

# 基于规则和混合算法的智能 STEP – NC 微观工艺规划

张 禹, 王志伟, 李东升, 巩亚东  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为解决 STEP – NC 微观工艺规划智能性差和效率不高的问题,提出一种基于规则和混合算法的智能 STEP – NC 微观工艺规划方法.首先,采用本文提出的基于规则的加工资源匹配算法,为每一加工工步匹配相应的机床和刀具;然后,以最短换刀时间为优化目标,采用混合算法(混沌算法和遗传算法)对 STEP – NC 加工工步序列进行优化;最后,以最少加工时间和最低加工成本为优化目标,通过混合算法对 STEP – NC 加工工艺参数进行优化,进而得到最优的 STEP – NC 微观工艺规划.通过实例验证了该方法的有效性和可行性.

**关 键 词:** STEP – NC;智能微观工艺规划;规则;混合算法;加工资源匹配

**中图分类号:** TH 166      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005 – 3026(2020)08 – 1116 – 07

## Intelligent STEP-NC-Compliant Micro-process Planning Based on Rules and Hybrid Algorithm

ZHANG Yu, WANG Zhi-wei, LI Dong-sheng, GONG Ya-dong  
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: ZHANG Yu, E-mail: zy4097534@126.com)

**Abstract:** Aimed at the poor intelligence and low efficiency of STEP-NC-compliant micro-process planning, an intelligent STEP-NC-compliant micro-process planning method based on rules and hybrid algorithm was proposed. In this method, a rule-based algorithm for matching manufacturing resources is proposed to choose the corresponding machine tools and cutting tools for each workingstep. Then, taking the shortest tool exchanging time as the optimization target, the hybrid algorithm which combines chaos algorithm with the genetic algorithm is used to optimize the STEP-NC-compliant workingstep sequences. Finally, taking the shortest machining time and the lowest machining cost as optimization objectives, the hybrid algorithm is used to optimize the STEP-NC-compliant machining parameters, which results in obtaining the optimal STEP-NC-compliant micro-process planning. The effectiveness and feasibility of this method was verified by using cases.

**Key words:** STEP-NC; intelligent micro-process planning; rule; hybrid algorithm; manufacturing resources matching

为取代 ISO 6983,国际标准化组织开发了一个新型 NC 编程数据接口国际标准 STEP – NC<sup>[1-2]</sup>.该标准通过制造特征描述工件,涵盖了工件加工的所有信息,支持信息在工件设计与制造之间的双向流动,为工艺规划的智能化提供了条件.因此,基于 STEP – NC 的工艺规划已经成为智能制造领域的研究热点之一.

国内外很多学者对基于 STEP – NC 的工艺规划做了很多有意义的研究.田锡天等<sup>[3]</sup>对 STEP – NC 工步序列的优化问题进行研究,但没

有考虑车间可用制造资源的制约问题. Mokhtar 等<sup>[4]</sup>提出 STEP-NC 加工操作优先级生成算法. 欧阳华兵等<sup>[5]</sup>采用遗传算法实现 STEP-NC 工艺路线的优化,但所采用的遗传算法对初值敏感且容易陷入局部最优. 黄凤立和 Wang 等<sup>[6-7]</sup>通过蚁群算法分别实现了 STEP-NC 工步序列和工艺参数的优化,但上述两项研究都没有解决蚁群算法收敛速度慢和容易陷入局部最优的问题. 徐旬等<sup>[8]</sup>利用神经网络的非线性推理能力实现加工参数的自动获取,但所考虑的因素较少,很难得到最优的加工参数. Zhang 等<sup>[9]</sup>建立一种以表面粗糙度为评价依据的工艺规划系统 PPS,能够根据操作者输入的加工参数计算出切削后的表面粗糙度,但加工参数的选择依赖工艺人员的知识水平. Ridwan 等<sup>[10]</sup>提出一种加工参数自适应优化算法,但只能实现进给量的优化. 综上所述,国内外关于 STEP-NC 工艺规划的研究主要集中在车间级工艺规划即微观工艺规划,但所提出的方法存在智能性较差、效率不高等问题. 为了解决上述问题,本文对基于规则和混合算法的智能 STEP-NC 微观工艺规划进行了研究.

## 1 STEP-NC 简介

为了提供一种高级的产品数控数据描述的中性机制,国际标准化组织 ISO 提出了一种新型的 NC 编程数据接口国际标准 STEP-NC. STEP-NC 标准是 STEP 标准向数控领域的扩展,是以基于制造特征的方式描述加工对象,描述加工的是 什么,而不是和 G/M 代码一样描述怎么加工,包含零件加工所需的全部信息,而且支持设计和制造信息的双向流动以及网络化制造<sup>[11]</sup>,这种面向对象的数据模型能够全面清楚地描述工件的所有加工信息,为工艺规划的智能化提供了条件.

