

基于同贝同步装卸的岸桥与集卡协同调度

张艳伟, 谭永庆, 莫满华, 王楠

(武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 集装箱码头岸边装卸桥同贝同步装卸船模式下, 岸桥装卸作业序列决策和集卡调度协同优化是保障同步装卸率的关键, 属 NP 难问题。考虑集卡和岸桥作业之间的紧密衔接、堆场翻箱影响、船舶舱盖等空间约束, 构建以岸桥装卸总次数及堆场翻箱次数最小化、岸桥最大完工时间最小化、集卡等待时间最小化为目标的岸桥装卸序列决策与集卡调度联合优化数学模型。设计改进遗传算法-改进非支配排序多目标遗传算法(IGA-INSGA-II)两阶段算法, 利用 IGA 求解船舶贝位内岸桥装卸集装箱作业序列; 基于装卸作业序列优化方案和 INSGA-II, 提出岸桥最早可作业时间优先的集卡任务指派策略, 设计分段式编码及解码方法, 求解集卡任务分配与指派问题。通过算例, 将设计的算法与常见智能算法进行对比分析, 验证了模型与算法的有效性。

关键词: 集装箱码头; 同贝同步装卸; 装卸船顺序; 集卡调度; 多目标优化

中图分类号: U695.2

文献标志码: A

An Optimization Method for Loading/Unloading Sequence and Truck Dynamic Scheduling Based on Dual-cycling Model in Container Terminal

ZHANG Yanwei, TAN Yongqing, MO Manhua, WANG Nan
(School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Under the dual cycling operation of container terminal, the decision-making of quay crane loading and unloading sequence and the collaborative optimization of truck scheduling are the key to dual cycling, which is a NP hard problem. Considering the close relationship between container truck and quay crane operation, the impact of container relocation and the space restraint such as hatch cover, a joint optimization mathematical model of quay crane loading and unloading sequence and truck scheduling was established, which aimed at minimizing the number of

empty driving of quay crane and the number of container relocation in yard, minimizing the maximum completion time of the ship and minimizing the waiting time of container trucks. IGA-INSGA-II decision-making algorithm was designed and the improved genetic algorithm (IGA) was used to solve the container loading and unloading sequence at the ship bay; Based on the optimization scheme of loading and unloading sequence, the non-dominated sorting multi-objective genetic algorithm (INSGA-II) was improved, truck dispatching strategy with priority to earliest quay crane operational time was proposed, and the segmented coding and decoding method was designed to solve the truck dispatching problem. The algorithm was compared with intelligent algorithms to verify the effectiveness of the model and algorithm.

Key words: container terminal; dual-cycling; loading and unloading sequence; truck dispatching; multi objective optimization

随着集装箱运输业务的发展, 港口集装箱吞吐量持续增长, 业务量增长及船舶大型化对集装箱码头作业能力和作业效率产生巨大冲击。同贝同步装卸^[1]模式通过对装、卸两类集装箱的装卸顺序优化, 实现岸桥及水平搬运设备充分利用, 是提高集装箱码头装卸作业效率和资源利用率的有效途径。

国内外学者关于集装箱船舶的装船顺序问题^[2-4]已经取得了丰富的研究成果, 该问题主要考虑满足装船技术要求前提下以堆场内翻箱次数最少为优化目标, 利用遗传算法、启发式算法^[5]进行求解; 然而针对同贝同步装卸作业模式, 装船与卸船配合才是其提升效率的关键所在, Zhang^[6]在 Goodchild^[1]基础上以最大化岸桥的双循环操作次数为优化目标, 利用混合启发式算法求解岸桥装卸顺序问题; Wang^[7]研究了带舱盖板约束的双循环岸桥调度问题, 通过对舱位间

收稿日期: 2022-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(60904067)

第一作者: 张艳伟(1977—), 女, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为港口物流、智能决策与算法。

E-mail: zywtg@whut.edu.cn



论文
拓展
介绍

作业顺序优化和舱内列之间顺序优化达到减少岸桥空载行程的目的;张文韬^[8]基于遗传算法有效求解考虑舱盖板约束的岸桥作业序列优化问题;考虑到集装箱装卸受到岸桥、集卡以及场桥等多作业设备的影响,ALT等^[9]设计粒子群算法求解岸桥和集卡联合调度问题以减少岸桥与集卡间双向等待时间;Kaveshgar等^[10]结合贪婪算法设计遗传算法求解岸桥与集卡联合调度模型;Vahdani等^[11]针对多个码头间集卡共享情况下岸桥与集卡联合调度,建立以码头运营成本最小和码头溢出工作量最小为目标的双目标优化模型,制定了集卡分配和岸桥匹配方案。

综上,目前已有研究大多考虑先卸后装模式下岸桥与集卡调度或同贝同步装卸船模式下集装箱装卸顺序问题。本文研究同贝同步装卸模式下,船舶贝位内岸桥装卸集装箱作业序列与集卡任务分配及指派联合优化,同时考虑舱盖板等空间约束对同步装卸船顺序的影响,以及集卡双向重载与岸桥同步装卸作业配合等。针对同贝同步装卸模式下,装卸船作业序列空间约束多、集卡调度复杂度大等问题

特征,研究设计改进遗传算法-改进非支配排序多目标遗传算法(IGA-NSGA-II)两阶段决策算法。第一阶段,考虑舱盖板约束及堆场翻箱影响,设计基于空间约束算子的改进遗传算法求解船舶贝位内岸桥作业序列优化问题;基于第一阶段装卸船顺序优化序列,第二阶段考虑既定船舶多台岸桥共享集卡,以及最大化集卡双向重载配合岸桥同步装卸,设计基于最早可作业时间优先的分段式编码多目标遗传算法求解集卡水平搬运任务分配与指派问题。

1 问题描述

常规先卸后装情况下,岸桥移动到既定船舶贝位,先完成卸船作业,再进行装船作业。与先卸后装装卸船模式不同,同贝同步装卸是指在集卡及场桥的协同配合下,岸桥对船舶贝位内的集装箱同步进行卸载和装载作业,将集卡上一个出口箱装载到船上后立即卸载一个进口箱到同一辆集卡上,实现岸桥与集卡的双程重载,如图1所示。

