

文章编号:1006-7736(2021)01-0052-09

doi:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2021.01.007

## 集装箱空箱调运问题研究综述

靳志宏\*,邢磊,蔡佳芯,焉红

(大连海事大学 交通运输工程学院,辽宁 大连 116026)

**摘要:**集装箱具有载运工具与运输货物的双重属性,其在重箱状态体现的是载运工具的属性,而在空箱状态体现的是运输货物的属性。基于其双重属性,从运输与库存两个维度对空箱调运问题进行综述。在对国内外研究现状梳理基础上,对现行研究的热点问题及其发展趋势进行评述,进而对潜在研究方向与领域予以展望。

**关键词:**集装箱运输;空箱调运;综述;展望

中图分类号:U169

文献标志码:A

### Review on empty container repositioning

JIN Zhi-hong\*, XING Lei, CAI Jia-xin, YAN Hong

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

**Abstract:** Container has the dual attributes of carrier and cargo, which reflects the attribute of carrier in heavy container state, while in empty container state it embodies the attribute of transport goods. Based on its dual attributes, this paper summarizes the empty container repositioning problem from two dimensions of transportation and inventory. Based on the analysis of the current research situation at home and abroad, the hot issues and development trend of the current research are reviewed, and the potential research direction and field are prospected.

**Key words:** container transportation; empty container repositioning; review; prospect

### 0 引言

空箱产生于集装箱的周转过程。集装箱的周转必须经过拆箱与装箱的过程,而拆箱和装箱通常发生在不同的时间和不同的地点。货主为了装运货物产生空箱需求,附近的港口、堆场、中转场站将空箱运到货主所在地,如果上述地点缺少空箱,就需要从其他地点调运或从系统外的租箱点租借;当货主的空箱需求满足后,空箱装入货物成为重箱,经公路、铁路、内河运输到目的地港;重箱卸下后再经公路、铁路或内河运输到客户所在地;重箱卸完货物后成为空箱,空箱将再度被运往附近的港、场、站或还给租箱点。

空箱调运(empty container repositioning)源于集装箱供需的不平衡属性。在宏观层面,区域间的产业结构等的差异带来了各自相对比较优势,进而产生了区域间的内外贸不平衡;在微观层面,产业分工带来的进出口货源地空间位置的错落、租箱与还箱时间的差异、进出口箱量的不平衡、进出口箱型的不平衡等,均直接导致了空箱调运需求的产生。

值得注意的是,空箱调运涉及各种运输方式。

以中欧间的洲际运输为例,近10年中欧间海运及铁路重箱运输量分别如图1和图2所示。显而易见,中欧间贸易不平衡导致的空箱调运难题,不仅仅体现在海上运输,也同样显现在了洲际铁路运输,即中欧集装箱班列上。

收稿日期:2021-01-26;修回日期:2021-02-24。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71572023);中国科学技术协会项目(2020ZZGJB072032);大连市领军人才项目(2018-573)。

作者简介:靳志宏\*(1963-),男,博士,教授,博士生导师,Email:jinzhihong@dlmu.edu.cn。

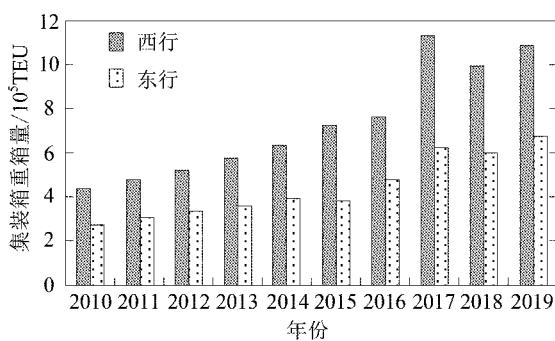


图1 中欧航线主要挂靠港集装箱班轮  
运输海运重箱运量

Fig. 1 Shipping loaded containers  
between China & Europe

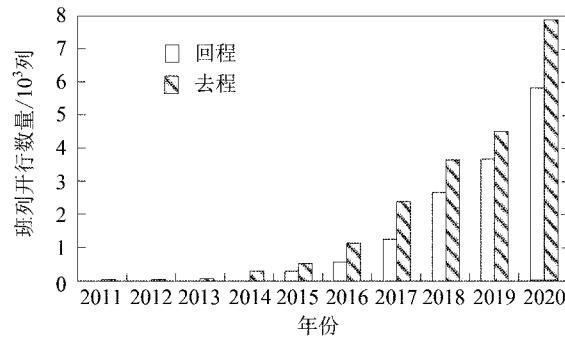


图2 中欧集装箱班列开行数量  
Fig. 2 Rail transport containers  
between China & Europe

针对空箱调运问题的研究围绕着集装箱具有载运工具与运输货物双重属性展开,其在重箱状态体现的是载运工具的属性;而在空箱状态体现的是一般运输货物属性。因此,空箱调运问题同时涉及运输与仓储两个环节。在运输环节,空箱的运输成本及时间与重箱基本相同,但与重箱运输不同的是,空箱运输没有收益;在仓储环节,也占据完全相同的空间资源并需要支出基本相同的存储费用。

