考虑集装箱簇边装边卸的港口集卡调度模型求解*

梁承姬，贾帅帅†
（上海海事大学 物流研究中心，上海 201306）

摘　要：在集装箱装卸作业问题中，以集装箱簇为作业单位，分两阶段分析集装箱在岸桥集卡间的调度方案，以集卡空驶率最小与移动距离最短为目标，建立了整数规划模型。针对上述模型，利用启发式算法与自适应遗传算法对问题进行分析求解。最后通过配置不同集卡数量，将其移动总距离以及空驶效率进行比较，并与禁忌搜索算法相对比。实验结果表明，启发式自适应遗传算法的计算结果在空驶率以及移动总距离最小问题上有更优的解决方案。

关键词：边装边卸；进出口箱簇组合；集卡调度；启发式算法；自适应遗传算法
中图分类号：TP301.6　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2017)02-0413-06
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2017.02.021

Considering loading and unloading of containers for model solution on yard truck scheduling in container terminal

Liang Chengji, Jia Shuaishuai†
(*Logistics Research Center*, *Shanghai Maritime University*, *Shanghai* 201306, *China*)

Abstract: This paper focused on the question of loading and unloading of containers, and analyzed the yard truck scheduling in two stages, with considered the loading and unloading of containers. It developed a mixed integer programming model, where the objective was to minimize the rate of empty-loading and the total distance which was from sum overloading distance and empty-loading distance. And it used heuristic algorithm and adaptive genetic algorithm to solve the above model. Finally with heuristic-adaptive genetic algorithm and Tabu search algorithm, it computed the mathematical model deployed different quantity of yard trucks. The result from experiment case proves that the result of the H-AGA is better than that of Tabu search algorithm in the problems of the rate of empty-loading and minimum distance of working.

Key words: loading and unloading; import and export container groups; yard truck scheduling; heuristic algorithm; adaptive genetic algorithm

0　引言

随着集装箱运输业的迅猛发展，集装箱码头间的竞争也越来越激烈。为了降低集装箱码头的运营成本，提高运行效率和经济效益，各集装箱码头对岸桥调度和集卡调度的联合作业进行装卸作业面的优化。即除了岸桥同时进行边装边卸作业外，集卡也根据岸桥和场桥的工作效率，动态服务于不同的岸桥和场桥之间，尽量避免集卡的空驶，从而实现基于装卸作业面的优化。曾成庆[1]提出了基于装卸作业面的调度方法的概念，其调度方法有两种，在不同作业线间共享集卡的方式：一种是集卡在进行同一船舶作业的岸桥间共享；另一种是集卡在进行不同船舶作业的岸桥间共享。前一种可以解决不同作业线集卡利用不平衡的问题，而后一种方法可以减少集卡空驶，两者都可以提高集卡利用率。Kaveshgar 等人[2]分析岸桥、集卡的集成调度问题，并运用遗传算法和贪婪算法计算集装箱装卸作业的完工时间最小。Tang 等人[3]对岸桥集卡联合作业中先从单向进口作业进行模型建立以及算法研究，运用改进 PSO 算法进行计算，并将计算结果与 CPLEX 求解器的结果进行对比，最后将单向进口作业拓展为双向进出口集装箱作业，进而用 PSO 算法进行模拟求解。Lee 等人[4]利用启发式算法对集卡调度和堆场分配问题进行求解，并建立了集卡移动时间与等待延迟时间权重之和最小的数学模型。王伟飞[5]针对混合交叉作业的集装箱作业问题，建立岸桥—集卡的作业路径选择模型，并利用标准的遗传算法对问题进行求解分析。钱继锋[6]利用两阶段的禁忌搜索算法对基于装卸作业面的岸桥—集卡协同作业进行分析求解，建立了集卡运输时间、空驶时间以及岸桥作业时间最小的数学模型。He 等人[7]提出 GA 和粒子群算法对内集卡、岸桥和场桥的集成调度问题进行求解，建立了混合整数规划模型，将集成调度作业分阶段进行细分。马超等人[8]针对集装箱码头岸桥和集卡的协同调度问题，以使进口箱和出口箱的总完工时间最短为目的，构建了边装边卸的混合整数规划模型，通过将分层的遗传算法结果与 CPLEX 求解器所求得的最优解或下界进行比较，证明遗传算法可以在较短的时间内快速有效地求得最优解。顾天意等人[9]基于集装箱码头堆场空间资源配置问题，提出了遗传算法的矩阵式染色体。徐晓雷[10]考虑岸桥作业和场桥作业对集卡作业效率的影响，

收稿日期：2016-01-10；**修回日期**：2016-02-24　　**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(71471110,71301101)；上海市科委资助项目(14170501500)

作者简介：梁承姬(1970-)，女(朝鲜族)，吉林龙井人，教授，博士，主要研究方向为物流系统运作计划与优化、口岸物流流程模拟与重组、港口布局优化与模拟等；贾帅帅(1990-)，男(通信作者)，硕士研究生，主要研究方向为港口运营与优化(1570533067@qq.com).

