

doi: 10.3969/j.issn.1673-4807.2016.05.015

集装箱堆场出口箱箱位分配优化模型及算法

刘婵娟 胡志华

(上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

摘要: 针对集装箱堆场出口箱箱位分配问题, 考虑出口箱进场时间的随机性, 在不同重量等级集装箱混合堆存模式下, 以取箱装船过程中翻箱操作最小化、场内集卡运输距离最小化和使贝位内各堆栈中箱数均衡为目标, 建立了堆场出口箱箱位分配的多目标优化模型, 并设计启发式优化算法, 对具体箱位分配问题进行求解; 通过数值实验验证模型和算法的有效性, 并对不同算法求解结果以及数学规划模型求解结果进行对比分析; 该结果对堆场出口箱箱位分配问题有一定的实用价值。

关键词: 出口箱; 堆场箱位分配; 多目标混合整数规划; 启发式算法;

中图分类号: U691.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-4807(2016)02-0490-08

Space allocation optimization model and algorithm for outbound containers in the yard

LIU Chanjuan, HU Zhihua

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

Abstract: Considering the randomness of export containers' time of arrival at yard and different heavyweight containers mixing pile, we propose a multi-objective optimization model to tackle the export container storage location assignment problem. The goal of the model is to minimize the reshuffling and storage cost and to make the number of each stack balance. Heuristic optimization algorithms are proposed to solve the model, and the results obtained by different algorithms are compared. The results have some practical value for outbound containers' storage location assignment.

Key words: outbound container, storage space allocation, multi-objective mixed integer programming model, heuristic algorithm

随着集装箱船舶的大型化, 港口集装箱吞吐量不断增加, 集装箱堆场系统的优化变得极为重要; 而堆场出口箱的堆存方式是影响码头取箱装船作业效率、码头运营成本以及提升港口竞争力的关键。因此, 研究码头堆场出口箱箱位分配问题对堆场空间资源优化, 有效缓解部分港口空间资源需求与供给不平衡矛盾具有重要意义。

针对集装箱堆场空间资源分配问题, 国内外专

家们提出了不同的解决方法和策略, 这些研究主要分为两大类: 一类是同时考虑进出口两种类型的集装箱混合堆存的情况; 另一类是以进口箱或出口箱单一箱型为研究对象。

对于进出口箱混堆模式, 文献[1]中在没有考虑集装箱分组因素下, 建立线性整数规划模型, 研究进出口箱混堆模式下集装箱堆场的空间分配问题。文献[2]中研究了考虑集装箱分组因素的进出

收稿日期: 2015-12-07

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20113121120002); 国家自然科学基金青年项目(71101088); 国家自然科学基金面上项目(71471109)

作者简介: 刘婵娟(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为港航与物流运作优化。E-mail: 491432270@qq.com

通信作者: 胡志华(1977—), 男, 教授, 研究方向为港航与物流运作优化、社会科学计算实验、计算智能。E-mail: zhhu@shmtu.edu.cn

引文格式: 刘婵娟, 胡志华. 集装箱堆场出口箱箱位分配优化模型及算法[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2016, 30(5): 490-497.

doi: 10.3969/j.issn.1673-4807.2016.05.015.

口箱空间分配问题,并应用遗传算法对问题进行求解.文献[3]中应用“critical-shaking”领域搜索算法解决这一问题.此外,很多文献对进出口箱最优堆放位置的研究均以平衡各箱区作业量和最小化集装箱堆放位置到船舶泊位之间的距离为目标来展开研究^[4-6].

对进出口箱单一箱型存储空间优化问题的研究主要以出口集装箱存储位置分配问题为主.文献[7-10]中运用数学规划的方法建立模型,进行堆场出口箱具体箱位分配.文献[11]中以集装箱卡车接运单位 TEU 平均作业时间最少、场桥作业成本最低为目标,构建了出口箱箱区选择与箱位分配两阶段非线性整数规划模型,并设计了基于遗传算法的双层启发式算法,该方法能够有效减少堆场集装箱装卸时间.文献[12-13]中运用遗传算法求解堆场出口箱箱位分配问题.文献[14]中在出口集装箱箱重未知的情况下,利用基于模拟退火的搜索算法来获得出口箱在堆场的堆存策略,使堆场作业时翻箱量最小化.文献[15]中针对堆场出口箱存储位置分配问题提出两阶段法:第1阶段以最小化场内集卡从集装箱存储位置到待装船泊位运输距离为目标,建立混合整数规划模型,进行贝位选择;第2阶段以最小化翻箱操作为目标,提出了一种混合顺序堆栈算法,进行贝位内集体箱位分配.

