

基于混合遗传算法的柔性作业车间机器人和 AGV 规划

邓 希^{1,2}, 胡晓兵^{1,2}, 江代渝^{1,2}, 彭正超¹

(1. 四川大学机械工程学院, 成都 610065; 2. 四川大学宜宾园区, 宜宾 644000)

摘要: 为解决柔性作业车间多自动导引小车(AGV)配送的调度问题,以加工过程中 AGV 运送工件从毛坯库到成品库总时间最短为目标,提出基于时间表和 A* 算法的混合遗传算法. 提出两种方案分别解决 AGV 路径规划中的冲突碰撞问题和 AGV 在机器位置等待时的占用问题. 将机器人和 AGV 调度集成在划分好的任务单元中,设计了基于任务单元的染色体编码方式,改进了种群初始化方案,交叉变异算子和精英保留策略,在解码操作中根据时间表信息,使用 A* 算法和冲突解决方案规划出每个任务单元中小车无碰撞和占用冲突的最佳路径. 最后,算例对比验证了该算法的可行性和有效性.

关键词: 柔性作业车间; 自动导引小车(AGV)/机器人集成调度; 混合遗传算法; A* 算法
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.022003

A hybrid GA approach to the scheduling of machines and automated guided vehicles in flexible job shops

DENG Xi^{1,2}, HU Xiao-Bing^{1,2}, JIANG Dai-Yu^{1,2}, PENG Zheng-Chao¹

(1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. Yibin R D Park of Sichuan University, Yibin 644000, China)

Abstract: This work proposes a hybrid genetic algorithm based on timetable and A* algorithm to solve the scheduling problem of multi-automatic guided vehicle (AGV) distribution in the flexible workshop, and the optimization goal of the algorithm is to minimize the total time for the AGV to transport the workpieces from the rough library to the finished product warehouse. Two schemes are proposed to solve the collision problem in AGV path planning and the problem of position occupation while the AGV is waiting at the position of machine. The machine and AGV scheduling is integrated in the divided task unit. Then the chromosome coding method based on the task unit is designed. The population initialization scheme, the cross and mutation operator and the elite retention strategy are improved. In the decoding operation, according to the schedule information, the A* algorithm and conflict resolution are used to plan out the best path without collisions and occupation conflicts in each task unit. Finally, the feasibility and effectiveness of the algorithm are verified by the numerical examples.

Keywords: Flexible job shop; Automatic guided vehicle (AGV)/machine integrated scheduling; Hybrid genetic algorithm; A* algorithm

收稿日期: 2020-07-07

基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2018ZX04032001-003); 川大-泸州校地合作项目(2018CDZG-2, 2020CDLZ-1)

作者简介: 邓希(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为企业信息化、智能制造. E-mail: dengxi@stu.scu.edu.cn

通讯作者: 胡晓兵. E-mail: xbh9009@qq.com; huxb@scu.edu.cn

1 引言

柔性制造系统(FMS)将加工设备与先进信息技术结合,实现了加工制造的柔性化和自动化加工^[1].柔性作业车间中工件加工可有一种或多种机器可选,并有相应的加工时间,一道工序完成后由 AGV 运送到下一加工机器的位置加工下一道工序,不同的机器和路径选择则有不同的运输时间,因此机器、AGV 选择和 AGV 路径规划都会影响整个生产调度周期,随着自动引导车辆(AGV)在柔性作业车间的广泛使用,考虑 AGV 运输的作业车间调度更能反映真实加工情况.解决柔性作业车间资源分配优化问题,最大化地利用生产资源,提高生产效率,对提高柔性制造企业的核心竞争力具有重大意义.

国内外学者对考虑 AGV 的作业车间调度问题做了许多研究.李岩等^[2]建立了可变工艺路径、包含 AGV 的 FMS 调度问题的模型,但其将返回成品区的时间包括在最后一道工序的时间内,忽略了 AGV 调度对时间的影响;柳赛男等^[3]提出了基于遗传算法的机器/AGV 的调度算法,Lacomme 等^[4]建立了一种基于析取图的机器/AGV 联合调度模型框架;这部分学者^[2-7]假定 AGV 的路径和行驶时间是确定的,但在调度中未考虑 AGV 行驶过程的碰撞冲突问题,以及不同路径对运输时长的影响.

Saidi-Mehrabad 等^[8]提出了一种二阶段蚁群算法求解问题,讨论了 AGV 的无冲突路径规划问题以及基本的车间作业调度(JSSP)问题,但所讨论的每道工序加工机器都是唯一的,未讨论柔性作业车间中零件的多台可选加工机器的情况.贺长征等^[9]针对柔性作业车间机器/AGV 的双资源调度设计了三链式编码结构,提出了基于时间窗和 Djikstra 算法的混合遗传算法,但在 AGV 路径规划中未考虑小车静止时的占用冲突问题.

遗传算法在车间生产排产问题中有较为广泛的应用^[10],本文针对柔性作业车间机器/AGV 的双资源集成调度问题,提出基于时间表和 A* 算法的混合遗传算法,以工件每一道工序为基础单元,以工件运回任务为特殊单元,设计了基于任务单元的染色体结构,分析解决了 AGV 小车在机器节点处等待的占用冲突问题,最终获得柔性作业车间的机器/AGV 完整调度分配方案.

2 问题描述和模型建立

假设生产车间有 k 台可加工机器, v 辆相同的

AGV 小车,当前总任务有 n 个待加工工件,每个工件有一道或多道工序,每道工序可在一台或多台机器上完成加工作业,并且有相应的加工时间.每台空闲的 AGV 小车都可以运送工件,最终加工完成的工件需要全部送回成品区.

本文引入表 1 的符号定义,并假设条件如下.

