

基于模糊机会约束规划和鲁棒优化的 绿色多式联运路径优化研究

柳伍生,肖必弘

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】探究在运输时间、中转时间、等待时间和运输货损率混合不确定条件下的绿色多式联运路径优化问题,为绿色多式联运路径决策提供理论依据。【方法】在考虑运输过程中碳排放和噪声污染的基础上,以最小化运输成本、运输时间、碳排放量、噪声污染以及货损量为目标建立不确定条件下的绿色多式联运路径优化模型,并将其扩展为模糊机会约束模型及鲁棒优化模型来处理不确定参数。使用 MATLAB 编程并调用 CPLEX 对算例进行求解,得到多式联运路径优化方案。对置信水平进行灵敏度分析,并将鲁棒解与确定条件下的最优解进行比较,验证所建模型的鲁棒性。【结果】将优化方案的计算结果与 5 个目标函数的最优值进行比较后发现:由模型所得最优运输方案的计算结果与各目标函数最优值之间的相对距离分别为 0.096 4、0.027 1、0.194 6、0.018 4、0.032 7,均接近最优值。【结论】本研究所建模型能降低多式联运的决策风险,也能为决策提供合理、有效的依据。

关键词: 绿色多式联运;路径优化模型;模糊机会约束规划;鲁棒优化模型

中图分类号: U116.2

文献标志码: A

Research on green multimodal transportation route optimization based on fuzzy chance-constrained programming and robust optimization

LIU Wu-sheng, XIAO Bi-hong

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of
Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] The paper explored the problem of green multimodal transportation route optimization under mixed uncertainties of the transport time, transit time, waiting time and freight damage rate to provide theoretical basis for green multimodal transport route decision. [Methods] Based on the consideration of carbon emission and noise pollution in the transport process, aiming to minimize transportation cost, transportation time, carbon emission, noise pollution and cargo damage, a green multimodal transportation route optimization model under uncertainties was established, and the uncertain parameters were

收稿日期:2021-08-03

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40306);长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(kfj180401)

通信作者:柳伍生(1976-),男,副教授,主要从事交通行为不确定分析、综合交通枢纽规划与设计等方面的研究。

E-mail: lwusheng@163.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

processed by extending the model to fuzzy chance-constrained model and robust optimization model. Programming with MATLAB and calling CPLEX to solve the example, the multimodal transportation route optimization scheme was obtained. The sensitivity of the confidence level was analyzed and the robust solution was compared with the optimal solution under certainties to verify the robustness of the model. [Findings] The comparison between calculation results of the optimization scheme and the optimal values of the five objective functions shows that the relative distances between the calculation results of the optimal transport scheme and the optimal values of the objective functions are 0.096 4, 0.027 1, 0.194 6, 0.018 4 and 0.032 7 respectively, namely, the calculation results are close to the optimal values. [Conclusions] The model proposed in the paper can reduce the decision-making risk and provide reasonable and effective basis for decision-making.

Key words: green multimodal transportation; route optimization model; fuzzy chance-constrained programming; robust optimization model

多式联运作为一种高效的货物运输组织模式,能够调整运输结构、促进节能减排,是实现绿色物流、低碳运输的有效手段。因此,多式联运将作为重要贡献者推动我国实现“碳达峰”和“碳中和”的“双碳”目标,发展绿色多式联运也必将成为交通运输行业的趋势。绿色多式联运网络具有复杂性的特点,且时间和货损率等均存在着不确定性,所以在考虑不确定性影响的基础上对运输方式和路径进行合理规划能够提高运输服务水平,同时对实现可持续发展具有重要意义。

一些学者在不同情景下构建模型进行绿色多式联运的优化研究,且多数情况下假设问题所处的环境是确定的。GRÄBENER 等^[1]、RESAT 等^[2]建立了以运输成本和运输时间为目标的多目标多式联运路径规划模型。周爱莲等^[3]以总配送时间最短为目标构建了混合整数规划模型。雷定猷等^[4]、代存杰等^[5]分别针对大宗货物及危险品,以最短运输时间、最小运输成本和最低运输风险为目标函数建立了多目标多式联运路径优化模型。从绿色多式联运路径优化的角度出发,DENG 等^[6]在多式联运的研究中考虑运输过程中的碳排放,并以总成本和碳排放量最小为目标,建立了混合时间窗约束下的多目标绿色多式联运最优路径模型。此外,一些学者围绕不确定性规划理论对多式联运问题展开了研究,例如,在时间的不确定性方面,LIU 等^[7]、UDDIN 等^[8]考虑多式联运时间的不确定性,采用区间数据对运输时间

