

doi:10.3788/gzxb20174611.1112001

基于光切法的曲面划痕深度测量技术

李慧鹏, 吕亚宁, 孙业飞, 唐若祥, 刘缤艳

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要:提出了一种基于光切法的曲面划痕测量方法, 相对传统光切法, 能有效地提高划痕测量的精度. 对传统光切法测量存在的不足进行分析, 对曲面上划痕的测量误差进行分析建模及仿真. 结果表明, 传统光切法对曲面上划痕的测量误差会随着曲率半径和划痕宽度的变化而变化. 实验选取不同曲率半径的精密零部件, 对其表面的划痕进行测量. 发现当曲率半径越小, 划痕宽度越大, 传统光切法对划痕深度测量的误差越大, 而用本文所提方法测量的结果精度越高, 当曲率半径小于 10 mm, 划痕宽度大于 283 μm 时, 利用该方法能减小超过 1 μm 的测量误差.

关键词:光切法; 划痕; 曲面; 测量误差; 建模仿真

中图分类号:TH741; TP391

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)11-1112001-7

Depth Measurement of Scratches on the Curved Surface Based on Light-sectioning Method

LI Hui-peng, LÜ Ya-ning, SUN Ye-fei, TANG Ruo-xiang, LIU Bin-yan

(Department of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A method for depth measurement of scratches on the curved surface using light-sectioning method is presented, which can improve the accuracy of scratches measurement compared with traditional light-sectioning method. The shortcomings of the traditional light-sectioning method were analyzed and the error of the scratches measurement on the curved surface was modeled and simulated. The results of the analysis and the simulation show that the error of the scratches on the curved surface varies with the radius of curvature and the width of the scratches using traditional light-sectioning method. The precision parts with different radius were selected in the experiment and the scratches on the curved surface were measured. Comparing with the large error of the conventional light-sectioning method, the accuracy of the results measured by this new method is higher when the radius of curvature is smaller and the width of the scratch is larger. The error of measurement less than 1mm can be reduced by this new method when the radius of curvature is less than 10 mm and the scratch width is greater than 283 mm. This method can be applied to the depth measurement of scratches on the curved surface of the precision instrument.

Key words: Light-sectioning method; Scratch; Curved surface; Measurement error; Modeling and simulation

OCIS Codes: 120.0120; 230.0230; 110.2960

0 引言

航天精密零部件表面因加工而产生的划痕, 直接关系到精密零部件能否正常使用, 如不严格检测, 使用

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项(No.2013YQ040877)资助

第一作者: 李慧鹏(1975—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为传感器技术、光电测试技术. Email: lihuipeg@buaa.edu.cn

通讯作者: 吕亚宁(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密检测及图像处理. Email: lvyanning@buaa.edu.cn

收稿日期: 2017-05-19; 录用日期: 2017-08-14

<http://www.photon.ac.cn>

时就会因电流电压等问题引起短路、失效,因此划痕检测对整个系统的可靠性具有十分重要的意义.无损检测被广泛应用在航空航天、化工船舶等领域,常用的无损检测方法有激光三角法^[1]、白光干涉法^[2]、光栅投影法^[3]和光切法^[4].激光三角法受被测量面特性影响较大,不适用于有倾角的被测件;白光干涉法所用仪器结构复杂且对环境要求较高;光栅投影法计算量较大,受物体阴影空洞的影响明显;光切法所用仪器虽测量范围小,但具有小型化、可便携、测量精度高且实时性强的优点,适用于航天精密零部件表面小范围的现场划痕检测.采用光切法和相机获取图像相结合的划痕检测方法,过程更加自动化,可获得更高的测量精度.2003年,重庆大学居琰、汪同庆在用光切法测量脚型轮廓的研究中,对中轴跟踪算法进行了改进,高效提取了光带中轴^[5].2007年中南大学罗三定、张中良提出一种自动分布阈值图像多目标分割算法,能快速地分割图像中明暗不同的目标^[6].2010年,哈尔滨工业大学的刘颖、唐文彦等人提出了采用旋滤波法对图像进行预处理的方法^[7],得到了较好的去噪效果.

