

高精度相位型计算全息图的设计

朱德燕^{1,2} 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 为了解决非球面及自由曲面的高精度检测问题,基于二元光学计算机全息图(CGH)模型基础,分析了该模型下相位型CGH各项误差对CGH检测精度的影响,同时结合工程实例,针对口径为846 mm×630 mm的自由曲面,设计了相应的相位型CGH,并实验验证了该设计的可行性。结果显示:在设计时应先将相位型CGH的各个衍射级次进行分离;改变CGH到干涉仪焦点距离以减小刻画畸变同时保证CGH尺寸;再将基板误差检测出来,并代入设计结果进行补偿标定;最后在编码时将占空比选择为0.5,刻蚀深度选择在 0.3λ 减小占空比误差、相位函数误差和振幅误差。

关键词 全息; 计算全息图; 高精度; 自由曲面; 误差分析; 光学检测

中图分类号 O439;O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0712002

Design of High-Precision Phase Computer-Generated-Hologram

Zhu Deyan^{1,2} 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 To solve the high precision of testing of aspheric surface or even free-form surface, the line binary grating theory is used, gave the influence result of each errors of the computer generated hologram (CGH), based on an 846 mm×630 mm free-form surface, the CGH to test the surface is designed and manufactured. The result shows that when design CGH to test surface, first separate the diffraction order, change the distance between the focus of the interferometer to CGH to decrease the pattern distortion; calibrate the substrate errors; at last choose duty-cycle to 0.5, etching depth to 0.3λ to decrease duty-cycle errors, phase function errors and amplitude errors when encoding.

Key words holography; computer-generated-hologram; high-accuracy; free-form surface; error analysis; optical testing

OCIS codes 120.3940; 120.3180

1 引言

作为一种高精度光学镜面的检测方法,计算全息法是指利用计算全息图(CGH)这一种衍射光学元件基于衍射原理而生成理想非球面波前,替代零位补偿器用于非球面的检测,不同之处在于,反射式和折射式零位补偿器通常仅能补偿球差等简单像差,而CGH可以生成几乎任意指定形状的波前,可以补偿任何类型的像差,因此除应用于非球面检测外,还可以用于自由曲面的检测^[1-8]。

CGH检测技术由20世纪70年代提出的,该方法利用多种技术合成全息图,用该计算全息图与非球面匹配进行光学检测。近年来,CGH技术逐渐成为一种成熟的高精度光学检测技术,国外大型望远镜如巨型麦

收稿日期: 2014-11-20; 收到修改稿日期: 2015-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)

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@aliyun.com

导师简介: 张学军(1968-),男,研究员,博士生导师,主要从事先进光学系统制造方面的研究。E-mail:zxj@ciomp.ac.cn

哲伦望远镜(GMT)、欧洲超大天文望远镜(EELT)主镜检测都采用了CGH这种技术^[9-11]。其设计和制造技术比较成熟,精度分析相关报道较少。Zhou^[12]对其误差进行分析,并提出将CGH的制作误差分为两个部分:CGH刻画畸变和刻画参数误差,分析了CGH制造误差的影响因素。2013年,Zhao等^[13]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,同年Cai等^[14]提出建立一个衍射元件检测的实验结构,该结构可以快速检测被检衍射元件的占空比和刻蚀深度信息。

目前国内非球面干涉检测主要采用传统补偿器,由于CGH相对补偿器的众多优点,CGH检测技术现已成为光学检测的热点。而CGH分为振幅型和相位型,振幅型CGH的衍射效率最高只能达到0.1,不能满足镜面反射率较低(例如玻璃元件,处于研磨或粗抛光阶段的SiC反射镜)的检测需求,而相位型CGH的衍射效率最高可以达到0.5,能够实现在镜面反射率较低时对光学元件的高精度检测,因此相位型CGH的设计成为当前光学检测的重点。本文结合工程实例,以某自由曲面反射镜的相位型CGH为例,结合二元光学理论中计算全息板的数学模型,给出并分析了该模型下相位型CGH各误差的影响因素,得出检测自由曲面的相位型CGH设计方法。

2 高精度相位型CGH设计

2.1 相位型CGH基本理论

相位型CGH用于干涉时其检测光路如图1所示:从干涉仪出来的球面波,经过CGH转为与被检镜非球面波前一致的非球面波前,再与被检镜干涉检验。对于高陡度大偏离量的离轴非球面,一般将其作为自由曲面放置于光轴上检测。

