doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.06.017

基于复杂网络的城市轨道交通货物运输路径优化方法

黄宝静[1]，陈　诚[1]，王嘉源[2]
（1. 中国铁道科学研究院集团有限公司，北京 100081；2. 北京交通大学交通运输学院，北京 100044）

摘　要：为满足高附加值、高时效货物快捷转运需要，解决超大城市内复杂网络情景下城市轨道交通货物运输最优路径选择的问题，考虑城市轨道交通网络复杂性和客流不均衡性特点，提出一种简化复杂网络拓扑结构的方法。构建考虑满载率和成本最小要求的路径优化模型，利用改进蚁群算法对模型进行求解，并结合粒子群算法优化蚁群算法的超参数，提升算法整体运行速度。以广州为例，通过网络简化算法，使拓扑网络节点简化率达到 76%，连边简化率达到 69%；将拓扑网络结构简化后，算法运行时间由 11 849 s 减少为 1 613 s，运算效率提升 87.4%；加入粒子群算法后，收敛速度明显加快，迭代次数由 46 次降低为 15 次。通过对比分析，本文提出的算法在有效性和优越性方面得到验证。

关键词：城市轨道交通；复杂网络；拓扑结构简化；路径优化；改进蚁群算法
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)06-0132-08

Optimization Method for Freight Intermodal Transportation of High Speed Rail and Urban Rail Transit Based on Complex Networks

HUANG Baojing[1], CHEN Cheng[1], WANG Jiaoyuan[2]
(1. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University Beijing 100044)

Abstract: To address the need for efficient transportation of high-value-added and time-sensitive goods and resolve the challenge of selecting optimal freight paths within the complex urban rail transit networks of megacities, this study presents a comprehensive approach. First, a network simplification method is proposed to streamline the topological structure of urban rail systems by accounting for network complexity and uneven passenger flow distribution, thereby enhancing the computational efficiency of multimodal path optimization algorithms. Second, a path optimization model is developed with dual objectives of maximizing load rate and minimizing operational costs to balance cargo capacity utilization and economic feasibility. Finally, a hybrid algorithm integrating an improved ant colony optimization and particle swarm optimization is designed to solve the model, where particle swarm optimization optimizes the hyperparameters of the ant colony algorithm to accelerate convergence speed. Validated through a case study in Guangzhou, the methodology achieves significant performance improvements: network simplification reduces nodes by 76% and links by 69%, cutting algorithm runtime from 11,849 seconds to 1,613 seconds and boosting computational efficiency by 87.4%. The hybrid algorithm further reduces iterations from 46 to 15 while maintaining solution quality. Comparative analysis confirms the superiority of this approach in balancing computational speed, resource utilization,

收稿日期：2025-07-26　修回日期：2025-10-20
第一作者：黄宝静，男，硕士，高级工程师，主要从事轨道交通运输组织、快捷物流、货运场站数智等研究工作，hbjtky123@qq.com
通信作者：陈诚，男，硕士，副研究员，主要从事铁路现代物流、多式联运、冷链物流等研究工作，chenchengcars@126.com
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2024X007)；中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2024YJ233)
引用格式：黄宝静，陈诚，王嘉源. 基于复杂网络的城市轨道交通货物运输路径优化方法[J]. 都市快轨交通，2025，38(6)：132–139.
HUANG Baojing, CHEN Cheng, WANG Jiaoyuan. Optimization method for freight intermodal transportation of high speed rail and urban rail transit based on complex networks[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(6): 132–139.

and path optimization effectiveness for urban rail freight systems.
Keywords: urban rail transit; complex network; topology simplification; path optimization; improved ant colony algorithm

为构建高效现代化交通物流体系，《交通强国建设纲要》《国家综合立体交通网规划纲要》和《“十四五”现代物流发展规划》相继提出，要完善城市配送网络，实现城际干线运输与城市末端配送的有机衔接。目前，我国对商务函件、精密仪器等高附加值货物的运输，主要依托航空和高速铁路，但此类模式多聚焦于主要节点之间，难以满足城市末端的高效转运需求。公路货运虽具备灵活性，却存在超限超载检查和城市货车限行政策限制。城市轨道交通作为国家干线铁路的“毛细血管”，点对点运输间不受质量与限行制约，常常拥有富余运能。因此，探索利用城市轨道交通承担高附加值快件的末端转运，不仅能充分发挥高速铁路与城市轨道网络的协同优势，也为完善我国现代交通物流体系提供了新的思路。

