

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

杨勇生^a, 冯有勇^a, 梁承姬^a, 许波桅^a, 李军军^b

(上海海事大学 a. 物流科学与工程研究院; b. 商船学院, 上海 201306)

摘要: 为解决自动导引小车 (Automated Guided Vehicle, AGV) 与轨道式龙门起重机 (Rail-Mounted Gantry Crane, RMG) 的协同调度问题, 考虑 AGV 和 RMG 的任务分配约束, 以卸船作业最小完工时间为目标, 建立混合整数规划 (Mixed Integer Programming, MIP) 模型. 改变 AGV, 岸桥和箱区数量的配置, 得出不同条件下的完工时间. 对该问题设计两组算例: 小规模算例采用 CPLEX 软件和遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 分别进行求解, 通过结果对比验证 GA 的有效性; 大规模算例采用 GA 求解, 给出自动化码头设备调度优化方案. 分析结果表明, 卸船完工时间随着卸船任务量的增加而增加, 随着 AGV, 岸桥和箱区数量的增加而减少, 且 AGV 和岸桥数量的增加对完工时间的影响大于箱区数量的增加时完工数量的影响.

关键词: 自动导引小车 (AGV); 堆场箱区; 协同调度; 混合整数规划 (MIP); 遗传算法 (GA)

中图分类号: U656.135; U691.34

文献标志码: A

Integrated scheduling of automated guided vehicles and rail-mounted gantry cranes at automated container terminals

YANG Yongsheng^a, FENG Youyong^a, LIANG Chengji^a, XU Bowei^a, LI Junjun^b

(a. Institute of Logistics Science & Engineering, b. Merchant Marine College,
Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: For the integrated scheduling issue of Automated Guided Vehicles (AGVs) and Rail-Mounted Gantry Cranes (RMGs), a Mixed Integer Programming (MIP) model is proposed so as to minimize the makespan of unloading operation with task allocation constraints of AGVs and RMGs. Changing the numbers of AGVs, quay cranes and blocks, the makespans under different conditions are obtained. Two groups of examples are performed. The small-sized examples are solved by CPLEX software and Genetic Algorithm (GA) respectively, and the validity of GA is verified by comparing the results. The large-sized examples are solved only using GA, and the equipment scheduling scheme at an automated container terminal is given. The results show that the makespan increases with the increase of unloading task, and de-

收稿日期: 2016-08-30 修回日期: 2016-12-21

基金项目: 国家自然科学基金 (61540045); 教育部人文社会科学研究项目 (15YJC630145, 15YJC630059); 上海市自然科学基金 (15ZR1420200); 上海市科学技术委员会科技创新行动计划 (14170501500, 16DZ2340400, 16DZ2349900, 14DZ2280200); 上海市人才发展基金 (201518)

作者简介: 杨勇生 (1965—), 男, 江西南昌人, 教授, 博导, 博士, 研究方向为物流管理与工程, (E-mail) ysyang@shmtu.edu.cn

creases with the increase of the numbers of AGVs, quay cranes and blocks, where the effects of the increase of the numbers of AGVs and quay cranes on the makespan are greater than that of the increase of the number of blocks.

Key words: Automated Guided Vehicle (AGV); block; integrated scheduling; Mixed Integer Programming (MIP); Genetic Algorithm (GA)

0 引言

由于劳动力成本上升、船舶大型化和码头作业高效化等多重原因的影响,国内外已经掀起了自动化集装箱码头(简称自动化码头)研究的热潮.近年来,自动化码头成为中国各港口重点建设对象,如:厦门远海自动化码头已建成,目前处于调试阶段;上海洋山四期自动化码头正在建设中.自动导引小车(Automated Guided Vehicle, AGV)是一种典型的水平运输设备,装备有电磁、激光等自动导引装置,沿着规定的导引路径在岸桥与堆场间来回作业,完成集装箱装卸任务.本文针对卸船作业过程,研究AGV与轨道式龙门起重机(Rail-Mounted Gantry Crane, RMG)的协同调度问题.

