

# 集装箱海铁联运运输组织优化研究综述

靳志宏<sup>1</sup>, 王小寒<sup>1</sup>, 易天培<sup>1</sup>, 左忠义<sup>2</sup>

(1. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 大连交通大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116028)

**摘要:**多式联运是集装箱运输组织的高级形态,而海铁联运作为两种运输批量最大的运输方式的组合,具有其他联运方式所无法比拟的规模与成本优势。近年来,随着中欧集装箱班列规模的不断扩大,我国海铁联运虽然得到了迅猛发展,但是与发达经济体 20%~40%海铁联运占比相比较,我国占比不到 3%还有巨大的增长空间。鉴于此,基于海铁联运运输组织优化的“软衔接”视角,从港站堆场资源配置协同、换装作业协同、班列开行方案优化三个维度对集装箱海铁联运相关研究进行梳理和评述,并提出潜在研究方向,以期对集装箱海铁联运的运输组织优化提供决策参考。

**关键词:**海铁联运;集装箱;港站资源配置;换装作业协同;班列开行方案

**文献标识码:**A **DOI:**10.13291/j.cnki.djdxac.2024.01.001

近年来我国交通运输由单一运输方式各自发展向各种运输方式协同发展转变,取得了长足的进步。随着对外贸易的发展,集装箱海铁联运因其集成了集装箱运输、水路运输和铁路运输的运量大、成本低、安全性高、绿色高效、衔接便利等优势,在多式联运中的地位日益凸显,是运输结构调整的关键突破口。国务院办公厅印发的《推进多式联运发展优化调整运输结构工作方案(2021—2025年)》提出,到2025年,多式联运发展水平明显提升,基本形成大宗货物及集装箱中长距离运输以铁路和水路为主的发展格局。由此可见,为提高综合交通运输体系的经济效益、降低社会物流成本,集装箱海铁联运未来仍是我国主要货运发展方向。

海铁联运是指通过衔接、协调和转换等方式将铁路运输和水路运输有机地结合在一起,进出口货物由船舶运输至港口,经换装设备转运,与铁路运输相连,全程仅需“一次申报、一次查验、一次放行”。海铁联运兴起于西方国家,发达经济体的海铁联运比例高达 20%~40%,我国占比还不足 3%,但是发展势头持续攀升,如图 1 所示。后劲十足的海铁联运打开了现代物流发展新局

面,连接内陆与沿海、国内与海外产业链,将不断促进国内国际双循环发展。

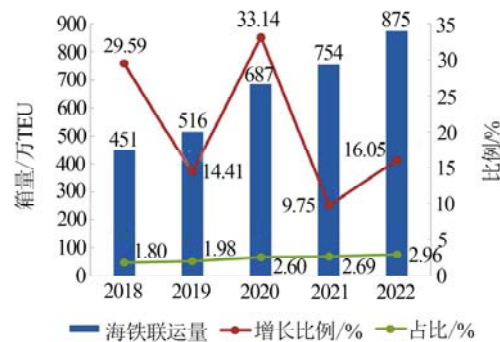


图 1 近五年我国海铁联运量、占比及增长情况

海铁联运的关键在于“联”,提升水路运输和铁路运输的衔接能力和协同水平,是海铁联运实现新突破亟待解决的重要问题。近年来,港口与铁路间的“硬衔接”条件显著改善,但其间的“软衔接”严重滞后,“连而不畅、邻而不接”问题仍然突出。集装箱海铁联运陆港衔接主要包括基础设施“硬衔接”和运输组织“软衔接”两大方面。“硬衔接”是对集装箱港口、铁路集装箱中心站、海铁联运港站等海铁联运基础设施的配置与协同;“软衔接”则是对港站堆场资源配置、换装作业、

收稿日期:2023-10-03

基金项目:国家自然科学基金项目(72172023、72171032、72202025);教育部人文社科基金项目(21YJA630048)

第一作者:靳志宏(1963—),男,教授。E-mail:jinzhihong@dltmu.edu.cn

班列开行方案优化等运输组织方面的协同。

国内外对有关集装箱海铁联运的综述鲜有报道,仅秦磊<sup>[1]</sup>从发展对策和评价研究两个角度对海铁联运相关文献进行了系统性综述,尚未有文献对集装箱海铁联运陆港衔接问题进行总结。鉴于此,本文从港站堆场资源配置协同、换装作业协同、班列开行方案优化三个维度,对国内外海铁联运运输组织优化问题进行整理和归纳,对研究现状进行述评,并据此提出潜在研究方向。

## 1 研究现状梳理

### 1.1 港站堆场资源配置协同研究现状

海铁联运堆场包括共堆场和分堆场两种空间布局。顾名思义,共堆场是指港口与铁路共用堆场,海铁联运集装箱堆存在港口堆场,铁路装卸线铺设在码头前沿或港口后方。分堆场是指铁路与港口分别拥有独立堆场,铁路装卸线铺设在港口后方,依据双方合作和共享程度,海铁联运集装箱可堆存在铁路堆场与港口堆场的一方或双方。

堆场资源配置协同问题主要包括两个方面,其一是战术层面的堆存空间分配问题,即为到达港站的集装箱合理分配堆存区域位置,以及安排每个区域堆存的箱量。根据堆存区域的范围,该问题可具体分为箱区分配和堆场分配两个子问题。其二是操作层面的堆存位置指派问题,即为集装箱分配具体的箱位,包括贝、排、层三个维度。

#### (1) 海铁联运集装箱堆场分配问题

分堆场是我国海铁联运港站常见布局,如大连港、宁波舟山港、钦州港等,是堆场分配问题决策海铁联运集装箱选择堆存的堆场。

基于共享堆场协议,靳志宏等<sup>[2]</sup>综合考虑运输、装卸、堆存与短捣四项费用,构建以转运总费用最低为目标的线性规划模型,研究班轮到港时间与班列到站时间不一致情形下的堆场分配问

题,并选取堆场容量、免费堆存期、转运费等因素进行灵敏度分析。以最小化集装箱作业距离和超期堆存成本为目标,曾庆成等<sup>[3]</sup>建立海铁联运集装箱堆场分配模型,并利用分支定界法求解铁路堆场和港口堆场的堆存箱量。Xie等<sup>[4]</sup>首次研究海铁联运码头的集装箱预堆存和动态装卸问题,以在港总物流成本为目标构建随机动态优化模型,决策装卸时间窗内堆场至铁路缓冲区的静态预存箱量,卸载时间窗内列车至堆场、装载时间窗内堆场(和/或铁路缓冲区)至列车的动态箱流量。在研究中欧班列在运输节点中转操作问题时,Guo等<sup>[5]</sup>考虑了部分公路中转箱可从港口堆场转移至铁路堆场而转化为铁路中转箱的情形,结果表明,与未考虑转移策略相比,考虑转移策略的总收益较优。基于铁路、支线船、内河船、外集卡组成的港口集疏运系统,Schepler等<sup>[6]</sup>以最小化船舶和列车加权周转时间为目标,探讨集装箱在港区多码头间的运输问题。

