

集装箱码头堆场取箱时间窗优化研究^①

魏航

(上海财经大学国际工商管理学院, 上海 200433)

摘要: 码头堆场是供装卸船舶存放集装箱的场所,同时也是向货主交接集装箱的地方. 由于取箱车辆到达时间的不确定性,码头运营方需要在堆场进行大量的翻箱作业,消耗大量的劳动成本. 首先对码头取箱时间窗优化机制进行了说明,构建了码头方补助金函数与车辆方的成本函数,获得了车辆方取箱的到达率函数,进而得到了码头方的翻箱次数公式. 然后,描述了集装箱码头堆场取箱时间窗优化问题,建立了取箱时间窗优化模型,并设计了求解的遗传算法. 最后给出算例,分别对两种不同的取箱模式进行对比,并进行了灵敏度分析. 通过对进口集装箱的提取时间进行取箱时间窗的优化分配,从而减少了码头方的翻箱操作,提高了码头的期望收益与运作效率.

关键词: 集装箱码头; 取箱; 时间窗; 优化

中图分类号: U116.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2011)09-0021-16

0 引言

随着中国经济的快速发展,对于港口物流处理能力的需求也不断上升. 2009年,全球吞吐量最大的10大集装箱港口中,中国占有6个,分别为上海港第2位,香港港第3位,深圳港第4位,广州港第5位,宁波港第7位,青岛港第9位. 因此,如何对这些集装箱码头进行有效管理成为一个非常重要的问题. 特别是2009年国务院发布了《国务院关于推进上海加快发展现代服务业和先进制造业建设国际金融中心和国际航运中心的意见》,提出了将上海建成具有全球航运资源配置能力的国际航运中心,就更加需要提高我国集装箱码头的运营水平,降低运营成本,提升运营效率.

对于集装箱码头的运作问题,主要涉及泊位优化、堆场管理、运输优化、设备管理等问题,对于这些问题目前已有大量的研究^[1-2]. 其中,由于堆场在整个集装箱码头管理中的重要地位,国内外

的许多学者都对堆场管理的相关问题进行了大量而深入的讨论,以提高堆场的利用效率. 研究主要分成堆场计划^[3-9]、减少翻箱次数和设备优化^[10-13]、以及收益管理^[14-15]3个研究方向.

在集装箱码头堆场中的集装箱基本上可以分为进口箱(in-bound)和出口箱(out-bound)两大类. 其中,进口箱由于其存在明确的目的地、航班、离港时间等信息,在堆放安排时相对较为容易. 然而,对于出口箱,由于取箱车辆到达时间的不确定性,导致堆场的管理面临巨大的挑战,也导致成本大量增加. 码头运营成本主要包括翻箱成本、运输成本、龙门吊作业成本等^[1]. 目前在大型的集装箱堆场,翻箱率达到67%~100%^[2]. 同时,随着最近几年集装箱吞吐量的不断增加,堆场中的集装箱层高也不断上升,导致翻箱作业大量增加. 比如,目前有9层的堆场,按照现在的堆箱方式和取箱方式,翻箱率大约为220%^[11]. 显然,与一般堆场4-6层的堆场层高相比,此时翻箱率将大量增

① 收稿日期: 2009-07-21; 修订日期: 2010-10-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70872068); 上海财经大学“211工程”3期重点学科建设资助项目.

作者简介: 魏航(1976—),男,浙江绍兴人,博士,副教授. Email: odaywei@yahoo.com.cn

加,约增大2-3倍,也就是说,仅仅翻箱成本将增加2-3倍。

显然,引起大量翻箱作业,并带来大量成本的主要原因来自于车辆到达时间的不确定性^[1]。因此,可以考虑设计一种机制来控制或改变车辆的到达时间,减少翻箱次数,以实现堆场的有效管理。目前的堆场管理中,码头运营方(下面简称码头方)采用的办法是7天之内免费,7天之后需要缴纳一定费用。但是,在这种形式下,导致取箱车辆在顺位上到达的概率相对较小,导致翻箱成本较高。因此,码头方可以考虑如何增加在顺位上被取走的概率,可以采用的方法为:对希望到达的时间范围给予取箱车辆方(下面简称车辆方)一定的补助,而不在希望到达的时间范围不予补助或是处以一定的罚金。对于这样的机制,通常可以利用时间窗来进行表达。在此,取箱时间窗的意思为对于某一个或某一类集装箱的最优的最早取箱时间与最晚取箱时间。

利用时间窗来表示在物流服务或是其他生产活动中对需要的服务、生产安排等满足一定的时间要求,是一种常见的方式。时间窗最常见是运用于车辆路径问题中,且取得了很好的成果^[16-17]。Braysy和Gendreau^[18-19]总结了目前关于有时间窗限制下的车辆路径问题研究,对目前关于求解车辆路径问题的传统启发式算法与快速搜索算法进行了总结与评述。其次,时间窗还应用于最短路问题的研究,Desrochers和Soumis^[20]研究了静态网络下有时间窗的最短路问题,利用对偶原理,通过重复优化的方法,给出了求解的算法。Ioachim等^[21]对具有线性节点成本情况下有时间窗限制的最短路问题进行了研究,对不同情况下路径的占优策略进行了定义,设计了新的动态规划求解方法。

其次,在港口管理中,往往也会有很多时间限制的情况。因此,时间窗在港口管理中也有些应用,Gendreau等^[22]对到达港口需要作业船只的作业顺序转化为有时间窗的车辆路径问题,利用禁忌搜索算法进行了求解。Imai等^[23]对连续岸线的泊位分配调度进行了研究,建立了类似于多车场有时间窗限制的车辆调度模型的泊位分配模型,并设计了基于拉格朗日松弛的启发式算法。Möhring等^[24]对自动引导车的调度进行了研究,基

于有时间窗限制的最短路模型,对实时情况下自动引导车可能出现的各种情况进行了分析。樊铁成等^[25]将船舶挂港选择问题作为基于软时间窗多船的装卸货问题来研究,减少了运营成本。

随着国际贸易的增加,目前码头堆场需要堆放的集装箱数量不断增加,集装箱堆场的层高也逐渐增高。因此,若是没有很好的取箱顺序,可能导致翻箱次数的急剧上升,会带来巨大的成本压力。这样就有必要对取箱的顺序进行安排,优化取箱的时间窗,以激励取箱车辆按照一定的顺序到达,降低翻箱次数。

本文讨论了集装箱码头堆场出口箱管理取箱时间窗的优化管理,首先说明码头取箱时间窗优化的机制,构建了码头方补助金函数与车辆方的成本函数,获得了车辆方取箱的到达率函数,进而得到了码头方的翻箱操作公式。然后,描述集装箱码头堆场取箱时间窗优化问题,建立了取箱时间窗优化模型,并设计了求解的遗传算法。最后给出了算例,对比了两种不同的取箱模式,并进行了灵敏度分析。

1 问题描述

在集装箱码头堆场管理中,由于取箱车辆到达时间的不确定性,导致需要大量翻箱作业,为码头方增加很多成本。为了控制取箱车辆的到达时间,码头方可以对希望到达的时间范围给予车辆方一定的补助,而不在希望到达的时间范围不予补助或是处以一定的罚金,以改变车辆在不同时间的到达率。当然,在具有时间窗机制下,码头方需要保证车辆方的利益不低于无时间窗下的利益,否则车辆方将不会配合与码头方合作,导致时间窗机制的无效。因此,码头方需要在不损害车辆方利益的前提下,对堆场中的每一类出口箱确定合理的取箱时间窗,以及合理的补助金函数,以最大化码头方的利益。

2 基本分析

对于集装箱码头方而言,其目标是为了减少支出的成本,提高运作效率,获取更高的收益。由于集装箱车辆方的取箱车辆到达时间的不确定

性,导致增加很多的成本,主要包括翻箱成本、运输成本、龙门吊作业成本等.因此,若是能够设计一种机制来控制车辆的到达时间,则可以降低这些成本,实现堆场的有效管理.

由于在机制设计中,分别涉及两个主体:码头方和车辆方,各自考虑的主要目标均为成本.在此,假设码头方作为机制的设计者,车辆方作为跟随者对码头方给出的机制作出反应.

显然,对于堆场中的集装箱,若是取箱的车辆方能够完全按照集装箱的摆放次序到达,即车辆对应于某一给定的时间窗内到达,则此不产生任何翻箱费用.因此,码头方的机制设计的基本思路就是激励车辆方尽量按照这样的次序到达,或是增加在给定的时间范围内到达的概率,以减少翻箱成本.当然,这样的设计可能增加车辆方的成本,因而车辆方不予配合.因此,码头方的机制需要保证车辆方的利益不受损害,即在保证车辆方利益的前提下,进行机制的设计.

