

文章编号 1004-924X(2013)02-0246-07

激光共焦透镜曲率半径测量系统

邱丽荣*, 李 佳, 赵维谦, 杨佳苗
(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要:基于共焦技术独特的轴向层析定焦能力并结合气浮导轨平移台和激光干涉仪测长系统,研制了一套高精度、非接触激光共焦透镜曲率半径测量系统。该系统利用共焦轴向光强响应曲线的峰值点对应系统物镜聚焦点这一特性,使用峰值点对被测透镜的猫眼位置及共焦位置进行精确定位,并结合激光干涉仪获得透镜猫眼位置及共焦位置坐标值,从而计算得到透镜的曲率半径。系统由主控软件控制气浮导轨带动被测透镜在猫眼位置及共焦位置附近进行扫描测量,并实现信号采集和数据处理。实验表明,利用该系统测量透镜的曲率半径时,测量重复性优于 $2\ \mu\text{m}$,满足国内高精度透镜曲率半径测量的精度需求。该系统测量速度快、操作简便、结构简单且易于实现小型化。

关键词:共焦透镜;曲率半径测量;非接触测量;激光干涉仪

中图分类号:TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0246

Laser confocal measurement system for curvature radii of lenses

QIU Li-rong*, LI Jia, ZHAO Wei-qian, YANG Jia-miao

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: qiugrass@126.com

Abstract: Combined an air bearing platform and a laser interferometer, a set of non-contact and high precision system for curvature radius measurements of lenses is developed based on the axial focusing of confocal technique. The developed system is characterized by that the peak point of the confocal axial intensive curve corresponds to the focus of an objective. On the characteristic, it identifies precisely the cat-eye and confocal positions of the test lens. Then it takes the laser interferometer to obtain the position coordinates of the cat-eye and confocal positions and calculates the curvature radius of the lens. Furthermore, the main control software drives an air bearing slider with a test lens to achieve the scanning measurement near the cat eye and confocal positions, and then acquires signals and processes data. Experimental results show that the measurement system has the reproducibility less than $2\ \mu\text{m}$, which meets the requirements of curvature radius measurement for high precision. The developed measurement system has the advantages of high test speed, easy operation, simple structure and easy to be miniaturized.

Key words: confocal lens; curvature radius measurement; non-contact measurement; laser interferometer

收稿日期:2012-10-11;修订日期:2012-11-19.

基金项目:国家自然科学基金纳米制造重大研究计划资助项目(No. 91123014);国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2011YQ040136)

1 引言

在光学测试领域中,曲率半径是光学透镜最基本和最重要的参数之一,其测量精度将直接影响透镜的焦距、像差等其它光学参数,而这些参数又在很大程度上影响着光学系统的成像质量。特别是在航天相机、光刻机物镜等高性能光学系统中,透镜的曲率半径都需要进行高精度的检测与评定。

曲率半径的高精度测量一直是光学测量领域的一个难点^[1-4]。传统的测量方法主要分为接触测量法和非接触测量法。接触测量法^[5-6],如球径仪法、三坐标测量法,要求对被测表面进行抛光处理,而且测量过程中会因光学球面的磨损或挤压而产生测量误差;非接触测量法^[7-8],如自准直显微镜法,虽然在测量过程中被测光学球面不会磨损,但光路调焦对准的精度要非常高,这不仅加大了调校光路的难度,而且光路调校时还容易引入系统误差。传统的测量方法大部分采用目视读数方法,不仅自动化程度低,还增大了测量的随机误差,均难以实现曲率半径的高精度测量。

