

文章编号: 1001-3806(2006)06-0589-04

# 阵列透镜测量仪的设计与应用分析

易亨瑜, 叶一东, 向汝建, 张家如, 彭 勇

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 绵阳 621900)

**摘要:** 为了解决  $f > 500\text{mm}$  以上大口径光束波前的实时测量问题, 设计了一种波前测量系统, 即透镜阵列测量仪, 其最大优点是避免了现有的 H-S 波前传感器所面临的大口径缩束器的加工难题。介绍了该测量系统的组成结构及其测量原理, 分析了测量系统在设计中的参数选择, 并根据具体的系统参数讨论了测量系统的检测性能。在此基础上, 利用数值模拟对  $f = 1200\text{mm}$  口径光束进行了波前测量的仿真实验研究, 分析了测量过程中系统标定对透镜阵列测量仪的作用。仿真实验表明, 透镜阵列测量仪能够实现大口径光束的波前探测。

**关键词:** 仪器测量与计量; 透镜阵列测量仪; 实验仿真; 光束波面

**中图分类号:** TH741      **文献标识码:** A

## Design and application of lens-array measurement instrument

YI Heng-yu, YE Yi-dong, XIANG Ru-jian, ZHANG Jia-ru, PENG Yong

(Institute of Applied Electronic, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** In order to solve real-time metrical problem on beam wave-front of more than  $f > 500\text{mm}$  large aperture, a wave-front measurement system is proposed based on lens-array. Its obvious merit is to avoid machining problem of large aperture optical system, which is used to translate large aperture beam into small aperture beam. Configuration and work principle of this measurement system is introduced, and its system parameters are studied. Then its measurement capability is analyzed according to a set of special system parameters. Two beams of  $f = 1200\text{mm}$  aperture are simulated, and those wave-fronts are measured separately. During this dummy experiments, system scale play an important role in wave-front measurement. The results show that the lens-array measurement can accomplish wave-front measurement of large aperture beam. Finally, its characteristic is evaluated compared with existing H-S wave-front sensor.

**Key words** instrumentation measurement and metrology; lens-array measurement appearance; experimental simulation; beam wave-front

## 引 言

大口径光学传输系统不仅在天文上能够提高系统的成像分辨率, 而且在高功率激光应用中能降低光学元件的热效应, 提高靶目标上的聚焦功率密度。这使大口径光束波前的测量成为科学研究和工程应用中的重要课题。随着光束口径的增大, 其测量仪器的价格和技术难度迅速增长, 甚至无法实现对光束波前的测量。近年来, 为了便于大口径天文探测系统的检验, 在国外的研究中望远镜光学系统的结构多为 ritchey-chretien (RC) 结构<sup>[1]</sup>, 由于被检光学系统为聚焦系统, 因此光束的口径变换可以通过被检光学器件自身实现, 不过相对于传统的无焦系统, 这种结构的光学加工更加复杂昂贵。目前检测大口径光学元件和系统的常

用的方法有: 使用价格昂贵的大口径相移干涉仪<sup>[2]</sup>、利用各种微透镜阵列<sup>[3,4]</sup>建立的 Hartmann-Shack (H-S) 波前传感器<sup>[5,6]</sup>, 或采用子孔径拼接技术<sup>[7,8]</sup>等, 其中相移干涉仪和子孔径拼接方法不能对光束波前进行实时测量。大口径 H-S 波前传感器, 需要小像差的大口径扩束光学系统对光束进行耦合, 其扩束系统的加工和装调, 不仅难度极大, 而且制造周期长, 成本高。寻找一种性价比好, 技术可行的测量方法是大口径激光束波前测量亟待解决的问题之一。天文上对光束的探测, 采用的是相距 1.5km 的若干探测器组成的阵列<sup>[9]</sup>。根据这种思想, 作者基于 H-S 测量原理, 设计了一种波前测量系统——透镜阵列测量仪, 分析了系统设计中的参数选择及相应的系统测量性能, 最后利用数值仿真研究了该仪器在大口径光束波前测量中的应用。