- 1) 同一工件各工序的加工顺序固定,不同工件的工序加工顺序互不影响;
- 2) 每个工件的每道工序只能在可选机器的一台上加工完成,加工时长确定,加工开始后不允许中断;
- 3) 每台机器一次只加工一个工件.机器的工件存放空间足够大,待加工工件可提前送达,已加工工件可暂时存放.机器位置小车停靠会引起阻塞;
- 4) 每台 AGV 小车一次只运送一个工件,行驶速度稳定不变;
- 5) 所有 AGV 小车起始位置为毛坯库,结束任务后停留在成品库或机器旁;
- 6) AGV 小车结束当前运输任务后从当前位置立即开始下一运输任务,无空闲等待时间,运输任务全部完成后返回装卸点;
- 7) 机器和 AGV 小车在零时刻都是可用的;
- 8) 考虑 AGV 小车之间的碰撞冲突.

表 1 符号定义

Tab. 1 Symbol definitions

符号	定义
N_i	表示工件(job) ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$)
M_k	表示机器(machine) ($k \in \{1, 2, \dots, m\}$)
V_v	表示 AGV 小车 ($v \in \{1, 2, \dots, w\}$)
P_i	工件 N_i 的总工序数
O_{ij}	工件 N_i 的第 j 个工序
S_{ijk}	工序 O_{ij} 在 M_k 上的加工开始时间
t_{ijk}	工序 O_{ij} 在 M_k 上的加工时长
C_{ijk}	工序 O_{ij} 在 M_k 上的加工完成时间
TA_{iu}	工件 N_i 的作业任务 ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$, $u \in \{1, 2, \dots, P_i + 1\}$)
VRT_{iuv}	TA_{iu} 中小车 V_v 运输可开始时间
VST'_{iuv}	TA_{iu} 中小车 V_v 前往 N_i 位置时间(空载)
VET'_{iuv}	TA_{iu} 中小车 V_v 到达 N_i 位置时间(空载)
VST_{iuv}	TA_{iu} 中小车 V_v 运输开始时间(负载)
VET_{iuv}	TA_{iu} 中小车 V_v 运输完成时间(负载)
VET_v	小车 V_v 所有运输任务完成时间

$$a_{ij'i'j'k} = \begin{cases} 1, & \text{在机器 } M_k \text{ 上工序 } O_{ij} \text{ 先于 } O_{i'j'} \text{ 加工} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$b_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{工序 } O_{ij} \text{ 在机器 } M_k \text{ 上加工} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$c_{iuv} = \begin{cases} 1, & \text{任务 } TA_{iu} \text{ 由小车 } V_v \text{ 运送} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

总调度任务为确定每一个任务单元的执行顺序, 加工机器和 AGV 小车, 规划 AGV 小车的最佳行驶路径, 获得各工件工序的最佳开始加工时间和加工完成时间, 以及最早运回成品区的时间。

目标函数:

$$T = \min(\max_{v=1}^w VET_v) \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{k=1}^m b_{ijk} = 1, \forall i \in N, j = 1, \dots, P_i \quad (2)$$

$$\sum_{v=1}^w c_{iuv} = 1, \forall i \in N, u = 1, \dots, P_i + 1 \quad (3)$$

$$S_{ijk} + A \times a_{ij'j'k} \geq S_{i'j'k} + t_{i'j'k} \quad (4)$$

$$S_{i'j'k} + A(1 - a_{ij'j'k}) \geq S_{ijk} + t_{ijk} \quad (5)$$

$$VST_{iuv} = \begin{cases} VET'_{iuv}, & u = 1 \\ \max\{VET'_{iuv}, C_{i(u-1)k}\}, & u > 1 \end{cases} \quad (6)$$

式(1)表示模型以最大总运输时间最短为目标; 式(2)表示工件的每道工序可也仅可在一台机器上加工完成; 式(3)表示每个任务只能由一台 AGV 小车运送; 式(4)和式(5)中 A 为一个特别大的数, 公式表示在同一机器上后加工的工序必须等待前一工序加工完成才能开始加工; 式(6)表示负载行程要等待小车到达且工件加工完成后才能开始, 运输工件第一道工序任务时, 无加工等待时间。

以每个工件的每道工序为一个任务单元, 并考虑加工完成后将工件运回成品区的任务, 每个工件有 $P_i + 1$ 个任务单元, 其中, 最后一个任务单元只含有运输任务, 其余则包含运输任务和加工任务。任务及资源调度解析图如图 1 所示。

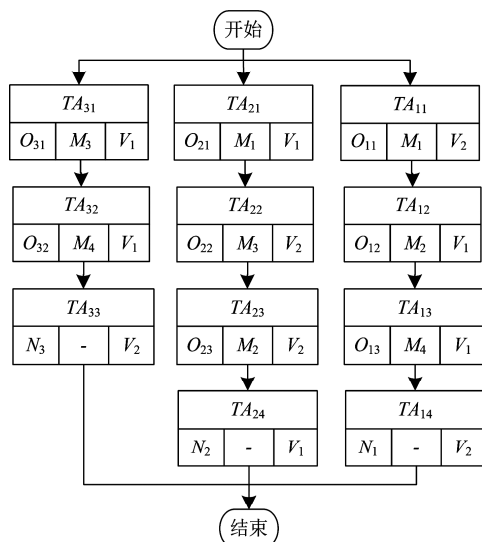


图 1 柔性作业车间任务及资源调度解析图
Fig. 1 Analysis diagram of tasks and resource scheduling in flexible job shop

图 1 中, TA_{iu} 表示一个作业任务, O_{ij}, M_k, V_v 表示该任务所处理的工件工序, 以及需要的机器和 AGV 资源, 如任务 TA_{11} 表示由 V_2 运输工件 N_1 到机器 M_1 , 在机器 M_1 上加工 O_{11} , TA_{14} 表示由 V_2 运输加工完成的工件 N_1 到成品区。

