

考虑可折叠集装箱的空重箱协同运输优化研究

高晓洁, 茆道方, 罗天, 高银萍
(上海海事大学, 上海 201306)

摘要: **目的** 针对集装箱供需矛盾的日益突出, 以及空重箱长期独立运输等问题, 研究空重箱的协同运输过程, 以减少运输资源的浪费。**方法** 在使用折叠式集装箱的情况下, 为实现门到门的高效服务, 以运输公司总利润最大为目标, 建立空重箱协同运输优化模型, 并通过 LINGO 建模求解具体算例。**结果** 通过算例分析, 验证了模型的可行性, 并与是否使用折叠式集装箱、是否考虑空重箱协同运输等多种模式进行对比。结果发现, 在一定条件下相对于传统的运输模式, 平均运力利用率提高了 15.23%。**结论** 验证了使用折叠式集装箱的空重箱协同运输的经济效益高于其他运输模式。

关键词: 折叠式集装箱; 空重箱; 协同运输; 转运

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0103-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.017

Optimization of Collaborative Transportation of Empty and Loaded Containers Considering Foldable Containers

GAO Xiao-jie, CHANG Dao-fang, LUO Tian, GAO Yin-ping
(Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The work aims to study the collaborative transportation process of empty and loaded containers to decrease the waste of transportation resources, in view of the increasingly prominent contradiction between the supply and demand of containers and the long-term independent transportation of empty and loaded containers. In the case of using foldable containers, with the maximum profits of the transportation company as the objective, a collaborative transportation optimization model for empty and loaded containers was established in order to achieve efficient door-to-door service. The specific example was solved by LINGO modeling. Through the example analysis, the feasibility of the model was verified. It was also compared with whether or not to use foldable containers, whether or not to consider the collaborative transportation of empty and loaded containers and other modes. The result showed that the average capacity utilization rate increased by 15.23% under certain conditions compared with the traditional transportation mode. It is verified that the economic benefits of collaborative transportation of empty and loaded containers with foldable containers are higher than other transportation modes.

KEY WORDS: foldable container; empty and loaded container; collaborative transportation; transshipment

近年来, 集装箱广泛应用于国内外贸易市场, 而随着贸易市场需求波动的加剧, 集装箱供需矛盾日益突出, 运输成本也日益增多。据 BCG 集团 2016 年统计数据表明, 集装箱运输过程中空箱调运每年耗费约 150~200 亿美元, 在运营成本中所占比例高达 8%。

折叠式集装箱则是为了减少空箱调运的运力损失而设计的, 但是存在成本高、易损坏等问题, 目前尚未普及。随着技术的发展, 折叠式集装箱具有占用空间小、装卸和运输效率高等优势, 在空箱调运的过程中也将占据越来越多的市场。重箱运输则是所有运输公

收稿日期: 2018-05-04

基金项目: 国家自然科学基金 (71602114); 上海市科委科研项目 (16040501500, 17595810300)

作者简介: 高晓洁 (1994—), 女, 上海海事大学硕士生, 主攻物流系统运作与优化。

通信作者: 茆道方 (1978—), 男, 博士, 上海海事大学教授、博导, 主要研究方向为物流系统运作与优化、供应链设计与运营。

司追求的目标,是评判企业运营能力的重要指标。此外,空箱与重箱长期的独立运输,导致线路运力利用率低,造成大量运输资源的浪费,带来了额外的运输成本,因此文中通过研究折叠式集装箱使用下的空重箱协同运输,实现运输公司总利润最大化。

目前,国内外许多学者从不同角度对集装箱运输问题进行了研究。在随机性方面,沈二乐^[1]、王斌^[2]等建立了基于随机机会约束规划的海运空箱调运优化模型;计明军^[3]提出不确定目的港策略。在合作共享方面,汪传旭^[4]、江玉杰^[5]、杨洋^[6]等建立了船公司合作下的海运空箱调运的优化方案。在折叠式集装箱方面,Wang K^[7]建立网络流模型以确定班轮运输需要使用可折叠集装箱的条件。张丽娜^[8]针对空箱调运问题,找出了影响可折叠集装箱使用的关键因素。在空重箱运输方面,段刚^[9]将适箱货物按重要程度分为不同的等级进行运输,建立了空重箱运输非线性混合整数规划模型;郭子坚^[10]考虑空重箱混合运输下的国际集装箱海运网络的航线配置、集装箱船服务频率等。

