

基于预约和图表示的集装箱出口箱位优选

周鹏飞^{1†}, 赵金秋^{1,2}

(1. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116000;

2. 深圳市盐田港集团有限公司 工程管理部, 广东 深圳 518000)

摘要: 针对预约交箱机制下集装箱堆场箱位优选问题, 提出一种交箱次序与箱位分配的三维图表示法; 基于图表示, 提出压箱量和龙门吊大车行驶距离的期望求解方法. 在此基础上, 构建基于图的集装箱堆场出口箱位优选模型, 优化堆场龙门吊行车成本和压箱量. 开发了改进禁忌搜索算法, 利用图表示特性缩小搜索空间并优选搜索方向, 提高收敛速度. 实验结果表明, 所提出的算法能够在合理的时间内获得满意解, 较确定性模型可减少堆场作业成本 20% 以上.

关键词: 集装箱堆场箱位分配; 图模型; 禁忌搜索算法; 预约机制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Appointment and graph representation based export container slot optimization

ZHOU Peng-fei^{1†}, ZHAO Jin-qiu^{1,2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China; 2. Engineering Management Department, Shenzhen Yantian Port Group Co Ltd, Shenzhen 518000)

Abstract: Aiming at container slots allocation in yard, which is affected by a container delivery appointment system, a 3D graph representation method of delivery sequence and slots allocation is proposed, and a solving method for the expected value of reshuffles and gantry crane traveling distances is presented. An optimization model of export container slots is established based on graphs to minimize crane traveling distance and reshuffles. A tabu-search algorithm is proposed with graph representation to narrow down searching space and to optimize searching direction, thus its convergence rate can be accelerated. Experiment results show that a satisfied solution can be gained in a reasonable time by using the proposed algorithm, and the model can save more than 20% operation cost than the determinative one.

Keywords: container slot allocation; graph model; tabu-search algorithm; appointment system

0 引 言

集装箱堆场是码头交接箱的缓冲区,也是码头生产组织与协调的关键部分.堆场收箱阶段的箱位优选和堆场翻箱时的箱位优选不仅有利于堆场龙门吊堆取箱作业,而且有利于减少装船时的堆场翻箱,进而提高船舶装卸效率,是堆场作业优化的重要问题,前者针对进场箱,后者针对在场箱优选箱位.近年来,随着信息技术的发展及其在集装箱运输中的应用,国内外一些码头已逐步建立了客户提交箱预约系统,如洛杉矶港、温哥华港、天津港、大连港等^[1].码头提交箱预约便于客户交箱信息收集,有利于堆场箱位优选

和作业组织^[2].如果能有效利用提交箱信息,则能改进箱位优化效果,提高堆场作业效率^[3].

集装箱堆场出口箱位优选现有研究可分为两类:基于启发式规则或知识的优选策略研究^[4-5]和基于数学规划与智能优化算法的优选研究^[6-8].第1类研究方面,计三有等^[4]针对翻箱率优化问题,利用箱重和进场顺序属性构建二维坐标系,并用坐标点表示集装箱,利用连接右上方集装箱不增加翻箱的特点提出了为同一目的港的集装箱优选箱位的启发式方法,该方法没有考虑多目的港箱以及龙门吊作业成本,且属于步步最优贪婪法;杨淑芹等^[5]以单贝位为研究

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2017-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71101014); 教育部留学回国人员科研启动基金项目(教外司留[2015]1098); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DUT16QY47).

