

基于双边匹配的城市地铁多级配送选址-路径研究

舒达, 梁承姬*, 王钰, 孙苗苗

(上海海事大学物流科学与工程研究院, 上海 201306)

摘要: 城市化进程的推进促进了城市物流的快速发展, 城市配送出现多层次的新特性, 但随之出现了交通拥堵和环境污染等问题。基于地铁货运探讨城市多级配送的选址-路径问题, 在物流节点与需求点的分配问题中引入双边匹配理论, 构建以最小化运营成本和最大化匹配满意度为目标的多目标 0-1 型整数规划模型。设计以地铁站的中心性、配送距离和货运量为基础的匹配偏好指标, 设计需求点与城内中转站匹配满意度的计算方法, 并提出 NSGA-II 与 Gale-Shapley 算法匹配机制相结合的混合算法对问题进行求解。以上海市部分地铁线路的数据为基础构建案例进行分析, 求得 Pareto 最优解集合, 通过熵权 TOPSIS 法来确定目标权重和最优解, 并对城内中转站最大服务能力进行敏感性分析, 结果表明, 同时考虑匹配满意度和运营成本可以获得兼顾“稳定性”和“满意度”的选址-路径方案。此外, 该研究对于建立大都市圈的物流配送体系、缓解城市交通压力以及增强城市物流配送能力都有重要的参考意义。

关键词: 综合交通运输; 选址-路径问题; 地铁货运; 多级配送; Gale-Shapley 双边匹配算法

中图分类号: U121

文献标志码: A

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0068518

Research on Multi-Level Distribution Location-Route of Urban Subway Based on Bilateral Matching

SHU Da, LIANG Chengji*, WANG Yu, SUN Miaomiao

(Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

【Abstract】 Urbanization advancement has promoted the rapid development of urban logistics, and multi-level new features have emerged in urban distribution. However, problems such as traffic congestion and environmental pollution, have also arisen. This study discusses the location-path problem of urban multi-level distribution based on subway freight transportation. The bilateral matching theory is introduced into the allocation problem of logistics nodes and demand points, and a multi-objective 0-1 integer programming model is constructed to minimize operating costs and maximize matching satisfaction. A matching preference index based on the centrality of subway stations, delivery distance, and freight volume is designed, and a calculation method for the matching satisfaction between demand points and urban transfer stations is established. Additionally, a hybrid algorithm combining the NSGA-II and the Gale-Shapley algorithm matching mechanism is proposed to solve the problem. Finally, based on data from some subway lines in Shanghai, a case study is constructed for analysis, and the Pareto optimal solution set is obtained. The entropy weight TOPSIS method is used to determine the target weight and optimal solution, and the maximum service capacity of urban transfer stations is analyzed for sensitivity. The results show that considering both matching satisfaction and operating costs can achieve a location-path scheme that balances "stability" and "satisfaction." In addition, the study findings provide important reference significance for establishing a logistics distribution system in metropolitan areas, alleviating urban traffic pressure, and enhancing urban logistics distribution capabilities.

【Key words】 integrated transportation; location-path problem; subway freight; multi-level distribution; Gale-Shapley bilateral matching algorithm

0 引言

近年来,随着城市人口和车辆的迅速增加,各种生产和生活的物资需求量不断增长,加剧了中大型城市地面交通拥堵的严重程度。已有相关研究表

明,基于道路运输的物流占据城市交通资源的 30%~40%,机动车碳排放量的 25%~50%^[1]。对城市而言,一个高效可靠的城市物流系统对其经济发展至关重要,因此物流对社会和环境的影响一直以来都是政府和公众关注的焦点^[2]。

收稿日期: 2023-10-08 修回日期: 2023-12-22

基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划(21YF1416400)。

通信作者 E-mail: *liangcj@shmtu.edu.cn

面对城市货运现有的压力,有学者提出地下物流系统(ULS),尝试通过地下空间缓解交通拥堵,提高城市货运的效率和持续性^[3]。但因地下工程造价高、建设周期长等因素的制约,导致 ULS 短期内难以实现。为规避上述制约,DAMPIER 等^[1]提出了地下货物运输融入现代地铁系统的理念,形成了基于地铁的地下物流系统(M-ULS),因其具有覆盖面广、送达速度快、运量大、碳排放低、成本低等优势,使得这一理念在有限的预算下为实现城市地下物流提供了可行的途径。

随着对 M-ULS 的深入研究,有学者研究如何将地铁网络运用到城市物流中。郑长江等^[4]构建了基于地铁配送的优化模型,合理地优化现有的地铁网络,使之与公路相结合进行货物运输更有效。为了更好地发挥 M-ULS 的优势作用,ZHAO 等^[5]对 M-ULS 中的选址问题进行研究,评价了各个地铁站点的重要性,并在考虑物流需求的情况下建立数学模型。周芳汀等^[6]探讨了地铁网络配送路径问题,构建了优化模型并设计了随机变邻域迭代搜索算法(ILS-RVND)进行求解。更重要的是,M-ULS 不仅仅局限日常的货物配送,XU 等^[7]的研究就是在应对大型公共卫生事件时,如何利用闲置的地铁建立多级配送网络,将生活、医疗等物资送往受影响地区。

目前,地铁货运主要有“共线拖挂”和“共线分离”两种模式,其区别在于乘客和货物是否在同一车次^[8]。但是“共线分离”模式需要在客运列车间穿插整列货运列车,考虑到其卸货时间过长,通常需要考虑单独设立货运站台,因此建设成本较高,运营较为复杂^[9]。而“共线拖挂”模式可在原有客运站台的基础上将部分客运站台改建为货运站台,因此成本较低,且学者们对其研究较多,模式更为成熟,故本文以“共线拖挂”模式进行研究^[10]。“共线拖挂”模式因承载货物能力有限,因此主要考虑运送的是生活物资、文件及快递包裹等轻便、易于打包和分拣的货物。

在使用地铁进行货物配送时,需要同时考虑到各种因素^[11]。从政府层面来看,他们希望在不影响货运的情况下提高整个地铁网络的协同,因此会有地铁枢纽的选择偏好^[12]。从企业层面来看,希望减少运输成本和改建成本,通过合理布局尽可能地提高货运量,减少配送距离^[13]。因此,在实际情况下,基于地铁的多级配送选址需要考虑到未来持续发展与成本相互协调沟通,如地铁站可达性和中心性、建设成本、运营成本等。目前主要缺乏高效的方法,即

