

8-15-2022

Layout Planning of Metro-based Underground Logistics System Network Considering Fuzzy Uncertainties

Wanjie Hu

1.Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;; steve_hu@emails.bjut.edu.cn

Jianjun Dong

2.College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;; dongjj@njtech.edu.cn

Rui Ren

3.College of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

Zhilong Chen

3.College of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Layout Planning of Metro-based Underground Logistics System Network Considering Fuzzy Uncertainties

Abstract

Abstract: Aiming at the network design and optimization of metro-based urban underground logistics under uncertainties, the facility components of two-tier metro-based underground logistics system (M-ULS) are proposed. *Focus on the comprehensive costs and system utilization rate, a M-ULS network flow assignment model is established based on the expectation of environmental benefits of underground freight transport. a M-ULS network location-allocation-routing fuzzy random programming model is established, and a crisp linearization method is presented. A solution portfolio combining discrete binary chaos particle swarm optimization-genetic algorithm and exact algorithms is designed for combinatorial optimization.* Effectiveness of the presented models and algorithms is verified in real-life cases. Results show that the best M-ULS layout schemes in fuzzy random scenarios are more conservative than those in deterministic scenarios. The external environment benefits of underground logistics can offset 10%~12% of costs in network construction and operations.

Keywords

urban underground logistics systems, metro, location and layout, particle swarm optimization algorithm, demand uncertainty

Recommended Citation

Wanjie Hu, Jianjun Dong, Rui Ren, Zhilong Chen. Layout Planning of Metro-based Underground Logistics System Network Considering Fuzzy Uncertainties[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(8): 1725-1740.

考虑模糊不确定的地铁货运系统成网布局规划

胡万杰¹, 董建军^{2*}, 任睿³, 陈志龙³(1. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211800;
3. 陆军工程大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 为解决不确定条件下依托地铁开展城市地下物流的网络设计与优化问题, 提出双层地铁-货运系统(metro-based underground logistics system, M-ULS)设施构成, 建立地下货运环境效益期望下的M-ULS网络流量配置模型, 以综合成本和系统利用率为目标, 构建M-ULS网络选址-分配-路径模糊随机规划模型并提出其线性精确化方法, 设计离散二进制混沌遗传粒子群算法和精确算法进行组合寻优。结果表明: 与确定性情景相比, 模糊随机情景下的M-ULS最佳布局方案更加保守, 地下物流的环境外部效益可以抵消10%~12%的网络建设运营成本。

关键词: 城市地下物流系统; 地铁; 选址与布局; 粒子群算法; 需求不确定

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)08-1725-16

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0206

Layout Planning of Metro-based Underground Logistics System
Network Considering Fuzzy UncertaintiesHu Wanjie¹, Dong Jianjun^{2*}, Ren Rui³, Chen Zhilong³(1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;
3. College of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Aming at the network design and optimization of metro-based urban underground logistics under uncertainties, the facility components of two-tier metro-based underground logistics system (M-ULS) are proposed. *Focus on the comprehensive costs and system utilization rate, a M-ULS network flow assignment model is established based on the expectation of environmental benefits of underground freight transport. a M-ULS network location-allocation-routing fuzzy random programming model is established, and a crisp linearization method is presented. A solution portfolio combining discrete binary chaos particle swarm optimization-genetic algorithm and exact algorithms is designed for combinatorial optimization.* Effectiveness of the presented models and algorithms is verified in real-life cases. Results show that the best M-ULS layout schemes in fuzzy random scenarios are more conservative than those in deterministic scenarios. The external environment benefits of underground logistics can offset 10%~12% of costs in network construction and operations.

Keywords: urban underground logistics systems; metro; location and layout; particle swarm optimization algorithm; demand uncertainty

收稿日期: 2021-03-15 修回日期: 2021-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(71631007, 71971214)

第一作者: 胡万杰(1995-), 男, 博士生, 研究方向为城市地下物流系统工程。E-mail: steve_hu@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 董建军(1983-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为地下空间规划与工程项目管理。E-mail: dongjj@njtech.edu.cn

引言

交通运输系统的革新将带来城镇化的发展和产业变革^[1]。城市物流是综合交通运输体系的重要组成部分,对区域经济和可持续发展产生重要影响。我国配送行业面临高成本、低效率、高负面外部性等问题。一方面,大型城市的物流需求逐年激增,2020年拥有十亿量级以上包裹派件数的城市超过18个^[2]。社会物流成本占GDP比重的13%~15%,远高于西方国家;另一方面,市内配送占据30%~40%的道路交通资源,对交通污染的贡献率超过50%^[3],每年因货运造成的拥堵损失高达数百亿元^[4],货车引起的交通事故占比超过三成。当前基于“货车入城限制”和“末端快递小哥”的传统运营模式已难以满足智慧城市的发展需求。

在我国地下空间发展的重大机遇下,推行智能化地下货物运输,重塑城市交通物流形态,是面向第二个百年目标,建设未来城市的战略性举措^[5]。《交通强国建设纲要》指出发展城市地下物流系统(underground logistics system, ULS)^[6]。ULS旨在建立地下隧道和管道分级网络以实现货物在城市地区的自动化运输和地下封闭式物流处理,具有可靠、高效、智能、节约用地等优势^[7]。荷、德、日、美、意等国家从20世纪80年代开始先后进行了ULS的规划和工程试点^[8-9]。我国北京、上海、青岛、武汉等城市也提出了ULS的规划设想和初步的可行性论证^[10-11]。世界上第一条专用城际地下货运通道建设项目已在瑞士实施。然而,受到高投资和地下基础设施发展水平的影响,世界各国目前尚未建成城市规模的专用地下物流网络。

利用地铁实现客流与货流的协同运输为城市ULS的落地提供了新思路。与新建系统相比,地铁-货运系统(metro-based ULS, M-ULS)的建造成本和实现难度更低且具备可观的货运能力,建成后能够快速发挥效益,被普遍认为是城市地下物流的优先发展模式^[12]。近20年来,地铁货运在巴黎、维也纳、苏黎世等欧洲城市实现了小规模应

用^[13],在满足乘客通勤服务的基础上兼顾向市中心运输邮件和快消类商品。项目的成功预示着以现代轨道交通为载体的货运技术和运营条件趋于成熟并被社会接受。从单线过渡到全城范围的地铁货运网络是该系统在未来的发展方向。

现有文献从运筹学的角度提出了货运站点在地铁网络中的选址优化方法。李彤等^[14]基于斯坦纳最小树理论建立了地下货运网络拓扑优化的植物生长算法;周芳汀等^[15]以成都地铁3号线为例,研究了带时间窗的地铁配送网络路径优化问题;任睿等^[16]以南京地铁4条线为例,设计了一类3层地铁货运网络并提出选址-分配优化模型;Dong等^[17]基于南京地铁案例构建了货运站点选址模型;Zhao等^[18]提出了上海地铁网络物流枢纽多目标选址评价方法;Behiri等^[19]通过离散事件仿真和启发式算法解决了巴黎Monoprix地铁货运线路中的客、货机车排班问题。从文献发表数量上看,相关理论研究尚处于起步阶段,且仅局限于确定性条件下的设施布局,少有研究基于一套完整的地铁-货运系统运作流程对网络进行全局规划。此外,考虑复杂不确定性的地铁货运网络多目标决策优化方法仍存在研究空白。

本文基于现实M-ULS试点项目,从系统运作层面思考地铁货运网络的整体设计,针对模糊随机条件下的地铁货运站点选址、客户分配、管道布局和运输路径等关键成网决策提出组合优化模型和高效求解算法,以期真实地还原系统建设场景,为地铁货运和城市地下物流规划提供科学参考。

1 系统规划问题描述

1.1 地铁货运网络形成

所规划的地铁-货运系统要求满足不同方向货流在城市地区的自动化地下运输和末端配送。M-ULS网络整体分为2层,其“上游”与物流园区相连,“下游”连接客户终端。独立的货运列车从园区发出进入地铁网络,在地铁线路上与客运

3

确定需求下的B2C采配协同模型和粒子群算法。

大型复杂地铁货运网络布局受到主观和客观不确定因素的影响。主观不确定指主体因认知差异和知识水平受限，易导致对客观事物的模糊决策，可表现为偏好函数或目标的期望效用，根据历史数据对不确定参数中的模糊量进行推断拟合，建立信度函数将模糊信息构造为一种特殊的数学形式纳入建模目标，如三角模糊变量、梯形模糊变量等。另一方面，M-ULS网络布局受到客观不确定因素的影响。对于未确知但潜在的随机事件赋予概率分布函数，通过计算均值和数学期望，模拟随机变量对系统的影响。本文综合考虑决策者对系统成本的主观估计以及客观货运需求偏差，建立地铁货运网络规划问题的不确定情景集，如图2所示。

