

# 双重不确定条件下低碳多式联运多目标优化

郭军华, 苗婉莹

(华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 针对运输需求和运输时间不确定条件下低碳多式联运网络, 考虑等待成本、时间窗及班期等影响因素, 探究集装箱多式联运网络多目标优化的问题。采用鲁棒优化的方法处理运输需求量的波动, 以 Monte Carlo 模拟时间扰动表征运输时间的不确定性, 纳入混合时间窗约束条件, 构建以经济成本、运输时间和总碳排放量为优化目标的随机鲁棒优化模型。为提升算法收敛质量和维持种群多样性, 设计结合多交叉变异策略的改进自适应快速非支配排序遗传算法II。改进的 NSGA-II 算法有效地处理了货运网络优化问题中的多目标不确定性, 为决策者提供了在不同鲁棒水平下的成本、时间和环境影响的综合视角, 证明了该方法在解决实际复杂运输问题中的潜力和有效性。

**关键词:** 综合运输; 双重不确定; 改进 NSGA-II 算法; 鲁棒优化; 多目标优化

中图分类号: AU116.2

文献标志码: A

## Multi-objective optimization of low-carbon intermodal transportation under dual uncertainty conditions

Guo Junhua, Miao Wanying

(School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** For the low-carbon multimodal transport network under conditions of uncertain transportation demand and transportation time, considering factors such as waiting costs, time windows, and schedules, the problem of multi-objective optimization for container multimodal transport network is explored. The robust optimization method is adopted to handle the fluctuations in transportation demand, and Monte Carlo simulation is used to represent the uncertainty of transportation time. Mixed time window constraints are incorporated, and a stochastic robust optimization model with economic cost, transportation time, and total carbon emissions as optimization objectives is constructed. To improve the convergence quality of the algorithm and maintain the diversity of the population, an improved adaptive fast non-dominated sorting genetic algorithm II combined with multiple crossover and mutation strategies is designed. The improved NSGA-II algorithm effectively handles the multi-objective and uncertainty issues in the optimization of the freight network, providing decision-makers with a comprehensive perspective on costs, time, and environmental impacts under different robust levels, and demonstrating the potential and effectiveness of this method in solving complex real transportation problems.

**Key words:** integrated transportation; dual uncertainty; improved NSGA-II algorithm; robust optimization; multi-objective optimization

中办、国办印发《关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》, 明确加快全国碳市场建设的总体要求。在多式联运实施过程中, 运输时效与货物需求量波动等不确定性因素, 会对运输方案的实际执行效果构成显著干扰。因此, 全面评估并系统性应对此类不确定性, 是确保运输方案具备科学性与可操作性的核心前提。

针对不确定条件下多式联运路径规划问题,已有研究主要从不确定性类型与求解方法两个逻辑层面展开梳理。从单一不确定视角来看,受市场波动、订货提前期等的影响,实际多式联运过程中的货物需求存在明显的不确定性。FAZAYEL I 等<sup>[1]</sup>、SUN 等<sup>[2]</sup>针对模糊需求环境下含柔性时间窗的多式联运路径优化问题,采用三角与梯形模糊数对需求的模糊性特征进行数学描述;张旭等<sup>[3]</sup>在统一及分段累进碳税机制下,构建随机需求下的双目标 0~1 路径优化模型;袁旭梅等<sup>[4]</sup>、邓明君等<sup>[5]</sup>分别采用鲁棒优化区间法、鲁棒优化情景法处理运输中的货运需求不确定性;彭勇等<sup>[6]</sup>、Wenjing Guo 等<sup>[7]</sup>考虑到运输过程中的调度约束,研究了时间不确定下路径优化问题;杨洛郡等<sup>[8]</sup>主要研究了运输时间、中转时间双重不确定因素服从随机分布时的绿色多式联运路径优化问题。随着研究深入,学界逐步转向多重异质不确定耦合的复杂场景研究,李珺等<sup>[9]</sup>以随机优化理论为模型基础,聚焦运输时间、中转作业耗时、货运量规模及客户需求波动这四重不确定因素;Baradaran等<sup>[10]</sup>探讨三类情景下含多个高优先级时间窗口的路径优化问题;徐国权等<sup>[11]</sup>运用三角模糊数刻画运输时间参数的不确定性特征,采用鲁棒优化情景分析法应对货运量的动态波动;孙岩等<sup>[12]</sup>探讨了由需求不确定性衍生的多重不确定环境。

多式联运过程中,受到复杂的社会环境、变化的交通状况和托运人特殊时间需求<sup>[13]</sup>的综合影响,转运时间及送达期限均可能存在不确定性。实际决策场景下决策目标通常是不唯一且相悖的<sup>[14]</sup>,多目标多式联运问题的解决方法——Pareto 解,可有效权衡相悖目标,广泛应用于多目标优化问题研究<sup>[15]</sup>。

综上所述,学者对不确定环境下多式联运的研究虽涵盖单一及多重不确定性,但未考虑现实决策场景中目标的多样性与不确定参数的随机性;现有研究中,如文献[8]等研究的不确定处理方法亦难以兼顾复杂路径决策中的班期及混合时间窗影响。基于此,将探究双重不确定条件下的低碳多式联运网络多目标优化。若考虑班期限制,通过上述不确定处理方法求解优化目标的分布函数或数值特征存在较大困难<sup>[16]</sup>。而采用统计抽样实验的蒙特卡洛算法可以模拟出不确定运输时间的近似解。结合设置的运输时间窗,提出随机鲁棒优化与多目标 NSGA-II 融合的混合启发式算法,为双重不确定条件下含班期和時間窗约束的多式联运决策提供理论参考。

## 1 问题描述与模型构建

### 1.1 问题描述

为响应国家“交通物流降本提质增效行动计划”和节能减排的号召,从承运商、社会及客户需求角度,以运输总成本最小、总碳排放量最少及总运输时间最短为优化目标。某企业计划将一批集装箱货物从起点运送到目的地,节点转运产生中转时间与成本,铁路、水路运输需考虑等待班期时间,并结合实际设置软硬时间窗。

### 1.2 模型假设

考虑到多式联运实际情况和便于建模求解,对模型做出如下假设:

