

文章编号: 0258-2724(2019)04-0840-08

DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20170924

# 集装箱码头泊位-堆场-闸口的周期协同分配

韩笑乐, 鞠留红, 栾晨, 陆志强

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 为提高集装箱进出口码头在周期性环境下的作业效率, 对集装箱码头泊位-堆场-闸口的周期协同分配问题进行了研究. 首先考虑泊位、堆场、闸口3类资源对船分配过程中的可用量约束、相关性约束和周期性约束, 以最小化船舶总在港时间为目标函数, 建立集成调度的混合整数规划模型; 在此基础上设计自适应遗传算法进行求解, 其上层对船舶优先级构成的编码空间展开进化搜索, 下层利用启发式将优先级解码为多资源协同分配计划, 并将其评价值返回至上层迭代. 数值实验显示, 协同考虑泊位、堆场和闸口3类资源的集成调度, 相较于传统的两阶段调度, 周期计划下的船舶总在港时间缩短约20%.

**关键词:** 集装箱码头; 资源分配; 周期性; 闸口; 遗传算法

**中图分类号:** U69; O221; TP29 **文献标志码:** A

## Periodic and Collaborative Allocation of Berth-Yard-Gate Resources at Container Terminals

HAN Xiaole, JU Liuhong, LUAN Chen, LU Zhiqiang

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of import/export container terminals in periodic environment, the periodical and collaborative allocation problem of key resources at container terminals, including berth, yard and gate is investigated. A mixed-integer linear programming model is first established for the integrated scheduling of three types of resources. This model takes into account the capacity restrictions, inter-relationships and periodicity requirements, and sets the objective of minimizing total dwelling time of all vessels. Furthermore, an adaptive genetic algorithm is proposed to find a solution. As for the algorithm, the upper level performs evolutionary search within the space consisting the encoded vessel priority lists, while the lower level decodes each vessel priority to generate a complete resource allocation plan by heuristics, and returns its evaluation for upper level iteration. Numerical experiments show that with the collaborative allocation of berth-yard-gate resources, the dwelling time of vessels in the execution of periodic plan is shortened by 20% comparing to traditional two-stage method.

**Key words:** container terminal; resource allocation; periodicity; gate; genetic algorithm

集装箱码头的运营管理效率和服务水平取决于其对海侧、堆场和陆侧等核心资源的协同分配能力. 一方面, 我国的集装箱码头以进出口业务为主, 相较于以海侧作业为主的香港、新加坡等中转港, 还需要

考虑陆侧作业, 即进/出口集装箱经闸口的出/进堆场. 闸口与海侧及堆场资源相互关联制约, 需要在三者之间进行集成的计划与调度决策. 另一方面, 船公司客户在航线设置时通常采用班轮形式, 从而使码

收稿日期: 2017-12-21 修回日期: 2018-04-17 网络首发日期: 2018-07-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71502129, 61473211)

作者简介: 韩笑乐(1983—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为集装箱码头运营优化, E-mail: hanxiaole@tongji.edu.cn

通信作者: 陆志强(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为物流与供应链管理建模与优化、生产工程, E-mail: zhiqianglu@tongji.edu.cn

引文格式: 韩笑乐, 鞠留红, 栾晨, 等. 集装箱码头泊位-堆场-闸口的周期协同分配[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4): 840-847.

HAN Xiaole, JU Liuhong, LUAN Chen, et al. Periodic and collaborative allocation of berth-yard-gate resources at container terminals[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(4): 840-847.

头运作决策呈现周期性特征.因此,对于集装箱进出口码头,在周期性环境下综合考虑自身和船公司及集装箱客户的利益诉求,将多类核心资源合理分配,成为其亟待解决的问题.

在现有集装箱码头资源分配决策相关研究中,大部分针对海侧、堆场和闸口中的一类或两类进行研究,即认为其它资源能力无限.对于单类资源的研究,文献[1]在集装箱码头中研究了泊位调度问题,以最小化总在港时间为目标,用遗传算法进行求解;文献[2]考虑岸桥不可穿越和安全距离约束,建立面向多艘船舶的集装箱码头岸桥统一调度和卸船任务分配问题的混合整数规划模型,并进行求解;文献[3-4]分别研究了确定性以及周期性环境下堆场资源的分配问题,同时考虑了出口箱的预存期问题;文献[5-6]研究了集装箱码头中外部集卡的时间窗预约问题,优化各个时间段内接受预约的卡车数量,以减少拥堵即高峰段卡车数量.对于两类资源集成的研究,一方面,针对泊位和堆场的集成调度,文献[7-8]在确定性环境下研究该问题,分别用模拟退火算法和选择式启发式算法进行求解;文献[9]在堆场中以最小化堆场重处理为目标,在周期性环境下研究泊位和堆场的资源分配问题;文献[10]考虑了堆场的拥堵,以搬运成本和离泊延迟成本最小化为目标,通过延长计划周期,将其转换为平面上的矩形排列问题,并用两阶段算法进行求解;文献[11-12]分别用班德分解算法和列生成算法来求解泊位和堆场的集成调度问题.另一方面,针对闸口和堆场的集成调度,文献[13-14]考虑闸口外的拥堵情况和能源消耗问题,用遗传算法和模拟退火算法等进行求解.而对于3类资源集成的研究则较少,且尚未考虑周期性要求.如文献[15-17]用面向对象的仿真方法将泊位、堆场和闸口3类资源结合讨论,且将闸口的出口和入口分开,用仿真模型进行分析.综上,本文研究3类资源协同化周期性调度,为码头有效运营提供集成化的决策支持.

