

文章编号 1004-924X(2008)02-0184-06

干涉法实时测量浅度非球面技术

王孝坤^{1,2}, 王丽辉^{1,2}, 张学军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种实时干涉检测非球面的新方法,该方法无需补偿器、计算全息图等辅助元件就能实现对浅度非球面的测量。对非球面度较小的非球面,直接利用标准球面镜作为参考表面,通过数字干涉仪可以测得全孔径位相分布,将所得的数据剔除参考球面波相对理论非球面的偏差,并运用最小二乘拟合求得机构定位误差,消去此误差,即可获得真实的面形信息。利用该方法对一口径为350 mm的浅度双曲面进行了测量,通过数据分析和处理得到面形误差的PV值和RMS值分别为 0.387λ 和 0.048λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),将该结果与零位补偿的检测结果相比较,两面形分布是一致的,其PV值和RMS值的偏差分别为 0.033λ 和 0.006λ ,说明该技术用于检测浅度非球面是切实可行的。

关键词:光学检测;非球面;干涉术;非球面度;最小二乘拟合

中图分类号:TQ171.65;O436.1 文献标识码:A

Testing of weak aspheric surface by real-time interferometry

WANG Xiao-kun^{1,2}, WANG Li-hui^{1,2}, ZHANG Xue-jun¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A real-time interferometric method for testing asphere was proposed to measure aspherical surface with small asphericity without other null optics. When the tested asphere was close to a sphere, a sphere mirror was used as the reference surface, the phase distribution can be obtained by the digital wavefront interferometer. The surface error was obtained by subtracting the theory wavefront error from the phase datum and eliminating the translation error through least-square fitting. Meanwhile a Φ 350 mm aspheric mirror was measured by this method. As results, the PV and RMS of the surface error are 0.387λ and 0.048λ , respectively; the surface map and interferogram measured by proposed method are consistent with those tested by null compensation; and the differences of PV and RMS errors between them are 0.033λ and 0.006λ , respectively. It concludes that this method is feasible and accurate.

Key words: optical testing; aspheric surface; interferometry; asphericity; least-square fitting

收稿日期:2007-07-18;修订日期:2007-08-22.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所二期创新工程基金资助项目

1 引言

当前,检测非球面元件的方法有很多种,主要分为接触式测量、阴影法、激光扫描法、干涉法等。接触式测量主要借助轮廓仪或者三坐标测量仪首先对光学元件进行多个离散点的测量,然后经过数据处理,拟合得到面形误差。该方法主要用于光学元件研磨和粗抛光阶段的检测,而且测头与元件的接触可能会给表面带来一定的划痕。阴影法主要分为刀口法和哈特曼法(光阑法),该方法主要用于观察阴影分布的图形和阴影图的明暗对比。这种方法设备简单,对于某些二次曲面测量方便,适于现场检验。但存在主观、定量困难、灵敏度不高等缺点,只能定性地检测出非球面的面形,即使能够定量地检测出非球面面形,也仅仅适合于中、低精度非球面镜,或仅作为研磨工序的中间检验。激光扫描法可分平移法、旋转法以及平移旋转法,这是一种利用光的直线传播原理进行面形检测的方法,用激光束对被测面进行逐点测量来计算出非球面的面形参数^[1]。它通用性强,可以测量各种非球面,而且是对被测面进行绝对测量,精度高,但是相应的数据处理比较复杂。干涉法是一种短时间检测非球面的方法,由于它具有高分辨率、高精度、高灵敏度、重复性好等优点,已成为测量光学面形的主要手段。但是对于非球面元件,一般都需要专门设计和定做补偿器或借助计算全息图(CGH)等辅助元件^[2],通过零位补偿才能实现干涉测量,这不仅提高了成本,延长了工期,而且辅助元件将会引入一定的制造误差和装调误差。

