

# 基于 PSO 的自动化集装箱码头双小车岸桥和 AGV 的协同调度

马孙豫 杨勇生 梁承姬

(上海海事大学物流科学与工程研究院 上海 201306)

**摘要** 为研究自动化集装箱码头的双小车岸桥 QCs( Quay Cranes) 与自动导引小车 AGV( Automated Guided Vehicle) 的协同调度问题,以自动化集装箱码头多种装卸运输设备为研究对象,以 AGV 调度为主,建立以卸船作业最末任务结束时间最小化为目标的混合整数规划模型,采用多层编码粒子群算法( PSO) 进行求解。在卸船任务数量变化下,通过改变双小车岸桥和 AGV 数量的配置,得出不同情况下作业完成时间,在相应最优调度方案下给出调度甘特图。运用 CPLEX 软件、PSO 和 GA( Genetic Algorithm) 分别进行求解分析,通过计算结果对比分析 PSO 的有效性。结果表明:卸船作业完成时间随着任务数量的增加而增加,随着 AGV 数量的增加而减少,但是并不是 AGV 数量越多,整个码头运作效率就会越高,算例证明了模型的实用性和有效性。

**关键词** 自动化集装箱码头 双小车岸桥 AGV 粒子群算法( PSO) 协同调度

**中图分类号** TP3 **文献标识码** A **DOI:** 10. 3969/j. issn. 1000-386x. 2018. 10. 004

## COLLABORATIVE SCHEDULING OF DOUBLE-TROLLEY QUAY CRANES AND AGV BASED ON PSO AT AUTOMATED CONTAINER TERMINAL

Ma Sunyu Yang Yongsheng Liang Chengji

( Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract** To study the collaborative scheduling of quay cranes ( QCs) and automated guided vehicles ( AGVs) in automated container terminals, a variety of automated loading and unloading equipment for container terminals were studied. A mixed integer programming model, which aims to minimize the completion time of unloading a ship, was established mainly based on AGV scheduling. With the change of unloading tasks number, the completion time under different circumstances was obtained by changing the allocation of QCs and AGV amount, which was solved by multi-layer particle swarm optimization algorithm ( PSO) , then a Gantt chart for scheduling was given under the corresponding optimal scheduling scheme. The CPLEX software, PSO, and Genetic Algorithm ( GA) were used to solve the problem, and the effectiveness of the PSO was compared and analyzed through the calculation results. The results show that the completion time of the unloading operation increases with the increase of the number of tasks and decreases with the increase of AGV amount. However, it does not mean that the terminal have higher efficiency with larger amount of AGVs. The example illustrates the practicability and effectiveness of the model.

**Keywords** Automated container terminal Dual-trolley quay crane AGV Particle swarm optimization ( PSO) Collaborative scheduling

## 0 引言

随着一带一路的政策逐渐实施,我国沿海港口集装箱吞吐量逐步增加,船舶逐渐大型化,港口对装卸效

率的要求越来越高,目前建造自动化集装箱码头已经形成一种趋势。双小车岸桥和自动导引车( AGV) 的运用,是自动化集装箱码头的主要特征,自动化集装箱码头水平运输系统的效率直接影响了船舶停靠时间。AGV 是水平运输系统的主要设备,而决定水平运输系

收稿日期:2018-03-29。上海市科学技术委员会项目( 1417501500,17595810300)。马孙豫,硕士生,主研领域:港口运作与运营。杨勇生,教授。梁承姬,教授。

