

考虑装卸顺序的岸桥与集卡协调调度问题研究^{*}

梁承姬, 沈佳杰[†]

(上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

摘要: 为解决集装箱港口岸桥和集卡资源紧张的现状, 针对岸桥和集卡协调调度问题, 综合考虑集装箱顺序及岸桥干涉、集卡作业面调度等约束, 建立了一个以最大完工时间最小化为目标的混合整数规划模型, 在使用遗传算法求解模型时采用了一种较为新颖的编码方式, 同时提出了相应的交叉与变异方法。最后针对不同规模问题, 比较了遗传算法(GA)与粒子群算法(PSO)求解, 实验结果表明对于该问题模型遗传算法在解的优劣性及运行时间上优于粒子群算法。

关键词: 岸桥调度; 集卡调度; 协调调度; 遗传算法; 粒子群算法

中图分类号: TP301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2016)12-3591-05

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2016.12.017

Study on the problem of quay cranes and container trucks scheduling with the consideration of handling order

Liang Chengji, Shen Jiajie[†]

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

Abstract: In order to solve the shortages of quay cranes and container trucks in the container ports, the paper proposed a mixed integer liner programming model in connection with the scheduling of quay cranes and container trucks, aiming to minimize the maximum completion time. The model also considered the interference of quay crane and containers' priority and the truck operation scheduling. This paper also proposed a new type of encoding mode and the corresponding crossover and mutation method. Then, genetic algorithm(GA) was used to solve this model. According to different scales problem, this paper compared the GA and particle swarm algorithm (PSO). Finally, the result shows that GA is more effective to solve this model.

Key words: quay cranes scheduling; trucks scheduling; coordinated scheduling; GA; PSO

0 引言

随着经济飞速发展, 海运贸易量愈发增大, 集装箱需求量也不断上升, 对集装箱码头的效率和效益带来严峻挑战。集卡调度和岸桥调度是集装箱码头两个重要操作, 它们作业效率的高低对集装箱码头运营有着重要影响。合理的岸桥与集卡调度对集装箱码头竞争力的提升以及效率的提高有着重要意义。

因岸桥调度问题的重要意义, 它得到较多关注, 而集卡调度研究相对较少。范志强等人^[1]研究岸桥支援对船舶装卸作业效率的影响, 采用一种对算法搜索空间进行讨论的遗传算法求解, 并与问题的下界比较。Fu等人^[2]建立一个岸桥分配和调度数学模型, 并将启发式算法的解与拉格朗日松弛进行比较。康志敏等人^[3]研究港口集装箱码头集卡调度问题, 采用一种新的遗传算法编码方式。尚晶^[4]研究集装箱码头双40英尺岸桥作业特点, 采用了自适应交叉和变异概率的遗传算法求解。靳志宏等人^[5]充分考虑岸桥作业不能交叉、有优先级装卸任务等现实约束, 构建了非线性数学规划模型, 并设计了基于任务排序的染色体结构。也有一部分论文讨论两者协调调度问题: 曾庆成等人^[6]研究提高作业调度的整体性问题, 采用

集装箱码头作业调度双层规划模型及求解算法。Tang等人^[7]建立一个混合整数线性规划模型, 并运用改进的粒子群算法求解。Kaveshgar等人^[8]考虑许多实际操作约束, 建立一个整数规划模型, 并用遗传算法与贪心算法组合求解。Cao等人^[9]考虑只有进口箱问题, 引入基于修改的约翰逊规则的启发式算法(MJRHA)及遗传算法寻找最优方案。计明军等人^[10]建立基于岸桥与集卡作业时间最少的优化模型, 设计求解此优化模型的进化算法。

以上文献将集装箱任务划分为多个集装箱簇, 以简化岸桥任务安排。但在实际操作中, 岸桥与集卡处理任务是单个集装箱, 考虑岸桥和集卡协调调度问题时, 应该将岸桥与集卡的装卸处理单位统一起来, 才能更贴近实际问题。

