

微细铣削表面粗糙度预测与试验*

石文天¹ 刘玉德¹ 王西彬² 蒋放³

(1. 北京工商大学机械工程学院, 北京 100048; 2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081;
3. 北华航天工业学院机械工程系, 廊坊 065000)

【摘要】 分别采用正交试验回归分析法和基于正交旋转组合设计的二次响应曲面法(RSM)建立了微细铣削表面粗糙度预测模型,并在微小型车铣中心上对硬铝合金进行了试验研究,分析了铣削参数对表面粗糙度的影响。分别对两种预测模型进行了显著性检验并进行对比分析后发现:二阶响应曲面法的预测精度明显优于正交回归分析法。根据二次响应曲面法的试验结果,对回归方程中的回归系数进行了显著性检验,得出了铣削参数影响表面粗糙度的线性效应、二次效应和交互效应的显著性并进行了排序。试验结果表明:在试验采用的工艺参数范围内,对微细铣削表面粗糙度影响重要程度依次是铣削速度、每齿进给量、切削深度。

关键词: 微细铣削 表面粗糙度 正交回归分析 预测模型 响应曲面法
中图分类号: TH161 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)01-0211-05

Experiment and Prediction Model for Surface Roughness in Micro-milling

Shi Wentian¹ Liu Yude¹ Wang Xibin² Jiang Fang³

(1. College of Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China
2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
3. Mechanical Engineering Department, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

Abstract

An orthogonal experiment regression analysis and a response surface methodology are used to build the models to predict roughness of aluminum surface machined by a micro turn-milling NC machine. The influence of milling parameters used in the experiment is analyzed by the two means, orthogonal analysis and RSM. The milling parameters include cutting speed, feed per tooth, and cutting depth. In contrast with the orthogonal analysis, the RSM is an optimization prediction model and has the higher precision in micro-milling. The significance order of the parameters in the prediction model is determined based on the result of the experiment. The cutting speed has the most significant effect on surface roughness, and the second and the third significant parameters are feed per tooth and the cutting depth respectively by the rounded analysis in the current experimental condition. The RSM prediction model has higher fitting degree and practicability than the orthogonal analysis method. The milling parameters can be chosen to control and improve the quality of the surface roughness based on the prediction model of RSM.

Key words Micro-milling, Surface roughness, Orthogonal regression analysis, Prediction model, Response surface methodology (RSM)

引言

近年来,随着产品小型化的趋势以及微电子机

械系统(MEMS)的飞速发展,对微小型结构件的需求与日俱增。微细切削技术在加工微小型三维结构件方面具有加工精度高、效率高、成本低、三维加工

收稿日期: 2009-03-03 修回日期: 2009-09-18
* 国家自然科学基金资助项目(50875026)、国防预研项目(62301090102)和北京市青年骨干教师资助项目
作者简介: 石文天,讲师,主要从事微细切削技术、微小型制造技术研究,E-mail: shiwt@th.btbu.edu.cn

能力强、适用工件材料范围广等优点^[1],其中微细铣削^[2~3]技术实用性最强,应用最广,成为加工研究的重点和热点。精加工后的表面粗糙度值对零件的各项性能如工作精度、接触刚度、配合性能、耐腐蚀性、耐磨性等影响很大,尤其对于微小型结构件,其自身几何尺寸微小,准确地预测和控制零件加工后的表面粗糙度有至关重要的现实意义和实用价值^[4]。

与常规尺度机械切削相比,微细切削伴有最小切削厚度现象^[5],其非自由切削程度也相应加强,从而出现尺度效应现象^[6],使得微细铣削的基本规律不同于常规铣削。研究微细铣削条件下,工艺参数对表面粗糙度的影响规律,并据此合理选择加工前的切削参数,对表面粗糙度进行控制和预测就显得尤为重要。本文首先采用正交回归方法建立表面粗糙度预测模型^[7],然后以此模型所确定的相关切削工艺参数为基础,采用二次响应曲面法构建优化预测模型,并进行相关的试验研究^[8~12]。