统效率的是码头各个装卸设备的调度情况<sup>[1]</sup>。因此,研究双小车岸桥和 AGV 的调度情况,对于提高自动化集装箱码头的整体效率有着巨大的意义。

目前,国内外学者对 AGV 调度问题已经进行了许多研究<sup>[2]</sup>。Xin 等<sup>[3]</sup>针对自由搜索生成无碰撞轨迹的问题,提出了一种多载 AGV 调度的混合整数规划模型,以减少自动化码头装卸时间;Angeloudis 等<sup>[4]</sup>针对不确定性环境下的 AGV 任务分配问题,通过采用滚动时域,减少船舶在港时间,从而提高自动化码头的装卸效率;Danijela 等<sup>[5]</sup>使用数据包络法对 AGV 调度进行进一步分析,建立仿真模型和效率评估,通过改变调度及 AGV 和任务数量来分析卸船集装箱的作业效率;康志敏等<sup>[6]</sup>考虑两种 AGV 调度方法,提出了基于成本的调度方法,建立了以等待时间最少为目标函数值的调度模型,利用遗传算法来求解模型;霍凯歌等<sup>[7]</sup>基于多载 AGV,以最小化 AGV 作业成本为目标函数,并采用 GUROBI 和遗传算法对该问题进行求解,与单载 AGV 结果进行比较,证明该模型的实用性;柯冉绚、任亚东等<sup>[8-9]</sup>基于两种 AGV 调度模式的优缺点,建立了以 AGV 等待时间为目标函数的整数规划模型,以 Netlogo 构建仿真模拟,证明模型的实用性。

国内外学者为解决 AGV 调度问题提出很多智能方法<sup>[10]</sup>。Jin 等<sup>[11]</sup>考虑 AGV 运输时间和任务的优先顺序,设计一种以最小化岸桥装卸的完成时间和标准差动态多 AGV 调度模型,利用遗传算法进行求解;Kim 等<sup>[12]</sup>基于 AGV 静态调度,提出了一种多标准的 AGV 调度策略,以岸桥延误时间和 AGV 空驶距离最小化为目标函数,使用多目标进化算法进行求解;李晔等<sup>[13]</sup>通过改变双小车岸桥上的中转平台容量限制,以岸桥前小车装卸延迟时间和岸桥后小车与 AGV 间的等待时间之和最小为目标函数,设计启发式算法求解后小车时间窗,采用遗传算法进行求解;宗辰光等<sup>[14]</sup>采用多层编码粒子群-遗传算法融合,对成本优化问题进行了仿真研究,给出了成本变化曲线及 AGV 调度甘特图,来证明算法的有效性。

通过上述可知,目前相关文献的研究主要围绕时间窗的调度、路径规划的调度、任务指派的调度,但是考虑的大都是单一设备装卸问题,求解算法以遗传算法为主。随着 AGV 数量的增加,水平运输系统的复杂化,遗传算法求解的效率和有效性会大大降低。为此,本文采用多层编码粒子群算法,以 AGV 调度为主,岸桥等设备为辅,通过改变装卸任务和 AGV 的数量进行算法求解,并通过实验结果进行分析比较,提高自动化码头运作效率。

## 1 问题描述

自动化码头与传统码头的最大的区别就是自动化码头的布局是垂岸式,所谓垂岸是指堆场的布局垂直于码头<sup>[15]</sup>。自动化集装箱码头如图 1 所示。

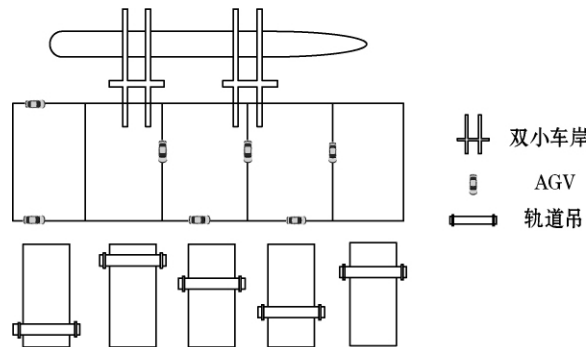


图 1 自动化集装箱码头布局图

由于各个设备之间的操作不连贯、不协调,出现岸桥等待 AGV 或 AGV 等待时间过长的现象。自动化码头作业包括自动化码头作业包括岸边作业、水平运输作业和堆场作业<sup>[16]</sup>。双小车岸桥和轨道吊分别负责岸边和堆场作业的主要装卸设备,AGV 是负责在岸边到堆场间水平运输的主要设备。在卸船过程中,岸桥前小车将船舶上的集装箱放置于岸桥中转平台上,岸桥后小车从中转平台上将集装箱吊起装载于 AGV 上,而后 AGV 选择路径运输至堆场,轨道吊将集装箱从 AGV 上取走存放在堆场指定位置<sup>[17]</sup>。装船过程与卸船过程相反。

