

文章编号: 1671-0444(2018)04-0550-05

基于不确定需求的多式联运物流网络设计

李淑霞, 陈 振, 刘丽萍, 吴一帆, 孙思凡

(华东理工大学 商学院, 上海 200237)

摘要: 随着全球贸易与电子商务的迅速发展,多式联运在运输业中的位置越来越重要,运输网络中的不确定需求为物流网络设计带来挑战。针对需求量存在的不确定性,设计了基于两阶段随机规划的中转点选址以及序贯决策的路径规划,进而实现经济高效多式联运网络的设计。通过与传统解决方法的对比研究,验证了本文所建模型的实用性及有效性,为多式联运网络的建立和科学运作提供了决策参考。

关键词: 不确定需求; 两阶段随机规划; 多式联运; 物流网络设计

中图分类号: TB 114 **文献标志码:** A

Intermodal Logistic Network Design under Uncertain Demand

LI Shuxia, CHEN Zhen, LIU Liping, WU Yifan, SUN Sifan

(School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: With the development of international trade and e-commerce, intermodal has become a key player in transportation. However, the uncertain demands in transport network bring challenge for the logistic network design. Aiming at the uncertain customer demands in multimodal transport, a sequential decision of terminal location and routes planning was designed based on a two stage stochastic programming model to accomplish the implementation of economical and efficient multimodal transport network. Compared with the traditional model, the practicality and effectiveness of multimodal transport network have been verified. Also, the study provides useful reference for intermodal network design and scientific operation.

Key words: uncertain demand; two-stage stochastic programming; intermodal transportation; logistic network design

随着全球贸易的快速发展,长距离的运输越来越重要,单一的运输模式已经无法满足这种急速扩张的运输需求。因此,多式联运的有效建设和管理就具有重要的理论和现实意义。多式联运不仅可以利用其规模效应取得经济优势,而且能够缓解交通拥挤而具有一定的环保优势。美国是较早发展多式联运方式的国家,目前其多式联运总量已占总运输

量的40%左右,在整个运输业中占据重要位置^[1]。2014年,欧盟委员会启动“马可·波罗”项目来促进道路运输向多式联运转变^[2]。到2030和2050年,多式联运预计将分别占据整个欧洲运输总量的30%和50%^[3]。2016年,我国交通运输部也审议并通过了《关于促进多式联运发展的若干意见》,借以推动交通提质增效,提升供给服务能力。特别是在

收稿日期: 2017-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71431004,71302043,71671067);上海市自然科学基金资助项目(18ZR1409400);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介: 李淑霞(1975—),女,湖北十堰人,副教授,博士,研究方向为物流与供应链管理,E-mail: sxli@ecust.edu.cn

“一带一路”倡议下,我国将在 2015—2019 年间投资基础设施建设超过 3 万亿美元。目前,我国已经开通了 23 个欧亚快线,新建了渝新欧铁路,显著地缩短了运输时间^[4]。在这种发展多式联运已上升为国家战略的背景下,多式联运网络设计方面的研究就显得尤为重要。

物流网络设计主要包含中转点选址和路径优化两方面问题。文献中不乏关于中转点选址的研究:Kenneth 等^[5]提出了一种有效的中转点选址方案;Limbourg 等^[6]解决了欧洲物流网络中集装箱多式联运的选址问题;Manish 等^[7]提出了一个卡车运输与火车运输结合的多目标优化模型;Kim 等^[8]研究了多式联运距离的收支平衡点问题。在中转点选址与路径选择集成优化方面:Xie 等^[9]研究了危险品多式联运的选址及路径优化问题;Meisel 等^[10]从微观的角度出发,考虑了运输工具容量的选择以及货物在中转点的整合,设计了一个生产与运输相结合的多式联运网络,并用分支定界法结合启发式算法对模型进行求解。

