

基于差分进化算法的自动化集装箱码头 AGV 调度问题*

潘迎新¹, 白丹宇², 曾庆成², 谢晨希², 陈周昊²

(1. 大连海事大学 交通运输工程学院; 2. 大连海事大学 航运经济与管理学院, 大连 116026)

摘要:【目的】自动化集装箱码头的水平运输作业是影响港口物流效率的关键环节,通过优化自动导引车(Automated guided vehicle, AGV)的任务分配,减少装卸作业的时间,提高港口生产效率。【方法】在同时考虑集装箱装卸作业的基础上,就 AGV 调度问题建立混合整数规划(MIP)模型,优化目标为极小化岸桥完工时间。考虑到该问题具有 NP 困难性,设计了离散差分进化(DDE)算法进行近似求解。【结果】通过数值仿真验证了 MIP 模型和 DDE 算法的有效性。【结论】结果表明上述模型和算法可以为自动化集装箱码头的装卸作业提供帮助。

关键词:自动化集装箱码头;AGV 调度;差分进化算法

中图分类号:O221.4

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2021)01-0121-09

随着航运业内竞争的日趋激烈以及新兴信息技术的广泛应用,自动化集装箱码头得到了快速发展。自动化集装箱码头主要由岸桥、场桥和自动引导车(Automated guided vehicle, AGV)构成。AGV 是自动化集装箱码头的水平运输设备,它的高效运行可以提高自动化集装箱码头的装卸效率。虽然增加 AGV 的数量可以提高自动化集装箱码头的作业效率,但是过多的 AGV 会造成码头拥堵以及 AGV 之间互相等待的情况。因此,较为正确的做法应该是在 AGV 数量一定的情况下,为每辆 AGV 合理地分配任务,从而使码头装卸作业时间尽量减少,实现码头作业效率的最大化。

目前,学者们就自动化集装箱码头 AGV 调度问题进行了大量的研究,主要通过建立数学模型和开发算法来解决相关问题。Bae 等人^[1]最早提出了“作业面”的调度模式,即 AGV 是由多个岸桥共享而不是服务于单个岸桥;并通过数值实验证明“作业面”调度模式可以减少 AGV 空驶距离,提高效率。基于“作业面”调度, Yang 等人^[2]同时考虑 AGV 调度和路径规划,以最小化岸桥完工时间为目标建立了双层模型,并设计双层遗传算法进行求解。Choe 等人^[3]以 AGV 空载距离最短和完工时间最短为目标,设计了在线偏好学习算法进行求解。霍凯歌等人^[4]在考虑多载 AGV 的调度问题时,以最小化作业费用为目标建立模型,并利用遗传算法进行求解。随着学者们的深入研究,一些与传统码头不同的实际因素也开始被考虑进有关问题中,如能耗因素^[5-6]、缓冲区容量限制^[7-8]等。

此外,一些学者关于传统码头的集卡调度同样对自动化集装箱码头 AGV 调度问题有一定的帮助: Iris 等人^[9]考虑了船舶的配载问题,以集卡作业时间和岸桥延误时间的加权和为目标建立混合整数规划模型,并设计启发式算法进行求解,算例分析表明该算法可以快速找到高质量的解; Wang 等人^[10]研究了集装箱箱位与集卡调度的关系,在同时装卸的情况下,以最小化岸桥完工时间为目标建立模型; Nishimura 等人^[11]提出了一种集卡动态调度方法,该方法可以减少行驶距离并降低码头运行成本;曹庆奎等人^[12]分析了影响集卡作业效率的因素,然后以集卡运输成本最小为目标,建立了混合整数规划模型。

目前,已有的关于 AGV 调度问题的文献大都基于集装箱作业顺序已知的情况,即装卸过程中每个集装箱何时被岸桥从船上卸下或者由场桥从箱位运到交接区的时间与前一个集装箱的时间关系是固定的。本文以文献[13-14]为基础,在集装箱作业顺序不固定的情况下,建立了 AGV 调度问题的优化模型,并设计了改进的差分进

* 收稿日期:2020-08-03 修回日期:2020-09-05 网络出版时间:2021-03-11 16:35

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61873173);“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(No. XLYC1807258);大连市重点学科(重点方向)重大课题(No. 2018J11CY023)

第一作者简介:潘迎新,男,研究方向为交通运输规划与管理, E-mail: panyingxin17@163.com;通信作者:白丹宇,男,教授,博士, E-mail: mikebdy@sina.com