产业界的客观需求催生了理论界大量空箱调运的相关研究,其中,文献[1-4]对空箱调运问题进行了比较深入的评述:文献[1]综述了铁路运输的空箱调运相关研究;文献[2]综述了海上运输的空箱调运相关研究;文献[3]重点对战略层面的空箱调运相关文献进行了综述;文献[4]基于多式联运的视角进行梳理,着重于运输环节,对于仓储环节鲜有触及。

基于上述理论研究现状,本文综述从运输与

仓储两个维度展开,涉猎不同运输方式,并侧重于运作层面的优化。

## 1 研究现状疏理

### 1.1 单一运输方式下的空箱调运问题

传统的空箱调运研究始于单一运输方式。研究关注点主要包括航运网络设计、航线路径选择、船队规划,以及空箱与重箱运输的联合调度优化等。Song等<sup>[5]</sup>研究了多船多航次的空箱调运优化问题,并分别用基于最短路和基于启发式算法的两阶段法求解该问题。Zheng等<sup>[6]</sup>通过考虑班轮承运人之间的协调研究空箱调运问题,并采用了逆向优化方法。汪传旭等<sup>[7]</sup>基于港口匹配研究了船公司合作下的多港口间空箱调运优化问题。计明军等<sup>[8]</sup>研究沿海不确定目的港的空箱调运问题。研究表明,在供需平衡模式下,有固定目的港的策略更具优势;而在供需不平衡模式下,不确定目的港策略更具优势。韩晓龙等<sup>[9]</sup>将概率模型转型为等价的确定性模型进行海运空箱调运问题的求解。蔡佩林等<sup>[10]</sup>将不确定需求引入博弈模型中进行数值分析。Francesco等<sup>[11]</sup>考虑参数不确定性的影响,构建了基于时间扩展的多场景空箱调运优化模型,分析了不同场景下的空箱需求。

以上研究均是从船公司的角度出发,优化空箱调运成本。表1对上述文献进行了汇总。

表1 单一运输方式下的空箱调运问题

Tab. 1 Research on optimization of empty container repositioning under single transportation mode

文献	主要决策	研究焦点	模型/求解方法
[5]	S	确定需求空箱调运	启发式算法
[6]	S	确定需求空箱调运	两阶段算法
[7]	S	多港口间的空箱调运	逆向优化方法
[8]	S+IS	不确定目的地港空箱调运	遗传算法
[9]	S	随机需求的空箱调运	整数线性规划
[10]	BLB	随机需求的空箱调运	博弈模型
[11]	S	不确定需求的空箱调运	情景分析

注释: S指何时从何地将多少空箱运到何地; BLB: 分别指从外部购买、租用、借用集装箱; IS: 库存控制策略。

### 1.2 多式联运下的空箱调运问题

Yu等<sup>[12]</sup>研究了由一个海运集装箱码头和一个内陆集装箱场站组成的港口与内陆腹地之间的空箱调运问题,利用两阶段博弈模型确定船公司空箱免费滞箱期及内陆集装箱经营人返回空箱的时间,并提出了船公司与内陆集装箱经营人合作

共赢的空箱调运策略。Hjortnaes 等<sup>[13]</sup>研究了由内陆场站、海运码头、内陆干港构成的空箱运输系统,优化目标是系统内的调运总成本最低。Jansen 等<sup>[14]</sup>提出了包括空箱调运在内的多式联运网络集装箱运输问题,应用于运作层面的集装箱调度计划。赵道致等<sup>[15]</sup>提出了基于海陆整体成本的集装箱空箱调运优化模型,并利用 LINGO 软件求解,通过算例揭示了海运与陆运成本的不同因素对整体成本的影响。Xie 等<sup>[16]</sup>研究了由一家内陆无水港的铁路运输公司和一家海港的班轮公司组成的多式联运系统的空箱调运问题,探讨了铁路箱与海运箱的共享与最优调运策略,指出了空箱共享与合作能给双方带来的收益。Yoonjea 等<sup>[17]</sup>探讨了包含陆运子系统的海运两港直达运输的双向四层多式联运网络的优化问题,该运输问题涵盖了重箱运输与空箱调运,并以韩国仁川港与中国青岛港为例进行了实证分析。Tran 等<sup>[18]</sup>以大西洋上的集装箱流为研究对象,优化包括海上运输的航运成本、内陆运输成本、库存成本以及碳排放成本在内的总成本,并基于欧洲与美国之间的集装箱流进行了实证分析。邢磊等<sup>[19]</sup>从中欧间海陆集装箱综合运输系统入手,加入可折叠集装箱因素,研究了中欧间的空箱调运优化问题,结果表明,海陆协同联运能够大幅降低空箱调运成本。韩曙光等<sup>[20]</sup>建立了基于船运公司和卡车运输公司之间相互合作的内陆空箱调运优化模型,结合三角运输、互租、互换等三种合作形式,实现各参与方空箱调运总成本最小化的目标。孙浩<sup>[21]</sup>结合海运和铁路、公路与内陆水运的多式联运,应用整数规划方法研究了空箱海陆多式联运调运优化问题。Zhang 等<sup>[22]</sup>同时考虑标准集装箱和可折叠集装箱,提出了在“一带一路”背景下的中欧间海陆多式联运空箱调运模型,并设计了人工蜂群算法。Finke 等<sup>[23]</sup>将内陆腹地仓库纳入船公司空箱调运问题,建立混合整数规划模型,并以德国腹地为对象进行实例验证,结果表明,基于内陆腹地的船公司空箱调运方案可以降低 40% 的总成本。表 2 对上述文献进行了汇总。