1 正交回归预测模型的建立

微细铣削加工条件下,铣削速度 v 、每齿进给量 f_z ,切削深度 α_p 对表面粗糙度的影响有明显的不同,采用正交回归方法建立表面粗糙度与铣削参数之间的表面粗糙度预测模型为

$$R_a = C v^{b_1} f_z^{b_2} \alpha_p^{b_3} \tag{1}$$

式中 C ——铣削条件和加工材料决定的修正系数
 $b_1、b_2、b_3$ ——指数

在式(1)两边分别取自然对数得到

$$\ln R_a = \ln C + b_1 \ln v + b_2 \ln f_z + b_3 \ln \alpha_p \tag{2}$$

令 $y = \ln R_a, x_1 = \ln v, x_2 = \ln f_z, x_3 = \ln \alpha_p, b_0 = \ln C$,则式(2)可改写为

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \tag{3}$$

建立多元线性回归方程并用矩阵形式表示为

$$Y = XB + \varepsilon \tag{4}$$

对参数 B 采用最小二乘法进行估计,可求出回归系数 $b_0、b_1、b_2、b_3$,进而可以反求表面粗糙度预测模型并进行相关检验。

2 RSM 模型方法

响应曲面法(response surface methodology, 简称 RSM)可探讨影响因子与响应输出之间的数学关系。一个包含响应 $y(x)$ 的过程或系统,该响应依赖于输入因子 $x_1, x_2, \cdots, x_p$ 。考虑交互效应和二次效应的二阶响应曲面模型可以表示为

$$y(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1, i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j +$$

$$\sum_{i=1}^p \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \tag{5}$$

式中 β_i ——编码 x_i 的斜率或线性效应
 β_{ij} —— x_i 和 x_j 之间的交互效应
 β_{ii} —— x_i 的二次效应 β_0 ——常数项

对于 3 个因素的二次响应曲面模型可以写成

$$\begin{aligned} y(x) = & \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \\ & \beta_{11} x_1 x_1 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \\ & \beta_{21} x_2 x_1 + \beta_{22} x_2 x_2 + \beta_{23} x_2 x_3 + \\ & \beta_{31} x_3 x_1 + \beta_{32} x_3 x_2 + \beta_{33} x_3 x_3 + \varepsilon \end{aligned} \tag{6}$$

3 2 种模型的不同试验设计及试验结果

试验机床为微小型车铣加工中心,驱动系统重复定位精度为 0.2 μm ,分辨率为 0.1 μm ,铣削电主轴最高转速为 60 000 r/min,工件材料为硬铝合金 LY12,刀具采用直径为 1 mm 的三刃细晶粒硬质合金立铣刀。表面粗糙度的测量采用表面粗糙度仪(时代 TR240)进行。微细铣削切削深度一般在 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ mm 范围内。为消除误差,必须先进行零切面的切削生成,然后根据已形成的零切面确定试验用切削深度,然后进行平面铣削试验,以保证结果的准确性。

正交回归预测模型中,微细铣削工艺试验采用了三因素三水平的正交试验方案,试验数据如表 1 所示。

表 1 正交试验切削参数及实测数据

Tab. 1 Parameters and the results of the orthogonal cutting experiment				
试验序号	铣削速度 $v/\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	每齿进给量 $f_z/\mu\text{m} \cdot \text{z}^{-1}$	切削深度 α_p/mm	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
1	18. 84	0. 083	0. 01	0. 353
2	18. 84	0. 167	0. 02	0. 849
3	18. 84	0. 250	0. 05	0. 861
4	37. 68	0. 083	0. 02	0. 232
5	37. 68	0. 167	0. 05	0. 231
6	37. 68	0. 250	0. 01	0. 327
7	56. 52	0. 083	0. 05	0. 272
8	56. 52	0. 167	0. 01	0. 265
9	56. 52	0. 250	0. 02	0. 353

对试验结果取对数,可得到表面粗糙度的预测模型为

$$R_a = 19. 205 6 v^{-0. 766 5} f_z^{0. 446 8} \alpha_p^{0. 107 1} \tag{7}$$

二次响应曲面模型采用了基于正交旋转组合设计的方案,此设计方法需要首先确定试验的零水平。根据正交回归预测模型的试验方案,确定零水平下主轴转速 $n = 12\,000$ r/min,进给量为 $f = 4. 5$ mm/min,

切削深度为 $\alpha_p=30\text{ }\mu\text{m}$, 刀具直径 $D=1\text{ mm}$, 铣刀齿数 $z=3$, 根据以上参数可进行铣削速度和每齿进给量的计算。对 3 个变量即铣削速度、每齿进给量、切

