

2016年度重庆市出版专项基金资助栏目

运筹学与控制论

DOI:10.11721/cqnj20170220

## 成对自动堆垛起重机在集装箱码头中的实时调度研究\*

丁一, 陈杭钦, 林国龙

(上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

**摘要:**【目的】通过对成对自动堆垛起重机在堆场调度问题的研究,为自动化集装箱码头中的运输问题的解决提供理论依据。【方法】针对成对自动堆垛起重机,建立了以最小化外集卡和船舶延时而为目标函数的不对称的多旅行商模型,引入了接力、缓冲、干扰等关键约束,并利用并行实时调度策略对多组情景进行案例研究分析。【结果】模型设立了多个缓冲区以及使用接力作业,结果表明这些对减少外集卡和自动引导小车的等待时间,从而提高作业效率有着重要作用。【结论】设主缓冲区以及接力区可以减少作业延时,并且在海侧作业量较多时,增加缓冲区的容量可以更有效地增加作业效率。

**关键词:**整数规划;自动化码头;自动堆垛起重机;实时调度

**中图分类号:** O221.1; C934

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6693(2017)02-0011-09

随着“一带一路”政策的出台,自动化集装箱码头的运输成为21世纪海上丝绸之路的重要组成部分。自动化集装箱码头的堆场和传统集装箱码头堆场在堆场布局、作业方式等方面存在巨大差异(图1),这决定了现有的传统码头堆场资源调度理论不能直接应用于自动化集装箱码头堆场。目前国内关于自动化集装箱码头和自动化场桥调度方面的研究都很缺乏。

随着工艺水平的发展,成对自动堆垛起重机(Twin automatic stacking crane, TASC)在堆场中的运用越来越得到重视,如即将完工的洋山4期工程中即是用了该类型的设备。集装箱作业流程中最后一个任务的完成时间直接关系到船舶以及外集卡的等待时间,所以TASC的作业效率影响着岸桥对船舶的作业效率,从而影响了整个码头的作业效率。对于自动化集装箱码头而言,TASC还承担了大部分的水平运输作业,故TASC调度的重要程度不言而喻。成对自动化堆垛起重机调度实时问题(Real-time scheduling for twin automatic stacking crane problem, RSTASCP)是指两个自动化堆垛起重机在同一个箱区内,共用同一条铁轨作业的实时调度问题。

过去的研究主要集中于单轮胎吊单箱区以及多轮胎吊多箱区的情况,而自动化堆场调度所产生新问题,例如缓冲区的设定、由碰撞等因素所产生的接力操作等,则较为新颖,国内相关研究也比较匮乏,因此本文重点参考了国外传统集装箱码头轮胎吊的调度研究,以及部分自动化码头的轨道吊调度研究。早期的研究主要集中在1台轮胎吊在单一箱区中的调度优化问题上<sup>[1-3]</sup>。Gharehgozli等人<sup>[4]</sup>研究了轨道吊在有多个交接点的箱区中的场桥调度问题,他们将问题建立在一个不对称旅行商问题(ATSP)之上,然后运用了分支割平面法来求解,最后证明了他们的算法所得到的结果优于邻域搜索算法。

由于单个箱区只由1台轮胎吊作业的情况效率低下,进而大量的研究集中在多台轮胎吊共用多箱区(Multiply RTG)进行调度的情况。在该情况下,1个箱区中可能有2台甚至多台轮胎吊作业,且轮胎吊之间不能互相穿越与碰撞。Cheung等人<sup>[5]</sup>用MIP模型研究了每个时间段中最小化未完成工作的问题,并用分段线性近似方法和拉格朗日分解方法解决了该问题。Ng<sup>[6]</sup>将一个IP模型建立在多轮胎吊多箱区的配置下,并且使用了基于动态规划的启发式方法解决了该问题。Guo等人<sup>[7]</sup>将内外集卡的最小化平均等待时间作为目标,对轮胎吊的调度采用了分层的策略,进而在运用时间分割和空间分割算法之后,发现他们的算法结论比Ng<sup>[6]</sup>的更加优异。

除了多轮胎吊外,双轨道吊(DRMG)也是一种将两个场桥置于同一箱区作业的方案。DRMG是两个大小不

\* 收稿日期:2015-12-07 修回日期:2017-11-17 网络出版时间:2017-03-13 11:06

资助项目:国家自然科学基金(No. 71301101)

第一作者简介:丁一,男,讲师,博士,研究方向为港口运作优化,E-mail:dingyi1018@gmail.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20170313.1106.008.html>

一样的轨道吊运行在不同轨道上的配置,当较大的轨道吊不在提取或者放下集装箱时,较小的轨道吊可以穿过较大轨道吊。Cao 等人<sup>[8]</sup>将该问题建立在一个 IP 模型上,并运用了一个结合 DRMG 启发式算法与退火模拟算法的贪婪算法解决这个问题。Vis<sup>[9]</sup>运用退火模拟算法研究了类似问题。

成对堆垛机(Twin-ASC, TASC)结合了 mRTG 和 DRMG 的部分特点,两个轨道吊被限制在同一箱区的同一轨道中,因此不能相互穿越,也不能在多个箱区中作业。Froyland 等人<sup>[10]</sup>提供了一个基于 IP 模型的时间分解方法。Park<sup>[11]</sup>提出了一个针对 TASC 的基于启发式和局部搜索方法的实时调度方法,在该模型中接力作业和翻箱作业被当成可被任何场桥处理的辅助作业,但在此问题中作者把堆场看作是一个一维模型。Gharehgozli<sup>[12]</sup>把模型建立在一个带有

有限约束的广义不对称多旅行商问题上,并运用自适应大型领域搜索算法计算出的最小最大完工时间要优于其他启发式算法高达 24%,但是作者没有考虑接力情况。Dorndorf 等人<sup>[13]</sup>考虑了 3 台场桥的情况——其中两台小的不能相互穿越,大的场桥可以穿过较小的场桥,在这一情况中他们运用了定向搜索来对场桥调度,同时运用分支割平面方法来对任务排序,以达到最小化延时的前提下提高系统的效率的目标。

