

航运公司合作下的海运空箱调运模糊优化模型

江玉杰, 韩晓龙

(上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

摘要: **目的** 对单独调箱与合作调箱策略进行对比分析, 以期为航运公司选择最佳调箱策略提供参考。**方法** 考虑港口空箱供需差和运力约束的模糊性, 以空箱调运总成本最小为目标, 建立基于航运公司合作的海运空箱调运模糊优化模型, 并通过 LINGO 建模求解具体算例。**结果** 与单独调箱策略相比, 采用合作调运策略能够有效降低航运公司的物流总成本。其中 0.32% 来自存储成本的节约, 54.05% 来自租箱成本的节约, 45.63% 来自运输成本的节约。**结论** 采用合作调箱策略, 能够降低航运公司空箱调运的总成本, 能够弱化单位空箱存储成本和租赁成本的增加对空箱调运总成本的影响, 但单位运输成本和运费加成因子的增加会降低合作调运空箱策略的优势。

关键词: 航运公司; 合作; 海运空箱调运; 模糊机会约束规划

中图分类号: TB485.3; U695.2⁺² **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)01-0151-06

Fuzzy Optimization Model of Maritime Empty Container Repositioning under the Cooperation of Shipping Companies

JIANG Yu-jie, HAN Xiao-long

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The work aims to carry out a comparative analysis of the individual and cooperative empty container repositioning strategy to provide a reference for shipping company to choose the best empty container repositioning strategy. Considering the fuzziness of empty container supply and demand margin in a port, as well as ship capacity constraint, with the minimization of the total cost of empty container transportation as the objective, the fuzzy optimization model of maritime empty container repositioning based on the cooperation of shipping companies was established. Then, the specific example was solved by LINGO. The cooperative empty container repositioning strategy could effectively reduce the total logistics cost of the shipping company compared with the individual empty container repositioning strategy. Of these, 0.32% came from storage cost savings, 54.05% from the rental cost savings, and 45.63% from transportation cost savings. In conclusion, the cooperative empty container repositioning strategy can reduce the total cost of empty container repositioning of the shipping company, and weaken the influence of the increase of the unit cost of holding and leasing empty container on the total cost of empty container repositioning, but the increase of unit transportation cost and freight royalty factor reduces the advantage of the cooperative empty container repositioning strategy.

KEY WORDS: shipping company; cooperative; maritime empty container repositioning; fuzzy chance constrained programming

国际贸易不平衡导致不同国家和地区空箱供给和需求不匹配, 从而使得海运空箱调运不可避免^[1]。

据统计, 每年在全球集装箱运量中有 20%~25% 是空箱, 每年因空箱调运产生的费用高达 300 亿美元, 这

收稿日期: 2017-07-27

基金项目: 国家自然科学基金 (71471110); 上海市科委创新项目 (16DZ1201402, 16040501500); 上海市科委工程中心能力提升项目 (14DZ2280200); 上海海事大学研究生学术新人培育计划 (YXR2017014)

作者简介: 江玉杰 (1990—), 男, 上海海事大学硕士生, 主攻物流工程与管理。

通讯作者: 韩晓龙 (1978—), 男, 上海海事大学副教授, 主要研究方向为物流与供应链管理。

严重影响航运公司经济效益^[2]。尤其在全球航运市场持续低迷的背景下,航运公司如何制定合理的空箱调运策略尤其重要。

目前,对海运空箱调运研究主要从确定条件、随机条件、模糊条件这3个角度展开。在确定条件下,Song等^[3]在分析空箱调运影响因素的基础上,根据航运公司“是否共享空箱”和“是否平衡重箱流”组合出4种空箱调运策略,并分析各种策略对空箱调运总成本的影响;杨洋^[4]从航运公司合作角度出发,考虑空箱运力约束,建立基于空箱和运力资源共享的空箱调运模型;Zheng等^[5]建立基于班轮联盟的两阶段空箱调运模型,但未考虑调箱时间因素。在随机条件下,Yin等^[6]考虑港口空箱供需差和运力约束的随机性,建立两阶段空箱调运模型;Francesco等^[7]研究了不确定性港口中断下的空箱调运问题;Zhang等^[8]建立基于 (U,D) 策略(当港口空箱量小于 U 时进口空箱至 U ;当港口空箱量大于 D 时出口空箱直至 D)的多周期空箱调运模型;Wong等^[9]将产量优化理论应用到海运空箱调运中;徐文思等^[10]考虑冷箱干用策略,建立基于空箱和运力资源共享的空箱调运模型。在模糊条件下,王斌^[11]考虑空箱需求的模糊性,建立多周期空箱调运模型;Chou^[12],Westarp等^[13]分别将模糊数学和库存理论、可持续利润优化理论应用到海运空箱调运中。

