

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022100223121966

文章编号: 1674-599X(2023)06-0111-12

引用格式: 郑长江, 张晨, 陶童统, 等. 冷链物流多式联运路径选择优化研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6): 111-122.

Citation: ZHENG Changjiang, ZHANG Chen, TAO Tongtong, et al. Research on the routing optimization for cold chain logistics multimodal transportation[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 111-122.

## 冷链物流多式联运路径选择优化研究

郑长江<sup>1</sup>, 张晨<sup>1,2</sup>, 陶童统<sup>1</sup>, 孙凯<sup>1</sup>, 陈田星<sup>2</sup>

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098;

2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019)

**摘 要:** 为降低冷链食品(CCF)在运输过程中的总成本, 提高客户满意度, 采用多式联运对冷链食品进行物流配送。先基于多式联运网络、总成本最小化和客户满意度最大化, 构建路径选择模型; 再采用改进粒子群优化算法(IPSO)对模型进行求解; 最后, 利用实际案例进行模型验证和敏感性分析。研究结果表明: 与公路单式联运相比, 多式联运的运输成本降低了13.4%, 总成本降低了2.4%, 时间满意度提高了3.3%, 总满意度提高了0.6%。通过提升铁路运输速度, 可有效地降低运输总成本, 提高客户满意度。

**关键词:** 冷链物流; 多式联运; 改进粒子群算法; 路径选择

中图分类号: U15

文献标志码: A

## Research on the routing optimization for cold chain logistics multimodal transportation

ZHANG Changjiang<sup>1</sup>, ZHANG Chen<sup>1,2</sup>, TAO Tongtong<sup>1</sup>, SUN Kai<sup>1</sup>, CHEN Tianxing<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Transportation Engineering, HoHai University, Nanjing 210098, China;

2. JSTI Group, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** In order to reduce the total cost of cold chain food (CCF) multimodal transportation process and improve customer satisfaction, this paper proposes the study of Cold Chain Food logistics routing optimization by multi-modal transportation. Based on the multimodal transportation network, the path selection model is constructed considering the minimization of total cost and the maximization of customer satisfaction. The improved particle swarm optimization algorithm (IPSO) was used to solve the model. Finally, the model verification and sensitivity analysis are carried out using real cases. The analysis results show that the transportation cost of multimodal transportation is reduced by 13.4%, the total cost is reduced by 7.2%, the time satisfaction is increased by 3.3%, and the total satisfaction is increased by 0.6%. By improving the speed of railway transportation, the total transportation cost can be effectively reduced and customer satisfaction can be improved.

**Key words:** cold chain logistics; multimodal transport; improved particle swarm optimization algorithm; path selection

收稿日期: 2022-10-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(71801080)

作者简介: 郑长江(1966—), 男, 河海大学教授, 博士生导师。Email: zheng@hhu.edu.cn

2016~2021年,中国冷链物流市场规模持续扩大,市场规模从2016年的2 210亿元增至2021年的4 117亿元,预计到2022年,中国冷链物流市场规模将突破4 500亿元。与传统物流相比,冷链物流需要使用各种制冷设施设备,排放更多的温室气体,其能耗远大于一般的物流运营的能耗。而多式联运作为一种新兴的运输方式,集成了多种运输方式的特点,具有效率高、成本低、污染少的优点。虽然目前冷链物流的运输方式依然以公路运输为主导,但正在积极地向多式联运的方向发展,多式联运能充分发挥各种运输方式的优势、特色和组合效率。

对于多式联运过程中产生的运输成本问题,胡元等<sup>[1-2]</sup>以路段运输成本之和最小为目标函数,研究了多式联运运输路径规划问题。MOCCIA等<sup>[3]</sup>研究了在运输能力限制下的多式联运运输路径规划问题。李玉民等<sup>[4]</sup>提出了将高铁作为一种运输方式参与到生鲜食品多式联运中的策略。刘松等<sup>[5]</sup>建立了以总成本最小为目标的路径优化模型。YU等<sup>[6]</sup>发现多式联运可以显著地减少碳排放、缩短运输时间、降低运输成本。ZHANG等<sup>[7]</sup>考虑了碳减排补贴与碳排放配额优化措施对冷链物流路径选择的影响。崔亚琼<sup>[8]</sup>提出了以铁路物流中心为节点的多式联运发展策略。侯海录<sup>[9]</sup>也提出了利用铁路集装箱进行多式联运的发展策略。朱欣媛等<sup>[10]</sup>提出了将模糊时间窗与客户满意度相结合的方法。李畅等<sup>[11]</sup>建立了以配送总成本最低和交付产品平均新鲜度最大为目标的路径规划模型。欧阳瑞祥等<sup>[12-14]</sup>研究了公交车的路径优化问题。王清洲等<sup>[15-18]</sup>研究了绿色多式联运的路径优化问题。LIU等<sup>[19]</sup>考虑了在模糊时间窗约束下的冷链物流路径选择问题。BABAGOLZADEH等<sup>[20]</sup>研究了需求不确定性及碳税政策下的冷链物流供应链管理问题。BORTOLINI等<sup>[21]</sup>将易腐食品的质量变化与运输时间进行了线性关联,对冷链物流供应链进行了探究。RADHIKA等<sup>[22]</sup>通过构建多目标实体运输问题(multi-objective solid transportation problem, MOSTP)模型,研究了货运中的不确定性问题。晏远春等<sup>[23]</sup>研究了在不确定环境下如何评价危险品道路运输企业的安全性及降低危险品运输风险的问题。MENG等<sup>[24]</sup>以化运营商的利润和乘客旅行需求满意度最大为目标,对货物运输组织优化,构建了列车开行时刻表。蒲松

等<sup>[25-28]</sup>建立了基于预测需求数据的列车线路规划鲁棒优化模型,获得了平衡乘客需求波动和线路规划的鲁棒解。FATHI等<sup>[29]</sup>提出了一种鲁棒两阶段网络数据包络分析(robust two-stage network data envelopment analysis, RTNDEA)模型,并以此评价在运输能力不确定性下的运输供应链的可持续性。BRUNS等<sup>[30]</sup>研究了在集装箱终端货运列车运输能力不确定条件下的鲁棒运输规划问题,得到了优化的货物运输时的路径选择方案。目前,冷链物流多式联运的研究多以总成本最小为目标函数进行建模。对于客户满意度方面,大多数的研究仅考虑了客户的时间满意度,未同时考虑客户的时间满意度与其对食品新鲜度的满意度。

