

计算全息零位补偿离轴非球面干涉检测技术 (特邀)

王 慎¹, 曹 耘^{2*}, 闫力松^{3*}

- (1. 中国人民大学, 北京 100872;
2. 宁波市知行光学科技有限公司, 浙江 余姚 315400;
3. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 离轴非球面反射镜是高性能空间光学系统的核心部件, 用于研制大视场、长焦距空间遥感相机。为了解决离轴非球面反射镜的高精度面形检测, 保障空间遥感相机的成像效果, 基于计算全息光学元件建立了一种离轴非球面反射镜的高精度面形检测方法。该方法通过设计基准光斑确定待测镜面的空间位置, 通过像差调节可以高精度实现对于待测镜面的干涉检测, 利用载频有效分离干扰衍射级次, 从而实现对于待测镜面的高精度测量。为了验证所述方法的设计检测精度与有效性, 完成对于目标离轴非球面反射镜的干涉检测补偿设计。设计结果表明, 利用所述方法可以有效地实现对于离轴非球面反射镜的干涉测量, 镜面全口径设计结果残差为 0 nm RMS, 验证了该方法的设计可靠性与实用性。

关键词: 干涉检测; 零位补偿; 计算全息; 离轴非球面

中图分类号: O439; O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20250156

引用格式: WANG Shen, CAO Yun, YAN Lisong. CGH null compensation testing method of off-axis aspheric mirror surface (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(6): 20250156.

王慎, 曹耘, 闫力松. 计算全息零位补偿离轴非球面干涉检测技术 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(6): 20250156.

0 引 言

非球面及自由曲面作为当今先进光学系统的核心部件, 被广泛应用于航空航天、对地遥感、极紫外光刻、AR/VR、照明设计等领域^[1-5], 其相较于球面光学系统, 不仅可以扩大视场范围、提高系统相对孔径, 同时还可以简化系统结构、减小光学系统体积进而降低成本, 是当今传统光学系统研究中的热点。离轴非球面由于其中心具有离轴量, 相较于同轴光学元件可以有效地解决光学系统中心遮拦问题, 从而提高光学系统的能量利用率, 同时实现大视场与长焦距的光学系统设计要求, 常应用于离轴三反空间光学相机、全景视觉系统、车载抬头显示系统等场景^[6-8]。

为了实现高性能离轴光学系统的制造, 需要对离

轴光学元件进行高精度的面形检测。在离轴光学元件研磨抛光过程中, 不同阶段采用不同的面形检测方法。在最初光学元件铣磨过程中, 其全口径面形精度 PV 值通常为 10~50 μm , 此时常采用铣磨机自带的轮廓检测装置完成面形检测; 在研磨抛光过程中, 光学元件全口径面形精度 PV 值在 1~30 μm 范围时, 常采用摆臂轮廓仪、三坐标测量仪等完成面形检测; 在最终面形收敛阶段, 通常采用干涉检测方法实现面形的最终测量, 若面形精度要求不高, 也常用 Lumphoscan、DUI 等设备完成光学元件面形测量。

在非球面干涉检测中, 常采用无像差点检测方法、补偿器检测方法以及计算全息补偿检测方法。对于无像差点检测方法, 其仅能应用于二次标准非球面检测, 对于高次非球面检测具有很强的局限性^[9]; 透射补

收稿日期: 2025-03-10; 修订日期: 2025-04-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC2203902); 宁波市重点研发计划项目 (2024T007)

作者简介: 王慎, 女, 工程师, 硕士, 主要从事光学测量方法的研究。

通讯作者: 曹耘, 男, 工程师, 主要从事先进光学制造与检测方面的研究。

闫力松, 男, 副教授, 博士, 主要从事光学测量方面的研究。

偿器检测方法补偿范围有限,同时设计制造成本相对较高,对于离轴非球面其光能利用率不高^[10]。计算全息补偿方法(Computer Generated Hologram, CGH)由于其利用衍射的方法实现对光学表面的补偿设计及检测,具有很高的设计灵活性,同时其还可以根据实际工程需求,设计各种类型的辅助对准区域,正越来越广泛地应用于复杂光学元件的面形检测中。

