

文章编号:1006-2467(2019)02-0188-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.02.009

# 基于同贝同步装卸的岸桥与集卡联合调度优化模型

张笑菊<sup>1,2</sup>, 曾庆成<sup>2</sup>, 陈子根<sup>2</sup>, 李桃迎<sup>2</sup>

(1. 北京工商大学 商学院, 北京 100048; 2. 大连海事大学 航运经济与管理学院, 辽宁 大连 116026)

**摘 要:** 为解决岸桥同贝同步装卸时多环节作业协调问题,加速集装箱在码头内部的周转,研究基于岸桥同贝同步装卸作业的岸桥与集卡联合调度问题.以船舶装卸完工时间最短为目标,建立岸桥与集卡联合调度优化模型,优化岸桥与集卡的任务分配及作业序列.岸桥同贝同步装卸增加了集卡作业环节,不同于传统作业时多阶段混合流水车间问题,其模型更加复杂,求解更加困难.针对大规模问题,设计了启发式算法进行求解,并将求解结果与下界值进行对比分析.结果表明,该启发式算法能有效提高岸桥与集卡联合调度模型的求解速度,有助于提高岸桥同贝同步装卸作业效率,为码头实际作业提供依据.

**关键词:** 集装箱码头; 同贝同步; 岸桥; 集卡; 联合调度

**中图分类号:** U 691 **文献标志码:** A

## Optimization Model for Integrated Quay Cranes and Yard Trucks Scheduling Based on Double Cycling

ZHANG Xiaojun<sup>1,2</sup>, ZENG Qingcheng<sup>2</sup>, CHEN Zigen<sup>2</sup>, LI Taoying<sup>2</sup>

(1. Business School, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

**Abstract:** To solve the integration problems when quay cranes are applied with double cycling and increase the speed of turn-around of containers in the container terminal, this paper researched in the integrated scheduling of quay cranes and trucks. An integrated scheduling model with the objective to minimize the makespan of the ship was developed. The task assignment and scheduling of quay cranes and trucks are optimized by the proposed model. Compared with traditional operations, double cycling increases the working stage of trucks and increases the difficulty of solving this problem. An algorithm based on heuristic rules was designed to solve large scale problems and results are compared with those obtained by low bounds. Results show that the proposed algorithm can increase the speed of solving the model. The integrated scheduling of quay cranes and trucks contributes to increasing the speed of double cycling of quay cranes and thereby provide theories for the container terminal.

**Key words:** container terminal; double cycling; quay crane; truck; integrated scheduling

世界贸易量的增加及船舶大型化的发展,对港口的吞吐能力提出了越来越高的要求.港口竞争日益激烈,港口作业效率成为班轮公司选择挂靠港的重要因素之一.为了争得货源,节约成本,码头经营

收稿日期:2017-05-27

基金项目:国家自然科学基金(71370137, 71671021),中央高校基本科研业务费专项基金(3132016302, 20110116104)资助项目

作者简介:张笑菊(1989-),女,河北省秦皇岛市人,讲师,主要研究方向为港口运作管理.

通信作者:曾庆成(1978-),男,教授,电话(Tel.):0411-84729563;E-mail: qzeng@dlnu.edu.cn.

管理者逐渐应用新方法、新技术管理内部作业。目前,我国的天津港、深圳盐田港等将同贝同步装卸作业技术应用于岸桥作业,使岸桥起重小车在一个作业循环中完成一个进口集装箱的卸船作业及一个出口集装箱的装船作业,并且保证了集卡在往返岸边及堆场的一个循环中完成一个进口集装箱和一个出口集装箱的运输任务。同贝同步装卸作业技术能有效减少岸桥及集卡作业过程的空载距离,进而提高了岸桥的作业效率及集卡利用率<sup>[1-2]</sup>。国内外一些学者对同贝同步装卸作业下岸桥调度进行了研究。例如:Zhang等<sup>[3]</sup>考虑舱口盖对岸桥作业的影响,以最大化起重小车作业双循环次数为目标,分别优化了舱内及舱口盖上岸桥的装卸顺序;Lee等<sup>[4]</sup>利用简化的串并行算法对模型进行求解,得到了用时最短的岸桥作业顺序;曾庆成等<sup>[5]</sup>以降低岸桥及堆场场桥作业时间为目标,建立同贝同步装卸调度模型,优化岸桥作业序列及集卡提箱顺序。然而,码头的作业效率不仅与岸桥有关,还受集卡、堆场龙门吊作业的影响。如何有效协调码头内部各环节作业,保证集装箱在码头高效流转受到码头经营者及学者的广泛关注。

岸桥同贝同步装卸作业时,集卡在岸边卸载一个出口集装箱后,装载一个进口集装箱并运送到堆场指定位置。与传统的作业相比,同贝同步装卸作业岸桥与集卡的联合调度的难点在于,集卡作业增加2个环节(空载行驶及装载出口集装箱),码头不仅为进口集装箱分配集卡,还需要为集卡指定同一循环作业所需要装载的出口箱任务。而集卡的任务分配受岸桥装卸船顺序、进出口集装箱在堆场堆存位置及出口箱装船顺序的影响,其周转效率反之决定岸桥作业效率。传统作业下,岸桥与集卡的调度受到众多学者的关注,建立的多阶段混合流水车间问题能够有效求解传统作业时的调度问题。例如:Chen等<sup>[6]</sup>将集装箱在码头内部周转看成混合流水车间问题,建立岸桥、集卡、堆场场桥联合调度模型,并用禁忌搜索算法进行求解;Zeng等<sup>[7]</sup>针对岸桥、集卡、堆场场桥联合调度问题,利用优化算法搜索最优解,并用仿真分析的方法对优化解进行评价;Agra等<sup>[8]</sup>和Shang等<sup>[9]</sup>研究了泊位和岸桥联合调度问题;Tang等<sup>[10]</sup>针对岸桥、集卡联合角度问题,以最小化装卸船完工时间为目标,建立混合整数规划模型,并利用粒子群算法进行求解;孙彬等<sup>[11]</sup>提出了一种基于鲁棒反应式策略的泊位和岸桥联合调度方法;郑红星等<sup>[12]</sup>考虑潮汐影响,研究了泊位分配和岸桥集成调度问题。