然而,大多数研究仍主要关注确定性需求下的相关问题,其中能解决需求不确定问题的有效手段还不多。Mehrdad 等^[11]解决了需求分布不规则情况下非容量限制的中转点选址问题。Hatefi 等^[12]考虑了各种参数的不确定性以及工厂的选址问题,建立了一个可靠的鲁棒模型,解决了集成正向储备物流网络设计问题。Marufuzzaman 等^[13]使用 L-shaped 算法建立了一个两阶段随机规划模型用于设计和管理生物柴油供应链。Kevin 等^[14]将两阶段随机规划与双目标规划进行了结合,用于解决不确定木材供应链网络设计。Simic^[15]采用两阶段区间随机规划来解决随机状况下的报废车辆处理问题。Yang^[16]使用两阶段随机规划来解决不确定运输量下航空运输中的中转点选址以及路径优化问题,并用现实数据予以例证,最终结果证实了随机方法的有效性。由此可见,鲁棒优化与随机规划是解决供应链中不确定性的两种有效方式,但是应用到多式联运网络的还十分有限。Demir 等^[17]提出了包含运输时间不确定性的多式联运服务网络设计问题,并使用随机规划得到了一个稳定高效的多式联运网络,但是其不确定性体现在运输时长上而没有涉及到需求点需求的不确定性。

此外,考虑到需求不确定性,期望值模型和情景优化模型是解决此类问题常见的两种模型。在期望值模型中,可变的需求量将会被其平均量所代替^[18],而情景优化模型将会对每种情形下产生的子

问题进行求解^[19]。通过这两种方法建立的模型仍然是确定性模型,其对问题的简化过于理想化。本文将对需求不确定下的多式联运物流网络设计问题展开研究,通过建立两阶段随机规划模型来设计兼具基本稳定结构以及灵活性的多式联运物流网络。

1 模型构建

在多式联运网络设计中,中转点选址与路径决策是最主要的两个决策。中转点选址决策属于战略层长期决策,不会因情景变化而轻易改变,而路径规划则属于战术层短期决策,可以根据情形不同而变化,如需求量的波动等。本文所构建的多式联运网络可以选择 D2D(door to door)直接公路运输或公路/铁路联运两种运输模式。在公路/铁路联运中,货物由卡车从供应点运往起始中转点,再由起始中转点通过火车运往终止中转点,最后使用卡车将货物由终止中转点配送到需求点。本文构造了需求确定环境下的多式联运网络设计模型,然后在此基础上研究需求不确定条件下基于两阶段随机规划的多式联运网络设计模型。

1.1 确定型模型

本文的参数设定如表 1 所示。

表 1 参数设定

Table 1 Parameters setting

参数类型	参数意义
基本参数	I 供应点集合
	J 需求点集合
	N 潜在中转点集合
	f_{ij} 供应点 i 提供给需求点 j 的总运输量
	B_l 终端 l 的容量
运输类型	D2D 门对门卡车运输
	INTERMODAL 卡车、火车多式联运
成本费用率	F_l 在潜在中转点 l 处建设一个中转点的固定费用
	β 短途卡车相对长途卡车的运输费率比
	α 火车运输带来的折扣
	C_{il} 卡车前端运输费率
	C_{lm} 火车运输费率
	C_{mj} 卡车后端运输费率
	C_{ij} D2D 卡车运输费率
	C_{imj} 供应点 i 对需求点 j 采用多式联运经过终端 l 与 m 运输的货物运输费率,其中 $C_{imj} = \beta C_{il} + \alpha C_{lm} + \beta C_{mj}$

(续表)

参数类型	参数意义
决策变量	X_{ilmj} 供应点 i 对需求点 j 采用多式联运经过终端 l 与 m 运输的货物比例
	X_{ij} 供应点 i 对需求点 j 采用 D2D 运输货物的比例
	Y_l 终端 l 是否建立

在此基础上,以总费用 z (包括运输费用和中转点建设费用)最小化为目标,建立确定型模型如式(1)~(11)所示。

$$\min z = \sum_{l \in N} F_l Y_l + \sum_{m \in N} F_m Y_m + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in N} \sum_{l \in N} X_{ilmj} f_{ij} C_{ilmj} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ij} f_{ij} C_{ij} \quad (1)$$

s. t.

