文章编号：1003-1421(2026)05-0161-12
引用格式：刘道宽，张涵禹，王伟，等.考虑堆场布局和作业组织的车船直取比例配置研究[J].铁道运输与经济，2026，48(5)：161-172，183.
LIU Daokuan，ZHANG Hanyu，WANG Wei，et al. Research on Ratio Configuration of Direct Vehicle-to-Vessel Handling Considering Yard Layout and Operational Organization[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(5)：161-172，183.

考虑堆场布局和作业组织的车船直取比例配置研究

刘道宽[1]，张涵禹[2]，王　伟[2]，杨海飞[3]，张晨宇[2]

(1.中铁第四勘察设计院集团有限公司 交通市政与港航设计研究院，湖北 武汉 430000；2.河海大学 港口海岸与近海工程学院，江苏 南京 210024；3.河海大学 土木与交通学院，江苏 南京 210024)

摘　要：集装箱铁水联运是一种集约高效的运输组织形态，车船直取作业方式对集装箱在港作业时间和效率的提升作用显著。首先讨论了车船直取作业组织的差异性，界定了广义车船直取、狭义车船直取模式，提出了堆场布局与作业组织的3种组合场景(分堆场+广义车船直取、共堆场+广义车船直取以及共堆场+狭义车船直取)。其次，以单位集装箱作业时间和作业成本最小为目标，利用Anylogic构建覆盖3种组合场景的集装箱铁水联运枢纽作业仿真模型，研究不同组合场景下适宜的车船直取集装箱比例配置策略。最后，以武穴港铁水联运枢纽为例进行实证分析，综合考虑时间成本与经济成本，对3种组合作业场景下车船直取比例的适用范围进行了系统分析。结果表明：车船直取集装箱的占比是影响铁水联运枢纽作业绩效的关键指标。当车船直取集装箱占比适中(37.9%~62.8%)时，推荐采用分堆场布局+广义车船直取的组合场景，而在比例低于37.9%和高于62.8%时，分别推荐采用结合共堆场布局的广义和狭义车船直取作业组合场景。

关键词：铁水联运；车船直取；集装箱铁水联运枢纽；Anylogic仿真平台；港口作业模式
中图分类号：U2；TP391.9；U15　　**文献标识码**：A　　DOI：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250325003

Research on Ratio Configuration of Direct Vehicle-to-Vessel Handling Considering Yard Layout and Operational Organization

LIU Daokuan[1]，ZHANG Hanyu[2]，WANG Wei[2]，YANG Haifei[3]，ZHANG Chenyu[2]

(1. Traffic Municipal and Port & Navigation Design Research Institute, China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430000, Hubei, China; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, Jiangsu, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, Jiangsu, China)

Abstract: Container rail-water intermodal transportation is an intensive and efficient transport organization form. The direct vehicle-to-vessel handling mode significantly improves the handling time and efficiency of containers at ports. First, the differences in direct vehicle-to-vessel handling organization were discussed; broad-sense and narrow-sense direct handling modes were defined, and three combined scenarios based on yard layout and operational organization were proposed: (segregated yard + broad-sense direct handling, shared yard + broad-sense direct handling, and

收稿日期：2025-03-25
通信作者：王伟(1979—)，男，湖北天门人，河海大学港口海岸与近海工程学院教授。
基金项目：国家自然科学基金面上项目(71974052)；中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研发项目(2022K137)

shared yard + narrow-sense direct handling). Second, aiming at minimizing unit container handling time and operational cost, a simulation model of a container rail-water intermodal hub covering the three combined scenarios was constructed using AnyLogic to study the suitable ratio configuration strategies of direct vehicle-to-vessel containers under different combined scenarios. Finally, an empirical analysis was conducted taking the Wuxue Port rail-water intermodal hub as an example. By considering both time cost and economic cost, the applicable scope of the direct handling ratio under the three combined operation scenarios was systematically analyzed. The results show that the ratio of direct vehicle-to-vessel containers is a key indicator affecting the operational performance of the rail-water intermodal hub. When the ratio is moderate (37.9%~62.8%), the combined scenario of segregated yard layout + broad-sense direct handling is recommended; while when the ratio is lower than 37.9% and higher than 62.8%, the combined operation scenarios of broad-sense and narrow-sense direct handling combined with shared yard layouts are recommended, respectively.
Keywords: Rail-Water Intermodal Transportation; Direct Vehicle-to-Vessel Handling; Container Rail-Water Intermodal Hub; AnyLogic Simulation Platform; Port Operation Mode

0　引言

铁水联运作为国家综合交通运输体系中的重要组成部分，具有运输效率高，社会物流成本低，“大批量、低污染”等特点。集装箱铁水联运换装作业模式的选择对枢纽的装卸计划和作业效率具有显著影响，对集装箱在港作业时间和效率起决定性作用。因此，选择合适的作业模式在集装箱铁水联运枢纽规划设计中至关重要[1]。

针对集装箱铁水联运流程优化，现有研究已从多个维度展开。首先，一些学者着眼于具体作业流程的优化，探索如何通过作业衔接与时间序列安排，实现运输效率和成本之间的平衡。例如杨忠振等[2]针对具有随机到港特征的出口箱集港模式，提出了能够显著提高作业效率和成本平衡的解决方案；Yan等[3]聚焦于最大化车船直取进口箱的数量，协调船舶和铁路时刻表设计路港协同模式下的集装箱转运方案以提高转运效率；王爽等[4]进一步研究了车船直取模式的运输时效性与装卸量匹配问题，强调了铁水联运衔接优化的重要性。此外，部分研究还拓展到多式联运系统中的时间不确定性与路径决策问题，如柳伍生等[5]探究了运输时间、中转时间、等待时间和运输货损率混合不确定条件下的多式联运优化问题，郑长江等[6]对多式联运网络的物流配送进行路径选择，综合考虑多式联运总成本和客户满意度，并采用改进粒子群优化算法进行求解。

然而，仅从单一流程优化出发难以完全释放铁水联运体系的整体效能，堆场布局与作业模式之间的匹配问题也逐渐受到关注。刘道宽等[7]基于SLP方法探索了港口作业区布局优化问题，在相同作业模式条件下提高港口布局的运营效率；沙梅等[8]利用仿真模拟技术进一步验证了堆场布局对具体作业模式选择的显著影响；Hao等[9]提出一种基于动态规划的算法，用于解决作业模式组合选择问题；Bok等[10]则在铁水联运网络层面比较分析了不同堆场布局与运营模式，强调了布局与运营协同的关键作用。

伴随流程和空间布局优化的深入，一些研究聚焦于装卸设备调度与堆场作业效率，探索如何通过设备与布局的协同进一步提升整体作业效率。刘文茜等[11]针对轨道门吊混合装卸模式，借助变邻域禁忌搜索算法，有效降低设备空驶时间，优化作业完工周期；鲁渤等[12]提出ALV调度与堆场位置分配集成优化模型，综合考虑船舶装卸与堆场作业的协同联动，凸显了设备调度与布局优化的复合效应。