以上学者从不同的角度,对集装箱运输问题进行了有益的补充和拓展,但同时也存在一些不足。一方面,现有研究很少将空箱与重箱运输问题结合考虑,大多只考虑空箱调运的优化,缺少对空重箱协同运输的深入研究,更没有在空重箱协同问题下考虑折叠式集装箱的使用,从而影响了运输公司做出最优决策,因此,文中在使用折叠式集装箱的情况下,额外考虑折叠式集装箱的维护成本、折叠展开成本与承重约束等。同时为保证重箱运输所获得的利润,优先考虑重箱运输。在满足重箱需求之后,剩余运力携带空箱,从而实现运力利用率与整体效益最大化。另一方面,在对集装箱运输公司总利润进行优化的同时,不同于许多问题仅将海港和内陆堆场作为服务的终点,文中将服务终点扩展至客户,为实现门到门的高效服务,考虑了客户、内陆堆场以及海港各点之间的转运过程。在已有研究中都没有结合转运问题考虑运输公司在客户、内陆堆场以及海港各点之间进行运输的总体利润。

1 问题描述

文中研究的对象为内陆集装箱运输网络^[11],其中包括1个内陆堆场Y、1个海港P以及n个客户C(2, 3...n+1),运输公司使用折叠式集装箱在这n+2个节点之间进行空重箱运输作业,具体见图1。由于货运市场中集装箱的不断流通,每个节点(0, 1...n+1)在不同时刻扮演不同的角色,可能是空箱需求者、空箱供应者、重箱需求者、重箱供应者^[12-13]。假设任一节点在任意时刻只能扮演需求者或供应者角色,需求量服从正态分布,供应量服从泊松分布。考虑到重箱运

输的收益,每次运输优先考虑重箱需求,在满足重箱需求的情况下,剩余运力携带空箱,但每一时刻的空重箱总需求都需完全得到满足。这样的协同运输模式既节省了运力也提高了作业效率。同时,将服务终点扩展至终端客户,为实现门到门的高效作业,文中考虑了客户、内陆堆场以及海港各点之间的转运过程。在任意2个节点之间存在一个转运节点,见图1。假设转运点处只实现转运而不发生存储作业,转运前后运输方式发生改变。由于运输过程存在铁路、水路、公路等3种运输方式,因此形成了铁路+公路、水路+公路、铁路+水路等多种联运模式。此外,在运输过程中重箱运输产生收入,并主要考虑空重箱运输成本、各节点处装卸成本以及转运点处转运成本。客户节点处多余的集装箱通常存放在内陆堆场或海港堆场中,可以视为内陆堆场与海港的需求来源,这项操作会产生存储费用,从而影响运输公司的总利润。同时,由于运输过程使用折叠式集装箱,考虑到折叠式集装箱易损坏的特性,经过内陆堆场和海港的集装箱需进行定期维护产生维护成本,每个节点处也需多加考虑折叠与展开成本,因此,该问题旨在使用折叠式集装箱的背景下,通过空重箱协同运输模式完成门到门的高效集装箱运输服务,以寻求运输公司总利润最大的运输方案。

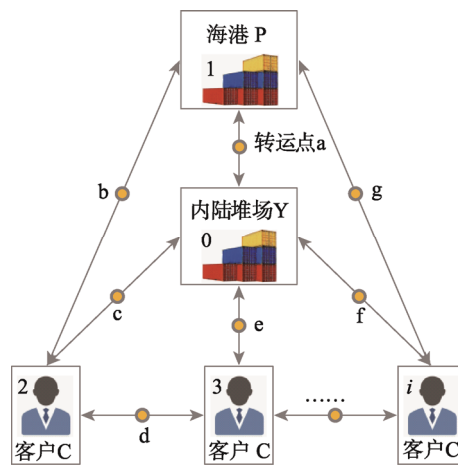


图1 集装箱运输网络
Fig.1 Container transport network

2 考虑可折叠集装箱的空重箱协同运输优化模型

2.1 基本假设

- 1) 运输过程均使用折叠箱。
- 2) 3 TEU (TEU 是以长度为 6.096 m 的集装箱为国际计量单位,也称国际标准箱单位)可折叠箱捆绑成一单元,一单元折叠箱相当于 1 TEU 普通箱。
- 3) 各节点之间存在 1 个转运点。

