

计算机再现全息与辅助球面混合补偿 检测凸非球面方法研究

李 明^{1,2} 闫力松¹ 薛栋林¹ 赵晶丽¹ 郑立功¹ 张学军¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 大口径凸非球面镜在现代光学系统的应用日渐广泛,尤其在离轴三反光学系统中,它往往作为次镜使用。出于力学特性和热学特性考虑,一般采用不透明的SiC材料来制作此类非球面镜面,而且对于离轴系统,次镜的全口径均参与成像。口径大、加工材料不透明且无中心遮拦,使得传统的检测方法已经无法实现对此类非球面的检测。为解决此问题,提出一种计算机再现全息(CGH)与辅助球面镜混合补偿的凸非球面检测方法,构建了基于CGH辅助功能区域的检测对准方案,并以此方法对一口径为 $\varphi 120$ mm的SiC凸非球面反射镜进行了混合补偿检测,其检测结果与子孔径拼接检测结果在均方根(RMS)值为 $1/50 \lambda$ 精度下一致,验证了该方法的可行性与正确性。

关键词 光学制造; 混合补偿检测; 凸非球面; 计算机再现全息; 辅助球面镜; 零位补偿检测

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1122001

Hybrid Compensation Testing of Convex Asphere with Computer Generated Holograms and Fold Sphere

Li Ming^{1,2} Yan Lisong¹ Xue Donglin¹ Zhao Jingli¹ Zheng Ligong¹ Zhang Xuejun¹

¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Large convex aspheric mirrors are widely used in optical system, especially for off-axis three mirror systems as secondary mirrors. Considering the mechanical and thermal properties, SiC is chosen as the material of the mirror, which is opaque. For off-axis optical system, the full aperture of the secondary mirror is used for imaging. Because of the properties of large convex aspheric mirrors, such as large aperture, opacification and no obstruction in the optical system, testing of this kind of aspheric mirrors can't be accomplished with traditional method. To solve the testing problem, hybrid compensation testing method with computer-generated hologram (CGH) and fold sphere is proposed, and an alignment method based on the assistant areas of CGH is proposed too. With actual project, a $\varphi 120$ mm mirror is tested using hybrid compensation testing method. The testing result is the same with the stitching testing result at $1/50 \lambda$ root mean square (RMS), which proves the feasibility and validity of the hybrid compensation testing method.

Key words optical fabrication; hybrid compensation testing; convex aspheres; computer-generated hologram; fold sphere; null test

OCIS Codes 220.4840; 090.1760; 120.3940; 120.6650

1 引 言

在离轴三反光学系统中,次镜一般为凸非球面,而对于Rug型离轴三反系统,次镜则为离轴凸非球面。

收稿日期: 2015-01-26; 收到修改稿日期: 2015-05-02

基金项目: 国家973计划(2011CB013205)、国家自然科学基金重点项目(61036015)

作者简介: 李 明(1990—),男,博士研究生,主要从事光学检测和光学系统装调等方面的研究。E-mail: tooldlm@163.com

导师简介: 张学军(1968—),男,博士,研究员,主要从事先进光学制造和空间光学系统等方面的研究。

E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

随着空间对地成像分辨率的要求越来越高,光学系统的尺寸也随之越来越大,次镜的口径通常达到 $\varphi 200\sim 400$ mm,在一些光学系统设计中凸非球面尺寸甚至达到 $\varphi 700$ mm以上^[1-3]。

口径较大的凸非球面通常面临检测的难题,宋强等^[4]提出在非球面检验中以反射镜补偿法线像差的方法,但此方法需被检镜为透镜,而空间使用的口径较大的凸非球面出于力学特性和热学特性考虑,一般要求该被检面使用SiC材料,因此该透射检测方法均无法使用。对于较大口径的凸非球面,一般难以提供口径如此大的标准会聚球面波前,且由于该非球面与球面的偏离量较大,难以直接使用诸如数字样板等非零位检测方法实现,也无法使用较为简单的光学元件将之部分补偿至非零位检测能力范围之内。王孝坤等^[5]提出了利用子孔径拼接干涉检测凸非球面的方法,使用子孔径拼接的非零位检测方法理论上可以检测任意凸非球面,然而,其检测精度受限于算法精度和拼接次数,考虑到拼接次数过多一方面导致精度下降,另一方面导致检测时耗长,工作效率降低,且这种复杂的检测方法带来了较大的潜在错误风险,降低了检测的可靠性,因此必须有其他更为理想的检测手段对之进行检测,而将子孔径拼接作为一种校验检测手段。

