

## 城市地下物流系统线路多编组车辆方案研究\*

侯夏杰, 周爱莲

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 对城市地下物流系统线路多编组问题的背景进行描述, 分析并建立多编组车辆开行方案模型, 运用带有精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)对车辆开行方案进行求解。结果表明, 相比于单一的编组开行方案, 在地下物流系统中使用多编组车辆开行方案可提高发车频率、节省货物等待时间、降低运营成本, 也有利于运输能力在各时段的均衡分配。

**关键词:** 物流; 地下物流; 编组方案; 多编组列车开行方案; 非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)

**中图分类号:** U492.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2019)06-0052-03

随着城市化的快速发展, 城市地面上的车辆交通愈加拥堵, 间接地带来大气、噪声污染和路面道路资源不足等问题, 利用地下空间建立货物运输系统成为城市未来货运发展趋势。地下物流系统采用类似于地铁列车的一节一节的车辆运输货物, 相较于单一化编组车辆开行方案, 多编组车辆开行方案根据货物流量进行编组发车, 可高效利用地下物流系统的运输能力, 提高满载率和服务能力。当前对地下物流的研究多集中在地下物流可行性、物流节点、网络研究等方面, 对线路多编组问题的研究较少。为此, 该文对地下物流车辆编组问题进行研究, 建立地下物流多编组车辆开行方案多目标优化模型。

## 1 模型介绍

### 1.1 问题描述

地下物流系统中的某一线路共有  $N$  个地下物流车站, 采用单一交路的运营模式。当追踪间隔为定值、车底独立运用时, 大小编组的发车频率不影响线路的通过能力。

模型假设: 1) 地下物流运输系统线路沿线的 OD 货流已知, 且在一定时段内保持稳定; 2) 客户事先将货物运送到地下物流系统各站点, 服从站点等待与安排; 3) 所有地下物流运输车辆编组都采用站站停的运营模式, 不跨站停车; 4) 每节运输车辆都可与其他车辆重联, 且不考虑重联费用; 5) 大小编组在行驶时旅行速度相同。

### 1.2 模型的建立

地下物流企业运营成本主要由车辆线路开行成

本和人力成本构成。考虑到采用费用表示列车的运行成本可能会因为经验参数取值对结果产生影响, 且列车编组上线车辆数不同、发车频率不同, 车辆的总开行公里数不同, 采用车辆开行公里数表示运行成本。人力成本用上线车组数表示, 上线车组数越多, 所需工作人员越多, 系统控制精度越大, 成本越高。因此, 地下物流企业运营成本最小化目标为:

$$\min Z_1 = S = \sum_{k=1}^2 b_k \cdot f_k \cdot 2L \quad (1)$$

$$\min Z_2 = N_V = \sum_{k=1}^2 T_{\text{周}} \cdot f_k / 60 \quad (2)$$

式中:  $Z_1$ 、 $Z_2$  为目标函数;  $S$  为车辆走行公里数;  $k$  为编组车辆标识, 其值为 1、2, 分别表示大小编组;  $b_k$  为编组类型为  $k$  的列车的编组数量;  $L$  为运营线路全长, 即车站 1 至车站  $N$  的运营距离;  $N$  为车站数量;  $N_V$  为上线车组数;  $V$  为地下物流车站集合;  $T_{\text{周}}$  为列车周转时间。

模型约束条件: 编组车辆数约束见式(3); 发车频率约束见式(4); 可用车底数约束见式(5); 在多编组情况下, 大小编组分担的货流量大小比例看作发车频率之比, 满载率约束见式(6); 决策变量整数约束见式(7)。

$$1 \leq b_k \leq M, b_k \in N_+, k=1, 2 \quad (3)$$

$$f_{\min} \leq f_1 + f_2 \leq f_{\max} \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^2 f_k \cdot b_k \cdot T_{\text{周}} / 60 \leq f_0 \quad (5)$$

$$q / \left( \sum_{k=1}^2 f_k \cdot b_k \cdot C \right) \leq \eta_{\max} \quad (6)$$

$$f_k \in Z^+; b_k \in Z^+ \quad (7)$$

\* 基金项目: 长沙理工大学科学基金项目(2019QJCZ004)

式中: $M$  为地下物流系统最大编组辆数; $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$  分别为最小、最大发车频率; $f_0$  为可用车底数; $C$  为每辆车的载货量; $q$  为地下物流系统某线路断面小时货运量; $\eta_{\max}$  为大小编组列车满载率的最大值。