4) 内陆堆场和海港产生存储费用。

5) 经过内陆堆场和海港的集装箱都需进行定期维护。

6) 每个节点集装箱可在现场进行折叠和展开作业。

7) 所有集装箱承重状态下质量相等, 空箱质量也相等。

2.2 符号定义

2.2.1 集合

S 为供应点集合 ($i=0, 1, \dots, n+1$); D 为需求点集合 ($j=0, 1, \dots, n+1, i \neq j$); M 为转运点集合 ($m=0, 1, \dots, n$); K 为供应点 i 到转运点 m 的运输方式集合 ($k=1, 2, 3$, 其中 1 为铁路, 2 为水路, 3 为公路); L 为转运点 m 到需求点 j 的运输方式集合 ($k=1, 2, 3$, 其中 1 为铁路, 2 为水路, 3 为公路); T 为计划期内的时刻集 ($t=0, 1, \dots, n$); $D_{j1}(t)$ 为不同时刻各需求点 j 的重箱需求量; $D_{j2}(t)$ 为不同时刻各需求点 j 的空箱需求量; $S_{i1}(t)$ 为不同时刻各供应点 i 的重箱可供量; $S_{i2}(t)$ 为不同时刻各供应点 i 的空箱可供量。

2.2.2 决策变量

$x_{im}^k(t)$ 为每一时刻从点 i 到点 m, k 方式下的重箱运量; $x_{mj}^l(t)$ 为每一时刻从点 m 到点 j, l 方式下的重箱运量; $y_{im}^k(t)$ 为每一时刻从点 i 到点 m, k 方式下的空箱运量; $y_{mj}^l(t)$ 为每一时刻从点 m 到点 j, l 方式下的空箱运量; $x_{ij}(t)$ 为每一时刻从点 i 到点 j 的重箱运量; $y_{ij}(t)$ 为每一时刻从点 i 到点 j 的空箱运量; $u_{im}^1(t)$ 为 0—1 变量, $u_{im}^1(t)$ 为 1 时表示时刻 t 从点 i 到点 m 现有运力已满足重箱运输; $u_{im}^2(t)$ 为 0—1 变量, $u_{im}^2(t)$ 为 1 时表示时刻 t 从点 i 到点 m 现有运力已满足空箱调运; $u_{mj}^1(t)$ 为 0—1 变量, $u_{mj}^1(t)$ 为 1 时表示时刻 t 从点 m 到点 j 现有运力已满足重箱运输; $u_{mj}^2(t)$ 为 0—1 变量, $u_{mj}^2(t)$ 为 1 时表示时刻 t 从点 m 到点 j 现有运力已满足空箱调运。

2.2.3 参数

x_0 为内陆堆场的重箱初始库存; y_0 为内陆堆场的空箱初始库存; x_1 为海港的重箱初始库存; y_1 为海港的空箱初始库存; w_1 为运输重箱的单位收入; l_{im}^k 为从点 i 到点 m, k 方式下的运输距离; l_{mj}^l 为从点 m 到点 j, l 方式下的运输距离; C_{im}^{k1} 为从点 i 到点 m, k 方式下重箱单位距离运输成本; C_{mj}^{l1} 为从点 m 到点 j, l 方式下重箱单位距离运输成本; C_{im}^{k2} 为从点 i 到点 m, k 方式下空箱单位距离运输成本; C_{mj}^{l2} 为从点 m 到点 j, l 方式下空箱单位距离运输成本; C_i^f 为各供应点处集

装箱折叠/展开的单位成本; C_j^f 为各需求点处集装箱折叠/展开的单位成本; C_1 为各节点处装(卸)重箱的单位成本; C_2 为各节点处装(卸)空箱的单位成本; C_m^{kl} 为运输方式由 k 变为 l 的单位中转费用, $k=l$ 时, $C_m^{kl}=0$; C_r 为单位集装箱维护成本; C_z^1 单位重箱存贮费; C_z^2 为单位空箱存贮费; C_0 为网络中折叠式集装箱的设备总成本; p 为每条线路的最大运力利用率 ($0 < p < 1$); V_{im} 为从点 i 到点 m 的运量限制; V_{mj} 为从点 m 到点 j 的运量限制; Q_0 为内陆堆场的最大存贮量; Q_1 海港的最大存贮量; g_1 为每个重箱的质量; g_2 为每个空箱的质量; G 为折叠式集装箱所能承受的最大质量; h_k 为 k 运输方式下集装箱堆放排数; h_l 为 l 运输方式下集装箱堆放排数; v_k 为 k 运输方式下集装箱堆放列数; v_l 为 l 运输方式下集装箱堆放列数。

