

文章编号:1002-2082(2014)06-1023-06

光栅尺测长式激光差动共焦曲率半径测量系统

徐 鹏,赵维谦,王方彪,肖 阳,周桃庚

(北京理工大学 光电学院 精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室,北京 100081)

摘 要:为了增强高精度曲率半径测量仪器的抗环境干扰能力,满足现场使用需求,研制了一套基于光栅尺测长的激光差动共焦曲率半径测量系统。该系统利用差动共焦轴向光强响应曲线的过零点对应系统物镜聚焦焦点这一特性,对被测样品的猫眼位置及共焦位置进行精确瞄准定位,并借助光栅尺测长得到透镜猫眼位置与共焦位置之间的距离,实现曲率半径的测量。实验表明,该系统相对测量精度优于 5×10^{-6} ,满足高精度曲率半径测量的精度需求。

关键词:差动共焦;曲率半径测量;非接触测量;光栅尺

中图分类号:TN247; TH741

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201435.0603002

Laser differential confocal curvature measurement system with grating length

Xu Peng, Zhao Weiqian, Wang Fangbiao, Xiao Yang, Zhou Taogeng

(Beijing Key Lab for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Opto-electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to enhance the environmental anti-interference capability for the radius of curvature (ROC) measurement and meet the requirements of use on the production spot, a laser differential confocal curvature measurement system with grating was developed, which used the property, that the zero point of a differential confocal intensity curve corresponds to the focus of objective, to precisely identify the cat-eye and confocal positions of the tested lens, and then used the grating to measure the distance between these two positions, thereby the high-precision measurement of ROC was achieved. Experimental results show that the system has an accuracy of better than 5×10^{-6} . So it can meet the demand of high-precision measurement of ROC.

Key words: differential confocal; curvature radius measurement; non-contact measurement; grating

引言

在现代光学测量领域中,曲率半径是光学透镜最基本的参数之一,其精度将直接影响透镜的焦距等光学参数,而这些参数又在很大程度上影响着光学系统的综合性能。特别是在高性能光学

系统中,透镜的曲率半径都需要高精度的测量和检测。高精度的曲率半径测量也一直是光学测量领域的一个难点^[1-4],同时人们对曲率半径测量仪器现场使用的测量精度要求也越来越高。

目前,曲率半径的高精度非接触测量方法

收稿日期:2014-08-06; **修回日期:**2014-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91123014;61327010);国家重大科学仪器开发专项(2011YQ04013602);国家高科技研究发展计划(2012AA040507)

作者简介:徐鹏(1989—),男,山东日照人,硕士研究生,主要从事光学元件参数测量方面的研究。

E-mail:18612301869@126.com

通信作者:赵维谦(1966—),男,新疆伊宁人,博士生导师,长江学者,主要从事仪器科学与技术方面的研究。

E-mail:zwq669@126.com

包括球面干涉法^[5-6]、刀口衍射法^[7]、自准直法和单模光纤自准直法^[5,8]等。其中,基于猫眼-共焦定焦的球面干涉法是目前最常用的曲率半径高精度非接触测量方法,该方法是通过干涉条纹的判读来确定猫眼和共焦位置。由于衍射效应的存在,光不能被聚焦于一点,限制了定焦精度,同时由于空气的扰动,对干涉条纹的稳定性产生很大的影响,曲率半径的高精度测量难以保证。

为了解决透镜表面曲率半径的高精度测量难题,我们提出了激光差动共焦曲率半径测量方法^[9]和共焦曲率半径测量方法^[10],其中差动共焦曲率半径测量方法具有定焦灵敏度高特点,系统使用激光干涉仪作为位置探测器,受环境干扰较大,研发成本高,难以满足工厂等现场使用要求,因此本文利用差动共焦曲率半径测量方法构建了光栅尺测长式激光差动共焦曲率半径测量系

