

## 长焦距红外光学系统焦距检测方法

姚震<sup>1,2</sup>, 吴易明<sup>1</sup>, 高立民<sup>1</sup>, 吴璀罡<sup>1</sup>, 梅超<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 强激光主机装置中, 需要利用各种不同焦距的光学透镜对光束进行扩束和准直, 透镜焦距的准确程度直接影响系统的整体性能, 所以对透镜焦距的准确测量尤为重要。提出了一种利用哈特曼-夏克波前检测仪和旋转平面镜辅助测量长焦距红外光学系统焦距的新方法。给出了系统的测量原理, 使用 ZEMAX 光学仿真软件仿真分析了待测透镜不同通光口径对焦距测量的影响, 并且通过误差理论推导出平面镜旋转角度与系统测量误差之间的解析表达式。最后进行了实验对比, 测量结果表明, 当平面镜旋转至一定角度, 采用合适的通光口径, 系统测量精度可以优于 3‰, 远高于传统测量方法。此外, 该测量方法还具有使用方便、高稳定度等显著优点。

**关键词:** 红外光学系统; 长焦距测量; 波前检测; 误差分析

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1950-05

## Method of focal length measurement for infrared optical system with long focal length

Yao Zhen<sup>1,2</sup>, Wu Yiming<sup>1</sup>, Gao Limin<sup>1</sup>, Wu Cuigang<sup>1</sup>, Mei Chao<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** In strong laser host device, various optical lens with different focal length are needed to expand and collimate the beam, the accurate of the lens' focal length directly affect the overall performance of the system, so it is particularly important to accurately measure the focal length of lens. A new method of measuring the infrared optical system with long focal length by using the Hartmann-Shack wave-front detected device and rotated plane mirror was proposed. The measuring principle of the system was given. Using optical simulation software ZEMAX, the influence of different aperture on the measurement of focal length was analyzed. Then the relationship between the rotation angle of the plane mirror and the system measurement error was deducted by using error theory. Finally the experiment was done to obtain the real result, the result of measurement shows that when the plane mirror rotated to a certain angle, set an appropriate optical aperture, the system measurement precision can be better than 3‰, much higher than the traditional measuring method. In addition, the measurement method is also

收稿日期: 2013-10-20; 修订日期: 2013-11-18

作者简介: 姚震(1987-), 男, 博士生, 主要从事光电瞄准、光学测量方面的研究。Email: yaozhen0492@163.com

导师简介: 吴易明(1975-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电精密测量、偏振光学方面的研究。Email: wym34@opt.ac.cn

conveniently to use, high stability in measure, etc..

**Key words:** infrared optical system; long focal length measurement; wave-front detection; error analysis

## 0 引言

光学透镜在完成加工装配以后,由于存在加工及装配误差,透镜的最终焦距与系统最初设计的焦距值存在一定的差异。对于强激光主机装置来说,各级光学系统的误差会逐级积累,虽然可以通过后端的自适应光学系统矫正部分误差,但是其矫正能力毕竟有限,因此对整个系统中所有光学透镜的焦距精度提出了非常严格的要求。为了获取透镜焦距的精度,必须提出一种可以满足该焦距精度要求的焦距测量方法。常用的焦距测量方法有放大率法、精密测角法、阿贝焦距仪法等<sup>[1]</sup>,这些方法主要应用于可见光波段,并且很难实现长达几米甚至数十米光学系统焦距的高精度测量。参考文献[2-3]介绍了采用 Zygo 干涉仪实现透镜焦距和面型同时测量的方法;参考文献[4]提出了经纬仪测量光学系统焦距的方法,但是这三种方法均不具有可操作性。参考文献[5]提出了直接测量光学系统透射波前检测透镜焦距,但是其测量精度仅达到 3.1%,很难满足强激光光学系统中长焦透镜焦距精确测量的要求。

对于激光准直光学系统,在光学系统设计的过程中不需要考虑轴外视场的像差。然而几乎所有的焦距检测方法都利用了轴外成像的方式。在焦距检测过程中,轴外像差的存在将会直接导致焦距测量的不准确性,文中提出了一种利用哈特曼-夏克波前检测仪和旋转平面镜辅助测量长焦距红外光学系统焦距的方法,通过 ZEMAX 光学仿真软件分析了被测光学系统不同通光孔径对该测量方法测量精度的影响。误差分析以及后续的测量结果表明,该方法使用方便、测量精度高。

