

文章编号: 0253-2239(2008)07-1313-05

用双计算全息图检测凹非球面

谢 意^{1,2} 陈 强¹ 伍 凡¹ 侯 溪¹ 张 晶¹ 吴高峰^{1,2}

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 为实现对凹非球面的高精度检测, 提出并设计了一种二元纯相位型双计算全息图。设计的双计算全息图由主全息和对准全息两部分组成, 分别用于检测非球面和精确定位主全息。介绍了双计算全息图的工作原理及其设计方法, 并给出了一个检测 $\Phi 140$ 、 $F/2$ 抛物面反射镜的双计算全息图设计实例, 实验得到的均方根(RMS)误差为 0.062λ 。通过分析对准全息的误差, 推导出主全息的条纹位置畸变误差, 最后计算出其综合误差为 0.06λ 。为验证实验结果的可靠性, 将其与平面镜自准直检测结果($E_{\text{RMS}}=0.062\lambda$)比较, 结果二者吻合良好。

关键词 光学测量; 凹非球面; 计算全息图; 零位检验; 自准直检验

中图分类号 O438.12; TB96 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1313

Concave Aspherical Surface Testing with Twin Computer-Generated Holograms

Xie Yi^{1,2} Chen Qiang¹ Wu Fan¹ Hou Xi¹ Zhang Jing¹ Wu Gaofeng^{1,2}

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstracts In order to test concave aspherical surfaces precisely, a binary phase twin computer-generated hologram (CGH) is proposed and designed. The designed twin CGH consists of two segments, called main CGH and alignment CGH, used for testing aspherical surfaces and aligning main CGH respectively. The principle of testing aspherical surfaces is reviewed and the design method is introduced. Then a design example for testing a paraboloidal mirror ($\Phi 140$, $F/2$) is presented, and its root-mean-square (RMS) error is 0.062λ . The pattern distortion error of main CGH is derived from analyzing the errors of alignment CGH, and then the integrative error is 0.06λ . The validity of the test result is demonstrated and compared with that of autocollimation test, which is 0.062λ (RMS). It is demonstrated that the results show a good agreement.

Key words optical measurement; concave aspherical surface; computer-generated holograms; null test; autocollimation test

1 引 言

具有无像缺点的二次非球面, 如抛物面、双曲面、椭球面等, 可以采用无像差法检验^[1]。然而, 这种方法需要大口径的辅助镜, 而大口径且高精度的辅助镜加工成本很高。非球面也可以采用环状子孔径拼接法实现非零检验, 但是其测量精度有待进一步提高^[2]。实际的工程应用中常采用的是零检验, 这种方法主要借助于折反射式补偿器或计算全息图

(Computer-generated holograms, CGH), 前者主要分为 Offner 补偿器、Dall 补偿器和镜式补偿器。理论上这几种补偿器都能达到较高的补偿精度, 但装调困难是对这项技术的最大挑战。用计算全息技术检测非球面是非球面检测方法的一个重大突破^[3-4]。早期, 这种方法主要受限于全息图的制作精度。随着超大规模集成电路的发展, 高精度, 高衍射效率的计算全息图的制作已成为现实。目前, 国

收稿日期: 2007-10-22; 收到修改稿日期: 2008-01-22

基金项目: 国家 973 计划资助课题。

作者简介: 谢 意(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事大口径非球面检测技术方面的研究。E-mail: sunny6840@163.com

导师简介: 陈 强(1966—), 男, 副研究员, 主要从事大口径非球面加工检测技术方面的研究。E-mail: chq@ioe.ac.cn

内外已有多家单位开展了这方面研究^[5~10]。本文在此基础上提出了一种二元纯相位型双计算全息技术,以实现凹非球面的高精度检测。

2 工作原理及设计方法

如图 1(a)所示,该计算全息由主全息和对准全息两部分组成,二者同心。前者用于检测非球面,而后者起辅助对准主全息的功能,从而使由于主全息定位不准所引入的离焦、偏心及倾斜误差最小化。

