

基于自准直原理的小视场镜头波像差测试系统

张学敏^{1,2} 魏儒义^{1,2} 李 华^{1*} 段嘉友¹ 杨建峰¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为实现对小视场光学镜头波像差的快速、高精度检测,将自准直原理与斐索型激光球面干涉仪检测波像差原理结合起来,提出一种基于自准直原理的光学镜头波像差检测系统。介绍了斐索型激光球面干涉仪检测波像差的工作原理,并详细论述了基于自准直原理的波像差检测系统的装调及检测方法。结合自准直光路的特点,实现对干涉仪光轴、被测光学镜头光轴以及高精度平面反射镜光轴的精确定轴,从而实现了系统光路的快速装调。实验证明,此系统可有效解决小视场光学镜头在波像差检测过程中的光轴偏斜问题,实现小视场光学镜头波像差快速、准确的检测。

关键词 测量;波像差;自准直;小视场;干涉仪

中图分类号 O436;TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s108011

Wave Aberration Measuring System of Optical Lens with Small-Field of View Based on Auto-Collimating Principle

Zhang Xuemin^{1,2} Wei Ruyi^{1,2} Li Hua¹ Duan Jiayou¹ Yang Jianfeng¹

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Xi'an, Shaanxi 710119, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to measure the wave aberration of optical lens with small field of view rapidly and precisely, a new wave aberration measuring system based on both auto-collimation principle and Fizeau spherical laser interferometer measurement principle is described. The wave aberration measurement principle by Fizeau spherical laser interferometer is introduced. The assembling and measuring methods of this new auto-collimation-based wave aberration system are discussed and analyzed in detail. By using the characteristic of auto-collimation optics, the interferometer's axis, the optical lens's optical axis and the high-precision reflector's axis are precisely determined, and the fast assembly of the optical system is implemented too. Analyses reveal that this system can be an effective solution to the optical axis deviation problem in measuring the wave aberration of optical lens with small-field of view, and implementing the wave aberration test of optical lens rapidly and accurately.

Key words measurement; wave aberration; auto-collimating; small-field of view; interferometer

OCIS codes 080.1010; 080.3630; 260.3160

1 引言

光学系统波像差是表征光学系统成像质量的重

要指标之一^[1],它与光学系统的焦距、相对孔径等性能参数无关,但与其他像质评价指标如中心点亮度、

收稿日期: 2011-07-25; **收到修改稿日期**: 2011-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(40805013)资助课题。

作者简介: 张学敏(1986—),女,硕士研究生,助理研究员,主要从事光学装调与检测等方面的研究。

E-mail: zhangxuemin0325@gmail.com

导师简介: 杨建峰(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事嫦娥工程光学相机的研究和研制工作方面的研究。

E-mail: yangjianfeng@opt.ac.cn

* **通信联系人**。E-mail: lihua@opt.ac.cn

光学传递函数等有密切关系,可以准确反映出整个光学系统的性能。在大多数光学镜头的波像差检测工作中,许多结果都是以干涉条纹的分布形式记录下来,通过对干涉条纹进行分析来获得所需信息^[2],因此如何快速并准确地得到干涉条纹是整个检测过程的关键。

小视场光学镜头由于视场角小,其面形数据更易受到镜头相对于检测仪器的调整精度的影响,通常从对面形干涉条纹的表现形式进行人工判断,其结果随机性极强,并在条纹不规则情况下变得复杂^[3],对操作者的经验要求很高,导致小视场光学镜头波像差的准确检测很难控制。本文基于自准直经纬仪与平面反射镜组合的自准直法提出一种改进的波像差检测系统,可实现系统光路的快速高精度装调,为镜头波像差的准确测量提供新的途径。

2 传统镜头波像差检测方法

斐索型激光球面干涉仪以其高稳定性、高精度性广泛应用于高精度光学件的波像差测量。图1为该干涉仪的基本光路图^[4],激光器发出的激光经过扩束准直镜组转变为平行光,再经过标准镜头出射具有一定孔径及焦距的参考光束,调节被测镜的位置使得被测镜的焦点与标准镜头的焦点重合,光路原路返回,与参考光发生干涉并成像在 CCD 上,最后根据干涉条纹的形状计算出被测镜的波像差。

