

自动化码头AGV共享式在线调度问题研究

梁 泉

(贵州交通职业技术学院 物流工程系, 贵州 贵阳 550008)

摘要: 为解决自动化集装箱码头岸桥和场桥作业序列变化、作业效率波动,以及自动导引小车(AGV)作业时间的不确定性等情况下AGV的调度问题,在总结目前AGV调度模式的基础上,设计了基于共享式调度和在线调度的AGV分配方式。考虑未来一段时间内任务分配的整体最优,提出了一套完整的AGV共享式在线调度解决方案。建立了AGV共享式在线调度数学模型,设计了遗传算法进行求解。对不同AGV数量的调度问题的求解进行试验,验证了遗传算法求解满足时间要求,并验证了其实用性和可行性。

关键词: 自动导引小车(AGV)调度; 共享式调度; 在线调度; 遗传算法

中图分类号: U 691.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-5581(2025)02-0298-06

Research on the shared online AGV dispatching problem of automated terminal

LIANG Xiao

(Department of Logistics Engineering, Guizhou Vocational and Technical College of Communications, Guizhou 550008, Guiyang, China)

Abstract: To solve automated guided vehicle (AGV) dispatching problem in situations such as mutual interference between the operating equipment and transportation network complexity makes loading and unloading system more complicated. The changes of quay and yard crane operation sequence and operational efficiency, and the uncertainty of AGV operating time. Thus a shared online AGV dispatching strategy combining shared dispatching and online dispatching is introduced to solve AGV dispatching problem. A mathematical model is proposed to describe AGV dispatching problem. AGA is introduced to solve this problem. Experiment with different AGV amounts shows the validity of the proposed method. With a strong reference meaning to AGV dispatching decision making.

Key words: automated guided vehicle (AGV) dispatching; shared dispatching; online dispatching; genetic algorithm

随着自动化集装箱码头向着大型化方向发展,码头作业设备增多,且相互干预,交通网络变得复杂。岸桥和场桥作业序列的变化、作业效率的波动以及自动导引小车(automated guided vehicle, AGV)作业时间的不确定性,都给AGV调度增加了难度。因此,AGV调度已成为码头智能化管理的研究热点与难点。

线下调度是在作业开始前,根据岸桥和场桥的作业序列和作业时间的预测,以某个或者某几个目标最优,规划出最佳的水平运输车辆作业任务和顺序。Chen等^[1]根据岸桥、场桥的作业序列,以作业

时间最短为目标制定集卡的作业序列。Rashidi等^[2]为AGV线下调度问题建立了最小代价流模型,并用改进的网络单纯形法求解。Dkhill等^[3]对QC-AGV-ASC的线下调度问题建立了以作业时间最短和AGV使用量最小为目标的数学模型。

在线调度是在作业过程中实时为水平运输车辆安排作业任务,基于对当前作业情况和短期预测等要素进行的。Angeloudis等^[4]为AGV在线调度建立了数学模型,用不同的方法求解,并进行了仿真验证。Le等^[5]分别对AGV和ALV的在线调度问题建立了混合整数规划模型,用分支定界算法求

解。Kim等^[6]针对AGV在线调度问题建立了以岸桥等待时间最短和AGV空载距离最短为目标的数学模型,并对其进行仿真验证。宓为建等^[7]提出了基于触发事件的ALV在线调度,建立了在线实时任务分配模型,并用A*搜索算法求解。Bian等^[8]提出触发事件驱动的AGV在线调度,建立了以AGV行驶距离最短为目标的模型。赵宁等^[9]提出了基于集卡池的在线调度模式,建立了发箱任务的集卡指派模型。梁晶等^[10]分析了集装箱在船舶与堆场之间的流动特性,设计了基于“最快到达”和“最短路径”的在线调度方案和模型。

综上分析,面向作业线的调度比较封闭和固定,缺乏灵活性,会导致资源浪费。面向作业面调度范围太广、环境复杂、调度难度较大,很难满足个性化的需求。线下调度在实际作业过程中难以实施,会导致作业瘫痪。在线调度较为精确,可实施性强,是最适用于实际作业的调度方式。国内外学者也提出了多种在线调度方式,但追求目标单一,只着眼于当前分配的最优,没有考虑未来短时内的全局最优。

