

文章编号 1004-924X(2016)增-0543-08

高速切削钛合金 TC4 的表面粗糙度预测与控制方法

张运建¹, 秦国华^{2*}, 侯源君², 赵洋洋², 谢文斌²

(1. 中国人民解放军 94829 部队, 江西向塘 330201;

2. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西南昌 330063)

摘要:零件表面粗糙度是衡量工件表面质量的重要参数, 实际加工中表面粗糙度的影响因素具有复杂性与不确定性。然而在众多因素中, 切削参数对表面粗糙度具有显著影响, 并且能够在加工中人为控制。因此, 选取适合的切削参数, 提高工件表面质量是一项非常重要的任务。本文采用均匀设计法进行钛合金 TC4 的切削实验, 利用德国马尔 MarSurf M 300C 精密型表面粗糙度测量仪测得工件表面粗糙度, 然后运用非线性回归求解技术, 建立了表面粗糙度的预测模型。采用方差分析法检验预测模型的拟合度及各独立输入参数的显著性, 并进行预测误差对比分析。实验结果表明, 所建立的回归预测模型预测误差低至 0.019%, 具有精度高、可靠性强等特点。最后, 提出了以最小表面粗糙度为目标, 使用遗传算法优化求解技术, 建立切削参数优化模型。这项研究的结果为加工表面粗糙度的预测提供理论上的依据, 为提高加工表面质量提供切削参数的合理选择。

关键词:表面粗糙度; TC4; 预测; 非线性回归; 遗传算法

中图分类号: TG75 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0543

Prediction and control of surface roughness for high speed machining of titanium alloy TC4

ZHANG Yun-jian¹, QIN Guo-hua^{2*}, HOU Yuan-jun², ZHAO Yang-yang², XIE Wen-bin²

(1. Troops 94829 of People's Liberation Army, Xiangtang 330201, China;

2. School of Aeronautical Manufacturing Engineering,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

* Corresponding author, E-mail: qghuzx@126.com

Abstract: Surface roughness of part is an important parameter to measure surface quality of work-piece. In actual processing, impact factor of surface roughness is complex and uncertain, but in many factors, cutting parameter has obvious effect on surface roughness, and it can be controlled manually in processing. Therefore, selecting proper cutting parameter and improving surface quality of work-piece are a very important tasks. Uniform design method is adopted in this paper to perform cutting experiment of titanium alloy TC4. Measure surface roughness of workpiece with Marl MarSurf M 300C precise surface roughness tester of Germany, and then employ nonlinear regression solution technology to establish prediction model of surface roughness. Inspect fitting degree of prediction

收稿日期: 2016-05-20; 修订日期: 2016-06-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51165039, No. 51465045); 深圳市科创委基础研究资助项目 (No. JCYJ2014050917410668)

model and significance of each independent input parameter by adopting analysis of variance. Perform contrastive analysis of prediction error. Experimental result shows that prediction error of regression prediction model established is as low as 0.019% with feature of high precision and strong reliability etc. Finally it puts forward to take the minimum surface roughness as target, use genetic algorithm to optimize solution technology and establish optimization model of cutting parameter. The research result provides theoretical basis for prediction of surface roughness processing and provides reasonable choice of cutting parameter to improve surface quality of processing.

Key words: surface roughness; TC4; prediction; nonlinear regression; genetic algorithm

1 引言

表面粗糙度作为衡量零件加工表面质量的关键参数,对工件的疲劳强度、接触刚度、耐腐蚀性能、工件精度都有着重要的影响^[1],也是学者们一直研究的重点内容。目前研究方法主要有两类:一是通过实验直接观察切削工艺对表面质量的影响。刘丽娟^[2]等人根据钛合金 TC4 的高速铣削实验,通过观察切屑的微观组织,指出高速铣削加强了钛合金 TC4 的动态再结晶软化作用,不仅加剧了切屑的锯齿化程度变大,也加剧了刀具的振动,从而使得表面粗糙度随之增大,并且表面粗糙度随着每齿进给量的增大而呈线性增大。Muguthu 等人^[3]用 PCD 金刚石刀具、涂层和未涂层的 CBN 刀具分别切削金属复合材料 Al₂124SiCp (45% wt),实验结果表明,在进给量为 8.3 mm/min 的切削条件下,PCD 刀具的磨损要比 CBN 更小,PCD 刀具加工后表面质量要比涂层 CBN 刀具更好,未涂层的 CBN 刀具加工后的表面质量最差。然而,这种方法仅能描述表面质量与切削工艺参数之间的定性关系。

