

# 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

黄亚<sup>1,2\*</sup>, 王丰璞<sup>1,2</sup>, 李新南<sup>1,2</sup>, 陈哲<sup>1,2</sup>, 李博<sup>1,2</sup>, 徐晨<sup>1,2</sup>, 曹亭<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

<sup>2</sup>中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042

**摘要** 提出一种基于计算全息元件(CGH)的折衍混合补偿检测光路,通过 CGH 和消球差透镜组合实现离轴子镜的缩焦零位检测。该方法使得检测光路长度减少至 CGH 直接检测的 1/4 至 1/8,同时提高了小焦比子镜的调节灵敏度,将大离轴量子镜的干涉图长宽畸变比率由 12.5 优化至 1.25。保持光路各器件位置不动,通过更换相应的计算全息片,还可实现不同离轴量子镜的批量高效检测。应用该方法完成直径为 330 mm 的离轴试验镜的加工与检测,测试结果面形均方根(RMS)值为 0.0290 $\lambda$  ( $\lambda$  为波长)。通过标准球面镜对消球差透镜进行标定,RMS 值降至 0.0267 $\lambda$ 。

**关键词** 测量;干涉测量;离轴非球面;计算全息片;30 m 望远镜;折衍混合补偿

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1212004

## Large Aperture Off-Axis Aspherical Segment Test Using Refraction and Diffraction Mixed Compensation Based on Computer Generated Hologram

Huang Ya<sup>1,2\*</sup>, Wang Fengpu<sup>1,2</sup>, Li Xinnan<sup>1,2</sup>, Chen Zhe<sup>1,2</sup>, Li Bo<sup>1,2</sup>, Xu Chen<sup>1,2</sup>, Cao Ting<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories,

Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, Jiangsu, China

**Abstract** In this paper, a refraction and diffraction mixed compensation test optical path based on computer-generated hologram (CGH) has been proposed, and the combination of the CGH and aplanatic lens is realized to measure the off-axis segment in null test with focal reducing. The total length has been reduced to 1/4 to 1/8 of that of the conventional method. And the adjustment sensitivity of the small focus ratio segment has been improved. The distortion ratio of the interferogram of the large off-axis segment has been optimized from 12.5 to 1.25. The segments with different off-axis distances can be measured rapidly with high precision by replacing different computer-generated holograms and keeping every elements in place. The method is used to complete the processing and testing of a  $\Phi 330$  mm off-axis trial mirror, and the root mean square (RMS) value of the test surface figure is 0.0290 $\lambda$  ( $\lambda$  is wavelength). The RMS value of the test surface figure is reduced to 0.0267 $\lambda$ , by calibrating the aplanatic lens using a standard spherical mirror.

**Key words** measurement; interferometry; off-axis aspheric surface; computer-generated hologram; 30 m telescope; refraction and diffraction mixed compensation

收稿日期: 2022-01-06; 修回日期: 2022-02-10; 录用日期: 2022-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(11627804)、江苏省自然科学基金(BK20191095)

通信作者: \*yhuang@niaot.ac.cn

# 1 引言

为提高天文望远镜的集光能力和分辨能力,天文光学望远镜主镜的口径越来越大。单镜面式的主镜目前最大只能做到  $\Phi 8.4\text{ m}$  口径<sup>[1]</sup>。更大尺寸的天文光学望远镜,如 30 m 望远镜 (TMT)<sup>[2]</sup>、口径  $\Phi 39\text{ m}$  的欧洲极大望远镜 (E-ELT)<sup>[3]</sup>、中国正在筹建的 12 m 大型光学红外望远镜 (LOT)<sup>[4]</sup>,其主镜均采用拼接镜面结构,由一系列尺寸相同、离轴量不同的离轴子镜组成。其中,TMT 共有 492 块子镜,每块子镜均为外径为 1.44 m 的正六边形子镜<sup>[5]</sup>。中国计划以技术参与的方式,负责其中最外围的离轴子镜的加工任务,这也是其中加工难度最大的。LOT 主镜计划采用相同的形式,由 84 块同样尺寸的子镜拼接而成。采用小尺寸的子镜来拼接成更大口径的主镜,能够有效降低单一主镜的加工与检测难度;数量众多、相同规格的子镜也使得加工、检测与装配更趋向于批量化、产业化<sup>[6]</sup>。

常规中小口径离轴非球面经过旋转平移后可作为在轴自由曲面,设计计算全息元件 (CGH),实现零位补偿检测<sup>[7-11]</sup>。离轴二次曲面,如离轴抛物面,也可采用自准直法进行检测,近似于零位检测<sup>[12]</sup>。大口径主镜的各子镜通常数量种类多、口径大、焦距长、焦比小,因此其检测光路长,对装调不敏感。以 TMT 为例,主镜为顶点曲率半径为 60 m 的近抛物面,直接应用 CGH 检测 TMT 子镜时,检测光路也在 60 m 以上。即使是采用自准直法检测,光路长度也大于 30 m。这对实验室的场地空间提出了很高的要求,既要保证足够的场地空间,同时还要有较好的气流环境<sup>[13]</sup>。此外,精测离轴非球面会引入投影畸变,离轴量越大,曲率偏差越大,进行零位干涉检测时,其畸变也更为严重<sup>[14-15]</sup>。

针对长焦距的大口径离轴子镜的检测,亚利桑那大学光学中心提出一种采用透镜缩短检测光路的检测方案,透镜后表面作为参考面,同时引入计算全息来补偿非球面偏差。该方法可以大幅度缩短检测光路,同时可实现离轴子镜的批量化高效率检测<sup>[16-17]</sup>。但该检测方案的光学元件众多,面形结果误差来源难以确定。此外,反衍混合补偿检测也被用于大口径离轴非球面的检测中。球面反射镜可缩短检测光路,同时反射式镜面将光路进一步压缩,因此结构紧凑,检测成本更为经济<sup>[18-20]</sup>。不过该方法的缩焦比受限于球面镜的曲率半径,光路设计复杂,同时对各器件的定位要求非常高。

