

引用格式:蔡佳芯,黄颖,靳志宏.考虑免费用箱期与船公司合作的多周期空箱调运优化决策[J].大连海事大学学报,2026,52(1):40-51.

考虑免费用箱期与船公司合作的多周期空箱调运优化决策

蔡佳芯¹,黄颖²,靳志宏^{*2}

(1. 辽宁工业大学 经济管理学院,辽宁 锦州 121001;2. 大连海事大学 交通运输工程学院,辽宁 大连 116026)

摘要:针对海运空箱调运成本高的行业痛点,本文将船公司合作机制与免费用箱期策略相结合,综合考虑调箱、存箱、租箱及交换用箱四种空箱获取渠道,构建了以空箱调运总成本最小化为目标的非线性规划模型。通过设计基于 ε -Greedy贪心策略的近似动态规划算法,解决了传统方法难以处理的多阶段决策与非线性耦合问题,并给出不同情境下免费用箱期长度的最优决策。研究发现,通过合理设置免费用箱期可降低租箱成本,优化船公司合作下的用箱成本。灵敏度分析表明:当空箱供大于求时,船公司空箱管理总成本可达到最优;而发往内陆箱量每增加33%或运输时间延长1天,需相应缩短免费用箱期1~2天,以实现成本最优。该决策框架有助于提升船公司空箱资源周转效率,并为船公司免费用箱期长度的制定提供参考依据。

关键词:免费用箱期;船公司合作;空箱调运;非线性规划
中图分类号:U169 **文献标志码:**A

文章编号:1006-7736(2026)01-0040-12

doi:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2026.01.005

Optimal decision-making for multi-period empty container repositioning considering free detention time and shipping company cooperation

CAI Jiixin¹, HUANG Ying², JIN Zhihong^{*2}

(1. School of Economics and Management, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China; 2. College of Transport Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Addressing the industry pain point of high costs associated with the empty containers repositioning by sea, this paper combined the cooperation mechanism of shipping com-

panies with the strategy of free container detention periods. It comprehensively considered four channels for obtaining empty containers: container allocation, container storage, container leasing, and container exchange, and a nonlinear programming model was constructed with the goal of minimizing the total cost of empty container repositioning. By designing an approximate dynamic programming algorithm based on ε -Greedy strategies, the multi-stage decision-making and nonlinear coupling issues that are difficult to handle with traditional methods were addressed, and optimal decisions for the length of free container detention periods under different scenarios were provided. Research has found that by reasonably setting the free container detention period, the cost of leasing containers can be reduced, and the cost of container use under cooperation with shipping companies can be optimized. Sensitivity analysis shows that when the supply of empty containers exceeds the demand, the total cost of empty container management for shipping companies will reach its optimal level. For every 33% increase in inland container volume or 1 day extension in transportation time, the free detention period needs to be shortened by 1~2 days to achieve cost optimization. This collaborative decision-making framework helps improve the efficiency of empty container resource turnover in shipping companies and provides a basis for determining the length of free detention period for shipping companies.

Key words: free detention period; shipping company cooperation; empty container repositioning; nonlinear programming

0 引言

空箱调运产生的原因之一,是空箱在内陆腹

收稿日期:2025-09-12;修回日期:2025-11-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(72172023)

作者简介:蔡佳芯(1995—),女,博士,E-mail:15021838052@163.com;靳志宏*(1963—),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:jinzhihong@dmlu.edu.cn

地周转需要一定时间,无法及时返回港口,进而导致港口空箱短缺。对于单个空箱而言,其周转周期主要取决于港口堆存期与内陆周转时间,而堆存期和内陆周转时间又往往受到船公司及港口制定的免箱期和免堆期的影响。为在更短时间内满足空箱用户的需求,船公司可通过调整免费用箱期时长,加快空箱在内陆腹地的周转效率。所谓免费用箱期,是指由船公司规定的集装箱免费使用期限^[1]。用箱期则是指集装箱自港口启运至内陆,直至再次返回港口的整个时长。若实际用箱期超出船公司规定的免费用箱期,船公司将超出部分向收货人收取滞箱费。

免费用箱期的长短,对内陆集装箱周转的影响最为显著。对于内陆节点较多的区域,往往需要设置更长的免箱期,因为其运输与还箱均需要较长时间。因此,免费用箱期具有灵活可调的特点,其时长也会直接影响收货人归还集装箱的时间。对于船公司而言,满足空箱需求的途径除租箱外,通常还可借助船公司间的联盟合作开展空箱调运,同时通过合理设定免费用箱期,加快集装箱在内陆的周转速度。

产业界的客观需求催生了理论界大量关于空箱调运的相关研究。靳志宏等^[2]从综合运输与仓储两个角度对空箱调运优化问题进行研究。Cai等^[3]采用机器学习算法研究内陆空箱调运策略,构建了两种不同的优化模型,以实现内陆空箱运输周转总里程的最小化。Tao等^[4]引入“堆场-港口”运输链与半生命周期评估概念,综合考虑了集装箱装卸、运输及空箱调运等环节的能源消耗与二氧化碳排放。Lu等^[5]构建随机动态规划模型,研究了双仓库航运系统中,空箱需求随机情形下的航运定价与空箱调运联合决策问题。Liang等^[6]提出一种新的动态分配策略,根据当前空箱库存、已完成需求及未来阶段的平均需求,确定各阶段空箱的分配方案。Sommer等^[7]将内陆单仓库空箱调运问题,建模为带容量约束的多供应商定期盘点库存管理问题,并构建了离散时间马尔可夫决策过程,同时针对空箱外生需求与集装箱返还过程建立了统计模型。Cai等^[8]构建了集成(s,S)库存控制策略的空箱调运联合优化模型,通过对空箱调运路径及库存量的联合控制,设计自适应粒子群算法,为降低空箱管理成本提供了新

思路。Abdelshafie等^[9]构建了基于代理的数学模型(ABM)以模拟内陆空箱运输,研究认为,客户需求频率对空箱运输效率具有重要影响,可直接作用于集装箱可用性与物流紧张程度。Wang等^[10]以中国海铁联运列车为研究背景,采用蒙特卡洛模拟生成随机空箱需求数据,建立了重载与空箱的协同优化模型,并引入“全长和满员”策略,以最大化集装箱周转效率。

