

# 集装箱堆场双自动化堆垛机调度与灵活缓冲贝位决策联合优化研究

黄艳玲<sup>1</sup>, 胡志华<sup>1\*</sup>, 张连钢<sup>2</sup>, 孙秀良<sup>2</sup>, 张智璐<sup>2</sup>

(1. 上海海事大学物流研究中心, 上海 201306;

2. 青岛港国际股份有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:**在垂直布局的自动化集装箱码头堆场中,双自动堆垛机(ASC)的协同调度与资源分配是提升作业效率的关键。传统固定缓冲贝位策略因任务分布不均易引发路径冲突与资源竞争瓶颈,导致作业效率受限。为此,本文提出一种双ASC调度与灵活缓冲贝位决策的联合优化框架,旨在通过动态任务-贝位匹配机制与安全时间间隔约束模型,实现堆场资源的高效协同。首先,构建混合整数规划模型,以最小化任务完成时间为目标,耦合ASC路径规划、任务序列与缓冲贝位动态分配;其次,设计多染色体编码遗传算法,通过排序交叉与高斯变异策略增强大规模算例的求解效率。数值试验表明:相较于单一固定缓冲贝位策略,灵活缓冲贝位机制可减少13.9%的平均任务完成时间,验证了动态分配的自适应性与精准性。本研究为自动化码头堆场资源配置提供了理论支持与决策依据。

**关键词:**自动化集装箱码头;自动堆垛机;灵活缓冲贝位;遗传算法

中图分类号:U651

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.01.009

## Research on the joint optimization of the scheduling of two automated stacking cranes and the decision-making of flexible buffer blocks in the container yard

HUANG Yanling<sup>1</sup>, HU Zhihua<sup>1\*</sup>, ZHANG Lianggang<sup>2</sup>, SUN Xiuliang<sup>2</sup>, ZHANG Zhilu<sup>2</sup>

(1. Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306;

2. Qingdao Port International Co., Ltd. Qingdao, 266000)

**Abstract:** In the automated container terminal yard with a vertical layout, the collaborative scheduling and resource allocation of non-crossing Automated Stacking Cranes (ASC) are crucial for improving operation efficiency. The traditional fixed buffer block strategy is prone to causing path conflicts and resource competition bottlenecks due to the uneven distribution of tasks, resulting in limited operation efficiency. To address this issue, this paper proposes a joint optimization framework for the scheduling of two ASCs and the decision-making of flexible buffer blocks. The aim is to achieve efficient collaboration of yard resources through a dynamic task-block matching mechanism and a safety time interval constraint model. Firstly, a mixed-integer programming model is constructed. With the goal of minimizing the task completion time, it couples the path planning of ASCs, task sequences, and the dynamic allocation of buffer blocks. Secondly, a multi-chromosome encoding genetic algorithm is designed, and the sorting crossover and Gaussian mutation strategies are adopted

收稿日期:2025-02-08

基金项目:国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项项目(2023YFE0113200)资助

作者简介:黄艳玲(1997—),女,博士研究生,研究方向为自动化集装箱码头运作优化。\*通信作者:zhhu@shmtu.edu.cn

引用格式:黄艳玲,胡志华,张连钢,等. 集装箱堆场双自动化堆垛机调度与灵活缓冲贝位决策联合优化研究[J]. 中国航海,2026,49(1): 89-95.

HUANG Y L, HU Z H, ZHANG L G, et al. Research on the joint optimization of the scheduling of two automated stacking cranes and the decision-making of flexible buffer blocks in the container yard[J]. Navigation of China, 2026, 49(1): 89-95. (in Chinese)

to enhance the solution efficiency for large-scale instances. Numerical experiments show that compared with the single fixed buffer block strategy, the flexible buffer block mechanism can reduce the average task completion time by 13.9%, verifying the adaptability and accuracy of the dynamic allocation. This study provides theoretical support and decision-making basis for the resource allocation in automated terminal yards.

**Key words:** automated container terminal; automated stacking crane; flexible buffer bay; genetic algorithm

在垂直布局的自动化集装箱码头堆场箱区中,通常配置两台同规格的自动化堆垛机(Automated Stacking Crane, ASC),分别部署于海侧与陆侧作业端。其中,海侧ASC负责执行船舶装卸作业,陆侧ASC则承担腹地集装箱收发任务。为应对高吞吐量需求,此类堆场普遍采用不可穿越式双ASC配置方案,即两台ASC采用相同的规格参数,作业范围互不重叠且无法相互跨越,以最大化空间利用率。根据作业模式差异,ASC系统可分为堆场双侧协同作业、单侧独立作业及端部接力作业等类型。本研究聚焦于端部接力作业场景下双ASC的协同调度问题。然而,该配置虽提升了空间利用效率,却存在显著瓶颈:其一,海陆侧任务分配不均衡易导致单侧ASC过载,而另一侧设备闲置率升高;其二,远端箱位作业需频繁触发设备避让机制,造成效率损失与能耗增加。为此,业界引入交接贝位策略,即在箱区内设置固定中转缓冲区,通过双ASC接力搬运缓解冲突。然而,单一固定缓冲贝位易成为资源竞争瓶颈,为此本文提出多交接贝位动态分配机制,其核心挑战包括:1)多缓冲贝位的空间布局优化;2)任务与缓冲贝位的动态匹配决策。作为集装箱中转枢纽,堆场作业效率高度依赖ASC调度与缓冲资源配置的协同优化。若未合理规划双ASC作业序列及缓冲贝位分配,将引发路径冲突与作业延误。针对上述问题,本文构建双ASC调度与缓冲贝位决策的混合整数规划模型,以最小化任务完工时间为目标,设计基于遗传算法的求解策略,从而为提升码头资源利用效率与作业协同性提供理论与方法支持。

