

引文格式: 玉海龙, 何陶. 基于粒子群优化算法的柔性生产线排产方法[J]. 航空制造技术, 2024, 67(6): 84-91.

YU Hailong, HE Tao. Scheduling method of flexible production line based on particle swarm optimization algorithm[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(6): 84-91.

## 基于粒子群优化算法的柔性生产线排产方法

玉海龙, 何陶

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

**[摘要]** 大力推进信息化和工业化的融合,要在航空航天装备上实现重点领域的技术突破。在未来十年,我国对飞机的需求将会持续加大,这就要求飞机零件的制造效率要高、响应速度要快。但实际生产中,对生产线排产算法的研究与应用还比较少,这就导致实际生产不能发挥出生产线的最大效能。针对上述问题,对实际柔性生产线进行了研究,建立符合现场生产实际的排产调度模型,采用优化的粒子群算法对模型进行求解,得到满足实际排产要求的最优解,使其发挥最大生产效能。

**关键词:** 航空航天; 柔性生产线; 排产; 粒子群优化算法; 车间调度问题

### Scheduling Method of Flexible Production Line Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

YU Hailong, HE Tao

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** To vigorously promote the integration of information and industrialization, we should achieve technological breakthroughs in key fields of aerospace equipment. In the next decade, China's demand for aircraft will continue to increase, which requires aircraft parts to be manufactured with high efficiency and fast response time. But the research and application of the production line scheduling algorithm are still relatively few, which leads to the actual production line can not play the maximum efficiency. Aiming at the above problems, this paper takes the actual flexible production line as the research object, establishes the production scheduling model in line with the actual field production, and then uses the optimized particle swarm optimization algorithm to solve the model and gets the optimal solution.

**Keywords:** Aerospace; Flexible production line; Scheduling; Particle swarm optimization algorithm; Job-shop scheduling problem

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2024.06.084

根据前瞻产业研究院的研究报道<sup>[1]</sup>,在未来十年期间,绝大部分的老旧机型将会在更新换代中退役,新一代的先进机型也将会随之列装。在军工产品型号升级换代速度快、生产效率要求高、飞机数量需求大的当下,根据长期经验进行生产排产的传统排产方式很难使车间的生产效率达到最优。

为了适应中小批多品种的生产线排产与调度需求,在 20 世纪 70 年代,柔性制造系统(Flexible manufacturing system, FMS)<sup>[2]</sup>应运而生。其中最关键的便是作业车间调度问题(Job-shop scheduling problem, JSP),该问题

的定义为:有一组机器需加工一组工件,每一个工件的加工由具有先后顺序约束的加工工序组成,每一个工序只需要一台机器来加工,且机器一直可用,机器可以在不被中断的情况下一次处理一个工序。在这样的条件下,决策的内容为如何对机器上的工序进行排序,使得完工时间最短<sup>[3]</sup>。在 JSP 的基础上,还有柔性作业车间调度问题<sup>[4]</sup>(Flexible job-shop scheduling problem, FJSP),其减少了工序对机器的约束,即每一个工序可以由一台或者多台机器进行加工,更加贴近实际生产,同时也增加了问题的复杂度,是一个更加难求解的非确定性多项式

时间难题<sup>[5]</sup>。

为了解决调度问题,国内外学者研究并提出了多种算法,较早研究 FJSP 问题的是 Bruker<sup>[5]</sup>,他于 1990 年提出了求解只有 2 个工件的简单 FJSP 的多项式算法; Lin 等<sup>[6]</sup>将遗传算法与粒子群算法相结合,提出混合演化算法; Xia 等<sup>[7]</sup>采用粒子群算法与模拟退火算法相结合的方法对多目标 FJSP 进行求解,不仅提高了算法的效率,还提高了求解的质量; Teekeng 等<sup>[8]</sup>提出一种改进的遗传算法,他们采用“模糊轮盘赌选择”的方式改进交叉算子和变异算子的计算,使遗传的种群保持了种群的多样性,克服了收敛过早的问题。

经过实际应用测试分析发现,传统的遗传算法和粒子群算法并不能实际解决本文生产线排产问题,为此,本文对粒子群算法进行求解优化,最终实现对文中排产问题的求解。

## 1 柔性生产线分析与建模

### 1.1 柔性生产线分析

零部件加工柔性生产线由物料库、物料机器人及导轨、上下料工位、加工机床、测量机、总控台、刀具机器人及导轨、刀具更换工位、刀具库组成,如图 1 所示。其中 MT1、MT2 是 4 轴数控加工机床, MT3、MT4 是 5 轴数控加工机床。

该生产线中的机床和测量机均具备双工作台,即加工区和准备区,通过双工作台可以实现机床和测量机不间断更换工件,减少物料更换与等待时间。但在以下情况发生时,需要考虑物料机器人搬运时间,即当某工件刚完成加工且该工件需要测量,而此时测量机处于空闲状态,物料机器人将直接从机床上取料,然后送往测量

