

文章编号: 1005-0523(2022)01-0089-10



基于地铁的地上地下闭环物流配送路径优化

郑长江, 陈宜恒, 沈金星

(河海大学土木与交通学院, 江苏, 南京, 210098)

摘要: 面对闭环物流需求增长与道路资源紧缺的不平衡问题, 设计了基于地铁的地上地下配送模式, 以运输成本, 时间窗惩罚成本, 碳排放成本, 转运成本, 固定成本和地铁货运运营成本的总成本最小为目标函数, 构建基于地铁的地上地下闭环物流配送路径优化模型。基于半初始子路径扰动策略改进了自适应遗传算法, 并以南京市秦淮区为例进行分析。结果表明: 相比于常规自适应遗传算法, 改进的算法可以缩短 49.14% 的运算时间, 且求解更高效、稳定; 选取多编组的开行方式, 并设置物流车厢容量和发车间隔分布为 3 000 件和 5 min, 可以降低 4.6% 的平均服务时间和 3.8% 的总成本, 具有较好的送达时效性和经济性; 相比传统物流模式, 合理利用现有地铁线网的地上地下闭环物流配送方案可以降低 57.5% 的碳排放量、减少 8.1% 的平均配送时间, 其配送模式可为未来城市物流与地铁的发展提供参考依据。

关键词: 交通运输规划与管理; 路径优化; 改进自适应遗传算法; 闭环物流; 地上地下配送模式

中图分类号: U121

文献标志码: A

本文引用格式: 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.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2022.01.006

Distribution Routing Optimization of Ground-Underground Closed-Loop Logistics Based on Metro Network

Zheng Changjiang, Chen Yiheng, Shen Jinxing

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to alleviate the imbalance between the closed-loop logistics demand growth and the road resources limit, a ground-underground model based on metro network was designed, and a ground-underground closed-loop logistics distribution optimization model was constructed to minimize transportation time cost, time window penalty cost, carbon tax, transshipment cost, vehicle fixed cost and subway station freight operation cost. Based on the semi-initialized and sub-path disturbance strategy, the adaptive genetic algorithm was improved. The implementation effect was evaluated based on the Qinhuai District, Nanjing. The results show that firstly, the improved adaptive genetic algorithm can shorten the calculation time of 49.14%, and the solution is more efficient and stable. Secondly, setting multi-group metro operations, 3 000-piece carriage capacity and 5 min departure interval can effectively reduce the average service time by 4.6% and the total costs by 3.8%, yielding better delivery timeliness and economy. Finally, compared with the traditional logistics mode, the ground-underground closed-loop logistics distribution plan based on the existing metro network can reduce carbon emissions by 57.5%, average delivery time by 8.1% and the distribution model can provide reference for the future development of urban logistics and metro network.

收稿日期: 2021-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808187); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B210202035)

Key words: transportation planning and management; routing optimization; improved adaptive genetic algorithm; closed-loop logistics; ground-underground intermodal distribution model

Citation format: ZHENG C J, CHEN Y H, SHEN J X. 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.

随着社会经济的发展以及环境污染的加剧,政府和消费者对物流运输业提出了更高的要求。闭环物流正是顺应这一趋势而兴起的,它是科学高效规划物流网络的出发点,是正向物流网络与逆向物流网络的集成^[1]。随着物流需求的增长,日益拥堵的城市路面交通难以保障闭环物流经济、绿色的发展,少占用地面空间的地上地下配送思路逐渐被发达国家重视^[2-3],其中基于地铁的物流配送模式,既充分利用低碳环保的地铁资源,又在成本上更具可行性,也受到学者们的关注。

日本札幌的地铁配送实验证明,小范围的地铁配送服务可以节约 1/4 的货车运输^[4]。Dampier 等^[5]研究了地铁货运的可行性和潜在问题,通过方案比选验证了该模式能有效缓解交通拥堵、减少车辆尾气排放。以上研究大都集中在配送模式的可行性分析和宏观影响评估,但基于地铁的地上地下配送模式研究需根据城市货运现状,以提高货运综合效能为目标,对配送路径和参数进行优化和分析。

Ghane 等^[6]以建设费用和运输费用最小为目标对物流网络进行优化。Eric 等^[7]考虑了车辆容量、时间窗约束等,设计了一种配送路线的优化算法。汤雅连等^[8]引入遗传算子和客户点分组策略,改进了蚁群算法以求解软时间窗约束下的多车型路径优化问题。Zhao 等^[9]和周晓晔等^[10]提出基于地铁系统在非高峰期进行物流运输,以最小运输距离为目标进行优化。周芳汀等^[11-12]考虑了低碳、运输成本和客户点时间窗约束,提出以地铁网络为骨干的路径优化模型。杨婷等^[13]研究了带软时间窗的地铁物流配送路径优化问题。易美等^[14]利用分层分级配送思路,以建设成本、运输费用及中转服务费用最低为目标建立地下物流规划模型。以上研究都考虑了不同因素下的配送路径优化,但大多研究仅关注了传统的正向物流网络,忽略了物流链的重要环节——逆向回收,求解方案难满足时下城市闭环物流的需求。此外,大多

