

海铁联运港口混合作业模式下轨道吊与集卡协同调度

李舒仪*, 韩晓龙

(上海海事大学 物流科学与工程研究院, 上海 201306)

(* 通信作者电子邮箱 13097021834@163.com)

摘要:在集装箱海铁联运港口中,铁路作业区作为连接铁路运输和水路运输的重要节点,其装卸效率将影响集装箱海铁联运的整体效率。首先,对比分析了“船舶-列车”作业模式和“船舶-堆场-列车”作业模式的特点,并结合海铁联运港口实际作业情况提出了混合作业模式。然后,以轨道吊完工时间最短为目标构建混合整数规划模型,既考虑了班列和船舶的作业时间窗约束,又考虑了轨道吊干扰和安全距离、轨道吊和集卡接续作业和等待时间等现实约束。针对遗传算法在局部搜索能力方面的不足,将启发式规则与遗传算法相结合设计了求解轨道吊与集卡协同调度问题的混合遗传算法(HGA),并进行了数值实验。实验结果验证了所提模型和混合算法的有效性。最后通过设计实验分析集装箱数量、岸边箱占比、轨道吊数量和集卡数量对轨道吊完工时间和集卡完工时间的影响,发现同等集装箱数量下岸边箱占比提高时,应通过增加轨道吊数量来有效缩短完工时间。

关键词:海铁联运;混合作业模式;协同调度;混合遗传算法;作业时间窗

中图分类号:TP391.9;U691.3 **文献标志码:**A

Collaborative scheduling of rail-mounted gantry crane and container truck in hybrid operation mode of rail-water intermodal terminal

LI Shuyi*, HAN Xiaolong

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

Abstract: In the container rail-water terminal, the railway operation area is the essential node linking rail transportation and water transportation and its efficiency can influence the efficiency of container rail-water transportation. Firstly, the features of the “ships, trains” operation mode and the “ships, yard, trains” operation mode were analyzed and compared, and a hybrid operation mode was proposed by combining the actual operation of container rail-water intermodal terminal. Next, with the goal of minimizing the completion time of rail-mounted gantry crane, a mixed integer programming model was developed. The model considered the allowable operating time window constraints of trains and ships, and the realistic constraints such as the interference and safety margin between the rail-mounted gantry cranes as well as the continuous operation and waiting time of rail-mounted gantry crane and container truck. Aiming at the insufficient local search ability of genetic algorithm, a Hybrid Genetic Algorithm (HGA) was proposed by combining the heuristic rules with genetic algorithm to solve the collaborative scheduling problem of rail-mounted gantry crane and container truck, and experiments were conducted. Experimental results verified the effectiveness of the proposed model and the hybrid algorithm. Finally, some experiments were designed to analyze the impact of the number of containers, the proportion of quayside containers, the number of rail-mounted gantry cranes and the number of container trucks on the completion time of rail-mounted gantry crane and container truck. It is found that under the same number of containers, the number of rail-mounted gantry crane should be increased with the increase of proportion of quayside containers to reduce the completion time.

Key words: rail-water intermodal transportation; hybrid operation mode; collaborative scheduling; Hybrid Genetic Algorithm (HGA); allowable operating time window

0 引言

近年来,我国多式联运发展速度较快,国家陆续出台相关政策。2017年,国家出台的《“十三五”国家信息化规划》提出在重要的集装箱港口逐步推进直通铁路建设,力争在2020年完成集装箱铁水联运的年运量增长10%的发展目标。但由于我国多式联运一直处于起步阶段,尤其码头与集装箱班列

的衔接并不顺畅。在整个海铁联运过程中,海铁联运港口铁路作业区是衔接铁路运输和水路运输的重要节点。作为这一运输链的重要节点,优化铁路作业区装卸设备调度可以有效提高集装箱在铁路运输和水路运输中的周转速度。

大多数研究集中在传统集装箱码头和铁路中心站的装卸设备调度问题上。He等^[1]将轨道吊调度问题转为带时间窗的

收稿日期:2020-07-23;修回日期:2020-09-15;录用日期:2020-09-27。

基金项目:上海市科学技术委员会创新项目(16DZ1201402, 16040501500)。

作者简介:李舒仪(1997—),女,江西抚州人,硕士研究生,主要研究方向:物流系统工程;韩晓龙(1978—),男,山东潍坊人,副教授,博士,主要研究方向:物流与供应链管理。

车辆路径问题;Nossack等^[2]在堆场垂直于岸边的布局下,将轨道吊调度问题分解为车辆路径问题和无冲突调度问题,运用分支定界算法实现了中等规模下在多项式时间内求得精确解;Sha等^[3]从能耗角度,考虑轮胎吊禁止相互跨越、安全距离等实际约束;Galle等^[4]结合轨道吊调度问题与倒箱问题同时设计局部搜索启发式算法解决问题;He等^[5]兼顾集装箱到达时间和装卸数量的不确定性,以最小化延迟时间为目标;李坤等^[6]关注了集卡与轨道吊的联系,以最小最大完工时间为目标,设计了两阶段禁忌算法求解;Kaveshgar等^[7]研究了岸桥与集卡的协同调度问题;Bazgosha等^[8]以集装箱最小完工时间为目标,提出了三种方法来解决铁路中心站轨道吊作业序列和箱位分配优化问题;Li等^[9]以最小化列车停留时间为目标,并考虑移动时间窗、安全距离等实际约束,采用动态分支定界算法求解模型;Guo等^[10]研究了铁路集装箱站轨道吊调度问题,考虑门吊的安全距离、走行时间等约束;Stephan等^[11]研究集装箱在列车间转运以及装卸,并通过区分轨道吊转运方向、停止准则和距离约束等来构建模型并分析运算复杂度。