薛栋林等^[6]详细分析了检测凸非球面的常规检测方法,其中介绍了Hindle球法(无像差点法)和零位补偿器补偿检验法。但Hindle球法检测通常仅用于凸双曲面,即便是凸双曲面,也需要口径较大的球面反射镜,且由于球面反射镜的中心孔问题导致其通用性极低,而成本高昂,若被检凸非球面为凸椭球面,其两焦点均为虚焦点,需要两个庞大无比的辅助球面反射镜才能构成Hindle球零位检测,可行性过低。若使用传统的null lens作为补偿器,则需口径与其母镜相当的两块透镜组成,较大口径的透镜在玻璃材料选择、力学结构以及装调分析等方面均存在较大技术困难,导致制造成本较高且难以达到精度需求。

利用计算机再现全息(CGH)检测凸非球面的方法国内外已有研究,美国Arizona大学的Burge等^[7-9]提出了多种基于CGH技术的凸非球面检测方法。其中,在凹球面上制作CGH的方法在工艺实现上具有难度,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所刘华等^[10-11]在类似研究中所制作的球面CGH口径仅为110 mm,400 mm以上的球面CGH超过其制作能力^[10-11];sphere reference plate+CGH方法中,干涉仪光源与成像光路在空间上分立,不能直接使用商用干涉仪实现其检测,干涉仪的相移实现也成为问题^[12];

针对此类凸非球面的检测问题,本文提出了CGH与辅助球面混合补偿检测方法,利用倾斜辅助球面反射镜提供会聚光波前并折转光路,CGH用来补偿该检测光路的残余像差。为解决复杂光路的对准问题,提出了基于CGH辅助区域的对准方案,可实现各元件的精确对准。

2 CGH与辅助球面混合补偿检测方案

CGH与辅助球面混合补偿检测的光路结构如图1所示。在该光路中,通过倾斜使用球面反射镜,提供较大口径的会聚光波波前,该球面反射镜在承载较大的光焦度的同时,还引入了一定的离轴误差(主要为像散),一定程度上补偿该离轴凸非球面的像散;CGH用来补偿该光路中的残余像差,主要包括非球面本身的固有像差、球面反射镜引入的球差、由于离轴使用球面反射镜而引入的非对称像差。由于CGH能产生几乎任何形状的光波波前^[13-15],因此在该光路结构的相关光学参数恰当的情况下,CGH可以胜任该非旋转对称波前补偿的工作,可以与辅助球面混合补偿检测凸非球面。

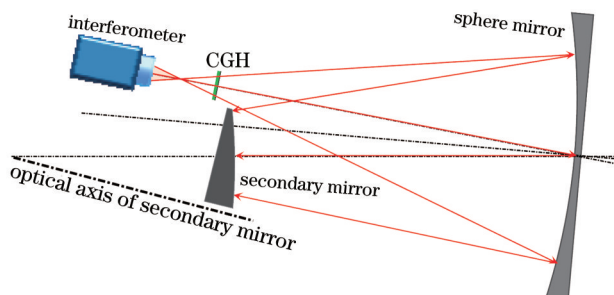


图1 CGH与球面反射镜混合补偿
Fig.1 Hybrid compensation with CGH and spherical mirror

3 基于CGH辅助功能区域的对准方案

对于该检测方案,由于光学元件较多,检测光路的对准显得尤为重要,各个光学元件之间的对准误差均会使检测结果产生误差。在该检测方案的设计中,根据该光路结构的特点,充分利用CGH设计的灵活性,构建了基于CGH辅助区域的对准方案。

实际设计得到的完整CGH的衍射区域应包含用于实现非球面波前补偿的主功能区域、用于对准CGH与干涉仪之间的相对位置的对准区域、用于对准辅助球面反射镜的对准区域、用于在球面处投射十字线的区域、用于在被检面处投射十字线作为横向定位基准的基准区域。

实现光路对准时,其流程如下所述:

- 1) 使用对准干涉仪对球面反射镜进行检测,获得零条纹状态;
- 2) 将CGH置于光路中,根据其于球面对准区域的干涉条纹,调整CGH的位置,获得零条纹,实现对准干涉仪和CGH对准,如此便实现了CGH与球面反射镜的相对位置精确地调整,该过程如图2所示;
- 3) 将检测干涉仪置入光路中,根据与干涉仪对准的CGH对准区域所形成的条纹,调整检测干涉仪,获得零条纹,实现检测干涉仪与CGH的相对位置调整,此时检测干涉仪、CGH与球面反射镜之间的相对位置调整完毕;
- 4) 检测干涉仪的光波波前通过CGH衍射和球面反射镜后,形成理想的非球面波前,同时投射出4个十字线用于作为该非球面的横向定位基准,将非球面置入光路中后,根据十字线完成横向位置调整,再根据干涉条纹实现其他自由度精调后,便完成检测光路调整,如图3所示。

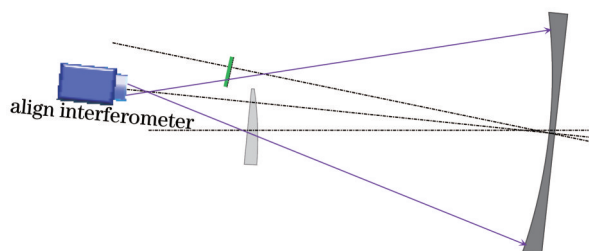


图2 光路调整过程(步骤1和步骤2)
Fig.2 Alignment process (step 1 and step 2)

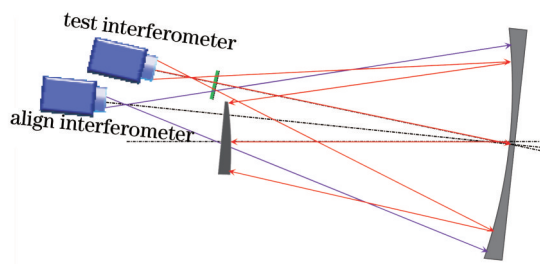


图3 光路调整过程(步骤3和步骤4)
Fig.3 Alignment process (step 3 and step 4)

4 球面面形误差去除及畸变校正

由于检测光波被检面反射一次,而被球面反射镜反射两次,因此球面反射镜的面形残差对于检测精度有较大的影响。在球面反射镜处贴靶标,首先用干涉仪直接检测该球面,获得带靶标的球面面形误差,再用混合补偿检测方法检测非球面,获得带靶标的非球面检测结果。将二者干涉检测结果对比,以靶标为基准,根据仿射变换将两检测结果的靶标精确对准,使球面检测结果映射到非球面检测结果坐标系下,即可对该球面反射镜进行精确的标定,将其作为系统误差在检测结果中予以去除。

干涉仪直接检测球面和平面时,在精确对准的条件下,测量坐标系与镜面坐标系是简单的正弦关系,然而由于非球面的曲率半径随镜面位置不同而变化,对其零位补偿检测时,检测坐标与镜面坐标存在复杂的非线性关系,该非线性关系体现为检测时的投影畸变。而该检测方案需要光路偏折,也会产生一定的畸变,因此检测结果会有一定畸变,通过以下方法校正畸变:

- 1) 在镜面贴靶标,通过 Laser Tracker 或三坐标测定靶标中心在镜面坐标系中的坐标;
- 2) 对设计光路进行光线追迹,得到被检面与CGH的二维非线性映射函数,和镜面坐标系与CGH坐标系的映射关系,根据靶标位置可获得镜面靶标处对应于CGH处的坐标;
- 3) 用混合补偿检测方法检测带靶标非球面,获取带靶标检测结果,通过质心算法算出靶标质心位置,并利用步骤b中获得的CGH处靶标位置,通过仿射变化求解 CCD坐标系与CGH坐标系的仿射变换参数;
- 4) 综合以上步骤,并根据靶标坐标,即可构建检测结果与被检面的二维投影畸变映射函数,根据检测结果,重构被检镜面形误差,实现投影畸变的高精度校正,具体步骤如图4所示^[16-17]。