研究了基于作业面的集卡作业路径选择问题。Homayouni 等人[11]对自动化集装箱港口的岸桥—车辆—场桥的集成调度进行研究,认为已有的基于模拟退火算法的 SP-AS/RS 系统的设备调度在精确度以及调度方案中不如遗传算法的计算结果。Chen 等人[12]研究了桥吊装卸与集卡运输之间的交互作用,建立了约束规划模型,并设计了三阶段算法求解。Cao 等人[13]研究了集卡与岸桥联合调度问题,建立了 MIP 模型,并设计了遗传算法和修订的基于约翰逊规则的启发式算法求解,但其只求解了小规模的问题。曾成庆等人[14]建立了集装箱码头作业调度双层规划模型,分别对岸桥调度和集卡路径优化进行模型建立,并设计了基于遗传算法的求解方法。尚晶等人[15]研究了基于集装箱装卸作业面的集卡全场调度策略,调度优化目标包括减少集卡的空驶行程。

在以往岸桥集卡装卸运输问题中,岸桥与集卡之间集装箱的装卸运输方式有两种:一种是岸桥将不同集装箱分配给各个集卡,不同集卡对单个集装箱作业;另一种是岸桥将同一簇的集装箱分配给一辆集卡,一辆集卡对同一簇的全部集装箱完成运输作业。在实际作业中,以上两种运输方式不能够有效地利用集卡,存在严重的集卡空驶现象,造成集卡资源的浪费。本文提出新的岸桥集卡装卸运输作业方式:岸桥将同一簇集装箱划分为小数量的单元簇分配给不同的集卡,不同的集卡对单元簇内的全部集装箱作业。本文所提出的运输方式可能会增加集卡路径的复杂度,但有效地提高了集卡的运输效率,显著地减少了集卡的空驶现象,并提高了集卡利用率。

在岸桥集卡联合作业的求解方法上,很多都是利用粒子群算法、CPLEX 求解器或者标准遗传算法、启发式算法等来求解。在以上求解方式中,利用单纯的求解器对大规模模型求解耗时长,且不一定能求出精确解;利用单一算法不能很好地对全局进行搜索,容易陷入局部解。所以,为了提高计算速度以及求解质量,本文利用启发式算法产生自适应遗传算法的初始种群,并运用轮盘赌的选择方式和精英保留策略对每代中的最优方案进行择优保留。首先采用启发式算法对集装箱进出口箱簇进行组合,并确定集装箱簇的作业顺序及岸桥的分配。在第二阶段中,采用自适应遗传算法进行求解,将集卡分配给已组合的进出口集装箱簇,并对分配不均衡的集装箱簇进行二次分配。在每次迭代过程中,被选中的染色体所进行的交叉、变异的交叉率、变异率都是由其适应度值所影响的,当个体的适应度低于当代种群的平均适应度时,将对其采用较大的交叉率和变异率;当个体适应度接近当代种群中的最大适应度时,认为该个体性能较好,应尽可能地保留其优良模式,即使该个体在选择机制中被选中,也会对其采用较低的交叉率和变异率。然后根据不同的集卡数量进行计算比较,得出最优集卡数量与其调度方案。最后将基于启发式的遗传算法的求解结果与文献中的粒子群算法的求解结果进行对比,得出基于启发式的自适应遗传算法的结果较优。

1 问题描述

在基于装卸作业面的作业中,岸桥进行边装边卸的作业,即在装一个出口箱之后,再卸一个进口箱(或者先卸一个进口箱之后,再装一个出口箱)。集卡在运输集装箱的过程中,根据岸桥的作业效率和岸桥的作业时间,将集装箱运至其中一个空闲(或将要完成作业)的岸桥,即集卡在这两个岸桥之间是被共享。为了提高码头的作业效率,集卡每一次卸下一个集装箱,同时也必须装上一个集装箱(或者装上一个集装箱时,同时卸下一个集装箱)。这样基于装卸作业面的作业方式,可以极大地提高集卡和岸桥的作业效率,显著降低了集卡空驶。

在本文中,岸桥将同一簇集装箱划分为小数量的单元簇分配给不同的集卡,不同的集卡对单元簇内的全部集装箱作业。在本文所提出的运输方式可能会增加集卡路径的复杂度,但有效地提高了集卡的运输效率,显著减少了集卡的空驶现象,并提高了集卡利用率。作业示意图如图 1 所示。

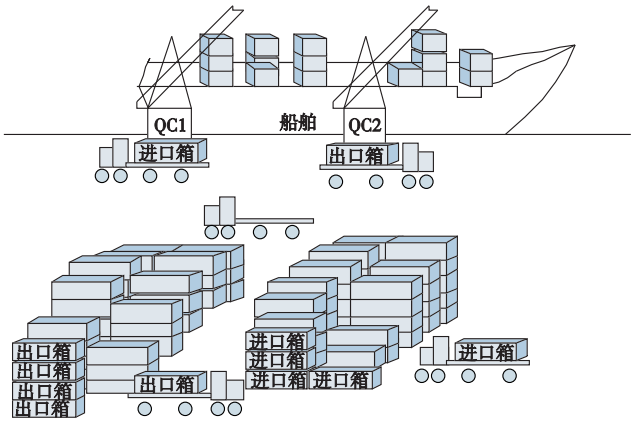


图1 作业示意图

2 数学模型

2.1 基本假设

a)集卡一次只服务于一个 20 英尺箱子;b)集卡在作业时不发生冲突;c)岸桥总是能够及时服务于集卡,即不存在岸桥等待集卡的情况;d)集卡在移动过程中是匀速行驶,且不存在绕路等情况;e)针对进口箱的堆场贝位容量满足进口箱的数量。

