

文章编号: 1003-1421(2024)10-0082-16 中图分类号: U292.3⁺6 文献标识码: A

DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2024.10.10

引用格式: 段力伟, 吴晓莉. 集装箱多式联运空箱调运问题研究综述[J]. 铁路运输与经济, 2024, 46(10): 82-97.

DUAN Liwei, WU Xiaoli. Review of Empty Container Repositioning Problems in Intermodal Transport[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(10): 82-97.

集装箱多式联运空箱调运问题研究综述

段力伟, 吴晓莉

(重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

摘 要: 多式联运是构建现代综合交通运输体系的重要运输组织模式, 而空箱调运是其中不可或缺的环节, 对于进一步降低多式联运的总成本和提高多式联运的运输效率至关重要。基于战略层、战术层和运营层3个规划层次, 结合集装箱共享策略、运输网络设计、不同运输方式的组合、多周期多阶段决策、运输费用目标、不确定性环境和空箱库存策略7个领域, 对2014年至今的集装箱多式联运中的空箱调运研究进行了综述和评析, 以梳理当前研究现状。最后, 随着多式联运向协同运输的转变和开放式模式预定的不断发展, 研究强调协同运输和考虑托运人需求偏好2个未来研究方向, 并且将这两者与空箱调运问题有机结合, 探索更加高效率、人性化的运输方案, 这将成为未来研究的一个重要方向。

关键词: 多式联运; 集装箱运输; 空箱调运; 协同运输; 托运人需求偏好; 综述

Review of Empty Container Repositioning Problems in Intermodal Transport

DUAN Liwei, WU Xiaoli

(School of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Intermodal transport is an important transportation organization mode for building a modern comprehensive transportation system, and empty container repositioning is an indispensable part of it. It is very important for the further reduction of the total cost of intermodal transport and the improvement of transportation efficiency. Based on the three planning levels including strategic level, tactical level, and operational level, this paper considered the seven fields such as container sharing strategy, transportation network design, the combination of different transportation modes, multi-period and multi-stage decision-making, transportation cost target, uncertain environment, and empty container inventory strategy. In this way, this paper summarized and analyzed the research on empty container repositioning of container intermodal transport from 2014 to the present to sort out the current research status quo. Finally, with the transformation of intermodal transport to synchromodal transport and the increasingly evolving open mode booking, this paper emphasized two future research directions: synchromodal transport and considering the shipper's demand preference. The paper combined the two with the empty container repositioning problem to explore more efficient and humanized transportation schemes.

收稿日期: 2023-11-30

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目(18XJCZH001); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN20200704); 重庆交通大学研究生科研创新项目资助课题(CYS22410)

This will become an important direction of future research.

Keywords: Intermodal Transport; Container Transport; Empty Container Repositioning; Synchromodal Transport; Shipper's Demand Preference; Review

0 引言

集装箱运输是全球化的支柱,其产生的价值约占所有国际贸易总价值的60%^[1]。同时,由于地区间经济贸易发展水平不对等、集装箱流向不平衡、箱型不匹配等,集装箱空箱调运问题在所难免^[2-4]。集装箱空箱调运约占全球所有集装箱运输的20%,而其调运总成本却占到班轮公司总管理成本的60%^[5]。空箱的调运会消耗人力、财力等成本,却并不直接产生任何经济利益^[6-7],因此降低空箱调运成本,提高运输效率已逐渐成为集装箱运输行业关注的焦点问题之一。

空箱调运问题最早是空车调度问题的特殊情况,集装箱作为交通工具进行运输,集装箱空箱即可看作是一类“空车”^[6]。White等就在研究空车调度网络算法^[8]的基础上构建了一个时空动态转运网络对空箱调运问题进行了研究^[9]。20世纪90年代以来,研究者们注意到空箱作为运输工具和货物的双重属性,逐渐在集装箱空箱调运的研究中考虑了更多的因素:随机/不确定情况^[2]、动态但确定性的情况^[10]、计划周期长短的影响^[11]和集装箱共享策略^[12]等。

21世纪以来,随着集装箱多式联运的不断发展,其逐渐成为货物运输中最高效的运输组织方式,而空箱调运是保持其高效性的重要环节之一^[13]。吉清凯等^[7]、靳志宏等^[14]、Kuzmich等^[15]分别从管理层次、空箱的双重属性和所用模型角度对集装箱空箱调运问题进行了综述,但前两者都是针对单一运输方式的综述,而后者则仅涉及欧亚海铁联运中的空箱调运研究。

集装箱多式联运中的空箱调运问题涉及多种运输模式和运输环节的协调和集成,具有关联性、复杂性、动态性和随机性等特性,包括战略层、战术层和运营层3个规划层次,涉及集装箱共享策略、运输网络设计、库存策略和不确定性环境等多个领域。因此研究基于3个规划层次,结合其中的7个领域,针对2014年至今的集装箱多式联运空箱调

运研究展开系统且充分的评述,以盼有助于捋清研究现状,把握未来研究方向。

1 研究现状概述

“战略、战术、运营”这一层次结构最早是管理学和军事战略领域的概念,用于描述和区分不同决策层次和规划水平。StadieSeifi等^[13]基于此层次结构对货物多式联运领域的相关研究进行分类:将关注调查规划、与基础设施相关的问题归为战略层次,将服务和运输方式的选择、容量分配和路线与频率的规划问题归为战术层次,将动态性和随机性问题、日常和常规业务的处理问题归为运营层次。本节则基于此分别从战略、战术和运营层次对集装箱多式联运空箱调运问题的现有研究展开系统的评述。

1.1 战略层

战略规划问题与现有基础设施的投资决策有关^[7],在多式联运空箱调运中的战略层问题主要有:集装箱共享策略、运输网络设计(如终端选址、路径规划和箱型选择)等。

1.1.1 集装箱共享策略下的空箱调运问题

多式联运涉及2种以上的运输方式,且空箱调运问题涉及多方的利益,考虑集装箱共享策略,能够大大减小多式联运空箱调运的成本,提高多式联运的运输效率。

集装箱共享策略往往存在于班轮联盟和各方合作的情况下,主要包括集装箱交换、集装箱互租和集装箱共享3种模式。除此之外,目前空箱调运资源共享平台也在快速发展当中,其不同于班轮联盟和第三方租箱公司,是船公司、港口和内陆腹地场站等多方共同合作的结果,该平台中共享空箱资源,空箱需求方可以在平台上以较低的价格租箱,或与空箱供给方合作借用集装箱。

集装箱交换模式就是2家或少数几家班轮公司彼此合作,在满足本公司运输计划的条件下,允许互相调运对方的空箱,这种模式能够在较小的范围内降低空箱调运的总成本^[16]。Sterzik等^[17]研究了卡

车运输公司间实行空箱交换模式的影响,同时考虑了交货时间窗对空箱调运成本的影响。汪传旭等^[16]、孙家庆等^[18]都对船公司合作下空箱交换模式对多港口、多决策期空箱调运成本的优化进行了研究,不同的是后者进一步考虑了多种箱型的交换,并增加了航线、船舶运力、运输时间等限制性因素。

在多家班轮公司组成的班轮联盟内部或是达成合作协议的公司之间,空箱互租的租金低于向租箱公司租箱的租金,各公司彼此的部分富余空箱不但不产生堆存成本或调运成本,而且还能通过租给需求空箱的公司而取得租金收入,能够有效实现空箱调运的优化^[19]。郭金鑫等^[20]结合时间扩展网络流图和空箱互租战略,综合考虑了重箱和空箱的联合调运。Xing等^[21]研究发现设定合理的空箱互租成本,能够加强中欧班列公司和国际班轮公司的合作可持

