

文章编号: 1005-0523(2024)06-0065-09



## 考虑可靠性的冷链公铁联运多目标路径优化

杨航, 段力伟

(重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400074)

**摘要:**【目的】为了确保货物按时到达,提高冷链公铁联运的可靠性,解决不同需求下的路径优化问题。【方法】在不确定时间条件下,引入路径时间可靠性的概念,并将路径方案的可靠性定义为所有运输路径对应时间可靠性的最小值。构建以总运输成本最小化、碳排放量最小化、路径方案可靠性最大化为目标的多目标优化模型。采用NSGA-II,结合精英策略求解计算实例,分析不同路径方案可靠性策略及不确定时间对路径优化的影响。【结果】以路径方案可靠性为目标的优化模型的解集平均可靠性接近0.9,Pareto解集的分布空间更大。与不确定的等待转运时间相比,不确定的公路运输时间对路径方案可靠性的影响更显著。【结论】文章提出的优化模型能够有效提供高可靠性路径,满足不同承运人的需求。

**关键词:** 冷链物流;公铁联运;时间不确定;可靠性;路径优化

中图分类号:U16

文献标志码:A

本文引用格式:杨航,段力伟.考虑可靠性的冷链公铁联运多目标路径优化[J].华东交通大学学报,2024,41(6):65-73.

## Research on Multi-Objective Route Optimization of Cold Chain Road-Rail Intermodal Transportation Considering Reliability

Yang Hang, Duan Liwei

(College of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** 【Objective】In order to ensure the timely arrival of goods and enhance the reliability of cold chain road-rail intermodal transport, this paper addresses path optimization under conditions of varying demand. 【Method】The concept of path time reliability was introduced under uncertain time conditions, with the reliability of a route scheme defined as the minimum time reliability of all paths. A multi-objective optimization model was constructed with the goals of minimizing total transportation cost, minimizing carbon emissions, and maximizing reliability. The model was solved using the NSGA-II combined with an elite strategy to compute examples, analyzing the effects of different reliability strategies and uncertain timing on route optimization. 【Result】The optimized model focused on reliability achieves an average reliability close to 0.9, with a broader distribution of Pareto solutions. The impact of uncertain road transportation time on reliability is more significant compared to uncertain waiting transfer times. 【Conclusion】The optimization model proposed in this paper effectively provides high-reliability paths to meet the needs of different carriers.

**Key words:** cold chain logistics; road-rail intermodal transportation; time uncertainty; reliability; route optimization

**Citation format:** YANG H, DUAN L W. Research on multi-objective route optimization of cold chain road-rail intermodal transportation considering reliability[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(6): 65-73.

收稿日期: 2024-05-12

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目(18XJCZH001); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202000704)

**【研究意义】**冷链物流主要依赖公路运输,易受环境影响,造成“断链”“伪冷链”等问题。相比之下,公铁联运集成了公路运输的灵活性和铁路运输的稳定性,具备可靠、环保和经济的优点<sup>[1]</sup>。合理的路径和运输方式组合选择不仅是公铁联运组织的核心内容,也是提升冷链公铁联运的可靠性、降低成本、提升效率、实现可持续发展的关键。推动冷链公铁联运的应用将有助于应对当前冷链物流的挑战。

**【研究进展】**国内外学者针对多式联运路径优化开展了大量研究,但多数研究均假设运输时间、转运时间与距离及货运量成正比,忽略了实际运输中存在的时间不确定性<sup>[2-3]</sup>。在不确定时间方面的研究中,学者们通过假设运输时间或转运时间服从随机概率分布<sup>[4-7]</sup>,或分布于某一区间<sup>[8]</sup>,采用随机规划理论或鲁棒优化理论对路径进行优化;或使用模糊数刻画时间,并采用模糊规划理论将模糊规划模型转化为确定型模型求解<sup>[9-10]</sup>,但这些研究较少以冷链物流为研究对象。由于时间不确定性的影响,导致运输时间具有波动性,同时由于铁路班期的存在,当前程运输时间出现延误时,货物可能错过原定班次,需要等待下一班次,从而延长整体运输时间<sup>[11-13]</sup>。这些因素都会增加送达时间不满足时间窗要求的风险。因此,在路径送达时间可靠性方面的研究中,学者们采用违反时间窗的惩罚成本或客户满意度表示可靠性<sup>[14]</sup>,或采用置信度约束的形式表达。但当置信度较高时,单目标模型可能无法产生可行解,多目标模型的前沿解分布可能较为集中,且运输路径易于集中于单一的铁路运输<sup>[5,15]</sup>。

**【创新特色】**本文的创新在于引入路径时间可靠性概念,并构建一个包含总运输成本最小化、碳排放量最小化和可靠性最大化的多目标优化模型,结合改进的快速非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)求解,旨在为不同需求的公铁联运经营人规划最优的运输路径方案。**【关键问题】**在考虑公路运输时间不确定性、等待转运时间不确定性和铁路班期限制的情况下,设计有效的求解算法,在合理的计算时间内获得较优的路径方案。

