

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.044

# 基于改进遗传算法的车削加工中心工步排序与优化\*

苏於梁 褚学宁 孙习武 汤岑书

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

**【摘要】** 多主轴多动力刀架车削加工中心工步排序问题是同时涉及资源调度和工步排序的复杂问题。提出一种改进遗传算法以解决结合工艺资源调度的车削加工中心工步排序问题。通过建立0-1混合整数规划模型,为算法提供目标函数及约束,并根据此模型中多参数多约束的特点,设计了一种基于结构体的编码方法。为改善算法性能,根据相邻基因间的相似程度,构造了多概率交叉算子与多概率变异算子,从而提高由相邻基因组成优秀基因段遗传至下一代的概率。实例表明该遗传算法具有可行性与有效性,并且较传统遗传算法在解决该类问题方面具有更好的收敛性。

**关键词:** 车削加工中心 工步排序 改进遗传算法

**中图分类号:** TH162 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0216-07

## Worksteps Sequencing and Optimization of Mill/turn Machining Center Based on Improved Genetic Algorithm

Su Yuliang Chu Xuening Sun Xiwu Tang Censhu

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

### Abstract

Mill/turn machining center can perform several operations simultaneously with multiple spindles and power turrets, which means worksteps sequencing should be integrated with scheduling. According to the characteristics of mill/turn machining center, an improved genetic algorithm to optimize worksteps sequence was proposed. A 0-1 mixed integer programming model was set up to support the algorithm with object function and constraints. In order to present so many parameters of the 0-1 mixed integer programming model, coding strategy was developed based on data structure instead of integer or symbol. According to the similarity of genes, two novel genetic operators named multi-probability crossover operator and multi-probability mutation operator were also introduced. Consequently, these genetic operators insure that chromosomes consisted of genes with more similarity could transmit their characteristics to next generation with higher probability. The effectiveness of the proposed algorithm was verified by a real case using dual spindles and twin power turrets mill/turn machining center. The results also indicated that the improved genetic algorithm gained a better performance than the conventional genetic algorithm.

**Key words** Mill/turn machining center, Worksteps sequencing, Improved genetic algorithm

### 引言

多主轴多动力刀架车削加工中心比传统车削机

床增加了铣削、钻孔等多种综合加工能力,并可以使用多把动力刀架同时加工不同的工步,是一种具有并行加工能力的新型复合数控加工中心<sup>[1]</sup>。该类

收稿日期: 2009-07-24 修回日期: 2009-09-07

\* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA04Z140)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070248020)和上海市重点学科建设资助项目(Y0102)

作者简介: 苏於梁, 博士生, 主要从事数字化制造研究, E-mail: suyuliang@sjtu.edu.cn

型加工中心的工步排序问题可视为在复杂工艺资源调度前提下寻求全局最优加工顺序的过程。本文研究如何充分利用多主轴多动力刀架的特性,在排序过程中实时并且合理选择装夹的主轴以及加工的动力刀架,提高加工效率。在本类问题的研究中,遗传算法是主要解决手段之一<sup>[2-3]</sup>,本文以经过改进的遗传算法(简称为改进遗传算法)为工具求解最优工步排序和资源调度。

传统工步排序一般面向单主轴单刀架机床,不存在并行加工的情况,因此不需要考虑刀架主轴等工艺资源的调度问题<sup>[4-5]</sup>;而一般涉及工艺资源调度的工步排序研究中,所谓“工艺资源调度”主要指对机床或者工位等要素的调度,是作业车间调度的研究内容,并未针对机床自身的主轴与刀架进行调度<sup>[6]</sup>;部分研究虽然同时考虑到工步排序和工艺资源调度,但主要考虑的是局部最优解<sup>[7]</sup>。因此,本文提出一种基于改进遗传算法求解车削加工中心工步排序的方法,将工艺资源调度与工步排序结合起来,通过建立 0-1 混合整数规划模型来描述该问题,最后利用改进遗传算法求解。

## 1 车削加工中心工步排序问题描述

与常见的单一功能车床或者铣床相比,车削加工中心柔性更高,工步排序也更加复杂。多个动力刀架及主轴使车削加工中心具有并行加工能力,在满足约束的前提下,可同时对多个工步进行加工。以常见的车削加工中心(如双主轴双动力刀架式,如图 1 所示)为例,适合加工两端都有钻铣工艺的小型复杂精密零件。因为工件自动反装装置使工件的装夹位置可以在两主轴间任意转换,无需人工干预,所以在工步排序中可以利用该装置来减少换装夹次数,提高加工效率。因此,在多主轴的情况下,车削加工中心的主轴及动力刀架实际也可以视为工艺资源,如果在工步排序过程中对其进行调度,更合理地分配给各个工步,可以缩短整个工件的加工时间。因此,将车削加工中心的工步排序问题归结为结合工艺资源调度的工步排序问题。

