doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.04.018

基于城市地铁网络的地下物流发展模式综述

冯江红[1]，代存杰[1,2]，李海军[2]，余　耀[3]

（1. 兰州交通大学交通运输学院，兰州 730070；2. 高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室，兰州 730070；
3. 中国铁路兰州局集团有限公司，兰州 730015）

摘　要：针对现有研究在基于地铁地下物流系统(metro-based underground logistics system，M-ULS)的实践、选址和运营中存在的问题，提出 M-ULS 既有问题的研究思路与改善措施。首先总结国内外建设可行性与实践研究中的不足，提出发展 M-ULS 的中长期可行性规划；其次剖析 M-ULS 关键节点选址与现实情况存在的差异，并阐述后续的研究思路；最后，归纳影响 M-ULS 整体运营的各个因素和尚未深入研究的影响因素，并指出实现 M-ULS 运营信息化的几种关键技术。研究结果表明：我国具备建设 M-ULS 的现实基础，但需要制定相应的货物运输标准、建立完善的评估体系并改进信息化运营所需的多种技术。

关键词：地铁；地下物流系统；建设可行性；关键节点选址；运营组织

中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)04-0134-10

Development Models for Underground Logistics Based on Urban Metro Networks: A Review

FENG Jianghong[1], DAI Cunjie[1,2], LI Haijun[2], YU Yao[3]

(1. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070; 2. Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control, Lanzhou 730070; 3. China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou 730015)

Abstract: Aiming at the problems existing in the practice, location and operation of Metro-based Underground Logistics System (M-ULS), the research ideas and improvement measures for the existing problems of M-ULS are proposed. Firstly, it summarises the shortcomings of domestic and foreign construction feasibility and practice research, and puts forward the medium- and long-term feasibility planning for the development of M-ULS; secondly, it analyses the differences between the siting of key nodes of M-ULS and the reality, and points out the ideas for subsequent research; finally, it summarises the factors affecting the overall operation of M-ULS and the influencing factors that have not yet been studied in depth, and points out several key technologies for realising the informatisation of the operation of M-ULS. and points out several key technologies to realise the informatisation of M-ULS operation. The results of the study show that China has a realistic foundation for the construction of M-ULS, but it needs to formulate appropriate cargo transport standards, establish a perfect evaluation system and improve the technologies required for information-based operation.

Keywords: metro; underground logistics system; construction feasibility; key node location; operational organization

收稿日期：2024-10-29　修回日期：2025-04-08

第一作者：冯江红，男，硕士研究生，研究方向为轨道交通运输，2766172529@qq.com

基金项目：甘肃省自然科学基金(23JRRA858)；甘肃省科技计划(联合科研基金)项目(24JRRA868)；甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目(2025CXZX-704)；中国工程院咨询研究项目(2024-DFZD-34-02)

引用格式：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]. 都市快轨交通，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.

在全球经济的快速发展和社会物流量逐年递增的背景下，2015 至 2024 年间，我国社会物流总额从 219.2 万亿元增至 360.6 万亿元，增幅高达 64.51%[1]。各国物流业的繁荣为运输业带来了发展机遇和压力，由于社会物流主要通过公路运输方式完成，在配送中不可避免会造成道路拥堵。政府为了缓解城市交通拥堵的通常做法是增建道路设施。而建设道路设施的传统方式很难跳出“交通拥挤→建造新路→车辆增加→再度拥挤”的怪圈，交通拥堵已成为城市发展的掣肘因素[2]。

在此背景下，国内外学者都在不断探索新方法来改变城市所面临的交通拥堵困境。文献[3-7]指出发展地下物流系统(underground logistics system，ULS)在缓解交通拥堵、降低碳排放、实现资源共享等方面具有积极意义；文献[8]早在 2004 年就指出应对严峻交通形势的解决思路是建设发展 ULS；文献[9]结合国外 ULS 的发展经验，指出我国发展 ULS 已经迫在眉睫。

地下物流系统作为除传统公路、铁路、航运和海运之外的第五类运输和供应系统，通过地下管道或隧道网络实现货物运输，能够突破地面运输的限制，多个国家的学者相继从理论和技术层面对 ULS 的应用开展实践研究，但因为地下空间的地质情况复杂、开发成本和建设难度远高于地上空间[10]，导致 ULS 无法有效服务于货物运输。鉴于此，利用城市地铁网络进行货物运输的地下物流系统(metro-based underground logistics system，M-ULS)[11]被提出并应用于实践，与独立建设的地下物流网络相比，建造成本和实施难度显著降低[12]。

为了更好地呈现已有研究成果并为后续研究提供思路，本文首先分析了 M-ULS 的国内外发展可行性研究及国内外已运营/倡议项目的实践研究，提出了适合我国的中长期发展规划和未来可行性研究思路；然后对 M-ULS 中的地铁站点选址、鲜有研究的物流中心、货运车场的选址问题进行分析，并提出了关键节点选址问题的后续研究思路；最后从地铁列车运营组织、运营的因素和效益、实现信息化运营等方面进行分析，总结研究现状并提出了后续的研究思路。

1　M–ULS 的可行性与实践研究

1.1　可行性研究

城市轨道交通经历了 160 余年的发展，世界各国城市轨道交通运营总里程都在逐年增长。截至 2024 年 12 月 31 日，我国内地累计有 58 座城市投运地铁线路，里程达 9281.37 km[13]，这为我国发展 M-ULS 提供了有利条件。国内外学者从政策法规、问卷调查等定性角度和建模、仿真、预测等定量角度，分析了 M-ULS 的可行性及对城市发展所具备的现实意义。

