

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.07.002

# 混合工作日历下柔性作业车间多目标调度优化方法

曾 强, 常梦辉, 王孟华, 张进春

(河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**针对混合工作日历下柔性作业车间多目标调度的困难,提出了一种基于 NSGA II 的多目标优化方法。基于设备工作日历的时间推算机制,设计了时间推算函数;采用“分段”方式对工序和设备进行编码;采用“分段”交叉和变异方式进行交叉和变异操作;采用“遗传算子改进策略”保证交叉、变异操作后子代个体的可行性,以减少计算量;采用基于设备工作日历的时间推算函数于解码操作中,用于准确计算工序的起止时刻,以保证调度方案的可行性;采用 2 种技术于解码操作中,用于缩短生产周期,以提高调度方案的质量:一是将工序时间细分为设备调整时间和加工时间,使下道工序的设备可提前调整,二是安排工序时采用正向可插入式挤压调度方法。结果表明:提出的方法能在可接受的计算时间内得到有效的混合工作日历下柔性作业车间多目标调度 Pareto 解集供调度人员决策。

**关键词:**柔性作业车间调度;多目标优化;混合工作日历;NSGA II;时间推算

**中图分类号:**C93-03;TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2019)07-010-17

## Multi-objective optimization method for FJSP under mixed work calendars

ZENG Qiang, CHANG Menghui, WANG Menghua, ZHANG Jinchun

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China)

**Abstract:** This paper presents a multi-objective optimization method based on NSGA II to solve a kind of flexible job-shop scheduling problem (FJSP) under mixed work calendars. A time reckoning mechanism based on the machine's work calendar is proposed and related time reckoning functions are designed. A two-segment encoding method is used to encode the processes and equipments. A two-segment crossover and mutation operator is respectively used to implement crossover operation and mutation operation, in which an improved strategy of genetic operators is applied to ensure feasibility of the progeny individuals and reduce amount of calculation. The time reckoning functions proposed above are used to calculate start time and end time of each operation accurately so as to ensure feasibility of each scheduling scheme in the decoding operation. The following two techniques are employed to shorten production cycle so as to improve quality of each scheduling scheme in the decoding operation: 1) Operation time is subdivided into adjusting time and processing time so that the machine of the next operation can be adjusted in advance. 2) A forward extrusion scheduling method is used to arrange each operation so as to reduce idle time of the machines. The research result shows that the proposed method can provide an effective Pareto set of the flexible job-shop scheduling problem under mixed work calendars for the dispatcher.

**Keywords:** FJSP; multi-objective optimization; mixed work calendars; NSGA II; time reckoning

**收稿日期:**2019-01-08

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51774113);河南省重点研发与推广专项(192102210223);河南省高等学校重点科研资助项目(19A410001)。

Supported by the National Natural Science Foundation, China(51774113), the Fund for Key Research and Extending Project of Henan Province, China (192102210223), and the Research Fund for Universities of Henan Province, China (19A410001).

**作者简介:**曾强(1975—),男,博士,副教授,主要从事生产调度研究,(E-mail) spzq2005@163.com。

作业车间调度问题多年来一直是学术界的研究热点。现有研究对工作日历的处理主要有3种方式:不考虑工作日历、调度后考虑工作日历、调度中考虑工作日历。大部分研究属于第一种情况<sup>[1-3]</sup>。虽然计算量最小,但调度方案未与工作日历挂钩,显然会与实践脱节。部分研究属于第二种情况。调度时先不考虑工作日历,在设备连续可用的时间轴上安排工序,将调度方案根据工作日历,通过“整体平移”映射到具体的日历时间点上<sup>[4]</sup>。第二种方式计算量较小,仅适用于设备具有相同工作日历的场合。极少部分研究属于第三种情况。调度过程中根据各设备的工作日历安排工序的起止时刻。虽然计算量较大,但能保证调度方案与实践相吻合,适用于设备具有混合工作日历的场合。考虑到设备自动化程度、运行可靠性、固定成本、生产任务量及人性化管理等的需要,中国机械加工企业或车间内设备往往采用不尽相同的工作日历,即混合工作日历现象还较普遍。另外,柔性作业车间调度问题是作业车间调度问题的扩展,在生产实践中应用更为广泛;随着市场环境的变迁,出于竞争的需要,调度目标并不单一,往往要综合考虑生产周期、生产成本等多个目标。因此,研究混合工作日历下柔性作业车间多目标调度具有重要意义。

混合工作日历下柔性作业车间多目标调度问题属于高度复杂的组合优化问题。从考虑的要素看,由于考虑设备的混合工作日历,无疑增加了工序安排的难度。设备工作日历是工作制和工作班次(工作时段)的合称,调度中必须二者兼顾,同时又要考虑到可操作性和计算量。现有关于混合工作日历的作业车间调度尚存在一些不足。武志军等<sup>[5]</sup>提出了动态工作日历的实现策略和关键算法,但未考虑工作班次。黄瑜岳等<sup>[6]</sup>在调度中考虑了工作班次,但未考虑工作制。万春辉等<sup>[7]</sup>在调度中虽然既考虑了工作制又考虑了工作班次,但存在可操作性不强、计算量大的不足。从优化的对象看,不仅要确定工序的加工顺序,还要确定工序的加工设备,其组合数随工序数和设备数的增加而呈指数级增加。从优化的目标看,需要在多个目标之间进行协调。对多目标优化的处理方法有间接法和直接法两种。间接法又称“化多为少法”,该方法通过一些技术手段将多目标转化为单目标,然后在单目标空间中寻优<sup>[8-9]</sup>,只能求得一部分最优解,不能得到完整的 Pareto 解集。直接法是直接在多目标空间中寻优的方法,主要包括线性加权和变系数法<sup>[10]</sup>和基于 Pareto 寻优的方法<sup>[11-12]</sup>。线性加权和变系数法要求随机权重足够均匀,很难找到比较完整的 Pareto 解集。基于 Pareto 寻优的方法是相对更理想的多目标优化方法,其中,非支配排序遗传算法(NSGA, non-doing sorting genetic algorithm)是一种比较成熟和理想的 Pareto 寻优算法<sup>[13-14]</sup>。2002年,Deb等<sup>[15]</sup>在NSGA的基础上提出了带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA II, non-doing sorting genetic algorithm with elite strategy),使其性能又得以进一步提升。

基于此,针对一类混合工作日历下柔性作业车间调度问题(设备具有不尽相同的工作制或工作时段,一旦某设备的工作制和工作时段被设定,则该设备在同一个调度周期内每个工作日均按相同且固定不变的工作时段运行),提出基于设备工作日历的时间推算机制和函数用于调度中进行工序安排,调度过程中将工序的加工顺序和设备选择2个优化对象统一进行编码处理,选择生产周期、生产成本为优化目标,研究提出一种基于NSGA II的多目标优化方法。

## 1 问题描述

车间需在 $c$ 台设备(编号依次为 $1\sim c$ )上安排 $m$ 个工件(编号依次为 $1\sim m$ )的加工任务。假设:①设备按指定的工作日历运行。工作日历是工作制和工作时段的合称,一旦某设备的工作制和工作时段被设定,则该设备在同一个调度周期内每个工作日均按相同且固定不变的工作时段运行;②每个工件有多道工序,每道工序可选设备可能有多;③工件的工艺流程已知,工序在可选设备上的调整时间和加工时间已知;④当一个工件正在加工时,不能停下来加工其他工件;⑤当设备按工作日历停工时,设备停止调整、工件停止加工,待设备重新开工时继续未完成的工作;⑥调度从指定的调度起始时刻往后进行;⑦初始状态下设备自调度起始时刻往后的时间轴连续。要求:在以上假设条件下进行合理调度,使生产周期最短、生产成本最低。

## 2 NSGA II 算法设计

以 Excel VBA 为平台设计了一种带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA II)。

### 2.1 类型、变量及数组定义

根据算法需要,定义了图 1 所示的类型 proc、job、mach、chr 和表 1 所示的变量及数组。其中,chr.**R** 为  $tpnum \times 12$  的数组,1~12 列分别存储任务序号、工件号、工序号、设备号、调整时间、加工时间、调整开始时刻、调整结束时刻、加工开始时刻、加工结束时刻、调整成本、加工成本。MA 为  $mnum \times 22$  的数组(根据需要可扩展),用于存储各设备的参数。JB 为  $jnum$  个元素的数组,其元素类型为 job,用于存储各工件的参数。MMB 为  $mnum$  个元素的数组,其元素类型为 mach,用于存储解码前设备的时间状态。