二是利用实验测试数据建立表面粗糙度的预测模型。张宝磊等人^[4]利用硬质合金 TiAlN 涂层刀具高速铣削钛合金 TC4,通过铣削表面粗糙度的测试结果,分别建立了表面粗糙度的广义回归神经网络和线性回归等两种预测模型,经过两者预测误差的比较分析,认为广义回归神经网络模型预测结果精度更高。王义强等人^[5]利用圆环面铣刀对模具钢 NAK80 进行了高速铣削试验,运用 BP 神经网络技术,建立了以主轴转速、进给速度、切削深度、切削行距、刀具倾角为输入节点,粗糙度为输出节点的加工表面预测模型。Br-

ezocnik 等人^[6]通过端铣铝合金 6061,研究了切削速度、切削深度、进给量和加工振动对表面粗糙度的影响,通过 GA 算法和 GP 算法对铣削加工表面粗糙度分别进行了预测,指出进给量对表面粗糙度起着决定性作用。Tugrul 等人^[7]通过 CBN 刀具切削难加工材料 AISI 52100 钢和 AISI H-13 钢,在考虑进给量、切削速度、切削长度的情况下,利用神经网络和线性回归分析方法,建立了表面粗糙度和刀具磨损的预测模型,认为随着进给量降低,表面粗糙度也将减小,但会加快刀具的磨损;而切削速度的增加,刀具磨损将显著加大,但表面粗糙度将减小。Sudhansu 等人^[8]利用 PVD-TiN 涂层刀具切削 AISI 4140 钢,建立了切削速度、进给量、背吃刀量及其相互作用关系的回归模型,用来预测加工表面的表面粗糙度,指出进给量是影响表面粗糙度的最主要因素,背吃刀量对粗糙度的影响较小,可以忽略。Ashok 等人^[9]通过 TiN 涂层、ZrCN 涂层以及未涂层的硬质合金刀具分别切削 AISI 4340 钢,研究了刀具后刀面磨损、加工表面粗糙度及切屑形态,建立了关于切削时间的表面粗糙度预测模型,指出涂层刀具对表面粗糙度预测模型的精度要高于非涂层刀具,TiN 涂层刀具加工下粗糙度的预测模型精度要高于 ZrCN。上述研究工作集中在构建表面粗糙度与切削工艺参数之间的定量预测模型,然而没有进一步考虑表面质量的控制方法。

本文运用均匀设计法确定钛合金 TC4 的切削实验方案,通过测量加工表面的粗糙度,建立表面粗糙度的多元非线性回归预测模型,实现加工表面粗糙度的定量描述。为了提高加工表面质量,以最小表面粗糙度为目标,构建切削参数优化模型及其遗传算法的求解技术。

2 实验测试

2.1 测试方案

作为航空、航天、电子领域广泛应用的重要材料,钛合金 TC4 具有比强度高、热强度高、抗腐蚀性等优良特性^[10-11],但钛合金材料具有导热系数小、高温化学性大、弹性模量低、与其他金属材料对磨时摩擦系数大,导致其加工性能差^[12-13]。为此,实验采用钛合金 TC4 作为切削的工件材料、棒料,工件长度为 375 mm,直径为 45 mm。

