



基于多种合作模式的内陆空集装箱调运优化

韩曙光^a, 张 潇^b

(浙江理工大学, a.理学院; b.经济管理学院, 杭州 310018)

摘 要: 为了有效降低内陆空集装箱调运成本以提高船运公司的收益, 建立基于船运公司和卡车运输公司相互合作的内陆空集装箱调运优化模型。以船运公司之间共享空集装箱资源、调运资源为基础, 结合三角运输、互租、互换等三种合作模式, 形成相互合作的共赢局面。综合考虑租箱成本、运输费用、堆存限制、停留时间窗等因素, 在保证满足空箱需求的前提下, 达到各参与方空箱调运总成本最小化的目标。最后, 通过算例, 给出船运公司内陆空集装箱合作调运的优化方案, 从而验证模型的有效性, 为船运公司之间的合作决策提供参考和指导。

关键词: 空集装箱调运; 合作模式; 三角运输; 空集装箱互租; 空集装箱互换

中图分类号: F224.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2019)04-0120-08

Research on optimization of inland empty container allocation on sharing basis

HAN Shuguang^a, ZHANG Xiao^b

(a. School of Sciences; b. School of Economics and Management,
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to effectively reduce the inland empty container transportation cost so as to improve the revenue of shipping companies, an inland empty container transportation optimization model based on cooperation between shipping companies and truck transportation companies was established. Based on the sharing of empty container resources and transportation resources among shipping companies, three cooperation modes (triangular transportation, mutual rent, and interchange) were combined to form a win-win situation of mutual cooperation. By taking into account of factors such as renting cost, transportation cost, storage limit, and residence time window, the goal of minimizing empty container transportation cost for each party was reached under the premise of meeting the demand for empty containers. At the same time, through the example, the optimization scheme of the shipping company's inland empty container transportation was given to verify the effectiveness of the model and provide valuable reference and guidance for the shipping company's cooperative decision-making.

Key words: empty container transportation; cooperation mode; triangular transportation; empty container mutual rent; empty container interchange

集装箱运输是一种以集装箱为载体, 将货物进行集成管理的运输方式。随着经济全球化进程的推

进, 集装箱运输行业在过去的十几年中得到快速发展, 全球港口集装箱总吞吐量从 2000 年的近 2.25

收稿日期: 2018-08-28 网络出版日期: 2018-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(11571013, 11471286, 11701518)

作者简介: 韩曙光(1977—), 男, 江苏建湖人, 副教授, 博士, 主要从事物流与供应链管理、算法设计等方面的研究。

亿标箱(长度为20英尺的集装箱)增加到2016年的7.01亿标箱,年增长率为13%。相对于传统的运输方式,集装箱运输将货物组合集成单元,能够极大地提高运输的效率和质量。同时,也对地区贸易往来和现代物流业的发展起到重大的促进作用。然而,集装箱运输也存在一些问题和挑战:虽然运输需求不断增加,但贸易需求极度不平衡,对集装箱的管理和调度提出了很高的要求^[1]。

空集装箱(简称空箱)调度是一个以满足集装箱需求为目标,平衡各地区集装箱流通数量的过程。Rodrigue等^[2]发现航运公司每年花费约1100亿美元来管理集装箱船队(如采购、维修),其中160亿美元(约占15%)用于空箱调度。因此,优化空箱调度对减少航运公司的空箱管理成本具有重要意义。由于集装箱运输主要应用于海上运输行业,过往许多研究都聚焦在航运公司全球服务网络调度模型的构建上,诸如时空网络模型^[3]、多场景混合整数规划模型^[4]与两阶段空箱协调模型^[5]。随着铁路运输与公路运输的不断发展,内陆集装箱运输业务日益繁荣,但存在空箱空缺导致客户订单逾期的问题,而且返程空箱不仅导致资源浪费,其在调度过程中还会造成重大的环境和社会影响,如额外的废气排放和道路拥挤。此外,内陆集装箱运输是中国连接西亚和欧洲的主要运输方式,对“一带一路”发展战略的实施具有重要影响^[6]。因此,内陆空箱调运优化是一个亟待解决的重要问题。