双小车岸桥按照已知确定的卸船顺序依次卸载集装箱,由于存在中转平台的限制,一般中转平台只能存放 2 个集装箱,当超过 2 个容量时,前小车不再放置集装箱至中转平台,需等待后小车将中转平台中的集装箱放置于 AGV 上。在这整个过程中,需要对 AGV 的任务进行调度分配,来减少 AGV 的装载运输时间和岸桥的等待时间,从而达到缩短船舶停靠时间的目的。因此,该问题实质是 AGV 的调度问题。

本文针对自动化码头新设备,以小型自动化码头为例,以 AGV 为研究对象,已知岸桥卸船作业顺序的情况下,建立以岸桥作业时间最短为目标的 AGV 调度混合整数规划模型。本文研究的问题主要设备涉及到了双小车岸桥和 AGV,为了保证算法的精确性和完整性,将箱区主要运输设备轨道吊 RMG (Rail-Mounted Gantry Crane) 也纳入考虑范围。采用粒子群算法进行求解,CPLEX 软件和 GA 进行对比分析验证粒子群算法的有效性,实现整个系统的最优化调度,提高码头装

卸运输效率,减少在港口时间。

## 2 数学模型

### 2.1 模型假设

根据自动化码头实际情况,对相关问题进行简化:

- (1) 岸桥作业装卸顺序已知且只卸不装;
- (2) 岸桥后小车装载集装箱到 AGV 上的时间已知;
- (3) AGV 采用作业面装卸且一次只能运输一个集装箱;
- (4) AGV 匀速行驶,不考虑加减速和运输过程中冲突死锁问题;
- (5) 每个箱区使用一个 RMG 进行装卸作业。

### 2.2 参数及决策变量

(1) 参数变量:

$S$ : 一个虚拟任务的开始,  $O_S = D \cup S$ ;

$F$ : 一个虚拟任务的结束,  $O_F = D \cup F$ ;

$D$ : 集装箱数量集合,  $i, j \in D$ ;

$K$ : 岸桥数量集合,  $k, l \in K$ ;

$P$ : 集装箱堆存位置集合,  $(n, b) \in p, (n, b)$  表示在箱区  $b$  的第  $n$  个位置;

$B$ : 箱区数量集合,  $b, a \in B$ ;

$V$ : AGV 数量集合;

$C$ : 轨道吊(RMG)数量集合;

$T$ : 岸桥后小车将集装箱卸载到 AGV 的时间为固定值;

$N_k$ : 岸桥  $k$  卸载的集装箱数量;

$(i, k)$ : 岸桥  $k$  卸载第  $i$  个集装箱;

$h_{(i, k)}$ : 岸桥完成集装箱  $i$  卸载工作的时间;

$s_{(i, k)}$ : 岸桥前小车将集装箱卸载到中转平台上的时刻;

$r_{(i, k)}$ : 岸桥后小车将集装箱从中转平台卸载的时刻;

$d_{(i, k)}$ : AGV 执行岸桥  $k$  的第  $i$  个任务的时刻;

$f_{(k, b)}$ : AGV 在岸桥  $k$  和箱区  $b$  之间的运行时间;

$e_{(i, k)}$ : RMG 开始处理集装箱  $i$  的时刻;

$\varphi_{(n, b)}$ : RMG 运行到箱区  $b$  的第  $n$  的位置的时间;

$u_{(i, k)}$ : 岸桥前小车开始卸载集装箱  $i$  到中转平台的时刻;

$M$ : 一个较大的整数。

(2) 决策变量:

$x_{(i, k)}^{(j, l)}$ : AGV 完成岸桥  $k$  的第  $i$  个任务后去执行岸桥  $l$  的第  $j$  个任务, 值为 1, 否则为 0;

$\beta_{(i, k)}^{(n, b)}$ : 岸桥  $k$  的第  $i$  个集装箱堆存在箱区  $b$  的第  $n$  个位置, 值为 1, 否则为 0;