因海铁联运港口同一般港口、一般铁路中心站的布局模式与作业模式相比,有很多不同,有必要专门进行海铁联运港口作业设备调度的研究。近年来,已经有越来越多的研究与海铁联运有关。刘勇等^[12]研究了集装箱海铁联运港口铁路作业区“船舶-堆场-列车”模式的设备配置,兼顾作业时间窗约束;武惠荣^[13]研究了“船舶-堆场-列车”作业模式下轨道吊调度问题;常祎妹等^[14]在“船舶-堆场-列车”作业模式下研究海铁联运港口轨道吊、集卡和场桥协同调度问题,并考虑集卡堵塞的影响;Luo等^[15]设计了全新铁路作业区,在“船舶-堆场-列车”作业模式下,以每个计划周期内的轨道吊为研究对象;李晓培^[16]在“船舶-堆场-列车”作业模式下,以最小化轨道吊的最大完工时间为目标,将“岸桥-集卡-轨道吊”集成调度问题转化成混合流水车间调度问题;Yan等^[17]在“船舶-列车”作业模式下,设计了一种具有自适应水平和回溯策略的定制滚动计划方法。

在现有的海铁联运港口作业设备调度的研究中,针对“船舶-列车”和“船舶-堆场-列车”这两种作业模式下的研究相对较多,即研究分别是在船舶时刻表和班列时刻表完全重合和完全不重合情况下进行的。随着海铁联运的发展,列车和船舶之间的协同性大幅提高,使铁路和水上运输的无缝衔接有了可能。在海铁联运港口,列车作业区的集装箱能直接转运至码头前沿的船舶上,但由于不确定因素的干扰,船舶计划和列车计划往往存在不完全重合的情况。为加快集装箱的周转,海铁联运港口利用该时间窗将一些集装箱运至码头前沿,其余集装箱再进入堆场堆存,这符合海铁联运集装箱装卸作业高效化原则,利用这种时间窗的重合性来降低装卸操作次数,有利于提高海铁联运港口的装卸作业能力,在海铁联运港口实际作业中得到开展。

相较于传统集装箱港口作业,海铁联运港口增加了列车装卸和中转作业,这对泊位和岸桥的调度没有影响。编组后的集装箱班列进入到铁路作业区,在和码头交换集装箱后离开海铁联运港口。本文关注海铁联运港口铁路作业区和码头的衔接情况,即在保证不耽误班期和船期的情况下,优化铁路作业区轨道吊和集卡协同调度问题来最小化最大轨道吊完工时间。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

我国研究的海铁联运港口作业模式主要有“船舶-列车”和“船舶-堆场-列车”两种。

“船舶-堆场-列车”作业模式装卸流程下:以出口集装箱为例,铁路作业区的轨道吊将到达的集装箱班列上的集装箱卸下并等待集卡,集卡到后,轨道吊将集装箱放在集卡上,然后集卡将其运往堆场,场桥再把集装箱安放于分配好的位置上;待船舶到达后,集卡将堆场中的集装箱运到码头前沿,由岸桥完成装船工作。堆场区在整个作业过程中起着缓存的作用,相当于多了一次中转,使得海铁联运港口的运输效率偏低。

“船舶-列车”作业模式装卸作业流程较为简单,以出口集装箱为例,铁路作业区轨道吊将到达班列上的集装箱转移到集卡上,然后集卡完成从铁路作业区到码头前沿的水平运输,载有集装箱的集卡到达码头前沿,由岸桥将集装箱卸载至等待的船舶上。

“船舶-堆场-列车”作业模式相较“船舶-列车”作业模式,从作业工序来说,前者多了一个堆场作业环节,相当于多了一次中转,那么在运输成本及换装时间方面,“船舶-列车”作业模式优于“船舶-堆场-列车”作业模式;从协同组织水平看,后者省去了中间堆场的衔接环节,节省了作业时间及堆场资源,但对车船的协调性要求很高。

现如今国内铁路和港口的协同作业组织水平不是很高,由于不确定因素的干扰,往往导致船舶和班列的时刻表部分重合。针对船舶与列车在码头交汇时时间窗部分重合的特点,提出了“船舶-堆场-列车”和“船舶-列车”两种模式相混合的一种调度模型。以出口集装箱为例,在该模式下,部分出口箱在列车卸下后直接装运至船舶上从而减去了堆场中转的二次吊运环节,而剩余出口箱则卸载至堆场等待后续船舶装船。以出口集装箱为例,混合作业模式下作业示意图如图1。首先,把班列上集装箱进行分类;然后,在船期和班期内,将符合装船条件的集装箱(岸边箱)采用“船舶-列车”模式,其余放入堆场的集装箱(堆存箱)采用“船舶-堆场-列车”模式。在一次卸车装船或卸船装车过程中,由于集装箱的属性不同,使用到两种模式,为简明化,把这种作业流程命名为混合作业模式。

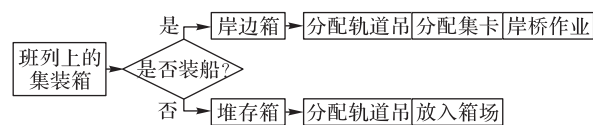


图1 混合作业模式下装卸作业流程

Fig. 1 Loading and unloading operation process in hybrid operation mode

集装箱海铁联运作业场地多为长窄型,场地布局图如图2。以卸车装船过程为例,轨道吊从前序任务的目标位置空驶至后序集装箱的初始位置后,吊起集装箱,再走到后序集装箱的目标位置:若是岸边箱,轨道吊在等待集卡到达后,轨道吊作业以放至集卡上为结束;若是堆存箱,则以放至列车堆场中的箱位为止。影响轨道吊作业时长的主要因素有相邻两次装卸作业间的空走时间和等待时间,即轨道吊的操作顺序。