其中,亚利桑那大学的 MACGONVERN A J 等人最早在 1971 年提出了基于 CGH 的反射镜光学补偿检测方法^[11],而后 BURGE J H 等人对于 CGH 补偿检测非球面方法进行了详细的误差分析^[12],DUBIN 等人将 CGH 补偿检测方法子孔径拼接方法相结合,完成了 LSST (Large Synoptic Survey Telescope) 次镜的面形检测^[13];德国 Stuttgart 大学的 PETERHANSEL S 等人对 CGH 高线密度在非球面检测中对检测精度的影响进行了详细分析^[14]。华中科技大学的闫力松等人将 CGH 补偿检测方法结合光学透镜缩短光路长度的特点提出一种长焦距非球面混合补偿检测方法^[15];中国科学院长春光学精密机械与物理研究所王孝坤等人提出一种 CGH 补偿与子孔径拼接结合的混合补偿方法,实现了对于凸非球面的面形检测^[16];南京理工大学高志山等人完成了自由曲面光学元件的 CGH 设计与制造^[17]。南京理工大学沈华等人将 CGH 与球面反射镜相结合,实现了对于 $\phi 135\text{ mm}$ 离轴抛物面的面形检测^[18];南京航空航天大学朱德燕等人将 CGH 与球面反射镜相结合,实现了同轴次镜反射镜的面形检测^[19]。

文中主要针对离轴非球面的 CGH 零位补偿设计方法进行深入探讨,为了提高光能利用率,通过添加平移与倾斜将离轴非球面移至轴上进行零位补偿设计。该方法可以避免对整个离轴非球面所对应的同轴母镜进行补偿设计,从而极大地提高能量利用率,同时结合工程实例光学系统对该方法的实用性与补偿精度进行了检测,验证文中所述方法的有效性。文中所述内容具体如下:首先详细介绍了离轴非球面轴上补偿设计方法数学模型,具体包括如何结合工程实例将离轴光学元件移至轴上、如何设计主补偿区域以实现对于待测离轴非球面的零位补偿、如何设计辅助对准区域于基准投射区域;并结合工程实例对所述的离轴非球面进行了 CGH 零位补偿设计实验,验证文

中所述方法的有效性;最后对所述方法进行了总结与展望。

1 CGH 零位补偿离轴非球面设计模型

在进行 CGH 零位补偿离轴非球面设计时,常采用如图 1 所示的设计方法,此时将离轴非球面按照同轴母镜进行补偿,进而利用 CGH 对整个同轴母镜进行补偿设计。由于实际离轴非球面是该同轴母镜的一部分,故此时可以实现对于离轴非球面的零位补偿检测。然而由于该方式需要对离轴非球面所对应的整个同轴母镜进行补偿设计,而作为该母镜的一小部分组成成分,其对应的干涉仪能量利用率低。此时对于一些低反射率镜面,测量干涉条纹图像对比度差,检测效果不佳。为此,笔者通过增加平移与倾斜的方式,将离轴非球面移动至干涉仪轴上进行零位补偿设计,如图 2 所示,此时干涉仪光源所出射的能量大部分均由待测镜面反射回干涉仪,大大提高了检测时的能量利用率,可以实现对低反射率材料的零位补偿检测,有效增加了检测结果的对比度,提高了干涉检测效果。

在设计实际 CGH 时应该充分考虑条纹密度及刻画条件的限制要求,如果设计 CGH 在实际加工中条纹密度过高,则其制作困难。根据目前 CGH 制作工艺,采用激光直写设备进行 CGH 加工,主区域条纹密

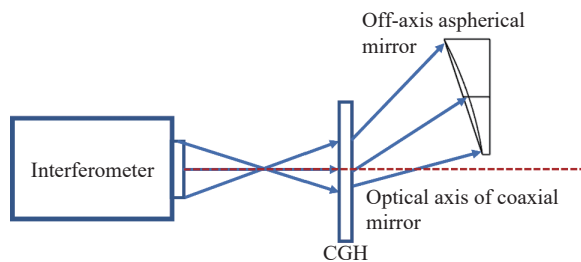


图1 母镜 CGH 设计检测示意图

Fig.1 Schematic diagram for CGH design and testing of master mirror

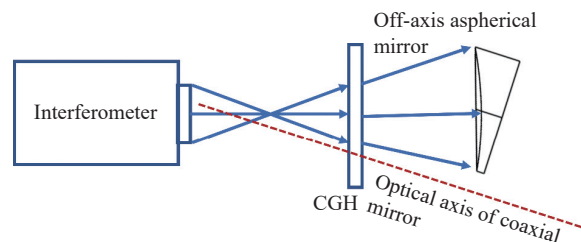


图2 轴上 CGH 设计检测示意图

Fig.2 Schematic diagram of on-axis CGH design and testing

度控制在 200 lp/mm 以内均易于加工, 在 400 lp/mm 以内均可加工。同时还应充分考虑衍射级次分离, 检测拟合残差符合设计要求等条件。

为了更详细地阐述离轴非球面 CGH 补偿设计方法, 笔者结合工程实例, 对一口径为 352 mm×192 mm 的离轴双曲面进行了 CGH 补偿设计, 镜面参数方程如公式 (1) 所示, 镜面具体参数如表 1 所示。

$$z = \frac{s^2/r}{1 + [1 - (k + 1)(s/r)^2]^{1/2}}$$

(1)