2.3 模型构建

2.3.1 目标函数

以计划期内集装箱运输公司的总利润最高为目标建立目标函数^[14-16]见式(1)。

$$\begin{aligned} \max W = & \sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+1} w_1 x_{ij}(t) - \\ & \sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{m=1}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+1} (C_{im}^{k1} x_{im}^k(t) l_{im}^k + C_{mj}^{l1} x_{mj}^l(t) l_{mj}^l) - \\ & \sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{m=1}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+1} (C_{im}^{k2} y_{im}^k(t) l_{im}^k + C_{mj}^{l2} y_{mj}^l(t) l_{mj}^l) - \\ & \sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{m=1}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+1} (2C_1(x_{im}^k(t) + x_{mj}^l(t)) + \\ & 2C_2(y_{im}^k(t) + y_{mj}^l(t))) - \sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{m=1}^n C_i^f y_{im}^k(t) - \\ & \sum_{t=1}^n \sum_{m=1}^n \sum_{j=0}^{n+1} C_j^f y_{mj}^l(t) - \\ & \sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{m=1}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+1} C_m^{kl} (x_{ij}(t) + 1/3 y_{ij}(t)) - \\ & \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^{n+1} C_r (x_{i0}(t) + y_{i0}(t)) - \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^{n+1} C_z^1 (x_0 + x_{i0}(t)) - \\ & \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^{n+1} C_z^2 (y_0 + y_{i0}(t)) - \sum_{t=1}^n \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq 1}}^{n+1} C_r (x_{i1}(t) + y_{i1}(t)) - \\ & \sum_{t=1}^n \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq 1}}^{n+1} C_z^1 (x_1 + x_{i1}(t)) - \sum_{t=1}^n \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq 1}}^{n+1} C_z^2 (y_1 + y_{i1}(t)) - C_0 \quad (1) \end{aligned}$$

式中: $\sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+1} w_1 x_{ij}(t)$ 为计划期内集装箱运输公

司运输重箱的总收入； $\sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{m=1}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+1} (C_{im}^{k1} x_{im}^k(t))_{im}^k +$

$C_{mj}^{l1} x_{mj}^l(t)_{mj}^l$ ， $\sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{m=1}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+1} (C_{im}^{k2} y_{im}^k(t))_{im}^k + C_{mj}^{l2} y_{mj}^l(t)_{mj}^l$

分别为计划期内重箱和空箱运输总成本；

$\sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{m=1}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+1} (2C_1(x_{im}^k(t) + x_{mj}^l(t)) + 2C_2(y_{im}^k(t) + y_{mj}^l(t)))$

为计划期内各节点处空重箱装卸成本；

$\sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{m=1}^n C_i^f y_{im}^k(t)$ ， $\sum_{t=1}^n \sum_{m=1}^n \sum_{j=0}^{n+1} C_j^f y_{mj}^l(t)$ 分别为计划期内

各节点处空箱折叠/展开成本； $\sum_{t=1}^n \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{m=1}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+1} C_m^{kl} (x_{ij}(t) +$

$1/3y_{ij}(t))$ 为计划期内各转运点处空重箱转运成本；

$\sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^{n+1} C_r(x_{i0}(t) + y_{i0}(t))$ 为内陆堆场集装箱维护成本；

$\sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^{n+1} C_z^1(x_0 + x_{i0}(t))$ 为内陆堆场重箱存储费用；

$\sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^{n+1} C_z^2(y_0 + y_{i0}(t))$ 为内陆堆场空箱存储费；

$\sum_{t=1}^n \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq 1}}^{n+1} C_r(x_{i1}(t) + y_{i1}(t))$ 为海港集装箱维护成本；

$\sum_{t=1}^n \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq 1}}^{n+1} C_z^1(x_1 + x_{i1}(t))$ 为海港重箱存储费用；

$\sum_{t=1}^n \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq 1}}^{n+1} C_z^2(y_1 + y_{i1}(t))$ 为海港空箱存储费用； C_0 为网络

中可供使用的折叠式集装箱的总固定成本。

2.3.2 约束条件

1) 不同时刻需求量约束。

$$\sum_{m=1}^n x_{mj}^1(t) = D_{j1}(t), j \in D, l \in L \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^n y_{mj}^1(t) = D_{j2}(t), j \in D, l \in L \quad (3)$$

式(2—3)分别为每一时刻从所有转运点 m 运往需求点 j 的重箱和空箱数量等于此时该点的重箱和空箱需求量。

2) 不同时刻可供量约束。

$$\sum_{m=1}^n x_{im}^k(t) \leq S_{i1}(t), i \in S, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^n y_{im}^k(t) \leq S_{i2}(t), i \in S, k \in K \quad (5)$$