作者简介: 周鹏飞(1977-),男,副教授,博士,从事港口系统规划与物流运作优化等研究; 赵金秋(1990-),男,硕士生,从事港口工程管理的研

†通讯作者. E-mail: pfzhou@dlut.edu.cn

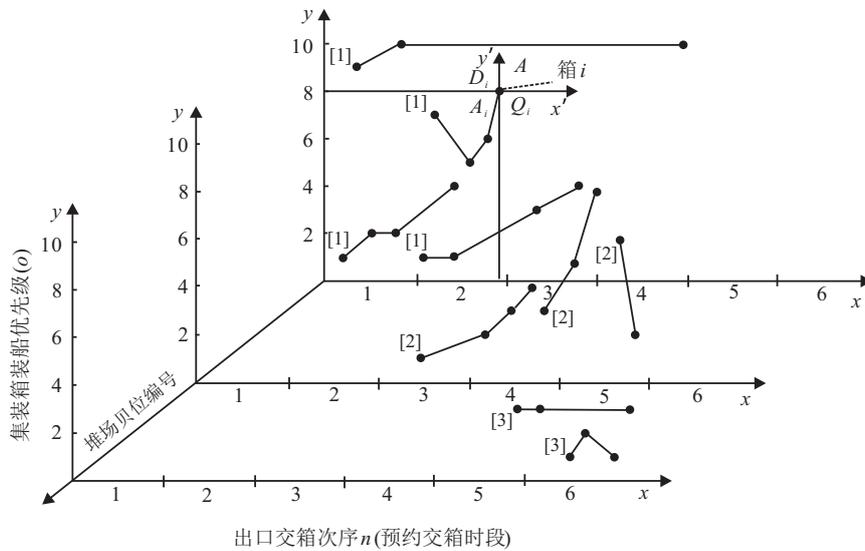
对象,考虑箱重属性,以最少压箱量为目标构建了箱位优选模型.第2类研究方面,Kang等^[6]运用模拟退火算法和仿真技术优选不确定箱重条件下的出口箱位;Kozan等^[7]开发了集装箱装船缓冲区翻箱遗传算法和禁忌搜索算法,该问题相当于进场箱同时到港的箱位优选问题;周鹏飞等^[8]考虑出口箱交箱时间的动态性,提出了两级调度策略,建立规划模型以优化龙门吊行驶距离和压箱量,并开发了基于禁忌搜索的启发式算法.上述基于全局搜索的智能优化算法搜索空间大,搜索方向不易控制,通常耗时较多.本文将借助于箱位优选问题的图表示特点简化搜索空间以及优化搜索方向,以改进算法收敛速度和全局性能.

从上述分析可以看出,客户预约提交箱信息有助于改进出口箱位优选效果^[3],但即使建立预约机制的码头也难以获取准确的客户交箱时间(实际交箱时间受交通等多因素影响具有不确定性).现有箱位优选确定性模型应用条件苛刻,实际问题难以满足,目前尚未见到有关考虑客户预约信息进行箱位优选的研究报道.

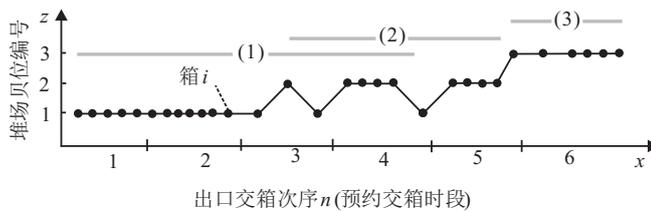
1 基于图的交箱序列与箱位分配表示

出口箱位优选主要考虑堆箱时龙门吊作业成本与装船时的翻箱量等问题,通常可分解为两个关联问题:贝位优选和栈位优选.前者主要优化龙门吊作业成本(主要指龙门吊大车行车成本,可用龙门吊大车行驶距离表示),后者主要优化根据长途重箱优先装船原则的后装船箱压先装船箱的总量(装船时的翻箱量).为表示长途重箱优先装船原则,引入装船优先级变量 c 来表示装船优先级别,即 $c = d \times w_{\max} + w$.其中: w 为箱重等级, d 表示目的港远近次序, w_{\max} 为最大重量等级.优先级越大越优先装船.

基于客户交箱预约可获得交箱次序、箱重及目的港等信息.本文受文献[4]利用箱重与集装箱到港次序构建二维坐标系的启发,提出一种利用多层交箱次序和装船优先级二维坐标联动表示多贝箱位分配的三维图表示方法,用于模型构建和算法搜索控制,如图1所示.用 St_i 表示箱 i 同折线(栈)的箱集合(包含箱 i);用 b_i 表示栈内箱 i 所分配的贝位; $x-z$ 平面中虚线表示堆箱过程中龙门吊大车在贝位间的移动,称



(a) 交箱次序与箱位分配三维视图



(b) 交箱次序与箱位分配x-z平面视图

- 出口集装箱
- 位于同一堆栈的出口集装箱
- (1)- 贝位区间
- 龙门吊大车的移动虚线
- [1] 堆栈所处的贝位编号
- A_i 在 x^1-y^1 坐标系中位于箱 i 的第1或第4象限中的出口箱集合
- D_i 在 x^1-y^1 坐标系中位于箱 i 的第2象限中的出口箱集合
- Q_i 在 x^1-y^1 坐标系中位于箱 i 的第4象限中的出口箱集合

图1 交箱次序与箱位分配图表示

作“移动虚线”,虚线水平时表示相邻的堆取作业间无需大车移动,否则大车需在相应贝位间移动.在图1中,栈位优选与贝位优选问题可分别转化为 $x-y$ 平面中节点连线选择和折线标号选择.箱位优选问题指标(压箱量和龙门吊大车行驶距离)可分别表示为 $x-y$ 平面中斜率为负的折线段总数和 $x-z$ 平面中移动虚线连接的贝位距离总和.