针对大口径天文望远镜离轴子镜检测过程中存在的检测光路长、畸变严重、装调不敏感的特点,本文提出一种基于 CGH 的折衍混合补偿检测方案,利用消球差透镜实现检测光路的缩焦,利用可更换的 CGH 实现离轴子镜的零位补偿检测。透镜出射波前为与待测离轴子镜中心曲率半径相近的球面波前,可以补偿离轴子镜的离焦量;透镜的加工需要相应的标准球面反射镜,通过标准球面反射镜可对消球差透镜和干涉系统误差进行标定,进一步提高待测件的检测精度。同时,不同的离轴子镜具有相同的外形尺寸、相近的中心曲率半径,保持光路各器件位置不动,通过更换相应的计算全息片,即可实现系列子镜的批量快速检测。

## 2 基本原理

### 2.1 检测方案

TMT 主镜顶点的曲率半径为 60 m,圆锥系数  $k = -1.000953$ ,TMT 主镜为近抛物面,共由 492 块六边形子镜拼接而成。其镜面可按对称性质分为 6 个扇区,每个扇区包含 82 种类型的离轴子镜,如图 1 所示<sup>[5]</sup>。为了提高加工效率,在离轴子镜的加工过程中,需要先按  $\Phi 1.5\text{ m}$  的圆镜坯加工,加工至合适精度以后,再切割加工出对应的六边形。部分子镜具有相同的离轴量,仅切割出的正六边形的方向不一样,在圆形镜加工情况下,TMT 子镜离轴量类型只有 46 种。中国计划承接其中最外围的 12 种类型离轴子镜的加工任务,离轴量为 13.4 ~ 14.3 m。本文后续的讨论中均针对圆形镜面进行考虑,如无特殊说明, $\lambda = 632.8\text{ nm}$ 。

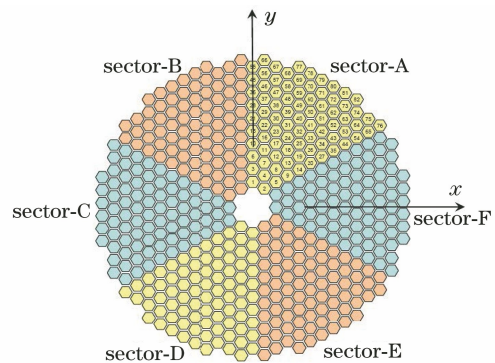


图 1 TMT 主镜分区及子镜编号

Fig. 1 Primary mirror sectors and segment numbering scheme of TMT

对离轴非球面元件进行零位检测时,通常将其经过旋转平移后作为轴上光学元件。图 2(a)即为经过旋转平移后的 TMT 离轴子镜的最大矢高和最

大非球面度随离轴量增大的变化曲线;考虑到加工任务要求,本文选择离轴量为 13.99 m 的第 79 号 TMT 子镜作为仿真分析对象,图 2(b)和(c)分别给出了离轴量为 13.99 m 的离轴子镜的矢高分布和非球面度分布,其中  $y$  方向为母镜顶点方向。可

见,随着离轴量的增加,离轴子镜的矢高相对变化较小,而最大非球面度则显著增加,从最里层 1 号子镜的  $8.35 \mu\text{m}$  增加到最外围 82 号子镜的  $257.61 \mu\text{m}$ ,呈现出更为明显的非旋转对称分布,越到外围加工难度越大。

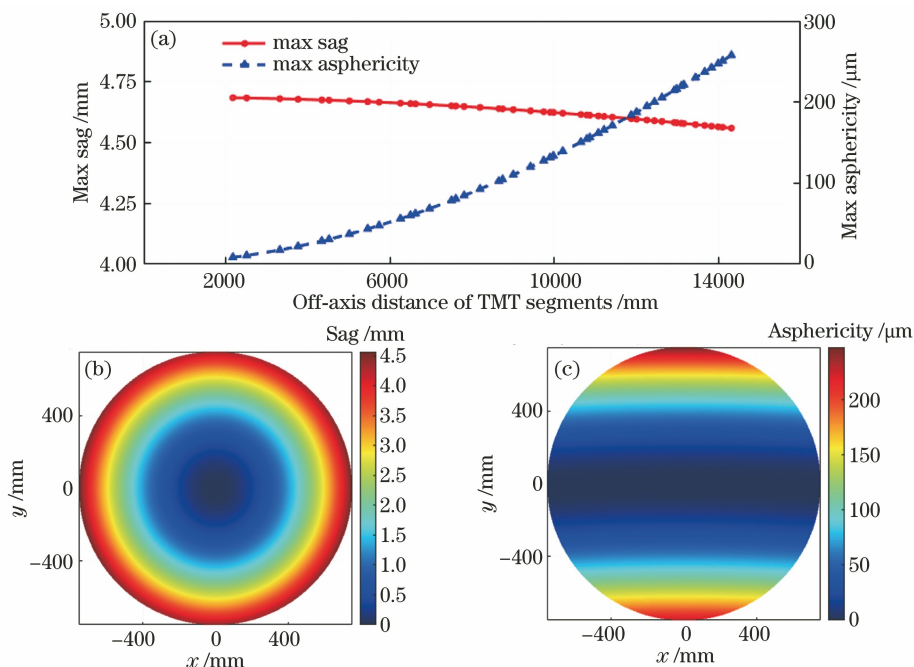


图 2 经过旋转平移后的 TMT 离轴子镜的矢高和非球面度。(a) TMT 子镜的最大矢高和最大非球面度随离轴量的变化;离轴量为 13.99 m 时 TMT 子镜的(b)矢高分布和(c)非球面度分布

Fig. 2 Sag and asphericity of TMT segments after rotation and translation. (a) Max sag and max asphericity of TMT segments as functions of off-axis distance; (b) sag distribution and (c) asphericity distribution of TMT segment with off-axis distance of 13.99 m

对于经过旋转平移后的 TMT 各子镜,直接应用 CGH 对其进行零位补偿检测时,为了满足现有 CGH 的加工能力,控制 CGH 的尺寸和空间频率,检测光路通常也会在 60 m 左右。检测光路过长对实验室的场地提出了很高的要求,既要保证足够长的场地空间,同时还要有较好的气流环境,避免温度和气流扰动对检测结果的影响。

针对 TMT 离轴子镜检测光路长的问题,设计折衍混合补偿器对其进行零位干涉测量,完整的补偿器由 CGH 和消球差透镜组成,测量光路结构如图 3 所示。干涉仪出射的球面波波前经过 CGH 衍射及消球差透镜的折射后,沿待测离轴子镜法线垂直入射后原路返回。