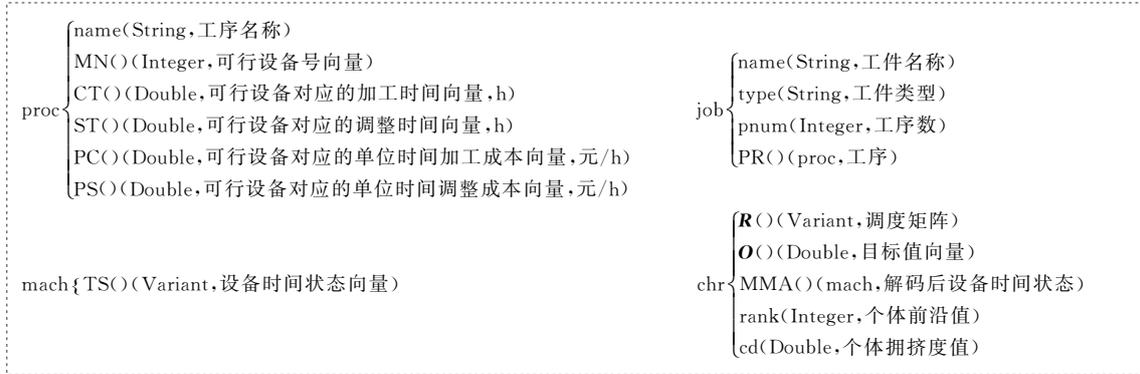


图 1 自定义类型

Fig. 1 Custom type

表 1 变量及数组定义

Table 1 Definition of variables and arrays

变量	含义	变量	含义
jnum	工件数	cr	交叉比例
tpnum	总工序数	mr	变异比例
mnum	设备数	mbs	优化目标数
bt	调度起始时刻	maxgen	最大进化代数
tln	时间大值	MA()	设备数组
popsiz	种群规模	JB()	工件数组
pc	交叉率	MMB()	解码前设备时间状态
pm	变异率		

### 2.2 基于设备工作日历的时间推算机制及函数设计

首先,按照假设条件①,根据需要,用 Excel 设计“工作制”工作表,用于设置工作制。图 2 中,从左到右每两列对应一个工作制,第 1 行奇数列单元格为工作制名称,其他行奇数列存放该工作制非周末休息日期、偶数列存放该工作制周末上班日期。

然后,设计了“设备”工作表,用于为设备指定工作制和设置工作时段。图 3 中,D 列用于为设备指定工作制,从 G 列开始的各列用于为设备设置工作时段。工作时段须成对输入,范围从 0:00~24:00,且须保证停工时刻大于开工时刻,各工作时段之间不能有交叉。以设备 300T 为例,当前被指定的工作制为“X 工作制”,每天的工作时段有 2 个,即 8:00~12:00 和 13:00~17:00,日工作时间为 8 h。

最后,利用 Excel VBA 编写时间推算函数实现基于设备工作日历的时间推算,分别是 Isworkday、Nextworkday、Getsd、Forwardwd、Backwd、Getat。

	A	B	C	D	E	F
1	X 工作制		Y 工作制		Z 工作制	
2	2017/1/2	2017/1/7	2017/1/2	2017/1/7	2017/1/2	
3	2017/1/27	2017/1/14	2017/1/27	2017/1/14	2017/1/27	
...	...	...	...	...	...	...

图 2 “工作制”工作表

Fig.2 ‘Working system’ sheet

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	设备号	设备代码	设备类型	工作制	时段数	日工作时间	开工	停工	开工	停工	开工	停工
2	1	300T	车床	X 工作制	2	8	8:00	12:00	13:00	17:00		
3	2	T52	车床	Y 工作制	2	8	9:00	13:00	14:00	18:00		
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

图 3 “设备”工作表

Fig.3 ‘Machines’ sheet

1) Isworkday 函数

该函数有 2 个参数,md(Date 型)和 wds(String 型),其作用是根据设备工作制 wds 判断日期 md 是否为其工作日,若是工作日则返回 1,否则返回 0。

2) Nextworkday 函数

该函数有 3 个参数,md(Date 型)、x(Integer 型)和 wds(String 型),其作用是获得根据设备工作制 wds 从日期 md 推算 x 天后的工作日,x>0 时为正向推算,x<0 时为反向推算。

3) Getsd 函数

该函数有 2 个参数,t(Double 型)、mn(Integer 型),其作用是根据设备 mn 的工作时段获得时间 t 所在的位置,其返回值为数组 A。该数组有 2 个元素,A(2)是标志元素,其值为 0 表示时间 t 属于设备 mn 第 A(1)个非工作时段,其值为 1 则表示时间 t 属于设备 mn 第 A(1)个工作时段。在图 4 中,该设备的工作日有 2 个工作时段,8:00~12:00(编号为 1)和 13:00~17:00(编号为 2),把时间 0:00~24:00 划分成 5 个时间段,另外 3 个时间段为非工作时段,0:00~8:00(编号为 0)、12:00~13:00(编号为 1)、17:00~24:00(编号为 2)。

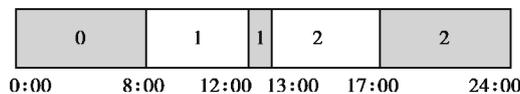


图 4 某设备工作时段与非工作时段

Fig. 4 Work time and non-work time periods of a machine

4) Forwardwd 函数

该函数有 3 个参数,mdt(Date 型)、tt(Double 型)和 mn(Integer 型),其作用是根据设备 mn 的工作日历获得从某个工作时刻 mdt 正向推算 tth 后的工作时刻。

5) Backwd 函数

该函数有 3 个参数,mdt(Date 型)、tt(Double 型)和 mn(Integer 型),其作用是根据设备 mn 的工作日历获得从某个工作时刻 mdt 反向推算 tth 后的工作时刻。

6) Getat 函数

该函数有 2 个参数,mdt(Date 型)和 mn(Integer 型),其作用是根据设备 mn 的工作日历获得从某个时

刻 mdt 正向推算得到的最早工作时刻。

### 2.3 算法流程

取 popsize 为偶数,设计的算法流程如图 5 所示。

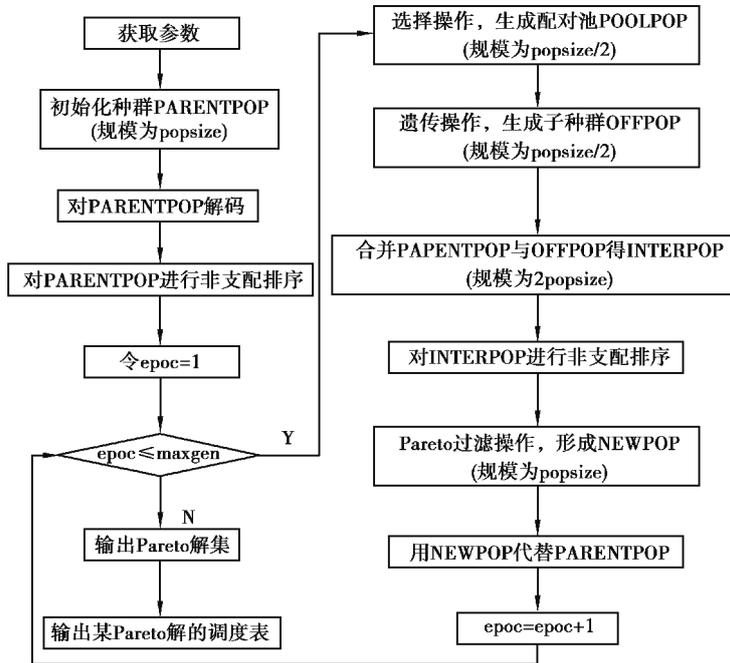


图 5 算法流程

Fig. 5 Flow of the algorithm

### 2.4 获取参数

根据算法需要,设计了“工件”“调度工件”“工艺流程”“其他参数”工作表,用于调度人员进行参数设置。算法从工作表“其他参数”读取参数赋给表 1 中的变量。从工作表“设备”读取第 2 行及以后的数据赋给数组 MA。采用 for 循环对数组 MMB 进行赋初值:对设备  $i$ ,令  $MMB(i).TS(1)=bt, MMB(i).TS(2)=tln$ 。采用 for 循环对 JB 的每一个元素赋值:对于工件  $i$ ,首先从工作表“工件”中读取第  $i$  个工件的工件名称、型号、工序数分别赋给  $JB(i).name, JB(i).type, JB(i).pnum$ ,然后用  $Redim JB(i).PR(JB(i).pnum)$ 重新定义  $JB(i).PR$  的维数,再用 for 循环从工作表“工艺流程”的中读取该工件对应工序参数分别赋给  $JB(i).PR(1) \sim JB(i).PR(JB(i).pnum)$ 。