1 AGV共享式在线调度描述

本文设计基于共享式调度和在线调度的新的AGV任务分配方式,形成完整的AGV共享式在线调度解决方案。根据船舶和作业线的不同需求设置不同的AGV资源池,每个AGV资源池追求的目标有所不同,形成共享式调度模式,在此基础上进行在线的实时调度。本文的在线调度是基于事件触发的,对触发事件发生时的AGV和运输任务进行预测,预测多个AGV的空载行驶的时间和到达任务地点的时间,同时预测多个任务的准备时间。结合AGV资源池的决策目标,完成多个AGV对多个任务的分配。综合了共享式调度和在线调度的优点,也考虑了未来短时间内的整体最优。

1.1 AGV资源池设置及决策目标

共享式调度的优势在于多条作业线之间共享AGV,在提高作业效率的基础上为部分作业线提供个性化服务。每个AGV资源池根据所服务作业线的需求不同,AGV的分配数量、分配方式不同,决策目标也不同。本文考虑AGV资源池作业效率优先和成本优先两个目标,对应总的岸桥和场桥的“握手”等待时间最短和总的AGV空载行驶时间最短两个目标。

1.2 可分配AGV选择及时间预测

作业中的AGV会处于3种状态:A为空闲状

态,没有运输集装箱也未分配任务;B为执行任务状态,没有运输集装箱,已分配任务;C为运输状态,正在运输集装箱前往卸箱地点。本文的可分配AGV为状态A和C的AGV。

1.2.1 可分配AGV空载行驶时间预测

在行驶速度不变的情况下,用空载时间作为空载行驶率的衡量指标。AGV_j到任务*i*地点的空载行驶距离用 D_{ij} 表示, G_{ij} 表示空载行驶时间, V_e 表示AGV的空载行驶速度,则

$$G_{ij} = \frac{D_{ij}}{V_e} \quad (1)$$

1.2.2 AGV到达任务地点时间预测

对于空闲的可分配AGV,AGV_j到达任务*i*地点的时间为 G_{ij} 。正在运输任务的可分配AGV_j需完成当前任务才能执行后面任务,完成当前任务的预测时间表示为 W_j ,则AGV_j到达任务*i*地点的时间为 $(G_{ij}+W_j)$ 。 W_j 包括完成当前任务的行驶时间 T_j 和卸箱时间 T_d 。若卸箱时存在AGV等待岸桥或场桥的情况, W_j 还包括等待岸桥*n*的时间 T_{jn} ,等待场桥*m*的时间 T_{jm} 。重载速度为 V_w 、装卸船时 W_j 分别为

$$W_j = \begin{cases} T_j + T_d, & \text{AGV 不等待岸桥} \\ T_j + T_d + T_{jn}, & \text{AGV 等待岸桥} \end{cases} \quad (2)$$

$$W_j = \begin{cases} T_j + T_d, & \text{AGV 不等待场桥} \\ T_j + T_d + T_{jm}, & \text{AGV 等待场桥} \end{cases} \quad (3)$$

$$T_j = \frac{D_j}{V_w} \quad (4)$$

1.3 可分配任务选择及时间预测

1.3.1 可分配任务选择

可分配任务是可以参与本次分配的集装箱任务。可分配任务选择从触发事件发生时起,准备时间最短的*c*个未分配给空闲AGV的集装箱任务。为了保证每个可分配AGV都能分配到任务,则*c*要大于或等于可分配AGV的数量。

触发事件发生时,对未来一段时间内的任务进行预测,根据任务产生的时间顺序为任务预先分配合适的AGV。任务产生的时间顺序就是通过准备时间来衡量的。当集装箱被岸桥或场桥吊起,并且马上可以装上AGV,就认为任务已经完成了准备工作。从触发事件发生时到任务完成准备工作的时间称为任务的准备时间。

