

基于部分集卡到达信息的码头进口箱翻箱优化

曾庆成*,李厚源,吴 萍

(大连海事大学 交通运输管理学院,辽宁 大连 116026)

摘 要: 集装箱码头进口箱提箱作业过程中,由于外集卡到达时间的不确定性,存在外集卡提箱顺序与目标箱的堆存位置不一致,从而产生大量翻箱.为了解决这一问题,本文以期望翻箱量最小为落箱位置的选择原则,提出最小化二次翻箱启发式算法,利用算例验证算法的有效性,分析集卡到达的信息质量对进口箱提箱翻箱的影响,根据集卡到达信息质量的不同选择最佳翻箱规则.结果表明:提出的翻箱策略可以在获得部分集卡到达信息下有效地减少翻箱,针对不同的集卡到达信息质量,采取相应翻箱规则进行翻箱作业能有效减少翻箱,提高码头堆场的作业效率.

关键词: 水路运输;最小二次翻箱启发式算法;进口箱;集装箱码头;部分集卡到达信息

Re-handling Strategies for Import Containers Based on Partial Truck Arrival Information in Container Terminals

ZENG Qing-cheng, LI Hou-yuan, WU Ping

(School of Transport Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: During the import container retrieval progress, this is unproductive but unavoidable re-handling work if truck arrivals are a stochastic process, as the truck arrival sequence seldom matches the container storage sequence. This paper proposes a minimum re-handling heuristic algorithm for container pickup process, based on the principle choosing the stock which expected re-handling is minimum as the location, in order to analyze the effect of container re-handling problem and to optimize the re-handling strategy under different levels of information. Through the computer simulation, the results demonstrate that the proposed re-handling strategies can substantially reduce the number of re-handling under incomplete arrival information. According to different levels of information, taking appropriate strategy, can more effectively reduce re-handling operation and improve the productivity of container yard.

Keywords: waterway transportation; minimum re-handling heuristic algorithm; import container; container terminal; partial arrival information of external trucks

0 引言

随着集装箱吞吐量的增长,码头为了提高堆场利用率,增加堆场堆存密度,这对进口箱提箱作业提出了挑战.由于外集卡到港时间不确定,导致提箱顺序与目标箱在堆场的堆存位置顺序不一致,从而产生大量翻箱,这不仅增加外集卡在码头的周转时间,而且降低堆场提箱作业效率^[1].因此,对于翻箱问题的研究具有学术价值和现实意义,已成为国内外学者及码头管理者共同关注的对象.

翻箱问题是NP-hard问题^[2],国内外学者针对进口箱翻箱问题进行了大量的研究.针对已知集卡到达信息的翻箱问题, Kim和Hong^[3]提出了分支定界法和基于预计额外翻箱量的启发式算法,以决策落箱位置.在此基础上,徐亚等^[4]提出了改进的OH算法; Aydin等^[5]提出了贪婪启发式算法和差异启发式算法,大幅提高了计算速度.此外, Lee Y.等^[6]采用邻域搜索启发式算法对翻箱问题进行优化, Lee等^[7]、Wan等^[8]、Tang等^[9]以翻箱量最小为目标建立了整数规划模型, Caserta等^[10]应用动态规划方法求解翻箱方案, Zhu等^[11]提出IDA*算法解决进口箱翻箱问题, Forster等^[12]设计了树形检索过程求解进口箱翻箱问题.然而,实际翻箱过程中外集卡到港顺序具有不确定性,已知集卡到港顺序的前提下研究翻箱策略不能从根本上解决翻箱问题.近年,集卡预约集港在国内外港口相继实施^[13-16],码头可以获得外集卡的到港时间段、部分集卡到港的先后顺序,这为优化翻箱策略、降低翻箱率提供了条件.

