

计算全息图检测大口径凹非球面系统的研究

刘 华, 卢振武, 李凤有, 张红鑫

(中科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, 吉林 长春 130022)

摘 要: 根据圆形计算全息图的衍射特性, 将曲面圆形计算全息图与补偿镜相结合, 应用于凹非球面折射式零检测光学系统中。与传统的折射式零检测光学系统相比, 该系统不仅可以简化光学系统的装调过程, 还可以降低计算全息图与补偿镜的制作精度, 减少制作成本。阐述了利用曲面计算全息图衍射特性的折射式零检测光学系统检测凹非球面的基本原理, 给出了具体的设计实例。对于口径为 950 mm 的抛物面, 检测结果 P-V 值为 0.024。

关键词: 光学设计; 非球面检测; 计算全息图

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2007)03-0312-04

CGH testing for large concave surface

LIU Hua, LU Zhen-wu, LI Feng-you, ZHANG Hong-xin

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130022, China)

Abstract: For the large concave surface, the traditional testing method is null tests by using refractive compensator. However, not only it is difficult to align the optical elements of the system, but also it is expensive to fabricate them. In this paper the CGH fabricated on the compensator lens surface which is utilized in system to substitute the traditional compensator is discussed, and the practical optical parameters are given. For the sample surface with the aperture of 950 mm, testing result of P-V is 0.024.

Key words: Optical design; Aspherical-surface testing; Computer-generated holograms

0 引 言

随着应用光学的不断发展, 非球面被越来越广泛地应用于光学系统中。无论是天文研究, 还是在军事及航天领域中, 越来越多地需要用到反射光学系统。这些光学系统都离不开非球面凹镜, 通常其主镜为凹非球面, 副镜为凸非球面。对高精度的凹非球面检测需要精度很高。对特殊的二次曲面如抛物面、双曲面, 可采用无像差点法检验^[1]。对不具有无像差点对的非球面, 可采用零检验方法。目前零检验方法中一般都采用折射式补偿器, 包括补偿镜和场镜^[2-4]。对补偿器不仅要求制

作精度很高, 而且在装调过程中相对位置也要非常精确, 稍有偏差就会对检测结果造成很大影响。Hubble 望远镜就是因为检测时补偿镜的位置有误差, 导致抛光过程中主镜的二次项系数有误, 造成了巨大的损失。因此需要另一种完全独立的零检测方法来验证这种检测方法。近年来使用衍射光学元件检测大口径非球面得到广泛关注, 1971 年提出的计算全息图(CGH)检测法, 可以说是全息图检测法的一个重大突破^[5-8]。尤其是计算全息图可以制作在曲面基底上, 大大降低了对全息图的制作要求, 即使是检测大口径的非球面, 其制作精

收稿日期: 2006-10-10; 修订日期: 2007-01-10

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目

作者简介: 刘华(1976-), 女, 辽宁抚顺人, 在站博士后, 主要从事光学检测、光学设计方面的研究。Email: girlhuhua@sohu.com

导师简介: 卢振武(1955-)男, 吉林长春人, 研究员, 主要从事衍射光学、光学检测等方面的研究。Email: Luzw@ciomp.ac.cn

度仍可满足检测需求^[9-11]。

文中初步研究了利用 CGH 检测凹非球面的原理和方法, 首次尝试了将曲面 CGH 与补偿镜相结合形成凹非球面折射式零检测的光学系统, 其中刻制在补偿镜凸面上的 CGH 只承担部分光焦度, 补偿理想球面与理想非球面之间的部分位相差, 有效地增加了全息图的最小线宽, 使其达到几十微米, 大大降低了对 CGH 的制作要求, 同时又使装调变得相对容易。系统中的待测凹曲面为一抛物面, 口径为 950 mm, 检测结果 P-V 值为 0.024。

1 利用全息图检测非球面

利用全息图检测凹非球面就是将全息图放置在干涉仪观察臂的适当位置, 通过波前再现和空间滤波, 获得参考波与检测波所形成的干涉图, 从而实现非球面的检测。根据全息图制作方法的不同可分为利用光学全息图的检测法和利用 CGH 的检测法。尤其是近几年随着光刻工艺的不断进步, 利用曲面 CGH 的检测法日益完善。

1.1 利用曲面 CGH 检测非球面

1994 年美国 Arizona 大学光学中心 J.Burge 等人应用曲面 CGH 解决了平面 CGH 的一些难题, 成功地检测了口径为 380、840 mm 的凸非球面, 检测结果非常理想。

