

# 基于仿真优化的自动化集装箱码头 双 ARMG 调度研究

裴磊磊, 苕道方

( 上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

**摘要:** 为了提高自动化集装箱码头的装卸作业效率, 针对堆场箱区内双自动轨道式集装箱龙门起重机 ( ARMG) 调度问题, 在考虑 ARMG 之间协调性、缓存区容量限制的基础之上, 以作业总时间最短和 ARMG 间的行驶距离之差最小为目标, 建立双 ARMG 协调调度的混合整数规划模型, 针对模型求解的复杂度, 采用遗传算法与仿真相结合的方法对模型进行求解。算例分析表明: 采用仿真优化方法使集装箱在中转区的等待时间远小于 CPLEX 算法, 中转效率提高 72%, 大大提高了 ARMG 之间的作业的协调性, 也为自动化集装箱码头的未来发展研究和提高港口的综合竞争力提供了重要参考。

**关键词:** 仿真优化; 自动化集装箱码头; 自动轨道式集装箱龙门起重机 ( ARMG) 调度; 混合整数规划

中图分类号: U691. 3

文献标识码: A

文章编号: 1001-7445( 2017) 02-0500-11

## Research on twin ARMGs scheduling of automated container terminal based on simulation and optimization

PEI Lei-lei, CHANG Dao-fang

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

**Abstract:** In order to improve the loading/unloading operation efficiency of automated container terminal and to solve the scheduling problem of twin automated rail-mounted gantry ( ARMG) in a single container block, a mixed-integer programming model was proposed to minimize the total operating time and the distance between twin ARMGs on the basis of considering the coordination of the ARMG and the capacity of the seaside handover point. In view of the complexity in solving the problem, an innovative strategy was used by combining genetic algorithm with simulation, the simulation model is designed to optimize the problem, and a genetic algorithm was employed to optimize the initial solutions generated. The case study show that comparing to CPLEX, the way of simulation and optimization can get a shorter waiting time in the transfer station and improve the

收稿日期: 2016-11-08; 修订日期: 2016-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 61540045, 71602114); 上海市科委科研项目( 16DZ2349900, 16DZ1201402, 16DZ2340400, 16040501500, 15590501700, 14DZ2280200, 14170501500); 上海市晨光计划项目( 14CG48); 上海人才发展基金( 201508)

通信作者: 苕道方( 1978—), 男, 上海人, 上海海事大学教授, 博士; E-mail: dfchang@shmtu.edu.cn。

引文格式: 裴磊磊, 苕道方. 基于仿真优化的自动化集装箱码头双 ARMG 调度研究 [J]. 广西大学学报( 自然科学版), 2017, 42( 2): 500-510.

coordination between twin ARMGs greatly, the efficiency of the transferring is increased 72 percent. This strategy provides a significant reference for the future development of automated container terminal and improving the comprehensive competitiveness of the port.

**Key words:** simulation and optimization; automated container terminal; automated rail-mounted gantry (ARMG) scheduling; mixed-integer linear program

## 0 引言

科学技术水平的不断提高给传统的集装箱码头带来了巨大的改变,各个集装箱码头为了降低人工作业成本、改善码头作业的安全性、提高作业效率,TCT(Traditional Container Terminal,传统集装箱码头)正在逐步向自动化、智能化过渡,ACT(Automated Container Terminal,自动化集装箱码头)也成为提高企业竞争力的核心方法。ACT与TCT除了内在的技术水平的差距,还有外在的基础设施的配置。而堆场内场桥的差异更为明显,ACT堆场内采用ARMG(Automated Rail-Mounted Gantry,自动轨道式集装箱龙门起重机)进行装卸作业,一般不存在起重机的跨箱区调度作业,那么这对箱区内的调度提出了更高的要求,如何优化箱区内ARMG的调度问题,不仅影响ARMG的作业效率,而且对岸桥、集卡等设备的作业协调问题产生重大影响,对提高码头的资源合理利用具有重要意义。

针对集装箱码头场桥的调度优化问题,国内外相关专家学者做出了大量研究:

Kim等<sup>[1]</sup>研究了单场桥的调度作业问题,以出口集装箱为研究对象,以场桥在箱区间总移动时间最小为目标,建立了混合整数规划模型。Zeng等<sup>[2]</sup>在考虑不确定和随机因素基础之上,利用仿真技术优化集装箱码头的调度问题,有效地提高了码头作业的协调能力。Zhang等<sup>[3]</sup>采用静态滚动式方法研究了场桥的调度问题,并针对所建立的混合整数规划模型,采用拉格朗日松弛变量法实现了模型的求解。Chang等<sup>[4]</sup>进一步对滚动式策略进行了研究,提出了动态滚动式策略,该策略对实现全局最优有更好的效果。韩晓龙等<sup>[5]</sup>从优化场桥调度的算法着手,以总作业时间最短为目标,建立了混合整数规划模型,通过启发式算法和模拟退火法的求解比较,得出了模拟退火法具有更好的求解适应性。以上的研究在一定程度上解决了场桥调度中的协调性问题,提高了集装箱码头的作业效率。

