

铁路冷链物流运输多目标机会约束规划

鲁玉¹, 徐行方¹, 尹传忠², 李晨林³, 汤莲花¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海海事大学交通运输学院, 上海 201306;

3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 以运输网络总成本、碳排放量和货损率最低为目标, 建立了随机需求、运能限制的铁路冷链物流网络优化模型, 采用机会约束规划理论将模型进行确定性转化, 设计了自适应遗传-模拟退火算法(A-SAGA), 通过MATLAB仿真计算最优冷链物流运输方案集, 并对运价补贴、列车旅速、冷链货物品类进行灵敏度分析。结果表明, 在同时考虑以上3个冲突目标下, 当采取5%的运价补贴时, 或仅提高列车旅速至70 km·h⁻¹时, 铁路市场份额的提升效果明显; 不同基础设施条件下可灵活采用这两种方式; 对运输时间敏感程度不同的货物直接影响货损率的变化以及铁路市场份额的初始值。

关键词: 铁路冷链物流; 机会约束规划; 自适应遗传-模拟退火; 运价补贴; 列车旅速

中图分类号: U29

文献标志码: A

Multi-Objective Chance-Constrained Programming of Railway Cold Chain Logistics

LU Yu¹, XU Xingfang¹, YIN Chuanzhong², LI Chenlin³, TANG Lianhua¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Transport and Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Aimed at the lowest total cost, carbon emission, and freight loss rate of transportation network, an optimization model of railway cold chain logistics network with stochastic demand and transportation capacity constraints was established. The model is transformed deterministically using the chance-constrained programming theory, and an adaptive genetic-simulated annealing algorithm (A-SAGA) is designed. The optimal cold chain logistics transportation scheme set is

obtained by MATLAB simulation calculation. The sensitivity analysis of freight subsidy, train travel speed and freight category are conducted. The simulation results show that under the multiple conflicting objectives of considering transportation costs, carbon emissions, and cargo loss rates, rail cold chain market share can be improved significantly when 5% of the freight subsidy is applied, or only 70 km·h⁻¹ of train travel speed is increased. These two methods can be used flexibly under different infrastructure conditions. Cargo with varying degrees of sensitivity to transit time directly affects the change in the rate of cargo loss and the initial value of rail market share.

Key words: railway cold chain logistics; chance-constrained programming; adaptive genetic-simulated annealing algorithm; freight subsidy; train travel speed

2018年,我国冷链物流运输中近90%的货运量是由公路冷链运输完成,铁路仅占1%。随着我国碳达峰、碳中和目标的不断推进,冷链物流“公转铁”运输具有广阔的发展前景。目前,上海至成都、广西至北京、潍坊至昆明等多个方向已开行冷链运输班列。2019年,铁路冷链运输通过采取开行冷链班列、组织整列运输等方式,冷链运输货物量同比增长30.6%,但相较于整体冷链物流运输市场,铁路冷链运输占比仍然相对较低。

由于冷链货物对温度的要求高,除了以运输成本的大小作为冷链运输评价准则,还需要对运输过程中的碳排放、运输质量等多种因素进行综合考虑。Zhang等^[1]在满足产品质量要求的前提下,以储运成本最小化为目标建立冷链配送系统优化模型;Lin等^[2]设计了易腐产品冷链供应链物流决策模型,根据需求、初始路线、终端市场地理位置评估实际运输

收稿日期: 2021-01-05

基金项目: 上海市科技创新行动计划(19692105400)

第一作者: 鲁玉(1997—),男,博士生,主要研究方向为多式联运组织与优化。E-mail: luyu07@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

条件和装运货物位置,做出停止运输或将货物重新安排到较近地点的决策。Fang等^[3]考虑总成本和碳排放量两个冲突目标,提出了多品类进口新鲜农产品的多目标绿色冷链网络设计模型。张戎等^[4]从托运人的角度对货运服务选择影响因素识别、货运服务潜在市场份额预测、货运服务质量属性价值估算3个方面对货运非集计行为模型的研究方法和结论进行了综述。杨珍花等^[5]构建了冷藏车多车型混合配送调度优化模型,采用混合模拟退火算法,得出混合配送方案在总成本和碳排放方面比单一车型配送方案具有优势。

在运输因素不确定性的研究上,Yang等^[6]设计随机模糊方法,求解时间、费用均不确定下的多式联运路径优化问题;Zhang等^[7]基于轴辐式网络,同时考虑成本、时间和可靠性3个目标,建立水路-铁路-公路多式联运网络的不确定多目标规划模型;Sun^[8]在需求不确定下,考虑客户偏好服务水平,提出一种公铁联运路径选择的线性模糊多目标模型;马向国等^[9]基于客户服务时间、安全系数等方面,以总成本最小化为目标,建立基于随机需求的冷链物流车辆路径优化模型;李珺等^[10]建立随机运输速度下的绿色多式联运随机路径优化模型,采用样本平均近似法和基于优先权的粒子群算法相结合的混合算法求解。赵宇哲等^[11]利用随机规划方法,建立不确定OD(起迄点)需求下的轴-辐式集装箱海运网络机会约束规划模型,并结合贪婪算法改进禁忌搜索算法进行求解;邓亚娟等^[12]提出了需求不确定有容量限制的枢纽辐射式航线网络机会约束规划模型,采用了基于随机模拟的遗传算法对模型进行求解。

对冷链运输过程的成本构成、不确定因素、运输网络优化等方面的研究,已取得了很多显著的成果,但仍存在以下不足:

(1)铁路冷链运输中所涉及的如运价补贴、列车旅速提升等因素,对冷链多式联运网络中的铁路市场以及其他运输方式的影响,缺乏具体的定量分析。

(2)从冷链货物属性的角度看,货物属性不同对运输时间的敏感度不同,针对不同货物属性对冷链物流多式联运运输方式的选择影响缺少定量分析。

为此,本文在现有研究基础上,从托运人角度出发并考虑交通运输业的碳排放^[13]发展趋势,以冷链运输网络成本最小、碳排放量最小、货物损失率最低为目标,考虑冷链多式联运全过程,将运价补贴转化为数学模型,建立随机需求的铁路冷链物流网络优化模型,采用机会约束理论对模型进行可求解转化,并设

