

用于凹非球面的计算全息设计及其误差分析

冯婕^{1,2} 邓超¹ 邢廷文¹

(¹中国科学院光电技术研究所应用光学实验室, 四川 成都 610209)

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为实现非球面元件表面面形的高精度检测, 提出并设计了一种兼具相位补偿、装调计算全息图(CGH)和待测非球面的多功能计算全息图。多功能计算全息图由主全息、对准全息和基准全息3部分组成。介绍了各部分的工作原理及其设计方法, 比较了辅助全息装调方法和普通装调方法的优劣, 并给出了检测 $\Phi 187.72$ mm、 F 数为1.71的凹非球面镜的计算全息设计实例, 分析了影响全息检测精度的各项误差源, 计算得出所设计的计算全息的检测精度可达4.75 nm, 实现了非球面元件面形的高精度检测。

关键词 全息术; 非球面检测; 计算全息图; 光学设计; 误差分析

中图分类号 O438.12; TB96

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.110902

Design and Error Analysis of the Computer-Generated Hologram Used for Concave Aspheric Surface Testing

Feng Jie^{1,2} Deng Chao¹ Xing Tingwen¹

(¹Laboratory of Applied Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

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

Abstract In order to test concave aspheric surfaces precisely, a multifunctional computer-generated hologram (CGH) which can compensate wavefront in null test, adjust the relative position between CGH and interferometer and adjust the relative position between CGH and the tested aspheric surface is proposed and designed. It consists of three segments, called main CGH, alignment CGH and fiducial CGH. The principle of testing aspheric surfaces is reviewed and the design method is introduced. The pros and cons of the auxiliary CGH adjustment method and the common adjustment method are compared. Then a design example for testing a paraboloidal mirror ($\Phi 187.72$ mm, F number is 1.71) is presented. The effects of CGH fabrication errors on the accuracy of interferometric measurements are analyzed. The accuracy of using a CGH to measure the surface is 4.47 nm. The designed CGH meets the requirements of high precision aspheric surfaces testing.

Key words holography; aspheric-surface testing; computer-generated holograms; optical design; error analysis

OCIS codes 090.1760; 090.2880; 120.2880; 220.4840

1 引言

随着现代光学的发展,非球面在光学系统中扮演着越来越重要的角色。在光学系统中引入非球面可以缩小外型尺寸,减轻仪器重量,提高光学性能,改善成像质量^[1~5]。然而非球面的高精度检测一直是限制非球面技术快速发展的瓶颈。

计算全息因其优秀的波前生成能力,被广泛应用于高精度非球面检测中^[6~9]。计算全息法克服了光学全息法需要参考非球面实体的困难,是非球面干涉检测方法的一个重大突破。但计算全息的自身对准和待测非球面的对准问题制约了检测精度的提高。本文在设计相位补偿全息的同时也设计了全息片上用于自对

收稿日期: 2012-06-26; **收到修改稿日期:** 2012-08-13; **网络出版日期:** 2012-10-18

作者简介: 冯婕(1985—),女,博士研究生,主要从事高精度非球面检测技术方面的研究。E-mail: ygc1212@21cn.com

导师简介: 邢廷文(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事应用光学方面的研究。E-mail: xingtw@ioe.ac.cn

准和装调待测非球面的功能区域,使计算全息法(CGH)检测非球面的精度得到进一步提高。这种具备相位补偿、装调 CGH 本身和待测非球面的多功能计算全息可以解决复杂的检测难题。利用设计的多功能全息检测了 $\Phi 187.72$ mm、 F 数为 1.71 的凹非球面镜,实现了非球面元件面形的高精度检测。

2 CGH 设计

CGH 包括 3 个部分:用于零位测试中补偿波前的主全息部分;用于调整 CGH 和干涉仪之间相对位置的对准全息部分;以及用于调整 CGH 和被测非球面元件之间相对位置的基准全息部分。

