

文章编号 1004-924X(2015)05-1246-08

## 考虑投影畸变设计大口径离轴非球面检测用计算全息图

李明<sup>1,2\*</sup>, 罗霄<sup>1</sup>, 薛栋林<sup>1</sup>, 赵晶丽<sup>1</sup>, 郑立功<sup>1</sup>, 张学军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所  
中国科学院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:** 对大口径离轴非球面进行零位补偿检测时, 投影畸变过于严重的区域会由于干涉条纹密度过大而无法检测, 从而使加工难以进行。针对此问题, 本文采用相对畸变参数定量描述投影畸变, 设计了自由度更高、补偿能力更强的计算全息图(CGH)检测方法。该方法在 CGH 设计阶段考虑投影畸变分布, 选择合适的光路结构使得所有区域的投影畸变均较小。根据此方法, 对直径为 1.45 m 的离轴非球面设计了比零位补偿器畸变小 CGH。检测实验显示: 使用设计的 CGH 可检测非球面的全口径面形误差, 验证了在 CGH 设计阶段考虑投影畸变的正确性与实用性, 表明该方法可解决加工过程中零位补偿器由于投影畸变导致部分区域不能检测的问题。以 CGH 的检测结果为指导, 目前该 1.45 m 直径的离轴非球面加工精度已达  $0.374\lambda$  PV,  $0.023\lambda$  RMS。

**关键词:** 投影畸变; 大口径离轴非球面; 计算全息图; 光学检测

**中图分类号:** TH703; O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1246

### Design of CGH for testing large off-axis asphere by considering mapping distortion

LI Ming<sup>1,2\*</sup>, LUO Xiao<sup>1</sup>, XUE Dong-lin<sup>1</sup>, ZHAO Jing-li<sup>1</sup>, ZHENG Li-gong<sup>1</sup>, ZHANG Xue-jun<sup>1</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: toooldlm@163.com

**Abstract:** In the process of an asphere fabricating, the part with large mapping distortion in the large caliber off-axis asphere may not be measured by an interferometer due to larger interferometric fringe density. To solve this problem, the parameter named related distortion was used to describe the mapping distortion quantitatively, and a Computer Generated Hologram(CGH) with higher freedom and stronger compensation ability was designed. By taking the mapping distortion distribution into account, the method selected a proper path and allowed all the aspheric surface to have smaller mapping distortion in the design of the CGH. With the method, a CGH with proper paths was

收稿日期: 2014-01-13; 修订日期: 2014-03-05.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB013205); 国家自然科学基金重点项目 (No. 61036015)

designed for testing the 1.45 m off-axis asphere, by which the full map distortion of the system is less than that of the traditional null-lens compensator. The test experiment shows that the designed CGH can test the full map error of the off-axis asphere, which verifies the validity and practicability of the proposed CGH design method and demonstrates that designed CGH with considering test mapping distortion has solved the problem as mentioned above. By this method, the map errors of 1.45 m diameter off-axis asphere are  $0.374\lambda$  PV and  $0.023\lambda$  RMS now.

**Key words:** mapping distortion; large off-axis aspherics; computer-generated hologram; optical testing

## 1 引言

在空间光学系统中应用非球面元件可减小系统的总体尺寸和重量,降低发射成本,提高可靠性,因而非球面元件已成为空间光学系统中不可或缺的核心元件<sup>[1]</sup>。随着空间技术的发展,空间光学领域中非球面的应用要求不断提高,口径要求越来越大。特别是某些光学系统,为追求更卓越的像质使用了大偏离量大离轴量的非球面,这些场合中非球面的加工检测要求也越来越高<sup>[2-4]</sup>。

非球面检测可大致分为坐标测量法和光学检测法两类。在粗抛光阶段,摆臂轮廓仪等坐标测量方法的精度受限,需要采用光学检测方法;而大口径大离轴量的非球面与其最接近球面的偏离量过大,会超出 Hartmann 或其它非零位检测方法的动态范围<sup>[5-8]</sup>,所以考虑采用零位补偿检测。