#### (2) 海铁联运集装箱箱区分配问题

箱区是箱位的集合,堆场由多类型箱区组成。箱区分配是为到达港站的集装箱分配堆存箱区。港口箱区分配问题研究起步早,成果较为丰富,如Carlo等<sup>[7]</sup>对其进行了比较深入的总结。箱区分配研究目标通常为均衡各箱区间作业量、最小化集装箱移动、最小化运输工具在港时间等。

海铁联运堆场箱区分配问题的研究远滞后于港口,如表1的汇总。武慧荣等<sup>[8]</sup>将海铁联运混堆堆场作业箱分为6种类型,基于滚动计划方法构建箱区分配模型,优化目标为各箱区作业量均衡,并设计模拟退火算法进行求解。Chang等<sup>[9]</sup>、曾庆成等<sup>[3]</sup>建立两阶段模型研究海铁联运堆场资源管理问题,其中Chang等<sup>[9]</sup>在第一阶段决策了到场集装箱的堆存箱区,优化目标为箱区作业量均衡,曾庆成等<sup>[3]</sup>基于第一阶段堆场分配结果,

表1 海铁联运集装箱箱区分配文献汇总

作者(年份)	模型特点	研究内容	目标函数	求解算法
王力等(2015)	ILP	箱区分配	箱区间作业量均衡	启发式算法
Zeng等(2017)	MILP	轨道吊调度+箱区分配	最小化装卸完工时间	回溯搜索算法
武慧荣等(2018)	ILP	箱区分配	箱区间作业量均衡	模拟退火算法
Chang等(2019)	TSM	箱区分配+箱位指派	箱区间作业量均衡、压箱量最小	模拟退火算法+启发式算法
曾庆成等(2020)	TSM	堆场分配+箱区分配	箱区作业量均衡、集卡作业距离最短、超期堆存成本最少	分支定界+启发式算法

注:ILP—整数线性规划;MILP—混合整数线性规划;TSM—两阶段模型。

第二阶段同时考虑箱区作业量均衡和缩短集装箱作业总距离两个目标,为到港集装箱分配箱区。基于既定的到离场时间,王力等<sup>[10]</sup>以各箱区作业量均衡为目标,决策铁路堆场箱区分配问题,并设计启发式算法进行求解,通过与随机堆存策略对比验证所提出模型与算法的有效性。针对铁路集装箱中心站主堆场多箱区,Zeng等<sup>[11]</sup>认为卸载箱区影响堆场作业效率,将箱区分配作为子问题来集成优化主堆场装卸资源和空间资源。

### (3) 海铁联运集装箱箱位分配问题

集装箱堆存位置不合理会导致二次翻箱甚至多次翻箱。从单贝位角度研究箱位分配问题时,学者们通常引入压箱量或倒箱量来评价集装箱堆存状态,利用优先级描述集装箱的属性,如集装箱离场时间、重量、目的港挂靠顺序等。压箱量为待作业箱上方不满足优先级的集装箱数量,属于静态指标;翻箱量细化了待作业箱上方阻碍箱的落箱位选择不合理而导致的再翻箱,属于相对动态指标。从多贝位角度,场桥作为堆场瓶颈资源,减少其在贝位间的移动是十分必要的。国内外学者对港口堆场箱位分配的研究较成熟,Lersteau等<sup>[12]</sup>给出了较全面的综述,随着海铁联运的发展,理论界开始关注海铁联运堆场和铁路堆场箱位分配问题。

从单贝位角度,计明军等<sup>[13]</sup>运用滚动计划方法构建动态箱位指派模型,以提箱时间作为优先级,目标函数为最小化压箱量,优化“同卸同装”模式下的海铁联运集装箱堆存位置。综合考虑海铁联运集装箱的重量、离场时间、目的港挂靠顺序等属性,Chang等<sup>[9,14-15]</sup>构建多阶段箱位指派模型,旨在降低堆场压箱量。Li等<sup>[16]</sup>基于船舶配载计划获取海铁联运出口箱的目的港和重量属性,以压箱量最小为目标构建箱位分配模型,引入调车作业计划中的解体问题来设计求解算法。基于

已知的船舶配载计划,常祎妹等<sup>[17]</sup>根据装船顺序属性设定集装箱优先级,考虑铁路箱分批到达和公路箱随机到达特点,以压箱量最小为目标建立铁路堆场箱位指派模型,并设计启发式算法进行求解。武慧荣等<sup>[18]</sup>仅考虑集装箱离场时间属性,以最小化压箱量为目标建立模型,设计基于滚动计划的启发式算法,解决“船舶-堆场-列车”换装模式下混堆堆场箱位分配问题。段刚等<sup>[19]</sup>探讨零散箱箱位分配问题,假设集装箱到离站时间既定,以倒箱次数最小化为目标构建动态箱位分配模型,并设计遗传算法求解。考虑提箱时间属性,王力等<sup>[20-21]</sup>和Wang等<sup>[22]</sup>以压箱量最小为目标建立模型,解决铁路集装箱堆场箱位分配问题。

从多贝位角度,Dotoli等<sup>[23]</sup>考虑离场时间和箱型属性,以最大化堆存箱量为目标构建整数规划模型,并提出决策支持系统求解最佳集装箱堆存位置。基于抵港班列入场顺序和离港时间,任刚等<sup>[24]</sup>考虑最小化压箱量和场桥移动贝位数,探讨海铁联运进口箱箱位分配问题。王小寒等<sup>[25]</sup>将集装箱贝位分配问题作为铁路堆场资源分配与调度子问题,考虑最小化轨道吊移动成本和最大化轨道吊作业均衡率,建立双目标优化模型,为“列车-堆场”流向的集装箱分配堆存贝位。考虑能耗和效率指标,Yang等<sup>[26]</sup>将影响场桥作业的海铁联运出口箱箱位分配作为子决策之一,研究海铁联运码头多设备集成调度与堆存位置分配问题。Wang等<sup>[27]</sup>考虑集装箱到站和离站时间属性,以及偏好堆存区域,研究铁路集装箱混堆堆场箱位分配问题,优化目标为最小化压箱量和轨道吊移动距离。郭鹏等<sup>[28]</sup>在研究铁路集装箱中心站轨道吊调度问题时考虑了翻箱作业的影响,并提出用阶梯恶化函数表示翻箱作业。

