

# 利用地铁进行城市物流配送的路径选择模型

刘晓佳<sup>1,2</sup>, 何利军<sup>1,2</sup>, 施金斌<sup>1,2</sup>, 邢蒙<sup>1</sup>

(1. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学海上交通安全研究所, 福建 厦门 361021)

[摘要] 设计了一种基于地铁的城市物流配送网络, 以配送时间及配送费用为目标, 以货车及地铁的载重限制、货物运输流向及相关变量限制为约束, 构建双目标配送路径选择模型, 通过改进遗传算法对模型进行求解, 得出货物调度时间及费用成本。以厦门市的数值为例进行分析, 结果表明, 当决策者选择偏好为(0.1, 0.9)时, 配送总运输时间为11.3 h, 配送总运输费用为20 206.65元。当物流中心与终端站点距离较近时, 采用地铁运输会增加配送节点, 导致运输成本增加。表明地铁参与运输对中长距离的货物配送更有利。

[关键词] 物流配送模式; 路径选择; 地铁; 改进遗传算法

[中图分类号] U 121

## Route Selection Model of Urban Logistics Distribution Using Subway

LIU Xiaojia<sup>1,2</sup>, HE Lijun<sup>1,2</sup>, SHI Jinbin<sup>1,2</sup>, XING Meng<sup>1</sup>

(1. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Institute of Maritime Traffic Safety, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In this study, an urban logistics distribution network is designed based on the subway. With the distribution time and cost as the target, and the truck and subway load restrictions, freight transport directions and related variable restrictions as the constraints, a dual-objective distribution path selection model is constructed. The model is solved by improving the genetic algorithm to obtain the goods scheduling time and cost. The numerical analysis taking Xiamen City as an example shows that when the decision-maker's preference is (0.1, 0.9), the total delivery time is 11.3 h and the total delivery cost is 20,206.65 yuan. When the logistics center is close to the terminal station, the use of subway transportation will increase the distribution nodes, resulting in increased transport costs. It shows that the involvement of metro is more favorable for medium and long distance goods distribution.

**Keywords:** logistics distribution mode; path choice; subway; improved genetic algorithm

## 0 引言

随着电子商务行业的快速发展, 城市物流配送量与日俱增。为了满足配送的时效性, 越来越多的配送车辆投入使用, 导致城市汽车尾气排放量增大, 不符合绿色物流的发展理念。此外, 物流配送车

[收稿日期] 2022-09-01

[基金项目] 福建省教育厅项目“基于HEACS-MPA模型的船舶引航员人因可靠性研究”(JAT210248); 福建省自然科学基金项目“基于数据驱动的自动化码头设备冲突辨识与多资源协同调度优化研究”(2021J01820)

[作者简介] 刘晓佳(1979—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为交通运输规划与管理、交通安全保障与技术。  
E-mail: happylxj1314@163.com

辆数目的增多加剧了道路拥挤,增加了城市交通压力。与此同时,城市道路拥挤现象反过来会限制物流车辆的运行,从而导致物流末端配送延误风险增加,配送成本提高,降低了城市物流配送综合服务水平。地铁作为多数中大型城市公共交通运输中的主要交通工具,具有网络覆盖面广、单次可运输量大、运营能源消耗低、运输效率高等特点。此外,对城市地铁客流量进行分析可发现,地铁客流量分布存在明显的高峰及平峰,且高峰时间较为固定,平峰时间段内地铁存在显著的富余运能,如果将这些富余运能进行充分利用,既能解决城市物流配送服务中存在的时效性低等弊端,还可以有效减少城市污染,提高公共资源的利用率。

目前,部分学者开始研究如何将公共交通工具融入物流配送之中。对于地铁参与城市物流配送的可行性,陈一村等<sup>[1]</sup>提出了协同运输的3种可行方式,为未来城市地铁和地下物流的规划建设提供了理论支撑。陈梓毓<sup>[2]</sup>从技术层面和流通要素角度对地铁开展配送的可行性做了进一步探讨。李昊等<sup>[3]</sup>以南京市为研究对象,提出了一种地下物流网络在仙林区的构建方法,并建立路线决策模型。Egbunike<sup>[4]</sup>研究分析并评估了地下物流系统探索项目,通过访谈等形式对其实施效果进行了评估。