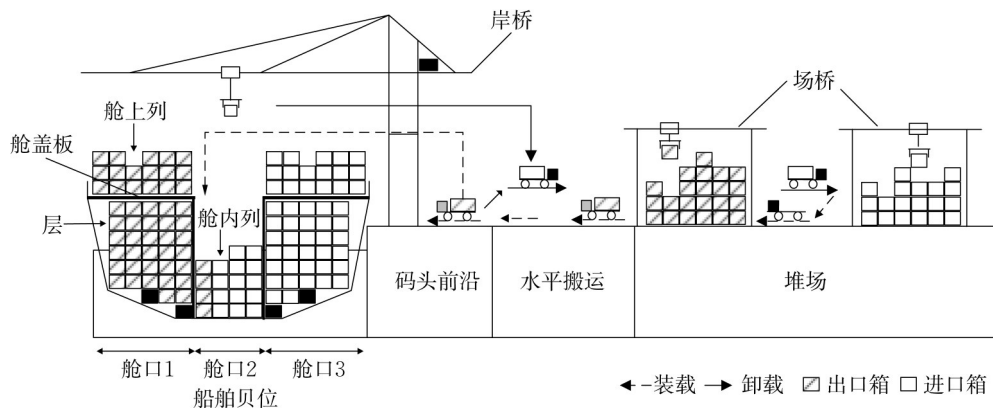


图1 同贝同步装卸船模式

Fig.1 Dual cycling model of loading/unloading ship

同步装卸的关键在于岸桥装卸、集卡双向搬运及堆场收发箱等多设备多环节的协同配合,其难点在于需要考虑舱盖板等空间约束及堆场翻箱等复杂影响,优化决策同时装、卸集装箱的装卸船作业顺序,并针对装卸作业顺序给出优化的集卡水平搬运调度方案,有效衔接岸桥同贝同步装卸实施。本文以“岸桥-集卡-场桥”装卸工艺集装箱码头同贝同步装卸船系统为研究对象,集卡为单船作业面调度模式,船舶贝位内的装卸过程可分解为单卸船作业、混合装卸作业以及单装船作业三个阶段。船舶既定贝位的积载、配载状态及各阶段岸桥、集卡等设备配置状况已知,以岸桥装卸总次数及堆场翻箱次数最小

为岸桥装卸作业序列问题优化目标,综合考虑舱盖板对装卸顺序的影响,确定船舶贝位内集装箱装、卸顺序;基于优化的装卸顺序,以岸桥最大完工时间最小化和集卡总等待时间最小化为目标完成集卡任务分配与指派优化。

2 模型构建

结合生产实际,做出如下假设:

- (1)基于严格配载模式,按照积、配载图装卸集装箱。
- (2)只考虑40英尺集装箱,不考虑船舶稳定性等

因素对船舶贝位内装卸作业顺序的影响。

(3)堆场资源充足,不存在堆场拥堵,集卡在堆场场桥下无排队。

(4)岸桥、场桥不存在带箱等待集卡,集卡完全就位后,岸桥、场桥开始装、卸箱起吊。

2.1 集合

T_s 为船舶贝位内装卸集装箱集合, $T_s = T_{s1} \cup T_{s0}$, 其中 T_{s1} 表示卸载集装箱集合, T_{s0} 表示装载集装箱集合; T_{sf} 为船舶贝位作业阶段 f 卸载、装载集装箱的集合, $f=1, 2, 3$, $T_s = T_{s1} \cup T_{s2} \cup T_{s3}$; K_f 为船舶贝位作业阶段 f 配备集卡的集合; R 为舱口集合; S 为船舶贝位内需装卸所有列的集合, $S = S_{r,ul} \cup S_{r,u0} \cup S_{r,dl} \cup S_{r,d0}$, 其中 $S_{r,ul}$ 表示舱口 r 舱盖板上需要卸载的列集合; $S_{r,u0}$ 为舱口 r 舱盖板上需要装载的列集合; $S_{r,d0}$ 为舱口 r 舱盖板下需要装载的列集合; $S_{r,dl}$ 为舱口 r 舱盖板下需要卸载的列集合。

2.2 参数

相关参数及含义如表1所示。

表1 参数设定

Tab.1 Parameter setting

参数	含义
f	船舶贝位的作业阶段, $f=1$ 为单卸船作业阶段, $f=2$ 为混合装卸作业阶段, $f=3$ 为单装船作业阶段。
i, j	集装箱, $i, j \in T_s$ 。
k	集卡, $k \in K_f$ 。
s	船舶贝位内集装箱列编号, $s \in S$ 。
r	舱口的编号, $r \in R$ 。
p_i	堆场贝位内当前堆存状态下集装箱 i 上方集装箱的数量, $i \in T_{s0}$ 。
t_{qi}	岸桥装卸集装箱 i 时的作业时间。
t_{ci}	场桥装卸集装箱 i 时的作业时间。
t_{ki}	集卡在执行集装箱 i 水平搬运任务时的行驶时间。
t_{ai}	集装箱 i 在岸桥处的实际作业开始时刻, 即 i 被岸桥从集卡上提起或从船舶上提起的时刻。
k_{si}	集卡完成上一次搬运作业, 可以对集装箱 i 进行作业的时刻。
k_{ai}	集装箱 i 被岸桥或场桥装载到集卡时刻, $k_{ai} > k_{si}$ 。
$t_{k,ij}$	集卡 k 搬运完集装箱 i 后, 到达集装箱 j 所在位置所需的行驶时间, $t_{k,ij} \geq 0$ 。
$w_{k,ij}$	集卡 k 完成搬运集装箱 i 和 j 之间的等待时间。
α_{ij}	0-1 变量, 当卸船集装箱 i 和装船集装箱 j 在船上堆存在同一位置上时为 1, 否则为 0。
β_{ij}	0-1 变量, 当船舶贝位内同一列中集装箱 i 位于集装箱 j 的上方时为 1, 否则为 0。
ω	翻箱次数权重系数。