2.2 数学符号定义

I 为堆场出口箱簇 i 的集合;

J 为堆场进口箱簇 j 的集合;

T 为集卡 t 的集合;

C 为岸桥 c 的集合;

N_i 为堆场出口箱簇 i 的数量,$i \in I$;

N_j 为堆场进口箱簇 j 的数量,$j \in J$;

D_i^c 为出口箱簇 i 的每一个箱子到岸桥 c 的距离;

D_j^c 为进口箱簇 i 的每一个箱子到岸桥 c 的距离;

D_{c1}^{c2} 为岸桥 c_1 与 c_2 之间的距离;

D_j^i 为进口箱簇 j 中的每一个箱子到出口箱簇 i 中的每一个箱子的距离;

α 为权重参数;

K_1、K_2 为常数。

2.3 决策变量

$$x_{ijt}^c = \begin{cases} 1 & \text{出口箱 } i \text{ 和进口箱 } j \text{ 通过集卡 } t \text{ 在岸桥} \\ & c \text{ 上作业,且箱 } i \text{ 在箱 } j \text{ 前被作业} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_{it}^c = \begin{cases} 1 & \text{出口箱 } i \text{ 通过集卡 } t \text{ 在岸桥 } c \text{ 上作业} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_{jt}^c = \begin{cases} 1 & \text{出口箱 } j \text{ 通过集卡 } t \text{ 在岸桥 } c \text{ 上作业} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_i^t=\begin{cases}1 & \text{出口箱 } i \text{ 被集卡 } t \text{ 作业}\\ 0 & \text{否则}\end{cases}$$

$$W_{ij}^t=\begin{cases}1 & \text{出口箱 } i \text{ 和进口箱 } j \text{ 由集卡 } t \text{ 作业,且箱 } i \text{ 在箱 } j \text{ 前被作业}\\ 0 & \text{否则}\end{cases}$$

$$z_u^v=\begin{cases}1 & \text{集卡经过路径 } u、v \text{ 时}\\ 0 & \text{否则}\end{cases}$$

2.4　建立数学模型

在装卸作业面的岸桥—集卡调度中,其移动可以分为四个过程:出口箱区到岸桥的移动;岸桥之间的移动;岸桥对进口箱区的移动;进出口箱区之间的移动。

2.4.1　发生空载的移动

岸桥之间的移动、堆场之间的移动,以及未组合的进出口集装箱之间存在单程的空车移动。其中,岸桥之间的空载移动距离为

$$D_1=\sum_{c\in C}\sum_{t\in T}x_{ijt}^c\times D_{c1}^{c2} \tag{1}$$

堆场之间的空载移动距离为

$$D_2=\sum_{c\in C}\sum_{t\in T}x_{ijt}^c\times D_i^j \tag{2}$$

未组合的出口集装箱之间存在单程的空车移动距离为

$$D_3=\sum_{c\in C}\sum_{t\in T}y_{it}^c\times D_i^c \tag{3}$$

未组合的进口集装箱之间存在单程的空车移动距离为

$$D_4=\sum_{c\in C}\sum_{t\in T}y_{jt}^c\times D_j^c \tag{4}$$

则空载移动总距离为

$$f_1=D_1+D_2+D_3+D_4 \tag{5}$$

2.4.2　发生重载的移动

已组合的出口箱由堆场到岸桥、已组合的进口箱由岸桥到堆场以及未组合的进出口箱在岸桥与堆场之间的单程载重移动。其中,已组合的出口箱由堆场到岸桥和已组合的进口箱由岸桥到堆场移动距离为

$$D_5=\sum_{c\in C}\sum_{j\in J}\sum_{t\in T}x_{ijt}^c\times z_i^c\times D_i^c+\sum_{c\in C}\sum_{i\in I}\sum_{t\in T}x_{ijt}^c\times z_j^c\times D_j^c \tag{6}$$

未组合的进出口箱在岸桥与堆场之间的单程载重移动距离分别与其空载的移动距离 D_3、D_4 相等。

未组合的出口箱在岸桥与堆场之间的单程载重移动距离为

$$D_6=\sum_{c\in C}\sum_{t\in T}y_{it}^c\times D_i^c \tag{7}$$

未组合的进口箱在岸桥与堆场之间的单程载重移动距离为

$$D_7=\sum_{c\in C}\sum_{t\in T}y_{jt}^c\times D_j^c \tag{8}$$

则载重移动总距离为

$$f_2=D_5+D_6+D_7 \tag{9}$$

2.4.3　目标函数

基于装卸作业面的岸桥—集卡作业问题,主要根据对进出口箱的装卸作业面作业,计算其载重的移动距离和空载的移动的距离,从而求得完成所有集装箱的总作业时间最小。但是由于空载的作业效率非常低,在问题中尽量避免空驶的发生,所以在对目标函数求解的过程中,将空驶的移动距离的权重 α 的设置高于载重的权重。