进行描述,并采用鲁棒优化方法对区间数据进行处理。张得志等^[9]针对节点之间运输时间的单一不确定性及客户服务时间窗约束等,在最大化客户满意度的情况下构建多式联运优化模型,充分考虑多式联运过程中的多种不确定性。在成本的不确定性方面,ABBASSI 等^[10]考虑多式联运过程中运输成本存在的不确定性,提出了鲁棒优化模型。JIANG 等^[11]对区域多式联运物流网络的设计问题进行了研究,充分考虑了网络中的碳排放和需求的不确定性,建立了双层规划模型,并提出了一种改进的可调鲁棒优化框架来解决不确定性。在混合不确定性研究方面,李孟良等^[12]将灾后应急物资作为多式联运的运输对象,在满足优先需求的前提下,提出了紧急救援总成本最低、运输时间最短、损失最小的运输方案,并运用鲁棒优化思想建立了一个应急物资多式联运规划模型。尹传忠等^[13]考虑了在途时间和中转时间等的不确定性,将模型扩展为随机机会约束规划模型,并将蒙特卡洛模拟和 NSGA-II 相结合对模型进行求解。陈汨梨等^[14]将最小运输总成本作为模型的优化目标,考虑货运的速度和转运时间的不确定性,将货物准时送达概率设置为模型的机会约束,采用 K 短路算法对算例进行求解。李珺等^[15]、DEMIR 等^[16]则对绿色多式联运网络设计问题进行了研究,在考虑碳排放的基础上考虑运输时间和需求等的不确定性,建立了以成本、时间和碳排放量最小为目标的多式联运随机优化模型,并探

讨了不确定性因素对路径优化结果产生的影响。综合对比现有的研究成果发现,这些研究大多在参数确定的情况下以成本或时间为对象建立优化模型,很少考虑运输过程中存在的单一不确定性,但实际上多式联运过程会受到多种不确定因素的共同影响。

鉴于此,本研究综合考虑多式联运网络中运输时间、转运时间、转运等待时间以及不同运输方式货损的不确定性,以成本、时间、碳排放量、噪声污染以及运输货损最小为目标,建立了多个不确定条件下的多目标绿色多式联运路径优化模型,利用模糊机会约束规划和鲁棒优化的相关理论处理模型中的不确定参数对模型进行扩展,并通过算例验证了模型的有效性和鲁棒性,为多式联运的路径决策提供依据。

1 绿色多式联运规划模型的建立

1.1 问题描述及假设

本研究探讨的绿色多式联运问题为:通过多种运输方式、多条运输路径、多个中转节点,考虑多项不确定因素,以最短的时间、最小的成本、最小的环境污染从起点将货物运输至终点的最短路问题。在实际运输过程中,不同运输方式的运输时间、换装时间以及等待换装时间均具有随机性。本研究在此前提下,研究运输过程中的成本、时间、货损、碳排放以及噪声污染,得到最优的多式联运方案。研究过程遵循以下假设:

- ① 运量无法分割,货物不能通过两条线路运输,且在两个相邻节点之间只能选择一种方式进行运输;
- ② 货物只在节点处转换运输方式,并且转换只发生在不同运输方式之间,相同的运输方式不需要进行转换;
- ③ 3种运输方式均不受运输能力和出发时刻的限制;
- ④ 忽略仓储、装卸等运输之外的环节产生的碳排放量。

1.2 参数说明

将多式联运网络抽象为有向图 $G = (N, E, M)$, 其中, N 为节点集合(o 为起点, d 为终点, 其余为中转节点); E 为运输路径集合; M 为运输方式集合。模型参数及变量见表 1。

表 1 模型参数及变量

Table 1 Parameters and variables of the model	
参数或变量	含义
\tilde{t}_{ijm}	用运输方式 m 将货物从节点 i 运输到 j 所需要的时间, h
d_{ijm}	用运输方式 m 将货物从节点 i 运输到 j 的运输距离, km
c_m	运输方式 m 的单位运输成本, 元/(t · km)
r_{imn}	在节点 i 将运输方式 m 转换为 n 的单位转运费用, 元/t
\tilde{s}_{imn}	在节点 i 将运输方式 m 转换为 n 的转换时间, h
\tilde{w}_{imn}	在节点 i 将运输方式 m 转换为 n 的转换等待时间, h
e_m	运输方式 m 产生的碳排放量, kg/km
e'_{mn}	从运输方式 m 转换为 n 的碳排放量, kg/t
L_m	运输方式 m 产生的等效连续 A 声级, dB(A)
$\tilde{\theta}_m$	运输方式 m 的货损率
q	多式联运的货物量, t
x_{ijm}	0—1 决策变量, 将货物由运输方式 m 从节点 i 运输至 j 时, 该值为 1, 否则为 0
y_{imn}	0—1 决策变量, 将货物从节点 i 由运输方式 m 转换为 n 时, 该值为 1, 否则为 0

