

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.02.015

车船直取作业模式下轨道吊与集卡调度优化

王伟¹,张涵禹¹,杨海飞²,张晨宇¹

(1.河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏南京 210098; 2.河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098)

摘要:为提升车船直取作业模式下集装箱在班列和船舶间的转运效率并降低作业成本,提出了一种充分利用两者重合时间窗的轨道吊与集卡调度优化策略,通过最小化单位集装箱作业时间和成本构建了多目标优化模型,并设计智能算法进行求解,同时以武穴港水铁联运枢纽为例进行了验证分析,测试了不同码头布局与前沿铁路利用场景的优化效果。结果表明:对于特定车船直取集装箱比例(50%),构建的优化模型能够有效改善轨道吊和集卡的衔接水平,提升各种场景下集装箱的转运效率并降低作业成本,综合效益最高提升达到11.7%,广义直取模式的时间与综合效率优化幅度高于狭义直取模式,同时广义直取模式分堆场较共堆场布局取得更显著的优化效益;对于不同车船直取集装箱比例,总体上优化模型均取得优化效益,其中在中低直取比例范围内(<70%)广义直取模式经优化取得的提升幅度较狭义模式更为显著,而高比例条件下($\geq 70%$)狭义较广义、共堆场较分堆场则取得了更优的提升效能,表明采用相适配的车船直取布局模式是提高不同场景下码头作业综合效率的有效途径。

关键词:车船直取;集装箱;作业时间窗;调度优化

中图分类号:TP391.9;U15

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2025)02-0124-09

Optimization on crane and tractor scheduling in vehicle-to-ship direct transfer mode

WANG Wei¹, ZHANG Hanyu¹, YANG Haifei², ZHANG Chenyu¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To enhance the efficiency of container transfers between trains and ships under the direct transfer mode and to reduce operational costs, this paper proposes an optimized strategy for crane and tractor scheduling that fully utilizes the overlapping time windows of both modes. A multi-objective optimization model is constructed to minimize the operation time and cost per container, and an intelligent algorithm is designed for its resolution. An empirical analysis at the WuXue Port multimodal transport hub tests the optimization effects of different terminal layouts and advanced railway utilization scenarios. The results show that, for a specific direct transfer ratio (50%), the proposed optimization model effectively improves the coordination between cranes and tractors, enhancing container transfer efficiency and reducing operational costs across various scenarios, with a maximum comprehensive benefit increase of 11.7%. The optimization extent of generalized direct transfer in terms of time and overall efficiency is higher than that of the narrow sense. Moreover, the segregated yard layout achieves more significant optimization benefits than the shared yard layout for generalized direct transfer. Additionally, for different direct transfer ratios, the proposed strategy yields optimization benefits overall. In the medium to low direct transfer ratio range (<70%), the generalized mode shows a more significant improvement after optimization than the narrow sense. Conversely, at high ratio conditions ($\geq 70%$), the narrow sense mode and shared yard layout achieve better optimization performance, indicating that adopting a suitable direct transfer layout mode is an effective way to improve the comprehensive efficiency of terminal operations in different scenarios.

Key words: vehicle-to-ship direct transfer mode; container; operation time window; scheduling optimization

基金项目:国家自然科学基金委员会-联合国环境规划署(NSFC-UNEP)可持续发展国际合作科学计划重点项目(42361144873);宜宾智慧物流研究院项目(YW2024ZD03);国家自然科学基金面上项目(71974052)

作者简介:王伟(1979—),男,教授,博士,主要从事多式联运与港航物流发展研究。E-mail:13813826667@163.com

通信作者:张涵禹(2001—),男,硕士研究生,主要从事多式联运与港航物流发展研究。E-mail:smuhyzhang@163.com

引用本文:王伟,张涵禹,杨海飞,等.车船直取作业模式下轨道吊与集卡调度优化[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):124-132.

WANG Wei,ZHANG Hanyu,YANG Haifei,et al. Optimization on crane and tractor scheduling in vehicle-to-ship direct transfer mode [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025,53(2):124-132.

车船直取模式通过集装箱在班列和船舶间的直接转运,显著减少了中转装卸环节和次数,成为解决水铁联运“最后一公里”问题^[1]的创新作业模式。然而,由于班列抵港计划和船期的不匹配,导致装卸设备以及船舶或班列出现等待与滞留,使码头在实际作业过程中难以充分释放车船直取的转运效能。因此,开展车船直取模式下轨道吊和集卡等设备的调度优化、提升不同设备间衔接水平,是提升集装箱转运作业效率与降低转运作业成本的重要途径。

目前,关于转运设备调度的既有研究侧重于传统堆场堆存作业模式,主要针对不同功能分区提出相应的调度优化策略。例如在码头作业区调度方面,有学者以船舶配载计划为研究对象,对船舶作业区的调度进行了研究^[2];另一部分学者研究了靠近船舶作业区的堆场与船舶装卸作业之间的调度优化^[3-4];在陆域侧的铁路作业区调度上,目前有学者针对集卡作业次序混乱,时间不均衡的问题提出了单车程和多车程的概念^[5],以集卡调度总成本最小为目标构建多车程调度优化模型解决集卡作业时间不均衡的问题,对于铁路作业区和码头作业区间的联合调度,目前主要从两个方面进行研究,一方面是对设备资源的指派调度实现作业时间最小等目标,通过多目标优化的方法得到设备资源的指派结果^[6-8],另一方面是针对作业设备资源之间的配比进行研究^[9],以最小化任务最大完工时间为目标,确定码头任务数量与设备资源配比之间的关系。

在水铁联运班列和船舶的联合调度研究方面,多数文献以传统装卸工艺的水铁联运码头换装设备调度为背景开展研究,如Li等^[10-11]研究U形自动化码头堆场和铁路间多设备的联合调度问题,考虑等待时间、运输时间等对场桥作业顺序和AGV任务分配进行决策,对联合调度进行了细致研究;针对传统装卸工艺的水铁联运码头“轨道吊-集卡”的联合调度问题,王小寒等^[12]提出了在分堆场模式下铁路主堆场的“轨道吊-集卡”联合装卸工艺,Li等^[13]基于“轨道吊-集卡”装卸工艺,以最小化装卸完工时间和能耗为目标构建了轨道吊和集卡协同调度优化模型,将码头作业区的船舶和铁路作业区的列车与堆场进行衔接,目前“轨道吊-集卡”的联合调度研究中缺少多种换装模式的综合对比与适用范围分析。

