

集卡分批到达模式下的进口箱场桥作业调度优化

邵乾虔¹, 徐婷婷², 杨惠云³, 靳志宏¹

(1. 大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026; 2. 中华人民共和国
浙江海事局, 杭州 310000; 3. 大连口岸物流科技有限公司, 辽宁 大连 116601)

摘要: 在进口箱疏港过程中, 服务于相同客户的若干集卡组成集卡组, 具有相同的抵港时间, 因此, 外部集卡抵港提箱呈现分批到达的特点. 集卡组内作业指派的优劣直接影响场桥的作业效率, 存在较大的优化空间. 对此, 基于翻箱作业不能跨贝进行的现实约束, 将场桥作业调度解构为场桥作业路径优化问题和贝内翻箱作业优化问题两部分并分别建立动态优化模型. 针对场桥作业路径优化问题, 提出一种多项式时间的精确算法并给以证明; 针对贝内翻箱作业优化问题, 设计一种基于 MSA 的双层启发式算法进行求解. 一系列数值实验的结果显示了所提出优化模型及算法的有效性和鲁棒性.

关键词: 集装箱; 分批到达; 场桥作业调度; 翻箱

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Scheduling optimization of yard crane for import containers based on truck batch arrival pattern

SHAO Qian-qian¹, XU Ting-ting², YANG Hui-yun³, JIN Zhi-hong¹

(1. College of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Zhejiang Maritime Safety Administration of People's Republic of China, Hangzhou 310000, China; 3. Dalian Port Logistics Technology Co Ltd, Dalian 116601, China. Correspondent: JIN Zhi-hong, E-mail: jinzhihong@dmlu.edu.cn)

Abstract: In the configuration process of import containers, external trucks who serve the same customer own the same arrival time, therefore the trucks' arrival regularity present the characteristics of arrival in batch. The task assignment for trucks in the same batch will directly affect the operation efficiency of the corresponding yard crane, which implies the large optimization space. To solve this problem, based on the actual constraint that relocation operation can not be carried out across different bays, the yard crane scheduling is deconstructed into moving path scheduling and relocation scheduling. Accordingly, the mathematical optimization model for these two parts are formulated respectively. In order to get the optimal solution of the yard crane moving path optimization model, a polynomial time algorithm is developed and two auxiliary theorems are proved to support it. Meanwhile, a bi-level heuristic algorithm based on memory simulated annealing is developed to obtain satisfying solutions of the relocation optimization model. Experimental results show the effectiveness and robust of the optimization models and algorithms.

Keywords: container; batch arrival; yard crane scheduling; relocation

0 引言

随着集装箱码头吞吐量的快速增长, 由集装箱集疏港作业给码头带来的问题日益凸显. 集装箱堆场(以下简称“堆场”)是港区内待作业集装箱的统一集散地, 其作业效率是影响集装箱码头运作效率的重要因素, 而堆场调度系统的关键设备资源——场桥的作

业调度水平直接决定了堆场作业效率的高低. 由于堆场作业繁忙程度和复杂程度与日俱增, 如何合理配置与调度场桥设备, 成为长期困扰堆场调度人员的难题. 在实际作业中, 进口箱翻箱率远高于出口箱, 其场桥作业调度更具研究价值和实际意义. 在进口箱疏港过程中, 服务于同一客户的集卡车队(本文称其为“集

收稿日期: 2015-07-09; 修回日期: 2015-12-25.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71431001); 国家自然科学基金项目(71172108, 71302044, 71572023); 交通运输部应用基础项目(2014329225110); 教育部高等学校博士学科点专项科研项目(20122125110009, 20132125120009); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132013320, 3132013076); 中国博士后基金项目(2013M530927); 辽宁省博士启动基金计划(20131007).

作者简介: 邵乾虔(1988—), 男, 博士生, 从事物流系统仿真优化的研究; 靳志宏(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流优化技术等研究.

卡组”)往往同时出发、同时抵港,因此从整体上看,外部集卡抵港具有分批到港的特点.与此相应,在堆场中堆存的待提集装箱按集卡组分批提走,每组集卡抵港都产生一次场桥调度决策.集卡组入场后,被分配的提箱任务顺序难以匹配对应集装箱在堆场的堆存顺序,从而造成了场桥作业效率的降低.集卡组内的提箱顺序存在一定的优化空间,较优的提箱顺序可以降低提箱过程中的场桥移动距离和翻箱数量,但遗憾的是,国内的集装箱码头并没有对该作业环节进行优化.

目前,国内外学者对于场桥作业调度的研究按照作业细分程度可以分为两类:不考虑栈内具体箱位的研究,统称为宏观调度研究(如场桥作业路径优化、堆存策略优化等);考虑具体箱位的研究,统称为微观调度研究(如堆存箱位优化、翻箱优化等).虽然两类研究的切入点各异,但总体上多以提高效率、降低成本以及平衡作业量为优化目标.

关于场桥的宏观调度研究, Kim等^[1-3]针对出口箱场桥路径优化问题,建立了以最小化场桥总作业时间的数学规划模型,并设计了一系列算法进行求解; Narasimhan等^[4]基于出口箱分配方案,设计了分支定界算法用来求解场桥作业时间最小化问题; Ng等^[5]基于确定时间的任务序列研究了场桥作业调度问题,开发了分支定界法求得问题最优解; Li等^[6]考虑多场桥作业干涉,建立了基于离散时间的场桥调度优化模型,并开发了启发式方法进行求解; Jiang等^[7]通过子街区空间共享堆存策略提高了繁忙中转港集装箱堆场的土地空间利用率; Yu等^[8]基于自动化集装箱码头,通过优化进口箱堆存策略来减少外集卡的等待时间; Zheng等^[9]提出了一种融合了禁忌搜索的混合遗传算法来解决混堆箱区内的多场桥作业调度问题.

