

[经营·管理]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.03.015

基于改进遗传算法的附加约束重调度策略

王少航^{1,2}, 蒋毅^{1,2*}, 赵晓梦^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122;
2. 江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要:针对某柔性生产线上遇到机器故障、加工延时、插单、撤单等不能提前预知的意外情况而对生产线的初始调度方案产生干扰的问题,课题组研究了该柔性生产线的重调度问题,设计了一种改进的遗传算法,提高了算法的收敛速度。课题组采用矩阵编码方式使算法便于添加约束条件;设计了一种附加约束重调度方案,采用统一的决策方式,有效应对处理多种意外干扰;最后在MATLAB软件中进行了仿真模拟运算。实验和仿真结果表明:改进遗传算法收敛时间相比经典遗传算法减少了38%,且避免了输出局部极值。课题组提出的重调度方案可有效处理生产线的各种意外情况。

关键词:柔性生产线;遗传算法;附加约束;重调度

中图分类号:TB49;TH186 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)03-0100-05

Rescheduling Strategy with Additional Constraints Based on Improved Genetic Algorithm

WANG Shaohang^{1,2}, JIANG Yi^{1,2*}, ZHAO Xiaomeng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: Aiming at the problem that unexpected situations such as machine failures, processing delays, order insertion and cancellation that cannot be predicted in advance on a flexible production line may interfere with the initial scheduling plan of the production line, an improved genetic algorithm was designed to improve the convergence speed of the algorithm. The matrix coding method was used to make the algorithm easy to add constraints; An additional constraint rescheduling scheme was designed, which adopted a unified decision-making mode to effectively deal with multiple unexpected disturbances; Finally, the simulation was carried out in MATLAB software. The experimental and simulation results show that the convergence time of the improved genetic algorithm is reduced by 38% compared with the classical genetic algorithm, and the output of local extremum is avoided; Rescheduling scheme can effectively deal with various unexpected situations of the production line.

Keywords: flexible production line; genetic algorithm; additional constraints; rescheduling

航发叶片生产线在加工时由于气膜孔的大小、位置和数量在各类工件上都有区别,且需要经过多道指定顺序的工序加工,属于多品种小批量加工的柔性生产线,为了提高产出率需要通过寻优算法找到最优调度方案^[1-2]。但加工过程中总会遇到意外导致初始调度方案不能继续执行,或继续执行原方案会降低产出

率。如气膜孔采用电火花加工方式,由于其工艺特点而不可避免地会发生诸如加工延时、电极更换等情况;机器故障和人为的插单、撤单操作也会对生产线的初始调度方案产生干扰。所以这时就需要重新寻优计算得到新的最优调度方案,防止生产线因为遇到干扰而导致产出率大幅下降。

收稿日期:2022-11-07;修回日期:2023-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675233)。

第一作者简介:王少航(1997),男,河北邯郸人,硕士,主要研究方向为柔性生产线、嵌入式系统。通信作者:蒋毅(1981),男,江苏无锡人,博士,副教授,主要研究方向为电火花加工、自动化技术等。E-mail:jiangyi@jiangnan.edu.cn

在给定机器故障情形下,金鹏博等^[3]提出一种融合了遗传优化、数据仿真和神经网络的重调度方式决策模型,增强了柔性生产线在遇到机器故障时的反应能力。张国辉等^[4]提出了一种改进的帝国竞争算法,解决了机器故障后柔性生产线的重调度问题。张守京等^[5]提出了基于免疫度的规则导向策略,以免疫度作为重调度判定依据,量化分析了柔性生产线在遇到随机干扰时所受影响程度。Zhang Xiaohui 等^[6]设计了一个离散模因算法,可以对受影响的部分工序进行局部重排序以应对机器故障。Zhang Xingong 等^[7]针对生产线在加工过程中遇到意外新作业到达的干扰,提出了一种改进的模拟退火算法,来求解最优重调度方案。Zhang Sicheng 等^[8]同时考虑 3 个典型的优化目标,包括完工时间、最大机器工作量和总拖期,设计了一种混合多种群遗传算法-决策树分类算法(multiple population genetic algorithm-complexity parameter, MPGA-CP)的方法解决动态环境下实时柔性生产调度与重调度问题。Tighazoui Ayoub 等^[9]基于预测-反应策略,开发了一种混合整数线性规划模型以应对客户随时取消订单的意外情况。

