

文章编号 1004-924X(2015)增-0266-06

超精密切削加工表面粗糙度影响因素的实验

毕 果¹, 孙 郅 佶^{1,2*}, 张 剑 锋², 王 振 忠¹, 安 晨 辉²

- (1. 厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005;
2. 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要: 为了优化超精密飞刀切削加工表面的粗糙度, 对超精密飞刀切削加工主要参数的变化进行了实验研究。根据超精密飞刀切削加工机床加工原理, 分析了影响加工工件表面质量的因素。使用控制变量法对不同的切削参数进行了实验和理论分析的对比, 以寻找最优加工参数组合。实验显示: 加工后的工件表面粗糙度和表面刀纹对低主轴转速、较高的进给速度比较敏感, 而对切削深度较为不敏感; 同时转速 400 r/min, 进给速度 60 μm , 切削深度 6 μm 时, 加工后的工件表面粗糙度均优于 7.5 nm, 并且基本不存在加工刀纹。实验结果表明, 合理选择飞切加工切削参数可以保证加工表面粗糙度及效率。

关键词: 超精密飞切; 表面粗糙度; 主轴转速; 进给速度; 切削深度

中图分类号: TG501 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0266

Experiment on main factors affecting surface roughness in ultra-precision fly cutting

BI Guo¹, SUN Zhi-ji^{1,2*}, ZHANG Jian-feng², WANG Zhen-zhong¹, AN Chen-hui²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering,
Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Chengdu Fine Optic Engineering Research Center, Chengdu 620041, China)

* Corresponding author, E-mail: guobi@xmu.edu.cn

Abstract: To optimize the surface roughness in ultra-precision fly cutting machining, a number of experiments were conducted to analysis on the changes of main factors affecting the surface roughness. On the basis of the processing principle of ultra-precision fly cutting machine, the main factors affecting surface roughness were analyzed theoretically. To obtain an optimized parameter combination, the experimental results were compared with the theoretical results of different cutting parameters by using the control variable method. Experimental results indicate that the surface roughness and blade ripples are sensitive to low spindle speed and high feed rate, but is not sensitive to cutting depth. Meanwhile, under the cutting conditions in spindle speed of 400 r/min, feed rate of 60 $\mu\text{m}/\text{s}$, cutting depth within 6 μm , the surface roughness is better than 7.5 nm, and shows a smooth surface. It concludes that choosing reasonable processing parameters allows to optimize the surface roughness and

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-04-18.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (No. 2013ZX04006011-102-001); 国家自然科学基金 (No. 51275433)

improve the machining efficiency.

Key words: ultra-precision fly cutting; surface roughness; spindle speed; feed rate; cutting depth

1 引 言

随着光学技术的发展,光学元件的应用越来越广泛,对光学元件的表面质量的要求也越来越高,其中各向异性、易潮解光学材料是常用的非线性光学材料,大尺寸、高质量的各向异性光学材料被公认为是最难加工的光学元件之一,传统的磨抛等光学加工方式已经不能满足该类材料的加工,超精密单点金刚石飞切加工就成了唯一可以选择的加工手段,其加工后的表面常常作为工件的最终表面^[1-5]。美国的劳伦斯·利佛尔国家实验室(LLNL)研究结果表明,采用负前角的金刚石刀具超精密切削能够获得纳米级光学表面^[6]。各向异性晶体光学元件加工过程是机床、工件、夹具和金刚石刀具车削参数等组成的复杂工艺系统,其中车削参数的设置是非常重要的一项,不仅关系到刀具的使用寿命,还对提高机床的车削效率和更好的工件表面质量起着重要的作用^[7]。超精密切削参数主要包括切削深度、进给速度、主轴转速、刀具圆弧半径等,正对不同的材料和机床需要的最佳工艺参数也不同,这就需要大量的实验去确定最佳切削参数。哈尔滨工业大学王洪祥等对切削加工金属材料时影响表面粗糙度的因素进行了系统的研究,并提出了特定机床下加工工件表面粗糙度的经验模型^[8-9]。香港理工大学 W. B. Lee 等将加工过程中影响粗糙度的因素进行了理论分析,并使用计算机对表面形貌和粗糙度进行模拟分析,预测实际加工后的表面粗糙度,然后根据光学元件的表面质量要求对车削参数进行修正^[10-11]。成都精密光学工程研究中心安晨辉等使用欧拉方程建模分析了超精密切削加工工件表面中频微波的产生原因^[12]。本文通过实验,对超精密切削机床对加工过程中不同的加工工艺参数对加工光学元件的表面质量进行了研究,来寻求最优加工参数组合以控制表面粗糙度。