削深度分别进行编码后可得表 2 所示试验设计标准矩阵, 并依此进行试验, 得到的试验结果^[13]。

拟合的最小二乘估计的二次响应曲面方程为

表 2 二次响应曲面试验设计标准矩阵及结果

Tab. 2 Matrix of RSM model and the measured result

试验序号	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$y/\mu\text{m}$
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	0.540
2	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	0.296
3	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	0.640
4	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	0.212
5	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.864
6	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	0.310
7	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	0.643
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.546
9	-1.682	0	0	2.828	0	0	0	0	0	0.878
10	1.682	0	0	2.828	0	0	0	0	0	0.323
11	0	-1.682	0	0	2.828	0	0	0	0	0.268
12	0	1.682	0	0	2.828	0	0	0	0	0.552
13	0	0	-1.682	0	0	2.828	0	0	0	0.391
14	0	0	1.682	0	0	2.828	0	0	0	0.586
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.441
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.642
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.483
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.621
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.478

$$y(x)=0.440\ 4-0.165\ 2x_1+0.037\ 2x_2+0.073\ 4x_3+0.057\ 2x_1^2-0.010\ 1x_2^2+0.017\ 6x_3^2+0.034\ 1x_1x_2+0.002\ 6x_1x_3-0.000\ 1x_2x_3\quad(8)$$

该表面粗糙度预测模型的适用范围为: $21.84\text{ m/min}\leq v\leq 53.52\text{ m/min}$; $0.11\text{ }\mu\text{m/z}\leq f_z\leq 0.39\text{ }\mu\text{m/z}$;

$13\text{ }\mu\text{m}\leq\alpha_p\leq 46\text{ }\mu\text{m}$ 。

4 2 种预测模型的比较检验及试验结果分析

对以上 2 种方法的预测模型进行显著性检验如表 3 所示。

表 3 2 种预测模型显著性检验

Tab. 3 Analysis of variance of the two prediction models

	方差来源	平方和	均方	自由度	F 值	显著性检验
正交回归法	回归	$S_A=1.505\ 6$	0.501 86	3	4.468	当 $\alpha=0.10$ 时, $F_{0.9}(3,5)=3.62$
	残差	$S_E=0.561\ 6$	0.112 32	5		
	总计	$S_T=2.067\ 2$		8		
二次响应曲面法	回归	$S_A=0.515$	0.057	9	4.719	当 $\alpha=0.05$ 时, $F_{0.95}(9,9)=3.18$
	残差	$S_E=0.109$	0.012	9		
	总计	$S_T=0.624$		18		

结果表明:二次响应曲面法预测模型呈高度显著,明显优于正交回归法的预测模型,用二次响应曲面法模型预测微细铣削硬铝合金 LY12 的表面粗糙度有较高的可信度。

将 2 种预测模型所预测的结果和真实试验结果进行比较,如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,二次响应曲面预测模型的预测结果比正交回归预测模型更接近于真实试验得

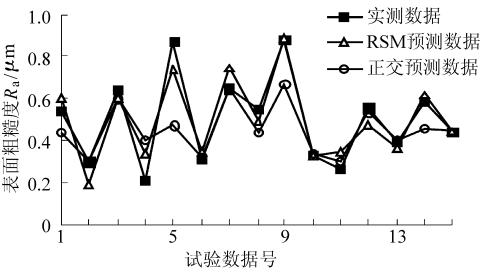


图1 2种模型预测结果和实测数据的比较
Fig.1 Comparison of practical R_a and the result of the two prediction model

到的表面粗糙度值,也进一步印证了显著性检验的结果。

对二次响应曲面方法所得到的回归方程的回归系数进行显著性检验,可考察每个自变量对因变量作用的显著程度,从而对影响微细铣削表面粗糙度的铣削工艺参数进行分析以更好地对试验结果进行预测和控制。检验结果表明在现有微细铣削试验条件下表面粗糙度影响的显著性排序为:①线性效应:铣削速度(v)、切削深度(α_p)、每齿进给量(f_z)。②二次效应: f_z^2 、 v^2 、 α_p^2 。③交互效应: vf_z 交互、 $v\alpha_p$ 交互、 $f_z\alpha_p$ 交互。

