

大口径非球面反射镜零位补偿器误差标定方法

徐秋云*, 孔令臣

常州工学院光电工程学院, 江苏 常州 213032

摘要 非球面反射镜通常使用零位补偿器配合干涉仪进行面形检测,因此零位补偿器的加工和装配精度直接决定了检测结果的可靠性。提出一种具备良好通用性的基于计算全息片(CGH)的补偿器误差标定方法。以一块 $\Phi 856$ mm、 $f/1.54$ 的双曲面反射镜作为待测非球面镜,首先设计反射式 CGH,运用光线追迹法得到 CGH 的相位函数,使其引入的球差与待测非球面主镜的法线像差相同,再由 ZEMAX 仿真计算验证该设计的正确性,并根据相位函数加工出主全息。在同一块玻璃基片上设计和加工对准全息带用于标定光路的调整。实验结果表明,所制作的 CGH 标定零位补偿器的精度达到 $\lambda/80$ 。可见对于大口径、快焦比的凹非球面反射镜,所提方法仍然适用,因此可用于指导多数正轴非球面镜的零位补偿器标定。

关键词 零位补偿器; 干涉检测; 计算全息片; 相位函数; 光线追迹

中图分类号 P111.2; O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232075

Error Calibration Method of Null Correctors for Large-Aperture Aspherical Mirrors

Xu Qiuyun*, Kong Lingchen

School of Photoelectric Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, Jiangsu, China

Abstract Aspheric mirrors commonly utilize a zero position compensator along with an interferometer for surface shape detection. Therefore, the machining and assembly accuracy of the zero position compensator play a crucial role in determining the reliability of the detection results. This paper introduces a universal compensation error calibration method based on computer generated hologram (CGH). To test the method, a $\Phi 856$ mm, $f/1.54$ hyperboloid mirror is employed as the target aspheric mirror. First, a reflective CGH is designed, and the phase function of the CGH is determined using a ray tracing method. This ensures that the introduced spherical aberration is the same as the normal aberration of the aspheric main mirror to be tested. Subsequently, the correctness of the design is confirmed through ZEMAX simulation calculation, and the primary hologram is processed based on the phase function. Holographic strips are designed and processed on the same glass substrate for adjusting the calibration optical path. The experimental results demonstrate that the CGH calibration achieves a zero position compensator accuracy of $\lambda/80$. The proposed method is applicable to concave aspheric mirrors with large apertures and fast focal ratios. Consequently, it can serve as a reliable guide for calibrating zero position compensators in most positive axis aspheric mirrors.

Key words null corrector; interferometry; computer generated hologram; phase function; ray tracing

1 引言

天文望远镜的大口径主镜多为二次曲面反射镜,面形检测时常使用零位补偿器对其非球面度进行补偿,补偿器出射光束与主镜理想面形的法线方向一致,满足光学干涉检测条件^[1-4]。因此,补偿器的精度直接决定了主镜的加工精度^[5-6]。由于补偿器引入的非球

面度通常较大,有时高达数百个波长,其出射波面形状对加工和装调误差非常敏感。鉴于 Hubble 望远镜的经验^[7],大型天文望远镜主镜磨制过程中均倾向于采用不同检验光路结构进行交叉验证,例如使用不同形式的补偿器。但是这种方法成本高、准备周期长,而且具有不确定性风险:一旦两套补偿器的检验结果不一致,无法判定哪个是准确的;另一方面,这类方法并非

收稿日期: 2023-09-08; 修回日期: 2023-10-26; 录用日期: 2023-11-14; 网络首发日期: 2023-11-24

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(11603052)

通信作者: *xuqy@czu.cn

对补偿器本身进行检测,因此不能直接确定补偿光路设计和补偿器制作能否达到足够高的精度^[8-9]。可见,如果单纯依靠补偿器检测大口径非球面而不对补偿器进行标定,则难以提供足够的证据定量地阐述镜面最终所能达到的精度。虽然在干涉检测方法以外,可以使用扫描五棱镜法或者摆臂轮廓仪检测大口径主镜面形^[10],但是测量精度无法与干涉检测相比。利用透镜补偿器对天文光学镜面进行零位干涉检验在未来很长时间内仍将发挥主要作用。

