

# 集装箱多式联运枢纽港作业设备调度优化

严静雨<sup>1\*</sup>, 李俊<sup>1,2#</sup>, 张凯霞<sup>1</sup>, 唐璐瑶<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup> 天津港(集团)有限公司, 天津

收稿日期: 2023年10月23日; 录用日期: 2023年12月20日; 发布日期: 2023年12月28日

## 摘要

装卸设备作为集装箱多式联运枢纽的核心资源, 其有效组织及协同作业与枢纽港降本增效、节能减排等目标均直接相关。以多式联运枢纽港集装箱中转作业过程为研究背景, 将集装箱多式联运枢纽港作业涉及的龙门吊、正面吊、集卡、岸桥等设备协同调度问题作为研究对象, 综合考虑设备间协同作业及节能减排需求, 建立以总完工时间最小和能耗最低为目标的双目标优化数学模型, 并使用改进遗传算法进行求解, 缩小完工时间, 降低能耗, 得到较优设备协同调度方案。不同规模算例研究发现: 针对多式联运港口装卸设备开展协同调度可在提升作业效率的同时降低能耗; 改进遗传算法求解效率更高, 缩短10%左右求解时间; 且随着作业箱量的增加, 改进算法对优化目标的提升程度更加显著。以上结果表明改进后的遗传算法具有更好地求解性能。

## 关键词

集装箱多式联运, 装卸设备, 协同调度, 改进遗传算法

# Optimization of Operation Equipment Scheduling for Container Intermodal Transport Hub Ports

Jingyu Yan<sup>1\*</sup>, Jun Li<sup>1,2#</sup>, Kaixia Zhang<sup>1</sup>, Luyao Tang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

<sup>2</sup> Tianjin Port (Group) Co., Ltd., Tianjin

Received: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Dec. 28<sup>th</sup>, 2023

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 严静雨, 李俊, 张凯霞, 唐璐瑶. 集装箱多式联运枢纽港作业设备调度优化[J]. 运筹与模糊学, 2023, 13(6): 7386-7396. DOI: 10.12677/orf.2023.136726

## Abstract

As the core resource of container multimodal transportation hubs, the effective organization and collaborative operation of loading and unloading equipment are directly related to the goals of cost reduction, efficiency increase, energy conservation and emission reduction of hub ports. Taking the container transfer operation process of multimodal transport hub ports as the research background, the collaborative scheduling problem of gantry cranes, front cranes, trucks, and quay bridges involved in container multimodal transport hub port operations is taken as the research object. Taking into account the collaborative operation between equipment and energy conservation and emission reduction requirements, a dual objective optimization mathematical model is established with the goal of minimizing total completion time and energy consumption, and an improved genetic algorithm is used to solve the problem, so as to shorten the completion time, reduce energy consumption, and obtain an optimal equipment collaborative scheduling plan. Case studies on different scales have found that collaborative scheduling for multimodal port loading and unloading equipment can improve operational efficiency while reducing energy consumption; the improved genetic algorithm has higher solving efficiency and can reduce the solving time by about 10%. And as the number of job boxes increases, the improvement algorithm has a more significant impact on the optimization objectives. The above results indicate that the improved genetic algorithm has better solving performance.

## Keywords

Container Intermodal Transport, Handling Equipment, Integrated Scheduling, Improved Genetic Algorithm

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在集装箱多式联运运输组织中，枢纽港作为联运网络的“制高点”，对整个集装箱多式联运效率具有重要影响，其生产作业的高效组织和集装箱快速通过等受到了广泛关注。其中，装卸设备作为枢纽港内部作业的核心资源，其有效组织和协同调度等与实现枢纽港高效作业、节能减排等目标直接相关且尤其重要。

目前已经有很多学者针对枢纽港设备调度问题展开研究，王志刚[1]等针对自动化码头的设备调度和AGV路径规划问题，构建双层调度模型，并且设计双层遗传算法进行求解；Lu Yiqin [2]提出了自动化集装箱码头调度的三阶段集成优化模型，以自动化集装箱码头装卸任务作业时间最小为目标；Hop [3]等在解决集卡和场吊作业调度优化问题时建立了时间最小的单目标数学模型；代江涛[4]等考虑了集装箱码头装卸设备在不同作业状态下的能耗，建立了完工时间最小和能耗最低的双目标模型；秦琴等[5]等使用柔性流水车间调度理论解决了缓冲支架、AGV、双小车岸桥以及自动化轨道吊的协同调度问题，利用NEH启发式算法得到初始解的遗传算法进行求解；张笑菊[6]基于码头岸桥同贝同步装卸，构建了枢纽港集卡和岸桥联合调度模型，以完工时间最小为目标。

从以上研究来看，已有的建模场景以集装箱码头或者铁水联运为主，且主要针对作业完工时间、装卸成本等目标进行优化。从节能减排现实需求出发考虑多式联运枢纽港设备能耗和完工时间开展的研究仍较为缺乏。