按照式(8)的表面粗糙度模型进行拟合并绘制图2~4,得到各工艺参数对表面粗糙度的影响规律。

(1)图2为 $f_z=0.25\text{ }\mu\text{m/z}$,即每齿进给量为零水平铣削条件下,铣削速度和切削深度对表面粗糙度的响应曲面。切削深度 $13\sim46\text{ }\mu\text{m}$ 范围内,表面粗糙度值随铣削速度的增加下降明显。在铣削速度接近 60 m/min ,切深最小时,表面粗糙度接近 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。可见提高铣削速度对于降低表面粗糙度影响显著。

(2)图3为 $\alpha_p=30\text{ }\mu\text{m}$,即切深为零水平切削条件下,铣削速度和每齿进给量对表面粗糙度的响应曲面。在低铣削速度 $v=18.84\text{ m/min}$,随每齿进给量的增加,表面粗糙度值变化不显著。但在铣削速度较大时,表面粗糙度随每齿进给量的增加影响显

著。在铣削速度 $40\sim50\text{ m/min}$ 时,表面粗糙度值稳定在 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 内,受其他参数的影响较小,此时,可获得比较稳定的加工表面质量。

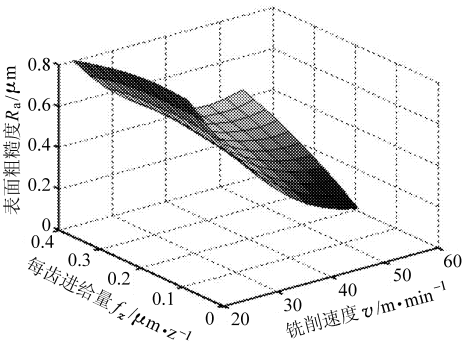


图3 铣削速度和每齿进给量对表面粗糙度的影响
Fig.3 Variation of R_a with various levels of f_z and v

(3)图4为 $v=37.68\text{ m/min}$ 时,即铣削速度为零水平铣削条件下,切削深度和每齿进给量对表面粗糙度的响应曲面。从二次响应曲面的弯曲程度可以看出,切削深度和每齿进给量的增加使表面粗糙度值显著增加,其中切削深度对表面粗糙度的影响比每齿进给量要显著的多,在切深和每齿进给量值最小的情况下,可获得最小的表面粗糙度值。

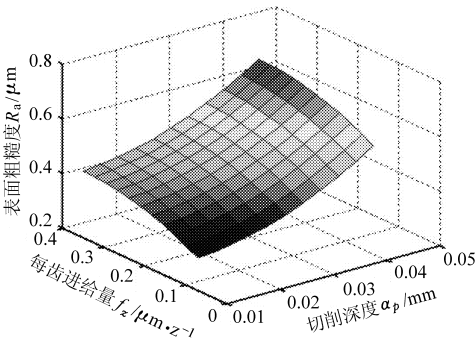


图4 切削深度和每齿进给量对表面粗糙度的影响
Fig.4 Variation of R_a with various levels of f_z and α_p

5 结论

(1)基于正交回归法和二次响应曲面法分别建立了微细铣削条件下表面粗糙度的预测模型,并进行了相关的试验研究,经检验二次响应曲面模型在试验条件内有较高置信度和实用性,预测精度和与实际结果的重合度明显优于正交回归方法,适于加工前选择切削参数对表面粗糙度进行优化预测和结果控制。

(2)通过二次响应曲面预测模型和试验结果分析了铣削参数影响表面粗糙度的线性效应、二次效应和交互效应的显著性。综合比较,微细铣削3个切削参数中对表面粗糙度影响较大的是铣削速度,其次是每齿进给量,切削深度对表面粗糙度的影响最弱。试验条件下,提高铣削速度,减少每齿进给量

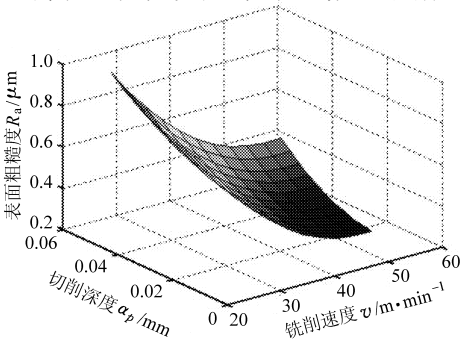


图2 铣削速度和切削深度对表面粗糙度的影响
Fig.2 Variation of R_a with various levels of α_p and v

和切削深度可以有效降低微细铣削表面粗糙度值。同时,可以有效增加试验的信息量,提高预测精度,减少试验次数,这种方法也可以用于建立其他的预测模型,但必须注意其适用范围。

