

文章编号:1004-4213(2011)06-0912-4

基于哈特曼-夏克波前测量原理的焦距测量

吴佳杰,陈家璧,徐安成,高晓燕

(上海理工大学 光电信息与计算机科学学院, 上海 200093)

摘 要:本文从哈特曼-夏克波前测量原理出发,提出了基于波前测量的透镜焦距测量方法;得到了使用这一方法测量焦距的计算公式,使用 633 nm 和 780 nm 两种波长的半导体准直激光器作为光源,测量了三片双合透镜的焦距,结果表明,633 nm 光源下测量得到的波长与透镜的设计焦距值相吻合,能够正确测量透镜焦距;而 780 nm 光源的测量结果显示出较大的相对测量偏差,但可用于评估透镜的剩余球差、色差以及制造公差。

关键词:焦距;焦点;哈特曼-夏克;波前;色差

中图分类号:TN247; TP29

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114006.0912

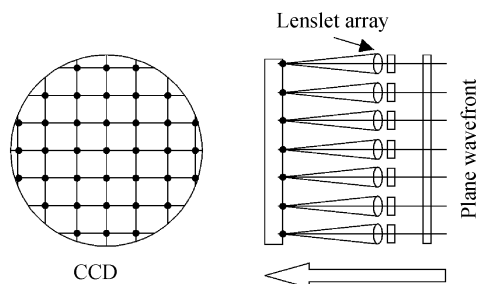
0 引言

焦距是光学系统最重要的参量指标之一,在可见光范围内,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^[1]。这些测量方法基于几何光学测量原理,测量过程需要测量人员在光具座上逐项进行观测、记录、数据分析和计算结果,对测量人员要求高,存在较大的由主观不确定性所引起的误差^[2],并且测量范围主要限于可见光。从物理光学的相关原理出发也能实现透镜焦距的测量,这类测量方法主要利用单缝衍射^[3-4]、莫尔偏折术^[5]以及 Talbot 效应^[6-7]。单缝衍射法的测量准确度受限于对干涉条纹间距与宽度测量的精确度;莫尔偏折术以及 Talbot 效应法则通过测量莫尔条纹的倾斜角来间接测量焦距,这两种方法的测量误差主要来自于手动测量莫尔条纹倾斜角的不准确性^[8],因而两者则更适合测量长焦透镜以减少测量误差^[9]。在光学测量领域,往往对透镜的焦距、色差有着严格的要求,对于诸如人眼高阶像差测量系统^[10]在内的以波长为量级的精密光学测量系统而言,上述焦距测量方法很难满足系统搭建与调试准确度要求^[11]。而基于共聚焦显微镜原理的焦距测量方法^[12],虽能获得较高的测量准确度,但构造复杂的测量系统却制约了它的应用范围。在生产活动及科研活动中,往往需要一种精确、快速、简便的方法来测量焦距长度或标

定焦点位置。因此,本文提出了基于哈特曼-夏克波前测量原理的焦距测量方法,该方法具有客观、准确、快速的特点,同时又易于搭建。通过改变测量光源的波长,该方法既能测量透镜在其设计波长下的焦距,也能够评估透镜的色差,球差和制造公差对透镜实际焦距所带来的影响。

1 哈特曼-夏克波前测量原理

哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)原理的基本思想是把一个待测区域内完整波前划分为很多小区域叠加的形式,这个划分通过使用密排列的微透镜阵列加以实现。入射波前经过透镜阵列后在透镜阵列的焦平面上得到一系列的焦点^[13]。位于焦平面上的 CCD 能够捕获光波前通过每一个微透镜后汇聚点所在的位置。畸变的波前经过透镜阵列后,其汇聚点相对于理想平面波垂直入射透镜阵列所形成的汇聚点(微透镜焦点)之间会产生一个偏移量(图 1)。



基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(No. 2007CB935303)、国家自然科学基金(No. 60778031)和国家重点科技攻关项目(No. 2006BAK03A03)资助

第一作者:吴佳杰(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为人眼高阶像差的测量与矫正。Email: Jason_wow@126.com