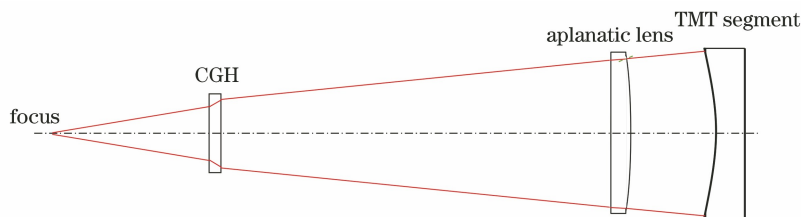


图 3 大口径离轴子镜折衍混合补偿测量光路

Fig. 3 Measurement light path of refraction and diffraction mixed compensation using large aperture off-axis mirror

CGH 作为衍射光学元件,可根据计算结果生成特定的二元光学结构,产生任意形状的波前,实现待

测离轴子镜非球面度的补偿。消球差透镜为平凸非球面式结构,用于实现待测镜的缩焦,其检测光路如

图 4 所示。在消球差透镜的加工过程中,需要提前加工好相应的标准球面反射镜,球面反射镜的顶点曲率半径与待测镜面的顶点曲率半径相近。对于消

球差透镜误差和干涉仪系统误差,可通过标准球面反射镜对其进行标定,以进一步提高加工和检测精度。

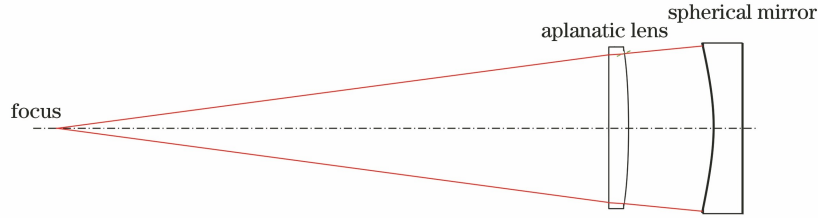


图 4 消球差透镜检测光路

Fig. 4 Layout of aplanatic lens test

离轴非球面折衍混合补偿检测光路设计中最重要就是 CGH 的设计。针对 13.99 m 离轴量的 TMT 子镜,完成 CGH 的设计,仿真结果如图 5 所示。图 5(a)为 13.99 m 离轴量的 TMT 子镜折衍混合补偿检测仿真光路,TMT 子镜口径为  $\Phi 1.5$  m,消球差透镜和标准球面镜的口径均为  $\Phi 1.6$  m,TMT 子镜与消球差透镜的距离为 3 m,消球差透镜与焦点(含 CGH)的距离为 12 m,检测光路总长约

15 m。图 5(b)为仿真波前残差,点列图几何半径为  $0.03 \mu\text{m}$ ,波前残差峰谷值(PV)、均方根(RMS)接近于零。图 5(c)为检测光路中各级衍射级次点列图,工作级次为  $(+1, +1)$ 。为避免杂散光干扰,CGH 增加倾斜载频,增加载频后,焦点处最接近工作级次的干扰点离工作级次点  $1.5$  mm 左右,常规小孔光阑即可遮拦,避免了杂散光对检测的影响。

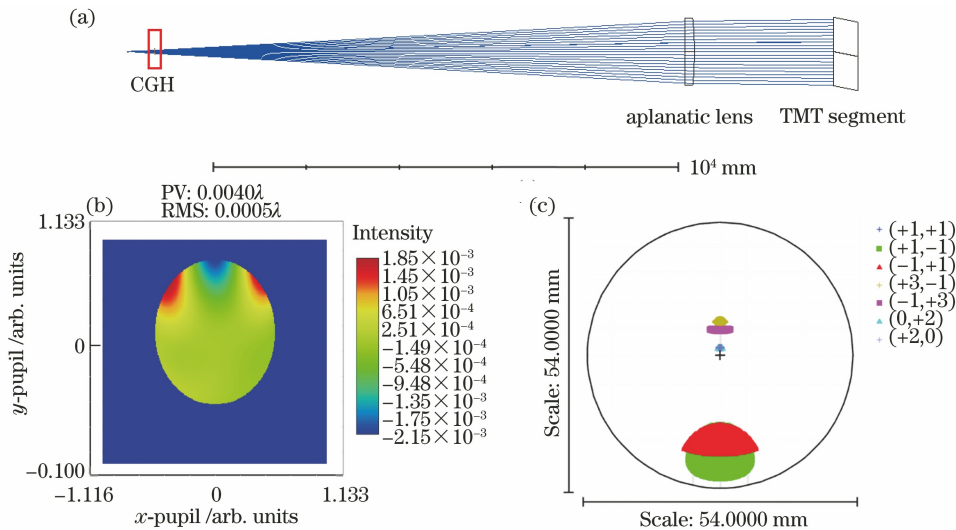


图 5 折衍混合补偿检测 TMT 子镜仿真。(a)仿真光路;(b)波前残差;(c)多级衍射级次点列

Fig. 5 Simulation of TMT segment test using refraction and diffraction mixed compensation. (a) Layout of simulation; (b) wavefront residual error; (c) spot diagram of multiple diffraction orders

对于折衍混合补偿检测光路,去除补偿元件的透射波前误差后,检测光路像差主要由 CGH 及消球差透镜的装调误差决定。对检测光路进行公差模拟,以波像差为评价标准,判断各自由度装调公差对检测光路的波前影响。各自由度装调引入的波前误差仅以待测镜面绕轴偏转、沿检测光轴距离、待测镜母镜曲率半径进行补偿,光路灵敏度结果如表 1 所示。公差结果表明,检测光路的综合均方根波前误差为  $9.066 \text{ nm}$ ,补偿元件各自由度失调引入的波前

误差相对较小。CGH 沿检测光轴的距离偏差和消球差透镜绕  $x$ 、 $y$  轴的旋转偏差对像面彗差的影响相对较大,检测光路装调需严格保证消球差透镜的倾斜装配。