基于文献[16]的研究,考虑不同重量等级集装箱混合堆存模式,以取箱装船过程中翻箱操作最小化、场内集卡运输距离最小化、贝位内各堆栈中箱数均衡为目标,建立堆场出口箱箱位分配的多目标优化模型,并设计启发式优化算法求解具体箱位分配问题.最后对不同算法以及数学规划模型的求解结果进行比较,通过数值实验验证了模型和算法的有效性.与已有研究相比,文中的贡献主要在于考虑最小化翻箱操作和最小化集卡运输距离的同时,使贝位内各堆栈中箱数均衡,既可以减少起重机工作量,又能防止堆栈过高发生倾倒,保证堆场作业安全性.文中提出的逐层堆放和垂直堆栈启发式算法均能针对大规模堆场,快速给出堆场出口箱的具体存放位置.

1 问题描述与假设

集装箱码头堆场是指办理集装箱重箱或空箱装卸、保管、暂存和转运的场所,是链接内陆运输和海上运输的缓冲区.堆场作业系统主要由3部分构成:集卡作业系统、堆场作业系统和前方泊位作业系统,如图1.文中主要解决堆场作业系统中,由外

集卡运送到堆场的出口箱箱位分配问题.

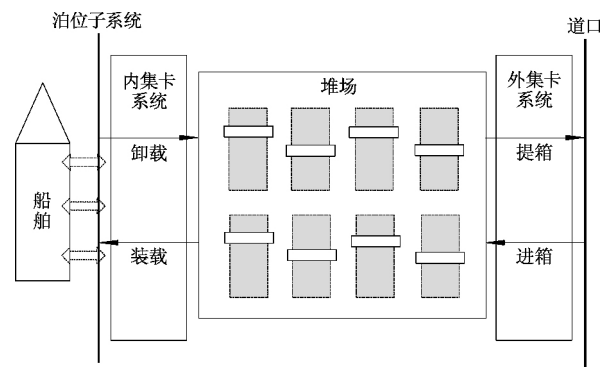


图1 集装箱码头堆场作业系统示意

Fig. 1 Illustration of container yard operation system

集装箱码头堆场划分为不同的区(block),每个区由多个贝位(bay)组成,每个贝位由若干列(row)和层(tier)组成.贝位内在竖直方向堆放的一个或多个集装箱称为一个堆栈(stack).在我国码头堆场,一般情况下,每个贝位由6列4层组成,即一个贝位中能堆装24个集装箱,如图2.但是,通常每贝位中会预留一定的缓冲箱位.

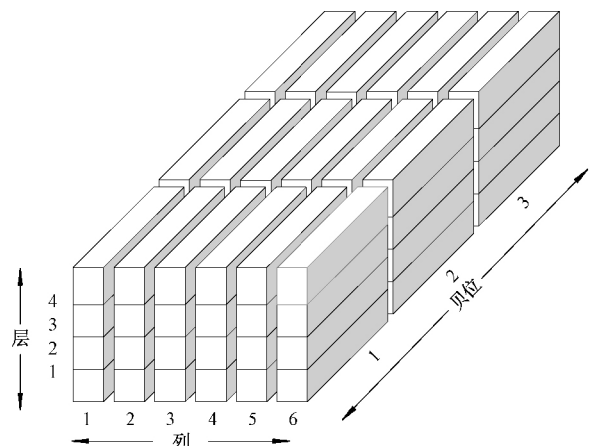


图2 集装箱堆存示意

Fig. 2 Illustration of container yard bays

堆场出口箱箱位分配优化主要为了充分利用堆场有限的空间资源,提高码头装船作业效率.而码头装船作业效率与取箱装船过程中翻箱次数直接相关.为了保证后续装船过程中船舶稳定性要求,一般情况下,出口箱在堆场的堆存必须遵循轻箱在下,重箱在上的原则,当集装箱堆存违背这一原则时,就会出现翻箱操作.文中定义贝位内同一堆栈中任一上下相邻的两个集装箱不满足轻箱在下,重箱在上原则时,发生一次翻箱操作,如图3.箱位内有两组数字,前面数字表示所放集装箱进场顺序,后面数字表示集装箱重量等级.第3列和第5列会出现翻箱操作,翻箱数分别为1和2.此外,

堆场集装箱的堆存还应满足时间先后顺序原则,即贝位内堆栈中集装箱进场顺序应该由下到上,先进场的放在下面,后进场的放在上面。

4	18(4)	19(5)	20(2)			21(4)
3	13(3)	14(4)	15(3)		16(2)	17(3)
2	7(2)	8(2)	9(1)	10(4)	11(3)	12(1)
1	1(2)	2(1)	3(1)	4(2)	5(5)	6(1)
	1	2	3	4	5	6
列						
翻箱数:	0	0	1	0	2	0