近年来我国城市轨道交通不断发展，国内外学者针对城市轨道交通物流开展了广泛研究。Hu[1]等利用系统动力学方法，将城市物流活动整合至轨道交通客运网络中，论证了城市轨道交通物流的社会效益。周芳汀[2]基于城市轨道交通配送背景，着眼于转运点选择、路径选择及车辆安排等关键问题。王晓平[3]等提出“局部试点、由点到线、串线成网”的轨道交通货运网络发展路径，为特大城市货运体系转型提供实践范本。冯佳等[4]对国内外城市利用轨道交通采用客货混运和客货混跑 2 种模式开展快捷物流业务进行了总结。周晓晔等[5]提出利用轨道交通非高峰时段运力开展货物配送，并以配送距离为优化目标函数，探索了低干扰的物流运输模式。张涵等[6]对货品运输属性、公众认可度以及多类别货主的吸引力进行了综合评估，并计算了不同类型货主转向城市轨道货运的概率。

上述研究多聚焦于对运输组织模式和社会效益的评估，对运输组织方面的研究探索较少。在联运组织优化领域，石俊刚等[7]针对客货共载模式构建了融合时间惩罚成本与货物挂载成本的多约束优化模型，并提出车厢配置与装载优化方案。张英贵等[8]面向超限超重货物运输场景开发多目标路径优化算法，同步权衡运输时效、经济成本与运能损耗。周芳汀等[9]提出轨道交通网与道路网关键节点衔接方法，建立了基于需求密度的转运点选址模型。李竹君等[10]基于客货混载与货运专列双模式，构建多目标优化模型以协同决策列车时刻表与停站方案。在算法创新方面，学者们针对行业痛点提出了差异化解决方案。吴暖等[11]针对冷链物流多目标路径优化中随机性强、收敛速度慢的缺陷，开发了自适应权重模拟植物生长算法，验证其算法较传统算法的优越性。崔瑶等[12]依托城市轨道交通-货车联运体系，通过遗传-蚁群混合算法实现了转运点选址与配送路径的全局优化。

总结以上问题，本文针对城市轨道交通网络复杂性和客流的时空不均衡特征，在保证客运需求的前提下探索了轨道交通系统客货协同运输的路径优化问题。

1 城市轨道交通货物联运路径优化模型

1.1 问题描述

本研究聚焦于北京、上海、广州及深圳等城区常住人口超千万的超大城市轨道交通系统，其典型特征表现为高密度线网拓扑结构与多层级节点规模。在给定 OD 对间，无环简单路径的搜索空间呈组合爆炸特性，传统路径优化算法面临计算复杂度指数级增长的严峻挑战。更为关键的是，超大城市轨道交通客流具有显著的双峰分布特征与断面不均衡性，导致运力资源时空分布存在动态冗余窗口。在此背景下，开展轨道交通货运组织需优先建立断面客流饱和度动态评估模型，精准识别低峰时段剩余运力时空分布特征，进而实现客货运输时空资源的协同配置。研究提出的复杂网络情景下城市轨道交通货物联运路径优化问题可描述为：以城市高铁站为货运起始节点，向分布于轨道交通网络中的多个终端站点客户配送货物。在此过程中，需同时满足运输成本最小化与路径可行性约束，重点考虑轨道交通站点客流满载率阈值限制，确保货运路径规避高负荷时段与区域。

1.2 模型假设

本研究基于城市轨道交通货物联运的实际应用场景构建问题框架：当货物通过高铁运输至目标城市后，货物自高铁车厢卸货至站台，经短驳运输转移至邻近轨道交通站点，通过搭载轨道交通列车，经多线路换乘最终抵达目标配送站点。研究设定以下基础假设：

1) 节点约束：货物由指定入口站点进入轨道交通系统，直达目标出口站点完成交付，中途不增设临时装卸节点。

2) 车辆完整性：运输车辆在路径执行中需全程保持编组完整性，禁止拆解分运。

3) 容量与时窗简化：暂不考虑货运批次规模、列车载货容量限制及客户时间窗要求。

4) 运行参数：轨道交通列车按站站停靠模式运营，恒定行驶速度为 50 km/h。

5) 组织模式：采用客货协同运输模式，货运车厢与载客车厢物理隔离并行运行，货物通过专用换乘通道和笼车等机械辅助设备进行搬运，以实现线路间转移。

1.3 成本分析

高铁场站与城市轨道交通货物联运组织的成本由固定运营成本、车辆运输成本与时间成本 3 部分构成。

固定运营成本 C_1 包括列车车厢成本以及配送 1 次所需的运营调度成本等，即

$$C_1 = \sum_i k_i c_k \tag{1}$$

$$k_i = \begin{cases} 1 & 第i个客户单独配送 \\ 0 & 第i个客户不单独配送 \end{cases}$$

式中，c_k 为配送 k 次的固定运营成本，k_i 为是否为第 i 个客户单独配送。

运输成本 C_2 由路径距离成本与换乘成本构成。路径距离成本指货物通过轨道交通网络运输时因路线长度产生的直接运输费用；换乘成本则源于货物在不同轨道交通线路间转运所产生的额外操作损耗，具体表现为单次运输任务中货物跨线路换乘的总次数，即

$$C_2 = \sum_i k_i (c_d d_i + c_n n_i) \tag{2}$$

式中，c_d 为城市轨道交通物流的单位运输成本；d_i 为第 i 个客户的配送路径距离；c_n 为城市轨道交通物流的单位换乘成本；n_i 为第 i 个客户的配送路径换乘次数。

