

# 铁水联运港口车船直取模式下作业设备调度优化

张凯霞<sup>1</sup>, 李俊<sup>1,2\*</sup>, 唐璐瑶<sup>1</sup>, 严静雨<sup>1</sup>, 李晨璐瑶<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25日; 录用日期: 2023年12月22日; 发布日期: 2023年12月29日

## 摘要

随着集装箱多式联运在我国集装箱运输中的飞速发展, 客户对集装箱货物运输的时效性要求不断提高。在集装箱铁水联运港口作业中, 使用车船直取模式可有效提高集装箱运转效率。将铁水联运港口车船直取模式下的出口集装箱作业流程为对象, 构建了以最小化设备总作业时间和碳排放量为目标的数学模型。为实现构建模型的有效求解, 引入偏向度差值策略确定最优个体, 改进果蝇优化算法寻优能力。算例分析一方面验证了构建模型的有效性, 另一方面表明与典型的遗传算法相比, 改进后的果蝇优化算法具有更好的寻优性能。

## 关键词

铁水联运, 车船直取模式, 设备调度, 碳排放, 果蝇优化算法

# Scheduling Optimization of Handling Equipments under Travel Straight Mode in Rail-Water Intermodal Container Terminal

Kaixia Zhang<sup>1</sup>, Jun Li<sup>1,2\*</sup>, Luyao Tang<sup>1</sup>, Jingyu Yan<sup>1</sup>, Chenluyao Li<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. 25<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2023; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 张凯霞, 李俊, 唐璐瑶, 严静雨, 李晨璐瑶. 铁水联运港口车船直取模式下作业设备调度优化[J]. 运筹与模糊学, 2023, 13(6): 7622-7631. DOI: 10.12677/orf.2023.136747

## Abstract

With the rapid development of container multimodal transportation in container transportation in China, customers' requirements for the timeliness of container cargo transportation are constantly improved. In the operation of rail-water intermodal port, the use of travel straight mode can effectively improve the efficiency of container operation. The export container operation process of the rail-water intermodal port is the object, and a mathematical model is constructed to minimize the total operation time and carbon emission of the equipment as the goal. In order to realize the effective solution of the construction model, the bias difference strategy is introduced to determine the optimal individual and improve the optimization ability of the fruit fly optimization algorithm. The example analysis verifies the validity of the construction model, on the one hand. On the other hand, it shows that the improved fruit fly optimization algorithm has better optimization performance compared with the typical genetic algorithm.

## Keywords

Rail-Water Intermodal, Travel Straight Mode, Equipment Scheduling, Carbon Emissions, Fruit Fly Optimization 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

集装箱运输在我国货物运输中发挥着重要作用,近年来多式联运作为集装箱运输发展的新形式取得了长足发展。《水运“十四五”发展规划》中提出要补齐港口集疏运短板,实现长江干线主要港口铁路进港全覆盖。同时为推动水运绿色发展,需加强资源集约利用、降耗减排。港口作为集装箱铁水联运的重要节点,其通过效率对整个铁水联运的运输效率至关重要。在港口作业模式中,相比传统的堆场堆存模式,车船直取模式省去了集装箱过堆场的作业环节,可有效提高港口的作业效率,也可节省港口的作业资源。该模式下涉及轨道式龙门吊、岸桥、集卡等设备之间的协调作业,如何实现不同设备间的协同调度优化,对提高港口的作业效率和降低碳排放均有重要意义。

