

基于城市轨道交通的电商末端配送协同优化研究

刘 帅, 刘志钢

上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海

收稿日期: 2026年5月15日; 录用日期: 2026年6月1日; 发布日期: 2026年10月29日

摘 要

随着电子商务和快递业务快速发展, 城市末端配送面临订单碎片化、道路拥堵和低碳转型等压力。城市轨道交通具有网络覆盖广、运行准点、非高峰运力富余等优势, 可为电商末端配送提供补充运输方式。文章构建了“订单筛选 - 站点换装 - 轨道运输 - 末端接驳 - 信息协同”的城轨配送模式, 并从需求适配、路径组织、运力调度和主体协同等方面提出了优化机制。情景模拟结果表明, 在合理筛选订单、避开客流高峰并控制换装效率的条件下, 城轨协同配送能够减少道路行驶里程, 提高配送准时性, 并降低一定的碳排放, 可为相关主体开展试点提供参考。

关键词

电子商务, 城市轨道交通, 末端配送, 快递物流, 协同优化

Research on Collaborative Optimization of E-Commerce Last-Mile Delivery Based on Urban Rail Transit

Shuai Liu, Zhigang Liu

School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: May 15, 2026; accepted: June 1, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

With the rapid growth of e-commerce and express delivery, urban last-mile delivery faces pressures such as fragmented orders, road congestion, and low-carbon transformation. Urban rail transit, with

its wide network coverage, high punctuality, and surplus off-peak capacity, provides a supplementary transport option for e-commerce last-mile delivery. This paper develops an urban rail-based delivery mode of order screening, station transshipment, rail transport, terminal connection, and information coordination, and proposes optimization mechanisms for demand matching, route organization, capacity scheduling, and multi-agent coordination. Scenario simulation shows that, with proper order screening, off-peak operation, and efficient transshipment, the proposed mode can reduce road mileage, improve delivery punctuality, and lower carbon emissions to some extent. The study provides references for pilot applications.

Keywords

E-Commerce, Urban Rail Transit, Last-Mile Delivery, Express Logistics, Collaborative Optimization

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

近年来,我国电子商务与快递业务快速发展。国家统计局数据显示,2025年我国电子商务交易额为467,339亿元,网上零售额为159,722亿元[1];国家邮政局数据显示,2025年我国快递业务量完成1989.5亿件,快递业务收入累计完成1.5万亿元[2]。电商交易规模和包裹数量持续增长,使城市配送系统承受更大压力。

城市末端配送仍存在车辆重复出行、空驶率偏高、路径绕行和运力错配等问题。中国物流与采购联合会数据显示,2025年全国社会物流总额为368.2万亿元,社会物流总费用为19.5万亿元[3]。在“618”、“双十一”等大促期间,高频次、小批量、强时效订单集中释放,传统道路配送模式面临较大调度压力。

城市轨道交通具有准点性强、受道路拥堵影响小、网络覆盖广和运行稳定等特点。交通运输部数据显示,2025年12月,全国开通城市轨道交通运营线路341条,运营里程11651公里[4]。在不影响客运安全和服务质量的前提下,利用非高峰时段、车站空间和标准化装载单元开展电商小件运输,有望形成道路配送之外的补充通道。

已有研究从理论模型、优化方法和实践探索等方面讨论了城轨参与快递物流运输的可行性。陈骏等认为,利用城轨非高峰富余运力开展快递运输,有助于降低配送成本并提高非票务收益,但存在停站时间短、运量有限和设施改造需求等问题[5]。雷晓瑜等探讨了城市轨道交通物流组织模式,认为城轨在特定场景下承担同城快递接力服务具有时效优势[6]。戴子文等结合深圳实践指出,该模式在缓解道路压力、优化末端配送和推动绿色转型方面具有应用潜力[7]。国外研究中,Li等从客货协同角度提出城市轨道交通客货协同运输服务设计模型[8]。总体看,既有研究已验证城轨配送可行性,但对高密度客运条件下订单筛选、站点换装、班次利用和责任协同关系讨论不足。基于此,本文将城轨电商末端配送界定为多主体、多节点、多约束下的协同优化问题。