## 2. 问题描述

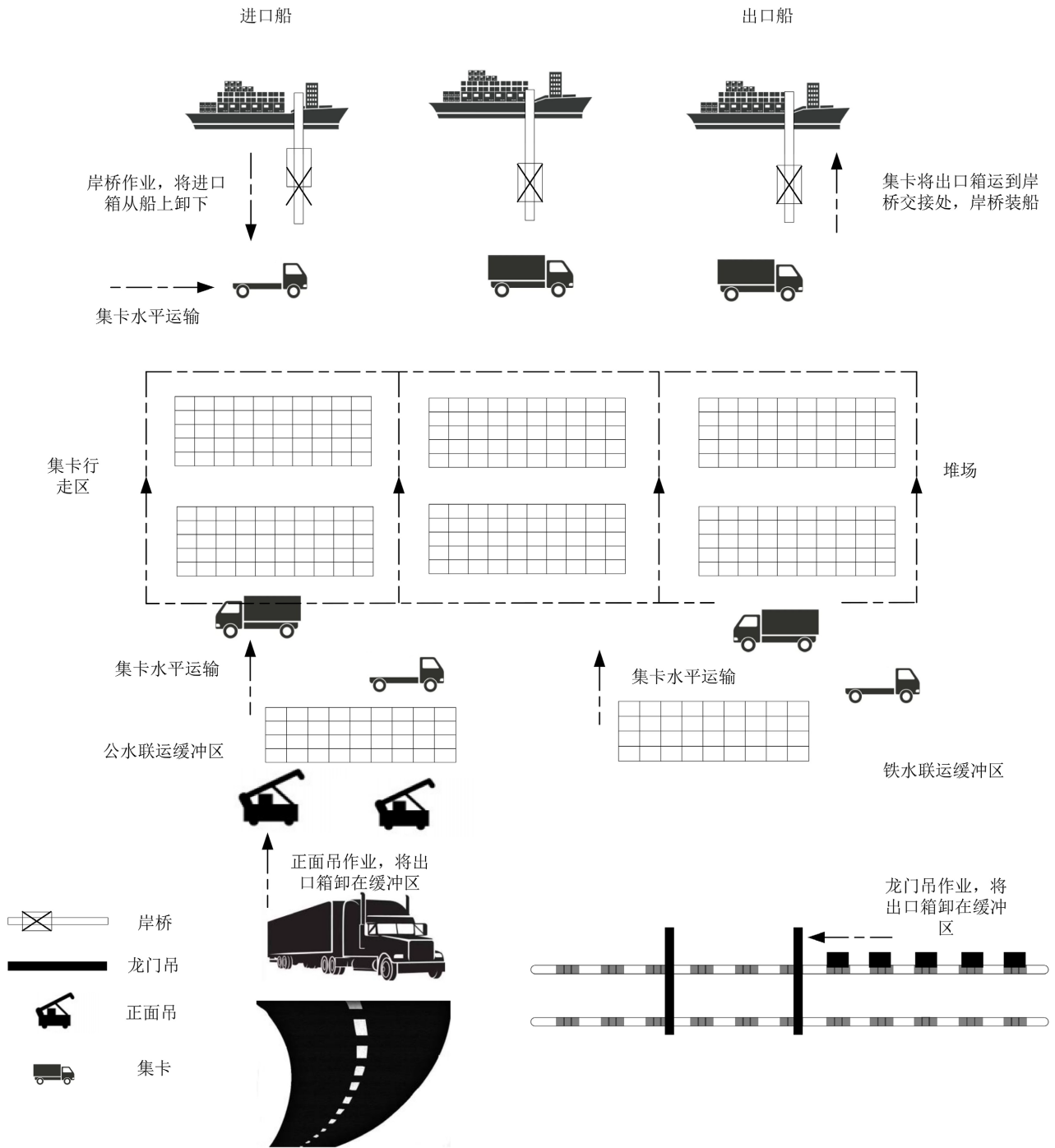


Figure 1. Schematic diagram for loading and unloading of export boxes

图 1. 出口箱装卸示意图

多式联运枢纽港集装箱作业主要有三个环节，一是在铁水联运中由门吊承担的集装箱从火车上取下，在公水联运中由正面吊承担的集装箱从货车上取下，在水水转运过程中由岸桥承担的集装箱从船上取下环节；二是集卡承担的码头与场区的水平作业环节；三是岸桥承担的装船环节，如图 1 所示。集装箱在

枢纽港中转过程中, 各种作业设备相互配合完成中转。设备的作业序列是多设备间协同调度需要考虑的核心问题, 决定了枢纽港的整体作业水平, 不合理的作业序列会导致设备间的彼此等待, 装卸设备的利用率过低, 产生不必要的设备能耗。综上本文以龙门吊、正面吊、集卡和岸桥协同调度问题为研究对象, 综合考虑不同设备作业能力等约束, 以作业完工时间和能耗最小为目标展开研究。

### 3. 数学模型

本文模型在参考文献[7]的基础上, 拓展考虑了公水转运、水水转运多种联运模式, 并以岸桥(卸)、正面吊、龙门吊、集卡、岸桥(装)作业阶段的设备协同调度为对象来构建。