同直接应用 CGH 对 TMT 子镜进行检测相比,折衍混合补偿法通过加入消球差透镜对待测镜的光焦度进行补偿,从而减少 CGH 所需承担的光焦度,这从两种方法得到的 CGH 相位函数的 Zernike 多项式系数即可看出。图 6 给出了基于 Zernike 条纹

多项式拟合的 CGH 相位函数的前 15 项 Zernike 多项式系数,测试对象为 13.99 m 离轴量的 TMT 子镜,对相位函数进行归一化处理。可见在同样施加  $y$  方向载频(第 3 项)的情况下,CGH 主要的补偿像差项均为垂直像散项(第 5 项),不过由于折衍混合补偿法有消球差透镜承担光焦度,故 CGH 仅需补偿少量 Power 项(第 4 项),而直接补偿法中 CGH 则需要补偿更多的 Power 项。

加入消球差透镜的折衍混合补偿检测方法可应用于大口径望远镜离轴子镜的批量化检测。对于不同离轴量的子镜,只需要加工一块消球差透镜,并通过调节它们与消球差透镜之间的距离来补偿曲率偏差,根据它们相对其各自最佳拟合球面的剩余像差设计不同的 CGH 来进行补偿。所有的子镜检测具有相同的光路结构,其中 CGH 和消球差透镜位置保持不变,并通过相同的夹持装置进行定位和调整,

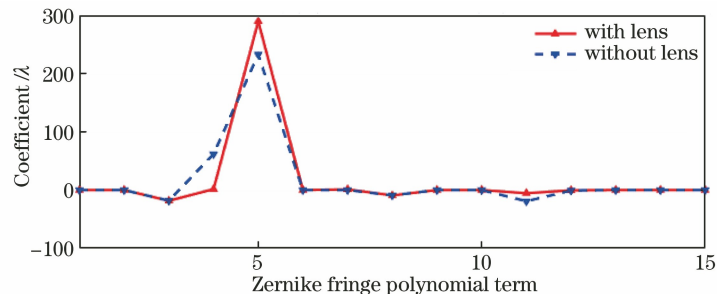


图 6 归一化的 CGH 相位函数前 15 项 Zernike 多项式系数

Fig. 6 First 15 Zernike fringe polynomial coefficients of CGH phase function after normalization

## 2.2 方法比较

同直接应用 CGH 对 TMT 子镜进行检测对比,消球差透镜的引入将检测光路从 60 m 以上缩短到了 15 m 以内。通过优化还可以进一步压缩缩焦比,这样大大降低了镜面加工检测对空间的要求。

由于离轴非球面镜面上各点的法向量均不相同,在对其进行零位检测时,不可避免地会造成投影畸变。由于弧矢方向和子午方向的曲率偏差相对更大,圆形待测镜上的光线追迹在 CGH 面上已经不再是一个圆形,通常会呈椭圆形,忽略干涉系统成像畸变,光线进入干涉仪后所得到的干涉图也近似呈椭圆形。尤其是对于 TMT 的子镜,在顶点曲率半径相同的情况下,随着离轴量的增大,离轴角也逐渐增大,畸变也更为严重。畸变是对离轴非球面进行零位检测时固有的问题,虽对检测结果并无太大影响,但在加工过程中,为了加工方便,尽量减少畸变,使得测试结果轮廓与镜面轮廓一致,同时还要对测试结果进行进一步的畸变校正。

采用相同的 CGH 辅助对准方案,可实现不同离轴量子镜的批量化检测。

表 1 折衍混合补偿检测光路的元件装调公差及波前像差变化

Table 1 Element adjustment tolerance and wavefront aberration change of testing system for refraction and diffraction mixed compensation

Element	Distance tolerance / $\mu\text{m}$	Wavefront RMS / nm	Tilt tolerance / ( $'$ )	Wavefront RMS / nm
CGH	10 ( $d_x$ )	2.210	5 (tilt $x$ )	2.192
	10 ( $d_y$ )	2.204	5 (tilt $y$ )	2.212
	50 ( $d_z$ )	4.147	100 (tilt $z$ )	2.210
Aplanatic lens	100 ( $d_x$ )	2.210	5 (tilt $x$ )	2.348
	100 ( $d_y$ )	2.304	5 (tilt $y$ )	2.330
	1000 ( $d_z$ )	2.211	100 (tilt $z$ )	2.210
Off-axis segment	100 ( $d_x$ )	2.210		
	100 ( $d_y$ )	2.210		

用折衍混合补偿检测法检测不同离轴量的 TMT 子镜,采用同一块消球差透镜作为缩焦器件,仅需根据待测镜参数对 CGH 进行更换,同时调整待测镜与消球差透镜之间的距离,即可实现离轴子镜的批量检测。通过光线追迹设计 CGH,为了尽可能满足 CGH 加工要求,所有计算均以 CGH 最大尺寸为 80 mm 左右、最大空间频率在 50 lp/mm 左右为设计目标。考虑到由离轴非球面法线追迹造成的畸变,将 CGH 面上长短轴作为畸变比率,分别采用直接补偿法和折衍混合补偿法对不同离轴量 TMT 子镜进行光线追迹得到的 CGH 面的畸变比率具体数值如表 2 所示。

部分离轴量的 TMT 子镜的 CGH 折衍混合检测方案和 CGH 直接检测方案的畸变比率变化如图 7 所示。不同方法的畸变比率随离轴量变化的曲线如图 7(a)所示,13.99 m 离轴量子镜 CGH 直接检测和折衍混合补偿检测得到的 CGH 面相位分布分别如图 7(b)和(c)所示。

表 2 CGH 折衍混合检测方法和 CGH 直接检测方法得到的不同离轴量 TMT 子镜的畸变比率

Table 2 Distortion ratio of different off-axis TMT segments obtained by CGH refraction and diffraction mixed detection method and CGH direct detection method

Off-axis distance /mm	Distortion ratio of CGH without lens	Distortion ratio of CGH with lens	Off-axis distance /mm	Distortion ratio of CGH without lens	Distortion ratio of CGH with lens
2170	1.023	1.007	8651	1.602	1.105
3313	1.059	1.017	9744	1.976	1.131
4337	1.102	1.028	10794	2.508	1.157
5006	1.138	1.037	11876	4.022	1.189
6254	1.240	1.057	12923	7.762	1.218
7499	1.384	1.081	13994	12.523	1.248