导师(通讯作者):陈家璧(1946-),男,教授,主要研究方向有超介质材料,人眼高阶像差测量与矫正,液体变焦透镜等。

Email: jbchenk@163.com

收稿日期:2010-10-25; **修回日期:**2011-01-11

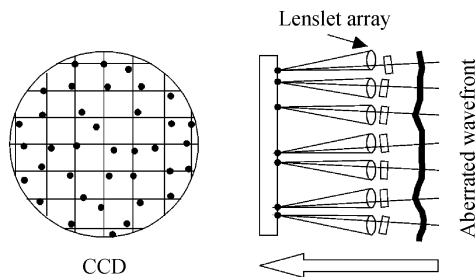


图1 光波前入射微透镜阵列后的汇聚点分布
Fig.1 Convergent points of wavefront after entering into lenslet array

通过计算每个光波汇聚点的质心相对于微透镜焦点在焦平面上的偏移量(图2给出了在 y 轴方向上的法线斜率计算原理),由式(1),可以计算得到各子波面的平均法线斜率.

$$\begin{cases} \frac{\partial W_i(x, y)}{\partial x} = \frac{\Delta x_i}{f_m} = \tan \alpha_{xi} \\ \frac{\partial W_i(x, y)}{\partial y} = \frac{\Delta y_i}{f_m} = \tan \alpha_{yi} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $W_i(x, y)$ 为第 i 个子孔径上的被测波前; f_m 为微透镜阵列中一个微透镜的焦距,为形成共同的焦平面,所有微透镜都有着相同的焦距 f_m ; Δx 和 Δy 分别是焦点质心在 x 轴和 y 轴的偏移量.

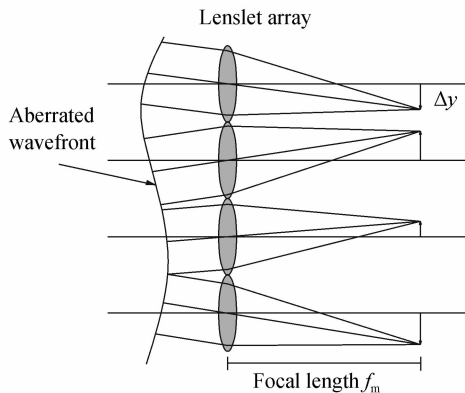


图2 H-S波前探测原理
Fig.2 Principle of wavefront detection

理论上,仅当微透镜取的无限小,才能获得被测波面上任意点的法线斜率;实验中,当微透镜的采样孔径取得足够小,即认为波面在这一足够小的采样孔径内是平坦的,亦即采样孔径内的波面法向量是相同的,从而通过式(1)得到的平均法线斜率可代表微透镜所在的微小孔径的波面法线斜率.

1.1 基于哈特曼-夏克波前测量的焦距测量原理

由于波面法向量对应着光波前的传播方向,正向或反向延伸任意两个采样孔径上的波面法线即可得到这两个采样孔径的汇聚/发散中心(图3),若入射哈特曼-夏克波前传感器(Hartmann-Shack sensor, HSS)的是完美的球面波,则应有每个采样

孔径对应的波面法线都汇聚/发散于同一点,亦即球面波的汇聚/发散中心.当使用平行光入射待测透镜时,光波前通过透镜后的汇聚中心对应的就是焦点(图4),通过对入射被测透镜后的光波面曲率的测量我们即可获得焦点所在的位置进而获得透镜在指定波长下的焦距.