以上研究分别针对机器故障、插单和撤单等具体的某一个干扰,提出了相应的解决方案。鉴于遗传算法发展成熟,且适用于参数较多的模型等特点,课题组设计了一种基于改进遗传算法的附加约束重调度方案,采用统一的决策方式应对多种干扰情况。

1 问题描述

叶片生产线如图 1 所示。

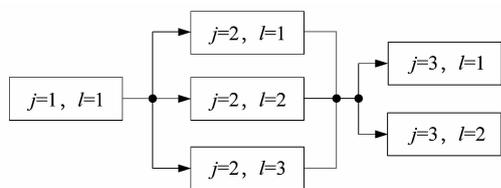


图 1 航发动机叶片气膜孔生产线示意图
Figure 1 Schematic diagram of production line for aeroengine blade film hole

图 1 中 j 表示 j 道工序,共有 3 道工序,每道工序并行机床个数分别为 1,3 和 2; l 表示 l 个工位。一批叶片从上料机进入生产线,它们加工顺序相同、各工序

加工时长已知。但是由于小孔的大小、数量和位置都不同,所以各类叶片在同一工序消耗的时间也不同。

1.1 建立生产线模型

生产线数学模型的变量: n 为加工工件总数; m 为工序总数, $m = 1, 2, 3$; P_i 为第 i 个工件,且 $i = 1, 2, \dots, n$; O_j 为第 j 个工序,且 $j = 1, 2, \dots, m$; M_j 为工序 O_j 中并行机数量(工位); $W_{j,l}$ 为工序 O_j 的第 l 个工位; $S_{i,j}$ 为工件 P_i 在工序 O_j 的开工时刻; $C_{i,j}$ 为工件 P_i 在工序 O_j 的完工时刻; $T_{i,j}$ 为工件 P_i 在工序 O_j 的标准加工时长。

生产线在调度和重调度时新添加的一些参数: t_0 为意外发生时刻,且有 $t_0 > 0$; M 为机器集合, $M = \{k | 1, 2, \dots, M\}$; I 为工件集合, $I = \{i | 1, 2, \dots, I\}$; J 为工序集合, $J = \{j | 1, 2, \dots, J\}$; o_{ij} 为第 i 工件的第 j 道工序操作; M_{ij} 为工序 o_{ij} 的可选机器集合; m_{ij}^o 为原调度方案选择的加工机器; s_{ij}^o 为原调度方案 o_{ij} 开工时间; c_{ij}^o 为原调度方案 o_{ij} 完工时间。

定义标志变量 $F_{i,j,l}$ 用来判断工件 P_i 是否在机床 $W_{j,l}$ 上加工。当工件 P_i 在工序 O_j 的机床 $W_{j,l}$ 上加工时, $F_{i,j,l} = 1$; 否则, $F_{i,j,l} = 0$ 。

1.2 基本约束条件

所有可能的加工方案共同遵循的约束条件为基本约束条件,包括:①叶片加工顺序不能改变;②叶片的加工时长为完工时刻减开工时刻;③叶片在各工序只能经过一个机床。即:

$$C_{i,j-1} \leq S_{i,j}; \tag{1}$$

$$C_{i,j} = S_{i,j} + T_{i,j}; \tag{2}$$

$$\sum_{l=1}^{M_j} F_{i,j,l} = 1. \tag{3}$$

1.3 附加约束条件

调度就是给所有的操作 o_{ij} 安排加工机器,然后安排该机器上的所有操作 o_{ij} 的顺序。重调度时的约束条件显然不同于初始调度,如机器故障导致的重调度,在可选机器上会发生变化,即在基本约束条件上附加一个机器故障的约束条件。不同的意外干扰(如机器故障、插单和撤单等)有不同的附加约束。