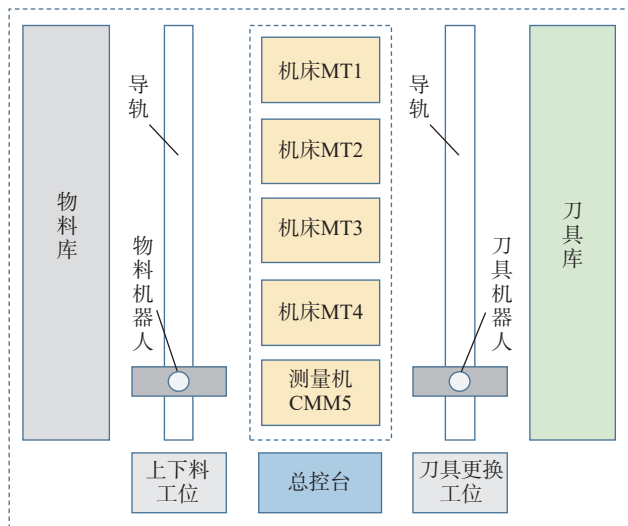


图 1 柔性生产线布局图

Fig.1 Layout drawing of flexible production line

机进行测量,此时需要考虑物料机器人搬运时间,该时间平均约为 1 min。机器人给各个机床和测量机上料与下料的时间大约也是 1 min。

根据柔性生产线的实际生产任务,其调度需求如下。

(1) 紧急插单。即在原定的计划中添加新的订单,并且该订单需要被优先加工。

(2) 任务指定机床。在进行生产计划制定的时候,将某一个加工任务指定到某一类或者一类机床上进行加工,指定到某一类机床通常适用于操作人员调试新品工艺参数,而指定到某一类机床适用于只能使用某类机床进行加工的工件。

(3) 机床热拔插。一种情况是在某一类机床不执行任务时,将该机床退出该生产线,通常适用于对机床的维修等工作;另一种情况是在需要增加生产线的产能时,新增机床。

(4) 工件测量。在某些工件完成加工后,需要对其进行测量,通常适用于对精度、质量要求较高的产品,或者是首批加工的产品。

(5) 工件暂停生产。根据生产或者用户的需要停止某些工件的生产。

(6) 任务指定期限。有一些特定的工件,其需求时间是有要求的,针对这种情况,生产线在排产时需要实现其在指定期限内完成加工。

(7) 加工效率最高。在满足所有加工条件约束的前提下,实现所有工件以最高效率完成加工与测量,即所有的加工任务完工时间最短。

### 1.2 生产线建模

#### 1.2.1 通过任务优先级解决紧急插单问题

为实现有特殊工期要求的工件可以提前加工,对进入柔性生产线加工的工件设立优先级,在排产时,优先加工优先级高的工件。本文为工件设计 3 个优先级:普通等级、优先等级、紧急等级,对应的编码为 1、2、3,其加工的优先级为紧急等级 > 优先等级 > 普通等级。

在排产时,为减少排产复杂度,提高资源利用率,仅考虑同一台机床上所加工的零件的优先级。例如 A 号机床分配到 TK1、TK2、TK3、TK4 4 个工件进行加工,它们的优先级依次为 3、2、1、1; B 号机床分配到 4 个工件 TK5、TK6、TK7、TK8 进行加工,它们的优先级依次为 1、1、1、1。

本文仅单独考虑 A 号、B 号机床上的 4 个零件,其优先级满足要求即可,并不要求 B 号机床上加工的第 1 个工件的优先级高于 A 号机床上加工的第 2 个工件。

#### 1.2.2 机床约束

根据生产线的实际情况,工件任务对机床的约束可以分为 4 种情况:(1) 只能在 4 轴机床上加工;(2) 只

能在 5 轴机床上加工；(3)可以在 4、5 轴机床上加工；(4)指定在某台机床上加工。

对于可以在两类机床上加工的工件,本文认为其不同机床上加工的时间是相同的。

为了明确表示工件任务对应的机床以及加工时间信息,工件任务信息中关于设备属性的信息如表 1 所示。

### 1.2.3 刀具更换与冲突时间

一个工件的加工通常需要一个刀具集才能完成,为了方便分析,本文对刀具做如下设定。

(1)将工件任务所需的刀具集作为一个整体,在需要刀具时,将其以一个整体为单位运送到机床上。

(2)当下一个加工任务所需的刀具集不同时,需要将当前的刀具集全部移出,并换上新的刀具集。因此加工第 1 个工件时,默认需要进行一次刀具更换。

(3)当相邻的两个工件使用的刀具集相同时,无须更换刀具。

(4)由于刀具数量有限,设定一个刀具集只有一套,当某刀具集正在被使用,其他机床的工件若需要使用此刀具集,需等待该刀具集使用完毕。

(5)由于只有一个刀具更换机械手,当刀具更换时间冲突时,计算冲突机床的剩余加工时间,先给剩余加工时间最长的机床换刀;若剩余加工时间相同,则任务号小的先进行换刀。

(6)根据现场测试情况,刀具更换时间约为 4 min。

### 1.2.4 工件测量顺序

柔性生产线上只有 1 台测量机,因此,本文设定所有工件均可以在该测量机上进行测量,工件测量顺序计算规则如下:

(1)首先根据任务完工时间对加工完成后的工件测量顺序进行排序;

(2)如果完工时间相同,则根据工件加工优先级进行排序;

(3)若完工时间与优先级均相同,则根据任务单的序号进行排序。

表 1 工件任务设备信息表

Table 1 Workpiece task equipment information table

任务编号	设备种类	加工时间/min	指定机床
TK1	4	20	—
TK2	4, 5	30	—
TK3	5	45	MT3
TK4	5	40	—

注:设备种类中“4”表示 4 轴机床,“5”表示 5 轴机床,“4,5”表示可以在 4 轴和 5 轴两种类型机床上加工。最后一个指定机床表示 TK3 工件任务只能在 MT3 机床上进行加工。

### 1.2.5 任务总超期时间

工件超期是针对完成时间有限定的工件任务而言的,任务总超期时间是所有任务超期时间的总和,设任务  $i$  的计划完工时间为  $T_{pi}$ ,若无计划完成时间,则令  $T_{pi}=0$ 。假设实际完成时间为  $T_i$ ,则任务  $i$  超期时间  $T_{Oi}$  为

$$T_{Oi} = \begin{cases} 0 & T_{pi} = 0 \\ 0 & T_{pi} \geq T_i, T_{pi} \neq 0 \\ T_i - T_{pi} & T_{pi} < T_i, T_{pi} \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

任务总超期时间  $T_{over}$  为

$$T_{over} = \sum_{i=1}^n T_{Oi} \quad (2)$$

### 1.2.6 调度的目标

本文生产排产的调度目标是:在满足机床约束、工件任务优先级约束及所有工件不超期的情况下,任务总完工时间最短。

任务总完工时间  $T_{total}$  为所有任务完成加工与测量后的时间。假设任务  $i$  的完成时间  $T_i$  对应的机床加工完成时间为  $P_i$ ,测量完成时间为  $M_i$ ,对于不进行测量的工件,令  $M_i=0$ 。任务总完工时间是最后一个工件完工时间。有

$$T_i = \max\{P_i, M_i\} \quad (3)$$

$$T_{total} = \max\{T_i | i=1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

式中,  $n$  为任务数量。

## 2 排产算法设计与优化

### 2.1 工件任务信息描述

有 20 个工件加工任务,需要将其分配到柔性生产线的 4 台机床和测量机中进行加工和测量,其机床加工约束要求、加工时间、测量要求以及测量时间、加工刀具集合类型、完工时间要求以及加工优先级见表 2。

### 2.2 排产算法设计

#### 2.2.1 粒子群算法简介

粒子群优化 (Particle swarm optimization, PSO) 算法在连续域内寻优表现出良好的求解性能<sup>[9]</sup>,通过适当的编码规则,PSO 同样也可以应用在某些离线域的寻优求解上,例如调度问题<sup>[10-12]</sup>。因此,本文选用粒子群算法作为核心算法,求解柔性生产线排产调度问题。

粒子群优化算法流程图如图 2 所示,其种群迭代退出条件是达到最大的迭代次数或者全局最优位置满足最小界限。

其中粒子速度和位置的更新公式为

$$V_x^{k+1} = wV_x^k + c_1r_1(P_x^k - X_x^k) + c_2r_2(P_g^k - X_x^k) \quad (5)$$

$$X_x^{k+1} = X_x^k + V_x^{k+1} \quad (6)$$

式中,  $V_x^k$  表示第  $k$  次迭代粒子  $x$  飞行速度矢量;  $P_x^k$  表示第  $k$  次迭代粒子  $x$  的个体极值;  $X_x^k$  表示第  $k$  次迭代粒

表2 工件任务信息表  
Table 2 Job task information table

任务编号	设备种类	加工时间/min	指定机床	是否测量	测量时间/min	刀具集合	完工时间/min	优先级
TK1	4	15	—	—	—	TS1	—	1
TK2	4	20	—	Y	20	TS1	—	2
TK3	4	20	MT1	—	—	TS2	—	1
TK4	4,5	15	—	Y	15	TS3	—	1
TK5	5	30	MT3	—	—	TS4	80	3
TK6	5	28	—	—	—	TS5	—	2
TK7	5	30	—	—	—	TS5	—	2
TK8	4	20	—	—	—	TS6	—	1
TK9	5	25	MT4	Y	25	TS6	—	1
TK10	4,5	30	—	—	—	TS7	—	3
TK11	4	15	—	—	—	TS1	—	1
TK12	4	20	—	—	—	TS1	—	2
TK13	4	20	MT1	—	—	TS2	—	1
TK14	4,5	15	—	Y	15	TS3	—	1
TK15	5	27	—	—	—	TS4	100	3
TK16	5	28	—	—	—	TS5	—	2
TK17	5	25	—	Y	30	TS5	—	2
TK18	4	20	—	—	—	TS6	—	1
TK19	5	25	MT4	—	—	TS6	—	1
TK20	4,5	31	—	—	—	TS7	—	1