2.3 决策变量

u_{ij} 为 0-1 变量, 当集装箱 i 和 j 属于船舶同一贝位, j 是 i 的紧后工序任务, 且 i 和 j 可由岸桥同步作业时, u_{ij} 为 1, 否则为 0。 z_{ij} 为 0-1 变量, 当集装箱 i 和 j 由同一台岸桥装卸, 且 j 是 i 的后序任务时为 1, 否则为 0; x_{ik} 为 0-1 变量, 当集装箱 i 由集卡 k 搬运时为 1,

否则为 0; y_{ijk} 为 0-1 变量, 当集卡 k 搬运完集装箱 i 后立即搬运集装箱 j 时为 1, 否则为 0。

2.4 多目标优化模型

目标函数:

$$F_1 = \min(|T_s| - \sum_{i=1}^{T_s} \sum_{j=1}^{T_s} u_{ij} + \omega \sum_{i=1}^{T_{s0}} p_i) \quad (1)$$

$$F_2 = \min(\max(t_{ai} + t_{qi})) \quad (2)$$

$$F_3 = \min \sum_{f=1}^3 \sum_{i \in T_{sf}} \sum_{k \in K_f} w_{k,ij} \quad (3)$$

约束:

$$\sum_j z_{ij} \leq 1, \forall i, j \in T_s \quad (4)$$

$$\sum_i z_{ij} \leq 1, \forall i, j \in T_s \quad (5)$$

$$\sum_{i \in T_s} y_{ijk} \leq 1, \forall j \in T_s \quad (6)$$

$$\sum_{j \in T_s} y_{ijk} \leq 1, \forall i \in T_s \quad (7)$$

$$\sum_{f=1}^3 \sum_{k \in K_f} x_{ik} = 1, \forall i \in T_s \quad (8)$$

$$t_{ai} > t_{aj}, \forall i \in S_{r,dl}, \forall j \in S_{r,ul}, \forall r \in R \quad (9)$$

$$t_{ai} > t_{aj}, \forall i \in S_{r,u0}, \forall j \in S_{r,d0}, \forall r \in R \quad (10)$$

$$t_{ai} < t_{aj}, \forall i, j \in T_{s1}, \beta_{ij} = 1 \quad (11)$$

$$t_{ai} > t_{aj}, \forall i, j \in T_{s0}, \beta_{ij} = 1 \quad (12)$$

$$t_{ai} < t_{aj}, \forall i \in T_{s1}, \forall j \in T_{s0}, \alpha_{ij} = 1 \quad (13)$$

$$t_{aj} \geq \sum_{i \in T_s} z_{ij} (t_{ai} + t_{qi}), \forall j \in T_s \quad (14)$$

$$t_{aj} \geq \sum_{f=1}^3 \sum_{i \in T_{s0} \cap T_{sf}} y_{ijk} (t_{ai} + t_{k,ij}) \quad \forall j \in T_{s1}, \forall k \in K_f \quad (15)$$

$$t_{aj} \geq \sum_{f=1}^3 \sum_{i \in T_{s1} \cap T_{sf}} y_{ijk} (k_{ai} + t_{ki} + t_{ci} + t_{k,ij}), \forall k \in K_f, \forall j \in T_{s1} \quad (16)$$

$$t_{ai} \geq \sum_{f=1}^3 \sum_{i \in T_{s0} \cap T_{sf}} x_{ik} (k_{ai} + t_{ki}), \forall k \in K_f \quad (17)$$

$$k_{aj} \geq \sum_{i \in T_{s0}} y_{ijk} (t_{ai} + t_{k,ij} + t_{cj}), \forall j \in T_{s0} \quad (18)$$

$$k_{aj} \geq \sum_{i \in T_{s1}} y_{ijk} (k_{ai} + t_{ki} + t_{ci} + t_{k,ij} + t_{cj}) \quad \forall j \in T_{s0} \quad (19)$$

$$k_{ai} \geq t_{ai} + t_{qi}, \forall i \in T_{s1} \quad (20)$$

$$k_{sj} = \sum_{f=1}^3 \sum_{i \in T_{s1} \cap T_{sf}} y_{ijk} (k_{ai} + t_{ki} + t_{ci} + t_{k,ij} + t_{qj}), \forall k \in K_f, \forall j \in T_{s1} \quad (21)$$

$$k_{sj} = \sum_{f=1}^3 \sum_{i \in T_{s1} \cap T_{sf}} y_{ijk} (k_{ai} + t_{ki} + t_{ci} + t_{k,ij} + t_{cj}), \forall k \in K_f, \forall j \in T_{s0} \quad (22)$$

$$k_{sj} = \sum_{f=1}^3 \sum_{i \in T_{so} \cap T_{sf}} y_{ijk} (t_{ai} + t_{k,ij} + t_{qj}) \quad \forall k \in K_f, \forall j \in T_{st} \quad (23)$$

$$k_{sj} = \sum_{f=1}^3 \sum_{i \in T_{so} \cap T_{sf}} y_{ijk} (t_{ai} + t_{k,ij} + t_{cj}) \quad \forall k \in K_f, \forall j \in T_{so} \quad (24)$$

$$w_{k,i} = \begin{cases} \sum_{f=1}^3 \sum_{k \in K_f} x_{ik} (k_{ai} - k_{si}) & i \in T_{st} \\ \sum_{f=1}^3 \sum_{k \in K_f} x_{ik} (t_{ai} - (k_{ai} + t_{ki})) & i \in T_{so} \end{cases} \quad (25)$$

目标函数式(1)表示最小化岸桥装卸总次数和堆场翻箱次数,目标函数式(2)表示最小化岸桥最大完工时间,目标函数式(3)表示最小化集卡总等待时间;约束式(4)~(7)限制任意一个集装箱在岸桥或集卡的前序和后序作业;式(8)表示任意一个集装箱