本文的创新点在于将岸桥任务定为单个集装箱, 并考虑集装箱装卸顺序及岸桥干涉等约束, 集卡采用“作业面”调度方法, 建立了一个以最大完工时间最小化为目标的混合整数规划模型, 在使用遗传算法求解模型时采用了一种较为新颖的编码方式, 也提出了相应的交叉与变异方法。最后针对不同规模问题, 比较了遗传算法(GA)与粒子群算法(PSO)求解, 实验结果表明对于该问题模型遗传算法在解的优劣性及运行时间上优于粒子群算法。

收稿日期: 2015-08-26; **修回日期:** 2015-10-13 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(71471110, 71301101); 中国博士后科学基金项目(2014M550084); 上海市科委项目(1417051500)

作者简介: 梁承姬(1970-), 女, 吉林延边人, 教授, 博士, 主要研究方向为物流系统运作计划与优化; 沈佳杰(1983-), 男(通信作者), 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要研究方向为进口运营优化(479416275@qq.com)。

1 问题描述

在传统集装箱码头,集卡通常采用作业线调度方法,即一个岸桥与一组固定集卡联合工作。可能导致岸桥或集卡等待,造成资源浪费。以卸载过程为例,当岸桥卸载完一个集装箱时,所分配的集卡都在工作,则岸桥需要等待集卡到达。相反,若集卡到达时,岸桥还未完成卸载,则集卡需要等待岸桥完成工作。这样的等待会影响集装箱码头生产效率。为此,本文采用作业面调度方法:集卡属于公共资源,不再固定于一个岸桥。如图 1 所示,集卡完成岸桥 1 的运输任务后直接服务岸桥 4,避免岸桥 4 等待。多数文献中岸桥处理任务为:a) 集装箱组;b) 完整的贝位;c) 贝位区域,这些任务通常包含多个集装箱。多少文献并没有考虑集装箱处理顺序。不同处理顺序对最终结果有较大影响。例如同一个贝位中有三个集装箱 1、2、3,因目标堆场不同运输时间分别为 6、5、8 min,岸桥卸载时间为 1 min。假设有一台岸桥,两辆集卡,当卸载顺序为 1、2、3 时,最大完工时间为 15 min;当卸载顺序为 3、1、2 时,最大完工时间为 13 min;当卸载顺序为 1、3、2 时,最大完工时间为 12 min。如图 2 所示。

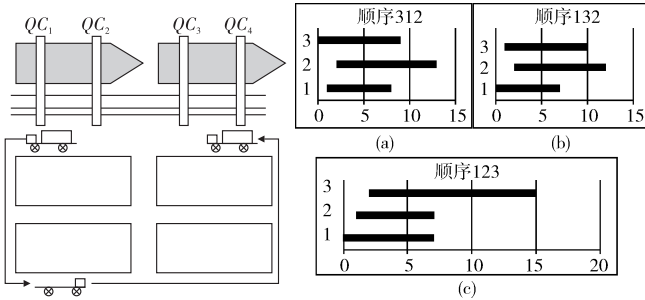


图 1 作业面调度

图 2 不同处理顺序对比图

综上所述,在实际操作中,不同集装箱卸载顺序对系统作业时间有较大影响。实际操作中某些集装箱需遵循一定卸载顺序,例如:考虑船舶安全问题不能先卸载完船舶一侧的集装箱;位于下层的集装箱必须等待上层集装箱卸载后才能卸载;集装箱与集装箱之间有优先级关系。

考虑以上因素,本文将岸桥处理任务设为单个集装箱。岸桥调度问题考虑集装箱装卸顺序,确定岸桥处理任务以及处理顺序。集卡调度问题确定集卡处理任务以及处理顺序。本文考虑以下因素:a) 岸桥必须完成当前贝位所有任务后才能去下一个贝位服务。b) 集装箱之间有优先级,例如:必须先卸载上层的集装箱再卸载下层的集装箱。c) 岸桥在同一轨道移动,岸桥不能冲突。

2 问题模型

在本章中,将建立一个岸桥与集卡协调调度问题的数学模型。作出如下假设:a) 场桥有足够的力量,集卡在堆场无须等待;b) 已知进口箱在堆场存放位置,因此集卡运输时间是已知的。