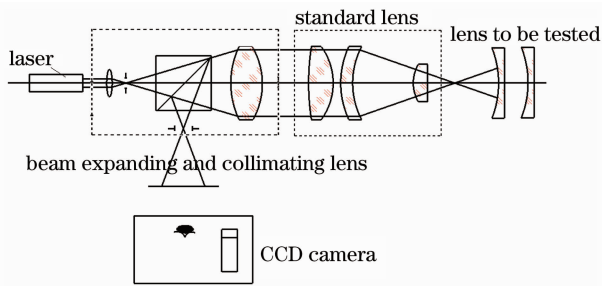


图1 斐索型激光球面干涉仪光路图

Fig. 1 Light path of Fizeau-type spherical laser interferometer

图2为使用斐索型激光球面干涉仪对光学镜头波像差^[5,6]进行检测的系统示意图,系统由干涉仪、被测镜头、平面反射镜以及计算机组成。为降低整个测试系统的系统误差,要求平面反射镜的波像差优于被测镜头2倍以上。检测系统要求干涉仪光轴、被测镜头光轴以及平面反射镜法线三者完全共轴。

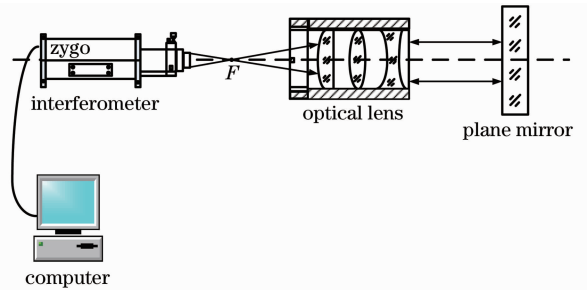


图2 干涉仪检测镜头波像差示意图

Fig. 2 Diagram of wave aberration testing by using interferometer

3 改进的波像差检测系统

3.1 系统组成及工作原理

图3为改进的、基于自准直原理检测光学镜头波像差的系统示意图。从图中可以得出,本系统有三条自准直^[7]光路,分别为自准直经纬仪与光轴指向工装中的平板玻璃组成的自准直光路、自准直经纬仪与平面反射镜组成的自准直光路以及干涉仪与平面反射镜组成的自准直光路。通过自准直经纬仪分别与被测镜头光轴指向工装以及平面反射镜的自准直保证了被测镜头光轴与平面反射镜的垂直性,再通过干涉仪与平面反射镜的自准直保证了干涉仪光轴与平面反射镜的垂直性,从而实现了干涉仪、被测镜头以及平面反射镜的光轴一致性。

自准直经纬仪用来观察系统光路中的自准像,由于波像差对系统光轴一致性非常敏感,因此要求自准直经纬仪的自准精度为 $0.5''$,从而实现光轴的高精度定位。

对于焦距较短的光学镜头,干涉仪与镜头之间的距离较短,检测系统光路比较紧凑。如果将自准直经纬仪放在干涉仪与被测镜头之间,操作空间较小甚至没有,因此加入五棱镜进行光路转折,可以方便地观察被测镜头以及平面反射镜的自准直情况。

为了精确地标定被测镜头的光轴指向,设计了光轴指向工装。光轴指向工装是一个经过光学定心^[8,9]加工的平板玻璃,图4为其结构示意图,尾座法兰用于实现指向工装与定心车床的连接,A表示工装镜框内圆尺寸,B面为定心加工的切断面。平板玻璃由直径为无穷大的两个平面组成,其光轴为平面表面法线,且要求平板玻璃上下表面的平行度优于 $5''$ 。通过光学定心加工的方法可以保证平板玻璃的光轴与其镜框内圆机械轴同轴^[8,9],且要求镜框内圆周尺寸与被测镜头镜框的外圆周尺寸紧密

配合。此外,为了保证被测镜头的外圆机械轴与其光轴重合,通过光学定心的原理在定心车床上找到镜头的光轴位置,使用车削^[9,10]工具轻加工镜框外圆,从而保证了外圆机械轴与镜头光轴的同轴性^[11,12]。根据传递原则,光轴指向工装的光轴可以用来代替被测镜头的光轴,定心加工的精度为微米量级,因此光轴替代精度可以达到角秒级,可以精确地标定被测镜头的光轴指向。

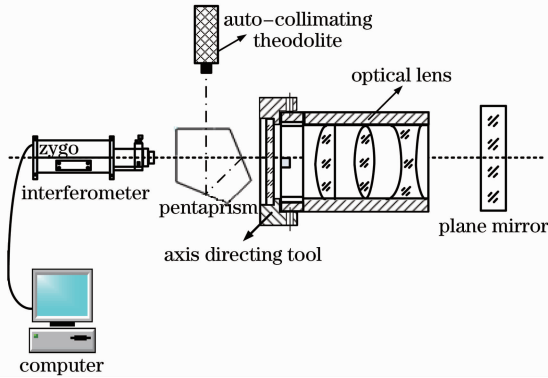


图3 基于自准直原理的镜头波像差检测系统示意图
Fig. 3 Diagram of wave aberration testing system based on the principle of auto-collimation

