

文章编号 2095-1531(2015)04-0621-08

## 镜面偏心测量光学系统设计及其杂光分析

郭帮辉\*, 李 灿, 王 健

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为了解决现有镜面偏心测量设备存在的问题,本文研究了一种采用切换镜头和调焦相结合的方法来设计的镜面偏心测量光学系统,使用这个光学系统,既能使被测镜面的曲率半径扩展到 $-\infty \sim +\infty$ 范围,又能保证测量精度。通过Lighttools软件对这个光学系统进行光线追迹,分析其杂光分布,结果表明:准直镜头内部多次反射产生的杂光强度很低,可以忽略。而当被测镜头中存在相邻球心像距的镜面时,产生的杂光强度比较大,在后续的图像处理过程中,必须增强目标图像的对比度。利用研制的镜面偏心测量设备进行测量实验,结果进一步验证了杂光分析的正确性。

**关键词:**中心偏心;杂光分析;切换镜头;调焦

中图分类号:TH74; TH703 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150804.0621

## Design of lens centering error measuring optical system and stray light analysis

GUO Bang-hui\*, LI Can, WANG Jian

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail:gbhyxl@163.com

**Abstract:** To improve current equipments in the market, a lens-eccentricity-measuring optical system that combines the focusing method and lens-switching method is designed in this paper. This optical system can be used to measure lens with curvature radius from  $-\infty$  to  $+\infty$ , as well as maintain the test accuracy. Lighttools software is used to trace the light ray and analyze stray light distribution of this optical system. Results show that the intensity of the stray light after multiple reflection inside the collimated lens is low and negligible. The stray light intensity becomes stronger when the image distances of sphere centers are nearby in the testing lens. So in the later image processing, the contrast of target images must be strengthened. Measurement experiments are done by using the equipment with this optical system. All the experimental results further verify the correctness of stray light analyzing.

**Key words:** centering error; stray light analyzing; lens switching; focusing adjustment

收稿日期:2015-04-20;修订日期:2015-05-11

基金项目:吉林省科技厅发展计划资助项目(No. 20125092);中国科学院院地合作资助项目(No. 2011CJT0004)

## 1 引言

光学系统已经广泛用于国防军事、航空航天、工业检测、安防监控和日常生活等多个领域<sup>[1-6]</sup>,许多应用领域对光学系统的性能要求很高,而光学镜头的装调精度对于光学系统性能指标影响很大<sup>[7-9]</sup>。为了保证光学镜头的装调精度,必须使光学镜头中各个镜面的中心偏差满足公差要求。目前,已有多种光学镜头辅助装调设备用于镜头装调过程中测量镜片的中心偏差<sup>[10-12]</sup>,这些辅助装调设备各有优缺点。例如,20世纪80年代,中科院成都光电所研制的定心仪采用内调焦的方式调节靶标聚焦点的位置,操作很方便,但是,在调焦的过程中,难以精确获得测量镜头组的放大倍率,从而降低了中心偏差的测量精度<sup>[13-15]</sup>。近年来,德国 Trioptics 公司研制的定心仪采用切换镜头的方式来调节靶标聚焦点的位置,虽然提高了中心偏差的测量精度,但是,由于可切换的镜头数有限,无法测量较大曲率半径的镜面中心偏差<sup>[16]</sup>。

为了解决上述国内外定心仪存在的问题,本文采用调焦和切换镜头相结合的方法设计镜面中心偏差测量设备的光学系统,实现靶标聚焦点的连续调节,既能用于各种曲率半径镜面的中心偏差测量,又能保证中心偏差的测量精度。另外,本文还对该光学系统进行光线追迹,分析了系统中的杂光,并利用研制的中心偏差测量设备验证杂光分析的正确性。

## 2 镜面偏心测量原理

镜面中心偏差测量原理如图1所示,采用反射式测量方法,系统的组成结构分为测量头和精密旋转台两部分,其中测量头由光源、分光棱镜、测量镜组、成像探测器组成。测量头部分连接在竖直导轨上,可以上下移动。

光源产生十字靶标,经过分光棱镜和测量镜组,形成会聚光束,或者发散光束,会聚光束有一个会聚点,发散光束的反向延长线也会聚在一点,统称为会聚点。在测量过程中,竖直导轨带动测量头上下移动,使靶标的会聚点与当前被测镜面