$$\min\{(\alpha\times f_1)+(1-\alpha)\times f_2\} \tag{10}$$

本文在集卡调度中侧重于减少集卡空驶,提高集卡利用率,所以在目标函数的加权值设定上提高空驶移动距离对目标函数的影响,将空驶移动距离的加权数值大于重载移动的加权数值。这样可以将集卡空驶移动距离在总移动距离中清楚地体现出来。在权重值确定过程中,运用了偏好比率法对本文中权重进行计算。本文中空驶距离 f_1 比重载移动距离 f_2 的影响程度更大,且使空驶权重 $\alpha=w_1$,重载权重 $1-\alpha=w_2$。$a_{ij}(i,j=1,2,\cdots,n)$ 为影响因素 f_i 与 f_j 进行比较的比率标度值,其比率标度值为 1 ~ 5。由其建立方程组:

$$\begin{cases}a_{11}w_1+a_{12}w_2+a_{12}w_3+\cdots a_{1n}w_n=nw_1\\ a_{22}w_2+a_{23}w_3+\cdots+a_{1n}w_n=(n-1)w_2\\ \cdots\\ a_{n-1,n-1}w_{n-1}+a_{n-1,n}w_n=2w_{n-1}\\ w_1+w_2+\cdots+w_n=1\end{cases} \tag{11}$$

式中:$0\leqslant w_i\leqslant 1, i=1,2,\cdots,n$;$w_i$ 就是所求的权重值,得到 $w_1=0.6$,即空驶权重值 α 为 0.6。

2.4.4　约束条件

$$\sum_{c\in C}z_i^c=1\quad \forall i\in I \tag{12}$$

$$\sum_{c\in C}z_j^c=1\quad \forall j\in J \tag{13}$$

式(12)(13)表示每一个进口箱 j、出口箱 i 都有岸桥去服务,且只服务一次。

$$\sum_{t\in T}z_i^t=1\quad \forall i\in I \tag{14}$$

$$\sum_{t\in T}z_i^t=1\quad \forall j\in J \tag{15}$$

式(14)(15)表示每一个进口箱 j、出口箱 i 都有集卡去服务,且只服务一次。

$$\sum_{c\in C}z_j^i=1\quad \forall j\in J \tag{16}$$

$$\sum_{c\in C}z_j^i=1\quad \forall i\in I \tag{17}$$

式(16)(17)表示进口箱与出口箱两两组合,并且每个箱子只被服务一次。

$$\sum W_{ij}^t\leqslant\sum z_j^i\quad \forall i\in I,j\in J,t\in T \tag{18}$$

每一对进口箱与出口箱都是由同一辆集卡完成。

$$y_i^t-0.5=0.5\times(W_{ij}^t+W_{ji}^t)\quad \forall i\in I,j\in J,t\in T \tag{19}$$

式(19)确定集卡的作业序列。

$$\sum_{c\in C}\sum_{t\in T}y_{it}^c+\sum_{c\in C}\sum_{j\in J}\sum_{t\in T}x_{ijt}^c=N_i\quad \forall i\in I \tag{20}$$

每一出口箱簇 i 未组合的数量与组合数量之和等于这一簇集装箱的数量。

$$\sum_{c\in C}\sum_{t\in T}y_{jt}^c+\sum_{c\in C}\sum_{i\in I}\sum_{t\in T}x_{ijt}^c=N_j,\ \forall j\in J \tag{21}$$

每一进口箱簇 j 未组合的数量与组合数量之和等于这一簇集装箱的数量。

3　求解算法

在装卸作业面的岸桥—集卡问题中,本文分两个阶段对问题进行求解。第一阶段:将进、出口箱簇随机分配给各个岸桥,并确定各个集装箱簇的作业次序。第二阶段:根据第一阶段确定的结果,将集卡分配给以上组合的进、出口箱簇,对分配不均衡的集装箱簇进行二次分配组合,并确定每个集装箱簇的作业路径。在第二阶段的自适应遗传算法中,每次迭代被选中的染色体所进行的交叉、变异的交叉率、变异率都是由其适应度值所影响的,当个体的适应度低于当代种群的平均适应度时,将对其采用较大的交叉率和变异率;当个体适应度接近当代种群中的最大适应度时,认为该个体性能较好,应尽可能地保留其

优良模式,即使该个体在选择机制中被选中,也会对其采用较低的交叉率和变异率。

由于本文中每一辆集卡所对应的是一个集装箱箱簇的组合,所以在集卡对相应的集装箱箱簇作业时,是随机取集装箱箱簇中的一个集装箱进行作业,且各个集装箱之间不存在优先级关系,如图 2 所示。