然而岸桥同贝同步装卸作业时,集卡交替运输进口集装箱及出口集装箱,增加了码头内部的设备作业调度的复杂性,多阶段混合流水车间模型不能刻画集卡及岸桥的作业过程。国内外针对集卡、岸桥的联合调度的研究为本文提供了借鉴,但要解决岸桥同贝同步装卸作业下,岸桥与集卡的联合调度问题还面临着以下困难:①集卡在同一个作业循环中,运送1个进口集装箱和1个出口集装箱,比多阶段混合流水车间问题增加1个任务对象,岸桥、集卡的联合调度模型更加复杂;②多环节的联合调度涉及多种约束条件及变量,随着问题规模的增加,模型求解变得困难,如何设计高效的求解算法是研究的另一个重要问题。

针对上述问题,为解决岸桥同贝同步装卸作业下码头多环节协同调度问题,本文建立岸桥与集卡联合调度模型,通过优化岸桥与集卡的任务分配和作业序列,提高岸桥同贝同步装卸效率,从而减少船舶的在港时间,节约码头作业成本。

## 1 模型建立

### 1.1 问题描述

集装箱在码头内部的流转经过3个作业环节:岸桥装卸、集卡水平运输和堆场龙门吊装卸。考虑岸桥作业时的不交叉及安全距离等约束,岸桥调度优化决定每个岸桥作业分配的贝位及每个贝位的作业顺序,直接影响船舶的装卸时间。集卡负责集装箱在码头内部的水平运输,是连接岸桥作业与堆场龙门吊作业的重要节点,其调度优化决定每个集卡运输的集装箱的任务分配及运输顺序。集卡配合岸桥的装卸船作业,卸船时,岸桥将集装箱从船舶直接卸到集卡上,若此时岸桥处无集卡,则岸桥需要等待直至集卡到达,反之亦然。因此,岸桥、集卡的协调作业有助于减少各环节的等待时间,实现集装箱在码头内部高效的运转。

岸桥同贝同步装卸作业时(见图1),岸桥将一个进口集装箱(2号)装载到集卡上,并由集卡负责集装箱的水平运输任务至进口箱区,卸箱后集卡空载行驶至出口箱区载一个出口集装箱(1号)并运送到岸边,由岸桥负责装船作业。与传统先卸后装作业模式相比,集卡增加运送出口箱作业环节,码头同时为集卡安排运送进口集装箱及出口集装箱任务,集卡作业调度安排更加复杂,并且由同一个集卡在一个循环内运输的进口集装箱及出口集装箱需配合岸桥同贝同步装卸作业(1号出口箱和2号进口箱由岸桥起重小车在一个循环中进行装卸),增加了岸桥

调度的约束. 为集卡分配进口集装箱和出口集装箱运送任务时, 要考虑进出口集装箱在堆场的堆存位置, 合理计划集卡的周转时间, 来减少岸桥及集卡的等待时间, 从而减少装卸船作业时间.

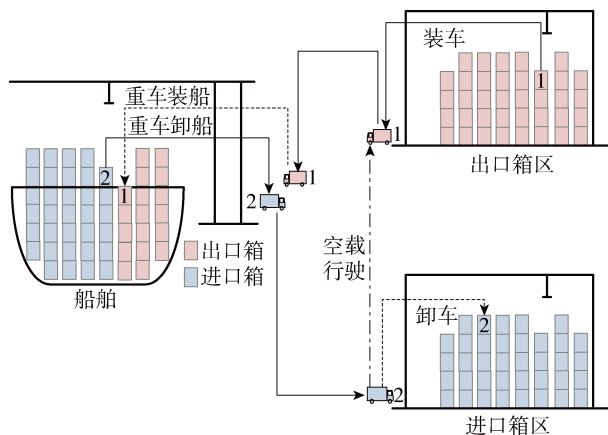


图1 岸桥同贝同步作业下集卡岸桥联合调度示意图

Fig. 1 Integration of quay cranes and trucks with double cycling

本文基于岸桥同贝同步装卸作业, 为了缩短船舶在港时间, 提高装卸船作业效率, 不考虑堆场龙门吊作业, 建立岸桥与集卡联合调度优化模型, 优化岸桥及集卡的任务分配及作业序列.

## 1.2 建立模型

在同贝同步装卸作业下, 以装卸船作业的完工时间最短为目标, 建立岸桥与集卡联合调度模型, 优化岸桥及集卡的任务分配及作业序列. 该模型假设如下:

- (1) 只考虑 20 英尺集装箱;
- (2) 假设堆场作业资源充足, 不考虑堆场龙门吊作业时间;
- (3) 由于同贝同步装卸, 所以岸桥的作业时间为装一个出口箱和卸一个进口箱的时间;
- (4) 不考虑船舶配积载对出口箱装船顺序的影响;
- (5) 不考虑船舶稳定性对岸桥同贝同步装卸的影响.