近年来,许多学者对内陆空箱调运做了不少有益的探讨,研究方向主要分为两类。一类是基于库存控制模型,围绕航运公司的港口和内陆仓库,优化空箱存储量和空箱滞留时间。Song等^[7]在不确定需求的情况下,建立了一种以空箱库存为基础的最优控制策略。汪传旭等^[8]考虑在空箱需求和供给均为模糊随机的条件下,建立以集装箱调运总成本最小化为目标的多阶段空箱持有量优化模型。Yu等^[9]利用两阶段博弈模型来描述承运人关于集装箱滞留时间的决定,推导出空箱的最优配送策略和在承运人处的最优滞留时间。而另一类研究则是基于网络流方法建立数学模型,通过平衡运输网络中的集装箱流通量达到整体协调的目的。Braekers等^[10]同时考虑空箱和重箱的运输路线,并将其转化为带有时间窗的不对称多重旅行推销员问题。An等^[11]在空箱调运中加入水陆运输方式,并提出基于遗传算法和整数规划的混合算法。Hjortnaes等^[12]提出基于区分无损集装箱和受损集装箱流动网络的

多商品模型,并根据网络的组成、集装箱的类型和特定的运输方式制定空箱调度策略。Liu等^[13]在加入空箱退货政策的情境下考虑集装箱卡车的调度问题,以提高空箱的周转速率。在上述两类研究的基础上,一部分学者通过拓展集装箱的使用方式和功能,使其能够更灵活地应对现实场景。Olivo等^[14]根据决策变量和约束条件,在不同的集装箱尺寸类型之间进行替换,灵活租赁集装箱。徐文思等^[15]提出“冷箱干用”策略,以总利润最大化为目标,构建基于航运公司共享舱位资源的海运冷藏空箱调租优化模型。而另一部分学者探讨整个运输链条中所有参与者之间的关系,提出了各种基于协同合作的模型。Furió等^[16]基于两种不同的集装箱运输模式进行比较,以优化托运人、收货人、码头和仓库之间的陆地空集装箱运输为目的,最小化空箱调运成本。Sterzik等^[17]则通过加入车辆约束使用禁忌搜索算法在实例上进行优化。

综上所述,现有研究^[7-12]大多只考虑了单个运输公司的空箱调度问题,而基于多公司合作下的调运优化研究^[15-17]较少,所考虑的合作模式和合作对象也较为单一,缺少不同合作模式下空箱调度效果的验证和对比。针对上述问题,本文提出空箱资源共享,建立基于多种合作模式组合的空箱调运优化模型,研究多航运公司在不同空箱持有量情况下的调运策略,以期能为航运公司实际运营提供借鉴及指导。

一、集装箱运输模式分析

(一)集装箱运输背景

集装箱运输业务始于客户对产品进行销售和供应的需求。通常客户会向航运公司询问从某一个港口运输定额数量的集装箱到另一个港口的报价,一旦获知海上运输的费率,客户会进一步沟通发货人和收货人的确切位置,并询问全程运输服务的报价。整个运输服务分为海运和陆运两部分,当承运人所提供的运输服务不能满足客户的需求,诸如运输目的地不在航运公司的营运范围内或者价格过高时,客户会考虑选择混合运输方式,即分别与航运公司谈判海运部分,与卡车运输公司和铁路公司谈判陆运部分。在实际运输过程中,航运公司也倾向于将内陆运输外包,以利用其合作伙伴的经验、技术和设备(诸如卡车、托盘、信息系统等)。同时,航运公司也拥有足够的集装箱运输业务量与卡车运输公司进行谈判,压低卡车运输公司的报价并获得高质量的服务。因此,一家航运公司会跟多家卡车运输公司

建立合作关系,凭借后者的运输能力来扩大自己的服务范围,满足更多客户的需求。

合作伙伴的集装箱运输业务统一由船运公司进行分配,因此淡化了卡车运输公司之间在该业务方向上的竞争关系,使得卡车运输公司之间具有合作的基础。另外,为了降低运营成本、优化航线配置,船运公司之间也相互建立合作关系,组成班轮联盟。如马士基航运与地中海航运组建为 2 M 联盟;法国达飞、长荣海运、中远集运和东方海外组成 Ocean Alliance 等。船运公司与卡车运输公司的合作、卡车运输公司之间的合作以及船运公司之间的合作,使得内陆空箱调运拥有更丰富的运输合作模式,可以根据不同的业务需求进行选择。

(二) 集装箱运输模式

在整个集装箱运输环节中,其流通节点有发货方、内陆集装箱仓库、港口、收货方。港口与内陆集装箱仓库都具有存储集装箱的功能,港口同时也负责重箱和空箱的进出口流通。内陆集装箱仓库的建立是为了更快捷地响应发货人的需求,同时减少空箱往返运输的时间和成本。当发货人告知船运代理公司空箱的需求信息后,船运代理公司将需求信息进行处理,生成订单传递给船运公司,然后由船运公司将订单分配至负责该区域的仓库,并调配集装箱卡车与司机,将空集装箱在约定时间范围内送达发货人处进行货物装载。集装箱随着货物经由港口海运,一同到达目的地,卸载货物后集装箱由重箱状态转变为空箱状态,再被运回就近的集装箱仓库或港口。而何时从何地调运多少空箱来满足发货人的空