式中: D 为光学镜面口径; r 为镜面顶点曲率半径; k 为二次曲面常数; dx 为镜面 x 方向离轴量; dy 为镜面 y 方向离轴量。

表 1 离轴非球面基本参数

Tab.1 The basic parameters of off-axis aspherical mirror

Parameter	Value
D	352 mm×192 mm
r	-1 190 mm
k	-0.900 1
dx	0
dy	-148 mm

在对表 1 所示离轴非球面完成零位补偿干涉检测设计时, 为了提高能量利用率, 增强干涉检测结果对比度, 将其在 dy 方向进行了 148 mm 的位移, 同时在 x 方向进行了 -7.1° 的倾斜。此时, 检测光路设计结果如图 3 所示。

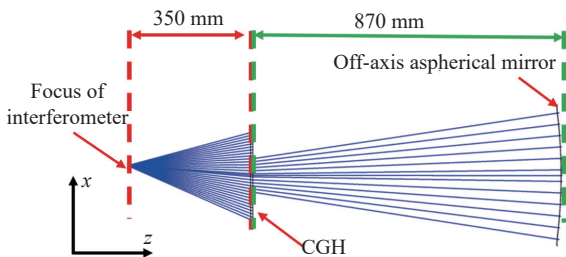


图 3 CGH 零位补偿离轴非球面光路图

Fig.3 CGH null compensator layout for off-axis aspheric testing

在对离轴非球面进行零位补偿设计时, 将 CGH 放置于干涉仪焦点后 350 mm 位置, 同时 CGH 前表面距离非球面轴上距离为 870 mm。CGH 口径为 150 mm, 厚度 15 mm, 干涉仪标准镜采用 $F\#2.2$ 的球

面参考镜。

检测中, 为了实现对于待测镜面的零位补偿, 在 CGH 上设计了三种不同的区域。如图 4 所示, 分别为绿色的主补偿区域, 其用于对待测离轴非球面镜进行零位补偿; 五个紫色区域, 其可以在待测镜周围投射五个基准光斑, 用于在搭建光路时约束待测镜的镜面位置, 从而完成干涉仪、CGH 及待测镜面的快速定位; 红色区域为干涉仪与 CGH 的对准区域, 该区域用于确定 CGH 的具体位置。

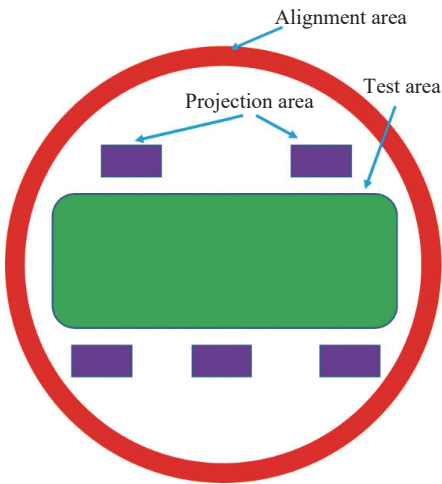


图 4 CGH 区域设计示意图

Fig.4 Schematic diagram of CGH zone design

在设计 CGH 主区域时, 干涉仪球面波前经过 CGH 到达待测离轴非球面时, 其波前应与离轴非球面几何形状一致。以此为主区域条纹设计目标, 主区域相位拟合残差如图 5 所示。由图 5 可以看出, 其主区域 Zernike 拟合残差结果 RMS 值为 0λ ($\lambda=632.8$ nm)。