### 2.5 编码方式

采用“分段”方式分别对工序和加工设备进行编码。设种群为 POP,如式(1)所示,  $POP(i).R$  为  $tpnum \times 12$  的数组,第 2 列和第 4 列为编码所用,其他各列为辅助或解码所用。其中,第 2 列基因值为  $1 \sim jnum$  的自然数,代表工件号,各自然数出现的次数等于对应工件的工序数;第 4 列为各工序的可行加工设备号。

$$POP(i).R = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 3 & \cdots & 510 \\ 2 & 1 & 1 & 4 & \cdots & 618 \\ 3 & 1 & 2 & 2 & \cdots & 380 \\ 4 & 2 & 2 & 2 & \cdots & 760 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ tpnum & 5 & 6 & 9 & \cdots & 360 \end{pmatrix} \quad (1)$$

### 2.6 种群初始化

按照图 6 所示的流程依次产生 popsize 个随机个体,存入种群 PARENTPOP,完成种群初始化。其中,给  $R$  第 4 列赋可行设备号的流程如图 7 所示。从图 6 和图 7 可见,产生的随机个体为可行个体。

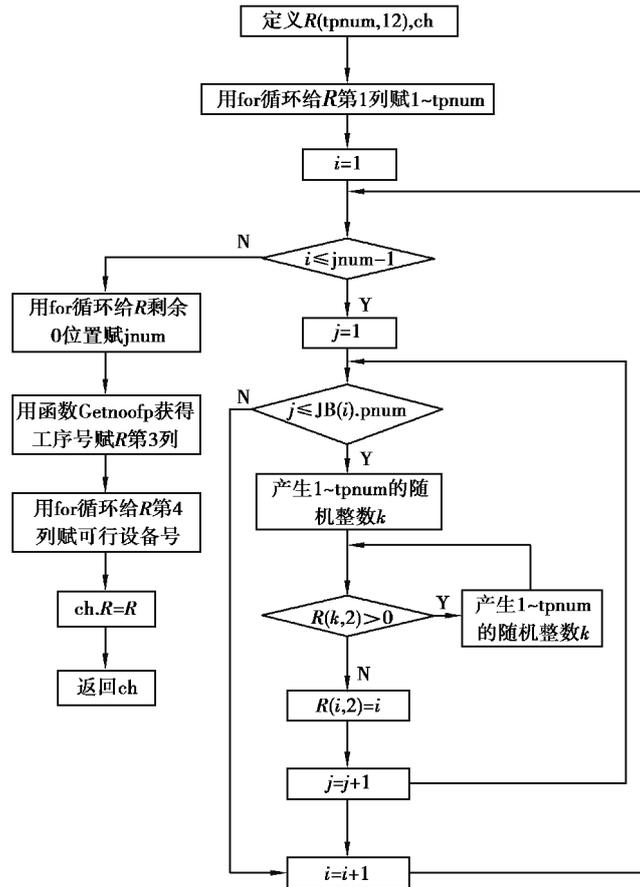


图 6 产生随机个体

Fig.6 Generation of random individuals

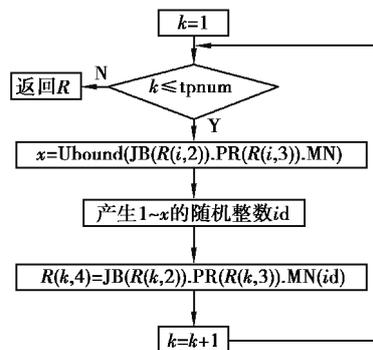


图 7 给 R 第 4 列赋设备号

Fig. 7 Assigning feasible machine number to column 4 of R

### 2.7 选择操作

通过“联赛机制”从父代种群 PARENTPOP 中选择“优秀”个体形成规模为 popsize/2 的配对池 POOLPOP。设联赛规模为 tour-size,用 for 循环每次从父代种群 PARENTPOP 中随机选出 tour-size 个个体,从 tour-size 个个体中根据个体前沿值 rank 和拥挤度 cd 选出一个“优秀”个体加入配对池,直到 for 循环结束,返回 POOLPOP。

### 2.8 遗传操作

由配对池 POOLPOP 通过交叉、变异操作产生规模为 popsize 的子代种群 OFFPOP,流程如图 8 所示。

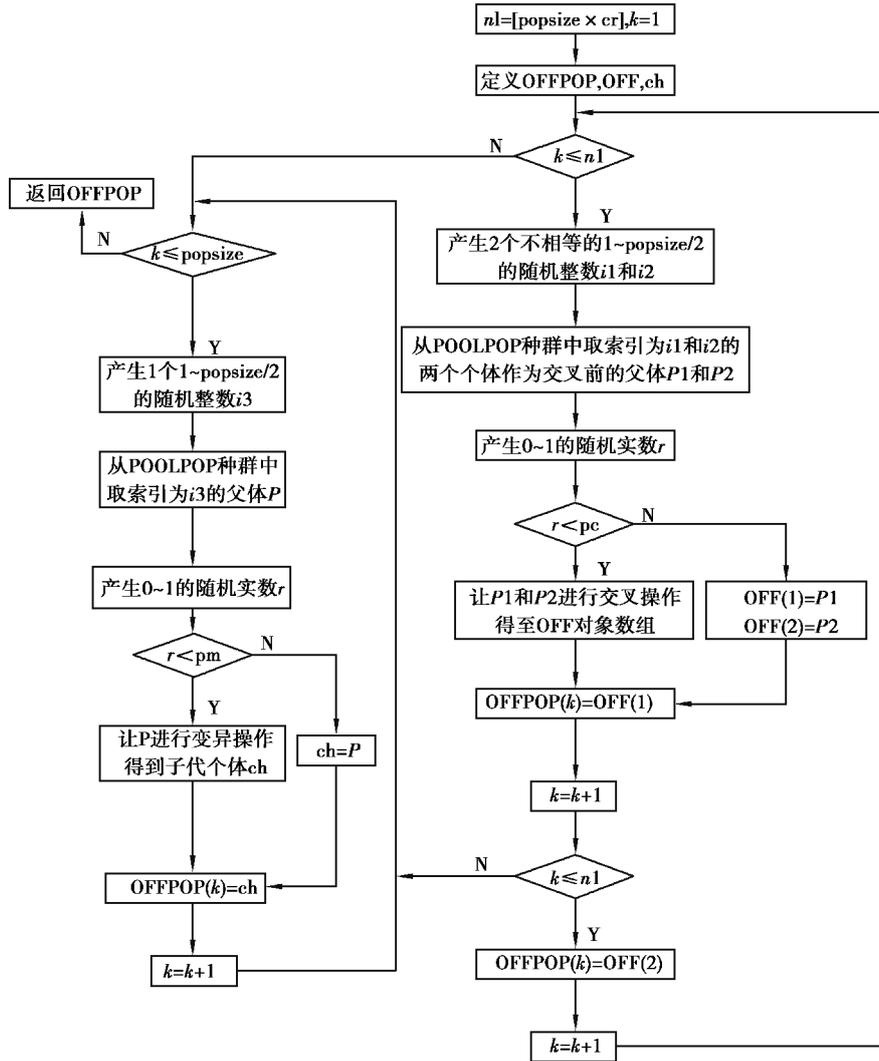


图 8 遗传操作

Fig. 8 Genetic operation

2.9 交叉操作

采用“分段”方式分别对工序和加工设备进行交叉。

1) 工序交叉

基于“遗传算子改进策略”，采用“基于工序顺序的交叉”方式来保证子代个体可行性<sup>[16]</sup>：同一工件的工序之间具有先后顺序，为保证交叉操作不破坏这种先后顺序，固定某父体的某个工件号所在行(工件号、工序号和设备号)不变，从上到下依次用另一父体中除该工件号所在行之外的其他行取代本父体剩余行，如式(2)中，若  $P1.R$  中固定工件 1,  $P2.R$  中固定工件 3 不动，则  $P1.R$  与  $P2.R$  交叉后的结果如式(3)所示。

$$P1.R = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 & 4 \\ 2 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 3 \\ 4 & 3 & 2 & 2 \\ 5 & 1 & 2 & 4 \\ 6 & 2 & 2 & 3 \\ 7 & 4 & 1 & 2 \\ 8 & 4 & 2 & 4 \end{pmatrix}, \quad P2.R = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 5 \\ 2 & 3 & 1 & 2 \\ 3 & 1 & 1 & 3 \\ 4 & 1 & 2 & 1 \\ 5 & 4 & 1 & 4 \\ 6 & 2 & 2 & 2 \\ 7 & 4 & 2 & 5 \\ 8 & 3 & 2 & 3 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$P1'.\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 5 \\ 2 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 1 & 2 \\ 4 & 4 & 1 & 4 \\ 5 & 1 & 2 & 4 \\ 6 & 2 & 2 & 2 \\ 7 & 4 & 2 & 5 \\ 8 & 3 & 2 & 3 \end{pmatrix}, \quad P2'.\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 1 & 3 \\ 4 & 1 & 2 & 4 \\ 5 & 2 & 2 & 3 \\ 6 & 4 & 1 & 2 \\ 7 & 4 & 2 & 4 \\ 8 & 3 & 2 & 3 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