本研究结合冷链物流与多式联运特点,考虑冷链运输过程中的经济成本和客户满意度,根据不同运输模式的优缺点,选择合理的运输方式组合与路径,并考虑了铁路速度和成本的变化对路径选择的影响。主要创新点如下:

- 1) 所构建的客户满意度可以反映运输时间损失度和冷链食品损坏度;
- 2) 采用改进粒子群优化(improved particle swarm optimization, IPSO)算法进行多式联运最佳路径的搜索;
- 3) 采用案例分析验证了该模型的可行性以及算法的有效性,并对该模型进行了敏感性分析。该分析反映了铁路运输速度和运输成本对运输方式选择的影响。

## 1 模型建立

### 1.1 问题描述

在某多式联运网络中,先设定起点、终点、货运量,冷链食品(cold chain food, CCF)分别通过公路、铁路和航空三种途径,从始发地运输到目的地。在运输过程中,有多条路径可供选择,且每条路径都有不同的运输组合方式。决策者需要选择合适的运输路径和运输方式,在追求最低总成本的同时,保证客户满意度。

### 1.2 问题假设

为简化模型,对问题做出如下假设:

- 1) 运输工具的运输速度、货运量以及运输过程

中的温度均为常数;

- 2) 不考虑转运过程中的库存成本;
- 3) 运输时间为节点之间的理想运输时间;
- 4) 在运输过程中,因货物质量而产生的碳排放均产生于制冷过程中。

### 1.3 变量定义

模型中使用的符号及定义见表1。

表1 模型中使用的符号及定义

Table 1 Symbols and definitions used in the model

符号	定义
$K$	运输方式集合
$N$	网络节点集合
$M$	转运节点集合
$Q/\text{TEU}$	货物总标准集装箱量
$c_{1ij}^k (\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	单位货物从节点 <i>i</i> 到 <i>j</i> ,采用运输方式 <i>k</i> 的运输成本
$c_{2i}^{kk'} c_{1ij}^k (\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	单位货物在节点 <i>i</i> ,从运输方式 <i>k</i> 到 <i>k'</i> 的转运成本
$c_{31} c_{1ij}^k (\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	运输期间每小时产生的制冷成本
$c_{32} (\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	转运期间每小时产生的制冷成本
$c_4 (\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	单位货物价值
$c_5 (\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	单位二氧化碳碳税
$e_{ij}^k (\text{kg} \cdot \text{km}^{-1})$	采用运输方式 <i>k</i> ,从节点 <i>i</i> 到 <i>j</i> 的单位距离运输过程的碳排放量
$e_i^{kk'} (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	单位货物在节点 <i>i</i> ,从运输方式 <i>k</i> 到 <i>k'</i> 转运过程的碳排放量
$e/(\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1})$	单位货物每小时制冷设备的碳排放量
$d_{ij}^k \text{ km}$	运输方式 <i>k</i> 下从节点 <i>i</i> 到 <i>j</i> 的运输里程
$v_{ij}^k (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	运输方式 <i>k</i> 下从节点 <i>i</i> 到 <i>j</i> 的运输速度
$t_{ij}^k / \text{h}$	运输方式 <i>k</i> 下从节点 <i>i</i> 到 <i>j</i> 的运输时间
$t_i^{kk'} / \text{h}$	在节点 <i>i</i> 中从运输方式 <i>k</i> 到 <i>k'</i> 的转运时间
$q_{ij}^k (\text{kg})$	运输方式 <i>k</i> 下从节点 <i>i</i> 到 <i>j</i> 的运输量
$\xi$	货品损坏的比例
$\delta$	新鲜度衰减系数
$x_{ij}^k$	如果从节点 <i>i</i> 到 <i>j</i> ,选择运输方式 <i>k</i> ,则取值为1;否则取值为0
$y_i^{kk'}$	如果在节点 <i>i</i> 中,运输方式从 <i>k</i> 变为 <i>k'</i> ,则取值为1;否则取值为0

### 1.4 模型建立

1) 运输成本  $C_1$ 。

运输成本与运输距离成正相关,运输成本表示为

$$C_1 = \sum_{i,j \in N} \sum_{k \in K} Q c_{1ij}^k d_{ij}^k x_{ij}^k \quad (1)$$

2) 转运成本  $C_2$ 。

转运成本是指由于在转运节点中切换运输方式而产生的货物成本,转运成本表示为

$$C_2 = \sum_{i \in M} \sum_{k,k' \in K} Q c_{2i}^{kk'} y_i^{kk'} \quad (2)$$

3) 制冷成本  $C_3$ 。

制冷成本是指在运输和转运过程中,为保持车辆内温度而制冷的成本,制冷成本表示为

$$C_3 = c_{31} \sum_{i,j \in N} \sum_{k \in K} Q t_{ij}^k x_{ij}^k + c_{32} \sum_{i \in M} \sum_{k,k' \in K} Q t_i^{kk'} y_i^{kk'} \quad (3)$$

4) 货损成本  $C_4$ 。

冷链食品的质量和值随时间的推移而逐渐降低。其质量  $f$  与时间之间为指数函数关系<sup>[31-32]</sup>。假设在运输过程中货物的温度是恒定的,则新鲜度衰减系数  $\delta$  可视为常数。损坏成本表示为

$$C_4 = c_4 \xi Q (1 - f) \quad (4)$$

$$f = e^{-\delta T_t} \quad (5)$$

$$T_t = \sum_{i,j \in N} \sum_{k \in K} t_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i \in M} \sum_{k,k' \in K} t_i^{kk'} y_i^{kk'} \quad (6)$$

5) 碳排放成本  $C_5$ 。

碳排放成本存在于运输、转运和冷藏过程中,其与运输距离、转运过程和运输时间均相关,总排放成本表示为

$$C_5 = c_5 \left( \sum_{i,j \in N} \sum_{k \in K} e_{ij}^k d_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i \in M} \sum_{k,k' \in K} Q e_i^{kk'} y_i^{kk'} + Q e T_t \right) \quad (7)$$