续性,有效降低空箱调运的总成本。

集装箱共享模式常出现在班轮联盟中或同区域多家运输公司合作情况下,即空箱资源完全无偿共享,能够在较大范围内有效缓解空箱资源限制的影响,降低空箱的储存成本和租赁成本^[22]。徐文思等^[23]、江玉杰等^[24]都在海运空箱调运研究中涉及到空箱共享模式,二者分别将顾客满意度和空箱供需的模糊性考虑在内。Irannezhad等^[25]通过基于模拟的模型来衡量内陆货运中航运公司之间实行空箱共享模式的环境和经济效益,该模型同时考虑了车辆类型和需求的二维变量。朱星龙等^[26]、王林等^[27]则在中欧班列的空箱调运研究中涉及了空箱共享模式,后者进一步考虑了集结中心的影响,以扩大空箱共享模式辐射的范围。

综上所述,基于集装箱共享策略的空箱调运文献汇总表如表1所示。

表1 基于集装箱共享策略的空箱调运文献汇总表
Tab.1 Literature summary of empty container repositioning based on container sharing strategy

文献	研究焦点	问题结构	目标函数	模型/求解方法	算例
汪传旭等 ^[16] (2016)	船公司合作	S+F+SA+DSD	成本最小	MIP+配对分解思想+MATLAB	模拟算例
Sterzik等 ^[17] (2015)	集装箱共享策略	S+F+SA	时间最小	MIP+禁忌搜索启发式算法	模拟算例
孙家庆等 ^[18] (2019)	集装箱共享系统	M+F+SA	成本最小	随机机会约束+SA与GA混合算法	模拟算例
邢玉伟等 ^[19] (2016)	空箱互租战略	S+F+TW	成本最小	动态规划+Lingo9.0	模拟算例
郭金鑫等 ^[20] (2018)	空箱互租战略	S+F	成本最小	MIP+CPLEX	模拟算例
Xing等 ^[21] (2021)	中欧班列公司与国际班轮公司合作	S+IF+DD	成本最小	MILP+CPLEX	成都华润公司的腹地城市和中远航运有限公司的服务港口
徐华锋等 ^[22] (2022)	各铁路货运站空箱资源共享	S+F+DS+SA	成本最小	MIP+MATLAB	长三角沿海港口群(宁波舟山港、上海港)及其长三角地区的经济腹地(上海、江苏、浙江、安徽)
徐文思等 ^[23] (2016)	航运公司共享空箱和舱位资源	R+IF+DD+SA	利润最大	随机规划+随机机会约束+MATLAB	模拟算例
江玉杰等 ^[24] (2018)	航运公司合作	S+F+DSD	成本最小	模糊机会约束+动态整数规划+Lingo	模拟算例
Irannezhad等 ^[25] (2018)	航运公司合作	S+F+TW+DSD	成本最小	仿真+禁忌搜索元启发式算法+ArcGIS中的VRP求解器	澳大利亚布里斯班港2周的进出口集装箱移动情况
朱星龙等 ^[26] (2020)	中欧班列集装箱共享策略	S+F+SA	成本最小	整数规划+B&B+LINGO	3个中欧班列公司(武汉、长沙和重庆——汉堡和杜伊斯堡)
王林等 ^[27] (2022)	集结中心集装箱共享策略	S+F+SA	成本最小	整数规划+Lingo18.0	2个中欧班列公司(襄阳、石家庄——杜伊斯堡、汉堡),西安集结中心

注: S: 标准集装箱; M: 多种集装箱; R: 冷藏集装箱; F: 有限的计划周期; IF: 无限的计划周期; SA: 允许集装箱互换; DSD: 动态(包括不确定、未知或随机)的供需; DS: 需求不确定; DD: 供给不确定; TW: 运送空箱的时间段限制; IP: 整数规划; MIP: 混合整数规划; MILP: 混合整数线性规划; B&B: 分支定界法; GA: 遗传算法; SA: 模拟退火算法。

1.1.2 运输网络设计与空箱调运问题

运输网络设计是指通过规划、组织和优化各种运输资源、设施和流程,以实现货物在供应链中高效、可靠、经济的运输,其关键组成部分包括终端选址、路径规划和箱型选择3个方面^[28]。而在运输网络设计中综合考虑空箱调运问题能够进一步提高服务网络的收益,同时降低空箱调运的成本^[29]。

终端选址旨在最大化货物流通效率,减少中转时间。综合考虑终端选址和空箱调运问题,利于设计出更适合空箱调运的运输路线,从而进一步降低空箱调运成本^[28]。Wang等^[30]进一步探讨了集装箱租赁定价问题,以空重箱运输成本的最小化为目标,研究了考虑可折叠集装箱的空箱调运班轮枢纽选址问题;Jeong等^[31]研究了可折叠集装箱在设施失效情况下的可靠集装箱网络设计,并通过设计具有失效模式的目标函数,提出了可折叠集装箱设施可靠选址问题的一种新的整数线性规划公式。

路径规划旨在最小化运输成本和时间,提高运输效率。综合考虑路线规划和空箱调运问题,利于空重箱的协调调运,在提高重箱运输效率的同时降低空箱调运的成本。Akyüz等^[32]开发了一种决策工具,该工具中设计有嵌入在分支定界算法框架中的列生成(CG)程序,用于解决服务类型分配和空箱路径规划同步问题(SARP);Jeong等^[33]在研究两国双边贸易双向四梯次集装箱供应链中的空箱管理策略的同时研究了直航的影响,并提出一种基于加速粒子群优化和启发式的混合求解过程,以确定在选定港口之间空箱调运的数量、租赁空箱的数量以及路线的选择。

箱型选择旨在最大化货物中转效率,降低储存成本。可供选择的创新箱型有可组合集装箱和可折叠集装箱,这2种箱型可以使运输公司更有效地管理集装箱,减少空箱调运成本,并以更具成本效益的方式利用存储空间。可组合集装箱实际是20 ft大小的标准集装箱,2个可组合箱可以组合成1个单元,以创建1个40 ft的集装箱,这意味着更灵活地分配货物,有效减少了由于集装箱尺寸变化而发生空箱调运的机会^[34-35]。可折叠集装箱则可以折叠且包装在一起进行库存和运输,往往3~5个可折叠集装箱仅占1个标准集装箱的空间,这有助于节省空

箱调运的时间和空箱存储成本^[36-37]。但这2种创新箱型的采购成本都较高,可折叠箱会产生额外的折叠和展开成本^[38-40],而可组合箱会产生额外的组合和分解过程相关的成本^[35],因此在使用这2种创新箱型的空箱调运问题中,都存在着较低的运输成本与较高的运营成本之间的权衡^[41]。

综上,运输网络设计与空箱调运研究汇总表如表2所示。

1.2 战术层

战术规划问题包括服务和运输方式的选择问题、运输方式的能力分配、频率规划问题以及货物的转运问题等。在战术层面,多式联运空箱调运问题主要涉及不同运输方式组合、多阶段多周期和考虑费用目标的空箱调运问题等。

1.2.1 不同运输方式组合下的空箱调运问题

在多式联运空箱调运问题中,运输方式组合不同,需要考虑的因素就大不相同,成本组成也就各不相同,多式联运空箱调运往往发生在公铁联运、海陆联运和海铁联运中。对于河海联运,虽然其名称中带有“联运”二字,但其实际并不涉及除了水运之外的第二种运输方式,因此其并不满足多式联运的定义^[36]。