针对合作与共享模式下的空箱调运策略,Xie等^[11]研究了由单一铁路公司与单一班轮公司组成的多式联运系统中的空箱库存共享与协调问题。Lin等^[12]提出融合空箱共享与交换策略的求解框架,以空箱匹配平台与给定航线的船公司为主体,采用双层规划模型实现空箱调运的协同优化。Tang等^[13]结合集装箱共享策略,构建了总成本最低、网络稳定的多周期空箱调运优化模型,采用李雅普诺夫优化方法实现了集装箱的调运与共享。徐华锋等^[14]提出“共享模式”下的海铁协同集装箱空箱调运策略,对港口群范围内各港口间及港口与铁路货运站间的空箱资源配置方案进行优化。Xin等^[15]提出通过组建联盟来提升空箱管理韧性,并运用逆优化方法解决联盟成员间的利润分配问题。Park等^[16]以租箱公司与船公司作为研究主体,运用单向集装箱租赁服务与空箱调运策略,并辅以定期盘点与持续盘点两种库存管理策略,减少物流资源浪费。胡广红等^[17]提出了考虑集装箱共享的中欧班列空箱调运新模式,以国内外两端及集装箱共享站的空箱调运费用之和最小为优化目标建立优化模型,研究成果可为降低中欧班列运输成本提供参考。

关于免费用箱期的研究,最初是对其起算时间的探讨。此后,Stefano等^[18]评估了不同滞箱与滞港收费制度对内陆运输系统的影响。Song等^[19]将滞期费作为等待成本纳入模型,对集装箱运输进行规划。Bouchery等^[20]从物流服务提供商的视角,对滞箱费、空箱调运与运输效率问题进行联合优化。Legros等^[21]对空箱延迟返回海港的数量与时间进行优化,以降低空箱运输成本与滞箱费用。Yu等^[22]研究了由单个海运集装箱码头和单个内陆集装箱场站组成的海陆合作系统中的空箱调运问题,利用两阶段博弈模型确定航运企业的免费滞箱期及内陆集装箱经营人返回空箱的

时间。

综上,在内陆空箱调运策略研究中,现有成果主要围绕合作与共享模式,开展内陆场站与海港间的运输网络设计,优化目标多为总成本最小化或空箱运输里程最小化。尽管已有学者对免费用箱期进行了研究,但也仅限于概念设定与公式推演层面,缺乏实际的案例计算,同时也忽略了内陆返还箱也是船公司空箱补给的重要来源这一关键因素。Cai 等^[23]在早期研究中,针对免费用箱期时长开展了案例分析,但仅给出了免费期为 7 天时的 Cplex 求解结果。本文在船公司合作前提下,结合内陆集装箱场站与沿海港口,研究余箱港与缺箱港的不同空箱调运决策。在此基础上,对免费用箱期进行优化决策,探讨内陆集装箱返还时间随机条件下,如何确定免费用箱期时长以实现船公司总成本最小化,验证免费用箱期设置对船公司的重要作用。

1 问题描述

假定存在多个内陆集装箱场站和两种类型港口,即余箱港和缺箱港,内陆集装箱经营人负责集

装箱在内陆的周转与存储,并代替收货人行使相关权利。船舶到达海港后,一部分集装箱将发往内陆,交付内陆收货人。集装箱由重箱变为空箱后堆存于内陆集装箱场站,等待返还港口。船公司在合作联盟框架下,可相互调配使用空箱,并通过支付用箱费维持联盟稳定。本文船公司的空箱主要来源于四类:调运箱、库存箱、租赁箱及内陆返还箱。为减少空箱调运成本,船公司通过设置免费用箱期加速集装箱在内陆的周转,促使空箱能够更快返还港口。因此,如何设置免费用箱期,以及如何在余箱港与缺箱港之间开展空箱调运,是本文重点研究的问题,目标是实现船公司总成本最小化。

根据免费用箱期的定义,可得到用箱期、免费用箱期及滞箱期三者之间的关系,如图 1 所示。集装箱离开港口的时间定义为随机量第 μ_{ih}^k 天,此时用箱期开始起算,装箱在第 $\mu_{ih}^k + trt_{ih}$ 天到达内陆集装箱场站。收货人提货后,集装箱于第 ret_{hi}^k 天从内陆集装箱场站出发返港,并于第 $ret_{hi}^k + trt_{ih}$ 天返回港口,此时,用箱期结束。



图 1 用箱期、免费用箱期与滞箱期计算示意图

Fig.1 Schematic diagram for calculating container usage period, free detention period, and demurrage period

2 模型构建

2.1 前提假设

- (1) 在计划期内,余箱港与缺箱港的重箱运输需求均须得到满足;
- (2) 不考虑购买新箱;
- (3) 海港与内陆腹地之间的空箱运输成本是固定的,不考虑运输方式的选择;
- (4) 忽略装卸时间;
- (5) 产生租赁需求时,船公司可以立即在市场上租到空箱;
- (6) 不考虑内陆集装箱场站之间的调箱。

2.2 符号说明

(1) 集合

T : 规划期天数集合, $t \in T$;

L : 船公司集合, $k, m \in L$;

P : 港口集合, $i, j \in P$;

H : 内陆集装箱场站集合, $h \in H$;

D^t : 规划期第 $t \in T$ 天的缺箱港集合;

S^t : 规划期第 $t \in T$ 天的余箱港集合, 且 $D^t \cup S^t = P$;

D^k : 船公司 $k \in L$ 在第 $t \in T$ 天的缺箱港集合;

S^{kh} : 船公司 $k \in L$ 在第 $t \in T$ 天的余箱港集合。

(2) 参数

CR : 单位租箱费用;

CP : 单位空箱存储费用;

trt_{ih} : 内陆集装箱场站 $h \in H$ 与港口 $i \in P$ 之间的空箱运输时间;

μ_{ih}^k : 船公司 $k \in L$ 的重箱从港口 $i \in P$ 出发至内陆集装箱场站 $h \in H$ 的时间, 其为随机变量;

ret_{hi}^k : 船公司 $k \in L$ 的集装箱从内陆集装箱场站 $h \in H$ 返回港口 $i \in P$ 的时间, 其为随机变量, 且 $ret_{hi}^k \geq \mu_{ih}^k + trt_{ih}$;

U_i^k : 船公司 $k \in L$ 在港口 $i \in P$ 的初始空箱库存量;

θ_{ij} : 从港口 $i \in P$ 到港口 $j \in P$ 的单位空箱运输成本;

f_i^k : 船公司 $k \in L$ 在港口 $i \in P$ 的单位集装箱日滞箱费;

$cost_j$: 在船公司合作的前提下, 缺箱港 $j \in D'$ 的单位空箱用箱成本, 表示船公司 $k \in L$ 由于使用其他船公司 $m \in L$ 在余箱港 $i \in S'$ 的空箱而支付的用箱费用;

Iq_{ij}^k : 第 $t \in T$ 天, 船公司 $k \in L$ 在港口 $j \in P$ 运进的重箱数量, 即空箱供给量, 其为随机变量;

Oq_{ji}^k : 第 $t \in T$ 天, 船公司 $k \in L$ 从港口 $j \in P$ 运出的重箱数量, 即空箱需求量, 其为随机变量;