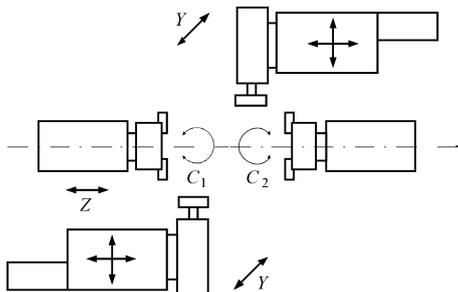


图 1 双主轴双动力刀架车削加工中心结构简图

Fig. 1 Dual spindles and twin power turrets machining center

根据车削加工中心的特点,在建立数学模型前作一些假设:①一个主轴在一段时间内最多只能安装一个工件。②一个动力刀架在一段时间内最多只能加工一个工步。③不同的动力刀架可以同时加工不同的工步。④主轴旋转类加工(例如车削)和刀具旋转类加工(例如铣削与钻削)不能同时进行。⑤工步一旦开始不能中断。⑥零时刻所有主轴与动力刀架都是可用资源。

以具有  $I$  个主轴与  $J$  个动力刀架的车削加工中心为例,假设要加工有  $K$  个工步的工件,则针对结合工艺资源调度的工步排序问题建立数学模型需要的变量如下:

(1) 主轴集记为  $\{C_1, C_2, \dots, C_I\}$ ,  $C_i$  为第  $i$  个主轴,  $i=1, 2, \dots, I$ ,  $I$  为主轴总数。

(2) 动力刀架集记为  $\{M_1, M_2, \dots, M_J\}$ ,  $M_j$  为第  $j$  个动力刀架,  $j=1, 2, \dots, J$ ,  $J$  为动力刀架总数。

(3) 工步集记为  $\{O_1, O_2, \dots, O_K\}$ ,  $O_k$  为第  $k$  个工步,  $k=1, 2, \dots, K$ ,  $K$  为工步总数。

(4)  $O_k^i$  表示在主轴  $C_i$  上被动力刀架  $M_j$  加工的  $O_k$ , 上标  $i$  对应选定的主轴  $C_i$ , 上标  $j$  对应选用的动力刀架  $M_j$ , 下标  $k$  对应工步号。

(5)  $s_k^i$  表示动力刀架  $M_j$  在主轴  $C_i$  上开始加工  $O_k^i$  的时间, 如果  $O_k^i$  未开始加工, 则  $s_k^i = +\infty$ 。

(6)  $f_k^i$  表示动力刀架  $M_j$  在主轴  $C_i$  上结束加工  $O_k^i$  的时间, 如果  $O_k^i$  未开始加工, 则  $f_k^i = 0$ 。

(7)  $[s_k^i, f_k^i]$  表示从  $s_k^i$  开始至  $f_k^i$  结束的时间段, 必有  $s_k^i \leq f_k^i$ ,  $s_k^i > f_k^i$  没有物理意义。

(8)  $O_k^i[s_k^i, f_k^i]$  表示  $O_k$  在时间段  $[s_k^i, f_k^i]$  中在主轴  $C_i$  上被动力刀架  $M_j$  加工的状态, 有“0”和“1”两种状态,  $O_k^i[s_k^i, f_k^i] = 1$  表示  $O_k$  在  $[s_k^i, f_k^i]$  时间内被动力刀架  $M_j$  在  $C_i$  轴上加工;  $O_k^i[s_k^i, f_k^i] = 0$  表示  $O_k$  在  $[s_k^i, f_k^i]$  时间内未被动力刀架  $M_j$  在  $C_i$  轴上加工。

(9)  $M_j[s_k^i, f_k^i]$  表示动力刀架  $M_j$  在时间段  $[s_k^i, f_k^i]$  中的状态,  $M_j[s_k^i, f_k^i] = 0$  表示空闲,  $M_j[s_k^i, f_k^i] = 1$  表示正忙。

(10)  $C_i[s_k^i, f_k^i]$  表示主轴  $C_i$  在时间段  $[s_k^i, f_k^i]$  中的状态,  $C_i[s_k^i, f_k^i] = 0$  表示空闲,  $C_i[s_k^i, f_k^i] = 1$  表示正忙。