在多场桥的调度方面,Ng<sup>[6]</sup>对给定作业任务序列下具有不同准备时间的多场桥作业问题进行了研究,针对调度问题的复杂性,采用动态规划方法实现了模型的求解。Lee<sup>[7]</sup>在求解调度问题上,采用模拟退火法实现最大化减少场桥的作业时间的目标。乐美龙等<sup>[8]</sup>分析了多场桥作业调度问题,在考虑场桥间的不可跨越和安全距离的因素上,建立了混合整数规划模型,并设计了两阶段启发式算法实现了模型的求解。He等<sup>[9]</sup>针对场桥的调度,提出了调度作业任务组的概念,并根据所建立MIP(mixed-integer program)模型求解的复杂性,采用滚动式策略实现了模型的转化求解。对多场桥的优化调度研究逐步完善了场桥调度理论,但其主要是针对TCT中场桥的调度研究。

在ACT研究方面,乐美龙等<sup>[10]</sup>对码头内多个设备的联合调度问题进行了研究,以桥吊、AGV(Automated Guided Vehicle,自动导引车)和龙门吊为对象进行建模分析,有效提高了经验调度的效率,但其龙门吊仍以单个为研究对象。Choe等<sup>[11]</sup>针对AGV的调度问题,提出了一种自适应在线学习法,使AGV更加适应动态的调度环境。为了更好的使AGV适应动态的码头环境,马越汇等<sup>[12]</sup>对不确定性环境下的AGV调度与配置问题进行了研究,探究出不确定性因素对AGV作业效率的影响程度。为了增加对AGV的精准控制,李凤娥等<sup>[13]</sup>利用了磁钉技术对AGV的运动状态进行了深入分析。霍凯歌等<sup>[14]</sup>则从效率出发,对具备多载功能的AGV进行了费用和空载率的分析,并验证了多载AGV的优越性。在ACT水平运输系统中,除了上述的AGV系统,还有轨道式的场桥系统,轨道式场桥系统具有较高的工作效率<sup>[15]</sup>,并且一个箱区配置双场桥。Park等<sup>[16]</sup>从翻箱的角度阐明了箱区内设置双场桥的重要性,并提出了以启发式算法和本地搜索为基础的实时调度模型,最后通过仿真实验表明了双场桥模型能大大提高对堆场的作业效率。Bian等<sup>[17]</sup>对双场桥轨道式系统进行了深入研究,并根据优化问题的复杂程度,分

别对三个不同类型的场桥系统进行了优化建模。魏晨等<sup>[18]</sup>在不考虑箱区两端交接等待的基础之上,以总作业时间最短为目标,对箱区两端同时作业的双场桥系统问题进行了研究。

综合以上的研究发现:①目前 TCT 中场桥调度理论较为完善;②在 ACT 领域的研究大多是以 AGV 为研究对象;③ACT 堆场中的双 ARMG 系统对提高码头的作业效率具有重要意义。基于以上的研究,为了促进 ACT 的发展,本文探究了 ACT 堆场内双 ARMG 的协同调度问题,在考虑 ARMG 间的碰撞问题、时间约束问题基础上,以总作业时间最小和场桥移动距离差最小为目标,建立多目标混合整数规划模型,最后通过算法与仿真相结合的方法实现模型的求解和结果的优化。

## 1 模型

### 1.1 问题描述

如图 1 为常见 ACT 布局,其作业流程为:集装箱由岸桥从船舶卸载到岸桥中转平台,再由 AGV 小车将集装箱从岸桥中转平台转运到堆场区的缓冲交接区,前端 ARMG 将集装箱由缓存区提取到堆场交接区,再由后端 ARMG 完成后端的出口箱堆存和作业。在整个作业流程中,堆场中 ARMG 的作业效率决定着整个码头的效率,加强对场桥的研究,优化场桥调度作业顺序,成为本文工作的重点。

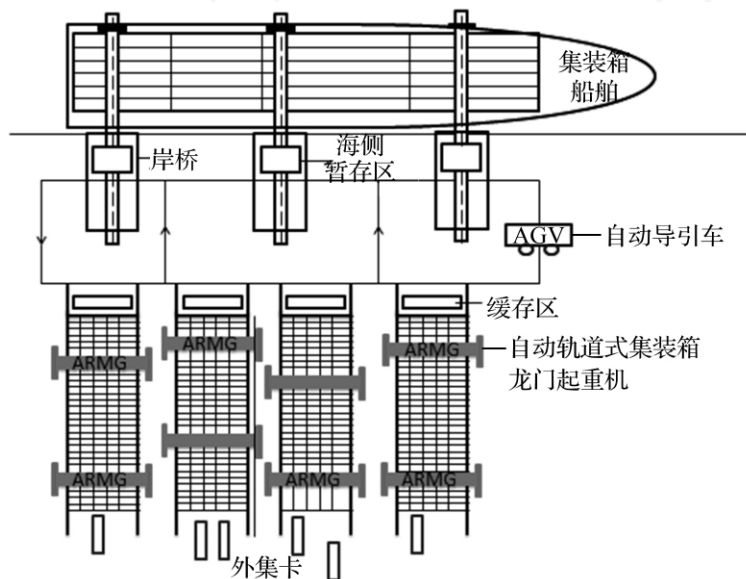


图 1 常见自动化集装箱码头( ACT) 布局

Fig. 1 An example of the layout of the automated container terminal ( ACT)