目前,一般采用较复杂的光路来检测超大口径离轴量非球面,如使用多个补偿元件的混合补偿检测<sup>[9-11]</sup>。但是此类方法的补偿元件较多,其检测对准调整过程很复杂,有些需要采用较大的辅助元件,不仅增加了检测成本,而且各补偿元件自身的面形误差及对准误差均会对检测结果有很大影响,后期的误差分离及去除也很复杂。因此在口径未达到一定量级,有其他检测方法可选时应避免使用较复杂的检测光路。

使用零位补偿器进行检测时,由于大口径离轴非球面与其最接近球面的偏离量较大,补偿器需要补偿的像差也较大,而受补偿器光路结构、元件尺寸、待补偿像差、镜片数量等因素的限制,设计时不能很好地校正投影畸变,导致检测时的投影畸变较大<sup>[12-13]</sup>。非球面在加工过程中,投影畸变严重的区域干涉条纹密度会过大并超出干涉仪的动态范围,即使采用补偿器也不能获得全口径

面形分布。

针对上述问题,本文用相对畸变参数描述投影畸变,设计了自由度更高、补偿能力更强的计算全息图(Computer-generated Hologram, CGH)进行非球面检测。在CGH设计阶段考虑投影畸变分布,选择合适光路使得所有区域的投影畸变均较小。然后针对某直径1.45 m的离轴非球面,设计了比补偿器畸变小CGH。该CGH可检测全口径面形误差,解决了补偿器由于部分区域畸变严重不能检测的问题,其检测结果可指导加工过程顺利进行。

## 2 待检离轴非球面

本实验室目前正在加工直径为1.45 m的离轴非球面,其离轴量达到1 328.8 mm,与最接近球面的偏离量达到1.132 mm PV, 0.290 mm RMS,图1为该非球面与最接近球面的偏离量。

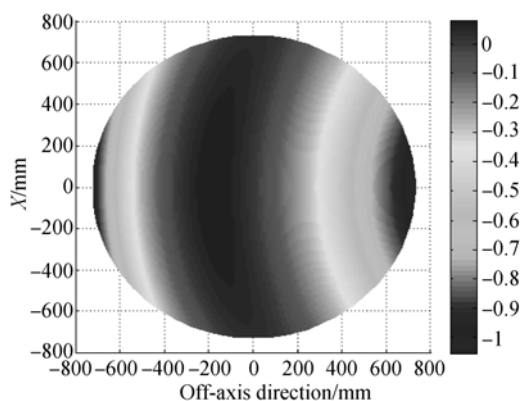


图1 非球面与最接近球面的偏离量

Fig. 1 Asphere departure from best fit sphere

对如此大偏离量的非球面进行零位补偿时,补偿器不能很好地校正畸变会使投影畸变很大。由于干涉仪内部的成像畸变很小,可忽略不计,所

以投影畸变与非球面的点和补偿器靠近干涉仪端面的点的映射关系直接相关。图 2 为所设计的补偿器检测时非球面的点与相应的补偿器的点的映射图。其中光轴在图形左侧,可见在远离光轴方向图形严重压缩,畸变很大。若干涉仪的 CCD 像元数为  $1\,000 \times 1\,000$ ,计算可知在远离光轴端单个像元对应镜面上约 7.6 mm 的区域,而靠近光轴一端单个像元仅对应镜面上 1.3 mm 的区域,因此远离光轴端的条纹密度会过大,干涉仪不能检测。