1.3.2 任务准备时间预测

任务*i*的准备时间为 O_i 。如果岸桥或场桥正在对任务*i*进行作业,岸桥*n*完成任务*i*的准备时间为 T_{in} ,则 $O_i = T_{in}$,场桥*m*完成任务*i*的准备时间为 T_{im} ,则 $O_i = T_{im}$ 。如果岸桥或场桥还未对任务*i*进

行作业,任务*i*处于等待状态。任务*i*等待岸桥*n*的时间为 W_{in} ,则 $O_i = T_{in} + W_{in}$ 。任务*i*等待场桥*m*的时间为 W_{im} ,则 $O_i = T_{im} + W_{im}$ 。

1.4 在线调度触发事件设置

AGV共享式在线调度是基于AGV触发事件,每次重新调度是在新的可分配AGV产生时进行的。设置的触发事件:①AGV被装上集装箱,产生正在运输集装箱的AGV;②AGV完成上一个运输任务,产生空闲AGV。

1.5 主要决策约束条件

1.5.1 岸桥和场桥要箱AGV数量限制

岸桥和场桥要箱AGV是指已经分配给某台岸桥或场桥的任务的空闲AGV,它们接收到任务后会前往对应的缓冲区执行任务。岸桥和场桥要箱AGV数量太多,会导致其他岸桥或场桥的AGV不足,影响整体的作业效率。所以要对岸桥和场桥要箱AGV数量进行限制。

1.5.2 作业线回路AGV数量限制

作业线回路AGV是指为某条作业线服务的AGV,包括岸桥要箱AGV、属于该作业线的场桥要箱AGV和正在为该作业线运输集装箱的AGV。作业线回路AGV过多,会导致其他作业线AGV不足。所以要对作业线回路AGV数量进行限制。

2 模型建立

2.1 模型假设

假设1 AGV每次只运输一个集装箱。

假设2 AGV重载、空载都是匀速的。

2.2 符号说明

2.2.1 模型维度

h :资源池, $h=1,2,\dots,p,p$ 为资源池数量;

q :作业的岸桥, $n=1,2,\dots,q,q$ 为岸桥数量;

m :作业的场桥, $m=1,2,\dots,y,y$ 为场桥数量;

i :当前可分配集装箱任务, $i=1,2,3,\dots,c,c$ 为可分配任务的数量;

j :当前可分配的AGV, $j=1,2,\dots,a,a$ 为可分配AGV的数量。

2.2.2 已知参数及符号表示

Z_j AGV*j*的状态, $Z_j=1,2,Z_j=1$ 表示AGV*j*处于空闲状态, $Z_j=2$ 表示AGV*j*处于运输状态;

U_{jh} 为0-1变量,表示AGV*j*是否属于AGV资源池*h*,如果是, $U_{jh}=1$,否则 $U_{jh}=0$;

B_{nh} 为0-1变量,表示岸桥*n*是否由资源池*h*提供服务,如果是, $B_{nh}=1$,否则 $B_{nh}=0$;

R_{in} 为0-1变量,表示任务*i*是否由岸桥*n*进行卸船或装船,如果是, $R_{in}=1$,否则 $R_{in}=0$;

E_{im} 为0-1变量,表示装船任务*i*是否由场桥*m*装上AGV,如果是, $E_{im}=1$,否则 $E_{im}=0$;

L_n 为已分配给岸桥*n*的空闲AGV数量;

P_n 为正在运输岸桥*n*卸载的任务的AGV数量;

K_m 为已分配给场桥*m*的空闲AGV数量;

O_i 为任务*i*的准备时间。

G_{ij} 为AGV*j*到达任务*i*的空载行驶时间。

W_j 为正在运输任务AGV*j*完成任务的时间。

T_{ij} 为任务*i*的岸桥或场桥等待AGV*j*时间。

S_m 为场桥*m*要箱AGV数量上限;

V_n 为岸桥*n*要箱AGV数量上限;

F_n 为岸桥*n*的作业线回路AGV数量上限;

α_h AGV资源池*h*的岸桥和场桥等待时间权重系数, $\alpha_h \geq 0$;

β_h AGV资源池*h*的AGV空载行驶时间权重系数, $\beta_h \geq 0$ 。

2.2.3 决策变量及符号表示

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{AGV}j \text{ 分配给任务}i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_{ij} 为0-1变量,表示AGV*j*是否分配给任务*i*。