## 2 基于规则和混合算法的智能 STEP-NC 微观工艺规划方法

微观工艺规划是一个为了适应车间可利用的加工资源和加工能力,确定车间级最优加工资源、加工工步序列和加工工艺参数的复杂推理优化决策过程. 在该过程中,由于加工资源的匹配所涉及的知识往往是显性的,因此本文采用规则对加工资源匹配进行推理决策,而对于加工工步序列和加工参数的优化则可以通过智能寻优的遗传算法<sup>[12-13]</sup>实现优化决策. 但遗传算法容易陷入局部

最优和“早熟”,而具有遍历性和随机性的混沌算法<sup>[14-15]</sup>能够克服遗传算法的缺陷. 因而,结合规则,并混合混沌算法和遗传算法,可以高效智能地解决 STEP-NC 微观工艺规划. 基于此,提出一种基于规则和混合算法的智能 STEP-NC 微观工艺规划方法,其中包括基于规则的加工资源匹配、基于混合算法的 STEP-NC 加工工步序列优化和基于混合算法的 STEP-NC 加工工艺参数优化.

### 2.1 基于规则的加工资源匹配

#### 2.1.1 基于规则的加工机床匹配

基于规则的加工机床匹配就是从机床数据库中寻找满足加工要求的机床,其算法流程概括如下:①根据车间可利用的机床建立机床数据库;②根据“毛坯的尺寸应小于机床的 X,Y,Z 轴最大行程”原则选出相应机床;③根据“毛坯的质量应小于机床工作台最大负荷”原则筛选出相应机床;④根据“机床的精度应满足零件各个特征的精度”原则进行进一步筛选;⑤根据“加工零件需要的转速应小于机床的最大转速”原则再进行筛选;⑥根据“机床应具备适当的辅助功能”原则选出车间可利用的加工机床.

#### 2.1.2 基于规则的加工刀具匹配

基于规则的加工刀具匹配过程就是从刀具数据库中寻找满足加工要求的刀具,其算法流程概括如下:①根据车间可利用的刀具建立刀具数据库;②根据“刀具类型应与加工机床相适应”原则选出相应刀具;③根据“刀具尺寸应适用于加工范围”原则筛选出相应刀具;④根据“刀具加工后零件的精度和表面粗糙度应满足加工要求”原则进行进一步筛选;⑤根据“刀具材料硬度应比所加工零件的硬度高”原则再进行筛选;⑥根据“刀具切削后的余量应满足每道工序规定的加工余量范围”原则选出车间可利用加工刀具.

### 2.2 基于混合算法的 STEP-NC 加工工步序列优化

#### 2.2.1 STEP-NC 工步序列优化数学模型

以最短换刀时间为优化目标,所建立的目标函数  $g(x)$  为

$$g(x) = \min(f_1, \dots, f_i, \dots, f_{M_s}). \quad (1)$$

式中: $M_s$  为加工工步序列的个数; $f_i$  为第  $i$  条加工工步序列对应的换刀时间:

$$f_i = \sum_{j=1}^{N_s-1} (T[j+1] - T[j]) \cdot t[j]. \quad (2)$$

式中: $i=1,2,\dots,M_s$ ;  $j=1,2,\dots,N_s-1$ ,  $N_s$  为加工工步序列含有的工步数; $t[j]$  为相邻两个工步间的换刀

时间; $T[j]$ 为第 $j$ 个工步对应的刀具代码,当相邻两工步需要换刀时 $T[j+1]-T[j]$ 取1,否则取0。

### 2.2.2 STEP-NC 工步序列的混合算法优化

1) 基因编码:采用字符串进行基因编码。一个加工工步序列即为一条染色体,而加工工步序列所包含的每个加工工步即为一个基因。

2) 初始种群的混沌生成:采用 Logistic 映射进行混沌搜索从而形成初始种群。其映射公式为

$$\beta_i^{(q+1)} = \mu \beta_i^{(q)} (1 - \beta_i^{(q)}). \quad (3)$$

式中: $\beta_i$ 为混沌变量, $i=1,2,3,\dots,r$ , $r$ 为染色体长度; $u$ 为种群序号, $u=1,2,3,\dots,M$ , $M$ 为种群的总数; $\mu$ 为混沌吸引子, $\mu=4$ 。

3) 适应度函数:评价个体优劣的指标是适应度,适应度函数为

$$f_i(x) = \begin{cases} c_{\max} - g(x), & c_{\max} > g(x); \\ 0, & c_{\max} \leq g(x). \end{cases} \quad (4)$$

