

控制与决策

Control and Decision

基于混合流水作业组织的码头集疏港作业集成优化

刁瑾洁, 王文敏, 黄颖, 蔡佳芯, 靳志宏

引用本文:

刁瑾洁, 王文敏, 黄颖, 等. 基于混合流水作业组织的码头集疏港作业集成优化[J]. *控制与决策*, 2025, 40(8): 2481-2490.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0076>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[超启发式交叉熵算法求解模糊分布式流水线绿色调度问题](#)

Hyper-heuristic cross-entropy algorithm for green distributed permutation flow-shop scheduling problem with fuzzy processing time
控制与决策. 2021, 36(6): 1387-1396 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1681>

[基于改进蚁群算法的水面无人艇路径规划](#)

Path planning for unmanned surface vehicle based on improved ant colony algorithm
控制与决策. 2021, 36(4): 847-856 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0839>

[基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度](#)

Flight deck operations scheduling based on dual population fuzzy gravitational search algorithm
控制与决策. 2021, 36(11): 2751-2759 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0523>

[基于2D-OTSU图像边缘检测的回转窑工况识别方法](#)

Condition recognition method of rotary kiln based on 2D-OTSU image edge detection
控制与决策. 2021, 36(10): 2427-2434 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0348>

[基于改进蛙跳算法的分布式两阶段混合流水车间调度](#)

An improved shuffled frog leaping algorithm for the distributed two-stage hybrid flow shop scheduling
控制与决策. 2021, 36(1): 241-248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0472>

基于混合流水作业组织的码头集疏港作业集成优化

刁瑾洁¹, 王文敏¹, 黄颖¹, 蔡佳芯², 靳志宏^{1†}

(1. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 大连海事大学 航运经济与管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为充分利用码头资源, 减少集卡在港时间, 缓解码头拥堵问题, 考虑闸口与堆场作业的相互影响, 将集装箱码头集疏港作业视为两阶段混合流水作业, 优化集卡作业指派和作业顺序. 首先, 将集卡视为工件, 每个集卡需要依次经过第 1 阶段闸口作业和第 2 阶段堆场作业, 完成集卡进港提/送箱作业; 然后, 考虑堆场作业中中场桥安全距离、场桥不可跨越等现实约束, 建立基于混合流水作业组织的码头集疏港作业调度优化模型; 接着, 结合问题特点设计搜索算子, 应用基于 Q -learning 的改进变邻域搜索算法进行求解; 最后, 通过数值实验验证所提出算法的有效性, 将所提出策略与传统策略进行对比, 实验结果显示: 所提出基于混合流水作业组织优化策略能够降低 17.78% 的设备间作业时间不平衡度, 并降低 3.70% 集卡最大流程时间.

关键词: 集疏港作业; 混合流水线; 作业指派; 集卡调度; Q -learning; 变邻域搜索

中图分类号: U169 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2025.0076

引用格式: 刁瑾洁, 王文敏, 黄颖, 等. 基于混合流水作业组织的码头集疏港作业集成优化 [J]. 控制与决策, 2025, 40(8): 2481-2490.

Integration optimization of container terminal collection and distribution operations based on hybrid flow shop

DIAO Cui-jie¹, WANG Wen-min¹, HUANG Ying¹, CAI Jia-xin², JIN Zhi-hong^{1†}

(1. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: The paper takes into account the impact between the gate system and the yard system to make full use of terminal resources, reduces the trucks turnaround time, and alleviates the congestion at the terminals. This paper optimizes the truck task assignment and sequence through evaluating the collection and distribution operations as a two-stage hybrid flow shop. Specifically, trucks are considered workpieces that must go through gate operations in the first stage and yard operations in the second stage to complete pickup/delivery operations. The optimization model for collection and distribution operations based on the hybrid flow shop is established, taking into account the realistic constraints such as the non-crossing and safety spacing between the yard cranes. To solve this model, a variable neighbourhood search algorithm based on Q -learning is developed, and search operators are designed based on the problem characteristics. Numerical experiments show the effectiveness of the proposed algorithm. In comparison to conventional strategies, the hybrid flow shop-based strategy reduces the maximum flow time of trucks by 3.70% and reduces the imbalance of operating time between equipment by 17.78%.

Keywords: collection and distribution operations; hybrid flow shop; task assignment; container truck scheduling; Q -learning; variable neighbourhood search

0 引言

随着全球海运贸易量的增长, 我国主要港口的吞吐量逐年增长. 目前, 我国港口的集疏运方式仍然以公路运输为主, 港口每天需要处理大量的集卡作业, 对港口的作业效率提出了更高的要求. 集卡的集

疏港作业主要由码头的闸口和堆场构成的两阶段系统进行, 集卡在闸口通道与堆场场桥间的作业指派和作业顺序直接影响集卡在港滞留时间和码头设备利用率. 通过合理的作业指派和作业顺序, 可有效降低集卡在港时间, 平衡设备间作业负荷, 能够有效提

收稿日期: 2025-01-15; 录用日期: 2025-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72172023, 72171032, 72202025); 国家资助博士后研究人员计划项目 (GZC20230342).

责任编委: 樊治平.

†通信作者. E-mail: jinzhihong@dlnu.edu.cn.

高码头的作业效率和服务水平。

集卡在码头的集疏港作业可分为3个阶段:第1阶段,集卡按照预约系统的安排按时到港,由进港闸口通道进行过闸作业;第2阶段,集卡驶往目标箱区,由场桥进行堆场内的装卸作业;第3阶段,集卡完成装卸作业后行驶至出港闸口,完成出闸作业。研究表明,堆场作业是制约集装箱码头集疏港效率的主要瓶颈^[1],而闸口作业与堆场作业间相互影响,因此,将闸口与堆场视为一个系统,从系统整体的角度考虑子系统间相互作业集成优化集疏港作业。

近年来,国内外学者在集装箱码头作业系统优化领域取得了显著的研究进展。Li等^[2]以缓解码头拥堵为目标,构建了两阶段鲁棒优化模型,分阶段决策各集卡预约配额和箱区任务分配,实现了集卡作业计划的科学制定;在堆场作业优化方面,Hu等^[3]和Wang等^[4]分别针对集装箱转运延迟和堆存空间灵活分配问题展开了研究,前者运用了Benders分解算法,后者运用了基于列生成的启发式算法,均有效解决了堆场作业优化问题;此外,Kong等^[5]探讨了堆场布局对自动化集装箱码头服务能力的影响机制,提出了堆场布局优化方案,为提升码头作业效率提供了新思路。

部分学者基于混合流水作业组织对集装箱码头子系统展开了研究。Chen等^[6]以提高装卸效率为目标,基于混合流水作业组织研究了集装箱码头多设备调度优化问题;邢曦文等^[7]和徐奇等^[8]分别基于多阶段混合流水作业组织,研究了装卸作业调度和拖轮调度优化;Wang等^[9]和Xin等^[10]将集装箱视为工件,分别采用了离散事件仿真方法和基于树的邻域搜索算法,以最小化最大作业时间为目标,求解了基于混合流水作业组织的集装箱码头场桥-集卡和岸桥-场桥调度优化问题。这些研究充分挖掘了车间流水作业与码头作业的相似性,将混合流水作业优化方法应用于码头子系统的优化中,提高了码头作业效率。