随着研究视角从局部优化向宏观系统评价转变，当前的研究进一步强调对铁水联运枢纽运行效率的整体性评价和风险管控[13]。Zehendner等[14]侧重分析了多式联运集装箱码头的集卡预约系统，突出了其对内陆运输模式服务质量提升的重要作用；冯芬玲等[15]通过采用突变级数法对国际集装箱多式联运风险进行量化评估，突出了其缩短运输时间、减少综合能耗并降低运输风险的优势；Jiang等[16]从节能减排和环境可持续性方面，综合评价了铁水联运枢纽的运行效率，拓展了评价体系的深度与广度。

尽管已有研究较全面地涵盖了作业流程、布局规划、设备调度及综合评价，但总体上仍偏重于传统的堆场作业模式，尚未充分关注车船直取作为新型换装模式及适用场景分析。近年来，车船直取作

为一种新型“降本增效”的换装作业模式逐渐在我国部分港口开展了实践探索[17]。此模式可实现集装箱在列车与船舶间的低延时交接。已有研究主要关注其作业流程和设备协同问题[18]，冯力源[19]界定了“班列–集卡–船舶”的车船直取模式与堆场堆存模式的换装流程区别，并提出调度优化方案，杨宜佳等[20]以“班列–集卡–船舶”的集装箱作业流程为基础，分析多设备协同调度对车船直取效率的影响；除此之外，仍有部分学者关注列车和船舶装卸节奏不匹配导致的路径冲突问题，有研究针对班列时刻波动引发的换装冲突提出调度优化方法[21]，江雨星等[22]探讨了集装箱与列车路径间的匹配，决策班列的沿线开行时间。近年来，车船直取模式因能够显著降低货物在港时间，提升作业效率，逐渐被部分港口实践探索并获得了初步成果。然而，现有研究多关注具体流程和设备协同优化问题，未能明晰不同类型车船直取模式的概念界定、适用场景和条件，缺乏系统化的布局与作业组织方式组合的定量研究。

综上，通过分析集装箱铁水联运交接模式的特点，界定出不同的集装箱铁水联运车船直取作业组织方式(广义车船直取、狭义车船直取)，并结合堆场布局设定提出分堆场+广义车船直取、共堆场+广义车船直取以及共堆场+狭义车船直取3种组合模式，利用Anylogic构建了集装箱铁水联运车船直取仿真模型，以作业完工时间和成本最小等构建多目标仿真评估模型。最后以武穴港为案例，验证不同组合模式下车船直取比例配置的效果，明确各自适用范围，旨在为集装箱铁水联运枢纽换装模式规划设计提供理论支持和实践参考。

1　车船直取作业组织与堆场布局设定

1.1　堆场布局设定

在传统的港口铁水联运作业中，集装箱通常通过“班列–堆场–船舶”的流程完成转运作业，即列车抵达港区后，首先进入铁路换装线作业区，通过轨道吊将集装箱卸载至集卡上，再由集卡搬运至堆场临时存放。随后当码头前沿集装箱信息需求传输至堆场，则利用轨道吊和集卡将集装箱运输至码头前沿，码头岸桥将集装箱货物吊装上船。传统集装箱铁水联运集装箱换装流程图如图1所示。

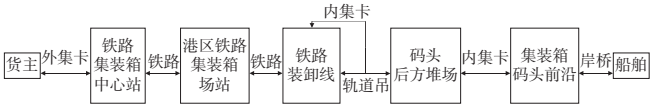


图1　传统集装箱铁水联运集装箱换装流程图

Fig.1　Flow chart of traditional container rail-water intermodal transshipment

鉴于码头前沿作业功能复杂，且装卸机械对空间需求较大，为防止码头作业区拥堵，故将铁路作业区设于码头后方。堆场布局考虑共堆场、分堆场2类布局模式，即铁路端和码头端分设堆场的分堆场布局，铁路和码头端共用同一堆场的共堆场布局。

分堆场布局下，铁路到(发)集装箱堆放至铁路堆场，码头到(发)集装箱则堆放在码头堆场，分堆场码头布局示意图如图2所示。

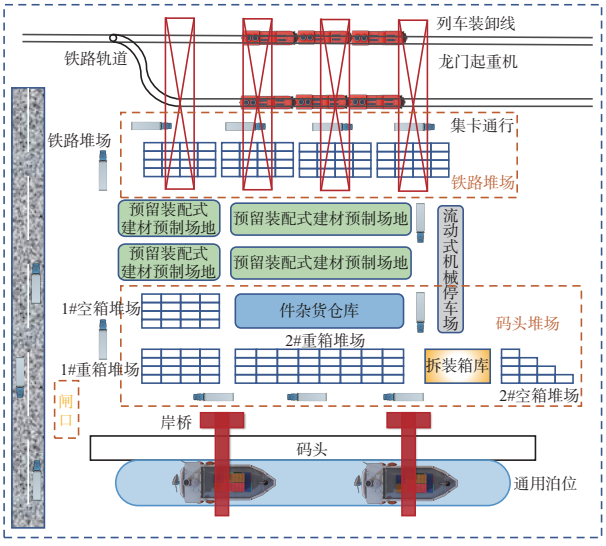


图2　分堆场码头布局示意图

Fig.2　Schematic diagram of terminal layout with segregated yard

共堆场布局则采用码头作业区和铁路作业区共用堆场的布局形式，相较于分堆场布局，共堆场布局下，铁路作业区不设堆场[23]，所有内陆铁路箱和海铁联运箱均堆存于港口堆场。相比之下，共堆场模式适当简化了集装箱的换装流程，提高了堆场的使用效率。但是由于两者作业区共用同一堆场，从一定程度上提高了集卡和轨道吊的调度要求。共堆场码头布局示意图如图3所示，其中，预留装配式建材预制场地是基于港口未来多功能发展需要所设的可拓展区域。该场地在当前阶段尚未实际建设，仅作为陆域布置方案中的潜在功能区进行展示。

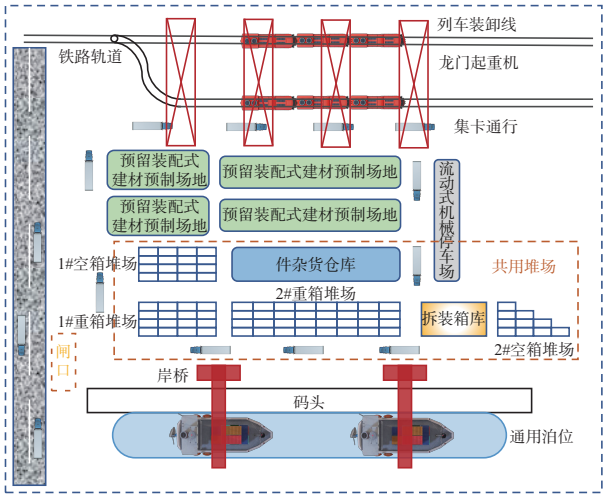
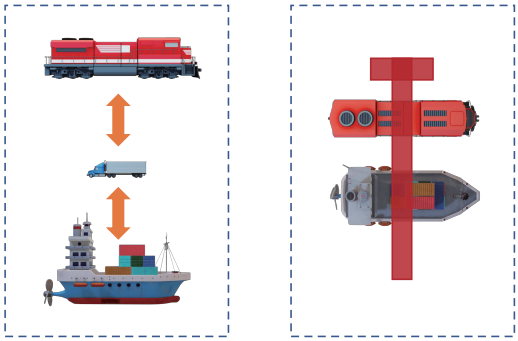