这样,码头方的激励机制的基本方式为:码头方对希望车辆到达时间范围内到达的车辆方,给予一定的补助金,以激励车辆方;同时,对在时间窗范围之外到达者,相应减少补助金金额,甚至为负.由于这样的机制对于车辆方的成本有所改变,相应地会影响车辆到达码头的到达率,并进而影响堆场集装箱的翻箱情况.因此,下面将分别对机制设计的整体思路、机制设计所涉及的码头方和车辆方的成本、车辆的到达情况、以及在这样的机制设计下的码头方的翻箱情况进行分析.

2.1 机制设计思路

当集装箱运输船舶自上一港口出发后,码头方根据目的地为自己码头的集装箱确定卸箱次序,再确定所卸集装箱在堆场中的位置.当确定位置后,码头方设计出堆场中各集装箱的时间窗,并向车辆方告知其各自集装箱取箱的时间窗以及相应的补助金形式.车辆方在取箱时需要支付一般情况下取箱缴纳的堆场费用.此外,如果车辆方在时间窗内到达,可以获得一定金额的补助;否则,在时间窗之外到达,补助金金额会减少,甚至为负(为负时,车辆方支付给码头罚金).具体流程如图 1 所示.

2.2 集装箱取箱顺序与聚类

一般地,集装箱的位置由其所处的堆(block),以及在某一堆内的列(row)、贝(bay)、层(tier)三个指标来定位.对于某一堆中的某一个集装箱,可以表示为 (i, j, k) .其中 i 指列数, j 指贝数, k 指层数,具体如图 2 所示.比如:(1, 1, 1)指第 1 列,第 1 贝,第 1 层的集装箱;(6, 2, 5)指第 6 列,第 2 贝,第 5 层的集装箱.

在实际取箱活动中,单次取箱和翻箱操作的成本主要由 3 部分构成:龙门吊的前后,吊具的上下,吊具的横向移动的成本所构成^[1].这样,相应地可以通过减少龙门吊的前后,吊具的上下,吊具的横向移动来降低由于翻箱操作所带来的成本.因此,在设计集装箱的取箱顺序时,主要考虑如何减少这 3 个成本.

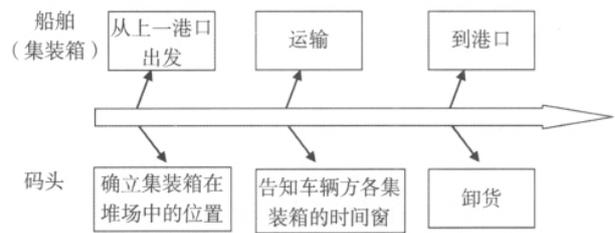


图 1 码头方决策流程

Fig. 1 The decision process for container terminal

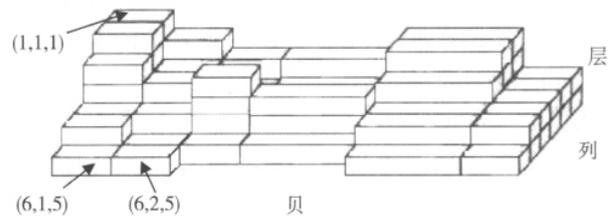


图 2 编号规则

Fig. 2 The rule of coding

显然,龙门吊的前后、吊具的上下、吊具的横向移动,分别对应于集装箱的贝、层和列.因此,可以在设计集装箱堆场取箱时间窗的分配顺序时,也主要从这 3 个方面来进行.根据龙门吊的前后、吊具的上下、吊具的横向移动的成本情况,在取箱顺序的设计上,可以分别从简单和复杂两个方面考虑设计取箱时间范围:①在龙门吊的前后,吊具的上下,吊具的横向移动 3 个成本中,选择占比最大的成本,然后确定其所需要的对应策略.②整体考虑优化龙门吊的前后,吊具的上下,吊具的

横向移动3个成本.

这样,相应地可以设计集装箱取箱顺序的时间窗优化方案,具体如下:①单独每一层(或贝、列)的所有集装箱共享1个时间窗,且不同类集装箱不能共享1个时间窗(否则可能增加翻箱次数),后一层(或贝、列)时间窗的起点是前一层(或贝、列)时间窗的终点.可以共享的原因是此区域的集装箱相互间无干扰;②每一贝、列、层的集装箱,单独具有1个时间窗,且后一个时间窗的起点是前一个时间窗的终点,且不同类集装箱不能共享1个时间窗(否则可能增加翻箱次数).由于单独每一个集装箱均分配1个时间窗可能导致每一集装箱所能够分配的时间很短,反而造成取箱的不方便,而增加翻箱次数与成本.根据Kim^[10]的研究,可以知道龙门吊吊具的横向移动成本相对较低(对应于列).因此,可以将列的因素消除,考虑每一贝和层的集装箱,作为一类,具有同一个时间窗.

2.3 补助金与成本设定

由于码头方希望车辆在一定的时间窗内到达.因此,可以对在希望取箱车辆到达的时间窗内到达的车辆方,给予一定的补助金,以激励车辆方;同时,若取箱车辆在时间窗之外到达,补助金金额会减少,甚至会处以罚金.同时,车辆自身也存在一定的成本.下面分别从码头方设计的补助金和车辆自身的成本进行分析.

2.3.1 补助金形式

对于堆场中的某个集装箱,根据其在堆场中的位置,码头方可以得到希望取箱车辆到达的时间窗(a, b).为了激励车辆方在码头方希望的时间窗(a, b)到达,可以对在给定的时间窗(a, b)内到达者给予较高的补助金.同时由于码头方在设计时间窗时,导致有些集装箱的取箱时间可能过晚,以至于增加了车辆方的成本.考虑到对于车辆方的公平性,在此,假设最高补助金为希望到达时间范围(a, b)的最大时间b的函数;车辆方必须在码头方所提供的大时间窗(a - d, b + d)的范围内到达, d为时间窗前后允许伸缩的弹性时间;所有集装箱最晚会在时间D之前被取走.

这样,可以假设对于堆场中的某个集装箱的补助金f(t, a, b)表达式如下,形式如图3所示.

$$f(t, a, b) = \begin{cases} \alpha(t-a) + \gamma b & t \in (\max(0, a-d), a) \\ \gamma b & t \in [a, b] \\ -\alpha(t-b) + \gamma b & t \in (b, \min(D, b+d)) \end{cases} \quad (1)$$

其中, f(t, a, b) 为取箱车辆到达时间 t 的函数, 在 (max(0, a - d), a) 时是增函数, 在 (b, min(D, b + d)) 时为减函数, 在 [a, b] 时为定值 γb, 即最高的补助金额与码头分配的时间窗相关. 在此, 为了方便起见, 设不同集装箱取箱车辆的补助金在 (max(0, a - d), a), (b, min(D, b + d)) 的斜率是一样的.

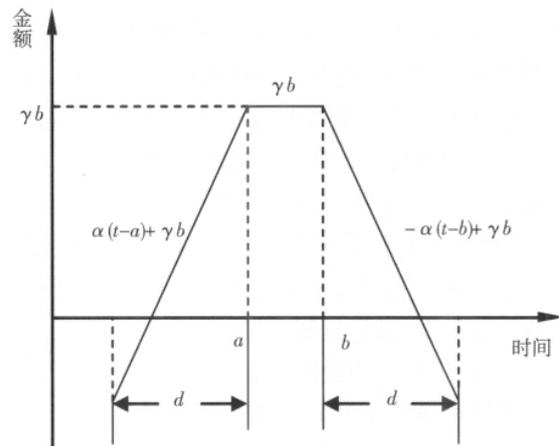


图3 补助金函数形式

Fig. 3 The subsidy function

2.3.2 车辆方成本函数

一般地,所有的车辆方成本是由于车辆方到达码头而产生的运输与等待的成本,设为g(t),为车辆到达时间t的函数.g(t)的值随着时间t的增加而变大,即越迅速地取箱,车辆方的成本越低,越晚取箱,成本越高^[14].为了简化运算,将车辆方的成本函数表达成线性函数,即

$$g(t) = \beta t \quad (2)$$

其形式如图4所示.