本文提出了一种实时干涉检测光学非球面元件的方法,该方法无需零位补偿就能够实现对浅度非球面的测量。文中介绍了该技术的基本原理

以及具体的实验和数据处理过程。

2 基本原理

一般检测的是旋转对称的非球面,设光轴为 z 轴,以非球面顶点为坐标原点,建立如图1所示的坐标系。非球面方程可表达为下式^[3]:

$$z = \frac{cS^2}{1 + [1 - (K+1)c^2S^2]^{1/2}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + \dots, \quad (1)$$

式中: $S^2 = x^2 + y^2$; c 为近轴曲率, $c = 1/R_0$ (R_0 为顶点曲率半径); K 为二次曲面常数, $K = -e^2$ (e 为二次曲面的偏心率); A_1, A_2, A_3, \dots 为非球面变形系数。当曲面是二次曲面时,其不同的 K 或者 e^2 代表着不同的曲面:双曲面 $K < -1, e^2 > 1$; 抛物面 $K = -1, e^2 = 1$; 椭球面 $-1 < K < 0, 0 < e^2 < 1$; 球面 $K = 0, e^2 = 0$ 。

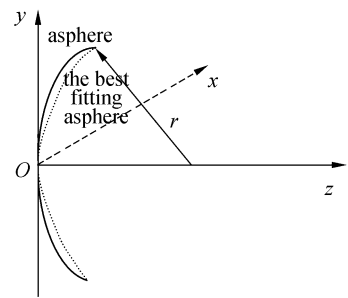


图1 非球面坐标系

Fig. 1 Asphere coordinate

在旋转轴对称非球面中,最接近比较球面一般是以非球面顶点和边缘相交的球面。其最接近球面半径可由下式求出^[4]:

$$r = D^2 / (8h) + h/2, \quad (2)$$

式中, D 为非球面的直径; h 为非球面全口径矢高,由非球面方程可以求出。

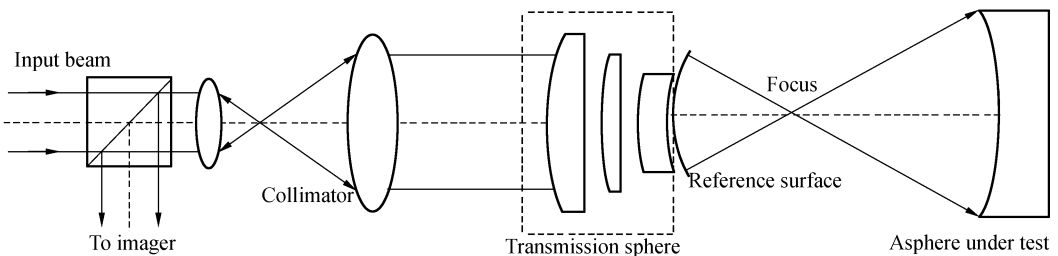
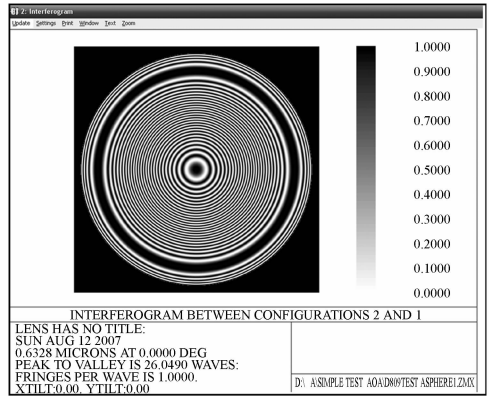