关于场桥的微观调度研究, Watanabe^[10]提出了方便指数法来估计集装箱码头翻箱量,并结合重箱在上轻箱在下的原则,运用动态规划求解待装船集装箱最小化翻箱率问题;针对该问题, Kim^[11]提出了在集装箱随机提取条件下的进口集装箱翻箱数量的估算公式,并显示出该公式的精度优于 Watanabe 的方法; Kim等^[12]研究了进口箱堆存方式,使得提箱过程中的翻箱量最小,同时提出了估计期望翻箱量的模型; Kim等^[13]提出了ENAR(翻箱量增加期望值)的概念,运用分支定界法求解存取箱翻箱时的落箱位选择问题;针对相同的问题,徐亚等^[14]延续了ENAR的计算方法,并在 Kim等^[13]的基础上提出了改进算法;诸如RDH算法^[15]、Min-Max启发式算法^[16]等同类翻箱启发式算法被大量开发研究; Kim等^[17]以最大化堆场集卡和场桥工作效率为目标建立箱位分配模型,并运

用约束满足技术进行求解; Lee等^[18]开发了启发式算法求解预翻箱过程中翻箱量最小化问题,并优化了翻箱路径;周鹏飞等^[19]引用顺序统计量描述集装箱随机到达序列,建立了同时考虑翻箱数和场桥移动距离的两阶段箱位分配优化模型,并设计了禁忌搜索算法进行求解;周鹏飞等^[20]考虑集装箱进出堆场时间的不确定性,建立了出口箱位随机双层规划模型,分别优化预期翻箱数和场桥作业成本,并开发了启发式算法进行求解.

上述研究中均将集卡视为独立任务单元进行优化,但实际疏港过程中外部集卡按客户分批到达,同批次到达的集卡在任务指派上存在优化空间;同时,这些研究大多只针对场桥作业的宏观调度和微观调度之一展开讨论,没有将二者建立调度联系.本文以外部集卡分组为核心,将提箱过程中的场桥作业解构为宏观、微观两个调度层面并分别建模优化,充分挖掘集卡组内部任务指派的优化空间.

1 进口箱提箱作业问题描述

集装箱堆场由若干个箱区组成,若干具有相同属性的集装箱堆砌形成箱区,如进口箱区、出口箱区以及空箱区等.如图1所示,箱区中有3个范围概念:贝、栈、层,用以表示集装箱在箱区中所处的位置.竖直堆砌的若干集装箱形成栈,水平排列的若干栈组成贝,若干贝组成一个箱区.

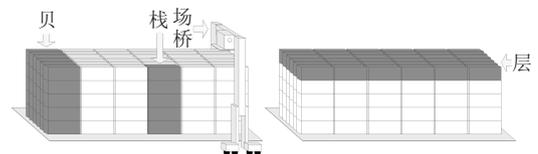


图1 箱区示意

在疏港提箱阶段,集装箱按照集卡组到达顺序被分批提走,每一集卡组到达堆场时都需要进行一次动态调度.该调度中影响场桥作业效率的主要因素是翻箱数量以及场桥作业移动路径,而前者对堆场作业效率的影响最为严重.集卡组中的每一辆集卡在进入码头之后都会被分配一个固定的提箱任务,而在实际作业中该任务的分配往往没有考虑到调度层面的优化和协同.

图2给出了集卡组内优化示意.图2中箱区堆存的集装箱共需被 n 个集卡组提走,此时抵港的客户1

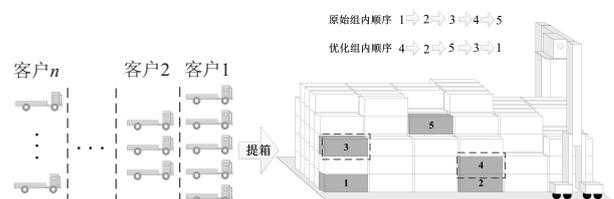


图2 集卡组内优化示意

集卡组共有 5 辆集卡, 被分配的任务是依次提走图 2 中 1~5 号集装箱. 将组内的提箱任务顺序优化后, 不仅可以减少 2 个翻箱作业(图 2 中虚线框标出), 同时可以使场桥的移动距离大幅减少.

出于安全考虑, 在实际作业中翻箱作业必须在同一贝位内进行, 而场桥路径是跨贝移动, 翻箱作业与场桥移动路径不具有直接关联性, 因此, 需将场桥提箱作业调度解构为场桥作业路径优化问题和贝内翻箱作业优化问题. 待提集装箱在箱区的不同贝位分布导致场桥作业路径优化问题的产生, 而在同一贝位不同栈、不同层的分布导致了翻箱作业优化问题的产生. 本文将每一集卡组抵港时刻提箱看作一个动态决策时点, 在每一决策时点根据待提集装箱在街区内的分布情况来优化场桥作业移动路径以及翻箱操作, 本文优化结构与思路如图 3 所示.

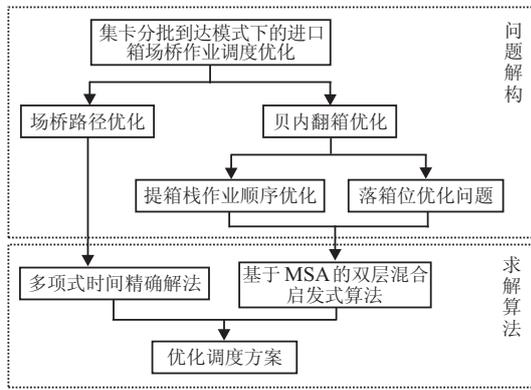


图 3 优化结构与思路

2 进口箱提箱作业建模

本文两个优化模型的建立均以以下假设条件为基础: 1) 待作业街区已知; 2) 所有待作业集装箱箱型相同, 如均为 20 英尺标准集装箱; 3) 在任一贝位内的提箱任务完成之前, 场桥不能移动至其他贝位进行作业; 4) 集卡组到达顺序已知.

2.1 场桥作业路径优化模型

将场桥在每一集卡组的提箱作业过程中停留的贝位分为初始贝位、作业开始贝位、作业中间贝位以及作业结束贝位. 图 4 为场桥作业路径示意, 该场桥作业开始前所处位置为贝位 1, 作业顺序为贝位 2、贝位 5、贝位 3、贝位 7, 其贝位名称如图 4 所示.

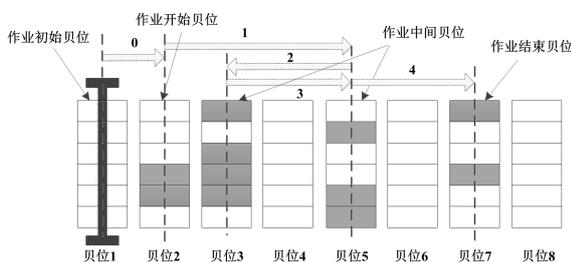


图 4 场桥作业路径示意

对于每一集卡组的提箱作业, 将场桥移动总距离分为切换距离与执行距离两部分, 前者指场桥由初始贝位移动至作业开始贝位的距离(即图 4 中路径 0), 后者指场桥由作业开始贝位直至当前集卡组作业结束的移动距离之和(即图 4 中路径 1、2、3、4). 优化场桥提箱路径的实质是选择最优的贝位作业顺序以最小化场桥移动总距离, 场桥移动距离以贝为单位计算. 模型的符号说明如下.