据文献指出,含有 TiC 和 TaC 成分的 YT、YW 硬质合金刀具不适合切削钛合金^[14-15]。在相同的切削条件下,使用 YT、YW、YG 类刀具切削钛合金 TC4,发现不同速度下切削钛合金时,YW2 刀具的耐用度最好,YG8 刀具的耐用度次之,YT15 刀具的耐用度最差^[16]。而实际生产也是用 YG8 刀具切削加工钛合金,正是因为要考虑到刀具中的元素与工件中的 Ti 元素在高温下容易产生亲和作用,从而影响刀具的性能,加剧刀具磨损。因此,本试验也采用硬质合金 YG8 刀具,刀杆型号为 90° 20W3K13。刀片的几何参数为前角 $\gamma_0=12^\circ$,后角 $\alpha_0=8^\circ$,刃倾角 $\lambda_s=-3^\circ$,主偏角 $\kappa_r=90^\circ$,副偏角 $\kappa'_r=30^\circ$,过渡棱宽 0.2 mm,排屑槽宽度为 0.5 mm,如图 1 所示。

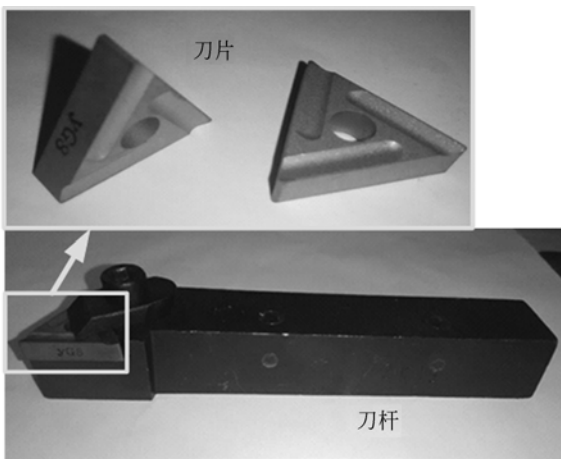


图 1 实验用的刀片和刀杆

Fig. 1 Cutting tool

影响加工表面粗糙度的因素很多,这里主要考虑主轴转速 n 、进给量 f 、背吃刀量 a_p 以及切削长度 L 对表面粗糙度的影响,切削实验在数控车

床 CAK6150 上进行,如图 2 所示,且不使用冷却液。

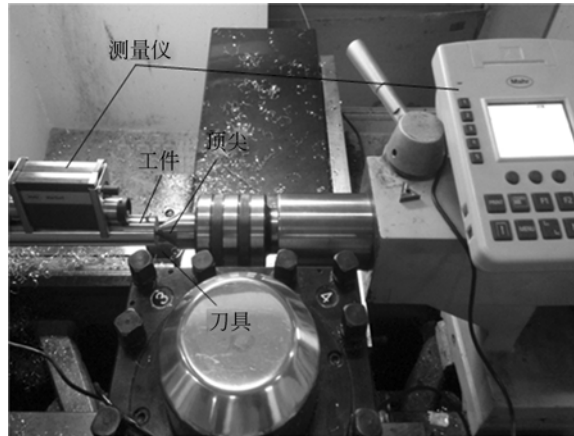


图 2 加工现场测量表面粗糙度

Fig. 2 Measurement of surface roughness in manufacturing work bench

2.2 数据分析

切削工艺参数范围分别为: $200 \text{ r/min} \leq n \leq 500 \text{ r/min}$, $0.15 \text{ mm/r} \leq f \leq 0.30 \text{ mm/r}$, $0.2 \text{ mm} \leq a_p \leq 0.50 \text{ mm}$, $50 \text{ mm} \leq L \leq 800 \text{ mm}$ 。采用均匀设计法安排实验,共进行 16 组切削试验,如表 1 所示。相同工艺参数的实验进行 3 次,每次均更换新刀片进行切削。