模型的变量定义:  $Q$  为岸桥集合;  $B$  为贝位的集合;  $H$  为集卡的集合;  $E$  为出口集装箱的集合;  $I$  为进口集装箱的集合;  $M$  为足够大的常数;  $O$  为虚拟的起始任务;  $F$  为虚拟的终止任务;  $b_i$  为第  $i$  个贝的集装箱的集合;  $d_i^l$  为第  $i$  个进口集装箱由岸桥从船上卸下所需时间;  $d_i^s$  为第  $i$  个进口集装箱水平运送时间;  $d_i^u$  为第  $i$  个出口集装箱水平运送时间;  $s_{ij}$  为集卡从第  $i$  个进口箱位置到第  $j$  个出口箱在堆场的位置的

运行时间.

决策变量的定义:  $t_i^l$  为第  $i$  个进口集装箱从船上卸下完成时间;  $t_i^s$  为第  $i$  个进口集装箱运送至堆场的完成时间;  $t_i^u$  为第  $i$  个出口集装箱运送至岸边的完成时间;  $T_i$  为第  $i$  个贝的作业开始时间;  $C_i$  为第  $i$  个贝的作业完成时间;  $X_{ijk}$  为第  $i$  个进口集装箱在第  $j$  个进口集装箱紧前由第  $k$  个岸桥作业时则为 1, 否则为 0;  $x_{ik}$  为第  $i$  个进口集装箱由第  $k$  个岸桥作业时则为 1, 否则为 0;  $Y_{ij}$  为第  $j$  个贝的开始时间不晚于  $i$  个贝的结束时间时则为 1, 否则为 0;  $y_{ik}$  为第  $i$  个贝由第  $k$  个岸桥作业时则为 1, 否则为 0;  $z_{ik}$  为第  $i$  个进口集装箱由第  $k$  个集卡运输时则为 1, 否则为 0;  $Z_{ijk}$  为第  $i$  个进口集装箱在第  $j$  个进口集装箱紧前由第  $k$  个集卡运输时则为 1, 否则为 0;  $P_{ijk}$  为第  $j$  个出口集装箱在第  $i$  个进口集装箱紧后由第  $k$  个集卡运输时则为 1, 否则为 0;  $p_{ik}$  为第  $i$  个出口集装箱由第  $k$  个集卡运输时则为 1, 否则为 0;  $T$  为作业完成时间.

本文模型为

$$\min T \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in Q} y_{ij} = 1, \quad i \in B \quad (2)$$

$$C_i - T_j + Y_{ij}M > 0, \quad i, j \in B \quad (3)$$

$$C_i - T_j - (1 - Y_{ij})M \leq 0, \quad i, j \in B \quad (4)$$

$$M(Y_{ij} + Y_{ji}) \geq \sum_{k \in Q} ky_{ik} - \sum_{q \in Q} qy_{jq} + 1 \quad (5)$$

$$i < j \in B$$

$$t_i^l \geq T_j + d_i^l, \quad i \in b_j, j \in B \quad (6)$$

$$C_j \geq t_i^l, \quad j \in B, i \in b_j \quad (7)$$

$$\sum_{j \in I \cup F} X_{Ojk} = 1, \quad k \in Q \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I \cup O} X_{iFk} = 1, \quad k \in Q \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I \cup O, i \neq j} X_{ijk} = \sum_{i \in I \cup F, i \neq j} X_{jik} \quad (10)$$

$$j \in I, k \in Q$$

$$t_i^l - d_i^l \geq M(X_{Okk} - 1), \quad i \in I, k \in Q \quad (11)$$

$$\sum_k x_{ik} = 1, \quad i \in I \quad (12)$$

$$x_{ik} = \sum_{j \in I \cup O, j \neq i} X_{jik}, \quad i \in I, k \in Q \quad (13)$$

$$t_j^l + M(1 - X_{ijk}) \geq t_i^l + d_j^l \quad (14)$$

$$i, j \in I, k \in Q$$

$$x_{ik} = y_{jk}, \quad i \in b_j, k \in Q, j \in B \quad (15)$$

$$\sum_{j \in I \cup F} Z_{Ojk} = 1, \quad k \in H \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I \cup O} Z_{iFk} = 1, \quad k \in H \quad (17)$$

$$\sum_{i \in I \cup O, i \neq j} Z_{ijk} = \sum_{i \in I \cup F, i \neq j} Z_{jik} \quad (18)$$

$$j \in I, k \in H$$

$$t_i^s - d_i^s \geq M(Z_{Ok} - 1) \quad (19)$$

$$i \in I, k \in H$$

$$\sum_k z_{ik} = 1, \quad i \in I \quad (20)$$

$$z_{ik} = \sum_{j \in I \cup O, j \neq i} Z_{jik}, \quad i \in I, k \in H \quad (21)$$

$$t_i^s \geq t_i^l + d_i^s, \quad i \in I \quad (22)$$

$$t_j^s + M(1 - Z_{ijk}) \geq t_i^s + d_j^s + \sum_{m \in E, n \in H} P_{imn} (d_m^u + s_{nm}) \quad (23)$$

$$i, j \in I, k \in H$$

$$t_j^u \geq M(P_{ijk} - 1) + t_i^s + d_j^u + s_{ij} \quad (24)$$

$$i \in I, j \in E, k \in H$$

$$\sum_{j \in E} P_{ijk} = z_{ik}, \quad i \in I, k \in H \quad (25)$$

$$\sum_{i \in I} P_{ijk} = p_{jk}, \quad j \in E, k \in H \quad (26)$$

$$T \geq t_i^u, \quad i \in E \quad (27)$$

$$X_{ijk}, x_{ij}, Y_{ijk}, y_{ij}, Z_{ijk}, z_{ij}, P_{ijk}, p_{ij} \in \{0, 1\} \quad (28)$$