目前地铁参与城市物流配送多为研究配送网络。如:李润国<sup>[5]</sup>设计了不同配送模式下货物在城市轨道交通网络中的运输方式,并给出了物流网络中节点的选取方法;马成林等<sup>[6]</sup>提出一种城市地下物流系统发展模式,指出地下物流系统的建设受到不同发展模式的影响;李珍萍等<sup>[7]</sup>设计了一种两阶段贪婪算法求解地下物流网络目标规划问题,得到了符合预期的城市地下网络模型;詹佳妮<sup>[8]</sup>从地下物流网络构建时的设施选址、车辆路径问题及地下物流网络自身的特点出发,使用斯坦纳最小树构建网络优化模型,为后续城市地下物流建设提供依据;Holgu'N-Veras 等<sup>[9-10]</sup>关注了美国的非高峰时段配送(off-hour delivery, OHD),分析了配备人员的 OHD 和独立的 OHD 两种模式的经济影响,并总结了纽约 OHD 的经验教训。

这些文献只是针对参与的配送路段进行研究,缺少详细严谨的“货车+地铁”混合货物配送路径选择模型和具有说服力的实例验证。本文在现有城市物流配送系统的基础上,设计了利用地铁的城市物流配送网络,并考虑地铁前后与货车衔接的问题。

# 1 问题描述与建模

## 1.1 问题描述

设有  $m$  个物流中心,  $n$  个地铁站台(即转运中心),  $s$  个终端需求站点。货物从城市物流中心  $A$  出发,经过转运中心转运,送往离终端站点  $D$  最近的转运中心  $B$ 、 $C$ ,并最终送到客户手中(见图 1)。

将利用地铁进行的城市物流配送模式定义为:满足城市地铁运输条件的货物,根据不同目的地,选择合适的配送方式,将货物通过地铁参与的形式送达终端站点。图 2 至图 4 为三种配送方式,对于可用地铁进行运输的货物而言,应当明确其目的地,根据货物的终端站点选择合适的配送方式。

第一种配送方式如图 2 所示,即货物直接由物流中心送往终端站点。这部分货物的终端站点在物流中心附近,若用地铁进行转运,会造成不必要的资源浪费,增加运输成本,因此

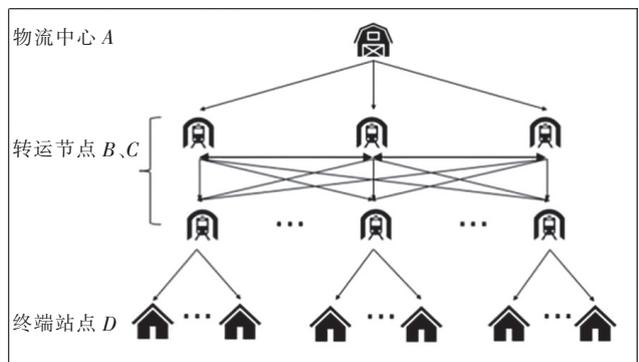


图 1 地铁参与下的配送网络图

Fig.1 Distribution network diagram with Metro participation



图 2 第一种配送方式

Fig.2 The first delivery method

可采用公路运输的方式由物流中心直接发往终端站点。

第二种配送方式如图 3 所示, 这部分货物的终端站点距离物流中心相对较远, 货物由物流中心发出, 地铁参与转运, 最终到达终端站点, 其中地铁转运时不换乘。



图 3 第二种配送方式  
Fig.3 The second delivery method

第三种配送方式如图 4 所示, 货物仍然由物流中心发出, 地铁参与转运送达, 最终到达终端站点, 但该模式中地铁转运时会进行换乘。

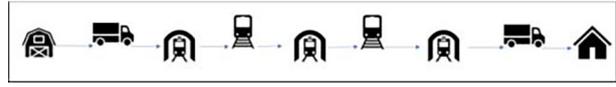


图 4 第三种配送方式  
Fig.4 The third distribution method

考虑实际情况中换乘需要装卸以及搬运, 会浪费大量时间及费用, 因此规定最多允许换乘一次。这一部分货物从物流中心出发, 先通过城市道路运输将货物送达起始转运中心, 然后经过地铁线路运输到达换乘转运中心进行换乘, 再经过另一条地铁线路运输到达末端转运中心, 最后将货物从末端转运中心通过城市道路运输送达终端站点。

针对货物的调度选择出最佳的调度路径, 目标函数考虑运输时间成本以及费用成本, 在满足约束的条件下, 求解能够使目标达到最优的调度路径选择方案。

### 1.2 条件假设

由于现实情况过于复杂, 为了能够用数学模型进行解释, 针对上述问题, 提出如下假设:

- 1) 只考虑适合地铁运输的货物, 且货物分批次运输;
- 2) 货物在物流中心已根据货物种类及最终目的地做好分类, 并打包成适合地铁进行运输的包裹;
- 3) 本模型仅为货物调度路径选择问题, 不考虑节点选址问题;
- 4) 物流中心及终端网点的数量和位置信息已知且固定;
- 5) 终端网点的需求量已知且稳定;
- 6) 只考虑货物流动状态所消耗的时间, 不考虑货物在站台等车时间;
- 7) 货物在地铁之间换乘只可在特定站台换乘且最多换乘一次;
- 8) 不考虑与地铁运输无关的费用。

### 1.3 模型建立

对于物流公司来说, 城市物流配送要求在配送时间尽可能短的情况下选择配送成本尽可能低的配送路径。因此, 本文以配送总运输时间和总运输费用最小为目标函数, 以节点间运输货物量限制及运输通道方向限制为约束, 构建双目标配送路径选择模型。

本文的节点集合  $V = V_M \cup V_N \cup V_S$ 。其中:  $V_M$  表示物流中心集合,  $V_M = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ ;  $V_N$  表示地铁站台集合,  $V_N = \{m + 1, m + 2, m + 3, \dots, m + n\}$ ;  $V_S$  表示终端站点集合,  $V_S = \{m + n + 1, m + n + 2, m + n + 3, \dots, m + n + s\}$ 。当  $i, j, k \in V_M$  时,  $V$  表示物流中心; 当  $i, j, k \in V_N$  时,  $V$  表示地铁站台; 当  $i, j, k \in V_S$  时,  $V$  表示终端网点。

#### 1.3.1 运输时间 $T$

- 1)  $T_1$  表示物流中心到起始转运中心的时间, 在第二种及第三种配送模式中存在;
- 2)  $T_2$  表示不同功能转运中心之间转运的时间, 在第二种及第三种配送模式中存在, 是从起始转运中心到末端转运中心的运输时间;
- 3)  $T_3$  表示末端转运中心到终端网点的时间, 在第二种及第三种配送模式中存在;
- 4)  $T_4$  表示物流中心到终端网点的时间, 只在第一种配送模式中存在;
- 5)  $T_5$  表示货车与地铁之间换乘的搬运时间, 在第二种及第三种配送模式中存在;
- 6)  $T_6$  表示地铁之间换乘的搬运时间, 只在第三种配送模式中存在;
- 7)  $T_7$  表示货物装卸时间包括物流中心货车装货时间、起始转运中心货车卸货时间、起始转运中心地铁装货时间、换乘转运中心地铁卸货时间、换乘转运中心地铁装货时间、末端转运中心地铁卸货

时间、末端转运中心货车装货时间和终端站点货车卸货时间。

各项运输时间的计算式为:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \sum_{i \in V_M} \sum_{j \in V_M} t_{ij} \cdot H_{ij} \cdot x_{ij} \cdot z_j; \\
 T_2 &= \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_N} t_{ij} \cdot x_{ij} \cdot H_{ij} \cdot z_i \cdot z_j - \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_N} \sum_{k \in V_N} t_k^{ic} \cdot x_{ij} \cdot H_{ij} \cdot y_{ikj} \cdot z_i \cdot z_j; \\
 T_3 &= \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_S} t_{ij} \cdot H_{ij} \cdot x_{ij} \cdot z_i; \quad T_4 = \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_S} t_{ij} \cdot H_{ij} \cdot x_{ij}; \\
 T_5 &= \sum_{i \in V_M} \sum_{j \in V_N} x_{ij} \cdot H_{ij} \cdot t_j^{go} \cdot z_j \cdot \delta; \quad T_6 = \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_N} \sum_{k \in V_N} x_{ij} \cdot H_{ij} \cdot y_{ikj} \cdot z_i \cdot z_j \cdot t_k^{ic} \cdot \delta; \\
 T_7 &= 2 \cdot \sum_{i \in V_M} \sum_{j \in V_S} x_{ij} \cdot w_{ij} \cdot H_{ij} \cdot v_3 + 2 \cdot \sum_{i \in V_M} \sum_{j \in V_N} x_{ij} \cdot w_{ij} \cdot H_{ij} \cdot z_j \cdot v_3 + \\
 & 2 \cdot \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_N} x_{ij} \cdot w_{ij} \cdot H_{ij} \cdot z_i \cdot z_j \cdot v_4 + 2 \cdot \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_N} \sum_{k \in V_N} x_{ij} \cdot H_{ij} \cdot y_{ikj} \cdot w_{ij} \cdot z_i \cdot \\
 & z_j \cdot v_4 + 2 \cdot \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_S} x_{ij} \cdot H_{ij} \cdot w_{ij} \cdot z_i \cdot v_3。
 \end{aligned}$$