基于公路运输的灵活性和陆港位置的特殊性,公路运输在空箱调运中常用于解决“最后一公里”的问题。公铁联运一般出现在腹地空箱运输系统中,旨在解决内陆货运之中的空箱调运问题。Yu等^[42]建立了一个整数规划模型来描述公路-铁路运输网络中空箱分配和转运问题,并提出了一种高效的贪心-最短路径快速算法来求解模型。El Yaagoubi等^[43]和Wang等^[44]分别采用优化-模拟耦合方法和两阶段优化模型来优化铁路-公路集装箱转运系统的运行效率。

考虑到公路运输的运输距离局限性,海港与其直接腹地之间的空箱调运问题会采用海陆联运的运输组织方式。蔡佳芯等^[45]建立了多周期混合整数规划模型研究了辽宁沿海港口群-东北腹地的空箱调运优化;Yu等^[46]建立了两阶段博弈模型来研究腹地空箱运输系统中海运承运人对集装箱自由滞留时间的决策和内陆集装箱经营人对将到达陆港的空箱何时调至海港的决策。

表2 运输网络设计与空箱调运研究汇总表
Tab.2 Summary of transport network design and empty container repositioning research

文献	问题类型	研究焦点	问题结构	目标函数	模型/求解方法	算例
Riessen等 ^[28] (2015)	终端选址	多式联运集装箱网络服务网络设计	S+F+TW	成本最小	MILP+ CPLEX	欧洲门户服务网
Wang等 ^[30] (2023)	终端选址	考虑空箱调运的班轮运输枢纽港选址	M+F	成本最小	MILP+CPLEX	模拟算例
Jeong等 ^[31] (2023)	终端选址	可折叠集装箱设施失效的影响	M	成本最小	ILP	模拟算例
Akyüz等 ^[32] (2016)	路径规划	服务类型分配和空箱路径规划同步问题	S+F+TW	成本最小+惩罚期限最短	MILP+B&B+列生成算法	模拟算例
Jeong等 ^[33] (2018)	路径规划	双向四梯次集装箱供应链的空箱管理策略	S+F	成本最小	MIP+加速粒子群算法+CPLEX	模拟算例
Shintani等 ^[35] (2019)	箱型选择-可组合箱	使用可组合箱对空箱调运总成本的影响	M+F	成本最小	MCFP+Gurobi求解器	3条每周航运服务航线：亚欧(EU)、亚洲-北美(NA)和亚洲内部(AS)
Zhang等 ^[36] (2020)	箱型选择-可折叠箱	具有桥梁高度和水深约束的河海多式联运空箱调运	M+IF	成本最小	MIP+LP软件包	长江沿岸19个主要港口，上海港是空箱供给港
Lee等 ^[37] (2020)	箱型选择-可折叠箱	不确定需求空箱调运	M+F+DD+TW	成本最小	线性规划+随机规划+鲁棒优化+仿真+Xpress	模拟算例
Moon等 ^[38] (2016)	箱型选择-可折叠箱	考虑可折叠集装箱的折叠和展开成本	M+F	成本最小	MIP+LP+LP-based GA+Hybrid GA+CPLEX	模拟算例
张亚梅等 ^[39] (2019)	箱型选择-可折叠箱	可折叠箱使用的关键因素	M+F	成本最小	MINP+Lingo12.0	模拟算例
Goh等 ^[40] (2019)	箱型选择-可折叠箱	可折叠箱对减碳的影响	M+F	成本最小	影子定价方法	模拟算例
Zhang等 ^[41] (2018)	箱型选择-可折叠箱	“一带一路”多式联运网络空箱调运	M+F	成本最小	MIP+人工蜂群算法	模拟算例

注：LP：线性规划；ILP：整数线性规划；MINP：混合整数非线性规划。

相较于公路运输，铁路运输具有运输距离长、运输能力强和污染小的特点，因此海铁联运不仅包括海港与其内陆腹地之间的联运、海港与陆港间的联运，还包括中欧班列与国际班轮之间的联运。徐华锋等^[22]建立了多周期混合整数规划模型来研究海港与其内陆腹地之间的空箱调运问题，其中内陆腹地的各铁路货运站资源及空箱资源均可共享。Xie等^[47]基于集中式模型和分散模型研究海港班轮公司与陆港铁路公司之间的空箱分担与协调问题。Xing等^[21]、Kuzmicz等^[15]和邢磊等^[48]都对中欧班列与国际班轮之间的空箱调运问题进行了研究，前两者研究发现中欧班列与国际班轮之间的合作共享关系能够降低空箱调运总成本，后者则基于可折叠集装箱能够降低空箱调运总成本的优势，提出同时使用标准集装箱与可折叠集装箱，以更好地适应不同

需求。
不同运输方式组合下的空箱调运研究汇总表如表3所示。

1.2.2 多阶段多周期的空箱调运问题

空箱大多由重箱转换而来，因此空箱调运问题具有周期性的特点，上一周期到达的重箱会成为下一周期需要调运的空箱。在多式联运中，货物运输需要转换不同的运输方式，空重箱的转换更加频繁，空箱调运问题变得更加复杂，同时空箱的产生量及需求量等信息实时更新，是一个动态离散过程，因此有必要将整个计划期划分成多个时段并且多周期地进行研究。

集装箱班轮运输的班期具有一定的规则性和固定性，往往具有固定的发班频率，且港口服务按周执行，因此港口空箱的供给量也会呈现周期性^[45]。

表3 不同运输方式组合下的空箱调运研究汇总表

Tab.3 Summary of empty container repositioning research under the combination of different transportation modes

文献	研究焦点	问题结构	目标函数	模型/求解方法	算例
Yu 等 ^[42] (2022)	公铁联运空箱分配和转运问题	S+F+DSD	成本最小	MCFP+贪心-最短路快速算法(Greedy-SPFA)	模拟算例
El Yaagoubi 等 ^[43] (2021)	公铁联运集装箱装卸优化	S+F	移动次数最小	Anylogic 仿真+CPLEX	巴黎地区的公铁联运码头为例
Wang 等 ^[44] (2017)	公铁联运集装箱分配策略	S+F	空箱库存最小	两阶段优化模型+遗传算法	模拟算例
蔡佳芯等 ^[45] (2020)	多港口共享内陆腹地空箱调运	S+F+DD	成本最小	MIP+CPLEX	辽宁沿海港口群—东北腹地
Yu 等 ^[46] (2018)	海陆联运集装箱滞留决策	S+F+TW	利润最大	两阶段博弈模型	数值实验
Xie 等 ^[47] (2017)	海铁联运中的空箱分配与协调	S+F+DSD	利润最大	集中式模型+分散式模型	数值实验
邢磊等 ^[48] (2019)	海铁联运中欧班列空箱调运	M+F+DD	成本最小	MILP+CPLEX	模拟算例

注：MCFP：最小费用流问题。

詹斌等^[49]允许无水港间的空箱调运，建立了一个多周期混合整数规划模型，以优化区域海港群与内陆无水港群间的空箱调运模式。徐华锋等^[22]和蔡佳芯等^[45]则都对海陆协同中港口与其直接腹地之间的空箱调运问题进行了研究，都考虑了“单站对多港”服务模式，但二者侧重点不同，前者侧重于“共享”，而后者侧重于“公共腹地”。

考虑到空箱储存的周期性变化和空箱运输的动态性，Song 等^[50]建立了多港口不确定环境下的空箱调运优化模型，并提出一种两阶段粒子群优化算法(PSO)求解该模型；而 Tang 等^[51]结合集装箱共享策略，构建了调运总成本最低、网络稳定的多周期空箱调运优化模型；Hosseini 等^[52]则结合一种新的辅助机会约束规划，建立了多周期优化模型，以便