图3　共堆场码头布局示意图

Fig.3　Schematic diagram of terminal layout with shared yard

1.2　“班列–船舶”广义和狭义车船直取作业组织方式

车船直取作业示意图如图4所示。根据集装箱铁水联运车船直取的作业组织特征，将船舶到港和列车到港后，立即办理舱单确认等手续，使集装箱不经过堆场堆存直接运输至列车或者船舶进行装卸作业的模式界定为广义车船直取，作业示意图见图4a。而将码头前沿布置有铁路专用线，列车行驶至码头前沿尽端式铁路，采用定位牵引技术，岸桥从船舶或列车直接提取集装箱进入铁路装卸位或船舶装卸位的作业方式界定为狭义车船直取，作业示意图见图4b。



a　广义车船直取　b　狭义车船直取

a　Broad-sense direct vehicle-to-vessel handling　b　Narrow-sense direct vehicle-to-vessel handling

图4　车船直取作业示意图

Fig.4　Schematic diagram of direct vehicle-to-vessel handling operation

广义车船直取下集装箱换装流程图如图5所示，狭义车船直取下集装箱换装流程图如图6所示。广义车船直取和狭义车船直取作业组织方式可节省卸船(车)落场、理货，以及办理铁路申报等手续时间。

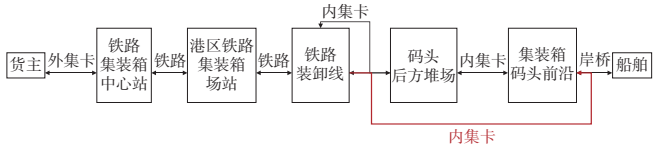


图5　广义车船直取下集装箱换装流程图

Fig.5　Flow chart of container transshipment under broad-sense direct vehicle-to-vessel handling

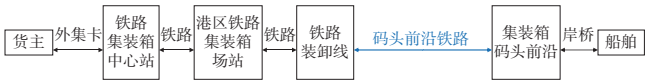


图6　狭义车船直取下集装箱换装流程图

Fig.6　Flow chart of container transshipment under narrow-sense direct vehicle-to-vessel handling

1.3　典型作业场景组合设定

车船直取作业方式简化了船舶靠港后续卸船落场、办理理货等申报手续以及列车装车进入场站等流程，免去集装箱在港区内堆存与多次装卸的环节。但是，列车与船舶装卸配载计划难以协调且码头前沿的工作繁重，在无形中提高了集装箱码头调度的柔性要求与成本。因此实际应用中车船直取的作业范围不能够覆盖所有集装箱，仍需在码头设置堆场以满足所有集装箱的转运需求，其余集装箱可采用“班列–共堆场–船舶”或“班列–分堆场–船舶”的换装流程完成作业。

为了系统分析不同港区作业条件下车船直取比例的配置问题，在前文所描述的2类堆场布局形式(分堆场布局和共堆场布局)和2类车船直取作业组织方式(广义和狭义)的基础上，构建了以下3种典型作业场景组合：共堆场+广义车船直取、分堆场+广义车船直取以及共堆场+狭义车船直取。共堆场+广义车船直取场景码头布局图如图7所示，分堆场+广义车船直取场景码头布局图如图8所示，共堆场+狭义车船直取作业场景码头布局图如图9所示。

1.4　组合作业场景对比分析

对比分析3种典型作业场景的优劣，作业场景优劣势分析表如表1所示。分堆场+广义车船直取的集装箱堆放策略有较多的变化性，适当地避免了船舶和列车到发时间不匹配以及船舶和列车之间的装载能力差异问题，但是导致换装过程中具有较为复杂的流程。在共堆场布局中，由于码头与铁路作业区共用同一堆场，从一定程度上提高了集卡和轨道

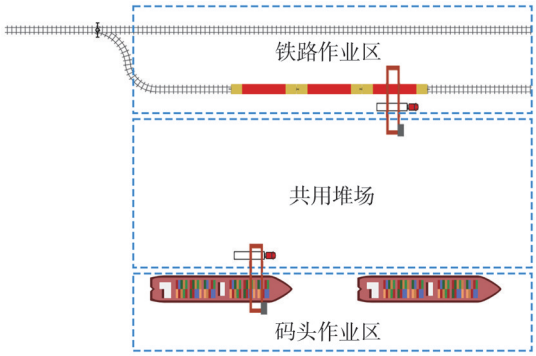


图7　共堆场+广义车船直取场景码头布局图

Fig.7　Terminal layout of shared yard + broad-sense direct vehicle-to-vessel handling scenario

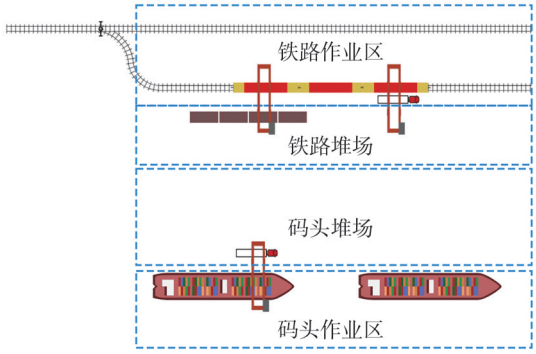


图8　分堆场+广义车船直取场景码头布局图

Fig.8　Terminal layout of segregated yard + broad-sense direct vehicle-to-vessel handling scenario

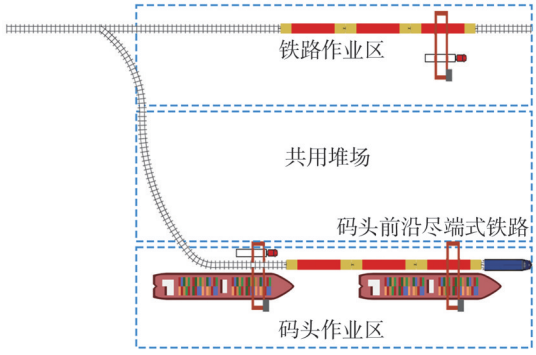


图9　共堆场+狭义车船直取作业场景码头布局图

Fig.9　Terminal layout of shared yard + narrow-sense direct vehicle-to-vessel handling scenario

吊的调度要求，但也存在作业流程复杂且设备资源利用率低下等问题。

以上3种场景各有优劣，其运行效率还会受到车船直取集装箱比例的影响。一般而言，车船直取集装箱占比越高，集装箱换装时间窗口越紧迫，对作业响应速度的要求也越高，反之则容许更长的换装周期。3种组合作业场景在集装箱换装时间方面呈现出明显差异，不同组合场景下换装流程的组织结构以及所需的换装时间各不相同，这种换装特征的差异进一步导致每种场景所对应的最佳车船直取比例区间也不一致，因此，为明确各组合场景与车船直取占比之间的最优匹配关系，仍需在优化视角下展开进一步的系统仿真分析。