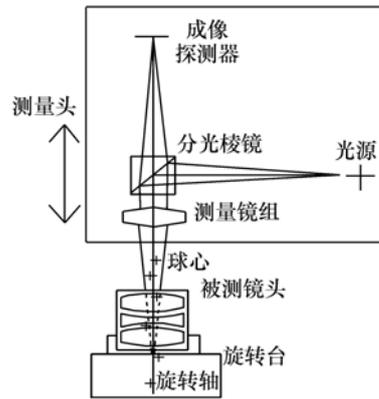


图1 镜面中心偏差测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of lens centering error measurement

的球心重合,此时,入射到被测镜面的光束,在被测透镜表面发生部分反射,反射光束沿原路返回测量镜组中,经过分光棱镜,聚焦在成像探测器的靶面上,形成清晰的十字线图像。

被测镜头放置在旋转台的中心,在测量过程中,被测镜头绕着转台的中心轴旋转,该转轴即是中心偏差测量过程中的参考轴,如果被测镜面的球心不在转轴上,在成像探测器的靶面上,十字靶标画出圆形轨迹,靶标像的轨迹如图2所示。根据圆的直径和测量镜组的放大率可以计算被测镜面的球心相对参考轴的中心偏差。利用此方法,可以得到所有镜面球心的中心偏差。光学镜头装调人员可以根据测量得到的中心偏差值,将各个球心调节到参考轴上,或者调节到公差范围内。

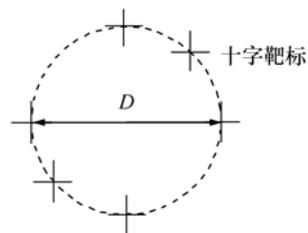


图2 靶标像的轨迹

Fig. 2 Trajectory of target image

镜面的角偏心率可以表示为:

$$\chi = \frac{1}{4} \arctan\left(\frac{D/\beta}{R}\right), \quad (1)$$

式中, $D$ 是探测器上靶标中心所画圆的直径, $\beta$ 是测量镜头组的垂轴放大率, $R$ 是被测球面的曲率半径。

镜面的线偏心率可以表示为:

$$a = \frac{D}{4\beta}, \quad (2)$$

式中, $a$ 为线偏心率。

### 3 光学系统设计

目前,现有的光学镜头中心偏差测量设备在光路上主要采用两种方法来改变十字靶标聚焦点的位置,一种称为内调焦方法,另一种称为切换镜头方法。内调焦方法通过改变测量镜头组的焦距来实现靶标聚焦点位置的连续调节,该方法的优点是操作方便,其缺点是存在调节盲区。根据文献资料,其盲区大约为 $-400 \sim +400$  mm,而且,在有些情况下,测量镜头组的调焦量很小,垂轴放大率的变化率很大,此时得到的垂轴放大率误差较大,从而导致中心偏差测量精度不高。

切换镜头方法通过更换测量镜组下端的镜头,改变测量镜组的焦距,从而实现靶标聚焦点位置的改变。该方法的优点是能得到精确的垂轴放大率,从而具有较高的中心偏差测量精度;其缺点是需要的镜头数量较多,不仅增加了成本,而且无法测量大曲率半径表面的中心偏差。根据其产品资料,曲率半径大于 $2\,000$  mm就无法测量。

为了解决现有中心偏差测量系统存在的问题,在上述两种光路基础上,取其优点,避免其缺点,采用调焦和切换镜头相结合的技术方案,本文设计了光学镜头中心偏差测量仪的光学系统,其光路原理图如图3所示,图3(a)是调焦模式的光路图,图3(b)是切换镜头模式的光路图。

光路结构如下:光源的靶标面与探测器的靶面到分光棱镜中心的距离相等,即为共轭面。光源产生的靶标光束经过分光棱镜,部分反射,再经过测量镜组,进行准直或者会聚。测量镜头组由两个双胶合镜组成。在设计过程中,需要综合考虑光学系统的极限分辨率和视场角之间的关系。本文选用的探测器分辨率是 $1\,390$  pixel  $\times$   $1\,040$  pixel,像元大小为 $3.75$   $\mu\text{m}$ ,当探测器靶面