由于 CGH 补偿检测是利用光栅衍射原理实现对待测非球面的补偿测量, 则在设计 CGH 时需要充分考虑设计衍射级次以外的其他衍射级次对于干涉检测的影响。为了防止其他衍射级次作为杂散光影响干涉检测结果, 在设计主区域条纹时要分析各衍射级次分离结果。如图 6 所示, 可以采用多重结构分析得到干涉仪焦面处光线两次通过 CGH 后不同衍射级次干涉产生的鬼像分布图, 其中主区域设计级次采用 +1 级级次, 其衍射级次位于图 6 中心十字叉丝位置。由图 6 可以看出, 主区域补偿所采用的衍射级次与其他干扰级次充分分开, 各干扰级次不会影响主区域补偿干涉检测。

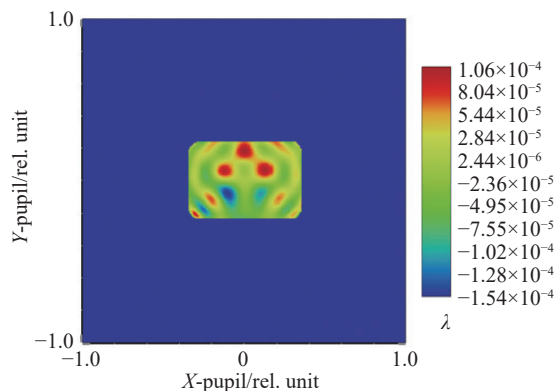


图 5 主区域拟合残差结果

Fig.5 Fitting residual results of the main region

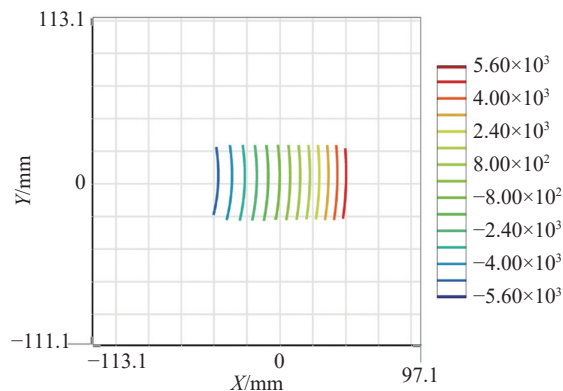


图 7 离轴非球面 CGH 主区域条纹图

Fig.7 Fringe pattern of the main region in off-axis aspheric CGH

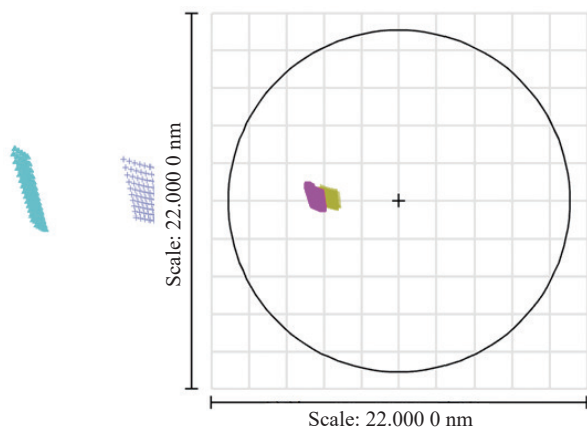


图 6 主区域衍射级次分离结果示意图

Fig.6 Schematic diagram of diffraction order separation results in the main region

在完成 CGH 主区域设计后, 还需要充分考虑 CGH 的实际制做能力。为此, 对主区域的条纹密度进行了分析, 其条纹密度分析结果如图 7 所示, 条纹图采用 1 : 800 比例尺, 此时主区域条纹密度不超过 137 lp/mm, 其周期间隔不超过 7.3 μm , 满足激光直写设备的刻画能力, 可以很好地实现对于 CGH 条纹的刻画加工。

同理, 采用 +3 级衍射级次对图 4 所示的对准区域 (图 4 中红色区域) 进行了条纹设计, 其条纹区域形状为环形, 内圆半径 53 mm, 外圆半径 63 mm。其条纹设计其条纹密度分析结果如图 8 所示, 条纹图同样采用 1 : 800 比例尺, 此时对准区域条纹密度不超过 251 lp/mm, 其周期间隔不超过 3.98 μm , 同样可以利用激光直写设备对其完成高精度的刻画加工。