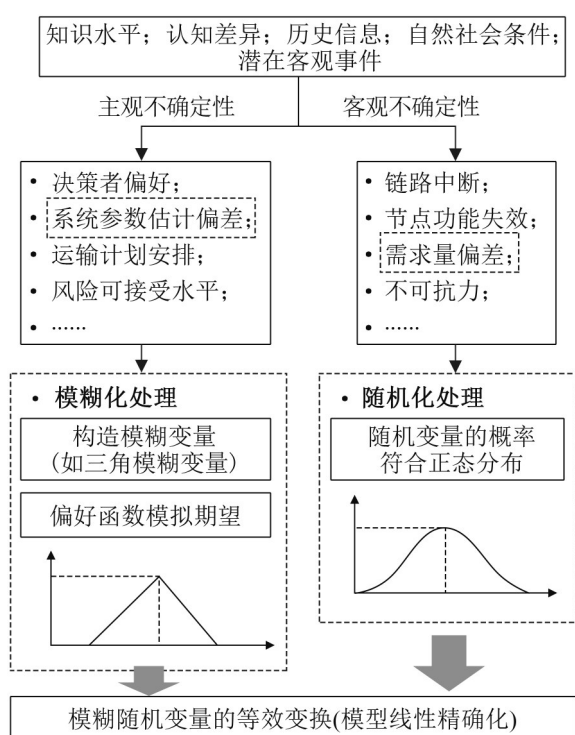


图2 不确定性的模糊随机化
Fig. 2 Fuzzification and randomization of uncertainties

1.3 建模框架

地铁货运网络规划涵盖如下决策。

(1) 系统规模：在一定的效益期望水平下，确定地铁货运网络中的流量O-D配置，即确定二级

节点的数量和位置；

(2) 选址：确定地铁货运站点的数量和位置；

(3) 分配：确定地铁货运站点与二级节点的分配关系；

(4) 路径：确定管道区间的固定布置路线，以及货物在双层网络中的运输路线。

本文建模的总体目标是在成本参数和需求混合不确定的条件下，考虑地下设施容量限制，以建设成本最低、运营成本最低、设施利用率最高为多目标，确定地铁货运网络的最佳布局。所述问题可归纳为一类特殊的选址-分配-路径(location-allocation-routing, LAR)运筹学问题。本文通过两阶段建模对4部分决策进行组合优化。图3描绘了建模的要素及其关联。

2 M-ULS两阶段成网建模

2.1 符号与假设

定义 $k \in K$, $j \in J$, $t \in T \subseteq I$, $i \in I$ 分别为所有园区、地铁站、换乘站点和客户终端的集合，构成点集 Z 。网络表征为有向图 $G = (Z, \bar{S}, E)$ 。其中， $\bar{S}$ 包含地铁线路区间集合 $s \in S$ 与城市道路路段集合 $h \in L$ ； E 为货流在一级地铁网络和二级管道网络中的路径集合。引入以下6条假设进一步明确模型边界：

A1：采用单分配树状拓扑形式布置二级管道网络；

A2：为避免管道施工障碍，规定二级管道必须沿道路布置，允许在同一路段下方平行布置多条等规格的货运管道，管道默认为单洞双向；

A3：不考虑地铁线路的通行能力限制；

A4：传统模式下，LGV始终沿路网最短路径往返于前端配送中心与客户终端；

A5：当二级节点建立在某终端处时，与该终端相关的所有需求均通过地铁运输；

A6：换乘地铁站默认视为货流换乘站。

阶段1: 基于环境效益的地铁
货运网络规模决策模型

阶段2: 模糊随机条件下的地铁货运网络LAR决策模型

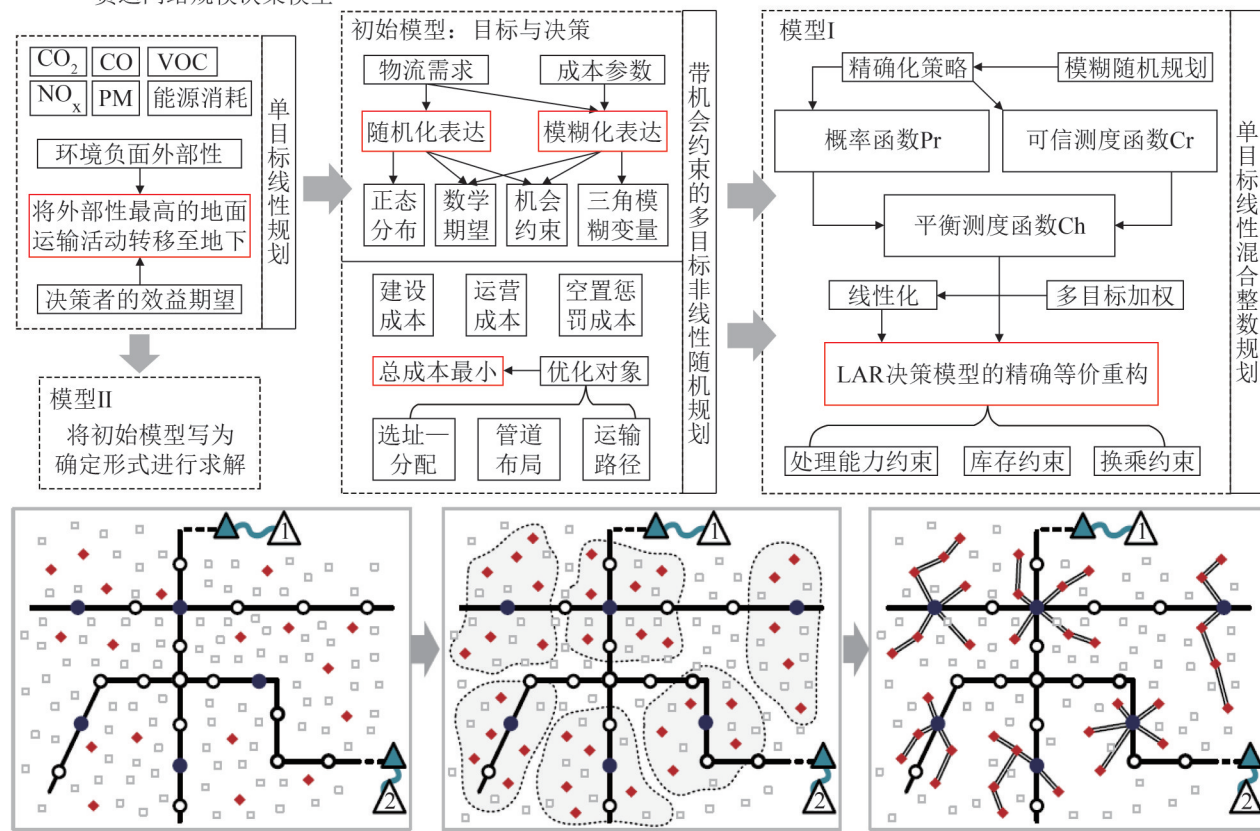


图3 地铁货运网络规划框架

Fig. 3 Framework of M-ULS network planning

主要建模参数:

 d_{ik} 、 $\hat{D}_{ik}$: 园区 k 与需求点 i 之间货运需求量的预测值和模糊值; $\hat{\sigma}_j$ 、 $\hat{\sigma}_j$: 地铁货运站点的货物处理能力和临时库存能力; H_i : 换乘站点的货物转运能力; ς : 二级管道的货流通行能力; a_h 、 a_s 、 a_{ij} : 道路段 h 、地铁区间 s 、需求点 i 至地铁站 j 的欧几里得距离; r_j 、 $\hat{R}_j$: 地铁货运站点的建设成本预测值和模糊值; e_i 、 $\hat{E}_i$: 二级节点的建设成本预测值和模糊值; c_h 、 $\hat{C}_h$: 管道区间的建设成本预测值和模糊值; θ : 地下设施折旧系数; u_j 、 $\hat{U}_j$: 地铁货运站点的单位货物处理成本预测值和模糊值; v_i 、 $\hat{V}_i$: 换乘站点的单位货物转运成本预测值和模糊值; p_s 、 $\hat{P}_s$: 地铁区间单位货物运输成本预测值和模糊值; q_h 、 $\hat{Q}_h$: 管道区间单位货物运输成本预测值和模糊值; w_j 、 $\hat{W}_j$: 单位货物在地铁货运站点的库存成本预测值和模糊值; γ 、 η : 地铁货运站点的空置惩罚成本和最大允许空置率; φ : 轻型货车(LGV)的运载能力; ζ 、 O : LGV 的各类污染物释放系数与相应的

单位治理成本;

κ : LGV的燃油消耗系数;

ε : 单位不可再生能源(燃油)消耗所造成的外部损失;

$x_i=1$: 若终端*i*建设为二级节点;