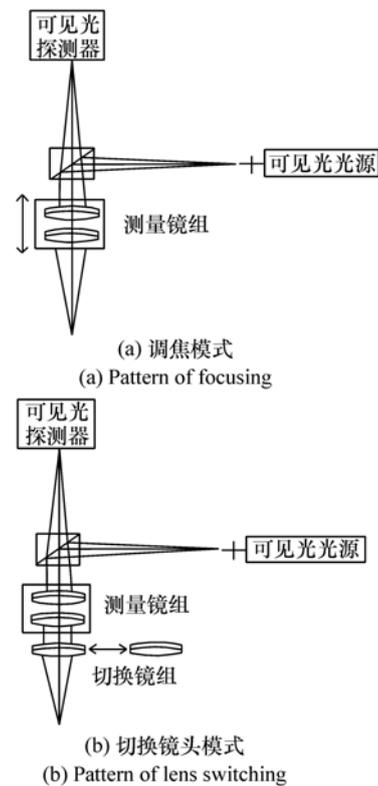


图3 镜面中心偏差测量光路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of optical path of lens centering error measurement

位于测量镜组的焦面时,全视场角为 $1.37^\circ \times 1.02^\circ$ ,极限分辨率为 $0.017$  mrad。

在调焦模式中,位于棱镜下方的测量镜组能够沿光轴方向上下移动,改变测量镜组与探测器靶面的距离,从而使十字靶标的聚焦位置在 $-\infty \sim -2\,000$  mm和 $2\,000$  mm  $\sim +\infty$  范围内连续调节;在切换镜头模式中,测量镜组移动到某个位置,使其光源靶面位于测量镜组的焦面上,则可以产生靶标的平行光束,在准直镜头组的下方增加一个双胶合镜头,该镜头有多种型号,可以进行切换,同时,该测量系统放置在竖直导轨上,能够整体上下移动,因此,此工作模式能够使十字靶标的聚焦位置在 $-2\,000 \sim 2\,000$  mm 范围内连续调节。这两种工作模式相互补充,能够保证十字靶标在 $-\infty \sim +\infty$  范围内连续调节,因此,利用该系统可以测量各种曲率半径的光学镜面的中心偏差。

最终设计的光路如图4所示。图4(a)和

图 4(b)是调焦模式的光路图,图 4(a)的靶标聚焦点位于 +2 000 mm 的位置,图 4(b)的靶标聚焦点位于 -2 000 mm 的位置,图 4(a)和图 4(b)各有两幅图,分别为光路全图和局部放大图。图 4(c)和图 4(d)是切换镜头模式的光路图,图 4(c)的靶标聚焦点位于 +200 mm 的位置,图 4(d)的靶标聚焦点位于 -200 mm 的位置。

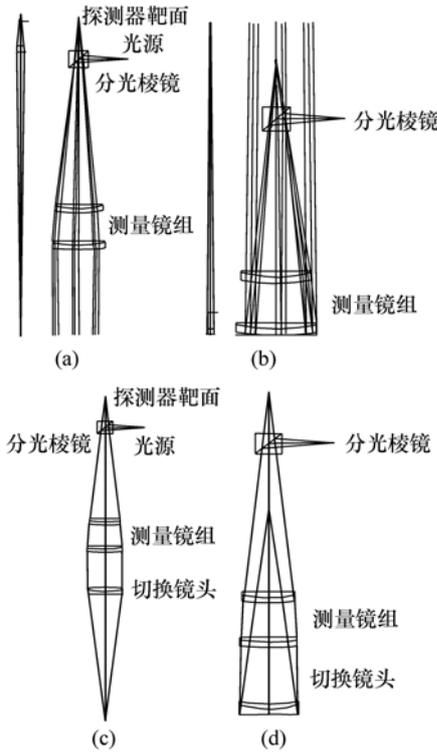


图 4 镜面中心偏差测量光路设计图

Fig. 4 Optical design diagram of lens centering error measurement

准直镜组的焦距是 218 mm,其调焦的行程是 45 mm,靶标的聚焦点可以在  $-\infty \sim -2\ 000$  mm 和  $2\ 000$  mm  $\sim +\infty$  范围内连续调节,调焦过程中,准直镜组的放大率变化速率较小,有利于得到其精确放大率。

可切换的镜头组一共 10 个,其工作距分别为:400、800、1 200、1 600、2 000、-400、-800、-1 200、-1 600 和 -2 000。选用的垂直导轨的行程是 600 mm,垂直导轨配合切换镜头移动,能够保证十字靶标的聚焦点在  $-2\ 000 \sim +2\ 000$  mm 内连续调节。

