

柔性车间冲压与物流资源多维度联合遗传调度

李江涛^{1,2}

(1. 濮阳职业技术学院 数学与信息工程学院, 河南 濮阳 457000; 2. 河南大学 濮阳工学院, 河南 濮阳 457000)

摘要: 为了提高柔性冲压车间的生产效率, 实现多维度资源的合理调度, 提出了基于小生境引导遗传算法的联合调度方法。分析了柔性冲压车间中生产和物流的耦合过程, 建立了带约束的多维度资源联合调度优化模型。将遗传算法染色体区分为先验体和搜索体, 将先验体适应度作为先验信息引导搜索体的搜索方向, 进而提出了小生境引导遗传算法并将其应用于调度问题求解。经校企合作单位的柔性冲压车间生产验证, 小生境引导遗传算法得到的调度方案的完工时间最短 (57.6 h), 比标准遗传算法减少了 10.4%, 比遗传-郊狼混合算法减少了 5.6%, 比自适应差分进化算法减小了 4.6%。实验结果表明, 所提方法在多维度资源联合调度中具有优越性。

关键词: 多维度资源; 耦合过程; 联合调度; 柔性车间; 小生境引导遗传算法

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.09.033

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 09-0254-07

Multi-dimensional joint genetic scheduling of stamping and logistics resources in flexible workshops

Li Jiangtao^{1,2}

(1. Department of Mathematics and Information Engineering, Puyang Vocation Technology College, Puyang 457000, China;

2. Puyang Institute of Technology, Henan University, Puyang 457000, China)

Abstract: In order to improve the production efficiency of flexible stamping workshops and achieve reasonable scheduling of multi-dimensional resources, a joint scheduling method based on niche guided genetic algorithm was proposed. Then, the coupling process between production and logistics in a flexible stamping workshop was analyzed, and a multi-dimensional resource joint scheduling optimization model with constraint condition was established. Furthermore, the genetic algorithm chromosomes was divided into prior bodies and search bodies, and the prior body fitness was used as the prior information to guide the search direction of the search body. A niche guided genetic algorithm was proposed and applied to solve the scheduling problems. The production verification in the flexible stamping workshop of school enterprise cooperation units shows that the completion time of scheduling scheme obtained by the niche guided genetic algorithm is the shortest (57.6 h), which is 10.4% less than that of the standard genetic algorithm, 5.6% less than that of the genetic coyote hybrid algorithm, and 4.6% less than that of the adaptive differential evolution algorithm. Thus, the experimental results show that the proposed method has superiority in the multi-dimensional resource joint scheduling.

Key words: multi-dimensional resource; coupling process; joint scheduling; flexible workshop; niche guided genetic algorithm

冲压件具有质量高、成本低和设计灵活等优点, 广泛应用于汽车、医疗器械和航空航天等多领域的加工制造^[1]。目前, 随着客户多样化、需求多样化的发展趋势, 产品也由大规模生产模式转化为小批量、多品种生产模式, 传统刚性生产车间无法适应新型生产模式而逐渐被柔性车间替代^[2]。在国家倡导绿色、经济、可持续发展的背景下, 如何合理分

配车间中的生产资源、物流资源以实现高效率 and 低能耗生产, 具有重要意义。

柔性冲压车间包括生产资源 (即冲压资源)、物流资源, 有些还包括人力资源等^[3-4]。目前, 车间调度研究主要集中在单一资源调度, 常见方法有数学规划法^[5]、智能启发法^[6-7]等。文献 [8] 以客户满意度为目标, 针对完工时间和延期时间进行优化, 设计了一种双重资源约束下具有更高灵活度的生产调度方法, 有效提高了客户满意度。文献 [9] 研究了半导体生产的多目标复杂车间生产调度问题, 并提出了贪婪随机元启发算法的优化方法, 该方法显著改善了具有偏好的调度方案。文献 [10] 针对

收稿日期: 2024-02-20; 修订日期: 2024-05-16

基金项目: 河南省高等学校青年骨干教师资助项目 (2014CGJS-292)

作者简介: 李江涛 (1978-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: lijiao19781@sina.com

柔性作业车间调度问题，以加工时间、机器负荷为优化指标，设计了基于混合自适应差分进化算法的求解方法，实现了多目标调度优化。文献[11]针对流水车间调度问题，提出了一种多策略教学算法的求解方法，该方法缩短了所给案例的车间完工时间。