目前,国内外学者对自动化码头AGV调度已有一定的研究.单独研究AGV调度的有:CHOE等^[1]以AGV空驶距离最短和岸桥作业时间最短为优化目标,提出一种基于人工神经网络的在线学习算法,实时选择最优的AGV调度方案;KIM等^[2]以任务的总延迟时间和AGV的总运输成本最小为优化目标,采用整数规划模型对自动化码头AGV的静态调度问题进行了研究;ANGELOUDIS等^[3]对不确定环境下自动化码头AGV任务分配问题提出了一种滚动时域的策略,最大限度地减少船舶的在港时间,提高自动化码头的作业效率;MIYAMOTO等^[4]主要考虑AGV在自由路径上的调度,考虑缓冲区的容量限制,提出了本地搜索和随机搜索的方法并进行评估;邱跃龙等^[5]在分析自动化码头AGV工作的基础上,建立了基于Petri网的AGV运输路径模型,并对其进行了系统性能分析;马越汇等^[6]为研究不确定环境下自动化码头AGV调度与配置问题,建立了以最小化最末任务结束时间为目标的基本模型,并通过算例证明了模型的有效性和实用性;霍凯歌等^[7]研究了自动化码头多载AGV调度问题,以最小化作业费用为目标,建立了混合整数规划模型,通过Gurobi和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)求解;康志敏^[8]提出在作业面调度模式下,考虑集装箱装卸并行的作业工艺,建立以等待时间最少为目标的AGV调度模型,并利用GA进行求解;柯冉绚等^[9]为解决

集装箱码头AGV调度优化问题,建立以无效时间最短为原则的数学模型,采用NetLogo软件进行仿真,比较了“作业线”与“作业面”两种AGV调度模式.

相比单独研究AGV调度,研究AGV与场桥或岸桥集成调度的很少,其中最具代表的有:MEERSMANS等^[10]最早提出解决自动化码头AGV,岸桥和场桥集成调度问题,采用分支定界和定向搜索方法在合理的时间内求出最小完工时间;WU等^[11]和LUO等^[12]采用GA研究岸桥与AGV的集成调度,考虑边装边卸和只卸不装两种作业模式,有效减少了船舶在港时间;XIN等^[13]提出一种方法论,在提高自动化码头作业效率的同时减少AGV,岸桥和自动堆垛机的能源消耗,通过仿真论证了该方法的有效性.

传统码头与垂岸式自动化码头布局的不同使集卡与AGV的调度方式有着很大的差别:AGV行驶路径比较固定,而集卡调度路径相对比较灵活,可根据实时道路交通状况改变路径.随着AGV数量的增加,AGV之间发生死锁与冲突的概率变大,给AGV调度带来很大的难度,并且随着装卸设备的改进,岸桥和场桥的结构发生了显著变化.因此,研究新的装卸设备具有重要的实用价值.本文主要考虑的是双小车岸边起重机、AGV和接力式双轨道龙门起重机等3种自动化码头设备的调度问题.

1 问题描述

垂岸式自动化码头包含泊位区、岸桥作业区、堆场箱区、AGV水平运输区等区域,其布局见图1.

本文采用的岸桥是双小车岸边起重机.与传统岸桥不同,双小车岸边起重机有2台小车,一般将靠近海侧的称为海侧小车,另一台称为岸侧小车.岸桥采用接力式的作业方式,海侧小车将集装箱从船卸至中转平台,随即岸侧小车将中转平台上的集装箱卸至AGV.由于海侧小车不用等待AGV,可以连续进行卸船作业,因此这种卸箱工艺能最大程度地减少船舶在港时间.本文采用的场桥是接力式双轨道龙门起重机,每个箱区配置2台,分别记为RMG1和RMG2.两台RMG互相合作完成任务作业,具体流程为:首先AGV通过水平运输将集装箱运输到堆场

交接区,接着 RMG1 将集装箱从 AGV 上卸下,放到箱区的暂存区;接着 AGV 回到岸桥的交接区运输下一个集装箱,与此同时, RMG2 将暂存区的集装箱卸到指定位置,直到完成所有的卸箱任务.本文主要针对进口箱作业,已知岸桥卸箱作业顺序,结合岸桥、AGV 和 RMG 等 3 种设备,建立以最小化最末卸箱任务结束时间为目标的混合整数规划模型,采用 CPLEX 软件和 GA 进行求解,并给出相应的调度方案.