本文优化目标为:在混合作业模式下,构建轨道吊和集卡的协同调度模型,确定轨道吊和集卡操作顺序、轨道吊作业时

间和集卡作业时间。

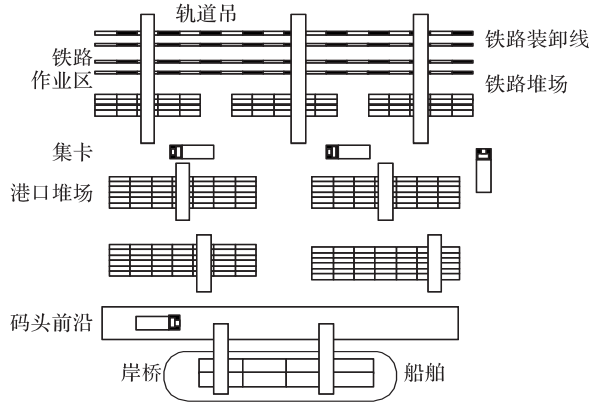


图2 海铁联运港口布局

Fig. 2 Layout of rail-water intermodal terminal

1.2 模型假设

本文提出如下4点假设：

- 1)轨道吊和集卡的作业效率恒定；
- 2)装卸计划已知,且各个任务的起讫点已知；
- 3)轨道吊的操作时间和集装箱装卸计划已知,且船舶和列车的允许作业时间已知；
- 4)不考虑轨道吊放箱时间；

1.3 符号与变量说明

参数与变量如表1所示。

1.4 模型描述

本文建立的混合整数规划模型为

$$\min \left(\max_{g \in G} F_g^i \right); \forall i \in I_1 \cup I_2 \quad (1)$$

$$\sum_{g \in G} X_g^i = 1; \forall i \in I_1 \cup I_2 \quad (2)$$

$$\sum_{w \in W} X_w^i = 1; \forall i \in I_2 \quad (3)$$

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

$$\sum_{g \in G} \sum_{j \in I_1 \cup I_2} C_g^{i,j} = 1; \forall i \in I_1 \cup I_2 \quad (5)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{i \in I_2} C_w^{i,j} = 1; \forall j \in I_2 \quad (6)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{j \in I_2} C_w^{i,j} = 1; \forall i \in I_2 \quad (7)$$

$$(1 - D_{g,g'}^{i,j}) \geq X_g^i - X_{g'}^j; \forall i, j \in I_1 \cup I_2, g, g' \in G \quad (8)$$

$$|O_i - O_j| * |g - g'| + (1 - D_{g,g'}^{i,j}) \geq 1; \quad (9)$$

$$(D_i - D_j) * (g - g') + (1 - D_{g,g'}^{i,j}) > 0; \quad (10)$$

$$\forall i, j \in I_1 \cup I_2, g, g' \in G \quad (11)$$

$$S_g^j - (F_g^i + W_g^i + E_1^i) + (1 - C_g^{i,j}) * M \geq 0; \quad (12)$$

$$\forall i, j \in I_1 \cup I_2, \forall g \in G \quad (13)$$

$$W_g^i \geq F_w^k + E_2^{k,i} - (S_g^i + O_g^i); \quad (14)$$

$$\forall i, k \in I_2, \forall w \in W, \forall g \in G \quad (15)$$

$$S_w^j - (F_w^i + E_2^{i,j} + W_w^i) + (1 - C_w^{i,j}) * M \geq 0; \quad (16)$$

$$\forall i, j \in I_2, \forall w \in W \quad (17)$$

$$W_w^j \geq (S_g^i + O_g^i) - (F_w^i + E_2^{i,j}); \quad (18)$$

$$\forall i, j \in I_2, \forall w \in W, \forall g \in G \quad (19)$$

$$F_g^i = S_g^i + O_g^i; \forall i \in I_1 \cup I_2, \forall g \in G \quad (20)$$

$$F_w^i = S_w^i + O_w^i; \forall i \in I_2, \forall w \in W \quad (21)$$

$$S_w^i - F_g^i + |X_g^i - X_w^i| * M \geq 0, \forall i \in I_2, \forall w \in W, \forall g \in G \quad (22)$$