图3 翻箱操作示意

Fig.3 Diagram of rehandling operation

本文假定:①不考虑集装箱大小差异,所有箱子全为标准集装箱(5 898 mm×2 352 mm×2 393 mm);②只针对普通货箱的存储,而暂不考虑冷藏箱、危险品等特殊箱;③集装箱组别已按船名和目的港确定;④每组集装箱对应的船舶配载方案已知;⑤场内集卡运输距离等于集装箱所在贝位到目的船舶泊位之间的距离;⑥不同重量级集装箱混合堆存。将堆场出口箱箱位分配问题转化为:①使取箱装船作业过程场内集卡运输距离最小,主要通过贝位选择来实现;②使每一贝位中各个堆栈箱子数尽量均衡分布;③使贝位内翻箱操作数最少,主要通过贝位内具体箱位选择来控制。

2 模型建立

2.1 符号说明

集合: $I = \{1, 2, 3, \dots, N_I\}$, 所有出口集装箱的集合; N_I 为到场集装箱总数, 通过 $i, j \in I$ 索引; $B = \{1, 2, 3, \dots, N_B\}$, 箱区内贝位集合; N_B 为箱区内贝位总数, 通过 $b \in B$ 索引; $R = \{1, 2, 3, \dots, N_R\}$, 贝位内列数的集合; N_R 为贝位内总列数, 通过 $r \in R$ 索引; $T = \{1, 2, 3, \dots, N_T\}$, 贝位内层数的集合; N_T 为贝位内总层数, 通过 $t \in T$ 索引; d_{bi} 表示 b 贝位内的集装箱 i 在取箱装船过程中集卡运输距离, $d_{bi} \in \{1, 2, 3, \dots, B\}$, 通过 $b \in d_{bi}$ 索引。

参数: E_{ij} 为贝位内满足时间先后顺序原则的箱子, 当集装箱 i 和 j 的放置满足时间先后顺序时 E_{ij} 取 1, 否则取 0; W_{ij} 为贝位内满足重量约束原则的箱子数, 当集装箱 i 和 j 的放置满足重量约束时 W_{ij} 取 1, 否则取 0; O_{brt} 为贝位内已被占用的箱位; $W_{O_{brt}}$ 为已被占用箱位上的在场集装箱重量等级; W_i 为随机到场集装箱重量等级。

决策变量: $x_{ibrt} \in \{0, 1\}$, 如集装箱 i 被放置在 b 贝位 t 层的位置时 x_{ibrt} 的值为 1, 否则为 0; $y_{ijbrt1t2} \in \{0, 1\}$, 如集装箱 i 和 j 被分配到 $(b, r, t1)$ 和 $(b, r, t2)$ 两个箱位时 $y_{ijbrt1t2}$ 的值为 1, 否则为 0; $z_{ijbrt1t2}^w \in \{0, 1\}$, 如 i 和 j 两个集装箱的堆存满足重量约束原则时 $z_{ijbrt1t2}^w$ 的值为 1, 否则为 0; $z_{ijbrt1t2}^e \in \{0, 1\}$, 如 i 和 j 两个集装箱的堆存位置满足时间先后约束原则时 $z_{ijbrt1t2}^e$ 取 1, 否则为 0。

2.2 模型

文中建立了不同重量级集装箱混堆模式下的堆场出口箱箱位分配多目标优化模型, 目标函数如式(1), 表示最小化贝位内翻箱操作数, 最小化场内集卡运输距离和使贝位内各堆栈中箱数均衡。式(2)中 f^{rehandle} 表示翻箱操作数量; 式(3)中 f^w 为不满足重量约束原则的箱子数; 式(4)中 f^e 为不满足时间先后原则的箱子数; 式(5)中 f^d 为场内集卡运输距离; 式(6)中 f^h 为堆栈堆存高度。

$[M1] \min$

$$f = (f^{\text{rehandle}} + f^d + f^h) \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad f^{\text{rehandle}} = f^e + f^w \quad (2)$$

$$f^w = \sum_{i,j,b,r,t1 < t2} ((y_{ijbrt1t2} - z_{ijbrt1t2}^w)(t2 - t1)) \quad (3)$$

$$f^e = \sum_{i,j,b,r,t1 < t2} ((y_{ijbrt1t2} - z_{ijbrt1t2}^e)(t2 - t1)) \quad (4)$$

$$f^d = \sum_b (d_{bi} \cdot \sum_{irt} x_{ibrt}) \quad (5)$$

$$f^h = \sum_{i,b,r,t} (x_{ibrt} \cdot t^2) \quad (6)$$

$$\sum_{b,r,t} x_{ibrt} = 1, \forall i \quad (7)$$

$$\sum_i x_{ibrt} \leq 1 - O_{brt}, \forall (b, r, t) \quad (8)$$

$$\sum_{i,r,t} x_{ibrt} + \sum_{r,t} O_{brt} \leq R \cdot T - 3, \forall b \quad (9)$$

