

考虑能耗的海铁联运集装箱码头多设备协同调度

杨佳珠, 余芳*, 杨勇生

(上海海事大学物流科学与工程研究院, 上海 201306)

摘要: 随着多式联运和绿色港口的发展, 提高海铁联运效率和降低能源消耗成为码头亟需解决的问题。针对集装箱码头铁路作业区与码头作业区共堆场布局下设备利用率低与作业能耗高的问题, 构建混合装卸作业下轨道吊、自动导向车(AGV)及场桥的协同调度优化模型, 旨在实现作业完工时间最短、轨道吊和 AGV 的作业能耗最优, 以及提高轨道吊协同作业的利用率。该模型综合考虑轨道吊间相互干涉、AGV 伴侣容量限制以及 AGV 和轨道吊装卸过程中的重载、空载与等待状态下的不同能耗等约束, 并针对轨道吊的干涉约束引入轨道吊任务分配策略。同时, 采用改进的混合灰狼遗传算法对模型进行求解, 具体改进策略包括引入灰狼算法位置更新策略优化遗传算法的交叉方式以提高最优解搜索效率, 以及在遗传算法的选择步骤前引入基于奖励机制的评估器增强算法的局部搜索能力。实验结果表明, 与轨道吊作业范围已知相比, 考虑轨道吊任务分配使轨道吊的平均利用率提升了 3%~8%。与自适应混沌遗传算法、遗传算法相比, 改进混合灰狼遗传算法能在较短的作业完工时间内节约更多的能耗。

关键词: 海铁联运; 协同调度; 混合装卸; 任务分配; 改进混合灰狼遗传算法

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0068369

Multi-Equipment Coordinated Scheduling Considering Energy Consumption in Sea-Rail Intermodal Container Terminal

YANG Jiazhuzhu, YU Fang*, YANG Yongsheng

(Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

【Abstract】 With the growth of multimodal transportation and the push for green ports, improving the efficiency of sea-rail intermodal transportation and reducing energy consumption have become critical concerns for ports. This study focused on optimizing the layout of shared yards between the railway and terminal operation areas at a container terminal. The objective is to minimize operation completion time and optimize the energy consumption of Rail-Mounted Gantry (RMG) cranes and Automatic Guided Vehicles (AGV), thereby improving the utilization rate of RMGs. To achieve this, a coordinated scheduling optimization model is developed for RMGs, AGVs, and yard cranes within a mixed loading and unloading environment. The model considered interference and task allocation among the RMGs, capacity constraints of AGV partners, and energy consumption variations during different AGV states such as loading, unloading, and waiting. In addition, a task assignment strategy that considered interference constraints is introduced for RMG operations. An improved hybrid grey wolf genetic algorithm is proposed to solve the model. This algorithm incorporated a grey wolf algorithm position update strategy to enhance the crossover method of the genetic algorithm, thereby improving the efficiency of finding optimal solutions. A reward-based evaluator is also introduced before the selection step of the genetic algorithm to enhance the local search capability of the algorithm. Experimental results indicated that considering task allocation for RMGs improved their average utilization rate by 3%-8% compared to scenarios where the RMG operating range is predetermined. Furthermore, the improved hybrid grey wolf genetic algorithm reduced energy consumption more effectively within a shorter completion time compared to adaptive chaotic and traditional genetic algorithms. In conclusion, this study provides an effective and superior solution for improving efficiency and reducing energy consumption in sea-rail intermodal transportation at container terminal.

【Key words】 sea-rail intermodal transportation; coordinated scheduling; mixed loading and unloading; task assignment; improved hybrid gray wolf genetic algorithm

收稿日期: 2023-09-11 修回日期: 2023-12-11

基金项目: 上海市科学技术委员会基金(20dz1203005)。

通信作者 E-mail: * yufang@shmtu.edu.cn

0 引言

随着经济全球化的发展以及现代综合运输体系的逐步完善,多式联运在我国物流系统中发挥着不可或缺的作用。与其他联运模式相比,海铁联运具有低成本、大运量、绿色环保等显著优势,成为多式联运体系的重要组成部分^[1-2]。由于集装箱海铁联运的快速发展,港站作业量不断增大,在装卸作业过程中造成的能源消耗也随之增长^[3-4]。因此,本文主要研究海铁联运集装箱码头铁路装卸轨道吊、自动导向车(AGV)与场桥的协同调度和任务分配问题,旨在提高海铁联运码头装卸效率的同时兼顾环境效益。

目前,已有一些学者对海铁联运集装箱码头多设备调度优化问题进行了研究。文献[5]在车船直取模式下,针对“岸桥-集卡-轨道吊”的卸船装车作业和装卸混合作业分别建立了调度优化模型,并设计了双层遗传算法去求解模型。文献[6]在车船直取模式下考虑了装卸同步作业以及生产调度中的不确定因素,如岸桥、集卡的速度变化等,建立了集成调度模型并设计多层遗传算法求解模型,在传统的遗传算法中引入了蒙特卡罗法以确定随机变量的具体值。文献[7]结合海铁联运港口分堆场布局提出了一种混合作业模式,考虑了班列和船舶的作业时间窗约束,以轨道吊完工时间最短为目标构建混合整数规划模型。文献[8]研究了考虑装卸双向同步作业下的铁路轨道吊、内集卡和正面吊集成调度优化。文献[9]结合码头容量、箱区作业量和集装箱作业距离等因素,建立进出口集装箱在铁路中心站与码头前沿堆场协同调度的两阶段模型,以堆场箱区间作业量均衡、集卡作业距离最短和超期箱堆存成本最少为目标,优化规划期内海铁联运箱堆存计划。文献[10]为提高堆场设备的利用率和配载结果的合理性,根据桥机计划安排的配载任务,提出一种深度优先且动态深度多分支搜索的配载算法。文献[11]提出了一种 U 型自动化码头堆场与铁路堆场间的多设备集成调度方法。文献[12]采用滚动窗策略方法解决了港口海铁转运集装箱作业规模过大的问题。文献[13]在共堆场交接模式下研究了海铁联运港口轨道吊、集卡和场桥协同调度问题,并考虑了轨道吊间的干涉和安全距离、轨道吊和场桥走行时间及缓冲区等现实约束。文献[14]以海铁联运集装箱码头 U 型堆场布局为例,建立双层优化模型对堆场起重机调度问题、AGV 任务分配问题和 AGV 路径规划问题同时进行研究,并设计了一种基于时空贪

心策略的双层遗传算法进行求解。文献[15]提出一种灵活的起重机交叉工作区域,研究了起重机区域装卸资源、双龙门起重机以及内集卡的综合优化问题。然而,上述海铁联运港口多设备调度问题的研究大多以作业完工时间或设备等待时间最短为目标函数,未考虑作业能耗。为在提高作业效率的同时降低能耗,文献[16]提出了自适应混沌遗传算法来求解轨道吊和 AGV 协同调度模型以最大限度地降低设备能耗。文献[17]基于混合流水车间调度思想,以总完成时间最短和能耗最低为目标,构建了岸桥、集卡、正面吊的三阶段协同调度模型,实现高效利用下的设备协同优化。文献[18]以轨道吊、ALV 以及场桥为研究对象,以最小化作业总时间及能耗为目标,针对设备集成调度问题与堆位分配问题进行研究,但该研究忽略了水平运输设备与装卸设备之间的相互等待时间。另外,大多研究中轨道吊作业范围已知,未考虑轨道吊任务分配问题,而列车长达数百米,且轨道吊数量有限,考虑轨道吊任务分配并提高其利用率是海铁联运集装箱码头中一个重要问题。因此,在保证作业效率的前提下如何提高码头的设备利用率,同时兼顾降低能耗的目标成为当前海铁联运码头中亟需解决的问题。