K : 街区的总贝数.

G : 当前作业集卡组待提集装箱所占贝位数量.

B_g : 当前作业集卡组待提集装箱所处贝位的集合, B_g 表示其中第 g 贝, $g = 1, 2, \dots, G$.

OB_g : B_g 的贝位序号, $g = 1, 2, \dots, G$.

C : 当前作业客户提箱作业开始前场桥所处贝位序号, 即初始贝位序号, 为上一集卡组的场桥作业结束贝位.

决策变量为 X_{gl} : 表示 B_g 是否被场桥第 l 次作业, 即

$$X_{gl} = \begin{cases} 1, & \text{当场桥第 } l \text{ 次作业 } B_g; \\ 0, & \text{其他;} \end{cases}$$

$$g, l = 1, 2, \dots, G.$$

目标函数与约束条件为

$$P = \min \left(\left| C - \sum_{g=1}^G OB_g X_{gl} \right| + \sum_{l=2}^G \left| \sum_{g=1}^G OB_g X_{gl} - \sum_{g=1}^G OB_g X_{g(l-1)} \right| \right). \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{g=1}^G X_{gl} = 1, \quad l = 1, 2, \dots, G; \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^G X_{gl} = 1, \quad g = 1, 2, \dots, G. \quad (3)$$

目标函数(1)前一项表示切换距离, 后一项表示执行距离, 整体表示最小化两者之和; 约束(2)表示场桥每次只作业一个待作业贝位; 约束(3)表示每个待作业贝只被场桥作业一次.

2.2 贝内翻箱作业优化模型

本文将翻箱优化归结为双层决策问题, 即待提箱栈的作业顺序问题以及每一待提箱栈阻塞箱落箱位的选择问题. 落箱位的选择需要考虑被翻集装箱与落

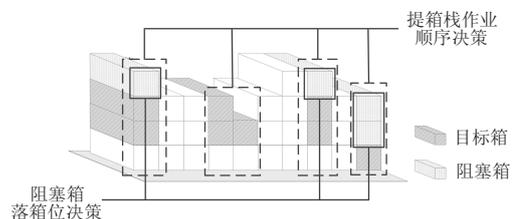


图 5 翻箱优化的双层决策

栈内集装箱的提箱次序关系,如图5所示.

因当前作业客户的提箱翻箱数已经确定,故将降低后续翻箱作为优化目标,该模型的补充假设条件为:1)提箱作业以栈为单位进行,即将同一栈中归属于同一客户的集装箱提箱完毕前不进行其他栈的提箱作业;2)除常规翻箱作业外,不对非作业集装箱进行箱位调整.符号说明如下.

I : 集装箱的额定堆存高度.

J : 每一贝的栈数.

N : 集卡组总数.

O_n : 集卡组的提箱顺序, $n = 1, 2, \dots, N$.

$slot(j, i)$: 当前作业贝位中第 j 栈第 i 层的箱位, $j = 1, 2, \dots, J, i = 1, 2, \dots, I$.

S^n : 集卡组 n 的待提集装箱在当前贝位所占栈位数量, $n = 1, 2, \dots, N$.

EJ^n : 集卡组的待提集装箱所处栈位的有序集合, EJ_s^n 表示 EJ^n 中的第 s 栈, $n = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, S^n$.

OJ_s^n : EJ_s^n 的栈位序号, $n = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, S^n$.

T_s^n : EJ_s^n 中待提箱量, $n = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, S^n$.

$ST^n(m, j, i)$: 将任一 EJ_s^n 中待提箱全部提走称为一次作业.该变量表示集卡组 n 提箱过程中,当前贝位第 m 次作业后 $slot(j, i)$ 堆放集装箱的客户编号,空箱位为0, $ST^n(m, j, i)$ 为集卡组 n 作业前的初始堆存客户标号.显然有 $ST^n(0, j, i) = ST^{n-1}(S^{n-1}, j, i)$,该变量为递推矩阵. $n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, S^n, j = 1, 2, \dots, J, i = 1, 2, \dots, I$.

$L^n(m, j)$: 表示集卡组 n 提箱过程中,当前贝位第 m 次作业后第 j 栈中的集装箱数量, $L^n(0, j)$ 表示集卡组 n 作业前各栈初始堆存箱量.显然有 $L^n(0, j) = L^{n-1}(S^{n-1}, j)$,该变量为递推向量. $n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, S^n, j = 1, 2, \dots, J$.

W_{sm}^n : 表示集卡组 n 提箱过程中,当前贝位第 m 次作业后 EJ_s^n 中阻塞箱数量. $n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, S^n, s = 1, 2, \dots, S^n$.

BL_{smw}^n : 表示集卡组 n 提箱过程中,当前贝位第 m 次作业后 EJ_s^n 中从上至下第 w 个阻塞箱. $n = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, S^n, w = 1, 2, \dots, W_{sm}^n$.

num_{smw}^n : 表示 BL_{smw}^n 的客户编号.

决策变量如下.

Y_{ms}^n : EJ_s^n 是否被场桥第 m 次作业,即

$$Y_{ms}^n = \begin{cases} 1, & \text{当场桥第 } m \text{ 次作业 } EJ_s^n; \\ 0, & \text{其他;} \end{cases}$$

$$n = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, S^n,$$

$$m = 1, 2, \dots, S^n.$$

Z_{smwj}^n : BL_{smw}^n 是否被移至第 j 栈,即

$$Z_{smwj}^n = \begin{cases} 1, & BL_{smw}^n \text{ 被移至第 } j \text{ 栈;} \\ 0, & \text{其他;} \end{cases}$$

$$n = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, S^n,$$

$$w = 1, 2, \dots, W_{sm}^n, j = 1, 2, \dots, J.$$

可以推导出以下符号:

j_m^n : 表示集卡组 n 作业中第 m 次作业栈的序号,即 $j_m^n = \sum_{s=1}^{S^n} OJ_s^n Y_{ms}^n, n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, S^n$.

sj_m^n : 表示集卡组 n 作业中第 m 次作业栈在 EJ^n 中的序号,即 $sj_m^n = \sum_{s=1}^{S^n} sY_{ms}^n, n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, S^n$.

tj_{smw}^n : 表示 BL_{smw}^n 的目标栈序号,即 $tj_{smw}^n = \sum_{j=1}^J jZ_{smwj}^n, n = 1, 2, \dots, N, w = 1, 2, \dots, W_{sm}^n$.