N_{ih}^k : 第 $t \in T$ 天, 船公司 $k \in L$ 从港口 $i \in P$ 运至内陆集装箱场站 $h \in H$ 的重箱数量, 其为随机变量;

(3) 决策变量

F_i^k : 船公司 $k \in L$ 在港口 $i \in P$ 设置的免费用箱期长度, 且 $F_i^k \geq 2trt_{ih}$;

y_{ij}^{ikm} : 第 $t \in T$ 天, 船公司 $k \in L$ 从余箱港 $i \in S^{tk}$ 调运至船公司 $m \in L$ 所属缺箱港 $j \in D^m$ 的空箱数量;

R_i^k : 第 $t \in T$ 天, 船公司 $k \in L$ 在港口 $i \in P$ 的租箱数量。

(4) 衍生变量

ω_i^k : 第 $t \in T$ 天, 船公司 $k \in L$ 在港口 $i \in P$ 的空箱流入与流出的差值, 并据此判断该港为余箱港或缺箱港。计算公式如下:

$$\omega_i^k = \begin{cases} U_i^k + \sum_{j \in P} Iq_{ji}^k - \sum_{j \in P} Oq_{ij}^k, t=1 \\ stock_i^{(t-1)k} + x_{ih}^{tk} N_{ih}^{uk} + \sum_{j \in P} Iq_{ji}^k - \sum_{j \in P} Oq_{ij}^k, t \geq 2 \end{cases} \quad \forall i \in P, \forall k \in L, \forall t, \mu \in T, \forall h \in H \quad (1)$$

$stock_i^{tk}$: 第 $t \in T$ 天, 船公司 $k \in L$ 在港口 $i \in P$ 的空箱库存量;

x_{ih}^{tk} : 用于判断在第 $t \in T$ 天, 船公司 $k \in L$ 在港口 $i \in P$ 与内陆集装箱场站 $h \in H$ 之间是否产生滞箱, 计算公式如下:

$$x_{ih}^{tk} = \begin{cases} 1, ret_{hi}^k + trt_{ih} - \mu_{ih}^k - F_i^k > 0 \\ 0, ret_{hi}^k + trt_{ih} - \mu_{ih}^k - F_i^k \leq 0 \end{cases} \quad \forall k \in L, \forall i \in P, \forall h \in H, \forall t \in T \quad (2)$$

2.3 数学模型

本文目标函数旨在最小化联盟内所有船公司的总成本, 包括空箱调运费、租箱费、空箱库存费与空箱使用费, 并扣除滞箱费收入。其数学表达式为:

$$\begin{aligned} \min = & \sum_{k \in L} \sum_{m \in L} \sum_{t \in T} \sum_{i \in S^{tk}} \sum_{j \in D^m} \theta_{ij} y_{ij}^{ikm} + \sum_{i \in P} \sum_{k \in L} \sum_{t \in T} R_i^{tk} CR + \\ & \sum_{i \in S^{tk}} \sum_{k \in L} \sum_{t \in T} \max(stock_i^{tk}, 0) CP + \\ & \sum_{k \in L} \sum_{j \in D^{tk}} \sum_{t \in T} \left[cost_j \left(-\omega_j^{tk} - \sum_{i \in S^{tk}} y_{ij}^{tkk} \right) \right] - \\ & \sum_{k \in L} \sum_{h \in H} \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} x_{ih}^{tk} f_i^k N_{ih}^{tk} \left[ret_{hi}^k + trt_{ih} - \mu_{ih}^k - F_i^k \right] \end{aligned} \quad (3)$$

约束条件:

$$stock_i^{tk} = \begin{cases} U_i^k - \sum_{j \in P} Oq_{ij}^k, t=1 \\ \omega_i^{(t-1)k} - \sum_{h \in H} N_{ih}^{tk} - \sum_{m \in L} \sum_{j \in D^{(t-1)m}} y_{ij}^{(t-1)km}, \omega_i^{(t-1)k} > 0, t \geq 2 \\ \omega_i^{(t-1)k} + R_i^k + \sum_{h \in H} x_{ih}^{tk} N_{ih}^{tk} + \sum_{m \in L} \sum_{j \in D^{(t-1)m}} y_{ji}^{(t-1)km}, \omega_i^{(t-1)k} \leq 0, t \geq 2 \end{cases} \quad \forall t \in T, \forall k \in L, \forall i \in P \quad (4)$$

$$\sum_{h \in H} x_{jh}^{tk} N_{jh}^{uk} + \sum_{k \in L} \sum_{i \in S^{tk}} y_{ij}^{ikm} + R_j^m \geq -\omega_j^m \quad \forall j \in D^m, \forall t \in T, \forall m \in L \quad (5)$$

$$\sum_{i \in S^{tk}} y_{ij}^{tkk} \leq -\omega_j^{tk}, \forall j \in D^{tk}, \forall k \in L, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{m \in L} \sum_{j \in D^m} y_{ij}^{tkm} \leq \omega_i^{tk}, \forall i \in S^{tk}, \forall k \in L, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{m \in L} \sum_{j \in D^m} y_{ij}^{tkm} = 0, \forall i \in D^{tk}, \forall k \in L, \forall t \in T \quad (8)$$

$$x_{ih}^{tk} N_{ih}^{uk} + R_i^k + stock_i^{(t-1)k} + \sum_{j \in P} Iq_{ji}^{(t-1)k} + \sum_{m \in L} \sum_{j \in D^m} y_{ij}^{tkm} \geq \sum_{j \in P} Oq_{ij}^k, \forall t \in T, \forall k \in L, \forall h \in H, \forall i \in P \quad (9)$$

$$R_i^k \leq |\omega_i^{tk}|, \omega_i^{tk} \leq 0, \forall t \in T, \forall k \in L, \forall i \in P \quad (10)$$

$$R_i^k = 0, \omega_i^{tk} > 0, \forall t \in T, \forall k \in L, \forall i \in P \quad (11)$$

$$F_i^k \geq 2trt_{ih}, \forall k \in L, \forall t \in T, \forall i \in P \quad (12)$$

$$y_{ij}^{km}, F_i^k, R_i^k \geq 0 \text{ 且为整数}, \forall i \in S^{tk}, \\ \forall j \in D^m, \forall k, m \in L, \forall t \in T \quad (13)$$

约束(4)为船公司 k 在港口 i 的空箱库存量迭代关系;约束(5)、(6)表示船公司在缺箱港的空箱调入量、租箱量与内陆返还箱量之和应大于空箱净缺口量;约束(7)表示船公司 k 在余箱港的调箱量不超过其空箱剩余量;约束(8)表示如果船公司 k 在港口 i 处于缺箱状态,则空箱调运量为 0;约束(9)保证船公司 k 的重箱运输需求能够得到满足;约束(10)、(11)为租箱量约束,即当 $\omega_i^{tk} > 0$ 时,该港口是船公司的余箱港,此时不需要租箱,租箱量为 0,当 $\omega_i^{tk} \leq 0$ 时,该港口为缺箱港,此时租箱量不能超过空箱缺量 ω_i^{tk} 的绝对值;约束(12)表示免费用箱期与运输时间的关系;约束(13)为非负约束。