6) 客户满意度  $\lambda$ 。

客户满意度可以用时间满意度和食品新鲜度满意度来表示,该满意度范围为 $[0,1]$ ,为保证模型的计算可行性,将最小满意度设置为极小的正数,为0.001。

7) 时间满意度  $\lambda_t$ 。

在实际中,若货物越早送达,客户的时间满意度越高;反之,若货物越晚送达,客户的时间满意度越低。因此,客户的时间满意度与实际到达时间和预计到达时间的时间差密切相关,其表达式为

$$\lambda_t = \begin{cases} 0, & T_t \leq T^E \\ \left( \frac{T_t - T^E}{T^e - T^E} \right)^{\phi_1}, & T^E < T_t < T^e \\ 1, & T^e \leq T_t \leq T^l \\ \left( \frac{T^L - T_t}{T^L - T^l} \right)^{\phi_2}, & T^l < T_t < T^L \\ 0, & T_t \geq T^L \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $T_t$  表示实际交货时间;

$[T^e, T^l]$  表示预期的交货期限;

$[T^E, T^L]$  表示可接受的最大时间范围;

$\phi_1$  和  $\phi_2$  均为敏感度指数。

时间满意度与总运输时间之间的关系如图1所示。

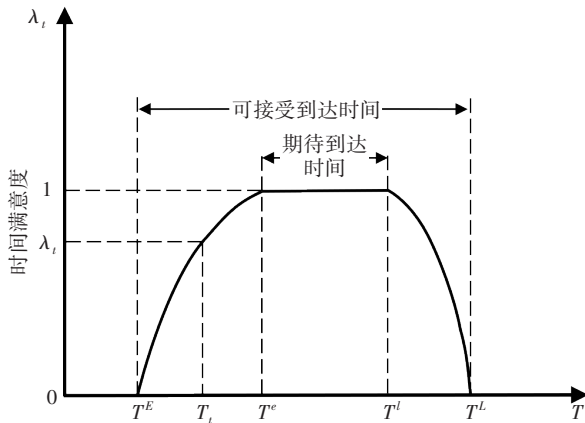


图1 时间满意度函数

Fig. 1 Time satisfaction function

## 8) 食品新鲜度满意度 $\lambda_f$

客户满意度也与食品新鲜度有关,食品新鲜度满意度用分段函数表示,其表达式为

$$\lambda_f = \begin{cases} 1, & T_t \leq \tau_{\text{QRP}} \\ 1 - \frac{T_t - \tau_{\text{QRP}}}{M - \tau_{\text{QRP}}}, & \tau_{\text{QRP}} < T_t < M \\ 0, & T_t \geq M \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\tau_{\text{QRP}}$  为质量降低点 (quality reduction point, QRP), 其表示在未观察到质量下降的情况下  $T_t$  的临界值<sup>[33]</sup>, 其对应的质量为  $f_1$ ;

$M$  代表客户可以接受的质量对应的  $T_t$  的临界值, 其对应的质量为  $f_2$ 。

质量和食品新鲜满意度与时间的关系如图2所示。

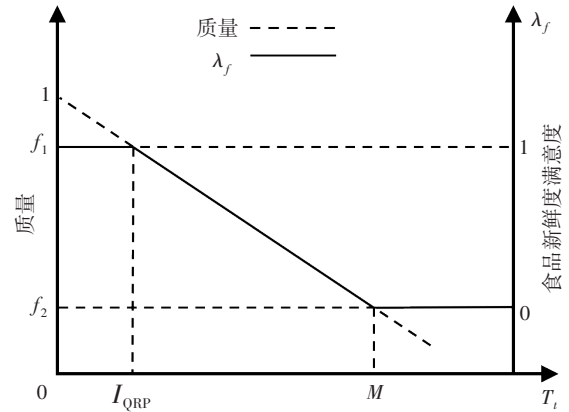


图2 质量损失和食品新鲜满意度随时间的变化

Fig. 2 Changes in quality loss and food freshness satisfaction over time

冷链物流多式联运的目标是最大限度地降低总成本,同时最大限度地提高客户满意度。因此,将所有这些成本相加,得到最后的总成本,该模型可表示为

$$\min Z = \frac{C}{\lambda} = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5}{\lambda_t + \lambda_f} \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq 1, \forall i, j \in N \quad (11)$$

$$\sum_{k, k' \in K} y_i^{kk'} \leq 1, \forall i \in M \quad (12)$$

$$\text{s.t. } x_{hi}^k + x_{ij}^{k'} \geq 2y_i^{kk'}, \forall h, i, j \in N, \forall k, k' \in K \quad (13)$$

$$\sum_{i, j \in N} \sum_{k \in K} t_{ij}^k + \sum_{i \in M} \sum_{k, k' \in K} t_i^{kk'} \leq T \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} q_{hi}^k = \sum_{k \in K} q_{ij}^k, \forall h, i, j \in N \quad (15)$$

式(11)表示在两个相邻的节点之间只能选择一种运输模式,式(12)表示在转运节点上只能进行一次转运,式(13)表示转运期间的运输方式是连续的,式(14)表示总运输时间不应超过设定的边界,式(15)表示网络中节点的流动平衡约束。

## 2 改进粒子群优化算法

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法是 KENNEDY 等<sup>[34]</sup>提出的一种进化算法。PSO 算法可实现对最优解的搜索,且收敛速度较快,但该算法仍存在过早收敛和容易陷入局部最优等问题。为提高该算法的鲁棒性,有研究者提出了 IPSO。



## 2.1 PSO算法

在PSO算法中,假设在 $D$ 维搜索空间中,有 $N$ 个粒子组成粒子群,该粒子群中存在潜在解,每个粒子 $i$ 与位置向量 $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ 和速度向量 $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 关联。在第 $k+1$ 次迭代中,粒子 $i$ 在维度 $d$ 上速度的更新表达式为

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^k) \quad (16)$$

在第 $k+1$ 次迭代中,粒子 $i$ 在维度 $d$ 上的位置的更新表达式为

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^k \quad (17)$$

式中: $\omega$ 为惯性权重;

$c_1$ 为粒子下一步动作来源于自身经验部分所占的权重;

$c_2$ 为粒子下一步动作来源于其他粒子经验部分所占的权重;

$r_1$ 和 $r_2$ 是两个用来调节粒子之间学习因子的随机数,其范围均为 $[0, 1]$ ;

$p_i$ 是粒子 $i$ 的历史最优位置;