经典混合流水作业组织优化中各设备为相互独立的并行机,码头的场桥间存在作业干扰,部分学者针对场桥实际作业限制研究了场桥作业优化问题。范厚明等^[11]和Zhang等^[12]考虑了场桥间和集卡间的作业干扰,研究了堆场作业优化问题;Chu等^[13]考虑了场桥间安全距离和不可跨越约束,研究了3个场桥在两个相邻箱区中的调度优化问题;Gao等^[14]提出了基于任务的综合调度策略,优化了作业指派和作业顺序,其效果优于传统先到的先服务策略。这些研究充分考虑了现实作业约束,为场桥作业决策提

供了理论支持。

堆场作为码头中集装箱装卸和堆存的核心区域,其作业与泊位中的船舶装卸作业以及闸口中的集卡进出港作业密切相关。已有学者研究了堆场和闸口作业系统^[2],堆场和泊位作业系统^[6-7,10]的集成优化问题,其中部分学者从混合流水作业的角度将集装箱视为工件,聚焦于码头内部作业优化^[7,9-10]。然而,现有基于混合流水作业理论的码头作业优化研究,鲜有能够充分考虑设备间的作业干扰,多采用作业空间预分配策略来减少作业干扰对于优化结果的影响,虽然显著降低了模型复杂度,但是难以准确地反映实际作业情况。

本文在上述研究的基础上,从混合流水作业组织优化的角度出发,将集卡视为工件,研究集装箱码头集疏港作业。考虑集卡公司和集装箱码头双方的优化需求以及码头作业中的现实约束,以各设备的作业时间均衡和减少集卡最大流程时间为目标,提出考虑设备间作业干扰的集装箱码头闸口与堆场两阶段混合流水作业优化模型,丰富了现有研究。分析集疏港作业与经典混合流水车间作业的异同,构建混合整数规划模型,采用基于Q-learning的变邻域搜索算法求解,通过数值实验验证所提出模型的有效性和所提出算法的高效性。

本文的主要内容如下:1)分析集疏港作业与经典混合流水车间作业的异同,将集卡视为工件,将闸口过闸和堆场装卸视为两道工序,构建两阶段集疏港作业优化模型;2)采用改进的变邻域搜索算法求解,根据问题特点设计作业顺序交换以及设备间的作业交换和作业插入作为邻域结构,结合Q-learning进一步优化邻域结构选择;3)基于码头作业数据设计不同规模的算例,对所建立的数学模型和求解算法进行验证。

1 基于混合流水作业组织的调度优化模型

1.1 问题描述

混合流水线作业通常描述为有多个工件需要经过多道工序进行加工,每个工件的加工顺序相同,至少有一道工序由多个相同的设备作业。通过优化工件在各阶段各设备上的作业指派和加工顺序以最小化工件的最长流程时间以及均衡各设备的作业负荷。

本文将集装箱码头集疏港作业视为两阶段混合流水作业调度问题,如图1所示。具体而言,将待作业集卡视为工件,集卡需要依次经过第1阶段闸口作业和第2阶段堆场作业,以完成集卡进港提送箱作业。第1阶段的作业设备为多个并行闸口通道,各

通道作业相互独立; 第2阶段的作业设备为场桥, 各场桥间存在作业限制和干扰. 各集卡在任一阶段由不同设备作业的时间相同. 集卡在各阶段的作业指派与顺序决策具有耦合性, 直接影响集卡的作业流程时间. 本研究通过决策集卡在闸口通道和堆场场桥上的作业指派以及作业顺序来优化集卡最长流程时间并均衡各设备作业时间.

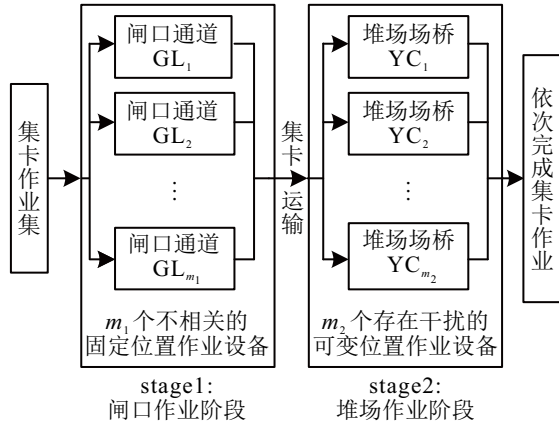


图1 集装箱码头集卡集疏港两阶段流水作业组织示意图

相较于经典的混合流水作业, 集装箱码头集卡集疏港作业呈现出以下特征, 增加了问题的复杂性.

1) 阶段间水平运输: 集卡在闸口阶段作业结束与堆场阶段作业开始间存在与集卡作业目标位置相关的水平运输时间, 导致集卡到达堆场目标位置的顺序与其进港顺序产生偏差, 需要考虑阶段间水平运输时间对于作业顺序的影响.

2) 动态准备时间: 经典混合流水作业中设备在连续作业间的准备时间通常是固定的, 而堆场场桥需要移动至目标箱位进行作业, 其连续作业准备时间取决于作业指派和作业顺序.

3) 设备间作业干扰: 经典混合流水作业中, 通常认为设备是独立作业的并行机, 而场桥间存在作业干扰和限制. 具体表现为场桥在作业过程中需要保持安全距离, 且在移动过程中不可跨越其他场桥.

1.2 模型假设

本文结合码头作业实际情况, 对问题进行合理简化, 作出假设如下:

- 1) 所有待作业集卡均以一标准箱为目标箱;
- 2) 集卡预约信息和堆场堆存计划在规划期开始前已知, 即集卡的到港时间、提箱集卡的目标箱位置以及送箱集卡的目标堆栈位置均已知;
- 3) 集卡在各阶段作业过程不可中断;
- 4) 提箱集卡在提箱过程中, 将目标箱上方的集装箱暂时堆存至箱区旁, 在完成目标箱提取后立即移动回原堆栈^[13];

- 5) 所有场桥和所有集卡的行驶速度相等且不变;
- 6) 将同一水平位置的多个相邻箱区作为一个箱区, 同一箱区内可用场桥共享.

1.3 数学符号

本文中的符号定义如表1和表2所示.