2. 电商末端配送与城市轨道交通协同的现实基础

2.1. 电商末端配送的运行特征

电商末端配送是指商品从城市分拨中心、前置仓或末端网点送达消费者的最后环节,直接影响消费者购物体验 and 平台履约质量。与传统商业物流相比,电商末端配送具有订单碎片化、时效要求高、空间

分布不均和主体多元等特征。电商订单通常以小件、多批次、高频率形式出现, 促销活动期间订单会在短时间内集中释放, 对分拣、排线和配送能力形成冲击。同时, 消费者对“次日达”、“当日达”、“小时达”等服务的需求不断提升, 配送系统不仅要降低成本, 还要控制超时风险。电商订单多集中于居住区、商务区、校园和大型社区周边, 而这些区域往往存在道路拥堵和停车困难等问题。此外, 电商末端配送涉及平台、快递企业、骑手、社区驿站和智能快递柜等多个主体, 信息接口和服务标准不统一, 容易造成订单、运力和站点资源协同不足。相关研究指出, 电子商务配送需求增长会进一步加重城市末端配送中的拥堵、排放和履约压力[9]。

2.2. 城市轨道交通参与末端配送的适用性

城市轨道交通参与电商末端配送, 并不是替代全部道路配送, 而是承担部分中长距离、标准化、小件化、时效相对稳定的包裹转运任务。相比道路车辆, 城轨列车受路面拥堵、交通管制和停车限制影响较小, 运行图相对稳定, 有利于控制跨区配送时间。与此同时, 轨道交通站点多分布在商业中心、居住组团、办公区和综合枢纽周边, 与电商订单空间分布具有一定匹配性。通过在站点周边设置微型前置仓、智能柜或社区配送点, 可以缩短末端接驳距离。多数城市轨道交通客流具有早晚高峰集中、平峰和夜间相对较低的特点, 在不影响客运服务和安全管理的前提下, 非高峰时段的富余能力可为小件快递运输提供空间。城轨以电力驱动为主, 若承担部分城市中距离转运需求, 也有助于减少道路货车穿城配送里程, 提升城市配送绿色化水平。既有研究表明, 在合理组织条件下, 利用客运轨道网络承担部分城市货运任务具有一定可行性[10]。

2.3. 协同配送面临的主要问题

尽管城轨参与电商末端配送具有一定优势, 但实际落地仍存在约束。首先, 城市轨道交通以客运服务为核心, 货物运输必须服从客运安全、消防安全、安检规则和站内客流组织要求, 危险品、超大件和易泄漏品不适合进入轨道系统。其次, 多数既有车站并未按照物流作业需求设计, 站厅、站台、通道和出入口空间有限, 若缺少专用周转箱、临时缓存区和快速装卸设备, 可能影响乘客通行效率。再次, 地铁列车停站时间较短, 不适合大量货物上下车, 更适合采用标准化、小批量、快装快卸的组织方式。因此, 城轨配送不仅是运输方式替代, 更是多主体在责任边界、数据共享和异常处置上的协同决策问题。

3. 城轨参与电商末端配送的协同模式设计

3.1. 总体流程

本文构建的城市轨道交通参与电商末端配送模式, 主要包括订单筛选、分拨集货、始发站换装、轨道运输、目的站卸载和末端接驳六个环节。

该流程的核心是将传统“分拨中心-道路车辆-末端网点-消费者”的单一路径, 转化为“分拨中心-城轨站点-轨道运输-站点服务点-消费者”的多方式联运路径。道路车辆主要承担分拨中心至始发站、目的站至社区终端的短驳任务, 城市轨道交通承担跨区或中长距离转运任务。该类“轨道主干运输+两端短驳接驳”的组织方式, 与城市轨道交通货运优化研究中的基本思路具有一致性[11]。