$\gamma_{(i, k)}^{(j, l)}$ : RMG 完成岸桥  $k$  的第  $i$  个任务后去执行岸桥  $l$  的第  $j$  个任务, 值为 1, 否则为 0;

$\alpha_{(i, k)}^b$ : 岸桥  $k$  的第  $i$  任务落在箱区  $b$  中, 值为 1, 否则为 0。

### 2.3 基本模型

(1) 目标函数:

$$\text{MIN} = \text{MAX}(u_{(i, k)} + h_{(i, k)})$$

(2) 约束条件:

$$\sum_{(j, l) \in o_F} x_{(i, k)}^{(j, l)} = 1 \quad \forall i \in D, \forall k \in K \quad (1)$$

$$\sum_{(j, l) \in o_S} x_{(i, k)}^{(j, l)} = 1 \quad \forall j \in D, \forall l \in K \quad (2)$$

$$\sum_{(n, b) \in p} \beta_{(i, k)}^{(n, b)} = 1 \quad \forall i \in D \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i=1} \beta_{(i, k)}^{(n, b)} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad \forall (n, b) \in p \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N_k} \sum_{n \in N} \beta_{(i, k)}^{(n, b)} = \alpha_{(i, k)}^b \quad \forall i \in D, \forall k \in K, \forall b \in B, \forall (n, b) \in p \quad (5)$$

$$\sum_{(j, l) \in o_F} \gamma_{(i, k)}^{(j, l)} = 1 \quad \forall i, j \in D, \forall k, l \in K \quad (6)$$

$$\sum_{(j, l) \in o_S} \gamma_{(i, k)}^{(j, l)} = 1 \quad \forall i, j \in D, \forall k, l \in K \quad (7)$$

$$u_{(i, k)} + h_{(i, k)} + \sum_{b \in B} f_{(k, b)} \alpha_{(i, k)}^b \leq e_{(i, k)} \quad \forall i \in D, \forall k \in K \quad (8)$$

$$e_{(i, k)} + \sum_{b \in B} f_{(k, b)} \alpha_{(i, k)}^b \leq u_{(j, l)} + h_{(j, l)} + M(1 - x_{(i, k)}^{(j, l)}) \quad \forall (i, k) \in o_S, \forall (j, l) \in o_F \quad (9)$$

$$e_{(i, k)} + \sum_{(n, b) \in p} \varphi_{(n, b)} \beta_{(i, k)}^{(n, b)} \leq e_{(j, l)} + M(1 - \gamma_{(i, k)}^{(j, l)}) \quad \forall (i, k) \in o_S, \forall (j, l) \in o_F, a, b \in B \quad (10)$$

$$s_{(j+1, l)} + r_{(j, l)} - s_{(j, l)} + T \leq d_{(j, l)} \quad \forall (j, l) \in o_F, j = 1, 2, \dots, N_{k-1} \quad (11)$$

$$d_{(j, l)} - (r_{(i, k)} + e_{(i, k)} - d_{(j, l)}) \geq M(1 - x_{(i, k)}^{(j, l)}) \quad \forall (i, k) \in o_S, \forall (j, l) \in o_F \quad (12)$$

$$r_{(i, k)} + T \leq d_{(i, k)}, \forall (i, k) \in o_S \quad (13)$$

$$u_{(i, k)} + s_{(i, k)} + r_{(i, l)} + T = h_{(i, k)} \quad \forall i, j \in D, \forall k, l \in K \quad (14)$$

$$u_{(i, k)} \leq s_{(i, k)} \leq r_{(i, k)} \leq d_{(i, k)} \leq e_{(i, k)} \leq \varphi_{(n, b)} \quad \forall i \in D, \forall k \in K \quad (15)$$

$$x_{(i, k)}^{(j, l)} + x_{(j, l)}^{(i, k)} \leq 1 \quad (16)$$

$$\gamma_{(i, k)}^{(j, l)} + \gamma_{(j, l)}^{(i, k)} \leq 1 \quad (17)$$

$$u_{(1, k)} = 0 \quad (18)$$

$$x_{(i,k)}^{(j,l)}, \alpha_{(i,k)}^b, \beta_{(i,k)}^{(n,b)}, \gamma_{(i,k)}^{(j,l)} \in \{0,1\}$$

