

文章编号 1004-924X(2014)02-0376-07

微磨削锥塔结构光滑表面的自适应 方向检测与微加工精度

谢 晋^{*}, 刘旭冉, 吴可可, 李 萍, 卢泳贤
(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:用白光干涉检测(WLI)法检测微结构表面形貌时,其光滑结构面和边角数据很容易丢失,因此本文提出了自适应方向 WLI 检测法。该方法分别沿着每个微斜面法向进行自适应方向检测,评价分析其面形、特征轮廓和特征点的加工精度。首先,采用#3000 金刚石砂轮微细尖端在 Si 表面加工出高度为 50 μm 、宽度为 56 μm 且光滑的微锥塔结构。然后,利用四次检测点云对微磨削表面进行拼接与重建。最后,分析面形误差、特征轮廓误差和特征点误差。实验显示:自适应方向 WLI 检测可以重构出完整的微锥塔结构表面,微磨削的面形误差为 5.3 μm ,表明该微磨削技术可以确保微锥塔结构光滑 Si 表面的加工精度。但是,对微锥塔结构表面特征轮廓误差及特征点误差的评价表明,特征轮廓误差高达 7.7 μm ,而特征点误差约为 15 μm ,约为面形误差的 3 倍。分析认为这些误差是由微金刚石砂轮 V 形尖端磨钝及微磨粒钝化造成的。

关键词:白光干涉术;自适应方向检测;微结构表面;微磨削精度

中图分类号:TH744.3;TG115.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142202.0376

Adaptive-orientation measurement and micro-machining accuracy of micro-ground pyramid-structured smooth surface

XIE Jin^{*}, LIU Xu-ran, WU Ke-ke, LI Ping, LU Yong-xian

(College of Mechanical and Automotive Engineering,
South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

^{*} Corresponding author, E-mail: jinxie@scut.edu.cn

Abstract: When a White Light Interferometry (WLI) is used to measure the micro-structured surface topography, the measured points on smooth micro-structured surfaces and edges are easy to lose. Therefore, an adaptive-orientation WLI was proposed. The method measured each steep surface along its near normal-orientation for the evaluation of its surface shape, feature profile and micro-machining accuracy. First, a #3000 diamond wheel V-tip was employed to fabricate a micro-pyramid-structure Si surface with a depth of 50 μm and a width of 56 μm . Then, four adaptive-orientation measured point clouds were used to splice and reconstruct whole micro-ground surface. Finally, the micro-ground form error, feature profile error and the feature point error were investigated. Experiments show that the adaptive-orientation measurement can reconstruct integrated micro-pyramid-structured surface and the form error is 5.3 μm , which means that the micro-grinding may assure the machining

收稿日期:2013-09-20;修订日期:2013-11-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075156)

accuracy of micro-pyramid-structured Si surface. In contrast, the evaluation for the feature profiles and feature points of a micro-pyramid-structure indicates that the feature profile error reaches $7.7 \mu\text{m}$, and the feature point error is about $15 \mu\text{m}$, which is about 3 times of its form error. It suggests that these errors come from the passivations of diamond wheel V-tip and micro grains.

Key words: White Light Interferometry (WLI); adaptive-orientation measurement; micro-structured surface; micro-machining accuracy

1 引 言

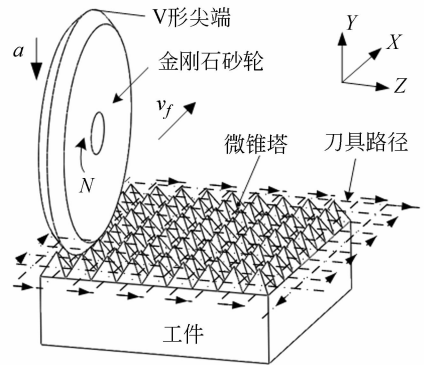
零部件表面被加工出规则的微结构形状可以比不规则的微结构形状产生更高的功能特性^[1-3],但微结构表面加工的面形精度评价尚未有很好的方法。虽然微结构可以采用 CCD 检测^[4]、激光检测^[5]、红外干涉检测^[6]、白光干涉检测^[7]等非接触检测方法,但是光滑微倾斜面数据容易丢失。