式(1)为目标函数,作业完成时间最短;式(2)表示每个贝只能由一个岸桥作业;式(3)和(4)表示任意2个贝作业时间关系;式(5)表示岸桥作业的安全距离约束;式(6)表示任意贝中任意进口集装箱的卸船开始时间晚于所在贝的卸船开始时间;式(7)表示任意贝的卸船完成时间要晚于贝中任意进口集装箱的卸船完成时间;式(8)和(9)表示每个岸桥都有一个起始任务和一个终止任务;式(10)表示任何一个集装箱卸船都有一个前序任务和后序任务;式(11)约束了第1个集装箱卸船任务的完成时间;式(12)表示每个集装箱只能由1个岸桥作业;式(13)表示如果进口集装箱*i*由岸桥*k*作业,则一定有一个紧前任务由*k*作业;式(14)表示由同一个岸桥作业的前后2个集装箱卸船完成时间的关系;式(15)表示岸桥作业的集装箱与岸桥作业的贝的关系;式(16)和(17)表示每个集卡都有一个起始任务和一个终止任务;式(18)表示每一个进口集装箱水平运输都有一个前序任务和后序任务;式(19)约束了第1个进口集装箱水平运输的完成时间;式(20)表示每个进口集装箱只能由一个集卡运输;式(21)表示如果进口集装箱*i*由集卡*k*运输,则一定有一个紧前任务由*k*作业;式(22)表示任何一个进口集装箱运送至堆场的完成时间与岸边卸船完成时间的关系;式(23)表示由同一集卡前后运输的2个进口集装箱至堆场的完成时间的关系;式(24)表示由同一辆集卡先后运输的出口箱运送至岸边的完成时间与进口箱运送至堆场的完成时间关系;式(25)表示如果进口集装箱*i*由集卡*k*运输,则一定有一个出口集装箱在*i*后

由集卡*k*运输;式(26)表示如果出口集装箱*j*由集卡*k*运输,则一定有一个进口集装箱在*j*前由集卡*k*运输;式(27)表示装卸任务的完成时间晚于任何一个出口集装箱运送至岸边的时间;式(28)表示变量的取值约束。

## 2 模型下界

本文模型的目标是优化岸桥及集卡任务分配及作业序列,作业过程分为岸桥作业阶段和集卡作业阶段,分别考虑岸桥无等待作业与集卡无等待作业,本文提出2种求解原模型下界值的方法。

### 2.1 下界一

不考虑集卡作业,以最小化最大完工时间对岸桥作业顺序进行优化,则原模型的下界值可以表示为

$$LB1 = T^l + \min\{d_i^s \mid i \in I\} + \min\{d_j^u \mid j \in E\} + \min\{s_{ij} \mid i \in I, j \in E\} \quad (29)$$

式中: $T^l$ 可由以下模型得到,

$$\min T^l \quad (30)$$

$$\text{s. t. } \sum_k y_{ik} = 1, \quad i \in B \quad (31)$$

$$C_i \geq q_i, \quad i \in B \quad (32)$$

$$q_i = \sum_j d_j^l, \quad j \in b_i \quad (33)$$

$$C_i + Y_{ij}M > C_j - q_j, \quad i, j \in B \quad (34)$$

$$C_i - (1 - Y_{ij})M \leq C_j - q_j, \quad i, j \in B \quad (35)$$

$$M(Y_{ij} + Y_{ji}) \geq \sum_{k \in Q} ky_{ik} - \sum_{n \in Q} ny_{jq} + 1 \quad (36)$$

$$i < j \in B$$

$$T^l \geq C_i, \quad i \in B \quad (37)$$

$$y_{ik}, Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad (38)$$

式(30)为目标函数,作业完成时间最短;式(31)为第*i*个进口集装箱被集卡运送到堆场的时间;式(32)表示第*i*个出口集装箱运送到岸边的时间;式(33)表示任意贝中任意进口集装箱的卸船开始时间晚于所在贝的卸船开始时间;式(34)表示任意贝的卸船完成时间要晚于贝中任意进口集装箱的卸船完成时间;式(35)和(36)表示连续由同一个岸桥作业的2个贝的时间关系;式(37)表示岸桥作业时的安全距离约束;式(38)表示变量取值范围约束。

### 2.2 下界二

不考虑岸桥作业及集卡运进出口箱环节,以最小化最大完工时间对集卡运送进口箱任务分配及作业顺序进行优化,则原模型的下界值可以表示为

$$LB2 = T^2 + \min\{d_j^l \mid j \in E\} + \min\{d_j^s \mid j \in E\} + \min\{s_{ij} \mid i \in I, j \in E\} \quad (39)$$