$y_j=1$: 若站点*j*建设为地铁货运站点;

$z_{ij}=1$: 若二级节点*i*归属于地铁货运站点*j*;

$\mu_h=1$: 若货运管道建立于道路段*h*下;

$v_{ikh}=1$: 若 d_{ik} 在M-ULS网络中经历管道区间*h*;

$\omega_{iks}=1$: 若 d_{ik} 在M-ULS网络中经历地铁区间*g*;

$\psi_{ikt}=1$: 若 d_{ik} 在换乘站*t*处转运;

$\tau_{ikh}=1$: 传统模式下, 若 d_{ik} 经历道路段*h*。

2.2 基于环境效益的网络流量配置模型

构建反映网络流量配置决策的数学模型, 涵义如下: 决策者根据环境效益期望决定地铁货运网络的规模。该期望可以是一个绝对量, 或是一个相对量, 如M-ULS建成后要求使得传统城市地面货运造成的污染经济损失降低一定的比例, 本文选择相对量计算方式。

$$\min \sum_{i \in I} x_i \quad (1)$$

subject to:

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_i \cdot B_{ik} \geq \frac{\delta}{\varphi} \cdot L \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{h \in L} d_{ik} \cdot a_h \cdot \tau_{ikh} \quad (2)$$

式中: $L = \sum_g \zeta_g \cdot O_g \mid g = \text{CO}_2, \text{CO}, \text{NO}_x, \text{PM}, \text{VOC} + \kappa \cdot \varepsilon$ 。

在模型中, 首先对各O-D货物运输所产生的污染损失进行排序, 优先选择环境影响较大的终端位置建立二级节点, 将与该二级节点相关的全部货运需求转入地下, 直至效益达到期望水平。其次, 本文引入假设A6来计算LGV开展传统城市配送所引起的交通量。然而, 现实中无法保证LGV按照最短路径抵达目的地。故式(2)计算的M-ULS环境效益与实际值相比小得多。另外, 由于Alpha地区路网体系尚未建成, 故无法将M-ULS网络规模决策的另一项主要依据(即拥堵缓解效益)纳入上述模型。

从5类污染物排放(即二氧化碳、一氧化碳、氮氧化物、颗粒物、挥发性有机化合物)和汽油等不可再生能源消耗所带来的负面效应2个方面, 计算传统模式下的LGV运输所产生的外部经济损失。式(2)采用了需求量预测值而非模糊值, 因已通过模拟证明了需求不确定性对上述模型的计算结果无实质影响, 故忽略。

2.3 选址-分配-路径混合整数规划模型

目标函数 f_1 表示地铁货运站点、二级节点和二级管道的总建设折旧成本最小化; 目标函数 f_2 由地铁货运站点处理成本、库存成本、换乘站点转运成本和地下运输成本组成, 反映M-ULS网络在单位折旧期内的总运营成本最小化; 目标函数 f_3 表示地铁货运站点在单位折旧期内因未达到额定负荷量的总惩罚成本最小化。

$$\min f_1 = \frac{1}{\theta} \cdot \sum_{h \in L} \hat{C}_h \cdot a_h \cdot \mu_h \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \left\lceil \frac{\hat{D}_{ik} \cdot v_{ikh}}{\varsigma} \right\rceil + \frac{1}{\theta} \cdot \sum_{j \in J} \hat{R}_j \cdot y_j + \frac{1}{\theta} \cdot \sum_{i \in I} \hat{E}_i \cdot x_i \quad (3)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算符。

$$\begin{aligned} \min f_2 = & \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \hat{D}_{ik} \cdot a_s \cdot \hat{P}_s \cdot \omega_{iks} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{h \in L} \hat{D}_{ik} \cdot a_h \cdot \hat{Q}_h \cdot v_{ikh} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \hat{D}_{ik} \cdot (\hat{U}_j \cdot z_{ij} + \hat{V}_t \cdot \psi_{ikt}) + \\ & \sum_{i \in I} \max_i \left\{ \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (\hat{D}_{ik} \cdot z_{ij} - \hat{\sigma}_j) \cdot \hat{W}_j, 0 \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\min f_3 = - \sum_{i \in I} \min_i \left\{ \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (\hat{D}_{ik} \cdot z_{ij} - \eta \cdot \hat{\sigma}_j), 0 \right\} \cdot \gamma \quad (5)$$

构建平衡机会约束反映模糊随机量不超过平衡测度水平的综合概率和可信度。

任意站点处理的货物量不超过其处理能力和库存能力之和:

$$\text{Ch} \left\{ (\alpha, \beta) \in \mathbb{N} \times \mathbb{Q} \mid \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \hat{D}_{ik} \cdot z_{ij} \leq \hat{\sigma}_j + \hat{\sigma}_j \right\} \geq \xi, \forall j \quad (6)$$

换乘站的货物转运能力限制:

$$\text{Ch} \left\{ (\alpha, \beta) \in \mathbb{N} \times \mathbb{Q} \left| \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \hat{D}_{ik} \cdot \psi_{ikt} \leq H_t \right. \right\} \geq \zeta, \forall t \quad (7)$$

若地铁站 i 未建为货运站点或终端 j 未建为二级节点, 则 j 的需求不可由 i 指派:

$$z_{ij} \leq y_j, z_{ij} \leq x_i, \forall i, j \quad (8)$$

确保任意二级节点归属的唯一性:

$$\sum_{j \in J} z_{ij} = 1, \forall i \quad (9)$$

若客户未被 M-ULS 服务, 则地下运输和转运过程都不会发生:

$$v_{ikh} \leq x_i, \omega_{iks} \leq x_i, \psi_{ikt} \leq x_i, \forall i, j, k \quad (10)$$

任意路段未建设二级管道时不存在地下货流:

$$v_{ikh} \leq \mu_h, \forall i, k, h \quad (11)$$

货流在地铁网络中的转运次数不超过 2 次。

设置该约束的目的是避免地下转运操作过于集中, 导致换乘站点的工作负载不均匀:

$$\sum_{t \in T} \psi_{ikt} \leq 2, \forall i, k \quad (12)$$

任意货流在地铁网络和管道网络中分别至少经历 1 个区间:

$$\sum_{h \in L} v_{ikh} \geq 1, \sum_{s \in S} \omega_{iks} \geq 1, \forall i, k \quad (13)$$

基于模糊随机规划理论^[21, 25], 将包括需求量预测值、货运站点建设成本预测值、管道建设成本预测值、运输成本预测值等在内的 9 项不确定参数构造为相互独立的三角模糊随机变量, 如表 1 所示。

以需求为例, 三角模糊变量 $\hat{D}_{ik}(\alpha, \beta)$ 由中值 D_{ik} 、左边界值 $D_{ik}(\alpha) - m_{ik}^1$ 和右边界值 $D_{ik}(\alpha) + n_{ik}^1$ 构成。另假设中值 D_{ik} 符合正态分布 $D_{ik} \rightarrow N(d_{ik}, \rho_{ik})$, 其中, d_{ik} 为需求量预测值, ρ_{ik} 为方差, 推导出随机需求的可信性测度函数:

表 1 模糊随机变量构造

Table 1 Representing fuzzy random variables

变量	左边界	右边界	均值	方差
$\hat{D}_{ik}$	m_{ik}^1	n_{ik}^1	d_{ik}	ρ_{ik}
$\hat{R}_j$	m_j^2	n_j^2	r_j	—
$\hat{E}_i$	m_i^3	n_i^3	e_i	—
$\hat{C}_h$	m_h^4	n_h^4	c_h	—
$\hat{U}_j$	m_j^5	n_j^5	u_j	—
$\hat{V}_t$	m_t^6	n_t^6	v_t	—
$\hat{P}_s$	m_s^7	n_s^7	p_s	—
$\hat{Q}_h$	m_h^8	n_h^8	q_h	—
$\hat{W}_j$	m_j^9	n_j^9	w_j	—

$$\begin{aligned} \text{Cr} \{ \hat{D}_{ik}(\alpha, \beta) \geq t \} &= 1 - \text{Cr} \{ \hat{D}_{ik}(\alpha, \beta) \leq t \} = \\ &= \begin{cases} 1 - \frac{t - D_{ik}(\alpha) + m_{ik}^1}{2m_{ik}^1}, & D_{ik}(\alpha) - m_{ik}^1 < t \leq D_{ik}(\alpha) \\ \frac{D_{ik}(\alpha) + n_{ik}^1 - t}{2n_{ik}^1}, & D_{ik}(\alpha) < t \leq D_{ik}(\alpha) + 2n_{ik}^1 \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} E[\hat{D}_{ik}] &= \int_0^{+\infty} \text{Cr} \{ \hat{D}_{ik} \geq t \} dt - \int_{-\infty}^0 \text{Cr} \{ \hat{D}_{ik} \leq t \} dt \\ &= (4d_{ik} - m_{ik}^1 + n_{ik}^1)/4 \end{aligned} \quad (15)$$