由于码头实际运营中所获得的信息是非常有限的,所以实时调度在码头决策过程中非常重要,但是现阶段实时调度的研究比较少<sup>[14-15]</sup>。Petering<sup>[16-17]</sup>等研究了集卡到达时间随机的实时环境。Park<sup>[11]</sup>提供了一个基于调度问题的具有自修正长度的前向启发式算法。

## 1 问题描述与假设

### 1.1 问题描述

在自动化集装箱码头中,自动堆垛起重机将来自外集卡和船舶的集装箱放入堆场中储存,并将需要提取的箱子取出交予外集卡和自提式起重小车(Automatic lifting vehicle, ALV),其中在中转环节起着至关重要的作用。TASC 的作业行为主要分为 4 个:路侧 ASC 的进箱与提箱,以及海侧 ASC 的卸船与装船。例如海侧 ASC 卸船活动作业流程为,当船舶靠岸后,岸桥将集装箱卸船交于 ALV,ALV 装取集装箱后运送到目标箱区的缓冲区,然后由海侧 ASC 将箱子从缓冲区取出放入既定位置。

一个箱区可以使用  $X$  列  $Y$  贝  $Z$  层的三维坐标来进行描述(图 2),对于每个作业  $i$  有与之相对应的起始位置  $X_i Y_i Z_i$  和目标位置  $X'_i Y'_i Z'_i$ 。其中  $1 \leq X_i, X'_i \leq X_M, 0 \leq Y_i, Y'_i \leq Y_M, 1 \leq Z_i, Z'_i \leq Z_M, X_M, Y_M,$  和  $Z_M$  分别是箱区的最大贝位、最大列数以及最大层高。

由于自动化码头箱区垂直于海岸线,外集卡和 ALV 只能在箱区两端作业,不允许进入堆场内部。为此堆场与海侧交接区之间设立了缓冲容量为  $b$  的缓冲区。对于卸船作业,ALV 将集装箱放置于缓冲区之上便可直接离

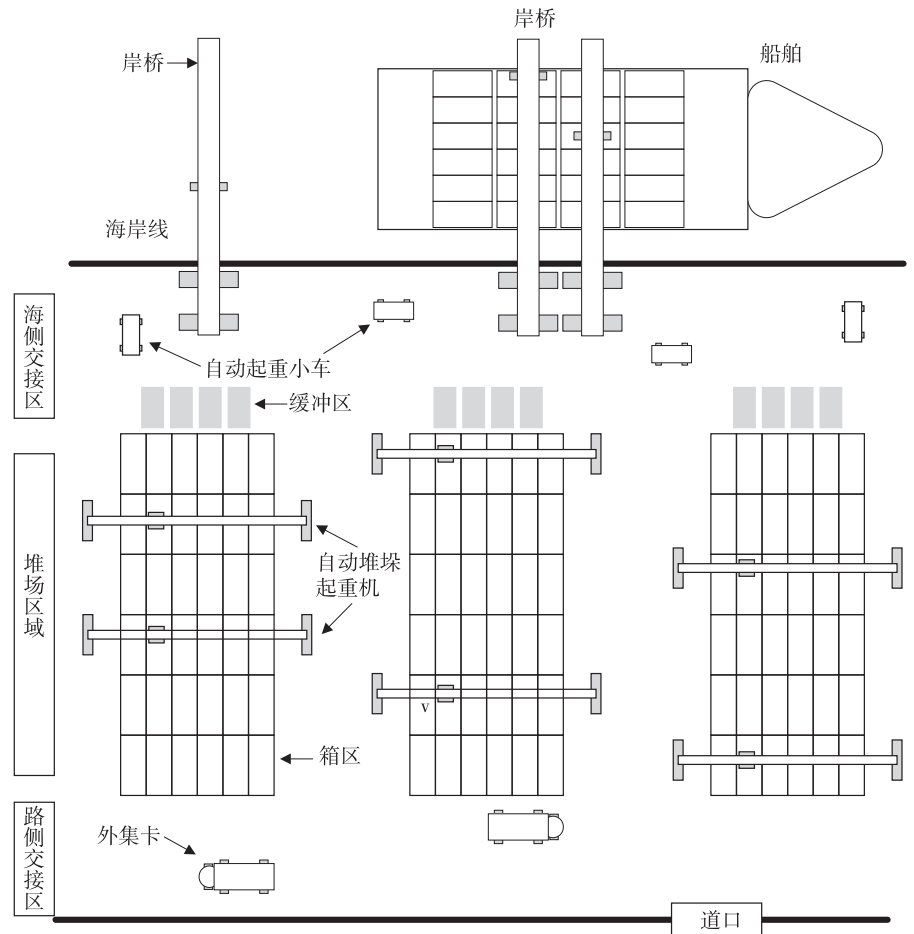


图 1 自动化集装箱码头布局

Fig. 1 Layout of automatic container terminal

开,无需等待 ASC。对于装船作业,ASC 也无需等待 ALV,可直接进行作业。当缓冲区中集装箱数量超过  $b$  时,就会在缓冲区发生堵塞。发生堵塞时 ASC 和 ALV 需要排队等待直到堵塞结束才能正常作业。

由于两个 ASC 不能相互穿越,所以在 TASC 的调度模型中,经常会产生两个 ASC 相互干扰作业的情况,例如路侧 ASC 要获取海侧交接区一边的箱子,此时路侧 ASC 只能等待海侧 ASC 将位置让出才能继续自己的作业,严重降低作业效率。为此对于一些位置比较偏远的箱子的作业通常用两个场桥接力来完成。本文将接力作业分为两个阶段,如图 3 所示接力第一阶段是指需要由一侧 ASC 作业的箱子被另一侧 ASC 事先运送一段距离到共享箱区的临时储存点,然后进入第二阶段,由这一侧 ASC 继续将集装箱从临时储存点运送出堆场。为了方便计算,将箱区分为 3 块:路侧箱区、共享箱区和海侧箱区。3 个箱区中的所有作业分用  $B_l, B_s, B_w$  等 3 个集合来表示。并且满足以下两个条件的作业是一定需要接力的 1) 作业  $i \in B_l \cap R_2$  或者 2) 作业  $i \in B_w \cap R_1$ 。如果是共享箱区  $B_s$  中的作业可接力也可不接力,因此创建一个与原作业互斥的镜像作业,将原作业直接调度,镜像作业接力调度,然后进行比较,最终选取效率较高的方案。其中  $R_k$  集合是需要由堆垛机  $k$  作业的集合。 $k \in K = \{1, 2\}$ , 1 代表路侧堆垛起重机, 2 代表海侧堆垛起重机。