只由一个集卡搬运;式(9)~(13)根据集装箱在船舶贝位上的空间位置限制其装卸顺序;式(14)表示任意作业任务在岸桥处的开始时间受当前岸桥前序任务的结束时间影响;式(15)~(17)表示任意作业任务在岸桥处的开始时间受当前集卡前序任务结束时间的影响;式(18)~(20)表示任意任务在集卡上的实际开始时间与当前集卡前序任务的结束时间以及岸桥作业完成时间的关系;式(21)~(24)更新当前任务在集卡上的预计作业开始时间;式(25)计算集卡总等待时间。

3 求解算法设计

设计两阶段求解算法,算法流程如图 2 所示,其中扰动参数 *tur* 计数, *TUR* 为给定扰动阈值。

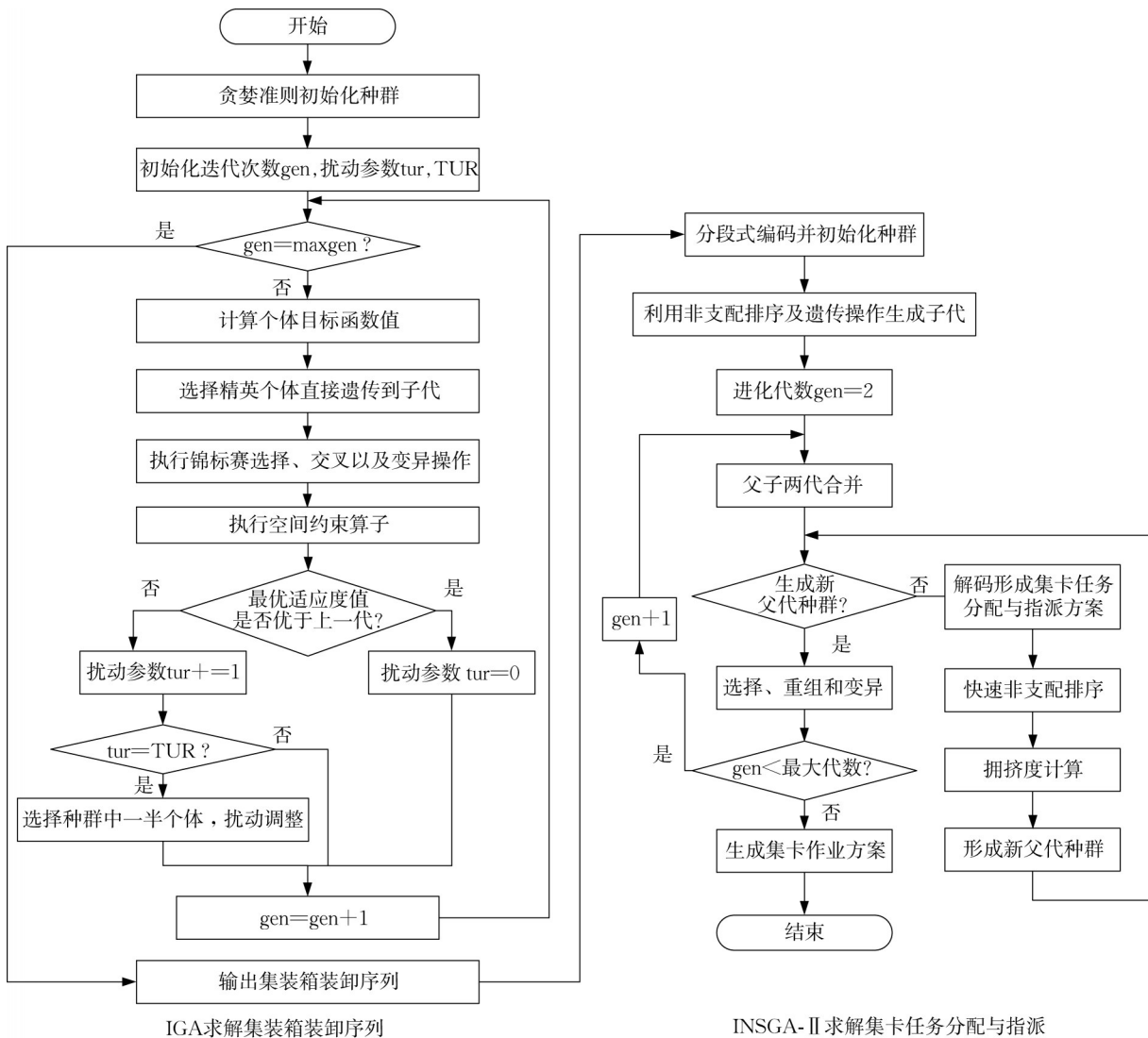


图 2 IGA-INSGA-II 算法流程
Fig.2 Flowchart of IGA-INSGA-II Algorithm

利用 IGA 求解同贝同步装卸模式下集装箱岸桥装卸作业序列,其中 IGA 主要改进包括:设计空间约束算子及种群扰动,空间约束算子与罚函数结合,保证所有解满足舱盖板空间约束、列内上下箱位及同一箱位装卸箱空间约束等,设计种群扰动策略促进种群进化,有效避免陷入局部最优解;设计 INSGA-II 求解集卡任务分配与指派问题,INSGA-II 主要改进包括:根据贝位作业阶段和集卡数量配置约束,设计分段式