1.3 模型求解

地下物流系统多编组车辆开行方案优化模型采用发车频率、大小编组满载率、列车编组车辆数和列车可用车底数等进行约束,采用在精英策略下的非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解。

2 算例分析

以拟建 A 市的地下物流的一级节点为例,以该

市往年货运总量为依据预测未来年该市市域货运总量。根据 2001—2017 年该市人口数量  $X_1$ 、地区总值  $X_2$ 、工业总值  $X_3$ 、社会消费品零售总额  $X_4$  与市域货运总量的相关数据,结合目前经济发展形势、国家宏观调控战略及相关经济指标的变化情况,预测各指标的增长分别为 1.5%、13%、15%、17%,结合线性方程预测,得:

$$y = -39\,465.87 + 7.5 \times 10^{-3} X_1 + 3.02 \times 10^{-4} X_2 - 1.5 \times 10^{-4} X_3 + 3.2 \times 10^{-5} X_4 \tag{8}$$

表 1 为由式(8)预测得到的该市 2018—2022 年市域货运总量。

表 1 2018—2022 年 A 市市域货运总量预测结果

年份	人口/人	地区总值/万元	工业总值/万元	社会消费品零售总额/万元	市域货运量/万 t
2018	7 194 258	115 374 476	44 200 745	53 207 799	44 630
2019	7 305 171	130 373 158	50 830 857	62 253 125	49 793
2020	7 411 704	147 321 669	58 455 486	72 836 157	54 917
2021	7 522 886	166 473 486	67 223 809	85 218 303	60 626
2022	7 635 723	188 115 039	77 307 380	99 705 415	66 971

由表 1 可知:2022 年,该市市域货运总量为 66 971 万 t。根据国内相关城市的研究成果,市域货运量的 50%~80% 进入城市内部。使用下式对城市地下物流系统货运量进行分配,求得地下物流系统某线路平均小时断面货运量  $q_i$  为:

$$q_i = \frac{Q \times \alpha \times \beta \times \gamma_i}{365 \times 16 \times (N - 1)} \tag{9}$$

式中: $Q$  为市域货运总量; $\alpha$  为进入市域内部的货运量比例; $\beta$  为市域货运量选择使用地下物流运输的比例; $\gamma_i$  为第  $i$  条线路的运输量与使用地下物流系统运输总量的比例; $N-1$  为市域地下物流系统的断面数量。

设该地下物流系统线路长度为 49.81 km,共设 20 个车站,平均间距为 2.490 5 km。地下物流车辆编组的运行速度为 100 km/h,该线路的发车频率为 6~30 对/h,线路车辆编组最大车辆数  $M$  不大于 8 节/列,线路编组车辆的周转时间为 90 min,最小追踪间隔为 2 min,每个运营时段为 1 h,大小编组数量分别为 6、4 辆,对应的载重分别为 15、9 t/列。由式(2)得平均小时断面货运量为 227 t/h。设可用车底数为 180 辆,高峰小时为 240 t/h,用上文模型和算法进行求解,结果见表 2。

表 2 车辆多编组开行方案模型计算结果

大编组/ (对· h <sup>-1</sup> )	小编组/ (对· h <sup>-1</sup> )	车辆开行 公里数/ 车公里	车组 数/列	车辆 数/辆	平均发 车间隔/ min
1	25	10 556.72	33	159	2.30
2	24	10 758.96	39	162	2.30
3	21	10 161.24	36	153	2.50
4	20	10 360.48	36	156	2.50
5	18	10 161.24	35	153	2.60
6	17	10 360.48	35	156	2.60
7	15	10 161.24	33	153	2.72
8	14	10 360.48	33	156	2.72
9	12	10 161.24	32	153	2.85
10	10	9 962.00	30	150	3.00
11	9	10 161.24	30	153	3.00
12	7	9 962.00	29	150	3.15
13	5	9 762.76	27	147	3.33
14	4	9 962.00	27	150	3.33
15	1	9 364.28	24	141	3.75
16	1	9 962.00	26	150	3.52
17	1	10 559.72	27	159	3.33