因为无法精确确定微结构表面的三维数值,所以其评价仅限于平均深度、深宽比等定性指标^[8-12]。作者采用 #600 金刚石砂轮的微细尖端已在 Si 表面加工出 $100 \mu\text{m}$ 以上高度的微锥塔结构^[13],但因金刚石磨粒尺度较大很难加工出 $100 \mu\text{m}$ 以下尺度的微结构。而且,采用白光干涉仪(WLI)可以检测到较完整的数据^[13],这是因为微结构表面较为粗糙,很容易将倾斜的检测光反射回来。

因此,本文采用 #3000 金刚石砂轮的微细尖端在 Si 表面加工出 $100 \mu\text{m}$ 以下尺度的光滑微锥塔结构。提出自适应方向 WLI 检测方法,即沿着 4 个微倾斜面的近法向进行 4 次检测,识别每个微锥塔结构斜面及边界,然后重构微锥塔结构形面,最后评价微锥塔结构的面形、特征轮廓和特征点的加工精度。

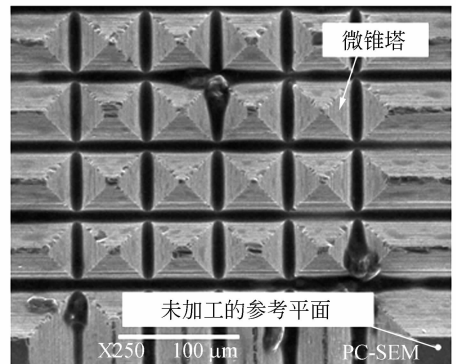
2 微磨削结构的自适应方向检测

图 1 所示为微磨削方法和工件检测图。利用修整的金刚石砂轮 V 形尖端沿着数控交叉的准确轨迹行走(图 1a)^[13],加工出高度为 $50 \mu\text{m}$ 、宽度为 $56 \mu\text{m}$ 的微锥塔结构表面。加工条件如表 1 所示。



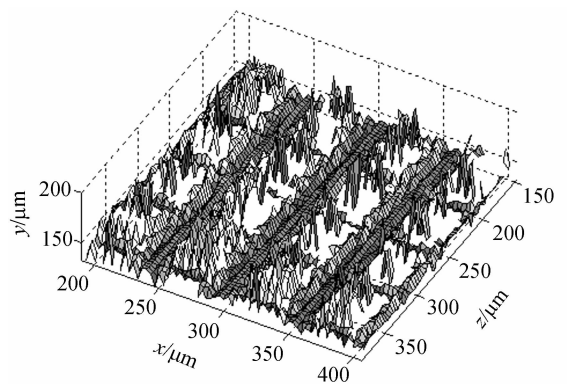
(a)微磨削方法

(a) Micro-grinding process



(b)SEM 照片

(b) SEM photo



(c)传统 WLI 检测图

(c) Traditional WLI measurement

图 1 微磨削结构表面

Fig. 1 Micro-ground structured surface

表 1 微磨削的试验条件

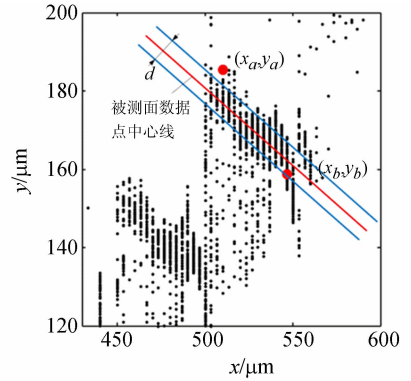
Tab.1 Micro-grinding conditions

CNC 磨床	SMART-B818
金刚石砂轮	粒度 3000, 树脂结合剂, V 形尖端
加工参数	$N=2\ 000\ \text{r/min}$, $v_t=500\ \text{mm/min}$, $\alpha=1\ \mu\text{m}$
冷却液	BM_2 水溶性磨削液体