鉴于上述文献中的研究成果,本文基于集装箱码头铁路作业区与码头作业区共堆场布局,研究作业完工时间最短、轨道吊和 AGV 的作业能耗最优的问题,以及提升轨道吊协同作业利用率的问题。本文主要贡献如下:

1)考虑轨道吊以及 AGV 在装卸作业过程中可能出现的重载状态、空载状态与等待状态,以及 AGV 伴侣容量、轨道吊间干涉等约束,建立以作业完工时间最小以及轨道吊和 AGV 产生的能耗最优为目标的轨道吊、AGV 及场桥的协同调度优化模型,并提出轨道吊任务分配策略提高轨道吊的利用率。

2)提出了改进混合灰狼遗传算法,用于解决混合装卸作业下轨道吊、AGV 及场桥的协同调度优化模型。该算法将灰狼算法位置更新策略应用于遗传算法的交叉过程中,提高了最优解的搜索效率,并运用强化学习算法中奖励机制的思想对目标函数值进行评估,以优化算法的局部搜索能力。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

在海铁联运集装箱码头中,根据功能区之间多样的组合形式,可以分类出不同的布局模式,而不同

的布局模式涉及到海铁联运码头集装箱进出口作业流程的差异。本文选用铁路作业区与码头作业区共用堆场的布局为研究模式,如图 1 所示。

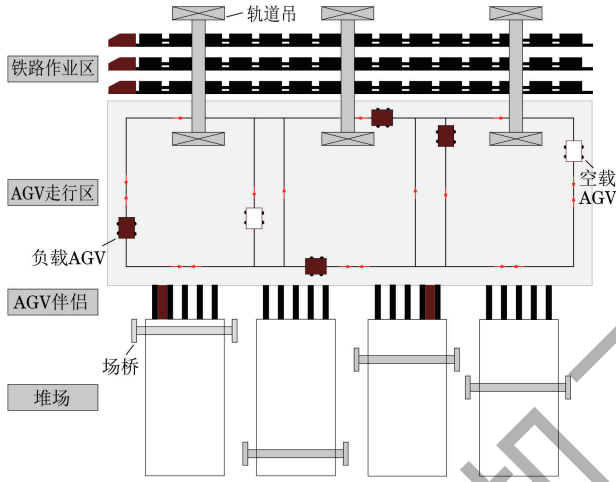


图 1 海铁联运共堆场交接布局

Fig.1 Common yard handover layout for sea-rail transportation

在卸车过程中,铁路作业区的轨道吊从上一任务的目标位置空驶至当前任务的初始位置,等待 AGV 到达后,将列车上的集装箱卸到 AGV 上,AGV 将卸车集装箱运至该箱所在箱区,待 AGV 伴侣空闲时将其放到 AGV 伴侣上。在装车过程中,场桥将装车集装箱放到空闲的 AGV 伴侣上,AGV 从 AGV 伴侣上取箱并送至其所在列车车厢下方,由轨道吊吊起装至列车上。AGV 伴侣作为场桥与 AGV 之间的衔接桥梁,可以有效提高设备间的协调性,减少场桥与 AGV 之间相互等待时间。另外,多轨道吊协同作业有助于提升列车装卸效率。但受到不可跨越和相互安全距离的限制,轨道吊在操作时可能发生干涉,导致额外等待时间。这不仅对港口列车的装卸效率构成影响,还可能加大码头作业的能源消耗。

本文针对所描述的海铁联运集装箱混合装卸过程,在 AGV 伴侣容量、轨道吊间干涉等约束的前提下,通过对轨道吊以及 AGV 装卸过程中的重载状态、空载状态以及等待状态的综合考虑,构建以作业完工时间最小以及轨道吊和 AGV 的作业能耗最优为目标的协同调度优化模型,解决轨道吊、AGV 及场桥的调度问题和轨道吊任务分配问题。

1.2 模型假设

本文提出如下 4 点假设:

- 1) 每个集装箱的初始位置以及目标位置已知;
- 2) 不考虑 AGV 的路径规划及冲突问题;
- 3) 列车单层装载集装箱;

4) 场桥或 AGV 在 AGV 伴侣上的提/放箱时间忽略不计。

1.3 模型符号与变量说明

本文模型符号与变量说明如下:

I_1 : 卸车箱集合, $i \in I_1$ 。

I_2 : 装车箱集合, $i \in I_2$ 。

G : 轨道吊集合, $g \in G$ 。

V : AGV 集合, $v \in V$ 。

Y : 场桥集合, $y \in Y$ 。

α_1 : 轨道吊装卸集装箱过程中在重载状态下的单位时间能耗。

α_2 : 轨道吊装卸集装箱过程中在空载状态下的单位时间能耗。

α_3 : 轨道吊装卸集装箱过程中在等待状态下的单位时间能耗。

β_1 : AGV 运输集装箱过程中在重载行驶状态下的单位时间能耗。

β_2 : AGV 运输集装箱过程中在空载行驶状态下的单位时间能耗。

β_3 : AGV 运输集装箱过程中在等待状态下的单位时间能耗。

δ : 轨道吊单位提/放箱时间。

τ : 场桥对单个集装箱装卸作业的平均时间。

$et_{ii'g}^G$: 轨道吊 g 从前序任务 i 目标位置到后序任务 i' 初始位置的时间。

$et_{ii'v}^V$: AGV v 从前序任务 i 目标位置到后序任务 i' 初始位置的时间。

ft_{ig}^G : 轨道吊 g 对集装箱 i 结束作业时间。

ft_{iv}^V : AGV v 对集装箱 i 结束作业时间。

ft_{iy}^Y : 场桥 y 对集装箱 i 结束作业时间。

l_i : 任务 i 所对应的列车车厢编号。

M : 一个很大的正数。

ot_{iv} : AGV v 对集装箱 i 由起始位置运送至目标位置的时间。

p : 每个箱区 AGV 伴侣的容量。

qt_{ivy} : 场桥 y 的箱区下 AGV v 最早可在伴侣上提/放集装箱 i 的时间。

rt_{ivy} : 场桥 y 的箱区下 AGV v 最晚可在伴侣上提/放集装箱 i 的时间。

st_{ig}^G : 轨道吊 g 对集装箱 i 开始作业时间。

st_{iv}^V : AGV v 对集装箱 i 开始作业时间。

st_{iy}^Y : 场桥 y 在 AGV 伴侣上取/放集装箱 i 的时间。

wt_{ig}^G : 轨道吊 g 作业任务 i 时的等待时间。

wt_{ivg}^{VG} : AGV v 作业任务 i 时等待轨道吊 g 的

时间。

wt_{ivy}^{VY} : AGV v 作业任务 i 时在场桥 y 下的等待时间。

x_{ig}^G : 若轨道吊 g 对集装箱 i 进行作业, 则 $x_{ig}^G=1$, 否则 $x_{ig}^G=0$ 。

x_{iv}^V : 若 AGV v 对集装箱 i 进行作业, 则 $x_{iv}^V=1$, 否则 $x_{iv}^V=0$ 。

x_{iy}^Y : 若场桥 y 对集装箱 i 进行作业, 则 $x_{iy}^Y=1$, 否则 $x_{iy}^Y=0$ 。

$z_{i'g}^G$: 若轨道吊 g 作业完任务 i 后作业任务

$f_1 = \min\{\max_i(ft_{ig}^G, ft_{iv}^V, ft_{iy}^Y)\}$, $\forall i \in I_1 \cup I_2$, $\forall g \in G$, $\forall v \in V$, $\forall y \in Y$

$f_2 =$

$$\min\left\{\sum_{g \in G}(\alpha_1 \delta + \alpha_2 \sum_{i, i' \in I_1 \cup I_2, i \neq i'} z_{i'g}^G et_{i'g}^G + \alpha_3 \sum_{i \in I_1 \cup I_2} wt_{ig}^G) + \sum_{v \in V, i' \in I_1 \cup I_2, i \neq i'} [\beta_1 ot_{iv} + \beta_2 z_{i'v}^V et_{i'v}^V + \beta_3 (wt_{ivg}^{VG} + wt_{ivy}^{VY})]\right\} \quad (3)$$