共焦技术是近年来在国内外显微成像领域快速发展的一种高精度非接触测量方法^[9-11],它具有测量精度高和自动化程度高的优点,因此在光学测量领域得到了广泛的应用。本课题组先期研究的差动共焦曲率半径测量技术^[12-14]具有定焦灵敏度高和抗干扰能力强的特点,但是在测量参数差异较大的样品时,需要调节两个探测器的离焦量,操作过程比较繁琐。因此,课题组提出了共焦曲率半径测量方法,该方法的定焦灵敏度和测量精度稍低于差动共焦曲率半径测量方法;但其探测器位于焦点位置,不需要调节离焦量,且测量过程操作简单、易行。该系统结构简单,研发成本低,易于实现仪器的小型化和便携化,因此具有重要的应用价值。

本文基于提出的共焦曲率半径测量方法^[15],结合气浮导轨平移台和激光干涉仪测长系统,研制了一套高精度、非接触的共焦透镜曲率半径测量系统。相对于传统测量方法,该系统不仅提高了测量精度,而且简化了系统结构。

2 测量系统原理

共焦检测技术的基本原理如图1所示,激光器发出的光经物镜聚焦在被测透镜表面,反射光沿原路返回,再通过分光镜反射后进入虚拟针孔探测系统中,形成点检测。共焦探测系统使用虚拟针孔(Virtual Pinhole, VPH)代替传统的物理针孔,用以降低系统的装调难度。虚拟针孔由显微物镜和 CCD 探测器组成,其中 CCD 探测器位于显微物镜的像面,显微物镜将焦点的光斑放大后成像在 CCD 探测器上。

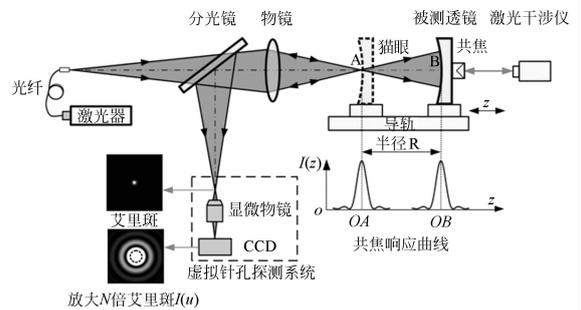


图1 共焦曲率半径测量系统工作原理

Fig. 1 Principle of confocal radius measurement system

系统测量软件根据公式(1)处理 CCD 探测图像 $g(m, n)$, 计算得到艾里斑的中心坐标 $M(x, y)$ 。

$$\begin{cases} x = \left(\sum_{m,n} m \cdot g(m, n) \right) / \sum_{m,n} g(m, n) \\ y = \left(\sum_{m,n} n \cdot g(m, n) \right) / \sum_{m,n} g(m, n) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: m 和 n 是图像的像素坐标。

然后,以 $M(x, y)$ 点为圆心求给定半径 r 圆域范围内像素灰度值的总和 $\Sigma I(x, y)$, 半径为 r 的圆域等价于共焦显微系统的物理针孔, 该针孔的大小可根据需求利用软件任意设定。测量过程中, 系统利用公式(1)实现对艾里斑中心位置 $M(x, y)$ 的自动追踪, 使 VPH 的针孔中心始终与焦面的艾里斑中心相重合, 以消除径向偏移对定焦的影响。

当被测透镜位于猫眼和共焦位置时, VPH 接收到的光能量最大; 当被测透镜偏离猫眼或者共焦位置时, 反射光被聚焦于像焦平面前或后的某个位置上, 此时 VPH 仅接收到小部分光能量, 这样就可以利用光强信号的强弱变化来反映被测透

镜相对于猫眼或共焦位置的偏离。该方法轴向定焦精度可达亚微米级,可满足透镜曲率半径测量的要求,并且简单易行。

共焦测量系统利用共焦检测技术获得共焦轴向光强响应曲线,由该曲线的峰值点来精确定位被测透镜的猫眼及共焦位置,继而实现被测透镜的曲率半径测量。测量时,被测透镜沿光轴做直线扫描运动,当被测透镜被移动到猫眼或共焦位置附近时,测量光束由被测透镜表面反射沿原路返回,分光镜将光束反射至 VPH 探测系统,然后计算机程序利用 VPH 算法计算艾利斑中心的强度值,得到归一化的光强信号 $I(u)$ 。

$$I(u) = \left[\frac{\sin(u/2)}{u/2} \right]^2, \quad (2)$$

其中: $u = \frac{\pi}{2\lambda} \times \left(\frac{D}{f}\right)^2 \times z$, 为轴向归一化光学坐标, z 为轴向坐标, $\frac{D}{f}$ 为共焦测量系统物镜的相对孔径。