2 超精密飞刀切削加工机理

机床结构如图 1 所示,大口径超精密飞刀切

削机床采用立轴平面铣削形式,飞刀盘直径达到 630 mm,可以减少加工圆弧轨迹对光学元件表面质量的影响。安装在飞到盘边缘的圆弧刃单点金刚石刀具对光学元件表面的超精密切削,金刚石飞切加工是非连续切削加工,工件通过真空吸附加紧在工作台上,由伺服进给系统驱动空气静压导轨完成工件的直线进给。

金刚石飞切加工为非连续加工,金刚石刀具随飞刀盘每旋转一周,刀具与工件只接触一段,由于刀具和工件的相对运动及刀具几何形状的关系,每两刀切削之间有一小部分材料未被切削而残留在工件表面上,称为残留高度,如图 2 所示。实际表面粗糙度都是由其他因素在这个基本形貌上叠加的结果,因此残留高度在一定程度上可以反应表面粗糙度的理论值水平和趋势。平面光学元件加工后的表面粗糙度经验模型通常可以表示为^[8]:

$$R_a = Cn^x f^y a_p^z, \quad (1)$$

其中: C 为常数, n 为主轴转速, f 为主轴每转一圈的进给速度, a_p 为切深。

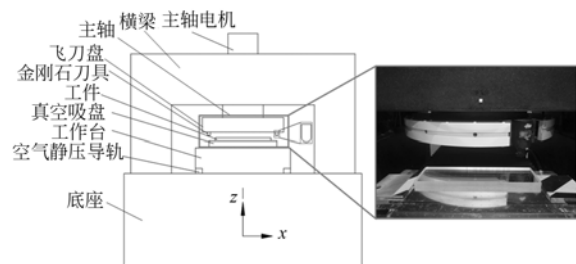


图 1 机床结构示意图

Fig. 1 Structure of fly-cutting machine

由此可见对加工工件表面产生直接影响的因素均为加工工艺参数。微结构表面的残留高度沿法线方向并没有变化,而是沿进给方向有周期性变化。通过计算,切削后残留的高度 R_{\max} 为:

$$R_{\max} = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2}, \quad (2)$$

$$f = \frac{60}{n} \times F, \quad (3)$$

式中: R 为刀具圆弧半径, F 为工件的进给速度。

由式(2)可知,加工后工件表面粗糙度与每转

的进给量和刀具圆弧半径有着密切的关系。减小每转的进给量或者增大刀具圆弧半径理论上可以减小工件表面粗糙度。为了尽可能的增加金刚石刀具的圆弧半径,使用圆弧半径为 6 mm

的金刚石圆弧刀具,因此影响工件表面质量的因素主要为工件的进给速度和主轴转速,减小进给速度或者增大转速都可以降低理论表面粗糙度,但减小进给速度会影响实际的加工效率。

