

文章编号:1002-2082(2012)01-0124-05

非零位检测凸非球面反射镜的研究

王孝坤

(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:在简要总结各种检测凸非球面方法优缺点的基础上,提出了利用部分补偿法和子孔径拼接干涉检测凸非球面的新方法。分别研究和分析了这两种非零位检测非球面方法的基本原理和基础理论;设计并制作了部分补偿器件,并对其系统误差进行了标定;开发了综合优化和误差均化的子孔径拼接算法;设计并研制了两种方法都适用的检测装置。并结合实例对一口径为 130 mm 的碳化硅凸非球面分别进行了部分补偿检测和子孔径拼接测量,这两种方法测量所得的全口径面形分布是一致的,其 PV 值和 RMS 值的偏差仅为 0.010λ 和 0.002λ ($\lambda=0.6328\mu\text{m}$)。从而提供了两种非零位补偿测试凸非球面的手段。

关键词:非零位检测;部分补偿;子孔径拼接干涉;凸非球面;零位补偿

中图分类号:O436.1;TQ171.65

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201233.0103005

Measurement of convex aspheric mirror by non-null testing

WANG Xiao-kun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China)

Abstract:Conventional testing methods for convex aspheric surfaces were briefly reviewed, and two novel methods for testing convex asphere by partial compensation method and sub-aperture stitching interferometry (SSI) were proposed. The basic principle and theory of the two methods were investigated. The partial compensator was designed and customized, the system error of the partial compensator was calibrated, and the synthetical optimization stitching model and the effective stitching algorithm were established based on homogeneous coordinate transformation and simultaneous least-squares fitting. The prototype and setup for testing of convex asphere by the non-null testing were developed. A convex SiC asphere with the aperture of 130 mm was tested by the two methods respectively. The results show that the difference of PV and RMS error between SSI and partial compensation is 0.010λ and 0.002λ respectively, the full aperture surface maps of the two methods are consistent and it provides two non-null testing methods for measuring convex aspheric surfaces.

Key words:non-null testing; partial compensation; SSI; convex asphere; null compensation

引言

在光学系统中,使用非球面元件能矫正像差,改善像质,而且可以减小光学系统的尺寸和质量,

因此非球面光学元件正越来越多地被运用于各个领域。在众多应用领域中,凸光学非球面元件是较为常用的核心部件^[1-3]。

收稿日期:2010-11-23; **修回日期:**2010-12-22

基金项目:863 基金资助项目(O8663NJ090);中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新三期基金资助项目(NO:O83Y32J080)

作者简介:王孝坤(1980—),男,江苏丹阳人,副研究员,博士,主要从事光学超精加工和检测技术研究。

E-mail: jimwxk@sohu.com

凸非球面面形的测量一直是光学检测中的难点和热点,以往我们一般采用无像差点法对其进行测量,其实质是:若待测表面是理想的,而点光源精确置于其中的一个几何焦点上,则由表面反射的光线形成球面波前,其球心与另一几何焦点重合^[4]。通过求解波前的变形量及其方向,并据此确定引起波前形变的非球面形状偏差。无像差点法是一种经典、可靠的检验二次曲面的方法,其优点是设计理论误差为0;但缺点是当检验大口径非球面时,就需要更大口径的Hindle球或者大口径的辅助平面,尤其是检测凸非球面,辅助镜面的口径往往是待测镜面的几倍,这就造成了材料和工艺上的难度。此外利用该方法在检测反射系统时,非球面的中心部位往往无法检测。

目前,设计补偿透镜利用零位补偿法对凸非球面进行测量,仍是检测凸非球面镜最常用的方法之一。但是凸非球面补偿器的设计要比凹非球面补偿器的设计要复杂得多,凸非球面的补偿器至少要由两片透镜组成,有时补偿器本身可能还含有非球面元件,而要实现该非球面的高精度检测,还要为其再设计一套补偿器,因此又给加工和装调带来了很多的困难^[5-6]。通过计算全息(CGH)进行零位补偿可以较好地实现对非球面的检测,但是针对某个非球面的测量,需要特制的CGH^[7-8]。此外,由于检测凸非球面需要汇聚波前作为参考波面,这就需要所使用的干涉仪的口径和补偿透镜或CGH的口径大于待测凸非球面的口径,大口径的补偿透镜和CGH的制作和装调在目前仍然存在很多的困难。