Q : 岸桥集合 $Q = \{1, 2, \dots, |Q|\}$, 沿码头方向,岸桥按顺序从一端到另一端编号

U_{il} : 岸桥卸载集装箱 i 需要的时间

U_{i2} : 一辆集卡运输集装箱 i 从岸边到堆场,再回到岸边的时间

T : 集卡的集合

M : 一个非常大的数

Φ : 需要卸载的集装箱集合

$\Phi_0: \Phi_0 = \Phi \cup \{0\}$, 0 为所有设备的初始位置(虚拟位置)

$\Phi_F: \Phi_F = \Phi \cup \{F\}$, F 为所有设备的最终位置(虚拟位置)

Ω : 集装箱对集合 (i, j) , i 必须先于 j 卸载

B : 船卸载贝位集合, $B = \{1, 2, \dots, |B|\}$, 与岸桥从同一方向排序

C_b : 贝位 b 上的集装箱集合

$C_{\max}$: 所有集装箱的最大完工时间

C_{il} : 卸载集装箱 i 的完成时间

C_{i2} : 运输集装箱 i 往返的完成时间

d_i : 岸桥放下集装箱 i 的时间,即集卡运输集装箱 i 的开始时间

S_b : 贝位 b 开始时间

F_b : 贝位 b 完成时间

决策变量:

z_{ijq} : 表示岸桥 q 卸载集装箱 i 后立即卸载集装箱 j , 其值为 1; 否则为 0

Z_{iq} : 表示岸桥 q 卸载集装箱 i , 其值为 1; 否则为 0

$y_{bb'}$: 表示贝位 b 在贝位 b' 开始前完成, 其值为 1; 否则为 0

Y_{bq} : 表示岸桥 q 处理贝位 b , 其值为 1; 否则为 0

X_{it} : 表示集装箱 i 由集卡 t 运输, 其值为 1; 否则为 0

x_{ijq} : 表示集卡 t 运输集装箱 i 后立即运输集装箱 j , 其值为 1; 否则为 0

基于上述参数,建立以下模型:

$$\min Z = C_{\max} \quad (1)$$

$$C_{\max} = \max_{i \in \Phi} C_{i2} \quad (2)$$

$$C_{il} + U_{i2} = C_{i2} \quad i \in \Phi \quad (3)$$

$$C_{il} + U_{j2} \leq C_{j2} \quad (i, j) \in \Omega \quad (4)$$

$$S_b + U_{il} \leq C_{il} \quad i \in C_b, b \in B \quad (5)$$

$$F_b \geq C_{il} \quad i \in C_b, b \in B \quad (6)$$

$$M(y_{bb'} + y_{b'b}) \geq \sum_q q Y_{bq} - \sum_k k Y_{b'k} + 1 \quad q, k \in Q, b < b' \in B \quad (7)$$

$$\sum_{q \in Q} Y_{bq} = 1 \quad b \in B \quad (8)$$

$$\sum_{q \in Q} Z_{iq} = 1 \quad i \in \Phi \quad (9)$$

$$Z_{iq} = Y_{bq} \quad i \in \Phi, b \in B, q \in Q \quad (10)$$

$$\sum_{i \in \Phi_F} z_{Oiq} = 1 \quad q \in Q \quad (11)$$

$$\sum_{i \in \Phi_O} z_{iFq} = 1 \quad q \in Q \quad (12)$$

$$\sum_{i \in T} X_{it} = 1 \quad i \in \Phi \quad (13)$$

$$\sum_{i \in \Phi_F} x_{Oiq} = 1 \quad q \in Q \quad (14)$$

$$\sum_{i \in \Phi_O} x_{iFq} = 1 \quad q \in Q \quad (15)$$

$$C_{i2} - U_{i2} = d_i \quad i \in \Phi \quad (16)$$

$$z_{ijq}, x_{ijq}, y_{bb'}, Y_{bq}, X_{it}, Z_{iq} \in \{0, 1\} \quad i, j \in \Phi, q \in Q, t \in T \quad (17)$$