因为该问题中所有变量都为整数,且部分整数变量仅有 0 和 1 两种状态,所以采用 0-1 混合整数规划模型解决该问题。

## 2 0-1 混合整数规划模型

加工时间最短是工艺资源调度与工步排序的优化目标,以此作为 0-1 混合整数规划模型的目标函

数,结合第1节提出的假设,设计目标函数为

$$\min(\max f_k^{ij}) =$$

$$\min \left( \max \left( \sum_{k=2}^K T_c(O_k^{ij}(\text{tool}) \parallel O_{k-1}^{ij}(\text{tool})) + T_s(O_k^{ij}(\text{setup}) \parallel O_{k-1}^{ij}(\text{setup})) + \sum_{k=1}^K t_k O_k^{ij}[s_k^{ij}, f_k^{ij}] \right) \right)$$

$$(i=1,2,\dots,I; j=1,2,\dots,J; k=1,2,\dots,K) \quad (1)$$

式中  $O_k^{ij}(\text{tool})$ ——动力刀架  $M_j$  在主轴  $C_i$  上加工  $O_k$  选用的刀具序号

$O_k^{ij}(\text{setup})$ ——动力刀架  $M_j$  在主轴  $C_i$  上加工  $O_k$  采用的装夹方式

$T_s$ ——装夹时间,由于车削加工中心一般都采用工件自动反装装置,每次更换装夹所需时间相近,所以假设每次装夹时间相同,都为  $T_s$

$T_c$ ——换刀时间,假设平均换刀时间为  $T_c$

$t_k$ —— $O_k^{ij}$  的加工时间

式(1)表示最后一个工步的完成时间,即整个工件加工完成的时间。因为车削加工中心存在多个主轴和动力刀架,并且具有并行加工能力,所以必须检查所有主轴上的工步完成时间,从而确定整个工件的最后完成时间。针对第1节中提出的多种假设,目标函数还需要满足约束:

$$(1) \sum_{j=1}^J M_j[s_k^{ij}, f_k^{ij}] \leq 1: \text{一个工步只能由一个动力刀架完成,不能中途更换动力刀架或者同时由多个动力刀架加工。}$$

$$(2) \sum_{i=1}^I C_i[s_k^{ij}, f_k^{ij}] \leq 1: \text{一个主轴一次最多只能装夹一个工件。}$$

$$(3) O_k^{ij}[s_k^{ij}, f_k^{ij}] = M_j[s_k^{ij}, f_k^{ij}] C_i[s_k^{ij}, f_k^{ij}]: O_k^{ij}[s_k^{ij}, f_k^{ij}] = 1 \text{ 表示 } O_k \text{ 被动力刀架 } M_j \text{ 在主轴 } C_i \text{ 上从 } s_k^{ij} \text{ 开始加工,直到 } f_k^{ij} \text{ 加工完成; } O_k^{ij}[s_k^{ij}, f_k^{ij}] = 0 \text{ 表示 } O_k \text{ 未被动力刀架 } M_j \text{ 在主轴 } C_i \text{ 上加工。}$$

$$(4) \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K O_k^{ij}[s_k^{ij}, f_k^{ij}] \leq J: \text{参与加工的动力刀架数不能超过车削加工中心拥有的动力刀架总数。}$$

$$(5) O_k^{ij}[s_k^{ij}, f_k^{ij}] + O_{k'}^{ij'}[s_{k'}^{ij'}, f_{k'}^{ij'}] \leq 1 (\text{当 } O_k^{ij} \in W \text{ and } O_{k'}^{ij'} \in L, s_k^{ij} < s_{k'}^{ij'} < f_{k'}^{ij'} \text{ or } s_{k'}^{ij'} < s_k^{ij} < f_k^{ij}): \text{工件静止加工方式如铣削,不能与工件旋转类加工方式如车削在同一主轴上同时进行。其中, } W \text{ 为工件静止类加工方式集合; } L \text{ 为工件旋转类加工方式集合。}$$

$$(6) f_k^{ij} = s_k^{ij} + t_k O_k^{ij}[s_k^{ij}, f_k^{ij}]: O_k \text{ 被动力刀架 } M_j \text{ 在主轴 } C_i \text{ 上完成加工的时间。}$$

$$(7) s_k^{ij} = f_{k-1}^{ij} + T_c(O_k^{ij}(\text{tool}) \parallel O_{k-1}^{ij}(\text{tool})) + T_s(O_k^{ij}(\text{setup}) \parallel O_{k-1}^{ij}(\text{setup})) (1 < k \leq K): O_k \text{ 被$$

力刀架  $M_j$  在主轴  $C_i$  上开始加工的时间。

$$(8) s_k^{ij} = +\infty (k=1, \dots, K): \text{工步未开始。}$$

$$(9) f_k^{ij} = 0 (k=1, \dots, K): \text{工步未完成。}$$

### 3 改进遗传算法求解

建立的模型约束较多且复杂,人工求解不但低效费时,而且容易出错,可以通过遗传算法、禁忌搜索算法和模拟退火算法等智能算法求解。本文采用遗传算法求解,其优点有:具有隐并行性,求解效率较高;全局搜索能力强,其交叉算子与变异算子使遗传算法具有随机特性,不易陷入局部最优。