表1 集合和参数符号定义

符号	定义
N	集卡集合, $N = \{i, j i, j = 1, 2, \dots, N \}$; $N = N^C \cup N^D$, N^C 、 N^D 分别为提箱集卡和送箱集卡集合
P	预约时段集合, $P = \{p p = 1, 2, \dots, P \}$
T	时间间隔集合, $T = \{t t = 1, 2, \dots, T \}$
集合	O 箱区集合, $O = \{o o = 1, 2, \dots, O \}$
B	贝位集合, $B = \{b b = 1, 2, \dots, B \}$
K	作业阶段集合, $K = \{k k = 1, 2\}$, $k = 1$ 为闸口作业阶段, $k = 2$ 为堆场作业阶段
M_k	第 k 阶段作业设备集合, $M_k = \{m m = 1, 2, \dots, M_k\}$
$[b_o^L, b_o^R]$	箱区 o 所包含的贝位, $\forall o \in O$
$[t_p^L, t_p^R]$	预约时段 p 所包含的时间间隔, $\forall p \in P$
ug	闸口通道对集卡的单位作业时间
uk	堆场场桥对集装箱的单位作业时间
d	场桥间的安全距离
H	一个足够大的正数
la_i	集卡 i 作业目标所在行位, $\forall i \in N$
lb_i	集卡 i 作业目标所在位置, $\forall i \in N$
lh_i	提箱集卡 i 作业目标在规划期开始前所在位置, 若为最上层可直接提取, 则 $lh_i = 1, \forall i \in N^C$
参数	ra_i 集卡 i 的预约到港时间, $\forall i \in N$
	rb_i 集卡 i 从闸口到目标箱位置的行驶时间, $\forall i \in N$
	rr_{ij} 场桥在集卡 i, j 作业目标所在位置的行驶时间, $\forall i, j \in N, i \neq j$
	rl_{ij} 若集卡 i, j 作业目标所在位置为同一箱区间一贝位同一行的不同层, 则 $rl_{ij} = 1$; 否则, $rl_{ij} = 0, \forall i, j \in N, i \neq j$
	ru_{ij} 若集卡 i, j 作业目标在同一箱区内, 且集卡 i 作业目标在集卡 j 左侧, 则 $ru_{ij} = 1$; 否则, $ru_{ij} = 0, \forall i, j \in N, i \neq j$
	$tv_{mm'}$ 若场桥 m, m' 在堆场同一箱区内, 且场桥 m 在场桥 m' 右侧, 则 $tv_{mm'} = 1$; 否则, $tv_{mm'} = 0, \forall m, m' \in M_k, m \neq m', k = 2$

1.4 数学模型

所提出策略的数学模型如下所示:

$$f_1 = \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M_k} \left| q_{mkp} - \sum_{m \in M_k} q_{mkp} / |M_k| \right|; \quad (1)$$

$$f_2 = \max(ts_{i2} - ra_i). \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{m \in M_k} x_{imk} = 1, \forall i \in N, \forall k \in K; \quad (3)$$

$$y_{ijmk} + y_{jimk} \leq 1, \forall i, j \in N, i \neq j, \forall m \in M_k, \forall k \in K; \quad (4)$$

表2 决策变量和衍生变量符号定义

符号	定义
ts_{ik}	集卡 <i>i</i> 在第 <i>k</i> 阶段作业的开始时刻, $\forall i \in N, \forall k \in K$
决策变量 x_{imk}	若集卡 <i>i</i> 在第 <i>k</i> 阶段由设备 <i>m</i> 进行作业, 则 $x_{imk} = 1$; 否则, $x_{imk} = 0, \forall i \in N, \forall m \in M_k, \forall k \in K$
y_{ijmk}	若在第 <i>k</i> 阶段分配给同一设备 <i>m</i> 的集卡 <i>i</i> 是 <i>j</i> 的紧前作业, 则 $y_{ijmk} = 1$; 否则, $y_{ijmk} = 0, \forall i, j \in N, i \neq j, \forall m \in M_k, \forall k \in K$
te_{ik}	集卡 <i>i</i> 在第 <i>k</i> 阶段作业的完成时刻, $\forall i \in N, \forall k \in K$
α_{imkt}	若第 <i>k</i> 阶段设备 <i>m</i> 在时间间隔 <i>t</i> 中对集卡 <i>i</i> 进行作业, 则 $\alpha_{imkt} = 1$; 否则, $\alpha_{imkt} = 0, \forall i \in N, \forall m \in M_k, \forall k \in K, \forall t \in T$
φ_{ikt}	若集卡 <i>i</i> 在时间间隔 <i>t</i> 中开始进行第 <i>k</i> 阶段作业, 则 $\varphi_{ikt} = 1$; 否则, $\varphi_{ikt} = 0, \forall i \in N, \forall k \in K, \forall t \in T$
ϕ_{ikt}	若集卡 <i>i</i> 在时间间隔 <i>t</i> 中正在进行第 <i>k</i> 阶段作业, 则 $\phi_{ikt} = 1$; 否则, $\phi_{ikt} = 0, \forall i \in N, \forall k \in K, \forall t \in T$
衍生变量 β_{mkbtt}	若第2阶段作业设备场桥 <i>m</i> 在时间间隔 <i>t</i> 中位于贝位 <i>b</i> , 则 $\beta_{mkbtt} = 1$; 否则, $\beta_{mkbtt} = 0, \forall m \in M_k, \forall b \in B, \forall t \in T, k = 2$
δ_{mkott}	若第2阶段作业设备场桥 <i>m</i> 在时间间隔 <i>t</i> 中位于箱区 <i>o</i> , 则 $\delta_{mkott} = 1$; 否则, $\delta_{mkott} = 0, \forall m \in M_k, \forall o \in O, \forall t \in T, k = 2$
q_{mkp}	在预约时段 <i>p</i> 第 <i>k</i> 阶段设备 <i>m</i> 作业时长, $\forall m \in M_k, \forall k \in K, \forall p \in P$
g_i	在同一堆栈中位于任务 <i>i</i> 之上且在任务 <i>i</i> 前被提走的集装箱数, $\forall i \in N$
h_i	在同一堆栈中位于任务 <i>i</i> 之上且在任务 <i>i</i> 前被送到的集装箱数, $\forall i \in N$