其中:  $t_{ij}$  为从节点  $i$  到节点  $j$  的时间 (单位: s);  $H_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的运输次数 (单位: 次);  $x_{ij}$  为 0/1 变量,  $x_{ij}=0$  表示货物不是从节点  $i$  到节点  $j$ ,  $x_{ij}=1$  表示货物是从节点  $i$  到节点  $j$ ;  $z_j$ ,  $j \in V_N$ , 为 0/1 变量,  $z_j=0$  表示站点  $j$  不是转运中心,  $z_j=1$  表示站点  $j$  是转运中心;  $t_k^{ic}$  为乘客在地铁站台  $k$  内部换乘步行所需的时间 (单位: s);  $y_{ikj}$  为 0/1 变量,  $y_{ikj}=0$  表示货物是从节点  $i$  到节点  $j$  不经过节点  $k$ ,  $y_{ikj}=1$  表示货物从节点  $i$  到节点  $j$  经过节点  $k$ ;  $t_j^{go}$  为乘客从进入地铁站  $j$  的入口到到达候车站台的时间 (单位: s);  $\delta$  为乘客携带重物步行时间与不携带重物步行时间的比例系数;  $w_{ij}$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的货物运输总量 (单位: t);  $v_3$  为货车装卸的平均速率 (单位: t/s);  $v_4$  为地铁装卸的平均速率 (单位: t/s)。

### 1.3.2 费用成本 $W$

- 1)  $W_1$  表示物流中心到转运中心的运输成本, 在第二种及第三种配送模式中存在;
- 2)  $W_2$  表示不同功能转运中心之间转运的运输成本, 在第二、三种配送模式中存在;
- 3)  $W_3$  表示转运中心到终端网点的运输成本, 在第二种及第三种配送模式中存在;
- 4)  $W_4$  表示物流中心到终端网点的运输成本, 只在第一种配送模式中存在;
- 5)  $W_5$  表示货车与地铁之间换乘的搬运成本, 在第二种及第三种配送模式中存在;
- 6)  $W_6$  表示地铁之间换乘的搬运成本, 只在第三种配送模式中存在;
- 7)  $W_7$  表示货物装卸费, 包括物流中心货车装货费用、起始转运中心货车卸货费用、起始转运中心地铁装货费用、换乘转运中心地铁卸货费用、换乘转运中心地铁装货费用、末端转运中心地铁卸货费用、末端转运中心货车装货费用和终端站点货车卸货费用。

各种费用成本的计算式为:

$$\begin{aligned}
 W_1 &= \sum_{i \in V_M} \sum_{j \in V_N} c_1 \cdot w_{ij} \cdot d_{ij} \cdot x_{ij} \cdot z_j; \quad W_2 = \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_N} c_2 \cdot w_{ij} \cdot d_{ij} \cdot x_{ij} \cdot z_i \cdot z_j; \\
 W_3 &= \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_S} c_1 \cdot w_{ij} \cdot d_{ij} \cdot x_{ij} \cdot z_i; \quad W_4 = \sum_{i \in V_M} \sum_{j \in V_S} c_1 \cdot w_{ij} \cdot d_{ij} \cdot x_{ij}; \\
 W_5 &= \sum_{i \in V_M} \sum_{j \in V_N} c_3 \cdot w_{ij} \cdot x_{ij} \cdot z_j; \quad W_6 = \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_N} c_3 \cdot w_{ij} \cdot x_{ij} \cdot z_i \cdot z_j; \\
 W_7 &= 2 \cdot \sum_{i \in V_M} \sum_{j \in V_S} x_{ij} \cdot w_{ij} \cdot c_4 + 2 \cdot \sum_{i \in V_M} \sum_{j \in V_N} x_{ij} \cdot w_{ij} \cdot c_5 \cdot z_j + \\
 & 2 \cdot \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_N} x_{ij} \cdot w_{ij} \cdot z_i \cdot z_j \cdot c_5 + 2 \cdot \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_N} \sum_{k \in V_N} x_{ij} \cdot y_{ikj} \cdot w_{ij} \cdot c_5 \cdot \\
 & z_i \cdot z_j + 2 \cdot \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_S} x_{ij} \cdot w_{ij} \cdot c_4 \cdot z_i。
 \end{aligned}$$