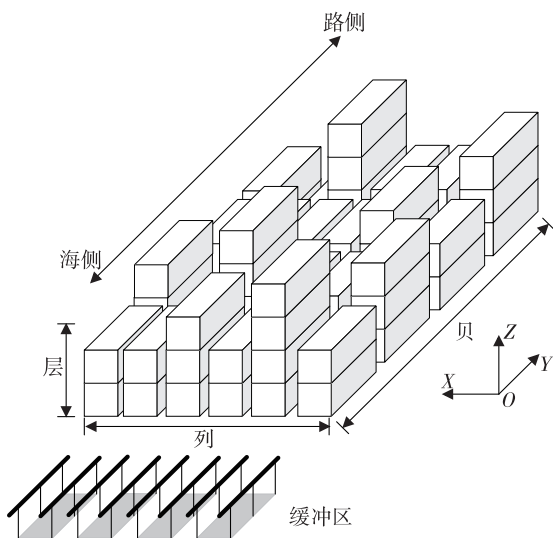


图 2 堆场箱区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of block in stacking area

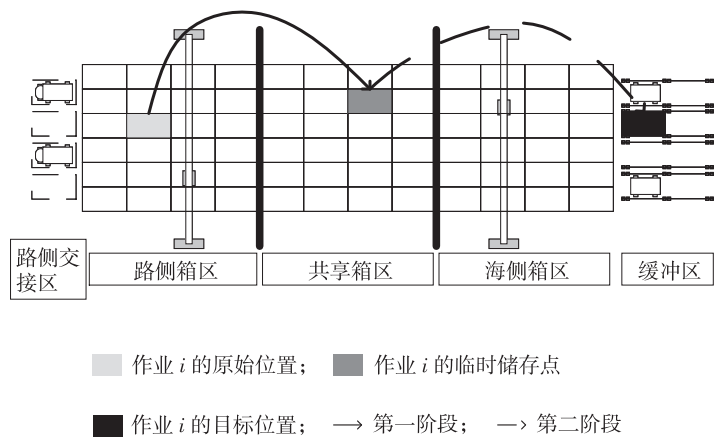


图 3 接力作业示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reposition task

### 1.2 问题假设

由于本文是调度问题所以已知条件如下:集装箱的来源(海侧路侧);集装箱作业性质(进箱、提箱、装船、卸船);作业的初始位置与目标位置;以及水平交通工具的到达时间。

同时做出以下不对轨道吊调度产生本质影响的相关假设:所有作业的集装箱均已在作业开始前预翻箱所以在作业中无需翻箱;不考虑集装箱的箱型和重量,假设所处理的集装箱尺码统一为 20 寸的重箱;并且堆垛机每次只处理一个集装箱;由于 TASC 运作成本比外集卡和 ALV 高的多,所以假设 TASC 不会等待水平运输交通工具;并且集装箱到达缓冲区时需要先装卸,至少要在缓冲区停留一个时间单位。

本文模型为整数规划模型,将时间离散化处理的主要依据在于本文假设自动堆垛起重机在水平方向位移和垂直方向起重为匀速运动且速度为单位速度,单位速度是指 TASC 移动一个贝位的所需时间,本文只关注取放集装箱的时刻而不用关注整个系统运行的所有时间,因此将时间离散化以达到简化问题复杂度的目的。

在码头的实际运作中,可能由于个别集装箱的延时而延误整个船舶的行程造成巨大损失,所以本文以最小化每个集装箱的延时为目标,以求最小化外集卡,尤其是船舶等待的时间成本。

## 2 模型建立

### 2.1 集合

$R_n$  为不需要接力的作业的集合,  $R_n = \{1, 2, \dots, m\}$ ;  $R_p$  为需要接力的作业的接力部分第一阶段的集合,  $R_p = \{m+1, m+2, \dots, N\}$ ;  $R_a$  为需要接力的作业的第二阶段的集合,数量上等同于  $R_p$ , 其中  $R_a = \{N+1, N+2, \dots,$

$2N-m$ ;  $R_s$  代表存箱或卸船的作业集合;  $R_r$  代表取箱或装船的作业集合;  $R_k$  集合是需要由  $ASC_k$  作业的集合, 其中  $R_1$  为路侧  $ASC$  作业集合,  $R_2$  为海侧  $ASC$  作业集合;  $R$  为所有作业的集合  $R=R_n \cup R_p \cup R_a=R_r \cup R_s \cup R_p=R_1 \cup R_2$ ,  $K$  为堆垛机的集合;  $T$  是所有单位时间集合  $t \in T=\{1, 2, 3, \dots, \theta\}$ , 其中  $\theta$  为一个自修正的参数。

2.2 参数的选取及说明

当  $ASC_k$  处理完当前作业  $i$  前往下一个作业  $j$  所需的时间为作业准备时间  $s_{ij}^k$ 。计算如下:  $s_{ij}^k = \max\{|X'_i - X_j|, |Y'_i - Y_j|\}, \forall i \in R \cup \{s_k\}, \forall j \in R \cup \{e_k\}$ 。其中  $\{s_k\}$  是  $ASC_k$  初始位置,  $\{e_k\}$  是  $ASC_k$  的结束位置,  $X_i, Y_i, Z_i$  为作业  $i$  的初始位置,  $X'_i, Y'_i, Z'_i$  为目标位置。

作业处理时间  $p_i^k$  是指  $ASC_k$  处理作业  $i$  所需时间即从作业  $i$  的初始位置移动到目标位置的时间包括了水平方向的移动时间和垂直方向抓取放下集装箱的时间。因为两个水平方向的移动是同时进行的, 所以较长的那个方向所需的移动时间是关键时间。所以  $p_i^k$  的计算如下:  $p_i^k = \max\{|X_i - X'_i|, |Y_i - Y'_i|\} + Z_i + Z'_i, \forall i \in R$ 。