对仅已知部分集卡到达信息的翻箱问题,由

于准确的集卡到达顺序未知,翻箱过程中无法判断翻倒箱是否会对后续提箱产生阻碍.同时,堆场堆存状态、提箱顺序与翻箱落位之间相互影响,这为翻箱策略的研究带来了困难.对于不确定信息下的翻箱问题, Kim和Hong^[3]提出了基于预计额外翻箱量启发式算法. Zhao等^[17]在不同的信息质量和贝位规模下,采用修正的差异启发式翻箱策略,研究集卡到达信息对于进口箱提箱翻箱的影响. Zhao仅研究了集卡到达信息质量对于进口箱翻箱问题的影响,没有优化翻箱策略.集卡预约分组份额的变化(集卡到达信息的质量)影响翻箱策略的效果,这也增加了翻箱问题的难度.

本文针对部分集卡到达信息下的进口箱翻箱问题,设计进口箱二次翻箱优化方法,分析不同质量的集卡到达信息对进口箱翻箱的影响.

1 问题描述

假设集装箱码头可以通过预约等手段获得部分外集卡到达信息,即码头可以获得外集卡的到港时间段,但无法获得外集卡的准确到达时间.如图1所示,12辆外集卡预约在三个时间段入港,将其分为A、B、C三组.定义两个概念:①组优先级:指每个组的优先级大小,优先级越高,该组外集卡越早到达.图1中,组优先级由高到低排序为:A→B→C.②组内优先级:指每个目标箱在组内的优先级大小,优先级越高,其对应外集卡在该组内越早到达.本文即假设组优先级已知而组内优先级未知,研究不完全信息下进口箱翻箱问题.

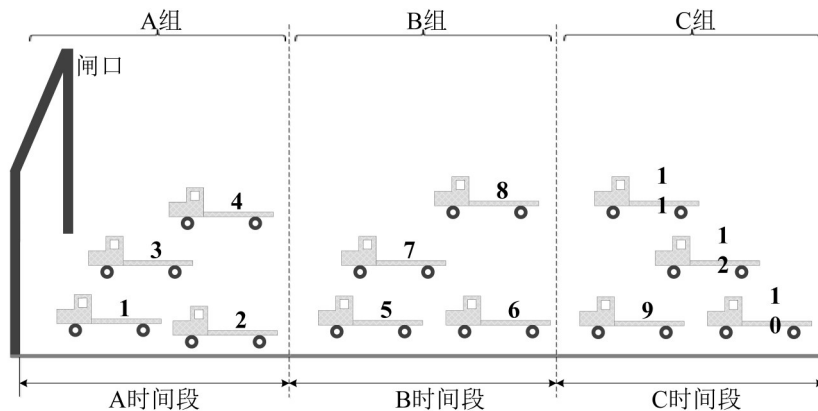


图1 外集卡到达示意图

Fig. 1 The external truck arrival diagram

完全信息下,翻箱问题可以通过分支定界法得到准确的落箱位置,但是不完全信息下,组内的集卡到达顺序未知,选择落箱位时可能产生二次翻箱,如图2所示,每个集装箱被标上组优先级和组内优先级(括号内标号代表组内优先级,其值越小,表示越早被提走)。取箱1(1)时,需要翻倒箱2(2);若将其放在箱2(1)上,由于2(1)、2(2)的实际取箱顺序未知,可能会产生二次翻箱。这种不确定性为落箱位的选择带来困难,同时组内集卡的数量变化也会影响翻箱落位的决策。

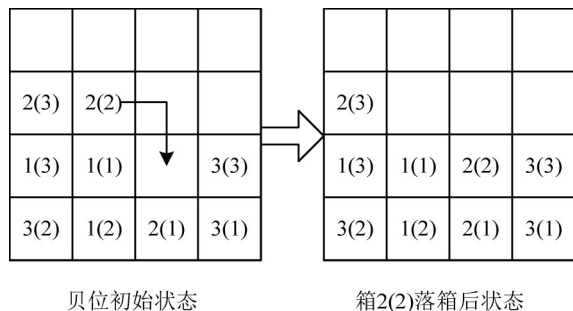


图2 部分集卡到达信息示意图

Fig. 2 Partial arrival information of external trucks

根据问题特点,本文基于部分集卡到达信息,设计最小化二次翻箱的启发式算法,优化翻箱落位。为设计算法,进行如下定义:

第一类候选栈:该栈堆放集装箱的组优先级均低于待翻倒箱的组优先级,将待翻倒箱放到该栈,不会引起二次翻箱。

第二类候选栈:该栈组优先级最高的集装箱的组优先级等于待翻倒箱的组优先级,将待翻倒箱放到该栈,可能引起二次翻箱。

第三类候选栈:该栈中至少存在一个集装箱,其组优先级高于翻倒箱的组优先级。将待翻倒箱放到该栈,一定会引起二次翻箱。

2 最小化二次翻箱启发式算法

2.1 算法整体框架

基于差异启发式算法^[5]和预计额外翻箱量法^[3],设计基于部分集卡到达信息的进口箱提箱翻箱启发式算法(MRHA)。其基本思路是选择预期二次翻箱量最小的栈作为落箱位,即优先选择不产生二次翻箱的第一类候选栈和空栈,其次选择可能产生二次翻箱的第二类候选栈,最后分别按照三种

规则选择一定会产生二次翻箱的第三类候选栈。算法的整体流程与框架如图3所示。

对于当前待翻倒箱,若只存在第三类候选栈,此时翻箱,不可避免地要引起二次翻箱。为了进一步优化翻箱,在此基础上提出三种翻箱规则,进一步选择落箱位置。

●规则1:计算每一栈中组优先级最高的集装箱上面阻碍箱的数量,选择数量最少的栈作为落箱位。若存在多个数量最少的栈,则任选其一作为落箱位。

●规则2:首先选出每一栈中组优先级最高的集装箱,再在其中选择组优先级最低的集装箱所在的栈作为落箱位。若存在多个满足条件的栈,则任选其一作为落箱位。

●规则3:为了减少二次以上翻箱,计算将翻倒箱移到该栈引起的期望翻箱量,选择期望翻箱量最小的栈作为落箱位。若存在多个期望翻箱量最小的栈,则任选其一作为落箱位。

2.2 期望翻箱量计算方法

为计算期望翻箱量,定义参数与变量: N 表示贝位中目标箱的总数量; g 表示组的数量; f 表示每组中目标箱的数量; n 表示每个栈中的最高组优先级大小; n' 表示每个栈中具有最高组优先级目标箱的组内优先级大小; k 表示每个栈中空箱位的数量; $p(i)$ 表示组优先级为 i 的翻倒箱选择某一个栈作为落箱位的概率; $p'(i)$ 表示组内优先级为 i 的翻倒箱选择某一个栈作为落箱位的概率; $E(k, n)$ 表示最高组优先级为 n ,空箱位数量为 k 的考察栈由于翻倒箱的移入而引起的预计翻箱量。

当 $k=0$ 时, $E(0, n)=0$,即考察栈达到额定堆存高度,不允许再堆箱。

当 $k=1$ 时,考虑图4(a)所示的栈,额定堆存高度 T 为4,假设贝位中目标箱数量为21,分为7组,每组三个目标箱。若翻倒箱的组优先级低于3,则会引起二次翻箱;组优先级高于3,不会引起二次翻箱;组优先级等于3,可能会引起二次翻箱,此时翻倒箱的组内优先级高于3(2)时,不会引起二次翻箱;组内优先级低于3(2)时,会引起二次翻箱。因此该栈预计翻箱量的计算方法为