设计的光学系统传递函数如图 5 所示,图 5

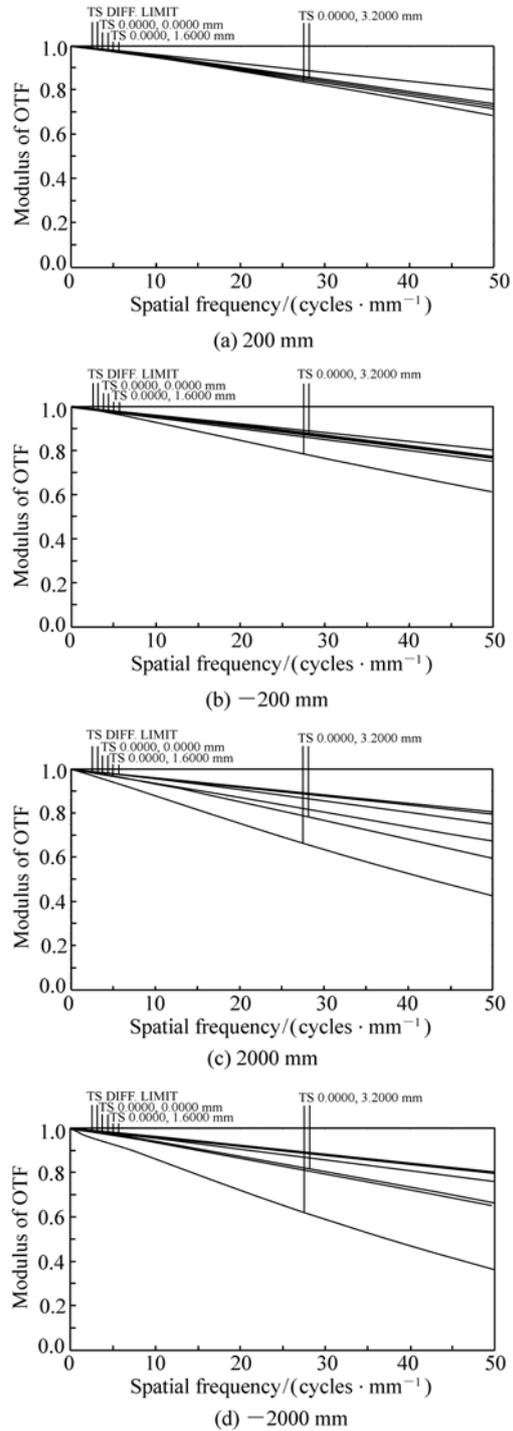


图 5 光学系统传递函数

Fig. 5 MTF of the optical system

(a)、(b)、(c)、(d) 分别是物距为 200、-200、2 000 和 -2 000 mm 的光学系统传递函数曲线。从图 5(a)、图 5(b) 可以看出,物距为 200 和 -200 mm,在空间频率为 50 ly/mm 时,全视场内

的传递函数值大于 0.6;物距为 2 000 和 -2 000 mm,在空间频率为 50 ly/mm 时,中心视场和 0.5 视场的传递函数值大于 0.6,1 视场的传递函数值大于 0.3。具有以上传递函数曲线的光学系统能够得到较好的成像质量,完全能够满足中心偏差测量要求。

## 4 光学系统杂光分析

在光学系统中,杂光是指不按预定的传输路径到达探测器靶面的光束,杂光会在一定程度上降低目标信号的对比度<sup>[17-18]</sup>,在光学系统的设计过程中,对光学系统的杂光进行分析非常必要,通过杂光分析的结果,找到光学系统中杂光产生的源头和传输路径,采取合适的措施,降低光学系统中的杂光水平,从而提高目标信号的对比度。

根据此镜面偏心测量光学系统的实际使用情况,需要分析以下几种情况产生的杂散光:

- (1) 准直镜头组各表面的反射;
- (2) 被测镜头中的各表面的反射;

采用 Light Tools 软件建立设计的光学系统光线追迹模型,如图 6 所示。由于被测镜面的曲率半径多种多样,因此,为了简化分析过程,只考虑被测镜面为平面时的探测器照度分布。在该光线



图 6 光学系统的光线追迹图

Fig. 6 Ray trace of the optical system



图 7 探测器靶面的照度

Fig. 7 Illumination on surface of the detector

追迹模型中,被测镜面的反射率为 2%,光源的辐射通量是 1 W,被测镜面反射光束在探测器靶面的照度分布如图 7 所示,在靶标聚焦点的中心,最大照度达到  $0.4 \text{ W/mm}^2$ 。