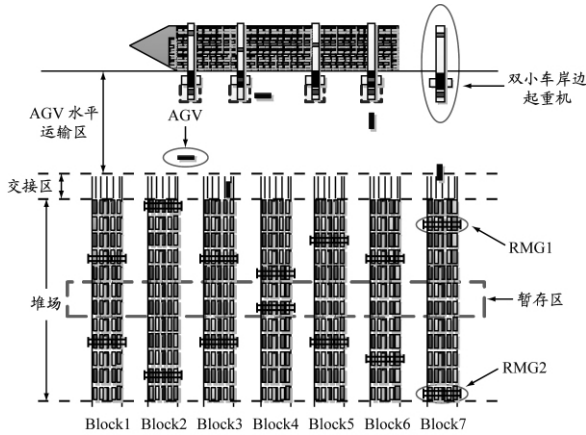


图1 垂岸式自动化码头布局

2 模型建立

2.1 模型假设

根据自动化码头的实际情况,对问题进行合理的简化.在实际卸船过程中,海侧小车、AGV 和 RMG2 的运行时间与集装箱初始位置(船上位置)和最终位置(箱区位置)有关,因此可以假设其运行时间在一个范围内.^[14]

假设:(1)提前分配岸桥给集装箱船,且已知岸桥卸箱作业顺序;(2)海侧小车取箱至中转平台的时间在一个范围内;(3)岸侧小车取箱时间不计,且从中转平台取箱放到 AGV 上的时间已知;(4)AGV 从岸桥交接区行驶至堆场交接区的时间在一个范围内;(5)RMG1 取箱时间不计,且取箱至暂存区的时间已知;(6)RMG2 取箱时间不计,且将集装箱放至指定位置的时间在一个范围内;(7)当 AGV 开始下一个卸箱作业时,若没有可用岸桥和 RMG,则 AGV 需要等待,同理,若岸桥和 RMG 没有可用的 AGV,则岸桥和 RMG 也要等待;(8)AGV 可以服务任何一个岸桥,集装箱可以堆存到任何一个箱区.

2.2 模型参数

称每卸载 1 个集装箱为岸桥完成 1 个任务. N 为任务集合, $N = \{1, 2, \dots, n\}$, $i, j \in N$; K 为所有岸桥

的集合; B 为所有可用箱区的集合, $b \in B$; S 为虚拟开始岸桥; F 为虚拟结束岸桥; V 为所有可用 AGV 的集合, $v \in V$; $O_S = K \cup \{S\}$, $O_F = K \cup \{F\}$, $O = K \cup \{S, F\}$; $k, l \in O$; φ 为可用 AGV 的总数; γ 为可用箱区的总数; λ 为分配给箱区 b 的任务数; u_{ik} 为岸桥 k 开始执行第 i 个任务的时刻; t_{ik} 为海侧小车将船上的集装箱卸到中转平台上所需的时间; T_1 为岸侧小车将中转平台上的集装箱卸到 AGV 上花费的时间; r_{ik} 为 AGV 执行岸桥 k 的第 i 个任务的时刻; t_{kb} 为 AGV 从岸桥 k 运行到箱区 b 交接区所需要的时间; d_{ik} 为 AGV 到达箱区交接区的时刻; T_2 为 RMG1 将集装箱卸到暂存区所需时间; e_{ik} 为 RMG2 开始执行岸桥 k 的第 i 个任务的时刻; h_{ik} 为 RMG2 将岸桥 k 的第 i 个集装箱运到指定位置所需的时间; f_{ik} 为完成岸桥 k 的第 i 个任务的时刻; M 是一个较大的整数.