当平衡度系数 $0 < \zeta \leq 0.5$ 时, 式(6)可按式(16)表现为精确形式:

$$\begin{aligned} &\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} d_{ik} \cdot z_{ij} + \Omega_{\zeta} \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sqrt{\rho_{ik}} \cdot z_{ij} - \\ &(1 - 2\zeta) \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} m_{ik}^1 \cdot z_{ij} \leq \hat{\sigma}_j + \bar{\sigma}_j, \forall j \end{aligned} \quad (16)$$

式中: Ω_{ζ} 为标准正态分布 ζ 百分比对应的 Z 值。

本文设置权重系数 λ 反映决策者的优化偏好, 将多目标加权为单目标进行求解。按照上述步骤对全部不确定参量和机会约束进行重构, 得到 M-ULS 网络模糊随机规划模型(简称模型 I)。另一方面, 消除机会约束并将模糊值替换为预测值后可得到确定条件下的网络规划模型(简称模型 II, 考虑到公式重复性, 模型 II 的表达被省略)。

模型I:

$$\begin{aligned}
\min E[F(\alpha, \beta)] = & \frac{\lambda_1}{4\theta} \cdot \sum_{j \in J} (4r_j - m_j^2 + n_j^2) \cdot y_j + \frac{\lambda_1}{4\theta} \cdot \sum_{i \in I} (4e_i - m_i^3 + n_i^3) \cdot x_i + \\
& \frac{\lambda_1}{4\theta} \cdot \sum_{h \in L} (4c_h - m_h^4 + n_h^4) \cdot a_h \cdot \mu_h \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \left[\frac{(4d_{ik} - m_{ik}^1 + n_{ik}^1) \cdot v_{ikh}}{4\zeta} \right]^+ + \\
& \frac{\lambda_2}{16} \cdot \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (4d_{ik} - m_{ik}^1 + n_{ik}^1) \cdot a_s \cdot (4p_s - m_s^7 + n_s^7) \cdot \omega_{iks} + \\
& \frac{\lambda_2}{16} \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{h \in L} (4d_{ik} - m_{ik}^1 + n_{ik}^1) \cdot a_h \cdot (4q_s - m_s^8 + n_s^8) \cdot v_{ikh} + \\
& \frac{\lambda_2}{16} \cdot \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} (4d_{ik} - m_{ik}^1 + n_{ik}^1) \cdot [(4u_j - m_j^5 + n_j^5) \cdot z_{ij} + (4v_t - m_t^6 + n_t^6) \cdot \psi_{ikt}] + \\
& \frac{\lambda_2}{16} \cdot \sum_{i \in I} \max_i \left\{ \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (4d_{ik} - m_{ik}^1 + n_{ik}^1) \cdot (4w_j - m_j^9 + n_j^9), 0 \right\} - \\
& \lambda_3 \cdot \sum_{i \in I} \min_i \left\{ \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \left[\frac{(4d_{ik} - m_{ik}^1 + n_{ik}^1)}{4} \cdot z_{ij} - \eta \cdot \ddot{\sigma}_j \right], 0 \right\} \cdot \gamma
\end{aligned} \quad (17)$$

subject to:

$$\begin{cases} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} d_{ik} \cdot z_{ij} + \Omega_\zeta \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sqrt{\rho_{ik}} \cdot z_{ij} - (1 - 2\zeta) \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} m_{ik}^1 \cdot z_{ij} \leq \dot{\sigma}_j + \ddot{\sigma}_j, \forall j, \forall 0 < \zeta \leq \frac{1}{2} \\ \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} d_{ik} \cdot z_{ij} + \Omega_\zeta \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sqrt{\rho_{ik}} \cdot z_{ij} + (2\zeta - 1) \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} n_{ik}^1 \cdot z_{ij} \leq \dot{\sigma}_j + \ddot{\sigma}_j, \forall j, \forall \frac{1}{2} < \zeta \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} d_{ik} \cdot \psi_{ikt} + \Omega_\zeta \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sqrt{\rho_{ik}} \cdot \psi_{ikt} - (1 - 2\zeta) \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} m_{ik}^1 \cdot \psi_{ikt} \leq H_t, \forall t, \forall 0 < \zeta \leq \frac{1}{2} \\ \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} d_{ik} \cdot \psi_{ikt} + \Omega_\zeta \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sqrt{\rho_{ik}} \cdot \psi_{ikt} + (2\zeta - 1) \cdot \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} n_{ik}^1 \cdot \psi_{ikt} \leq H_t, \forall t, \forall \frac{1}{2} < \zeta \leq 1 \end{cases} \quad (19)$$

模型I其余约束与式(8)~(13)一致。

3 求解算法设计

3.1 算法框架

所提出的地铁货运网络规划模型具有NP难的计算复杂度。已证明启发式算法能够在可接受的计算时间内获得大型选址-分配-路径问题的高质量近似最优解^[26]。另外,考虑到决策的多样性,将精确式算法与启发式算法联合使用,能够充分发挥二者的优势,是解决组合优化问题的卓越途径。本文基于对二阶段模型的分解,设计了一个混合精确-启发式算法框架,如图4所示。

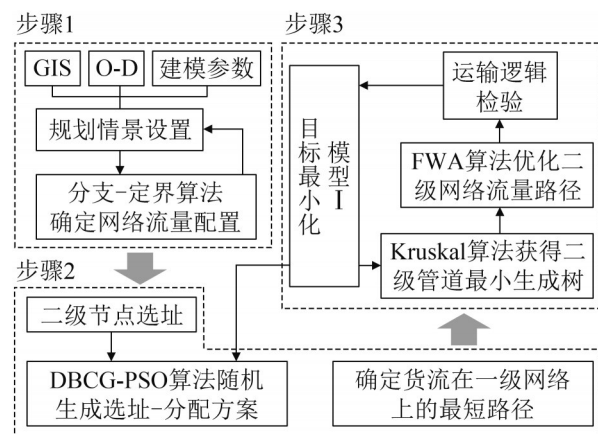


图4 优化思路

Fig. 4 Optimization scheme

step 1: 设置决策场景, 包括效益期望、客户终端和地铁设施地理位置、容量、货流O-D对等。采用分支-定界算法获得第一阶段流量配置模型的精确解, 确定二级地下物流节点选址, 并将结果输出给模型I和模型II。

step 2: 基于一种改进后的粒子群优化启发式算法随机生成地铁货运站点的选址-分配方案。其中, 分配决策遵守约束式(8), (9), (18), 并在满足约束式(12), (13), (19)的前提下确定货流在一级网络上的最短路。

step 3: 利用Kruskal最小生成树算法和Floyd-Warshall算法(FWA)优化二级管道路径布局。Kruskal算法是一种基于贪心策略的图论算法, 其思路是选择代价最小的边(U, V), 若边的顶点属于不同树, 则选择 U 与 V 之间最短的一条边代替原有边, 直到所有顶点由唯一的最小生成树相连。将FWA算法嵌套在Kruskal算法的主循环中优化建设运输成本加权最小时的路径。在此过程中, 贪心策略迫使最小生成树放弃冗余边, 追求网络总流量最小, 从而减少运输里程。获得路径精确解之后, 返回step 2更新选址-分配方案, 再次反馈给step 3进行新一轮寻优, 直至达到终止条件。

3.2 改进的粒子群算法

粒子群算法(PSO)是一种基于群体智能的高效启发式算法。PSO源于对鸟类种群捕食行为的仿生研究, 通过将个体(即潜在解)视为没有质量或大小的粒子, 利用适应度值评估粒子是否处于合适的位置。粒子速度决定了其移动的方向和距离, 可根据自身及其他粒子的运动经验沿最优方向动态调整。PSO的优点是具有记忆性, 结构简单且全局搜索能力较强; 不足之处在于局部寻优能力较差, 随可行解空间的增大易产生早熟现象。另外, PSO算法将粒子初始的位置和速度更新视为连续函数, 易导致其在求解复杂离散选址

问题时表现不佳。

基于地铁货运网络规划的复杂性, 本文从3个方面对PSO算法进行改进: ①引入粒子的离散二进制操作处理大规模0-1决策变量; ②引入遗传算法(GA)中的交叉和变异算子丰富粒子的空间搜索能力; ③引入混沌搜索策略增强局部搜索能力。改进后的算法称为离散二进制混沌遗传-粒子群算法(discrete binary chaos genetic-PSO, DBCG-PSO), 算法流程如图5所示。