目前已有关于铁水联运港口的作业设备调度优化研究大多围绕传统的堆场堆存模式展开。李想[1]以作业集装箱总时间和设施设备空载的总时间最短为目标,对“堆场-铁路”作业段设备调度进行研究,利用遗传算法求解问题。Lu Chen [2]将港口作业集装箱的问题视为混合流水车间调度问题进行研究。茅伟娟[3]从装卸作业时间、能耗、CO<sub>2</sub>排放等方面,分析比较新型和传统两种集装箱海铁联运系统。Dingyou Lei 等[4]研究铁路集装箱货场装卸设备资源的配置问题,构建协调作业调度模型。常伟妹[5]以装卸过程总完成时间最短为目标,研究集装箱码头铁路作业区场所的作业设备协同调度问题,使用改进的多层遗传算法求解。对于铁水联运港口车船直取模式下的作业设备调度优化的研究较少。杨忠振等[6]主要是对基于出口箱随机到达码头的车船直取装船作业优化问题进行研究。冯力源[7]将装卸时间最小化作为优化目标,以研究铁水联运港口作业集装箱设备的调度优化问题。国巍等[8]提出了白洋港铁水联运车船直取模式,从车船直取模式下的港口设施布局和作业流程等方面分析。在实际作业过程中因设备作业产生的碳排放量、能耗也是影响设备调度优化的关键因素。李曼[9]从减少港口内污染物排放的角度出发,构建

了多目标码头核心作业区域设备的集成调度模型。代江涛[10]等将总完成时间最短、总作业能耗最小作为优化目标，对港口设备的协同调度问题进行研究。

综上所述，现有关于铁水联运港口作业设备调度的研究主要考虑堆场堆存模式，而有关设备碳排放的研究大多围绕传统集装箱港口场景开展，车船直取模式下作业设备调度优化的研究较少。为此，本文针对铁水联运港口车船直取模式下作业设备调度优化展开研究，且在决策时纳入设备碳排放考虑。针对车船直取作业模式，以出口集装箱的作业流程为研究对象，构建以设备总作业时间和碳排放量最小为优化目标的数学模型，并改进果蝇优化算法实现求解。

## 2. 问题描述

车船直取模式是指经多式联运的集装箱在到达铁水联运港口时，不用经过港口堆场作业，可以直接在列车与船舶之间换装的作业模式。集装箱铁水联运港口的作业设备调度问题主要是依据装卸作业的要求，在满足作业设备的各类约束条件下合理调度各类作业设备，在考虑不同设备协同作业的前提下制定出最佳的作业计划。目前，我国铁水联运港口主要采用铁路装卸线布置在港口堆场后方的形式，且多使用单装单卸作业模式。针对上述场景研究车船直取模式下出口集装箱作业流程中的设备协同调度优化问题。

车船直取模式下出口集装箱作业流程为：载有出口集装箱的列车抵达铁路作业区时，轨道式龙门吊将集装箱卸至集卡上，由集卡将出口集装箱运至码头前沿，随后岸桥将出口集装箱装至船舶，如图1所示。本文构建的数学模型是在冯力源[7]的调度优化模型上进行改进后所提出，考虑将设备总作业时间和碳排放量最小化作为优化目标，以得到合理的作业设备调度方案。

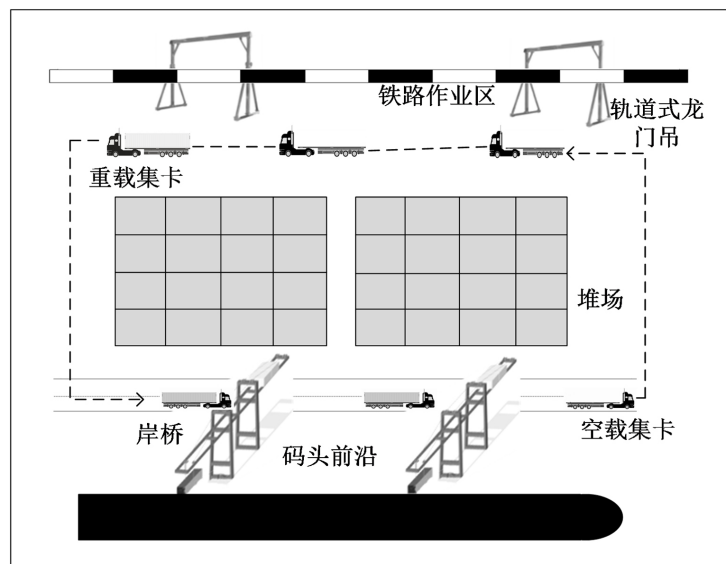


Figure 1. Straight transport mode the export container operation flow chart  
图1. 车船直取模式下出口集装箱的作业流程示意图