式(1)为模型总目标, 即最小化最大完工时间(f_1)以及最小化轨道吊和 AGV 装卸过程中产生的能耗(f_2)之和, 本文采用归一化的无量纲处理办法对两个目标函数式(2)和式(3)无量纲化, 采用权重系数法将多目标规划转化为单目标规划。

$$\sum_{g \in G} x_{ig}^G = 1, \forall i \in I_1 \cup I_2 \quad (4)$$

$$\sum_{v \in V} x_{iv}^V = 1, \forall i \in I_1 \cup I_2 \quad (5)$$

$$\sum_{y \in Y} x_{iy}^Y = 1, \forall i \in I_1 \cup I_2 \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I_1 \cup I_2} z_{i'g}^G \leq 1, \forall i' \in I_1 \cup I_2, \forall g \in G \quad (7)$$

$$\sum_{i' \in I_1 \cup I_2} z_{i'g}^G \leq 1, \forall i \in I_1 \cup I_2, \forall g \in G \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I_1 \cup I_2} z_{i'v}^V \leq 1, \forall i' \in I_1 \cup I_2, \forall v \in V \quad (9)$$

$$\sum_{i' \in I_1 \cup I_2} z_{i'v}^V \leq 1, \forall i \in I_1 \cup I_2, \forall v \in V \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I_1 \cup I_2} z_{i'y}^Y \leq 1, \forall i' \in I_1 \cup I_2, \forall y \in Y \quad (11)$$

$$\sum_{i' \in I_1 \cup I_2} z_{i'y}^Y \leq 1, \forall i \in I_1 \cup I_2, \forall y \in Y \quad (12)$$

式(4)~式(6)表示每个集装箱都有且仅有一台轨道吊、一辆 AGV 和一台场桥对其作业; 式(7)~式(12)表示对轨道吊、AGV 或场桥都至多有一个前序作业或后序作业的约束。

$$qt_{ivy} = st_{iy}^Y - p\tau, rt_{ivy} = st_{iy}^Y, \forall i \in I_1, \forall y \in Y \quad (13)$$

$$qt_{ivy} = st_{iy}^Y, rt_{ivy} = st_{iy}^Y + p\tau, \forall i \in I_2, \forall y \in Y \quad (14)$$

$$qt_{ivy} \leq st_{iv}^V + ot_{iv} \leq rt_{ivy}, \forall i \in I_1, \forall y \in Y \quad (15)$$

i' , 则 $z_{i'g}^G=1$, 否则 $z_{i'g}^G=0$ 。

$z_{i'v}^V$: 若 AGV v 作业完任务 i 后作业任务 i' , 则 $z_{i'v}^V=1$, 否则 $z_{i'v}^V=0$ 。

$z_{i'y}^Y$: 若场桥 y 作业完任务 i 后作业任务 i' , 则 $z_{i'y}^Y=1$, 否则 $z_{i'y}^Y=0$ 。

$z_{i'gg'}$: 若轨道吊 g 作业任务 i 的同时轨道吊 g' 作业任务 i' , 则 $z_{i'gg'}=1$, 否则 $z_{i'gg'}=0$ 。

1.4 模型描述

本文建立的混合整数规划模型如下:

$$\min f = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 \quad (1)$$

$$\min f = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 \quad (2)$$

$$qt_{ivy} \leq st_{iv}^V \leq rt_{ivy}, \forall i \in I_2, \forall y \in Y \quad (16)$$

式(13)~式(14)表示 AGV 运输卸车箱或装车箱时在 AGV 伴侣的作业时刻应满足的最早/最晚时间约束; 式(15)~式(16)表示 AGV 作业装车任务或卸车任务时, 在场桥 y 下取集装箱或放集装箱应满足的时间窗约束。

$$st_{ig}^G - (ft_{ig}^G + et_{i'g}^G + wt_{i'g}^G) + M(1 - z_{i'g}^G) \geq 0, \forall i, i' \in I_1 \cup I_2, \forall g \in G \quad (17)$$

$$wt_{i'g}^G \geq ft_{i'v}^V + et_{i'v}^V - (st_{i'g}^G + \delta), \forall i'' \in I_1 \cup I_2, \forall i' \in I_1, \forall g \in G, \forall v \in V \quad (18)$$

$$wt_{i'g}^G \geq ft_{i'v}^V - (ft_{ig}^G + et_{i'g}^G), \forall i \in I_1 \cup I_2, \forall i' \in I_2, \forall g \in G, \forall v \in V \quad (19)$$

$$st_{iv}^V - (ft_{iv}^V + et_{i'v}^V + wt_{i'v}^{VG}) + M(1 - z_{i'v}^V) \geq 0, \forall i \in I_1 \cup I_2, \forall i' \in I_1, \forall v \in V \quad (20)$$

$$st_{i'v}^V - (ft_{i'v}^V + et_{i'v}^V + wt_{i'v}^{VY}) + M(1 - z_{i'v}^V) \geq 0, \forall i \in I_1 \cup I_2, \forall i' \in I_2, \forall v \in V \quad (21)$$

$$wt_{i'vg}^{VG} \geq ft_{i'g}^G - (ft_{iv}^V + et_{i'v}^V), \forall i \in I_1 \cup I_2, \forall i' \in I_1, \forall v \in V, \forall g \in G \quad (22)$$

$$wt_{i'vg}^{VG} \geq ft_{i'g}^G + et_{i'g}^G - (st_{i'v}^V + ot_{i'v}^V), \forall i'' \in I_1 \cup I_2, \forall i' \in I_2, \forall v \in V, \forall g \in G \quad (23)$$

$$wt_{i'vy}^{VY} \geq qt_{i'vy} - st_{i'v}^V - ot_{i'v}^V, \forall i' \in I_1, \forall v \in V, \forall y \in Y \quad (24)$$

$$wt_{i'vy}^{VY} \geq qt_{i'vy} - st_{i'v}^V, \forall i' \in I_2, \forall v \in V, \forall y \in Y \quad (25)$$

式(17)~式(19)表示轨道吊作业后序任务 i'

的开始时间必须要大于前序任务的作业完成时间,加上轨道吊从前序集装箱位置空驶至后序集装箱位置的时间之和,若轨道吊到达时间小于 AGV 到达时间,还要加上轨道吊等待 AGV 的时间,如果任务 i' 是卸车箱,则轨道吊提箱等待 AGV 到来,如果任务 i' 是装车箱,则轨道吊等待 AGV 将待装车集装箱 i' 运送到目标位置;式(20)、式(21)表示 AGV 的后序任务 i' 作业开始时间必须要晚于前序任务作业完成时间加上 AGV 从前序任务作业位置到后序作业位置的时间;式(22)、式(23)分别表示 AGV 的后序任务 i' 为卸车箱或装车箱时等待轨道吊的时间;式(24)、式(25)分别表示 AGV 的后序任务 i' 为卸车箱或装车箱时在场桥下的等待时间。

$$st_{iv}^V - ft_{ig}^G + |x_{ig}^G - x_{iv}^V| \cdot M \geq 0, \quad \forall i \in I_1, \forall v \in V, \forall g \in G \quad (26)$$

$$st_{iy}^Y - ft_{iv}^V + |x_{iv}^V - x_{iy}^Y| \cdot M \geq 0, \quad \forall i \in I_1, \forall v \in V, \forall y \in Y \quad (27)$$

$$st_{iv}^V - ft_{iy}^Y + |x_{iy}^Y - x_{iv}^V| \cdot M \geq 0, \quad \forall i \in I_2, \forall v \in V, \forall y \in Y \quad (28)$$

$$st_{ig}^G - ft_{iv}^V + |x_{iv}^V - x_{ig}^G| \cdot M \geq 0, \quad \forall i \in I_2, \forall v \in V, \forall g \in G \quad (29)$$

$$ft_{ig}^G \geq st_{ig}^G + et_{ig}^G + \delta, \quad \forall i \in I_1 \cup I_2, \forall g \in G \quad (30)$$

$$ft_{iv}^V \geq st_{iv}^V + ot_{iv}, \quad \forall i \in I_1 \cup I_2, \forall v \in V \quad (31)$$

$$ft_{iy}^Y \geq st_{iy}^Y + \tau, \quad \forall i \in I_1, \forall y \in Y \quad (32)$$

$$ft_{iy}^Y \geq st_{iy}^Y, \quad \forall i \in I_2, \forall y \in Y \quad (33)$$