国外方面，MOTRAGHI 等[3]针对纽卡斯尔-泰恩地区现有的地铁轨道系统，在 ARENA 软件中对货运专列和即兴运营模式进行了评估。KIKUTA 等[4]对地铁货运的实施可行性进行居民民意调查和项目试点，结果表明地铁货运具备实施的现实基础。BEHIRI 等[14]研究了资源共享(车辆、线路、车站)模式下的“货-轨-运”调度问题，并通过仿真验证了资源共享模式的可行性。

国内方面，胡万杰等[15]指出地铁货运模式有助于缓解交通拥堵，且在规划政策、市场需求、科技供给等方面已具备实施的现实基础；刘崇献[16]和陈梓毓[17]分别从北京和南京的实际情况出发，从技术层面、政策性发展等方面论述了这两个城市建设 M-ULS 的可行性；陈慧等[18]指出地铁与道路的协同运作模式不仅能够降低货运交通风险，还能够提升运输效率；王小林等[19]对地铁线路运输能力进行预测分析，指出地铁站通过改造可以分担一定的物流量。

1.2　实践研究

M-ULS 最早的应用可以追溯至 1927 年英国伦敦设计并使用的地下邮政铁路系统[20]。当时普遍认为地铁货运基础设施造价高、运距短、收益差且地面运输足以满足货物运输需求，因此 M-ULS 没有得到重视[12]。随着城市运输问题的逐渐显现，直到近 20 年 M-ULS 才进一步得到研究和发展。

按照地铁列车运作模式的不同，通常将已有的 M-ULS 项目分为 3 种模式，分别是客货混载模式、共线拖挂模式和共线分离模式。纽约地铁采用客货混载模式在夜间运输垃圾[21]；英国纽卡斯尔采用客货混载模式在客运低峰期运输航空托盘[22]；巴黎 TramFret 电车货运系统采用共线拖挂模式运送快递包裹[23]；法国“大巴黎(Grand Paris)”项目采用共线分离模式运送快递包裹[14]；德国、荷兰、瑞士、奥地利等国家也已经成功试点 M-ULS 项目[24-27]。国外地下物流项目的分类总结如表 1 所示。

国内方面，2021 年深圳地铁试行“驿站”服务[28]，2023 年 8 月，深圳地铁和顺丰合作运营的地铁货运项目，在 11 号线采用客货混载模式运行[29]；2022 年 7 月，

广州采用共线分离模式，开行夜间地铁货运专列[30]；2023 年 9 月，北京市采用客货混载模式进行城市轨道交通快递运输试运营[31]；浙江、江苏、上海等省市相继开始尝试“地铁送快递”物流运输模式。总结客货混载、共线拖挂和共线分离等模式的特点，结果如表 2 所示。

表 1　国外地下物流项目

Table 1　Overseas underground logistics project list

货运模式	优缺点	国家/城市	年份	状态	设施	货物类型	项目名称
客货混载	优点：建设成本低，运输组织灵活 缺点：影响客运乘客运输，安全性较低	日本/札幌	2000	研究	地铁	包裹	未知
		美国/纽约	2002	运行	地铁	城市垃圾	Garbage & Work Trains
		瑞士/苏黎世	2003	运行	电车	城市垃圾	Cargo Tram
		奥地利/维也纳	2004	破产	轻轨	工业用品	Güterbim
		德国/不来梅	2004	运行	电车	邮件	City Post
		英国/纽卡斯尔	2016	倡议	地铁	航空托盘	未知
		新加坡	2021	试点	地铁	小型货物	未知
		法国/巴黎	2022	试点	城际	冷链生鲜	未知
共线拖挂	优点：实现了客货分离，客运安全性较高 缺点：需要考虑列车编组和站台建设	荷兰/阿姆斯特丹	2000	倡议	地铁	包裹	未知
		荷兰/阿姆斯特丹	2007	运营	轻轨	包裹	City Cargo
		法国/巴黎	2007	运营	城际	包裹	Monoprix
		法国/巴黎	2017	运营	电车	包裹	Tram Fret
共线分离	优点：不影响客运，安全性高，运量大 缺点：建设成本高，需要设计专用列车和装卸设备	德国/德累斯顿	2000	运营	电车	包裹	Cargo Tram
		美国/纽约	2010	运营	城际	垃圾	未知
		法国/巴黎	2018	研发	地铁	包裹	Grand Paris
		英国/伦敦	2020	倡议	地铁	应急物资	未知
		巴西/圣保罗	2023	短期	地铁	应急物资	未知
其他	优点：拥有独立货运轨道，运量大 缺点：建设成本高	英国/伦敦	1927	废止	地铁	邮件	Mail Rail
		瑞士/苏黎世	2022	研发	隧道	中小型货物	Cargo Sous Terrain
		日本/东京	2024	研发	传送带	小型货物	Autoflow-Road

表 2　M-ULS 3 种运输模式的对比

Table 2　Comparison of the three modes of transportation of M-ULS

模式	载运能力	投入成本	适用时段	客流情况是否需要考虑	货运车厢是否需要设计	是否需要货运站台	列车运行图是否需要调整
客货混载	小	小	客运平峰期	是	是	否	否
共线拖挂	中	中	全天	是	是	是	依据运量
共线分离	大	大	客运平峰期/夜间	是	是	是	是

