

控制与决策

Control and Decision

基于(D, U)控制策略的港口群空箱存储与调运联合优化

蔡佳芯, 李宇博, 王小寒, 靳志宏

引用本文:

蔡佳芯, 李宇博, 王小寒, 靳志宏. 基于(D, U)控制策略的港口群空箱存储与调运联合优化[J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 3012–3022.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0703>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于混合果蝇优化算法的选址-库存联合优化策略](#)

Location-inventory joint optimization strategy based on hybrid fruit fly optimization algorithm
控制与决策. 2022, 37(9): 2343–2352 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0205>

[面向冷链物流配送路径优化的知识型蚁群算法](#)

Knowledge based ant colony algorithm for cold chain logistics distribution path optimization
控制与决策. 2022, 37(3): 545–554 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0160>

[基于分层强化学习的通用装配序列规划算法](#)

A general assembly sequence planning algorithm based on hierarchical reinforcement learning
控制与决策. 2022, 37(4): 861–870 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1289>

[需求和退货与供应中断相关环境下库存控制](#)

Inventory control under demands and returns dependent supply disruptions
控制与决策. 2021, 36(4): 1003–1009 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0980>

[铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化](#)

Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal
控制与决策. 2021, 36(12): 3063–3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

基于 (D, U) 控制策略的港口群空箱存储与调运联合优化

蔡佳芯, 李宇博, 王小寒, 靳志宏[†]

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对区域港口群内陆公共腹地的空箱供需状况, 构建多港口、多周期空箱存储与调运联合优化混合整数规划模型, 利用马尔科夫决策过程与动态规划相结合的方法, 在 (D, U) 库存控制策略下对港口群内各港口的空箱库存保有量区间进行动态优化, 以此为基础对港口群公共腹地和各港口间的空箱调运方案进行优化, 并以辽宁沿海港口群——东北腹地为对象进行实证分析. 实验结果表明, (D, U) 控制策略下的空箱调运能够为船公司节省 15.22% 的总成本. 选取公共腹地数量、公共腹地和港口空箱需求量、单位租箱成本以及单位库存成本进行灵敏度分析, 进而验证 (D, U) 控制策略能够削弱船公司在外界环境发生变化时受到的影响.

关键词: 港口群; 公共腹地; (D, U) 库存策略; 空箱调运; 马尔科夫决策; 动态规划

中图分类号: U169.6

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0703

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 蔡佳芯, 李宇博, 王小寒, 等. 基于 (D, U) 控制策略的港口群空箱存储与调运联合优化[J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 3012-3022.

Inventory-repositioning integrated optimization of empty container in port group based on (D, U) control strategy

CAI Jia-xin, LI Yu-bo, WANG Xiao-han, JIN Zhi-hong[†]

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In view of the supply and demand situation of empty containers in the inland public hinterland of regional port groups, a multi-port and multi-stage mixed integer programming model considering inventory-repositioning integrated optimization of empty containers is established, and a combination of Markov decision-making process and dynamic planning is used under the (D, U) inventory control strategy, and on the basis of dynamic optimization of the empty container inventory holding interval of each port in the port group, the scheme of empty container repositioning between the public hinterland of the port group and the port is optimized, and the empirical analysis is carried out with the Liaoning coastal port group-northeast hinterland as the object. The results show that the empty container repositioning under the (D, U) control strategy can save the shipping company 15.22% of the total cost. The sensitivity analysis of the quantity of public hinterland, the demand of empty container in public hinterland and port, the cost of unit rental container and the cost of unit inventory is selected, and the (D, U) control strategy can be verified to reduce the influence of shipping companies when the external environment changes.

Keywords: port group; public hinterland; (D, U) control strategy; empty container repositioning; Markov decision; dynamic programming

0 引言

随着我国港口面临的竞争愈加激烈, 资源和环境的压力层出不穷, 港口资源整合已成为不可逆转的趋势. 各大港口由原来各自为营的状态逐渐向港口群的合作共享模式转变, 如何在港口群的发展模式下利用共享的腹地场站与港口间形成良好的空箱调运模

式, 如何通过库存控制方法合理安排空箱调运, 对于船公司在运营过程中降低总成本具有十分重要的意义.

从运输角度而言, 传统的空箱调运研究以海运单一调运模式为主, 关于此方面的研究成果有许多, 不作重点介绍; 在内陆运输方面, 近些年的研究主要

收稿日期: 2021-04-22; 录用日期: 2021-07-19.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71572023, 71702019); 欧盟H2020项目(MSCA-RISE-777742-56); 大连市领军人才项目(2018-573); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132019301, 3132020301).

责任编委: 梁樑.

[†]通讯作者. E-mail: jinzhihong@dlnu.edu.cn.

涉及内陆场站之间的单周期调运、内陆场站的选址、内陆空箱调运的路径选择以及内陆重空箱的联合调配问题等^[1-3]。多式联运的发展和兴盛使得采用海陆联运方式进行空箱调运的研究越来越多。Peng等^[4]、Xie等^[5]从海陆多式联运角度出发,以单港、单场站两端合作的方式对空箱的运输协调和运输利润进行了研究;Kolar等^[6]提出空箱调运需要内陆集装箱运输的各方合作,现有的空箱调运模式忽视了基于合作的多式联运空箱调运的潜力和重要性;邢磊等^[7]以中欧海陆集装箱运输为研究对象,利用线性规划模型验证了海陆协同的方式能够有效降低空箱调运成本;Zhao等^[8]在海陆联运背景下研究随机需求和供给的变化对空箱调运的影响。

从库存论的角度看,Luo等^[9]研究了在多式联运系统下客户需求发生变化时空箱的库存管理问题,并讨论了空箱调运对最优库存水平的影响;汪传旭等^[10]通过构建多阶段空箱库存保有量优化模型,以有效降低租箱成本;Legros等^[11]通过阈值策略管理空箱,以节省空箱使用成本;Poo等^[12]在动态环境下对支线运输中的空箱库存成本、空箱调运成本进行动态控制,为船公司制定空箱库存控制的动态策略。

在空箱运输与空箱库存联合优化研究方面,Wang^[13]将集装箱的库存成本整合至现有的班轮航线网络设计中,对库存成本和空箱运输网络进行研究;Eide等^[14]将船舶速度与负荷因素纳入模型,证明考虑这两个因素可节省38%的成本;Dong等^[15]目的在于确定每一航次的航行路线,将挂靠港口的空箱库存控制在合理范围内;Zhou等^[16]建立了空箱调运的两阶段随机规划模型,并设计了一种可分离的分段线性学习算法(SPELL)以有效解决大规模的空箱调运问题;Misra等^[17]提出了混合时间离散化方法,并结合滚动时域策略,求解复杂的多时间段海上库存路径问题。

综合上述从库存、运输角度出发的空箱调运研究发现,还有以下问题需要进一步优化和研究,即单周期的空箱调运问题、静态空箱库存问题、港口群与陆向腹地的脱节以及重空箱转化问题的忽视。针对上述问题,本文以区域港口群内的港口和陆向公共腹地为研究对象,综合考虑多周期、 (D, U) 策略的因素,同时加入重箱与空箱间进行转化的考量,构建了港口群与共享的腹地场站之间的空箱调运系统,通过将动态规划与马尔科夫决策过程相结合,优化各周期的空箱调运量、租箱量以及库存保有量,使得船公司的总运营成本最小。