快速选择相应的地铁站和配送点形成服务关系来满足运营成本最小。

为了解决上述问题,本文在地铁货运“共线拖挂”模式的基础上引入双边匹配理论,从政府与企业两个角度同时考虑,构建双目标模型研究地铁货运涉及的各项指标和物流成本的协同优化问题。主要工作包括:1)引入双边匹配理论,提出一种混合算法,以寻求地铁站点和需求点在多级配送和站点选择的协同效用;2)将双边匹配模型与传统选址-路径模型相结合建立双目标模型,研究匹配满意度与运营成本之间的关系;3)揭示混合方法在减少多级配送的运营成本和满足地铁中转站的选择偏好中具有一定优势。

1 问题描述与数学模型

1.1 城市多级配送选址-路径的问题描述

基于城市地铁的多级配送模式如图 1 所示。在一级配送中,货物从物流场站发出,通过货运汽车运送至地铁线路末端的中转站,货物将在此处转运进入地铁网络,该站点称之为末端中转站。二级配送是指地下运输阶段,货物通过地铁运输到需求点附近的地铁中转站并转运至地面,该站点称之为城内中转站。三级配送是指货物从城内中转站转运至地面以后,通过电动货车送往需求点完成配送的过程。因货物进入地铁网络必须通过地铁中转站转运,故一条地铁线路用于货物运输必须存在至少一个末端中转站和一个城内中转站,且末端中转站只能由地铁线路中的首尾两站改建而成,城内中转站可由其他任意地铁站改建。

定义该运输网络模型为 $G(V, E)$, 其中, V 是物流节点集合,包括物流场站 O 、末端中转站 M 、城内中转站 N 、需求点 D , E 是弧集合 $\{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, v_i \neq v_j\}$ 。每个连接节点 v_i 和 v_j 的弧 (v_i, v_j) 都有自己的行程时间 $T(v_i, v_j)$, 该行程时间可以通过节点 v_i 和 v_j 之间的距离进行计算。设一条地铁线路中有 N_f 个构造相同的地铁站,其中有 N_e 个被选择为末端中转站, N_g 个被选择为城内中转站。因此,一条基于城市地铁的多级配送路径应表示为:物流场站→末端中转站→城内中转站→需求点。

此外,本文还考虑需求点与备选城内中转站的一对多双边匹配问题,在双边匹配决策中,参与双方分别为需求点集合和备选城内中转站集合,其中需求点集合为 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_j\}$, 备选城内中转站集合为 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_g\}$ 。需求点集合 D 中任

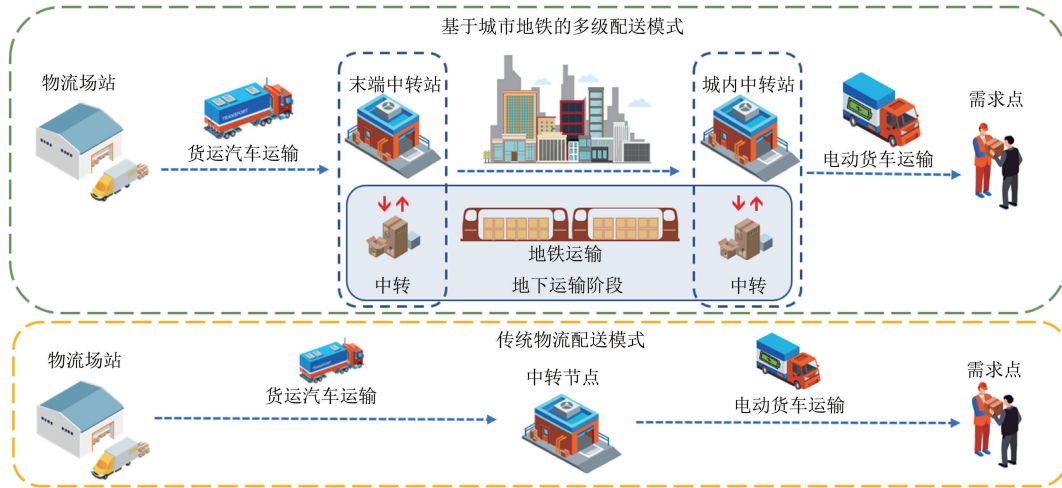


图 1 基于城市地铁的多级配送和传统物流配送示意图

Fig.1 Schematic drawing of multilevel distribution and traditional logistics distribution based on urban subway

一主体 d_j 可以根据已知信息和自身偏好给出备选城内中转站集合 N 中所有主体的偏好信息, 同样备选城内中转站集合 N 中任一主体 n_g 也可以根据已知信息和自身偏好给出需求点集合 D 中所有主体的偏好信息。此时, 匹配中介可以使用某种特定的决策方法获得需求点与城内中转站双方主体的最优匹配方案, 匹配中介通常是指撮合双方进行匹配的个人、机构或决策系统。设 (d_j, n_g) 表示需求点 d_j 与备选城内中转站 n_g 的匹配方案, 则如图 2 所示, (d_1, n_2) 、 (d_2, n_3) 和 (d_j, n_1) 等为最终匹配方案。

2) 每个末端中转站只能由一个物流场站服务, 每个城内中转站只能由一个末端中转站服务, 每个需求点只能由一个城内中转站服务。

3) 每条地铁线路只有首尾站可作为备选末端中转站, 其他非首尾地铁站均可作为备选城内中转站。

4) 货物不能在地铁线路之间进行转运。

5) 地铁列车运输货物的能力不会影响客运的服务质量。

为便于描述, 本文模型参数及其定义如表 1 所示。

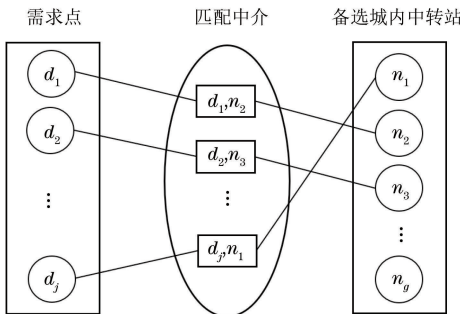


图 2 双边匹配决策示意图

Fig.2 Schematic diagram of bilateral matching decision

综上所述, 本文主要决策内容包括: 1) 确定多级配送中改建为末端中转站与城内中转站的地铁站; 2) 基于双边匹配理论, 对备选城内中转站与需求点进行偏好评价, 依据匹配满意度获取城内中转站与需求点的匹配方案; 3) 对基于地铁的多级配送中的路径选择进行决策。

1.2 数学模型

1.2.1 模型假设与符号

为方便构建数学模型, 本文做以下几点假设:

1) 物流场站、地铁站、需求点的数量、位置和需求量已知。

表 1 模型参数及符号

Table 1 Model parameters and symbols

符号	符号解释
O	物流场站集合, 索引为 i
M	备选末端中转站集合, 索引为 m
N	备选城内中转站集合, 索引为 n
D	需求点集合, 索引为 j
L	地铁线路集合, 索引为 l
c_e	末端中转站 e 的日折旧成本
c_g	城内中转站 g 的日折旧成本
θ_u	货运汽车承载每单位货物每公里的运输成本
θ_s	地铁承载每单位货物每公里的运输成本
θ_e	电动货车承载每单位货物每公里的运输成本
d_{ie}	物流场站 i 到末端中转站 e 的距离
d_{eg}	地铁从末端中转站 e 到城内中转站 g 的行驶距离
d_{gj}	城内中转站 g 到需求点 j 的距离
f_{ie}^j	运往需求点 j 货物在物流场站 i 与末端中转站 e 之间的货运量
f_{eg}^j	运往需求点 j 货物在末端中转站 e 与城内中转站 g 之间的货运量

表 1(续)

符号	符号解释
f_{gj}	需求点 j 与城内中转站 g 之间的货运量
q_j	需求点 j 的需求量
Q_g	城内中转站 g 的最大服务能力
α_{gj}	城内中转站 g 对需求点 j 的满意度
β_{jg}	需求点 j 对城内中转站 g 的满意度
l_n	地铁站 n 的所在地铁线路的线号
C_1	末端中转站和城内中转站的折旧总成本
C_2	货运汽车、地铁列车、电动货车完成所有货物运输的总成本
S	城内中转站与需求点的匹配满意度
Inf	一个很大的数
x_{ie}^j	0-1 变量,需求点 j 的货物从物流场站 i 运输到末端中转站 e 为 1, 否则为 0
y_{eg}^j	0-1 变量,需求点 j 的货物从末端中转站 e 运输到城内中转站 g 为 1, 否则为 0
z_{jg}	0-1 变量,需求点 j 的货物来自城内中转站 g 为 1, 否则为 0
p_e	0-1 变量,地铁站 e 被选择为末端中转站为 1, 否则为 0
p_g	0-1 变量,地铁站 g 被选择为城内中转站为 1, 否则为 0

1.2.2 城内中转站与需求点的稳定匹配方案

双边匹配的概念最早是在 1985 年由 ROTH^[14]提出的,是指如何匹配两个不同有限集合中的主体,使每个主体匹配到满意度最高的另一个主体。依据李铭洋等^[15]给出的经典的一对多双边匹配问题相关概念,结合地铁中转站与需求点匹配问题,下面分别给出地铁中转站最优稳定匹配和需求点最优稳定匹配的数学定义。

定义 1 地铁中转站与需求点的一对多双边匹配 μ 定义为映射 $\mu: N \cup D \rightarrow 2^{N \cup D}, \forall n_i \in N, \forall d_j \in D, \mu$ 满足如下条件:

- 1) 对于任意的 $n_i \in N, \mu(n_i) \subseteq D, |\mu(n_i)| < Q_i$, 特别地,若 $|\mu(n_i)| = 0$, 则称 n_i 没有服务任何需求点;
- 2) 对于任意的 $d_j \in D, \mu(d_j) \subseteq N, |\mu(d_j)| = 1$;
- 3) 对于任意的 $n_i \in N$ 和 $d_j \in D$ 当且仅当 $d_j \in \mu(n_i)$, 此时称 (n_i, d_j) 为地铁中转站与需求点匹配对。

所有匹配对组成的集合称为地铁中转站与需求点匹配方案。如匹配方案中存在阻塞对,即在当前匹配方案中,对于没有形成匹配对的地铁中转站和需求点,如果双方都认为对方的满意度高于对当前

匹配对象的满意度,则说明有更好的匹配方案,从而造成现有匹配方案失效。可见一个有效的匹配方案不能存在阻塞对,即所获得的匹配方案为稳定匹配方案,对于已经形成匹配对的匹配主体而言,即使放弃当前匹配对象也不会获得更好的匹配结果。

需求点与地铁中转站的阻塞对是指满足下列条件之一的一对需求点与地铁中转站:

- 1) 同时存在没有匹配到任何地铁中转站的需求点和未达到最大服务容量的城内中转站;
- 2) 需求点认为某个未达到最大服务容量的城内中转站优于当前匹配对象;
- 3) 已达到最大服务容量的地铁中转站认为一个没有匹配对象的需求点优于与其形成匹配的一个需求点;
- 4) 已达到最大服务容量的城内中转站认为一个已经有匹配对象的需求点优于与其形成匹配的一个需求点,该需求点认为该城内中转站优于当前匹配对象。

具体的数学定义如下:

定义 2 需求点与地铁中转站的阻塞对具体描述如下: $\mu: D \cup N \rightarrow 2^{D \cup N}$, 对于 $\forall d_j, d_h \in D, \exists n_l, n_g \in N, i \neq h, l \neq j$ 。如果 d_j 和 n_g 满足如下条件之一,则称匹配对 (d_j, n_g) 是匹配 μ 的一个需求点与地铁中转站的阻塞对。

- 1) $|\mu(n_g)| < Q_g, |\mu(d_j)| = 0$;
- 2) $|\mu(n_g)| < Q_g, \mu(d_j) = n_l$, 满足 $\beta_{jg} > \beta_{jl}$;
- 3) $|\mu(n_g)| \geq Q_g, |\mu(d_h)| = 0, \mu(d_j) = n_g$, 满足 $\alpha_{gh} > \alpha_{gj}$;
- 4) $|\mu(n_g)| \geq Q_g, \mu(d_h) = n_l, \mu(d_j) = n_g$, 满足 $\beta_{hg} > \beta_{hl}$ 且 $\alpha_{gh} > \beta_{gj}$ 。

以下为城内中转站与需求点的稳定匹配定义:

定义 3 对于城内中转站与需求点的一对多匹配 $\mu: N \cup D \rightarrow 2^{N \cup D}$, 如果 μ 中不存在城内中转站与需求点的阻塞对,则称 μ 为关于 N 和 D 的稳定匹配方案,否则称为不稳定匹配方案。