当前柔性车间资源调度研究主要为单一资源依次调度，比如生产调度方案固定的情况下对物流进行调度。这种调度方式为低纬度的调度，忽略了加工生产过程中不同资源之间的耦合。仅在生产空间或物流空间进行调度优化，忽略了耦合空间的优化，是不彻底的、浅层次的调度优化。

针对上述问题，本文分析了物流过程和生产过程之间的耦合，建立了多维度资源的联合调度优化方案，并提出了基于小生境引导遗传算法的联合调度方法。最后，通过柔性车间调度案例对本文方法的可行性和优越性进行了验证。

1 多维资源联合调度建模

1.1 柔性冲压车间工作过程

在柔性冲压车间中，主要包括生产资源和物流资源，其中生产资源包括冲压机床在内的加工单元，物流资源包括自动导引车（Automated Guided Vehicle, AGV）、装载台、中转台和卸载台，如图1所示。

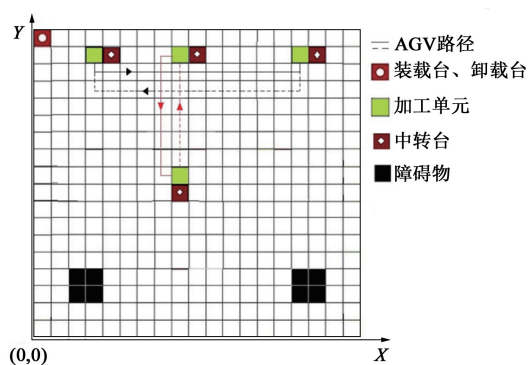


图1 柔性冲压车间的生产资源

Fig. 1 Resources for production of flexible stamping workshop

车间冲压加工过程为：AGV将原料由装载台依次运输到各工序对应的加工单元，加工完毕后将成品运输到卸载台，AGV无任务状态下驻留在中转台。按照图1中AGV的物流路径，AGV之间的路径冲突仅存在交叉冲突这一种情况，如图2所示。在这种情况下，只需要编码大的AGV原地等待1步，编码小的AGV按照原节奏行驶，就可以避免碰撞。

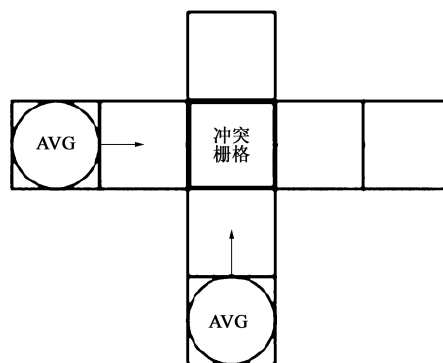


图2 AGV路径冲突

Fig. 2 Path conflict of AGV

在车间物流中，AGV工作模式包括产品随行模式、机床伴随模式和共享模式^[12]，其中产品随行模式是指AGV负责某一产品的整个物流任务，机床伴随模式是指AGV负责某一机床的所有物流任务，共享模式是指AGV可以承担任一物流任务。考虑到共享模式具有最高的物流效率，因此本文采用共享模式。

1.2 柔性冲压车间多维资源调度问题描述

在柔性冲压车间中，包含有 M 个加工单元和 N 个共享AGV物流车。其中 M 个加工单元记为 $\{T_1, T_2, \dots, T_m, \dots, T_M\}$ ， N 个共享AGV物流车记为 $\{A_1, A_2, \dots, A_n, \dots, A_N\}$ 。车间负责生产 I 个产品，记为 $\{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_I\}$ 。每个产品的加工工序已知，假设第 i 个产品的工序数为 J_i ，将第 i 个产品的全部工序记为 $\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{ij}, \dots, O_{iJ_i}\}$ 。任意工序 O_{ij} 的可加工单元已知，由于工序跟生产单元的匹配度不同，工序 O_{ij} 在不同加工单元的加工时间不同且已知。

柔性冲压车间多维资源联合调度是指：在车间布局确定、生产任务已知的情况下，通过对加工单元和AGV物流车进行多维度联合调度，实现车间完工时间短、能耗低等多个优化目标。