表 1 实验方案

Tab. 1 Experiment scheme

序号	$N \text{ (r/min)}$	$f \text{ (mm/r)}$	$a_p \text{ (mm)}$	$L \text{ (mm)}$	$Ra \text{ (}\mu\text{m)}$
1	200	0.24	0.46	750	3.158
2	220	0.17	0.38	650	1.725
3	240	0.27	0.32	550	4.416
4	260	0.2	0.28	450	2.285
5	280	0.3	0.21	350	5.471
6	300	0.23	0.5	250	2.948
7	320	0.16	0.44	150	1.416
8	340	0.26	0.36	50	4.092
9	360	0.19	0.3	800	2.440
10	380	0.29	0.25	700	5.273
11	400	0.22	0.2	600	2.789
12	420	0.15	0.48	500	1.461
13	440	0.25	0.42	400	3.053
14	460	0.18	0.34	300	2.096
15	480	0.28	0.29	200	4.786
16	500	0.21	0.23	100	2.575

每次切削完成后,使用德国马尔 MarSurf M 300C 精密型表面粗糙度测量仪测量已加工表面的粗糙度值 3 次,取其平均值作为该表面的最终粗糙度值。图 3 所示为不同的切削参数与已加工表面粗糙度的关系。

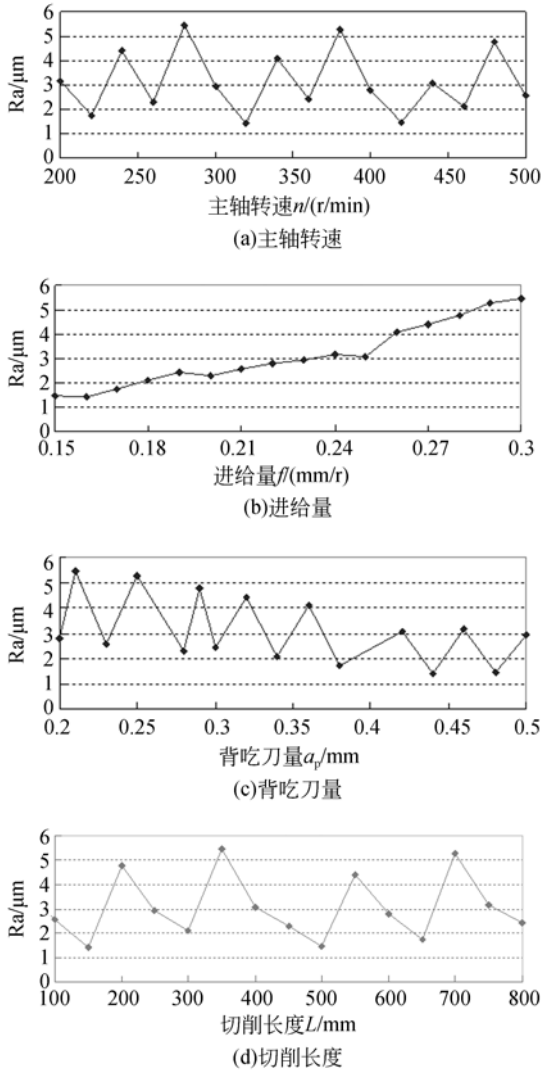


图 3 切削参数对表面粗糙度的影响

Fig. 3 Effect of machining parameters on surface roughness

从图 3(a)可以看到,主轴转速 $n=350$ r/min 和 $n=370$ r/min 时,测得的表面粗糙度值基本相同。说明在此切削条件下主轴转速并不是影响表面粗糙度的重要因素。从图 3(b)可以看出,已加工表面粗糙随着切削进给量的增大而呈指数增大。图 3(c)显示,随着背吃刀量的增大,加工表面粗糙度 R_a 一直上下起伏,但是从总体看来,表

面粗糙度 R_a 伴随着背吃刀量的增大有降低的趋势,说明背吃刀量对表面粗糙度有一定的影响。图 3(d)表明,切削长度和转速一样,表面粗糙度一直随着切削长度的增大在上下波动,说明切削长度不是影响表面粗糙度的重要因素。

3 预测模型

3.1 回归模型

为了更好地表达反映切削速度、进给量、背吃刀量及切削长度,以及它们之间相互作用关系对已加工表面粗糙度 R_a 的影响,选用下列多元非线性回归模型:

$$R_a = b_0 + b_1 n + b_2 f + b_3 a_p + b_4 L + b_5 n^2 + b_6 f^2 + b_7 a_p^2 + b_8 L^2 + b_9 n f + b_{10} a_p n + b_{11} n L + b_{12} a_p f + b_{13} f L + b_{14} a_p L, \quad (1)$$