### 1.3 基于空箱库存视角的空箱调运问题

针对集装箱双重属性的运输货物属性,对空箱库存进行控制以及对保有量进行优化,主要涵盖空箱库存控制策略、空箱库存阈值,以及库存成

表 2 多式联运下的空箱调运问题研究

Tab. 2 Empty container repositioning in multimodal transportation mode

文献	主要决策	研究焦点	模型/求解方法
[12]	S	内陆集装箱空箱运输系统	两阶段博弈
[13]	S	内陆无水港	数值分析
[14]	S	内河多式联运系统	启发式算法
[15]	BLB+S	海陆运整体成本优化	数值分析
[16]	IS	空箱共享与协调问题	纳什均衡模型
[17]	S	双向空箱管理策略	粒子群算法
[18]	S	考虑内陆腹地的航线设计	暴力算法
[19]	BLB+S	中欧间空箱调运优化	混合整数规划
[20]	BLB+IS	内陆空集装箱调运优化	分支界定算法
[21]	BLB	空箱海陆协同调运问题	数值分析
[22]	S	考虑可折叠集装箱	人工蜂群算法
[23]	S	考虑内陆腹地的空箱调运	分支界定算法

本优化等方面。

关于空箱库存控制策略,Dang 等<sup>[24]</sup>研究了多场站的空箱调运问题,分别针对海运空箱、内陆空箱和租赁空箱采用不同的库存控制策略,并为内陆场站之间的空箱调运提出了四种启发式方法,以寻找总成本最优库存控制策略。Luo 等<sup>[25]</sup>研究了多式联运系统中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。Hariga 等<sup>[26]</sup>构建了定期补给库存策略下的混合整数非线性规划,求解最优补给周期以及最优空箱补给数量。Poo 等<sup>[27]</sup>探讨了支线运输中的空箱库存成本、空箱调运成本的动态控制策略。

关于空箱库存阈值,汪传旭等<sup>[28]</sup>分析了由多个港口组成的集装箱班轮运输网络中空箱调运组织和库存优化问题,提出了混合整数线性规划模型,优化空箱在不同船期之间的分配量和在不同港口节点的存箱量;陈飞燕等<sup>[29]</sup>构建了港口空箱保有量和空箱保有区间的多阶段优化模型,分析了港口空箱租赁受限量、空箱调运成本、空箱需求和供给的不确定性等对港口最优空箱保有量的影响;Zhang 等<sup>[30]</sup>提出了港口空箱保有量区间的临界点,设计了多项式时间算法以确定每一决策周期的阈值。

关于空箱库存总成本,段刚等<sup>[31]</sup>建立了动态集装箱空箱调运模型,以空箱调运过程中所产生的车辆租用费用、积压库存费用以及延误损失等费用之和最小为目标,提出了空箱调运动态优化

方法;宋若辰等<sup>[32]</sup>在分析集装箱空箱在途库存成本构成的基础上,以空箱在途库存成本最小为优化目标,给出班轮公司空箱调运方案;杨华龙等<sup>[33]</sup>针对近洋航线下班轮运输的空箱调运优化问题,构建了考虑在途库存成本的滚动多航班班轮空箱调运优化模型,给出了班轮公司空箱调运方案;孙家庆等<sup>[34]</sup>基于航线、船舶运力、运输时间等限制性因素,以多决策期的空箱调运总成本最低为目标,建立集装箱共享系统的不确定需求随机机会约束模型,辅助船公司制订空箱共享、舱位共用策略;Long 等<sup>[35]</sup>基于空箱供需平衡,构建了两阶段随机规划模型,并采用样本平均值近似方法估计预期成本,设计了基于渐进式对冲策略算法。表3对上述文献进行了汇总。

表3 基于空箱库存视角的空箱调运问题研究

Tab. 3 Empty container repositioning  
based on inventory control

文献	主要决策	研究焦点	模型/求解方法
[24]	BLB	多货场港区内的空箱调运	模拟退火算法
[25]	S+IS	考虑客户需求的空箱调运	数值分析
[26]	BLB	定期补给策略	混合整数规划
[27]	S+IS	支线运输空箱调运	人工蜂群算法
[28]	S	多港口间的空箱调运	混合整数规划
[29]	BLB	空箱保有量和保有区间	数值分析
[30]	S+IS	多港口多周期空箱调运	多项式时间算法
[31]	S	动态空箱调运	混合算法
[32]	BLB+S	空箱在途库存成本优化	数值分析
[33]	BLB	近洋航线的空箱调运优化	数值分析
[34]	S	共享模式下的空箱调运	混合算法
[35]	IS	空箱调运的随机规划	样本平均值近似

#### 1.4 关于运输与库存联合优化的空箱调运

对空箱调运过程中的空箱运输费用与空箱库存费用的联合优化,这一类问题可以归结为航运库存路径问题(maritime inventory routing problem, MIRP)。