1 问题描述

在港口群运输网络中,港口之间、港口的内陆腹地场站与港口之间进行着往复的空重箱运输。处于公共腹地范围内的内陆集装箱场站可以与多个其覆盖的港口间进行空重箱的运输。这也意味着当港口处于空箱供给不足的状态时,来自公共腹地的内陆场站可以为多个港口提供空箱补给,以此方式为船公司增加了一种新的空箱补给来源。图1为区域港口群与陆向公共腹地之间的空箱调运模式。

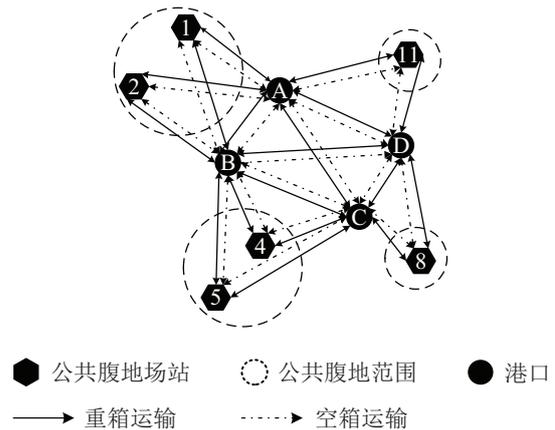


图1 港口群与公共腹地场站间的空箱调运示意图

此外,为了弥补空箱调运所耗费的时间成本,每个周期在港口群的各个港口设置不同的库存保有量区间, D 为港口库存量的最小值, U 为港口空箱库存量的最大值。当港口空箱库存量低于 D 时,通过港口间、港口与内陆场站间以及租箱的方式补足空箱量直至达到 D 值;当港口的空箱库存量超过 U 时,要通过向外调运空箱减少港口的空箱库存量,调运方向为其他港口和共享的内陆公共腹地场站。每一周期的最优库存保有量区间随着重箱运输量、调运量、租箱量不断地发生变化,通过动态规划在每一周末对库存保有量进行决策,经过一个周期的重空箱运输,使得在期末的港口空箱库存量能够保持在优化区间内。

本文以所有周期的总成本最小化为目标,综合考虑每个港口节点的空箱流入流出量平衡、港口节点以及内陆场站节点的库存量平衡等约束条件,并设置两种情形:1)不考虑空箱库存保有量区间,对空箱调运方案进行优化;2)计算在 (D, U) 策略下的各项成本和优化的空箱调运方案。综合两种情形的计算结果,对各类成本作出对比,以此验证 (D, U) 策略下的区域港口群空箱调运方案的有效性。

2 模型构建

2.1 前提假设

1)上一周期到达港口的重箱转化后作为本周期的空箱供给量,上一周期由港口运至场站的重箱转化

后作为本周期场站的空箱供给量;

- 2) 不考虑公共腹地场站间的空箱调运;
- 3) 租箱在本期内便可到达, 不考虑还箱;
- 4) 不考虑空箱的装卸费, 统一计费至运输费用中;
- 5) 仅考虑20英尺集装箱.

2.2 符号说明

2.2.1 集合

- T : 计划期长度, $t \in T$.
- P : 港口群内的所有港口集合, $i, j \in P$.
- H : 内陆集装箱场站集合, $m \in H$.

2.2.2 成本参数

- CP_{ij} : 港口 i 与港口 j 之间的单位空箱运输成本.
- CE_{im} : 港口 i 与场站 m 之间的单位空箱运输成本.
- CS_m^1 : 场站 m 的单位空箱存储成本.
- CS_i^2 : 港口 i 的单位空箱存储成本.
- CL_i : 港口 i 的单位租箱成本.
- CL_m : 场站 m 的单位租箱成本.

2.2.3 其他参数

- Iq_{ij}^t : t 周期从港口 i 运往港口 j 的重箱数量, 经过转化可作为空箱供给量, 是一个独立同分布的随机量.
- Oq_{ij}^t : t 周期从港口 i 运出至港口 j 的重箱数量, 即当期空箱需求量, 是一个独立同分布的随机量.
- λ_{im} : 当场站 m 处于港口 i 覆盖范围内时取值为1, 否则取值为0.

- QH_{im}^t : t 周期从港口 i 运往场站 m 的重箱数量.
- DH_m^t : t 周期场站 m 的空箱需求量.
- IV_i^0 : 港口 i 的初始空箱量.
- IV_m^0 : 场站 m 的初始空箱量.
- $W1_m^{\max}$: 场站 m 的空箱最大堆存量.
- $W2_i^{\max}$: 港口 i 的空箱最大堆存量.
- F_{ij}^t : t 周期港口 i 与港口 j 间的最大运输能力.

2.2.4 决策变量

- QP_{ij}^t : t 周期从港口 i 调运至港口 j 的空箱数量.
- QL_i^t : t 周期港口 i 的租箱数量.
- QL_m^t : t 周期场站 m 的租箱数量.
- QE_{im}^t : t 周期港口 i 运往场站 m 的空箱数量.

2.2.5 衍生变量

- $ST1_m^t$: t 周期末场站 m 的空箱库存量.
- $ST2_i^t$: t 周期末港口 i 的空箱库存量.
- $\omega 1_m^t$: t 周期场站 m 的空箱流入流出量差, 如下式所示:

$$\omega 1_m^t = ST1_m^{t-1} + \sum_{i \in P} \lambda_{im} QH_{im}^{t-1} - DH_m^t. \quad (1)$$

若 $\omega 1_m^t > 0$, 表明场站 m 处于余箱状态, 则可以为其覆盖范围内的港口进行空箱供给; 若 $\omega 1_m^t \leq 0$, 表明场站 m 处于缺箱状态, 则此时场站不能向外调箱, 需要余箱港口调运或租箱以满足空箱需求.

$\omega 2_i^t$: t 周期港口 i 的空箱流入流出量差, 可表示为

$$\omega 2_i^t = ST2_i^{t-1} + \sum_{j \in P} Iq_{ji}^{t-1} - \sum_{m \in H} \lambda_{im} QH_{im}^{t-1} - \sum_{j \in P} Oq_{ij}^t. \quad (2)$$

2.3 数学模型

2.3.1 情形1模型

情形1: 未设置空箱库存阈值的空箱调运模型. 目标函数是使得所有周期内船公司的总成本最小, 共包括3部分, 即港口间和港口与公共腹地场站之间的调运成本、租箱成本以及公共腹地场站与港口的空箱库存成本. 有

$$C_1 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} CP_{ij} QP_{ij}^t + \sum_{i \in T} \sum_{i \in P} \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t CE_{im}, \quad (3)$$

$$C_2 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in P} CL_i QL_i^t + \sum_{t \in T} \sum_{m \in H} CL_m QL_m^t, \quad (4)$$

$$C_3 = \sum_{t \in T} \sum_{m \in H} \max(ST1_m^t, 0) CS_m^1 + \sum_{t \in T} \sum_{i \in P} \max(ST2_i^t, 0) CS_i^2. \quad (5)$$

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3. \quad (6)$$

s.t.