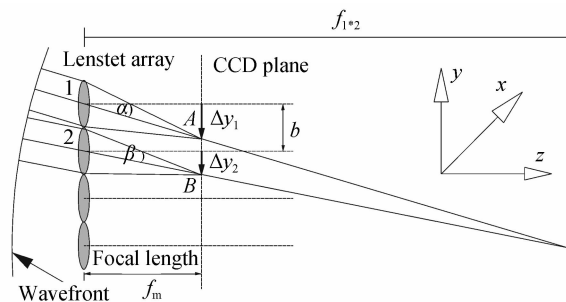


图3 测量波前汇聚长度的算法原理
Fig.3 Principle of convergence length measurement algorithm

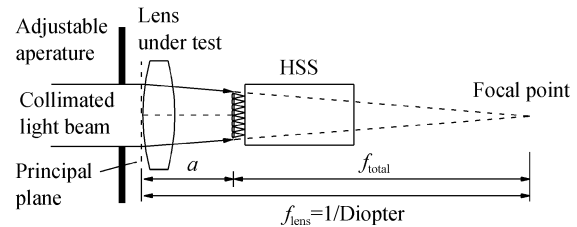


图4 HSS测焦距原理
Fig.4 Principle of focal length measurement by using HSS

然而,由于透镜像差的存在,实际情况下平行光通过透镜后形成的波形并非理想的球面波,而是带有一定畸变的准球面波,因而HSS上各采样孔径上的波面法线并不能完美地指向同一点(焦点)位置,而是以焦点为中心,分布相交在焦点的周围.如图3,考察HSS入瞳微透镜阵列上的任意两个采样微透镜(未必如图3所画的那样相邻排列),已知其间距为 b ,有一列波前传播到微透镜阵列所在平面后(图3中为清晰起见并未将两者重叠),分别在焦平面上形成以 A 、 B 两个汇聚光斑,其光斑强度与位置信息被固定安装在焦平面上的CCD所接收;两个汇聚光斑在 y 轴方向上偏离微透镜1、2的焦点的距离分别为 Δy_1 和 Δy_2 ,微透镜焦距为 f_m ;从而,入射光轴同微透镜主光轴的夹角 α 、 β 可表示为

$$\tan \alpha = (\Delta y_1 / f_m), \tan \beta = (\Delta y_2 / f_m) \quad (2)$$

由三角关系易知

$$f_{1*2} = \frac{b}{\tan \alpha - \tan \beta} \quad (3)$$

由此,可获得1、2两个采样波面在 z 轴方向上的汇聚长度 f_{1*2} ,基于同样的方法,可以获得所有采样孔径间两两组合获得的汇聚长度(f_{1*2}, f_{1*3}, \dots ,

$f_{1 \times n}, \dots, f_{2 \times 3}, f_{2 \times 4}, \dots, f_{2 \times n}, \dots, f_{(n-1) \times n}$). 对这些汇聚长度求统计平均, 即得对应被测波前汇聚点到 HSS 入瞳的距离为

$$f_{\text{total}} = \frac{f_{1 \times 2} + f_{1 \times 3} + \dots + f_{(n-1) \times n}}{C_n^2} \quad (4)$$

式中, C_n^2 是所有 n 个微透镜的两两组合数. 值得注意的是, 由于波前是传播到 HSS 微透镜阵列上的波前, 因而, 测得的 f_{total} 对应 HSS 入瞳到焦点的距离. 为获得被测透镜的焦距值, 需要加上被测透镜像方主面到 HSS 入瞳之间的距离 a (图 4), 即有

$$f_{\text{lens}} = \frac{1}{\text{Diopter}} = f_{\text{total}} + a \quad (5)$$

2 实验与结果

实验所使用的 HSS 是由荷兰 OKO 公司提供的, 该 HSS 拥有 127 个呈六边形密排布的微透镜所组成的阵列, 单个微透镜直径为 0.3 mm, 波长适应范围为 400~1 000 nm.

2.1 被测透镜主面位置的确定

应用式(5)正确测量透镜焦距 f_{lens} 的另一个必要条件是正确测量出 HSS 入瞳到透镜像方主面的距离 a (图 4), 亦即透镜像方主面的标定. 对于如图 4 所示的简单透镜, 透镜的像方主面直接同透镜的第一个折射面相重合, 但对于主面不与透镜的物理折射面相重合的情况 (例如月牙形透镜), 则通常难以直接测得 a .

为此, 在被测透镜前方紧贴被测透镜的位置处添加一个孔径可调光阑, 实现对被测透镜通光孔径的限制. 一方面, 这一改进能够使入射光集中从透镜中心通过, 从而使得通过后的光束像差较小, 提高焦距的测量准确度; 另一方面, 通过调节光阑限制入射光束的直径, 可以使得进入 HSS 入瞳的光束在入瞳处的直径刚好等于 HSS 的入瞳直径 (D_{HSS}), 测量此时可调光阑的通光直径 (D_A), 根据透镜像方主面的定义以及三角几何关系, 所测被测透镜的焦距为

$$f_{\text{lens}} = \frac{f_{\text{total}} \times D_A}{D_{\text{HSS}}} \quad (6)$$

2.2 光源的选择

由于光学玻璃自身不可避免的色散特性, 每一片透镜都只能针对特定的光波长进行优化设计, 光源波长的选择因而也会直接影响到透镜焦距测量的精确度. 使用不同波长的单色光来检测透镜的色散特性, 图 5 给出了本文实验中所用的两种激光光源的实测谱线. 值得指出的是: 由于光强数据采集的过程是通过 CCD 传感器来实现的, 因而光源可选的范

围将不囿于可见光波段, 在 CCD 的响应范围之内, 使用不同光源可以将这一方法的测量范围推广至红外或者紫外波段的焦距测量.