相较于传统装卸工艺的水铁联运集装箱码头作业模式,车船直取作业模式增加了直接转运的作业通道,但是在船期和班列计划不完全重合的因素下,同一班列或船舶的集装箱装卸计划存在差异,导致作业过程中装卸设备出现等待或空驶,限制了系统的效能发挥^[14]。为此,学者们对“班列-集卡-船舶”这种广义层面的车船直取作业模式下的设备调度问题开展优化研究:杨忠振等^[15]以车船直取比例最大为目标,对“班列-集卡-船舶”出口集装箱的装船顺序进行优化;杨宜佳等^[16]在车船直取双向作业模式下,研究了集卡、岸桥和轨道吊的协同调度;冯力源^[17]研究了“班列-集卡-船舶”车船直取作业模式下的设备资源协同调度问题,对集卡和轨道吊的数量进行配置以提升边际效益;Yan等^[18]考虑最大化车船直取进口箱的数量、船舶和铁路时刻表,设计了路港协同模式下的集装箱转运方案。然而,目前研究集中于分堆场或共堆场的单一布局情况,侧重讨论设备资源数量配置和抵港时刻表对作业效率的影响,尚未充分考虑车船直取集装箱比例与码头布局模式差异化对作业效率的具体影响。此外,狭义“班列-船舶”的转运流程作为车船直取作业的终极形态,其转运设备调度优化的研究成果仍然匮乏。

针对以上问题,本文提出充分利用重合时间窗实现集装箱在铁路和水路间直接转运的调度策略,同时考虑其装卸成本,在班列计划和船期一定的情况下,构建多目标多设备资源调度优化模型,并设计智能算法进行求解,以实现单位集装箱转运在效率和成本上综合效益值的最小化。

1 问题描述

1.1 车船直取过程

水铁联运的车船直取作业主要有广义“班列-集卡-船舶”和狭义“班列-船舶”两种模式(分别简称广义模式与狭义模式)。在广义模式下,由于铁路作业区和码头前沿间存在较长空间距离,抵港班列的集装箱经轨道吊装卸后,需等待集卡转运至岸桥完成装卸作业。如图1所示,相对于A、B区域的“班列-集卡-船舶”作业方式,狭义模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出口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,即“班列-船舶”作业方式。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作业,则采用“班列-堆场-船舶”的方式堆存后再出港,图1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,其中共堆场布局的铁路作业区与码头作业区共用堆场分区,可以简化换装流程,而分堆场布局下的铁路作业

区拥有独立堆场,通常位于码头后方,可以有效避免班列和船舶间集装箱数量不匹配的问题。

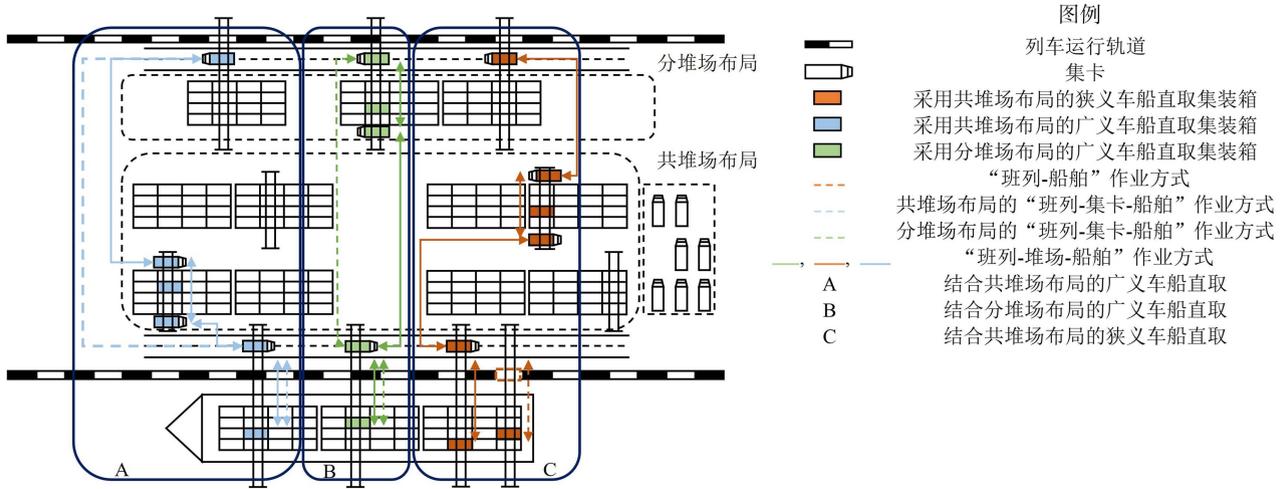


图 1 水铁联运车船直取作业模式

Fig. 1 Vessel-train direct transfer mode in water-rail intermodal transportation

1.2 存在问题

从作业时间协同角度看,车船直取模式的轨道吊和集卡仅在两者作业时间窗重合范围内进行衔接并实现集装箱转运,而在非重合时间,集装箱需要被卸载至堆场并等待装船,如图 2(a)(b)所示。图 2 中两条箭头分别表示轨道吊和集卡的作业流程, $S_{g,i}$ 、 $F_{g,i}$ 为轨道吊 g 的开始和结束作业时间, $S_{u,i}$ 、 $F_{u,i}$ 为集卡 u 的开始和结束作业时间, $O_{g,i}$ 、 $O_{u,i}$ 为轨道吊 g 和集卡 u 的作业时间, $E_{u,ij}$ 为集卡 u 从前序集装箱 i 终止位置行驶至后序集装箱 j 的初始位置的空载时间, $E_{g,ij}$ 为轨道吊 g 从前序集装箱 i 的终止位置运行至后序集装箱 j 的初始位置的空驶时间,由于轨道吊和集卡的作业时间可能不一致,轨道吊在装卸集装箱时的速度与集卡转运集装箱的速度不匹配,导致它们产生互相等待的作业时间差 $W_{g,i}$ (轨道吊等待集卡的时间)和 $W_{u,i}$ (集卡等待轨道吊的时间)。