## 1 透镜阵列测量仪的结构和测量原理

透镜阵列测量仪对大口径光束的测量原理是基于

基金项目: 国家八六三计划资助项目 (2005AA861014)

作者简介: 易亨瑜 (1969-), 男, 高级工程师, 从事光学检测技术的研究。

E-mail: yihengyu1@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-11-23 收到修改稿日期: 2006-02-13

哈特曼波前测量方法,它主要分为光束采样和波前重构两个部分。光束采样器的组成结构如图1所示。

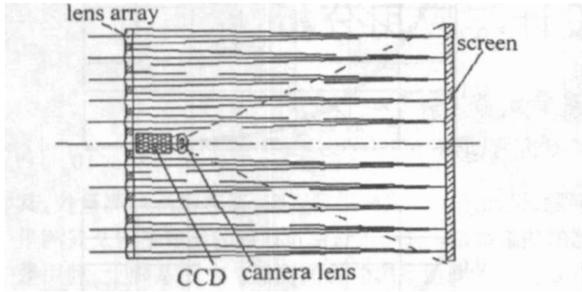


Fig 1 Wave-front sampling of large beam

当大口径光束入射时,透镜阵列测量仪利用二维子孔径阵列和透镜阵列,对光束波面进行空间采样后,在透镜焦平面处的散射屏上,得到光束经透镜阵列聚焦形成的光斑点阵;通过成像系统,由 CCD 相机获取点阵图像,最后在计算机上通过数据处理得到光束重构的波前参数。可以看到在大口径光束的测量中,透镜阵列测量仪不需要昂贵的光学缩束器,可以大大减少加工成本和制造周期。

透镜阵列由完全相同的许多小透镜在基板和夹持层的固定下形成,图2中给出了  $N \times N$  单元的透镜阵

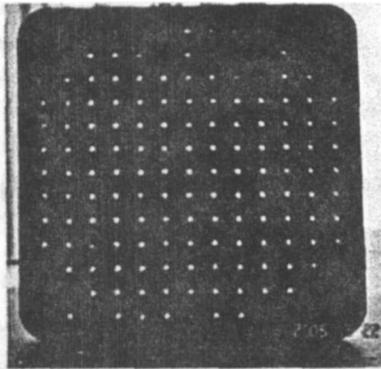


Fig 2 Layout of the array-lens

列,其子孔径的通光口径为  $d$ ,间距为  $D$ ,小透镜的焦距为  $f$ 。考虑到单个子孔径的边缘,则小透镜的相位变换因子为:

$$t_1(x, y) = \text{circ}\left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{d}\right] \exp\left[-i\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right] \quad (1)$$

式中,  $\text{circ}()$  为圆域函数,设该透镜阵列的总通光口径为  $\Phi$ ,则子孔径阵列的采样函数为:

$$t_2(x, y) = \text{circ}\left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\Phi}\right] \text{camb}\left[\frac{x}{D}, \frac{y}{D}\right] \quad (2)$$

通过卷积可得。式中,  $\text{camb}()$  为梳状函数<sup>[10]</sup>。该透镜阵列对入射光束的采样和聚焦效果可用下式进行相应模拟:

$$t(x, y) = t_1(x, y) t_2(x, y) \quad (3)$$

透镜阵列测量仪直接测量的物理量是波前的局部斜率,在每个子孔径  $(i, j)$  坐标系内,具体表现为其焦面处光斑点阵在 CCD 上子孔径  $(i, j)$  内光斑像的质心位

置  $(x_c, y_c)$ 。相应子孔径内的波前斜率为:

$$\begin{cases} g_x = \delta x / f = (x_c - x_0) / f \\ g_y = \delta y / f = (y_c - y_0) / f \end{cases} \quad (4)$$