#### 3.1. 符号定义

$R$  定义为铁水联运集装箱任务集合  $r, r' \in R$ ,  $L$  定义为公水联运集装箱任务集合  $l, l' \in L$ ,  $S$  定义为水水转运集装箱任务集合  $s, s' \in S$ ,  $N_j$  表示阶段  $j$  的作业设备集合,  $j=1,2,3,4$  时分别代表集卡, 岸桥, 正面吊, 龙门吊的作业阶段;  $p_j$  表示阶段  $j$  中装卸设备的工作效率;  $\mu_j$  表示阶段  $j$  中设备单位时间的能耗指标,  $j=2,4$ ;  $\xi_j$  表示阶段  $j$  中设备单位时间的能耗指标,  $j=1,3$ ;  $\partial$  表示电力能源折算系数;  $\beta$  表示柴油能源折算系数;  $K_j$  表示设备在阶段  $j$  的作业时间效率;  $Z$  表示虚拟任务箱;  $P_{rj}^{mk}$  表示在阶段  $j$  设备  $mk$  对任务箱  $r$  的装卸时间,  $j=1,2,4$ ;  $P_{lj}^{mk}$  表示在阶段  $j$  设备  $mk$  对任务箱  $l$  的装卸时间,  $j=1,2,3$ ;  $P_{sj}^{mk}$  表示在阶段  $j$  设备  $mk$  对任务箱  $s$  的装卸时间,  $j=1,2$ ;  $H_{rj}^{mk}$  表示 0~1 变量, 铁水联运在阶段  $j$ , 任务箱  $r$  由设备  $mk$  操作为  $H_{rj}^{mk} = 1$ , 否则为 0,  $r \in R, j=1,2,4, mk \in N_j$ ;  $H_{lj}^{mk}$  表示 0~1 变量, 公水联运在阶段  $j$ , 任务箱  $l$  由设备  $mk$  操作为  $H_{lj}^{mk} = 1$ , 否则为 0,  $l \in L, j=1,2,3, mk \in N_j$ ;  $H_{sj}^{mk}$  表示 0~1 变量, 水水转运在阶段  $j$ , 任务箱  $s$  由设备  $mk$  操作为  $H_{sj}^{mk} = 1$ , 否则为 0,  $s \in S, j=1,2, mk \in N_j$ ;  $H_{rr'j}^{mk}$  是 0~1 变量, 铁水联运时在阶段  $j$ , 当同一设备  $mk$  完成任务箱  $i$  的操作之后接着对任务箱  $i'$  进行作业时  $H_{rr'j}^{mk} = 1$ , 反之为 0,  $r, r' \in R, j=1,2,4, \forall mk \in N_j$ ;  $H_{ll'j}^{mk}$  是 0~1 变量, 公水联运时在阶段  $j$ , 当同一设备  $mk$  完成任务箱  $i$  的操作之后接着对任务箱  $i'$  进行作业时  $H_{ll'j}^{mk} = 1$ , 反之为 0,  $l, l' \in L, j=1,2,3, \forall mk \in N_j$ ;  $H_{ss'j}^{mk}$  是 0~1 变量, 水水联运时在阶段  $j$ , 当同一设备  $mk$  完成任务箱  $i$  的操作之后接着对任务箱  $i'$  进行作业时  $H_{ss'j}^{mk} = 1$ , 反之为 0,  $s, s' \in S, j=1,2, \forall mk \in N_j$ ;  $TC_T = \max(G_{rj}^{mk}, G_{lj}^{mk}, G_{sj}^{mk}) - \min(F_{rj}^{mk}, F_{lj}^{mk}, F_{sj}^{mk})$ ;  $F_{rj}^{mk}$  决策变量, 铁水联运在阶段  $j$ , 设备  $mk$  对任务箱  $r$  开始作业的时间;  $F_{lj}^{mk}$  决策变量, 公水联运在阶段  $j$ , 设备  $mk$  对任务箱  $l$  开始作业的时间;  $F_{sj}^{mk}$  决策变量, 水水转运在阶段  $j$ , 设备  $mk$  对任务箱  $s$  开始作业的时间;  $G_{rj}^{mk}$  决策变量, 铁水联运在阶段  $j$ , 设备  $mk$  对任务箱  $r$  完成作业的时间;  $G_{lj}^{mk}$  决策变量, 公水联运在阶段  $j$ , 设备  $mk$  对任务箱  $l$  完成作业的时间;  $G_{sj}^{mk}$  决策变量, 水水转运在阶段  $j$ , 设备  $mk$  对任务箱  $s$  完成作业的时间。

#### 3.2. 模型构建

在多式联运条件下, 枢纽港中转装卸的协同优化问题的主要优化目标是作业完工时间和能耗。其中在集装箱的中转装卸过程中消耗电能的是岸桥和龙门吊, 消耗柴油的是集卡和正面吊。为了方便计算装卸过程中各设备消耗的总能耗, 引入设备能耗折算系数  $\alpha$ , 单位是 kg 标准煤/kg 或 kg 标准煤/kWh, 然后将不同的设备能耗统一转换成标准煤能耗, 结合设备的单位能耗指标  $\mu$ , 单位为 kWh/TEU 或 kg/TEU, 以及各设备单位时间的作业效率  $p_j$  单位为 kWh/h 通过计算得到装卸设备的单位时间能耗  $E_{mk}$ , 单位为 kWh/h 或 kg/h, 如式(1)示:

$$E_{mk} = \frac{\mu \cdot \alpha}{p_j} \tag{1}$$

进而构建“铁水”“公水”“水水”出口集装箱中转的最小能耗公式：

1) 铁水联运集装箱中转的最小能耗计算公式为：

$$\min f_1 = \sum_{r \in R, j=2,4} \sum_{mk \in N_j} \frac{\mu \cdot \alpha \cdot P_{rj}^{mk} \cdot H_{rj}^{mk}}{P_j} + \sum_{r \in R, j=1} \sum_{mk \in N_j} \frac{\xi_j \cdot \beta \cdot P_{rj}^{mk} \cdot H_{rj}^{mk}}{P_j} \quad (2)$$