图2 检测设备示意图

Fig. 2 Setup for testing asphere with spherical reference wavefronts

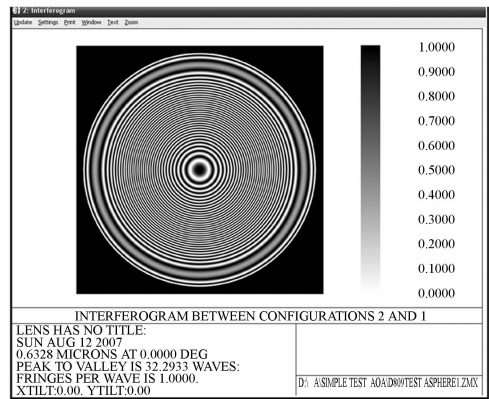
用标准球面镜作为参考表面检测非球面的示意图如图 2。首先,调整好干涉仪和被测非球面之间的距离,使得参考球面波会聚的焦点与待测非球面最接近球面的圆心重合。由于所测量的非球面的非球面度比较小,经过非球面表面反射的波面与参考球面波能够形成干涉条纹,干涉条纹的密度一般 $<2 \text{ Pixel}/\lambda$,所以不会造成条纹混叠现象,用数字干涉仪可以测得其相位分布为 w 。

用 Zemax 光学设计软件模拟实时干涉检测,模拟所采用的 CCD 像素密度为 $1\,024 \text{ pixel} \times 1\,024 \text{ pixel}$,选用的波长为 632.8 nm ,分别与实验室干涉仪常用的 CCD 像素密度和工作波长是一致的。图 3 为在不同非球面度的情况下所得的干涉图样。可以看出:当所检测的非球面的非球面度的最大值为 $22.256 \, 2\lambda/2 = 7.04 \, \mu\text{m}$ 时(因为所检测的非球面为反射镜,光线入射到非球面上又返回,所以参考球面波前与非球面间的波相差约为待测非球面非球面度的 2 倍),干涉条纹比较清晰,易于 CCD 分辨,如图 3(a)所示;当非球面度的最大值增为 $26.049 \, 0\lambda/2 = 8.24 \, \mu\text{m}$ 时,干涉条纹仍然很清晰,如图 3(b)所示;继续增大非球面度,当所检测的非球面的非球面度的最大值为 $32.293 \, 3\lambda/2 = 10.22 \, \mu\text{m}$ 时,干涉图中局部的干涉条纹已经很难分辨,如图 3(c)所示;将非球面度的最大值增大至 $44.179 \, 9\lambda/2 = 13.98 \, \mu\text{m}$ 时,将会出现如图 3(d)所示的条纹混叠现象。因此,分析可得:利用目前实验室常用的数字干涉仪可以实时测量非球面度 $10 \, \mu\text{m}$ 以下的非球面反射镜。



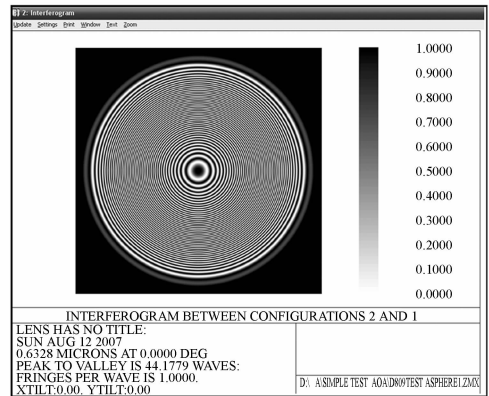
(b) 最大非球面度为 $8.24 \, \mu\text{m}$

(b) Maximum asphericity is $8.24 \, \mu\text{m}$



(c) 最大非球面度为 $10.22 \, \mu\text{m}$

(c) Maximum asphericity is $10.22 \, \mu\text{m}$

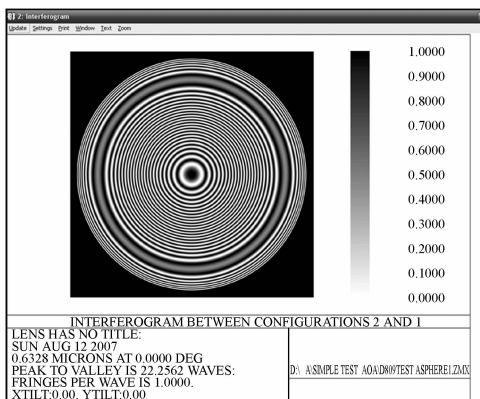


(d) 最大非球面度为 $13.98 \, \mu\text{m}$

(d) Maximum asphericity is $13.98 \, \mu\text{m}$

图 3 计算机模拟不同非球面度情况下实时干涉检测的干涉图

Fig. 3 Interferograms simulated at different asphericities



(a) 最大非球面度为 $7.04 \, \mu\text{m}$

(a) Maximum asphericity is $7.04 \, \mu\text{m}$

假定系统高阶误差可以忽略,所建立的非球面坐标系如图 1 所示,则全孔径波前误差的相位测量值可用下式表示^[5]:

$$w(x,y) = z(x,y) - s(x,y,r) + e(x,y) + \epsilon(x,y), \quad (3)$$

式中: $z(x,y)$ 为非球面沿光轴方向的矢高表达式, $s(x,y,r)$ 为参考球面波前表达式, $e(x,y)$ 表示待测非球面表面误差, $\epsilon(x,y)$ 为定位误差。通常在装调过程中会引入 4 项定位误差^[5]:

$$\epsilon(x,y) = ax + by + c(x^2 + y^2) + d, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum xx & \sum xy & \sum x(x^2 + y^2) & \sum x \\ \sum yx & \sum yy & \sum y(x^2 + y^2) & \sum y \\ \sum (x^2 + y^2)x & \sum (x^2 + y^2)y & \sum (x^2 + y^2)^2 & \sum (x^2 + y^2) \\ \sum x & \sum y & \sum (x^2 + y^2) & n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum xw' \\ \sum yw' \\ \sum (x^2 + y^2)w' \\ w' \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: n 为采样点的个数,由上式计算出 a 、 b 、 c 和 d ,因此将 w' 减去该误差就可得到整个非球面的表面加工残留误差分布,从而完成对整个非球面面形的检测。

3 实 验

运用上述方法,对一口径为 350 mm 的双曲

分别对应为 x 方向倾斜、 y 方向倾斜、离焦和平移项。因为表达式 $z(x,y)$ 和 $s(x,y,r)$ 都是已知的,所以将 $z(x,y) - s(x,y,r)$ 代入式(3)就可以将参考球面波与被测非球面间的偏差从直接测得的相位数据中消除。因此,可得仅具有装调误差和表面误差的相位分布函数为下式:

$$w'(x,y) = e(x,y) + ax + by + c(x^2 + y^2) + d, \quad (5)$$

利用最小二乘拟合,可求得装调系数的最优解:

面($R_0 = 4\ 188.04\ \text{mm}$, $k = -2.816\ 915$)进行了检测:

(1)根据公式(2)求得待测非球面最接近球面半径为 $4\ 193.19\ \text{mm}$,调整干涉仪使得出射波前的焦点与最适球的顶点重合。经非球面反射的波面与参考球面波形成干涉,相位分布和干涉图如图 4 所示。

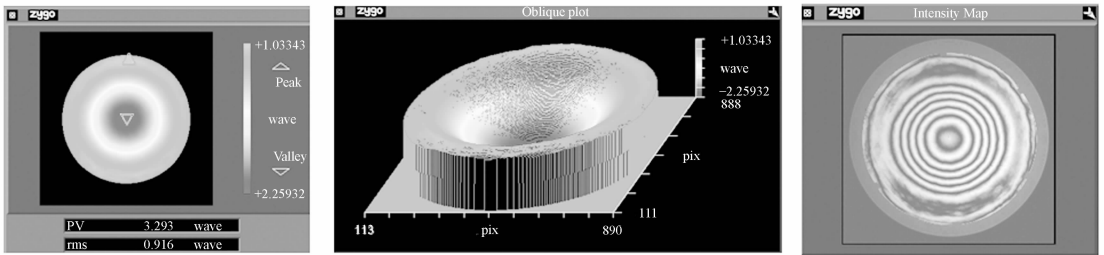


图 4 实时干涉检测的相位分布图和干涉图

Fig. 4 Phase map and interferogram by real-time interferometric measurement

(2)将所得的位相数据消去参考球面波相对非球面方程的理论偏差,并利用最小二乘拟合求得调整定位误差,其误差系数如表 1 所示,消去该误差,最终得到面形误差分布如图 5 所示,其 PV 值为 $0.387\ \lambda$,RMS 值为 $0.048\ \lambda$ 。