2　不同组合模式的运行仿真与评价

2.1　研究边界界定

本研究的重点是港口集装箱运输系统中船舶与列车之间的车船直取作业模式，重点分析集装箱在铁路作业区、船舶作业区和堆场之间实现车船直取作业的组织方式与资源配置，构建了用于作业效能评估的仿真分析框架和模型，主要考虑了车船直取模式、堆场布局方式、设备作业时间和成本等关键因素，以支持不同典型场景下的作业模式对比与优化。

需要说明的是，尽管模型已对铁路和船舶的装载计划和运行计划进行了建模，但尚未引入港口与铁路之间在作业组织层面上的协同计划机制。现实中，车船直取作业的连续性和效率不仅取决于作业资源匹配，还受到列车和船舶装载能力差异性、港口与铁路之间协同计划等的影响，这些因素直接决定了车船直取作业的可执行性与系统瓶颈的位置。

为明确研究适用边界和简化问题，本研究暂未考虑港前站到发线资源的实际调度、车船作业计划

表1　作业场景优劣势分析表

Tab.1　Analysis of advantages and disadvantages of operation scenarios

场景	优势	劣势
分堆场+广义车船直取	作业系统柔性较高，能够实现部分集装箱不经过堆存直接发出	作业流程较为复杂，堆场的利用率降低，设备资源使用率下降
共堆场+广义车船直取	充分利用港口空间资源，能够实现部分集装箱不经过堆存直接发出	堆场作业规则较为复杂，集卡运行路线增多，堆场作业繁琐
共堆场+狭义车船直取	集装箱换装时间快，效率高	对列车和船舶的周期协调较广义车船直取难度加大，码头前沿作业繁重，土地资源占用大

联动、列车到达节拍、作业窗口安排等港口与铁路之间协同计划，也未充分考虑列车和船舶装载能力差异性。这样避免引入过多因素显著增加模型复杂度，对于非核心因素的简化处理有助于提升核心问题解决的操作性、可行性。

综上，通过设定合理的系统边界，将分析重心聚焦于直取比例、场景布局与作业方式之间的耦合关系，构建了具备计算可行性与应用针对性的评估模型，为车船直取模式的适用条件判定与组织优化提供方法支撑。

2.2　仿真逻辑构建

考虑3类铁水联运组合作业场景，铁水联运车船直取码头布局示意图如图10所示，A，B区域中蓝、绿色虚线分别表示在共堆场和分堆场布局下的广义车船直取集装箱换装流程，集卡将班列上的集装箱直接转运至码头前沿，由岸桥装卸至船舶完成作业；相较而言，狭义车船直取作业组织方式的部分集装箱无需集卡运输，作业流程更加高效，如C区域中橙色虚线所示，班列通过进港铁路将集装箱运送至码头前沿，然后由轨道吊直接将集装箱装卸至船舶完成作业。由于班列抵港计划和船期不完全一致，部分集装箱无法进行车船直取，则采用“班列–堆场–船舶”的方式堆存后再出港，图中蓝(橙)、绿色实线分别表示该作业方式在共堆场和分堆场布局下的流程。

在建模仿真过程中，针对每一种组合场景分别构建独立的仿真模型，比较其在不同车船直取比例设定下的系统表现差异。对车船直取过程中集装箱的转运提出研究假设，即使集装箱能够进行车船直取时，由于地区经济发展水平或货主对于成本的考量，也选择堆场堆存的方式进行转运，并非所有的集装箱均进行车船直取作业。

运用Anylogic软件构建了双向的集装箱码头铁水联运车船直取作业仿真模型，仿真实体包括列车、船舶、轨道吊、集卡和集装箱等，仿真模型逻辑如图11所示，主要包括铁路、水路和公路运输子系统，黑色和蓝色线条分别代表列车和船舶的进出港逻辑，红色代表公路运输系统内集装箱作业的逻辑，除此之外还包括集卡运输、堆场堆存以及轨道吊作业子系统。

在仿真过程中所采用的调度规则对系统运行表现具有显著影响，但不同模式对调度水平的依赖程度存在差异。例如，车船直取模式对实时响应能力要求较高，而中转堆场模式则对资源分配的均衡性更为敏感。为了确保模型的可解释性与结果的代表性，在3种作业组合模式下均采用统一的先到先服务调度策略，以反映在所设定调度规则下的相对表现。

上述模型模拟了图10中A，B和C所示的3组仿真场景，其中狭义和广义车船直取作业组织方式下的集装箱换装流程如图11中框A和C所示，堆存过程如框B所示。考虑到分堆场与狭义车船直取对码头纵深空间要求较大，仅考虑分堆场布局下的广义车船直取作业场景。

2.3　仿真系统设计

集装箱码头铁水联运作业的设备以及空间资源，通过Anylogic仿真软件内置的物料搬运库、道

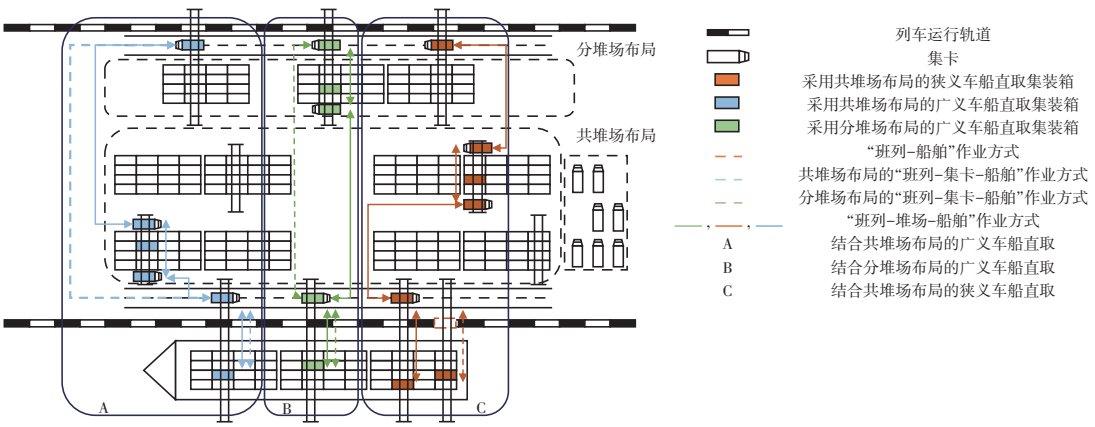


图10　铁水联运车船直取码头布局示意图

Fig.10　Schematic diagram of rail-water intermodal direct vehicle-to-vessel terminal layout