$\tau$  是堆垛机间的安全距离;  $b$  为缓冲区容量;  $d_i$  为作业  $i$  的目标完成时间;  $v_i^k$  为作业  $i$  所对应的车辆(外集卡或 ALV)在  $ASC_k$  一侧的到达时间。

2.3 决策变量

$x_{ij}^k \in \{0, 1\}$ , 当  $ASC_k$  完成作业  $i$  之后立刻处理作业  $j$  取 1, 否则取 0;  $w_{ij} \in \{0, 1\}$ , 当作业  $i$  与作业  $j$  由不同  $ASC_k$  和  $ASC_{k'}$  处理且作业  $j$  在作业  $i$  之后完成取 1, 否则取 0;  $r_i^k$  为  $ASC_k$  到达作业  $i$  的初始位置时间即作业  $i$  的开始时间;  $c_i^k$  为  $ASC_k$  完成作业  $i$  的时间;  $y_i^t \in \{0, 1\}$ , 当  $t \geq c_i^k, \forall i \in R_r$  时或者  $t \geq r_i^k, \forall i \in R_s$  时为 1, 否则为 0;  $z_i^t \in \{0, 1\}$ , 当  $t \geq v_i^k, \forall i \in R$  时则为 1, 否则为 0;  $f_{ik}^t \in \{0, 1\}$  表示当  $ASC_k$  在时间  $t$  完成作业  $i$  则为 1, 否则为 0;  $Y_{kl}^t \in \{0, 1\}$  表示当  $ASC_k$  在时间  $t$  时在贝位  $l$  取 1, 否则取 0。

2.4 模型

目标函数为:

$$\min \sum_{i \in R_n \cup R_a} T_i, \tag{1}$$

$$T_i = \max\left(\sum_{k \in K} c_i^k - d_i, 0\right), \forall i \in R_n \cup R_a. \tag{2}$$

目标函数(1)是最小化所有作业的总延时时间。约束(2)给出了若作业  $i$  完成时间晚于目标完成时间则会有延时惩罚。

2.4.1 带取送货的多旅行商约束(m-TSPDP)

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in R} x_{ij}^k = 1, \forall i \in R \cup \{s_k\}, i \neq j, \tag{3}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in R} x_{ij}^k = 1, \forall j \in R \cup \{e_k\}, i \neq j, \tag{4}$$

$$\sum_{i \in R \cup \{s_k\}} x_{il}^k = \sum_{j \in R \cup \{e_k\}} x_{lj}^k, \forall l \in R, \forall k \in K, i \neq j \neq l, \tag{5}$$

$$c_i^k + s_{ij}^k - r_j^k \leq M(1 - x_{ij}^k), \forall i \in R \cup \{s_k\}, \forall j \in R \cup \{e_k\}, \forall k \in K, i \neq j, \tag{6}$$

$$(r_i^k + p_i^k - c_i^k) \leq M(1 - x_{ji}^k), \forall i \in R, \forall j \in R \cup \{s_k\}, \forall k \in K, i \neq j, \tag{7}$$

$$r_i^1 - v_i^1 \geq M(x_{ji}^1 - 1), \forall i \in R_s \cap R_1, \forall j \in R_1 \cup \{s_1\}, \tag{8-1}$$

$$r_i^2 - v_i^2 - 1 \geq M(x_{ji}^2 - 1), \forall i \in R_s \cap R_1, \forall j \in R_1 \cup \{s_1\}, \tag{8-2}$$

$$v_i^1 - c_i^1 \leq M(1 - x_{ji}^1), \forall i \in R_r \cap R_1, \forall j \in R_1 \cup \{s_1\}. \tag{9}$$

约束(3)~(9)给出了本文 TASC 调度问题的模型是基于 TSP 模型的。约束(3)和约束(4)表示每个作业都只执行一次; 约束(5)是流守恒公式; 约束(6)定义了  $ASC_k$  在完成作业  $i$  后到作业  $j$  开始之前的准备时间; 约束(7)定义了作业  $i$  的完成时间; 约束(8)表示对于卸船和进箱作业  $i$ , 作业必须在水平交通工具到位后开始, 其中由于缓冲区的存在, 海侧作业开始时间还要顺延一个时间单位; 约束(9)表示路侧的提箱作业, 必须要在外集卡到位后才能结束。

2.4.2 接力作业约束

$$w_{ij} + w_{ji} \leq \sum_{l \in R_k} x_{li}^k, \forall i \in R_k, \forall j \in R_{k'}, \forall k, k' \in K, k \neq k', \tag{10-1}$$

$$w_{ij} + w_{ji} \leq \sum_{l \in R_{k'}} x_{lj}^{k'}, \forall i \in R_k, \forall j \in R_{k'}, \forall k, k' \in K, k \neq k', \tag{10-2}$$



$$w_{ij} + w_{ji} \geq \sum_{l \in R_k} x_{li}^k + \sum_{l \in R_{k'}} x_{lj}^{k'} - 1, \forall i \in R_k, \forall j \in R_{k'}, \forall k, k' \in K, k \neq k', \quad (10-3)$$

$$c_i^k - r_j^{k'} \leq M(1 - w_{ij}), \forall i \in R_p, \forall j \in R_a, j = i + N - m, \forall k, k' \in K, k \neq k'. \quad (11)$$

约束(10)定义了当作业  $i$  和作业  $j$  分别有两个不同的堆垛机完成且作业  $i$  在作业  $j$  之前完成时,  $w_{ij}$  为 1, 否则为 0; 在约束(11)中, 当作业  $i$  是需要接力的作业时, 作业  $j$  为作业  $i$  重新放置后的对应的提箱或者装船作业, 所以作业  $j$  一定是在作业  $i$  完成之后开始的。