首先对操作分类,不同类操作应对干扰的方式不同。 t_0 时刻到来以后,除插单操作外的所有操作 o_{ij} 可归为 3 类:已完成的操作集合 D ,正在进行的操作集合 Z 和未开始的操作集合 U 。判定方式如下:

$$o_{ij} \in \begin{cases} Dt_0 \geq c_{ij}^o; \\ Zs_{ij}^o \leq t_0 \leq c_{ij}^o; \\ Ut_0 \leq s_{ij}^o. \end{cases} \quad (4)$$

如果遇到机器故障、加工延时等意外情况,第 1 类附加约束条件 B1 为:①属于集合 D 和 Z 的操作 o_{ij} 可选机器为 $k = m_{ij}^o$ 。②属于集合 Z 且遇到加工机器故障的 o_{ij} ,工件 i 直接淘汰,不再参与后续工序,即 $i \notin I$ 。③属于集合 U 的操作 o_{ij} ,可选机器为 $k \in M_{ij}$ 。

如果遇到插单,相关操作归类为 C ,第 2 类附加约束条件 B2 为:按照优先等级从大到小给所有操作安排加工顺序,操作 o_{ij} 优先级 p 的值如表 1 所示。

如果是工件 i 撤单,第 3 类附加约束 B3 为: t_0 时刻后,不论 i 属于哪个集合,直接将被撤工件 i 淘汰,即 $t > t_0, i \notin I$ 。

表 1 遇到插单时各操作的优先级
Table 1 Priority of each operation in case of order insertion

操作 o_{ij} 类别	优先级 p
D	3
Z	3
U	1
C	2

1.4 调度方案评价指标

最大完工时间 C_{\max} (适应度值) 的值越小,表示调度方案效率越高。调度目标:

$$\min C_{\max} = \min [\max \{C_i\}], i \in \{1, 2, \dots, n\}。 \quad (5)$$

2 改进遗传算法

经典遗传算法通常先确定编码方式和适应度值计算方法,生成初始种群,然后进行选择、交叉、变异等步骤的循环进行迭代。经典遗传算法收敛速度慢且容易陷入局部极值,变异后可能会出现不满足约束条件的个体。为贴合本文研究内容,需要对算法进行改进。

2.1 改进编码方式

课题组采用矩阵作为编码方式,以便后续添加工序和并行机器,扩大生产规模;并且所有个体都满足基本约束条件,避免了约束检验环节。表 2 所示为各工序可选机器集合。

表 2 各工序可选机器集合

Table 2 Sets of optional machines for each process

操作 o_{ij}	可选机器序号集合 M_{ij}
o_{i1}	{1}
o_{i2}	{2,3,4}
o_{i3}	{5,6}

根据表 2 的可选机器集随机生成的一个工件规模为 4,工序数为 3 的个体:

$$\begin{bmatrix} 1.2 & 2 & 5 \\ 1.3 & 4 & 6 \\ 1.1 & 3 & 5 \\ 1.4 & 4 & 6 \end{bmatrix}。 \quad (6)$$

式(6)的矩阵行序号对应工件序号 i ,列序号对应工序序号 j ,元素的整数值代表当前操作 o_{ij} 所选机器号 k 。 $j=1$ 时,小数的元素值是由算法随机生成,按照从小到大作为工序 1 上工件的加工顺序。 $j>1$ 时,由算法计算得出机器 k 上加工顺序。

2.2 改进算法流程

将选择环节放到交叉之后,且在交叉操作完成以后增加一个融合环节:将交叉产生的子代和父代混合成双倍规模的扩展种群。在扩展的种群中进行选择操作,可以增加种群多样性,及避免丢失父代优秀个体和陷入局部收敛。改进遗传算法的流程如图 2 所示。