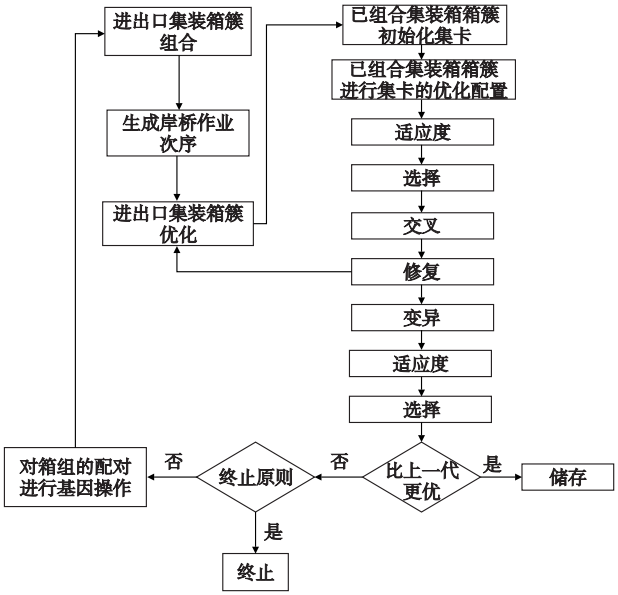


图2 算法步骤

3.1 第一阶段——启发式算法

a)将进口箱簇与出口箱簇进行随机组合,形成一组进口箱簇与出口箱簇相对应的组合(其组合顺序就是作业顺序),如表 1 所示。

表 1 步骤 a)箱簇组合

出口箱簇	进口箱簇	出口箱簇数量	进口箱簇数量	出口箱簇	进口箱簇	出口箱簇数量	进口箱簇数量
3	2	65	50	4	1	60	80
1	3	70	75	2	4	85	65

b)在步骤 a)的基础上,将岸桥随机分配给各个集装箱箱簇的组合,如表 2 所示。

表 2 步骤 b)岸桥分配

岸桥	出口箱簇	进口箱簇	出口箱簇数量	进口箱簇数量
1	3	2	65	50
2	1	3	70	75
1	4	1	60	80
2	2	4	85	65

在表 1 中,第一列和第二列分别为出口箱簇与进口箱簇,第三列和第四列分别是其对应箱簇的集装箱数量。在表 2 中,进出口箱簇各有三个,例如,出口箱簇 3 和进口箱簇 2 被分配在岸桥 1 上,而出口箱簇 1 和进口箱簇 3 被分配在岸桥 2 上。

c)由于在步骤 b)中已组合的进、出口集装箱箱簇的数量不均衡,所以要对进、出口集装箱箱簇进行一次优化。在进口箱与出口箱的数量组合上,存在很多的数量不均衡,现在将不均衡的进、出口箱簇进行进一步的均衡组合,取每一行的第四列、第五列的数值进行比较,取 $\min\{a_i^4,a_i^5\}$(其中 $\{a_i^4,a_i^5\}$ 表示第 i 行的第四列第五列的数值)将分配不均匀的数值进行 $\max\{a_i^4,a_i^5\}-\min\{a_i^4,a_i^5\}$,将得到的数值存储在相应的 $N+i$ 行(其中 N 表示进口箱的任务数或者出口箱的任务数),如表 3 所示。

表 3 步骤 c)箱簇数量优化

岸桥	出口箱簇	进口箱簇	出口箱簇数量	进口箱簇数量
1	3	2	50	50
2	1	3	70	70
1	4	1	60	60
2	2	4	65	65
1	3	0	15	0
1	0	3	0	5
2	0	1	0	20
2	2	0	20	0

表 3 中数字代表示启发式中的一个数字矩阵,矩阵中第 1 ~4 行为已均衡,第 5 ~8 行是对不均衡集装箱箱簇的修复后的结果。例如,针对矩阵第一行的修复,将多余的出口箱簇的 15 个集装箱放置于 $N+i$ 行,即第 5 行(此时 $N=4,i=1$;表示针对当前 4 个进出口箱簇的任务中,对第 1 行不均衡组合进行再次优化)。例如表 3 中第二行,第 3 进口箱簇为 75,而第 1 出口箱簇为 70,所以将多余的 5 个箱子放置在第 6 行的第五列。

3.2 第二阶段——自适应遗传算法

1)初始化 在第一阶段的启发式中完成了进、出口集装箱箱簇的组合,还有岸桥分配的任务。在第二阶段中,将完成针对每一个进、出口箱簇所对应的集卡的分配。将集卡编号随机分配到以均衡的进、出口箱簇组合行。对均衡部分的集卡分配的作业数量进行求和 $\sum_{i\in I}\sum_{c\in C}y_{it}^c$(其中 i 表示要作业的集装箱),将作业数量最小的集卡 $\min\{\sum_{i\in I}\sum_{c\in C}y_{it}^c\}$ 分别分配给不均衡的进口箱和出口箱中最大的一个箱簇 $\max\{a_i^5\}$、$\max\{a_i^6\}$(a_i^5、a_i^6 表示图表的第五列第六列,其中 i 的取值为[5,8]行),依次分配,将第二个数量最小集卡的分别分配给第二个不均衡最大的集装箱簇。由此得到的数组矩阵即为一条初始化的染色体,如表 4 所示。

表 4 初始化的矩阵式染色体

集卡	岸桥	出口箱簇	进口箱簇	出口箱簇数量	进口箱簇数量
4	1	3	2	50	50
2	2	1	3	70	70
3	1	4	1	60	60
1	2	2	4	65	65
3	1	3	0	15	0
3	1	0	3	0	5
4	2	0	1	0	20
4	2	2	1	20	0