$$L \geq \max(F_w^i); \forall i \in I_2, \forall w \in W \quad (23)$$

$$L \leq P \quad (24)$$

表1 参数说明表

Tab. 1 Parameter and variable description table

参数	说明	参数	说明
I_1	堆存箱集合, $i, j, k \in I_1$	P	船舶的允许作业时间
I_2	岸边箱集合, $i, j, k \in I_2$	S_g^i	轨道吊 g 对集装箱 i 进行作业的开始时间, $i \in I_1 \cup I_2$
G	轨道吊集合, $g, g' \in G$	S_w^i	集卡 w 对集装箱 i 进行作业的开始时间, $i \in I_2$
W	集卡集合, $w \in W$	F_g^i	轨道吊 g 对集装箱 i 进行作业的完成时间, $i \in I_1 \cup I_2$
O_g^i	轨道吊 g 自拿起集装箱 i 至放下集装箱前所需的时间, $i \in I_1 \cup I_2$	F_w^i	集卡 w 对集装箱 i 进行作业的完成时间, $i \in I_2$
O_w^i	集卡 w 装上集装箱 i 后位移至码头前沿所需的时间, $i \in I_2$	W_g^i	轨道吊 g 为完成集装箱 i 等待集卡的时间
$E_1^{i,j}$	轨道吊从前序集装箱 i 终止位置空驶至后序集装箱 j 的初始位置的时间, $i, j \in I_1 \cup I_2$	W_w^i	集卡 w 为开始集装箱 i 等待轨道吊的时间
$E_2^{i,j}$	集卡从前序集装箱 i 终止位置空驶至后序集装箱 j 的初始位置的时间, $i, j \in I_2$	$C_g^{i,j}$	如果轨道吊 g 对集装箱 i 和集装箱 j 进行操作且 i, j 是前后连续作业, 则 $C_g^{i,j} = 1$, 否则 $C_g^{i,j} = 0$
O_i	集装箱 i 的初始位置, $i \in I_1 \cup I_2$	$C_w^{i,j}$	如果集卡 w 对集装箱 i 和集装箱 j 进行操作且 i, j 是前后连续作业, 则 $C_w^{i,j} = 1$, 否则 $C_w^{i,j} = 0$
D_i	集装箱 i 的目标位置, $i \in I_1 \cup I_2$	$D_{g,g'}^{i,j}$	如果轨道吊 g 对集装箱 i 作业时, 同时轨道吊 g' 对集装箱 j 作业, 则 $D_{g,g'}^{i,j} = 1$, 否则 $D_{g,g'}^{i,j} = 0$
M	表示无限大的数	X_g^i	如果集装箱 i 由轨道吊 g 作业, 则 $X_g^i = 1$, 否则 $X_g^i = 0, i \in I_1 \cup I_2$
L	集卡的最大完成时间	X_w^i	如果集装箱 i 由集卡 g 作业, 则 $X_w^i = 1$, 否则 $X_w^i = 0, i \in I_2$

式(1)为目标函数,表示装卸作业最大完成时间最小化,其中最大完成时间为最后一项任务的轨道吊作业完成时间;式(2)~(7)表示轨道吊或集卡有且仅有一个前序作业或后序作业;式(8)~(10)表示轨道吊的安全操作约束,包括安全距离

约束和不能相互跨越的约束,即编号较小的轨道吊应在较小的贝位号区域工作,编号较大的轨道吊应在较大的贝位号区域工作。式(11)和式(12)要求轨道吊的后序集装箱作业开始时间必须要晚于前序集装箱作业完成时间以及轨道吊从前序

作业位置移动至后序作业位置的时间。如果后序集装箱去向为岸边,且轨道吊比集卡抵达得更早,则还需加上轨道吊等待集卡的时间。等待时间是集卡到达时间和轨道吊抵达时间之间的差。式(13)和式(14)要求集卡的后序集装箱的作业开始时间晚于前序集装箱作业完成时间以及集卡从前序作业位置空驶至后序作业位置的时间。如果集卡比轨道吊抵达得更早,则需加上集卡等待轨道吊的时间。其中 W_{wi} 表示后序去向岸边的集装箱任务中集卡等待轨道吊的时间;式(15)表示轨道吊作业开始时间与完成时间的关系;式(16)表示集卡作业开始时间与完成时间的关系;式(17)表示同一卸车装船任务中,轨道吊的作业完成时间必须早于或等于集卡的作业开始时间;式(18)和式(19)表示集卡的最大完成时间应不大于船舶允许作业时间;所有变量都是非负量。

2 混合遗传算法

轨道吊与集卡的协同调度问题已由文献[18]证明是 NP_hard 问题。针对遗传算法在局部搜索能力方面的不足,将启发式规则与遗传算法相结合,设计了求解轨道吊与集卡协同调度问题的混合遗传算法 (Hybrid Genetic Algorithm, HGA), 算法流程如图3所示。