早期的MIRP问题研究针对散杂货等不定期船舶,如Papageorgiou等<sup>[36]</sup>提出了关于MIRP的离散与连续两类模型、基于弧段和基于路径的两类算法;Rakke等<sup>[37]</sup>以长期合约的LNG不定期船为研究对象,构建了考虑远洋运输模式特点的MIRP模型,设计了分支定价及割平面混合求解算法;Hemmati等<sup>[38]</sup>针对近洋航线散杂货运输问题,构建了非线性整数规划模型,设计了两阶段启发式算法。

针对集装箱班轮运输的MIRP问题,Song等<sup>[39]</sup>提出设置港口空箱保有量阈值的方法;Jiang等<sup>[40]</sup>提出了连续与离散两种混合整数线性规划模型对库存量与调运量进行优化;De等<sup>[41]</sup>探讨了具有班期时间窗约束的航运库存路径问题;Wang<sup>[42]</sup>将集装箱的库存成本整合至现有的班轮航线网络设计中,结果表明,空箱库存成本对于班轮运输网络设计有直接影响;Eide等<sup>[43]</sup>将船舶速度与负荷因素纳入模型,结果表明,考虑该两个因素可以节省航运成本;Dong等<sup>[44]</sup>研究了通过动态调整航线挂靠港口顺序,同时进行空箱库存控制;Rodrigues等<sup>[45]</sup>研究了航行时间不确定条件下的航运库存路径问题,探讨了具有库存缓冲的确定性规划、鲁棒优化以及随机规划模型;Zhou等<sup>[46]</sup>建立了空箱调运的两阶段随机规划模型,设计了一种分段线性学习算法来逼近期望函数,当空箱调运问题的规模以及维数增加时,该算法依然有良好的收敛性;Rabbani等<sup>[47]</sup>分别以运输成本最小化、碳排放最小化以及经济与社会效益最大化为目标,建立了变速航线的多目标船舶路径与调度规划模型;Bell等<sup>[48]</sup>构建了最小化运营成本的线性规划模型,其中的运营成本不仅包括重箱和空箱的运输成本、装卸成本、空箱租赁成本,还包括重箱(及其内部货物)的库存成本;Zhang等<sup>[49]</sup>考虑集装箱运输途中的不确定性扰动对运输时间的影响,探讨了灵活空箱调运方案。

关于多周期动态空箱调运MIRP问题,Misra等<sup>[50]</sup>将连续时间和多重网格离散化时间框架结合,提出了滚动时域策略,求解了复杂的多周期航运库存路径问题;Han等<sup>[51]</sup>提出了一个多周期随机动态规划模型,设计了一种简化迭代算法,有效获取了近似最优解;Siswanto等<sup>[52]</sup>研究了多时间窗的航运库存路径问题,并设计了启发式算法对船舶的航线选择与装箱数量进行协同优化;Sarmadi等<sup>[53]</sup>探讨了不确定环境下的集装箱运输和库存联合动态决策;Ahmad等<sup>[54]</sup>构建了一种辅助机会约束规划模型,并将其转换为确定性约束规划模型。表4对上述文献进行了汇总。

表 4 空箱运输与库存的联合优化研究  
Tab. 4 Joint optimization on empty container repositioning and inventory

文献	主要决策	研究焦点	模型/求解方法
[36]	BLB+IS	远洋库存路径问题	整数线性规划
[37]	BLB+IS	LNG 的航运库存路径	混合整数规划
[38]	S+IS	短途航运库存路径	两阶段混合算法
[39]	S+IS	灵活目的港的空箱调运	数值仿真
[40]	S	航运库存路径问题	连续和离散模型
[41]	BLB	航运库存路径问题	非线性规划模型
[42]	S	考虑货物的库存成本	启发式方法
[43]	S+IS	航运库存路径问题	非线性转为线性
[44]	S+IS	滚装运输问题	非线性规划
[45]	S+IS	不确定性航运库存路径	鲁棒优化
[46]	S	空箱的分配问题	非线性学习算法
[47]	S	不确定性航运库存路径	多目标优化模型
[48]	S	空箱的分配问题	随机规划
[47]	S	不确定性航运库存路径	多目标优化模型
[48]	S	考虑货物库存成本	线性规划模型
[49]	S	不确定性航运库存路径	拉格朗日算法
[50]	IS	多周期航运库存路径	混合时间离散化
[51]	BLB	多周期随机需求	随机动态规划
[52]	S+IS	多时间窗的航运库存路径	遗传算法
[53]	BLB	海陆协同空箱调运	两阶段随机规划
[54]	S+IS	随机需求的航运库存路径	机会约束模型

### 1.5 可折叠箱的空箱调运问题

近年来,可折叠集装箱的出现为空箱调运提供了一个新途径。可折叠箱使得同尺寸的3~5个集装箱通过折叠后仅占有1个集装箱的空间。相比传统集装箱,可折叠箱可以极大地降低调运及存储成本。