将柔性冲压车间多维资源联合调度问题更加具化，就是要完成以下3个任务：

- (1) 确定所有加工工序的生产顺序；
- (2) 确定所有加工工序的生产单元；
- (3) 确定各工序原料运输的AGV小车。

在工程实际中，车间多维资源调度问题需要考虑的因素极多，难以建立全面的数学模型。为了建立合理、实用且简化的数学模型，以保留主要变量、忽略次要变量为原则，做出以下假设：

- (1) 若同一产品的相邻工序在同一加工单元进行生产，则无需AGV进行运输；

(2) 初始时刻, 所有 AGV 物流车和加工单元均为完好状态, 可用于运输与生产;

(3) 对于任一工序, 开始加工后直到结束才停止, 不考虑故障等突发情况的影响;

(4) 任一工序的原料由 1 台 AGV 运输, 且仅需 1 次运输即可;

(5) 加工单元在同一时刻最多只能加工一道工序。

1.3 柔性冲压车间多维资源调度建模

随着市场节奏的加快, 产品的快速加工能够迅速迎合市场需求, 使厂家占据主动性。因此, 本文以车间完工时间最短为优化目标, 即:

$$\text{obj. } f = \min(\max C_i) \quad (1)$$

式中: f 为调度优化目标函数; C_i 为产品 P_i 生产完成并运输完成的时间。

为了后续方便描述, 设置 2 个标识参数, 分别记为加工标识 x_{ijm} 和物流标识参数 y_{ijn} , 并定义为:

$$x_{ijm} = \begin{cases} 1, & \text{当 } O_{ij} \text{ 由 } T_m \text{ 加工时} \\ 0, & \text{当 } O_{ij} \text{ 由其他机床加工时} \end{cases} \quad (2)$$

$$y_{ijn} = \begin{cases} 1, & \text{当 } O_{ij} \text{ 生产材料由 } A_n \text{ 运输} \\ 0, & \text{当 } O_{ij} \text{ 生产材料由其他 AGV 运输} \end{cases} \quad (3)$$

柔性冲压车间多维资源联合调度需要满足以下约束:

- (1) 任一工序只能由 1 个机床加工;
- (2) 任一工序原料只能由 1 个 AGV 运输或无需运输;
- (3) 任一时刻, 每一机床最多加工 1 道工序;
- (4) 任一时刻, 每一 AGV 最多运载一种原料;
- (5) 原料运输到达后才能开始加工;
- (6) 工序开始加工后不允许中断。

上述约束的公式描述为:

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_m^M x_{ijm} = 1 \\ \sum_n^N y_{ijn} = \begin{cases} 1, & \text{若 } O_{ij} \text{ 与 } O_{i(j-1)} \text{ 在不同机床加工} \\ 0, & \text{若 } O_{ij} \text{ 与 } O_{i(j-1)} \text{ 在同一机床加工} \end{cases} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ijm} = 1 \vee 0 \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ijn} = 1 \vee 0 \\ C_{ij} + R_{ij} \leq S_{i(j+1)} \\ C_{ij} - S_{ij} = t_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_{ij} 为工序 O_{ij} 的结束时间; S_{ij} 为工序 O_{ij} 的开始时间; R_{ij} 为工序 O_{ij} 原料的物流时间; t_{ij} 为工序

O_{ij} 的加工时间。

2 小生境引导遗传算法的求解方法

小生境引导遗传算法的设计思路是: 首先在全区域内随机生成染色体, 并计算染色体的适应度值; 适应度高的个体, 表明其小生境^[13]内产生最优个体的概率大, 则以该个体为小生境种子, 生成较多的染色体继续搜索; 对于适应度小的个体, 表明其小生境内产生最优个体的概率小, 则以该个体为小生境种子, 生成较少的染色体继续搜索。

2.1 小生境引导遗传算法原理

遗传算法的优化过程包括编码、交叉、变异和选择等^[14]。小生境引导遗传算法与遗传算法区别在于染色体的初始化和遗传过程。

(1) 染色体初始化

将染色体规模设置为 K , 在小生境引导遗传算法中将染色体进行分类, 其中 $20\%K$ 的染色体称为“先验体”, 另外 $80\%K$ 的染色体称为“搜索体”。首先, 将“先验体”进行初始化, 并计算其适应度值作为先验信息, 依据先验信息对“搜索体”进行初始化。染色体适应度值的计算方法为:

$$g_{\text{fit}} = \frac{1}{f} \quad (5)$$

式中: g_{fit} 为染色体适应度值。

搜索体根据各先验体 (即小生境种子) 的适应度值, 确定选择先验体的概率, 并在相应先验体小生境内进行初始化和细致搜索。搜索体对先验体的选择概率为:

$$p_l = \frac{g_{\text{fit}}(l)}{\sum_{l=1}^{20\%K} g_{\text{fit}}(l)} \quad (6)$$

