

文章编号 1004-924X(2013)02-0281-06

单光源双光路激光并行共焦测量系统设计

余 卿^{1*}, 余晓芬², 崔长彩¹

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 安徽 230009)

摘要:针对传统激光并行共焦测量过程中存在的泰伯效应, 提出将数字微镜器件(DMD)引入激光并行共焦测量系统来正确辨识正焦面的位置。采用了 DMD 作为光分束器件, 从理论上验证了它是一种投影式的阵列光源, 对激光分束后不会在光路方向上产生泰伯像; 同时, 考虑 DMD 不能对分束后的光线产生会聚作用, 并非高效的并行光源分束器件, 本文将 DMD 与微透镜阵列(MLA)结合构建了单光源双光路并行共焦测量系统。该系统利用 DMD 光路探测正焦面位置, 利用微透镜阵列光路进行精确的共焦测量。实验结果表明, 两种光路下的正焦面位置仅相差 $2\ \mu\text{m}$, 在一个泰伯间距范围之内, 可以较好地克服泰伯效应对激光并行共焦测量的影响, 进而保证较高精度的并行共焦测量。

关键词:数字微镜器件; 微透镜阵列; 泰伯效应; 激光并行共焦测量系统

中图分类号: TN247; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0281

Design of laser parallel confocal measurement system with single source and dual beam paths

YU Qing^{1*}, YU Xiao-fen², CUI Chang-cai¹

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: jorson.y@163.com

Abstract: To avoid the Talbot effect that is a multiple imaging in the traditional laser parallel confocal measurement, this paper introduces a Digital Micromirror Device(DMD) into the laser parallel confocal measurement to recognize the in-focus image. By taking the DMD as an optical splitting system, it is verified to be a flexible array source, and can not bring Talbot effect into the measurement system. However, the DMD is not an effectual splitting source as it can not converge the split ray effectively. Based on the characteristics of DMD, a laser parallel confocal measurement system with a single source and dual beam paths is constructed by combining a DMD and a Microlens Array(MLA). In this system, the position of in-focus image can be distinguished with the beam path of DMD and the high precision measurement can be completed with the beam path of MLA. The theoretical analysis and the experiment results indicate that the difference between the positions of in-focus images under two

收稿日期: 2012-09-11; 修订日期: 2012-10-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50775063); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-10-0116); 华侨大学高层次人才科研启动费资助项目(No. 12BS109)

kinds of optical detection paths is about $2 \mu\text{m}$. Moreover, the influence of Talbot effect on the laser parallel confocal measurement becomes weaker, and the parallel confocal measurement with high precision is achieved.

Key words: digital micromirror device; Microlens array; Talbot effect; laser parallel confocal measurement system

1 引言

随着现代科技的高速发展和制造技术的不断进步,微光学元件、微机械器件等各种微零件不断出现,这些微零件的表面形貌测量需要借助显微放大技术,要求有较高的横向分辨率和纵向分辨率。光学三维轮廓测量技术因具有无破坏性的显微观察能力,而在精密测试领域越来越受到重视^[1]。常见的光学微形貌测量技术有投影光栅法、光学探针法和干涉显微镜法等。共焦显微镜法是光学探针法中的一种,近十几年来,该技法随着激光技术的进步而发展迅速,目前广泛地应用于生物医药、材料学等领域^[2-3]。

提高测量精度和提高测量效率是激光共焦显微术的两大发展方向。在激光共焦测量技术中引入光分束器件可将单点测量变成并行测量,从而极大地提高测量速度,但同时也会将泰伯效应引入到测量之中。泰伯效应又称为自成成像效应,它会造成激光并行共焦测量系统的物方在光路方向上出现多个成像面^[4-9],其中真正可用于测量的成像面只有一个,称为正焦面,而其他泰伯像面会干扰正焦面的辨识。如何准确识别出正焦面的位置是进行激光并行共焦测量的关键,本文将从理论上分析了数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)对激光的调制作用,并基于 DMD 构建了单光源双光路激光并行共焦测量系统,利用 DMD 来确定正焦面的位置,再利用微透镜阵列(Microlens Array, MLA)进行精确的并行共焦测量。实验结果表明,两种光分束器件下的正焦面位置相差程度远小于一个泰伯间距,由此可知采用此测量系统可以对正焦面位置进行精确定位,从而获得较高的测量精度。