2.3 目标函数

对于不同状态的AGV, T_{ij} 的计算方式不同,具体计算方式为

$$T_{ij} = \begin{cases} G_{ij} - O_i, & \text{如 } Z_j = 1 \text{ 和 } G_{ij} \geq O_i \\ G_{ij} + W_j - O_i, & \text{如 } Z_j = 2 \text{ 和 } G_{ij} + W_j \geq O_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

模型目标为总的岸桥、场桥的等待时间和总的AGV空载行驶时间加权之和最短,针对不同的AGV资源池所追求的目标的不同,通过调整 α_h 和 β_h 的大小可以决定资源池是效率优先还是成本优先。当权重系数为零时,则不考虑此目标。当权重系数都大于零时,权重系数越小,对应的目标优先级越高,则会优先满足此目标。目标函数表示为

$$Z = \sum_{h=1}^p \left(\alpha_h \sum_{n=1}^q \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^a B_{nh} R_{in} U_{jh} T_{ij} x_{ij} + \beta_h \sum_{n=1}^q \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^a B_{nh} R_{in} U_{jh} G_{ij} x_{ij} \right) \quad (7)$$

2.4 约束条件

约束条件为:可分配任务数量大于可分配AGV数量;每辆AGV只能分配一个任务,每个任务只能分配一辆AGV;每个AGV都能分配到任务;每台岸

桥只能由一个资源池服务;每辆AGV只能属于一个资源池;岸桥和场桥要箱AGV数量限制;作业线回路AGV数量限制。

$$c \geq a \tag{8}$$

$$\sum_{j=1}^a x_{ij} \leq 1, \forall i \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^c x_{ij} \leq 1, \forall j \tag{10}$$

$$\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^a x_{ij} = a \tag{11}$$

$$\sum_{h=1}^p B_{nh} = 1, \forall n \tag{12}$$

$$\sum_{h=1}^p U_{jh} = 1, \forall j \tag{13}$$

$$\sum_{h=1}^p \sum_{j=1}^a \sum_{i=1}^c B_{nh} R_{in} U_{jh} x_{ij} + L_n \leq V_n, Z_j = 1, \forall n \tag{14}$$

$$\sum_{h=1}^p \sum_{n=1}^q \sum_{j=1}^a \sum_{i=1}^c B_{nh} R_{in} U_{jh} E_{im} x_{ij} + K_m \leq S_m, Z_j = 1, \forall m \tag{15}$$

$$\sum_{h=1}^p \sum_{j=1}^a \sum_{i=1}^c B_{nh} R_{in} U_{jh} x_{ij} + \sum_{h=1}^p \sum_{m=1}^y \sum_{j=1}^a \sum_{i=1}^c B_{nh} R_{in} U_{jh} E_{im} x_{ij} + L_n + P_n \leq F_n, Z_j = 1, \forall n \tag{16}$$

3 算法设计

3.1 遗传算法编码设计

遗传算法的染色体由基因位和对应基因组成。如何定义基因位和基因,以及确定其对应关系,是最重要的问题之一。解决AGV共享式在线调度问题的核心在于确定AGV和任务的一一对应关系,本文采用整数编码方式。个体基因位编码由AGV组成,当前有两个AGV资源池分别为P01和P02。资源池P01内有4辆AGV,分别为A01、A02、A03、A04。资源池P02内有5辆AGV,分别为A05、A06、A07、A08、A09。则编码总长度为9,如图1所示。

基因位	1	2	3	4	5	6	7	8	9
AGV资源池编号	01	01	01	01	02	02	02	02	02
AGV编号	01	02	03	04	05	06	07	08	09