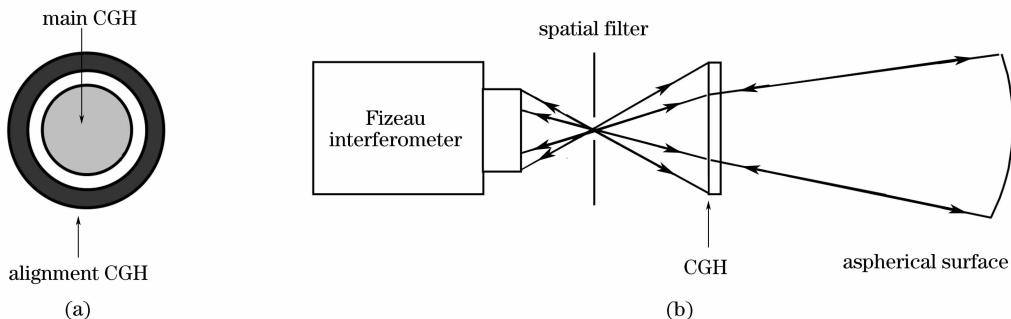


图 1 (a) 双计算全息结构图, (b) 非球面检测原理图

Fig. 1 (a) Configuration of twin-CGH, (b) principle of testing an aspherical surface

主全息的设计原理如图 2 所示,其相位函数可表示为^[11]

$$\phi(r) = -[O'P'H'I(r) - OPHI(r)], \quad (1)$$

式中 r 为被测面径向位置。条纹环带数为

$$k_{\max} = \text{int} \left| \frac{\phi(r_0)}{m\lambda} \right|, \quad (2)$$

式中 m 为主全息设计衍射级次, λ 为设计波长, r_0 为被测非球面半口径。各环带中线半径 r_{mid} 位置满足

$$km\lambda = \phi(r_{\text{mid}}), \quad k = 0, 1, \dots, k_{\max}. \quad (3)$$

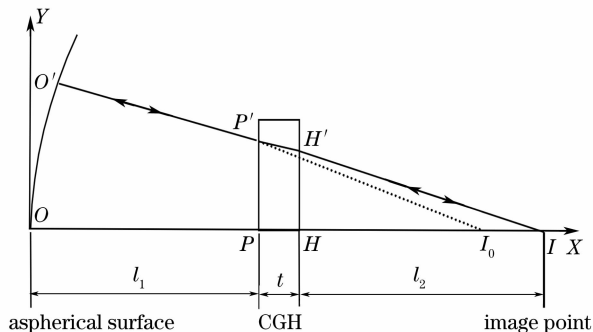


图 2 主全息设计

Fig. 2 Geometry for design of main CGH

对准全息的设计原理如图 3 所示,其相位函数为

$$\Phi(r') = -2(OT(r') - OP(r')). \quad (4)$$

利用(2)式、(3)式同样可计算出这部分全息的

非球面检测原理如图 1(b)所示,入射的球面波经主全息衍射透射后在被测面位置转换为与其相一致的理想非球面波前,携带被测面信息的反射光波再次通过全息图与参考波发生干涉后可测得其面形精度。入射到对准全息的球面波由于对准全息的反射衍射作用原路返回,通过观察该环带的干涉条纹可判断全息板是否存在离焦、偏心及倾斜,从而实现全息板的精确定位。

环带数及各条纹的半径位置。

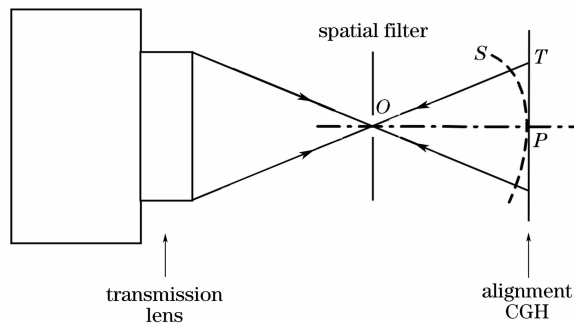


图 3 对准全息设计

Fig. 3 Geometry for design of alignment CGH

3 设计实例

根据分析,设计并制作了用于检测 $\Phi 140$ 、 $F/2$ 、半径 $R_0 = 573.788$ 凹抛物面反射镜的双计算全息图,具体参量如表 1 所示,折射率 $n = 1.515292$, $\lambda = 632.8$ nm, $t = 5.118$ mm, $l_1 = 550$ mm, $l_2 = 50$ mm。

为保证全息图的制作精度及精确对准,采用电子束曝光技术一次性将两部分图形在同一块掩模版上制作出来,然后再将图形转印在高精度平面基片上,最后刻蚀出具有两种不同相位深度的双计算全息图^[12~13]。