子  $x$  位置矢量;  $P_g^k$  表示第  $k$  次迭代粒子的群体极值;  $c_1$ 、 $c_2$  表示加速常数, 调节学习最大步长;  $r_1$ 、 $r_2$  表示两个随机函数, 取值范围  $[0, 1]$  以增加搜索随机性;  $w$  表示惯性权重, 非负数, 调节对解空间的搜索范围。

### 2.2.2 粒子编码

针对柔性生产线实际排产任务, 可进行粒子编码, 即假设总加工任务为  $N$ , 则其可行解为一个  $2N$  的行向量, 向量中包含了  $N$  个任务的加工顺序及各个任务对应的  $N$  个加工机床。粒子群优化算法中, 将该可行解定义为粒子  $P$ , 其包含  $P_{MT}[N]$  以及  $P_{task}[N]$ 。其中  $P_{task}[N]$  是任务向量, 由  $N$  个  $1 \sim N$  之间的不重复的正整数组成;  $P_{MT}[N]$  是机床向量, 是由  $N$  个  $1 \sim M$  (不包括测量机在内的机床总数) 之间的正整数组成。

为了说明粒子含义, 本文随机构造一个粒子, 即

$P_{task}[N]: [4, 5, 9, 10, 1, 2, 3, 6, 8, 12, 7, 15, 11, 13, 16, 17, 18, 20, 19, 14]$

$P_{MT}[N]: [1, 2, 4, 2, 3, 2, 1, 4, 2, 3, 1, 4, 2, 3, 4, 2, 1, 3, 1, 4]$

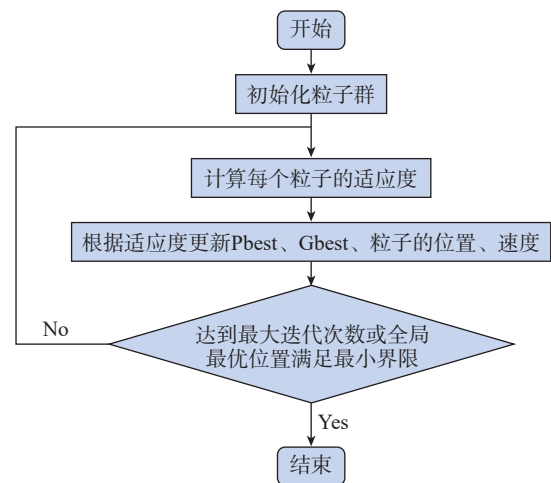


图2 粒子群优化算法流程图

Fig.2 Particle swarm optimization algorithm flow chart

$P_{task}[N]$  中各个序号代表任务数,  $P_{MT}[N]$  中各个序号代表加工的机床。由此可以得到任务与机床的对应关系如表3所示。

2.2.3 适应度定义

根据生产线模型可知,本文对任务的要求是多方面的,它包括任务总完工时间  $T_{total}$ 、任务总超期时间  $T_{over}$ 、机床约束积分  $S_{MT}$  以及任务优先级约束积分  $S_{Pr}$ 。本文根据生产实际需要,将这 4 个要求定义了如下的重要等级:  $S_{MT}(x) > T_{over}(x) > S_{Pr}(x) > T_{total}(x)$ 。

设定粒子  $x$  的适应度函数为  $F(x)$ ,则有  

$$F(x) = S_{MT}(x) / T_{over}(x) / S_{Pr}(x) / T_{total}(x)$$
  
 适应度函数值越小,则该粒子的解越好。

根据粒子假设和对应关系可对任务增加机床约束,本文对机床约束采用积分方式判断排产后机床约束符合情况,当发现有一项任务不满足要求时,积分加 1,可得表 4 所示对照表。

只有当排产积分  $S=0$  时,该排产才是有效的,才是可行解。

同时任务还有优先级顺序,因此对每一个机床上加工任务采用积分  $S_{Pr}$  的方式进行验证,最后将所有机床的积分相加,得到的分值为该排产计划的任务优先级约束积分。

积分规则为: 设第  $j$  个机床上的第  $i$  个任务的优先级为  $Pr_j^i$ ,第  $j$  个机床的积分为  $S_{Pr}^j$ 。将  $Pr_j^i$  与  $Pr_j^m$  ( $0 < m < i$ ) 进行大小判断,当  $Pr_j^i > Pr_j^m$  时,积分  $S_{Pr}^j$  加上  $(Pr_j^i - Pr_j^m)$ ; 当  $Pr_j^i \leq Pr_j^m$  时,积分  $S_{Pr}^j$  加上 0 分,公式为

$$S_{Pr}^j = \begin{cases} \sum_{i=2}^n \sum_{m=1}^{i-1} f(Pr_j^i - Pr_j^m) & n \geq 2 \\ 0 & n < 2 \end{cases} \quad (7)$$

其中,

$$f(Pr_j^i - Pr_j^m) = \begin{cases} Pr_j^i - Pr_j^m & Pr_j^i > Pr_j^m \\ 0 & Pr_j^i \leq Pr_j^m \end{cases} \quad (8)$$