统,该系统使用光栅尺测长系统作为位置探测器测量猫眼位置和共焦位置之间的距离,具有开机速度快、抗环境干扰能力强等优点,可应用于工厂或车间等环境中。

1 激光差动共焦曲率半径测量原理

本文利用差动共焦曲率半径测量方法构建了光栅尺测长曲率半径测量系统,仪器测量原理如图1所示。该系统由差动共焦主机、光栅尺测长系统、高精度气浮导轨等组成。其中,文献[11]和[12]指出差动共焦主机是基于差动共焦轴向响应曲线的过零点与标准透镜 L 。聚焦点相对应这一特性,利用差动共焦轴向强度响应特性曲线 I_A 和 I_B 的过零点 Z_A 和 Z_B ,对被测元件的猫眼位置和共焦位置进行高精度触发瞄准,并由光栅尺测长系统获得猫眼位置和共焦位置之间的距离,从而实现了曲率半径的测量。

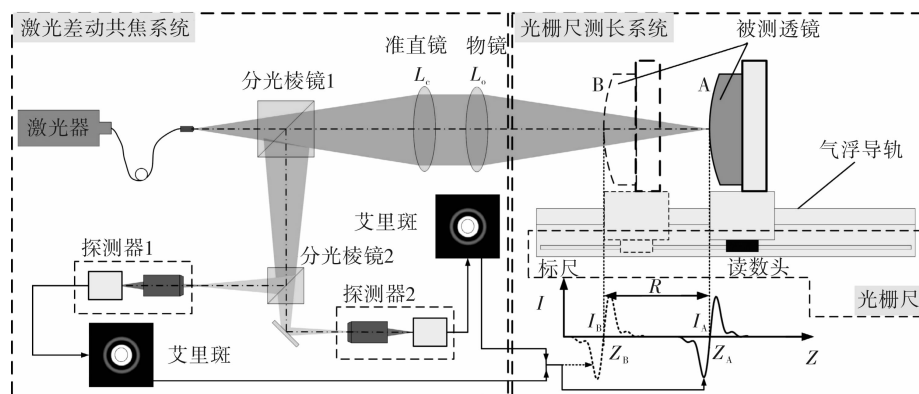


图1 激光差动共焦曲率半径测量原理

Fig. 1 Laser differential confocal adius measurement principle

当被测元件在猫眼或共焦位置附近时,测量光束经被测元件表面反射沿原光路返回,经分光镜1反射到分光镜2,被虚拟针孔探测器1和虚拟针孔探测器2接收,通过图像处理技术计算艾里斑中心的强度值,获得差动共焦轴向响应曲线。如图1所示,曲线过零点精确定位差动共焦聚焦点,而且过零点附近的线性度好、灵敏度高,便于后期的数据处理。

光栅尺测长系统采用定尺动读数头方式,如图1所示,光栅尺标尺贴在气浮导轨上,读数头固定在气浮导套上。测量过程中,电控平移台带动气浮套直线移动,读数头和光栅尺标尺产生相对

位移发出脉冲信号,通过细分卡细分,由计数板卡累积读数,经上位机进行数据处理实现测长。

2 误差分析

2.1 测长误差对系统测量的影响

猫眼和共焦位置之间的距离通过光栅尺测长系统测得,光栅尺标尺、读数头、细分卡由Renishaw公司生产,其测长精度可达 1×10^{-6} ,测长误差 σ_L 满足:

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

其中 R 是被测件的曲率半径。

2.2 定焦误差 σ_Z

差动共焦定焦误差 σ_Z 与物镜相对口径满足

关系^[13]:

$$\sigma_z = \frac{1.18\lambda}{\text{SNR}(D/f')^2} \quad (2)$$

式中: λ 是激光光源波长; SNR 是虚拟针孔探测器的信噪比; D/f' 是物镜相对口径。

2.3 各轴线不重合引起的偏差 σ_{mxial}

在曲率半径测量过程中, 由于气浮导轨具有很高的直线度, 可近似认为与光轴平行, 但在实际操作过程中, 总是存在一定的夹角。将被测透镜轴线和运动平移台轴线之间的夹角定义为 α 。

由图 1 可知, 由于光栅尺读数头运动轴线与系统测量光轴不重合, 不能达到完全平行的状态, 将光栅尺标尺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

$$\sigma_{\text{mxial}} = R \times (1 - \cos\alpha \times \cos\beta) \quad (3)$$

其中夹角 α 由精密五维调整架精细调整后小于

$1'$, 而夹角 β 只需进行长度标定即可求得大小。

2.4 面形误差 σ_{figure}

面形误差 σ_{figure} 满足^[14]:

$$\sigma_{\text{figure}} \approx 0.1 \cdot \text{PV} \quad (4)$$

式中 PV 是被测件的表面面型, 通过移相干涉仪测得。

2.5 误差合成

综合以上几项误差源对测量结果 R 的影响, 该系统的测量误差:

$$\sigma_R \approx \sqrt{\sigma_L^2 + 2 \times \sigma_z^2 + \sigma_{\text{mxial}}^2 + \sigma_{\text{figure}}^2} \quad (5)$$