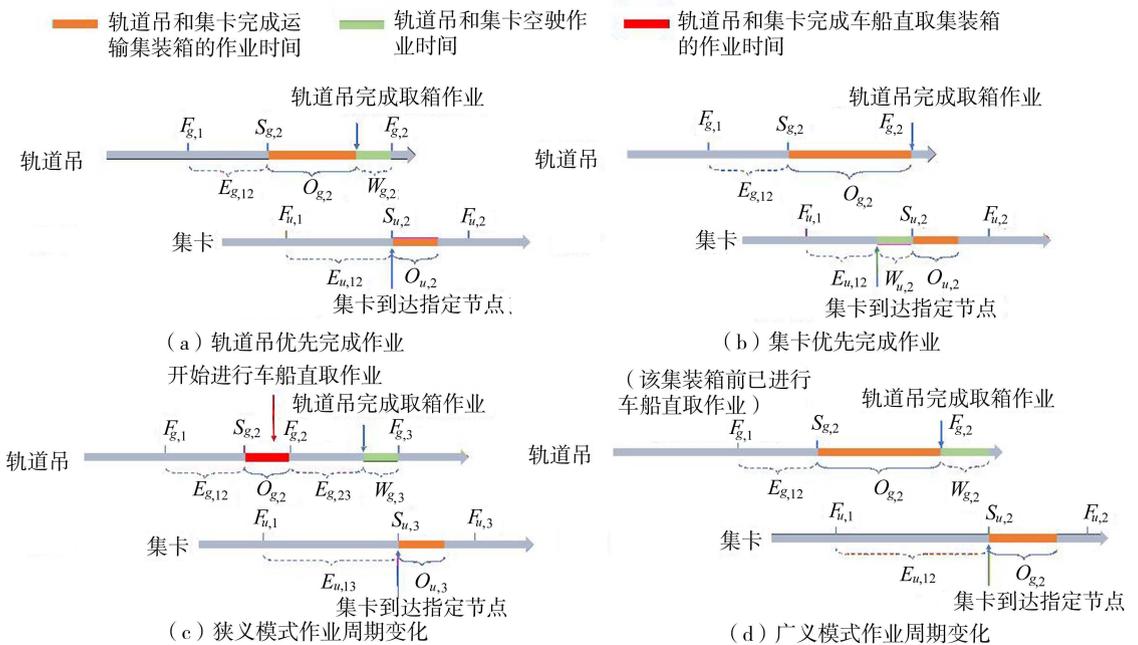


图 2 集装箱换装计划示意图

Fig. 2 Schematic diagram of container reloading plan

由于班列和船舶抵港时间不同,当船舶抵港并采用狭义模式进行作业时,班列上集装箱由轨道吊直接完成换装,作业时间为 $O_{g,2}$,此时集卡可以直接空驶前往下一集装箱的作业位置节点,其作业时间为 $E_{g,23}$,作业

周期变化如图 2(c) 所示;而广义模式下集卡作业时间相对较长,如图 2(d) 所示,这将导致衔接过程中的等待时间由 $W_{u,2}$ 变为 $W_{g,2}$,从而造成作业周期的增长,进一步导致设备利用效率降低,作业延误或提前的可能性增大。以上变化通常发生在班列和船期时间窗重合的开始或结束时,其结果是造成转运效率损失。

从作业效益角度来看,车船直取模式减少了堆场作业所带来的运输成本和装卸时间,但其集卡运输路径的增加导致运输成本上升,尤其是狭义模式引入码头前沿铁路会显著增加陆运成本,因此其为集装箱码头所提供的“时间+成本”综合效益存在优化空间。

综上,本文针对班列和船舶计划不完全重合的特点,考虑集装箱作业时间和码头作业成本,构建多目标多设备资源调度优化模型并设计智能算法进行求解,通过调度优化轨道吊和集卡在不同作业模式下的作业顺序以最大化两者衔接的重合时间窗,实现单位集装箱作业综合效益值最大化。

2 模型构建

2.1 模型假设

为便于问题研究与求解,本文提出以下假设:①所有集装箱为 20 英尺(1 英尺=0.3048 m)且数量已知;②直取箱的比例为已知固定值;③忽略堆场分区内部及船舶岸桥处内部的装卸作业顺序;④集装箱水铁联运枢纽堆场集卡停靠点唯一且固定,在同一堆场不分设不同集卡停靠点;⑤班列进站停靠位置恒定且班列长度已知。

2.2 变量符号

模型中的参数集和关键指标见表 1,作业时间包括轨道吊和集卡的运行及等待时间、集装箱在途时间等,成本包括建设成本以及对应的运行成本等。

2.3 多目标设备资源优化模型

本文以最小化单位集装箱作业时间和成本的综合效益值为优化目标,建立如下模型:

$$\min z_1 + z_2 \quad \forall i \in I_1 \cup I_2 \quad (1)$$

$$\sum_{g \in G} X_{Tg,i} = \sum_{g \in G} X_{Sg,i} = \sum_{u \in U} X_{Tu,i} = \sum_{u \in U} X_{Su,i} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{i \in I_1 \cup I_2} C_{Tg,ij} = \sum_{g \in G} \sum_{i \in I_2} C_{1Sg,ij} = \sum_{u \in U} \sum_{i \in I_1 \cup I_2} C_{Tu,ij} = \sum_{u \in U} \sum_{i \in I_2} C_{2Su,ij} = 1 \quad (3)$$

$$(1 - D_{Tg,g',ij}) \geq X_{Tg,i} - X_{Tg,j} \quad (1 - D_{2Sg,g',ij}) \geq X_{Sg,i} - X_{Sg,j} \quad (1 - D_{h,h',ij}) \geq X_{h,i} - X_{h,j} \quad (4)$$

$$|X_{Tg,i} - X_{Tg,j}| + (1 - D_{Tg,g',ij}) \geq 1 \quad |X_{2Sg,i} - X_{2Sg,j}| + (1 - D_{2Sg,g',ij}) \geq 1 \quad (5)$$

$$|X_{h,i} - X_{h,j}| + (1 - D_{h,h',ij}) \geq 1 \quad (S_{h,i} - F_{h,j}) + (1 - D_{h,h',ij}) > 0 \quad (6)$$

$$(S_{Tg,j} - F_{Tg,i}) + (1 - D_{Tg,g',ij}) > 0 \quad (S_{2Sg,i} - F_{2Sg,j}) + (1 - D_{2Sg,g',ij}) > 0 \quad (7)$$