由图 1 及公式(2)可知,根据共焦轴向光强响应曲线 $I(u)$ 的峰值点可求出对应的标准透镜猫眼位置及共焦位置,但受测量环境震动和测量光路中杂散光干扰的影响,光强响应曲线会产生一定的噪声,使得峰值点对应的轴向坐标发生偏移,从而带来定焦误差,影响测量精度。因此,测量软件中的数据模块会对采集的原始数据进行滤波处理,以降低噪声干扰,精确求取共焦曲线的峰值点,从而进一步提高系统的定位灵敏度和抗干扰能力。

3 测量系统

3.1 系统结构

共焦曲率半径测量系统结构如图 2 所示,主要包括 6 部分:共焦曲率半径测量主机、标准物镜、直线气浮导轨平移系统(气浮块和气浮导轨)、五维调整架、机电平移台和 Renishaw XL-80 激光干涉仪(及环境补偿单元)。其中,共焦测量光路、标准物镜、被测透镜与干涉仪需要同光轴,以减小阿贝误差,提高被测透镜猫眼位置与共焦位置之间的直线测长精度。

测量时,被测透镜固定在气浮导轨的气浮块上,机电平移台驱动气浮块,进而带动被测透镜沿光轴方向移动,通过共焦测量主机实现对被测透

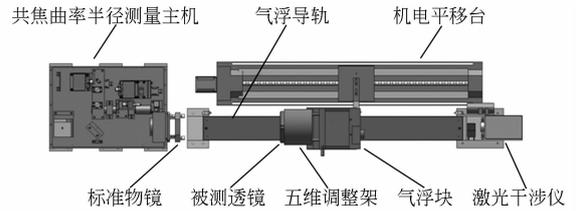


图 2 共焦曲率半径测量系统结构

Fig. 2 Structure of confocal radius measurement system

镜猫眼位置和共焦位置的精确定位,并用激光干涉仪对其位移实现高精度测量,进而通过计算机控制系统的各部分协调配合;然后对共焦曲率半径测量主机及激光干涉仪采回的实时数据进行处理;最后通过主控软件求出被测透镜的曲率半径。

3.2 系统软件

控制软件的结构如图 3 所示,主要由 CCD 相机控制模块、激光干涉仪控制模块、机电控制模块和 I/O 控制模块组成。测量过程中,机电控制模块控制机电平移台带动被测透镜在猫眼位置和共焦位置附近进行扫描,I/O 控制模块控制 CCD 摄像机和激光干涉仪同步采集数据并传输给主计算机。

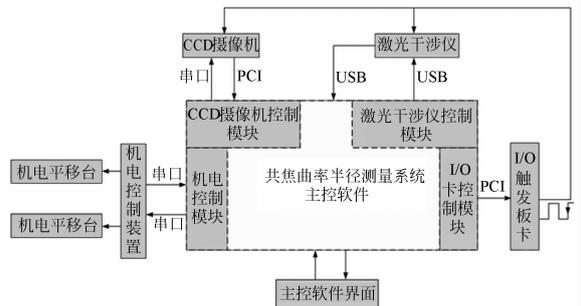


图 3 控制软件结构

Fig. 3 Software structure

系统测量软件以 VC++ 6.0 软件为基础开发平台进行设计,由软件初始化界面、光路调整与测量界面和数据处理界面 3 部分组成。初始化界面实现系统硬件设备自检、测量参数设置和粗瞄照明控制;光路调整与测量界面可调整被测透镜光轴,对透镜在共焦位置和猫眼位置进行定焦扫描,同时采集测量数据和图像并实时显示,该测量界面如图 4 所示;数据处理界面根据所采集的数据拟合、滤波绘制出共焦响应曲线,并求得被测透镜的猫眼位置和共焦位置所对应的轴向坐标,最后计算出被测透镜的曲率半径,该界面还具有测