#### 2.4.3 缓冲区约束

$$t - c_i^2 \leq M \cdot y_i', \forall i \in R_r \cap R_2, \forall t \in T, \quad (12-1)$$

$$t - c_i^2 \geq M(y_i' - 1), \forall i \in R_r \cap R_2, \forall t \in T, \quad (12-2)$$

$$v_i^2 - c_i^2 \leq M(1 - b_i), \forall i \in R_r \cap R_2, \quad (13-1)$$

$$M \cdot (z_i' - 1) - t + c_i^2 + 1 \leq M \cdot b_i, \forall i \in R_r \cap R_2, \forall t \in T, \quad (13-2)$$

$$t - c_i^2 - 1 - M \cdot z_i' \leq M \cdot b_i, \forall i \in R_r \cap R_2, \forall t \in T, \quad (13-3)$$

$$c_i^2 - v_i^2 \leq M(1 - a_i), \forall i \in R_r \cap R_2, \quad (14-1)$$

$$M \cdot (z_i' - 1) - t + v_i^2 \leq M \cdot a_i, \forall i \in R_r \cap R_2, \forall t \in T, \quad (14-2)$$

$$t - v_i^2 - M \cdot z_i' \leq M \cdot a_i, \forall i \in R_r \cap R_2, \forall t \in T, \quad (14-3)$$

$$t - r_i^2 \leq M \cdot y_i', \forall i \in R_s \cap R_2, \forall t \in T, \quad (15-1)$$

$$t - r_i^2 \geq M(y_i' - 1), \forall i \in R_s \cap R_2, \forall t \in T, \quad (15-2)$$

$$t - v_i^2 \leq M \cdot z_i', \forall i \in R_s \cap R_2, \forall t \in T, \quad (16-1)$$

$$t - v_i^2 \geq M(z_i' - 1), \forall i \in R_s \cap R_2, \forall t \in T, \quad (16-2)$$

$$\sum_{i, j \in R_r \cap R_2} (z_i' - y_j') + \sum_{i, j \in R_r \cap R_2} (y_i' - z_j') \leq b, \forall t \in T. \quad (17)$$

约束(12)表示对于装船作业  $i$ , 当时间大于作业  $i$  的完成时间即 ASC 已将集装箱放入缓冲区中, 此时  $y_i'$  为 1, 否则为 0; 约束(13)表示在装船作业中, 当 ALV 到达缓冲区时间在 ASC 完成该作业之后。该情况下, 当时间大于 ALV 到达时间  $z_i'$  为 1, 否则为 0; 约束(14)表示在装船作业中, ALV 到达缓冲区时需等待 ASC 完成作业  $i$ , 当时间大于作业  $i$  的完成时间加上缓冲区装卸时间即  $c_i^2 + 1$  时,  $z_i'$  为 1, 否则为 0; 约束(15)表示对于卸船作业  $i$ , 当时间大于作业  $i$  的开始时间即  $ASC_k$  将集装箱吊离缓冲区, 则  $y_i'$  为 1, 否则为 0; 约束(16)表示在卸船作业中, 时间大于 ALV 到达时间  $z_i'$  为 1, 否则为 0; 约束(17)表示在缓冲区中的集装箱数量要小于缓冲区的容量。

#### 2.4.4 场桥互不干扰约束

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} f_{ik}^t = 1, \forall i \in R, \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^{\theta} t \cdot f_{ik}^t = c_i^k, \forall i \in R, \forall k \in K, \quad (19)$$

$$\sum_{l \in (1, Y_M)} Y_{kl}^t = 1, \forall t, \forall k \in K, \quad (20)$$

$$\sum_{l=0}^{Z_i'-1} Y_{ky_i'}^{t-l} - Z_i' \geq M(f_{ik}^t - 1), \forall i, i' \in R, \forall Z_i' \in (1, Z_M), \forall Y_i' \in (1, Y_M), \forall t \in (Z_i', \theta), \forall k \in K, i \neq j, \quad (21-1)$$

$$\sum_{l=0}^{Z_i'-1} Y_{ky_i'}^{t-l} - Z_i' \geq M(f_{ik}^t - 1), \forall i, i' \in R, \forall Z_i, Z_i' \in (1, Z_M), \forall Y_i \in (1, Y_M), \forall t \in (Z_i, \theta), \forall k \in K, i \neq j, \quad (21-2)$$

$$\sum_{a \in (l-1, l+1)} \sum_{b \in (l-1, l+1)} Y_{ab}^a - 2 \geq M(Y_{kl}^t - 1), \forall l \in (2, Y_M - 1), \forall t \in (2, \theta - 1), \forall k \in K, \quad (22)$$

$$l \cdot Y_{1l}^t - l' \cdot Y_{2l'}^t \geq \tau, l, l' \in (1, Y_M), \forall t \in T. \quad (23)$$

约束(18)定义了作业  $i$  只能在某一时刻由某一 ASC 完成; 约束(19)将整数变量  $c_i^k$  转化为 0-1 变量  $f_{ik}^t$ ; 约束(20)为某一时刻,  $ASC_k$  位置唯一性约束; 约束(21)定义了对作业  $i$  进行吊起和放下动作时,  $ASC_k$  不能移动; 约束(22)定义了  $ASC_k$  在 1 个时间单位内只能移动 1 个单位的距离; 约束(23)定义了两辆堆垛机之间的安全距离。

2.4.5 整数约束以及非负约束

$$x_{ij}^k, y_i^l, z_i^l, w_{ij}, a_i, b_i, f_{ik}^l, Y_{kl}^l = \{0, 1\}, \forall i, j \in R, \forall k \in K, \forall l \in T, \tag{24}$$

$$r_i^k, c_i^k \geq 0, \forall i \in R, \forall k \in K, \tag{25}$$

$$r_i^k, c_j^k = 0, \forall i \in \{s_k\}, \forall j \in \{e_k\}, \forall k \in K. \tag{26}$$

约束(24)定义  $x_{ij}^k, y_i^l, z_i^l, w_{ij}, a_i, b_i, f_{ik}^l, Y_{kl}^l$  为 0~1 变量。约束(25),(26)定义了作业  $i$  的开始时间,完成时间的取值范围。

3 模型求解

3.1 并行算法与实时调度

并行算法是指在各种并行计算机上求解问题和处理数据的算法,其本质是把多任务映射到多处理器中执行。并行算法的目标是尽可能减少时间复杂性,通常这是通过增加空间复杂性(如增加空间的维数及增加处理器的台数)来实现的。成对自动化堆垛起重机并行调度问题是将堆场内各个箱区进行并行处理,以达到节约时间的目的,当某计算机核心空闲时,亦可帮助未完成作业的核心工作。