$x-y$ 平面中节点连线(栈)选择时,非负斜率的连线不产生压箱,同时斜率较小的堆存方案压箱量鲁棒性较好.如:箱 $i(n, c)$ 和 $j(n', c')$ 间连线(同栈),若 $dx = n' - n \geq 0$ 和 $dy = c' - c \geq 0$ 时,则不存在压箱.当 dx 较大时,交箱次序变动引发压箱的概率较小,即箱 i 推迟到港或箱 j 提前到港而不影响与箱 i 、 j 交箱次序的时间范围广; dy 较小时,折线不产生压箱的连线可选集较大,即箱 j 上堆放无需翻倒箱的装船优先级范围大,可用 $\sum_{i=1}^N r_i$ 来衡量堆存方案的鲁棒性,其中 $r_i = dy_i/dx_i$.折线标号(贝)选择时,考虑较近的堆栈折线选择同贝或邻近贝有助于减少龙门吊大车移动,可控制邻近堆栈折线的标号(贝)选择范围,排除过大的龙门吊大车移动集,用折线标号(贝) b 的堆栈折线范围 $[Sc_b^-, Sc_b^+]$ 表示,简称贝区间,如图1中 $x-z$ 平面上方的水平范围线.

2 压箱量与大车行驶距离期望的求解

上述分析表明,交箱次序决定着压箱量与龙门吊大车行驶距离,客户预约交箱时间通常为时间段,同预约时段内的交箱次序具有不确定性,受交通、天气等多因素的影响.因此,这里假定客户实际交箱时间在预约时段内,同预约时段内的交箱服从同概率分布.

不同预约时段箱的压箱可通过装船优先级和时段先后计算,同预约时段的压箱可通过数学期望表示,则压箱量期望求解公式为

$$\sum_{i=1}^N (R_i + E_i). \quad (1)$$

其中: N 为总箱数; R_i 表示箱 i 不同预约时段箱的压箱量,当 $St_i \cap D_i \neq \emptyset$ 时, $R_i = 1$,否则 $R_i = 0$; E_i 表示箱 i 同预约时段箱的压箱量期望,当 $R_i = 1$ 时, $E_i = 0$,否则 $E_i = num_i/(num_i + 1)$.这里 num_i 为箱 i 同预约时段,装船优先级大于箱 i 且分配到同栈的箱数,即集合 $Te_i \cap St_i \cap (D_i \cup A_i^1)$ 的元素个数. Te_i 表示箱 i 所在预约时段的箱集合, A_i^1 表示 $x-y$ 平面中位于箱 i 右上区域的集装箱集合, D_i 表示 $x-y$ 平面中位于箱 i 左上区域的集装箱集合.其推导如下:因为

$num_i + 1$ 个同预约时段箱中,每个箱最先进场的概率均为 $1/(num_i + 1)$,箱 i 不是最先进场时将压其他箱,有 num_i 个优先级高于箱 i 的集装箱,所以其压箱期望为 $num_i/(num_i + 1)$.

龙门吊大车行驶距离期望求解公式为

$$LE_m = \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1, i' \neq i}^N |b_i - b_{i'}| \times p_{i, i'}^{m-1, m}. \quad (2)$$

其中: LE_m 为龙门吊大车第 m 次移动的距离期望; b_i 和 $b_{i'}$ 为箱 i 和 i' 分配的贝位; $p_{i, i'}^{k-1, k}$ 为箱 i 第 $k-1$ 个交箱、箱 i' 第 k 个交箱的联合概率,则有

$$p_{i, i'}^{k-1, k} = \begin{cases} 1/\Delta_i \times \Delta'_{i'}, i' \notin Te_i, zt_i + 1 < k \leq zt_i + \Delta_i + 1 \text{ and } zt'_{i'} < k \leq zt'_{i'} + \Delta'_{i'}; \\ 1/\Delta_i(\Delta_i - 1), i' \in Te_i, zt_i + 1 < k \leq zt_i + \Delta_i; \\ 0, \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

其中 zt_i 和 Δ_i 分别表示箱 i 所在预约时段前总箱量和时段内箱量.如:1、2、3和4号箱预约交箱时段为1;5和6号箱预约交箱时段为2;7、8和9号箱预约交箱时段为3;则 $p_{2,4}^{1,2} = 1/(4-1) \times 1/4 = 1/12$, $p_{3,5}^{4,5} = 1/4 \times 1/2 = 1/8$.

3 出口箱位优选模型

主要假设:1)根据交箱预约信息,可确定交箱时段、箱重、目的港等信息;2)交箱时间在交箱预约时段内服从相同概率分布;3)待分配箱型相同且属同一船舶,不同箱型箱可分开求解;4)装船优先级根据长途重箱先装原则确定,其计算见第2节.

主要符号及变量说明如下:

N :计划周期内进场箱总数.

B, S, T :分别为堆场段内贝位数、贝内堆栈数和额定栈高.

b_0 :龙门吊初始位置.