2.1 主全息设计

主全息的作用就是将干涉仪^[10]和标准镜头出来的标准球面波补偿为所需要的非球面波,实现非球面零位补偿检测。主全息是透射式全息,入射球面波经过主全息的透射衍射后,被补偿为所需的非球面波。光线垂直入射待测非球面元件,被元件表面垂直反射,再次经过主全息的透射衍射,回到干涉仪与参考光相干涉。通过得到的干涉图就可知待测非球面元件的面形信息。主全息相位补偿原理如图 1 所示。

主全息的相位方程为

$$\phi(r) = -[\overline{OP'H'S}(r) - \overline{OPHS}(r)], \quad (1)$$

式中 r 为被测面径向位置, $\overline{\cdot}$ 表示光程,即线段长度。

CGH 设计的关键就是确定 CGH 的相位方程。主全息利用光学设计软件 Code V 来优化相位,为了方便优化设计,采用虚拟玻璃的概念^[11]。主全息相位设计的模型如图 2 所示。

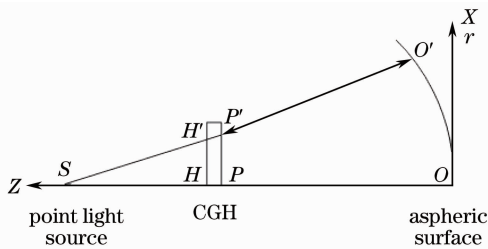


图 1 主全息相位补偿原理

Fig. 1 Phase compensation principle of main CGH

主全息相位优化完成后,需进行相位量化,然后加工制作成 CGH,其设计流程图如图 3 所示。

2.2 对准全息设计

对准全息是为了装调 CGH 本身而在主全息基片上同时制作的另一功能全息,一般为反射式全息。对准全息设计原理如图 4 所示,从 O 点入射到对准全息的球面波经反射衍射后原路返回重新聚焦于 O 点。对准全息反射回的波和参考光进行干涉,干涉图反映了 CGH 本身的装调信息。如果 CGH 不存在自身定位不准所引入的离焦、偏心及倾斜误差,则干涉图对比度为 0;反之干涉图对比度不为 0^[12]。

对准全息的相位函数为

$$\phi(r) = -2 \times [\overline{OT}(r) - \overline{OP}]. \quad (2)$$

2.3 基准全息设计

基准全息是为了装调待测非球面而在主全息基片上同时制作的另一功能全息。由于要反映待测面的装调信息,基准全息为透射式全息,且光在基准全息处要发生往返两次衍射。

基准全息可以确定待测非球面的 Z 向偏移(沿轴)。基准全息利用了猫眼对准原理,如图 5 所示,球面波经基准全息透射衍射后会聚到待测面中心,经待测面中心反射的光再次经过基准全息透射衍射后回到干