2 测量系统泰伯间距分析

所构建的激光并行共焦测量系统如图 1 所示。

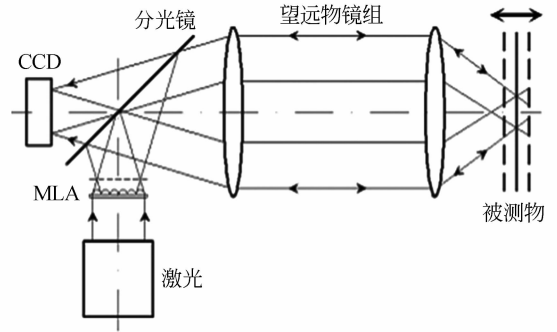


图 1 激光并行共焦系统结构示意图

Fig. 1 Laser parallel confocal measurement system

物方的泰伯间距可表述为 $Z'_T = 2(d\Gamma)^2/\lambda$, 其中 d 是 MLA 的周期, Γ 是望远物镜组的视觉放大率, λ 是激光波长。测量时,被测物面的反射光线由 CCD 感知,而在这个系统中,做轴向移动的部件是被测物面,考虑到“反射”因素,此时 CCD 探测到的泰伯间距应只有 Z'_T 的一半,所以最终系统的泰伯间距应该是 $Z''_T = (d\Gamma)^2/\lambda$ 。取微透镜阵列的周期 $d = 130 \mu\text{m}$, 望远物镜组的视觉放大率 $\Gamma = 1/20$ 以及激光的波长 $\lambda = 635 \text{ nm}$, 计算得到 $Z''_T = 66.54 \mu\text{m}$, 远小于系统预期的量程^[10]。

3 DMD 的空间光调制模型

DMD 是由一定像素的微镜阵列构成的(有多种规格: 800×600 , $1\ 024 \times 768$, $1\ 280 \times 1\ 024$ 等,单位是 pixel),每一个微镜的大小固定、彼此的间距也固定,且可以绕着各自的旋转轴做 $\pm 12^\circ$ 的偏转,即每个微镜都有 $+12^\circ$, 0° 和 -12° 3 种状态,其结构如图 2 所示。

由 DMD 的结构可知,它可以看成是一种周期性光分束器件,可建立它反射单色光时的光调制衍射模型^[11-13]。

本文将微镜阵列看成是具有一定占空比的二维衍射光栅,并以此为模型推导它在单色光照射

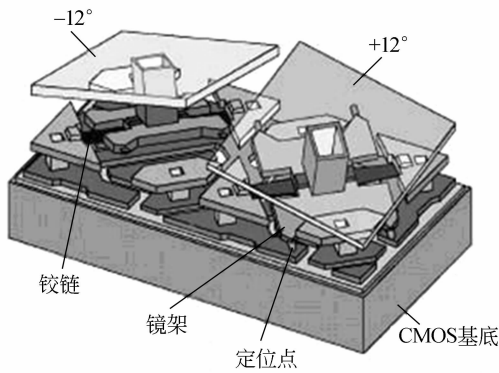


图 2 DMD 微镜的结构示意图

Fig. 2 Structure of DMD

下的空间衍射特性。在进行推导之前,首先定义几个和 DMD 相关的物理量: M, N 分别为 DMD 在 X 向、 Y 向的微镜数目; α, β 分别为 DMD 在 X 向、 Y 向的占空比; d 为相邻微镜中心之间的距离, X 向与 Y 向的值相等。