表 1 系统调整误差拟合参数

Tab. 1 Misalignment errors of the system

	piston	X/tilt	Y/tilt	power
Misalignment coefficients	-2.648 9	$3.879\ 6 \times 10^{-3}$	$4.537\ 6 \times 10^{-4}$	3.054 2

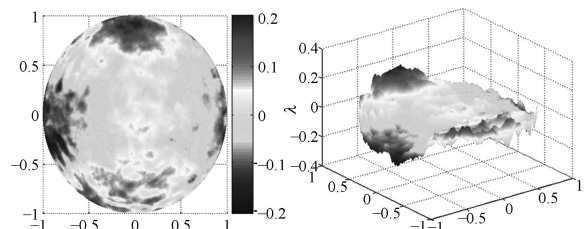


图 5 面形误差分布三维和二维分布图

Fig. 5 3-D and 2-D maps of surface error after data processing

(3)为了验证该方法的准确性和可行性,对该非球面进行了零位补偿干涉测量,检测的实验装置图如图 6,干涉仪出射的平面波经过补偿器后转换为非球面波并与被检非球面的理论形状重合,因此所有光线都垂直入射到被检非球面上,并沿原路返回与参考波面形成干涉条纹。所得的面形误差分布和干涉图如图 7,其 PV 值和 RMS 值分别为 0.354λ 和 0.042λ 。

(4)比较可得,两种方法检测得到的面形误差分布是一致的,其 PV 值和 RMS 值的偏差分别为 0.033λ 和 0.006λ 。

经分析可得,两种方法的检测结果相差很小,说明这种简单的检测浅度非球面的技术是切实可行的。

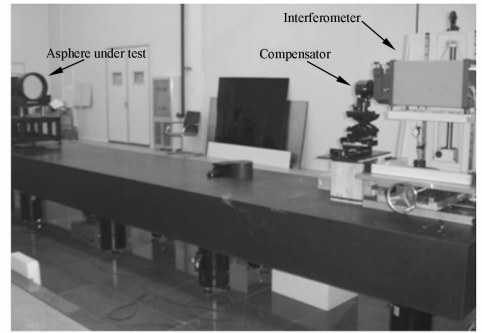


图 6 零位补偿干涉检测非球面装置图

Fig. 6 Setup for null-compensation interferometry

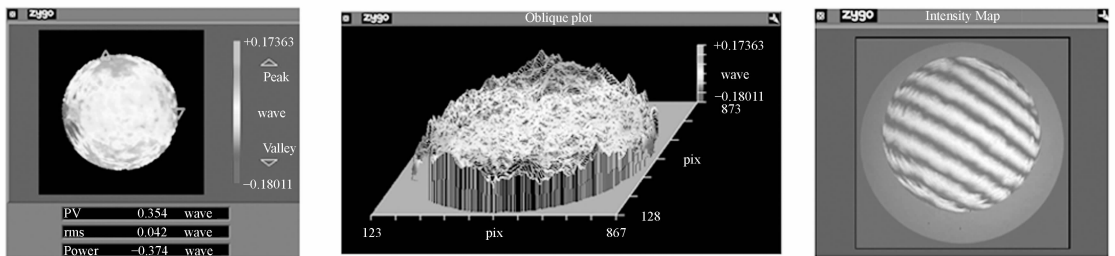


图 7 零位补偿检测面形分布图和干涉图

Fig. 7 Surface map and interferogram by null-compensation

4 结 论

提出了一种实时检测非球面的方法,该方法无需其它辅助元件就能实现对浅度非球面的测量,从实验结果可以看出该方法是准确可行的。该方法物理概念明确,数据处理和数学运算简单,实验操作简单易行,检测成本很低,且缩短了测试时间,在测量范围内实现了对非球面的直接检测,进一步扩充了干涉仪的现有功能。计算分析可得