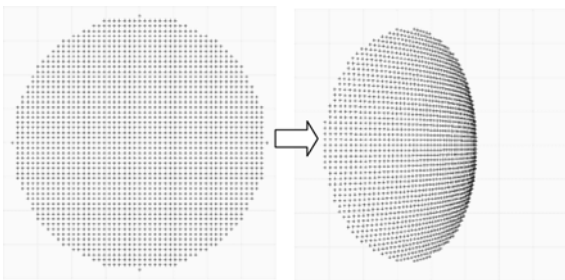


图 2 非球面点与补偿器点的映射关系

Fig. 2 Distribution of points on asphere and null-lens

### 3 非球面检测投影畸变的数学描述

为了准确地分析投影畸变,需要找到参数定量描述投影畸变。众所周知,光学系统的畸变是由于球差的影响,不同视场的主光线通过光学系统后与高斯像面的交点高度  $y'_z$  与理想像高  $y'$  的差就是系统的畸变<sup>[14]</sup>。光学设计中,相对畸变  $q'$  表示为:

$$q' = \frac{y'_z - y'}{y'} \times 100\% \quad (1)$$

与光学系统的畸变不同,投影畸变是由于非球面存在像散,镜面不同位置的光汇聚到距离被检镜距离不同的点,导致检测时非球面点非线性映射到干涉图点。为了分析并描述投影畸变,提出的相对畸变概念如下:

(1)首先通过光线追迹得到非球面上每一点坐标  $(X_A, Y_A)$  对应到补偿元件 (null-lens 或 CGH) 靠近干涉仪端面的点的坐标  $(X_C, Y_C)$ ;

(2)以非球面中心  $(X_{ACEN}, Y_{ACEN})$  为圆心,求出包含非球面区域的最小圆半径  $R_A$ ,相应地,以非球面中心对应的补偿元件的点  $(X_{CCEN}, Y_{CCEN})$  为圆心,求出包含补偿元件的最小圆半径区域  $R_C$ ;

(3)计算出镜面及补偿器各点的圆域归一化坐标  $(HX_A, HY_A)$ 、 $(HX_C, HY_C)$ ,其中:

$$HX_A = \frac{X_A - X_{ACEN}}{R_A}, HY_A = \frac{Y_A - Y_{ACEN}}{R_A};$$

$$HX_C = \frac{X_C - X_{CCEN}}{R_C}, HY_C = \frac{Y_C - Y_{CCEN}}{R_C}.$$

则定义相对畸变如下:

$$D(X, Y) = \frac{\sqrt{HX_A^2 + HY_A^2} - \sqrt{HX_C^2 + HY_C^2}}{\sqrt{HX_A^2 + HY_A^2}} \quad (2)$$

由上述定义计算补偿器的光线追迹数据,可得出补偿器的畸变分布,如图 3 所示(彩图见期刊电子版)。可以看出远离光轴方向的畸变最大,而靠近光轴方向的畸变很小,垂直于离轴量方向的畸变最小,与点映射关系吻合,表明用此参数描述投影畸变是可行的。

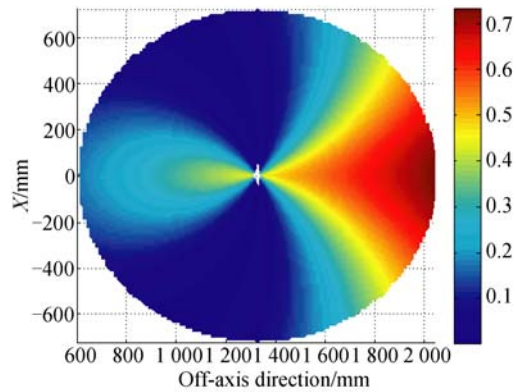


图 3 补偿器畸变分布

Fig. 3 Distribution of null-lens distortion

### 4 基于投影畸变考虑的 CGH 设计

为了正确设计出比补偿器畸变小的 CGH,需要分析投影畸变与补偿元件至被检镜间距的关系,并以此为依据选择合适光路。本文追迹得到随着补偿元件至被检镜间距的变化,镜面靠近光轴端与远离光轴端的畸变曲线如图 4 所示。由曲线可知,补偿元件与被检镜的距离越小,畸变越小;在 7 000 mm 附近,各方向畸变均较小,而且由检测光路得到此处的 CGH 口径在 150 mm 以下,处于 CGH 加工能力范围内,且主区域条纹密