决策变量: $x_{ikjl} \in \{0, 1\}$, $x_{ikjl} = 1$ 表示 AGV 完成岸桥 k 的第 i 个任务后接着执行岸桥 l 的第 j 个任务,否则 $x_{ikjl} = 0$; $\beta_{ikv} \in \{0, 1\}$, $\beta_{ikv} = 1$ 表示岸桥 k 的第 i 个任务分配给编号为 v 的 AGV, 否则 $\beta_{ikv} = 0$; $z_{ikmb} \in \{0, 1\}$, $z_{ikmb} = 1$ 表示岸桥 k 的第 i 个任务是箱区 b 的第 m 个任务, 否则 $z_{ikmb} = 0$; $y_{ikb} \in \{0, 1\}$, $y_{ikb} = 1$ 表示岸桥 k 的第 i 个任务落在箱区 b 上, 否则 $y_{ikb} = 0$; $w_{ikjl} \in \{0, 1\}$, $w_{ikjl} = 1$ 表示 RMG 完成岸桥 k 的第 i 个任务后再去执行岸桥 l 的第 j 个任务, 否则 $w_{ikjl} = 0$; $\sigma_{ikb} \in \{0, 1\}$, $\sigma_{ikb} = 1$ 表示岸桥 k 的第 i 个任务分配给编号为 b 的箱区, 否则 $\sigma_{ikb} = 0$.

2.3 基本模型

$$\min T \mid T = \max_{k \in K} \{F_k - S_k\} \quad (1)$$

s. t.

$$F_k = \max_{k \in O_F} \{f_{ik}\}, \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$S_k = \min_{k \in O_S} \{r_{ik}\}, \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{l \in O_F} \sum_{j=1}^n x_{ikjl} = 1, \quad \forall i \in N, \quad k \in O_S \quad (4)$$

$$\sum_{k \in O_S} \sum_{i=1}^n x_{ikjl} = 1, \quad \forall j \in N, \quad l \in O_F \quad (5)$$

$$\sum_{v=1}^{\varphi} \beta_{ikv} = 1, \quad \forall i \in N, \quad k \in O_S \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \beta_{ikv} = 1, \quad \forall v \in V, \quad k \in O_F \quad (7)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{m=1}^{\lambda} z_{ikmb} = 1, \quad \forall i \in N, \quad k \in O \quad (8)$$

$$\sum_{k \in O} \sum_{i=1}^n z_{ikmb} \geq 1, \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, \lambda\}, \quad b \in B \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^{\lambda} z_{ikmb} = y_{ikb}, \quad \forall i \in N, \quad b \in B \quad (10)$$

$$\sum_{l \in O_F} \sum_{j=1}^n w_{ikjl} = 1, \quad \forall i \in N, \quad k \in O_S \quad (11)$$

$$\sum_{k \in O_S} \sum_{i=1}^n w_{ikjl} = 1, \quad \forall j \in N, \quad l \in O_F \quad (12)$$

$$\sum_{b=1}^y \sigma_{ikb} = 1, \quad \forall i \in N, \quad k \in O_S \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{ikb} = 1, \quad \forall b \in B, \quad k \in O_S \quad (14)$$

$$u_{ik} + t_{ik} + T_1 \leq r_{ik}, \quad \forall i \in N, \quad k \in O \quad (15)$$

$$r_{ik} + \sum_{b \in B} t_{kb} y_{ikb} \leq d_{ik}, \quad \forall i \in N, \quad k \in O \quad (16)$$

$$d_{ik} + T_2 \leq e_{ik}, \quad \forall i \in N, \quad k \in O \quad (17)$$

$$d_{ik} + \sum_{b \in B} t_{lb} y_{ikb} \leq r_{jl} + M(1 - x_{ikjl}), \quad \forall i, j \in N, \quad k \in O_S, \quad l \in O_F \quad (18)$$

$$d_{ik} + 2T_2 \leq d_{jl} + M(1 - w_{ikjl}), \quad \forall i, j \in N, \quad k \in O_S, \quad l \in O_F \quad (19)$$

$$e_{ik} + h_{ik} = f_{ik}, \quad \forall i \in N, \quad k \in O \quad (20)$$

$$u_{i(k+1)} - u_{ik} = t_{ik} + t_{i(k+1)}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n-1\}, \quad k \in O \quad (21)$$

$$u_{ik} \geq 0, \quad r_{ik} > 0, \quad d_{ik} > 0, \quad e_{ik} > 0, \quad f_{ik} > 0, \quad \forall i \in N, \quad k \in O \quad (22)$$

