

文章编号:1005-0523(2019)04-0067-08

基于地铁的带时间窗地下物流路径优化研究

杨 婷¹, 郑长江¹, 马庚华²

(河海大学 1.土木与交通学院;2.港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:随着电子商务的快速发展,城市物流配送量日益增长,加剧了城市交通拥堵状况。相对应的,城市交通拥堵也严重影响着物流配送的准时率和服务水平。为了缓解物流导致的交通拥堵,文中将地面物流转移至地下,提出基于地铁的地下物流配送模式,并且考虑地下物流与地面物流的转运时间协同,引入货物在地面转运点堆积的时间成本惩罚函数,以总成本最低为目标函数,建立基于地铁的带时间窗地下物流路径优化模型。利用遗传算法进行路径优化并用 MATLAB 实现算法。最后,以南京市为例,利用模型得出最优路径以及总成本最优的调度方案。

关键词:地下物流系统;地铁;时间窗;协同;遗传算法

中图分类号:U121

文献标志码:A

地下物流系统(underground logistics system, ULS)通过合理开发和利用地下空间资源来有效缓解物流业造成的地面交通拥堵,同时,ULS 具有高效、快捷和高自动化水平的特点,能提高物流的服务水平并且大量减少所需人力资源,缓解人才缺乏对物流业发展的制约。因此地下物流系统的规划建设已成为物流业未来发展的趋势。目前国内外学者已对地下物流网络优化问题展开了大量研究^[1-2]。杨文浩通过分析我国城市交通问题和发达国家在 ULS 方面的研究,提出我国发展 ULS 的综合优势和存在的问题及相应针对性对策^[3]。郑长江等将 Voronoi 图与改进 P-中值模型相结合,进行物流节点优化,求出整个物流系统的节点选址最优布局^[4]。穆树录以北京市为例,采用多模块层次分析法建立集合覆盖模型,对城市 ULS 的线路规划问题进行分析研究^[5]。周婷、周爱莲建立了基于投资成本和时间成本最小的地下物流配送路线优化模型,该模型加入配送线网合理规模约束与可达性约束并以地下物流配送线路的总成本最小为目标,得出针对新建地下物流系统的最优路径^[6]。

但是,地下空间的开发成本和建设难度远高于地上空间开发,使其成为限制 ULS 发展的主要因素。因此,利用现有地下设施进行物流配送可作为目前 ULS 发展的一大方向。目前,已有不少学者提出地铁兼货运功能的设想,利用地铁进行物流运输^[8-9],也有学者据此提出基于地铁运输的美国的非高峰时段货物配送(OHD)模式^[10]。周芳汀等将地铁作为城市配送的骨干网络,提出基于地铁配送的选点-路径问题,整体优化配送中心和地铁出站点的选择及离开站点后的配送路径^[10],并考虑列车开行时间表、客户服务时间窗、城市配送车辆容量等限制条件,构建了带时间窗的地铁配送网络路径优化模型^[11];该设想既能充分利用地铁资源,又能大大降低 ULS 的建设成本,推动 ULS 的发展。但目前的研究主要集中在理论研究和可行性研究层面,针对基于地铁的地下物流配送模型研究较少,且现有模型假设无仓储功能,忽视了货物堆积点问题;因此,

收稿日期:2019-01-07

基金项目:国家自然科学基金(51808187);江苏省自然科学基金(BK20170879)

作者简介:杨婷(1996—),女,硕士研究生,研究方向为交通运输规划与管理。

通讯作者:郑长江(1966—),男,教授,博士,主要研究方向为交通运输与管理。

考虑货物堆积成本的地下物流配送路径优化研究还有待深入。

综上所述,目前国内外学者已经对地下物流系统的研究取得了不少成果。地下物流系统的理论体系已基本成型,但目前的研究仍存在以下几个不足:

1) 研究主要集中在理论层面,实际实施可行性较低。目前地下物流系统的研究方向主要在地下空间的新开发上,其建设成本高、建设难度大始终是制约地下物流发展的主要因素。

2) 目前国内外学者在基于地铁的地下物流方面研究主要停留在可行性研究和配送模式研究层面,分析验证地铁用于物流的可行性和效益,与地铁协同的地下物流配送路线优化研究还处在初步探索阶段,缺乏货物堆积成本与地铁和地面车辆转运时间成本方面的研究。