由于遗传算法常用的二进制编码与自然数编码等编码方法基因信息含量较少,为在基因中反映本数学模型要求的主轴装夹状态、动力刀架加工状态、工步加工开始和结束时间等参数,将以上参数以结构体的形式进行编码形成基因,以携带本数学模型所需的基本属性。同时,在工步排序过程中,工步加工顺序、全部工步完成时间等参数都需要包括在染色体中,所以基因经过排序形成的染色体也是以结构体形式编码的。将该方法称为基于结构体的编码方法,区别于只考虑较少变量的二进制编码与自然数编码方法。在计算过程中,本算法还根据不同基因的相似度,设计了多概率交叉算子与多概率变异算子,使染色体中相邻基因在进化中形成的优秀基因段有较大概率被遗传,以改善算法性能。遗传算法的主要计算流程如图2所示。

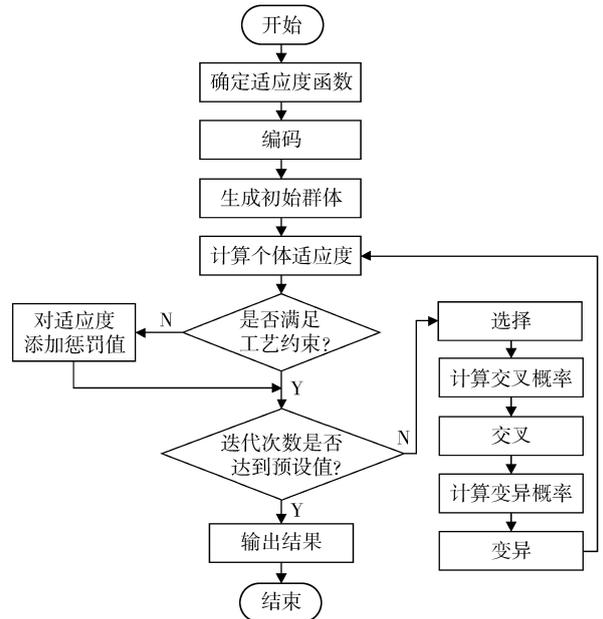


图2 改进遗传算法流程图

Fig.2 Flow chart of improved genetic algorithm

#### 3.1 基于结构体的编码方法

考虑到所提出模型变量较多,采用结构体编码

方式可以更好地在基因中表达工步信息。每个工步及其相应的刀具、安装主轴等工步信息以结构体的形式编码,形成基因。基因根据工步开始时间排序,形成染色体,染色体中的基因顺序表示工步开始加工的顺序。基因和染色体的编码结构:

基因结构体:

```
struct gene {
    string gene_id; // 基因 ID, 代表了工步  $O_k$ 
    string[] tool_set; // 可用刀具集, 供  $O_k$  选择
    string[] setup_set; // 可用装夹集, 供  $O_k$  选择
    string[] method_set; // 可用加工方法集, 供  $O_k$  选择
    string tool; // 选用的刀具  $O_k^{ij}$  (tool)
    string setup; // 选用的装夹  $O_k^{ij}$  (setup)
    string machining_method; // 选用的加工方法, 有工件静止 W 或工件旋转 L 两类,  $O_k^{ij} \in W$  或  $O_k^{ij} \in L$ 
    string M; // 选用的动力刀架, 代表模型中  $O_k^{ij}$  的上标  $j$ 
    string C; // 选用的主轴, 表示模型中  $O_k^{ij}$  上标  $i$ 
    double man_hour; // 工步加工时间  $t_k$ 
    double start_time; // 工步加工开始时间  $s_k^{ij}$ 
    double finish_time; // 工步加工结束时间  $f_k^{ij}$ 
}
```

染色体结构体:

```
struct chromosome {
    string ID; // 染色体 ID, 代表不同的加工方案
    struct_gene[] genes; // 基因, 数组中元素的顺序代表了工步  $O_k$  的开始顺序
    double makespan; // 全部工步完成的时间  $\max_k f_k^{ij}$ 
    double[] PC; // 交叉概率
    double[][] PM; // 变异概率
}
```

### 3.2 适应度函数

遗传算法在搜索过程中以适应度函数作为依据,通过适应度函数对每个染色体进行性能评价。适应度函数一般由目标函数变换而成,如果目标函数可以直接利用,则目标函数即为适应度函数,否则需要对目标函数的值域进行某种映射,使之适合于适应度函数的应用。本文采用 0-1 混合整数规划模型的目标函数作为适应度函数。

### 3.3 选择

本文采用锦标赛选择法,随机地从种群中挑选一定数目的个体作为竞赛群体,在其中选出最优的作为父母个体。每次选择的个体数目称为竞赛规模,反映了选择强度。过低的选择强度会使收敛太

