

倾斜计算全息板标定补偿器误差

朱德燕^{1,2} 李明^{1,2} 薛栋林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 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 为了标定利用补偿器检测非球面的精度, 提出采用倾斜计算全息法(CGH)校验补偿器, 并将补偿器精度提高。介绍补偿器检测离轴非球面基本原理, 同时结合工程实例, 设计补偿器检测 860 mm×600 mm 的离轴高次非球面, 通过加工与装配, 仿真分析出装配后的补偿器精度为 2.91 nm [均方根(RMS)值]。设计了利用倾斜式的计算全息板检测该补偿器的实验, 并分析出利用该 CGH 校验补偿器的精度为 1.79 nm(RMS 值)。结果表明, 受限于补偿器光学元件加工和组装精度, 其检测精度未知, 通过对补偿器误差进行检测与标定, 可以确定利用该补偿器检测非球面的可行性并将其精度提高。

关键词 测量; 计算全息法; 补偿器; 离轴非球面; 光学检测; 精度分析

中图分类号 O439;O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0412001

Absolute Testing of Null Lens Errors with Tilted Computer-Generated-Hologram

Zhu Deyan^{1,2} Li Ming^{1,2} Xue Donglin¹ Zhang Xuejun¹

¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract Aspheric surface testing always needs null lens, but the accuracy of the null lens are decided by the optical elements and the assemblage, and the accuracy and the feasibility of the null lens are unknown, and most of null lens need to be calibrated by tilted computer-generated-hologram (CGH). We introduce the principle of the null lens, and designe null lens to test aspherical surface, getting the simulation accuracy of the null lens which is 2.91 nm [root mean square (RMS)], and then design CGH to calibrate the null lens. Our initial results show that the accuracy of null lens is limited by the accuracy of optical elements and the assemblage. The simulation accuracy of null lens is 2.91 nm (RMS) and the actual accuracy is unknown. Though the calibrating of null lens, we can test the aspheric surface to 1.79 nm (RMS) surface errors, and also make sure the accuracy of null lens to test aspheric surface.

Key words measurement; computer-generated-hologram; null lens; off-axis aspheric surface; optical testing; accuracy analysis

OCIS codes 120.3940; 120.3180

1 引言

由于非球面光学元件可以在不增加独立像差的情况下, 降低光学系统的复杂性, 提高光学系统的成像质量。因此, 随着光学加工和检测技术的发展, 光学系统中越来越多地采用非球面, 人们对大口径高陡度离

收稿日期: 2014-10-11; 收到修改稿日期: 2014-11-11

基金项目: 国家 973 计划(2011CB013205)、国家自然科学基金(61210015)

作者简介: 朱德燕(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: zhedy@yahoo.cn

导师简介: 张学军(1968—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事先进光学制造技术等方面的研究。

E-mail: zhangxj@ciomp.ac.cn

轴非球面精度要求越来越高,高精度的非球面光学检测成为当前的热点和难点^[1-4]。

离轴非球面的常用检测方法有:轮廓检测法、子孔径拼接、无像差点法、补偿器、计算全息法(CGH)^[5-6]。在非球面的抛光阶段一般采用干涉检验的方法,非球面的干涉检验一般都需要补偿器,但是补偿器的精度受限于补偿器组成中的各个光学元件加工精度和组装精度,为了避免因为哈勃望远镜主镜和欧洲南方天文台新技术望远镜(NTT)主镜的补偿器误差而导致的巨大经济损失,需要采用其他的方法对补偿器进行误差标定以验证利用该补偿器检测非球面的可行性^[7-9]。

CGH检测技术于20世纪70年代提出的。随着光刻技术的发展,CGH技术逐渐成为一种成熟的高精度光学检测技术,CGH可以用来产生任何需要的波前,高精度的CGH干涉检验需要对CGH误差进行分析标定。从20世纪90年代至今,Burge等^[10]利用CGH成功检测巨型麦哲伦望远镜GMT主镜等超大口径非球面。Arizona光学中心Zhou等^[6]提出将CGH的制作误差分为两个部分:CGH刻画畸变和刻画参数误差,并分析了该实验室所采用的CGH制造误差。Arizona光学中心Zhao等^[11]结合Zhou等的工作将CGH基板误差标定并分离,采用该方法将CGH提高到优于6 nm的精度。Burge^[12]提出利用反射式CGH标定补偿器以防出现由于补偿器误差导致的巨大经济损失,随后一直采用该方法标定补偿器,但是该方法由于CGH基板前后干涉影响,使得衍射级次分离困难,中心区域的补偿器误差不能检测。