$$ST1_m^t = \begin{cases} IV_m^0 - DH_m^t, & t = 1; \\ \omega 1_m^t - \sum_{i \in P} \lambda_{im} QE_{im}^t, & \omega 1_m^t > 0, t \geq 2; \\ \omega 1_m^t + QL_m^t + \sum_{i \in P} \lambda_{im} QE_{im}^t, & \omega 1_m^t \leq 0, t \geq 2. \end{cases} \quad \forall t \in T, \forall m \in H. \quad (7)$$

$$ST2_i^t = \begin{cases} IV_i^0 - \sum_{j \in P} Oq_{ij}^t, & t = 1; \\ \omega 2_i^t - \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t - \sum_{j \in P} QP_{ij}^t, & \omega 2_i^t > 0, t \geq 2; \\ \omega 2_i^t + QL_i^t + \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t + \sum_{j \in P} QP_{ji}^t, & \omega 2_i^t \leq 0, t \geq 2. \end{cases}$$

$$\forall t \in T, \forall i \in P. \tag{8}$$

$$\sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t \leq \omega 2_i^t - \sum_{j \in P} QP_{ij}^t, \omega 2_i^t > 0,$$

$$\forall i \in P, \forall t \in T. \tag{9}$$

$$\sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t = 0, \omega 2_i^t \leq 0, \forall t \in T, \forall i \in P. \tag{10}$$

$$\sum_{i \in P} \lambda_{im} QE_{mi}^t \leq \omega 1_m^t, \omega 1_m^t > 0, \forall t \in T, \forall m \in H. \tag{11}$$

$$\sum_{i \in P} \lambda_{im} QE_{mi}^t = 0, \omega 1_m^t \leq 0, \forall t \in T, \forall m \in H. \tag{12}$$

$$\sum_{j \in P} QP_{ij}^t \leq \omega 2_i^t, \omega 2_i^t > 0, \forall t \in T, \forall i \in P. \tag{13}$$

$$\sum_{j \in P} QP_{ij}^t = 0, \omega 2_i^t \leq 0, \forall t \in T, \forall i \in P. \tag{14}$$

$$\sum_{j \in P} QP_{ji}^t + QL_i^t + \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{mi}^t \geq -\omega 2_i^t, \omega 2_i^t \leq 0, \forall t \in T, \forall i \in P. \tag{15}$$

$$\sum_{i \in P} \lambda_{im} QE_{im}^t + QL_m^t \geq -\omega 1_m^t, \omega 1_m^t \leq 0, \forall t \in T, \forall m \in H. \tag{16}$$

$$QL_i^t \leq |\omega 2_i^t|, \omega 2_i^t \leq 0, \forall t \in T, \forall i \in P. \tag{17}$$

$$QL_i^t = 0, \omega 2_i^t > 0, \forall t \in T, \forall i \in P. \tag{18}$$

$$QL_m^t \leq |\omega 1_m^t|, \omega 1_m^t \leq 0, \forall t \in T, \forall m \in H. \tag{19}$$

$$QL_m^t = 0, \omega 1_m^t > 0, \forall t \in T, \forall m \in H. \tag{20}$$

$$ST1_m^t \leq W1_m^{\max}, \forall t \in T, \forall m \in H. \tag{21}$$

$$ST2_i^t \leq W2_i^{\max}, \forall t \in T, \forall i \in P. \tag{22}$$

$$QP_{ij}^t + Oq_{ij}^t \leq F_{ij}^t, \forall i, j \in P, \forall t \in T. \tag{23}$$

$$QP_{ij}^t, QL_i^t, QL_m^t, QE_{im}^t \geq 0, \text{且为整数.} \tag{24}$$

式(7)和(8)分别为 t 周期末在满足空箱需求后场站 m 和港口 i 的空箱库存量;式(9)~(12)为 t 周期港口 i 与其覆盖范围内的内陆场站 m 间的空箱调运量约束;式(13)和(14)为 t 周期港口 i 向其他港口 j 调出的空箱量约束;式(15)和(16)为 t 周期港口 i 和场站 m 处于缺箱状态时,空箱调运量和租箱量要超过其缺箱量;式(12)~(20)为港口和场站的租箱量限制;式(21)~(23)分别为最大库存量和最大运输能力限制;式(24)为非负约束.

2.3.2 情形2模型

情形2:考虑港口空箱库存阈值的调运模型.设 D_i^t 为 t 周期港口 i 调入空箱的极值,即最低库存量值; U_i^t 为 t 周期港口 i 调出空箱的极值,即最高库存量值.因此,在情形2下新增约束如下:

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \\ ST2_i^t &= \max\left(\omega 2_i^t - \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t - \sum_{j \in P} QP_{ij}^t, D_i^t\right), \\ \omega 2_i^t - \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t - \sum_{j \in P} QP_{ij}^t &\leq U_i^t, \omega 2_i^t > 0, \\ \forall t \in T, i \in P. \end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned} ST2_i^t &= \min\left(\omega 2_i^t - \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t - \sum_{j \in P} QP_{ij}^t, U_i^t\right), \\ \omega 2_i^t - \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t - \sum_{j \in P} QP_{ij}^t &\geq D_i^t, \\ \omega 2_i^t &> 0, \forall i \in P, t \in T. \end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned} ST2_i^t &= \max\left(\omega 2_i^t + \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{mi}^t + \sum_{j \in P} QP_{ji}^t, D_i^t\right), \\ \omega 2_i^t + \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{mi}^t + \sum_{j \in P} QP_{ji}^t &\leq U_i^t, \omega 2_i^t \leq 0, \\ \forall t \in T, i \in P. \end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned} ST2_i^t &= \min\left(\omega 2_i^t + \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t + \sum_{j \in P} QP_{ij}^t, U_i^t\right), \\ \omega 2_i^t + \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t + \sum_{j \in P} QP_{ij}^t &\geq D_i^t, \omega 2_i^t \leq 0, \\ \forall i \in P, t \in T. \end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned} \max(D_i^t - \omega 2_i^t, 0) &\leq \\ \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t + \sum_{i \in P} QP_{ij}^t + QL_i^t &\leq \max(U_i^t - \omega 2_i^t, 0), \\ \forall t \in T, \forall j \in P. \end{aligned} \tag{29}$$

$$\begin{aligned} \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t + \sum_{j \in P} QP_{ij}^t &\leq \max(\omega 2_i^t - U_i^t, 0), \\ \omega 2_i^t &> 0, \forall t \in T, \forall i \in P. \end{aligned} \tag{30}$$

式(25)~(28)表示港口的空箱库存量控制在阈值区间内;式(29)和(30)表示通过调箱和租箱使得港口空箱库存量达到阈值区间要求.需要指出的是,式(29)中,在 (D, U) 控制策略下,无论港口是处于余箱还是缺箱状态,均需要通过调箱和租箱使得港口的空箱库存量保持在阈值范围内.

同时,本文在Li等^[18]、Song等^[19]研究的基础上,针对多周期条件下空箱在港口、内陆的流动过程,给出在不同周期下的空箱库存阈值的推导公式,即

$$U_i^t = \sum_{j \in P} \mu_{ij}^t + \sqrt{\sum_{j \in P} (\sigma_{ij}^t)^2}, \tag{31}$$

$$D_i^t = \max \left\{ 0, \left(\sum_{j \in P} \mu_{ji}^t - \sum_{j \in P} \mu_{ij}^t - \sum_{m \in H} \mu_{im}^t \right) \right\} + \sqrt{\sum_{j \in P} (\sigma_{ij}^t)^2} \quad (32)$$

其中: μ_{ij}^t 、 μ_{im}^t 为 i 港口每周期运出空箱的均值(即空箱需求), μ_{ji}^t 为 i 港口每周期运进空箱的均值(即空箱供给), σ_{ij}^t 为 i 港口每周期空箱需求的标准差. 在求上限值公式中, 采用的是港口 i 每周期的空箱总需求量均值与总标准差之和; 在求下限值的公式中, 采用的是港口 i 每周期的空箱流入流出量总差值(净流出量)

的均值与总标准差之和, 这是为了使得空箱能够从余箱港流向缺箱港, 减少反方向的空箱运输.

