

集装箱码头 ALV 调度与堆场位置分配集成优化模型

鲁 渤<sup>1</sup>, 吕家智<sup>2</sup>, 曾庆成<sup>2</sup>

(1. 大连大学 国际学院, 大连 116622; 2. 大连海事大学 交通运输管理学院, 大连 116026)

**摘 要** 针对自动化集装箱码头水平搬运作业和堆场作业, 提出一种集成调度优化方法, 以最小化最大完工时间为目标, 同时考虑船舶装、卸作业, 建立自动升降车 (automated lifting vehicles, ALV) 调度与堆场位置分配集成优化模型, 提出求解模型的优化算法, 设计基于遗传算法的启发式算法, 利用算例对模型与算法的有效性进行了验证. 计算结果表明, 提出的启发式算法可以提高运算效率, 能够在很短的时间内对大规模算例求出高质量的解. 另外, 集成优化模型同时考虑码头多个作业环节, 有利于提高自动化集装箱码头的装卸作业效率.

**关键词** 自动化集装箱码头; ALV 调度; 堆场位置分配

Integrated optimization model for automated lifting vehicles scheduling and yard allocation at automated container terminals

LU Bo<sup>1</sup>, LÜ Jiazh<sup>2</sup>, ZENG Qingcheng<sup>2</sup>

(1. International College, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract** This study proposed an integrated approach to determine the ALV (automated lifting vehicle) dispatching and container storage, considering the loading and unloading operations simultaneously. An integrated optimization model of ALV scheduling and storage allocation was developed taking the minimum of the maximum completion time as objective function. To solve the model, a heuristic algorithm based on genetic algorithm was designed. Numerical experiments were provided to illustrate the validity of the model and algorithm. Results indicate that the designed algorithm proposed can improve the computation efficiency and obtain near-optimum solution for large-scale problems efficiently. Moreover, the integrated optimization model considers multiple links, which contributes to the operation efficiency in automated container terminals.

**Keywords** automated container terminal; ALV scheduling; yard allocation

1 引言

近年来, 随着船舶大型化发展, 以及港口竞争的日趋激烈, 自动化集装箱码头 (automated container terminal, ACT) 进入新一轮的快速发展时期. 美国、韩国、中东、东南亚等国家地区先后投产了多个自动化集装箱码头. 我国于 2014 年厦门港投产了第一个自动化集装箱码头, 上海洋山四期、天津太平洋二期等自动

收稿日期: 2016-07-14  
作者简介: 鲁渤 (1983-), 男, 汉, 大连人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 港口运营管理与优化; 吕家智 (1993-), 男, 汉, 大连人, 硕士研究生, 研究方向: 港口运营管理与优化; 曾庆成 (1978-), 男, 汉, 大连人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 港口运营管理与优化.  
基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (71573028, 7161101158); 辽宁省自然科学基金面上项目 (201601006); 中央高校基本科研费专项资金 (3132016302)  
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (71573028, 7161101158); Natural Science Foundation of Liaoning Province of China (201601006); Fundamental Research Funds for Central Universities (3132016302)  
中文引用格式: 鲁渤, 吕家智, 曾庆成. 集装箱码头 ALV 调度与堆场位置分配集成优化模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(5): 1349-1359.  
英文引用格式: Lu B, Lü J Z, Zeng Q C. Integrated optimization model for automated lifting vehicles scheduling and yard allocation at automated container terminals[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2017, 37(5): 1349-1359.

化集装箱码头处于建设中, 国内多个港口也在进行自动化码头的前期工作. 自动化集装箱码头的建设与运营已成为国内外港航界的热点问题.

ACT 作业通常包括三个环节 (如图 1): 岸边装卸船作业、水平搬运作业和堆场作业, 其中, AGV (automated guided vehicle, 自动导引车) 和 ALV (automated lifting vehicle, 自动升降车) 是两种常见的水平搬运设备, 其运作效率直接影响 ACT 的效率. 采用 AGV 作为水平搬运设备的自动化集装箱码头, 由于岸桥、场桥和 AGV 作业不同步, 所需作业时间相差较大, 因此会在码头前沿产生岸桥等待 AGV 或 AGV 等待岸桥的现象, 在堆场产生场桥等待 AGV 或 AGV 等待场桥的现象, 造成码头设备之间作业不连贯、不协调, 从而影响码头整体装卸作业效率. 针对上述问题, 一些自动化集装箱码头采用 ALV 进行水平搬运作业, 与 AGV 相比, ALV 可直接自行从缓冲区提箱和卸箱, 无需等待岸桥或场桥对集装箱进行作业, 极大地减少了岸桥、场桥和水平搬运设备之间的对位操作, 降低了作业设备之间操作的不连贯性和不协调性, 从而减少设备的双向等待时间, 使设备得到更加充分的利用, 提高了码头整体装卸效率. 已有研究表明, 与 AGV 相比, ALV 的单位作业成本更少, 更能提高码头整体的生产作业效率.