## 1 问题描述

区别于现有文献,本文主要研究进出口码头中泊位-堆场-闸口资源的周期协同分配.为描述三者间相关关系,结合实际情况对问题界定如下:船舶方面,已知周期性的到达时间和装卸作业量,且认为单条船舶的装载箱量和卸载箱量相同;泊位方面,考虑为连续型泊位,船舶在满足码头物理约束的任意位置均可停靠;堆场方面,所有船舶均先卸载完所有进口箱后再装载出口箱,装卸载箱的存放位置不在

问题考虑范围,仅要求不超出堆场容量,同时设定船舶装载箱需要在船舶开始作业之前运达堆场,在作业结束时卸载箱开始运离堆场;闸口方面,同一条船舶对闸口呈分摊式占用,而多条船舶对闸口呈累加式占用,出于对问题的抽象简化要求,认为闸口进出方向的处理能力恒定,外部集装箱匀速到达码头且闸口外不存在排队现象.另外,为便于码头管理,设定船舶出口箱在堆场的预存期以及进口箱在堆场的留存期相同.

3类资源间相关关系示例如图1,以 $L_i$ 、 $b_i$ 、 $A_i$ 、 $s_i$ 、 $e_i$ 、 $g_i$ 和 $f_i$ 依次为船舶 $i$ 的船长、靠泊位置、到港时刻、作业开始时刻、作业完成时刻、装载箱堆场预存开始时刻、卸载箱堆场留存结束时刻; $T_L$ 和 $T_D$ 分别为装载箱预存期和卸载箱留存期; $t$ 为离散的时间段编号.以图1中船舶1为例,船舶1在时刻 $A_1$ 到达港口,若各类资源充足,船舶会在该时刻开始作业(即 $s_1$ 等于 $A_1$ ),在 $s_1$ 到 $e_1$ 这段时间内完成进口箱的卸载作业和出口箱的装载作业,为减少船舶对堆场资源的占用,在时刻 $s_1$ 之前的 $T_L$ ,即装载箱预

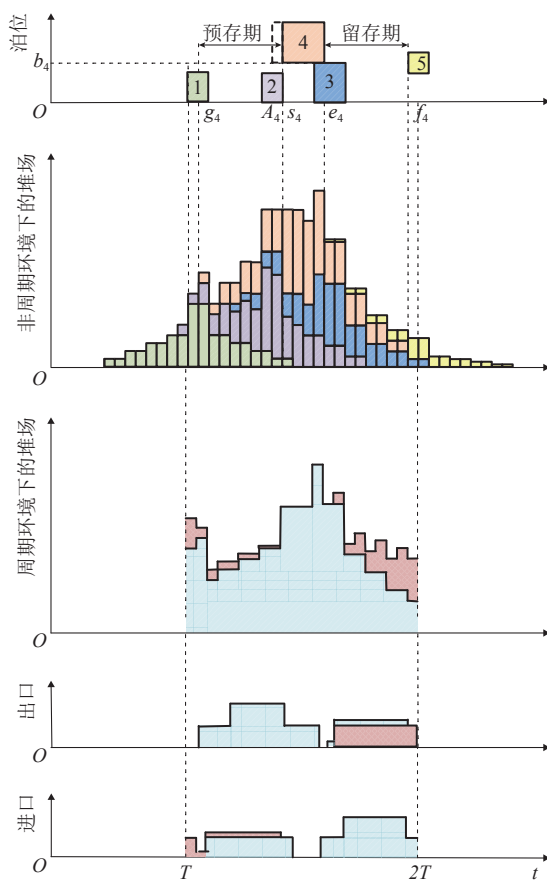


图1 泊位-堆场-闸口资源分配相关关系

Fig. 1 Inter-relationship among berth-yard-gate resource allocations

存期内,船舶出口箱以匀速通过闸口完成进港作业,同时在船舶作业结束时刻  $e_i$  之后的  $T_D$  内,船舶进口箱匀速通过闸口完成离港作业.同时,在调度期间内的所有时刻,任意两条船舶之间不能在泊位上发生时间或空间的冲突;所有船舶对堆场资源占用之和不能大于堆场能力、对闸口进出口方向的资源占用之和也不能大于闸口进出口方向的能力.