3 基于动态规划与马尔科夫决策的组合算法设计

由于上述模型具有多阶段、动态性以及随机性的特点, 选择动态规划与马尔科夫决策过程相结合的方法, 既可以利用动态规划过程对多阶段问题进行求解, 也可以利用马尔科夫决策过程转移概率, 用以处理空箱调运过程中的随机性. 具体组合算法流程如图2所示.

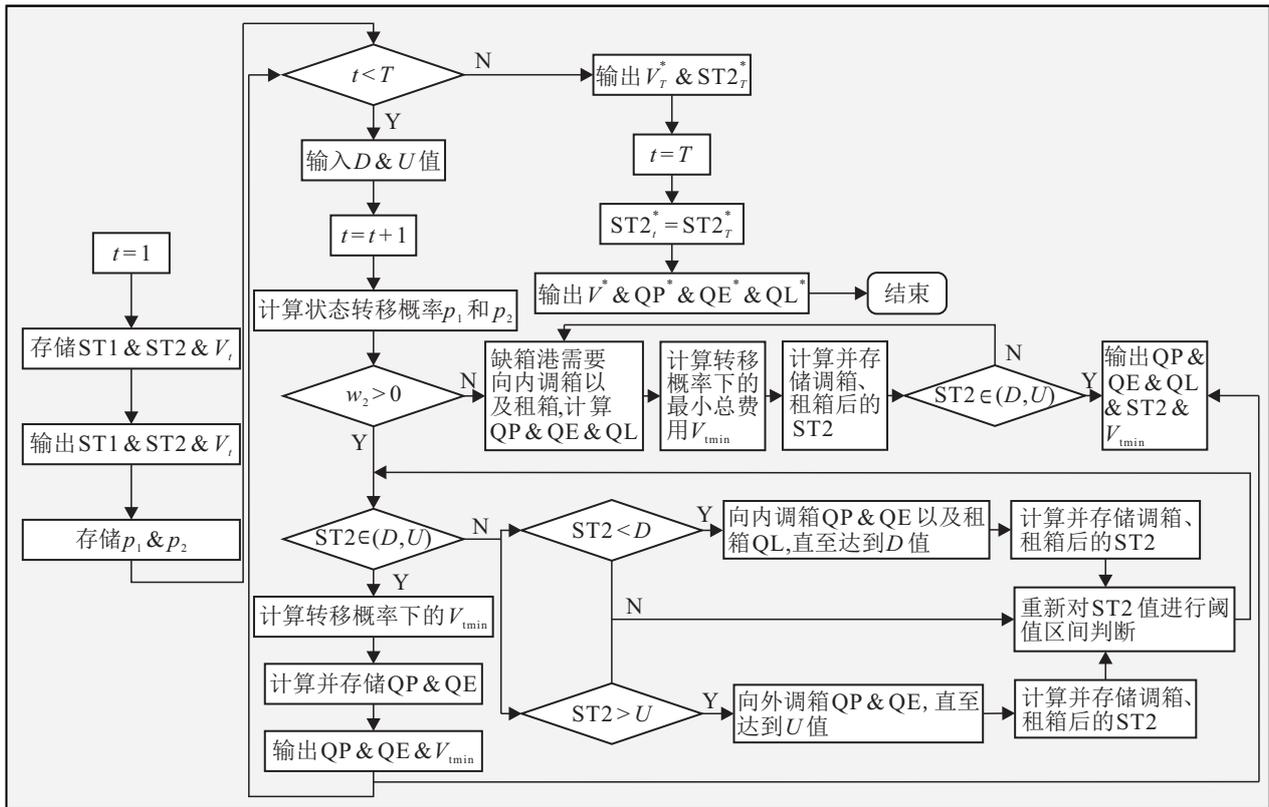


图2 组合算法基本流程

3.1 动态规划主算法设计

以港口、内陆集装箱场站每决策周期末的空箱库存量表示阶段的状态, 各港口和内陆集装箱场站的空箱库存量可通过每阶段的空箱库存量、空箱调运量、租箱量和重箱转化量进行表示, 状态转移方程为

$$ST1_m^t = \begin{cases} ST1_m^{t-1} + \sum_{i \in P} QH_{im}^{t-1} - DH_m^t - \sum_{i \in P} \lambda_{im} QE_{mi}^t, & \omega_1^t > 0; \\ ST1_m^{t-1} + \sum_{i \in P} QH_{im}^{t-1} - DH_m^t + \sum_{i \in P} \lambda_{im} QE_{im}^t + QL_m^t, & \omega_m^t \leq 0. \end{cases}$$

$$\forall m \in H, \forall t \in T. \quad (33)$$

$$ST2_i^t = \begin{cases} ST2_i^{t-1} + \sum_{j \in P} Iq_{ji}^{t-1} - \sum_{m \in H} QH_{im}^{t-1} - \sum_{j \in P} Oq_{ij}^t - \sum_{j \in P} QP_{ij}^t - \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{im}^t, & \omega_2^t > 0; \\ ST2_i^{t-1} + \sum_{j \in P} Iq_{ji}^{t-1} - \sum_{m \in H} QH_{im}^{t-1} - \sum_{j \in P} Oq_{ij}^t + QL_i^t + \sum_{j \in P} QP_{ji}^t + \sum_{m \in H} \lambda_{im} QE_{mi}^t, & \omega_2^t \leq 0. \end{cases} \quad \forall i \in P, \forall t \in T. \quad (34)$$

3.2 转移过程设计

3.2.1 状态转移的动态过程设计

设 Iq_{ij}^t 和 Oq_{ij}^t 的取值范围为集合 $K, \exists k, l \in K, p_1^t$ 为 Iq_{ij}^t 取值范围概率, $p_1^t\{\alpha \leq Iq_{ij}^t \leq \beta\} = p_1^t(k); p_2^t$ 为 Oq_{ij}^t 取值范围概率, $p_2^t\{\mu \leq Oq_{ij}^t \leq \theta\} = p_2^t(l); M$ 为港口吞吐量与船舶最大运输能力的较小值; α_i^t 为 $(0, 1)$ 变量, 当 $\omega 2_i^t > 0$ 时, 值为 1, 否则值为 0. 结合上述状态转移方程, 借鉴张爽^[20] 在随机条件下对空箱调运问题的研究, 提出在多周期条件下港口空箱调运 MDP 过程, 具体归纳如下.

令 $S = \{ST2_i^t | 0 \leq ST2_i^t \leq M, ST2_i^t \in Z\}$ 为系统状态空间; $\forall ST2_i^t \in S$, 设 a_t 为在该状态下一个可用的行动, 即代表发生实际的空箱调进、调出或租箱. 令 $A(i)$ 为整个系统的可用行动集, 则有 $a_t \in A(i)$. 在第 t 周期初船公司在港口 i 的空箱库存数量为

$$\varphi_t = ST2_i^t + \sum_{j \in P} \alpha_i^t QP_{ij}^t + \alpha_i^t QL_i^t +$$

$$\sum_{m \in H} \alpha_i^t \lambda_{im} QE_{im}^t + \sum_{j \in P} Iq_{ji}^{t-1}.$$

若不考虑重箱, 船公司可用空箱数量为

$$\psi_t = ST2_i^t + \sum_{j \in P} \alpha_i^t QP_{ij}^t + \alpha_i^t QL_i^t +$$

$$\sum_{m \in H} \alpha_i^t \lambda_{im} QE_{im}^t.$$

因此, 在 $t + 1$ 阶段初始系统状态为

$$ST2_i^{t+1} = \psi_t + \sum_{j \in P} (Iq_{ji}^{t-1} - Oq_{ij}^t) - \sum_{m \in H} \lambda_{im} QH_{im}^t.$$

此时从状态 $ST2_i^t$ 转移至状态 $ST2_i^{t+1}$ 的转移概率为 $p(ST2_i^{t+1} | ST2_i^t, a_t) = p_1^t(z_1)p_2^t(z_2)$. 图 3 为状态转移的动态过程.