箱需求,是空箱调运需要解决的核心问题。

当前的空箱调运模式主要基于库存控制模型,即当某个节点的空箱库存数量下降到库存最低安全线时,便从其他地区调运空箱至该节点,但每个节点所制定的安全库存策略会导致大量的空箱储备和反复调运,使得经营成本不断升高。鉴于每一家船运公司在其仓库节点都会存储一定量空箱的情况下,本文提出空箱资源共享的合作调运方式。结合上文所阐述的合作背景,有以下三种合作调运模式可以选择。

1. 三角运输模式

三角运输^[18]模式是在传统运输模式的基础上将发货人与收货人联立起来,因其运输轨迹与三角形相似而得名。如图 1 所示,在图 1(a)中,装满货物的集装箱(以下简称重箱)从港口运输至收货人 A 处,卸载货物后将空箱运送至内陆仓库 1,发货人 B 处的空箱需求则由内陆仓库 2 提供服务。而在图 1(b)中,重箱在收货人 A 处卸载货物后,集装箱的使用状态转化为空箱,可直接运送至发货人 B 处。三角运输模式依赖于卡车运输公司和船运公司的合作,船运公司将订单信息共享给运输公司,运输公司则负责空箱调运的实施,使得能够节约无利可图的空集装箱进出内陆仓库的成本。且在更高的合作维度上,当一辆装满货物的集装箱卡车到达收货人处后,或者一辆空集装箱卡车到达发货人处后,将车头与箱体分开,由顾客进行装卸,而司机开往另一处执行运输任务。但其缺陷在于空箱需求随机产生时,无法预估发货人的位置,而当卡车和空集装箱一直停留在收货人处时,其也会随着停留时间的增加而产生更多的等待成本。

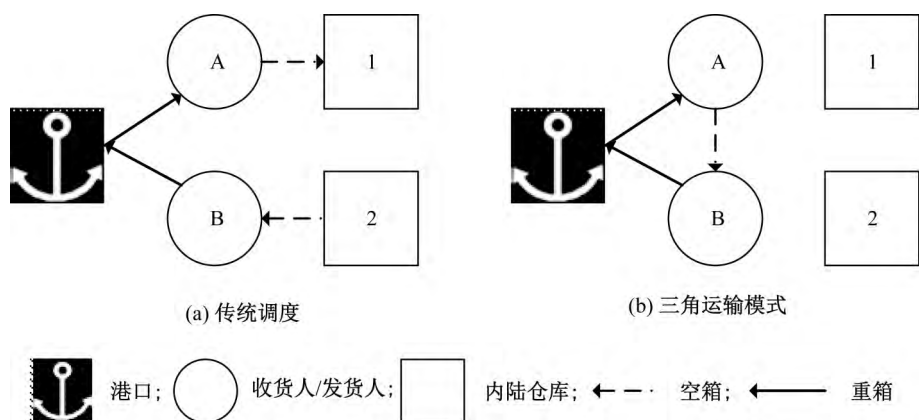


图 1 传统调运模式与三角运输模式示意图

2. 空箱互租模式

空箱互租^[19]是一种基于船运公司空箱资源共享的运输模式。虽然当下有专门的集装箱租赁公司为船运公司提供集装箱,但也存在还箱点数量少、位

置固定、租期必须为整月等缺点。而船运公司之间的空箱互租策略通过签订合作协议,淡化租赁行为的盈利性质,共同追求空箱调运成本的降低,使得模式更具有灵活性和便利性。当船运公司在某一港口

处的空集装箱数量不足,且在其他节点的空集装箱无法及时调运时,可以向在同一港口或同一区域的合作船运公司租赁空集装箱来满足客户需求,减少因违约或延误造成的损失。当租赁的集装箱在运输任务完成后,可选择就近的合作方仓库归还集装箱。这种模式不仅能够增加集装箱运营的稳健性,同时也为部分闲置空箱资源创造新的使用价值。