图1 基因位与AGV的对应关系

Fig.1 Diagram of genetic seat and AGV

基因由任务组成,每个任务为一个基因。若有9个任务,表示为A、B、C、D、E、F、G、H、I。将基因分配到基因位上形成染色体,如图2所示。

3.2 初始化种群生成

初始化的目的就在于产生具有一定数量的可

基因位	1	2	3	4	5	6	7	8	9
可分配集装箱	D	A	B	C	G	E	I	H	F

图2 基因位与基因的对应关系

Fig.2 Diagram of genetic seat and gene

行解个体,形成种群。本文AGV的数量和状态都是已知的,则基因位的长度和顺序是固定的。通过改变基因位的基因,得到不同的个体染色体。种群基因位和个体见表1。

表1 种群基因位和个体表

Tab.1 Population genetic seat and individuality

基因位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
AGV资源池	01	01	01	01	02	02	02	02	02	03	...
AGV	01	02	03	04	05	06	07	08	08	10	...
个体1	A	C	B	D	E	G	H	F	I	J	...
个体2	A	B	D	C	E	H	G	I	F	J	...
个体3	D	C	B	A	F	G	I	E	H	J	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

3.3 适应度计算

遗传算法的适应度函数值是衡量个体优劣的标准,决定了个体被选择进行交叉和变异操作的可能性。适应度函数与数学模型中的目标函数有一定关系,因此需要根据目标函数建立相应的适应度函数。根据本文模型特征,遗传算法适应度函数为模型目标函数,则 $f=Z$ 。

3.4 遗传操作

3.4.1 选择操作

选择操作是选择适应度值较小的个体进行遗传操作,使得种群朝着整体变优的趋势发展。本文采用轮盘赌方法,个体被选中的概率为适应度值倒数,公式如下:

$$p_i = \frac{1}{f_i} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{f_i} \tag{17}$$

式中: p_i 为个体*i*被选择的概率; f_i 为个体*i*的适应度值; n 为个体数量。

3.4.2 交叉和变异操作

(1) 交叉操作。交叉操作是将两个染色体上的基因位相邻且个数相同的几个基因进行互换,得到新个体。为满足约束条件,只对资源池相同的基因位片段进行交叉,不能对资源池不同的进行交叉,如图3所示。

两个染色体的相同资源池的基因片段交叉,采用次序交叉方式来保证交叉后基因不重复。先将

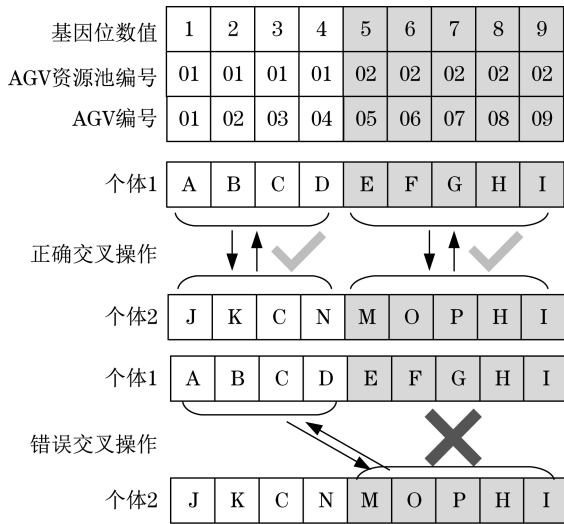


图3 交叉操作案例

Fig.3 Diagram of crossover operation case

两个染色体上不同的基因按照先后顺序分配到对应基因位中,若不能占满基因位,再将相同的基因按照先后顺序分配到对应基因位中,如图4所示。

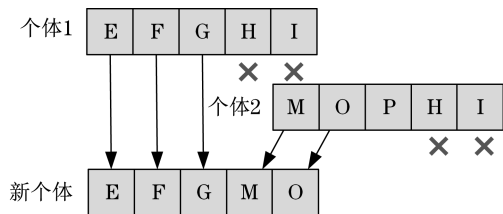


图4 次序交叉操作案例

Fig.4 Diagram of sequential crossover operation

(2) 变异操作。变异是通过改变染色体的基因来产生新个体。本文设计了两种变异,第1种是“自交叉变异”,将同一个资源池的两个基因位上的基因互换。为满足约束条件,只在同一个资源池内进行基因互换。选取资源池内2个随机基因位的基因进行互换,如图5所示。第2种是“新增变异”。本文的任务数量大于等于AGV数量,可能存在基因个数多余基因位个数,可以用染色体上没有的基因来替换原有的基因。为满足约束条件,用于替换的新基因要和被替换的基因同属一个资源池。通过随机产生自然数来确定替换基因位,如图6所示。