双自动化堆垛机调度与灵活缓冲贝位协同优化研究,旨在通过动态任务分配、路径规划与资源配置的集成决策,提升集装箱码头作业效率、降低堆场滞留时间并优化设备运行能耗。现有研究主要围绕双ASC调度策略、任务分配和负荷均衡和缓冲贝位决策与优化三个维度展开。

双ASC调度策略。路径规划与冲突规避。双ASC协同作业的核心挑战在于路径冲突规避与时空资源优化。早期研究多采用静态路径规划策略,通过预定义作业路径规避冲突<sup>[1]</sup>,但难以适应动态作业场景的实时需求。针对此问题,动态规划算法逐渐成为研究焦点,代表性方法包括启发式算法

(如粒子群优化算法<sup>[2]</sup>、遗传算法<sup>[3]</sup>)及智能优化技术(如强化学习<sup>[4]</sup>)。例如,李敏等<sup>[5]</sup>针对可穿越式双ASC系统,提出基于时间窗约束的冲突消解模型;王耀宗等<sup>[6]</sup>设计任务优先级驱动的遗传算法,优化双ASC同步调度效率。然而,现有研究多局限于单一设备或固定场景,对相同规格不可穿越式双ASC的协同机制缺乏系统探讨。

任务分配与负荷均衡。任务分配的目标是实现双ASC工作负荷均衡,最小化空驶时间与总作业周期。经典方法基于线性规划与混合整数规划<sup>[7]</sup>,通过建模任务时序关系优化分配方案。LU等<sup>[8]</sup>进一步引入任务重叠分析,构建混合整数规划模型以压缩完工时间;针对不确定性干扰,部分学者提出鲁棒优化与随机规划方法,增强调度方案的适应性<sup>[9]</sup>。研究表明,合理的任务分配可使ASC空驶时间减少达30%<sup>[10]</sup>,但现有模型多假设缓冲贝位固定,未能耦合动态贝位决策,限制了实际场景的适用性。

缓冲贝位决策与集成优化。缓冲贝位布局直接影响ASC作业效率与堆场资源利用率。传统策略采用固定规则(如先到先服务或区域划分<sup>[11]</sup>),虽易于实施,但难以应对流量波动与任务分布不均的挑战。近年来,集成ASC调度与缓冲贝位决策的综合优化模型成为趋势:ZHANG等<sup>[12]</sup>验证缓冲贝位可减少15%-20%的作业干扰;HU等<sup>[13]</sup>通过混合整数规划模型证明最优贝位选择可缩短35%的作业周期。然而,现有研究普遍采用全局固定缓冲贝位,忽略了任务目标位置差异性对贝位分配的影响<sup>[14]</sup>。尽管马飞杨等<sup>[15]</sup>与OLADUGBA等<sup>[16]</sup>指出动态调整贝位位置可提升效率,但其模型未与ASC路径规划深度耦合,且缺乏安全时间间隔约束下的冲突消解机制。

本文针对不可穿越式双ASC作业场景,提出双ASC调度与灵活缓冲贝位决策的联合优化框架,主要贡献包括:1)构建任务-贝位动态匹配机制,基于集装箱起止位置自适应分配缓冲贝位,突破固定贝位策略的局限性;2)设计融合安全时间间隔的混合整数规划模型,协同优化ASC路径规划、任务序列与贝位布局,降低冲突风险;3)开发多染色体编码遗传算法,实现大规模算例的高效求解。