除了以上设定的条件之外,船舶的周期性访问也会对实际的调度产生影响.如图1所示,船舶1在时刻  $T$  到达,如若堆场所有资源得到满足,船舶将在到达后立即开始作业,其对应的装载箱则在  $T$  之前的  $T_L$  段内完成进港作业,则必然在上一周期中对闸口形成资源占用;同样,船舶5在下一周期中对闸口、泊位均产生了占用.所以周期性资源分配过程中,需要考虑上一周期的该条船舶对本周期资源的挤占以及该船舶对下一周期资源的预占.

## 2 集成调度模型

定义模型构建中的基础参数及决策变量如下:

符号索引:

$t$  为离散化的时间段编号;

$i$  为船舶编号;

$j$  为连续泊位的区段编号.

输入参数:

$\mathcal{T}_0$  为离散化的时间段集合,  $\mathcal{T}_0 = \{-T+1, \dots, t, \dots, 2T\}$ ;  $T$  为计划周期长度,一般为一周;

$\mathcal{T}_1$  为离散化的时间段集合,  $\mathcal{T}_1 = \{1, \dots, t, \dots, T\}$ ;

$\mathcal{T}_2$  为离散化的时间段集合,  $\mathcal{T}_2 = \{1, \dots, t, \dots, 2T\}$ ;

$\mathcal{V}$  为船舶集合,  $\mathcal{V} = \{1, \dots, i, \dots, V\}$ ;  $V$  为周期  $T_1$  内的到港船舶总数;

$\mathcal{J}$  为泊位区段集合,  $\mathcal{J} = \{1, \dots, j, \dots, J\}$ ;  $J$  为泊位段总数;

$W_i$  为船舶  $i$  的作业时间;

$N_{Li}$  为船舶  $i$  的装载集装箱总量;

$N_{Di}$  为船舶  $i$  的卸载集装箱总量;

$M_{Li}$  为船舶  $i$  的装载集装箱在预存期内各单位时间需占用的闸口进场能力;

$M_{Di}$  为船舶  $i$  的卸载集装箱在留存期内各单位时间需占用的闸口离场能力;

$G_L$  为闸口的进场能力上限;

$G_D$  为闸口的离场能力上限;

$S$  为堆场的容量上限;

$M$  为一个足够大的正数.

决策变量:

$x_{it}$  为 0/1 变量,船舶  $i$  在时段  $t$  在港接受服务取 1, 否则取 0;

$w_{ij}$  为 0/1 变量,船舶  $i$  占用泊位段  $j$  取 1, 否则取 0;

$\alpha_{ijt}$  为 0/1 变量,泊位段  $j$  在时段  $t$  被分配给船舶  $i$  则取 1, 否则取 0;

$y_{Lit}$  为 0/1 变量,船舶  $i$  的装载箱在时段  $t$  在港接受服务则取 1, 否则取 0;

$y_{Dit}$  为 0/1 变量,船舶  $i$  的卸载箱在时段  $t$  在港接受服务则取 1, 否则取 0;

$z_{Lit}$  为 0/1 变量,船舶  $i$  的装载箱在时段  $t$  通过闸口则取 1, 否则取 0;

$z_{Dit}$  为 0/1 变量,船舶  $i$  的卸载箱在时段  $t$  通过闸口则取 1, 否则取 0;

$\delta_{Lit}$  为船舶  $i$  的装载箱在时段  $t$  占用的闸口进场能力;

$\delta_{Dit}$  为船舶  $i$  的卸载箱在时段  $t$  占用的闸口离场能力;

$\theta_t$  为在时段  $t$ ,经闸口进出的装卸载箱对堆场容量的净占用量;

$\gamma_{it}$  为在时段  $t$ ,经海侧进出的船舶  $i$  的装卸载箱对堆场容量的净占用量.

目标函数:

$$\min Z = \sum_{i \in \mathcal{V}} (e_i - A_i + 1), \quad (1)$$

式中:  $Z$  为船舶总在港时间.

约束条件:

$$A_i \leq s_i, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \quad (2)$$

$$s_i \leq tx_{it} + M(1 - x_{it}), \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (3)$$

$$e_i \geq tx_{it}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (4)$$

$$g_i = s_i - T_L, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \quad (5)$$

$$f_i = e_i + T_D, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \quad (6)$$

$$e_i = s_i + W_i - 1, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \quad (7)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}_0} x_{it} = W_i, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \quad (8)$$

$$b_i \leq jw_{ij} + M(1 - w_{ij}), \quad \forall i \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{J}, \quad (9)$$

$$b_i + L_i - 1 \geq jw_{ij}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{J}, \quad (10)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} w_{ij} = L_i, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \quad (11)$$