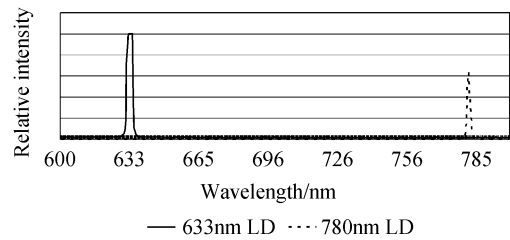


图 5 实验所用的激光光源谱线

Fig. 5 Laser diode spectrum

2.3 测试实例

实验中用于测试的透镜是针对 587.6 nm 可见光加以优化设计的双胶合透镜, 在设计波长附近其焦距允许存在 $\pm 2\%$ 的制造公差. 分别使用中心波长为 633 nm 和 780 nm 的激光光源测试了三片双胶合透镜的焦距, 测试结果如表 1.

表 1 双胶合透镜的测量结果

Table 1 Focal length measurement of doublet

Lens	nominal f_0	Measured f'		Bias ($\Delta f/f_0$)	
		633 nm	780 nm	633 nm	780 nm
1#	150 mm	151.7 mm	159.1 mm	1.1%	6%
2#	300 mm	302.5 mm	314.3 mm	0.8%	4.7%
3#	400 mm	409.2 mm	429.6 mm	2.3%	7.4%

从表 1 中可以发现, 应用 633 nm 光源测量焦距时, 相对偏差普遍较小. 以透镜 3# 为例, 从透镜供应商提供的理论消色差曲线上来看 (图 6), 该透镜在 633 nm 波长下因色差而产生的焦距偏移的理论值大约为 0.15 mm ($\sim 0.04\%$), 远小于实验测量值 9.2 mm ($\sim 2.3\%$), 因而可以认为 633 nm 波长下的相对偏差主要来源于实验测量误差与透镜制造公差 ($\pm 2\%$).

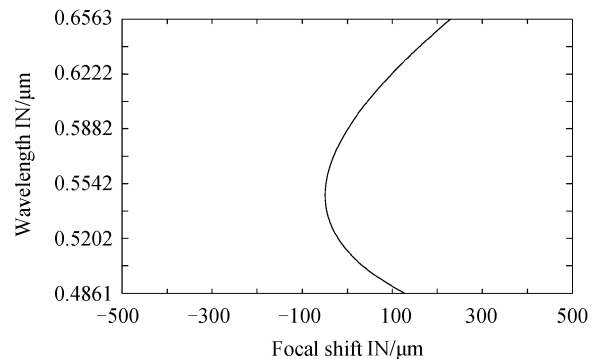


图 6 3# 透镜理论消色差曲线

Fig. 6 Chromatic focal shift of lens 3#

在本例中, 所用 HSS 的可重复测量准确度为

$$1/300, \text{ 即 } \left| \frac{\Delta f_{\text{total}}}{f_{\text{total}}} \right| = \frac{1}{300}; D_A \approx 10 \text{ mm}, D_A \text{ 测量准确}$$

度 $\Delta D_A = 0.1 \text{ mm}$, 根据式(6), 由误差理论, 实验测量误差的推测值为

$$\left| \frac{\Delta f_{\text{lens}}}{f} \right| = \sqrt{\left(\frac{\Delta f_{\text{total}}}{f_{\text{total}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta D_A}{D_A} \right)^2} = 1.05\% \quad (7)$$

根据误差叠加理论, 相对偏差容许的上限为

$$\left| \frac{\Delta f}{f_0} \right| \leq (1 + 0.04\%) \cdot (1 + 2\%) \cdot (1 + 1.05\%) - 1 = 3.1\% \quad (8)$$

实验在 633 nm 光源下, 测得三枚透镜的相对偏差均小于相对偏差的上限 3.1%(式(8))。

另外, 从表 1 中还可以发现, 在应用接近红外波长 780 nm 的光源测量透镜焦距时, 测量结果显示出较大的相对偏差。这是由于 780 nm 波长已经超出样本透镜的优化设计波长(486.1~656.3 nm), 因而具有较大的剩余球差与色差。同时, 考虑到透镜在制造过程中不可避免地存在制造公差, 相对偏差的存在是可以理解的。