表2总结了上述海铁联运集装箱箱位分配的相关研究文献。

表2 海铁联运集装箱箱位分配文献汇总

作者(年份)	研究区域	优化范围	属性	箱流	目标函数	求解方法
段刚等(2011)	RCT	单贝位	DT	I&O	最小化倒箱次数	遗传算法
王力等(2013)	RCT	单贝位	DT	I&O	最小化压箱量	启发式算法
Wang等(2017)						
武慧荣等(2015)	SRICT	单贝位	DT	I&O	最小化压箱量	启发式算法
计明军等(2016)	RCT	单贝位	DT	I&O	最小化压箱量	启发式算法
Li等(2017)	SRICT	单贝位	W+DP	O	最小化压箱量	启发式算法
Chang等(2019)	SRICT	单贝位	W+DT	I	最小化压箱量	启发式算法

表2(续)

作者(年份)	研究区域	优化范围	属性	箱流	目标函数	求解方法
Chang 等(2019)	SRICT	单贝位	W+DT+DP	0	最小化压箱量	启发式算法
常祎妹等(2020)	RCT	单贝位	VL	0	最小化压箱量	启发式算法
Dotoli 等(2017)	RCT	多贝位	DT+CT	0	最大化堆存箱量	决策支持系统
郭鹏等(2019)	RCT	多贝位	—	I&O	最小化装卸完工时间	阶梯恶化函数
Yang 等(2019)	SRICT	多贝位	—	0	最小化装卸完工时间、 最小化设备能耗	遗传算法
Wang 等(2020)	RCT	多贝位	DT	I&O	最小化压箱量、最小化 场桥移动距离	基于仿真的智能算法
王小寒等(2021)	RCT	多贝位	—	0	最小化轨道吊移动 成本、最大化轨道吊 作业均衡率	三层混合智能算法
任刚等(2022)	SRICT	多贝位	DT	I	最小化压箱量、最小化 场桥移动贝位数	启发式算法

注:RCT—铁路集装箱中心站;SRICT—海铁联运集装箱港站;I—进口;O—出口;DT—离场时间;W—重量;DP—目的港挂靠顺序;VL—装船顺序;CT—箱型。

## 1.2 换装作业协同研究现状

海铁联运集装箱换装模式主要包括“水-公-铁”、“水-堆场-铁”(“船舶-堆场-铁路”)、“车船直取”(“列车-船舶”)3种。不同运输方式间的交接质量和效率与换装设备的衔接密切相关。常用的换装设备包括码头前沿岸桥、内集卡、堆场场桥、外集卡、铁路堆场轨道吊、正面吊等。

### (1) 单一设备调度优化

区别于传统海运集装箱,海铁联运集装箱特殊换装设备为轨道吊。轨道吊是铁路集装箱中心站主堆场关键装卸资源,横跨主堆场、铁路装卸线、集卡通道,负责到离站集装箱装卸、堆存和倒箱作业。

多轨道吊协同调度优化涉及任务分配和作业顺序两个子问题。轨道吊任务分配实质上可理解为轨道吊作业范围的划分,包括固定作业范围和柔性作业范围。关于固定作业范围,王力等<sup>[29]</sup>基于等分作业范围将装卸任务分配给轨道吊,以装卸完工时间最小为目标构建多轨道吊调度优化模型。王小寒等<sup>[25,30]</sup>和Ren等<sup>[31]</sup>综合考虑轨道吊重载和空载移动,以最大化轨道吊总移动距离均衡率为目标建立模型,探讨轨道吊动态作业区域问题。针对柔性作业范围,刘勇等<sup>[32]</sup>引入允许作业时间概念,研究了轨道吊数量配置和柔性调度优化问题,同时考虑轨道吊运营成本、作业时间、作业量,建立多目标规划模型,并设计基于使用权

分配的遗传算法进行求解。周勇等<sup>[33]</sup>考虑多轨道吊间的干扰和安全距离约束,以最小化装卸完工时间为目标建立模型,解决多轨道吊协同调度问题,通过与固定作业范围下的顺序装卸模式相比,验证其提出的柔性调度模式的优越性。Guo等<sup>[34]</sup>和郭鹏等<sup>[28]</sup>引入最小时间距离概念来处理多轨道吊间的非交叉和安全距离约束,研究多轨道吊调度问题。

### (2) 两种设备间的协同调度

两种设备间的协同调度主要针对轨道吊与集卡间的协同调度。基于“车船直取”和“船舶-堆场-列车”两种换装模式,李舒仪等<sup>[35]</sup>以卸车作业完工时间最小化为目标建立轨道吊与集卡协同调度模型,结果表明,车船直取箱占比较高时应增加轨道吊数量以提高装卸效率。王小寒等<sup>[25,30]</sup>和Ren等<sup>[31]</sup>提出在铁路主堆场采用“轨道吊-集卡”装卸工艺,考虑成本、作业效率和能耗等指标,探讨轨道吊与集卡协同调度问题。Jeong等<sup>[36]</sup>研究集装箱转运问题,决策进出口集装箱匹配、集卡停靠位置和轨道吊调度三个子问题。基于“轨道吊-集卡”装卸工艺,Li等<sup>[37]</sup>构建轨道吊和集卡协同调度优化模型,优化目标为最小化装卸完工时间、设备空驶时间和能耗,并设计人工蜂群算法求解问题。Tschöke等<sup>[38]</sup>为提高公铁集装箱转运效率,研究“轨道吊-多拖车”装卸工艺下集卡停靠位置和轨道吊调度协同优化问题,并与单AGV(智

能导引车, Automatic Guided Vehicle) 运输模式和不同集装箱分配方案进行了对比试验。

### (3) 多种设备间的协同调度

考虑轨道吊、集卡、正面吊在卸车作业中的竞争性因素,王清斌等<sup>[39]</sup>构建非合作博弈的协同调度模型,并设计遗传算法进行求解,结果表明,考虑竞争因素可显著提高作业任务间的公平性。蒋惠园等<sup>[40]</sup>分别以最小化完工时间和最大化边际效益为目标建立两阶段模型,研究双高集装箱列车到发时的轨道吊、AGV、场桥、空箱堆垛机与智能举升机的协同调度与最优配置问题。常祎妹等<sup>[41]</sup>考虑装卸设备走行速度和提放箱时间变化等不确定因素,以装卸完工时间最小为目标构建优化模型,探讨“车船直取”模式下岸桥、集卡、轨道吊的集成调度问题,并在多层遗传算法中引入蒙特卡罗法确定随机变量的取值。刘文茜等<sup>[42]</sup>研究“铁路-堆场”换装流程下轨道吊、集卡与场桥的协同调度问题,以最小化作业完工时间和设备空驶时间为目标建立模型,在约束中考虑了集装箱作业顺序的优先级,并且设计基于析取图的变邻域禁忌搜索算法求解问题。Chang 等<sup>[43]</sup>考虑集卡堵塞、轨道吊干扰等现实约束,研究“铁路-堆场”换装模式下轨道吊、集卡和场桥的协