度可控制在 100 lp/mm 以下,检测精度较高。若减小补偿元件与被检镜的距离,CGH 口径会增大,从而增加制作难度及成本;同时畸变会变大,CGH 条纹密度也增大,从而降低检测精度。所以最终将 CGH 放置在距镜面 7 000 mm 附近。

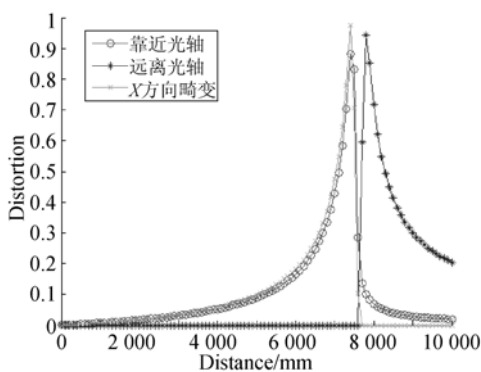


图 4 投影畸变与到镜面距离的关系

Fig. 4 Relationship of distortion with distance between CGH and tested mirror

此时非球面点到 CGH 点的映射关系如图 5 所示。与补偿器不同,在靠近光轴端图形压缩较严重,而远离光轴端图形畸变很小,但是不存在像补偿器图像一样严重的压缩区域。经过光线追迹计算其相对畸变参数,可得其畸变分布如图 6 所示(彩图见期刊电子版)。与图 3 比较可知,其整体畸变比补偿器的畸变小。若干涉仪仍使用 1 000×1 000 的 CCD,经计算在远离光轴端单个像元对应镜面仅约 0.9 mm 的区域,而靠近光轴一端单个像元对应镜面也只有 2.6 mm 的区域,在垂直离轴量方向最远端单个像元对应镜面 1.9 mm,与补偿器相比,图像没有被严重压缩。

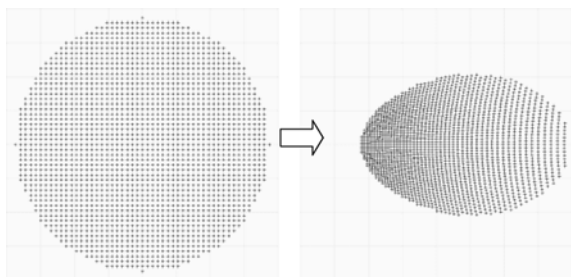


图 5 非球面点与 CGH 点的映射关系

Fig. 5 Distribution of points on asphere and CGH

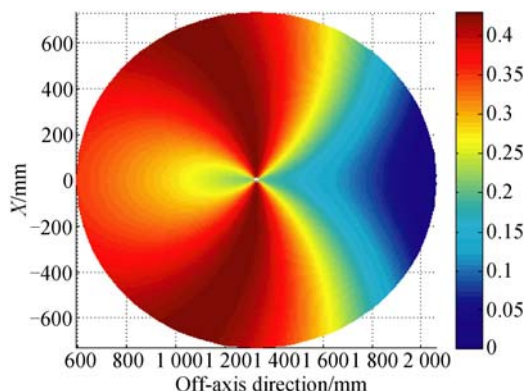


图 6 CGH 畸变分布

Fig. 6 Distribution of CGH distortion

至此已基本确定 CGH 的检测光路。为了减小检测光路的相对口径,及 CGH 需要补偿的像差和 CGH 的条纹密度,本文通过平移并倾斜离轴非球面将其几何中心移至干涉仪轴上,将离轴非球面作为轴上自由曲面进行补偿检测<sup>[15]</sup>。

确定了 CGH 检测方案的光路结构及具体的各项光学参数后,CGH 的位相函数也随之确定,通过自研软件进行光线追迹,计算其位相函数,将结果导入到 Zemax 得到其设计残差如图 7 所示。残差为 0.001 6λ RMS,满足非球面检测需求。

