

# 钛合金盘铣振动模型预测及工艺参数优化

王丽博<sup>1</sup>, 陈俭<sup>1</sup>, 辛红敏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>河南机电职业学院; <sup>2</sup>西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室

**摘要:** 盘铣因其铣削力大和铣削效率高等特点被广泛应用于机械加工领域,但有关盘铣钛合金方面的研究相对较少。本文针对盘铣振动模型预测及工艺参数优化进行了钛合金盘铣开槽试验,采用信噪比试验设计法和响应曲面法进行主轴转速、切削深度和进给速度对振动加速度的影响规律分析。各因素对加速度的影响程度依次为切削深度 > 进给速度 > 主轴转速。采用信噪比试验设计法和线性回归技术建立振动加速度预测模型,根据预测结果与试验结果可知,两者误差较小,预测模型精度较高。

**关键词:** 盘铣;钛合金;振动加速度;信噪比;响应曲面;预测模型;工艺参数优化

中图分类号: TG506.7;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.020

## Vibration Model Prediction and Technological Parameter Optimization in Disc-milling of Titanium Alloy

Wang Libo, Chen Jian, Xin Hongmin

**Abstract:** Disc-milling is used in manufacturing because of its strong cutting force and high machining efficiency. But the research report on cutting mechanism of disc milling titanium alloy is still lack in literature. In this study, the vibration model prediction and technological parameters optimization are studied through grooving experiment of titanium alloy with disc milling. Based on S/N-ratio experimental design and response surface analysis, the effect of spindle speed, depth of cut, feed rate on vibration acceleration is investigated. It is found that the influencing degree of each factor on the vibration acceleration is depth of cut > feed speed > spindle speed respectively. A polybasic linear regression model about vibration acceleration is established by S/N-ratio experimental design and linear regression technology. The predicted value of the two prediction models and the tested value are approximated, which shows that the prediction effect is good.

**Keywords:** disc-milling; titanium alloy; vibration acceleration; S/N-ratio; response surface; prediction model; technological parameter optimization

### 1 引言

盘铣因其切削力大和加工效率高而广泛应用于机械加工领域。但另一方面,盘铣刀具直径较大且齿数较多,在切削加工过程中,刀具和机床易产生剧烈振动,从而加剧刀具磨损,影响产品加工质量。为解决上述问题,国内外学者对其振动特性开展了大量的研究。梁睿君等<sup>[1]</sup>对铣削加工三维稳定性进行了预测;吴琼等<sup>[2]</sup>、汪通悦等<sup>[3]</sup>对铣削薄壁件时的动态特性进行了试验分析及振动模型预测;刘安民等<sup>[4]</sup>研究了高速铣削时刀夹联体振动特性影响后刀面磨损的机理;N. Fang等<sup>[5]</sup>研究了在高速切削钛合金和铬镍铁合金时,刀具磨损对振动的影响;Huang Panling等<sup>[6]</sup>研究了铣削钛合金时,如何减少振动;Lv Dongxi等<sup>[7]</sup>研究了在旋转超声波加工BK7玻璃时如何改善振动对切削力的影响;Ostasevicivs Vytautas等<sup>[8]</sup>研究振动铣削对提高难加工材料表面

光洁度的作用;Zahia Hessainia等<sup>[9]</sup>以切削参数和刀具振动为基础,预测了硬切削的表面粗糙度;Guang Chen等<sup>[10]</sup>研究了采用超声振动螺旋铣削钛合金TC4时的材料去除率机理,试验结果表明该技术可以提高零件表面加工质量;林盖等<sup>[11]</sup>采集了高速铣削钛合金时的加速度信号,并建立了表面粗糙度预测模型,认为工作台对表面粗糙度的影响程度低于主轴的振动;Qi Yao等<sup>[12]</sup>研究了端铣振动加工时铣削力系数的确定,并提出了一种铣削力系数确定的新方法。

整体叶盘是发展高推重比航空发动机的关键,其通道粗加工主要在进口五轴加工机床上进行插铣和侧铣加工。盘铣在加工过程中会产生较大的铣削力,且材料去除率高。经试验验证,整体叶盘如采用盘铣工艺进行开槽粗加工,其加工效率将得到极大提高,其开槽效率是插铣的2倍以上<sup>[13]</sup>。由于盘铣切削力大,切削温度高,势必在加工过程中产生振动,造成刀具磨损及刀具与工件间的相对位置发生变化,导致加工精度无法保证等问题。因此,本研究