1.3 模型的建立

1) 目标函数一: 运输总成本最小。

多式联运全过程的成本包括节点之间运输产生的成本和节点处转运产生的成本。表示运输总成本最小的目标函数为:

$$\min \omega_1 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} q \cdot c_m \cdot d_{ijm} \cdot x_{ijm} + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} q \cdot r_{imn} \cdot y_{imn} \tag{1}$$

其中, 第一项为在节点之间进行货物运输时产生的运输费用, 第二项为在节点进行运输方式转换时产生的转运费用。

2) 目标函数二: 总运输时间最短。

多式联运过程所花费的时间包括节点之间的运输时间、节点处运输方式转换所需的转运时间以及等待转运作业开始的时间。表示总运输时间最短的目标函数为:

$$\min \omega_2 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} \tilde{t}_{ijm} \cdot x_{ijm} + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} \tilde{s}_{imn} \cdot y_{imn} + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} \tilde{w}_{imn} \cdot y_{imn} \tag{2}$$

其中, 第一项为节点之间的运输时间, 第二项为节

点处发生运输方式转换时的转运时间,第三项为节点处发生运输方式转换时的等待时间。

3) 目标函数三:运输过程中产生的碳排放量最少。

对于多式联运,不同的运输方式在运输过程中以及转运过程中都会产生碳排放。参考文献[17]可知,公路、铁路、水路运输对柴油的消耗量分别为 0.014 8、0.002 5 和 0.005 6 kg/(t·km),柴油的碳排放因子为 0.074 1 kg/MJ,燃油热值为 43 MJ/kg,由此可得这 3 种运输方式的碳排放量分别为:

$$e_1 = 0.047\ 2\ \text{kg}/(\text{t} \cdot \text{km}) \quad (3)$$

$$e_2 = 0.008\ 0\ \text{kg}/(\text{t} \cdot \text{km}) \quad (4)$$

$$e_3 = 0.017\ 8\ \text{kg}/(\text{t} \cdot \text{km}) \quad (5)$$

因此,表示碳排放量最少的目标函数为:

$$\min \omega_3 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} q \cdot d_{ijm} \cdot e_m \cdot x_{ijm} + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} q \cdot e'_{mn} \cdot y_{imn} \quad (6)$$

其中,第一项为不同运输方式运输过程中产生的碳排放总量,第二项为节点转运过程中产生的碳排放总量。

4) 目标函数四:运输过程中产生的噪声污染最小。

货物运输过程中不同的运输方式会产生不同程度的噪声污染,不同运输工具在不同的速度及参考距离下产生的等效连续 A 声级也均不相同。本研究用不同运输方式产生的等效连续 A 声级与时间的乘积来量化噪声污染。表示噪声污染总量最小的目标函数为:

$$\min \omega_4 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} L_m \cdot \tilde{t}_{ijm} \cdot x_{ijm} \quad (7)$$

5) 目标函数五:总货损最小。

由于不同运输方式的特性存在差异,其在运输过程中的货损也不尽相同。表示总货损最小的目标函数为:

$$\min \omega_5 = \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} q \cdot \tilde{\theta}_m \cdot x_{ijm} \quad (8)$$

6) 多目标函数处理。

本研究将具有不同含义及量纲的目标函数值映射至 $[0, 1]$ 区间,即可将 5 个具有不同量纲的目标函数值转化为具有统一量纲的函数值,从而

将多目标问题转换为单目标问题。

将各目标函数进行归一化的公式为:

$$f_i = \frac{\omega_i - \omega_i^{\min}}{\omega_i^{\max} - \omega_i^{\min}} \quad (9)$$

式中: ω_i 为式(1)~(2)、(6)~(8)计算出来的第 i 个目标函数值; ω_i^{\min} 、 ω_i^{\max} 分别为目标函数 i 的最小值和最大值, $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。