为了保证在离轴非球面检测时可以快速完成镜

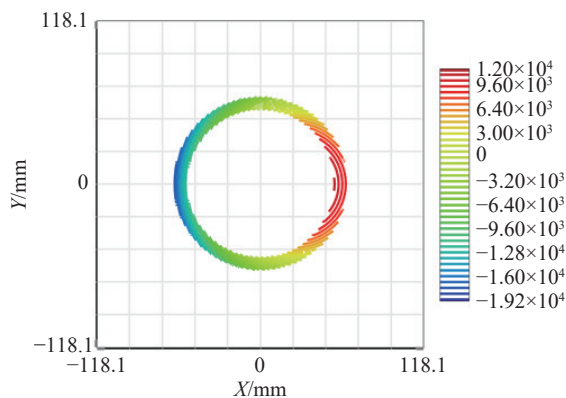


图 8 离轴非球面对准区域条纹图

Fig.8 Alignment zone fringe pattern of off-axis aspheric surface

面的对准以及在检测过程中保障镜面位置始终处于理论位置, 在镜面的边缘位置处设计了五个投射光斑, 投射光斑设计时采用 +1 级衍射级次, 其每个投射光斑在 CGH 处尺寸为 10 mm × 6 mm 的矩形区域, CGH 上位置坐标分别为 (30, 33)、(-30, 33)、(0, -33)、(-30, -33)、(30, -33), 对应在镜面处位置分布如图 9 所示, 汇聚位置为待测镜边缘上下左右。以镜坯中心为坐标零点 (0, 0), 五个光点分别汇聚于 (149.7, 98)、



图 9 光斑镜面投射位置分布示意图

Fig.9 Spot pattern projection distribution map on mirror

(-149.7, 98)、(0, -98)、(-178, 0)、(178, 0)。

2 结 论

文中提出了一种基于计算全息光学元件的离轴非球面反射镜的高精度面形检测方法。通过添加平移与倾斜将离轴非球面移至轴上进行零位补偿设计,该方法有效地避免了对整个离轴非球面所对应的同轴母镜进行零位补偿设计,从而极大地提高了系统的能量利用率。结合工程实例,详细分析了在利用该设计方法进行离轴非球面补偿设计时,如何考虑各光学元件的精确对准、如何在主区域设计时有效的分离各衍射级次、如何结合实际制造水平对各区域的条纹密度进行设计等问题。从设计结果可以看出,基于文中所述方法,可以有效地实现对于离轴非球面的零位补偿设计,该方法的建立将为高精度光学系统的制造检测提供一定的技术保障。

参考文献:

- [1] WANG Y N, LIU W Q, MENG X X, et al. Development of an immersive virtual reality head-mounted display with high performance[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 6969-6977.
- [2] MA Linfeng, LIU Zhiying, HUANG Yunhan, et al. Optical design and analysis of illumination system based on augmented reality [J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 179-190.
- [3] ZHU Z B, WEI S L, FAN Z C, et al. Freeform illumination optics design for extended LED sources through a localized surface control method [J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 11524-11535.
- [4] ZHANG Shuang, QIN Hua, YANG Kai, et al. Particle swarm optimization method for designing aspheric lens Gaussian beam shaping [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1206005. (in Chinese)
- [5] LAMPRECHT B, ULM A, LICHTENEGGER P, et al. Origination of free-form micro-optical elements using one- and two-photon grayscale laser lithography [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(8): 1863-1875.
- [6] LUO Jing, WANG Jinxin, JU Guohao, et al. Computer-aided alignment for large-aperture off-axis three mirrors optical system with artificially random air flow[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(7): 802: 812. (in Chinese)
- [7] LI Xinghua, ZHANG Dong, GAO Lingyu, et al. Study on line-of-sight deflection error for off-axis three mirror system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0918005. (in Chinese)
- [8] CHEN Shanyong, XUE Shuai, XIONG Yupeng, et al. Research progress of ultra-precision measurement of optical surfaces for manufacturing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 0312011. (in Chinese)
- [9] CHEN Qinfang, LI Yingcai, MA Zhen, et al. Alignment of off-axis conic aspheric mirrors in stigmatic null test [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0222001. (in Chinese)
- [10] LIANG Zijian, YANG Yongying, ZHAO Hongyang, et al. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 161-186. (in Chinese)
- [11] MACGOVERN A J, WYANT J C. Computer generated holograms for testing optical elements[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(3): 619-624.
- [12] ZHOU P, BURGE J H. Fabrication error analysis and experimental demonstration for computer-generated holograms [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(5): 657-663.
- [13] DUBIN M B, SU P, Burge J H. Fizeau interferometer with spherical reference and CGH correction for measuring large convex aspheres [C]//Proceeding of SPIE, 2009, 7426(S): 1-10.
- [14] PETERHÄNSEL S, PRUSS C, OSTEN W. Phase errors in high line density CGH used for aspheric testing: beyond scalar approximation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 11638-11651.
- [15] ZHANG Yuxin, LI Fazhi, YAN Lisong, et al. Long focal length aspherical mirror testing with CGH and auxiliary lenses (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220384. (in Chinese)
- [16] SU Hang, WANG Xiaokun, CHENG Qiang, et al. Sub-aperture stitching and CGH mixed compensation for the testing of large convex asphere (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220576. (in Chinese)
- [17] 刘亮. 基于离轴型 CGH 的非球面检测技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [18] SHEN Hua, ZHU Rihong, GAO Zhishan, et al. Design and fabrication of computer-generated holograms for testing optical freeform surfaces [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(3): 032201.
- [19] ZHU D Y, WANG F, LI P, et al. Research on hybrid compensation testing of convex aspherical mirror [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 132: 106108.