而光切法对于曲面上划痕深度的测量还没有进行探究.本文利用光切法对划痕进行测量,对曲面结构和测量中存在的不足进行分析,对测量误差进行分析建模及仿真.实验证明,基于光切法的曲面划痕测量技术提高了划痕的测量精度,不仅可应用于工业检测领域,而且在航空航天领域具有重要的实用价值.

1 光切法测量原理

光切法测量划痕深度的基本光路及其工作原理如图1.图1中,光源 S_0 置于聚光镜 O_0 的焦点上,由 S_0 发出的光,经 O_0 后得到一束平行光,平行光经过狭缝光阑 S ,形成一束扁平的平行光束.此光束经投射物镜 O_1 的汇聚,以 45° 方向投射到零件被测表面上形成一条绿色的光切面,该光切面边缘的形状即为被测工件在 45° 截面的轮廓^[8].图1示意出零件被测表面上具有微小的峰和谷.图1B是图1A的AA剖视图.在剖视图中,波峰在 S'_1 点产生反射,波谷在 S'_2 产生反射(其中 S'_1 点正好是 O_1 和 O_2 的共同焦点),则反射光通过观察物镜 O_2 后,各自成像在分划板上, S'_1 的影像是 S''_1 , S'_2 的影像是 S''_2 ,即在分划板上得到了光切面的放大影像.若 S''_1 至 S''_2 之间的距离为 N ,观察光路系统的放大倍数为 V ,则 S'_1 和 S'_2 两点之间的距离为 N/V ^[9].而 $S'_1S'_2$ 即 N 与波峰、波谷之间的高度 $H_{划}$ 的关系为

$$H_{划} = f_1(N, V) = \frac{N}{V} \cos 45^\circ = \frac{N}{\sqrt{2} \cdot V} \quad (1)$$

式中, V 为观察光路系统的放大倍数; $\sqrt{2}$ 为工作原理的放大倍数.

根据成像大小,选用 $V=7$ 倍的显微镜物镜,所以当被测表面的微观高度为 $H_{划}$ 时,划痕深度将放大10倍呈现在CCD相机上^[10].

2 误差建模仿真

基于光切法测量平面上的划痕已经具有很高的精度,但对于在曲面划痕的测量存在误差,因此需要对曲面上划痕的测量误差进行分析建模及仿真,提高测量结果的精度.

对于曲面上的划痕,可以分为两个方向:平行于径向和垂直于径向方向,如图2.由于划痕的观测方向是顺划痕方向进行的,所以对于平行于径向方向的划痕,呈现的图像基准面仍然是一条直的狭缝,没有弧度,等同于传统光切法测量平面上的划痕,而对于垂直于径向方向的划痕,呈现的图像基准面是一条带弧度的狭缝光带,具有测量误差,因此,本文主要针对曲面上垂直于径向方向的划痕进行误差的建模仿真和实验验证.

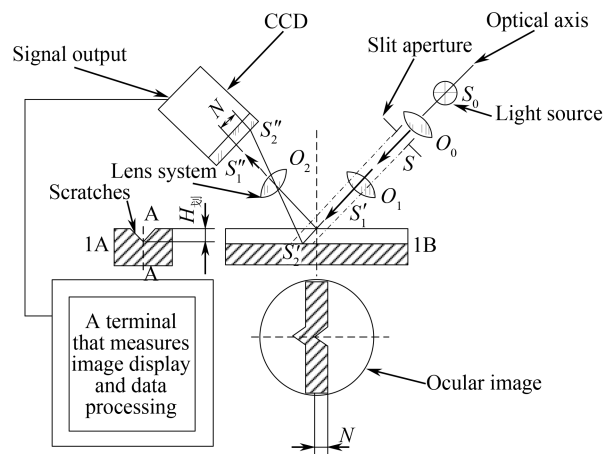


图1 光切法测划痕深度原理

Fig.1 Principle diagram of measuring the scratch depth by light-sectioning method

对于曲面上划痕的深度,包括两部分,一部分是从划痕的两个边缘点 AB 的连线到划痕底部的距离,等同于传统光切法测量的划痕深度 $H_{\text{划}}$,另一部分是划痕所对应的圆弧的最高点到划痕边缘点 AB 的距离,即测量误差 Δh ,如图 3 所示。