对各目标函数的归一化值与权重的乘积进行求和即可得到总目标函数。因此,绿色多式联运路径优化模型可表示为:

$$\min f = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 + \lambda_4 f_4 + \lambda_5 f_5 \quad (10)$$

s. t.

$$\sum_{i \in N} \sum_{m \in M} x_{oim} - \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} x_{iom} = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{m \in M} x_{ijm} = \sum_{h \in N} \sum_{m \in M} x_{jhm}, \forall j \in N/(o \cup d) \quad (12)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{m \in M} x_{idm} - \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} x_{dim} = 1 \quad (13)$$

$$u_i - u_j + n \sum_{m \in M} x_{ijm} \leq n - 1, \forall i, j \in N \quad (14)$$

$$y_{jmn} = \sum_{i \in N} x_{ijm} \cdot \sum_{h \in N} x_{jhm}, \forall m \neq n, j \in N \quad (15)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{ijm} \leq 1, \forall i \in N \quad (16)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{n \in M} y_{imn} \leq 1, \forall i \in N \quad (17)$$

$$x_{iim} = 0, \forall i \in N, m \in M \quad (18)$$

$$y_{imm} = 0, \forall i \in N, m \in M \quad (19)$$

$$x_{ijm}, y_{imn} \in \{0, 1\}, i, j \in N; m, n \in M \quad (20)$$

其中,式(10)为总目标函数, λ_i 表示第 i 个目标函数的权重;式(11)~(13)表示从起点出发最终抵达终点的运输过程具有连续性;式(14)为避免闭回路的约束, u_i 代表路径中节点 i 的序号;式(15)表示因节点前后运输方式不同,需在节点内进行运输方式的转换;式(16)表示在节点之间最多只能进行一次运输;式(17)表示在节点内最多只能进行一次运输方式的转换;式(18)表示运输只能在不同节点之间进行;式(19)表示需要更换运输方式进行转运;式(20)为决策变量约束条件。

2 不确定参数的处理

2.1 时间的不确定性

假设 \tilde{c} 为三角模糊数,且 $\tilde{c} = [c_L, c_M, c_U]$ 。其中, c_L 为模糊数 \tilde{c} 的保守估计值, c_M 为模糊数 \tilde{c} 最可能的估计值, c_U 为模糊数 \tilde{c} 的最乐观估计值,且隶属度函数为:

$$\mu_{\tilde{c}}(x) = \begin{cases} 0, & c_M < x < c_L \\ \frac{x - c_L}{c_M - c_L}, & c_L \leq x < c_M \\ \frac{c_U - x}{c_U - c_M}, & c_M < x < c_U \\ 1, & x = c_M \end{cases} \quad (21)$$

根据模糊数可能性理论, $p\{\tilde{a} \leq b\}$ 表示模糊数 \tilde{a} 小于等于清晰数 b 的概率。对于给定的置信水平 α , 当且仅当清晰数 $a \geq (1 - \alpha)c_L + \alpha c_M$ 时,有 $p\{\tilde{c} \leq a\} \geq \alpha$ 成立;当且仅当清晰数 $a \leq (1 - \alpha)c_U + \alpha c_M$ 时,有 $p\{\tilde{c} \geq a\} \geq \alpha$ 成立;当且仅当清晰数同时满足 $a \geq (1 - \alpha)c_L + \alpha c_M$ 与 $a \leq (1 - \alpha)c_U + \alpha c_M$ 时,有 $p\{\tilde{c} = a\} \geq \alpha$ 成立。

在多式联运过程中,运输时间、转运时间以及转运等待时间都具有不确定性。借鉴学者们的经验^[18-19],利用三角模糊数描述时间参数的模糊性,并根据含有模糊参数的机会约束模型对模型中的式(2)和式(7)进行扩展,得到:

$$\min \omega_2 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} t'_{ijm} + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} s'_{imn} + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} \omega'_{imn} \quad (22)$$

$$\min \omega_4 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} L_m \cdot t'_{ijm} \quad (23)$$

s. t.

$$p\left\{ \left[\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} \tilde{t}_{ijm} \cdot x_{ijm} + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} \tilde{s}_{imn} \cdot y_{imn} + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} \tilde{\omega}_{imn} \cdot y_{imn} \right] \leq \omega_2 \right\} \geq \alpha_1 \quad (24)$$

$$p\left\{ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} L_m \cdot \tilde{t}_{ijm} \cdot x_{ijm} \leq \omega_4 \right\} \geq \alpha_1 \quad (25)$$

$$p\{t'_{ijm} = \tilde{t}_{ijm} \cdot x_{ijm}\} \geq \alpha_2 \quad (26)$$

$$p\{s'_{imn} = \tilde{s}_{imn} \cdot y_{imn}\} \geq \alpha_2 \quad (27)$$

$$p\{\omega'_{imn} = \tilde{\omega}_{imn} \cdot y_{imn}\} \geq \alpha_2 \quad (28)$$