编码,设计基于岸桥最早可作业时间优先的解码策略等有效减少计算复杂度。

3.1 IGA 设计

基于船舶贝位内集装箱装卸顺序空间约束设计空间约束算子,约束算子与罚函数配合,保证所有解均为可行解,设计扰动策略避免算法陷入局部最优。

3.1.1 编码及解码

采用整数排列编码,如图 3 所示。

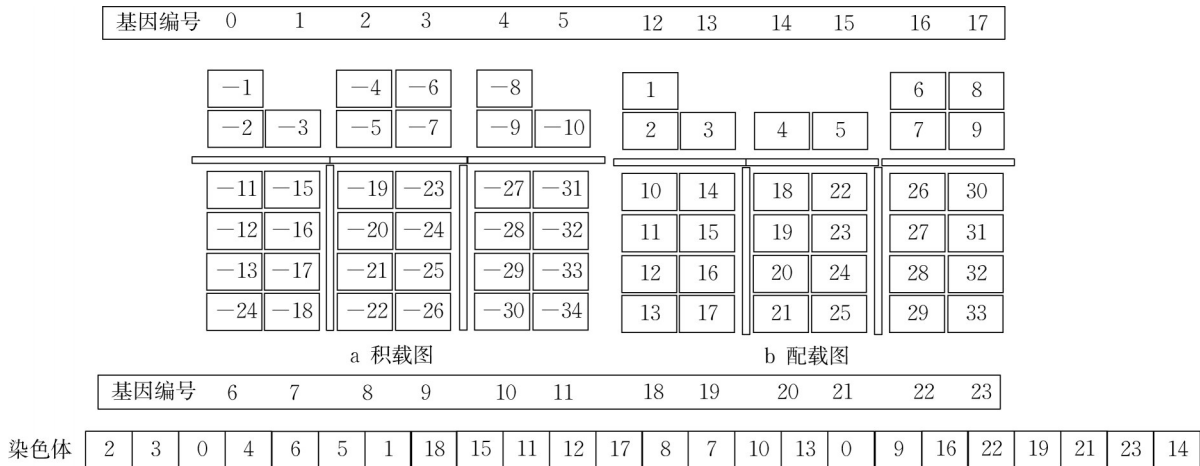


图 3 染色体编码示意图

Fig.3 Chromosome coding diagram

基因表示装卸列编号,一条染色体为一个装卸船顺序方案。根据船舶贝位积载图和配载图,划分舱内外并分别统计既定贝位需要装卸的集装箱列的数量,以最大卸船列数量为界限,卸船列用小于该界限值的整数依次编号,装船列用大于该值的整数进行编号,利用贪婪准则初始化种群,使每个列的卸载编号排列在装载编号之前;解码时,根据船舶积载图和配载图信息,以及船舶舱位先卸后装、卸船列从上至下进行卸船作业、装船列从下至上进行装船作业等生产启发信息,交叉读取卸载列和装载列对应的集装箱,得到集装箱作业序列。

3.1.2 罚函数的构建

为保证算法迭代过程中同列集装箱先卸后装,设计惩罚项 $\sigma P(x)$,其中 σ 为惩罚因子,取很大的正数; $P(x)$ 是染色体 x 的函数,当遍历整条染色体过程中出现同列先装后卸的排列状态时, $P(x)$ 加 1; $F_1(x)$ 为目标函数,利用式(26)计算染色体适应度值,即

$$F_1(x, \sigma) = F_1(x) + \sigma P(x) \quad (26)$$

3.1.3 交叉重组与变异算子

采用顺序交叉算子完成交叉操作。在染色体上的随机生成三个位置,将染色体划分为四段,交换中间两个片段,完成染色体变异操作。

3.1.4 空间约束算子

针对集装箱列之间舱盖板上下空间约束,设计空间约束算子约束舱盖板上下集装箱列的装卸顺序,如图 4 所示。

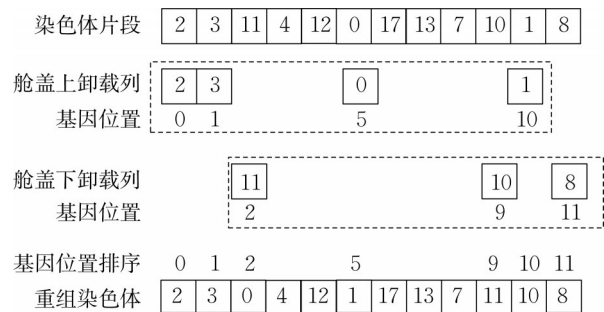


图 4 空间约束算子示意图

Fig.4 Schematic diagram of reconstruction operator

(1) 遍历染色体中某一舱位上下需要卸载的集装箱列,取出其基因编号和在染色体中的位置,按照升序对取出的基因位置进行排序,形成基因位置排序序列;

(2) 将取出的基因按照舱盖板上方的卸载列在前,下方卸载列在后的原则排序,形成基因序列;

(3) 根据基因序列按照基因位置排序序列对原染

染色体对应位置的基因进行替换;

(4)根据上述步骤原理,按照舱盖板下集装箱列优先装载原则,对染色体中该舱位需要装载集装箱列的装载顺序进行约束;

(5)重复上述步骤直到染色体中所有舱位的装载顺序都满足约束。

3.1.5 扰动设计

为减少遗传算法陷入局部最优解,设计局部调整和部分初始化扰动策略。当种群进化过程中连续多代目标函数值未改进时,取出其中排序靠后的一半个体进行调整:

(1)利用贪婪策略对取出种群中前一半个体局部调整:当染色体中出现连续两个装船集装箱列基因时,取出后一个装船列对应的卸载编码并将其插入到两个连续装载列基因之间;

(2)采用半初始化策略^[12]对取出种群中后一半染色体处理:利用随机生成染色体替换表现最差的染色体。

3.2 INSGA-II设计

基于岸桥最早可作业时间优先指派原则设计分段编码及解码方法,实现集卡水平搬运任务指派。

3.2.1 分段式编码

在已知集装箱装卸作业顺序的基础上,对整条船舶“多岸桥-多集卡”匹配同贝同步装卸,进行集卡任务指派方案优化。以配备2台岸桥同时开始,各装卸一个贝位为例。开始阶段,贝位内2台岸桥仅进行卸船作业,为单卸船阶段;任何一个贝位开始进行同步装卸即进入混合装卸阶段;最后为单装船阶段。已知单卸船阶段配备 K_1 辆集卡,集卡编号分别为1、2、 \dots 、 K_1 ;混合装卸阶段、单装船阶段分别配备 K_2 辆和 K_3 辆集卡,且均可服务于2台岸桥。对不同作业阶段水平搬运任务进行分段式整数编码,基因表示执行该贝位搬运任务集卡的编号。贝位内配对同步装卸的两个集装箱应该由同一辆集卡搬运,为减少计算复杂度对配对的搬运任务进行标记并简化编码,如图5所示。