以钛合金试块代替整体叶盘进行整体叶盘铣削的模拟加工,并测量试验过程中的振动加速度。研究结果可为盘铣开槽工艺参数的优化提供参考。

## 2 试验与测量

### (1) 铣削条件

试验平台为 XH716 数控加工机床,材料选用 TC4 钛合金,整体硬质合金盘铣刀的具体参数见表 1。为减小刀具磨损速率,采用加切削液顺铣的方式,采用三因素三水平设计正交试验,具体工艺参数见表 2。试验加工原理见图 1a,为节约材料,对每一试块铣削三次,试块的铣削位置如图 1b 所示。

表 1 盘铣刀参数

直径(mm)	齿数	厚度(mm)	刀体材料	
200	16	20	合金结构钢	
刀片材料	前角(°)	后角(°)	刃倾角(°)	主偏角(°)
YG6	5	4	90	20

表 2 正交试验数据及试验结果

编号	因素			结果	
	主轴转速 $n$ (r/min)	切削深度 $a_p$ (mm)	进给速度 $v_f$ (mm/min)	加速度 $g$ (m/s <sup>2</sup> )	信噪比
试块 1	40(水平 1A1)	10(水平 1B1)	60(水平 1C1)	0.245	12.21
	40(水平 1A1)	15(水平 2B2)	100(水平 3C3)	0.178	14.99
	40(水平 1A1)	20(水平 3B3)	80(水平 2C2)	0.169	15.44
试块 2	70(水平 1A2)	10(水平 1B1)	100(水平 3C3)	0.194	14.24
	70(水平 1A2)	15(水平 2B2)	80(水平 2C2)	0.181	14.84
	70(水平 1A2)	20(水平 3B3)	60(水平 1C1)	0.187	14.56
试块 3	100(水平 1A3)	10(水平 1B1)	80(水平 2C2)	0.207	13.68
	100(水平 1A3)	15(水平 2B2)	60(水平 1C1)	0.198	14.06
	100(水平 1A3)	20(水平 3B3)	100(水平 3C3)	0.158	16.02

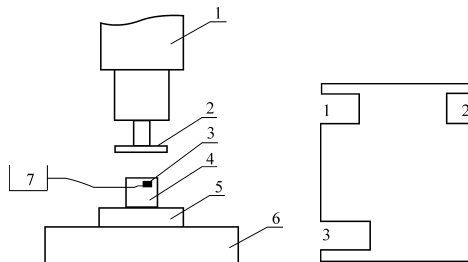


图 1 盘铣加工原理  
(a)加工原理 (b)已加工工件  
1. 主轴 2. 盘铣刀 3. 加速度传感器 4. 工件  
5. 虎钳 6. 工作台 7. 多功能测试系统

图 1 盘铣加工原理

### (2) 振动加速度测量

如图 1a 所示,加速度传感器粘贴在钛合金试块上,将采集到的加速度信号传输到多功能测试系统中,对信号进行分析处理,过滤掉高频及噪音,将绝对值的平均值作为试验结果,用符号  $g$  表示。

## 3 工艺参数优化

### 3.1 信噪比法

在信噪比试验方法中,可以用特性值来表示不同的因素对期望结果的影响程度,并寻求最佳系统、最优产品和最适合条件。试验中,振动加速度越小越好,所以振动加速度的信噪比可以用望小特性来计算,即

$$\eta_i = -10\lg g_i^2 \quad (1)$$

式中, $\eta_i$  为每次试验值所对应的信噪比; $g_i$  为每次试验所对应的振动加速度值; $i$  为每次的试验序号。

试验中的信噪比数值可通过式(1)计算得出,具体结果可见表 2。根据表中的数据,通过下式计算出因素 A 在 1、2、3 水平下的影响力,有

$$\eta_{A1} = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)/3 = (12.21 + 14.99 + 15.44)/3 = 14.21 \quad (2)$$

$$\eta_{A2} = (\eta_4 + \eta_5 + \eta_6)/3 = (14.24 + 14.84 + 14.56)/3 = 14.54 \quad (3)$$

$$\eta_{A3} = (\eta_7 + \eta_8 + \eta_9)/3 = (13.68 + 14.06 + 16.02)/3 = 14.58 \quad (4)$$