(3) 交叉和变异操作流程。每一代的交叉和变异的概率分别为 γ_1 和 γ_2 ,且 $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ 。“自交叉变异”和“新增变异”的概率分布为 ϵ_1 和 ϵ_2 ,且 $\epsilon_1 + \epsilon_2 = 1$ 。采用轮盘赌的方式选择交叉和变异操作,步骤为如图7所示。

3.4.3 终止操作

迭代终止条件是指迭代次数达到预先设定值,并且最小适应度值已趋于稳定,适应度值增加量不

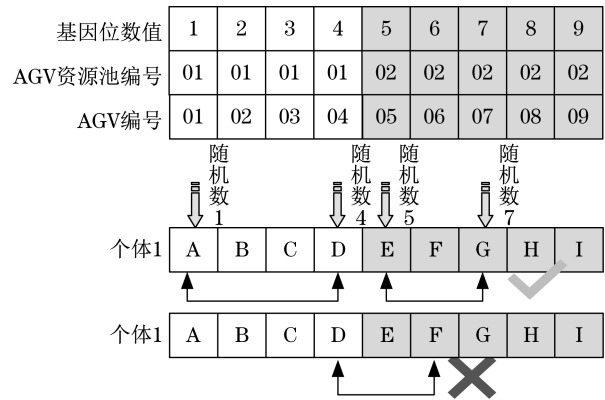


图5 “自交叉变异”操作案例

Fig.5 Diagram of self-cross operation case

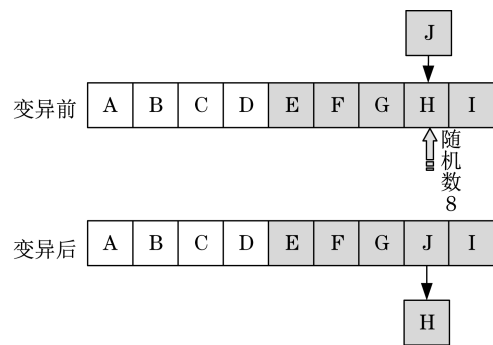


图6 “新增变异”操作案例说明

Fig.6 Diagram of new mutate operation case

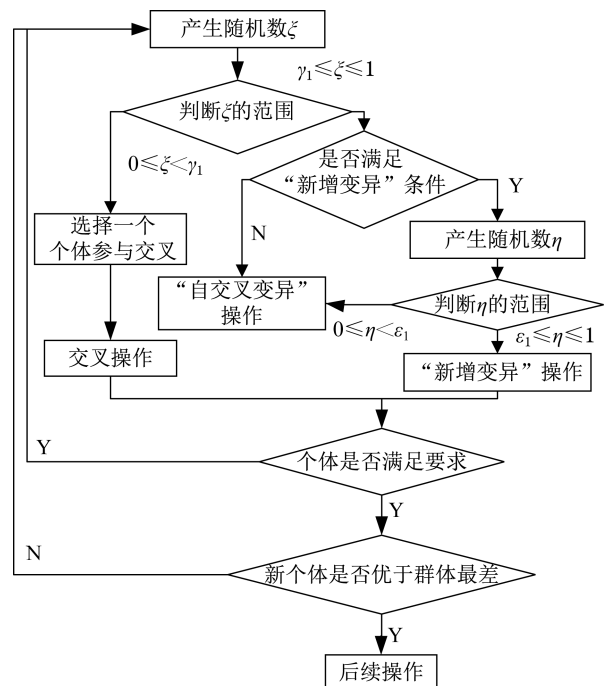


图7 交叉和变异操作流程

Fig.7 Diagram of crossover and mutate flow

超过1%。达到迭代终止条件时,群体中适应度最小的个体为最优个体,最优个体代表AGV实时分配的最优解。其染色体上的基因位所对应的任务基因即为最优的分配方案。

4 算例分析

4.1 算例描述及结果分析

在码头的某个装卸作业时间段设置4个AGV资源池、20台AGV分配给资源池、服务11台岸桥和11台场桥,触发事件发生时有可分配任务22个。按照AGV共享式在线调度方案,将遗传算法通过计算机编程计算求解。迭代次数为200次,得到最小值的迭代曲线如图8所示。在经过94次迭代后,最小总时间在1358s处趋于稳定,得到最优解和最优分配方案。