3 基于 ε -Greedy 贪心策略的近似动态规划算法设计

3.1 算法设计思想

本文构建的考虑免费用箱期的多周期空箱调运优化模型为包含多阶段的混合整数非线性模型,状态空间及决策空间规模庞大,传统方法难以求解。同时,本文研究的空箱调运问题是一个具有多阶段性、多周期性、动态性及随机性的复杂系统问题,以往研究多采用动态规划算法,但由于本文决策中涉及周期、船公司、港口等五维变量,求解计算空间极大,在规定时间内难以求得最优解。

为此,本文采用近似动态规划算法(ADP)对该模型进行优化。ADP 算法不需要遍历和存储每一个状态,通过增量式的计算过程,每获得一个新的样本数据就更新一次估计,计算效率得以提高。本文设计的 ADP 算法融入了贪心策略,相较传统 ADP 算法,在最优决策探索方面更加省时高效。同时,在计算过程中,本文通过模拟一天的决策过程来进行状态更新。该设计也更能符合空箱调运问题中多周期性、动态性等多重特征。

3.2 步骤与整体框架

基于空箱调运问题,采用 ADP 解决多阶段决策问题的步骤与框架如下。

Step1:问题定义与模型参数初始化

(1)定义状态变量

定义状态变量 $S_t = I_t$,其中, I_t 为在第 t 天的空箱库存量。

(2)定义决策变量 $x_t = (y_t, z_t, f_t)$,其中, y_t 为空箱调运量, z_t 为租箱量, f_t 为免费用箱期长度。基于贝尔曼最优性原理,原目标函数(3)可以等效解耦为一系列单阶段随机优化子问题,如下式所示:

$$V_t(S_t) = \min_{a_t} (C_t(S_t, a_t) + E[V_{t+1}(S_{t+1})]) \quad (14)$$

式中: $V_t(S_t)$ 为状态 S_t 下的值函数,即从状态 S_t 开始的系统最优成本。

(3)参数初始化。设定模型参数,包括单位租箱成本 c_{lease} 、单位调箱成本 $c_{reposition}$ 、单位存箱成本 $c_{inventory}$ 、单位用箱成本 $c_{exchange}$ 及单位滞箱费收入 $c_{detention}$ 。初始化各港口空箱库存量及初始免费用箱期长度,并设置随机数种子 $rng(0)$,便于结果重现。设计预分配结果存储结构,用于记录每日的决策变量与系统状态。构建数据生成函数,用于生成每日各港口的重箱吞吐量、发往内陆的集装箱数量及相应运输时间。

Step2:值函数近似

式(14)中期望值计算量较大,为此,本文将其近似为特征向量,即

$$V_t(S_t) \approx \theta_t^T \phi(S_t) \quad (15)$$

式中: $\phi(S_t)$ 为特征向量,表示各决策周期的库存量。随机初始化参数 $\theta_t^{(0)}$,并采用正向状态更新与成本累加方式实现反向递归求解。

Step3:对单日决策过程与状态更新进行模拟,主要计算步骤如下。

(1)计算空箱净流入、流出差值 $diff$;

(2)判断内陆返还集装箱是否超出免费用箱期,并计算滞箱费;

(3)根据式(8)和式(12)引入启发式策略,判断各港口的空箱余缺状态,并据此调整免费用箱期;

(4)船公司内部及联盟间的空箱调运决策计算;

(5)对空箱需求缺口部分,制定租箱决策;

(6)根据式(14)进行库存更新,并进行各项成本计算。

Step4: 前向路径采样与迭代优化

for 迭代 $k = 1$ to:

(1) 初始状态生成: 从初始状态分布中采样 $S_0^{(k)}$ 。

(2) 前向模拟

for 决策天数 $t = 0$ to $T - 1$:

获取当前状态 $S_t^{(k)}$, 并求解当前状态下的最优决策 $x_t^{(k)}$,

$$x_t^{(k)} = \arg \min_{x_t} \left[C(S_t^{(k)}, x_t) + \gamma \widehat{V}_{t+1}(S_{t+1}^{(k)}) \right] \quad (16)$$

执行状态转移: 根据决策 $x_t^{(k)}$, 生成下一状态 $S_{t+1}^{(k)}$ 。

(3) 反向更新值函数近似值

for 决策天数 $t = T - 1$ downto 0:

计算目标值:

$$\widehat{v}_t^{(k)} = C(S_t^{(k)}, x_t^{(k)}) + \gamma \widehat{V}_{t+1}^{(k-1)}(S_{t+1}^{(k)}) \quad (17)$$

更新近似参数, 通过最小化误差 $\| \widehat{v}_t^{(k)} - \widehat{V}(S_t^{(k)}) \|^2$, 调整 $\theta_t^{(k)}$ 。

Step5: 最优决策探索策略。引入 ε -Greedy 贪心策略, 在前向路径生成过程中, 以概率 ε 随机探索, 否则贪心选择最优动作, 并对 ε 进行动态调整, 即 $\varepsilon^{(k)} = \varepsilon_0 / \sqrt{k}$ 。该步骤的伪代码如下所示。

```

ε-Greedy 贪心策略
1   for k = 1:k_max
2       % 动态衰减探索率
3       epsilon_k = epsilon_0 / sqrt(k);
4       % 前向模拟生成轨迹
5       S = zeros(T+1, 1); % 存储状态轨迹[]
6       X = zeros(T, 3); % 存储动作轨迹[y, z, f]
7       % 初始状态采样
8       S(1, :) = [randi(state.I), 0]; % 初始扰动 R=0
9       %% 前向路径生成
10      for t = 1:T
11          % ε-Greedy 动作选择
12          if rand() < epsilon_k
13              % 随机探索动作
14              X(t, :) = [action.y(randi(length(action.y))), ...
15                          action.z(randi(length(action.z))), ...
16                          action.f(randi(length(action.f)))];
17          else
18              % 基于当前值函数选择最优动作
19              [~, idx] = min(arrayfun(@(y,z,f) costFunc(S(t,:),y,z,f)
20                                     + ...
21                                     gamma * valueApprox(theta(t+1), nextState(S
22                                     (t,:),y,z,f)), ...action.y, action.z, action.f));
23              X(t, :) = [action.y(idx), action.z(idx), action.f(idx)];
24          end
25      end
26  end

```

Step6: 监测收敛指标 $\theta_t^{(k)}$ 的变动幅度。若 $\| \theta_t^{(k)} - \theta_t^{(k-1)} \| < \delta$, 则近似参数趋于稳定; 若达到最大迭代次数, 则算法终止。