查阅现有文献可知,模糊条件下基于航运公司合作的空箱调运研究比较少。在实际业务中,由于市场需求的波动,决策者很难确切地知道未来港口空箱供需差和供需港口间空箱运力情况,但通过对历史数据统计分析可估算其区间范围,因而可以采用三角模糊数对其进行描述。其中,三角模糊数左边界、隶属度为1的点、右边界分别表示其所取的最小值、平均值和最大值。基于此,这里将考虑港口空箱供需差和运力约束的模糊性,建立基于航运公司合作的海运空箱调运模型,探讨航运公司采用合作调箱策略对空箱调运总成本的影响,并对经济参数进行灵敏度分析。

1 问题描述

为了满足未来一定时期内缺箱港的用箱需求,航运公司会事先从供箱港调运空箱到缺箱港,但调箱量会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,由于海运空箱调运时间较长,航运公司为了降低空箱调运总成本,通常会估算未来几个决策期内港口空箱供需差、供需港口间空箱运力,以便进行多周期海运空箱调运决策。然而,各决策期内,港口空箱供需差、供需港口间空箱运力会受到市场需求、重箱返空速率以及修箱比率等因素的影响,使其具有模糊性。当航运公司无法满足货主用箱需求时,通常会进行就地租箱以弥补其缺箱量,但该方法会急

剧增加航运公司的成本。为了降低空箱调运成本,航运公司之间可以建立合作调箱机制,即实现空箱资源共享、空箱舱位互租的战略联盟关系。在该机制下,航运公司可以利用联盟企业较低廉的运力或自有运力将自有或联盟企业的空箱及时地调运到缺箱港,以降低联盟企业空箱调运总成本。

2 数学模型

2.1 模型构建

2.1.1 基本假设

1) 同一航线上有几家相互独立的航运公司,在不考虑空箱中转、往返运输的前提下,已达成免费用箱、加成运费的合作协议,即航运公司可以免费使用联盟企业的空箱,但使用联盟企业的运力需支付加成的对方运输成本。

2) 决策期内,在供需港口类型不变的前提下,航运公司在其供箱港的空箱供应量、缺箱港的空箱需求量以及供需港口间空箱运力均为三角模糊变量。

3) 当调运的空箱数量无法满足货主的用箱需求时,航运公司可以从租赁公司租用空箱以满足其缺箱量。所租赁的空箱在缺箱港能够即刻得到,且租箱量无限制。

2.1.2 参数与变量

1) 下标集合。 $T(t \in T)$ 为计划周期集合; $I(i \in I)$ 为供箱港集合; $J(j \in J)$ 为缺箱港集合; $K(k, m \in K)$ 为航运公司集合; $P(p \in I \cup J = P)$ 为港口集合。

2) 节点参数。 \hat{S}_i^k 为航运公司 k 在 t 时期供箱港 i 的空箱供给量,且为三角模糊变量,即 $\hat{S}_i^k = (S_{i1}^k, S_{i2}^k, S_{i3}^k)$; \hat{D}_j^k 为航运公司 k 在 t 时期缺箱港 j 的空箱需求量,且为三角模糊变量,即 $\hat{D}_j^k = (D_{j1}^k, D_{j2}^k, D_{j3}^k)$; C_{hp}^k 为航运公司 k 在 t 时期港口 p 的单位空箱存储成本; C_{rj}^k 为航运公司 k 在 t 时期缺箱港 j 的单位空箱租赁成本; C_{sij}^k 为航运公司 k 在 t 时期从供箱港 i 调运单位空箱到缺箱港 j 的运输成本; O_{ij}^k 为航运公司 k 从供箱港 i 调运空箱到缺箱港 j 所需的决策期数; \hat{U}_{ij}^k 为航运公司 k 在 t 时期从供箱港 i 调运空箱到缺箱港 j 的运输能力,且为三角模糊变量,即 $\hat{U}_{ij}^k = (U_{ij1}^k, U_{ij2}^k, U_{ij3}^k)$; ω 为航运公司之间所达成的运费加成因子。