基本流程如图 4 所示:将新增作业加入到总作业计划中;通过既定的配载计划将各个作业分配到对应箱区中;检查各作业是否满足本文问题描述中的接力条件,若满足则拆分原作业为两个子作业,并将拆分后的两个子作业加入该箱区的作业计划中;并行作业计划分配完成后,选取一定的作业量创建实时调度计划;最后根据各箱区的调度计划以及实际的调度完成情况对总作业计划进行更新。

由于本文中作业的到达时间是动态不确定的,因此无法将所有已知作业进行统一调度,并且该问题属于 NP-难问题,问题复杂度会随问题规模的扩大呈几何增长,为了能够在较短的时间内得到较为准确的调度顺序,因此引入实时调度的概念。通常情况下,各个箱区在每个时间区间内均都有可能增加来自配载计划的新增作业,因此调度计划是实时的。所以本文以  $\omega$  作为一个时间区间进行调度,调度时只考虑  $\omega - 1$  区间之内的未完成作业以及  $\omega - 1$  区间内新增的作业并不考虑  $\omega$  区间以及之后的已知作业的调度,以保证计算机的运行效率。当并行实施调度计划制定完成后,由对应 ASC 进行操作,并根据计划以及实际操作进度,对总作业计划进行更新,以分配新的作业给该箱区进行新一轮的并行实时调度计划。

具体操作步骤如图 5 所示,该图给出了 3 次调度之间的关系,图中  $\omega$  为更新一次调度计划时间区间,其中  $R_{new}^\omega$  为在  $\omega$  时间区间内新增的作业集合,  $R_{exc}^\omega$  为在  $\omega$  时间区间内完成的作业集合,因此存在

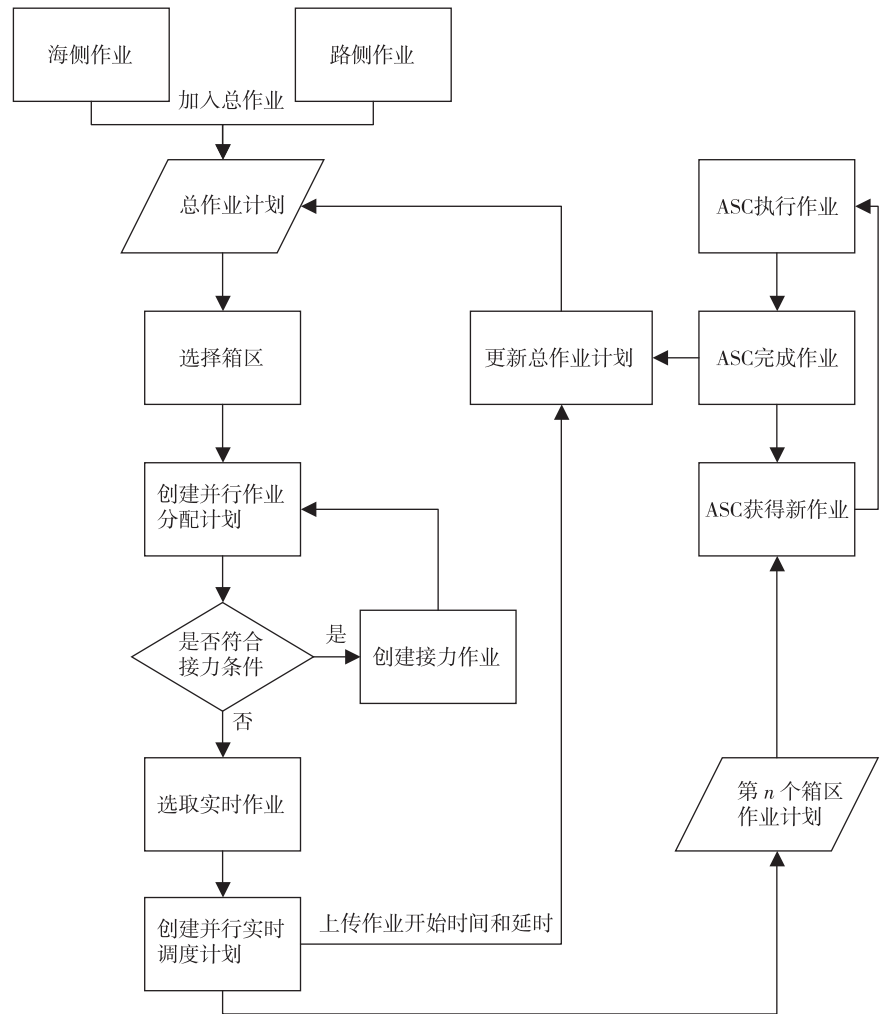


图 4 自动堆垛起重机基本流程图

Fig. 4 Flow chart of automatic stacking crane

以下关系  $R^w \cup R_{new}^w \setminus R_{exe}^w = R^{w+1}$ ,  $T_i^w$  为  $T_i$  在每个时间区间  $w$  内的子延时,即  $\sum_{w \in R} T_i^w = T_i$ , 于是  $w$  时间区间内作业的总延时可以表达为  $\sum_{w \in R} T_i^w$ , 其中  $i \in R_{new}^{w-1} \cup \{R^{w-1} \setminus R_{exe}^{w-1}\}$ 。具体流程为:在第  $w-1$  时间段内,起重机按照既定的调度计划进行实际的调度操作,之后根据实际调度情况将已经完成的作业从实时调度计划中去除。进入第  $w$  个时间区间,在开始制定调度计划之前,起重机需要将  $w-1$  时间区间内新增的作业与  $w-1$  时间区间剩下的作业一起加入第  $w$  个时间区间的调度计划并进行调度运算。