表 1 双计算全息图参量
Table 1 Parameters of twin-CGH

Parameter	Main CGH	Alignment CGH
Hologram type	Binary phase hologram	Binary phase hologram
Material	K9	K9
Operating mode	Transmission	Reflection
Diffraction order	First	Third
Grating groove depth	λ	$\lambda/4$
Smallest grating spacing / μm	10.4	7.4
Duty cycle	0.5	0.5
Diameter /mm	6	13
Fringe number	171	180

4 实验结果

如图 4 所示,通过观察对准全息的干涉图可判断出全息板的调整状态,从而能够将其快速对准。 $\Phi 140$ 、 $F/2$ 抛物面反射镜检测现场及实验结果如图 5 所示。

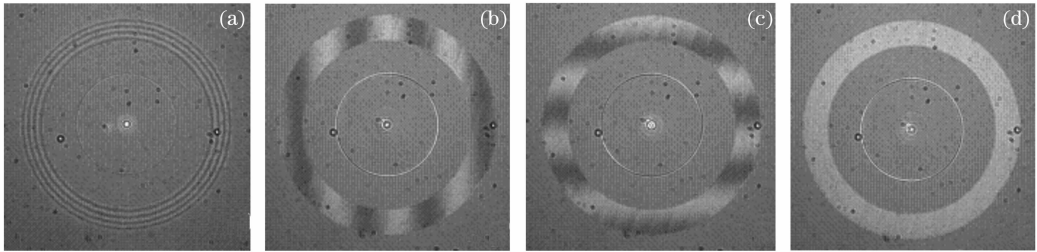


图 4 不同调整状态下的对准全息干涉图。(a)离焦,(b)X 向倾斜,(c)Y 向倾斜,(d)对准

Fig. 4 Interferograms of alignment CGH at different position. (a) Defocus, (b) X tilt, (c) Y tilt, (d) precise alignment

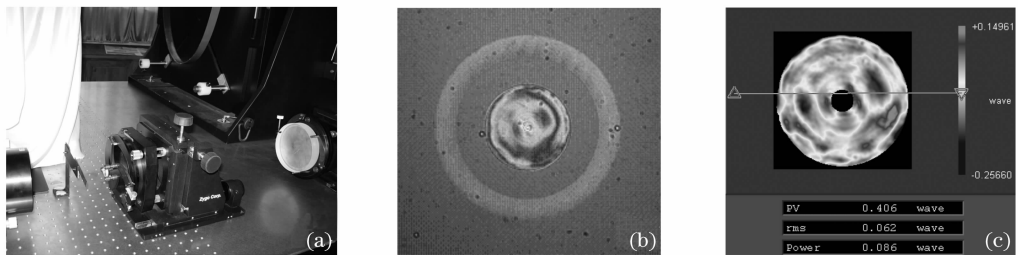


图 5 (a)抛物面镜检测现场,(b)实验干涉图,(c)检测结果

Fig. 5 (a) Setup for testing paraboloidal mirror, (b) interferogram, (c) test result

从图 5 可见,在对准全息干涉图为零条纹即实现了精确对准的条件下,被测镜的检测结果为:峰值(PV)为 0.406λ ,均方根(RMS)误差为 0.062λ 。

5 误差分析

实验中所包含的误差主要分为被测镜的调整误差、全息图的制作误差及其定位误差。由于采用辅助对准全息对主全息进行了精确定位,由于主全息定位不准所引入的离焦、偏心及倾斜误差可忽略不计,而被测镜的调整误差则可以通过实验中观测干涉图将其控制在尽可能小范围内。因此,全息图的

制作误差是决定检测精度的最关键因素。

全息图的制作误差主要包含^[14]:基底面形误差、台阶深度误差、条纹占宽比误差及条纹位置畸变误差等。

5.1 基底面形误差

典型的基底面形误差一般是低频误差,会对衍射波前造成低空间频率的波像差。对于反射式全息,反射后波像差为基底面形偏差的 2 倍,而对于透射式全息,其误差为基底面形偏差的 $(n-1)$ 倍。基底的面形精度在制作全息图形前已用 Zygo 干涉仪精测过,对准全息部分和主全息部分的面形精度分

别为 0.029λ 和 0.023λ 。所以,由基底面形偏差所带来的波像差分别为 0.058λ 和 0.012λ 。与主全息相对应的基底另一面的面形偏差为 0.032λ ,其产生的波像差为 0.016λ 。

5.2 台阶深度误差

由于台阶刻蚀深度的不均匀性造成的波像差为

$$\Delta W_{\varphi} = \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \Delta \varphi, \quad (5)$$