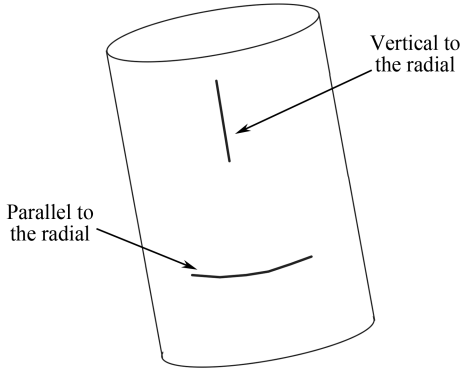


图 2 划痕方向

Fig.2 Direction of the scratch

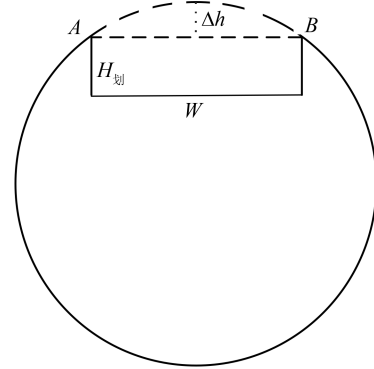


图 3 划痕实物

Fig.3 Physical drawing of scratch

由图 4 可知,测量误差 Δh 的大小与圆弧的半径 R 、圆弧所对应的直线到圆弧圆心的距离 H 有关,即

$$\Delta h = f_2(R, H) \quad (2)$$

H 可由划痕的宽度 W 和圆弧半径 R 求出,即

$$H = g(R, W) = \sqrt{R^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2} \quad (3)$$

将两式合并得

$$\Delta h = f_2[R, g(R, W)] = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2} \quad (4)$$

实际测量过程中, $R \gg W$.

划痕总深度为

$$H_{\text{总}} = H_{\text{划}} + \Delta h = f_1(N, V) + f_2[R, g(R, W)] = H_{\text{划}} + R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2} \quad (5)$$

即:

$$H_{\text{总}} = \frac{N}{\sqrt{2} \cdot V} + R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2} \quad (6)$$

根据式(4),测量误差的三维仿真图如图 5.由图 5 可知,测量误差与圆弧半径成反比,与划痕的宽度成正比;当圆弧的半径很小且划痕的宽度较大时,测量误差较大,而当圆弧的半径较大且划痕宽度较小时,测量误差较小。

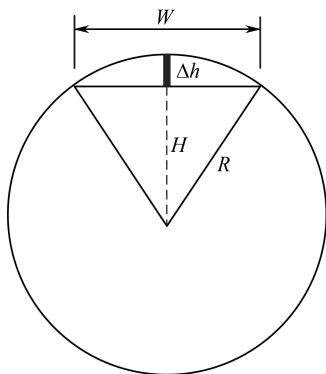


图 4 误差计算

Fig.4 Calculation of error

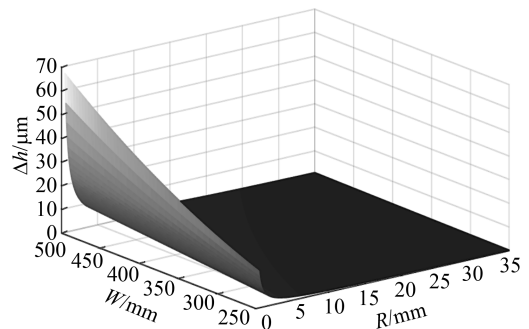


图 5 误差的三维图

Fig.5 3D diagram of error

图 6 为划痕宽度和圆弧半径变化时,测量误差 Δh 的取值图,由二维图可以看出当圆弧半径越小,划痕

宽度越大,划痕的测量误差越大.同时也证明存在测量误差,且当圆弧半径越小,划痕宽度越大时测量误差是越不能被忽略的.在不同检测场合中,对允许误差的范围要求不一样.可根据圆弧半径或者划痕的宽度求得测量误差,做出判断.如:对于半径为 50 mm 的精密零部件表面上的划痕,当划痕宽度小于 200 μm 时,划痕的测量误差小于 0.1 μm ,测量误差可忽略不计,此时可等同于光切法测量平面上的划痕深度.