计算全息片(CGH)作为一种新兴的光学检测器件,可用于零位补偿器的标定,从而弥补上述不足^[11-14]。CGH可以认为是一种故意“扭曲”的衍射光栅,利用刻线频率的空间变化产生所需的波前,可做成透射式的,也可以是反射式的^[15-19]。设计成反射式结构时,使CGH对补偿器出射光束的反射与理想待检镜面一样,从而代替待检非球面反射镜对补偿器进行标定。标定光路不包含其他光学元件并且是零位测试,因此这种方法简单可靠、精度高。由于零位补偿器和CGH是分别进行设计加工的,对零位补偿器的标定结果能够实现真正意义上的交叉检测。

本文提出一种具有通用性的基于CGH的补偿器误差标定方法。首先,根据被测非球面面形,通过光线追迹法计算得到CGH的相位函数,使其引入的球差与待测非球面法线像差相同;其次,通过ZEMAX仿真验算该设计的正确性,以避免CGH加工错误造成的经济和效率损失;最后,根据设计结果在基片上加工主全息,在主全息周围区域设计并加工一圈对准全息环带以确保检测光路的装调精度。以一块口径 $\Phi 856$ mm、 $f/1.54$ 的凹双曲面镜(中孔直径为150 mm,圆锥系数 $K=-1.0011$,非球面度为 $57.4 \mu\text{m}$)为测试对象,阐述其零位补偿器标定光路的设计步骤。该非球面镜相较于一般的正轴非球面镜具有深焦比、大非球面度的特点,面形检测难度更高,因此以该镜为例得到的实验结果可更好验证所提方法的通用性。实验结果表明,所提方法可以高效地对多数非球面反射镜补偿器误差进行精确标定。

2 零位补偿器误差标定方法

CGH玻璃基片材料为融石英,该材料具有优良的光透过能力和温度稳定性。本文使用的基片尺寸为 $152 \text{ mm} \times 152 \text{ mm} \times 6.35 \text{ mm}$ 。在同一块基片上设计加工两种条纹图样(图1),即主全息图(零位补偿全息)和对准全息图,分别实现非球面零位光程差补偿和CGH在光路中定位这两种不同的功能。

2.1 主全息设计

标定零位补偿器误差的CGH为主全息。图2是CGH标定Offner补偿器的光路图,其中,补偿器与干涉仪的相对位置与检测非球面镜时相同,即补偿器的标定状态与使用状态保持完全一致。图3是主镜加工