文献针对基于单条地铁线路的配送问题进行研究,由于地铁配送货运需依靠列车运输货物,并利用地铁站完成货物转移,单线路地铁配送模式存在因上游货物转移延迟或阻塞导致货物堆积或货运中断^[15]的问题。

面向区域闭环物流配送服务,设计地下地铁线网-地面货车的物流配送模式,提出考虑地铁客货共运方式的带时间窗闭环物流配送优化问题,并建立以运输成本、碳排放成本、时间窗惩罚成本、转运成本、固定成本和地铁货运运营成本为优化目标的地上地下闭环物流配送路径优化模型。还根据配送模式的地下地面分层特点,设计了基于半初始子路径扰动策略的改进自适应遗传算法,并通过案例分析对所建立的模型和算法进行验证评估。

1 问题描述

1.1 地上地下闭环物流配送模式

针对一组分布在一定区域内需求已知,时间窗约束已知的客户点,地上地下闭环物流配送系统采用客货共运的地铁班列和轻型货车对其进行配送服务,其中客货共运的地铁班列是在不改变现行地铁发车时刻表的情况下,利用平峰时段在客运车厢后增设物流车厢的新型配送模式^[15]。

但是由于客货共运地铁班列的运力限制和时段限制,所有货物由单一地铁线路运输、中转易影响到常规客运服务和物流配送效率。本文采取分层分级分区域的地上地下配送策略,以降低对常规客运的影响,提高地下配送转运效率。图 1 所示为具体配送模式描述:① 根据区位因素和周围交通环境,选择 1,2 级地铁站承担货物中转功能,确定各 2 级地铁站的配送区域;② 正向物流中,利用地下网络货物从物流园依次运往 1,2 级地铁站,并在 2 级地铁站由货物电梯运往地面进行装卸,最终由货车运往各客户点;③ 逆向物流中,客户点的回收品用货车运往 2 级地铁站,再由地铁运输至市郊回收。

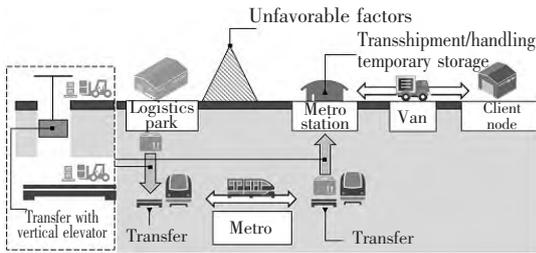


图 1 基于地铁的地上地下配送模式

Fig.1 A ground-underground model based on metro network

综上,基于地铁的地上地下闭环物流配送模式假设条件如下。

- 1) 1 级地铁站至同一 2 级地铁站的运输任务由同一线路的地铁分班次运输;
- 2) 1 级地铁站一次只开行一列至 2 级地铁站的客货共运模式地铁,直到 2 级地铁站的配送量均

完成才开行下一列至另一 2 级地铁站的地铁;

- 3) 一个客户点仅允许同一辆货车服务;
- 4) 当 2 级地铁站的配送量超过单次列车容量时,需等待下一班次列车;
- 5) 当客户点的配送量超过货车容量时,同一辆货车需返回至对应 2 级地铁站以完成剩余运输任务;
- 6) 货物由地铁专用物流车厢运输,可快速装卸;
- 7) 地面路网各路段的行车速度是恒定的,不考虑路段内的车辆变速情况;
- 8) 地铁的客运发车时刻表已知,且假设地铁线网的发车间隔是恒定的。

1.2 符号说明

为便于理解,现将本文用到的参数汇总如表 1 所示。决策变量定义如表 2 所示。

表 1 参数符号描述

Tab.1 Notation and description for the parameters

Parm	Description	Parm	Description
N_0	Set of metro 1 stations $N_0=\{0\}$	Q_1	Logistics capacity
N_d	Set of metro 2 stations $N_d=\{1, 2, \dots, n_d\}$	Q_2	Truck capacity, set to 4 500 pieces
N_c	Set of client nodes $N_c=\{1, 2, \dots, n_c\}$	p_1	Unit metro transportation cost, set to 73.515 yuan ^[6]
N_t	Number of trucks	p_2	Unit truck transportation cost, set to 20 yuan
A_1	Set of metro network arcs	t_{ur}	Unit cargo transit time of ground and underground cargo, set to 0.002 min/piece ^[10]
A_2	Set of ground transportation network arcs	t_{uc}	Unit cargo loading and unloading time, set to 0.02 min/piece
D_i	Delivery volume of metro 2 station i	c_{tc}	Unit cargo transit cost of metro 2 station, set to 0.013 yuan/piece ^[13]
d_i	Distribution volume of customer node i	c_{pde}	Unit accumulated risk cost of metro 2 station, set to 0.11 yuan/piece ^[13]
q	Pick-up volume of customer node i	c_{car}	Truck rental, set to 150 yuan
f	Metro departure interval	c_{nde}	Unit fixed cost of metro 2 station
S_{ij}	Distance between node i and j	c_{us}	Unit freight operating cost of metro 2 station