## 1 哈特曼-夏克波前测量原理

经典的哈特曼原理是由哈特曼<sup>[6-7]</sup>于 1900 年在检验位于波茨坦的大型折射望远镜时提出的。夏克于 1971 年在经典哈特曼原理的基础上将小孔光阑改为微透镜阵列。其核心思想是把一个完整波前划

分为很小的区域,并且认为该很小区域内的波前近似为平面波。微透镜阵列将带有畸变的波前成像至 CCD 像面,在 CCD 像面上提取透过微透镜阵列后的像点质心坐标,计算相对于理想平面波垂直入射微透镜阵列所形成汇聚点的偏移量,进而求解出各微透镜区域内波前的斜率。最后通过波前拟合还原波前曲面。其测量原理如图 1 所示。

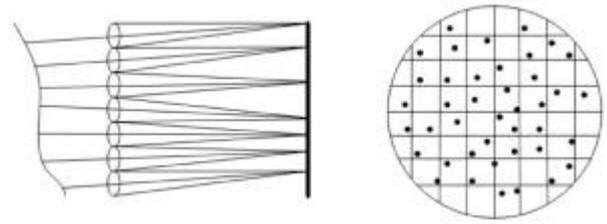


图 1 畸变波前通过微透镜阵列在 CCD 上汇聚点分布

Fig.1 Spots distribution when the wave-front though the micro-lens array

由公式(1)可以得出各个微透镜区域内近似平面波前的斜率:

$$\begin{cases} \frac{\partial W_i(x, y)}{\partial x_i} = \frac{\Delta x_i}{f} \\ \frac{\partial W_i(x, y)}{\partial y_i} = \frac{\Delta y_i}{f} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $W_i(x, y)$ 为通过第  $i$  个子孔径的被测波前; $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$  分别为通过第  $i$  个微透镜后在 CCD 平面上像点相对于理想平面波垂直入射该微透镜后像点的偏移量; $f$  为微透镜的焦距。

计算出各个区域波前之后再通过 Zernike 多项式拟合出完整的畸变波前,通过 Zernike 多项式各项系数确定被测波前所含各项几何像差。

## 2 长焦距红外光学系统焦距测量装置

如图 2 物像关系所示,对于任何一个光学系统,当一束平行光以一定角度入射至光学系统,其出射光束必然聚焦于系统的像方焦平面。因此,只要获知平行光束的入射角  $\theta$  以及像点偏移光轴的位移量  $\Delta$  就可以通过简单的函数关系得出光学系统的焦距  $f$ 。

$$f = \frac{\Delta}{\tan \theta} \quad (2)$$

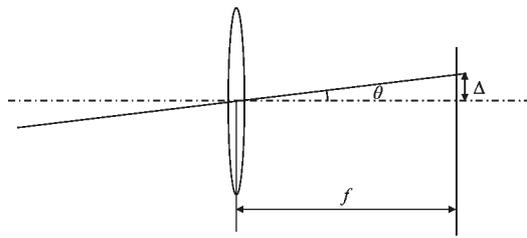


图 2 物像关系

Fig.2 Relationship between object and image

实现该测量原理的关键就是获得已知入射角度的平行光束。图 3 给出了利用哈特曼-夏克波前检测仪和旋转平面镜实现该测量原理的具体方案。

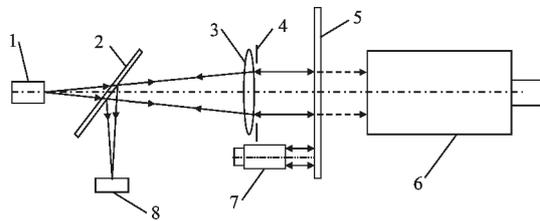


图 3 焦距检测装置

Fig.3 Focal length measurement device

图 3 中:1 为光纤光源,2 为半透半反镜,3 为待检测透镜,4 为小孔光阑,5 为可旋转平面反射镜,6 为哈特曼-夏克波前检测仪,7 为穆勒自准直仪,8 为 CCD 探测器。

