

文章编号 1004-924X(2008)12-2491-06

大口径碳化硅材料凸非球面反射镜的检验

薛栋林,张忠玉,郑立功,张学军

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研究中心,吉林 长春 130033)

摘要:为了实现某大口径碳化硅材料凸非球面反射镜检验,研究了无像差点法以及补偿检验法方案。经过比较优选,确定选用补偿检验方案并专门设计了高精度大口径非球面补偿器,设计精度为 $PV:0.008\ 2\lambda$, $RMS:0.002\ 9\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm)。采用会聚光束,使用大口径数字干涉仪进行凸非球面正面检测,最终检测结果为 0.022λ (RMS)。所述补偿器的设计方法和要求具有普遍性,设计结果也可用于同类型大口径凸非球面检验用补偿器的设计。采用该方法提高了凸非球面检测精度,并且在凸非球面镜的材料选择、结构设计、支撑方式等方面提供了更多的优化空间,为新型光学材料在凸非球面反射镜的应用奠定了基础。

关键词:凸非球面镜;碳化硅反射镜;零位检验;补偿器设计

中图分类号:TH703;TQ171.6 **文献标识码:**A

Testing methods for large aperture convex SiC asphere mirror

XUE Dong-lin, ZHANG Zhong-yu, ZHENG Li-gong, ZHANG Xue-jun

(*Optical Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: In order to test a large aperture SiC convex asphere, the anastigmatic null testing methods and null lens compensator testing method are analyzed. After comparison, the null lens compensator testing method is selected to use in testing the asphere mirror and a null lens compensator for large SiC convex asphere is designed. The design results indicate that the precision of the system is $PV:0.008\ 2\lambda$, $RMS:0.002\ 9\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm). A large aperture Zygo interferometer is used in testing the large aperture mirror, the final testing results is $0.022\ \lambda$ (RMS). Proposed design method is universal and the design results can be used in the compensator design for other convex SiC mirrors. Testing result shows that the convex asphere has been improved, and the selection aspects of material, design structure and support structure in this paper can give a lots references for new style of convex asphere mirror.

Key words: convex asphere mirror; SiC mirror; null test; null lens compensator design

收稿日期:2008-09-28;修订日期:2008-10-23.

基金项目:国家杰出青年基金资助项目(No. 69925512)

1 引言

目前非球面的主要检测方法包括轮廓测量法、无像差点法、光学补偿法、子孔径拼接法等,其中轮廓测量法受到测量仪器的精度限制,不能用于检测高精度非球面光学元件,无像差点法^[1]适合二次曲面的检测,其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镜面,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,因此,造成了材料和工艺上的难度。

光学补偿检验法^[2-3]是目前非球面检验的主流技术,按照光学补偿器类型,该技术可以分为折射式光学补偿法和衍射式光学补偿法。折射式光学补偿法起源较早,其技术和工艺相对比较成熟,目前仍然广泛应用于高精度非球面检验中,是大多数非球面制造企业和研究机构的首选技术。

衍射式光学补偿法采用 CGH (Computer Generated Hologram, 计算全息图)^[4]元件作为补偿器,其技术于上世纪 60 年代末由 Lohmann, Paris 和 Lee 提出并得到发展。随着光刻、离子束、电子束刻蚀技术水平的进步,CGH 器件制造精度越来越高,该技术于 90 年代末发展为较成熟的光学检测技术。但是,国内 CGH 应用于光学检测起步较晚,中科院长春光机所、成都光电所、南京理工大学等对 CGH 设计方法进行了一定的理论探讨或实验验证,目前还不能满足实际工程应用需求。

2 大口径凸非球面的检验技术

抛光阶段是非球面加工的最后阶段,在抛光阶段结束后,非球面的面形精度和表面粗糙度应该满足设计精度要求。一般来讲,非球面抛光结束后面形精度和表面粗糙度的均方根值(RMS)