3) 决策变量。 x_{ij}^k 为 t 时期航运公司 k 使用自有空箱和运力,从供箱港 i 调运空箱到缺箱港 j 的数量; y_{ij}^{km} 为 t 时期航运公司 k 使用航运公司 m 的运力,从供箱港 i 调运自有空箱到缺箱港 j 的数量; z_{ij}^{km} 为 t 时

期航运公司 k 使用自有运力，从供箱港 i 调运来自航运公司 m 的空箱到缺箱港 j 的数量； f_{ij}^{km} 为 t 时期航运公司 m 使用自有空箱和运力为航运公司 k 从供箱港 i 调运空箱到缺箱港 j 的数量； r_{ij}^k 为 t 时期航运公司 k 在缺箱港 j 所租赁的空箱量； v_{in}^k 为 t 时期航运公司 k 在港口 p 所存储的空箱量。

2.1.3 建立模型

根据上述描述，以空箱调运总成本最小为目标，可建立基于航运公司合作的海运空箱调运模糊优化模型（模型 I）。

$$\begin{aligned} \min TC = & \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} C_{hp}^k v_{in}^k + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} C_{tj}^k r_{ij}^k + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{sij}^k x_{ij}^k + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{m \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{sij}^k z_{ij}^{km} + \quad (1) \\ & \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{m \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (C_{sij}^m y_{ij}^{km} + C_{sij}^m f_{ij}^{km})(1 + \omega) \end{aligned}$$

在目标函数中，依次为在计划周期 T 内空箱存储总成本、租箱总成本和运输总成本。约束条件如下所述。

1) 航运公司在供箱港所存储的空箱量约束，即 t 时期航运公司 k 在供箱港 i 所存储的空箱量 = $t-1$ 时期所存储的空箱量 + 第 t 时期空箱供给量 - t 时期使用自有或联盟企业的运力从供箱港 i 调出的自有空箱量，则：

$$\begin{aligned} v_{in}^k = & v_{in}^{k,t-1} + \delta_{in}^k - \sum_j x_{ij}^k - \sum_{m \in K, m \neq k} \sum_j y_{ij}^{km} - \\ & \sum_j \sum_{m \in K, m \neq k} z_{ij}^{mk} - \sum_j \sum_{m \in K, m \neq k} f_{ij}^{mk} \quad (2) \end{aligned}$$

2) 航运公司在缺箱港所存储的空箱量约束，即 t 时期航运公司 k 在缺箱港 j 所存储的空箱量 = $t-1$ 时期所存储的空箱量 + t 时期所租赁的空箱量 - t 时期空箱需求量 + t 时期空箱调入量，则：

$$\begin{aligned} v_{in}^k = & v_{in}^{k,t-1} + r_{ij}^k - \bar{D}_{ij}^k + \sum_{i \in I, t > O_{ij}^k} x_{t-O_{ij}^k, i, j}^k + \\ & \sum_{i \in I, t > O_{ij}^m} \sum_{m \in K, m \neq k} y_{t-O_{ij}^m, i, j}^{km} + \sum_{i \in I, t > O_{ij}^k} \sum_{m \in K, m \neq k} z_{t-O_{ij}^k, i, j}^{km} + \quad (3) \\ & \sum_{i \in I, t > O_{ij}^m} \sum_{m \in K, m \neq k} f_{t-O_{ij}^m, i, j}^{km} \end{aligned}$$

3) 供需港口间空箱运力约束，即 t 时期航运公司 k 从供箱港 i 调运空箱（包括自有和联盟企业的空箱）到缺箱港 j 的数量 ≤ 供箱港 i 调运空箱到缺箱港 j 的运输能力，则：

$$x_{ij}^k + \sum_{m \in K, m \neq k} z_{ij}^{km} + \sum_{m \in K, m \neq k} y_{ij}^{mk} + \sum_{m \in K, m \neq k} f_{ij}^{mk} \leq \bar{U}_{ij}^k \quad (4)$$