将以上约束条件进行等价转化,得到:

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} [(1 - \alpha_1)t_{ijmL} + \alpha_1 t_{ijmM}] \cdot x_{ijm} + \\ & \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} [(1 - \alpha_1)s_{imnL} + \alpha_1 s_{imnM}] \cdot y_{imn} + \\ & \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} [(1 - \alpha_1)\omega_{imnL} + \alpha_1 \omega_{imnM}] \cdot y_{imn} \leq \omega_2 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} [(1 - \alpha_1)t_{ijmL} + \alpha_1 t_{ijmM}] \cdot \\ & L_m \cdot x_{ijm} \leq \omega_4 \end{aligned} \quad (30)$$

$$[(1 - \alpha_2)t_{ijmL} + \alpha_2 t_{ijmM}] \cdot x_{ijm} \leq t'_{ijm} \quad (31)$$

$$[(1 - \alpha_2)t_{ijmU} + \alpha_2 t_{ijmM}] \cdot x_{ijm} \geq t'_{ijm} \quad (32)$$

$$[(1 - \alpha_2)s_{imnL} + \alpha_2 s_{imnM}] \cdot y_{imn} \leq s'_{imn} \quad (33)$$

$$[(1 - \alpha_2)s_{imnU} + \alpha_2 s_{imnM}] \cdot y_{imn} \geq s'_{imn} \quad (34)$$

$$[(1 - \alpha_2)\omega_{imnL} + \alpha_2 \omega_{imnM}] \cdot y_{imn} \leq \omega'_{imn} \quad (35)$$

$$[(1 - \alpha_2)\omega_{imnU} + \alpha_2 \omega_{imnM}] \cdot y_{imn} \geq \omega'_{imn} \quad (36)$$

式中: t'_{ijm} 、 s'_{imn} 、 ω'_{imn} 为实数变量,分别为模糊数 \tilde{t}_{ijm} 、 \tilde{s}_{imn} 、 $\tilde{\omega}_{imn}$ 的取值; α_1 为目标函数的置信水平; α_2 为新增约束条件的置信水平。

2.2 货损率的不确定性

为了研究货损率不确定性的影响,运用鲁棒优化的思想对模型进行转化。本研究假设不同情况下各运输方式的货损率不同,即存在 S 种情景,不同情景下货损率的取值不同。假设在情景 s 下运输方式 m 的货损率为 θ'_{ms} ,情景 s 发生的概率为 p_s 。据此可对式(8)进行转化,将确定性的目标函数五转化为不同情景下的鲁棒优化偏好模型,即:

$$\begin{aligned} \min \omega_5 = & \sum_{s \in S} p_s g_s + \\ & \lambda \sum_{s \in S} p_s \left(g_s - \sum_{s \in S} p_s g_s + 2\varphi_s \right) \end{aligned} \quad (37)$$

式中:

$$g_s = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} q \cdot \theta'_{ms} \cdot x_{ijm} \quad (38)$$

s. t.

$$g_s \leq (1 + \gamma) g'_s, \forall s \in S \quad (39)$$

$$g_s - \sum_{s \in S} p_s g_s + \varphi_s \geq 0, \forall s \in S \quad (40)$$

$$\varphi_s \geq 0, \forall s \in S \quad (41)$$

式(37)为转化后的目标函数,第一项为总货损的期望值,第二项为总货损偏差值的总和,引入实数变量 φ_s 后,该项为正,这样可以保证模型鲁棒解的稳定性和可靠性;式(39)中, g'_s 为情景 s 下目标函数的最优值,此约束可以使鲁棒解接近最优解, γ 为允许鲁棒解偏离最优解的范围;式(40)为鲁棒优化约束条件;式(41)为参数约束条件。

根据以上的转化与推导,得到了最终的多式联运路径规划模型,其中,式(10)为总目标函数,式(1)、(6)、(22)、(23)、(37)为子目标函数,式(11)~(20)、(29)~(36)、(39)~(41)为约束条件。