式中

$$\frac{\partial \psi}{\partial \varphi} = \frac{A_1^2 - A_0 A_1 \cos \varphi}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_0 A_1 \cos \varphi},$$

A_0, A_1 分别为从全息条纹台阶两侧出射的波前振幅, φ 和 $\Delta \varphi$ 分别为设计台阶深度和台阶深度制作误差, ψ 为衍射波前相位。

用 Alpha-step500 台阶仪对制作的全息图条纹台阶深度进行了抽样检测,主全息和对准全息的台阶深度最大变化分别为 0.027λ 和 0.007λ 。根据(5)式可得其对主全息和对准全息所产生的残余波像差均为 0.007λ 。

5.3 条纹占宽比误差

当衍射级次 $m \neq 0$ 时,由条纹的占宽比变化引起的波像差为

$$\Delta W_D = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \psi}{\partial D} \Delta D, \quad (6)$$

式中

$$\frac{\partial \psi}{\partial D} = \begin{cases} \infty, & \text{for } \text{sinc}(mD) = 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$D, \Delta D$ 分别为条纹设计占宽比和条纹占宽比制作误差。

由(6)式可见,条纹占宽比变化不影响非零衍射级次的全息图的波像差。

5.4 条纹位置畸变误差

条纹位置畸变误差是由全息图条纹的实际位置偏离理想位置引起的,主要取决于掩模版的制作精度,由其引入的波像差为

$$\Delta W_{PD} = -m\lambda \frac{\xi(r)}{S(r)}, \quad (7)$$

式中 $\xi(r)$ 为特定位置的条纹畸变, $S(r)$ 为局部条纹间距。

为保证主全息和对准全息同心,这两部分图形一次性在同一块掩模版上制作完成,因此主全息和对准全息的条纹位置畸变相同。用 Zygo 干涉仪对准全息部分检测,结果为 0.086λ 。

根据误差合成准则,此检测结果的波像差为

$$\Delta W_1 = \sqrt{(\Delta W_{\text{sub1}})^2 + (\Delta W_{\text{PD1}})^2 + (\Delta W_{\varphi1})^2}, \quad (8)$$

式中 $\Delta W_{\text{sub1}}, \Delta W_{\text{PD1}}, \Delta W_{\varphi1}$ 分别为对准全息基底面形偏差、条纹位置畸变及条纹台阶相位深度误差。由(5)式、(7)式和(8)式可得条纹的位置畸变为 $0.16 \mu\text{m}$ 。

此外,还包含全息平面基底平行度及材料不均匀性造成的误差。用高精度测角仪测得基底的平行度为 $10''$,经 Zemax 软件仿真,由此产生的波像差 $\Delta W_P = 0.012\lambda$ 。

基底选用的是一级 K9 材料,其不均匀性误差为 1×10^{-6} 。若基底的厚度为 t ,则所产生的波像差为^[15], $\Delta W_n = t \Delta n$,由此得 $\Delta W_n = 0.008\lambda$ 。

根据以上分析,用双计算全息检测非球面的综合误差为

$$\Delta W_2 = [(\Delta W_{\text{sub21}})^2 + (\Delta W_{\text{sub22}})^2 + (\Delta W_{\varphi2})^2 + (\Delta W_{\text{PD2}})^2 + (\Delta W_P)^2 + (\Delta W_n)^2]^{1/2} \approx 0.06\lambda. \quad (9)$$

式中 $\Delta W_{\text{sub21}}, \Delta W_{\text{sub22}}$ 分别为主全息基底两面面形偏差。

为验证设计方法的正确性及实验结果的可靠性,用 $\Phi 150$ 标准平面镜自准直检测了此抛物面镜,实验结果如图 6 所示, $PV = 0.335\lambda, E_{\text{RMS}} = 0.062\lambda$ 。两种检测结果吻合良好。

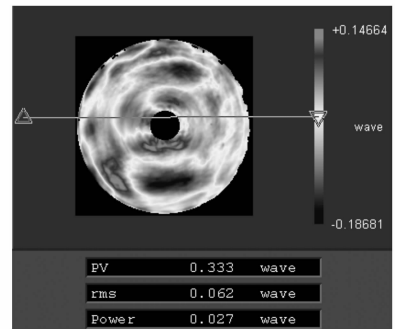


图 6 自准直检测结果

Fig. 6 Autocollimation test result

6 结 论

提出了一种用于检测凹非球面的二元纯相位型双计算全息图,介绍了其工作原理及设计方法,给出了一检测 $\Phi 140, F/2$ 抛物面镜的双计算全息设计实例,实验结果为 $PV = 0.406\lambda, E_{\text{RMS}} = 0.062\lambda$ 。通过分析对准全息的误差推导出主全息的条纹位置畸变误差从而计算出其综合误差为 0.06λ 。为验证实验结果的可靠性,将其与平面镜自准直检测结果比较,二者吻合良好,充分说明了所设计制作的双计算全息能够实现对非球面面形的高精度检测。