同调度问题,并在数值试验中给出了特定算例下 3 种设备的最佳配比。基于混合流水车间调度思想,杨宜佳等<sup>[44]</sup>以作业完工时间最短和能耗最低为目标建立岸桥、集卡、正面吊协同调度模型。Liu 等<sup>[45]</sup>提出铁路箱和公路箱均堆存在港口堆场,以最小化完工时间、设备等待时间和内集卡空驶时间为目标,建立多目标优化模型,解决轨道吊、集卡、场桥的集成调度问题,并结合仿真技术和自适应大邻域搜索算法求解问题。针对“轨道吊-内集卡-正面吊”装卸工艺,Yan 等<sup>[46]</sup>以最小化装卸完工时间和设备等待时间为目标构建模型,对多设备协同调度问题进行优化。基于动态固定作业区域,Li 等<sup>[47]</sup>研究 U 型自动化码头堆场与铁路间轨道吊、AGV 和双悬臂场桥间的集成调度问题,以集装箱运输时间最小为目标建立模型,并设计基于 ADMM 框架的启发式算法对模型进行重构和分解。Liu 等<sup>[48]</sup>构建 U 型自动化海铁联运码头的场桥、AGV 和集卡的双层协同调度模型,考虑场桥装卸完工时间、AGV 和集卡等待时间、AGV 运输时间,决策场桥作业顺序、AGV 任务分配和 AGV 运输路径。

表 3 汇总了上述海铁联运换装设备衔接的相关研究文献。

表 3 海铁联运换装设备衔接文献汇总

作者(年份)	换装模式				换装设备					目标函数			
	①	②	③	④	轨道吊	集卡/拖车/AGV	场桥	岸桥	正面吊/堆垛机	T	C	B	E
Jeong 等(2011)	√	√			√	√				√			
刘勇等(2014)		√			√					√	√	√	
王力等(2014)	√	√			√					√			
常祎妹等(2017)				√	√	√		√		√			
Guo 等(2018)		√			√					√			
Tschöke 等(2018)	√				√	√				√			
Yan 等(2018)		√			√	√			√	√			
杨宜佳等(2018)		√	√		√	√		√		√			√
Chang 等(2019)		√			√	√	√			√			
王清斌等(2020)	√	√			√	√			√	√			
李舒仪等(2021)		√	√	√	√	√				√			
Ren 等(2021)		√			√	√				√	√	√	√
王小寒等(2021)		√			√						√	√	
Li 等(2022)		√			√	√				√			√
刘文茜等(2022)		√			√	√	√			√			
Liu 等(2022)		√	√			√	√			√			

表3(续)

作者(年份)	换装模式				换装设备					目标函数			
	①	②	③	④	轨道吊	集卡/拖车/AGV	场桥	岸桥	正面吊/堆垛机	T	C	B	E
周勇等(2022)		√			√					√			
王小寒等(2022)		√			√	√				√		√	
蒋惠园等(2023)	√	√			√	√	√		√	√			
Li等(2023)		√			√	√	√			√			
Liu等(2023)		√			√	√	√			√			

注:①—公-铁;②—堆场-列车;③—船舶-堆场;④—车船直取;T—最小化作业时间;C—最小化作业成本;B—最大化轨道吊作业均衡率;E—最小化能耗。

### 1.3 班列开行方案优化研究现状

国内外对海铁联运集装箱列车开行方案的研究主要从“点”和“线”两个维度展开。

#### (1) 基于“点”视角

“点”可理解为集装箱海铁联运港站。基于“点”的视角,Yan等<sup>[49-50]</sup>基于既定的到港集装箱数量和列车编组,为提高车船直取进口箱量、降低进口箱在港停留时间,研究列车开行时间和集装箱转运方案。在此基础上,以最小化堆存成本、转运成本和延迟成本在内的联运集装箱作业成本为目标建立模型,综合决策列车开行时间、运行方向和转运方案问题。邓夕贵等<sup>[51]</sup>运用列车开行时间推算卸船时间,考虑最小化海铁联运集装箱在港停留时间和班列开行成本,建立双层规划模型,优化集装箱卸船顺序、列车编组数量、列车在始发港的开行时间等问题。针对海铁联运集疏运系统,Ng等<sup>[52]</sup>考虑重箱和空箱,以最大化双层列车利用率为目标,建立模型,提出列车流向和装载方案。

#### (2) 基于“线”视角

基于“线”视度,江雨星等<sup>[53-54]</sup>基于货物时间和数量特征,考虑集装箱与班列间的匹配关系,将列车编成箱数和发车间隔作为约束条件,分别以集装箱在始发站总停留时间最小和送达终点站总延误最小为目标,构建优化模型,决策班列始发时刻和沿线开行时刻。基于公铁联运网络,Khobotov等<sup>[55]</sup>考虑列车开行时间窗,运用机器调度理论决策列车到离沿线各站的时间。Crainic等<sup>[56]</sup>从战术规划角度,构建海港与干港间的时空网络模型,综合考虑列车运营成本、运输成本、装卸成本、集装箱堆存成本以及增值服务成本,决策列车开行路径和开行时间。Newman等<sup>[57]</sup>综合考虑堆存、运输和装卸成本,研究集装箱与沿线直达和集结班列的匹配问题。Hu等<sup>[58]</sup>构建时空网络

模型讨论多码头间列车调度问题,决策列车运输路径、停靠时刻以及货运量等子问题。为评估潜在货物与班列开行间的适配度,张家瑞等<sup>[59]</sup>通过运输时效特征来量化潜在货流预期收益函数,综合考虑确定货流和潜在货流,以最大化运输收益为优化目标,构建多商品流模型来反映班列和货流网络间的映射关系。考虑海铁联运网络繁忙度和排队模式两种不确定拥堵因素,Yuan等<sup>[60]</sup>以最小化总运输成本和重分配成本建立列车重分配随机优化模型,通过嵌入超立方体空间排队模型预估队列长度和等待时间,并提出近似超立方体迭代算法进行求解。张小强等<sup>[61]</sup>以最大化铁路企业运输收益为目标函数,建立班列沿线开行方案和定价的综合时变优化模型,并设计积压控制与价格优化BCPO算法,将时变网络离散为单一时隙。