分别要达到 $\lambda/20 \sim \lambda/50$ 和 $1 \sim 3$ nm。因此,抛光阶段的检测精度应该达到纳米级水平。

本文结合实际工程任务,需要完成 $\phi 320$ mm 口径 SiC 材料凸双曲面检验。大口径凸非球面的检验技术一直是困扰光学检测技术人员的难题。

2.1 凸非球面无像差点检验

传统凸非球面镜的干涉检验方案一般采用无像差点法^[5]。根据双曲面的数学特性,如果在它的一个几何焦点上设置点光源,则经双曲面反射后成为一束从它的另一个焦点发出的完好同心光束。凸非球面无像差点检验示意图如图 1 所示。利用无像差点检验反射式二次非球面的实质是:若表面具有理想形状,而点光源精确置于其中一个几何焦点上,则由表面反射的光线形成球面波,其球心与另一个几何焦点重合,显然,光源同它的像可以互相易位,通过该方法检验波前的变形量,以此来确定非球面的面形偏差。

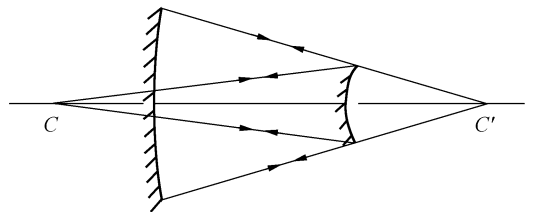


图 1 凸非球面无像差点检验示意图

Fig. 1 Sketch of convex asphere anastigmatic null test

对于 $\phi 320$ mm, $R = 4\ 087.999$, $k = -3.662\ 46$,凸非球面无像差点法检验设计光路图如图 2 所示,设计结果如图 3 所示。

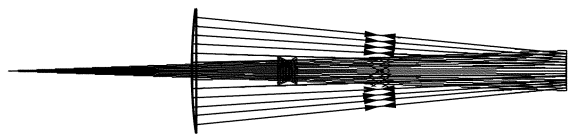


图 2 凸非球面无像差点检验光路图

Fig. 2 Design structural drawing of convex asphere anastigmatic null test

表 1 SiC 材料凸非球面无像差点检验设计

Tab.1 Design results of convex asphere anastigmatic null test

序号	曲率半径	间隔 (mm)	口径 (mm)	二次 曲面常数
1	infinity	4 473. 833		
2	4 087. 998 95	3 000	320	-3. 662 46
3	4 402. 999	3 000	1 000	
4	4 087. 998 95	4 473. 833	320	-3. 662 46
5	infinity			

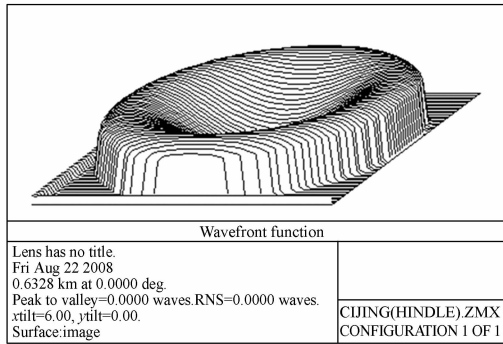
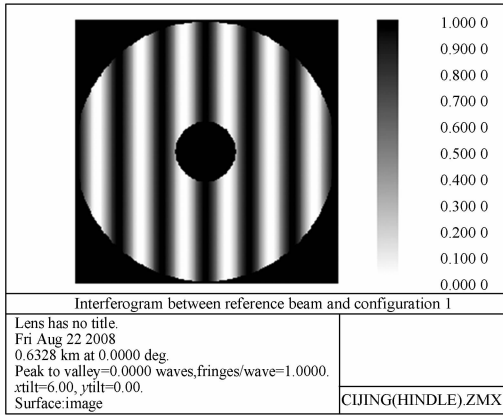