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20210310.1440.024.html>

化算法对模型进行求解,最后通过算例验证这一算法的有效性。

1 问题与模型

1.1 问题描述

自动化集装箱码头由岸桥作业区、AGV 水平运输区、堆场等区域构成,具体布局如图 1 所示。在卸船作业时,首先由岸桥将集装箱从船上卸到岸桥作业区,等待 AGV 到达后将集装箱卸到 AGV 上,再由 AGV 运输到堆场的交接区,最后由场桥将集装箱卸到特定的箱位上。而装船作业则与卸船作业相反。在“作业面”的调度模式下,AGV 往复执行装卸作业,直到所有的集装箱都装卸完成。

由于岸桥为自动化集装箱码头中最为昂贵的设备,它尽快地完成作业才符合自动化集装箱码头的实际需要;因此,本文综合考虑岸桥、AGV、场桥对每个集装箱的作业时间和作业顺序以及不同设备之间的相互等待时间,在基于 AGV“作业面”调度模式的基础上,建立 AGV 调度的混合整数规划模型,通过为每个进出口集装箱分配合适的 AGV 来尽可能地降低岸桥的作业时间。

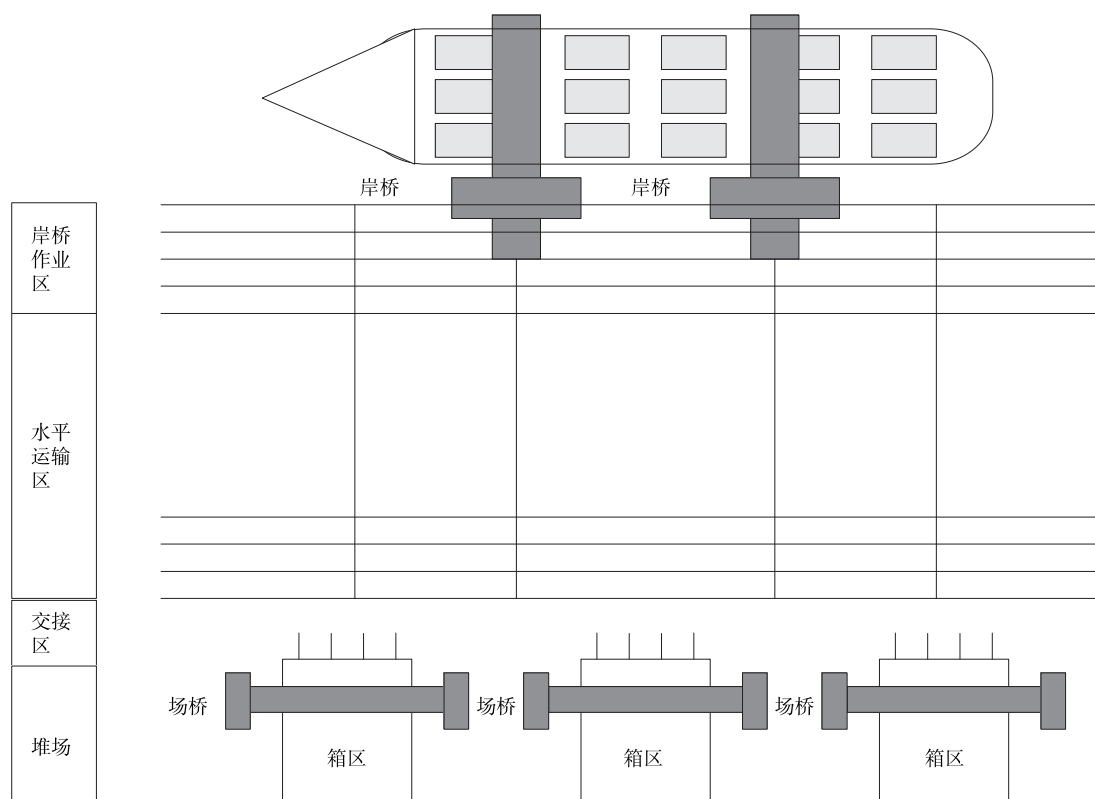


图 1 自动化集装箱码头布局和 AGV 运输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of automatic container terminal and AGV transportation

1.2 模型建立

本文的研究基于如下假设:1) 每个岸桥、AGV、场桥 1 次只能处理 1 个集装箱;2) 岸桥和场桥作业的集装箱是已知的;3) 岸桥、AGV、场桥还有集装箱数量是已知的;4) AGV 在任意两个位置之间的行驶距离是已知的;5) 不考虑 AGV 在行驶过程中的拥堵情况。

模型的参数定义如下: Q 为岸桥的集合; L 为出口集装箱的集合; U 为进口集装箱的集合; T 为任务的集合; V 为 AGV 的集合,AGV 数量为 v ; Y 为场桥的集合; T_q 为岸桥 q 任务的集合; T_y 为场桥 y 任务的集合; S 为虚拟的开始任务; F 为虚拟的结束任务; p_{yi} 为场桥装卸集装箱 i 的时间; p_{qi} 为岸桥装卸集装箱 i 的时间; v_l 为 AGV 重载时的行驶速度; v_u 为 AGV 空载时的行驶速度; d_{ij} 为 AGV 完成任务 i 后到开始任务 j 的距离; d_i 为任务 i 水平运输的距离; M 为一个极大的正数。