$$(x_{it} + w_{ij} - 1)/2 \leq \alpha_{ijt} \leq (x_{it} + w_{ij})/2, \quad \forall i \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}_0 \quad (12)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{V}} (\alpha_{ijt} + \alpha_{ij(t+T)}) = 1, \quad \forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}_1, \quad (13)$$

$$g_i \leq ty_{Lit} + M(1 - y_{Lit}), \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (14)$$

$$e_i \geq ty_{Lit}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (15)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}_0} y_{Lit} = W_i + T_L, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \quad (16)$$

$$s_i \leq ty_{Dit} + M(1 - y_{Dit}), \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (17)$$

$$f_i \geq ty_{Dit}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (18)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}_0} y_{Dit} = W_i + T_D, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \quad (19)$$

$$z_{Lit} = y_{Lit} - x_{it}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (20)$$

$$z_{Dit} = y_{Dit} - x_{it}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (21)$$

$$\delta_{Lit} = z_{Lit} M_{Li}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (22)$$

$$\delta_{Dit} = z_{Dit} M_{Di}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (23)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{V}} (\delta_{Li(t-T)} + \delta_{Lit} + \delta_{Li(t+T)}) \leq G_L, \quad \forall t \in \mathcal{T}_1, \quad (24)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{V}} (\delta_{Di(t-T)} + \delta_{Dit} + \delta_{Di(t+T)}) \leq G_D, \quad \forall t \in \mathcal{T}_1, \quad (25)$$

$$\theta_t = \theta_{t-1} + \sum_{i \in \mathcal{V}} (\delta_{Lit} - \delta_{Dit}), \quad \forall t \in \mathcal{T}_0, \quad (26)$$

$$\gamma_{it} = y_{Dit} N_{Di} - z_{Dit} N_{Li}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (27)$$

$$\theta_{t-T} + \theta_t + \theta_{t+T} + \gamma_{i(t-T)} + \gamma_{it} + \gamma_{i(t+T)} \leq S, \quad \forall t \in \mathcal{T}_1, \quad (28)$$

$$\theta_{(-T+1)} = 0, \quad (29)$$

$$s_i, e_i, g_i, f_i \in \mathcal{T}_0, b_i \in \mathcal{J}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \quad (30)$$

$$x_{it}, w_{ij}, y_{Lit}, y_{Dit}, z_{Lit}, z_{Dit}, \alpha_{ijt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}_0, \quad (31)$$

$$\delta_{Lit}, \delta_{Dit}, \gamma_{it}, \theta_t \in \mathbf{R}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}_0. \quad (32)$$

式(2)~(8)定义了  $x_{it}$  与  $s_i$ 、 $e_i$  之间的关系,以及  $s_i$ 、 $e_i$ 、 $g_i$ 、 $f_i$  之间的相关关系. 式(9)~(11)定义了  $b_i$  与  $w_{ij}$  的关系. 式(12)、(13)通过  $\alpha_{ijt}$  表述了周期性情况下各泊位区段的空间能力上限. 式(14)~(19)基于  $s_i$ 、 $e_i$ 、 $g_i$ 、 $f_i$ , 定义了  $y_{Dit}$ 、 $y_{Lit}$ . 式(20)、(21)基于  $y_{Dit}$ 、 $y_{Lit}$  与  $x_{it}$ , 定义了  $z_{Dit}$ 、 $z_{Lit}$ . 式(22)~(25)通过  $\delta_{Lit}$ 、 $\delta_{Dit}$  表述了周期性情况下闸口的进/离场能力上限. 式(26)~(29)通过  $\gamma_{it}$ 、 $\theta_t$  表述了周期性情况下堆场的容量上限, 其中式(26)、(27)分别表示经闸口进出和经海侧进出的装卸载箱在时段  $t$  对堆场容量的净占用量. 式(30)~(32)为各决策变量的定义域.

### 3 搜索算法设计

本文综合考虑了周期性环境下的泊位、堆场和闸口3类资源的协同分配问题, 无法在实际问题规模下使用商用优化软件(如 Cplex)精确求解. 因此

本文设计了遗传算法和启发式构成的双层嵌套算法: 在遗传算法部分随机生成或按照一定规则生成船舶服务优先级序列, 通过内层启发式算法依据上层生成的优先级序列为每一艘船舶安排开始服务时间、停泊位置和离港时间, 形成一套船舶的排班计划, 将排班计划的结果作为决策依据, 为遗传算法的迭代、选择和变异提供依据, 在每一代的遗传迭代中, 寻找目标函数的最小值.

#### 3.1 遗传算法

采用自适应遗传算法, 交叉和变异概率可以依照适应度进行调整, 在编码时采用自然数编码的形式, 编码为一条长度为  $V$  的染色体, 表示船舶的优先级序列号. 在交叉变异以及重启规则方面, 参照了文献[1]中的相应方法.