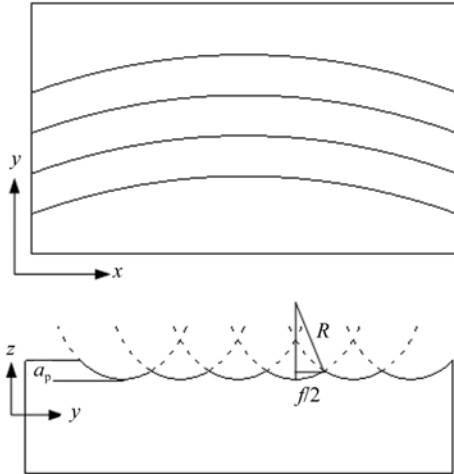


图 2 飞切加工后工件表面示意图

Fig. 2 Schematic surface topography of fly cut surface

3 测量实验与结果

3.1 实验条件

超精密切削机床采用超精密空气静压主轴和空气静压导轨,床身使用大理石搭建,使得机床具有较高的刚度和机械精度,其加工平面光学元件的最大尺寸为 430 mm×430 mm。切削刀具选用刀具圆弧半径达到 6 mm 的单点金刚石刀。针对不同的工艺参数,设计 3 组实验,并对加工后的表面使用具有 3 nm 分辨率和 500 mm 行程的 WykoRST-plus (Veeco Metrology Group) 粗糙度测量仪对粗糙度进行检测,分析不同的工艺参数对加工后表面粗糙度的影响,并寻找最优的工艺参数。实验条件如表 1 所示。

表 1 实验工艺参数

Tab. 1 Cutting conditions

组别	主轴转速/(r·min ⁻¹)	进给速度/μm·s ⁻¹)	切削深度/μm
1	200,250,300,350,400,450,500,500	60	4
2	400	27,30,33,57,60,63,87,90,93,117,120,123	4
3	400	60	2,4,6,8,10,12

3.2 实验结果及讨论

3.2.1 主轴转速对表面粗糙度的影响

根据表 1 第 1 组实验的设计,主轴转速与实测表面粗糙度以及根据式(2)计算的理论粗糙度的关系如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,在进给速度和切深不变的情况下,当主轴转速较小时,每转的进给量很大,因此实际的粗糙度的变化趋势跟理论公式(2)计算的粗糙度趋势一致,主轴转速越小,进给量越大、粗糙度越大,随着转速地增加,在进给速度不变的情况下,每一圈的进给量减小,因此表面粗糙度减小,同时由于转速越小,刀具在工件表面的刮擦现象越明显,在工件的表面形成周期性刀纹非常明显,如图 4 所示,这样周期性刀纹会使表面粗糙度明显增大。当转速达到一定程度后,摩擦热