## 1 模型构建

### 1.1 问题描述

公路运输相较于铁路运输碳排放更高,且其运输时间受交通拥堵和极端天气等因素影响,时间预

测难度大。同时,在枢纽节点转换运输方式时,卡车常需长时间排队怠速运行,产生不确定的等待时间和额外的碳排放。另外,铁路运输存在班期限制,可能因错过原定班次而增加额外的停留时间。这些因素综合导致总运输时间产生波动,直接影响路径的时间可靠性。

因此,本文将重点考虑以上因素对总运输时间的影响,并以运输成本、碳排放量、路径方案可靠性为优化目标,构建数学模型,旨在寻求最优策略。如未作特别说明,本文所说的可靠性均指路径方案可靠性。模型假设如下:

- 1) 以标准箱(twenty equivalent unit, TEU)为运输载体进行运输和转运;
- 2) 同一订单货物不可拆分,在任意两节点间只能选择一种运输方式;
- 3) 仅在枢纽处发生转运,且一批货物在一个枢纽最多转运一次;
- 4) 货物完成转运后采用铁路运输时,需等待最近班期进行下一程运输;而采用公路运输不需要等待;
- 5) 不确定的公路运输时间和等待转运时间均服从正态分布;
- 6) 铁路运输按班期运行相对稳定,故不考虑其运输时间的不确定性。

### 1.2 符号说明

建模中涉及的参数符号及其含义如下: $N$ 为枢纽节点集合, $o, i, h, j, d \in N$ ,  $o$ 为起点,  $d$ 为终点,  $i, h, j$ 均为运输途径的任意枢纽节点; $K$ 为运输方式集合,  $k, l \in K$ ;  $A$ 为运输弧段集合,  $(i, j) \in A$ ;  $P$ 为货物批次集合,  $p \in P$ ;  $N_i^+$ 为连接任意节点 $i$ 的运输弧段的后置节点集合,  $N_i^+ \in N$ ; 若  $j \in N_i^+$ ,  $(i, j) \in A$ , 此时该弧段是节点 $i$ 的流量流出弧段;  $N_i^-$ 为连接任意节点 $i$ 的运输弧段的前置节点集合,  $N_i^- \in N$ ; 若  $j \in N_i^-$ ,  $(j, i) \in A$ , 此时该弧段是节点 $i$ 的流量流入弧段;  $t_{(i,j)}^k$ 为在路段 $(i, j)$ 上使用运输方式 $k$ 的理想运输时间,  $h$ ;  $t_i^{kl}$ 为单个集装箱在枢纽 $i$ 运输方式由 $k$ 转为 $l$ 的转运操作时间,  $h$ ;  $T^p$ 为第 $p$ 批次货物的总运输时间,  $h$ ;  $t^p$ 为第 $p$ 批次货物运输需求的产生时刻;  $c_{(i,j)}^k$ 为在路段 $(i, j)$ 上采用运输方式 $k$ 的单位运输费用, 元/(TEU·km);  $c_i^{kl}$ 为在节点 $i$ 上运输方式由 $k$ 转为 $l$ 的单位转运费用, 元/TEU;  $c_i$ 为单位制冷成本, 元/kCal;  $e^k$ 为运输方式 $k$ 的单位碳排放量, kg/(TEU·km);  $e^{kl}$ 为

运输方式由  $k$  转为  $l$  的单位碳排放量,  $\text{kg}/\text{TEU}$ ;  $e^d$  为卡车怠速下单位时间的碳排放量,  $\text{kg}/(\text{TEU} \cdot \text{h})$ ;  $s_{(i,j)}^k$  为路段  $(i,j)$  使用运输方式  $k$  的运输距离,  $\text{km}$ ;  $v^k$  为运输方式  $k$  的速度,  $\text{km}/\text{h}$ ;  $Q^p$  为第  $p$  批货物使用的集装箱数量,  $\text{TEU}$ ;  $g$  为货物早到的单位库存成本,  $\text{元}/(\text{TEU} \cdot \text{h})$ ;  $G$  为冷藏集装箱的热负荷,  $\text{kCal}/(\text{TEU} \cdot \text{h})$ ;  $[a^p, b^p]$  表示第  $p$  批货物的送达时间窗约束;  $a^{lp}$  为第  $p$  批货物允许提前到达的最早时刻;  $u_{(i,j)}^k$  为运输方式  $k$  在路段  $(i,j)$  上的最大运输能力,  $\text{TEU}$ ;  $T_i$  为枢纽  $i$  处等待转运的期望等待时间,  $\text{h}$ ;  $T_{(i,j)}^{kp}$  为第  $p$  批货物等待路段  $(i,j)$  上运输方式  $k$  最近班期的时间,  $\text{h}$ ;  $T_{(i,j)}^{k,n}$  为路段  $(i,j)$  上运输方式  $k$  的第  $n$  班车的发车时刻;  $T_{A,i}^p$  为第  $p$  批货物从起点送达枢纽  $i$  的时刻;  $T_i^p$  为第  $p$  批货物在节点  $i$  开始等待铁路班期的时刻;  $M$  为一个足够大的数;  $o(p)$  为第  $p$  批货物的起点;  $d(p)$  为第  $p$  批货物的终点;  $x_{(i,j)}^{k,p}$  为第  $p$  批次货物在路段  $(i,j)$  上采用运输方式  $k$  进行运输为 1, 否则为 0;  $y_i^{kl,p}$  为在第  $p$  批次货物在节点  $i$  上由运输方式  $k$  转变到  $l$  为 1, 否则为 0。