Moon 等<sup>[55]</sup>构建了考虑标准箱和可折叠箱的空箱调运优化模型,验证了可折叠箱在海运空箱调运方面的经济性。Shintani 等<sup>[56]</sup>研究了考虑可折叠箱的内陆地区集装箱空箱调运优化问题,同样表明,可折叠箱的使用能够大大节省空箱调运成本。Zhang 等<sup>[57]</sup>基于多式联运网络,考虑标准箱和可折叠箱,构建空箱调运优化模型,并设计人工蜂群算法求解大规模算例。Zhang 等<sup>[58]</sup>考虑桥梁高度和水深限制,以总成本最小化为目标,构建江海联运下可折叠集装箱空箱调运优化模型,并以长三角为例进行数值实验,验证了可折叠集装箱可有效节省空间、降低成本。

## 2 研究热点与现状述评

### 2.1 基于运输视角

相对早期的关于空箱调运的研究,大多以单

独的海运子系统或陆运子系统为研究对象,或研究单一运输方式,与集装箱运输客观上要求的“门到门”的运输服务需求不相适应。当前研究热点呈现由单一运输方式向多式联运协调调运空箱的发展趋势,即考虑海域与陆域的协同以及运输方式之间的协调。

分析基于运输视角的研究现状与趋势,存在两个方面的突出问题:

一是空箱供给量与需求量的主观估算。空箱与重箱在一定时空范围内是相互转化的,到达港口的重箱经过一个或多个周期可以转化成为空箱供给,而每个决策周期运出港口的重箱即可以视为空箱的需求量。但是现行研究,无论是对于确定性需求还是随机需求,往往会忽视这一重要的转化关系,导致了空箱流量的确定不是基于客观的大数据分析,而是基于主观估算,进而导致与实际脱节。

二是多周期问题的单周期化处理。集装箱空箱调运是动态性的离散过程,需要在一定时间区间内对空箱调运进行决策,包括空箱的流向、流量、库存量。虽然现行研究热点已经从单周期逐渐转向了多周期决策问题,但对于求解算法,仍然大多采用静态优化方法来处理,即对系统某一时点进行决策优化。显然,静态的求解方法并不适用于多周期的空箱调运问题。

### 2.2 基于库存视角

空箱存储是在其调运过程中的一个环节,作为一种特殊的库存货物来对待,主要包括空箱库存控制策略的选择、空箱库存阈值的确定等,包括单决策周期的静态情形以及多决策周期的动态情形,研究热点呈现由单周期静态决策向多周期动态决策发展的趋势。

分析基于库存视角的研究现状与趋势,存在两个方面的突出问题:

一是海港与内陆无水港之间的库存协同。海港的陆向腹地既是进口箱的流入地,也同时是出口箱的来源地,也可为海港提供一部分的空箱供给。内陆无水港、集装箱场站等节点的空箱库存,与海港的空箱库存密切关联,然而现有的文献对此关注不够。

二是库存控制策略之间的协同。传统的库存控制策略主要包括定量控制策略、定期控制策略

以及混合控制策略。对于空箱库存而言,“期”是指空箱调运在途期间,而“量”是指空箱保有量的上(下)限,这几个控制参数相互关联、相互影响,需要系统协同。

### 2.3 基于运输与库存联合优化视角

关于航运库存路径问题(MIRP)的早期研究大多是针对大宗货物、散杂货、油品、LNG等不定期船的运输问题,集装箱的运输模式与上述的不定期船舶运输模式完全不同,均采用班轮运输模式。当前的研究热点呈现由不定期船舶运输向班轮运输、由单周期静态决策向多周期动态决策发展的趋势。

分析基于运输与库存联合优化的研究现状与趋势,同样存在两个方面的突出问题:

一是海域与陆域的分割以及运输方式之间协调缺失。现行研究大多以单独的海运子系统或陆运子系统为研究对象,然而,该两个子系统均是以港口为起始节点、以集装箱为媒介,是密不可分的,需要研究由海港作为枢纽港与由内陆无水港作为其喂给港所组成的海陆协同运输网络。与海域及陆域的分割相伴而生的就是单一运输方式的局限,与集装箱“门到门”的运输服务客观需求不相适应。目前,数十列中欧集装箱班列所遭遇到的集装箱“重去空回”、“有去无回”的尴尬局面,就是海上运输与铁路运输协调缺失的生动写照。洲际运输更加需要对于两种运输方式之间的海陆协调空箱调运进行进一步的深入研究。

二是集装箱班轮运输特点刻画与特征提炼缺位。关于航运库存路径问题(MIRP)的现行研究,虽然目前大都集中于集装箱的班轮运输,但对于定期、定线、定时的班轮运输,尤其是对于班轮运输的这种多阶段性、强周期性等的特点刻画、特征提炼等问题,无论是在优化模型构建,还是在优化算法设计等方面,都有待深入探索。

## 3 潜在研究方向展望

基于上述对研究现状与趋势的把握,提出以下几个潜在研究方向与领域。

### 3.1 空箱共享机制设计

集装箱尽管是最标准化的运输载体,但其归属于多类不同的主体,如不同的承运人和货主,对集装箱的循环流转带来了极大不便,由此引发各

主体集装箱场站重复建设、空箱迂回调运、异地还箱等现象。因此,空箱的有效流转需要不同运输方式以及同一运输方式内部各拥箱主体(承运人、货主)之间的协同。要实现上述不同层面之间的协同,关键词是“共享”,而集装箱的标准化属性为共享提供了必要条件。解决问题的基本思路是借鉴共享单车经验教训,基于大数据实现集装箱空箱在供需时空的多维度匹配,通过政策引导与市场主导,构建一个由第三方运营的共享集装箱平台,实现空箱在不同运输方式、不同集装箱所有者、不同空箱供需点之间的有效流转。理论研究理应为此提供决策支持。