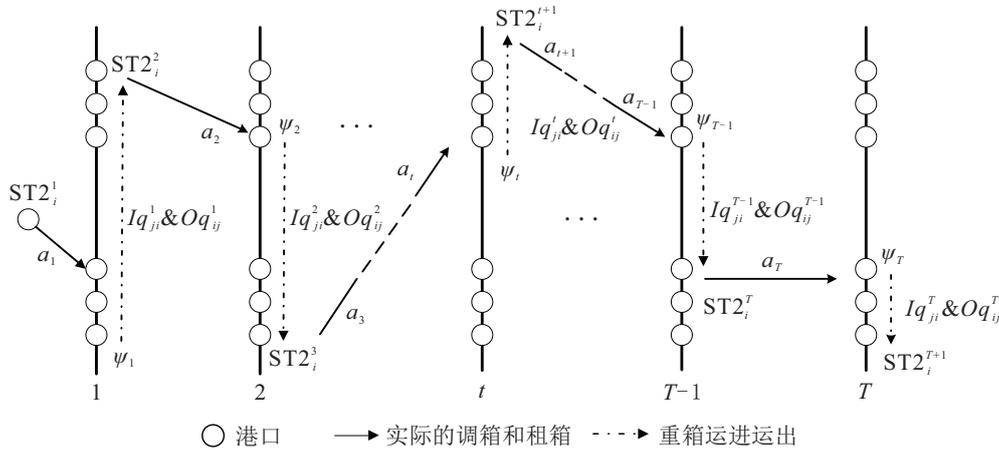


图 3 空箱库存保有量动态决策过程

3.2.2 总费用和最优状态计算

利用逆向推导得出每一个周期内产生的费用和最优状态.

1) 在第 T 阶段, 经过实际行动 a_T 后使得港口的可用空箱数量达到 ψ_T , 相应产生的调箱和租箱费用记为 $\sum_{i \in P} (C_1^T + C_2^T)$. 受重箱运进运出影响, 会产生库存费用 $\sum_{i \in P} \sum_{m \in H} C_3^T$. 完成重空箱运输后系统的状态为 $ST2_i^T$, 设 V_t 为 $t - T$ 所有周期的费用总和, 总费用如下所示:

$$V_T = \sum_i \sum_m (C_1^{T-1} + C_2^{T-1} + C_3^{T-1}). \quad (35)$$

2) 在第 $T - 1$ 阶段, 行动 a_{T-1} 后使得可用的空箱数量调整至 ψ_{T-1} , 周期末空箱库存量为 $ST2_i^{T-1}$, 此时费用为 $\sum_i \sum_m (C_1^{T-1} + C_2^{T-1} + C_3^{T-1})$. 受重箱运输影响, 系统在第 T 周期末的状态为 $ST2_i^T = \psi_{T-1} +$

$\sum_{j \in P} Iq_{ji}^{T-1} - \sum_{m \in H} \lambda_{im} QH_{im}^T - \sum_{j \in P} Oq_{ij}^{T-1}$, 状态 $ST2_i^t$ 出现的概率为 $p^{T-1}(a_{T-1})$, 此时总费用为

$$V_{T-1} = \sum_i \sum_m (C_1^{T-1} + C_2^{T-1} + C_3^{T-1}) + \sum_i \sum_m \left(\sum_a (C_1^T + C_2^T + C_3^T) \times p^{T-1}(a_{T-1}) \right) = \sum_i \sum_m (C_1^{T-1} + C_2^{T-1} + C_3^{T-1}) + \sum_i \sum_m \left(\sum_a V_T p^{T-1}(a_{T-1}) \right). \quad (36)$$

在第 $t - T$ 阶段, 周期的总费用为

$$V_t = \sum_i \sum_m \left(C_1^t + C_2^t + C_3^t + \sum_a V_{t+1} p^t(a_t) \right) = \sum_i \sum_m \left(C_1^t + C_2^t + C_3^t +$$

$$\sum_a V_{t+1} p_1^t(z_1) p_2^t(z_2). \tag{37}$$

由此可得出每个阶段的最优状态,同时可得出基于马尔科夫过程的空箱调运问题的动态规划基本方程

$$\begin{aligned} \min V_t = & \sum_i \sum_j CP_{ij} QP_{ij}^t + \sum_i \sum_m \lambda_{im} QE_{im}^t CE_{im} + \\ & \sum_i CL_i QL_i^t + \sum_m CL_m QL_m^t + \sum_{m \in H} (ST1_m^t, 0) CS_m^1 + \\ & \sum_{i \in P} (ST2_i^t, 0) CS_i^2 + \sum_a V_{t+1} p_1^t(z_1) p_2^t(z_2). \end{aligned} \tag{38}$$

3.2.3 转移概率计算

为进行转移概率计算,进行如下定义:

$$\begin{aligned} ST2_i^t &= s_t, ST2_i^{t+1} = s_{t+1}, \\ ST2_i^{t+n} &= s_{t+n}, s_t, s_{t+1}, s_{t+n} \in S, \end{aligned}$$

则n步状态转移概率可表示为

$$p^{(n)} = \sum_{s_{t+1} \in S} p_{s_t s_{t+1}} p_{s_{t+1} s_{t+n}}^{(n-1)}.$$

推导过程如下:

$$\begin{aligned} p^{(n)} &= p\{ST2_i^{t+n} = s_{t+n} | ST2_i^t = s_t\} = \\ & \frac{p\{ST2_i^{t+n} = s_{t+n}, ST2_i^t = s_t\}}{p\{ST2_i^t = s_t\}} = \\ & \sum_{s_{t+1} \in S} \frac{p\{ST2_i^{t+n} = s_{t+n}, ST2_i^{t+1} = s_{t+1}, ST2_i^t = s_t\}}{p\{ST2_i^t = s_t, ST2_i^{t+1} = s_{t+1}\}} \times \\ & p\{ST2_i^{t+1} = s_{t+1} | ST2_i^t = s_t\} = \\ & \sum_{s_{t+1} \in S} p_{s_t s_{t+1}} p_{s_{t+1} s_{t+n}}^{(n-1)}. \end{aligned} \tag{39}$$

4 数值实验与灵敏度分析

4.1 数值例选取

以辽宁沿海港口群——东北腹地为例进行库存控制策略下的港口群内空箱调运优化研究. 选取大连港、营口港以及丹东港作为港口研究对象,并选取沈阳市、鞍山市、长春市、通化市、哈尔滨市作为港口群的内陆公共腹地.

研究周期数为10,每个周期为7天. 根据大连和沈阳两地的实际港口与内陆场站调研,标准空箱通过公路运输成本为4.5元/箱/km,铁路运输成本为1.8元/箱/km. 港口与公共腹地间距离超过200km采取铁路运输,否则采取公路运输. 公共腹地场站堆存成本平均为5元/箱. 港口间单位空箱运输成本为0.5元/箱/km,堆存成本为500元/箱. 本文基于港口的历史数据和现实运营情况,对需求量的均值和标准差进行刻画和假设,设置各港口、各场站的空箱需求量均服从正态分布,即大连港 $N(300, 20^2)$ 、营口港 $N($

200, 20²)、丹东港 $N(100, 20^2)$. 各个港口与其覆盖范围内的内陆集装箱场站间距离如表1所示(距离数据由百度地图查询得到),“-”为不存在覆盖关系.

