

用计算全息图检测非球面时的自补偿效应分析

高松涛 武东城 彭石军 苏东奇 苗二龙

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室超精密光学工程研究中心,吉林 长春 130033

摘要 用计算全息图(CGH)检测非球面时,除了设计零位补偿CGH外,还往往设计辅助调节CGH,从而可以利用干涉图来精确调节CGH的位置。针对这种同时具有零位补偿和辅助调节功能的CGH,提出零位补偿CGH和辅助调节CGH之间具有相互补偿效应。针对一高次非球面,设计了四种不同的CGH配置方案,而后逐一分析了零位补偿CGH和辅助调节CGH之间的补偿效应。分析结果表明,在相同的基板误差的条件下,具有自补偿效应的配置方案的Power项误差小于其他方案的1/40,而球差和高阶球差则小于其他方案的1/70。利用具有自补偿效应的配置方案加工制作了CGH,用此CGH完成了对非球面的加工检测迭代,非球面面形的收敛精度均方根(RMS)达到0.48 nm。

关键词 全息; 计算全息图(CGH); 非球面检测; 自补偿效应

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1112002

Self-Compensating Effect Analysis in Testing Asphere with Computer-Generated Hologram

Gao Songtao Wu Dongcheng Peng Shijun Su Dongqi Miao Erlong

Engineering Research Center of Extreme Precision Optics, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Besides null computer-generated hologram (CGH), the alignment CGH is usually designed for aligning the position of CGH through interferogram precisely when testing asphere with CGH. The compensating effect between null CGH and alignment CGH for the CGH which contains null CGH and alignment CGH simultaneously is presented. Four types of CGHs are designed for a high order asphere, and the compensating effects between the null CGH and alignment CGH are analyzed respectively. The results show that the configuration which has self-compensating effect suffers less than 1/40 power error, and 1/70 spherical and high order spherical error compared to other configurations. A CGH is fabricated based on the configuration which has self-compensating effect, and thereby, the aspheric fabricating and testing are accomplished iteratively. The final testing results show that the aspheric surface figure converges at 0.48 nm root mean square (RMS).

Key words holography; computer-generated hologram(CGH); asphere testing; self-compensating effect

OCIS codes 120.2880; 120.3940; 050.1380; 090.2880

1 引言

非球面有比较多的设计自由度,所以在结构复杂、成像质量要求较高的系统中(如投影光刻物镜),普遍采用非球面元件来减少所使用的透镜个数,提升系统的成像质量^[1-2]。虽然非球面对于光学设计非常有利,但是对于非球面的高精度检测,一直是光学检测领域的一大难题。近年来,随着数控抛光和离子束抛光技术的逐步成熟,非球面的加工难度在逐步降低,而非球面的检测精度成为制约非球面精度的关键因素。

当前,对于二次型非球面,一般采用无像差点法进行检测^[3];对于高次非球面,则普遍采用补偿镜法^[3-5]或计算全息图(CGH)法^[3,6-9]进行检测。补偿镜一般由2~3片透镜构成,为了保证检测精度,往往需要严格控制透

收稿日期: 2015-05-14; 收到修改稿日期: 2015-07-06

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 高松涛(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事精密光学检测技术方面的研究。E-mail: gaost965@126.com

镜的中心厚、间隔、曲率半径和折射率等因素;CGH则只有基板和基板上的刻线构成,结构相对简单,但为了实现高精度的检测,需要严格控制CGH基板的中心厚、折射率和调整误差。