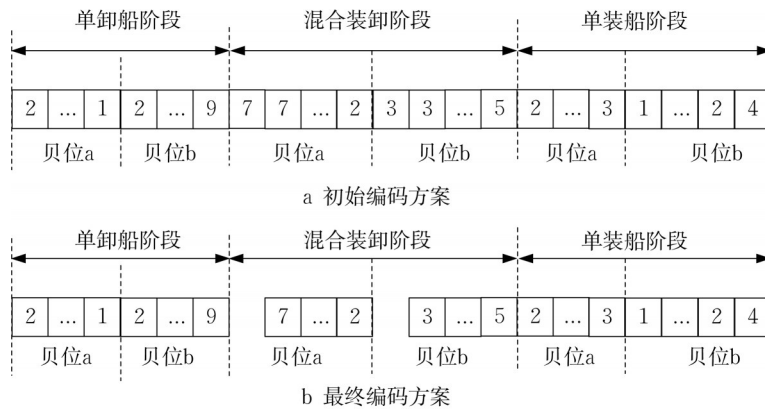


图5 分段式编码示意图

Fig.5 Schematic diagram of segmented coding

3.2.2 基于岸桥最早可作业时间优先的解码方法

针对任务分配与指派问题,现有研究多采用两段式编码^[13]或者多行矩阵式编码^[14],由于1辆集卡可协同服务于多台岸桥,本文设计的染色体编码对多台岸桥对应的所有搬运任务进行分配,不同岸桥作业任务之间没有优先级,基于岸桥最早可作业优先指派原则进行集卡任务指派,解码方案:

(1)初始化岸桥实际作业开始时间 t_{a_i} 、集卡搬运计划开始时间 k_{s_i} 、集卡搬运实际开始时间 k_{a_i} ,设定集卡位置参数;

(2)读取染色体中每台岸桥的集卡分配方案,比较所有岸桥当前任务最早可作业时间,若相同则随机选择一台岸桥,否则选择计划开始时间最早的岸

桥,按照染色体分配的集卡执行其当前集装箱装卸任务,记录集卡作业顺序;

(3)根据式(14)~(24)更新当前集装箱装卸任务的岸桥实际开始作业时间、集卡实际开始作业时间、当前任务序列内后续任务的计划开始作业时间;

(4)根据最优染色体和任务执行顺序输出集卡的任务分配和指派方案。

3.2.3 遗传操作

采用精英策略和拥挤度比较算子进行个体选择,利用模拟二进制交叉算子进行染色体交叉,采用多项式变异算子进行染色体变异操作。

4 算例分析

4.1 算例及参数设定

(1) 算例设计

装船顺序优化算例船舶贝位内包含3个舱盖板,小规模算例既定贝位需卸载34个集装箱,装载33个集装箱;大规模算例贝位内卸载130个集装箱,装载125个集装箱,相关积载、配载图及集装箱信息均已知。集卡调度算例,两台岸桥同时对2个贝位进行作业,设计装卸量为14个集装箱、22个集装箱、60个和118个集装箱4个不同规模算例,其中,装箱、卸箱、可同步装卸的集装箱等信息由上层装船顺序优化结果获取。

(2) 参数设计

将式(26)中 σ 设为1 000;考虑堆场的翻箱次数权重系数 ω 取值范围为(0, 1),取0~1之间的离散值进行实验,如图6所示。

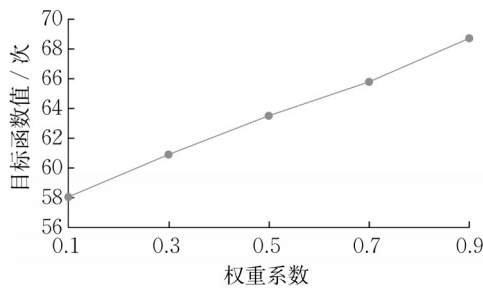


图6 ω 对目标函数的影响

Fig.6 ω influence on objective function

结果表明, ω 对目标函数值产生线性影响,不影响寻优方向。综合考虑翻箱次数相对于岸桥装卸的重要性,将 ω 设为0.5进行后续实验。

集卡任务调度算例,参考张笑菊^[15]设置设备数量、装卸速度等相关参数,如表2所示。

表2 参数设定

Tab.2 Parameter setting

参数	值
岸桥同贝同步装卸一个循环所需时间/min	2.78
岸桥传统装卸一个循环所需时间/min	2.08
场桥平均装卸一个循环所需时间/min	2.08
集卡空载从岸桥A到对应堆场和从堆场到岸边的平均行驶时间/min	3.55
集卡重载从岸桥A到对应堆场和从堆场到岸边的平均行驶时间/min	4.26
集卡空载从岸桥B到对应堆场和从堆场到岸边的平均行驶时间/min	3.45
集卡重载从岸桥B到对应堆场和从堆场到岸边的平均行驶时间/min	4.14

$K_1 = \{1, 2, \dots, 10\}$ $K_2 = \{1, 2, \dots, 9\}$ $K_3 = \{1, 2, \dots, 10\}$

4.2 结果分析

采用Python编程,实验在PC(Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU@2.30GHz 2.40 GHz 内存8.00 GB)上进行。集装箱装卸作业顺序优化,基于算例对遗传算法(GA),粒子群算法(PSO)以及本文的改进遗传算法(IGA)进行测试,其中,IGA设定种群数量100,精英保存率0.1,交叉概率0.9,变异概率0.1,扰动阈值设为10;GA种群数量为200,其余参数相同,PSO种群数量200,个体最优值保存概率0.9,种群最优值保存概率0.9,迭代次数均为200代。集卡任务分配与指派算例中,算法参数均设置为种群数500,交叉概率0.9,变异概率0.1,进化代数300代。各算法20次实验结果如表3及图7所示,算法收敛状态如图8所示。