1.3　我国 M-ULS 的可行性研究

鉴于我国地铁物流事业处于起步阶段，城市与货物运输模式的匹配关系要满足两个前提条件：要能够量化地铁客运流量和剩余运力；修建城市地铁基础设施要与运力相匹配。考虑这两个前提条件，结合表 2 中 3 种不同运输模式的特点，将 M-ULS 的发展规划分为 3 个阶段：

1）短期运营阶段。地铁货运部门占据小部分市场份额，根据历史客流数据可以测算出剩余运力。需要对现有的基础设施和客运车辆进行改造，将客货实现一定程度的分隔，在满足客运的前提下使用客货混载模式。

2）中期运营阶段。地铁货运部门占据一定的市场份额，基本可以实现客货流协调。车站修建了货运站台并设计了专用的货物车厢，但没有装卸整列货运列车的能力，可以选择客货混载/共线拖挂模式，运营将更加灵活。

3）长期运营阶段。地铁货运部门占据的市场份额已达饱和，客流可以实现精准预测，基础设施更加完善，能够实现客货运列车运行图的灵活调整。单独的

客货混载模式和共线拖挂模式已不能满足日常运营，需要结合多种模式灵活运用。

考虑我国很多城市具备实施 M-ULS 的现实条件，但在项目建设之前需要制定专业的货物运输标准。具体包括：①货物种类标准，前期要做好充分调研，对运营货物的种类进行合理评估；②城市运营标准，由于我国城市经济发展水平和路网形状不一，需要按照实际情况制定适用的运营方案；③设备制造标准，合格的列车车厢制造、货位设计、装卸搬运设备等标准都需要深化研究。

2 M–ULS 中关键节点的选址问题研究

以物流中心为起点，货物经由 M-ULS 和道路协同运输系统将货物配送到客户手中的流程如图 1 所示。M-ULS 需要物流中心、地铁站和末端的车场多方协作来完成货物运输的流程，因此这 3 个站点均属于 M-ULS 选址问题中的关键节点。关键节点的选择影响着整个系统的发展，不合理的选址会导致无效的配送、高昂的成本和低质的服务。因此本文总结已有研究，从地铁站点选址、物流中心和货车车场选址及选址问题的研究思路 3 个方面进行阐述。

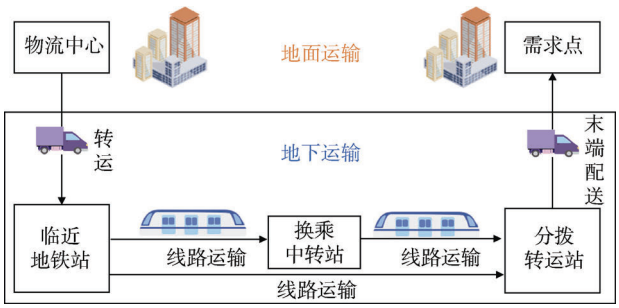


图 1　M-ULS 与道路协同运输示意

Figure 1　Schematic diagram of M-ULS and roadway co-transportation

2.1 地铁站点选址问题研究

合理的 M-ULS 选址不仅能够优化运输路径、降低运输成本、增强站点覆盖能力，而且还能提升服务质量、并保障日常的安全运营。

2.1.1 站点选址问题

地铁站点覆盖的需求点越多，末端配送越方便，越容易被选中成为货物转运点。周芳汀等[32-33]指出配送中心所在地铁线路上的备选转运点有较大机会被选中作为转运点，同时转运点的覆盖范围也会影响最优转运点的数量。ZHENG 等[34]指出靠近居民区和商业中心的地铁站更容易被选择为配送站。ZHAO 等[35]基于复杂网络理论选取评价指标，利用逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution，TOPSIS)选择候选地铁站点。

2.1.2 站点选址+路径优化问题

鉴于站点选址-路径优化问题是经典的 NP-hard 问题，因此站点选址-路径优化问题需要从不同角度研究。在满意度方面，舒达等[36]指出站点选址和路径优化需要考虑物流节点与需求点的匹配满意度；ZHENG 等[37]从管理者和参与者的角度出发，指出选址-路径优化要兼顾成本和客户满意度。在精准优化方面，王晓平等[38]利用多个优化模型研究了共线分离模式下的货运区域选择、物流供需情况和地铁站点选址和路径优化问题；崔瑶等[39]提出基于动态需求点的两阶段选址-路径优化模型，利用该模型能够更加快速、精准地响应动态需求；李铖钰[40]将选址-路径优化问题拆分为两级选址-配送问题，更加精准地实现了集成优化。

2.1.3 选址站点建设问题

要考虑选址站点的建设费用，确保选址问题更贴合实际情况。任睿等[41]以建设运营成本为优化目标，研究了辐射式的地铁货运模式下的地铁站选址问题。地铁站选址问题的一般模型为

$$\min \sum_{i\in N}\sum_{j\in M}\left\lceil \frac{q_j}{c} \right\rceil d_{ij}y_{ij} \tag{1}$$

$$\text{s. t.} \sum_{i\in N} y_{ij} = 1, \forall j \tag{2}$$

$$\sum_{i\in N} x_i = p \tag{3}$$

$$x_i \in \{0,1\}, \forall i \tag{4}$$

$$y_{ij} \leqslant x_i, \forall i, j \tag{5}$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \tag{6}$$