由决策变量可以导出递推向量 $L^n(m, j)$ 以及递推矩阵 $ST^n(m, j, i)$ 的值,进而推出 W_{sm}^n 的值.设 $m = 1$,递推步骤可描述如下.

Step 1: 若 $m > S^n$,则递推结束,否则执行 **Step 2**.

Step 2: 令 $w = 1, L^n(m, j) = L^n(m - 1, j)$,

$$ST^n(m, j, i) = ST^n(m - 1, j, i),$$

$$j = 1, 2, \dots, J, i = 1, 2, \dots, I.$$

Step 2.1: 若 $w > W_{sj_m^n}^n$,则执行 **Step 3**,否则执行 **Step 2.2**;

Step 2.2: $ST^n(m, tj_{sj_m^n, mw}^n, L^n(m, tj_{sj_m^n, mw}^n) + 1) = num_{sj_m^n, mw}^n, L^n(m, tj_{sj_m^n, mw}^n) = L^n(m, tj_{sj_m^n, mw}^n) + 1$.令 $w = w + 1$,执行 **Step 2.1**.

Step 3: $ST^n(m, j_m^n, L^n(m, j_m^n) - i) = 0, i = 0, 1, \dots, T_{sj_m^n}^n + W_{sj_m^n}^n - 1, L^n(m, j_m^n) = L^n(m, j_m^n) - T_{sj_m^n}^n - W_{sj_m^n}^n$,更新 $W_s m^n, BL_{smw}^n$ 以及 num_{smw}^n .令 $m = m + 1$,执行 **Step 1**.

目标函数与约束条件为

$$P = \min \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^{S^n} \sum_{m=1}^{S^n} W_{sm}^n. \quad (4)$$

s.t.

$$\sum_{m=1}^{S^n} Y_{ms}^n = 1, n = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, S^n; \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^{S^n} Y_{ms}^n = 1, n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, S^n; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J Z_{smwj}^n = 1,$$

$$n = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, S^n,$$

$$m = 1, 2, \dots, S^n, w = 1, 2, \dots, w_{sm}^n; \quad (7)$$

$$L^n(m, j) \leq I, n = 1, 2, \dots, N,$$

$$m = 1, 2, \dots, S^n, j = 1, 2, \dots, J. \quad (8)$$

目标函数(4)表示最小化预翻箱数;约束(5)表示每个待作业栈只能被作业一次;约束(6)表示场桥一次只能作业一个栈;约束(7)表示若待提箱栈存在阻塞箱,则每一个阻塞箱只存在一个目标栈位;约束(8)表示翻箱操作中每一栈堆存的集装箱不允许超过额定堆存高度.

3 算法设计

场桥作业路径优化模型不属于标准0-1规划模型,本文根据其调度特点,在两个辅助命题的证明下,提出一种多项式时间的精确解法;贝内翻箱作业优化模型属于NP-hard问题,结合其双层决策的特点,设计了基于MSA(memory simulated annealing)的双层混合启发式算法.

3.1 路径优化算法

由于当前待提集装箱的堆存位置可能分布在街区内的不同贝位,场桥的初始贝位会与其存在如图6所示的3种关系.情况1和情况2为初始贝位位于待作业贝位的同一侧,情况3为初始贝位位于待作业贝位的中间.

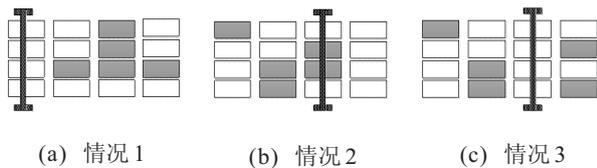


图 6 3种位置关系

本文给出作业移动距离最小值的多项式时间精确算法可描述为:当场桥初始贝位位于待作业贝位的同一侧时,移动至距离最近的待作业贝位向另一端顺次提箱;当场桥初始贝位位于待作业贝位中间时,移动至距离待作业贝位分布较近一端开始向另一端顺次作业,若距离相同,则随机选择一端开始作业.本文算法共执行加法 $G - 1$ 次,时间复杂度为 $O(n)$ 级别,故为多项式时间解法,下面给出算法结果为精确解的证明过程.该证明过程基于本文提出的命题1和命题2.定义当前待提集装箱分布间隔距离用 H 表示,即当前待提集装箱分布的贝位总跨度.其值为分布两端贝位序号之差,即 $H = \max(OB_g) - \min(OB_g)$.分布间隔距离用来描述当前待提集装箱在街区内的贝位分散程度.

命题1 在不约束作业开始贝位以及作业结束贝位的条件下,场桥作业路径优化模型的执行距离的理论下界值为集装箱的分布间隔距离.

证明 任何客户的作业贝位都可分为两端贝位(位于作业贝位分布两端的贝位)和非两端贝位(位于作业贝位分布中间的贝位),在提箱时这两类贝位都可能是作业开始贝位、作业结束贝位以及作业中间贝位.定义作业间隔距离为两个贝位的距离,这两个贝位应满足:含有归属于同一客户的集装箱,且这两个贝位之间的任何贝不能含有该客户的集装箱.作业间隔距离总和为 H ,图7为街区俯视图,其中灰色的栈表示含有归属于同一客户的集装箱的栈,因此,贝位2与贝位3以及贝位3与贝位5存在作业间隔距离,分别为1个贝位和2个贝位.

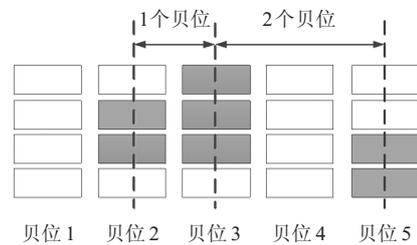


图 7 街区俯视图

设作业序列 $SB = \{SB_1, SB_2, \dots, SB_G\}$,其中作业初始贝位为 SB_1 ,作业结束贝位为 SB_G ,作业中间贝位为 SB_z .将 SB 中的元素按从左至右的位置顺序组成有序集合 $EB = \{EB_1, EB_2, \dots, EB_G\}$.左端贝位 EB_1 只存在右侧作业间隔距离,设为 d_1 ;非两端贝位 EB_g 的右侧作业间隔距离设为 d_g .设场桥驶向 SB_z 的移动为 D_z , D_1 为切换作业移动.