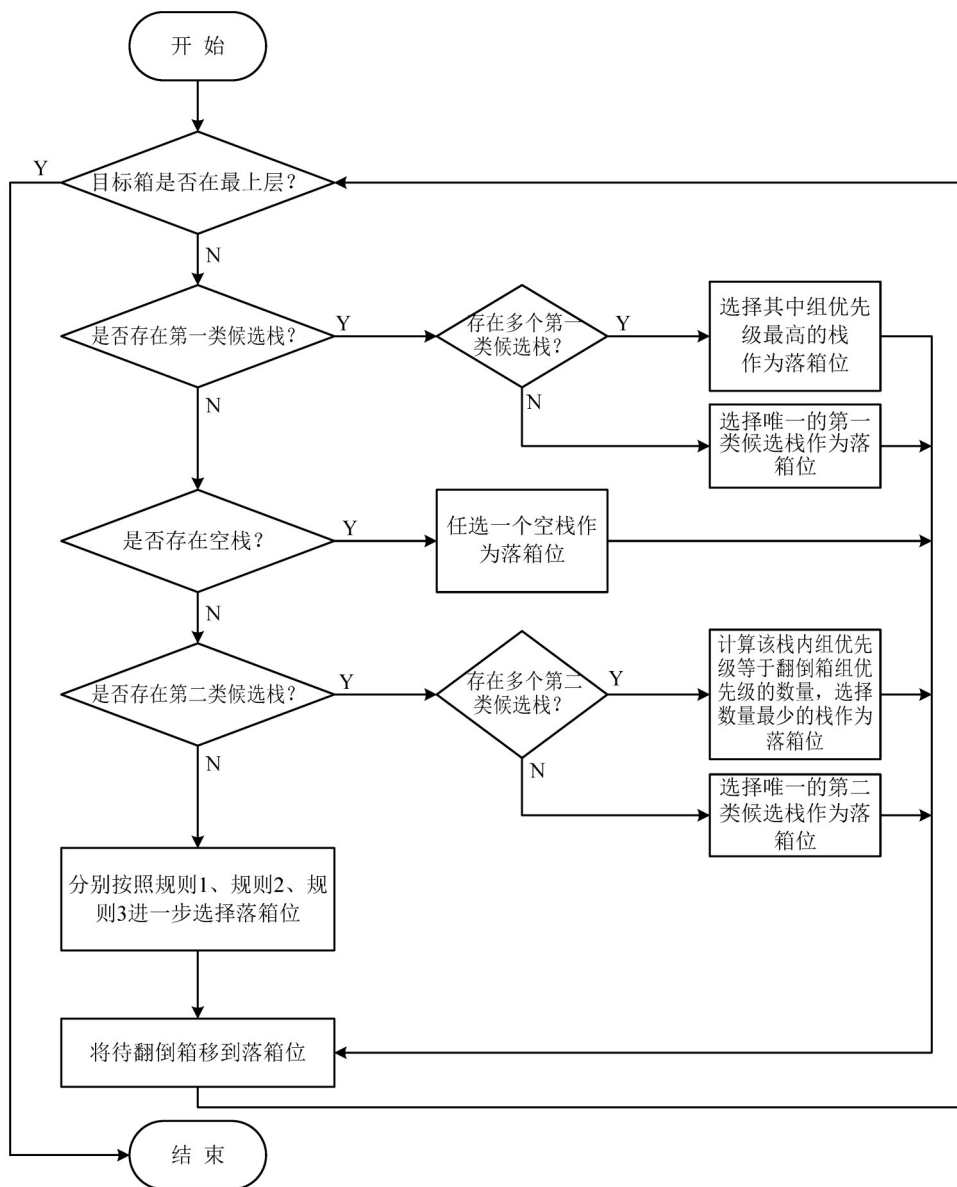


图3 最小化二次翻箱启发式算法流程图

Fig. 3 Minimum re-handling heuristic algorithm flow

$$E(1,3) = [p(4) + p(5) + p(6) + p(7)] \times 1 + p[3(3)] \times 1 + [p(1) + p(2)] \times 0 + p[3(1)] \times 0 = \frac{11}{18}$$

因此 $E(1,n)$ 一般的表示方法为

$$E(1,n) = \frac{f \cdot (g-n) - (T-2)}{N-(T-1)} \times 1 + \frac{f-n'}{N-(T-1)} \times 1 + \frac{n'-1}{N-(T-1)} \times 0 + \frac{f \cdot (n-1)}{N-(T-1)} \times 0 = \frac{f \cdot (g-n) + f + 2 - T - n'}{N-(T-1)} \quad (1)$$