表1 各个港口与其覆盖范围内的场站间距离

| 港口 | 腹地/(距离/km) | | | | |
|-----|------------|-------|--------|-------|-------|
| | 沈阳市 | 鞍山市 | 哈尔滨市 | 长春市 | 通化市 |
| 大连港 | 379.2 | 298.9 | 1015.8 | 676.1 | 623 |
| 营口港 | 180.4 | 102.1 | 747.7 | 478.6 | 439.4 |
| 丹东港 | 243.2 | 236.0 | - | - | 275 |

根据空箱库存阈值上下限公式,3个港口在10个决策周期内的空箱库存保有量区间如表2所示.

表2 各港口每周期的空箱库存保有量区间

| 周期 | $(D, U)/TEU$ | | |
|----|--------------|------------|------------|
| | 大连港 | 营口港 | 丹东港 |
| 1 | (140, 321) | (127, 222) | (107, 214) |
| 2 | (114, 321) | (135, 220) | (132, 215) |
| 3 | (123, 319) | (133, 225) | (116, 219) |
| 4 | (128, 319) | (117, 225) | (111, 215) |
| 5 | (115, 323) | (111, 222) | (121, 208) |
| 6 | (107, 323) | (127, 222) | (123, 222) |
| 7 | (123, 322) | (139, 222) | (131, 214) |
| 8 | (139, 322) | (137, 220) | (115, 216) |
| 9 | (133, 320) | (115, 221) | (111, 209) |
| 10 | (126, 320) | (129, 221) | (100, 214) |

4.2 求解结果分析

表3为利用上述组合算法求得的两种情形下的成本结果.

表3 模型计算结果 单位:万元

| 模型 | 调运成本 | 租箱成本 | 库存成本 | 总成本 |
|-------|--------|-------|--------|---------|
| 情形1 | 63.471 | 201.8 | 19.025 | 284.296 |
| 情形2 | 56.65 | 161.2 | 23.17 | 241.02 |
| 差额比/% | 10.75 | 20.12 | -21.79 | 15.22 |

由表3可见,情形1与情形2模型在总成本方面相差15.22%. 通过(D, U)策略,船公司在不同港口制定了空箱阈值范围,有效的空箱库存管理降低了船公司在空箱调运方面的总成本. 从各项成本值看,情形2调运成本与租箱成本相比于情形1均得到了明显的降低,但是库存成本明显上升,这是因为船公司在不同港口保有一定量的空箱库存,同时空箱库存又能够及时满足一部分的空箱需求,减少了调运量和租箱量.

同时,采用 CPLEX 12.6.2 求解器对模型的正确性和可行性进行验证,与上述算法结果对比如表 4 所

示,其中 $GAP = (DP \& MDP - CPLEX) / CPLEX \times 100\%$.

表 4 CPLEX 与 DP & MDP 算法结果对比 单位: 万元

| 模型各项成本 | 情形 1 | | | 情形 2 | | |
|--------|-------|----------|-------|--------|----------|-------|
| | CPLEX | DP & MDP | GAP/% | CPLEX | DP & MDP | GAP/% |
| 调运成本 | 62.59 | 63.471 | 1.4 | 54.08 | 56.65 | 4.75 |
| 租箱成本 | 193.2 | 201.8 | 4.45 | 155.4 | 161.2 | 3.73 |
| 库存成本 | 18.61 | 19.025 | 2.23 | 22.53 | 23.17 | 2.84 |
| 总成本 | 274.4 | 284.296 | 3.61 | 232.01 | 241.02 | 3.88 |

表 4 的结果验证了所构建模型的正确性和可行性;CPLEX 与算法之间的 GAP 偏差均处于 5% 以下,验证了所提出算法的有效性.

所有决策周期内的空箱调运量和租箱量如图 4 所示. 其中: P_1 、 P_2 、 P_3 分别为大连港、营口港和丹东港, H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 分别为沈阳市、鞍山市、哈尔滨市、长春市以及通化市的内陆集装箱场站. 以决策的第 2 阶段为例,大连港、营口港、沈阳市场站、哈尔滨市市场站处于缺箱状态,其余为余箱状态. 为将空

箱库存补足到阈值范围内,对大连港而言需要接受来自丹东港 33 TEU、鞍山市场站 22 TEU、长春市场站 35 TEU、通化市场站 10 TEU 的调运以及 26 TEU 的空箱租赁量. 对于沈阳市场站而言,需要丹东港调运 2 TEU 和租赁 8 TEU 满足空箱需求. 同时可以发现,所有周期内大连港一直处于缺箱状态,通化市场站一直处于余箱状态,这与重箱的运进运出量有极大的关系. 因此在作空箱调运决策时要充分考虑重箱运输的影响.

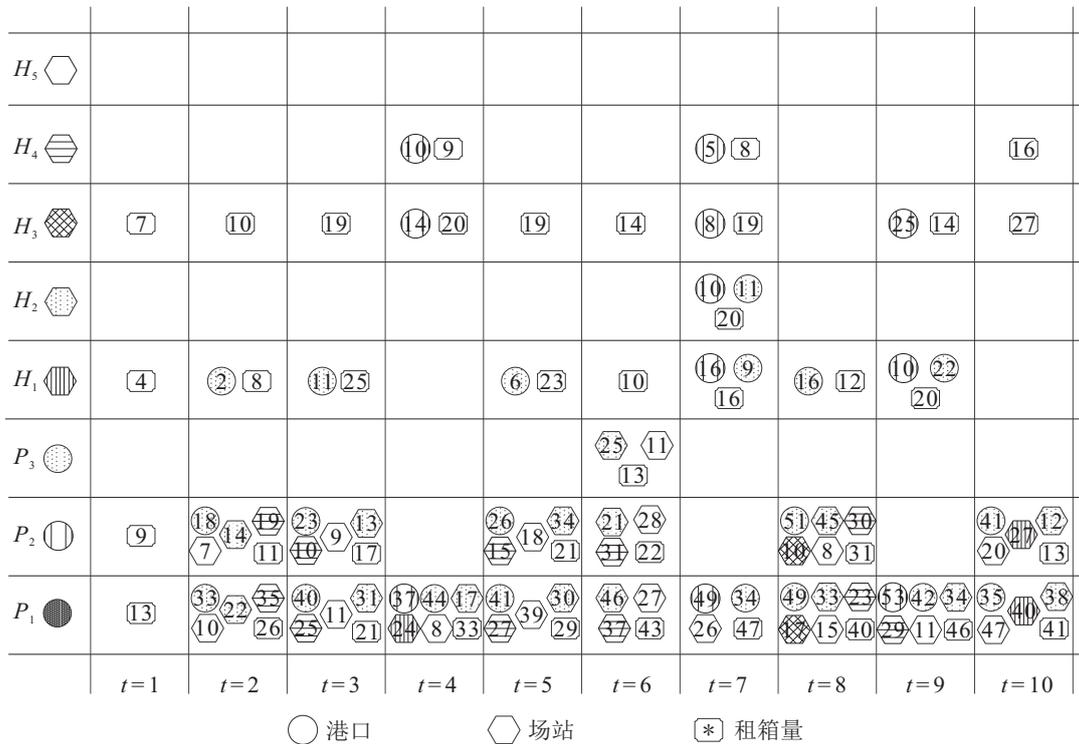


图 4 空箱调运和租箱方案示意图

4.3 灵敏度分析

4.3.1 不同公共腹地数量下各项成本对比分析

图 5 为公共腹地场站数量发生变化时两种情形下各项成本的变化情况. 首先从总体看,随着公共腹地数量的减少,两种情形下的各项成本值均处于增

长状态,这主要源于租箱数量和港口间的调箱数量增加. 当公共腹地数量从 5 减少至 1 时,情形 1 下的总成本值增长了 33.57%,情形 2 下的总成本值增长了 25.94%,各港口的空箱缺口急剧增大,只能通过大量租箱弥补空箱需求,情形 1 与情形 2 租箱成本相比于