为了降低补偿器的设计难度,简化补偿器的结构,甚至无需补偿器就能够实现对凸非球面进行测量,本文提出了部分补偿检测和子孔径拼接检测凸非球面的新方法。

1 部分补偿检测

1.1 部分补偿检测基本原理

为了降低补偿器的设计难度和简化补偿器的结构,我们设计了单块简单的平凸透镜作为补偿器。显然这样的单片光学元件只能补偿部分球差,并不能补偿所有的球差,选择这种形式的补偿器的目的并不完全在于给测量波面赋以足够的球差,其首要目的是扩束功能,即保证测量波面可以覆盖整个待测凸非球面,同时保证通过部分补偿

的波前经过待测凸非球面反射后与干涉仪的参考波面干涉不超过干涉仪的分辨极限。

假定利用该部分补偿器测定凸非球面镜所得的相位分布为 W_a ,则 W_a 由3部分误差组成,即为下式

$$W_a = W_l + W_s + W_m = W_c - W_f + W_s + W_m \quad (1)$$

其中: W_l 为部分补偿器出射的参考波面与理论非球面之间的偏差; W_c 为待测非球面检测位置时部分补偿器的出射波前; W_f 为非球面理论波前; W_s 为部分补偿本身的系统误差; W_m 为非球面面形误差分布。

我们可以标定出部分补偿器的系统误差以及理论非球面与参考波面之间的偏差,标定光路示意图如图1所示。干涉仪出射的标准球面波经部分补偿器扩束后,经过超高精度的标准球面反射

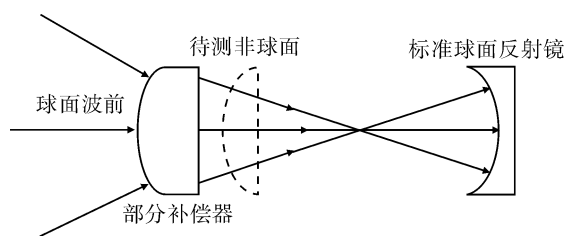


图1 标定光路示意图

Fig. 1 Sketch of calibration

球面镜返回,形成干涉条纹。假设标定得到的相位分布为 W_b ,则其可以表达为下式

$$W_b = W_s + W_l = W_s + (W'_c - W_q) \quad (2)$$

其中: W_s 为部分补偿本身的系统误差,它包含了两个光学表面的面形制造误差、顶点曲率误差、折射率误差、厚度误差以及位置装调误差等; W_l 为部分补偿器出射的参考波面与理论反射球面之间的偏差; W'_c 为球面反射镜波前;是位于球面反射镜面前时部分补偿器的出射波前。我们将球面反射镜置于与待测凸球面共轭的位置,以保证标定位置 and 实际测量位置理论非球面与参考波面之间的偏差是相同的,即

$$W'_c = W_c \quad (3)$$

由(1)-(3)式可得非球面面形误差分布 W_m 为下式

$$W_m = W_a - W_b + (W_f - W_q) = W_a - [W_b + (W_q - W_f)] \quad (4)$$

其中: W_a 与 W_b 是实际测量的相位分布; W_f 与 W_q 是理论波前,可以通过理论计算得到。因此我们可以将标定获得的 W_b 与 W_f 和 W_q 的理论偏差叠加在一起,做成数字虚拟样板,将此存成干涉仪的系统误差文件,从每次测量的相位分布 W_a 中剔除

该误差,即可获得非球面的面形误差分布 W_m , 完成对非球面的测量。

2 部分补偿检测实验

我们设计并组建了一套部分补偿检测装置, 检测设备如图 2 所示, 它由 Zygo 数字干涉仪、部分补偿器、待测非球面和精密调整机构等组成, 所有组件都安装在防振气浮平台上。

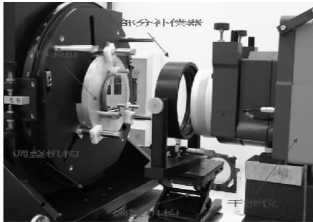


图 2 部分补偿检测设备图

Fig. 2 Setup of partial compensation testing

待测凸非球面的通光口径为 $\Phi=130\text{ mm}$, 顶点曲率半径 $R=1\ 083.875\text{ mm}$, 二次曲面系数 $K=-1.875\ 652$ 。经分析和计算, 我们选用口径为 150 mm 的干涉仪和 $F\# = 11$ 的标准镜。