$\eta_{B1}$ 、 $\eta_{B2}$ 、 $\eta_{B3}$ 、 $\eta_{C1}$ 、 $\eta_{C2}$ 、 $\eta_{C3}$  的计算以此类推。

$$\Delta\eta = |\eta_{A1} - \eta_{A2}| + |\eta_{A2} - \eta_{A3}| \quad (5)$$

由式(5)计算得出影响力之差,因素 B、C 的计算方法与此类似。

利用上述方法可以计算各因素在不同水平下对振动加速度的影响力、影响力之差和影响率,计算结果见表 3。由表 3 可绘制工艺参数对影响力的影响趋势,见图 2。

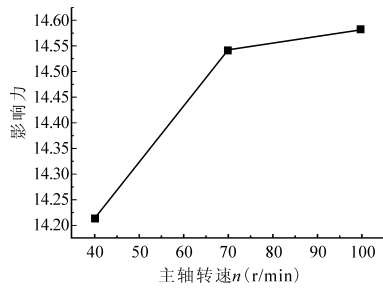
表 3 各因素不同水平对振动加速度的影响力

因素	不同水平下的影响力			影响力之差	合计	影响率(%)
	1	2	3			
A	14.21	14.54	14.58	0.37	3.81	9.7
B	13.37	14.63	15.34	1.97		51.7
C	13.61	14.65	15.08	1.47		38.6

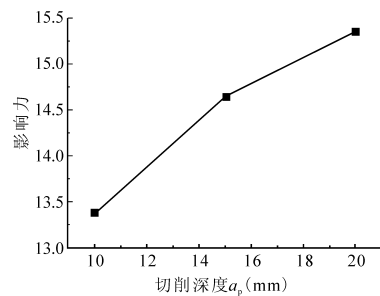
由表 3 可知,在试验参数范围内,所选取的三因素对振动加速度的影响力程度从大到小依次为切削深度 B > 进给速度 C > 主轴转速 A。要想使振动加速度最小,必须选择影响力数值最大时所对应的工艺参数,所以振动加速度最小的工艺参数组合为:A 因素 = 100r/min, B 因素 = 20mm, C 因素 = 100mm/min。

为验证各因素对振动加速度是否有显著影响,采用 F 检验法进行统计检验,其结果见表 4。由表可知,因素 B(切削深度)对振动加速度的影响最为显著,因素 C(进给速度)次之,因素 A(主轴转速)

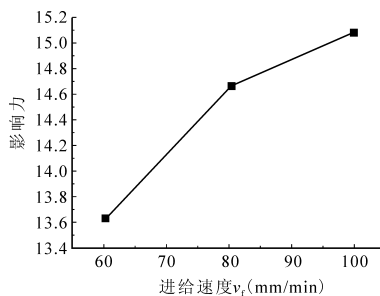
影响不显著。



(a) 主轴转速



(b) 切削深度



(c) 进给速度

图2 工艺参数对影响力的影响趋势

表4 F 检验法结果

因素	平方和 S	自由度 f	均方和 V(S/f)	F	sig
截距	1878.934	1	1878.934	46039.754	0.000
A	0.252	2	0.126	3.088	0.245
B	5.930	2	2.965	72.647	0.014
C	3.444	2	1.722	42.196	0.023
E	0.082	2	0.041		
总计	1888.641	9			
校正总计	9.707	8			

注:  $R^2=0.992, F_{0.05}(2,2)=19.00$

### 3.2 响应曲面法

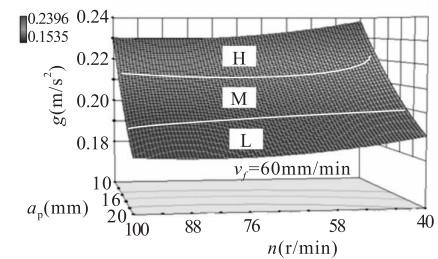
由于各工艺参数不可能单独起作用,要得到最小的振动加速度,需要考虑工艺参数两两交互作用对振动加速度的影响。图3为工艺参数对振动加速度的交互影响曲面,图中H代表振动加速度高值区域,M代表振动加速度中值区域,L代表振动加速度低值区域。

由图3a可见,随着主轴转速的增大,振动加速

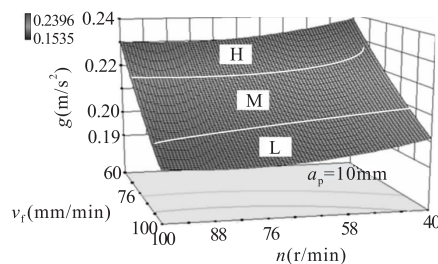
度先减小后增大;随着切削深度的增大,振动加速度逐渐减小,在铣削速度  $n=70\text{r/min}$ 、切削深度  $a_p=20\text{mm}$  时振动加速度最小。