慢或者不收敛,但是过高的选择强度会导致过早收敛,本文在实例中根据多次试验确定合适的竞赛规模为 2。

### 3.4 多概率交叉算子

交叉是将两个父个体的部分结构加以替换重组,从而产生新的个体。交叉发生的位置被称为交叉点,假设有  $n$  个基因,则有  $n-1$  个交叉点。交叉点被选择的概率称为交叉概率,交叉概率越低则被选中发生交叉的可能性就越低。基因间相似度是指基因参数的相似程度,数个相邻基因称作基因段,相似度高的相邻基因组成的基因段称作优秀基因段。常用交叉算子例如顺序交叉(OC)、部分映射交叉(PMX)与循环交叉(CX)对不同交叉点的交叉概率是相同的<sup>[8]</sup>,不能体现出优秀基因段在进化中的遗传优势。本文提出的多概率交叉算子,根据相邻基因间的相似度,计算每个交叉点交叉概率,优秀基因段内部的交叉概率会较小,使其被打散重组的概率就较低,能够更多体现出优秀基因段在进化中的遗传优势。假设不同主轴不同动力刀架基因间交叉概率为  $P_1^C$ ,同动力刀架不同主轴的基因间交叉概率为  $P_2^C$ ,同主轴不同动力刀架的基因间交叉概率为  $P_3^C$ ,同主轴同动力刀架的基因间交叉概率是  $P_4^C$ ,则交叉概率如图 3 所示。交叉概率越低,交叉点两边基因越容易聚在一起组成基因段。根据上文提出的适应度函数,同一主轴上的工步聚类在一起依次加工,可以减少主轴间转换装夹的时间,而选择同一动力刀架的工步聚类在一起可以减少动力刀架移动调整时间,从而提高加工效率。假设主轴间转换装夹的时间要大于动力刀架移动调整时间,所以设置交叉概率之间关系为  $P_1^C > P_2^C > P_3^C > P_4^C$ 。

如图 3 所示,在交叉过程中染色体两两配对,然后随机产生一个交叉概率  $P^C$ ,假设  $P_2^C > P^C > P_3^C$ ,则交叉概率大于  $P^C$  的交叉点成为备选交叉点。在父代的备选交叉点中随机选择一个作为选中的交叉点,在此处将染色体分成两段,在 P1 与 P2 中各随机选择一个基因段分别复制到子代 Ch1 与 Ch2。假设 P1 中复制到 Ch1 的基因段为  $O_2O_5O_4O_6O_3$ ,为保证同一染色体中基因的唯一性,从 P2 中选择目前 Ch1 中还没有的基因  $O_{10}$ 、 $O_1$ 、 $O_8$ 、 $O_7$ 、 $O_9$ ,以 P2 中的顺序依次复制到 Ch1 形成新的子代个体 Ch1:  $O_{10}O_1O_8O_7O_9O_2O_5O_4O_3O_6$ ;类似的,新产生的 Ch2 为  $O_{10}O_5O_6O_3O_1O_4O_2O_8O_7O_9$ 。

### 3.5 多概率变异算子

多概率变异算子根据基因的相似度设置每一种属性都具有  $P_1^M$ 、 $P_2^M$ 、 $P_3^M$  3 种变异概率。假设某基因的刀架属性与相邻两个基因都不同,则该属性的变