F_k :贝的额定容量.

M :一个足够大的正数.

$St_i, A_i^1, D_i, Te_i, p_{i, i'}^{m-1, m}$,见第2节.

x_{ij} (决策变量): $x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ 箱 } i \in St_j; \\ 0, \text{ 否则.} \end{cases}$

y_i^k (决策变量): $y_i^k = \begin{cases} 1, \text{ 箱 } i \text{ 所分配贝位为 } k; \\ 0, \text{ 否则.} \end{cases}$

h_i^m (中间变量): $h_i^m = \begin{cases} 1, \text{ 箱 } i \text{ 所在的堆栈有 } m \text{ 个箱;} \\ 0, \text{ 否则;} \end{cases}$

$$m \in \{1, 2, \dots, T\}.$$

R_i, E_i, num_i (中间变量): 见第2节.

目标函数为

$$P = \min c_1 \sum_{i=1}^N (R_i + E_i) + c_2 \sum_{m=1}^N \text{LE}_m. \quad (4)$$

即最小化总压箱量与龙门吊大车行驶总距离的加权和, 其中 c_1 和 c_2 为翻箱单位成本和龙门吊大车单贝行驶成本.

约束条件为

$$\begin{aligned} \text{LE}_m \geq & \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1, i' \neq i}^N \left| \sum_{k=1}^B k \cdot y_i^k - \sum_{k=1}^B k \cdot y_{i'}^k \right| \cdot p_{i, i'}^{m-1, m}, \\ & m \in \{2, 3, \dots, N\}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$E_i \geq \text{num}_i / (\text{num}_i + 1), \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{num}_i \geq & \sum_{j \in \text{Te}_i \cap (D_i \cup A_i^1) \setminus i} x_{ij} \cdot (1 - R_i), \\ & i \in \{1, 2, \dots, N\}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$(1 - R_i) \cdot \sum_{j \in D_i} x_{ij} = 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (8)$$

$$\sum_{j \in D_i} x_{ij} - R_i \geq 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (9)$$

$$x_{ij} = x_{ji}, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (10)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^N x_{ij} \leq T - 1, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & x_{ih} + x_{jh} + x_{ij} \neq 2, \\ & i < j < h, \quad i, j, h \in \{1, 2, \dots, N\}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^B y_i^k = 1, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N y_i^k \leq F_k, \quad k \in \{1, 2, \dots, B\}; \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^B y_i^k \cdot y_j^k + (1 - x_{ij})M > 0, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (15)$$

$$\sum_{m=1}^T \left[\left(\sum_{i=1}^N (h_i^m \cdot y_i^k) \right) / m \right] \leq S, \quad k \in \{1, 2, \dots, B\}; \quad (16)$$

$$\sum_{m=1}^T m \cdot h_i^m = \sum_{j=1}^N x_{ij} + 1, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (17)$$

$$\sum_{m=1}^T h_i^m = 1, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (18)$$

式(5)中 $\sum_{k=1}^B k \cdot y_i^k$ 表示分配给箱 i 的贝位 k ,

$\left| \sum_{k=1}^B k \cdot y_i^k - \sum_{k=1}^B k \cdot y_{i'}^k \right|$ 表示相邻两进场箱所在贝位差, 该约束表示完成第 m 个收箱作业龙门吊大车行驶距离的期望; 式(6)为同预约时段箱的压箱量期望约束; 式(7)中 $\text{Te}_i \cap (D_i \cup A_i^1)$ 表示箱 i 同预约时段且装船优先级大于箱 i 的箱集合, 与 $(1 - R_i)$ 相乘使 $R_i = 1$ 时, $E_i = 0$; 式(8)和(9)为不同预约时段箱的压箱量约束, 即当 $\sum_{j \in D_i} x_{ij} = 0$ 时, $R_i = 0$, 当 $\sum_{j \in D_i} x_{ij} \neq 0$ 时, $R_i = 1$, 其中 D_i 为箱 i 的翻箱集合; 式(10)表示箱 i 和 j 的位置对称约束; 式(11)表示箱堆放高度不超过额定高度; 式(12)表示两箱堆存关系的传递性约束; 式(13)表示分配给箱的贝唯一; 式(14)表示贝内总箱量不超过额定容量; 式(15)表示同堆栈箱位于同贝位; 式(16)表示贝内堆栈数约束; 式(17)和(18)保证中间变量 h_i^m 的取值要求.