### 1.3 路径方案可靠性模型

在规划周期内,各批次货物的运输路径共同构成一个路径方案。本文所定义的路径方案可靠性  $R$ ,是指某路径方案中所有路径对应的时间可靠性的最小值,表达式为

$$R = \min R_{\text{time}}^p, \forall p \in P \quad (1)$$

式中:路径时间可靠性  $R_{\text{time}}^p$  是指在不确定时间因素和铁路班期的限制下,尽管路径的送达时间可能难以精确预测,但该路径仍能在规定时间窗内送达货物的概率。

#### 1.3.1 运输总时间

在冷链公铁联运运输过程中,运输总时间主要包括运输时间和在枢纽的停留时间。如图 1 所示,当发生转运时,枢纽停留时间主要包括等待转运的时间  $T_i$ ,转运作业时间,以及等待班期的时间  $T_{(i,j)}^{kp}$ 。

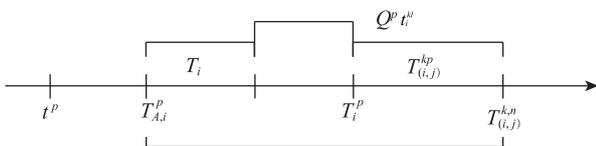


图 1 枢纽停留时间组成

Fig. 1 Hub dwell time composition

批次  $p$  的运输总时间为

$$T^p = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} t_{(i,j)}^k x_{(i,j)}^{k,p} + \sum_{i \in N} \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k,l \in K} \left( (T_i + Q^p t_i^{kl}) y_i^{kl,p} + T_{(i,j)}^{lp} x_{(i,j)}^{l,p} \right), \quad \forall p \in P \quad (2)$$

在节点  $i$  的到达时刻为

$$T_{A,i}^p = \begin{cases} t^p + \sum_{k \in K} t_{(o,i)}^k x_{(o,i)}^{k,p} \\ T_{A,h}^p + (T_h + Q^p t_h^{kl}) y_h^{kl,p} + T_{(h,i)}^{lp} + t_{(h,i)}^l \end{cases}, \quad \forall i, h \in N \setminus o(p), k, l \in K, p \in P \quad (3)$$

开始等待班期时刻为

$$T_i^p = \begin{cases} t^p, i = o(p) \\ T_{A,i}^p + (Q^p t_i^{kl} + T_i) y_i^{kl,p} \end{cases}, \quad \forall i \in N \setminus (o(p), d(p)), k, l \in K, p \in P \quad (4)$$

等待班期的时间为

$$T_{(i,j)}^{kp} = \begin{cases} T_{(i,j)}^{k,n} - T_i^p, T_{(i,j)}^{k,n-1} < T_i^p < T_{(i,j)}^{k,n}, k = 2, \\ 0, k = 1 \end{cases}, \quad \forall i \in N \setminus d(p), (i,j) \in A, k \in K, p \in P \quad (5)$$

弧段上理想运输时间

$$t_{(i,j)}^k = \frac{s_{(i,j)}^k}{v^k}, \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (6)$$

需要注意的是,无论是否发生转运,只要在节点  $i$  后一路段使用铁路运输,就会产生等待班期时间。

#### 1.3.2 路径时间可靠性

根据各路段公路运输的时间分布,以及转运等待时间的分布特征,基于随机模拟技术,生成  $Z$  次独立的随机变量组合,计算各批次货物的运输总时间。通过结合运输需求的产生时刻,得到路径的送达时间。路径时间可靠性计算式为

$$R_{\text{time}}^p = \frac{Z_p}{Z} \quad (7)$$

式中: $Z$  为模拟的总次数;  $Z_p$  为第  $p$  批次货物路径可行的次数。

### 1.4 多目标路径优化模型构建

在满足所有批次集装箱运输需求的基础上,以理想运输时间下的总运输成本和总碳排放量最小,模拟时间下的可靠性最大为目标,建立多目标路径优化模型。

#### 1.4.1 优化目标

本文构建的多目标优化模型包括总运输成本最小化、碳排放量最小化、路径方案可靠性最大化 3

个主要目标模型。

总运输成本最小化目标模型为

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} Q^p c_{(i,j)}^k s_{(i,j)}^k x_{(i,j)}^{k,p} \\ & + \sum_{i \in N} \sum_{k,l \in K} \sum_{p \in P} Q^p c_i^{kl} y_i^{kl,p} + \sum_{p \in P} c_p Q^p T^p G \\ & + \sum_{p \in P} \begin{cases} M, t_o^p + T^p < a^p \\ Q^p g(a^p - t_o^p - T^p), a^p \leq t_o^p + T^p < a^p \\ 0, a^p \leq t_o^p + T^p \leq b^p \\ M, t_o^p + T^p > b^p \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中： $G$ =热传率×箱体平均导热面积×集装箱内外温差<sup>[21]</sup>。