$n$  为  $j$  机床上加工分配到的任务数量。排产计划的总得分  $S_{Pr}$  为

$$S_{Pr} = \sum_{j=1}^{N_{MT}} S_{Pr}^j \quad (9)$$

式中,  $N_{MT}$  为机床数量。

根据式 (9) 可分别计算得到 MT1~MT4 机床的任务优先级积分,即

$$S_{Pr}^1 = 2; S_{Pr}^2 = 2; S_{Pr}^3 = 1; S_{Pr}^4 = 4;$$

总积分为 9。

2.2.4 更新策略设计

根据更新公式 (式 (5) 和 (6)) 及机床约束、任务优先级约束,可得具体迭代过程如下。

位置向量是由任务向量  $P_{task}[N]$  和机床向量  $P_{MT}[N]$  组成,速度向量也可以表示为任务更新速度向量  $V_{task}[N]$  和机床更新速度向量  $V_{MT}[N]$ 。

任务共有  $N$  个,因此任务更新速度向量  $V_{task}[N]$  的最大速度取  $[-N/2, N/2]$  之间,任务更新速度向量初始值通过随机数获取,计算公式为

$$V_{task}[N] = N/2 \times \text{rand}(-1, 1) \quad (10)$$

机床更新速度向量  $V_{MT}[N]$  同理,最大速度取  $[-N_{MT}/2, N_{MT}/2]$  之间,  $N_{MT}$  为机床数量,其初始值计算公式为

$$V_{MT}[N] = N_{MT}/2 \times \text{rand}(-1, 1) \quad (11)$$

由于机床向量  $P_{MT}[N]$  的取值范围必须在  $[1, N_{MT}]$  之间,因此对更新后的  $P_{MT}^2[N]$  向量的处理方法是首先进行四舍五入取整,再对超过边界值的数值,取对应的

表 3 通过粒子获取的机床与任务的对应关系表

Table 3 Correspondence between machine tools and tasks obtained through particles

$P_{MT}[N]$	机床序列	$P_{task}[N]$	任务编号	$P_{MT}[N]$	机床序列	$P_{task}[N]$	任务编号
1	MT1	4	TK4	1	MT1	7	TK7
2	MT2	5	TK5	4	MT4	15	TK15
4	MT4	9	TK9	2	MT2	11	TK11
2	MT2	10	TK10	3	MT3	13	TK13
3	MT3	1	TK1	4	MT4	16	TK16
2	MT2	2	TK2	2	MT2	17	TK17
1	MT1	3	TK3	1	MT1	18	TK18
4	MT4	6	TK6	3	MT3	20	TK20
2	MT2	8	TK8	1	MT1	19	TK19
3	MT3	12	TK12	4	MT4	14	TK14

表 4 任务与排产机床对照信息

Table 4 Control information between tasks and production scheduling machines

任务编号	约束机床	排产机床	积分	任务编号	约束机床	排产机床	积分
TK4	MT1~4	MT1	0	TK7	MT3~4	MT1	1
TK5	MT3	MT2	1	TK15	MT3~4	MT4	0
TK9	MT4	MT4	0	TK11	MT1~2	MT2	0
TK10	MT1~4	MT2	0	TK13	MT1	MT3	1
TK1	MT1~2	MT3	1	TK16	MT3~4	MT4	0
TK2	MT1~2	MT2	0	TK17	MT3~4	MT2	1
TK3	MT1	MT1	0	TK18	MT1~2	MT1	0
TK6	MT3~4	MT4	0	TK20	MT1~4	MT3	0
TK8	MT1~2	MT2	0	TK19	MT4	MT1	1
TK12	MT1~2	MT3	1	TK14	MT1~4	MT4	0

边界值。

而任务向量  $P_{task}[M]$  的取值是  $[1, M]$  之间不重复的正整数,为此采用排序映射法求取更新后的任务向量。具体过程为:

- (1) 记录原各个任务对应的向量序号;
- (2) 根据更新公式,计算获取下一代任务序列;
- (3) 将任务序列从低到高进行排序;
- (4) 提取排序后的任务序列对应的向量序号,作为新的任务序列。

### 2.3 算法性能测试

通过 MATLAB 对粒子群算法以及生产线模型进行实际测试的种群数量为 80 个,迭代次数为 50 次,学习因子  $c_1=2, c_2=2$ ,惯性权重  $w=0.75$ ,运算 10 次,测试结果如表 5 所示。

由运算结果可以看出,使用没有经过改进的粒子群算法对工件任务进行排产,所有的排产结果均不能满足机床约束和任务优先级约束的要求。

### 2.4 排产算法优化

根据生产线模型以及适应度函数的定义,可以发现本文研究的 FJSP 问题属于多目标优化问题,需要同时最小化 4 个目标,即任务总完工时间、任务总超期时间、机床约束积分以及任务优先级约束积分。根据文献 [13] 可知,虽然 PSO 算法在进行搜索时,可以一次性搜索解空间中的多个解,具有较好的并行计算能力,但是 PSO 算法的性能会随着问题规模的增大而降低,粒子飞行速度也会在算法的迭代过程中逐渐减小,最终会陷入局部极值而停止搜索。

根据上述分析可知,求解失败是因为求解目标过多,导致问题规模过大,最终在局部极值时收敛。因此,可通过减少粒子群优化算法的求解目标来降低问题规模,实现对 FJSP 问题的求解。