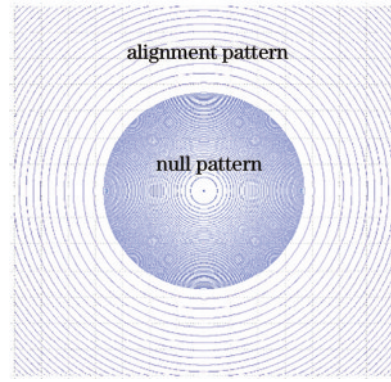


图1 CGH图样分布

Fig. 1 Pattern distribution of CGH

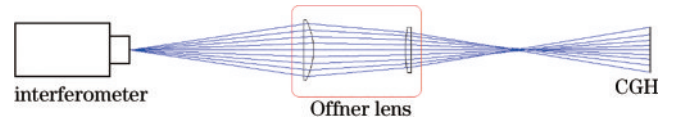


图2 CGH标定Offner补偿器光路图

Fig. 2 Optical layout of the calibration of Offner null using CGH

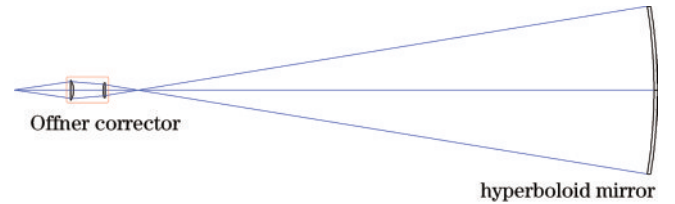


图3 Offner补偿器检测凹双曲面镜光路图

Fig. 3 The optical layout of concave hyperboloid mirror by Offner compensator

过程中的检测光路。

主全息是加工在平面玻璃基片上的圆光栅,其相位函数由3个因素共同确定:1)CGH所替代的非球面镜参数;2)CGH在光路中的轴向位置;3)CGH相位中加入的圆载频。

对于具有旋转对称性的CGH,可利用光线追迹公式^[20]对CGH的相位分布进行编程计算。轴上物点经单球面折射成像的光线追迹公式为

$$\begin{cases} \sin I = \frac{L-r}{r} \cdot \sin U \\ \sin I' = \frac{n}{n'} \cdot \sin I \\ U' = U + I - I' \\ L' = r + r \cdot \frac{\sin I'}{\sin U'} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: n 和 n' 分别是光线折射前后介质的折射率; I 和 I' 分别是光线在两种介质分界面上的入射角和折射角; r 为球面的曲率半径; L 和 L' 分别是物方截距和像方截距; U 和 U' 分别是物方孔径角和像方孔径角。共轴球面光学系统由多个面组成,其光路计算的过渡公式为

$$\begin{cases} L_2 = L'_1 - d_1 \\ L_3 = L'_2 - d_2 \\ U_2 = U'_1 \\ U_3 = U'_2 \\ n_2 = n'_1 \\ n_3 = n'_2 \end{cases} \quad (2)$$

图 4 中, (x_0, y_0) 为测试点, 也是坐标原点, 逐步计算出光线与透镜各个面以及 CGH 的交点坐标。根据物像之间的等光程性^[21], 可以计算出 CGH 的相位函数 Φ_{CGH} (用光程差表示):

$$\Phi_{CGH} = 2(L_{OPL2} - L_{OPL1}), \quad (3)$$

式中: L_{OPL1} 是轴外光线的光程; L_{OPL2} 是轴上光线的

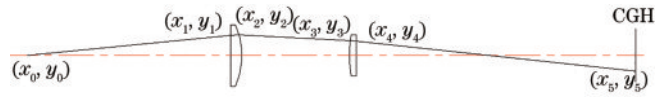


图 4 光线追迹示意图

Fig. 4 Ray tracing schematic diagram

光程。

按照偶次多项式对 CGH 的相位函数 Φ_{CGH} 进行曲线拟合, 拟合公式为

$$\Phi_{CGH} = M \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i} \quad (4)$$

式中: M 是 CGH 的衍射级次, 这里为 1; 取 $N=8$ 。拟合所得系数如表 1 所示。

表 1 偶次多项式的系数

Table 1 Coefficients of even polynomials

A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
-5.19×10^1	5.27×10^{-3}	-1.99×10^{-6}	1.09×10^{-9}	-6.38×10^{-13}	3.09×10^{-16}	-9.79×10^{-20}	1.43×10^{-23}

由于是偶次多项式, 可以用 ZEMAX 的 Binary 2 功能对计算结果进行仿真验算。CGH 到补偿器最后一个镜面的距离为 400 mm。主镜口径 Φ 为 856 mm, 与之对应的 CGH 口径 Φ 为 75 mm。由于主镜有

$\Phi 150$ mm 的中孔遮拦, 对应 CGH 中心 $\Phi 10$ mm 为无效范围。将这些参数和表 1 的偶次多项式系数输入, 由图 5 可以看出, 设计结果达到衍射极限, 证明了设计结果的正确性。