首先标定所得部分补偿本身的系统误差以及理论非球面与参考波面之间的偏差, 所得的相位分布和干涉图, 如图 3 所示, 可以看出该部分补偿器的面形精度并不是很好, 但是这并不影响非球面面形的测量, 因为数字样板将补偿这些偏差。理论计算 W_f 和 W_q 的偏差, 得到其相位分布, 如图 4 所示。

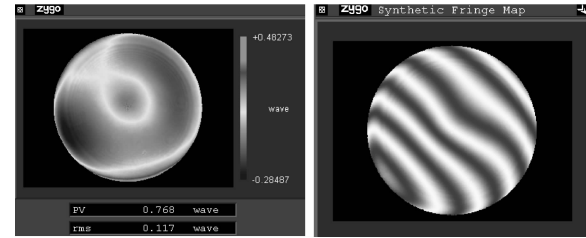


图 3 系统标定相位分布图和干涉图

Fig. 3 Phase and interferogram of calibration

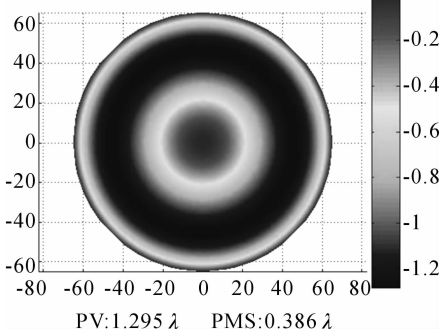


图 4 理论偏差相位分布图

Fig. 4 Phase map of theoretical error

将标定所得的相位分布与理论偏差相位分布叠加做成数字样板, 得到其相位信息, 如图 5 所示。将其作为整个系统的误差, 存成干涉仪的系统误差文件, 利用干涉测量获得非球面的面形误差分布, 如图 6 所示, 其 PV 值和 RMS 值分别为 0.176 和 0.017 。

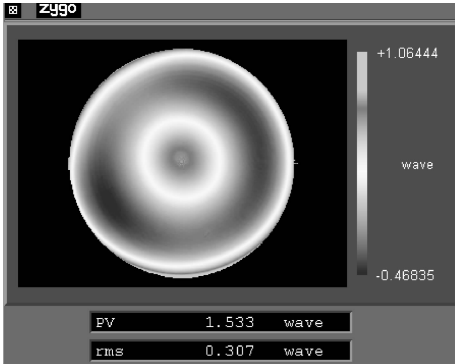


图 5 数字样板相位分布图

Fig. 5 Phase map of digital template

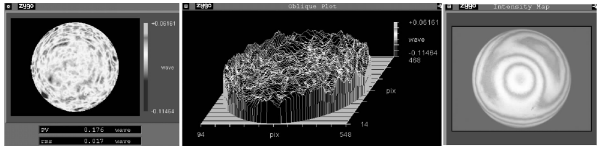


图 6 部分补偿干涉测量干涉图和面形颁布图

Fig. 6 Interferogram and surface map by partial compensation

3 子孔径拼接检测

3.1 子孔径拼接基本原理

非球面的子孔径拼接干涉检测技术是一种将子孔径拼接技术与干涉计量技术相结合进行非球面面形检验的新方法^[9-10]。该技术利用干涉仪产生的标准球面波前, 对大口径非球面各局部区域的相位分布进行逐次测量, 去除非球面与参考波面的偏差和调整误差后, 通过拼接算法获得非球面全口径的面形误差分布。