在数据短缺的情况下得到高质量的空箱调运方案。

针对多商品多周期空箱调运问题，Song 等^[53]结合空箱调运问题的动态性和随机环境，提出了时空多商品网络流模型、基于始发链路的网络流模型和基于路径的两阶段网络流模型3个网络流模型和1个库存控制模型，并基于物流渠道范围提出了解决多商品多周期空箱调运问题的4类解决方案；Misra 等^[54]则考虑到不同货物具有不同的时间限制，提出了一种结合连续时间表示与多重网格离散时间框架的新型混合时间表示，以研究复杂的多商品多周期航运库存路径问题。

多阶段多周期的空箱调运研究汇总表如表4所示。

表4 多阶段多周期的空箱调运研究汇总表

Tab.4 Summary of multi-stage and multi-period empty container repositioning research

文献	研究焦点	问题结构	目标函数	模型/求解方法	算例
詹斌等 ^[49] (2022)	区域海港与无水港间空箱调运	S+IF	成本最小	MIP+CPLEX	北部湾3港和其内陆无水港群
Song 等 ^[50] (2022)	供需不确定多港口空箱调运	S+F+DSD	成本最小	两阶段粒子群优化(TS-PSO)算法	长三角地区港口(太仓港、南通港和张家港港)
Tang 等 ^[51] (2021)	集装箱共享策略	S+F+SA	成本最小	ILP+GA+Lyapunov 优化算法+LP 软件包	中欧班列每周固定班次列车
Hosseini 等 ^[52] (2019)	不确定性空箱调运	M+IF	成本最小	机会约束规划+CPLEX	模拟算例
Song 等 ^[53] (2014)	空箱调运的建模方法与解决方案	—	—	网络流模型+库存控制模型+动态规划	—
Misra 等 ^[54] (2020)	海运库存路径规划问题	S+F	—	混合时间离散化+滚动地平线策略	—

1.2.3 考虑费用目标的空箱调运问题

货物多式联运规划的3个层次相互依存,相辅相成,不可分割,在这整个过程中,费用目标都需要被考虑在内^[55]。但费用目标对于运输服务的规划至关重要,而运输服务规划往往被归于战术规划层次,并且战术规划问题还涉及服务选择问题、运输能力分配、频率规划问题以及货物的转运问题等,这些问题会分别产生运营费用、租赁费用、燃油消耗费用和转运费用,都会对费用目标产生较大影响^[56]。

在多式联运空箱调运问题的战术层研究中,大多数研究的费用目标是空箱调运总成本最小,少部分将空箱调运问题与重箱运输协同考虑的研究费用目标为利润最大^[46-47],以及极少部分空箱调运相关研究的目标为移动次数最少、空箱库存最小等其他目标^[43-44]。因此,空箱调运研究的目标类型大致可被分为3类,分别是成本最小、利润最大和其他目标。考虑费用目标的空箱调运研究汇总表如表5所示。

表5 考虑费用目标的空箱调运研究汇总表
Tab.5 Summary of empty container repositioning research considering cost target

目标类型	参考文献
成本最小	Xing等 ^[21] (2021)、徐华锋等 ^[22] (2022)、Zhang等 ^[36] (2020)、Yu等 ^[42] (2022)、蔡佳芯等 ^[45] (2020)、邢磊等 ^[48] (2019)、詹斌等 ^[49] (2022)、Song等 ^[50] (2022)、Tang等 ^[51] (2021)、Hosseini等 ^[52] (2019)
利润最大	Yu等 ^[46] (2018)、Xie等 ^[47] (2017)
其他目标	El Yaagoubi等 ^[43] (2021)、Wang等 ^[44] (2017)

在成本最小为费用目标的空箱调运研究中,成本构成基本都包括空箱调运成本、空箱储存成本和空箱租赁成本,少部分研究还将购箱成本^[36,48]、装卸成本^[36]和缺箱相关的惩罚成本^[52]考虑在内,其中使用可折叠箱的空箱调运研究的成本构成还包括可折叠箱的折叠和展开成本^[48],以及在港口安装可折叠集装箱专用设备的摊销固定成本^[36]。

在利润最大为费用目标的空箱调运研究中,计算公式基本都是重箱运输收入减去空箱管理成本,包括空箱调运成本和空箱滞留费用^[46-47]。其中,Yu等^[46]考虑到空箱滞留在陆港时,还可将空箱租出以获得收益,因此空箱滞留费用不能仅用滞留费率来计算,还需考虑空箱在腹地从事出口货物业务的机会成本。

除了以上2类目标类型之外,El Yaagoubi等^[43]提出以空箱移动次数最少为目标,旨在优化码头存储区域使用的堆栈和装卸集装箱的非生产性移动,从而减少总装卸时间;Wang等^[44]考虑以集装箱重叠量和起重机作业距离来计算最小空箱库存,该方法对公铁联运集装箱转运码头的生产和管理具有重要意义。

空箱调运研究目标构成和计算要素分析表如表6所示。

表6 空箱调运研究目标构成和计算要素分析表
Tab.6 Target composition and calculation element analysis table of empty container repositioning research

目标类型	目标构成	计算要素
成本最小	空箱调运成本	距离、运价率、空箱数量
	空箱储存成本	单位储存成本、空箱数量
	空箱租赁成本	单位租赁成本、逾期费用、退租费用、空箱数量
	购箱成本	集装箱单价、空箱数量
	装卸成本	空箱数量
	惩罚成本	时间
	可折叠箱的折叠和展开成本	可折叠箱数量
利润最大	在港口安装可折叠集装箱专用设备的摊销固定成本	—
	重箱运输收入	重量、货物价值
	空箱调运成本	距离、运价率、空箱数量
空箱移动次数最少	空箱滞留费用	滞留费率、空箱收入机会成本
	空箱库存最小	—
空箱库存最小	—	集装箱重叠量、起重机作业距离

1.3 运营层

运营规划问题往往涉及到动态性和随机性问题,目标是在最小化成本的同时最大化系统的可靠性。在多式联运空箱调运问题的运营层问题主要有:考虑不确定性和库存控制问题。

1.3.1 不确定性下的空箱调运问题

不确定性问题是空箱调运领域中的热点问题,在很大程度上影响货物运输计划的规划与执行,进一步影响空箱调运规划的成本控制。由于码头的额外使用和货物的转运,多式联运与单一模式运输相比,具有更多的不确定性来源^[57]。不确定性主要包

括供需不确定性、时间不确定性和运输干扰。

空箱供需的不确定性与空箱调运系统内外部供需的不确定性有关,内部供需即指对空箱库存有影响的事件:集装箱的损坏和合作方的需求,外部供需则是指始发港对空箱的需求和目的港对空箱的供给^[50]。在空箱调运的需求不确定性方面,Wong等^[4]、Von Westarp等^[58]、Bakir等^[59]和Chen等^[60]在空箱调运研究中分别将空箱需求激增、空箱需求视为模糊变量、未来需求变化和需求概率分布未知的情况考虑在内。计明军等^[61]、Tang等^[62]和石红国等^[63]则都同时考虑了空箱的供给和需求随机性对空箱调运的影响。

空箱调运过程是动态的,存在到达时间的不确定性,空箱过早和过晚地到达港口或货运站会产生不必要的库存和机会损失费用^[63-64]。李永军等^[65]考虑到空箱运输过程中走行时间的不确定性对时间窗

的影响;石红国等^[63]和闵德权等^[66]则分别将时间窗作为目标函数和约束条件来进行空箱调运的优化研究,其中石红国等^[63]在模型中还考虑了空箱供需的随机性。