$p_g$ 是所有粒子的历史最优位置。

## 2.2 自适应动态惯性权重

当固定惯性权重与平衡值不同时,根据成本和满意度的变化,动态调整单个粒子到最优值的距离与所有粒子到最优值的平均距离之间的比值,这种调整进一步提高了算法的搜索性能。非线性自适应动态调整的惯性权重表示为

$$\omega = \omega_{\min} + \gamma(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \quad (18)$$

$$\gamma = \left( \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\text{avg}} - C_{\min}} + \frac{\lambda_{\max} - \lambda_i}{\lambda_{\max} - \lambda_{\text{avg}}} \right) / 2 \quad (19)$$

式中: $\omega_{\min}$ 为最小权重,通常设置为0.4;

$\omega_{\max}$ 为最大权重,通常设置为0.9<sup>[35-36]</sup>;

$\gamma$ 为非线性动态调整系数;

$C_i$ 和 $\lambda_i$ 分别为总成本和客户满意度;

$C_{\min}$ 和 $C_{\text{avg}}$ 分别为最小总成本和平均总成本;

$\lambda_{\max}$ 和 $\lambda_{\text{avg}}$ 分别为最大客户满意度和平均客户满意度。

## 2.3 柯西突变

对于PSO算法,算法在收敛之前,最优粒子 $p_{\text{gbest}}$ 的选取总是在之前的几个候选粒子之间振荡。因此,在算法前期,应扩大 $p_{\text{gbest}}$ 的搜索空间以增强算法的搜索能力,在算法的迭代后期,应减小变异率以避免最优解的振荡,加快收敛速度。

柯西分布的分布函数 $F(x; \theta, \alpha)$ 是一个期望和方差均不存在的函数,其定义如式(20)所示:

$$\text{Cauchy}(x; \theta, \alpha) = \frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{x - \theta}{\alpha}\right) + \frac{1}{2} \quad (20)$$

式中: $x$ 是自变量;

$\theta$ 是定义分布峰值位置的位置参数;

$\alpha$ 是柯西分布的比例参数。

作为柯西分布的比例参数, $\alpha$ 决定了干扰幅度,令其随迭代过程线性减小,即:

$$\alpha^{k+1} = \alpha^k - \frac{1}{t_{\max}} \quad (21)$$

式中: $\alpha^k$ 第 $k$ 次迭代的比例参数;

$t_{\max}$ 是最大迭代次数。

令 $\theta = 0$ 时,所构成的柯西分布函数为:

$$F(t; 0, \alpha) = \frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{t}{\alpha^k - 1/t_{\max}}\right) + \frac{1}{2} \quad (22)$$

式中: $t$ 是迭代次数。

使用柯西分布的精英粒子扰动为

$$p_{\text{gbest}}^* = p_{\text{gbest}} + \eta \text{Cauchy}(t; 0, \alpha) \quad (23)$$

式中: $\eta$ 是 $[0, 1]$ 的随机数。

假设柯西突变后的最优粒子为 $p_{\text{gbest}}^*$ ,将适应度值 $f(p_{\text{gbest}}^*)$ 与 $f(p_{\text{gbest}})$ 进行比较, ( $f(\cdot)$ 为问题适应度函数,若 $f(p_{\text{gbest}}^*) < f(p_{\text{gbest}})$ ,则 $p_{\text{gbest}} = p_{\text{gbest}}^*$ ;否则将其舍去。因此,将柯西分布应用于群体最优粒子的学习过程中。该ISPO算法流程如图3所示。

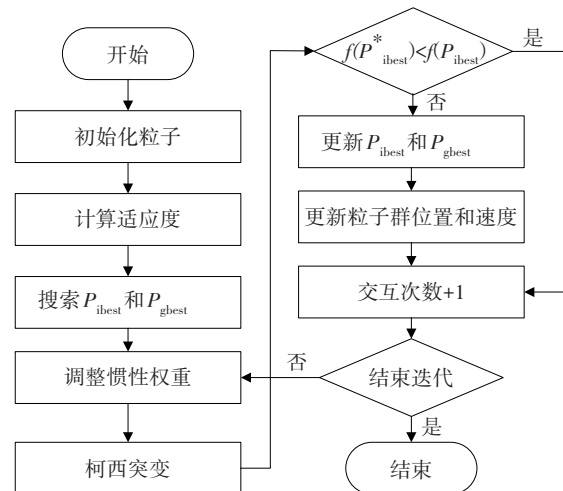


图3 IPSO 的流程

Fig. 3 Flow chart of IPSO

### 3 案例研究

#### 3.1 案例描述

假设以中国 10 个主要枢纽城市为节点,并对其进行标记,结果见表 2。由于中国内河航道的缺乏,本文仅考虑公路、铁路和空运方式之间的多式联运。运输节点和弧线在网络中的分布如图 4 所示。节点之间的运输距离见表 3。各运输方式的单位运输成本、平均速度和对应的碳排放量见表 4。在表 4 中,公路、铁路及航空运输采用的单位成本都是采用集装箱的标准箱(twenty feet equivalent unit, TEU)进行换算的。不同运输方式之间的单位转运成本、转运时间和对应的碳排放量见表 5。本例中的其他参数取值见表 6。

在该 IPSO 算法参数中:粒子数  $N$  为 40,维数  $D$  为 30,  $c_1=c_2=1.193$ ,扰动振幅  $\alpha$  初始值为 1,迭代次数为 200。采用的数值计算软件是 MATLAB 2016a。

表 2 城市的节点编号

Table 2 Number of nodes in the city

编号	节点城市名称	编号	节点城市名称
1	贵阳	6	郑州
2	重庆	7	太原
3	长沙	8	济南
4	西安	9	石家庄
5	武汉	10	沈阳

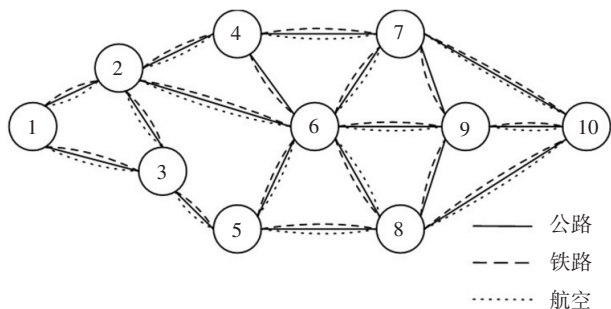


图 4 多式联运网络示意图

Fig. 4 Schematic diagram of multimodal transportation network

表 3 节点对之间的运输距离

Table 3 Transport distance between node pairs

相邻节点	距离/km			相邻节点	距离/km		
	公路	铁路	航空		公路	铁路	航空
(1,2)	375	347	343	(5,8)	846	1 182	729
(1,3)	775	706	667	(6,7)	432	646	346
(2,3)	892	1 040	644	(6,8)	446	401	359
(2,4)	694	960	580	(6,9)	418	412	421
(2,6)	1 153	1 390	895	(7,9)	223	232	-
(3,5)	333	362	288	(7,10)	1 160	1 195	1 032
(4,6)	483	505	-	(8,9)	313	593	-
(4,7)	602	579	514	(8,10)	976	991	803
(5,6)	513	536	480	(9,10)	962	963	876