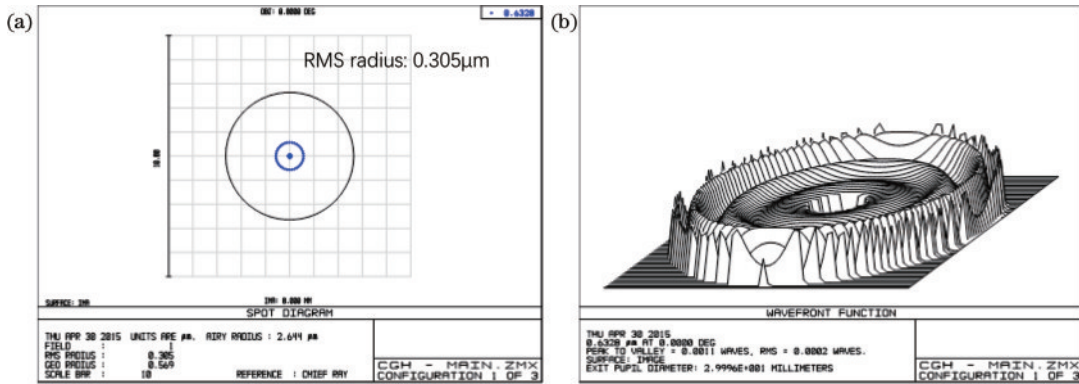


图 5 标定光路成像质量。(a)点列图;(b)波像差

Fig. 5 The image quality of calibration path. (a) Spot diagram; (b) wavefront function

对 CGH 的相位函数求导可以直接得到 CGH 的频率, 频率决定 CGH 的条纹密度, 其倒数则为线宽。线宽越小则 CGH 刻蚀难度也越大。因此为了增大 CGH 的线宽, 有时使用更高级次的衍射光, 但高衍射级次的衍射效率较低, 会导致干涉条纹对比度下降。本文主全息采用 1 级衍射光, 最小线宽是 $1.96 \mu\text{m}$, 如图 6 所示。

2.2 对准全息设计

对准全息用于 CGH 与测试点 (干涉仪镜头的焦点) 相对位置和姿态的确定。对准全息是 CGH 中不可或缺的部分, 否则无法区分测量结果中 CGH 的位置、姿态造成的误差和待标定的 Offner 补偿器本身的误差。完整的标定过程光路调整步骤如下:

- 1) 将全息片放置在五维调整架上;

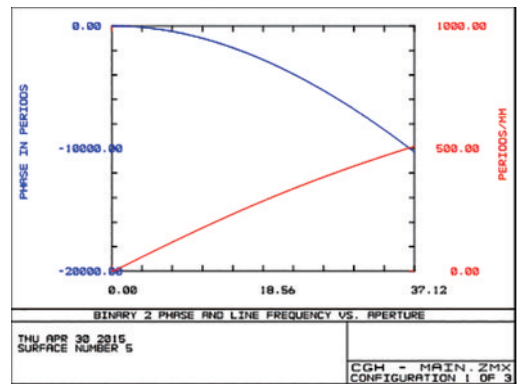


图 6 CGH 相位函数和空间频率分布

Fig. 6 CGH phase function and spatial frequency distribution

- 2) 根据干涉仪的条纹 (对准全息) 调整基片的位置状态, 把条纹数目调至最少;

3) 全息片固定不动,把 Offner 补偿器放入光路中,调整补偿器的横向平移、轴向平移和倾斜以消除干涉图的倾斜、离焦和彗差。

对准全息光路如图 7 所示,可以看出,相当于一个曲率半径已知的标准球面反射镜,使干涉仪出射的标准球面光波沿原路返回。因此,CGH 到测试点的距离由主全息标定补偿器的光路确定,即图 2 中干涉仪焦

点到 CGH 的距离,也即图 4 中 (x_0, y_0) 到 (x_5, y_5) 的距离,根据前文光路追迹计算可知该距离为 871 mm。由于图 7 光路中只有一个反射面,因此只要使用一次光线追迹[式(1)和式(2)]即可计算出对准全息的相位和图案,结果如图 8 所示。这里为了显示清楚,将全息图的线宽放大了 200 倍。