表3 算法测试结果对比

Tab.3 Comparison of algorithm test

算例	算法	F_1 最优目标值/次	F_1 平均目标值/次	算法平均用时/s
算例1 (34/33)	IGA	49	50.80	42.85
	GA	52	54.15	84.7
	PSO	53	56.30	41
算例2 (130/125)	IGA	204.5	212.32	167.55
	GA	221	238.15	275.6
	PSO	240	256.97	130.9

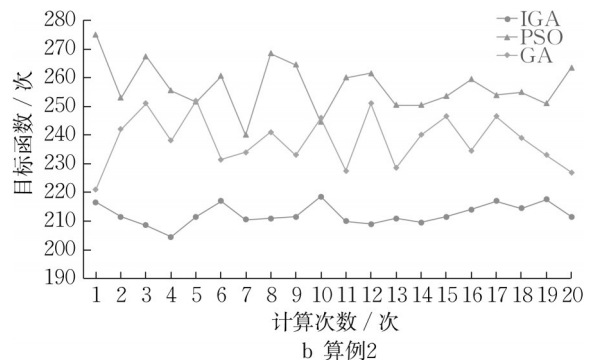
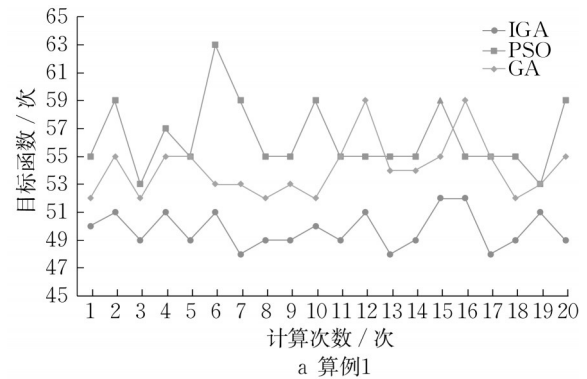


图7 IGA、PSO、GA算法20次最优解对比

Fig.7 Comparison of 20 times results of each algorithm

(1) 集装箱装卸作业顺序结果分析

通过上述2个算例对比可知,本文改进的遗传算法

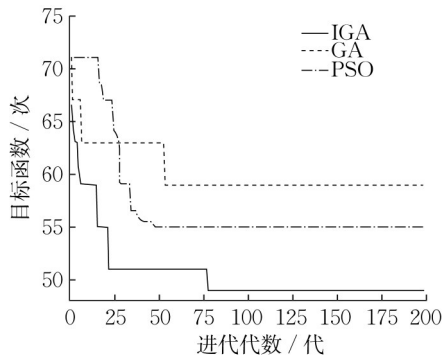


图8 IGA、GA、PSO算法收敛对比

Fig.8 Comparison of convergence of different algorithms

跳出局部最优解及寻优的能力具有明显优势,较常规遗传算法及粒子群算法,运行20次平均结果分别提升约8.51%、13.47%;计算用时较GA有较大幅度减少,较PSO有所增加,且计算时间控制在3min以内。实验结果表明,本文改进遗传算法能有效求解同贝同步装卸作业模式下岸桥作业序列优化问题。

(2)集卡任务分配与指派结果分析

将本文INSGA-II与两段式编码的NSGA-II及参考向量引导多目标优化进化算法(Reference Vector Guided Evolutionary Algorithm,RVEA)对比,求解结果如表4及图9所示。

表4 集卡调度优化求解结果

Tab.4 solution of truck dispatching

算法	集装箱装卸数量	平均决策时间/s	岸桥最大完工时间/集卡总等待时间/min		
			方案1	方案2	方案3
INSGA-II	14	9.34	16.92/18.18	28.92/8.89	42.77/6.51
	22	12.52	23.48/40.56	30.97/14.73	37.46/4.36
	60	36.18	70.28/135.28	72.15/125.65	75.58/107.5
	118	69.06	139.41/332.85	140.95/312.93	144.88/307.18
NSGA-II	14	10.41	25.07/16.82	32.31/12.58	47.54/4.61
	22	12.95	27.17/59.99	39.18/22.50	48.61/14.26
	60	37.71	74.39/184.45	75.52/170.43	76.44/139.13
	118	70.89	150.55/435.92	153.10/383.76	164.09/356.90
RVEA	14	11.68	20.10/40.01	27.08/15.16	37.38/3.84
	22	14.46	26.5/56.67	32.37/36.14	38.03/25.68
	60	38.83	77.93/240.87	80.43/204.35	82.81/181.30
	118	71.89	159.52/525.14	161.90/499.28	187.62/459.34

