

模糊需求下空箱调运问题研究

肖青¹, 胡豪²

(大连海事大学, 大连 116026)

摘要: **目的** 同时考虑重箱和空箱运输, 研究多周期情形下重箱运输需求及相关成本参数变化对空箱调运方案的影响。**方法** 考虑重箱需求的模糊性, 以系统总成本最小为目标, 建立空箱调运模糊规划模型, 并转换为清晰等价形式进行求解。**结果** 租箱与空箱调运比随航次数的增加而变化明显, 决策期为 2 个航次的租箱与空箱调运比约为 4 个航次时的 6 倍; 系统总成本随着可信度的增大而增大, 在可信度为 0.5 时总成本最小。**结论** 空箱调运在长期决策中更明显, 空箱调运量与空箱调运成本反向变化, 与堆存成本和甩箱成本同向变化, 在一定范围内随着租箱成本进行反向变化。

关键词: 空箱调运; 模糊需求; 模糊期望值

中图分类号: U169.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)19-0124-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.19.022

Empty Container Repositioning under Fuzzy Demand Conditions

XIAO Qing¹, HU Hao²

(Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

ABSTRACT: The work aims to consider the loaded container and empty container repositioning at the same time, and study the impact of changes in loaded container repositioning demand and related cost on the empty container repositioning plan under multi-cycle conditions. The fuzziness of the loaded container demand was considered. An empty container repositioning fuzzy planning model was established with the minimization of the total cost of the system as the objective. Then, the model was converted into clear equivalent form for solving. The leasing and empty container repositioning ratio changed significantly with the increase of the number of cycles. The leasing and empty container repositioning ratio of double cycles was approximately 6 times that of the four cycles, and the total cost of the system increased with the increase of credibility. When the credibility was 0.5, the total cost was the lowest. The empty container repositioning is more obvious in long-term decision-making and the quantity of empty container repositioning changes in the opposite direction as the empty container repositioning cost, in the same direction as the storage cost and container dumping cost, and in the reverse changes with the leasing container cost within a certain range.

KEY WORDS: empty container repositioning; fuzzy demand; fuzzy expectation

由于货流不平衡现象产生的集装箱空箱调运问题是各航运企业面对的重要难题之一。在缺箱时,为满足客户需求,临时租箱成本远高于调运成本,提升了集装箱运输运营成本,因此如何实现空箱调运优化具有重要意义。

空箱调运问题可以分为空箱调度战略决策以及空箱调度优化两大类。空箱调度战略决策主要为船队规模^[1-3]、运输网络设计^[4-5]、终端选址^[6]。在空箱调度优化方面, Wong^[7-8]等将空箱问题抽象为资源分

配问题,对全球范围内的空箱调运问题进行多目标优化。徐奇^[9]等建立了空重箱运输模型,揭示了弃货成本,租箱成本,不确定性重箱运输情况对调运策略的影响。计明军^[10]等提出了不确定目的港空箱调运模型,并与确定目的港模型进行了对比。王琳^[11]针对重箱流不确定情况,对比了一定扰动幅度下不同保守程度的成本大小。Song^[12]针对灵活目的港建立了数学模型,并通过模拟的方法验证了模型的有效性。杨洋^[13]建立了基于空箱和运力资源共享的空箱调运模型。汪

收稿日期: 2018-06-15

作者简介: 肖青(1963—),女,大连海事大学副教授,主要研究方向为交通运输规划。

传旭^[14]考虑船公司之间的合作,建立了空箱需求不确定下空箱调运优化模型。江玉杰等^[15]建立了船公司合作下的空箱调度模糊优化模型。

大部分研究将空箱单独考虑,未考虑到重箱对空箱调运的影响;部分研究仅以一个航次为决策期,而空箱调运是一个长期决策的过程;需求变化受各种因素的影响而无法精确统计,模糊规划能够很好处理这一类不确定性问题,因此文中在模糊需求的环境下,同时考虑重箱运输和空箱调运,建立了重箱和空箱运输的模糊期望值模型,研究空箱调运成本、甩箱成本、租箱成本以及堆存成本对运输方案的影响。