DMD 的理论模型 $t(x, y)$ 可表述为:

$$t(x, y) = t_x(x)t_y(y), \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} t_x(x) = [\text{rect}(\frac{x}{\alpha d}) * \frac{1}{d} \text{comb}(\frac{x}{d})] \text{rect}(\frac{x}{Md}) \\ t_y(y) = [\text{rect}(\frac{y}{\beta d}) * \frac{1}{d} \text{comb}(\frac{y}{d})] \text{rect}(\frac{y}{Nd}) \end{cases} \quad (1)$$

这时,让一个单位振幅的单色平面波照射在 DMD 上,那么根据菲涅耳衍射可知,在显示屏 $x_1 y_1$ 上的光波场可以表示为:

$$E(x_1, y_1) = \iint_{-\infty}^{\infty} t(x, y) \cdot \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda S}[(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2]\right\} dx dy, \quad (2)$$

式中: S 为 DMD 表面到显示屏的距离。如果再考虑入射光的角度 θ ,则需要引入空间频率 (μ, ν) ,用 θ_x 和 θ_y 表示空间频率,故有 $\mu = \frac{\sin \theta_x}{\lambda}$, $\nu = \frac{\sin \theta_y}{\lambda}$ 。

由此得到:

$$E(x_1, y_1) = \iint_{-\infty}^{\infty} t_x(x) \cdot t_y(y) \cdot \exp[i2\pi(\mu x + \nu y)] \cdot \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda S}[(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2]\right\} dx dy. \quad (3)$$

在此只考虑和积分因子 dx, dy 相关的量,可以得到:

$$E(x_1, y_1) = \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(x_1^2 + y_1^2)\right] \iint_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(x^2 + y^2)\right] \cdot t_x(x) \cdot t_y(y) \cdot \exp\left\{i2\pi\left[\left(\frac{\sin \theta_x}{\lambda} - \frac{x_1}{\lambda S}\right)x + \left(\frac{\sin \theta_y}{\lambda} - \frac{y_1}{\lambda S}\right)y\right]\right\} dx dy. \quad (4)$$

令 $\frac{\sin \theta_x}{\lambda} - \frac{x_1}{\lambda S} = f_x, \frac{\sin \theta_y}{\lambda} - \frac{y_1}{\lambda S} = f_y$, 并进行傅里叶变换可以得到:

$$E(x_1, y_1) = \alpha\beta M^2 d^2 \cdot \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(x_1^2 + y_1^2)\right] \cdot F\left\{\exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(x^2 + y^2)\right]\right\} \Big|_{f_x, f_y} * \sum_{m=-\infty}^{\infty} \{\sin c(\alpha m)\} \cdot \sin c\left[Md\left(f_x - \frac{m}{d}\right)\right] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \{\sin c(\beta n)\} \sin c\left[Nd\left(f_y - \frac{n}{d}\right)\right]. \quad (5)$$

从式(5)中不难发现,当 $m=0, n=0$ 时,光波场出现零级衍射图像,此时的光强最大;当 $\alpha=1, \beta=1$ 时,调制后光波场的周期性消失,从宏观上看,此时 DMD 微镜之间的间隙消失了, DMD 平面可以看作是一个完整的平面镜。但是实际上,相邻微镜之间肯定是存在间隙的,即 $0 < \alpha, \beta < 1$ 始终成立,所以调制后的光波场始终是一个二维周期性衍射场。

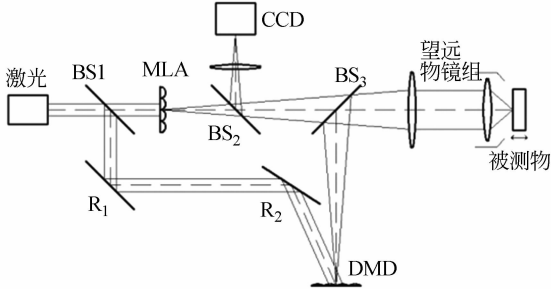
由此可知,相干光经过 DMD 调制后所形成的光波场是一个包含了 DMD 自身的衍射图案, DMD 所显示图像的实像和虚像的复杂二维周期性光波场^[14]。