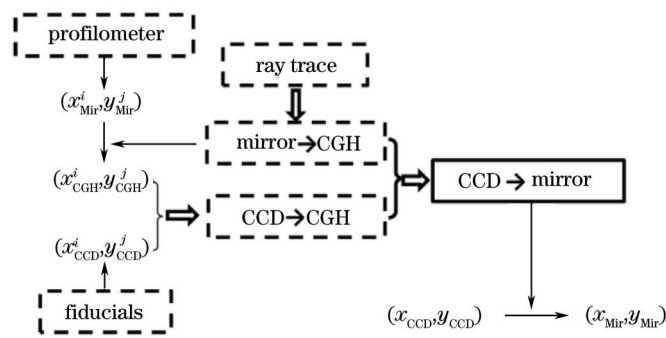


图 4 畸变校正流程图

Fig.4 Process of distortion correction

5 实验验证

为验证该方案的正确性,并方便与其他检测方法对比,用该方法检测某一较小口径的凸非球面,该凸非球面参数如下,顶点曲率半径 $R=1083.875\text{ mm}$, $K=-1.87565206$,直径为 120 mm ,该非球面用子孔径拼接检测或其他常规检测手段不难实现,在此按所提的CGH与辅助球面镜组合补偿检测方案检测,并与子孔径拼接方法结果对比,验证该方案的正确性。

检测光路设计如图5所示,干涉仪发出的光经CGH衍射和球面反射后,沿法线入射到被检凸非球面后沿原路返回,形成检测光。其中球面曲率半径为 1800 mm ,直径为 250 mm ,球面倾斜 4° 。设计残差很小,Zemax软件显示均方根值(RMS)为 0.0000λ 。

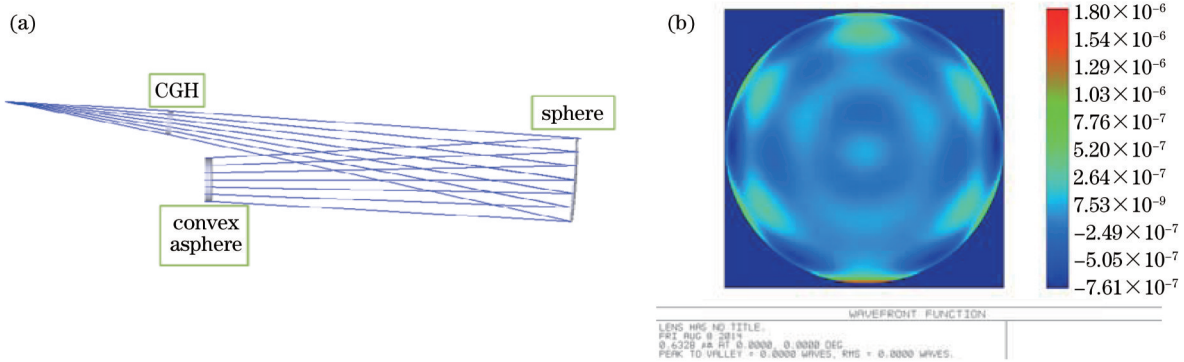


图 5 (a) 光路设计结果和(b) 检测结果

Fig.5 (a) Optical design result and (b) test result

设计完成的CGH区域分布如图6(a)所示,其中绿色区域为用于实现非球面波前补偿的主功能区域,其余区域为用于对准的辅助区域。红色区域用于对准CGH与干涉仪之间的相对位置,蓝色区域用于在被检面处投射十字线作为横向定位基准,指导被检面在检测光路中对准。紫色区域用来实现与辅助光学元件(即该球面反

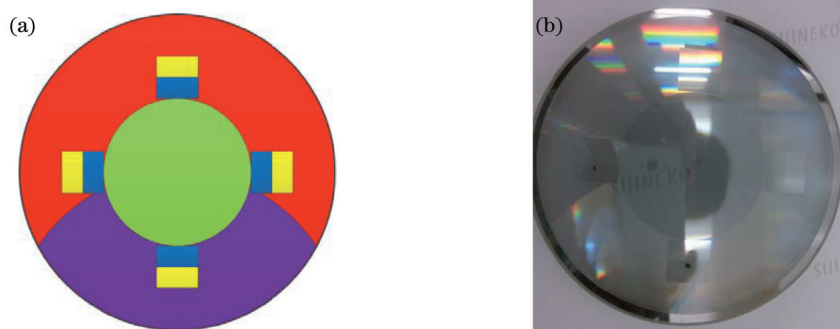


图 6 (a) CGH 区域分布及 (b) 实物图

Fig.6 (a) Diffractive section on (a) CGH and (b) picture

射镜)的对准,黄色区域用于在球面处投射十字线,用来确定球面镜的大致位置及所使用的球面镜区域大小。

经过计算得到CGH相位分布,通过自主研发的软件,将CGH各衍射区域计算得到的CGH条纹离散化转为加工文件,采用激光直写技术将计算图案写到高精度平行玻璃基板上,CGH实物如图6(b)所示。