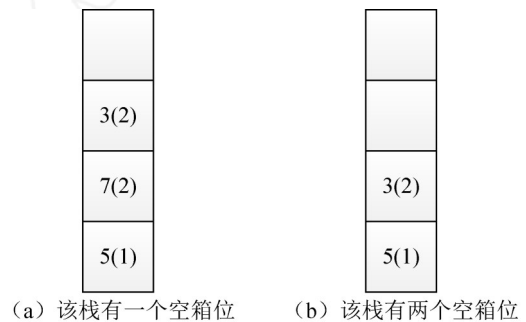


图4 堆场某栈状态举例

Fig. 4 One of the container stacks diagram

当 $k=2$ 时,考虑图4(b)所示的栈,该栈有两个

空箱位,翻倒箱移入后还剩一个空箱位,因此要对这两个空箱位计算其预计翻箱量.该栈预计翻箱量的计算方法为

$$E(2,3)=p(1)\times\{0+E(1,1)\}+p(2)\times\{0+E(1,2)\}+ \\ \{p(4)+p(5)+p(6)+p(7)\}\times\{1+E(1,3)\}+ \\ p(3(1))\times\{0+E(1,3)\}+p(3(3))\times\{1+E(1,3)\}$$

因此 $E(2,n)$ 一般的表示方法为

$$E(2,n)=\frac{f\cdot\sum_{i=1}^{n-1}E(1,i)}{N-(T-2)}+\frac{f\cdot(g-n)-(T-2-1)+f-n'}{N-(T-2)}\times \\ \{1+E(1,n)\}+\frac{n-1}{N-(T-2)}\times E(1,n) \quad (2)$$

当 $k=k$ 时,根据式(2)递推得到式(3)为

$$E(k,n)=\frac{f\cdot\sum_{i=1}^{n-1}E(k-1,i)}{N-(T-k)}+\frac{f\cdot(g-n)-(T-k-1)+f-n'}{N-(T-k)}\times \\ \{1+E(k-1,n)\}+\frac{n-1}{N-(T-k)}\times E(k-1,n) \quad (3)$$

从 $k=1$ 开始,使用式(3)可以计算任意栈的预计翻箱量 $E(k,n)$.

为了计算确定二次翻箱和预计翻箱量之和,即期望翻箱量,符号定义如下. S 表示翻箱前整个贝的状态, $S=[s_1,s_2,\dots,s_r]$; S' 表示翻箱后整个贝的状态, $S'=[s'_1,s'_2,\dots,s'_r]$; $E(s_i)$ 表示栈 i 在状态 s_i 时的预计翻箱量,根据式(3)计算; $E(S)$ 表示整个贝在状态 S 时的预计翻箱量, $E(S)=\sum_i E(s_i)$; $n[a]$ 表示由翻箱动作 a 引起的确定二次翻箱,动作 a 定义为 $a=(i,j)$,表示将翻倒箱 i 移到 j 栈. $N[a]$ 表示翻箱动作 a 对整个贝造成的确定二次翻箱和预计翻箱量之和,由 $E(S')-E(S)+n[a]$ 计算,其中 S 经过动作 a 变为 S' .选择落箱位的启发式规则是选择 $N[(i,j)]$ 最小的翻箱动作 $a=(i,j)$.假设当前翻倒箱 i 由栈 k 移至栈 j , $N[(i,j)]$ 的计算方法为

$$N[(i,j)]=E(s'_k)-E(s_k)+E(s'_j)-E(s_j)+n[(i,j)]$$

式中: $E(s'_k)-E(s_k)$ 的值相同,且对于所有第三类候选栈 $n[(i,j)]=1$,因此有式(4):

$$\text{Min } N[(i,j)]=\text{Min } \{E(s'_j)-E(s_j)+1\} \quad (4)$$

规则3选择期望翻箱量 $N[(i,j)]$ 最小的栈作为落

箱位.

3 算例分析

以一个贝位内所有待提进口箱为研究对象,贝位规模为6行5层,26个待提进口箱,在对大连某码头调研基础上随机生成算例,分析集卡到达信息质量、启发式翻箱策略对堆场翻箱的影响.利用 Visual C++6.0 开发程序,所得结果均在 Inter(R) Core(TM)i5-4258U 2.40GHz CPU 及 8GB RAM 的 x64 PC 上测得.