- 1) 假设同一节点处最多发生一次运输方式转变且节点具备足够的中转能力<sup>[3]</sup>;
- 2) 假设在运输、中转过程中,不考虑货物的损耗,也不存在运量分割问题<sup>[17]</sup>;
- 3) 假设铁路、水路运输的固定班期作用于所有节点<sup>[19]</sup>;
- 4) 假设每种转运节点处及相邻节点的装载运输能力都能满足实际情况<sup>[17]</sup>。

1.3 符号与变量说明

表 1 参数符号说明  
Tab.1 Explanation of parameter symbol

符号	定义和说明
$N$	运输网络节点集合
$A$	运输路段集合
$M$	运输方式集合
$C$	运输总成本
$T$	运输总时间
$Q$	运输货物的总量
$O$	运输任务起点
$D$	运输任务终点
$h, i, j$	运输节点, $h, i, j \in N$
$h, i$	运输路段, $h, i \in A$
$k, l, m$	分别表示公铁水 3 种运输方式, $k, l, m \in M$
$c_1$	在 $T_S$ 前到达终点的单位仓储成本
$c_2$	在 $T_E$ 前到达终点的单位惩罚成本
$c_3$	等待发车的单位货物、单位时间等待成本
$c_i^{k,l}$	表示货物运输至 $i$ 节点时运输方式从 $k$ 转换 $l$ 后的单位货物中转成本
$p$	碳交易政策下的碳价, 取 90 元/ $t$
$c_{h,i}^k$	表示路段 $h, i$ 间, 运输方式 $k$ 的单位运输成本
$d_{h,i}^k$	表示路段 $h, i$ 间, 运输方式 $k$ 的运输距离
$v_m$	表示运输的平均速度
$[T_S, T_E]$	表示多式联运的收货时间窗
$[T_{\min}, T_{\max}]$	表示到达目的地节点的硬时间窗范围
$t_h^s$	货物在 $h$ 节点处的出发时间
$w_i^{k,l}$	表示货物运输至 $i$ 节点时运输方式从 $k$ 转换 $l$ 后的等待时间
$s_i^{k,l}$	表示货物运输至 $i$ 节点时运输方式从 $k$ 转换 $l$ 后的最近发班时间
$t_{h,i}^k$	表示路段 $h, i$ 间运输方式 $k$ 的在途运输时间
$t_i^{k,l}$	表示货物运至 $i$ 节点时运输方式从 $k$ 转换 $l$ 后的单位中转时间
$E_{act}$	碳排放总量
$E_{all}$	碳交易政策下的碳排放配额
$e_{h,i}^k$	在运输路段 $h, i$ 上采用运输方式 $k$ 的单位碳排放量
$e_i^{k,l}$	表示货物运输至 $i$ 节点时运输方式从 $k$ 转换 $l$ 后的单位货物中转碳排放系数
$x_{h,i}^k$	表示路段 $h, i$ 间采用运输方式 $k$ 为 1, 反之为 0
$y_i^{k,l}$	表示节点 $i$ 处运输方式从 $k$ 转换 $l$ 为 1, 反之为 0

#### 1.4 不确定参数处理

考虑运输需求的随机不确定性, 基于 Soyster、Ben-Tal 和 Nemirovski 的工作, Bertsimas 和 Sim 在 21 世纪初期提出了一套全新的鲁棒优化框架<sup>[18]</sup>, 该框架涉及到离散优化的内容, 其具体实现方式是设置鲁棒水平调控参数  $\Gamma_i$ , 将具有不确定参数的线性规划问题转换为易于求解的鲁棒等价模型, 模型如下

$$\begin{aligned}
 & \max C^T X \\
 \text{s.t. } & \sum_{j \in [N]} a_{ij} x_j + z_i \Gamma_i + \sum_{j \in J_i} p_{ij} \leq b_i \quad \forall i \in [M], \\
 & z_i + p_{ij} \geq \hat{a}_{ij} y_j \quad \forall j \in J_i, i \in [M], \\
 & -y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \in [N], \\
 & l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \in [N], \\
 & p_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in J_i, i \in [M], \\
 & y_j \geq 0 \quad \forall j \in [N], \\
 & z_i \geq 0 \quad \forall i \in [M].
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中,  $z_i$  和  $p_{ij}$  是用来线性化的对偶变量,  $\hat{a}_{ij}$  代表扰动量,  $x_j$  为决策变量,  $y_j$  为非负变量。

采用蒙特卡洛 (Monte Carlo) 方法模拟时间不确定性, 通过结合随机数与概率分布构建数学模型以解决不确定性及确定性问题, 在优化目标样本数量足够大时, 通过固定次数模拟逼近分布特征, 并将其作为最优目标真值的无偏估计。通过概率随机产生在途时间  $t_{h,i}^k$ 、中转时间  $t_i^{k,l}$ , 模拟运输总时间  $T$ ; 当生成的  $T$  个数达到预期次数时, 终止, 取运输总时间均值  $\bar{T}$  作为  $\tilde{T}$  的无偏估计, 符合截断正态分布  $T \sim TN(\bar{T}, (\bar{T}\sigma)^2, a\bar{T}, b\bar{T})$ 。

#### 1.5 多式联运网络模型建立

在多式联运网络  $G=(N, A, M)$  中,  $N$  为节点集 ( $h, i, j \in N$ ),  $A$  为运输路径集合,  $h, i \in A$ , 其中  $M$  为运输方式集合, 则  $k, l, m \in M$ 。在碳交易市场作用机制下, 通过二级市场买卖配额, 不足则购买付出成本, 多余则出售获取收益, 碳交易成本为  $(E_{act} - E_{all}) \cdot p$ , 模型参考<sup>[19]</sup>, 则目标函数为

$$\min C = \tilde{Q} \left\{ \begin{aligned} & \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} c_{h,i}^k d_{h,i}^k x_{h,i}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} c_i^{k,l} y_i^{k,l} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} c_3 w_i^{k,l} y_i^{k,l} + c_1 \max[(T_s - T), 0] \\ & + c_2 \max[(0, T - T_E)] + p \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_{h,i}^k d_{h,i}^k x_{h,i}^k + p \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_i^{k,l} y_i^{k,l} \end{aligned} \right\} - E_{all} \cdot p \tag{2}$$

$$\min \tilde{T} = \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} t_{h,i}^k x_{h,i}^k + \tilde{Q} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} t_i^{k,l} y_i^{k,l} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} w_i^{k,l} y_i^{k,l} \tag{3}$$

$$\min E_{act} = \tilde{Q} \left( \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_{h,i}^k d_{h,i}^k x_{h,i}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} e_i^{k,l} y_i^{k,l} \right) \tag{4}$$