## 2) 加工设备交叉

采用“两点交叉”方式进行设备交叉:产生2个 $1 \sim \text{tpnum}$ 的随机整数 $\text{mp1}$ 、 $\text{mp2}$ ,保证 $\text{mp1} < \text{mp2}$ ,对于父体 $P1'$ ,根据 $P1'.\mathbf{R}$ 的第 $k$ 行( $k$ 从 $\text{mp1} \sim \text{mp2}$ 变化)工件号 $P1'.\mathbf{R}(k, 2)$ 、工序号 $P1'.\mathbf{R}(k, 3)$ ,在父体 $P2'.\mathbf{R}$ 中找到对应的工件号、工序号所在行号 $h$ ,令 $P1'.\mathbf{R}(k, 4) = P2'.\mathbf{R}(h, 4)$ ;对于父体 $P2'$ 按类似方法进行处理。例如,若 $\text{mp1} = 3, \text{mp2} = 5$ ,式(3)的 $P1'$ 、 $P2'$ 设备交叉后的结果如式(4)所示。显然,通过这种交叉操作能保证交叉后的设备号为对应工序的可行设备号,从而保证交叉后的子代个体可行。

$$\text{OFF}(1).\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 5 \\ 2 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 1 & 2 \\ 4 & 4 & 1 & 2 \\ 5 & 1 & 2 & 4 \\ 6 & 2 & 2 & 2 \\ 7 & 4 & 2 & 5 \\ 8 & 3 & 2 & 3 \end{pmatrix}, \quad \text{OFF}(2).\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 1 & 5 \\ 4 & 1 & 2 & 4 \\ 5 & 2 & 2 & 2 \\ 6 & 4 & 1 & 2 \\ 7 & 4 & 2 & 4 \\ 8 & 3 & 2 & 3 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

交叉后需对新个体进行重新解码,分别赋给 $\text{OFF}(1)$ 和 $\text{OFF}(2)$ 。

## 2.10 变异操作

采用“分段”方式分别对工序和加工设备进行变异。

### 1) 工序变异

基于“遗传算子改进策略”,采用“滑动变异”方式来保证子代个体可行性<sup>[16]</sup>:对于父体 $P$ ,产生一个 $1 \sim \text{tpnum}$ 之间的随机整数 $\text{mp}$ 作为变异点,以此点为基准向上向下分别寻找与该点工件号相同的最近位置 $s1$ 和 $s2$ ,若向上未找到则令 $s1 = 0$ ,向下未找到则令 $s2 = \text{tpnum} + 1$ ;取 $k1 = s1 + 1, k2 = s2 - 1$ ,产生 $k1 \sim k2$ 的随机整数 $k$ ,将该工件号、工序号及设备号滑移至 $k$ 位置。例如,式(5)中,若 $\text{mp} = 3$ ,可求得 $k1 = 2, k2 = 8$ ,若产生的随机整数 $k = 6$ ,变异后的结果如式(6)所示。

$$P.\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 2 & 3 \\ 4 & 2 & 1 & 4 \\ 5 & 1 & 2 & 3 \\ 6 & 2 & 2 & 5 \\ 7 & 1 & 3 & 2 \\ 8 & 2 & 3 & 3 \end{pmatrix}, \quad (5) \quad P'.\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 4 \\ 4 & 1 & 2 & 4 \\ 5 & 2 & 2 & 5 \\ 6 & 3 & 2 & 3 \\ 7 & 1 & 3 & 2 \\ 8 & 2 & 3 & 3 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

### 2) 加工设备变异

采用“单点变异”方式进行设备变异:产生1个 $1 \sim \text{tpnum}$ 的随机整数 $\text{mp}$ 作为变异点,令 $k = \text{Ubound}(\text{JB}(P'.\mathbf{R}(\text{mp}, 2)), \text{PR}(P'.\mathbf{R}(\text{mp}, 3)), \text{MN})$ ,产生 $1 \sim k$ 的随机整数 $\text{id}$ 作为新的加工设备号的索引,再令 $P'.\mathbf{R}(\text{mp}, 4) = \text{JB}(P'.\mathbf{R}(\text{mp}, 2)), \text{PR}(P'.\mathbf{R}(\text{mp}, 3)), \text{MN}(\text{id})$ 。

变异后需对新个体进行重新解码赋给 $\text{ch}$ 。

2.11 解码操作

为尽可能缩短生产周期,在解码操作中采用 2 种技术:①将工序时间细分为设备调整时间和加工时间,使得下道工序的设备调整工作有条件提前进行,从而使上道工序加工完毕后能尽早开始加工<sup>[16-17]</sup>。②采用正向可插入式挤压调度方法在设备的时间轴上安排工序,以尽可能减少设备的空闲时间。解码操作流程如图 9 所示。

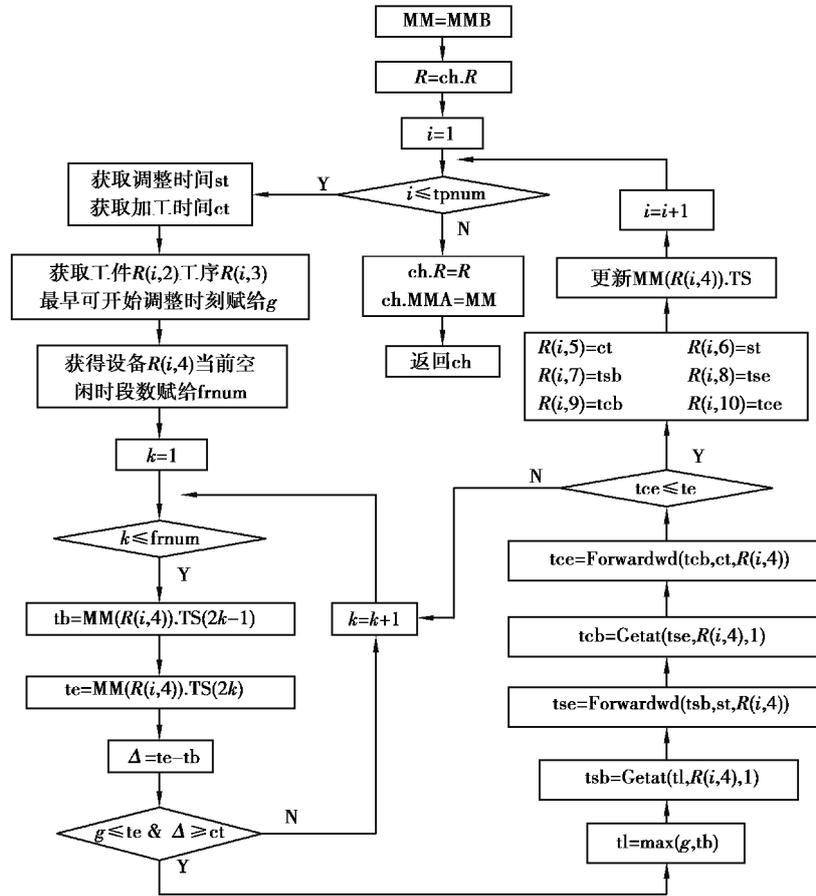


图 9 解码操作流程

Fig.9 Flow of decoding operation

解码操作分三步。第一步:将解码前设备对象数组 MMB 赋给 MM,将 ch.R 赋给 R。第二步:令  $i=1 \sim tpnum$ ,依次安排各工序,确定 R 的第 5~12 列值。第三步:当把  $1 \sim tpnum$  个工序全部安排完毕后,将得到的调度数组 R 及 MM 赋给 ch 的属性 R、MMA,即令  $ch.R=R$ 、 $ch.MMA=MM$ ,解码结束。其中,需要说明以下三点。