碳排放量最小化目标模型为

$$\begin{aligned} \min E = & \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} Q^p e^k s_{(i,j)}^k x_{(i,j)}^{k,p} \\ & + \sum_{i \in N} \sum_{k,l \in K} \sum_{p \in P} (Q^p e^{kl} + Q^p e^d T^p) y_i^{kl,p} \end{aligned} \quad (9)$$

式中： $e^d$ =怠速油耗×柴油碳排放系数<sup>[23]</sup>。

路径方案可靠性最大化目标模型为

$$\max R \quad (10)$$

#### 1.4.2 约束条件

货物在节点上的-弧段选择约束为

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

$$\sum_{j \in N_i^-} \sum_{k \in K} x_{(j,i)}^{k,p} \leq 1, \forall i \in N, p \in P \quad (12)$$

该约束保证每批货物在每个节点上的输出弧和输入弧均最多有一条,即同一批货物不能拆分。

转运次数约束为

$$\sum_{k,l \in K} y_i^{kl,p} \leq 1, \forall i \in N/(o(p), d(p)), p \in P \quad (13)$$

该约束保证每批货物在枢纽转运不超过一次。

选择平衡约束为

$$\begin{aligned} \sum_{j \in N_i^+} \sum_{k \in K} x_{(j,i)}^{k,p} + \sum_{j \in N_i^-} \sum_{l \in K} x_{(i,j)}^{l,p} \geq 2 \sum_{k,l \in K} y_i^{kl,p}, \\ \forall i \in N/(o(p), d(p)), p \in P \end{aligned} \quad (14)$$

该约束确保当转运发生在一个节点时,该节点必须同时存在输入弧和输出弧。同时,在一个节点上同时存在输入和输出弧并不意味着发生了转运。

流量平衡约束为

$$\begin{aligned} \sum_{j \in N_i^+} \sum_{k \in K} x_{(i,j)}^{k,p} - \sum_{j \in N_i^-} \sum_{k \in K} x_{(j,i)}^{k,p} \\ = \begin{cases} 1 & i = o(p) \\ -1 & i = d(p) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \forall i \in N, p \in P \end{aligned} \quad (15)$$

运输能力约束为

$$\sum_{p \in P} Q^p x_{(i,j)}^{k,p} \leq u_{(i,j)}^k, \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (16)$$

决策变量约束为

$$x_{(i,j)}^{k,p} \in \{0, 1\}, \forall (i,j) \in A, k \in K, p \in P \quad (17)$$

$$y_i^{kl,p} \in \{0, 1\}, \forall i \in N/(o(p), d(p)), k, l \in K, p \in P \quad (18)$$

该约束表明决策变量  $x_{(i,j)}^{k,p}$  和  $y_i^{kl,p}$  是二元变量。

## 2 求解算法

本文基于 Deb 等<sup>[24]</sup>提出的 NSGA-II, 求解建立多目标优化模型。

步骤1:种群初始化。采用双层整数编码结构生成一定种群数量的染色体,第1层表示运输路径,为整数 $[1, n]$ 的随机排列。第2层表示运输方式。节点序列节点1~节点14。

步骤2:随机模拟生成公路运输时间和等待转运时间,计算个体满足时间窗的次数,得到其可靠性。

步骤3:计算个体目标函数值,进行非支配排序。对所有个体的运输成本、碳排放、可靠性3个目标的函数值进行比较,赋予其不同的非支配等级。

步骤4:计算拥挤度。为保证种群的多样性,需要计算同一非支配等级下各个体的拥挤度  $I[i]_d$ ,对于某一优化目标  $m$ ,拥挤度计算式为

$$I[i]_{m,d} = \frac{f[i+1]_m - f[i-1]_m}{f[i]_m - f[0]_m} \quad (19)$$

整合三个优化目标下的拥挤度为个体的拥挤度,计算式为

$$I[i]_d = \sqrt{I[i]_{C,d}^2 + I[i]_{E,d}^2 + I[i]_{R,d}^2} \quad (20)$$

式中： $f[i]_m$ 和  $f[0]_m$ 分别为按目标函数值从小到大进行排序后的最大值和最小值； $f[i+1]_m$ 和  $f[i-1]_m$ 为排序后大于和小于个体  $i$  目标函数值的相邻值； $I[i]_{C,d}$ 、 $I[i]_{E,d}$ 和  $I[i]_{R,d}$ 分别为在总成本、总碳排放量和路径方案可靠性下的拥挤度。