如图 2 和图 3 所示,集装箱在箱区内装卸作业主要由箱区内的 2 台场桥相互交接完成,本次我们将重点研究卸船过程中的场桥间协调调度问题,卸船作业的流程如下:集装箱进入堆场→集装箱放置在箱区前端的暂存区 H→ARMG1 接到任务指令后行驶至箱区前端暂存区 H→ARMG1 将目标集装箱卸至箱区 B 区域指定位置→ARMG1 离开 B 区→ARMG2 将目标集装箱卸至箱区 C 区域指定位置。

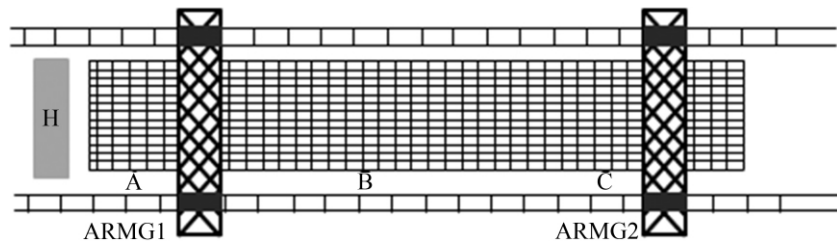


图 2 自动轨道式集装箱龙门起重机( ARMG) 箱区调度作业俯视图

Fig 2. Overhead view of the automated rail-mounted gantry ( ARMG) scheduling

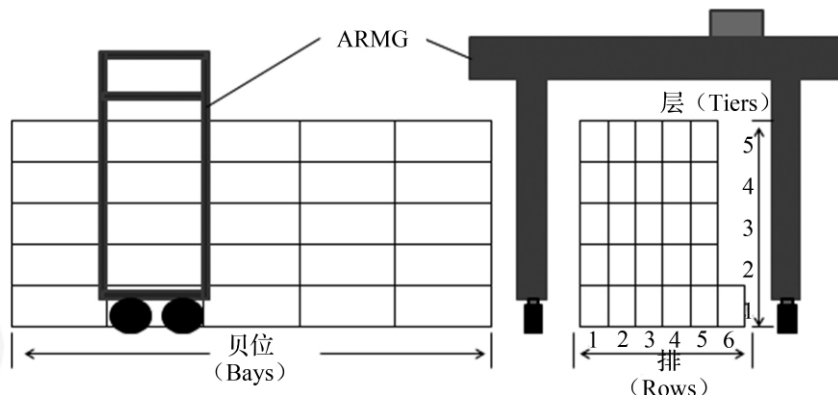


图3 ARMG 箱区调度作业侧视图

Fig. 3 Side view of the ARMG scheduling

卸船作业过程中,如何实现作业时间最短,减少 ARMG 作业过程中的等待时间,充分提高 ARMG 间的协调性,是我们研究的重点,本文从优化作业顺序出发,充分考虑 ARMG 间的防碰撞和箱区前端暂存区容量的限制,建立以作业时间和场桥行驶距离差最小化为目标的混合整数规划模型,并结合算例实现模型的求解。

### 1.2 模型假设

- ① 只考虑一种标准箱型的装卸作业;
- ② 场桥的移动速度均匀,不考虑加速度问题;
- ③ 堆场箱区平均分为 A、B、C 三个功能区;
- ④ 堆场中转区空余位充足,不考虑翻箱问题。

### 1.3 参数设置

$t$ : 所有任务完成时间;

$d_k$ : 表示场桥  $k$  的行驶距离;

$D$ : 表示场桥的行驶的距离差;

$m = \{A, B, C\}$ : 堆场箱区的集合;

$A = \{1, 2, \dots, A^b\}$ :  $A$  箱区内贝位的编号集合;

$B = \{A^b + 1, A^b + 2, \dots, B^b\}$ :  $B$  箱区内贝位的编号集合;

$C = \{B^b + 1, B^b + 2, \dots, C^b\}$ :  $C$  箱区内贝位的编号集合;

$k = \{1, 2\}$ : 堆场内场桥的集合;

$M$ : 足够大的正数;

$N$ : 总的任务数量;

$H$ : 缓存区最大容量;

$T$ : 表示场桥完成一次装或卸所需要的时间;

$L^a$ : 表示场桥间的安全距离限制;

$L^b$ : 表示场桥单位时间内移动距离;

$L^c$ : 一个贝位的长度。

时间变量:

$O_{kmj}$ : 表示场桥  $k$  预提箱位  $j$  上集装箱时,到达箱区  $m$  的时刻;

$P_{kmj}$ : 表示场桥  $k$  在箱区  $m$  提取箱位  $j$  上集装箱的时刻;

$Q_{kmj}$ : 表示场桥  $k$  在箱区  $m$  预卸载箱位  $j$  上集装箱的时刻;

$R_{kmj}^s$ : 表示场桥  $k$  在箱区  $m$  装卸箱位  $j$  上集装箱后开始移动的时刻;

$T_{hj}$ : 表示箱位  $j$  上集装箱进入缓存区  $H$  的时刻。

决策变量:

$v_{ij}$ : 0/1 决策变量, 为 1 表示  $i$  时刻箱位  $j$  上集装箱进入了缓存区;

$x_{kij}$ : 0/1 决策变量, 为 1 表示场桥  $k$  在  $i$  时刻处于箱位  $j$  上;

$u_{kij}$ : 0/1 决策变量, 为 1 表示场桥  $k$  在  $i$  时刻装载箱位  $j$  上的集装箱;