模型的决策变量定义如下: e_{qi} 为岸桥计划完成任务 i 的时刻; e_{yi} 为场桥计划完成任务 i 的时刻; c_{qi} 为岸桥实际完成任务 i 的时刻; c_{yi} 为场桥实际完成任务 i 的时刻; x_{ij} 为同一 AGV 在完成任务 i 后执行任务 j 时为 1,否则

为 0; g_{ij} 为同一场桥在完成任任务 i 后执行任任务 j 时为 1, 否则为 0; h_{ij} 为同一岸桥在完成任任务 i 后执行任任务 j 时为 1, 否则为 0; a_{si} 为水平运输时, AGV 到达任任务 i 起点的时刻; a_{fi} 为水平运输时, AGV 到达任任务 i 终点的时刻。

本文的模型可以表示为:

$$\begin{aligned} \min c &= \max_{q \in Q} c_{qi}, \\ \text{s. t. } \sum_{i \in T_q \cup S} h_{ij} &= 1, \forall q \in Q, \forall j \in T_q, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in T_q \cup F} h_{ij} = 1, \forall q \in Q, \forall i \in T_q, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in T \cup S} x_{ij} = 1, \forall j \in T, \quad (3)$$

$$\sum_{j \in T \cup F} x_{ij} = 1, \forall i \in T, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in T_y \cup S} g_{ij} = 1, \forall y \in Y, \forall j \in T_y, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in T_y \cup F} g_{ij} = 1, \forall y \in Y, \forall i \in T_y, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in T} x_{si} = v, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in T} x_{fi} = v, \quad (8)$$

$$c_{qi} \geq a_{si}, \forall i \in U, \quad (9)$$

$$c_{qi} \geq e_{qi}, \forall i \in U, \quad (10)$$

$$c_{qi} + \frac{d_i}{v_l} = a_{fi}, \forall i \in U, \quad (11)$$

$$a_{fi} \leq c_{yi} - p_{yi}, \forall i \in U, \quad (12)$$

$$e_{yi} \leq c_{yi}, \forall i \in U, \quad (13)$$

$$e_{yi} \leq c_{yi}, \forall i \in L, \quad (14)$$

$$a_{si} \leq c_{yi}, \forall i \in L, \quad (15)$$

$$c_{yi} + \frac{d_i}{v_l} = a_{fi}, \forall i \in L, \quad (16)$$

$$a_{fi} \leq c_{qi} - p_{qi}, \forall i \in L, \quad (17)$$

$$e_{qi} \leq c_{qi}, \forall i \in L, \quad (18)$$

$$c_{yi} - p_{yi} + \frac{d_{ij}}{v_u} \leq a_{sj} + M(1 - x_{ij}), \forall i \in U, \forall j \in T, \quad (19)$$

$$c_{qi} - p_{qi} + \frac{d_{ij}}{v_u} \leq a_{sj} + M(1 - x_{ij}), \forall i \in L, \forall j \in T, \quad (20)$$

$$c_{qi} \leq e_{qj} - p_{qj} + M(1 - h_{ij}), \forall q \in Q, \forall i, j \in T_q, \quad (21)$$

$$c_{yi} \leq e_{yj} - 2p_{yj} + M(1 - g_{ij}), \forall y \in Y, \forall i, j \in T_y, \quad (22)$$

$$e_{qi}, e_{yi}, c_{qi}, c_{yi}, a_{si}, a_{fi} \geq 0, \quad (23)$$

$$x_{ij}, g_{ij}, h_{ij} \in \{0, 1\}. \quad (24)$$

约束(1)和(2)、(3)和(4)、(5)和(6)分别表示每个岸桥、AGV、场桥的装卸任务都有一个前序和后序作业;约束(7)和(8)表示 AGV 作业数量的约束;约束(9)和(10)表示岸桥完成一个卸船任务的时间要在 AGV 到达岸桥与岸桥的完成时间取大值;约束(11)表示 AGV 将进口集装箱从岸桥送到所在箱区的时间关系;约束(12)和(13)表示进口箱区场桥开始作业的时间要在场桥完成上一个任务回到交接区与 AGV 将集装箱送到交接区的时间取大值;约束(14)和(15)表示出口箱区场桥完成一个装船任务的时间要在 AGV 到达交接区与场桥完成的完成时间取大值;约束(16)表示 AGV 将出口集装箱从箱区送到岸桥的时间关系;约束(17)和(18)表示岸桥开始一个装船任务的时间要在岸桥可以开始作业的时间与 AGV 将出口集装箱送到岸桥的时间取大值;约束(19)和(20)分别为 AGV 完成一个卸船、装船任务与开始下一个任务的时间关系;约束(21)和(22)分别为岸桥、场桥完成一个任务与开始下一个任务的时间关系;约束(23)和(24)表示决策变量的取值约束。