步骤5:遗传操作。通过比较个体的非支配等级和拥挤度,以二元锦标赛的方式选择较优个体,然后以一定概率交叉、变异,产生新的个体。

步骤6:精英策略。将遗传操作后产生的新个体和原有个体合并为新的种群,重新进行非支配排序和计算拥挤度,优先选择非支配等级较高的个体

放入下一代种群,对于同一等级的个体,选择拥挤度较高的。

步骤7:重复步骤5,步骤6直到满足迭代次数要求。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例描述

某冷链公铁联运网络各节点间公路和铁路的运输距离如表1所示。4批冷链集装箱运输需求如表2,其中*G*为全年平均温度(10.7℃)下求得的值。参考文献[5,23],设置模型相关参数如表3所示,各运输方式参数如表4所示。列车开行班次时刻为2:00,4:00,6:00,10:00,16:00,20:00,23:00。

参考文献[25-27],设置公路运输时间均值为理想运输时间 $t_{(i,j)}^k$ ,标准差为 $0.4 t_{(i,j)}^k \div 6$ ,表示时间几乎

分布于 $0.8 t_{(i,j)}^k \sim 1.2 t_{(i,j)}^k$ 之间。等待转运时间分布为:公转铁服从正态分布 $N(4,1.5^2)$ ,铁转公服从正态分布 $N(1.5,0.3^2)$ 。交叉概率为0.85,变异概率为0.05,最大迭代次数为400次。

#### 3.2 算法对比

在相同算法参数设置下,分别采用NSGA和NSGA-II算法求解算例,应用MATLAB软件编程,得到的前沿解的平均目标函数值如表5所示,前沿解的平均成本迭代曲线图如图2所示。

相较于NSGA算法,NSGA-II的求解结果明显更优,同时在迭代过程中,NSGA收敛过快,易于陷入局部最优解。NSGA-II采用的拥挤度算子和精英策略,可以有效提升算法的寻优能力,避免陷入局部最优解。本文采用NSGA-II算法求解具有一定优势。

表1 节点间公路和铁路的运输距离

Tab.1 Transportation distance between nodes by road and rail

			km		
Node pair	Highway	Railway	Node pair	Highway	Railway
Node 1—Node 2	839	938	Node 6—Node 11	791	923
Node 1—Node 3	824	924	Node 7—Node 9	446	668
Node 1—Node 4	1 328	1 679	Node 7—Node 10	852	976
Node 1—Node 5	1 877	2 254	Node 8—Node 10	550	516
Node 2—Node 6	292	283	Node 9—Node 10	510	514
Node 2—Node 7	407	495	Node 9—Node 11	479	511
Node 3—Node 7	320	357	Node 9—Node 12	503	670
Node 4—Node 7	352	393	Node 10—Node 13	324	394
Node 4—Node 8	570	837	Node 11—Node 14	710	790
Node 5—Node 8	304	301	Node 12—Node 14	677	733
Node 6—Node 9	417	412	Node 13—Node 14	578	776

表2 运输需求表

Tab.2 List of transportation requirements

<i>o</i>	<i>d</i>	Container/TEU	$t_o^p$	$a^{op}$	$[a^p, b^p]$	$G/[kCal/(TEU \cdot h)]$
Node 1	Node 14	12	4	39	[44,64]	630.49
Node 13	Node 2	15	2	27	[32,52]	335.87
Node 1	Node 11	12	8	33	[43,63]	630.49
Node 13	Node 1	15	5	30	[40,60]	335.87

表3 模型参数

Tab.3 Parameters of the model

Parameters	Value	Parameters	Value
$t_i^{kl}$	0.2 h/TEU	$c_i^{kl}$	150 yuan/TEU
$e^{kl}$	0.567 kg/TEU	$e^d$	11.01 kg/h
$c_i$	1 yuan/kCal	$g$	50 yuan/(TEU·h)
$u_{(10,13)}^2$	35 TEU	$u_{(2,7)}^2$	25 TEU

表4 运输方式参数

Tab.4 Parameters of transportation mode

Transport mode	Average speed/(km/h)	Tariff rate/[yuan/(km·TEU)]	Unit carbon emission/[kg/(TEU·km)]
Highway	80	7.818	0.48
Railway	60	4.140	0.12

表5 前沿解平均目标函数值  
Tab.5 Average objective function value for frontier solutions

Algorithm	Average total cost/yuan	Average total carbon emissions/kg	Average reliability
NSGA	1 883 114	31 192	0.839 3
NSGA-II	1 734 802	31 647	0.892 8