其中:  $c_1$  为货车运输货物的单价 (单位: 元/(t·km));  $d_{ij}$  为表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的货物运输距离 (单位: km);  $c_2$  为地铁运输货物的单价 (单位: 元/(t·km));  $c_3$  为货物搬运的单价 (单位: 元/t);

$c_4$  为货车货物装卸的单价 (单位: 元/t);  $c_5$  为地铁货物装卸的单价 (单位: 元/t)。

### 1.4 约束条件

本模型约束条件设立如下:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i \in V_M} \sum_{j \in V_N} w_{ij} \cdot z_j &= \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_S} w_{ij} \cdot z_i; & (1) \\
 \sum_{i \in V_M \cup V_N} w_{ij} &= D_j, \forall j \in V_S; & (3) \\
 \sum_{j \in V_N} x_{ij} &\geq 1; & (4) \\
 \sum_{i \in V_M \cup V_N} x_{ij} &= 1, \forall j \in V_S; & (5) \\
 \sum_{j \in V_S} x_{ij} &\geq 1, \text{其中, } \forall i \in V_N; & (6) \\
 \sum_{k \in V_N} y_{ikj} &\leq 1, \text{其中, } \forall i \in V_N, \forall j \in V_N; & (7) \\
 w_{ij}^{\text{once}} &\leq w_{ij}^{\text{cap}}; & (8)
 \end{aligned}
 \begin{cases}
 \sum_{i \in V_M} \sum_{j \in V_M} x_{ij} = 0, \\
 \sum_{i \in V_S} \sum_{j \in V_S} x_{ij} = 0, \\
 \sum_{i \in V_N} \sum_{j \in V_M} x_{ij} = 0, \\
 \sum_{i \in V_S} \sum_{j \in V_M} x_{ij} = 0, \\
 \sum_{i \in V_S} \sum_{j \in V_N} x_{ij} = 0. \\
 \begin{cases}
 x_{ij} = 0, \text{如果 } i = j, \\
 y_{ikj} \leq x_{ij}, \\
 2x_{ij} = z_i + z_j, \forall i, j \in V_N.
 \end{cases}
 \end{cases} \quad (2) \quad (9)$$

其中:  $w_{ij}^{\text{once}}$  表示表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的单趟货物运输量;  $w_{ij}^{\text{cap}}$  表示表示节点  $i$  和节点  $j$  之间因站台停靠时间限制而导致的装货站台最大装货量和卸货站台最大卸货量之间的最小值。

式 (1) 表示物流中心送往转运中心的货物量要等于转运中心到终端站点的货运量; 式 (2) 为运输方向限制约束; 式 (3) 为运往终端站点的货物量等于终端站点的需求量; 式 (4) 表示每个物流中心至少有一个转运中心接收货物; 式 (5) 表示每个终端站点至少必须接受且只接受一个转运中心或物流中心的配送服务; 式 (6) 为每个转运中心至少服务一个需求点; 式 (7) 表示转运中心之间最多换乘一次; 式 (8) 为地铁容量限制; 式 (9) 为变量限制。

## 2 求解算法

本文通过 NSGA-II 算法<sup>[12]</sup> 对目标模型进行求解, 得到 Pareto 前沿解集, 以供决策者使用。

### 2.1 染色体编码

本文采用分层编码形式, 由于物流中心一般为 1 个, 即  $m = 1$ , 因此构建的染色体中, 不需要对物流中心进行表示, 据此构建的双层染色体分别表示中间节点及终端站点。

### 2.2 种群初始算法

由于本文研究的是含有多条约束的路径选择问题, 因此需要在进行种群初始化时将约束条件以一定的表现形式加入到初始染色体中, 以保证初始种群对应的染色体均为可行解。因此选择如下方式生成初始化种群: 以编码形式生成若干个初始种群, 并判断是否满足约束, 不满足则重新生成, 直到初始种群全部满足为止<sup>[10]</sup>。

### 2.3 非支配排序及拥挤度计算

1) 非支配排序。本文求解结果为 Pareto 最优解集。非支配排序是针对种群个体优劣进行分层排序, 采用同层非支配, 非同层支配原则。

2) 拥挤度计算。通过拥挤度来表现种群中个体间的相似程度。拥挤度越小, 则相似个体越少。拥挤度计算公式<sup>[10]</sup>为:

$$d_i = \begin{cases} \infty, \\ \sum_{k=1}^m (f_k^{i+1} - f_k^{i-1}) / (f_k^{\text{max}} - f_k^{\text{min}}), \end{cases}$$