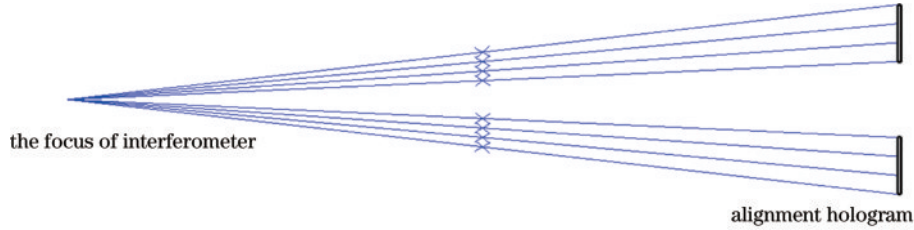


图 7 对准全息光路图

Fig. 7 Optical layout of the alignment hologram

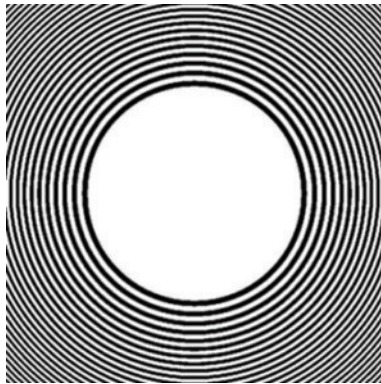


图 8 对准全息图样分布(线宽放大 200 倍)

Fig. 8 Alignment hologram patterns (line width magnified by 200 times)

本文所用 CGH 基片尺寸为 $152\text{ mm} \times 152\text{ mm} \times 6.35\text{ mm}$,主全息条纹区域为 $\Phi 76\text{ mm}$,主全息与对准全息单边间隔 1 mm 。为了提高对准全息对位置误差的灵敏度,尽可能增大对准全息的刻蚀范围,因此对准全息条纹图样加工范围为 $\Phi 78\text{ mm} \sim 140\text{ mm} \times 140\text{ mm}$ 。使用 3 级衍射光以降低刻线的空间频率。显然,最大衍射角对应 CGH 刻蚀区的边角位置,即 $\theta_{\max} = \arctan [140/2/\cos(45^\circ)/871] = 6.483^\circ$ 。因光线沿原路返回,故入射角等于衍射角, $m=3, \lambda=0.6328\ \mu\text{m}$,因此根据光栅方程可得最小线宽 $d_{\min} = m\lambda/2/\sin \theta_{\max} = 8.4\ \mu\text{m}$ 。

3 实验结果

首先使用 ESDI 平面干涉仪测量 CGH 基片的面形误差,测量结果如表 2 所示。表中展示了剔除和不剔除离焦量的结果,基片离焦会叠加到测量结果中,但在补偿器标定光路中可以忽略离焦量,因此这里取剔除离焦量的值。可以看出,该基片面形均方根(RMS)值达到 0.013λ ,精度很高,其中,心主全息部分($\Phi 76\text{ mm}$ 范围内)精度值则更高,对测量造成的影响

表 2 基片面形误差($\lambda = 0.6328\ \mu\text{m}$)

Table 2 Substrate shape error ($\lambda = 0.6328\ \mu\text{m}$)

Index	With power	Without power
PV	0.15λ	0.083λ
RMS	0.029λ	0.013λ

完全可以忽略。此外,CGH 背面要涂黑色消光漆,避免背面反射产生杂散光影响测量。

CGH 标定 Offner 补偿器的实验装置如图 9 所示,使用 4D phasecam4020 型干涉仪和第 2 节设计出的 CGH 对补偿器进行标定。标定过程中首先利用 CGH 对准环带调整 CGH 与干涉仪之间的相对位置,然后在光路中放入补偿器,调节补偿器的五维调整架使球差和彗差最小,从而获得最终的标定结果,如图 10 所示。可以看出,该补偿器的精度优于 $\lambda/80$ (RMS),高于双曲面主镜的设计指标 $\lambda/40$ (RMS),一定程度上验证了补偿器的加工装配精度,因此使用该补偿器检测主镜能够给出可靠的检测结果。