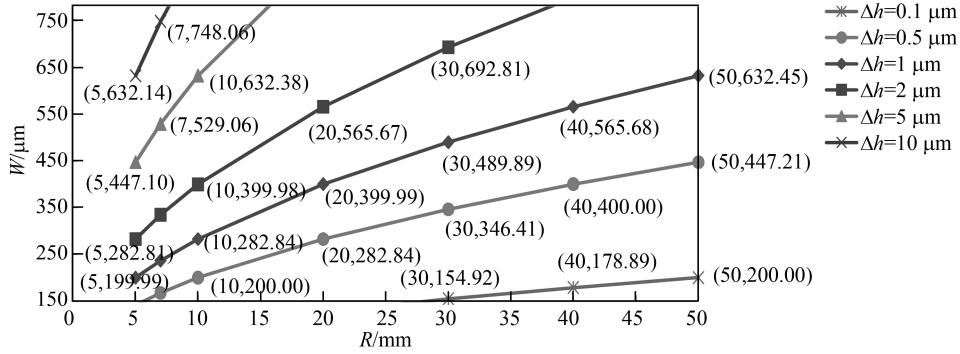


图 6 R, W 变化时 Δh 的取值
Fig.6 The curve graph of Δh when R and W is changed

3 建模验证及测量结果

当被测划痕位于视野的中间位置且图像清晰完整时为最理想的测量状态.对于同一被测件,当狭缝光带的中心位于曲面的最高点附近时,所成图像上下对称,宽度一致且亮度最大,最适合测量计算;当狭缝光带的中心偏离曲面的最高点越远,所成图像越倾斜,宽度越不等且亮度向一侧逐渐变暗.图 7(a)~(c)是半径为 17 mm 的曲面零部件表面,光带从曲面最高点向一侧移动时依次形成的图像.

由测量原理可知,划痕所在曲面的半径越大,即基准面形成的狭缝光带越直,划痕的测量误差越小;反之,测量误差越大.图 7(a)(d)(e)分别表示半径为 17 mm、4.1 mm 和 11.4 mm 的曲面零部件表面所呈现的图像.

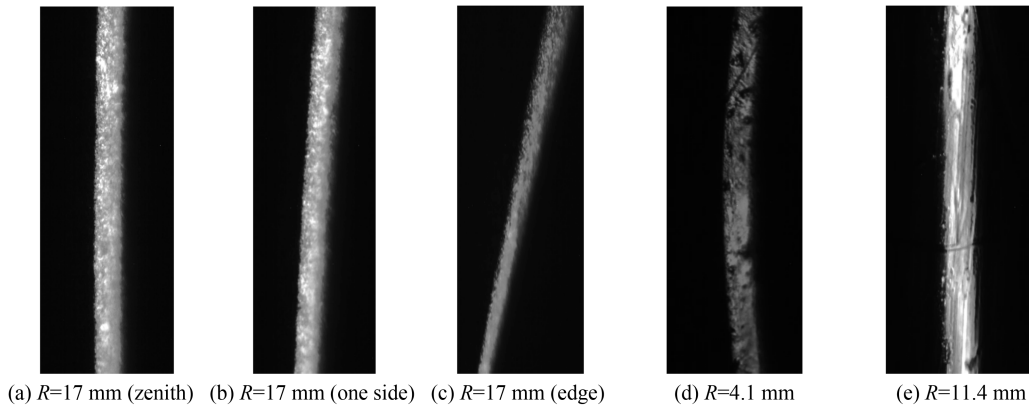


图 7 不同半径的曲面零部件表面所呈现的图像
Fig.7 The diagram of the surface of precision instrument with different radius

为了计算曲面划痕的测量误差,选用不同半径的曲面被测件,测量划痕深度和宽度.共选取九组不同的情况,每组重复十次,将其平均测量值作为最终的测量结果,由此计算其测量误差;由于测量结果是由实验测量得到的观测数据,所以根据文献[11]中的计量标准计算 A 类测量不确定度 u .

$$u = \frac{s(y_i)}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N \cdot (N - 1)}} \quad (7)$$

式中: N 为测量次数, $N=10$; $s(y_i)$ 为试验标准差,由贝塞尔公式计算得出.