时间成本 C_3 由运输过程耗时与换乘衔接耗时共同构成。运输过程耗时指货物在轨道交通线路上基于列车行驶速度与停站时间的累计运输时长；换乘衔接耗时为货物跨线路转运时所需的装卸、调度及跨站台移动等操作时间，即

$$C_3 = \sum_i k_i (t_i + \alpha n_i)\beta \tag{3}$$

式中，t_i 为第 i 个客户衔接点到出站点的所需时间，α 表示换乘 1 次消耗时间，n_i 为第 i 个客户的配送路径换乘次数，β 为时间成本权重。

1.4 目标函数和约束

模型的目标函数为

$$\begin{aligned} \min Z = C_1 + C_2 + C_3 &= \sum_i k_i c_k \\ &+ \sum_i k_i (c_d d_i + c_n n_i) + \sum_i k_i (t_i + \alpha n_i)\beta \end{aligned} \tag{4}$$

模型的约束条件如下：

$$\sum_i k_i \leqslant \mathrm{U} \tag{5}$$

$$e_i = s_i + \frac{1}{v} \sum_{d_{x,y} \in D_i} d_{x,y} \leqslant l_i \tag{6}$$

$$P^{t,m} = \max\left\{P_1^t, P_2^t, P_3^t \cdots P_n^t\right\} \leqslant \bar{P} \tag{7}$$

式中，C 为总成本；U 为客流总数；e_i 为第 i 个客户的货物送达时间；s_i 为第 i 个客户货物的换乘时间；D_i 为第 i 个客户的配送路径；$d_{x,y}$ 为配送路径 D_i 上相邻站点的运输距离；v 为列车平均行驶速度；l_i 为第 i 个客户的最晚收货时间；$P^{t,m}$ 为路径 m 在时段 t 的最大断面满载率(即瓶颈满载率)；$P_1^t, P_2^t, \cdots, P_n^t$ 分别为该路径所包含的第 1 至第 n 个路段在时段 t 的具体满载率；$\bar{P}$ 为设定的允许客货共运满载率阈值。

式 5 表示单独配送的客户数量不超过客户总数，式 6 表示货物到达第 i 个客户的时间应早于其允许的最晚收货时间，式 7 表示客户配送路径上配送开始时间所属时间段的城市轨道交通站点间载客率要小于允许客货共运的设定载客率。当线路区间上该时段满载率大于设定的运输满载率阈值时，货物运输路径就不会包含该线路区间。

其中，站点 j 在时段 t 的满载率计算公式为

$$P_j^t = \frac{q_j^t}{Q_{\mathrm{cap}}} \tag{8}$$

式中，P_j^t 表示第 j 个站点在时间段t的满载率；q_j^t 表示第 j 个站点在时间段 t 的平均进站客流量；Q_{cap} 为列车的额定定员，人。

2 模型求解

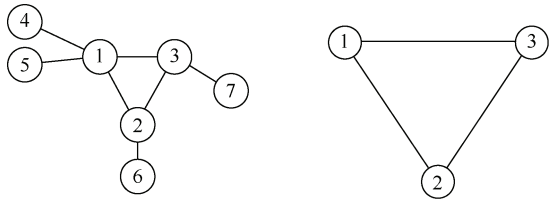
2.1 网络简化方法

网络节点规模是制约路径搜索算法效率的核心因素，为提高蚁群算法在轨道交通联运网络中的求解效率，本节聚焦于终端节点(货物起讫点)与中间节点(线路过境站点)的双层优化，具体实施路径如下。

2.1.1 网络端点车站简化

在网络拓扑简化过程中，针对端点车站(仅与单一相邻节点连接的边界站点)的特性，提出基于路径必要性的端点剪枝策略。由于非起讫点的端点车站不参与中间路径构成(即配送路径通常无需途经其他端点车站)，其拓扑冗余性导致算法需额外遍历无效路径分支。通过剔除此类冗余节点，可直接减少路径搜索空