其中:  $d_i$  为个体  $i$  的拥挤距离;  $m$  为假设目标函数的个数, 根据群体中的所有个体在第  $k$  个目标上的数值大小从小到大进行个体排序;  $f_k^{i+1}$  与  $f_k^{i-1}$  表示在第  $k$  个目标上  $i$  个相邻的两个个体的函数值;  $f_k^{\text{max}}$  与

$f_k^{min}$  表示在第  $k$  个目标上的最大值和最小值。

### 2.4 算子设计

#### 1) 交叉

遗传算法的交叉操作是为了交换两个随机个体的部分基因, 以保证种群的多样性。本文采用算术交叉的方式进行交叉操作, 对于算术后小数值接进行取整操作。算术交叉是指由两个个体的线性组合而产生出两个新的个体。通过系数的不同可以分为平均交叉和扩展中间交叉。具体交叉过程如图 5 所示。

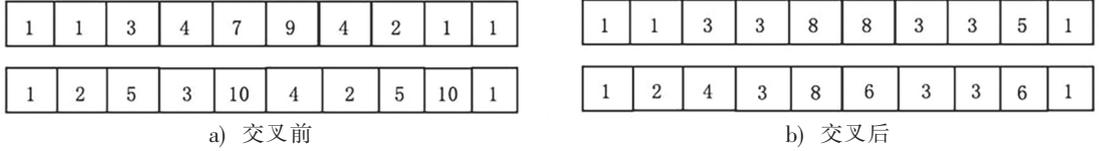


图 5 交叉操作示意图  
Fig.5 Schematic diagram of cross operation

#### 2) 变异

变异操作是对染色体的某一个或某一些基因座上的基因值按某一概率进行改变, 如图 6 所示, 它也是产生新个体的一种操作方法, 决定了遗传算法的局部搜索能力, 并有助于维持群体的多样性, 防止出现早熟现象。

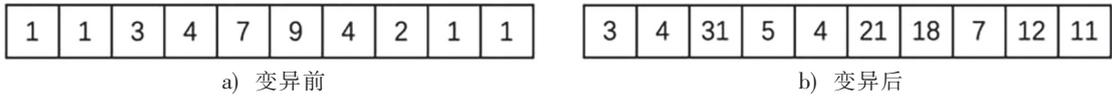


图 6 变异操作示意图  
Fig.6 Schematic diagram of variation operation

本文设计的算法中采取 Breeder GA 变异算子进行变异操作<sup>[14]</sup>。对个体的每一个基因组, 以变异概率  $P_m$  指定其变异点, 对每一个指定的变异点, 基因值用其他等位基因值来替代, 从而产生出一个新的个体。

## 3 算例验证及分析

S 公司在福建省厦门市湖里区建有一座物流中心, 用于接收到达厦门市的货物, 并对货物进行初步的打包处理, 并送达厦门市各街道的终端站点。本文借用 S 公司的数据, 考虑加入地铁运输后, 如何利用现有的地铁站点及地铁线路, 选择最优的配送路径完成配送任务。相关数据如表 1 所示。其中: 物流中心编号为 1; 地铁站台按照 1 号线 (镇海路-岩内)、2 号线 (五缘湾-天竺山)、3 号线 (厦门火车站-蔡厝), 依次编号为 2—66, 终端站点编号为 67—120。

表 1 终端站点需求量  
Tab.1 Terminal site demand 单位:t

编号	需求量	编号	需求量	编号	需求量	编号	需求量	编号	需求量	编号	需求量
67	25	76	32	85	20	94	25	103	18	112	25
68	27	77	34	86	18	95	20	104	24	113	26
69	34	78	30	87	26	96	18	105	15	114	28
70	18	79	28	88	18	97	14	106	29	115	27
71	24	80	27	89	25	98	23	107	16	116	25
72	22	81	25	90	23	99	20	108	29	117	27
73	34	82	22	91	21	100	15	109	25	118	25
74	29	83	24	92	22	101	16	110	24	119	31
75	25	84	23	93	26	102	16	111	23	120	22