式(26)~式(29)表示对同一作业任务而言,设

备协同交互的时间约束,即当任务 i 为卸车集装箱时,轨道吊的作业完成时间大于或等于 AGV 作业任务 i 的开始时间,AGV 作业任务 i 的完成时间大于或等于场桥作业任务 i 的开始时间;式(30)~式(33)分别表示轨道吊、AGV 和场桥的作业完成时间不早于作业开始时间与其作业一个集装箱时间之和。

$$l_i - l_{i'} \geq 2 - (1 - z_{ii'gg'})M, \quad \forall i, i' \in I_1 \cup I_2, \forall g, g' \in G \quad (34)$$

$$(l_i - l_{i'}) \cdot (g - g') + (1 - z_{ii'gg'})M \geq 0, \quad \forall i, i' \in I_1 \cup I_2, \forall g, g' \in G \quad (35)$$

式(34)~式(35)表示轨道吊的安全作业距离和轨道吊之间不可跨越的约束,两台轨道吊同时对两个集装箱作业的安全距离为 1 节车厢,且编号较小的轨道吊在编号较小的车厢区域进行工作。

2 模型求解

从数学模型目标函数及约束条件整体分析可知,同一集装箱作业任务可选择多个作业设备去操作,该问题为混合柔性流水车间调度问题,属于 NP-hard 问题,本文采用改进混合灰狼遗传算法(HGWGA)求解。针对遗传算法局部搜索能力不足、易发生早熟的缺点^[19-20],本文引入一种基于奖励机制用以评估目标函数值,改善局部搜索能力。同时,根据灰狼算法快速收敛的特性,设计了基于灰狼算法位置更新策略的交叉方式^[21-22]。

2.1 算法流程

改进混合灰狼遗传算法流程如图 2 所示。

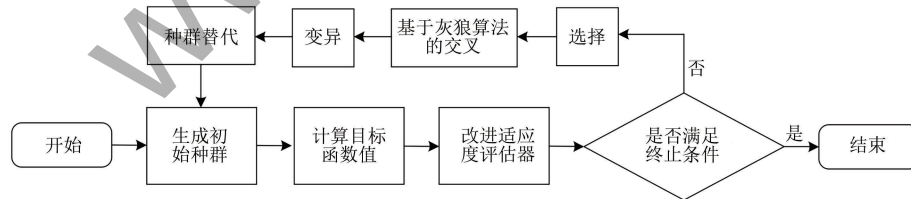


图 2 HGWGA 算法流程

Fig.2 The procedure of HGWGA algorithm

2.2 算法步骤

改进混合灰狼遗传算法步骤如下:

1) 染色体编码。

采用自然数编码的方式进行编码,其中编码长度即为问题中总任务数量,假设有 10 个集装箱等待装卸车,则染色体共有 10 个基因,基因顺序表示集装箱的作业顺序,染色体编码示例如图 3 所示。

2) 解码。

随机产生的染色体如图 3 所示,已知集装箱的装卸类型,L 表示装车集装箱,D 表示卸车集装箱,

作业任务	1	5	8	2	4	6	3	10	7	9
作业类型	L	D	D	D	L	L	D	L	L	L

图 3 染色体编码

Fig.3 Chromosome code

具体任务分配流程如图 4 所示。基于模型的优化目标,本文以最早可用设备规则对 AGV 进行指派,考虑到轨道吊为核心作业设备,优先选择 AGV 等待轨道吊的情况。同时,考虑轨道吊干涉和不可跨越,设计轨道吊任务分配策略(如图 4 虚线框所示)。

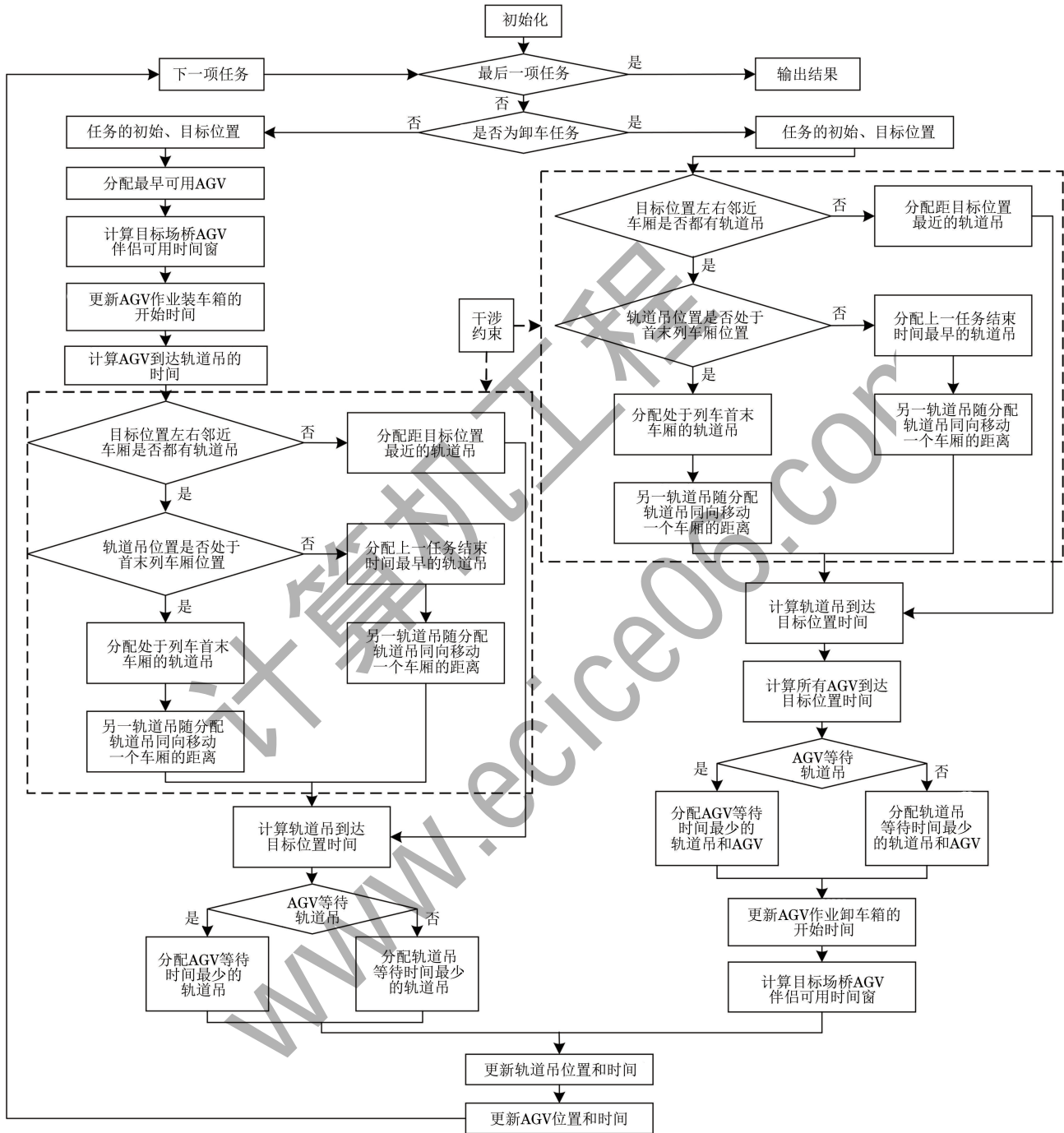


图4 任务分配流程

Fig. 4 Task allocation procedure

3) 基于奖励机制的评估器。

为加强遗传算法的局部搜索能力,设计一种基于强化学习奖励机制^[23]的评估器,其评估函数具体设计如下:

$$\text{reward}(x) = w_1 \cdot [\text{performance}(x)] + w_2 \cdot [\text{diversity}(x)] + k \quad (36)$$