3.2. 参与主体与功能分工

城轨参与电商末端配送需要多主体共同参与, 不同主体在订单、运力、站点、信息和服务方面承担不同职责, 如表 1 所示。

Table 1. Collaborative stakeholders and responsibility allocation in urban rail-based e-commerce last-mile delivery
表 1. 城轨电商末端配送协同主体与职责分工

主体	主要职责	关键资源	协同重点
电商平台	提供订单需求、履约时效和消费者服务要求	订单数据、用户地址、时效承诺	订单分类、履约规则、服务评价
快递企业	负责分拨、集货、装箱和末端派送	分拨中心、快递网点、车辆和骑手	包裹集拼、装载组织、异常处理
城轨运营方	提供非高峰运力 and 站点换装条件	列车、车站、运行图、安检体系	安全管理、运力分配、站内作业
站点服务商	承担站内暂存、分拣和交接	智能柜、缓存区、装卸设备	快速换装、货物追踪、责任交接
政府监管部门	制定安全、价格和运营监管规则	政策、标准、规划资源	试点审批、安全规范、数据监管

3.3. 适用业务场景

结合电商物流特点和城轨运输约束，本文认为城市轨道交通更适用于以下四类业务场景：

1) 跨区小件快递转运。对于同城跨区、距离较长但时效要求相对稳定的小件快递，可以利用轨道交通完成主干段运输，减少道路车辆跨城行驶距离。

2) 电商大促期间补充运力。在“618”、“双十一”等订单高峰期，快递企业道路运力紧张，城轨可作为弹性补充通道，承担部分标准化包裹的跨区转运。

3) 站点周边即时零售配送。对于地铁站周边商圈、社区和办公区，可以通过站点服务点或智能柜形成“小件暂存 + 短距离配送”模式，支撑即时零售和本地生活电商服务。

4) 绿色低碳示范配送。在低碳城市、绿色商圈或核心区交通管控场景下，可以选择部分线路开展城轨配送试点，减少燃油货车进入中心城区的频次。

4. 城轨电商末端配送协同优化框架与关键方法

4.1. 协同优化框架

基于城市轨道交通的电商末端配送协同优化框架可分为四个层次：需求适配层、路径组织层、运力调度层和信息协同层，如图 1 所示。

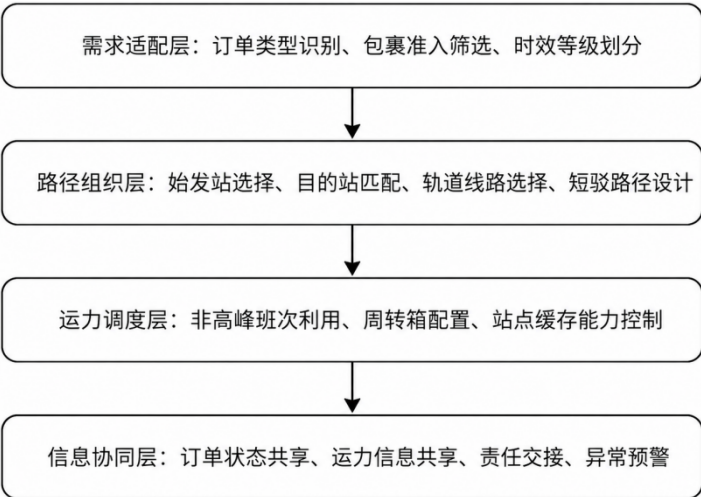


Figure 1. Collaborative optimization framework for urban rail-based e-commerce last-mile delivery
图 1. 城轨电商末端配送协同优化框架

该框架的核心在于形成“订单是否适合进入城轨系统、站点是否具备换装条件、班次是否存在富余能力、主体之间如何交接追踪”的协同决策链条。其中, 需求适配层解决订单筛选问题, 路径组织层解决站点与短驳路径匹配问题, 运力调度层解决非高峰班次和站点缓存能力配置问题, 信息协同层解决状态共享、责任交接和异常预警问题。

