. and Li, T. (2022) A Capacity Matching Model in a Collaborative Urban Public Transport System: Integrating Passenger and Freight Transportation. *International Journal of Production Research*, **60**, 6303-6328. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1991021>
- [46] 巫威眺, 周霄, 朱彦辰, 李鹏, 邹弘辉, 李余. 考虑乘客时空灵活性的需求响应客货联运动态调度[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(4): 211-227.
- [47] Masson, R., Trentini, A., Lehuédé, F., Malhéné, N., Péton, O. and Tlahig, H. (2017) Optimization of a City Logistics Transportation System with Mixed Passengers and Goods. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, **6**, 81-109. <https://doi.org/10.1007/s13676-015-0085-5>
- [48] Fatnassi, E., Chaouachi, J. and Klibi, W. (2015) Planning and Operating a Shared Goods and Passengers On-Demand Rapid Transit System for Sustainable City-logistics. *Transportation Research Part B: Methodological*, **81**, 440-460. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.016>
- [49] 詹斌, 鲁子骏. 基于地铁的城市物流配送网络优化研究[C]//中国公路学会, 中国航海学会, 中国铁道学会, 中国航空学会, 中国汽车工程学会. 2025 世界交通运输大会论文集(WTC2025). 武汉: 中国公路学会, 2025: 64-70.
- [50] Huang, H., Savkin, A.V. and Huang, C. (2020) A New Parcel Delivery System with Drones and a Public Train. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, **100**, 1341-1354. <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01223-y>
- [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.
- [52] Sun, K., Gu, Y., Wan Fei Ma, K., Zheng, C. and Wu, F. (2024) Medical Supplies Delivery Route Optimization under Public Health Emergencies Incorporating Metro-Based Logistics System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2678**, 111-131. <https://doi.org/10.1177/03611981231223287>
- [53] Ghilas, V., Demir, E. and Van Woensel, T. (2016) The Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Scheduled Lines. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, **54**, 147-167. <https://doi.org/10.1080/03155986.2016.1166793>
- [54] Schmidt, J., Tilk, C. and Irmich, S. (2024) Using Public Transport in a 2-Echelon Last-Mile Delivery Network. *European Journal of Operational Research*, **317**, 827-840. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.10.041>
- [55] 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.
- [56] Powell, S., Melissa Campbell, A. and Hosseini, M. (2025) Underground Freight Transportation for Package Delivery in Urban Environments. *Networks*, **87**, 83-105. <https://doi.org/10.1002/net.70013>
- [57] Jazemi, R., Alidadiani, E., Ahn, K. and Jang, J. (2023) A Review of Literature on Vehicle Routing Problems of Last-Mile Delivery in Urban Areas. *Applied Sciences*, **13**, Article 13015. <https://doi.org/10.3390/app132413015>