1 问题描述

为了满足用箱需求,航运公司会进行空箱调运以合理利用空箱资源,减少租箱,但调箱量受到港口空箱供需差、供需港口间空箱运力等因素的影响。同时空箱需求受到各种因素的综合影响,往往表现为随机不确定性且很难精确得到其分布函数,具有模糊性,但可以估计其变化范围。在需求不确定时可能出现由于舱容约束,重箱与空箱相冲突,造成空箱提前卸载或甩箱,产生一定的甩箱成本或者造成空箱资源的浪费,使得运营成本增加。为了降低运营成本,航运公司需要合理的安排重箱和空箱的运输,实现空箱资源的有效利用。

相关假设如下:港口实际需求值为模糊值,且不区分合同市场和现货市场;只考虑 6.096 m(20 英尺)的标准集装箱(TEU)一种箱型;决策期内船队规模和航行时间表无变化,且为周班航线;当天卸载的重箱可满足第 2 天的空箱需求。

2 模型建立

2.1 参数说明

班轮公司经营航线港口集合为 P ;船舶集合为 M ; T 为决策期,为若干个航次; m 船舱容限制为 C_m ;第 t 天港口 i 到 j 的空箱需求为 $\tilde{d}_{ijt}$; s_{it} 为第 t 天港口 i 的空箱剩余量; C_1^i 为港口 i 到 j 的甩箱惩罚成本; C_2^i 为港口 i 到 j 的空箱运输成本; C_3^i 为港口 i 的单位租箱成本; C_4^i 为港口 i 的单位时间单位空箱堆存成本; C_5^i 为港口 i 的单位空箱装卸成本; λ_{ijt} : 若有船舶挂靠且航行方向为港口 i 到港口 j 则为 1, 否则为 0; β_{it}^m : 船舶 m 在第 t 天挂靠港口 i 则为 1, 否则为 0; r_{it} : 第 t 天港口 i 的租箱数量; x_{ijt} : 第 t 天由港口 i 到港口 j 的空箱调运量; y_{ijt} : 第 t 天由港口 i 港口的 j 重箱运输量; τ_{ij} : 港口 i 到港口 j 的航行时间; y_{ijt}^1 : 第 t 天由港口 i 港口的 j 重箱弃货量。

2.2 模型建立

空箱调运模糊机会约束规划模型各约束如下所述。

1) 任意时间 t 港口 i 的空箱需求被满足。

$$r_{it} + s_{i(t-1)} \geq \sum_{j \neq i} \tilde{d}_{ijt} \quad (1)$$

2) 非同方向上的港口间的空箱和重箱运输量为 0。

$$(1 - \lambda_{ijt})(x_{ijt} + y_{ijt}) = 0 \quad (2)$$

3) 港口间重箱运输量与重箱弃货量之和为同方向 2 次挂靠时间的累积需求。

$$y_{ijt} + y_{ijt}^1 = \lambda_{ijt} \sum_{t'=t-7}^t \tilde{d}_{ijt'} \quad (3)$$

4) 任意时间 t 港口 i 空箱装载数量不超过此时的空箱库存。

$$\sum_{j \neq i} x_{ijt} \leq s_{i(t-1)} \quad (4)$$

5) 第 t 天的空箱堆存数量为第 $t-1$ 天的空箱堆存数量、第 $t-1$ 天租箱数量、第 t 天卸载的空箱、重箱数量、以及第 t 天弃货量之和减去第 t 天的需求数量;初始库存量为 $s_{i0} = h(i)$, 当 $t \geq 2$ 时有:

$$s_{it} = s_{i(t-1)} + r_{it} - \sum_{j \neq i} \tilde{d}_{ijt} + \sum_{j \neq i} (y_{ji(t-\tau_{ji})} + x_{ji(t-\tau_{ji})}) - \sum_{j \neq i} x_{ijt} + \sum_{j \neq i} y_{ijt}^1 \quad (5)$$