利用曲面 CGH 检测凸非球面的方法如图 1 所示,

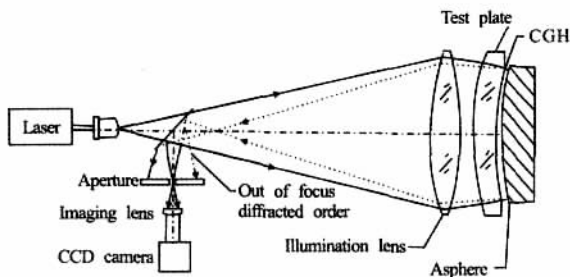


图 1 计算全息法检测凸非球面光路

Fig.1 Configuration for CGH measurement of convex aspheric

光波经过照明透镜到达含有 CGH 表面的检测镜时, 0 级光透过, 直接到达待测非球面, 通过设计照明透镜和检测镜, 使得直接照射到被检非球面的光波波面 and 理想待测非球面相吻合, 此光波返回作为检测光波; 另一部分光经过检测镜上含有 CGH 的表面衍射返回, 此级次衍射光一般选取 1 级光波, 也可选取 -1 级光波, 作为参考光。它与从待测面反射回的光波相干涉。检测光波和参考光波的干涉条纹经成像透镜成像, 被 CCD 相机记录并得到处理。CGH 在这不仅需要承担补偿部分球

差作用, 还起到了分光元件的作用。

2 利用曲面 CGH 检测凹非球面的检测原理

将曲面 CGH 应用到凹非球面的面形检测中, 其检测方法如图 2 所示, 激光经显微物镜和针孔后, 产生标准球面波, 经过照明物镜后, 入射到带有计算全息图的透镜上, 由透镜反射面反射回来的标准球面波作为参考波前, 而由全息图的衍射 1 级光产生标准的待检非球面波前。设计时, 使照明光经带有 CGH 的透镜后, 垂直照射在待检非球面上, 由非球面反射的波前与由透镜反射面反射回来的参考波前经分束器反射后, 再由成像物镜成像到 CCD 探测器上, 并在反射光会聚处加光阑, 滤掉其他级次杂光。

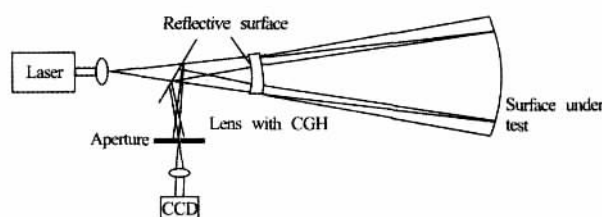


图 2 用 CGH 检测的光路图

Fig.2 Configuration for CGH measurement

2.1 CGH 的位相函数

标准球面波入射到带有 CGH 的补偿镜上, 其中用来检测凹抛物镜面的 CGH 的位相函数是由以下方法得到的, 如图 3 所示。

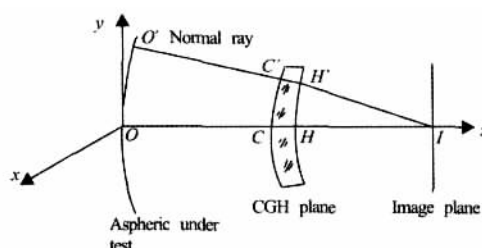


图 3 CGH 位相函数的几何定义

Fig.3 Geometry defining of CGH phase function

图中 CGH 刻制在补偿镜上的凸面上。设 OPL 是抛物面上离轴物点到像点 I 的光程, OPL_0 是抛物面上轴上物点到像点 I 的光程, r 为带有 CGH 的球面的口径则:

$$OPL(r) = OC + CH + HI \quad (1)$$

$$OC = \sqrt{(C_x - O_x)^2 + (C_y - O_y)^2 + (C_z - O_z)^2} \quad (2)$$

$$CH = \sqrt{(H_x - C_x)^2 + (H_y - C_y)^2 + (H_z - C_z)^2} \quad (3)$$

$$HI = \sqrt{(I_x - H_x)^2 + (I_y - H_y)^2 + (I_z - H_z)^2} \quad (4)$$

$$OPL_0(r) = OC + CH + HI \quad (5)$$

$$OC = |C_z - O_z| \quad (6)$$

$$CH = |H_z - C_z| \quad (7)$$

$$HI = |I_z - H_z| \quad (8)$$

所以 CGH 的位相函数为:

$$W_{CGH}(r) = OPL(r) - OPL(r) \quad (9)$$

由于计算全息图是刻制在补偿镜的曲面上的, 选择适当的补偿镜, 就可以增加全息图的最小线宽, 使其达到几十甚至几百微米, 大大降低了对全息图的制作要求。当确定好各元件相互的位置后, CGH 的位相函数经过公式(9)的计算(光线追迹)可得两部分:

$$W_{CGH}(r) = W_f(r) + W_p(r) \quad (10)$$

其中, $W_f(r)$ r^2 , 可以调节光焦度, 使各衍射波最后成像于光轴上不同位置, 以致在理想像面上分离掉其他级次的杂散光, 而 $W_p(r)$ 用来补偿理想凹非球面与理想球面之间的部分位相差。