式中 $c_{\max}$ 是一个理论最大值。

4) 选择操作:采用轮盘赌方式选择个体,个体 $i$ 被选择的概率为

$$P_i = F_i / \sum_{i=1}^N F_i. \quad (5)$$

式中: $F_i$ 为第 $i$ 个个体的适应度; $N$ 为群体大小。

5) 交叉操作:通过两点交叉策略实现交叉操作,如图1所示。在图1中, $P_1$ 和 $P_2$ 是有效的父代染色体,通过对父代染色体 $P_2$ 在交叉点1左侧基因和在交叉点2右侧基因的复制,以及从父代染色体 $P_1$ 中依次寻找出与父代染色体 $P_2$ 复制给子代 $C_1$ 不同的基因,并按照其原来的顺序依次复制到交叉点之间,进而得到有效的 $C_1$ 子代染色体。

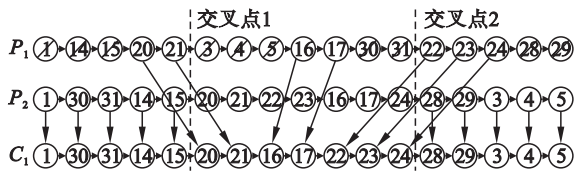


图1 交叉操作

Fig. 1 Cross operation

6) 变异操作:采用随机交换染色体中的两段基因代码的位置来完成变异操作。经变异操作而生成的染色体依据加工工步的排序规则对染色体的有效性进行判断。

7) 附加混沌扰动:为了防止算法陷入局部极值,在最优染色体附近混沌生成一条新的染色体,并与当前最优个体进行比较,保留适应度值较大的个体作为当代最优个体。混沌扰动公式:

$$\delta'_k = (1 - \alpha)\delta^* + \alpha\delta_k, \quad (6)$$

$$\alpha = 1 - \left( \frac{k-1}{k} \right)^m. \quad (7)$$

式中: $\delta_k$ 为经过 $k$ 次迭代后的混沌向量, $\delta'_k$ 为扰动后的相应混沌向量; $\delta^*$ 为当前最优的混沌向量; $\alpha$ 范围为 $[0,1]$ ; $m$ 是一个整数。

8) 终止条件判断:终止条件为进化代数。若满足条件,则输出最优加工工步序列;若不满足条件,则进行下一轮的迭代,直到满足条件为止。

### 2.3 基于混合算法的 STEP-NC 加工工艺参数优化

#### 2.3.1 STEP-NC 工艺参数多目标优化数学模型

1) 加工时间目标函数:

$$t = t_m + t_{et} \frac{t_m}{T} + t_o. \quad (8)$$

式中: $t$ 是加工时间; $t_m$ 是切削时间; $T$ 是刀具寿命; $t_{et}$ 是一次刀具更换所消耗的时间; $t_o$ 是辅助时间。

计算切削时间 $t_m$ 和刀具寿命 $T$ 的公式为

$$t_m = \frac{\pi l h D}{1000 f_z v a_p Z}. \quad (9)$$

$$T = \frac{K_l D^a}{v^b f_z^c a_p^d a_e^e Z^f}. \quad (10)$$

式中: $v$ 是切削速度; $f_z$ 是每齿进给量; $a_p$ 是背吃刀量; $Z$ 是刀具齿数; $D$ 是刀具直径; $l$ 是切削长度; $a_e$ 是切削宽度; $h$ 是切削厚度; $a, b, c, d, e, f$ 和 $K_l$ 是经验系数。

将式(9)和式(10)代入式(8)可得

$$t = \frac{\pi l h D}{1000 f_z v a_p Z} \left( 1 + \frac{t_{et} v^b f_z^c a_p^d a_e^e Z^f}{K_l D^a} \right) + t_o. \quad (11)$$

2) 加工成本目标函数:

$$c = c_0 t + c_t \frac{t_m}{T}. \quad (12)$$

式中: $c$ 是加工成本; $c_0$ 是单位加工工时成本; $c_t$ 是加工刀具材料的成本。

将式(9)~式(11)代入式(12)可得

$$c = c_0 \left[ \frac{\pi l h D}{1000 f_z v a_p Z} \left( 1 + \frac{t_{et} v^b f_z^c a_p^d a_e^e Z^f}{K_l D^a} \right) + t_o \right] + c_t \cdot \frac{\pi l h v^{b-1} f_z^{c-1} a_p^{d-1} a_e^e Z^{f-1}}{1000 K_l D^{a-1}}. \quad (13)$$

3) 约束条件:

切削力约束:

$$R_1(x) = \frac{K_F f_z^m a_p^n a_e^p Z}{D^u v^w} \leq F_{\max}. \quad (14)$$

式中: $F_{\max}$ 为最大允许切削力; $m, n, p, u, w$ 和 $K_F$ 为切削力经验系数。

主轴扭矩约束:

$$R_2(x) = \frac{K_q f_z^m a_p^n a_e^p Z}{2D^{u-1} v^w} \leq T_{q, \max} \quad (15)$$

式中： $T_{q, \max}$  为最大允许扭矩； $K_q$  为扭矩经验系数。

加工功率约束：

$$R_3(x) = \frac{K_p f_z^m a_p^n a_e^p Z}{D^u v^{w-1}} \leq P_{\max} \quad (16)$$

式中： $P_{\max}$  为最大允许功率； $K_p$  为功率经验系数。

工件表面质量约束：

$$R_4(x) = \frac{K_s f_z^2}{D} \leq R_{a, \max} \quad (17)$$

式中： $R_{a, \max}$  为最大允许表面粗糙度； $K_s$  为表面粗糙度经验系数。

切削速度约束：

$$\frac{\pi D N_{\min}}{1000} = v_{\min} \leq v \leq v_{\max} = \frac{\pi D N_{\max}}{1000} \quad (18)$$

式中： $N_{\min}$  和  $N_{\max}$  为机床最小和最大主轴转速； $v_{\min}$  和  $v_{\max}$  为最小和最大切削速度。

每齿进给量约束：

$$\frac{\pi D v_{f, \min}}{1000 v Z} = f_{z, \min} \leq f_z \leq f_{z, \max} = \frac{\pi D v_{f, \max}}{1000 v Z} \quad (19)$$

式中： $v_{f, \min}$  为机床最小进给速度； $v_{f, \max}$  为最大进给速度； $f_{z, \min}$  为最小每齿进给量， $f_{z, \max}$  为最大每齿进给量。

4) 以最短加工时间和最低加工成本为优化目标，所建立的多目标函数为

$$\begin{aligned} F(x) = \min F(f_z, v) = & \frac{\pi l h D}{1000 f_z v a_p Z} \left[ \lambda_1 \left( 1 + \frac{t_{et} v^b f_z^c a_p^d a_e^e Z^f}{K_t D^a} \right) + \right. \\ & \left. \lambda_2 \left( c_0 + \frac{c_0 t_{et} v^b f_z^c a_p^d a_e^e Z^f}{K_t D^a} + c_1 v^b f_z^c a_p^d a_e^e Z^f \right) \right] + \\ & (\lambda_1 + \lambda_2 c_0) t_o \end{aligned} \quad (20)$$

式中， $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为加权系数。

采用混合罚函数法将上述问题转化为无约束最优化问题，得到最终用于工艺参数优化的多目标优化数学模型。

$$\begin{aligned} P(x) = \min P(f_z, v, M) = & \frac{\pi l h D}{1000 f_z v a_p Z} \times \\ & \left[ \lambda_1 \left( 1 + \frac{t_{et} v^b f_z^c a_p^d a_e^e Z^f}{K_t D^a} \right) + \right. \\ & \left. \lambda_2 \left( c_0 + \frac{c_0 t_{et} v^b f_z^c a_p^d a_e^e Z^f}{K_t D^a} + \frac{c_1 t_{et} v^b f_z^c a_p^d a_e^e Z^f}{K_t D^a} \right) \right] + \\ & t_o (\lambda_1 + c_0 \lambda_2) - M \left[ \ln \left( F_{f, \max} - \frac{K_q f_z^m a_p^n a_e^p Z}{D^u v^w} \right) + \right. \\ & \left. \ln \left( T_{q, \max} - \frac{K_q f_z^m a_p^n a_e^p Z}{2D^{u-1} v^w} \right) + \ln \left( P_{\max} - \frac{K_p f_z^m a_p^n a_e^p Z}{D^u v^{w-1}} \right) + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \ln(R_{a, \max} - K_s f_z^2 / D) + \ln \left( \frac{\pi D N_{\min}}{1000} - v \right) + \\ & \ln \left( v - \frac{\pi D N_{\max}}{1000} \right) + \ln \left( \frac{\pi D v_{f, \min}}{1000 v Z} - f_z \right) + \\ & \ln \left( f_z - \frac{\pi D v_{f, \max}}{1000 v Z} \right) + \frac{1}{M} \left[ \max \left\{ 0, \left( \frac{K_q f_z^m a_p^n a_e^p Z}{D^u v^w} - F_{f, \max} \right) \right\} + \right. \\ & \max \left\{ 0, \left( \frac{K_q f_z^m a_p^n a_e^p Z}{2D^{u-1} v^w} - T_{q, \max} \right) \right\} + \\ & \max \left\{ 0, \left( \frac{K_p f_z^m a_p^n a_e^p Z}{D^u v^{w-1}} - P_{\max} \right) \right\} + \\ & \max \left\{ 0, \left( \frac{K_s f_z^2}{D} - R_{a, \max} \right) \right\} + \max \left\{ 0, \left( v - \frac{\pi D N_{\min}}{1000} \right) \right\} + \\ & \max \left\{ 0, \left( v - \frac{\pi D N_{\max}}{1000} \right) \right\} + \max \left\{ 0, \left( f_z - \frac{\pi D v_{f, \min}}{1000 v Z} \right) \right\} + \\ & \left. \max \left\{ 0, \left( f_z - \frac{\pi D v_{f, \max}}{1000 v Z} \right) \right\} \right] \quad (21) \end{aligned}$$