$l_{ik}^s$ : 0/1 决策变量, 为 1 表示场桥  $k$  在  $i$  时刻装卸完集装箱后处于运动状态; 其中  $s = 1$  表示完成装箱,  $s = 2$  表示完成卸箱。

目标函数

$$\text{Min}(t, d), \quad (1)$$

$$t = \min \sum_j (R_{k=2, m=C, j}^{s=2} - O_{k=1, m=A, j}), \quad (2)$$

$$D = \min |d_2 - d_1|, \quad (3)$$

s. t

$$\sum_j u_{ijk} \leq 1, \forall i, k, \quad (4)$$

$$\sum_k u_{ijk} \leq 1, \forall i, j, \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_j u_{ijk} = N, \quad \forall k, \quad (6)$$

$$\sum_j u_{ijk} + l_{ik}^{s=1} \leq 1, \quad (7)$$

$$\sum_j u_{ijk} + l_{ik}^{s=2} \leq 1, \quad (8)$$

$$\sum_j v_{ij} - u_{ij, k=1} \leq H, \quad (9)$$

$$P_{kmj} \geq t_{hj}, \quad \forall j, \quad (10)$$

$$P_{k=1, m=A, j} - O_{k=1, m=A, j} \geq 0, \quad (11)$$

$$P_{k=2, m=B, j} - O_{k=2, m=B, j} \geq 0, \quad (12)$$

$$M(1 - l_{i+1, k}^{s=1}) + T + P_{kmj} = R_{kmj}^{s=1}, \quad (13)$$

$$M(1 - l_{i+1, k}^{s=2}) + T + P_{kmj} = R_{kmj}^{s=2}, \quad (14)$$

$$d_1 = L^b \sum_j (Q_{k=1, m=B, j} - R_{k=2, m=A, j}^{s=1} + O_{k=2, m=A, j+1} - R_{k=1, m=B, j}^{s=2}), \quad (15)$$

$$d_2 = L^b \sum_j (Q_{k=2, m=C, j} - R_{k=2, m=B, j}^{s=1} + O_{k=2, m=B, j+1} - R_{k=2, m=C, j}^{s=2}), \quad (16)$$

$$\sum_j x_{ijk} = 1, \quad \forall i, k, \quad (17)$$

$$L^c (\sum_j j_1 x_{i, j_1, k=2} - \sum_j j_2 x_{i, j_2, k=1}) \geq L^a \quad j_1, j_2 \in B, j_1 \neq j_2, \quad (18)$$

$$\sum_j j_1 x_{i, j_1, k=2} - \sum_j j_2 x_{i, j_2, k=1} \leq C^b - 1, \quad (19)$$

$$M(2 - x_{i+\Delta t, j_1, k} - x_{i, j_2, k}) + |j_1 - j_2| \times L^c = \Delta t \times L^b. \quad (20)$$

式(1)表示最小化总作业时间、最小化场桥移动距离差, 式(2)、式(3)是对目标函数的具体化。式(4)~式(9)是对作业的任务约束, 式(4)表示一个 ARMG 一次只能提取一个箱位上的集装箱, 式(5)表示一个集装箱在相同时刻最多被 ARMG 一个提取, 式(6)对单个 ARMG 作业次数与总任务量的限制, 式(7)、(8)对场桥装卸和运动状态的约束, 式(9)表示缓存区容量的限制, 式(10)~(15)是对时间的约束, 式(10)表示集装箱进入缓存区时刻要早于提箱时刻, 式(11)、(12)表示 ARMG 到达提箱箱区时刻早于时间提箱时刻, 式(13)、(14)对提箱完成与运动时间的限制, 并确保下一刻进入运动状态。式(15)~(20)是对作业的空间约束, 其中式(15)、(16)分别表示 ARMG1 和 ARMG2 运动的距离, 式(17)表示 ARMG 在每一时刻只能处于一个箱位上, 式(18)、(19)限制了 ARMG 间的安全距离和最大距离, 式(20)确保 ARMG 在单位时间内所处箱位和移动距离的一致性。

## 2 模型求解

针对该问题属于 NP( Non-Deterministic Polynomial) 问题,并且又属于多目标优化问题,在考虑到模型求解的复杂性、模型中若干时间约束基础之上,以及现实作业中 ARMG 之间存在着等待问题,本文设计了算法与仿真相结合的两阶段方法,对模型进行求解。

第一阶段以 ARMG 之间在作业过程中移动距离差最小为目标,即为了实现两个 ARMG 之间的协调作业,通过遗传算法,对作业顺序进行优化,优化集装箱在堆场中转功能区的位置。

第二阶段设计仿真模型,将第一阶段得到的优化作业顺序反馈到仿真模型中,通过仿真作业,得到实际作业时间。

两阶段算法流程如图 4,具体步骤如下:

**Step 1:** 设计遗传算法,得到场桥优化作业顺序;

**Step 2:** 将 Step 1 中得到的作业顺序输入到仿真系统,进行仿真实验;

**Step 3:** 将 Step 2 中得到的总的作业时间与 CPLEX 求得结果进行比较,若达到满意度要求,则结束算法,输出作业顺序与作业时间。否则,进入下一步;

**Step 4:** 以 Step 3 中仿真实验得到的作业时间为新的参考指标,重新对遗传算法进行优化,返回到 Step 1。

针对两阶段算法,第一阶段利用遗传算法对作业顺序进行优化,主要步骤如下:

**Step 1:** 初始化种群。根据实际问题的特点本文采用实数编码,染色体由两段基因编码组成,分别对应为集装箱要到达的中转贝位与目的贝位,如图 5 所示。



图 5 染色体编码示意图

Fig. 5 Representation of chromosome

**Step 2:** 适应度值计算。一般的,适应度函数由目标函数转化而来,本文第一阶段算法由于解决 ARMG 之间行驶距离之差最小化的问题,故采用倒数变换的方法来确定适应度函数,即

$$\text{fitness}(x_i) = \frac{1}{f(x_i)};$$

**Step 3:** 检查种群代数是否达到终止值,满足则算法终止,输出最优解,否则继续;

**Step 4:** 选择适应度值最优的个体作为父代,根据交叉率与变异率,进行交叉、变异。

采用轮盘赌算法进行选择,主要步骤如下:

① 所有个体适应度值求和:  $\text{sumfitness} = \sum_i^n \text{fitness}(x_i);$

② 确定个体选择概率:  $P_i = \frac{\text{fitness}}{\sum_i^n \text{fitness}(x_i)};$

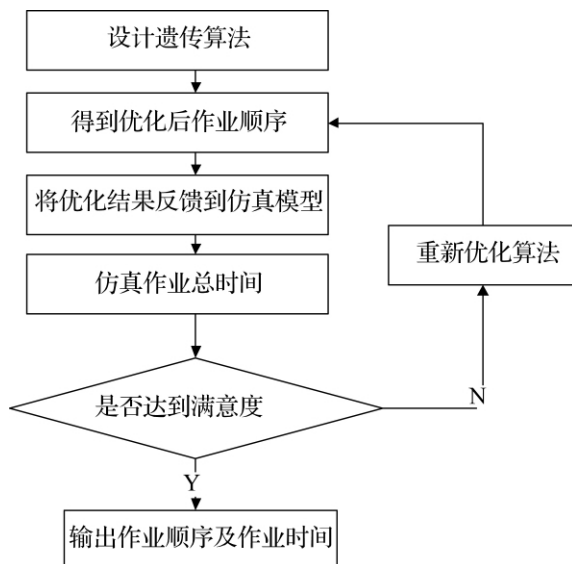


图 4 两阶段算法流程图

Fig. 4 Flow diagram of the two-phase algorithm

- ③ 确定个体累计概率;
  - ④ 产生一个随机数  $n_k \in (0, 1)$ ;
  - ⑤ 从第一个个体开始, 一次判断其累计概率是否  $\geq n_k$ , 判断得到的第 1 个符合条件的个体入选。
- 在交叉时, 为保留优秀的个体, 本文采用双切点交叉法, 进行染色体的交叉如图 6。

	切点1				切点2			
父代1	21	25	23	27	25	34	...	36
父代2	21	32	30	38	29	25	...	21
	切点1				切点2			
子代1	21	25	30	38	29	34	...	36
子代2	21	32	23	27	25	25	...	21

图 6 染色体双切点交叉图

Fig. 6 Representation of crossover

**Step 5:** 将交叉、变异得到的个体作为新的个体, 返回到 Step 2。

第二阶段仿真实验设计, 由于我们主要研究对象是箱区内的场桥, 因此忽略了 AGV 在箱区前端的作业过程。在 eM-Plant 平台下, 整个仿真系统涉及到的主要实体有岸桥、箱区前端缓存区、堆场箱区、ARMG、ARMG 行驶轨道、传感器等。利用 eM-Plant 平台的仿真模型设计如图 7, 并针对仿真模型做如下三点说明:

- ① 为了提高集装箱码头的作业效率, 降低作业过程各个环节的等待时间, 在仿真过程中, 针对 ARMG 设置的作业规则是当每一个 ARMG 卸箱完成后, 自动返回至待提箱区, 而不是原地等待接收提箱命令。
- ② 利用 eM-Plant 平台建立仿真模型, 必须充分考虑现实作业中的实际情形, 考虑各个子系统之间的逻辑关系。在本次仿真模型中, 主要有以下三个子系统: 岸桥作业子系统、ARMG1 作业子系统、ARMG2 作业子系统。各个子系统内部的逻辑关系如图 8、图 9 和图 10。
- ③ ARMG 行驶轨道上设置有传感器, 一方面用来控制 ARMG 之间的安全距离, 另一方面用来确定箱位信息, 最后根据集装箱所属的贝位、层级信息, 在仿真系统中赋予集装箱以不同颜色。