式中: $[\cdot]$ 表示归一化值; $\text{performance}(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x)$ 表示个体 x 的目标函数; $\text{diversity}(x)$ 表示个体 x 与种群中其他个体的差异性函数; w_1 和 w_2 表示权值因子;自适应平衡因子

$k = \begin{cases} 0, & m < k_1 \cdot P \\ k_0, & \text{其他} \end{cases}$, m 表示目标函数值在 $[\min(\text{performance}(x)), 1.2 \cdot \min(\text{performance}(x))]$ 之间的个体数, P 表示种群大小, k_0 和 k_1 为常数。在评估函数中,通过设置权值 w_1 和 w_2 来权衡目标函数值和差异性函数值,从而保持种群的丰富度。另外,若在进化初期有较多个体的目标函数值均接近于最小值,则会降低算法的全局寻优能力,使其陷入局部最优。因此,所设计的自适应平衡因子 k 通过降低选择目标函数值接近于最小值个体的概

率,在一定程度上减缓了陷入局部最优解现象的产生。

将所得到的奖励函数值的倒数作为适应度值用于染色体选择过程,采用轮盘赌法选择适应度值较大的染色体,保存并记录最优个体。

4) 基因修复。

考虑到在混合装卸过程中可能存在当 AGV 将装车箱送到目标车厢时,轨道吊还未把目标位置的卸车箱卸载,则需要对产生冲突的作业顺序进行基因修复,设置装卸作业优先级,同一车厢的装车作业需要在卸车作业完成后执行。

5) 交叉。

本文采用基于灰狼算法的交叉操作,灰狼算法的位置更新策略如式(37)~式(45)所示。灰狼算法模拟了灰狼群在自然界中的等级机制和狩猎机制,该算法优势在于其快速的收敛速度和全局搜索能力,定义了 α 为最优解, β 和 δ 为第2和第3最优解,其余解为 ω , ω 的位置根据 α 、 β 和 δ 这3个解来更新。

$$D_{\alpha} = |C_1 \cdot X_{\alpha} - X| \quad (37)$$

$$D_{\beta} = |C_2 \cdot X_{\beta} - X| \quad (38)$$

$$D_{\delta} = |C_3 \cdot X_{\delta} - X| \quad (39)$$

$$X_1 = |X_{\alpha} - A_1 \cdot D_{\alpha}| \quad (40)$$

$$X_2 = |X_{\beta} - A_2 \cdot D_{\beta}| \quad (41)$$

$$X_3 = |X_{\delta} - A_3 \cdot D_{\delta}| \quad (42)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1(t) + X_2(t) + X_3(t)}{3} \quad (43)$$

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (44)$$

$$C = 2r_2 \quad (45)$$

式中: D_{α} 、 D_{β} 、 D_{δ} 分别表示 ω 灰狼个体距离 α 层狼群、 β 层狼群、 δ 层狼群的距离; X_1 、 X_2 、 X_3 分别表示受 α 层狼群、 β 层狼群、 δ 层狼群影响; ω 灰狼个体需要调整的位置,这里取平均值; A 用于模拟灰狼对猎物的攻击行为; C 为确定的系数向量; r_1 、 r_2 是两个一维分量; a 的取值随迭代次数的增大从2到0线性递减。首先根据灰狼算法的位置更新策略对每个基因进行更新,然后将每个基因位中的元素四舍五入取整,并将相同元素置0,接着从种群中随机选择一个个体,并根据更新后的个体与随机个体确认缺少的元素及其顺序,对置0元素进行替换,如图5所示。

6) 变异。

本文采用两点变异方式对染色体进行变异操作,若变异过程中产生了不可行解,则修复为可行解,如图6所示。

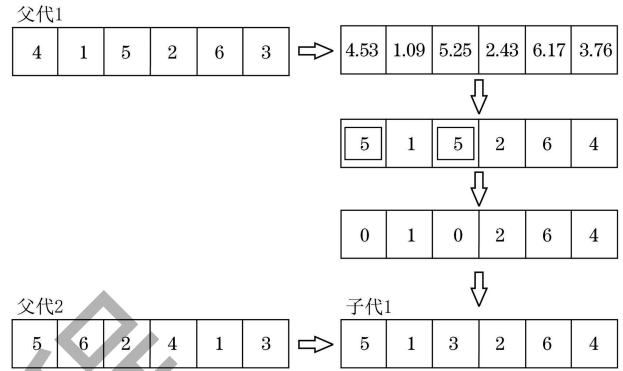


图 5 染色体交叉

Fig. 5 Chromosome crossover

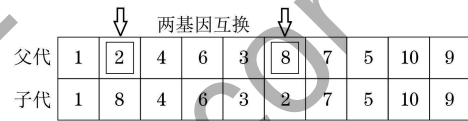


图 6 染色体变异

Fig. 6 Chromosome mutation

3 模拟计算与实验分析

本文在运行环境为 Python 3.8, 计算机配置在 Windows 11 操作系统, AMD Ryzen 7 5800H CPU @ 3.20 GHz, 16 GB 内存的条件下进行实例验证。

3.1 参数设置

为了验证模型及算法的有效性, 本节进行实例验证, 设置 AGV 伴侣容量为 4^[24], 模型及作业设备的基本参数如表 1 所示^[18,25]。算法相关参数取值为: 种群规模 $P=100$, 最大迭代次数 $G=500$, 交叉概率 $p_c=0.7$, 变异概率 $p_m=0.1$, 评估函数权重系数 $w_1=0.7$, $w_2=0.3$, r_1 、 r_2 是取值在 $[0,1]$ 内的随机数向量。

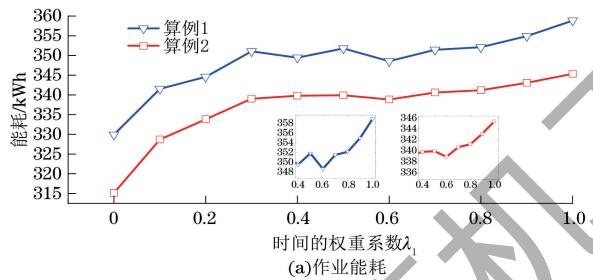
表 1 模型及设备基本参数

Table 1 Basic parameters of the model and equipment

参数	参数值
装卸线/条	2
装卸线长度/m	1 050
列车满轴编组编成辆数/车	50
装卸线与堆场的距离/m	800
列车单节车厢长度/m	17
集装箱的长度/m	13
集装箱的宽度/m	2.5
集装箱的高度/m	2.5
AGV 重载速度/(m·min ⁻¹)	210
AGV 空载速度/(m·min ⁻¹)	350
轨道吊重载起升速度/(m·min ⁻¹)	15
轨道吊空载起升速度/(m·min ⁻¹)	24
轨道吊小车速度/(m·min ⁻¹)	85
轨道吊大车速度/(m·min ⁻¹)	80

表 1(续)

参数	参数值
轨道吊起升高度/m	10
$\tau /(\min)$	2.0
$\alpha_1 /[\text{kWh} \cdot (\text{h} \cdot \text{台})^{-1}]$	30
$\alpha_2 /[\text{kWh} \cdot (\text{h} \cdot \text{台})^{-1}]$	20
$\alpha_3 /[\text{kWh} \cdot (\text{h} \cdot \text{台})^{-1}]$	15
$\beta_1 /[\text{kWh} \cdot (\text{h} \cdot \text{台})^{-1}]$	21
$\beta_2 /[\text{kWh} \cdot (\text{h} \cdot \text{台})^{-1}]$	14
$\beta_3 /[\text{kWh} \cdot (\text{h} \cdot \text{台})^{-1}]$	9