4) 决策变量（具体见 2.1.2 节）为非负整数约束，则：

$$x_{ij}^k, y_{ij}^{km}, z_{ij}^{mk}, f_{ij}^{km}, r_{ij}^k, v_{in}^k, v_{in}^k \in \mathbb{N} \quad (5)$$

2.2 模型求解

2.2.1 模型转化

模型 I 是一个带有模糊约束的动态整数规划模

型。由于该模型存在模糊变量，使得约束式（2—4）没有明确的意义。为了求解该模型，需要进行合理地转化，在 Liu^[14]的研究基础上，可将模型 I 转化为一个模糊机会约束的动态整数规划模型（模型 II）。其中，目标函数同式（1），约束式（2—4）可分别转化为约束式（6—8），约束式（5）保持不变。 $p\{X\}$ 为事件 X 成立的可能性，约束式（6—8）分别表示约束条件得到满足的可能性至少应达到给定的可信度水平 α, β, γ 。

$$p\{\bar{S}_{in}^k = v_{in}^k - v_{in}^{k,t-1} + \sum_j x_{ij}^k + \sum_{m \in K, m \neq k} \sum_j y_{ij}^{km} + \quad (6)$$

$$\sum_j \sum_{m \in K, m \neq k} z_{ij}^{mk} + \sum_j \sum_{m \in K, m \neq k} f_{ij}^{mk}\} \geq \alpha$$

$$p\{\bar{D}_{ij}^k = v_{in}^{k,t-1} - v_{in}^k + r_{ij}^k + \sum_{i \in I, t > O_{ij}^k} x_{t-O_{ij}^k, i, j}^k + \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I, t > O_{ij}^m} \sum_{m \in K, m \neq k} y_{t-O_{ij}^m, i, j}^{km} + \sum_{i \in I, t > O_{ij}^k} \sum_{m \in K, m \neq k} z_{t-O_{ij}^k, i, j}^{km} + \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I, t > O_{ij}^m} \sum_{m \in K, m \neq k} f_{t-O_{ij}^m, i, j}^{km}\} \geq \beta$$

$$p\{\bar{U}_{ij}^k \geq x_{ij}^k + \sum_{m \in K, m \neq k} z_{ij}^{km} + \sum_{m \in K, m \neq k} y_{ij}^{mk} + \quad (8)$$

$$\sum_{m \in K, m \neq k} f_{ij}^{mk}\} \geq \gamma$$

2.2.2 模型清晰化

基于文献[15]中的 α 切割法原理，可将模型 II 中的模糊机会约束转化为相应的清晰等价类，则约束式（6）可以转化为清晰等价类式（9—10）；约束式（7）可以转化为清晰等价类式（11—12）；约束式（8）可以转化为清晰等价类式（13）。在将航运公司各决策期内港口空箱供需差、供需港口间空箱运力看作隶属度函数已知的三角模糊数的前提下，可得一个清晰动态整数规划模型（模型 III）。

$$v_{in}^k - v_{in}^{k,t-1} + \sum_j x_{ij}^k + \sum_{m \in K, m \neq k} \sum_j y_{ij}^{km} + \sum_{m \in K, m \neq k} \sum_j z_{ij}^{mk} + \quad (9)$$

$$\sum_j \sum_{m \in K, m \neq k} f_{ij}^{mk} \geq (1 - \alpha)S_{in}^k + \alpha S_{in}^k \quad (9)$$

$$v_{in}^k - v_{in}^{k,t-1} + \sum_j x_{ij}^k + \sum_{m \in K, m \neq k} \sum_j y_{ij}^{km} + \sum_{m \in K, m \neq k} \sum_j z_{ij}^{mk} + \quad (10)$$

$$\sum_j \sum_{m \in K, m \neq k} f_{ij}^{mk} \leq (1 - \alpha)S_{in}^k + \alpha S_{in}^k \quad (10)$$