式中:  $T^2$  可由以下模型得到,

$$\min T^2 \quad (40)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in I \cup F} Z_{Ojk} = 1, \quad k \in H \quad (41)$$

$$\sum_{i \in I \cup O} Z_{iFk} = 1, \quad k \in H \quad (42)$$

$$\sum_{i \in I \cup O, i \neq j} Z_{ijk} = \sum_{i \in I \cup F, i \neq j} Z_{jik} \quad (43)$$

$$j \in I, k \in H$$

$$t_i^s - d_i^s \geq M(Z_{Oik} - 1), \quad i \in I, k \in H \quad (44)$$

$$\sum_k z_{ik} = 1, \quad i \in I \quad (45)$$

$$z_{ik} = \sum_{j \in I \cup O, j \neq i} Z_{jik}, \quad i \in I, k \in H \quad (46)$$

$$t_j^s + M(1 - Z_{ijk}) \geq t_i^s + d_j^s \quad (47)$$

$$i \in I, k \in H$$

$$z_{ik}, Z_{ij} \in \{0, 1\} \quad (48)$$

式(40)为目标函数,最小化集卡的完工时间;式(41)和(42)表示每个集卡都有一个起始任务和一个终止任务;式(43)表示每一个进口集装箱水平运输都有一个前序任务和后序任务;式(44)表示约束了第 1 个进口集装箱水平运输的完成时间;式(45)表示每个进口集装箱只能由一个集卡运输;式(46)表示如果进口集装箱  $i$  由集卡  $k$  运输,则一定有一个紧前任务由  $k$  作业;式(47)表示由同一集卡前后运输的 2 个进口集装箱至堆场的完成时间的关系;式(48)表示变量取值范围约束。

### 3 算法设计与算例分析

#### 3.1 算法设计

本文解决岸桥同贝同步装卸作业模式下岸桥与集卡的联合调度问题,通过优化岸桥与集卡的任务分配及作业序列,最小化装卸船作业的完工时间.本文模型比传统作业模式下岸桥与集卡的调度问题更复杂,集卡作业不仅增加了一个环节,并且作业对象发生变化,混合流水车间调度问题的求解方法不能求解本文模型.因此,本文设计基于启发式算法进行求解。

随机产生岸桥的作业顺序及由同一辆集卡在一个作业循环中运送的出口箱与进口箱匹配方案,针对每一个方案,利用启发式规则为岸桥分配运送每一个进口集装箱的集卡,最后利用模拟退火遗传算法对整个种群进化.遗传算法利用生物进化的思想,采取优胜劣汰的准则,对每一代染色体采取变异措施,根据适应度函数选择适应度较高的个体遗传到下一代,从而逐渐找到最优解.遗传算法是一种快速寻找问题近似最优解的算法之一,但是在后期的

进化中,容易过早收敛,陷入局部最优解.模拟退火算法由 Kirkpatrick 等<sup>[13]</sup>提出,是一种基于固体退火过程的随机寻找最优解的算法,其利用 Metropolis 准则,以一定概率对当前个体进行变异,从而跳出局部最优解.本文利用遗传模拟退火算法求解岸桥集卡联合调度模型,在遗传算法中引入模拟退火 Metropolis 准则,增强了算法的全局搜索能力,避免陷入局部最优解,并且加快了算法的收敛速度.算法的流程框架如图 2 所示。

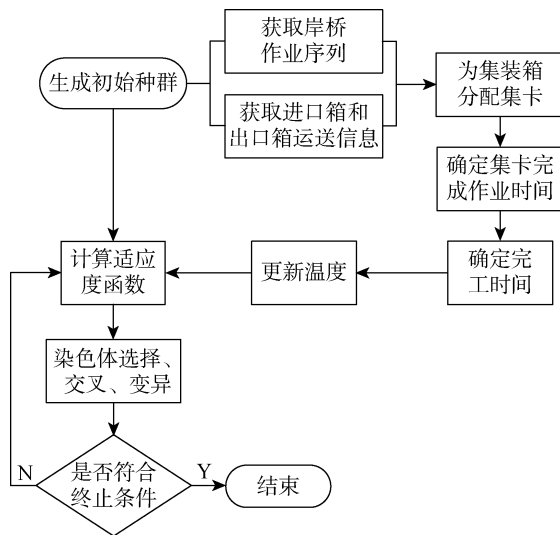


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow diagram of the designed algorithm

**3.1.1 产生初始种群** 每个染色体包含 2 部分信息:第 1 部分是岸桥任务分配及作业序列,以船舶贝位号表示;第 2 部分是为每一个进口集装箱分配由同一辆集卡运输的出口集装箱.首先为卸船的所有进口集装箱依次进行编号,编号从 01 贝位开始,按照由上到下,海侧到陆侧的顺序,03 贝位的集装箱与 01 贝位集装箱编号连续,以此类推,因此,船舶每一个进口集装箱编号不同.同理,按照出口集装箱在堆场的堆存位置,为每一个出口集装箱依次编号,编号各不相同且惟一.染色体的表示方法如图 3 所示,每个岸桥的任务之间用 0 隔开.图 3 中染色体的前 3 个数字表示岸桥 1 按照 2-3-1 的贝位顺序进行作业,0 之后的数字表示第 2 个岸桥作业的贝位顺序为 4-6-5-7,9-8 表示岸桥 3 的作业贝顺序.第 2 部分编码中,与 1 号进口箱由同一辆集卡在一个作业循环中运输的是 20 号出口集装箱,与 2 号进口箱由同一辆集卡在一个作业循环中运输的是 6 号出口集装箱,以此类推。

**3.1.2 染色体选择、交叉、变异** 染色体选择:首先

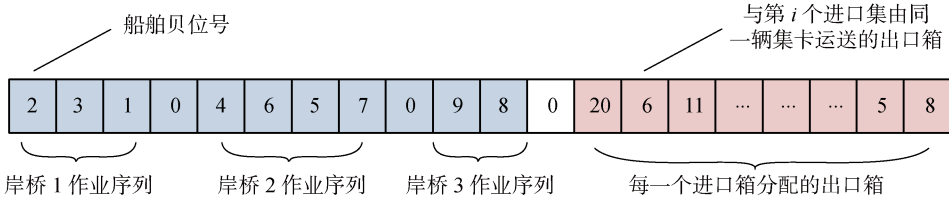


图3 染色体编码

Fig. 3 Code of chromosome

采用轮盘赌的方式选择染色体,计算每个染色体的适应度函数值累积概率,记为  $P_i$ . 任意产生  $(0,1)$  之间的随机数  $a$ ,找出满足条件  $P_i < a < P_{i+1}$  的个体  $i$ ,遗传到下一代种群中.