式(4—5)分别为每一时刻从供应点 i 运往所有转运点 m 的重箱和空箱数量小于等于此时该点的重箱和空箱可供量。

3) 线路运量约束。

$$x_{im}^k(t) + \frac{1}{3}y_{im}^k(t) \leq p \cdot V_{im}, i \in S, m \in M, k \in K \quad (6)$$

$$x_{mj}^l(t) + \frac{1}{3}y_{mj}^l(t) \leq p \cdot V_{mj}, j \in D, m \in M, l \in L \quad (7)$$

式(6—7)分别为每一时刻从供应点 i 到转运点 m 和从转运点 m 到需求点 j 的空重箱运量不大于该线路总运量的 p 倍，保留一部分运力以应对随机需求。

4) 空重箱协同约束。

$$\sum_{m=1}^n u_{im}^2 \leq \sum_{m=1}^n u_{im}^1, i \in S \quad (8)$$

$$\sum_{j=0}^n u_{mj}^2 \leq \sum_{j=0}^n u_{mj}^1, m \in M \quad (9)$$

$$1 - u_{im}^1 \leq p \cdot V_{im} - x_{im}^k, i \in S, m \in M, k \in K \quad (10)$$

$$1 - u_{mj}^1 \leq p \cdot V_{mj} - x_{mj}^l, j \in D, m \in M, l \in L \quad (11)$$

$$1 - u_{im}^2 \leq p \cdot V_{im} - y_{im}^k, i \in S, m \in M, k \in K \quad (12)$$

$$1 - u_{mj}^2 \leq p \cdot V_{mj} - y_{mj}^l, j \in D, m \in M, l \in L \quad (13)$$

在同一条线路上，线路运力优先满足重箱运输，再顺带空箱。只有在重箱运输满足的情况下，才会考虑空箱的调运。式(8—9)分别为从供应点 i 到转运点 m 和从转运点 m 到所有需求点的路线优先满足重箱运力需求。式(10)为保证从供应点 i 到转运点 m 的重箱运输全部得到满足时有 $u_{im}^1 = 1$ 成立。式(11)为保证从转运点 m 到需求点 j 的重箱运输全部得到满足时有 $u_{mj}^1 = 1$ 成立。式(12)为保证从供应点 i 到转运点 m 的空箱调运全部得到满足时有 $u_{im}^2 = 1$ 成立。式(13)为从转运点 m 到需求点 j 的所有空箱调运全部得到满足时有 $u_{mj}^2 = 1$ 成立。

5) 转运点的转运量约束。

$$\sum_{j=0}^{n+1} x_{mj}^l = \sum_{i=0}^{n+1} x_{im}^k (i \neq j), m \in M, k \in K, l \in L \quad (14)$$

$$\sum_{j=0}^{n+1} y_{mj}^l = \sum_{i=0}^{n+1} y_{im}^k (i \neq j), m \in M, k \in K, l \in L \quad (15)$$

式(14—15)分别为每一时刻每一个转运点运出的重箱和空箱数量等于运进的重箱和空箱数量。

6) 耐重约束。

$$g_1 \left(\frac{x_{im}^k}{h_k \cdot v_k} - 1 \right) \leq G, i \in S, m \in M, k \in K \quad (16)$$

$$g_1 \left(\frac{y_{mj}^l}{h_l \cdot v_l} - 1 \right) \leq G, j \in D, m \in M, l \in L \quad (17)$$

考虑到折叠式集装箱易损坏，而集装箱在运输过程中经常处于堆放状态，因此式(16—17)分别为每

一时刻从供应点 i 到转运点 m 和从转运点 m 到需求点 j 最下层重箱的耐重约束。

$$g_2\left(\frac{y_{im}^k}{h_k \cdot v_k} - 1\right) \leq G, i \in S, m \in M, k \in K \quad (18)$$

$$g_2\left(\frac{y_{mj}^l}{h_l \cdot v_l} - 1\right) \leq G, j \in D, m \in M, l \in L \quad (19)$$

式 (18—19) 分别为每一时刻从供应点 i 到转运点 m 和从转运点 m 到需求点 j 最下层空箱的耐重约束。

7) 存储量约束。

$$\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} (x_0 + x_{i0} - x_{0j} + y_0 + y_{i0} - y_{0j}) \leq Q_0 \quad (20)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq 1}}^{n+1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 1, j \neq 1}}^{n+1} (x_1 + x_{i1} - x_{1j} + y_1 + y_{i1} - y_{1j}) \leq Q_1 \quad (21)$$