3 结论

本文根据 Hartmann-Shack 波前测量的基本原理, 提出了应用 H-S 传感器测量透镜焦距的方法, 在给出物理阐述和数学推导的前提下, 实验测量了透镜在不同波长激光照明下实际的透镜焦距值。给出了实测结果并计算了相对偏差。实验结果表明, 该方法操作简便, 切实可行, 具有较高的测量准确度的同时, 还具有快速、实时的特点。对于透镜的生产、检测以及精密光学系统的正确安装、使用具有现实的指导意义。

参考文献

- [1] 苏大图, 沈海龙, 陈进榜, 等. 光学测量与像质鉴定[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988, 45-50.
- [2] LI Jun, SHA Ding-guo, LIN Jia-ming, et al. Experiment research on the error distribution of optical measurement[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(5): 442-446.
李筠, 沙定国, 林家明, 等. 光学焦距测量误差分布的实验研究[J]. *光学技术*, 2002, **28**(5): 442-446.
- [3] CHEN Lei, GAO Zhi-shan, HE Yong. Focal length measurement of infrared lenses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 986-988.
陈磊, 高志山, 何勇. 红外光学透镜焦距测量[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 986-988.
- [4] SU Mei-kai, SONG Jiang-shun. Measurement of lenses monochromatic focal length[J]. *Optical Technology*, 1995, **6**(11): 18-19.
苏美开, 宋江顺. 透镜单色焦距的测量[J]. *光学技术*, 1995, **6**(11): 18-19.
- [5] ELIEZER K, KATHI M K, ODED K. Universal method for determining the focal length of optical systems by moire deflectometry[J]. *Applied Optics*, 1998, **27**(8): 1383-1389.
- [6] SUN Chen, SHEN Yi-bing, BAI Jian, et al. The precision limit analysis of long focal length testing based on Talbot effect of Ronchi grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1214-1217.
孙琛, 沈亦兵, 白剑, 等. Ronchi 光栅 Talbot 效应长焦距测量的准确度极限研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(10): 1214-1217.
- [7] SRIRAM K V, KOTHIYAL M P, SIROHI R S. Direct determination of focal length by using Talbot Interferometry[J]. *Appl Opt*, 1992, **31**(28): 5984-5987.
- [8] ZHAO S, WEN J F, CHUNG P S. Simple focal-length measurement technique with a circular Dammann grating[J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(1): 44-49.
- [9] HOU Chang-lun, BAI Jian, HOU Xi-yun et al. The measurement of long focal length based on Talbot effect of Ronchi grating[J]. *Acta Optica Sinica*. 2002, **22**(11): 1328-1330.
侯昌伦, 白剑, 侯西云, 等. 基于龙基光栅塔尔博特效应的长焦距测量[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1328-1330.
- [10] ZHANG Pei-ming, CHEN Jia-bi, XIE Hai-ming et al. Application of information fusion method in the human eyes' aberration survey[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1446-1449.
张培茗, 陈家璧, 谢海明, 等. 在测量人眼像差中信息融合方法的应用[J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1446-1449.
- [11] WU Jia-jie, CHEN Jia-bi, XU An-cheng, et al. Uncollimated light beam illumination during the ocular aberration detection and its impact on the measurement accuracy by using hartmann-shack wavefront sensor [C]. *SPIE*, 2009, **7508**: 75080V-1-12.
- [12] ZHAO Wei-qian, SUN Ruo-duan, QIU Li-rong, et al. Laser differential confocal ultra-long focal length measurement[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(22): 20051-20062.
- [13] MANZANERA S, CANOVAS C, PRIETO P M, et al. A wavelength tunable wavefront sensor for the human eye[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(11): 7748-7755.

Focal Length Measurement Based on Hartmann-Shack Principle

WU Jia-jie, CHEN Jia-bi, XU An-cheng, GAO Xiao-yan

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A novel means of lens focal length measurement was proposed based on Hartmann-Shack principle of wavefront detection. Mathematical approaches of focal length measurement were deduced. In the experiments, laser sources with wavelength of 633 nm and 780 nm were separately used and focal length of three pieces of doublets were measured by the two wavelengths. The results show that the measured result can truly reflect the designed focal length by using 633 nm wavelength laser beam, which indicates that this measurement method is feasible and reliable. Meanwhile, the measured result by using 780 nm wavelength laser beam shows larger differences compared with its 633 nm counterpart, which reveals that this method can also be used to evaluate residual spherical aberrations, chromatic aberrations and manufacturing tolerance.

Key words: Focal length; Focal point; Hartmann-Shack; Wavefront; Chromatic aberration