表 4 运输方式参数

Table 4 Transport mode parameters

运输方式	运输成本/ (元·t <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup> )	平均速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	碳排放/ (kg·t <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup> )
公路	0.350	90	0.021 2
铁路	0.165	70	0.004 3
航空	0.800	800	0.433 1

表 5 转运参数

Table 5 Transfer parameters

转运	公路			铁路			航空		
	成本/ (元·TEU <sup>-1</sup> )	时间/ h	碳排放/ (kg·t <sup>-1</sup> )	成本/ (元·TEU <sup>-1</sup> )	时间/ h	碳排放/ (kg·t <sup>-1</sup> )	成本/ (元·TEU <sup>-1</sup> )	时间/ h	碳排放/ (kg·t <sup>-1</sup> )
公路	-	-	-	150	0.267	1.56	200	0.200	3.12
铁路	150	0.267	1.56	-	-	-	300	0.350	6.00
航空	200	0.200	3.12	300	0.350	6.00	-	-	-

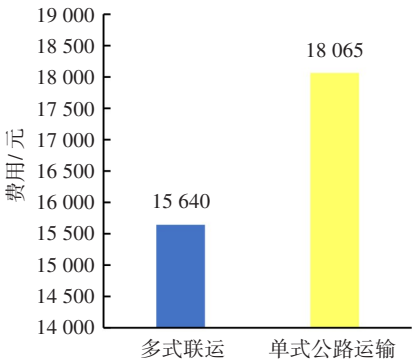
表6 参数取值

Table 6 Parameters values

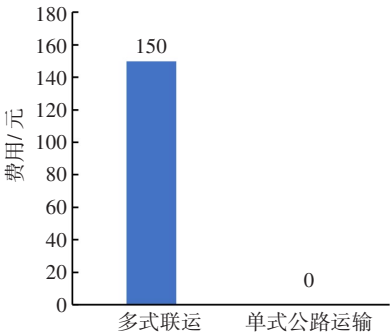
参数	数值	参数	数值
$Q_{\text{TEU}}$	20	$\phi_1$	0.5
$c_{31}/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	8	$\phi_2$	0.8
$c_{32}/(\text{元}\cdot\text{kg}^{-1})$	12.0	$T^E/\text{h}$	30
$c_4/(\text{元}\cdot\text{kg}^{-1})$	10.0	$T^e/\text{h}$	42
$c_5/(\text{元}\cdot\text{kg}^{-1})$	0.5	$T^l/\text{h}$	48
$e/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	10	$T^L/\text{h}$	52
$\zeta$	0.300	$f_1$	0.95
$\delta$	0.003	$f_2$	0.60

3.2 结果分析

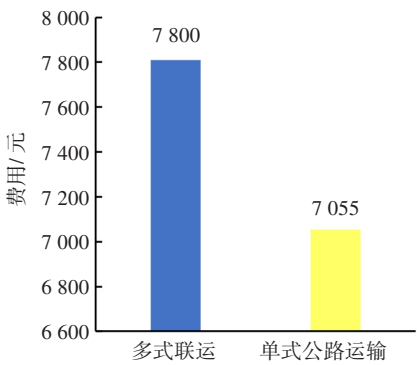
经过计算,该冷链物流多式联运的最佳路径为:贵阳—长沙—武汉—济南—沈阳。其中,贵阳到长沙的路段采取铁路运输,其他路段采取公路运输,多式联运总费用为34 591元,总满意度为1.80。采用公路进行单式运输的总费用为37 272元,总满意度为1.79,两种运输方式的对比结果分别如图5~6所示。