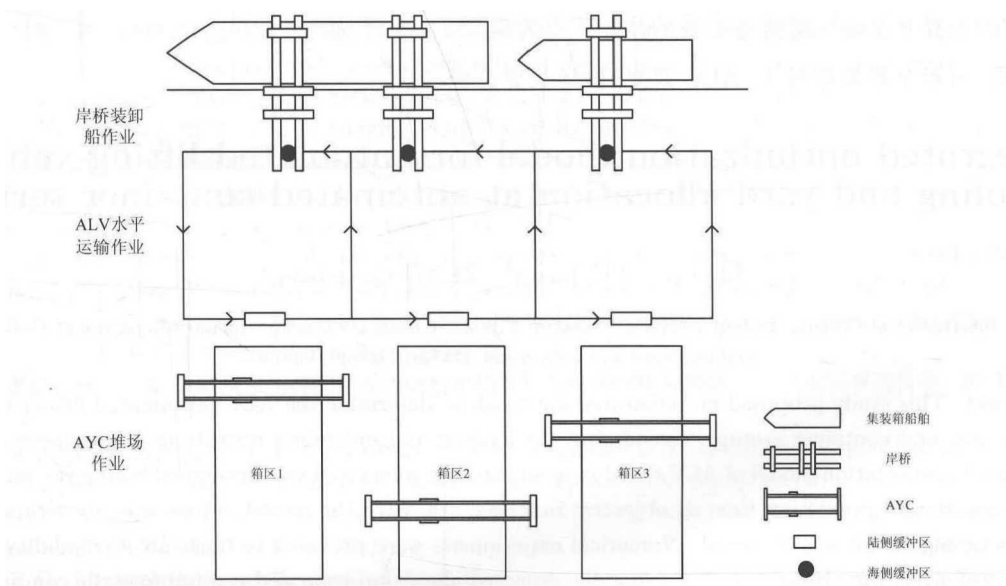


图 1 自动化集装箱码头作业环节

ACT 中, 各个作业环节之间的高效合作以及不同设备的合理调度, 对 ACT 整体效益起着至关重要的作用, 其中, 由于每个堆场箱区内通常只配备一至两台场桥, 为均衡各箱区作业量, 最大化场桥利用率, 码头通常为进口集装箱在堆场内预留若干分散的堆存位置. 进口集装箱在堆场的不同堆存位置, 会影响 ALV 在完成两个连续搬运任务时的搬运距离. 因此, 可以看出, 水平搬运设备调度问题和堆场堆存位置分配问题是两个紧密相连的决策问题. 然而, 由于不同设备作业所需时间不同, 因此需要同时考虑多方面约束条件, 这从理论上对构建模型提出了挑战. 同时, 随着问题规模的扩大, 解空间急剧变大, 如何快速求得最优解至关重要.

因此, 为取得码头整体最优效益, 本文在已有研究的基础上, 同时考虑船舶装、卸作业, 建立 ALV 调度与堆场位置分配集成优化模型. 为求解模型, 设计基于遗传算法的启发式算法, 并采用实际算例进行分析验证.

2 国内外研究现状及分析

水平搬运作业和堆场作业是自动化集装箱码头中两个至关重要的环节, 对码头整体效益有着重大影响. 不同设备的合理调度以及它们之间的有效衔接, 可以提高自动化集装箱码头整体作业效率, 缩短船舶在港时间, 从而增强港口竞争力. 国内外学者针对水平搬运设备调度和堆场位置分配开展了大量的研究, 开发了一系列模型与算法.

在水平搬运设备调度方面, 目前更多的研究集中在 AGV 的调度上, 而 ALV 作为一种新型设备, 关于它的研究较少. Rashidi 和 Tsang<sup>[1]</sup> 将 AGV 调度问题转化为最小成本流模型, 对 NSA+ (改进的单纯形算法) 和 GVS (贪婪车辆搜索) 算法等两种求解算法进行比较. Kim 和 Bae<sup>[2]</sup> 进一步利用集装箱堆存位置及作业

时间等信息, 对 AGV 的调度作业进行研究. Liu<sup>[3]</sup> 研究了水平搬运系统的应用对码头总体绩效的影响, 并在两种常见的码头布局中进行仿真实验. 另外, Le 等<sup>[4]</sup> 分析了 AGV 和 ALV 调度问题的差异性. Bae<sup>[5]</sup> 对比两种水平搬运设备 (AGV 和 ALV) 的运营效率. Nguyen 和 Kim<sup>[6]</sup> 研究了 ALV 调度问题, 将 ALV 派遣问题视为带有优先级约束和缓冲区约束的调度问题. Yang 等<sup>[7]</sup> 研究了 ALV 的数量对自动化码头效率的影响, 与 AGV 相比, ALV 可以用更少的数量达到与之相同的作业效率. 针对水平搬运设备的运输路径优化问题, Nishi 等<sup>[8]</sup> 对 AGV 的生产调度及无冲突路径问题同时进行优化, 建立双层混合整数规划模型, 并采用拉格朗日松弛算法进行求解.

堆场作业调度研究方面, Vis 和 Carlo<sup>[9]</sup> 对自动化码头集装箱堆场设备的调度问题展开了研究, 研究在单个堆场箱区内, 两个自动化场桥的合作调度问题. 另外, 已有许多学者针对集装箱堆场堆存位置展开了广泛研究. Kim 和 Kim<sup>[10]</sup> 通过分析当集装箱到达率为常量、周期性变化和动态变化时, 研究如何为进口集装箱分配堆存位置已达到期望翻箱总量最小. Preston 和 Kozan<sup>[11]</sup> 以设备作业的准备时间和运输时间之和最小为目标, 研究在不同集装箱装卸作业调度的情况下, 为集装箱分配最优的堆存位置. Lee 等<sup>[12]</sup> 研究中转码头堆场堆存位置分配问题, 为减少交通拥堵, 提出一种新的工作量平衡方法, 为减少翻箱, 提出将集装箱分组的新策略, 建立混合整数规划模型, 并采用 Cplex、序列法和列生成方法进行求解. 以上这些研究主要关注堆场作业环节中作业设备调度问题和堆场堆存位置分配问题, 而没有考虑与码头其他作业环节的集成调度问题.

越来越多的学者发现, 针对多种作业设备的调度问题进行集成研究, 对于提高码头作业系统整体效率具有十分重要的影响. 如 Homayouni 等<sup>[13]</sup> 针对自动化码头 AGV 和岸桥调度同步优化问题, 提出混合遗传启发式算法, 并分两阶段进行求解. Sadeghian<sup>[14]</sup> 在无缓冲区容量限制的条件下, 研究岸桥和 ALV 的集成调度问题. Homayouni 等<sup>[15]</sup> 以最小化最大完工时间为目标, 研究自动化码头岸桥和 AGV 集成调度问题, 建立混合整数规划模型, 采用模拟退火算法求解. Vis 和 Bakker<sup>[16]</sup> 研究 AGV、ASC (automated stacking crane, 自动堆垛起重机) 派遣和码头布局的联合决策问题. Gujjula 和 Günther<sup>[17]</sup> 针对 AGV 派遣、堆场箱区指派以及场桥调度问题进行集成研究. Luo 和 Wu<sup>[18]</sup> 同时考虑装、卸船作业, 对 AGV 调度问题和集装箱堆存位置问题进行集成优化. Sadeghian 等<sup>[19]</sup>、Meersmans 和 Wagelmans<sup>[20]</sup>、Homayouni<sup>[21]</sup>、Lau 和 Zhao<sup>[22]</sup> 针对自动化集装箱码头中水平搬运设备、岸桥与场桥的集成调度进行了相关研究, 通过分支定界法、光波搜索算法、遗传算法等进行求解.