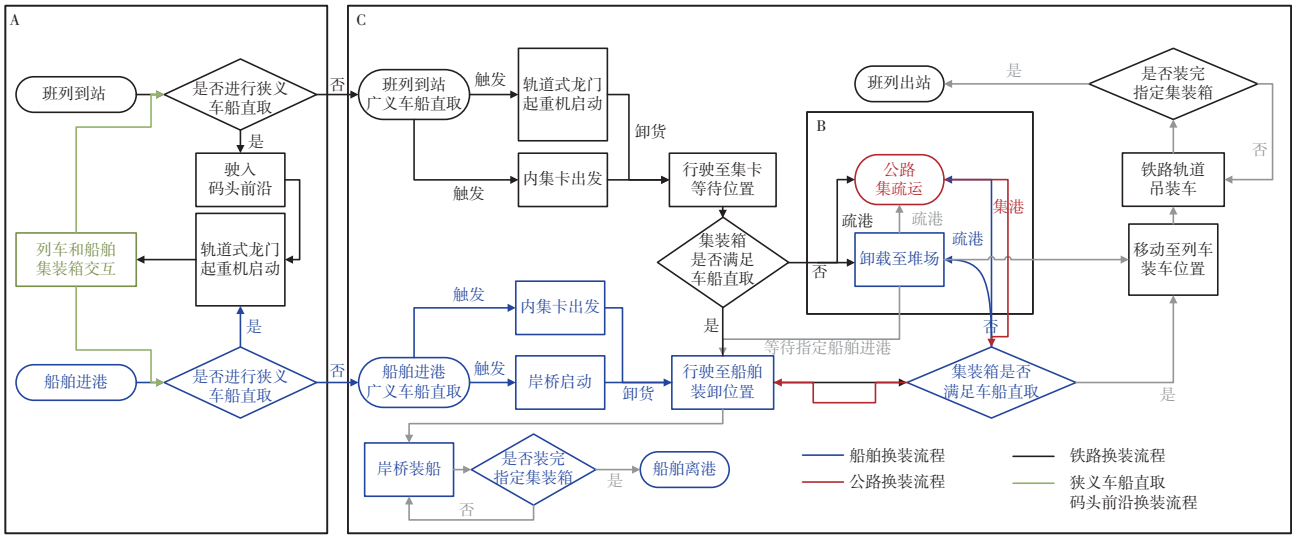


图11　仿真模型逻辑图

Fig.11　Logic diagram of simulation model

路交通库等特定库进行设置，其中对船舶、岸桥、场桥、列车、集卡、集装箱等主要实体进行自定义设置，根据集装箱的流向建立逻辑链接，依据集装箱的流向和作业需求，依次触发各作业设备进行作业，确保每一次的作业与其他作业无冲突[24]。

对于码头船舶装卸作业线，在船舶到达后设置延迟触发卸箱作业，完成卸船任务的最后一个集装箱后触发装船作业，保证同一批次集装箱的先卸后装作业顺序；对于分堆场布局，须在码头堆场和铁路堆场均设置装船集装箱的触发条件；对于共堆场布局，需要在共用堆场处设置装船集装箱的触发条件；对于广义车船直取作业组织方式下，需在列车到达后设置装船集装箱的触发条件；相同情况下，位于码头前沿的狭义车船直取模式下的列车同样需设置装船集装箱触发条件；对铁路作业区的列车和码头作业区的船舶均设置消息触发，当列车和船舶的集装箱箱位装载完毕后，系统发送消息实现列车发货任务，并在服从泊松分布的间隔时间段后，触发列车到货任务[25]。仿真模型3D运行界面图如图12所示，系统仿真的基本模型的运行平面图如图13所示。

2.4　评价指标选择

为系统评估不同组合场景下车船直取比例对作业绩效的影响，构建了包含单位集装箱作业时间与单位集装箱作业成本2个核心指标的仿真评价指标体系，分别反映系统的效率性与经济性。

单位作业成本包含固定成本与可变成本2部分。

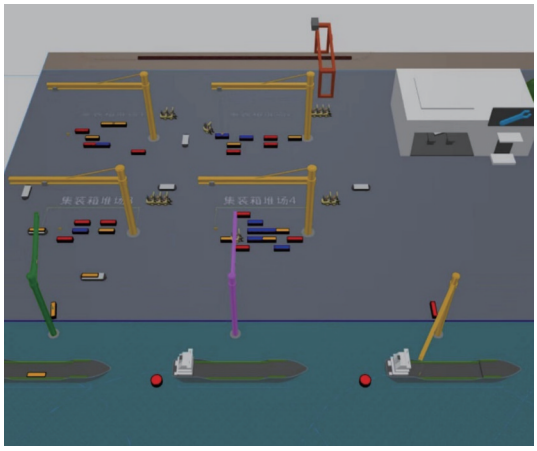


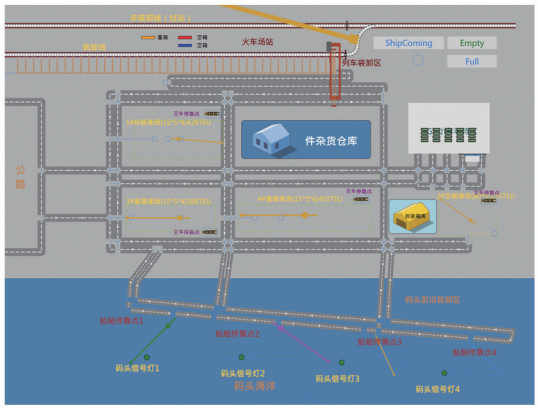
图12　仿真模型3D运行界面图

Fig.12　3D running interface diagram of simulation model

固定成本主要包括轨道式龙门起重机、集卡、堆场箱区建设、港区场地改造、水域泊位建设等按单箱折算的设施成本；可变成本包括设备操作成本、集卡运行成本、列车运输成本等运营成本。

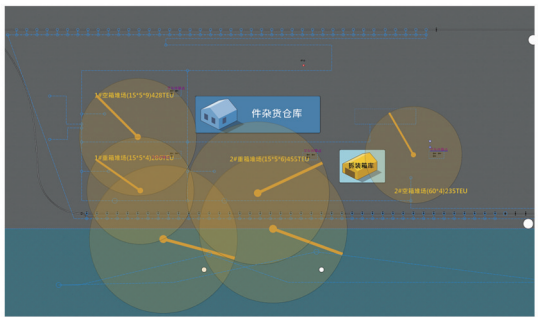
单位作业时间指标包括船舶作业时间、列车装卸时间、集卡运输时间、轨道吊作业时间(含卸车、装车、装船、卸船等环节)，综合反映集装箱从铁路抵达至船舶装载全过程的平均时间消耗。

考虑到实际运营中成本与效率常需协同优化，将上述2个目标指标进行归一化处理后，采用线性加权法构建综合评价指标。基于公平权衡的原则，设定单位作业时间与单位作业成本的权重均为0.5，通过对不同车船直取比例下各组合场景的仿真结果



a　广义车船直取仿真模型运行平面图

a　Operational layout of the broad direct truck-ship simulation model



b　狭义车船直取仿真模型运行平面图

b　Operational layout of the narrow direct truck-ship simulation model

图13　系统仿真的基本模型的运行平面图

Fig.13　Operational plan of basic system simulation model

进行该指标计算，选取综合性能最优的场景与比例作为推荐配置方案。

2.5　仿真目标设定

设铁路集疏运节点$t(t \in T)$，公路集疏运节点为$r(r \in R)$，堆场集疏运节点为$s(s \in S)$，集卡停靠节点为$c(c \in C)$，船舶集疏运节点为$b(b \in B)$。