图 3 凸非球面无像差点法检验设计结果

Fig. 3 Design results of convex asphere anastigmatic null test

尽管用 Hindle 球检验凸二次曲面可以提供
一个无像差的自准像,但是实现起来并不容
易,检测系统调整比较困难,另外参考球面
镜的尺寸通常比较大,为被检凸非球面镜
的几倍以上,而且系统存在一定的遮拦。

设双曲面的直径为 A ,则 Hindle 球面镜
的孔径 A_H 由下式给出^[6]:

$$A_H = \frac{A(m+1)}{mr+1},$$

式中, r 为遮拦比; m 为双曲面的无像差
共轭点处的放大率。

对于该项目中的 $\Phi 320$ mm 凸非球面,参
考球面尺寸达到 1 000 mm,且存在一定的遮
拦。采用该方法存在以下缺点:(1)该方法
仅限于二次曲面检验;(2)参考球面镜尺
寸必较大,为被检镜尺寸的几倍以上;(3)
不能完成无中心遮拦非球面检验;(4)需
要在反射镜表面镀高反射率薄膜。因此,
使用该方法进行检验存在一定的局限性。

2.2 凸非球面零位补偿检验

利用补偿法能够高精度地检测大口径
非球面,检测精度可以达到几十分之一波
长到百分之一波长左右,是抛光阶段非球
面加工最终检验的最常用方法之一。在检
验光路中使用专门设计、制作的零位补偿
器(Null lens),能够获得高精度非球面形
偏差检验结果。零位补偿法是一种干涉测
量技术,补偿法主要分为反射式补偿法和
折射式补偿法。零位补偿检验的原理,就
是根据非球面光学元件的参数,设计并制
造光学补偿器,将干涉仪产生的球面或平
面波前转变为非球面波前,该波前经被检
非球面表面反射后,再次通过光学补偿器
还原为包含非球面表面误差信息的球面
或平面波前,与干涉仪的参考波面相干涉,
对干涉条纹进行分析、处理就可得到非球
面的面形误差。

对于凸非球面反射镜过去通常采用透
射检验方法,如图 4 所示,将凸非球面反
射镜的后表面加工成为高精度平面,设计
补偿器使光线从后表面(平面)透射,再经
过前表面(非球面表面)反射后获得干涉测
量结果。该方式对反射镜材料的折射率均
匀性、反射镜后表面的加工精度提出了很
高的技术要求,并且限制了反射镜结构(不
能轻量化)、反射镜材料选择范围(透光性
好、折射率均匀性好)和支撑方式(不能背
部支撑)。

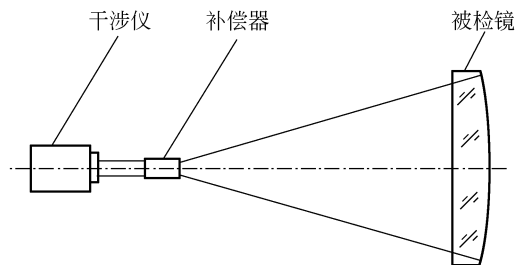


图 4 传统凸非球面透射补偿检验光路

Fig. 4 Conventional null test of convex aspheric mirror

由于碳化硅材料为非透明材料,因此,不能采用传统凸非球面透射补偿检验方式进行检验。

本文针对某工程应用的 $\Phi 320$ mm 凸非球面设计了高精度大口径非球面补偿器,检验光路见图 5,采用汇聚光束、使用大口径数字干涉仪进行凸非球面正面检测。该方法提高了凸非球面检测精度,扩大了凸非球面反射镜材料的选取范围,为新型光学材料在凸非球面反射镜的应用铺平了道路。