$$\begin{aligned}
 &y_{ijmk} + y_{jimk} \geq -1 + x_{imk} + x_{jmk}, \\
 &\forall i, j \in N, i \neq j, \forall m \in M_k, \\
 &\forall k \in K; \tag{5}
 \end{aligned}
 \qquad
 \begin{aligned}
 &q_{mkp} = \sum_{t \in [t_p^L, t_p^R]} \sum_{i \in N} \alpha_{imkt}, \forall m \in M_k, \\
 &\forall k \in K; \tag{18}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &x_{imk} \geq y_{ijmk}, \forall i, j \in N, i \neq j, \\
 &\forall m \in M_k, \forall k \in K; \tag{6}
 \end{aligned}
 \qquad
 \sum_{b \in B} \beta_{mkbtt} = 1, \forall t \in T, \forall m \in M_k, k = 2; \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 &\sum_{i \in N} \alpha_{imkt} \leq 1, \forall m \in M_k, \forall k \in K, \forall t \in T; \tag{7} \\
 &\beta_{mk(lb_i)t} \leq 1 + M(1 - \alpha_{imkt}), \forall i \in N, \\
 &\forall t \in T, \forall m \in M_k, k = 2; \tag{20}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\alpha_{imkt} \leq x_{imk}, \forall i \in N, \forall m \in M_k, \\
 &\forall k \in K, \forall t \in T; \tag{8} \\
 &\beta_{mk(lb_i)t} \geq 1 - M(1 - \alpha_{imkt}), \forall i \in N, \\
 &\forall t \in T, \forall m \in M_k, k = 2; \tag{21}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\phi_{ikt} \geq \varphi_{ikt}, \forall i \in N, \forall k \in K, \forall t \in T; \tag{9} \\
 &\sum_{t'=1}^{t-1} \phi_{ikt'} \leq M(1 - \varphi_{ikt}), \forall i \in N, \\
 &\forall k \in K, \forall t \in T; \tag{10}
 \end{aligned}
 \qquad
 \begin{cases} ts_{ik} \geq ra_i, k = 1, \\ ts_{ik} \geq te_{i(k-1)} + rb_i, k = 2, \end{cases} \forall i \in N; \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
 &\sum_{t \in T} \varphi_{ikt} = 1, \forall i \in N, \forall k \in K; \tag{11} \\
 &ts_{ik} = \sum_{t \in T} t\varphi_{ikt}, \forall i \in N, \forall k \in K; \tag{23}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\alpha_{imkt} \geq x_{imk} + \phi_{ikt} - 1, \forall i \in N, \forall m \in M_k, \\
 &\forall k \in K, \forall t \in T; \tag{12} \\
 &g_j = \sum_{m \in M_k} \sum_{i \in N^C \setminus j} y_{ijmk} r_{ij}, \forall j \in N, k = 2; \tag{24}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\sum_{m \in M_k} \alpha_{imkt} = \phi_{ikt}, \forall i \in N, \\
 &\forall k \in K, \forall t \in T; \tag{13} \\
 &h_j = \sum_{m \in M_k} \sum_{i \in N^D \setminus j} y_{ijmk} r_{ij}, \forall j \in N, k = 2; \tag{25}
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \sum_{t \in T} \phi_{ikt} = ug, \forall i \in N, k = 1; \\ \sum_{t \in T} \phi_{ikt} = uk \cdot [2(lh_i - g_i + h_i) - 1], \\ \forall i \in N^C, k = 2; \\ \sum_{t \in T} \phi_{ikt} = uk, \forall i \in N^D, k = 2; \end{cases} \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
 &\alpha_{imkt} - \alpha_{imk(t+1)} \geq -M(2 - \phi_{ikt} - \phi_{ik(t+1)}), \\
 &\forall i \in N, \forall m \in M_k, \forall k \in K, \forall t \in T; \tag{14}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\alpha_{imkt} - \alpha_{imk(t+1)} \leq M(2 - \phi_{ikt} - \phi_{ik(t+1)}), \\
 &\forall i \in N, \forall m \in M_k, \forall t \in T, \forall k \in K; \tag{15}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &ru_{ij} \leq tv_{mm'} + M(2 - \alpha_{imkt} - \alpha_{jm'kt}), \forall t \in T, \\
 &\forall i, j \in N, i \neq j, \forall m, m' \in M_k, k = 2; \tag{16} \\
 &te_{ik} \geq ts_{ik} + \sum_{t \in T} \phi_{ikt}, \forall i \in N, \forall k \in K; \tag{27}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\phi_{ik(t+1)} + \phi_{ik(t-1)} - \phi_{ikt} \leq 1, \forall i \in N, \\
 &\forall k \in K, \forall t \in T; \tag{17} \\
 &\begin{cases} ts_{jk} \geq te_{ik} + 1 - M(1 - y_{ijmk}), k = 1; \\ ts_{jk} \geq te_{ik} + rr_{ij} + 1 - M(1 - y_{ijmk}), k = 2; \\ \forall i, j \in N, i \neq j, \forall m \in M_k; \end{cases} \tag{28}
 \end{aligned}$$

$$\delta_{mkt} = \sum_{b \in [b_o^L, b_o^R]} \beta_{mktb}, \forall t \in T, \forall m \in M_k, \forall o \in O, k = 2; \quad (29)$$

$$\sum_{o \in O} \delta_{mkt} = 1, \forall t \in T, \forall m \in M_k, k = 2; \quad (30)$$

$$\sum_{m \in M_k} \delta_{mkt} \leq 2, \forall t \in T, \forall o \in O, k = 2; \quad (31)$$

$$b' \sum_{b' \in B} \beta_{mkb't} - b \sum_{b \in B \setminus b'} \beta_{m'kbt} \geq d - M \cdot (2 - \delta_{mkt} - \delta_{m'kot}), \forall t \in T, \forall o \in O, \forall m, m' \in M_k, k = 2; \quad (32)$$

$$ts_{ik}, te_{ik}, p_i, h_i \in Z^+, \forall i \in N, k \in K; \quad (33)$$

$$q_{mkp} \in Z^+, \forall m \in M_k, \forall k \in K, \forall p \in P. \quad (34)$$

其中: 式 (1) 为各阶段各设备的作业时间不平衡度 f_1 . 式 (2) 为规划期内集卡最长流程时间 f_2 . 式 (3) ~ (6) 为集卡任务指派相关约束. 这里: 式 (3) 确保各阶段各集卡均由一台设备进行作业; 式 (4) 表示若集卡 i, j 在任意阶段指派给同一设备, 则集卡 i, j 不同时作业; 式 (5) 和 (6) 表示若集卡 i, j 在任意阶段同一设备上有作业顺序关系, 则须将集卡 i, j 指派给此设备. 式 (7) ~ (21) 为与时间间隔相关的约束. 其中: 式 (7) 保证各设备在各时间间隔最多只能对一个集卡进行作业; 式 (8) 表示在任意阶段内, 若任意设备在规划期内某一时间间隔中对集卡 i 作业, 则必须将集卡 i 指派给该设备; 式 (9) 和 (10) 表示在任意阶段内若集卡 i 在时间间隔 t 开始作业, 则在此时间间隔前不进行集卡 i 的作业; 式 (11) 保证规划期内各集卡各阶段只有一个开始时间间隔; 式 (12) 和 (13) 保证各阶段各时间间隔内集卡和所分配的设备同时处于作业状态; 式 (14) 和 (15) 保证各阶段各集卡在作业期间由同一设备连续作业; 式 (16) 保证堆场作业阶段场桥间不可跨越; 式 (17) 保证集卡作业开始后不中断; 式 (18) 表示以各设备处于作业状态的时间间隔总和作为设备的作业时间; 式 (19) 限制任意时间间隔内各场桥只占用一个贝位; 式 (20) 和 (21) 表明场桥若在时间间隔 t 正在对集卡 i 进行作业, 则场桥在集卡 i 作业目标所在贝位. 式 (22) ~ (28) 表示与开始时间、结束时间相关的约束. 其中: 式 (22) 确保集卡在各阶段作业开始时间不早于其到达时间; 式 (23) 表示集卡各阶段开始作业时间间隔与开始作业时间的关系; 式 (24) 和 (25) 表示集卡在堆场作业开始前在同一堆栈内目标位置之上的集装箱提箱和送箱的数量; 式 (26) 为集卡在各阶段的作业时间与设备单位作业时间的关系; 式 (27) 为集卡在各阶段作业完

成时间与开始时间的关系; 式 (28) 表示集卡在各阶段作业开始时间不早于其紧前作业结束时间. 式 (29) ~ (32) 为确保场桥安全运行的相关约束. 这里: 式 (29) 和 (30) 表示在堆场阶段各时间间隔内场桥只能在一个箱区内, 式 (31) 确保堆场阶段各时间间隔同一箱区内最多配置两台场桥, 式 (32) 保证同一箱区内作业的两个场桥间安全距离. 式 (33) 和 (34) 为变量取值范围.