计了A-SAGA算法。通过对算例进行仿真求解,得到运价补贴、提高旅速和不同运输时间敏感度货物对铁路冷链运输网络的影响机理,最大限度发挥铁路运输的优势及潜能,提升冷链运输市场竞争力。

1 模型建立

1.1 问题描述及假设条件

为研究铁路运价补贴、列车旅速、冷链货物属性等因素在运输网络中的影响机理,首先构建以集货过程、运输过程、配送过程为主体的冷链运输结构网络,如图1所示。在集货过程和配送过程仅采用公路运输方式,物流中心间的干线运输过程可以选择铁路、公路及航空多种运输方式,起始物流中心至少与一个目的物流中心连接,至少存在一种运输方式。对于每一个OD运输需借助运输过程的干线运输与集货、配送过程的支线运输进行衔接,经过物流中心中转完成^[11]。

模型假设条件如下:

(1)在冷链运输集货、运输、配送全过程中,单次OD运输任务在各运输过程中不可拆分。

(2)各区域间的支线运输仅限于服务于同一区域,不服务其他区域。

(3)中间运输过程中各运输方式有运能限制,可在起始物流中心节点间自由调配。

(4)在各运输过程不考虑因自然灾害、极端条件导致运输路径拥堵而产生额外时间的情况。

(5)物流中心的货物处理受到能力限制,达到限制后不能继续接收货物。

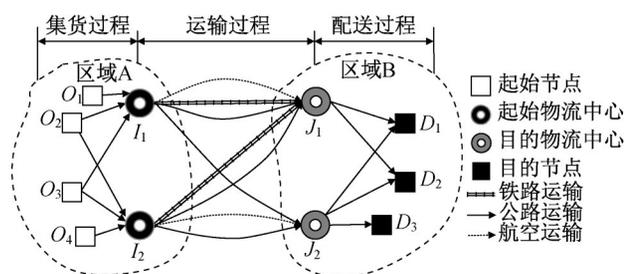


图1 冷链运输过程结构图

Fig.1 Structure of cold chain transport process

1.2 符号定义

符号定义见表1。

1.3 目标函数

1.3.1 运输成本最小 F_1

全程冷链运输的运输成本,包括集货过程的公

表 1 符号定义
Tab.1 Definition of symbols

集合	定义
O	冷链运输的起始节点集合, $o \in O$
I	起始物流中心的节点集合, $i \in I$
J	目的物流中心的节点集合, $j \in J$
D	冷链运输的目的节点集合, $d \in D$
K	运输方式集合, $k \in K$, 其中, $k = 1$ 为铁路运输, $k = 2$ 为公路运输, $k = 3$ 为航空运输
参数	定义
L_{ijk}, L_{oi}, L_{jd}	分别表示节点 i 到 j 之间采用第 k 种运输方式的距离, 节点 o 到 i 之间、节点 j 到 d 之间采用公路运输的距离
v_{oi}, v_{ijk}, v_{jd}	分别表示节点 o 到 i 之间公路运输的速度, 节点 i 到 j 之间采用第 k 种运输方式的速度, 节点 j 到 d 之间采用公路运输的速度
Q_{ijk}	节点 i 到 j 之间采用第 k 种运输方式的日均运输能力
c_{ijk}	节点 i 到 j 之间采用第 k 种运输方式的单位运输成本
c_{oi2}, c_{jd2}	采用公路运输从节点 o 到 i 之间、节点 j 到 d 之间的单位运输成本
c_{rs}	采用铁路运输时单位运价补贴比率
t_{oi}, t_{ijk}, t_{jd}	分别表示节点 o 到 i 之间的公路运输以及在 i 中转运的时间, 节点 i 到 j 之间采用第 k 种运输方式的运输时间, 节点 j 到 d 之间采用公路运输的时间以及在 j 中转运的时间
q_{ijk}, q_{oi}, q_{jd}	分别表示节点 i 到 j 之间采用第 k 种运输方式的货运量, 采用公路运输从起始节点 o 到 i 之间的货运量, 采用公路运输从节点 j 到 d 之间的货运量
q_{od}, Q_{od}	分别表示从起始节点 o 到目的节点 d 之间的 OD 需求量及冷链运输的 OD 需求量的总和, $Q_{od} = \sum q_{od}$
c_{tr}	在物流中心节点处的单位中转成本
E_k	第 k 种运输方式的碳排放因子
H_i, H_j	分别表示节点 i 、节点 j 的在研究时期内的最大处理能力
决策变量	定义
$x_{ijk} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	采用第 k 种运输方式从节点 i 到 j , 该值为 1; 否则, 为 0

路运输、物流中心间的多种方式运输、配送过程的公路运输成本以及中转成本^[14], 同时将铁路运价补贴转化为数学模型。运输相关成本可表示为

$$F_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{ijk} x_{ijk} q_{ijk} - c_{rs} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij1} x_{ij1} q_{ij1} + \sum_{o=1}^O \sum_{i=1}^I c_{oi2} q_{oi} + \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^J c_{jd2} q_{jd} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{tr} x_{ijk} q_{ijk} \quad (1)$$

式中: 等式右边第 1 部分为运输过程中采用不同运输方式的运输成本; 第 2 部分为物流中心节点 i 和 j 间对铁路冷链运输的补贴; 第 3、4 部分为集货、配送过程的公路成本; 第 5 部分为在冷链运输过程中, 在物流中心节点 i 和 j 处进行中转运作业产生的成本。

1.3.2 碳排放量最小 F_2

依据生态环境部[2020]19 号的《碳排放权交易管理办法(试行)》, 在确定研究时期区域内冷链运输碳排放配额下, 运输中产生的碳排放量越少意味着运输企业在碳交易市场的收益越高。为获得全程冷

链运输过程的 CO₂ 排放量, 采用投入产出法^[15]进行计算, 以不同运输方式的碳排放因子与运量和距离相乘得到各阶段运输的 CO₂ 排放量, 将各阶段累加, 计算公式如下:

$$F_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K q_{ijk} E_k L_{ijk} x_{ijk} + \sum_{o=1}^O \sum_{i=1}^I q_{oi} E_2 L_{oi} + \sum_{j=1}^J \sum_{d=1}^D q_{jd} E_2 L_{jd} \quad (2)$$