## 1 问题描述

针对不可穿越双 ASC 调度与灵活缓冲贝位决策联合优化问题,引入相关集合和数据,说明关键特征与约束,模型相关符号及定义如表 1 所示。

表 1 模型相关符号及定义

Tab.1 Symbols and definitions related to the model

| 变量符号      | 具体定义  |
|-----------|---|
| $N$       | $N = \{1, 2, \dots\}$ , 集装箱任务集合, 以 $i, j$ 索引        |
| $B$       | $B = \{0, 1, 2, \dots\}$ , 堆场贝位集合                   |
| $K$       | 起重机集合, 由 $k$ 索引, 由海侧起重机 $p$ 和陆侧起重机 $c$ 组成           |
| $O_i$     | 任务 $i$ 的起始位置  |
| $D_i$     | 任务 $i$ 的目标位置  |
| $T_s$     | 两台起重机之间的安全时间间隔                                      |
| $T_m$     | 起重机移动一个贝位的时间  |
| $T_h$     | 起重机小车吊起/放下一个集装箱的时间                                  |
| $x_{ijk}$ | 0-1 变量, 起重机 $k$ 作业完任务 $i$ 后作业任务 $j$ 取 1, 否则取 0      |
| $y_i$     | 0-1 变量, 任务 $i$ 通过缓冲贝位取 1, 否则取 0                     |
| $b_{ik}$  | 起重机 $k$ 作业任务 $i$ 的起始贝位                              |
| $d_{ik}$  | 起重机 $k$ 作业任务 $i$ 的目标贝位                              |
| $s_{ik}$  | 起重机 $k$ 作业任务 $i$ 的开始时间                              |
| $e_{ik}$  | 起重机 $k$ 作业任务 $i$ 的结束时间                              |
| $u_{ij}$  | 0-1 变量, 海侧起重机在陆侧起重机开始作业任务 $j$ 之前完成任务 $i$ 取 1, 否则取 0 |
| $w_i$     | 任务 $i$ 的交接贝位  |
| $z$       | ASC 完成所有任务的完工时间                                     |

堆场的贝位集合记为  $B$ , 集合中贝位采用从海侧到陆侧从 1 开始的顺序编码的序号表示, 引入箱区两端交接区作为虚拟贝位, 记为 0 和  $|B| + 1$ , 并记  $\bar{B} = B \cup \{0, |B| + 1\}$ 。

不可穿越双 ASC 记为集合  $K = \{p, c\}$ ,  $p, c$  分别表示海侧与陆侧两个 ASC。

如图 1 所示, 由海侧交互区、陆侧交互区、海侧和陆侧 ASC、缓冲贝位和堆场内存储贝位组成。在卸船作业中, 当集装箱任务到达海侧交互区 (如图 1 中黑色三角形路线) 先由海侧 ASC 运输到缓冲贝位, 再由陆侧 ASC 从缓冲贝位将集装箱运送到目标贝位中进行存储。在装船作业中 (如图 1 中白色三角形路线), 陆侧 ASC 先将集装箱运送到缓冲贝位

中, 再由海侧 ASC 从集装箱提取运送到海侧交互区。

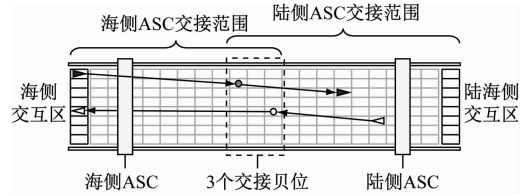


图 1 不可穿越 ASC 与灵活交接贝位作业箱区俯视图  
Fig.1 The top view of a non-crossable ASC (Automated Stacking Crane) operation box area with flexible transfer buffer bays

两个 ASC 的初始位置记为  $p_{kB} \in B, k \in K$ 。

引入以下时间数据: ASC 沿箱区方向移动一个贝位的时间记为  $T_m$ ; ASC 将任务  $i$  的集装箱从一个贝位起升/放下的时间记为  $T_h$ ; 两个 ASC 需要保持安全距离以避免冲突, 转换为时间后记为  $T_s$ 。

并引入两个虚拟任务 0 和  $|N| + 1$  表示任务的开始和结束, 从而任务集合表示为  $\bar{N} = N \cup \{0, |N| + 1\}$ 。

## 2 数学模型

### 2.1 基于固定单一交接贝位的 ASC 调度模型 M1

首先, 建立基于固定单一交接贝位的双 ASC 调度模型 M1。模型 M1 考虑卸船作业过程中, 所有需要经过缓冲贝位的集装箱任务, 交接贝位是固定的。由于垂直布局的自动化集装箱码头中布置的两个 ASC 不可穿越, 在双 ASC 调度问题中需要考虑设备的时空冲突问题。在模型 M1 中, 以所有任务完成时间最小为优化目标, 主要包括任务作业顺序约束、任务处理时间约束、时空冲突规避约束等三组约束。

所有任务完成时间的优化目标为式 (1)。

$$z \geq e_{ik}, \forall i, k \quad (1)$$

任务作业顺序约束包括式 (2) — (5), 是基于旅行商模型建立。约束 (2) ~ (3) 保证每个任务至多只有一个前继任务和一个后续任务。约束 (4) 和 (5) 保证需要进行交接贝位作业的任务依次由海侧起重机和陆侧起重机作业依次。

$$\sum_j x_{ijk} \leq 1, \forall i \in N, k \in K \quad (2)$$

$$\sum_i x_{ijk} \leq 1, \forall j \in N, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijp} = |N| - 1 \quad (4)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijc} = \sum_{i \in N} y_i - 1 \quad (5)$$