### 3.2 重空箱转换的大数据分析

对于整个空箱调运系统而言,每个网络节点的空箱供给量与需求量的测算是个难点。空箱的需求量取决于每个网络节点及其内陆腹地的集装箱货源生成量;而空箱的供给量来源于该节点及其内陆腹地之前到达的重箱经卸空后形成的空箱量。对于这两个关键量的预测难度较大,现行研究尚无成熟的方法可供选择。

此外,由于重箱与空箱是在一定的时间与空间内相互转化的,对这一相互转化过程及转化规律的刻画可以从转化空间的映射关系、转化数量的对应关系、转化周期的分布规律三方面来测度。大数据分析技术无疑给空箱供给量预测、空箱需求量预测、重空箱时空转化规律刻画提供了可能。

### 3.3 航运库存路径问题建模

在整个海陆协同的空箱调运系统中,以班轮运输组织形式的海运子系统占据主导地位,内陆集疏运是围绕着海上干线班轮周期进行组织的。同时,相对于陆上直达运输模式,海上运输网络状航线更复杂,同一航线往返往往挂靠不同的港口,同一航段会有不同航线的船舶挂靠等。因此,基于海上干线班轮运输的主要航线网络结构,诸如钟摆航线结构、环绕航线结构等,构建基于航线网络结构的航运库存路径问题优化模型是一个潜在的研究方向。

### 3.4 动态优化算法开发

多周期(班轮班期)以及每一周期多航段(多挂靠港)是海上班轮运输的固有特征属性,采用多周期动态优化算法更能客观反映考虑空箱调运的航运库存路径问题的本质。因此,需要引入动态算

法,并将其作为主算法程序进行全局优化。鉴于库存路径问题的 NP 难属性,导致各周期、各航段的状态数量呈现几何级数增长的态势,有必要结合问题自身特点,通过航运启发式规则的引入,有效降低“组合爆炸”带来的动态优化算法的计算复杂程度是另一个潜在的研究领域。

### 3.5 针对特种箱的深入探讨

这里所指的特种箱包括可折叠箱、交换箱以及危险品箱与冷藏箱等,其中,前两者在产业界有了初步的实践,对其理论研究滞后于实践,故重点阐述。

较之传统集装箱,可折叠集装箱通过折叠能够极大地降低调运及存储成本。有关可折叠箱的技术论证、经济性分析、与传统集装箱混合运输优化、与传统集装箱混合库存优化等领域尚存在许多值得探索的空间。

产业界新出现的交换箱,在进行公路运输时可以减少 50% 以上的牵引车购置费;同时,也使空箱调运与空箱甩挂联合优化成为可能;此外,交换箱自身可以充当临时仓库,减少存储费用,促进多式联运发展,实现“门到门”运输。同样,在与传统集装箱混合使用过程中存在大量的优化空间可供深入探索。