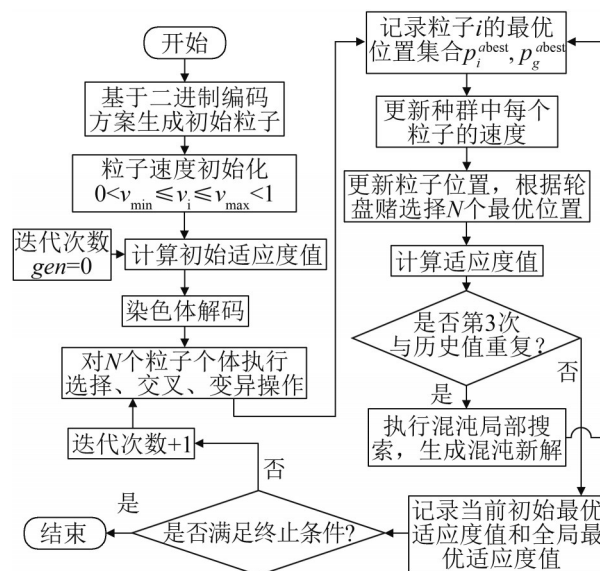


图5 DBCG-PSO算法流程

Fig. 5 Flowchart of DBCG-PSO algorithm

(1) 粒子群的离散二进制化

构造0-1矩阵反映地铁货运站点选址-分配决策, 粒子位置表示为一系列值为1的染色体序号。根据染色体编码产生初代粒子群, 计算得到个体 i 的初始适应度值 $fit(i) = [F(i) \cdot (1 + G \cdot \rho_i)]^{-1}$ 。其中, 惩罚因子 G 用于排除违背约束的方案; $F(i)$ 为模型I的目标函数; ρ_i 为二元变量, 当个体不满足模型约束时取为1。

将粒子 i 经历的最优位置记为集合 p_i^{abest} , 全局最优位置记为集合 p_g^{abest} 。粒子位置更新的二进制操作通过在 $[0, 1]$ 区间内引入S型函数 $S(v_i^{a+1}) = \text{sigmoid}(v_i^{a+1}) = (1 + \exp^{-v_i^{a+1}})^{-1}$ 实现。采用轮盘

赌的方法选择 N 个最优粒子位置,确定节点的选址-分配关系。此后调用迭代过程更新粒子状态。粒子 i 在 $a+1$ 次迭代后的速度和位置为

$$\begin{aligned} v_i^{a+1} &= \theta \cdot v_i^a + c_1 \cdot r_3 \cdot (p_i^{\text{abest}} - x_i^a) + c_2 \cdot r_4 \cdot (p_g^{\text{abest}} - x_i^a) \\ x_i^{a+1} &= \begin{cases} 1, & \text{if rand} < S(v_i^{a+1}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

式中: c_1 、 c_2 为非负学习因子; r_3 、 r_4 为 $[0, 1]$ 间的随机小数; θ 为惯性权重; $S(v_i^{a+1})$ 为粒子轨迹为0的概率。粒子的离散二进制操作如图6所示。

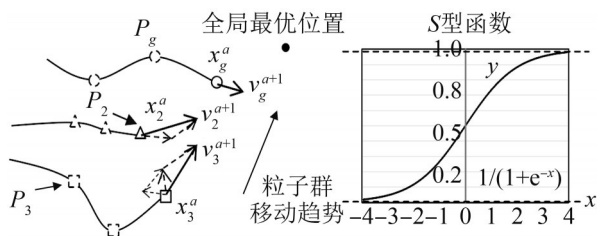


图6 粒子离散二进制示意
Fig. 6 Illustration of discrete binary particle

(2) 遗传算子

GA交叉算子和变异算子能够增加粒子个体跳出次优解的概率。采用基于等比策略的轮盘赌方法从上一代种群 P_s 中选择优秀的个体,繁殖为下一代种群 P_a 。个体 i 的适应度越高,被选中的概率 $g_i = \text{fit } P_s(i) / \sum_{j=1}^S \text{fit } P_s(j)$ 则越高。

根据图7进行交叉变异操作。并行交换一级节点选址阵列和二级节点分配阵列中的两组随机长度

子串,按照概率 ζ 单点交叉,并根据概率 ω 进行变异。变异染色体的极性反转并生成子代个体。

(3) 单维全分量混沌局部搜索

采用混沌搜索策略使得粒子在一定范围内不重复遍历解空间,增强PSO算法跳出局部极值的能力^[27]。若 p_g^{abest} 中的第 g 项对应的最优适应度值已第3次与历史值重复,则对第3次的 g 项执行单维全分量混沌局部搜索。混沌扰动量 s_n 赋予解向量 g 中的第1分量至第 x 分量。计算 x 个混沌解向量的适应度并逐个与 g 比较,筛选出最小值替换 g 作为本次迭代的最优解。混沌解为

$$\begin{aligned} g_{\text{new } n}^m &= g^m + \delta \cdot (b_{\text{up}}^m - b_{\text{low}}^m) \cdot s_n^m \\ s_n^m &= \begin{cases} 4 \sin \frac{2}{R_n}, & \forall m = n \\ 0, & \forall m \neq n \neq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

式中: g^m 为当前最优解的第 m 个分量; s_n^m 为 s_n 的第 m 个分量; $R_n \in [0, 1]$ 为随机数; δ 为控制参数; b_{up}^m , b_{low}^m 分别为 m 搜索范围的上界与下界。

3.3 算法复杂度及有效性分析

本文DBCG-PSO在求解Alpha地区地铁货运网络规划案例时的计算量如表2所示。算法的整体时间复杂度是关于种群大小 n 、规模参数 $|I|$ (即客户终端数量)和 $|J|$ (即拟建的货运站点数量)的三次多项式。取种群大小 $n=100$,迭代次数 $\text{gen}_{\text{max}}=100$,得出模型的最大计算量级为 10^8 ,说明规划问题规模扩大不会造成严重的计算负担。

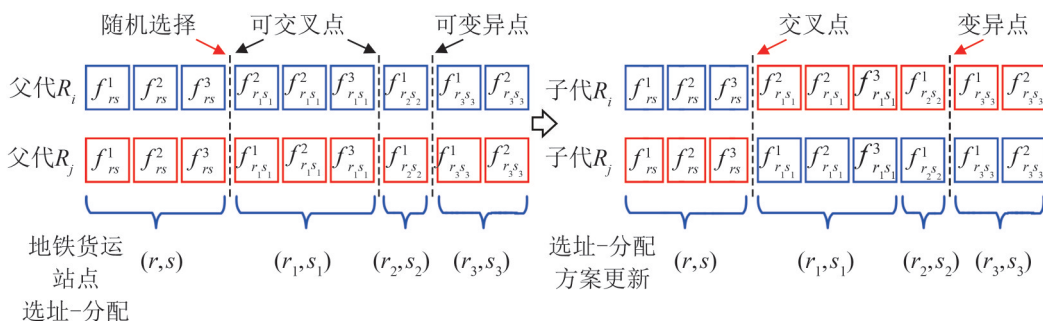


图7 GA交叉变异
Fig. 7 GA crossover and mutation

表2 算法各步骤的理论复杂度
Table 2 Theoretical complexity of each algorithm step

算子	时间复杂度	计算量级
选择-交叉-变异	$O(n^2 + 2n)$	$\times 10^4$
混沌局部搜索	$O(3n)$	$\times 10^2$
粒子群状态更新	$O(2n)$	$\times 10^2$
选址-分配	$O(n \cdot I)$	$\times 10^4$
一级路径优化	$O(n \cdot \bar{J} \cdot K \cdot S)$	$\times 10^5$
K-MST	$O(n \cdot I \cdot \bar{J})$	$\times 10^5$
FWA	$O(n \cdot I \cdot \bar{J} + n \cdot \bar{J} \cdot L)$	$\times 10^6$
总计		$\times 10^8$

通过一组小规模算例验证本文算法的精度和效率。小规模问题的设置与模型 I 基本一致。表 3 展示了本文算法和线性规划求解器 Cplex 的优化结果差距, 其中, CPU 时间的优化差距为正数表示本文算法效率更高。通过对后续 Alpha 地区仿真数据进行调整设置小规模算例的参数。

结果表明, DBCG-PSO 算法获得的近似最优解与精确解的平均差距为 1.12%。Cplex 在求解极小规模问题时(即算例 A)的效率更高, 但随着节点数量增加, CPU 时间呈指数级上升。DBCG-PSO 算法则没有出现这种情况。在算例 C 中, 两者的效率差距达到近 45 倍。这说明所提出的混合算法有能力求解大规模 LAR 决策问题, 具有良好的优化精度和计算效率。

4 仿真实验结果分析

Alpha 地区规划人口为 130 万。借鉴陈一林等^[28]提出的城市地下物流需求预测方法, 预计到 2035 年当地的人均包裹配送需求为 1.94 件/d, 地