目前国内非球面的干涉检验均采用补偿器,但更重要的对补偿器的可行性检测以及补偿器的标定工作一直未曾展开。本文介绍了补偿器检测非球面的基本原理,并利用干涉仪实际测量补偿器中各透镜面形,再利用Zemax理论分析出该补偿器装配后精度。同时介绍CGH的基本理论,并根据其理论合理设计出倾斜式的CGH来标定该补偿器,分析出该CGH精度并得到整个补偿器的误差。

2 CGH检测补偿器

2.1 补偿器基本原理及精度分析

离轴非球面的光学检测一般常用补偿器,其基本组成为光学玻璃元件。原理是根据非球面光学参数,设计并制造补偿器,使得经干涉仪出来的平面或者球面波前转化为非球面波前与被检镜干涉检验。在补偿器检验时,光源可采用平行光或者会聚光。采用会聚光在检验时会给调整带来很大困难,使得干涉仪和补偿器位置对准困难;而使用平行光时,干涉仪和补偿器对准容易,但是为了实现全口径检测,透镜系统的通光口径必须小于干涉仪标准镜头的有效口径。因此,一般采用平行光光源设计补偿器。设计完补偿器后,加工出补偿器中各玻璃元件,再将其组装起来,形成整个补偿器。

结合工程实例,针对实验室某在研离轴非球面,该非球面参数如表1所示,设计了如图1所示的补偿器,利用干涉仪对补偿器每个透镜的每个面进行检测。根据装配补偿器能达到的装配精度以及补偿器中透镜面形,代入Zemax中,得到该补偿器最后仿真精度为2.91 nm[均方根(RMS)值]如图2所示。

表1 离轴非球面参数

Table 1 Parameter of the off-axis aspheric surface

Parameter	Value
Radius of curvature R /mm	3753.715
Conic constant K	-3.5
4 order constant A_4	-3.28×10^{-12}
6 order constant A_6	-1.19×10^{-19}
R_{x1} /mm	842/2
R_{x2} /mm	624/2
X axis decenter /mm	0
Y axis decenter /mm	334.5

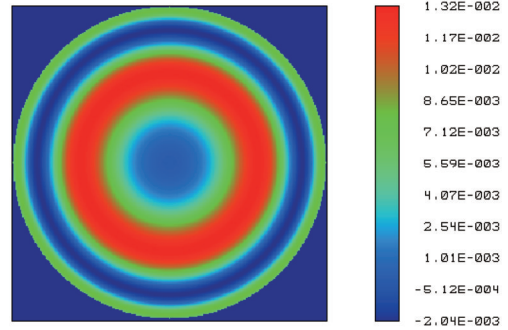
在实际检测非球面时,需要将补偿器与干涉仪对准,检测时在补偿器后放置玻璃平板,以便于补偿器与干涉仪对准,其光路如图3所示,由于此对准依赖于补偿器端面的平行度,因此该补偿器实际精度未知。

2.2 CGH检测补偿器设计

Surf.Type	Comment	Radius	Thickness	Glass
OBJ	Standard	Infinity	Infinity	
STO	Standard	-57.230000	21.449000	K9-194-NNN
2	Standard	-57.980000	180.667649	
3	Standard	-460.000000	18.361000	K9-ZZY-25B
4	Standard	-146.980000	8997.489341	
5	Even Asph...	-8708.23318	-8997.48934	MIRROR
6	Standard	-146.980000	-18.361000	K9-ZZY-25B P
7	Standard	-460.000000	-180.667649	
8	Standard	-57.980000	-21.449000	K9-194-NNN P
9	Standard	-57.230000	-100.000000	
10	Paraxial		-100.000000	
IMA	Standard	Infinity	-	

图1 检测非球面的补偿器

Fig.1 Null lens to test aspheric surface



WAVEFRONT FUNCTION
 LENS HAS NO TITLE.
 THU NOV 20 2014
 0.6328 AA RT 0.0000 DEG
 PEAK TO VALLEY = 0.8153 WAVES, RMS = 0.0049 WAVES.