约束条件为

$$T_{\min} \leq \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} t_{h,i}^k x_{h,i}^k + \tilde{Q} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} t_i^{k,l} y_i^{k,l} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} w_i^{k,l} y_i^{k,l} \leq T_{\max} \tag{5}$$

$$w_i^{k,l} = \begin{cases} 0, & s_i^{k,l} = t_h^s + t_{h,i}^k + Q t_i^{k,l} \\ s_i^{k,l} - (t_h^s + t_{h,i}^k + Q t_i^{k,l}), & s_i^{k,l} \geq t_h^s + t_{h,i}^k + Q t_i^{k,l} \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{h \in N} \sum_{k \in M_{h,j}} x_{h,i}^k - \sum_{j \in N} \sum_{k \in M_{i,j}} x_{i,j}^k = \begin{cases} 1, i = d \\ 0, i \neq 0, i \neq d, i \in N \\ -1, i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{k \in M_{h,i}} x_{h,i}^k \leq 1, \quad k \in M_{h,i}, M_{h,i} \in M \quad (8)$$

$$\sum_{k \in M_{h,i}} \sum_{l \in M_{i,j}} y_i^{k,l} \leq 1, \quad h, i, j \in N, k \neq l \quad (9)$$

$$\sum_{h,i \in N} x_{h,i}^k + \sum_{i,j \in N} x_{i,j}^l \geq 2y_i^{k,l}, \quad \forall i \in N, k \neq l, k, l \in M_{h,i} \quad (10)$$

$$x_{h,i}^k x_{i,j}^l = y_i^{k,l} \quad (11)$$

$$x_{h,i}^k, y_i^{k,l} \in \{0, 1\} \quad (12)$$

式(2)为总运输成本,涵盖在途运输、转运、等待、货物提前/延迟交付的储存/处罚成本,以及碳交易收益或成本;式(3)为总时间;式(4)为总碳排放量;式(5)代表硬时间窗;式(6)为等待时间;式(7)表示节点间货流守恒;式(8)限定单一路径仅采用1种运输方式;式(9)规定单个节点中转至多1次;式(10)确保节点前后运输方式与转换信息一致;式(11)约束运输的连续性;式(12)为决策变量。

## 2 模型求解

### 2.1 不确定条件下多式联运网络模型转换求解

假设不确定的需求量 $Q$ 是一个对称且分布信息未知的有界区间,即 $\tilde{Q} \in [Q - \alpha \hat{Q}, Q + \alpha \hat{Q}]$ ,其中 $\hat{Q}$ 是最大扰动需求量, $\alpha$ 为取值于 $[0, 1]$ 的非负随机变量,受带预算的盒式不确定集合 $\alpha \in U = [\alpha \leq \Gamma, 0 \leq \alpha \leq 1]$ 的约束。结合上述表达,假设最坏情况发生,不确定需求条件下的最小总成本表示为

$$\text{Min } C = \left\{ \begin{array}{l} \left( \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} c_{h,i}^k d_{h,i}^k x_{h,i}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} c_{i,j}^{k,l} y_i^{k,l} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} c_3 (s_i^{k,l} - t_h^s - t_{h,i}^k -) \right) \\ (Q + \alpha \hat{Q}) \left( (Q + \alpha \hat{Q}) t_i^{k,l} y_i^{k,l} + c_1 \max[(T_s - \tilde{T}), 0] + c_2 \max[(0, \tilde{T} - T_E)] \right) \\ \left. \left( + p \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_{h,i}^k d_{h,i}^k x_{h,i}^k + p \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_i^{k,l} y_i^{k,l} \right) \right\} - E_{all} \cdot p \quad (13)$$

涉及到 $Q t_i^{k,l}$ 的复合不确定性,进行分层求解,先分配 $Q$ 进行化简运算,后将模拟的 $t_i^{k,l}$ 的值代入计算。结合线性规划的强对偶原理,其中 $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5$ 是对偶变量,引入辅助决策变量 $\gamma$ ,设 $\gamma = \alpha^2$ ,最终得到

$$\min_{\xi} \{ \xi_1 + \Gamma \xi_2 \} \quad (14)$$

$$\xi_1 + \xi_2 - \xi_3 \geq \hat{Q} \left( \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} c_{h,j}^k d_{h,j}^k x_{h,j}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} c_i^{k,l} y_i^{k,l} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} c_3 (s_i^{k,l} - t_h^s - t_{h,j}^k - 2Q t_i^{k,l}) y_i^{k,l} + c_1 \max[(T_s - \tilde{T}), 0] + c_2 \max[(0, \tilde{T} - T_E)] + p \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_{h,j}^k d_{h,j}^k x_{h,j}^k + p \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_i^{k,l} y_i^{k,l} \right) \quad (15)$$

$$\xi_3 \geq \gamma \hat{Q} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} t_i^{k,l} y_i^{k,l} c_3 \quad (16)$$

$$\xi_1, \xi_2, \xi_3 \geq 0 \quad (17)$$

$$\text{Min } C = \left\{ \begin{array}{l} \left( \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} c_{h,j}^k d_{h,j}^k x_{h,j}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} c_i^{k,l} y_i^{k,l} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} c_3 (s_i^{k,l} - t_h^s - t_{h,j}^k - Q t_i^{k,l}) y_i^{k,l} \right. \\ \left. + c_1 \max[(T_s - \tilde{T}), 0] + c_2 \max[(0, \tilde{T} - T_E)] + p \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_{h,j}^k d_{h,j}^k x_{h,j}^k + p \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_i^{k,l} y_i^{k,l} \right) \\ - E_{all} \cdot p + \xi_1 + \Gamma \xi_2 \end{array} \right\} \quad (18)$$