铁货运网络的总包裹需求量为 253 万/d。接下来根据用地性质和规划纲要将人口数量分配至图 1 所示的地块区域, 再以客户终端为中心进行需求聚类。对于某客户终端的需求组成, 假设来自主城区之间的货流以及来自南北部物流园区的货流分别占其需求量的 20%~45% 和 55%~80%, 不同方向货运需求的占比以随机方式确定。

模型仿真参数取值如表 4 所示。其中, 与地铁货运网络成本和设施容量相关的参数取自文献[12-17]。为其余参数根据类似地下工程项目和城市物流运作数据拟定。通过改变流量配置模型参数 δ , 将决策者对 M-ULS 的环境效益期望刻画为 6 种情景, 即 $\delta = [50\%, 60\%, 70\%, 80\%, 90\%, 100\%]$ 。不确定参量模糊特征值和随机特征值的取值范围如表 5 所示。可信度水平 $\xi=0.87$, 子目标权重系数分别取 $\lambda_1 = 1.2$, $\lambda_2 = 1$ 和 $\lambda_3 = 0.8$ 。

算法编程和仿真实验依托 MATLAB R2019b, 测试环境为 Windows 10 Intel Core i7-7700 CPU @ 3.60 GHZ 24 GB RAM。启发式算法的参数设置如下: 种群大小 $n=100$; 迭代次数 $gen_{\max}=200$; 交叉概率为 50%; 变异概率为 30%; 学习因子 $c_1=c_2=1.5$; $\theta_{\max}=0.9$; $\theta_{\min}=0.4$; 轮盘赌概率为 0.8; 混沌控制参数为 0.01; 惩罚因子 $G=200\%$ 。

通过分支-定界算法求得不同环境效益期望下的流量配置。结果表明, 随着 δ 从 50% 增至 100%, 地铁-货运系统产生的年环境效益从 1 707 万元上升至 3 366 万元。各情景下要求建立的二级地下物流节点个数分别为 43、56、72、89、111 和 135。

表3 小规模算例优化结果
Table 3 Optimization outputs of small-scale instances

算例	规模		管道建设成本	运输及运营成本	CPU 时间/s
A	园区 1 个; 终端 10 个; 地铁站 5 个; 无换乘站; 45 段道路; 选择 3 个货运站点	精确解	419	670	0.178
		本文算法解	419	670	0.932
B	园区 2 个; 终端 20 个; 地铁站 8 个; 换乘站 1 个; 100 段道路; 选择 5 个货运站点	精确解	876	1 802	25.360
		本文算法解	883	1 820	3.841
C	园区 2 个; 终端 30 个; 地铁站 12 个; 换乘站 2 个; 200 段道路; 选择 8 个货运站点	精确解	2 057	6 091	239.890
		本文算法解	210	6 247	5.273

表4 模型仿真参数取值

Table 4 Parameter values for model simulation			
参数	值	参数	值
$\dot{\sigma}_j$ /(万件/d)	11	η %	55
$\ddot{\sigma}_j$ /(万件/d)	4	ϕ /(万件/车)	0.02
H_i /(万件/d)	60	ζ_{CO_2} /(万元/t)	0.071
ς /(万件/d)	2	ζ_{CO} /(万元/t)	0.359
r_j /(亿元)	3	ζ_{NO_x} /(万元/t)	10.32
e_i /(亿元)	3 000	ζ_{PM} /(万元/t)	26.34
c_h /(万元/km)	4 000	ζ_{VOC} /(万元/t)	0.703
θ /d	36 500	κ /(L/km)	0.125
u_j /(元/件)	0.1	ε /(万元/L)	7.1×10^{-4}
v_i /(元/件)	0.07	O_{CO_2} /(t/km)	2.8×10^{-4}
p_s /(元/(件·km))	0.006	O_{CO} /(t/km)	1.7×10^{-6}
q_h /(元/(件·km))	0.002 4	O_{NO_x} /(t/km)	1.01×10^{-6}
w_j /(元/件)	0.05	O_{PM} /(t/km)	1.2×10^{-7}
γ /(元/件)	0.5	O_{VOC} /(t/km)	3.4×10^{-7}

表5 不确定参数取值分布

Table 5 Distribution of uncertain parameters			
变量	左边界控制量	右边界控制量	方差
$\hat{R}_j$	$U(0.126, 0.215)$	$U(0.225, 0.38)$	—
$\hat{E}_i$	$U(0.011, 0.018)$	$U(0.035, 0.059)$	—
$\hat{C}_h$	$U(0.011, 0.018)$	$U(0.013, 0.022)$	—
$\hat{U}_j$	$U(0.027, 0.047)$	$U(0.045, 0.076)$	—
$\hat{P}_s$	$U(0.001, 0.002)$	$U(0.002, 0.003)$	—
$\hat{Q}_h$	$U(0.001, 0.002)$	$U(0.001, 0.002)$	—
$\hat{V}_t$	$U(0.018, 0.031)$	$U(0.018, 0.03)$	—
$\hat{W}_j$	$U(0.011, 0.019)$	$U(0.01, 0.017)$	—
$\hat{D}_{ik k=1}$	$U(0.12, 0.32) \times d_{ik k=1}$	$U(0.24, 0.4) \times d_{ik k=1}$	$U(37, 595)$
$\hat{D}_{ik k=2}$	$U(0.15, 0.48) \times d_{ik k=2}$	$U(0.2, 0.3) \times d_{ik k=2}$	$U(9, 149)$
$\hat{D}_{ik k=3}$	$U(0.15, 0.25) \times d_{ik k=3}$	$U(0.2, 0.35) \times d_{ik k=3}$	$U(15, 189)$
$\hat{D}_{ik k=4}$	$U(0.2, 0.4) \times d_{ik k=4}$	$U(0.18, 0.42) \times d_{ik k=4}$	$U(5, 205)$

注: $U(a, b)$ 代表区间 $[a, b]$ 内的均匀分布随机数

在 $\delta=50\%$ (待建立的站点固定为10个)和 $\delta=100\%$ (待建立的站点固定为22个)2种场景下, 利用DBC-G-PSO算法和传统PSO算法对模型I反复优化10次, 得到目标收敛曲线如图8所示。

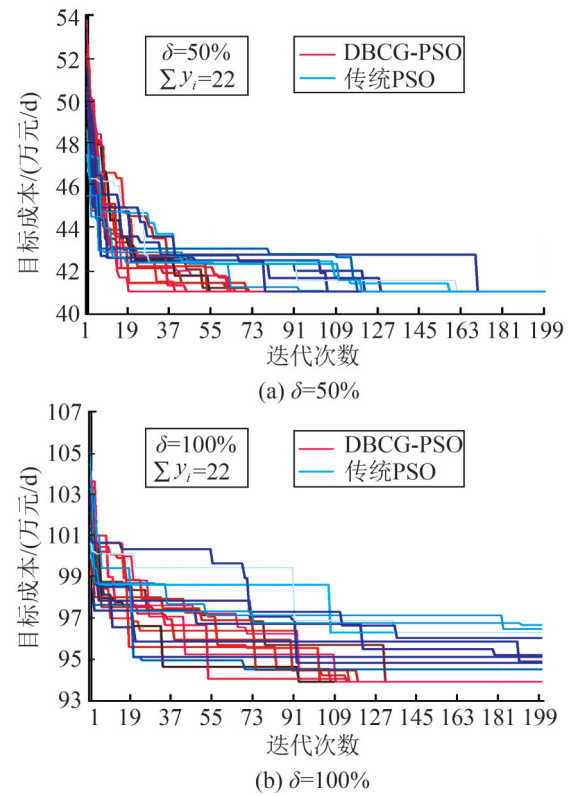
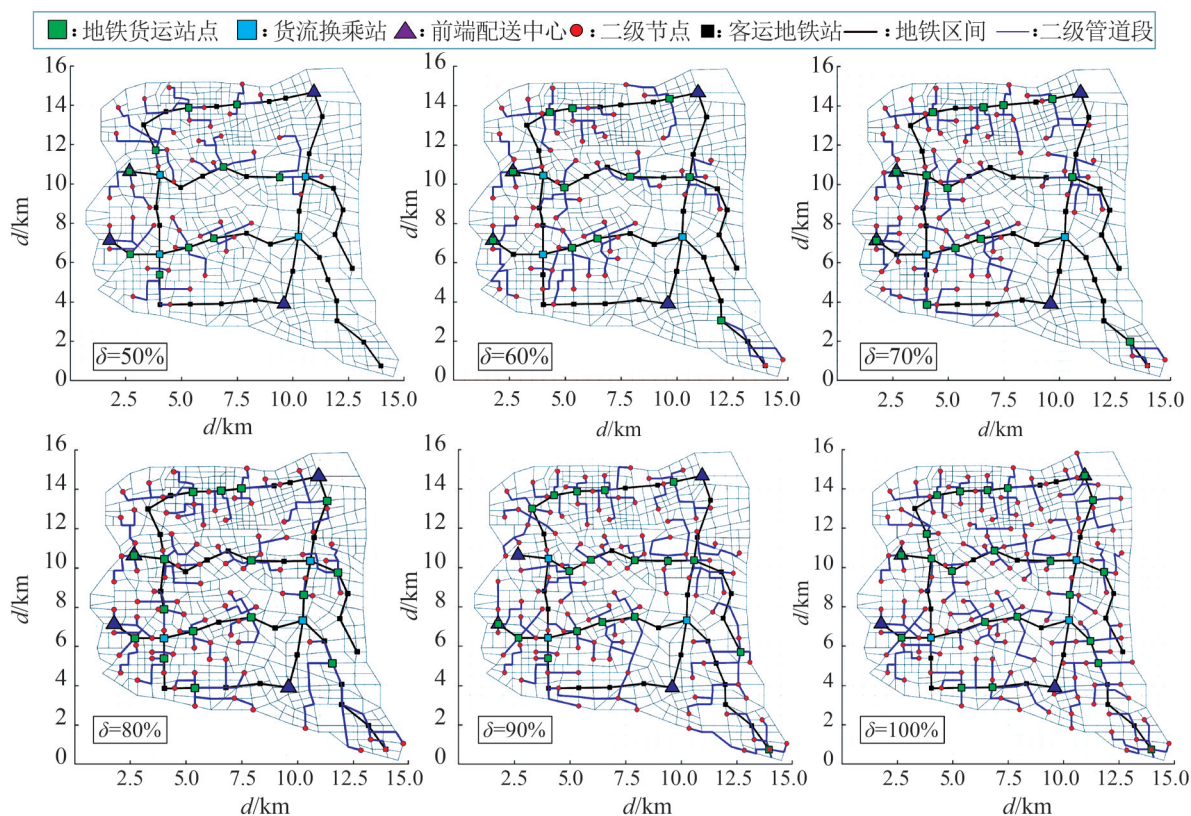