由图3b可见,随着主轴转速的增大,振动加速度先减小后增大;随着进给速度的增大,振动加速度逐渐减小,当主轴转速  $n=70\text{r/min}$ 、 $v_f=100\text{mm/min}$  时振动加速度最小。

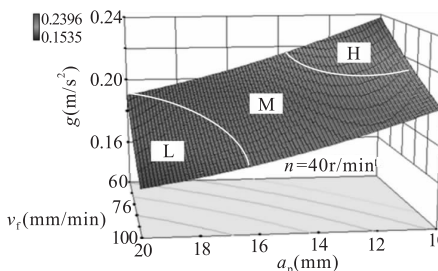
由图3c可见,随着切削深度、进给速度的增大,振动加速度逐渐减小;当切削深度  $a_p=20\text{mm}$ 、 $v_f=100\text{mm/min}$  时振动加速度最小,所以响应面法得到的最优工艺参数组合为  $n=70\text{r/min}$ 、 $a_p=20\text{mm}$ 、 $v_f=100\text{mm/min}$ 。



(a) 切削深度  $a_p$  和主轴转速  $n$  对  $g$  的交互影响



(b) 进给速度  $v_f$  和主轴转速  $n$  对  $g$  的交互影响



(c) 切削深度  $a_p$  和进给速度  $v_f$  对  $g$  的交互影响

图3 工艺参数对振动加速度  $g$  的交互影响

为比较信噪比法与响应曲面法优化工艺参数的优劣进行试验。试验条件同上,验证结果见表5。由表可见,响应曲面法优化工艺参数更为可靠。

表5 优化方法结果对比

优化方法	主轴转速 $n$ (r/min)	切削深度 $a_p$ (mm)	进给速度 $v_f$ (mm/min)	加速度 $g$
信噪比法	100	20	90	0.161
响应曲面法	60	20	90	0.157

## 4 振动预测模型建立

### 4.1 信噪比法

不同工艺参数组合下对振动加速度的影响程度可通过信噪比来表示,所以振动加速度也可通过信噪比来预测。

$\eta$  的计算公式为

$$\eta = \bar{\eta} + (\eta_{A_i} - \bar{\eta}) + (\eta_{B_j} - \bar{\eta}) + (\eta_{C_k} - \bar{\eta}) \quad (6)$$

式中,  $i, j, k = 1, 2, 3$ ;  $\eta_{A_i}, \eta_{B_j}, \eta_{C_k}$  为因素 A、B、C 在 1、2、3 水平下的信噪比;  $\bar{\eta} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \eta_i = 14.44$ 。

由式(6)得到  $\eta$  后,计算出振动加速度,获得不同条件下振动加速度预测值。

由式(1)可得振动加速度的预测模型为

$$g = 10^{-\frac{\eta}{20}} \quad (7)$$

如选定铣削条件 A1B2C1,可预测出振动加速度为  $0.2128\text{m/s}^2$ ,其具体计算过程为

$$\begin{aligned} \eta_{A1B2C1} &= \bar{\eta} + (\eta_{A1} - \bar{\eta}) + (\eta_{B2} - \bar{\eta}) + (\eta_{C1} - \bar{\eta}) = 14.44 \\ &+ (14.21 - 14.44) + (14.63 - 14.44) + (13.48 - 14.44) \\ &= 14.44 + (-0.23) + 0.19 + (-0.96) = 13.44 \\ g &= 10^{-\frac{\eta}{20}} = 10^{-\frac{13.44}{20}} = 10^{-0.672} = 0.2128\text{m/s}^2 \end{aligned}$$

### 4.2 线性回归振动模型预测

利用主轴转速  $n$ 、切削深度  $a_p$ 、进给速度  $v_f$  建立振动预测模型为<sup>[14]</sup>

$$g = cn^k a_p^l v_f^m \quad (8)$$

由于式(8)为非线性函数,将其取对数变换为线性函数,有

$$\lg g = \lg c + k \lg n + l \lg a_p + m \lg v_f \quad (9)$$

令  $\lg g = y, \lg c = b_0, k = b_1, l = b_2, m = b_3, \lg n = x_1, \lg a_p = x_2, \lg v_f = x_3$ ,则其对应的线性回归方程为