本文减少的求解目标为机床约束积分与任务优先级约束积分,保留任务总完工时间和任务总超期时间。

生成粒子时,工件将会分配到机床上,此时通过查

询工件任务信息表即可知道工件是否符合机床约束的条件,若不符合约束要求,则对粒子进行调整,使其满足要求。调整规则如下:

- (1) 工件任务对机床的约束为“只能在 4 轴机床上加工”时,随机选取一个 4 轴机床作为工件任务的加工机床;
- (2) 工件任务对机床的约束为“只能在 5 轴机床上加工”时,随机选取一个 5 轴机床作为工件任务的加工机床;
- (3) 工件任务对机床的约束为“指定在某台机床上加工”时,将工件任务的加工机床设置为指定的机床。

通过上述规则调整后获得粒子的机床约束都满足要求,以此减少了“机床约束积分”求解目标。

为使工件的优先级满足要求,通过以下规则对机床的加工任务序列进行调整:

- (1) 将工件优先级从高到低重新排序,生成新的序列;
- (2) 当前后工件的优先级相同时,不对工件的前后位置关系进行调整。

通过上述规则调整后获得的粒子的优先级约束都满足要求,以此减少了“任务优先级约束积分”求解目标。

## 3 算法仿真结果

通过 MATLAB 对优化后的粒子群算法进行实现,以上述任务为对象,进行算法的性能、效率与可行性验证。

第 1 次测试的种群数量为 60 个,迭代次数为 50 次,学习因子  $c_1=2, c_2=2$ ,惯性权重  $W=0.75$ ,运算 10 次,结果如表 6 所示。

表 6 中运算结果按照“任务总超期时间 / 任务总完工时间”进行呈现,如“0/152”表示任务总超期时间为 0 min,任务总完工时间为 152 min; 其中的最优解任务向量与最优解机床向量共同构成一个解向量。

10 次运算中的最优结果为“0/143”,其收敛过程如图 3 (a) 所示,可以看出,总完工时间最初为 163 min,经过 27 次迭代后,收敛到 143 min。

图 3 (b) 中“W”表示等待时间。机床 MT1 在生产过程中的总使用时间为 136 min,其中刀具等待时间 4 min、换刀时间 12 min、执行机床加工时间 120 min; 机床 MT2 在生产过程中的总使用时间为 140 min,其中刀具等待时间 18 min、换刀时间 16 min、执行机床加工时间 106 min; 机床 MT3 在生产过程中的总使用时间 137 min,其中刀具等待时间 14 min、换刀时间 8 min、执行机床加工时间 115 min; 机床 MT4 在生产过程中的总使用时间为 142 min,其中刀具等待时间 12 min、换刀时间 12 min、执行机床加工时间 118 min; 测量机的总使用时间为 143 min,其中测量等待时间 38 min、执行测量时间

表 5 测试结果  
Table 5 Test results

序号	运算结果	序号	运算结果
1	2/13/11/263	6	1/72/22/204
2	2/0/20/220	7	2/0/2/244
3	1/65/13/200	8	2/183/22/286
4	3/67/25/244	9	3/116/23/225
5	3/7/20/294	10	2/0/18/273

注:运算结果为  $S_{MT}/T_{over}/S_{Pr}/T_{total}$ 。

表 6 优化后的算法第一次测试结果  
Table 6 First test results of optimized algorithms

序号	运算结果/min	最优解任务向量	最优解机床向量
1	0/152	12, 15, 8, 14, 2, 4, 6, 17, 3, 16, 5, 10, 19, 11, 9, 13, 20, 7, 1, 18	4, 2, 4, 1, 4, 1, 3, 4, 4, 2, 2, 2, 3, 4, 3, 1, 4, 2, 1, 1
2	0/143	4, 9, 2, 13, 1, 8, 15, 18, 6, 17, 14, 16, 19, 11, 3, 20, 7, 5, 12, 10	2, 4, 4, 2, 1, 2, 1, 4, 2, 1, 2, 4, 2, 2, 2, 2, 2, 4, 1, 1
3	0/152	18, 1, 2, 8, 6, 19, 14, 17, 12, 13, 5, 3, 4, 20, 11, 7, 9, 15, 16, 10	4, 2, 1, 1, 3, 2, 2, 1, 2, 1, 4, 4, 2, 3, 2, 4, 1, 4, 2
4	0/154	13, 6, 17, 18, 11, 14, 10, 2, 15, 4, 3, 8, 16, 12, 5, 7, 9, 20, 19, 1	1, 3, 4, 1, 2, 4, 2, 3, 3, 2, 4, 3, 3, 4, 4, 2, 1, 4, 1, 1
5	0/152	10, 19, 5, 14, 4, 17, 15, 12, 18, 7, 9, 2, 20, 1, 11, 3, 6, 16, 8, 13	4, 3, 1, 1, 2, 3, 4, 4, 1, 2, 4, 2, 2, 4, 1, 3, 3, 2, 4, 1
6	0/148	17, 8, 18, 2, 14, 5, 13, 9, 4, 6, 16, 15, 3, 19, 12, 11, 7, 20, 1, 10	4, 2, 3, 1, 2, 2, 3, 3, 2, 1, 3, 3, 2, 4, 3, 4, 2, 4, 1, 2
7	0/151	2, 5, 13, 8, 9, 3, 12, 10, 16, 17, 15, 14, 4, 20, 11, 18, 19, 7, 1, 6	3, 4, 1, 4, 2, 1, 3, 2, 3, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 3, 4, 1, 4, 2
8	0/157	6, 8, 2, 11, 10, 12, 18, 16, 1, 19, 5, 17, 14, 13, 4, 3, 20, 9, 7, 15	4, 1, 1, 4, 2, 4, 3, 1, 4, 4, 4, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 3
9	0/152	15, 18, 17, 12, 2, 11, 10, 1, 9, 3, 16, 13, 7, 5, 20, 19, 14, 8, 4, 6	2, 1, 1, 4, 2, 4, 2, 2, 2, 1, 1, 3, 2, 3, 4, 3, 1, 4, 2, 1
10	0/154	4, 5, 7, 14, 3, 17, 15, 18, 20, 8, 16, 10, 13, 11, 1, 6, 2, 12, 9, 19	4, 3, 3, 2, 1, 2, 3, 3, 1, 4, 3, 1, 2, 4, 1, 2, 2, 2, 1, 3