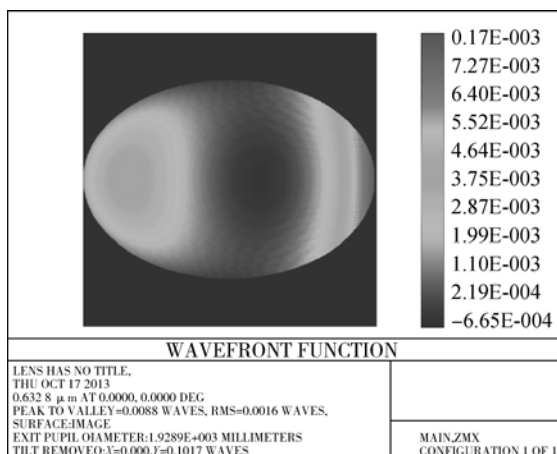


图 7 CGH 设计残差

Fig. 7 Design error of CGH

为了实现光学元件的精密调整与定位,除 CGH 主区域外,还设计了辅助功能区域。完整的 CGH 包括主区域、对准区域和基准区域,其分布如图 8 所示。其中主区域用于非球面面形检测,对准区域用于实现 CGH 与干涉仪对准,基准区域用于在被检面处的四边及光轴处投射十字线作为定位基准。

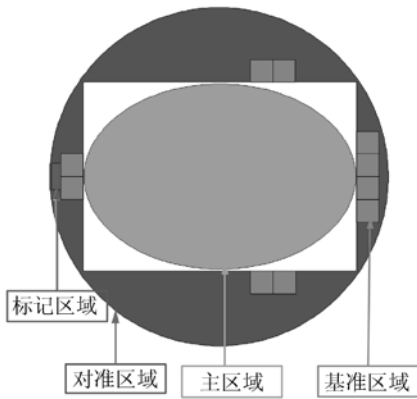


图 8 CGH 衍射区域分布  
Fig. 8 Diffractive sections on CGH

经过以上计算得到 CGH 位相分布,通过自研软件将 CGH 各衍射区域计算得到的 CGH 条纹离散化为加工文件,采用激光直写技术制作光刻掩模板,然后使用 1:1 接触式光刻技术将图案复制到高精度平行玻璃基板上,经过复制工艺得

到的 CGH 实物如图 9 所示。

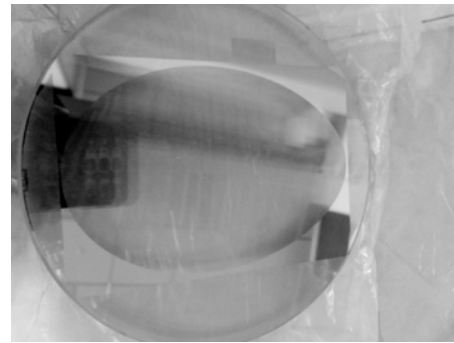
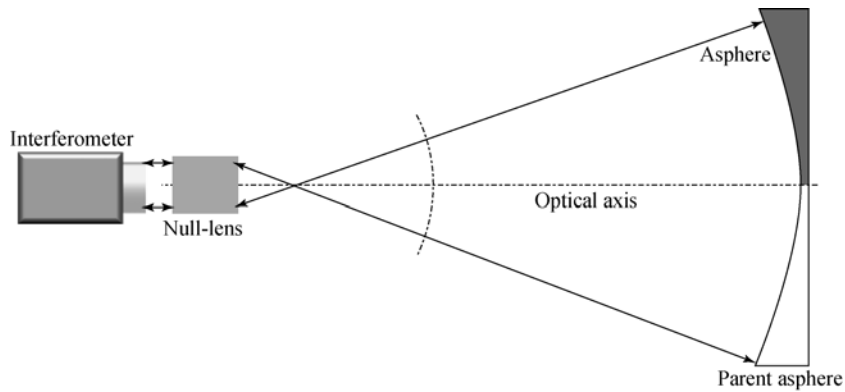