由于目标函数 f_1, f_2 具有不同的量纲, 首先设定 f_1^{\max}, f_1^{\min} 以及 f_2^{\max}, f_2^{\min} 分别为目标函数 f_1, f_2 的可接受上界值和下界值, 采用线性归一化对目标函数进行无量纲化处理, 如下所示:

$$f'_1 = (f_1 - f_1^{\min}) / (f_1^{\max} - f_1^{\min}), \quad (35)$$

$$f'_2 = (f_2 - f_2^{\min}) / (f_2^{\max} - f_2^{\min}), \quad (36)$$

为各目标函数分配权重系数, 分别为 w_1, w_2 , 要求 $w_1 + w_2 = 1$, 且 $w_1, w_2 \geq 0$. 利用加权方法将多目标函数转化为单目标函数, 如下所示:

$$\min f' = w_1 f'_1 + w_2 f'_2. \quad (37)$$

2 基于 Q-learning 的变邻域搜索算法

变邻域搜索算法是一种求解组合优化问题的启发式算法框架, 其核心在于通过动态调整邻域结构来平衡局部搜索深度与全局探索广度. 在混合流水作业组织优化领域, 变邻域搜索算法已得到了广泛应用^[15]. 一方面, 基于问题设计的解编码中, 包含闸口和堆场两个作业阶段, 每个阶段包含作业指派和作业顺序两个子结构, 有多种可行的邻域结构; 另一方面, 由于闸口和堆场的作业开始时间受集卡到港时间限制, 且堆场作业指派受目标箱位置限制, 采用对初始解破坏性较小的邻域搜索策略更为合适. 相较于其他全局寻优能力更强的算法, 变邻域搜索算法通过渐近式邻域变换来实现有效搜索, 具有较好的适配性.

近年来, 部分学者将 Q-learning 与元启发式算法相结合来提升算法的性能, 并在组合优化问题求解中取得了显著成效^[16]. Q-learning 作为一种无模型的强化学习算法, 通过与环境交互学习最优策略, 具有强大的全局探索能力, 但是收敛速度较慢. 考虑到 Q-learning 的全局探索特性与变邻域搜索算法的局部搜索能力具有互补性, 且 Q-learning 可通过学习历史搜索经验指导邻域选择策略, 二者结合能够提高搜索效率, 实现更优的搜索效果^[17], 因此, 采用 Q-learning 优化变邻域搜索算法的搜索算子选择, 具体算法流程如图 2 所示.

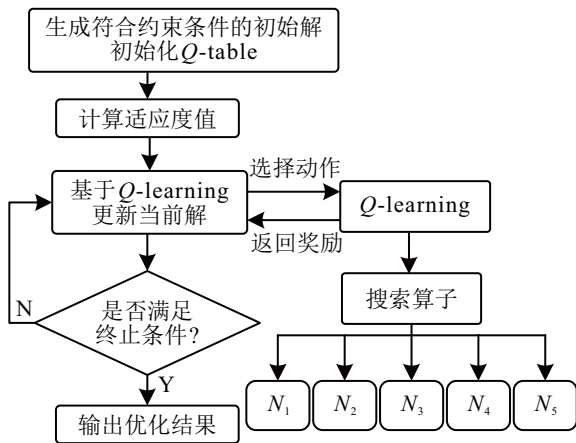


图2 基于Q-learning的变邻域算法流程

2.1 编码方式

集装箱码头集卡集疏港作业优化需要解决两个子问题: 1) 集卡在各阶段的作业顺序; 2) 集卡在各阶段设备间的作业指派. 为此设计双层编码方案, 如图3所示: 第1层编码表示集卡在闸口阶段的作业顺序和通道指派, 第2层编码表示集卡在堆场阶段的作业顺序和场桥指派, 每层前*N*个基因为作业顺序, 后*N*个基因为作业指派. 以5个集卡作业任务, 2个闸口通道和3个堆场场桥为例, 闸口阶段的作业顺序为2→5→1→3→4, 堆场阶段的作业顺序为2→5→3→1→4, 其中集卡2由通道1和场桥1作业.

	作业顺序					作业分配				
闸口阶段	2	5	1	3	4	1	2	2	1	1
堆场阶段	2	5	3	1	4	1	2	3	1	2

图3 解的编码

2.2 初始解生成与不可行解调整

为保证解的可行性, 基于集卡预约到港时间生成初始作业顺序, 应用*K*近邻算法, 以集卡到港时间为指标对作业任务进行聚类, 随机交换同一类中集卡的作业顺序, 生成集卡在闸口和堆场中的初始作业顺序.

在闸口作业阶段, 将集卡作业随机指派给可用闸口通道, 尽可能均衡各闸口通道的任务分配. 在堆场作业阶段, 根据各箱区块包含的箱区数、可用场桥数以及集卡任务信息, 预设每个场桥的作业范围. 将集卡作业按照预设范围指派给场桥, 以确保初始解的可行性.

以模型的目标函数作为适应度函数. 在适应度计算中, 根据当前解的作业顺序和指派信息, 计算各阶段各设备在各时间间隔内的作业情况以及各集卡各阶段的开始和结束作业时间. 若同一时间间隔内,

同一箱区块中两个集卡*i, j*满足: 集卡*i*的作业位置在集卡*j*左侧, 集卡*i*由场桥*m*作业, 集卡*j*由场桥*m'*作业, 且场桥*m*位于场桥*m'*右侧, 则交换集卡*i, j*的指派场桥.

2.3 搜索算子

根据码头集卡集疏港两阶段混合流水作业优化问题的特征, 设计如下5种局部搜索算子.

1)*N*₁(作业顺序的交换): 应用*K*近邻算法, 以集卡到港时间为指标对作业任务进行聚类, 根据聚类结果, 选择某一类中的随机两个作业进行顺序交换.

2)*N*₂(闸口通道的作业插入): 随机选择两个闸口通道, 将作业时间较长的闸口通道中某个集卡作业指派至另一闸口通道.

3)*N*₃(堆场场桥的作业插入): 随机选择一个箱区, 从该箱区内被指派作业任务的两台场桥中, 将作业时间较长场桥的某个集卡作业指派给另一场桥.