$$v_{in}^{k,t-1} - v_{in}^k + r_{ij}^k + \sum_{i \in I, t > O_{ij}^k} x_{t-O_{ij}^k, i, j}^k + \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I, t > O_{ij}^m} \sum_{m \in K, m \neq k} y_{t-O_{ij}^m, i, j}^{km} + \sum_{i \in I, t > O_{ij}^k} \sum_{m \in K, m \neq k} z_{t-O_{ij}^k, i, j}^{km} + \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I, t > O_{ij}^m} \sum_{m \in K, m \neq k} f_{t-O_{ij}^m, i, j}^{km} \geq (1 - \beta)D_{ij}^k + \beta D_{ij}^k \quad (11)$$

$$v_{in}^{k,t-1} - v_{in}^k + r_{ij}^k + \sum_{i \in I, t > O_{ij}^k} x_{t-O_{ij}^k, i, j}^k + \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I, t > O_{ij}^m} \sum_{m \in K, m \neq k} y_{t-O_{ij}^m, i, j}^{km} + \sum_{i \in I, t > O_{ij}^k} \sum_{m \in K, m \neq k} z_{t-O_{ij}^k, i, j}^{km} +$$

$$\sum_{i \in I, t > O_{ij}^m} \sum_{m \in K, m \neq k} f_{t-O_{ij}^m, i, j}^{km} \leq (1-\beta)D_{ij3}^k + \beta D_{ij2}^k \quad (12)$$

$$x_{ij}^k + \sum_{m \in K, m \neq k} z_{ij}^{km} + \sum_{m \in K, m \neq k} y_{ij}^{mk} + \sum_{m \in K, m \neq k} f_{ij}^{mk} \leq$$

$$(1-\gamma)U_{ij3}^k + \gamma U_{ij2}^k \quad (13)$$

3 算例分析

3.1 已知条件

1) 假设航运公司 1 和航运公司 2 在某条覆盖 6 个港口的航线上采用合作调箱策略。对于两家航运公司来说, 位于北美的鲁伯特王子港、长滩港和奥克兰港为供箱港, 位于中国的上海港、青岛港和天津新港为缺箱港。

2) 根据历史数据统计分析知, 两家航运公司在未来 8 个决策期内, 供箱港空箱供给情况、缺箱港空箱需求情况和供需港口间空箱运力情况具体数据见表 1—3, 其中*/*/*分别表示供给港空箱供给、缺箱港空箱需求、供需港口间空箱运力的最小值/平均值/最大值, 单位为箱。

表 1 供箱港空箱供给情况
Tab.1 Empty container supply at surplus ports

航运公司	决策期	鲁伯特王子港	长滩港	奥克兰港
1	1	28/48/68	30/45/75	25/50/85
	2	30/45/65	35/60/95	35/50/90
	3	28/45/65	24/48/75	32/55/95
	4	25/50/70	18/36/50	35/65/85
	5	20/45/70	24/60/85	45/75/85
	6	15/50/65	26/70/90	35/65/80
	7	20/35/65	32/50/75	55/75/90
	8	10/45/70	20/50/75	15/45/85
2	1	35/45/55	25/35/75	30/45/80
	2	45/55/75	35/45/80	25/40/65
	3	30/45/65	25/35/55	15/35/75
	4	10/40/70	18/35/80	25/45/60
	5	25/45/65	32/45/65	35/60/80
	6	35/55/75	28/35/80	30/55/75
	7	15/55/75	18/28/60	20/60/80
	8	10/40/70	25/45/70	20/40/65

表 2 缺箱港空箱需求情况
Tab.2 Empty container demand at deficit ports

航运公司	决策期	上海港	青岛港	天津新港
1	1	25/45/80	45/65/85	35/50/85
	2	30/60/85	40/70/90	30/65/99
	3	45/60/70	45/60/70	35/55/95
	4	40/65/85	45/60/95	30/50/90
	5	35/65/99	35/70/90	35/55/85
	6	50/70/90	45/65/95	55/85/95
	7	45/60/70	40/60/70	35/55/88
	8	40/70/85	45/70/98	55/70/90
2	1	30/55/95	35/55/95	35/60/70
	2	40/60/85	55/75/85	40/65/95
	3	55/75/95	45/65/80	35/65/90
	4	35/60/85	65/80/85	45/60/85
	5	30/50/95	40/65/95	30/65/90
	6	40/60/80	55/60/85	45/70/95
	7	55/75/90	65/85/95	55/75/95
	8	35/65/95	45/85/95	45/75/90