其中 $b_i (0 \leq i \leq 14)$ 为系数。

若令 $x_1 = n, x_2 = f, x_3 = a_p, x_4 = L, x_5 = n^2, x_6 = f^2, x_7 = a_p^2, x_8 = L^2, x_9 = n f, x_{10} = a_p n, x_{11} = n L, x_{12} = a_p f, x_{13} = f L, x_{14} = a_p L$, 则式(1)就等价于:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i, \quad (2)$$

显然,式(2)为 y 关于 x 的线性函数。可以运用统计软件 SPSS 中的线性回归模型进行处理,得到的多元回归模型表达式为:

$$y = 0.316 + 62.013 x_6 - 6.173 x_{12}. \quad (3)$$

即表面粗糙度可表示为进给量与背吃刀量的关系为:

$$R_a = 0.316 + 62.013 f^2 - 6.173 a_p f, \quad (4)$$

式(4)描述的定量关系与上节的定性推断具有较好的吻合性。

表 2 显示了模型的拟合情况,复相关系数 $R = 0.989$, 决定系数 $R^2 = 97.8\%$ 。 R^2 越接近 1, 说明该回归方程模型对数据的拟合程度越好, 此处表明表面粗糙度值的 97.8% 可由 f^2 和 $a_p f$ 来表达。

表 2 模型拟合分析

Tab. 2 Analysis of model fitness

判定系数 R	决定系数 R^2	估计标准误差
0.989	0.978	0.211

采用方差分析对模型的拟合度进行检验,因此对模型进行 F 检验。表 3 为方差分析表,若 $F > F_{\alpha}(p, n-p-1)$,即认为回归模型可信,其中 p 和 $n-p-1$ 分别为回归平方和与残差平方和的自由度,这里 $n=16, p=2$ 。一般取显著性水平为 $\alpha=0.05$,由于 $F_{0.05}(2, 13) = 3.81$,故有 $F = 283.328 > F_{0.05}$,可见上述求得的回归方程有意义,即方程在显著性 0.05 上显著。回归平方和为 25.236,残差平方和为 0.579,回归平方和远大于残差平方和,说明线性模型解释了总平方和中的绝大部分,拟合效果较好。

表 3 方差分析表

Tab. 3 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F	$F_{0.05}$	Sig
回归	25.236	2	12.618	283.328	3.81	0.00
残差	0.579	13	0.045	—	—	—
总和	25.815	15	—	—	—	—

表 4 为回归系数分析表,在给定的水平 α 下, t 值(按绝对值计)越大表示该值越重要,并且这些 t 值都是遵从 t_{n-p-1} 分布的随机变量。当取 $\alpha=0.05$,时, $t_{n-p-1} = t_1$ 的临界值 $t_1(0.05) = 1.7709$ 。 t 值大于该值的因素表示对方程有显著贡献,否则表示不显著。式(4)中 f^2 、 $a_p f$ 系数的 t 检验中,其 t 值分别为 23.179 与 -2.334,按 $\alpha=0.05$ 水准,认为表面粗糙度 R_a 与 f^2 、 $a_p f$ 有线性回归关系。标准系数的绝对值越大,说明相应的自变量对因变量的作用越大。

表 4 回归系数分析表

Tab. 4 Regression coefficient analysis

变量	非标准化系数		标准系数	t	Sig
	系数值	标准误差			
常量项	0.316	0.210	—	1.506	0.156
f^2 项	62.013	2.675	1.017	23.179	0.000
$a_p f$ 项	-6.173	2.644	-0.102	-2.334	0.004