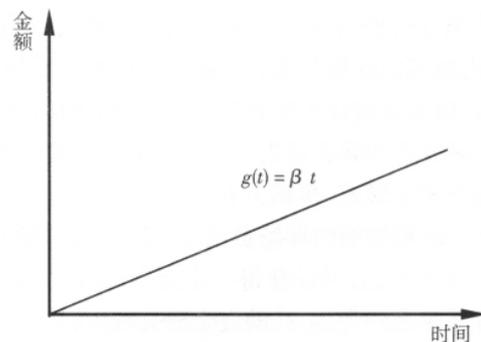


图4 车辆方的成本函数

Fig. 4 The inconvenient cost of vehicle

2.4 车辆到达率函数

由于码头方对在一定时间窗内到达者给予一定补助金,在这种新机制下对于车辆方的成本有所改变,相应地会影响车辆到达码头的到达率.为了构造车辆的到达率函数,可以分成 3 个步骤:构造新的收益函数;获得车辆方新的到达意愿;获得新的到达概率分布函数.

1) 车辆方新的收益函数 $h'(t, a, b)$,如图 5 所示.表示在码头方设置了时间窗的条件以及相应的补助金函数下车辆方的收益函数为

$$h'(t, a, b) = f(t, a, b) - g(t) \quad (3)$$

2) 车辆方新的到达意愿 $h''(t, a, b)$,如图 6 所示.由于车辆的到达意愿依赖于车辆方的收益函数,且一定为正.因此,可以通过 $h'(t, a, b)$ 取正进行构造,将收益函数整体上移为正,就可以得到车辆方的到达意愿函数 $h''(t, a, b)$.令

$$\min\{h'[\max(a-d, 0)]\} h'[\max(b+d, D)] = K$$

可以得到

$$h''(t, a, b) = h'(t, a, b) - K \quad (4)$$

3) 基于到达意愿函数,就可以构造出车辆到达率的密度函数 $h(t, a, b)$.由于车辆到达率的密度函数需要满足 $\int_{\max(0, a-d)}^{\min(D, b+d)} h(t, a, b) dt = 1$.因此,可以将其表示为

$$h(t, a, b) = \frac{h''(t, a, b)}{\int_{\max(0, a-d)}^{\min(D, b+d)} h''(t, a, b) dt} \quad (5)$$

2.5 翻箱成本与次数

由于车辆的达到时间不确定,可能导致下层集装箱取箱的时间早于上层集装箱,因此需要进行翻箱操作. Kim 利用选择指数 $\langle IOS \rangle$ (index of selectivity) 在给定 N 只集装箱的情况下,给出了近似的计算翻箱次数的公式^[10].其基本思想为由于处在最上层的集装箱可以直接被取走,所以假设其 $\langle IOS \rangle$ 为 1,次上层为 1/2,其余依次为 1/3, 1/4 等.但是,由于车辆到达的时间不确定性,因此,假设任何一个集装箱 (i, j, k) 取箱车辆在其合适(顺位)的时间上到达,在其合理的顺序上被取走的概率 p_{ijk} 相等,且 $p_{ijk} = 1/N, i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$.具体的翻箱次数的公式如下^[10]

$$N_1 = \frac{N}{S} - N \quad (6)$$

$$S = \frac{\sum_{i,j,k} \langle IOS \rangle_{ijk}}{N} \quad (7)$$

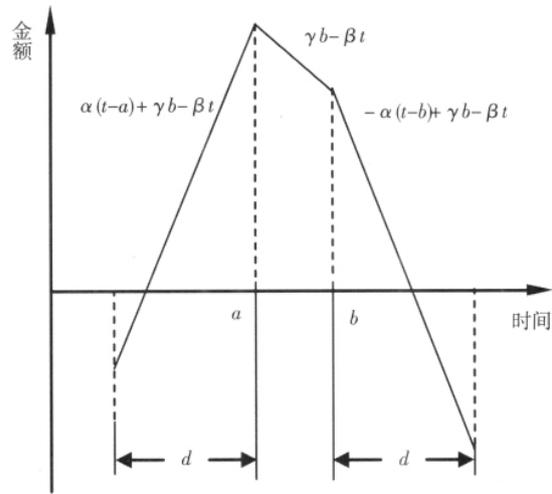


图 5 车辆方新的收益函数
Fig. 5 The new revenue function of vehicle

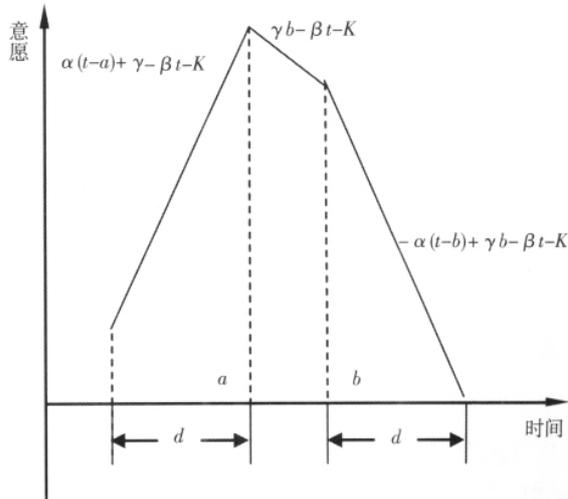


图 6 车辆方新的到达意愿
Fig. 6 The new arriving distribution function of vehicle

其中, N_1 表示翻箱次数; N 表示集装箱的数量; S 表示所有集装箱在顺位上被取走的概率.

显然,发生翻箱与集装箱是否在顺位上被取走有关,若是在顺位上被取走的概率较大,则翻箱次数较少.在此,设集装箱 (i, j, k) 顺位上被取走的概率为 $p_{ijk}, i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$.则原有的计算在顺位上被取走的概率为

$$S = \sum_{i,j,k} \langle IOS \rangle_{ijk} p_{ijk} \quad (8)$$

这样,在新的机制下,由于集装箱码头对车辆到达时间进行了不同的激励,改变了集装箱在顺

位上被取走的概率. 这样, 就可以得到新的计算翻箱次数的公式为

$$N_2 = \frac{N}{\sum_{i,j,k} \langle IOS \rangle_{ijk} P_{ijk}} - N \tag{9}$$

其中 N_2 代表新机制下的翻箱次数. 且

$$P_{ijk} = \int_{a_{ijk}}^{b_{ijk}} h(t_{ijk}, a_{ijk}, b_{ijk}) dt,$$

$$i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$$

表示当集装箱 (i, j, k) 在顺位上被取走的概率.

3 数学模型

由于在集装箱堆场中每个堆的集装箱数量相当多, 比如 $6 \times 6 \times 4$ 的 1 个堆有 144 个箱子, 而大部分集装箱在堆场的堆放时间约为 3 - 5 d^[1]. 因此, 若是每一贝、列、层的集装箱, 单独具有一个时间窗, 且后一个时间窗的起点是前一类时间窗的终点, 不同集装箱不能共享 1 个时间窗. 则可能导致每个集装箱的时间窗范围极短, 约为 0.5 ~ 1 h. 这对车辆方提出了极高的要求, 很难在这样精确的时间范围内到达, 反而可能增加翻箱次数. 同时, 龙门吊吊具的横向移动成本相对较低(对应于列)^[10]. 因此, 可以考虑将列的因素消除, 以每一贝和层的集装箱作为一类, 具有同一个时间窗. 基于这样的集装箱聚类, 即消除了列的因素, 对于每一类集装箱均可以表示为 (j, k) , 现

$$\max E = \left\{ \sum_j \sum_k \left[P - \int_{\max(0, a_{jk} - d_{jk})}^{\min(D, b_{jk} + d_{jk})} h(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk}) f(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk}) dt - c_0 \right] \right\} I - c_0 N_2 \tag{10}$$

$$\text{s. t. } a_{jk} = b_{j(k-1)} \quad \forall k \in 2, 3, \dots, K \tag{11}$$

$$b_{(j-1)K} = a_{j1} \quad \forall j \in 2, 3, \dots, J \tag{12}$$

$$b_{JK} \leq D \tag{13}$$

$$\left[\sum_j \sum_k \int_{\max(0, a_{jk} - d_{jk})}^{\min(D, b_{jk} + d_{jk})} h(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk}) f(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk}) dt \right] I \leq c_0 (N_1 - N_2) \tag{14}$$

$$N_2 \leq N_1 \tag{15}$$

$$\left\{ \int_{\max(0, a_{jk} - d_{jk})}^{\min(D, b_{jk} + d_{jk})} h(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk}) [g(t) - f(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk})] dt \right\} I \leq \int_0^D h^0(t) g(t) dt \tag{16}$$

其中, 式(10) 是目标函数, 即最大化码头收益, 由 4 部分构成: 车辆方缴纳的堆场取箱费用 P , 码头方给予车辆方的补助金函数, 完成卸货时所花费的成本, 整体翻箱费用. 式(11) 表明下一层时间窗的开始时间等于上一层的结束时间; 式(13) 表达了最下面一层的集装箱时间窗结束时间与下

需要获得其相应的时间窗 (a_{jk}, b_{jk}) 以最大化码头方的收益.