$$X_{ilmj} f_{ij} \leq Y_l f_{ij}; i \in I; j \in J; m, l \in N \quad (2)$$

$$X_{ilmj} f_{ij} \leq Y_m f_{ij}; i \in I; j \in J; m, l \in N \quad (3)$$

$$\sum_{l \in N} \sum_{m \in N} X_{ilmj} + X_{ij} = 1, i \in I, j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{l \in N} \sum_{m \in N} f_{ij} X_{ilmj} + \sum_{l \in N} \sum_{m \in N} f_{ij} X_{imlj} \leq B_l, i \in I, j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{l \in N} \sum_{m \in N} f_{ij} X_{ilmj} + \sum_{l \in N} \sum_{m \in N} f_{ij} X_{imlj} \leq B_m, i \in I, j \in J \quad (6)$$

$$X_{illj} = 0, i \in I, j \in J, l \in N \quad (7)$$

$$X_{ilmj} \geq 0, i \in I, j \in J, m, l \in N \quad (8)$$

$$X_{ij} \geq 0, i \in I, j \in J \quad (9)$$

$$Y_l \in (0, 1), l \in N \quad (10)$$

$$Y_m \in (0, 1), m \in N \quad (11)$$

式中:式(1)为目标函数,下标 l, m 分别对应两个终端;约束(2)和(3)保证在中转点建立的情况下该路段才能使用多式联运;而约束(4)保证了需求点的需求最终会被满足;约束(5)和(6)保证使用多式联运时中转点转运的货物量不能超过其容量限制;约束(7)则排除了只经过一个中转点的多式联运状况;约束(8)~(11)则说明了战略层决策变量以及战术层决策变量的数学特性。

1.2 基于两阶段随机规划的模型

考虑需求不确定的情形,假设一共有 n 种情形,构成一个集合 Ω ,而每一种情形用 ω 来表示,这种情形出现的概率为 $P(\omega)$ 。同时,由于供应点运往需求点的货物量也会根据情形的不同而发生变化,故采用多式联运时的折扣也会发生相应的变化。因此,

对确定型模型中若干参数进行局部调整,如下所述。

(1) 基本参数:

Ω 为需求点需求层级集合;

$P(\omega)$ 为情形 ω 出现的概率;

$f_{ij}(\omega)$ 为在情形 ω 下,供应点 i 提供给需求点 j 的总运输量。

(2) 成本费率:

$\beta(\omega)$ 为在情形 ω 下,短途卡车相对长途卡车的运输费率比;

$\alpha(\omega)$ 为在情形 ω 下,火车运输带来的折扣;

$C_{ilmj}(\omega)$ 为在情形 ω 下,供应点 i 对需求点 j 采用多式联运经过中转点 l 与 m 运输的货物运输费率,此时 $C_{ilmj}(\omega) = \beta(\omega)C_{il} + \alpha(\omega)C_{lm} + \beta(\omega)C_{mj}$ 。

(3) 决策变量:

$X_{ilmj}(\omega)$ 为在情形 ω 下,供应点 i 对需求点 j 采用多式联运经过中转点 l 与 m 运输的货物比例;

$X_{ij}(\omega)$ 为在情形 ω 下,供应点 i 对需求点 j 采用 D2D 运输货物的比例。

如前所述,中转点选址问题是一个长期决策,应该在路径规划决策之前完成。因此,需要构造一个基于两阶段随机规划的中转点选址以及路径选择和运输量配置的序贯决策,其中,第一阶段随机规划将解决中转点选址问题。

第一阶段模型如式(12)~(22)所示。

$$\min z = \sum_{l \in N} F_l Y_l + \sum_{m \in N} F_m Y_m + \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m, l \in N} P(\omega) X_{ilmj}(\omega) C_{ilmj}(\omega) f_{ij}(\omega) + \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} P(\omega) X_{ij}(\omega) C_{ij} f_{ij}(\omega) \quad (12)$$

s. t.

$$X_{ilmj}(\omega) f_{ij}(\omega) \leq Y_l f_{ij}(\omega); i \in I; j \in J; m, l \in N, \omega \in \Omega \quad (13)$$

$$X_{ilmj}(\omega) f_{ij}(\omega) \leq Y_m f_{ij}(\omega); i \in I; j \in J; m, l \in N, \omega \in \Omega \quad (14)$$

$$\sum_{l \in N} \sum_{m \in N} X_{ilmj}(\omega) + X_{ij}(\omega) = 1; i \in I; j \in J, \omega \in \Omega \quad (15)$$