从扫描电镜中发现,该微磨削技术可将 Si 表面加工出高度为 $100\ \mu\text{m}$ 以下的完整微锥塔结构(图 1b)。但是,采用白光干涉检测仪检测会导致微锥塔结构的微斜面和顶端的检测数据大部分都丢失(图 1c)。这是因为采用 #3000 金刚石砂轮微磨削结构斜面非常光滑,检测光很难反射回来。

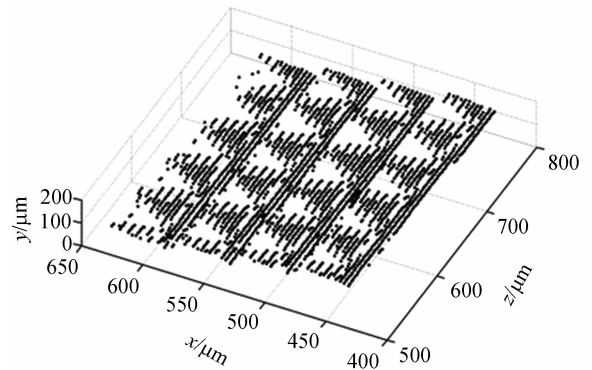
图 2 所示为微锥塔结构表面的 WLI 检测示意图。传统 WLI 检测是朝着微结构表面的法向检测,但微结构斜面的入射角 α 不为 0(图 2a),所以检测光反射后会丢失,无法获得微结构光滑斜面的完整数据(图 1c)。

部的光线不被相邻微锥塔尖端遮挡,选取 β 为 30° ,因理论微锥塔顶角为 60° ,所以每次检测的微斜面入射角 α 为 30° 。



(a)有效点确定

(a) Definition of valid points



(b)提取出有效点的锥面图

(b) Extracted surface extracted

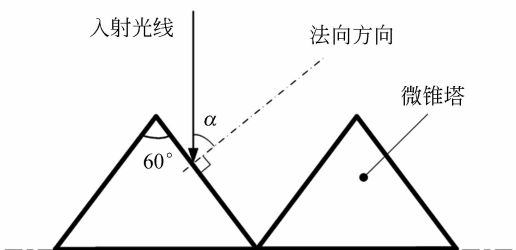
图 3 有效数据点云的提取

Fig. 3 Extraction of valid point clouds

3 自适应方向检测数据拼接

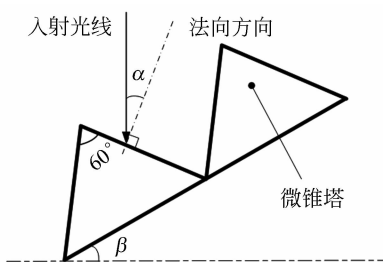
图 3 为一个微斜面近法向的检测点云。可以发现,沿着微斜面的近法向检测可以获得较完整的数据,但相邻的微斜面数据基本丢失(图 3a)。为了消除微斜面周边存在的噪音,先拟合边界点阵中心线(红色)(彩图见文章电子版),然后确定阈值 d ,偏离中心线距离 $d/2$ 的点阵 $n_1(x_{n1}, z_{n1}, y_{n1})$ 为微斜面的有效数据(图 3b)。

在检测过程中,两锥面为刚性联系。因此,先以未加工的参考表面(图 1b)为基准面,把 4 个方向检测的提取点云旋转平移到该基准面的坐标系中,然后将 4 个有效的检测点云面重构成一个微锥塔结构。