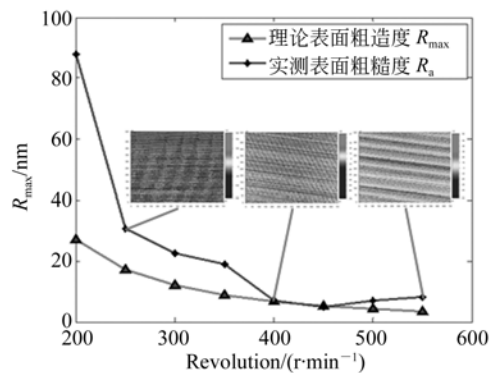


图 3 表面粗糙度随转速变化趋势

Fig. 3 Variation trend of surface roughness vs Revolution

来不及散热,使刀具磨损加快,导致粗糙度增加,另外当主轴转速越高,机床的动平衡等误差将对表面粗糙度产生影响。

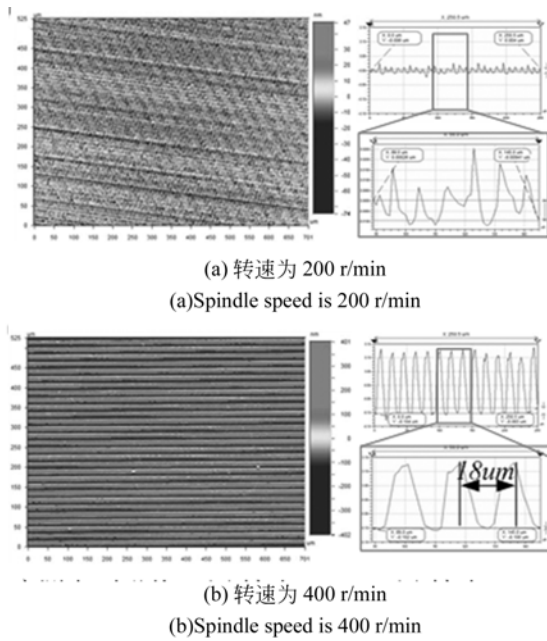


图 4 实测表面形貌

Fig. 4 Measured surface profiles of different spindle speed

3.2.2 进给速度对表面粗糙度的影响

根据表 1 第 2 组实验的设计,进给速度与实测表面粗糙度以及根据公式(2)计算出来的理论粗糙度的关系如图 5 所示。

从图 5 中可以看出在主轴转速和切深不变的情况下,进给量速度越小每转的进给量就越小,因此加工工件的表面粗糙度较好。并当进给速度较小时,每转的进给量较小,实际测得的表面粗糙度和根据公式(2)预测的表面粗糙度趋势一致,表面形貌也较为均匀,不存在明显的纹理,但是当进给速度大到一定程度后表面粗糙度对进给速度的变化非常敏感,微小的进给速度变化可能引起表面粗糙度大幅的变化,这主要是由于高的进给速度使刀具在工件表面的划擦更为严重,且切除热上升导致的,并且划擦严重将导致加工后的工件表面刀纹非常严重,导致表面粗糙度急剧变差并且并且转速越高刀纹越严重,如图 6 所示。

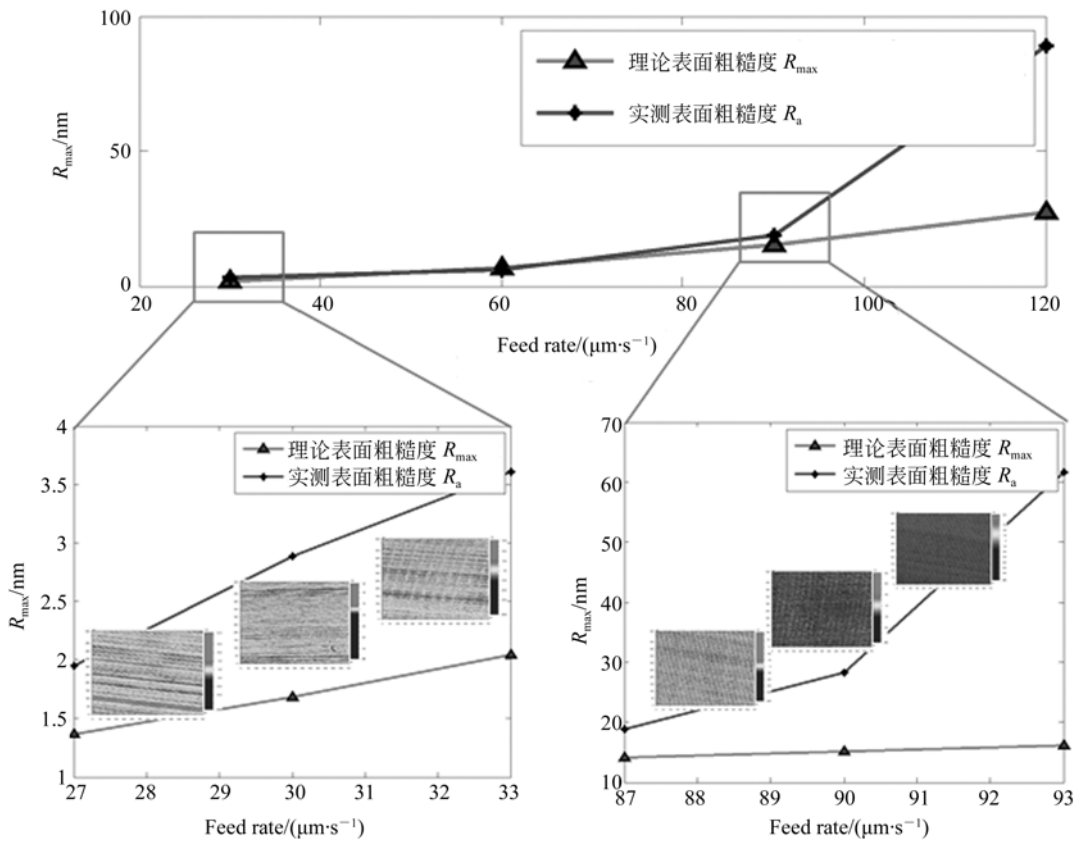
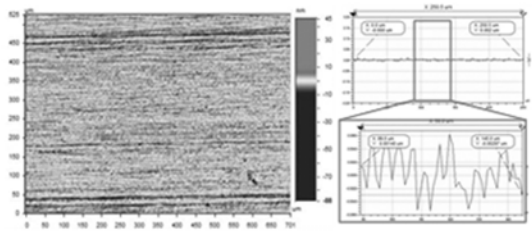
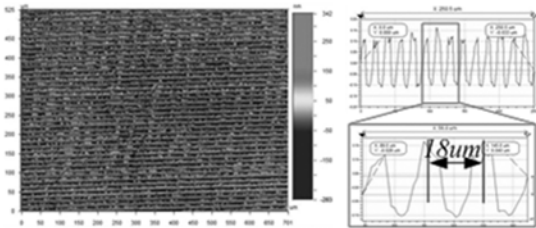