式 (20—21) 分别为每一时刻集装箱存放至内陆堆场和海港后, 集装箱总量不能超过内陆堆场和海港的最大存储量。

8) 变量整数约束。 $x_{ij}, y_{ij}, x_{im}^k, x_{mj}^l, y_{im}^k, y_{mj}^l \geq 0$ 且为整数。

3 算例分析

在内陆集装箱运输网络中, 假设运输公司在内陆堆场 0、海港 1、客户 2 和 3 之间进行空重箱运输。1 个计划期内包含 4 个时刻, 各节点在每一时刻只能作为需求点或供应点。不同时刻各需求点重箱需求量服从 $\mu=24, \sigma=3$ 的正态分布, 空箱需求量服从 $\mu=8, \sigma=1$ 的正态分布, 各供应点重箱供应量服从 $\lambda=29$ 的泊松分布, 空箱供应量服从 $\lambda=12$ 的泊松分布。内陆堆场与海港的重箱初始库存为 120 TEU, 空箱初始库存为 30 TEU, 最大存储量为 180 TEU。运输过程中存在铁、水、公 3 种运输方式, 其中铁路运输中有 10 个编组, 每个编组可以运输 1 TEU 集装箱, 水路运输中船舶按 3 排 6 列堆放集装箱, 公路运输中集卡按 1 排 1 列堆放集装箱。每条线路运力的最大利用率 p 为 98%。运输公司运输单位重箱平均可获收入 12 000 美元, 折叠式集装箱总固定成本为 34 000 美元。各节点各项运输成本见表 1。各节点与转运点之间的运输方式和不同运输方式下的运输费率见表 2—3。运输距离见表 4, 路线运力限制见表 5。

此外, 假设每 TEU 重箱质量 17.5 t, 每 TEU 空箱质量 2.3 t, 折叠箱所能承受的最大质量为 40 t。

3.1 求解模型

运用 lingo12.0 进行求解, 得出使用折叠式集装箱时最优空重箱协同运输方案见图 2, 总利润为 74.95 万美元, 平均运力利用率为 44.84%。

表 1 各节点各项运输成本

Tab.1 Transportation cost of each node \$/TEU

节点	0	1	2	3
C_1	44	46	47	46
C_2	7	8.5	7.5	8
C_i^f	14	16	8	5
C_j^f	14	16	8	5
C_z^1	15	15		
C_z^2	15	15		
C_r	65			
C_m^{kl}	20	20	20	20

表 2 各节点与转运点之间的运输方式

Tab.2 Mode of transport between each node and transfer node

客户节点	a	b	c	d	e	f
0	水路	公路	公路	水路	水路	水路
1	水路	水路				水路
2	铁路	公路	铁路	铁路		
3	公路			公路	公路	铁路

表 3 不同运输方式下重箱与空箱运输费率

Tab.3 Transport rates for different modes of loaded and empty container transportation \$/(TEU·km)

箱型	铁路	水路	公路
重箱	5.8	3.18	7
空箱	1.62	1.35	1.8

表 4 各节点与转运点之间的运输距离

Tab.4 Transportation distance between each node and transfer node km

客户节点	a	b	c	d	e	f
0	311	176	131	1064	828	846
1	1011	1271				406
2	1100	883	1095	873		
3	576			347	360	1055

表 5 各路线的运力限制

Tab.5 Capacity limit of each route TEU

客户节点	a	b	c	d	e	f
0	24	31	31	35	24	24
1	24	24	0	0	0	24
2	24	31	24	24	0	0
3	31	0	0	31	31	24

从图 2 中可以看出, $T=1$ 和 $T=3$ 时, 节点 2, 3 为供应点, 节点 0, 1 为需求点。 $T=2$ 和 $T=4$ 时, 节点 0, 1 为供应点, 节点 2, 3 为需求点。其中, $T=1$ 时, 从节点 3 到转运点 a 通过公路运输了 3 TEU 重箱, 同