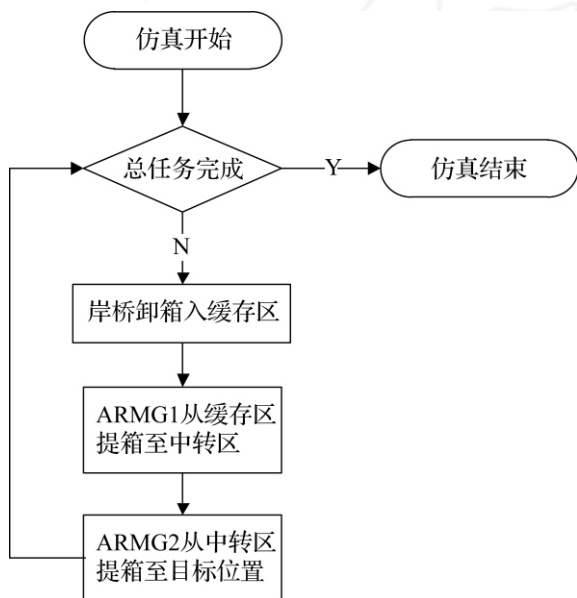


图 7 仿真实验流程图

Fig. 7 The process of simulation model

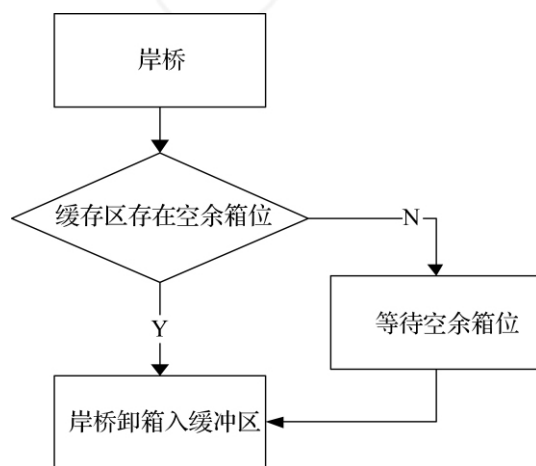


图 8 岸桥作业子系统

Fig. 8 Quay crane subsystem

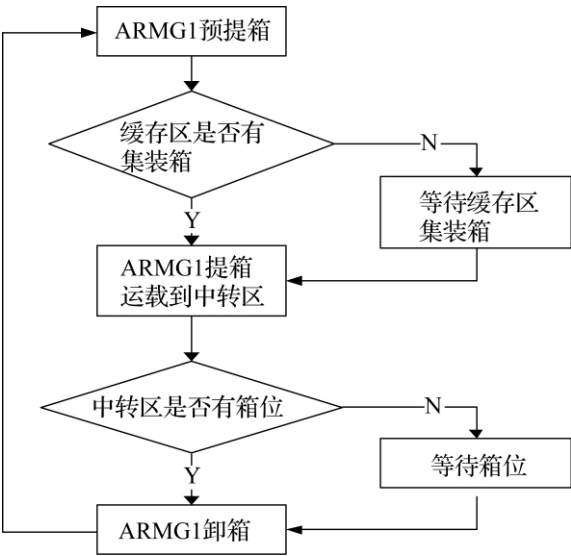


图 9 ARMG1 作业子系统  
Fig. 9 ARMG1 subsystem

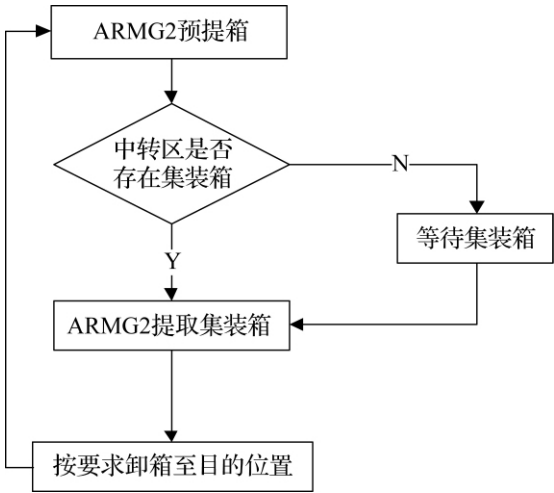


图 10 ARMG2 作业子系统  
Fig. 10 ARMG2 subsystem

3 算例分析

3.1 参数设置

本研究选择长三角某港口的实际作业数据进行算法的求解和仿真的模拟,总的任务为根据集装箱的任务要求,完成 100 个指定位置的卸箱任务,作业任务部分数据如表 1 所示,其中 imp\_084 的三个属性为( bay42,tier1,row4),表示第 84 个进入仿真系统的集装箱目的位置在第 42 贝位、第 1 层、第 4 排。堆场箱区的总长度为 390 m(每个箱位长度为 6.5 m,包括箱位之间间隔,即 60 贝位),宽度为 26 m(每个箱位宽度为 2.6 m,包括箱位间的间隔,即 10 排),可堆存高度为 5 层。箱区内被平均分为 A、B、C 三个功能区,每个功能区各占 20 贝位。场桥间的安全距离为 2 个贝位。两阶段算法结束的满意度为 5% (即由算法得到的优化顺序下的作业距离与作业时间,在与 CPLEX 结果相比较时,误差都要小于 5%)。遗传算法参数设置为:最大代数为 1 000 代,种群数量为 200,变异率为 0.3,交叉概率为 0.9。eM-Plant 仿真系统主要参数设置为:岸桥的卸载速度服从正态分布(1,1:40,0:05,0:50,2:30),其中均值为 100 s,方差为 5 s,最大值 150 s,最小值 50 s,ARMG 移动速度为 4 m/s,ARMG 的提箱/卸箱时间为 90 s/个,缓存区容量为 20 个,传感器间隔为 6.5 m。