当 DMD 应用于并行共焦测量时,所利用的是它所显示图像的实像,即它在空间的投影像。这个投影像具有唯一性,对应着并行共焦测量中的正焦像,因此,基于 DMD 的激光并行共焦测量不会产生泰伯效应。

虽然 DMD 可以对光线进行分束,但是并不会对分束后的光线产生会聚作用,而共焦测量的分辨率又与聚焦后的光点大小有重要的关系;所以为了提高并行共焦测量的分辨率,对入射光线有分束作用,对分束后的细光束有会聚作用的微透镜阵列是最好的选择。为了克服使用微透镜阵列后出现的泰伯效应,本文构建了一种双光路的实验装置,利用没有泰伯效应的 DMD 光路寻找正焦面位置,再利用微透镜阵列进行精密测量。

4 单光源双光路系统

如果双光路系统采用两个光源,很有可能会出现正焦面位置有偏差的情况,为了尽量减小这种偏差,设计了一种单光源双光路的并行共焦测量系统,如图 3 所示。



BS: 分光镜 R: 反射镜

图 3 单光源双光路并行共焦测量系统

Fig. 3 Parallel confocal measurement system with single source and dual beam paths

系统采用最小步距为 $0.01 \mu\text{m}$ 的步进电机对位移台进行纵向驱动,并利用分辨率为 $0.01 \mu\text{m}$ 的电感测微仪作为位移测量装置,实验装置如图 4 所示。

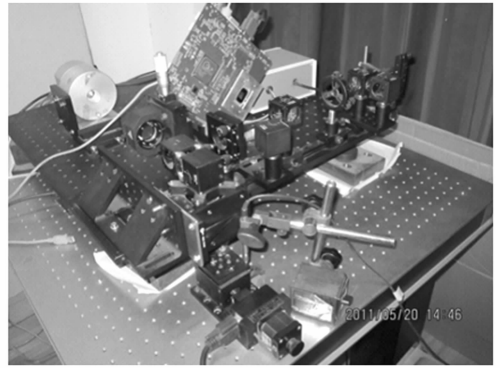


图 4 实验装置实物图

Fig. 4 Picture of experiment devices

5 测量系统的实验研究

利用量块作为被测物,在 $200 \mu\text{m}$ 范围内连续移动被测物面,分别用 DMD 和微透镜阵列构建的并行光源进行测量,得到的部分测量数据如表 1 所示。表 1 描述了在 DMD 和 MLA 下,CCD 所接收到的光强差随量块纵向位移时的变化状况,出现过零点时表示到达了正焦面的位置。

表 1 DMD 与微透镜阵列构建的并行光源实验数据对比

Tab. 1 Comparison of experimental data between DMD and MLA

Displace/ μm	960	970	980	...	1 140	1 150	1 160
DMD	0.003 4	0.006 6	0.009 4	...	-0.010 6	-0.004 2	0.000 8
MLA	-0.043 6	-0.045 2	-0.069 3	...	-0.021 0	-0.048 0	-0.046 0

根据这些数据分别绘制出两种光路下的像散位移曲线,如图 5 所示。显然,在 DMD 光路中,全行程中曲线只出现了一次过零点,故只有一个正焦面;而在微透镜阵列光路中,出现了 3 次过零点,此时,其余两个泰伯像面会影响正焦面的辨识。

微透镜阵列测量时,得到的泰伯间距实测值为 $65.01 \mu\text{m}$,与理论计算的结果 $66.54 \mu\text{m}$ 非常接近;经数据处理后得知,两个正焦面位置相差 $2 \mu\text{m}$,小于泰伯间距,故这种单光源双光路的方式是可以较准确地辨识出正焦面位置的。