实际检测光路如图7所示,对准干涉仪用于与CGH和球面镜对准,检测干涉仪发出的光经CGH衍射及球面镜反射后,沿法线入射至被检镜,沿原路返回形成检测测光。

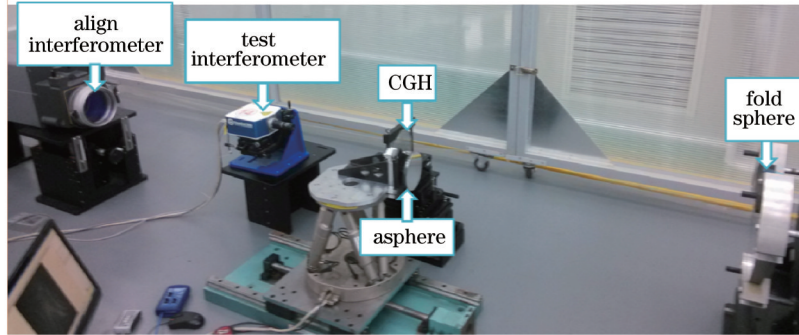


图7 检测装置图

Fig.7 Diagram of test setup

实际检测对准过程如下:

- 1) 对准干涉仪检测辅助球面镜,获得零条纹,如图8所示;
- 2) 将CGH置于光路中,根据如图6中紫色区域所形成的干涉条纹,调整CGH的位置,实现对准干涉仪和CGH对准,如此便精确地实现了CGH与球面反射镜的相对位置调整,该过程如图9所示;
- 3) 将用于检测非球面的检测干涉仪置入光路中,根据如图6中红色区域的对准CGH区域所形成的条纹,调整检测干涉仪,实现干涉仪与CGH的相对位置调整,此时检测干涉仪、CGH与球面反射镜之间的相对位置调整完毕,如图10所示;
- 4) 检测干涉仪的光波波前通过CGH衍射和球面反射镜后,形成理想的非球面波前,同时投射出4个十字线用于作为该非球面的横向定位基准,如图11所示,将非球面置入光路中后,根据十字线完成横向位置调整,再根据干涉条纹实现其他自由度精调后,便完成检测光路调整,如图12所示。