$$\forall (i,k)(j,l) \in o, \forall (n,b) \in p, \forall b \in B \quad (19)$$

上述基本模型是一个混合整数规划模型,其中目标函数为最小岸桥卸货操作时间。式(1)表示 AGV 每个任务都有一个后序任务;式(2)表示 AGV 每个任务都有一个紧前任务;式(3)保证每个集装箱在箱区中都有位置;式(4)保证每个箱区的位置只能放少于一个集装箱;式(5)表示如果集装箱被分配到了箱区  $b$  中,可以放在任意位置;式(6)表示 RMG 每个任务都有一个后序任务;式(7)表示 RMG 每个任务有一个紧前任务;式(8)表示 AGV 将集装箱运到箱区交接处, RMG 才能开始处理该集装箱任务;式(9)表示只有当 AGV 完成前一个任务才能开始后一个任务;式(10)表示 RMG 只能完成前一个任务才能开始后一个任务;式(11)约束岸桥中转平台上的集装箱数量;式(13)表示只有后小车将集装箱放到 AGV 上,AGV 才能开始任务;式(14)表示参数之间的关系;式(15)为对任务操作时间需要满足的实际情况;式(16)和式(17)表示对于同一设备,如果  $(i,k)$  是  $(j,l)$  的前置任务,那么  $(i,k)$  就不可能再是  $(j,l)$  的后序任务,即任务流向是单向的;式(18)表示设定岸桥卸载第一个集装箱的时刻为 0;式(19)为 0-1 变量。

### 3 PSO 求解

PSO 是进化计算的一种,因其算法简单,易于实现而常被用来解决非线性连续函数优化、约束优化、多目标优化等问题<sup>[18]</sup>。利用 PSO 算法求解 AGV 调度优化模型的流程是:设计并初始种群粒子,每个粒子是问题的一个可行解,粒子的位置表示一个调度的方案,通过粒子个体间的相互协作逐步在搜索空间中寻找最优解。在每一次迭代的过程中,当前粒子的位置和速度都是由上一代粒子的位置和速度所决定<sup>[19]</sup>。利用上述模型定义的适应值函数,通过粒子不断迭代进化寻找全局最优解。

#### 3.1 编 码

为验证 PSO 的有效性,在设计算法时,采用多层编码粒子的方法来表示自动化码头的调度问题,以求得全局最优解。假设有 3 台岸桥,15 个装卸任务,使用 3 辆 AGV 进行运输,随机运载到 4 个箱区中,其中箱区编号为 RMG 编号,则第  $i$  个任务的编码表示为:编号为第  $v$  辆 AGV 将第  $i$  个任务运送到并由第  $b$  个 RMG 运输到箱区中。多层编码即初始种群示例如图 2 所示。

岸桥任务编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
AGV 编号	1	2	3	2	3	1	3	2	1	3	2	3	1	2	3
RMG 编号	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

图 2 初始种群

### 3.2 控制参数的选择

(1) 学习因子 PSO 中的粒子无法通过 GA 中交叉变异来进行更新,粒子只能通过内部速度进行更新。学习因子  $c1$  和  $c2$  为非负常数, $c1$  调节粒子飞向最好位置方向的步长, $c2$  则是调节粒子飞向全局最好位置方向的步长<sup>[19]</sup>。在本文中,设置  $c1 = c2 = 1.494\ 45$ 。

(2) 初始速度 为了防止算法在迭代过程中粒子离开搜索空间,通常设定最大速度  $v_{\max}$  和最小速度  $v_{\min}$ ,设置种群初始速度  $v_{\max} = 1, v_{\min} = -1$ 。

(3) 惯性权重  $w$  为惯性权重,取较大值时,粒子群具有较强的全局搜索能力,较小时,则倾向局部搜索。本文采取线性递减的取值方法,其大小变化如下:

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \times g / T_{\max}$$

式中:  $w_{\max} = 0.9, w_{\min} = 0.4, g$  为进化代数,  $T_{\max}$  为最大迭代数,  $T_{\max} = 200$ 。

## 4 算例验证

以图 1 的码头布局为模型,参照某自动化码头实际数据,对参数进行初步设定。假定码头有 2 个箱区,随着任务数量的改变,双小车岸桥和 AGV 的数量也进行改变。为验证算法解决此问题的有效性,采用 MATLAB 实现 PSO 和 GA,同时采用 CPLEX12.6 对约束条件进行求解,对比结果如表 1。

表 1 PSO 与 CPLEX、GA 对比

算例	任务数量	岸桥-AGV 数量	PSO		CPLEX		GA	
			最优适应值/s	运行时间/s	最优适应值/s	运行时间/s	最优适应值/s	运行时间/s
1	5	1~4	352	2.42	352	11.32	352	3.53
2	6	1~4	478	2.18	478	13.28	478	3.68
3	7	2~4	525	2.52	525	15.42	525	3.77
4	8	2~4	563	2.22	560	11.96	568	4.22
5	9	3~4	587	3.28	569	17.87	592	4.32
6	10	2~4	613	3.34	602	24.85	621	4.52
7	10	2~6	607	2.78	587	20.95	614	4.69
8	20	3~6	736	3.27	692	536.79	753	4.89
9	20	3~8	844	5.99	832	870.52	865	5.32
10	30	3~8	987	4.45	-	-	1 035	5.59
11	40	3~8	1 179	4.89	-	-	1 201	6.87
12	50	3~8	1 277	7.55	-	-	1 323	7.32

从表1中可以看出,通过与其他两种方法对比,我们提出的 PSO 算法可以获得近似最优解。与 CPLEX 的最优解相比,其运行速度更快,范围从 2.42 s 到 7.55 s 且没有剧烈波动,GA 运行速度从 3.53 s 到 7.32 s,同样没有剧烈波动。在运行时间方面,CPLEX 所需时间远远大于 PSO 和 GA 范围。从 11.32 s 到 11 055.28 s,波动剧烈。随着任务数量的增加,三者运行时间都逐渐增长,但当任务数量增长到 30 时,CPLEX 无法在合适的时间得出最优解。在运行结果方面,可以看出,随着任务数量的增加,CPLEX、PSO 和 GA 三者最优解结果差距不大,因此证明了 PSO 算法在解决此问题的有效性。从算例 6 和算例 7 可以看出,任务数量一定时,增加 AGV 的数量会提高码头效率,使得卸船作业时间减少,提高作业效率。从算例 8 和算例 9 可以发现,并不是 AGV 数量越多则效率越高,数量过多反而会导致效率降低,而影响这类情况有很多原因。

以算例 12 为例,基于 PSO 对模型进行求解所得的甘特图如图 3 所示。该甘特图中包含了岸桥作业时间、AGV 时间和箱区 RMG 作业时间,并每个任务编号作业区上标注了岸桥、AGV 和箱区 RMG 编号。在本文中未设置交接区,因此运行过程中,出现了 AGV 运输到箱区时等待 RMG 这种情况。以任务编号 25 为例,1 号岸桥将集装箱运输到 2 号 AGV,而后运输到 2 号箱区,所求得收敛情况如图 4 所示,最终得到的最优值为 1 277 s。