间规模，从而提升整体求解效率，如图 1 所示。



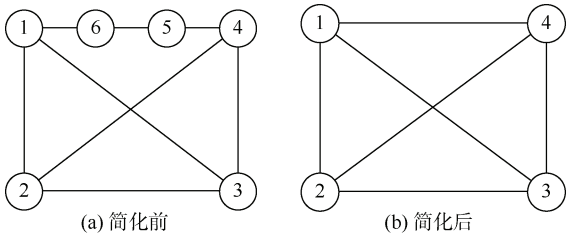
(a) 简化前　　(b) 简化后

图 1　网络端点车站简化示意

Figure 1　Simplified diagram of network terminal stations

2.1.2　城市轨道交通线路中间车站简化

针对城市轨道交通线路中间车站(如站点 5、站点 6)，除作为配送起讫点的中间车站外，其余仅承担相邻节点连通功能的中间车站可被省略。通过消除此类冗余节点的路径组合可能性，可减少算法遍历次数，降低蚁群信息素更新计算复杂度，如图 2 所示。



(a) 简化前　　(b) 简化后

图 2　网络中间车站简化示意

Figure 2　Simplified diagram of network intermediate stations

2.2　改进蚁群算法介绍

蚁群算法是一种模拟蚂蚁觅食行为的启发式算法，在城市轨道交通货物联运问题中，蚂蚁具有以下特点：蚂蚁在前进中不会重复访问城市；蚂蚁可以得知站点间的距离矩阵；蚂蚁依据概率选择下一个前进的站点。

蚂蚁选择下一个站点的概率计算式如下：

$$P_{ij}^{k}=\frac{\tau_{ij}^{\alpha}(t)\eta_{ij}^{\beta}(t)}{\sum_{j}\tau_{ij}^{\alpha}(t)\eta_{ij}^{\beta}(t)} \tag{9}$$

其中，$\eta_{ij}(t)=\frac{1}{d_{ij}}$

式中，$\tau_{ij}^{\alpha}(t)$为 t 时刻站点 i 到站点 j 的信息素浓度；$\eta_{ij}^{\beta}(t)$ 为 t 时刻站点 i 到站点 j 的能见度；α 为信息素因子；β 为启发函数因子；d_{ij} 为站点 i 与站点 j 之间的物理距离或路径阻抗。

本文使用的改进蚁群算法采用精英蚂蚁策略，该策略是通过调节不同蚂蚁留下信息素的权重，将每一代蚁群中表现最好的蚂蚁作为精英蚂蚁，并提高精英蚂蚁在更新信息素时的影响权重。精英蚂蚁策略能够加快算法搜索速度，提高解的质量。精英蚂蚁策略下的信息素更新过程为：

$$\tau_{ij}(t+1)=(1-\rho)\tau_{ij}(t)+\sum_{k=1}^{N}\Delta\tau_{ij}^{k}(t)+\frac{\sigma}{L^{bs}} \tag{10}$$

式中，$\tau_{ij}(t+1)$ 为更新后的信息素浓度；ρ 为信息素挥发系数，取值范围(0，1)；N 为蚁群算法中的蚂蚁总数；$\Delta\tau_{ij}^{k}(t)$ 为第 k 只蚂蚁在本次迭代中留在路径$(i，j)$上的信息素增量；σ 为精英蚂蚁策略的权重调整参数；L^{bs} 为当前迭代获得的全局最优路径长度。

2.3　粒子群优化算法

粒子群算法是模拟鸟群捕食行为的优化算法，粒子群算法在迭代过程中具有记忆性，可将迭代过程中的最优位置和方向记录下来用于更新粒子的状态。粒子群算法中中间参数的推导式如下。

$$X_i=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{iD}) \tag{11}$$

$$V_i=(v_{i1},v_{i2},\cdots,v_{iD}) \tag{12}$$

$$v_{id}^{k+1}=\omega v_{id}^{k}+c_1r_1\left(p_{id}^{k}-x_{id}^{k}\right)+c_2r_2\left(g_{d}^{k}-x_{id}^{k}\right) \tag{13}$$

$$x_{id}^{k+1}=x_{id}^{k}+v_{id}^{k+1} \tag{14}$$

式中，X_i 和 V_i 分别表示第 i 个粒子的位置向量和速度向量；D 为解空间的维数；v_{id}^{k} 和 x_{id}^{k} 分别表示第 k 次迭代时粒子 i 在 d 维度的速度和位置；ω 为惯性权重因子，用于调节对解空间的搜索能力；c_1、c_2 为学习因子，分别调节粒子向个体历史最优和群体全局最优方向飞行的步长；r_1、r_2 为分布在[0，1]区间的随机数；p_{id}^{k} 为粒子 i 截止当前迭代的个体极值位置；g_{d}^{k} 为整个种群截止当前迭代的全局极值位置。

利用粒子群算法对蚁群算法中蚂蚁数量、信息素因子等超参数进行优化。粒子群算法首先定义模型超参数，将模型粒子群初始化。迭代过程中不断更新粒子群算法的惯性系数和偏移量，根据偏移量更新模型参数组合，以得到新的模型粒子群。当迭代过程的结果达到精度要求或满足退出条件后，迭代结束并将最优参数返回蚁群算法中。