3.1 变量及参数

参数:

P 一般情况下取箱缴纳的堆场费用;

c_0 操作单个集装箱的成本;

α 对车辆的补助金函数 $f(t, a, b)$ 的斜率;

β 车辆方成本函数 $g(t)$ 的斜率;

γ 码头方提供给车辆方的最大补助金额的斜率;

D 集装箱最晚被取走的时间;

N 所考虑堆区集装箱的个数;

N_1 没有设置时间窗情况下的翻箱次数;

d_{jk} 码头方允许某类集装箱 (j, k) 取箱车辆到达时间偏离区间的长度;

I, J, K 集装箱的列、贝、层的最大值.

变量:

a_{jk} 码头方允许某类集装箱 (j, k) 取箱车辆最优的最早取箱时间;

b_{jk} 码头方允许某类集装箱 (j, k) 取箱车辆最优的最晚取箱时间;

N_2 在设置时间窗情况下的翻箱次数.

3.2 模型

这样, 对给定 I 列、 J 贝、 K 层的 1 个集装箱堆, 在消除了列的因素后, 就可以给出集装箱码头堆场取箱时间窗优化设置问题的数学模型

贝第一层的集装箱时间窗开始时间一样, 即只有上一贝的集装箱被取走后, 才会开始取下一贝中的集装箱, 与式(12) 结合在一起即表示不同类型的集装箱的时间窗将会构成连续的时间; 式(13) 表示了时间窗设置不能超过边界; 式(14) 表示码头方支付的补贴金总额不超过其采取了时间窗优化

而获得的成本节约,该条件确保码头方愿意实施优化方案;式(15)表示在时间窗时的翻箱次数应该不大于没有时间窗时的翻箱次数;式(16)表示在设置了时间窗的情况下,车辆方的成本应该不比原来没有时间窗时高,此条件保证了车辆方有动力在时间窗到达,其中,车辆方的到达成本为 $\int_0^D h^0(t) g(t) dt$ 其中

$$h^0(t) = \frac{\beta D - \beta t}{\int_0^D (\beta D - \beta t) dt} \quad (17)$$

为车辆方在原有情况下的到达率。

4 算法设计

由于集装箱取箱时间窗的设定是一个连续优化问题,且为非线性规划。因此,利用传统的方法很难获得其最优解。因此,可以利用快速的搜索算法来获得最优(或次优、满意)策略。遗传算法已经在许多领域,如:路径优化、选址、资源优化等方面得到了成功的应用,且获得了良好的效果^[26-30]。在此,

利用遗传算法进行求解。下面将构造集装箱码头堆场取箱时间窗优化设置的遗传算法。

第 1 步 随机产生初始群体 为了产生初始群体,首先需要设计编码,将问题的策略表达为编码形式。对于堆场中每一类集装箱而言,其时间窗的起点为上一类集装箱时间窗的终点,其时间窗的终点为下一类待取箱时间窗的起点。由于各个集装箱对应时间窗的起止并不一定是整数,因此,在进行编码时可以采用实数编码的形式。假设存在 m 类集装箱,需要生成 m 个时间窗,可以将 m 类集装箱进行排列,然后通过 $0 - D$ 内随机生成 $m - 1$ 个点,获得 m 个时间段。即染色体可以表示为: $0, t_1, t_2, \dots, t_m$ 。其中 t_1, t_2, \dots, t_m 分别对应于集装箱 1, 2, ..., m 的取箱时间窗的结束时间。相应地,其起始时间为前一类集装箱的结束时间。这样,可以获得一条染色体,其表达的意义为对应的每类集装箱取箱时间窗的结束时间。

对于任何一个染色体,由于其取箱时间窗的结束时间是严格按照 m 类集装箱进行排列,它自动地具有以下信息,即每一个结束时间对应一类集装箱,同时自然地可以得到其对应的取箱时间窗范围。

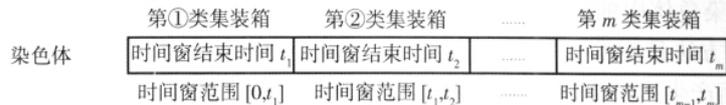


图 7 染色体表达意义

Fig. 7 The character of chromosomes

这样,在获得了染色体的编码之后,就可以生成初始种群。在此,设种群大小为 n ,时间窗个数为 m $gen = 0$,并将这些群体记为 $P(0)$ 。初始种群可按如下步骤随机产生:

- ① 在 $0 - D$ 内随机生成 $m - 1$ 个点,生成 m 项时间窗的随机排列;
- ② 将时间窗安排给每个集装箱,产生 1 条可行染色体;
- ③ 重复以上过程,直至产生给定的 n 条可行染色体。

第 2 步 计算个体适应度 其次,需要构造适应度函数。根据数学模型中给出的目标函数,可以进行适应度函数 $F(A, B)$ 的设计,其中 (A, B) 为所有集装箱时间窗的集合

$$F(A, B) = \sum_j \sum_k \left\{ P - \int_{\max(0, a_{jk} - d_{jk})}^{\min(D, b_{jk} + d_{jk})} h(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk}) f(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk}) dt - c_0 \right\} I - c_0 N_2 -$$

$$(A, B) = [(a_{11}, b_{11}), (a_{12}, b_{12}), \dots, (a_{jk}, b_{jk})]$$

显然,给出的染色体不一定能满足模型中所要求的各个约束条件。根据给出的染色体设计方案,约束(11) - (12)天然地能够满足;约束(14)需要满足码头方支出小于其由于翻箱减少所带来的成本节约,显然对于任意给定的染色体并不能够满足此约束;还有,对于约束(15)满足翻箱减少的约束,则不需要考虑,因为若在新机制的情况下,翻箱没有减少,同时还需要增加补助金,则码头方的收益一定会更加恶化;最后,对于约束(16)需要满足车辆收益约束,显然给出的染色体也不一定能够满足。因此,可以将约束(14)和(16)放入目标函数中,作为适应度函数的一个部分,于是有

$$\mu \left\{ \left[\sum_j \sum_k \int_{\max(0, a_{jk}-d_{jk})}^{\min(D, b_{jk}+d_{jk})} h(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk}) f(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk}) dt \right] I - c_0(N_1 - N_2) \right\}^+ - \quad (18)$$

$$v \left\{ \left[\int_{\max(0, a_{jk}-d_{jk})}^{\min(D, b_{jk}+d_{jk})} h(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk}) [g(t) - f(t_{jk}, a_{jk}, b_{jk})] dt \right] I - \int_0^D h^0(t) g(t) dt \right\}^+$$

其中 μ 为不满足车辆收益约束的单位罚金,且充分大; v 为不满足车辆收益约束的单位罚金,且充分大; $\{x\}^+ = \max\{x, 0\}$. 当然,在利用罚函数处理时,若是不可能解数量太多,还可以利用修补方法将不满足约束的染色体转为合法. 因此,可以结合罚函数与修补的方法,进行处理^[26].

显然,给出的适应度函数具有越大越好的特性,因此,可以根据式(18)计算种群 $P(\text{gen})$ 中每一个个体的适应度.

第3步 复制和交叉 对于遗传算法中的交叉操作,可以利用赌盘法作选择机制,并用精选法嵌入其中,以加大优秀个体可以生存到下一代的机会,同时利用复制,将最优个体保存至下一代.

1) 复制 在每代种群中,将适应度最大的染色体复制到下一代,并保留,以使下一代的最优策略不会差于父代的策略.

2) 交叉 对每代种群以一定的交叉率 p_c 进行染色体交叉. 由于染色体中的时间窗为连续变量,在此采取的交叉方法是算术交叉^[26],即由两个个体的线性组合而产生出两个新的个体,其主要操作过程是:① 确定两个个体进行线性组合时

的系数 θ ; ② 在两个个体 $Ch_1^{\text{gen}}, Ch_2^{\text{gen}}$ 之间进行算术交叉,产生新的个体. 新个体的计算方式如下

$$Ch_1^{\text{gen}+1} = \theta Ch_1^{\text{gen}} + (1 - \theta) Ch_2^{\text{gen}} \quad (19)$$

$$Ch_2^{\text{gen}+1} = (1 - \theta) Ch_1^{\text{gen}} + \theta Ch_2^{\text{gen}} \quad (20)$$

比如,若存在5类集装箱,且设最后取箱的时间为10. 假设存在如表1所示的两条父代染色体 Ch_1^{gen} 和 Ch_2^{gen} . 当 $\theta = 0.15$ 时,子代 $Ch_1^{\text{gen}+1}$ 在①位的数值为: $2 \times 0.15 + 1 \times 0.85 = 1.15$. 按照此方法计算其余位置数值从而得到子代 $Ch_1^{\text{gen}+1}$; 子代 $Ch_2^{\text{gen}+1}$ 在①位的数值为 $1 \times 0.15 + 2 \times 0.85 = 1.85$. 按照此方法计算其余位置数值从而得到子代 $Ch_2^{\text{gen}+1}$, 最终结果如表2所示.