式中: 等式右边第 1 部分为在运输过程中采用不同运输方式的碳排放量; 第 2、3 部分为集货、配送过程的公路运输碳排放量。

1.3.3 货损率最小 F_3

在冷链运输中即使是保持最适宜的温度, 产品质量也会随着时间的推移下降^[5]。根据化学家阿伦尼乌斯提出的反应速率常数与温度之间关系的方程 $K = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$, 结合传统的 T. T. T. (Time. Temperature. Tolerance.) 理论, 与初始质量 Q_0 相关

的产品完全变质可以通过总结冷链各环节中的产品变质情况来确定。对于给定的化学反应,在一定的温度范围内, E_a 与 A 变化不大,可视为定值^[1]。在假设温度不变或波动很小的情况下, E_a 也可以看作为常量。变质率 l_{qm} 可以用质量变化量 ΔQ 与初始质量 Q_0 的百分比来确定,即

$$l_{qm} = \frac{\Delta Q}{Q_0} \times 100\% = \left\{ 1 - \exp \sum_i \left[-K_{\max} t_i \exp \left(\frac{-E_a}{RT_i} \right) \right] \right\} \times 100\% \quad (3)$$

式中: K_{\max} 为与温度无关的反应速度恒量,给定反应的特征常数,为 $5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$; R 为气体常量, $R=8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T_i 为热力学温度, K ; E_a 为活化能,取值为 $110 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (大多数化学反应的活化能都处于 $60 \sim 250 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

在此基础上,由于当前冷链运输装备在运输全程中能够保证温度恒定,包含集货、运输和配送过程的冷链运输货损率公式可表示为

$$F_3 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} q_{ijk} [1 - e^{-\theta(\tau_{oi} + \tau_{jk} + \tau_{jd})}]}{Q_{od}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\theta = K_{\max} \exp \left(\frac{-E_a}{RT_i} \right)$ 。

由以上分析可得到随机需求的铁路冷链物流网络优化的目标函数为

$$\begin{cases} \min F_1 \\ \min F_2 \\ \min F_3 \end{cases} \quad (5)$$

为求解建立的多目标规划模型,采用线性加权组合法对以上目标函数进行处理,在各目标函数前设置相应的权重。得到以下公式:

$$\min Z = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \alpha_3 F_3 \quad (6)$$

式中: α_1 、 α_2 、 α_3 分别为运输成本、碳排放量、货损率子目标的权重。

线性加权组合法中以权数形式体现重要程度,权重大小的设定至关重要。对于产生的每个随机OD任务,对冷链运输网络成本、碳排放量、货损率各子目标需要在同一层面上进行比较。容限法的特点是在评价函数中使各子目标在数量级上达到统一平衡,具体流程如下:

Step1 求出各目标函数在区域的变化范围 $a \leq F(x) \leq b$ 。

Step2 取 $\Delta = \frac{a+b}{2}$ 作为容限。

Step3 各目标函数对应的权数为 $\alpha = \frac{1}{\Delta^2}$ 。

1.4 约束条件

$$q_{od} \sim N(\mu_{od}, \sigma_{od}^2) (\forall o \in O, \forall d \in D) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ijk} q_{ijk} \leq Q_{ijk} (\forall k \in K) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} q_{ijk} - q_{oi} = 0 (\forall i \in I) \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K x_{ijk} q_{ijk} - q_{jd} = 0 (\forall j \in J) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I q_{oi} = \sum_{j=1}^J q_{jd} = Q_{od} (\forall o \in O, \forall d \in D) \quad (11)$$

$$\sum_{o=1}^O q_{oi} - H_i \leq 0 (\forall i \in I) \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K x_{ijk} q_{ijk} - H_j \leq 0 (\forall j \in J) \quad (13)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1 (\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K) \quad (14)$$

$$q_{od}, q_{ijk}, q_{oi}, q_{jd} \in N^*$$

$$(\forall o \in O, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall d \in D) \quad (15)$$

其中,式(7)表示OD量服从均值为 μ_{od} 、方差为 σ_{od}^2 的正态分布;式(8)表示 k 种运输方式的运输能力约束,各运输方式承担的总货运量不超过其运能限制;式(9)表示节点 i 的货运到发量平衡;式(10)表示节点 j 的货运到发量平衡;式(11)表示从起始节点 o 发出的货运量与到达目的节点 d 的货运量平衡;式(12)、(13)表示节点 i 和节点 j 的货物接收量不超过其最大处理能力;式(14)表示相关决策变量为0、1约束;式(15)表示OD量及各运输阶段的货运量符合整数约束。

1.5 机会约束模型

由于OD量在一定时期内是服从均值为 μ_{od} 、方差为 σ_{od}^2 的正态分布,各阶段的运量与OD量密切相关(式(9)~(12)),因此式(6)是典型的随机规划模型。根据机会约束规划理论,模型的约束条件只需保证在一定的置信水平上得到满足,因此,将上述模型转化为如下的机会约束规划模型^[11-12]:

假设 $\gamma \in (0, 1)$ 为目标函数(6)预先给定的置信度水平,那么对于随机变量 q_{od} ,总存在一个值 \bar{f} ,使得下式成立:

$$P \left\{ f(q_{od}) = \left[\alpha_1 \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{ijk} x_{ijk} q_{ijk} - c_{rs} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij1} x_{ij1} q_{ij1} + \sum_{o=1}^O \sum_{i=1}^I c_{oi2} q_{oi} + \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^J c_{jd2} q_{jd} \right) \right] \right\}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{ij} x_{ijk} q_{ijk} + \alpha_2 \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K q_{ijk} E_k L_{ijk} x_{ijk} + \sum_{o=1}^O \sum_{i=1}^I q_{oi} E_2 L_{oi} + \sum_{j=1}^J \sum_{d=1}^D q_{jd} E_2 L_{jd} \right) + \alpha_3 \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} q_{ijk} [1 - e^{-\theta(t_{oi} + t_{ij}^k + t_{jd})}] / Q_{od} \right) \leq \bar{f} \} \geq \gamma \tag{16}$$