3. 空箱互换模式

空箱互换^[20]是另一种集装箱共享模式,通过资源共享的方式调和双方资源的差异。因为贸易不平衡以及公司业务经营区域的不同,导致不同的船运公

司在不同的地区的空箱数量存在较大的差异。如图2所示,在某一区域内,A公司有两个仓库节点A1、A2,B公司有两个仓库节点B1、B2,其中仓库A1与仓库B1距离较近,仓库A2与仓库B2距离较近,当A1仓库与B2仓库存在较多空箱,而A2仓库与B1仓库缺少空箱时,即可通过就近相互交换空箱使得两者在花费更少运输成本的情况下完成空箱调度。相较于空箱互租模式,空箱互换模式的优点在于双方不需要支付额外的集装箱租赁费用,而缺点在于该模式发生的条件更为苛刻,需要合作双方恰好有互换的需求且在一定周期内存有数量适当的可置换空箱。

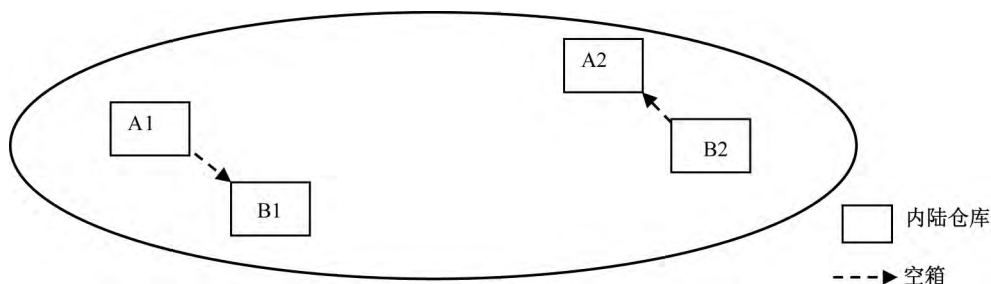


图2 空箱互换模式图

上述三种空箱调运模式都有各自的优点和局限,本文从多船运商协同合作的角度对集装箱调度进行优化,空箱互租、空箱互换是双方合作的本质,三角运输模式是双方合作的基本形式。因此,本文以最小空箱调运成本为目标,对这三种模式进行组合优化,以期获得最优的空箱调运策略。

二、空箱调运优化模型

将发货人的空箱需求与来自收货人、内陆仓库、港口的空箱供给进行匹配,以空箱调运成本最小化为目标构建数学模型。在集装箱海运中,客户需要提前向船运公司预约订舱,船运公司可以明确地知道在未来的一段周期内对集装箱的具体需求信息,因此整个动态随机发生的需求在某一时间段内可以看作是已知的需求。在这个周期内,各个节点的空箱状态会发生变化,因此将周期切分为多个时间段,以便对集装箱进行统一的调度和管理,每个时间段的时长设定为一个单位时间。如图3所示,0到K表示整个周期的时间长度,将其分割为7个时间段,每个时间段的右端点为整体调度情况的状态观察点。

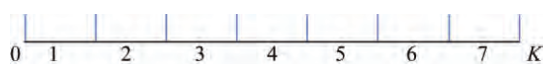


图3 时间段示意图

(一) 条件假设

a) 不失一般性,本文只考虑标箱,空箱无需修

理,随时可用。

b) 每个时间段内,由港口运往收货人的重箱数量,港口进出的空箱数量已知。

c) 各个港口和内陆仓库的初始空箱存量以及空箱堆存数量上限已知。

d) 各运输公司运输成本、租赁费用、存储费用等参数已知。

e) 每个节点有操作时间窗限制,早到该节点会有等待成本,晚到会有延时惩罚成本。

f) 各个节点间运输所需要的时长为一个单位时间的整数倍。

g) 各个节点的时间窗时长为一个单位时间的整数倍。

h) 集装箱卡车数量充分多,即不考虑运力限制,且集装箱卡车能按时完成运输任务。

(二) 符号说明

a) 索引。

$R = \{1, 2, \dots, r, \dots, R_0\}$, 收货人;

$S = \{1, 2, \dots, s, \dots, S_0\}$, 发货人;

$D = \{1, 2, \dots, d, \dots, D_0\}$, 内陆仓库;

$J = \{1, 2, \dots, j, \dots, J_0\}$, 港口;

$T = \{1, 2, \dots, t, \dots, T_0\}$, 时间段;

$G = \{G_1, G_2, \dots, g, \dots, G_0\}$, 公司集合;