$$\sum_{l \in N} \sum_{m \in N} f_{ij}(\omega) X_{ilmj}(\omega) + \sum_{l \in N} \sum_{m \in N} f_{ij}(\omega) X_{imlj}(\omega) \leq B_l, i \in I, j \in J, \omega \in \Omega \quad (16)$$

$$\sum_{l \in N} \sum_{m \in N} f_{ij}(\omega) X_{ilmj}(\omega) + \sum_{l \in N} \sum_{m \in N} f_{ij}(\omega) X_{imlj}(\omega) \leq B_m, i \in I, j \in J, \omega \in \Omega \quad (17)$$

$$X_{illj}(\omega) = 0, i \in I, j \in J, l \in N, \omega \in \Omega \quad (18)$$

$$X_{ilmj}(\omega) \geq 0; i \in I; j \in J; m, l \in N; \omega \in \Omega \quad (19)$$

$$X_{ij}(\omega) \geq 0, i \in I, j \in J, \omega \in \Omega \quad (20)$$

$$Y_l \in (0,1), l \in N \quad (21)$$

$$Y_m \in (0,1), m \in N \quad (22)$$

不确定型模型中目标函数和各约束综合考虑了不同情形下参数的变化,具体含义与确定型模型类似,此处不再赘述。

根据不同情形下的需求点平均需求计算得到第一阶段中的决策变量 Y_l 和 Y_m , 即是否选取这些取值为 1 的中转点。假设通过第一阶段选择了 t 个中转点, 那么此时这 t 个中转点构成中转点集合 T , 且 Y_l 和 Y_m 的值将不会受到需求变化的影响。同时, 还将得到一个“初步目标函数值”, 并对应一个合适的多式联运网络结构。

为了得到最优路径决策, 需要进行第二阶段的决策。假设在此阶段选取的中转点为 k 与 s , 则 $k, s \in T$ 。补充参数说明如下所述。

(1) 基本参数: T 为第一阶段模型建立的中转点集合。

(2) 决策变量: Y_k 为在建设 t 个中转点的前提下, 选择使用的中转点。

在此阶段中, 根据每种不同的需求情形产生一个子问题, 可以被表述为

$$\min z = \sum_{i \in T} F_l + \sum_{m \in T} F_m + \theta(Y_k, Y_s, \omega) \quad (23)$$

$$\theta(Y_k, Y_s, \omega) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k, s \in T} X_{iksj}(\omega) C_{iksj}(\omega) f_{ij}(\omega) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ij}(\omega) C_{ij} f_{ij}(\omega) \quad (24)$$

在每个子问题中, 目标函数(23)已经不再是关于中转点建设的决策, 而是关于路径分配的决策, 即决定 $X_{iksj}(\omega)$ 与 $X_{ij}(\omega)$ 。通过基于两阶段随机规划的中转点选址和路径规划的序贯决策, 就可以得到多式联运物流网络优化设计方案。

2 实例研究

2.1 数据设定

本文使用的需求量等数据均来自澳大利亚邮政数据集(以下称为 AP 数据集), 其节点数为 50。选取最北边的 10 个点为供应点, 地理位置处在中间的 30 个点为可选中转点, 而最南边的 10 个点则为需求点。

多式联运网络采用两种可选的运输途径, 即长途的 D2D 卡车直接运输和短途卡车与火车运输相结合的多式联运。由于多式联运具有规模效应, 而且长途和短途运输卡车的环保性和效率有所差异,

因此单位货物费率表达式为

$$C_{ilmj} = \beta C_{il} + \alpha C_{lm} + \beta C_{mj} \quad (25)$$

一般而言, $\alpha < 1$ 而 $\beta > 1$, 且取值可分别为 0.525 和 1.458^[6]。考虑到需求的不确定也会带来折扣系数的变化, 故根据需求量大小对应调整 α 值, 如表 2 所示。同时, 本文通过在 0.5~2 之间取 5 个随机数作为需求等级来模拟需求量的变化。

表 2 参数数据设定
Table 2 Parameters data setting

等级	概率	需求层级	α
非常高	0.25	1.90	0.441
高	0.22	1.50	0.389
中	0.31	1.00	0.525
低	0.14	0.85	0.693
非常低	0.08	0.65	0.856