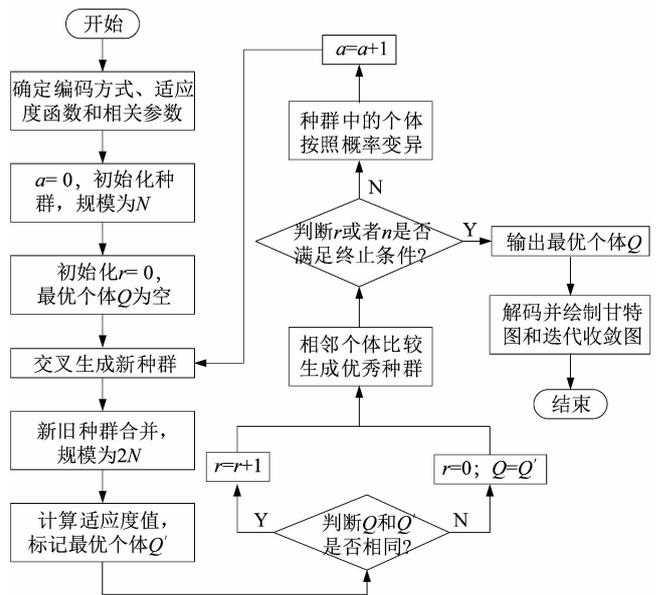


图 2 改进后遗传算法流程

Figure 2 Operation flow of improved genetic algorithm

3 生产线重调度实验仿真

课题组以 1 批 2 类(A 和 B)共 6 个叶片在该生产线上加工为例,上料顺序指定为 i 的值从小到大,进行调度和重调度的实验仿真。算法程序使用 MATLAB 2016b 软件脚本编写,CPU 使用 Intel 的 i7 处理器,16 GiB 内存。表 3 所示为叶片序号和其所属类别;表 4 所示为两类叶片在不同工序 j 上的加工时长 $T_{i,j}$ 。由于默认同一工序的所有并行机床性能相同,所以同类叶片在这些并行机床上加工所耗时长视为相等。

表 3 2 类工件 A 和 B 的序号

Table 3 Number of class A and B workpieces

工件类别	工件序号 i
A	1,2,3
B	4,5,6

表 4 2 类工件 A 和 B 标准加工时长

Table 4 Standard processing hours of class A and B workpieces

工序	$T_{i,j}/\text{min}$	
	A 类	B 类
1	3	5
2	15	20
3	10	16

以上述工件为例,分别使用经典遗传算法和改进遗传算法进行寻优。以 5 次实验结果的平均值作为分析对象,图 3 所示为两种算法的迭代收敛图。

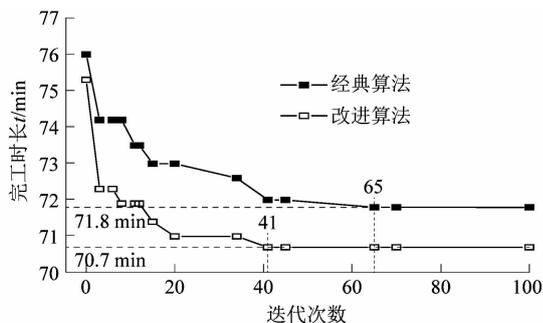


图 3 经典遗传算法和改进算法的迭代收敛图

Figure 3 Iterative convergence diagram of classical genetic algorithm and improved genetic algorithm

从图 3 可以看出,经典遗传算法陷入局部收敛状态,未找到全局最优值。改进遗传算法相比于经典遗

传算法,在避免局部收敛的同时收敛时间减少了 36.9%。由得到的初始调度方案通过 Origin 软件绘制甘特图如图 4 所示,甘特图中每一个矩形都代表一个操作 o_{ij} ,矩形内的数字为工件序号和工序($i-j$)的值。