与传统道路配送相比, 该框架的核心在于将较长距离的跨区转运任务从道路系统部分转移至轨道系统, 从而减少配送车辆穿城运行距离, 降低道路拥堵对履约时效的影响。公共交通与城市配送融合研究也强调需求筛选、转运节点选择和末端接驳之间的协同关系[12]。

4.2. 订单适配性筛选方法

并非所有电商订单都适合采用城轨配送。城轨配送更适合标准化、小件化、跨区距离较长且收货点靠近轨道站点的包裹; 对于生鲜冷链、大件商品、危险品、易碎品以及极端即时配送订单, 仍应以传统道路配送或专用配送方式为主。设订单集合为:

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$$

对于订单 o_i , 其城轨配送适配得分可表示为:

$$S_i = w_1 D_i + w_2 T_i + w_3 B_i + w_4 Q_i - w_5 R_i$$

式中, D_i 表示空间距离适配度, 跨区距离越长、道路绕行越明显, 该值越高; T_i 表示时效适配度, 适合城轨运输的订单通常为当日达、次日达或预约配送订单; B_i 表示包裹标准化程度, 包裹越适合周转箱装载, 该值越高; Q_i 表示目的地与轨道站点的耦合度; R_i 表示安全与作业风险; w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 为权重系数。

根据适配得分, 可将订单划分为优先城轨配送订单、可选城轨配送订单和不适合城轨配送订单。其中, 优先城轨配送订单主要包括标准小件、跨区距离较长、站点接驳便利的订单; 不适合订单主要包括大件、危险品、强时效即时订单和特殊温控订单。

4.3. 换装站选择与路径组织

换装站选择直接影响城轨配送效率。应优先选择客流压力适中、空间条件较好、周边快递需求密集且接驳便利的车站作为换装站。

设订单 o_i 的分拨中心为 a_i , 消费者位置为 b_i , 可选始发站集合为 P , 可选目的站集合为 Q 。若选择始发站 $p \in P$ 、目的站 $q \in Q$, 则该订单的联运成本可表示为:

$$C_{ipq} = c_1 d(a_i, p) + c_2 r(p, q) + c_3 d(q, b_i) + c_4 h_{pq} + c_5 L_i$$

式中, $d(a_i, p)$ 为分拨中心至始发站的短驳距离; $r(p, q)$ 为轨道运输段成本; $d(q, b_i)$ 为目的站至消费者或末端服务点的接驳距离; h_{pq} 为站点换装和暂存成本; L_i 为超时惩罚成本; c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 为成本权重。路径组织目标是在满足时效、安全、站点能力和列车装载约束的前提下降低联运成本。实际应用中, 可采用“订单筛选-站点匹配-班次分配”的分步优化思路, 在剔除低适配订单后, 结合站点空间、接驳距离、客流压力和班次富余能力确定联运路径。

4.4. 运力调度与信息协同机制

城轨电商配送应坚持“客运优先、平峰利用、小批量组织、标准化装载”的原则, 普通快递包裹不宜在早晚高峰进入车厢, 应优先选择平峰期、夜间运营前后或客流较低方向的列车班次。设线路 l 在时间段 t 可用于快递运输的预留装载能力为 K_{lt} , 计划装载包裹量为 Y_{lt} , 则应满足:

$$Y_{lt} \leq K_{lt}$$

当时间段 t 属于早晚高峰, 或车站出现限流、延误、大客流等情况时, 可令:

$$K_{it} = 0$$

即暂停该时段快递运输任务。平峰期可根据线路客流、站点空间和列车运行状态动态调整装载能力。同时, 应采用标准周转箱或可锁闭快递箱, 统一编号和封签, 实现快速交接与全过程追踪。