$$S_{Tg,j} - (F_{Tg,j} + W_{Tg,i} + E_{g,ij}) + M(1 - C_{Tg,ij}) \geq 0 \quad (8)$$

$$S_{2Sg,j} - (F_{2Sg,i} + W_{2Sg,i} + E_{g,ij}) + M(1 - C_{2Sg,ij}) \geq 0 \quad (9)$$

$$S_{1Sg,j} - (F_{1Sg,i} + W_{1Sg,i} + E_{g,ij}) + M(1 - C_{1Sg,ij}) \geq 0 \quad (10)$$

$$S_{h,j} - (F_{h,i} + W_{h,i} + E_{h,ij}) + M(1 - C_{h,ij}) \geq 0 \quad (11)$$

$$W_{Tg,i} \geq F_{Tu,i} + E_{Tu,ij} - S_{Tg,j} + O_{Tg,j} \quad E_{Tu,ij} = \{E_{1Tu,ij}, E_{2Tu,ij}\} \quad (12)$$

$$W_{2Sg,j} \geq F_{2Su,i} + E_{2Sg,j} - (S_{2Sg,j} + O_{2Sg,j}) \quad (13)$$

$$W_{1Sg,j} \leq S_{1Sg,j} - (F_{1Su,i} + O_{1Sg,i} + E_{1Sg,ij}) \quad (14)$$

$$W_{h,j} \leq S_{h,j} - (F_{u,i} + O_{h,i} + E_{h,ij}) \quad (15)$$

$$S_{Tu,i} - (F_{Tu,i} + W_{Tu,i} + E_{Tu,ij}) + M(1 - C_{Tu,ij}) \geq 0 \quad (16)$$

$$S_{2Su,i} - (F_{2Su,i} + W_{2Su,i} + E_{Su,ij}) + M(1 - C_{2Su,ij}) \geq 0 \quad (17)$$

$$S_{Tu,j} - (F_{Tu,i} + O_{h,i} + E_{h,ij} + W_{h,j}) + M(1 - C_{Tu,ij}) \geq 0 \quad (18)$$

$$S_{Tu,j} - (F_{Tu,i} + O_{Sg,i} + E_{g,ij} + W_{1Sg,j}) + M(1 - C_{Tu,ij}) \geq 0 \quad O_{Sg,i} = (O_{1Sg,i}, O_{2Sg,i}) \quad (19)$$

$$W_{Tu,j} \geq (S_{Tg,j} + O_{Tg,j}) - (F_{Tu,i} + E_{Tu,ij}) \quad (20)$$

$$W_{2Su,j} \geq (S_{2Sg,i} + O_{2Sg,j}) - (F_{2Su,i} + E_{Su,ij}) \quad (21)$$

$$F_{Tg,i} + F_{2Sg,i} + F_{Tu,i} + F_{2Su,i} = S_{Tg,i} + O_{Tg,i} + S_{2Sg,i} + O_{2Sg,i} + S_{Tu,i} + O_{Tu,i} + S_{2Su,i} + O_{Su,i} \quad (22)$$