图8 算法比较

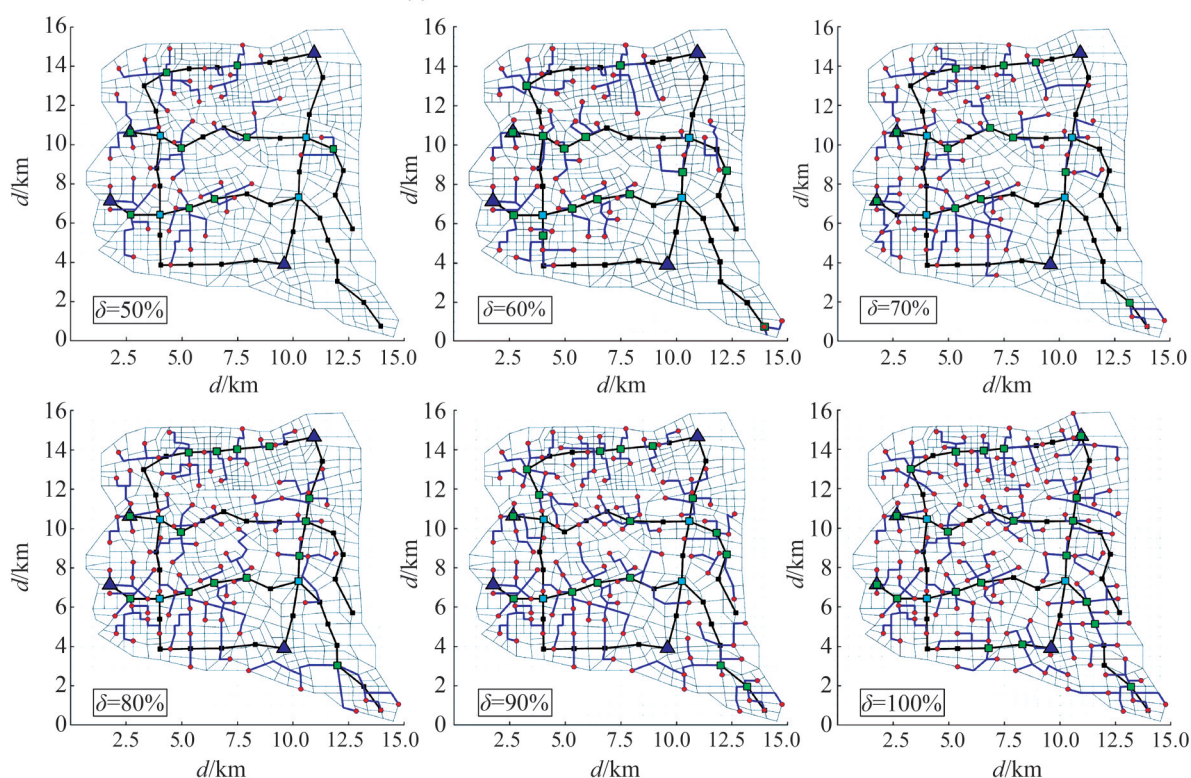
Fig. 8 Algorithm comparisons

当 δ 取50%时, 2种算法每次均可收敛至最小目标值41.06万元/d。DBC-G-PSO算法平均在40~60次迭代后收敛, 而传统PSO则需要127次迭代; 在 $\delta=100\%$ 情景下, 前者平均经历111次迭代寻得最小目标函数值93.94万元/d, 而传统PSO几乎无法收敛。比较10次运行得到的最小目标平均值, 发现2种算法在 $\delta=100\%$ 情景下的优化精确度差距为1.81%。随着网络规模增大, DBC-G-PSO算法的CPU时间从54.7 s上升至72.3 s, 而传统PSO算法则从60.5 s上升至84.4 s。以上结果表明: 改进后的PSO算法在收敛性和计算效率方面具有明显优势。

图9展示了地铁货运网络在不确定条件和确定性条件下的布局优化结果。不确定条件下的网络最优配置数据如表6所示。 $\delta=50\% \sim 100\%$ 情景下的模型I最优目标成本分别为40.03万元/d、49.21万元/d、60.89万元/d、69.55万元/d、80.94万元/d和93.46万元/d, 网络中的站点数量分别为10、11、13、16、18和22个。



(a) 模型I: 模糊随机条件下的网络布局



(b) 模型II: 确定条件下的网络布局

图9 Alpha地区地铁货运网络布局优化结果

Fig. 9 Optimization results of M-ULS network layout in Alpha district

表6 不确定条件下的地铁货运网络最优配置
Table 6 Best configurations of M-ULS network under uncertainties

$\delta/\%$	站点 数量	一级网络 运输成本	二级网络 运输成本	站点平均 运营成本	站点平均 负载率/%	空置惩 罚成本	地下转 运成本	节点建 设成本	管道建 设成本	管道 里程/km	库存 成本	总目标 成本
50	10	5.59	1.10	0.99	87.85	0.14	1.86	12.72	8.57	104	1.17	40.04
60	11	6.36	1.34	1.07	92.76	0.08	1.92	15.09	11.78	143	1.87	49.22
70	13	8.16	1.61	1.05	93.60	0.26	3.02	18.67	14.50	177	2.04	60.89
80	16	9.83	1.82	1.04	92.87	0.02	4.02	22.37	14.73	179	2.22	69.55
90	18	10.93	2.11	1.04	92.24	0.78	3.87	26.65	16.19	197	2.83	80.94
100	22	13.67	2.34	0.95	84.07	1.08	5.93	32.88	17.08	208	2.45	93.46

注：与成本相关的单位为万元/d

随着 δ 从50%上升至100%，货物的地下运输成本分别从5.59万元/d(地铁运输)和1.1万元/d(管道运输)上升至13.67万元/d和2.34万元/d。同时，全部地铁货运站点的总运营成本从9.88万元/d增至20.81万元/d；换乘站点的货流转运成本从1.86万元/d增至5.93万元/d；地铁货运站点和二级节点的总建设成本从12.72万元/d增至32.88万元/d；站点的平均空置惩罚成本从0.14万元/d上升至1.08万元/d；网络中的二级管道总长度从104 km增加至208 km；站点的平均覆盖半径在2.15~3.04 km范围内变化。当网络达到最大规模时，站点的平均负载率为84.1%，处于所有情景中的最低值。来自园区的货物在地铁网络中的平均运距为19.8 km，运输成本占一级网络总运输成本的比例为63%；主城方向货流在一级网络中的平均运距和运输成本占比分别为16.5 km和37%。站点饱和度在 $\delta=70\%$ 时达到最高值93.6%。进一步计算得到不确定性影响下的地铁-货运系统环境效益与综合成本之比最高为1:8.57，最低为1:10.13。