2 求解算法

本文研究的自动化集装箱码头 AGV 调度问题属于 NP-难问题^[15],因而随着问题规模的扩大,精确算法很难在较短的时间内对问题进行求解。因此,本文根据自动化集装箱码头 AGV 的作业特点,设计了基于整数编码的离散差分进化算法来求解本文建立的混合整数规划模型。差分进化算法(Differential evolution, DE)最早由 Storn 等人^[16]提出。与遗传算法相类似,差分进化算法是一种基于种群的全局进化方法,它通过对父代个体执行交叉和变异操作产生子代个体,最后采用一对一的“贪婪”选择方式来更新种群。该算法具有收敛速度快,鲁棒性强等特点。

2.1 编码与解码

采用矩阵实数编码的方式,设计一个两行 n 列的染色体(本文中 n 表示需要进行装卸的集装箱数量),染色体的第 1 行表示集装箱的序号,第 2 行为每个集装箱分配 1 辆 AGV。假设有 10 个集装箱需要装卸,4 辆 AGV 可进行水平运输作业,图 2 表示了一种可能的调度方案。此时,10 号集装箱由 4 号 AGV 进行作业,而 4 号 AGV 在完成 10 号集装箱的运输后去完成 4 号集装箱的运输,最后去完成 1 号集装箱的运输。

集装箱序号	10	2	8	9	5	6	7	4	3	1
AGV 序号	4	1	3	2	3	2	1	4	3	4

图 2 染色体编码示意图

Fig. 2 Chromosomal coding representation

2.2 初始化种群

随机产生 N 个个体作为初始种群,在集装箱序号一行上,奇数编号为进口集装箱,偶数编号为出口集装箱。每个个体的集装箱序列以及为每个集装箱分配的 AGV 随机生成。

2.3 计算目标函数

根据每个染色体可以得到一个具体的调度方式,最后可以得到完成所有装卸任务的完工时间。对于一个集装箱,首先判断它是进口集装箱还是出口集装箱。若为进口集装箱,根据模型中的约束(9)~(13)可以计算出岸桥、AGV、场桥分别完成该任务的时刻;若为出口集装箱,根据模型中的约束(14)~(18)可以计算出场桥、AGV、岸桥分别完成该任务的时刻;然后判断该集装箱是否为最后一个任务,若不是则计算下一个集装箱的完工时间,若是则输出此时得到的目标函数值。具体的计算流程如图 3 所示。

2.4 变异

变异操作作为当前种群的每一个个体都生成一个目标个体,与传统的差分进化算法不同,本文设计的变异操作可由

$$V_{ij} = x_{bj} \oplus F \otimes (x_{1j} - x_{2j}) \quad (25)$$

表示,其中: x_{1j} 和 x_{2j} 是种群中随机选择的不相同的个体 x_1 和 x_2 的第 j 个编码,对 x_1 和 x_2 进行差分运算。(25)式意为在每次迭代中,对于种群中的每个个体,随机选择两个个体,将相对应的编码进行减法运算,然后每个编码随机生成一个随机数 F ,且 $F = \text{rand}(0, 1)$;若 F 小于等于变异概率 Z 则保留,否则置对应的编码为 0,从而得到一个变异个体;最后将该变异个体与当前种群中的最好个体 x_{bj} 相加,得到一个目标个体 V_{ij} 。(25)式中的 $\otimes$ 运算符的计算方法为:

$$F \otimes (x_{1j} - x_{2j}) = \begin{cases} x_{1j} - x_{2j}, & F < Z \\ 0, & \text{否则} \end{cases}。$$

进行差分后,此时的目标个体存在编码为 0、负数甚至大于取值范围的情况,这就需要进行修补,将每个编码对他们的最大取值做取模运算,这样便得到了一个目标个体 V_{ij} ,公式为:

$$V_{ij} = \text{mod}((V_{ij} + n - 1), n) + 1。$$

其中:mod 为取模操作, n 为每个编码的最大取值,对于第 1 行即为集装箱的个数,第 2 行即为 AGV 的数量。当变异概率为 0.4,且(25)式中的 x_{1j} 就是 x_{bj} 时,具体的变异示意图可由图 4 所示。