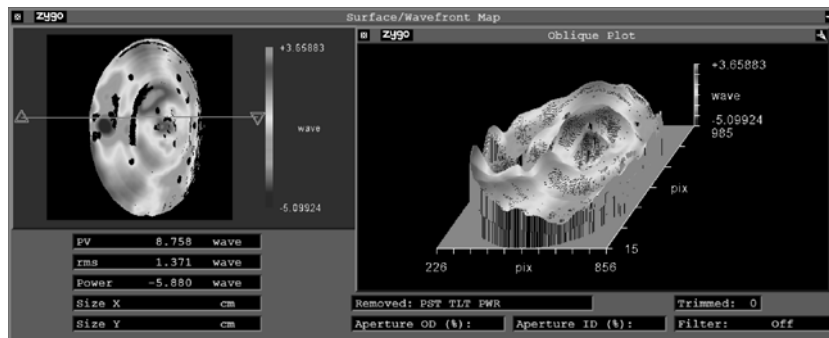
图 9 CGH 实物图  
Fig. 9 Photo of CGH after replication

### 5 补偿器与 CGH 检测实验

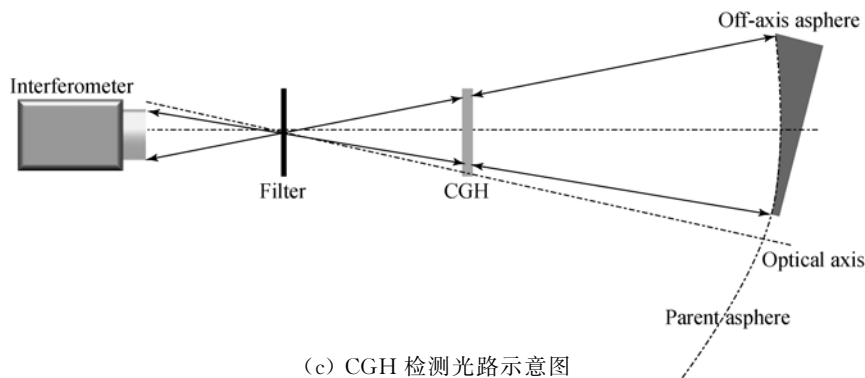
图 10 为直径 1.45 m 离轴非球面的检测光路示意图及检测结果,其中光轴在检测结果的左侧。



(a) 补偿器检测光路示意图  
(a) Layout of testing aspheric surface with null-lens

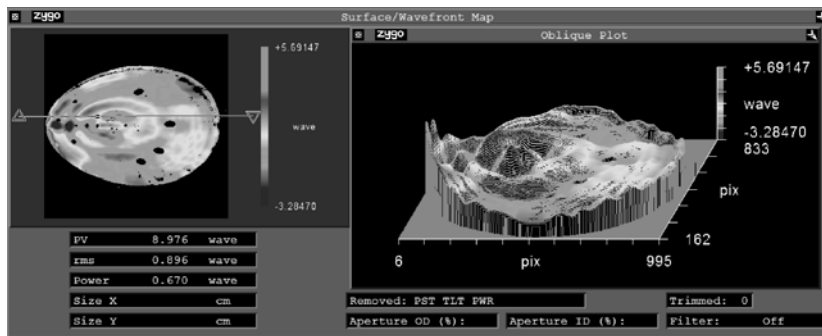


(b) 补偿器检测结果  
(b) Test result with null-lens



(c) CGH 检测光路示意图

(c) Layout of testing aspheric surface with CGH



(d)CGH 检测结果

(d) Test result with CGH

图 10 检测光路及检测结果

Fig. 10 Test layouts and results

由图 10(b)可看出:补偿器检测时,投影畸变会导致圆形口径映射到干涉图为近似竖椭圆形口径,而远离光轴方向由于畸变过于严重不能检测。而由图 10(d)可看出:CGH 的投影畸变正好相反,垂直于离轴量方向的畸变比离轴量方向的大,导致检测图形大致为横椭圆。由图 6 的 CGH 畸变分布可知,CGH 远离光轴一侧畸变很小,所以补偿器不能检测的区域 CGH 可检测,由此解决了补偿器由于畸变部分区域不能检测的问题。