任务处理时间相关约束为式 (6) — (10)。约束 (6) 表示同一任务作业开始时间与结束时间的关

系。约束(7)表示任务*i*需要经过缓冲贝位交接时,陆侧起重机执行任务*i*的开始作业时间与结束作业时间的关系。约束(8)表示任务*i*和任务*j*由同一起重机制作业时,且任务*j*是任务*i*的后续作业任务,任务*j*的开始时间晚于任务*i*的结束作业时间加上起重机的移动时间。约束(9)表示同一起重机制作业同一任务时,结束作业时间晚于作业开始时间。约束(10)表示需要进行交接的任务*i*,陆侧起重机制作业任务*i*的开始时间晚于海侧起重机制作业任务*i*的结束时间。其中 $M_1 = 2|N||B|T_m + 2|N|T_h$

$$e_{ip} \geq s_{ip} + T_m \cdot (d_{ip} - b_{ip}) + 2T_h, \forall i \quad (6)$$

$$e_{ic} \geq s_{ic} + T_m \cdot (d_{ic} - b_{ic}) + 2T_h + M_1 \cdot (y_i - 1), \forall i \quad (7)$$

$$s_{jk} \geq e_{ik} + T_m \cdot (d_{ik} - b_{ik}) + M_1 \cdot (x_{ijk} - 1), \forall i, j, k \quad (8)$$

$$e_{ik} \geq s_{ik}, \forall i, k \quad (9)$$

$$s_{ic} \geq e_{ip} + M_1 \cdot (y_i - 1), \forall i \quad (10)$$

时空冲突规避约束为式(11)—(15)。为了规避起重机在交接贝位上的冲突问题,模型引入了安全时间间隔 $T_s$ 。式(11)表示当海侧起重机制在缓冲贝位作业任务*i*时,陆侧起重机的作业时间需要晚于海侧起重机制作业任务*i*的结束时间加上安全时间间隔。其中, $M_2 = 2|N||B| \cdot T_m + 2|N|T_h + T_s$ 。式(12)表示如果任务*i*在任务*j*后面,海侧起重机的作业时间应该晚于陆侧起重机制作业时间加上安全时间间隔和任务*j*的起升时间。式(13)表示起重机按照顺序作业缓冲贝位上的任务。式(14)表示在卸船任务中,海侧起重机制在陆侧起重机制之前处理。式(15)表示若任务*i*经过缓冲贝位,陆侧起重机制将集装箱从缓冲贝位运送到任务目标贝位,否则,陆侧起重机制不作业任务*i*。

$$s_{jc} \geq e_{ip} + T_s + M_2 \cdot (u_{ij} - 1), \forall i, j \quad (11)$$

$$e_{ip} \geq s_{jc} - M_2 \cdot u_{ij} + 2T_h + T_s, \forall i, j \quad (12)$$

$$\sum_i u_{ij} \leq |N| \cdot y_j, \forall j \quad (13)$$

$$u_{ii} = y_i, \forall i \quad (14)$$

$$2y_i \geq \sum_j x_{ijc} + \sum_j x_{jic}, \forall i \quad (15)$$

## 2.2 灵活缓冲贝位决策与ASC调度联合优化模型M2

在模型M1的基础上,模型M2引入了决策变量 $w_i$ ,增加了对每个任务缓冲贝位的决策。

$$w_i \geq O_i \cdot y_i + 1, \forall i \quad (16)$$

$$w_i \geq D_i \cdot y_i - 1, \forall i \quad (17)$$

$$w_i \geq d_{ip} + M_3 \cdot (y_i - 1), \forall i \quad (18)$$

$$d_{ip} \geq w_i + M_3 \cdot (y_i - 1), \forall i \quad (19)$$

$$w_i \geq b_{ic} + M_3 \cdot (y_i - 1), \forall i \quad (20)$$

$$b_{ic} \geq w_i + M_3 \cdot (y_i - 1), \forall i \quad (21)$$

$$D_i \geq d_{ic} + M_3 \cdot (y_i - 1), \forall i \quad (22)$$

$$d_{ic} \geq D_i + M_3 \cdot (y_i - 1), \forall i \quad (23)$$

$$s_{jc} + b_{ic}T_m \geq e_{ip} + d_{ip} \cdot T_m + T_s + M_3 \cdot (u_{ij} - 1) + M_3(y_i - 1), \forall i, j \quad (24)$$

$$s_{ip} \geq s_{jc} + T_s - b_{ip} \cdot T_m + T_s - M_3 \cdot u_{ij} + M_3 \cdot (y_i - 1), \forall i, j \quad (25)$$

$$e_{ip} \leq s_{jc} + M_3 \cdot (1 - u_{ij}), \forall i, j \quad (26)$$

$$u_{ij} + u_{ji} \geq 1, \forall i, j \quad (27)$$

$$x_{ijk}, y_i, u_{ij} \in \{0, 1\}, b_{ik} \in B,$$

$$d_{ik} \in B, w_i \in B, s_{ik} \geq 0, e_{ik} \geq 0, z \geq 0 \quad (28)$$

扩展模型M2中,约束(16)和(17)定义了如果任务需要经过缓冲贝位,缓冲贝位的位置在任务的开始贝位和结束贝位之间。约束(18)—(21)定义了如果任务经过缓冲贝位,海侧起重机和陆侧起重机的作业结束贝位和作业开始贝位,其中 $M_3 = 2|N||B|$ 。海侧起重机制作业到缓冲贝位结束(式(18)—(19)),陆侧起重机制从缓冲贝位开始作业(式(20)—(21))。约束(22)—(23)定义了任务目标贝位与陆侧起重机制作业任务结束贝位的关系。如果任务经过缓冲贝位,陆侧起重机制作业任务的结束贝位为任务目标贝位。式(24)表示海侧起重机制先于陆侧起重机制进入缓冲贝位时的安全间隔约束。式(25)表示陆侧起重机制先于海侧起重机制进入交接贝位时的安全时间间隔约束。约束(26)保证了海侧起重机制作业完任务*i*后陆侧起重机制作业任务*j*。式(27)是作业任务*i, j*的顺序约束。式(28)为决策变量取值约束。