### 4.1 准直镜头组各表面的反射

准直镜头组各表面反射的光线追迹模型如图 8 所示,光源的辐射通量是 1 W,准直镜头组各个表面镀膜之后的反射率是 2%。采用 Light Tools 软件进行光线追迹,得到的探测器靶面照度分布如图 9 所示,探测器靶面上的光束没有形成聚焦,最大照度只有  $1.2 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2$ ,远小于  $0.4 \text{ W/mm}^2$ ,这种情况下产生的杂光照度,远小于被测平面反射产生的照度,因此,可以忽略准直镜头组各表面的反射对靶标图像对比度的影响。

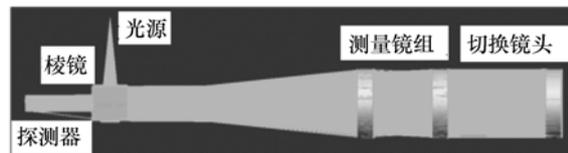


图 8 准直镜头组反射的光线追迹图

Fig. 8 Trace of light reflected from collimating lens

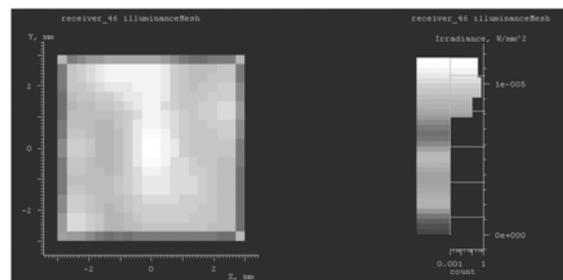


图 9 准直镜头组反射产生的靶面照度

Fig. 9 Illumination on surface of the detector produced by light reflected from collimating lens

### 4.2 被测镜头中各表面的反射

在镜面的中心偏差测量过程中,靶标光束能够到达被测镜头的各个表面,对于被测镜面,其他各个表面反射的光束都是杂光。由于被测镜头结构千变万化,无法用光线追迹的方法模拟所有的情况,因此,本文只分析被测镜面球心像附近存在其他镜面球心像的情况,作为被测镜头中产生杂光的示例。

被测镜头组反射的光线追迹图如图 10 所示,

被测镜头组反射产生的靶面照度如图 11 所示。设被测镜面与某镜面的球心像距分别为 1、2、3、5 和 10 mm, 被测镜面是上表面, 通过软件模拟, 可以得到下表面反射光束在靶面上的照度, 如表 1 所示。从表中可以看出, 当球心像距小于 5 mm 时, 杂光形成的相对照度大于 15%, 并且, 杂光会聚在靶面上形成鬼像, 对靶标图像形成较大干扰。当球心像距大于 10 mm 时, 杂光形成的相对照度小于 4%, 对靶标图像的干扰较小。



图 10 被测镜头组反射的光线追迹图

Fig. 10 Trace of light reflected from the measured lens

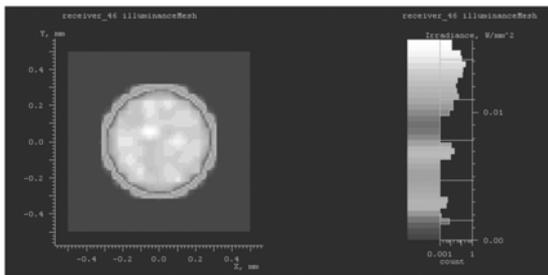


图 11 被测镜头组反射产生的靶面照度

Fig. 11 Illumination on surface of the detector produced by light reflected from the measured lens

表 1 不同球心像距形成的杂光照度

Tab. 1 Illumination of stray light produced by different image distances of sphere centres

| 厚度/mm                          | 1     | 2     | 3     | 5     | 10    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 靶面照度/<br>( $W \cdot mm^{-2}$ ) | 0.249 | 0.136 | 0.095 | 0.063 | 0.016 |
| 相对照度/%                         | 62.5  | 34    | 23.7  | 15.7  | 4     |

### 5 实验分析

本文研制的镜面偏心测量系统的实物如图 12 所示, 利用该设备对镜面的中心偏差进行测量。自主研发的软件测量界面如图 13 所示。

图 13 的图像显示区域得到的十字靶标图像, 其对应的被测镜面的球心像附近 10 mm 范围内没有其他球心像, 可以看出, 该十字靶标的图像对比度比较高, 说明测量镜头组内部产生的杂光对图像对比度的影响很小, 与上节的分析结果一致, 验证了上节软件模拟的正确性。