综合以上研究可以发现, 已有文献针对 ACT 水平搬运环节的研究, 更多的集中在 AGV 的调度, 而针对 ALV 的研究较少, 如前文所述, 采用 ALV 进行水平搬运作业可以减少作业设备的双向等待时间, 提高码头作业的连贯性和协调性, 从而改善码头整体作业效率. 另外, 已有研究更多的集中在 ACT 单一作业环节调度上, 然而为取得码头整体最优效益, 有必要对不同环节进行集成调度优化. 其中, 如前文所述, 进口集装箱在堆场的不同堆存位置会影响 ALV 在完成两个连续搬运任务时的搬运距离. 可以看出, 水平搬运设备调度问题和堆场堆存位置分配问题是两个紧密相连的决策问题. 集装箱码头不同环节集成调度的研究已有较多研究成果<sup>[23-25]</sup>, 可以为本文研究起到借鉴作用.

因此, 在已有研究的基础上, 本文针对 ACT 中水平搬运作业和堆场作业环节, 对 ALV 的调度问题和进口集装箱在堆场的堆存位置分配问题进行优化, 建立 ALV 调度与堆场位置分配集成优化模型, 并设计基于遗传算法的启发式算法进行求解. 最后, 利用算例对模型与算法的有效性进行了验证.

3 ALV 调度与堆场位置分配集成优化模型

3.1 问题描述

本文综合考虑岸桥、ALV 和 AYC (automated yard crane, 自动化场桥) 作业时间的限制, 在岸桥装卸集装箱的顺序和操作时间已知的情况下, 同时假设缓冲区无容量限制, 建立 ALV 调度与堆场位置分配集成优化模型. 模型涉及的决策问题有: 为每个进出口集装箱分配的 ALV 和 AYC、进口集装箱在堆场的堆存位置及船舶装卸作业的完工时间等.

3.2 模型构建

为了构建自动化集装箱码头 ALV 调度与堆场位置分配集成调度模型, 本文进行如下假设:

- 1) 岸桥装卸集装箱的顺序已知且装卸作业必须按照此顺序进行; 集装箱在船位置已知, 因此各集装箱的岸桥操作时间已知, 如表 1 所示为岸桥装卸集装箱顺序的一个例子;
- 2) 集装箱、ALV、AYC 以及岸桥数量已知;
- 3) 同种设备的能力相同, 且 ALV、AYC 以及岸桥每次只能操作一个集装箱;
- 4) ALV、AYC 在任何两个位置之间的行驶时间已知;
- 5) 不考虑 ALV 的拥堵;
- 6) 堆场有容量堆存所有进口箱;
- 7) 不考虑岸桥、场桥之间的作业干扰;
- 8) 只考虑两个箱区, 即进口箱区和出口箱区, 且每个 AYC 只能作业一种类型的集装箱;
- 9) 缓冲区容量无限制;
- 10) ALV 和岸桥提放箱时间忽略不计;

表 1 岸桥装卸顺序				
岸桥	任务箱	作业类型	船舶堆存位置贝位列层	作业时间 (s)
QC 1	(1, 1)	装船	04-05-02	148
	(2, 1)	卸船	06-02-04	126
	(3, 1)	卸船	04-05-04	150
	(4, 1)	装船	06-02-05	180
QC 2	(1, 2)	卸船	03-06-06	168
	(2, 2)	装船	05-03-02	155
	(3, 2)	装船	05-05-04	130
	(4, 2)	卸船	03-05-03	129

模型参数定义为:  $D$ 、 $L$ 、 $N$ 、 $P$ 、 $K$ 、 $V$ 、 $C$  分别表示进口箱、出口箱、所有集装箱、堆场位置、岸桥、ALV、AYC 集合, 其中,  $N = D \cup L$ ;  $k$ 、 $l$  代表岸桥,  $b$  代表堆场箱位;  $(i, k)$  和  $(j, l)$  代表集装箱, 即集装箱  $(i, k)$  表示岸桥  $k$  作业的第  $i$  个集装箱;  $N_k$  分别为岸桥  $k$  作业集装箱、ALV、AYC 总数量;  $h_{(i,k)}$  表示岸桥作业集装箱  $(i, k)$  所需时间;  $(S, I)$ 、 $(F, I)$  分别表示开始任务和结束任务, 用来标志任务的开始和结束, 如图 2 所示, a. 当第一个任务箱  $(j, l)$  为装船作业时, ALV 首先开始作业任务, 再行驶到堆场出口箱区提箱  $(j, l)$ , 最后将任务箱  $(j, l)$  运至岸桥  $l$  装船; b. 当第一个任务箱  $(j, l)$  为卸船作业时, ALV 首先开始作业任务, 再行驶到岸桥  $l$  提箱  $(j, l)$ , 最后将任务箱  $(j, l)$  运至堆场进口箱区; c. 当最后一个任务箱  $(i, k)$  为装船作业时, ALV 首先行驶到堆场出口箱区提箱  $(i, k)$ , 再将任务箱  $(i, k)$  运至岸桥  $k$  装船, 最后结束作业任务; d. 当最后一个任务箱  $(i, k)$  为卸船作业时, ALV 首先行驶到岸桥  $k$  提箱  $(i, k)$ , 再将任务箱  $(i, k)$  运至堆场进口箱区, 最后结束作业任务;  $O_S$ 、 $O_F$  分别表示包括开始、结束任务的所有任务集合;  $O = O_S \cup O_F$ , 表示包括开始和结束任务的所有任务集合;  $q_{(i,k)}$  表示岸桥开始作业  $(i, k)$  箱的时间, 即对于进口集装箱, 它表示岸桥将集装箱从船上提起的时间; 对于出口集装箱, 它表示岸桥将集装箱从海侧缓冲区提起的时间;  $d_{(i,k)}$  表示 AYC 开始作业  $(i, k)$  箱的时间, 即对于进口集装箱, 它表示 AYC 将集装箱从陆侧缓冲区提起的时间; 对于出口集装箱, 它表示 AYC 将集装箱从堆场箱位提起的时间;  $p_{(i,k)}$  表示 ALV 开始作业  $(i, k)$  箱的时间, 即对于进口集装箱, 它表示 ALV 将集装箱从海侧缓冲区提起的时间; 对于出口集装箱, 它表示 ALV 将集装箱从陆侧缓冲区提起的时间. 由于缓冲区的设置, 与采用 AGV 作为水平搬运设备相比, 本文中各设备的开始作业时间不受相互之间的等待时间影响.  $\varphi_{Ti}^b$  表示 AYC 从进口箱区陆侧缓冲区移动到箱位  $b$  所需时间;  $\varphi_b^{Ti}$  表示 AYC 从箱位  $b$  移动到进口箱区陆侧缓冲区所需时间;  $\varphi_s^{Te}$  表示 AYC 从当前出口箱所在箱位移动到出口箱区陆侧缓冲区所需时间;  $\varphi_{Te}^S$  表示 AYC 从出口箱区陆侧缓冲区移动到下一个出口箱所在箱位所需时间;  $t_{kB}^{Te}$  表示 ALV 从出口箱堆场缓冲区行驶至岸桥  $k$  下方的缓冲区所需时间;  $t_{kB}^{Te}$  表示 ALV 从岸桥  $k$  下方的缓冲区行驶至出口箱堆场缓冲区所需时间;  $t_{kB}^{Lb}$  表示 ALV 从岸桥  $k$  下方的缓冲区行驶至岸桥  $l$  下方的缓冲区所需时间;  $t_{Ti}^{Te}$  表示 ALV 从进口箱堆场缓冲区行驶至出口箱堆场缓冲区所需时间;  $t_{Ti}^{Lb}$  表示 ALV 从进口箱堆场缓冲区行驶至岸桥  $l$  下方的缓冲区所需时间;  $t_{kB}^{Ti}$  表示 ALV 从岸桥  $k$  下方的缓冲区行驶至进口箱堆场缓冲区所需时间.