指代各个节点, $m \in (J \cup D \cup R)$, $n \in (J \cup D \cup S)$ 。

b) 集装箱数据。

U_j^0 , 港口 j 的初始空集装箱库存数量;
 U_d^0 , 内陆仓库 d 的初始空集装箱库存数量;
 U_d^{t-} , 内陆仓库 d 在第 t 时间段开始时的库存数量;
 U_d^{t+} , 内陆仓库 d 在第 t 时间段末的库存数量;
 U_j^{\max} , 港口 j 的空集装箱最大堆存量;
 U_d^{\max} , 内陆仓库 d 的空集装箱最大堆存量;
 N_r^{t+} , 收货人 r 在第 t 时间段末产生的空箱数量。

c) 各类费用。

c_{rj} , 空集装箱从收货人 r 运输到港口 j 的费用;
 c_{rd} , 空集装箱从收货人 r 运输到内陆仓库 d 的费用;
 c_{rs} , 空集装箱从收货人 r 运输到发货人 s 的费用;
 c_{dj} , 空集装箱从内陆仓库 d 运输到港口 j 的费用;
 $c_{dd'}$, 空集装箱从内陆仓库 d 运输到内陆仓库 d' 的费用;
 c_{ds} , 空集装箱从内陆仓库 d 运输到发货人 s 的费用;
 $c_{jj'}$, 空集装箱从港口 j 运输到港口 j' 的费用;
 c_{jd} , 空集装箱从港口 j 运输到内陆仓库 d 的费用;
 c_{js} , 空集装箱从港口 j 运输到发货人 s 的费用;
 c_j , 在港口 j 每个空集装箱一个时间段的存储费用;
 c_d , 在内陆仓库 d 每个空集装箱一个时间段的存储费用;
 c_{mn}^l , 空集装箱租赁费用;
 $c_{jj'}^e$, 港口 j 与港口 j' 交换空集装箱的费用;
 c_{jd}^e , 港口 j 与内陆仓库 d 交换空集装箱的费用;
 $c_{dd'}^e$, 内陆仓库 d 与内陆仓库 d' 交换空箱的费用。

d) 惩罚系数。

Pu_l , 晚到的成本惩罚系数;
 Pu_e , 早到的成本惩罚系数;

e) 时间量。

$[a_n, b_n]$, 节点 n 的服务时间窗;
 o_{mn} , 由节点 m 到节点 n 空箱运输所需要的时间。

f) 节点归属。

f_{mn} , 表示节点 m 和节点 n 是否属于同一公司,若是为 1, 若不是,为 0。

g) 决策变量。

x_{mn}^t , 第 t 时间段从节点 m 发往节点 n 的空集装箱数量;
 x_{mn}^{et} , 第 t 时间段节点 m 与节点 n 交换的空集装箱数量。

(三)模型建立

每个节点都存在操作时间窗,比如工厂早上 8 点上班,因此当空集装箱与卡车早于 8 点到工厂,会产生等待成本,而如果晚到,则会产生延误成本。因此对各个节点建立惩罚函数

$$M_{mn} = Pu_l \max(a_n - (t + o_{mn}), 0) + Pu_e \min(t + o_{mn} - b_n, 0) \quad (1)$$

结合问题描述,最终建立模型如下:

$$\begin{aligned} \min \{ & \sum_t [\sum_r \sum_j (c_{rj} + M_{rj} + c_{rj}^l f_{rj}) x_{rj}^t + \sum_r \sum_d (c_{rd} + M_{rd} + c_{rd}^l f_{rd}) x_{rd}^t + \\ & \sum_r \sum_s (c_{rs} + M_{rs} + c_{rs}^l f_{rs}) x_{rs}^t] + \sum_t [\sum_j \sum_{j'} (c_{jj'} + M_{jj'} + c_{jj'}^l f_{jj'}) x_{jj'}^t + \\ & \sum_j \sum_d (c_{jd} + M_{jd} + c_{jd}^l f_{jd}) x_{jd}^t + \sum_j \sum_s (c_{js} + M_{js} + c_{js}^l f_{js}) x_{js}^t] + \\ & \sum_t [\sum_d \sum_j (c_{dj} + M_{dj} + c_{dj}^l f_{dj}) x_{dj}^t + \sum_d \sum_{d'} (c_{dd'} + M_{dd'} + c_{dd'}^l f_{dd'}) x_{dd'}^t + \\ & \sum_d \sum_s (c_{ds} + M_{ds} + c_{ds}^l f_{ds}) x_{ds}^t] + \sum_t [\sum_j \sum_{j'} c_{jj'}^e x_{jj'}^{et} + \sum_j \sum_d c_{jd}^e x_{jd}^{et} + \\ & \sum_d \sum_{d'} c_{dd'}^e x_{dd'}^{et}] + \sum_t [\sum_j c_j U_j^t + \sum_d c_d U_d^t] \} \end{aligned} \quad (2)$$

s.t.