第4步 变异 对每代种群以一定的变异率 p_m 进行染色体变异. 变异方式选择将染色体中某两类集装箱所对应的时间窗进行互换. 同时,重新获得每一类集装箱所对应的时间窗,以及相应的开始时间与结束时间.

第5步 根据复制、交叉和变异获得新的群体 $\text{gen} = \text{gen} + 1$, 并记新的群体为 $P(\text{gen})$. 若满足停止条件,结束并输出结果; 否则,转第2步.

表1 交叉示例的父代染色体

Table 1 The parents chromosomes for crossover

染色体	集装箱编号				
	①	②	③	④	⑤
父代 Ch_1^{gen}	2	4	5	8	10
	[0, 2]	[2, 4]	[4, 5]	[5, 8]	[8, 10]
父代 Ch_2^{gen}	1	3	6	7	10
	[0, 1]	[1, 3]	[3, 6]	[6, 7]	[7, 10]

表2 交叉示例的子代染色体

Table 2 The child chromosomes by crossover

染色体	集装箱编号				
	①	②	③	④	⑤
子代 $Ch_1^{\text{gen}+1}$	1.15	3.15	5.85	7.15	10
	[0, 1.15]	[1.15, 3.15]	[3.15, 5.85]	[5.85, 7.15]	[7.15, 10]
子代 $Ch_2^{\text{gen}+1}$	1.85	3.85	5.15	6.85	10
	[0, 1.85]	[1.85, 3.85]	[3.85, 5.15]	[5.15, 6.85]	[6.85, 10]

在此, 停止条件为判断迭代的代数是否为要求代数(或是要求的计算精度), 若是, 停止进化迭代. 选择性能最好的染色体所对应的时间窗分配集合作为集装箱取箱时间窗优化的问题解输出.

5 算例分析

由于在实际集装箱运输过程中, 堆场取箱操作次数非常高, 模拟整个堆场的集装箱取箱情况难度很高且不现实. 同时, 集装箱堆场由堆组成, 各堆之间基本独立. 因此, 可以以堆场中的某一堆 (block) 为例, 进行模拟和计算, 具有较好的代表性, 也具有很好的应用价值.

5.1 算例描述

设堆场中存在 $6 \times 6 \times 4$ 的 1 个堆, 集装箱的列、贝、层的最大值分别为 $I = 6, J = 6, K = 4$. 码

$$f(t, a, b) = \begin{cases} 2.5t - 2.5a + 0.4b & t \in (\max(0, a - 12), a) \\ 0.4b & t \in [a, b] \\ -2.5t + 2.9b & t \in (b, \min(D, b + 12)) \end{cases} \quad (21)$$

5.2.2 车辆方的到达率函数

将所设置参数代入式(3)、(4)、(5), 可以得到

$$h'(t, a, b) = \begin{cases} 2t - 2.5a + 0.4b & t \in (\max(0, a - 12), a) \\ 0.4b - 0.5t & t \in [a, b] \\ -3t + 2.9b & t \in (b, \min(D, b + 12)) \end{cases} \quad (22)$$

$$h''(t, a, b) = \begin{cases} 2t - 2.5a + 0.4b - \min[h'(\max(0, a - 12)), h'(\min(D, b + 12))], & t \in (\max(0, a - 12), a) \\ 0.4b - 0.5r - \min[h'(\max(0, a - 12)), h'(\min(D, b + 12))], & t \in [a, b] \\ -3t + 2.9b - \min[h'(\max(0, a - 12)), h'(\min(D, b + 12))], & t \in (b, \min(D, b + 12)) \end{cases} \quad (23)$$

$$h(t, a, b) = \begin{cases} \frac{2t - 2.5a + 0.4b - \min[h'(\max(0, a - 12)), h'(\min(D, b + 12))]}{\int_{\max(0, a-d)}^{\min(D, b+d)} h''(t, a, b) dt}, & t \in (\max(0, a - 12), a) \\ 0.4b - 0.5t - \min[h'(\max(0, a - 12)), h'(\min(D, b + 12))], & t \in [a, b] \\ \frac{-3t + 2.9b - \min[h'(\max(0, a - 12)), h'(\min(D, b + 12))]}{\int_{\max(0, a-d)}^{\min(D, b+d)} h''(t, a, b) dt}, & t \in (b, \min(D, b + 12)) \end{cases} \quad (24)$$

5.3 运行结果

在此设计了两种不同的取箱模式来减少在层、贝、列上的成本, 具体如下:

1) 单独每一层的所有集装箱共享 1 个时间

窗. 可以共享的原因是此区域的集装箱相互间无干扰, 且后一类时间窗的起点是前一类时间窗的终点. 通过此方式减少在翻箱中成本最大的部分, 即龙门吊上下所带来的成本.

5.2 构造函数

5.2.1 码头方提供的补助金函数

根据给出 $\gamma = 0.4, \alpha = 2.5$, 可以形成如下的补助金函数

头方收取的取箱费用 $P = 100$ 元, 即无论车辆方在任何时间到达码头方取箱时, 均要支付 100 元的费用. 码头方对于集装箱单次操作成本为 $c_0 = 40$ 元, 即码头方的翻箱、取箱操作成本为 40 元. 所有集装箱的最迟取箱时间为 $D = 120$ h, 即集装箱自从船上卸下后 5 d 内会被所有车辆取走, 这与实际情况基本一致. 允许的偏离程度为 $d_{ijk} = 12$ h; 码头对于车辆方的补助金函数的斜率为 $\alpha = 2.5$; 码头方的最高补助金斜率为 $\gamma = 0.4$. 车辆方的车辆方成本函数为 $g(t) = 0.5t$, 即每向后推迟 1 h, 单个集装箱成本会上升 0.5 元. 现需要获得一种时间窗的优化分配方式, 在不损害车辆方利益的前提下, 最大化码头方的收益.

2) 每一贝、层的集装箱,单独具有 1 个时间窗.通过此方式可以减少龙门吊的前后、吊具的上下所带来的两类翻箱中成本较大的部分.

5.3.1 以层为分类的时间窗设置

当同层集装箱共享时间窗时,原 $6 \times 6 \times 4$ 的堆场结构所代表的 144 个集装箱按集装箱所处的层次分为 4 类,即堆场的结构变为 $1 \times 1 \times 4$.根据给出的遗传算法,设种群规模为 15(15 条染色

体),交叉系数为 0.85,变异系数为 0.15,精度为 0.001,运算 50 次,可以得到以下结果,包括:方案的时间窗范围、方案的收益情况、以及集装箱堆场层高变化对码头方收益的影响.

1) 时间窗 经过运算,表 3 给出了 50 次同等条件下的 4 个最优运算结果.图 8 给出了方案 1 各层的时间窗变化情况,可以看出每一层集装箱对应时间窗长度呈现先下降后上升规律.

表 3 各个集装箱时间窗起始时间与时间窗长度

Table 3 The starting time and time window for container at each tier

层数	集装箱取箱时间窗优化方案							
	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4	
	起始时间	时间窗长度	起始时间	时间窗长度	起始时间	时间窗长度	起始时间	时间窗长度
1	0	53.2	0	53.4	0	53.7	0	54.7
2	53.2	12.6	53.4	12.6	53.7	13.4	54.7	14.0
3	65.8	19.4	66.0	19.5	67.1	19.4	68.7	19.6
4	85.2	34.8	85.5	34.5	87.4	32.6	88.3	31.7

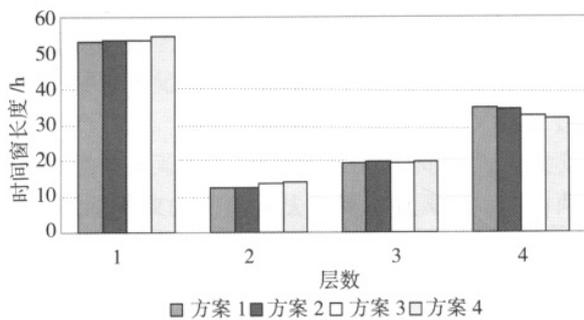


图 8 每层时间窗长度

Fig. 8 The time window for each tier

2) 码头方期望收益

相应地,根据获得的运行结果,可以得到码头方的期望收益如表 4 所示.由表可见,4 个方案运算的结果都优于没有设置时间窗时码头方的期望收益,且增加的幅度相当的大,码头方的收益平均约增加了 3 481.66 元.