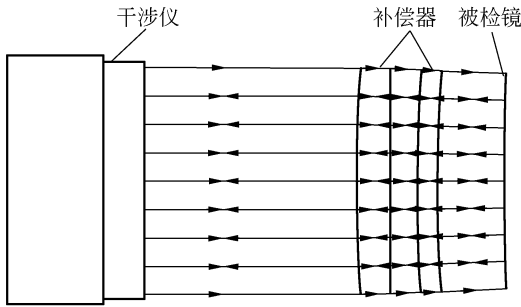


图 5 新型凸非球面补偿检验光路

Fig. 5 New style structural design of convex asphere

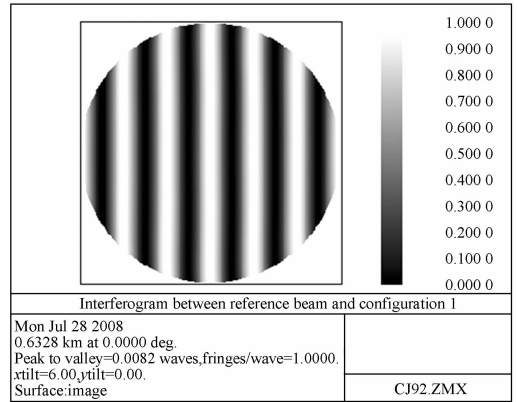
3 应用实例

某相机采用了全 SiC 材料反射镜的离轴三反结构,其次镜为凸面非球面反射镜,为解决次镜检验问题,专门设计制造了高精度大口径补偿器,采用汇聚光束、使用 24" ZYGO GPI 数字干涉仪进行凸非球面的正面检测。采用该技术扭转了凸非球面检测精度低的局面,并且扩大了凸非球面反射镜材料的选取范围,为新型光学材料在凸非球面反射镜的应用铺平了道路。凸非球面补偿检验补偿器设计结果见表 2、图 6,其中 PV: 0.008 2,RMS: 0.002 9。

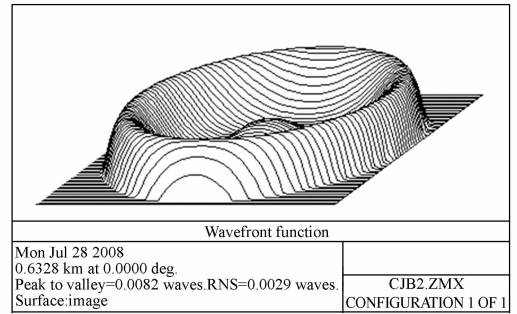
表 2 SiC 材料凸非球面补偿检验补偿器设计

Tab. 2 Design results of convex asphere null lens

序号	曲率半径	间隔 (mm)	玻璃材料	口径 (mm)	二次曲面常数
1	2 239.722 3	40	BK7	336.784	
2	infinity	40		335.17	
3	1 825.204 4	40	BK7	330.857	
4	1 822.243 5	100		327.529	0.918 432
5	4 087.999			320	-3.662 46



Interferogram between reference beam and configuration 1	
Mon Jul 28 2008	
0.6328 km at 0.0000 deg.	
Peak to valley=0.0082 waves,fringes/wave=1.0000.	
xtilt=6.00,ytilt=0.00.	
Surface:image	CJ92.ZMX



Wavefront function	
Mon Jul 28 2008	
0.6328 km at 0.0000 deg.	
Peak to valley=0.0082 waves.RMS=0.0029 waves.	
Surface:image	CJB2.ZMX
	CONFIGURATION 1 OF 1

图 6 新型汇聚光束凸非球面检测补偿器设计结果
Fig. 6 New convergent style design results of null lens for convex asphere

由于补偿器中有一个补偿镜为非球面镜,为此在该非球面加工过程中单独设计制作了高精度非球面补偿器,设计结果见表 3、图 7,其中 PV: 0.008 5,RMS: 0.003。补偿镜加工检验结果见图 8,优于 $\lambda/50$ (RMS)。

表 3 非球面补偿镜检验用补偿器设计

Tab. 3 Null lens design results of asphere compensator lens

序号	曲率半径	间隔 (mm)	玻璃材料	口径 (mm)	二次曲面常数
1	-103.391	30	BK7	80	
2	-142.076	100		88.67	
3	243.847	20	BK7	98.83	
4	-783.567	2 332.886		97.74	
5	-1 822.243 5			340	0.918 432