1.2 计算结果及分析

本文模型使用 CPLEX 12.6 运行, 并对比期望值模型、情境优化模型以及本文提出的随机规划模型的中转点集合、多式联运总比例以及总成本等指标, 如表 3 所示。其中, 中转点集合 $\Phi_1 = \{12, 14, 17, 31, 36\}$, $\Phi_2 = \{12, 14, 17, 31, 36, 38\}$, $\Phi_3 = \{12, 14, 17, 20, 31, 34, 36, 38\}$ 。

传统的期望值模型采用的是基于不确定需求取期望值的方法, 并得到唯一的中转点集合。情景优化模型虽能针对假设的不同情景分别得出最优结果, 但这不适用于较长一段时间内的决策。由表 3 可知, 随机规划模型能够在保持稳定的多式联运网络结构的基础上, 充分利用规模效应, 通过灵活地调整多式联运的比例来获得接近最优的总成本。

在本例中, 基于随机规划模型构建的多式联运网络 II 比基于期望值模型构建的网络 I 多一个中转点 38。随着需求的增加, 采用更高比例的多式联运获得的成本节约和环保效应更多。另外, 当需求较低时, 采用直接运输则更为经济, 因为运输需求不足以形成规模效益。具体而言, 基于情景优化模型的运输系统将不构建任何多式联运网络, 而对于采用随机规划模型所构建的多式联运物流系统则通过使多式联运比例为 0 来避免公路/铁路联运。

为探讨需求不确定情况下, 折扣因子的变动对多式联运网络设计的影响, 本文对折扣因子 α 在 $[0, 1, 0.6]$ 内进行灵敏度分析, 观察不同等级规模经济下随机规划模型与传统期望值模型中总成本及多式联运比例的变化, 如图 1 所示。其中, C 和

表 3 不确定需求下多式联运网络设计结果

Table 3 Results of uncertain demand for intermodal network design

需求等级	中转点集合			多式联运比例			总成本/万元		
	期望值模型	情景优化模型	随机规划模型	期望值模型	情景优化模型	随机规划模型	期望值模型	情景优化模型	随机规划模型
非常高		Φ_2			0.565	0.565	8 821	8 757	8 757
高		Φ_3			0.681	0.600	6 903	6 817	6 825
中	Φ_1	Φ_1	Φ_2	0.395	0.391	0.391	4 768	4 768	4 788
低		N/A			0	0	4 206	4 074	4 138
非常低		N/A			0	0	3 340	3 115	3 179

P 分别代表总成本和比例,实线表示两种模型中总成本随着折扣因子变化情况,虚线则表示多式联运比例随着折扣因子变化的变化情况。

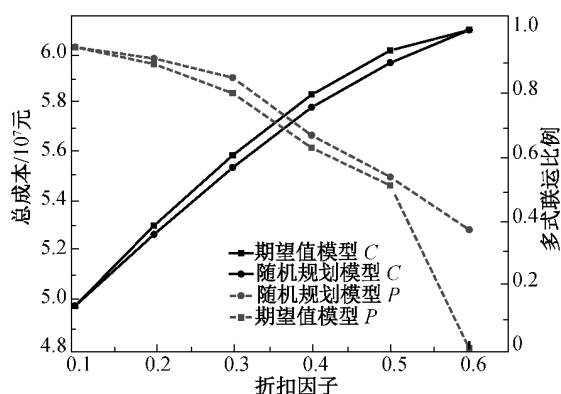


图 1 折扣因子灵敏度分析

Fig. 1 Sensitivity analysis of discount factor

由图 1 可知,不同折扣因子下,随机规划模型计算得到的总成本始终比期望值模型成本更低,这说明随机规划模型相对于传统期望值模型成本更节约。另外,多式联运的比例随着折扣因子的上升即优惠的减少而减少,这是因为规模经济带来的成本节约无法抵消中转点建设的费用,从而货物不再选择多式联运而是使用直接运输。在需求不确定情况下,随机规划模型获得的网络结构比期望值模型更稳定。此例中,折扣因子在 0.5~0.6 之间时,期望值模型的多式联运比例变动很大,由 0.51 直接降到了 0,而随机规划模型在折扣因子为 0.6 时还保持着 0.37 的多式联运比例。