## 3 算法设计

由于双ASC调度问题具有NP难特征,双ASC与缓冲贝位联合优化加大了这一问题的求解难度。本文设计了多染色体编码的遗传算法对大规模问题求解。

编码方式:在编码方式上,本文对于双ASC调度和缓冲贝位决策问题采用了多染色体混合编码方式。将染色体长度设置为 $3 \times |N|$ ,其中 $|N|$ 为作业任务数量。前 $2 \times |N|$ 采用排序编码方式,分别代表海侧起重机制作业顺序和陆侧起重机制作业顺序。最后 $|N|$ 个染色体采用实数编码方式,代表作业任务缓冲贝位。

适应度函数:为了优化任务完成时间,本文将任务完工时间作业适应度函数。任务完工时间为每个

任务装卸和搬运时间之和。

**选择操作:**本文采用轮盘赌选择策略进行个体适度选择。基于个体的适应度值,根据比例分配选择的概率进行下一代选择。主要包括适应度评估、计算适应度总和、计算每个个体的选择概率三个步骤。

**交叉操作:**本文采用排序交叉和单点交叉结合的混合交叉策略。对于前  $2 \times |N|$  个排序编码染色体采用排序交叉方式生成新的染色体,而最后  $|N|$  个代表缓冲贝位决策的实数编码染色体采用单点交叉的方式。交叉算法的设计同时考虑了不同编

码部分的特性,通过选择合适的交叉算法,并将其有效地结合,可以产生更具多样性的新染色体,从而提高算法的搜索效率和优化性能。

**变异操作:**本文采用交换变异和高斯变异组合的方式,针对排序编码染色体采用交换变异的方式,在实数编码染色体中采用高斯变异方式。通过在实数解空间中添加高斯噪声来引入变化,帮助算法在搜索空间中进行更广泛的探索,避免陷入局部最优解。

**解码策略:**本文采用基于任务优先级的解码策略,解码算法如算法 1 所示。

| 算法 1    | 基于任务优先级的解码算法  |
|---------|---|
| 输入:     | 任务数量 $N$ , 起重机集合 $K$ , 堆场贝位数量 $B$ , 任务开始贝位和结束贝位 $O, D$ , 起重机移动速度 $T_m$ , 装卸时间 $T_h$ , 安全作业间隔 $T_s$ , 染色体 $v$    |
| 输出:     | 任务完成时间 $z$ , 作业任务顺序 $p$ , 缓冲贝位 $w$  |
| Step1   | 初始化海侧起重机和陆侧起重机作业序列 $K_p \leftarrow v[0:N], K_c \leftarrow v[N:2N]$  |
| Step2   | $N_p \leftarrow$ 对 $K_p$ 降序排序的索引列表, $N_c \leftarrow$ 对 $K_c$ 排序并满足目标贝位大于缓冲贝位的索引列表, 结果降序排序                       |
| Step3   | $pos_p \leftarrow [[0, \min(D[i], w_i)]]$ 对于每个 $i$ 在 $N_p$ , $pos_c \leftarrow [[w_i, D[i]]]$ 对于每个 $i$ 在 $N_c$  |
| Step4   | 分别定义海侧起重机和陆侧起重机作业任务开始时间和结束时间列表 $T_p \leftarrow [[0, 2T_h + pos_p[0][1] \cdot T_m]]$ , $T_c \leftarrow [[0, 0]]$ |
| Step5   | $j = 0, F_n \leftarrow [N_p[0]]$ , 对任务 $i$ 进行遍历   |
| Step5.1 | 如果 $i$ 在 $F_n$ 中, 更新 $pos_c, pos_c, T_c, j + 1$   |
| Step5.2 | 如果 $j \geq \text{len}(N_c), i \leftarrow -1, \text{else}; i \leftarrow N_c[j]$                                  |
| Step5.3 | 计算 $T_p$ 并更新, 更新 $pos_p$ 和 $pos_c$  |
| Step6   | 遍历陆侧起重机作业任务   |
| Step6.1 | 陆侧起重机任务从缓冲贝位到目标贝位的作业时间 $T_c$ , 同时更新陆侧起重机位置 $pos_c$  |
| Step7   | 统计任务完工时间, $z + = \max(T_p[-1][1], T_c[-1][1])$  |