表1 模型参数说明

Table 1 Model parameters description

参数	说明
I_1, I_2	堆存箱和直取箱集合
I_{20}, J_{22}	进口箱来源为铁路的车船直取集装箱和进口箱来源为堆场的堆存箱
G	轨道吊(铁路)集合, $g, g' \in G$, 其中 $1Sg$ 和 $2Sg$ 分别表示集装箱进入和离开堆场侧的轨道吊, Tg 表示铁路侧轨道吊
H	岸桥(船舶)集合, $h, h' \in H$
U	集卡集合, $u \in U$, $1Su$ 和 $2Su$ 表示目的为堆场和码头前沿的铁路侧集卡, $1Tu$ 和 $2Tu$ 表示进入和离开堆场侧的集卡
$O_{Tg,i}(O_{h,i})$	集装箱 i 由铁路轨道吊 g (岸桥 h) 吊装所需要的时间, $i \in I_1 \cup I_{20}(i \in I_2)$
$O_{1Sg,i}(O_{2Sg,i})$	进入(离开)堆场轨道吊 g 自拿起集装箱 i 至放下集装箱 i 前所需要的时间, $i \in I_1(i \in I_{22})$
$O_{Tu,i}(O_{Su,i})$	集装箱 i 由铁路(堆场)侧集卡 u 装载后位移至目标位置所需要的时间, $i \in I_1 \cup I_{20}(i \in I_{22})$
$E_{g,ij}(E_{h,ij})$	轨道吊(岸桥)从集装箱 i 的终止位置运行至后序集装箱 j 的初始位置的空驶时间, $i, j \in I_1 \cup I_2(i, j \in I_2)$
$E_{1Sg,ij}(E_{2Sg,ij})$	进入(离开)堆场侧轨道吊从集装箱 i 的终止位置运行至后序集装箱 j 的初始位置的空驶时间, $i, j \in I_1 \cup I_2(i, j \in I_2)$
$E_{1Tu,ij}(E_{2Tu,ij})$	目的为堆场(码头前沿)的铁路侧集卡从集装箱 i 终止位置行驶至后序集装箱 j 初始位置的空载时间, $i, j \in I_1(i, j \in I_{20})$
$E_{Su,ij}$	目的为码头前沿的堆场侧集卡从前序集装箱 i 终止位置行驶至后序集装箱 j 的初始位置的空载时间, $i, j \in I_{22}$
$S_{Tg,i}(S_{h,i})$	指派铁路侧轨道吊 g (岸桥 h) 对集装箱 i 作业的开始时间, $i \in I_1 \cup I_{20}(i \in I_2)$
$S_{1Sg,i}(S_{2Sg,i})$	指派堆场侧(离开堆场侧)轨道吊 g 对集装箱 i 作业的开始时间, $i \in I_1(i \in I_{22})$
$S_{Tu,i}$	指派铁路侧集卡 u 对集装箱 i 作业的开始时间, $i \in I_1 \cup I_{20}$
$S_{1Su,i}(S_{2Su,i})$	指派进入(离开)堆场集卡 u 对集装箱 i 作业的开始时间, $i \in I_1(i \in I_{22})$
$F_{Tg,i}(F_{h,i})$	指派铁路轨道吊 g (岸桥 h) 对集装箱 i 作业的完成时间, $i \in I_1 \cup I_{20}(i \in I_2)$
$F_{1Sg,i}(F_{2Sg,i})$	指派进入(离开)堆场轨道吊 g 对集装箱 i 作业的完成时间, $i \in I_1(i \in I_{22})$
$F_{Tu,i}$	指派铁路侧集卡 u 完成集装箱 i 作业的时间, $i \in I_1 \cup I_{20}$
$F_{1Su,i}(F_{2Su,i})$	指派进入(离开)堆场侧集卡 u 完成集装箱 i 作业的时间, $i \in I_1(i \in I_{22})$
$W_{Tg,i}(W_{h,i})$	集装箱 i 由铁路轨道吊 g (岸桥 h) 作业后等待集卡的时间, $i \in I_1 \cup I_{20}(i \in I_2)$
$W_{1Sg,i}(W_{2Sg,i})$	集装箱 i 由进入(离开)堆场轨道吊 g 作业后等待集卡的时间, $i \in I_1(i \in I_{22})$
$W_{Tu,i}$	铁路侧集卡为开始集装箱 i 等待轨道吊的时间, $i \in I_1 \cup I_{20}(i \in I_2)$
$W_{1Su,i}(W_{2Su,i})$	进入(离开)堆场侧集卡为开始集装箱 i 等待轨道吊的时间, $i \in I_1(i \in I_{22})$
$L_{g,ij}(L_{u,ij})$	轨道吊 g (集卡 u) 由集装箱 i 位置运行至集装箱 j 位置的运行距离
$Q_{g,ij}(Q_{u,ij})$	轨道吊 g (集卡 u) 由集装箱 i 位置运行至集装箱 j 位置的成本
$F_{OS}(F_{OT})$	集装箱在船舶(班列)作业时间
N	码头建设成本
M	惩罚系数
$C_{Tg,ij}$	集装箱 i 和 j 为连续作业且由铁路侧轨道吊 g 进行装卸, 则 $C_{Tg,ij} = 1$, 否则 $C_{Tg,ij} = 0, i, j \in I_1 \cup I_{20}$
$C_{1Sg,ij}$	集装箱 i 和 j 为连续作业且由进入堆场侧轨道吊 g 进行装卸, 则 $C_{1Sg,ij} = 1$, 否则 $C_{1Sg,ij} = 0, i \in I_1, j \in I_1 \cup I_{22}$
$C_{2Sg,ij}$	集装箱 i 和 j 为连续作业且由离开堆场侧轨道吊 g 进行装卸, 则 $C_{2Sg,ij} = 1$, 否则 $C_{2Sg,ij} = 0, i \in I_1, j \in I_1 \cup I_{22}$
$C_{h,ij}$	集装箱 i 和 j 为连续作业且由岸桥 h 进行装卸, 则 $C_{h,ij} = 1$, 否则 $C_{h,ij} = 0, i, j \in I_2$
$C_{Tu,ij}$	集装箱 i 和 j 为连续作业且由铁路侧集卡进行运输, 则 $C_{Tu,ij} = 1$, 否则 $C_{Tu,ij} = 0, i, j \in I_1 \cup I_{20}$
$C_{2Su,ij}$	集装箱 i 和 j 为连续作业且由离开堆场侧集卡进行运输, 则 $C_{2Su,ij} = 1$, 否则 $C_{2Su,ij} = 0, i \in I_{22}, j \in I_1 \cup I_{22}$
$D_{Tg,g',ij}$	铁路侧轨道吊 g 对集装箱 i 作业时, 同时轨道吊 g' 对集装箱 j 作业, 则 $D_{Tg,g',ij} = 1$, 否则 $D_{Tg,g',ij} = 0, i, j \in I_1 \cup I_{20}$
$D_{1Sg,g',ij}$	进入堆场侧轨道吊 g 对集装箱 i 作业时, 同时轨道吊 g' 对集装箱 j 作业, 则 $D_{1Sg,g',ij} = 1$, 否则 $D_{1Sg,g',ij} = 0, i \in I_1, j \in I_1 \cup I_{22}$
$D_{2Sg,g',ij}$	离开堆场侧轨道吊 g 对集装箱 i 作业时, 同时轨道吊 g' 对集装箱 j 作业, 则 $D_{2Sg,g',ij} = 1$, 否则 $D_{2Sg,g',ij} = 0, i \in I_1, j \in I_1 \cup I_{22}$
$D_{h,h',ij}$	岸桥 h 对集装箱 i 作业时, 同时岸桥 h' 对集装箱 j 作业, 则 $D_{h,h',ij} = 1$, 否则 $D_{h,h',ij} = 0, i, j \in I_2$
$X_{h,i}$	集装箱 i 由岸桥 h 作业, 则 $X_{h,i} = 1$, 否则 $X_{h,i} = 0, i, j \in I_1 \cup I_{20}$
$X_{Tg,i}$	集装箱 i 由铁路轨道吊 g 作业, 则 $X_{Tg,i} = 1$, 否则 $X_{Tg,i} = 0, i, j \in I_1 \cup I_{20}$
$X_{Tu,i}$	集装箱 i 由铁路侧集卡 u 作业, 则 $X_{Tu,i} = 1$, 否则 $X_{Tu,i} = 0, i, j \in I_1 \cup I_{20}$
$X_{Su,i}$	集装箱 i 由堆场侧集卡 u 作业, 则 $X_{Su,i} = 1$, 否则 $X_{Su,i} = 0, i, j \in I_1 \cup I_{20}$
$X_{Sg,i}$	集装箱 i 由堆场侧轨道吊 g 作业, 则 $X_{Sg,i} = 1$, 否则 $X_{Sg,i} = 0, i, j \in I_1 \cup I_{20}$, 其中 $X_{Sg,i} = \{X_{1Sg,i}, X_{2Sg,i}\}, X_{1Sg,i}, X_{2Sg,i}$ 分别为进入堆场侧和离开堆场侧的轨道吊 g 作业

$$S_{Tu,i} - F_{Tg,i} + M |X_{Tg,i} - X_{Tu,i}| \geq 0 \quad (23)$$

$$S_{2Su,i} - F_{2Sg,i} + M |X_{2Sg,i} - X_{Su,i}| \geq 0 \quad (24)$$

其中

$$z_1 = \max(F_{Tg,i} + F_{1Sg,i} + F_{Tu,i} + F_{2Sg,i} + F_{h,i} + F_{OS} + F_{OT})$$