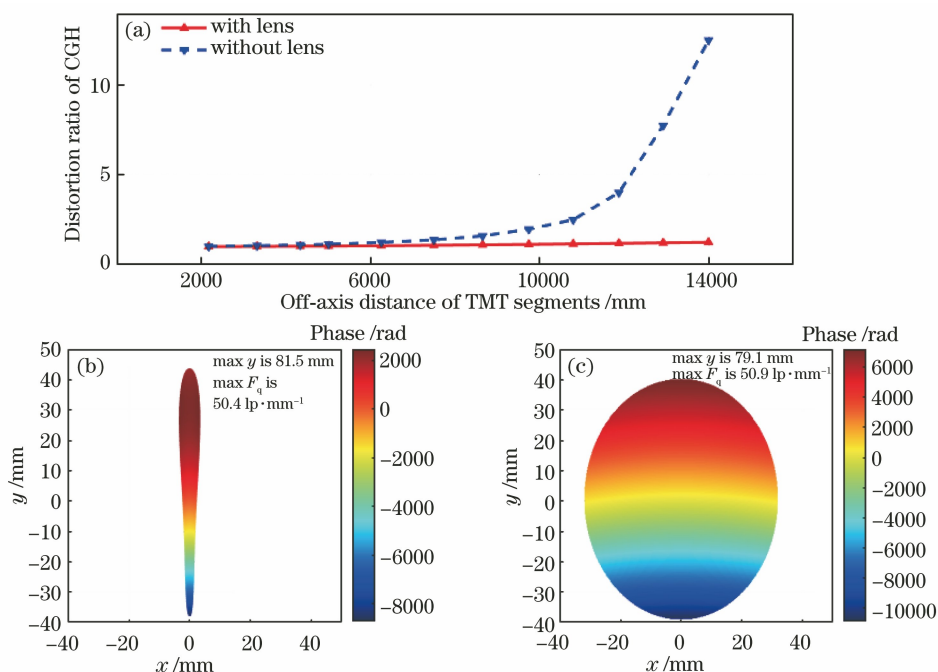


图 7 CGH 折衍混合检测方法和 CGH 直接检测方法得到的不同离轴量 TMT 子镜的畸变比率。(a)不同方法得到的畸变比率随离轴量的变化;(b) 13.99 m 离轴量 TMT 子镜直接补偿检测 CGH 相位图;(c)13.99 m 离轴量 TMT 子镜折衍混合检测 CGH 相位图

Fig. 7 Distortion ratio of different off-axis TMT segments obtained by CGH refraction and diffraction mixed detection method and CGH direct detection method. (a) Distortion ratio as a function of off-axis distance obtained by different methods; (b) phase of CGH obtained by direction compensation for 13.99 m off-axis distance TMT segment; (c) phase of CGH obtained by refraction and diffraction mixed detection for 13.99 m off-axis distance TMT segment with lens

可见,为了满足 CGH 的加工要求,在合适的尺寸和空间频率  $F_q$  的要求下,随着离轴子镜离轴量的增大,引入的畸变也越大。直接应用 CGH 对离轴子镜进行检测,畸变比率快速增加,尤其是在离轴量为 13.99 m 左右时,畸变比率已经超过 12,甚至已经无法辨识干涉图。而在折衍混合补偿检测光路中,畸变比率随着离轴量的增大缓慢增加,即使是离轴量为 14 m 左右时,畸变比率也只有 1.2,虽在加工中仍需对测量结果进行畸变校正,但在测量过程中已经可以直接判读干涉条纹。

### 2.3 对准全息设计

折衍混合补偿检测法对系统中各个器件的位置装调要求极高,尤其是 CGH 的位置装调。设计时可充分利用 CGH 器件具有分区设计、编码、制作的特点,设计不同功能的辅助对准区域,以满足各器件在光路中的定位精度要求。对 CGH 进行分区设计,在 CGH 表面完成补偿 CGH、对准 CGH 以及待测镜基准 CGH 和消球差透镜定位 CGH 的分区分布,采用的分区设计方案如图 8 所示,这里对各部分的条纹进行了相位放大处理。

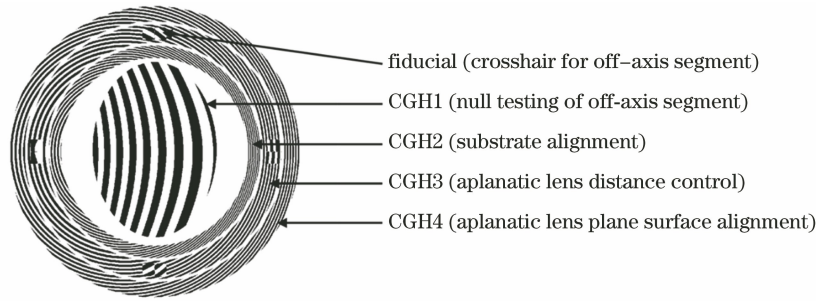


图 8 CGH 功能分布

Fig. 8 Layout of CGH

图 8 中:CGH1 为补偿检测区域,可实现离轴子镜的检测;CGH2 为 CGH 位置辅助装调区域,从干涉仪出射的光入射到该区域时会反射衍射回干涉仪;CGH3 为消球差透镜距离辅助装调区域,出射的 +1 级光聚焦至透镜后表面顶点,并按猫眼反射原理返回干涉系统;CGH4 为消球差透镜角度辅助装调区域,出射的 +1 级光为平面波,经透镜前表面反射后,原路返回干涉系统。fiducial 区域为离轴子镜定位区域,光经 4 个区域后,衍射的 +1 级光分别在离轴子镜的上下左右 4 个方向交叉投射十字叉丝,用于实现离轴子镜的距离和角度粗定位。

#### 2.4 $\Phi 330$ mm 试验镜实验

考虑到直接进行  $\Phi 1.5$  m 的 TMT 子镜加工难度和成本较大,本文拟采用一块与 TMT 子镜参数较为接近,但口径和曲率半径均只有 1/3 的离轴非球面试验镜作为测试对象,进行方案验证。该试验镜为  $\Phi 330$  mm 口径的离轴抛物面,母镜顶点曲率