基本模型是一个混合整数规划模型^[12]。令岸桥卸第1个集装箱的时刻为0, 即 $u_{1k} = 0, \forall k \in O$ 。式(1)表示最小化卸船任务的完工时间; 式(2)表示岸桥 k 完成所有任务的时刻 (F_k) 与完成每个任务的时刻的关系; 式(3)表示岸桥 k 开始执行任务的时刻 (S_k) 与每个任务开始的时刻的关系; 式(4)表示 AGV 完成1个集装箱运输任务后还有1个集装箱运输任务; 式(5)表示 AGV 开始集装箱运输任务之前有1个集装箱运输任务; 式(6)表示每个集装箱运输任务只能由1辆 AGV 完成; 式(7)表示每辆 AGV 每次只能完成1个集装箱运输任务; 式(8)表示每个待卸集装箱都会堆存在堆场箱区; 式(9)表示每个箱区至少会有1个卸箱任务; 式(10)构建了1个中间变量用来表示2个决策变量之间的关系; 式(11)表示 RMG 完成1个卸箱任务后还有1个卸箱任务; 式(12)表示 RMG 开始执行卸箱任务前有1个卸箱任务; 式(13)表示每个集装箱只能堆存在1个箱区上; 式(14)表示 RMG 每次只能完成1个卸箱任务 (RMG 每次只能卸1个集装箱); 式(15)表示在岸侧将集装箱放到 AGV 上后, AGV 才能开始执行任务; 式(16)表示 AGV 到达堆场交接区的时刻与 RMG1 开始作业时刻的关系; 式(17)表示 RMG1 将集装箱运到暂存区的时刻与 RMG2 开始作

业时刻的关系; 式(18)表示当 AGV 完成上一个集装箱运输任务再回到下一个集装箱运输任务指定岸桥缓存区后, 才能开始执行下一个任务; 式(19)表示 RMG1 的下一个卸箱任务开始时刻与上一个卸箱任务开始时刻的关系; 式(20)表示完成任务的时刻; 式(21)表示岸桥执行两个相邻任务的开始时刻关系; 式(22)表示时间参数的范围。

3 GA 求解

本文所提出的问题涉及岸桥、AGV 和 RMG, 因此采用多层染色体及整数编码的方式表示自动化码头调度问题。假设有2台岸桥, 每台岸桥有9个卸箱任务, 1~9为岸桥1的任务, 10~18为岸桥2的任务, 采用3辆 AGV 进行水平运输, 将集装箱随机卸到3个箱区。第 i 个卸箱任务的编码 v, b 表示第 v 辆 AGV 将1个集装箱运送到箱区 b 。染色体示例如图2所示。根据箱区对染色体进行解码, 即将分配给不同箱区的集装箱进行适应度值的计算, 然后对适应度值进行比较, 最大的适应度值即为所求目标函数。

岸桥任务	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
AGV 编号	3	3	1	1	2	3	2	2	1	1	3	2	2	1	3	2	2	3
箱区编号	3	3	3	1	1	3	3	2	1	2	1	1	3	2	3	1	2	3

图2 染色体示例

由于每个卸箱任务可以被任何1辆 AGV 和任何1台 RMG 服务, 为提高计算最优解的效率, 交叉操作采用两点交叉原则 (即只需要对染色体的 AGV 编号和箱区编号进行交叉操作), 变异操作是针对单条染色体进行的 (即只要对染色体中 AGV 编号和箱区编号进行变异操作)。

交叉操作的具体做法为: 选择2条父代染色体, 随机产生2个切点位置, 交换2个切点位置的 AGV 编号和箱区编号, 得到子代染色体。变异操作的具体做法为: 随机选择1条父代染色体, 确定其中2个变异点, 交换2个变异点相对应的子串, 得到子代染色体。

4 算例分析

首先对参数进行初步设定。对小规模问题 (卸箱任务较少), 采用 MATLAB 中的 YALMIP 工具箱结合 CPLEX 12.2 求解器进行精确求解, 同时采用 GA 进行近似求解, 通过对两种结果进行对比来验证 GA 的有效性。随着问题规模的扩大, 即卸箱数量增加, 很难采用精确求解方法解决问题, 故采用 GA 获得满意解。