式中: $P\{ \}$ 为事件成立的概率; \bar{f} 为目标函数在置信度水平为 γ 时所取得的最小值。

根据中心极限定理, $q_{od} \sim N(\mu_{od}, \sigma_{od}^2)$, 则 $f(q_{od}) \sim N(E(f(q_{od})), D(f(q_{od})))$, 其中 $E(f(q_{od}))$ 为 $f(q_{od})$ 的均值, $D(f(q_{od}))$ 为 $f(q_{od})$ 的方差, 由于 OD 需求的分布函数相互独立, 故 $\frac{f(q_{od}) - E(f(q_{od}))}{\sqrt{D(f(q_{od}))}}$ 服从标准正态分布。

计 ϕ 为 $\frac{f(q_{od}) - E(f(q_{od}))}{\sqrt{D(f(q_{od}))}}$ 的标准正态分布函

数, $P \left\{ \frac{f(q_{od}) - E(f(q_{od}))}{\sqrt{D(f(q_{od}))}} \leq \frac{\bar{f} - E(f(q_{od}))}{\sqrt{D(f(q_{od}))}} \right\} \geq \gamma$

与式 (16) 等价, 可得 $\bar{f} \geq \phi^{-1}(\gamma) \sqrt{D(f(q_{od}))} + E(f(q_{od}))$ 。因此, 随机需求下铁路冷链物流网络优化模型转化为以下确定性 0-1 规划模型:

$$\min \bar{f} = \phi^{-1}(\gamma) \sqrt{D(f(q_{od}))} + E(f(q_{od})) \tag{17}$$

2 模型求解

基于随机模拟的遗传算法是解决机会约束规划的目标函数最优集的常用方法。为了避免单一启发式算法的局限性, 本文采用自适应遗传-模拟退火算法(A-SAGA), 在交叉、变异操作步骤中采用自适应交叉、变异概率, 并引入模拟退火操作, 这样既能克服传统遗传算法局部搜索能力差的缺点, 也能很好地避免模拟退火算法不能使优化搜索过程进入最有希望区域的不足。

为求解使式 (16)、(17) 成立的最小值 \bar{f} , 需要采用随机模拟的方法。从概率分布函数中生成 N 个独立的随机变量, $n=1, 2, \dots, N$, 分别求解得到 $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, 取 N' 为 γN 的整数部分, 由大数定律, $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 中的第 N' 个最小的元素可以作为 \bar{f} 的

估计^[12]。

求解优化模型的目标是确定各个 OD 间的运输方案, 以使得总目标函数最小。结合模型特点, 染色体采用 0-1 编码方式, 其中每个染色体有 $O \times D$ 个子单元, 代表每个 OD 运输任务; 对于每个 OD 任务, 有 3 组子基因, 分别代表该次运输选择的物流中心 $I_1 - I_i$ 、物流中心 $J_1 - J_j$ 和选择的运输方式 $K_1 - K_k$, 第 I 、 J 、 K 组基因分别含有 i 个、 j 个、 k 个基因位; 因此, 这些子基因所构成的染色体共同形成了一个个体, 以此作为优化模型的解。染色体编码如图 2 所示, 具体算法流程如图 3 所示, 具体流程如下:

Step1 初始化。输入冷链运输网络相关数据并利用 MATLAB 生成服从设定分布的随机 OD, 初始化种群大小 P_{size} 、最大迭代次数 G_{max} 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、初始温度 T_0 、降温系数 ϵ 。由于物流中心的运能限制, 对 OD 运输任务不同的计算顺序也会导致不同的结果, 因此通过随机不同的 OD 计算顺序生成初始个体, 将 P_{size} 个初始个体构成初始种群。

Step2 自适应遗传-模拟退火操作。针对生成的初始种群, 对其进行选择、交叉、变异、降温操作, 并采用自适应概率算子提高运行效率, 通过迭代计算得到可行的运输方案集。

(1) 选择策略。采用正比选择策略, 将总目标函数取倒数作为正比选择的依据。

(2) 交叉操作。交叉操作中采用单点交叉, 对第 n 代的第 q_1 、 q_2 个体的随机的第 w 个基因位进行单点交叉。以生成 0-1 的随机数与自适应交叉概率的大小比较, 作为判断是否进行交叉操作的依据; 在 GA (genetic-algorithm) 交叉的基础上, 引入模拟退火操作, 基于 Metropolis 准则对适应度小的新种群再以概率 $e^{(-\Delta T/T)}$ 接受, 其中 ΔT 为评价函数的改变量。

(3) 变异操作。变异操作中采用单点变异, 在每个基因位的取值集合中, 随机选取一个数值将原基因位的数值进行替换。比较生成 0-1 的随机数与自适应变异概率的大小决定是否进行变异操作; 在遗传算法变异操作基础上, 引入模拟退火操作, 对变异后适应度小的新种群再以概率 $e^{(-\Delta T/T)}$ 接受。

(4) 降温操作。以 $T = T_0 \epsilon^g$ 对后续子代进行降温, 其中上标 g 表示迭代次数, 初始温度的确定与物理意义无关, 温度越高则计算结果越精准, 计算耗时更长。