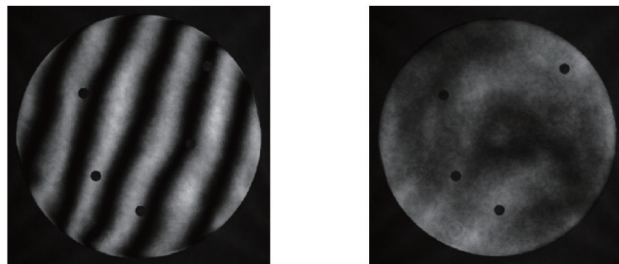


图8 对准干涉仪检测球面

Fig.8 Test sphere with align interferometer

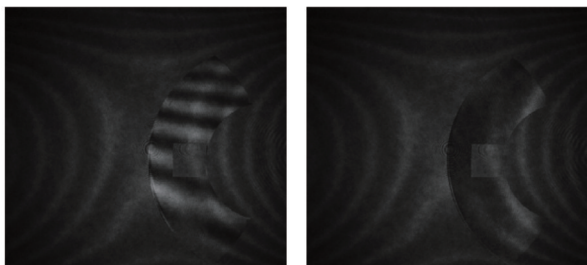


图9 对准干涉仪与CGH对准
Fig.9 Align CGH to align interferometer

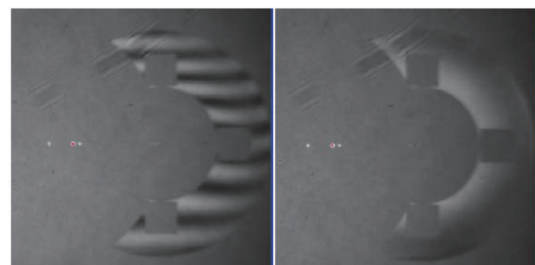


图10 检测干涉仪与CGH对准
Fig.10 Align CGH to test interferometer

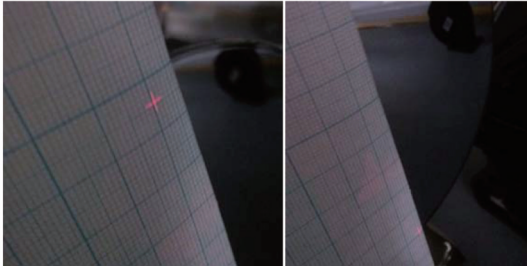


图 11 投射的十字线

Fig.11 Cross-lines projected

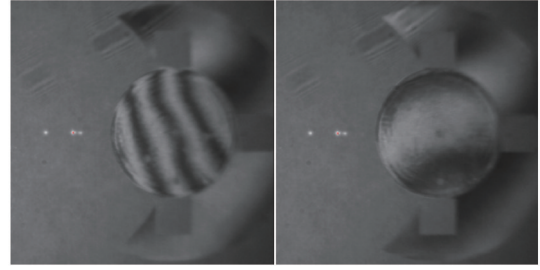


图 12 非球面对准

Fig.12 Asphere alignment

检测结果如图 13 所示,其中图 13(a)为检测干涉仪直接检测结果;图 13(b)为对准干涉仪检测的球面结果;通过在球面贴靶标,以靶标位置为基准,去除球面误差,并在被检面贴靶标,通过光线追迹方法校正畸变,可得到最终非球面面形误差,如图 13(c)所示;图 13(d)为通过子孔径拼接检测的非球面面形误差,对比图 13(c)、(d)可知,混合补偿检测获得的面形结果与子孔径拼接检测获得的面形结果较为一致。

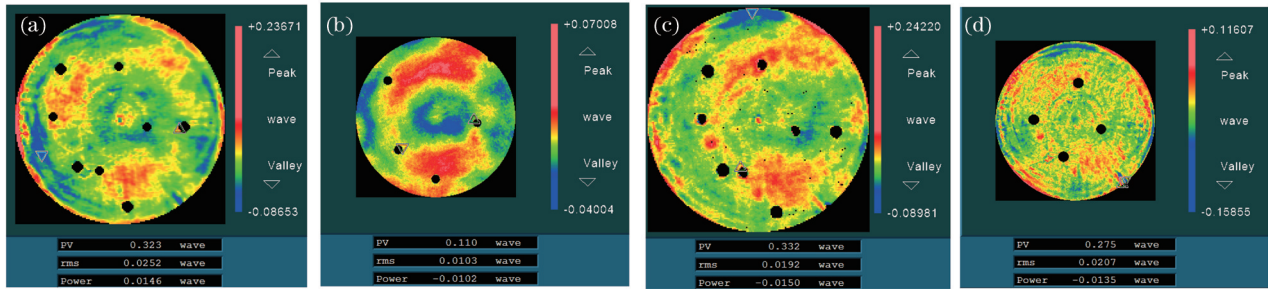


图 13 混合补偿检测实验结果。(a)检测结果;(b)球面结果;(c)非球面面形误差;(d)子孔径拼接结果

Fig.13 Experimental result of hybrid compensation test. (a) Test result; (b) map error of fold sphere;

(c) error of surface under test; (d) sub-aperture stitching result

为进一步比较二者检测结果,将 MetroPro 拟合的前 36 项 Zernike 系数提取出来,分别画出其对应面形,如图 14 所示,由拟合结果可知两方法检测结果的低阶面形吻合较好,但由于被检面存在高阶面形误差,而子孔径拼接检测结果像素数较多,获取高阶面形误差较多,二者高阶面形吻合一般。