3 算例验证

一个含有公路、铁路、水路 3 种运输方式的多式联运网络,共有 23 个节点、36 条运输路径,起点和终点分别为 1 号和 23 号节点,如图 1 所示。该

网络各节点之间的运输距离及运输时间见表 2。通过查阅相关文献可知,3 种运输方式在正常运行中产生的等效连续 A 声级分别为 93.83、87.64 和 83.01 dB(A),运输需求量 q 为 100 t。假定决策者将成本、时间作为主要考虑因素,将货损量作为次要考虑因素,将碳排放及噪声污染作为一般考虑因素,同时决策者比较保守,则各子目标函数的权重分别取为 0.3、0.3、0.1、0.1、0.2,置信度 α_1 、 α_2 分别取为 0.9、0.8。

利用 MATLAB 编程并调用 CPLEX 对上述算例进行求解,得到 5 个子目标函数的最小值和最大值,见表 3,最优解见表 4。

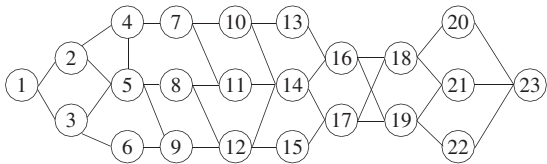


图 1 多式联运网络

Fig. 1 Multimodal transport network

表 2 不同运输方式下各节点之间的运输距离及运输时间

Table 2 Distances and durations of transportation between nodes for different transport modes

节点对	运输距离/km			运输时间/h		
	公路	铁路	水路	公路	铁路	水路
1—2	280	—	—	(2.7,2.9,3.1)	—	—
1—3	320	370	—	(3.1,3.5,3.5)	(5.0,5.4,5.4)	—
2—4	310	340	380	(2.8,3.3,3.8)	(4.5,5.0,5.1)	(10.5,10.9,11.3)
2—5	310	—	—	(3.2,3.2,3.6)	—	—
3—5	310	350	—	(2.8,3.4,3.6)	(4.7,5.0,5.3)	—
3—6	290	—	—	(2.7,3.2,3.3)	—	—
4—5	280	—	—	(2.7,2.8,3.2)	—	—
4—7	320	380	390	(3.1,3.4,3.7)	(5.1,5.3,5.9)	(10.7,11.1,11.5)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
17—19	430	395	240	(3.8,4.4,4.8)	(5.1,5.6,5.9)	(5.8,6.5,6.9)
18—20	365	300	—	(3.3,3.8,4.2)	(3.7,4.3,4.9)	—
18—21	365	345	—	(3.1,3.7,4.3)	(4.1,4.9,5.6)	—
19—21	390	320	—	(3.8,4.1,4.5)	(4.2,4.6,5.2)	—
19—22	340	330	—	(3.2,3.6,4.2)	(3.9,4.6,4.9)	—
20—23	400	295	—	(3.6,4.1,4.6)	(3.8,4.2,4.8)	—
21—23	410	375	—	(3.6,4.2,4.9)	(4.8,5.3,5.6)	—
22—23	315	330	—	(3.0,3.3,3.7)	(4.2,4.6,5.0)	—

表 3 5 个子目标函数的最大值和最小值

项目	子目标函数值				
	成本/元	时间/h	碳排放量/kg	噪声污染/[dB(A)·h]	货损/t
最小值	214 342.0	22.3	2 389.8	2 251.8	0.83
最大值	862 968.2	135.9	31 869.8	11 840.7	3.10

表 4 5 个目标函数的最优解

Table 4 Optimal solutions of the five objective functions

最优运输方案	成本/元	时间/h	碳排放量/kg	噪声污染/[dB(A)·h]	货损/t
	290 328.0	27.4	6 812.4	2 412.2	0.89

根据式(9)可求得表 4 中运输方案的 5 个子目标函数的归一化值,分别为 0.096 4、0.027 1、0.194 6、0.018 4、0.032 7,说明在该运输方案中,5 个子目标函数值与各自最优值的相对距离都较小。因此,该运输方案不仅能保证运输成本较低,也能迅速、环保、安全地将货物运输至终点。

为研究时间的不确定性对优化结果的影响,对 α_1 、 α_2 在 $[0.6, 1.0]$ 区间内以 0.1 为增幅进行取值,计算最优运输方案的总运输时间,结果如图 2 所示。