染色体交叉:首先产生随机数  $b$ ,若  $b$  小于交叉率,则进行染色体交叉. 设船舶共有  $B$  个贝位,  $Q$  个岸桥,进口集装箱数与出口集装箱数量相等且为  $E$ ,则随机产生 2 个整数  $c$  和  $d$ ,满足  $c \in (1, B+Q-1)$ ,  $c \in (B+Q+1, B+Q+E+1)$ ,  $c$  和  $d$  为染色体的 2 个交叉点分别处于岸桥作业序列和进出口集装箱组合信息中,将 2 个父代交叉点之后的基因进行交叉,并且满足染色体的可行性.

染色体变异:首先产生随机数  $e$ ,若  $e$  小于变异率,则进行染色体变异. 设船舶共有  $B$  个贝位,  $Q$  个岸桥,进口集装箱数与出口集装箱数量相等且为  $E$ ,则随机产生 4 个整数  $e, f, g$  和  $h$ ,满足  $e, f \in (1, B+Q-1)$ ,  $g, h \in (B+Q+1, B+Q+E+1)$ ,  $e, f, g$  和  $h$  为染色体的 4 个变异点,分别处于岸桥作业序列和进出口集装箱组合信息中,将父代个体中  $e$  和  $f$  两点的基因互换,  $g$  和  $h$  两点的基因互换,产生新的子代个体.

**3.1.3 计算适应度函数** 染色体的适应度值利用模拟退火算法的适应度值表示方法表示,该方法结合了模拟退火算法的优点,防止快速收敛而陷入局部最优解. 具体表示方法:

$$f_i(t_k) = \exp\left(-\frac{f(i) - f_{\min}}{t_k}\right) \quad (49)$$

式中:  $f_i(t_k)$  为第  $i$  个染色体在温度为  $t_k$  时的适应度值;  $t_k$  为第  $k$  代种群的温度,由温度下降函数确定;  $f(i)$  为第  $i$  个染色体的目标函数值;  $f_{\min}$  为第  $k$  代种群中最小的目标函数值.

染色体进化过程的温度下降函数表示为

$$t_k = T_0 \alpha^k \quad (50)$$

式中:  $T_0$  为初始温度;  $\alpha$  为温度下降速率.

计算目标函数值  $f(i)$  的具体步骤如下:

(1) 以  $a_i$  表示第  $i$  个进口集装箱从岸边到堆场

的运送时间为已知量,以  $m_{i,j}$  表示从进口集装箱  $i$  所在堆场位置到出口集装箱  $j$  所在堆场位置的集卡走行时间为已知量,  $b_i$  表示第  $i$  个出口集装箱从岸边到堆场的运送时间为已知量,根据染色体中信息,初始化运送第  $i$  个进口集装箱的集卡返回岸边的时间  $a'_i$ ,则  $a'_i = a_i + m_{i,j} + b_j$ .

(2) 根据染色体的信息,初始化岸桥  $i$  作业集装箱的集合  $S_i$ . 以图 3 染色体为例,  $S_1 = 2, 3, 1$ ;  $S_2 = 4, 6, 5, 7$ ;  $S_3 = 9, 8$ .

(3) 以  $q_k^i$  表示第  $k$  个岸桥作业的第  $i$  个集装箱的完成时间,以  $p_k^i$  表示第  $k$  个岸桥作业的第  $i$  个集装箱所需的时间,以  $\Lambda = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$  表示所有岸桥当前作业完成时间集合.  $q_k^i = p_k^i + q_k^{i-1}$ ,  $c_k = q_k^i$ .

(4) 以  $\Omega = \{n_1, n_2, \dots, n_j\}$  表示第  $j$  辆集卡的当前可用时间,令  $n_k = 0$ .

(5) 以先到先服务 (FCFS) 的规则为进口集装箱分配集卡,从  $\Lambda = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$  找到最小的  $c_k$ ,即为岸桥  $k$  作业的第  $i$  个集装箱分配集卡,分配时从  $\Omega = \{n_1, n_2, \dots, n_j\}$  中选择最小的  $n_j$ ,即集卡  $j$ . 若此时  $c_k > n_j$ ,则  $n_j = c_k + a'_i$  ( $a'_i$  由步骤 (2) 得到),  $i = i+1$ ,  $c_k = q_k^{i+1}$  ( $q_k^{i+1}$  表示岸桥  $k$  的下一个作业的集装箱的作业时间),更新集合  $\Omega$  和  $\Lambda$ ; 若  $c_k < n_j$ ,则  $i = i+1$ ,  $c_k = n_j + q_k^{i+1}$ ,  $n_j = n_j + a'_i$ ,更新集合  $\Omega$  和  $\Lambda$ . 若集合  $\Omega$  中有相等的元素,则从标号较小集卡的开始分配集装箱,同理集合  $\Lambda$ ,从标号较小的岸桥为其分配集卡.

(6) 重复步骤 (5),直至岸桥、集卡完成所有任务. 记录此时  $\Omega$  中的最大值,令  $T^{\text{time}} = \max\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ ,  $T^{\text{time}}$  为任务作业完成时间,即该染色体的目标函数值.