$$y_{ijbrt1t2} \geq x_{ibrt1} + x_{jbrt2} - 1, \forall i, j, b, r, t1, t2 \quad (10)$$

$$\sum_i x_{ibrt} + O_{brt} \geq \sum_i x_{ibrt(t+1)}, \forall b, r, t \quad (11)$$

$$z_{ijbrt1t2}^w \geq W_{ij} + y_{ijbrt1t2} - 1, \forall i, j, b, r, t1 < t2 \quad (12)$$

$$z_{ijbrt1t2}^w \leq y_{ijbrt1t2} \cdot W_{it2}, \forall i, j, b, r, t1 < t2 \quad (13)$$

$$z_{ijbrt1t2}^e \geq E_{ij} + y_{ijbrt1t2} - 1, \forall i, j, b, r, t1 < t2 \quad (14)$$

$$z_{ijbrt1t2}^e \leq y_{ijbrt1t2} \cdot E_{it2}, \forall i, j, b, r, t1 < t2 \quad (15)$$

式(7)~(15)是约束条件。式(7)表示一个集装箱只能占用一个箱位; 式(8)表示一个箱位只能

放一个箱子;式(9)表示某一贝位内堆存集装箱总数不能超过贝内箱位数,文中假定每个贝位由6列4层构成,且有3个缓冲箱位,则贝内可堆存集装箱数最多为21个;式(10)表示决策变量 y_{ijbrl} 和 x_{ibrl} 之间的关系,只有当 i 和 j 集装箱分别分配给箱位 $(brl1)$ 和 $(brl2)$ 时,决策变量 y_{ijbrl} 的值取1,否则为0;式(11)表示箱子不能悬空放置;式(12)和(13)表示决策变量 z_{ijbrl}^w 与 y_{ijbrl} 和 W_{ij} 之间的关系,当 i 放在 j 下面,且 i 比 j 轻时, z_{ijbrl}^w 取1,否则为0;式(14)和(15)表示决策变量 z_{ijbrl}^e 与 y_{ijbrl} 和 E_{ij} 之间的关系,当 i 在 j 下面,且 i 比 j 早到堆场时, z_{ijbrl}^e 取1,否则为0。

3 堆场出口箱箱位分配启发式算法

3.1 逐层堆放算法

针对堆场出口箱箱位分配问题,设计逐层堆放算法,进行具体箱位选择,算法流程图如图4,相关符号定义见2.1节符号说明。按照出口箱到场顺序进行逐层堆放可以有效均衡贝位内各堆栈中箱子数,减少起重机移动距离,减轻起重机工作量。

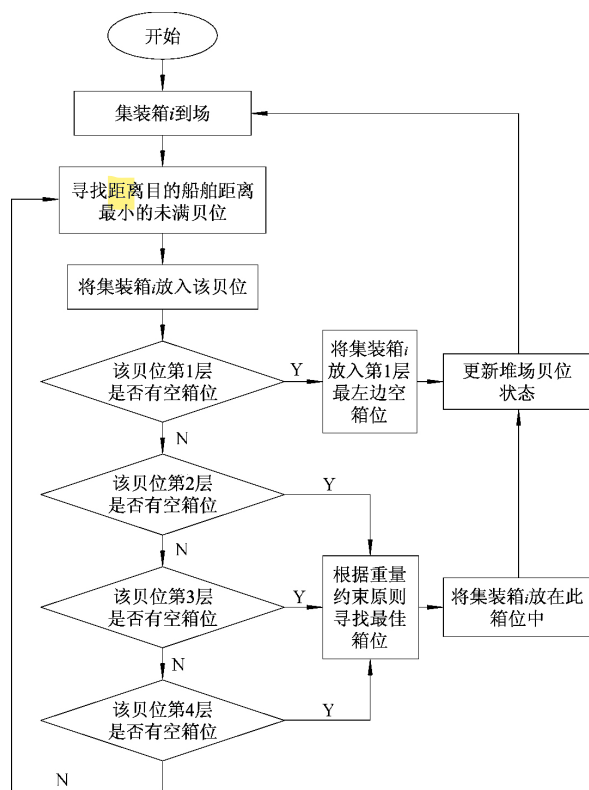


图4 逐层堆放算法流程

Fig. 4 Flow chart of the step by step algorithm

输入: $B, R, T, d_{bi}, W_i, O_{brl}, W_{O_{brl}}$

输出: $x_{ibrl}, f^{\text{rehandle}}, f^d$

步骤如下:

步骤1: 根据 d_{bi} 选择距离目的船舶泊位距离最小的可堆存贝位, 将集装箱 i 放入该贝位中。

步骤2: 检查所选贝位第1层是否有空箱位。

如果 $\sum_r (O_{brl} + x_{ibrl}) = R$ (该层没有空箱位), 转步骤3;