确保满足城内中转站与需求点的稳定匹配方案条件由定理 1 给出。

定理 1 设 z_{jg} 为 0-1 决策变量, $z_{jg} = 1$ 表示需求点 d_j 与城内中转站 n_g 进行匹配; 否则 $z_{jg} = 0$, 当需求点与城内中转站的匹配方案满足式(1)~式(3)时,一定是需求点与城内中转站的稳定匹配方案。

$$\sum_{j \in V_j} z_{jg} q_j \leq Q_g \tag{1}$$

$$\left(\sum_{g: \beta_{jg} \geq \beta_{jk}} z_{jg} + z_{jk} \right) Q_k + \sum_{i: \alpha_{ki} \leq \alpha_{kj}} z_{ik} \geq Q_k \tag{2}$$

$$\sum_{g \in N} z_{jg} \leq 1 \quad (3)$$

证明:采用反证法,由定义 3 可知,当需求点与城内中转站匹配方案中不含满足条件的稳定阻塞对时,该方案为满足条件的需求点与城内中转站的稳定匹配方案。因此,只需证明满足式(2)和式(3)的匹配方案一定没有满足期望的稳定阻塞对。可证明 (d_j, n_g) 满足式(1)、式(2)、式(4),则一定是满足期望的稳定阻塞对。

$$\left(\sum_{g: \beta_{jg} \geq \beta_{jk}} z_{jg} + z_{jk} \right) Q_k + \sum_{i: \alpha_{ki} \leq \alpha_{kj}} z_{ik} < Q_k \quad (4)$$

$$\text{当且仅当 } \sum_{g: \beta_{jg} \geq \beta_{jk}} z_{jg} = z_{jk} = 0 \text{ 和 } \sum_{i: \alpha_{ki} \leq \alpha_{kj}} z_{ik} < Q_k$$

同时满足时,式(4)成立,即城内中转站 n_k 能够为匹配到的需求点 d_j 提供服务, d_j 既没有与 n_k 形成匹配,以及与任何在未达到最大服务能力的其他城内中转站匹配,也没有与任何比 n_k 更偏好的城内中转站匹配,这就意味着 d_j 没有城内中转站为其提供服务;同时,在 n_k 所匹配的需求点中与 d_j 相比是 n_k 更偏好的类型,且并未达到其限额,这就意味着 n_k 要么没有为任何需求点提供服务,要么服务能力已经达到其限额,但至少存在一个需求点对 n_k 而言劣于 d_j 。

综上所述,由定义 2 可知, (d_j, n_g) 是满足条件的稳定阻塞对。因此,当需求点与城内中转站的匹配方案同时满足式(1)~式(3)时,一定是满足条件的需求点与城内中转站稳定匹配方案。

1.2.3 数学模型

参考周芳汀等^[16]提出的模型,本文引入双边匹配理论的城市地铁多级配送选址-路径问题的数学模型如下所示:

1) 目标函数。

式(5)为第一个目标,表示最小化运营成本, C_1 和 C_2 分别为折旧成本与运输成本的代数和;式(6)为第二个目标,表示最大化城内中转站与需求点的匹配满意度;式(7)为末端中转站和城内中转站的折旧总成本的计算公式;式(8)为货运汽车、地铁列车、电动货车完成货物运输总成本的计算公式。

$$F_1 = \min C_1 + C_2 \quad (5)$$

$$F_2 = \max \sum_{g \in M} z_{jg} \alpha_{gj} + \sum_{j \in D} z_{jg} \beta_{jg} \quad (6)$$

$$C_1 = \sum_{e \in M} p_e c_e + \sum_{g \in N} p_g c_g \quad (7)$$

$$C_2 = \sum_{j \in D} \sum_{i \in O} \sum_{e \in M} x_{ie}^j d_{ie} f_{ie}^j \theta_u + \sum_{j \in D} \sum_{e \in M} \sum_{g \in N} y_{eg}^j d_{eg} f_{eg}^j \theta_s + \sum_{j \in D} \sum_{g \in N} z_{jg} d_{gj} f_{gj} \theta_e \quad (8)$$

2) 一级配送中的约束。

式(9)表示物流场站只能服务被选为末端中

转站的地铁站;式(10)表示末端中转站只能由一个物流场站服务。

$$\sum_{i \in O} \sum_{j \in D} x_{ie}^j \leq \text{Inf} \cdot p_e, \forall e \in M \quad (9)$$

$$\sum_{i \in O} \sum_{e \in M} x_{ie}^j = 1, \forall j \in D \quad (10)$$

3) 二级配送中的约束。

式(11)表示只有被选为末端中转站的地铁站才能服务城内中转站;式(12)表示只有被选为城内中转站的地铁站才能被末端中转站服务;式(13)表示城内中转站只能被一个末端中转站服务;式(14)表示每个末端中转站至少需要服务于一个城内中转站;式(15)表示末端中转站只能服务于同一条线路上的城内中转站。

$$\sum_{g \in M} \sum_{j \in D} y_{eg}^j \leq \text{Inf} \cdot p_e, \forall e \in M \quad (11)$$

$$\sum_{e \in M} \sum_{j \in D} x_{eg}^j \leq \text{Inf} \cdot p_g, \forall g \in N \quad (12)$$

$$\sum_{e \in M} y_{eg}^j = 1, \forall g \in N, j \in D \quad (13)$$

$$\sum_{g \in N} \sum_{j \in D} y_{eg}^j \geq 1, \forall e \in M \quad (14)$$

$$\sum_{e \in M} \sum_{g \in N} y_{eg}^j l_e = \sum_{e \in M} \sum_{g \in N} y_{eg}^j l_g, \forall j \in D \quad (15)$$

4) 三级配送中的约束。

式(16)表示需求点只能由被选为城内中转站的地铁站服务;式(17)表示需求点只能由一个城内中转站服务;式(18)表示城内中转站至少需要服务于一个需求点。

$$\sum_{j \in D} z_{jg} \leq \text{Inf} \cdot p_g, \forall g \in N \quad (16)$$

$$\sum_{g \in N} z_{jg} = 1, \forall j \in D \quad (17)$$

$$\sum_{j \in D} z_{jg} \geq 1, \forall g \in N \quad (18)$$

5) 流量平衡约束、阻塞对约束及决策变量约束。

式(19)、式(20)表示各级物流节点之间的流量平衡;式(21)表示城内中转站转运的货物不超过最大服务能力;式(22)根据定义 2 确定的排除城内中转站和需求点匹配阻塞对的约束条件;式(23)表示决策变量范围和类型。

$$\sum_{i \in O} \sum_{e \in M} f_{ie}^j = \sum_{e \in M} \sum_{g \in N} f_{eg}^j, \forall j \in D \quad (19)$$

$$\sum_{e \in M} \sum_{g \in N} f_{eg}^j = \sum_{g \in N} f_{gj}^j, \forall j \in D \quad (20)$$

$$\sum_{j \in D} z_{jg} q_j \leq Q_g, \forall g \in N \quad (21)$$

$$\left(\sum_{g: \beta_{jg} \geq \beta_{jk}} z_{jg} + z_{jk} \right) Q_k + \sum_{i: \alpha_{ki} \leq \alpha_{kj}} z_{ik} \geq Q_k \quad (22)$$

$$x_{ie}^j, y_{eg}^j, z_{jg}, p_e, p_g \in \{0, 1\}, \forall i \in O, e \in M, g \in N, j \in D \quad (23)$$