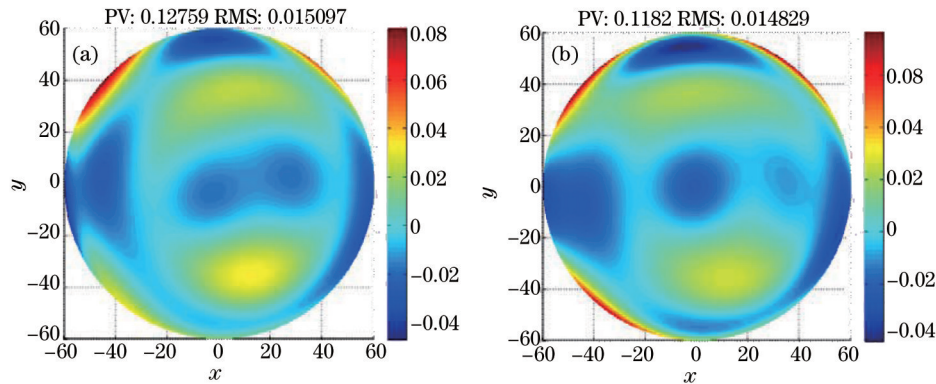


图 14 Zernike 拟合前 36 项。(a) 混合补偿结果;(b) 子孔径拼接结果

Fig.14 36th Zernike fit result. (a) Hybrid compensation result; (b) sub-aperture stitching result

以上通过 120 mm 直径的凸非球面的检测实验验证了该方法的正确性,为进一步验证该混合补偿检测方法的检测能力,用该方法检测加工阶段的某离轴碳化硅凸椭球面,该椭球面参数如下:母镜顶点曲率半径 $R=933$ mm、二次圆锥常数 $I=-0.54$,有效尺寸为 332 mm×144 mm 的矩形,离轴量为 86.2 mm。图 15 为检测装置。

检测结果如图 16 所示,其中(a)为直接混合补偿检测结果,(b)为使用对准干涉仪检测的球面结果;(c)为通过在球面贴靶标,以靶标位置为基准,计算出的球面所用口径内的面形误差;(d)为去除球面误差,得到的目前非球面面形误差。由此结果可知目前非球面加工至 0.0435 λ RMS。

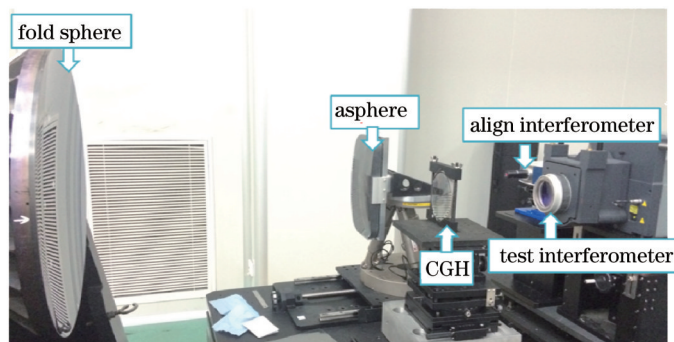


图 15 检测装置图

Fig.15 Diagram of test setup

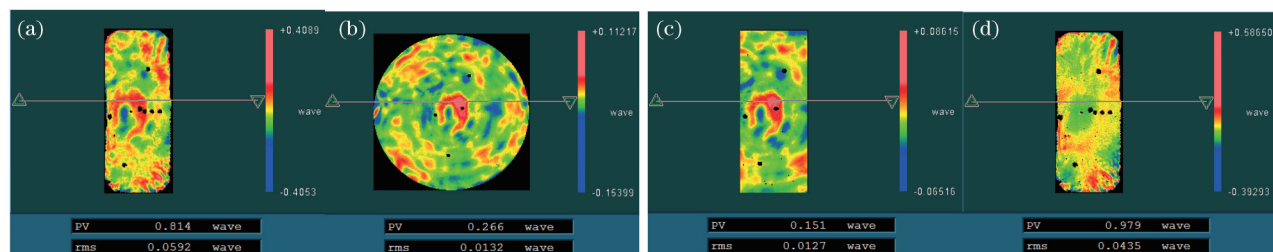


图 16 混合补偿检测实验结果。(a) 直接检测结果; (b) 球面结果; (c) 球面面形误差; (d) 非球面面形误差

Fig.16 Diagram of hybrid compensation. (a) Test result; (b) map error of fold sphere; (c) map error of fold sphere (useful part); (d) map error of surface under test