6) 重箱和空箱装载量不超过此时的船舶剩余容量,船舶初始容量 $C_{m0} = C_m$ 。

$$C_{mt} = C_{m(t-1)} + \sum_i \beta_{it}^m \sum_{j \neq i} (y_{ji(t-\tau_{ji})} + x_{ji(t-\tau_{ji})} - y_{ijt} - x_{ijt}) \quad (6)$$

7) 任意港口发生空箱装载则不存在空箱卸载。

$$\sum_{j \neq i} x_{ji(t-\tau_{ji})} + \sum_{j \neq i} x_{ijt} = \text{abs} \left(\sum_{j \neq i} x_{ji(t-\tau_{ji})} - \sum_{j \neq i} x_{ijt} \right) \quad (7)$$

8) 相关参数大于等于 0。

$$x_{ijt}, r_{it}, y_{ijt}, y_{ijt}^1, s_{it}, C_{mt}, \tilde{d}_{ijt} \geq 0 \quad (8)$$

目标函数:

$$\min C = \sum_t \sum_i \sum_j y_{ijt}^1 C_1^j + \sum_t \sum_i \sum_j x_{ijt} (C_2^j + C_3^i + C_5^j) + \sum_i \sum_t r_{it} (T-t) C_3^i + \sum_t \sum_i s_{it} C_4^i \quad (9)$$

式(9)右边第 1 项为甩箱成本;第 2 项为空箱调运成本,包含空箱的运输成本以及空箱起讫点的装卸成本;第 3 项为租箱成本,考虑到集装箱租赁时间通常远超过决策期长度,同时具有循环往复的特点,当前决策期的箱子也将进入下一决策期使用,下个决策期的租金则体现为常数,因此租用时间开始至决策期结束计算当前决策期内的租金;第 4 项为空箱堆存成本。

模型中 $\tilde{d}_{ijt}$ 为模糊变量,为方便求解,文中将相应约束转换为确定等价形式,设 ξ 为随机变量,其隶属度函数为 $\mu(x)$,则可信度为:

$$\text{Cr}\{\xi \leq \tau\} = (\sup_{x \leq \tau} \mu(x) + 1 - \sup_{x > \tau} \mu(x)) / 2 \quad (10)$$

文中采用三角模糊数描述需求 $\xi = (\tau_1, \tau_2, \tau_3)$, 由三角模糊数隶属度函数及式 (10) 可得在一定可信度水平条件下 $\alpha \in [0.5, 1]$, 有如下不等式存在:

$$Cr\{\tau \geq \xi\} \geq \alpha \Rightarrow \tau + (1-2\alpha)\tau_3 + (2\alpha-2)\tau_2 \geq 0 \quad (11)$$

在给定可信度 α 的前提下, 根据式 (11) 可将不等式 (1) 改写为以下形式:

$$r_{it} + s_{it} + (1-2\alpha) \sum_{j \neq i} d_{ijt3} + (2\alpha-2) \sum_{j \neq i} d_{ijt2} \geq 0 \quad (12)$$

根据 $Cr\{\tau = \xi\} = \mu(\tau)/2 + 1/2 \geq \alpha$ 可将式 (3) 和式 (5) 改写为以下区间约束:

$$\lambda_{ijt} \sum_{t'=t-7}^t d_{ijt'2} - (2-2\alpha) \lambda_{ijt} \sum_{t'=t-7}^t (d_{ijt'2} - d_{ijt'1}) \leq y_{ijt} + y_{ijt}^1 \quad (13)$$