$$S_b \geq 0, C_{il} \geq 0 \quad i \in \Phi, b \in B \quad (18)$$

模型(1)的目标函数是最小化最大完工时间。约束(2)定义了 $C_{\max}$ 。约束(3)确保运输时间。约束条件(4)保证集装箱优先级约束。约束条件(5)申明只要这一贝位任何一个集装箱开始卸载,这个贝位就开始卸载。同样,约束(6)保证贝位所需卸载的集装箱都完成卸载时,这个贝位的任务才结束。约束(7)确保岸桥不冲突。约束(8)明确每个贝位有且只有一个岸桥服务。约束(9)明确每个集装箱有且只有一个岸桥服务,约束(10)保证同一贝位的集装箱由同一岸桥服务。约束(11)和(12)确保每个岸桥从初始状态 0 开始在最终状态 F 结束。约束(13)明确每个集装箱有且只有一个集卡服务。约束(14)和(15)确保每一辆集卡从初始状态 0 开始和在最终状态 F 结束。约束(16)确定集装箱 i 运输开始时间,是岸桥和集卡的连接点。约束(17)和(18)指定变量值范围。

3 遗传算法

3.1 染色体编码

集装箱编码,令 $N = |\Phi|$,因本问题包含岸桥及集卡操作两个部分,采用两段编码,使用 $2N$ 长度的染色体表示解。前 N 个基因代表岸桥分配及作业顺序。每个基因位的值是 1 到 $|Q| + 1$ 之间的一个实数,第 k 个位置的值 X_k 代表集装箱 k 分配给岸桥 $|X_k|$ 。不同贝位的处理顺序根据每一贝位的最小值确定,最小值小的优先处理。同一贝位中的集装箱的处理顺序由小到大排序。后 N 个位置代表对应集装箱所分配的集卡编号。每个基因位的值是 1 到 $|T|$ 之间的整数,第 i ($i > N$) 个位置的值 X_i 代表集装箱 i 由集卡 X_i 运输。如图 3 所示,岸桥 1 处理集装箱 1、2、5;岸桥 2 处理集装箱 4、3。集卡 1 运输集装箱 1、5;集卡 2 运输集装箱 3;集卡 3 运输集装箱 2、4。对于集卡的处理顺序,根据岸桥卸载完成时间来确定。

集装箱编号	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
染色体	1.2	1.4	2.3	2.2	1.7	1	3	2	3	1
岸桥(集卡)编号	1	1	2	2	1	1	3	2	3	1
处理顺序	1	2	2	1	3					

图 3 染色体编码

3.2 初始种群

本文采用随机方式产生初始种群,以确保种群的多样性。考虑同一贝位所有集装箱必须由同一岸桥服务及集装箱优先级约束。随机产生的初始解可能不满足上述约束,产生不可行解。因此,需进行不可行解修复。

例如:假设集装箱 1、2、3 属于一个贝位,4、5 属于一个贝位;集装箱 2 必须先于集装箱 3 卸载。

如图 4 所示为随机产生的一个染色体。在这染色体中集装箱 4、5 违反了同一贝位由同一岸桥服务的约束,需进行修复,将集装箱 5 对应染色体值变为 1.3。集装箱 2 和集装箱 3 则违反优先级约束,将二者对应值交换。修复后的染色体如下图 5 所示。

集装箱编号	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
染色体	2.5	2.4	2.3	1.2	2.3	1	3	2	3	1

图 4 修复前

集装箱编号	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
染色体	2.5	2.3	2.4	1.2	1.3	1	3	2	3	1

图 5 修复后

3.3 适应度函数

本文直接采用目标函数作为适应度值,即最大完工时间。简单明了地对个体优劣进行判断。

3.4 遗传操作

3.4.1 选择

本文采用精英选择,将适应度值高的 25% 染色体直接复制两遍到下一代,接下来 50% 复制一遍到下一代,剩下 25% 直接抛弃。通过该策略确保每代优秀个体不会在种群进化过程中丢失,确保优秀个体进入下一代,加快算法收敛,并且可以保证下一代种群中的最优个体不会比上一代差,使得进化曲线保持单调下降趋势。