### 2.1. 模型假设

为方便建模，考虑现实约束，做出以下假设：1) 假设只考虑集装箱单一箱型；2) 假设列车仅装载一层集装箱；3) 假设各设备一次只能作业一个集装箱；4) 假设集装箱列车到站时间与船舶到港时间配合紧密[7]，集装箱的相关信息已知。

## 2.2. 相关模型

### 2.2.1. 参数与变量说明

1) 参数

$I$  表示集装箱作业任务的集合,  $i, j \in I$ ;

$T_1, T_2, T_3$  分别表示轨道式龙门吊、集卡、岸桥的集合,  $t_1, t_1' \in T_1; t_2, t_2' \in T_2; t_3, t_3' \in T_3$ ;

$a$  表示设备索引,  $a, a' \in \{1, 2, 3\}$ ;

$S_i^{t_a}$  表示设备  $t_a$  作业集装箱  $i$  时的开始时间,  $a \in \{1, 2, 3\}$ ;

$O_i^{t_a}$  表示设备  $t_a$  作业集装箱  $i$  时的操作时间,  $a \in \{1, 2, 3\}$ ;

$C_i^{t_a}$  表示设备  $t_a$  作业集装箱  $i$  时的完成时间,  $a \in \{1, 2, 3\}$ ;

$E_{ij}^{t_a}$  表示设备  $t_a$  为完成连续的集装箱作业  $i$  和  $j$  所产生的空驶时间,  $a \in \{1, 2, 3\}$ ;

$W_i^{t_a t_{a'}}$  表示设备  $t_a$  在作业集装箱  $i$  时与设备  $t_{a'}$  交接时产生的等待时间,  $|a - a'| = 1, a, a' \in \{1, 2, 3\}$ ;

$W_{ij}^{t_a t_{a'}}$  表示设备  $t_a$  为完成连续的集装箱作业  $i$  和  $j$  与设备  $t_{a'}$  交接时产生的等待时间,  $|a - a'| = 1, a, a' \in \{1, 2, 3\}$ ;

$\alpha_n, \alpha_{n0}$  分别表示单位时间内轨道式龙门吊  $t_1$  在工作状态下和其等待集卡时的能耗;

$\theta_n, \theta_{n1}, \theta_{n0}$  分别表示单位时间内集卡  $t_2$  重载状态下和空载状态及等待状态时的能耗;

$\gamma_n, \gamma_{n0}$  分别表示单位时间内岸桥  $t_3$  在工作状态下和其处于等待状态时的能耗;

$\varphi_{co_2}, \mu_{co_2}$  分别表示燃油、电力的碳排放因子;

$H$  是一个很大的正数。

2) 决策变量

$X_i^{t_a}$  表示当设备  $t_a$  作业集装箱  $i$  时取 1, 反之为 0;

$Y_{ij}^{t_a}$  表示当集装箱  $i$  和  $j$  被同一台设备  $t_a$  作业时,  $i, j$  为连续作业取 1, 反之为 0。

### 2.2.2. 模型建立

综上所述, 本文构建的铁水联运港口车船直取模式下作业设备调度优化模型如下:

$$F_1 = \min \left\{ \max \left( C_i^{t_3} \right) \right\}, \forall i \in I, t_3 \in T_3 \quad (1)$$

$$F_2 = \min \left\{ f_{2t_1} + f_{2t_2} + f_{2t_3} \right\} \quad (2)$$

$$f_{2t_1} = \varphi_{co_2} \cdot \sum_{t_1 \in T_1} \left[ \alpha_n \cdot \left( \max_i C_i^{t_1} - \sum_{t_2 \in T_2} \sum_{i \in I} W_i^{t_1 t_2} \right) + \alpha_{n0} \cdot \left( \sum_{t_2 \in T_2} \sum_{i \in I} W_i^{t_1 t_2} \right) \right] \quad (3)$$