空箱调运过程中存在意外事件、突发状况等运输干扰,不仅会影响空箱调运计划的执行,还会降低空箱调运的效率。Hariga等^[67]考虑到空箱调运中存在的随机运输干扰因素,提出了以协调重箱和空箱的随机流动以及最小化供应链范围成本为目标的混合整数非线性方案。Zhou等^[68]通过可分离分段线性学习算法(SPELL)来近似期望成本函数,从而建立了空箱调运问题的两阶段随机规划模型,以减少运输中不确定的低效率,有效地进行空箱分配。

不确定性环境下的空箱调运研究汇总表如表7所示。

表7 不确定性环境下的空箱调运研究汇总表
Tab.7 Summary of empty container repositioning research in uncertain environments

文献	研究焦点	问题结构	目标函数	模型/求解方法	算例
Delbart等 ^[57] (2021)	多式联运与协同运输中的不确定性文献综述	—	—	—	—
Wong等 ^[4] (2015)	集装箱重新定位优化	S+F+DD	利润最大	动态约束线性规划+MATLAB	模拟算例
Von Westarp等 ^[58] (2016)	空重箱协同调运优化	S+F+DD	利润最大	MILP+FLP	模拟算例
Bakir等 ^[59] (2022)	需求不确定空箱调运	S+F+DD	成本最小	两阶段鲁棒模型+鲁棒优化+滚动地平线框架	模拟实例
Chen等 ^[60] (2022)	库存与运输联合优化	S+F+DD	成本最小	NSP+最大负债优先策略+启发式算法	模拟算例
计明军等 ^[61] (2014)	不确定目的港空箱调运	S+F+DP+DSD	成本最小	MCFP+GA	营口、大连、厦门、深圳、广州5个港口
Tang等 ^[62] (2023)	供需随机性空箱调运	S+F+DSD	成本最小	循环计算法+GA	营口港、大连港和烟台港
石红国等 ^[63] (2020)	同时考虑空箱供需和到达时间约束的随机性	S+F+DSD+TW	成本最小+满意度最大	双目标随机机会约束模型+基于TOPSIS的限定参数区间搜索算法	模拟算例
胡建鹏等 ^[64] (2020)	具有时间不确定和最低排空要求的空箱调运	M+F+TW	最低排空+效益最大	双层规划模型+NP+CPLEX	模拟算例
李永军等 ^[65] (2016)	时间不确定空箱调运	S+F+TW	成本最小	鲁棒优化+ILP+Lingo15.0	模拟算例
闵德权等 ^[66] (2022)	时间不确定空箱调运	S+F+TW	成本最小	MCFP+改进遗传模拟退火算法	模拟算例
Hariga等 ^[67] (2016)	考虑随机运输干扰因素的空箱调运	S+F+DT	成本最小	MINP+回归分析	模拟算例
Zhou等 ^[68] (2020)	考虑不确定性的集装箱分配问题	S+F+DSD	成本最小	两阶段随机规划模型+SPELL+CPLEX	数值实验

注: NP: 非线性规划; NSP: 非线性随机规划; FLP: 模糊线性优化; DP: 不确定、随机港口; DT: 动态、随机运达时间; MINP: 混合整数非线性规划; SPELL: 可分离分段线性学习算法。

1.3.2 考虑库存因素的空箱调运问题

集装箱具有双重属性，重箱状态下作为装载工具运输，空箱状态下作为货物进行运输。集装箱在空箱状态下就要和普通货物一样，考虑其库存问题。对空箱库存进行控制和优化主要包括空箱库存策略、空箱库存阈值和空箱库存与调运联合优化等方面^[14]。

在空箱库存策略方面，Chen等^[60]在研究集装箱空箱中转系统的库存和运输问题的联合优化中，在库存方面考虑了自有空箱的库存控制策略，提出了空箱库存优化模型。Lu等^[69]首先为避免租赁成本的快速增长采用库存策略满足港口的临时需求，其次提出了基于启发式规则的多周期最小库存成本模型来解决空箱调运问题，该模型能够满足需求港口在不同时期、受各种约束条件下的所有空箱需求。Xie等^[47]以陆港多式联运为研究对象，研究了多式联运中空箱库存的共享与协调问题，通过描述集中式模型中陆港和海港之间的最优交货策略来探索最优政策与陆港和海港空箱初始库存的关系。

在空箱库存阈值方面，Dong等^[70]通过在某次航线中跳过一些港口来动态调整航线挂靠的港口顺序，以控制挂靠港口的空箱库存存在阈值范围内。蔡佳芯等^[71]通过动态规划使港口空箱库存量保持在优化区间(D，U)内，以所有周期的总成本最小化为目标，验证(D，U)策略下的区域港口群空箱调运方案的有效性。Chao等^[72]建立了一个适于大规模数学问题的时-空模型来处理冷藏空箱的调运问题，模型中要求各个港口的空箱库存保持在安全范

围内。

在空箱库存与调运联合优化方面，Wang等^[5]将空箱库存和调运作为一个整体考虑，并基于排队论，建立以空箱库存调运总成本最小为目标的空箱调运模型。Poo等^[73]在航运中将集装箱空箱调运问题和集装箱库存管理问题相结合进行研究，以明确空重箱比例为目标，通过人工蜂群算法将其转化为空箱调运模型，来实现港口间的空箱均衡。杨华龙等^[74]同时考虑了空箱调运途中产生的在途库存持有成本、租赁成本和调运成本，结合近洋班轮运输多港挂靠循环航线，建立了考虑在途成本的滚动多航班班轮空箱调运优化模型。

考虑库存因素的空箱调运研究汇总表如表8所示。

2 潜在研究方向

基于上述对集装箱多式联运空箱调运问题的研究现状与趋势的把握，提出以下2个潜在研究方向。

2.1 协同运输中的空箱调运问题

随着物流业的发展和全球贸易的增长，通过协调不同运输系统之间的合作与协作，多式联运正逐渐向协同运输转变。协同运输是一系列多式联运运输系统的最新一代，增加了灵活模式选择和基于实时信息的决策，旨在通过结合多种运输模式来提高运输系统的整体效率并提供需求驱动的运输服务^[75-76]。

相较于传统多式联运，协同运输增加了扩展门、推拉系统和开放式模式预定3个重要概念，进

表8 考虑库存因素的空箱调运研究汇总表
Tab.8 Summary of empty container repositioning research considering inventory factors

文献	研究重点	问题结构	目标函数	模型/求解方法	算例
Lihua等 ^[69] (2016)	基于库存策略的多周期最小成本空箱调运优化	S+F	成本最小	多周期最小库存成本模型(MP-MCMS)+仿真+CPLEX	模拟算例
Dong等 ^[70] (2020)	滚装运输的航线规划和库存管理问题	S+F+TW+DP	收益最大	MIP+库存阈值约束+Xpress	模拟算例
蔡佳芯等 ^[71] (2022)	空箱存储与调运联合优化	S+F	成本最小	MIP+动态规划+库存控制策略+CPLEX	辽宁沿海港口群—东北腹地
Chao等 ^[72] (2015)	考虑港口库存阈值的冷藏空箱调运	R+F+DD	成本最小	MCFP+LP+CPLEX	模拟算例
Poo等 ^[73] (2019)	集装箱空箱调运和库存管理问题相结合	S+F+DSD	利润最大	网络模型+人工蜂群算法	模拟算例
杨华龙等 ^[74] (2014)	考虑在途库存成本的滚动多航班空箱调运	S+IF	成本最小	IP+Lingo软件包	模拟算例