1) 若 EB_1 为 SB_1 ,则 D_2 一定包含 d_1 ;若 EB_1 为 SB_z ,则 D_z 以及 D_{z+1} 一定包含 d_1 ;若 EB_1 为 SB_G ,则 D_g 一定包含 d_1 .

2) 若 EB_g 为 SB_1 ,当 SB_2 位于其右侧时, D_2 一定包含 d_g ,当 SB_2 位于其左侧时,必存在 $\lambda > 2$ 使得 SB_λ 位于 EB_g 右侧且 $SB_{\lambda-1}$ 位于其左侧,则 D_λ 一定包含 d_g .

若 EB_g 为 SB_z ,当 SB_{z-1} 和 SB_{z+1} 其中之一位于其右侧时, d_g 一定被包含,当 SB_{z-1} 和 SB_{z+1} 均位于其左侧时,若其左侧为先完成的一侧,必存在 $\lambda > z + 1$ 使得 SB_λ 位于其右侧且 $SB_{\lambda-1}$ 位于其左侧,则 D_λ 一定包含 d_g ,反之亦然.

若 EB_g 为 SB_G ,当 SB_{G-1} 位于其右侧时, D_G 一定包含 d_g ,当 SB_{G-1} 位于其左侧,必存在 $\lambda < G - 1$ 使得 SB_λ 位于其右侧且 $SB_{\lambda+1}$ 位于其左侧,则 $D_{\lambda+1}$ 一定包含 d_g .

综上所述,对于任意作业序列 SB_1, SB_2, \dots, SB_G ,其作业移动距离一定包含 d_1, d_2, \dots, d_{G-1} ,也即任

意作业顺序的场桥执行距离大于等于 $\sum_{g=1}^{G-1} d_g$, 又因

$$\sum_{g=1}^{G-1} d_g = H, \text{ 故命题得证. } \square$$

当场桥作业初始贝位位于待作业贝位的同一侧时, 本文算法的切换距离为 $C - \max(\text{OB}_g)$ 或 $\min(\text{OB}_g) - C$, 为所有可能的切换距离最小值. 算法的执行距离为 $\sum_{g=1}^{G-1} d_g$, 由命题1可知为最小值. 因此两者之和为最小值, 本文算法为精确解法得证.

命题2 当场桥作业初始贝位位于待作业贝位中间时, 场桥作业路径优化模型的理论下界值为 $\min(C - \min(\text{OB}_g), \max(\text{OB}_g) - C) + H$.

证明 以初始贝位为分割线, 位于其两侧的待作业贝位总有一侧全部完成作业要先于另一侧. 设已完成的一侧为左侧, 共有 G' 栈 (若作业初始贝位包含待作业集装箱, 则将其划分至其中), 组成有序集合 $\text{EB}' = \{\text{EB}_1, \text{EB}_2, \dots, \text{EB}_{G'}\}$, 集合内的元素均不能为 $\text{SB}_{G'}$.

1) 若 EB_1 为 SB_1 , 则 D_1 及 D_2 一定包含 d_1 ; 若 EB_1 为 SB_z , 则 D_z 及 D_{z+1} 一定包含 d_1 . 因此 d_1 必被经过两次.

2) 若 $\text{EB}_g (g < G')$ 为 SB_1 , 则 D_1 一定包含 d_g ; 当 SB_2 位于其右侧时, D_2 一定包含 d_g ; 当 SB_2 位于其左侧时, 必存在 $\lambda > 2$ 使得 SB_λ 位于 EB_g 右侧且 $\text{SB}_{\lambda-1}$ 位于其左侧, 则 D_λ 一定包含 d_g . 此时 d_g 必被经过两次.

若 $\text{EB}_g (g < G')$ 为 SB_z , 当 SB_{z-1} 和 SB_{z+1} 均位于其右侧时, D_z 及 D_{z+1} 一定包含 d_g , 此时 d_g 必被经过两次; SB_{z-1} 位于其左侧而 SB_{z+1} 位于其右侧时, 若 SB_1 位于其左侧, 则 D_1 一定包含 d_g ; 若 SB_1 位于其右侧, 则必存在 $\lambda < z - 1$ 使得 SB_λ 位于 EB_g 左侧且 $\text{SB}_{\lambda-1}$ 位于其右侧, 则 D_λ 一定包含 d_g , 同时 D_{z+1} 一定包含 d_g , 此时 d_g 必被经过两次, 反之亦然; 当 SB_{z-1} 和 SB_{z+1} 均位于其左侧时, 若 SB_1 位于其左侧, 则 D_1 一定包含 d_g ; 若 SB_1 位于其右侧, 则必存在 $\lambda < z - 1$ 使得 SB_λ 位于 EB_g 左侧且 $\text{SB}_{\lambda-1}$ 位于其右侧, 则 D_λ 一定包含 d_g ; 因 $\text{SB}_{G'}$ 一定位于 EB_g 右侧, 故存在 $\eta > z + 1$ 使得 SB_η 位于 EB_g 右侧且 $\text{SB}_{\eta-1}$ 位于其左侧, 从而 D_η 一定包含 d_g , 此时 d_g 必被经过两次.

3) 对于 EB_g , 设其与初始贝位的距离为 d_c , 显然有 d_c 被经过两次. 因此, 任意 $d_g (g \in \text{EB}_1, \text{EB}_2, \text{EB}_g)$ 均经过两次. 如命题1证明过程所述, 任意 d_g 都包含于场桥行驶路径中, 因此当已完成的一侧为左侧时, 执行距离与切换距离之和必大于等于 $\sum_{g=1}^{G-1} d_g + \sum_{g=1}^{G'-1} d_g$

$$+ d_c. \text{ 因 } \sum_{g=1}^{G-1} d_g = H, \text{ 且 } \sum_{g=1}^{G-1} d_g + d_c = C - \min(\text{OB}_g),$$

即作业初始贝位与左端贝位的距离, 故执行距离与切换距离之和必大于等于 $C - \min(\text{OB}_g) + H$. 若已完成的一侧为右侧, 则会得出结论: 执行距离与切换距离之和必大于等于 $\max(\text{OB}_g) - C + H$. 因此, 执行距离与切换距离之和必大于等于 $\min(C - \min(\text{OB}_g), \max(\text{OB}_g) - C) + H$. \square

当场桥初始贝位位于待作业贝位中间时, 本文算法的执行距离与切换距离之和即为 $\min(C - \min(\text{OB}_g), \max(\text{OB}_g) - C) + H$, 根据命题2, 本文算法为精确解法.