2) 公水联运集装箱中转的最小能耗为：

$$\min f_2 = \sum_{l \in L, j=2} \sum_{mk \in N_j} \frac{\mu \cdot \alpha \cdot P_{lj}^{mk} \cdot H_{lj}^{mk}}{P_j} + \sum_{r \in R, j=1,3} \sum_{mk \in N_j} \frac{\xi_j \cdot \beta \cdot P_{lj}^{mk} \cdot H_{lj}^{mk}}{P_j} \quad (3)$$

3) 水水转运集装箱中转的最小能耗为：

$$\min f_3 = 2 \sum_{s \in S, j=2} \sum_{mk \in N_j} \frac{\mu \cdot \alpha \cdot P_{sj}^{mk} \cdot H_{sj}^{mk}}{P_j} + \sum_{s \in S, j=1} \sum_{mk \in N_j} \frac{\xi_j \cdot \beta \cdot P_{sj}^{mk} \cdot H_{sj}^{mk}}{P_j} \quad (4)$$

多式联运出口集装箱各设备协同作业的目标模型为：

$$\min F_1 = TC_T \quad (5)$$

$$\min F_2 = \min(f_1 + f_2 + f_3) \quad (6)$$

式(5)表示所有集装箱中转的总完工时间，式(6)表示最小化集卡、岸桥、正面吊、龙门吊、协同作业过程的总能耗。模型的条件约束主要是：

1) 作业序列约束。

$$\sum_{mk \in N_j} H_{rj}^{mk} = 1, \forall r \in R; j = 1, 2, 4 \quad (7)$$

$$\sum_{mk \in N_j} H_{lj}^{mk} = 1, \forall l \in L; j = 1, 2, 3 \quad (8)$$

$$\sum_{mk \in N_j} \sum_{r' \in R} H_{r'rj}^{mk} = 1, \forall r \in R; j = 1, 2, 4 \quad (9)$$

$$\sum_{mk \in N_j} \sum_{l' \in L} H_{ll'j}^{mk} = 1, \forall l \in L; j = 1, 2, 3 \quad (10)$$

$$\sum_{mk \in N_j} \sum_{s' \in S} H_{ss'j}^{mk} = 1, \forall s \in S; j = 1, 2 \quad (11)$$

$$\sum_{r' \in R} H_{0r'j}^{mk} = 1, \forall r \in R; \forall mk \in N_j; j = 1, 2, 4 \quad (12)$$

$$\sum_{r \in R} H_{rZj}^{mk} = 1, \forall r \in R; \forall mk \in N_j; j = 1, 2, 4 \quad (13)$$

$$\sum_{l' \in L} H_{0l'j}^{mk} = 1, \forall l \in L; \forall mk \in N_j; j = 1, 2, 3 \quad (14)$$

$$\sum_{l \in L} H_{lZj}^{mk} = 1, \forall l \in L; \forall mk \in N_j; j = 1, 2, 3 \quad (15)$$

$$\sum_{s \in S} H_{0s'j}^{mk} = 1, \forall s \in S; \forall mk \in N_j; j = 1, 2 \quad (16)$$

$$\sum_{s \in S} H_{sZj}^{mk} = 1, \forall s \in S; \forall mk \in N_j; j = 1, 2 \quad (17)$$

$$\sum_{r' \in R^0} H_{r'rj}^{mk} - \sum_{r' \in R^Z} H_{r'rj}^{mk} = 0, \forall r \in R; \forall mk \in N_j; j = 1, 2, 4 \quad (18)$$

$$\sum_{l' \in L^0} H_{l'j}^{mk} - \sum_{l' \in L^Z} H_{l'j}^{mk} = 0, \forall l \in L; \forall mk \in N_j; j = 1, 2, 3 \quad (19)$$

$$\sum_{s' \in S^0} H_{s'sj}^{mk} - \sum_{s' \in S^Z} H_{s'sj}^{mk} = 0, \forall s \in S; \forall mk \in N_j; j = 1, 2 \quad (20)$$

式(7)代表铁水联运出口集装箱在各个阶段作业的唯一性；式(8)代表公水联运出口集装箱在各个阶段作业的唯一性；(9)铁水联运出口集装箱在当前作业阶段有且仅有一个紧前箱或紧后箱；式(10)公水联运出口集装箱在当前作业阶段只有一个紧前箱或紧后箱；式(11)水水转运出口集装箱在当前作业阶段只有一个紧前箱或紧后箱；式(12) (13)代表在铁水联运各阶段的起始箱是虚拟箱 0, 终止箱是虚拟箱 Z；式(14) (15)代表在公水联运各阶段起始箱是虚拟箱 0, 终止箱是虚拟箱 Z；式(16) (17)代表在水水转运各阶段起始箱是虚拟箱 0, 终止箱是虚拟箱 Z；式(18)确定铁水联运各阶段设备的作业顺序；式(19)确定公水联运各阶段设备的作业顺序；式(20)确定水水转运各阶段设备的作业顺序