半径  $R = -21000$  mm,圆锥系数  $k = -1$ ,离轴量  $b = 3600$  mm。

根据前述原理,首先设计消球差透镜,通过一个顶点曲率半径为 21600 mm 的球面反射镜对其进行标定。球面镜与消球差透镜的口径均为  $\Phi 330$  mm,厚度为 45 mm;球面镜与消球差透镜的非球面距离为 500 mm,消球差透镜平面距焦点 2000 mm。用试验镜替换球面镜,在光路中插入 CGH,根据试验镜的参数设计 CGH,CGH 面距焦点距离为 346 mm,仿真计算结果如图 9 所示。根据光线追迹得到的 CGH 相位分布如图 9(a) 所示,补偿 CGH 的有效最大尺寸为  $\Phi 58.6$  mm,畸变系数为 1.01,基本上无形状畸变,最大空间频率为 53.5 lp/mm;含辅助对准 CGH 的有效尺寸为  $\Phi 100$  mm,均满足 CGH 加工要求。正向仿真优化波前残差如图 9(b) 所示,点列图几何半径为  $0.002 \mu\text{m}$ ,波前残差 PV、RMS 接近于零。

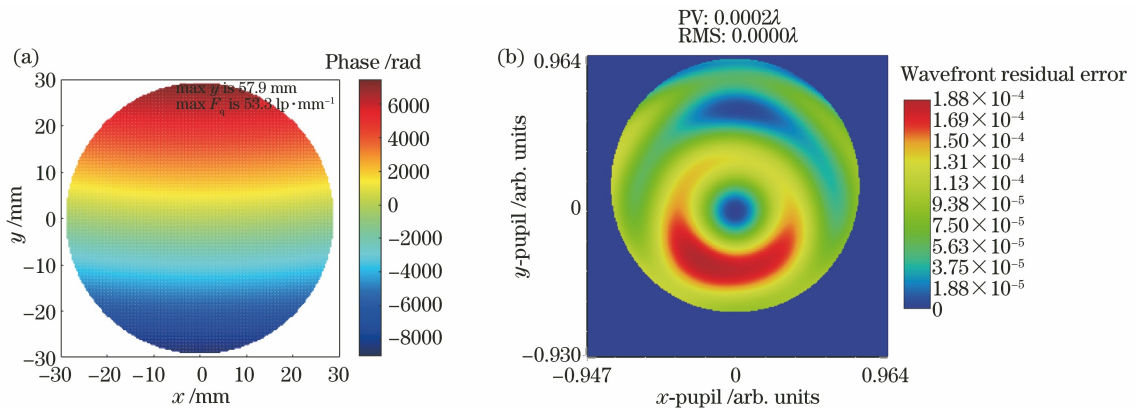


图 9 试验镜 CGH 折衍混合补偿检测仿真计算。(a) CGH 相位分布;(b) 波前残差

Fig. 9 Simulation of trial CGH refraction and diffraction mixed compensation.

(a) Phase distribution of CGH; (b) wavefront residual error

在 4D 动态干涉仪上搭建如图 3 所示的实验光路,试验镜折衍混合补偿检测的实际测试光路如图 10 所示。为实现 CGH 方向和试验镜离轴方向的匹配,CGH 和试验镜装调机构均可实现 6 维调节。屏

幕上的干涉图中各区域条纹分别对应图 8 所示的 CGH 功能区域。

试验镜折衍混合补偿检测测试结果如图 11 所示。图 11(a)为测试干涉图,图 11(b)为测试结果面



图 10 试验镜 CGH 折衍混合补偿检测的实际测试光路

Fig. 10 Actual test optical path of CGH refraction and diffraction mixed compensation of trial mirror

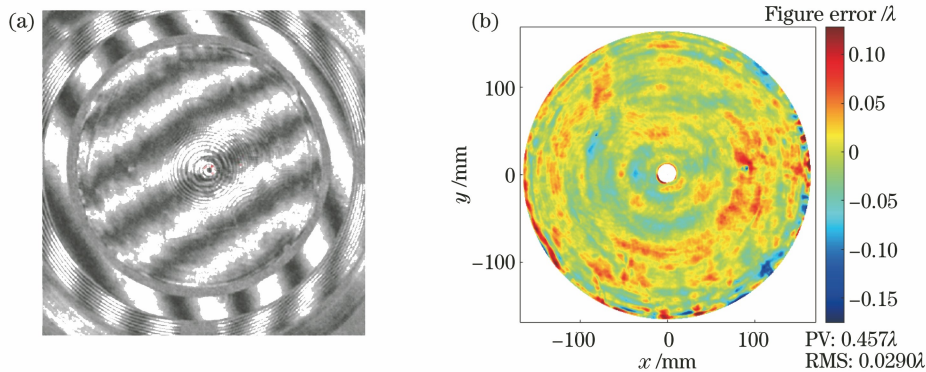


图 11 试验镜 CGH 折衍混合补偿检测的测试结果。(a)干涉图;(b)面形测试结果

Fig. 11 Test results of CGH refraction and diffraction mixed compensation of trial mirror.

(a) Interferogram; (b) surface test result

形图, PV 为  $0.457\lambda$ , RMS 为  $0.0290\lambda$ 。

### 3 分析与讨论

折衍混合补偿检测法可有效缩短测试光路的总长。 $\Phi 330$  mm 试验镜的测试结果显示, 加入消球差透镜补偿以后, 折衍混合补偿检测光路的总长约 2.7 m。相比之下, 直接应用 CGH 对试验镜进行检测的光路总长约 22 m, 光路长度缩短到原长度的  $1/8$ 。

折衍混合补偿检测法可有效降低待测离轴子镜零位检测中的畸变比率。检测试验镜时, 畸变比率只有 1.01, 无明显的形状畸变, 这对加工和检测都非常有利。而直接应用 CGH 对试验镜进行零位检测时, 畸变比率为 1.21, 畸变呈现出明显的椭圆状。在 2.2 节的讨论中, 随着离轴量的增大, TMT 最外围子镜在直接应用 CGH 进行检测时, 畸变比率甚至达到了 12.5 以上, 已经无法用于检测; 而折衍混合补偿法则仍保证有 1.25 的畸变比率。中国计划加工的最外围 TMT 子镜是无法直接用 CGH 进行检测的, 只能用折衍混合补偿法。