3.4.2 交叉

本文所采用的编码方式为两段编码,分为岸桥段以及集卡

段,两段编码方式不同,染色体值也不同。若采用之前交叉方式,两段的界限将被打破,产生非法解。采用两阶段交叉能规避这一问题。岸桥操作部分,即前 N 位染色体,在 0 到 $|B|$ 之间随机选择两个数,即选择两个贝位。将属于这两个贝位的值交叉,生成新的染色体。对应的集卡段染色体值也同步交换,如图 6 所示。但是这种方式会产生不可行解,因为每个贝位中有优先级的集装箱对位置并不相同。此时要对产生的子代进行修复,方法如前文所示。

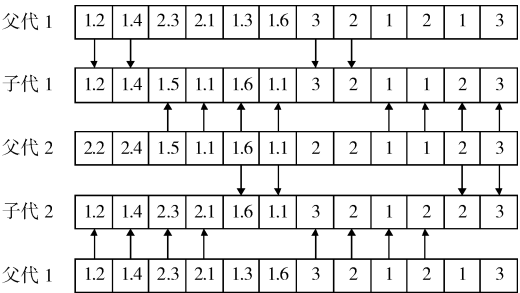


图 6 交叉

3.4.3 变异

与交叉相同,同样采用两阶段变异。在岸桥段,随机产出 0 到 B 的任意两个索引,即贝位号。将这两个贝位所有值交换。在集卡段,随机产生 0 到 N 的两个点,并将这两个点的值交换。如图 7 所示。同样需要对产生的子代进行修复,方法如前文所示。

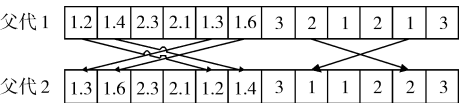


图 7 变异

4 数值实验

遗传算法参数的设置对算法的性能有较大影响,不同问题参数设置不同。本文备选参数为 $pc = 0.5, 0.7, 0.8$, $pm = 0.02, 0.06$ 和 0.1 。基于函数的收敛性及求解时间的长短,通过多次实验,结果如表 1 所示:当 $pc = 0.8$, $pm = 0.1$ 时性能最好。相关参数设置如下:迭代次数 $maxage = 500$ 、交叉概率 $pc = 0.8$ 、变异概率 $pm = 0.1$ 、种群规模为 50 个。

表 1 参数设置

算法	$pm = 0.02$		$pm = 0.06$		$pm = 0.1$	
	最优解	运行时间	最优解	运行时间	最优解	运行时间
$pc = 0.4$	45 min	13.9 s	43 min	13.7 s	41 min	12.8 s
$pc = 0.6$	42 min	14.32 s	41 min	13.31 s	38 min	12.9 s
$pc = 0.8$	41 min	14.5 s	38 min	13.4 s	36 min	12.6 s

4.1 小规模实验

设备最早可利用时间均为 0 时刻。设有 3 台岸桥,12 辆集卡,一艘待卸船舶。共 5 个贝位需要卸载,每个贝位有 5 个集装箱,共 25 个集装箱。岸桥卸载集装箱时间固定,设为 1min。集卡运输时间由集装箱目标位置决定。设集卡运行速度为 5 m/s。如表 2、3 所示。优先级顺序如表 4 所示。

表 2 集装箱目标堆场

堆场	1	2	3
集装箱集合	1,6,9,12,14, 16,21,24	2,5,11, 17,20	3,4,7,8,10,13,15, 18,19,22,23,25

表 3 到堆场的距离

堆场	1	2	3
距离/km	0.9	1.2	1.5

表 4 各贝位内集装箱优先级

贝位	优先级	贝位	优先级
1	3 > 5	4	无
2	6 > 9	5	无
3	13 > 15		

运用 MATLAB 进行计算,最优解为 24 min。

由表 5 可知:岸桥处理集装箱顺序满足优先级约束;岸桥完成一个贝位所有任务后才开始处理另一个贝位任务。表 6 表明:12 辆集卡所接受的任务量较平均,集卡不再隶属于固定岸桥,减少设备间的等待时间。

表 5 岸桥调度结果

岸桥	集装箱处理顺序
1	11,13,14,15,12
2	16,19,20,17,18,22,23,24,25,21
3	3,2,1,4,5,8,7,6,9,10