在对CGH进行设计时,除需要考虑设计零位补偿外,还需设计辅助调节功能^[8-13],并且辅助调节CGH的好坏直接决定了整个检测系统的误差灵敏度大小。实际上,辅助调节CGH和零位补偿CGH可能会存在正向补偿效应(自补偿效应)、无补偿效应或负向补偿效应。对于具有自补偿效应的系统,可以最大限度地减小整个系统的误差灵敏度,从而提升测量精度;而对于负向补偿效应,效果恰好相反。前人在进行CGH设计时,往往只关注CGH的相位计算,很少考虑这种补偿效应^[10-13]。本文采用最常使用的轴对称双CGHs(Twin-CGHs),即同时包含零位补偿CGH和辅助调节CGH。针对一高次非球面,根据CGH刻线在基板上所处位置的不同,设计了四种不同的配置方案;针对所设计的四种配置方案,逐一分析了零位补偿CGH和辅助调节CGH的补偿效应;最后采用具有自补偿效应的设计方案,加工制作了CGH,从实验上验证了此方案的可行性。

2 CGH的设计

2.1 非球面参数

为了具有一般性,选择检测对象为一高次非球面,其可以表示为

$$z = \frac{(\rho/R)^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)(\rho/R)^2}} + \sum_{n=1}^M A_n \rho^{2n+2}, \quad (1)$$

式中 z 为非球面矢高, R 为顶点曲率半径, κ 为二次曲面常数, A_n 为高阶项系数, M 为高阶项阶数, ρ 为非球面的径向坐标。非球面的具体参数如表1所示,非球面偏离度及非球面梯度如图1所示。

表1 非球面的参数

Table 1 Parameters of asphere

Aperture	R	κ	A_4	A_6	A_8	A_{10}	A_{12}
148	178.7334	0	8.1813×10^{-9}	-2.2420×10^{-12}	-1.4404×10^{-16}	-1.2525×10^{-20}	-4.6082×10^{-25}

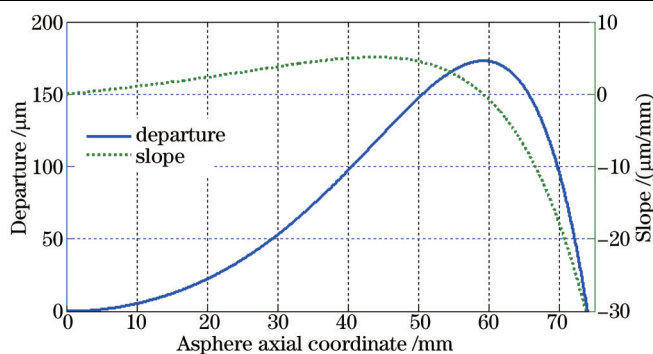


图1 非球面的偏离度和非球面梯度

Fig.1 Departure and slope of the asphere

2.2 CGH的设计

光栅方程是进行CGH设计的理论基础,如图2所示,CGH作为二元衍射光学元件,可以表示为

$$n_2 \sin \theta_2 - n_1 \sin \theta_1 = \frac{M\lambda}{d} = M\lambda f, \quad (2)$$

式中 n_1 和 n_2 是两种介质的折射率, M 为CGH的衍射级次, λ 是光波波长, d 是CGH刻线的空间周期, f 是CGH刻线的空间频率。

在光学设计软件中,为表征CGH,更多采用的是CGH的相位。实际上,CGH的相位和空间频率的关系为

$$\phi(\rho) = 2\pi M \int f(\rho) d\rho. \quad (3)$$

为了计算CGH的相位,可以首先利用光栅方程计算出空间频率,而后利用(3)式计算出CGH的相位;也可以直接利用等光程原理计算出CGH的相位,而后利用(3)式的导数形式计算CGH的空间频率。这两种计算方法结果是等效的。众多文献^[11,13-16]给出了CGH相位和空间频率的计算方法,这里不再赘述,将直接给出