在信息协同方面, 应构建轻量化信息平台, 实现订单状态、运力状态和交接状态共享。电商平台、快递企业、城轨运营方和站点服务商可在最小必要原则下共享订单编号、目的区域、包裹规格、可用班次、可用站点和异常状态等信息, 从而提高多主体协同效率。

5. 情景模拟与结果分析

5.1. 情景设定

为分析城市轨道交通参与电商末端配送的潜在效果, 本文构建模拟城市配送情景, 对传统道路配送模式与“城轨 + 末端接驳”模式进行对比。该情景并非某一企业的真实运营数据, 而是基于电商末端配送和城市轨道交通运行特征设置的模拟算例, 用于说明城轨协同配送的适用条件和优化效果。

假设某超大城市轨道交通网络较为完善, 快递企业在城市外围设置 1 个分拨中心, 并在中心城区选择 6 个城轨换装站和 24 个社区末端服务点。模拟对象为日均 10,000 件电商小件快递, 其中约 35% 的订单经筛选后适合采用城轨联运配送, 其余订单继续采用传统道路配送。城轨运输主要安排在 10:00~16:00 和 21:00~23:00 等非高峰时段, 单个周转箱容量设为 30~40 件, 末端接驳半径控制在 1~3 km 范围内。

5.2. 两种配送模式对比

传统道路配送模式下, 快递企业主要依靠面包车、厢式货车或新能源配送车, 从分拨中心向各末端网点运输。该模式组织简单、责任清晰, 但车辆需要穿越城市道路, 容易受到拥堵、停车困难和交通管制影响。对于跨区小件订单而言, 道路车辆往往承担较长距离的主干转运任务, 若订单密度不足或返程货源不稳定, 容易导致车辆空驶和单位包裹运输成本上升。

城轨联运配送模式下, 适配订单先在分拨中心完成集货和装箱, 再由短驳车辆送至城轨始发换装站; 随后利用非高峰时段轨道交通完成跨区运输, 并在目的换装站卸载后, 通过社区驿站、智能柜或骑手配送完成末端服务。该模式的优势在于将跨区主干运输从道路转移至轨道系统, 减少道路车辆穿城行驶距离, 并利用轨道交通运行稳定的特点降低配送时间波动。

5.3. 模拟结果分析

在上述参数条件下, 对两种配送模式进行模拟对比, 结果如表 2 所示:

Table 2. Comparison of simulation results between traditional road delivery and urban rail intermodal delivery
表 2. 传统道路配送与城轨联运配送模拟结果对比

指标	传统道路配送	城轨联运配送	变化情况
适配订单道路车辆行驶里程	2560 km	1610 km	下降 37.1%
平均履约时间	5.2 h	4.1 h	缩短 21.2%
道路配送车辆需求	32 辆	24 辆	减少 25.0%
平均装载率	72%	86%	提升 14 个百分点
准时送达率	89.50%	95.80%	提升 6.3 个百分点
单日道路端碳排放折算	640 kg	445 kg	下降 30.5%

从结果看, 城轨联运配送在道路里程压缩方面效果较明显。其主要原因是跨区主干运输由轨道交通承担, 短驳车辆只需完成分拨中心至始发站、目的站至末端服务点的局部运输。道路车辆行驶里程减少后, 车辆需求量和道路端碳排放也随之下降。

在配送时效方面, 城轨联运模式的平均履约时间低于传统道路配送模式, 主要得益于轨道交通运行稳定、受道路拥堵影响较小。同时, 分拨中心提前集货和标准周转箱装载也有助于提升平均装载率。但需要注意的是, 城轨配送增加了站点换装和多主体交接环节, 若站内装卸效率较低或末端接驳距离过长, 其时效优势可能被削弱。