使用标定后的补偿器对 $\Phi 856\text{ mm}$ 双曲面主镜面

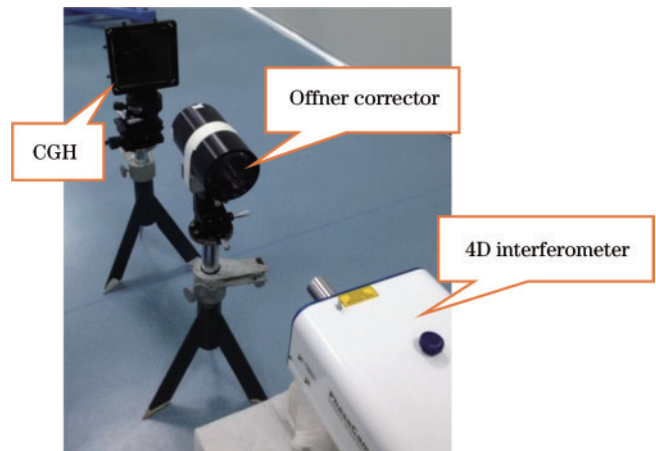


图 9 Offner 补偿器标定实验

Fig. 9 Calibration experiment of Offner compensator

形进行检测,主镜及检测结果如图 11 所示。该主镜加工后的最终面形精度达到 $\lambda/43$ (RMS), 优于其设计指标。

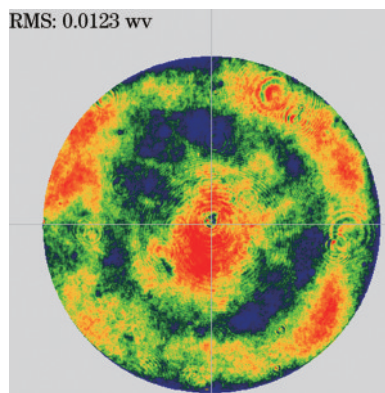


图 10 Offner 补偿器标定结果

Fig. 10 Calibration result of the Offner compensator

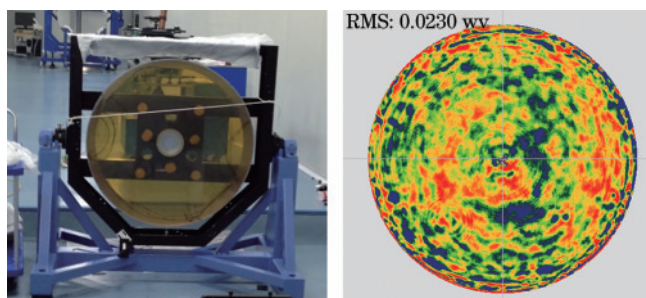


图 11 $\Phi 856$ mm 凹双曲面镜及其使用标定后的 Offner 补偿器检测的面形

Fig.11 The $\Phi 856$ mm concave hyperboloid mirror and its surface measured by the calibrated Offner compensator

4 结 论

大口径非球面镜加工过程中常使用零位补偿器对其法线像差进行补偿以进行高精度的光学干涉检测。补偿器的精度决定了镜面的最终加工精度,因此对补偿器进行标定是大口径非球面镜加工的关键步骤。CGH 具有灵活的波前转换能力,可作为一种独立的手段对补偿器出射光束的质量进行校验。从标定光路设计结果来看,像质达到衍射极限,但是 CGH 对位置要求极其严格,少量的偏心和倾斜都会引入较大的误差,需在同一块玻璃基片上加工对准全息并按照光路调整步骤进行操作。本文以一块大口径双曲面镜的 Offner 补偿器为对象设计了包含主全息和对准全息的 CGH 及其检测光路,并进行标定实验。实验结果表明,该补偿器自身精度为 $\lambda/80$ (RMS),也验证了最终双曲面反射镜的面形测量结果 $\lambda/43$ (RMS) 具备较高的可信度。因该镜的口径和非球面度较一般的正轴非球面更大,因此本文给出的 CGH 设计方式和测量步骤具备较高的普适性,可用于指导多数正轴非球面 Offner 补偿器的标定。