表 1 作业任务部分数据  
Tab. 1 List of the tasks

贝位( bay)	42	43	44	45	46	47	48	49	50
tier1_row1	imp_081					imp_021			
tier1_row2	imp_082					imp_022			
tier1_row3	imp_083					imp_023			
tier1_row4	imp_084					imp_024			
tier1_row5	imp_085					imp_025			imp_093
tier1_row6	imp_086					imp_026			imp_094
tier1_row7	imp_087					imp_027			imp_095
tier1_row8	imp_088					imp_028			imp_096
tier1_row9	imp_089					imp_029			imp_097
tier1_row10	imp_090					imp_030			imp_098
tier2_row1	imp_091								
tier2_row2	imp_092								



### 3.2 结果与分析

在 MATLAB R2015b 中进行第一阶段的遗传算法编码求解,并进行了两次算法的优化,最终结果显示如图 11。在 eM-Plant 9.0 中进行作业时间仿真,选择三次算法优化后的作业顺序进行仿真模拟,并与 CPLEX 求得最优解进行比较,主要结果显示如图 11 及表 2。

从图 11 可以看出,在两阶段算法中,当以仿真时间作为算法的优化目标时,不仅能够提高算法的收敛速度,而且能大大提高算法的解的质量。从三次的优化结果可以看出,仿真时间随着三次算法的不断优化也变得越来越好。另外,从表 2 也可以看出,在第三次优化与 CPLEX 相比较时,即使在场桥间移动距离差相同的情况下,仿真时间也会存在着差异。以上的现象表明一方面场桥的作业时间受到其相互之间协调性的影响,另一方面也说明在协调性相同的情况下仍然存在着不同的作业任务的分配顺序。

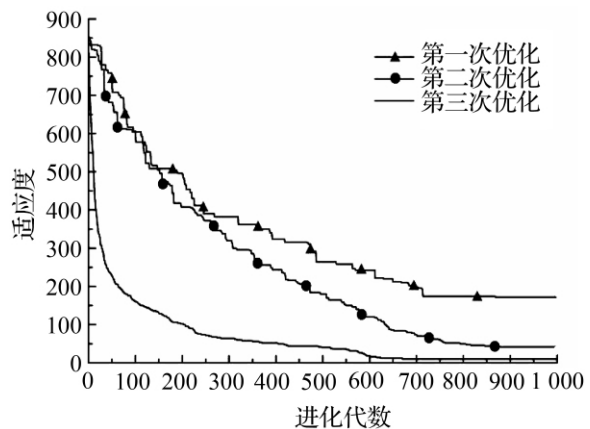


图 11 遗传算法迭代结果

Fig. 11 Result of the genetic algorithm

表 2 仿真结果  
Tab. 2 List of the simulation result

优化次数	$d_1/m$	$d_2/m$	$D/m$	$t/s$	缓存区平均等待时间/s	中转区平均等待时间/s
第一次优化	33 566	35 516	975	27 013. 761 7	4 422	76. 429
第二次优化	34 268	34 814	273	26 898. 310 7	4 396	60. 365
第三次优化	34 476	34 606	65	26 846. 300 7	4 395	9. 035
CPLEX 解	34 476	34 606	65	26 859. 310 7	4 392	32. 273

从表 2 的三次优化结果可以看出,在总的作业时间  $t$  上,三次优化结果之间的差异并不是十分的明显,这在一定程度上与模型假设关于中转区的容量充足有关,从而减少了翻箱的作业时间的影响。但是从中转区的等待时间可以看出,中转区中的等待时间有了极大的改善,其中每个集装箱在中转区的平均等待时间较前次相比,分别下降了 16. 064 s 和 51. 33 s,中转效率分别对应提高了 21% 和 85%。并且在与 CPLEX 求解下的仿真结果比较时,中转效率也提高了 72%,极大地改善了场桥之间作业的协调性。

通过图 12 对比在算法优化和 CPLEX 求解下集装箱在中转区的等待时间可以看出,在前 20 个集装箱装卸时,两者的等待时间基本相同,而从第 21 到第 28 个集装箱开始出现了差异,这个差异也导致了后续虽然两者的变化趋势相同,但等待时间却不断增加。这一现象说明在实际的作业过程中,即使是作业顺序存在着极小的差异,这种差异将会带来巨大的时间成本。

从图 13 可以看出,集装箱在缓存区的等待时间,在卸载前 32 个集装箱时保持递增的趋势,此后波动幅度较小,说明缓存区一直处于饱和状态。缓存区处于饱和状态,一方面说明堆场前端 ARMG 有充足的

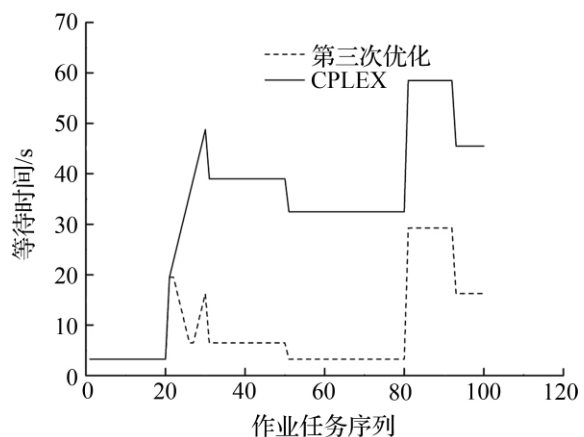


图 12 第三次优化与 CPLEX 结果对比

Fig. 12 The comparison between the third optimization and CPLEX

作业任务,减少了其不必要的等待时间,实现堆场设备资源的有效利用,另一方面也说明了岸桥和 ARMG 之间作业存在着不协调性,这主要是我们忽略了 AGV 作为中间环节的水平运输时间,结合表 2 中的数据,可以发现缓存区平均等待时间在 73 min 左右,如何利用好这个时间,实现岸桥、AGV、ARMG 三者之间作业的协调性将是下一阶段要研究的重点。