表 3 供需港口间空箱运力情况
Tab.3 Empty container transportation capacity between surplus and deficit ports

航运公司	供需港口	上海港	青岛港	天津新港
1	鲁伯特王子港	25/40/55	25/40/65	25/45/70
	长滩港	25/40/55	25/35/60	30/40/55
	奥克兰港	30/45/60	30/40/60	35/45/65
2	鲁伯特王子港	35/55/60	25/40/60	35/45/65
	长滩港	30/55/60	40/55/65	30/60/70
	奥克兰港	40/50/70	50/60/70	35/45/70

3) 根据两家航运公司实际经营情况知, 供需港口间空箱运输成本、空箱调运所需决策期数见表 4—5; 供箱港、缺箱港每期空箱存储成本分别为 28, 26, 30, 24, 16, 18 美元/标箱; 缺箱港每期租箱成本分别为 520, 500, 510 美元/标箱; 航运公司 1 和 2 在决策期开始时, 供箱港、缺箱港的空箱存储量分别为 50/55, 60/65, 40/45, 80/95, 85/95, 85/70 标箱。可信度水平 α, β, γ 设置为 0.9, 运费加成因子设置为 0.1。

表 4 供需港口间空箱运输成本
Tab.4 Empty container transportation cost between surplus and deficit ports

供需港口	上海港	青岛港	天津新港
鲁伯特王子港	100/280	120/260	140/230
长滩港	150/210	170/190	190/160
奥克兰港	200/180	220/160	240/130

注: */*表示航运公司 1 和 2 的供需港口间空箱运输成本, 单位为美元/箱。

表 5 供需港口间空箱调运所需决策期数
Tab.5 Empty container transportation decision-making cycles between surplus and deficit ports

供需港口	上海港	青岛港	天津新港
鲁伯特王子港	1/4	1/3	2/3
长滩港	2/3	2/2	2/2
奥克兰港	2/2	3/2	3/1

注：*/*表示航运公司 1 和 2 供需港口间的空箱调运所需决策期数，单位为周

3.2 计算结果分析

运用 LINGO 编程求解算例可知，当两家航运公司采用合作调箱策略时，空箱调运总成本为 467 613 美元，而采用单独调箱策略时，空箱调运的总成本为 586 650 美元（其中，航运公司 1/2 空箱调运的成本为 229 578/357 072 美元），即采用合作调箱策略能降低空箱调运 119 037 美元的成本。其中，0.32%来自存储成本的节约，54.05%来自租箱成本的节约，45.63%来自运输成本的节约。

两家航运公司采用合作调箱策略，能够在不增加存储成本的前提下大幅度降低空箱调运系统的租箱成本和运输成本，从而使得联盟企业空箱调运的总成本下降 20.29%。其原因可归纳为：航运公司可以利用联盟企业的运力和空箱资源，针对市场需求变化，合理地组织空箱调运，这样既可以降低调运系统中的租箱量，也可以合理地将空箱分布在存储费率较低的港口，以便及时地进行空箱调运，进而增加调运系统的运输弹性，从而增强联盟企业应对未来不确定性风险的能力，以及提高调运系统的空箱利用率。

此外，为了激励航运公司之间的合作，使双方空箱调运的总成本均有等价性地降低，可采用 Shapely 值法对节约成本进行合理分配，即航运公司 1 和航运公司 2 均应分配 59 518.5 美元的收益，即航运公司 1/2 的空箱调运的总成本降至 170 059.5/297 553.5 美元。

3.3 经济参数变化分析

3.3.1 单位成本

单位成本的变化对总成本的影响见图 1—3。

由图 1 可知，在其他条件不变的前提下，随着单位存储成本的增加，2 种调箱策略的空箱调运总成本均有减速上升的趋势，不过单独调箱策略的空箱调运总成本增长速度更快，即合作调箱策略能够有效地弱化单位存储成本的增加对空箱调运总成本的影响。