3.2 结果分析

基于上述参数,在不同问题规模下,以 0.1 为步长调整权重 λ_1 和 λ_2 的值,当改变 λ_1 时, $\lambda_2 = 1 - \lambda_1$ 相应发生变化。算例 1 的问题规模为 100 个集装箱、4 个轨道吊、6 个 AGV 和 3 个场桥,算例 2 的问题规模为 100 个集装箱、4 个轨道吊、7 个 AGV 和 3 个场桥。对同一参数下的同一算例进行 30 次实验并取平均值为该组参数的实验结果,如图 7 所示。

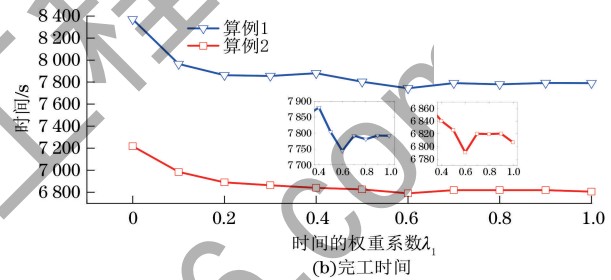


图 7 不同权重下完工时间与作业能耗情况

Fig. 7 Completion time and operational energy consumption under different weights

可以看出,单一地对完工时间或作业能耗进行优化都不利于控制另一目标,且完工时间所占权重越高,最大完工时间越小,但作业过程中轨道吊和 AGV 产生的能耗越大。通过实验分析可知,对于不同规模的问题改变权重系数时,最大完工时间及能耗呈现相同的变化趋势。综合考虑作业最大完工时间和设备作业能耗,当 $\lambda_1 = 0.6$ 、 $\lambda_2 = 0.4$ 时,时间和能耗的值相对较小,因此,在后续实验中,设置权重系数 λ_1 和 λ_2 的值为 0.6 和 0.4。

3.2.1 不同模型的实验对比与分析

与轨道吊作业范围已知相比,本文考虑了轨道吊任务分配,可以提高作业效率,如表 2 所示为 3/6/3(分别表示轨道吊数量/AGV 数量/场桥数量)规模下不同集装箱数量的数据(加粗数值为最优值,下表同)。

表 2 考虑与未考虑轨道吊任务分配的对比

Table 2 Comparison of tasking with and without consideration of rail cranes

集装箱数量/个	考虑轨道吊任务分配		未考虑轨道吊任务分配	
	f_1 / s	目标函数值	f_1 / s	目标函数值
30	2 332.7	1 471.4	2 349.8	1 490.8
60	4 782.5	2 946.8	4 863.5	2 998.5
90	6 924.7	4 272.8	7 013.4	4 324.5
100	7 824.6	4 824.8	7 885.5	4 866.0
120	9 179.3	5 657.7	9 213.5	5 680.7

在作业 100 个集装箱时轨道吊的一次实时走行路径如图 8 所示,分析可知,轨道吊作业路线始终保持安全距离,没有发生干涉。由表 2 可得,考虑轨道吊任务分配比不考虑轨道吊任务分配的最大完工时

间要小,提高了作业效率。轨道吊利用率即为重载时间和空载时间在轨道吊总作业时间中的占比,如图 9 所示。与轨道吊作业范围已知相比,在不同集

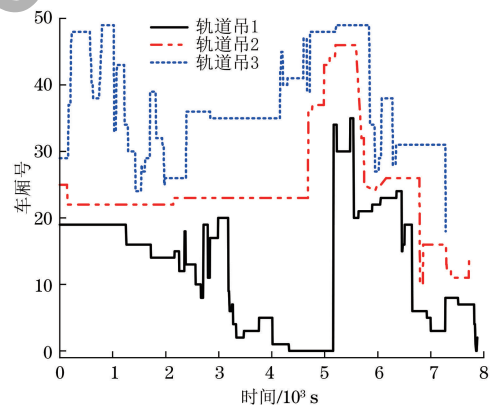


图 8 轨道吊作业路线

Fig. 8 Route for rail crane operations

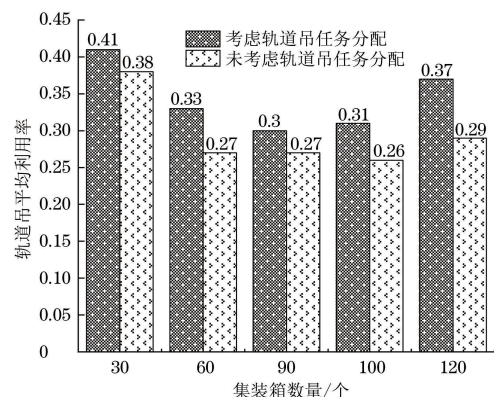


图 9 两种情况下的轨道吊平均利用率对比

Fig. 9 Comparison of the average utilization rate of rail cranes in the two case

装箱数量情况下考虑轨道吊任务分配时轨道吊的平均利用率提升了 3%~8%。因此,本文考虑的轨道吊任务分配在提高作业效率的同时能够提升轨道吊的平均利用率。

3.2.2 不同算法的实验对比与分析

首先,为验证所设计算法改进策略的有效性,将基于奖励机制的评估器的遗传算法(HGA)和结合灰狼算法的遗传算法(GWGA)与遗传算法进行对比实验,每组实验进行 30 次求解后取平均值,实验结果如

表 3 所示。由表 3 的实验结果可以看出,相较于遗传算法,基于改进策略的 HGA 算法和 GWGA 算法具有更好的模型求解结果。为进一步展现所设计改进策略的有效性,在 100 个集装箱的相同问题规模下任取一次不同算法的收敛曲线如图 10 所示。从图 10 的结果可以看出:HGA 算法相较于 GA 算法,由于其不易陷入局部最优解,因此在求解质量上更优异;GWGA 算法相较于 GA 算法,收敛效果更优异,能在较短时间内收敛到一个较优解。

表 3 改进策略的对比实验

Table 3 Comparative experiments on improved strategies

集装箱数量/个	轨道吊/AGV/场桥	HGA			GWGA			GA		
		f_1 /s	f_2 /kWh	CPU 时间/s	f_1 /s	f_2 /kWh	CPU 时间/s	f_1 /s	f_2 /kWh	CPU 时间/s
20	3/3/3	2 378.3	58.1	334.2	2 377.9	59.1	77.4	2 393.1	59.7	336.7
20	3/5/3	1 670.1	54.8	340.3	1 668.4	54.3	86.2	1 674.8	55.2	341.1
50	3/5/3	4 510.7	165.1	498.2	4 498.3	164.9	181.6	4 535.9	165.6	501.4
50	3/6/3	3 902.7	161.4	502.5	4 067.9	162.0	206.4	4 141.8	162.8	505.3
80	3/5/3	7 338.6	266.5	734.8	7 526.6	267.3	272.8	7 604.9	267.9	720.2
80	3/6/3	6 429.9	261.7	736.8	6 301.4	260.8	283.1	6 791.7	262.8	726.9
100	3/6/3	8 114.2	332.3	783.1	8 275.5	333.6	358.2	8 341.7	336.7	825.9
100	4/6/3	8 030.7	353.2	754.3	7 902.8	355.9	303.5	8 120.1	359.9	776.4
100	4/7/3	7 020.5	338.5	747.1	7 202.2	341.1	299.6	7 335.6	352.6	775.0
120	4/10/3	6 389.4	375.8	812.5	6 463.3	380.8	337.2	6 950.0	395.5	815.9
120	4/12/3	5 809.1	386.6	793.7	5 795.0	398.2	318.9	6 549.2	408.1	800.1
180	4/16/3	9 491.4	790.4	952.6	9 288.7	782.4	623.1	11 152.1	902.5	1 096.3
180	4/20/3	9 552.3	876.0	931.5	9 105.1	850.7	595.0	10 458.5	1 113.2	1 025.9
200	4/18/3	10 018.9	911.2	1 106.6	9 501.2	893.4	739.7	12 332.2	1 144.3	1 204.5
200	4/20/3	9 587.0	936.5	1 096.3	9 004.1	910.5	723.5	11 992.1	1 212.3	1 180.0