近几年,中欧班列逐渐成了研究热点。薛峰等<sup>[62]</sup>考虑直达班列和集结班列,构建混合轴辐式中欧班列运输网络,以班列运营成本最小化为目标建立中欧班列开行方案优化模型,结果表明,与全直达运输模式相比,混合轴辐式网络可大幅度节省运输时间。胡梦影等<sup>[63]</sup>构建中欧班列运营质量评价体系,以最大化综合运营收益为目标,建立中欧班列动态开行方案模型,决策开行枢纽、开行频率和运量。针对中欧班列运输路径重叠问题,张琦等<sup>[64]</sup>考虑货物时间价值和运输时效性,建立中欧班列服务网络优化模型,决策枢纽点选择和货运量。魏玉光等<sup>[65]</sup>研究中欧班列运输组织优化问题,基于直达运输和集结运输两种模式,以综合运输费用和站场改建费用最小化为目标,建立模型,优化路径选择、枢纽选址、列车开行频率和货运量等问题。王臻杰等<sup>[66]</sup>考虑运输规模和拥堵效应,探讨中欧班列集散中心选址与流量分配问题,基于直达与集结混合开行模式,构建双

层规划模型,上层模型以最大化社会福利为目标决策选址问题,下层考虑运输成本建立随机用户均衡的网络配流模型决策运输路径问题,结果表明,新增集散中心可缓解拥堵。为解决中欧班列在阿拉山口存在进出境列车不平衡和衔接不畅等困境,Liu 等<sup>[67]</sup>以最小化口岸总集装箱小时数为

目标,建立模型,决策去回程列车匹配和列车开行时刻。Yin 等<sup>[68]</sup>考虑时间成本、运输成本和碳排放,建立中欧班列开行方案模型,决策运营路径、开行频率和收货方式,并设计模拟退火算法进行求解。

表 4 汇总了上述班列开行方案优化研究现状。

表 4 班列开行方案优化相关文献汇总

作者(年份)	角度	研究内容	研究目标	模型类型	算法类型
Ng 等(2020)	点	列车流向、列车装载	最大化双层列车利用率	MINLP	Cplex
Yan 等(2020)	点	列车调度、集装箱换装	最小化总成本	MINLP	有效不等式 基于回溯策略的可变长度
Yan 等(2020)	点	列车调度、集装箱换装	最小化进口箱滞留时间、 最大化直取进口箱比例	MINLP	滚动周期算法
邓夕贵等(2021)	点	卸船顺序、列车编组和时刻表	最小化海铁联运集装箱 在港滞留时间和班列 开行成本	TLM	遗传算法
Newman 等(2000)	线	集装箱与列车匹配	最小化总运营成本	MILP	拉格朗日松弛和 Benders 分解
Crainic 等(2015)	线	列车开行路径和时刻表	最小化总运营成本	MILP	Cplex
Khobotov 等(2016)	线	列车时刻表	最小化列车到站时间 和延误时间	ILP	机器调度理论
Hu 等(2018)	线	列车运输路径、时刻表和货运量	最小化总运营成本	ILP	禁忌搜索算法
张小强等(2018)	线	列车时刻表和定价	最大化铁路运营收益	MINLP	BCPO 算法
Liu 等(2019)	线	去回程列车匹配、列车时刻表	最小化口岸总集装箱 小时数	MINLP	遗传算法
江雨星等(2020)	线	集装箱与列车匹配、列车时刻表	最小化集装箱延误	MILP	Benders 分解
江雨星等(2020)	线	列车时刻表	最小化集装箱在站停留 时间	MINLP	遗传算法
Yin 等(2020)	线	列车运输路径、开行频率、 收货方式	最小化总运营成本	MINLP	模拟退火算法
张琦等(2020)	线	枢纽点选择、铁路货运量	最小化综合运输成本	MINLP	遗传算法
王臻杰等(2021)	线	枢纽选址、列车运输路径	最大化社会福利,最小化 运输成本	TLM	遗传算法+MSA
魏玉光等(2022)	线	列车运输路径、枢纽选址、 开行频率、货运量	最小化综合运输费用 和站场改建费用	ILP	Gurobi
薛峰等(2022)	线	列车运输路径、时刻表和货运量	最小化总运营成本	ILP	Cplex
胡梦影等(2023)	线	开行频率、枢纽选址和货运量	最大化综合运营收益	INLP	求解器
Yuan 等(2023)	线	列车重分配	最小化总运输成本 和重分配成本	SPM	近似超立方体迭代算法
张家瑞等(2023)	线	集装箱与列车匹配、列车运输 路径和时刻表	最大化列车开行收益	MCFM	Gurobi 求解器

注:MINLP—混合整数非线性规划;INLP—整数非线性规划;TLM—双层模型;MCFM—多商品流模型;SPM—随机规划模型。

## 2 研究现状述评

### 2.1 关于港站堆场资源配置协同

相较于港口,海铁联运起步晚、发展较缓慢,海铁联运港站堆场资源配置协同方面的研究远不如港口成熟。分析上述港站堆场资源配置协同的研究现状,具有如下特点:

(1) 针对堆场分配问题,多数文献关注共堆场布局,将港口堆场和铁路堆场视为一个整体。我国大多数海铁联运港站采用分堆场布局,港口堆场和铁路堆场是分离的,分属于不同的经营主体。随着联合协作意识加强,港方与铁方开始建立资源开放共享的合作关系,催生了堆场分配问题,以破解因一方空间资源紧张而无法及时满足客户需求的困境。现有文献对不同经营主体堆存空间共享问题的关注度不高,仅有的几篇文献集中于成本指标,忽略了转运设备的影响,研究缺乏一定的全局性。

(2) 针对箱区分配问题,多数文献直接套用海运集装箱堆场管理理论和方法,在挖掘海铁联运集装箱自身属性方面稍有欠缺。部分文献采用两阶段思路研究箱区分配和箱位分配两个子问题,第一阶段研究箱区分配问题,基于第一阶段的既定箱区,第二阶段决策箱位分配问题。

(3) 针对箱位分配问题,多数文献都是从静态角度展开研究,优化目标多是 minimized 压箱量,很少从动态角度考虑阻碍箱落箱位的滞后影响;研究角度更加深入,从单贝位逐渐深入至多贝位;研究目标也更加多元化,不仅考虑了堆场堆存状态目标,还考虑减少作业设备移动目标;由于箱位分配问题属于 NP-hard 问题,文献多采用启发式规则或者智能算法求解。

### 2.2 关于换装作业协同

(1) 固定作业范围可简化装卸桥调度问题,柔性作业范围下,装卸桥移动灵活,但需持续关注装卸桥的干扰约束,调度方式更加复杂。现有文献中,固定作业范围的衡量指标过于单一,要么仅考虑任务数量均衡,要么仅考虑装卸桥移动距离均衡。基于柔性作业范围的装卸桥调度多以装卸效率作为优化目标,忽略了装卸桥作业均衡目标。

(2) 多数文献研究传统的海铁联运码头换装设备调度、列车装卸工艺和运输技术也缺乏新意。在绿色低碳政策引领下,智慧型海铁联运码头的建设势在必行。虽然文献[47]和[48]研究了自