2 求解算法

2.1 匹配满意度计算

匹配满意度通过需求点与地铁站的偏好指标计算,偏好指标以需求量、货运距离以及中心性来确定。其中,对于地铁站的中心性指标,值越高说明该地铁站在地铁网络中的可达性越高,且经过该地铁站的线路可能更多,优先选择其作为货运中转站不仅能够满足更多需求点的需求,而且在将来开放更多地铁线路进行货物配送时能够减少地铁站的改造费用。在考虑货运成本时,主要偏好指标为需求量和货运距离,需求量越高说明需求点的优先级越高,货运距离越短配送成本越低。

2.1.1 需求点对地铁站的偏好指标

ZHAO 等^[5]提出了评价地铁站点的 4 个中心性指标,其在量化网络节点重要性方面具有较高的有效性。它们分别为度中心性、介数中心性、接近中心性和特征向量中心性。因此,本文在货运距离的基础上加入以上 4 个中心性指标作为需求点对地铁站的偏好指标。

指标 1 距离指标 (R_{1i})。地铁站与需求点最短距离的倒数。计算公式如下:

$$R_{1i} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (24)$$

式中: d_{ij} 为需求点 j 到地铁站 i 的最短距离。

指标 2 度中心性 (R_{2i})。表示某一地铁站与其他地铁站之间的路径连接数。 R_{2i} 值越高,表示地铁站 i 与其他地铁站的联系越多,表明该地铁站比 R_{2i} 值低的地铁站更重要。计算公式如下:

$$R_{2i} = \frac{K_i}{N-1} \quad (25)$$

式中: K_i 为地铁网络节点 i 的度; N 为地铁网络中地铁站的数量。

指标 3 介数中心性 (R_{3i})。表示地铁站 i 在两个地铁站之间充当中间站的频率^[17]。因此, R_{3i} 值越高,表明配送经过该地铁站的可能性越大,说明该地铁站更适合作为城内中转站。计算公式如下:

$$R_{3i} = \sum_{i \neq j \neq r} \frac{k_{jr}(i)}{k_{jr}} \quad (26)$$

式中: k_{jr} 为地铁站 j 到地铁站 r 的最短路径总数; $k_{jr}(i)$ 为该路径中经过地铁站 i 的最短路径数。

指标 4 接近中心性 (R_{4i})。定义为地铁站 i 到其他地铁站最短路径的平均距离的倒数。 R_{4i} 的值越大,地铁站就越靠近整个地铁网络的中心^[18]。

且该地铁站能服务的需求点可能更多,这使得地铁站 i 更适合作为城内中转站。计算公式如下:

$$R_{4i} = \frac{N-1}{\sum_{j=1}^N d_{ij}} \quad (27)$$

式中: d_{ij} 为地铁站 i 到地铁站 j 的最短距离; N 为地铁网络中地铁站的数量。

指标 5 特征向量中心性 (R_{5i})。反映了地铁站 i 的重要性是否与其相连的其他节点的重要性相关。如果地铁站 i 与其他更多度中心度较大的地铁站相连,那么地铁站 i 也具有较高的重要性^[19]。如果地铁站 j 是地铁站 i 的邻站,则地铁站 i 的特征向量中心性的计算公式如下:

$$R_{5i} = \frac{\sum_j A_{ij} R_{5j}}{\lambda} \quad (28)$$

式中: A 为地铁网络的邻接矩阵; λ 为常数。

2.1.2 地铁站对需求点的偏好指标

地铁站对需求点的偏好指标主要考虑配送成本,以两者的距离和货运量作为偏好指标。

指标 6 距离指标 (T_{1j})。距离过长会增加货物的运输成本,优先服务离地铁站较近的需求点,可使运输减少成本。距离指标与 R_{1i} 计算方法相同,计算公式如下:

$$T_{1j} = \frac{1}{d_{ji}} \quad (29)$$

式中: d_{ji} 为地铁站 j 到需求点 i 的最短距离。

指标 7 需求量指标 (T_{2j})。物流效益会随着货运 d_{ji} 量的增长而提升^[20],因此可以考虑优先给需求量大的配送中心提供服务,需求量指标等于需求点的需求量。计算公式如下:

$$T_{2j} = q_j \quad (30)$$

式中: q_j 为需求点 j 的需求量。

2.1.3 地铁站与需求点的匹配满意度计算

由于所有偏好指标度和权重不同,为了方便计算,需要对指标进行归一化处理并加权求和。假设地铁站对需求点的偏好指标权重矩阵为 $V_T = [V_1 \ V_2]$,需求点对地铁站的偏好指标权重矩阵为 $W_R = [W_1 \ W_2 \ W_3 \ W_4 \ W_5]$,则城内中转站 i 对需求点 j 的满意度 α_{ij} 和需求点 j 对城内中转站 i 的满意度 β_{ji} 的计算公式如下:

$$\alpha_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^2 V_t \sum_{j \in D} T_{kj}}{2} \quad (31)$$

$$\beta_{ji} = \frac{\sum_{r=1}^5 W_r \frac{R_{ki}}{\sum_{i \in N} R_{ki}}}{5} \quad (32)$$

式中： N 为地铁站点的数量； D 为需求点的数量。

2.2 算法设计

学者们已经证实了多层级的选址-路径规划是典型的 NP-hard 问题,问题的复杂程度主要受到各级物流节点数量的影响。混合启发式算法对该问题的求解方法具有较好的求解效果^[21-22]。本文针对所研究问题的特点,设计了 NSGA-II 与 Gale-Shapley (GS)算法匹配机制相结合的方法对模型进行求解,其中 GS 算法主要解决城内中转站与需求点的匹配问题。相比较于 NSGA-II 算法,混合了 GS 算法匹配机制后在确定需求点与备选城内中转站的服务关系时,最多计算 $D \times N$ 次(N 为备选城内中转站数量, D 为需求点数量),而 NSGA-II 需要计算 $2^{D \times N}$ 次。因此该方法能够有效降低计算复杂度,减少运算时间。算法流程如图 3 所示。