#### 3.2 启发式算法

启发式算法是根据染色体中的船舶优先级信息, 在满足泊位、堆场和闸口约束的情况下将船舶依次添加到现有的班轮排班计划中, 具体算法流程如图2所示. 假设船舶  $i$  在未调度船舶中优先级最高,  $v$  表示当前正在调度的第  $v$  条船舶, 在对其进行解码时, 假定到达后即可进入初始泊位进行装卸作业, 即  $s_i = A_i$ , 且停靠在编号为 0 的位置. 由此可得相应的离港时间、装/卸载箱在堆场的预存/留存起始时刻和截止时刻, 判断在相应时段内船舶  $i$  所需要占用的泊位是否均为空闲状态, 如任意一段泊位被占用, 都需要在满足空间约束的前提下, 将靠泊起始位置后移, 如果所有的泊位均不能满足泊位要求, 则将开始

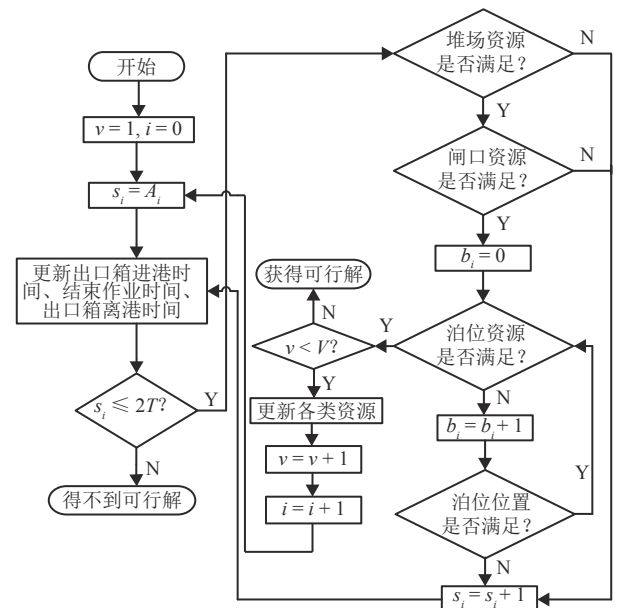


图2 启发式算法流程

Fig. 2 Flow chart of the proposed heuristic algorithm



时间延后,即  $s_i + 1$  进港停泊,以此类推.在满足泊位约束的前提下,判断船舶  $i$  从装载箱开始进港时刻到卸载箱完成离港时刻内,堆场能力是否满足,如果不满足则推迟进港,并判断新的进港时刻泊位能力是否依旧满足.在满足泊位和堆场的前提下,判断船舶  $i$  的装载箱在预存期即  $s_i$  前长度为  $T_L$  的时段,以及卸载箱留存期即  $e_i$  后长度为  $T_D$  的时段内的任意时刻,闸口能力是否满足,如果不满足约束则推迟进港,并判断该进港时刻下泊位和堆场能力是否依旧满足.如果满足,则表明这艘船安排完毕,更新相应的资源.此处需要强调的是,如果船舶对资源的占用

超出当前周期,则需要对上一周期或下一周期内的资源作提前占用.

以图3中船舶4的调度为例,在时刻  $A_4$ ,第1个空闲泊位段在  $b_4$  位置,此时若安排船舶进港,则船舶对堆场的占用情况如图3(a)所示,很明显超出堆场能力,按照图2流程,需要将开始作业时间延后,但此时  $b_4$  开始的泊位段与船舶3发生冲突,需要将靠泊位置向后顺延,到新的  $b_4$  位置(如图3(b)所示),在该位置再次对堆场和闸口的情况加以判断,直至满足所有约束,则完成对船舶4的调度,更新资源后方可进行后续船舶调度.