(3) 式中的 β 未知, 因此要进行夹角 β 的标定, 夹角 β 标定方法如图 2 所示。通过精度达 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ 的 Renishaw 激光干涉仪进行标定, 夹角 β 满足 (6) 式, 因此只要标定测量出激光干涉仪输出数据 d_1 和光栅尺输出数据 d_2 即可, 有

$$\beta = \arctan \frac{d_2 - d_1}{d_1} \quad (6)$$

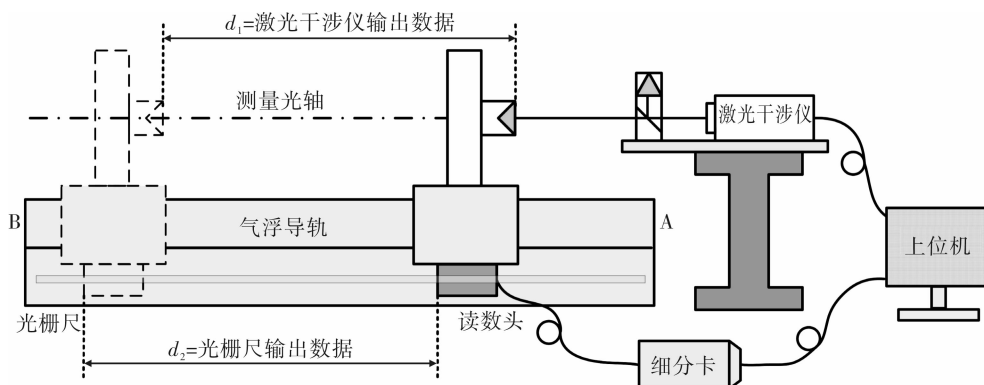


图 2 光栅尺标定

Fig. 2 Grating calibration

实验在室温 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、湿度 40% 环境下进行, 为了减小气流波动对 Renishaw 激光干涉仪测长的影响, 使用仪器罩遮挡。设定导轨 A 端为起始位置, 并同时激光干涉仪和光栅尺读数

系统置零, 电控平移台驱动气浮导套从导轨 A 端运行到导轨 B 端, 然后分别读出激光干涉仪和光栅尺的测长数据, 并重复测量 8 次, 结果如表 1 所示。

表 1 标定数据

mm

Table 1 Measurement results

测量次数	d_1	d_2	$d_2 - d_1$	百分比
1	521.886 095	521.885 97	-0.000 125	-2.40E-07
2	521.894 598	521.894 82	0.000 222	4.25E-07
3	522.106 817	522.106 66	-0.000 157	-3.01E-07
4	522.097 716	522.097 87	0.000 154	2.95E-07
5	521.956 548	521.956 721	0.000 173	3.31E-07
6	521.603 297	521.602 954	-0.000 343	-6.58E-07
7	522.325 641	522.325 795	0.000 154	2.95E-07
8	521.965 421	521.966 194	0.000 773	1.48E-06

激光干涉仪测距 8 次平均值为 $d_1 = 521.979\ 517\ \text{mm}$,光栅尺测距 8 次平均值为 $d_2 = 521.979\ 623\ \text{mm}$,相差 $0.000\ 106\ \text{mm}$ 。由(6)式可知 $\beta \approx 0^\circ$,故轴线不重合引起的透镜曲率半径 R 的测量误差 σ_{mxial} 仅与被测透镜轴线和运动平移台轴线之间的夹角 α 相关,为

$$\sigma_{\text{mxial}} \approx R \times (1 - \cos \alpha) \quad (7)$$

$\lambda = 632.8\ \text{nm}$,选用物镜的相对口径 $D/f' = 0.13$,被测件参数 $R = -25\ \text{mm}$,CCD 的信噪比为 $\text{SNR} = 150:1$,根据(1)式~(4)式,各项误差分别为 $\sigma_L \approx 0.025\ \mu\text{m}$, $\sigma_Z \approx 0.05\ \mu\text{m}$, $\sigma_{\text{mxial}} \approx 0.01\ \mu\text{m}$, $\sigma_{\text{figure}} \approx 0.01\ \mu\text{m}$ 。由(7)式得该系统的测量误差:

$$\sigma_R \approx \sqrt{\sigma_L^2 + 2 \times \sigma_Z^2 + \sigma_{\text{mxial}}^2 + \sigma_{\text{figure}}^2} = \sqrt{(0.025)^2 + 2 \times (0.05)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2} \approx 0.076\ \mu\text{m} \quad (8)$$