4)*N*₄(闸口通道间作业交换): 随机选择两个闸口通道, 各选择一个集卡作业进行交换.

5)*N*₅(堆场场桥间作业交换): 随机选择一个箱区, 从该箱区内被指派作业任务的两台场桥中, 各选择一个集卡作业进行交换.

2.4 基于Q-learning的改进变邻域搜索算法

Q-learning是核心思想为 value-based 的强化学习算法, 从环境中收集行动所获得的奖励信息选择合适的行动, 从而进行决策优化. Q-learning中, 应用Q-table记录所有状态和行动对应的Q值. Q值更新公式如下所示:

$$Q(s, a) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s, a) + \alpha(R(s, a) + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)). \quad (38)$$

其中: *s*为当前状态, *a*为行动, *Q*(*s, a*)为在状态*s*下采取行动*a*时对应的Q值, ρ 和 γ 分别为学习率和折现因子, *Q*(*s', a'*)为转移后采取行动*a'*状态为*s'*时对应的Q值.

在所提出基于Q-learning的改进变邻域搜索算法(Q-VNS)中, 将解作为状态, 搜索算子作为行动. 若对某个解选择某个搜索算子后, 其适应度值优化程度较好, 相应奖励值增加, Q-table中的Q值增加, 则该搜索算子被选择的概率增加; 否则, 其被选择的概率降低. 通过持续更新Q-table, 能够更有效地选择合适的搜索算子, 从而生成更优的解.

Q-VNS算法步骤如下.

step 1: 初始化解和Q-table. 每个解对应一个状态, 每个搜索算子对应一个行动.

step 2: 计算当前解的适应度值.

step 3: 基于Q-learning选择搜索算子.

step 4: 选择行动后根据奖励值 reward 更新 Q-table. 若 $f' > f$, 则 reward = 10; 若 $f' = f$, 则 reward = 1; 其余情况, reward = 0.

step 5: 评估新解, 更新当前解.

step 6: 判断是否满足终止条件, 若满足, 则输出当前最优解; 否则, 返回至 step 3.

3 数值实验

3.1 实验设计

以我国东部某集装箱码头为例进行数值实验. 该码头为传统码头改建的自动化码头, 堆场仍然采用水平布局. 将 4 个箱区划分为一个箱区块, 包括两个提箱箱区和两个送箱箱区, 实际作业中箱区任务情况根据船舶作业计划动态调整. 每个箱区最多可同时分配两台场桥, 箱区的最大贝位、行数和层高分别为 [40, 6, 6]. 一个预约时段为 1 h, 划分为 60 个时间间隔, 每个时间间隔长度为 1 min. 闸口通道和堆场场桥对集卡和集装箱的单位作业时间分别为 1 个时间间隔和 2 个时间间隔. 场桥间的安全距离为 8 个贝位. 考虑码头实际作业情况, 设备间的作业时间不平衡度不超过 25%, 集卡最大周转时间为 45 min, 设定 $f_1^{\max} = \sum_{k \in K} 0.25|T| \times |M_k|$, $f_2^{\max} = 45$. 理论上, 期望各设备作业时间均衡, 集卡在码头各阶段无需等待可直接作业, 设定 $f_1^{\min} = 0$, $f_2^{\min} = uk + ug$. 为验证所提出模型和所提出算法的适用性, 根据预约时段、待作业集卡数量、箱区块和可用设备数量的不同, 设置 12 个算例, 如表 3 所示.

为提高算法有效性, 应用正交实验对算法关键参数进行优化设置: 解集规模 SN、学习率 ρ 、折现因子 γ . 分别设置 4 个水平值 $SN \in \{10, 20, 30, 40\}$, $\rho \in \{0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$, $\gamma \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}$. 利用算例 12 进行正交实验, 取 10 次实验的目标函数平均

表3 算例参数

算例	预约时段	待作业集卡数量 (总数/装箱/送箱)	箱区块和可用设备数量 (箱区块/闸口通道/堆场所)
1	1	20/10/10	1/2/5
2	1	40/15/25	1/2/5
3	1	60/30/30	1/2/5
4	2	60/30/30	1/2/5
5	2	90/45/45	1/2/5
6	2	120/60/60	1/2/5
7	3	320/160/160	2/3/10
8	3	320/160/160	2/2/10
9	3	320/160/160	2/3/12
10	4	400/200/200	2/3/10
11	4	400/240/160	2/3/10
12	4	400/160/240	2/3/10

值, SN、 ρ 、 γ 不同水平下的值分别为 [0.440, 0.399, 0.392, 0.416], [0.413, 0.404, 0.416, 0.412], [0.419, 0.407, 0.405, 0.415], 取参数分别为 $SN = 30$, $\rho = 0.7$, $\gamma = 0.3$ 进行数值实验.

3.2 算法有效性分析

通过对比 Q-VNS 与 CPLEX 结果, 验证所提出模型和所提出算法的有效性, 结果如表 4 所示. 对于小规模算例, CPLEX 和 Q-VNS 均能够在可接受时间内获得可行解, 随着算例规模的增大, CPLEX 的求解时间显著增加, 远高于 Q-VNS. 如在算例 3 中: CPLEX 的求解时间为 3466 s, 而 Q-VNS 的求解时间为 332 s. 对于算例 1 ~ 算例 3, Q-VNS 的最大 Gap 值为 3.72%. 在算例 4 中: CPLEX 无法在有限的计算时间 (30 min) 内获得最优解, 而所提出 Q-VNS 能够在保证求解质量的同时有效控制计算成本.

通过对比 Q-VNS 与 VNS 结果, 验证 Q-learning 对于改进邻域搜索算法的有效性. 如表 4 所示: Q-VNS 的最大值、平均值、最小值和极差分别比 VNS 减少了 7.10%、6.44%、2.06% 和 32.25%, 表明了

表4 Q-VNS、VNS 与 CPLEX 结果对比

算例	Q-VNS				VNS				CPLEX	
	Max	Ave	Min	CPU/s	Max	Ave	Min	CPU/s	f'	CPU/s
1	0.159	0.159	0.158	197	0.163	0.159	0.158	182	0.158	66
2	0.197	0.188	0.181	255	0.204	0.190	0.181	232	0.181	407
3	0.284	0.276	0.271	332	0.312	0.286	0.272	308	0.267	3466
4	0.230	0.214	0.198	347	0.237	0.230	0.201	321	-	-
5	0.232	0.215	0.212	433	0.255	0.236	0.218	402	-	-
6	0.302	0.279	0.233	583	0.325	0.287	0.251	558	-	-
7	0.369	0.338	0.299	2182	0.393	0.368	0.308	1997	-	-
8	0.370	0.349	0.329	1972	0.427	0.373	0.337	1838	-	-
9	0.332	0.304	0.269	2292	0.354	0.331	0.277	2119	-	-
10	0.350	0.329	0.305	2642	0.385	0.355	0.309	2431	-	-
11	0.322	0.351	0.313	2737	0.395	0.384	0.328	2545	-	-
12	0.335	0.319	0.297	2546	0.384	0.346	0.338	2370	-	-

Q-VNS具有更好的计算稳定性,且初始解的质量对于输出结果的影响更小.此外,Q-VNS的平均值和最小值均优于或等于VNS,表明了其寻优能力更强,能够有效跳出局部最优解.尽管Q-VNS的平均计算时间比VNS增加了7.72%,但是其在寻优能力和稳定性上的显著提升,验证了Q-learning的改进效果.