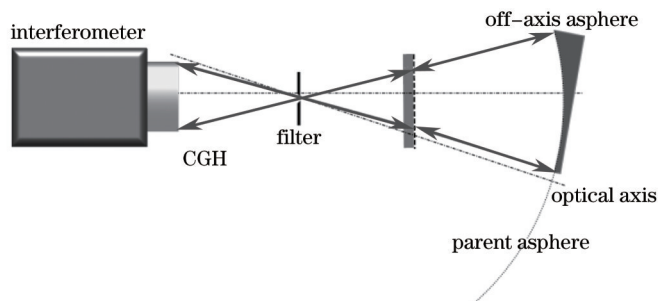


图1 离轴非球面作为自由曲面的检测光路

Fig.1 Optical layout for testing aspheric surface as freeform surface

由于用于干涉检验中的相位型CGH为单台阶光栅,其具体示意图如图2所示。

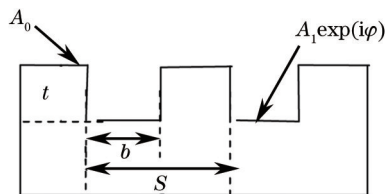


图2 单台阶光栅示意图

Fig.2 A linear binary grating

其中,光栅的周期为 S ,刻蚀深度为 t ,占空比为 $D=b/S$, A_0 、 A_1 分别为未刻蚀和刻蚀区域的出射波前振幅,相位型CGH, A_0 、 A_1 均为常数。相位函数 $\varphi = 2\pi t(n-1)$, n 表示基板的折射率, t 表示CGH基板厚度, λ 表示干涉仪波长。

干涉光通过CGH引起的相位满足:

$$\psi = W \cdot \pi \frac{\text{Im}[U(\xi)]}{\text{Re}[U(\xi)]}, \quad (1)$$

式中为 W 为CGH衍射引起的波前变化。

由刻画时占空比误差、相位函数误差和振幅误差引起的波前误差为

$$\Delta W_D = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial D} \cdot \left(\frac{\Delta D}{D} \right) \cdot D, \quad (2)$$

$$\Delta W_\varphi = \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \cdot \left(\frac{\Delta \varphi}{\varphi} \right) \cdot \varphi, \quad (3)$$

$$\Delta W_{A_1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \varphi_1} \cdot \left(\frac{\Delta A_1}{A_1} \right) \cdot A_1. \quad (4)$$

除了刻画时占空比误差、相位函数误差和振幅误差会引起CGH的误差外,从CGH设计到制造,CGH误差还包括产生拟合残差、编码误差、基板误差、刻画畸变。

2.2 CGH 误差分析

2.2.1 拟合残差

在设计CGH中,使用Zemax进行光学仿真时,根据自由曲面的参数对CGH进行拟合设计,拟合后的残余波前误差为拟合残差。一般地,设计残差都可以控制到 0.001λ 量级,可忽略。

2.2.2 编码误差

编码误差是指将CGH各衍射区域的条纹结构编码离散化时引入的误差,其大小可描述为^[5,12]

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

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。一般地,编码误差在1 nm以内,可忽略。

2.2.3 基板误差

为了分析CGH的基板误差,在实验中,将CGH的基板直接采用干涉仪检测,其具体检测光路如图3所示,将基板、反射镜依次放在干涉仪后,其检测结果包括干涉仪误差、基板误差和反射镜误差。在上述光路基础上,将基板去掉进行检测,结果为干涉仪误差和反射镜误差。将两个结果中的数据点采用靶标一一对应后相减可得到CGH的基板误差。

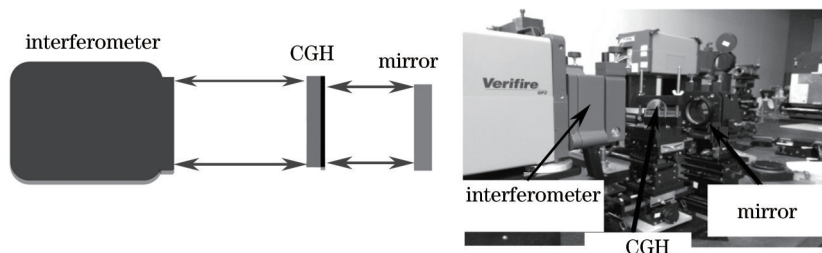


图3 干涉仪检CGH基板误差

Fig.3 CGH substrate errors calibration by interferometer and mirror

2.2.4 刻画畸变

若在 (x,y) 位置的刻画误差为 ε ,CGH条纹间隔为 S ,则^[12]