图2 补偿器检测非球面设计结果

Fig.2 Testing result of the aspheric surface by the null lens

作为一种衍射补偿元件,CGH从刻蚀方式上可以分为振幅型和相位型。振幅型CGH的加工是先在基板上镀上大约100 nm厚的铬层薄膜,再涂上均匀的光刻胶,激光直写出设计的图案到光刻胶上,得到高精度振

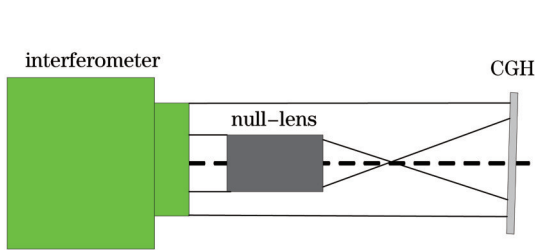


图3 CGH校验补偿器光路

Fig.3 Optical layout for testing null lens by CGH

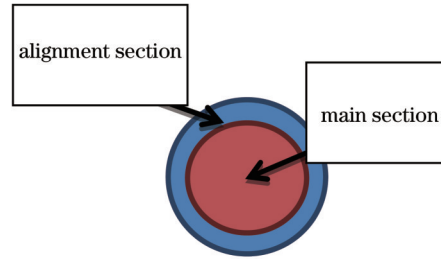
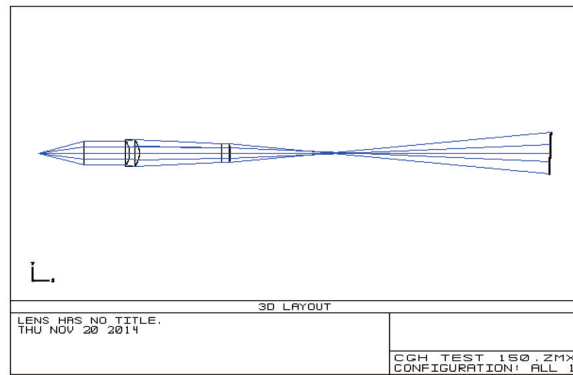


图4 校验补偿器的CGH

Fig.4 CGH used to test null lens



Surf.Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000000
STO	Standard	-57.230000	21.449000	K9-194-NNN	30.000000
2	Standard	-57.980000	180.667649		33.824478
3	Standard	-460.000000	18.361000	K9-ZZY-25B	24.146421
4	Standard	-146.980000	700.000000		23.882676
5	Coordinat..	Element Tilt	0.000000	-	0.000000
6	Zernike F..	Infinity	0.000000	MIRROR	53.579170
7	Coordinat..	Element Tilt	-700.000000	P	0.000000
8	Standard	-146.980000	-18.361000	K9-ZZY-25B P	23.895858
9	Standard	-460.000000	-180.667649	P	24.159231
10	Standard	-57.980000	-21.449000	K9-194-NNN P	33.834452
11	Standard	-57.230000	-100.000000		30.008374
12	Paraxial		-100.000000		30.003435
IMA	Standard	Infinity	-		0.011877

图5 CGH校验补偿器

Fig.5 Testing of the null lens by CGH

幅型CGH。相位型CGH的加工和振幅型CGH的区别为是否镀膜,相位型CGH直接在基板上涂上光刻胶,激光直写刻蚀出设计的图案,然后进行离子刻蚀将图案转移到CGH基板上。相位型CGH衍射效率高于振幅型,但是它需要在振幅型的基础上进行离子刻蚀,工艺复杂而且制造误差增多。由于振幅型CGH误差相对相位型CGH工艺简单,误差源少。因此,本文针对补偿器设计采用振幅型CGH。

由于未经倾斜的CGH前后面会互相干涉,使得衍射级次不能分离,中心区域的补偿器不能被检测。因此,针对该补偿器,设计了如图3所示的校验补偿器光路,其中CGH为振幅型CGH,该CGH分为两个区域如图4所示,主区域是为了将干涉仪出来的平面波通过补偿器再通过CGH,利用CGH主区域校验该补偿器,其设计结果,如图5所示。在设计时,CGH作为衍射元件,将CGH镀膜面设定为mirror如图5所示,Zemax中由Zernike Fringe Phase表示,首先将CGH面倾斜 2° ,如图5中的Element Tilt所示,再利用Zernike系数的前37项作为变量,优化该变量,使得残差最小,优化后的设计残差如图6所示。对准区域是为了实现该干涉仪与CGH的对准,干涉仪出来的平面波不通过补偿器直接到达CGH以确定该CGH位置,其设计光路如图7所示。CGH对准区域的优化思路与主区域相同,首先将CGH镀膜面设定为mirror,利用Element Tilt将其倾斜 2° ,再利用Zernike系数的前37项作为变量,优化该变量,使得残差为零。由于CGH的对准区域是光束不能通过补偿器而直接到达CGH,所以CGH对准区域到光轴的距离必须大于补偿器半径,CGH的口径也就必须