2.2 CGH 的衍射特性

标准球面波入射到带有 CGH 的补偿镜上后, 各级衍射波的波前为:

$$\begin{aligned} H[W(r)] &= \sum_m A_m \exp(2\pi i m W(r)/\lambda + 2\pi i W_c(r)/\lambda + 2\pi i W_{in}(r)/\lambda) = \\ &\dots A_{-1} \exp(-2\pi i W(r)/\lambda + 2\pi i W_c(r)/\lambda + 2\pi i W_{in}(r)/\lambda) + \\ &A_0 \exp(2\pi i W_c(r)/\lambda + 2\pi i W_{in}(r)/\lambda) + \\ &A_1 \exp(2\pi i W(r)/\lambda + 2\pi i W_c(r)/\lambda + 2\pi i W_{in}(r)/\lambda) \dots \\ A_m &= D \text{sinc}(D_m), A_0 = D \quad W(r) = W_f + W_p \quad (11) \end{aligned}$$

式中: A 为各衍射级次的系数值; D 为计算全息图的占空比; m 代表各衍射级次; $W_c(r)$ 是标准球面波的位相, 由补偿镜引起, 用来补偿理想凹非球面与球面之间的部分波相差并承担部分光焦度。各衍射波中 $m=+1$ 级为所需要的级次, 形成理想的凹非球面波, 垂直照射到待检凹非球面上。由凹非球面反射的波前再次经过计算全息图和补偿镜的补偿后, 其中的 $m=+1$ 级衍射光产生带有凹非球面表面误差的波前并会聚于一点。而其他级次则成像于光轴上其他不同的位置如图 4 所示。在 $m=+1$, $m=+1$ 级衍射光的会聚处加光阑形成空间滤波器, 滤掉其他级次杂光。与传统的凹非球面折射式零检测光学系统相比, 减少了系统中光学元件的数目, 使装调变得相对容易。同时可以先对补偿镜进行精确检测, 利用计算全息图自身的特性, 在刻制时对其制作误差进行补偿, 这样就可以降低补偿镜的制作精度, 减少费用。

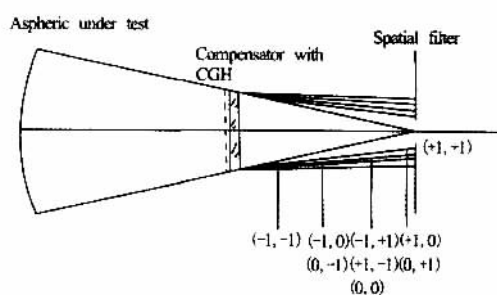


图 4 利用空间滤波器以滤掉不必要级次
Fig.4 Illustration of filtering out the unnecessary diffraction orders by space filter

3 模拟结果

待检凹面非球面的参数为: 孔径 $D=950$ mm, 球面半径为 $7\,200$ mm, 非球面系数为 -1 。

使用光学设计软件对检测凹非球面的光学系统进行了设计, 光路结构如图 5 所示。

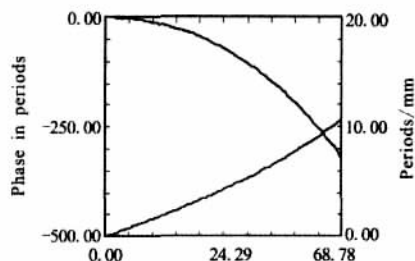


图 5 二元面位相分布图
Fig.5 Phase distribution of binary surface

光线追迹得到了该系统在出瞳位置得到的干涉图的 P-V 值为 0.024 。其中关键元件球面样板的二元面的位相数据见表 1, 分布图见图 5。

表 1 二元面的参数

Tab.1 Parameters of binary surface

Binary	Max term	Norm radius	Coeff. on		
			p^2	p^4	p^6
6	2	50	-889.193	-90.74	-0.13

从设计的结果可知, 在最大半孔径 68.78 mm 处的球面 CGH 样板上每毫米共有大约 10.72 个环带周期, 很容易制作。

4 结论

文中主要针对目前检测凹曲面反射镜存在的困难, 研究 CGH 在凹曲面检验中的应用, 通过将 CGH 刻制在补偿镜的表面, 成功地降低了 CGH 与补偿镜的制作要求, 简化了装调过程。这种新的完全独立的