量结果的打印和存档功能。

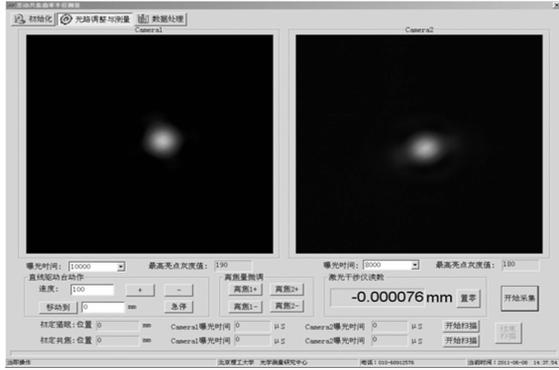


图 4 共焦曲率半径软件测量界面

Fig. 4 Software interface of measuring process

4 误差分析

影响曲率半径测量的误差主要有:激光干涉仪的测长误差、猫眼位置和共焦位置的定焦误差、轴线不重合偏差。

4.1 测长误差 σ_L

通过 Renishaw XL-80 激光干涉仪完成猫眼和共焦位置之间距离的测量,因此测长误差满足:

$$\sigma_L = 1 \times R \times 10^{-6}, \quad (3)$$

其中: R 为被测透镜的曲率半径值,激光干涉仪的测量精度可达 1×10^{-6} 。

4.2 定焦误差 σ_z

本系统使用的物镜 Zygo 为口径 100 mm,焦距 150 mm 的标准镜。共焦曲率半径测量系统对平面反射镜进行多次反复定焦测量,测得其定焦重复性误差 σ_z 为 $1 \mu\text{m}$ 。

采用高斯滤波算法对共焦信号进行滤波处理。高斯低通滤波器的脉冲响应函数为:

$$h(x) = \frac{1}{\alpha\lambda_c} \exp\left[-\pi\left(\frac{x}{\alpha\lambda_c}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中: $\alpha^2 = \ln 2 / \pi = 0.469 7$; λ_c 为滤波器的截止波长。

通过一次卷积可以将原始艾里斑的光强响应信号 $z(x)$ 分离为低频光强信号 $W(x)$ 和高频噪声信号 $R(x)$ 两部分:

$$W(x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi) z(x) d\xi, \quad (5)$$

$$R(x) = z(x) - W(x). \quad (6)$$

如图 5 所示,共焦轴向强度响应信号经过高

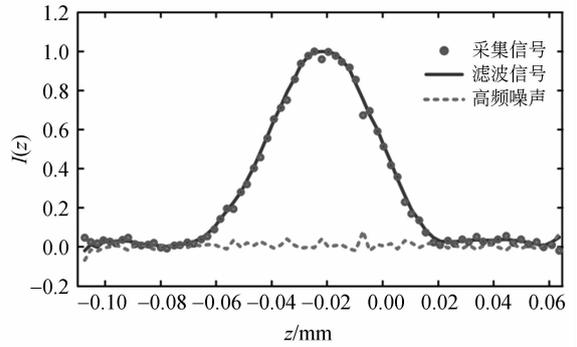


图 5 滤波前后的共焦轴向强度响应信号

Fig. 5 Confocal axial intensive curves before and after filtering

斯低通滤波处理后,因高次谐波噪声(高频噪声)影响出现的随机跳跃点被滤除,抑制了异常信号的影响和扩散,良好地保持了高、低频信号附近的峰高和异常信号处的谷深,更为真实地反映了高、低频信号的原貌。信号峰形对称,有利于峰值点的确定和定焦精度的提高。

