

# 模具型腔精加工粗糙度预测模型与加工量优化

蔡玉俊<sup>1</sup>, 吴志静<sup>2</sup>, 戚厚军<sup>1</sup>

(1.天津市高速切削与精密加工重点实验室, 天津 300222; 2.天津工程师范学院图书馆, 天津 300222)

**摘 要:** 利用二次回归通用旋转设计方法建立了模具型腔精加工的表面粗糙度预测模型, 分析了精加工中轴向切深、径向切深、每齿进给量、切削速度等加工参数对表面粗糙度的影响。并采用遗传算法实现了切削用量的优选, 从而达到了在特定的条件下预测和控制模具型腔表面粗糙度的目的。

**关键词:** 模具型腔; 粗糙度模型; 加工参数控制; 析因设计

**中图分类号:** TG 54

**文献标识码:** A

## Surface roughness model and cutting parameters control in mold cavity finishing

CAI Yujun<sup>1</sup>, YAN Bing<sup>1</sup>, WU Zhijing<sup>2</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of High Speed Cutting & Precision Machining (TUTE), Tianjin, 300222, China;

2. Library of Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Based on factorial design and regression method, a surface roughness predictable model in mold cavity finishing was developed. Also, the effects of machining parameters, such as axial depth of cut, radial depth of cut, feed per-tooth and cutting speed, were analyzed. Using Genetic Algorithm, an optimal combination of cutting parameters was obtained. With the application of the surface roughness predictable model and Genetic Algorithm, it will allow to predict and control the surface quality of mold cavity finishing.

**Key words:** mold cavity; roughness predictable model; cutting parameters control; factorial design

### 0 引言

模具型腔精加工中, 工程技术人员很难精确设置合理的加工参数以保证加工表面的粗糙度尽可能小, 尤其在高速切削加工中。为寻求最佳切削用量以控制表面质量, 有必要在加工前建立表面粗糙度预测模型。如何快速建立可靠的表面粗糙度预测模型, 实现加工前切削用量的优选, 是模具型腔精加工亟待解决的课题<sup>[1-4]</sup>。本文利用回归分析方法建立表面粗糙度预测模型, 进而在模具型腔精加工前预测和控制表面粗糙度。

### 1 试验测量方案

试验采用 OKUMA 公司的 MB-56VA 三轴高速加工中心, 工件如图 1。

为减小刀具磨损对表面质量的影响, 每加工 5m 后更换新刀具。表面粗糙度采用 SE-3H 表面轮廓仪测得。粗糙度的测量方案如下: 在零件曲面上

依据弧长划分七个位置测量粗糙度, 顶部测量一个, 对应两侧各测量三个, 如图 2。 $R_a$  是这七个位置沿  $Y$  方向所测得的粗糙度的平均值。加工方向为沿  $Y$  轴方向己字形走刀。

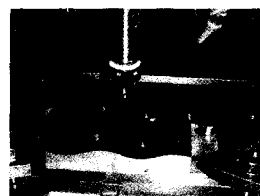


图 1 实验工件

Fig.1 experiment workpiece



图 2 粗糙度测量方案

Fig.2 measure strategy of  $R_a$

## 2 试验原理简介

回归试验设计也称响应曲面设计,是在多元分析的基础上用主动分析的方法获得具有较好性质的回归方程的一种试验设计方法。该方法既能分析各因子的影响,又能建立定量的数学模型,是更高级的试验设计技术<sup>[5-6]</sup>。当设计某试验时若使试验点到试验中心的距离相等和同球面上各点回归预测值( $\hat{y}$ )的方差相等,这样的设计就是旋转设计。通用旋转设计的试验次数比正交试验的次数要少,加上单位超球体内各点预测值方差近似相等,因此在实用中人们更喜欢用通用性设计。本文采用二次回归通用旋转设计方法设计试验,二次多项式逐步回归方法分析数据,分析数据借助统计软件 DSP 和 MATLAB。