一步提高运输效率和运输灵活性^[77]。扩展门即多式联运码头,可直接连接到港口使用高容量的运输;在推拉系统中,集装箱直接由驳船或火车从海港运输到内陆码头,有效减少集装箱在海港的不当延误;开放式预定模式则基于托运人偏好允许货运代理灵活地选择运输模式和及时地在几种可用模式之间切换,大大增加了灵活性。

Behdani 等^[78]的研究表明,实现协同运输必须实现固定资源、移动资源和客户需求这3个维度的协同,这就涉及平衡整个货运过程中的供应(固定和移动资源)和需求,空箱调运是其中一个重要策略。港口和内陆码头的空箱库存会影响供需稳定,灵活的空箱调运策略能够有效平衡运力,降低运输成本并缓解供需不平衡的问题^[79]。

相较于传统多式联运,协同运输的高度灵活性和信息实时性能够进一步提高空箱调运的效率,但目前还没有相关文献证实这一点。因此,如何实现空箱调运模式的灵活选择、如何基于空箱实时信息做出调运决策,以及如何在空箱调运问题中充分利用协同运输通过实时模式变化而提供的灵活性来降低调运总成本等问题将是未来的研究重点。

2.2 考虑托运人需求偏好的空箱调运问题

多式联运日渐发展,供应链日益相互关联,托运人要求更高水平的运输服务,托运人偏好因素在货物运输领域中越来越重要^[80]。Vinod 和 Baumol 最早建立了一个托运人选择模型来描述具有成本、时间、可靠性和安全性等属性的模式选择^[81]。从此,学者们开始进行托运人偏好与货物运输相关问题相结合的研究。

托运人的需求偏好针对整个货物运输过程,是对运输服务的偏好,主要体现为对运输成本、时间、可靠性和可持续性等具体属性的偏好。而整个运输过程包括空箱的调运和重箱的运输,且空箱调运是重箱运输的前提。已有研究往往关注托运人偏好在重箱运输中的重要性,例如,许多研究在货物多式联运路径规划和运输网络设计中考虑了托运人偏好因素。Chen 等^[82]在集装箱远洋运输系统优化模型中将托运人选择惯性考虑在内;Cheng 等^[83]在 Chen 等^[82]的基础上提出了托运人双重偏好的概念,并将其融入在集装箱班轮运输网络设计中。Duan

等^[84]在货物运输的服务网络设计中考虑到托运人偏好的异质性,即托运人考虑不同的属性或对相同属性有不同的评价;Zhang 等^[85]进一步在协同运输路径规划中考虑了托运人异质偏好的模糊性,并基于多属性决策(MADM)模型对其进行了量化。

尽管在如何以更高效的方式进行多式联运重箱运输方面已经取得了很大进展,但很少有研究关注在制定空箱调运计划时融入托运人的需求偏好。空箱的调运优化实质也是为了满足托运人的运输需求,为托运人提供更满意的运输服务,从而进一步提高货物多式联运的服务质量。因此,包括货运代理、租箱公司、运输公司等角色在内的服务提供者有必要在制定空箱调运方案时考虑托运人的需求偏好,进一步提高运输服务水平。

即,托运人对运输成本、时间、可靠性等具体属性的偏好会对多式联运空箱调运规划产生不同的影响。例如,当托运人注重时效性时,货运代理会第一时间选择调运或是租赁最近的空箱,以确保空箱能按时抵达起运点;而当托运人重视运输成本时,货运代理会考虑在合适的时机将空箱与重箱一同运输,这能最大程度地降低货物运输的成本^[67]。Wang 等^[86]考虑到托运人对运输成本的偏好,提出了基于运价需求递减的概念,设计出一种调整运费以实现利润最大化的机制,从而解决集装箱分配问题。但多式联运空箱调运涉及多个托运人,而不同托运人的不同偏好之间存在属性冲突,例如,降低运输成本意味着运输时间的延长^[85]。为了获得结果最优、满意度最高的多式联运空箱调运方案,有必要选择适当的方法来解决这些冲突。因此,考虑托运人偏好的多式联运空箱调运决策将是未来值得研究的方向。

3 总结

近些年许多学者针对航运、海铁联运、铁路运输、海陆联运和江河联运等多个运输方式及其组合的空箱调运问题进行了研究,综合应用了库存理论、共享策略、最优化理论等方法从多个角度寻求空箱调运的最优方案。但考虑到目前协同运输的快速发展以及空箱流向不平衡的问题突出,并且大多数空箱调运问题都仅有总成本最小化这一个目标,

这也在一定程度上不符合实际情况。基于此本综述提出考虑协同运输背景和托运人需求偏好2个未来研究方向。

将空箱调运、协同运输和托运人需求偏好三者结合起来进行研究更是一个潜在的研究重点。三者结合的目标是优化整体运输效益,空箱调运可能会带来一定的运输成本,但如果能够通过合理的组织和资源配置,使得协同运输的整体效益超过这部分成本,就可以实现双赢的局面。因此,在制定协同运输方案时,需要综合考虑不同角色的利益,找到平衡点,推动各方共同合作,实现整体效益最大化。合作伙伴应具备相关能力和资源,能够满足托运人的偏好和需求。同时,密切的沟通和协调也是成功实施协同运输的关键。确保信息的共享和协同,促进各方的利益一致性,共同推动协同运输的实施。

参考文献:

- [1] CASTRELLON J P, SANCHEZ-DIAZ I, ROSO V, et al. Assessing the Eco-Efficiency Benefits of Empty Container Repositioning Strategies via Dry Ports[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 120: 103778.
- [2] CRAINIC T G, GENDREAU M, DEJAX P. Dynamic and Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers[J]. Operations Research, 1993, 41(1): 102–126.
- [3] LOPEZ E. How Do Ocean Carriers Organize the Empty Containers Reposition Activity in the USA?[J]. Maritime Policy & Management, 2003, 30(4): 339–355.
- [4] WONG E Y C, TAI A H, RAMAN M. A Maritime Container Repositioning Yield-Based Optimization Model with Uncertain Upsurge Demand[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 82: 147–161.
- [5] WANG Q B, WANG Z W, ZHENG J F. Joint Optimization of Inventory and Repositioning for Sea Empty Container Based on Queuing Theory[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(6): 1097.
- [6] DEJAX P J, CRAINIC T G. Survey Paper: A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation[J]. Transportation Science, 1987, 21(4): 227–248.
- [7] 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 Qingkai, HU Xiangpei, SUN Lijun. Empty Container Allocation: Status and Perspectives[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(6): 1578–1586.
- [8] WHITE W W, BOMBERAULT A M. A Network Algorithm for Empty Freight Car Allocation[J]. IBM Systems Journal, 1969, 8(2): 147–169.
- [9] WHITE W W. Dynamic Transshipment Networks: An Algorithm and Its Application to the Distribution of Empty Containers[J]. Networks, 1972, 2(3): 211–236.
- [10] LAI K K, LAM K, CHAN W K. Shipping Container Logistics and Allocation[J]. Journal of the Operational Research Society, 1995, 46(6): 687–697.
- [11] CHOONG S T, COLE M H, KUTANOGLU E. Empty Container Management for Intermodal Transportation Networks[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2002, 38(6): 423–438.
- [12] LEI L, FAN C X, BOILE M, et al. Collaborative Vs. Non-Collaborative Container-Vessel Scheduling[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(3): 504–520.
- [13] STEADIESEIFI M, DELLAERT N P, NUIJTEN W, et al. Multimodal Freight Transportation Planning: A Literature Review[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 233(1): 1–15.
- [14] 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, 110.
- JIN Zhihong, XING Lei, CAI Jiaxin, et al. Review on Empty Container Repositioning[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(1): 52–60, 110.
- [15] KUZMICZ K A, PESCH E. Approaches to Empty Container Repositioning Problems in the Context of Eurasian Intermodal Transportation[J]. Omega, 2019, 85: 194–213.
- [16] 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 Chuanxu, CHEN Feiyan. Optimal Empty Container Reposition with Collaboration among Shipping Companies Based on Multiple Ports[J]. Journal of Systems &