式中: p_l 为搜索体选择先验体 l 的概率。

(2) 染色体编码

根据 1.2 节的问题描述, 车间资源多维度联合调度具体有 3 个任务。相应地, 设计 3 条基因链缠绕为染色体, 分别称为顺序链、加工链、物流链。联合调度染色体编码存在的困难在于: 每个产品的物流过程比加工过程多 1 个环节, 这意味着物流链要长于顺序链和加工链, 与自然界中染色体各基因链等长的情况相违背。

针对此问题, 参考“隐性编码”的思想, 在顺序链和加工链中插入隐性基因使得各基因链对齐。且为了变异遗传, 采用耦合与独立混合的缠绕方法。

以 3 个产品为例，3 个加工单元、3 台 AGV 为例，某可行染色体如图 3 所示。

顺序链	1	3	2	2	3	隐	1	隐	2	2	隐
物流链	1	3	2	2	3	1	2	2	3	2	3
加工链	2	3	3	2	1	3	1	1	隐	隐	隐
	O_{11}	O_{12}	O_{21}	O_{22}	O_{23}	O_{24}	O_{31}	O_{32}			
	产品 1			产品 2			产品 3				

图 3 某可行染色体

Fig. 3 A feasible chromosome

图 3 所示染色体的含义为：工序的加工顺序为 O_{11} 、 O_{31} 、 O_{21} 、 O_{22} 、 O_{32} 、 O_{12} 、 O_{23} 、 O_{24} ；对应的加工单元为 T_2 、 T_1 、 T_3 、 T_2 、 T_1 、 T_3 、 T_1 、 T_3 。

(3) 交叉

按照本文对染色体的编码和缠绕方法，物流链和加工链采用传统单点交叉法^[15]即可。顺序链需满足“各工序必须且只能存在 1 次”的约束，因此采用 POX 交叉法，如图 4 所示。

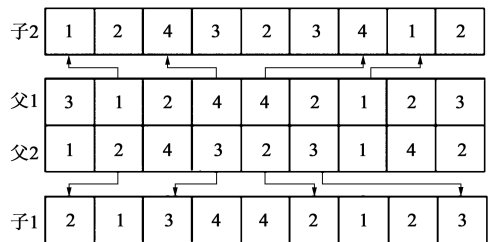


图 4 POX 交叉法

Fig. 4 POX crossover method

POX 交叉的具体方法为：将产品 1~4 随机分为 {1, 4} 和 {2, 3} 两类，其中父 1 的基因 {1, 4} 保持不变遗传给子 1，父 2 的基因 {2, 3} 保持顺序不变嵌入到子 1 中。子 2 的产生过程与子 1 类似。

(4) 变异

染色体中的物流链和加工链采用传统随机变异^[16]即可，而顺序链仍需满足“各工序必须且只能存在 1 次”的约束。为了满足这一约束，本文采用逆序变异法，如图 5 所示。



图 5 逆序变异法

Fig. 5 Reverse variation method

图 5 中，从父代顺序链中随机选择“1324”基

因段，将其逆序为“4231”并嵌入到原位置，得到子代顺序链。

(5) 选择及更新

染色体进行交叉变异后，得到子代个体，而后依据式 (5) 计算染色体的适应度值，若某一染色体在同一位置附近连续搜索 5 次而适应度值没有明显提高，则该染色体采用随机方式重新初始化。