图 5 表面粗糙度随进给速度变化趋势

Fig. 5 Variation trend of Surface roughness vs feed rate



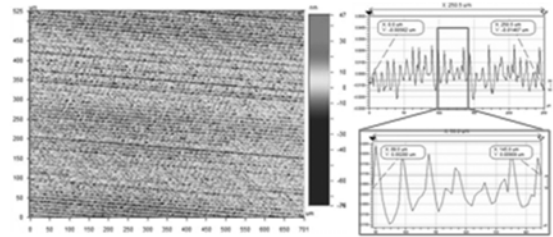
(a) 进给速度 30 μm/s
(a) feed rate is 30 μm/s



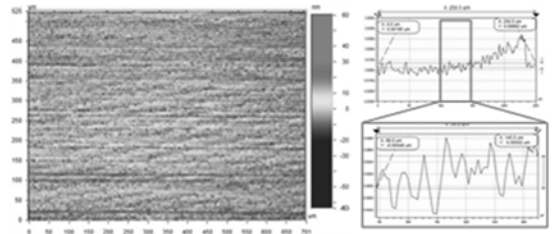
(b) 进给速度 120 μm/s
(b) Feed rate is 120 μm/s

图 6 实测表面形貌

Fig. 6 Measured surface profiles of different feed rate



(a) 切深 2 μm
(a) Cutting depth is 2 μm



(b) 切深 12 μm
(b) Cutting depth is 12 μm

图 8 实测形貌

Fig. 8 Measured surface profiles of different cutting depth

3.2.3 切削深度对表面粗糙度的影响

根据表 1 第 3 组实验的设计,切削深度与实测表面粗糙度的关系如图 7 所示。

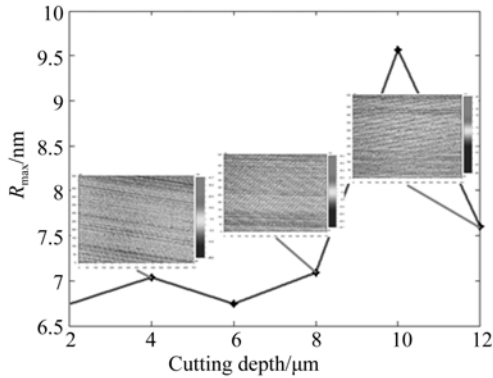


图 7 表面粗糙度随切深变化趋势

Fig. 7 Influence of cutting depth

从图中可以看出在主轴转速和进给速度不变的情况下随着切深的增加工件的表面粗糙度有增加的趋势,根据式(2)超精密飞刀切削加工方式,切削深度并不影响加工的工件的表面粗糙度,但是切深增加,每次的切除量增加,切削过程产热和排屑等因素会造成加工后工件表面粗糙度存在一定的变化。同时切削深度改变不会使工件表面出现刀纹,但是会造成表面均匀性变差,如图 8 所示。

根据上述分析可以发现,低转速时加工工件

的表面粗糙度对转速比较敏感,高进给速度加工工件时工件表面粗糙度对进给速度比较敏感,而超精密飞刀切削机床加工后的工件表面粗糙度对切深不敏感,同时低转速或者高进给速度都会造成加工工件表面严重的刀纹。增加转速和减小进给速度可以从理论上降低工件的表面粗糙度,但是进给速度太小将大大降低加工效率,综合考虑加工工件的表面粗糙度和加工效率,转速 400 r/min,切深 6 μm,进给速度 60 μm/s 是适合的切削加工参数。