3) 灵敏度分析 随着集装箱设计的进步,堆场管理水平的上升,集装箱堆放高度呈现出增加的趋势.下面讨论堆场最高可堆放层数增加时,码头方期望收益的变化.为此,针对给定 144 个集装箱堆,分别对层数变化为 3、4、6、8 时,不同的堆场模式进行研究和计算.由表 5 与图 9 可以看出,

随着堆场层数的增加,码头方期望收益逐渐减少,且趋势加快.特别是当堆场层数为 8 层时,原有模式下码头方的收益降为负值,而利用时间窗机制得到的收益还能够维持在较高的 4 266.52 元水准.

5.3.2 以层和贝为分类的运算结果

其次,对于同贝同层的集装箱共享时间窗这种情况,设种群规模为 50,交叉系数为 0.85,变异系数为 0.15,精度为 0.001 时,应用给出的遗传算法运算 50 次,可以得到以下结果,包括:方案的时间窗范围、方案的收益情况、以及集装箱堆场取箱成本变化对码头方收益的影响.

1) 时间窗 利用给出的算法,可以得到结果如附录表 1 所示的 4 个最佳方案.从该表中取方案 1 按不同的贝与层进行时间窗长度的比较,可以得到图 10 ~ 图 12.

表 4 码头方的期望收益

Table 4 The expected revenue of container terminal

码头方的期望收益 / 元				
原收益 ^②	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
3 340.80	6 824.16	6 822.78	6 820.63	6 817.33

② 原收益指在没有设置时间窗时,码头方的期望收益.其中,原收益的计算公式如下: $144 \times (100 - 40) - 132.48 \times 40 = 3 340.80$ 元,其中 132.48 为码头方未设置时间窗时的翻箱次数.

表 5 码头方总期望收益

Table 5 The expected revenue of container terminal

堆场方式	堆场方式与收益				
	层数	列数	贝数	原收益 / 元	总期望收益 / 元
1	3	6	8	4 974.55	6 994.08
2	4	6	6	3 340.80	6 824.16
3	6	6	4	529.77	6 014.88
4	8	6	3	- 1 494.86	4 266.52

从图 10 到图 13 中可以看出以下的规律:

- ① 随着层数的增加,各贝集装箱的时间窗长度呈现先降后升的规律;
- ② 除了少数集装箱外,多数集装箱时间窗长度在 1 ~ 10 h 之间;
- ③ 随着层数的增加,各层集装箱的时间窗加总后的长度大致呈现出先减少再增加的规律;

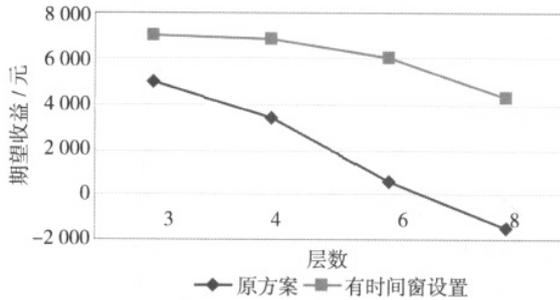


图 9 堆场不同堆高时的期望收益

Fig. 9 The expected revenue of container terminal with different tier

- ④ 随着贝数的增加,各贝集装箱的时间窗加总后的长度大致呈现出先增加再减少的规律.

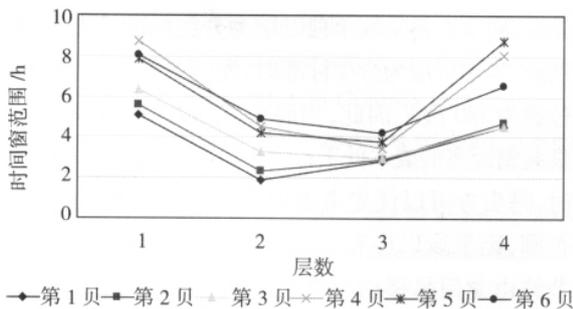


图 10 方案 1 中各贝集装箱时间窗长度

Fig. 10 The time window for each container in solution 1

2) 码头方期望收益 根据给出的上述运行结果,可以得到码头方的期望收益,如表 6 所示.由表可见 4 个方案运算的结果值都优于没有设置时间窗时码头方的期望收益,平均码头方的收益

增加了 1 964.5 元,较未设置时间窗时增加了 58.74%.

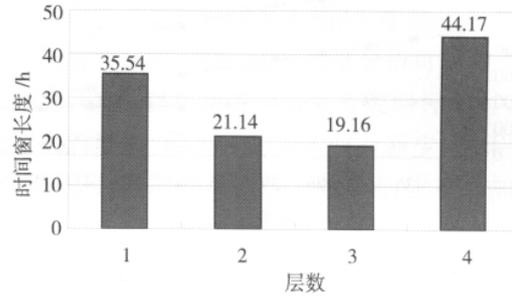


图 11 方案 1 中各层集装箱时间窗长度

Fig. 11 The time window for each tier in solution 1

表 6 码头方的期望收益

Table 6 The expected revenue of container terminal

码头方的期望收益 / 元				
原收益	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
3 340.80	5 306.71	5 305.32	5 305.02	5 304.30

3) 灵敏度分析 由于码头设备老化与更新、科学技术的提高、人力成本的变化、码头管理水平变化等因素,会使得码头方的单次翻箱成本出现上升或下降的波动.在此条件下,码头方相应获得更多成本上的节约或承担更多的成本支出.在此,设码头方的翻箱成本在 35 - 45 元之间波动.应用给出的算法,码头方的期望收益的变化情况如表 7 所示.相应地可以得到图 13,从图中可以看出码头方的期望收益随着翻箱成本的降低而上升.

5.4 方案对比与分析

经过运算,从所给算例的两个方案的运算结果可以得到如下结论.

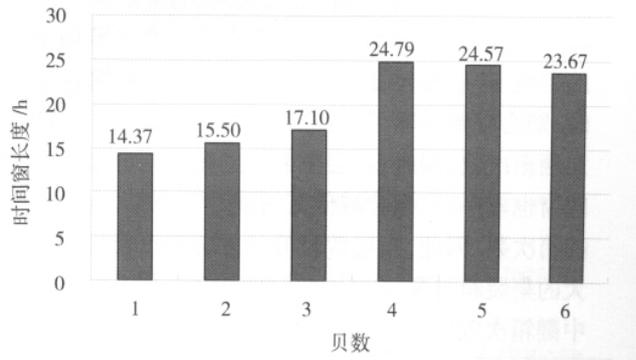


图 12 方案 1 中各贝集装箱时间窗长度

Fig. 12 The time window for each bay in solution 1

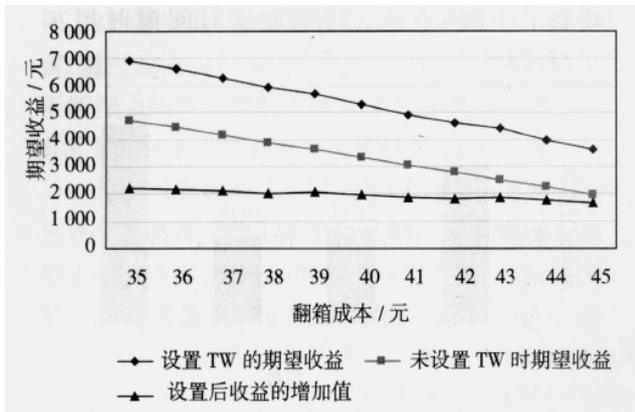


图 13 码头方的期望收益与翻箱成本

Fig. 13 The expected revenue of container terminal with different rehandle cost

表 7 不同翻箱成本时码头方的期望收益及边际收益③

Table 7 The expected revenue of container terminal with different rehandle cost

翻箱成本 / 元	码头方的期望收益及边际收益		
	设置 TW 的期望收益 / 元	未设置 TW 时期望收益 / 元	设置后收益的增加值 / 元
35	6 942.24	4 723.20	2 219.04
36	6 609.12	4 446.72	2 162.40
37	6 292.02	4 170.24	2 121.78
38	5 930.34	3 893.76	2 036.58
39	5 681.76	3 617.28	2 064.48
40	5 306.70	3 340.80	1 965.90
41	4 928.58	3 064.32	1 864.26
42	4 605.12	2 787.84	1 817.28
43	4 398.06	2 511.36	1 886.70
44	3 987.18	2 234.88	1 752.30
45	3 634.02	1 958.40	1 675.62

1) 无论是哪个方案,各贝集装箱的时间窗长度都呈现出先降后升的规律.从堆场实践操作来看,对于翻箱次数影响较大的是集装箱在堆场中的层数.若层数较低的集装箱分配的时间窗较小时,则会导致车辆可能在其他时间到达,因此会增加翻箱次数;同时,若层数最大的集装箱分配的时间窗也较小时,则会减低其被取走的概率,也增加翻箱次数.因此,当层数较低的集装箱以及层数最大的集装箱分配到较长的时间窗时,意味着堆场中翻箱次数的减少,即码头方的收益部分就越多.