试验镜和 TMT 子镜的口径与顶点曲率半径相差甚远, 顶点曲率半径与口径之比都在 40 以上, 焦

比非常小。直接应用 CGH 检测时, 装调不敏感, 微小的失调量都需要很大的调节行程, 这极大地增加了装调难度和装夹机构设计难度。应用折衍混合补偿检测时, 发散光线快速收敛, 焦比已经达到  $F/5$  左右, CGH 和消球差透镜处于合适的装调敏感度。

消球差透镜加工过程中不可避免地引入误差, 测量结果中还包含消球差透镜的加工误差以及干涉系统误差。可通过标准球面对测量结果进行系统误差标定, 将消球差透镜引入的系统误差去除。图 12(a) 为试验镜折衍混合补偿检测中用到的消球差透镜的系统波前误差, 其 PV 为  $0.171\lambda$ , RMS 为  $0.0176\lambda$ ; 图 12(b) 为经过标定后的试验镜面形分布, PV 为  $0.412\lambda$ , RMS 为  $0.0267\lambda$ 。

CGH 折衍混合补偿检测离轴非球面引入的误差主要由 CGH 设计与加工误差、消球差透镜加工误差、装调误差等组成, 其中 CGH 设计与加工误差包括设计误差、图形刻写误差、基底误差、编码误差等, 各项误差分布及合成的总系统误差见表 3。

CGH 加工过程中不可避免地引入图形刻写偏差, 出射波前的局部相位偏差  $W_{PE}$  与偏差量  $\zeta(x, y)$ 、工作波长  $\lambda$ 、衍射级次  $m$  及局部空间频率  $\nu(x, y)$ <sup>[21]</sup> 的关系满足



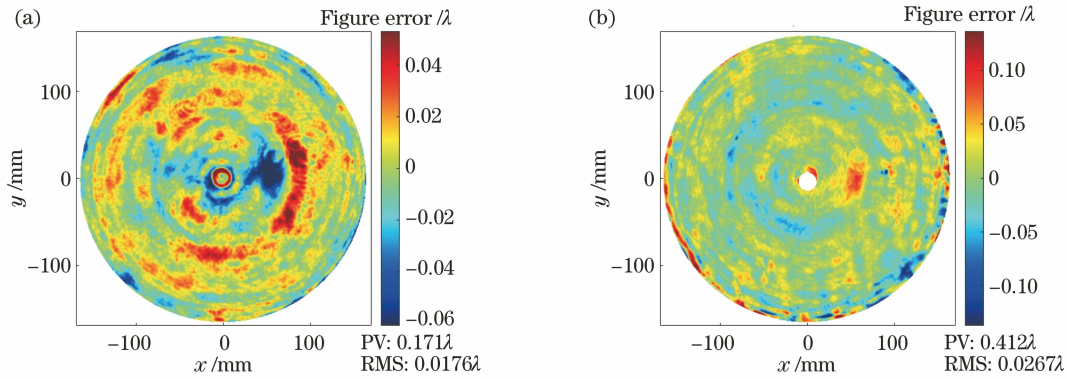


图 12 试验镜测试结果标定。(a)消球差透镜误差标定;(b)标定后试验镜面形测试结果

Fig. 12 Test result calibration of trial mirror. (a) Error calibration of aplanatic lens; (b) surface test result of trial mirror after calibration

$$W_{PE} = -m\lambda\zeta(x, y)v(x, y). \quad (1)$$

CGH 加工设备的定位精度为  $0.1 \mu\text{m}$ , 本文加工的 CGH 工作在 +1 级次, 最大空间频率约为  $53 \text{ lp/mm}$ , 由此引入的图形刻写误差为  $0.005\lambda$ 。

在对 CGH 相位面的编码过程中, 需要对相位函数进行二量化并进行分块拟合, 拟合过程中会造成位置的偏离, 引起的相位偏差如式(1)所示。本文 CGH 在设计过程中引入的最大编码偏差约为  $0.06 \mu\text{m}$ , 由此引入的编码误差为  $0.006\lambda$ 。

CGH 和消球差透镜主要通过 CGH 面上的辅助对准区域进行定位调整, 如调节 CGH 位置使得对准区域只有 1~2 根条纹, 通过仿真可以得到其产生的误差约为  $0.01\lambda$ 。

包含消球差透镜在内的干涉仪系统误差如前所述, RMS 为  $0.0176\lambda$ , 故经过均方根合成后的折衍混合补偿检测系统误差为  $0.0107\lambda$ 。

相比于直接用 CGH 进行补偿检测, 折衍混合补偿检测增加了消球差透镜, 进而引入了额外的包含消球差透镜加工误差在内的系统误差, 检测精度有所下降。不过消球差透镜的加入主要是为了解决长焦距离轴非球面检测场地受限的问题, 从而使得其加工和检测成为可能, 为此牺牲了一定的检测精度, 但结果满足加工要求。

表 3 试验镜折衍混合补偿检测误差

Table 3 Error of trial mirror test using refraction and diffraction mixed compensation

Error type	RMS error
CGH patterning error	$0.005\lambda$
CGH substrate shape	$0.005\lambda$
CGH encoding error	$0.006\lambda$
Wavefront of aplanatic lens	$0.0176\lambda$
Adjustment error	$0.01\lambda$
Total error	$0.0107\lambda$

试验镜为离轴抛物面, 在加工检测过程中, 也常采用自准直法对其进行检测。自准直法虽然不是零位检测, 不过试验镜离轴角比较小, 也可以近似为零位检测。图 13 即为  $\Phi 300 \text{ mm}$  试验镜应用自准直法得到的测量结果, 其 PV 为  $0.545\lambda$ , RMS 为  $0.0226\lambda$ 。