初始状态分别增长了39.29%、30.18%。

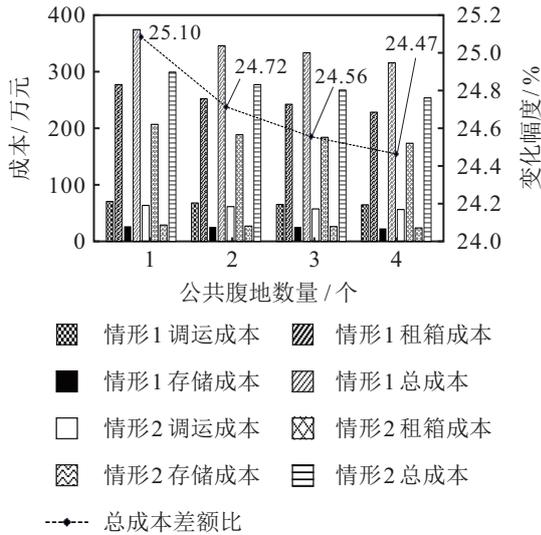


图5 公共腹地情况的变化对各成本的影响

另外,港口群内的各港口在采取(D,U)策略进行空箱库存保有量管理后,总成本和其他各项成本明显下降.随着公共腹地数量的不断减少,两种情形下的总成本差距越来越大,当公共腹地数量最终变为1时,情形1的总成本已超出情形2总成本值的25.10%.综观各项成本值的变化,情形1下的各项成本有着剧烈的增长变化,而情形2下的各项成本虽然总体均在增长,但波动幅度不明显,进一步表明(D,U)策略对于船公司节省空箱调运总成本具有重要作用.

4.3.2 不同空箱需求下的各项成本对比分析

图6为港口空箱需求量增长至50%的变化情况.显然,随着港口需求量不断增长,两种情形下的总成本均在不断增长.当成本增长至10%时,情形1与情形2的总成本值均出现大幅波动;但从20%增长

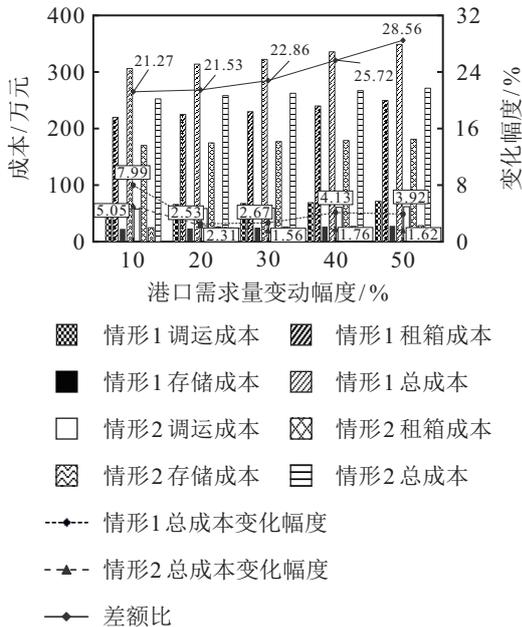


图6 港口空箱需求量变动对各项成本的影响

至50%时,情形1下的总成本值变化了3.92%,而情形2下的总成本值波动了1.62%.需求量增长幅度越大,(D,U)策略下的总成本波动幅度越小,其他各项成本越平稳增长.在该策略下,根据港口不断变化的调箱量、租箱量已将空箱库存保有量控制在合理范围内,即使出现大量的随机空箱需求,港口的空箱库存也能够及时应对,不需要进行大量租箱弥补空箱缺失.

图7为内陆公共腹地空箱需求变化时各项成本发生的变化.首先,内陆公共腹地需求的不断增大导致了两种情形下的总成本均在不断升高;其次,在各项成本中,随着变化幅度的不断增大,租箱成本和调运成本随之不断上升.这是由于在内陆公共腹地空箱需求增大时,大量的空箱用于满足内陆发货人的用箱需求,进而导致从公共腹地场站流向港口越来越少的空箱,使得船公司在港口的调运量和租箱量增多;再次,当内陆空箱需求增长从20%增长至50%后,情形2下的存储成本下降了41.74%,而情形1下降了27.62%,这表明在(D,U)策略下船公司在港口保有一定量的空箱,在公共腹地空箱不能及时补给的状态下,大量的港口库存能够应对空箱的需求缺口.而在情形1下由于没有充足的港口空箱库存,船公司只能通过租箱和调箱进行空箱的补足.

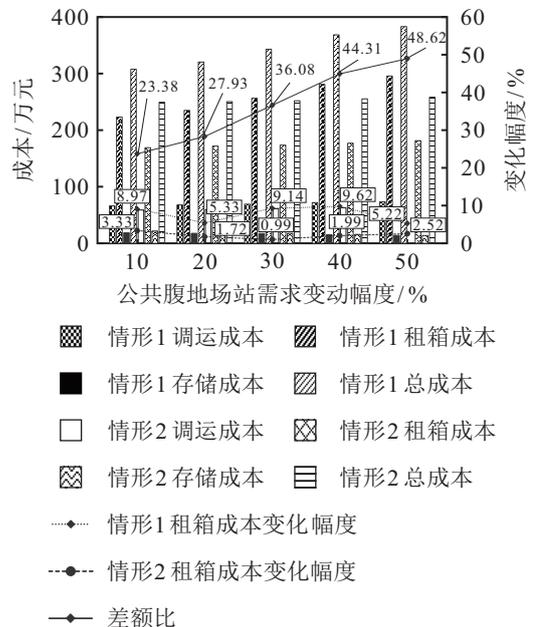


图7 公共腹地场站需求变化对各项成本的影响

4.3.3 不同单位租箱成本下各项成本对比分析

图8为租箱成本变动对两种情形下各项成本的影响.由图8可见,租箱成本与总成本之间存在正相关的关系.单位租箱成本增长至10%后,增长速度加快,变化至30%时较初始状态情形1下的租箱成本增

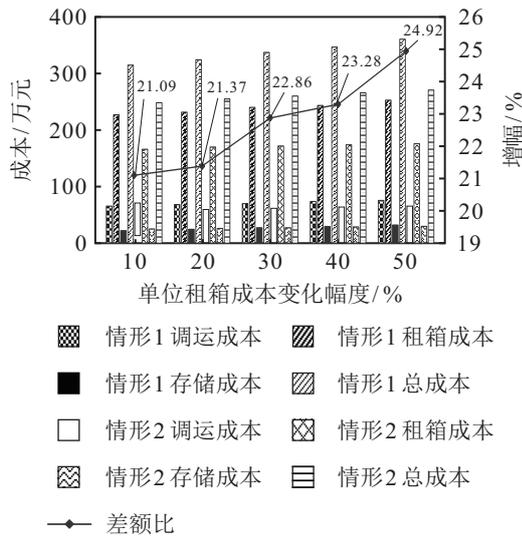


图 8 单位租箱成本变动对各项成本的影响

长了 18.51%, 情形 2 增长了 6.09%; 当增长至 40% 后, 增长速度明显放缓, 情形 1 下的调运总成本上升. 这表明在港口群模式下, 租箱成本持续增长时, 船公司虽依然会选择租箱, 但也更多地注重港口与内陆公共腹地之间的空箱调运, 减少对租箱的依赖.