式中，N 为区域内候选地铁站点的集合，索引为 i；M 为区域内需求点的集合，索引为 j；q_j 为区域内需求点 j 每天产生的包裹数量；d_{ij} 为需求点 j 与候选地铁站点 i 之间的距离；c 为从需求点到地铁站点每次所能处理的最大批量；p 为选择的地铁站点数量；x_i 为候选地铁站点 i 被选为配送中心则为 1；否则为 0；y_{ij} 为需求点 j 由候选地铁站点 i 服务则为 1；否则为 0。

2.2 物流中心、货车车场选址问题

目前有关道路运输的物流中心和货车车场选址问

题的研究已经相对成熟，但图 1 中的物流中心和货车车场选址的问题却鲜有研究。物流中心与临近地铁站的距离通常较远，修建至物流中心的线路费用巨大，此时应考虑在合适的位置建立二级物流中心，在缩短运输距离的同时，也能避免超过单个地铁站的容量限制。

货车车场与地铁站的匹配关系同样会对货物的配送产生影响，由于地铁承担“站到站”的货物运输，所以物流取送的“第一公里”则需要道路运输来补充。但考虑到城市地铁站周边土地的高额费用，可以选择改造临近的车场实现资源共享或在合适的位置进行车场选址和建设工作。

2.3 关键节点选址问题的研究思路

地铁站选址问题研究的主要研究内容是选择合理的地铁站来进行货物中转或分拨，而现实情况中被选择的部分站点往往拥有较大的客流量，这些站点不适合承担货物运输，即选址问题所求得的选址点不是最优的站点，因此协调货运站点选址与客流分拨之间的关系有待深入研究。

M-ULS 通常提供市域内的货物运输服务，但该系统并不具备取/送货的能力，因此该模式只能作为多式联运的一个中间环节，在货物运输网络中与其他运输方式相结合。采用“地铁+公路”“地铁+高铁”“地铁+航空”等方式构建城市内部和城市之间的货物运输网络，实现货物高效的周转和流通。

3 M–ULS 的运营问题分析

运营问题作为 M-ULS 的核心，需要协调运力和需求之间的关系，避免运力过剩和货物长时间滞留。为确保 M-ULS 提供高质量的货物运输服务，现有研究主要从列车运营组织、运营的因素和效益及实现信息化运营 3 个方面展开。

3.1 M-ULS 列车运营组织

确保货物能够及时装载和运达是影响M-ULS发展的重要因素之一。为充分保障列车的高效运输，现有研究多从预留/分配车厢、列车编组和货物运载方案等多方面展开。在车厢分配和列车编组方面，邸振等[42]指出列车运输组织优化需要优先满足乘客需求，否则会产生较高的运输延误成本；DI 等[43]指出采用列车编组、流量控制策略安排货物和乘客运输车厢可以生成最优的运营方案；石俊刚等[44-45]提出了一种基于历史客流数据的货物分配方案和车厢配置策略，指出可以将列车运力分配到各个地铁车站，从而确保各车站乘客都能被列车服务，而不会出现极端拥堵的情况；LI 等[46]指出实际运营中应依据客运、货运需求的数量，决策客运车厢、货运编组的数量。

在货物运载方面，AN 等[47]针对 M-ULS 运营提出了一种灵活的跳站策略，并结合货运需求的不确定性构建了客货协同模型，可以有效提升地铁货物运载的质量；OZTURK 等[48]指出在客运列车之间增加货物运输专列，可以更加高效地进行货物运载；YE 等[49]基于客运非高峰时段的客流不确定情况，提出了地铁货运模式和货车货运模式来应对不同的客货运情形；YE 等[50]在考虑列车到发时刻，货运容量、车头时距等约束条件下建立地铁货运模型，得到了最优的运行时刻表和货物装载方案。相关研究的总结分析如表 3 所示。

表 3 M-ULS 列车运营组织的相关文献分析

Table 3 Literature analysis related to the organisation of M-ULS train operations

文献	研究对象	模型	优化目标	求解方法
邸振[42]	车厢分配、流量控制	ILP	总成本最小	CPLEX
DI[43]	列车编组、流量控制	MILP	总成本最小	I-BDA
石俊刚[44]	预留车厢、车厢分配	ILP	乘客总等待时间最小	CPLEX
石俊刚[45]	车厢分配、装载方案	ILP	惩罚和车厢改造成本最小	CPLEX
LI[46]	客货运车厢编组	ILP	总成本最小	BBGA+GUROBI
AN[47]	专列开行、货流分配	MILP	运营成本最小	CPLEX
OZTURK[48]	货运专列开行	MILP	总延误时间最短	DSA+PPDPA
YE[49]	固定/灵活装载方案	ILP	总成本最小	I-VNSA+CPLEX
YE[50]	列车时刻表、货流分配	MILP	货运成本最小	I-VNSA

注：ILP(integer linear programming)表示整数线性规划模型；MILP(mixed integer linear programming)表示混合整数线性规划模型；I-BendersDA(improved benders decomposition algorithm)表示改进的 Benders 分解算法；DSA(demand splitting algorithm)表示需求拆分算法；PPDPA(pseudo-polynomial dynamic programming algorithm)表示伪多项式动态规划算法；I-VNSA(improved variable neighborhood search algorithm)表示改进的变领域搜索算法；BBGA(branch and bound algorithm with constraint gap)表示带约束间隙的分支定界算法。