(1) 完全信息下进口箱提箱翻箱仿真设计.

分析在外集卡到港完全信息下,MRHA 策略、规则 1-3 对堆场翻箱的影响.随机生成 100 个堆存状态,调用 MRHA 策略以及三种翻箱规则,得出每种翻箱规则下的平均翻箱量、最小翻箱量及平均翻箱量和最小翻箱量的偏差 β .

(2) 不完全信息下进口箱提箱翻箱仿真设计.

分析外集卡到港不完全信息下,MRHA 策略、规则 1-3 对堆场翻箱的影响.根据组内集卡数量设计 25 组算例.针对每组算例,随机产生 100 个堆存状态,在每种状态下随机生成 $f!$ 种组内集卡的到达顺序,分别调用三种翻箱规则,得出每种翻箱规则下的平均翻箱量、最小翻箱量,以及平均翻箱量和最小翻箱量的偏差 β .

(3) 结果分析.

①完全信息下翻箱策略对翻箱量的影响:在外集卡到港的完全信息下,100 个算例的求解结果如表 1 所示.其中平均翻箱量与最小翻箱量的偏差 β (%)的计算公式为

$$\text{平均翻箱量与最小翻箱量的偏差} = \frac{\text{平均翻箱量} - \text{最小翻箱量}}{\text{最小翻箱量}} \times 100\%$$

表 1 完全信息下翻箱规则的求解结果

Table 1 Result of different rules under the complete arrival information

翻箱策略	平均翻箱量/TEU	最小翻箱量/TEU	β /%
规则 1	19.8	16	23.75
规则 2	15.4	13	18.46
规则 3	17.4	14	24.29

由表1可以看出,三种翻箱规则的平均翻箱量(TEU)分别为19.8,15.4,17.4.与Kim提出的启发式算法在同种贝位规模下比较,验证了本文提出的翻箱策略的有效性.同时三种翻箱规则的优劣程度为:规则2→规则3→规则1.此外,三种规则的平均翻箱量与最小翻箱量的偏差(%)分别为:22.75,18.46,24.29,可见本文提出的翻箱策略的鲁棒性均相对较高.

②不完全信息下翻箱策略对翻箱量的影响:
在外集卡到港的不完全信息下,三种翻箱规则的各25组算例求解结果如表2所示,由表2和图5可以得出以下结论:

(a) 与经典的启发式算法相比,平均翻箱量降

低,翻箱策略有效.

(b) 集卡到达信息的质量影响翻箱量.同种翻箱规则下,集卡到达信息质量不同,平均翻箱量不同.规则1和2的平均翻箱量随组内集卡数量的增多(信息不完全程度增大)快速上升,规则3则缓慢上升.由此可见,组内集卡数量(即集卡到达信息的质量)影响翻箱量.

(c) 不同信息质量下,最优翻箱策略不同.在外集卡到达完全信息下,规则2最优,应选择规则2作为翻箱策略;在组内集卡数量少于8时,规则2最优;在组内集卡数量多于8时,规则3最优.

综上,三种翻箱规则各有利弊,在不同质量的到达信息下应采用不同的规则.

表2 不完全信息下翻箱规则的求解结果
Table 2 Result of different rules under different partial arrival information