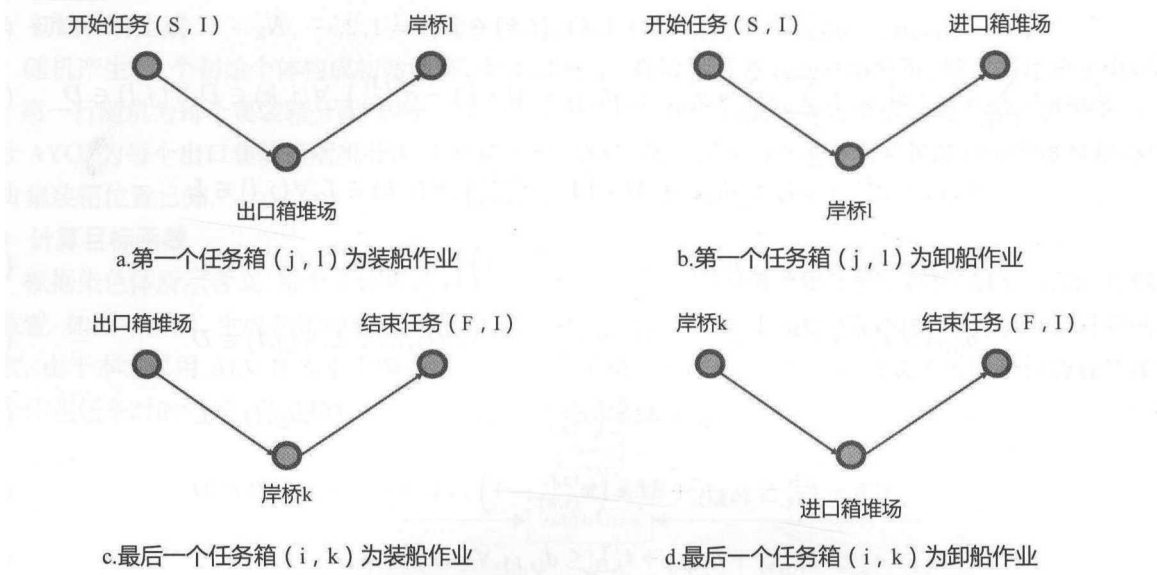


图 2 四种不同情况下的开始和结束任务

决策变量定义为: 当集装箱  $(i, k)$  和  $(j, l)$  由同一台 ALV 作业且  $(i, k)$  为  $(j, l)$  的紧前作业时,  $x_{(i,k)}^{(j,l)} = 1$ , 否则等于 0; 当进口集装箱  $(i, k)$  堆存在箱位  $b$  时,  $y_{(i,k)}^b = 1$ , 否则等于 0; 当集装箱  $(i, k)$  和  $(j, l)$  由同一台 AYC 作业且  $(i, k)$  为  $(j, l)$  的紧前作业时,  $\sigma_{(i,k)}^{(j,l)} = 1$ , 否则等于 0.

于是, 自动化集装箱码头 ALV 调度与堆场位置分配集成调度模型可以表示为:

$$\text{Min : } \max_k (q_{(N_k,k)} + h_{(N_k,k)}) \tag{1}$$

$$\sum_{(j,l) \in O_F} x_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (i, k) \in N \tag{2}$$

$$\sum_{(i,k) \in O_S} x_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (j, l) \in N \tag{3}$$

$$\sum_{(j,l) \in N} x_{(S,I)}^{(j,l)} = v \tag{4}$$

$$\sum_{(i,k) \in N} x_{(i,k)}^{(F,I)} = v \tag{5}$$

$$\sum_{(i,k) \in D \cup (S,I)} \sigma_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (j, l) \in D \tag{6}$$

$$\sum_{(j,l) \in D \cup (F,I)} \sigma_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (i, k) \in D \tag{7}$$

$$\sum_{(i,k) \in L \cup (S,I)} \sigma_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (j, l) \in L \tag{8}$$

$$\sum_{(j,l) \in L \cup (F,I)} \sigma_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (i, k) \in L \tag{9}$$

$$\sum_{(j,l) \in D \text{ or } L} \sigma_{(S,I)}^{(j,l)} = c \tag{10}$$

$$\sum_{(i,k) \in D \text{ or } L} \sigma_{(i,k)}^{(F,I)} = c \tag{11}$$

$$\sum_{b \in B} y_{(i,k)}^b = 1, \forall (i, k) \in D \tag{12}$$

$$\sum_{(i,k) \in D} y_{(i,k)}^b \leq 1, \forall b \in B \tag{13}$$

$$q_{(i+1,k)} - q_{(i,k)} \geq h_{(i,k)}, \forall (i+1,k), (i,k) \in N, i = 1, 2, \dots, N_k - 1$$