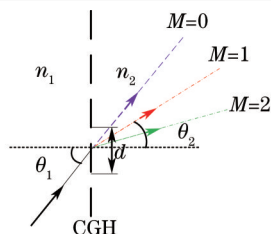


图 2 光栅方程示意图

Fig.2 Schematic layout of grating equation

CGH的设计结果。

CGH一般刻蚀在一块平面基板上,可以刻蚀在基板的正面,也可以刻蚀其背面,或者不同的功能区分别刻蚀在两个面上。根据零位补偿功能区和辅助调节功能区所在位置的不同,可以分成四种不同的配置方案:1)零位补偿和辅助调节功能区都在正面;2)零位补偿和辅助调节功能区都在背面;3)零位补偿功能区在正面,辅助调节功能区在背面;4)零位补偿功能区在背面,辅助调节功能区在正面。对于这四种配置方案,同时考虑零位补偿CGH和辅助调节CGH,最终的CGH设计结果如图3所示。从设计结果上来看,这四种方案的相位与空间频率非常相近,相互之间没有明显差别。但如果进一步分析CGH基板中心厚度、折射率等公差,则会发现这四种方案存在明显的差异:若零位补偿CGH与辅助调节CGH存在自补偿效应,则基板中心厚度和折射率等公差要求较松;若二者没有补偿效应或者存在反向的补偿效应,则其对基板的中心厚度和折射率等公差要求非常严格。

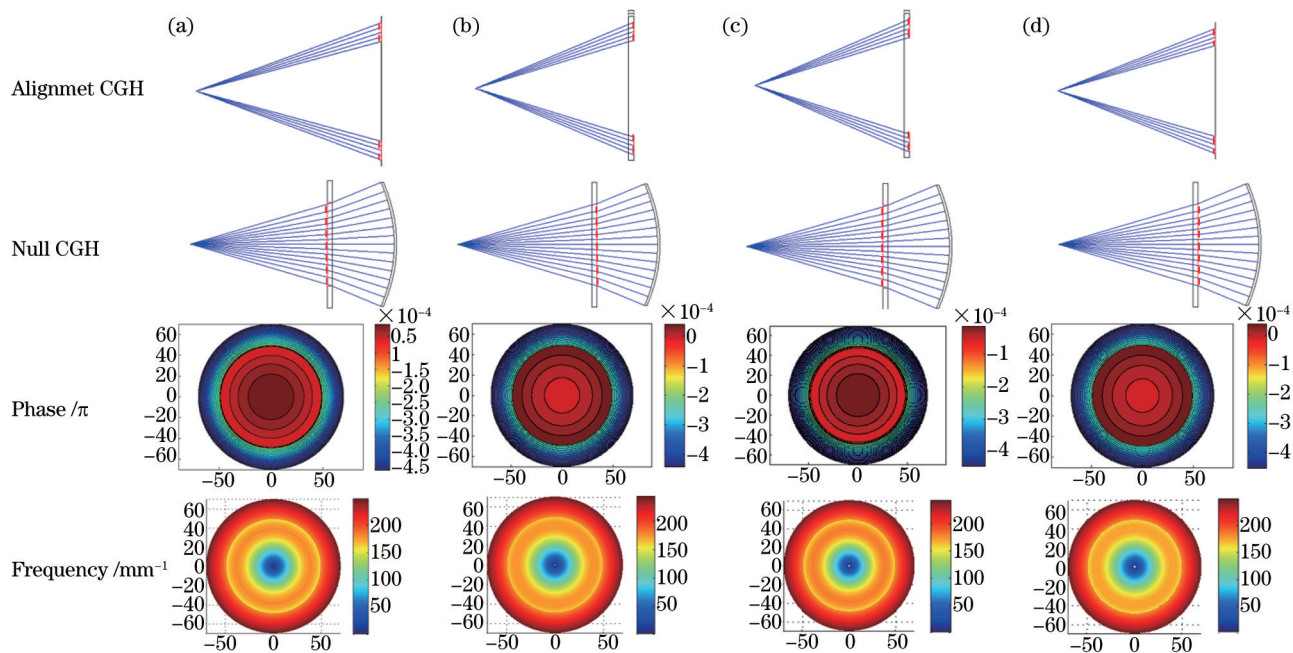


图 3 四种配置方案下CGH的设计结果

Fig.3 Design results of the four type configurations

3 零位补偿CGH与辅助调节CGH的补偿效应

3.1 仿真分析方法

当光路中的某一系统参量存在误差时(如CGH基底的中心厚度、折射率等参量),应首先考虑这些误差对辅助调整光路造成的影响,而后再考虑其对零位补偿光路造成的影响,具体的仿真分析方法为:

1) 考虑对辅助调节光路造成的影响。将参量误差带入辅助调整光路,以CGH的偏心、倾斜和离焦作为优化变量,以辅助调节光路的波像差作为优化目标进行优化。此过程仿真利用辅助调节CGH来调节CGH的位置。

2) 考虑系统参量误差和CGH的位置误差对测量结果造成的影响,即将系统参量误差和步骤1)中获得的CGH位置误差带入零位补偿光路中,分析系统的波像差,从获得对非球面测量精度的影响。

从以上步骤可以看出,对于Twin-CGHs,当某一系统参量存在误差时,并不能直接简单地将这一误差带入零位补偿光路来获得其对非球面测量精度的影响,而应首先分析零位补偿CGH与辅助调节CGH之间是否存在补偿效应。若二者存在补偿效应,则需要按照以上分析方法进行分析;若不存在补偿效应,则可以直接进行分析。

3.2 仿真举例

以CGH基底的中心厚度误差为例来分析补偿效应。当辅助调节CGH位于基板的前表面时,基底的中心厚度误差对辅助调节光路不存在影响,无补偿效应,可以直接将中心厚误差带入零位补偿光路,从而获得非球面的测量误差;当辅助调节CGH位于基板的后表面时,由于基板厚度误差会影响辅助调整光路,存在补偿效应,因此需要按照第3.1节中的操作步骤进行分析。对于图3所示的四种方案,若基板中心厚误差为 $2\mu\text{m}$,则零位补偿光路的波像差分析结果如图4所示,各分项误差如表2所示。对于不同的光路配置方案1)和4),由于辅助调节CGH处于前表面,因此这两个方案没有补偿效应;尽管二者都不存在补偿效应,但从图4和表2可以看出,光路配置4)的灵敏度明显较低。光路配置方案2)和3)存在补偿效应,其中光路配置方案2)具有自补偿效应,引入的球差(Z9)和高阶球差(Z16)可以忽略;而光路配置方案3)具有负向补偿效应,尽管基底的中心厚度误差只有 $2\mu\text{m}$,但是引入球差和高阶球差方均根(RMS)却高达 6.9nm 。

对于CGH基底的折射率误差,也可以采用同样的方法进行分析。当基底折射率偏差 1×10^{-4} 时,零位补偿光路波像差分误差如表3所示。可以看出,与表2类似,具有自补偿效应的2)方案的误差明显小于其他方案。因此,在进行CGH设计时,可充分利用这种自补偿效应,从而获得最佳的非球面检测精度。表2和表3中,Z4、Z9和Z16表示条纹Zernike多项式中第4、9和16项系数,单位为波长(632.8nm)。