由于存在投影畸变,被检镜在不同区域的压缩比例不同,且有部分区域检测不到,使得 CGH 与补偿器的检测结果中的 PV 和 RMS 不同。为了比较两种检测结果,并最终获得全口径面形的误差分布,分别对检测结果进行畸变校正<sup>[16-17]</sup>,结果如图 11 所示。可以看出二者的检测结果基本一致。

用 CGH 的检测结果指导加工面形的收敛效果很好。最新的 CGH 检测结果如图 12 所示, PV 为  $0.374\lambda$ , RMS 为  $0.023\lambda$ 。

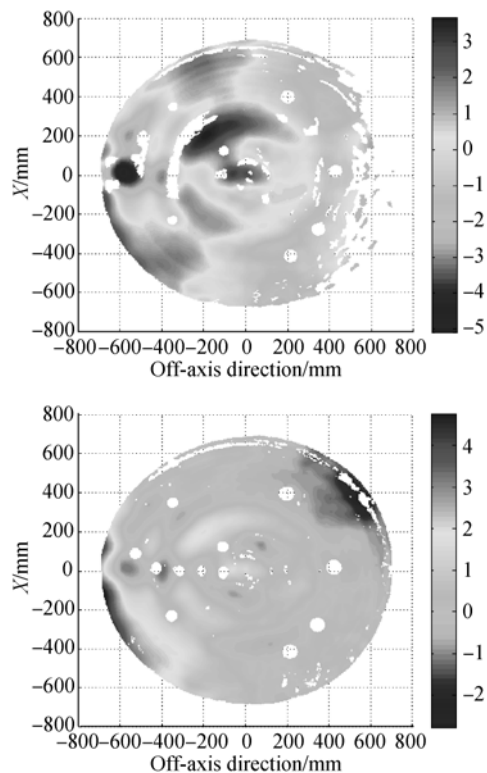


图 11 补偿器与 CGH 检测结果校正畸变后的面形分布

Fig. 11 Surface maps after distortion corrected

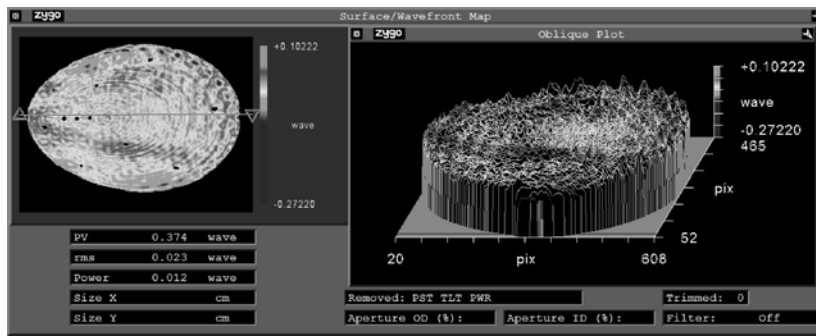


图 12 CGH 最新检测结果

Fig. 12 Latest test result with CGH

## 6 结 论

本文针对大口径离轴非球面零位补偿检测时由于投影畸变严重致使部分区域不能检测的问题,使用相对畸变参数描述其投影畸变,并使用设计自由度更高、补偿能力更强的 CGH 检测大口径离轴非球面。在 CGH 设计阶段考虑投影畸变