3 路径规划冲突类型及解决策略

使用栅格地图^[11]表示柔性作业车间布局环境, 如图 2 所示, LU_1 表示毛坯仓库上货点, LU_2 表示成品仓库卸货点, 标有 M_k 的栅格为机器 M_k 所在的节点位置。

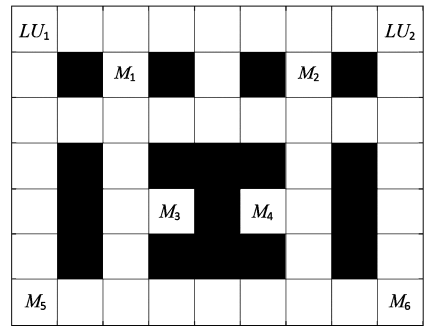


图 2 栅格地图
Fig. 2 Raster map

在小车的一次运输任务周期内, 包含空载行程, 等待负载, 负载行程三个状态, 如图 3 所示, 负载行程结束后立即进入下一任务等待状态, 当前一任务结束时小车所在位置和下一任务起始位置相同时, AGV 小车无空载行程。

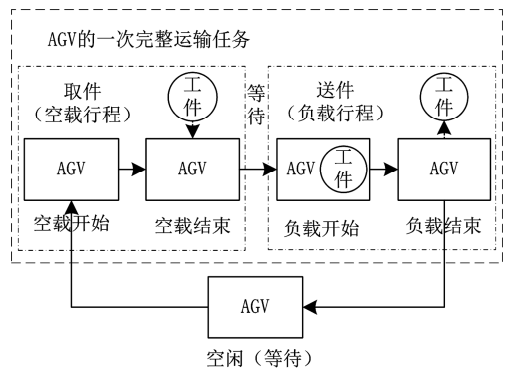


图 3 AGV 小车作业周期示意图
Fig. 3 Operation cycle of AGV

3.1 A* 算法

A* 算法是一种启发式的搜索算法, 通常采用 $f(n) = g(n) + h(n)$ 作为启发式评估函数^[12]. 本文采用曼哈顿距离作为启发函数, 曼哈顿距离的启发式函数为

$$h(n) = \text{abs}(n.x - \text{goal}.x) + \text{abs}(n.y - \text{goal}.y) \quad (7)$$

A* 能快速搜索出起点和终点之间的全局最优路径,具有结构简单、搜索精度高等优点^[13].但是在多小车运输的路径规划中,由于存在交通冲突,A* 算法并不完全适用,因此需要使用改进的基于时间表的 A* 算法进行路径规划.

3.2 AGV 行走状态冲突及解决策略

在 AGV 路径规划的问题中,常见的交通阻塞有相向阻塞,交叉阻塞和节点占用 3 种.假设起始时间 t ,每拓展一个节点时间增加 Δt ,在 A* 算法中拓展节点 N 时,根据时间表查询待拓展节点的占用情况,并判断阻塞类型.

若为交叉阻塞,小车以当前点当作一个临时目标点,查询节点 N 占用结束时间为 t_1 ,以当前节点 C 为新的起始点,起始时间 $t = t_1$ 进行路径规划,更新时间表.

若为相向阻塞和节点占用,则将被占用节点 N 设为不可行点,并继续拓展新的节点,若无可扩展节点,则起始时间 $t = t + \Delta t$,重新进行路径规划.

3.3 AGV 等待状态冲突及解决策略

由于 AGV 小车完成单个任务后停靠于机器旁,而其他任务优先级的小车若要访问此机器则不允许其长时间占用,因而产生的机器节点位置占用冲突.

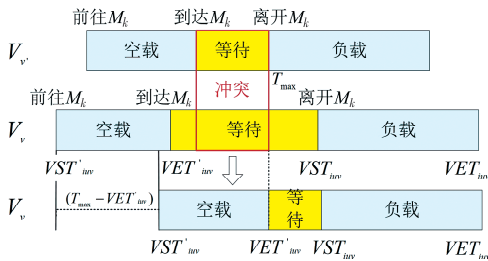


图 4 AGV 等待状态冲突示意图
Fig. 4 Conflict of AGV waiting state

在任务 TA_{ik} 中,如图 4 所示,小车 V_v 取件(空载)时,根据路径规划获得到达机器 M_k 的时间 VET'_{uv} ,根据式(6)计算小车 V_v 运输 O_{ij} (负载)开始时间 VST_{uv} .

判断在 $VET'_{uv} \sim VST_{uv}$ 这段等待时间段之间,是否有任务优先级更高的小车会访问机器 M_k ,若无,允许等待;若有,则查询任务优先级更高的小车 V_v 访问该机器的最晚时间 T_{\max} ,更新 VST'_{uv} 为式(8),重新进行空载路径规划.

$$VST'_{uv} = VST_{uv} + (T_{\max} - VET'_{uv}) \quad (8)$$

当小车 V_v 的当前任务的负载结束位置和下一任务负载起始位置相同时,无取件任务(空载)行程,即 $VST'_{uv} = VET'_{uv}$,同理,计算小车 V_v 运输 O_{ij} (负载)开始时间 VST_{uv} ,判断在 $VET'_{uv} \sim VST_{uv}$ 这段等待时间之间,是否有任务优先级更高的小车会访问机器 M_k ,若有,则查询 T_{\max} ,小车 V_v 返回装卸点缓冲区,到达缓冲区时间为 VRT_{uv} ,重新进行空载路径规划.

4 基于遗传算法的车间作业规划

采用一个实例来描述遗传操作的过程.工件加工信息如表 2 所示.