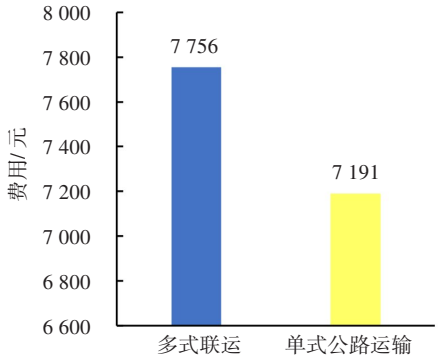
(a) 运输成本



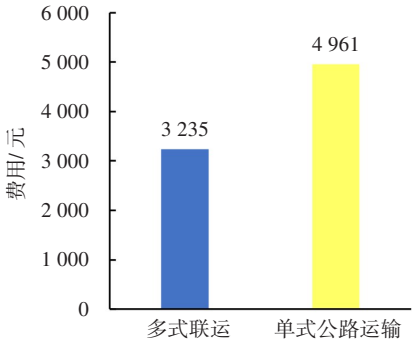
(b) 转运成本



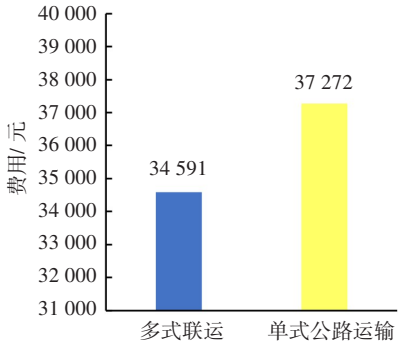
(c) 制冷成本



(d) 货损成本



(e) 碳排放成本

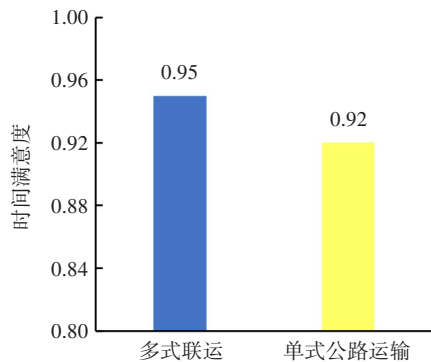


(f) 总成本

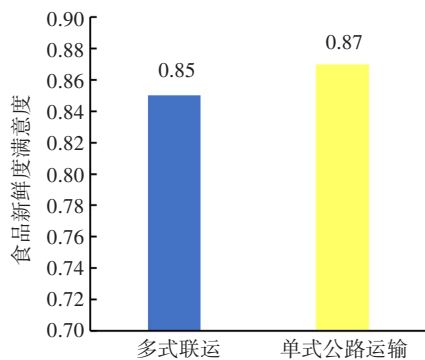
图5 多式联运与单式联运成本对比图

Fig. 5 Cost comparison between multimodal transport and single modal transport

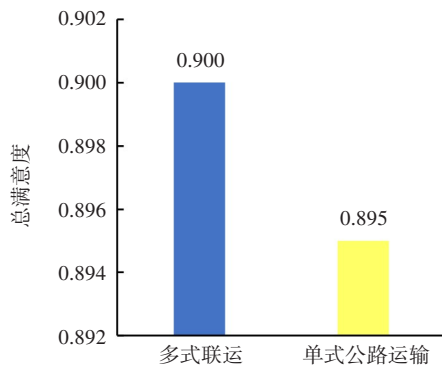
从图5可以看出,与公路单式联运相比,多式联运的运输成本降低了13.4%,碳排放成本降低了34.8%,总成本降低了7.2%。



(a) 时间满意度



(b) 食品新鲜度满意度



(c) 时间满意度

图6 多式联运与单式联运满意度对比图

Fig. 6 Comparison of satisfaction between multimodal and unimodal transport

从图6可以看出,与公路单式联运相比,多式联运的时间满意度提高了3.3%,总满意度提高了0.6%。因此,与公路相比,铁路在中长途货物运输方面更具有优势。

### 3.3 敏感性分析

基于上述冷链物流多式联运的案例,进行敏感性分析,研究铁路不同的运输速度和运输成本对冷链物流路径选择的影响。

#### 1) 铁路运输速度的敏感性分析。

铁路运输速度的变化,将影响客户满意度 $\lambda$ 。因此,选取铁路运输速度上限为90 km/h,速度下限为40 km/h,变化步长为10 km/h,其他参数保持不变。在不同铁路运输速度下,最优路径的选择见表7。各类成本和满意度的指标如图7所示。

表7 最优路径随铁路运输速度的变化

Table 7 Variation of optimal path with railway transportation speed

速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	最优路径	铁路里程 比例/ %
50	1 → 2 → 4 → 7 → 9 → 10	12.27
60	1 → 3 → 5 → 8 → 10	24.68
70	1 → 3 → 5 → 8 → 10	24.68
80	1 → 3 → 5 → 6 → 9 → 10	100.00
90	1 → 3 → 5 → 8 → 10	100.00

注:→表示两节点之间采用公路进行运输;

---表示两节点之间采用铁路进行运输。

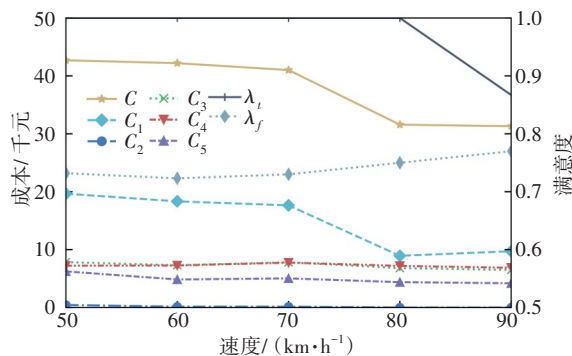


图7 不同铁路运输速度下最优路径的成本和满意度

Fig. 7 Cost and satisfaction of the optimal path under different railway transportation speeds

根据最优路径选择的结果,随着铁路速度的提高,最优运输路径将发生变化。铁路在多式联运里程中的比例逐渐增加,对应的食品新鲜度、满意度



也逐渐提高。当铁路运输速度从 70 km/h 提升到 90 km/h 的过程中,运输方式从公-铁联合运输方式转变为全程铁路运输的方式,运输成本的下降导致总成本的大幅下降。当铁路速度达到 90 km/h 时,冷链食品将提前到达,这将反而导致时间满意度的下降,但结合铁路的成本优势,最佳路径仍为全程铁路运输。

2) 铁路运输成本的敏感性分析。

铁路运输成本的变化直接影响其对公路的竞争能力。因此,在保持其他参数不变的前提下,将铁路运输成本的 10% 作为变化步长,在 -20% ~ 20% 的范围内进行变化。各铁路运输成本下的最优路径见表 8。此时,成本和满意度的指标如图 8 所示。

表 8 最优路径随铁路运输成本的变化

Table 8 Variation of optimal path with railway transportation cost

成本变化率/ %	最优路径	铁路里程比例/ %
-20	①→②→④→⑦→⑨→⑩	41.70
-10	①→③→⑤→⑧→⑩	36.96
0	①→③→⑤→⑧→⑩	24.68
10	①→③→⑤→⑧→⑩	24.68
20	①→②→④→⑦→⑩	12.38

注:→表示两节点之间采用公路进行运输;  
---→表示两节点之间采用铁路进行运输。

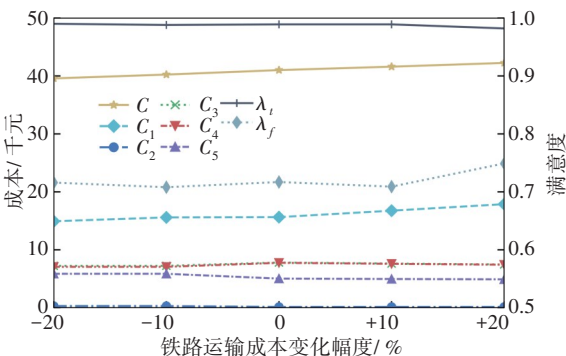


图 8 不同铁路运输成本下最优路径的成本和满意度

Fig. 8 Cost and satisfaction of the optimal path under different railway transportation costs

根据最优路径选择的结果,铁路运输在多式联运中的占比随着铁路运输成本的降低而增加。当运输成本增加 10% 时,路径选择保持不变。但随着运输成本的进一步增加,铁路运输里程的占比开始下降。铁路运输成本的上升将导致总成本的增加,促使运营商选择更高效的公路运输方式以保证 CCF 的新鲜度,具体表现在食品新鲜度满意度的提高和公路里程占比的增加上。