表 6 集卡调度

集卡	集装箱处理顺序	集卡	集装箱处理顺序
1	17,24	7	3,22
2	19,10	8	5,12
3	11,8	9	18,21
4	2,9	10	13,6
5	4,25	11	16,14,15
6	20,23	12	1,7

GA 收敛情况如图 8 所示。

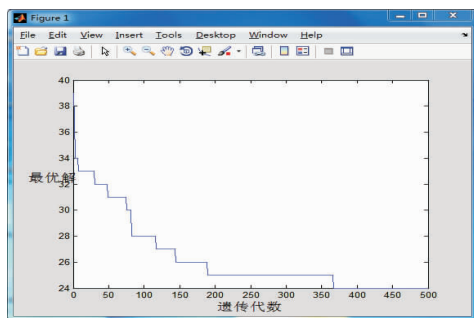


图 8 GA 收敛图

有最大完工时间同样是 24 min 的调度方案,但该方案各岸桥总等待时间为 20 min,图 9 所示的方案岸桥总等待时间为 18 min。如图 10 所示,岸桥调度时没有发生冲突,但岸桥 1 在处理贝位 3 时消耗了大量时间,用时 14 min。相比贝位 1 和 4 的处理时间,岸桥 1 耽误较多时间。若此时有其他船舶需要卸载,岸桥 1 不能及时支援,将延长船舶的在港时间。显而易见,图 9 所示的方案更佳。岸桥越早完成工作,可以越快去支援其他船舶,提高码头的整体工作效率。可见,在评价解的优劣时可以同时参考最大完工时间以及岸桥等待时间。

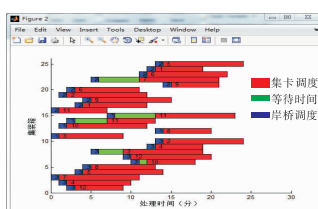


图 9 集成调度结果甘特图

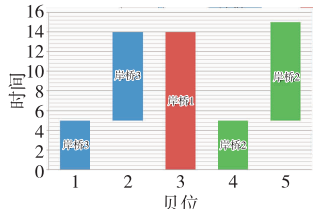


图 10 岸桥调度

4.2 大规模实验

随机生成 100 个集装箱的数值实验。设有 3 台岸桥,12 辆集卡,使用遗传算法求解,结果如表 7、8 所示。

表 7 岸桥处理任务及顺序

岸桥	处理贝位顺序	集装箱处理顺序
1	3,5	56.60.43.53.55.50.52.59.46.48.44.45.47.42.49.54. 51.41.57.58.97.83.96.91.88.87.82.84.95.90.86. 92.89.98.99.81.85.93. 100.94 31.39.23.30.32.21.26.36.28.29.37.35.40.22.33.27.
2	2,4	24.34.38.25.64.66.61.76.73.63.69.71.77.62.74. 70.79.65.68.75.67.72.80.78
3	1	13.16.12.1.14.8.10.18.4.17.15.2.6.11.9.20.3.7.19.5

表 8 集卡处理任务及顺序

集卡编号	处理任务及顺序
1	53.44.57.25.73.2.67
2	16.30.1.36.38.76.69.15.99.72
3	56.52.58.97.94
4	31.32.49.35.96.64.86.92.69.5
5	60.12.45.14.29.91.66.100
6	46.51.28.10.61.63.62.65.3
7	55.54.41.33.27.84.95.6.79.75.7
8	43.23.47.8.40.83.88.4.17.81.93
9	18.90.74.85
10	48.42.22.87.71.98.9.80
11	39.50.21.26.37.34.77.70.20.78
12	13.59.24.82.89.11.19

表 7 和图 11 表示,岸桥调度较好,未产生冲突。岸桥 2 处理完贝位 2 时,岸桥 1 已经移动到贝位 5,岸桥 3 一直在贝位 1,所以岸桥间没有冲突,该调度方案很好地避免了因冲突造成的等待。图 12 调度的甘特图。图 13 收敛图显示了,遗传算法在将近 300 代时开始收敛,收敛于 116 min。