视场中的图像包含基准面形成的狭缝光带和划痕形成的狭缝凹槽.因光带成像原因,狭缝光带两边边缘只有一边是清晰的^[12],所以在划痕深度测量时,以清晰一边作为测量标准^[13];对 RGB 图像进行平滑滤波、

Laplacian 算子边缘检测及迭代法二值处理,将其变为二值图像,之后进行划痕深度和宽度的检测。

测量图像如图 8 所示,由于光的反射,基准面两端的亮度较大且形成的分界线明显,划痕形成的凹槽两端的亮度较低,所以,划痕形成的凹槽和基准面光带就会形成明显的分界区域,在进行划痕宽度 W 测量时,横向扫描每一排非背景点,找到基准面上的分界区域,取基准面分界区域的中心位置为划痕宽度的一边端点,两个基准面分界区域的端点之间的宽度即为划痕的宽度。

在进行划痕深度 $H_{划}$ 的测量时,首先选取划痕边缘的两个小区域基准面,对两区域内边缘线进行小范围的 Hough 直线拟合^[14-15];对于划痕处的曲线,可用一元二次函数 $y = a_2x^2 + a_1x + a_0$ 表示,利用多项式拟合原理求解出划痕曲线方程^[16-17],之后

从对称轴 $x = -\frac{a_1}{2a_2}$ 处向两侧交替扫描上下 N 行边缘点,当某点处的纵坐标大于等于周围点坐标,且与周围两点的线段斜率小于一定范围时,取该点的坐标作为划痕最低点处的坐标。

通过点到直线的距离公式求出划痕深度 $H_{划}$,测量结果如表 1 所示。

表 1 不同半径、不同划痕宽度的划痕测量结果

Table 1 Measuring result of scratches with different radius and different width of scratches

No.	Radius R/mm	Depth of scratch $H_{划}/\mu\text{m}$	Width of scratch $W/\mu\text{m}$	Measured error $\Delta h/\mu\text{m}$	Uncertainty of measurement
X1	2.10	60.27	328.70	6.44	0.348
X2	4.10	32.33	357.40	3.89	0.131
X3	8.70	14.91	358.10	1.84	0.112
X4	11.40	14.64	358.60	1.41	0.119
X5	17.00	16.64	361.90	0.96	0.175
X6	25.10	5.72	298.40	0.44	0.115
X7	25.10	27.17	319.40	0.51	0.122
X8	25.10	191.44	477.80	1.14	0.283
X9	30.10	5.79	300.10	0.37	0.084

由 X3 和 X4 组可以看出,当划痕的宽度一定时,圆弧半径越大,测量误差越小;由图 9 中的 X6、X7 和 X8 组可以看出,当半径一定时,划痕的宽度越大,测量误差越大。

为了验证上述理论测量误差,选取同一圆弧半径 R 的曲面上无划痕位置,在圆弧线上截取与划痕宽度 W 等长的直线段,如图 10(1)所示,测量直线段到其所对应的圆弧最高点的距离,此为实际测量出的测量误差 $\Delta h_{实}$ 。本文选取 $R = 4.10 \text{ mm}$ 、 8.70 mm 和 11.40 mm ,测量其实际测出的误差, $\Delta h_{实}$ 分别为 $3.98 \mu\text{m}$ 、 $1.96 \mu\text{m}$ 和 $1.51 \mu\text{m}$,与理论的测量误差 $3.89 \mu\text{m}$ 、 $1.84 \mu\text{m}$ 、 $1.41 \mu\text{m}$ 大致相同。

