

文章编号 1004-924X(2004)06-0555-05

利用曲面计算全息图进行非球面检测

卢振武,刘 华,李凤有

(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,吉林 长春 130033)

摘要:研究了利用曲面计算全息图进行非球面检测。分析了曲面计算全息图的衍射特性,给出了曲面计算全息图与传统检测方法相结合检测凹非球面和凸非球面的原理及特点,并进行了具体设计。利用激光直接写入设备,在口径为 110 mm、曲率半径为 504 mm 的曲面基底上制作出了计算全息图,并对金刚石车床车削的凸面非球面进行了检测。利用两步测量法解决了凸非球面的中心部位难以检测的难题,同时利用旋转相减法消除了调节误差,非球面的面形精度为 234 nm(PV),与金刚石车床的精度相符。

关键词:激光直写;非球面检测;计算全息图

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

Aspheric surface testing with CGH on curved surface

LU Zhen-wu, LIU Hua, LI Feng-you

(State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A research on aspheric surface testing by using a computer-generated hologram (CGH) on curved surface is presented. The diffractive property of CGH on curved surface is briefly analyzed, and the principle, property and design examples are given for testing concave and convex aspheric surface, respectively. Compared with the traditional testing methods, this method not only simplifies the optical system, but also decreases the fabrication accuracy of the computer-generated hologram. A CGH on a concave surface with diameter of 110 mm and radius curvature of 504 mm was fabricated by using a laser direct writer, and used to test a convex aspheric surface produced by diamond-turning successfully. Two methods were developed, one that utilizes the strategy in measuring twice can overcome the difficulty in measuring the center areas of the aspheric surface under test, the other that utilizes the strategy of rotating and subtracting can eliminate adjustment errors. We have successfully measured a 110 mm diameter convex surface with the error of 234 nm PV, which well agree with the fabrication accuracy of the surface produced by diamond-turning.

Key words: laser direct writer; aspheric surface testing; computer-generated hologram

收稿日期:2004-10-04;修订日期:2004-11-07.

基金项目:国家自然科学基金(60078006)和中国科学院创新课题(2002LQ.04)资助

1 引言

随着光学加工和检测技术的不断发展,光学系统中采用非球面愈来愈普遍。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。而这些光学系统一般都需要使用非球面镜。高精度的非球面制作需要高精度的检测方法。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]。然而这种方法需要大口径的辅助镜面,尤其是检测凸非球面,辅助镜面的口径往往是待测镜面的几倍。对不具有无像差点的非球面,可采用零检验方法^[2]。目前零检验方法中的补偿器一般都采用折射式的,不仅制作精度要求很高,在装调过程中相对位置也要求非常精确,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,导致主镜的二次项系数有误以致造成巨大损失。凸非球面的口径较大时,一般需要采用背检的方法,由于检测时光在凸非球面的背面入射到非球面上,因此,除需制作零透镜之外,还要求制作非球面的材料均匀性特别好,非球面的另一个表面也要加工到非常高的精度,这无疑增加了费用和制作难度。利用计算全息图(CGH)检测非球面,可以说是非球面检测方法的一个重大突破^[3-4]。但由于一般都是把计算全息图制作在平面基底上形成单独的检测元件,计算全息图的特征尺寸较小,计算全息图的制作精度成为限制该方法应用的主要瓶颈。若把计算全息图制作在透镜的曲面基底上,与传统的补偿法相结合,或与传统的样板法相结合,可以大大降低了计算全息图的制作要求^[5-8]。

本文主要介绍了在非球面检测方面的一些工作,初步研究了曲面 CGH 与传统的补偿法或样板法相结合,检测凹非球面以及凸非球面的原理和方法。设计了两套检测非球面的干涉仪分别用来检测凹非球面和凸非球面,并且实际制作搭建了凸面非球面的检测装置。利用自行研制的激光直写设备,制作出了曲面计算全息图,对利用金刚石车床制作的凸面非球面进行了实际检测。结果与车床的实际制作精度吻合的很好,证明了该方法是检测大口径凸面非球面的可行性。实验过程中通过两步检测法解决了中心无法检测的问题,