相对测量误差为

$$\frac{\sigma_R}{R} \approx \left| \frac{0.076}{-25 \times 1000} \right| = 3.04 \times 10^{-6}$$

实际情况中,考虑环境等因素对测量的影响,该系统的相对测量误差仍优于 5×10^{-6} 。

3 实验分析

根据图 1 所示原理构建了差动共焦曲率半径测量系统,如图 3 所示。

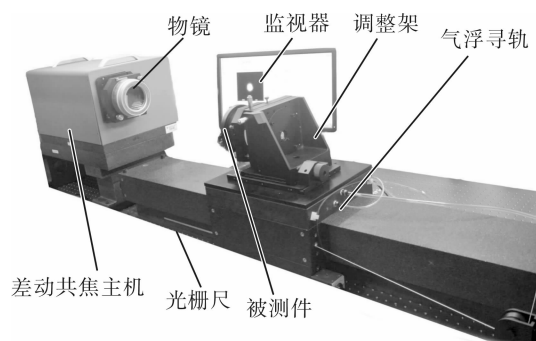


图 3 测量系统实物图

Fig. 3 Differential confocal curvature measurement system

为了验证本文构建的曲率半径测量系统的方法有效性和测量精度,同时为了验证光栅尺测长模块的抗环境干扰能力,将实验设计为 2 个对比实验。

3.1 理想环境下曲率半径测量对比实验

进行曲率半径测量实验,需要构建理想环境,

因此,控制环境温度,并使用仪器罩对仪器进行遮挡以减少气流扰动等因素对测量结果的影响。选用标称值 $R = -25\ \text{mm}$ 的被测透镜,实验在室温 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、湿度 40% 环境下进行。测量结果如表 2 所示,其中激光干涉仪栏代表使用激光干涉仪测长的差动共焦曲率半径测量仪器,光栅尺栏代表使用光栅尺测长的差动共焦曲率半径测量仪器。

表 2 曲率半径测量数据 mm

Table 2 Measurement results

	激光干涉仪	光栅尺
1	-25.038 341	-25.038 253
2	-25.038 892	-25.038 776
3	-25.039 905	-25.039 752
4	-25.038 770	-25.038 661
5	-25.040 218	-25.040 133
6	-25.038 846	-25.038 720
7	-25.039 991	-25.039 948
8	-25.039 501	-25.039 433
均值	-25.039 308	-25.039 209
标准差	0.000 687	0.000 695

在有遮挡的情况下,使用光栅尺作为测长模块的曲率半径测量系统重复测量结果的平均值为 $-25.039\ 209\ \text{mm}$,标准差为 $0.000\ 695\ \text{mm}$,使用基于激光干涉测长的曲率半径测量系统测量结果均值为 $-25.039\ 308\ \text{mm}$ 。从测量结果可以看出,测量结果相差 $0.000\ 1\ \text{mm}$,相对误差为 3.95×10^{-6} 。

通过实验验证,使用光栅尺测长的曲率半径测量系统与使用激光干涉仪测长的曲率半径测量系统测量值精度一致,而且该测量结果可以作为真实值进行参考。

3.2 一般环境下曲率半径测量对比实验

激光干涉测长仪受环境干扰大,稳定性较差,而光栅尺测长模块抗环境干扰能力强,稳定性好,满足现场使用测长需求。而且测长模块的测长稳定性将直接影响高精度曲率半径测量仪器的测量结果真实性、稳定性等仪器的整体性能。为了模拟工厂等现场环境,将仪器罩去掉进行实验,测量结果如表 3 所示。