作者又用不同量块构建了由电控位移台进行直线位移驱动高度差为 $10 \mu\text{m}$ 的台阶面,在所设计的单光源双光路激光并行共焦测量系统上进

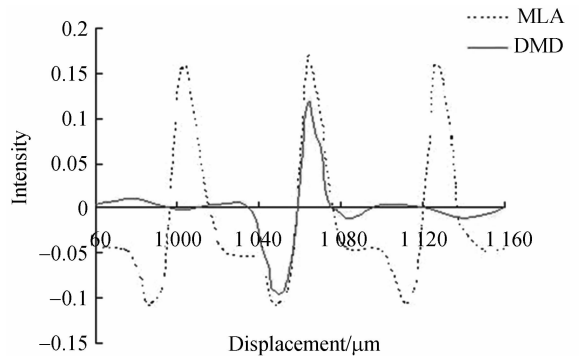
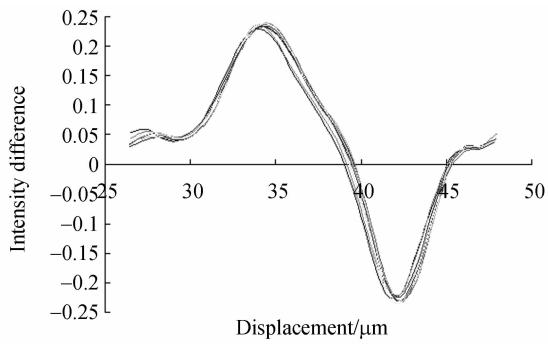


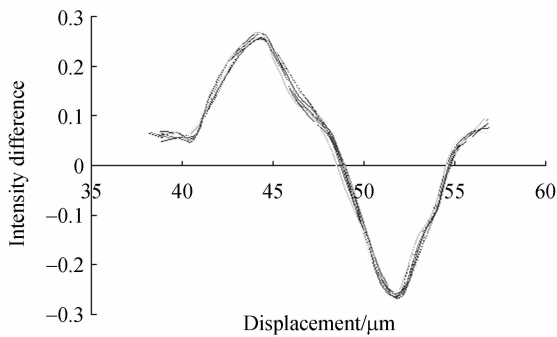
图 5 像散位移曲线

Fig. 5 Astigmatism displacement curves

行了 10 次测量,其中回程和去程各 5 次。然后用



(a) 990 μm 量块
(a) 990 μm gauge block



(b) 1 000 μm 量块
(b) 1 000 μm gauge block

图6 实测像散位移曲线

Fig. 6 Astigmatism displacement curves

最小二乘法拟合得到台阶高度差为 $9.68 \mu\text{m}$, 重复性误差为 $0.14 \mu\text{m}$, 实验数据如图6所示。实验结果表明,该测量装置可以克服泰伯效应的影响,同时达到较高的测量精度要求。

6 结 论

DMD作为一种可控的阵列光源可以用于并行共焦测量,由于激光并行共焦系统利用的是它所显示图像的实像,因而不会在光路方向上产生泰伯效应,导致无法辨识正焦面位置;但DMD对光线没有会聚作用的特性会致使基于它的并行共焦测量系统的分辨率不如基于MLA的测量系统,因此,本文设计了一种单光源双光路的激光并行共焦测量系统。通过实验可知,在DMD光路下,正焦面附近并不像微透镜阵列光路时有多个泰伯像面,并且两种光路下的正焦面位置差异很小。实验结果表明,基于DMD的照明光路可以准确辨识出正焦面的位置,进而再利用基于MLA的照明光路进行精确的并行共焦测量。

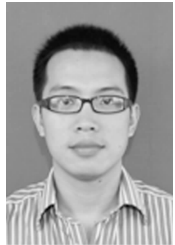
参考文献:

- [1] 姚楠,王中林. 纳米技术中的显微学手册[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
YAO N, WANG ZH L. *Handbook of Microscopy for Nanotechnology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press. (in English)
- [2] THOMAS R, ANDREAS W, VERDES, *et al.*. Confocal reader for biochip screening and fluorescence microscopy[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2005, 20(9):1872-1877.
- [3] 曾毅波,蒋书森,黄彩虹,等. 激光共焦扫描显微镜在微机电系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7):1241-1246.
ZENG Y B, JIANG SH S, HUANG C H, *et al.*. Application of laser scanning confocal microscope in micro-electro-mechanical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7):1241-1246. (in Chinese)
- [4] ZHOU CH, WANG W, DAI E W, *et al.*. Simple principles of the Talbot effect [J]. *Opt. Photonics*