表 2 决策变量符号描述

Tab.2 Notation and description for the decisive variables

Variables	Description
x_{ijr}	If the route between metro 1 station i and metro 2 station j is chosen, $x_{ijr}=1$, otherwise, $x_{ijr}=0$
x_{ijrf}	If there is the additional cargo transportation route between metro 1 station i and metro 2 station j , $x_{ijrf}=1$, otherwise, $x_{ijrf}=0$
y_{ir}	If the metro 2 station i is chosen, $y_{ir}=1$, otherwise, $y_{ir}=0$
x_{ijc}	If the route between metro 2 station i and customer node j is chosen, $x_{ijc}=1$, otherwise, $x_{ijc}=0$
x_{ijcf}	If there is the additional to-and-fro route between metro 2 station i and client node j , $x_{ijcf}=1$, otherwise, $x_{ijcf}=0$

1.3 数学模型

地下配送时间和地铁发车间隔 $f/2$ 级地铁站间的运输时间 t_{ij} 相关。由于地面配送时间易受路面交通状况影响,根据百度地图实时交通拥堵指数和祝付玲^[7]的研究成果,设路面交通状况为拥挤、缓行、畅通不稳定和畅通时,货车路段平均速度 V 分别为 20,25,30 km/h 和 40 km/h。货物配送总时长 T 如式(1)所示。

$$T = \sum_{(i,j) \in A_1} ((x_{ijr} + x_{ijf})t_{ij} + x_{ijf}f) + \frac{(n_d - 1)n_d}{2}f + t_{ur} \sum_{i \in N_d} (y_{ir}D_i) + \sum_{(i,j) \in A_2} \left((x_{ijc} + x_{ijf}) \frac{S_{ij}}{V} \right) + t_{uc} \sum_{i \in N_c} (d_i + q_i) \quad (1)$$

为保证地铁货运不影响常规地铁客运,基于地铁的地上地下闭环物流配送模式引入地铁站配送时间窗。如果货物提前到达 2 级地铁站,货物堆积在地铁站内,产生货物堆积风险成本,这与堆积的货物量和堆积时间有关;如果货物在指定时间窗内到达 2 级地铁站,则不产生额外费用;当货物延迟抵达 2 级地铁站时,提前到达的货车需要停靠等待,产生停靠等待的成本。

设 2 级地铁站 i 的服务时间窗为 $[T_{ai}^m, T_{bi}^m]$,即货车预计到达 2 级地铁站 i 的时间段为 $[T_{ai}^m, T_{bi}^m]$, T_i 为货物到达 2 级地铁站 i 并完成货物中转的时刻,则时间窗约束下 2 级站点的货物堆积惩罚成本 $F_i^m(T_i)$ 如式(2)所示。

$$F_i^m(T_i) = c_{pile} D_i \max(T_{ai}^m - T_i, 0) + p_2 \max(T_i - T_{bi}^m, 0) \quad (2)$$

由于经济和运营原因,货车到达客户点的配送时刻也可能会违反时间窗。设客户点 i 的软时间窗限制为 $[T_{ai}^f, T_{bi}^f]$, T_i 为到达客户点 i 并完成货物装卸的时刻,则软时间窗约束的惩罚成本 $F_i^f(T_i)$ 如式(3)所示。

$$F_i^f(T_i) = \begin{cases} M & T_i < (T_{ai}^f - T_i) \\ 5(T_{ai}^f - T_i) & T_i < T_{ai}^f \\ 0 & T_{ai}^f \leq T_i \leq T_{bi}^f \\ 500(T_i - T_{bi}^f) & T_{bi}^f < T_i \\ M & (T_{bi}^f + T_i) < T_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: M 是一个趋近于无穷大的数; T_i 是可容忍的

超出时长。

碳排放成本是对货车的每单位 CO_2 排放量按照税率 0.75^[18]征收碳排放税。参考英国交通研究所的实载车辆碳排放计算公式^[19]和任腾等^[20]对车辆碳排放量的修正,设货车在路段 (i,j) 上运载的货物量为 k_{ij} ,碳排放成本 C_{tax} 如式(4)所示。

$$C_{tax} = 0.75\beta \sum_{(i,j) \in A_1} ((x_{ijc} + x_{ijf})S_{ij}k_{ij}) + 0.75\beta \sum_{(i,j) \in A_2} (x_{ijc}S_{ij})(\alpha_0 + \alpha_1 V_{ij} + \alpha_2 (V_{ij})^3 + \alpha_3 (V_{ij})^{-2}) \quad (4)$$

式中: $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为 0.98, -0.011, 7.3×10^{-7} , 22.36; β 取 7.5×10^{-5} 。