因此,码头方有足够的动机将这两种位置的集装箱分配较多的时间跨度.

2) 两个方案都有效地改善了码头方的期望收益.如在单独以层为分类标准时,码头方可以获得的收益为 6 824.16 元,以层和贝为分类标准时,码头方可以获得的收益为 5 306.7 元.显然,在这两种模式下,均有效地改善了集装箱码头方的收益,主要原因是减少了集装箱堆场的翻箱次数.

3) 单独以层为分类标准与以层和贝为分类标准时,码头方可以获得的收益相差 1 517.46 元.此部分的差异是由于车辆方可以在较长的时间窗内选择到达,从而其在时间窗内到达堆场的概率上升.因此,码头方虽然支付较多的补助金额,但是总的翻箱次数会下降,从而使得码头方的期望收益上升.但是,此时由于是同层的集装箱共享 1 个时间窗,因此,龙门吊的移动会相当频繁,产生较多的龙门吊移动成本.

4) 当仅以层为分类标准时,堆场龙门吊会由于在不同贝间移动产生额外的成本,即龙门吊的纵向移动成本.但此部分成本在以层为分类标准的方案中没有被计算.因此,在以层为分类标准时,集装箱码头的收益还需要减去由于龙门吊移动所带来的成本.如果考虑此部分成本,则方案对应的码头方的期望收益值会发生变化,相应的对码头方而言的最优方案也会变化:即当龙门吊纵向移动成本高于 1 517.46 元时,码头方将采取以层和贝为分类标准的方案;当纵向移动成本低于 1 517.46 元时,码头方将采取单独以层为分类标准的方案.特别地,当仅以层为分类标准时,龙门吊平均移动的贝位数为 280 次^④.因此,当码头方的龙门吊移动单个集装箱距离的成本低于 $c_1 = 1 517.46 / 280 \approx 5.42$ 元时,码头方可以优先考虑以层为分类标准的方案;否则,则采取以层和贝为分类的方案,能够有效地节约由龙门吊移动所产生的成本.

6 结束语

码头堆场是供装卸船舶存放集装箱的场所,

③ 表中所有数据来源于本算例在只改变翻箱成本,其它条件不变的情况下,所得出的最佳染色体所代表的结果.

④ 见附录 2.

同时也是临时保管和向货主交接集装箱的地方。首先说明了码头取箱时间优化的机制,构建了码头方补助金函数与车辆方的成本函数,获得了车辆方取箱的到达率函数,进而得到了码头方的翻箱操作公式。然后描述了集装箱码头堆场取箱时间优化问题,建立了取箱时间优化模型,并利用遗传算法进行求解。

根据给出的算例,可以得到码头方在设置时间窗时可以遵循以下规律: 1) 一般情况下设置时间窗,可为第一层与最后一层集装箱分配较多时间窗,每贝时间窗长度逐渐增加等规律; 2) 龙门吊移动单个集装箱位置的成本决定了码头方进行

时间窗分类的标准: 龙门吊移动单个集装箱位置的成本较高时,选择按层和贝分类标准; 龙门吊移动单个集装箱位置的成本不高时,单独选择按层进行分类的标准。其次,由灵敏度分析可以得到如下结论: 1) 单独选择按层进行分类的标准时,随着层次的增加,码头方的期望收益减少。2) 码头方的期望收益随着单次翻箱操作的成本增加而减少。

当然,研究并没有涉及到堆场管理中收益管理部分,如何对于车辆方的补助金实现动态定价,以及不同定价方式与车辆方相应成本的相关关系等都可以是未来研究的方向。

参考文献:

- [1]Steenken D, Voß S, Stahlbock R. Container terminal operation and operations research: A classification and literature review [J]. *OR Spectrum*, 2004, 26(1): 3-49.
- [2]Stahlbock R, Voß S. Operations research at container terminals: A literature update [J]. *OR Spectrum*, 2008, 30(1): 1-52.
- [3]Saanen Y A, Dekker R. Intelligent stacking as way out of congested yards [J]. *Port Technology*, 2006, (31): 80-92.
- [4]Dekker R, Voogd P, Asperen E. Advanced methods for container stacking [J]. *OR Spectrum*, 2006, 28(4): 563-586.
- [5]Hirashima Y, Takeda K, Harada S, et al. A Q-learning for group-based plan of container transfer scheduling [J]. *JSME International Journal Series C*, 2006, 49(2): 473-479.
- [6]Kim K H, Lee J-S. Satisfying constraints for locating export containers in port container terminals [M]//Gavrilova M, et al. *ICCSA 2006 LNCS*. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 564-573.
- [7]Lim A, Xu Z. A critical-shaking neighborhood search for the yard allocation problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 174(2): 1247-1259.
- [8]陈庆伟,王继荣. 集装箱堆场出口箱堆存模型及其算法 [J]. *物流科技*, 2007, (7): 106-108.
Chen Qing-wei, Wang Ji-rong. Modeling and algorithm on piling outbound for container terminal [J]. *Logistics Sci-Tech*, 2007, (7): 106-108. (in Chinese)
- [9]王斌. 集装箱堆场基于混堆的滚动式计划堆存方法 [J]. *系统工程学报*, 2005, 20(5): 466-471.
Wang Bin. Method of planned rolling period of a container yard based on mixture storage [J]. *Journal of System Engineering*, 2005, 20(5): 466-471. (in Chinese)
- [10]Kim K H. Evaluation of the number of rehandles in container yards [J]. *Computers & Industry Engineering*, 1997, 32(4): 701-711.
- [11]Kim K H, Hong G-P. A heuristic rule for relocating blocks [J]. *Computer & Operations Research*, 2006, 33(4): 940-954.
- [12]Aydiñ C. Improved rehandling strategies for container retrieval process [D]. Istanbul: Sabanci University, 2006: 37-66.
- [13]计三友,高悦文. 集装箱堆场减少倒箱率方法研究 [J]. *水运工程*, 2006, (8): 53-61.
Ji San-you, Gao Yue-wen. Reduction of rate of container transposition in container yard [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2006, (8): 53-61. (in Chinese)
- [14]Kim K H, Kim K Y. Optimal price schedules for storage of inbound containers [J]. *Transportation Research*, 2007, 41(8): 892-905.
- [15]Jose H-V, Sergio J-D. Preliminary insights into optimal pricing and space allocation at intermodal terminals with elastic arrivals and capacity constraint [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2006, 6(1): 25-38.
- [16]Desrochers M, Desrosiers J, Solomon M. A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows

- [J]. *Operations Research*, 1992, 40(2): 342–354.
- [17] Solomon M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints [J]. *Operations Research*, 1987, 35(2): 254–265.
- [18] Braysy O, Gendreau M. Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms [J]. *Transportation Science*, 2005, 39(1): 104–118.
- [19] Braysy O, Gendreau M. Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics [J]. *Transportation Science*, 2005, 39(1): 119–139.
- [20] Desrochers M, Soumis F. A reoptimization algorithm for the shortest path problem with time windows [J]. *European Journal of Operational Research*, 1988, 35(2): 242–254.
- [21] Ioachim I, Soumis F, Desrosiers J, et al. A dynamic programming algorithm for the shortest path problem with time windows and linear node costs [J]. *Networks*, 1998, 31(3): 193–204.
- [22] Gendreau M, Iori M, Laporte G, et al. A tabu search algorithm for a routing and container loading problem [J]. *Transportation Science*, 2006, 40(3): 342–350.
- [23] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. The dynamic berth allocation problem for a container port [J]. *Transportation Research-B*, 2001, 35(4): 401–417.
- [24] Möhring RH, Köhler E, Gawrilow E, et al. Conflict-free real-time AGV routing [M] // Fleuren H, den Hertog D, Kort P. *Operations Research Proceedings*. Berlin: Springer, 2005.
- [25] 樊铁成, 马 孜, 李 亚. 基于时间窗的船舶挂港顺序优化 [J]. *大连海事大学学报*, 2005, 31(4): 5–14.
Fan Tie-cheng, Ma Zi, Li Ya. Optimization of ship scheduling with soft time windows [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2005, 31(4): 5–14. (in Chinese)
- [26] 玄光南, 程润伟. 遗传算法与工程优化 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Gen M, Cheng R. *Genetic Algorithm and Engineering Application* [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [27] 李 波, 曾成培. 一种逆向物流网络的多期动态选址方法 [J]. *管理科学学报*, 2008, 11(5): 76–84.
Li Bo, Zeng Cheng-pei. Method of multi-period dynamic location in reverse logistic network [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2008, 11(5): 76–84. (in Chinese)
- [28] 张建勇, 李 军, 郭耀煌. 具有模糊预约时间的 VRP 混合遗传算法 [J]. *管理科学学报*, 2005, 8(3): 64–71.
Zhang Jian-yong, Li Jun, Guo Yao-huang. Hybrid genetic algorithm to vehicle routing problem with fuzzy due time [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2005, 8(3): 64–71. (in Chinese)
- [29] 吕永波, 贾 楠, 任锦鸾, 等. 救灾物资发放问题的动态遗传算法求解 [J]. *管理科学学报*, 2008, 11(3): 29–34.
Lü Yong-bo, Jia Nan, Ren Jin-luan, et al. Dynamic genetic algorithm for problem of distributing goods to disaster area [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2008, 11(3): 29–34. (in Chinese)
- [30] 潘震东, 唐加福, 韩 毅. 带货物权重的车辆路径问题及遗传算法 [J]. *管理科学学报*, 2007, 10(3): 23–29.
Pan Zhen-dong, Tang Jia-fu, Han Yi. Vehicle routing problem with weight coefficients [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2007, 10(3): 23–29. (in Chinese)