约束条件：式（5）~式（12）、式（15）~式（17）。

不妨将  $\tilde{Q} \in [Q - \alpha \hat{Q}, Q + \alpha \hat{Q}]$  的设定继续代入不确定需求中，并根据鲁棒等价模型的转换思想进行变换，最终得到时间和碳排放模型

$$\text{Min } T = \left\{ \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} t_{h,j}^k x_{h,j}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} (s_i^{k,l} - t_h^s - t_{h,j}^k) y_i^{k,l} \right\} \quad (19)$$

$$\text{Min } E_{act} = \left\{ \begin{array}{l} \left( \hat{Q} \left( \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_{h,j}^k d_{h,j}^k x_{h,j}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} e_i^{k,l} y_i^{k,l} \right) \right. \\ \left. + \max_{\alpha \in U} \left\{ \begin{array}{l} \alpha \hat{Q} \left( \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_{h,j}^k d_{h,j}^k x_{h,j}^k \right) \\ + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} e_i^{k,l} y_i^{k,l} \end{array} \right\} \right) \end{array} \right\} = Q \left( \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_{h,j}^k d_{h,j}^k x_{h,j}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} e_i^{k,l} y_i^{k,l} \right) + \xi_4 + \Gamma \xi_5 \quad (20)$$

约束条件

$$\xi_4 + \xi_5 \geq \hat{Q} \left( \sum_{h \in N} \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} e_{h,j}^k d_{h,j}^k x_{h,j}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} e_i^{k,l} y_i^{k,l} \right) \quad (21)$$

$$\xi_4, \xi_5 \geq 0 \quad (22)$$

## 2.2 改进算法设计

### 2.2.1 染色体编码与种群初始化

采用双层不定长实数对运输路径和运输方式进行染色体编码，如图 1。采用预生成有效路径库，并进行佳点集初始化，使用低差异序列来初始化大部分种群个体，确保初始种群在解空间中的分布更加均匀。

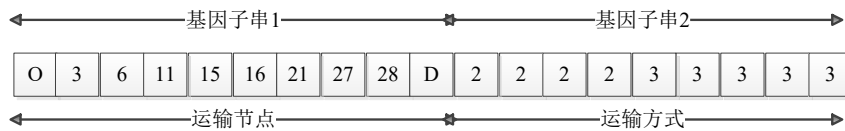


图 1 简易编码图

Fig.1 Simple coded graph

### 2.2.2 遗传操作与自适应交叉

#### 1) 基于线性排名的父代选择

在 NSGA-II 算法中采用基于线性排名的父代选择方法时，先按等级降序、拥挤距离升序对个体排序，

再依据非支配层序号计算选择概率。

2) 自适应交叉、变异概率

自适应交叉  $p_c$ 、变异概率  $p_m$  是 NSGA-II 算法中动态调整关键参数的策略,旨在平衡种群多样性与收敛效率。具体的概率计算公式如下<sup>[11]</sup>

$$p_c = \text{mean}(p_{ci}), p_m = \text{mean}(p_{mi});$$

$$p_{ci} = \begin{cases} \frac{p_{c1}(f_{avgi} - f'_i) + p_{c2}(f_{avgi} - f'_i)}{f_{avgi} - f_{\min i}}, f'_i < f_{avgi} \\ \frac{p_{c2}(f_{\max i} - f'_i) + p_{c3}(f'_i - f_{avgi})}{f_{\max i} - f_{avgi}}, f'_i \geq f_{avgi} \end{cases}$$

$$p_{mi} = \begin{cases} \frac{p_{m1}(f_{avgi} - f_i) + p_{m2}(f_{avgi} - f_i)}{f_{avgi} - f_{\min i}}, f_i < f_{avgi} \\ \frac{p_{m2}(f_{\max i} - f_i) + p_{m3}(f_i - f_{avgi})}{f_{\max i} - f_{avgi}}, f_i \geq f_{avgi} \end{cases} \quad (23)$$

3) 交叉、变异操作

混合交叉策略包含两种交叉方式:路径段交叉和基于质量的交叉。染色体两段均参与变异,采用多策略混合变异的方法,增强算法的局部搜索能力和跳出局部最优的能力。

3 算例研究

为了检验模型的有效性,参考 SUN<sup>[21]</sup>文献中的案例,构建了多式联运集装箱运输网络如图 2 所示,该网络共有 35 个运输节点,69 条运输路段,包含公路、铁路及水路三种运输方式。

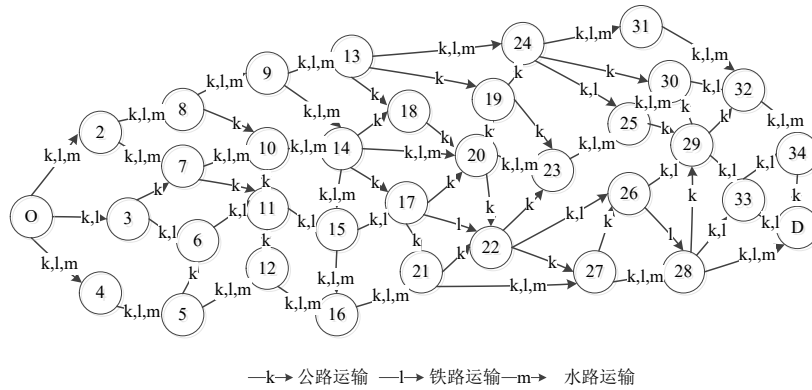


图 2 多式联运网络  
Fig.2 Intermodal transportation network

3.1 算例数据

多式联运企业需在 70 h 内将货物从起点 O 运至终点 D。客户要求时间窗为[20 h, 60 h],提前或延迟到达的单位存储成本为 10 元/(h·TEU)和 25 元/(h·TEU),铁、水路班期产生的单位等待成本为 12 元/(h·TEU)。参考“上海能源交易”最新碳价标准和碳交易政策,预测最新碳价为 90 元/吨,设置碳排放配额为 1 000 kg。

通过查询运输服务运价率表、中国交通年鉴等权威数据源,获取运输基础参数(详见表 2)。结合

相关文献研究及港口、货运中转站等节点的实际运营数据，进一步确定不同运输方式的单位中转成本与碳排放系数（详见表3）。

表2 运输参数  
Tab.2 Transportation parameters

运输方式	平均速度/(km/h)	单位碳排放量/(kg/(TEU·km))	单位货物运输成本/[元/(TEU·km)]
公路运输	80	3.93	8
铁路运输	60	0.42	3.4
水路运输	30	0.66	0.9

针对不确定货运量的处理，基准情景为 50TEU 集装箱运输，因需求受波动水平的扰动，设波动幅度为 30%；对于不确定时间的处理，基于历史数据与经验，选取由平均运输速度计算的平均运输时间作为基准参考时间，时间相对标准差设置为 0.15，正态分布扰动限制为[0.5,2.0]。