(14)

$$d_{(i,k)} + \sum_{b \in P} \varphi_{Ti}^b * y_{(i,k)}^b + \sum_{b \in P} \varphi_b^{Ti} * y_{(i,k)}^b \leq d_{(j,l)} + M * \left(1 - \sigma_{(i,k)}^{(j,l)}\right), \forall (i,k) \in D, \forall (j,l) \in D$$

(15)

$$d_{(i,k)} + \varphi_s^{Te} + \varphi_{Te}^S \leq d_{(j,l)} + M * \left(1 - \sigma_{(i,k)}^{(j,l)}\right), \forall (i,k) \in L, \forall (j,l) \in L$$

(16)

$$p_{(i,k)} + t_{Te}^{kB} + t_{kB}^{Te} \leq p_{(j,l)} + M * \left(x_{(i,k)}^{(j,l)} - 1\right), \forall (i,k) \in L, \forall (j,l) \in L$$

(17)

$$p_{(i,k)} + t_{Te}^{kB} + t_{kB}^{lB} \leq p_{(j,l)} + M * \left(x_{(i,k)}^{(j,l)} - 1\right), \forall (i,k) \in L, \forall (j,l) \in D$$

(18)

$$p_{(i,k)} + t_{kB}^{Te} + t_{Ti}^{Te} \leq p_{(j,l)} + M * \left(x_{(i,k)}^{(j,l)} - 1\right), \forall (i,k) \in D, \forall (j,l) \in L$$

(19)

$$p_{(i,k)} + t_{kB}^{Te} + t_{Ti}^{lB} \leq p_{(j,l)} + M * \left(x_{(i,k)}^{(j,l)} - 1\right), \forall (i,k) \in D, \forall (j,l) \in D$$

(20)

$$q_{(i,k)} + h_{(i,k)} + t_{kB}^{Ti} \leq d_{(i,k)}, \forall (i,k) \in D$$

(21)

$$d_{(i,k)} + \varphi_s^{Te} + t_{Te}^{kB} \leq q_{(i,k)}, \forall (i,k) \in L$$

(22)

$$x_{(i,k)}^{(j,l)}, \sigma_{(i,k)}^{(j,l)}, y_{(i,k)}^b \in \{0, 1\}, \forall (i,k), (j,l) \in O, \forall b \in B$$

(23)

$$q_{(i,k)}, d_{(i,k)}, p_{(i,k)} \geq 0, \forall (i,k) \in N, i = 1, 2, \dots, N_k, \forall k \in K$$

(24)

其中, 式 (1) 为目标函数, 表示最小化最大完工时间; 式 (2)~(3)、式 (6)~(9) 分别保证任意 ALV、AYC 作业任务只有一个前序作业和后序作业; 式 (4)~(5)、式 (10)~(11) 分别保证 ALV 数量等于  $v$ 、AYC 数量等于  $c$ ; 式 (12) 保证每个集装箱只堆存在一个箱位; 式 (13) 保证堆场每个箱位最多堆存一个集装箱; 式 (14) 保证岸桥连续作业两个集装箱的时间间隔至少等于岸桥作业前一个集装箱的作业时间; 式 (15)~(16) 分别表示在卸船作业和装船作业过程中, 由同一台 AYC 连续作业的两个集装箱之间的时间约束; 式 (17)~(20) 表示在  $(i,k)$  箱和  $(j,l)$  箱分别为进口或出口集装箱等四种不同情况下, 同一台 ALV 连续作业两个集装箱之间的时间约束; 式 (21)~(22) 分别表示在卸船作业和装船作业过程中, QC、ALV 和 AYC 之间联合调度时的时间约束; 式 (23) 和式 (24) 定义变量类型及取值范围。

4 求解算法

本文研究的 ALV 调度与堆场位置分配同步优化问题属于 NP-hard 问题。随着问题规模的扩大, 在有效的时间内很难获得精确的最优解, 因此, 设计基于遗传算法的启发式算法对本文所建立的混合整数规划模型进行求解。

4.1 染色体表示方法

采用矩阵编码的方式, 设计一个三行  $n$  列的二维染色体 (其中,  $n$  为集装箱数), 将为每个集装箱分配的 ALV、AYC 以及堆场位置这三个决策变量进行编码。第一行表示为每个集装箱分配的 ALV, 第二行表示为每个集装箱分配的 AYC, 第三行表示为每个集装箱分配的堆场堆存位置, 其中, 出口箱堆场堆存位置已知。如图 3 所示, 染色体设计为一个  $3 \times 10$  的矩阵, 第一行表示为各集装箱分配的 ALV 的编号, 第二行表示为各集装箱分配的 AYC 的编号, 第三行表示为各集装箱分配的堆场堆存位置的编号。例如, 为 1 号集装箱分配 3 号 ALV、1 号 AYC, 堆存在堆场 3 号位置。

	集装箱编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
分配ALV	3	1	3	3	2	1	3	1	1	2
分配AYC	1	4	1	3	2	3	1	3	2	3
堆存位置	3	9	4	8	1	6	2	10	5	7

图 3 染色体表示

4.2 初始种群生成

随机产生  $N$  个初始个体构成初始种群. 如图 3 所示, 奇数箱号表示进口集装箱, 偶数箱号表示出口集装箱. 第一行随机为每个集装箱分配 1 号、2 号和 3 号 ALV; 第二行随机为每个进口集装箱随机分配 1 号和 2 号 AYC, 为每个出口集装箱随机分配 3 号和 4 号 AYC; 第三行为每个进口集装箱随机分配堆场堆存位置, 出口集装箱位置已知.

4.3 计算目标函数

根据染色体所示含义, 每个个体可以表示出三个决策变量, 即为每个集装箱分配的 ALV、AYC 和堆场堆存位置. 如图 4 所示, 生成初始种群后, 根据这三个决策变量以及模型中的约束条件, 即可求出相对应的目标函数. 由于本文采用 ALV 作为水平搬运设备, 所以在求解本文的目标函数时, 只需考虑同一设备在连续完成两个作业任务时的约束, 确定其可用时间, 而无需考虑设备之间的等待时间.