$$f_{2t_2} = \varphi_{co_2} \cdot \sum_{t_2 \in T_2} \sum_{i, j \in I} \left[ \theta_n \cdot O_i^{t_2} + \theta_{n1} \cdot E_{ij}^{t_2} \cdot Y_{ij}^{t_2} + \theta_{n0} \cdot \left( \sum_{t_3 \in T_3} W_i^{t_2 t_3} + \sum_{t_1 \in T_1} W_{ij}^{t_2 t_1} \right) \right] \quad (4)$$

$$f_{2t_3} = \mu_{co_2} \cdot \sum_{t_3 \in T_3} \left[ \gamma_n \cdot \left( \max_i C_i^{t_3} - \sum_{t_2 \in T_2} \sum_{i \in I} W_{ij}^{t_3 t_2} \right) + \gamma_{n0} \cdot \left( \sum_{t_2 \in T_2} \sum_{i \in I} W_{ij}^{t_3 t_2} \right) \right] \quad (5)$$

约束条件:

$$\sum_{i \in I} X_i^{t_a} = 1, t_a \in T_a, a \in \{1, 2, 3\} \quad (6)$$

$$X_i^{t_a} - Y_{ij}^{t_a} \geq 0, \forall i, j \in I, t_a \in T_a, a \in \{1, 2, 3\} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} Y_{ij}^{t_a} \leq 1, \forall j \in I, t_a \in T_a, a \in \{1, 2, 3\} \quad (8)$$

$$\sum_{j \in I} Y_{ij}^{t_a} \leq 1, \forall i \in I, t_a \in T_a, a \in \{1, 2, 3\} \quad (9)$$

$$S_i^{t_1} - (C_i^{t_1} + E_{ij}^{t_1}) + (1 - Y_{ij}^{t_1}) \cdot H \geq 0, \forall i, j \in I, t_1 \in T_1 \quad (10)$$

$$S_i^{t_a} - (C_i^{t_a} + E_{ij}^{t_a} + W_{ij}^{t_a t_a'}) + (1 - Y_{ij}^{t_a}) \cdot H \geq 0, \forall i, j \in I, t_a \in T_a, a \in \{2, 3\} \quad (11)$$

$$S_i^{t_1} - (C_i^{t_2} + E_{ij}^{t_2}) + (1 - Y_{ij}^{t_2}) \cdot H \geq 0, \forall i, j \in I, t_1 \in T_1, t_2 \in T_2 \quad (12)$$

$$S_i^{t_2} - C_i^{t_1} + (X_i^{t_1} - X_i^{t_2}) \cdot H \geq 0, \forall i, j \in I, t_1 \in T_1, t_2 \in T_2 \quad (13)$$

$$S_i^{t_3} - C_i^{t_2} + (X_i^{t_2} - X_i^{t_3}) \cdot H \geq 0, \forall i, j \in I, t_2 \in T_2, t_3 \in T_3 \quad (14)$$

$$C_i^{t_a} = S_i^{t_a} + O_i^{t_a} + W_i^{t_a t_a'}, \forall i \in I, t_a \in T_a, a \in \{1, 2\} \quad (15)$$

$$C_i^{t_3} = S_i^{t_3} + O_i^{t_3}, \forall i \in I, t_3 \in T_3 \quad (16)$$

$$W_{ij}^{t_a t_a'} = \max \left\{ \left[ C_j^{t_a'} - (C_i^{t_a} + E_{ij}^{t_a}) \right], \forall i, j \in I, t_a \in T_a, a \in \{1, 2, 3\} \right\} \quad (17)$$

$$W_i^{t_a t_a'} = \max \left\{ \left[ C_j^{t_a'} + E_{ij}^{t_a'} - (S_i^{t_a} + O_i^{t_a}), 0 \right], \forall i, j \in I, t_a \in T_a, a \in \{1, 2, 3\} \right\} \quad (18)$$