$$\sum_t [\sum_r x_{rs}^t + \sum_d x_{rd}^t + \sum_j x_{rj}^t] = U_s, \forall s \in S \quad (3)$$

$$U_d^{t+} \leq U_d^{\max}, \forall t \in T, \forall d \in D \quad (4)$$

$$\begin{aligned} U_d^{(t-1)+} + \sum_{d'} [x_{dd'}^{e,t-odd} - x_{dd'}^{e,t}] + \sum_j [x_{jd}^{e,t-oid} - x_{jd}^{e,t}] + \sum_{d'} [x_{dd'}^{t-odd} - x_{dd'}^t] + \\ \sum_r x_{rd}^{t-oid} + \sum_j [x_{jd}^{t-oid} - x_{jd}^t] - \sum_s x_{ds}^t = U_d^{t+}, \forall d \in D \end{aligned} \quad (5)$$

$$U_j^{t+} \leq U_j^{\max}, \forall t \in T, \forall j \in J \quad (6)$$

$$N_r^{t+} - [\sum_s x_{rs}^t + \sum_d x_{rd}^t + \sum_j x_{rj}^t] - [\sum_s x_{rs}^{t+1} + \sum_d x_{rd}^{t+1} + \sum_j x_{rj}^{t+1}] = 0, \forall r \in R, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum_t [\sum_j \sum_{j'} c_{jj'}^e x_{jj'}^{et} + \sum_j \sum_d c_{jd}^e x_{jd}^{et} + \sum_d \sum_{d'} c_{dd'}^e x_{dd'}^{et} + \sum_d \sum_{j'} c_{jd}^e x_{jd}^{et}] = \sum_t [\sum_j \sum_{j'} c_{jj'}^e x_{jj'}^{et} + \sum_j \sum_d c_{jd}^e x_{jd}^{et} + \\ \sum_d \sum_{d'} c_{dd'}^e x_{dd'}^{et} + \sum_d \sum_{j'} c_{jd}^e x_{jd}^{et}], j, d \in G \setminus j', d' \in G \setminus G_i \end{aligned} \quad (8)$$

$$x_{mn}^{et} \in 0 \cup Z^+, \text{且 } mn \text{ 不属于同一公司} \quad (9)$$

$$x_{mn}^t \in 0 \cup Z^+ \quad (10)$$

式(2)是总成本最小化的目标函数,其中包含了运输成本、租赁成本、交换成本、惩罚成本和存储成本;式(3)使得所有发货人处的空箱需求都满足;式(4)是限制内陆仓库空箱存储量,使其不超过仓库所能存储空箱数量的最大值;式(5)是对内陆仓库处的流量守恒约束,每一个时间段的初始空箱数量加上该时间段从其他节点运输至该内陆仓库的空箱数量减去该时间段送往其他节点的空箱数量等于时间段末的空箱剩余数量;式(6)是限制港口空箱存储数量,使其不超过港口所能存储空箱数量的最大值;式(7)是对收货人处的约束,使得从港口运至收货人处的重箱在转变为空箱之后,可停留一个时间段后再根据当前决策进行运输;式(8)是对空箱交换模式的约束,使得不同公司在这一个周期内交换的空集装箱数量一致;式(9)——(10)是限制空箱调运数量为大于等于0的整数。

上述模型从全局对空箱调运进行优化,根据在不同收货人、仓库、港口处的空箱数量,以及在不同时间段的空箱需求,利用三种模式灵活组合,最终得出具体的调箱、租箱和换箱决策。

(四)模型求解

本文使用分支定界法对模型进行求解,在满足式(3)——(8)各整数约束条件的情况下,将各分支的最优目标函数值作为下界,用它来判断分支是保留还是剪枝。在上述模型中,式(9)——(10)中的变量 x_{mn}^t 和 x_{mn}^{et} 取值均限定为整数,同时,惩罚函数中带有时间窗和非线性约束,而其他约束条件均含有与时间段 t 和运输时长 o_{mn} 有关的参数。为此,本文设计以下求解步骤:

步骤1:根据港口、仓库是否属于同一家公司,对 f_{mn} 赋值,从而确定约束条件式(8)和目标函数的表达式;

步骤2:确定各收货人、内陆仓库、港口、发货人节点之间的运输距离,并将其转化为运输费用和运输时间,从而确定 o_{mn} 。再根据 t , $(t+1)$ 的停留时间限制,确定在收货人处的空箱调运路径和数量;