基于上述假设分析和实际闭环物流的配送过程,以运输成本,时间窗惩罚成本,碳排放成本,转运成本,固定成本和地铁货运运营成本的总成本 W 最小化为目标,建立了基于地铁的地上地下配送路径优化目标函数如式(5),约束条件如式(6)~式(16)所示。

$$\min W = p_1 \left(\sum_{(i,j) \in A_1} ((x_{ijr} + x_{ijf})t_{ij} + x_{ijf}f) + \frac{(n_d - 1)n_d}{2}f \right) + p_2 \left(\sum_{(i,j) \in A_2} \left((x_{ijc} + x_{ijf}) \frac{S_{ij}}{V} \right) + t_{uc} \sum_{i \in N_c} (d_i + q_i) \right) + c_{ur} t_{ur} \sum_{i \in N_d} (y_{ir}D_i) + \sum_{i \in N_d} F_i^m(T_i) + \sum_{i \in N_d} F_i^f(T_i) + C_{tax} + c_{car} N_t + c_{note} \sum_{i \in N_d} y_{ir} + c_{us} T \sum_{i \in N_d} y_{ir} \quad (5)$$

$$\text{s.t.}: \sum_{i \in N_0} x_{ijr} \leq 1, \forall j \in N_d \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_d} \sum_{j \in N_d} x_{ijc} = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{ijf} \leq 1, \forall j \in N_d \quad (8)$$

$$\left(\sum_{(i,j) \in A_1} x_{ijr} + \sum_{(i,j) \in A_1} x_{ijf} \right) \cdot Q_1 \geq D_z, \forall z \in N_c \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N_d} (y_{ir} \cdot D_i) - \sum_{i \in N_c} d_i = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_2} x_{ijc} \leq 1 \quad (11)$$

$$\sum_{i \in N_d} x_{ijef} \leq 1, \forall j \in N_c \quad (12)$$

$$\left(\sum_{(i,j) \in A_2} x_{ijc} + \sum_{(i,j) \in A_2} x_{ijef} \right) \cdot Q_2 \geq d_z, \forall z \in N_c \quad (13)$$

$$x_{ii}=0, \forall i \in N \quad (14)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} - \sum_{i \in N} x_{ji} = 0 \quad (15)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, x_{ijf} \in \{0, 1\}, y_{ir} \in \{0, 1\}, x_{jic} \in \{0, 1\}, x_{jif} \in \{0, 1\} \quad (16)$$

约束条件(6)~(10)与地下运输有关,其中:约束条件(6)保证一个 2 级地铁站仅由同一地铁线路服务,约束条件(7)保证 2 级地铁站间路径不连通,约束条件(8)表示一个 2 级地铁站至多允许同一地铁线路额外发车一次,约束条件(9)确保同一线路地铁至多发车两次就完成运输任务,约束条件(10)保证 2 级地铁站的配送量等于客户点的配货量之和。约束条件(11)~(13)与地面运输有关,其中:约束条件(11)保证一个客户点仅由一辆货车服务,约束条件(12)表示一个客户点至多允许货车返程一次,约束条件(13)确保货车至多往返一次就完成运输任务。约束条件(14)确保同一节点内无路径。约束条件(15)确保配送路径的单向性。约束条件(16)表示决策变量的属性。

2 算法设计

地上地下物流配送线路联合优化问题实质上是 2E-VRP 问题,属于 NP 难题,许多学者都采用遗传算法(genetic algorithm, GA)求解目标模型。但遗传算法在寻优过程中存在收敛速度慢、易早熟等问题。首先,基于配送模式分层分级分区特点,对 2 级地铁站和客户点进行聚类;其次,采用改进的自适应遗传算法(adaptive genetic algorithm, AGA)提高收敛速度,并引入半初始化策略和子路径扰动策略增加算法迭代后期的种群多样性。

1) 基于 K-means 的聚类。地上地下物流配送路径优化问题包含多车辆分区配送。根据 2 级地铁站数 N_d 、客户点的配送量 q_i 和可派遣货车数等约束条件,基于地理位置信息,利用 K-means 法对配送区域进行聚类划分,并确定各 2 级地铁站配送区域内的客户点。

2) 编码与初始化。采取排列编码:① 随机选取 2 级地铁站生成 N_i 个序列;② 将 2 级地铁站服务范围内的客户点随机排列成子路径,并插入到对应的 2 级地铁站序列中;③ 插入 1 级地铁站,生成一条染色体编码;④ 评估该染色体的目标值,并标注需要货车返程的节点。例如 $N_i=2$ 的配送路径为

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 1,$$

$$1 \rightarrow 3 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow 3 \rightarrow 1。$$

其中 1 为 1 级地铁站,2-3 为 2 级地铁站。地下运输顺序为先配送 2 号站点,再配送 3 号站点;2 级地铁站节点 2 服务节点 4,5,6 和 8, 配送完节点 8 后货车需返回节点 2 再前往节点 5,2 级地铁站节点 3 服务节点 7,9。

3) 子路径交叉和变异。为加快种群进化速度,引进反映种群集中分散程度的参数 $\gamma = \arcsin(f_{\min}/f_{\text{avg}})$, f_{avg} 和 f_{\min} 为当前种群的平均适应度和最优适应度;改进的交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 如式(17)和(18)所示。当 $\gamma < \pi/6$ 时,种群适应度较分散,应增加 P_c 值以快速生成新的优质解,同时降低 P_m 值,减小破坏优质解的概率;当 $\gamma > \pi/6$ 时,适应度较集中、个体过于相似,需降低 P_c 值、提高 P_m 值。