**终止规则:**判断是否满足迭代条件,如果满足则输出最优任务作业序列和缓冲贝位分配,以及求解目标,否则返回重新进行适应度评价。

## 4 数值试验

### 4.1 数据集生成

参考青岛港自动化集装箱码头堆场布局模式,采用垂直布局堆场作业,堆场交付作业采用端交互方式。每个箱区内设置 40 个贝位,且箱区内配备两台起重机。起重机在箱区内通常保持 2.5 m/s 的速度匀速移动,起重机小车吊起/放下一个集装箱的速度是 2.0 m/s,在实际作业过程中还需要 25 ~ 30 s 的校准时间调整任务集装箱的堆存位置。采用定量分析方法,将模型参数起重机移动速度设置为

6 s/bay, 小车作业一个集装箱的时间为 30 s,两个起重机之间的安全时间间隔设置为 9 s。

### 4.2 模型和算法求解结果证明

为验证模型和算法的有效性,设计了三种不同类型的数据集。在卸船作业中,需要转运到堆场的集装箱首先到达海侧交互区,所以任务的起始贝位设置为海侧交互区记作贝位 0。分别将任务的目标贝位设置为距离海侧交互区与陆侧交互区 1/3, 2/3 的区域,划分为 s, c, i 三组数据。其中, s 代表目标贝位海侧交互区到 1/3 堆场长度之间的任务, c 代表目标贝位在 1/3 堆场长度到 2/3 堆场长度之间的任务, i 代表目标贝位在 2/3 堆场长度到陆侧交互区之间的任务。采用灵活缓冲贝位模型求解任务数量为 5 和任务数量为 7 的计算如表 2 中 res 所示,同时

对比了采用单一缓冲贝位的计算结果如表2中 Res1 所示。两个求解结果作业轨迹如图2和图3所示。

表2 模型求解结果

Tab.2 Task completion times for scenarios solved by models

| 任务数量/个 | 任务类型 | Res/s | Res1/s |
|--------|------|-------|--------|
| 5      | s    | 537   | 516    |
| 5      | c    | 705   | 777    |
| 5      | l    | 927   | 1 053  |
| 7      | s    | 663   | 693    |
| 7      | c    | 1 011 | 1 089  |
| 7      | l    | 1 347 | 1 479  |

注:res 为采用灵活缓冲贝位求解结果,res1 为采用单一贝位求解结果。

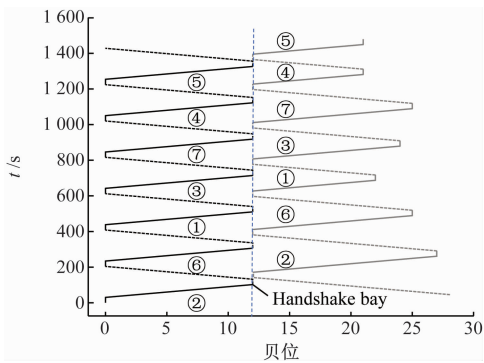


图2 单一缓冲贝位求解结果轨迹

Fig.2 Trajectory diagram of the solution results for a single buffer bay

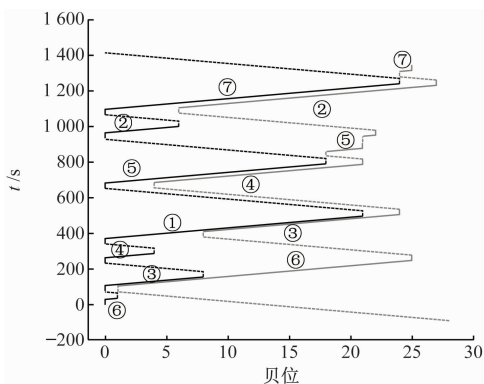


图3 灵活缓冲贝位求解结果轨迹

Fig.3 Trajectory diagram of the solution results for flexible buffer bays

从表2可以看出,相对于单一缓冲贝位结果,采用灵活缓冲贝位的模型在三种作业类型的数据集中,都能求得较好的解。图2和图3分别是7个作业情境下,采用单一缓冲贝位和灵活缓冲贝位策略

求解的ASC作业轨迹。7个任务的目标贝位分别为:[22,27,24,21,21,25,25],在图2中,海侧ASC的作业任务顺序为[2,6,1,3,7,4,5],陆侧ASC的作业任务顺序为[2,6,1,3,7,4,5],求解的缓冲贝位为贝位12,任务完成时间为1479s。在图3中,海侧ASC作业任务顺序为[6,3,4,1,5,2,7],陆侧ASC作业任务顺序为[6,3,4,5,2,7],任务1没有经过缓冲贝位,任务完成时间为1347s。相比单一缓冲贝位策略,ASC采用灵活缓冲贝位进行作业能够优化作业效率。

#### 4.3 算法参数调整试验

调参试验的算例包含了[5,15,20,50]个任务的数据算例,任务均匀分布在堆区中,调参结果如图10。遗传算法的收敛过程如图4。目标值在算法运行开始时急剧下降,目标值下降速度在算法执行到100代后逐渐减缓,运行到450代时得到最优解,并在500代后保持稳定。算法迭代次数的试验结果如图5。由双ASC作业完成时间的平均值和分布可见,迭代次数去值为300,其对应最优完成时间平均低于其他取值,且结果分布稳定。图6展示了不同交叉比例和变异概率组合的算法最优值,两个参数共同影响遗传算法的计算效率和计算性能。表现良好的参数组合及其对应的目标数值如图6中白色区域,当交叉比例为0.1且变异概率为0.7时,遗传算法取得较好的优化结果。