Step7: 提取近似策略, 对每个状态 S_t , 计算如下最优决策:

$$x_t^*(S_t) = \arg \min_{x_t} \left[C(S_t, x_t) + \gamma \widehat{V}_{t+1}(S_{t+1}) \right] \quad (18)$$

4 数值实验

4.1 算例描述

本文将规划期设置为 30 天 ($T = 1, 2, \dots, 30$)。同时, 某区域内设有四个港口 (P1, P2, P3, P4)、三个内陆集装箱场站 (H1, H2, H3) 及两家

船公司 (L1, L2)。借鉴计明军等^[24]对空箱调运模型各参数的设置, 在置信水平 $\alpha = 0.95$ 条件下, 空箱的供给量与需求量均服从正态分布 $N(200, 10)$, 发往内陆的集装箱数量服从正态分布 $N(80, 10)$; 集装箱驶离港口时间与返回时间均服从参数为 4 的指数分布。结合行业实际与调研数据, 本文将单位租箱成本与单位存储成本设为 10 倍关系, 即单位租箱成本为 500 元 / TEU, 单位存储成本为 50 元 / TEU, 初始库存量设定为 $[20, 50]$ TEU 区间, 决策初期免费用箱期设为 5 天, 缺箱港口用箱成本为 80 元 / TEU, 滞箱费率为 120 元 / (TEU · 天)。

4.2 结果分析

根据上述算法设计进行求解可得,在规划期 30 天内,总调运成本为 6.4 万元,总租箱成本为 247.85 万元,总存箱成本为 1.235 万元,总用箱成本为 1.624 万元,滞箱费总收入为 1081.932 万元,核算总成本为 824.823 万元。总成本随时间的变化如图 2 所示,全联盟空箱库存与滞箱数量变化如图 3 所示,各港口船公司免费用箱期长度变化如图 4 所示,各港口的日调箱量变化如图 5 所示。

由图 2 可知,随着规划期逐渐延长,总成本在第 7 天出现拐点,由增长趋势转变为逐日下降趋势。这是由于各船公司免费用箱期的设置,使得第 7 天之后,滞箱费收入已远超调箱成本、租箱成本、存箱成本与用箱成本之和。由图 3 可知,第 2 天开始出现滞箱,但直至第 5 天才大幅增加。结合图 2 可知,第 7 天总滞箱费收入开始超过空箱管理总成本。由图 4 可知,两家船公司设置的免费用箱期均不超过 5 天,主要集中在 2~3 天。这是由于本文在初始算例设置中,将空箱需求量与供给量设为相等,船公司无法通过各港口空箱净流量获得补给,因此,只能通过缩短免费用箱期加速空箱在内陆的周转,这也与图 3 中规划后期出现大量滞箱现象相对应。

本文不再将船公司合作与免费用箱期视为并列的自变量,而是将“船公司合作水平”作为调节变量,用以调节“免费用箱期长度”与“集装箱周转效率”之间的关系。研究表明,仅在船公司合作水平较高时,延长免费用箱期才能显著提升集装箱周转效率;而在合作水平较低的情况下,该效果不显著,甚至可能产生负向影响。

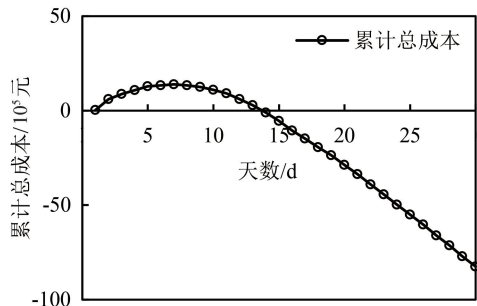


图 2 总成本随时间变化曲线

Fig.2 Changes in total cost over time

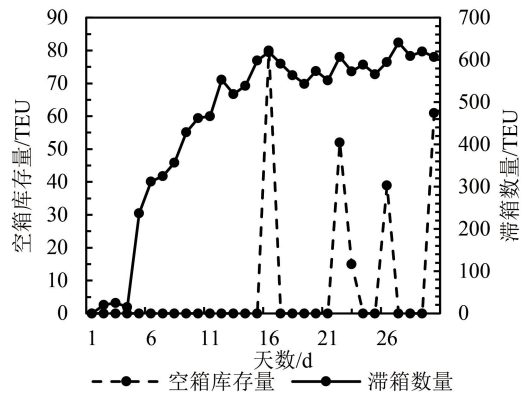


图 3 全联盟空箱库存与滞箱数量变化曲线

Fig.3 Changes in empty container inventory and detention quantity across the entire alliance

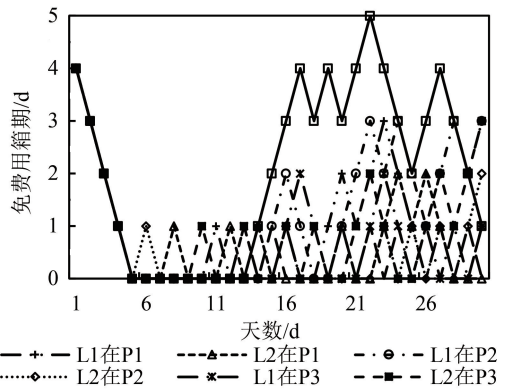
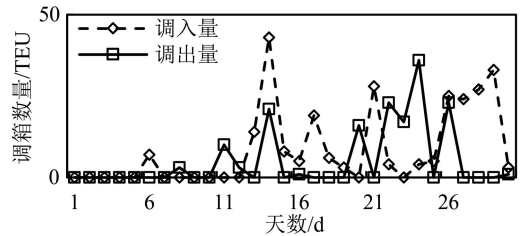
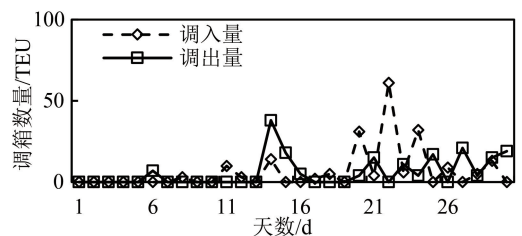


图 4 各港口船公司免费用箱期变化曲线

Fig.4 Changes in free detention periods for container at various ports by shipping companies



(a) 港口 P1



(b) 港口 P2

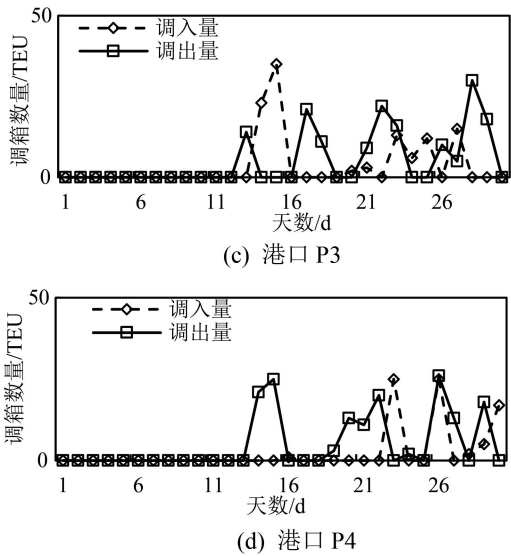


图 5 各港口日调箱量变化曲线
Fig.5 Daily changes in container repositioning volume at each port