2.5 交叉

通过将当前个体 x_i 的部分变量用目标个体 V_i 的对应变数替换,生成测试个体 U_i 。变异操作首先为 V_i 的每

个编码生成一个交叉因子 C , 且 $C = \text{rand}(0, 1)$; 若 C 大于交叉概率则对应编码不参与交叉, 置编码为 -1; 否则编码保持不变。为了提高解的质量, 采用三点交叉的方式, 将目标个体 V_i 分成 3 个部分, 然后在当前个体 x_i 中随机选择 3 个插入位置, 将 3 个部分整体插入 x_i , 保留每个集装箱第 1 次出现时对应的编码, 得到最终的测试个体 U_i 。若当前个体为 x_2 , 交叉概率为 0.7, 交叉示意图可由图 5 所示。

2.6 选择

本文的研究问题是极小化问题, 因此采用一对一的“贪婪”选择方式, 即将当前个体 x_i 和测试个体 U_i 的目标函数值进行一对一比较, 选择目标函数值更低的作为下一代进化的新个体, 有关公式为:

$$x_i(g+1) = \begin{cases} U_i(g+1), & \text{如果 } f(U_i(g+1)) \leq f(x_i(g)) \\ x_i(g), & \text{否则} \end{cases}.$$

总之, 对种群中的每个个体重复执行变异、交叉、选择等 3 种算子, 直到达到最大迭代次数时算法终止。

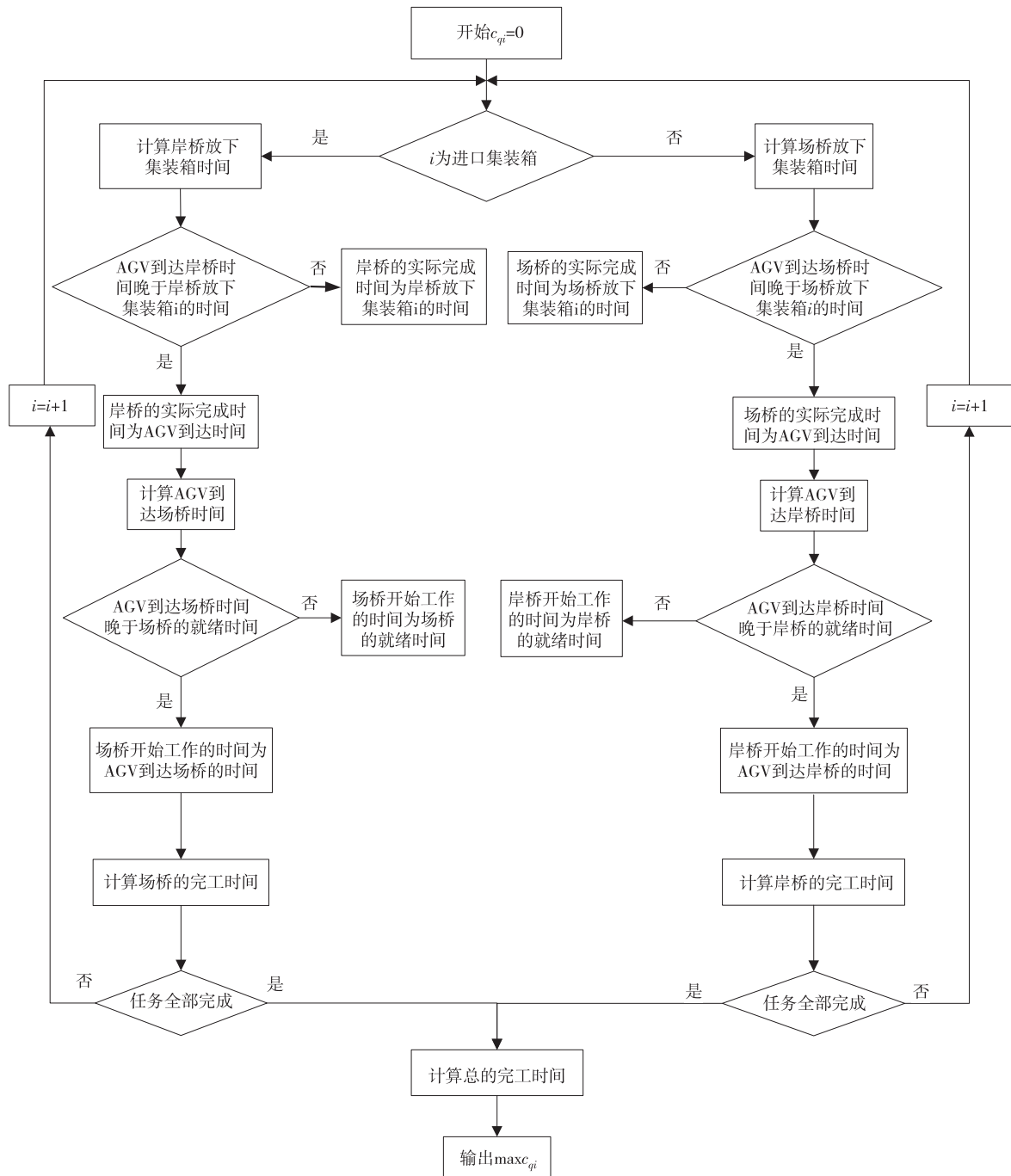


图 3 目标函数计算流程图

Fig. 3 Framework of calculating the objective function

x_{1j}	10	2	8	9	5	6	7	4	3	1
	4	1	3	2	3	2	1	4	3	4
x_{2j}	1	5	9	3	10	7	8	2	6	4
	1	4	2	3	4	2	1	4	2	3
F	0.3	0.5	0.2	0.3	0.9	0.5	0.6	0.4	0.7	0.2
$x_{1j}-x_{2j}$	9	-3	-1	6	-5	-1	-1	2	-3	-3
F	0.7	0.4	0.5	0.2	0.1	0.6	0.2	0.9	0.6	0.2
$x_{1j}-x_{2j}$	3	-3	1	-1	-1	0	0	0	1	1
V_{ij}	9	2	7	5	5	6	7	4	3	8
	4	1	3	1	2	2	1	4	3	1

图 4 10 个集装箱 4 辆 AGV 变异示意图

Fig. 4 Mutation operation of 10 containers and 4 AGVs

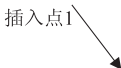
C	0.1	0.3	0.2	0.8	0.6	0.2	0.5	0.9	0.4	0.3
V_i	9	2	7	-1	5	6	7	-1	3	8
	4	1	3	-1	2	2	1	-1	3	1
插入点1  插入点2  插入点3 										
x_2	1	5	9	3	10	7	8	2	6	4
	1	4	2	3	4	2	1	4	2	3
										