检测系统不仅可以用来高精度检测大口径的凹非球面, 还可以验证传统零补偿系统的检测结果, 具有重要的使用价值。

参考文献:

- [1] SHEN Zheng -xiang,HAO Pei -ming,ZHAO Wen -cai,et al. Autocollimating testing of convex conic aspheric surface[J]. Infrared and Laser Engineering(沈正祥, 郝沛明, 赵文才,等. 凸二次非球面反射镜的自准法检验.红外与激光工程), 2005,34(1):46- 50.
 - [2] OFFNER A. Field lenses and secondary axial aberration [J]. Appl Opt, 1969, 8:1735- 1736.
 - [3] OFFNER A. A null corrector for paraboloidal mirrors [J]. Appl Opt, 1963, 2:153- 155.
 - [4] SASIAN J M. Optimum configuration of the offner null corrector: testing an F/1 paraboloid [C]// Proceedings of SPIE, 1989,1164: 8- 17.
 - [5] Broder -Burszyn F, Malacara -Hernandez D. Holographic interferometer to test optical surfaces [J]. Appl Opt, 1975, 14 (9): 2280- 2282.
 - [6] AMOLD S M. How to test an asphere with a computer generated hologram [C]// Proceedings of SPIE, 1989, 1052: 191- 197.
 - [7] LOOMIS J S. Computer -generated holography and optical testing [J]. Opt Eng, 1980, 19(5): 679- 685.
 - [8] Tae-hee K, BURGE J H, LEE Y W. Measurement of highly parabolic mirror using computer generated hologram [C]// Proceedings of SPIE, Interferometry XI: Applications, 2002, 4778: 119- 126
 - [9] BURGE J H. Applications of computer -generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics [C]// Proceedings of SPIE, International Conference on Optical Fabrication and Testing,1995, 2576:258- 269.
 - [10] BURGE J H, ANDERSON D S, MILSTER T D, et al. Measurement of a convex secondary mirror using a holographic test plat [C]//Proceedings of SPIE, Advanced Technology Optical Telescopes V, 1994, 2199:193- 198.
 - [11] LIU Hua,LU Zhen -wu,LI Feng -you.CGH testing system for large aspheric surface[J]. Infrared and Laser Engineering(刘华, 卢振武, 李凤有.大口径非球面检测系统.红外与激光工程),2006, 35(2):177- 182.
-
- (上接第 292 页)
- omena [J]. Appl Phys Lett, 2000, 77 (23): 3698- 3700.
 - [7] WANG Li, WANG Zhan -shan, WU Yong -gang, et al. Enlargement of the nontransmission frequency range of multiple -channeled filters by the use of heterostructures [J]. J Appl Phys, 2004, 95 (2): 424- 426.
 - [8] WANG Zhan -shan, WANG Li, WU Yong -gang, et al. Multiple channeled phenomena in heterostructures with defects mode [J]. Appl Phys Lett, 2004, 84 (10): 1629- 1631.
 - [9] WANG Zhan -shan, SANG Tian, WANG Li, et al. Guided -mode resonance Brewster filters with multiple channels [J]. Appl Phys Lett, 2006, 88 (25): 251115 (1- 3).
 - [10] WANG Zhan -shan, SANG Tian, ZHU Jing -tao, et al. Double -layer resonant Brewster filters consisting of a homogeneous layer and a grating with equal refractive index [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89 (24): 241119 (1- 3).
 - [11] WANG Shao -wei, CHEN Xiao -shuang, LU Wei, et al. Integrated optical filter arrays fabricated by using the combinatorial etching technique [J]. Opt Lett, 2006, 31 (3): 332- 334.
 - [12] JIAO Hong -fei, WU Yong -gang, TIAN Guo -xun, et al. Two -chamber integrated multi -channel narrowband filter prepared by multi -step etching method [J]. Appl Opt, to be published.
 - [13] MACLEOD H A. Thin -film optical filters [M]. Bristol: Institute of Physics, 1989.
 - [14] MAGNUSSON R, SHIN D, LIU Z S. Guided -mode resonance Brewster filter [J]. Opt Lett, 1998, 23 (8): 612- 614.
 - [15] GAYLORD T K, MOHARAM M G. Analysis and application of optical diffraction by gratings [J]. Proc IEEE, 1985, 73 (5): 894- 937.
 - [16] RYTOV S M. Electromagnetic properties of a finely stratified medium [J]. Sov Phys JETP, 1956, 2 (3): 466- 475.
 - [17] LIU Z S, MAGNUSSON R. Concept of multiorder multimode resonant optical filters [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2002, 14 (5): 1091- 1093.