1) 编码。

采用基于优先级的编码,每一个基因对应一个任务,给分配一个随机生成的0~1的优先级值,染色体依据优先级值生成。任务编码如6-3-1-2-5-4。

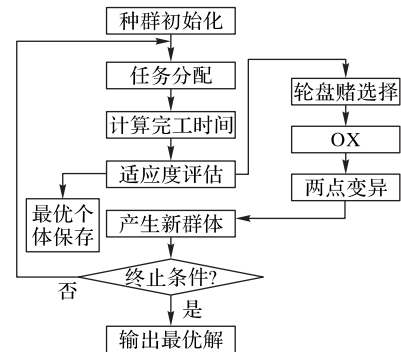


图3 混合遗传算法流程

Fig. 3 Hybrid genetic algorithm flowchart

2) 启发式规则。

本文引入集装箱码头中比较有效的作业方式,并在多变量约束下设计了一个“双层调度”规则。具体流程如图4所示。

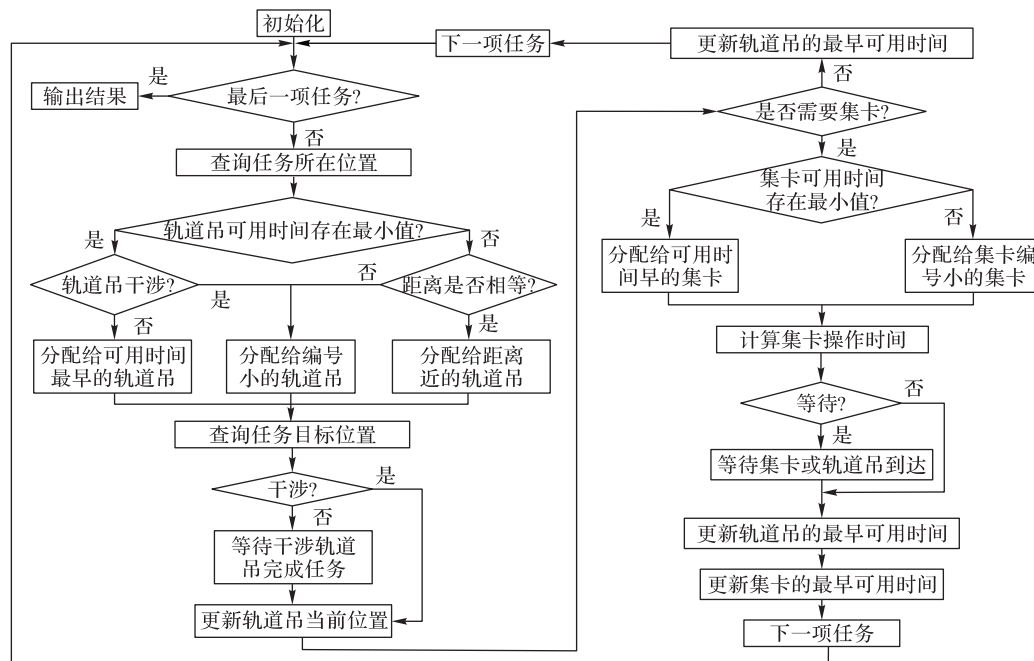


图4 任务分配流程

Fig. 4 Task allocation flowchart

基于轨道吊的任务属性,即上一任务的完工时间、任务编号和上一任务的目标位置,建立 $3 \times G$ 维的特征矩阵来实现对每个轨道吊的控制。同理,建立 $2 \times W$ 维的特征矩阵来实现对每个集卡的控制。

染色体上的每个基因依次分配到轨道吊和集卡,一旦任务分配完成,便根据式(8)~(10)先后更新轨道吊和集卡的特征矩阵。

第一层为轨道吊调度层。首先将最早可用时间、干涉情况、与任务位置的距离和编号依次作为轨道吊的选择条件,把任务分配给合适的轨道吊;其次通过限制轨道吊的移动来满足轨道吊的安全操作约束。

第二层为集卡调度层。检查集装箱的属性,若为堆存箱,则进行下一个任务分配;若为岸边箱,将最早可用时间和编号依次作为集卡的选择条件,将任务分配给合适的集卡;然后通过限制设备的移动来满足顺序作业约束。

3) 解码。

随机产生的染色体如6-3-1-2-5-4,已知各集装箱的去往方向为:0-0-1-0-1-1,1表示岸边箱,需要集卡作业;0表示堆存箱,不需要集卡作业。若1号轨道吊、2号轨道吊、1号集卡和2号集卡参与调度,在任务分配后的轨道吊作业序列表:1-1-2-2-1-2,集卡作业序列表:无-无-1-无-2-1。其中1号轨道吊操作顺序为集装箱6-3-5,2号轨道吊操作顺序为集装箱1-2-4,1

号集卡操作顺序为集装箱 1-4, 2 号集卡操作顺序为集装箱 4。

4) 适应度函数。

目标函数值越小, 说明适应度值越大, 个体适应度越高。

5) 最优个体保存。

若当前最优个体的目标值在允许作业时间内, 则保存下来; 反之, 则不予保留。

6) 顺序交叉 (Order Crossover, OX)。

本文采用 OX 方式, 如图 5 所示。

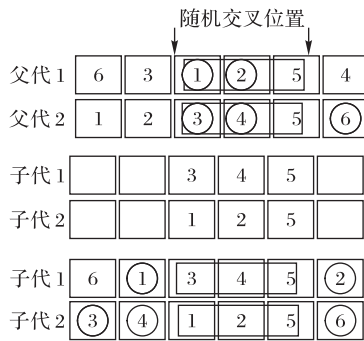


图 5 OX
Fig. 5 OX

7) 两点变异。

为了避免算法陷入局部最优, 本文采用两点变异方式进行染色体变异。具体步骤如下:

第 1 步 设定一个变异概率 (Mutation Probability, MP)。

第 2 步 对每一个个体, 随机生成一个 (0, 1) 内的随机数 i 。

第 3 步 如果 $i > MP$, 则实施变异操作; 否则, 不变异。

第 4 步 选取两个基因位, 再将这两个位置上的基因互换, 获得新的个体。

3 模拟计算与实验分析

本文设备参数的数据来源于文献[14]和文献[17], 如表 2 和表 3 所示。

表 2 设备基本参数

Tab. 2 Basic parameters of equipment

轨道吊参数	数值	集卡参数	数值
起升速度(满载)/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	15	重载速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	300
起升速度(空载)/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	24	空载速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	600
小车速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	85		
大车速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	80		
起升高度/m	10		

表 3 模型基本参数

Tab. 3 Basic parameters of the model

参数	数值	参数	数值
列车车厢间距	17	集装箱的长度	13.0
装卸线与码头前沿的距离	1 500	集装箱的宽度	2.5
装卸线长度	1 050	集装箱的高度	2.5

为较好地解决轨道吊与集卡的协同调度问题, 本文设计了蚁群优化 (Ant Colony Optimization, ACO) 算法来同混合遗传算法进行对比分析。ACO 算法的流程如图 6 所示。

ACO 算法过程如下:

步骤 1 生成初始种群。

步骤 2 随机产生任务序列。

步骤 3 计算转移概率。蚂蚁选择该任务的概率与距离, 和当前连接支路上所包含的信息有关。这里根据式 (8)~(10) 来跳过不能爬行到这个点的蚂蚁。

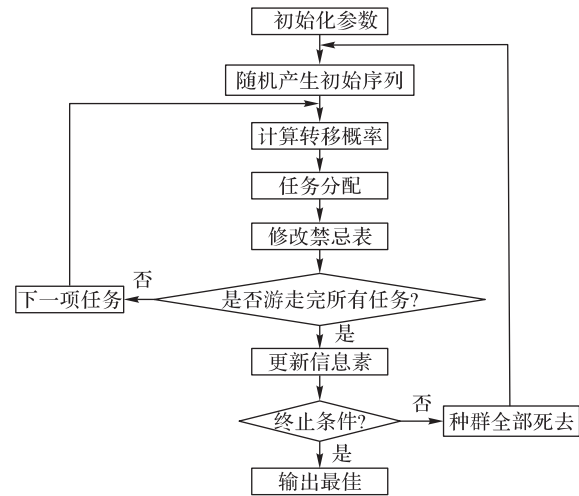


图 6 ACO 算法流程

Fig. 6 Flowchart of ACO algorithm

步骤 4 任务分配。和混合遗传算法的任务分配规则一样。

步骤 5 修改禁忌表。为了强制蚂蚁进行合法的游走, 不能游走已访问过的点和到不了点。

步骤 6 重复步骤 3~5, 直到全部的点游走过。更新所有路径上的信息素。

步骤 7 记录本次迭代的路径, 更新当前的最优路径, 清空禁忌表。

步骤 8 判断是否达到预定的迭代次数: 若是, 算法结束; 若不是, 种群全部死去, 转步骤 2 进行下一次迭代。

基于以上思想, 开始编程实现, 图 7 所示为同等迭代次数下两种算法的收敛曲线, 可以看出混合遗传算法 (HGA) 相较于蚁群优化 (ACO) 算法, 迭代次数较少, 计算速度较快。

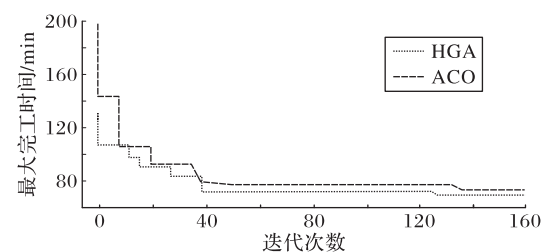


图 7 HGA 和 ACO 算法收敛曲线对比

Fig. 7 Convergence curve comparison of HGA and ACO algorithm

为进一步验证混合遗传算法的优越性。参照文献[16]来设计针对轨道吊与集卡协同调度的 13 个算例, 分别采用 HGA 和 ACO 算法进行验算。表 4 为岸边箱占总集装箱比为 1 的情况下的 13 个算例结果。遗传算法基本参数如表 5 所示, 同时比较遗传算法得到的结果和 CPLEX (IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.9) 直接求解的最优目标值, obj_{HGA} 表示混合遗传算法获得的目标值, obj_{CPLEX} 表示 CPLEX 获得的目标值。可以通过遗传算法获得的目标值与通过 CPLEX 获得的目标值之间的差距 GAP 来衡量混合遗传算法的解的有效性:

$$GAP = \frac{(obj_{HGA} - obj_{CPLEX})}{obj_{CPLEX}} \times 100\%$$

表 4 不同数据规模的实验结果
Tab. 4 Experimental results of different data scales

序号	基础数据	CPLEX		HGA		ACO		GAP/%
		目标值	计算时间/s	目标值	计算时间/s	目标值	计算时间/s	
1	10/3/4	22	58	22	17	22	19	0.00
2	10/3/6	16	56	16	18	16	20	0.00
3	15/3/4	33	481	34	26	35	32	3.03
4	15/3/6	24	445	25	26	26	31	4.10
5	20/3/4	46	1 573	47	34	50	48	2.17
6	20/3/6	31	1 389	32	33	35	45	3.22
7	30/3/6	47	4 438	49	53	54	67	2.13
8	30/3/8	42	4 079	43	51	46	64	2.06
9	40/3/6	N/A	4 500	68	66	74	83	—
10	40/3/8	N/A	4 500	57	68	65	81	—
11	50/3/8	N/A	4 500	74	84	78	110	—
12	50/3/10	N/A	4 500	72	86	80	115	—
13	100/3/10	N/A	4 500	150	178	163	244	—

注:基础数据*/*/表示集装箱数量/轨道吊数量/集卡数量。

分析可知,对于所有算例,混合遗传算法在计算效率上均优于 CPLEX 和 ACO 算法,且计算效率的优势随着问题规模的增大越来越明显。从计算结果看,混合遗传算法略优于 ACO 算法,与 CPLEX 相比,平均 GAP 值仅为 2.08%,这表明所提出的遗传算法是有效的。总之,根据表 4 的实验结果,该模型有效地解决了轨道吊和集卡的协同调度问题,并且所提出的混合遗传算法通过了很好的测试,验证为解决海铁联运港口轨道吊和集卡的协同调度问题的较优算法。

表 5 混合遗传算法基本参数
Tab. 5 Basic parameters for hybrid genetic algorithm

参数	数值	参数	数值
种群数	60	变异概率	0.001
交叉概率	0.8	最大迭代次数	1 000

混合遗传算法的稳定性测试:以集装箱数为 90,5 台轨道吊和 8 辆集卡、岸边箱占比分别为 0.4 和 0.6,进行 30 次实验得到的结果如表 6。从表 6 可以看出,在大规模算例下,混合算法依然发挥较好的稳定性。

表 6 混合遗传算法的稳定性测试
Tab. 6 Stability test of hybrid genetic algorithm

岸边箱占比	设备	完工时间/min		标准差	变异系数/%
		极大值	极小值		
0.4	轨道吊	90	76	15	4.61
	集卡	111	76	261	6.73
0.6	轨道吊	96	87	92	2.79
	集卡	119	92	36	6.11