此外, 当租箱成本增长至 10% 后, (D,U) 策略下的总成本更加具有优势, 同时波动幅度平稳, 受租箱成本增长的影响不明显. 随着租箱成本的不断增加, 两种情形下的总成本差距从初始的 15.22% 扩大至 24.92%. (D,U) 策略不仅能够为船公司节省大量的调运成本, 同时使得空箱库存免受外界环境波动的影响.

4.3.4 不同单位库存成本下的各项成本对比分析

图 9 为单位库存成本发生变化时两种情形下的各项成本变化情况. 由图 9 可见, 单位库存成本与总

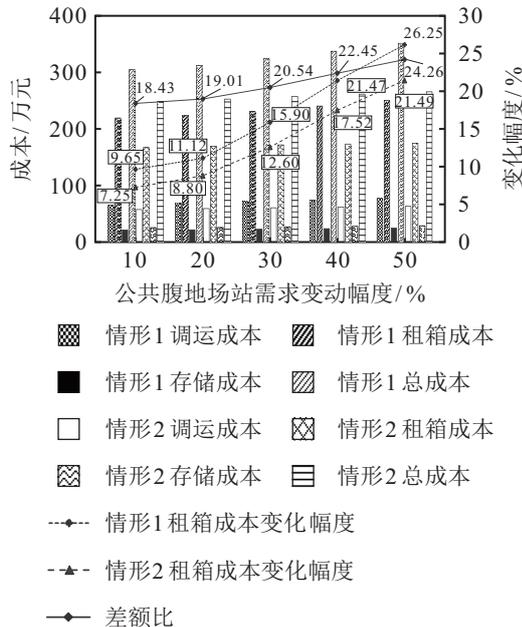


图 9 单位库存成本变动对各项成本的影响

成本之间存在正相关的关系. 单位库存成本不断增加时, 情形 1 下的库存成本出现了明显的上升趋势, 并逐渐与情形 2 下的库存成本接近, 当增长至 50% 时, 库存成本已经较初始状态增加了 26.25%, 而情形 2 下只增加了 21.49%; 其次, 情形 1 的总成本值随着单位库存成本的增加始终高于情形 2 下的总成本值, 并随着增加幅度不断扩大, 二者间的差距也在不断拉大, 增长至 50% 时差距已从原来的 16.18% 扩大至 24.26%. 因此 (D,U) 策略下对于库存成本控制十分有效.

5 结 论

本文建立了港口群与内陆公共腹地间的空箱调运系统, 综合考虑 (D,U) 策略, 采取马尔科夫决策过程与动态规划相结合的方法, 验证了公共腹地场站的空箱对船公司在港口的重要补给作用; (D,U) 策略能够帮助船公司减少空箱调运的总成本, 同时该策略也能够减少船公司因外界因素的波动而对空箱调运方案和成本产生的影响. 对于船公司未来的发展而言, 要更加融入到港口群的发展之中, 从港口群中争取更多的公共腹地资源, 同时要根据动态变化的调箱量、租箱量、重箱量等因素实时调整空箱库存的保有量区间, 减少对租箱的依赖, 是船公司的长远发展之计.

进一步的研究方向是: 在考虑优化空箱保有量区间的基础上, 研究港口群范围内公共腹地场站之间的相互调运、公共腹地场站与港口群之间的空箱调运, 打造港口群与陆向腹地之间的联动空箱调运系统.

参考文献 (References)

- [1] Kuźmicz K A, Pesch E. Container depot location problem in the frame of the polish part of the new silk road[J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 312: 02004.
- [2] Sarmadi K, Amiri-Aref M, Dong J X, et al. Integrated strategic and operational planning of dry port container networks in a stochastic environment[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2020, 139: 132-164.
- [3] Shan W X, Peng Z X, Liu J M, et al. An exact algorithm for inland container transportation network design[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2020, 135: 41-82.
- [4] Peng Z X, Wang H Z, Wang W S, et al. Intermodal transportation of full and empty containers in harbor-inland regions based on revenue management[J]. European Transport Research Review, 2019, 11: 7.
- [5] Xie Y Y, Liang X Y, Ma L J, et al. Empty container

- management and coordination in intermodal transport[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 257(1): 223-232.
- [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] 邢磊, 杨珍花, 徐奇, 等. 海陆联运下的中欧班列集装箱空箱调运优化[J]. *大连海事大学学报*, 2019, 45(2): 1-8.
(Xing L, Yang Z H, Xu Q, et al. Optimizing empty container dispatching of China Railway Express under sea-land intermodal transport[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2019, 45(2): 1-8.)
- [8] Zhao Y, Xue Q W, Zhang X. Stochastic empty container repositioning problem with CO2 emission considerations for an intermodal transportation system[J]. *Sustainability*, 2018, 10(11): 4211.
- [9] Luo T, Chang D F. Empty container repositioning strategy in intermodal transport with demand switching[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 40: 1-13.
- [10] 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: 理学版*, 2015, 50(9): 61-68.
(Wang C X, Wang W, Chen F Y, et al. Empty container reposition optimization with the corporation of the shipping lines[J]. *Journal of Shandong University: Natural Science*, 2015, 50(9): 61-68.)
- [11] Legros B, Bouchery Y, Fransoo J. A time-based policy for empty container management by consignees[J]. *Production and Operations Management*, 2019, 28(6): 1503-1527.
- [12] Poo M C P, Yip T L. An optimization model for container inventory management[J]. *Annals of Operations Research*, 2019, 273(1/2): 433-453.
- [13] Wang S A. Formulating cargo inventory costs for liner shipping network design[J]. *Maritime Policy & Management*, 2017, 44(1): 62-80.
- [14] Eide L E, Årdal G C H, Evsikova N, et al. Load-dependent speed optimization in maritime inventory routing[J]. *Computers & Operations Research*, 2020, 123: 105051.
- [15] Dong B, Christiansen M, Fagerholt K, et al. Combined maritime fleet deployment and inventory management with port visit flexibility in roll-on roll-off shipping[J]. *Transportation Research—Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 140: 101988.
- [16] Zhou S R, Zhuo X P, Chen Z M, et al. A new separable piecewise linear learning algorithm for the stochastic empty container repositioning problem[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 4762064.
- [17] Misra S, Kapadi M, Gudi R D. Hybrid time-based framework for maritime inventory routing problem[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(46): 20394-20409.
- [18] Li J G, Liu K, Leung S C H, et al. Empty container management in a port with long-run average criterion[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2004, 40(1/2): 85-100.
- [19] 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.
- [20] 张爽. 随机条件下海运集装箱空箱调运优化问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2006.
(Zhang S. The optimization research of sea-bound empty container allocation under stochastic conditions[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2006.)

作者简介

蔡佳芯 (1995—), 女, 博士生, 从事物流系统优化与模拟仿真的研究, E-mail: 15021838052@163.com;

李宇博 (1997—), 女, 硕士生, 从事物流系统优化与模拟仿真的研究, E-mail: lyb727402@163.com;

王小寒 (1993—), 女, 博士生, 从事物流系统优化与模拟仿真的研究, E-mail: 1002924430@qq.com;

靳志宏 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流系统优化与模拟仿真等研究, E-mail: jinzhihong@dlnu.edu.cn.

(责任编辑: 魏冰)