$$z_2 = L_{g,ij}Q_{g,ij} + L_{u,ij}Q_{u,ij} + N$$

式(1)为目标函数,式(2)为决策变量,指定了集装箱由特定轨道吊和集卡进行作业;式(3)为集装箱连续作业的决策变量,确保作业流程的连续性;式(4)确保所有轨道吊或岸桥在同一时间内不会同时作业两个集装箱,避免资源冲突;式(5)~(7)保证轨道吊对集装箱装卸的顺序要求;式(8)~(11)表示轨道吊或岸桥的作业开始和结束时间受到集卡等待和返回时间的约束;式(12)~(15)表示集卡受轨道吊作业的等待时间以及返回时间的约束;式(16)~(19)表示集卡前后作业顺序的约束;式(20)(21)表示轨道吊的作业时间受

集卡前后作业顺序的影响;式(22)表示开始和结束时间的约束;式(23)(24)规定对应的轨道吊和集卡必须对同一集装箱进行作业,以保证作业的一致性。

2.4 求解算法

多目标设备资源调度优化模型采用遗传算法进行求解^[19]:①为保证码头设备资源的均衡协调性,以轨道吊在固定区域作业、集卡柔性作业为编码原则,采用两段基因编码方式,前段基因组表示集装箱的作业序列,后段为在给定作业序列条件下的集卡运输策略^[20];②为提高码头设备资源间优化的性能,以编码得到的任务分配顺序集合为输入,关键设计如图 3 所示,考虑码头设备资源交互过程中的等待成本确定最佳的设备任务分配方案^[21]。

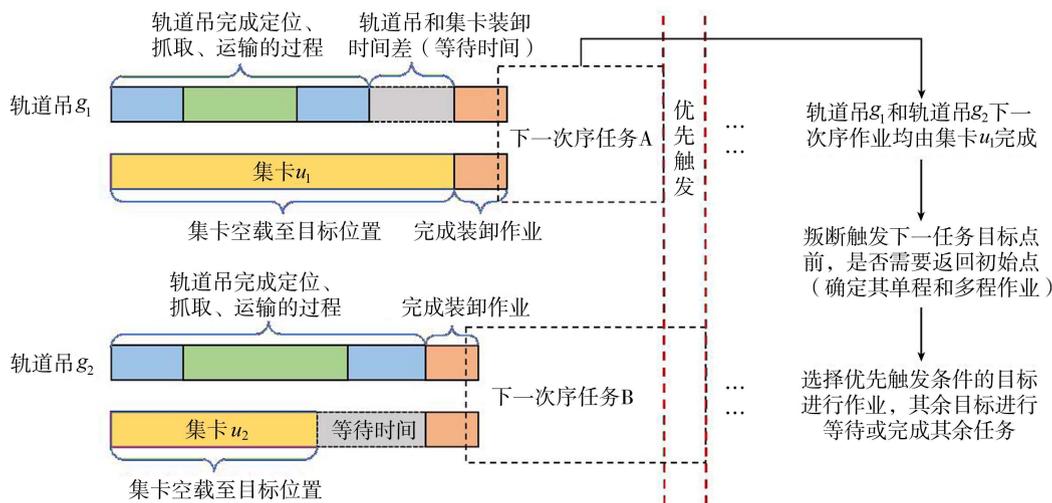


图 3 并行机调度策略流程图

Fig. 3 Flow chart of parallel machine scheduling

3 实例验证

3.1 背景参数

为验证本文提出的优化模型的有效性,以武穴港水铁联运枢纽为背景构建集装箱水铁联运集疏运网络进行算例分析,根据实际调查数据获取作业相关参数见表 2。

表 2 作业实例的相关参数

Table 2 Relevant parameters to the operation instance

参数	单位	取值	参数	单位	取值
轨道吊移动速度	m/s	5	集卡	万元/辆	60~85
轨道吊提升速度	m/s	0.2	堆场及其道路建设成本	万元	24 296.7
集卡运行速度	m/s	10	港区场地改建成本	万元/km	5 000~7 000
轨道式龙门起重机操作成本	元/TEU	10.49	运输线路成本	万元/km	3 000
集卡运行成本	元/(km·TEU)	5~8	码头+引桥+护岸建设成本	万元	17 913.11
空(满)载班列运行成本	元/(km·t)	0.1/(0.18)	单台集装箱轨道吊	万元/台	1 000~2 000

考虑到码头实际运营的发展过程,本文在狭义车船直取中同步考虑广义车船直取,同时为控制直取集装箱数量过少而造成的随机误差,保证堆场作业的集装箱数量处于显著水平以评估转运设备作业情况,选择 50%的车船直取集装箱比例进行调度优化。此外,由于车船直取作业在堆场布局、码头前沿铁路利用、设备调度方式上具有差异,本文共设计 3 组试验对优化模型进行测试,具体测试场景见表 3。

表 3 测试场景

Table 3 Test scenario

测试场景序号	堆场布局	是否建设码头前沿铁路	作业方式
1	共堆场	否	班列-共堆场-船舶、班列-集卡-船舶
2	分堆场	否	班列-分堆场-船舶、班列-集卡-船舶
3	共堆场	是	班列-共堆场-船舶、班列-集卡-船舶、班列-轨道吊-船舶

表3的测试场景中,按照集装箱的作业性质和设备操作区域将堆场布局分类为共堆场与分堆场2种模式,根据是否利用码头前沿铁路将其划分为广义车船直取和狭义车船直取作业模式,同时在以上场景中进一步考虑是否调度轨道吊与集卡设备的影响。

3.2 结果分析

通过固定车船直取集装箱占比,运用优化模型对3组测试场景的轨道吊、集卡调度方案进行优化求解,优化结果及其收敛曲线如表4、图4和图5所示。

表4 优化结果

Table 4 Optimization result

测试场景	优化前		优化后		时间优化比率/%	综合效益优化比率/%
	效益值	t_1 /min	效益值	t_2 /min		
1	50603	4.79	46148	4.45	7.10	8.80
2	47786	4.72	42174	4.26	9.75	11.70
3	48363	4.20	44942	4.14	1.43	7.07

