

基于响应曲面车削加工表面粗糙度稳健性分析

刘春景^{1,2} 唐敦兵¹ 何 华² 陈兴强²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 蚌埠学院机电系, 蚌埠, 233030)

摘要: 随着现代科学技术的发展, 对零件的表面加工质量提出了越来越高的要求。但由于机械加工过程较复杂, 各种参数都不同程度地影响着表面粗糙度, 表面粗糙度分析时, 很难建立显式的解析模型。本文提出基于响应曲面法建立表面粗糙度可靠性指标对应刀具结构影响参数的灵敏度分析模型。结果表明, 表面粗糙度对刀尖圆角半径 r 的变化最为敏感, 对主偏角 κ 的变化敏感次之, 对前角 γ 变化不敏感; 刀尖圆角半径、主偏角和前角对表面粗糙度的贡献率分别为 56.82%, 27.84% 和 9.75%。

关键词: 表面粗糙度; 响应曲面法; 可靠性; 灵敏度

中图分类号: TP183

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)04-0520-06

Surface Roughness Robustness Analysis for Turning Operations Based on Response Surface Methodology

Liu Chunjing^{1,2}, Tang Dunbing¹, He hua², Chen Xingqiang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Department of Mechanical & Electrical Engineering, College of Bengbu, Bengbu, 233030, China)

Abstract: With the development of science and technology, the more excellent surface quality of part is demand. But considering the complicated relation of machining parameters to surface roughness, the explicit analytical model has not been fingered out. Response surface methodology is introduced to build parameter sensitivity model corresponding to reliability of surface roughness to structure parameters of the tool. The results show that the tool nose radius and the approach angle are the dominant factors influencing the surface roughness, accounting for 56.82% and 27.84% of the surface roughness, respectively. Surface roughness is insensitive to rake angle. The rake angle only accounts for 9.75% of the surface roughness.

Key words: surface roughness; response surface methodology; reliability; sensitivity

随着现代科学技术的发展, 工业部门对零件的表面加工质量提出了越来越高的要求。表面粗糙度不仅对机械系统的摩擦、磨损、接触刚度、疲劳强度、配合性质和传动精度等机械性能影响很大, 而且直接影响着机器的使用性能、可靠性及寿命。如何提高零件的表面质量已成为多年来的研究热点^[1-2]。Asiltürk^[3]等基于田口方法研究了车削

AlSi 4140 钢时切削参数对表面粗糙度的影响。Tsao 等^[4]采用田口方法研究了钴削复合材料时表面完整性, 研究表明进给速度和主轴转速越大表面粗糙度越大。Nalbant 等^[5]基于田口方法研究了涂层硬质合金刀具加工 AISI 1030 钢时的表面完整性, 研究表明刀尖圆角半径和进给速度越大表面粗糙度越大。Dong 等^[6]基于网络的自适应模糊推理

基金项目: 国家自然科学基金(51175262)资助项目; 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08)资助项目; 安徽省高等学校优秀青年基金(2010SQRL117)资助项目。

收稿日期: 2011-10-13; **修订日期:** 2011-11-21

通讯作者: 唐敦兵, 男, 教授, 博士生导师, 1972 年生, E-mail: d. tang@nuaa.edu.cn。

系统对铣削加工 6061 铝合金的表面粗糙度进行预测。Zain 等^[7-8]基于神经网络方法对铣削加工零件表面粗糙度进行了预测和优化。但由于机械加工过程复杂,各种过程参数都不同程度地影响着零件表面质量,且各因素之间存在复杂的相关性和高度非线性,这样在表面粗糙度可靠性分析时,很难建立显式的解析模型,也难以建立可靠性指标对应影响参数的灵敏度分析模型。