表3 各运输方式的中转参数  
Tab.3 Transferring parameters of each transportation mode

运输方式	单位中转成本/（元/TEU）	单位中转碳排放系数/（kg/TEU）
公路-铁路	5	2.17
公路-水路	7	1.98
铁路-水路	10	1.92

考虑到铁路、水路在实际运输过程中均存在班期限制，查阅相关文献资料<sup>[19]</sup>，得到各运输方式的发车时刻表。

表4 各运输方式的发车时刻表  
Tab.4 Departure time of each transportation mode

公路运输	铁路运输	水路运输
	8:00	9:00
	10:30	12:00
无限制	12:00	13:30
	14:30	15:00
	17:30	18:00
	20:00	

### 3.2 算例分析

#### 3.2.1 算法性能对比

根据所建立的模型，基于大数定律，确保样本统计量收敛于总体参数，设定随机次数  $R=200$ ，采用改进非支配排序遗传算法，通过 Matlab2023a 编程求解模型。兼顾参数探索与种群多样性，设置种群大小 100，最大迭代次数 200，初始交叉概率 0.9 及初始变异概率 0.1，后续结合具体情景进行自适应调整。针对不同运输（如长途大宗货运、短途零担运输）场景适应性，应结合“场景特征-不确定性结构-算法配置”调整种群规模、随机次数  $R$ 、迭代次数和交叉变异率。

多目标优化算法根据性能评价指标衡量其优劣。HV 定义为

$$HV(S, z^{ref}) = volume \left( \bigcup_{i=1}^{|S|} c^i \right) \quad (33)$$

式中： $c^i$  为非支配解  $x$  与参考点  $z^{ref}$  作为对角线所构成的超立方体，超体积  $volume(c^i)$  为

$$volume(c^i) = \begin{cases} \prod_{k=1}^m (z_k^{ref} - f_k(x^i)), & \forall k (z_k^{ref} - f_k(x^i) > 0) \\ 0, & \exists k (z_k^{ref} - f_k(x^i) \leq 0) \end{cases} \quad (34)$$

$\Delta$  值定义为

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})} \quad (35)$$

其中  $d_i$  计算的是帕累托近似前沿  $P$  上参考点  $p$  与相邻解  $x^i$  间的欧氏距离,  $\bar{d}$  为  $d_i$  的均值。

$IGD$  表示为

$$IGD(P, S, q) = \left( \sum_{i=1}^{|P|} d_i^q \right)^{\frac{1}{q}} / |P| \quad (36)$$

式 (36) 中  $d_i = \min_{x \in S} \|F(p^i) - F(x)\|$ , 计算的是欧式距离,  $p^i \in P$ , 参数  $q$  控制  $\Delta_p$ 。

NSGA-II 的交叉、变异概率固定取 0.8、0.2。算法结果为 30 次运行的性能均值以保证可靠性和稳定性, 具体结果见表 5 (保留 4 位或 2 位小数)。

表 5 NSGA-II 与改进 NSGA-II 算法的性能对比  
Tab.5 Performance comparison between NSGA-II and improve algorithm

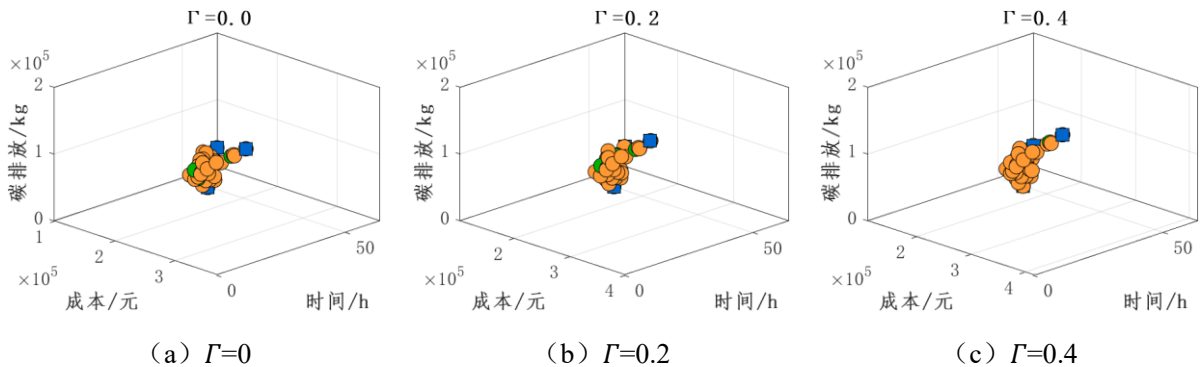
$\Gamma$ 值	超体积 (HV) 均值	分布性( $\Delta$ )均值	IGD 均值	解数量均值	运行时间均值
1.0	3 879 041.548 0	99 454.791 8	2 807.282 8	74.50	31.68
	3 927 204.752 6	113 626.928 0	592.490 5	79.27	58.81

其中设置  $\Gamma$  值的范围为 [0,1], 取  $\Gamma = 1.0$  时, 经营人对风险的厌恶程度最大。由表 5 分析可得, 改进算法的超体积均值相较于标准算法提升 1.2%, 表明其解集在目标空间中的支配范围更广。改进算法的  $\Delta$  值更高, 探索能力增强。

改进算法  $IGD$  相较于标准算法降低 78.9%, 在保证分布性的同时更有效保留高质量解。改进算法解集平均数量较标准 NSGA-II 提升 6.4%。但因引入自适应机制、混合交叉及局部优化策略, 计算复杂度上升, 导致运行耗时增加。