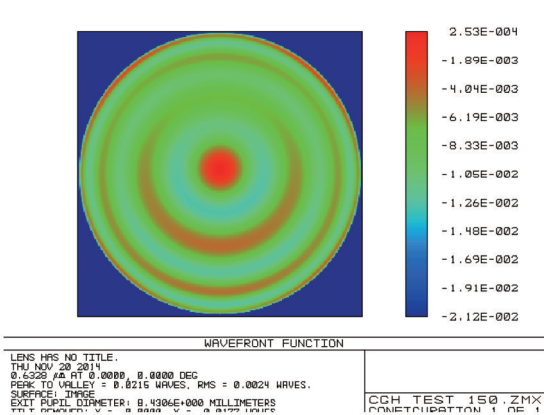


图6 CGH校验补偿器设计残差

Fig.6 Design result of the null lens tested by CGH

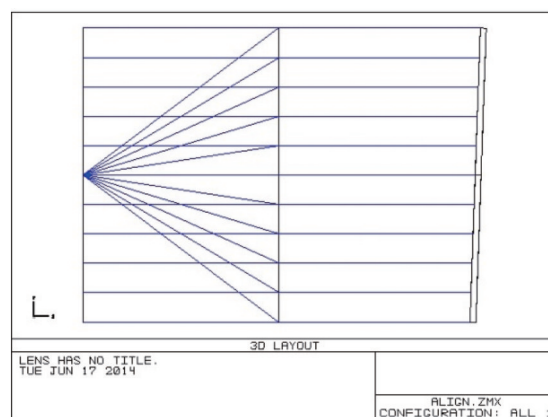


图7 CGH对准区域光路

Fig.7 Layout of the CGH alignment section

大于补偿器的口径。

2.3 CGH误差分析

CGH误差包括拟合残差、编码误差、基板误差、刻画畸变、占空比误差、相位函数误差、振幅误差。由于振幅型CGH占空比误差、相位函数误差和振幅误差为零,因此本实验采用的CGH只有拟合残差、编码误差、基板误差和刻画畸变。

2.3.1 拟合残差

根据设计CGH标定补偿器仿真结果如图6所示可知,该CGH拟合残差为1.52 nm (RMS)。

2.3.2 编码误差

CGH的编码误差由(1)式所示^[5-7]:

$$E_{\text{encoding}} = \frac{2\sqrt{5}}{15} \cdot \frac{l^2}{8r} \cdot Q \cdot \lambda, \quad (1)$$

式中 l 为编码步长, r 为CGH的曲率半径, Q 为CGH条纹密度, λ 为光波波长,如无特殊说明,本实验中采用的光波波长均为632.8 nm。

由CGH设计结果: $l=1$ mm, $r=13$ mm, $Q=75$ lp/mm,代入(1)式可以得到:检测中的编码误差为0.57 nm (RMS)。

2.3.3 基板误差

基板误差可由(2)式得到^[11]:

$$\Delta W = \sqrt{\varepsilon_{\text{substrate}}^2 + \varepsilon_{\text{pixel}}^2} \cdot \frac{S_y}{2}, \quad (2)$$

式中 S_x, S_y 分别表示基板面形误差中的 X 方向和 Y 方向斜率, $\varepsilon_{\text{substrate}}$ 表示基板面形误差, $\varepsilon_{\text{pixel}}$ 表示检测基板面形时由于干涉仪像元尺寸不是理论上的无穷小而产生的误差, 等于干涉仪中采用的 CCD 的一个像素尺寸大小。若 t 表示基板厚度, n 表示基板反射率, F 表示用于检测 CGH 中的干涉仪标准镜 F 数, 则

$$\varepsilon_{\text{substrate}} = \frac{t}{6nF}, \quad (3)$$

由设计结果: $F = 3.3, n = 1.52, t = 8 \text{ mm}, \varepsilon_{\text{substrate}} = 0.27 \text{ mm}, \varepsilon_{\text{pixel}} = 0.18 \text{ mm}, S_x = 2.6, S_y = 1.4$, 因此基板误差为 $\sqrt{0.27^2 + 0.18^2} \times \frac{2.6 + 1.4}{2} = 0.65 \text{ nm (RMS)}$ 。