本文拟采用 Box-Behnken 设计法安排车削加工表面粗糙度试验,基于响应曲面法得到表面粗糙度的极限状态函数,建立表面粗糙度可靠性指标对应车刀几何结构影响参数的灵敏度分析模型,由该方法得到的极限状态函数是形式简单的二次函数,不仅包括一次项、二次项信息,而且考虑了自变量之间的交互作用信息,二次响应面法一定程度上反映了真实极限状态方程的非线性,对于真实极限状态函数的阶数小于 2 时,二次响应面法具有较高的近似精度,当真实极限状态函数的阶次高于 2 时,二次响应面法对设计点仍有较高的近似精度^[9]。因此显著提高了表面粗糙度可靠度和灵敏度的计算精度。

1 响应曲面法

响应曲面法(Response surface methodology, RSM)是一种多元分析方法,它是以回归方法作为函数估计的工具,将多因子试验中的因素与试验结果(响应值)的关系用多项式近似,把因子与试验结果的关系函数化,依次可对函数进行曲面分析,定量地分析各因素及其交互作用对响应值的影响。RSM 法与其他数据统计方法相比,不仅考虑了自变量之间的交互作用,提高了拟合精度,而且还可以运用图形技术将二者之间的函数关系显示出来,使结果更加直观。

RSM 法的基本理念是:在系统的真实响应 y 未知的情况下,假定 y 与影响系统的随机参数矢量的关系可用某含有交叉项的二次函数描述,则近似函数如式(1)所示。

$$y = f(\mathbf{x}) = a_0 + \mathbf{x}'\mathbf{b} + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x} \quad (1)$$

$$\text{式中: } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_k \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \frac{\alpha_{12}}{2} & \cdots & \frac{\alpha_{1k}}{2} \\ & \alpha_{22} & \cdots & \frac{\alpha_{2k}}{2} \\ & & \ddots & \\ & & & \alpha_{kk} \end{bmatrix},$$

\mathbf{b} 为一阶回归系数的一个 $k \times 1$ 向量, \mathbf{B} 为 $k \times k$ 对

称矩阵,其对角线元素为纯二次系数 α_{ii} ,非对角线元素为混合二次系数 $\alpha_{ij}(i \neq j)$ 的 $1/2$ 。

对随机参数矢量的 n 个样本点进行数值计算,得到 n 个输出点为 y_1, y_2, \dots, y_n ,对这些数据用最小二乘法进行回归分析^[10]

$$s = \sum_{i=1}^n \varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\alpha_0 + \mathbf{x}'\mathbf{b} + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x})]^2 \quad (2)$$

式中: n 为样本点个数; ε 为误差项。使误差项为最小,则有

$$\begin{cases} \frac{\partial s}{\partial \alpha_0} = 0 \\ \frac{\partial s}{\partial \alpha_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, k \\ \frac{\partial s}{\partial \alpha_{ij}} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (3)$$

求解式(3),可以得到式(1)中各系数。

2 试验方案与分析

2.1 试验条件

试验以典型的难加工材料钛合金 Ti6Al4V 为加工对象,其强度、塑性、韧性都较高,但切削性能差,工件的长度 $L=250$ mm,直径 $D=50$ mm,其化学成分和物理性能分别如表 1,2 所示。所使用的刀具为硬质合金 PVD-TiAlN 涂层刀具,具体成分和特性如表 3 所示。所有试验都是干式车削,切削速度 160 m/min,进给率 0.12 mm/r,切深 1.5 mm,用 Mitutoyo Surf test 301 粗糙度仪测量工件表面粗糙度值,测量时,每个工件选 3 个不同测试点,测量后取其平均值^[11-12]。

表 1 工件材料化学成分(质量百分数)

C	N	H	Fe	O	Al	V	Ti
0.08	0.05	0.015	0.40	0.20	5.50~6.75	3.50~4.50	余量

表 2 工件材料物理性能

密度/(g·cm ⁻³)	4.45
热传导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	7.2
抗拉强度,极限/MPa	900~1 100
抗拉强度,屈服/MPa	890
弹性模量/GPa	115
硬度(HRC)	36
熔点/°C	1 670
泊松比/%	0.342