式(6)为非线性约束, 可通过引进变量 $I_i^m \in \{0, 1\}$ 和常量 ex_m 将其转化为线性约束. 其中: $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, $m \in \{0, 1, \dots, T - 1\}$, $ex_m = 1/m + 1$. 使 I_i^m 满足下式:

$$\sum_{m=0}^{T-1} I_i^m = 1, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (19)$$

$$\sum_{m=0}^{T-1} m \cdot I_i^m = \text{num}_i, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (20)$$

则约束(6)可表示为

$$E_i \geq \sum_{m=0}^T ex_m \cdot I_i^m, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (21)$$

上述模型为二次整数规划模型, 式(7)、(8)和式(15)、(16)为二次约束, 其约束函数均为凸函数, 模型可利用 CPLEX 的分支定界等算法进行求解, 但模型决策变量随问题规模 N 呈二次方增长, 计算复杂度随 N 呈指数增长.

4 基于图的禁忌搜索算法

算法的基本思路: 依据启发式规则生成初始解, 基于解的箱位交换迭代搜索, 寻找模型近似最优解, 利用基于图的搜索邻域选择控制搜索方向和空间, 利用搜索禁忌保证搜索路径的多样化和解的全局性. 禁忌搜索算法设计主要内容如下.

1) 评估函数选定: 目标函数, 其值越小, 对应方案越好; 评估值相同, $r_{\text{obs}} = \sum_{i=1}^N r_i$ 值越小, 方案鲁棒性越好.

2) 初始解构建: 依次将压箱量为零且龙门吊移动最小的箱位分配给当前箱产生初始解。

3) 禁忌对象表 (T) 与禁忌长度 (l): 禁忌对象 $T_{nbs} = (n, b, s), n \in \{1, 2, \dots, N\}, b \in \{1, 2, \dots, B\}, s \in \{1, 2, \dots, S\}$, 表示箱 n 不能分配到堆栈 (b, s) 。禁忌表为禁忌对象组成的队列, 前进后出, 禁忌队列长度 (l) 可根据堆场区段规模选定。

4) 邻域集合 $H(x)$: 控制箱位交换的集合, 由箱与箱的位置交换和空箱位交换组成。基于图表示的邻域集合基于以下规则确定: i) 箱与箱的位置交换, 考虑箱位交换对龙门吊大车移动与压箱量的影响, 将箱位分配图中邻近箱作为交换箱对, 表示为 (i, j) , 其中箱 i 和 j 满足以下条件: a) $|n_i - n_j| \leq \text{Dis}$, 其中 n_i 和 n_j 分别为箱 i 和 j 的交箱次序, Dis 为控制参数; b) $j \in [\text{Sc}_{b_i}^-, \text{Sc}_{b_i}^+]$ 且 $i \in [\text{Sc}_{b_j}^-, \text{Sc}_{b_j}^+]$, 其中 $i \in [\text{Sc}_{b_j}^-, \text{Sc}_{b_j}^+]$ 为箱 i 所在贝区间。ii) 空箱位交换, 即分配箱到空箱位, 表示为 (i, z) , 其中箱 i 和栈 z 满足条件 $i \in$

$[\text{Sc}_{b_z}^-, \text{Sc}_{b_z}^+], [\text{Sc}_{b_z}^-, \text{Sc}_{b_z}^+]$ 为栈 z 所在贝区间。

5) 交换实施集合 $S(x)$: 为提高搜索效率, 搜索迭代允许许多对箱位交换, 考虑邻域集合 $H(x)$ 中的多对箱位交换可能产生冲突, 定义 $H(x)$ 的子集 (交换实施集合) 满足如下条件: i) 若 (i_1, j_1) 和 $(i_2, j_2) \in S(x)$, 则 $i_1 \neq j_2$ 且 $i_1 \neq i_2$; ii) 若 (i_1, z_1) 和 $(i_2, z_2) \in S(x)$, 则 $i_1 \neq i_2$ 且 $z_1 \neq z_2$; iii) 若 $(i, j) \in S(x)$, 则其交换后的评估值不劣于当前解。

6) 藐视准则: 若被禁忌候选方案的评估值小于历史最优评估值, 则将其解禁。

7) 终止条件: 迭代次数达到最大迭代次数 (max-iter) 时, 终止算法, 输出方案。

8) 算法流程: 为便于描述, 定义如下符号: x^* 表示最优箱位方案, $f(x^*)$ 表示最优方案下的成本评估值, m 表示从 $H(x)$ 选取的一次邻域交换, $A(s, x)$ 表示破禁水平函数。