2.4　算法流程

本研究构建的模型以高铁站点拓扑数据、城市轨道交通线路拓扑数据、站点地理坐标数据及断面客流满载率数据为输入，基于 Python 平台集成 networkx 库构建多模态网络拓扑结构，依托 pandas 与 numpy

库实现数据清洗与特征计算。模型求解算法核心流程如图 3 所示。

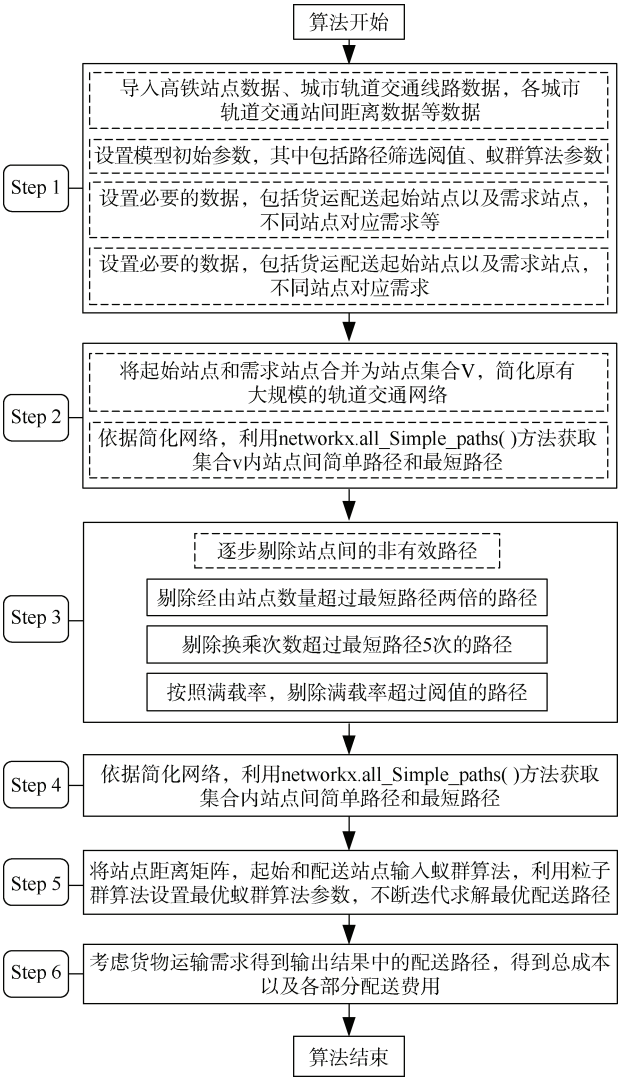


图 3　算法求解流程示意

Figure 3　Schematic diagram of algorithm solving process

基于 networkx 库的路径搜索算法，通过枚举起终点间所有无环简单路径生成初始候选集，然而该集合因网络规模扩展呈现组合爆炸特性，包含大量低效冗余路径(如显著偏离最优解的绕行路径或高频次换乘方案)。若仅凭路径成本逐一进行筛选，将导致算法计算量的显著增加，影响算法效率。因此，在 Step3 采用了基于路径长度和换乘次数对路径进行筛选的策略，构建先验约束条件，动态剔除无效路径。

3　实例验证

3.1　案例描述

3.1.1　广州城市轨道交通网络特征

广州市作为我国超大城市代表，其常住人口规模与城市轨道交通网络复杂度均处于国内前列。截至 2023 年 1 月，全市轨道交通运营车站规模逾 300 座(含 4 座高铁枢纽站)，网络总里程突破 1066 km，日均客运量达 860.52 万人次。如图 4 所示[13]，线网各线路客流强度差异显著，呈现出典型的不均衡分布特征。其中，3 号线及支线日均客运量最高，达 180.16 万人次；2 号线与 5 号线次之，均超过 100 万人次，构成了线网的客流骨架；而外围线路及有轨电车客流规模相对较小，形成多制式、高密度的立体化线网格局。然而，这种高强度的客流负荷并非全时段持续，而是呈现出显著的时间波动特征。从客流分布来看，高峰时段断面客流量可达平峰时段的数倍，而平峰期即使考虑运力动态调配机制，仍存在运力冗余，为客货协同运输提供了利用窗口。

本研究基于客货协同运输场景构建路径优化框架，重点解析客流时空分布特征对货运组织的影响机理。城市轨道交通作为城市公共交通系统的核心载体，其货运组织需严格遵循客运优先原则，在保障客运的前提下，通过动态识别运力冗余窗口实现货运资源调度。