3.2 翻箱优化算法

模型目标函数为优化提箱过程中总翻箱数, 现以每一集卡组抵港作为决策时点. 在每一决策时点下, 障碍箱总数 (翻箱数) 已经确定, 如何优化落箱位以减少后续决策时点翻箱数应为阶段性的决策目标. 定义变量 $R(n_1, n_2)$, 表示客户 n_1 的集装箱与客户 n_2 的集装箱的提箱顺序关系, 若 $O_{n_1} > O_{n_2}$, 则其值为1, 否则为0. 因此, 函数

$$P = \sum_{j=1}^J \sum_{i=2}^I \sum_{z=1}^{i-1} R(\text{ST}^n(S^n, j, i), \text{ST}^n(S^n, j, i - z))$$

为算法的适应值函数. 算法分为内外两层: 外层以 MSA 为框架, 用于搜索待提箱栈的作业顺序; 内层算法采用启发式规则求解当前提箱栈作业顺序下障碍箱的落箱位选择.

解编码为一维实数串, 每一个数值对应一个待提箱栈, 表示 S^n 个待提箱栈的先后作业顺序, 对应数学模型中的决策变量 Y_{ms}^n . 给定待提箱栈作业顺序后, 落箱栈的选择由启发式算法得出, 因此不在编码中体现, 该结果对应数学模型中的决策变量 Z_{smwj}^n . 图8为一组解编码, 当前待提集装箱归属于客户3 (灰色部分), 贝位内共有8个栈存在客户3的集装箱.

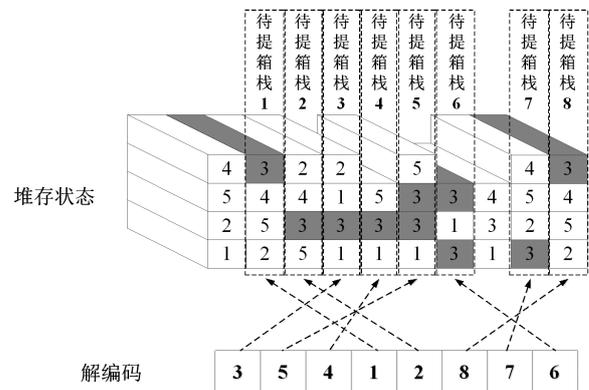


图8 解编码

MSA 的邻域搜索策略是基于 n-opt 思想的局部较优解搜索策略, 对于任意作业序列, 任取其中栈以

等概率转换为该栈的一个全排列,然后按原位放回序列从而构成一个新解.图9所示为一次邻域搜索过程.

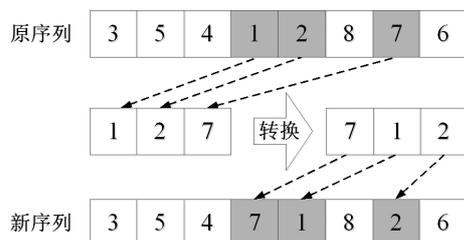


图9 邻域搜索过程

算法参数设置如下:结合不同规模的算例实验以及 Δf 值的大小设计初始温度;结束温度设为 1° ,温度下降系数 $\alpha = 0.8$;为了减小迭代计算量,设计自适应内循环次数 $L_t = a - (t/b)$,以有效减小不同温度下马氏链收敛步长,其中 t 为当前温度,参数 a 和 b 的值根据算例规模取值不同.

给定提箱栈的作业顺序,则决策变量 $Y_{m,s}^n$ 已知,进而变量 j_m^n 和 sj_m^n 已知.设贝内全体栈的集合为 U ,贝内第 m 次作业时,设集合

$$V = \left\{ j \mid j \in (U - EJ_s^n) \cup EJ_s^n \mid \sum_{z=1}^{S^n} zY_{zs}^n > m, \right. \\ \left. L^n(m-1, j) < I \right\},$$

表示当前不含待提集装箱且高度小于额定高度的栈的集合,也即备选落箱栈集合.以贪婪算法为例描述内层启发式规则的求解过程,令 $w = 1$,算法步骤如下.

Step 1: 若 $w > W_{sj_m^n}$,则算法结束,否则执行 Step 2;

Step 2: 若 $V \neq \emptyset$,则执行 Step 3,否则执行 Step 4;

Step 3: 在集合 V 中依次计算

$$L^n(m-1, j) - 1 \\ \sum_{z=0} R(\text{num}_{sj_m^n w}, ST^n(m-1, j, L^n(m-1, j) - z)),$$

取最小值作为落箱栈(确定 $tj_{sj_m^n w}$),令 $ST^n(m, tj_{sj_m^n w}, L^n(m-1, tj_{sj_m^n w}) + 1) = \text{num}_{sj_m^n w}$, $L^n(m, tj_{sj_m^n w}) = L^n(m-1, tj_{sj_m^n w}) + 1$, $w = w + 1$,更新集合 V ,执行 Step 1;

Step 4: 在集合 $V' = \left\{ j \mid j \in EJ_s^n \mid \sum_{z=1}^{S^n} zY_{zs}^n > m, \right.$

$\left. L^n(m-1, j) < I \right\}$ 中选择 $\sum_{z=1}^{S^n} zY_{zs}^n$ 值最大的栈作为落箱栈(确定 $tj_{sj_m^n w}$),令 $ST^n(m, tj_{sj_m^n w}, L^n(m-1, tj_{sj_m^n w}) + 1) = \text{num}_{sj_m^n w}$, $L^n(m, tj_{sj_m^n w}) = L^n(m-1, tj_{sj_m^n w}) + 1$, $w = w + 1$,更新集合 V' ,执行 Step 1.

该算法旨在 $V = \emptyset$ 时,将障碍箱放置在增加预翻箱数最小的栈;当 $V = \emptyset$ 时,将障碍箱放置在外层算法MSA编码序列靠后的栈,以增加其二次翻箱的

可选栈位.内层算法可嵌入除贪婪算法以外的诸如OH^[13]、IH^[14]、Max-Min^[15]、RDH^[16]等启发式算法进行落箱位优选.