Step3 终止准则。以最大迭代次数 G_{max} 作为停止准则, 当迭代次数等于 G_{max} 时, 迭代停止。

Step4 置信度输出准则。根据机会约束理论下的模型,选取所有随机需求所得到的最优解中符合置信度水平为 γ 的解集,作为最终的最优解并进行输出。

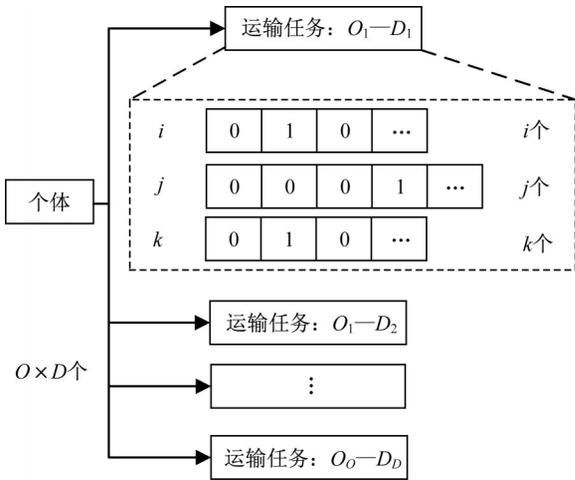


图2 染色体编码

Fig.2 Chromosome coding

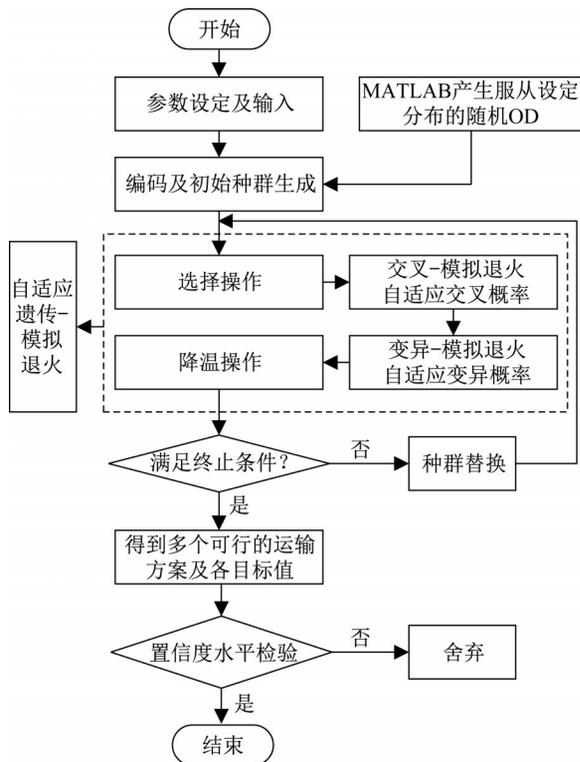


图3 算法流程

Fig.3 Algorithm flow

3 仿真分析

3.1 参数输入

为验证铁路冷链物流网络优化模型及算法的有

效性,以下进行必要的数值分析。假设某冷链多式联运公司预测某一时期冷链市场OD需求 q_{od} 服从正态^[9,11-12]分布,见表2,并得到冷链运输的OD需求量的总和 $Q_{od} = \sum q_{od}$ 。网络中起始节点有15个($o = 1, 2, \dots, 15$);目的节点10个($d = 1, 2, \dots, 10$);起始物流中心4个($i = 1, 2, 3, 4$),设置在起始节点中的第1、2、11、12处;目的物流中心3个($j = 1, 2, 3$),设置在目的节点中的第1、2、4处。冷链运输各过程的起讫点间的距离情况如表3~5所示。

铁路单位运价 c_{ijl} 依据2018年实行的发改委[2017]2163号运价规则进行计算,运价构成分为2个部分:运价=基价1+基价2×运价公里,机械冷藏车的基价1为20元·t⁻¹,基价2为0.14元·t⁻¹·km⁻¹。公路、航空的单位运价设定参考了相关文献[1,5],碳排放相关参数来自文献[10,15]。设定该时期内铁路和公路的日均运输能力为1.5万t·d⁻¹,由于航空运输的运量小,设定为0.5万t·d⁻¹;起始物流中心的处理能力设置为1.0万t·d⁻¹,目的物流中心的处理能力为1.5万t·d⁻¹,相关参数的取值如表6所示。

表2 冷链集装箱OD需求的期望值与标准差

Tab.2 Expectation and standard deviation of cold chain container OD

		(期望值/标准差)/(20 t·d ⁻¹)									
O	D										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	3/2	11/3	9/1	2/1	3/1	3/5	11/2	7/4	2/1	8/5	
2	5/1	5/2	2/1	7/1	5/4	2/5	1/1	10/3	7/1	1/1	
3	4/1	6/5	8/5	5/3	3/1	8/3	5/3	2/3	5/2	11/1	
4	5/4	3/4	3/2	2/5	7/2	11/1	1/1	3/2	4/3	5/1	
5	6/1	5/1	3/1	7/1	5/1	4/1	10/1	3/1	1/1	5/3	
6	9/4	5/2	5/1	2/1	11/3	2/1	7/2	6/1	1/1	7/4	
7	2/1	4/5	5/2	7/1	9/2	7/4	2/5	1/2	5/2	3/2	
8	1/1	9/4	6/1	2/3	5/2	3/1	8/5	2/3	8/3	11/3	
9	1/1	5/1	2/1	1/1	3/5	11/5	5/2	1/1	1/1	5/2	
10	2/1	2/1	7/4	9/2	3/2	1/2	7/2	7/3	3/4	11/5	
11	5/4	11/2	7/5	2/1	5/4	1/1	1/2	9/1	3/1	3/2	
12	5/2	5/2	6/5	2/1	2/1	1/2	3/1	9/4	11/1	5/2	
13	5/3	2/1	10/3	2/3	5/4	11/2	2/1	5/1	8/3	6/1	
14	7/5	11/1	2/1	3/1	5/2	4/1	5/4	3/2	2/3	7/3	
15	9/4	9/5	11/1	6/1	10/1	2/1	3/1	11/4	11/2	5/2	

3.2 仿真结果

在不考虑运价补贴,列车旅速为60 km·h⁻¹的条件下,采用自适应遗传-模拟退火算法,参照文献[5-6]设定各初始化参数:初始交叉概率 P_c 为0.9,初始变异概率 P_m 为0.2,初始温度 T_0 为1 000 K,降温系数 ϵ 为0.9,种群大小为100,迭代次数设定100次,并采用Matlab生成50个服从表2分布的随机运输任

表 3 起始物流中心到起始节点的公路运输距离

Tab.3 Road transport distance from initial logistics center to initial node

		公路运输距离/km														
I	O															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	30	298	130	185	108	126	307	282	254	238	175	168	100	148	196	
2	298	30	174	171	233	257	302	101	75	162	273	—	289	206	341	
3	175	273	200	244	158	257	403	292	270	312	30	160	89	81	56	
4	168	—	271	310	220	—	—	412	394	388	155	30	147	236	117	

表 4 起始物流中心到目的物流中心的铁路/公路/航空运输距离

Tab.4 Railway/road/air transport distance from initial logistics center to destination logistics center