将基于混合流水作业组织的集疏港作业优化策略与传统集疏港作业策略进行对比分析.传统策略通常采用先到先服务的原则,以集卡到港顺序为作业顺序.集卡到港后指派给排队长度最短的闸口通道.采用等分贝位范围和等分任务量范围,预先划分

场桥作业范围.基于混合流水作业组织的优化策略与传统策略(等分贝位范围策略和等分任务量范围策略)的对比实验结果如表5所示,基于混合流水作业组织的结果选择最接近平均值的一组.在算例1~算例12中,基于混合流水作业组织的优化策略均优于传统策略.具体而言,基于混合流水作业组织的优化策略相较于等分贝位范围策略,设备间不平衡度降低了65.98%,集卡最长流程时间降低了7.14%,目标函数值降低了24.74%;相较于等分任务量范围策略,设备间不平衡度降低了17.78%,集卡最长流程时间降低了3.70%,目标函数值降低了6.19%.

表5 传统策略与基于混合流水作业组织策略的结果对比

算例	等分贝位范围			等分任务量范围			基于混合流水作业组织		
	f_1	f_2	f'	f_1	f_2	f'	f_1	f_2	f'
1	16.7	14	0.210	8.4	14	0.171	6.0	14	0.159
2	18.2	18	0.265	9.8	17	0.213	6.8	16	0.187
3	27.2	20	0.332	22.4	19	0.297	20.4	18	0.276
4	31.8	21	0.290	23.2	18	0.234	21.8	16	0.207
5	35.6	22	0.311	24.0	19	0.248	21.0	17	0.217
6	47.6	23	0.351	35.6	22	0.311	33.6	19	0.270
7	73.3	31	0.396	58.8	29	0.360	56.7	27	0.334
8	66.6	34	0.431	43.8	30	0.362	42.4	28	0.337
9	78.0	30	0.379	63.6	28	0.345	58.7	25	0.305
10	156.0	29	0.418	69.2	28	0.346	58.3	26	0.314
11	192.4	31	0.467	79.4	32	0.400	61.7	28	0.340
12	174.0	28	0.418	72.0	27	0.336	59.2	26	0.315

3.3 结果分析

以算例1为例,选取最接近平均值的一组结果展示作业计划,如图4所示.其中:各闸口通道的作业时间分别为[10,10]个作业间隔,各堆场场桥的作业时间分别为[22,18,21,20,19]个时间间隔,集卡的平均周转时间为12.6个时间间隔,集卡的最大周转时间为14个时间间隔;闸口通道1的作业顺序为11→15→10→16→6→5→19→18→9→13,闸口通道2的顺序为1→8→14→20→2→3→

4→12→7→17;堆场场桥1的作业顺序为8→6→5,堆场场桥2的顺序为10→2→3,堆场场桥3的顺序为1→4→9,堆场场桥4的顺序为14→16→12→7→17,堆场场桥5的作业顺序为11→15→20→19→18→13.

所提出优化策略,一方面考虑集疏港作业中间口作业与堆场作业的相互影响,基于闸口和场桥的可用状态优化集卡作业顺序和作业指派,相较于传统的先到先服务原则,该策略小幅度降低了集卡在各作业阶段等待时间;另一方面,考虑场桥调度的灵活性,与等分贝位范围策略以及等分任务量范围策略相比,所提出策略进一步考虑了场桥在任务间的准备作业和翻箱作业,平衡设备作业时间时,兼顾设备生产作业时间和非生产作业时间,能够实现合理调度,提高集卡服务质量.

3.4 灵敏度分析

为进一步表明所提出模型和所提出算法的有效性,分析可用场桥数量、集卡到港时间集中度以及集卡目标贝位分散度对结果的影响.

分析可用场桥数量对结果的影响,结果如

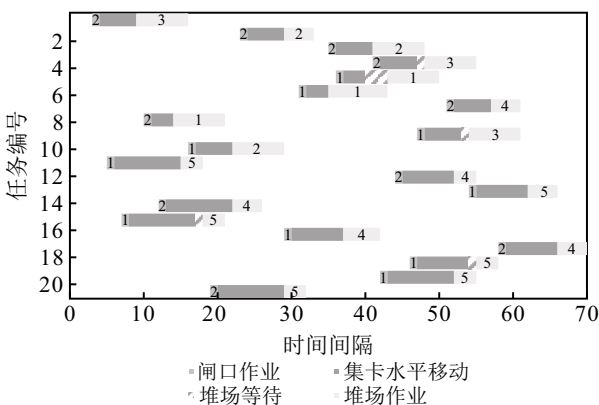
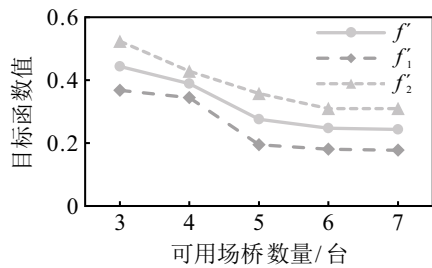
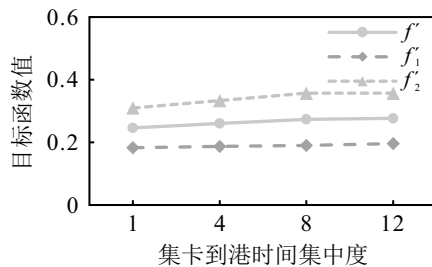


图4 集卡作业甘特图

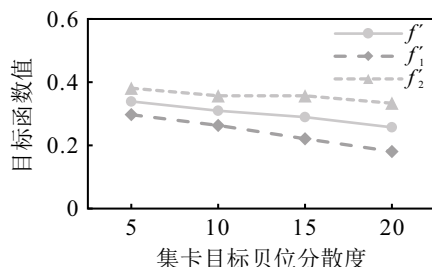
图5(a)所示. 随着可用场桥数量的增加, 目标函数值呈下降趋势. 集卡最长流程时间减少幅度逐渐降低, 分别为16.00%、14.29%、11.11%、0%. 设备间作业时间不平衡度的减少幅度出现波动, 分别为6.22%、43.65%、6.86%、2.11%. 当集卡任务量相同时, 增加场桥数量, 可降低集卡最长流程时间和设备间作业时间不平衡度, 当可用场桥数量大于等于5时, 下降幅度显著减小. 因此, 需要根据作业任务量合理配置场桥数量, 以避免资源浪费.