图 12 镜面偏心测量设备

Fig. 12 Equipment of lens centering error measurement

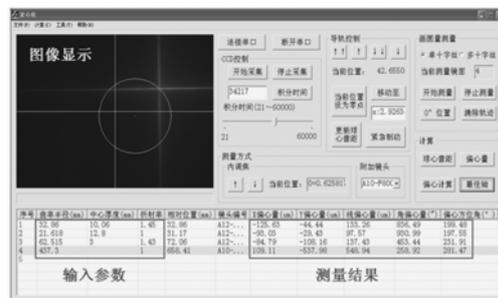


图 13 镜面偏心测量系统的软件界面

Fig. 13 Software interface of lens centering error measurement system

另外, 图 13 下方的表格中, 包括被测镜头输入参数部分和测量结果显示部分。输入镜头各个镜面的曲率半径、中心厚度和镜片的折射率, 选用合适的切换镜头, 或者对测量镜组进行调焦, 并且调节竖直导轨的位置, 从上至下, 依次测量各个镜面的中心偏差。镜面偏心的测量结果包括线偏心量和角偏心量, 以及偏心方位角, 分别显示在相应的表格中。

图 14 是被测镜头中有两个镜面的球心像距

相差 1.86 mm 的十字靶标的图像,从图中可以看出,产生了两个十字丝图像,其中一个十字丝图像比较清晰,边界较明显,另外一个十字丝图像比较模糊,线条比较粗,说明当被测镜头中两个镜面的球心像距比较近时,杂光干扰比较严重,实验结果与上节分析结果一致。这种存在杂光干扰的情况,在一定程度上会降低十字靶标中心的定位精度,从而影响镜面中心偏差的测量精度。因此,为了提高各种情况下的中心偏差测量精度,需要研

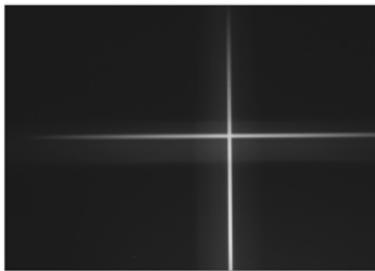


图 14 被测镜头内部反射产生的杂光图像

Fig. 14 Picture of stray light reflected in measured lens

究复杂背景下的十字靶标提取算法,提高十字中心的定位精度。

## 6 结 论

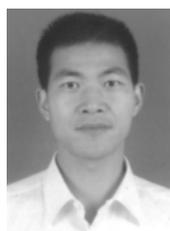
本文设计了镜面偏心测量光学系统,该系统采用调焦和切换镜头相结合的方式,实现十字靶标在  $-\infty \sim +\infty$  范围内连续调节,从而能够测量各种曲率半径的镜面中心偏差。利用 Lighttools 软件建立光线追迹模型,对该系统的杂光进行分析,该系统的杂光主要来源于准直镜头组和被测镜头的各个镜面的多次反射,分析结果表明,准直镜头组内部产生的杂光较小,可以忽略不计,而当被测镜头中的球面存在相邻的球心像距时,会产生较强的杂光,对目标图像的对比度影响较大。利用上述方案,成功研制了一台镜面偏心测量设备,并进行镜面偏心测量实验,实验结果验证了杂光分析的正确性。本文的工作对于镜面偏心测量系统的研制具有一定的参考意义。