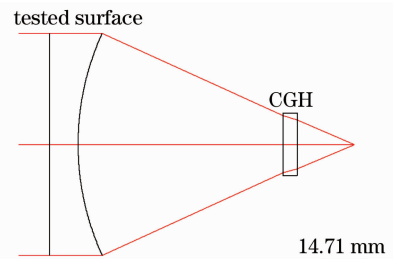


图 2 主全息相位设计模型

Fig. 2 Design layout of main CGH phase

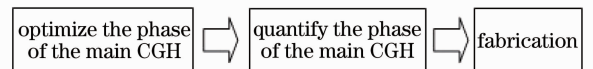


图 3 主全息设计流程图

Fig. 3 Design flow diagram of the main CGH

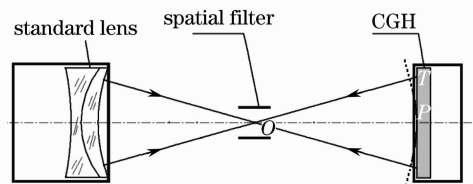


图 4 对准全息设计原理图

Fig. 4 Design layout of alignment CGH

涉仪与参考光进行干涉,如果待测面是按照设计轴向位置装调且中心位于轴上,则干涉图对比度为 0;如果存在误差,则干涉图对比度不为 0。

对准全息相位函数为

$$\phi(r) = -[\overline{OPHS}(r) - \overline{OphS}(0)]. \quad (3)$$

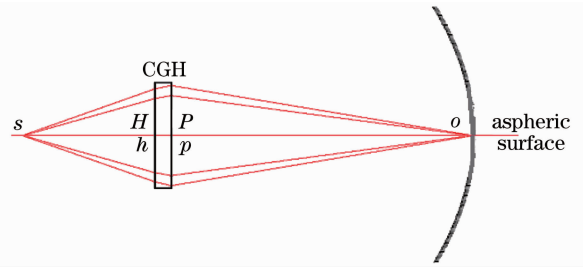


图 5 基准全息设计原理图

Fig. 5 Design layout of fiducial CGH

3 普通装调方法和辅助全息装调方法的精度对比

设计对准全息和基准全息是为了装调 CGH 和待测

非球面,普通装调方法也能完成对 CGH 和待测面的装调。采用普通方法装调误差可以分为 5 种:CGH 的 Y 向(垂直与 XOZ 平面向外)偏心(或 X 向偏心)、CGH 的 Y 向倾斜(或 X 向倾斜)、待测面的 Y 向偏心(或 X 向偏心)、待测面的 Y 向倾斜(或 X 向倾斜)和 CGH 待测面间隔误差。分别改变以上 5 种误差值可以得到波前均方根(RMS)值的变化量。

针对普通装调方法的装调精度,对间隔和偏心误差取 $0.05 \mu\text{m}$ 误差间隔,对 CGH 和待测面的倾斜误差取 $0.1''$ 间隔,分别仿真得到各个波前 RMS 的变化值。假定各个误差是相互独立的,则可以根据平方和两平方根(RSS)误差合成原则得到普通装调误差对检测精度的影响。

取元件偏心误差为 $0.2 \mu\text{m}$,倾斜误差为 $0.4''$ 和厚度误差为 $0.1 \mu\text{m}$ 时,由仿真结果可知,CGH 倾斜误差、CGH 偏心误差、待测面倾斜误差、待测面偏心误差以及待测面和 CGH 间隔误差引入的检测误差值为 $0.012656, 0.582176, 0.455616, 0.582176$ 和 0.03164 nm 。根据 RSS 原则误差合成可以得到普通装调误差对检测波前 RMS 值的影响为 0.94 nm 。各种装调误差对检测精度的影响如图 6~10 所示。