动化海铁联运码头换装设备调度问题,但是美中不足,文献[47]忽略了与船舶的衔接,文献[48]中忽略了与列车的衔接。

(3) 聚焦于铁路集装箱中心站主堆场,大多数文献认为仅由轨道吊负责列车装卸和集装箱中转操作,仅有4篇文献从节约成本、提高装卸效率角度出发,提出采用“轨道吊-集卡”联合装卸方案。

(4) 现有文献多集中于海铁联运换装设备调度问题,而较少关注设备配置问题,仅有的几篇文献,且多是运用灵敏度分析方法展开浅层次讨论。

### 2.3 关于班列开行方案优化

班列开行方案设计的研究具有如下特点:

(1) 从“线”角度展开的研究主要是决策列车运输路径、开行时刻表、开行频率和货运量等问题,更多地关注集装箱的铁路运输属性,而难以体现海运属性。与“线”的角度相比,聚焦于“点”的文献相对较少,而“点”的角度更能反映海铁联运系统对班列开行方案的影响,尤其是换装模式。本文总结的几篇集中于“点”的班列开行方案优化的文献,对船舶和列车间有效衔接的研究层次不够,例如,文献[49]和文献[50]忽略了船舶和列车运输批量的衔接,文献[51]有悖于列车为港口提供集疏运服务的初衷,文献[52]忽略了与海运端的衔接。

(2) 海铁联运集装箱具有数量、时间和流向三大特征。数量特征与列车开行频率和装载方案密切相关,时间特征影响着列车开行时间,列车流向与集装箱流向一致是硬性约束。现有文献大多关注一种或者两种特征,对三大特征的刻画和提炼缺位。

(3) 多数研究均考虑确定性需求,然而,实际业务中,到港集装箱可能选择公、铁、水三种集疏运方式,同时,铁路运营商需提前制定列车开行方案,因此,海铁联运集装箱三大特征均具有动态性和不确定性。不确定需求前提下的海铁联运列车开行方案中,优化模型的构建、求解算法的设计、不确定需求的转换等方面均有待深入探索。

(4) 关于中欧班列开行方案优化的研究主要解决运输路径、列车开行频率和枢纽选址问题;另外,研究层次逐渐深入,除常考虑的成本因素外,拥堵、时效性、碳排放已吸引了众多学者关注。直达班列与集结班列混合组织模式也逐渐成为研究焦点。

### 3 研究展望

#### 3.1 关于港站堆场资源配置协同

基于对港站堆场资源配置协同研究现状的把握,本文提出以下几个潜在研究方向与领域。

(1)海铁联运堆场动态堆存。动态翻箱问题复杂性较高,提箱过程中,阻碍箱落箱位选择不合理可能导致多次翻箱,翻箱属于无效作业,因而,在研究箱位分配问题时,不拘泥于待提箱,将研究视角扩展至为阻碍箱选择最佳落箱位。同时,列车和船舶到离站时间不确定是箱位分配问题的外部干扰因素,基于干扰管理理论,对海铁联运集装箱堆存方案进行动态调整具备潜在研究意义。

(2)海铁联运箱位分配与换装设备调度集成优化。海铁联运集装箱具有运输批量大、集中性强的特征。业界做法通常是同一货主集装箱同时到离站,同一船舶或者同一列车集装箱集中分布,这是区别于海运集装箱最明显的特征。属性相同集装箱集中分布虽可降低场桥移动,但是难免导致堆场拥堵,因此,集成考虑集卡拥堵、场桥移动和集装箱贝位层面的分配问题更具备应用价值。

(3)考虑停靠方案的海铁联运集装箱箱区分配。海铁联运集装箱两端分别连接着船舶和列车,比传统海运集装箱多一个环节。在优化箱区分配问题时,除常用的箱区作业量均衡之外,考虑船舶靠泊位置和列车停靠股道,优化目标权衡海铁联运集装箱在船舶、堆场和列车间的移动。

(4)基于博弈论的海铁联运堆场分配。针对分堆场布局,资源共享和合作是大趋势,堆场分配问题是未来研究热点。除成本指标外,运输工具的周转效率同样影响海铁联运服务质量,充分考虑港口堆场和铁路堆场间的合作和博弈关系,解决堆场分配问题是一个值得探索的研究方向。

#### 3.2 关于换装作业协同

(1)考虑多元化指标的装卸桥作业均衡评估。无论是固定作业范围,或是柔性作业范围,评估装卸桥作业均衡有助于提高装卸桥利用率,减少装卸桥无效作业。此外,衡量指标多元化更具合理性,诸如装卸桥移动、任务数量、完工时间等。多装卸桥作业区域的划分与港口腹地划分存在一定的相似性,从装卸效率或者成本角度出发,即使是柔性作业范围,存在装卸桥在某个作业区域内拥有绝对优势,而在另一作业区域内没有明显优势的情况,这种独立作业区域和交叉作业区域的划

分是一个有趣的研究领域。

(2)新型海铁联运码头下换装设备衔接。广西钦州港U形海铁联运码头揭开了我国海铁联运自动化码头的帷幕,青岛港空中智轨实现港口与铁路联运的“零换乘”,双层集装箱铁路运输缓解了铁路运力受限难题。在新型的布局规划、资源类型和作业组织下,换装设备衔接的研究必然需要开拓新视角。

#### 3.3 关于班列开行方案优化

根据上述分析,本文认为海铁联运集装箱班列开行方案优化的未来研究方向有:

(1)班轮与班列衔接模式设计与联合调度优化。一直以来,无论是产业界还是理论界,集装箱海运的班轮运输与铁路的班列运输之间缺乏有效衔接,两个调度子系统缺乏沟通协调。以班轮运输网络和铁路集疏运网络为平台,区别于以往海上班轮运输、铁路班轮运输独立的运作模式设计,针对两种运输模式之间在运输批量、发班频率、班次周期等方面的固定差异,班轮与班列衔接模式设计和联合调度优化等领域尚存在许多可探索的空间。

(2)不确定需求下的海铁联运列车开行方案设计。运输需求的不确定性是现实业务的真实写照,考虑动态需求来制定海铁联运列车开行方案更具有现实意义。将实际场景中的不确定需求抽象为数学表达是解决问题至关重要的一步,常用的不确定性转化方法包括机会约束、随机规划、鲁棒优化、灵敏度分析等。结合问题自身特点,选择合适的理论方法衡量不确定性特征值得深入探索。

(3)多元化中欧班列服务模式。首先,货源分配不当是中欧班列运费高涨和拥堵的根本原因,依据货源价值和时效要求,将货源合理地分配至海运和中欧班列,在一定程度上能突破中欧班列运力紧张瓶颈。其次,抓住西部陆海新通道开通这一机遇,研究中欧班列海铁联运服务模式是一个有趣的研究方向。最后,受俄乌冲突等地缘政治影响,中欧班列传统干线遭受一定冲击,运输线路的探索和增加是一个潜在研究方向。