班列上的集装箱种类和数目是变化的,若要保证班期和船期不延误,那么轨道吊数量和集卡数量也应根据实际情况有所变动。在混合作业模式下,集装箱数量、岸边箱占比、轨道吊数量和集卡数量,是影响轨道吊最大完工时间和集卡最大完工时间的四个重要因素,合理的设备配比和调度是提高班列和船舶正点率的重要手段。本文分别选取 3 台轨道吊和 6 辆集卡、4 台轨道吊和 6 辆集卡、5 台轨道吊和 8 辆集卡对不同岸边箱占比不同数目的集装箱进行了 60 组实验,每组实验进行 30 次,取每组实验平均值,实验结果如表 7 所示。

1)为研究不同集装箱数量不同岸边箱占比对完工时间的影响,以 4 台轨道吊 6 辆集卡为例,集装箱数量分别为 30、40、50、60、90,岸边箱占比分别为 0、0.4、0.6 和 0.8,轨道吊完工

时间的变化如图 8 所示。

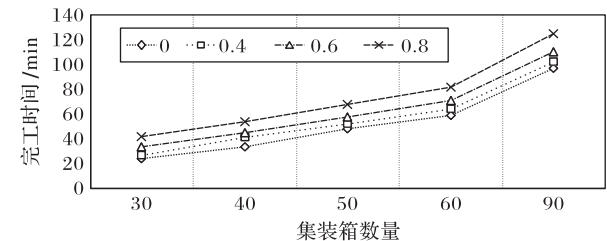


图 8 不同集装箱数量不同岸边箱占比下轨道吊完工时间
Fig. 8 Completion time of rail-mounted gantry crane under different container numbers and different proportions of quayside containers

从图 8 可以看出,当集装数量是某一确定的数量时,随着岸边箱占比的增加,轨道吊完工时间也随之增加。当集装箱数量从 30 增加到 90 时,可以明显地看出,随着岸边箱占比的提高,轨道吊完工时间增加的幅度越大。从表 7 较明显地可以看出,集卡完工时间的变化类似于轨道吊完工时间的变化,就不展开描述了。故当班列上的岸边箱较多时,应适当提高轨道吊数量,才能有效降低集装箱在港停留时间。

2)为研究轨道吊数量和集卡数量对完工时间的影响。以岸边箱占比为 0.6 为例,当轨道吊数目增加以及集卡数目增加时,观察完工时间的变化情况,如图 9 所示(注:第一次变化指从 3 台轨道吊 6 辆集卡增加到 4 台轨道吊 6 辆集卡,完工时间减少的值;第二次变化指从 4 台轨道吊 6 辆集卡增加到 5 台轨道吊 8 辆集卡,完工时间减少的值)。

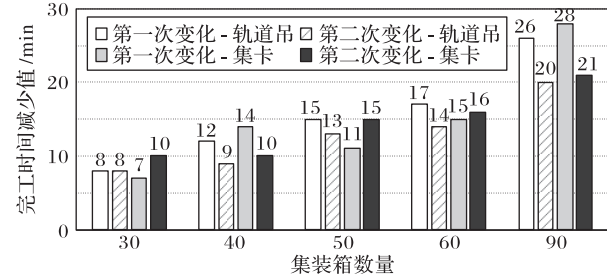


图 9 不同集装箱数量不同设备配置下完工时间的变化
Fig. 9 Change of completion time under different container numbers and different configurations

从图 9 可看出,集装箱数量较少时,轨道吊数目和集卡数

目的变化对轨道吊完工时间和集卡完工时间产生的影响不大。但当集装箱数量达到 60 和 90 时,完工时间减少的值较明显增大,说明此时设备配比不是最佳的。进而在固定 4 台轨道吊的情况下,改变集卡数量来确定最佳设备配比,实验结果如表 8 所示。从表 8 看出,当集装数量为 60 和岸边箱占比为 0.6 时,集卡数量从 6 辆增加至 8 辆时,边际效益值较高,而集卡数量从 8 继续增加时,边际效益值明显减少,故最佳设备配

比为 4 台轨道吊 8 辆集卡;同理,90 个集装箱的设备配比为 4 台轨道吊 8 辆集卡。

还发现在岸边箱占比为 0.4 的情况,集卡数量的增加不一定会减少完工时间,这说明当岸边箱占比较低时,集卡数量增加到一定时,反而会使轨道吊完工时间延长,故当班列上集装箱的岸边箱占比有所变化时,有必要根据具体的情况调整设备配比。

表 7 不同设备配置下的实验结果

单位:min

Tab. 7 Experimental results under different equipment configurations

unit:min

集装箱数量	岸边箱占比	3 台轨道吊和 6 辆集卡		4 台轨道吊和 6 辆集卡		5 台轨道吊和 8 辆集卡	
		轨道吊完工时间	集卡完工时间	轨道吊完工时间	集卡完工时间	轨道吊完工时间	集卡完工时间
30	0.0	41	—	24	—	17	—
	0.4	41	50	27	36	20	30
	0.6	42	51	34	44	26	34
	0.8	45	54	42	54	32	41
40	0.0	56	—	34	—	26	—
	0.4	56	65	41	52	30	38
	0.6	57	67	45	53	36	43
	0.8	60	68	54	62	42	54
50	0.0	72	—	48	—	37	—
	0.4	72	79	52	60	41	46
	0.6	73	80	58	69	45	54
	0.8	77	84	68	78	53	64
60	0.0	86	—	59	—	48	—
	0.4	87	97	64	74	52	62
	0.6	88	94	71	79	57	63
	0.8	93	102	82	92	66	78
90	0.0	132	—	97	—	83	—
	0.4	134	142	102	107	85	96
	0.6	136	145	110	117	90	96
	0.8	141	150	125	132	99	107