式(1)和(2)均为目标函数，其中式(1)表示设备总作业时间最小化，式(2)表示最小化碳排放量；式(3)至式(5)表示各设备在整个作业过程中的碳排放量；式(6)和式(7)表示每个需作业的集装箱仅能由一台轨道式龙门吊、一辆集卡、一台岸桥作业；式(8)和式(9)表示每个作业集装箱的设备都至多仅有一个前续和一个后续作业；式(10)和式(11)表示当设备进行连续作业时，后面集装箱作业的开始时间要晚于前面集装箱作业的完成时间与该设备空驶时间之和；式(12)至式(14)表示轨道式龙门吊开始作业的时间不能比集卡完成前面作业并返回的时间早，集卡作业的开始时间要晚于轨道式龙门吊作业的完成时间，岸桥作业的开始时间不可以比集卡的作业完成时间早；式(15)和式(16)表示各设备完成作业的时间；式(17)表示当岸桥完成前面集装箱的作业且已经到达后一集装箱位置时，若集卡没有及时到达该位置，岸桥将产生等待时间；当集卡完成前面集装箱作业且已空驶到达后一作业位置，若轨道式龙门吊没及时到达，那集卡产生等待时间；式(18)表示轨道式龙门吊作业时，由于集卡未到产生的等待时间；当集卡到达码头前沿时，岸桥未及时到达产生的等待时间。

### 3. 算法设计

铁水联运港口车船直取模式下作业设备调度优化问题是一个考虑作业过程中设备间协同调度的问题。果蝇优化算法因为其全局寻找最优能力较强、较好的收敛性等特点非常适用于求解设备协同调度等问题。为求解双目标优化问题，对传统果蝇优化算法进行改进，引入偏向度差值策略[11]来选择最优个体，即在果蝇种群中选择偏向度差值最小的个体作为最优个体。算法的求解步骤如下：

步骤 1：初始化种群。随机生成初始种群。解是由三个一维数组表示，数组长度代表待调度任务数，分别表示各设备执行待调度任务，数组的值在[0, 1]范围内随机生成。

步骤 2：解码。将解的数值按照最大到最小以及各设备的数量进行切分，解落在哪个区间，就代表由相应设备执行当前作业。

步骤 3: 计算目标函数。从轨道式龙门吊开始依次获取待运输的集装箱, 找到待运输的集卡和岸桥及其对应的可使用时间, 可得到每个阶段作业的详细信息, 进而计算目标函数值。

步骤 4: 确定最优的果蝇个体。步骤 3 已知两个优化目标函数值, 偏向度差值最小所对应的解即为最优的果蝇个体。

步骤 5: 更新果蝇种群的解。按式(19)分别更新种群中其他个体的解。

$$x_i^g = x_i^g + \beta \cdot e^{-\gamma(f_i - f_{\min})^2} + (x_{\min}^g - x_i^g) + \alpha \cdot \bar{r} \quad (19)$$

## 4. 算例分析

### 4.1. 算例描述

本文设列车载有 60 个集装箱, 集装箱尺寸为 40 英尺, 轨道式龙门吊、集卡、岸桥数量分别为 3 台、7 辆、3 台。集装箱作业区和作业设备的参数如表 1 所示, 集装箱信息如表 2 所示。

**Table 1.** Basic parameter information

**表 1.** 基本参数信息

基本参数名称	取值
铁路作业区与码头前沿固定距离/m	2000
列车单节车厢长度/m	17
船舶上集装箱位行间距/m	12.5
铁路装卸线有效长度/m	1050
轨道式龙门吊行走速度(满载/空载)/(km/h)	5/6
集卡行驶速度(满载/空载)/(km/h)	20/25
岸桥行走速度(满载/空载)/(km/h)	3/4
轨道式龙门吊单位时间能耗(工作/等待)/(L/h)	28.42/16
集卡单位时间能耗(重载/空载/等待)/(L/h)	11.8/6.8/3
岸桥单位时间能耗(工作/等待)/(kwh/h)	30/21.7
燃油的碳排放因子/(kg/L)	2.63
电力的碳排放因子/(kg/kwh)	0.8587