U_i	1	5	9	2	7	3	10	6	8	4
	1	4	4	1	3	3	4	2	1	4

图 5 10 个集装箱 4 辆 AGV 交叉示意图

Fig. 5 Crossover operation of 10 containers and 4 AGVs

3 实例分析

3.1 参数设定

为验证本文所提出的模型和算法的有效性,选取某自动化集装箱码头的实际数据进行分析。为了模拟集装箱所在箱位对装卸时间的影响,岸桥作业每个集装箱的时间服从均匀分布 $U(90,150)$,场桥处理集装箱的时间服从均匀分布 $U(40,120)$ 。AGV 的重载速率 $v_1=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,空载速率 $v_u=5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对于小规模实例,岸桥数量为 2 个,箱区数量为 4 个,AGV 数量为 4~6 个,集装箱数量为 10~20 个;对于大规模实例,岸桥数量为 2 个,箱区数量为 4~6 个,AGV 数量为 4~12 个,集装箱数量为 50~200 个。

本文进行了正交实验,获得合适的参数使差分进化算法更加高效。为了平衡解的质量和问题的求解时间,本文算法设定种群规模为 200,最大迭代次数为 100,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.3。

3.2 小规模实例

对于小规模实例,分别用 CPLEX 12.6.2 和 Microsoft Visual Studio 2015 中用 C++ 编写的差分进化算法进行比较。由于差分进化算法存在误差,因此每个实例随机生成 5 组数据,每组数据计算 5 次,取 25 次计算结果的平均值。由表 1 中的实例 1,2,4 可以看出,当集装箱数小于 12 个时,CPLEX 可以在较短的时间内求得精确解。然而,随着问题规模的进一步扩大,CPLEX 已经无法在合理的时间内求得精确解。对于本文提出的算法而言,求解时间随着问题规模的扩大缓慢增加,并且求得的目标函数值与 CPLEX 求得的精确解差别不大,平均误差仅为 1.63%,最大误差也只有 2.71%。因此,本文提出的算法是有效的。

表 1 小规模实例计算结果
Tab.1 Results of small-scale problem

实例编号	岸桥-箱区-AGV-集装箱数/个	CPLEX		DE		GAP1/%
		平均值/s	计算时间/s	平均值/s	计算时间/s	
1	2-4-4-10	611	1.18	614.6	0.24	0.59
2	2-4-4-12	722	6.25	732.5	0.28	1.45
3	2-4-4-16	975.4	96.12	1 001.8	0.35	2.71
4	2-4-8-12	706.2	17.72	713	0.27	0.99
5	2-4-8-16	941.8	236.80	964.6	0.35	2.42
6	2-4-8-20	—	—	1 223.2	0.42	