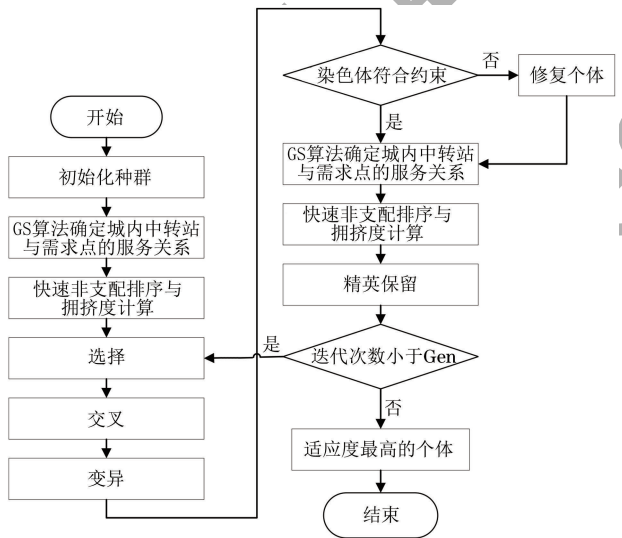


图 3 NSGA-II 与 GS 混合算法流程

Fig.3 Procedure of NSGA-II and GS hybrid algorithm

2.2.1 GS 算法步骤

GS 算法是 1962 年 Gale 和 Shapley^[23] 为了寻求一个稳定匹配方案使得匹配双方都能够在现有偏好的基础上实现最好的匹配而提出的。其核心思想是主动方按照偏好申请匹配,而被动方根据偏好进行比较,每次只保留最合适的匹配申请做最后统一的决定,最终达到稳定匹配,因此该算法也被称为“延迟接受算法”。

考虑到 GS 算法的防策略性^[24],在备选城内中转站与需求点的一对多双边匹配问题中,本文将多方(需求点)设置为选择方,一方(备选城内中转站)

设置为接收方。此外,在备选城内中转站和需求点的匹配过程中,备选城内中转站对于所服务需求点的数量没有限制,但存在最大服务能力限制。GS 算法步骤如下:

步骤 1 匹配轮次 $K=1$,每个需求点对其满意度最高的备选城内中转站发起匹配申请。

步骤 2 所有备选城内中转站对目前接收到的匹配申请按照对需求点的匹配满意度从高到低接收,直到不违反其最大服务能力限制,随后本轮匹配中其他未被备选城内中转站接受的申请均拒绝,未收到匹配申请的备选城内中转站不进行操作。

步骤 3 进入下一轮匹配 $K=K+1$,未匹配成功的需求点向未被拒绝过且匹配满意度最高的备选城内中转站发出匹配申请。

步骤 4 备选城内中转站将本轮接收到的申请和已经匹配成功的需求点比较匹配满意度,在不超过最大服务能力的前提下,保留满意度最高的需求点,拒绝其他的需求点。

步骤 5 如果所有需求点都匹配到了备选城内中转站或者所有需求点发起的匹配申请总和达到 $D \times N$ 次则停止匹配,此时得到的匹配结果为满足备选城内中转站最大服务能力限制的稳定匹配方案;否则,重复步骤 3。

2.2.2 算法设计要素

1) 染色体编码。

染色体编码采用 0-1 编码,染色体分为 4 段:第 1 段代表地铁站 n 是否被选择为城内中转站,若是则为 1,否则为 0,长度为 N ;第 2 段代表地铁线路 L 中末端地铁站 m 是否被选择为末端中转站,若是则为 1,否则为 0,长度为 $2 \times l$ (l 为地铁线条数);第 3 段代表物流场站与末端中转站的配送关系,长度为 $2 \times l$;第 4 段代表末端中转站与城内中转站的配送关系,长度与第 1 段相同。

2) 选择、交叉和变异操作。

选择方法为锦标赛法和精英保留相结合的方式,交叉和变异分别采用多点交叉和多点变异策略。

3 数值计算与结果分析

3.1 数据输入

截至目前,上海市地铁共有运营线路 20 条,地铁站 508 座,运营里程共 831 km,本文选取上海地铁 1、2 号线作为城市多级配送的地铁线路数据构建计算案例。为方便计算,设地铁行驶的线路为地铁站点与相邻站点之间连接的直线。以地铁线路中的部分地铁站为起始点,在其半径为 3 km 圆形范围内随机生

成 50 个坐标点作为需求点,每个需求点的需求量在 [50,100]之间随机生成,并且在每条线路末端附近给定 4 个坐标作为物流场站,其余参数设置见表 2。

表 2 参数设置

Table 2 Parameter setting

参数	参数值
初始种群规模	200
最大迭代次数/次	2 000
交叉概率	0.8
变异概率	0.1
末端地铁站日折旧成本 c_e /元	4 000
城内中转站日折旧成本 c_g /元	3 000
城内中转站最大服务能力 Q_g	400
货运汽车承载每公里每单位运输成本 θ_u /元	0.5
地铁承载每公里每单位运输成本 θ_s /元	0.1
电动货车承载每公里每单位运输成本 θ_e /元	0.3

在计算匹配满意度指标时,参考 ZHAO 等^[5]的研究,需求点对地铁站的偏好指标权重矩阵 $W_R = [0.5, 0.030\ 5, 0.063\ 5, 0.132, 0.274]$,设地铁站对需求点的两个指标权重矩阵 $V_T = [0.5, 0.5]$ 。

本文采用仿真计算,使用 Matlab2018a 编程实现,依据基础数据得到在上海市地铁 1、2 号线部分地铁站附近 3 km 的范围内配送 50 个需求点的运营成本及需求点与城内中转站的匹配满意度。

3.2 计算结果

3.2.1 地铁站中心性计算结果

在需求点对地铁站的偏好指标计算中,对于一个确定的地铁网络,地铁站的中心性指标是确定的。以上海市地铁网络为基础,计算 1、2 号线所有地铁站中心性指标的值,4 个中心性指标权重矩阵为 $R = [0.061, 0.127, 0.264, 0.548]$ 。经过加权求和计算得出,上海市 1、2 号线所有地铁站点中心性值热度图如图 4 所示(彩色效果见《计算机工程》HTML 版,下同),中心性的值最高的前 4 个地铁站如表 3 所示,分别为人民广场、一大会址·黄陂南路、陕西南路、静安寺地铁站。

表 3 上海地铁 1、2 号线部分地铁站的中心性值和经过的地铁线路

Table 3 The centrality values and the subway lines they pass through of some subway stations on Shanghai metro line 1 and 2

地铁站名称	中心性值	经过的地铁线路
人民广场	0.024 360	1、2、8
一大会址·黄陂南路	0.022 747	1、14
陕西南路	0.021 756	1、10、12
静安寺	0.020 818	2、7、14