4.1 参数设定

卸箱数量为4~200个,4~20个集装箱卸载任务视为小规模问题,21~200个集装箱卸载任务视为大规模问题,AGV数量为3~10辆,箱区数量为2~7个,岸桥数量为2~5台.海侧小车处理集装箱的时间服从均匀分布 $U(30\text{ s}, 70\text{ s})$;RMG2处理集装箱的时间服从均匀分布 $U(80\text{ s}, 140\text{ s})$;AGV行驶时间(从岸桥交接区到堆场交接区的时间)服从均匀分布 $U(20\text{ s}, 90\text{ s})$;岸侧小车和RMG1处理集装箱时间是确定的,分别为20 s和25 s. GA参数设置:交叉概率 $P_c=0.8$,变异概率 $P_m=0.05$,初始种群为50,最大迭代次数为200.

4.2 小规模算例

小规模问题集装箱任务为4~20个,分别采用CPLEX和GA进行求解.由于GA求解结果存在随机误差,所以为减小这个随机误差,每个算例运行20次,记录其平均运算时间和平均最优适应度值.最优适应度值差异表示采用GA求得的最优适应度值与采用CPLEX得到的精确解之间的差异程度.详细的计算结果见表1.

表1 CPLEX与GA对比

算例 编号	卸箱 数量	AGV-岸 桥-箱区 数量	CPLEX		GA		最优适 应度值 差异/%
			运行 时间/s	精确 解/s	运行 时间/s	最优适应 度值/s	
1	4	2-2-2	0.27	347	2.12	349	0.57
2	5	2-2-2	0.24	457	3.25	466	1.90
3	6	2-2-2	0.69	494	2.35	514	4.00
4	7	2-2-2	1.11	536	3.23	562	4.80
5	8	3-2-3	3.32	568	4.56	588	4.10
6	9	3-2-3	6.57	593	5.59	611	3.00
7	10	2-2-2	10.23	711	3.07	756	6.30
8	10	2-2-3	11.35	737	2.58	768	4.20
9	15	3-2-2	104.54	1 018	3.87	1 035	1.70
10	20	3-2-2	454.61	1 152	4.15	1 201	4.30
11	20	4-2-3	800.29	1 023	4.62	1 033	1.00
12	30	4-3-2	-	-	6.73	1 678	-

以算例5为例,共有8个集装箱任务,3辆AGV,2台岸桥和3个箱区.利用CPLEX可得到AGV最优调度方案:AGV1的调度方案为(1,1)→1,(1,3)→1,(2,2)→2;AGV2的调度方案为(2,1)→2,(2,3)→1,(1,4)→2;AGV3的调度方案为(1,2)→1,(2,4)→2.也就是说,AGV1执行岸桥1的第1个任务到达箱区1,执行岸桥1的第3个任务到达箱区1,执行岸桥2的第2个任务到达箱区

2.同理可得AGV2和AGV3的具体调度方案.利用CPLEX求解该算例的运行时间为3.32 s,精确解为568 s.

从算例1~3可知,当卸箱数量较小时,CPLEX能很快计算出结果.然而,随着卸箱数量的增加(如算例9和10),CPLEX的求解时间越来越长,当卸箱数量达到30个时,CPLEX无法在可接受的时间内得到精确解.从算例7和8可知,当卸箱数量相同时,箱区数量增加使CPLEX的求解时间变长.再观察GA的性能:随着卸箱数量的增加,GA的求解时间并没有随着卸箱数量的增加而剧烈变化,几乎稳定在2~7 s之间;利用GA求得的最优适应度值与利用CPLEX求得的精确解差别不大,最大差别出现在算例7,也只有6.3%,其他11个算例的平均最优适应度值差异为3.26%.以上结果表明,GA对小规模算例是有效的.

4.3 大规模算例

采用CPLEX很难在可接受的时间内求得大规模算例的精确解,因此在GA对小规模算例有效的基础上,采用GA对大规模问题进行求解.与小规模算例一样,每个算例运行20次,取其平均值来减小误差.结果见表2.