4 结论

本研究针对多式联运与冷链物流相结合探讨了路径的选择问题。建立了考虑多式联运影响因素的路径选择模型,研究了 CFF 的运输问题,并提出了采用 IPSO 对模型进行求解。并以中国主要枢纽城市多式联运网络为例,验证模型的有效性和算法的可行性。最后,对铁路的运输速度和运输成本进行敏感性分析。研究结果表明:相比于降低铁路运输成本,提高运输速度可以更有效地降低总运输成本、提高客户满意度、优化运输结构。

未来从以下方向继续深入研究:

1) 对于同一批货物可在运输过程进行拆分,以满足不同地区的需求,这对于特定场景的路径选择问题,具有重要的研究价值。

2) 考虑到在长途多式联运中,环境温度会随着地理位置的变动而大幅变化,这将对载具的制冷设备造成一定的影响,因此制冷设备的能耗对总成本的影响也是未来研究的一个重要方向。期待在未来的工作中可以提出相应的解决方案。

参考文献 (References):

[1] 胡元, 帅宇红. 整车物流运输多式联运与路径优化研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2019, 17(1): 13-18. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2019.01.003.  
HU Yuan, SHUAI Yuhong. Multimodal transportation and route optimization of vehicle logistics[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2019, 17(1): 13-18. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2019.01.003.  
[2] HEI X L, MENG Q A, WANG S A, et al. Optimal automobile distribution model in multimodal freight transportation networks [J]. Transportation Research

- Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2410(1): 50-57. DOI: 10.3141/2410-06.
- [3] MOCCIA L, CORDEAU J F, LAPORTE G, et al. Modeling and solving a multimodal transportation problem with flexible-time and scheduled services [J]. Networks, 2011, 57 (1): 53-68. DOI: 10.1002/net.20383.
- [4] 李玉民, 邱梦, 闫凯丽, 等. 高铁参与下考虑时间窗的生鲜品多式联运路径选择[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(4): 54-61.
- LI Yumin, QIU Meng, YAN Kaili, et al. Multimodal transportation route selection of fresh products considering time window with the participation of high-speed rail [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(4): 54-61.
- [5] 刘松, 邵毅明, 彭勇. 转运限制下的冷藏集装箱多式联运路径优化[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(7): 37-42. DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2020.07.006.
- LIU Song, SHAO Yiming, PENG Yong. Multimodal transport path optimization for refrigerated containers under transshipment limit [J]. Computer Applications and Software, 2020, 37 (7): 37-42. DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2020.07.006.
- [6] YU Y L, XIAO T J. Analysis of cold-chain service outsourcing modes in a fresh agri-product supply chain [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 148: 102264. DOI: 10.1016/j.tre.2021.102264.
- [7] ZHANG S Y, CHEN N, SONG X M, et al. Optimizing decision-making of regional cold chain logistics system in view of low-carbon economy [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 130: 844-857. DOI: 10.1016/j.tra.2019.10.004.
- [8] 崔亚琼. 以铁路物流中心为节点的多式联运探究[J]. 新西部, 2020(14): 17-18.
- CUI Yaqiong. Research on multimodal transport with railway logistics center as the node [J]. New West, 2020 (14): 17-18.
- [9] 侯海录. 铁路集装箱多式联运发展策略研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(1): 56-60.
- HOU Hailu. Research on the development strategy of multimodal transport by railway container [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2018, 16 (1): 56-60.
- [10] 朱欣媛, 赵建有, 张璐璐, 等. 碳排放约束下考虑模糊时间窗的多式联运路径选择[J]. 物流科技, 2020, 43 (11): 77-82. DOI: 10.13714/j.cnki.1002-3100.2020.11.019.
- ZHU Xinyuan, ZHAO Jianyou, ZHANG Lulu, et al. Path selection of multimodal transportation considering fuzzy time window under carbon emission constraint [J]. Logistics Sci-Tech, 2020, 43 (11): 77-82. DOI: 10.13714/j.cnki.1002-3100.2020.11.019.
- [11] 李畅, 陈淮莉. 基于新鲜度和配送成本的易腐食品配送路径[J]. 上海海事大学学报, 2019, 40(1): 14-20, 36. DOI: 10.13340/j.jsmu.2019.01.003.
- LI Chang, CHEN Huaili. Distribution route of perishable food based on freshness and distribution cost [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2019, 40(1): 14-20, 36. DOI: 10.13340/j.jsmu.2019.01.003.
- [12] 欧阳瑞祥, 周和平, 刘静波, 等. 时变路网下机场接驳车辆-用户共享路径优化[J]. 交通科学与工程, 2020, 36 (3): 88-93. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.014.
- OUYANG Ruixiang, ZHOU Heping, LIU Jingbo, et al. Airport feeder vehicle-user shared path optimization under time-varying network [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (3): 88-93. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.014.
- [13] 郭权, 周和平, 欧阳瑞祥, 等. 动态信息下的机场定制巴士路径优化[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 85-90. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.013.
- GUO Quan, ZHOU Heping, OUYANG Ruixiang, et al. Route optimization of customized airport bus base on dynamic information [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 85-90. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.013.
- [14] 杨艳, 黄晴, 龙思, 等. 基于ARIMA-LSTM的货运量组合预测方法研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38 (2): 102-108. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.02.011.
- YANG Yan, HUANG Qing, LONG Si, et al. Research on combined forecasting method of freight volume based on ARIMA-LSTM [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38 (2): 102-108. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.02.011.