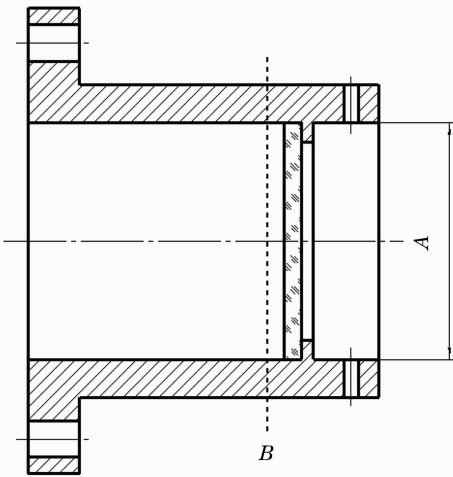


图4 光轴指向工装结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of axis directing tool

3.2 检测系统光路装调

基于自准直原理检测光学镜头波像差的检测步骤如下:

- 1) 干涉仪放置在五维调整台上,可实现前后平移、左右平移、上下平移以及左右、上下偏摆的调节;
- 2) 在干涉仪出射光方向摆放平面反射镜,平面反射镜可以实现上下、左右偏摆调节,其口径要求大于被测镜头的通光口径,且面形精度优于被测镜头两倍以上;

3) 在干涉仪和平面反射镜中间放置五棱镜,保证五棱镜与平面反射镜等高;

4) 在五棱镜的入射端放置自准直经纬仪,与五棱镜等高,调整经纬仪与大地水平;

5) 通过经纬仪观察其发出的光束经五棱镜转折并经平面反射镜反射后的自准像,调节平面反射镜使其自准像与经纬仪十字线重合,从而保证了平面反射镜法线与大地水平;

6) 打开干涉仪,不加标准镜头,此时干涉仪出射平行光,移去五棱镜,调节干涉仪使得其发出的激光与其经平面反射镜反射的光束重合,从而实现干涉仪出射光光轴与平面反射镜垂直;

7) 重新放入五棱镜,复检平面反射镜在经纬仪中的自准直情况;

8) 将被测小视场镜头固定在五维调整架上,放置在五棱镜与平面反射镜之间,高度与整个系统光路高度一致,调整镜头使其工装平板玻璃的反射像在经纬仪中自准直,从而保证了被测镜头、干涉仪以及平面反射镜的光轴一致;

9) 将五棱镜从光路中移走,将标准镜头装在干涉仪上;

10) 通过前后、左右平移干涉仪,使得测试干涉条纹尽可能少并且平整、竖直,得到的干涉条纹成像在 CCD 上并在计算机显示器中显示,可通过干涉仪配置的测量软件测量出被测镜头的峰谷(PV)值及均方根(RMS)值。

以上为基于自准直原理检测光学镜头波像差的具体检测步骤,相比传统的检测系统,改进的系统加入了新的测试组件,复杂度提高,但却使整个检测过程有据可循,消除了传统检测系统的随机性以及对操作者经验的依赖性。

3.3 实验结果分析

某光学镜头视场角为 1.3° , 焦距为 50 mm, F 数为 5, 要求镜头波像差优于 0.025λ , 达到衍射极限。由于镜头像质参数要求很高,在装配过程中需要对镜头波像差进行检测,若未满足要求需要多次装配调整,同时需要进行多次波像差检测,工作量很大。应用传统的波像差检测方法,使得整个检测过程完全重复,而使用基于自准直原理的波像差检测方法,只需重复上述检测步骤中的 8)~10),大大提高了工作效率。图 5 为使用上述两种方法得到的干涉图,由测量结果可知,两种方法的测量结果吻合良好。因此,基于自准直原理的波像差检测方法不但可以实现波像差的准确测量,并且测量方法更加有效。