染色体种群每完成 1 次遗传操作，按照适应度由大到小进行选择 and 保留，从而维持染色体规模的恒定。

2.2 基于小生境引导遗传算法的求解流程

根据柔性冲压车间的生产资源和物流资源调度实际，结合小生境引导遗传算法原理，制定基于小生境引导遗传算法的求解流程。

步骤 1：给定柔性冲压车间的生产情况，包括产品数量、产品加工工序、各工序可用加工单元、AGV 物流车数量等。

步骤 2：初始化染色体中的先验体，并计算各先验体的适应度值。

步骤 3：依据适应度值计算各小生境内产生的搜索体数量。

步骤 4：先验体和搜索体同时进行交叉变异等遗传操作，并按照式 (5) 进行染色体选择和保留。

步骤 5：当任一染色体在某一位置连续搜索 5 次而适应度值没有明显提高，则该染色体采用随机方式重新初始化。

步骤 6：判断是否达到最大迭代次数，若否则转至步骤 4，若是则输出最优染色体，算法结束。

3 实验与分析

3.1 实验设计

以校企合作单位的柔性冲压车间为例进行验证。车间可用的加工单元为 9 台，分别记为 $T_1 \sim T_9$ 。某一加工单元照片如图 6 所示。



图 6 冲压生产单元照片

Fig. 6 Photo of stamping production unit

根据订单要求,需要生产 10 批产品,即 $P_1 \sim P_{10}$ 。每个产品包括剪切、翻边、折弯等不同工序。可用的 AGV 物流车为 3 台,分别记为 $A_1 \sim A_3$ 。10 批产品各工序的可用加工单元及加工时间如表 1 所示。

表 1 可用加工单元及加工时间

Table 1 Available processing units and processing time		
工件	工序	可用加工单元及时间/h
P_1	O_{11}	$T_1/3.9, T_2/2.4$
	O_{12}	$T_3/2.5, T_4/3.0, T_5/4.4$
	O_{13}	$T_6/4.5, T_7/3.1$
	O_{14}	$T_8/3.0, T_9/4.1$
P_2	O_{21}	$T_1/3.5, T_2/4.4$
	O_{22}	$T_3/2.9, T_4/3.9, T_5/4.4$
	O_{23}	$T_6/3.5, T_7/3.3$
	O_{24}	$T_8/3.7, T_9/3.1$
P_3	O_{31}	$T_1/4.3, T_2/3.3$
	O_{32}	$T_3/2.5, T_4/3.3, T_5/2.0$
	O_{33}	$T_6/2.8, T_7/3.0$
	O_{34}	$T_8/5.0, T_9/4.1$
P_4	O_{41}	$T_1/4.8, T_2/3.4$
	O_{42}	$T_3/4.5, T_4/2.8, T_5/4.6$
	O_{43}	$T_6/4.2, T_7/3.8$
	O_{44}	$T_8/4.0, T_9/2.4$
P_5	O_{51}	$T_1/3.5, T_2/2.6$
	O_{52}	$T_3/4.5, T_4/2.4, T_5/2.6$
	O_{53}	$T_6/2.6, T_7/4.1$
	O_{54}	$T_8/3.6, T_9/4.8$
P_6	O_{61}	$T_1/4.2, T_2/2.4$
	O_{62}	$T_3/3.5, T_4/5.0, T_5/4.1$
	O_{63}	$T_6/2.0, T_7/4.5$
	O_{64}	$T_8/2.4, T_9/4.1$
P_7	O_{71}	$T_1/3.6, T_2/3.0$
	O_{72}	$T_3/3.2, T_4/3.7, T_5/3.0$
	O_{73}	$T_6/2.4, T_7/2.9$
	O_{74}	$T_8/4.9, T_9/2.1$
P_8	O_{81}	$T_1/3.9, T_2/4.9$
	O_{82}	$T_3/4.7, T_4/2.6, T_5/4.3$
	O_{83}	$T_6/3.6, T_7/3.2$
	O_{84}	$T_8/4.4, T_9/2.7$
P_9	O_{91}	$T_1/2.8, T_2/2.3$
	O_{92}	$T_3/4.1, T_4/4.4, T_5/4.0$
	O_{93}	$T_6/3.9, T_7/3.3$
	O_{94}	$T_8/4.4, T_9/3.3$
P_{10}	O_{101}	$T_1/3.1, T_2/4.4$
	O_{102}	$T_3/4.7, T_4/4.5, T_5/3.4$
	O_{103}	$T_6/4.0, T_7/5.0$
	O_{104}	$T_8/2.2, T_9/3.4$