在隔振光学平台上搭建如图 3 所示的光路,保证光源处于待测光学系统的理论后截距处,并且调节光源的横向以及轴向平移、待检测光学系统的六维位姿,最终使光源、待检测光学系统以及哈特曼-夏克波前检测仪共轴;在待检测光学系统前放置旋转平面镜,旋转平面反射镜的方位,反射回来的像点在 CCD 靶面上产生平移,计算平移的像素个数以及平面镜旋转过的角度,通过公式(2)可以求解出待测镜头的焦距。

$$f = \frac{nd}{\tan(2\theta)} \quad (3)$$

式中:n 为平移的像素个数;d 为单个像素的像元尺寸;θ 为自准直仪测得的平面镜旋转过的角度。

### 3 小孔光阑对焦距测量的影响

光学设计中的焦距是指近轴焦距,并不适用于非近轴光学系统。一般的焦距测量均采用成像的方法提取像点质心,而真正需要得到却是近轴主光线在像面

上的位置,这两者之间必然存在区别。如果光学系统带入较大的像差,很可能导致最终焦距测量结果不准确。强激光准直光学系统在设计初期为了保证光束质量以及所用光学材料的一致性均采用零视场设计,这样可以减少轴外像差对光学设计以及光学材料特性的要求,但同时也导致了其轴外像差较大。

文中通过 ZEMAX 光学仿真软件分析了该测量方法中增加孔径光阑对焦距测量的影响。ZEMAX 的点列图分析功能可以给出不同视场下像点的灰度分布,并且集成了灰度质心算法,可以分别给出主光线在像面上的位置以及通过灰度质心法得到的像点质心位置。图 4 为被测光学系统,在 ZEMAX 光学仿真软件中可以人为改变光学系统的通光口径。图 5 给出了未添加小孔光阑时,0.05°与 0.07°视场下像面位置的点列图分布,并且分别给出了像面位置上主光线的投射高度以及通过质心法获取的像点质心位置。



图 4 被测光学系统

Fig.4 Optical system which is need to be measured

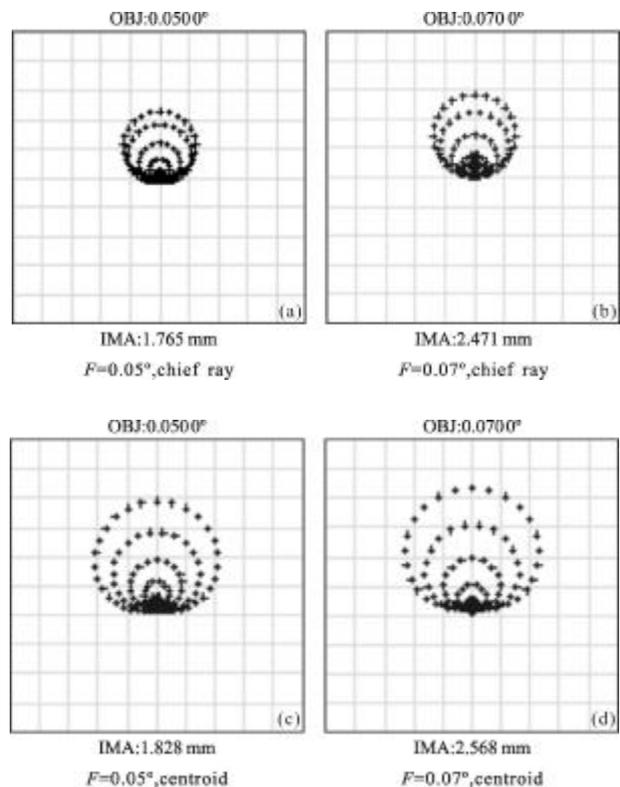


图 5 未设置小孔光阑点列图分布

Fig.5 Spots distribution without aperture

表 1 未设置小孔光阑计算焦距

Tab.1 Calculated focal length without aperture

Field of view/(°): $\theta$	Image height /mm: $\Delta$	Focal length/mm: $f = \frac{\Delta}{\tan(\theta)}$	
Method of chief ray	0.05	1.765	2 022.54
	0.07	2.471	2 022.54
Method of centric	0.05	1.828	2 094.73
	0.07	2.560	2 095.39