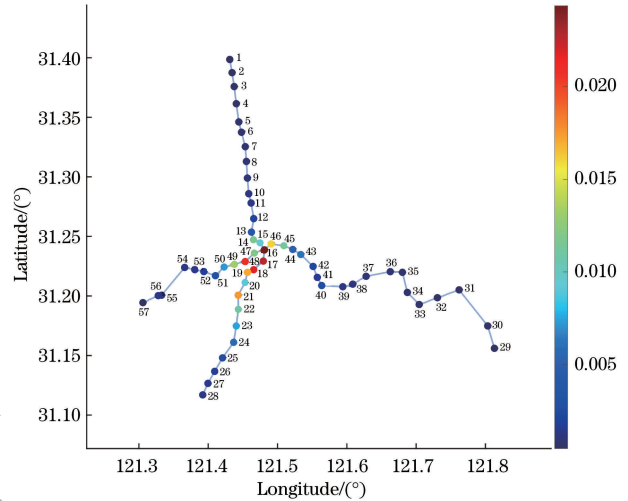


图 4 上海地铁 1、2 号线各站点中心性值
Fig.4 Centrality value of each station of line 1 and 2 in Shanghai metro

由表 3 中可知,虽然一大会址·黄陂南路地铁站相比与中心性值排名前 4 的其他 3 个地铁站经过的地铁线路更少,但是由于其离地铁网络中心处较近,因此其中心性值高于陕西南路、静安市地铁站。因此,中心性偏好指标能够综合反映地铁站所处的位置及经过的地铁线路数量。

3.2.2 基于地铁的多级配送选址-路径计算结果

本文基于案例数据迭代 2 000 次所生成的 Pareto 集合如图 5 所示, Pareto 最优解集共有 8 个解组成。

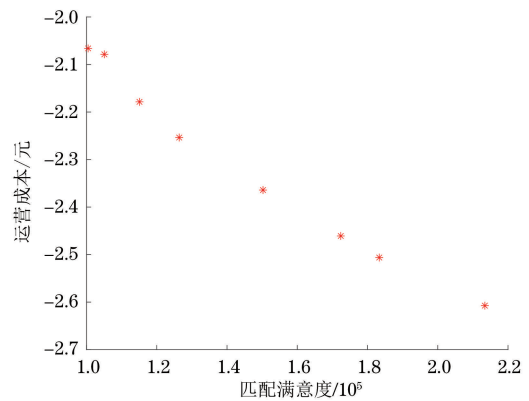


图 5 Pareto 最优解集
Fig.5 Pareto solution set

对于该 Pareto 最优解集,本文使用熵权 TOPSIS 算法计算指标权重,并选择出折中的最优解。其中熵权法是一种客观赋值法,可以减少主观赋值带来的偏差。TOPSIS 算法又被称为“近似理想排序”,是一种多属性决策分析为特征的决策方法。采用熵权法计算的权重结果如表 4 所示,其中运营成本权重为 37.379%,匹配满意度的权重为 62.621%。

表 4 指标权重计算结果

Table 4 Indicator weight calculation results

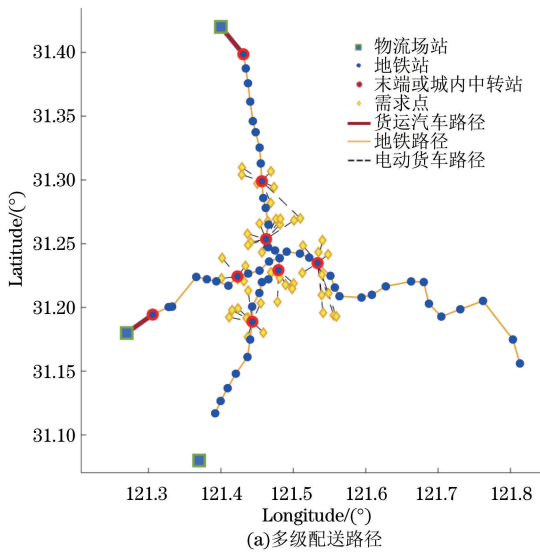
指标	信息熵值 e	信息效用值 d	权重/%
运营成本(目标 1)	0.895	0.105	37.379
匹配满意度(目标 2)	0.823	0.177	62.621

以该权重计算的 Pareto 最优解集的评价结果如表 5 所示,其中结果 5 的综合得分最高。对于结

表 5 TOPSIS 评价法计算结果

Table 5 Calculation results of TOPSIS evaluation method

结果	正理想解距离 ($D+$)	负理想解距离 ($D-$)	综合得分 指数	排序
1	0.535 578	0.545 037	0.504 377	5
2	0.791 045	0.611 380	0.435 945	7
3	0.444 357	0.618 091	0.581 761	2
4	0.446 042	0.553 762	0.553 871	4
5	0.472 352	0.663 432	0.584 118	1
6	0.631 563	0.557 093	0.468 675	6
7	0.773 128	0.586 680	0.431 444	8
8	0.611 380	0.791 045	0.564 055	3



果 5 的解析如表 6 所示,共有 6 个地铁站设为城内中转站,2 个地铁站设为末端中转站,城内中转站经过地铁线路共有 7 条。城市多级配送路径如图 6(a)所示,城市内中转站与需求点的匹配关系图 6(b)所示。

表 6 选择改造的地铁站

Table 6 Choose the renovated subway station

地铁线路	末端 中转站	城内中转站	城内中转站 经过的地铁线路
1 号线	富锦路	汶水路、上海火车站、 一大会址·黄陂南路、 上海体育馆	1、3、4、14
2 号线	徐泾东	世纪大道、中山公园	2、3、4、6、9

结果表明,城内中转站与需求点的匹配方案大部分能匹配双方较为满意的对象,且最优方案兼顾了“稳定性”和“满意性”两种要求。

此外,本文以城内中转站最大服务能力 Q_g 作为敏感性参数,研究城内中转站最大服务能力的变

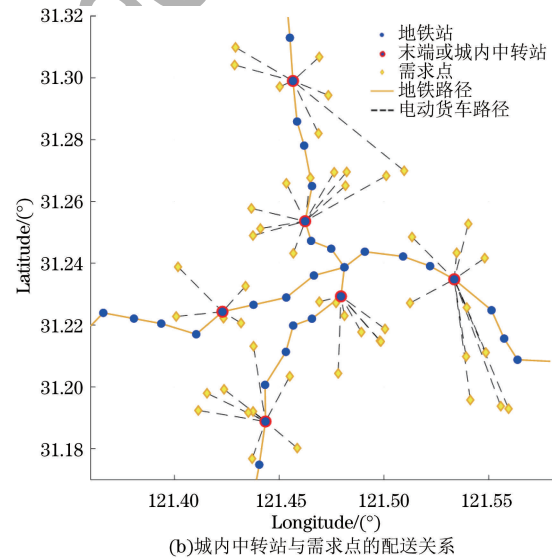


图 6 基于上海市地铁 1、2 号线的多级配送路径

Fig. 6 Multi-level distribution route based on Shanghai metro line 1 and 2

化对运营成本和匹配满意度的影响。首先,将城内中转站最大服务能力 Q_g 从 300 以 50 为单位增加到 500,计算每次增加后的运营成本和匹配满意度,不同取值重复运行 10 次取最好的解。结果如图 7 所示,运营成本随着最大服务能力 Q_g 的增加而减小,匹配满意度随着最大服务能力 Q_g 的增大而增大。因此,可知城内中转站的最大服务能力 Q_g 一定程度上影响了选址的结果,通过地铁来进行货运需要设定适当的最大服务能力,避免因最大服务能力欠缺导致的运营成本增加和匹配满意度的降低。