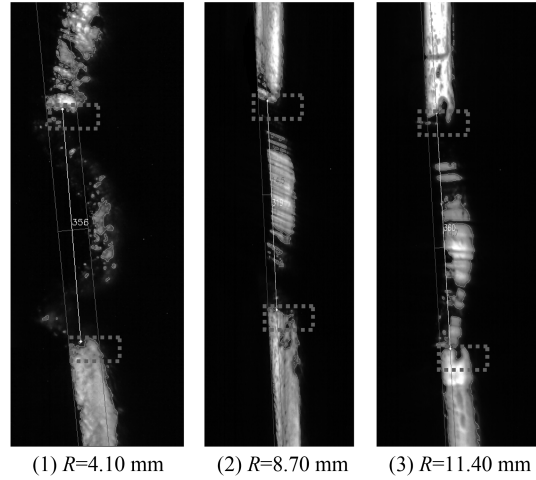


图 8 不同半径的曲面元器件划痕测量图像

Fig.8 The scratch diagram of the precision instruments with different radius

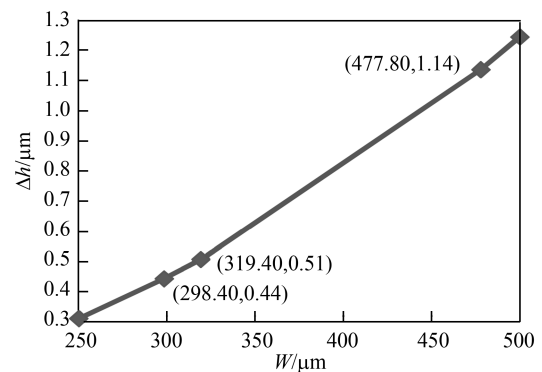


图 9 $R = 25.1 \text{ mm}$ 时划痕宽度与测量误差的关系

Fig.9 The relation between width of scratch and error when $R = 25.1 \text{ mm}$

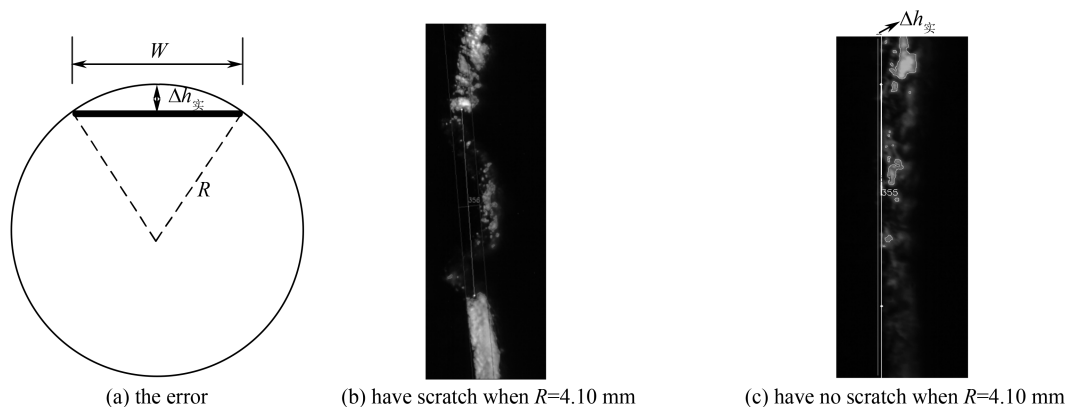


图 10 实际测出的测量误差
Fig.10 Actual measured error

4 结论

本文提出的基于光切法的曲面划痕测量方法,是在利用光切法对划痕进行测量的基础上,针对曲面结构和测量存在的不足进行分析,对测量的误差进行了分析建模及仿真.通过实验证明了,测量误差会对测量结果的精度产生影响,传统的光切法测量曲面划痕时,存在测量误差,使得测量的精度降低;当划痕的宽度越大或者圆弧的曲率半径越小,测量误差越大.当半径大于 50 mm,划痕宽度不大于 $200\ \mu\text{m}$ 时,测量误差低于 $0.1\ \mu\text{m}$,与光切法测量平面划痕的结果大致相同;但当半径小于 10 mm,划痕宽度大于 $283\ \mu\text{m}$ 时,测量误差会大于 $1\ \mu\text{m}$,根据划痕宽度和圆弧半径对测量结果进行了误差补偿,进而使曲面测量的精度得到了提高.对于绝大多数尺寸的精密零部件及仪器,其曲面上的划痕可用该误差补偿的光切法进行测量,且测量不确定度小.该技术可以运用在航天工业中针对精密零部件及仪器曲面划痕的检测上,并且具有广泛的应用前景.