式中， $M$  为惩罚因子且  $M^0 < M^1 < M^2 \cdots \rightarrow \infty$ 。

## 2.3.2 STEP-NC 工艺参数优化的混合算法优化

1) 基因编码：采用实数编码方式进行编码。每个个体由每齿进给量  $f_z$  和铣削速度  $v$  两部分组成。

2) 初始种群的混沌生成：采用式(4) (Logistic 映射) 进行初始种群的混沌生成。

3) 适应度函数：

$$f_2(x) = \begin{cases} C_{\max} - P(x), & C_{\max} > P(x); \\ 0, & C_{\max} \leq P(x). \end{cases} \quad (22)$$

式中  $C_{\max}$  是一个较大的数。

4) 选择操作：采用轮盘赌方式选择个体，个体被选择的概率见式(5)。

5) 交叉操作：通过实数交叉方式来完成交叉操作，其交叉操作公式为

$$\begin{cases} a_{kj} = a_{kj}(1-b) + a_{lj}b, \\ a_{lj} = a_{lj}(1-b) + a_{kj}b. \end{cases} \quad (23)$$

式中： $a_{kj}$  为第  $k$  个染色体的第  $j$  位基因； $a_{lj}$  为第  $l$  个染色体的第  $j$  位基因； $b$  为随机数， $0 \leq b \leq 1$ 。

6) 变异操作：通过同位变异进行变异操作，变异操作公式为

$$f(g) = r(1 - g/G_{\max})^2 \quad (24)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} a_{ij} + (a_{ij} - a_{\max})f(g), & r > 0.5; \\ a_{ij} + (a_{\min} - a_{ij})f(g), & r \leq 0.5. \end{cases} \quad (25)$$

式中： $a_{ij}$  为第  $i$  个染色体的第  $j$  位基因； $a_{\min}$  为  $a_{ij}$  的最小值， $a_{\max}$  为  $a_{ij}$  的最大值； $r$  为一个随机数， $0 \leq r \leq 1$ ； $g, G_{\max}$  分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

7) 附加混沌扰动：为防止陷入局部最优，利用式(6)和式(7)在最优解附近混沌生成一条新的染色体，以便获得更优的适应度值。



8) 终止条件判断:终止条件为进化代数. 若满足条件,则输出最优加工工艺参数;若不满足条件,则进行下一轮的迭代,直到满足条件为止.

3 实例研究

图 2 给出了某一零件的三维模型,该模型包含了槽、孔和闭口式型腔三种特征. 基于上述所提出的方法,对该零件进行智能微观工艺规划. 该零件的加工信息见表 1.

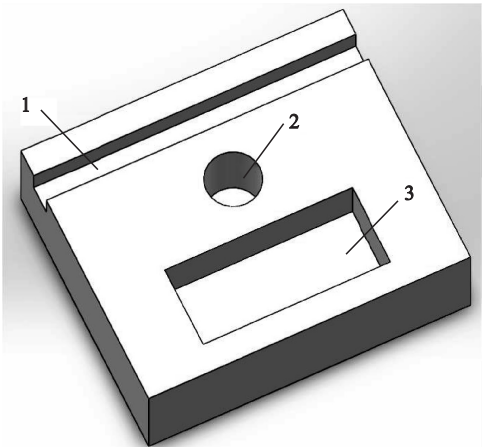


图 2 实例 1 中零件三维模型  
Fig. 2 3D model of the part in Case 1

表 1 实例 1 中零件加工信息  
Table 1 Machining information of the part in Case 1

特征	特征尺寸/mm	材料类型	表面粗糙度/ $\mu\text{m}$	公差等级
槽 1	120 × 10 × 10	45#钢	6.3	IT11
孔 2	20 × 25	45#钢	0.8	IT7
闭口式型腔 3	70 × 30 × 20	45#钢	3.2	IT10

针对此零件,应用所提出的加工资源匹配算法为其匹配相应的加工机床和加工刀具,匹配结果见表 2.