表 2 柔性作业车间工件加工及运输信息

Tab. 2 The processing and transportation information of flexible job shop

工件	工序	机器号	AGV 号
工件 1	1	1,3	
	2	1,2	
	3	2,4	
工件 2	1	2,3	
	2	4	1,2,3
工件 3	1	1,2	
	2	1,3,4	
	3	3,4	
	4	2,3	

4.1 编码

采用扩展的基于工序的编码^[7],编码由三部分组成,第一部分为任务编码,表示工件的工序加工任务顺序,和工件加工完成后运回成品区任务的顺序,基因串长度为

$$L_1 = \sum_{i=1}^n (P_i + 1) \quad (9)$$

第二部分为机器编码,表示各工件各工序的加工机器,基因串长度为总工序数为

$$L_2 = \sum_{i=1}^n P_i \quad (10)$$

第三部分为 AGV 编码,表示执行各工件各工序运输任务的 AGV 小车,顺序对应任务编码中的各任务运输所需 AGV 号,基因串长度为 L_1 .

根据表 1 实例信息编码的染色体编码方式如图 5 所示.

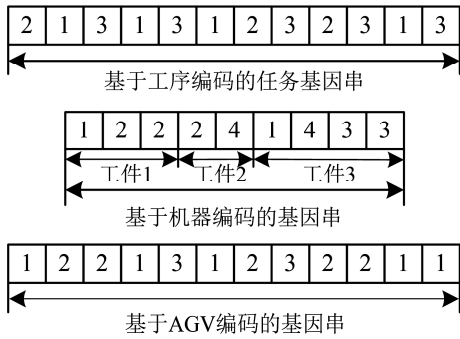


图 5 染色体编码方式

Fig. 5 The coding pattern of chromosome

按从左到右的顺序计数,任务编码基因串中的数字表示工件号,出现的次数 n 表示执行工件的第 n 道工序的任务,最后一次出现的数字表示运回该工件的任务.如第一个 1 表示执行工件 1 的第一道工序任务,第二个 1 表示执行工件 1 的第二道工序任务,第四个 1 即最后一次出现的 1 表示运回工件 1 的任务,以此类推;AGV 编码中第三个的数字为 2,表示任务编码中第三个任务即加工工件 3 的第一道工序使用的 AGV 小车号为 3,以此类推;机器编码中工件 1 的范围内表示工件 1 的三道工序依次由机器 1、2、2 加工,以此类推.此编码方式可得到柔性作业车间一个完整加工和运输作业中多机器和多 AGV 调度问题的可行解.

4.2 初始化

初始种群的质量对遗传算法求解 FJSP 问题有较大影响,由于本文以最短完工时间为目标函数,在机器编码中按 0.2 的概率选择加工工序 O_{ij} 时长最短的机器,在 AGV 编码中按 0.2 的概率将 AGV 小车较为均匀的分配,减少部分小车的闲置.在保持初始种群多样性的同时提高初始化种群个体质量.

4.3 选择操作

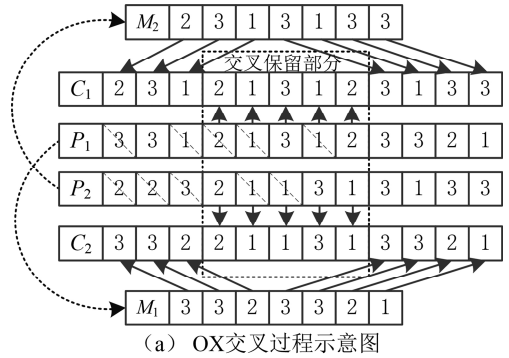
使用随机遍历选择法,根据随机生成的序号选择选择种群中相应位置的个体进行交叉和变异操作,保证种群的多样性.

4.4 交叉操作

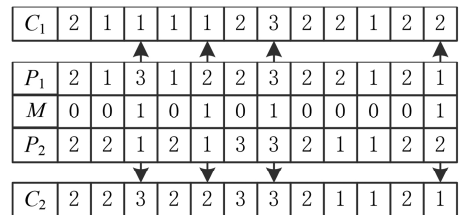
根据染色体编码的不同,针对任务基因串使用 OX 交叉算子,随机取两条 P_1, P_2 父代染色体和随机的两个点,分别将 P_1, P_2 两点之间的基因段 G_1, G_2 提取到子代两条染色体 C_1, C_2 的相同位置,将 P_1 按顺序删除 G_2 中存在的基因,按顺序填入 C_2 的基因空位中,将 P_2 按顺序删除 G_1 中存在的基因,按顺序填入 C_1 的基因空位中.任务编码基因串交

叉过程见图 6(a).

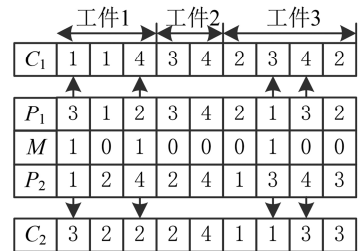
针对机器基因串和 AGV 基因串使用 MPX 交叉算子.随机生成一条与机器基因串长度相同的 0、1 序列 M ,将父代染色体 P_1, P_2 中数字 1 位置的基因互相交换,即交换所使用的机器或 AGV 小车. AGV 基因串交叉过程见图 6(b),机器基因串交叉过程见图 6(c).



(a) OX交叉过程示意图



(b) AGV基因串MPX交叉过程示意图



(c) 机器基因串MPX交叉过程示意图

图 6 染色体交叉示意图

Fig. 6 The crossing process of chromosome

4.5 变异操作

针对任务基因串,从染色体 P_1 中随机选择两个位置的基因,然后将它们的位置互换.任务基因串变异过程见图 7(a).

针对机器基因串,随机选择机器编码的基因串上的一个基因,在该工序的加工机器集中随机选取另外一个不同的机器替换掉当前机器,并按 0.2 的概率选择加工时间最短的机器.机器基因串变异过程见图 7(b).