Optimal pickup time windows allocation at container terminal

WEI Hang

School of International Business Administration, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China

Abstract: Container terminal is not only the area for storing inbound and outbound containers, but also the place for pickup. Because of the uncertainty of pickup time, terminal operators have to rehandle the containers frequently which incur significant cost to the operators. In order to reduce the cost in rehandling, a time win-

dow mechanism for container pickup was introduced. A function of the subsidies to the terminal operators and a function of rehandling costs to the consignees were constructed. Based on these functions , the distribution of pickup times and the formulation of rehandling times were derived. Then , the problem of optimal pickup time windows allocation was proposed and the model was constructed. Because of the high computational complexity , a genetic algorithm was developed. Finally , a numerical example was given in two different modes , and the sensitivity analysis was conducted. By applying the time windows allocation mechanism , the rehandling operations were greatly reduced , and both of the operational efficiency and the expected profits of the terminal operators were improved significantly.

Key words: container terminal; delivery; time windows; optimization

附录

附录 1

附表 1 各个集装箱时间窗起始时间

Table 1 The starting time and time window for each container

集装箱 编号	集装箱取箱时间窗优化方案							
	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4	
	起始时间	时间窗长度	起始时间	时间窗长度	起始时间	时间窗长度	起始时间	时间窗长度
(1 , 1)	0	5.12	0	5.12	0	5.11	0	5.11
(1 , 2)	5.12	1.89	5.12	1.90	5.11	1.90	5.11	1.91
(1 , 3)	7.01	2.82	7.02	2.82	7.01	2.82	7.02	2.82
(1 , 4)	9.83	4.54	9.84	4.54	9.83	4.55	9.83	4.57
(2 , 1)	14.37	5.61	14.38	5.60	14.38	5.60	14.41	5.6
(2 , 2)	19.98	2.31	19.98	2.31	19.98	2.30	20.01	2.3
(2 , 3)	22.29	2.88	22.29	2.88	22.28	2.88	22.31	2.85
(2 , 4)	25.17	4.7	25.17	4.72	25.16	4.72	25.16	4.72
(3 , 1)	29.87	6.37	29.89	6.35	29.88	6.34	29.88	6.31
(3 , 2)	36.24	3.28	36.24	3.28	36.22	3.28	36.19	3.28
(3 , 3)	39.52	2.93	39.52	2.91	39.52	2.93	39.49	2.93
(3 , 4)	42.45	4.53	42.43	4.53	42.43	4.53	42.4	4.53
(4 , 1)	46.98	8.75	46.96	8.77	46.96	8.75	46.93	8.78
(4 , 2)	55.73	4.53	55.73	4.53	55.71	4.53	55.71	4.53
(4 , 3)	60.26	3.48	60.26	3.48	60.24	3.48	60.24	3.49
(4 , 4)	63.74	8.03	63.74	8.05	63.72	8.05	63.73	8.05
(5 , 1)	71.77	7.88	71.79	7.88	71.77	7.91	71.78	7.91
(5 , 2)	79.65	4.22	79.67	4.20	79.68	4.21	79.69	4.2
(5 , 3)	83.87	3.76	83.87	3.76	83.89	3.75	83.89	3.75
(5 , 4)	87.63	8.72	87.63	8.72	87.64	8.72	87.64	8.72
(6 , 1)	96.35	8.02	96.35	8.00	96.35	7.99	96.35	7.97
(6 , 2)	104.37	4.9	104.35	4.90	104.35	4.90	104.33	4.89
(6 , 3)	109.27	4.19	109.25	4.18	109.25	4.17	109.22	4.17
(6 , 4)	113.46	6.56	113.43	6.57	113.42	6.58	113.39	6.61

附录 2 对于龙门吊纵向移动成本的计算,需要考虑龙门吊的初始位置与其目标位置.显然,由于龙门吊纵向移动成本主要由于龙门吊位置与需要取箱的位置之间不匹配而造成,而龙门吊位置具有随机性,取箱位置也具有随机性.在此,假设龙门吊的初始位置与目标位置相互独立,且取箱车辆随机到达,龙门吊取箱之后在取箱位置等待下一个需要提取的集装箱.按照其初始位置与到达的目标位置,可以将其分成不同的类型,并进行变化.这样,就可以给出龙门吊在贝位方向纵向移动成本计算的基本公式为

$$C_{\text{move}} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p_l n_l c_1 IJ \quad (2-1)$$

其中 p_l 是编号为 l 的移动方式的概率; n_l 是编号为 l 的移动方式的龙门吊移动的集装箱个数(距离); c_1 是龙门吊移动的单个集装箱贝位距离的成本; I, J 的定义为集装箱在堆场的列与贝的最大值.

对于算例中给出的 $6 \times 6 \times 4$ 的堆场结构,可以得到其龙门吊在不同的初始贝位以及目标贝位时,可能需要移动的距离,以及相应的概率,分别如附录表 2 所示.比如:若初始贝位为 1,当目标贝位为 4 时,龙门吊需要移动的贝数为 3 个;若初始贝位为 3,当目标贝位为 5 时,龙门吊需要移动的贝数为 2 个.由于假设了龙门吊的初始位置与目的位置相互独立,且取箱车辆随机到达.因此,此时存在 36 种情况,其各自的概率为 $1/36$.

这样,根据式(2-1)可以得到此时由于龙门吊移动所产生的成本 C_{move} 为

$$C_{\text{move}} = 4 \times \frac{1}{36} \times [1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 1 + 1 + 2 + 3 + 4 + 1 + 2 + 3 + 1 + 2 + 1 + 2 + 1 + 2 + 3 + 1 + 1 + 2 + 3 + 4 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5] \times 36 \times c_1 = 280c_1 \quad (2-2)$$

根据两种分类方式的结果,可以获得的收益相差 1 517.46 元,同时龙门吊平均移动的贝位数为 280 次.因此,当码头方的龙门吊移动单个集装箱距离的成本低于 $c_1 = 1\,517.46/280 \approx 5.42$ 元时,码头方可以优先考虑以层为分类标准的方案;否则,则采取以层和贝为分类的方案,能够有效地节约由龙门吊移动所产生的成本

附表 2 龙门吊移动距离及相应概率

Table 2 The crane moving step and corresponding probability

移动方式 编号 l	集装箱位置变化情况及概率			
	初始 贝位	目标 贝位	概率 p_l	移动的 贝数 n_l
1	1	1	1/36	0
2		2	1/36	1
3		3	1/36	2
4		4	1/36	3
5		5	1/36	4
6		6	1/36	5
7	2	1	1/36	1
8		2	1/36	0
9		3	1/36	1
10		4	1/36	2
11		5	1/36	3
12		6	1/36	4
13	3	1	1/36	2
14		2	1/36	1
15		3	1/36	0
16		4	1/36	1
17		5	1/36	2
18		6	1/36	3
19	4	1	1/36	3
20		2	1/36	2
21		3	1/36	1
22		4	1/36	0
23		5	1/36	1
24		6	1/36	2
25	5	1	1/36	4
26		2	1/36	3
27		3	1/36	2
28		4	1/36	1
29		5	1/36	0
30		6	1/36	1
31	6	1	1/36	5
32		2	1/36	4
33		3	1/36	3
34		4	1/36	2
35		5	1/36	1
36		6	1/36	0