注: t_1 、 t_2 分别为优化前后的单位集装箱作业时间。

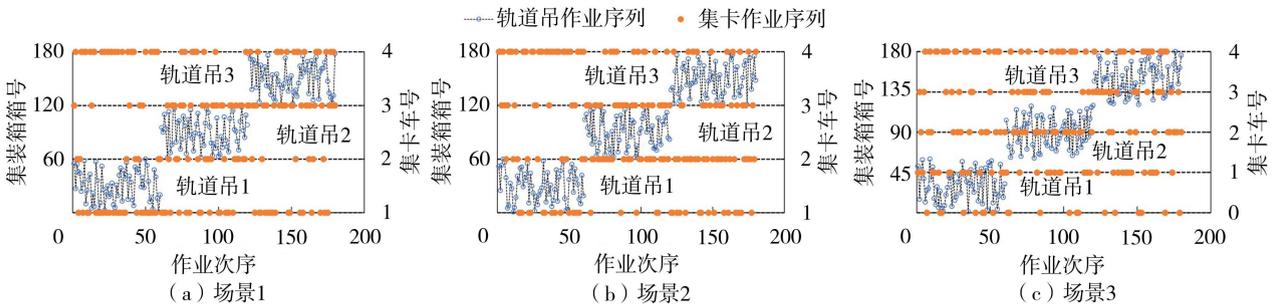


图4 考虑轨道吊和集卡的作业序列

Fig. 4 Job scheduling sequence considering rail cranes and container trucks

表4、图4和图5表明,本文优化模型有效提升了所有测试场景的作业效率和综合效益,其中共堆场和分堆场布局下的广义车船直取分别在114代、111代达到最优状态,而共堆场布局的狭义车船直取在99代达到最优状态。具体来看:①通过轨道吊和集卡的调度优化能够进一步挖掘综合优化效益,在3组测试场景下分别提升8.8%、11.7%和7.07%;②广义车船直取的时间与综合效率优化比率明显优于狭义模式,这是由于广义模式下集卡需要跨越堆场运输至码头前沿,而优化模型能够有效减少轨道吊和集卡之间的等待时间,相比之下,狭义模式利用码头前沿铁路进行换装,对集卡的需求较低,因此本文的优化模型对提升二者间衔接水平的效果较小,但从作业时间角度考虑,狭义模式下的作业时间低于广义模式;③广义车船直取的分堆场较共堆场布局取得更显著的优化效益,这是由于分堆场布局提供了更大的灵活性,允许进出口集装箱在码头堆场或铁路堆场进行选择性地堆存,而共堆场布局虽然简化了换装流程,但也增加了设备调度的灵活性要求。

由图6可知,优化调度后取得的成本效益提升均大于时间效益,说明在单次重合时间窗内能够完成更多集装箱转运作业,减少班列和船舶的等待成本,即能够在班列计划和船舶计划一致的条件下较为充分利用该时间窗进行直取作业。

为进一步研究不同车船直取比例对作业效益的影响,本文固定集装箱总量为180个,分别选取10%、30%、50%、70%和90%的直取比例进行试验。为消除班列时刻表和船舶随机到达所产生的波动影响,每组试验进行10轮,最终取各组试验综合效益的平均值作为优化结

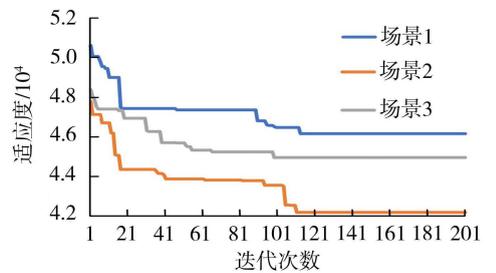


图5 各测试场景收敛图

Fig. 5 Convergence graphs for each test scenario

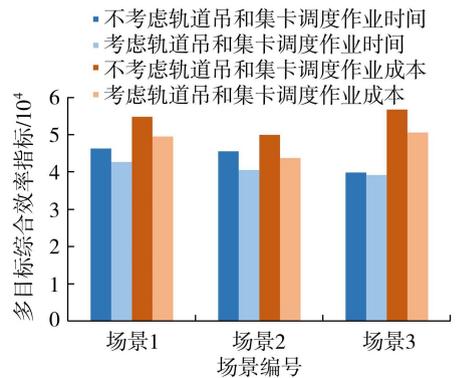


图6 各测试场景效率指标对比

Fig. 6 Comparison of efficiency indicators for each test scenario

果(表 5)。

结合图 4、图 5 和表 5 可知,在各组测试场景下考虑轨道吊和集卡的调度优化后,部分集装箱的作业始末时间、进行操作的作业设备得到了优化,使其作业效率得到不同程度的提升,因此可以通过对表 5 试验结果的横纵向对比,得到各类测试场景的提升效果及其适用范围。在广义模式下,以共堆场交接模式为布局且车船直取比例较低时,其作业效率提升程度最为显著,例如在 10%比例下,作业效率提升幅度达 13.45%,总体上在 10%~30%的区间范围该模式的综合效益在所有测试场景中表现最优,而以分堆场交接模式为布局的广义模式在直取比例适中时(50%)为最佳选择,提升幅度达到 11.74%;在狭义模式下,作业效率整体上与车船直取比例呈正相关性,在 90%的直取比例时效率提升效果最优,提升幅度达到 13.21%,并且在较高直取比例下(70%和 90%)其综合效益值要优于广义模式。

进一步分析不同试验场景的差异可发现,在较高直取比例下由于广义车船直取的班列和船舶间存在较长的空间距离,导致在重合时间窗内,进行车船直取作业集装箱的数量少于狭义车船直取,因此在较高比例下,狭义车船直取能够充分利用班列和船期的重合时间窗完成转运作业。此外,共堆场情况下其作业设备间作业交换较为频繁,而分堆场布局下由于其相对独立的设备作业区域,导致其协同性低于共堆场布局,当车船直取集装箱比例由 50%提升至 90%时,共堆场布局的作业效率提升幅度要大于分堆场布局,此时考虑轨道吊和集卡的调度对共堆场所提供的平均优化率也要优于分堆场布局。由此可见,各类车船直取布局模式具有差异化的适用范围,可针对不同直取比例集装箱采取相适配的模式以提高作业效率。