2.2 试验因素和水平

工件车削加工过程中,决定表面粗糙度的因素有很多,如工件材料、刀具材料、冷却润滑条件、刀

具几何结构、切削用量及相关运动方式等工艺条件。这些条件对表面粗糙度的影响程度是不同的。本试验研究刀具几何结构参数(刀尖圆角半径 r 、主偏角 κ 、前角 γ)对表面粗糙度的影响,假定以上随机变量服从正态分布,每个参数选出 3 个水平,采用 Box-Benhnken 设计法,自变量按 $T_i = (X_i - X_0) / \Delta X_i$ 进行编码变换,其中 T_i 为自变量 X_i 的编码值, X_0 为自变量 X_i 在中心点的值, ΔX_i 为自变量变化步长。以表面粗糙度作为评价指标(响应值),因素水平及其标准差见表 4。

表 3 试验刀具成分和特性

基底 质量百分数/%	WC 94	Co 6
特性	等级 K30	颗粒大小/ μm 0.5
涂层	涂层厚度/ μm 3~4	薄膜成分/ (mol-%AlN) 约 54

表 4 Box-Benhnken 设计试验因素水平及编码

因素	代码		编码水平		
	未编码	已编码	-1	0	1
刀尖圆角半径 r/mm	X_1	T_1	0.50	0.75	1.00
主偏角 $\kappa/(\text{°})$	X_2	T_2	55	70	85
前角 $\gamma/(\text{°})$	X_3	T_3	-8	-6	-4

2.3 模型建立

按照 Box-Benhnken 试验设计的统计学要求,进行 17 组试验,试验设计和结果如表 5 所示。利用 Design Expert 软件对表 5 试验数据进行二次多项回归拟合,可得表面粗糙度 y 对刀尖圆角半径 r 、主偏角 κ 和前角 γ 的多元响应面函数

$$y = -0.454 + 2.109r - 0.011\kappa - 0.076\gamma + 5.801 \times 10^{-3}r\kappa - 0.0545r\gamma - 1.201 \times 10^{-3}\kappa\gamma - 1.262r^2 + 7.733 \times 10^{-5}\kappa^2 - 0.012\gamma^2 \quad (4)$$

表面粗糙度二次回归方程方差分析结果见表 6,由表 6 可知方程差异极显著($P < 0.0001$),而且各因子系数均有意义,拟合度好。证明模型是合适有效的,具有一定的实践指导意义。

2.4 响应曲面分析

通过表面粗糙度回归方程所作的响应曲面图及其等高线图如图 1~3 所示,由动态图可评价试验因素对表面粗糙度的两两交互作用。

表 5 Box-Benhnken 设计表及试验结果

组别	编码			响应值
	T_1	T_2	T_3	表面粗糙度/ μm
1	-1	-1	0	0.612
2	1	-1	0	1.043
3	-1	1	0	0.897
4	1	1	0	1.415
5	-1	0	-1	0.757
6	1	0	-1	1.287
7	-1	0	1	0.615
8	1	0	1	1.036
9	0	-1	-1	0.918
10	0	1	-1	1.319
11	0	-1	1	0.793
12	0	1	1	1.051
13	0	0	0	1.046
14	0	0	0	1.064
15	0	0	0	1.088
16	0	0	0	1.025
17	0	0	0	1.043