组内集卡 数量/辆	规则1			规则2			规则3		
	平均翻箱量	最小翻箱量	β/%	平均翻箱量	最小翻箱量	β/%	平均翻箱量	最小翻箱量	β/%
2	21.0	16	31.25	16.8	14	20.00	17.9	14	27.86
3	22.7	18	26.11	17.4	14	24.29	18.2	14	30.00
4	23.3	18	29.44	17.4	14	24.29	18.5	15	23.33
5	23.6	17	38.82	17.9	15	19.33	18.9	15	26.00
6	23.9	18	32.78	18.4	14	31.43	19.2	15	28.00
7	24.2	19	27.37	18.9	16	18.13	19.1	16	19.38
8	25.0	19	31.58	19.3	14	37.86	19.3	14	37.86
9	25.4	18	41.11	19.9	14	42.14	19.1	14	36.43
10	25.8	18	43.33	20.7	15	38.00	19.1	13	46.92
11	26.2	19	37.89	20.9	15	39.33	19.4	15	29.33
12	26.0	19	36.84	20.9	16	30.63	19.9	14	42.14
13	26.5	19	39.47	21.1	15	40.67	20.2	14	44.29
14	27.0	19	42.11	21.9	14	56.43	21.0	15	40.00
15	27.0	19	42.11	22.1	14	57.86	21.2	15	41.33
16	27.3	18	51.67	22.3	15	48.67	21.7	15	44.67
17	27.1	18	50.56	22.4	16	40.00	21.8	16	36.25
18	27.0	19	42.11	22.7	15	51.33	22.0	16	37.50
19	27.5	18	52.78	23.0	15	53.33	22.0	14	57.14
20	27.1	18	50.56	23.1	15	54.00	21.9	15	46.00
21	27.1	19	42.63	23.4	15	56.00	22.0	15	46.67
22	27.2	19	43.16	23.0	15	53.33	21.7	16	35.63
23	27.1	18	50.56	23.7	15	58.00	21.6	16	35.00
24	27.2	18	51.11	23.5	15	56.67	21.9	15	46.00
25	27.1	19	42.63	23.4	15	56.00	21.8	16	36.25
26	27.2	19	43.16	23.4	16	46.25	21.7	15	44.67
平均值	25.86	18.36	40.85	21.1	14.84	42.18	20.44	14.88	37.37

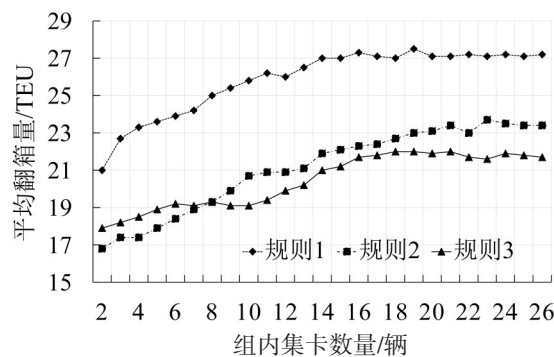


图5 不完全信息下翻箱规则效果对比图

Fig. 5 The comparison diagram of different rules under different partial arrival information

4 结 论

外集卡到港时间的不确定性给码头进口箱的提箱翻箱作业带来了挑战.针对部分集卡到达信息下的进口箱提箱翻箱作业,本文提出最小化二次翻箱启发式算法以降低二次及以上翻箱.随机生成算例进行仿真实验,分析集卡到达信息的质量、翻箱规则对翻箱的影响.实验结果验证了本文提出的翻箱策略的有效性,同时,表明集卡到达信息质量的不同对翻箱有一定程度的影响,针对不同的集卡到达信息质量,应该选择不同的翻箱规则.

基于部分集卡到达信息的翻箱优化研究具有较大的理论价值,同时对码头进口箱的提箱翻箱作业具有现实意义.本文仅以翻箱量最小优化翻箱策略,未来研究可考虑龙门吊小车的移动路径,进一步刻画小车在贝位内的横向、纵向移动距离,进一步降低翻箱成本.

参考文献:

- [1] 靳志宏,毛钧,李娜.基于混合动态规划的集装箱堆场贝位内翻箱作业调度优化[J].交通运输系统工程与信息, 2011, 11(6): 131-136. [JIN Z H, MAO J, LI N. Scheduling of relocating containers within a bay in container yard based on hybrid dynamic programming[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(6): 131-136.]
- [2] CASERTA M, SCHWARZE S, VOß S. A mathematical formulation and complexity considerations for the blocks relocation problem[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 219(1): 96-104.
- [3] KIM K H, HONG G P. A heuristic rule for relocating blocks[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33 (4): 940-954.
- [4] 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]. Journal of System Simulation, 2008, 20(14): 3666-3674.]
- [5] ÜNLÜYURT T, AYDIN C. Improved rehandling strategies for the container retrieval process[J]. Journal of Advanced Transportation. 2012, 46(4): 378-393.
- [6] LEE Y, CHAO S L. A neighborhood search heuristic for pre-marshalling export containers[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 196(2): 468-475.
- [7] LEE Y, HSU N Y. An optimization model for the container pre-marshalling problem[J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(11): 3295-3313.
- [8] WAN Y, LIU J, TSAI P C. The assignment of storage locations to containers for a container stack[J]. Naval Research Logistics, 2009, 56(8): 699-713.
- [9] TANG L, JIANG W, LIU J, et al. Research into container reshuffling and stacking problems in container terminal yards[J]. IIE Transactions, 2015, 47 (7): 751-766.
- [10] CASERTA M, SCHWARZE S, VOß S. A mathematical formulation and complexity considerations for the blocks relocation problem[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 219(1): 96-104.
- [11] ZHU W, QIN H, LIM A, et al. Iterative deepening A* algorithms for the container relocation problem[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2012, 9(4): 710-722.
- [12] FLORIAN FORSTER, ANDREAS BORTFELDT. A tree search procedure for the container relocation problem[J]. Computers & Operations Research, February 2012, ISSN 0305-0548.
- [13] 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, 2007, 12(7): 460-473.
- [14] ZEHENDNER E, FEILLET D. Benefits of a truck appointment system on the service quality of inland transport modes at a multimodal container terminal[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235 (2): 461-469.
- [15] NAMBOOTHIRIA R, ERERA A L. Planning local container drayage operations given a port access appointment system[J]. Transportation Research Part E, 2008, 44(2): 185-202.
- [16] 曾庆成,张笑菊,陈文浩,等.基于BCMP排队网络的码头集卡预约优化模型[J].系统工程学报, 2013, 28

(5): 592–599. [ZENG Q C, ZHANG X J, CHEN W H, et al. Optimization model for truck appointment based on BCMP queuing network[J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(5): 592–599.]

[17] ZHAO W, GOODCHILD A V. The impact of truck arrival information on container terminal rehandling[J]. Transportation Research Part E, 2010, 46(3): 327–343.

上接第 175 页

- [4] 张东, 李文权, 郭士永, 等. 快速公交发车频率优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015 (2): 288–291. [ZHANG D, LI W Q, GUO S Y, et al. Research on frequency optimization of bus rapid transit[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2015(2): 288–291.]
- [5] LEIVA C, MUÑOZ J C, GIESEN R, et al. Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2010, 44(10): 1186–1201.
- [6] 叶清, 马昌喜, 杨信丰, 等. 快速公交发车间隔优化研究[J]. 兰州交通大学学报, 2015, 34(1): 170–174. [YE Q, MA C X, YANG X F, et al. Study on the optimization of departing time interval for bus rapid transit[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2015, 34(1): 170–174.]
- [7] 孙传姣, 周伟, 王元庆. 快速公交车辆调度组合及发车间隔优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(5): 61–67. [SUN C J, ZHOU W, WANG Y Q. Scheduling combination and optimization of bus rapid

transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(5): 61–67.]

- [8] 杨信丰, 刘兰芬, 李引珍, 等. 多目标快速公交多车型优化调度研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16 (3): 107–112. [YANG X F, LIU L F, LI Y Z, et al. A multi-objective bus rapid transit dispatching optimization considering multiple types of buses[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(3): 107–112.]
- [9] 李志东, 贺国先. 基于乘客需求及成本分析的快速公交发车频率优化模型[J]. 兰州交通大学学报, 2014(4): 116–119. [LI Z D, HE G X. Frequency optimization model of bus rapid transit based on passenger demand and cost analysis[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2014(4): 116–119.]
- [10] 白子建, 龚凤刚, 王玉秀. 快速公交线路发车频率优化仿真研究[J]. 城市道桥与防洪, 2010(2): 111–116. [BAI Z J, GONG F G, WANG Y X. Study on optimizing simulation of bus rapid transit schedule[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2010(2): 111–116.]