步骤3:根据 $(t-o_{mn})$,确定在该时间段的各节点的空箱调运数量;

步骤4:利用Lingo软件进行编程,输入步骤1、2、3中所确定的已知数据,对上述模型求解,从而得到船运公司在决策期内的总支出成本和最优空箱调运方案。

三、算例分析

(一)算例描述

假设有甲、乙两家船运公司在某区域提供集装箱运输服务并参与空箱资源共享下的空箱调运合作。每家公司在该区域内均有一个港口和两个内陆仓库,所使用的集装箱均为标箱。由于船运公司赠送给客户的免费集装箱使用期一般为一周,因此以7天为一个周期,以半天为一个时间单位。初始状态下,内陆仓库中存储一定数量的集装箱,而港口每天会不断产生重箱,并被运送至该区域的收货人处。

本文为验证所提出的合作方案的可行性以及适用范围,进行了一系列的数值实验。为表示数据的一般性,空箱需求数量和供给数量随机产生,整体服从均匀分布 U ,并由此产生各节点之间的运输距离、运输费用和运输时间。

考虑到运输过程的时间成本,在实际输入数据时,将时间段扩展为28个,但仍然只设置中间14个时间段有供给和需求产生,这使得每个 $(t-o_{mn})$ 都在该14个时间段内有意义。初始数据集及参数设定如表1所示。

表1 数据集及参数设定

数据集 编号	港口初始空箱数/个		内陆仓库初始空箱数/个				收货 人/个	重箱产生 数据分布	发货 人/个	空箱需求 数据分布
	P1	P2	N11	N12	N21	N22				
D1	170	170	50	50	50	50	40	$U(2,10)$	60	$U(2,20)$
D2	80	60	200	20	320	80	40	$U(2,10)$	60	$U(2,20)$
D3	80	260	150	50	150	50	60	$U(2,10)$	40	$U(2,20)$

(二)结果分析

对设计的数据集,分别采用三种混合模式进行空箱调运模拟。a)对两家公司分别进行单公司空箱调运的传统运输模式和三角模式;b)两家公司进行

合作,使用传统运输模式+三角运输模式+空箱互换模式;c)在前一种混合模式的基础上,增加空箱互换模式。以上三种模式分别用M1、M2、M3指代,在不同数据集上计算结果如表2所示。

表2 不同数据集下三种混合模式的案例计算结果

编号	数据集	组合模式	街道转弯调运数	互租空箱数/个	互换空箱数/个	总费用/元
1	D1	M1	39	0	0	1577802
2	D1	M2	52	34	0	1414580
3	D1	M3	52	34	0	1414580
4	D2	M1	28	0	0	1848903
5	D2	M2	47	35	0	1447994
6	D2	M3	39	31	16	1446853
7	D3	M1	17	0	0	1576949
8	D3	M2	19	13	0	1452493
9	D3	M3	17	10	5	1437606

通过分析表2可见,在相同的数据集和调运条件下,采用不同的合作模式,导致甲、乙公司的空箱调运总成本产生了显著的变化。

a)对比三种不同数据集在模式M1上的总费用,可知数据集D2中由于空集装箱数量分布不均,大大增加了船运公司的调运费用,这与现实场景——全球贸易不平衡所导致的空集装箱调运困难相符合。

b)对比模式M1和M2在三个数据集上的运行结果可得,即使利用相同的优化调运思想,采用三角运输的方式来减少空箱运输的费用,但通过互相合作,更能够降低空箱调运的成本。在合作调运的情况下,甲、乙公司获取空箱的总成本比单独调运情况下节省近11%。这是因为合作调运时,其中一家公司减少了在单独调运时由于空箱资源有限而导致长距离调运空箱的次数,转而由资源相对充裕的另一家公司就近将富余的空箱资源提供给该公司,使得整体的调度总成本降低。因此,当调运成本高于租箱成本时,模式M2优于模式M1。

c)对比模式M2和M3可知,在数据集D1下,总空箱调运成本无变化,说明当两家的仓库持有量较为均衡时,无法实现空箱互换。而对比在数据集D2、D3中的表现,由于存在运输不平衡或空箱无法及时到达等因素,会导致部分仓库的空集装箱持有量不足且数量差异较大,因此存在空箱互换策略的实施空间。且在数据集D2中,即使乙公司在另一内陆仓库节点拥有大量空箱,但在考虑成本取舍时,使用不同地区节点的空箱互换策略能够节省长距离的空箱调运费用,因此降低船运公司的总调运成本。可以看出,当集装箱流通不平衡,即某处的仓库集装箱大量堆积,而另一处集装箱则出现供不应求时,更适合使用模式M3。