货车的平均行驶速率  $v_1 = 30$  km/h; 地铁的平均行驶速率  $v_2 = 50$  km/h; 货车装卸的平均速率  $v_3 = 1/180$  t/s; 地铁装卸的平均速率  $v_4 = 4/180$  t/s; 货车运输货物的单价  $c_1 = 60$  元/(t · km); 地铁运输货物的单价  $c_2 = 5/3$  元/(t · km); 货物搬运的单价  $c_3 = 15$  元/t; 货车货物装卸的单价  $c_4 = 7$  元/t; 地铁

货物装卸的单价  $c_5 = 7/2$  元/t; 乘客携带重物步行时间与不携带重物步行时间的比例系数  $\delta = 1.25$ 。

### 3.1 试验环境及求解结果

本文使用 Python 3.7, 运用遗传算法对模型进行求解, 设置种群规模为 100, 最大迭代次数为 1000, 种群变异概率为 0.01, 交叉概率为 0.6, 求解结果如图 7 所示。由图 7 可以看出, 运输时间在 10.2 ~ 11.4 h 之间浮动, 运输费用在 2.00 ~ 2.25 万元之间浮动。

图 7 中 Pareto 前沿面上共包含 86 个 Pareto 最优解, 即 86 个配送方案, 方案之间无优劣之分, 均为可行的等效优化方案。

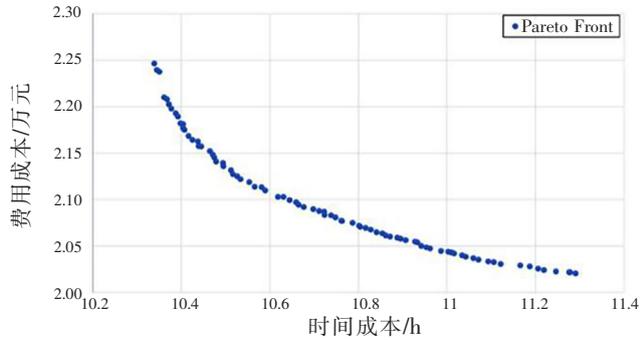


图 7 迭代结果图

Fig.7 Iteration result graph

### 3.2 路径选择偏好结果分析

对于本文求解得到的 Pareto 解集, 只能作为参考依据, 实际方案由决策者根据权重的选择确定。对于解集中的方案, 首先对时间及费用进行 0 ~ 1 标准化处理, 然后赋予其不同的权重, 并排序同权重下的加权总值, 选择最小值为最优解。

设一共有  $n$  个 Pareto 前沿解, 第  $i$  个 Pareto 前沿解中时间成本为  $F_{1i}$ , 费用成本为  $F_{2i}$ , 赋予时间成本和费用成本的权重为  $(a, b)$ 。

1) 首先对时间成本和费用成本进行 0 ~ 1 标准化, 即

$$f_{1j} = F_{1j} / (\sum_{i=1}^n F_{1i}), \quad j = 1, 2, 3, \dots, n; \quad f_{2j} = F_{2j} / (\sum_{i=1}^n F_{2i}), \quad j = 1, 2, 3, \dots, n。$$

2) 随后对标准化后的时间成本及费用成本进行加权, 即  $f_j = f_{1j} \cdot a + f_{2j} \cdot b$ 。

3) 选出权重  $(a, b)$  下的最优解  $f = \min f_j$ 。

以  $(0.1, 0.9)$  为例, 通过上述公式计算可得, 该权重下路径选择最优方案为第 52 个 Pareto 最优解, 路径选择结果如表 2 所示。由表 2 可知, 选择结果与权重设置相关, 因此决策者偏好对于结果具有较大影响。在正式决策时, 决策者应根据企业实际进行权重选择, 以平衡成本与风险。

表 2 (0.1,0.9) 权重下路径选择结果

Tab.2 path selection results under weight(0.1,0.9)