1)获取设备调整时间 st 和加工时间 ct 的方法:由设备号  $R(i, 4)$  求得其 在  $JB(R(i, 2)).PR(R(i, 3)).MN$  中的索引号 id,取  $st=JB(R(i, 2)).PR(R(i, 3)).st(id)$ , $ct=JB(R(i, 2)).PR(R(i, 3)).ct(id)$ 。

2)获取工件  $R(i, 2)$  的工序  $R(i, 3)$  的设备最早可开始调整时刻 g 的方法:如图 10 所示,分 3 种情况处理。① $R(i, 3)=1$  时,即待安排工序是工件  $R(i, 2)$  的第 1 道工序,则取  $g=bt$ 。② $R(i, 3) \neq 1$  且工件  $R(i, 2)$  的工序  $R(i, 3)$  与  $R(i, 3)-1$  均在同一台设备 p 上加工,在这种情况下,工件  $R(i, 2)$  的工序  $R(i, 3)$  必须等到工序  $R(i, 3)-1$  完工后才能开始设备调整,故取 g 为工件  $R(i, 2)$  的工序  $R(i, 3)-1$  的加工结束时刻。设工件  $R(i, 2)$  的工序  $R(i, 3)-1$  在 R 中的行号为 h,则取  $g=R(h, 10)$ 。③ $R(i, 3) \neq 1$  且工件  $R(i, 2)$  的工序  $R(i, 3)$  与  $R(i, 3)-1$  不在同一台设备上加工,此时工件  $R(i, 2)$  的工序  $R(i, 3)$  可从  $R(i, 3)-1$  的加工结束时刻提前 sth 开始设备调整,待设备调整完毕,工序  $R(i, 3)-1$  正好完成加工,使工序  $R(i, 3)$  可立即开始加工。设工件  $R(i, 2)$  的工序  $R(i, 3)-1$  在 R 中的行号为 h,则首先采用 Getat 函数根据设备  $R(i, 4)$  的工作日

历正向推算得到工作时刻  $t$  (工序  $R(i, 3) - 1$  的加工结束时刻未必在设备  $R(i, 4)$  的工作时间段内,其最早可能开始加工时刻为正向推算得到的工作时刻  $t$ ),再利用 Backwd 函数从时刻  $t$  反向推算 sth 得到设备最早可开始调整时刻  $g$ 。先令  $t = \text{Getat}(R(h, 10), R(i, 4))$ ;再令  $g = \text{Backwd}(t, \text{st}, R(i, 4))$ 。

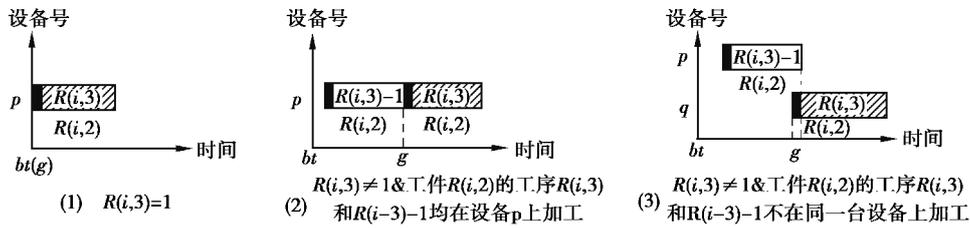


图 10 获取工件  $R(i, 2)$  的工序  $R(i, 3)$  的设备最早可开始调整时刻  $g$

Fig.10 Obtaining the machines' earliest start time  $g$  in the process  $R(i, 3)$  of job  $R(i, 2)$

3)更新  $MM(R(i, 4)).TS$  的方法:如图 11 所示,  $MM(R(i, 4)).TS$  的初始长度为 2,仅包含两个元素,第 1 个为调度起始时刻  $bt$ ,第 2 个是时间大值  $tln$ 。此时空闲时间段数  $frnum = 1$ 。当为设备  $R(i, 4)$  安排某工序  $a$  后,需在  $bt \sim tln$  之间插入 2 个值,分别是  $tsba$ (调整开始时刻)和  $tcea$ (加工结束时刻)。此时  $bt \sim tln$  被分割成 2 个空闲时间段,分别是  $bt \sim tsba$  和  $tcea \sim tln$ ,此时空闲时间段数  $frnum = 2$ 。当再为  $R(i, 4)$  安排某工序  $b$  后(假设工序  $b$  安排在工序  $a$  加工结束时刻之后),空闲时间段分别为  $bt \sim tsba$ ,  $tcea \sim tsbb$ ,  $tceb \sim tln$ ,此时空闲时间段数  $frnum = 3$ 。依次类推,随着工序的不断安排,  $MM(R(i, 4)).TS$  的长度动态变化、元素动态更新。需说明的是:若  $tcea = tsbb$  则  $MM(R(i, 4)).TS$  数据结构仍旧不变,空闲时间段数和空闲时间段保持不变。只是第 2 个空闲时间段的时间差为 0,在后续的工序安排中,由解码流程可以看出不会在  $tcea \sim tsbb$  之间插入工序。设插入时段为设备  $R(i, 4)$  的第  $k$  个空闲时段,则更新  $MM(R(i, 4)).TS$  的步骤如下:首先,将  $MM(R(i, 4)).TS$  的长度增加 2 位;然后,从  $k$  空闲时段对应的第 2 个数据起,将后面的数据后移 2 位,从而腾出 2 个空位;最后,在 2 个空位处分别填入待插入工序的设备调整开始时刻和加工结束时刻。

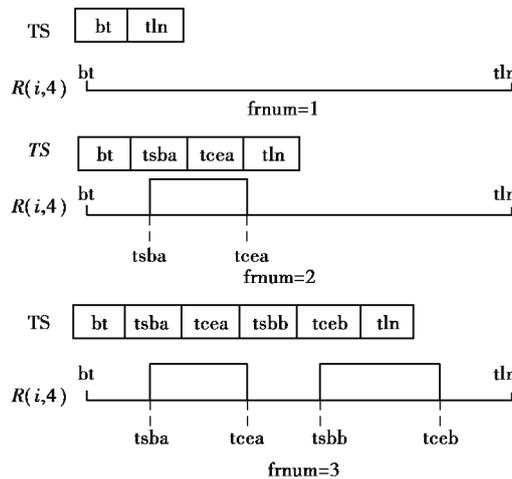


图 11 更新  $MM(R(i, 4)).TS$

Fig. 11 Updating  $MM(R(i, 4)).TS$

### 2.12 计算目标值

用 for 循环找出  $ch.R$  第 7 列的最小值赋给  $smin$ 、第 10 列的最大值赋给  $smax$ 、第 11 列和 12 列的和赋给  $s$ ,再令  $ch.O(1) = smax - smin$ ,  $ch.O(2) = s$ 。

## 3 案例分析

某机加车间要在 10 台设备上安排 7 个工件的加工任务,各工件信息如表 2 所示、工艺流程如表 3 所示,

设备信息如表 4 所示,其他参数如表 5 所示。本例中设备所用工作制共有 3 个,即 5 天工作制、6 天工作制和 7 天工作制。“工作制”工作表的设置内容如图 12 所示。

表 2 工件

Table 2 Jobs

工件号	工件名称	型号	工序数
1	L2027	X5	6
2	G46-100F	L5	6
3	ZU30100B2	M3	6
4	L90GF	M2	6
5	L35MC	X5	6
6	HP6100	Y2	6
7	16V32G	M6	6

表 3 工艺流程

Table 3 Process flow

工件号	工件名称	工序号	工序名称	设备号	加工时间/h	调整时间/h	加工单价/(元·h <sup>-1</sup> )	调整单价/(元·h <sup>-1</sup> )
1	L2027	1	车成型	1,2,3,4	1.5,3,3.5,4	0.6,1,1.3,1.5	280,190,180,170	130,140,150,160
1	L2027	2	车端面	2,4	2,3	1,1.5	190,170	140,160
1	L2027	3	车外圆	2,4	3,4	1,1.5	190,170	140,160
1	L2027	4	铣 20 扁势	5,6	1.5,2.5	0.8,1	200,130	110,110
1	L2027	5	磨外圆	7,8	2,4	0.5,0.8	240,150	120,130
1	L2027	6	磨端面	9,10	2,4	0.8,1	180,150	125,130
2	G46-100F	1	车成型	1,2,3,4	1.5,2.5,3,3.5	0.6,1,1.3,1.5	280,190,180,170	130,140,150,160
2	G46-100F	2	车端面	2,4	4,4.5	1,1.5	190,170	140,160
2	G46-100F	3	车外圆	2,4	2,3	1,1.5	190,170	140,160
2	G46-100F	4	铣 20 扁势	5,6	1.5,2.5	0.8,1	200,130	110,110
2	G46-100F	5	磨外圆	7,8	2,4	0.5,0.8	240,150	120,130
2	G46-100F	6	磨端面	9,10	2,4	0.8,1	180,150	125,130
3	ZU30100B2	1	车成型	2,4	2,3	1,1.5	190,170	140,160
3	ZU30100B2	2	车端面	1,2,4	1.5,3,3.5	0.6,1,1.5	280,190,170	130,140,160
3	ZU30100B2	3	车外圆	1,2,4	1.5,6,7	0.6,1,1.5	280,190,170	130,140,160
3	ZU30100B2	4	铣 20 扁势	5,6	1.5,2.5	0.8,1	200,130	110,110
3	ZU30100B2	5	磨外圆	7,8	2,4	0.5,0.8	240,150	120,130
3	ZU30100B2	6	磨端面	9,10	2,4	0.8,1	180,150	125,130
4	L90GF	1	车成型	1,2,3,4	1.5,2,3,3	0.6,1,1.3,1.5	280,190,180,170	130,140,150,160
4	L90GF	2	车端面	1,2,3,4	2,3,3,3.5	0.6,1,1.3,1.5	280,190,180,170	130,140,150,160
4	L90GF	3	车外圆	3,4	2.5,3.5	1.3,1.5	180,170	150,160