CGH null compensation testing method of off-axis aspheric mirror surface (*invited*)

WANG Shen¹, CAO Yun^{2*}, YAN Lisong^{3*}

(1. Renmin University of China, Beijing 100872, China;

2. Ningbo Zhixing Optical Technology Co., Ltd., Ningbo 315400, China;

3. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract:

Objective As the core component of high-performance space cameras, off-axis mirrors can be used to realize the design of space cameras with large fields of view and long focal lengths. The high-precision surface map is the guarantee of high-quality imaging of space cameras. In order to solve the high-precision surface map testing of off-axis aspheric mirrors and ensure the imaging effect of space remote sensing cameras, a high-precision surface map testing method for off-axis aspheric mirrors is established based on computer generated hologram optical components, and the high-precision testing of off-axis aspheric mirrors is realized. This provides the necessary conditions for the fabrication of ultra-precision optical systems.

Methods In order to improve the utilization of light energy and improve the detection accuracy, the off-axis aspheric surface was moved to the axis by adding translation and tilt to carry out the null compensation design. This method can avoid the compensation design of the coaxial parent mirror corresponding to the entire off-axis aspheric surface, so as to greatly improve the energy utilization. The spatial position of the mirror to be measured can be determined by designing the reference spot, the interference testing of the mirror to be measured can be realized with high precision through aberration adjustment, and the interference diffraction order can be effectively separated by using the carrier frequency, so as to achieve high-precision measurement of the mirror surface to be measured.

Results and Discussions Null compensation design is performed by adding translation and tilt to move the off-axis aspheric surface onto the axis. It avoids the compensation design of the whole coaxial mirror corresponding to the entire off-axis aspheric surface, thus greatly improving the energy utilization. The relevant design results are shown in Figure 3-Figure 8. The author conducted a detailed analysis of the optical path structure, including the spatial relative positions of the interferometer, the CGH, and the off-axis aspheric mirror. To properly position the aforementioned optical components, auxiliary zones were designed to achieve precise alignment among them. The fitting residual of the main zone is zero, indicating that the design accuracy meets the requirements of the test results. The fringe density in the main zone does not exceed 137 lp/mm, with a periodic spacing of no more than 7.3 μm , which meets the fabrication capability of laser direct writing systems and enables high-quality patterning of CGH fringes. The alignment zone pattern was designed using the +3rd diffraction order, featuring an annular fringe configuration. With a fringe density not exceeding 251 lp/mm and a periodic spacing no greater than 3.98 μm , this design remains compatible with laser direct writing systems for high-precision fabrication. Additionally, during testing, the diffraction spots of various orders can be fully separated. This effectively prevents light from other diffraction orders from interfering with the measurement results as stray light during testing.

Conclusions A high-precision surface map testing method for off-axis aspheric mirrors are proposed based on computer generated hologram optical elements. By adding translation and tilt to move the off-axis aspheric surface to the axis for null compensation design, this method effectively avoids the null compensation design of

the whole coaxial mirror corresponding to the entire off-axis aspheric surface, so as to greatly improve the energy utilization rate of the system. Combined with engineering examples, it analyzes in detail how to consider the precise alignment of each optical element, how to effectively separate each diffraction order in the design of the main region, and how to design the fringe density of each region in combination with the actual manufacturing level when using the design method for off-axis aspheric compensation design. From the design results, it can be seen that based on the method, the null compensation design for off-axis aspheric surface can be effectively realized, and the establishment of this method will provide some technical support for the manufacturing and testing of high-precision optical systems.

Key words: off-axis aspherical surface; interferometry; null compensation; computer generated hologram

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2022YFC2203902); Key Research and Development Program of Ningbo (2024T007)