3.2 M-ULS 运营的因素和效益

为了更好地保障 M-ULS 系统的长期运营，需要结合影响因素和效益对整个系统进行评价。为明确这些因素与效益的关系，将已有研究分为影响因素、直接效益和间接效益。

1) 影响因素直接关联着整个系统的运营质量，任一影响因素没有充分调研和设计，都会导致整体收益遭受损失。陈一村等[51]认为地下物流系统的发展成熟不仅要考虑选址和地下设施布局规划，而且还需要对影响运营的因素进行多方面的研究；王京[52]指出发展M-ULS需要加大基础设施建设投入并合理规划线路布局；汪雨欣等[53]指出在项目投入前需要综合评估自动导引车(automated guided vehicle，AGV)、充电桩和快递柜等基础设施的资金投入。

2) 直接效益体现在相较于纯道路运输，可以减少能耗、降低运输成本、提升货物周转效率等。DI等[54]指出地铁客货协同可以节省5.63%～10.43%的油耗，有效减少碳排放；郑长江等[55]指出M-ULS可以有效减少配送时间和碳排放量；VILLA等[5]针对M4G模型，指出具备更优社会效益和环境效益的替代方案就是建设M-ULS；叶倪[56]指出构建地铁货运系统可以有效减少地面货运车辆、降低交通拥堵并减少碳排放；刘亚丽等[57]指出相较于纯货车运输，M-ULS可以提高货物的运达时效，提升客户满意度。

3) 间接效益与直接效益相关联，直接效益会产生相对应的间接效益并形成系统内部的良性循环。DAMPIER等[58]认为现有地铁系统的基础设施和空间未充分利用，若合理使用可以分担道路货运需求，减少因道路运输产生的伤亡和费用；倪洪亮等[59]指出合理的运输方式可以更好地服务于差异化的货运需求，提升城市物流效率。

整合已有研究，并总结分析得到M-ULS的因素和效益关系示意如图2所示，若M-ULS具备正向的运营影响因素，如政策的积极引导、大量的民众支持和健全的基础设施等，则能够确保M-ULS产生更高的运营效益，同样运营效益可以反向改善影响因素，保障M-ULS更加有效地服务于城市货物运输。

除图2所示的因素之外，M-ULS的运营还有很多因素有待深入研究。

由于M-ULS需要开拓地下空间，但是地下空间的开发成本远高于地上，为确保在一定年限内抵消支出成本的同时取得收益，需要在开展运营之前做好严格的效益评估，避免出现设备闲置或收支不抵的情况。

M-ULS的运营也需要研究地铁公司同物流公司的博弈，地铁公司与物流公司属于竞争还是合作需要重点研究。M-ULS的建成必然会对物流公司货运业务产生影响，因此物流公司的意愿对M-ULS的运营具有重要的参考价值。若各自运营，竞争关系可能会导致双方陷入恶性价格竞争之中，反而影响M-ULS的可持续发展。若双方合作，地铁公司分担的货运需求比例，以及协同运输的各个环节如何保持畅通，都需要后续深入评估。

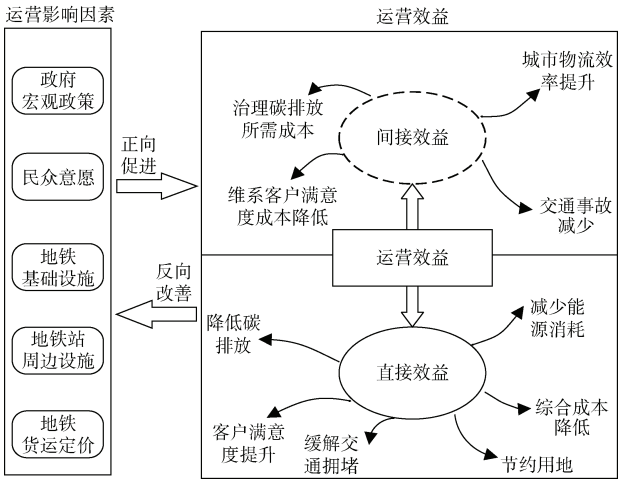


图2 M-ULS运营影响因素与效益的正反馈关系

Figure 2 Schematic diagram of the positive feedback relationship between M-ULS operational influences and benefits

3.3 M-ULS的运营信息化

为了保障信息的畅通，地铁物流需要构建一个M-ULS信息体系，确保M-ULS能够充分协调人、车、货三者之间的关系，使得信息能够及时交互并实现网络化运营。M-ULS的运营信息化需要以下几种技术：

1) 更新自动售检票技术。地铁客流数据的获取通常是通过地铁站的自动售检票系统(automatic fare collection，AFC)采集而来，通过AFC刷卡数据不仅能够了解时段客流情况，还可以分析列车车厢的整体占用情况，文献[44]就利用AFC刷卡历史客运数据，在客运非高峰时段进行了车厢分配方案和货物装载方案的编制。考虑到M-ULS的运营信息化对客流数据的时效性要求较高，为提升AFC捕获客流信息的速度，张义鑫等[60]设计了基于云平台和微服务架构的城市轨道交通AFC系统技术。张方冰等[61]改进原有AFC系统，能够实时客流监测、客流预测等功能。