子孔径拼接检测凸非球面的实验装置示意图, 如图 7 所示。它由干涉仪、待测非球面以及调整结

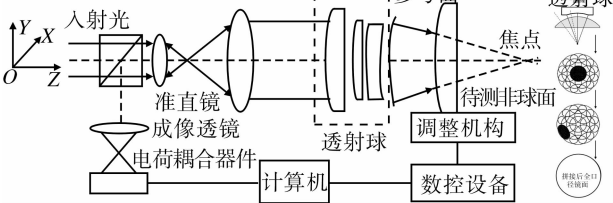


图 7 子孔径拼接检测凸非球面的装置和模型示意图

Fig. 7 Sketch of setup and model for testing convex asphere by SSI

构等组成。待测非球面安置在六维精密调整架上,可以精确调整非球面的俯仰、扭摆和旋转以及沿 X 方向、 Y 方向和沿 Z 方向(光轴方向)的平动。

首先根据待测非球面的口径和顶点曲率半径选取合适的标准镜头并决定子孔径的大小及数目。调整干涉仪,使干涉仪出射的参考球面波前的曲率中心与被测非球面的顶点曲率中心重合。此时得到的干涉图中心部分的条纹较稀,干涉仪很容易分辨,记录下中心区域的位相信息。通过精确调整干涉仪和被检非球面的相对位置,选取非球面上的离轴圆形区域进行测量,球面波焦点与该区域最佳拟合球面的球心重合,这样入射到被测子孔径区域的光线就能够近似沿原路返回。在获取各子孔径的测量结果后,将这些测量结果拼接并进行数据处理,以获得整个非球面的面形误差分布。

3.2 子孔径拼接检测实验

为了验证拼接原理和数学模型的准确性,我们对以上测量的凸非球面镜进行了子孔径拼接检测。经分析和计算,利用 5 个子孔径即可完成对其拼接测量。子孔径分布,如图 8 所示,其中阴影区

域为非球面元件。且检测设备与部分补偿检测装置是完全一致的,仅仅是拆去部分补偿器。

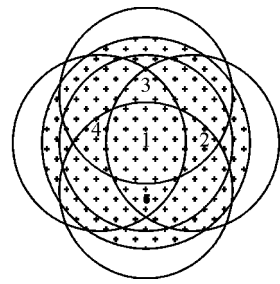


图 8 子孔径分布图

Fig. 8 Distribution of subapertures

调节好干涉仪,使干涉仪出射的参考球面波前的曲率中心与待测非球面的顶点曲率中心重合,干涉测量该区域的相位分布图和干涉图,如图 9(a)所示。调整待测非球面,使非球面沿 X 轴横向移动 30 mm,计算可得该子孔径中心的切向角为 1.584° ,因此再调整非球面扭摆 1.584° ,从而可以测定该子孔径的干涉图和相位分布,如图 9(b)所示。通过依次旋转待测非球面(每次间隔 90°),测定非球面其它 3 个子孔径的干涉图和相位分布如图 9(c)~9(e)所示。

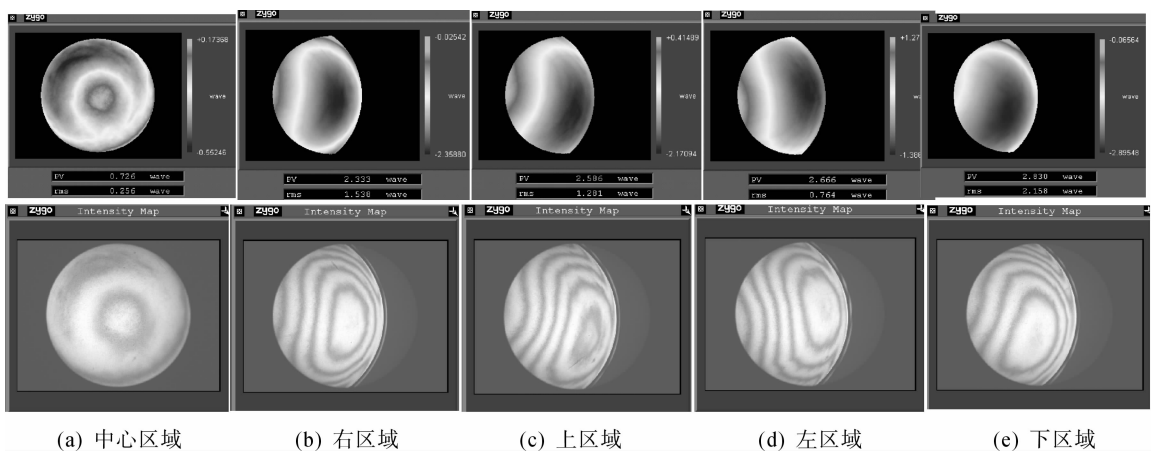


图 9 5 个子孔径相位分布图和干涉图

Fig. 9 Phase map and interferogram of five subapertures

利用齐次坐标变换把采集的所有子孔径测量数据统一到待测非球面的物理坐标系上,然后利用子孔径间重叠部分的相位分布数据从各子孔径相位分布数据中剔除理论非球面与标准球面的偏差。利用所有子孔径间重叠部分的相位分布数据求得所有子孔径相对基准子孔径的相对定位误