**Table 2.** Unloading location information of container shipment

**表 2.** 卸车装船的集装箱位置信息

集装箱编号	初始位置	目标位置	集装箱编号	初始位置	目标位置	集装箱编号	初始位置	目标位置
1	L1-25	070302	21	L1-57	130402	41	L1-58	100102
2	L1-41	150102	22	L1-34	110201	42	L1-47	120102
3	L1-7	080201	23	L1-51	130201	43	L1-13	040401

## Continued

4	L1-37	100202	24	L1-11	010501	44	L1-44	080203
5	L1-31	060201	25	L1-4	040103	45	L1-38	040301
6	L1-50	150301	26	L1-22	020201	46	L1-27	030302
7	L1-1	010502	27	L1-3	050201	47	L1-40	120302
8	L1-30	110304	28	L1-18	070404	48	L1-9	090102
9	L1-60	080503	29	L1-21	120502	49	L1-49	120105
10	L1-26	110404	30	L1-42	110203	50	L1-55	010201
11	L1-23	130202	31	L1-16	030104	51	L1-43	020305
12	L1-14	060103	32	L1-59	100103	52	L1-20	120301
13	L1-54	070301	33	L1-10	080104	53	L1-36	050202
14	L1-52	150101	34	L1-48	060202	54	L1-39	070501
15	L1-33	030301	35	L1-8	010101	55	L1-17	010202
16	L1-28	090505	36	L1-32	090203	56	L1-35	100201
17	L1-15	030202	37	L1-12	140504	57	L1-24	140103
18	L1-46	110501	38	L1-29	110202	58	L1-56	150405
19	L1-45	100101	39	L1-53	120501	59	L1-6	040302
20	L1-19	080202	40	L1-2	010405	60	L1-5	020401

注：初始位置表示集装箱位置的装卸线和车厢的编号，目标位置代表着集装箱在船上的行列层号。

## 4.2. 算例分析

算法相关参数设置为初始种群数  $\text{pop\_size} = 1000$ ，算法的最大迭代次数  $\text{max\_iter\_num} = 100$ 。算例实验中轨道式龙门吊、集卡、岸桥的初始位置随机生成。

### 4.2.1. 算例结果分析

采用改进果蝇优化算法针对 3.1 中算例连续运行 20 次所得到的最优结果，如表 3 所示。对应 20 次算法连续优化的运行结果如图 2 所示，其中，优化前结果按集装箱按任务顺序执行得到。

**Table 3.** The results before and after optimization

**表 3.** 优化前后运行结果

	设备总作业 时间(s)	轨道式龙门吊作业 完成时间(s)	集卡作业完成 时间(s)	岸桥作业完成 时间(s)	碳排放量 (kg)
优化前结果	8026	7522	7866	8026	524
优化后结果	5607	5216	5462	5607	304