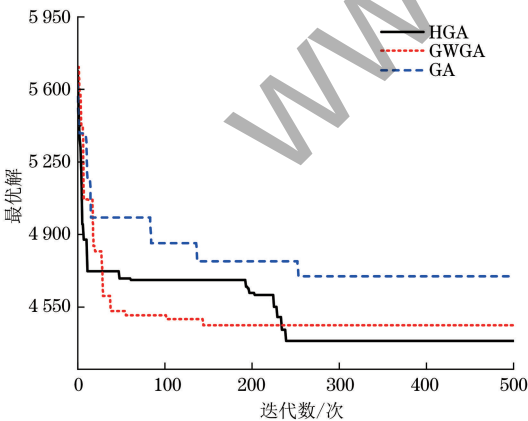


图 10 改进策略的算法收敛对比

Fig. 10 Comparison of convergence of algorithms with improved strategies

其次,为验证所设计算法的优越性,本文分别采用改进的混合灰狼遗传算法(HGWGA)、自适应混沌遗传算法(ACGA)^[16]、遗传算法(GA)在不同数据规模下进行了 15 组对比实验,每组实验进行 30 次求解后取平均值,实验结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出,所提出的 HGWGA 算法能够稳定求解大规模多设备协同调度问题的近似最优解。在实验 12 和实验 15 中,当集装箱任务数为 180,AGV 数量为 16 时,其作业最大完工时间为 9 141.6 s,作业过程中轨道吊和 AGV 产生的能耗为 771.1 kWh。当集装箱任务数为 200,AGV 数量为 20 时,其作业最大完工时间为 8 996.1 s,作业过程中轨道吊和 AGV 产生的能耗为 908.4 kWh,满足当前自动化码头作业设备调度的时间和能耗要求。

随着集装箱任务数量的不断增加,码头的总能耗也在不断增加。在一定规模的任务下,改变设备配置对完工时间以及轨道吊和 AGV 产生的能耗都有明显的影响,随着 AGV 数量的增加,在作业完工时间减小的同时能耗也在降低,例如表 4 中集装箱数量为 100,当把 AGV 的数量由 6 增加到 7 时,完工时间减少了 980.8 s,能耗减少了 12.5 kWh。然而,当集装箱数量为 200,AGV 的数量由 18 增加到

20 时,总能耗增加了 22.3 kWh。因此,在一定数量的轨道吊和场桥下,增加 AGV 的数量能够在提高装卸效率的同时减少能耗,但过多的 AGV 会造成

码头道路拥堵,不利于降低能耗。因此,选择合适的 AGV 数量对自动化码头作业设备调度的效率和能耗有着重要影响。

表 4 3 种算法不同数据规模的对比实验

Table 4 Comparative experiments of three algorithms with different data sizes

编号	集装箱数量/个	轨道吊/AGV/场桥	HGWGA			ACGA			GA		
			f_1 /s	f_2 /kWh	CPU 时间/s	f_1 /s	f_2 /kWh	CPU 时间/s	f_1 /s	f_2 /kWh	CPU 时间/s
1	20	3/3/3	2 377.7	58.4	65.3	2 529.3	61.4	339.8	2 393.1	59.7	336.7
2	20	3/5/3	1 666.6	54.4	71.2	1 809.7	58.9	365.5	1 674.8	55.2	341.1
3	50	3/5/3	4 479.6	164.8	165.1	4 609.2	165.5	434.4	4 535.9	165.6	501.4
4	50	3/6/3	3 905.5	160.4	173.5	4 034.6	161.6	415.2	4 141.8	162.8	505.3
5	80	3/5/3	7 203.4	265.8	260.0	7 502.3	268.6	782.0	7 604.9	267.9	720.2
6	80	3/6/3	6 261.6	259.4	270.8	6 584.5	260.3	762.6	6 791.7	262.8	726.9
7	100	3/6/3	7 824.6	325.2	337.4	8 210.5	333.7	814.2	8 341.7	336.7	825.9
8	100	4/6/3	7 785.1	350.2	277.7	8 022.1	351.7	786.3	8 120.1	359.9	776.4
9	100	4/7/3	6 804.3	337.7	272.7	7 242.2	338.5	767.6	7 335.6	352.6	775.0
10	120	4/10/3	6 340.4	372.0	312.0	6 657.9	378.8	806.4	6 950.0	395.5	815.9
11	120	4/12/3	5 784.7	374.5	303.2	6 246.4	393.7	795.4	6 549.2	408.1	800.1
12	180	4/16/3	9 141.6	771.1	610.2	10 203.1	788.8	987.7	11 152.1	902.5	1 096.3
13	180	4/20/3	9 019.7	848.2	580.1	10 067.8	919.0	954.1	10 458.5	1 113.2	1 025.9
14	200	4/18/3	9 448.0	886.1	728.3	11 018.1	937.5	1 137.7	12 332.2	1 144.3	1 204.5
15	200	4/20/3	8 996.1	908.4	712.5	10 889.8	1 010.5	1 096.5	11 992.1	1 212.3	1 180.0

对于同一数据规模的实验,3 种算法的目标函数数值对比如图 11 所示。对比结果表明,HGWGA 算法在求解不同数据规模的实验时均表现出良好的性能,且任务量越大与其他两个算法相比的优势越明显。从表 4 可以看出,在问题规模为 200 个集装箱、4 个轨道吊、20 个 AGV 和 3 个场桥时,HGWGA 算法的求解结果的最大完工时间为 8 996.1 s,轨道吊以及 AGV 的能耗为 908.4 kWh,而其他两个算法求解结果分别 10 889.8 s、1 010.5 kWh 以及 11 992.1 s、1 212.3 kWh,所提 HGWGA 算法的性能明显优于其他算法。同时,对

于表 4 中所有实验,HGWGA 算法的 CPU 时间均优于 ACGA 算法和 GA 算法,且问题规模越大,HGWGA 算法计算效率的优势越明显。

为进一步展现所设计 HGWGA 算法的性能,本文在 100 个集装箱的相同问题规模下任取一次不同算法的收敛曲线如图 12 所示。分析可知,HGWGA 算法、ACGA 算法和 GA 算法分别迭代了 127 次、208 次和 252 次达到收敛,本文所设计的 HGWGA 算法收敛速度好且求解得到的目标值优于另外两个算法。这是因为提出的基于灰狼算法位置更新策略的交叉方式改善了算法收敛效率,使探索解空间的能力增强,同时提出的基于奖励机制的评估器也增

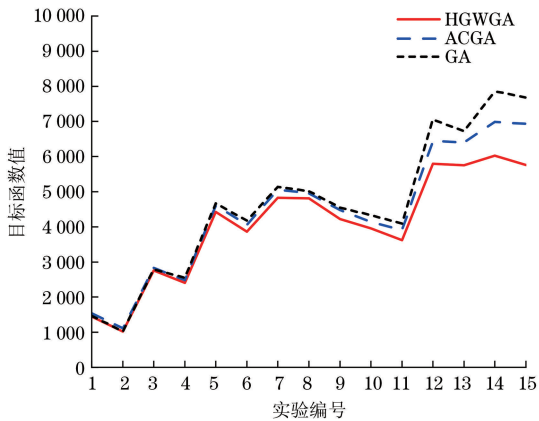


图 11 3 种算法的 15 组实验性能趋势图

Fig.11 Performance trend plots for 15 sets of experiments for the three algorithms