该技术一般只能检验非球面度在 $10 \mu\text{m}$ 以下的非球面元件,对于偏离量比较大的非球面,直接用标准球面或者平面作为参考表面,生成的干涉条纹局部很密,一般会超过 $2 \text{ Pixel}/\lambda$,会形成条纹混叠现象,造成部分干涉数据丢失。但是如果采用高分辨率的探测器(提高 CCD 的像素密度),使用波长较长的光源,或将该方法与子孔径拼接技术联用^[6-9],则能在一定程度上拓宽测量范围,从而可以降低对非球面度的要求。

参考文献:

- [1] 朱秋东,郝群.激光束偏转法非球面面形测量和计算[J].光学技术,2002,28(1):22-27.
ZHU Q D, HAO Q. Aspheric surface testing and calculating by laser deflectometry [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(1):22-27. (in Chinese)
- [2] 郭培基,余景池.用校正法提高补偿器检测法的精度[J].光学精密工程,2006,14(2):202-206.
GUO P J, YU J CH. Improving precision of null lens method with correction technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):202-206. (in Chinese)

- [3] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. New York: J. Wiley & Sons, 1992.
- [4] 王之江. 光学技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
WANG Z J. *Manual of Optical Technique* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987. (in Chinese)
- [5] MAURO M, LUCA P, ALESSANDRO M. Testing aspheric surfaces using multiple annular interferograms [J]. *Opt. Eng.*, 1993, 32(5): 1073-1079.
- [6] 王孝坤, 张学军, 王丽辉, 等. 环形子孔径拼接干涉检测非球面的数学模型和仿真研究 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 527-532.
WANG X K, ZHANG X J, WANG L H, *et al.*. Mathematical model and simulation for testing aspheric surface by annular subaperture stitching interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 527-532. (in Chinese)
- [7] FERMIN G A, FAUSTO E R. Testing a paraboloid mirror using annular subapertures without auxiliary optics [J]. *SPIE*, 2003, 4829: 44-45.
- [8] 王孝坤, 王丽辉, 张学军, 等. 子孔径拼接干涉法检测非球面 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 192-198.
WANG X K, WANG L H, ZHANG X J, *et al.*. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 192-198. (in Chinese)
- [9] PAUL E M, JON F, GREG F, *et al.*. High precision metrology of domes and aspheric optics [J]. *SPIE*, 2005, 5786: 113-121.

作者简介: 王孝坤(1980—), 男, 江苏丹阳人, 博士研究生, 主要从事光学超精加工和检测技术方面的研究; E-mail: jim-wxk@sohu.com

张学军(1968—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 中科院百人计划获得者, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

● 下期预告

四程抽运 Yb : YAG 薄片激光器

田玉冰^{1,2}, 檀慧明¹, 田智辉^{1,2}, 李义民^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

设计了四程抽运的 Yb : YAG 薄片激光器。选用掺杂原子数分数为 10%, 几何尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 300 \mu\text{m}$ 的薄片状 Yb : YAG 晶体, 采用钎焊工艺将其焊接到水冷系统上, 用可调式恒温水箱对其进行温度控制。使用两个 $\Phi = 30 \text{ mm}, R = 50 \text{ mm}$ 的球面反射镜, 完成了四程抽运。利用蒙特卡罗方法对抽运光斑的大小进行了计算, 将反射镜轴向与光纤头轴向夹角控制在 12° 以内, 以使抽运光斑半径与基模光斑半径比符合模式匹配原则。在 LDA 抽运功率为 4.13 W 时, 获得了最大功率为 670 mW 的 1 030 nm 连续激光输出, 光-光转换效率为 16.2%。结果表明: 该结构可降低激光介质的热透镜效应和应力双折射效应, 可获得高光束质量的激光输出, 但散热系统和焊接工艺需进一步优化。