### 3.2 算例分析

为了验证同贝同步装卸作业效率及算法的有效性,选取某船舶的装卸数据进行分析,岸桥同贝同步装卸作业一个进口箱和一个出口箱需要 170 s,集卡水平运输的速度为 30 km/h. 进口集装箱在堆场的位置随机分配,出口集装箱的装船位置随机产生.

算法初始种群的数量设为 300 个,种群进化代数  
为 200 代,交叉率为 0.7,变异率为 0.05,初始温度  $T$   
设为 8 000 ℃,温度下降速率  $\alpha$  设为 0.9,当最优目  
标函数值连续 6 代不发生变化后,将温度重新设置  
为 4 000 ℃.

(1) 算法有效性验证.

选取 12 个不同规模的小算例对本文的模型及  
算法进行验证,每个算例用启发式算法运行 10 次得  
到平均值,并与 Cplex 12.61 求得结果进行对比.  
GAP 值的计算方法为

$$\text{GAP} = \frac{\text{启发式算法近似最优值} - \text{Cplex 最优值}}{\text{Cplex 最优值}}$$

表 1 的计算结果表明,随着问题规模的变大,  
Cplex 求解时间明显增加,算例 11 和算例 12 不能  
在 3 h 内求得最优解. 本文设计的启发式算法的求  
解时间小于 Cplex 求解时间,且随着问题规模的增  
加,求解速度优势越来越明显. 启发式算法求得的近  
似最优解与 Cplex 求得的最优解平均 Gap 值为  
7.36%,表明本文设计的启发式算法求得的解的质  
量可以在接受的范围,并且求解速度快.

由表 1 可知,当集装箱数量( $N_1$ )大于 30,集卡  
数量( $N_3$ )大于 12,岸桥数量( $N_2$ )大于 3 时,Cplex  
求解时间大于 2 h. 因此,为了进一步分析启发式算  
法及本文提出的 2 个计算下界值的方法,现选取 12  
个大规模算例进行分析,参照表 1 算例规模,逐渐增  
加集装箱、岸桥、集卡数量,利用启发式算法对每个  
算例进行求解,运行 10 次得到平均值,并得到每个算例

的 LB1 和 LB2. GAP1 和 GAP2 的计算方法分别为

$$\text{GAP1} = \frac{\text{启发式算法近似最优值} - \text{LB1}}{\text{启发式算法近似最优值}}$$

$$\text{GAP2} = \frac{\text{启发式算法近似最优值} - \text{LB2}}{\text{启发式算法近似最优值}}$$

表 2 的计算结果表明,本文设计的启发式算法  
能够在有效时间内求解大规模问题,与模型的 2 个  
下界值相比,GAP1 的平均值为 17.42%,GAP2 的  
平均值为 4.6%.

(2) 下界值分析.

为了分析本文模型的 2 个下界值,选取 12 个不  
同规模的算例进行分析,将求得结果与 Cplex 最优  
值及启发式算法近似最优值进行对比. GAP1、  
GAP2、GAP3 和 GAP4 的计算方法分别为

$$\text{GAP1} = \frac{\text{启发式算法近似最优值} - \text{LB1}}{\text{启发式算法近似最优值}}$$

$$\text{GAP2} = \frac{\text{启发式算法近似最优值} - \text{LB2}}{\text{启发式算法近似最优值}}$$

$$\text{GAP3} = \frac{\text{Cplex 最优值} - \text{LB1}}{\text{Cplex 最优值}}$$

$$\text{GAP4} = \frac{\text{Cplex 最优值} - \text{LB2}}{\text{Cplex 最优值}}$$

表 3 的计算结果表明,LB1 和 LB2 为 2 个求解  
本文模型下界值的方法,由于求解方法不同,导致下  
界值有差距. 当集卡数量逐渐增多,而岸桥数量不变  
时,说明集卡数量越来越充足,则岸桥作业时等待集  
卡的作业时间降低. 因此,LB2 更接近最优值.

表 1 小规模算例计算结果

Tab. 1 Computation results of small scale problems

算例	问题规模 ( $N_1 \times N_2 \times N_3$ )	Cplex		启发式算法		GAP/%
		最优值/min	求解时间/s	近似最优值/min	求解时间/s	
1	15×2×6	42	1 643	46	0.46	9.52
2	20×2×6	54	2 302	59	0.46	9.26
3	25×2×6	68	3 028	74	0.47	8.82
4	15×2×8	37	1 685	39	0.52	5.41
5	20×2×8	49	2 396	51	0.53	4.08
6	25×2×8	62	3 297	66	0.55	6.45
7	30×3×10	69	7 816	73	0.81	5.80
8	30×3×12	57	7 924	61	0.89	7.02
9	40×3×10	76	7 895	82	0.93	7.89
10	40×3×12	64	8 017	70	0.98	9.38
11	45×4×12	—	—	88	1.21	—
12	60×4×12	—	—	105	1.43	—



表 2 大规模算例计算结果

Tab. 2 Computation results with large scale problems

算例编号	问题规模 ( $N_1 \times N_2 \times N_3$ )	启发式算法		LB1/min	LB2/min	GAP1/%	GAP2/%
		近似最优值/min	求解时间/s				
1	40×3×12	70	0.98	62	68	11.43	2.86
2	80×3×12	153	1.69	125	149	18.30	2.61
3	150×3×13	239	3.47	193	234	19.25	2.09
4	120×4×13	195	3.53	157	184	19.49	5.64
5	180×4×13	292	4.25	218	273	25.34	6.51
6	260×4×13	397	5.37	329	369	17.13	7.05
7	340×4×14	426	6.81	348	394	18.31	7.51
8	420×4×14	519	8.34	395	482	23.89	7.13
9	500×4×15	508	9.58	434	471	14.57	7.28
10	600×4×16	624	11.35	542	607	13.14	2.72
11	700×4×17	703	13.97	597	689	15.08	1.99
12	800×4×18	827	16.82	719	812	13.06	1.81