在 MATLAB 中分别采用传统遗传算法和上述混合算法对 STEP – NC 加工工步序列进行优化,相关参数设置为:最大迭代次数 500 次,混沌吸引子  $\mu=4$ ,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.01. 图 3 给出了传统遗传算法和混合算法的收敛曲线. 由图可知,传统遗传算法在迭代 380 次后陷入局部最优,而混合算法经历 169 次迭代后得到了最优值. 图 4 给出了混合算法优化后得到的 2 条最优加工工步序列.

表 2 实例 1 中机床刀具匹配结果  
Table 1 Matching results of machine tools and cutting tools in Case 1

工步编号	特征	加工操作方法	加工机床(机床编号)	加工刀具(刀具编号)
OP1	槽	底面和侧面粗铣	XK5042A 数控铣床( $M_1$ )	莫式锥柄立铣刀 1( $T_5$ )
OP2	孔	普通钻	XK5042A 数控铣床( $M_1$ )	莫氏锥柄麻花钻 1( $T_{21}$ )
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
OP5	闭口式型腔	底面和侧面粗铣	XK5042A 数控铣床( $M_1$ )	莫式锥柄立铣刀 1( $T_5$ )
OP6	闭口式型腔	底面和侧面精铣	XK5042A 数控铣床( $M_1$ )	直柄立铣刀 1( $T_3$ )

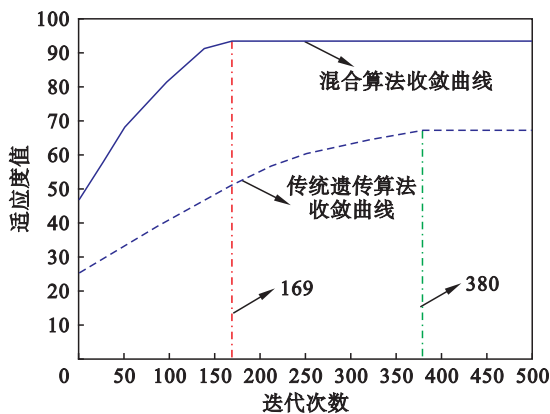


图 3 工步序列优化时不同算法的收敛曲线  
Fig. 3 Convergence curves of different algorithms for optimizing workingstep sequences

个加工工步的工艺参数优化的过程类似,以图 4 中第一条工步序列的第一个工步即槽的底面和侧面粗铣为例,求解最优工艺参数. 加工条件如下:机床最大功率 11 kW,机床最小转速 18 r/min,机床最大转速 1 400 r/min,  $t_{\text{et}}=10\text{ s}$ ,  $t_{\text{o}}=10\text{ s}$ ,  $l=120\text{ mm}$ ,  $h=10\text{ mm}$ ,  $D=10\text{ mm}$ ,  $Z=3$ ,  $a_{\text{p}}=2\text{ mm}$ ,  $a_{\text{e}}=10\text{ mm}$ . 在 MATLAB 中分别采用传统遗传算法和混合算法对该工步的加工参数进行优化,相关参数设置为:最大迭代次数 500 次,混沌吸引子  $\mu=4$ ,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.01. 图 5 给出了遗传算法和混合算法的收敛曲线. 由图可知,传统遗传算法经过 231 次迭代后陷入局部最优,而混合算法在经过 126 次迭代后得到了最优值. 表 3 给出了混合算法优化后的加工工步的工艺参数优化结果.

最后,进行 STEP – NC 工艺参数的优化. 由于每

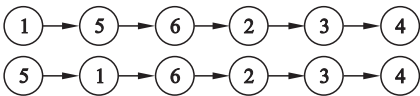


图 4 实例 1 混合算法优化后的加工工步序列  
Fig. 4 Workingstep sequences optimized by hybrid algorithm in Case 1

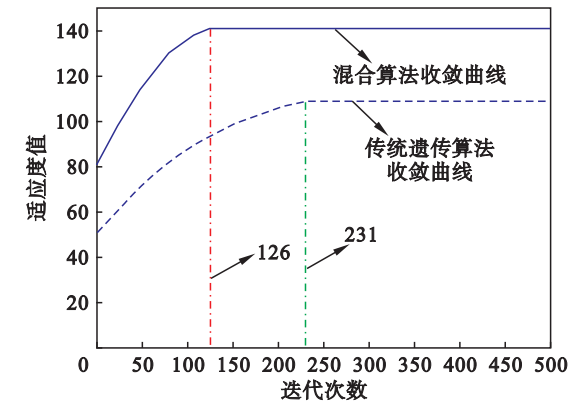


图 5 实例 1 工艺参数优化时不同算法的收敛曲线  
Fig. 5 Convergence curves of different algorithms for optimizing machining parameters in Case 1