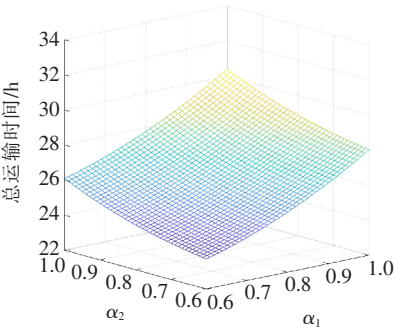


图 2 总运输时间与置信水平的关系

Fig. 2 Relationship between total transportation duration and confidence level

由图 2 可以看出,在各子目标函数的权重一定的情况下,提高置信水平会导致运输总时间增长,且随着置信水平的增大,总运输时间的增幅也在变大。当置信水平 α_1 、 α_2 较低时,模型约束条件的要求较宽松,时间不确定性参数的取值范围较大,故最优解中总运输时间较短,但同时风险较

大。随着置信水平的增大,模型对约束条件及目标函数的要求变得严格,不确定性参数的变化范围也愈发狭窄,故总运输时间的增幅变大,但此时最优解的可信度更高。运输决策者根据自身的决策偏好和风险接受能力设定置信水平和目标函数权重能得到更具针对性的优化方案,这将对决策者的决策具有重要的指导意义。

为了进一步研究所建模型的鲁棒性,设定 3 种运输情景:① 运输方案为 1—3—5—8—12—15—17—18—20—23,运输方式为公—公—公—公—铁—铁—水—铁—铁;② 运输方案为 1—2—5—9—12—14—16—19—21—23,运输方式采用公—公—公—公—公—公—铁—公—公;③ 运输方案为 1—3—6—9—12—15—17—18—20—23,运输方式为铁—铁—公—铁—铁—铁—水—铁—公。将这 3 种运输情景下的货损率分别代入确定性模型,计算出相应的货损最优值,并与鲁棒优化模型的货损最优值进行比较,在 $[100, 200]$ t 区间内以 10 t 为增幅进行货运量取值,分析货运量与货损量的关系,结果如图 3 所示。

分析图 3 可以发现,若运输情景发生变化,最优解也会随之改变,原情景下的最优解不再是新情景下的最优解,当货运量一定时,各情景下的货损最优值各不相同。货损与货运量呈正相关关系,且当货运量增加时,不同情景下货损的变化幅度也有所不同。鲁棒模型综合考虑了并能够适用于各种不确定性情景,同时也能使目标函数达到

最优值,所以考虑了不确定性情景的鲁棒解能较好地降低由于不确定性因素所带来的多式联运方案的决策风险,为企业管理者提供决策依据。

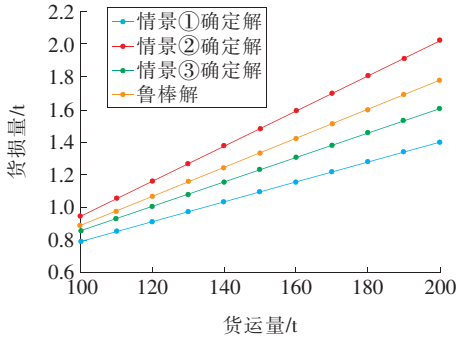


图 3 货运量与货损量的关系

Fig. 3 Relationship between cargo volume and cargo damage

4 结论

1) 针对多式联运路径规划问题,考虑了运输过程中的碳排放和噪声污染,以及时间和货损的不确定性,以运输成本、时间、货损和环境污染为目标建立了多目标绿色多式联运路径规划模型。

2) 针对模型中存在的确定性因素,通过引入三角模糊数描述运输时间的不确定性,并根据模糊机会约束规划对所建模型进行扩展。采用不同情景集表示货损率的不确定性,根据基于情景集的鲁棒优化思想对以货损为目标函数的模型进行转换。

3) 调用 CPLEX 对算例进行求解,得到了综合最优的运输方案。在各子目标函数的权重一定的情况下,提高置信水平,总运输时间会随之增长。随着置信水平的继续增大,模型对约束条件及目标函数的要求变得严格,总运输时间增长幅度变大,但此时最优解的可信度更高。根据运输决策者的决策偏好设定的置信水平和目标函数的权重能得到具有针对性的优化方案,这将对决策者的决策具有重要指导意义。将模型最优解与不同确定情景下的最优解进行比较,认为模型最优解充分考虑了各种不确定性情景,能够降低运输网络中存在的各种不确定性所带来的决策风险,可为多式联运路径规划决策提供一定的参考。

〔参考文献〕

[1] GRÄBENER T,BERRO A,DUTHEN Y. Time dependent multiobjective best path for multimodal urban routing[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics,2010,36:487-494.