算法流程如图2所示。

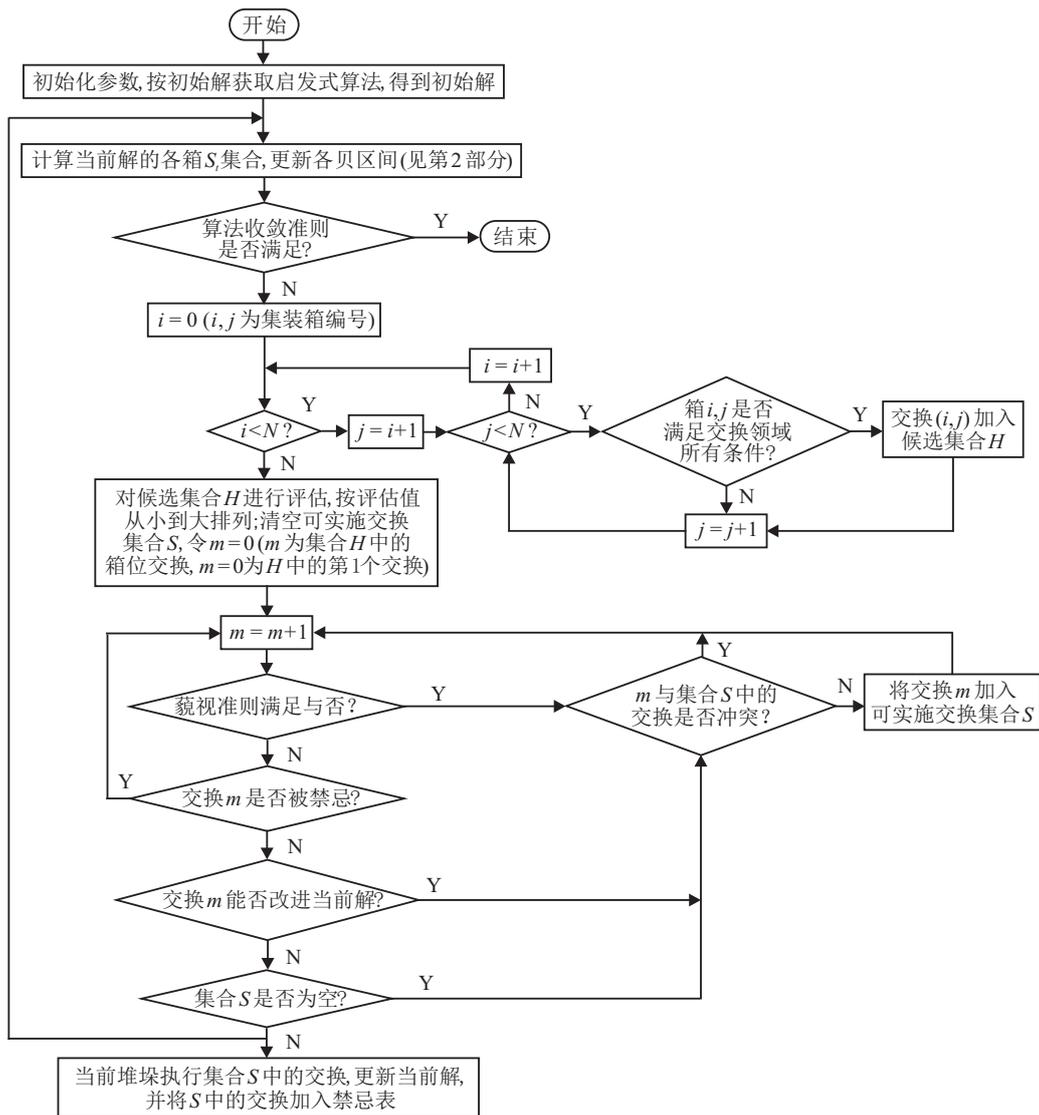


图2 禁忌搜索算法流程

5 实验分析

实验箱区规模从 $6 \times 6 \times 4$ 到 $25 \times 6 \times 4$ (贝 \times 栈 \times 层), 布设一台龙门吊, 交箱预约时段数 F 从 3 到 50, 装船优先级分 10 级. 算例生成: 交箱预约时段为 $1 \sim F$ 的均匀分布整数, 装船优先级为 $1 \sim 10$ 的均匀分布整数, 实际交箱时间为预约交箱时段内的均匀分布数. 实验平台为 CPU Pentium(R)D3.19 GHz / 2G, 算法采用 C++ 开发. 大车移动单位成本与翻箱单位成本参数均取 1, 算法禁忌表长度 l 取进场箱总数. 实验表明, 算法迭代 30 步后目标值均趋于稳定, 50 步近乎收敛, 因此本文算法 max-iter 取 50 次. 后文没有注明的实验结果均为 5 次同组实验均值.