4.3 灵敏度分析

4.3.1 空箱供需关系的变化

初始状态下,空箱供需皆服从正态分布 $N(200,10)$ 。在此基础上,本文设置两种供需关系:(1)供过于求。此时,空箱供给服从 $N(300,10)$,空箱需求服从 $N(200,10)$ 。(2)供不应求。此时,空箱供给服从 $N(200,10)$,空箱需求服从 $N(300,10)$ 。不同供需情景下的成本对比见表 1。

表 1 不同供需关系下的成本对比

Tab.1 Cost comparison under different supply-demand scenarios

	supply-demand scenarios				万元
供需情景	总调箱成本	总租箱成本	总存箱成本	总用箱成本	总滞箱费收入
供过于求	0.28	0	96.450	0	185.820
供需平衡	0.64	247.85	1.235	1.624	1081.932
供不应求	0	1435.50	0	0	1150.080

由表 1 可知,当船公司空箱供过于求时,租箱成本与用箱成本均为 0,船公司可凭借自有箱满足发货人的用箱需求,此时,存箱成本明显增加。当空箱供不应求时,船公司主要通过租箱补足空箱缺口,因空箱均处于流动状态,存箱成本为 0。同时,各船公司的空箱仅用来满足自身运输需要,无富余空箱为其他公司提供服务,因此,调箱与用箱成本均为 0。由于租箱成本远高于滞箱费收入,最终呈现负成本状态。

不同供需关系下免费用箱期变化和全联盟总库存及滞箱量变化分别如图 6、7 所示。由图 6、7 可知,空箱供过于求时,船公司拥有充足空箱满足需求,因此对内陆集装箱的返还时间与返回数量要求相对宽松,两家船公司均将免费用箱期放宽至 10 天,此时,全联盟的滞箱数量显著少于供需平衡情形下的滞箱数量。而在供不应求情景下,自规划期第 5 天开始,为加速内陆箱回流,船公司甚至将免费用箱期压缩至 0,以期通过增加滞箱费收入弥补空箱供给不足带来的损失。

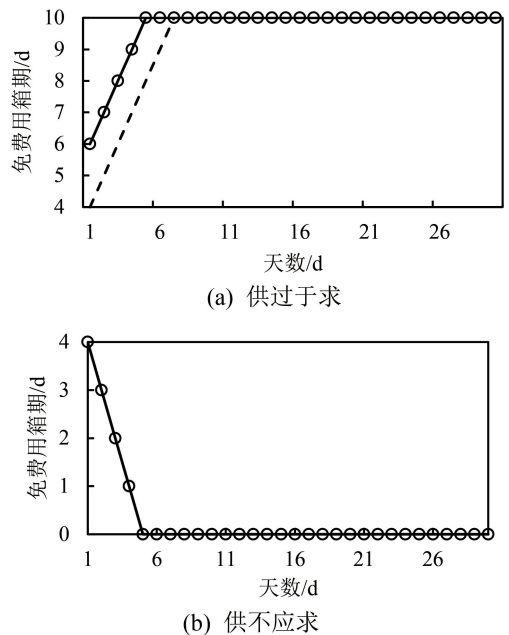
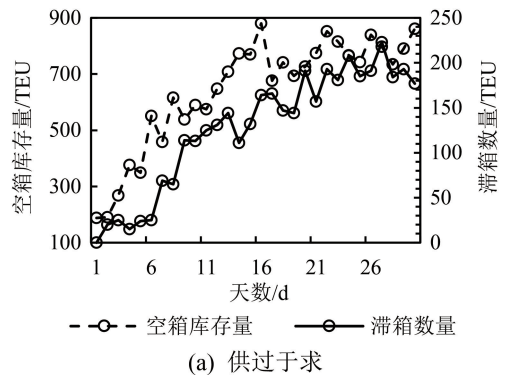


图 6 不同供需关系下免费用箱期变化
Fig.6 Changes in free detention period under different supply-demand relationships



(a) 供过于求

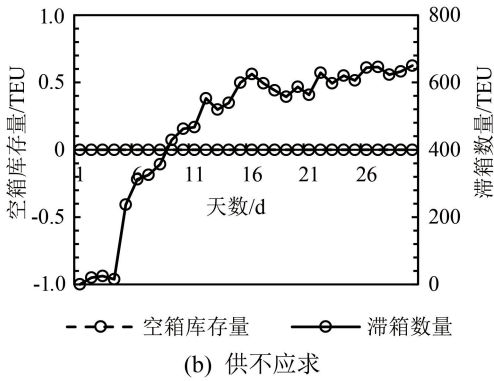


图 7 不同供需关系下全联盟总库存及滞箱数量变化

Fig.7 Changes in total alliance inventory and detention quantity under different supply-demand relationships

对于船公司而言,免费用箱期设置是在供需关系不确定且具有随机性的条件下,规避成本剧增风险的重要手段。当船公司面临需求激增的市场环境时,可通过缩短免费用箱期来加速空箱的周转效率;当市场处于淡季时,船公司可适当延长免费用箱期,以减少不必要的空箱调运。

4.3.2 内陆集装箱场站与港口间运输时间的变化

内陆集疏运条件会影响内陆集装箱场站与港口之间的运输时长,进而影响免费用箱期的设置,并最终对船公司的总成本产生影响。本文通过调整内陆集装箱场站与港口间的运输时间,探究其对各项成本及免费用箱期设置的影响。将指数分布参数分别设定为 5、6、7、8,各项成本变化如表 2 所示。图 8 为不同参数设置下租箱数量的变化。

表 2 集装箱内陆运输时间变化下的各成本值

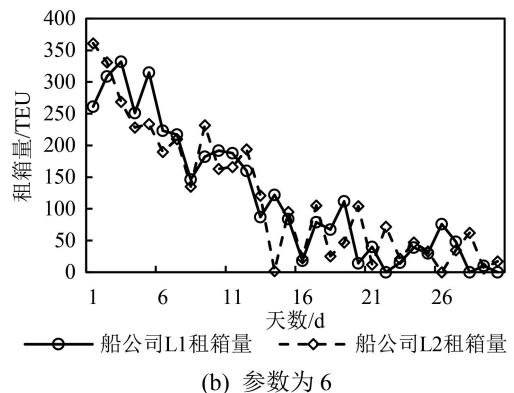
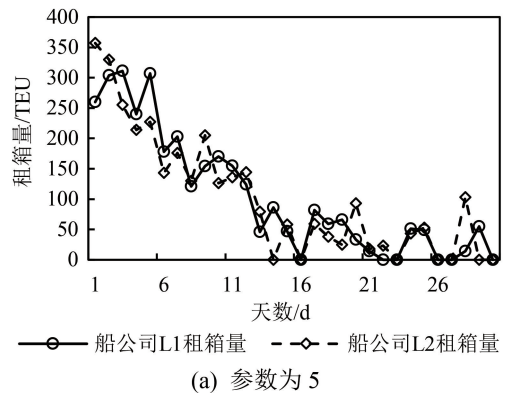
Tab.2 Cost values under changes in inland container transportation time 万元