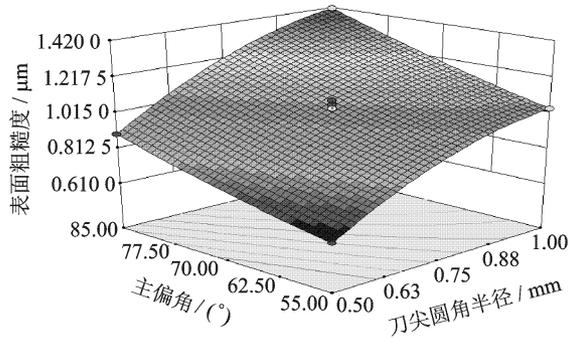


图 1 刀尖圆角半径和主偏角交互影响表面粗糙度的曲面图

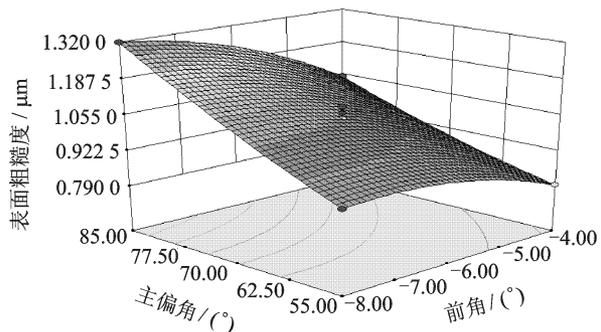


图 2 前角和主偏角交互影响表面粗糙度的曲面图

表6 表面粗糙度回归方程方差分析表

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.794 147	9	0.088 239	270.961 217 8	<0.000 1
r	0.451 25	1	0.451 25	1 385.690 158	<0.000 1
κ	0.216 153	1	0.216 153	663.759 020 4	<0.000 1
γ	0.077 421	1	0.077 421	237.743 359 4	<0.000 1
$r\kappa$	0.001 892	1	0.001 892	5.810 686 320	0.046 7
$r\gamma$	0.002 97	1	0.002 97	9.120 988 792	0.019 4
$\kappa\gamma$	0.005 184	1	0.005 184	15.918 931 37	0.005 3
r^2	0.026 178	1	0.026 178	80.9387 532 63	<0.000 1
κ^2	0.001 275	1	0.001 275	3.914 567 626	0.088 4
γ^2	0.010 78	1	0.010 78	33.104 446 98	0.000 7
失拟项	7.5E-07	3	2.5E-07	0.000 438 827	
误差项	0.002 279	4	0.000 57		
总和	0.796 426	16		$R^2=0.997 1$,信噪比=58.072	

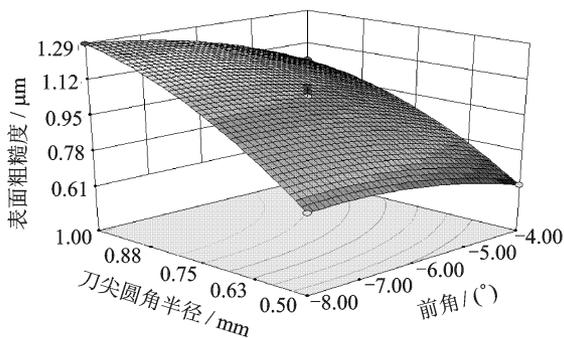


图3 前角和刀尖圆角半径交互影响表面粗糙度的曲面图

由图1~3可知,随着刀尖圆角半径 r 、主偏角 κ 和前角 γ 的增加,表面粗糙度随之增加。线性项 r, κ, γ ;二次项 r^2, γ^2 和交互作用项 $\kappa\gamma, r\gamma$ 是影响表面粗糙度的最重要因素。其中刀尖圆角半径 r 、主偏角 κ 和前角 γ 的贡献率分别为56.82%、27.84%和9.75%。

3 表面粗糙度可靠性灵敏度分析

3.1 可靠性灵敏度

功能函数是可靠性分析中的一个基本概念,它表征了响应值与影响结构安全的各因素之间的函数关系。若以随机向量 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_k)$ 表示刀具几何结构中的基本影响因素,则称 $g(\mathbf{x})=0$ 为极限状态方程。极限状态方程所张成的表面称为失效面, $g(\mathbf{x})<0$ 为失效状态, $g(\mathbf{x})>0$ 为安全状态, $g(\mathbf{x})=0$ 为临界状态。

假定设计要求的零件加工表面粗糙度为

$h(\mathbf{x})$,则极限状态函数为

$$g = g(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_k) - h(x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_n) \quad (5)$$

式中: f 为表面粗糙度输出函数; h 为表面粗糙度的许用量函数; x_i 为随机参数变量($i=1, 2, \dots, k$);当 $i=k+1, k+2, \dots, n$ 时, x_i 为许用量函数的变量。