4 结 论

本文提出了影响表面粗糙度的主要因素,介绍了超精密飞切加工机床的结构和工作原理。研究了超精密飞刀切削机床加工后工件表面形貌的成形机理。最后分析了影响超精密飞切加工后工件表面质量的因素,并进行了实验验证。实验结果表明:超精密飞切机床在低转速时对转速比较敏感,在高进给速度时对进给速度比较敏感,而在很大程度上对切削深度并不敏感,综合分析认为,在转速为 400 r/min,进给速度 60 μm,切深小于 6 μm 时,加工后的表面粗糙度优于 7.5 nm,加工工件即能保证加工工件的表面质量又能保证加工的效率。

参考文献:

- [1] 袁巨龙,张飞虎,戴一帆,等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
YUAN J L, ZHANG F H, DAI Y F, *et al.*. Development research of science and technologies in ultra-precision machine field [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(15): 161-177. (in Chinese)
- [2] 安晨辉,王健,张飞虎,等. 超精密飞刀切削加工表面中频微波产生机理[J]. 纳米技术与精密工程, 2010, 8(5): 439-446.
AN CH H, WANG J, ZHANG F H, *et al.*. Mid-spatial frequency micro-waviness on machined surfaces by ultra-precision fly-cutting [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2010, 8(5): 439-446. (in Chinese)
- [3] 黄坤涛,房丰洲,官虎. 超精密车削表面微观形貌对光学特性的影响[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 101-107.
HUANG K T, FANG F ZH, GUAN H. Effect of surface microscopic topology generated by ultra-precision turning on optical characteristics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 101-107. (in Chinese)
- [4] 张文生,张飞虎,董申. 光学脆性材料的金刚石切削加工[J]. 光学精密工程, 2003, 11(2): 139-143.
ZHANG W SH, ZHANG F H, DONG SH. Diamond cutting of optical brittle materials [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2): 139-143. (in Chinese)
- [5] 周明,邹莱. 金刚石切削黑色金属时刀具磨损机理的摩擦磨损试验[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1786-1794.
ZHOU M, ZOU L. Tool wear mechanism of diamond cutting of ferrous metals in frictional wear experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1786-1794. (in Chinese)
- [6] 杨福兴. KDP 晶体超精密加工技术的研究[J]. 制造技术与机床, 2003(9): 63-65.
YANG F X. Study on the Ultra-precision machining technology for KDP crystals [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2003(9): 63-65. (in Chinese)
- [7] CHEUNG C F, LEE W B. Characterization of nano-surface generation in single point diamond turning [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41: 851-875.
- [8] 王洪祥,孙涛,张龙江,等. 影响超精密车削表面粗糙度几种主要因素分析[J]. 制造技术与机床, 2003(9): 55-57.
WANG H X, SUN T, ZHANG J L, *et al.*. Analysis on Main Factors Affecting Surface Roughness in Ultra-precision Turning [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2003(9): 55-57. (in Chinese)
- [9] 王洪祥,孟庆鑫,宗文俊,等. 金刚石刀具前角对超精密切削过程影响的有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(9): 1220-1223.
WANG H X, MENG Q X, ZONG W J, *et al.*. Finite element analysis for the influence of rake angles of diamond tool on ultraprecision cutting process [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, 36(9): 1220-1223. (in Chinese)
- [10] CHEUNG C F, LEE W B. Characterization of nanosurface generation in single point diamond turning [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41: 851-875.
- [11] LEE W B, CHEUNG C F. A dynamic surface topography model for the prediction of nano-surface generation in ultra-precision machining [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43: 961-991.
- [12] AN C H, ZHANG Y, XU Q, *et al.*. Modeling of dynamic characteristic of the aerostatic bearing spindle in an ultra-precision fly cutting machine [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, 50: 374-385.

作者简介:



毕 果(1982—),女,河南南阳人,博士,副教授,2007年毕业于上海交通大学。现在厦门大学机电工程系工作。主要从事精密加工质量评价与控制、加工过程监控等。Email: guobi@xmu.edu.cn