2) 设备能力约束。

$$\sum_{r \in R} \sum_{mk \in N_j} P_{rj}^{mk} H_{rj}^{mk} \leq N_j \cdot K_j \cdot T; j = 1, 2, 4; \quad (21)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{mk \in N_j} P_{lj}^{mk} H_{lj}^{mk} \leq N_j \cdot K_j \cdot T; j = 1, 2, 3; \quad (22)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{mk \in N_j} P_{sj}^{mk} H_{sj}^{mk} \leq N_j \cdot K_j \cdot T; j = 1, 2; \quad (23)$$

(21)表示铁水联运阶段各阶段设备在可利用范围内作业；式(22)表示公水联运阶段各阶段设备在可利用范围内作业；式(23)表示水水转运阶段各阶段设备在可利用范围内作业。

3) 变量约束。

$$H_{ij}^{mk}, H_{rr'j}^{mk} \in \{0, 1\}, \forall r, r' \in R; \forall mk \in N_j; j = 1, 2, 4 \quad (24)$$

$$H_{lj}^{mk}, H_{l'l'j}^{mk} \in \{0, 1\}, \forall l, l' \in L; \forall mk \in N_j; j = 1, 2, 3 \quad (25)$$

$$H_{sj}^{mk}, H_{ss'j}^{mk} \in \{0, 1\}, \forall s, s' \in S; \forall mk \in N_j; j = 1, 2 \quad (26)$$

式(24) (25) (26)为决策变量约束。

#### 4. 算法求解

设备调度问题是 NP 难问题[8]，遗传算法比较适合此类问题的求解。代江涛[4]等在遗传算法迭代时改进的自适应交叉变异概率公式，可以有效解决变异概率或交叉概率过大适应度高的染色体被破坏或二者的值过小迭代初期无法产生新的个体陷入局部最优解的问题，将公式应用到设备调度问题中以找到最优设备协同调度方案，使完工时间和能耗最小。

公式如下：

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg} \\ P_{c1}, & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (27)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg} \\ P_{m1}, & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (28)$$

式(27)和(28)中,  $f_{avg}$  是种群个体的平均适应度值;  $f_{max}$  是种群个体的最大适应度值;  $f'$  是进行交叉操作的两个个体之中较大的适应度值;  $f$  是进行变异操作个体的适应度值;  $p_{c1}$  是最大交叉概率,  $p_{c1} = 0.9$ ;  $P_{c2}$  是最小交叉概率,  $P_{c2} = 0.6$ ;  $p_{m1}$  是最大变异概率,  $p_{m1} = 0.1$ ;  $P_{m2}$  是最小变异概率,  $P_{m2} = 0.01$ 。

#### 4.1. 染色体编码与解码

本文采用实数编码的方式。以铁水中转为例, 在遗传算法的初始阶段构造一个  $(10 * 3 * mk)$  的矩阵, 根据各阶段的设备数量确定  $mk$ , 设定为  $Int[1, 3]$  然后随机向下取整生成部分的初始解。得到初始解后对数据进行处理使其中一列数据转化为一行, 得到另一部分染色的编码最终表达方式, 分别代表了第一阶段设备龙门吊作业、第二阶段设备集卡作业、第三阶段设备岸桥作业的设备作业序列。

#### 4.2. 种群初始化

在约束条件(7)-(26)的限制下生成一定数量的个体, 每个个体的任务编号和作业设备序号利用随机数产生生成的所有个体形成初始种群。

#### 4.3. 适应度评价和选择

本文采取的是分别给两个目标函数分别赋予权重, 将双目标问题转化为单目标问题, 将目标函数  $f_1$  的权重系数设置为  $\alpha$ ,  $f_2$  的权重系数设置为  $1 - \alpha$ 。则归一化后的目标函数[9]为:

$$\min f = \alpha \frac{(F_1 - \min F_1)}{(\max F_1 - \min F_1)} + (1 - \alpha) \frac{(F_2 - \min F_2)}{\max F_2 - \min F_2} \quad (29)$$

#### 4.4. 遗传操作

##### 1) 选择

使用本文将采取随机通用采样的方式来选取父代个体, 这种方式每随机选择一次就能够选择  $N$  个父代的个体。通过选择好的个体适应力分配求出各个体被选择比例, 得出各个体中可选择的期望个体, 构造出一个轮盘, 每转动一个轮盘,  $N$  条指针所指到的个体被选作父体进行次代演化。

##### 2) 交叉

选择两个染色体的随机位置进行断点, 然后将两个断点前后的基因进行交换。

##### 3) 变异

随机选择一染色体的两个基因交换它们的位置, 即完成变异。

### 5. 算例分析

结合 Sha 等[10]的实验参数和武汉港相关作业数据开展算例研究, 改进遗传算法(Improved Genetic Algorithm, IGA)使用 Matlab 进行编程实现。采用的计算机参数为 AMD Ryzen 7 5800H with Radeon Graphics @3.20 GHz 16.0 GB。