(a)传统检测

(a) Traditional measurement



(b)自适应方向检测

(b) Adaptive-orientation measurement

图 2 检测方法

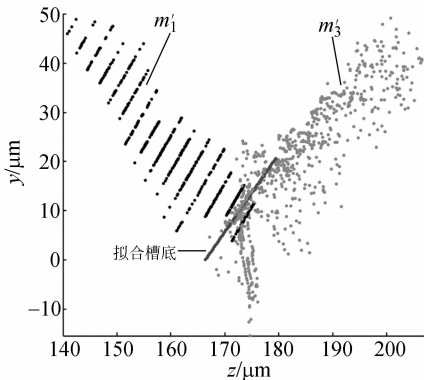
Fig. 2 Measurement methods

因此,本文提出针对 4 个微倾斜面在水平面上旋转微锥塔结构 Si 表面,使其与水平面形成 β 角度,可以使入射角 α 减小。考虑微锥塔结构底

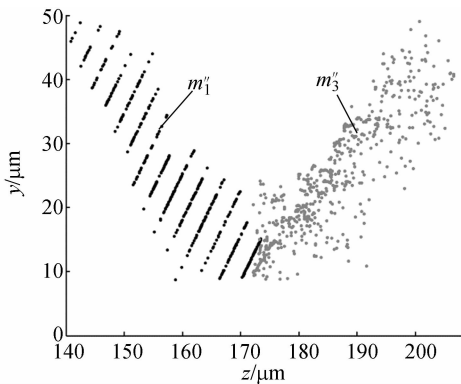
4 微结构边界识别

4.1 微锥塔阵列结构的槽底识别

图4所示为重构的两微锥面底部点云相交图。可以看到,检测的两微锥面由于噪声点存在不规则交界。为了识别微锥塔结构底部,即两微锥面点云相交位置,先将各锥面点云旋转和平移与基准面对准,然后逼近两数据点云 m_1' 和 m_3' 的相近点,拟合出槽底(图4a)。



(a) V 沟槽底部的直线拟合
(a) Linear fitting of V-groove bottom



(b) V 沟槽底部识别完成
(b) Identification of V-groove bottom

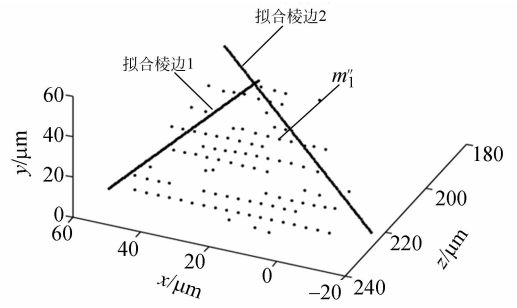
图4 微锥塔结构底部的交叉图

Fig. 4 Interferences of micro-groove bottom

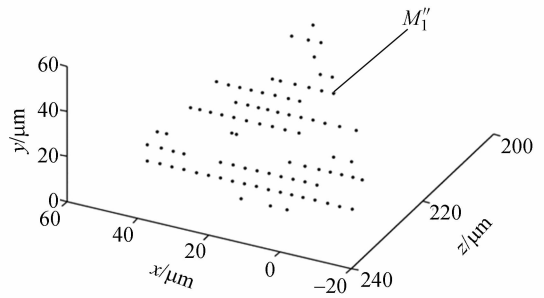
去噪音后,再利用“全最小二乘法则下的拟合算法”^[14]将槽底拟合成一条直线(图4b)。可以看到,该方法可以识别两空间点云的交叉边界。