4 数值实验

4.1 实验设计

数值实验共分为两部分:第1部分,在相同集装箱初始堆存状态下通过随机算例测试本文优化算法的优化性能;第2部分,在不同贝内堆存结构下,测试本文翻箱优化算法的优化性能.

表1给出了实验箱区的基础参数设置.

表1 数值实验基础参数

箱区规模	额定堆垛高度	客户数量	箱区空间占用率	单客户箱量
8贝,8栈	5层	10	70%(224箱)	20~24

作为实验对比策略,即集卡组内任务指派没有进行优化,设其组内提箱顺序由计算机随机产生.提箱顺序确定后场桥移动路径已经确定,贝内翻箱作业与进行对比的本文优化算法采取相同的落箱位选择算法,表2所示为翻箱优化的对比算法列表.两组实验的集卡组抵港顺序相同,均为计算机随机产生.

表2 对比算法列表

算法属性	算法名称	算法简介
组内优化算法	MSA+Greedy	记忆模拟退火算法搜索作业栈顺序,贪婪算法计算落箱位
	MSA+RDH	记忆模拟退火算法搜索作业栈顺序,启发式算法RDH ^[16] 计算落箱位
	MSA+MM	记忆模拟退火算法搜索作业栈顺序,启发式算法Max-Min ^[15] 计算落箱位
	MSA+IH	记忆模拟退火算法搜索作业栈顺序,启发式算法IH ^[14] 计算落箱位
	MSA+OH	记忆模拟退火算法搜索作业栈顺序,启发式算法OH ^[13] 计算落箱位
依赖于组内指派顺序	Greedy	固定作业栈顺序,贪婪算法计算落箱位
	RDH	固定作业栈顺序,启发式算法RDH ^[16] 计算落箱位
	MM	固定作业栈顺序,启发式算法Max-Min ^[15] 计算落箱位
	IH	固定作业栈顺序,启发式算法IH ^[14] 计算落箱位
	OH	固定作业栈顺序,启发式算法OH ^[13] 计算落箱位

调度开始前的集装箱堆存状态直接影响算法结果,现用以下3个指标来控制实验的初始堆存结构:

- 1) 设 H_n 为客户 n 的分布间隔距离,则令 $\alpha = \sum_{n=1}^N H_n$,用以描述集装箱在贝位间的分布跨度.
- 2) 设 B_n 为客户 n 集装箱所占贝位总数,则令 $\beta = \sum_{n=1}^N B_n$,用以描述集装箱在贝位间的聚散程度.

3) 定义集装箱的栈内分散数的概念: 归属于同一客户的集装箱在同栈内堆垛的离散块数量, 如图10所示. 设 $k_{n\alpha}$ 表示客户 n 的集装箱中所占第 α 栈的分散数, 则令 $\delta = \sum_{n=1}^N \sum_{\alpha=1}^{A_n} k_{n\alpha}$, 用以描述集装箱在栈内的分散程度. 设 U_n 表示客户 n 待提集装箱总数, 显然有 $\sum_{\alpha=1}^{A_n} k_{n\alpha} < U_n$.

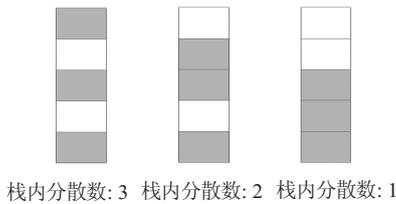


图10 栈内分散数

在上述箱区规模下, 取 $\alpha = 40, \beta = 30, \delta \in [130, 140]$ 随机产生100组算例进行实验.

4.2 结果分析

表3给出了场桥路径优化算法与翻箱优化算法的综合对比结果. 可以看出, 相比于没有进行组内优化的原始解, 本文提出的场桥作业调度算法对翻箱数和场桥移动距离的降低效果显著. 场桥作业移动距离与翻箱数量对场桥作业效率的影响主要体现在时间上. 根据实际操作经验, 场桥移动一个贝位的距离平均耗时2s, 一次翻箱操作平均耗时120s, 将翻箱数量与场桥移动距离分别折算成时间值并进行求和, 结果见表4, 各翻箱算法下优化解相比于原始解在时间值上约降低10%~15%, 有效提高了场桥在进口箱提箱过程中的作业效率.

表3 优化前后对比结果

路径优化算法		翻箱优化算法		优化解均值		对比解均值		优化百分比%	
本文算法	对比算法	本文算法	对比算法	翻箱数	场桥移动总距离	翻箱数	场桥移动总距离	翻箱数	场桥移动总距离
精确解法	依托于组内指派顺序	MSA+Greedy	Greedy	84.78	74.67	91.2	518.26	7.04	85.59
		MSA+RDH	RDH	81.47		88.33		7.77	
		MSA+MM	MM	83.09		89.36		7.02	
		MSA+IH	IH	82.67		83.37		0.84	
		MSA+OH	OH	80.84		85.77		5.75	

表4 对比算法列表

路径优化算法		翻箱优化算法		优化解	对比解	优化
本文算法	对比算法	本文算法	对比算法	时间值/s	时间值/s	百分比/%
精确解法	依托于组内指派顺序	MSA+Greedy	Greedy	10250.27	11980.52	14.44
		MSA+RDH	RDH	9853.07	11636.12	15.32
		MSA+MM	MM	10047.47	11759.72	14.56
		MSA+IH	IH	9997.07	11040.92	9.45
		MSA+OH	OH	9777.47	11328.92	13.69

图11所示为表4各算法的时间值构成对比. 可以看出, 集卡组内优化前, 场桥在移动上消耗的时间占总时间值的8%~10%, 组内优化后, 该值下降至2%左右. 场桥设备属于集装箱码头的瓶颈资源, 优化后的结果将场桥资源的大部分作业时间集中在翻箱作业, 大幅降低了其在箱区内频繁启动的跨贝行驶.