### 参考文献(References) :

- [1] 王宝红. 铁路集装箱空箱调运研究综述[J]. 交通运输研究, 2016, 2(3): 56-62.  
WANG B H. Review of study on allocation of railway empty containers transportation[J]. Transport Research, 2016, 2(3): 56-62. (in Chinese)
- [2] KHAKBAZ H, BHATTACHARJYA J. Maritime empty container repositioning: a problem review[J]. International Journal of Strategic Decision Sciences, 2014, 5 (1): 1-23.
- [3] 吉清凯,胡祥培,孙丽君. 集装箱空箱调度问题的研究现状与发展[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(6): 1578-1586.  
JI Q K, HU X P, SUN L J. Empty container allocation: status and perspectives [J]. System Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(6): 1578-1586. (in Chinese)
- [4] KATARZYNA A K, ERWIN P. Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation [J]. Omega, 2019, 85: 194-213.
- [5] SONG D P, DONG J X. Cargo routing and empty container repositioning in multiple shipping service routes [J]. Transportation Research Part B, 2012, 46 (10): 1556-1575.
- [6] ZHENG J F, SUN Z, GAO Z Y. Empty container exchange among line carrier[J]. Transportation Research Part E, 2015, 83: 158-169.
- [7] 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 C X, CHEN F Y. Optimal empty container reposition with collaboration among shipping companies based on multiple ports [J]. Journal of Systems & Management, 2016, 25(3): 539-545. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 韩晓龙,童辉. 随机需求下考虑多目标的空箱调运研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017 ,42(2): 764-772.  
HAN X L, TONG H. Empty containers dispatching optimization with multi-objective based on random demand [J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2017 ,42(2): 764-772. (in Chinese)
- [10] 蔡佩林,涂建军. 基于随机需求的集装箱空箱调度研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014,38(2):298-303.  
CAI P L, TU J J. Empty container scheduling research under stochastic demand[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014,38(2):298-303. (in Chinese)
- [11] FRANCESCO M D, CRAINIC T G, ZUDDAS P. The effect of multi-scenario policies on empty container repositioning[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2009, 45 (5) : 758-770.
- [12] 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.
- [13] HJORTNAES T, WIEGMANS B, NEGENBORN 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.
- [14] JANSEN B, SWINKELS P C J, TEEUWEN G J A, et al. Operational planning of a large-scale multimodal transportation system [J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 156(1): 41-53.
- [15] 赵道致,黄健.基于海陆运整体成本的集装箱空箱调运优化研究[J].北京交通大学学报(社会科学版),2008,7(4):48-52.
- ZHAO D Z, HUANG J. Research on optimization of empty container distribution based on integral cost of ocean shipping and land-carriage [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University (Social Science Edition)*, 2008, 7 (4):48-52. (in Chinese)
- [16] XIE Y, LIANG X, MA L, et al. Empty container management and coordination in intermodal transport [J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 257: 223-232.
- [17] YOONJEA J, SUBRATA S, DEBAJYOTI C, et al. Direct shipping service routes with an empty container management strategy [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 118: 123-142.
- [18] TRAN N K, HAASIS H D, BUER T. Container shipping route design incorporating the costs of shipping, inland/feeder transport, inventory and CO<sub>2</sub> emission [J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2017, 19(4): 667-694.
- [19] 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. (in Chinese)
- [20] 韩曙光,张潇.基于多种合作模式的内陆空集装箱调运优化[J].浙江理工大学学报(社会科学版),2019,42(2):120-127.
- HAN S G, ZHANG X. Research on optimization of inland empty container allocation on sharing basis [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2019, 42(2): 120-127. (in Chinese)
- [21] 孙浩.海陆多式联运空箱调运模型研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2010,34(3):533-536.
- SUN H. Research on multimodal repositioning of empty containers around seaborne and land carriage [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2010, 34 (3): 533-536. (in Chinese)
- [22] ZHANG S Z, RUAN X, XIA Y Z, et al. Foldable container in empty container repositioning in intermodal transportation network of Belt and Road Initiative: strengths and limitations [J]. *Maritime Policy & Management*, 2018, 45 (3): 351-369.
- [23] FINKE S, KOTZAB H. An inland-depots-for-empty-containers-model for the hinterland [J]. *Maritime Business Review*, 2017, 2 (2): 126-141.
- [24] DANG Q V, YUN W Y, KOPFER H. Positioning empty containers under dependent demand process [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 62 (3): 708-715.
- [25] LUO T, CHANG D F. Empty container repositioning strategy in intermodal transport with demand switching [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 40:1-13.
- [26] HARIGA M, GLOCK C H, KIM T. Integrated product and container inventory model for a single-vendor single-buyer supply chain with owned and rented returnable transport items [J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(7):1964-1979.
- [27] 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.
- [28] 汪传旭,蒋良奎.集装箱班轮运输中空箱调运组织与库存优化研究[J].交通运输系统工程与信息,2010,10(5): 137-143.
- WANG C X, JIANG L K. Empty container reposition and inventory optimization of container liner shipping [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, 10 (5): 137-143. (in Chinese)
- [29] 陈飞燕,汪传旭.模糊随机条件下港口空箱保有量多阶段优化决策[J].上海交通大学学报,2013, 47 (2): 312-316.
- CHEN F Y, WANG C X. Multi-stage optimization decision for empty container inventory under fuzzy random condition [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2013, 47(2): 312-316. (in Chinese)
- [30] ZHANG B, NG C T, CHENG T C E. Multi-period