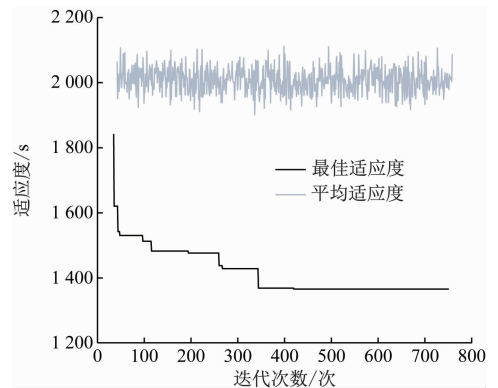


图4 遗传算法求解收敛

Fig.4 Convergence of Genetic Algorithm

#### 4.4 单一固定交接贝位于多个交接贝位对比试验

在40个贝位的箱区内,分别设置任务数为{5,10,15,20,25,30},计算相同策略下采用单个交接贝位和多个交接贝位的任务完成时间情况。试验结果如图7所示,采用单个交接贝位的任务完成时间均长于采用多个交接贝位完成时间。其中,五种任务数量下单个交接贝位作业完成的平均时间为5999s,多个交接贝位的任务完成时间为5160.5s。采用

多个交接贝位平均完成时间能够减少约 13.9% ( $(5\ 999 - 5\ 160.5) / 5\ 999 \times 100\% = 13.9\%$ )。

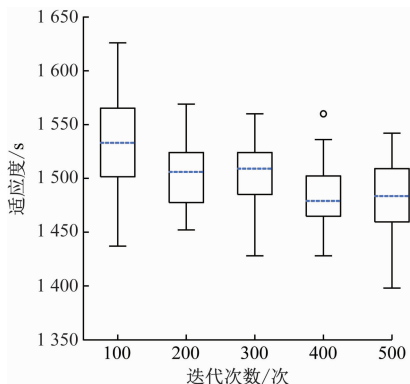


图5 迭代次数箱线

Fig. 5 Boxplot of optimal solutions for different iterations

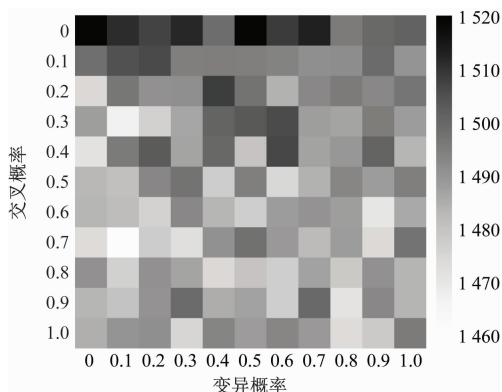


图6 选取交叉变异试验热力

Fig. 6 Heatmap of mutation and crossover probability selection

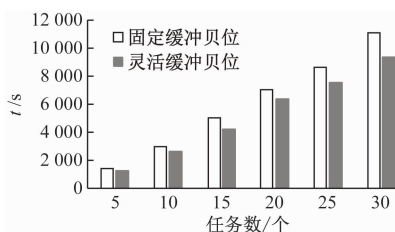


图7 灵活缓冲贝位与固定缓冲贝位任务完成时间对比

Fig. 7 Comparison of task completion time between flexible buffer bays and fixed buffer bays

## 5 总结

本文针对垂直布局自动化集装箱码头中不可穿越式双 ASC 的协同调度难题,提出动态缓冲贝位分配与路径规划的联合优化方法。通过引入任务-贝位动态匹配机制,突破传统固定缓冲策略的局限性,并结合安全时间间隔约束,有效降低双 ASC 作业冲突风险。基于混合整数规划模型与改进遗传算法的求解框架,显著提升了大规模场景下的计算效率。试验结果表明:灵活缓冲贝位策略通过就近分配原则,减少 ASC 空驶距离与冲突等待时间,任务完成

时间较固定缓冲贝位策略平均降低 13.9%。未来研究可进一步扩展至多目标优化、动态任务到达场景,并探索深度强化学习等智能算法在超大规模算例中的应用。本研究为码头作业系统的智能化升级与资源协同管理提供了重要参考。