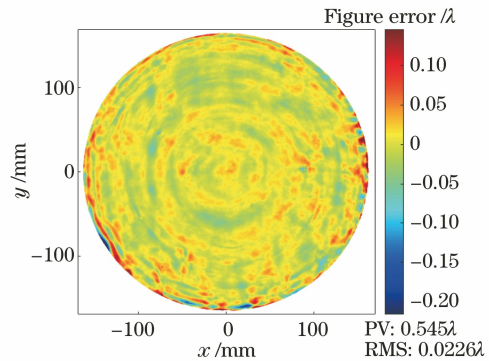


图 13 试验镜 CGH 自准直法测试结果

Fig. 13 Test result of trial mirror CGH autocollimation method

自准直法中只有平面镜和待测镜两个器件, 且经过了二次反射, 对平面镜面形要求低, 因此相对精度也较高。同自准直法的检测结果相比, 图 12(b) 的检测结果偏差在  $4/1000$  波长, 相对偏差较小, 且细节基本一致, 可见结果可信。相对于自准直法的检测光路长度约  $12 \text{ m}$ , 折衍混合补偿法的光路长度只有  $2.7 \text{ m}$ , 大大降低了对场地的要求。

## 4 结 论

当前大口径天文望远镜, 如 TMT, 常采用拼接式主镜结构, 离轴子镜数量多, 结构相似, 同时焦距长, 焦比小, 直接对其进行零位检测对场地空间环境要求高。通过上述分析研究, 针对大口径离轴子镜

检测过程中存在的检测光路长、畸变严重、装调不敏感的问题,提出一种基于 CGH 的折衍混合补偿检测方案,通过在传统 CGH 零位检测中增加一块消球差透镜构成折衍混合检测。通过消球差透镜实现检测光路的缩焦,通过计算全息片实现子镜的零位补偿检测。消球差透镜出射波前为与待测非球面子镜中心曲率半径相近的球面波前,可以补偿离轴子镜的离焦量,引入消球差透镜后可以将检测光路总长降至直接进行 CGH 检测时的  $1/4 \sim 1/8$ ;同时,折衍混合补偿检测可以有效减小由待测离轴非球面法向量不一致造成的干涉图畸变,TMT 最外围的离轴子镜畸变比率可由 12.5 降至 1.25,只有 CGH 直接检测的  $1/10$ ,从而使得加工与检测成为可能。通过标准球面反射镜可对消球差透镜和干涉系统误差进行标定,进一步提高待测件的检测精度,对一个  $\Phi 330$  mm 试验镜的折衍混合补偿检测结果进行标定,测试结果中的 RMS 值由  $0.0290\lambda$  降至  $0.0267\lambda$ 。单独为一块离轴非球面镜加工尺寸相近的消球差透镜和标准球面镜会大幅度提升加工成本,得不偿失。不过大口径天文望远镜的拼接式主镜的每类子镜都需要 6 块以上,而且不同的离轴子镜具有相同的外形尺寸、相近的中心曲率半径,这样几十块子镜可以使用同一套消球差透镜和标准球面镜实现折衍混合补偿检测。检测中各器件采用相同的装夹机构,保持 CGH 和透镜位置不动,更换待测离轴子镜后,仅需通过更换相应的计算全息片即可实现各离轴子镜的批量高效检测。这样消球差透镜和标准球面镜的加工成本会分摊到每一块子镜上,从而节省成本。这个方法可用于 TMT 离轴子镜的加工中,也可以应用在未来的 LOT 离轴子镜的加工中。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Prabaha P, Radhakrishnan N. Thirty meter telescope (TMT) research as reflected in web of science: a study [EB/OL]. (2022-01-19) [2022-01-06]. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0194262X.2021.2018634>.
- [3] Tamai R, Spyromilio J. European extremely large telescope: progress report [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9145: 91451E.
- [4] Su D Q, Liang M, Yuan X Y, et al. A suggested 12-m telescope optical system configuration for China [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 460(2): 2286-2295.
- [5] Beverage J, Burge J H, Blanchard J, et al. Interferometric metrology for the TMT primary mirror segments: design and analysis [C] // Optical Design and Fabrication 2019 (Freeform, OFT), October 10-12, 2019, Washington, DC. Washington, D.C.: OSA, 2019: OM3A.5.
- [6] 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.
- [7] Burge J H. Efficient testing of off-axis aspheres with test plates and computer-generated holograms [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3782: 348-357.
- [8] 贾文昕, 韩森, 张凌华, 等. 离轴椭圆柱面镜测量方法及调整误差分析 [J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2012004.  
Jia W X, Han S, Zhang L H, et al. Measurement method and alignment error analysis of off-axis elliptical cylindrical mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2012004.
- [9] 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.
- [10] 任王涛, 徐洪艳. 逆向迭代离轴非球面检测方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 212301.  
Ren W T, Xu H Y. Method of inverse iteration off-axis aspheric surface detection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 212301.
- [11] 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.
- [12] 张学敏, 魏儒义, 于涛, 等. 一种实现离轴非球面反射镜离轴量和离轴角精确测量的方法 [J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416001.  
Zhang X M, Wei R Y, Yu T, et al. A method to measure off-axis fabrication and off-axis angle of axis aspheric mirror precisely [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0416001.
- [13] 姜自波, 李新南, 季波. 空气垂直温度梯度对长焦镜面检测精度的影响分析 [J]. 光学学报, 2015, 35

- (10): 1012004.  
Jiang Z B, Li X N, Ji B. Influence analysis of testing accuracy for long focal length mirror by vertical temperature gradient of air[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1012004.
- [14] 赵础鑫, 胡明勇, 张少伟, 等. 大口径高次非球面补偿检测方法的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 072203.  
Zhao C C, Hu M Y, Zhang S W, et al. Research on compensation testing method for large-aperture and high-order aspheric surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 072203.
- [15] 梁子健, 杨甬英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 1-26.  
Liang Z J, Yang Y Y, Zhao H Y, et al. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 1-26.
- [16] Burge J H, Zhao C Y, Dubin M. Measurement of aspheric mirror segments using Fizeau interferometry with CGH correction [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7739: 773902.
- [17] 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 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5869: 586911.
- [18] Li S J, Zhang J, Liu W G, et al. Measurement investigation of an off-axis aspheric surface via a hybrid compensation method [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(28): 8220-8227.
- [19] Li S J, Zhang J, Liu W G, et al. The methods and experiments of shape measurement for off-axis conic aspheric surface [J]. *Materials*, 2020, 13(9): 2101.
- [20] 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.
- [21] Gan Z H, Peng X Q, Chen S Y, et al. Evaluation of wavefront errors introduced by pattern distortion of computer-generated holograms [J]. *Optik*, 2019, 185: 699-706.