2)适应度函数 根据以上数学模型和约束条件,对每一条染色体进行计算。在本文中是最小化问题,建立目标函数 $g(x)$ 与适应度函数 $f(x)$ 之间的关系:

$$f(x)=\begin{cases}M-g(x) & \forall g(x)<M\\ 0 & \forall M\leqslant g(x)\end{cases}$$

其中:M 是指理论上的一个最大数。

3)选择 使用轮盘赌进行选择。适应度值大的值,其被选择的概率就越大。将选择到的适应度与原来的相比较,运用精英选择将适应度更大的染色体矩阵随机替代差的染色体矩阵。

4)交叉 当个体的适应度低于当代种群的平均适应度时,认为该个体性能不佳。若该个体在选择机制下被选中,将对其采用较大的交叉率;当个体适应度接近当代种群中的最大

适应度时,认为该个体性能较好,应尽可能地保留其优良模式,即使该个体在选择机制中被选中,也会对其采用较低的交叉率 P_c:

$$P_c=\begin{cases}K_1(f_{\max}-f)/(f_{\max}-f_{\text{avg}}) & f\geqslant f_{\text{avg}}\\ K_1 & f<f_{\text{avg}}\end{cases}$$

其中:K_1 是常数;f 是父代染色体的适应度;f_{avg} 是种群平均适应度值;$f_{\max}$ 是种群最大适应度值。矩阵式交叉过程如图 3 所示。

父代1

集卡岸桥	出口箱簇	进口箱簇	出口箱簇数量	进口箱簇数量
4	1	3	2	50	50
2	2	1	3	70	70
3	1	4	1	60	60
1	2	2	4	65	65
3	1	3	0	15	0
3	1	0	3	0	5
4	2	0	1	0	20
4	2	2	1	20	0

父代2

集卡岸桥	出口箱簇	进口箱簇	出口箱簇数量	进口箱簇数量
2	1	4	3	80	80
3	2	1	2	65	65
1	2	2	4	65	65
4	1	3	1	50	50
3	1	4	0	5	0
4	2	0	2	0	10
1	2	2	2	5	0
4	1	3	0	10	0

子代

集卡岸桥	出口箱簇	进口箱簇	出口箱簇数量	进口箱簇数量
2	1	4	3	80	80
3	2	1	2	65	65
1	2	2	4	65	65
4	1	3	2	50	50
3	1	4	0	5	0
4	2	0	2	0	10
1	2	2	2	5	0
4	1	3	0	10	0

图3　交叉过程

5)修复　由于染色体的基因交叉操作会出现对同一集装箱簇作业两次,这是不合理的。例如,在图 3 中,子代中的出口箱簇 2 被作业两次,所以要对第二行中的出口箱簇 2 进行修复,将其转变为箱簇 1,并将其对应的箱簇内的作业数量校正,以及再次进行集装箱簇—集卡的二次分配。所以要对交叉后的子代染色体进行基因修复。

6)变异　在已均衡的出口箱簇和进口箱簇各随机选取一个数值进行变异。其变异率 P_m 由其适应度值决定。

$$P_m=\begin{cases}K_2(f_{\max}-f)/(f_{\max}-f_{\text{avg}}) & f\geqslant f_{\text{avg}};\\ K_2 & f<f_{\text{avg}}\end{cases}$$

其中:K_2 是常数;f 是父代染色体的适应度;f_{avg} 是种群平均适应度值;$f_{\max}$ 是种群最大适应度值。

7)终止原则　由于在遗传算法中设置的迭代次数足够大,所以当迭代次数达到设定的最大迭代次数时计算终止。

4　数值算例

以某港口数据为例,对只有两个岸桥,进出口作业任务各八个的集装箱簇进行作业,作业总箱量为 1 110 个。各个进、出口箱簇的集装箱数量如表 5 所示。

表5　各个箱簇的集装箱数量

箱簇	1	2	3	4	5	6	7	8
出口箱簇	60	80	120	50	60	45	70	65
进口箱簇	50	80	70	60	100	60	80	65

各个箱区之间的距离为 60 ~ 1 200 m,以及各个箱区到不同的岸桥之间的距离为 200 ~ 1 720 m。

根据以上数据,分两个阶段,利用启发式算法和自适应遗传算法对以下问题进行求解:基于减少空载的条件下,完成所有作业移动距离最小。

利用两阶段的启发式自适应度遗传算法对提出的模型进行求解,在设置不同集卡数量的条件下,根据集卡利用率确定对应的集卡数量的配置。在此,分别配置 5、6、7、8 辆集卡完成上述作业,得出具体调度方案如表 6(a) ~ 6(d)所示。

当设置集卡数为 5 辆的时候调度方案,如表 6 ~ 9 所示。

表6　5 辆集卡调度方案

线路	集卡	出口集装箱簇	出口箱岸桥	进口箱岸桥	进口集装箱簇	出口箱箱量	进口箱箱量	重载距离/km	空载距离/km
1	集卡5	7	岸桥2	岸桥1	3	70	70	134.4	31.5
2	集卡1	3	岸桥1	岸桥1	1	50	50	66	30
3	集卡2	5	岸桥2	岸桥2	8	50	50	111	55
4	集卡3	8	岸桥2	岸桥1	4	60	60	127.2	27
5	集卡4	6	岸桥2	岸桥2	5	45	45	90.9	31.5
6	集卡2	4	岸桥1	岸桥2	7	50	50	101	57.5
7	集卡1	1	岸桥1	岸桥1	2	60	60	75.6	37.2
8	集卡4	2	岸桥1	岸桥2	6	60	60	103.2	75
9	集卡3	3	岸桥1	岸桥2	5	70	55	94.6	211.5
10	集卡2	5	岸桥2	岸桥1	2	10	20	16.2	16.1
11	集卡4	8	岸桥2	无	无	5	0	0	9.2
12	集卡5	2	岸桥2	岸桥2	7	20	40	36.4	58.2