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - (P_{c1} - P_{c2}) \left(\frac{2\gamma}{\pi} \right) & \gamma < \frac{\pi}{6} \\ \frac{P_{c1} + P_{c2}}{2} - \frac{\gamma(P_{c1} - P_{c2})}{\pi} & \gamma \geq \frac{\pi}{6} \end{cases} \quad (17)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m2} + (P_{m1} - P_{m2}) \left(\frac{2\gamma}{\pi} \right) & \gamma < \frac{\pi}{6} \\ \frac{P_{m1} + P_{m2}}{2} - \frac{\gamma(P_{m1} - P_{m2})}{\pi} & \gamma \geq \frac{\pi}{6} \end{cases} \quad (18)$$

式中: P_{c1} 和 P_{c2} 为预设的交叉概率最大值和最小值,可取 0.8, 0.6; P_{m1} 和 P_{m2} 为预设的变异概率最大值和最小值,可取 0.1, 0.01。

如图 2 以概率 P_c, P_m 随机选择客户点子路径执行交叉和变异。执行交叉操作时,选择 2 个父代染色体 1 和 2,随机选择一组节点序号,交换 2 个染色体的对应节点,生成 2 个子代染色体 1 和 2;执行变异操作时,针对同一编码中的客户点子路径,随机产生 2 组同数目不同数的索引,找到对应节点进行翻转。

4) 半初始化策略和子路径扰动策略。采取精英保留和半初始化策略以改进后期个体过于相似的问题。若新一代种群最优适应度高于历史最优值,则未更新次数的计数 φ 增 1;当 φ 大于阈值 μ ,则认为迭代已陷入局部最优,此时随机选择除最优个体外的一半个体进行初始化,另一半个体进行子路径交叉变异。

为增加后期种群多样性,借鉴粒子群算法的扰动方式^[20],引入式(19)的扰动概率 P_r 和图 2 的子路径扰动操作:① 随机选择客户点 i ;② 以所属的子

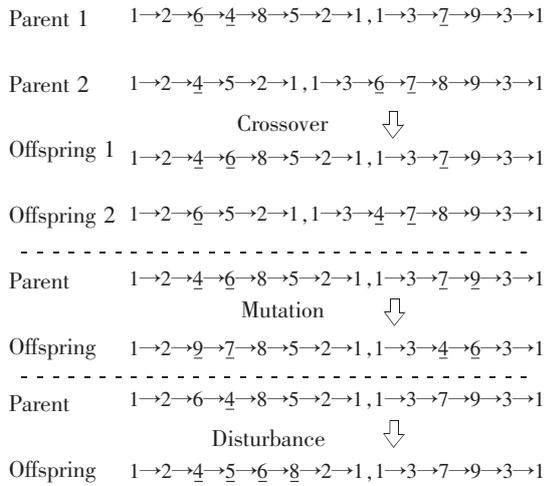


图2 子路径交叉变异扰动

Fig.2 The crossover, mutation and disturbance of sub path

路径总距离最小为目标,重排客户点*i*所属的子路径;③以概率 $\exp(-(f_i-f_{\min})/R_{\text{iter}})$ 接受新编码。

$$P_r = p_r \times \exp((R_i - 1) / R_{\text{iter}}) \quad (19)$$

式中: f_i 为扰动后的适应度; p_r 为预设扰动概率最小值,可取0.15; R_{iter} 为最大迭代次数; R_i 为当前迭代次数。

5)改进AGA算法流程简述。①生成初始种群,种群规模为*S*;②存储历史最优个体,收敛次数加1;③轮盘赌法选择个体,计算 P_c, P_m, P_r ;④若 $\varphi \leq \mu$,以概率 P_c, P_m 执行子路径交叉变异;若 $\varphi > \mu$,执行半初始化策略的交叉变异;⑤若0-1随机数 $r < P_r$,执行子路径扰动;⑥若新种群最优适应度低于历史最优值,更新最优个体,进入⑦;反之 φ 加1进入⑦;⑦若达到最大收敛次数,输出历史最优个体;反之,返回②。

3 实例分析

3.1 背景

根据周芳汀等^[11]的地铁服务范围敏感度分析,地铁配送模式对服务范围大小不敏感,参考该文设定的100 km²服务范围,如图3选取南京市地铁站作为1级地铁站(节点1)和附近6 km内为研究区域;考虑区位因素和客流量,选取5个现有站点(节点2-3,5-7)、2个候选的改建站点(节点4,8)作为2级地铁站,选取20个客户点,表3展示了各节点经纬度转换为XY坐标的相关信息,表4展示了各客户点配送量、取货量和时间窗需求。

参考英国地下物流系统单位里程的总投资额为1.32亿元^[22]和地铁使用年限为30年,设改建地铁站点的固定成本和运营成本每工作小时折旧额为500元。根据周晓晔等^[10]对地铁转运点转运时间的设置,设地上地下单位货物中转时间为0.003 min/件。结合邓红星等^[23]对地面货物装卸时长的设置,设地面单位货物装卸时间为0.02 min/件。