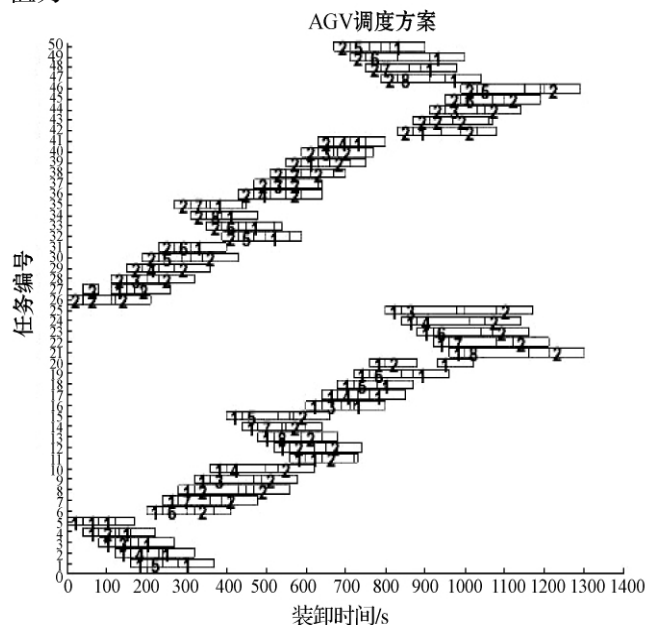


图3 调度甘特图

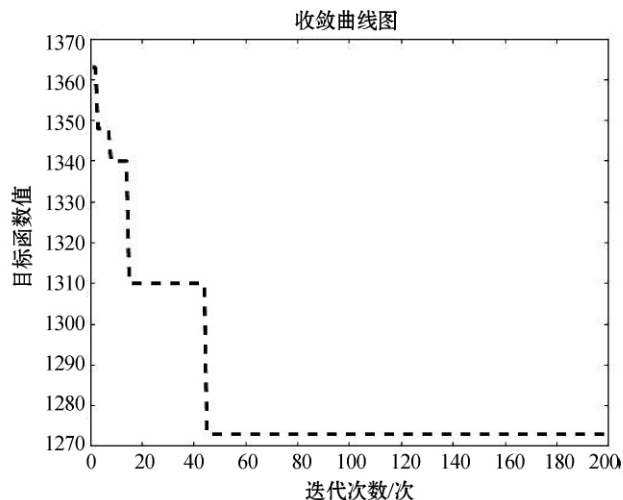
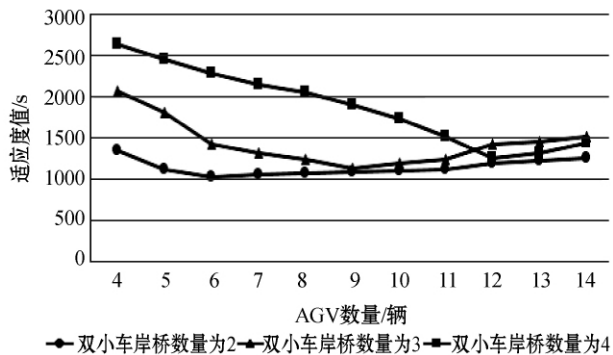


图4 PSO 收敛图

下面讨论不同任务数量下双小车岸桥和 AGV 数量对最优值的影响。数据均来源于运行多次结果的均值,如图 5 所示。

图5 不同岸桥及 AGV 数量变化下目标值的变化  
可以看出:

(1) 不同双小车岸桥数量下,最优适应度值达到最低值时的 AGV 数量不同。当双小车岸桥数量为 2 时,AGV 数量为 6 时适应度值最小;当双小车岸桥数量为 3 时,AGV 数量为 9。双小车岸桥的数量和 AGV 的数量应相互配合。

(2) 当双小车岸桥数量一定时,随着 AGV 数量的增加,岸桥卸载作业时间逐渐减少。这是因为当 AGV 数量较少时,AGV 不能及时将岸桥后小车所卸载的集装箱运到箱区。此时,岸桥需等待 AGV,使得集装箱堆积在中转平台上。当超过 2 个集装箱时,岸桥前小车也需等待后小车,但是适应度值并非随着 AGV 数量的增加而减少。例如图 3 中岸桥数量为 2,AGV 数量为 7 时,可以看出最优值开始增加。出现这种情况的原因是 AGV 数量较多,导致当 AGV 将上一个集装箱运输到指定箱区后返回至岸桥后小车前等待运输,而岸桥装载能力有限,不能及时配合 AGV 运输作业,造

成 AGV 等待。

(3) 当 AGV 数量一定时,适应度值随着双小车岸桥数量的增加而减少。这是因为随着双小车岸桥数量的增加,岸桥前小车将任务卸载至中转平台,岸桥后小车将其放置于 AGV 上,期间任务连续,并没有造成 AGV 等待岸桥后小车的情况。但是,当双小车岸桥的数量较多时,AGV 运输能力的限制会导致后小车需要等待 AGV。