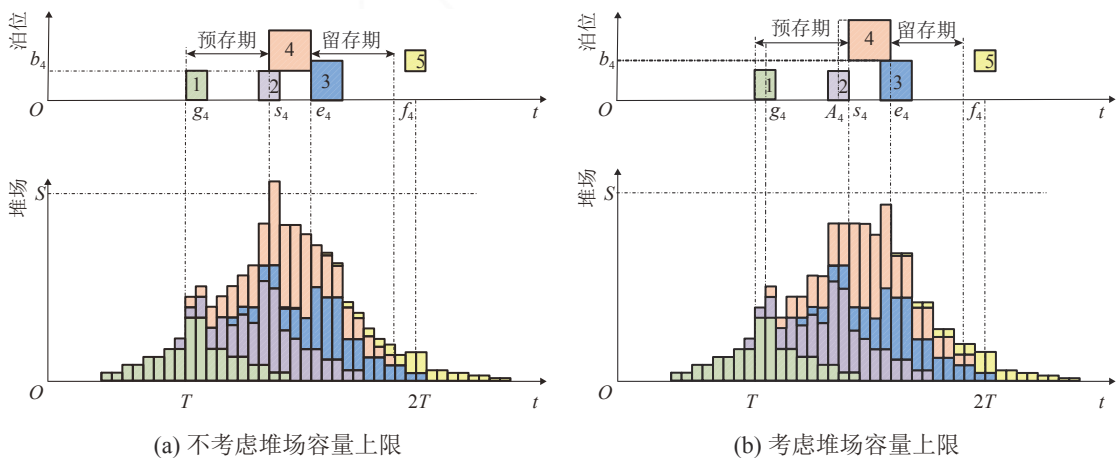


图3 堆场调度安排示例  
Fig. 3 Illustration of yard resource allocation

4 数值实验

为了验证本文设计的自适应遗传算法对于集装箱码头泊位-堆场-闸口集成资源分配问题的有效性,将数学模型转化为计算机语言来实现前面的算法.本文使用的软件为 Microsoft Visual Studio 2010,使用计算机语言为 C#,测试平台为 Intel Xeon E5-1650 v3 处理器,3.5 GHz 主频,16 GB 内存.

常见集装箱码头资源调度问题的解决方法是分为两阶段进行决策,本文所解决的泊位-堆场-闸口集成调度问题尚属首创,没有现成的文献可供对比.在码头的实际操作中,为保证船舶尽快靠港并尽快

作业,优先考虑泊位和堆场的约束,满足两类资源约束的前提下,船舶靠港,如果闸口资源不够,只能通过延迟船舶的开始作业时间来协调.所以本文的数值实验将集成调度和两阶段调度进行对比.

4.1 算例生成

由于本文的研究内容缺乏前人研究的算例基础,故文章将文献[10]和文献[16]中的算例进行结合,用于本文的数值实验测试.算例中将船舶分成小、中、大3类,相关参数如表1.其中:  $U$  表示均匀分布,泊位和时间的离散化标准分别为 10 m 和 h,船舶作业量以国际标准箱单位 (twenty foot equipment unit, TEU) 为计量单位,3类船舶数量均占总体

表1 船舶类型及其参数  
Tab. 1 Parameters of different types of vessel

| 船舶类型 | 船长/( $\times 10$ m) | 占比  | 装卸载箱总量/TEU          | (预存/留存期)/h |
|------|---------------------|-----|---------------------|------------|
| 小型   | $U[10, 20]$         | 1/3 | $U[360, 1\ 080]$    | 72         |
| 中型   | $U[20, 30]$         | 1/3 | $U[960, 1\ 920]$    | 72         |
| 大型   | $U[30, 40]$         | 1/3 | $U[1\ 800, 3\ 600]$ | 72         |

的 1/3, 且设置单条船舶装载箱和卸载箱数量相等, 预存期和留存期时长相等.

测试时设置 3 种问题规模, 对应一个周期内的到港船舶数量分别为 20、30、40 艘. 为避免偶然误差

的出现, 每个问题规模下生成 10 组随机算例. 各问题规模下的资源配置见表 2. 参照文献[10], 1 岸桥时等价于 30 TEU, 考虑到单位的标准化, 表 2 中堆场容量、闸口的进场与离场能力上限均以 TEU 为计量单位.

表 2 不同问题规模下的可用资源配置  
Tab. 2 Resource configurations under different problem scales

| $V/\text{条}$ | $J/(\times 10\text{ m})$ | $S/\text{TEU}$ | $G_L/(\text{TEU}\cdot\text{h}^{-1})$ | $G_D/(\text{TEU}\cdot\text{h}^{-1})$ |
|--------------|--------------------------|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 20           | 70                       | 28 800         | 18                                   | 18                                   |
| 30           | 110                      | 38 400         | 27                                   | 27                                   |
| 40           | 150                      | 57 600         | 36                                   | 36                                   |

4.2 实验结果

不同船舶规模下的集成调度算法与两阶段算法的运行结果对比, 如表 3~5 所示. 其中  $Z_1$  为两阶段调度中第一阶段(在泊位和堆场两类资源约束下对船舶进行调度)在到达最大迭代步数时取得的最优解;

$Z_2$  为在第 1 阶段调度结果的基础上加入闸口约束, 达到最大迭代步数时取得的最优解.  $Z$  为运用集成调度算法(在泊位、堆场和闸口 3 类资源的约束下对船舶进行调度)在达到最大迭代步数时所取得的最优解.  
 $g = (Z - Z_2)/Z_2 \times 100\%$ , 为泊位-堆场-闸口 3 类资源集成

表 3 20 船规模下数值实验  
Tab. 3 Algorithm performance of 20 vessels

| 算例  | $Z$   | $Z_1$ | $Z_2$ | $g/\%$ |
|-----|-------|-------|-------|--------|
| 1   | 202   | 142   | 229   | -11.8  |
| 2   | 258   | 109   | 322   | -19.8  |
| 3   | 194   | 96    | 288   | -32.6  |
| 4   | 195   | 114   | 242   | -19.4  |
| 5   | 224   | 119   | 327   | -31.5  |
| 6   | 203   | 116   | 227   | -10.6  |
| 7   | 202   | 121   | 262   | -22.9  |
| 8   | 170   | 112   | 186   | -8.6   |
| 9   | 215   | 128   | 254   | -15.4  |
| 10  | 152   | 95    | 187   | -22.8  |
| 平均值 | 201.5 | 115.2 | 253.4 | -20.5  |