(3)基于正交旋转组合设计的二次响应曲面法建立的表面粗糙度预测模型,在具备较高置信度的

参 考 文 献

1 刘志兵,王西彬,解丽静,等. 微小型结构件的微细切削技术[J]. 工具技术,2008,42(3):19~23.
Liu Zhibing, Wang Xibin, Xie Lijing, et al. Study on micro-cutting technology for microstructure[J]. Tool Engineering, 2008, 42(3): 19~23. (in Chinese)

2 Schmidt J, Tritschler H. Micro cutting of steel[J]. Microsystem Technologies, 2004,10(3):167~174.

3 Adams D P, Vasile M J, Benavides G. Micro milling of metal alloys with focused ion beam-fabricated tools[J]. Precision Engineering, 2001,25(2):107~113.

4 石文天,王西彬,辛民,等. 微细干车削硬铝合金的表面粗糙度研究[J]. 工具技术,2009,43(1):39~42.
Shi Wentian, Wang Xibin, Xin Min, et al. Study on micro-turning surface roughness of aluminum alloy LY12 without cutting fluid[J]. Tool Engineering, 2008, 43(1): 39~42. (in Chinese)

5 李洪涛. 介观尺度材料力学性能建模及微铣削工艺优化研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.
Li Hongtao. Mechanism studies and process optimization of mesoscale milling process [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. (in Chinese)

6 魏悦广. 机械微型化所面临的科学难题——尺度效应[J]. 世界科技研究与发展,2001,22(2):57~61.
Wei Yueguang. Size effect, a hard topic for machine——miniaturization[J]. World Sci-Tech R&D, 2001,22(2):57~61. (in Chinese)

7 Wang X, Feng Jack C X. Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning[J]. Int. J. Adv. Manuf. Tech. ,2002,20(5):348~356.

8 李国发,王龙山,丁宁. 基于进化神经网络外圆纵向磨削表面粗糙度的在线预测[J]. 中国机械工程,2005,16(3):223~227.
Li Guofa, Wang Longshan, Ding Ning. On-line prediction of surface roughness in cylindrical longitudinal grinding based on evolutionary neural networks[J]. China Mechanical Engineering, 2005,16(3):223~227. (in Chinese)

9 吴德会. 基于最小二乘支持向量基的铣削加工表面粗糙度预测模型[J]. 中国机械工程,2007,18(7):838~841.
Wu Dehui. A prediction model for surface roughness in milling based on least square support vector machine [J]. China Mechanical Engineering, 2007,18(7):838~841. (in Chinese)

10 赵岩,王波,梁迎春,等. 微细立铣削硬铝 2A12 表面粗糙度分析与预测[J]. 纳米技术与精密工程,2008,6(2):130~136.
Zhao Yan, Wang Bo, Liang Yingchun, et al. Analysis and prediction of surface roughness in micro-end-milling of Al 2A12 [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2008,6(2):130~136. (in Chinese)

11 袁人炜,陈明,曲征洪,等. 响应曲面法预测铣削力模型及影响因素的分析[J]. 上海交通大学学报,2001,35(7):1328~1329.
Yuan Renwei, Chen Ming, Qu Zhenghong, et al. Milling force prediction and analysis using statistics method[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001,35(7):1328~1329. (in Chinese)

12 胡雅琴. 响应曲面二阶设计方法比较研究[D]. 天津:天津大学,2005.
Hu Yaqin. A comparative study on the second-order designs in response surface methodology [D]. Tianjin: Tianjin University,2005. (in Chinese)

13 石文天,王西彬,刘玉德,等. 基于响应曲面法的微细铣削表面粗糙度预报模型与试验研究[J]. 中国机械工程,2009,20(20):2399~2402.
Shi Wentian, Wang Xibin, Liu Yude, et al. A prediction model and experimental study for surface roughness in micro-milling based on RSM[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(20): 2399~2402. (in Chinese)