2) 建立M-ULS电子票据编制技术。鉴于目前鲜有对M-ULS电子票据编制技术的研究，因此后续研究可以参照铁路系统现有的票据编制技术，实现对M-ULS的货物运输、装载、回送等票据的一体化编制。在已有研究中，钟立民等[62]设计了铁路货运票据电子化现车系统关键技术。张建国等[63]设计了铁路装卸清

算信息系统关键技术。

3) 加入无线射频识别技术(radio frequency identification，RFID)。为发挥 RFID 高效的读取和识别功能，HE 等[64]通过增加机械结构部署了一个基于 RFID 的地铁货运初级控制系统，能够实现站台物理设施运作与终端信息的交互。

4 研究展望

1) 我国的 M-ULS 项目多处于起步阶段，与 M-ULS 相关的法规制度及货物运输标准都需要重新制定。

2) M-ULS 有关线路成网情况下的运输、客/货流不确定和考虑站点改造等研究较少，如何推广至线网研究并落地实施则需要进一步研究。

3) 为充分利用 M-ULS 的线路冗余运力和列车冗余运力，保障乘客、列车和货物信息的及时传递，需要设计交互式的客货协同信息共享系统。

5 结论

1) 通过分析国内外已有 M-ULS 项目的可行性与实践研究，目前我国已具备开展地铁货物运营的政策法规、市场环境和技术手段的现实基础，但要确保项目顺利落地，需要做好充足的调研，如运输的货物种类、运输模式和基础设施情况等。

2) 通过分析 M-ULS 的关键节点选址研究，被选择的关键站点通常需要能够保障就近覆盖需求点，且能够维持客户满意度使得收益最大化的要求。但站点是否具备快速组织分拨货物的能力需要结合实际情况进行检验。

3) 整合 M-ULS 运营问题的研究，首先货物运营需要在优先保障乘客运输的前提下进行；其次需要结合影响因素和效益对整个系统进行合理评价，同时处理好与物流公司的竞争与合作关系，确保货物能够精细分流；最后需要构建一个功能完善的地铁物流信息化运营体系保障信息的及时交互并实现网络化运营。

参考文献

[1] 中国物流与采购联合会. 2024 年全国物流运行情况通报[EB/OL]. (2025-02-12)[2025-04-01]. http://www.chinawuliu.com.cn/lhhzq/202502/12/644829.shtml.

[2] 傅方方. 城市地下物流系统风险评价及发展前景研究[D]. 大连：大连海事大学, 2010.
FU Fangfang. Research on risk evaluation and development prospect of urban underground logistics system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010.

[3] MOTRAGHI A, MARINOV M V. Analysis of urban freight by rail using event based simulation[J]. Simulation modelling practice and theory, 2012, 25: 73-89.

[4] KIKUTA J, ITO T, TOMIYAMA I, et al. New subway-integrated city logistics system[J]. Procedia-social and behavioral sciences, 2012, 39: 476-489.

[5] VILLA R, MONZÓN A. Sustainable e-commerce urban distribution in LEZ areas: a greening Metro-based solution (M4G: Metro For Goods)[J]. Transportation research procedia, 2023, 72: 3363-3370.

[6] CHEN Z L, DONG J J, REN R. Urban underground logistics system in China: opportunities or challenges?[J]. Underground space, 2017, 2(3): 195-208.

[7] 郭东军，陈志龙，钱七虎. 发展北京地下物流系统初探[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 37-41.
GUO Dongjun, CHEN Zhilong, QIAN Qihu. Discussion on developing underground logistic system in Beijing[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2005, 1(1): 37-41.

[8] 钱七虎. 建设特大城市地下快速路和地下物流系统：解决中国特大城市交通问题的新思路[J]. 科技导报, 2004, 22(4): 3-6.

[9] 彭玫贞，陈一村. 城市地下物流系统探析[J]. 江苏科技信息, 2017, 34(19): 65-67.
PENG Meizhen, CHEN Yicun. Discussion on urban underground logistics system[J]. Jiangsu science & technology information, 2017, 34(19): 65-67.

[10] 陈一村，陈志龙，郭东军，等. 城市地下物流系统研究现状[J]. 管理现代化, 2019, 39(3): 91-97.
CHEN Yicun, CHEN Zhilong, GUO Dongjun, et al. Review on the study of urban underground logistics system[J]. Modernization of management, 2019, 39(3): 91-97.

[11] DAMPIER A, MARINOV M. A study of the feasibility and potential implementation of metro-based freight transportation in Newcastle upon Tyne[J]. Urban rail transit, 2015, 1(3): 164-182.

[12] 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.
HU Wanjie, DONG Jianjun, CHEN Zhilong. Development patterns of city logistics for metro-based underground logistics system[J]. Railway transport and economy, 2022, 44(2): 8-15.

[13] 韩宝明，李卓一，靳雨馨，等. 2024 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市快轨交通, 2025, 38(1): 1-12.

HAN Baoming, LI Zhuoyi, JIN Yuxin, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations worldwide in 2024: a review[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(1): 1-12.

[14] BEHIRI W, BELMOKHTAR-BERRAF S, CHU C B. 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.

[15] 胡万杰, 董建军, 陈志龙. 基于地铁的城市地下物流系统发展可持续性研究[J]. 综合运输, 2023, 45(10): 67-72.
HU Wanjie, DONG Jianjun, CHEN Zhilong. Development sustainability of metro-based urban underground logistics system[J]. China transportation review, 2023, 45(10): 67-72.