参 考 文 献

- 1 James C. Wyant. Interferometric testing of aspherical surfaces [C]. *Proc. SPIE*, 1987, **816**: 19~39
- 2 Xi Hou, Fan Wu, Li Yang *et al.*. Stitching algorithm for annular subaperture[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4): 211~214
- 3 R. Mercier. Holographic testing of aspherical surfaces [C]. *Proc. SPIE*, 1977, **136**: 208~214
- 4 J. C. Wyant, V. B. Bennett. Using computer generated holograms to test aspherical wave front[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(12): 2833~2839
- 5 Chang Jun, Li Fenyong, Wong Zhicheng *et al.*. Testing large convex aspherical surface with computer-generated holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1266~1268
常 军,李凤友,翁志成等. 用计算全息法检测大口径凸非球面的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1266~1268
- 6 Liu Hua, Lu Zhenwu, Li Fengyou *et al.*. Analysis for property of CGH on spherical surface used for aspheric surface testing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(7): 38~41
刘 华,卢振武,李凤友等. 用于非球面检测的球面计算全息图特性分析[J]. *光电工程*, 2004, **31**(7): 38~41
- 7 Liu Hua, Lu Zhenwu, Li Fengyou. CGH testing system for large aspheric surface[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 177~182
刘 华,卢振武,李凤友等. 大口径非球面计算全息图检测系统[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(2): 177~182
- 8 Chen Qiang, Wu Fan, Yuan Jiahu *et al.*. Certification of compensator by computer-generated holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2175~2178
陈 强,伍 凡,袁家虎等. 用计算全息标校补偿器技术研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2175~2178
- 9 H. J. Tiziani, S. Reichelt, C. Prueß *et al.*. Testing of aspherical surfaces[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4440**: 109~119
- 10 James H. Burge, James C. Wyant. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2576**: 258~269
- 11 Taehee Kim, James H. Burge, Yunwoo Lee *et al.*. Null test for a highly paraboloidal mirror[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(18): 3614~3618
- 12 Zhu Jianhua, Huang Qizhong, Gao Fuhua *et al.*. Computer-generated hologram fabricated by electron-beam direct-writing [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **28**(6): 556~558
朱建华,黄奇忠,高福华等. 电子束直写计算全息图[J]. *中国激光*, 2001, **28**(6): 556~558
- 13 James Logue. Fabrication of binary optics using electron beam lithography[C]. *Proc. SPIE*, 1988, **884**: 95~99
- 14 Yu-Chun Chang, James Burge. Errors analysis for CGH optical testing[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3782**: 3782~366
- 15 Yang Li. *Advanced Optical Fabrication Technologies* [M]. Beijing: Science Press, 2001
杨 力. *先进光学制造技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2001

Chinese Optics Letters (《中国光学快报》)“生物光子学”专题 征 稿 启 事

光学技术给生物医学成像、传感以及诊断学领域带来了重大变革,并产生了巨大影响。例如,内窥式激光共聚焦显微镜、光学相干层析技术(OCT)等光学成像技术为生物组织提供了高分辨率的三维影像;而各种光学传感技术也被应用于生物医学中提供高灵敏度的痕量气体分析和化学分析。*Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)计划于2008年12月推出“生物光子学”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“生物光子学”方面原创性的研究论文,旨在集中反映该领域基础理论的研究进展以及最先进的临床试验水平。

征稿范围包括:

- Optical imaging techniques
- Optical bio-sensors
- Non-invasive optical diagnostics
- Optical biomedical instrumentation
- Laser tissue treatment
- Other

Feature Editor:

Jin U. Kang

Department of Electrical and Computer Engineering, Johns Hopkins University

截稿日期:2008年9月15日

投稿方式以及格式:可直接将稿件电子版发至邮箱:col@mail.shnc.ac.cn(主题标明“生物光子学专题投稿”),或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission),详情请参见《中国光学快报》网站:<http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿,其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shnc.ac.cn 询问。