针对 AGV 基因串的变异采用和任务基因串相同的变异方式,在其基础上按 0.2 的概率随机选

择 AGV 编码基因串上的一个基因,选择出现次数最少的 AGV 小车号替换当前基因,以平均 AGV 小车的利用率,且较为均匀的小车数量分配能减少总运输时间. AGV 基因串变异过程见图 7(c).

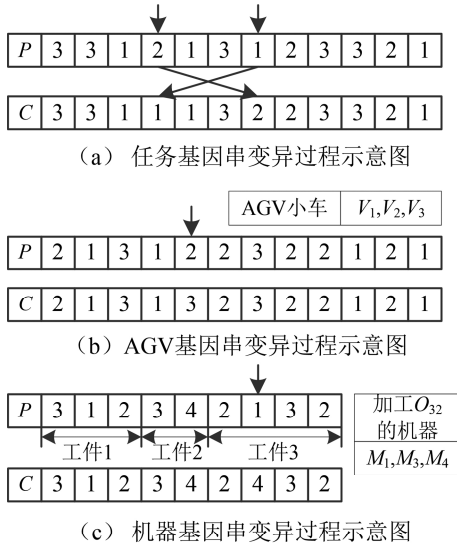


图 7 染色体变异示意图

Fig. 7 The variation process of chromosome

4.6 精英保留策略

父代种群通过交叉变异产生子代种群,将种群合并后得到规模大于 P 的临时种群,为保证进化过程中种群规模一致,需对种群内个体进行筛选. 首先保存父代种群中的最优解,当存在多个最优个体相等时,以 AGV 行走时间最短为第二目标,计算 AGV 小车的总运行时间 T ,根据下式.

$$F = F + 0.0001 \times T \quad (11)$$

对个体进行排序,保留 AGV 小车的总运行时间最小的个体为最优解.

通过轮盘赌法根据适应度占比在临时种群中随机选择个体,生成规模为 P 的新种群,最后采用精英保留策略,用保存的父代种群最优解替换新种群中的最差解,得到下一代的父代种群.

既保证种群的多样性又保留种群中最优的个体,加快全局收敛性和计算效率.

4.7 解码和适应度计算

根据染色体的编码可以获得任务信息,包括加工工件工序 O_{ij} ,所使用机器 M_k 和运输的 AGV 小车 V_v . 将信息作为基于时间窗的 A^* 路径算法的初始条件,结合冲突检测和解决方案,得到一条无冲突无阻塞的路径和相应的运输时间,将已加工完成的工件最后运送到达成品库的最晚时间 $\max(VET_v)$,为完成所有任务的最大时长,即染色体

适应度值 F . 路径规划具体步骤如下.

步骤 1 读取信息. 从左到右依次读取任务染色体中的一个基因,判断任务类型. 若为加工任务,对应工序为 O_{ij} ,加工机器为 M_k ,加工时间为 t_{ijk} ,前一道工序 $O_{i(j-1)}$ 的完工时间 $C_{i(j-1)}$,小车可用时间 VRT_{ijv} ;若为运回任务,则无加工机器和加工时长信息. 对应工件为 N_i ,工件最后一道工序 O_{iP_i} 的完工时间 C_{iP_i} ,小车执行运输任务 $TA_{i(P_i+1)v}$ 可用时间 $VRT_{i(P_i+1)v}$.

根据相应信息和运输起始位置 SP ,终点位置 EP ,选用的 AGV 小车 V_v ,小车当前位置 P_v ,执行步骤 2.

步骤 2 空载路径规划. 根据地图和时间表,小车 V_v 的可使用时间 VRT_{ijv} ,起点小车位置 P_v ,空载任务终点 SP ,进行空载路径规划,执行步骤 5,获得最短路径和相应的时间表,执行步骤 3.

步骤 3 等待状态冲突判断. 根据时间表查询是否存在机器节点占用冲突,若有,执行 AGV 等待状态冲突解决方案,返回步骤 2,若无,执行步骤 4.

步骤 4 负载路径规划. 根据负载开始运输时间 VST_{ijv} ,起点 SP ,终点 EP ,由基于时间表的 A^* 算法求解出最短可行路径,执行步骤 5;获得最短路径和相应的时间表,执行步骤 10.

步骤 5 基于时间表的 A^* 算法搜索路径,根据输入的起始时间 t ,起始节点 S ,目标节点 G 进行路径搜索,当前节点为 C ,拓展节点 N ,每拓展一个节点时间增加 Δt .

步骤 6 冲突检测. 通过时间表查询 $t + \Delta t$ 时刻节点 N 占用情况,若未被占用,更新时间表,执行步骤 7,若占用,执行步骤 8.

步骤 7 判断节点 N 是否为目标节点 G ,若是,输出最短路径和相应的时间表,返回相应调用步骤 2 或步骤 4. 若不是,则继续拓展下一节点,执行步骤 6.

步骤 8 判断阻塞类型. 执行 AGV 行走状态冲突解决方案,拓展新的节点,执行步骤 6,若无可拓展节点,则起始时间 $t = t + \Delta t$,重新进行路径规划,执行步骤 5.

步骤 9 根据空载和负载行程的最优路径和时间表计算此任务中工序 O_{ij} 的开始运送时间 VST_{ijv} ,运送结束时间 VET_{ijv} ,当任务为加工任务时,计算开始加工时间 S_{ijk} 和加工完成时间 C_{ijk} ,当任务为运回任务时,得到小车运回工件到成品库的

时间.

步骤 10 重复步骤 1~步骤 9, 直至所有任务都解码完成, 得到各工件的加工方案, 小车的调度

方案和适应度值 F .

算法的具体流程如图 8.