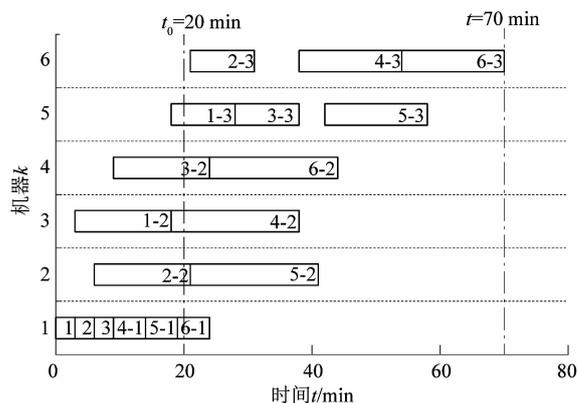


图 4 改进遗传算法得到甘特图

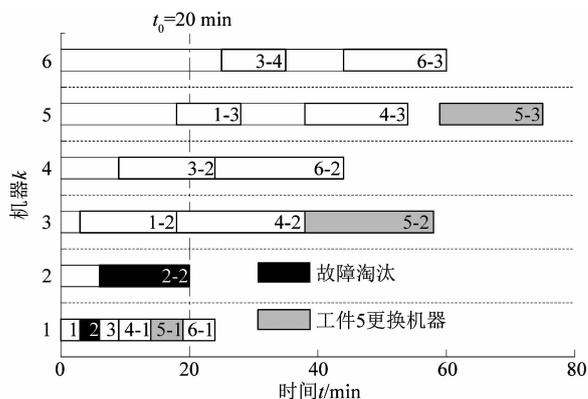
Figure 4 Gantt chart obtained by improved genetic algorithm

图 4 所示的甘特图为初始调度方案,假定在时刻 $t_0 = 20 \text{ min}$ 机器遇到意外情况。未开工的操作集合如表 5 所示。图 5(a)为序号为机器 2 发生故障重调度甘特图,图 5(b)为插入 1 个 A 类订单重调度甘特图,图 5(c)为工件 5 撤单重调度甘特图,图 5(d)为时刻 $t = 21 \text{ min}$ 时操作 $o_{5,2}$ 加工延时 3 min 重调度甘特图。

表 5 t_0 时刻未开工的操作

Table 5 Operations not started at time t_0

机器 k	未开工操作 o_{ij} 的集合 U
2	$\{o_{52}\}$
4	$\{o_{62}\}$
5	$\{o_{33}, o_{53}\}$
6	$\{o_{23}, o_{43}, o_{63}\}$