经多次实验论证可知:对滤波前后的共焦轴向强度响应信号进行滤波处理后,其定焦误差 σ_z 可提高到 $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 。

4.3 各轴线不重合引起的偏差 σ_{axial}

在曲率半径测量过程中,由于运动平移台具有很高的直线度,可近似认为与光轴平行,若将被测透镜轴线和运动平移台轴线之间的夹角定义为 α ,激光测长干涉仪的测量轴线与运动平移台轴线之间的夹角定义为 β ,通过几何关系可以得到轴线不重合引起的透镜曲率半径 R 的测量误差为:

$$\sigma_{\text{axial}} = R \times (1 - \cos \alpha \times \cos \beta). \quad (7)$$

在上述关系式中, β 角可通过精细调整激光干涉仪的测量轴线与平移台的运动轴线来减小,系统构建时只需一次调整。 α 角是由于被测透镜安放引起的,故每次安放都需要调整 α 。在实际测量过程中,通过仔细装调, α 和 β 的调整精度可控制在 $2''$ 以内。

4.4 误差合成

综合以上几项误差源对测量结果的影响,该系统的测量误差 σ_R :

$$\sigma_R \approx \sqrt{\sigma_{\text{axial}}^2 + \sigma_L^2 + \sigma_z^2}, \quad (8)$$

式中: σ_L 为激光干涉仪的测长误差, σ_z 为猫眼位置和共焦位置的定焦误差, σ_{axial} 为轴线不重合偏差。

当 $\lambda=632.8\text{ nm}$, 物镜相对口径 $D/f=0.67$, 被测镜参数 $R=54.70183\text{ mm}$, CCD 信噪比 $\text{SNR}=1:100$ 时, 根据式(3)、式(7), 各项误差可分别达 $\sigma_L \approx 0.05\text{ }\mu\text{m}$, $\sigma_z \approx 1\text{ }\mu\text{m}$, $\sigma_{\text{axial}} \approx 0.019\text{ }\mu\text{m}$, 由式(8)得该系统的测量误差:

$$\sigma_R \approx \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_z^2 + \sigma_{\text{axial}}^2} = \sqrt{(0.05)^2 + (1)^2 + (0.019)^2} \approx 1.00\text{ }\mu\text{m}.$$

相对测量误差:

$$\frac{\sigma_R}{R} = \frac{1.00}{54\,701.83} \approx 1.83 \times 10^{-5}.$$

理论上该测量系统误差可达 1.83×10^{-5} 。考虑到实际测量中, 实验室温度、湿度波动以及环境振动等对激光干涉仪的影响, 该系统的相对测量误差仍可优于 3×10^{-5} 。

5 实验验证

为了验证激光共焦曲率半径测量方法的有效性和测量精度, 课题组根据图 1 构建了共焦曲率半径测量系统, 如图 6 所示。

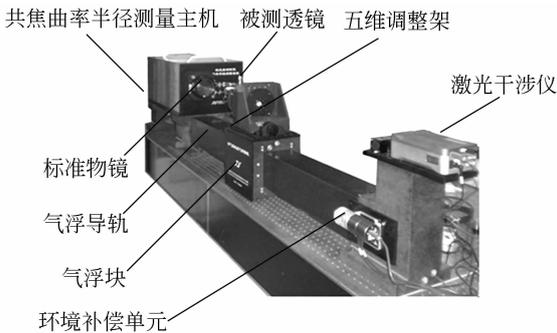


图 6 测量系统实物图

Fig. 6 Confocal radius measurement system

验证试验在室温 $(20 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ 的实验室环境下进行, 使用一个凸透镜作为样品进行测量, 利用激光共焦透镜曲率半径测量系统对凸透镜样品进行 10 次测量, 然后利用虚拟针孔计算艾里斑中心的强度值, 得到归一化的轴向光强响应曲线。图 7 为第一次测量凸透镜得到的共焦位置和猫眼位置的光强响应曲线。通过主控软件数据处理后得到: 共焦位置 $z_B=54.6831\text{ mm}$, 猫眼位置 $z_A=-0.0186\text{ mm}$, 则曲率半径为 $R=z_B-z_A=54.7017\text{ mm}$ 。