表7　6 辆集卡调度方案

线路	集卡	出口集装箱簇	出口箱岸桥	进口箱岸桥	进口集装箱簇	出口箱箱量	进口箱箱量	重载距离/km	空载距离/km
1	集卡4	6	岸桥2	岸桥2	5	45	45	90.9	31.5
2	集卡3	1	岸桥1	岸桥2	8	50	50	93	7
3	集卡1	2	岸桥1	岸桥1	1	50	50	61	35
4	集卡1	4	岸桥1	岸桥2	6	50	50	96	52.5
5	集卡6	8	岸桥2	岸桥2	7	65	65	157.3	45.5
6	集卡2	5	岸桥2	岸桥1	3	60	60	103.2	39
7	集卡1	3	岸桥1	岸桥1	4	60	60	97.2	54
8	集卡2	7	岸桥2	岸桥1	2	70	70	127.4	24.5
9	集卡3	1	岸桥1	岸桥2	6	10	10	16.6	3.3
10	集卡5	2	岸桥1	岸桥2	7	30	25	45.5	8.05
11	集卡6	0	无	岸桥1	3	0	10	0	7.2
12	集卡4	1	岸桥1	岸桥2	5	60	55	94.6	7.05
13	集卡1	0	无	岸桥1	2	0	10	0	5.2

表8　7 辆集卡调度方案

线路	集卡	出口集装箱簇	出口箱岸桥	进口箱岸桥	进口集装箱簇	出口箱箱量	进口箱箱量	重载距离/km	空载距离/km
1	集卡7	4	岸桥1	岸桥2	5	50	50	91	47.5
2	集卡1	6	岸桥2	岸桥2	6	45	45	95.4	36
3	集卡4	2	岸桥1	岸桥2	8	50	50	96	72.5
4	集卡5	5	岸桥2	岸桥1	1	50	50	76	22.5
5	集卡6	1	岸桥1	岸桥1	3	60	60	81.6	30
6	集卡3	8	岸桥2	岸桥2	7	65	65	157.3	45.5
7	集卡2	7	岸桥2	岸桥1	2	70	70	127.4	24.5
8	集卡4	3	岸桥1	岸桥1	4	60	60	97.2	54
9	集卡7	2	岸桥1	岸桥2	7	30	25	45.5	8.05
10	集卡5	5	岸桥2	岸桥2	6	10	15	20.2	11.8
11	集卡6	0	无	岸桥1	3	0	10	0	7.2
12	集卡3	0	无	岸桥1	2	0	10	0	5.2
13	集卡1	3	岸桥1	岸桥2	5	60	50	86	14.1

根据表 9 所示,在配置 6 辆集卡时,集卡完成所有任务的移动距离为 1 302 500 m,其中空驶距离为 319 800 m,其集卡利用率最大,集卡的空驶率最小为 24.6%。例如,在表 7 的路径 2:集卡 3 运载出口箱簇 1 中的 50 个箱子到岸桥 1,然后再到岸桥 2 提取进口箱簇 8 中的 50 个箱子,并且在堆场与岸桥之间存在集卡重载移动的发生为 93 km,在岸桥之间以及堆场

之间都存在空载移动为7 km。根据表10可得出在配置6辆集卡时,集卡的利用率最高,所以在配载6辆集卡的条件下,完成所有作业所移动的距离最小。

表9 8辆集卡调度方案

线路	集卡	出口集装箱簇	出口箱岸桥	进口箱岸桥	进口集装箱簇	出口箱箱量	进口箱箱量	重载距离/km	空载距离/km
1	集卡1	6	岸桥2	岸桥2	6	45	45	95.4	36
2	集卡7	1	岸桥1	岸桥2	5	60	60	93.6	24
3	集卡4	3	岸桥1	岸桥1	3	70	70	106.4	56
4	集卡3	5	岸桥2	岸桥1	1	50	50	76	22.5
5	集卡5	2	岸桥1	岸桥1	4	60	60	91.2	60
6	集卡8	8	岸桥2	岸桥2	8	50	50	126	40
7	集卡2	4	岸桥1	岸桥2	7	50	50	101	57.5
8	集卡6	7	岸桥2	岸桥1	2	70	70	127.4	24.5
9	集卡1	3	岸桥1	岸桥2	5	50	40	68.8	14.1
10	集卡2	5	岸桥2	岸桥1	2	10	10	16.2	5.5
11	集卡8	2	岸桥1	岸桥2	7	20	40	36.4	58.5
12	集卡3	8	岸桥2	岸桥2	6	15	15	34.8	9