编号	路径	编号	路径	编号	路径
67	A1→B30→B50→D67	85	A1→B10→C9→B53→D85	103	A1→B10→B25→D103
68	A1→B30→B51→D68	86	A1→B30→B46→D86	104	A1→B30→B52→D104
69	A1→B30→C9→B15→D69	87	A1→B30→B29→D87	105	A1→B31→B54→D105
70	A1→B31→C9→B16→D70	88	A1→B30→B46→D88	106	A1→B30→B54→D106
71	A1→B59→B55→D71	89	A1→B30→B26→D89	107	A1→B10→B24→D107
72	A1→B30→C9→B24→D72	90	A1→B10→B13→D90	108	A1→B30→B54→D108
73	A1→B30→B43→D73	91	A1→B31→B46→D91	109	A1→B30→C26→B58→D109
74	A1→B31→B43→D74	92	A1→B10→B25→D92	110	A1→B30→B26→D110
75	A1→B30→B40→D75	93	A1→B59→B57→D93	111	A1→B30→B54→D111
76	A1→B30→B43→D76	94	A1→B31→B54→D94	112	A1→B30→B26→D112
77	A1→B30→B43→D77	95	A1→B10→B25→D95	113	A1→B30→B54→D113
78	A1→B10→C6→B66→D78	96	A1→B10→B25→D96	114	A1→B30→B9→D114
79	A1→B30→B39→D79	97	A1→B30→B54→D97	115	A1→B10→B13→D115
80	A1→B30→B37→D80	98	A1→B10→B24→D98	116	A1→D116
81	A1→B60→B41→D81	99	A1→B10→B25→D99	117	A1→D117
82	A1→B31→B43→D82	100	A1→B30→C9→B25→D100	118	A1→D118
83	A1→B30→B52→D83	101	A1→B60→C12→B25→D101	119	A1→D119
84	A1→B30→B49→D84	102	A1→B30→C9→B25→D102	120	A1→B30→C26→B63→D120

根据第 52 个 Pareto 最优解,可以得到配送总运输时间为 11.29 h, 配送总运输费用为 20 206.65 元。本实验选择的物流中心位于湖里区,而终端站点中编号 114 至 120 也位于湖里区,与物流中心之间的距离较近。由配送路径选择结果可以看出,物流中心至编号 116—119 的终端站点之间,由城市道路运输直接送达。由此可知,基于地铁的城市物流配送模式更适合中长距离的货物配送,能够更好地满足城市物流配送的时效性要求。短距离的货物配送采用地铁运输将会增加配送节点,导致运输成本增加,运输更加复杂,因此短距离配送仍然采用城市道路运输方式。

## 4 结束语

本文考虑将城市地铁纳入城市物流配送体系中,建立物流配送路径选择模型。运用 NSGA-II 算法对模型进行求解,以厦门市为例,代入相关数据,得出城市物流配送最优配送路径。

1) 本文建立的路径选择模型以配送成本及配送时间最小化为目标,考虑了运输过程中所产生的各项成本以及各个环节所消耗的时间,得到的结果更加符合实际情况。

2) 在城市物流配送过程中,提出了地铁参与城市物流配送的新模式,并设计出利用地铁进行城市物流配送的运输网络,在满足城市物流配送需求的同时提高配送服务的时效性。

3) 基于厦门市 S 公司的分析,通过求解结果可以看出,地铁参与物流配送对于中长距离的货物配送更加有利,可以有效节约配送的成本及时间,使配送的效率更高,能够更好地满足城市物流配送的时效性要求。

4) 由具体配送路径选择结果,以及相应的运输时间、运输费用成本的具体数值,验证了本文构建的利用地铁的城市物流配送网络以及配送模式的是可行的合理的。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] EGBUNIKE O N,POTTER A T. Are freight pipelines a pipe dream?: a critical review of the UK and european perspective [J]. Journal of Transport Geography,2011,19(4):499-508.
- [5] 李润国.基于城市轨道交通的物流配送系统及其节点研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.
- [6] 马成林,毛海军,许恒勤.城市地下物流系统发展模式及相关技术要求[J].物流技术,2012,31(5):72-75.
- [7] 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.
- [8] 詹佳妮.基于斯坦纳最小树的地下物流网络优化研究[D].大连:大连理工大学,2019.
- [9] HOLGUIN-VERAS J,MARQUIS R,BROIN M. Economic impacts of staffed and unassisted of f-hour deliveries in New York City[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2012,39(2312):34-46.
- [10] HOIUIN-VERAS J,WANG C,BROWNE M, et al. The New York City off-hour delivery project: lessons for city logistics[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2014,125:36-48.
- [11] DED K,PRATAP A,AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE transactions on evolutionary computation,2002,6(2):182-197.
- [12] 周帅,黄宗南.基于改善初始种群的免疫遗传算法优化 JSP 问题[J].计量与测试技术,2018,45(5):10-12.
- [13] 曹奇锋,张震宇,陈珍平,等.基于非支配排序遗传算法的辐射屏蔽多目标优化方法研究[J].核动力工程,2020,41(1):167-171.
- [14] 余文娟,杨胡萍,何志勤,等.考虑变异算子的 CTSS 配电网检修计划优化策略[J].南昌大学学报(理科版),2020,44(5):504-510.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 周云龙)