为了进一步说明本方法的优势,下面对另外一个零件进行实例研究. 图 6 给出了零件的三维模型,该模型包含了槽、开口式型腔、台阶、孔和闭口式型腔五种特征. 采用与第一个实例相同的方法,对该零件进行智能微观工艺规划. 该零件的加工信息见表 4.

表 4 实例 2 中零件加工信息  
Table 4 Machining information of the part in Case 2

特征	特征尺寸/mm	材料类型	表面粗糙度/ $\mu\text{m}$	公差等级
槽 1、槽 2	30 × 20 × 19	45#钢	1. 6	IT9
开口式型腔 3	20 × 15 × 15	45#钢	3. 2	IT11
台阶 4	150 × 20 × 20	45#钢	1. 6	IT8
孔 5	20 × 30	45#钢	0. 8	IT7
闭口式型腔 6	90 × 50 × 48	45#钢	3. 2	IT10

表 5 实例 2 中机床刀具匹配结果  
Table 5 Matching results of machine tools and cutting tools in Case 2

工步编号	特征	加工操作方法	加工机床 (机床编号)	加工刀具 (刀具编号)
OP1	槽 1	底面和侧面粗铣	XK5042A 数控铣床 ( $M_1$ )	莫式锥柄立铣刀 1 ( $T_5$ )
OP2	槽 1	侧面精铣	XK5042A 数控铣床 ( $M_1$ )	直柄立铣刀 1 ( $T_3$ )
OP3	槽 1	平面精铣	XK5042A 数控铣床 ( $M_1$ )	直柄立铣刀 1 ( $T_3$ )
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
OP14	孔	铰孔	XK5042A 数控铣床 ( $M_1$ )	莫式锥柄机用铰刀 1 ( $T_{26}$ )
OP15	闭口式型腔	底面和侧面粗铣	XK5042A 数控铣床 ( $M_1$ )	莫式锥柄立铣刀 1 ( $T_5$ )
OP16	闭口式型腔	底面和侧面精铣	XK5042A 数控铣床 ( $M_1$ )	直柄立铣刀 1 ( $T_3$ )

采用混合算法对 STEP – NC 加工工步序列进行优化,图 7 给出了混合算法优化后得到的 8

表 3 实例 1 中工艺参数优化结果  
Table 3 Optimization results of machining parameters in Case 1

工步	切削速度 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	每齿进给量 $\text{mm} \cdot \text{齿}^{-1}$	加工时间 min	加工成本 元
1	25. 12	0. 09	2. 43	6. 95
2	23. 42	0. 08	0. 89	2. 42
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5	32. 48	0. 10	20. 23	58. 23
6	43. 11	0. 06	4. 39	10. 53

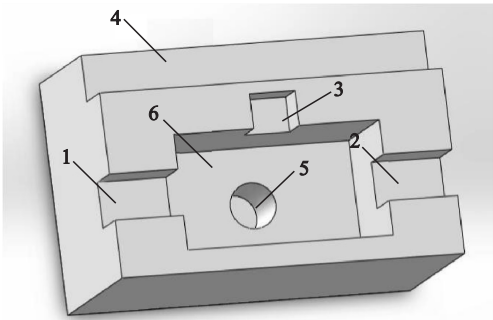


图 6 实例 2 零件三维模型  
Fig. 6 3D model of the part in Case 2

针对此零件,应用所提出的加工资源匹配算法为其匹配相应的加工机床和加工刀具,匹配结果见表 5.

条最优加工工步序列.  
最后,进行 STEP – NC 工艺参数的优化. 以图

7 中第一条工步序列的第一个工步即台阶的底面和侧面粗铣为例,求解最优工艺参数.表 6 给出了混合算法优化后的加工工步的工艺参数优化结果.