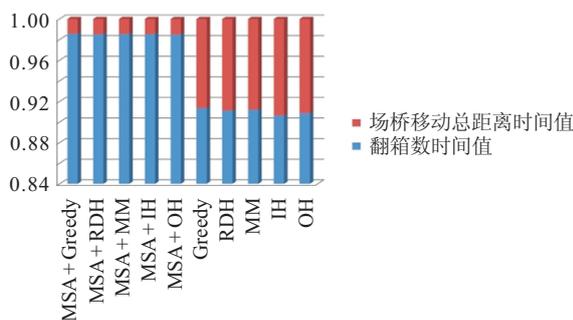


图11 时间值构成对比

图12展示了各组算法随着区间由低增高其翻箱量均值的统计趋势. 从整体上看, 各组算法的翻箱量均值均呈现上升趋势, 这是堆存结构的愈加复杂导

致的必然结果. 在上升过程中, 随着贝内堆存结构的复杂程度加深, 考虑组内优化的算法结果逐渐向原始算法靠拢, 这说明集装箱贝内堆存结构越复杂, 考虑组内优化的算法优化性能越弱. 但在实际作业中, 一线作业人员会根据自己的经验进行卸船堆存作业, 贝内集装箱的堆存结构不可能复杂到本算例的程度 (当 $\delta \in [190, 200]$ 时几乎同组客户的每个集装箱均隔离堆放), 因此, 本文所提出的算法仍然有效.

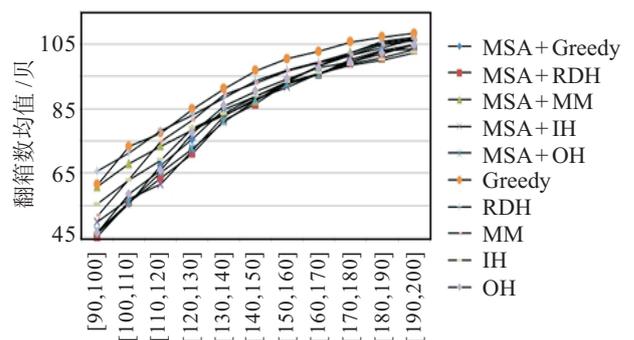


图12 不同 δ 区间下翻箱数统计趋势

5 结 论

本文讨论了集卡分批到达模式下进口箱场桥作业调度的结构与优化问题. 首先阐述了进口箱疏港过程中, 外部集卡按照客户的不同分批分组抵港的作业实际和特点. 在该模式下, 通过翻箱作业不能跨贝进行的现实约束, 将场桥作业调度优化问题解构为场桥作业路径优化问题和贝内翻箱作业优化问题两部分, 并分别建立了数学规划模型进行优化描述. 针对前者, 根据当前待提集装箱的贝位分布设计了多项式时间的精确解法并辅以证明; 针对后者, 结合翻箱优化模型的双层决策特点, 设计了基于MSA的双层混合启发式算法进行求解. 一系列的算例实验验证了本文所提出的优化模型及算法的有效性和实用性, 给集卡分批到达模式下进口箱调度决策提供了理论支持. 今后的研究重点是: 1) 解构集卡组抵港顺序不确定条件下的贝内翻箱问题; 2) 研究多目标箱区的联合调度解构与优化问题.

参考文献(References)

- [1] Kim K Y, Kim K H. A routing algorithm for a single transfer crane to load export containers onto a containership[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1997, 33(3/4): 673-676.
- [2] Kim K H, Kim K Y. An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals[J]. *Transportation Science*, 1999, 33(1): 17-33.
- [3] Kim K Y, Kim K H. Heuristic algorithm for routing yard-side equipment for minimizing loading times in container terminals[J]. *Naval Research Logistics*, 2003, 50(5): 498-514.
- [4] 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.
- [5] Ng W C, Mark K L. Yard crane scheduling in port container terminals[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2005, 29(3): 263-276.
- [6] Li W, Wu Y, Petering M E H, et al. Discrete time model and algorithms for container yard crane scheduling[J]. *European J of Operational Research*, 2009, 198(1): 165-172.
- [7] Jiang X, Lee L H, Chew E P, et al. A container yard storage strategy for improving land utilization and operation efficiency in a transshipment hub port[J]. *European J of Operational Research*, 2012, 221(1): 64-73.
- [8] Yu M, Qi X. Storage space allocation models for inbound containers in an automatic container terminal[J]. *European J of Operational Research*, 2013, 226(1): 32-45.
- [9] Zheng H X, Yu K. Yard crane scheduling in the mixture storage block based on hybrid genetic algorithm[J]. *J of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2013, 13(5): 150-158.
- [10] Watanabe I. Characteristics and analysis method of efficiencies of container terminal: An approach to the optimal loading/unloading method[J]. *Container Age*, 1991(3): 36-47.
- [11] Kim K H. Evaluation of the number of rehandles in container yards[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 1997, 32(4): 701-702.
- [12] Kim K Y, Kim K H. A routing algorithm for a single transfer crane to load export containers onto a containership[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1997, 33(3): 673-676.
- [13] Kim K H, Hong G P. A heuristic rule for relocating blocks[J]. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(4): 940-954.
- [14] Kim K H, Lee J S. Satisfying constraints for locating export containers in port container terminals[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 3982: 564-573.
- [15] 徐亚, 陈秋双, 龙磊, 等. 集装箱倒箱问题的启发式算法研究[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(14): 3666-3674. (Xu Y, Chen Q S, Long L, et al. Heuristics for container relocation problem[J]. *J of System Simulation*, 2008, 20(14): 3666-3674.)
- [16] Zhao W J, Anne V, Goodchild. The impact of truck arrival information on container terminal rehandling[J]. *Transportation Research Part E*, 2010, 46(46): 327-343.
- [17] Ünlüyurt T, Aydin C. Improved rehandling strategies for the container retrieval process[J]. *J of Advanced Transportation*, 2012, 46(46): 378-393.
- [18] Lee Y, Hsu N Y. An optimization model for the container pre-marshalling problem[J]. *Computer and Operations Research*, 2007, 34(11): 3295-3313.
- [19] 周鹏飞, 方波. 基于随机交箱序列的集装箱堆场出口箱箱位优选[J]. *沈阳工业大学学报*, 2011, 33(6): 678-685. (Zhou P F, Fang B. Slot allocation optimization for export container in container storage yard based on stochastic delivery sequence[J]. *J of Shenyang University of Technology*, 2011, 33(6): 678-685.)
- [20] 周鹏飞, 李丕安. 不确定条件下集装箱堆场出口箱具体箱位优选[J]. *工业工程*, 2013, 16(1): 25-30. (Zhou P F, Li P A. Slot allocation for export containers in container yard with arrival and leaving time uncertainties delivery sequence[J]. *Industrial Engineering J*, 2013, 16(1): 25-30.)