$$\Delta W(x,y) = -M\lambda \frac{\varepsilon(x,y)}{s(x,y)}, \quad (6)$$

式中 M 表示由于刻画畸变导致的波前误差, m 表示衍射级次。

利用原子力显微镜观测不同线宽的CGH,可以得到其刻画后的结果如图4所示。

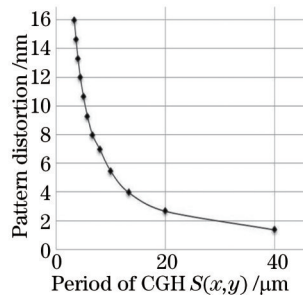


图4 不同线宽的刻画畸变

Fig.4 Pattern distortion of different widths designed

其中横轴表示设计的 CGH 线宽周期, 竖轴表示对应线宽下的刻画畸变。

2.2.5 占空比误差、相位函数误差和振幅误差

将(1)式求导代入(2)~(4)式可以得到占空比误差、相位函数误差和振幅误差这三个误差导致的波前误差关系。实际干涉检测时, 采用一级衍射光进行干涉检验, 因此利用软件模拟可以得到: 当占空比误差为 0.01 时导致的波前误差如图 5 所示, 相位函数误差为 0.02 时导致的波前误差如图 6 所示, 振幅误差为 0.005 时导致的波前误差如图 7 所示, 占空比误差为 0.01、相位函数误差为 0.02、振幅误差为 0.005 时导致的波前误差如图 8 所示。

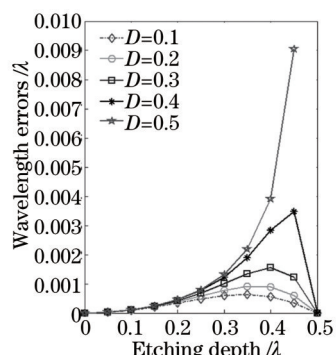


图 5 0.01 占空比误差导致波前误差

Fig.5 Wavefront errors by 0.01 duty-cycle errors

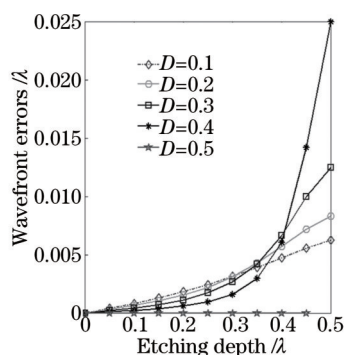


图 6 0.02 相位函数误差导致波前误差

Fig.6 Wavefront errors by 0.02 phase depth errors

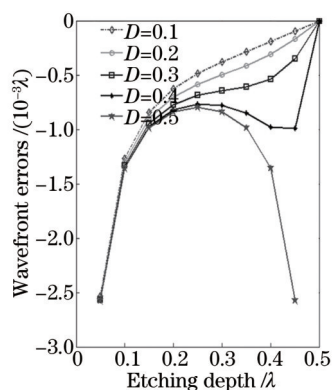


图 7 0.005 振幅误差导致波前误差

Fig.7 Wavefront errors by 0.005 amplitude errors

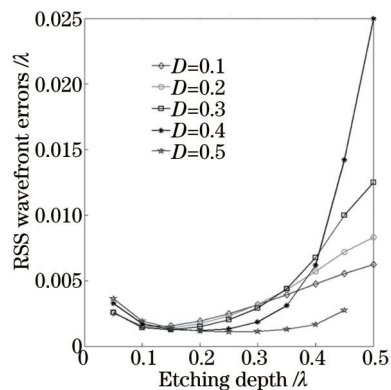


图 8 0.01 占空比误差、0.02 相位函数误差、0.005 振幅误差导致波前误差

Fig.8 Wavefront errors by 0.01 duty-cycle errors, 0.02 phase depth errors and 0.005 amplitude errors

因此, 可根据检测该自由曲面时设计的 CGH 参数; A_0 、 A_1 、占空比、刻蚀深度, 对应图 5~7 得到该 CGH 的占空比误差导致的波前误差, 相位函数误差导致的波前误差, 振幅误差导致的波前误差。由图 8 中可以看出: 要想减小占空比误差、相位函数误差和振幅误差导致的综合和的平方根(RSS)波前误差, 需要将占空比设定为 0.5, 刻蚀深度设定为 0.3λ , 为 CGH 设计的参数选取提高参考。