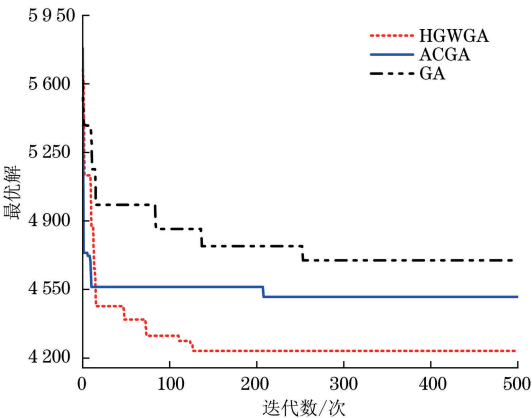


图 12 3 种算法收敛曲线对比

Fig.12 Comparison of convergence curves of three algorithms

加了算法的局部搜索能力。

4 结束语

本文分析了海铁联运集装箱码头多设备协同调度问题,以最小化完工时间以及最小化轨道吊和 AGV 作业能耗为目标,考虑 AGV 伴侣容量、轨道吊干涉、AGV 的重载状态、空载状态以及等待状态时的不同能耗等约束,设计了海铁联运码头多设备协同调度优化模型。基于轨道吊干涉约束提出了轨道吊任务分配策略,并设计了改进的混合灰狼遗传算法解决轨道吊、AGV 和场桥的调度问题。仿真结果表明,本文提出的模型和算法不仅能够满足当前自动化码头作业设备调度的时间和能耗要求,提高了装卸效率和轨道吊的利用率,且与其他算法相比,在不同数据规模的问题求解上均具有良好的优势。在实际作业过程中存在诸多不确定因素,在今后的研究中,为使问题更加贴合实际,可将 AGV 的电量、AGV 行驶过程中的路径冲突和堵塞等不确定情况考虑在内建立集成调度模型。另外,列车发车时间的限制也将作为下一步的研究目标。

参考文献

- [1] 刘秉镰,林坦. 国际多式联运发展趋势及我国的对策研究[J]. 中国流通经济, 2009, 23(12): 17-20.
LIU B L, LIN T. International multimodal transport: the trends and policies[J]. China Business and Market, 2009, 23(12): 17-20. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] HE J L, HUANG Y F, YAN W, et al. Integrated internal truck, yard crane and quay crane scheduling in a container terminal considering energy consumption[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(5): 2464-2487.
- [4] WANG L, ZHU X N. Container loading optimization in rail-truck intermodal terminals considering energy consumption [J]. Sustainability, 2019, 11(8): 2383.
- [5] 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.
FENG L Y. Optimization of operation equipment scheduling in container port under direct access mode of hot metal combined transport vehicle and ship [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [6] 常祎妹,朱晓宁. 不确定因素下的集装箱码头车船间装卸作业集成调度[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(6): 115-124.
CHANG Y M, ZHU X N. Integrated scheduling of handling operation between train and vessel in container terminal under uncertain factor[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(6): 115-124. (in Chinese)
- [7] 李舒仪,韩晓龙. 海铁联运港口混合作业模式下轨道吊与集卡协同调度[J]. 计算机应用, 2021, 41(5): 1506-1513.
LI S Y, HAN X L. Collaborative scheduling of rail-mounted gantry crane and container truck in hybrid operation mode of rail-water intermodal terminal [J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(5): 1506-1513. (in Chinese)
- [8] YAN B C, ZHU X N, WANG L, et al. Integrated scheduling of rail-mounted gantry cranes, internal trucks and reach stackers in railway operation area of container terminal [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(9): 47-58.
- [9] 曾庆成,吕明蔚. 集装箱码头堆场与港前铁路中心站协同调度模型[J]. 中国航海, 2020, 43(4): 129-134.
ZENG Q C, LÜ M Y. Modeling of cooperative scheduling for container yard and central railway station in port [J]. Navigation of China, 2020, 43(4): 129-134. (in Chinese)
- [10] 杨奔,王炜晔,赵婉婷,等. 基于 DQN 的动态深度多分支搜索自动配载算法[J]. 计算机工程, 2020, 46(8): 313-320.
YANG B, WANG W Y, ZHAO W T, et al. DQN-based automatic stowage planning algorithm using dynamic depth multi-branch search [J]. Computer Engineering, 2020, 46(8): 313-320. (in Chinese)
- [11] LI J J, YAN L X, XU B W. Research on multi-equipment cluster scheduling of U-shaped automated terminal yard and railway yard[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(2): 417.
- [12] 唐梦宇,梁承姬. 基于滚动窗策略的港口海铁联运集装箱转运优化[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(1): 185-191, 197.
TANG M Y, LIANG C J. Container transshipment optimization of terminal-sea-rail intermodal transport based on rolling window strategy [J]. Application Research of Computers, 2023, 40(1): 185-191, 197. (in Chinese)
- [13] CHANG Y M, ZHU X N, YAN B C, et al. Integrated scheduling of handling operations in railway container terminals[J]. Transportation Letters, 2019, 11(7): 402-412.
- [14] LIU W Q, ZHU X N, WANG L, et al. Multiple equipment scheduling and AGV trajectory generation in U-shaped sea-rail intermodal automated container terminal [J]. Measurement, 2023, 206: 112262.
- [15] REN G, WANG X H, CAI J X, et al. Allocation and scheduling of handling resources in the railway container terminal based on crossing crane area [J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1190.
- [16] YANG Y S, HE S, SUN S. Research on the cooperative scheduling of ARMGs and AGVs in a sea - rail automated container terminal under the rail-in-port model[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(3): 557.
- [17] 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 Y J, ZHU X N, YAN B C, 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)
- [18] YANG Y J, ZHU X N, HAGHANI A. Multiple equipment integrated scheduling and storage space allocation in rail-water intermodal container terminals considering energy efficiency[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(3): 199-209.
- [19] 代江涛,韩晓龙. 考虑作业状态能耗的集装箱码头设备协调调度[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(19): 290-298.
DAI J T, HAN X L. Coordinated scheduling of equipment in container terminals considering energy consumption under different job status [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(19): 290-298. (in Chinese)
- [20] YANG Y S, SUN S, ZHONG M S, et al. A refined collaborative scheduling method for multi-equipment at U-shaped automated container terminals based on rail crane process optimization [J]. Journal of Marine Science and

- Engineering, 2023, 11(3): 605.
- [21] 李静, 朱小林. 集装箱码头上多自动引导车的调度和路径规划[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1449-1461.
LI J, ZHU X L. Scheduling and path planning of multiple automatic guided vehicles in container terminals [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(5): 1449-1461. (in Chinese)
- [22] 胡亚萍, 王子磊. 一种命名数据网络的视频全域协作缓存算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(5): 280-285, 295.
HU Y P, WANG Z L. A video global domain cooperative caching algorithm for named data networking[J]. Computer Engineering, 2018, 44(5): 280-285, 295. (in Chinese)
- [23] GUPTA A, SAVARESE S, GANGULI S, et al. Embodied intelligence via learning and evolution [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 5721.
- [24] 范厚明, 郭振峰, 岳丽君, 等. 考虑能耗节约的集装箱码头双小车岸桥与 AGV 联合配置及调度优化[J]. 自动化学报, 2021, 47(10): 2412-2426.
FAN H M, GUO Z F, YUE L J, et al. Joint configuration and scheduling optimization of dual-trolley quay crane and AGV for container terminal with considering energy saving [J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(10): 2412-2426. (in Chinese)
- [25] 赵倩儒. 考虑能耗的自动化集装箱码头作业设备协同调度优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
ZHAO Q R. Collaborative scheduling optimization of automatic container terminal operation equipment considering energy consumption[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)

编辑 索书志