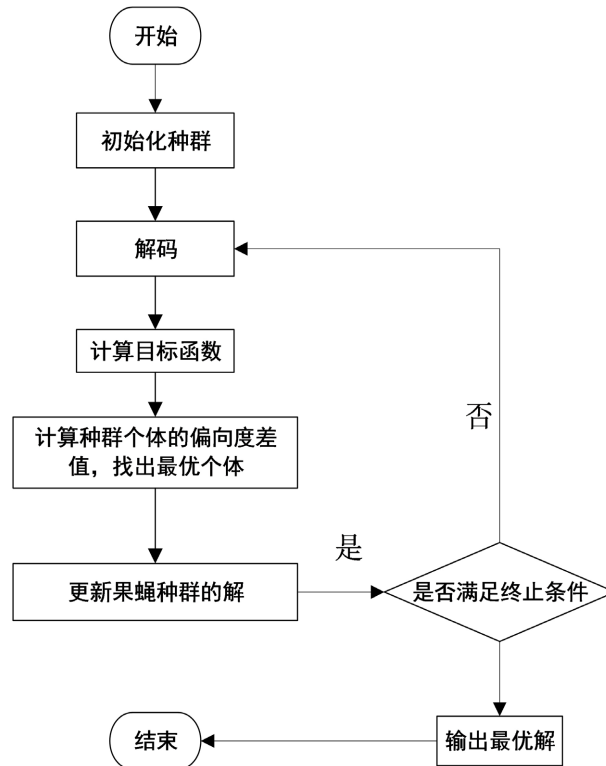


Figure 2. Algorithm flow chart  
图 2. 算法流程图

由表 3 可以看出作业设备调度优化后, 设备总作业的平均时间优化了 30.1%, 轨道式龙门吊的作业时间缩短了 30.7%, 集卡的作业时间优化了 30.6%, 岸桥的作业时间缩短了 30.1%; 且碳排放量从 524 kg 减少到 304 kg, 优化了 41.9%。通过图 3 可知, 对所作业设备调度优化后, 提升了集装箱在港口的运转效率且碳排放量显著降低。

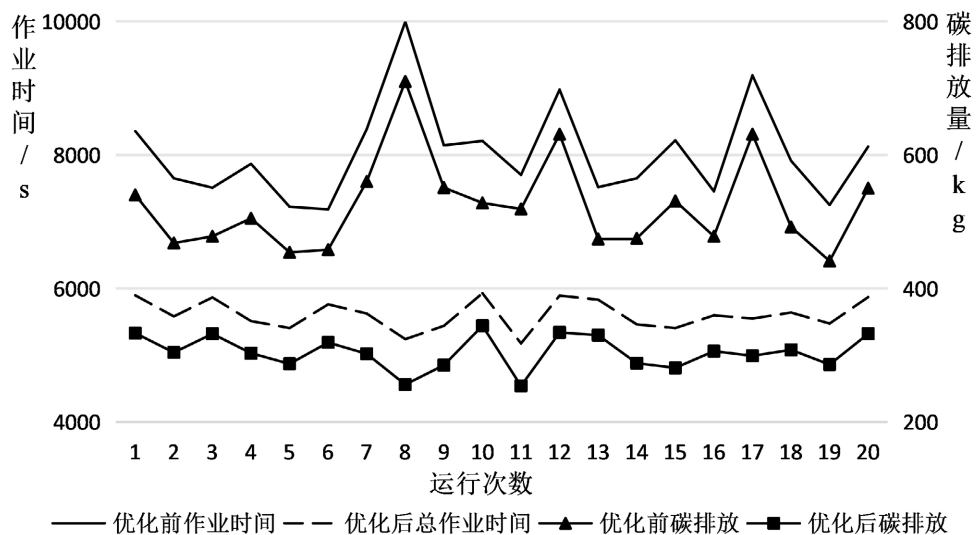


Figure 3. Solving results  
图 3. 运行结果



将运行 20 次后设备总作业时间最少的方案作为最优调度方案，轨道式龙门吊的设备作业方案如表 4 所示，集卡的设备作业方案如表 5 所示，岸桥的设备作业方案如表 6 所示。

**Table 4.** Rail-mounted gantries operation sequence

**表 4.** 轨道式龙门吊的作业序列

轨道式龙门吊序号	作业序列
1	1-9-12-19-33
2	3-4-5-6-7-8-11-13-14-15-16-18-20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-30-31-32-34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-45-46-47-48-49-50-51-52-53-54-56-57-58-59
3	2-10-17-55-60