#### 5.1. 算例设计

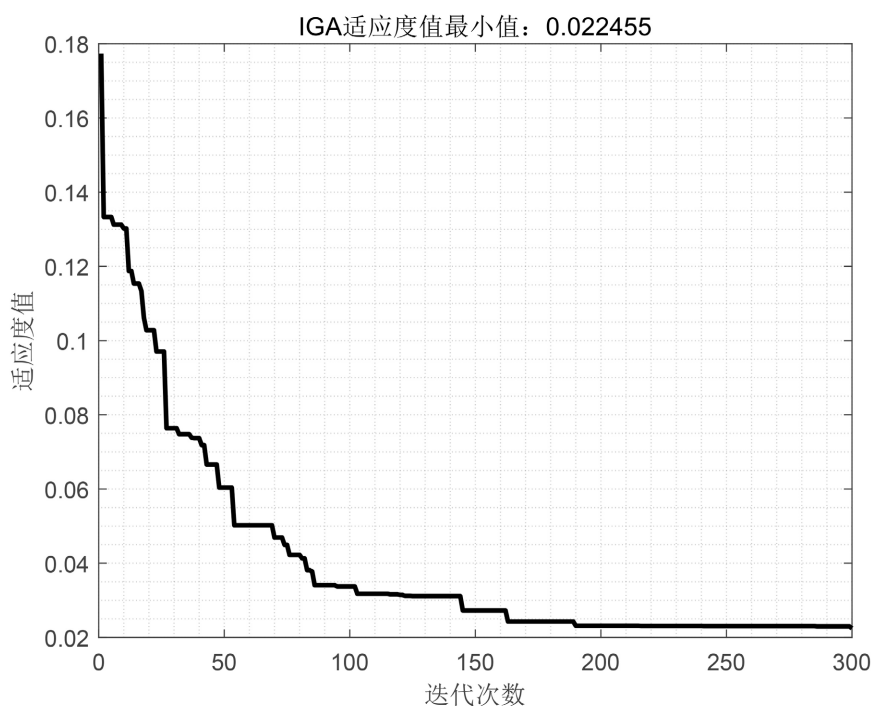
设定初始数据按照铁路集装箱: 公路集装箱: 水路集装箱 = 4:5:7 的比例设置, 集装箱 160 个其中铁路集装箱为 40 个, 公路集装箱 50 个, 水路集装箱 70。同时设置集卡 10 辆; 岸桥 7 个(其中前三个岸桥负责水路集装箱卸下, 后 4 个岸桥负责集装箱装船); 正面吊 3 个; 龙门吊 3 个, 基本参数如表 1 所示。改进遗传算法的参数设置为, 迭代次数 300, 交叉概率最大为 0.9, 最小为 0.6, 变异概率最大为 0.1 最小为 0.01 [4]时间权重 0.8, 能耗权重 0.2 [7]。

**Table 1.** Basic parameter information**表 1.** 基本参数信息

基本参数	数值	基本参数	数值
码头前沿与堆场距离/m	1700	正面吊单位能耗指标(kg/TEU)	0.85
列车车长/m	17	正面吊单位时间能耗(kg/h)	18.5
场区间距离/m	65	正面吊作业效率(TEU/h)	15
集卡单位能耗指标(kg/TEU)	0.81	龙门吊单位能耗指标(kwh/TEU)	0.51
集卡单位时间能耗(kg/h)	11.8	龙门吊单位时间能耗(kwh/h)	23.58
集卡作业效率(TEU/h)	10	龙门吊作业效率(TEU/h)	20
岸桥单位能耗指标(kwh/TEU)	3	电力折算系数(kg/kwh)	0.40
岸桥单位时间能耗(kwh/h)	30.3	柴油折算系数(kg/kg)	1.46
岸桥作业效率(TEU/h)	25	-	-

## 5.2. 算例求解

上述算例用于验证 IGA 的可行性, 求解结果为: 算法约在第 190 次收敛, 求解得到的最小完工时间为 6791 s, 最小能耗为 628.97 kg, 算法收敛过程如图 2 所示。得到的出口箱设备作业序列如表 2 所示, 其中铁路出口箱第一个集装箱由第 1 个龙门吊, 第 3 辆集卡, 第 4 个岸桥完成出口箱卸下与装船; 公路出口箱第一个集装箱则是由第 3 个正面吊, 第 6 辆集卡, 第 9 个岸桥完成出口箱卸下与装船; 水路出口箱第一个集装箱则是由第 2 个岸桥, 第 10 辆集卡, 第 6 个岸桥完成出口箱中转。