## 3 试验设计与结果分析

影响表面粗糙度的因素很多,这里选取轴向切深  $A_d$ 、径向切深  $R_d$ 、每齿进给量  $f_z$ 、切削速度  $V_c$  为主要影响因素,其他的诸如系统误差、机床振动、切削力引起的系统几何变形等作为随机误差由统计方法加以综合考虑。

### 3.1 二次回归正交旋转设计的数学模型

二次回归正交旋转试验设计研究的就是自然因素  $z$  与试验指标  $y$  之间的关系,这种关系的数学模型如下

$$\begin{cases} y = \beta_0 + \sum_j \beta_j z_j + \sum_{h < j} \beta_{hj} z_h z_j + \sum_j \beta_{jj} z_j^2 + \dots + \varepsilon \\ \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, p \quad (1)$$

$\varepsilon$  为系统随机误差

这里  $\beta_0, \beta_j, \beta_{jj}, \beta_{hj}, \dots$  为回归系数,需要通过收集到的数据对它进行估计,若分别用  $b_0, b_j, b_{jj}, b_{hj}$  表示相应的估计,则称

$$\hat{y} = b_0 + \sum_j b_j z_j + \sum_{h < j} b_{hj} z_h z_j + \sum_j b_{jj} z_j^2 \quad (2)$$

$j=1, 2, \dots, p$

为二次回归方程。

### 3.2 因子水平的编码

为了数据处理的方便,对所有因子做一个线性变换,使得所有因子的取值范围都转化为以原点的一个“立方体”中,这种变换称为对因子水平的编码。本文在以  $x_1, x_2, x_3, x_4$  为坐标轴的编码空间中进行变量编码设计。

设因子  $z_j$  的取值范围为

$$z_{1j} \leq z_j \leq z_{2j} \quad j=1, 2, 3, 4;$$

$z_{1j}, z_{2j}$  分别称为因子  $z_j$  的上水平和下水平。

其中心是

$$z_{0j} = \frac{z_{1j} + z_{2j}}{2}, \quad j=1, 2, 3, 4; \text{也称零水平。}$$

因子变化半径为

$$\Delta_j = \frac{z_{2j} - z_{1j}}{2}, \quad j=1, 2, 3, 4;$$

$$\text{令 } x_j = \frac{z_j - z_{0j}}{\Delta_j}, \quad j=1, 2, 3, 4$$

通过此变换后,  $z_{1j}, z_{2j}$  对应的编码值分别对应  $-1, 1$ ;  $z_{0j}$  对应的编码值为  $0$ 。不管原来因子取值范围是什么,都转化为  $-1, 1$ 。

具体的编码公式如下

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{A_d - 0.3}{0.1}, \quad x_2 = \frac{R_d - 0.3}{0.1}, \\ x_3 &= \frac{f_z - 0.2}{0.1}, \quad x_4 = \frac{V_c - 300}{100} \end{aligned} \quad (3)$$

因子  $x_j (j=1, 2, 3, 4)$  为坐标轴构成的空间称为因子空间,寻求最优化的切削条件,就是在因子空间中寻求使得表面粗糙度值达到最小的最优解,利用式(3)对独立变量  $A_d, R_d, f_z, V_c$  进行变换后,就建立了  $A_d, R_d, f_z, V_c$  与  $x_1, x_2, x_3, x_4$  取值的一一对应关系,表面粗糙度值对变量  $A_d, R_d, f_z, V_c$  的回归问题,就转化为对  $x_1, x_2, x_3, x_4$  的回归问题,表1为因素水平表。

表1 因素水平

Tab.1 factors and levels selected

因子	$A_d/\text{mm}$	$R_d/\text{mm}$	$f_z/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	$V_c/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
零水平(0)	0.3	0.3	0.2	300
变化半径 $\Delta$	0.1	0.1	0.1	100
-r	0.1	0.1	0.02	100
-1	0.2	0.2	0.1	200
0	0.3	0.3	0.2	300
1	0.4	0.4	0.3	400
r	0.5	0.5	0.4	500