式中,理想情况下  $(x_0, y_0)$  为子孔径内中心位置,  $f$  是微透镜的焦距。

采用模式法进行入射光束的波前重构。入射光束的波前  $\Phi(x, y)$  可以用泽尼克正交多项式展开成:

$$\Phi(x, y) = \sum_{k=0}^M a_k Z_k(x, y) \quad (5)$$

式中,  $M$  表示所采用的多项式数,  $a$  为展开系数,  $Z_k(x, y)$  为第  $k$  项泽尼克多项式。对上式微分得到:

$$\begin{cases} g(x_i) = \sum_{k=1}^M a_k \iint \frac{\partial Z_k(x_i, x, y)}{\partial x} dx dy + \epsilon_{x_i} \\ g(y_j) = \sum_{k=1}^M a_k \iint \frac{\partial Z_k(y_j, x, y)}{\partial y} dx dy + \epsilon_{y_j} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $g(x_i, y_j)$  即为 (4) 式中第  $i$  个子孔径的波前斜率  $(g_x, g_y)$ ,  $(\epsilon_x, \epsilon_y)$  为拟合误差。采用矩阵形式,利用最小二乘法可求出波前恢复的最小范数解<sup>[2]</sup>  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_M\}$ 。将系数矩阵  $A$  代入 (5) 式可得到入射光束的测量波前。

## 2 透镜阵列测量仪的参数选择及性能分析

在透镜阵列测量仪中,波面采样透镜阵列是关键组件,它采用多个单透镜排列而成,其子孔径的间距  $D$ 、焦距  $f$  及光学成像系统(探测器和成像镜头)决定了系统波面测试的空间频率、动态范围和精度。设待测光束的口径为  $\Phi = 1200\text{mm}$ ,透镜阵列和散射屏为正方形,取透镜阵列的单元数  $N = 13$  见图 2。

透镜阵列测量仪正常工作的关键在于选择适当 CCD 相机的成像系统。取 CCD 相机的像素数为  $k \times k = 2046 \times 2046$  其靶面尺寸为正方形,通过成像镜头与散射屏大小匹配。为了避免 CCD 像素间“死区”引入的测量误差,对于屏上的光斑点阵在 CCD 中的成像大小,成像系统需满足:

$$\Phi / k < 2.44 \lambda f / d \quad (7)$$

考虑实际使用情况,取阵列中每个透镜的通光口径为  $d = 15\text{mm}$ ,透镜焦距  $f = 9230\text{mm}$ 。

### 2.1 空间频率

在透镜阵列测量仪中,子孔径的间距  $D = \Phi / N$ 。当  $N = 13$  时,只能测试出入射光束中周期在  $92.3\text{mm}$  以上的低频空间像差。为了测试周期在  $0.12\text{mm} \sim 33\text{mm}$  的中频像差,应采用  $N \geq 37$  以上单元的透镜阵列。

### 2.2 动态范围

波前测量的动态范围可表示为透镜阵列的焦距间对比  $f\# = f/D$ 。当  $f\#$  大时,可测量的波前扰动的动态范围就小;反之动态范围大。动态范围的大小可由几

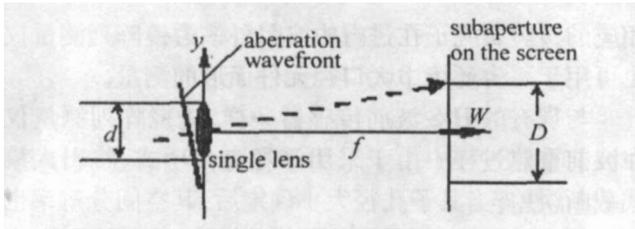


Fig 3 Dynamic range of wave-front measurement

何光学估算,如图 3所示。

局部波前的斜率可以表示为  $dW/dy$ , 其中  $dW$  是波面的起伏量,  $dy$  是沿波束横截面的位移量, 则在上述参数下透镜阵列测量仪能探测的最大局部波前的斜率为:

$$(dW/dy)_{max} = (D/2)/f = 5m \text{ rad} \quad (8)$$

### 2.3 测量精度

由(2)式可以看到,波前斜率的测量精度直接由光斑质心位置的检测精度和透镜焦距决定,较大的焦距对波前小误差的检测更有效。另外像素接收到的光强值也影响其测量精度。设光斑直径是 CCD 像素尺度的  $\alpha$  倍, CCD 输出的数字信号为  $m$  bit 光斑光强是饱和光强的  $\eta$  倍,系统能检测出的最小光斑质心位移量是像素尺度的  $1/n$ 。为了提高波前探测的灵敏度,就需要使  $1/n$  尽量小。当  $\alpha$  值为 1.1 个~2.0 个像素尺度之间时,下式近似成立<sup>[11]</sup>:

$$[(\alpha/2)^2 - 0.5^2]^{1/2} \cdot 1/n = 1/(\eta \cdot 2^m) \quad (9)$$

上式表明,系统的质心位置检测精度与光斑的强度、CCD 输出信号的数字精度是密切相关的。图 4 中给出了几种情况下这些物理量之间的关系。可以看到,

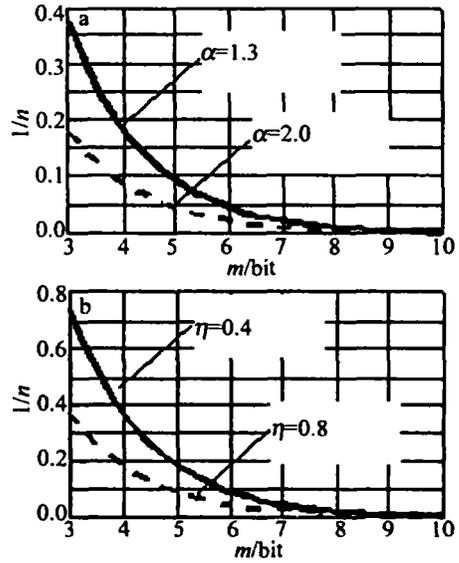


Fig 4 Centroid metrical precision of spots position  $1/n$  changes with CCD output digit  $m$  a- $\eta=0.8$  b- $\alpha=1.3$

为了提高系统检测精度,必须增大散射屏上光斑尺寸、选择合适的光强衰减片及提高 CCD 输出数据的精度。由图 4 结果并考虑实际应用方便,在系统设计中取  $m=8$  bit 子孔径内像素数为  $157 \times 157$ , 对于理想入射光束,  $\alpha=1.36$  倍。

### 3 透镜阵列测量仪的波前探测模拟仿真

利用数值模拟产生一束光束口径为  $\Phi=1200$ mm 的标准平面波,其振幅和位相见图 5a 图 5b。对于上节中的系统参数,该光束入射到透镜阵列测量仪中,通过透镜阵列后产生一幅均匀的光斑强度阵列,其三维