- News*, 2004, 15(11):46-50.
- [5] TENG S Y, LIU L, ZU J, *et al.*. Uniform theory of the Talbot effect with partially coherent light illumination [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, 20:1747-1754.
- [6] TENG S Y, CHEN X Y, ZHOU T, *et al.*. Quasi-Talbot effect of a grating in the deep fresnel diffraction region [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, 24(6):1656-1665.
- [7] 滕树云,刘立人,刘德安,等. 部分相干光照明下光栅的塔尔博特效应[J]. *光学学报*, 2004, 24(5):692-695.
TENG SH Y, LIU L R, LIU D A, *et al.*. Fresnel diffraction of the grating illuminated by partially coherent light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5):692-695. (in Chinese)
- [8] 周同军,滕树云. 光栅尺寸对光栅泰伯效应的影响[J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 22(3):50-51.
ZHOU T J, TENG SH Y. The influence of size of

- the grating on the Talbot effect [J]. *Journal of Shandong Normal University (Natural Science)*, 2007, 22(3):50-51. (in Chinese)
- [9] 滕树云, 刘立人, 祖继锋, 等. 脉冲和连续多色光源照明下光栅泰伯效应的等价性[J]. *中国激光*, 2004, 31(10):1177-1182.
TENG SH Y, LIU L R, ZU J F, *et al.*. Equivalence of Talbot effect of the grating illuminated by the pulsed laser and continuous polychromatic light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(10): 1177-1182. (in Chinese)
- [10] 余卿, 余晓芬, 程伶俐, 等. 泰伯效应对激光并行共焦显微系统成像影响的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(6):1271-1274.
YU Q, YU X F, CHENG L L, *et al.*. Research on the influence of Talbot effect on the imaging in laser parallel confocal microscopy system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(6):1271-1274. (in Chinese)
- [11] 韩超, 韦穗, 叔希龙, 等. 数字微镜器件的全息显示[J]. *中国激光*, 2010, 37(1):190-194.
HAN CH, WEI S, QUAN X L, *et al.*. Holographic display of digital micromirror device [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1):190-194. (in Chinese)
- [12] 王巍, 巩马理. 数字微镜器件(DMD)在相干光照明下的空间光调制特性[J]. *光电技术应用*, 2007, 22(3):31-35.
WANG W, GONG M L. Spatial light modulating characters of digital micromirror device (DMD) at laser illumination [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2007, 22(3):31-35. (in Chinese)
- [13] 李俊昌, 宋庆和, 桂进斌. 数字微镜用于菲涅耳衍射全息显示的理论研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(6):1459-1463.
LI J CH, SONG Q H, GUI J B. Theory research on fresnel diffraction hologram display with DMD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6):1459-1463. (in Chinese)
- [14] 余卿, 余晓芬, 刘文文, 等. 数字微镜器件用于并行共焦测量的再研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(5):0523005-1-0523005-5.
YU Q, YU X F, LIU W W, *et al.*. Re-studies on parallel confocal measurement system with digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5):0523005-1-0523005-5. (in Chinese)

作者简介:



余卿(1983—),男,江西新余人,博士,讲师,2005年,2011年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电检测、精密机械设计方面的研究。E-mail: jorson.y@163.com



余晓芬(1954—),女,安徽合肥人,博士,教授,博士生导师,1982年,2000年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事现代检测技术及仪器、微米测量、在线检测技术及系统等方面的研究。E-mail: yuxiaofen99@hotmail.com



崔长彩(1972—),女,山东胶南人,博士,华中科技大学博士后,教授,博士生导师,1996年于佳木斯大学获得学士学位,2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事表面微地貌重构、几何量精密测量技术与优化算法应用技术等方面的研究。E-mail: cuichc@hqu.edu.cn