U_{ts}^{k}表示节点t到s之间的第$k(k \in K)$个集装箱；C_{ts}^{k}表示第k个集装箱在节点t到s之间的运输成本，元；T_{ts}^{k}表示第k个集装箱在节点t到s之间的运输时间，min；$p^{n,\ kts}$表示在铁路节点内第$n(n \in N)$节车厢运输集装箱占总路径长度的比例，%，用于区分列车不同位置集装箱的作业路径；WT_{t}^{k}，WT_{b}^{k}则为集装箱在铁路运输节点和船舶运输节点的等待时间，min；T_{c}^{k}为第k个集装箱需要集卡的运输时间，min；D_{s}^{k}为第k个集装箱由集卡运输的距离，km；C_{s}^{k}表示集卡的单位距离运输成本，元/km；若货物运输节点为s，则需要进行中转堆存，则f_{s}^{k}表示第k个集装箱在堆场堆存的成本，元；φ_{s}^{k}表示决策变量；C_{j}表示固定建设成本，元。

共设置3项目标函数，基于时间成本的目标函数Z_1，由运输时间和等待时间组成；基于经济成本的目标函数Z_2，由运输成本和中转堆存成本以及固定建设成本组成，两者的综合评价目标函数$Z(Z_1^*$和Z_2^*分别由Z_1和Z_2通过归一化得出)。

$$\min Z_1 = T_t + WT_t^k + T_r + T_c^k + T_b + WT_b^k \tag{1}$$

$$\min Z_2 = C_t + C_s + C_r + C_b + T_s^k \times C_s^k \tag{2}$$

$$Z_1^* = \frac{Z_1 - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \tag{3}$$

$$Z_2^* = \frac{Z_2 - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \tag{4}$$

$$\min Z = Z_1^* + Z_2^* \tag{5}$$

综上，通过模拟不同车船直取比例下联运码头的作业运行过程，仿真计算并确定以上目标函数最优的组合作业场景。

3　实证分析

武穴港是武穴市铁水联运项目的重要组成部分和铁水联运枢纽节点，将充分发挥铁路优势赋能港口发展，推动临港产业发展。但目前仍存在一些问题，在货物类型方面，既有码头以散杂货码头为主，主要承担大宗货物运输，难以满足集装箱的运输需求；在运量方面，其运输货物涉及与武汉阳逻港的竞争，导致码头铁水联运量存在一定的不确定性，因此有必要对其车船直取模式的选择进行探讨。

3.1　参数设定

在武穴市铁水联运项目中，通过实地调研收集并整理仿真模型中的关键参数，选取仿真参数如表2所示。为控制其他因素对实证结果的影响，3种组合场景中的集卡作业模式统一设定，借鉴唐国磊等[26]的经验，均采取固定岸桥作业模式。

仿真目标中的集装箱作业成本包括运营成本与折算后的基础设施建设成本。在3种组合模式中，狭义车船直取作业模式因涉及轨道直铺至码头前沿，存在额外的轨道铺设及系统建设费用，而堆场中转模式则主要利用现有基础设施，新增建设成本相对较低。为了便于不同方案的横向比较，将相关建设成本按照一定时限进行折算，转换为集装箱作业成本的一部分以反映其对整体成本目标的影响。

根据实地调研数据，一艘船舶的最大装载能力为300 TEU，而一列火车通常由41节车厢组成，每

表2　仿真参数
Tab.2　Simulation parameters

参数	取值
轨道吊移动速度/(m/s)	5
轨道吊提升速度/(m/s)	0.20
集卡运行速度/(m/s)	10
轨道式龙门起重机操作成本/(元/TEU)	10.49
集卡运行成本(元/(TEU·km))	5~8
列车运行行驶成本(空载)/(元/(t·km))	0.10
列车运行行驶成本(满载)/(元/(t·km))	0.18
单台集装箱轨道吊/万台	1 000~2 000
集卡/万辆	60~85
堆场及其道路建设成本/万元	10 768.52
陆域侧建设成本/万元	13 528.18
港区场地改建成本/(万元/铺轨公里)	5 000~7 000
运输线路成本/(万元/km)	3 000
码头+引桥+护岸建设成本/万元	17 913.11

节车厢可装载2个20 ft标准集装箱，即单列列车的总装载能力约为82 TEU。

如要进行车船直取，可以通过港口和铁路部门之间协作，编制综合生产计划，实现船到，列车到，车船直取，列车装满，列车返回港前站(或是另一条线进行平行卸船装车作业)，港前站发下一趟列车等连续生产过程，从而充分利用港前站和码头之间的单线铁路通过能力。但是考虑到目前港口和铁路部门充分协同还不能实现，在列车和船舶服从各自独立的运行规律的条件下，通过车船直取提升港前站和码头铁水联运作业能力和效率。假设：列车和船舶服从各自独立的运行规律，到达均服从“泊松分布”。因此，在模型构建过程中，采用泊松分布对列车间隔进行建模，以更真实地反映现有铁路运行规律。

3.2　仿真实验

依据建立的集装箱铁水联运枢纽仿真系统，在固定任务下对多种布局模式进行仿真模拟，通过数据的比选，确定在不同车船直取比例条件下各组合场景的适用性，以便在多种场景中进行比选界定。

根据组合作业场景的界定，共设置3组实验场景如表3所示，设定仿真时间为14 400 min，为避免单日作业存在随机性，设置多次实验取平均值作为实验结果。

表3　实验场景
Tab.3　Experimental scenarios

实验序号	堆存模式	直取模式
1	共堆场	广义
2	分堆场	广义
3	共堆场	狭义

3.3　研究结果

3.3.1　基于单位集装箱作业时间的模式对比

仿真计算出各场景下单位集装箱的作业时间，各作业模式时间结果分析如图14所示。

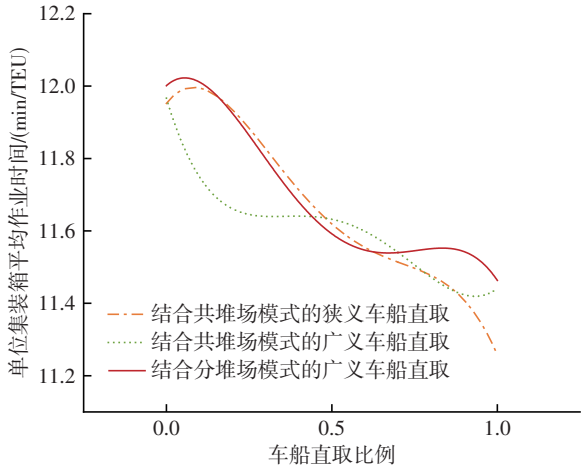


图14　各作业模式时间结果分析
Fig.14　Analysis of time results for each operation mode

当车船直取比例达到62.5%以上，推荐采用共堆场+狭义车船直取的组合作业场景，此场景下能够高效降低作业时间，可以将单位集装箱的运输时间压缩至11.25 min；而当车船直取比例处于44.1%以下，则推荐采用共堆场布局+广义车船直取的组合作业场景，在此场景下，单位集装箱作业时间最低可以缩短至11.65 min；当车船直取比例处于44.1%~62.5%之间则可以采用结合分堆场布局的广义车船直取组合作业场景。