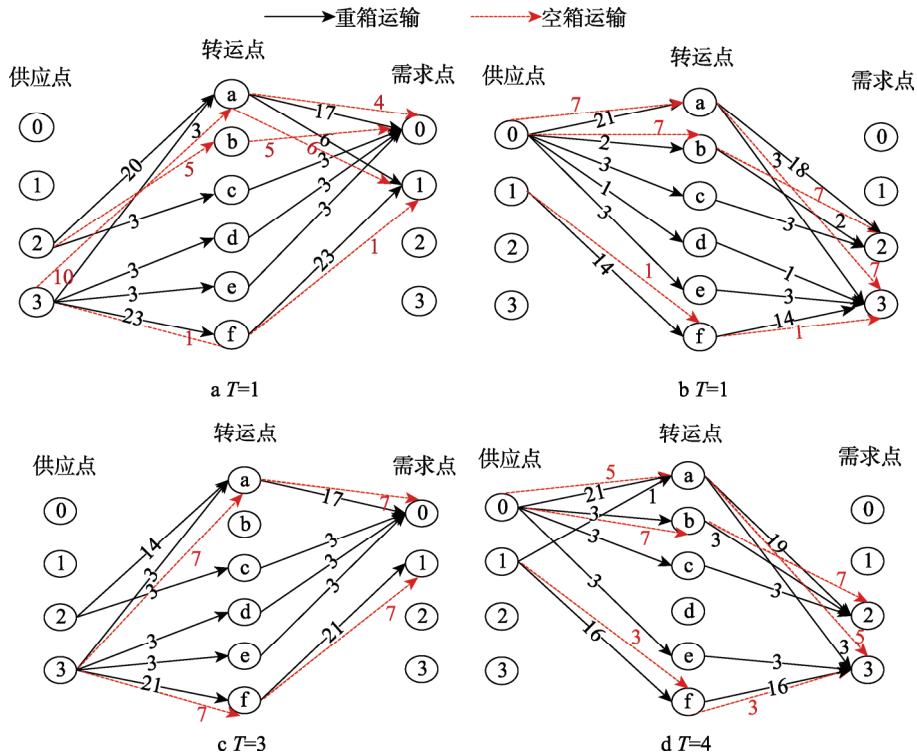


图2 考虑折叠式集装箱的空重箱协同运输方案

Fig.2 Program on collaborative transportation of empty and loaded container considering foldable container

时可携带 10 TEU 空箱；从节点 3 到转运点 f 通过铁路运输了 23 TEU 重箱，同时可携带 1 TEU 空箱；从转运点 a 到需求节点 0 通过水路运输了 17 TEU 重箱，同时可携带 4 TEU 空箱；从转运点 a 到需求节点 1 通过水路运输了 6 TEU 重箱，同时可携带 6 TEU 空箱；同样，从转运点 f 到需求节点 1 通过水路运输了 23 TEU 重箱，同时可携带 1 TEU 空箱。同样可以看出， $T=2$ 、 $T=3$ 与 $T=4$ 时的协同运输情况。

3.2 利用普通箱进行空重箱协同运输对总效益的影响

假设运输过程中都使用普通箱，则空箱在运输过程中所占据的体积与重箱相同，因此普通箱空箱运输成本与装卸成本都高于折叠箱。假设普通箱空箱运输成本为折叠箱的 1.5 倍，空箱装卸成本为折叠箱的 3 倍。同时，考虑到普通箱的固定成本远低于折叠箱成本，耐重能力大于折叠箱且无折叠/展开费用，因此本文中假设普通箱固定成本为 2.6 万美元，维护成本为折叠箱的 0.78 倍，承重能力变为 1.125 倍，此时通过计算可以得出总利润为 62.36 万美元，下降了 12.59 万美元，平均运力利用率为 36.22%。可以看出，虽然普通箱不易损坏，耐重能力较强，但由于运输过程中空箱占据较大体积，运力利用率下降，因此导致总利润下降，这体现了折叠式集装箱在一定情况下的经济效益。

3.3 利用折叠式集装箱分别运输空重箱对总效益的影响

在这种模式下，依旧使用折叠箱进行空重箱运

输，但运输过程将空重箱分开作业。每一时刻，任意 2 个节点之间只能完成一种集装箱的运输，即只能进行重箱或者空箱运输。此时，需要单独进行空箱调运作业，空箱调运成本上升。假设运输空箱的费率变为原问题的 1.85 倍，此时总利润为 59.26 万元，下降了 15.69 万元，平均运力利用率为 30.55%。可以看出，在集装箱运输市场中，当空重箱分开作业时，运输资源浪费现象严重，运输总利润下降，因此，空重箱协同运输作业具有一定的现实意义。