表 4 30 船规模下数值实验  
Tab. 4 Algorithm performance of 30 vessels

| 算例  | $Z$   | $Z_1$ | $Z_2$ | $g/\%$ |
|-----|-------|-------|-------|--------|
| 1   | 318   | 197   | 412   | -22.8  |
| 2   | 293   | 145   | 384   | -23.7  |
| 3   | 268   | 154   | 380   | -29.5  |
| 4   | 259   | 140   | 313   | -17.3  |
| 5   | 302   | 172   | 381   | -20.7  |
| 6   | 277   | 154   | 347   | -20.2  |
| 7   | 262   | 146   | 325   | -19.4  |
| 8   | 239   | 167   | 256   | -6.6   |
| 9   | 330   | 157   | 436   | -24.3  |
| 10  | 260   | 168   | 317   | -18.0  |
| 平均值 | 280.8 | 160   | 355.1 | -19.8  |

表 5 40 船规模下数值实验  
Tab. 5 Algorithm performance of 40 vessels

| 算例  | $Z$   | $Z_1$ | $Z_2$ | $g/\%$ |
|-----|-------|-------|-------|--------|
| 1   | 387   | 251   | 445   | -13.0  |
| 2   | 350   | 187   | 443   | -21.0  |
| 3   | 349   | 184   | 460   | -24.1  |
| 4   | 298   | 187   | 370   | -19.5  |
| 5   | 382   | 208   | 505   | -24.4  |
| 6   | 284   | 188   | 330   | -13.9  |
| 7   | 362   | 201   | 434   | -16.6  |
| 8   | 326   | 185   | 401   | -18.7  |
| 9   | 402   | 222   | 544   | -26.1  |
| 10  | 299   | 183   | 358   | -16.5  |
| 平均值 | 343.9 | 199.6 | 429.0 | -19.8  |

调度方法相较于两阶段调度策略求解提升的比率.

通过实验对比发现,在所有算例中,泊位-堆场-闸口资源协调调度问题的最优解均比单纯的泊位-堆场资源调度问题的结果要大,这表明在闸口资源引入之后,原本的问题求解过程中增添了新的约束,新问题的解空间变小了.  $g$  的取值表明,在求解 3 类资源协同调度问题中本文所提出的集成调度算法优于传统的两阶段求解思路. 其中, 20.5%、19.8% 和 19.8% 这 3 个具有代表性的均值提升在实际生产中意味着节省了几十甚至几百小时船舶调度时间. 对于集装箱码头而言,这将会节省非常大的成本,同时有效的提升码头的服务质量.

#### 4.3 敏感性分析

利用 20 船规模下的 10 个算例,对闸口能力和

集装箱预存/留存时间两个维度的敏感性进行分析. 设置 7 个闸口能力数值和 7 个预存/留存期数值,在构建的 49 组场景下分别对问题求解,获取近优解及其目标函数值,并拟合三维曲面关系图如图 4(a). 图 4(b)则分别为曲面图中 49 组点在左方侧面及后方侧面的二维投影. 从三者的关系可知,一方面,在闸口能力固定时,预存/留存期的增大有利于调度结果优化,但实际上过多增大会带来管理和实施上的困难;另一方面,在预存/留存期固定时可行解的值随闸口能力的增大而减小并趋于平缓,显示其在实际调度中边际收益递减的效应. 这些都是管理者在码头设计和配置时需要合理考虑的因素;基于三维曲面图,可以对闸口能力和集装箱预存/留存期的大小进行合理地调整.