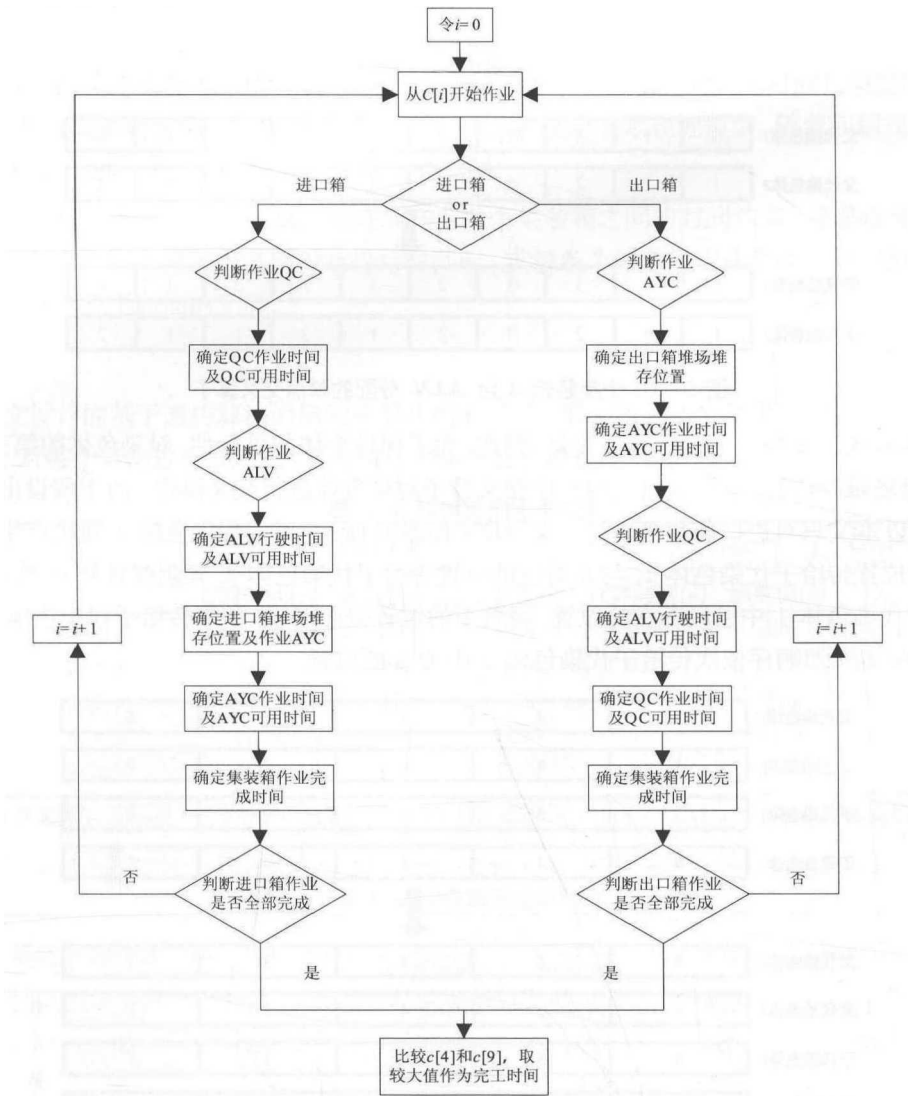


图 4 目标函数求解流程

4.4 确定适应度函数

本文研究的 ALV 调度与堆场位置分配集成调度问题目标函数为求极小值, 因此, 目标函数值越小, 适应度函数值越大. 本文采用目标函数值的倒数作为适应度函数. 在模型中的决策变量都确定后, 目标函数值可以求出, 进而可以求出适应度函数值.

4.5 遗传操作

4.5.1 选择

对于每一代种群, 采用轮盘赌方法进行选择, 并将适应度值最大的染色体通过复制直接进入下一代种

群中. 设种群规模为  $N$ , 个体  $i$  的适应度为  $f_i$ , 则个体  $i$  被选中的概率为:

$$P_i = f_i / \sum_{k=1}^N f_k$$

(25)

4.5.2 交叉

本文将三个决策变量采用矩阵编码, 即为每个集装箱分配的 ALV、AYC 和堆场堆存位置, 针对为每个集装箱分配的 ALV 和 AYC, 本文采用单点交叉算子对染色体进行交叉操作. 如图 5 所示, 选择两个个体, 首先, 从染色体前两行, 即为每个集装箱分配的 ALV 和 AYC, 随机产生用来交叉的行, 然后, 在选择交叉行上再随机产生一个交叉点位置, 令选中的两个染色体在交叉行的交叉点位置互换部分基因码, 形成两个新染色体.

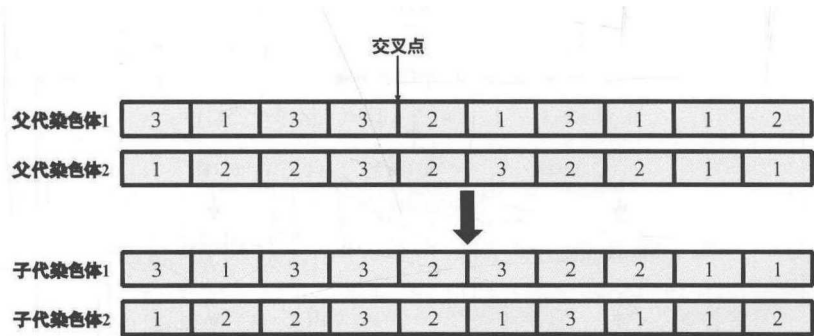


图 5 10 个集装箱 3 台 ALV 分配的单点交叉算子

由于模型中对进口箱堆存位置有严格约束, 因此, 为了保持个体的可行性, 对染色体的第三行, 即为每个集装箱分配的堆场堆存位置, 本文采用均匀排序交叉算子对染色体进行交叉操作. 由于假设出口箱在堆场堆存位置已知, 所以本文只对进口集装箱进行交叉操作. 如图 6 所示, 对父代染色体 1 随机产生一串二进制数, 与 1 对应的位置传给子代染色体 1, 与 0 对应的位置传给子代染色体 2, 其余位置补 0; 然后, 在父代染色体 2 中, 划去子代染色体 1 中已经存在的位置, 将剩下的位置按照顺序, 依次传给子代染色体 1 中为 0 的位置, 再将划去的位置按照顺序依次传给子代染色体 2 中为 0 的位置.