续表3

工件号	工件名称	工序号	工序名称	设备号	加工时间/h	调整时间/h	加工单价/(元·h <sup>-1</sup> )	调整单价/(元·h <sup>-1</sup> )
4	L90GF	4	铣 20 扁势	5,6	1.5,2.5	0.8,1	200,130	110,110
4	L90GF	5	磨外圆	7,8	2,4	0.5,0.8	240,150	120,130
4	L90GF	6	磨端面	9,10	2,4	0.8,1	180,150	125,130
5	L35MC	1	车成型	1,2,3,4	2,3,3.5,4	0.6,1,1.3,1.5	280,190,180,170	130,140,150,160
5	L35MC	2	车端面	3,4	2,3	1.3,1.5	180,170	150,160
5	L35MC	3	车外圆	3,4	3,4	1.3,1.5	180,170	150,160
5	L35MC	4	铣 20 扁势	5,6	1.5,2.5	0.8,1	200,130	110,110
5	L35MC	5	磨外圆	7,8	2,4	0.5,0.8	240,150	120,130
5	L35MC	6	磨端面	9,10	2,4	0.8,1	180,150	125,130
6	HP6100	1	车成型	1,2,3,4	2,3,4,4.5	0.6,1,1.3,1.5	280,190,180,170	130,140,150,160
6	HP6100	2	车端面	1,2	1.5,4	0.6,1	280,190	130,140
6	HP6100	3	车外圆	1,2	2,5	0.6,1	280,190	130,140
6	HP6100	4	铣 20 扁势	5,6	1.5,3	0.8,1	200,130	110,110
6	HP6100	5	磨外圆	7,8	2,4	0.5,0.8	240,150	120,130
6	HP6100	6	磨端面	9,10	2,4	0.8,1	180,150	125,130
7	16V32G	1	车成型	1,2	1.5,3	0.6,1	280,190	130,140
7	16V32G	2	车端面	1,2	2,4	0.6,1	280,190	130,140
7	16V32G	3	车外圆	2,3,4	3,5,4	1,1.3,1.5	190,180,170	140,150,160
7	16V32G	4	铣 20 扁势	5,6	1.5,3	0.8,1	200,130	110,110
7	16V32G	5	磨外圆	7,8	2,4	0.5,0.8	240,150	120,130
7	16V32G	6	磨端面	9,10	2,4	0.8,1	180,150	125,130

表 4 设备

Table 4 Machines

设备号	设备代码	设备类别	工作制	时段数	工作时间/h	开工	停工	开工	停工	开工	停工
1	300T	数控车床	5 天工作制	2	8	8:00	12:00	13:00	17:00		
2	200T	数控车床	6 天工作制	2	16	0:00	8:00	9:00	17:00		
3	T52	数控车床	7 天工作制	3	19	2:00	7:00	8:00	15:00	16:00	23:00
4	T42	数控车床	6 天工作制	2	8	8:00	12:00	13:00	17:00		
5	X8126	铣床	7 天工作制	2	8	8:00	12:00	13:00	17:00		
6	X5126	铣床	6 天工作制	3	16	0:00	8:00	9:00	12:00	13:00	18:00
7	3U5	外圆磨床	7 天工作制	3	16	0:00	8:00	9:00	12:00	13:00	18:00
8	2U5	外圆磨床	7 天工作制	2	8	8:00	12:00	13:00	17:00		
9	120CNC	内圆磨床	6 天工作制	2	8	8:00	12:00	13:00	17:00		
10	111CNC	内圆磨床	6 天工作制	3	16	0:00	8:00	9:00	12:00	13:00	18:00

表 5 其他参数

Table 5 Other parameters

参数	值	参数	值
jnum	7	pc	0.7
tpnum	42	pm	0.1
mnum	10	cr	0.7
bt	2017/11/1 8:00:00	mr	0.3
tln	4637/11/26 0:00:00	mbs	2
popsize	40	maxgen	100

序号	A	B	C	D	E	F
1	7 天工作制		6 天工作制		5 天工作制	
2	2017/1/2	2017/1/7	2017/1/2	2017/1/7	2017/1/2	
3	2017/1/27	2017/1/14	2017/1/27	2017/1/14	2017/1/27	
4	2017/1/30	2017/1/21	2017/1/30	2017/1/21	2017/1/30	
5	2017/1/31	2017/2/4	2017/1/31	2017/2/4	2017/1/31	
6	2017/2/1	2017/2/18	2017/2/1	2017/2/18	2017/2/1	
7	2017/2/2	2017/2/25	2017/2/2	2017/2/25	2017/2/2	
8	2017/4/3	2017/3/4	2017/4/3	2017/3/4	2017/4/3	
9	2017/4/4	2017/3/11	2017/4/4	2017/3/11	2017/4/4	
10	2017/5/1	2017/3/18	2017/5/1	2017/3/18	2017/5/1	
11	2017/5/29	2017/3/25	2017/5/29	2017/3/25	2017/5/29	
12	2017/5/30	2017/4/1	2017/5/30	2017/4/1	2017/5/30	
13	2017/10/2	2017/4/8	2017/10/2	2017/4/8	2017/10/2	
14	2017/10/3	2017/4/15	2017/10/3	2017/4/15	2017/10/3	
15	2017/10/4	2017/4/22	2017/10/4	2017/4/22	2017/10/4	
16	2017/10/5	2017/5/6	2017/10/5	2017/5/6	2017/10/5	
17	2017/10/6	2017/5/13	2017/10/6	2017/5/13	2017/10/6	
18		2017/5/20		2017/5/20		
...		...		...		
49		...		2017/12/30		
...		...				
95		2017/12/31				

图 12 “工作制”工作表设置内容

Fig. 12 Content of 'working system' sheet

在上述设置之下,利用算法独立运行多次,均能得到基本相同且均匀的 Pareto 解集,表明收敛效果较好。图 13 是某次进化计算得到的 Pareto 解集,调度人员可从中进行选择。表 6 是某方案(生产周期为 2.81 d,生产成本为 24 078 元)对应的调度表,图 14 和图 15 是该方案对应的工件甘特图和设备甘特图。