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (10)$$

该线性方程共包括 3 个自变量  $x_1, x_2, x_3$ ,为确定  $b_0, b_1, b_2, b_3$  的值,建立多元线性回归方程为

$$\begin{cases} y_1 = b_0 + b_1 x_{11} + b_2 x_{12} + b_3 x_{13} + \varepsilon_1 \\ y_2 = b_0 + b_1 x_{21} + b_2 x_{22} + b_3 x_{23} + \varepsilon_2 \\ \dots \\ y_9 = b_0 + b_1 x_{91} + b_2 x_{92} + b_3 x_{93} + \varepsilon_9 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $y_i$  为试验测量值;  $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}$  为所对应的试验自变量;  $\varepsilon$  为试验误差。

可用矩阵表示为

$$Y = Xb + e \quad (12)$$

式中,  $Y$  为 9 组试验测量数据所组成的  $9 \times 1$  矩阵;  $X$  为正交试验所组成的  $9 \times 4$  矩阵;  $b$  为  $b_0, b_1, b_2, b_3$

所组成的  $4 \times 1$  矩阵;  $e$  为  $\varepsilon_i$  所组成的  $9 \times 1$  矩阵。

由最小二乘原理有

$$b = (X'X)^{-1} X'Y \quad (13)$$

可得

$$b = \begin{bmatrix} 0.3849 \\ -0.0497 \\ -0.3286 \\ -0.3359 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(14)确定回归方程为

$$\hat{y} = 0.3849 - 0.0497x_1 - 0.3286x_2 - 0.3359x_3 \quad (15)$$

由式(15)得到振动预测模型经验公式为

$$g = 10^{-0.3849} n^{-0.0497} a_p^{-0.3286} v_f^{-0.3359} \quad (16)$$

把 A1B2C1 对应的工艺参数代入式(16)预测模型,得  $g_{A1B2C1} = 0.2097$ ,可知,与信噪比中的预测值  $0.2128$  较接近。

### 4.3 回归模型的试验验证

为验证振动加速度预测模型的精度,设计了 9 组正交试验数据。将测得的振动加速度信号在 Labview 中进行低通滤波,滤掉 50Hz 以上波形。对滤波后的波形取绝对值并除以 2 作为测量结果。图 4 为振动加速度模型的预测值与试验验证结果对比。由图可知,两种结果的误差较小,说明该预测模型精度较高。

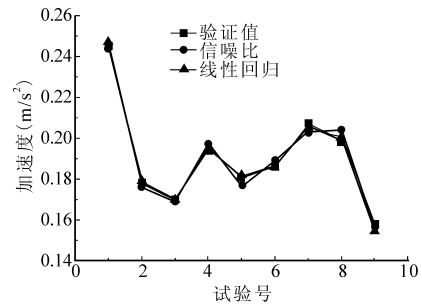


图 4 试验值与预测值对比

## 5 结语

(1)利用信噪比法和响应曲面法对铣削工艺参数进行优化,试验范围内信噪比法优化的最优工艺参数组合为主轴转速  $100\text{r/min}$ 、切削深度  $20\text{mm}$ 、进给速度  $90\text{mm/min}$ 。选取的三因素对振动加速度的影响力程度从大到小依次为切削深度  $B >$  进给速度  $C >$  主轴转速  $A$ 。响应曲面法优化的最优工艺参数组合为主轴转速  $60\text{r/min}$ 、切削深度  $20\text{mm}$ 、进给速度  $90\text{mm/min}$ 。选取的三因素对振动加速度的影响力程度从大到小依次为切削深度  $B >$  进给速度  $C >$  主轴转速  $A$ 。经过试验验证,响应曲面法优化工艺

参数较为可靠。

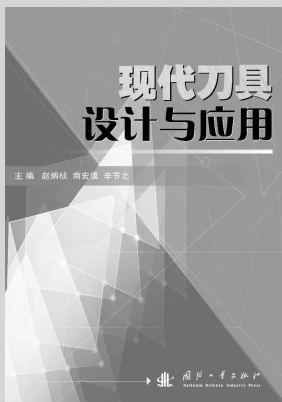
(2) 利用信噪比法和线性回归法建立振动模型, 并进行预测模型的试验验证。结果表明, 信噪比和线性回归模型的预测值与验证值较接近, 预测效果良好。