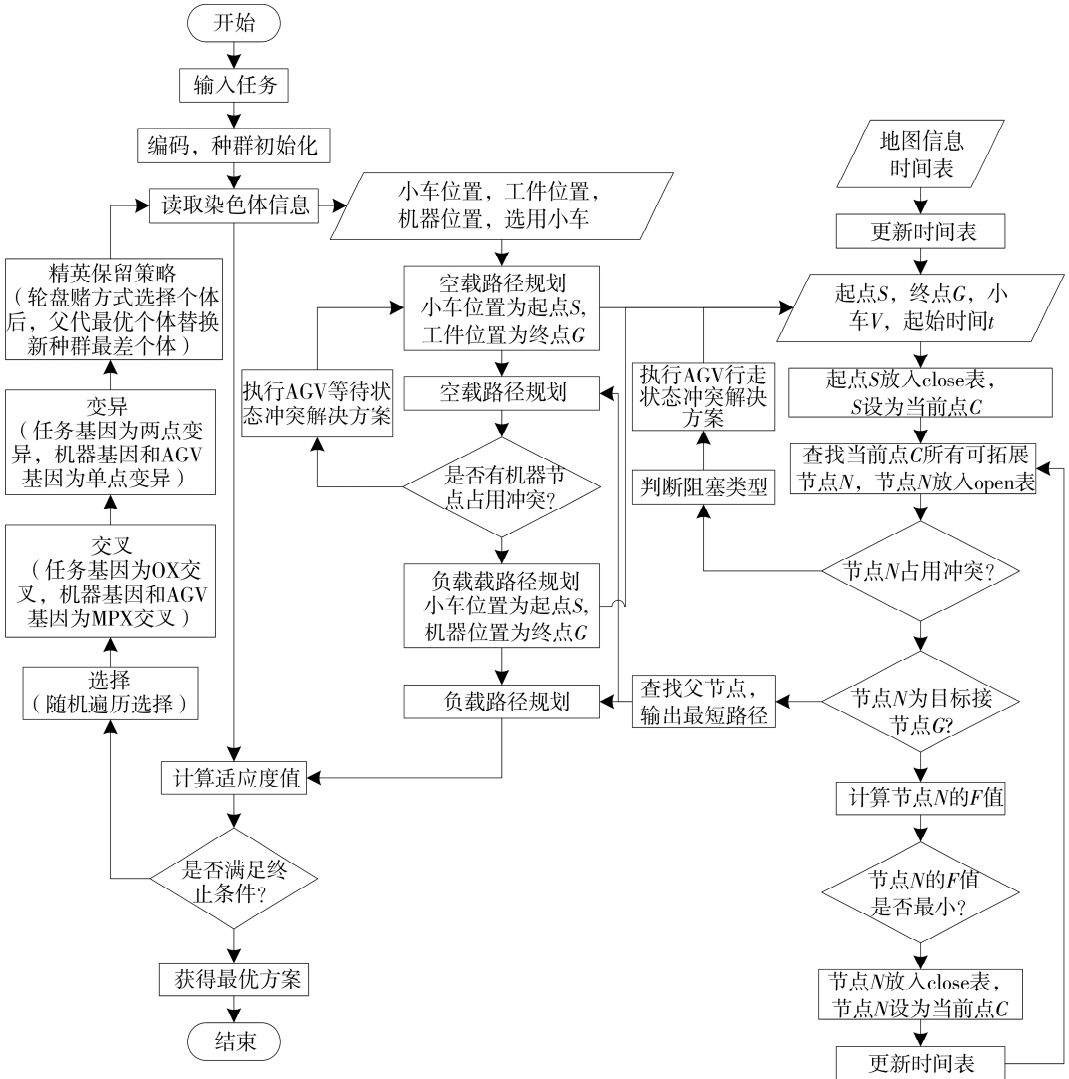


图 8 算法流程图
Fig. 8 The flow chart of algorithm

5 算法对比分析

采用文献[8]中的算例(1~8)在 MATLAB 2016a 对本文算法进行对比验证. 算例中布局环境信息, 工件、小车及机器信息见文献[8], 将该文献中的算法命名为 GAMS, ACA, 一般遗传算法记为 GA, 本文改进的混合遗传算法命名为 HGA. 以总任务完成时间最小为目标进行计算, 程序运行 5 次结果平均值见表 3. 一般遗传算法与本文改进遗传算法的基本参数设置分别为: 初始化种群 $popsiz e = 30$, 最大进化代数 $mgen = 30$ 交叉概率 $pc = 0.6$, 变异概率 $pm = 0.2$.

表 3 不同算法求解结果对比表

Tab. 3 The results comparison of different algorithms

算例号	AGV 数量/工件数量/机器数量/最大坐标点	最大完工时间/min VETmax			
		GAMS	ACA	GA	HGA
0	2/2/3(3,3)	63	63	63	63
1	1/2/2(2,2)	76	77.2	55	55
2	1/3/3(3,3)	97	99.4	51	51
3	2/2/3(3,3)	49	50.2	51	51
4	2/3/3(3,3)	70	72.7	51	51
5	2/4/3(3,3)	69	71.3	58	56
6	3/4/4(4,4)	82	84.6	73	70
7	3/5/5(4,4)	—	115.5	98	87
8	3/5/5(5,5)	—	112.5	105	96

表中“—”表示求解时间较长,无法求得结果,对比结果可以看出本算法在解决中小规模 JSP 问题时相较于文献[8]中的算法有较优的结果,使用本文算法获得的最大完工时间比 ACA 算法平均减少了 20%左右,相较于一般的遗传算法,在求解规模增大后也逐渐产生优势,因此可以证明本算法的可行性和优越性。

应用本文算法求解柔性作业车间的算例,以下是通过对离散制造企业进行调研处理后获得的柔性作业车间中多加工机器选择的算例数据. 车间待加工工件为 5 个,机器 6 台,AGV 小车 3 辆,具体工序和加工机器时间如表 4 所示. 车间布局如图 2 栅格地图所示,假设 AGV 小车行走每一栅格的时间为 1 min.