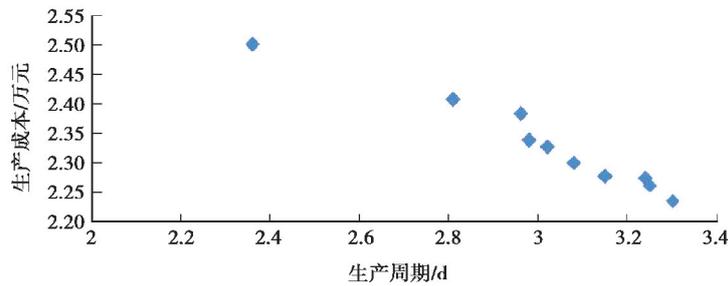


图 13 Pareto 解集

Fig. 13 Pareto solution set

表 6 某方案的调度表

Table 6 Scheduling table of a solution

序号	工件	工序号	设备号	调整时间/h	加工时间/h	调整开始时刻	调整结束时刻	加工开始时刻	加工结束时刻	调整成本/元	加工成本/元
1	7	1	1	0.6	1.5	2017/11/1 8:00	2017/11/1 8:36	2017/11/1 8:36	2017/11/1 10:06	78.00	420.00
2	1	1	1	0.6	1.5	2017/11/1 10:06	2017/11/1 10:42	2017/11/1 10:42	2017/11/1 13:12	78.00	420.00
3	5	1	3	1.3	3.5	2017/11/1 8:00	2017/11/1 9:18	2017/11/1 9:18	2017/11/1 12:48	195.00	630.00
4	6	1	1	0.6	2	2017/11/1 13:12	2017/11/1 13:48	2017/11/1 13:48	2017/11/1 15:48	78.00	560.00
5	5	2	3	1.3	2	2017/11/1 12:48	2017/11/1 14:06	2017/11/1 14:06	2017/11/1 17:06	195.00	360.00
6	7	2	1	0.6	2	2017/11/1 15:48	2017/11/1 16:24	2017/11/1 16:24	2017/11/2 9:24	78.00	560.00
7	2	1	1	0.6	1.5	2017/11/2 9:24	2017/11/2 10:00	2017/11/2 10:00	2017/11/2 11:30	78.00	420.00
8	7	3	2	1	3	2017/11/2 7:24	2017/11/2 9:24	2017/11/2 9:24	2017/11/2 12:24	140.00	570.00
9	2	2	4	1.5	4.5	2017/11/2 10:00	2017/11/2 11:30	2017/11/2 11:30	2017/11/2 17:00	240.00	765.00
10	6	2	2	1	4	2017/11/1 14:48	2017/11/1 15:48	2017/11/1 15:48	2017/11/2 2:48	140.00	760.00
11	4	1	2	1	2	2017/11/1 9:00	2017/11/1 10:00	2017/11/1 10:00	2017/11/1 12:00	140.00	380.00
12	2	3	2	1	2	2017/11/2 16:00	2017/11/2 17:00	2017/11/3 0:00	2017/11/3 2:00	140.00	380.00
13	6	3	1	0.6	2	2017/11/2 11:30	2017/11/2 13:06	2017/11/2 13:06	2017/11/2 15:06	78.00	560.00
14	3	1	2	1	2	2017/11/2 2:48	2017/11/2 3:48	2017/11/2 3:48	2017/11/2 5:48	140.00	380.00
15	4	2	4	1.5	3.5	2017/11/1 10:30	2017/11/1 12:00	2017/11/1 13:00	2017/11/1 16:30	240.00	595.00
16	1	2	2	1	2	2017/11/2 12:24	2017/11/2 13:24	2017/11/2 13:24	2017/11/2 15:24	140.00	380.00
17	3	2	2	1	3	2017/11/3 2:00	2017/11/3 3:00	2017/11/3 3:00	2017/11/3 6:00	140.00	570.00
18	1	3	2	1	3	2017/11/3 6:00	2017/11/3 7:00	2017/11/3 7:00	2017/11/3 11:00	140.00	570.00
19	6	4	6	1	3	2017/11/2 14:06	2017/11/2 15:06	2017/11/2 15:06	2017/11/3 0:06	110.00	390.00
20	7	4	5	0.8	1.5	2017/11/2 11:12	2017/11/2 12:00	2017/11/2 13:00	2017/11/2 14:30	88.00	300.00

续表6

序号	工件	工序号	设备号	调整时间/h	加工时间/h	调整开始时刻	调整结束时刻	加工开始时刻	加工结束时刻	调整成本/元	加工成本/元
21	7	5	7	0.5	2	2017/11/2 14:00	2017/11/2 14:30	2017/11/2 14:30	2017/11/2 16:30	60.00	480.00
22	2	4	5	0.8	1.5	2017/11/2 16:12	2017/11/2 17:00	2017/11/3 8:00	2017/11/3 9:30	88.00	300.00
23	5	3	3	1.3	3	2017/11/1 17:06	2017/11/1 18:24	2017/11/1 18:24	2017/11/1 21:24	195.00	540.00
24	4	3	3	1.3	2.5	2017/11/1 21:24	2017/11/1 22:42	2017/11/1 22:42	2017/11/2 4:12	195.00	450.00
25	4	4	6	1	2.5	2017/11/2 3:12	2017/11/2 4:12	2017/11/2 4:12	2017/11/2 6:42	110.00	325.00
26	5	4	5	0.8	1.5	2017/11/1 16:12	2017/11/1 17:00	2017/11/2 8:00	2017/11/2 9:30	88.00	300.00
27	2	5	7	0.5	2	2017/11/3 9:00	2017/11/3 9:30	2017/11/3 9:30	2017/11/3 11:30	60.00	480.00
28	3	3	1	0.6	1.5	2017/11/2 16:24	2017/11/2 17:00	2017/11/3 8:00	2017/11/3 9:30	78.00	420.00
29	3	4	5	0.8	1.5	2017/11/3 9:30	2017/11/3 10:18	2017/11/3 10:18	2017/11/3 11:48	88.00	300.00
30	4	5	7	0.5	2	2017/11/2 6:12	2017/11/2 6:42	2017/11/2 6:42	2017/11/2 9:42	60.00	480.00
31	3	5	7	0.5	2	2017/11/3 11:30	2017/11/3 12:00	2017/11/3 13:00	2017/11/3 15:00	60.00	480.00
32	1	4	6	1	2.5	2017/11/3 10:00	2017/11/3 11:00	2017/11/3 11:00	2017/11/3 14:30	110.00	325.00
33	6	5	7	0.5	2	2017/11/2 17:36	2017/11/3 0:06	2017/11/3 0:06	2017/11/3 2:06	60.00	480.00
34	4	6	9	0.8	2	2017/11/2 8:54	2017/11/2 9:42	2017/11/2 9:42	2017/11/2 11:42	100.00	360.00
35	2	6	10	1	4	2017/11/3 10:30	2017/11/3 11:30	2017/11/3 11:30	2017/11/3 16:30	130.00	600.00
36	1	5	7	0.5	2	2017/11/3 15:00	2017/11/3 15:30	2017/11/3 15:30	2017/11/3 17:30	60.00	480.00
37	3	6	9	0.8	2	2017/11/3 14:12	2017/11/3 15:00	2017/11/3 15:00	2017/11/3 17:00	100.00	360.00
38	7	6	9	0.8	2	2017/11/2 15:42	2017/11/2 16:30	2017/11/2 16:30	2017/11/3 9:30	100.00	360.00
39	1	6	10	1	4	2017/11/3 16:30	2017/11/3 17:30	2017/11/3 17:30	2017/11/4 3:30	130.00	600.00
40	5	5	7	0.5	2	2017/11/2 9:42	2017/11/2 10:12	2017/11/2 10:12	2017/11/2 13:12	60.00	480.00
41	6	6	9	0.8	2	2017/11/3 9:30	2017/11/3 10:18	2017/11/3 10:18	2017/11/3 13:18	100.00	360.00
42	5	6	9	0.8	2	2017/11/2 11:42	2017/11/2 13:30	2017/11/2 13:30	2017/11/2 15:30	100.00	360.00