由图 2 可知，在其他条件不变的前提下，随着单位租箱成本的增加，2 种调箱策略的空箱调运总成本均有平稳上升的趋势，但合作调箱策略的空箱调运总成本增长明显慢于单独调箱策略，且随着单位租箱成

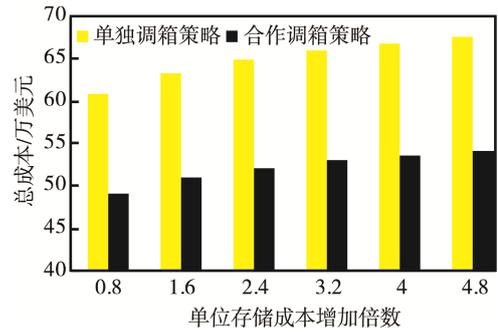


图 1 单位存储成本变化对总成本的影响

Fig.1 The impact of change in unit holding cost on total cost

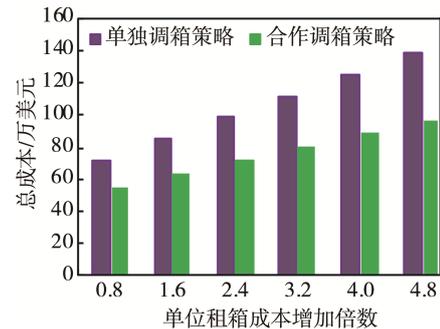


图 2 单位租箱成本变化对总成本的影响

Fig.2 The impact of change in unit rental cost on total cost

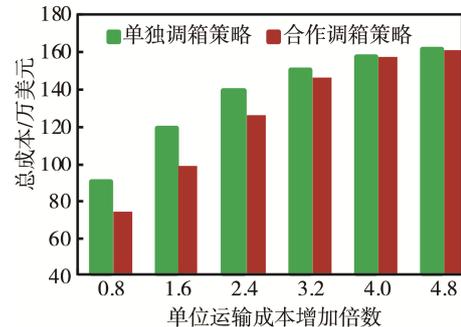


图 3 单位运输成本变化对总成本的影响

Fig.3 The impact of change in unit transportation cost on total cost

本的增加，2 种调箱策略下的成本差越来越大，合作调箱策略的优势更加明显，即航运公司采用合作调箱策略能够有效弱化单位租箱成本的增加对空箱调运总成本的影响。

由图 3 可知，在其他条件不变的前提下，随着单位运输成本的增加，2 种调箱策略的空箱调运总成本均有减速上升的趋势，且随着单位运输成本的增加，合作调箱策略的优势越来越不明显，这是因为随着单位运输成本的增加，缺箱港的单位租箱成本相对而言就会降低，当运输成本远大于租箱成本时，航运公司就会就地租箱，无需进行空箱调运，此时合作调箱策略就会失效。实际生活中单位空箱运输成本通常小于租箱成本。

3.3.2 运费加成因子

运费加成因子的变化对节约成本的影响见图 4。

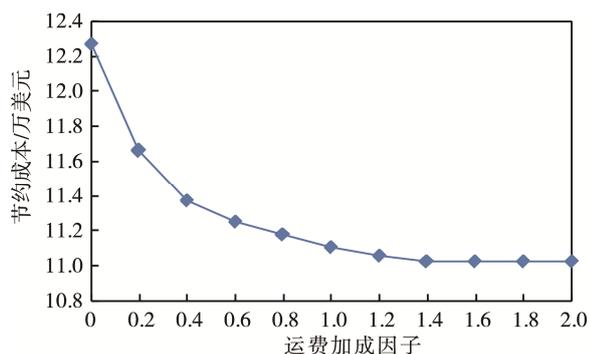


图4 运费加成因子变化对节约成本的影响

Fig.4 The impact of change in freight royalty factor on total cost

由图4可知,在其他条件不变的前提下,当运费加成因子以0.2为步长从0逐渐增加到2时,合作调箱策略下的节约成本呈现减速下降趋势,且在运费加成因子 ≥ 1.6 时,节约成本维持在11.03万美元,但与单独调箱策略相比,合作调箱策略始终具有优势,这是因为航运公司除了运力合作外还有空箱资源共享,即因空箱资源共享而使联盟企业节约的成本为11.03万美元。由此,为了提高联盟企业的合作力度以及降低空箱调运的总成本,航运公司在设置运费加成因子时应结合实际情况合理地在0~1.6之间进行选值。