4.2 微锥塔阵列结构棱边识别与补全

图5所示为微锥塔的微斜面棱边去噪图。用以上拟合空间直线的方法进行其棱边拟合。先将底部识别的点云和拟合的棱边投影到X-Z方向



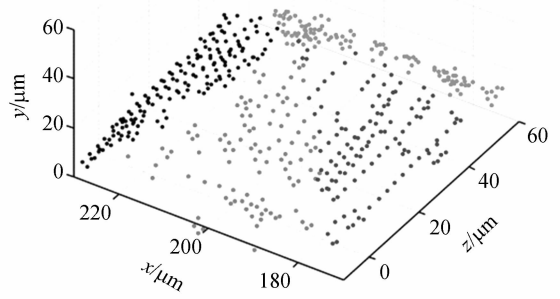
(a) 棱边拟合
(a) Edge linear fitting



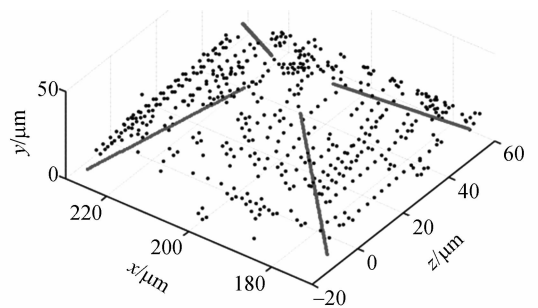
(b) 棱边去噪
(b) Edge denoising

图5 棱边去噪过程

Fig. 5 Edge denoising process.



(a) 微锥塔合成图
(a) Micro-pyramid-structured surface composite



(b) 添加拟合棱边后的微锥塔
(b) Micro-pyramid-structured surface with added linear edges

图6 微结构棱边识别

Fig. 6 Identification of micro-structured edge

上(图 5a),然后去除拟合的棱边范围外的噪音(图 5b)。

图 6 为去噪后的 4 个微锥面重构的微锥塔形貌。由于在检测过程中,每个锥面棱边数据会部分缺失(图 6a),因此需要再通过拟合方法识别棱边,线性插值出棱边上数据点,使得锥塔结构更加完整(图 6b)。

5 结果与讨论

5.1 微锥塔阵列结构表面的重构

图 7 所示为通过加工表面自适应方向检测后重组的微锥塔结构形貌图。可以看见利用以上方法对各锥塔进行旋转、去噪以及添加棱边处理,且经过线性插值后可得到完整的微结构形貌图。这与图 1(b)所示的微锥塔形貌加工表面的扫描电镜图基本一致。但是,图 1(c)所示的传统 WLI 检测方法却无法完全展现微结构表面加工的完整形貌。因此,自适应 WLI 检测方法可以获取微结构表面的微斜面的有效数据点,重构出微米尺度加工的光滑结构形貌特征。