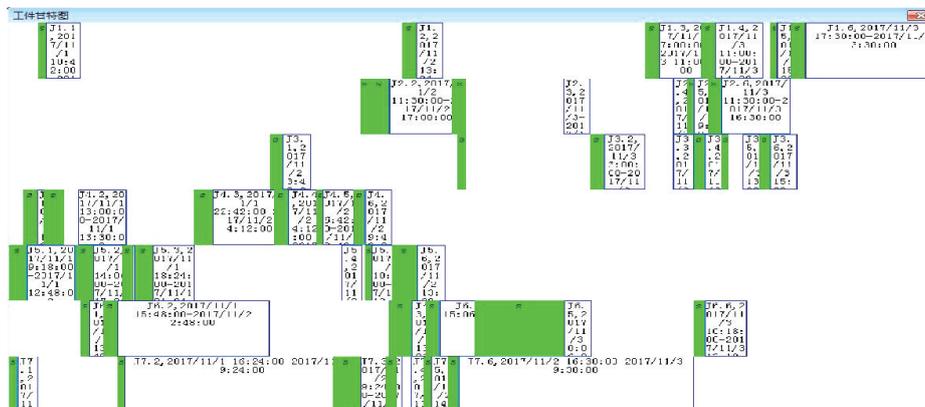


图 14 工件甘特图

Fig.14 Gantt chart of the jobs

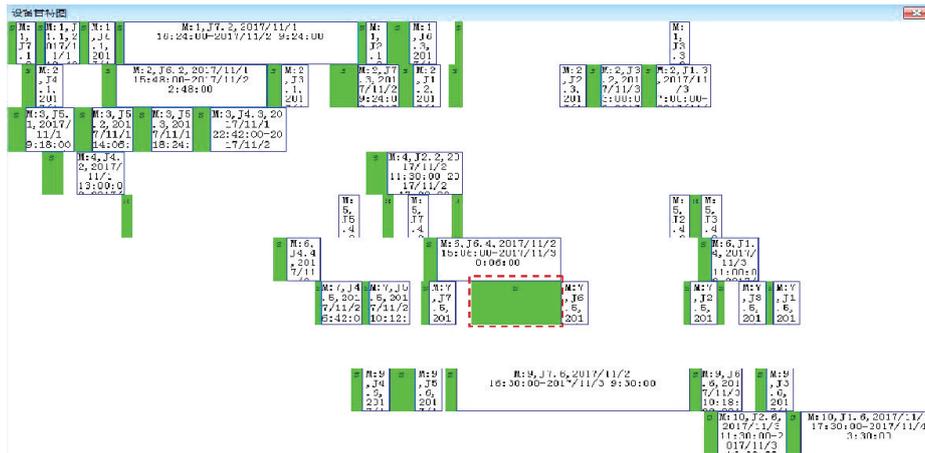


图 15 设备甘特图

Fig.15 Gantt chart of the machines

图 14 和图 15 中,带 s 标识符的方框表示设备调整起止时段,带 J 或 M 标识符的方框表示工序的加工起止时刻。例如,图 15 中虚线方框是工件 6 第 5 道工序的设备调整起止时段,紧随其后的方框表示工件 6 第 5 道工序在设备号 7 上加工的起止时段。从表 6 第 33 行可以看出,该工序的设备调整起始时刻为 2017/11/2 17:36、调整结束时刻为 2017/11/3 0:06,其加工起始时刻为 2017/11/3 0:06、加工结束时刻为 2017/11/3 2:06。根据设备 7(代码为 3U5)的工作日历进行验算,2017/11/2 17:36~2017/11/3 0:06 的日历时间为 6.5h,但工作时间却为 0.5 h;2017/11/3 0:06~2017/11/3 2:06 之间的日历时间和工作时间相等,均为 2 h,0.5 h 和 2 h 正好与表 3 中该工序的设备调整时间  $s_t$  和加工时间  $c_t$  相吻合,表明计算结果正确。

从表 6 的 18 行和 32 行可见,工件 1 的工序 3 和 4 为相邻工序,由于分别在不同的设备上加工,因此可以提前进行设备调整,当上道工序(工序 3)完成加工时,可立即开始下道工序(工序 4)的加工,采用这种安排方式能在一定程度上缩短生产周期。

从表 6 可以看出,按序号升序排列,设备 2(代码为 200T)上安排的工序依次为 J7.3、J6.2、J4.1、J2.3、J3.1、J1.2、J3.2、J1.3,而从图 15 可以看出,设备 2 上从左到右安排的工序依次为 J4.1、J6.2、J3.1、J7.3、J1.2、J2.3、J3.2、J1.3,二者并不完全一致。产生这种现象的原因在于解码过程中采用了正向可插入式挤压调度方法。采用这种方法可以尽可能地减少设备空闲时间从而缩短生产周期。

### 4 结 论

为解决混合工作日历下柔性作业车间多目标调度的困难,提出了一种基于 NSGA II 的多目标优化方法。论文的研究结论如下:

- 1)在工序调度过程中,通过时间推算函数准确推算设备调整起止时刻和工序加工起止时刻,能保证调度方案的可行性。
- 2)算法在解码过程中采用 2 项技术能在一定程度上缩短生产周期:将工序时间细分为设备调整时间和加工时间,能使下道工序的设备可提前开始设备调整;采用正向可插入式挤压调度方法安排工序。
- 3)文中提出的方法突破了传统柔性作业车间调度的局限,能在可接受的计算时间内得到有效的混合工作日历下柔性作业车间多目标调度方案集(Pareto 解集)供调度人员决策。

### 参考文献:

[ 1 ] Gao L, Pan Q K. A shuffled multi-swarm micro-migrating birds optimizer for a multi-resource-constrained flexible job shop scheduling problem[J]. Information Sciences, 2016, 372: 655-676.

[ 2 ] Amirghasemi M, Zamani R. An effective asexual genetic algorithm for solving the job shop scheduling problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 83: 123-138.

[ 3 ] Kundakcı N, Kulak O. Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem

- [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 96: 31-51.
- [4] 熊唯, 李宗斌, 郝建波. 解决动态作业车间调度关键问题的方法研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2008(7): 105-108,112.  
XIONG Wei, LI Zongbin, HAO Jianbo. Research on solving the key problem of dynamic job shop scheduling[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2008(7): 105-108,112.(in Chinese)
- [5] 武志军, 宁汝新, 万春辉. 车间调度中的动态工作日制研究与实现[J]. *制造业自动化*, 2006, 28(4): 46-48,75.  
WU Zhijun, NIN Ruxin, WAN Chunhui. Research and realization of dynamic shop calendar in shop scheduling [J]. *Manufacturing Automation*, 2006, 28(4): 46-48,75.(in Chinese)
- [6] 黄瑜岳, 李克清, 郑晓峰. 考虑班次约束的 Job Shop 等量分批调度算法[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(1): 1-7,16.  
HUANG Yuyue, LI Keqing, ZHENG Xiaofeng. A scheduling algorithm to equal amount of batches for job shop considering the constraint of work-shifts[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013,13(1):1-7,16.(in Chinese)
- [7] 万春辉, 闫艳, 武志军, 等. 面向车间生产动态调度的动态工作日制研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2006(3): 102-104.  
WAN Chunhui, YAN Yan, WU Zhijun, et al. Research and realization of dynamic shop calendar orienting dynamic scheduling[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2006(3): 102-104.(in Chinese)
- [8] Ponnambalam S G, Ramkumar V, Jawahar N. A multiobjective genetic algorithm for job shop scheduling[J]. *Production Planning & Control*, 2001, 12(8): 764-774.
- [9] 张师博华, 车阿大, 宋强磊. 基于 Pareto 排序和混沌加权的多目标项目调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(6): 1215-1222.  
ZHANG Shibohua, CHE Ada, SONG Qianglei. Multi-objective project scheduling based on Pareto sorting and chaos weighting[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(6): 1215-1222.(in Chinese)
- [10] Zhu Z Q. Construction of Integrated Objective Function/Adaptive Function for Multiobjective/Multidisciplinary Optimization[C]//China Aerodynamics Society. 2003 Advances in Aerodynamic Frontier Research. China Aerodynamics Society, 2003: 6.
- [11] 刘晓霞, 谢里阳, 陶泽, 等. 柔性作业车间多目标调度优化研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(3): 362-365,382.  
LIU Xiaoxia, XIE Liyang, TAO Ze, et al. Research on multi-objective scheduling optimization for flexible job shop [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2008, 29(3): 362-365,382.(in Chinese)
- [12] 彭建刚, 刘明周, 张玺, 等. 基于 Pareto 优化的离散自由搜索算法求解多目标柔性作业车间调度问题[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(5): 620-626.  
PENG Jiangang, LIU Mingzhou, ZHANG Xi, et al. Discrete free search based on pareto-optimality for multi-objective flexible job-shop scheduling problem [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(5): 620-626.(in Chinese)
- [13] El-Abbasy M S, Elazouni A, Zayed T. MOSCOPEA: Multi-objective construction scheduling optimization using elitist non-dominated sorting genetic algorithm[J]. *Automation in Construction*, 2016, 71: 153-170.
- [14] Zitzler E, Thiele L, Laumanns M, et al. Performance assessment of multiobjective optimizers: an analysis and review [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2003, 7(2): 117-132.
- [15] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [16] 陈华平, 谷峰, 卢冰原, 等. 自适应多目标遗传算法在柔性生产车间调度中的应用[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(8): 2271-2274,2288.  
CHEN Huaping, GU Feng, LU Bingyuan, et al. Application of self-adaptive multi-objective genetic algorithm in flexible job shop scheduling[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(8): 2271-2274,2288.(in Chinese)
- [17] 周亚勤, 李蓓智, 杨建国. 考虑批量和辅助时间等生产工况的智能调度方法[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(1): 52-56.  
ZHOU Yaqin, LI Beizhi, YANG Jianguo. Intelligent scheduling algorithm for problems with batch and non cutting time [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(1): 52-56.(in Chinese)
- [18] 潘全科, 朱剑英. 多工艺路线多资源多目标的作业调度优化[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(20): 1821-1826.  
PAN Quanke, ZHU Jianying. An optimization method for a multi-objective job-shop scheduling problem under multi-resource constraints[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(20): 1821-1826.(in Chinese)