AGV 物流车的运行速度为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 车间的布局如图 7 所示。

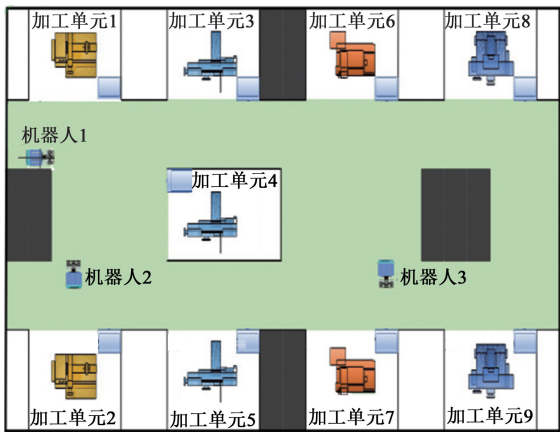


图 7 冲压车间布局

Fig. 7 Layout of stamping workshop

3.2 实验结果与分析

对小生境引导遗传算法的多维资源联合调度性能进行验证。为了进行对比,同时使用文献 [17] 遗传-郊狼混合算法、文献 [18] 自适应差分进化算法对 3.1 节的生产案例进行求解。小生境引导遗传算法的参数设置为:染色体规模为 60、交叉概率为 0.2、变异概率为 0.1、最大迭代次数为 200。遗传-郊狼混合算法、自适应差分进化算法参数与原文保持一致。上述算法在搜索过程中的目标函数值变化如图 8 所示。

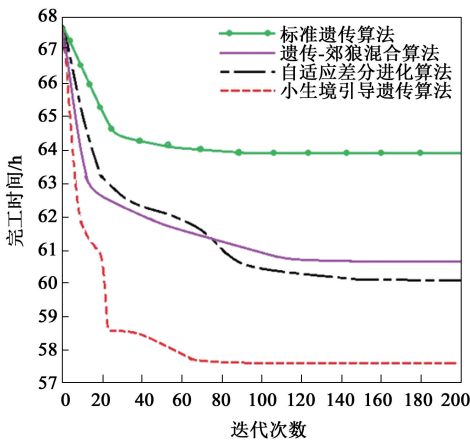


图 8 搜索过程中完工时间变化

Fig. 8 Changes of completion time during search process

4 种算法得到的最小完工时间分别如表 2 所示。结合图 8 和表 2 可知:(1) 本文小生境引导遗传算法在搜索过程中,车间完工时间下降最快,说明本文算法的搜索效率最高,能够快速向最优染色体收敛;(2) 从最终结果看,本文小生境引导遗传

表 2 4 种算法得到的最小完工时间 (h)

Table 2 Minmum completion time obtained by four algorithms (h)

算法	完工时间
标准遗传算法	64.3
遗传-郊狼混合算法	61.0
自适应差分进化算法	60.4
小生境引导遗传算法	57.6

算法得到的车间完工时间最短,说明遗传-郊狼混合算法、自适应差分进化算法搜索过程中陷入局部最优位置,而小生境引导遗传算法由于先验信息的引导作用,能够快速锁定较优位置,并且重新初始化方法可以有效跳出局部最优。因此,小生境引导遗传算法的搜索速度和搜索结果均好于另外两种算法。小生境引导遗传算法得到的完工时间为 57.6 h,对应的最优染色体解码为调度方案,如图 9 所示。