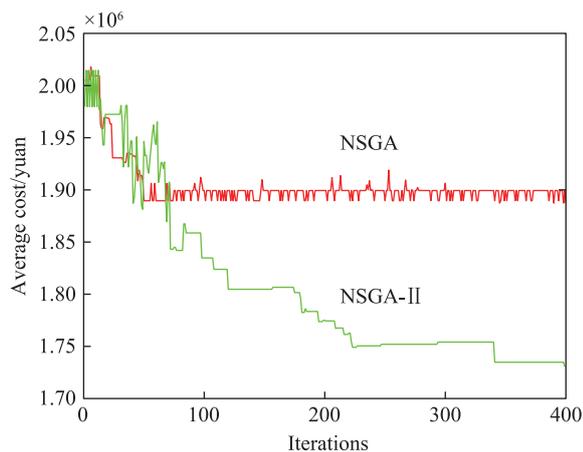


图2 前沿解平均成本迭代曲线图

Fig. 2 Iterative curve of the average cost of the frontier solution

### 3.3 结果分析

采用NSGA-II算法求解,得到解1~解26可靠性均大于0.7,且平均可靠性接近0.9,它们具有多样的成本和碳排放构成,适合于追求可靠性,对成本和碳排放有不同需求的承运人。部分前沿解的相关数据如表6所示。方案18的成本最低,但碳排放量最高,铁路占比最低,可靠性接近0.8,适合于追求最低成本,接受适当风险,且碳排放政策对其约束力较弱的承运人。方案6碳排放最低,铁路运输占比达到82.54%,但由于等待转运时间的不确定性和铁路班期的存在,增大了货物不能按时送达的风险,其可靠性为0.86,且其成本较高,适合于接受适当风险,碳排放政策对其约束力较强的承运人。

综上,本文提出的模型和算法可对不同需求的冷链公铁联运承运人的路径决策提供支持。

#### 3.3.1 路径方案可靠性对路径优化的影响

分别以路径方案可靠性作为约束,最小必须达到0.95,以及不考虑路径方案可靠性,以总成本和碳排放为优化目标时,得到Pareto前沿,前沿解的数据平均值如表7所示。

表6 部分前沿解相关数据  
Tab.6 Data on selected frontier solutions

Solution	Total cost/yuan	Total carbon emissions/kg	Reliability	Percentage of railroad mileage
Solution 6	1 883 112	24 404	0.860 0	0.825 4
Solution 18	1 673 591	43 926	0.793 3	0.288 2
Solution 22	1 699 192	40 128	1.000 0	0.393 1
Average value	1 734 802	31 647	0.892 8	0.627 5

表7 双目标前沿解数据均值  
Tab.7 Mean values of data for the bi-objective frontier solutions

Strategy	Total cost/yuan	Total carbon emissions/kg	Reliability	Percentage of railroad mileage
As a constraint	1 795 173	19 938	0.993 3	0.897 7
Non-consideration	1 715 257	29 341	0.779 4	0.659 5

可以看出,当以路径方案可靠性为约束时,路径方案可靠性较高。但为了满足路径方案可靠性约束,运输方式集中于铁路运输,其平均里程占比接近90%,这也使得Pareto前沿中解的碳排放较低,成本偏高,前沿解数量较少,且分布较为集中,得到的6个解中各批次集装箱经过的城市节点顺序均相同(节点1—节点2—节点6—节点11—节点14;节点13—节点10—节点7—节点2;节点1—节点2—节点6—节点11;节点13—节点10—节点7—节点2—节点1),仅采取的运输方式不同。这会使得经营人的选择有限,难以满足不同需求。

当不考虑路径方案可靠性时,虽然前沿解的数量更多,且分布较为分散,部分解的成本和碳排放均比以可靠性为约束时更优。但路径方案可靠性较低,大量未超过0.7,平均值未超过0.8,只能为能接受较高风险的承运人所选择。

综上,考虑路径方案可靠性是必要的。以路径方案可靠性为目标得到的前沿解,路径方案可靠性大于0.95的解分布更均匀,说明以路径方案可靠性为目标的模型能有效克服以路径方案可靠性为约束的模型解分布集中的劣势,在生成可靠路径的同时,提供多样的路径选择。

#### 3.3.2 时间不确定性对路径方案可靠性的影响

针对时间的不确定性进行灵敏度分析,探究其对路径方案可靠性的影响。因为追求碳排放最小时,铁路里程占比较高,时间不确定性对路径方案

可靠性影响较低;而追求运输成本最小时的路径方案可靠性相对较小,更易观察变化。本文主要针对运输成本最小的路径进行灵敏度分析。

对公路运输时间的分布范围比例以0.01的步长在0.20~0.30变化。公转铁和铁转公的转运等待时间标准差,分别以0.05和0.01的步长在1.50~2.00和0.30~0.40变化,如图3~图5。

由图3可见,公路运输时间的分布范围比例越大,即公路运输时间波动越大,延误可能性越大时,得到的最小成本路径方案可靠性越低,可见公路运输时间的不确定性对路径方案可靠性影响较大。

由图4,图5可见,随着转运等待时间标准差的变化,路径方案可靠性大致在0.764~0.776波动,大部分位于0.770附近,波动较小。说明转运等待时

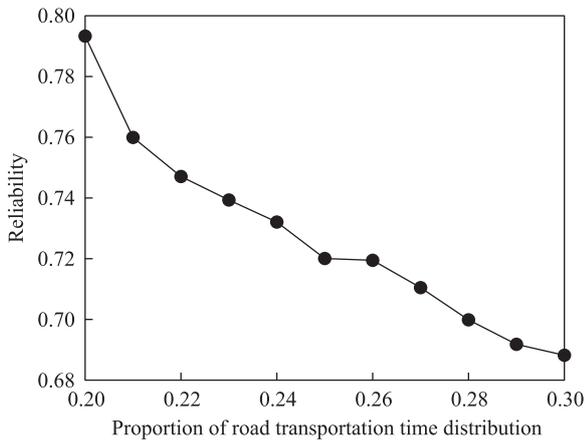


图3 公路运输时间不确定性对路径方案可靠性的影响  
Fig. 3 Effect of road transportation time uncertainty on reliability of route scheme