$$y_{ijt} + y_{ijt}^1 \leq \lambda_{ijt} \sum_{t'=t-7}^t d_{ijt'2} + (2-2\alpha) \lambda_{ijt} \sum_{t'=t-7}^t (d_{ijt'3} - d_{ijt'2}) \quad (14)$$

$$d_{ijt2} - (2-2\alpha)(d_{ijt2} - d_{ijt1}) \leq s_{i(t-1)} + r_{it} - s_{it} + \sum_{j \neq i} \left(y_{ji(t-\tau_{ji})} + x_{ji(t-\tau_{ji})} \right) \quad (15)$$

$$s_{i(t-1)} + r_{it} - s_{it} + \sum_{j \neq i} \left(y_{ji(t-\tau_{ji})} + x_{ji(t-\tau_{ji})} \right) \leq d_{ijt2} + (2-2\alpha)(d_{ijt3} - d_{ijt2}) \quad (16)$$

3 算例分析

文中引用文献[12]中的部分数据进行算例分析。该航线共有 6 个港口, 投入 5 艘船舶进行运营, 航次周期为 35 天, 港口去程航线为港口 1→港口 2→港口 3→港口 4→港口 5→港口 6, 返程航线为港口 6→港口 5→港口 4→港口 3→港口 1。装卸成本等相关数据见表 1—3。采用三角模糊数描述各港口空箱需求, 并且分为平衡模式、适度不平衡模式、严重不平衡模式 3 种情况, 需求平均值具体数据参考文献[12], 最小值和最大值则根据平均值随机生成。

表 1 相邻港口间航行时间和空箱运输成本

Tab.1 Sailing time and empty container transportation cost between neighborhood ports

起点 港口	终点 港口	航行时间/d	空箱运输成本/ (元·TEU ⁻¹)
1	2	1	3
2	3	1	2
3	4	2	7
4	5	10	18
5	6	4	5
6	5	4	5
5	4	9	18
4	3	2	7
3	1	2	5

表 2 空箱堆存、装卸和租赁成本

Tab.2 Unit inventory, lifting costs and leasing cost

港口	堆存成本/ (元·TEU ⁻¹)	装卸成本/ (元·TEU ⁻¹)	租箱成本/ (元·(d·TEU) ⁻¹)
1	0.9	30	3.6
2	0.84	29	3
3	0.96	32	3.3
4	0.9	34	2.7
5	0.9	32	2.7
6	0.87	28	2.7

表 3 初始空箱保有量

Tab.3 Initial inventory of empty containers

港口	初始空箱/TEU
1	100
2	100
3	100
4	150
5	150
6	200

针对适度不平衡模式, 分别决策期为 1, 2, 3, 4 个航次的空重箱运输方案, 相关数据见表 4。

表 4 不同决策期长度运输方案对比

Tab.4 Comparison of transportation schemes during different lengths of decision-making period

决策期长 度(航次)	租箱数量/ TEU	空箱调运数 量/TEU	甩箱数量/ TEU	总成本/元
1	12 300	0	0	845 504
2	15 216	3667	1338	2 772 543
3	12 866	9842	5452	4 602 934
4	11 483	15 899	9224	6 246 782

随着考虑决策期长度的增加, 空箱调运量增加明显, 租箱与空箱调运的比减小, 说明单周期的决策不能有效反映空箱调运的实际情况, 应该考虑到空箱调运长时间决策的特点。针对 3 种模式下的需求信息, 取 $\alpha=0.9$, 决策期为 3 个航次进行求解。

表 5 不同模式下运输方案对比

Tab.5 Comparison of transportation schemes in different modes

模式	租箱数量/ TEU	空箱调运 数量/TEU	甩箱数量/ TEU	总成本/元
平衡模式	4143	1920	1316	1 673 887
适度不平 衡模式	12 866	9842	5452	4 602 934
严重不平 衡模式	23 961	21 782	8446	8 065 172