- Management, 2016, 25(3): 539–545.
- [17] STERZIK S, KOPFER H, YUN W Y. Reducing Hinterland Transportation Costs through Container Sharing[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2015, 27(2): 382–402.
- [18] 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, 50.
- SUN Jiaqing, LIU Mingli, XU Linkun, et al. Optimization of Empty Container Allocation under Shared Mode[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2019, 40(3): 14–20, 50.
- [19] 邢玉伟, 杨华龙, 储飞飞. 基于互租战略的班轮联盟空箱调运[J]. 大连海事大学学报, 2016, 42(1): 101–106.
- XING Yuwei, YANG Hualong, CHU Feifei. Empty Container Reposition in Liner Alliance Based on Mutually Renting Strategy[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2016, 42(1): 101–106.
- [20] 郭金鑫, 史立, 管明静. 战略联盟下的班轮公司集装箱联合调度问题[J]. 计算机仿真, 2018, 35(6): 362–366, 389.
- GUO Jinxin, SHI Li, GUAN Mingjing. Container of Company Alignment Joint Scheduling Problem under the Strategic Alliance[J]. Computer Simulation, 2018, 35(6): 362–366, 389.
- [21] XING L, YAN H, YIN Y D, et al. Research on the Optimization of Empty Container Repositioning of China Railway Express in Cooperation with International Liner Companies[J]. Sustainability, 2021, 13(6): 3182.
- [22] 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 Huafeng, WANG Yuhong, HONG Cheng. A Sharing Mode Based Synergy of Sea and Rail for Repositioning of Inland Empty Containers within Port Clusters[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2022, 35(3): 81–88.
- [23] 徐文思, 张荣. 航运公司合作下的海运冷藏箱空箱调租优化模型[J]. 大连海事大学学报, 2016, 42(4): 105–111.
- XU Wensi, ZHANG Rong. Optimal Model of Maritime Empty Reefer Repositioning and Leasing under Shipping Companies' Cooperation[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2016, 42(4): 105–111.
- [24] 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 Yujie, HAN Xiaolong. Fuzzy Optimization Model of Maritime Empty Container Repositioning under the Cooperation of Shipping Companies[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 151–156.
- [25] IRANNEZHAD E, PRATO C G, HICKMAN M. The Effect of Cooperation among Shipping Lines on Transport Costs and Pollutant Emissions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 65: 312–323.
- [26] 朱星龙, 汤银英, 陈思. 基于集装箱共享的中欧班列空箱调租优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1571–1577.
- ZHU Xinglong, TANG Yinying, CHEN Si. Optimization of Empty Container Repositioning and Renting in China Railway Express Based on Container Sharing Strategy[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6): 1571–1577.
- [27] 王林, 肖功向, 郭云罗, 等. 考虑集结中心的中欧班列空箱共享调运优化[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2022, 44(6): 944–949.
- WANG Lin, XIAO Gongxiang, GUO Yunluo, et al. Optimization of Empty Container Sharing Dispatching in China-Europe Railway Express Considering the Assembly Center[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2022, 44(6): 944–949.
- [28] RIESSEN B V, NEGENBORN R R, DEKKER R, et al. Service Network Design for an Intermodal Container Network with Flexible Transit Times and the Possibility of Using Subcontracted Transport[J]. International Journal of Shipping and Transport Logistics, 2015, 7(4): 457.
- [29] ZHENG J F, SUN Z, ZHANG F J. Measuring the Perceived Container Leasing Prices in Liner Shipping Network Design with Empty Container Repositioning[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 94: 123–140.
- [30] WANG Q, ZHENG J F, LU B. Liner Shipping Hub Location and Empty Container Repositioning: Use of Foldable Containers and Container Leasing[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 237: 121592.

- [31] JEONG Y, KIM G. Reliable Design of Container Shipping Network with Foldable Container Facility Disruption[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 169: 102964.
- [32] AKYÜZ M H, LEE C Y. Service Type Assignment and Container Routing with Transit Time Constraints and Empty Container Repositioning for Liner Shipping Service Networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 88: 46–71.
- [33] JEONG Y, SAHA S, CHATTERJEE D, 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.
- [34] MALCHOW U. Tworty Box to Improve the Equipment Logistics of Container Lines[J]. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2016, 10(2): 323–330.
- [35] SHINTANI K, KONINGS R, IMAI A. Combinable Containers: A Container Innovation to Save Container Fleet and Empty Container Repositioning Costs[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 130: 248–272.
- [36] 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.
- [37] LEE S, MOON I. Robust Empty Container Repositioning Considering Foldable Containers[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 280(3): 909–925.
- [38] MOON I, HONG H. Repositioning of Empty Containers Using both Standard and Foldable Containers[J]. Maritime Economics & Logistics, 2016, 18(1): 61–77.
- [39] 张亚梅, 胡坚堃, 黄有方. 海上折叠集装箱空箱调运优化[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 149–154.
ZHANG Yamei, HU Jiankun, HUANG Youfang. Optimization of Empty Container Transportation for Folding Containers at Sea[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 149–154.
- [40] GOH S H. The Impact of Foldable Ocean Containers on back Haul Shippers and Carbon Emissions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 67: 514–527.
- [41] 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.
- [42] YU M Z, YU Z S, JIN B, et al. Empty Container Allocation and Transshipment in Road-Rail Transportation Network[C]//2022 IEEE International Symposium on Product Compliance Engineering-Asia (ISPCE-ASIA). November 4–6, 2022, Guangzhou, Guangdong Province, China. IEEE, 2022: 1–6.
- [43] EI YAAGOUBI A, ESSAGHIR Y, BOUKACHOUR J, et al. Optimization-Simulation of Container Handling Operations in a Rail/Road Intermodal Terminal: A Case Study of Moissy-Cramayel[C]//ICoSCaL21 International Conference on Smart Corridors and Logistics. Institut pour une Logistique Intelligente en Vallée de Seine. November 24–26, 2021, Le Havre, Normandy, France. ICoSCaL21, 2021: 43–46.
- [44] WANG L, ZHU X, XIE Z. Container Assignment Optimization Considering Overlapping Amount and Operation Distance in Rail-Road Transshipment Terminal[J]. Advances in Production Engineering & Management, 2017, 12(4): 363–374.
- [45] 蔡佳芯, 邢磊, 靳志宏. 腹地场站共享的区域港口群空箱调运优化[J]. 大连海事大学学报, 2020, 46(3): 1–10.
CAI Jiaxin, XING Lei, JIN Zhihong. Optimization of Empty Container Transportation in Regional Ports Group Shared by Hinterland Stations[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2020, 46(3): 1–10.
- [46] YU M Z, FRANSOO J C, LEE C Y. Detention Decisions for Empty Containers in the Hinterland Transportation System[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 110: 188–208.
- [47] 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.
- [48] 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 Lei, YANG Zhenhua, XU Qi, 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.
- [49] 詹 斌, 李宇涵, 冯国帅, 等. 无水港参与下的区域海港群空箱调运优化[J]. 中国航海, 2022, 45(2): 86–92.
- ZHAN Bin, LI Yuhan, FENG Guoshuai, et al. Optimization of Empty Container Allocation for Regional Sea Port Group with Dry Port Involved[J]. Navigation of China, 2022, 45(2): 86–92.
- [50] SONG J Y, TANG X, WANG C X, et al. Optimization of Multi-Port Empty Container Repositioning under Uncertain Environments[J]. Sustainability, 2022, 14(20): 13255.
- [51] 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.
- [52] HOSSEINI A, SAHLIN T. 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(4): 585–602.
- [53] SONG D P, DONG J X. Empty Container Repositioning[M]. International Series in Operations Research & Management Science. Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [54] 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.
- [55] ZHANG H Z, LU L H, WANG X F. Tactical and Operational Cooperative Empty Container Repositioning Optimization Model Based on Business Flow and Initial Solutions Generation Rules[J]. Symmetry, 2019, 11(3): 300.
- [56] PASHA J, DULEBENETS M A, KAVOOSI M, et al. Holistic Tactical-Level Planning in Liner Shipping: An Exact Optimization Approach[J]. Journal of Shipping and Trade, 2020, 5(1): 8.
- [57] DELBART T, MOLENBRUCH Y, BRAEKERS K, et al. Uncertainty in Intermodal and Synchromodal Transport: Review and Future Research Directions[J]. Sustainability, 2021, 13(7): 3980.
- [58] VON WESTARP A G, SCHINAS O. A Fuzzy Approach for Container Positioning Considering Sustainable Profit Optimization[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 92: 56–66.
- [59] BAKIR I, ERERA A, SAVELSBERGH M. A Robust Rolling Horizon Framework for Empty Repositioning[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 144: 103903.
- [60] CHEN K, LU Q Y, XIN X, et al. Optimization of Empty Container Allocation for Inland Freight Stations Considering Stochastic Demand[J]. Ocean & Coastal Management, 2022, 230: 106366.
- [61] 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 Mingjun, WANG Qingbin, ZHANG Xinyu, 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.
- [62] TANG X, XU C Y, WANG C X, et al. A Study on the Influence of Reposition Threshold on Low-Carbon Empty Container Repositioning Strategy under an Uncertain Environment[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1174395.
- [63] 石红国, 高明瑶. 带时间窗约束的集装箱空箱调运随机机会约束模型研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(2): 87–92.
- SHI Hongguo, GAO Mingyao. A Study on Stochastic Opportunity Constraint Model of Empty Container Transportation with Time Window Constraints[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(2): 87–92.
- [64] 胡剑鹏, 罗 霞, 甘易玄. 基于时间窗和最低排空要求的集装箱空箱调运优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(7): 79–85.
- HU Jianpeng, LUO Xia, GAN Yixuan. Optimization of Empty Container Transfer Based on Time Windows and Minimum Evacuation Requirements[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(7): 79–85.
- [65] 李永军, 段 刚, 陈 莉, 等. 基于技术站改编作业的集装箱空箱调运鲁棒优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(3): 583–589.