图3 案例背景

Fig.3 Case background

表3 节点位置

Tab.3 Node location information

Node	Coordinate/km	Node	Coordinate/km	Node	Coordinate/km	Node	Coordinate/km
1	[0,0]	8	[1.99, -2.35]	15	[-0.26, 5.09]	22	[-1.94, -1.73]
2	[1.49,3.94]	9	[2.91, 4.11]	16	[-1.39, 4.27]	23	[-5.89, -1.84]
3	[-1.01,4.30]	10	[2.59, 3.24]	17	[-3.05, 3.21]	24	[0.89, -4.09]
4	[-1.66,2.77]	11	[1.41, 1.80]	18	[-5.13, 1.00]	25	[5.58, -0.69]
5	[-3.38,-0.47]	12	[2.27, 0.84]	19	[-0.73, -3.08]	26	[1.23, -1.16]
6	[-1.23,2.02]	13	[-4.08, 4.76]	20	[-1.99, -4.45]	27	[4.53, -2.98]
7	[3.86, -0.16]	14	[-1.91, 4.69]	21	[-4.56, -1.28]	28	[1.95, -3.41]

表 4 节点基本信息
Tab.4 Node specific information

Node	Timetable	Distribution volume	Pick-up volume ^[24]	Node	Timetable	Distribution volume	Pick-up volume ^[24]
9	[30,150]	990	110	19	[30,150]	1 685	190
10	[30,210]	1 485	165	20	[60,150]	1 260	315
11	[60,150]	990	110	21	[60,210]	1 215	135
12	[120,170]	1 485	165	22	[90,210]	1 080	120
13	[30,150]	1 145	130	23	[90,240]	1 350	150
14	[120,180]	850	0	24	[120,180]	850	0
15	[90,210]	1 530	170	25	[60,270]	2 295	255
16	[90,210]	1 700	425	26	[150,240]	1 530	170
17	[120,240]	1 530	170	27	[90,270]	1 830	295
18	[30,90]	850	0	28	[60,150]	1 140	135

表 5 案例 1~6 的 50 次求解结果平均值
Tab.5 The average value of 50 algorithm results of Case 1 to 6

Case	Departure interval/min	Grouping	Logistics capacity	Underground transportation time/min	Average service time/min	Total cost/yuan
1	5	Add 1 metro carriage	3 000	281.72	49.43	23 340.95
2	5	Add 2 metro carriage	3 000	238.88	47.19	22 461.38
3	5	Multi-group	3 000	238.31	47.17	22 447.96
4	10	Multi-group	3 000	346.50	52.64	25 082.25
5	5	Multi-group	2 500	240.39	47.31	22 491.90
6	5	Multi-group	2 000	257.26	48.26	22 878.91

3.2 地铁客货共线时段确定

选取 1 级地铁站 2016 年 10 月 24 日(周一)至 28 日(周五)的 AFC 刷卡数据,绘制如图 4 的 1 级地铁站到站人数时间曲线图。根据到站人数的非高峰段确定地铁客货共线运营时段为 10:00~15:00,即 1 级地铁站时间窗限制为[10,15],同理各 2 级地

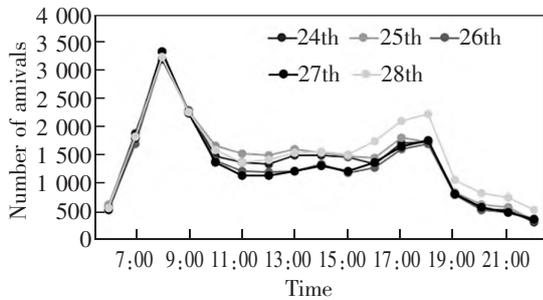


图 4 工作日期间 1 级地铁站到站人数曲线图
Fig.4 The number of people arriving at Metro 1 station within a workday

铁站的时间窗限制为[10,20]。

3.3 讨论与分析

1) 算法性能分析。取不同种群规模和最大迭代次数,分别用 AGA 算法^[25]($k_1=k_3=1, k_3=k_4=0.5$)和本文改进 AGA 算法($\mu=R_{iter}/3$)求解表 5 的案例 1,结果如图 5 所示,并与在 Cplex12.8 求解器得出的精确解进行对比。

可以看出改进的 AGA 算法,能在有限的迭代次数内更快求得优质解,其运算时间比 AGA 算法平均缩短了 49.14%;此外基于半初始化和子路径扰动策略的改进 AGA 算法求解的偏差小,更稳定,易求得优质解。由改进 AGA 算法求得的最优配送路径如图 6 所示,目标值 23 174.54,具体路径如下,其中,10,13,25 为货车返程点。

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 12 \rightarrow 2 \rightarrow 1, \\ 1 \rightarrow 8 \rightarrow 28 \rightarrow 26 \rightarrow 8 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 4 \rightarrow 18 \rightarrow 17 \rightarrow 4 \rightarrow 1,$$