如果 $\sum_r (O_{brl} + x_{ibrl}) = R - 1$ (只有1个空余箱位), 转步骤2.1; 如果 $\sum_r (O_{brl} + x_{ibrl}) < R - 1$ (该层空箱位数大于1个), 转步骤2.2。

步骤2.1: 将集装箱 i 放入该层唯一空箱位中, $x_{ibrl} = 1$, 更新贝位堆存状态。

步骤2.2: 将集装箱 i 放入该层最左边一个空箱位中, $x_{ibrl} = 1$, 更新贝位堆存状态。

步骤3: 检查所选贝位第2层是否有空箱位。

如果 $\sum_r (O_{br2} + x_{ibrl}) = R$ (该层没有空箱位), 转步骤4;

如果 $\sum_r (O_{br2} + x_{ibrl}) = R - 1$ (只有1个空余箱位), 转步骤2.1; 如果 $\sum_r (O_{br2} + x_{ibrl}) < R - 1$ (该层空箱位数大于1个), 转步骤3.1。

步骤3.1: 在该层多个空箱位中选取最优箱位。

步骤3.1.1: 比较集装箱 i 与该层中空箱位所在列对应的下面一层集装箱重量等级, 下层箱位中与集装箱 i 重量差最小且大于零的箱子对应的箱位即为最优箱位。将集装箱放入该箱位中, $x_{ibrl} = 1$, 更新贝位堆存状态。

步骤3.1.2: 若集装箱的 i 重量等级小于该层中空箱位所在列对应的下面一层集装箱重量等级, 则将集装箱堆放在该层最左边一个空位, 此时出现翻箱操作 f^{rehandle} 的值加1。

步骤4: 看所选贝位第3层是否有空箱位。

如果 $\sum_r (O_{br3} + x_{ibrl}) = R$ (该层没有空箱位), 转步骤5;

如果 $\sum_r (O_{br3} + x_{ibrl}) = R - 1$ (只有1个空余箱位), 转步骤2.1; 如果 $\sum_r (O_{br3} + x_{ibrl}) < R - 1$ (该层空箱位数大于1个), 转步骤3.1。

步骤5: 看所选贝位第4层是否有空箱位。

如果 $\sum_r (O_{br4} + x_{ibrl}) = R$ (该层没有空箱位), 选择新的贝位;

如果 $\sum_r (O_{br4} + x_{ibrl}) = R - 1$ (只有1个空余箱位), 转步骤2.1; 如果 $\sum_r (O_{br4} + x_{ibrl}) < R - 1$ (该层空箱位数大于1个), 转步骤3.1。

当一批集装箱堆存完毕后, 得到所有 $x_{ibrl} = 1$ 的点, 即所有集装箱存储位置, 以及在后续装船过程中可能出现的翻箱操作次数 f^{rehandle} 。

由 $f^d = \sum_b (d_{bi} \cdot \sum_{i, r, l} x_{ibrl})$ 得到集卡运输总距离。

3.2 垂直堆栈算法

按照堆场垂直顺序取箱作业方式设计堆场出口集装箱垂直堆栈存储算法,即将同一重量级的集装箱堆放在同一堆栈中。这种方式可以有效避免取箱装船过程出现翻箱操作。下面通过简单示例说明算法过程。假定某一贝位中已被占用箱位数 $O_{b,r,i} = 0$ 如图 7 中初始状态所示,已知一组集装箱共 8 个,