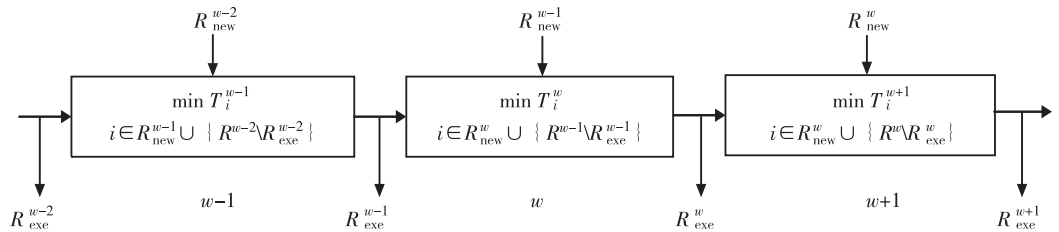


图 5 实时调度过程

Fig. 5 Real-time scheduling process

### 4 算例分析

由于 ASC 完成一项作业通常需要几分钟时间,所以完成 10~20 个作业所需时间约为 0.5 h。所以本文每个调度计划以 0.5 h 为一间隔,即各箱区均为并行的小规模的实时调度,因此本文仅使用 CPLEX 在 i5(4-core 8-TH)3.2 GHz, 8G DDR3 电脑上对 8 个箱区进行并行计算。

假设一个小型箱区共有 6 排,20 个贝位,5 层。1 号贝位为最靠近海侧的贝位,20 号贝位为最靠近陆侧的贝位,中间 8~12 号贝位为共享箱区,第 1 层为地面箱位层,第 5 层为最高箱位层,箱区最左侧的排为第 1 排,箱区最右侧的排为第 6 排。假设 ASC 水平方向沿列移动速度为 2 个单位速度,沿贝位移动速度为 1 个单位速度,垂直方向为 2 个单位速度,海侧 ASC 初始位置位于缓冲区,陆侧 ASC 初始位置位于陆侧交接区。需要装船和提取的集装箱初始位置随机分布在箱区各个位置,需要海侧卸船以及路侧进箱的作业随机选择交接作业点。

路侧提箱和进箱作业延时为外集卡等待时间;海侧提箱作业中,若海侧 ASC 在 AGV 到达缓冲区之前已将目标集装箱放上缓冲区支架,即认为海侧装船作业的堆场运输阶段已经完成,不存在延时;若海侧 ASC 在 AGV 到达后才将目标箱放置于缓冲区,则延时为 AGV 等待时间;海侧进箱作业中,若缓冲区未满载则延时为 0,若缓冲区已满载则延时为 AGV 等待时间。本文针对在 0.5 h 内,不同作业数量以及作业类型,缓冲区大小以及接力与否对目标函数的影响进行了多组实验,由于本文设定在每 0.5 h 的时间间隔内新作业的到达时间是随机的,所以将每组实验重复进行 5 次后取平均值为最终结果,具体结果如表 1 所示。

表 1 双侧作业组延时统计

Tab.1 Delay statics of handle jobs on both sides

作业个数	海侧占比/%	是否接力	作业组编号	缓冲 1/min	缓冲 2/min	缓冲 3/min	缓冲 4/min	缓冲 5/min
5	60.0	是	1	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
		否	2	4.1	3.9	3.9	3.9	3.9
10	50.0	是	3	10.3	8.0	6.9	6.2	6.2
		否	4	11.4	10.9	10.6	10.4	10.4
15	53.3	是	5	25.6	21.2	19.3	17.9	16.9
		否	6	27.5	26.4	25.6	25.1	24.8
20	50.0	是	7	51.0	50.4	49.7	49.2	48.8
		否	8	56.5	54.2	52.6	51.6	51.0

表 1 对 5~20 个作业数量、1~5 个缓冲区个数以及是否接力进行多组试验(例如作业组 3 的调度实例如图 6 所示)。其中接力作业比例占到总任务的 25%~35%且前 8 组实验的作业平均分配给两侧 ASC,而第 9~12 组两为大量海侧作业情况。实验表明,接力作业在缓冲区较少,即海侧 ASC 较忙的情况下通过对 2,4,6,8 组的情况对比发现增加缓冲区的数量可以减少各作业的总延时,并且随着作业的增多效果更加明显。通过对各组不同

缓冲区数量的总延时对比发现增加缓冲区的数量在减少总延时方面效果递减。对同样作业数是否接力的实验组进行两两对比,结果表明在缓冲区较少时接力作业的效果更加明显,平均延时减少 10%左右,使用更多缓冲区的情况下,接力的效果有所降低。

表 2 针对 20 个中转作业的情景进行试验。中转作业即由船舶卸下的集装箱经过堆场后不通过集卡运送出码头,而是继续由 AGV 运送回岸桥出港,以达到快速中转的目的。在中转作业中,任务集中在海侧 ASC,如若不使用接力作业则路侧 ASC 为闲置状态,资源大量浪费(第 9 组)。并且在该情景中任务到达时间比较相近且连续,导致短时间内场桥作业负载率较高。第 9 组为完全由单侧 ASC 作业情景,其中缓冲区为 1 时作业总延时高达 140.1 min。相对于双侧作业组,中转作业组增加缓冲区可以比较明显的减少作业延时,第 9 组中从 1 个缓冲区增加到

2 个缓冲区所减少的总延时多达 21.98% 远高于第 8 组的 4.07%。在第 10 组中另路侧 ASC 也加入到作业中,但是在第 10 组实验中,路侧 ASC 任有大量时间空闲,因此需要改变接力箱区以及海侧箱区的大小,以保证路侧 ASC 有一定强度的工作量。经过这个改变,在缓冲区较少时接力行为有较好的优化效果(第 11 组)。

由于采用算法多次运行的策略,在作业数较少且缓冲区较多时,每次计算结果较为相近甚至一样,但是随着作业数的增加,结果的随机性会大大增加,如果作业到达的时间过于集中会极大的提高总延时,特别在缓冲区较少的情况下,以上情况更加明显,因此在第 12 组中每两个作业的到达时间之间加入了冷却时间。首先,在一辆外集卡(AGV)装卸完成后需要开出交接区才能让下一辆外集卡(AGV)进入交接区,并且在交接区交接时是需要准备时间的,统一用冷却时间来表示这部分时间,以达到更加符合实际情况的效果。其次,冷却时间的加入大大限制住了问题的随机性,从而得到波动更小,更加准确的结果。