利用二参数等效正态法将非正态随机变量 x_i ($i=1, 2, \dots, n$)在 x_i^* 处等效为正态随机变量。设等效后 x_i 的均值为 μ_i ,标准差为 σ_i 。

灵敏度系数为

$$\lambda_i = \frac{\sigma_i \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sigma_i \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right)^2}} \quad (6)$$

可靠度为

$$\beta = \frac{g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (\mu_i - x_i^*) \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*}}{\sum_{i=1}^n \lambda_i \sigma_i \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*}} \quad (7)$$

把式(6)代入式(7)可得可靠度为

$$\beta = \frac{g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (\mu_i - x_i^*) \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sigma_i \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right)^2}} \quad (8)$$

灵敏度为失效概率对基本变量分布参数的偏导数,因此灵敏度可表示为

$$\epsilon_{\mu_i} = \frac{\partial \beta}{\partial x_i} = \frac{(\mu_i - x_i^*) \frac{\partial^2 g}{\partial x_i^2} \Big|_{x_i^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sigma_i \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right)^2}} - \frac{\left[g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (\mu_i - x_i^*) \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right] \cdot \sigma_i \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \cdot \sigma_i \frac{\partial^2 g}{\partial x_i^2} \Big|_{x_i^*}}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sigma_i \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right)^2} \right]^3} \quad (9)$$

均值灵敏度反映了变量均值大小对可靠性的影响程度。针对参数化模型参数变量标准差的灵敏度表示为

$$\epsilon_{\sigma_i} = \frac{\partial \beta}{\partial \sigma_i} = \frac{\left[g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (\mu_i - x_i^*) \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right]^2 \cdot \sigma_i \left[\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right]^2}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sigma_i \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right)^2} \right]^3} \quad (10)$$

标准差灵敏度反映了参数变量波动性对可靠性的影响程度。

3.2 表面粗糙度稳健性分析

根据表面粗糙度的响应面函数,由式(9)和式(10)可求得刀尖圆角半径 r 、主偏角 κ 和前角 γ 等变量的灵敏度,灵敏度曲线如图4所示。由图4可知,表面粗糙度对刀尖圆角半径的变化最为敏感,对主偏角的变化敏感次之,对前角变化不敏感,这与前文响应曲面分析一致。

由图4(a)可知,在刀尖圆角半径区间 $[0.50, 0.75]$ 的灵敏度值大于 $[0.75, 1.00]$ 区间,即当刀尖圆角半径从0.75 mm变化到1.00 mm时,其表面粗糙度的变化比较平缓。由图4(b)可知,在主偏角区间 $[55^\circ, 75^\circ]$ 的灵敏度值大于 $[75^\circ, 85^\circ]$ 区间,即当主偏角从75°变化到85°时,其表面粗糙度的变化比较平缓。同理,由图4(c)可知,在前角区间 $[-8^\circ, -6^\circ]$ 的灵敏度值大于 $[-6^\circ, -4^\circ]$ 区间,即当前角从-6°变化到-4°时,其表面粗糙度的变化比较平缓。