[16] 刘崇献. 北京地铁晚间和非高峰期用作城市物流系统探讨[J]. 城市发展研究, 2011, 18(6): 122-124.
LIU Chongxian. Study on how to use Beijing subways as a part of the city's logistics system in the evening and non-traffic peak time[J]. Urban studies, 2011, 18(6): 122-124.

[17] 陈梓毓. 南京地铁开展城市配送的可行性研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
CHEN Ziyu. Feasibility study of urban distribution in Nanjing metro[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.

[18] 陈慧, 胡万杰, 陈一村. 城市地面地下一体化物流网络货运性能研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(8): 1420-1427.
CHEN Hui, HU Wanjie, CHEN Yicun. Freight operating performance of urban surface-underground integrated logistics network[J]. Tunnel construction, 2022, 42(8): 1420-1427.

[19] 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 Xiaolin, ZHAO Han. Discussion on urban underground logistics system based on metro[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2019, 15(5): 1273-1282.

[20] 近百年前人类的奇特发邮方式伦敦 21 米地下"邮局地铁"[J]. 西部交通科技, 2017(2): 114.

[21] 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.

[22] KELLY J, MARINOV M. Innovative interior designs for urban freight distribution using light rail systems[J]. Urban rail transit, 2017, 3(4): 238-254.

[23] 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.

[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] PIETRZAK K, PIETRZAK O, MONTWIŁŁ A. Light freight railway (LFR) as an innovative solution for sustainable urban freight transport[J]. Sustainable cities and society, 2021, 66: 102663.

[26] VAN DUIN R, WIEGMANS B, TAVASSZY L, et al. Evaluating new participative city logistics concepts: The case of cargo hitching[J]. Transportation research procedia, 2019, 39: 565-575.

[27] 赵阳. 国外有轨电车网络货物运输及启示[J]. 都市快轨交通, 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.

[28] 深圳特区报. 搭飞机全程不带行李！深圳地铁全国首推地铁行李驿站[EB/OL]. (2021-10-21)[2024-10-29]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_15010114.

[29] 深圳新闻网. 深圳地铁 11 号线部分变身"物流专厢"[EB/OL]. (2023-11-20)[2024-10-29]. https://gd.spb.gov.cn/gdsyzglj/c100057/c100061/202309/0fe21d0cca064f49bddfd886ff3d133b.shtml.

[30] 潇湘晨报. 集拼货物"搭"地铁 18 号线到南沙港出海, 首个市域快轨货运项目试点运营[EB/OL]. (2022-07-23)[2024-10-29]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1739116062619899911&wfr=spider&for=pc.

[31] 北京日报. 北京今起试点地铁非高峰时段运快递, 乘客出行不受影响[EB/OL]. (2023-09-23)[2024-10-29]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1777786141041595150&wfr=spider&for=pc.

[32] 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 Fangting, ZHOU Guohua, ZHANG Jin. Point-routing problem of urban distribution based on subway[J]. Control and decision, 2018, 33(7): 1247-1254.

[33] 周芳汀, 周国华, 张锦. 依托地铁网络的城市配送系统转运点选址研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(7): 16-25.
ZHOU Fangting, ZHOU Guohua, ZHANG Jin. Study on location of trans shipment points in urban distribution system based on subway network[J]. Journal of the China railway society, 2019, 41(7): 16-25.

[34] ZHENG C J, ZHAO X J, SHEN J X. Research on location optimization of metro-based underground logistics system

with voronoi diagram[J]. IEEE access, 2020, 8: 34407-34417.

[35] ZHAO L J, LI H Y, LI M C, 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.

[36] 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 Da, LIANG Chengji, WANG Yu, et al. Research on multi-level distribution location-route of urban subway based on bilateral matching[J]. Computer engineering, 2024, 50(11): 369-379.

[37] ZHENG S K, YANG H P, HU H, et al. Station placement for sustainable urban metro freight systems using complex network theory[J]. Sustainability, 2024, 16(11): 4370.

[38] 王晓平, 张子宣. 客货“共线不共车”模式下地铁货运站点选择[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(4): 1062-1072.
WANG Xiaoping, ZHANG Zixuan. The selection of metro freight stations under the mode of “shared lines but not shared trains”[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2024, 20(4): 1062-1072.

[39] 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 Yao, ZHOU Xiaoye, HE Liang. 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.

[40] 李铖钰. 快递公司与地铁协同配送快件的路径优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
LI Chengyu. Path optimization research of express company and subway cooperative distribution of express[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.

[41] 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 Rui, HU Wanjie, DONG Jianjun, 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.

[42] 邸振, 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.

[43] 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.

[44] 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.

[45] 石俊刚, 秦昙, 李响, 等. 过饱和地铁线路的列车容量分配策略及优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(3): 112-119.
SHI Jungang, QIN Tan, LI Xiang, et al. Train capacity allocation strategy and optimization model for an oversaturated metro line[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2022, 22(3): 112-119.

[46] 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.

[47] 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.

[48] 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.

[49] YE Y, GUO J, YAN L. A mixed decision strategy for freight and passenger transportation in metro systems[J]. Comput Intell Neurosci, 2021, 2021: 5412016.

[50] YE Y T, GUO J H, YAN L X. A metro freight plan for mixed passenger and freight transportation[J]. Journal of advanced transportation, 2022, 2022: 6602387.