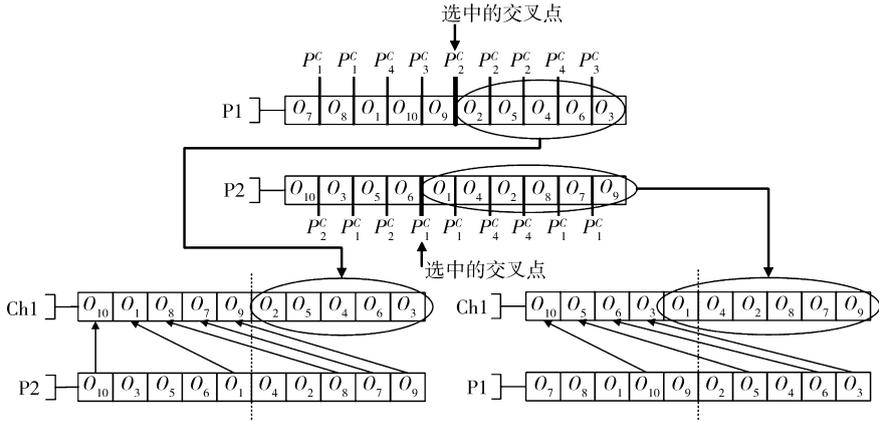


图3 多概率交叉示意图  
Fig.3 Multi-probability crossover

异概率为  $P_1^M$ ; 与一个相邻基因相同则为  $P_2^M$ ; 与两个相邻基因都相同则为  $P_3^M$ 。为了提高属性相同或相似基因的遗传概率, 设定  $P_1^M > P_2^M > P_3^M$ 。在变异操作过程中, 首先随机产生一个变异概率  $P^M$ , 假设  $P_2^M > P^M > P_3^M$ , 然后找出刀架属性的变异概率大于  $P^M$  的所有基因, 从中随机选择两个进行位置交换。以图4为例,  $O_1$  与  $O_6$  刀架属性的变异概率  $P_1^M$  与  $P_2^M$  均大于  $P^M$ , 因此互换位置。在产生新的基因排列后, 到达新位置的基因开始进行属性变异, 如果属性的变异导致该属性变异概率提高, 则这种变异不会发生, 基因的原有属性会被保留, 否则基因属性会发生变异。例如图4中,  $O_6$  基因的属性  $M_2$  变异成  $M_1$ , 相应地使变异概率从  $P_1^M$  变成  $P_3^M$ , 降低了新位置的变异概率;  $O_1$  的属性从  $M_2$  变异成  $M_1$ , 变异概率没有发生改变, 仍是  $P_2^M$ 。

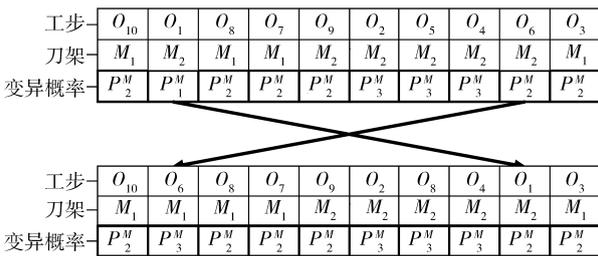


图4 多概率变异示意图  
Fig.4 Multi-probability mutation

3.6 约束

约束包括基于车削加工中心的工艺资源约束与针对具体工件的工艺约束。工艺资源约束是指第2节提出的11项约束, 而工艺约束是指某些工件的特定加工顺序, 包括工步加工顺序约束和定位约束。

工步加工顺序约束是指工步的加工必须按照一定的顺序进行, 因为定义每个工步对应一个特征, 所以工步加工顺序约束就是特征加工顺序约束。以图5所示工件为例: 特征F8在特征F7完成后才可

以开始加工, 即  $\{F7\} \rightarrow \{F8\}$ ; 先加工表面然后钻孔, 如  $\{F5\} \rightarrow \{F7, F14\}$ 、 $\{F6\} \rightarrow \{F9\}$ ; 先加工侧面, 然后倒角, 如  $\{F18, F19\} \rightarrow \{F26\}$ 、 $\{F19, F21\} \rightarrow \{F27\}$ 、 $\{F18, F20\} \rightarrow \{F28\}$ 、 $\{F20, F21\} \rightarrow \{F29\}$ 。定位约束也是工艺约束的一种, 被约束特征的加工必须在其基准特征加工完成后方可开始。以图5中工件为例: 孔特征F10以平面特征F18、F19为定位基准, 定位约束为  $\{F18, F19\} \rightarrow \{F10\}$ ; 面特征F15以F16为定位基准, 则定位约束为  $\{F16\} \rightarrow \{F15\}$ 。以上工艺约束不是本文的研究重点, 在实例中应用人工的方法生成并输入。

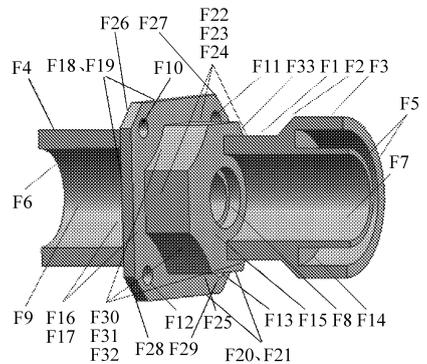


图5 工件模型  
Fig.5 Workpiece model

在交叉和变异完成后, 检查新生成的子代个体是否满足各类约束, 不满足的根据其违反约束的数量, 在适应度值上添加一个惩罚值。约束违反越多, 惩罚值越大, 以此降低违反约束的染色体被选择进入遗传过程的概率。

4 应用实例

在结合工艺资源调度的工步排序中, 每个工步只包含一个特征。以图5的工件为例, 该工件已完成粗加工, 现需要进行精加工。图5中各个特征对应工步的详细信息如表1所示。