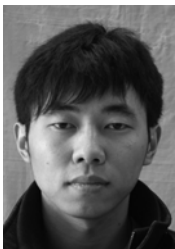
分布,选择合适光路使得所有区域的投影畸变均较小。针对 1.45 m 直径的离轴非球面设计了比补偿器畸变小 CGH,以 CGH 的检测结果为指导,加工得到的镜面 PV 为  $0.374\lambda$ , RMS 为  $0.023\lambda$ 。实验验证了在 CGH 设计阶段考虑投影畸变的正确性与可行性,有效地解决了补偿器由于畸变严重不能得到全口径面形数据的问题。

### 参考文献:

- [1] FISHER R E, TADIC-GALEB B, YOBER P R, *et al.*. *Optical System Design* [M]. McGraw Hill Professional, 2000.
- [2] NELSON J, SANDERS G H. The status of the thirty meter telescope project [J]. *SPIE*, 2008, 7012:70121A.
- [3] GILMOZZI R, SPYROMILIO J. The european extremely large telescope (E-ELT) [J]. *Messenger*, 2007, 127:11-19.
- [4] JOHNS M. The Giant Magellan Telescope (GMT) [J]. *SPIE*, 2006:6267.
- [5] 张金平, 张学军, 张忠玉, 等. Shack-Hartmann 波前传感器检测大口径圆对称非球面反射镜[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3):492-498.  
ZHANG J P, ZHANG X J, ZHANG ZH Y, *et al.*. Test of rotationally symmetric aspheric surface using Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):492-498. (in Chinese)
- [6] 王孝坤, 王丽辉, 邓伟杰, 等. 用非零位补偿法检测大口径非球面反射镜[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3):520-528.  
WANG X K, WANG L H, DENG W J, *et al.*. Measurement of large aspheric mirrors by non-null testing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3):520-528. (in Chinese)
- [7] 师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(1):26-46.  
SHI T, YANG Y Y, ZHANG L, *et al.*. Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1):26-46. (in Chinese)
- [8] 王孝坤. 子孔径拼接检测非球面时调整误差的补偿 [J]. *中国光学*, 2013, 6(1):88-95.  
WANG X K. Compensation of misalignment error on testing aspheric surface by subaperture stitching interferometry [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1):88-95. (in Chinese)
- [9] ZHAO CH Y, ZEHNDER R, BURGE J H. Testing an off-axis parabola with a CGH and a spherical mirror as null lens [J]. *SPIE*, 2005, 5869:586911.
- [10] PAN F Y, BURGE J. Efficient testing of segmented aspherical mirrors by use of reference plate and computer-generated holograms [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(28):5303-5322.
- [11] STEPHAN R, CHRISTOF P, TIZIANI H J. Absolute interferometric test of aspheres by use of twin computer-generated holograms [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(22):4468-4479.

- [12] NOVAK M, ZHAO C, BURGE J H. Distortion mapping correction in aspheric null test [J]. *SPIE*, 2008, 7063: 706313.
- [13] 李锐钢, 郑立功, 薛栋林, 等. 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, XUE D L, *et al.*. 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)
- [14] 郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- YU D Y, TAN H Y. *Optical Engineering* [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [15] 黎发志, 罗霄, 赵晶丽, 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.
- LI F ZH, LUO X, ZHAO J L, *et al.*. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 709-716. (in Chinese)
- [16] ZHOU P, MARTIN H M, ZHAO C, *et al.*. Mapping distortion correction for GMT interferometric test [C]. *Imaging and Applied Optics Technical Digest*, 2012.
- [17] 曾雪峰, 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): 237-241.
- ZENG X F, YAN F, XUE D L, *et al.*. Distortion correction in testing of off-axis asphere with computer-generated hologram [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 237-241. (in Chinese)

## 作者简介:



李明(1990—),男,安徽阜阳人,博士研究生,2010年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光学检测和光学系统装调等方面的研究。E-mail: toooldm@163.com

## 导师简介:



张学军(1968—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,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

(版权所有 未经许可 不得转载)