针对以上问题,本文提出了基于地铁的地下物流配送模式,并且考虑地下物流与地面物流的转运时间协同,为使载有货物的地铁和地面转运的车辆能基本同时到达,为每个转运点设定时间窗^[12],考虑货物堆积成本,引入货物在地面转运点堆积的时间成本惩罚函数,以总配送成本最低为目标函数进行路径优化研究。

1 基于地铁的 ULS 配送模式特征分析

地下物流系统是指利用地下空间进行物流配送,减少城市地面配送车辆数和使用频次。为了解决地下物流系统建设成本高、难度大的问题,本文采用利用地铁客货共线进行地下物流配送的模式。目前我国地铁具有高峰特性,由于夜间客运需求量低,多数地铁均在固定时间段内开放运营,而在夜间固定时段停止运营。在地铁不进行客运服务的时间段内,可将地铁作为货运工具,选取某一时段进行城市地下物流配送。

货物最终均需返回至地面之上,被派送至客户手中,因此地下物流还存在地下地上转运问题。本文所研究的地下物流主要是将长距离运输转至地下,降低城市物流配送车的行驶距离。根据地面物流派送点的分布,选取某些地铁站作为货物地上地下的转运点,每个转运点负责转运周边派送点所需货物。地铁在指定时间内抵达转运点,将货物卸于货物堆积点,利用时间调度,尽量使地面物流配送车也在该时间段内抵达,及时运走货物。若地铁和配送车未同时抵达转运点,则产生货物堆积成本或车辆等待成本,该成本均纳入总成本中考虑。本文提出的物流配送模式利用软时间窗限制将地上和地下物流协同,地上地下均给予相同的时间窗,若地铁和地面物流配送车均在该时间窗内抵达,则视作同时抵达转运点,否则根据相差的时间给予惩罚。

该配送模式利用地铁进行地下部分配送,在时间上与地面物流协同,其主要特点表现为以下几点:

1) 利用地铁进行配送,开发成本较低。该模式在地下配送部分完全以地铁为配送工具,采用客货共线形式,一方面不用开挖建设新的路线,节约了建设成本同时解决了地下隧道建设难度大的问题;另一方面,地铁作为配送工具,不用购置新的配送工具,节约了投资成本。

2) 充分考虑了货物转运和堆积问题,效率高而成本低。该配送模式将地铁站作为转运点,为了降低货物在站点的堆积时间,将地面与地下配送进行时间上的协同调配,确定一个服务时间窗,尽量使地上物流配送车和载货的地铁均在同一时间抵达转运点,货物到达后直接转运至地面配送车,减少货物堆积时间和成本及物流配送车的等待时间。将该时间约束以惩罚成本形式转化为成本,以总成本最小为目标函数进行优化。

2 基于地铁的带时间窗地下物流路径优化模型

2.1 模型假设

为将实际问题模型化,便于数学表达和求解,提出以下几个基本假设:

- 1) 仅考虑货物配送过程,不考虑车辆返程过程;
- 2) 仅有一个配送中心,且货物同时从配送中心发出;
- 3) 地铁最大货物容纳量已知,配送过程中货物重量不超过额定载重量;
- 4) 配送中心和地面转运点均为现有地铁站,且位置已知;
- 5) 每个地面转运点货物需求量已知;

- 6) 每个地面转运点必须且只能由一条线路服务;
- 7) 每个地面转运点都有指定的可接受服务时间,货物不在该时间区间内到达则将增加货物堆积成本。

2.2 模型建立

本文所研究的基于地铁的地下物流配送模型引入了软时间窗限制,即:若地铁在指定时间窗内到达则不收取额外费用,否则将收取额外费用。由此将该软时间窗限制转化为成本,建立惩罚成本函数。根据地上地下协同配送的特点,地铁到达时间可分为两种情况:

1) 地铁提前抵达转运点。在这种情况下,货物堆积在地铁站内,产生货物堆积成本,该成本与货物堆积量和堆积时间相关。若转运点 i 的指定时间窗为 $[T_{ei}, T_{li}]$,即地铁在 T_{ei} 时刻至 T_{li} 时刻这一时间段内抵达转运点 i ,则不收取额外费用。地铁到达时刻为 T_i ,转运点 i 的货物需求量为 q_i ,单位货物堆积成本系数为 α ,货物堆积成本时间系数为 β 。由此可得,地铁提前到达转运点时,所产生的惩罚成本 P 如式(1)所示

$$P = \alpha q_i \beta (T_{ei} - T_i) \tag{1}$$

2) 地铁延迟抵达转运点。在这种情况下,而地面物流配送车提前抵达转运点,将产生配送车停靠等待的成本,该成本仅与时间有关。车辆停靠时间系数为 θ 。由此可得,地铁延迟到达转运点时,所产生的惩罚成本 P 如式(2)所示

$$P = \theta (T_i - T_{li}) \tag{2}$$

结合上述两种情况,用 \max 函数来判断地铁抵达情况,可得惩罚成本函数

$$P = \alpha \beta q_i \times \max(T_{ei} - T_i, 0) + \theta \times \max(T_i - T_{li}, 0) \tag{3}$$

式中: P 为惩罚成本,元; α 为单位货物堆积成本系数, $\alpha=1.1$; β 为货物堆积成本时间系数, $\beta=0.1$; θ 为车辆停靠时间系数, $\theta=0.02$; q_i 为转运点 i 的货物需求量; T_{ei} 为转运点 i 可接受服务的最早时间; T_{li} 为转运点 i 可接受服务的最晚时间; T_i 地铁到达转运点 i 的时刻。

根据以上对模型的描述和设定的假设,现定义参量和变量如表 1 所示,其中由配送中心和各准运点排序组成的路线方案为决策变量。

表 1 参变量定义表
Tab.1 Parameter definition

变量	定义	变量	定义
k	各线路编号	K	线路总数
N	地面转运点总数	C_k	每条路径换乘一次所需成本(元)
C_g	启动成本(元)	c	单位距离运输成本(元/m)
d_{ij}	从 i 到 j 的路线长度(m)	V	地铁平均运行速度(km/h)
Q	地铁货物最大载重量(万件)	T_f	每个地铁换乘点转运货物所需时间(s)
f_{ij}	两个地面转运点间地铁换乘点数	T_0^k	线路的地铁出发时间
R_i, R_j	i 点, j 点的停留时间(s)		

引入: η_k, X_{ijk} ,其中

$$\eta_k = \begin{cases} 1, & \text{线路 } k \text{ 被选中} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{线路 } k \text{ 的地铁从 } i \text{ 到 } j \text{ 点} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

本文所建立的优化模型以总成本最小为目标函数,该总成本由开启线路的启动成本、货物运输成本、惩罚成本 3 部分组成。其中启动成本与所开启物流服务的地铁线路及每条路径转运次数成正比,货物运输成本与货物量和运输距离相关。

1) 启动成本

$$C_g = \sum_{k=0}^k \sum_{i=0, j \neq 1}^N \sum_{j=1}^N \eta_k C_k X_{ijk} f_{ij} \quad (4)$$

2) 货物运输成本

$$C = \sum_{k=0}^k \sum_{i=0, j \neq 1}^N \sum_{j=1}^N \eta_k c d_{ij} X_{ijk} \quad (5)$$

3) 惩罚成本

$$P = \alpha \beta q_i \times \max(T_{ei} - T_i, 0) + \theta \times \max(T_i - T_{li}, 0) \quad (6)$$

可得目标函数为

$$\min Z = \min(C_g + C + P)$$

$$= \min \left(\sum_{k=0}^K \sum_{i=1, j \neq 1}^N \sum_{j=1}^N \eta_k C_k X_{ijk} f_{ij} + \sum_{k=0}^K \sum_{i=1, j \neq 1}^N \sum_{j=1}^N \eta_k c d_{ij} X_{ijk} + \alpha \beta q_i \max(T_{ei} - T_i, 0) + \theta \max(T_i - T_{li}, 0) \right) \quad (7)$$

$$T_j = T_0^k + \sum_{k=0}^K \sum_{i=0}^N X_{ijk} (T_i + R_i + d_{ij}/V + T_f f_{ij}) \quad (8)$$

3 路径优化算法设计

针对本文提出的模型所解决的实际问题,将求解过程分为两大部分,即建立数据源和算法分析,如图1所示,具体实现步骤如下:

1) 分析地区地铁路线和物流派送点分布,绘制地铁路线图和物流派送点分布图,根据物流派送点的分布情况选择地铁站作为物流地面转运点。每个转运点负责转运周边派送点所需派送的货物,即针对地下物流系统而言,每个转运点的需求量等于其周边派送点的需求量之和。由此确定可选路线及地面转运点位置、需求量、地面转运点间地铁换乘站数量和时间窗作为初始数据。

2) 确定转运点分布后从地图读取各相邻转运点间的距离,不相邻转运点间距离取一个极大值 M 用来表示两个转运点不能直接相连,由此将配送路径限定为沿地铁路线配送。

3) 依次将各转运点进行编码,排列生成包含多条路线的序列作为初始解,计算目标函数,利用智能算法进行寻优,寻找到使目标函数最小的解。

由于遗传算法具有自适应、自组织和自学习性,覆盖面大,利于全局择优,易于实现并行化,能同时处理多个个体,具有良好的非线性问题处理能力^[13];因此本文选择遗传算法来求解最优路径。

用遗传算法求解模型的基本步骤如下:

第1步:将 N 个物流点分别标记为 1 到 N ,由 1 到 N 的 N 个不重复的数字组成一组数列作为种群的一个个体,随机生成多个个体后形成种群。例如个体 136524 表示路径:配送点 1—转运点 3—转运点 6—转运点 5—转运点 2—转运点 4。

第2步:根据目标函数计算种群中每个个体适应度。

第3步:将种群中的个体按照适应度大小进行排序,用轮盘赌法筛选出较优个体。

第4步:选择出的较优个体依次按照一定概率确定交叉个体,交叉时随机选出染色体中一个区段,交叉到目标染色体首个基因前,再删去该染色体原基因中与新加基因段重复的基因,形成一个新的基因数不变的染色体。

第5步:选中变异个体后,以一定概率选择变异段,将变异段中所有基因倒序排列进行交叉变异生成新个体。形成新种群后转到步骤 2。

4 以南京市为例进行地下物流配送路径优化

本文以南京市为例,建立基于地铁的地下物流系统。由邮政行业报告可知,南京市 2017 年度累计完成

快递业务量 63 415.67 万件,其中同城快递量 25 043.80 万件,由于本文提出的配送模式仅考虑南京市内配送阶段,因此可将同城快递量视为各转运点需求量之和,即各转运点每日需求量之和为 68.6 万件。

假设所有物流派送点所配送的货物均来自南京南站,货物从南京南站发出后由地铁运送到最近的地面转运点,再由物流配送车进行运送。确定配送中心和地面转运点,绘制得到地铁线路和物流分布图如图 1 所示。各转运点的需求量如表 2 所示。

各转运点时间窗限制假设如表 3 所示。假设 0 s 时,货物从配送点开始配送,时间窗以秒表示,每个转运点可接受的时间窗长度为 120 s,数值表示从配送点出发后配送所消耗的时长。

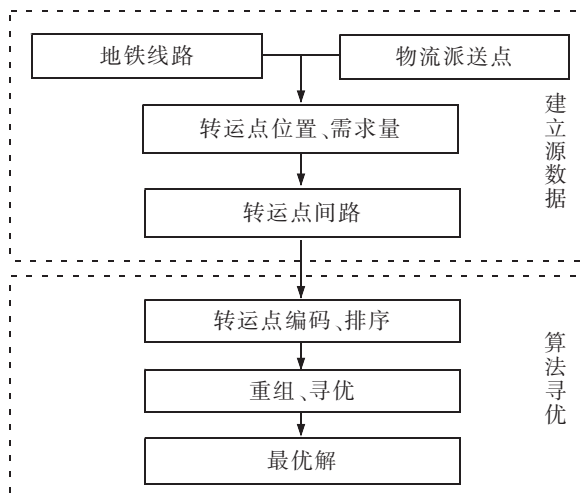


图 1 模型求解流程图
Fig.1 Model solving flow chart

表 2 各转运点需求量
Tab.2 Demand for each transfer point

转运点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
需求量 q_i /万件	0	1.9	3.6	2.9	3.2	1.8	5.0	2.5	3.2	2.2	2.5	1.8
转运点编号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
需求量 q_i /万件	3.6	2.9	4.3	4.7	2.2	2.9	3.6	1.1	5.4	3.2	3.6	1.1