依据补偿器光学设计结果,选取折射率均匀性优异的光学材料作为补偿镜光学元件,采用超

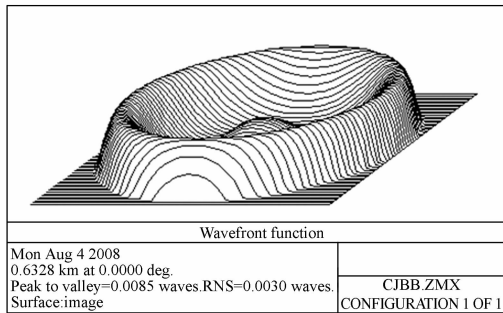
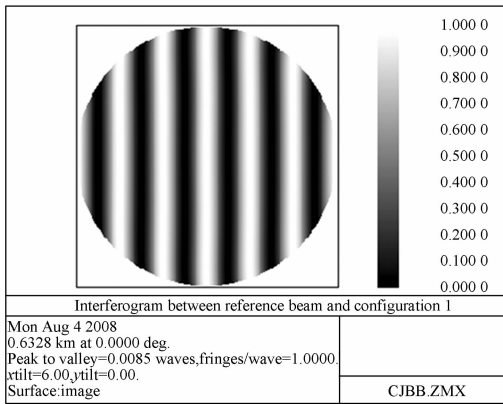


图 7 非球面补偿镜检验用补偿器设计

Fig. 7 Null lens design results of asphere compensator lens

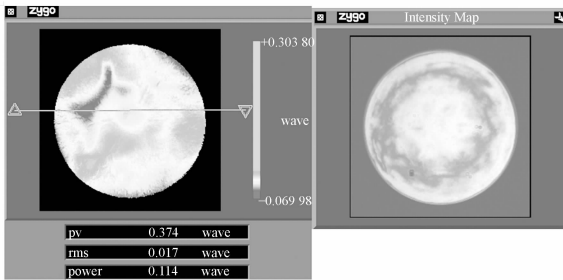


图 8 非球面补偿镜实际加工结果

Fig. 8 Fabrication result of compensator lens

精密加工、检测设备,光学透镜加工过程中严格控制其厚度、曲率半径、面形精度及偏心误差等方法。补偿器光学元件加工完成后,将检测数据输入光学设计软件中进行复算,进一步优化设计,获取补偿器装配参数。补偿器装配过程精确控制补偿器光学元件间隔以及透镜超高精度定心,实现光学元件无变形装校定位。 $\Phi 320$ mm 口径 SiC 材料凸双曲面检验装置实物图如图 9 所示, $\Phi 320$ mm 碳化硅凸非球面最终检验结果如图 10 所示。