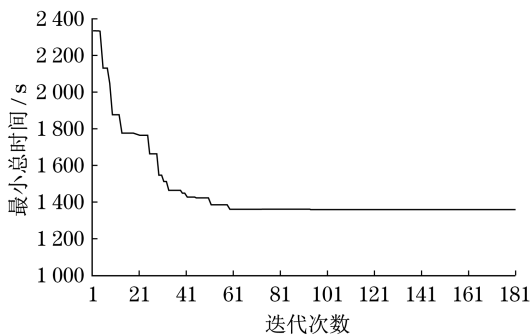


图8 最小总时间迭代曲线

Fig.8 Diagram of minimum time iterative curve

4.2 遗传算法求解性能测试

本文的AGV调度是在线进行的,需要在短时间内计算出分配方案。实验统计1~30辆AGV的调度问题的求解时间见表2,求解时间会随AGV数量的增多而增长。1~16辆的求解时间都在1s以内,满足大多数码头的需求,证明遗传算法求解能够满足时间要求。

表2 求解时间统计表

Tab.2 Solving time statistics

AGV数量/辆	求解时间/s	AGV数量/辆	求解时间/s	AGV数量/辆	求解时间/s
1	0.001	11	0.431	21	1.758
2	0.001	12	0.589	22	1.945
3	0.003	13	0.642	23	2.125
4	0.015	14	0.721	24	2.345
5	0.024	15	0.814	25	2.789
6	0.041	16	0.941	26	3.340
7	0.069	17	1.002	27	4.214
8	0.114	18	1.108	28	5.012
9	0.245	19	1.275	29	7.104
10	0.376	20	1.524	30	8.584

5 结语

本文在总结目前AGV调度模式的基础上,设计基于共享式调度和在线调度的AGV分配方式,考虑未来一段时间内的整体最优。建立共享式在线调度数学模型,设计遗传算法求解。对不同AGV数量的调度问题的求解进行试验,验证了遗传算法满足求解时间要求,并验证其实用性和可行性。本文的AGV调度模式还需进一步的实践论证,算法还需进一步探索和优化。

参考文献:

- [1] CHEN L, LANGVIN A, LU Z. Integrated scheduling of crane handling and truck transportation in a maritime container terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 225(1):142-152.
- [2] RASHIDI H, TSANG E P K. A complete and an incomplete algorithm for automated guided vehicle scheduling in container terminals[J]. *Computers & Mathematics with Applications: An International Journal*, 2011, 61(3):630-641.
- [3] DKHIL H, YASSINE A, CHABCHOUB H. Optimization of container handling systems in automated maritime terminal[J]. *Studies in Computational Intelligence*, 2013, 457:301-312.
- [4] ANGELOUDIS P, BELL M G H. An uncertainty-aware AGV assignment algorithm for automated container terminals[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2010, 46(3):354-366.
- [5] LE H M, YASSINE A, MOUSSI R. DCA for solving the scheduling of lifting vehicle in an automated port container terminal[J]. *Computational Management Science*, 2012, 9(2):273-286.
- [6] 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*. 2013:1-6.
- [7] 宓为, 梁泉, 张晓华, 等. 自动化码头ALV实时任务分配[J]. *上海海事大学学报*, 2016, 37(1):25-31.
- [8] BIAN Z C, YANG Y S, MI W, et al. Dispatching electric AGVs in automated container terminals with long travelling distance [J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 73(1):75-81.
- [9] 赵宁, 宓为建, 何军良. 集装箱码头发箱任务的集卡指派模型[J]. *上海海事大学学报*, 2011, 32(1):8-12.
- [10] 梁晶, 王超恒. 基于改进NSGA-II算法的自动化集装箱码头AGV调度优化[J]. *中国水运*, 2022(3):28-30.