[51] 陈一村, 董建军, 尚鹏程, 等. 城市地铁与地下物流系统协同运输方式研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 637-646.
CHEN Yicun, DONG Jianjun, SHANG Pengcheng, et al. Research on the cooperative transportation modes between metro and underground logistics system in urban area[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2020, 16(3): 637-646.

[52] 王京. 基于轨道交通的城市物流运输可行性分析[J]. 中国航务周刊, 2023(25): 70-72.

[53] 汪雨欣, 孙欣, 李晓琳, 等. 基于地铁与AGV的地下物流系统设计: 以武汉市为例[J]. 物流技术, 2021, 40(9): 50-56.
WANG Yuxin, SUN Xin, LI Xiaolin, et al. Design of underground logistics system based on metro and AGV: in the case of Wuhan[J]. Logistics technology, 2021, 40(9): 50-56.

[54] DI Z, LI L X, LI M F, et al. Research on the contribution of metro-based freight to reducing urban transportation exhaust emissions[J]. Computers & industrial engineering, 2023, 185: 109622.

[55] 郑长江, 陈宜恒, 沈金星. 基于地铁的地上地下闭环物流配送路径优化[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(1): 89-98.
ZHENG Changjiang, CHEN Yiheng, SHEN Jinxing. Distribution routing optimization of ground-underground closed-loop logistics based on metro network[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(1): 89-98.

[56] 叶倪. 无锡地铁构建地铁货运系统的SWOT分析[J]. 物流技术与应用, 2024, 29(1): 140-144.
YE Ni. SWOT analysis on the construction of metro-based underground logistics system in Wuxi Metro[J]. Logistics & material handling, 2024, 29(1): 140-144.

[57] 刘亚丽, 吴芳, 罗恕芳. 地铁物流协同配送模型构建及验证[J]. 交通科技与经济, 2024, 26(2): 1-7.
LIU Yali, WU Fang, LUO Shufang. Construction and validation of subway logistics collaborative distribution model[J]. Technology & economy in areas of communications, 2024, 26(2): 1-7.

[58] DAMPIER A, MARINOV M. A study of the feasibility and potential implementation of metro-based freight transportation in Newcastle upon Tyne[J]. Urban rail transit, 2015, 1(3): 164-182.

[59] 倪洪亮, 侯龙龙, 胡万杰, 等. 基于地下物流的城市物流服务供应系统仿真优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(25): 10856-10865.
NI Hongliang, HOU Longlong, HU Wanjie, et al. Simulation and optimization of underground logistics system based urban logistics service supply system[J]. Science technology and engineering, 2023, 23(25): 10856-10865.

[60] 张义鑫, 林磊, 张宁, 等. 基于云平台和微服务架构的城市轨道交通AFC系统[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(6): 131-139.
ZHANG Yixin, LIN Lei, ZHANG Ning, et al. AFC system of the urban rail transit cloud platform based on micro-service deployment[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(6): 131-139.

[61] 张方冰, 李金龙, 曲鸣川. 基于云平台架构的城市轨道交通实时客流监测系统[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(12): 135-139.
ZHANG Fangbing, LI Jinlong, QU Mingchuan. Real-time passenger flow monitoring system for urban rail transit based on cloud platform architecture[J]. Urban mass transit, 2024, 27(12): 135-139.

[62] 钟立民, 罗常津, 胡宸瀚. 铁路货运票据电子化现车系统关键技术[J]. 中国铁路, 2021(11): 19-23.
ZHONG Limin, LUO Changjin, HU Chenhan. Key technologies of wagons on hand system for electronization of railway freight documents[J]. China railway, 2021(11): 19-23.

[63] 张建国, 李东林, 宁祥东. 铁路装卸清算信息系统设计与实现[J]. 铁路计算机应用, 2024, 33(4): 45-48.
ZHANG Jianguo, LI Donglin, NING Xiangdong. Settle account information system for railway loading and unloading[J]. Railway computer application, 2024, 33(4): 45-48.

[64] He Y, Wang Q, Chen H, et al. Metro Passenger an-d Freight Transport: A Framework for Underground Logistics System[J]. IEEE, 2019.

（编辑：王艳菊）

封面车站设计理念

北京地铁19号线平安里站，地处北京老城新街口历史文化街区，恰处于历史风貌与现代都市的过渡节点，车站将传统与现代细细编织，地下换乘通道改为三层挑高的阳光换乘厅，引入自然光，一组传统的四合院落覆盖在换乘厅之上，仿佛是将四合院的地下空间精心剔凿造就了这方天地。当乘客于换乘厅内驻足仰望，可见阳光透过仿古叠梁与卷棚屋面倾泻而下，光影交织间，历史厚重感与当下时光悄然交融。站内立柱化作灯笼形态，天花灯具与旋转皮影灯柱形成一静一动的韵律美，匠心复现古时庆贺场景，令乘客恍若步入一场“上元灯会”；于绰约灯影与流转皮影前，或驻足凝赏，或拍照留念，皆成为一次沉浸式的北京地域文化与民间艺术体验。该站荣膺外交部点赞，入选“中国最美地铁站”，其创新建设工法获住建部推广并被教科书收录。其所在的19号线秉持“一站一景”的设计理念，如流动的艺术长廊，串起“荟萃京华”主题，彰显北京地铁深厚的艺术积淀与文化底蕴。

北京城建设计发展集团股份有限公司 夏瑞萌 供稿