(a) 可用场桥数量对结果的影响



(b) 集卡到港时间集中度对结果的影响



(c) 集卡目标贝位分散度对结果的影响

图5 灵敏度分析结果

分析集卡到港时间集中度对结果的影响. 若集卡到港时间集中度越大, 则待作业集卡越集中在某些时间间隔内到港; 反之, 则每个时间间隔内到港的集卡数量相近. 结果如图5(b)所示, 随着集卡到港集中度的增加, 目标函数值呈上升趋势. 集卡最大周转时间的增加幅度分别为6.25%、5.88%、0%. 设备间作业时间不平衡度的增加幅度分别为2.08%、2.04%、3.00%. 集卡到港集中度对集卡最大周转时间的影响更为显著.

分析集卡目标贝位分散度对结果的影响. 若集卡目标贝位分散度越大, 则集卡的目标贝位越均匀地分布在箱区内; 反之, 则集卡的目标贝位集中在某些贝位间. 结果如图5(c)所示, 随着集卡目标贝位

分散度的增加, 目标函数值呈下降趋势. 集卡最大周转时间的减少幅度分别为5.26%、0%、5.56%. 设备间作业时间不平衡度的减少幅度分别为11.54%、15.94%、18.10%. 集卡目标贝位分散度对于设备间作业时间不平衡度的影响更为显著.

4 结论

本文将集疏港作业视为以集卡为工件, 闸口过闸和堆场装卸为两道工序的两阶段混合流水作业, 构建了基于混合流水作业组织的两阶段集疏港作业组织优化模型. 该模型以减少集卡最长流程时间以及均衡设备间作业时间为目标, 采用了基于Q-learning的变邻域搜索算法来求解, 优化了集卡在码头的作业指派和顺序.

实验结果表明, 改进的变邻域搜索算法相较于传统变邻域搜索算法具有更强的寻优能力和更高的计算稳定性. 与等分贝位范围策略以及等分任务量范围策略相比, 所提出优化策略在设备间不平衡度上分别降低了65.98%和17.78%, 在集卡最长流程时间上分别降低了7.14%和3.70%. 基于混合流水作业组织的优化策略能够有效减少集卡最长流程时间并实现设备间作业时间均衡. 通过灵敏度分析可知, 可用场桥数量、集卡到港时间集中度以及集卡目标贝位分散度均对结果有影响, 表明了所提出模型和所提出算法在多场景下的有效性, 其中可用场桥数量对结果影响程度更为显著, 在集卡作业量相同时, 增加可用设备投入是减少集卡在港时间的有效手段.

未来将在此研究的基础上, 开展如下工作: 1) 细分集卡作业类型, 研究双重任务集卡作业优先级对于集疏港作业的影响; 2) 研究码头设备配置和集卡调度联合优化问题; 3) 考虑不同翻箱策略对于集疏港作业的影响.

参考文献 (References)

- [1] 邵乾虔, 徐婷婷, 杨惠云, 等. 集卡分批到达模式下的进口箱场桥作业调度优化[J]. 控制与决策, 2016, 31(9): 1654-1662.
(Shao Q Q, Xu T T, Yang H Y, et al. Scheduling optimization of yard crane for import containers based on truck batch arrival pattern[J]. Control and Decision, 2016, 31(9): 1654-1662.)
- [2] Li S Q, Jia S, Tao Y, et al. Gate appointment design in a container terminal: A robust optimization approach[J]. Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 184: 103495.
- [3] Hu H T, Mo J, Zhen L. Integrated optimization of container allocation and yard cranes dispatched under delayed transshipment[J]. Transportation Research —

- Part C: Emerging Technologies, 2024, 158: 104429.
- [4] Wang W C, Lin S M, Zhen L. Flexible storage yard management in container terminals under uncertainty[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 186: 109753.
- [5] Kong L R, Ji M J. Mathematical modeling and optimizing of yard layout in automated container terminals[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 258: 125117.
- [6] Chen L, Bostel N, Dejax P, et al. A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 181(1): 40-58.
- [7] 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 X W, Mao J, Zhang R, 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.)
- [8] 徐奇, 邵乾虔, 靳志宏. 基于混合流水作业组织的港口拖轮调度优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(2): 485-493.
(Xu Q, Shao Q Q, Jin Z H. Optimization on tugboat operation scheduling based upon the hybrid flow shop arrangement[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2014, 34(2): 485-493.)
- [9] Wang Y, Jiang X J, Lee L H, et al. Tree based searching approaches for integrated vehicle dispatching and container allocation in a transshipment hub[J]. *Expert Systems with Applications*, 2017, 74: 139-150.
- [10] Xin J B, Negenborn R R, Lodewijks G. Energy-aware control for automated container terminals using integrated flow shop scheduling and optimal control[J]. *Transportation Research — Part C: Emerging Technologies*, 2014, 44: 214-230.
- [11] 范厚明, 姚茜, 马梦知. 多场桥分区平衡策划下的集装箱堆场箱位分配问题[J]. *控制与决策*, 2016, 31(9): 1603-1608.
(Fan H M, Yao X, Ma M Z. Storage space allocation based on regional workload balance planning of multiple yard cranes in container terminal yard[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(9): 1603-1608.)
- [12] Zhang X J, Li H J, Sheu J B. Integrated scheduling optimization of AGV and double yard cranes in automated container terminals[J]. *Transportation Research — Part B: Methodological*, 2024, 179: 102871.
- [13] Chu F, He J K, Zheng F F, et al. Scheduling multiple yard cranes in two adjacent container blocks with position-dependent processing times[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 136: 355-365.
- [14] Gao Y F, Ge Y E. Integrated scheduling of yard cranes, external trucks, and internal trucks in maritime container terminal operation[J]. *Maritime Policy & Management*, 2023, 50(5): 629-650.
- [15] Doush I A, Al-Betar M A, Awadallah M A, et al. Island neighboring heuristics harmony search algorithm for flow shop scheduling with blocking[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022, 74: 101127.
- [16] Ren Y X, Gao K Z, Fu Y P, et al. A novel Q -learning based variable neighborhood iterative search algorithm for solving disassembly line scheduling problems[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2023, 80: 101338.
- [17] Karimi-Mamaghan M, Mohammadi M, Meyer P, et al. Machine learning at the service of meta-heuristics for solving combinatorial optimization problems: A state-of-the-art[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 296(2): 393-422.

作者简介

刁瑾洁 (1996-), 女, 博士生, 主要研究方向为物流系统建模与优化, E-mail: dcj2014@163.com;

王文敏 (1995-), 女, 博士生, 主要研究方向为交通运输系统优化, E-mail: wmmwarming@163.com;

黄颖 (1996-), 女, 博士生, 主要研究方向为物流系统建模与优化, E-mail: huangy825@dlmu.edu.cn;

蔡佳芯 (1995-), 女, 博士, 主要研究方向为物流系统建模与优化, E-mail: 15021838052@163.com;

靳志宏 (1963-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为物流系统优化、交通运输规划与管理、港口与航运物流运作管理, E-mail: jinzhihong@dlmu.edu.cn.