### 3.2.2 算法有效性检验

基于图 2, 在基准情景下求解货物从起点 O 至终点 D 的目标算例, 所得 Pareto 前沿解集在解空间中的分布见图 3。



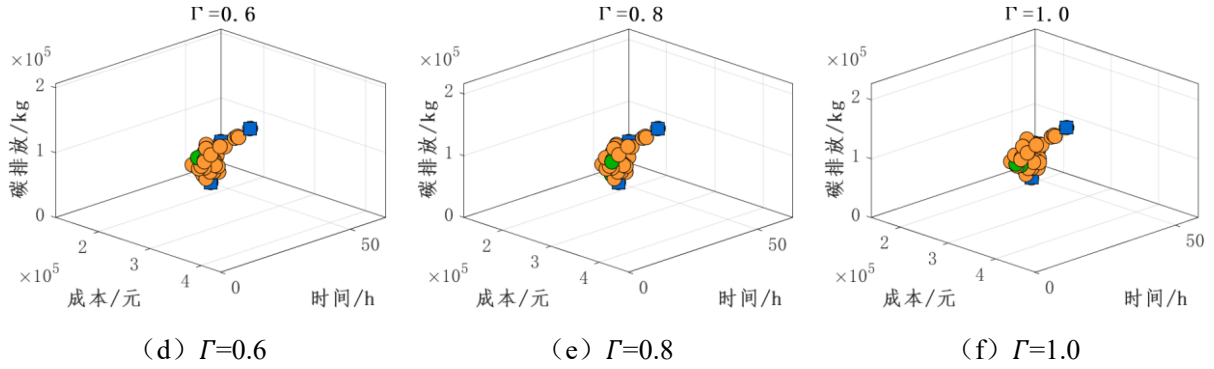


图3 Pareto 前沿解集

Fig.3 Pareto front solution set

在多目标优化问题中, 适应度值与 Pareto 前沿解的变化趋势直接反映算法的收敛性与多样性, 迭代和前沿大小演化过程如图 4 所示。

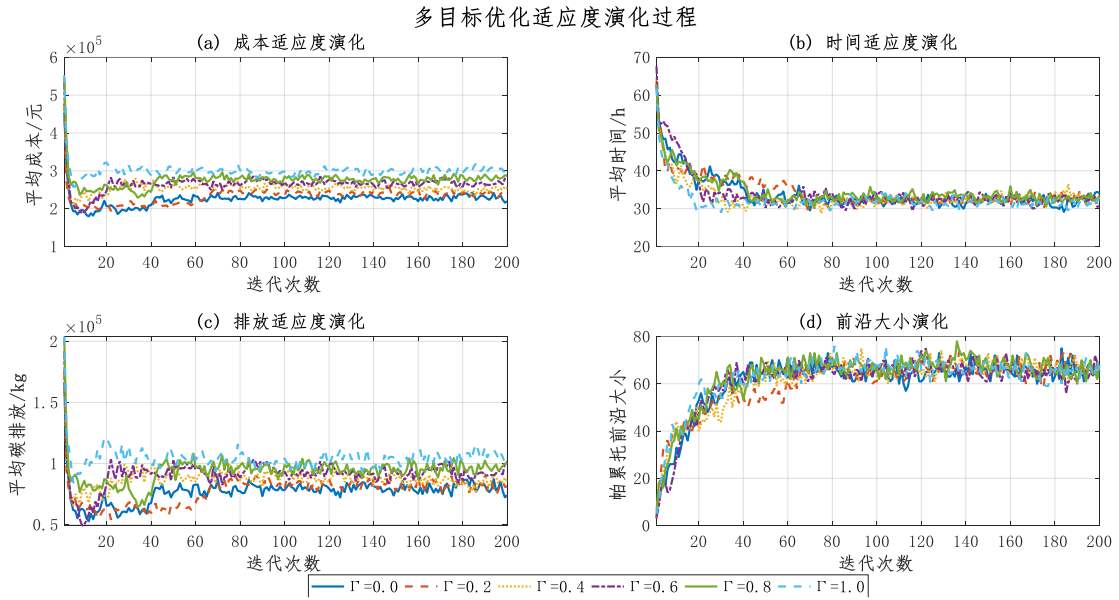


图4 演化过程

Fig.4 Evolutionary process

由图 4 可得, 改进算法在搜索精度、收敛性、优化效果及解集数量上综合优化能力较强。中期阶段后, 非支配解集中在“成本-时间-碳排放”三维空间的 Pareto 前沿, 各目标适应度值不再显著恶化, 形成均衡解集群。

该算例在多组基准情景下生成 Pareto 前沿解, 通过剔除相似运输方案, 筛选并保留各情景下具有显著目标最优特征的前沿解, 其部分信息见表 6。

表 6 各情景单个帕累托最优方案  
Tab.6 Single pareto optimal scheme for each scenario

情景	运输路径	
$\Gamma=0$	成本最优解:成本 98581 元,时间 63.8h,排放 27771kg	1 水 4 铁 5 水 12 水 16 水 21 水 27 铁 28 水 35
	时间最优解:成本 372159 元,时间 11.2h,排放 175082kg	1 公 4 公 5 公 12 公 16 公 21 公 27 公 28 公 35
	排放最优解:成本 176941 元,时间 41.5h,排放 19719kg	1 铁 4 铁 5 铁 12 铁 16 铁 21 铁 27 铁 28 铁 35
$\Gamma=0.4$	成本最优解:成本 119803 元,时间 58.2h,排放 28536kg	1 水 4 水 5 水 12 水 16 水 21 铁 27 铁 28 铁 35
	时间最优解:成本 416818 元,时间 11.2h,排放 196091kg	1 公 4 公 5 公 12 公 16 公 21 公 27 公 28 公 35

	排放最优解:成本 198 170 元,时间 41.6 h,排放 22 085 kg	1 铁 4 铁 5 铁 12 铁 16 铁 21 铁 27 铁 28 铁 35
	成本最优解:成本 124 328 元,时间 67.8 h,排放 39 012 kg	1 水 4 铁 5 水 12 水 16 水 21 水 27 水 28 水 35
$\Gamma=1.0$	时间最优解:成本 483 806 元,时间 11.1 h,排放 227 606 kg	1 公 4 公 5 公 12 公 16 公 21 公 27 公 28 公 35
	排放最优解:成本 230 099 元,时间 41.7 h,排放 25 635 kg	1 铁 4 铁 5 铁 12 铁 16 铁 21 铁 27 铁 28 铁 35

多目标帕累托最优解中成本最优解代表路径通常是铁-水联运的运输路径；时间最优解代表路径使用全公路的运输方式，追求速度最快，势必要以增加运输成本和牺牲环境为代价；而碳排放最优解代表方案为全铁路运输，运输过程和中转过程的碳排放量相对较少。