3 结 语

本文提出采用两阶段随机规划模型来解决不确定需求下的多式联运网络设计问题,得出了关于中转点的选址以及运输路径的选择和运量配置的决策结果。随机规划模型所采用的序贯决策能够比期望

值模型更灵活地进行路径决策,带来成本节约等方面的优势,同时也能获得比情景优化模型更稳定的多式联运网络结构。当然,本文提出的模型仍然具有局限性,例如随着数据量的增大,计算时间会显著增加,有效的算法设计以提高运算效率是另一个值得研究的问题。

参 考 文 献

- [1] United States Department of Transportation. BTS Technical Report[EB/OL]. <https://www.rita.dot.gov/bts/publications>, Accessed 2017-01-06.
- [2] European Commission 2014. Marco Polo Programme[EB/OL]. <http://ec.europa.eu/transport/marcopolo/>, Accessed 2016-09-03.
- [3] RICCI S, CAPODILUPO L, MUELLER B et al. Assessment methods for innovative operational measures and technologies for intermodal freight terminals[J]. transportation research procedia,2016,14: 2840-2849.
- [4] 王义桅. 世界是通的:“一带一路”的逻辑[M]. 北京:商务印书馆,2016.
- [5] KENNETH S, CHRISTINE V, SYLVIE B. Efficient metaheuristics to solve the intermodal terminal location problem[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(9): 2079-2090.
- [6] LIMBOURG S, JOURQUIN B. Optimal rail-road container terminal locations on the European network[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2009, 45(4): 551-563.
- [7] MANISH V, VEDAT V, NICOLAS Z. A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of hazardous materials[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(1):132-149.
- [8] KIM N S, WEE B V. The relative importance of factors that influence the break-even distance of intermodal freight transport systems[J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19(4): 859-875.
- [9] XIE Y C, LUW, WANG W, QADRIFOGLIO L. A multimodal location and routing model for hazardous materials

(下转第 577 页)

- [8] TIZHOOSH H R. Opposition-based learning: a new scheme for machine [C] // International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation/International Conference on Intelligent Agents Web Technologis and International Commerce. 2005: 695-701.
- [9] PENG, L WANG Y, DAI G. A novel opposition-based multi-objective differential evolution algorithm for multi-objective optimization[C]//Advances in Computation and Intelligence Lecture Notes in Compture Science 2008. 5370(15):162-170.

(责任编辑:杜 佳)

(上接第 554 页)

- transportation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 227-228(43): 135-141.
- [10] MEISEL F, KIRSCHSTEIN T, BIERWIRTH C. Integrated production and intermodal transportation planning in large scale production-distribution-networks[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2013, 60(6): 62-78.
- [11] MEHRDAD S, AVINASH U. Robust hub network design problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 70(C): 356-373.
- [12] HATEFI S M, JOLAI F. Robust and reliable forward - reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(9/10): 2630-2647.
- [13] MARUFUZZAMAN M, EKSIÖGLU S D, HUANG Y X. Two-stage stochastic programming supply chain model for biodiesel production via wastewater treatment[J]. Computers & Operations Research, 2014, 49(10): 1-17.
- [14] KEVIN Y, CRAIG W, MATTHEW Jet al. Lee Two stage stochastic bilevel programming model of a pre-established timberlands supply chain with biorefinery investment interests [J]. Computers and Chemical Engineering, 2015, 73(73): 141-153.
- [15] SIMIC V. A two-stage interval-stochastic programming model for planning end-of-life vehicles allocation under uncertainty[J]. Resources Conservation and Recycling, 2015, 98: 19-29.
- [16] YANG T H. Stochastic air freight hub location and flight routes planning[J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(12): 4424-4430.
- [17] DEMIR E, BURGHOLZER W, HRUSOVSKY M et al. A green intermodal service network design problem with travel time uncertainty [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2006, 93(7): 789-807.
- [18] SCHILDBACH G, MORARI M. Scenario-based model predictive control for multi -echelon supplychain management [J]. European Journal of Operational Research, 2016, 252(2): 540-549.
- [19] MARIN A, CANOVAS L, LANDETE M. New formulations for the uncapacitated multiple allocation hub location problem [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 172(1): 274-292.

(责任编辑:杜 佳)