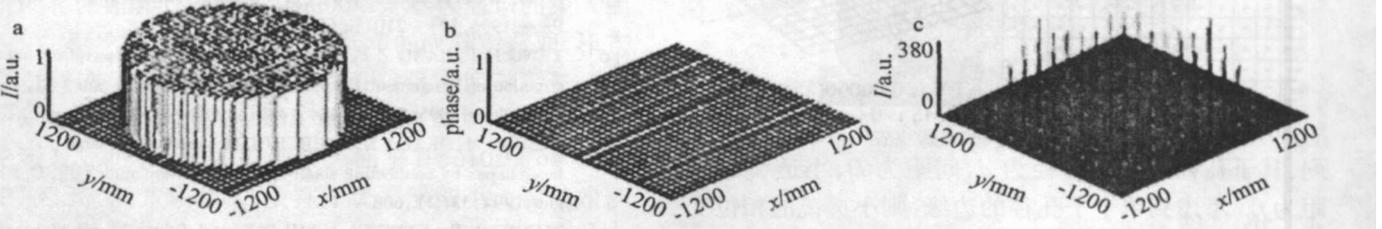


Fig 5 Plane wave a- amplitude b- phase c- wave-front sampling

立体图见图 5c。将模拟产生的光斑阵列图像输入到数据处理软件中。光斑阵列的平面图见图 6a 通过数据处理得到重构的入射光束波前,见图 6b。在波前重

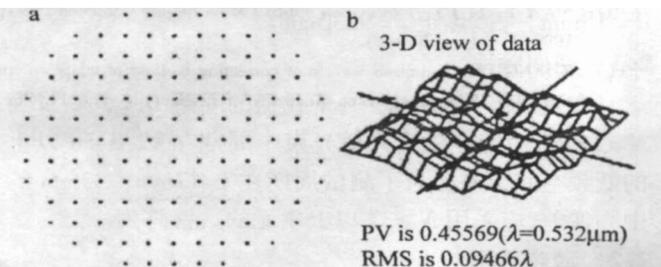


Fig 6 a-wave-front sampling of plane wave b-reconstruction of plane wave

构过程中由于光斑阵列与子孔径中心存在对准误差,使重构的入射光波前出现一定的像差,图 6b 显示该像

差的均方根值 RMS 为  $0.09466\lambda$ 。

用第 4 项泽尼克  $Z_3(x, y) = 2x^2 + 2y^2 - 1$  模拟一个 RMS 为  $2.6\lambda$  的离焦像差波面,其位相的三维立体图见图 7a 图 7b。应用透镜阵列测量仪对其进行采样显示,可以看到,在图 8a 中四周的子孔径光斑都偏离中心;通过波前重构得到图 8b 所示的入射光束波前。图 8b 显示重构的入射光波前的 RMS 为  $2.6795\lambda$ 。

为了消除光斑阵列与子孔径中心存在的对准误差,以及透镜阵列装配过程中,因透镜倾斜或聚光特性不一致引入的波前附加误差,在使用前必须对透镜阵列测量仪进行标定。采用标准平面波进行系统像差标定,将其波前重构(见图 6b)设置为透镜阵列测量仪的系统像差,取(1)式中  $(x_0, y_0)$  为标准平面波对应的

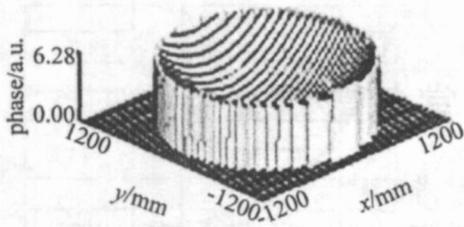


Fig. 7 Phase of aberration beam

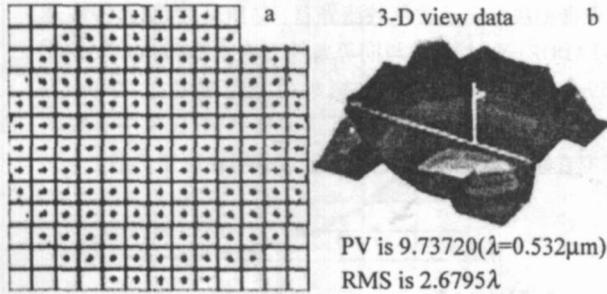


Fig. 8 a—sampling of aberration beam b—reconstruction of aberration beam

光斑位置,再对入射的标准平面波进行测量,得到标校后的均匀光斑阵列图和平面波前,如图9所示。此时重构的入射光波前的RMS为 $0\lambda$ 。

另外由于透镜阵列和像屏在加工、装调时会产生一定误差,在使用前通过对透镜阵列测量仪的标定,可以消除系统像差对测量结果的影响。通过上述模拟仿真实验,可以看到透镜阵列测量仪能够实现 $f=1200\text{mm}$ 口径光束的波前探测。