## 参考文献:

- [1] 王建立,刘欣悦. 智能光学的概念及发展[J]. 中国光学,2013,6(4):437-448.  
WANG J L,LIU X Y. Concept and development of smart optics[J]. *Chinese Optics*,2013,6(4):437-448. (in Chinese)
- [2] 宣明,王家琪. 长春光机所航天光学遥感器研制基地建设进展[J]. 中国光学,2015,8(1):1-16.  
XUAN M,WANG J Q. Current status of space remote sensing equipments research base in CIOMP[J]. *Chinese Optics*,2015,8(1):1-16. (in Chinese)
- [3] 张葆,崔恩坤,洪永丰. 红外双波段双视场共光路光学系统[J]. 光学精密工程,2015,23(2):395-401.  
ZHANG B,CUI E K,HONG Y F. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common-path optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2015,23(2):395-401. (in Chinese)
- [4] 伍雁雄,张新,张继真,等. 星光折射自主导航星敏传感器及光学系统设计研究[J]. 光学学报,2015,35(2):0222001-1-10.  
WU Y X,ZHANG X,ZHANG J ZH,*et al.*. Research on the autonomous star sensor based on indirectly sensing horizon and its optical design[J]. *Acta Optica Sinica*,2015,35(2):0222001-1-10. (in Chinese)
- [5] 王峰. 国内镜头市场的发展现状与未来[J]. 中国安防,2013(6):62-66.  
WANG F. The current situation and future of Chinese lens field[J]. *China Security & Protection*,2013(6):62-66. (in Chinese)
- [6] LEE H S,JEON W T,KIM S W. Development of Plastic lenses for high-resolution phone camera by injection-compression molding[J]. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*,2013,37(1):39-46.
- [7] LO Y C,HUANG K T,LEE X H,*et al.*. Optical design of a Butterfly lens for a street light based on a double-cluster LED[J]. *Microelectronics Reliability*,2012,52(5):889-893.
- [8] MORRISON E,MEERS B J,ROBERTSON D I,*et al.*. Automatic alignment of optical interferometers[J]. *Applied Optics*,1994,33(22):5041-5049.
- [9] MORRISON E,MEERS B J,ROBERTSON D I,*et al.*. Experimental demonstration of an automatic alignment system for

- optical interferometers[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(22):5037-5040.
- [10] 魏全忠,叶华寿,王肇勋. 电视内调焦定心仪及其应用[J]. *光电工程*, 1998, 25(6):106-110.  
WEI Q ZH, YE H SH, WANG ZH X. Television interior focusing and centering instrument and its application[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, 25(6):106-110. (in Chinese)
- [11] 杜洋,高志山. 使用高精度三坐标测量仪实现透镜定中心[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3):639-644.  
DU Y, GAO ZH SH. Lens centering using high-precision three coordinate measuring machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):639-644. (in Chinese)
- [12] A DE CASTRO A, ROSALES P, MARCOS S. Tilt and decentration of intraocular lenses in vivo from Purkinje and Scheimpflug imaging: validation study[J]. *J. Cataract & Refractive Surgery*, 2007, 33(3):418-429.
- [13] HOPKINS H H, TIZIANI H J. A theoretical and experimental study of lens centring errors and their influence on optical image quality[J]. *British Journal of Applied Physics*, 1966, 17(1):33-54.
- [14] 王肇勋. ZX-3 型内调焦对心器研制工作报告[J]. *西安工业大学学报*, 1984(2):11-23.  
WANG ZH X. Report of researching ZX-3 focusing and centering instrument[J]. *J. Xi'an Technological University*, 1984(2):11-23. (in Chinese)
- [15] 王肇勋. 整组物镜各面偏心差的测量[J]. *光电工程*, 1980(1):1-11.  
WANG ZH X. Measurement of lens centre error[J]. *Opti-electronic Engineering*, 1980(1):1-11. (in Chinese)
- [16] HEINISCH J, WEDEL D E, KREY S, et al. . Measurement of the positions of centres of curvature of optical surfaces of a multi-lens optical system; America, US20120133924A1 [P]. 2012-5-31.
- [17] 田铁印,王红,冯晟杰. 三线阵测绘相机光学系统的杂光分析与计算[J]. *中国光学*, 2013, 5(6):583-589.  
TIAN T Y, WANG H, FENG SH J. Analysis and calculation on stray light of three line array mapping camera[J]. *Chinese Optics*, 2013, 5(6):583-589. (in Chinese)
- [18] 张红鑫,卢振武,孙强,等. 折/衍混合长波红外凝视成像系统的杂散光分析[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(5):402-407.  
ZHANG H X, LU ZH W, SUN Q, et al. . Stray light analysis of diffractive/refractive LW IR staring imaging system[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2009, 2(5):402-407. (in Chinese)

#### 作者简介:



郭帮辉(1983—),男,湖北鄂州人,博士,助理研究员,2008年于华中科技大学获得硕士学位,2014年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学系统设计及光学镜头装调方面的研究。E-mail:gbhyxl@163.com



王健(1980—),男,吉林辉南人,博士,副研究员,2005年于南开大学获得硕士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail:wangj@ciomp.ac.cn



李灿(1985—),男,山东济宁人,博士,2009年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学系统设计等方面的研究。E-mail:LC19851125@163.com