由表 1 可以得出, 通过主光线位置得到的焦距与光学系统的正确焦距值相同, 而通过灰度质心法提取像点中心进而计算出来的焦距严重偏离光学系统的正确焦距值。

图 6 给出了 0.05° 视场下在光学系统的入射端设置  $\varnothing 60$ 、 $\varnothing 40$ 、 $\varnothing 20$  以及  $\varnothing 10$  的小孔光阑, 并且分别计算了此时质心法计算出的光学系统焦距。

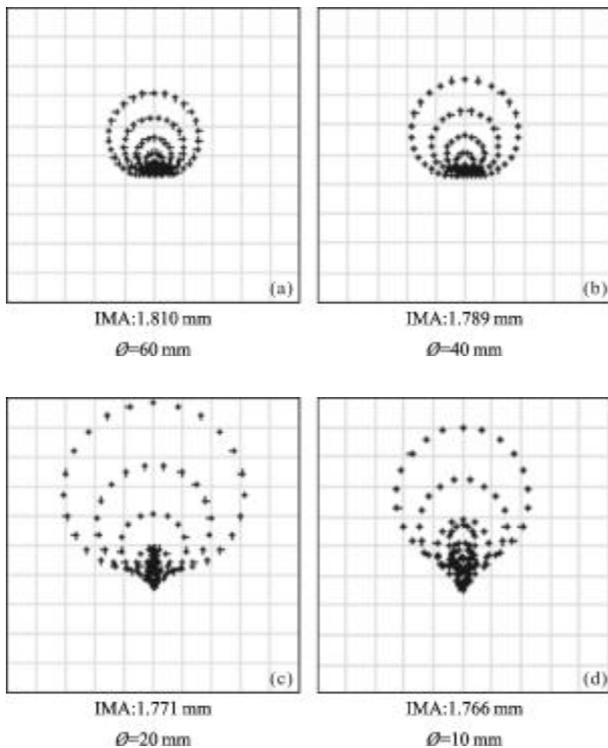


图 6 设置小孔光阑点列图分布

Fig.6 Spots distribution with aperture

由表 2 可以得出, 随着小孔光阑直径的减小, 通过灰度质心法提取像点中心进而计算出来的光学系

统焦距逐渐逼近光学系统的正确值。随着仿真光线数量的增加, 其结果将更加趋近于真实值。但是由此已经可以得出, 在焦距测量中采用增加小孔光阑的方式可以使焦距测量结果更趋近于真实值。

表 2 不同小孔光阑计算焦距

Tab.2 Calculated focal length with different aperture

Aperture diameter /mm	Image height/mm: $\Delta$	Focal length/mm: $f = \frac{\Delta}{\tan(\theta)}$
60	1.810	2 074.10
40	1.789	2 050.04
20	1.771	2 029.42
10	1.766	2 023.69

#### 4 误差仿真分析

该系统所采用的哈特曼-夏克波前检测仪为法国波前公司的 HASO3 系列, 其波前测量精度为  $0.05\lambda$ 。CMOS 成像器件像元尺寸为  $7.4\mu\text{m} \times 7.4\mu\text{m}$ 。自准直仪为德国穆勒的 T3000 系列, 其测角精度为  $0.1''$ 。像点质心提取采用加权灰度质心法, 其像点提取精度优于 0.5 像元。待测光学系统指定单波长理论焦距为 2 022 mm。

当自准直仪存在测角误差  $\Delta\theta$  以及像元判读误差  $\Delta n$  时, 焦距测量误差为:

$$\Delta f = \frac{d}{\tan(2\theta)} \Delta n - \frac{2nd(\sec(2\theta))^2}{(\tan(2\theta))^2} \Delta\theta \quad (4)$$

而对于某一特定焦距,  $nd = \tan(2\theta)f$ , 带入上式有:

$$\Delta f = \frac{d}{\tan(2\theta)} \Delta n - \frac{2f(\sec(2\theta))^2}{\tan(2\theta)} = \frac{d}{\tan(2\theta)} \Delta n - \frac{4f}{\sin(4\theta)} \Delta\theta \quad (5)$$

根据误差的独立性原理有:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{d}{\tan(2\theta)} \Delta n\right)^2 + \left(\frac{-4f}{\sin(4\theta)} \Delta\theta\right)^2} \quad (6)$$