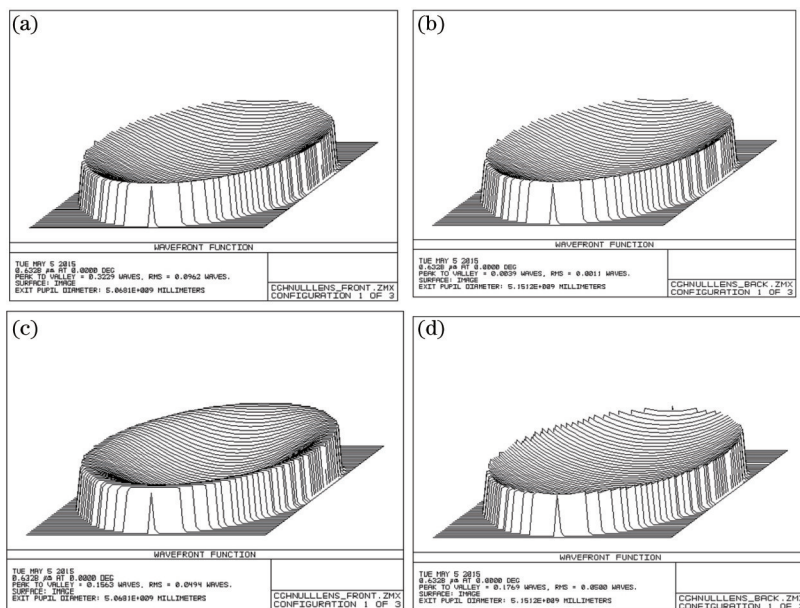


图4 CGH基板厚度误差为 $2\mu\text{m}$ 时,四种配置方案的波像差

Fig.4 Wavefront maps of the four type configurations for $2\mu\text{m}$ error in CGH substrate thickness

表2 CGH基板厚度误差为 $2\mu\text{m}$ 时,四种配置方案的Z4、Z9和Z16的值

Table 2 Z4,Z9 and Z16 of the four type configurations for $2\mu\text{m}$ error in CGH substrate thickness

	1)	2)	3)	4)
Z4	0.1668	0.0020	0.0834	0.0870
Z9	-0.0157	-0.0001	-0.0239	0.0076
Z16	-0.0054	0.0000	-0.0069	0.0014
RMS	4.6	0.03	6.9	2.2

表3 CGH基板折射率误差为 1×10^{-4} 时,四种配置方案的Z4、Z9和Z16的值Table 3 Z4,Z9 and Z16 of the four type configurations for 1×10^{-4} error in CGH substrate refracting index

	1)	2)	3)	4)
Z4	-0.0374	0.0003	-0.0184	-0.0191
Z9	0.0031	0.0000	0.0050	-0.0018
Z16	0.0013	0.0000	0.0016	-0.0003
RMS	0.9	0.0	1.5	0.5

4 实验实现

从上文的分析可以看出,由于配置方案2)具有自补偿效应,在相同的基底厚度误差和折射率误差的情况下,方案2)引入的非球面测量误差最小,可以满足高精度非球面面形检测的要求。因此,采用方案2),在美国亚利桑那大学完成了CGH的加工制作,如图5所示。基板正面镀有632.8 nm波长的减反膜,基板的背面刻蚀零位补偿和辅助调节CGH(零位补偿区范围 $0 < r < 50$ mm,辅助调节区范围 $50 < r < 70$ mm)。