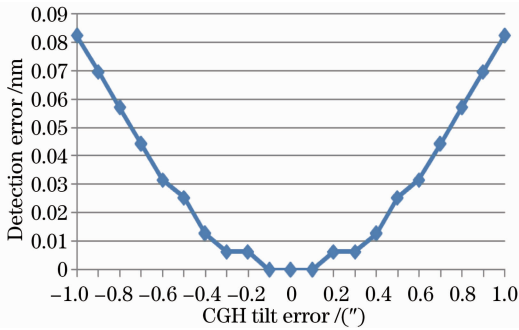


图 6 CGH 倾斜误差对检测精度的影响

Fig. 6 Influence of CGH tilt error on detection accuracy

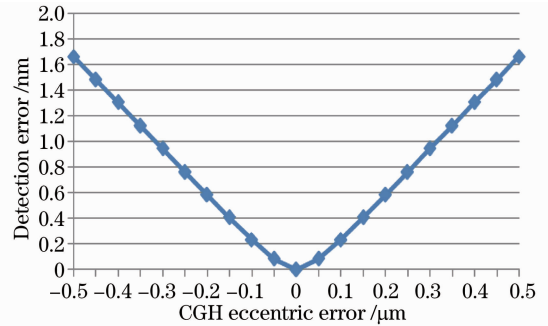


图 7 CGH 偏心误差对检测精度的影响

Fig. 7 Influence of CGH eccentric error on detection accuracy

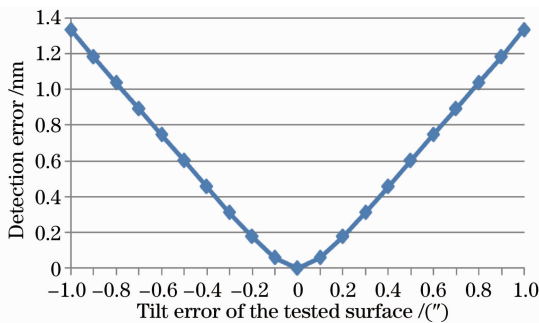


图 8 待测面倾斜误差对检测精度的影响

Fig. 8 Influence of the tested-surface tilt error on detection accuracy

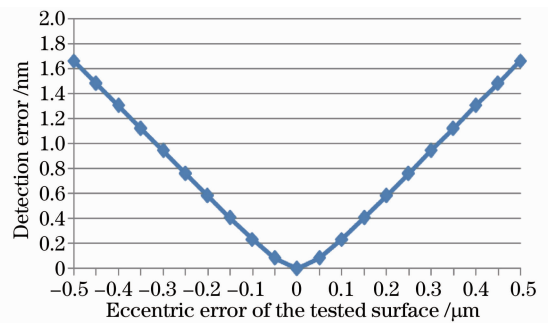


图 9 待测面偏心误差对检测精度的影响

Fig. 9 Influence of the tested surface eccentric error on detection accuracy

利用普通方法装调 CGH 和待测面,会引入纳米量级的误差;而且普通装调方法不能直接检测平面基底 CGH 的偏心,因此不能保证 CGH 的装调偏心。

利用辅助全息装调 CGH 和待测面,其误差主要来源于辅助全息的制作过程。制作误差主要有条纹图形畸变、相位深度不均匀性误差、面形误差和材料不均匀性误差,但是在实际的实验中,这些误差都不影响装调精度,因此由辅助全息装调引入的检测误差近似为 0。经过对比可以得出,对于高精度非球面检测,设计对准全息和基准全息来装调 CGH 和待测面是十分必要的。

4 设计实例

4.1 设计结果

为了高精度检测 $\Phi 187.72$ mm, F 数为 1.17 的非球面镜,设计了特定的 CGH,其各项结构参数如表 1 所示,假设入射光波长为 632.8 nm,待测面反射率为 4%。

主全息的相位方程可表示为

$$\phi = (2\pi/\lambda) \sum C_n r^{2n}, \quad (4)$$

式中 λ 为波长, r 为被测面径向位置, C_n 为 CGH 的各项相位系数。 C_n 可通过光学设计软件 Code V 得到,其值如表 2 所示。所设计的 CGH 的具体布局如图 11 所示。

表 1 CGH 参数

Table 1 Parameters of CGH

Parameters	Main CGH	Alignment CGH	Fiducial CGH
Hologram type	Binary phase hologram	Binary phase hologram	Binary phase hologram
Material	Fused silica	Fused silica	Fused silica
Operating mode	Transmission	Reflection	Transmission
Diffraction order	First	Third	First
Grating groove depth	0.35λ	0.35λ	0.35λ
Smallest grating spacing / μm	28.8	2.4	2.0
Duty cycle	0.5	0.5	0.5
Radius /mm	8.60	8.60	4.18
Fringe number	201	209	1057
Visibility	0.568	0.849	0.457

表 2 CGH 各项相位系数

Table 2 Phase coefficients of the CGH

Phase coefficients	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
Main CGH	0.002	5.667×10^{-6}	-2.431×10^{-7}	1.619×10^{-9}	5.267×10^{-12}	-8.631×10^{-14}	-6.356×10^{-16}	1.549×10^{-17}	-1.026×10^{-19}	2.833×10^{-22}

4.2 仿真误差分析

影响主全息检测精度的误差主要有全息图制作误差、对准全息和基准全息引入的装调误差、CCD 引入误差、干涉仪和标准镜头引入的误差、环境误差、测试波长带宽影响误差和装调附件引入的误差等。其中,全息图的制作误差是决定检测精度的最关键因素,主要包括基底面形误差、基片材料均匀性误差、相位深度不均匀性误差和条纹图形畸变误差等。