图 7(a)-(d) 给出了入射至光学系统的平行光束其入射角度对最终焦距测量精度的影响。可以看出, 随着入射角度的增加, 测量精度逐渐提高, 当入射角度大于  $3'$  时, 其焦距测量误差不大于 6 mm, 测量精度优于 3‰。

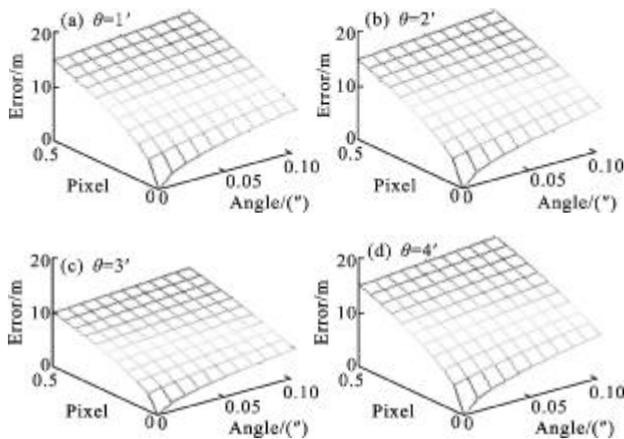


图 7 测量误差与平面镜旋转角度的关系

Fig.7 Relationship between rotation angle of plane mirror and system measurement error

## 5 实验结果

该实验分别对几套成品准直光学系统在没有小孔光阑与有小孔光阑的情况下进行焦距测量,实际测量中从自准直仪视场的一个边缘旋转平面镜至另一个边缘,并且保证旋转前后平面镜的俯仰不发生改变。表 3 列出了其中一套光学系统在无小孔光阑和有小孔光阑情况下所测得的焦距值。数据中给出了原始的自准直仪读数以及 CCD 获得的图像质心坐标。

表 3 实际测量数据

Tab.3 Actual measurement data

	Autocollimation result /(")		Centeroid of image		Focal length/mm
	Left	Right	Left	Right	
No aperture	156.9	154.9	765.3	282.5	2 076.5
	183.9	187.5	807.4	229.7	2 086.1
With aperture	152.4	150.7	745.8	287.6	2 025.9
	187.1	185.2	496.3	234.5	2 023.9

以上结果表明,增加小孔光阑对焦距测量精度的影响非常明显。

## 6 结论

文中结合实际工程需要,提出了应用哈特曼-夏克波前检测仪和旋转平面镜辅助测量长焦距红外光学系统焦距的方法。实验数据仅给出了 2 022 mm 焦距检测的数据,实际工程中还对 6 165 mm 以及 7 171 mm 焦距进行了测量,焦距测量精度均优于 3‰。该组光学系统已经装配至强激光主机装置中,设备运行良好。该焦距测量方法的提出对国内长焦距红外光学系统的焦距测量具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] Daniel Malacara. Optical Shop Testing [M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 610-612. (in Chinese)
- [2] Yue Jinying, Lu Zhenwu, Liu Hua, et al. The focal length and transmitted wave-front test for the long focal length lens [J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 2010, 21(2): 252-255. (in Chinese)
- [3] Yue Jinying, Liu Hua, Xu Wenbin, et al. Measurement of optical surface and foci of long focal length lens by CGH [J]. Chinese Journal of Optical and Applied Optics, 2009, 2(6): 502-507. (in Chinese)
- [4] Shen Lin, Yang Jinhua, Zhao Qun, et al. Reserch on measuring telephoto lens focal length by using image matching [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(11): 1043-1047. (in Chinese)
- [5] Wu Jiajie, Chen Jiabi, Xu Ancheng, et al. Focal length measurement based on Hartmann-Shack principle [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(6): 912-915. (in Chinese)
- [6] Jing Wenbo, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, et al. Comparison of Hartmann and CCD sensor for precision positioning of beacon axis [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 1963-1968. (in Chinese)
- [7] Gu Naiting, Yang Zeping, Huang Linhai, et al. Measurement method of misalignment for Hartmann-Shack sensor and deformable mirror in adaptive optics system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 287-292. (in Chinese)