在 3 种模式下, 需求增加导致租箱数量和空箱调运数量增加, 平衡模式下租箱与空箱之比要大于另外 2 种模式, 随着不平衡的加剧, 空箱调运数量明显上

升，此时更多的寻求已有空箱资源的合理配置。

改变可信度大小，可得各可信度条件下的对适度不平衡模式进行求解得到各项数据见表 6。

表 6 不同可信度测度下的运输方案				
Tab.6 Transportation schemes under the measurement of different credibility				
可信度	租箱数量/TEU	空箱调运数量/TEU	甩箱数量/TEU	总成本/元
0.5	4461	6650	5956	2 789 072
0.6	5704	7148	6577	3 119 565
0.7	7818	8462	5913	3 504 583
0.8	9918	9527	5593	3 993 930
0.9	12 866	9842	5452	4 602 934

随着可信度的变化，租箱与空箱之比逐渐增大，相应的总成本也逐渐增大，甩箱量无趋势性变化。由上述数据可得针对不同的可信度，其总成本不同， $\alpha=0.5$ 时总成本最小。根据约束也可得到，可信度越大，相应的重箱运输需求越大，所需租赁和调运的空箱数量越多，因此总成本会相应地增多。

4 灵敏度分析

在适度不平衡模式和 3 个航次为决策期以及 $\alpha=0.8$ 情形下进行灵敏度分析。分别改变单位调运成本、租箱成本、甩箱成本以及堆存成本至原成本的 0.5 倍，2 倍，5 倍，得到相关数据变化见图 1。