2.3 相位型 CGH 设计

针对在研某自由曲面进行 CGH 干涉检测实验, 该自由曲面参数如表 1 所示。

检测光路如图 1 所示, 考虑选用直径为 80mm 的基板, 干涉仪选用常见的 $F=3.3$ 标准镜。相位型 CGH 检测自由曲面的设计步骤为:

1) 搭建主要光路并使得衍射级次分离: 光波通过相位型 CGH 时将产生多个衍射级次, 为了使得各个衍射级次分离, 实际检测时所需要的衍射级次不被其他级次的光影响, 需要给相位型 CGH 增加倾斜作为载频来解决多个衍射级次混叠现象, 其具体设计为: 先用 Zemax 中的 Zernike Fringe Phase 表示相位型 CGH, 将 Zernike 系数中表示倾斜的第二项和第三项设为变量优化, 再将 Zernike 系数前三十七项中的设为变量进行优化, 得到初始结果。

表 1 自由曲面参数

Table 1 Parameters 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}
Rex /mm	842/2
Rey	624/2
X axis decenter /mm	0
Y axis decenter /mm	334.5

2) 减小条纹密度以降低刻画畸变:由(6)式可知,条纹越密,刻画畸变越大,因此需要优化设计时增大CGH到干涉仪焦点的距离,减小条纹密度至CGH口径在80 mm范围内,针对该自由曲面设计的相位型CGH条纹密度为75 line/mm。

3) 去除基板误差提高相位型CGH精度:利用2.2.3节所示检测相位型CGH基板,得到其结果如图9所示。

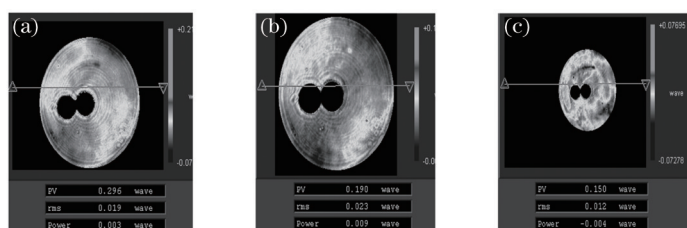


图 9 CGH 基板误差。(a)干涉仪误差、CGH 基板误差和反射镜误差;(b)干涉仪误差和反射镜误差;(c) CGH 基板误差

Fig.9 CGH substrate errors. (a) Error of interferometer, error of CGH substrate, error of reflector; (b) error of interferometer; (c) error of CGH substrate

通过图9(a)可以得到该CGH的基板误差和用于基板误差校正过程使用的干涉仪误差和反射镜误差面形图。图9(b)可以得到该反射镜误差和干涉仪误差面形图。利用图中所示两个孔形靶标将图9(a)和图9(b)中的数据点精确地一一对应,从图9(a)中去除图9(b)的检测结果可以得到如图9(c)所示的CGH基板误差面形图。