基于多种合作方式的空箱调运能够充分利用合作双方的空箱资源,且具体操作方式灵活,可以达到充分利用闲置资源,降低成本的目的。

四、结 语

本文研究了基于库存管理的内陆空箱调运模式及其缺陷,提出了在集装箱运输环节中所有参与者之间可能存在的合作方式。针对内陆空集装箱调运问题,研究空箱资源共享下的多种合作调运模式,构建基于船运公司、卡车运输公司相互合作的内陆空集装箱调运优化模型。并引入一些约束条件,利用软时间窗来泛化实际操作中的时间弹性,再运用算例加以验证。该模型利用各公司的空箱资源,灵活组合三角运输、空箱互租、空箱互换三种合作方式,形成安排调运任务的空箱合作调运方案,为实际工作者制定计划时提供指导。

内陆空箱调运是一个动态变化的过程,在实际操作过程中,需要根据实际情况而进行调整。因此,在今后的研究中应考虑更多的因素,诸如各种类型的集装箱尺寸、卡车车辆调度的数量限制等,使模型更加精确并符合实际。

参考文献:

- [1] Lee C Y, Song D P. Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017 (95): 442-474.
- [2] Rodrigue J, Comtois C, Slack B. The Geography of Transport Systems[M]. London: Routledge, 2016: 12.
- [3] Chao S L, Chen C C. Applying a time-space network to reposition reefer containers among major Asian ports[J]. Research in Transportation Business & Management, 2015(17): 65-72.
- [4] Myung Y S. Efficient solution methods for the integer programming models of relocating empty containers in the hinterland transportation network [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017(108): 52-59.

- [5] Zhang H, Lu L, Wang X. Two stages empty containers repositioning of Asia — Europe shipping routes under revenue maximization [C]// Proceedings of Second International Federation for Information Processing in International Conference on Intelligence Science. Shanghai: Springer International Publishing, 2017: 379-389.
- [6] Kolar P, Schramm H J, Prockl G. Intermodal transport and repositioning of empty containers in Central and Eastern Europe Hinterland [J]. Journal of Transport Geography, 2018(69): 73-82.
- [7] Song D P, Zhang Q. A fluid flow model for empty container repositioning policy with a single port and stochastic demand [J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2010, 48(5): 3623-3642.
- [8] 汪传旭, 汪琬, 陈飞燕, 等. 船公司合作下港口空箱调运研究 [J]. 山东大学学报, 2015, 50(9): 61-68.
- [9] Yu M Z, Fransoo J C, Lee C Y. Detention decisions for empty containers in the hinterland transportation system [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018 (110): 188-208.
- [10] Braekers K, Caris A, Janssens G K. Integrated planning of loaded and empty container movements [J]. Operations Research Spectrum, 2013, 35(2): 457-478.
- [11] An F, Hu H, Xie C. Service network design in inland waterway liner transportation with empty container repositioning [J]. European Transport Research Review, 2015, 7(2): 1-11.
- [12] Hjortnaes T, Wiegman B, Negenborn R R et al. Minimizing cost of empty container repositioning in port hinterlands, while taking repair operations into account [J]. Journal of Transport Geography, 2017 (58): 209-219.
- [13] Liu M, Liu R F, Wang S J, et al. Container truck scheduling problem under empty container return policy [C]// 15th International Conference on Networking, Sensing and Control. New York: IEEE, 2018: 1-6.
- [14] Olivo A, Di F M, Zuddas P. An optimization model for the inland repositioning of empty containers [J]. Maritime Economics & Logistics, 2013, 15 (3): 309-331.
- [15] 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.
- [16] Furió S, Andrés C, Adenso D B, et al. Optimization of empty container movements using street — turn: Application to Valencia hinterland [J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 66(4): 909-917.
- [17] Sterzik S, Kopfer H, Yun W Y. Reducing hinterland transportation costs through container sharing [J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2015, 27 (2-3): 382-402.
- [18] Deidda L, Di Francesco M, Olivo A, et al. Implementing the street — turn strategy by an optimization model [J]. Maritime Policy & Management, 2008, 35(5): 503-516.
- [19] 邢玉伟, 杨华龙, 储飞飞. 基于互租战略的班轮联盟空箱调运 [J]. 大连海事大学学报, 2016, 42(1): 101-106.
- [20] Zheng J F, Sun Z, Gao Z Y. Empty container exchange among liner carriers [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015 (83): 158-169.

(责任编辑: 钱一鹤)