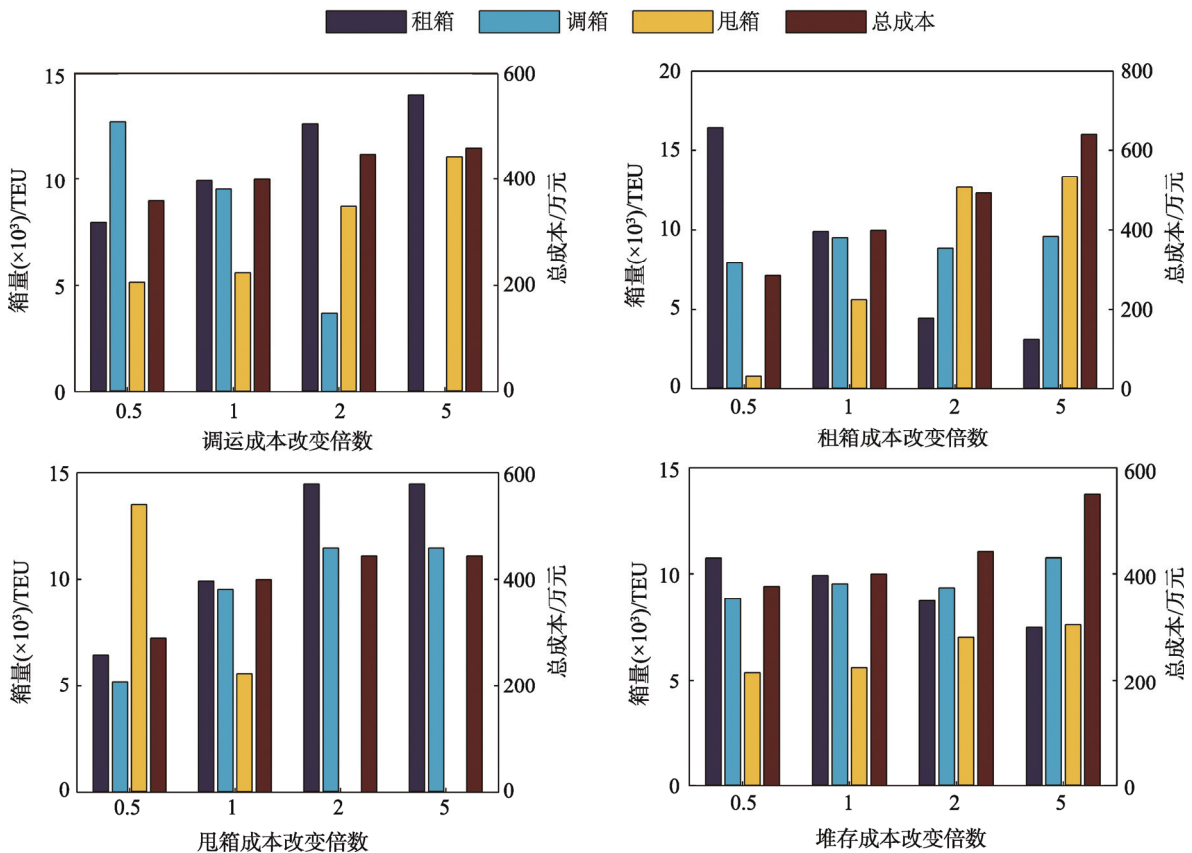


图 1 各项成本变化的影响
Fig.1 Impact of change in various costs

从图 1 可以得到的结果如下所述。

1) 在空箱运输成本减少时，空箱调运数量明显增多，甩箱数量减少，随着空箱调运成本的增加，空箱调运数量减少，甩箱数量逐渐增多，当调运成本达到一定值时，此时由于空箱成本过高，几乎不发生空箱调运，受空箱成本影响，甩箱量增加。

2) 租箱成本降低，租箱数量增加，空箱调运数量相应减少，甩箱量减少；当租箱成本增加，租箱数量减少，甩箱数量逐渐增加，而空箱调运数量在一定的范围内，随着租箱成本增加而逐渐减少，当租箱成本较大时，空箱调运量逐渐增加。由于租箱成本的计

算方式，租箱成本虽然上升，但一定时间内的租箱成本较低，在综合考虑堆存成本的情形下，租箱更有优势，且租箱减少，可调用空箱减少，因此空箱调运数量减少；而当租箱成本到达一定值时，此时空箱调运更有优势，为减少甩箱，更多的选择调运空箱，因此空箱调运量增加。

3) 甩箱成本降低，租箱数量和空箱调运数量减少，甩箱数量增多，总成本减少；甩箱成本升高，租箱数量和空箱调运数量增多，甩箱数量减少，总成本增加，当甩箱成本增加到一定值，不再出现甩箱的情况，空箱调运数量、租箱数量、总成本保持不变。

4) 空箱堆存成本降低, 租箱量增多, 空箱调运量和甩箱量数量减少, 总成本相应减少; 空箱堆存成本增加, 租箱量减少, 空箱调运量和甩箱量增多。为满足需求租入空箱, 但由于集装箱流向的不平衡造成空箱堆存, 当堆存成本增加, 租箱会引起空箱增多, 因此减少租箱, 同时为调运空箱以及其他成本综合考虑, 甩箱数量随之增多。

5 结语

在需求不确定的情形下, 重箱运输与空箱运输可能产生冲突, 导致运营成本增加, 因此综合考虑重箱和空箱约束以及需求模糊的特性, 建立了空重箱运输模糊规划模型。结合算例分析表明, 空箱调运在长期决策中更明显, 空箱调运量随着空箱调运成本进行反向变化, 与堆存成本和甩箱成本同向变化, 在一定范围内与租箱成本反向变化。文中研究了租箱成本、甩箱成本、空箱调运成本以及堆存成本对运输方案的影响, 也尚存在一些不足之处, 比如未考虑到集装箱运输过程的动态性, 针对不同的需求对运输方案进行实时调整, 也未考虑港口空箱库存以及多箱种等因素。

参考文献:

- [1] HUANG You-fang, HU Jian-kun, YANG Bin. Liner services Network Design and Fleet Deployment with Empty Container Repositioning[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 89: 116—124.
- [2] MONEMI R N, GLAREH S. Network Design, Fleet Deployment and Empty Repositioning in Liner Shipping[J]. Transportation Research Part E, 2017, 108: 60—79.
- [3] AKYÜZ M H, LEE C Y. Service Type Assignment and Container Routing with Transit Time Constraints and Empty Container Repositioning for Liner Shipping Service Networks[J]. Transportation Research Part B, 2016, 88: 46—71.
- [4] 陈康, 郭利泉, 杨忠振. 基于混合航线结构的集装箱航线与空重箱运输综合优化模型[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(1): 122—128.
CHEN Kang, GUO Li-quan, YANG Zhong-zhen. Optimization Model for Container Ship Routing And Empty/Full Container Transport in the Context of Mixed Route Structure[J]. Systems Engineering-Theory&Practice, 2014, 34(1): 122—128.
- [5] ZHENG Jian-feng, SUN Zuo, ZHANG Fang-jun. Measuring the Perceived Container Leasing Prices in Liner Shipping Network Design with Empty Container Repositioning[J]. Transportation Research Part E, 2016, 94: 123—140.
- [6] LEI T L, CHURCH R L. Locating Short-term Empty-container Storage Facilities to Support Port Operations: A User Optimal Approach[J]. Transportation Research Part E, 2011, 47(5): 738—754.
- [7] WONG E Y C, YEUNG H S C, LAU H Y K. Immunity-based Hybrid Evolutionary Algorithm for Multi-objective Optimization in Global Container Repositioning[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009, 22(6): 842—854.
- [8] WONG E Y C, LAU H Y K, MAK K L. Immunity-based Evolutionary Algorithm for Optimal Global Container Repositioning in Liner Shipping[J]. OR Spectrum, 2010, 32(3): 739—763.
- [9] 徐奇, 李娜, 靳志宏. 集装箱重空箱多周期联合调度优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(1): 145—152.
XU Qi, LI Na, JIN Zhi-hong. Combined Optimization of Allocation for Full and Empty Containers[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(1): 145—152.
- [10] 计明军, 王清斌, 张新宇, 等. 沿海港口集装箱空箱调运策略优化模型 [J]. 运筹与管理, 2014, 23(1): 80—89.
JI Ming-Jun, WANG Qing-bin, ZHANG Xin-yu, et al. Optimal Model for Allocation and Transportation Strategies of Empty Containers between Coastal Ports[J]. Operations Research And Management Science, 2014, 23(1): 80—89.
- [11] 王琳. 不确定环境下的班轮企业资源管理研究 [D]. 天津: 南开大学, 2010.
WANG Lin. Resource Management of Liner Companies Under Uncertain Environment[D]. Tianjing: Nankai University, 2010.
- [12] SONG D P, DONG J X. Effectiveness of an Empty Container Repositioning Policy with Flexible Destination Ports[J]. Transport Policy, 2011, 18(1): 92—101.
- [13] 杨洋. 基于班轮公司合作的海运空箱调运优化模型 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(1): 120—124.
YANG Yang. Stochastic Integer Programming Allocation Model of Empty Container by Sea Transportation for Liner Operators' Cooperation[J]. Journal of Shanghai Jiao-tong University, 2011, 45(1): 120—124.
- [14] 汪传旭, 陈飞燕. 船公司合作下基于多港口物流总成本最优的空箱调运 [J]. 系统管理学报, 2016, 25(3): 539—545.
WANG Chuan-xu, CHEN Fei-yan. Optimal Empty Container Reposition with Collaboration among Shipping Companies based on Multiple Ports[J]. Journal of Systems & Management, 2016, 25(3): 539—545.
- [15] 江玉杰, 韩晓龙. 航运公司合作下的海运空箱调运模糊优化模型[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 151—156.
JIANG Yu-jie, HAN Xiao-long. Fuzzy Optimization Model of Maritime Empty Container Repositioning under the Cooperation of Shipping Companies[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 151—156.