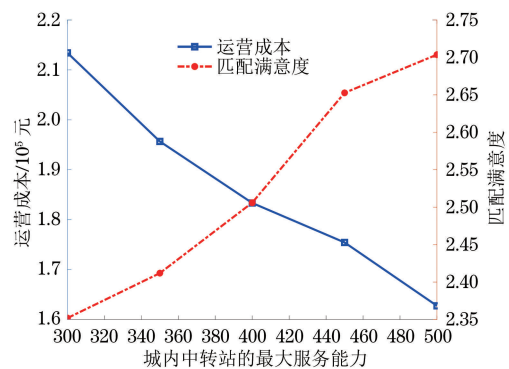


图 7 运营成本与匹配满意度的变化

Fig. 7 Changes in operating costs and matching satisfaction

4 结束语

本文旨在解决城市地铁多级配送选址-路径问题,同时考虑地铁物流节点与需求点的匹配满意度。首先,将需求点与城内中转站的分配问题代入双边匹配理论,构建多目标 0-1 型整数规划模型。其次,定义需求点与城内中转站偏好指标的计算方法,设计 NSGA-II 与 GS 算法相结合的混合算法对问题进行求解。最后,以上海市部分地铁线路数据设计案例进行数值分析,计算地铁站的中心性指标的综合值,确定需改造地铁站的位置以及配送路径的最优解,并对城内中转站最大服务能力进行敏感性分析。结果表明,本文的方法能够同时兼顾经济效益和社会效益,在保证物流成本尽可能低的情况下,提高地铁枢纽选择的中心性以及需求点的匹配满意度,对于地铁融入多级配送的运作与运营有重大影响,可广泛用于选址-路径的协同优化,为城市物资配送问题提供了新思路。然而,本文提出的规划方法是建立在许多假设前提下,并未考虑到地铁货运在不同模式下受地铁运力、不同时段客流量和建设成本等因素影响,如何在更贴近实际情况的条件下将各种现实因素转化为定量条件,并建立更精确的决策方法是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] 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.
- [2] SANCHEZ-DIAZ I. Modeling urban freight generation: a study of commercial establishments' freight needs [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017, 102: 3-17.
- [3] PAN Y, LIANG C J, DONG L. A two-stage model for an urban underground container transportation plan problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 138: 106113.
- [4] 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.
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. (in Chinese)
- [5] ZHAO L J, LI H Y, LI M C, et al. Location selection of intra-city distribution hubs in the metro-integrated logistics system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2018, 80: 246-256.
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] XU Y X, DONG J J, REN R, et al. The impact of metro-based underground logistics system on city logistics performance under COVID-19 epidemic: a case study of Wuhan, China[J]. *Transport Policy*, 2022, 116: 81-95.
- [8] SUN X L, HU W J, XUE X L, et al. Multi-objective optimization model for planning metro-based underground logistics system network: Nanjing case study[J]. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2023, 19(1): 170.
- [9] LI Z J, SHALABY A, ROORDA M J, et al. Urban rail service design for collaborative passenger and freight transport[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 147: 102205.
- [10] LENG K J, LI S H. Distribution path optimization for intelligent logistics vehicles of urban rail transportation using VRP optimization model [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(2): 1661-1669.
- [11] SHAN M, HWANG B G, WONG K S N. A preliminary investigation of underground residential buildings: advantages, disadvantages, and critical risks[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2017, 70: 19-29.
- [12] CHEN Z L, DONG J J, REN R. Urban underground logistics system in China: opportunities or challenges? [J]. *Underground Space*, 2017, 2(3): 195-208.
- [13] CUI J Q, DODSON J, HALL P V. Planning for urban freight transport: an overview [J]. *Transport Reviews*, 2015, 35(5): 583-598.
- [14] ROTH A E. Common and conflicting interests in two-sided matching markets [J]. *European Economic Review*, 1985, 27(1): 75-96.
- [15] 李铭洋,李博,曹萍萍,等. 考虑匹配稳定性的多属性双边匹配决策方法[J]. *系统工程*, 2017, 35(11): 153-158.
LI M Y, LI B, CAO P P, et al. Method for multiple attribute two-sided matching decision making considering the stability of matching problem [J]. *Systems Engineering*, 2017, 35(11): 153-158.
- [16] 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. (in Chinese)
- [17] BADER D A, KINTALI S, MADDURI K, et al. Approximating betweenness centrality [M]. Berlin, Germany: Springer, 2007.
- [18] BORGATTI S P, EVERETT M G. A Graph-theoretic perspective on centrality[J]. *Social Networks*, 2006, 28(4): 466-484.
- [19] NEWMAN M E J. *Mathematics of networks*[M]. London, UK: Palgrave Macmillan, 2008.
- [20] VAN BINSBERGEN A, BOVY P. Underground urban goods distribution networks[J]. *Innovation: the European Journal of Social Science Research*, 2000, 13(1): 111-128.
- [21] 刘博宇,梁承姬,王钰. 特大型城市地下物流多层级网络优化研究[J]. *计算机工程*, 2023, 49(12): 311-320.
LIU B Y, LIANG C J, WANG Y. Research on multi-level network optimization of urban underground logistics in the megalopolis [J]. *Computer Engineering*, 2023, 49(12): 311-320. (in Chinese)
- [22] 戴卓. 三层物流网络选址-路径优化及混合启发式算法研究

- [J]. 计算机应用研究, 2017, 34(8): 2349-2354.
- DAI Z. Study on optimization and hybrid heuristic algorithm for location-routing of three-layer logistics network [J]. Application Research of Computers, 2017, 34 (8): 2349-2354. (in Chinese)
- [23] GALE D, SHAPLEY L S. College admissions and the stability of marriage [J]. The American Mathematical Monthly, 2013, 120(5): 386.
- [24] 唐家俊, 吴晓刚, 张思, 等. 基于 Gale-Shapley 算法的虚拟电厂与分布式资源匹配机制 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 65-73.
- TANG J J, WU X G, ZHANG S, et al. Matching mechanism for virtual power plants and distributed energy resources based on Gale-Shapley algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (18): 65-73. (in Chinese)

编辑 索书志

计算机工程
www.ecice06.com