注:GAP1= $\frac{\text{DE 平均值}-\text{CPLEX 平均值}}{\text{CPLEX 平均值}} \times 100\%$

3.3 大规模实例

为了测试本文算法处理大规模问题时的性能,将差分进化算法与现在应用最为广泛的遗传算法进行比较。由于算法计算时间主要受迭代次数影响,设置遗传算法的迭代次数与差分进化算法一致,均为 100 代,因此会有相近的计算时间。表 2 展示了 16 个不同实例的计算结果,每个实例均列出了计算 25 次求得平均值和标准差以及 25 次中的最优值。其中,实例 7~12 的等待时间和每辆 AGV 的平均等待时间如表 3 所示。

表 2 大规模实例计算结果
Tab.2 Results of large-scale problem

实例编号	岸桥-箱区-AGV-集装箱数/个	DE			GA			GAP2/%
		平均值/s	最优值/s	标准差/s	平均值/s	最优值/s	标准差/s	
7	2-4-4-50	3 357.2	3 293.3	49.9	3 557.2	3 457.5	68.5	5.62
8	2-4-8-50	3 148.4	3 118.3	25.8	3 289.3	3 158.6	94.0	4.29
9	2-4-12-50	3 045.2	3 004.9	36.0	3 120.0	3 014.1	68.6	2.38
10	2-4-4-100	7 434.5	7 337.8	67.1	7 833.3	7 548.4	218.3	5.09
11	2-4-8-100	6 818.3	6 727.9	68.2	7 074.5	6 922.7	109.0	3.62
12	2-4-12-100	6 570.0	6 501.7	58.6	6 891.3	6 686.8	159.6	4.67
13	2-6-8-100	6 452.4	6 370.1	54.7	6 541.4	6 396.0	113.3	1.36
14	2-6-12-100	6 228.9	6 177.3	40.1	6 432.8	6 271.9	92.3	3.17
15	2-4-8-150	10 718.1	10 538.9	114.8	11 130.4	10 776.8	269.2	3.70
16	2-4-12-150	10 276.0	10 136.7	85.2	10 866.2	10 484.4	264.8	5.43
17	2-6-8-150	9 783.8	9 683.1	76.1	9 947.7	9 767.5	154.3	1.65
18	2-6-12-150	9 470.3	9 369.7	73.6	9 683.1	9 523.1	123.3	2.20
19	2-4-8-200	14 674.7	14 426.5	155.1	15 205.3	14 868.5	260.9	3.49
20	2-4-12-200	14 102.5	13 806.4	171.0	14 650.3	14 249.2	253.1	3.74
21	2-6-8-200	13 657.9	13 539.1	90.7	13 783.1	13 518.1	190.6	0.91
22	2-6-12-200	13 117.5	12 979.0	101.2	13 406.6	13 217.4	162.0	2.13

注:GAP2= $\frac{\text{GA 平均值}-\text{DE 平均值}}{\text{GA 平均值}} \times 100\%$

随着集装箱装卸数量的增加,作业时间也在增加。为了减少作业时间,一方面可以增加作业设备的数量。从实例 7~9 和实例 10~12 分别可以看出增加 AGV 的数量可以提高效率,但是过多的 AGV 数量对作业效率的提高效果不明显,过多的 AGV 增加了 AGV 的等待时间(表 3)。从实例 19,21 和实例 20,22 可以看出增加装卸

设备的数量可以提高作业效率(表 2)。因此,正确的做法是合理地配置各种设备。另一方面,要对作业设备进行合理的调度。差分进化算法在全部 16 个实例中的平均最优值均优于遗传算法,且 15 个实例的最优值优于遗传算法,证明了差分进化算法有更强的寻优能力。此外,差分进化算法的标准差小于遗传算法,说明差分进化算法的结果更加稳定,收敛性更强。因此,使用差分进化算法能够求得更加合理的调度方案。

表 3 实例 7~12 的 AGV 等待时间

Tab. 3 AGV waiting times of instances No. 7 to No. 12

实例 编号	岸桥-箱区-AGV- 集装箱数/个	等待时间/s	平均等待时间/s	实例 编号	岸桥-箱区-AGV- 集装箱数/个	等待时间/s	平均等待时间/s
7	2-4-4-50	3 592	898	10	2-4-4-100	6 791	1 698
8	2-4-8-50	8 082	1 010	11	2-4-8-100	15 873	1 984
9	2-4-12-50	15 425	1 285	12	2-4-12-100	30 516	2 543

4 结论与展望

本文针对自动化集装箱码头 AGV 水平运输作业环节,同时考虑装卸作业和作业顺序等实际因素,以最小化完工时间为目标建立了 AGV 调度模型,并设计了差分进化算法求解该模型,在小规模算例下与 CPLEX 进行比较证明了本文算法的有效性,在大规模算例下与遗传算法进行比较证明了本文算法的优越性。研究表明,对自动化集装箱码头的作业设备进行合理地配置和调度是提高作业效率的关键。