CPLEX12.6 可求解本文小规模问题, 但算法时耗随问题规模急速增长, 当箱量达到 18 时, 时耗超过 12h, 难以满足需要. 利用 30 组总箱量小于 18 的小规模问题对本文算法与 CPLEX 进行对比分析, 本文算法 50% 以上算例的解与 CPLEX 一致, 80% 以上算例大车移动距离误差小于 1 个贝长度, 翻箱量误差小于 1. 表 1 给出了本文算法与一般禁忌搜索算法效果对比 (不利用图特征控制搜索范围, 随机选取邻域作为候选集). 针对小规模问题, 两种算法求解效果与时间消耗差异不大; 当箱量超过 32 时, 本文算法精度和时耗均明显优于一般禁忌搜索算法, 作业成本改进 5% 以上, 且随着问题规模变大优势愈加明显.

表 1 本文算法与禁忌搜索算法对比结果

箱位规模 / 箱量	优化作业成本		CPU 时耗 / s
	本文算法 / 禁忌搜索	改进 / %	本文算法 / 禁忌搜索
$1 \times 3 \times 3(7)$	0.50 / 0.50	0.00	0.01 / 0.01
$2 \times 3 \times 3(12)$	2.00 / 2.00	0.00	0.03 / 0.10
$1 \times 4 \times 5(15)$	1.50 / 1.50	0.00	0.12 / 0.13
$2 \times 4 \times 5(32)$	8.36 / 8.80	4.93	0.80 / 1.29
$3 \times 4 \times 4(39)$	8.32 / 8.98	7.42	1.50 / 2.53
$4 \times 5 \times 4(65)$	16.45 / 17.46	5.78	2.23 / 3.50
$5 \times 5 \times 4(80)$	12.85 / 13.90	7.53	3.13 / 5.38
$6 \times 6 \times 4(120)$	21.02 / 23.36	9.99	17.32 / 27.88

如果不考虑交箱预约的不确定性, 则可利用文献 [8] 的确定模型对问题进行求解, 但方案执行时需处理由实际交箱偏差造成的箱位占用和悬空问题. 处理方法是: 若计划箱位被占用, 则向上寻找空箱位; 若计划箱位悬空, 则放入下层空箱位. 图 3 给出了本文模型与文献 [8] 方法的对比, 其中纵坐标为 5 组 100 个

算例的压箱量和大车行驶距离模拟平均值. 结果显示, 本文模型较确定模型, 压箱量改进 25% 以上, 龙门吊行驶距离改进 15% 以上, 总成本节约 20% 以上. 随着预约时段数与总箱量比值的减小, 同一预约时段内交箱量增多, 集装箱到港次序不确定性增加, 两模型目标值均有所增加, 但本文模型优势愈发明显.

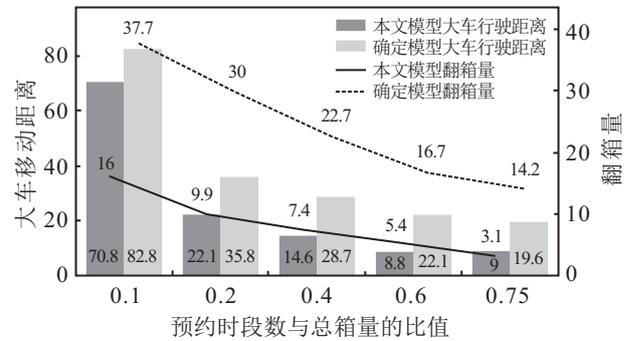


图 3 预约时段数下本文模型与确定模型效果对比

图 4 给出了本文预约模型与不考虑预约信息的实时调度方法的 4 组 80 次实验平均值对比, 实时调度根据已到港箱次序动态搜索邻近不产生压箱的箱位分配给到港箱. 堆场区段饱和度取 85% 和 80%, 结果显示, 本文模型利用进场箱预约信息, 提高了调度精度, 改进达 28% 以上.

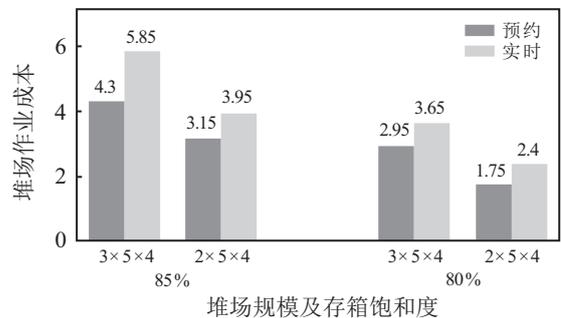


图 4 不同堆场规模下预约模型与实时调度效果对比

6 结论

集装箱码头堆场出口箱位优选是堆场作业计划的关键问题之一. 针对交箱预约的码头, 本文提出了基于图的交箱次序与箱位分配表示方法, 构建了出口箱位优选模型, 开发了基于图的禁忌搜索算法. 实验表明: 1) 基于预约的箱位优选模型利用客户交箱预约信息优化箱位, 相比于不考虑预约信息的方法节约作业成本 28% 以上; 2) 基于概率期望构建出口箱位优选模型可处理预约交箱的不确定偏差影响, 实验算例相比于确定模型压箱量减少 25% 以上, 龙门吊行驶距离减少 15% 以上, 总成本节约 20% 以上; 3) 改进的禁忌搜索算法利用图特性缩小搜索空间和优选搜索方向, 在合理时间内可获得满意解, 较一般禁忌搜索算法改进 5% 以上.