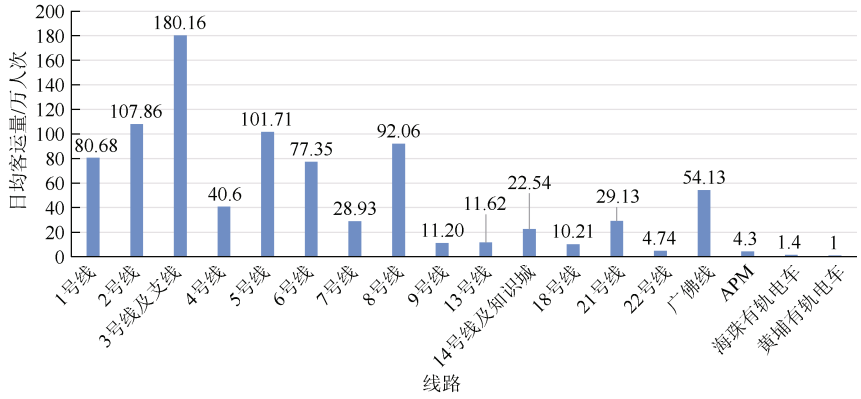
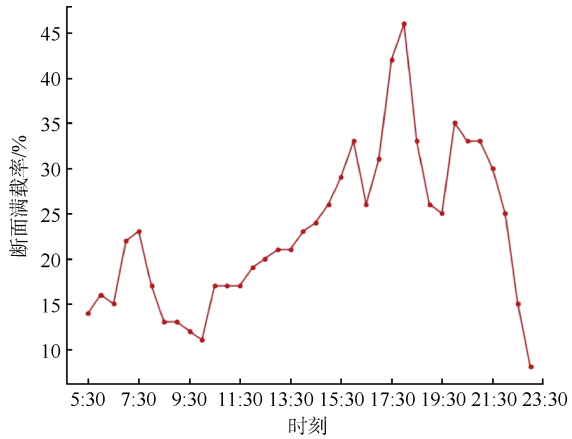


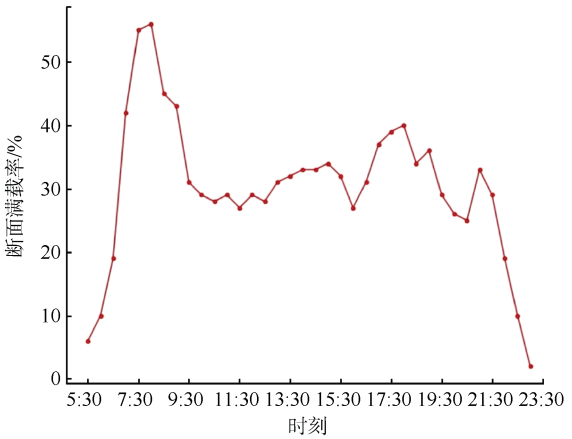
图 4　广州市 2023 年城市轨道交通各线路日均客运量

Figure 4　The average daily passenger volume of each rail transit line in Guangzhou in 2023

以 2 个断面的客流满载率为例(如图 5 所示)：黄边—嘉禾望岗断面在早高峰满载率处于 25%以下，而在晚高峰时段满载率最高超过 45%，是典型的单峰型断面；杨箕-体育西路则几乎全天都保持 30%的客流满载率，在早高峰时段客流满载率超过 50%，晚高峰时段超过 40%，呈现双峰型的走势，因此在后续进行算例分析时剔除早高峰时段的路径。



(a) 黄边—嘉禾望岗 断面满载



(b) 率杨箕—体育西路 断面满载率

图 5　广州市典型断面满载率日趋势图

Figure 5　Daily trend of load rate of typical section in Guangzhou

3.1.2　网络拓扑结构简化

网络拓扑结构简化可以大幅度降低求解问题的运算量，提升算法运行的效率。在简化前，广州城市轨道交通网络拓扑结构中包含 238 个节点，259 条连边；经过简化后的拓扑网络(见图 6)仅包含 58 个节点，78 条连边。

3.1.3　案例参数说明

本研究提出基于城市轨道交通富余运力的客货协同运输框架，通过耦合高铁班次时刻表与轨道交通动态断面客流饱和度数据，构建时空约束驱动的配送路径优化模型，通过动态识别不同时段线路运力冗余窗口，生成与高铁到发时刻精准匹配且规避客流高峰的最优配送路径方案，实现货运时效性与客运服务质量的协同优化。案例假设共有 6 个车站需要进行配送。在算法参数设置方面，蚁群算法的信息素重要程度因子 α 设定为 1.0，启发函数重要程度因子 β 设定为 2.0，信息素挥发因子 ρ 设定为 0.1，信息素常量 Q 设定为 97。在目标函数(公式 4)的成本权重参数设定中，单次配送的固定运营成本(c_k)取值为 500 元，城市轨道交通物流的单位换乘成本(c_n)取值为 5 元/次，单次换乘消耗时间(α)取值为 3 min。