其进场顺序及重量等级分布见表 1。按照垂直堆栈存储算法堆存过程如图 5。

表 1 集装箱进场顺序及质量等级分布

Table 1 Time sequence and weight distribution of containers

进场	1	2	3	4	5	6	7	8
质量等级	5	2	4	5	3	1	5	4

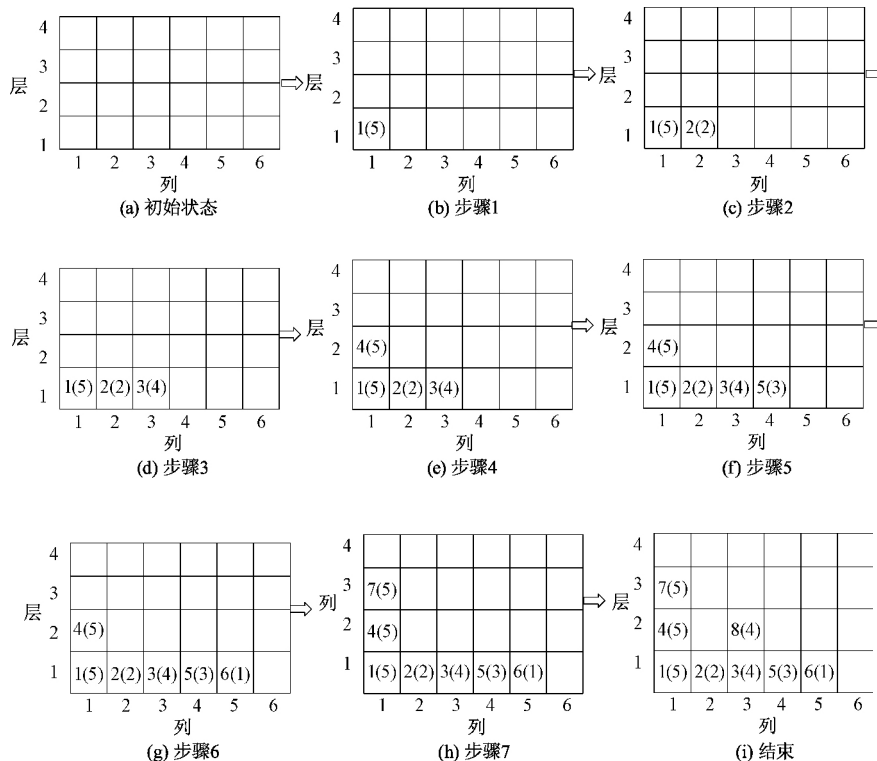


图 5 垂直堆栈存储过程示意

Fig. 5 Flow chart of the vertical stack storage process

4 算例分析与算法评价

为了对文中提出的两种求解堆场出口箱箱位分配问题的启发式算法进行算例测试,验证算法的有效性,对两种算法的性能进行比较,并且在小规模的情况下,将算法结果与文中提出的最优化数学模型精确求解结果进行对比,设计以下实验,见表 2。文中算法均采用 MATLAB 软件进行编写,程序在 Intel(R) - 32Core(TM) i5 - 4300U 1.90GHz 计算机上运行。结合 CPLEX 求解器进行求解。

基于以上 4 个实验,对所得结果结合图 6 ~ 12 进行分析得出以下结论:

(1) 由实验 1 的结果可知,如图 6 所示,参数 $O_{b,r,i}$ 变化对目标函数 $f^{rehandle}$ 的值并无影响。算例 3 中,当有 2 个贝位时,目标函数 f^d 和 f^h 的值会随着

已被占用箱位数的变化而变化。总体上,已被占用的箱位数越多,目标函数 f^h 值越大,即堆栈越高。集装箱堆存太高可能发生倒塌,存在安全隐患。此外,贝内堆栈高度分布不均衡将会增加取箱装船过程中起重机移动距离,加大机械作业成本。

(2) 应用数学规划模型求解进行出口箱箱位分配可尽量避免翻箱操作,但是仅适用于小规模算例,由实验 2 可知,当有 18 个集装箱时,求解时间为 13 min。而应用文中提出的两种启发式算法进行求解,可以快速得到具体箱位分配方案。例如,在实验 4 中,对 10 000 个出口箱进行具体箱位分配,求解 100 次仅需 38 s。

(3) 由实验 3 所得结果可知,在大规模算例求解时,两种算法求解速度相差不大。但是逐层堆放算法会产生一定的翻箱率,而垂直堆栈算法不会产生翻箱操作。但是较之于垂直堆放算法,应用逐层

表 2 实验配置

Table 2 Experimental purpose and settings

序号	实验目的	参数设置和计算结果
1	研究模型中参数 $O_{b,r,t}$ 对实验结果的影响	(1) 以表 3 中算例数据为例 (2) 令 $O_{b,r,t}$ 依次等于 0, 1, 2, 3, 4, 5 求解 [M1] (3) 实验结果如图 6.
2	在小规模算例下,对数学模型求解结果与两种算法求解结果进行比较	(1) 以表 3 中 18 个集装箱数据为例 (2) 假设某箱区有 2 个贝位,每一贝位中有 3 个缓冲箱位,贝位 1 和贝位 2 中共有 8 个箱位已被占用(图 7~9 中阴影部分) (3) 实验所得箱位分配方案见图 7~9 (4) 不同方法所得目标函数值比较如图 10
3	大规模算例下,逐层堆放算法与垂直堆栈算法求解结果比较	(1) 利用 MATLAB 随机生成 100 个出口箱到场时间顺序和重量等级分布 (2) 贝位中无已占用箱位 (3) 两种算法求解结果比较见表 4
4	观察集装箱数量对逐层堆放算法求得的翻箱率的影响	(1) 利用 MATLAB 随机生成 100 个和 10 000 个出口箱到场时间顺序和重量等级分布 (2) 应用逐层堆放算法分别求解 20 次和 100 次 (3) 翻箱率变化如图 11,12

表 3 18 个集装箱进场顺序及重量等级分布

Table 3 Time sequence and weight distribution of 18 containers

进场顺序	重量等级	进场顺序	重量等级	进场顺序	重量等级
1	5	7	2	13	5
2	5	8	3	14	3
3	1	9	5	15	5
4	5	10	5	16	1
5	4	11	1	17	3
6	1	12	5	18	5