差,从测量的相位数据中消除该误差,求得拼接后的全口径面形分布,如图 10 所示,其 PV 值和 RMS 值分别为 0.186λ 和 0.019λ 。

比较分析可得:子孔径拼接检测的得到的面形误差分布与部分补偿测量的结果是一致的;其 PV 值和 RMS 值的偏差仅为 0.010λ 和 0.002λ 。

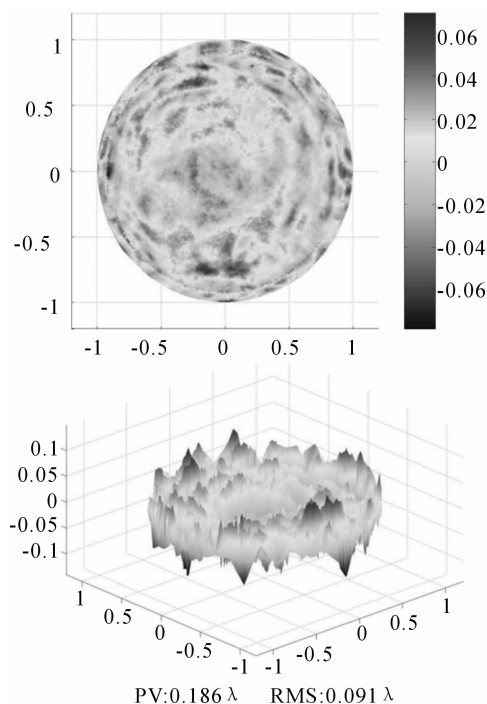


图 10 拼接后全口径面形分布图

Fig. 10 Normalized surface map of whole aperture after stitching

4 总结

本文对两种非零位检测非球面的方法进行了分析和研究,利用部分补偿法,可以降低补偿器的设计难度,减少补偿器件的透镜片数,从而可以降低补偿器装调的难度,节省了时间,提高了效率。利用子孔径拼接法,可以拓宽干涉仪测试的横向和纵向的动态范围,它无需其它辅助光学元件就能够实现对凸非球面的测量,这不仅提高了分辨率,降低了成本,而且缩短了工期。我们设计和研制了一套两种非零位补偿检测方法都适用的检测装置。并结合实例对一碳化硅凸非球面分别进行了部分补偿检测和子孔径拼接测量,这两种方法测量所得的全口径面形分布吻合。从而提供了除零位补偿检测外另外两种定量检测非球面面形的手段。

参考文献:

[1] ZHANG Xue-jun, ZHANG Zhong-yu, LI Zhi-lai. Manufacturing and testing of 1-m class SiC aspherical mirror[J]. SPIE, 2007, 6721: 672109-1-

672109-5.

- [2] MALACARA D. Optical shop testing[M]. New York: J. Wiley & Sons, 1992.
- [3] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, BINGHAM R G. The precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation[J]. SPIE, 2003, 4842: 73-84.
- [4] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工和检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- PAN Jun-hua. Design, fabrication and testing of optical aspheres [M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese)
- [5] GUO Pei-ji, YU Jing-chi. Design and certification of a null corrector to test hyperboloid convex mirror [J]. SPIE, 2006, 6150: 259-263.
- [6] 薛栋林, 张忠玉, 郑立功, 等. 大口径碳化硅材料凸非球面反射镜的检验[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2491-2496.
- XUE Dong-lin, ZHANG Zhong-yu, ZHENG Li-gong, et al. Testing methods for large aperture convex SiC asphere mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2491-2496. (in Chinese with an English abstract)
- [7] BURGE J H, ANDERSON D S. Full-aperture interferometric test of convex secondary mirrors using holographic test plates [J]. SPIE, 1994, 2199: 181-190.
- [8] QI Yue-jing, WANG Ping, XIE Jing-hui. A novel method of measuring convex aspheric lens using hologram optical elements [J]. SPIE, 2005, 6024: 60241F-1-60241F-7.
- [9] 王孝坤, 王丽辉, 张学军, 等. 子孔径拼接法检测非球面[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 527-532.
- WANG Xiao-kun, WANG Li-hui, ZHANG Xue-jun, et al. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 192-198. (in Chinese with an English abstract)
- [10] WANG Xiao-kun, ZHENG Li-gong, ZHANG Bin-zhi, et al. Test of an off-axis asphere by sub-aperture stitching interferometry[J]. SPIE, 2009, 7283: 72832J-1-72832J-6.