(铁路/公路/航空运输距离)/km			
I	J		
	1	2	3
1	1 976/1 938/1 664	1 762/1 680/1 445	1 848/1 596/1 336
2	1 665/1 653/1 407	1 361/1 388/1 202	1 498/1 311/1 075
3	1 910/1870/1 540	1 606/1 609/1 313	1 677/1 531/—
4	—/2 000/1 676	—/1 739/1 443	1 742/1 775/—

表 5 目的物流中心到目的节点的公路运输距离

Tab.5 Road transportation distance between destination logistics center and destination node

		公路运输距离/km									
J	D										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	30	329	234	—	76	120	161	181	169	225	
2	329	30	218	228	334	322	177	181	309	178	
3	—	228	—	30	—	393	278	404	—	249	

务。由于各运输方式运量存在明显差异,为匹配运能限制,以铁路、公路、航空总运输能力限制的比例

概率随机生成 k 值。在置信度水平 γ 为 0.9 下,得到了 5 组符合条件的可行解,如表 7、图 4 所示。在初始解相同的情况下,对比 A-SAGA 算法与传统 GA 算法在运行效率上的差异,在求解质量和收敛上优于传统 GA 算法,如图 5 所示。

表 6 其他相关参数取值

Tab.6 Values of other relevant parameters

参数	$v_{j1}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$v_{j2}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$v_{j3}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$(v_{oi2}, v_{jd2})/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$(c_{ij2}, c_{oi2}, c_{jd2})/(\text{元}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	$c_{ij3}/(\text{元}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	$c_{ir}/(\text{元}\cdot\text{t}^{-1})$	t_{oi}/s	t_{jd}/s
取值	60	80	800	60	0.45	1.5	2.5	7 200	7 200
参数	$E_1/(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	$E_2/(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	$E_3/(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	$Q_{j1}/(\text{t}\cdot\text{d}^{-1})$	$Q_{j2}/(\text{t}\cdot\text{d}^{-1})$	$Q_{j3}/(\text{t}\cdot\text{d}^{-1})$	$H_i/(\text{t}\cdot\text{d}^{-1})$	$H_j/(\text{t}\cdot\text{d}^{-1})$	T_i/K
取值	0.08	0.12	0.15	15 000	1 500	5 000	10 000	15 000	273

注:由于公一公相较于公一铁和公一空的中转时间更少,在计算货损率时不考虑其中转时间,公一铁和公一空的中转时间均设置为 2 h。

由图 4 可知,没有一种可行的运输方案可以支配其他方案,即模型中计算得到的解是非支配解。由表 7 可知,在随机 OD 条件下,由于对运输成本、碳排放和货损率 3 个目标同时进行考虑,最优方案集中相应的值在一定范围内波动。最优方案集中对应的铁路市场份额的波动范围为 19.1%~24.8%,公路为 46.4%~56.7%,航空为 20.5%~28.8%。在同时考虑到运输成本、碳排放量、货损率的多个冲突目标下,铁路运输在当前冷链运输市场的市场份额与公路仍有显著差距。航空运输因受到运能限制,并且在运输成本、碳排放量的表现不佳,导致其市场份额较少。

3.3 灵敏度分析

3.3.1 运价补贴的灵敏度分析

为了提高铁路冷链运输的竞争力,运价补贴通常作为引导冷链货物运输公转铁,实现运输结构合理化的有效方式。在固定列车旅速为 $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的情况下,通过改变铁路运价补贴的份额比例(0~30%),参照财政部对中欧班列运价补贴的限制(2020 年不超过运费的 30%),采用自适应遗传-模拟退火算法,计算得到铁路市场份额与运价补贴间的关系,以及铁路、公路、航空市场份额的变化情况,如图 6 所示。

从图 6 可以得出,随着运价补贴从 0 逐步增加至 30%,铁路市场份额呈现出逐步上升的现象,其波动

表7 仿真结果

Tab.7 Simulation results

序号	OD总量/20 t	目标函数	运输成本/ 10^7 元	碳排放/t	货损率/%	市场份额/%		
						铁路	公路	航空
1	941	6.52	1.70	79 972	4.78	19.1	56.7	24.1
2	856	6.83	1.83	72 272	4.57	23.7	51.3	25.0
3	829	7.28	1.91	93 043	4.60	24.2	55.2	20.5
4	896	7.45	2.16	91 897	4.34	24.8	46.4	28.8
5	866	7.49	1.96	92 205	4.68	24.7	48.0	27.3

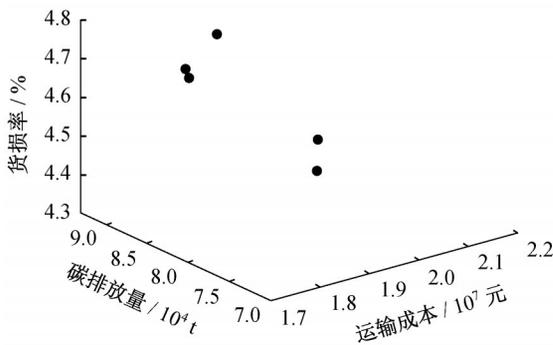


图4 随机OD下无补贴时的帕累托最优解集
Fig.4 Pareto optimal set of solutions without subsidies

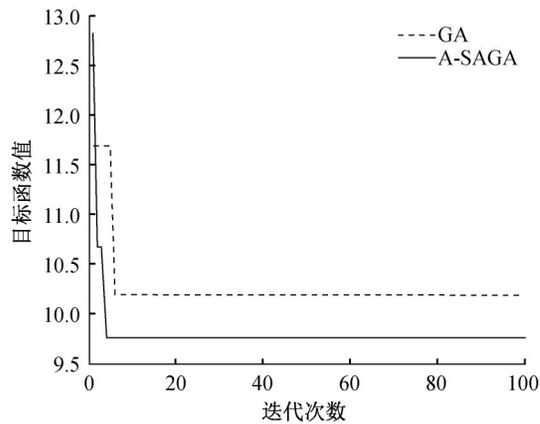


图5 A-SAGA和GA算法运行对比
Fig.5 Comparison of A-SAGA and GA algorithm operation under random OD