表 1 工步列表  
Tab. 1 Worksteps list

工步 ID	特征 ID	特征名	可用加工方法集	可用装夹集	可用刀具集
$O_1$	F1	圆柱面 1	{车削}	{S1}	{T1, T3}
$O_2$	F2	圆柱面 2	{车削}	{S1}	{T1, T3}
$O_3$	F3	圆柱面 3	{车削}	{S1}	{T1, T3}
$O_4$	F4	圆柱面 4	{车削}	{S2}	{T1, T3}
$O_5$	F5	端面 1	{车削, 铣削}	{S1}	{T1, T2}
$O_6$	F6	端面 2	{车削, 铣削}	{S2}	{T1, T2}
$O_7$	F7	孔 1	{车削, 铣削, 钻孔}	{S1}	{T1, T5}
$O_8$	F8	孔 2	{钻孔}	{S1}	{T6}
$O_9$	F9	孔 3	{车削, 铣削, 钻孔}	{S2}	{T1, T5}
$O_{10}$	F10	孔 4	{铣削, 钻孔}	{S1, S2}	{T4}
$O_{11}$	F11	孔 5	{铣削, 钻孔}	{S1, S2}	{T4}
$O_{12}$	F12	孔 6	{铣削, 钻孔}	{S1, S2}	{T4}
$O_{13}$	F13	孔 7	{铣削, 钻孔}	{S1, S2}	{T4}
$O_{14}$	F14	型腔 1	{铣削}	{S1}	{T7}
$O_{15}$	F15	平面 1	{车削, 铣削}	{S2}	{T1, T3}
$O_{16}$	F16	平面 2	{铣削}	{S1}	{T3}
$O_{17}$	F17	平面 3	{车削, 铣削}	{S1}	{T1, T3}
$O_{18}$	F18	平面 4	{铣削}	{S1, S2}	{T3}
$O_{19}$	F19	平面 5	{铣削}	{S1, S2}	{T3}
$O_{20}$	F20	平面 6	{铣削}	{S1, S2}	{T3}
$O_{21}$	F21	平面 7	{铣削}	{S1, S2}	{T3}
$O_{22}$	F22	平面 8	{铣削}	{S1, S2}	{T3}
$O_{23}$	F23	平面 9	{铣削}	{S1, S2}	{T3}
$O_{24}$	F24	平面 10	{铣削}	{S1, S2}	{T3}
$O_{25}$	F25	平面 11	{铣削}	{S1, S2}	{T3}
$O_{26}$	F26	倒角 1	{铣削}	{S1, S2}	{T8}
$O_{27}$	F27	倒角 2	{铣削}	{S1, S2}	{T8}
$O_{28}$	F28	倒角 3	{铣削}	{S1, S2}	{T8}
$O_{29}$	F29	倒角 4	{铣削}	{S1, S2}	{T8}
$O_{30}$	F30	圆弧面 1	{铣削}	{S1, S2}	{T3}
$O_{31}$	F31	圆弧面 2	{铣削}	{S1, S2}	{T3}
$O_{32}$	F32	圆弧面 3	{铣削}	{S1, S2}	{T3}
$O_{33}$	F33	圆弧面 4	{铣削}	{S1, S2}	{T3}

其中 S1 表示装夹位置是在轴  $C_1$  上, S2 表示装夹位置是在轴  $C_2$  上, T1 ~ T7 代表刀库中适应不同加工的多把刀具。

经过多次试验设置遗传算法参数, 种群规模为 400, 迭代次数为 200, 竞赛规模为 2, 交叉概率  $P_1^C = 0.9$ ,  $P_2^C = 0.7$ ,  $P_3^C = 0.4$ ,  $P_4^C = 0.05$ , 变异概率  $P_1^M = 0.7$ ,  $P_2^M = 0.3$ ,  $P_3^M = 0.05$ , 经 2 000 次计算, 其中最优加工顺序如图 6 所示。与图 7 的传统机床工步排序最优结果比较, 加工效率有提高显著。

再将改进遗传算法与传统遗传算法进行比较。根据多次试验设置传统遗传算法交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.3, 而其他参数均相同。图 8 反映了传统遗传算法与改进遗传算法的结果。统计 2 000 次计算结果可知, 改进遗传算法获得最优值 69 次(比例为 3.45%), 相对于传统遗传算法的 52 次(所占比例为 2.6%), 增加了 17 次, 提高比率达到 32.69%; 完成时间在 3 108 s 以上的不良结果比例, 改进遗传算法为 48 次(所占比例为 2.40%), 相比传统遗传算法的 91 次(所占比例为 4.55%), 减少了 43 次, 降低比率达到 47.25%。以上计算结果表明, 采用基于结构体的编码方法、多概率交叉算子与多概率变异算子的改进遗传算法, 相比传统遗传算法, 提高了搜索到全局最优解的可能性, 并且降低了陷入局部最优解的概率。

### 5 结束语

针对车削加工中心多主轴多刀架的特点, 提出了结合工艺资源调度的工步排序方法, 将主轴与动力刀架视为工艺资源进行调度, 与工步排序相结合, 以加工时间最短为目标进行优化。通过建立与问题对应的 0-1 混合整数规划模型, 利用改进遗传算法求解。该算法在传统遗传算法基础上, 对编码、交叉算子、变异算子等进行了改进, 其优点如下: 基于结构体的编码方法使染色体与基因都可以携带大量参数, 满足了工艺资源调度问题多参数多约束的要求; 根据不同基因间的相似程度, 提出多概率交叉算子与多概率变异算子, 提高了遗传过程中优秀基因段