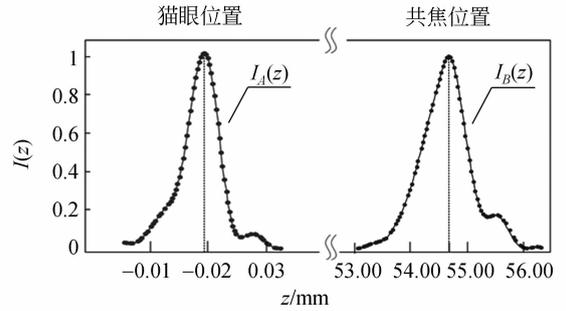


图 7 凸透镜的猫眼和共焦位置的共焦光强响应曲线

Fig. 7 Confocal curves of measuring test

多次测量凸透镜的曲率半径, 所得数据如表 1 所示。

表 1 测量数据

Tab. 1 Measurement results (mm)

测量次序	猫眼位置坐标 z_A	共焦位置坐标 z_B	曲率半径 $z_B - z_A$
1	-0.018 6	54.683 1	54.701 7
2	-0.016 7	54.684 2	54.700 9
3	-0.018 2	54.684 8	54.703 0
4	-0.013 6	54.688 4	54.702 0
5	-0.015 7	54.687 2	54.702 9
6	-0.017 7	54.685 6	54.703 3
7	-0.015 4	54.687 6	54.703 0
8	-0.013 3	54.690 6	54.703 9
9	-0.014 6	54.688 6	54.703 2
10	-0.006 2	54.694 4	54.700 6

由表 1 测量数据分析得到, 10 次重复测量结果的平均值为 54.70245 mm , 重复性 σ 为 0.0011 mm , 相对标准差为 2.0×10^{-5} 。

表 2 测量结果与标称值对比

Tab. 2 Comparison of measurement result with nominal value

	测量结果	标准差	标定结果	偏差
凸透镜	54.702 45	0.001 1	54.701 83	0.000 62

如表 2 所示, 将计量科学研究所的标定结果与共焦曲率半径测量系统测量的 10 次测量结果的平均值相比较, 可知测量结果与标定结果一致性较好, 偏差小于 $0.7\text{ }\mu\text{m}$, 测量标准差小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。

6 结 论

本文研制的激光共焦透镜曲率半径测量系统利用 VPH 算法计算光强的响应信号,并结合激光干涉仪位置读数得到共焦轴向光强响应曲线,利用曲线峰值点来精确定位被测透镜的猫眼位置及共焦位置,进而计算出透镜的曲率半径,实现透镜曲率半径的精确测量。实验验证表明,该系统

的测量重复性优于 $2\ \mu\text{m}$, 相对测量标准差为 2×10^{-5} , 高于一般的曲率半径测量方法(约为 10^{-5} 量级)^[2-6,8]。与差动共焦测量系统相比,该系统不需要光强探测器离焦量调整机构,结构简单,操作简便,测量速度快,易于实现小型化。

本文的测量结果均是在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 温度左右的实验室环境下获得的,若改善测量环境还可以进一步提高该系统的测量精度。

参考文献:

[1] YI H Y, ZHANG R ZH, HUA X Y, *et al.*. A novel compensation method for the measurement of radius of curvature [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 43(4): 911-915.

[2] 林旭东,陈涛,明名,等. 球面拼接镜的相对曲率半径测量[J]. 光学精密工程,2010,18(1): 75-82.

LIN X D, CHEN T, MING M, *et al.*. Measurement of relative curvature radius for spherical segmented mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 75-82. (in Chinese)

[3] SCHMITZ T L, N G, VAUGHN M, *et al.*. Improving optical bench radius measurements using stage error motion data [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(36): 6692-6670.