**Table 5.** Container trucks operation sequence

**表 5.** 集卡的作业序列

集卡序号	作业序列
1	17-19
2	8-9-15-35-36-38-50-57-60
3	1-4-5-6-7-18-20-24-26-34-37-45-46-47-52-53-55-58
4	2-13-23-25-30-40-41-44-48-51-54-56
5	3-10-11-14-22-27-28-31-32-33-39-42-43-49-59
6	16-21-29
7	12

**Table 6.** Quay cranes operation sequence

**表 6.** 岸桥的作业序列

岸桥序号	作业序列
1	3-6-8-11-14-17-19-21-25-26-29-34-40-42-43-47-49-54-56-60
2	4-5-7-9-10-12-15-18-24-27-30-31-35-36-39-45-46-50-53-59
3	1-2-13-16-20-22-23-28-32-33-37-38-41-44-48-51-52-55-57-58

#### 4.2.2. 算法对比分析

为更好展现本文算法的性能，本文与遗传算法进行对比，算法参数设置为种群规模 100、迭代次数 100、变异概率 0.1、交叉概率 1.0、保留精英比例 0.2。算例实验中轨道式龙门吊、集卡、岸桥的初始位置随机生成。针对 3.1 节中算例，利用不同算法分别连续运行 20 次得到的最优结果如表 7 所示。

由表 7 知，本文采用的果蝇优化算法所计算出的设备总作业时间要比遗传算法的作业时间少 587 s，且相应减少了 61 kg 的碳排放量，表明果蝇优化算法的寻找最优解的能力要比遗传算法更好。

**Table 7.** Fruit fly optimization algorithm and genetic algorithm  
**表 7.** 果蝇优化算法和遗传算法对比

	果蝇优化算法	遗传算法
设备总作业时间(s)	5607	6194
碳排放量(kg)	304	365

## 5. 结语

本文针对集装箱铁水联运港口车船直取模式下作业设备调度优化问题展开研究。为提高联运集装箱在港口运转效率且降低港口碳排放，以最小化设备总作业时间和碳排放量为优化目标构建设备协同调度的数学模型，并通过引入了偏向度差值策略改进果蝇优化算法完成问题求解。通过算例研究验证了所构建模型与改进果蝇优化算法的有效性，可实现铁水联运港口车船直取模式下作业设备调度优化问题的有效求解。本文研究中只考虑了出口集装箱作业时各类设备的协同调度问题，后续可拓展考虑进出口集装箱作业流程，进一步研究多设备的协同调度问题。

## 参考文献

- [1] 李想. 集装箱码头海铁共堆场下的“堆场-铁路”作业调度优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [2] Chen, L., Bostel, N., *et al.* (2007) A Tabu Search Algorithm for the Integrated Scheduling Problem of Container Handling Systems in a Maritime Terminal. *European Journal of Operational Research*, **181**, 40-58. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.033>
- [3] 茅伟娟. 集装箱海铁联运港口作业模式比较研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [4] Lei, D.Y., Zhang, P., Zhang, Y.G., *et al.* (2019) Research on Coordinated Scheduling of Multiple Systems and Single Jobs Based on Improved Particle Swarm Optimization. *Cluster Computing—The Journal of Networks Software Tools and Applications*, **22**, 1443-1458. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-1768-0>
- [5] 常祎妹, 朱晓宁, 闫柏丞, 等. 集装箱码头铁水联运装卸设备协同调度[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4): 40-47.
- [6] 杨忠振, 程健南. 基于出口箱随机到达码头的车船直取装船作业优化[J]. 大连海事大学学报, 2016, 42(4): 97-104.
- [7] 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]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [8] 国巍, 余永金. 白洋港铁水联运车船直取模式研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(5): 44-48+70.
- [9] 李曼. 考虑港区碳排放的集装箱码头核心作业区域集成调度研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [10] 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.
- [11] 吴暖, 王诺, 于安琪, 等. 基于柔性靠泊的港口疏船调度多目标优化及最优解选择[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(5): 1531-1540.