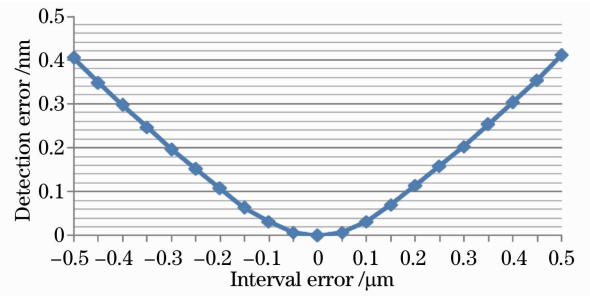


图 10 CGH 与待测面间隔误差对检测精度影响
Fig. 10 Influence of interval error between CGH and the tested surface on detection accuracy

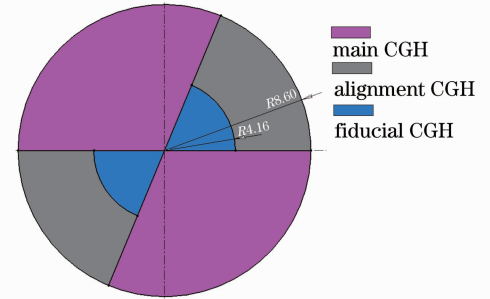


图 11 CGH 布局图

Fig. 11 Layout diagram of the designed CGH

4.2.1 基底面形误差

基底面形误差是由于基片加工、微结构刻蚀、元件装调和环境等因素造成的表面面形误差,一般是低频误差,对衍射波前造成低空间频率的波像差。基底面形误差是对检测精度影响最大的制作误差,设计过程中必须采取相应方法消除基底面形误差的影响。

现阶段普遍使用的消除基底面形误差影响的方法为:首先使用零级光标定出 CGH 的面形误差,再从非零级光检测非球面得到的干涉图中减去标定出的面形误差^[13]。这个方法可以实时标定出面形误差,同时由于考虑了微结构刻蚀、元件装调和环境等影响因素,可以较为彻底地消除面形误差对检测的影响。

4.2.2 基片材料均匀性误差

在玻璃的熔炼和切割成基片的生产环节中,由于应力不均匀等因素的影响,基片材料各个区域的折射率不一致,这种基片材料的不一致性称为材料的不均匀性误差。由于基片材料不均匀性,光线在同一厚度基片不同区域走过的光程不一致,这就直接引入了检测误差。基片材料均匀性误差也可以利用消除基底面形误差影响的方法来消除其对检测精度的影响。

4.2.3 相位深度不均匀性误差

刻蚀深度不均匀误差是由于在刻蚀过程中系统的不稳定所造成的,其不均匀程度直接导致衍射波前变形。相位深度不均匀性误差同样可以利用消除基底面形误差影响的方法来消除其对检测精度的影响。

4.2.4 条纹图形畸变误差

对于采用标准的二元器件制作方法加工制作的全息图,条纹位置畸变误差是由于掩模版制作设备的定位误差,制作出的掩模版的实际条纹位置偏离理想位置引起的。目前还没有很好的办法消除条纹图形畸变误差对检测精度的影响。对于主全息,要想减小小图形畸变带来的检测精度影响,应使全息条纹间距尽可能大。

根据当前国内的加工条件,取 1% 占空比误差、2% 刻槽相位深度误差、0.5% 振幅误差、0.1 μm 条纹位置畸变,计算分析各个误差源对检测精度的影响大小,如表 3 所示。终可得,采用设计的 CGH 检测 $\Phi 187.72 \text{ mm}$ 、 F 数为 1.17 的非球面镜,检测精度为 4.75 nm。