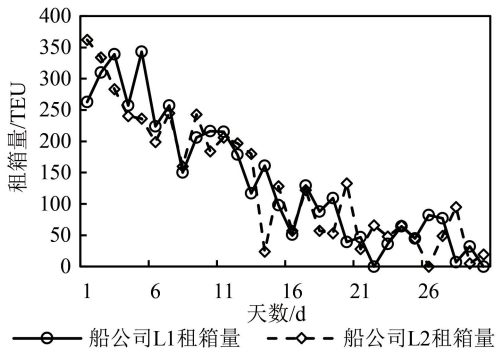
参数	总调箱成本	总租箱成本	总存箱成本	总用箱成本	总滞箱费收入
5	4.77	308.2	0.97	0.624	1187.148
6	4.50	357.8	0	0.360	1219.272
7	3.62	410.2	0	0.344	1204.032
8	2.16	459.4	0	0.488	1166.952

由表 2 可知,随着参数增大(即海陆间集装箱运输时间延长),调箱成本不断下降,租箱成本

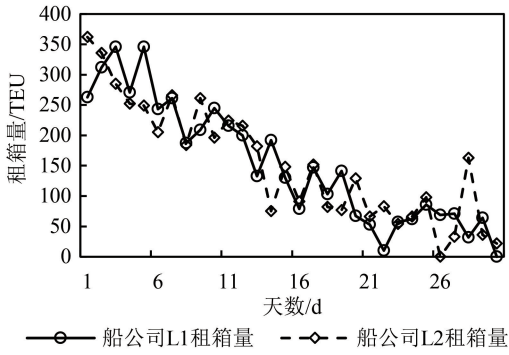
不断上升;当指数增长至 6 时,存箱成本已降为 0。这一现象说明,集装箱在内陆运输时间延长,会使其送达内陆收货人的时间也相应延长,进而阻碍空箱尽早返港。船公司的自有箱仅用于满足当下空箱需求,港口无富余箱库存。由于集装箱返回海港时间延长,船公司需大量租箱以满足发货人的用箱需求。如图 8 所示,指数 5~8 区间的的变化规律一致,即规划期初期租箱量最大,均在 350 TEU 以上,但随着内陆箱的陆续返还,整体租箱量呈下降趋势。

内陆集装箱周转延长,部分箱只因等待内陆托运人装箱而延迟返港,这直接影响了船公司在缺箱港的用箱需求。为弥补内陆滞箱导致的空箱缺口,船公司需大量租箱以满足用箱需求,进而使总成本增加。为避免内陆集疏运条件不利的影 响,船公司应进行集装箱的统一调度,使其运输全程皆处于船公司的监管范围,而多式联运是船公司的最佳选择。





(c) 参数为 7



(d) 参数为 8

图 8 不同内陆运输时间下的租箱量变化

Fig.8 Changes in container leasing volume under different inland transportation times

4.3.3 发往内陆的集装箱数量变化

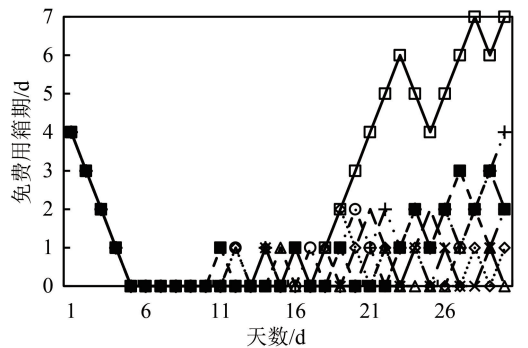
发往内陆的集装箱数量也是影响船公司免费用箱期设置的重要因素。为此,对该项参数进行灵敏度分析,结果如表 3 所示。图 9 为发往内陆集装箱数量对免费用箱期的影响曲线。由图 9 可知,随着发往内陆集装箱数量增多,租箱成本急速增加,调箱成本与用箱成本逐渐下降。该变化与图 8 的变化一致。发往内陆的集装箱越多,用于海港的空箱就越少,集装箱在内陆滞留时间增加直接导致租箱量增加,而船公司在海港仅能对剩余空箱进行调运或互换使用,以使调箱与用箱成本下降。

表 3 发往内陆集装箱量变化下的各项成本值

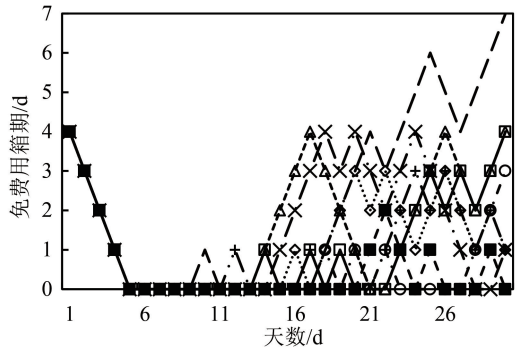
Tab.3 Cost values under changes in inland container volume

万元

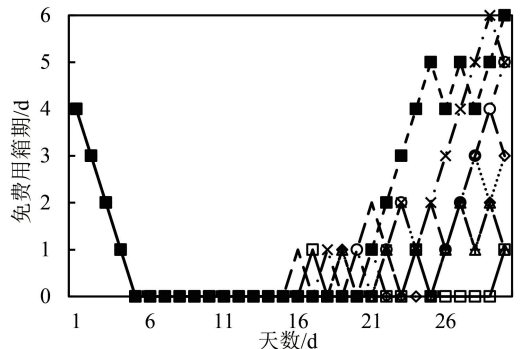
分布	总调箱成本	总租箱成本	总存箱成本	总用箱成本	总滞箱费收入
N~(120,10)	6.37	371.20	0.930	1.544	1644.264
N~(160,10)	6.18	477.85	1.305	0.752	2133.780
N~(200,10)	5.67	590.85	0.805	0.512	2750.376



(a) 分布为 N(120,10)



(b) 分布为 N(160,10)



(c) 分布为 N(200,10)