范围从无补贴时的19.1%~24.8%到最大补贴时的25.2%~27.8%。在铁路运价补贴份额为5%时,计算得到的运输方案中铁路市场份额的增加较为显著。在补贴10%、20%时,铁路市场份额的下限分别相较于补贴5%、15%时出现下降,主要原因是最优方案集同时考虑了成本、碳排放和货损率的影响。在铁路运价补贴下,采用铁路运输方式的成本减小,而在碳排放、货损率指标上没有变化,因此,图6给出最优方案集中铁路市场份额的区间,尽可能以最

少补贴获得铁路市场份额的高增长。

3.3.2 列车旅速的灵敏度分析

随着铁路冷链运输班列旅速得到提升,在无运价补贴的情况下,通过提高旅速($60\sim 120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$),得到旅速与铁路市场份额的之间的关系,如图7所示。

从图7可以得到,随着旅速从 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 增加至 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,铁路市场份额逐渐增加,波动范围从19.1%~24.8%增加至27.3%~32.8%。在较高旅速情况下,能够缩短铁路冷链班列的在途时间,从而降低货损率指标。置信水平为90%下最优运输方案集的结果显示,在旅速从 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 提高至 $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,铁路市场份额的增加显著,与旅速为 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的结果相当。

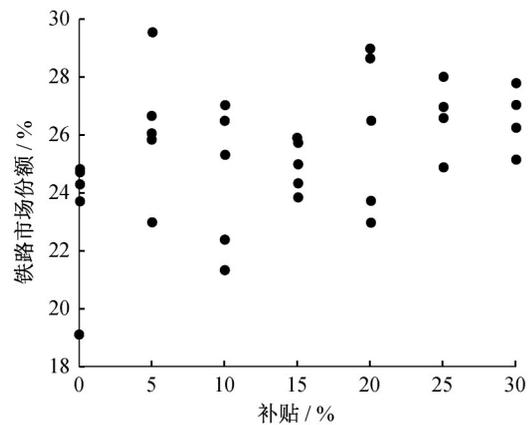


图6 运价补贴对铁路市场份额的影响
Fig.6 Effect of railway subsidy on railway market share

3.3.3 冷链货物品类的灵敏度分析

冷链运输货物中存在不同种类货物对运输时间的要求不同,在随机OD、无补贴、未提高铁路速度条件下,通过对活化能 E_a 的不同取值($106\sim 115\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$),确定不同运输时间敏感度的货物对冷链运输网络中铁路冷链物流的影响。其中 E_a 取值越小,对运输时间的敏感程度越高,如图8、9所示。

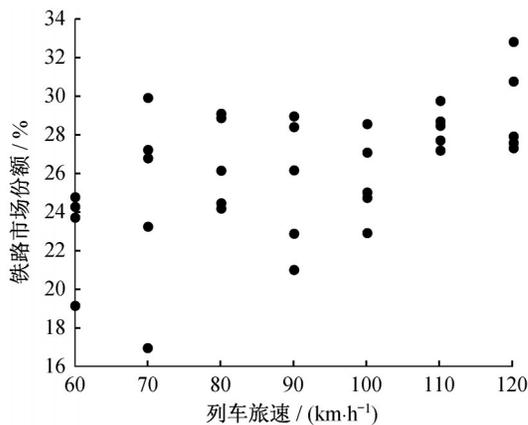


图 7 列车旅速对铁路市场份额的影响

Fig.7 Effect of railway speed on railway market share

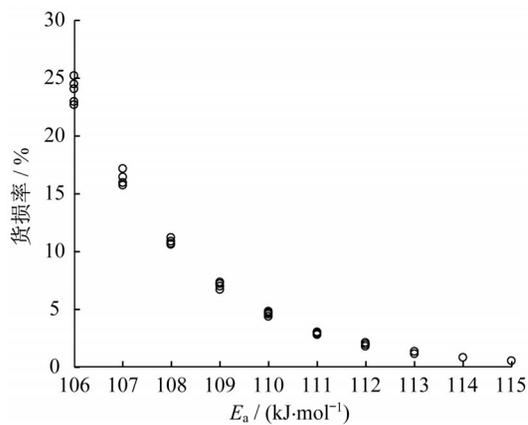


图 8 货物品类对货损率的影响

Fig.8 Effect of freight category on cargo damages rate

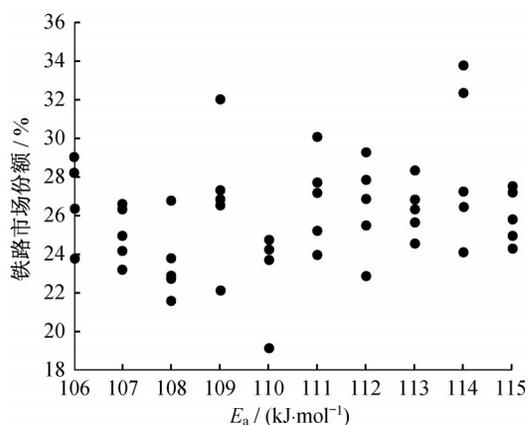


图 9 货物品类对铁路市场份额的影响

Fig.9 Effect of freight category on railway market share

从图 8 可知,在货损率指标方面,不同货物种类间存在很大差异,随着 E_a 取值的增加,其波动范围从 22.7%~25.2% 逐步下降至 0.49%~0.54%。由

图 9 可知,由于模型同时考虑运输成本、碳排放、货损率 3 个冲突目标进行优化求解,不同货物种类所对应的铁路市场份额的初始值(图 6、7 中最左侧数据)出现波动。由于铁路市场份额是基于求解冷链网络运输方案得到的,在求解运输方案时货损率的变化只是其中的一个目标,在模型中对以上 3 个冲突目标同时考虑时,不同运输时间敏感程度的货物所产生的货损率指标变化并不直接决定铁路市场份额的增减。因此,在机会约束规划模型下所求得的帕累托最优解集中,不同运输时间敏感程度的货物直接影响了货损率指标的变化以及铁路市场份额的初始值。