## 5 结 语

本文针对 AGV 调度,基于任务作业最小化建立数学模型,设计了 PSO,从双小车岸桥作业及箱区 RMG 作业时间进行优化分析,在任务数量变化的情况下,改变双小车岸桥数量和 AGV 数量,进行计算。算例表明,卸船时间随着任务的数量的增加而增加,随着 AGV 的数量的增加而减少,但是增加到一定程度时卸船时间反而增加。通过与 CPLEX 的对比分析,证明了本文所提模型和算法的有效性,并能减少卸船作业时间,提高码头运作效率。

在整个作业过程中,并没有设置交接区且是在已知卸船作业顺序情况下进行双小车和 AGV 的调度,AGV 等待的时间过长,阻碍了码头整体效率,且自动化码头调度问题同时还受到岸桥数量、堆场设备数量配置及其他资源分配和调度的影响。此外,码头作业装卸流程和 AGV 运输过程所造成的拥堵、冲突和死锁问题将是以后研究的重点。

## 参 考 文 献

- [1] 邱跃龙,陶德馨. 基于时间 Petri 网的集装箱码头 AGV 调度系统建模研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2006, 30(6): 958-960.
- [2] 张煜,王少梅. 自动化集装箱码头中自动导引小车的交通策略研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007, 31(4): 641-644.
- [3] Xin J, Negenborn R R, Corman F, et al. Control of interacting machines in automated container terminals using a sequential planning approach for collision avoidance[J]. Transportation Research Part C, 2015, 60: 377-396.
- [4] Angeloudis P, Bell M G H. An uncertainty-aware AGV assignment algorithm for automated container terminals[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2010, 46(3): 354-366.
- [5] Pjevecic D B, Vladislavjevic I, Vukadinovic K, et al. Application of DEA to the analysis of AGV fleet operations in a port container terminal[J]. Procedia—Social and Behavioral Sciences, 2011, 20(6): 816-825.
- [6] 康志敏. 集装箱自动化码头 AGV 路径优化和调度研究[D]. 武汉理工大学, 2011.
- [7] 霍凯歌,张亚琦,胡志华. 自动化码头多载 AGV 调度问题研究[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(3): 244-251.
- [8] 柯冉绚,任亚东. 集装箱码头 AGV 调度优化[J]. 集美大学学报(自然版), 2016, 21(1): 35-41.
- [9] 任亚东. 集装箱码头 AGV 调度研究[D]. 厦门: 集美大学, 2014.
- [10] 靳志宏,李娜. 基于泊位计划的集装箱港口岸桥动态调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(3): 58-64.
- [11] Jin J, Zhang X H. Multi agv scheduling problem in automated container terminal[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2016, 24(1): 32-38.
- [12] Kim J, Choe R, Ryu K R. Multi-objective optimization of dispatching strategies for situation-adaptive AGV operation in an automated container terminal[C]// Proceedings of the 2013 Research in Adaptive and Convergent Systems. ACM, 2013: 1-6.
- [13] 梁承姬,李晔,汤鹏飞. 考虑双小车岸桥中转平台的 AGV 调度问题研究[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(4): 1056-1061.
- [14] 宗辰光,于培培,费利鹏,等. 基于多层编码粒子群—遗传算法融合的 AGV 调度问题研究[J]. 机电工程技术, 2016, 45(4): 11-14.
- [15] 杨勇生,冯有勇,梁承姬,等. 自动化集装箱码头自动导引小车与轨道式龙门起重机的协同调度[J]. 上海海事大学学报, 2017, 38(2): 1-6.
- [16] 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, 41(2): 589-597.
- [17] 刘光. 基于多目标粒子群算法的港口调度系统设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [18] 李军军,许波桢,杨勇生,等. 多自动导引车路径规划的诱导蚁群粒子群算法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(12): 2758-2767.
- [19] 吴烈阳,俞智慧,万佳,等. 一种新改进的粒子群优化算法[J]. 科技广场, 2011(11): 17-20.