### 3.3 数据分析

在实际研究中,影响因变量  $Y$  的因素有很多,而这些因素之间可能存在多重共线性,特别是当各个解释变量之间存在高度的相互依赖关系时,就会给回归系数的估计带来不合理的解释。为得到一个可靠的回归模型,需要一种方法能够从众多影响  $Y$  的因素中挑选对  $Y$  贡献最大的变量,在它们和  $Y$  的观

测值数据基础上建立最优的回归方程。用二次多项式逐步回归方法分析所有测得数据<sup>[7-10]</sup> (见表 2)。

表 2 试验计划与试验结果

Tab.2 design of experiment matrix

N	$A_d$ /mm	$R_d$ /mm	$F_z$ /(mm·z <sup>-1</sup> )	$V_c$ /(m·min <sup>-1</sup> )	$R_a$ /μm	N	$A_d$ /mm	$R_d$ /mm	$F_z$ /(mm·z <sup>-1</sup> )	$V_c$ /(m·min <sup>-1</sup> )	$R_a$ /μm
1	0.4	0.4	0.3	400	1.66	17	0.1	0.3	0.2	300	1.02
2	0.4	0.4	0.3	200	1.7	18	0.5	0.3	0.2	300	1.12
3	0.4	0.4	0.1	400	1.13	19	0.3	0.1	0.2	300	0.26
4	0.4	0.4	0.1	200	1.16	20	0.3	0.5	0.2	300	1.76
5	0.4	0.2	0.3	400	0.75	21	0.3	0.3	0.02	300	0.7
6	0.4	0.2	0.3	200	0.78	22	0.3	0.3	0.4	300	1.23
7	0.4	0.2	0.1	400	0.59	23	0.3	0.3	0.2	100	1.11
8	0.4	0.2	0.1	200	0.62	24	0.3	0.3	0.2	500	1.04
9	0.2	0.4	0.3	400	1.58	25	0.3	0.3	0.2	300	1.07
10	0.2	0.4	0.3	200	1.61	26	0.3	0.3	0.2	300	1.06
11	0.2	0.4	0.1	400	1.15	27	0.3	0.3	0.2	300	1.1
12	0.2	0.4	0.1	200	1.18	28	0.3	0.3	0.2	300	1.08
13	0.2	0.2	0.3	400	0.62	29	0.3	0.3	0.2	300	1.12
14	0.2	0.2	0.3	200	0.65	30	0.3	0.3	0.2	300	1.04
15	0.2	0.2	0.1	400	0.56	31	0.3	0.3	0.2	300	1.07
16	0.2	0.2	0.1	200	0.6						

可得如下方程

$$R_a = -0.024 + 3.169R_d - 0.756f_z - 0.000167V_c - 1.681R_d^2 - 3.518f_z^2 - 0.951A_dR_d + 2.741A_d f_z + 9.375R_d f_z \quad (4)$$

模型的适用条件为

$0.2 \leq A_d \leq 0.4 \text{ mm}; 0.2 \leq R_d \leq 0.4 \text{ mm};$

$0.04 \leq f_z \leq 0.08 \text{ mm} \cdot \text{z}^{-1}; 250 \leq V_c \leq 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

将粗糙度模型 (4) 表示为

$$R_a = -0.024 + 3.169x_2 - 0.756x_3 - 0.000167x_4 - 1.681x_2^2 - 3.518x_3^2 - 0.951x_1x_2 + 2.741x_1x_3 + 9.375x_2x_3 \quad (5)$$

其中

4 切削量对表面粗糙的影响与优化

当其他因素取零水平时可以分析单个因素对表面粗糙度值的影响, 各因素的零水平取值为:

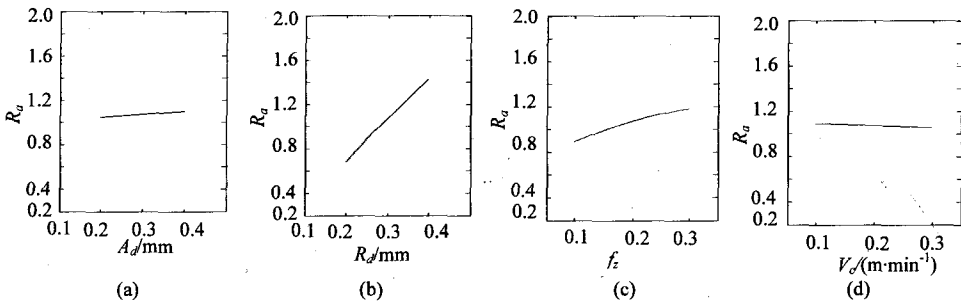


图 3 表面粗糙度值与各切削参数之间的关系度的影响  
Fig.3 main effects plot for cutting parameters

$$x_1 \Leftrightarrow A_d; \quad x_2 \Leftrightarrow R_d; \quad x_3 \Leftrightarrow f_z; \quad x_4 \Leftrightarrow V_c$$

3.4 显著性检验

因为中心点有重复试验, 所以在检验回归方程显著性前, 先对模型的合适性做失拟性检验, 检验方法选用方差 F 检验。回归方程的显著性检验的检验方法是做方差分析<sup>[4]</sup>。由表 3 可以看出失拟平方和  $F_1$  不显著, 认为模型误差比较稳定, 所以回归方程合适。回归平方和  $F_2$  高度显著, 说明方程是有效的。各回归系数的 F 值显著性检验在每一步回归中进行, 视自变量对因变量 Y 作用的显著程度, 从大到小依次逐个引入回归方程, 最终系数检验结果如表 3。

表 3 回归方程显著性检验表

Tab.3 the significance test of regression Equation

变异来源	自由度	比值 F	显著水平 p	变异来源	自由度	比值 F	显著水平 p
$X_1$	1	0.748 41	0.42618	$X_1X_3$	1	13.500 4	0.006 48
$X_2$	1	340.6 72	0	$X_1X_4$	1	7.489 93	0.028 64
$X_3$	1	109.688 5	0	$X_2X_3$	1	8.976 42	0.017 8
$X_4$	1	0.468 92	0.50213	$X_2X_4$	1	0.076 5	0.785 64
$X_1^2$	1	0.381 41	0.54554	$X_3X_4$	1	0.656 75	0.429 6
$X_2^2$	1	265.287	0	回归	14	$F_2=249.226$	0.005
$X_3^2$	1	0.010 37	0.92017	剩余	16		
$X_4^2$	1	0.010 37	0.92017	失拟	10	$F_1=1.176$	0.372 49
$X_1X_2$	1	37.053 4	0.00002	误差	6		
				总和	30		