表 7 各情景部分帕累托最优方案  
Tab.7 Partial pareto optimal solutions for each scenario

情景	总成本/元	总时间/h	总碳排放量/kg	运输路径
$\Gamma=0.4$	172 812	44.4	38 709	1 公 4 铁 5 水 12 铁 16 水 21 铁 27 铁 28 铁 35
	158 712	46.2	24 599	1 铁 4 铁 5 水 12 铁 16 水 21 铁 27 铁 28 铁 35
	276 737	22.7	109 877	1 公 4 公 5 公 12 铁 16 公 21 铁 27 铁 28 水 35
	222 254	34.0	59 237	1 公 4 公 5 铁 12 铁 16 水 21 铁 27 铁 28 铁 35
$\Gamma=0.6$	205 155	41.2	40 620	1 公 4 铁 5 铁 12 铁 16 铁 21 铁 27 铁 28 水 35
	273 094	25.5	82 814	1 公 4 铁 5 铁 12 铁 16 公 21 铁 27 铁 28 公 35
	247 260	34.8	58 753	1 公 4 铁 5 铁 12 铁 16 公 21 铁 27 铁 28 铁 35

由表 7 可知，多数方案符合理想时间窗，实现“成本-时间-碳排放”的帕累托均衡运输。当  $\Gamma = 0.4$  时，方案 1、2 均以铁路为主。方案 1 因 1-4 节点采用公路运输，总成本、总碳排放量较方案 2 分别高出 8.88%、57.36%，表明铁路在成本和环保上更优；当  $\Gamma = 0.6$  时，方案 2、3 均结合铁路与水路运输，方案 3 总成本降低 10.45%、总碳排放量减少 40.95%，但总时间增加 36.47%，是以时间大幅增加为代价实现成本与环保优化。

### 3.2.3 目标值敏感性分析

$\Gamma$  值表示需求量的不确定预算，受经营人对风险的偏好态度的影响，随着  $\Gamma$  值的增大，经营人对风险的厌恶程度加深，鲁棒性更强。

随着  $\Gamma$  从 0 上升至 1.0，成本呈现出整体上升趋势，涨幅约 23.5%。之间为成本控制的敏感区域，成本均值上升较快，而标准差增幅相对温和； $\Gamma=0.4$  的标准差是  $\Gamma=0.0$  的约 1.27 倍，高扰动带来了显著的成本不确定性，但其风险与成本的相对比例基本稳定，具备一定的稳健性。

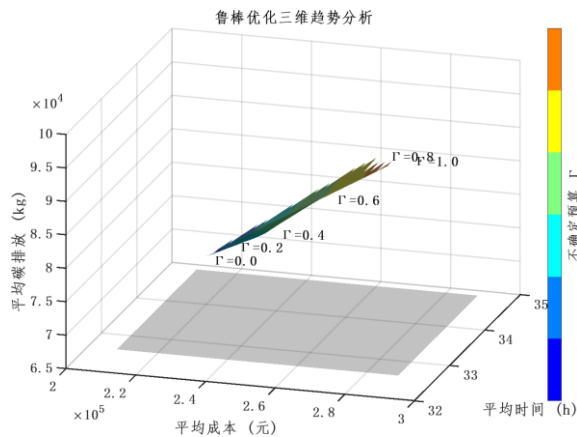


图 5 鲁棒优化分析

Fig.5 Robust optimization analysis

图6表明, 时间均值整体呈波动上升趋势, 时出现下降, 标准差和变异系数虽有波动, 但总体维持在较高水平。和 是时间响应的关键平衡点, 可作为优化区间参考。碳排放的不确定性高于成本与时间, 变异系数普遍在65%以上, 表明碳排放受外部扰动影响最为显著。

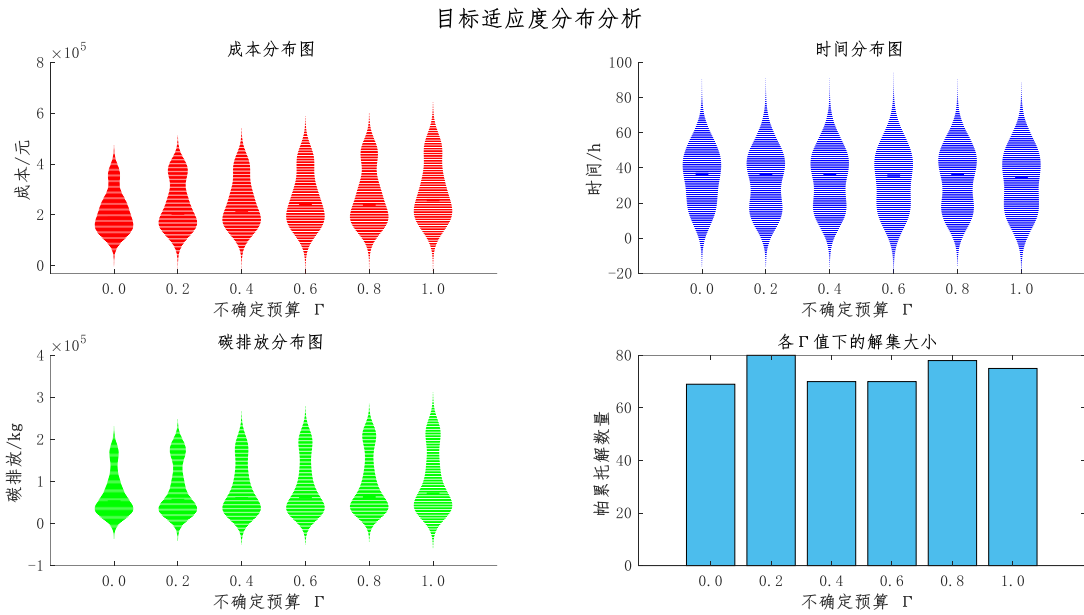


图 6 目标适应度分析及前沿

Fig.6 Target fitness analysis and frontier number

总的来说,  $\Gamma = 0.2 \sim 0.4$  为系统表现相对最优区间, 建议在  $\Gamma = 0.4$  附近设为“敏感阈值”, 超过此值需启动预警机制。 $\Gamma = 1.0$  系统处于最保守状态, 建议仅在极端扰动场景下使用, 否则可能造成资源浪费与效率低下。在低碳目标导向下, 建议优先控制  $\Gamma$  值在  $0.2 \sim 0.4$  区间, 以兼顾鲁棒性与稳定性。

#### 4 结论

该研究基于碳交易政策, 针对需求与时间双重不确定环境下的多式联运路径优化问题, 采用改进的 NSGA-II 算法, 构建以经济成本、碳排放总量及运输时间为优化目标的随机鲁棒优化模型。研究结论如下。

- 1) 提出的改进自适应 NSGA-II 算法可有效适配不同鲁棒情景的路径优化, 性能优于传统算法。
- 2) 研究明确了多式联运网络多目标间的普适性权衡逻辑, 为多目标协同优化领域的后续研究提供了基础理论支撑。
- 3) 在低碳目标导向下, 该研究为不同场景、不同规模的多式联运经营人制定低碳、稳健的运输方案, 提供了可落地的实践参考。

#### 参考文献:

[1] FAZAYELI S, EYDI A, KAMALABAD I N. Location-routing problem in multimodal transportation network with time windows and fuzzy demands: Presenting a two-part genetic algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 119: 233-246.