- empty container repositioning with stochastic demand and lost sales [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2014, 65(2) : 302-319.
- [31] 段刚, 李引珍, 田丽娜, 等. 基于技术站中转作业的动态空箱调运模型与算法 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2012, 12(2) : 111-118.
- DUAN G, LI Y Z, TIAN L N, et al. Dynamic empty container allocation model and algorithm based on technique station transfer operation [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2012, 12(2) : 111-118. (in Chinese)
- [32] 宋若辰, 赵一飞. 班轮公司集装箱空箱在途库存控制研究 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(4) : 890-894.
- SONG R C, ZHAO Y F. Study on liner operator's controlling of empty containers' in-transit inventory [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2012, 31(4) : 890-894. (in Chinese)
- [33] 杨华龙, 张欣迪, 王瑞娟, 等. 考虑在途库存成本的班轮空箱调运优化 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(6) : 131-135.
- YANG H L, ZHANG X D, WANG R J, et al. Optimization of empty liner containers allocation considering in-transit inventory cost [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2014, 33(6) : 131-135. (in Chinese)
- [34] 孙家庆, 刘明丽, 徐林坤, 等. 共享模式下的集装箱空箱调运优化 [J]. *上海海事大学学报*, 2019, 40(3) : 14-20.
- SUN J Q, LIU M L, XU L K, et al. Optimization of empty container allocation under shared mode [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2019, 40(3) : 14-20. (in Chinese)
- [35] LONG Y, LEE L H, CHEW E P. The sample average approximation method for empty container repositioning with uncertainties [J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 222(1) : 65-75.
- [36] PAPAGEORGIOU D J, KEHA A B, NEMHAUSER G L, et al. Two-stage decomposition algorithms for single product maritime inventory routing [J]. *Informs Journal on Computing*, 2014, 26(4) : 825-847.
- [37] RAKKE J G, ANDERSSON H, CHRISTIANSEN M, et al. A new formulation based on customer delivery patterns for a maritime inventory routing problem [J]. *Transportation Science*, 2015, 49(2) : 384-401.
- [38] HEMMATI A, HVATTUM L M, CHRISTIANSEN M, et al. An iterative two-phase hybrid matheuristic for a multi-product short sea inventory-routing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 252(3) : 775-788.
- [39] SONG D P, DONG J X. Effectiveness of an empty container repositioning policy with flexible destination ports [J]. *Transport Policy*, 2010, 18(1) : 92-101.
- [40] JIANG Y H, GROSSMANN I E. Alternative mixed integer linear programming models of a maritime inventory routing problem [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, 77 : 147-161.
- [41] DE A, KUMAR S K, GUNASEKARAN A, et al. Sustainable maritime inventory routing problem with time window constraints [J]. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 2017, 61 : 77-95.
- [42] WANG S. Formulating cargo inventory costs for liner shipping network design [J]. *Maritime Policy & Management*, 2017, 44(1) : 62-80.
- [43] EIDE L, ARDAL G C H, EVSIKOVA N, et al. Load-dependent speed optimization in maritime inventory routing [J]. *Computers & Operations Research*, 2020, 123 : 105051.
- [44] 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.
- [45] RODRIGUES F, AGRA A, CHRISTIANSEN M, et al. Comparing techniques for modelling uncertainty in a maritime inventory routing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 277(3) : 831-845.
- [46] 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 : 1-16.
- [47] RABBANI M, SADEGHSA S, VAEZ-ALAEI M, et al. Robust and sustainable full-shipload routing and scheduling problem considering variable speed: a real case study [J]. *Scientia Iranica*, 2019, 26(3) : 1881-1897.
- [48] BELL M G H, LIU X, RIOULT J, et al. A cost-based maritime container assignment model [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2013, 58(1) : 58-70.
- [49] ZHANG C L, NEMHAUSER G, SOKOL J, et al. Flexible solutions to maritime inventory routing problems

(下转第 110 页)

- HUANG W, CHANG J, SUN Z B. Characteristic curve prediction of compressor based on MEA-BP neural network [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33 (2) : 67-74. (in Chinese)
- [8] 周奎. 神经网络在燃气轮机建模仿真和性能监测中的应用 [D]. 北京: 清华大学, 2017.
- ZHOU K. Neural network-based research on the dynamic simulation and performance monitoring of gas turbine [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017. (in Chinese)
- [9] JIANG R, ZHANG J, TANG Y, et al. A collective intelligence based differential evolution algorithm for optimizing the structure and parameters of a neural network [J]. IEEE ACCESS, 2020, 8 : 69601-69614.
- [10] DAS S, SUGANTHAN P N. Differential evolution: a survey of the state-of-the-art [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2011, 15 (1) : 4-31.
- [11] BREST J, GREINER S, BOSKOVIC B, et al. Self-adapting control parameters in differential evolution: a comparative study on numerical benchmark problems [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10 (6) : 646-657.
- [12] STORN R, PRICE K. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11 (4) : 341-359.
- [13] TSAI J T, CHOU J H, LIU T K. Tuning the structure and parameters of a neural network by using hybrid tabuchi-genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2006, 17 (1) : 69-80.

(上接第 60 页)

- with delivery time windows [J]. Computers & Operations Research, 2013, 89 : 153-162.
- [50] MISRA S, KAPADI M, GUDI R D. Hybrid time-based framework for maritime inventory problem [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59 (46) : 20394-20409.
- [51] HAN G, PU X, HE Z, et al. Integrated planning and allocation: a stochastic dynamic programming approach in container transportation [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2018, 114 : 264-274.
- [52] SISWANTO N, WIRATNO S E, RUSDIANSYAH A, et al. Maritime inventory routing problem with multiple time windows [J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2020, 15(3) : 1185-1211.
- [53] 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, 2020, 139 : 132-164.
- [54] AHMAD H, TOBIAS S. An optimization model for management of empty containers in distribution network of a logistics company under uncertainty [J]. Journal of Industrial Engineering International, 2019, 15 : 585-602.
- [55] MOON I, DONGOC A D, KONING R. Foldable and standard containers in empty container repositioning [J]. Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review, 2013, 49(1) : 107-124.
- [56] SHINTANI K, KONINGS R, IMAI A. The impact of foldable containers on container fleet management costs in hinterland transport [J]. Transportation Research Part E, 2010, 46(5) : 750-763.
- [57] ZHANG S Z, XIAYZ F, RUAN X, et al. Foldable container in empty container repositioning in intermodal transportation network of Belt and Road Initiative: strengths and limitations [J]. Maritime Policy & Management, 2017, 45(4) : 1-19.
- [58] ZHANG R Y, HUANG C, FENG X H. Empty container repositioning with foldable containers in a river transport network considering the limitations of bridge heights [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020, 133 : 197-213.