参考文献(References)

- [1] Giuliano G, O'Brien T. Reducing port-related truck emissions: The terminal gate appointment system at the ports of los angeles and long beach[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2007, 12(7): 460-473.
- [2] Namboothiri R, Erera A L. Planning local container drayage operations given a port access appointment system[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(2): 185-202.
- [3] Zhao W, Goodchild A V. The impact of truck arrival information on container terminal rehandling[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010, 46(3): 327-343.
- [4] 计三有, 高悦文. 集装箱堆场减少倒箱率方法研究[J]. 水运工程, 2006(8): 53-56.
(Ji S Y, Gao Y W. Reduction of rate of container transposition in container yard[J]. Port & Waterway Engineering, 2006(8): 53-56.)
- [5] 杨淑芹, 张运杰, 王志强. 集装箱堆场问题的一个数学模型及其算法[J]. 大连海事大学学报: 自然科学版, 2002, 28(B08): 115-117.
(Yang S Q, Zhang Y J, Wang Z Q. A model and its algorithm on container yard problem[J]. J of Dalian Maritime University, 2002, 28(B08): 115-117.)
- [6] Kang J, Ryu K R, Kim K H. Deriving stacking strategies for export containers with uncertain weight information[J]. J of Intelligent Manufacturing, 2006, 17(4): 399-410.
- [7] Preston P, Kozan E. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals[J]. Computers & Operations Research, 2001, 28(10): 983-995.
- [8] 周鹏飞, 方波. 动态环境下集装箱码头堆场出口箱箱位分配建模与算法研究[J]. 控制与决策, 2011, 26(10): 1571-1576.
(Zhou P F, Fang B. Modeling and algorithm research on export container slots allocation under dynamic environments[J]. Control and Decision, 2011, 26(10): 1571-1576.)

(责任编辑: 李君玲)

第30届中国控制与决策会议(2018CCDC)征文通知

第30届中国控制与决策会议(2018CCDC)将于2018年6月9日~11日在中国沈阳举行. 会议由东北大学和中国自动化学会信息物理系统控制与决策专业委员会主办.

第30届中国控制与决策会议论文集中的英文论文将进入IEEE Xplore Data Base, 被EI检索.

第30届中国控制与决策会议将涉及理论与应用两方面, 主要涵盖系统、控制与决策相关课题. 征文范围如下:

控制与决策: 自适应控制; 复杂系统与复杂网络; 控制系统应用; 控制工程教育; 协同控制; 信号处理; 数据处理; 数据驱动控制; 决策理论与方法; 决策支持系统; 管控一体化; 时滞系统; 离散事件系统; 分布控制系统; 分布参数系统; 故障诊断与容错控制; 模糊系统; 对策论; 混杂系统; 系统辨识与参数估计; 智能系统; 知识管理与知识工程; 管理信息系统与企业信息化; 供应链与物流管理; 电子商务建模与优化; 运动控制; 网络控制系统; 神经网络; 非线性系统; 优化控制; 过程控制; 生产计划与调度; 鲁棒控制; 传感器网络; 社会经济系统; 随机系统; 变结构控制; 控制与仿真.

自动化: CIMS与制造系统; 工厂建模与仿真; 家

庭、实验室及服务自动化; 仪器仪表系统; 智能自动化; 人机交互; 纳米自动化与装配; 基于网络的系统; 计划、调度与协调; 过程自动化.

机器人: 以人为中心的人机系统; 医用机器人与生物机器人学; 微机器人与微操作; 移动机器人学; 移动传感器网络; 感知系统; 机器人控制; 机器人传感与数据融合; 搜寻、援救与野外机器人学; 人机交互; 空间与水下机器人; 遥控机器人; 视觉伺服; 多足机器人系统.

新兴技术领域: 信息物理系统; 智能电网; 再生能源; 能源管理系统; 集成系统与过程; 微机电系统; 电动车辆与智能交通; 交通控制; 暖通系统优化和控制; 生物系统建模.

除分组报告外, 会议另设有邀请专题, 特别专题, 特邀大会报告和杰出讲座.

会议投稿者请于2017年10月31日前提交全文. 录用文章的作者需要注册并到会宣讲论文. 请登陆<http://www.ccdc.neu.edu.cn>了解具体事宜并投稿. 同时也可通过E-mail向大会秘书(secretary_ccdc@ise.neu.edu.cn)咨询.

中国控制与决策会议秘书处