参考文献

- [1] WANG Xiao-jia, GAO Jun, WANG Lei. Survey on the laser triangulation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, **25**(4): 601-608.
王晓嘉,高隽,王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004, **25**(4): 601-608.
- [2] LIU Qiu-zhu, LIU Yi, NIU Kang-kang, et al. Reconstruction of the 3D surface profile of micro device based on white-light interference measurement technology[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2009, **23**(3): 201-204.
刘秋柱,刘毅,牛康康,等. 基于白光干涉测量技术的微器件三维形貌重构[J]. 测试技术学报, 2009, **23**(3): 201-204.
- [3] MEYERH U. An integrated capacitive position sensor[J]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions*, 2001, **45**(2): 521-525.
- [4] 黄柳. 易拉盖划痕现场检测的机器视觉系统研究[D]. 中国计量学院, 2012: 15-18.
- [5] JU Yan, WANG Tong-qing, LUO Xiao-hui, et al. Image acquisition and processing of 3-D profile measurement using light-sectioning method[J]. *Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics*, 2003, **15**(1): 43-47.
居琰,汪同庆,罗晓辉,等. 三维轮廓光切法测量的图像获取及处理[J]. 计算机辅助设计与图像学学报, 2003, **15**(1): 43-47.
- [6] LUO San-ding, ZHANG Zhong-liang. A fast multi-target image segmentation algorithm based on distributed thresholding image[J]. *Computing Technology and Automation*, 2008, **27**(2): 77-80.
罗三定,张中良. 自动分布阈值图像多目标分割算法[J]. 计算术与自动化, 2008, **27**(2): 77-80.
- [7] LIU Ying, TANG Wen-yan, DUAN Hai-feng. Preprocessing method for surface roughness image based on spin filtering [J]. *Optoelectronic Technology*, 2010, **30**(2): 107-110.
刘颖,唐文彦,段海峰. 基于旋滤波的表面粗糙度图像预处理方法[J]. 光电子技术, 2010, **30**(2): 107-110.
- [8] HAN Fang-fang, DUAN Fa-jie, ZHANG Bao-feng, et al. Study and modeling for surface pit defect detection based on linear array DDC system[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, **44**(4): 116-120.
韩芳芳,段发阶,张宝峰,等. 单线阵 CCD 系统的表面凹坑缺陷检测方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, **44**(4): 116-120.
- [9] JIN Shou-feng, CHEN Rong, FAN Di, et al. Optical cutting microvision measurement system for machining surface roughness[J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, **30**(3): 347-353.
金守峰,陈蓉,范荻,等. 面向机加工表面粗糙度的光切显微视觉测量系统[J]. 西安工程大学学报, 2016, **30**(3): 347-353.
- [10] LI Bo, HUANG Zhen-chang, QUAN Yan-ming. Surface roughness measurement system based on light section image processing[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, **30**(4): 184-187.

- 李博,黄镇昌,全燕鸣. 基于光切图像处理的表面粗糙度检测系统[J]. 电子测量技术,2007,**30**(4):184-187.
- [11] JJF1033-2008《计量标准考核规范》[M]. 中国计量出版社,2008.
- [12] 葛群. 基于光切法的激光毛化轧辊表面粗糙度检测系统的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011:10-13.
- [13] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,1999:58-62.
- [14] ZHANG F Y, CHEN R B, LI Yang, *et al.* Detection of broken manhole cover using improved Hough and image contrast[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2015, **31**(4): 553-558.
- [15] LIU Gui-xiong, SHEN Bo-hua, FENG Yun-qing, *et al.* Study of image segmentation based on improved Hough transform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **10**(3): 257-260.
刘桂雄,申柏华,冯云庆,等. 基于改进的 Hough 变换图像分割方法[J]. 光学精密工程,2006,**10**(3):257-260.
- [16] TANG Xiu-jian, LIU Qian, TIAN Xin-li, *et al.* Regulation and mechanism of edge chipping for Si₃N₄ ceramics worked by sliding loads[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(7): 2023-2030.
唐修检,刘谦,田欣利,等. 切向载荷作用下氮化硅陶瓷崩碎损伤规律与机理[J]. 光学精密工程,2015,**23**(7):2023-2030.
- [17] 苏育才. 矩阵理论[M]. 科学出版社,2006.