将CGH基板误差代入设计结果,重新优化CGH的Zernike参数,得到光学设计的最后结果如图10所示。

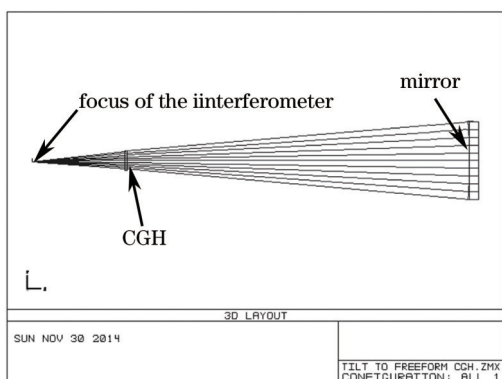


图 10 CGH 检测自由曲面设计结果

Fig.10 Design of the CGH to test the free-form surface

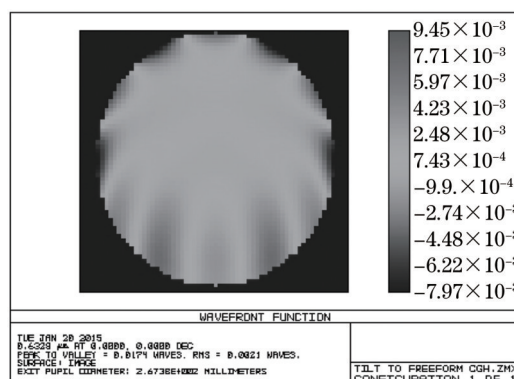


图 11 CGH 检测自由曲面设计残差

Fig.11 Designing result of the CGH to test the free-form surface

该设计残差为 0.021λ [均方根(RMS)值],满足优于 $\lambda/100$ (RMS值)值检测需求

4) 编码以减小占空比误差、相位函数误差和振幅误差并得到GDS文件制作相位型CGH占空比误差、相位函数误差和振幅误差与占空比、相位函数的选取有关,由图8可以得到要想减小占空比误差、相位函数误差和振幅误差,需要将占空比设定为0.5,刻蚀深度设定为 0.3λ 。因此将占空比设定为0.5,刻蚀深度设定为 0.3λ 编码该相位型CGH,并得到GDS文件,此时CGH上条纹的曲率半径最小处为13 mm。

2.4 相位型CGH检测自由曲面

利用GDS文件采用激光直写和离子刻蚀制作得到相位型CGH,再利用该相位型CGH检测自由曲面,其检测结果如图11所示为12.7 nm (RMS值)。

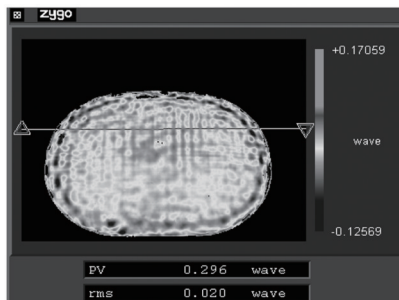


图 12 CGH 检测自由曲面结果

Fig.12 Result of the CGH to test the free-form surface

该自由曲面为某离轴三反系统三镜,其加工指标为精度达到 $\lambda/50$ (RMS值),由图12可以看出,基于本文自行设计制造的CGH可以完成对反射镜的加工精度要求,满足实际工程需求。

3 结 论

基于二元CGH模型,以自由曲面CGH补偿检测为例,对CGH补偿检测自由曲面进行了光学设计与实验检测。结果表明:CGH基板误差、刻画畸变、占空比误差、刻蚀深度误差和振幅误差均对相位型CGH精度有影响。为了提高CGH精度,在设计时应改变CGH到干涉仪焦点距离以减小条纹密度,同时保证CGH尺寸;通过检测基板误差,并将其代入设计结果进行补偿标定;最后在编码时应将占空比选择为0.5,刻蚀深度选择在 0.3λ 以减小占空比误差、相位函数误差和振幅误差。以上分析结果可以对CGH设计及标定提供一定的指导,同时有效地提高相位型CGH补偿检测的精度。

参 考 文 献

- 1 Malacara D. Optical Shop Testing [M]. Hoboken: A John Wiler & Sons, Inc, 1991: 486-496.
- 2 Wang Xiaokun. Optical design of a high resolution space camera [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122001.
王孝坤. 一种高分辨力空间相机的光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122001.
- 3 Gao Songtao, Sui Yongxin, Yang Huaijiang. High precise testing of asphere with computer-generated-hologram and error evaluation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 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. 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. 非球面测量中零位计算全息的测量不确定度分析研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112003.
- 6 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 峰, 等. 自由曲面的CGH光学检测方法与实践[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1052-1056.
- 7 Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0722001.
巩 盾, 王 红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722001.
- 8 Xue Donglin. Manufacture and application of large aperture standard transmission spheres[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0611001.
薛栋林. 大口径标准球面镜组研制与应用[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0611001.
- 9 Jim Burge. A null test for null correctors: error analysis[C]. SPIE, 1993, 1993: 86-97.
- 10 Michael T Tuell, Hubert M Martin, Burge J H, *et al.*. Optical testing of the LSST combined primary/tertiary mirror[C]. SPIE, 2010,

7739: 77392V.

- 11 Jim Burge, L B Kot, Martin H M, *et al.*. Design and analysis for interferometric measurements of the GMT primary mirror segments[C]. SPIE, 2006, 6273: 62730M.
- 12 Ping Zhou. Error Analysis and Data Reduction for Interferometric Surface Measurements[D]. Tucson: University of Arizona, 2009: 135-179.
- 13 Chunyu Zhao, Jim Burge. Optical testing with computer generated holograms: comprehensive error analysis[C]. SPIE, 2013, 8838: 88380H.
- 14 Wenrui Cai, Ping Zhou, Chunyu Zhao, *et al.*. Diffraction optics calibrator: design and construction[J]. Opt Eng, 2013, 52(12): 124101.

栏目编辑: 何卓铭