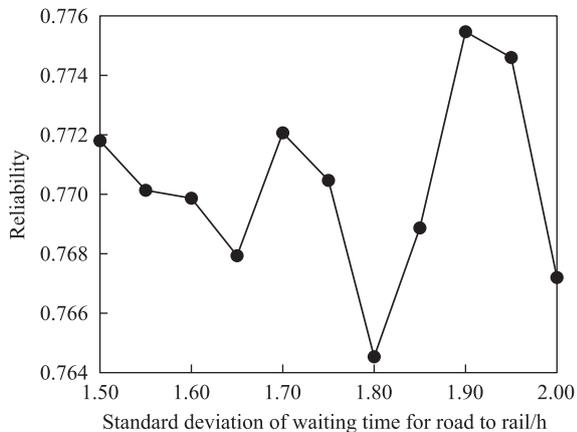


图4 公转铁等待时间不确定性对路径方案可靠性的影响  
Fig. 4 Impact of road-to-rail wait time uncertainty on reliability of route scheme

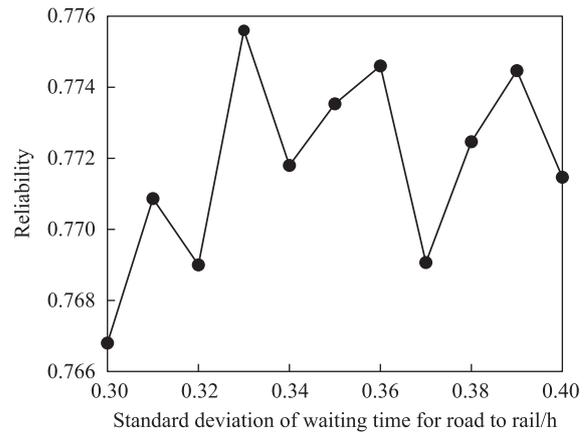


图5 铁转公等待时间不确定性对路径方案可靠性的影响  
Fig. 5 Impact of rail-to-road wait time uncertainty on reliability of route scheme

间的不确定性对路径方案可靠性的影响较小。

#### 4 结论

1) 本文针对冷链公铁联运的路径优化问题,同时考虑公路运输和等待转运时间的不确定性、班期限制、混合时间窗,引入了路径时间可靠性的概念,进而提出了不确定时间下的路径方案可靠性。

2) 以总运输成本和碳排放量最小化,路径方案的可靠性最大化为优化目标,构建多目标优化模型,以NSGA-II算法求解算例。求解结果表明:①将路径方案可靠性作为优化目标,求得的前沿解路径方案可靠性均大于0.7,平均值接近0.9,解的质量和分布空间,较不考虑路径方案可靠性和以路径方案可靠性为约束的模型更优,可以满足承运人对运输成本、碳排放、路径方案可靠性的不同需求。②公路运输时间的不确定性对路径方案可靠性的影响较大,而等待转运时间不确定性对路径方案可靠性的影响较小。

#### 参考文献:

[1] 简文良,何艺,胡永仕,等. 集装箱公铁联运“门到门”运输时间可靠性分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21(4): 14-24.  
JIAN W L, HE Y, HU Y S, et al. Analysis of "door-to-door" transportation time reliability for container road-rail intermodal transportation[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2023, 21(4): 14-24.

[2] BILEGAN I C, CRAINIC T G, WANG Y. Scheduled service network design with revenue management consider-