图 9 发往内陆集装箱数量对免费用箱期的影响

Fig.9 The impact of inland container volume on free detention period

由图 9 可知,船公司发往内陆箱量每增加 33%或运输时间延长 1 天,需同步缩短免费用箱期 1~2 天,才能实现成本最优。在日常运营中,船公司可根据实际发往内陆集装箱数量或实际运输时间调节免费用箱期的设置,以此规避无箱可用的风险。

5 结 论

在船公司合作的背景下,本文对船公司免费用箱期的设定进行研究,设计了近似动态规划算法对模型进行求解,并在最优免费用箱期条件下得到最优的调箱与租箱方案。同时,对影响免费用箱期长度的因素进行探讨。结果表明,空箱供需关系、内陆箱的运输时间与返回数量均会影响船公司对免费用箱期的最优决策,进而影响空箱管理层面的总成本,这也从侧面反映了免费用箱期的设定对船公司总成本控制的重要性。

参考文献(References):

- [1] YU M Z, FRANSOO J C, LEE C Y. Detention decisions for empty containers in the hinterland transportation system[J]. *Transportation Research Part B*, 2018, 110: 188-208.
- [2] 靳志宏,邢磊,蔡佳芯,等.集装箱空箱调运问题研究综述[J]. *大连海事大学学报*, 2021, 47(1): 52-60.
JIN Z H, XING L, CAI J X, et al. Review on the empty container repositioning[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2021, 47(1): 52-60. (in Chinese)
- [3] CAI M Y, LI H D, GUO Z Q, et al. Data-driven empty container repositioning for large scale railway network with fuzzy demands[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2023, 31(2): 557-570.
- [4] TAO X Z, WU Q. Energy consumption and CO₂ emissions in hinterland container transport[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279(1): 123394.1-123394.13.
- [5] LU T, LEE C Y, LEE L H. Coordinating pricing and empty container repositioning in two-depot shipping systems[J]. *Transportation Science*, 2020, 54(6): 1697-1713.
- [6] LIANG J P, MA Z Y, WANG S, et al. Dynamic container slot allocation with empty container repositioning under stochastic demand[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 187: 103603.
- [7] SOMMER B, LEE S, HOLST K K, et al. Markov decision processes for inland empty container inventory management[J]. *Computational Management Science*, 2025, 22(1): 4.
- [8] CAI J X, HUANG Y, DIAO C J, et al. Joint optimization of multi-period empty container repositioning and inventory control based on adaptive particle swarm algorithm[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, 13(6): 1113.
- [9] ABDELSHAFIE A, SALAH M, KRAMBERGER T. The environmental impact of inland empty container movements within two-depot systems[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(14): 7848.
- [10] WANG Y, WU Y, HAO C, et al. Research on the scheduling in sea-rail intermodal trains based on full-length and full-occupied strategy [J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2025, 59: 101301.
- [11] XIE Y Y, LIANG X Y, MA L J. Empty container management and coordination in intermodal transport [J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 257(1): 223-232.
- [12] LIN D Y, JUAHUN C J. A bilevel mathematical approach for the empty container repositioning problem with a sharing and exchanging strategy in liner shipping [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2021, 29(3): 403-414.
- [13] TANG Y Y, CHEN S, FENG Y, et al. Optimization of multi-period empty container repositioning and renting in China Railway Express based on container sharing strategy [J]. *European Transport Research Review*, 2021, 13(1): 42.
- [14] 徐华锋,王育红,洪铖.共享模式下港口群陆侧海铁协同空箱调运策略研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2022, 35(3): 81-88.
XU H F, WANG Y H, HONG C. A sharing mode based of sea and rail for repositioning of inland empty container within port clusters[J]. *Journal of Ningbo University (NSEE)*, 2022, 35(3): 81-88. (in Chinese)
- [15] XIN X, WANG X L, ZHANG T, et al. Liner alliance shipping network design model with shippers' choice inertia and empty container relocation[J]. *Electronic Research Archive*, 2023, 31(9): 5509-5540.
- [16] PARK J, MOON I. Rental pricing and empty container repositioning strategy for a one-way container rental service[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2025, 267: 107684.
- [17] 胡广红,汤银英,李麟睿,等.考虑集装箱共享的中欧班列空箱调运研究[J]. *铁道运输与经济*, 2025, 47(2): 15-24.
HU G H, TANG Y Y, LI L R, et al. Empty container repositioning of China Railway Express considering container sharing mode[J]. *Railway Transport and Econo-*

- my, 2025, 47(2): 15-24. (in Chinese)
- [18] FAZI S, ROODBERGEN K J. Effects of demurrage and detention regimes on dry-port-based inland container transport [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 89: 1-18.
- [19] SONG D P, DONG J X. Cargo routing and empty container repositioning in multiple shipping service routes [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2012, 46: 1556-1575.
- [20] BOUCHERY Y, WOXENIUS J, FRANSOO J C. Identifying the market areas of port-centric logistics and hinterland intermodal transportation [J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 285(2): 599-611.
- [21] LEGROS B, FRANSOO J, JOUINI O. How to optimize container withholding decisions for reuse in the hinterland? [J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 316(3): 930-941.
- [22] YU M, 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.
- [23] CAI J X, SHEN L X, JIN Z H. Empty container repositioning with consideration of free detention time and liner carrier cooperation [C] // *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Bari: IEEE, 2019. doi: 10.1109/SMC.2019.8914419.
- [24] 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 M J, WANG Q B, ZHANG X Y, 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. (in Chinese)

《大连海事大学学报》参考文献标注方法

本刊参考文献标注采取顺序编码制,各篇文献要按正文部分标注的序号依次列出,连续编码,并将序号置于方括号中。参考文献的页码一般置于参考文献表中,如多次引用同一著者的同一文献,则在正文中标注首次引用文献的序号,并在序号的右上标“[]”外注明引文页码。

文后参考文献的书写顺序、标点符号等如下。

期刊:作者.题名[J].刊名(外文可缩写),年份,卷(期):起止页码。

图书:作者.书名[M].版本(1版不写).出版地:出版者,年份:起止页码。

报纸:作者.题名[N].报纸名,出版年月日(版次)。

会议录:作者.题名[C].出版地:出版者,年份:起止页码。

专著中析出文献:析出文献作者.析出文献题名[C(会议录)或M(图书)或G(汇编)或S(标准)]//专著作者.专著题名.出版地:出版者,年份:起止页码。

报告:作者.题名[R].出版地:出版者,年份:起止页码。

学位论文:作者.题名[D].保存地:保存单位,年份:起止页码。

电子文献:作者.题名[EB/OL].(更新/修改日期)[引用日期].http://……。

标准:编者.标准编号 标准名称[S].出版地:出版者,年份。

另外,文献作者3个及以下的全部列出,4个及以上的只列前3个,后加“等”或“*et al*”;外文作者姓前名后,姓全部字母大写,名用缩写,不加缩写点。