设置基本参数分别为:初始化种群 $popsiz e = 60$,最大进化代数 $mgen = 50$,交叉概率 $pc = 0.6$,变异概率 $pm = 0.2$. 计算 5 次获得的最优调度方案甘特图见图 9,该生产调度最佳调度周期为 144,三辆 AGV 小车行走时长依次为 99、111、117. 小车每一时刻所在节点位置情况如图 10 所示,数字 1、2、3 分别表示三台 AGV 小车,从图中可以看出 AGV 小车在行走和等待的状态下都没有节点占用冲突,符合算法设计要求。

表 4 工件加工时间表(min)

Tab. 4 The processing schedule of workpiece (min)

工件	工序	机床 1	机床 2	机床 3	机床 4	机床 5	机床 6
工件 1	1	6	—	—	10	—	—
	2	—	8	—	—	14	9
	3	—	—	—	9	10	—
	4	—	8	10	—	—	16
工件 2	1	8	—	12	—	—	—
	2	—	12	—	14	18	—
	3	—	10	6	—	—	—
工件 3	1	—	8	—	9	—	14
	2	—	12	—	—	14	—
	3	15	—	20	—	—	—
	4	—	—	—	15	13	—
	5	—	—	11	—	—	9
工件 4	1	—	—	7	—	9	—
	2	—	10	—	—	—	10
	3	16	—	—	13	13	—
	4	—	—	—	—	12	11
工件 5	1	—	10	—	—	8	—
	2	9	—	—	9	—	—
	3	—	—	13	—	16	12
	4	—	18	—	10	—	—
	5	—	—	—	—	12	—