### 4 结论

海铁联运在我国综合交通运输体系占据十分重要地位,港口与铁路间的“软衔接”不足是制约海铁联运发展的瓶颈。本文从港站堆场资源配置

协同、换装作业协同、班列开行方案优化等三个维度对国内外研究现状进行归纳整理。经梳理发现,大多数文献套用传统港口相关理论来研究海铁联运系统,存在研究角度静态化、单一化等特点。基于对研究现状的把握,提出动态化、多元化、集成化的研究方向。此外,还应关注班轮与班列班期协同、运输批量协同、空箱调运协同、“一带”与“一路”协同以及海铁联运大数据应用等。

#### 参考文献:

- [1] 秦磊. 海铁联运发展对策及评价研究综述[J]. 物流科技, 2017, 40(5): 84-88.
- [2] 靳志宏, 王小寒, 任刚, 等. 共享堆场协议下海铁联运集装箱堆场分配优化[J]. 中国航海, 2020, 43(3): 105-111.
- [3] 曾庆成, 吕明蔚. 集装箱码头堆场与港前铁路中心站协同调度模型[J]. 中国航海, 2020, 43(4): 129-134.
- [4] XIE Y, SONG D P. Optimal planning for container pre-staging, discharging, and loading processes at seaport rail terminals with uncertainty [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, 119: 88-109.
- [5] GUO S J, DIAO C J, LI G, et al. The two-echelon dual-channel models for the intermodal container terminals of the China Railway Express considering container accumulation modes [J]. Sustainability, 2021, 13(5): 2806.
- [6] SCHEPLER X, BALEV S, MICHEL S, et al. Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 100: 38-62.
- [7] CARLO H J, VIS I F A, ROODBERGEN K J. Storage yard operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235(2): 412-430.
- [8] 武慧荣, 朱晓宁, 邓红星. 集装箱海铁联运港口混堆堆场箱区均衡分配模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 109-115.
- [9] CHANG Y M, ZHU X N. A novel two-stage heuristic for solving storage space allocation problems in rail-water intermodal container terminals [J]. Symmetry, 2019, 11(10): 1229.
- [10] 王力, 朱晓宁, 谢征宇. 铁路集装箱中心站堆场空间资源均衡调度模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(增刊1): 86-90.
- [11] ZENG M, CHENG W M, GUO P. Modelling and meta-heuristic for gantry crane scheduling and storage space allocation problem in railway container terminals [J/OL]. Discrete Dynamics in Nature and Society. (2017-11-20) [2023-10-03]. <https://www.hindawi.com/journal/s/d/dns/2017/90254821>.
- [12] LERSTEAU C, SHEN W M. A survey of optimization methods for block relocation and premarshalling problems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 172: 1370.
- [13] 计明军, 黄思佳, 郭文文. 海铁联运中心站堆场箱位指派优化[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(6): 1555-1567.
- [14] CHANG Y M, ZHU X N, HAGHANI A. Modeling and solution of joint storage space allocation and handling operation for outbound containers in rail-water intermodal container terminals [J]. IEEE Access, 2019(7): 55142-55158.
- [15] CHANG Y M, ZHU X N, HAGHANI A. The outbound container slot allocation based on stowage plan in rail-water intermodal container terminals [J]. Measurement & Control, 2019, 52(5/6): 509-525.
- [16] LI Y J, ZHU X N, WANG L, et al. Stowage plan based slot optimal allocation in rail-water container terminal [J]. Journal of Control Science and Engineering. (2017-02-13) [2023-10-03]. <https://www.hindawi.com/journals/jcse/2017/54895971>.
- [17] 常祎妹, 朱晓宁. 考虑配载计划的铁路集港箱位指派[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 205-216.
- [18] 武慧荣, 朱晓宁. “船舶-堆场-列车”混堆堆场箱位分配模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(4): 198-203.
- [19] 段刚, 陈莉, 陈志忠, 等. 铁路集装箱堆场混堆区箱位分配优化模型与算法[J]. 铁路学报, 2011, 33(7): 1-7.
- [20] 王力, 朱晓宁, 谢征宇, 等. 基于混堆的铁路集装箱中心站堆场箱位指派模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(增刊1): 271-275.
- [21] 王力, 朱晓宁, 闫伟, 等. 铁路集装箱中心站堆场混堆优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(2): 172-178.
- [22] WANG L, ZHU X N, XIE Z Y. 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.
- [23] DOTOLI M, EPICOCO N, FALAGARIO M, et al. A decision support system for optimizing operations at intermodal railroad terminals [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(3): 487-501.
- [24] 任刚, 靳志宏, 庞毛毛, 等. 基于班列抵港模式的海