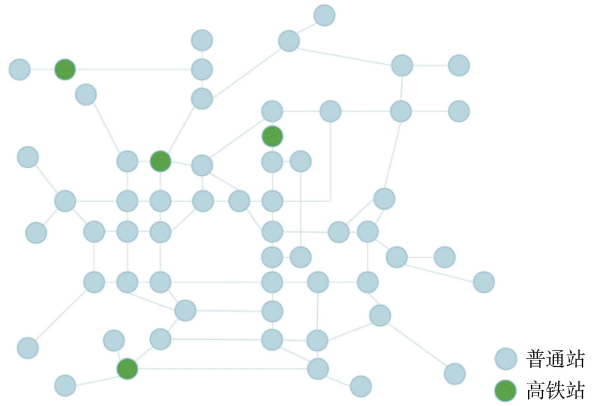


图 6　简化后广州城市轨道交通拓扑网络

Figure 6　Simplified topology network diagram

3.2　结果分析

将模型相关参数代入上述模型与算法流程中，利用改进蚁群算法逐代求解最优配送路径。经过 100 次迭代，在充分考虑线路及站点的客运波动情况、配送需求、快件时效和线路衔接的基础上，得出最优配送路线：广州南站—汉溪长隆—大学城北—淘金—凤凰新村—黄沙—海珠广场—广州南站，最优路线的配送总成本为 3 947.1 元，涉及高铁与地铁 7 号、12 号线等线路的协同，快件在不同线路之间转换通过笼车实现。图 7 展示了最优配送路线的。图中将车站的经纬坐标转换为二维点坐标，以直观呈现站点在城市中的相对位置关系。

研究通过引入多项针对性改进措施，有效提升了求解器的稳定性和寻优能力。实验结果表明，改进后的算法在迭代寻优过程中展现出良好的收敛特性，不仅成功避免了局部最优解的困扰，而且最优路径成本随迭代次数增加呈现持续下降趋势。在迭代过程中，算法最优路径成本随迭代次数增加而下降，如图 8 所示。

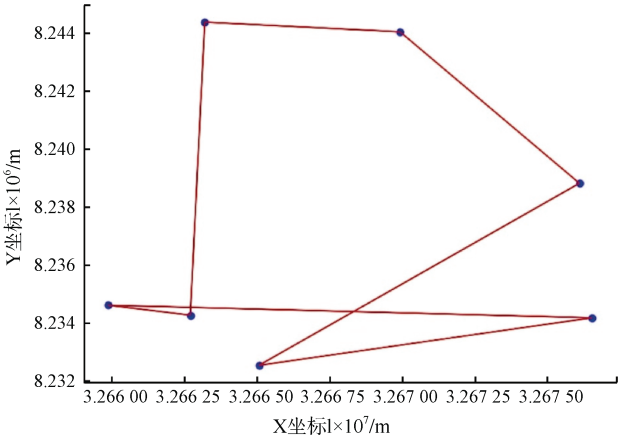


图 7　最优配送路线示意

Figure 7　Optimal distribution route diagram

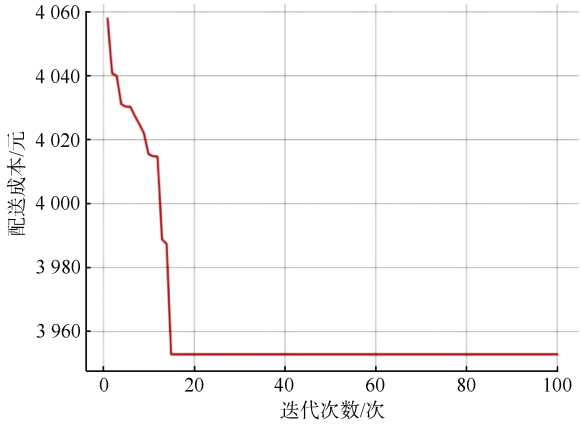


图 8　迭代过程最优解成本曲线

Figure 8　The iterative process optimizes the cost curve

在算法执行初期阶段，最优配送路线的配送成本迅速下滑，在第 15 次迭代后到达最优解附近，并没有长期陷入局部最优解之中。表明经过一系列改进措施，算法已经能够快速、高效地解决既有问题，证明了算法的有效性。依据求解后的最优解，可以测算出最优配送路径下的物流成本。该路径的总成本为 3947.1 元，其各项成本构成为：固定运营成本 3000 元，车辆运输成本 536.56 元，时间成本 410.54 元。其中固定运营成本占总成本比重最大，车辆运输与时间成本占比较小。