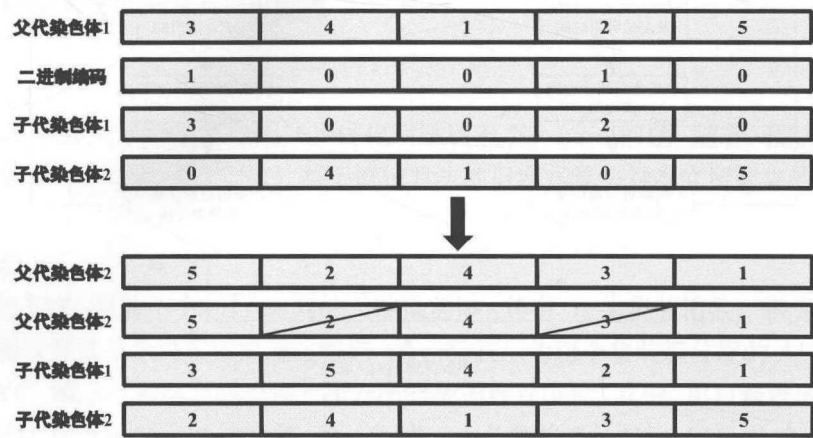


图 6 5 个堆存位置的均匀排序交叉算子

4.5.3 变异

采用交换变异算子. 首先, 从三个决策变量, 即为每个集装箱分配的 ALV、AYC 和堆场堆存位置, 随机产生用来变异的行, 然后, 在选择的变异行上再随机产生两个变异点位置, 交换两个变异点位置的基因, 形成两个新染色体. 为避免变异操作产生不可行解, 如图 7 所示, 在变异操作时, 若选择的变异行为第二行或第三行, 即为每个集装箱分配的 AYC 或堆场堆存位置, 只对两个进口箱或两个出口箱对应的基因进行交换变异操作.



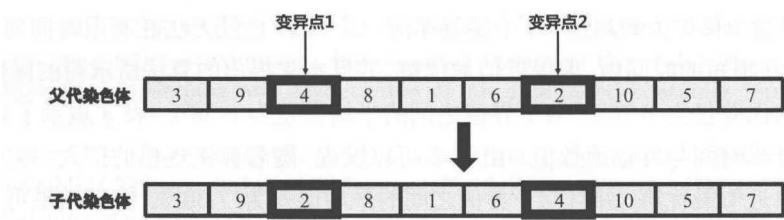


图 7 交换变异

4.5.4 设定参数值

为选择合适的遗传参数, 本文进行了大量的试验. 最终, 为了平衡计算时间与解的精确性, 设定种群规模大小为 200, 最大进化代数为 100, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.2.

4.6 模型下界

为了验证本文所设计的遗传算法的求解质量和有效性, 需要将其求得的完工时间与模型所求得的最优解进行比较. 但是获得模型最优解需要求解式 (1)~(24) 所示的混合整数规划模型, 随着问题规模的扩大, 无法求解模型的最优解. 因此, 采用模型下界代替模型最优解.

式 (14)~(20) 表示岸桥、场桥和 ALV 在连续作业两个集装箱之间的时间约束. 考虑在理想情况下, 即各个作业设备在连续作业两个集装箱之间没有等待时间时, 求解各个设备的作业完成时间, 然后再将总作业完成时间的平均值作为完工时间的下界.

5 算例分析

为验证本文设计的基于遗传算法的启发式算法的有效性, 用 CPLEX 求解模型, 并比较结果. 用 C 语言开发算法程序, 对每个算例进行 10 次计算并取平均值. 表 2 和表 3 分别展示了不同规模算例的求解结果.

表 2 小规模算例结果对比

算例	集装箱	ALV/QC/AYC	CPLEX			本文算法		GAP1	GAP2
			计算时间(s)	函数值(s)	下界值(s)	计算时间(s)	函数值(s)		
1	6	2/2/2	0.83	474	458	0.05	496	4.64	8.30
2	8	2/2/2	1.26	494	478	0.07	512	3.64	7.11
3	10	3/2/2	56.23	697	663	0.09	710	1.87	7.09
4	20	3/2/2	81.66	1418	1356	0.13	1484	4.65	9.44
5	26	3/2/2	/	/	1792	0.16	1960	/	9.38

注: GAP1 = (本文算法函数值 - CPLEX 函数值) / CPLEX 函数值 \*100%; GAP2 = (本文算法函数值 - 下界值) / 下界值 \*100%.

表 3 大规模算例结果对比

算例	集装箱	ALV/QC/AYC	本文算法		下界值(s)	GAP (%)
			计算时间(s)	函数值(s)		
6	30	3/2/2	0.16	2589	2366	9.43
7	30	4/2/2	0.17	2529	2425	4.29
8	40	3/2/2	0.20	4196	3862	8.65
9	40	3/2/4	0.25	5835	5331	9.45
10	60	3/2/2	0.36	6380	5874	8.61
11	60	4/2/2	0.37	6540	6082	7.53
12	80	3/2/4	0.52	9835	8961	9.75
13	80	4/2/4	0.53	9795	9283	5.52
14	100	3/2/4	0.72	12301	11642	5.66
15	100	4/2/4	0.75	12476	11879	5.03
16	200	3/2/4	2.39	26171	24365	7.41
17	200	4/2/4	2.48	27420	25620	7.03

注: GAP = (本文算法函数值 - 下界值) / 下界值 \*100%.