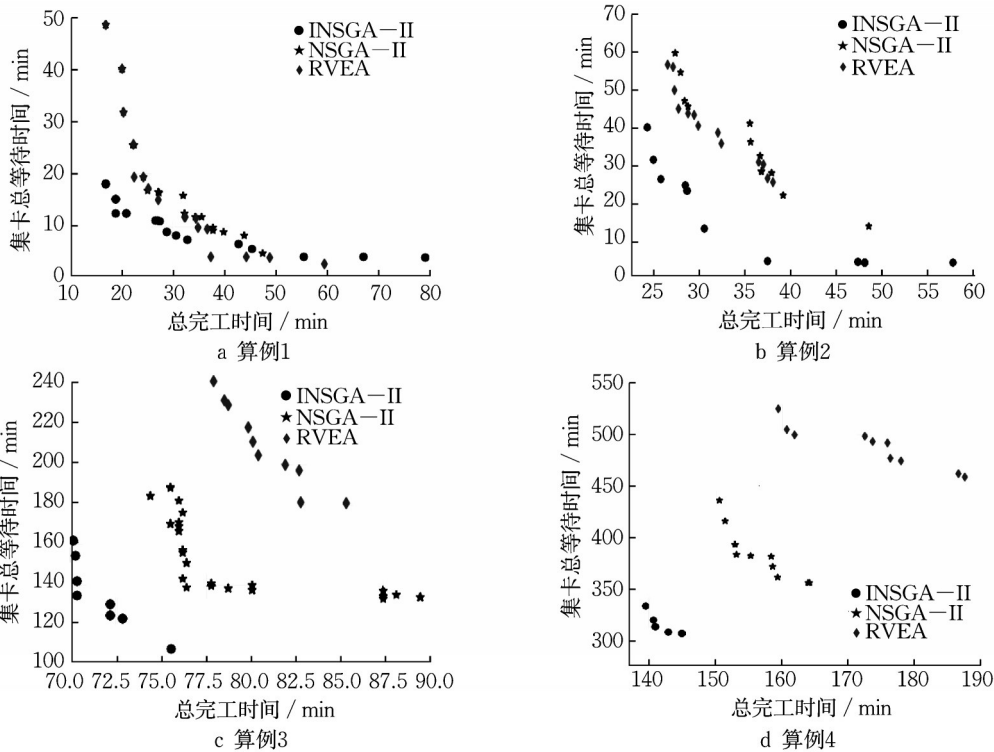


图9 不同规模算例帕累托前沿解对比

Fig.9 Comparison of Pareto front of different scale examples

其中,表4中平均决策时间为连续运行20次的平均计算时间,每个案例选择三个帕累托前沿解对应的方案,方案1、方案2和方案3的函数值如表4。结果显示,INSGA-II较两段式编码NSGA-II及RVEA,岸桥最大完工时间及集卡总等待时间减少明显。表明,采用改进编码解码策略以及岸桥最早可作业时间优先指派策略,解分布比较均匀,不同规模算例优化方案具有优势。

5 结语

本文针对集装箱码头同贝同步装卸作业模式下,船舶贝位内集装箱岸桥装卸作业序列决策优化与集卡联合调度问题,综合考虑舱盖板约束以及堆场翻箱等因素,构建包含岸桥装卸总次数最小化、总作业时间最小化、集卡总等待时间最小化为目标的数学模型。鉴于问题的NP难特性,设计两阶段IGA-INSGA-II求解算法,利用IGA求解岸桥装卸作业序列决策问题,通过设计空间约束算子和种群扰动策略有效增强IGA寻优与跳出局部最优解的能力,利用INSGA-II求解集卡的任务分配与指派问题,通过改进编码与指派策略有效提升了算法的寻优能力,实验验证了算法和模型的有效性。下一步研究将考虑不同箱型同贝同步装卸顺序优化、不确定因素下岸桥和集卡联合调度及优化方案韧性研究。

作者贡献声明:

张艳伟:确定研究方向,指导模型构建,撰写文稿;
谭永庆:构建模型并编程求解,撰写文稿;
莫满华、王楠:文献查阅、文稿修改。

参考文献:

- [1] GOODCHILD A V, DAGANZO C F. Double-cycling strategies for container ships and their effect on ship loading and unloading operations [J]. *Transportation Science*, 2006, 40(4):473.
- [2] 祝慧灵,计明军,郭文文,等.基于配载计划的集装箱提箱顺序和倒箱策略优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(2):191.
ZHU Huiling, JI Mingjun, GUO Wenwen, *et al* Optimization of container pick-up sequence and container transfer strategy based on stowage plan [J]. *Transportation System Engineering and Information*, 2016, 16(2): 191.
- [3] JI M, GUO W, ZHU H, *et al*. Optimization of loading sequence and rehandling strategy for multi-quay crane operations in container terminals[J]. *Transportation Research Part E*, 2015, 80(8):1.
- [4] MARCO Caserta, SILVIA Schwarze, STEFAN VoB. A mathematical formulation and complexity considerations for the blocks relocation problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 219(1):96
- [5] 李俊,张煜,计三有,等.集装箱船舶装箱排序问题的两阶段算法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(1):8.
LI Jun, ZHANG Yu, JI Sanyou, *et al* Two stage algorithm for container ship packing scheduling problem [J]. *Transportation system engineering and information*, 2017, 17(1): 8.
- [6] ZHANG H, KIM K H. Maximizing the number of dual-cycle operations of quay cranes in container terminals[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56(3):979.
- [7] WANG D, LI X. Quay crane scheduling with dual cycling[J]. *Engineering Optimization*, 2014, 47(10):1343.
- [8] 张文韬,韩晓龙.考虑同步装卸的岸桥作业序列优化[J]. *上海海事大学学报*, 2019, 40(4):22.
ZHANG Wentao, HAN Xiaolong. Optimization of quay crane operation sequence considering synchronous loading and unloading [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2019, 40(4): 22.
- [9] A L T, A J Z, B J L. Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 236(3):978.
- [10] KAVESHGAR N, HUYNH N. Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 159:168
- [11] VAHDANI B, MANSOUR F, SOLTANI M, *et al*. Bi-objective optimization for integrating quay crane and internal truck assignment with challenges of trucks sharing[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2019, 163(1):675
- [12] 郭晓金,郭彩杏,柏林江.采用半初始化和概率扰动策略改进的遗传算法[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(12):3670.
GUO Xiaojin, GUO Caixing, BAI Linjiang. Improved genetic algorithm using semi initialization and probabilistic perturbation strategy [J] *Computer application research*, 2019, 36(12): 3670.
- [13] 梁承姬,卢殷云,沈佳杰.基于滚动窗策略的岸桥集卡联合调度问题研究[J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(2):7.
LIANG Chengji, LU Yinyun, SHEN Jiajie. Research on joint scheduling problem of quay crane truck based on sliding time window strategy [J]. *Computer Application Research*, 2018, 35(2): 7.
- [14] ZHANG S, TANG F, LI X, *et al*. A hybrid multi-objective approach for real-time flexible production scheduling and rescheduling under dynamic environment in industry 4.0 context[J]. *Computers & Operations Research*, 2021, 132:105267.
- [15] 张笑菊.集装箱码头同贝同步装卸作业系统优化研究[D].大连:大连海事大学,2018.
ZHANG Xiaojin. Research on optimization of container terminal operation system with dual cycling [D]. Dalian:Dalian Maritime University, 2018.