4 结语

实际业务中,航运公司各决策期内港口空箱供需差以及供需港口间空箱运输能力会受到市场需求、重箱返空速率、修箱比率等因素的影响,使其具有模糊性。为了削弱这些不确定性因素的影响,航运公司之间可以建立合作调箱机制,即实现空箱资源共享、空箱舱位互租的战略联盟关系。为此,这里建立基于航运公司合作的海运空箱调运模糊优化模型。算例结果表明,采用合作调箱策略,能够降低航运公司空箱调运的总成本,能够弱化单位空箱存储成本、租赁成本的增加对空箱调运总成本的影响,但单位运输成本和运费加成因子的增加会降低合作调箱策略的优势。该研究尚存在一些不足之处,比如模型中未考虑碳排放、多箱种以及安全库存等因素,此外,还可以进一步研究航运公司合作下的空重箱协同调运问题。

参考文献:

- [1] 张丽娜, 韩晓龙. 海陆联运下可折叠集装箱的空箱调运研究[J]. 包装工程, 2016, 37(17): 112—117.
ZHANG Li-na, HAN Xiao-long. Optimization of Foldable Empty Containers Reposition under Sea-rail Transportation[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(17): 112—117.
- [2] LEE C Y, SONG D P. Ocean Container Transport in

Global Supply Chains: Overview and Research Opportunities[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2016, 95(1): 442—474.

- [3] SONG D P, CATER J. Empty Container Repositioning in Liner Shipping[J]. Maritime Policy & Management, 2009, 36(4): 291—307.
- [4] 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.
- [5] ZHENG Jian-feng, SUN Zhuo, GAO Zi-you. Empty Container Exchange among Liner Carriers[J]. Transportation Research Part E, 2015, 83(1): 158—169.
- [6] YIN L, LOO H L, EK P C. The Sample Average Approximation Method for Empty Container Repositioning with Uncertainties[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 222(1): 65—75.
- [7] FRANCESCO M D, LAI M, ZUDDAS P. Maritime Repositioning Empty Container under Uncertain Port Disruptions[J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 64(3): 827—837.
- [8] ZHANG B, NG C T, CHENG T C E. Multi-period Empty Containers Repositioning with Stochastic Demand and Lost Sale[J]. Journal of the Operational Research Society, 2014, 65(2): 302—319.
- [9] WONG E Y C, TAI A H, RAMAN M. A Maritime Containers Repositioning Yield-based Optimization Model with Uncertain Upsurge Demand[J]. Transportation Research Part E, 2015, 82(1): 147—161.
- [10] 徐文思, 张荣. 航运公司合作下的海运冷藏箱空箱调租优化模型[J]. 大连海事大学学报, 2016, 42(4): 105—111.
XU Wen-si, ZHANG Rong. Optimal Model of Maritime Empty Reefer Repositioning and Leasing under Shipping Companies' Cooperation[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2016, 42(4): 105—111.
- [11] 王斌. 海运空箱调运模糊优化研究[J]. 港工技术, 2007(4): 11—13.
WANG Bin. Research about the Fuzzy Optimization of Repositioning of Empty Container on Sea Bound[J]. Port Engineering Technology, 2007(4): 11—13.
- [12] CHOU C C, GOU R H, TSAI C L, et al. Application of a Mixed Fuzzy Decision Making and Optimization Programming Model to the Empty Container Allocation[J]. Applied Soft Computing, 2010, 10(4): 1071—1079.
- [13] WESTARP A G V, SCHINAS O, TALLEY W. A Fuzzy Approach for Container Positioning Considering Sustainable Profit Optimization[J]. Transportation Research Part E, 2016, 92(1): 56—66.
- [14] LIU B, IWAMURA K. Chance Constrained Programming with Fuzzy Parameters[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 94(2): 227—237.
- [15] 刘宝碇, 赵瑞清. 随机规划和模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
LIU Bao-ding, ZHAO Rui-qing. Stochastic Programming and Fuzzy Programming[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.