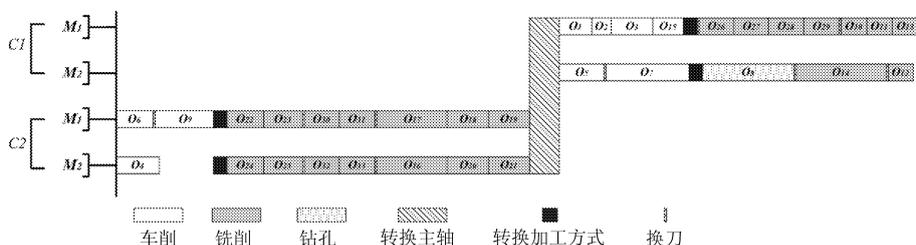


图 6 车削加工中心工步排序最优结果

Fig. 6 Optimal worksteps sequence of mill/turn machining center

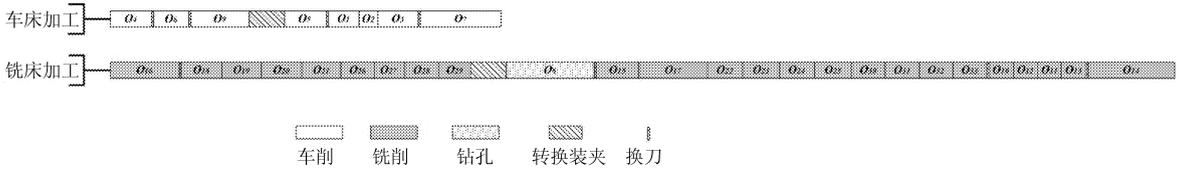


图7 传统机床工步排序最优结果

Fig. 7 Optimal worksteps sequence of traditional machine tool

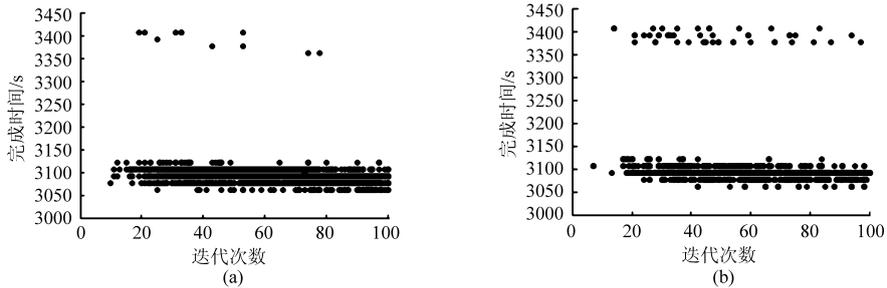


图8 2000次计算结果

Fig. 8 Results of 2000 times calculation

(a) 改进遗传算法 (b) 传统遗传算法

的遗传优势,使优秀基因段更易于遗传到下一代,从而改善了传统遗传算法在处理该类问题上的性能。实例证明,车削加工中心相对传统机床加工效率具有较大提高,加工时间缩短。此外,本文提出的改进

遗传算法,在搜索到全局最优解的可能性上,比传统遗传算法提高了32.69%,并且降低陷入局部最优解的概率。

#### 参 考 文 献

- Moriwaki T. Multi-functional machine tool[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(2):736~749.
- 张冠伟,赵相松,李佳,等. 基于遗传算法的工步优化排序方法[J]. 计算机制造集成系统, 2005, 11(2):242~246.  
Zhang Guanwei, Zhao Xiangsong, Li Jia, et al. Method of operation optimization sequencing using genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(2):242~246. (in Chinese)
- Goncalves J F, Mendes J J M, Resende M G C. A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189(3):1171~1190.
- 徐平,高奇,王明旭. 基于遗传算法的计算机辅助工艺计划工序决策优化[J]. 中国工程机械学报, 2006, 4(3):303~312.  
Xu Ping, Gao Qi, Wang Mingxu. GA-based CAPP optimization strategy[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2006, 4(3):303~312. (in Chinese)
- Hua G R, Zhou X H, Ruan X Y. GA-based synthesis approach for machining scheme selection and operation sequencing optimization for prismatic parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(5~6):594~603.
- Logendran R, McDonell B, Smucker B. Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setups[J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(11):3420~3438.
- Chiu N C, Fang S C, Lee Y S. Sequencing parallel machining operations by genetic algorithms[J]. Computers & Industrial Engineering, 1999, 36(2):259~280.
- Zhang W B, Lu Z H, Zhu G Y. Optimization of process route by genetic algorithm[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, 22(2):180~188.