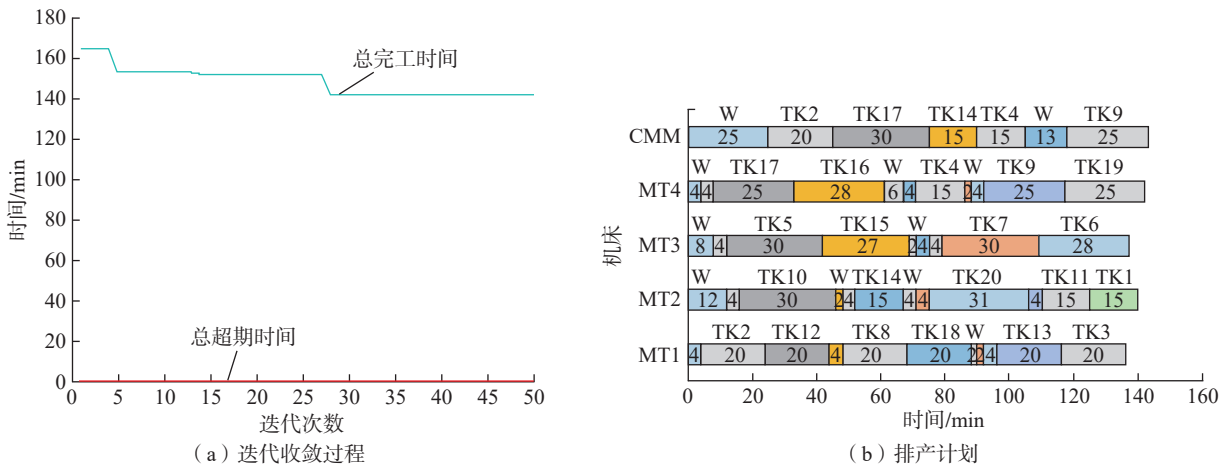


图 3 最优结果“0/143”的收敛过程和排产计划  
Fig.3 Convergence process and production schedule of the optimal result "0/143"

105 min。

第 2 次测试的种群数量为 100 个,迭代次数为 100 次,学习因子  $c_1=2, c_2=2$ ,惯性权重  $w=0.75$ ,运算 10 次。其最优结果为“0/146”,收敛过程如图 4 所示,可以看出,总完工时间最初为 163 min,经过 37 次迭代后,收敛到 146 min。

通过对比算法优化前与优化后的运算结果发现,优化后的所有最优解的超期时间均为 0,因此所有的解均为有效解,获得有效解的概率为 100%,而优化前的算法获得有效解的概率为 0。由此可见通过较少求解目标以降低问题规模的优化方法对求解本文中生产线排产问题是可行的。

#### 4 算法性能对比分析

为了测试改进后算法的性能,本节将改进后的算

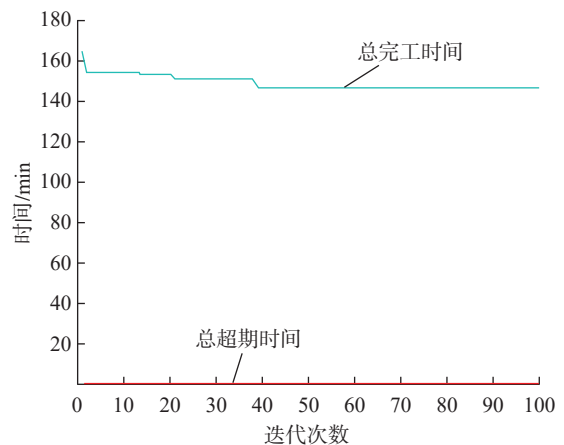


图 4 最优结果“0/146”的迭代收敛过程  
Fig.4 Convergence process of the optimal result "0/146"