3.2 实验验证

为了验证预测模型的可靠性,运用均匀设计法安排了 6 组实验用来验证已加工表面粗糙度预测模型的精度。实验方案和实验结果如表 5 所示。

表 5 预测结果与实验结果对比

Tab. 5 Comparison of predicted results with experimental data

序号	1	2	3	4	5	6
n (r/min)	240	280	300	340	380	420
f (mm/r)	0.19	0.25	0.30	0.17	0.21	0.27
a_p (mm)	0.30	0.41	0.28	0.37	0.25	0.33
L (mm)	720	600	480	360	240	120
实验值 (μm)	2.085	3.57	5.378	1.761	2.551	4.637
预测值 (μm)	2.203	3.56	5.379	1.720	2.727	4.287
相对误差	5.66%	0.28%	0.019%	2.33%	6.9%	7.55%

通过表 5 可以看出,表面粗糙度的实验测量值与模型预测结果之间的相对误差还是比较可观的,其最小值只有 0.019%,相对误差最大值为 7.55%,由此可见实验得到的表面粗糙度预测模型精度高,可靠性强。

4 优化方法

在实际生产中控制工件加工表面质量具有重要意义,而表面质量控制技术一般是通过优化切削参数实现。

4.1 优化模型

由式(4)可知,对于任意给定一组切削参数 $x = [x_1, x_2]^T$,加工表面出粗度 R_a 均易解算出来。这样,钛合金 TC4 的切削参数优化模型可定义为:

$$\begin{aligned} \min R_a \\ \text{s. t. } 0.15 \leq x_1 \leq 0.3, \\ \text{and } 0.2 \leq x_2 \leq 0.5 \end{aligned} \quad (5)$$

4.2 求解技术

遗传算法是一种全局性、并行性、快速性的优化方法,具有很强的鲁棒性,可用于求解式(5)获得加工参数值。图 4 为利用遗传算法求解式(5)的主要过程,详细如下:

步骤 1:设置初始值,包括遗传算法的初始种群规模 $p=20$ 、最大遗传代数 $\text{MAXGEN}=200$ 、交叉概率 $P_C=0.7$ 、变异概率 $P_M=0.5$ 、设计变量二进制长度 $L=20$ 。设置遗传代数计数器 $\text{gen}=0$ 。

步骤 2:对独立设计变量 $x_i (1 \leq i \leq 2)$ 据其设定的范围进行二进制编码,随机产生初始种群,其中的染色体为 2 个切削参数二进制顺序排列组成,长度即为 40。计数器计数 $\text{gen}=\text{gen}+1$ 。

步骤 3: 计算种群中各个体的适应度。适应度越小的染色体越健壮, 在下一代的生成概率越大; 适应度越大的染色体越虚弱, 在下一代的生成概率。越小, 越容易淘汰。因此, 适应度可定义为 $e=10-R_a$ 。

步骤 4: 根据个体适应度, 按照遍历随机抽样法从当前种群中选出个体进入下一代进行交叉操作。

步骤 5: 选择群体中的一对个体作为父体, 以交叉概率 P_c 进行单点交叉操作, 产生两个新个体。

步骤 6: 随机选择种群中的个体以一定的概率 P_m 进行变异操作, 通过随机改变个体中某些基因而产生新个体。

步骤 7: 终止条件判断。若 $gen \leq MAXGEN$, 则转到步骤 2; 若 $gen > MAXGEN$ 或平均适应度值变化持续小于某一常数超过一定代数, 则所得到的具有最大适应的个体作为最优解输出, 算法终止。