- [15] 王清洲, 张玉宁, 陈佳梦, 等. 基于Witness仿真的绿色多式联运路径优化[J]. 大连海事大学学报, 2020, 46(3): 22-30. DOI: 10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2020.03.003.
- WANG Qingzhou, ZHANG Yuning, CHEN Jiameng, et al. Path optimization of green multimodal transport based on Witness simulation [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2020, 46(3): 22-30. DOI: 10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2020.03.003.
- [16] 陈钉均, 李尧, 倪少权, 等. 收货时间窗软约束下绿色多式联运路径优化[J]. 计算机仿真, 2020, 37(4): 209-214.
- CHEN Dingjun, LI Yao, NI Shaoquan, et al. Optimal path of green multimodal transport under soft constraint of receipt time window[J]. Computer Simulation, 2020, 37(4): 209-214.
- [17] 辜勇, 李雨, 陈句, 等. 多式联运碳减排研究综述[J]. 物流技术, 2021, 40(9): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1005-152X.2021.09.001.
- GU Yong, LI Yu, CHEN Ju, et al. Summary of researches on carbon emissions reduction in multimodal transport [J]. Logistics Technology, 2021, 40(9): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1005-152X.2021.09.001.
- [18] 孙家庆, 王胜男, 闫淑贤. 考虑碳排放的冷藏集装箱多式联运路径选择[J]. 大连海事大学学报, 2022, 48(2): 57-65. DOI: 10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2022.02.007.
- SUN Jiaqing, WANG Shengnan, YAN Shuxian. Path selection of multimodal transport for refrigerated containers considering carbon emission [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2022, 48(2): 57-65. DOI: 10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2022.02.007.
- [19] LIU S C, ZHANG C. Optimization of urban cold chain transport routes under time-varying network conditions [J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021: 1-16. DOI: 10.1155/2021/8817991.
- [20] BABAGOLZADEH M, SHRESTHA A, ABBASI B, et al. Sustainable cold supply chain management under demand uncertainty and carbon tax regulation [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 80: 102245. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102245.
- [21] BORTOLINI M, FACCIO M, FERRARI E, et al. Fresh food sustainable distribution: cost, delivery time and carbon footprint three-objective optimization [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 174: 56-67. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.11.014.
- [22] RADHIKA K, ARUN PRAKASH K. Multi-objective optimization for multi-type transportation problem in intuitionistic fuzzy environment [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2022, 43(1): 1439-1452. DOI: 10.3233/jifs-213517.
- [23] 晏远春, 刘浩学, 张永, 等. 基于模糊TOPSIS的道路危险货物运输企业安全评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(9): 32-37. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2010.09.004.
- YAN Yuanchun, LIU Haoxue, ZHANG Yong, et al. A methodology for safety assessment of hazardous material road transport enterprises based on fuzzy TOPSIS [J]. China Safety Science Journal (CSSJ), 2010, 20(9): 32-37. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2010.09.004.
- [24] MENG L Y, ZHOU X S. An integrated train service plan optimization model with variable demand: a team-based scheduling approach with dual cost information in a layered network [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 125: 1-28. DOI: 10.1016/j.trb.2019.02.017.
- [25] 蒲松, 王文宪, 陈钉均, 等. 高速旅客列车开行方案的鲁棒优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(6): 101-106. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2015.06.016.
- PU Song, WANG Wenxian, CHEN Dingjun, et al. The robust model for line planning problems of high speed passenger train [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(6): 101-106. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2015.06.016.
- [26] 樊昊煜, 黄志鹏. 考虑旅客出行满意度的高铁列车开行方案优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 2006-2012. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200939.
- FAN Haoyu, HUANG Zhipeng. Optimization of the train operation scheme on high-speed railways considering the satisfaction of passenger travel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(8): 2006-2012. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200939.
- [27] 张春田, 戚建国, 杨立兴, 等. 基于不确定旅客需求的高速铁路鲁棒列车开行方案研究[J]. 交通运输系统工

- 程与信息, 2022, 22(1): 115-123. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2022.01.013.
- ZHANG Chuntian, QI Jianguo, YANG Lixing, et al. Robust train operation plan based on uncertain passenger demands for high-speed railway corridors[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(1): 115-123. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2022.01.013.
- [28] 薛锋, 范千里, 罗建. 基于多层复杂网络的轨道交通产业链优化[J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(2): 65-73, 83. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-4747.2021.02.007.
- XUE Feng, FAN Qianli, LUO Jian. Optimization of rail transit industry chain based on multi-layer complex networks[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(2): 65-73, 83. DOI: 10.3969/j. issn.1672-4747.2021.02.007.
- [29] FATHI A, KARIMI B, SAEN R F. Sustainability assessment of supply chains by a novel robust two-stage network DEA model: a case study in the transport industry [J]. Soft Computing, 2022, 26(13): 6101-6118. DOI: 10.1007/s00500-022-07013-y.
- [30] BRUNS F, GOERIGK M, KNUST S, et al. Robust load planning of trains in intermodal transportation [J]. OR Spectrum, 2014, 36(3): 631-668. DOI: 10.1007/s00291-013-0341-8.
- [31] VANKERSCHAUER K, WILLOCX F, SMOUT C, et al. Mathematical modeling of temperature and gas composition effects on visual quality changes of cut endive[J]. Journal of Food Science, 1996, 61(3): 613-620. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1996.tb13170.x.
- [32] MA Q L, WANG W Y, PENG Y, et al. An optimization approach to the intermodal transportation network in fruit cold chain, considering cost, quality degradation and carbon dioxide footprint [J]. Polish Maritime Research, 2018, 25(1): 61-69. DOI: 10.2478/pomr-2018-0007.
- [33] LELEŃ P, WASIAK M. The model of selecting multimodal technologies for the transport of perishable products [J]. Archives of Transport, 2019, 50(2): 17-33. DOI: 10.5604/01.3001.0013.5573.
- [34] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. November 27 - December 1, 1995, Perth, WA, Australia. IEEE, 1995(4): 1942-1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [35] SHI Y, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization [C]//Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406). July 6-9, 1999, Washington, DC, USA. IEEE, 1999(3): 1945-1950. DOI: 10.1109/CEC.1999.785511.
- [36] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C]//1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360). May 4-9, 1998, Anchorage, AK, USA. IEEE, 1998: 69-73. DOI: 10.1109/ICEC.1998.699146.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:李岳林)

(上接第110页)

- (34): 14805-14813. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1815.2021.34.047.
- BI Zhigang, LI Wenjie, LYU Wenguo, et al. Mechanical characteristics and reinforcement measures of middle rock column of shallow bias small spacing tunnel in southern Fujian [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(34): 14805-14813. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.34.047.
- [26] 潘文韬, 吴枋胤, 何川, 等. 浅埋偏压隧道施工工法研究与非对称设计优化[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊1): 352-361.
- PAN Wentao, WU Fangyin, HE Chuan, et al. Construction methods and asymmetric design optimization for shallow-buried tunnels subjected to unsymmetrical loads[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(sup 1): 352-361.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:陈璐)