表 8 不同集卡数量下作业完成时间

Tab. 8 Operation completion time of different numbers of container trucks

集装箱数量	集卡数量	岸边箱占比为 0.4				岸边箱占比为 0.6			
		轨道吊完工时间/min	集卡完工时间/min	Δ (轨道吊)/min	Δ (集卡)/min	轨道吊完工时间/min	集卡完工时间/min	Δ (轨道吊)/min	Δ (集卡)/min
60	6	64	74	—	—	71	79	—	—
	8	61	73	3	1	64	73	7	6
	10	62	70	-1	3	63	72	1	1
	12	61	69	1	1	61	71	2	1
	14	60	67	0	2	61	68	0	3
	16	61	67	-1	0	62	68	-1	0
90	6	102	107	—	—	110	117	—	—
	8	99	105	3	2	102	112	8	5
	10	98	109	1	-4	100	109	2	3
	12	97	110	1	-1	99	109	1	0
	14	98	104	-1	6	99	112	0	-3
	16	98	103	0	1	99	108	0	4

注:边际效益值 Δ 指在固定作业量下每增加 2 辆集卡,完工时间的减少值。

4 结语

在船舶和班列的时刻表不完全重合时,对混合作业模式下轨道吊和集卡的协同调度优化的研究,为海铁联运港口的运营与管理提供了优化思路,在一定程度上可帮助海铁联运港口提高综合竞争力。在今后的研究中为使问题更复杂,将建立轨道吊、集卡和岸桥的集成调度模型;还将轨道吊和集卡

的数量作为决策变量,均衡各轨道吊和集卡的作业量,以及考虑列车或船舶晚点情况下,研究设备最佳配比问题。

参考文献 (References)

- [1] HE J, HUANG Y, YAN W. Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption [J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29(1):59-75.
- [2] NOSSACK J, BRISKORN D, PESCH E. Container dispatching and

- conflict-free yard crane routing in an automated container terminal [J]. *Transportation Science*, 2018, 52(5):1059-1076.
- [3] SHA M, ZHANG T, LAN Y, et al. Scheduling optimization of yard cranes with minimal energy consumption at container terminals[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 113:704-713.
- [4] GALLE V, BARNHART C, JAILLET P. Yard crane scheduling for container storage, retrieval, and relocation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 271(1):288-316.
- [5] HE J, TAN C, ZHANG Y. Yard crane scheduling problem in a container terminal considering risk caused by uncertainty [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 39:14-24.
- [6] 李坤,唐立新,陈树发. 多集装箱堆场空间分配与车辆调度集成问题的建模与优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(1):115-121. (LI K, TANG L X, CHEN S F. Modeling and optimizing for the integrated problem with container storage allocation and truck scheduling [J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2014, 34(1):115-121.)
- [7] KAVESHGAR N, HUYNH N. Integrated quay crane and truck scheduling for unloading inbound containers [J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 159:168-177.
- [8] BAZGOSHA A, RANJBAR M, JAMILI N. Scheduling of loading and unloading operations in a multi stations transshipment terminal with release date and inventory constraints [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 106:20-31.
- [9] LI X, OTTO A, PESCH E. Solving the single crane scheduling problem at rail transshipment yards [J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2019, 264:134-147.
- [10] GUO P, CHENG W, ZHANG Z, et al. Gantry crane scheduling with interference constraints in railway container terminals [J]. *International Journal of Computational Intelligence System*, 2013, 6(2):244-260.
- [11] STEPHAN K, BOYSEN N. Crane scheduling in railway yards: an analysis of computational complexity [J]. *Journal of Scheduling*, 2017, 20(5):507-526.
- [12] 刘勇,朱晓宁,朱颂雅,等. 铁水联运港站的铁路作业区轨道门吊优化配置[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2014, 38(5):1135-1139. (LIU Y, ZHU X N, ZHU S Y, et al. Allocation optimization model of the rail-mounted gantry crane in railway area by rail-water intermodal container transport [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2014, 38(5):1135-1139.)
- [13] 武慧荣. 集装箱港口“船舶-堆场-列车”作业资源的调度优化[D]. 北京:北京交通大学, 2015. (WU H R. Handling resources scheduling optimization of “ships, yard, trains” container port[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.)
- [14] 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]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(4):40-47. (CHANG Y M, ZHU X N, YAN B C, et al. Integrated scheduling of handling operations in container terminal under rail-water intermodal transportation [J]. *Journal of Transportation System Engineering and Information Technology*, 2017, 17(4):40-47.)
- [15] LUO T, CHANG D, GAO Y. Optimization of gantry crane scheduling in container sea-rail intermodal transport yard [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 2018: No. 9585294.
- [16] 李晓培. 集装箱港口海铁联运装卸设备配置及能力协调研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018. (LI X P. Research on sea-rail combined transport loading/unloading equipment allocation and capacity coordination of container port [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.)
- [17] YAN B, ZHU X, LEE D H, et al. Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2020, 141: No. 106296.
- [18] LAU H Y K, ZHAO Y. Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals [J]. *International Journal of Production Economics*, 2007, 112(2):665-682.
- This work is partially supported by the Innovation Project of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (16DZ1201402, 16040501500).
- LI Shuyi**, born in 1997, M. S. candidate. Her research interests include logistics system engineering.
- HAN Xiaolong**, born in 1978, Ph. D., associate professor. His research interests logistics and supply chain management.