3.3.2　基于单位集装箱作业成本的模式对比

根据成本参数对试验的成本进行计算，各作业模式成本结果分析如图15所示。

当车船直取比例在28.2%以下，推荐使用共堆场+广义车船直取的组合作业场景；当车船直取比例位于28.2%~65.6%时，推荐使用结合分堆场布局的广义车船直取组合作业场景；当车船直取比例大于65.6%时，则推荐使用结合共堆场布局的狭义车船直取组合作业场景，该场景对集装箱作业时间的提升最为显著，当车船直取比例由0%增加至100%时，其作业成本由486.93元/TEU降至414.44元/TEU。

3.3.3　基于单位集装箱作业时间和成本的模式对比

根据仿真得到的集装箱单箱作业时间及成本，

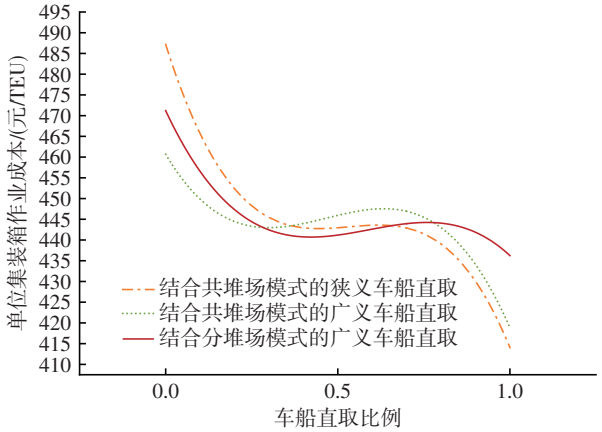


图15　各作业模式成本结果分析

Fig.15　Analysis chart of time results for each operation mode

得到作业成本–作业时间组合目标的铁水联运车船直取模式适用性，双目标评价体系适用性对比如图16所示。可以看到，车船直取比例越大，同等作业时间下，狭义车船直取模式的集装箱吞吐量就越高，此时集装箱的单位作业完工时间相对较短，且比例越大优势越明显；而广义车船直取不具有码头前沿铁路建设成本，在较低比例下具有一定优势，例如，当比例低于37.9%时，则可以采用结合共堆场布局的广义车船直取场景，而比例在37.9%~62.8%之间，则分堆场布局下的广义车船直取场景具有一定优势。

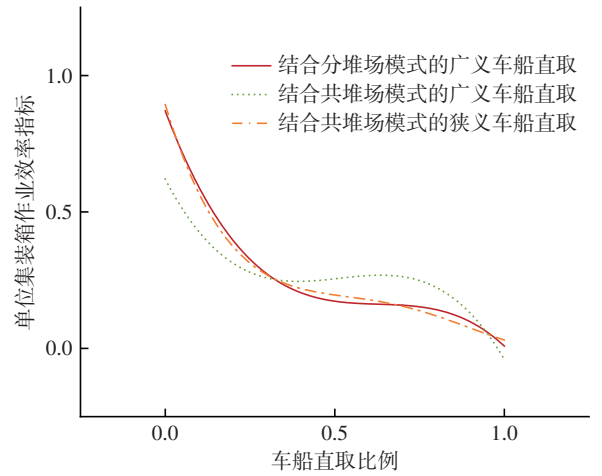


图16　双目标评价体系适用性对比图

Fig.16　Comparison chart of applicability of dual objective evaluation system

3.3.4　结果讨论与机理分析

首先，在以单位集装箱作业时间最短为目标的情况下，随着车船直取比例的增加，狭义车船直取模式的优势逐渐显现，这主要是因为该模式实现了“车船直连”，消除了集装箱在堆场的中转环节，从而大幅缩短了作业总时长。相比之下，广义车船直取模式仅在车船直取比例较低时具有性能优势，究其原因是在高比例下，作业复杂度增加，海侧卸船进场与陆侧铁路集港的集装箱流线在共用堆场内发生交织导致作业冲突加剧、流转节奏混乱，从而拉低了整体效率。

其次，在以单位集装箱作业成本最小为目标的情况下，集装箱堆存成本和码头建设成本以及集卡运输成本是影响其适用性的重要因素，在较低的车船直取比例下，会产生大量的集装箱堆存，虽然狭义车船直取模式能够减少集装箱的堆存成本，但其还具有较高的铺轨成本以及严格的实施条件，因此不适合在较低比例下进行作业。同时，共堆场布局下的集卡无须在码头堆场和铁路堆场间进行转换，其集卡运输成本较低，因此适用于更小规模的车船直取作业。

最后，综合考虑单位集装箱作业时间和成本的双重目标，狭义车船直取的适用范围与“仅考虑作业时间”下的结果基本相似，且优于“仅考虑作业成本”下的结果，这是由于狭义车船直取能够大幅度减少作业中转时间，更早地体现出其在作业时间方面的优化性能，这种在时间维度上的显著优化效果在双目标综合评价中占据了主导地位，从而弥补了其在建设成本上的劣势。

4　结论及展望

研究构建了3种典型组合场景下车船直取作业的仿真模型，并以最小化单位集装箱作业时间和成本为目标，系统分析了不同车船直取比例设定下的作业性能表现。研究成果为车船直取码头的场景布局建设提供了参考依据。主要结论如下。

（1）共堆场+广义车船直取等3种典型组合场景能够有效表征不同基础设施条件下的作业特征。本研究将广义与狭义车船直取模式与港区堆场布局深度融合，构建了“共堆场+广义车船直取”“分堆场+广义车船直取”以及“共堆场+狭义车船直取”3个关键场景，确立了多场景策略优化的基础模型框架。

（2）车船直取比例是铁水联运系统性能的关键

调控参数。仿真结果显示，在给定的堆场布局与作业组织前提下，车船直取比例的变化会显著影响单位作业时间与成本，进而改变组合场景的性能优劣排序，反映出较强的适配关系。

（3）实证案例验证了仿真模型的可行性与适用性。以武穴港为例，选取典型作业参数和固定作业时间，验证了仿真结果在现实条件下的适配性。在此基础上，进一步得出车船直取比例的最优设定范围，为港口实际建设与改造提供参考。

（4）3种组合场景分别适用于不同的车船直取比例区间。当车船直取比例较低时(低于37.9%)，由于系统对堆场功能依赖较强，推荐采用共堆场+广义车船直取场景，以减少场内水平运输距离和作业冗余；当车船直取比例处于中等区间(37.9%~62.8%)时，分堆场+广义车船直取的组合作业场景展现出更优的均衡性能，适用于换装运输线路并行、多点作业的港区；当比例较高(高于62.8%)时，共堆场+狭义车船直取场景由于其缩短了换装作业路径和最小化水平搬运环节时间的优势，具有显著的效率提升空间，尤其适用于码头前沿区域可铺设轨道的港区条件。

研究为港口联运组织优化提供了理论支撑与模型工具。提出了一种兼顾堆场布局与作业组织方式的系统性分析框架，为港口在不同发展阶段、基础设施条件下选择合适的作业组织方式与车船直取策略提供了依据。本研究尚未充分考虑列车和船舶装载能力差异性，未来将进一步聚焦于港口和铁路综合生产计划的协同，系统优化载容量、作业能力与时空匹配性，构建港铁综合协作计划生成模型，以充分利用港前站和码头之间的单线铁路通过能力。

参考文献：

[1] 王钟皓，侯　敬. 港口铁路专用线联运作业组织模式优化研究[J]. 铁道运输与经济，2021，43(6)：15-20，50.
WANG Zhonghao，HOU Jing. Organization Mode Optimization of Combined Transport for Port Railway Special Line[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(6)：15-20，50.