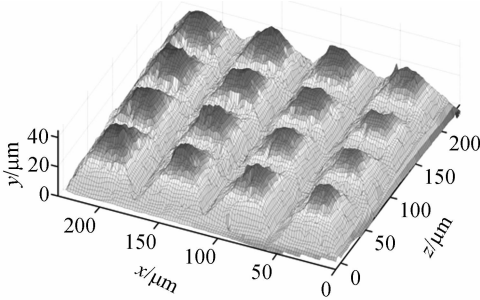


图 7 检测的微锥塔结构表面

Fig. 7 Measured micro-pyramid-structured surface

5.2 微锥塔结构加工的面形误差

图 8 为微锥塔阵列结构表面的微加工形状误差

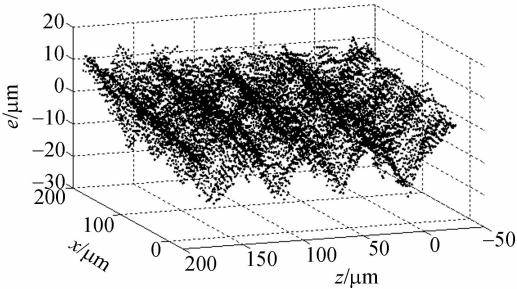


图 8 微磨削形状误差分布

Fig. 8 Distribution of micro-ground form errors

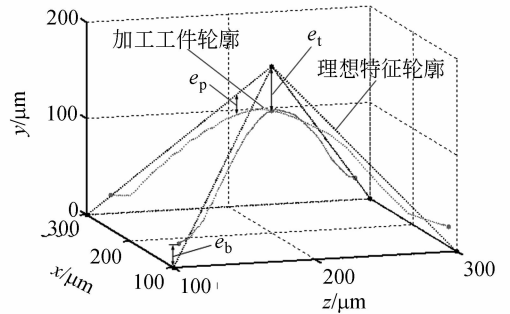
差分布图。形状误差 e 是重构与理想的微锥塔结构表面点云匹配后的 Y 轴方向差值^[13]。面形误差 e^* 为形状误差 e 的平均绝对值。可以计算出微加工的面形误差 e 为 $5.3 \mu\text{m}$ 。

因此,自适应方向检测模式可以重构出光滑微结构表面加工的精确形貌。

可以发现,形状误差 e 的较大绝对值主要分布在微锥塔底部及尖端部的周围,这是因为加工中金刚石砂轮的微尖端易磨钝,导致微槽底部无法成型;砂轮尖端上的微金刚石磨粒易钝化,导致脆性顶角易破碎。因此,微结构加工精度取决于金刚石砂轮 V 形尖端的修锐修整。

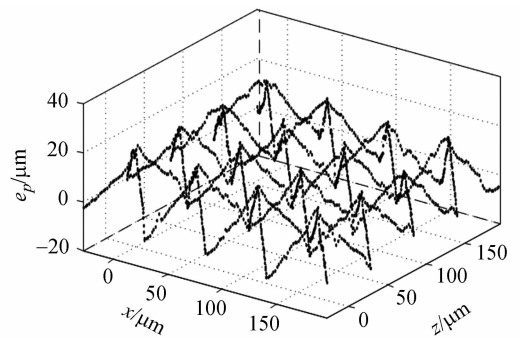
5.3 轮廓误差和特征点误差

图 9 所示为微锥塔结构表面的特征轮廓误差。特征轮廓误差 e_p 为微锥塔的 4 条棱边所构成的微锥塔轮廓与理想轮廓间的差。同样,特征点误差,即微锥塔顶点误差 e_t 和低点误差 e_b ,分别为微锥塔顶点和低点与理想值的差(图 9a)。



(a) e_p, e_t 和 e_b 的示意图

(a) e_p, e_t 和 e_b



(b) 微锥塔结构表面的特征轮廓误差分布图

(b) Characterized profile error distribution

图 9 微锥塔阵列结构的特征轮廓误差

Fig. 9 Characterized profile errors of micro-pyramid-structured surface

计算可知,平均的特征轮廓误差 e_p^* 、特征顶点误差 e_t^* 和特征低点误差 e_b^* 分别为 7.7, 15.9 和 14.6 μm 。这表明,轮廓误差大于面形误差,而特征点误差约为面形误差的 3 倍。

因为微结构表面特征轮廓和特征点的误差决定了表面功能特性,而刻蚀加工和激光加工很难控制微结构的形状精度,所以研究经常显示微结构表面的不同功能特性。未来,微结构表面加工技术研究将集中在如何控制微结构的特征轮廓和特征点的精度。

6 结 论

微结构斜面的自适应方向 WLI 检测及其去

噪和重构模式能获得到微结构结构面及边角数据,解决了 100 μm 以下的光滑结构面检测数据丢失问题;高度为 50 μm 、间距为 56 μm 的微锥塔结构 Si 表面加工的面形误差为 5.3 μm 。这表明,微磨削技术可以实现硬脆性 Si 表面的微细精密加工。构建了微锥塔结构表面的特征轮廓误差及特征点误差的评价模式,结果显示:特征化轮廓误差为 7.7 μm ,但特征顶点和低点误差为 15 μm 左右,远大于面形误差。分析表明:特征顶点和特征低点的误差是由微金刚石砂轮 V 形尖端磨钝及其微磨粒钝化造成的,因此,微砂轮尖端修锐修整是控制微结构加工精度的关键。本文的方法对结构光滑表面的自适应方面检测与微加工精度评价提出了有益的参考。