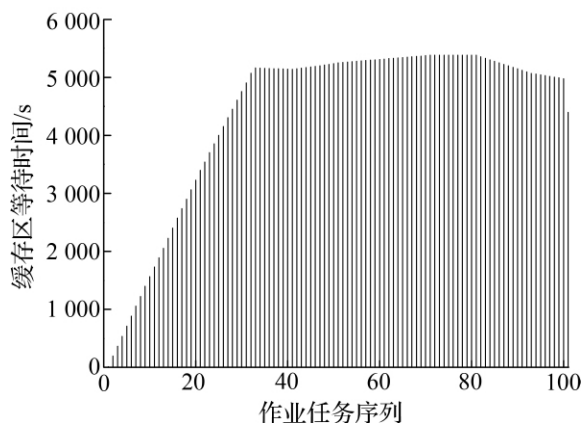


图 13 缓存区等待时间

Fig. 13 Waiting time in handover point

## 4 结 论

自动化集装箱码头的发展与建设不仅能够提高码头的作业效率,而且对提高港口的作业安全性、降低不确定性风险和港口综合竞争力有重大作用,而场桥作为堆场效率的瓶颈所在,其协调性对 ACT 的效率影响巨大。本文针对 ACT 堆场内双 ARMG 的调度问题,在考虑 ARMG 之间的时间限制、空间限制和任务限制的基础之上,建立了混合整数规划模型。最后利用仿真优化方法,在 5% 满意度条件下对算法进行了两次优化,逐步提高了算法的求解效率和解的质量,也使中转区的效率同比提高了 21% 和 85%,与 CPLEX 的解相比,中转区的中转效率大幅提高 72%,充分提高了 ARMG 之间的作业协调性。仿真优化也为以后解决自动化集装箱码头发展中的协调性和效率问题提供了重要参考。

## 参考文献:

- [1] KIM K Y, KIM K H. A routing algorithm for a single transfer crane to load export containers onto a containership [J]. Computers and Industrial Engineering, 1997, 33( 3) : 673-676.
- [2] ZENG Q C, YANG Z Z. Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals [J]. Computers & Operations Research, 2009, 36( 6) : 1935-1944.
- [3] ZHANG C Q, WAN Y W, LIU J Y, et al. Dynamic crane deployment in container storage yards [J]. Transportation Research Part B, 2002, 36( 6) : 537-555.
- [4] CHANG D F, JIANG Z H, YAN W, et al. Developing a dynamic rolling-horizon decision strategy for yard crane scheduling [J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25( 3) : 485-494.
- [5] 韩晓龙, 郎昊. 基于模拟退火算法的场桥调度研究 [J]. 广西大学学报( 自然科学版), 2015, 40( 2) : 427-435.
- [6] NG W C. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164: 64-78.
- [7] LEE D H, CAO Z, MENG Q. Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port container terminals with simulated annealing algorithm [J]. International Journal of Production Economics, 2007, 107( 1) : 115-124.
- [8] 乐美龙, 林艳艳, 范志强. 基于两阶段启发式算法的多场桥作业调度研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34( 1) : 60-65.

- [9] HE J L,ZHANG W M,HUANG Y F,et al. An efficient approach for solving yard crane scheduling in a container terminal [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2013,18( 5) : 606-619.
- [10] 乐美龙,张清波. 自动化码头桥吊、自动引导车以及龙门吊的联合调度 [J]. 青岛科技大学学报(自然科学版),2015,36( 5) : 569-574.
- [11] CHOE R,KIM J,RYU K R. Online preference learning for adaptive dispatching of AGVs in an automated container terminal [J]. Applied Soft Computing,2016,38: 647-660.
- [12] 马越汇,胡志华. 不确定环境下自动化集装箱码头 AGV 调度与配置问题 [J]. 广西大学学报(自然科学版),2016,40( 2) : 589-597.
- [13] 李凤娥,牛王强. 基于磁钉技术的集装箱码头 AGV 定位精度分析 [J]. 上海海事大学学报,2016,37( 1) : 38-41.
- [14] 霍凯歌,张亚琦,胡志华. 自动化集装箱码头多载 AGV 调度问题研究 [J]. 大连理工大学学报,2016,56( 3) : 244-251.
- [15] KEMME N. Effects of storage block layout and automated yard crane systems on the performance of seaport container terminals [J]. OR Spectrum,2012,34( 2) : 563-591.
- [16] PARK T, CHOE R, OK S M, et al. Real-time scheduling for twin RMGs in an automated container yard [J]. OR Spectrum,2010,32( 4) : 593-615.
- [17] BIAN Z,LI N,LI X J, et al. Operations scheduling for rail mounted gantry cranes ina container terminal yard [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2014,19( 3) : 337-345.
- [18] 魏晨,胡志华,高超锋,等. 自动化集装箱码头堆场内双起重机调度模型与算法 [J]. 大连海事学报,2015,41( 4) : 75-80.

(责任编辑 梁 健)