6 结 论

凸非球面检测一直是光学检测的难点,特别是口径超过干涉仪会聚光束尺寸的反射凸非球面。充分利用CGH在设计时的灵活性,提出了CGH与辅助球面镜混合补偿检测方法,并构建了基于CGH辅助功能区域的对准方案,可实现各个光学元件之间的精确对准。该方法可实现凸非球面的全口径高精度零位补偿检测,解决了凸非球面检测难题,并且辅助球面反射镜不存在中心孔,具有良好的通用性。以此方法检测某一较小口径面形精度(RMS值为 $1/50\lambda$)的凸非球面,检测结果与子孔径拼接结果较为一致,验证了该方法的正确性及可行性。并在实际工程中利用此方法成功检测某 $332\text{ mm}\times 144\text{ mm}$ 矩形口径的凸椭圆面。

参 考 文 献

- 1 Fisher R E, Tadic-Galeb B, Yoder P R, *et al.*. Optical System Design [M]. New York: McGraw Hill Professional, 2000.
- 2 Johns M. The Giant Magellan Telescope (GMT)[C]. SPIE 2006: 6986: 698603.
- 3 Wilson R N. Reflecting Telescope Optics II[M]. 2nd edition, Berlin: Springer, 2004.
- 4 Song Qiang, Yang Baoxi, Yuan Qiao, *et al.*. Study on large convex aspherical lens testing[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(4): 0408003.
宋 强, 杨宝喜, 袁 乔, 等. 大口径凸非球面面形检测方法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408003.
- 5 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry[J]. Acta Optica Sina, 2010, 30(7): 2022-2026.
王孝坤, 郑立功, 张学军. 子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2022-2026.
- 6 Xue Donglin, Zhang Zhongyu, Zheng Ligong, *et al.*. Testing methods for large aperture convex SiC asphere mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2491-2496.
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.
- 7 Zhao C Y, Zehnder R, Burge J H, *et al.*. Testing an off-axis parabola with a CGH and a spherical mirror as null lens[C]. SPIE, 2005, 586911.
- 8 Burge J H, Zhao C Y, Dubin M. Measurement of aspheric mirror segments using Fizeau interferometry with CGH correction[C]. SPIE, 2010, 7739: 773902.
- 9 Burge J H, Benjamin S, Caywood D, *et al.*. Fabrication and testing of 1.4-m convex off-axis aspheric optical surfaces[C]. SPIE, 2009, 7426:

74260L.

- 10 LiuHua, LuZhenwu, LiFengyou, *et al.*. Using curved hologram to test large-aperture convex surface[J]. Opt Express, 2004, 12(14): 3251-3256.
- 11 Liu Hua. Asphrics Test with Computer-Generated Hologram Fabricated on Curve Surface[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics ,Chinese Academia of Sciences, 2005.
刘 华. 利用曲面计算全息图检测非球面[D].长春, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- 12 Dubin M B, Su P, Burge J H. Fizeau interferometer with spherical reference and CGH correction for measuring large covexaspheres [C]. SPIE, 2009, 7426: 74260S.
- 13 Li Fazhi, Luo Xiao, Zhang Xuejun, *et al.*. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH[J]. Optics and Precision Engineering, 2011,19(4): 709-716.
黎发志, 罗 霄, 张学军, 等. 离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(4): 709-716.
- 14 Li Fazhi, Zheng Ligong, Zhang Xuejun, *et al.*. Optical testing method and its experiment on freeform surface with computer-generated hologram[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 41(4): 1052-1056.
黎发志, 郑立功, 张学军, 等. 自由曲面的CGH光学检测方法 with 实验[J]. 红外与激光工程, 2014, 41(4): 1052-1056.
- 15 Li Ming, Luo Xiao, XueDonglin, *et al.*. Design of CGH for testing large off-axis asphere with considering mapping distortion[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1246-1253.
李 明, 罗 霄, 薛栋林, 等. 考虑投影畸变的检测大口径离轴非球面的计算全息图设计[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(5): 1246-1253.
- 16 Zhou P, Martin H M, Zhao C, *et al.*. Mapping distortion correction for GMT interferometric test[C]. 2012, OFT / OW3D.
- 17 Zeng Xuefeng, Yan Feng, XueDonglin, *et al.*. Distortion correction in testing of off-axis asphere with computer-generated hologram[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1109003.
曾雪锋, 闫 锋, 薛栋林, 等. 计算全息图补偿检测离轴非球面中的投影畸变校正技术[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1109003.

栏目编辑: 韩 峰