3.4 利用普通箱分别运输空重箱对总效益的影响

在传统运输模式下，使用普通箱分别运输空重箱，此时虽然设备总成本下降，也无折叠/展开费用，但是由于运输资源的浪费，运输成本提高，计算得出总利润为 53.99 万元，下降了 20.96 万元，平均运力利用率仅为 29.61%。这在一定程度上可以看出传统集装箱运输模式的劣势，因此优化改善集装箱运输模式是必经之路。不同模式下运输效益对比见表 6。

表 6 不同模式下运输效益对比
Tab.6 Comparison of transport benefits under different modes

运输方式	利润/万美元	平均运力利用率/%
折叠箱+空重箱协同	74.95	44.84
普通箱+空重箱协同	62.36	36.22
折叠箱+空重箱分开运输	59.26	30.55
普通箱+空重箱分开运输	53.99	29.61

综上所述,4种运输模式下,在考虑折叠箱的空重箱协同运输下总利润最高,平均运力利用率也高于其他运输模式。进行空重箱协同运输作业时,平均运力利用率均高于空重箱独立运输的情况。传统运输模式下,利用普通箱分别运输空重箱,利润相对于原问题下降了27.97%,平均运力利用率也下降了15.23%,造成了运输资源的浪费,因此,在一定情况下,折叠箱的空重箱协同运输方案具有一定的可行性。

4 结语

科学合理的集装箱运输方案不仅可以降低重箱运输成本,避免空箱需求地区的货源流失,还能缩短集装箱周转时间。文中针对集装箱运输问题,考虑折叠式集装箱,建立了空重箱协同运输模型,得出了最优协同运输方案。最后,将其与“普通箱+空重箱协同运输”、“折叠箱+空重箱分开运输”、“普通箱+空重箱分开运输”3种运输模式进行对比。结果表明,在特定条件下,使用折叠式集装箱的空重箱协同运输模式的利润和平均运力利用率均明显高于其他模式。下一步可以考虑重箱、空箱、空车三者的协同,进一步进行整体协同优化,从而提高运输公司的整体利润。

参考文献:

- [1] 沈二乐,汪传旭. 低碳背景下考虑折叠式集装箱的海运空箱调运随机优化研究[J]. 上海管理科学, 2015, 37(3): 71—75.
SHEN Er-le, WANG Chuan-xu. Stochastic Optimization of Maritime Empty Container Repositioning under Low Carbon Environment[J]. Shanghai Management Science, 2015, 37(3): 71—75.
- [2] 王斌,唐国春. 海运集装箱调运随机优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(3): 58—63.
WANG Bin, TANG Guo-chun. Stochastic Optimization Model for Container Shipping of Sea Carriage[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(3): 58—63.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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 Jiaotong University, 2011, 45(1): 120—124.
- [7] WANG K. Ship Type Decision considering Empty Container Repositioning and Foldable Containers[J]. Transportation Research Part E, 2017, 108: 97—121.
- [8] 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.
- [9] 段刚,陈莉,李引珍,等. 基于货物等级的空重集装箱运输优化研究[J]. 交通运输系统工程信息, 2012, 12(5): 140—147.
DUAN Gang, CHEN Li, LI Yin-zhen, et al. Empty and Loaded Container Transportation Optimization Based on Cargo Rank[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(5): 140—147.
- [10] 郭子坚,王文渊,唐国磊,等. 空重箱混合运输条件下集装箱海运网络优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(2): 343—348.
GUO Zi-jian, WANG Wen-yuan, TANG Guo-lei, et al. Optimization of Maritime Transport Network for Both Empty and Loaded Container[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2013, 37(2): 343—348.

- [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): 8—19.
- [12] 张远一. 海陆联运下的集装箱空箱调运优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
ZHANG Yuan-yi. Research of Optimization Model on the Allocation of Empty Containers under Intermodal Transport System[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.
- [13] DENISE L B, BECKER J L, DENISE B. A DSS for Integrated Distribution of Empty and Full Containers[J]. *Decision Support Systems*, 2009, 47(4): 383—397.
- [14] 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*, 2017, 108: 52—59.
- [15] HJORTNAES T. Minimizing Cost of Empty Container Repositioning in Port Hinterlands, while Taking Repair Operations into Account[J]. *Journal of Transport Geography*, 2017, 58: 209—219.
- [16] 郭洋, 汤齐. 港口参与下的空箱调运优化研究[J]. *东南大学学报(哲学社会科学版)*, 2015(S1): 78—81.
GUO Yang, TANG Qi. Study on Optimization of Empty Container Repositioning with Port Participation[J]. *Journal of Southeast University (Philosophy and Social Science)*, 2015(S1): 78—81.