(a) 机器2故障重调度甘特图

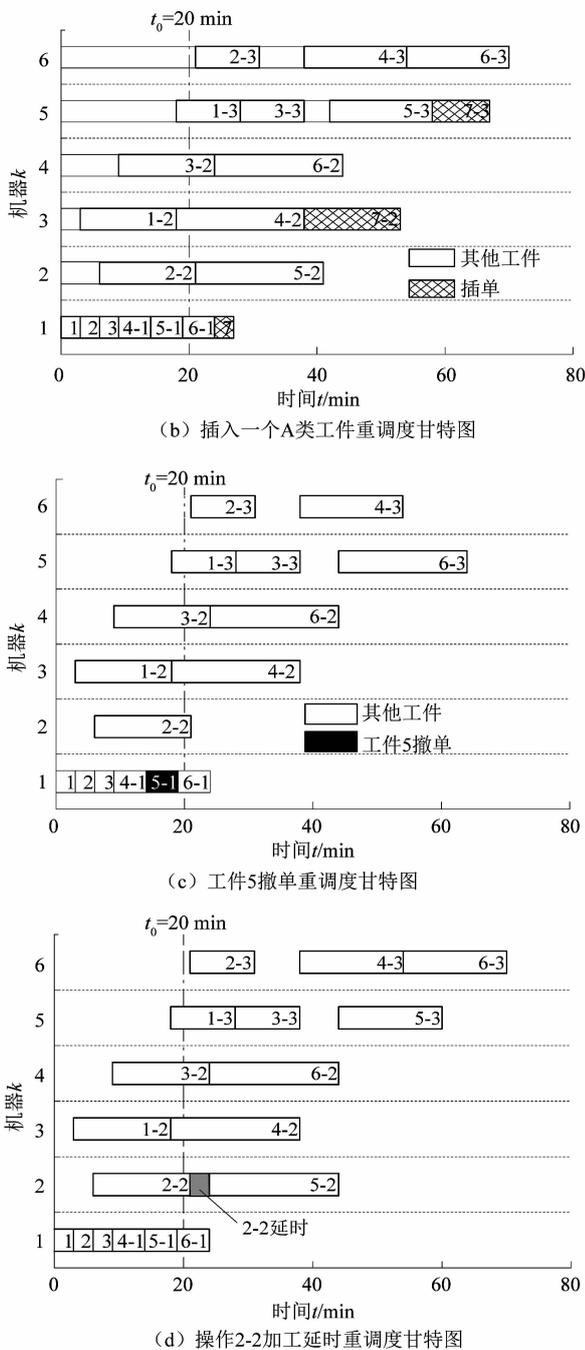


图5 t_0 时刻几种意外发生时对应的重调度甘特图
 Figure 5 Rescheduling Gantt chart corresponding to several accidents at time t_0

通过实验结果可以发现,只要在算法程序中提前设定好各种意外发生时产生的附加约束条件,在 t_0 时刻产生干扰时便可以基于基本约束条件和附加约束条件,通过改进的遗传算法重新寻优得到重调度方案,有效地应对各种意外。

4 结论

为了解决叶片气膜孔生产线遇到干扰的重调度问题,课题组设计了一种附加约束重调度方法,经过实验验证方法可行。并且贴合该生产线的特点改进了遗传算法,使算法收敛时间减少 36.9%。研究得出以下结论:

- 1) 改进的遗传算法,可以准确地描述柔性生产线的各种约束条件,并且在需要进行重调度时可以很方便地适应附加约束条件。
- 2) 课题组设计的附加约束重调度方案应用范围较广,可以应对插单、撤单、加工延时和机器故障等常见的几种随机事件。但是,由于每种干扰的约束条件不同,当算法需要考虑的意外情况越多时,它的体量不可避免地会增大,这会导致算法效率下降。
- 3) 每次遇到干扰,算法需要重新进行全域搜索,随着工件规模增加,算法消耗的时间会显著增加,因此该重调度方案更适合小规模生产线。

参考文献:

[1] 任丽. 基于遗传算法的柔性流水车间调度方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2017:2-6.

[2] 解占新,闫玺铃,陆春月. 面向订单的混流装配线多目标调度研究[J]. 机电工程,2021,38(5):580-586.

[3] 金鹏博,唐秋华,成丽新,等. 机器故障下柔性作业车间的生产重调度方式决策模型[J/OL]. 计算机集成制造系统:1-13[2022-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20211006.0811.002.html>.

[4] 张国辉,陆熙熙,胡一凡,等. 基于改进帝国竞争算法的柔性作业车间机器故障重调度[J]. 计算机应用,2021,41(8):2242-2248.

[5] 张守京,王彦亭,罗志轩. 免疫度下的柔性车间动态重调度研究[J]. 机械科学与技术,2021,40(1):109-115.

[6] ZHANG X H, HAN Y, KROLCZYK G. Rescheduling of distributed manufacturing system with machine breakdowns [J]. Electronics, 2022,11(2):428.

[7] ZHANG X G, LIN W C, WU C C. Rescheduling problems with allowing for the unexpected new jobs arrival [J]. Journal of Combinatorial Optimization,2022,43(3):630-645.

[8] ZHANG S C, TANG F C, LI X. A hybrid multi-objective approach for real-time flexible production scheduling and rescheduling under dynamic environment in Industry 4.0 context [J]. Computers & Operations Research,2021,132(8):1-23.

[9] TIGHAZOUI A, SAUVEY C, SAUER N. Predictive-reactive strategy for identical parallel machine rescheduling [J]. Computers & Operations Research,2021,134(10):1-23.