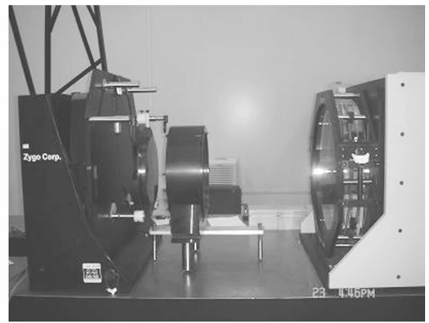


图 9 新型汇聚光束凸非球面检测装置

Fig. 9 New convergent style tesing device for convex aspheric mirror

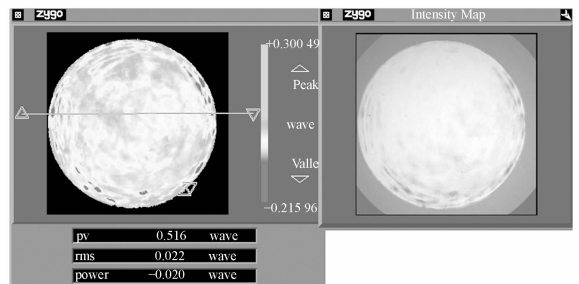


图 10 $\Phi 320$ mm 碳化硅凸非球面检验结果

Fig. 10 Tesing result of $\Phi 320$ mm SiC convex aspheric mirror

4 结 论

本文探讨了大口径 SiC 材料凸非球面反射镜补偿检验技术,针对某任务 $\Phi 320$ mm SiC 凸非球面研究了无像差点法以及补偿检验法方案,经过方案优选,确定选用补偿检验方案。专门设计了高精度大口径非球面补偿器,设计精度为 PV: 0.0082λ , RMS: 0.0029λ ($\lambda = 0.6328$ nm),采用会聚光束,使用大口径数字干涉仪进行凸非球面正面检测。该方法提高了凸非球面检测精度,并且在凸非球面镜的材料选择、结构设计、支撑方式等方面提供了更多的优化空间,有助于提高相机的整体技术水平,为新型光学材料在凸非球面反射镜的应用铺平了道路。采用该方法检验凸非球面反射镜,最终检测结果为 0.022λ (RMS)。

参考文献:

- [1] 王鹏,赵文才. 离轴凸非球面的 Hindle 检测[J]. 光学精密工程, 2002,10(2):139-142.
WANG P, ZHAO W C. Hindle testing of the off-axis convex asphere surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(2):139-142. (in Chinese)
- [2] 张忠玉,余景池. 用补偿器测量非球面的研究[J]. 光学精密工程, 1999,7(1):125-129.
ZHANG ZH Y, YU J CH. Study of testing aspheric surface with null corrector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(1):125-129. (in Chinese)
- [3] 李锐钢,郑立功. 大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法[J]. 光学精密工程, 2006,14(4): 533-538.
LI R G, ZHENG L G. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):533-538. (in Chinese)
- [4] 卢振武,刘华. 利用曲面计算全息图进行非球面检测[J]. 光学精密工程, 2004,12(6):555-559.
LU ZH W, LIU H. Aspheric surface testing with CGH on curved surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(6):555-559. (in Chinese)
- [5] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[D]. 苏州:苏州大学出版社, 2004:51-52.
PAN J H. *Aspherical Optical System Design, Fabrication and Testing* [D]. Suzhou: Soozhow University Press, 2004:51-52. (in Chinese)
- [6] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. New York: J. Wiley & Sons, 1992:450-452.

作者简介:薛栋林(1979—),男,副研究员,主要从事非球面加工与检测技术的研究。E-mail: xuedl@ciomp. ac. cn

通讯作者:张忠玉(1964—),男,研究员,主要从事非球面加工与检测技术的研究。E-mail: zhangzy@ciomp. ac. cn

● 下期预告

高精度大口径光栅拼接装置控制算法

邵忠喜,张庆春,白清顺,富宏亚

(哈尔滨工业大学机电学院,黑龙江哈尔滨 15001)

采用新颖的宏/微结合双驱动的少自由度并联进给结构,给出了一种光栅拼接装置设计算法。宏动部分是 5PTS-1PPS 型并联机构,采用步进电机驱动滚珠丝杠形式的进给机构;微动部分是 5TSP-1PPS 型并联机构,采用压电陶瓷驱动柔性铰链形式的进给机构。二者串联构成光栅拼接机构。计算了宏动部分和微动部分的并联机构自由度,利用并联机构运动学的逆解推导出该装置的控制算法,并根据控制算法进行了宏动、微动机构点位控制的运动学仿真。为了提高机构的定位精度,分析了机构的系统误差并提出了误差修正方法。最后将以上算法应用到光栅拼接装置中,实验结果表明:宏动部分最大移动定位误差为 $3.6 \mu\text{m}$,最大转动定位误差为 $4.4 \mu\text{rad}$;微动部分最大移动定位误差为 $0.06 \mu\text{m}$,最大转动定位误差为 $1.2 \mu\text{rad}$,基本满足光栅拼接系统的精度要求。