[4] 杨李茗,叶海仙. 大口径大曲率半径光学元件的高精度检测[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6):1207-1212.

YANG L M, YE H X. High-precision metrology for optical components with large-apertures and large radius of curvature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1207-1212. (in Chinese)

[5] 李海,徐海卫. 基于 3D 数模的三坐标测量机曲面检测[J]. 中国测试技术, 2005, 31(4):24-27.

LI H, XU H W. Inspecting surfaces by CMM based on 3D CAD model [J]. *China Measurement Technology*, 2005, 31(4): 24-27. (in Chinese)

[6] 李先元. 简易球径仪在光学加工中的应用[J]. 四川兵工学报, 1997, 18(4): 28-30.

LI X Y. Simple ball diameter instrument application in optical processing [J]. *Journal of Sichuan Ordinance*, 1997, 18(4): 28-30. (in Chinese)

[7] 魏仲慧. 数字光电自准直仪的研究与设计[J]. 光学精密工程,1996,4(3):116-120.

WEI ZH H. Research and design of the digital optoelectronic autocollimator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(3): 116-120. (in Chinese)

[8] 王孝坤,郑立功. 一种精确测量光学球面曲率半径的方法[J]. 光学学报, 2011, 31(8):1-5.

WANG X K, ZHENG L G. A method for testing radius of curvature of optical spheric surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 1-5. (in Chinese)

[9] SHEPPARD C J R, WILSON T. Depth of field in the scanning microscope [J]. *Optics Letters*, 1978, 3(3): 115-117.

[10] 顾敏. 共焦显微术的三维成像原理[M]. 新加坡: 新时代出版社,2000: 1-2, 3-5, 112-114.

GU M. *Three-Dimensional Imaging in Confocal Microscopes* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000: 1-2, 3-5, 112-114. (in Chinese)

[11] WANG F S, TAN J B, ZHAO W Q. The optical probe using confocal technique for surface profile measurement [J]. *SPIE*, 2000, 4222:194-197.

[12] ZHAO W Q, TAN J B, QIU L R. Bipolar absolute differential confocal approach to higher spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2004, 12(21): 5013-5021.

[13] ZHAO W Q, SUN R D, QIU L R, *et al.*. Laser differential confocal radius measurement[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2345-2360.

[14] 孙若端,邱丽荣,杨佳苗,等. 激光差动共焦曲率半径测量系统的研制[J]. 仪器仪表学报,2011, 32(12): 33-38.

SUN R D, Q L R, Y J M, *et al.*. Development of laser differential confocal radius measurement system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(12):33-38. (in Chinese)

[15] 赵维谦, 杨佳苗, 邱丽荣. 共焦干涉定焦及曲半径

测量方法: 中国, CN102175426A[P]. 2011-09-07.
ZHAO W Q, Y J M, Q L R. Confocal interference fixed focal length and curvature radius measuring method: China, CN102175426A[P]. 2011-09-07. (in Chinese)

作者简介:



邱丽荣(1975—), 女, 黑龙江绥滨人, 博士后, 副教授, 硕士生导师, 2000 年于西安交通大学获得硕士学位, 2005 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 主要研究方向为差动共焦理论与精密光学检测。E-mail: qiugrass@126.com



李 佳(1988—), 女, 北京人, 硕士研究生, 2010 年于合肥工业大学获得学士学位, 主要研究方向为精密光电仪器测试技术与仪器。E-mail: fanxing1291091@163.com



赵维谦(1966—), 男, 新疆伊宁人, 教授, 博士生导师, 1993 年, 2003 年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位, 主要从事光学测量领域的研究。E-mail: zwq669@126.com



杨佳苗(1987—), 男, 浙江绍兴人, 博士研究生, 2010 年于北京理工大学获得学士学位, 主要研究方向为精密光学检测。E-mail: yjm_1205@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)