参 考 文 献

- [1] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 10-30.
Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 10-30.
- [2] Offner A. A null corrector for paraboloidal mirrors[J]. Applied Optics, 1963, 2(2): 153-155.
- [3] 陈善勇, 薛帅, 熊玉朋, 等. 面向制造的光学面形超精密测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 0312011.
Chen S Y, Xue S, Xiong Y P, et al. Research progress of ultra-precision measurement of optical surfaces for manufacturing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 0312011.
- [4] Malacara D. Optical shop testing[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [5] Burge J H. Advanced techniques for measuring primary mirrors for astronomical telescopes[D]. Tucson: Optical Sciences, The University of Arizona, 1993: 104-135
- [6] 张学军. 空间光学系统先进制造技术进展: 从非球面到自由曲面[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822009.
Zhang X J. Progress on space optics manufacturing: from aspheres to freeforms[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822009.
- [7] Allen L, Angel J R P, Mongus J D, et al. The Hubble space telescope optical systems failure report[R]. Washington, DC: NASA Report, 1990.
- [8] Burge J H. Certification of null correctors for primary mirrors[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 1994: 248-259.
- [9] Burge J H, Kot L B, Martin H M, et al. Design and analysis for interferometric measurements of the GMT primary mirror segments[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6273: 62730M.
- [10] 朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0112001.
Zhu R H, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0112001.
- [11] MacGovern A J, Wyant J C. Computer generated holograms for testing optical elements[J]. Applied Optics, 1971, 10(3): 619-624.
- [12] Su P, Kang G G, Tan Q F, et al. Estimation and optimization of computer-generated hologram in null test of freeform surface[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(12): 1097-1100.
- [13] 朱德燕, 张学军. 高精度相位型计算全息图的设计[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0712002.
Zhu D Y, Zhang X J. Design of high-precision phase computer-generated-hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0712002.
- [14] Chang Y R, Burge J H. Error analysis for CGH optical testing[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3782: 358-366.
- [15] 黄亚, 王丰璞, 李新南, 等. 基于计算全息的大口径离

- 轴非球面子镜的折衍混合补偿检测方法[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1212004.
- Huang Y, Wang F P, Li X N, et al. Large aperture off-axis aspherical segment test using refraction and diffraction mixed compensation based on computer generated hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1212004.
- [16] 黄亚, 马骏, 朱日宏, 等. 基于计算全息的光学自由曲面测量不确定度分析[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1112007.
- Huang Y, Ma J, Zhu R H, et al. Investigation of measurement uncertainty of optical freeform surface based on computer-generated hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1112007.
- [17] 徐秋云, 徐晨, 李博, 等. 大口径批量化离轴非球面镜的检测光路设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1012005.
- Xu Q Y, Xu C, Li B, et al. Optical testing design for plenty of large off-axis aspherical mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1012005.
- [18] 王丰璞, 李新南, 徐晨, 等. 大型光学红外望远镜拼接非球面子镜反衍补偿检测光路设计[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1184-1193.
- Wang F P, Li X N, Xu C, et al. Optical testing path design for LOT aspheric segmented mirrors with reflective-diffractive compensation[J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1184-1193.
- [19] 国成立, 郑德康, 朱德燕, 等. 混合型计算全息图检测低反射率非球面(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9): 20220547.
- Guo C L, Zheng D K, Zhu D Y, et al. Detection of low reflectivity aspheric surface by hybrid computer hologram (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(9): 20220547.
- [20] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [21] 崔宏滨, 李永平, 康学亮. 光学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2015: 33-34.
- Cui H B, Li Y P, Kang X L. Optics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2015: 33-34.