步骤 8: 对得到的最优解译码, 得到优化的参数。

随着进化过程的进行, 群体中适应度较低的个体逐渐被淘汰, 适应度高的个体会越来越多, 并且更加集中在最优值附近, 最终可以搜索到最优值。

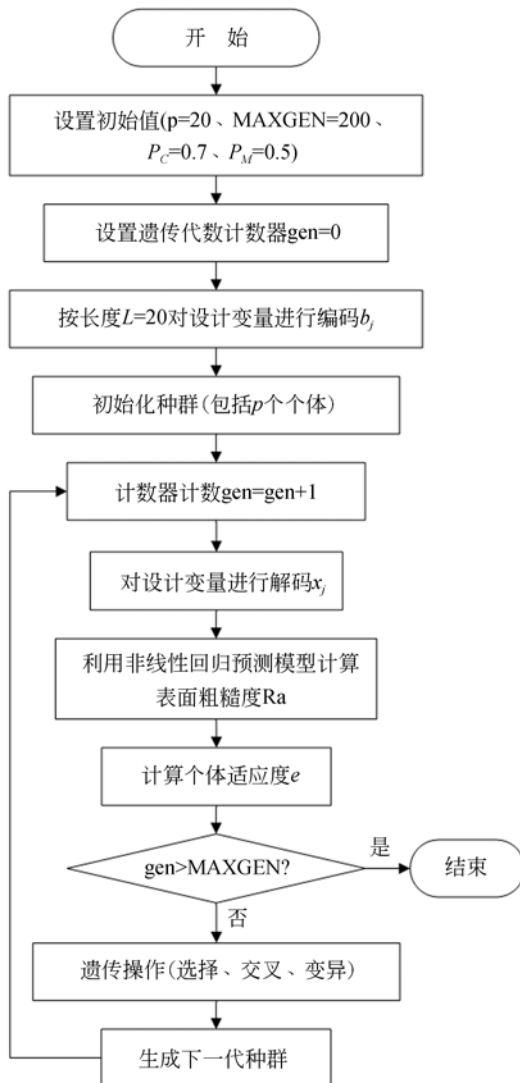


图 4 遗传算法求解流程

Fig. 4 Flowchart of genetic algorithm

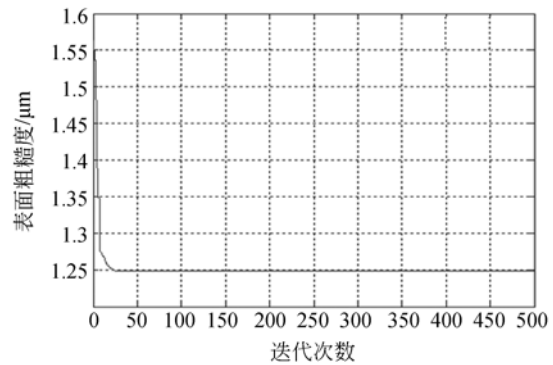


图 5 切削参数的优化过程

Fig. 5 Optimization of machining parameters

根据上述的遗传算法步骤, 对切削参数 f 和 a_p 进行优化, 优化过程图 5 所示。经过不到 30 次迭代, 遗传算法收敛, 表面粗糙度的最小值为 $1.2483 \mu\text{m}$, 对应的进给量 $f=0.1506 \text{ mm/r}$, 背吃刀量 $a_p=0.4813 \text{ mm}$ 。

5 结 论

通过实验研究和已加工表面质量的预测模型表明, 采用硬质合金 YG8 刀具切削钛合金 TC4 时, 影响加工表面质量的两个参数为进给速度和背吃刀量。在本次研究中采用了均匀设计法设计了实验方案减少了试验次数, 降低了实验成本, 提高了实验效率, 符合绿色制造的理念。所建立的关于表面粗糙度的回归模型, 可以用于加工前对表面粗糙度进行高精度预测。通过实验值和模型预测值对比, 发现相对误差低, 这充分说明了所得预测模型的精度高。通过方差分析表明预测模型与进给量和背吃刀量的确存在一定的数量关系,

进给量、背吃刀量对加工表面粗糙度有显著影响。通过遗传算法对所建立的预测模型进行了工艺参数的优化,优化结果表明当进给量 $f = 0.1506 \text{ mm/r}$,背吃刀量 $a_p = 0.4813 \text{ mm}$ 时,表

面粗糙度 R_a 的最小值为 $1.2483 \mu\text{m}$,这说明在给定的切削参数范围内,企业实际生产加工满足加工表面质量是完全可以满足的,可以大大的降低生产成本,提高加工质量。

参考文献:

- [1] 张利堂. 基于正交试验的高速铣削表面质量研究[J]. 机床与液压, 2014, 42(1): 80-103.
ZHANG L T. Research of surface quality of high-speed milling based on orthogonal experiment [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2014, 42(1): 80-103. (in Chinese)
- [2] 刘丽娟, 吕明, 武文革, 等. 高速铣削钛合金 Ti-6Al-4V 切屑形态试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 196-205.
LIU L J, LÜ M, WU W G, et al.. Experimental study on the chip morphology in high speed milling Ti-6Al-4V alloy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(3): 196-205. (in Chinese)
- [3] NJUGUNA M J, GAO D, HAO Z P. Tool wear, Surface integrity and dimensional accuracy in turning Al₂₁SiCp (45% wt) metal matrix composite using CBN and PCD tools[J]. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, 6(22): 4138-4144.
- [4] 张宝磊, 熊艺文, 王为庆, 等. 高速铣削 TC4 表面粗糙度预测模型研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015, 3: 108-110.
ZHANG B L, XIONG Y W, WANG W Q, et al.. Research on surface roughness prediction model for high-speed milling TC4 [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technology*, 2015, 3: 108-110. (in Chinese)
- [5] 王义强, 闫国琛, 王晓军, 等. 高速铣削工件表面粗糙度的预测[J]. 机械设计与制造, 2014, 11, 131-137.
WANG Y Q, YAN G CH, WANG X J, et al.. Surface roughness prediction in high-speed milling [J]. *Machinery Design & Manufacturing*, 2014, 11, 131-137. (in Chinese)
- [6] BREZOCNIK M, KOVACIC M. Integrated genetic programming and genetic algorithm approach to predict surface roughness [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2003, 18(3): 475-491.
- [7] TUGRUL O, YIGIT K. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45: 467-479.
- [8] SUDHANSU R D, DEBABRATA D, AMARESH K. Experimental investigation into machinability of hardened AISI 4140 steel using TiN coated ceramic tool [J]. *Measurement*, 2015, 62: 108-126.
- [9] ASHOK K S, BIDYADHAR S. Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts [J]. *Measurement*, 2012, 45: 2153-2165.
- [10] RIBEIRO M V, MOREIRA M R V, FERREIRA J R. Optimization of titanium alloy (Ti6Al4V) machining [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 143-144: 458-463.
- [11] EZAGWU E O, BONNEY J, YAMANE Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 134(2): 233-253.
- [12] CHEHARON C H, JAWAID A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6% Al-4% V [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 166: 188-192.
- [13] QU J, BLAU P B, WATKINS T R, CAVIN O B, Kulkarni N S. Friction and wear of titanium alloys sliding against metal, polymer, and ceramic counterfaces [J]. *Wear*, 2005, 258(9): 1348-1356.
- [14] DEAMLEY P A, DAHM K L, CIMENOGLU H. The corrosion wear behavior of thermally oxidized CP-Ti and Ti6Al4V [J]. *Wear*, 2004, 256(5): 469-479.
- [15] NURULAMIN A M, AHMAD E I, KHAI-RUSSHIMA M K. Effectiveness of uncoated WC-Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192: 147-158.
- [16] 姜增辉, 王琳琳, 石莉, 等. 硬质合金刀具切削 Ti6Al4V 的磨损机理及特征[J]. 机械工程学报,

2014, 50(1), 178-183.

JIANGZ H, WANG L L, SHI L, *et al.*. Study on tool wear mechanism and characteristics of car-

bide tools in cutting Ti6Al4V [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(1), 178-183. (in Chinese)

作者简介:



张运建(1987—),男,江西上饶人,硕士,工程师,2013年于南昌航空大学获得硕士学位,主要从事精密超超精密加工技术等方面的研究。

通讯作者:



秦国华(1970—)男,江西南昌人,博士后,教授,2002年于西北工业大学获得硕士学位,2005年于西北工业大学获得博士学位,2009年于西北工业大学力学博士后流动站出站,主要从事工件装夹分析与优化、加工过程建模与仿真、全制造周期内残余应力分析与预测、刀具磨损检测方法与分析、制造业信息化技术等方面的研究。E-mail: qghwzx@126.com