## 参考文献

- [1] 魏晨,胡志华,高超锋. 自动化集装箱码头堆场内双起重机调度模型与算法[J]. 大连海事大学学报, 2015, 41(4): 75-89.  
WEI C, HU Z H, GAO C F, et al. Scheduling model and algorithm of twin synchronized stacking cranes in stack yard of automated container terminal[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2015, 41(4): 75-80. (in Chinese)
- [2] PENG W, WANG D, QIU H, et al. Integrated Optimization on Double-Side Cantilever Yard Crane Scheduling and Green Vehicle Path Planning at U-Shaped Yard[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025, 26(3): 3684-3699.
- [3] 初良勇,阮志毅,李淑娟. 基于遗传算法的港口集装箱堆场场桥智能调度优化[J]. 中国航海, 2018, 41(1): 48-52.  
CHU L Y, RUAN Z Y, LI S J. Intelligent Scheduling Optimization of Yard Crane in Container Terminal Based on Genetic Algorithm[J]. Navigation of China, 2018, 41(1): 48-52. (in Chinese)
- [4] JIN X, MI N, SONG W, et al. Deep Reinforcement Learning for Dynamic Twin Automated Stacking Cranes Scheduling Problem[J]. Electronics, 2023, 12(15): 3288.
- [5] 李敏,韩晓龙. 考虑优先权规则的自动化码头穿越式双 ASC 调度[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(3): 1001-1010.  
LI M, HAN X L. Considering priority rules in optimization of passing twin automated stacking cranes in automated terminal[J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed), 2017, 42(3): 1001-1010. (in Chinese)
- [6] 王耀宗,胡志华. 干涉存在下自动化集装箱码头穿越式双起重机同步调度优化[J]. 大连理工大学学报, 2020, 60(1): 83-93.  
WANG Y Z, HU Z H. Synchronous scheduling optimization for dual automated stacking crane with interference at automated container terminals[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2020, 60(1): 83-93. (in Chinese)

- [13] 赵文博. 内河船舶动力系统选型及评估研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2021.  
ZHAO W B. Research on selection and evaluation of inland[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [14] 张涛,毕毅. 基于熵权法和模糊集的船舶操纵性综合评价研究[J]. 中国舰船研究,2013,8(3):45-49.  
ZHANG T, BI Y. Synthesized evaluation of ship maneuverability based on the entropy-weight method and vague value method [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013,8(3): 45-49. (in Chinese)
- [15] 赵云瑞,高海波,林治国,等. 基于组合赋权-TOPSIS法的极地邮轮减摇鳍选型评价[J]. 中国舰船研究, 2021,16(5):121-126.  
ZHAO Y R, GAO H B, LIN Z G, et al. Selection and evaluation of polar cruise fin stabilizer based on combination weighting-TOPSIS method [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(5): 121-126. (in Chinese)
- [16] LAI Y J, LIU T Y, HWANG C L. TOPSIS for MODM [J]. European Journal of Operational research, 1994, 76(3): 486-500.
- [17] 黄胜,郭海鹏,侯远杭,等. 基于改进 TOPSIS 法的舰船总体方案群决策方法[J]. 上海交通大学学报, 2014,48(1):92-97.  
HUANG S, GUO H P, HOU Y H, et al. Group decision-making method for warship based on improved TOPSIS[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014,48(1): 92-97. (in Chinese)
- 
- (上接第95页)
- [7] 丁一,陈杭钦,林国龙. 成对自动堆垛起重机在集装箱码头中的实时调度研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2017, 34(2): 11-19.  
DING Y, CHEN H Q, LIN G L. Real-time Scheduling of Twin Automatic Stacking Crane in Container Terminal [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2017, 34(2): 11-19. (in Chinese)
- [8] LU H J, WANG S. A study on multi-ASC scheduling method of automated container terminals based on graph theory[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 129(1): 404-416.
- [9] HAN X L, WANG Q Q, HUANG J W. Scheduling cooperative twin automated stacking cranes in automated container terminals [J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 128(1): 553-558.
- [10] HU Z H, SHEU J B, LUO J X. Sequencing twin automated stacking cranes in a block at automated container terminal[J]. Transportation Research Part C-Emerging Technologies, 2016, 69(1): 208-227.
- [11] 秦磊磊,胡志华,郑玉馨. 自动化集装箱码头同轨双堆垛起重机交接缓冲贝位优化 [J]. 大连理工大学学报, 2021, 61(5): 537-545.  
QIN L L, HU Z H, ZHENG Y X, et al. Handover buffer bay optimization for same-track double stacking crane in automated container terminal [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 61(5): 537-545. (in Chinese)
- [12] ZHANG Q L, HU W X, DUAN J G, et al. Cooperative scheduling of AGV and ASC in automation container terminal relay operation mode [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(1): 1-18.
- [13] HU Z H, TIAN X D, YIN Y Q, et al. Positioning a handshake bay for twin stacking cranes in an automated container terminal yard block [J]. Journal of Advanced Transportation, 2022, 2022(1): 1-17.
- [14] WANG H, Villa F, Vallada E, et al. Solving the yard crane scheduling problem with dynamic assignment of input/output points [J]. Computers & Operations Research, 2025, 173.
- [15] 马飞扬,朱瑾. 自动化码头同时考虑握手区容量和位置的双ASC调度 [J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(17): 302-311.  
MA F Y, ZHU J. Twin ASC Scheduling Considering Capacity and Location of Handshake Area in Automated Terminal [J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(17): 302-311. (in Chinese)
- [16] Oladugba A O, Gheith M, Eltawil A. A new solution approach for the twin yard crane scheduling problem in automated container terminals [J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 57(1): 102015.