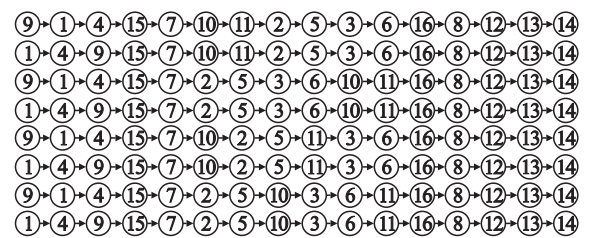


图 7 实例 2 混合算法优化后的加工工步序列  
Fig. 7 Workingstep sequences optimized by hybrid algorithm in Case 2

表 6 实例 2 工艺参数优化结果  
Table 6 Optimization results of machining parameters in Case 2

工步	切削速度 m·min <sup>-1</sup>	每齿进给量 mm·齿 <sup>-1</sup>	加工时间 min	加工成本 元
1	24.89	0.08	2.73	7.08
2	37.22	0.03	1.01	2.60
3	37.13	0.03	1.01	2.61
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
14	38.07	0.005	1.41	3.61
15	31.52	0.12	30.18	78.79
16	40.03	0.05	7.25	18.73

## 4 结 论

- 1) 提出了一种基于规则和混合算法的智能 STEP-NC 微观工艺规划方法,为高效智能实现基于 STEP-NC 的微观工艺规划提供了一个有效的解决方案,也为基于 STEP-NC 的智能数控系统的实现奠定了有力的技术基础.
- 2) 提出了基于规则的加工资源匹配算法,实现了基于 STEP-NC 的加工资源智能匹配.
- 3) 将混沌算法和遗传算法有机结合应用于 STEP-NC 工艺规划,高效智能地实现了基于 STEP-NC 的工步序列和工艺参数的智能优化.

### 参考文献:

[1] Zhang Y,Zeng Q F,Mu G D,et al. A design for a novel open, intelligent and integrated CNC system based on ISO10303-238 and PMAC[J]. *Technical Gazette*,2018,25(2):470-478.

[2] Zhong R Y,Xu X,Klotz E,et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0;a review[J]. *Engineering*,2017,3(5):616-630.

[3] 田锡天,杜娟,张振明,等. STEP-NC 系统中的非线性工艺设计和工艺优化技术[J]. *计算机集成制造系统*,2007,13(2):228-233.

(Tian Xi-tian,Du Juan,Zhang Zhen-ming,et al. Non-linear process planning & optimization technique in STEP-NC-based CAPP[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*,2007,13(2):228-233.)

[4] Mokhtar A,Xu X. Machining precedence of  $2\frac{1}{2}$ -D interacting features in a feature-based data model[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*,2011,22(2):145-161.

[5] 欧阳华兵,沈斌. 面向 STEP-NC 基于混合式遗传算法的工艺路线优化[J]. *计算机集成制造系统*,2012,18(1):66-75.

(Ouyang Hua-bing,Shen Bin. STEP-NC oriented process planning optimization based on hybrid genetic algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*,2012,18(1):66-75.)

[6] 黄凤立,顾金梅,张礼兵,等. 基于禁忌制造特征动态调整的 STEP-NC 工艺路线蚁群优化方法[J]. *中国机械工程*,2016,27(5):596-602.

(Huang Feng-li,Gu Jin-mei,Zhang Li-bing,et al. Ant colony optimization of STEP-NC process route based on dynamic update of taboo manufacturing features[J]. *China Mechanical Engineering*,2016,27(5):596-602.)

[7] Wang H H,Xu X,Zhang C R,et al. A hybrid approach to energy-efficient machining for milled components via STEP-NC[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*,2018,31(4/5):442-456.

[8] 徐旬,宋殿忠,孙军,等. 基于 STEP-NC 数控最优系统[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*,2009,25(5):987-992.

(Xu Xun,Song Dian-zhong,Sun Jun,et al. Construct a repository of milling CNC system based on STEP-NC[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*,2009,25(5):987-992.)

[9] Zhang X,Liu R,Nassehi A,et al. A STEP-compliant process planning system for CNC turning operations[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*,2011,27(2):349-356.

[10] Ridwan F,Xu X,Liu G Y. A framework for machining optimization based on STEP-NC[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*,2012,23(3):423-441.

[11] Zhang Y,Xu X,Liu Y X,et al. Service-oriented, cross-platform and high-level machining simulation[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*,2012,25(3):280-295.

[12] Choi H,Kim J,Yoon Y,et al. Investigation of incremental hybrid genetic algorithm with subgraph isomorphism problem[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*,2019,49:75-86.

[13] Demidova L A,Egin M M,Tishkin R V. A self-tuning multiobjective genetic algorithm with application in the SVM classification[J]. *Procedia Computer Science*,2019,150:503-510.

[14] Okamoto T,Hirata H. Global optimization using a multipoint type quasi-chaotic optimization method[J]. *Applied Software Computing*,2013,13(2):1247-1264.

[15] Hu Y J,Zhu F F,Zhang L,et al. Scheduling of manufacturers based on chaos optimization algorithm in cloud manufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*,2019,58:13-20.