表3 曲率半径测量对比数据 mm

Table 3 Measurement results

	激光干涉仪	光栅尺
1	-25.038 945	-25.039 786
2	-25.038 469	-25.038 982
3	-25.040 636	-25.039 606
4	-25.019 785	-25.038 761
5	-25.040 725	-25.038 204
6	-25.039 973	-25.038 740
7	-25.039 385	-25.037 943
8	-25.038 363	-25.037 027
均值	-25.037 035	-25.038 631
标准差	0.007 028	0.000 899

从表3中可以看出,在无遮挡时使用激光干涉仪作为测长模块的曲率半径测量仪器稳定性较差,与理想环境下的测量平均值相比相差0.002 273 mm,虽然使用光栅尺的曲率半径测量仪器无遮挡时相对于有遮挡的稳定性稍差一点,但都在同一个量级上,测量平均值相差0.000 578 mm。

综合上述2个实验可以看出,在相对理想的测量环境中,使用激光干涉仪作为测长模块的曲率半径测量仪器和光栅尺测长的差动共焦曲率半径测量仪器稳定性一致,且光栅尺测长的差动共焦曲率半径测量仪器测量精度满足高精度曲率半径测量要求;在有环境干扰的一般环境中,栅尺测长的差动共焦曲率半径测量仪器抗环境干扰能力强、稳定性好,可以使用在工厂环境中。

4 结论

本文研制的基于光栅尺测长的激光差动共焦曲率半径测量系统,依据差动共焦精确定焦技术确定猫眼位置和共焦位置,利用光栅尺精确测长,继而实现曲率半径的测量,实验验证其相对测量精度可达 5×10^{-6} ,满足高精度曲率半径测量需求。使用光栅尺作位置探测器,抗环境干扰能力强、稳定性好、开机速度快,适用于工厂等一般环境。光栅尺较激光干涉仪成本降低了90%,在很大程度上降低了仪器研发成本,符合仪器批量化

生产思想,为工厂和公司使用曲率半径测量仪器提供了可能。

参考文献:

- [1] Ding Xiang, Li Fei, Hong Baoyu. Curvature radius measurement by three-dimension profilometry [J]. Journal of Applied Optics, 2012,33(4):761-765.
定翔,李飞,洪宝玉. 三维轮廓扫描法测量透镜曲率半径的实验研究[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 761-765.
- [2] Medicus K M, Snyder J J, Davies A. Modeling the interferometric radius measurement using Gaussian beam propagation[J]. Applied Optics, 2006,45(34): 8621-8628.
- [3] Fernandez J F, Soares O D D, Perez-Amor M. Curvature radius measurement of reflecting surfaces by moire deflectometry[J]. SPIE, 1987,863:185-192.
- [4] Yang Zhongming, Gao Zhishan, Qun Yuan, et al. Radius of curvature measurement based on wavefront difference method by the point diffraction interferometer [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013,56:35-40.
- [5] Malacara D. Optical shop testing[M]. America: Wiley Interscience, 1992:821-823.
- [6] Gates J W. A precision spherometer[J]. Journal of Scientific Instruments, 1953,31:60-64.
- [7] Pi Y, Reardon P J. Determining parent radius and conic of an off-axis segment interferometrically with a spherical reference wave[J]. Optics Letters, 2007, 32:1063-1065.
- [8] Yang Xiang. Focus retrocollimated interferometry for long radius of curvature measurement[J]. Applied Optics, 2001,40(34):6210-6214.
- [9] Sun Ruoduan, Qiu Lirong, Yang Jiamiao, et al. Development of laser differential confocal radius measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011,32(12):2833-2838.
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): 2833-2838.
- [10] Qiu Lirong, Li Jia, Zhao Weiqian. Laser confocal measurement system for curvature radii of lenses [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2):246-252.
邱丽荣,李佳,赵维谦. 激光共焦透镜曲率半径测量系统[J]. 光学精密工程, 2013,21(2):246-252.

- [11] Zhao Weiqian, Sun Ruoduan, Qiu Lirong. Laser differential confocal radius measurement [J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2345-2360.
- [12] Sun Ruoduan, Qiu Lirong, Yang Jiamiao. Laser differential confocal radius measurement system[J]. Applied Optics, 2012, 51(26): 6275-6281.
- [13] Selberg L A. Radius measurement by interferometry [J]. Optical Engineering, 1992, 31(9): 1961-1966.