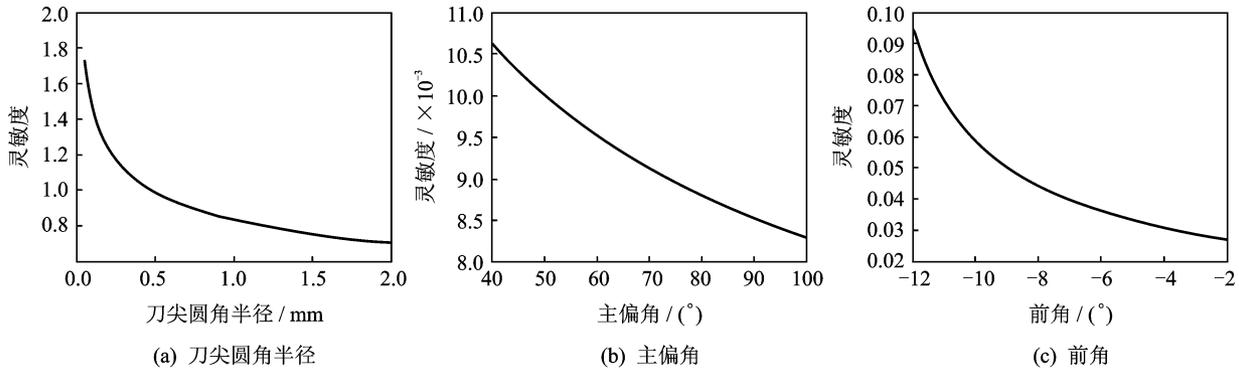


图4 表面粗糙度对刀具几何结构参数的灵敏度

4 结 论

(1) 基于响应曲面法通过试验研究刀具几何结构的3个关键参数对加工零件表面粗糙度的影响,建立了表面粗糙度的多元响应面函数。

(2) 根据响应面函数和刀具几何结构变量的对应关系,结合可靠性评价模型,进行了对应表面粗糙度可靠性灵敏度分析。

(3) 表面粗糙度对刀尖圆角半径的变化最为敏感,对主偏角的变化敏感次之,对前角变化不敏感;刀尖圆角半径 r 、主偏角 κ 和前角 γ 对表面粗糙度的贡献率分别为56.82%、27.84%和9.75%。

参考文献:

[1] 龙震海,王西彬,王好臣. 高速切削条件下难加工材料

表面粗糙度影响因素析因研究[J]. 工具技术, 2005, 39(1):26-29.

Long Zhenhai, Wang Xibin, Wang Haochen. Analysis of variance about influence factor on surface roughness of difficult-to-cut material in high speed machining process [J]. Tool Engineering, 2005, 39(1):26-29.

[2] 张烘州,明伟伟,安庆龙,等. 响应曲面法在表面粗糙度预测模型及参数优化中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(4):447-451.

Zhang Hongzhou, Ming Weiwei, An Qinglong, et al. Application of response surface methodology in surface roughness prediction model and parameter optimization [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(4):447-451.

- [3] Asiltürk I, Akkus H. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method[J]. *Measurement*, 2011(44):1697-1704.
- [4] Tsao C C, Hocheng H. Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 203(1/3):342-348.
- [5] Nalbant M, Gokkaya H, Sur G. Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(4):1379-1385.
- [6] Dong M, Wang N. Adaptive network-based fuzzy inference system with leave-one-out cross-validation approach for prediction of surface roughness[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(3):1024-1035.
- [7] Zain A M, Haron H, Sharif S. Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(2):1755-1768.
- [8] Zain A M, Haron H, Sharif S. Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(6):4650-4659.
- [9] 高宗战,刘志群,姜志峰,等. 飞机翼梁结构强度可靠性灵敏度分析[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(14):194-198.
Gao Zongzhan, Liu Zhiqun, Jiang Zhifen, et al. Strength reliability and parameter sensitivity analysis for airfoil spar structure[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14):194-198.
- [10] 闰明,孙志礼,杨强. 基于响应面方法的可靠性灵敏度分析方法[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(10):67-71.
Yan Ming, Sun Zhili, Yang Qiang. Analysis method of reliability sensibility based on response surface methods[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10):67-71.
- [11] 田荣鑫,姚倡锋,黄新春,等. 面向加工表面粗糙度的钛合金高速铣削工艺参数区间敏感性分析及优选[J]. *航空学报*, 2010, 31(12):2464-2470.
Tian Rongxin, Yao Changfeng, Huang Xinchun, et al. Process parameter interval sensitivity and optimization of machined surface roughness for high-speed milling of titanium alloys[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(12):2464-2470.
- [12] 吴德会. 铣削加工粗糙度的智能预测方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(6):1137-1141.
Wu Dehui. Intelligent prediction model for surface roughness in milling[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(6):1137-1141.