2.3.4 刻画畸变

刻画畸变即由现有的工艺水平导致的误差。若 (x, y) 处误差为 $\varepsilon(x, y)$, CGH 条纹间隔为 $S(x, y)$, 则^[9-11]

$$\Delta W(x, y) = -m\lambda \frac{\varepsilon(x, y)}{S(x, y)}, \quad (4)$$

式中 $\Delta W(x, y)$ 表示由于刻画误差导致的波前误差, m 表示衍射级次, 本实验室激光直写机直写精度为 50 nm , 即 $\varepsilon(x, y) = 50 \text{ nm}$,

$$Q = 75 \text{ lp/mm}, S(x, y) = 1/Q, \quad (5)$$

$$\Delta W = -632.8 \text{ nm} \times 50 \text{ nm}/75 \text{ mm} = -0.42 \text{ nm}, \quad (6)$$

因此刻画畸变为 0.42 nm (RMS) 。

2.3.5 CGH 总波前误差

根据分析可以得到用于标定的 CGH 精度如表 2 所示。

表 2 CGH 总波前误差

Table 2 Total RMS wavefront errors of CGH

Errors of CGH	Value
Design errors /nm	1.52
Encoding errors /nm	0.57
Substrate errors /nm	0.65
Pattern distortion /nm	0.42
Root-sun square /nm	1.79

该 CGH 精度优于补偿器装配后仿真精度, 因此可用该 CGH 对补偿器进行校验。

2.4 CGH 检测补偿器实验

根据设计方案, 进行校验实验, 首先将干涉仪放置在气浮平台上, 用夹具固定并将整个夹具和补偿器放在六维调整架上固定, 干涉仪与补偿器粗调位置如图 8 所示, 其中减光板为减去干涉仪中光强, 产生干涉。

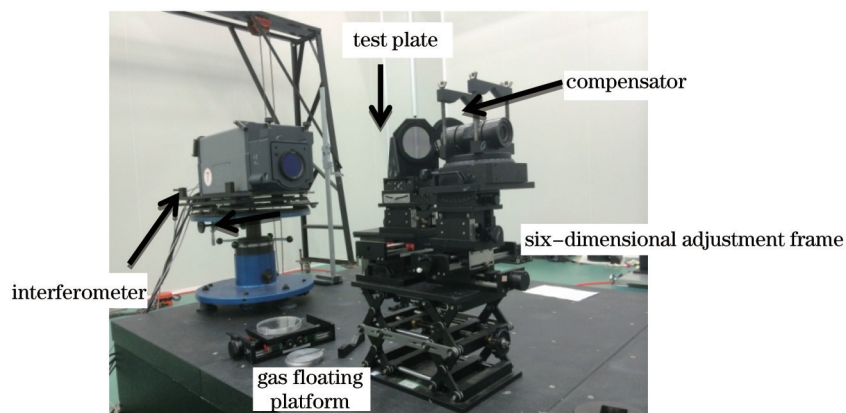


图 8 实验中干涉仪与补偿器

Fig.8 Interferometer and null lens in testing

最后用另一个夹具固定 CGH 并将整个夹具和 CGH 放在另一个六维调整架上,如图 9 所示,然后进行检测实验,其步骤为:

1) 调整干涉仪至自准直:将干涉仪调为 Align 模式,并将调整干涉仪的俯仰扭摆方向,直至显示屏中光斑最小至十字线中间区域。

2) 对准干涉仪与补偿器:按照设计参数,利用卷尺,粗调补偿器的位置,使得补偿器大致与干涉仪对准,再在补偿器端面放置精度优于 0.11 的玻璃平板,精调补偿器下方的六维调整架的 6 个自由度,直到干涉图实现零条纹。

3) 对准 CGH 与干涉仪:按照设计参数,利用卷尺,粗调 CGH 的位置,使得 CGH 与干涉仪位置大致对准,再精调 CGH 下六维调整架的 6 个自由度,至对准区域实现零条纹。