表 3 各转运点时间窗
Tab.3 Transfer point time window

时间窗	1	2	3	4	5	6	7	8
T_e	0	450	1 200	950	1 700	950	2 100	3 100
T_1	0	570	1 320	1 070	1 820	1 070	2 220	3 220
时间窗	9	10	11	12	13	14	15	16
T_e	1 500	900	800	1 000	1 600	3 100	2 500	1 800
T_1	1 620	1 020	920	1 120	1 720	3 220	2 620	1 920
时间窗	17	18	19	20	21	22	23	24
T_e	1 200	2 500	3 500	2 500	3 600	4 600	5 100	6 100
T_1	1 320	2 620	3 620	2 620	3 720	4 720	5 220	6 220

为使模型能够求解,本文对模型的参数进行了合理的假设,如表4所示。

选取路线数为7进行求解,迭代过程如图3所示。蓝色线条表示种群均值变化,种群均值上下波动较大,但总体在一个较高水平上。红色线条表示最优解目标值的变化,初代种群的最优解为 2.1×10^{12} ,经过近百次的迭代后最优解目标值降到最低,并持续保持不变,最终得到最优解的目标值为 2.8149×10^6 ,即一天所有同城快递由地铁运输的成本为281.49万元。迭代结果如表5所示。

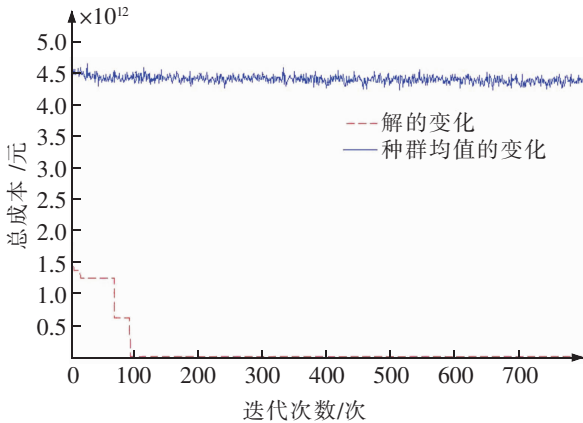


图3 迭代过程图

Fig.3 Iterative process diagram

改变线路数量,多次优化得到最小总成本变化如图4所示结果。由图可知,选取线路数量不同时,总成本最小值也不同。当线路数为8条时,总成本最低,仅为240万元。当线路数小于8时,线路越少成本越高。当线路数大于8且逐渐增加时,成本也逐渐上升。由此可得最优的配送方案为选取8条路线,各路线抵达转运点顺序如表6所示。

表5 遗传算法求解结果(7条线路)

Tab.5 Genetic algorithm solution results(7 lines)

路线编号	抵达转运点顺序
1	1-2-3
2	1-11-13-21-14
3	1-16-15-12-10-17-20
4	1-22-23-24-18-19
5	1-4-5
6	1-6-7-8
7	1-9

表4 模型参数值

Tab.4 Model parameter value

参数	取值
地铁最大载运量 Q /万件	20
地铁平均运输速度 V / (km/h)	60
单位距离运输成本 C / (元/m)	0.005
每条路径换乘一次所需成本 C_k / (元/次)	1 000
每个转运点货物转运所需时间 T_f /s	180
单位货物堆积成本系数 α	1.1
货物堆积成本时间系数 β	0.1
地面物流配送车停靠时间系数 θ	0.002
转运点停留时间/s	90

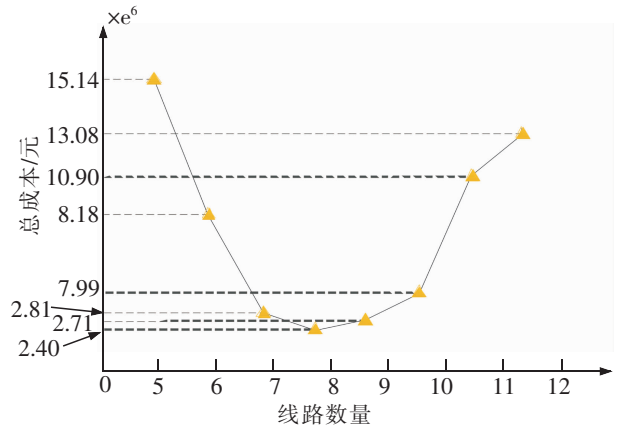


图4 不同线路数总成本变化图

Fig.4 Total cost change for different lines

表6 遗传算法求解结果(8条线路)