下一步研究可以考虑 AGV 在运输过程中的拥堵问题以及堆场交接区容量限制等实际问题,使得本文模型更加符合自动化集装箱码头的实际情况,能够切实提高自动化集装箱码头的作业效率。同时,根据所建立的混合整数规划模型,也可尝试采用基于分支定界的过滤束搜索算法,从而进一步增强求解小规模问题的能力。

参考文献:

- [1] BAE J W, KIM K H. A pooled dispatching strategy for automated guided vehicles in port container terminals[J]. Management Science and Financial Engineering, 2000, 6(2): 47-67.
- [2] YANG Y S, ZHONG M S, DESSOUKY Y, et al. An integrated scheduling method for AGV routing in automated container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 126: 482-493.
- [3] 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.
- [4] 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.
HUO K G, ZHANG Y Q, HU Z H. Research on scheduling problem of multi-load AGV at automated container terminal[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(3): 244-251.
- [5] HE J L, HUANG Y F, YAN W, et al. Integrated internal truck, yard crane and quay crane scheduling in a container terminal considering energy consumption[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(5): 2464-2487.
- [6] 范厚明, 郭振峰, 岳丽君, 等. 考虑能耗节约的集装箱码头双小车岸桥与 AGV 联合配置及调度优化[J]. 自动化学报, 2020 45(1): 1-15.
FAN H M, GUO Z F, YUE L J, et al. Joint configuration and scheduling optimization of dual-trolley quay crane and AGV for container terminal with considering energy saving[J]. Acta Automatica Sinica, 2020 45(1): 1-15.
- [7] 文家献, 魏晨, 尹宇起, 等. 考虑堆场缓冲区容量的 ASC 与 AGV 集成调度[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(11): 238-245.
WEN J X, WEI C, YIN Y Q, et al. Integrated scheduling of ASC and AGV considering the block buffer capacity[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(11): 238-245.
- [8] SADEGHIAN S H, MOHD ARIFFIN M K A, TANG S H, N. et al. Integrated dispatching model of automated lifting vehicles, quay cranes and yard cranes at automated container terminal[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 564: 678-683.
- [9] IRIS Ç, CHRISTENSEN J, PACINO D, et al. Flexible ship loading problem with transfer vehicle assignment and scheduling[J]. Transportation Research Part B, 2018, 111: 113-134.
- [10] WANG Y, JIANG X J, LEE L H, et al. Tree based searching approaches for integrated vehicle dispatching and container allocation in a transshipment hub[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 74: 139-150.

- [11] NISHIMURA E, IMAI A, PAPADIMITRIOU S. Yard trailer routing at a maritime container terminal[J]. *Transportation Research Part E*, 2003, 41(1): 53-76.
- [12] 曹庆奎, 赵斐. 基于遗传蚁群算法的港口集卡路径优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(7): 1820-1828.
CAO Q K, ZHAO F. Port trucks route optimization based on GA-ACO[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33(7): 1820-1828.
- [13] 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.
- [14] BAI D Y, LIANG J H, LIU B Q, et al. Permutation flow shop scheduling problem to minimize nonlinear objective function with release dates[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 112: 336-347.
- [15] LUO J B, WU Y. Modelling of dual-cycle strategy for container storage and vehicle scheduling problems at automated container terminals[J]. *Transportation Research Part E*, 2015, 79: 49-64.
- [16] STORN R, PRICE K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341-359.

Operations Research and Cybernetics

AGV Scheduling in Automated Container Terminal Based on Differential Evolution Algorithm

PAN Yingxin¹, BAI Danyu², ZENG Qingcheng², XIE Chenxi², CHEN Zhouhao²

(1. School of Transportation Engineering, Dalian Maritime University;

2. School of Maritime Economics & Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: [Purposes] Automated guided vehicle (AGV) is the horizontal transportation equipment of the automated container terminal. The optimization of AGVs' scheduling can save the time of loading and unloading operations and improve the terminal production efficiency. [Methods] It establishes a mixed integer programming (MIP) model with the objective to minimize the makespan of quay crane given loading and unloading operations simultaneously and the container operation sequence in horizontal transportation of automated container terminal. For this NP-hard problem, a differential evolution algorithm is designed to handle the problem. [Findings] Numerical simulations are conducted to show the effectiveness of the proposed MIP model and algorithm. [Conclusions] The results show that the model and algorithm can provide help for the scheduling of loading and unloading operations in container terminal.

Keywords: automated container terminal; AGV scheduling; differential evolution algorithm

(责任编辑 方 兴)