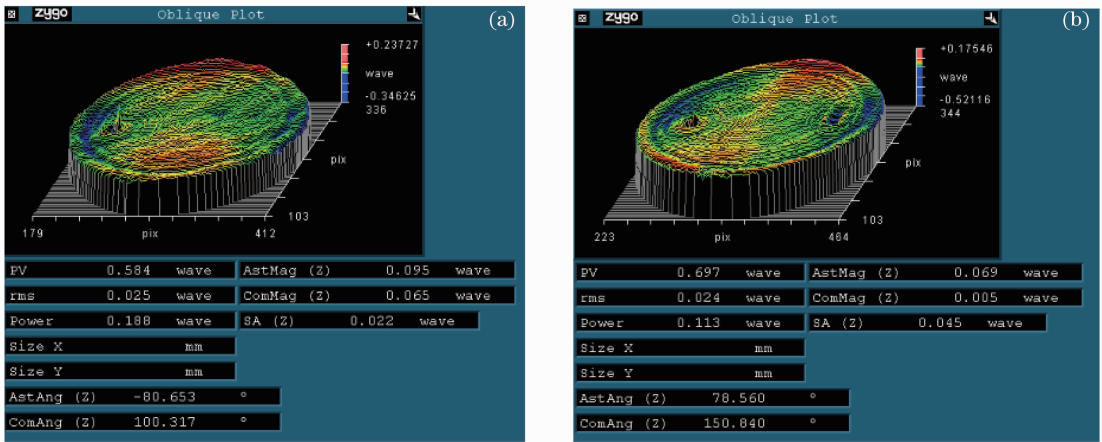


图 5 两种方法检测波像差得到的干涉图。(a)传统检测方法 RMS 值为 0.025λ ；
(b)基于自准直原理的波像差检测方法 RMS 值为 0.024λ

Fig. 5 Interference figure obtained from two methods of wave aberration measuring. (a) RMS value is 0.025λ based on traditional wave aberration measuring; (b) RMS value is 0.024λ based on auto-collimating principle

4 结 论

基于干涉仪检测波像差原理,从自准直测量原理出发,提出一种基于自准直原理的波像差检测系统,实现了光学镜头特别是小视场光学镜头波像差的快速、高精度检测;此外,对于批量生产的光学镜头以及需要多次装配调整的光学镜头,可大大提高波像差的检测效率,具有很好的工程应用价值。

参 考 文 献

- 1 Ma Dongmei, Chen Tuquan, Liu Zhixiang *et al.*. Application of phase retrieval technology in evaluation of optical imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17** (12): 2912~2918
马冬梅, 陈土泉, 刘志祥等. 位相复原技术在光学成像质量测评中的应用[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(12): 2912~2918
- 2 Wang Xiaohui, Mei Wenhui, Cao Genrui. Fourier transform phase shift interferometry in laser digital wavefront interferometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, **24**(4): 52~55
王晓辉, 梅文辉, 曹根瑞. 激光数字波面干涉仪傅里叶变换移相干涉术[J]. *光电工程*, 1997, **24**(4): 52~55
- 3 Cheng Haobo, Feng Zhijing. Error-separation model for interferometric testing aspheric surfaces based on wavefront aberrations [J]. *J. Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, **46**(2): 187~190
程灏波, 冯之敬. 波像差法构建非球面干涉检测的误差分离模型[J]. *清华大学学报*, 2006, **46**(2): 187~190
- 4 Sha Dingguo. *Optical Testing Techniques*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. 95~96
沙定国. *光学测试技术*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010. 95~96
- 5 Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan *et al.*. Concave aspherical surface testing with twin computer-generated holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1311~1317
谢意, 陈强, 伍凡等. 用双计算机全息图检测凹非球面

- [J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1311~1317
- 6 Zhang Dejiang, Liu Liren, Xu Rongwei *et al.*. Finite element analysis for wavefront error of lenses induced by gravity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 538~541
张德江, 刘立人, 徐荣伟等. 透镜自重变形引起波像差的有限元分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 538~541
- 7 Xu Xiufang, Hu Xiaodong, Chen Liangyi. The CCD electronic measurement technology of high precision auto-collimation teodolite[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2001, (1): 1~3
徐秀芳, 胡晓东, 陈良益. 高精度激光自准直经纬仪 CCD 电子测量技术[J]. *电子测量技术*, 2001, (1): 1~3
- 8 Ma Zhen, Li Yingcai, Fan Xuewu *et al.*. Study on optical centering of aspheric mirror by interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1455~1458
马臻, 李英才, 樊学武等. 非球面干涉定心方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1455~1458
- 9 Zhang Xuemin, Wei Ruyi, Hou Xiaohua *et al.*. Method of Dove lens assembling and adjustment based on optical alignment machining [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(4): 141~144
张学敏, 魏儒义, 侯晓华等. 基于光学定心加工的道威棱镜装配方法[J]. *光电工程*, 2011, **38**(4): 141~144
- 10 Zhou Fengli, Xu Zhaodong, Li Xin *et al.*. Research and application of lens centering technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(s2): 135~138
周凤利, 许照东, 李辛等. 透镜定心技术的研究及应用[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(s2): 135~138
- 11 Duan Xueting. Research on Consistency Assembling and Adjustment of Coaxial Optical System by the Aid of Computer [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006. 15~16
段学霆. 共轴光学系统计算机辅助光轴一致性装调研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006. 15~16
- 12 Wei Quanzhong. Research on Centering of High Performance Optical System[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2003. 14~16
魏全忠. 高性能光学系统定心研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2003. 14~16