通过比较模型I和模型II的优化结果，发现M-ULS网络布局方案在 $\delta=80\%$ 时差别最大，在 $\delta=50\%$ 时差别最小。不确定性对布局的影响随着网络规模的扩大愈发显著。6种情景下的总目标成本差距值分别为0.37万元/d($\delta=50\%$)、2.05万元/d($\delta=60\%$)、0.48万元/d($\delta=70\%$)、2.16万元/d($\delta=80\%$)、2.22万元/d($\delta=90\%$)和4.77万元/d($\delta=100\%$)。此外，模型I网络受不确定性的影响倾向于配备更多的地

铁货运站点和管道段。这一趋势的原因可解释如下：首先，本文引入正态分布方差来表示货运需求的模糊程度。因此，模型I网络中的总需求可能高于预测值，要求建立更多的货运站点；其次，经过精确化处理后的机会约束式与原约束式相比添加了由方差和区间两侧端点所表示的正数，这一转变相当于一定程度地缩小了站点设施的容量。因此，不确定条件下的M-ULS网络布局方案可视作为在对模糊随机参数近似的基础上寻求最优保守解的结果。

5 结论

本文考虑需求量和成本的混合不确定，围绕地铁-货运系统网络布局提出了建模优化方法。考虑流量O-D配置和选址-分配-路径决策，建立两阶段网络模糊随机规划模型，并对模型中的不确定参量和机会约束进行线性精确化重构，设计混合精确-启发式框架求解具有高计算复杂度的NP难问题。通过小规模算例和横向实验验证了所提出算法的优势和有效性。最后，以Alpha地区为案例进行仿真，分析了不同情景下的地铁货运网络布局和系统配置优化结果。

未来研究可以从3个方面进行拓展：

- (1) 将多样化的地铁网络形式(如环线的复杂轴辐式网络)与二级管道网络形式进行组合，提出配套的选址-分配优化方法；
- (2) 在静态LAR建模框架内探讨客、货机车

调度问题, 以网络运行效率和可靠性作为建模的主要目标;

(3) 考虑地面货运制式与地铁-货运系统的耦合运作, 针对道路运输瓶颈开展地上-地下一体化的物流网络布局规划。

参考文献:

- [1] 黄海军, 高自友, 田琼, 等. 新型城镇化导向下的城市群综合交通系统管理[J]. 中国科学基金, 2018, 32(2): 214-223.
Huang Haijun, Gao Ziyu, Tian Qiong, et al. The Management Theory and Method of the Comprehensive Transportation System in City Agglomeration under the New Urbanization Trend[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2018, 32(2): 214-223.
- [2] 国家邮政局. 2020 年邮政行业运行情况[EB/OL]. [2021-01-14]. http://www.spb.gov.cn/xw/dttx_15079/202101/t20210114_3760170.html.
- [3] Coulombel N, Dablanc L, Gardrat M, et al. The Environmental Social Cost of Urban Road Freight: Evidence from the Paris Region[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment (S1361-9209), 2018, 63: 514-532.
- [4] 北京市交通发展研究院. 2019 年北京市交通发展年度报告[EB/OL]. [2021-01-14]. <http://www.bjtrc.org.cn/List/index/cid/7.html>.
- [5] 钱七虎. 利用地下空间助力发展绿色建筑与绿色城市[J]. 隧道建设, 2019, 39(11): 1737-1747.
Qian Qihu. Exploiting Underground Space to Promote Green Building and Green City Development[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1737-1747.
- [6] 中共中央国务院. 交通强国建设纲要[EB/OL]. (2019-09-19) [2021-01-14]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.
- [7] 钱七虎, 郭东军. 城市地下物流系统导论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Qian Qihu, Guo Dongjun. Introduction to Urban Underground Logistics System[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [8] Chen Z, Dong J, Ren R. Urban Underground Logistics System in China: Opportunities or Challenges? [J]. Underground Space (S2467-9674), 2017, 2(3): 195-208.
- [9] Visser J. The Development of Underground Freight Transport: An Overview[J]. Tunnelling and Underground Space Technology (S0886-7798), 2018, 80: 123-127.
- [10] 陈志龙, 郭东军. 第五类运输和供应系统——北京建设地下物流系统的战略构想[J]. 北京规划建设, 2005(3): 77-80.
Chen Zhilong, Guo Dongjun. The Fifth Type of Transportation and Supply System - A Strategic Conception of Beijing Underground Logistics System[J]. Beijing Planning and Construction, 2005(3): 77-80.
- [11] 范益群, 游克思. 地下集装箱物流系统在港城融合发展中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增1): 49-54.
Fan Yiqun, You Kesi. Application of Underground Container Freight Transportation on Integration Development of City and Port[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 49-54.
- [12] Hu W, Dong J, Hwang B G, et al. Using System Dynamics to Analyze the Development of Urban Freight Transportation System Based on Rail Transit: A Case Study of Beijing[J]. Sustainable Cities and Society (S2210-6707), 2020, 53: 101923.
- [13] Cleophas C, Cottrill C, Ehmke J F, et al. Collaborative Urban Transportation: Recent Advances in Theory and Practice[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2019, 273(3): 801-816.
- [14] 李彤, 王众托. 大型城市地下物流网络优化布局的模拟植物生长算法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(4): 971-980.
Li Tong, Wang Zhongtuo. Optimization Layout of Underground Logistics Network in Big Cities with Plant Growth Simulation Algorithm[J]. System Engineering Theory & Practice, 2013, 33(4): 971-980.
- [15] 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 Fangting, Zhang Jin, Zhou Guohua. Subway-Based Distribution Network Routing Optimization Problem with Time Windows[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(5): 88-94.
- [16] 任睿, 胡万杰, 董建军, 等. 轴辐式城市地铁-货运系统网络布局优化[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(7): 1699-1712.
Ren Rui, Hu Wanjie, Dong Jianjun, et al. Optimization of Urban Metro-based Underground Logistics System Network with Hub-and-spoke Layout [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(7): 1699-1712.
- [17] Dong J, Hu W, Yan S, et al. Network Planning Method for Capacitated Metro-Based Underground Logistics System[J]. Advances in Civil Engineering (S1687-8094), 2018(6): 6958086.
- [18] 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 (S0886-7798), 2018, 80: 246-256.
- [19] Behiri W, Belmokhtar-Berraf S, Chu C. Urban Freight Transport Using Passenger Rail Network: Scientific Issues and Quantitative Analysis[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review (S1366-5545), 2018, 115: 227-245.
- [20] Nadizadeh A, Hosseini Nasab H. Solving the Dynamic Capacitated Location-Routing Problem with Fuzzy Demands by Hybrid Heuristic Algorithm[J]. European Journal of Operational Research(S0377-2217), 2014, 238 (2): 458-470.
- [21] Yang K, Yang L, Gao Z. Planning and Optimization of Intermodal Hub-and-Spoke Network Under Mixed Uncertainty[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review (S1366-5545), 2016, 95: 248-266.
- [22] Wang R, Yang K, Yang L, et al. Modeling and Optimization of a Road-Rail Intermodal Transport System Under Uncertain Information[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence (S0952-1976), 2018, 72: 423-436.
- [23] Shavarani S M, Mosallaeipour S, Golabi M, et al. A Congested Capacitated Multi-Level Fuzzy Facility Location Problem: An Efficient Drone Delivery System [J]. Computers & Operations Research (S0305-0548), 2019, 108: 57-68.
- [24] 崔利刚, 任海利, 邓洁, 等. 基于模糊随机需求的B2C多品采配协同模型及其粒子群算法求解[J]. 管理工程学报, 2020, 34(6): 183-190.
- Cui Ligang, Ren Haili, Deng Jie, et al. A Particle Swarm Algorithm for a Novel B2C Multi-Item Replenishment and Delivery Coordination Model with Fuzzy Random Demands[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020, 34(6): 183-190.
- [25] 刘彦奎, 白雪洁, 杨凯. 参数可信性优化方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- Liu Yankui, Bai Xuejie, Yang Kai. Parameter Credibility Optimization Method[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [26] Hu W, Dong J, Hwang B G, et al. Hybrid Optimization Procedures Applying for Two-Echelon Urban Underground Logistics Network Planning: A Case Study of Beijing[J]. Computers & Industrial Engineering (S0360-8352), 2020, 144: 106452.
- [27] 刘玉敏, 高松岩. 一种改进的粒子群优化算法及其算法测试[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(9): 237-247.
- Liu Yumin, Gao Songyan. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Algorithm Test[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(9): 237-247.
- [28] 陈一村, 郭东军, 陶西贵, 等. 城市地下物流系统货运需求量预测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1687-1694, 1741.
- Chen Yicun, Guo Dongjun, Tao Xigui, et al. Forecast Analysis of Freight Demand Volume in the Urban Underground Logistics System[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1687-1694, 1741.