5.4. 敏感性分析

为进一步分析城轨配送模式的适用边界, 本文从适配订单比例、站点换装效率和末端接驳半径三个方面进行分析。首先, 适配订单比例越高, 城轨联运越容易形成规模效应; 当适配比例较低时, 难以形成稳定批量, 换装和管理成本相对较高。其次, 站点换装效率直接影响配送时效, 若单批货物换装时间过长, 可能抵消轨道运输带来的时间节约, 因此标准化周转箱、固定作业窗口和清晰交接流程十分重要。最后, 末端接驳半径不宜过大, 若目的站至消费者或社区驿站距离较短, 城轨配送能够保持较高效率; 若接驳距离过长, 道路末端配送成本将明显上升。

由此可见, 城轨电商配送的关键不在于“所有包裹上地铁”, 而在于通过订单筛选、站点选择和时间组织, 找到适合城轨联运的订单集合和运营场景。末端接驳距离控制也是城市物流“最后一段”治理中的关键问题[13]。

6. 结语

本文围绕电子商务快速发展背景下城市末端配送效率、成本和绿色化问题, 提出了基于城市轨道交通的电商末端配送协同优化思路。研究认为, 城轨并不适合承担全部电商配送任务, 但对于标准化、小件化、跨区距离较长且站点耦合度较高的订单, 具有一定应用潜力。

本文的主要贡献在于, 将城轨电商配送从单一运输方式替代问题, 进一步界定为多主体、多节点、多约束下的协同优化问题, 并构建“订单筛选-站点换装-轨道运输-末端接驳-信息协同”的分析框架。该框架兼顾中国城市轨道交通客运优先、站点空间受限和电商订单碎片化等特征。情景模拟结果表明, 在合理筛选订单、避开客流高峰、控制换装时间和缩短末端接驳半径的条件下, 城轨联运能够减少道路车辆行驶里程、提升准时率并降低道路端的碳排放。

实施过程中, 应采取试点先行、逐步推广的方式, 优先选择客流压力较小、站点空间条件较好、周边快递需求密集的线路和车站开展试点, 并建立标准化装载、安检、交接和数据协同规则。本文情景分析基于模拟数据, 未来仍需结合真实订单、车站空间和列车运行图数据, 进一步检验城轨电商配送的经济性、安全性和长期运营机制。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2025 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202602/t20260228_1962662.html?utm_source=chatgpt.com, 2026-02-28.
- [2] 国家邮政局. 国家邮政局公布 2025 年邮政行业运行情况[EB/OL]. https://www.mot.gov.cn/shuju/tongjishuju/youzheng/202601/t20260130_4199355.html?utm_source=chatgpt.com, 2026-01-22.
- [3] 2025 年全国社会物流总额超 368 万亿元 社会物流总费用与国内生产总值比率降至历史最低水平[EB/OL]. https://data.mofcom.gov.cn/article/zxtj/202602/64272.html?utm_source=chatgpt.com, 2026-02-12.
- [4] 交通运输部. 2025 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].

-
- https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202606/t20260618_4207752.html, 2026-01-21.
- [5] 陈骏, 袁江, 赖远秋. 城市轨道交通开展快递物流运输的可行性探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2026, 29(3): 180-185.
 - [6] 雷晓瑜, 秦青, 孙锡京. 城市轨道交通轨道物流组织模式的探索[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(10): 159-163.
 - [7] 戴子文, 孙永海, 雷晓瑜. 城市轨道交通物流发展挑战及系统性策略——深圳市的探索实践[J]. 城市交通, 2026, 24(1): 87-95.
 - [8] 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 102205. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102205>
 - [9] 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>
 - [10] Ozturk, O. and Patrick, J. (2018) An Optimization Model for Freight Transport Using Urban Rail Transit. *European Journal of Operational Research*, **267**, 1110-1121. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.12.010>
 - [11] World Economic Forum (2020) The Future of the Last-Mile Ecosystem. World Economic Forum.
 - [12] International Transport Forum (2024) The Final Frontier of Urban Logistics: Tackling the Last Metres. OECD Publishing.
 - [13] Azcuay, 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 102525. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102525>