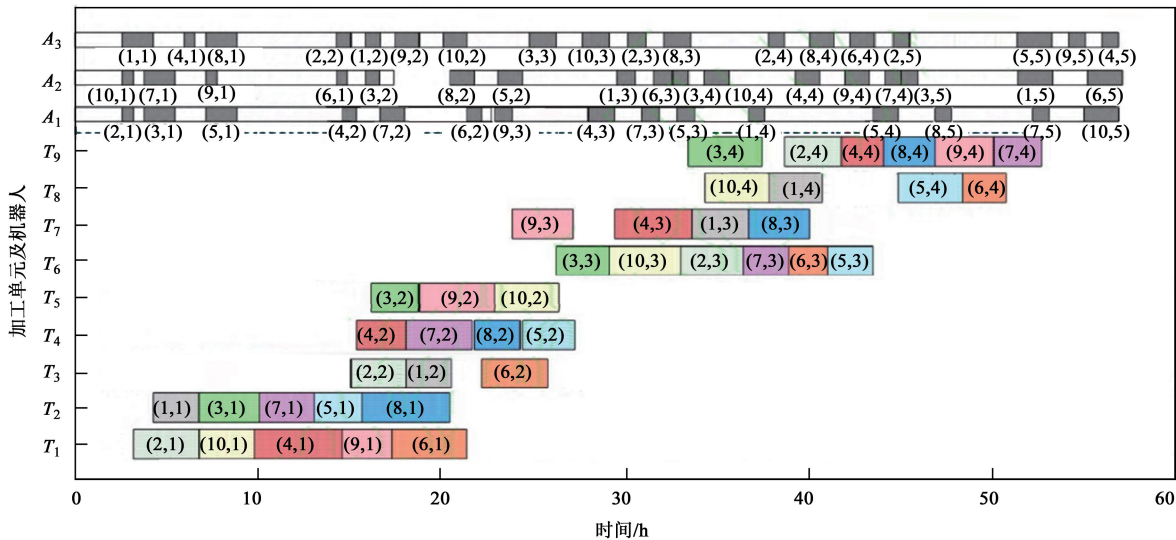


图 9 完工时间最短调度方案

Fig. 9 Scheduling plan of minmum completion time

以机器人 A_3 为例,机器人 A_3 运输 (1, 1) 表示工序 O_{11} 的原料由 A_3 运输,机器人 A_3 运输 (2, 1) 表示产品 P_2 加工完毕后由 A_3 运输。综合分析图 9 给出的调度方案,满足逻辑约束、时间约束及假设条件,是一个可行的加工与物流资源联合调度方案。

3.3 算法稳定性分析

为了分析算法的稳定性和鲁棒性,以车间中 AGV 物流车数量为变量进行分析。将车间中可用 AGV 数量区间设置为 [2, 7],生产任务、可用加工单元及时间同表 1 不变,算法参数设置同 3.2 节不变。

采用小生境引导遗传算法对多维资源联合调度问题进行求解,得到不同 AGV 物流车数量对应车间完工时间,结果如图 10 所示。

分析图 10 可以得出以下结论: (1) 在不同数量 AGV 物流车情况下,小生境引导遗传算法均能够得到可行的调度方案,说明该求解方法具有较好的

稳定性和鲁棒性; (2) 随着 AGV 数量的增加,车间完工时间呈现下降趋势,说明投入充足的物流资源,可以有效提高生产效率,减小车间完工时间; (3) AGV 数量增加至 5 个以上时,车间完工时间不再减少,是因为在该生产任务下,AGV 数量已经饱

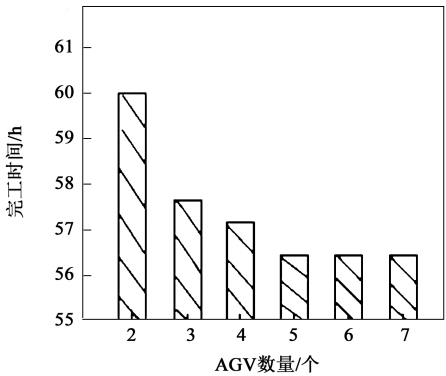


图 10 不同数量 AGV 的完工时间

Fig. 10 Completion time by different quantity of AGVs

和,通过增加 AGV 数量已经无法提高生产效率。

综上所述,本文提出的基于小生境引导遗传算法的调度方法是稳定的、可行的,且具有一定的优越性。

4 结 论

(1) 小生境引导遗传算法中“先验体”作为先验信息,有效提高了“搜索体”的搜索效率,进而提高了算法的优化能力。

(2) 在生产案例中,小生境引导遗传算法规划的联合调度方案的完工时间最短,为 57.6 h,表明该方法在多维资源联合调度中具有优越性。

参考文献:

- [1] 孔敏,胡伟. 工艺方案对高强平板冲压件回弹及补偿的影响[J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 75-80.
Kong M, Hu W. Influence of process scheme on springback and compensation for high strength flat stamping part [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 75-80.
- [2] ElMaraghy H, Monostori L, Schuh G, et al. Evolution and future of manufacturing systems [J]. CIRP Annals, 2021, 70 (2): 635-658.
- [3] 苑明海,黄涵钰,蔡仙仙,等. 隐性扰动下智能车间资源重调度决策方法研究[J]. 制造技术与机床, 2023 (9): 102-108, 137.
Yuan M H, Huang H Y, Cai X X, et al. Decision method for intelligent workshop resource rescheduling under implicit disturbance [J]. Intelligent Manufacturing, 2023 (9): 102-108, 137.
- [4] Arkhipov D I, Wu D, Wu T, et al. A parallel genetic algorithm framework for transportation planning and logistics management [J]. Ieee Access, 2020, 8: 106506-106515.
- [5] 于涛. 基于数学规划法的造纸制浆设备动态调度模型研究[J]. 造纸科学与技术, 2021, 40 (6): 45-48.
Yu T. Research on dynamic scheduling model of pulping and papermaking equipment based on mathematical programming method [J]. Paper Science and Technology, 2021, 40 (6): 45-48.
- [6] Bezdán T, Zivković M, Bacanin N, et al. Multi-objective task scheduling in cloud computing environment by hybridized bat algorithm [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2022, 42 (1): 411-423.
- [7] Hang S, Qi K Y, Miao L, et al. Research on workshop manufacturing resource scheduling control method based on industrial internet of things [A]. Guangzhou Internet Society, 2020 International Conference on Computer Engineering and Application [C]. Guangzhou, China: IEEE, 2020.
- [8] Andrade-Pineda J L, Canca D, Gonzalez-R P L, et al. Scheduling a dual-resource flexible job shop with makespan and due date-related criteria [J]. Annals of Operations Research, 2020, 291: 5-35.
- [9] Tamssaouet K, Dauzère-Pérès S, Knopp S, et al. Multiobjective optimization for complex flexible job-shop scheduling problems [J]. European Journal of Operational Research, 2022, 296 (1): 87-100.
- [10] 陈永灿,刘宇,周艳平. 求解多目标柔性作业车间调度问题的混合自适应差分进化算法[J]. 制造技术与机床, 2023 (12): 171-177.
Chen Y C, Liu Y, Zhou Y P. Hybrid adaptive differential evolution for multi-objective flexible job shop scheduling problem [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023 (12): 171-177.
- [11] 亓祥波,马志强,王宏伟. 求解 PFSP 的集成多策略教学优化算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023 (12): 34-39.
Qi X B, Ma Z Q, Wang H W. Integrated multi-strategy teaching-learning-based optimization algorithm for solving PFSP [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023 (12): 34-39.
- [12] Santos J, Rebelo P M, Rocha L F, et al. A based routing and scheduling modules for multiple agvs in an industrial scenario [J]. Robotics, 2021, 10 (2): 72.
- [13] 段连浪. 求解多模态优化问题的小生境进化算法研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
Duan L L. Research and Application of Niche Evolutionary Algorithm for Solving Multimodal Optimization Problems [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2023.
- [14] Sohail A. Genetic algorithms in the fields of artificial intelligence and data sciences [J]. Annals of Data Science, 2023, 10 (4): 1007-1018.
- [15] 张惠彬,黄顺祥,刘峰,等. 基于遗传算法的人员疏散路径优化控制[J]. 工业安全与环保, 2020, 46 (10): 24-28.
Zhang H B, Huang S X, Liu F, et al. Optimization of evacuation routes based on genetic algorithm [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2020, 46 (10): 24-28.
- [16] 李远锋,李章维,秦子豪,等. 基于蒙特卡洛相似度遗传算法的运输问题研究[J]. 计算机科学, 2020, 47 (10): 215-221.
Li Y F, Li Z W, Qin Z H, et al. Study on transportation problem using monte carlo similarity based genetic algorithm [J]. Computer Science, 2020, 47 (10): 215-221.
- [17] 姜鹏,方成刚,杨帆. GA-COA 求解柔性作业车间多资源调度问题[J]. 机械设计与制造, 2023 (3): 156-159, 164.
Jiang P, Fang C G, Yang F. Hybrid genetic-coyote algorithm for multi-resource flexible jobshop scheduling problem [J]. Machinery Design & Manufacture, 2023 (3): 156-159, 164.
- [18] 陈永灿,刘宇,周艳平. 求解多目标柔性作业车间调度问题的混合自适应差分进化算法[J]. 制造技术与机床, 2023 (12): 171-177.
Chen Y C, Liu Y, Zhou Y P. Hybrid adaptive differential evolution for multi-objective flexible job shop scheduling problem [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023 (12): 171-177.