为证明本研究提出的配送路径优化算法的优越性，从迭代次数和运行时间两个维度进行了对比分析。结果显示：改进前的传统算法达到最优解需迭代 46 次，运行时间长达 11 849 s；而改进后的算法仅需 15 次迭代即可收敛，运行时间大幅缩减至 1 613 s，计算效率提升显著。实验结果验证了算法改进策略在求解速度与收敛性能方面的双重优势。

4　结论

在国家推进“四网融合”与“双碳”行动、加快构建高效现代交通物流体系的大背景下，利用超大城市轨道交通富余运力开展货物运输已成为重要发展方向。本文以广州城市轨道交通线网为例，验证了所提方法的有效性与优越性，主要研究结论与创新点如下：

1) 构建了面向客货协同运输的多维度成本量化模型。本文综合考虑货物运输时间、轨道—道路接驳及运力占用惩罚等因素，建立了多目标成本核算框架，有效量化了货运作业对客运服务的动态干扰。实例求解得出最优配送路径(广州南站—汉溪长隆—大学城北—淘金—凤凰新村—黄沙—海珠广场—广州南站)的总成本为 3947.1 元，其中固定运营成本占比最高(约 76%)，验证了模型在平衡固定投入与动态运输成本方面的有效性。

2) 提出了基于复杂网络理论的网络拓扑结构简化方法。针对超大城市轨道交通网络节点多、连边复杂的特点，设计了剔除冗余端点与非关键中间节点的剪枝策略。在广州线网案例中，该方法使网络节点数由 238 个减少至 58 个(简化率 76%)，连边数由 259 条减少至 78 条(简化率 69%)，显著降低了路径搜索空间的复杂度。

3) 开发了融合粒子群优化与精英策略的改进蚁群算法。针对传统算法收敛慢、易陷入局部最优的问题，通过粒子群算法优化超参数并引入精英蚂蚁策略。对比实验表明：改进后的算法使求解收敛迭代次数由 46 次降低至 15 次；在计算效率方面，算法运行时间由 11 849 s 缩减至 1 613 s，计算效率提升了 87.4%，极大地满足了实际工程对时效性的要求。

4) 验证了基于客流满载率挖掘富余运力的可行性。研究通过分析典型断面(如黄边—嘉禾望岗、杨箕—体育西路)的客流时空分布特征，精准识别了非高峰时段的运力窗口，证明了在不影响客运服务的前提下，利用平峰间隙进行“客货共运”具备操作可行性。

综上所述，本文提出的优化方法不仅能有效降低超大城市轨道交通网络的计算复杂度，还能在保障客运的前提下实现货运路径的全局最优，为未来大城市构建“高铁+城轨”的高效联运体系提供了有力的理论支撑与技术参考。

参考文献

[1] HU Wanjie, DONG Jianjun, HWANG B G, et al. Using

system dynamics to analyze the development of urban freight transportation system based on rail transit: a case study of Beijing[J]. Sustainable cities and society, 2020, 53: 101923.

[2] 周芳汀. 基于地铁的城市配送网络选点及路径优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
ZHOU Fangting. Study on location selection and path optimization of urban distribution network based on subway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[3] 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 transportation based on underground logistics system[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(S2): 534-539.

[4] 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]. 都市快轨交通, 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.

[5] 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.

[6] 张涵, 吕永波, 任远, 等. 基于潜变量和有序 Logit 地铁货运分担率预测研究[J/OL]. 地下空间与工程学报, 1-10[2024-07-30].
ZHANG Han, LV Yongbo, REN Yuan, et al. Prediction Research of Subway Freight Sharing Rate Based on Latent Variables and Ordered Logit[J/OL]. Journal of Underground Space and Engineering, 1-10 [2024-07-30].

[7] 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.

[8] 张英贵, 刘家忱, 雷定猷. 基于多目标进化的超限超重货物运输专列路径优化方法[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(3): 138-148.
ZHANG Yinggui, LIU Jiachen, LEI Dingyou. Route optimization method of out-of-gauge and overweight freights transportation special train based on multi-objective evolution[J]. China railway science, 2024, 45(3): 138-148.

[9] 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.

[10] 李竹君, 柏赟, 陈垚. 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.

[11] 吴暖, 代焕杰, 李季涛, 等. 考虑时间容忍度的冷链物流配送路径多目标优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(2): 275-284.
WU Nuan, DAI Huanjie, LI Jitao, et al. Multi-objective optimization of cold chain logistics distribution path considering time tolerance[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2023, 23(2): 275-284.

[12] 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.

[13] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2024(4): 6-26.
China Association of Metros. 2023 Annual statistics and analysis report of urban rail transit[J]. Urban rail transit, 2024(4): 6-26.

（编辑：傅依萱）