Tab.6 Genetic algorithm solution results(8 lines)

路线编号	抵达转运点顺序
1	1-12-18-19
2	1-10-13-14-21-22-23
3	1-2-3
4	1-15-16-11-17-20
5	1-9
6	1-4-5
7	1-6-7-8
8	1-24

5 总结

本文通过分析目前国内外学者对物流配送、地下物流系统等方面的研究,提出了基于地铁线路的地下物流配送模式和地下物流与地面物流的协同方式,并且建立基于地铁的带时间窗的地下物流配送路径优化模型。此优化模型一方面加入时间窗限制,从时间上将地下物流与地面物流协同,有效减少货物从地下转运至地面过程中时间和空间的浪费。另一方面,该模型的目的在于求解最优路径方案,在研究地铁用于物流配送的理论基础上求得最优配送路径方案。

地下物流系统的发展可有效缓解物流车带来的地面交通拥堵,并提高物流配送的准点率和服务水平。因此地下物流系统的研究已成为物流业发展的方向。并且由于地下物流开发的高成本、高难度限制,利用地铁发展地下物流也是地下物流系统发展的一个重点方向。

但由于目前尚未有利用地铁进行物流配送的实例,相关资料缺乏,本文在模型参数取值上没有进行深入研究,参数取值参考了地面物流配送有关数据及地铁客运相关信息,其科学性和准确性有待考证。未来可对现有的数据资料,进一步进行分析论证,提出一些预测和模拟方法,得出更符合实际情况的参数取值。

参考文献:

- [1] 李珍萍,卜晓奇. 地下物流网络规划问题研究[J]. 数学的实践与认识,2018,48(16):207-214.
- [2] 李昊,张恒旭,李璐璐,等. 城市地下物流系统网络构建研究与分析[J]. 数学的实践与认识,2018,48(15):313-323.
- [3] 杨文浩. 城市交通问题与城市地下物流系统[J]. 物流工程与管理,2009,31(5):14-16.
- [4] 郑长江,戴冉,郑树青,等. 基于 Voronoi 图的物流节点选址研究[J]. 华东交通大学学报,2018,35(5):44-51.
- [5] 穆树录. 城市地下物流系统线路规划研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2015.
- [6] 周婷,周爱莲. 基于时间成本的地下物流配送路线优化模型[J]. 物流工程与管理,2016,38(8):60-62.
- [7] LIU Y, HE K, LIU J, et al. Analysis of the concept of urban rail transit based city logistics system[C]//2008 International Conference on Smart Manufacturing Application (ICSMA 2008),2008:288-292.
- [8] HE K, SHAO J, LIU Y, et al. Conceptual design of rail transit based urban logistics delivery system[C]//IEEE International Conference on Industrial Informatics, IEEE,2008:221-226.
- [9] JOSE HV, WANG C, BROWNE M, et al. The New York City off-hour delivery project: lessons for city logistics[J]. Procedia Social and Behavioral Sciences,2014,125(6):36-48.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 黄务兰,张涛. 基于改进遗传算法的带时间窗车辆路径问题研究[J]. 微型机与应用,2016,35(13):21-24.
- [13] 赵辰. 基于遗传算法的车辆路径优化问题研究[D]. 天津:天津大学,2012.

Research on Optimization of Underground Logistics Path with Time Window Based on Subway

Yang Ting¹, Zheng Changjiang¹, Ma Genghua²

(1. College of Civil Engineering and Transportation Engineering, HoHai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, HoHai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: At present, China's rapid development of e-commerce has led to an increase in urban logistics distribution, which has aggravated urban traffic congestion. Correspondingly, urban traffic congestion also seriously affects the punctuality rate and service level of logistics and distribution. In order to alleviate the traffic congestion caused by logistics, this paper transfers the ground logistics to the underground, proposes the underground logistics distribution mode based on the subway, analyzes the transfer time coordination between the underground logistics and the ground logistics, and introduces the time cost penalty function of the accumulation of goods at the ground transshipment point. Based on the lowest total cost as the objective function, an optimization model based on the subway with time window underground logistics path is established. The genetic algorithm is used to optimize the path and the algorithm is implemented in MATLAB. Finally, by taking Nanjing as an example, the model is used to obtain the optimal path and the optimal cost scheduling scheme.

Key words: underground logistics system; subway; time window; cooperation; genetic algorithm