1→6→19→20→6→1,
 1→5→22→23→21→5→1,
 1→3→15→14→13→16→3→1,
 1→7→27→25→24→7→1。

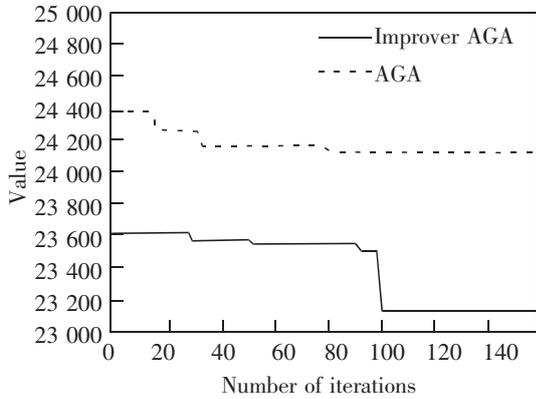


图5 迭代结果对比图

Fig.5 The comparison of iteration results

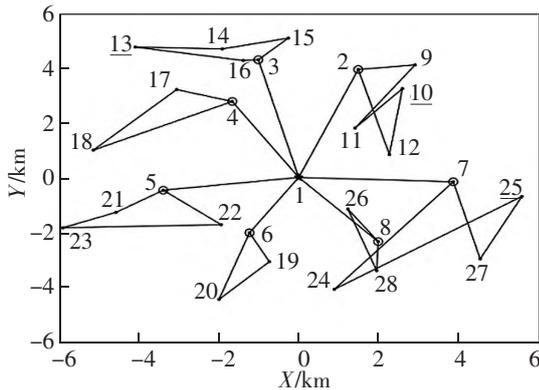


图6 改进算法求解的路径优化结果

Fig.6 The result of routing optimization

在同案例背景下,基于 CPLEX 12.8 运算精确求得的目标值为 22 978.20,即在有限的迭代次数内,改进算法求得平均最小目标值的相对误差为 0.894%,平均值的误差为 1.415%,该误差在可接受

范围内。

2) 地下网络运输因素分析。选择 7 个 2 级地铁站、7 辆货车,设计如表 5 的案例 1~6。分析可知总成本与地下运输时间、节点平均服务时间成正相关关系;从案例 1~3 可知,案例 1 单次列车运量小、发车频次高导致地下运输时间长,进而平均服务时间较长和总成本较高,而对比案例 1,可灵活调整物流车厢数的案例 3 有效减少了 15.4%的地下运输时间,平均送达时间和总成本也相应减少了 4.6%和 3.8%;对比案例 3~6 可知,增大发车间隔、减少物流车厢容量均会增加地下运输时间、平均服务时间和总成本,此时求得的配送路径具有较次的送达时效性和经济性。

3) 不同资源配置策略分析。基于表 5 中总成本小、送达时效性好的案例 3 参数设置,设计了如表 6 的案例。分析可知:对比仅依靠地面运输的案例 0 和案例 3 可知,地上地下闭环物流配送路径的碳排放量和平均服务时间分别降低了 57.5%,8.1%,可见地上地下的配送模式在保证经济性的同时可提供送达时效性好,低碳环保的配送路径;由案例 7~8 可知,合理的货车数可以优化地面运输路径、减少碳排放量,但货车数的增加会导致服务时间和总成本的上升,总成本的平均增长率为 4.1%;从案例 9~10 可知,合理利用现有地铁线网完成地下地上配送可以在保证货物送达时效性的同时降低 49.4%的总成本,但地铁站服务区域的缩小会导致配送方案的碳排放量上升 3.5%;此外由案例 11 可知,较少的客货共运地铁站点会导致货运中转时间超出站点时间窗,进而使总成本上升了 66.0%,即此时货物中转影响到了地铁客运,同样也使得配送方案的碳排放量和平均服务时间增加了 54.2%和 7.5%,货运送达稳定性和低碳无法满足。

表 6 不同资源配置案例的 50 次求解结果平均值

Tab.6 The average value of 50 algorithm results in resource allocation cases

Case	Rebuild nodes	Number of trucks	Carbon emission/kg	Average service time/min	Total cost/yuan
0	-	7	151.93	51.34	21 864.81
3	4,8	7	64.61	47.17	22 447.96
7	4,8	8	70.77	47.59	23 264.71
8	4,8	9	72.30	47.76	23 493.40
9	4	7	91.03	48.00	11 371.11
10	8	7	109.55	49.64	11 331.76
11	-	7	140.97	50.99	66 031.35

4 结论

共享地铁资源配送货物是一种提高地下资源利用率,减少地面交通拥堵和环境污染的模式。本文考虑城市闭环物流需求,提出地上地下闭环物流的配送模式和路径优化模型,改进AGA算法求解,并从地下网络运输因素和资源配置策略两个方面进行案例分析。

1) 基于半初始子路径扰动策略的改进AGA算法可以较快求得优质解,求解更高效、稳定。

2) 基于地铁的地上地下路径优化模型的总成本与地下运输时间、节点平均服务时间和地面货车数成正相关关系;采用多编组的开行方式、3 000件的物流车厢容量和5 min的发车间隔,可以有效减少闭环物流配送模式的4.6%的配送时间和3.8%的总成本,具有较好的送达时效性和经济性。

3) 相比传统地面货车配送模式,基于地铁的地上地下配送方案可以降低57.5%的碳排放量、减少8.1%的平均配送时间;此外合理地利用现有地铁线网可以进一步优化配送方案,其资源配置策略可为未来城市物流与地铁的发展提供参考依据。

参考文献:

- [1] GOVINDAN K, SOLEIMANI H. A review of reverse logistics and closed loop supply chains: a journal of cleaner production focus[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 142(1): 371-384.
- [2] CUI J, NELSON J D. Underground transport: an overview[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 87(5): 122-126.
- [3] MOTRAGHI A, MARINOV M V. Analysis of urban freight by rail using event-based simulation[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, 25(5): 73-89.
- [4] KIKUTA J, TATSUHIDE I, TOMIYAMA I, et al. New subway-integrated city logistics system[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, 39(8): 476-489.
- [5] 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.
- [6] GHANE B M, VERGARA H A. Decomposition approach for integrated intermodal logistics network design[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 89(5): 53-69.
- [7] ERIC H, CHAN L, YANG Y W. A hybrid route planning approach for logistics with pickup and delivery[J]. *Expert Systems with Applications*, 2019, 118(4): 482-492.
- [8] 汤雅连, 蔡延光, 杨期江. 求解带软时间窗多车场多车型车辆路径问题的一种改进蚁群算法[J]. *东南大学学报(英文版)*, 2015, 31(1): 94-99.
TANG Y L, CAI Y G, YANG Q J. Improved ant colony optimization for multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with soft time windows[J]. *Journal of Southeast University(English Edition)*, 2015, 31(1): 94-99.
- [9] ZHAO L, LI H, LI M, et al. Location selection of intra-city distribution hubs in the metro-integrated logistics system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 80(5): 246-256.
- [10] 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 X Y, CUI Y, HE L, et al. Logistics distribution routing optimization based on subway freight truck inter-modal transportation[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(3): 111-117.
- [11] 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 F T, ZHOU G H, ZHANG J. Point-routing problem of urban distribution based on subway[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(7): 1247-1254.
- [12] 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 F T, ZHANG J, ZHOU G H. Subway-based distribution network routing optimization problem with time windows[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(5): 88-94.
- [13] 杨婷, 郑长江, 马庚华. 基于地铁的带时间窗地下物流路径优化研究[J]. *华东交通大学学报*, 2019, 36(4): 67-74.
YANG T, ZHENG C J, MA G H. Research on optimization of underground logistics path with time window based on subway[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2019, 36(4): 67-74.
- [14] 易美, 周爱莲. 一类城市地下物流网络规划模型研究[J]. *交通科学与工程*, 2016, 32(3): 93-98.
YI M, ZHOU A L. Research on a logistics network planning model of the urban underground[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2016, 32(3): 93-98.

- [15] 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 Y C,DONG J J,SHANG P C,et al. Research on the cooperative transportation modes between metro and underground logistics system in urban area[J]. Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(3):637-646.
- [16] HAI D,XU J,DUAN Z,et al. Effects of underground logistics system on urban freight traffic:a case study in Shanghai,China[J]. Journal of Cleaner Production,2020,260(19):1-14.
- [17] 祝付玲. 城市道路交通拥堵评价指标体系研究[D]. 南京:东南大学,2006.
ZHU F L. Research on evaluation index system of urban road traffic congestion[D]. Nanjing:Southeast University,2006.
- [18] 杨珺,卢巍. 低碳政策下多容量等级选址与配送问题研究[J]. 中国管理科学,2014,22(5):51-60.
YANG J,LU W. A location and distribution model with hierarchical capacities under different carbon emission policies[J]. Chinese Journal of Management Science,2014,22(5):51-60.
- [19] FIGLIOZZI M. Emissions minimization vehicle routing problem[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board,2010,2197(1):1-7.
- [20] 任腾,陈玥,向迎春,等. 考虑客户满意度的低碳冷链车辆路径优化[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(4):1108-1117.
REN T,CHEN Y,XIANG Y C,et al. Optimization of low-carbon cold chain vehicle path considering customer satisfaction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2020,26(4):1108-1117.
- [21] FOGEL D B. Evolutionary algorithms in theory and practice[J]. Complexity,1997,2(4):26-27.
- [22] 曾令慧. 城市智能地下物流系统管网布局方法研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.
ZENG L H. The research on layout method of urban intelligent underground logistics system[D]. Changsha:Changsha University of Science & Technology,2017.
- [23] 邓红星,王玮琦,王永康. 公路零担物流企业末端配送路径优化[J]. 交通科技与经济,2018,20(4):1-4.
DENG H X,WANG W Q,WANG Y K. The terminal distribution routing optimization of road LTL logistics enterprises[J]. Technology & Economy in Areas of Communications,2018,20(4):1-4.
- [24] 张晓楠,范厚明,李剑锋. B2C物流配送网络双目标模糊选址模型与算法[J]. 系统工程理论与实践,2015,35(5):1202-1213.
ZHANG X N,FAN H M,LI J F. Biobjective fuzzy location model and algorithm for the design of logistics distribution network in B2C ecommerce[J]. Systems Engineering Theory & Practice,2015,35(5):1202-1213.
- [25] SRINIVAS M,PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems,Man and Cybernetics,2002,24(4):656-667.



第一作者:郑长江(1966—),男,教授,博士,博士生导师。研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:zheng@hhu.edu.cn。



通信作者:陈宜恒(1996—),女,硕士研究生。研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:1264701030@qq.com。

(责任编辑:刘棉玲)