### 参考文献

- [1] 梁睿君, 叶文华, 黄翔. 铣削加工 3 维稳定性预测[J]. 四川大学学报, 2011, 43(3): 219-224.
- [2] 吴琼, 张以都, 张洪伟, 等. 航空薄壁件铣削加工动态特性与实验分析[J]. 兵工学报, 2008, 29(9): 1118-1222.
- [3] 汪通悦, 何宁, 李亮. 薄壁零件铣削加工的振动模型[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 22-25.
- [4] 刘安民, 沈航, Kruth J P. 高速铣削时刀夹联体振动特性影响后刀面磨损机理[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 63-68.
- [5] N Fang, P Srinivasa Pai, N Edwards. A comparative study of high-speed machining of Ti-6Al-4V and Inconel 718-part II: effect of dynamic tool edge wear on cutting vibrations [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(5-8): 1417-1428.
- [6] Huang Panling, Li Jianfeng, Sun Jie, et al. Study on vibration reduction mechanism of variable pitch end mill and cutting performance in milling titanium alloy [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5-8): 1385-1391.
- [7] Lv Dongxi, Huang Yanhua, Wang Hongxiang, et al. Improve-

- ment effects of vibration on cutting force in rotary ultrasonic machining of BK7 glass [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(9): 1548-1557.
  - [8] Ostasevicivs Vytautas, Gaidys Rimvydas, Dauksevicius Rolanas, et al. Study of vibration milling for improving surface finish of difficult-to-cut materials [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 57(6): 351-357.
  - [9] Zahia Hessainia, Ahmed Belbah, Mohamed Athmone Yallase, et al. On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations [J]. Measurement, 2013, 46(5): 1671-1681.
  - [10] Guang Chen, Chengzu Ren, Yunhe Zou, et al. Mechanism for material removal in ultrasonic vibration helical milling of Ti6Al4V alloy [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 138: 1-13.
  - [11] 林盖, 林述温. 基于主成分分析的高速铣削振动特性研究[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 28-32.
  - [12] Qi Yao, Baohai Wu, Ming Luo, et al. On-line cutting force coefficients identification for bull-end milling process with vibration [J]. Measurement, 2018, 125: 243-253.
  - [13] 史耀耀, 赵鹏兵. 小曲率整体叶盘复合高效强力铣加工基础试验研究[J]. 航空制造技术, 2011(19): 44-47.
- 第一作者: 王丽博, 讲师, 河南机电职业学院机电工程学院, 451191 郑州市
- First Author: Wang Libo, Lecturer, College of Mechatronics Engineering, Henan Mechanical Electrical Vocational College, Zhengzhou 451191, China

## 《现代刀具设计与应用》征订



《现代刀具设计与应用》由成都工具研究所、行业协会和专业学会及标委会组织高等院校、科研院所、刀具企业和用户企业的 10 余名刀具专家编写, 国防工业出版社出版。本书介绍了近 20 多年来在先进制造技术快速发展过程中切削加工工艺的发展趋势, 全面反映了切削技术和刀具专业所取得的新进展。

全书 600 余页, 大 16 开, 130 余万字, 共 15 章, 分成两篇。第一篇为刀具设计基础, 共 7 章, 介绍金属切削基本原理、刀具材料、刀具几何参数及结构设计、刀具涂层、工具系统及刀具装夹技术和刀具标准等现代刀具设计应用的基础知识; 第二篇为刀具应用技术, 共 8 章, 内容涵盖了为获得最佳加工效果和正确应用刀具的系统专业知识, 包括工件材料可加工性、切削数据库、切削冷却润滑等基础知识以及高速、高效、硬切削、干式切削等切削新工艺, 刀具动平衡和平衡技术、加工表面完整性、铣削走刀路线及编程方法和刀具管理等切削刀具专业的新技术。内容翔实新颖, 充分显示了刀具应用技术在现代切削技术中的重要性。

本书可供从事金属切削专业技术工作的工程技术人员、科研人员在开发刀具新产品、应用切削新工艺、提高加工效率、降低加工成本等实际工作中使用, 也可作为高等或中等专业学校机械专业师生的参考书及各类切削技术和刀具培训班的教材。本书对刀具制造企业开展技术创新和提高为用户服务的能力起到积极作用, 为提升我国装备制造制造业切削加工技术水平具有重要的现实意义。

本书定价 128 元, 欢迎专业工作者及专业图书资料部门订阅, 联系方式:

四川省成都市府青路二段 24 号 工具技术杂志社发行部

电话: 028-83245073

邮箱: toolmagazine@163.com