表 3 模型的下界值分析

Tab. 3 Lower bound of the model

算例 编号	问题规模 ( $N_1 \times N_2 \times N_3$ )	LB1/min	LB2/min	Cplex 最优值/ min	启发式算法 最优值/min	GAP1/%	GAP2/%	GAP3/%	GAP4/%
1	10×2×4	45	46	49	54	16.67	14.81	8.16	6.12
2	10×2×5	36	38	40	45	20.00	15.56	10.00	5.00
3	10×2×6	31	34	36	41	24.39	17.07	13.89	5.56
4	15×2×4	62	64	68	75	17.33	14.67	8.82	5.88
5	15×2×5	49	51	54	60	18.33	15.00	9.26	5.56
6	15×2×6	37	40	42	46	19.57	13.04	11.90	4.76
7	20×3×8	48	50	53	58	17.24	13.79	9.43	5.66
8	20×3×9	40	43	46	51	21.57	15.69	13.04	6.52
9	20×3×10	35	37	39	44	20.45	15.91	10.26	5.13
10	25×3×8	53	56	59	65	18.46	13.85	10.17	5.08
11	25×3×9	46	49	52	58	20.69	15.52	11.54	5.77
12	25×3×10	45	48	50	56	19.64	14.29	10.00	4.00

4 结语

集装箱在码头内部的流转经过多个作业环节,如岸桥作业、集卡作业等,各环节作业互相联系、互相影响,并最终影响码头作业效率.针对码头岸桥同贝同步装卸工艺,为了提高码头内部集装箱多环节作业的协调性,保证岸桥同贝同步装卸作业效率,减少岸桥及集卡的等待时间,本文建立了岸桥与集卡联合调度优化模型,优化岸桥与集卡任务分配及作业序列.为了提高模型的求解效率,设计启发式算法

进行求解,并利用船舶装卸算例进行分析.结果表明,本文建立的岸桥与集卡联合调度模型能有效提高岸桥同贝同步装卸作业效率,与 Cplex 求解结果及下界值对比,本文提出的启发式算法能有效提高本文模型的求解速度.

本文的研究成果有助于同贝同步装卸作业中多环节的协调调度,为提高岸桥同贝同步装卸作业效率提供了新思路.集装箱在码头内部的流转还与堆场作业有关,堆场龙门吊的收箱及发箱速度影响集卡在码头内部的周转时间.因此,为了进一步提高码



头内部作业效率,岸桥、集卡、堆场龙门吊的多环节联合调度是值得进一步研究的问题。

## 参考文献:

- [1] 王嘉民, 何琪敏, 李晓鸣. 边装边卸流程的系统开发[J]. 港口装卸, 2006(3): 1-4.  
WANG Jiamin, HE Qimin, LI Xiaoming. System development for dual cycle both loading and unloading process[J]. **Port Operation**, 2006(3): 1-4.
- [2] 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): 473-483.
- [3] 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): 979-992.
- [4] LEE C Y, LIU M, CHU C C. Optimal algorithm for the general quay crane double-cycling problem[J]. **Transportation Science**, 2014, 49(4): 957-967.
- [5] 曾庆成, 杨忠振, 陆靖. 集装箱码头同贝同步装卸调度模型与算法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1): 88-93.  
ZENG Qingcheng, YANG Zhongzhen, LU Jing. Scheduling model and algorithm of integrating loading and unloading operations in same ship-bay at container terminal[J]. **Journal of Traffic & Transportation Engineering**, 2010, 10(1): 88-93.
- [6] CHEN L, BOSTEL N, DEJAX P, *et al.* A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal[J]. **European Journal of Operational Research**, 2007, 181(1): 40-58.
- [7] ZENG Q, YANG Z. Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals[J]. **Computers & Operations Research**, 2009, 36(6): 1935-1944.
- [8] AGRA A, OLIVEIRA M. MIP approaches for the integrated berth allocation and quay crane assignment and scheduling problem[J]. **European Journal of Operational Research**, 2017, 264(1): 138-148.
- [9] SHANG X T, CAO J X, REN J. A robust optimization approach to the integrated berth allocation and quay crane assignment problem[J]. **Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review**, 2016, 94: 44-65.
- [10] TANG L, ZHAO J, LIU J. Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem [J]. **European Journal of Operational Research**, 2014, 236(3): 978-990.
- [11] 孙彬, 孙俊清, 陈秋双. 基于鲁棒反应式策略的泊位和岸桥联合调度[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(4): 1076-1083.  
SUN Bin, SUN Junqing, CHEN Qiushuang. Integrated scheduling for berth and quay cranes based on robust and reactive policy[J]. **Systems Engineering Theory & Practice**, 2013, 33(4): 1076-1083.
- [12] 郑红星, 尹昊, 曹红雷, 等. 考虑潮汐影响的离散型泊位和岸桥集成调度[J]. 运筹与管理, 2017, 26(6): 167-175.  
ZHENG Hongxing, YIN Hao, CAO Honglei, *et al.* Integrated discrete berth allocation and quay crane scheduling under tidal influence at container terminal [J]. **Operations Research and Management Science**, 2017, 26(6): 167-175.
- [13] KIRKPATRICK S, GELATT C D, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing [J]. **Science**, 1983, 220(4598): 671-680.