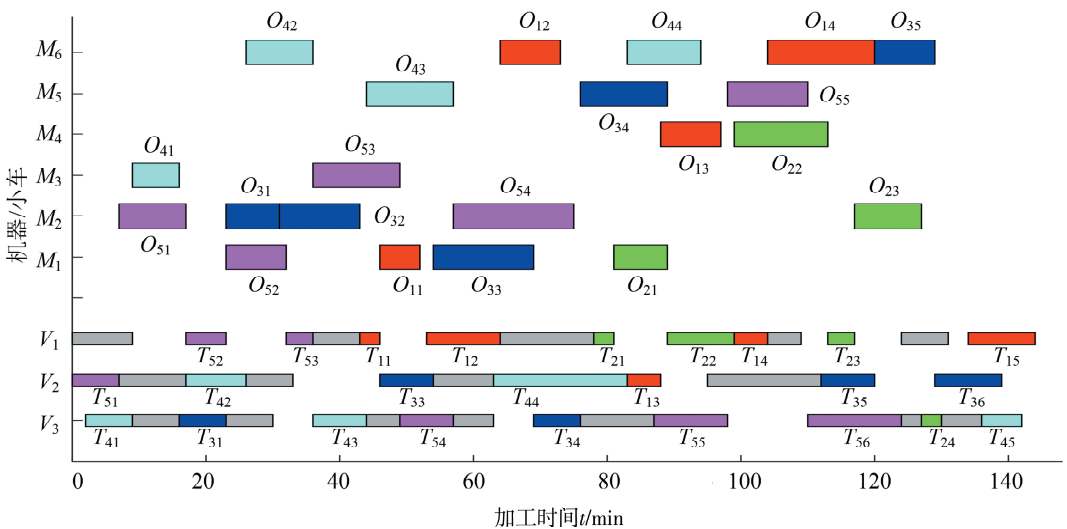


图 9 调度方案的甘特图
Fig. 9 The Gantt graph of scheduling scheme

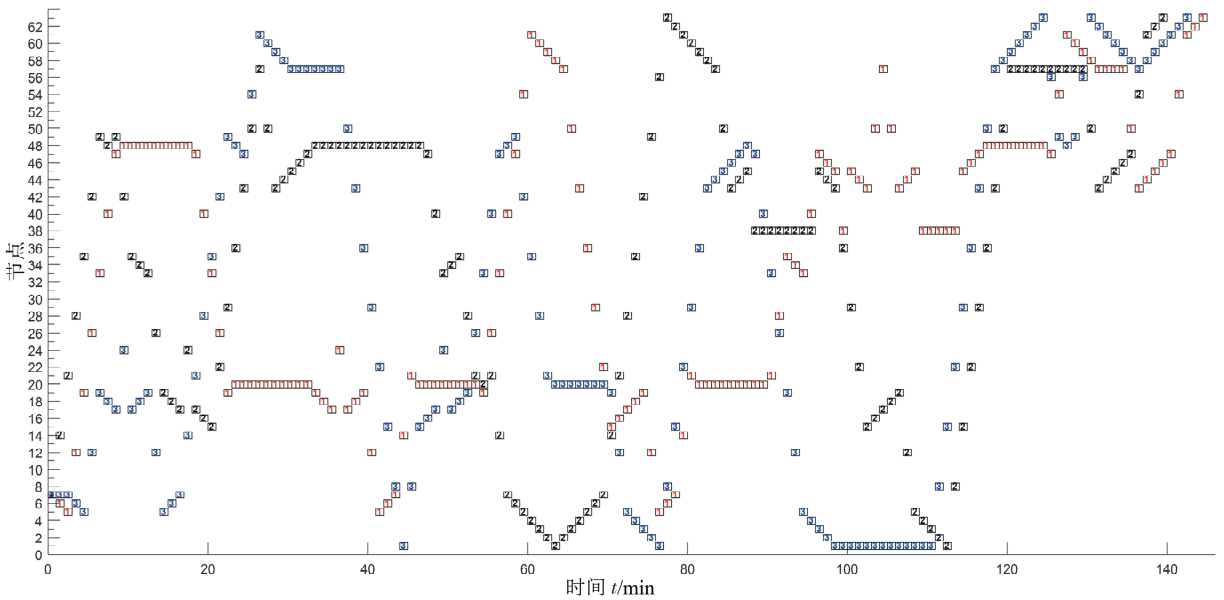


图 10 AGV 位置节点时间表
Fig. 10 Time table of AGV location

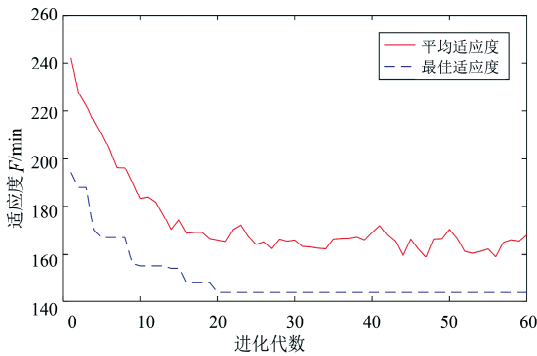


图 11 HGA 算法搜索过程曲线
Fig. 11 The process curve of HGA algorithm

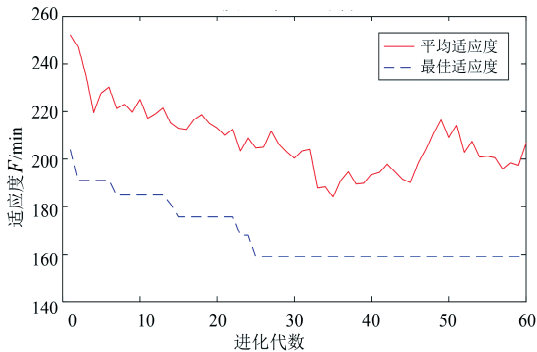


图 12 一般遗传算法搜索过程曲线
Fig. 12 The process curve of simple genetic algorithm

改进的混合遗传算法和一般遗传算法的搜索过程曲线分别如图 11 和图 12 所示。从图中可以看出适应度值逐渐减小并收敛,改进的混合遗传算法在 20 代开始收敛,比一般遗传算法收敛速度更快,

且获得的最优解更好。仿真结果表明,本文使用的基于时间表和 A* 算法的混合遗传算法在处理柔性作业车间机器/AGV 双资源调度问题是有效的,算法收敛速度较快,能够得到完整柔性车间工艺和物流集成规划方案。

6 结 论

本文针对柔性作业车间机器/AGV 双资源调度问题,使用栅格地图模拟车间机器布局和 AGV 运行环境,分析了 AGV 小车在运动和静止两种状态时的冲突情况并提出解决方案。提出基于时间表和 A* 算法的混合遗传算法,设计了以任务为单元的染色体结构,提出相应的交叉变异操作和精英保留策略。以 AGV 行走时间最短为第二目标,在适应度值相等的个体中优先选择 AGV 行走时间最短的个体,减少资源浪费。最后实验证明本文算法在解决中小规模柔性作业车间机器/AGV 双资源调度问题的有效性和优越性。

参考文献:

- [1] 王文. 柔性作业车间调度 Web 系统设计与开发 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
- [2] 李岩, 吴智铭, 甘泉. 柔性加工环境中机器和 AGV 的集成调度[J]. 中国机械工程, 2001, 12: 88.
- [3] 柳赛男, 柯映林. 一种解决有 AGV 小车约束的车间智能调度问题的算法[J]. 中国机械工程, 2007, 18: 1810.
- [4] Lacomme P, Larabi M, Tchernev N. Job-shop based

- framework for simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles[J]. *Int J Prod Econ*, 2013, 143: 24.
- [5] 刘旭, 楼佩煌, 钱晓明, 等. 基于改进遗传算法的物料配送多 AGV 调度优化[J]. *机械设计与制造工程*, 2015, 44: 16.
- [6] Abdelmaguid T F, Nassef A O, Kamal B A, *et al.* A hybrid GA/heuristic approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles [J]. *Int J Prod Res*, 2004, 42: 267.
- [7] 张超勇, 董星, 王晓娟, 等. 基于改进非支配排序遗传算法的多目标柔性作业车间调度[J]. *机械工程学报*, 2010, 46: 156.
- [8] Saidi-Mehrabad M, Dehnavi-Arani S, Evazabadian F, *et al.* An Ant Colony Algorithm (ACA) for solving the new integrated model of job shop scheduling and conflict-free routing of AGVs[J]. *Comput Ind Eng*, 2015, 86: 2.
- [9] 贺长征, 宋豫川, 雷琦, 等. 柔性作业车间多自动导引小车和机器的集成调度[J]. *中国机械工程*, 2019, 30: 438.
- [10] 周原令, 胡晓兵, 霍云亮, 等. 双基球扁发射药生产线的改进遗传排产算法研究[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 627.
- [11] 周润, 龙伟, 李炎炎, 等. 面向绿色再制造系统的 AGV 路径规划研究[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 883.
- [12] 刘家桐. 自动物料转运小车调度系统的研制[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [13] 吴麟麟, 杨俊辉, 汪若尘, 等. 基于混合 SA 算法的智能汽车全局路径规划[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2019, 40: 249.

引用本文格式:

中文: 邓希, 胡晓兵, 江代渝, 等. 基于混合遗传算法的柔性作业车间机器人和 AGV 规划[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2021, 58: 022003.

英文: Deng X, Hu X B, Jiang D Y, *et al.* A hybrid GA approach to the scheduling of machines and automated guided vehicles in flexible job shops[J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2021, 58: 022003.