**Figure 2.** Algorithm convergence curve**图 2.** 算法收敛曲线



**Table 2.** Operation sequence of container equipment  
**表 2.** 集装箱设备作业顺序

铁路出口箱设备作业顺序						
1 (1、3、4), 2 (2、7、4), 3 (3、5、6), 4 (3、5、4), 5 (1、8、4), 6 (3、6、6), 7 (2、3、4), 8 (1、9、6), 9 (2、2、4), 10 (1、6、6), 11 (2、7、6), 12 (3、10、4), 13 (3、4、6), 14 (3、2、7), 15 (3、3、5), 16 (1、2、6), 17 (2、4、4), 18 (3、6、7), 19 (1、8、7), 20 (2、1、5), 21 (3、8、4), 22 (1、10、4), 23 (3、6、7), 24 (2、10、6), 25 (3、9、4), 26 (2、8、7), 27 (3、9、4), 28 (2、2、4), 29 (2、4、5), 30 (1、2、5), 31 (2、1、5), 32 (3、5、4), 33 (2、4、4), 34 (1、5、6), 35 (1、8、7), 36 (2、2、4), 37 (3、1、5), 38 (3、3、5), 39 (3、6、7), 40 (2、3、7)						
公路出口箱设备作业顺序						
1 (3、9、6), 2 (1、3、6), 3 (3、5、7), 4 (3、8、4), 5 (2、2、6), 6 (1、1、4), 7 (1、1、7), 8 (1、4、6), 9 (3、10、7), 10 (2、10、7), 11 (1、7、5), 12 (1、10、6), 13 (1、2、5), 14 (2、4、6), 15 (3、8、6), 16 (1、4、5), 17 (3、5、7), 18 (3、2、5), 19 (1、1、4), 20 (2、6、7), 21 (3、9、6), 22 (3、10、4), 23 (1、9、4), 24 (3、9、4), 25 (3、9、5), 26 (2、9、7), 27 (2、5、6), 28 (3、6、4), 29 (1、1、4), 30 (1、8、6), 31 (1、10、7), 32 (1、7、5), 33 (3、6、7), 34 (1、6、6), 35 (2、7、4), 36 (2、1、7), 37 (3、8、5), 38 (1、5、6), 39 (1、1、4), 40 (2、3、5), 41 (1、7、5), 42 (1、5、4), 43 (2、9、5), 44 (1、7、6), 45 (2、7、6), 46 (2、3、6), 47 (3、5、5), 48 (1、2、7), 49 (1、7、6), 50 (1、3、5)						
水路出口箱设备作业顺序						
1 (2、10、6), 2 (1、10、7), 3 (1、5、7), 4 (3、4、7), 5 (2、7、7), 6 (2、7、6), 7 (1、10、4), 8 (2、1、6), 9 (3、4、5), 10 (2、2、4), 11 (3、6、5), 12 (3、9、7), 13 (1、10、5), 14 (3、1、5), 15 (3、2、5), 16 (2、6、6), 17 (1、8、5), 18 (1、4、5), 19 (1、4、6), 20 (3、5、7), 21 (1、3、7), 22 (2、6、4), 23 (1、5、4), 24 (1、5、5), 25 (3、8、4), 26 (3、4、7), 27 (3、7、5), 28 (3、1、5), 29 (2、4、4), 30 (1、6、4), 31 (2、6、5), 32 (1、9、4), 33 (1、9、6), 34 (2、3、5), 35 (1、1、7), 36 (3、8、6), 37 (2、10、4), 38 (3、7、6), 39 (3、3、4), 40 (1、5、7), 41 (3、8、6), 42 (2、6、5), 43 (3、5、4), 44 (2、5、7), 45 (3、1、5), 46 (2、3、4), 47 (3、1、5), 48 (2、9、6), 49 (2、1、7), 50 (3、10、4), 51 (1、10、6), 52 (1、7、4), 53 (3、3、6), 54 (2、6、6), 55 (3、8、4), 56 (1、10、7), 57 (3、4、6), 58 (3、6、6), 59 (3、10、7), 60 (3、7、7), 61 (1、5、5), 62 (2、3、6), 63 (3、7、7), 64 (2、10、7), 65 (1、10、5), 66 (1、10、4), 67 (2、7、5), 68 (3、1、7), 69 (3、4、5), 70 (2、2、7)						