表2 大规模算例结果

算例 编号	卸箱 数量	AGV-岸桥- 箱区数量	运行 时间/s	最优适应 度值/s
13	30	4-3-3	6.06	1 555
14	30	4-3-4	7.62	1 410
15	40	3-3-3	6.54	2 386
16	40	4-3-3	8.02	2 096
17	50	4-2-4	8.72	2 629
18	50	4-3-4	10.23	2 399
19	60	5-3-4	14.76	2 689
20	60	4-3-3	13.70	3 076
21	80	6-3-3	18.34	3 066
22	80	7-3-3	15.82	2 847
23	90	5-3-5	17.27	3 808
24	90	6-3-5	14.86	3 537
25	100	7-3-6	19.76	3 206
26	100	7-4-6	19.83	2 928
27	150	8-4-5	25.63	4 523
28	150	8-4-6	24.50	4 420
29	200	9-5-7	29.45	5 086
30	200	10-5-7	32.86	4 668

通过表2可以看出,对大规模问题:GA能够在较短的时间内得到近似最优解;最优适应度值随着卸箱数量的增加而增大;当卸箱数量相同时,随着AGV,岸桥和箱区数量的增加,最优适应度值变小.

从算例 13 和 14 可知,当卸箱数量、AGV 数量和岸桥数量不变时,箱区数量的增加使最优适应度值减小;从算例 17 和 18 可知,当卸箱数量、AGV 数量和箱区数量不变时,岸桥数量增加会减小最优适应度值;从算例 21 和 22 可知,当卸箱数量、岸桥数量和箱区数量不变时,增加 AGV 数量会使最优适应度值减小。综合以上分析可以发现,岸桥和 AGV 数量变化对最优适应度值的影响大于箱区数量变化的影响。因此,在实际的卸船作业中,岸桥和 AGV 的重要性略大于箱区装卸设备(RMG)的重要性,但同时需要三者之间的协调作业以提高作业效率。

图 3 为算例 13 利用 GA 进行一次求解得到的收敛图。

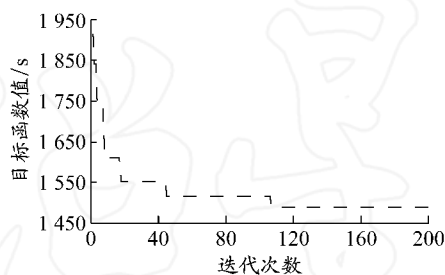


图 3 GA 收敛图

参考文献:

- [1] CHOE R, KIM J, RYU K R. Online preference learning for adaptive dispatching of AGVs in an automated container terminal [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 38: 647-660.
- [2] KIM J, CHOE R, RYU K R. Multi-objective optimization of dispatching strategies for situation-adaptive AGV operation in an automated container terminal [C] // *Association for Computing Machinery (ACM). Research in Adaptive and Convergent Systems*. New York: ACM, 2013: 1-6.
- [3] ANGELOUDIS P, BELL M G H. An uncertainty-aware AGV assignment algorithm for automated container terminals [J]. *Transportation Research Part E*, 2010, 46(3): 354-366.
- [4] MIYAMOTO T, INOUE K. Local and random searches for dispatch and conflict-free routing problem of capacitated AGV systems [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 91: 1-9.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 康志敏. 集装箱自动化码头 AGV 路径优化和调度研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [9] 柯冉绚, 任亚东. 集装箱码头 AGV 调度优化 [J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2016, 21(1): 35-41.
- [10] MEERSMANS P J M, WAGELMANS A P M. Effective algorithms for integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals [C] // *ERIM Report Series Research in Management*. Rotterdam: Erasmus Research Institute of Management, 2001: 31.
- [11] WU Yue, LUO Jianbin, ZHANG Dali, et al. An integrated programming model for storage management and vehicle scheduling at container terminals [J]. *Research in Transportation Economics*, 2013, 42(1): 13-27.
- [12] LUO J, WU Y, MENDES A B. Modelling of integrated vehicle scheduling and container storage problems in unloading process at an automated container terminal [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 94: 32-44.
- [13] XIN J, NEGENBORN R R, LODEWIJKS G. Energy-aware control for automated container terminals using integrated flow shop scheduling and optimal control [J]. *Transportation Research Part C*, 2014, 44: 214-230.
- [14] HAN Y, LEE L H, CHEW E P, et al. A yard storage strategy for minimizing traffic congestion in a marine container transshipment hub [J]. *OR Spektrum*, 2008, 30: 697-720.

(编辑 赵勉)