表 3 影响检测精度的各项误差源

Table 3 Varied error sources affecting detection accuracy

Sources of error	Wavefront errors (RMS) /nm	Sources of error	Wavefront errors (RMS) /nm
Residual wavefront error of main CGH	0.164	Pattern distortion of fiducial CGH	0
Pattern distortion of main CGH	2.18	Map registration error when correcting spherical aberration	3
Phase depth errors of main CGH	0.2	Measurement noise in the 0 th order	0.5
Duty-cycle error of main CGH	0	Measurement noise in the return optic	0.5
Amplitude error of main CGH	0.01	Map distortion when eliminating substrate errors	1.0
Pattern distortion of alignment CGH	0	Fabrication non-uniformities when eliminating substrate errors	2.5
Uncertainty in test surface measurement	1	Root-sum-squares error	4.75

5 结 论

提出了一种高精度检测非球面镜的计算全息图形式,介绍了主全息、对准全息、基准全息的工作原理及设计方法,比较了辅助全息装调方法和普通装调方法的优劣,说明了设计对准全息和基准全息的必要性。给出了检测 $\Phi 187.72 \text{ mm}$ 、 F 数为 1.71 凹非球面镜的计算全息设计实例,通过分析影响检测精度的各项误差,最后计算得出检测精度为 4.75 nm,由此说明所设计的计算全息能够实现非球面元件面形的高精度检测。

参 考 文 献

- 1 Li Jie, Wu Fan, Wu Shibin *et al.*. Using a laser tracker to measure the surface of off-axis aspheric mirror during grinding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0112002
李 杰, 伍 凡, 吴时彬 等. 使用激光跟踪仪测量研磨阶段离轴非球面面形[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0112002
- 2 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图的测量不确定度分析研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0112003
- 3 Qi Yuejing, Wang Ping, Kang Guoguo *et al.*. Design and parameter calculation of circular computer generated holograms [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, **26**(9): 821~823
齐月静, 王 平, 康果果 等. 圆形计算全息图的设计及其参数计算[J]. 北京理工大学学报, 2006, **26**(9): 821~823
- 4 Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan *et al.*. Design and fabrication of twin computer-generated holograms for testing concave aspherical surfaces[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(6): 59~62
谢 意, 陈 强, 伍 凡 等. 凹非球面检测的双计算全息图设计及制作[J]. 光电工程, 2008, **35**(6): 59~62
- 5 Gu Yongqiang, Miao Erlong, Gao Songtao *et al.*. Accuracy analysis on paraboloid calibration with computer-generated holography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1208005
谷勇强, 苗二龙, 高松涛 等. 计算全息法标定抛物面精度分析[J]. 中国激光, 2011, **38**(12): 1208005
- 6 R. Schreiner, T. Herrmann. Computer generated holograms for optical shop testing of aspheres [C]. *SPIE*, 2005, **5856**: 503~508
- 7 S. Reichelt, C. Pruß, H. J. Tiziani. New design techniques and calibration methods for CGH-null testing of aspheric surfaces [C]. *SPIE*, 2002, **4778**: 158~168
- 8 T. Herrmann. Testing aspheric surfaces with CGH of different accuracy in industrial manufacturing environ [C]. *SPIE*, 2001, **4440**: 120~126
- 9 Y. C. Chang, J. H. Burge. Errors analysis for CGH optical testing [C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 358~366
- 10 Wei Haoming, Xing Tingwen, Li Yun *et al.*. Measurement errors in 632.8 nm high precision phase-shifting Fizeau interferometer [J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041202
魏豪明, 邢廷文, 李 云 等. 632.8 nm 高精度移相菲佐干涉仪测量误差分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4): 041202
- 11 Diffraction International Ltd. Design and Analysis of Diffractive Aspheric Nulls [OL], [2005-11-07]. http://www.diffraction.com/tutorials/ASPE_2004_1384.php
- 12 R. Zehnder, J. H. Burge, Chunyu Zhao. Use of computer generated holograms for alignment of complex null correctors [C]. *SPIE*, 2006, **6273**: 281~287
- 13 P. Zhou, J. H. Burge. Fabrication error analysis and experimental demonstration for computer-generated holograms [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(5): 657~663