[2] 杨忠振，程健南. 基于出口箱随机到达码头的车船直取装船作业优化[J]. 大连海事大学学报，2016，42(4)：97-104.
YANG Zhongzhen，CHENG Jiannan. Optimization of Ship Loading Operations in the Context of Containers Arriving Randomly with Truck-to-Ship[J]. Journal of Dalian Maritime University，2016，42(4)：97-104.

[3] 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 Engineering，2020，141：106296.

[4] 王　爽，孙　翔. 基于车船直取模式的集装箱海铁联运衔接优化[J]. 交通运输系统工程与信息，2024，24(2)：53-62.
WANG Shuang，SUN Xiang. Connection Optimization of Container Sea-Rail Combined Transport Based on Vehicle-Ship Direct Access Mode[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2024，24(2)：53-62.

[5] 柳伍生，肖必弘. 基于模糊机会约束规划和鲁棒优化的绿色多式联运路径优化研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版)，2022，19(1)：96-104.
LIU Wusheng，XIAO Bihong. Research on Green Multimodal Transportation Route Optimization Based on Fuzzy Chance-Constrained Programming and Robust Optimization[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)，2022，19(1)：96-104.

[6] 郑长江，张　晨，陶童统，等. 冷链物流多式联运路径选择优化研究[J]. 交通科学与工程，2023，39(6)：111-122.
ZHANG Changjiang，ZHANG Chen，TAO Tongtong，et al. Research on the Routing Optimization for Cold Chain Logistics Multimodal Transportation[J]. Journal of Transport Science and Engineering，2023，39(6)：111-122.

[7] 刘道宽，卢勇利，沈学明，等. 我国铁水联运港口作业区布局优化研究[J]. 铁道运输与经济，2020，42(5)：30-37.
LIU Daokuan，LU Yongli，SHEN Xueming，et al. A Study on the Optimization of the Operation Area of Railway-Water Intermodal Transport Port in China[J]. Railway Transport and Economy，2020，42(5)：30-37.

[8] 沙　梅，周　鑫，秦天保，等. 集装箱码头堆场布局优化与仿真研究[J]. 工业工程与管理，2013，18(2)：24-30.
SHA Mei，ZHOU Xin，QIN Tianbao，et al. Study on Layout Optimization and Simulation of Container Yard[J]. Industrial Engineering and Management，2013，18(2)：24-30.

[9] HAO C L，YUE Y X. Optimization on Combination of Transport Routes and Modes on Dynamic Programming for a Container Multimodal Transport System[J]. Procedia Engineering，2016，137：382-390.

[10] BOK M D，DE JONG G，TAVASSZY L，et al. A Multimodal Transport Chain Choice Model for Container Transport[J]. Transportation Research Procedia，2018，31：99-107.

[11] 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.
LIU Wenqian，ZHU Xiaoning，WANG Li，et al. Disjunctive Graph Based Integrated Scheduling Method for Port Handling Equipment for Railway-Waterway Intermodal Transportation[J]. Journal of the China Railway Society，2022，44(8)：14-24.

[12] 鲁　渤，吕家智，曾庆成. 集装箱码头ALV调度与堆场位置分配集成优化模型[J]. 系统工程理论与实践，2017，37(5)：1349-1359.
LU Bo，LYU Jiazhi，ZENG Qingcheng. Integrated Optimization Model for Automated Lifting Vehicles Scheduling and Yard Allocation at Automated Container Terminals[J]. Systems Engineering-Theory & Practice，2017，37(5)：1349-1359.

[13] TAGILTSEVA J，VASILENKO M，KUZINA E，et al. The Economic Efficiency Justification of Multimodal Container Transportation[J]. Transportation Research Procedia，2022，63：264-270.

[14] ZEHENDNER E，FEILLET D. Benefits of a Truck Appointment System on the Service Quality of Inland Transport Modes at a Multimodal Container Terminal[J]. European Journal of Operational Research，2014，235(2)：461-469.

[15] 冯芬玲，孔祥光，吴庆芳. 考虑风险的国际集装箱多式联运路径选择研究[J]. 铁道科学与工程学报，2021，18(10)：2761-2768.
FENG Fenling，KONG Xiangguang，WU Qingfang. Research on the Route Selection of International Container Multimodal Transportation Considering Risk[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2021，18(10)：2761-2768.

[16] JIANG B，LI J，MAO X Y. Container Ports Multimodal Transport in China from the View of Low Carbon[J]. The Asian Journal of Shipping and Logistics，2012，28(3)：321-343.

[17] 王小寒，靳志宏. 基于线上订舱的海铁联运集装箱疏运鲁棒优化[J/OL]. 系统工程，2024：1-13. (2024-11-07). https：//kns. cnki. net/KCMS/detail/detail. aspx? filename=GCXT20241106002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
WANG Xiaohan，JIN Zhihong. Robust Distribution Optimization of Sea-Rail Intermodal Container Based on Online Booking Service[J/OL]. Systems Engineering，2024：1-13. (2024-11-07). https：//kns. cnki. net/KCMS/detail/detail. aspx? filename=GCXT20241106002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[18] 国　巍，余永金. 白洋港铁水联运车船直取模式研究[J]. 铁道运输与经济，2020，42(5)：44-48，70.
GUO Wei，YU Yongjin. A Study on the Direct Transfer Mode between Train and Ship for Railway-Water Intermodal Transport at Baiyang Port[J]. Railway Transport and Economy，2020，42(5)：44-48，70.

[19] 冯力源. 集装箱港口铁水联运车船直取模式下的作业设备调度优化[D]. 北京：北京交通大学，2016.

[20] 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.
YANG Yijia，ZHU Xiaoning，YAN Baicheng，et al. Integrated Scheduling of Rail-Water Containers Handling Operations in Intermodal Terminals Considering Energy-Efficiency[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2018，18(6)：215-221.

[21] ZHANG Q，LUSBY R M，SHANG P，et al. A Heuristic Approach to Integrate Train Timetabling，Platforming，and Railway Network Maintenance Scheduling Decisions[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2022，158：210-238.

[22] 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.
JIANG Yuxing，NIU Huimin. Optimization of Demand-Response Container Train Timetables and Benders Decomposition[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2020，20(5)：191-198.

[23] 王小寒，靳志宏. 海铁联运港站共享堆场的箱区分配及转场联合优化[J]. 交通运输系统工程与信息，2024，24(5)：283-294.
WANG Xiaohan，JIN Zhihong. Joint Optimization of Block Allocation and Transfer for Shared Yards at Sea-Rail Intermodal Container Terminals[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2024，24(5)：283-294.

[24] 许植深，李　鹤，陈　诚，等. 基于多智能体的高铁快运确认车业务设备技术改造优化仿真研究[J]. 铁道货运，2021，39(12)：1-8.
XU Zhishen，LI He，CHEN Cheng，et al. Multi-Agent-

（下转第183页）