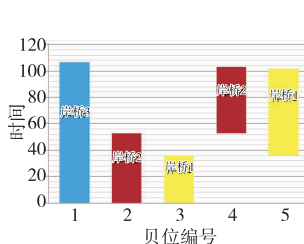


图 11 岸桥调度

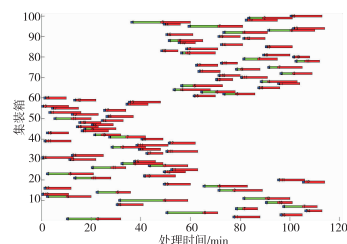


图 12 集成调度结果甘特图

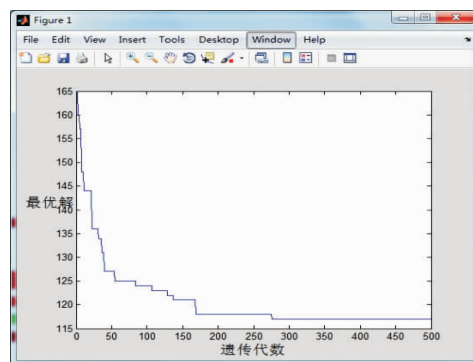


图 13 收敛图

对于集卡,根据表 8 可知集卡分配不大均衡,有些集卡处理了较多个任务,如集卡 7、8;而有部分集卡处理的任务却不多,如集卡 3、9。造成这种现象的一个原因是:每个集装箱目标堆场不同,所需运输时间也不同,集卡被分配到运输时间较长的集装箱时,处理集装箱数量则相对较少;而被分配到相对

较短的集装箱时,处理集装箱数量则较多。

为确定该实验最佳集卡配置,改变集卡数量进行计算,考虑岸桥等待、集卡空闲以及最大完工时间对结果进行比较选择最优解。 C 、 Q 、 T 分别是集装箱、岸桥与卡车的数量。各权重依次为 0.2、0.2 和 0.6。结果如表 9 所示。

表 9 确定最优集卡配置

实验 编号	规模 $C \times Q \times T$	最大完工时间 /min	岸桥总等待时间 /min	集卡总空闲时间 /min	总和
1	100 × 3 × 8	159.4	243.2	361.2	199.76
2	100 × 3 × 10	134.4	239.2	430	193.52
3	100 × 3 × 12	114	186.8	454	182
4	100 × 3 × 14	110.4	168.6	631.6	214.64
5	100 × 3 × 16	103	149.8	734	229.2

由表 9 可见,对于本实验,选择 12 辆集卡为最优。虽然选择 12 辆集卡时最大完工时间并不是最优,但是其集卡空闲时间以及岸桥等待时间都相对较少,资源利用相对充分。而其他方案中,有的最大完工时间太长,可能造成船舶在港时间增长,影响码头的处理效率;有的方案设备利用率太低,造成资源浪费。所以在评价最优方案时,应综合考虑最大完工时间以及设备利用率。

5 算法比较

5.1 小规模问题比较

下面本文用粒子群算法与遗传算法进行对比:粒子群算法编码方式与遗传算法编码方式相同,修复方法也一致。

本文生成九组实验进行两种算法的对比,每组问题运行五次,取平均值。对比结果如表 10 所示。

表 10 遗传算法与粒子群算法求解小规模问题对比

实验 编号	规模 $C \times Q \times T$	结果/min		运行时间/s	
		GA	PSO	GA	PSO
1	25 × 3 × 10	29.6	31.6	14.10	48.92
2	25 × 3 × 12	26	29.8	13.93	46.99
3	25 × 3 × 14	25.4	28.8	13.88	42.12
4	20 × 3 × 10	25.8	27.2	12.56	30.01
5	20 × 3 × 12	22.8	24.4	11.71	29.63
6	20 × 3 × 14	21.4	22.8	11.09	29.25
7	30 × 3 × 10	37	39.8	17.83	68.29
8	30 × 3 × 12	34	36.2	16.68	63.59
9	30 × 3 × 14	31.2	33.4	16.28	59.76