法与文献[14–15]中提出的改进 PSO–GA 算法和改进遗传算法进行比较。测试的对象为表 3 所示的工件信息,优化目标同样为任务总完工时间  $T_{total}$ 、任务总超期时间  $T_{over}$ 、机床约束积分  $S_{MT}$  及任务优先级约束积分  $S_{Pr}$ 。使用的软件为 MATLAB R2010b,系统运行环境为 Windows 7 64bit,3.30 GHz CPU,20 G RAM。每个算法运行 10 次,种群数量均为 60 个,迭代次数均为 50 次,其他参数采用文献中给出的典型值或最优值。从求解结果中选出较优的满意解。测试结果如表 7 所示。

从测试结果来看,文献[14–15]中算法的计算结果与改进前的 PSO 算法计算结果类似,均不能求解出满足机床约束和工件优先级约束的最优解。

## 5 结论

(1) 以实际生产线为研究对象,分析调度需求,考虑工况中紧急插单、指定机床、任务优先级等情况,对生产线进行建模。

(2) 提出一种带粒子调整环节的粒子群优化算法,在种群粒子初始化以及种群粒子更新后,新增粒子调整环节,在调整环节对粒子进行局部范围的定向编排优化,得到求解结果。

(3) 设计了两组对比试验,试验结果表明,调整环节极大提高了排产算法的求解速度与求解质量,求解成功率为 100%。

## 参考文献

- [1] 前瞻产业研究院. 2020 年中国飞机制造行业市场现状及发展前景分析[EB/OL]. [2021–02–03]. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/300/210203-41d087d5.html>.
- Prospective Industry Research Institute. 2020 present market situation and future of China aircraft manufacturing industry[EB/OL]. [2021–02–03]. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/300/210203-41d087d5.html>.
- [2] 孙杰. 浅议柔性生产线的产生与应用[J]. 科技资讯, 2010, 8(35): 33.
- SUN Jie. Discussion on the generation and application of flexible manufacturing system [J]. Science & Technology Information, 2010, 8(35): 33.
- [3] 黄泽慧, 闫秀霞. 制造型企业生产排产研究综述与展望[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2012, 26(4): 81–86.

表 7 算法性能对比结果

Table 7 Comparison results of algorithm performance

算法类型	$T_{total}/\text{min}$	$T_{over}/\text{min}$	$S_{MT}$	$S_{Pr}$
改进粒子群算法	143	0	0	0
PSO–GA 算法	189	0	1	10
改进遗传算法	201	0	1	15

HUANG Zehui, YAN Xiuxia. The review and prospect of manufacturing enterprise production scheduling[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 26(4): 81–86.

[4] 汪双喜. 基于差分进化算法的柔性作业车间调度问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

WANG Shuangxi. Research on flexible job-shop scheduling problem based on differential evolution algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.

[5] BRUCKER P, SCHLIE R. Job-shop scheduling with multi-purpose machines[J]. Computing, 1990, 45(4): 369–375.

[6] LIN L, GEN M, LIANG Y, et al. A hybrid EA for reactive flexible job-shop scheduling[J]. Procedia Computer Science, 2012, 12: 110–115.

[7] XIA W J, WU Z M. An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48(2): 409–425.

[8] TEEKENG W, THAMMANO A. Modified genetic algorithm for flexible job-shop scheduling problems[J]. Procedia Computer Science, 2012, 12: 122–128.

[9] 雷秀娟, 史忠科, 付阿利. 改进的粒子群优化算法求解车辆调度问题[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(9): 2674–2675, 2696.

LEI Xiujuan, SHI Zhongke, FU Ali. Improved particle swarm optimization method to solve vehicle dispatching problem[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(9): 2674–2675, 2696.

[10] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

WANG Ling. Shop scheduling with genetic algorithms[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[11] 李俊, 刘志雄, 邵正宇. 求解柔性作业车间调度的混合粒子群算法[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(6): 228–231, 307.

LI Jun, LIU Zhixiong, SHAO Zhengyu. Hybrid particle swarm optimisation for flexible job-shop scheduling problem[J]. Computer Applications and Software, 2015, 32(6): 228–231, 307.

[12] DEROUSSI L. A hybrid PSO applied to the flexible job shop with transport[M]//Swarm Intelligence Based Optimization. Cham: Springer International Publishing, 2014: 115–122.

[13] BERGH B V D. An analysis of particle swarm optimizers[D]. Pretoria: University of Pretoria, 2002.

[14] 于蒙, 刘德汉. 改进 PSO–GA 算法求解混合流水车间调度问题[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(3): 586–590.

YU Meng, LIU Dehan. Improved PSO–GA algorithm for hybrid flow shop scheduling problem[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2021, 45(3): 586–590.

[15] 吕永桂, 金远帆, 高平波, 等. 基于遗传算法的车间产线自动编排研究与实践[J]. 电子技术与软件工程, 2020(13): 46–48.

LU Yonggui, JIN Yuanfan, GAO Pingbo, et al. Research and practice on the automatic-arrangement flow shop based on genetic algorithms[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(13): 46–48.

通讯作者: 何陶, 工程师。

(责编 阳光)