- 铁联运堆场箱位分配优化[J]. 大连海事大学学报, 2022, 48(1):1-10.
- [25] 王小寒, 贾玉林, 蔡佳芯, 等. 铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化[J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 3063-3073.
- [26] YANG Y J, ZHU X N, HAGHANI A. Multiple equipment integrated scheduling and storage space allocation in rail-water intermodal container terminals considering energy efficiency[J]. *Transportation Research Record*, 2019(3): 199-209.
- [27] WANG L, ZHU X N, XIE Z Y. Efficient container stacking approach to improve handling: efficiency in Chinese rail-truck transshipment terminals [J]. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 2020, 96(1): 3-15.
- [28] 郭鹏, 何迅, 许素瑕. 考虑翻箱作业的铁路集装箱中心站起重机调度[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(11):2915-2924.
- [29] 王力, 朱晓宁, 闫伟, 等. 铁路集装箱中心站轨道门吊调度优化模型与算法[J]. 铁道学报, 2014, 36(5):8-13.
- [30] 王小寒, 廉凯歌, 张海萍, 等. 铁路场站轨道吊动态配置及其与集卡协同调度[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(1):217-229.
- [31] REN G, WANG X H, CAI J X, et al. Allocation and scheduling of handling resources in the railway container terminal based on crossing crane area[J]. *Sustainability*, 2021, 13(3):1190.
- [32] 刘勇, 朱晓宁, 朱颂雅, 等. 铁水联运港站的铁路作业区轨道吊门吊优化配置[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(5):1135-1139.
- [33] 周勇, 张杰, 钟稜充, 等. 铁路集装箱中心站多轨道吊柔性协同调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(1):133-141.
- [34] GUO P, CHENG W M, WANG Y, et al. Gantry crane scheduling in intermodal rail-road container terminals [J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(16): 5419-5436.
- [35] 李舒仪, 韩晓龙. 海铁联运港口混合作业模式下轨道吊与集卡协同调度[J]. 计算机应用, 2021, 41(5): 1506-1513.
- [36] JEONG J B, KIM K H. Scheduling operations of a rail crane and container deliveries between rail and port terminals[J]. *Engineering Optimization*, 2011, 43(6): 597-613.
- [37] LI W F, DU S S, ZHONG L C, et al. Multiobjective scheduling for cooperative operation of multiple gantry cranes in railway area of container terminal[J]. *IEEE Access*, 2022, 10:46772-46781.
- [38] TSCHÖKE M, BOYSEN N. Container supply with multi-trailer trucks: parking strategies to speed up the gantry crane-based loading of freight trains in rail yards[J]. *OR Spectrum*, 2018, 40(2): 319-339.
- [39] 王清斌, 王翠萍, 肖勤飞. 基于博弈论的铁路集装箱中心站装卸作业研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(2): 73-78.
- [40] 蒋惠园, 戴婷艳, 何春贵, 等. 双高箱列车到发装卸设备配置优化研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2023, 45(4): 607-611.
- [41] 常祎妹, 朱晓宁. 不确定因素下的集装箱码头车船间装卸作业集成调度[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(6): 115-124.
- [42] 刘文茜, 朱晓宁, 王力, 等. 基于析取图的铁水联运港口设备协同调度方法[J]. 铁道学报, 2022, 44(8): 14-24.
- [43] CHANG Y M, ZHU X N, YAN B C, et al. Integrated scheduling of handling operations in railway container terminals[J]. *Transportation Letters—the International Journal of Transportation Research*, 2019, 11(7): 402-412.
- [44] 杨宜佳, 朱晓宁, 闫柏丞, 等. 考虑能耗的铁水联运集装箱装卸设备协同调度[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(6): 215-221.
- [45] LIU W Q, ZHU X N, WANG L, et al. Integrated scheduling of yard and rail container handling equipment and internal trucks in a multimodal port [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 99:1-22.
- [46] YAN B C, ZHU X N, WANG L, et al. Integrated scheduling of rail-mounted gantry cranes, internal trucks and reach stackers in railway operation area of container terminal[J]. *Transportation Research Record*, 2018, 2672(9):47-58.
- [47] LI J J, YAN L X, XU B W. Research on multi-equipment cluster scheduling of U-shaped automated terminal yard and railway yard [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(2): 417.
- [48] LIU W Q, ZHU X N, WANG L, et al. Multiple equipment scheduling and AGV trajectory generation in U-shaped sea-rail intermodal automated container terminal [J]. *Measurement*, 2022, 206(3):112262.
- [49] YAN B C, JIN J G, ZHU X N, et al. Integrated planning of train schedule template and container transshipment operation in seaport railway terminals[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 142: 102061.
- [50] YAN B C, ZHU X N, LEE D H, et al. Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals[J]. *Computers & Industrial En-*

- gineering, 2020, 141:106296.
- [51] 邓夕贵,朱逸凡,雷智鹞,等. 基于双层规划的海铁联运班列编组数量研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(6): 80-86.
- [52] NG M, TALLEY W K. Rail intermodal management at marine container terminals: loading double stack trains [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 112:252-259.
- [53] 江雨星,牛惠民. 需求响应的集装箱班列时刻表优化及 Benders 分解算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(5):191-198.
- [54] 江雨星,高翠香,牛惠民. 基于需求响应的铁路集装箱班列始发时刻优化[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(2):139-146.
- [55] KHOBOTOV E N, TARASOV M A, SHAVIN M Y, et al. On one approach to constructing timetables of freight trains in a railroad network[J]. Automation and Remote Control, 2016, 77(11): 2006-2017.
- [56] CRAINIC T G, DELL'OLMO P, RICCIARDI N, et al. Modeling dry-port-based freight distribution planning [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 55:518-534.
- [57] NEWMAN A M, YANO C A. Scheduling direct and indirect trains and containers in an intermodal setting[J]. Transportation Science, 2000, 34(3): 256-270.
- [58] HU Q, CORMAN F, WIEGMANS B, et al. A tabu search algorithm to solve the integrated planning of container on an inter-terminal network connected with a hinterland rail network [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 91:15-36.
- [59] 张家瑞,李海鹰,王莹,等. 考虑潜在货流的铁路快运班列开行方案设计[J]. 铁道学报, 2023, 45(9):12-19.
- [60] YUAN Y, GUAN Y, HUANG J G, et al. Railcar reallocation optimization on water-rail network under uncertain busyness[J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 55:101828.
- [61] 张小强,李保轶,吴桐,等. 铁路集装箱班列开行方案与定价综合优化研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(11): 1-8.
- [62] 薛锋,黄倩,李海. 基于动态运输服务网络的中欧班列开行方案优化[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(4):1-8.
- [63] 胡梦影,王莹,张家瑞,等. 中欧班列开行方案动态优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2023,45(10):27-34.
- [64] 张琦,姜昊,魏玉光,等. 基于货物时间价值的中欧班列服务网络设计[J]. 铁道学报, 2020, 42(6):12-17.
- [65] 魏玉光,谷玉锷,夏阳,等. 基于枢纽集结的中欧班列运输组织优化研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(9): 17-25.
- [66] 王臻杰,张得志,秦进,等. 考虑运输规模效应与网络拥堵的中欧班列运输网络优化[J]. 铁道学报, 2021, 43(11):18-28.
- [67] LIU W Q, ZHU X N, WANG L. Distribution organization optimization for inbound China Railway Express at Alataw Pass Railway Station[J]. Sustainability, 2019, 11(24): 6914.
- [68] YIN C Z, KE Y D, YAN Y, et al. Operation plan of China Railway Express at inland railway container center station [J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2020, 9(3): 249-262.

## Review and Prospect on Transportation Organization Optimization for Sea-Rail Intermodal Transportation

JIN Zhihong<sup>1</sup>, WANG Xiaohan<sup>1</sup>, YI Tianpei<sup>1</sup>, ZUO Zhongyi<sup>2</sup>

(1. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** Multimodal transportation is an advanced form of container transportation organization. As a combination of two transportation modes with the big batch, sea-rail intermodal transportation has scale and cost advantages that other intermodal transportation modes cannot compare. Recently, with the continuous expansion of China railway express, sea-rail intermodal transportation has been developed rapidly in our country. However, compared to developed economies with a proportion of 20%-40% in sea-rail intermodal transportation, China's less than 3% still has growth space. Herein, a summary and comment on sea-rail intermodal transportation from three dimensions are raised based on the "soft connection" perspective of transportation organization optimization, including coordination of terminal resource allocation, cooperation of transshipment operations and optimization of train operation plans. The potential research directions are proposed to provide decision-making references for transportation organization optimization on sea-rail intermodal transportation.

**Keywords:** sea-rail intermodal transportation; container; terminal resource allocation; transshipment operation coordination; train operation plan