如表 10 所示,对于小型问题遗传算法的解优于粒子群算法。对于最大完工时间,九组实验中,任何一组遗传算法的解都优于粒子群算法,但是这些解相差并不大。对于程序运行时间,九组实验中,粒子群算法运行时间是遗传算法运行时间的几倍,遗传算法在运行时间上有较大优势。

综上,对于小规模问题,遗传算法在结果优劣性以及运行时间两个方面都较优于粒子群算法。

5.2 大规模问题比较

对不同规模问题分别用 GA 和 PSO 求解,并对比。每组问题运行五次,取平均值。结果如表 11 所示。

如表 11 所示,大规模问题中九组算例 GA 的解都优于 PSO 的解。相对于小规模问题,GA 和 PSO 所得的解相对偏差更大。运行时间同小规模问题,两者之间的差距非常明显。

表 11 大规模问题算法比较

编号	规模 $C \times Q \times T$	结果/min		运行时间/s	
		GA	PSO	GA	PSO
1	100 × 3 × 10	134.4	163.8	55.19	182.23
2	100 × 3 × 12	114	147	50.54	172.65
3	100 × 3 × 14	110.4	135.6	48.39	168.34
4	200 × 3 × 10	282.2	353.6	95.65	439.78
5	200 × 3 × 12	242	334.6	89.78	433.43
6	200 × 3 × 14	222.8	295.2	85.86	430.87
7	300 × 3 × 10	439	454.4	157.38	649.98
8	300 × 3 × 12	387.2	431.8	153.64	642.80
9	300 × 3 × 14	342.2	397.4	148.64	639.06

同样,对于大规模问题,遗传算法在结果优劣性以及运行时间两个方面明显优于粒子群算法。

综上,无论是大规模还是小规模问题,遗传算法所获得的解以及获得解的时间都优于粒子群算法。所以遗传算法对于本文提出的岸桥集卡协调调度问题模型更有效。

6 结束语

本文将岸桥处理任务定为单个集装箱,针对岸桥和集卡协调调度问题,综合考虑集装箱顺序及岸桥干涉、集卡作业面调度等约束,建立了一个以最大完工时间最小化为目标的混合整数规划模型,在使用遗传算法求解模型时采用了一种较为新颖的编码方式,也提出了相应的交叉与变异方法。最后针对不同规模问题,比较了遗传算法与粒子群算法求解,实验结果表明对于该问题模型遗传算法在解的优劣性及运行时间上优于粒子群算法。本文的研究仅限于只有卸载箱的单向流问题,未来的研究可以扩展到既有装载又有卸载的双向流问题。并且可以考虑多目标问题,增加岸桥等待时间、集卡空闲时间和成本等考虑因素。

参考文献:

[1] 范志强,乐美龙.最小化最大完工时间与等待时间的岸桥作业调度双目标优化及其遗传算法[J].系统管理学报,2013,22(1):120-127.

[2] Fu Yimin, Diabat A. A lagrangian relaxation approach for solving the integrated quay crane assignment and scheduling problem[J]. Applied Mathematical Modelling, 2015,39(3-4):1194-1201.

[3] 康志敏,吴洪明.港口集装箱码头集卡优化调度研究[J].物流工程与管理,2011,33(2):59-61.

[4] 尚晶.面向双40英尺岸桥的码头集卡调度模型与算法[J].华中科技大学学报:自然科学版,2010,38(11):84-87.

[5] 靳志宏,李娜.基于泊位计划的集装箱码头岸桥动态调度优化[J].交通运输系统工程与信息,2011,11(3):58-64.

[6] 曾庆成,杨忠振.集装箱码头作业调度双层规划模型及求解算法[J].哈尔滨工程大学学报,2007,28(3):277-281.

[7] Tang Lixin, Zhao Jiao, Liu Jiying. Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 236(3):978-990.

[8] Kaveshgar N, Huynh N. Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 159:168-177.

[9] Cao Jinxin, Shi Qixin, Lee Derhorng, et al. Integrated quay crane and yard truck schedule problem in container terminals[J]. Tsinghua Science & Technology, 2010, 15(4):467-474.

[10] 计明军,靳志宏.集装箱码头集卡与岸桥协调调度优化[J].复旦学报:自然科学版,2007,46(4):476-480.