4 结论

本文考虑全程冷链运输的成本构成、碳排放量以及货损率,构建基于随机需求的铁路冷链物流网络优化模型,设计自适应遗传-模拟退火算法对优化模型进行仿真求解,结合冷链运输网络算例得出满足置信度水平 γ 为 0.9 下的最优运输方案,对运价补贴、列车旅速、货物品类进行了灵敏度分析,结论如下:

(1)通过对算例的仿真求解,验证了设计的自适应遗传-模拟退火算法的可行性,与传统的 GA 遗传算法相比,在收敛、求解精确性上均具有优势。

(2)在同时考虑运输成本、碳排放和货损率的多个冲突目标下,政府给予适当的运价补贴政策或通过提高铁路冷链班列旅速,均能够提高铁路冷链运输市场份额。从仿真算例结果可以得出,当采取 5% 的运价补贴时,或仅提高列车旅速至 70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,铁路市场份额的提升效果明显。

(3)在提升铁路冷链物流运输竞争力方面,运价补贴与开行冷链班列在一定程度上可以进行替代。对于运输条件限制的区域,可以采用运价补贴的方式促进冷链运输结构合理化;对于运输条件较好的区域,依靠提高列车旅速,能够达到预期的铁路冷链竞争力时,可取消运价补贴。

(4)在随机 OD、未补贴、未提速的条件下,由于同时考虑运输成本、碳排放、货损率 3 个目标,在各运输方式运量、物流中心处理能力限制的冷链网络运输方案中,不同运输时间敏感程度的货物直接影响了货损率指标的变化以及铁路市场份额的初始值。

此外,本研究在一些方面仍存在不足,如模型中

未考虑水运冷链运输,以及方案运行期间公路、航空冷链物流的运价、技术水平等变化的影响,模型设计时采用了多个假设条件,算法设计还有提升空间等。在未来对铁路冷链物流研究中,可以在模型设计时松弛部分假设条件;结合其他运输方式经营策略的改变研究铁路冷链运输的竞争力;同时,铁路班列运量大,为保证铁路冷链班列开行,优化货源组织及开行路线选择是后续研究的主要方向。

作者贡献声明:

鲁玉:文献综述,模型、算法设计,案例分析与论文写作。
徐行方:研究内容设定,指导案例分析,论文写作与修改。
尹传忠:研究内容设定,指导案例分析,论文写作。
李晨林:参与模型设计。
汤莲花:参与算法设计。

参考文献:

- [1] ZHANG G, HABENICHT W, SPIEB W E L. Improving the structure of deep frozen and chilled food chain with tabu search procedure[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 60(1):67.
- [2] LIN Q, ZHAO Q H, LEV B. Cold chain transportation decision in the vaccine supply chain [J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 283(1):182.
- [3] FANG Y, JIANG Y P, SUN L J, *et al.* Design of green cold chain networks for imported fresh agri-products in belt and road development [J]. *Sustainability*, 2018, 10(5):1572.
- [4] 张戎,陶学宗. 托运人货运服务选择行为模型研究述评[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(9):1384.
ZHANG Rong, TAO Xuezhong. Review of behavioral model for shippers' freight transport choice [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(9):1384.
- [5] 杨珍花,赖平仲,汤洋,等. 冷藏车多车型混合配送调度优化[J]. *系统工程*, 2015, 33(10):28.
YANG Zhenhua, LAI Pingzhong, TANG Yang, *et al.* Mix distribution dispatch optimization by multi-type refrigerated trucks [J]. *Systems Engineering*, 2015, 33(10):28.
- [6] YANG K, YANG L X, GAO Z Y. Planning and optimization of intermodal hub-and-spoke network under mixed uncertainty [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 95:248.
- [7] ZHANG W Y, WANG X F, YANG K. Uncertain multi-objective optimization for the water - rail - road intermodal transport system with consideration of hub operation process using a memetic algorithm [J]. *Soft Computing*, 2019, 24(5):3695.
- [8] SUN Y. A fuzzy multi-objective routing model for managing hazardous materials door-to-door transportation in the road-rail multimodal network with uncertain demand and improved service level [J]. *IEEE Access*, 2020, 8:172808.
- [9] 马向国,刘同娟,杨平哲,等. 基于随机需求的冷链物流车辆路径优化模型[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(8):1824.
MA Xianguo, LIU Tongjuan, YANG Pingzhe, *et al.* Vehicle routing optimization model of cold chain logistics based on stochastic demand [J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(8):1824.
- [10] 李珺,杨斌,朱小林. 绿色多式联运随机优化策略[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(4):11.
LI Jun, YANG Bin, ZHU Xiaolin. A green intermodal transportation stochastic optimization strategy [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(4):11.
- [11] 赵宇哲,段浩,张连如. 不确定OD需求下的轴-辐式集装箱海运网络设计[J]. *系统工程*, 2014(4):21.
ZHAO Yuzhe, DUAN Hao, ZHANG Lianru. Hub-and-spoke container shipping network design under uncertain OD demands [J]. *Systems Engineering*, 2014(4):21.
- [12] 邓亚娟,陈小鸿,杨超. 需求不确定的枢纽辐射式航线网络设计[J]. *交通运输工程学报*, 2009, 9(6):69.
DENG Yajuan, CHEN Xiaohong, YANG Chao. Hub-and-spoke airline network design with uncertainty demand [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, 9(6):69.
- [13] 刘松,邵毅明,彭勇. 碳排放限制下的冷藏集装箱多式联运路径优化[J]. *应用数学和力学*, 2020, 41(3):1.
LIU Song, SHAO Yiming, PENG Yong. Optimization of multimodal transport path for refrigerated container under carbon emission restriction [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2020, 41(3):1.
- [14] 李海英,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.
LI Haiying, CAO Yue, LIAO Zhengwen, *et al.* Optimization of comprehensive express transportation scheme based on service network [J]. *China Railway Science*, 2020, 41(4):136.
- [15] 刘宇,吕郢康,周梅芳. 投入产出法测算CO₂排放量及其影响因素分析[J]. *中国人口资源与环境*, 2015, 25(9):21.
LIU Yu, LV Yingkang, ZHOU Meifang. Analysis on the influence factors of computing CO₂ emission by input-output method [J]. *China Population Resources and Environment*, 2015, 25(9):21.