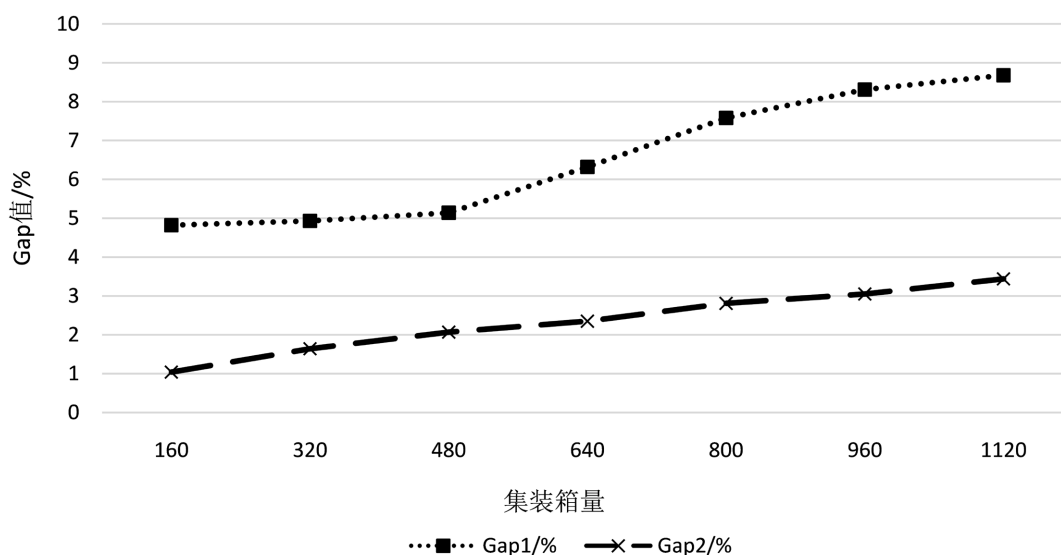
### 5.3. 算法对比

为进一步验证算法改进的有效性，设置多组不同集装箱数量的算例，将 GA 和 IGA 两种算法进行对比，结果如表 3 和图 3 所示。其中，图 3 表示 IGA 与 GA 求解结果之间的偏差值，用 Gap 表示。表 3 中结果表明，IGA 求解的最小完工时间和能耗结果都优于 GA，改进遗传算法求解效率更高，缩短 10% 左右求解时间。图 3 中结果表明，随着集装箱数量变化带来的问题规模增加，在求解结果方面，IGA 与 GA 之间的偏差呈现出逐渐增大趋势，表明 IGA 在求解更大规模问题时具有更好地求解性能。

**Table 3.** Comparison of Results for Different Container Volumes  
**表 3.** 不同集装箱量结果对比

集装箱数量	GA			IGA		
	F1/s	F2/kg	运行时间/s	F1/s	F2/kg	运行时间/s
160	7135	635.62	14.75	6791	628.97	11.98
320	13651	1256.56	46.81	12978	1235.91	41.56
480	20142	1876.38	83.36	19106	1837.41	74.79
640	27917	2531.38	156.82	26152	2471.85	141.76
800	33612	3052.28	227.57	31061	2966.50	204.87
960	41364	3777.56	334.39	37927	3662.24	298.38
1120	48092	4420.61	420.63	43919	4268.47	375.71

Gap对比图



注:  $Gap_1 = (GA\text{求解最小完工时间} - IGA\text{求解最小完工时间}) \times 100 / GA\text{求解最小完工时间}$ ;

$Gap_2 = (GA\text{求解能耗} - IGA\text{求解能耗}) \times 100 / GA\text{求解能耗}$ 。

Figure 3. Gap Comparison Chart

图 3. Gap 对比图

## 6. 结语

本文以集装箱多式联运枢纽港设备协同调度问题为研究对象,研究了枢纽港集装箱中转作业涉及的集卡、岸桥、龙门吊、正面吊等设备协同调度问题,建立了以作业完工时间最小和能耗最小的双目标模型,并改进遗传算法实现问题求解,得到较优设备作业序列;扩大算例研究结果表明集装箱数量增加,IGA 最小完工时间和能耗结果都优于 GA,随着作业箱量的增加,改进算法对优化目标的提升程度更加显著。其中,箱量为 1120 时 IGA 求解得到最小完工时间比 GA 缩短了 4173 s, Gap1 优化了 8.68%; IGA 求解的能耗比 GA 减少了 152.14 kg, Gap2 优化了 3.44%。后续的研究中将考虑多式联运过程中列车到达的不确定性等约束,将各阶段设备数量作为决策变量,深入研究出口箱量不同的情况下各阶段作业设备的最佳配比等问题。

## 基金项目

湖北省教育厅科学技术研究计划项目(编号: Q20211110)。

## 参考文献

- [1] 王志刚, 胡伟新. 考虑 AGV 路径冲突的自动化集装箱码头装卸设备的协同调度[J/OL]. 工业工程与管理: 1-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1738.T.20230710.1732.008.html>, 2023-10-12.
- [2] Lu, Y.Q. (2021) The Three-Stage Integrated Optimization of Automated Container Terminal Scheduling Based on Improved Genetic Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, Article ID: 6792137. <https://doi.org/10.1155/2021/6792137>
- [3] Hop, D.C., Van Hop, N. and Anh, T.T.M. (2021) Adaptive Particle Swarm Optimization for Integrated Quay Crane

and Yard Truck Scheduling Problem. *Computers & Industrial Engineering*, **153**, Article ID: 107075. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107075>

- [4] 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.
- [5] 秦琴, 梁承姬. 自动化码头考虑缓冲区的设备协调调度优化[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(6): 262-270.
- [6] 张笑菊, 曾庆成, 陈子根, 等. 基于同贝同步装卸的岸桥与集卡联合调度优化模型[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(2): 188-196.
- [7] 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.
- [8] 曾庆成, 杨忠振. 集装箱码头集成调度模型与混合优化算法[J]. 系统工程学报, 2010, 25(2): 264-270.
- [9] 叶慕静, 周根贵. 混合遗传算法在带走道的双目标布局问题中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(10): 101-107.
- [10] Sha, M., Zhang, T., Lan, Y., *et al.* (2017) Scheduling Optimization of Yard Cranes with Minimal Energy Consumption at Container Terminals. *Computers & Industrial Engineering*, **113**, 704-713. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.03.022>