表 4 大规模算例两种算法求解结果比较

Table 4 Comparison of the results of two kinds of algorithm in large scale numerical example

算法	翻箱数	f^h	f^l	求解时间/s
逐层堆放算法	18	66	290	0.018 472
垂直堆栈算法	0	103	357	0.015 362

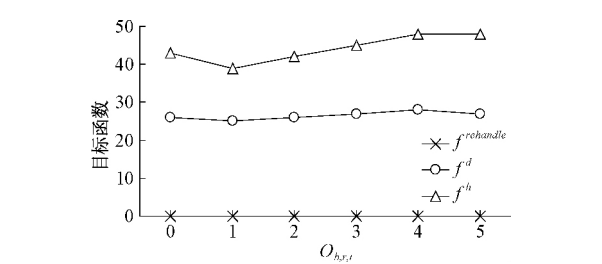


图 6 参数 $O_{b,r,t}$ 对实验结果的影响

Fig. 6 Influence of parameter $O_{b,r,t}$ on the results

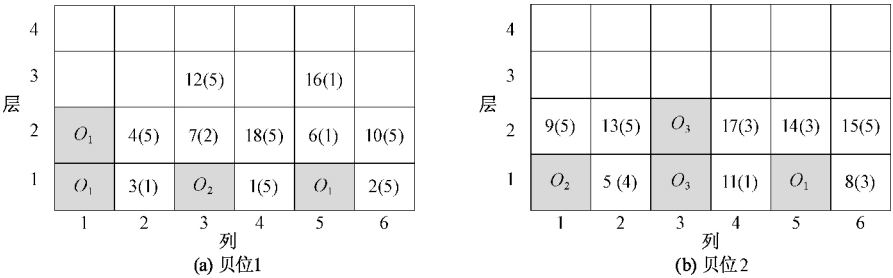


图 7 数学规划模型求解所得堆存方案

Fig. 7 Storage scheme solved by mathematical programming model

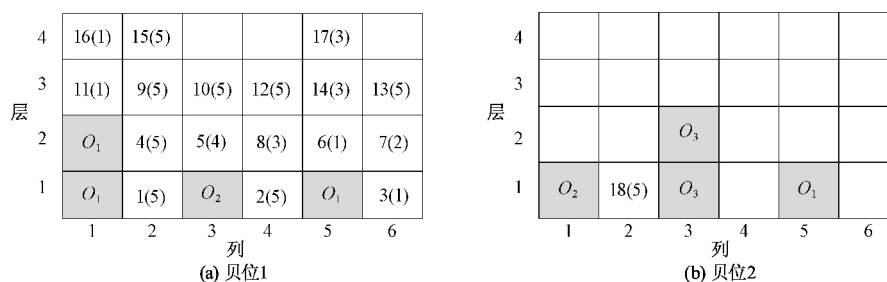


图 8 逐层堆存算法所得堆存方案

Fig. 8 Storage scheme solved by the step by step algorithm

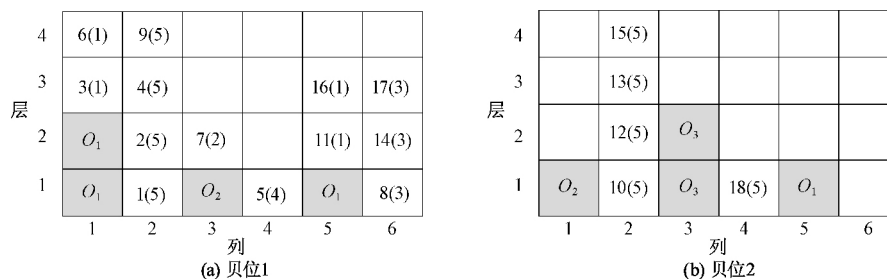


图 9 垂直堆栈算法所得堆存方案

Fig. 9 Storage scheme solved by vertical stack algorithm

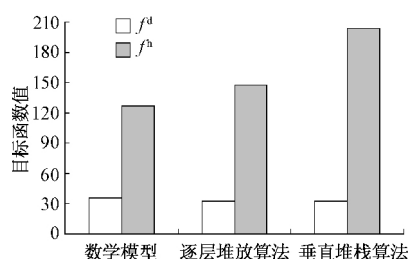
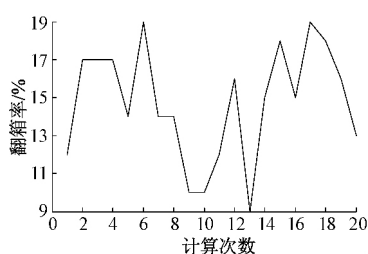
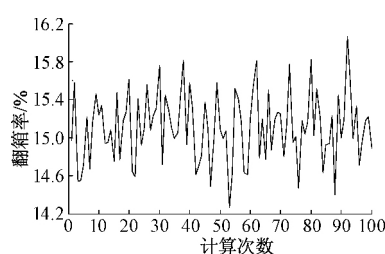