利用此CGH,对表1中的非球面进行检测加工迭代,经过离子束面形精修(IBF)之后,最终的非球面面形检测结果如图6所示。

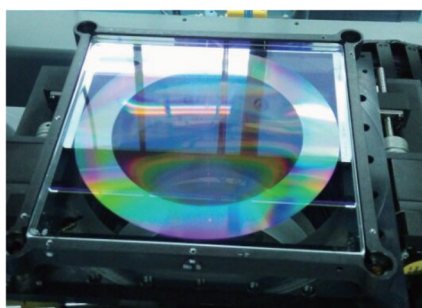


图5 CGH实物图

Fig.5 Picture of CGH

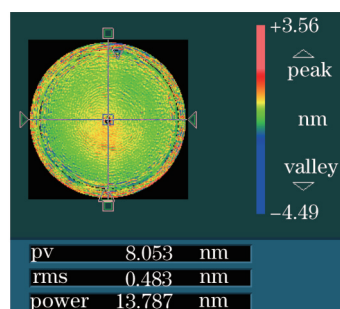


图6 用CGH对非球面的测量结果

Fig.6 Measurement result of the asphere with CGH

5 结 论

针对同时具有零位补偿和辅助调节功能的CGH,本文提出可有效利用零位补偿CGH和辅助调节CGH之间的补偿效应,从而提升非球面的检测精度。选择一高次非球面,首先设计了四种不同的CGH配置方案;而后针对这四种配置方案,逐一分析了零位补偿CGH和辅助调节CGH之间的补偿效应。分析结果表明:当零位补偿CGH和辅助调节CGH都刻蚀在基板的背面时,二者具有的自补偿效应可以极大地降低CGH基板误差(中心厚和折射率)对非球面测量精度的影响。在相同的基板误差下,具有自补偿效应的方案,Power(Z4)误差小于其他方案的1/40,而球差(Z9)和高阶球差(Z16)则小于其他方案的1/70。由此可见,具有自补偿效应的方案可以在很大程度上降低对基板公差的要求,并提高非球面的测量精度。最后,设计加工了具有自补偿效应的CGH方案,并用此CGH完成了对非球面的加工检测迭代,最终非球面面形收敛精度达到了0.48 nm (RMS值)。

参 考 文 献

- 1 J H Burge. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics[C]. SPIE, 1995, 2576: 258-269.
- 2 H J Tiziani, S Reichelt, C Pruss, *et al.*. Testing of aspheric surfaces[C] SPIE, 2001, 4440: 109-119.
- 3 D Malacara. Optical Shop Testing (3rd Edition)[M]. United States: John Wiley & Sons, 2007.
- 4 A Offner. A null corrector for paraboloidal mirrors[J]. Appl Opt, 1963, 2(2): 153-155.
- 5 Y S Kim, B Y Kim, Y W Lee. Design of null lenses for testing of elliptical surfaces[J]. Appl Opt, 2001, 40(19): 3215-3219.
- 6 J C Wyant, V P Bennett. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts[J]. Appl Opt, 1972, 11(12): 2833-2839.
- 7 R Schreiner, T Herrmann, J Röder, *et al.*. Design considerations for computer generated holograms as supplement to Fizeau interferometers

- [C]. SPIE, 2005, 5965: 59650K.
- 8 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.
- 9 Gao Songtao, Wang Gaowen, Zhang Jian, *et al.*. the distortion correction of asphere testing with computer-generated hologram[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 1929–1935.
高松涛, 王高文, 张 健, 等. 用计算全息图校正非球面的畸变[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(8): 1929–1935.
- 10 Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan, *et al.*. Concave aspherical surface testing with computer-generated holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1313–1317.
谢 意, 陈 强, 伍 凡, 等. 用双计算全息图检测凹非球面[J]. *光学学报*, 28(7): 1313–1317.
- 11 Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan. Design of twin computer-generated holograms used for testing concave conic mirrors[C]. SPIE, 1995, 6723: 67235S.
- 12 J B Song, H S Yang, H G Rhee, *et al.*. Modified alignment CGHs for aspheric surface test[C]. SPIE, 2009, 7426: 742616.
- 13 Qi Yuejing, Wang Ping, Jiang Yi. Design of CGH wavefront generator for aspheric testing with wavefront tracing method[C]. SPIE, 2007, 6723: 672362.
- 14 Li Ming, Luo Xiao, Xue Donglin, *et al.*. Design of CGH for testing large off-axis asphere by considering mapping distortion[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1246–1253.
李 明, 罗 霄, 薛栋林, 等. 考虑投影畸变设计大口径离轴非球面检测用计算全息图[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(5): 1246–1253.
- 15 Xu Yingchao, Zhang Xin, Zhou Ping. Optical design for unsymmetrical aspherical cubic phase plate testing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 971–975.
许英朝, 张 新, 周 平. 一种三次非旋转对称的相位板的检测系统设计[J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 971–975.
- 16 Su Ping, Tan Qiaofeng, Kang Guoguo, *et al.*. B-spline interpolation of scattered phase data of computer generated hologram for null test of freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1767–1771.
苏 萍, 谭峭峰, 康果果, 等. 自由曲面零补偿计算全息图离散相位的B样条拟合[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1767–1771.

栏目编辑: 何卓铭