- LI Yongjun, DUAN Gang, CHEN Li, et al. Robust Optimization on Railway Empty Container Allocation under Reclassifying Operation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(3): 583–589.
- [66] 闵德权, 孙海萍. 基于GASA的带时间窗航空箱调运模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 8–13.
- MIN Dequan, SUN Haiping. Model of Empty Container Transportation with Time Window Based on GASA[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(6): 8–13.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] LU L H, ZHANG H Z, WANG X F, et al. Multiple Periods Minimal Cost Programming Optimization Model for Empty Containers Repositioning with Stock Level[J]. International Journal of Hybrid Information Technology, 2016, 9(8): 265–276.
- [70] 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.
- [71] 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.
- CAI Jiaxin, LI Yubo, WANG Xiaohan, et al. Inventory-Repositioning Integrated Optimization of Empty Container in Port Group Based on (D, U) Control Strategy[J]. Control and Decision, 2022, 37(11): 3012–3022.
- [72] CHAO S L, CHEN C C. Applying a Time-Space Network to Reposition Reefer Containers among Major Asian Ports[J]. Research in Transportation Business & Management, 2015, 17: 65–72.
- [73] POO M C P, YIP T L. An Optimization Model for Container Inventory Management[J]. Annals of Operations Research, 2019, 273(1): 433–453.
- [74] 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 Hualong, ZHANG Xindi, WANG Ruijuan, 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.
- [75] TAVASSZY L, BEHDANI B, KONINGS R. Intermodality and Synchromodality[M]. Ports and Networks. Abingdon, Oxon; New York, NY: Routledge, 2017.
- [76] KHAKDAMAN M, REZAEI J, TAVASSZY L A. Shippers' Willingness to Delegate Modal Control in Freight Transportation[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 141: 102027.
- [77] PFOSER S, TREIBLMAIER H, SCHAUER O. Critical Success Factors of Synchromodality: Results from a Case Study and Literature Review[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 1463–1471.
- [78] BEHDANI B, FAN Y, WIEGMANS B, et al. Multimodal Schedule Design for Synchromodal Freight Transport Systems[J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2014: 424–444.
- [79] SAKTI S, ZHANG L L, THOMPSON R G. Synchronization in Synchromodality[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 179: 103321.
- [80] VAN RIESSEN B, NEGENBORN R R, DEKKER R. Synchromodal Container Transportation: An Overview of Current Topics and Research Opportunities[M]. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [81] BAUMOL W J, VINOD H D. An Inventory Theoretic Model of Freight Transport Demand[J]. Management Science, 1970, 16(7): 413–421.
- [82] CHEN K, CHEN D X, SUN X S, et al. Container Ocean-Transportation System Design with the Factors of Demand Fluctuation and Choice Inertia of Shippers[J]. Transportation

- Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 95: 267–281.
- [83] CHENG Q, WANG C X. Container Liner Shipping Network Design with Shipper's Dual Preference[J]. Computers & Operations Research, 2021, 128: 105187.
- [84] DUAN L W, TAVASSZY L A, REZAEI J. Freight Service Network Design with Heterogeneous Preferences for Transport Time and Reliability[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 124: 1–12.
- [85] ZHANG Y M, LI X L, VAN HASSEL E, et al. Synchronodal Transport Planning Considering Heterogeneous and Vague Preferences of Shippers[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 164: 102827.
- [86] WANG S A, LIU Z Y, BELL M G H. Profit-Based Maritime Container Assignment Models for Liner Shipping Networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 72: 59–76.
- (责任编辑 魏 然)

(上接第81页)

- Circulation Planning With Flexible Train Compositions: A Column-Generation-Based Approach[J]. European Journal of Operational Research, 2023, 305(1): 184–206.
- [45] TAI G X, HUANG Y N, LI C C, et al. An Optimization Method of Train Scheduling for Urban Rapid Rail Transit Based on Flexible Train Composition Mode[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(3): 195–203.
- [46] ALEKSANDR B, OKSANA M. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work[J]. Transportation Research Procedia, 2021, 54: 559–567.
- [47] BOHLIN M, GESTRELIUS S, DAHMS F, et al. Optimization Methods for Multistage Freight Train Formation[J]. Transportation Science, 2016, 50(3): 823–840.
- [48] UPADHYAY A, BOLIA N B. An Optimization Based Decision Support System for Integrated Planning and Scheduling on Dedicated Freight Corridors[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(24): 7416–7435.
- [49] 陈雍君, 周磊山. 基于序优化方法的列车运行调整算法研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(3): 1–8.
- CHEN Yongjun, ZHOU Leishan. Study on Train Operation Adjustment Algorithm Based on Ordinal Optimization[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(3): 1–8.
- [50] 王迎春. 朔黄铁路综合调度系统的分析与设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [51] 李荣娜. 朔黄重载铁路列车运行调整的模型与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- (责任编辑 金 晶)