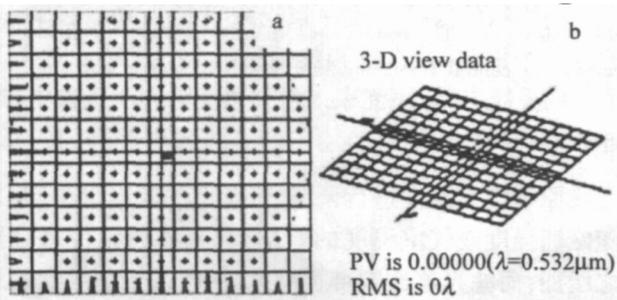


Fig. 9 a—scaled wave-front sampling of plane wave b—reconstruction of plane wave

#### 4 小 结

基于H-S测量原理,在理论上设计并研究了透镜阵列测量仪对 $f=500\text{mm}$ 以上大口径光束波前测量问题,讨论了设计注意事项,并通过仿真实验,验证了透镜阵列测量仪是能够实现大口径光束的波前探测。可以看到,其最大优点是避免了大口径缩束器的加工难题,但对于透镜阵列的加工和装配提出了较高的要求。

相应的实验研究正在进行中。另外该透镜阵列测量仪也可用于恶劣环境中大口径元件面形的测量。

与现有的H-S波前传感器一样,透镜阵列测量仪在波前重建过程中由于采用泽尼克多项式,将引入模式截断误差;当其子孔径大小确定后,其空间分辨率也相应确定,更高空间频率的起伏将被子孔径平滑掉,这决定了它只能用于中、低频段波前像差的探测上。为了提高其对中频像差的探测能力,必须增加透镜阵列的单元数,这在一定程度上会增大测量仪器的装调难度。其次在其它条件不变的情况下,若待测的入射光束越大,透镜阵列测量仪的长度也将越长。为了便于外场测量,需要考虑系统光路的折叠,购买更高像素阵列的CCD相机,或采用更小的单透镜通光口径。阵列孔径的通光限制,导致透镜阵列测量仪在理论上存在一定的波前采样误差,另外实际散射屏的材料特性也可能影响波面重构精度。以上问题有待下一步研究。

#### 参 考 文 献

- [1] GONCHAROV A A, PETERSEN M O, ANDERSEN T *et al*. Adaptive optics schemes for future extremely large telescopes [J]. *Opt Engng* 2002, 41(5): 1065~1071
- [2] CORPORATION Z. Large aperture system 12, 18 and 24-inch [EB/OL]. <http://www.zyga.com>, 2005-11-22
- [3] WANG Q Y, MA L, ZHAO F H *et al*. Study on fabrication technology of  $\text{SnO}_2$  micro-lens and its array by using excimer laser-CVD technique [J]. *Laser Technology*, 1996, 20(3): 164~167 (in Chinese).
- [4] YAO J GAO F H, GAO Fetal. Fabrication of refractive micro-lens array with enzyme-etching method [J]. *Laser Technology*, 2001, 25(4): 272~274 (in Chinese).
- [5] ZHOU R Zh. Adaptive optics [M]. Beijing National Defence Industry Press 1996 121~210 (in Chinese).
- [6] YANG H E, JIANG Z F. Research of zernike model wavefront reconstruction of 19-element Hartmann Shack wavefront sensor [J]. *Laser Technology* 2005, 29(5): 484~487 (in Chinese).
- [7] OTSUBO M, OKADA K, TDU JCH IJ M. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms [J]. *Opt Engng* 1994, 33(2): 608~613
- [8] ZHANG R Zh, YANG Ch L, SHI Q K *et al*. Principle and accuracy of the stitching interferometry [J]. *Acta Optica Sinica* 2003, 23(10): 1241~1244 (in Chinese).
- [9] NERONOV A. A telescope for PeV-EeV astronomy [EB/OL]. <http://ide.unige.ch/science/workshop> 2005-05-03
- [10] SU X Y, LI J T. Information optics [M]. Beijing Science Press 1999 3~5 (in Chinese).
- [11] ZHANG J R. Optimized wavefront correcting method of adaptive optics [D]. Mianyang China Academy of Engineering and Physics 2002 17~18 (in Chinese).