- ations and an intermodal barge transportation illustration [J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 300(1): 164-177.
- [3] 李海鹰, 曹玥, 廖正文, 等. 基于服务网络的综合快运方案优化[J]. *中国铁道科学*, 2020, 41(4): 136-145.  
LI H Y, CAO Y, LIAO Z W, et al. Optimization of comprehensive express transportation scheme based on service network[J]. *China Railway Science*, 2020, 41(4): 136-145.
- [4] DEMIR E, BURGHOLZER W, HRUŠOVSKÝ M, et al. A green intermodal service network design problem with travel time uncertainty[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 93: 789-807.
- [5] 匡才锦, 朱培, 邵荃. 考虑延误与班期限制的多商品流多式联运方案优化[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(13): 5715-5724.  
KUANG C J, ZHU P, SHAO Q. Scheme optimization of multi-commodity flow multimodal transport considering delay and time-table restriction[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(13): 5715-5724.
- [6] SINHA P, KUMAR S, CHANDRA C. Strategies for ensuring required service level for COVID-19 herd immunity in Indian vaccine supply chain[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 304(1): 339-352.
- [7] 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(4): 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.
- [8] 张丰婷, 杨菊花, 于江, 等. 基于海铁联运的集装箱班列服务路径优化[J]. *交通信息与安全*, 2021, 39(4): 125-133.  
ZHANG F T, YANG J H, YU J, et al. Optimization of container train service route based on sea-rail intermodal transportation[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2021, 39(4): 125-133.
- [9] 杨喆, 邓立宝, 狄原竹, 等. 基于模糊需求和模糊运输时间的多式联运路径优化[J]. *控制理论与应用*, 2024, 41(6): 967-976.  
YANG Z, DENG L B, DI Y Z, et al. Multimodal transportation route optimization based on fuzzy demand and fuzzy transportation time[J]. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(6): 967-976.
- [10] 袁雪丽, 杨菊花, 任金荟. 随机运输时间下集装箱海铁联运箱流路径优化方法[J]. *交通信息与安全*, 2022, 40(6): 106-117.  
YUAN X L, YANG J H, REN J H. A path optimization method for sea-rail intermodal container transport under random transit time[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2022, 40(6): 106-117.
- [11] 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 Y M, QIU M, YAN K L, 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.
- [12] WU X, NIE L, XU M, et al. A perishable food supply chain problem considering demand uncertainty and time deadline constraints: Modeling and application to a high-speed railway catering service[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 111: 186-209.
- [13] 尹传忠, 方颢蓉, 武中凯, 等. 随机机会约束的多式联运多目标优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(6): 1595-1603.  
YIN C Z, FANG H R, WU Z K, et al. Multi-objective optimization for multimodal transport based on stochastic chance-constrained programming[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(6): 1595-1603.
- [14] 宋丽英, 赵世超, 卞骞, 等. 低碳视角下城乡区域混合车队生鲜配送路径问题研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(6): 250-261.  
SONG L Y, ZHAO S C, BIAN Q, et al. Fresh food distribution route optimization of mixed fleets in urban and rural areas under low carbon perspective[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2023, 23(6): 250-261.
- [15] ZHAN S, XIE J, WONG S C, et al. Handling uncertainty in train timetable rescheduling: a review of the literature and future research directions[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 183: 103429.
- [16] 吴鹏, 李泽, 季海涛. 考虑排放控制区的绿色多式联运路径和速度优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(3): 20-29.  
WU P, LI Z, JI H T. Route and speed optimization for green intermodal transportation considering emission con-

- trol area[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(3): 20-29.
- [17] 邓红星,周洁,胡翼.考虑碳排放的生鲜农产品冷链物流配送路径优化模型[J].重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(2): 289-297.  
DENG H X, ZHOU J, HU Y. Optimization model of the cold chain logistics distribution path of fresh agricultural products considering carbon emission[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2023, 37(2): 289-297.
- [18] KURTULUŞ E. Optimizing inland container logistics and dry port location-allocation from an environmental perspective[J]. Research in Transportation Business & Management, 2023, 48: 100839.
- [19] GUO X, ZHANG W, LIU B. Low-carbon routing for cold-chain logistics considering the time-dependent effects of traffic congestion[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, 113: 103502.
- [20] ZHANG Y, FAN X, MA Y, et al. Spatial impacts of cold chain logistics for fresh agri-products on carbon emissions [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, 113: 103525.
- [21] 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.  
SUN J Q, WANG S N, YAN S X. Path selection of multimodal transport for refrigerated containers considering carbon emission[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2022, 48(2): 57-65.
- [22] 马成颖,牟海波.考虑路况、配送员与顾客满意度的冷链物流车辆配送路径优化方法[J].交通信息与安全, 2022, 40(5): 156-168.  
MA C Y, MOU H B. A route optimization method for cold chain logistics vehicles considering road conditions, satisfaction of deliverymen and customers[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(5): 156-168.
- [23] 唐继孟.我国集装箱公铁联运竞争力分析及其提升策略研究[D].北京:北京交通大学, 2018.  
TANG J M. Competitiveness of container rail-road intermodal transport and its improving strategies in China[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [24] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [25] 蒋琦玮,林艺,冯芬玲.模糊时间下考虑碳税值变化的多式联运路径优化问题研究[J].工业技术经济, 2020, 39(4): 81-88.  
JIANG Q W, LIN Y, FENG F L. Research on multimodal transport path optimization problem considering carbon tax value changes under fuzzy time[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2020, 39(4): 81-88.
- [26] 户佐安,蔡佳,罗涸.混合不确定条件下多式联运路径优化[J].北京交通大学学报, 2023, 47(6): 32-40.  
HU Z A, CAI J, LUO H. Optimization of multimodal transportation routes under mixed uncertainties[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(6): 32-40.
- [27] 王清斌,董悦.基于节点换装时间不确定的多任务集装箱运输方案优化[J].铁道运输与经济, 2019, 41(9): 93-99.  
WANG Q B, DONG Y. A research on optimization of multi-task container transportation scheme based on uncertain node replacement time[J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(9): 93-99.



第一作者:杨航(2000—),男,硕士研究生,研究方向为运输组织优化。E-mail:2254413880@qq.com。



通信作者:段力伟(1986—),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为运输组织优化。E-mail:liwei.duan@cqjtu.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)