### 5 结论

自动堆垛起重机调度在自动化码头调度中是一个既重要又复杂的问题,对外涉及到对外集卡的衔接,对内涉及到对自动导航小车以及缓冲区的利用。本文以成对自动堆垛起重机调度为主要研究内容,给出了一个用该问题整数规划模型,以及相应的并行实时调度算法。由于在过去针对堆场调度问题的研究中,鲜有学者针对缓冲区以及为避免碰撞所产生的接力操作而进行研究,因此本文的模型在基于 m-TSPDP 的基础上增加了接力、缓冲区、碰撞等条件约束,能较为准确地反映自动堆垛起重机在堆场调度问题中的实际情况,丰富了相关研究领域的理论成果。并对多种情景进行了数值实验,不仅验证了模型的正确性,还得到了相应的对比结论。

虽然本文对自动堆垛起重机进行了深入地创新研究,但该问题复杂而又庞大,仍然需要进行进一步的研究,接下来的研究中,首先会对交接区的设置进行更详细的讨论,其次会对该问题给出统一最优化算法(Unified optimization methodology, UMO),并对该问题进行更大规模的计算和实验。

### 参考文献:

[1] NARASIMHAN A, PALEKAR U S. Analysis and algorithms for the transtainer routing problem in container port operations[J]. Transportation Science, 2002, 36(1): 63-78.  
 [2] KU L P, LEE L H, CHEW E P, et al. An optimisation

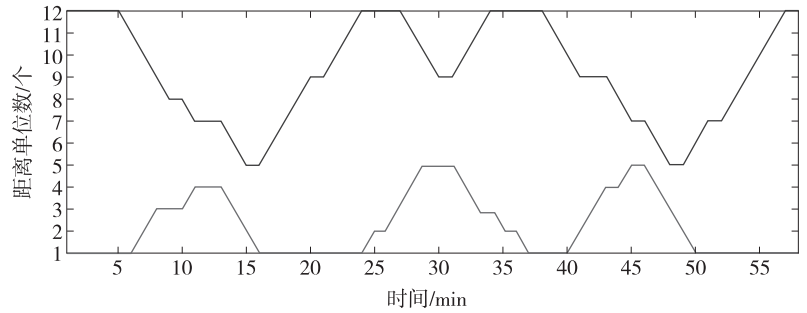


图 6 作业组 3 调度实例

Fig. 6 Example of real-time scheduling of group 3

表 2 中转箱区作业情况延时统计

Tab. 1 Delay statics of handle jobs with transfer area

	是否接力			
	否	是	是	是
作业组	9	10	11	12
缓冲 1/min	140.1	138.2	110.1	112.8
缓冲 2/min	109.3	113	99.1	99.7
缓冲 3/min	92.4	91.6	85.3	85.2
缓冲 4/min	83	84.4	77.2	77.6
缓冲 5/min	77.1	76.9	71.6	69.6



- framework for yard planning in a container terminal: case with automated rail-mounted gantry cranes[J]. *Or Spectrum*, 2010, 32(3):519-541.
- [3] NG W C, MAK K L. Yard crane scheduling in port container terminals[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2005, 29(3):263-276.
- [4] GHAREHGOZLI A H, YU Y, DE KOSTER R, et al. An exact method for scheduling a yard crane[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 235(2):431-447.
- [5] CHEUNG R K, LI C L, LIN W Q. Interblock crane deployment in container terminals[J]. *Transportation Science*, 2002, 36(3):Cp1.
- [6] NG W C. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 164(1):64-78.
- [7] GUO X, HUANG S Y. Dynamic space and time partitioning for yard crane workload management in container terminals[J]. *Transportation Science*, 2012, 46(1):134-148.
- [8] CAO Z, LEE D H, MENG Q. Deployment strategies of double-rail-mounted gantry crane systems for loading outbound containers in container terminals[J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 115(1):221-228.
- [9] VIS I F A, CARLO H J. Sequencing two cooperating automated stacking cranes in a container terminal[J]. *Transportation Science*, 2010, 44(2):169-182.
- [10] PARK T, CHOE R, OK S M, et al. Real-time scheduling for twin RMGs in an automated container yard[J]. *Or Spectrum*, 2010, 32(3):593-615.
- [11] GHAREHGOZLI A H, LAPORTE G, YU Y, et al. Scheduling twin yard cranes in a container block[J]. *Transportation Science*, 2014, 49(3):686-705.
- [12] FROYLAND G, KOCH T, MEGOW N, et al. Optimizing the landside operation of a container terminal[J]. *OR Spectrum*, 2007, 30(1):53-75.
- [13] DORNDORF U, SCHNEIDER F. Scheduling automated triple cross-over stacking cranes in a container yard[J]. *Or Spectrum*, 2010, 32(3):617-632.
- [14] FROYLAND G, KOCH T, MEGOW N, et al. Optimizing the landside operation of a container terminal[J]. *OR Spectrum*, 2007, 30(1):53-75.
- [15] STAHLBOCK R, VOSS S. Efficiency considerations for sequencing and scheduling of double-rail-mounted gantry cranes at maritime container terminals[J]. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 2010, 2(1):95-123.
- [16] PETERING M E H, MURTY K G. Effect of block length and yard crane deployment systems on overall performance at a seaport container transshipment terminal[J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(5):1711-1725.
- [17] PETERING M E H, WU Y, LI W, et al. Development and simulation analysis of real-time yard crane control systems for seaport container transshipment terminals[J]. *Or Spectrum*, 2009, 31(4):801-835.

## Operations Research and Cybernetics

### Real-time Scheduling of Twin Automatic Stacking Crane in Container Terminal

DING Yi, CHEN Hangqin, LIN Guolong

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** [Purposes] Through the research on the real-time scheduling for TASC problem, the theoretical results of automatic container terminals are enriched. [Methods] The problem is modeled as a multiple asymmetric traveling salesman problem with reposition, buffer space and interference constraints. The objective is to minimize the delay of trucks and vessels. We developed a parallel real-time scheduling algorithm to study the problem with computational experiments. [Findings] The result shows that use multiple buffer space and reposition operation can reduce the delay of trucks and automatic guided vehicle and improve the efficiency of operation in automatic container terminal. [Conclusions] Setting the buffer zone and reposition area can reduce the delay of the task. And increasing capacity of buffer zone can improve the efficiency, when there are lots of tasks in seaside.

**Keywords:** integer programming; automatic container terminal; automatic stacking crane; real time scheduling

(责任编辑 许 甲)