参考文献:

- [1] SHASTRY A, TAYLOR D, BOHRINGE K F. *Micro-Structured Surface Ratchets for Droplet Transport* [R]. Lyon: 14th Int. Conf. on Solid-State Sensors, 2007.
- [2] WU D, WANG K, LUO X B, *et al.*. *Enhancement of light extraction of multi-chips light-emitting diode (LED) modules with various micro-structure arrays* [R]. Xi'an: 11th Int. Conf. on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2010.
- [3] 黄昆涛,房丰洲,宫虎. 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, GONG 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] 徐慧,张金龙,刘京南,等. 零件轮廓表面检测与三维重构技术的研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2011, 11(2): 465-469.
- XU H, ZHANG J L, LIU J N, *et al.*. Research on the part surface measurement and 3D reconstruction [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and technology edition)*, 2011, 11(2): 465-469. (in Chinese)
- [5] 杨薇,赵娟,周学威,等. 基于线激光扫描的三维重构系统设计[J]. 光电技术应用, 2011, 26(5): 5-7.
- YANG W, ZHAO J, ZHOU X W, *et al.*. 3D reconstruction system design based on line laser scanning [J]. *Electro-optic technology application*, 2011, 26(5): 5-7. (in Chinese)
- [6] 贺俊,陈磊. 使用红外干涉仪测量非球面面形[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 69-74.
- HE J, CHEN L. Measurement of aspheric surfaces by infrared interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 69-74. (in Chinese)
- [7] 常素萍,谢铁邦. 基于白光干涉的 MEMS 三维表面形貌测量[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(9): 8-11.
- CHANG S P, XIE T B. MEMS profile measurement by white-light interferometry [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature science edition)*, 2007, 35(9): 8-11. (in Chinese)
- [8] YU D P, ZHONG X, WONG Y S, *et al.*. An automatic form error evaluation method for characterizing micro-structured surfaces [J]. *Measurement-science & Technology*, 2011, 22(1): 296-305.
- [9] ZHU Z D. 3D-measurement of micro structure of surface and the application in manufacture [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2010, 6(1): 61-65.
- [10] SHINSUKE N, YASUHIRO T, TATSURO E. Evaluation of cell adhesion characteristics on the porous silicon substrates with various surface structures [J]. *Electrochemistry*, 2008, 76(8): 559-562.
- [11] HAYDAR A, STEIN S. Evaluation of a physical

- length scale for granular materials [J]. *Computational materials science*, 2008, 42(3):525-530.
- [12] MOEPOULOU A, DELEGOU E T, VLAKAKIS V. Digital processing of SEM images for the assessment of evaluation indexes of cleaning interventions on pentelic marble surfaces [J]. *Materials characterization*, 2007, 58 (11-12): 1063-1069.
- [13] XIE J, ZHUO Y W, TAN T W. Experimental study on fabrication and evaluation of micro pyramid-structured silicon surface using a V-tip of diamond grinding wheel [J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(1):173-182.
- [14] 曹慧荣, 王福昌. 全最小二乘和全加权最小一乘准则下的空间直线拟合[J]. *计算机应用与软件*, 2010, 27(9):111-127.
- CAO H R, WANG F CH. Space fitting line with criteria of total least square and total weighted least absolute deviation [J]. *Computer applications and software*, 2010, 27 (9): 111-127. (in Chinese)

作者简介:



谢 晋(1963—),男,山西榆次人,博士,教授,1989年于武汉工业大学获得硕士学位,2002年于日本北见工业大学获得博士学位,主要从事微细精密机械加工研究。E-mail: jinxie@scut.edu.cn



刘旭冉(1988—),女,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,2011年于华南理工大学获得学士学位,主要从事机械制造及其自动化方面的研究。E-mail: xuranl@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)