由表 2 可以发现, 当问题规模扩大到超过 20 个集装箱时, CPLEX 已经无法在有限时间内求得精确解, 而本文提出的算法, 却可以在很短的时间内, 求得近似最优解, 并且本文提出的算法所求得的函数值与 CPLEX 求得的精确解之间的平均误差仅为 3.70%, 与下界值之间的平均误差为 8.26%。表 3 展示了本文提出的算法在求解大规模算例时的计算时间与目标函数值。由表 3 可以发现, 随着算例规模的扩大, 本文提出的算法仍然可以在较短时间内求出近似最优解, 并且与下界值之间的平均误差为 7.36%。综上结果可以表明, 本文提出的算法在求解不同规模算例时, 均可迅速获得近似最优解。

## 6 结论

本文针对自动化集装箱码头水平搬运环节和堆场作业环节, 同时考虑装、卸船作业, 提出一种集成调度优化方法, 更容易获得码头整体最优效益。以最小化最大完工时间为目标, 建立了 ALV 调度与堆场位置分配集成优化模型, 设计了基于遗传算法的启发式算法求解模型, 并与 CPLEX 求解结果进行对比, 实验结果表明本文提出的算法具有较高的求解效率和求解质量, 能够求解大规模的问题, 满足自动化集装箱码头作业系统实际调度的要求, 为自动化集装箱码头作业系统调度水平搬运环节和堆场作业环节提供了建模与求解的新思路。

本文没有考虑缓冲区的容量限制以及岸桥在作业时相互之间的干扰, 进一步研究可以在此基础上考虑缓冲区容量和岸桥作业其他方面的约束, 进一步完善 ALV 调度与堆场位置分配集成优化模型, 使其更贴近自动化集装箱码头的实际情况, 具有更强的实用性。

## 参考文献

- 1 Rashidi H, Tsang E P K. A complete and an incomplete algorithm for automated guided vehicle scheduling in container terminals[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2011, 61(3): 630–641.
- 2 Kim K H, Bae J W. A look-ahead dispatching method for automated guided vehicles in automated port container terminals[J]. Transportation Science, 2004, 38(2): 224–234.
- 3 Liu C I, Julia H, Vukadinovic K, et al. Automated guided vehicle system for two container yard layouts[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2004, 12(5): 349–368.
- 4 Le H M, Yassine A, Moussi R. DCA for solving the scheduling of lifting vehicle in an automated port container terminal[J]. Computational Management Science, 2012, 9(2): 273–286.
- 5 Bae H Y, Choe R, Park T, et al. Comparison of operations of AGVs and ALVs in an automated container terminal[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, 22(3): 413–426.
- 6 Nguyen V D, Kim K H. A dispatching method for automated lifting vehicles in automated port container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(3): 1002–1020.
- 7 Yang C H, Yong S C, Ha T Y. Simulation-based performance evaluation of transport vehicles at automated container terminals[J]. Operations Research-Spektrum, 2004, 26(2): 149–170.
- 8 Nishi T, Hiranaka Y, Grossmann I E. A bilevel decomposition algorithm for simultaneous production scheduling and conflict-free routing for automated guided vehicles[J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(5): 876–888.
- 9 Vis I F A, Carlo H J. Sequencing two cooperating automated stacking cranes in a container terminal[J]. Transportation Science, 2010, 44(2): 169–182.
- 10 Kim K H, Kim H B. Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 59(1): 415–423.
- 11 Preston P, Kozan E. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals[J]. Computers & Operations Research, 2001, 28(10): 983–995.
- 12 Lee L H, Chew E P, Tan K C, et al. An optimization model for storage yard management in transshipment hubs[J]. Operations Research-Spektrum, 2006, 28(4): 107–129.
- 13 Homayouni S M, Tang S H, Ismail N, et al. A hybrid genetic-heuristic algorithm for scheduling of automated guided vehicles and quay cranes in automated container terminals[C]// CIE 2009, International Conference on Computers & Industrial Engineering, IEEE, 2009: 96–101.
- 14 Sadeghian S H, Hong T S, Ismail N B. Integrated scheduling of quay cranes and automated lifting vehicles in automated container terminal with unlimited buffer space[M]// Advances in Systems Science, Springer International Publishing, 2014: 599–607.

- [15] Homayouni S M, Tang S H, Ismail N, et al. Using simulated annealing algorithm for optimization of quay cranes and automated guided vehicles scheduling[J]. International Journal of Physical Sciences, 2011(27): 6286–6294.
- [16] Vis I F A, Bakker M. Dispatching and layout rules at an automated container terminal[J]. Serie Research Memoranda, 2005, 2005-8.
- [17] Gujjula R, Günther H O. Integrated scheduling of equipment for quayside transport in automated seaport container terminals[M]// Transportation and Management, Science, 2008: 719–727.
- [18] Luo J, Wu Y. Modelling of dual-cycle strategy for container storage and vehicle scheduling problems at automated container terminals[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2015, 79: 49–64.
- [19] Sadeghian S H, Ariffin M K A M, Tang S H, et al. Integrated dispatching model of automated lifting vehicles, quay cranes and yard cranes at automated container terminal[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 564: 678–683.
- [20] Meersmans P J M, Wagelmans A P M. Effective algorithms for integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals[R]. Econometric Institute Report, 2001.
- [21] Homayouni S M, Vasili M R, Kazemi S M, et al. Integrated scheduling of SP-AS/RS and handling equipment in automated container terminals[C]// 42nd Conference of Computers and Industrial Engineering, 2012.
- [22] Lau H Y K, Zhao Y. Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals[J]. Annals of Operations Research, 2008, 112(2): 665–682.
- [23] 曾庆成, 冯媛君, 度盼. 面向干支线船舶衔接的集装箱码头泊位分配模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(1): 154–163.  
Zeng Q C, Feng Y J, Du P. Berth allocation model based on direct transshipment of trunk line and feeder vessels at container terminals[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2016, 36(1): 154–163.
- [24] 孙彬, 孙俊清, 陈秋双. 基于鲁棒反应式策略的泊位和岸桥联合调度 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(4): 1076–1083.  
Sun B, Sun J Q, Chen Q S. Integrated scheduling for berth and quay cranes based on robust and reactive policy[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2013, 33(4): 1076–1083.
- [25] 邢曦文, 毛钧, 张睿, 等. 基于混合流水作业组织的集装箱码头装卸作业集成调度优化 [J]. 中国管理科学, 2014, 22(10): 97–105.  
Xing X W, Mao J, Zhang R, et al. Optimization of container loading/unloading integrated scheduling in a container terminal based on hybrid flowshop[J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(10): 97–105.