按照上述步骤调整好干涉仪、补偿器与 CGH 位置后,进行测量,得到 CGH 主区域检测的结果如图 10 所示,该补偿器精度为 5.06 nm(RMS)。

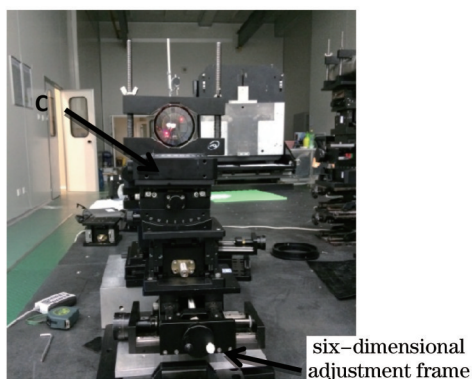


图 9 实验中 CGH 和六维调整架

Fig.9 CGH in testing and six-dimensional adjustment frame

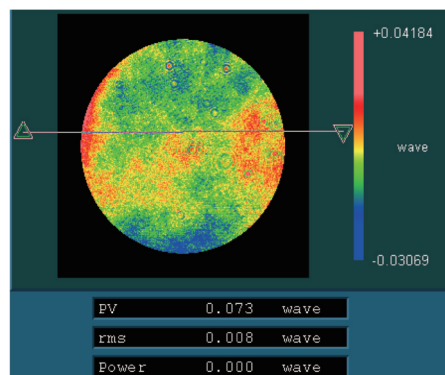


图 10 CGH 主区域检测补偿器结果

Fig.10 Testing result of the null lens by CGH main section

实际利用补偿器检测非球面时,为了满足系统要求,一般要求非球面加工精度达到 12.66 nm(RMS),因此该补偿器精度高于加工精度,能够用于非球面检测。

3 结 论

为了校验非球面干涉检测中所需的补偿器精度,提出了利用倾斜式 CGH 标定该补偿器的方法,并结合工程实例,设计用于检测某离轴非球面的补偿器,通过实验与仿真结合的方式得到该补偿器的设计精度,设计了倾斜 CGH 标定补偿器检测实验,同时通过数学计算和实验验证对 CGH 设计加工精度进行了分析,实验中对补偿器补偿精度进行了检测及标定,验证了利用该补偿器检测非球面的可行性,并将补偿器精度提高到 1.79 nm (RMS)。

参 考 文 献

- 1 D Malacara. Optical Shop Testing [M]. Wiley Series in Pure and Applied Optics, 1991. 486-496.
- 2 Li Fazhi, Zheng Ligong, Yan Feng, *et al.*. Optical testing method and its experiment on freedom surface with computer-generated-hologram [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 1052-1056.
黎发志, 郑立功, 闫 锋, 等. 自由曲面的 CGH 光学检测方法与实验[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1052-1056.
- 3 Gao Songtao, Sui Yongxin, Yang Huaijiang. High precise testing of asphere with computer-generated-hologram and error evaluation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 6(33): 0612003.
高松涛, 隋永新, 杨怀江. 用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612003.
- 4 Ren Jianfeng, Guo Peiji. Design of original structure of illuminating system with off-axis convex aspherical lens testing system with computer-generated-hologram [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 32(2): 0222005.
任建锋, 郭培基. 计算全息法检测离轴凸非球面照明镜组初始结构设计[J]. 光学学报, 2013, 32(2): 0222005.
- 5 Wang Xiaopeng, Gao Zhishan, Ma Jun, *et al.*. Investigation of measurement uncertainty of aspheric surface based on null-computer-generated holography [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112003.

- 王小鹏, 高志山, 马 骏, 等. 非球面测量中零位计算全息测量不确定度分析研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112003.
- 6 Ping Zhou, Jim Burge. Fabrication error analysis and experimental demonstration for computer-generated holograms [J]. Appl Opt, 2007, 46(5): 657-663.
- 7 L Allen, J R P Angel, J D Mongus, *et al.*. The Hubble Space Telescope Opticalsystems Failure Report [R]. Washington: NASA Report, 1990.
- 8 R N Wilson, F Franza, L Noethe, *et al.*. Active optics IV. Set up and performance of the optics of the ESO New technology telescope (NiT) in the observatory [J]. J Mod Opt, 1991, 38(2): 219-243.
- 9 Ping Zhou. Error Analysis and Data Reduction for Interferometric Surface Measurements [D]. Tucson: University of Arizona, 2009. 135-179.
- 10 Jim H Burge, L B Kot, H M Martrin, *et al.*. Design and analysis for interferometric measurements of the GMT primary mirror segments [C]. SPIE, 2006, 6273: 62730M.
- 11 Chunyu Zhao, Jim H Burge. Optical testing with computer generated holograms: comprehensive error analysis [C]. SPIE, 2013, 8838: 88380H.
- 12 Jim H Burge. Null test for null correctors: error analysis [C]. SPIE, 1993, 1993: 86-97.

栏目编辑: 何卓铭