[2] RESAT H G,TURKAY M. Design and operation of intermodal transportation network in the Marmara region of Turkey[J]. Transportation Research Part E:Logistics and Transportation,2015,83:16-33.

[3] 周爱莲,蒋利,侯夏杰. 应急物流无人机配送线路优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(2):54-60.

ZHOU Ai-lian,JIANG Li,HOU Xia-jie. Optimazation of UAV distribution routes in emergency logistics[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science),2020,17(2):54-60.

[4] 雷定猷,游伟,张英贵,等. 长大货物多式联运路径优化模型与算法[J]. 交通运输工程学报,2014,14(1):75-83.

LEI Ding-you,YOU Wei,ZHANG Ying-gui, et al. Optimization model and algorithm for multimodal transport path of long and large goods[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1):75-83.

[5] 代存杰,李引珍,马昌喜,等. 考虑风险分布特征的危险品运输路径优化[J]. 中国公路学报,2018,31(4):330-342.

DAI Cun-jie, LI Yin-zheng, MA Chang-xi, et al. Transportation path optimization for hazardous materials considering characteristics of risk distribution [J]. China Journal of Highway and Transport,2018,31(4):330-342.

[6] DENG X P,CHEN L,TIAN S H. Research on multimodal transport path optimization with mixed time windows constraints[J]. International Core Journal of Engineering,2020,6(3):125-129.

[7] LIU S,PENG Y,SONG Q K,et al. The robust shortest path problem for multimodal transportation considering timetable with interval data[J]. Systems Science & Control Engineering,2018,6(2):68-78.

[8] UDDIN M, HUYNH N. Model for collaboration among carriers to reduce empty container truck trips [J]. Information,2020,11(8):377.

[9] 张得志,李双艳. 不确定环境下协同运输优化模型及

其求解算法[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(4): 116-120.

ZHANG De-zhi, LI Shuang-yan. An optimization model for coordination transportation and its solution algorithm under uncertain environment[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(4): 116-120.

[10] ABBASSI A, AHMED E H A, BOUKACHOUR J. Robust optimisation of the intermodal freight transport problem: modeling and solving with an efficient hybrid approach[J]. Journal of Computational Science, 2019, 30: 127-142.

[11] JIANG J H, ZHANG D Z, MENG Q, et al. Regional multimodal logistics network design considering demand uncertainty and CO₂ emission reduction target: a system-optimization approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119304.

[12] 李孟良, 王喜富, 孙全欣, 等. 基于鲁棒优化的应急物资多式联运调配策略研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(7): 1-9.

LI Meng-liang, WANG Xi-fu, SUN Quan-xin, et al. Research on allocation strategies of multimodal transportation for emergency resources based on robust optimization[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(7): 1-9.

[13] 尹传忠, 方颖蓉, 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): 1 595-1 603.

YIN Chuan-zhong, FANG Hao-rong, WU Zhong-kai, et al. Multi-objective optimization for multimodal transport based on stochastic chance-constrained programming[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(6): 1 595-1 603.

[14] 陈汨梨, 赵孝进, 邓夕贵, 等. 不确定条件下的多式联运路径优化[J]. 公路交通科技, 2021, 38(1): 143-150, 158.

CHEN Mi-li, ZHAO Xiao-jin, DENG Xi-gui, et al. Multimodal transport path optimization under uncertain conditions [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(1): 143-150, 158.

[15] 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, 27.

LI Jun, YANG Bin, ZHU Xiao-lin. Path optimization of green multimodal transportation under mixed uncertainties[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(4): 13-19, 27.

[16] 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.

[17] 张电, 孙源泽. 考虑碳排放的连锁零售企业配送路径优化研究[J]. 公路与汽运, 2019(6): 47-51.

ZHANG Dian, SUN Yuan-ze. Research on distribution route optimization of chain retail enterprises considering carbon emission[J]. Highways & Automotive Applications, 2019(6): 47-51.

[18] 贺剑, 柳伍生, 周向栋, 等. 区间阻抗下的网约车合乘鲁棒有效路径[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(3): 41-47.

HE Jian, LIU Wu-sheng, ZHOU Xiang-dong, et al. Robust valid paths of internet private hire vehicles ride-sharing under interval-valued impedance [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(3): 41-47.

[19] 苏贞旅, 周和平. 区间不确定阻抗下的可靠最短路径[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(4): 77-81.

SU Zhen-lyu, ZHOU He-ping. Reliable shortest paths under interval uncertain impedance[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(4): 77-81.

(编辑 石月珍)