图 10 不同方法所得目标函数值比较

Fig. 10 Results of different methods

图 11 100 个集装箱计算 20 次的翻箱率变化
Fig. 11 Changes of rate of shift for 100 containers calculated for 20 times图 12 10 000 个集装箱计算 100 次的翻箱率变化
Fig. 12 Changes of rate of shift for 10 000 containers calculated for 100 time

堆放算法进行箱位分配可以减少场内集卡运输距离,使各堆栈中箱子数尽量解决均衡,且能均衡各个贝位工作量。

(4) 由图 11、12 可知,应用逐层堆放算法进行具体箱位分配时,集装箱数量的多少会影响其翻箱率的变化,箱子数越少翻箱率波动越大,箱子数越多,翻箱率波动越小。

5 总结

文中考虑堆场出口箱到场的随机性,以及不同重量级集装箱同贝混合堆存的情况,提出堆场出口箱箱位分配多目标混合整数规划模型,通过算例证明,此数学规划模型能够尽可能地降低或者消除取箱装船时翻箱操作,且使取箱装船过程中场内集卡

运输距离最小,从而达到提高装船时作业效率以及节约堆场机械设备耗费成本的目的,但是仅适用于较小规模算例求解。此外,提出启发式算法解决具体箱位分配问题,所提算法能够快速求解大规模算例。尽管逐层堆放算法会产生一定的翻箱率,但能够在减少场内集卡运输距离的同时均衡各个贝位工作量,而垂直堆栈算法虽然可以避免翻箱操作,但是无法充分利用贝位存储空间。

参考文献(References)

- [1] ZHANG C, LIU J, WAN Y W, et al. Storage space allocation in container terminals [J]. *Transportation Research Part B*, 2003, 37(10): 883–903.
- [2] PRESTON P, KOZAN E. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals [J]. *Computers & Operations Research*, 2001, 28(10): 983–995.
- [3] NG W C, MAK K L. Yard crane scheduling in port container terminals [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2005, 29(3): 263–276.
- [4] LIM A., ZHOU X. A critical-shaking neighborhood search for the yard allocation problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 174(2): 1247–1259.
- [5] 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): 105–109.
CHEN Qingwei, WANG Jirong. Modeling and algorithm on piling outbound for container terminal [J]. *Logistics Sci-Tech*, 2007(7): 105–109. (in Chinese)
- [6] 陶经辉,汪敏,基于混堆模式的集装箱堆场区段分配 [J]. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(8): 185–192.
TAO Jinghui, WANG Min, Assign problem of container yard section based on mixed storage model [J]. *System Engineering-Theory & Practice* 2009, 29(8): 185–192. (in Chinese)
- [7] 王斌. 集装箱码头堆场的一种动态随机堆存方法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 27(4): 147–153.
WANG Bin. Dynamic and stochastic storage model in a container yard [J]. *System Engineering Theory & Practice* 2007, 27(4): 147–153. (in Chinese)
- [8] CORDEAU J F, GAUDIOSO M, LAPORTE G, et al. A memetic heuristic for the generalized quadratic assignment problem [J]. *Inform Journal on Computing*, 2006, 18(4): 433–443.
- [9] KIM K H, PARK Y M, RYU K R. Deriving decision rules to locate export containers in container yards [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 124(1): 89–101.
- [10] MALUCELLI F, PALLOTTINO S, PRETOLANI D. The stack loading and unloading problem [J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2008, 156(17): 3248–3266.
- [11] SAURÍ S, MARTÍN E. Space allocating strategies for improving import yard performance at marine terminals [J]. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 2011, 47(6): 1038–1057.
- [12] 陈超,台伟力,杨逸蓝,等. 出口箱随机入港下的箱区选择与箱位分配协调调度 [J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(4): 544–557.
CHEN Chao, TAI Weili, YANG Yilan, et al. Coordinated scheduling problem for block choice and slot arrangement under outbound container random arrival [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2014, 48(4): 544–557. (in Chinese)
- [13] SAFAEI N, JAVADIAN N, MOHAMMAD B. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal [J]. *Computers & Industrial Engineering* 2009, 56(1): 44–52.
- [14] KANG J, RYU K R, KIM K H. Deriving stacking strategies for export containers with uncertain weight information [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2006, 17(17): 399–410.
- [15] CHEN L, LU Z. The storage location assignment problem for outbound containers in a maritime terminal [J]. *International Production Economics*, 2012, 135(1): 73–80.

(责任编辑:童天添)