以集卡利用率最大为依据,在本文中就是空驶率最小。根据表6~9的具体调度方案,配置5、6、7、8辆集卡的空驶率如表10所示。

表10 集卡空驶率比较

集卡数理	空驶移动距离/m	移动总距离/m	空驶率/%
5	449 350	140 585	32.0
6	319 800	1 302 500	24.6
7	378 850	1 352 450	28.0
8	407 300	1 380 500	29.5

针对岸桥集卡的调度问题,已经有很多专家学者进行了研究,本文参考了文献中的禁忌搜索算法进行分析求解,并与本文的两阶段启发式—自适应遗传算法的计算结果进行对比,如表11所示。

表11 H-AGA与Tabu Search结果对比

集卡数量	空驶移动距离/m		移动总距离/m		Tabu Search空驶率/%	H-AGA空驶率/%
	Tabu	H-AGA	Tabu	H-AGA		
5	395 800	449 350	1 458 600	140 585	27.136	32.0
6	364 400	319 800	1 434 200	1 302 500	25.408	24.6
7	369 600	378 850	1 450 600	1 352 450	25.656	28.0
8	370 100	407 300	1 462 400	1 380 500	25.826	29.5

依据表11中Tabu Search与H-AGA计算结果数据的比较,在配置不同集卡数量时,其完成作业移动总距离不同。相比较而言,在不同集卡配置条件下,H-AGA计算的移动总距离优于Tabu Search的计算结果。在配置6辆集卡时,经由H-AGA计算结果,其空驶距离、移动总距离以及空驶率皆优于Tabu Search的计算结果。H-AGA的求解方法不仅显著地缩短了全场集卡行驶的总距离,而且又降低了集卡在作业过程中的空驶率,大大提高了集卡的使用效率。将启发式算法输出的数列矩阵作为自适应遗传算法的初始化染色体,并且利用自适应遗传算法中交叉率、变异率的可变化特性,明显地提高了遗传算法的计算效率,提高了算法的全局搜索能力,找到相较于禁忌搜索算法的结果更优。集卡数为6时算法收敛图比较如图4所示。

5 结束语

通过分析基于装卸作业面的集卡的调度计划问题,本文运用小单元的集装箱簇与集卡分配的解题思路,以及启发式算法和自适应度遗传算法的解题方法,在针对边装边卸的集卡调度模型求解问题上,可以有效地降低集卡在作业过程中的空驶现象,提高集卡的作业效率,加快了计算效率,以及全局搜索能力。并且通过设置不同的集卡数量,将得到的不同的调度方案进行对比,获得了基于装卸面的最优集卡配置与调度。

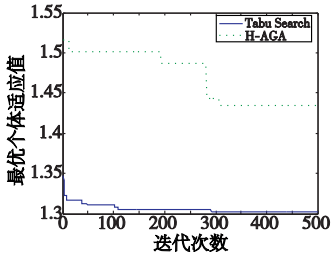


图4 集卡数为6时算法收敛图比较

参考文献:

[1] 曾成庆.集装箱码头装卸作业集成调度模型与方法[D].大连:大连海事大学,2008.

[2] Kaveshgar N, Huynh N. Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers[J]. International Journal of Production Economics,2015,159:168-177.

[3] Tang Lixin, Zhao Jiao, Liu Jiyin. Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research,2014,236(3):978-990.

[4] Lee D H, Cao Jinxin, Shi Qixin, *et al*. A heuristic algorithm for yard truck scheduling and storage allocation problems[J]. Transportation Research Part E,2009,45(5):810-820.

[5] 王伟飞.基于混合交叉作业的集装箱码头集卡优化调度研究[D].大连:大连海事大学,2011.

[6] 钱继锋.集装箱码头"岸桥—集卡—堆场"作业计划的优化[D].北京:北京交通大学,2014.

[7] He Junliang, Huang Youfang, Yan Wei, *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.

[8] 马超,梁承姬.集装箱码头岸桥分配与集卡调度整合问题研究[J].广西大学学报:自然科学版,2015,40(3):643-650.

[9] 顾天意,梁承姬.基于矩阵式遗传算法的集装箱码头堆场空间资源分配优化策略[J].上海海事大学学报,2012,33(2):40-46.

[10] 徐晓雷.集装箱码头集卡作业的路径选择问题研究[D].大连:大连海事大学,2012.

[11] Homayouni S M, Tang Saihong, Motlagh O. A genetic algorithm for optimization of integrated scheduling of cranes, vehicles, and storage platforms at automated container terminals[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics,2014,270(1):545-555.

[12] Chen Lu, Langevin A, Lu Zhiqiang. Integrated scheduling of crane handling and truck transportation in a maritime container terminal [J]. European Journal of Operational Research,2013,225(1):142-152.

[13] Cao Jinxin, Shi Qixin, Lee D H. Integrated quay crane and yard truck schedule problem in container terminals[J]. Tsinghua Science and Technology,2010,15(4):467-474.

[14] 曾成庆,杨忠振.集装箱码头作业调度双层规划模型及求解算法[J].哈尔滨工程大学学报,2007,28(3):277-281.

[15] 尚晶,徐长生.基于强化学习的集装箱码头卡车调度策略研究[J].武汉理工大学学报,2011,33(3):72-76.