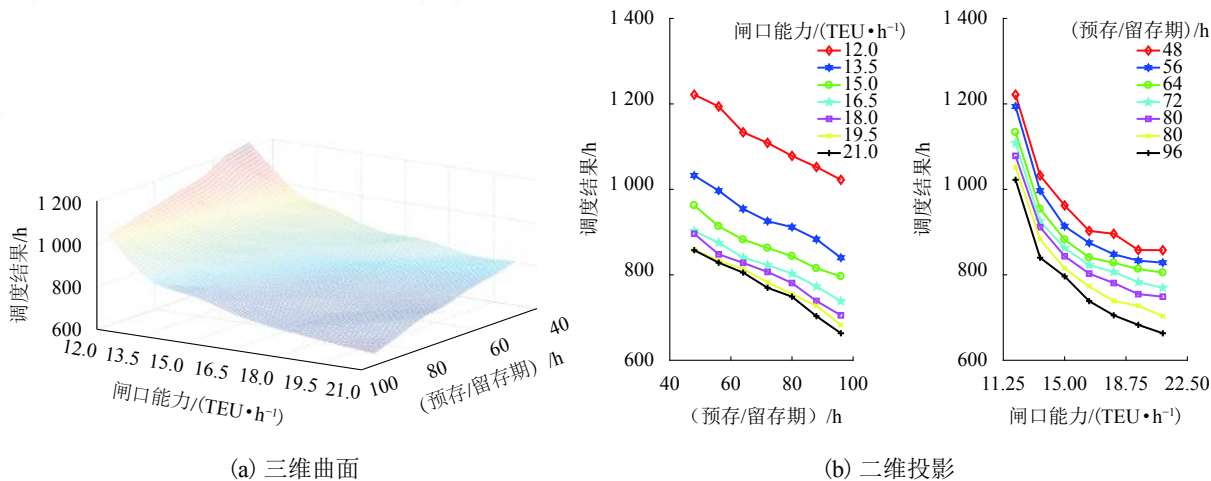


图 4 敏感性分析  
Fig. 4 Sensitivity analysis

## 5 总 结

本文提出并研究周期性环境下集装箱码头核心资源的协同分配问题,包括泊位安排计划、堆场与闸口能力计划.针对这一集成决策问题的界定和特点,建立了相应的混合整数规划模型,并设计基于优先级编码和启发式解码的自适应遗传算法.不同算例规模下的数值实验显示,集成化决策相比两阶段决策具有约20%的效果提升;敏感性分析显示,闸口能力和预存/留存期等主要参数对于决策效果存在协同影响.本研究可用于支持码头战术层面的模板计划决策,以及作为运作层面的调度与控制决策基础.

### 参考文献:

- [1] 桂小娅,陆志强,韩笑乐. 集装箱码头连续型泊位与岸桥集成调度[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(2): 226-229.  
GUI Xiaoya, LU Zhiqiang, HAN Xiaole. Integrating optimization method for continuous berth and quay crane scheduling in container terminals[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(2): 226-229.
- [2] 秦进,倪玲霖,王承娜,等. 集装箱码头岸桥调度优化模型及算法[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 184-192.  
QIN Jin, NI Linglin, WANG Chengna, et al. Optimization model and algorithm for quay crane scheduling in container terminals[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1): 184-192.
- [3] LI Mingkun, YIP T L. Joint planning for yard storage space and home berths in container terminals[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(10): 3143-3155.
- [4] NG W C, MAK K L, LI Mingkun. Yard planning for vessel services with a cyclical calling pattern[J]. Engineering Optimization, 2010, 42(11): 1039-1054.
- [5] ZHANG Chuqian, LIU Jiyin, WAN Y W, et al. Storage space allocation in container terminals[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37(10): 883-903.
- [6] CHEN Lu, LU Zhiqiang. The storage location assignment problem for outbound containers in a maritime terminal[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 135(1): 73-80.
- [7] MOORTHY R, TEO C P. Berth management in container terminal: the template design problem[J]. OR spectrum, 2006, 28(4): 495-518.
- [8] HENDRIKS MPM, LEFEBERE, UDDING J T. Simultaneous berth allocation and yard planning at tactical level[J]. OR Spectrum, 2013, 35(2): 441-456.
- [9] CORDEAU J F, LAPORTE G, LEGATO P, et al. Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem[J]. Transportation Science, 2005, 39(4): 526-538.
- [10] LU Zhen, CHEW E P, LEE L H. An integrated model for berth template and yard template planning in transshipment hubs[J]. Transportation Science, 2011, 45(4): 483-504.
- [11] ROBENEK T, UMANG N, BIERLAIRE M, et al. A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235(2): 399-411.
- [12] JIN Jiangang, LEE D H, HU Hao. Tactical berth and yard template design at container transshipment terminals: a column generation based approach[J]. Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review, 2015, 73: 168-184.
- [13] CHEN Gang, GOVINDAN K, YANG Zhongzhen. Managing truck arrivals with time windows to alleviate gate congestion at container terminals[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 141(1): 179-188.
- [14] 杨超,陆志强. 基于遗传算法的出口集装箱送箱时间窗优化[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(6): 1643-1646.  
YANG Chao, LU Zhiqiang. Optimizing time windows for delivering export container using genetic algorithm[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(6): 1643-1646.
- [15] YUN W Y, YONG S C. A simulation model for container-terminal operation analysis using an object-oriented approach[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 59(1/2/3): 221-230.
- [16] LIU C, JULA H, IOANNOU P A. Design, simulation, and evaluation of automated container terminals[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(1): 12-26.
- [17] HENESEY L, WERNSTEDT F, DAVIDSSON P. Market-driven control in container terminal management[C]//The 2nd International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries. Hamburg: [s.n.], 2003: 377-386.

(编辑:李永辉)