4 结 语

本文提出了充分利用重合时间窗实现集装箱在铁路和水路间直接转运的调度策略并构建优化模型,显著提升了车船直取模式下的集装箱转运效率并减少作业成本,发现合理采用不同的车船直取布局模式可以提高作业效率。通过多场景实例分析发现,各种车船直取模式具有最佳适用的直取比例范围,总体上中低比例范围内广义模式的作业效率提升幅度较高,而高比例下更适用于狭义模式。此外,在比例提升过程中,考虑轨道吊和集卡的调度对共堆场所提供的平均优化率要优于分堆场布局。

车船直取过程中集装箱在堆场或船舶存在翻箱问题,为提升所提优化策略的泛用性,其对转运效率的影响值得在后续工作中进一步研究。本文优化模型对其他多式联运场景具有推广和借鉴意义,可以借鉴应用于公铁联运、公水联运、公铁水联运等多式联运场景,提高联运作业效率,减少转运时间和成本,满足客户的高时效要求。

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. (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. (in Chinese))

[2] 王永生,黄鹏飞,陈麒龙,等.基于改进布谷鸟算法的集装箱码头配载优化研究[J].中国航海,2023,46(3):65-71. (WANG Yongjin, HUANG Pengfei, CHEN Qilong, et al. Loading optimization for container terminal based on Improved Cuckoo Search algorithm[J]. Navigation of China, 2023, 46(3): 65-71. (in Chinese))

[3] 黄肖玲,张迪,李嘉琦,等.基于同贝同步的岸桥与集卡两阶段协同优化[J].系统工程理论与实践,2021,41(10):2621-2630. (HUANG Xiaoling, ZHANG Di, LI Jiaqi, et al. Two-stage cooperative optimization of quay cranes and trucks with dual-cycling operations in same ship-bay[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(10): 2621-2630. (in Chinese))

[4] 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-

表 5 不同车船直取比例的优化结果

Table 5 Optimization results of different vessel/ship take ratios

测试场景	车船直取比例/%	综合效益		综合效益提升比率/%	最优车船直取比例范围/%
		优化前	优化后		
1	10	69 341	60 014	13.45	10~30
	30	61 390	53 563	12.75	
	50	50 603	46 148	8.80	
	70	39 949	36 582	8.43	
	90	34 932	32 469	7.05	
2	10	70 005	64 138	8.38	30~70
	30	58 772	53 591	8.82	
	50	47 786	42 174	11.74	
	70	40 601	37 789	6.93	
	90	31 773	29 583	6.89	
3	10	67 916	63 060	7.15	70~100
	30	60 575	55 918	7.69	
	50	48 363	44 942	7.07	
	70	36 990	32 515	12.10	
	90	30 246	26 251	13.21	

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 and Practice*, 2017, 37(5): 1349-1359. (in Chinese))
- [5] 李琦, 魏玉光. 带时间窗的中心站多车程集卡调度优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024, 24(1): 272-281. (LI Qi, WEI Yuguang. Multi-trip truck scheduling optimization of central station with time window[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(1): 272-281. (in Chinese))
- [6] 金淳, 赵璐, 高鹏. 集装箱港口多式运输系统资源配置协调优化研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(3): 900-904. (JIN Chun, ZHAO Lu, GAO Peng. Optimization for resource allocation coordination on multimodal transport system on container terminal[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(3): 900-904. (in Chinese))
- [7] 仲昭林, 孔珊, 张纪会, 等. 集装箱码头设备配置与作业调度集成优化研究[J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(10): 263-275. (ZHONG Zhaolin, KONG Shan, ZHANG Jihui, et al. Integrated optimization of container terminal equipment configuration and scheduling[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(10): 263-275. (in Chinese))
- [8] 邢曦文, 毛钧, 张睿, 等. 基于混合流水作业组织的集装箱码头装卸作业集成调度优化[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(10): 97-105. (XING Xiwen, MAO Jun, ZHANG Rui, et al. Optimization of container loading/unloading integrated scheduling in a container terminal based on hybrid flowshop[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(10): 97-105. (in Chinese))
- [9] 初良勇, 周于佩, 姚艺飞, 等. 自动化码头多资源协同调度优化模型与算法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(10): 1539-1546. (CHU Liangyong, ZHOU Yupei, YAO Yifei, et al. Co-scheduling optimization of multiple resources in the automated terminal considering AGV path conflict[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(10): 1539-1546. (in Chinese))
- [10] LI Junjun, YAN Lixing, XU Bowei. 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.
- [11] LIU Wenqian, ZHU Xiaoning, WANG Li, et al. Multiple equipment scheduling and AGV trajectory generation in U-shaped sea-rail intermodal automated container terminal[J]. *Measurement*, 2022, 206(3): 112262
- [12] 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. (WANG Xiaohan, JIA Yulin, CAI Jiixin, et al. Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(12): 3063-3073. (in Chinese))
- [13] LI Wenfeng, DU Shuaishuai, ZHONG Lingchong, et al. Multiobjective scheduling for cooperative operation of multiple gantry cranes in railway area of container terminal[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 46772-46781.
- [14] 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. (in Chinese))
- [15] 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. (in Chinese))
- [16] 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. (in Chinese))
- [17] 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.
- [18] YAN Baicheng, ZHU Xiaoning, LEE D H, et al. Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 141: 106296.
- [19] 金睿, 丁宏亮, 沈西华, 等. 基于遗传-剩余矩形算法的装配式预制构件堆场优化[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(2): 182-189. (JIN Rui, DING Hongliang, SHEN Xihua, et al. Packing optimization of precast concrete components for prefabricated construction based on genetic-surplus rectangle algorithm[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(2): 182-189. (in Chinese))
- [20] 王红瑞, 魏豪杉, 胡立堂, 等. 基于遗传算法的SVM-AR改进模型与应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(6): 488-497. (WANG Hongrui, WEI Haoshan, HU Litang, et al. Improved model and application of SVM-AR based on genetic algorithm[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(6): 488-497. (in Chinese))
- [21] 钟稜充, 李文锋, 贺利军, 等. 集装箱码头混合零空闲柔性流水作业调度优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(11): 3421-3432. (ZHONG Lingchong, LI Wenfeng, HE Lijun, et al. Optimization of mixed no-idle flexible flow scheduling in container terminal[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(11): 3421-3432. (in Chinese))