根据高峰断面客流法确定单一编组方案为 6 节编组,发车频率为 16 对/h(见表 3)。对单一编组开行方案和多编组开行方案下各目标值的变化率进行

对比,分析不同开行方案的运营效果,结果见表4。

表3 单一编组开行方案的参数

项目	参数值
编组方案	6节编组
发车间隔/min	3.75
发车频率(对·h <sup>-1</sup> )	16
车辆开行公里数/车公里	9 563.52
车组数/列	24
车辆数/辆	144

表4 单一组编与多编组开行方案运营效果对比

大编组/ (对·h <sup>-1</sup> )	小编组/ (对·h <sup>-1</sup> )	车辆开行 公里数 变化率/%	车组数 变化率/%	车辆数 变化率/%	平均发车 间隔变 化率/%
16	0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	25	10.37	3.75	10.41	-38.67
2	24	12.50	62.50	12.50	-38.67
3	21	6.25	50.00	6.25	-33.33
4	20	8.33	50.00	8.33	-33.33
5	18	6.25	45.83	6.25	-30.67
6	17	8.33	45.83	8.33	-30.67
7	15	6.25	37.50	6.25	-27.46
8	14	8.53	37.50	8.33	-27.46
9	12	6.25	33.33	6.25	-24.00
10	10	4.15	25.00	4.16	-20.00
11	9	6.25	25.00	6.25	-20.00
12	7	4.16	20.83	4.16	-16.00
13	5	2.08	12.50	6.25	-11.20
14	4	4.16	12.50	4.16	-11.20
15	1	-2.08	0.00	-2.08	0.00
16	1	4.16	8.33	4.16	-6.13
17	1	10.37	12.50	10.41	-11.20

由表4可知:1) 车辆开行公里数。地下物流多编组方案下的车辆开行公里数相较于单一编组方案下车辆开行公里数的变化率为-2.08%~12.50%。地下物流车辆6节编组的开行频率为15对/h、4节编组的开行频率为1对/h时,车辆的开行公里数最小,为9 364.28车公里,比单一编组方案下车辆开行公里数减少2.08%。车辆6节编组的开行频率为2对/h、4节编组的开行频率为24对/h时,车辆的开行公里数最大,为10 758.96车公里,比单一编组方案下车辆开行公里数增加12.5%。大小编组比为3:21、5:18、7:15、9:12、11:9的车辆开行公里数都为10 161.24车公里,4:20、6:17、8:14的车辆开行公里数为10 360.48车公里。2) 上线车组数

及车辆数。随着大小编组车辆总开行频率和的增大,上线车组数和车辆数增加。地下物流车辆6节编组开行频率为15对/h、4节编组开行频率为1对/h时,与单一编组方案相比,车辆的上车组数的变化率为零,车辆数的变化率为-2.08%。上线车辆数为153辆时,编组大小比分别为3:21、5:18、7:15、9:12、11:9。3) 平均发车间隔。随着大小编组频率之和的逐渐减小,车辆发车间隔减小。地下物流车辆6节编组开行频率为15对/h、4节编组开行频率为1对/h时,与单一6节编组方案相比,车辆走行公里数变化率和上线车辆数变化率为-2.08%、平均发车间隔变化率为零。

### 3 结论

(1) 调度不同的大小编组方案的发车频率能降低车辆的走行公里数。

(2) 不同方案中的车辆走行公里数相同,可安排不同的上线车组数。

(3) 相对于单一编组方案,多编组方案能降低车辆走行公里数和上线车组数。多编组方案更适应于货物到达时间上的任意性,可降低货物等待时间、减少损失的时间价值。

### 参考文献:

- [1] 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(4).
- [2] 石晓冬.北京城市地下空间开发利用的历程与未来[J].地下空间与工程学报,2006,2(增刊1).
- [3] 黄欧龙,郭东军,陈志龙.运用SLP方法布置地下物流系统配送中心[J].地下空间与工程学报,2006,2(1).
- [4] 周安邦,周爱莲.城市地下物流节点的选址[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2017,14(3).
- [5] 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).
- [6] 曾令慧,周爱莲.基于遗传算法的城市地下物流网络优化模型[J].交通科学与工程,2016,32(2).
- [7] 何煦,周爱莲.基于灰色模糊的城市地下物流系统建设适应性评价[J].公路与汽运,2017(6).
- [8] 李玉莹,郎茂祥.铁路小件货物快运产品开行方案研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2012,36(4).

收稿日期:2019-07-25