[2] SUN Y, LIANG X, LI X Y, et al. A fuzzy programming method for modeling demand uncertainty in the capacitated road-rail multimodal routing problem with time windows[J]. Symmetry-Basel, 2019, 11(1): 1-25.

- [3] 张旭,张海燕,袁旭梅,等.需求不确定下基于不同碳税机制的双目标多式联运路径优化 [J].公路交通科技,2025,42(2):41-51.  
ZHANG X, ZHANG H Y, YUAN X M, et al. Dual-objective multimodal transport route optimization based on different carbon tax mechanisms under uncertain demand[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2025,42(2):41-51.
- [4] 袁旭梅,降亚迪,张旭.低碳政策下基于区间的模糊多式联运路径鲁棒优化研究[J].工业工程与管理,2021,26(4):134-141.  
YUAN X M,JIANG Y D, ZHANG X. Research on Robust Optimization of Interval-based Fuzzy Multimodal Transport Paths under Low-Carbon Policies[J].Industrial Engineering and Management,2021,26(4):134-141.
- [5] 邓明君,代玉珍,李响.需求不确定下低碳多式联运路径鲁棒优化[J].工业工程,2023,26(4):104-113.  
DENG M J, DAI Y Z, LI X. Robust Optimization of Multi-modal Transportation Routing with Low-carbon under Demand Uncertainty[J]. Industrial Engineering Journal,2023,26(4):104-113.
- [6] 彭勇,肖云鹏,罗义娟.不确定环境下多式联运路径多目标优化[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(10):154-160+170.  
PENG Y, XIAO Y P, LUO Y J. Multi-Objective Optimization for Multi-Modal Transportation Routing in Uncertain Environment[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2021,40(10):154-160+170.
- [7] Guo W, Zhang Y, Li W, et al. Augmented Lagrangian relaxation-based coordinated approach for global synchromodal transport planning with multiple operators[J]. Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review,2024,185:103535.
- [8] 杨洛郡,张诚,郭军华.不确定条件下公铁水多式联运多目标路径优化研究[J].华东交通大学学报,2023,40(04):56-65.  
YANG L J, ZHANG C, GUO J H. Research on multi-objective path optimization of highway-railway-waterway multimodal transport under uncertain conditions[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40 (4): 56-65.
- [9] 李珺,杨斌,朱小林.混合不确定条件下绿色多式联运路径优化[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(4):13-19.  
LI J, YANG B, ZHU X L. Path Optimization of Green Multimodal Transportation under Mixed Uncertainties[J].Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2019,19(4):13-19+27.
- [10] BARADARAN V, SHAF AEI A, HOSSEINIAN A H.Stochastic Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Vehicles and Multiple Prioritized Time WindowsMathematical Modeling and Solution Approach[J]. Computers &Industrial Engineering,2019,131:187-199.
- [11] 徐国权,郑瑞,袁韶秋,熊典祯.混合不确定条件下低碳多式联运路径模糊鲁棒优化[J].北京交通大学学报,2025,49(01):55-70.  
XU G Q, ZHENG R, YUAN S Q, et al. Fuzzy robust optimization of low-carbon multimodal transport path undermixed uncertainty[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2025,41(1):1-7.
- [12] 孙岩,张正,张夏然,刘耘麟,孙国华.多重不确定环境下带有模糊软时间窗的多式联运路径优化与仿真[J].山东大学学报(理学版),2025,60(06):1-13.  
SUN Y, ZHANG Z, ZHANG X R, LIU Y L, SUN G H. Optimization and simulation for an intermodal routing problem with fuzzy soft time window under multiple uncertainty[J]. Journal of Shandong University (Natural Science),2025,60(06):1-13.
- [13] DUAN L, TAVA SSZY L A, REZAEI J. Freight Service Network Design with Heterogeneous Preferences

- for Transport Time and Reliability[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,2019,124:1-12.
- [14] XIONG G, WANG Y. Best routes selection in multimodal networks using multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Combinatorial Optimization,2014,28(3):655-673.
- [15] 蒋美芝,吕靖.基于 Pareto 蚁群算法的船舶风险规避路径优化[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(1);192-199.  
JIANG M Z, LV J. Ship Risk Aversion Path Optimization Based on Pareto Ant Colony Algorithm[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2019,19(1);192-199.
- [16] CHEN L.A polynomial approximation-based approach for chance constrained optimization[J].Optimization Methods and Software,2019,34(1):115-138.
- [17] 段力伟,高慧艳.碳交易机制下考虑需求不确定的多式联运路径优化[J].铁道运输与经济,2025,47(1):40-52.  
DUAN L W, GAO H Y. Route Optimization of Multimodal Transport Considering Demand Uncertainty under Carbon Trading Mechanism[J]. Railway Transport and Economy,2025,47(1):40-52.
- [18] Bertsimas D, Sim M. The price of robustness[J]. Operations research,2004,52(1):35-53.
- [19] 代玉珍.低碳政策下多重不确定多式联运路径鲁棒优化研究[D].南昌:华东交通大学,2023.  
DAI Y Z. Research on Robust Optimization of Multi-Uncertain Modal Transport Routes Under Low-Carbon Policy[D]. Nanchang: East China Jiaotong University,2023.
- [20] 綦潘安,计明军,冯泽等.考虑多任务集装箱多式联运路径优化方案研究[J].工业工程与管理,2022,Vol.27(3):54-63.  
QI P A, JI M J, FENG Z et al. Research on the Route Optimization Scheme of Multimodal Transportation Considering Multi-task Container, [J]. Industrial Engineering and Management, 2022,27(3):54-63.
- [21] SUN Y, LANG M. Bi-objective optimization for multi-modal transportation routing planning problem based on Pareto optimality[J]. Journal of industrial Engineering and Management,2015,8(4):1195-1217.



第一作者:郭军华(1976—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为智能交通与智慧物流。



通信作者:苗婉莹(2001—),女,硕士研究生,研究方向为智能交通与智慧物流。