$A_d=0.3\text{mm}, R_d=0.3\text{mm}, f_z=0.2\text{mm/z}, V_c=300\text{m/min}.$

表面粗糙度值与各切削参数之间的关系度的影响如图 3, 图 4 为加工参数对表面粗糙度的影响。

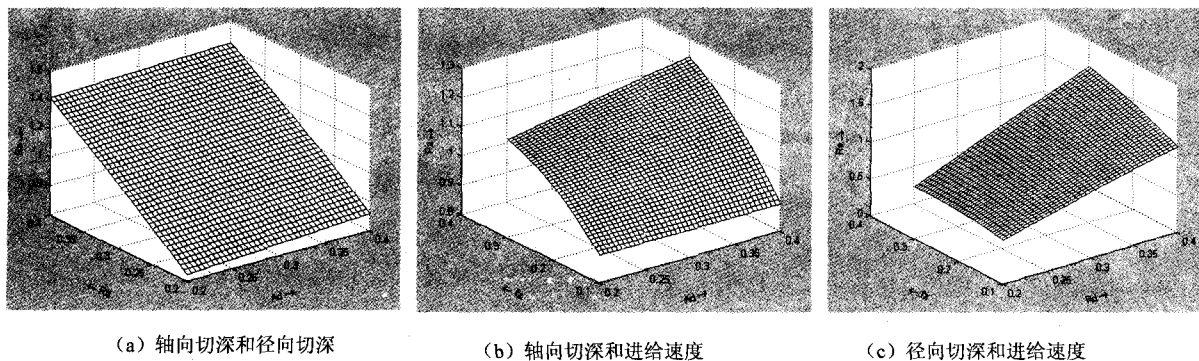


图4 加工参数对表面粗糙度的影响  
Fig.4  $R_a$  as a function of cutting parameters

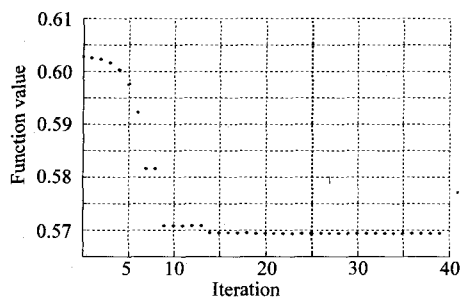


图5 56次迭代后的寻优结果  
Fig.5 optimization result after 56 iterations

各切削参数对表面粗糙度值的影响各不相同,实际加工中应综合考虑各因素的影响,尽量调整灵敏度比较大的因子。从控制表面粗糙度值出发,应尽量选用四个参数之间的最佳组合,利用回归出的表面粗糙度模型式(5),采用MATLAB中的遗传算法工具箱,获得最小粗糙度  $0.569\ 26\ \mu\text{m}$  时的最佳切削用量组合为:  $A_d=0.2\ \text{mm}$ ,  $R_d=0.2\ \text{mm}$ ,  $f_z=0.1\ \text{mm/z}$ ,  $V_c=400\ \text{m/min}$ 。

## 5 结 论

利用回归分析方法建立表面粗糙度预测模型是一种行之有效的办法,建立数学模型效率高,显著性好。由模型分析得出径向切深对粗糙度影响最为显著,每齿进给量次之,而轴向切深和切削速度显著性不明显。但是轴向切深和切削速度是加工效率的保证,所以应尽量综合考虑各切削参数对加工质量、加工效率和加工成本的影响,选用最优的切削加工用量组合。

## 参考文献:

- [1] Vivancos J, Luis C J, Costa J A. Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds[J]. Journal of Materials Processing Technology 2004, 155-156: 1505-1512.
- [2] Wardany E, Kishawy T I, Elbestawi H A. Surface integrity of die material in high speed hard machining[J]. Part 1. micrographical analysis transaction of the ASME. J. Manufact. Sci. Eng. 2000, (2):122.
- [3] 王洪祥.超精密车削表面微观形貌理论建模与实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- [4] Waldermar G, Rodriguez C A. Taylanl Altintas, Yusuf, Preliminary Experiments for Adaptive Finish Milling of Die and Mold Surfaces with Ball-nose End Mills[J]. T. of NAMRI/SME, 1995:193-198.
- [5] 任泉露.试验优化设计与分析(第二版)[M].北京:高等教育出版社, 2003.
- [6] 菲诗松,周纪芾,陈颖.试验设计[M].北京:中国统计出版社,2004.
- [7] Kline W A, Devor R E. The Effect of Runout on Cutting Geometry and Force in End Milling[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1993(23):123-140.
- [8] 周云鹏, 题正义.遗传算法在组合优化中的应用[J].辽宁工程技术大学学报, 2005(24):283-285.
- [9] Seok-Hyung Bae, Keyhoon Ko, Bo H. Kim, et al. Automatic feed-rate adjustment for pocket machining[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(5):495-500.
- [10] Lazoglu I, Liang SY. Analytical Modeling of Ball-End Milling Force[J]. Int. J. of machining Science and Technology I, 1997(3): 219-234