实现了全口径检测;并通过旋转检测法消除了调整误差,提高了检测精度。

2 曲面计算全息图(CGH)的衍射特性

用于检测非球面的计算全息图的位相函数可分为两部分:

$$W_{\text{CGH}}(r) = W_f(r) + W_p(r), \quad (1)$$

$W_f(r) = r^2$, 可以调节光焦距,使各衍射波最后会聚于光轴上不同位置,通过滤波分离掉其他级次的杂散光,而 $W_p(r)$ 用来补偿理想非球面与理想球面之间的位相差。可见,由于光焦距的存在,计算全息图的各衍射级次会聚在光轴上的不同位置,光焦距越大,越有利于用小孔滤波,中心因各级次相互混叠而无法检测的部分就越小。然而,光焦距并不能无限制的增大,这样会导致计算全息图的特征尺寸过小,增加计算全息图的制作困难,甚至无法制作。在参考文献[9]中已经详细讨论了这方面的问题,尤其是对小孔的选择问题。

3 凹非球面的检测原理及设计实例

利用曲面计算全息图与零位补偿法结合进行凹面非球面检测方法如图 1 所示,激光经显微镜和针孔后,产生标准球面波,经过分束器后,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,使照明光经带有全息图的透镜后,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,在反射光会聚处加光栏,滤掉其它级次杂光。这种检测方法与传统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。

利用 Zemax 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 1 所示。其中待检凹面非球面的参数为:

孔径: $D = 1\ 000\ \text{mm}$, 球面半径为 $2\ 000\ \text{mm}$, 非球面系数为 -1

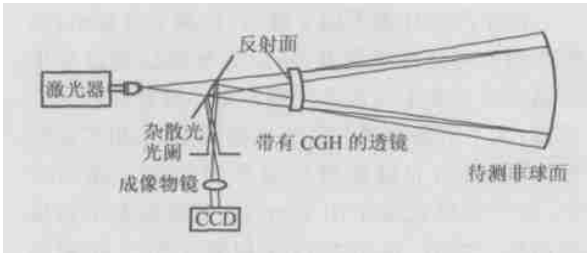


图 1 用 CGH 检测凹非球面的光路图

Fig. 1 Configuration for CGH measurement of concave aspheric

Jose M. Sasian 等曾经设计过用两片透镜(包括一片场镜)来检测同样参数的非球面的检测系统,其设计结果 $P-V$ 值为 0.01^[10]。而我们设计的系统中只含有一片透镜,大大地降低了系统制作以及装调的难度,减少了检测成本。光线追迹得到了该系统在出瞳位置得到的干涉图见图 2,检测精度为 0.024 ($P-V$),可以满足绝大多数应用要求。

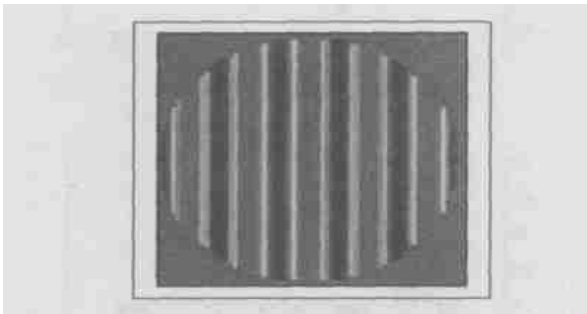


图 2 干涉图

Fig. 2 Interferogram map

4 凸非球面检测原理及设计实例

利用曲面计算全息图进行凸面非球面检测的原理图如图 3 所示^[11],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,由全息图的反射衍射 1 级光产生标准的待检非球面波前。设计时,使照明光经过照明物镜和带有全息图的透镜后,垂直照射在待检非球面上,由非球面反射的波前与计算全息图的反射衍射 1 级所产生的标准非球面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栏,滤掉其它级次杂光。这种检测方法无需加工高精度的凹非球面,检测系统的加工精度及调整精度要求较低,检

测系统的光学元件的口径较小,对非球面的制作材料及后表面的加工精度没有特殊要求,CGH 的最小特征尺寸大幅度提高,是检测大口径凸非球面的较为理想的方法。

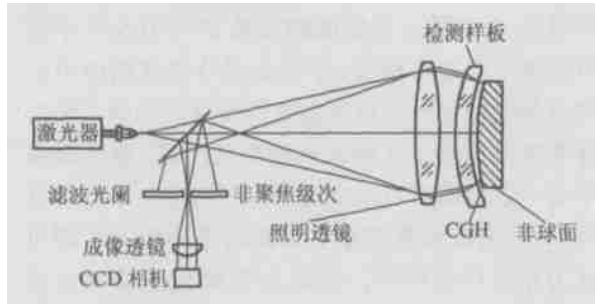


图 3 曲面计算全息图进行凸面非球面检测的原理图

Fig. 3 Configuration for CGH measurement of convex aspheric

使用光学设计软件对检测凸非球面的光学系统进行了设计,其结构如图 4 所示。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 0.017 3。其中待检凸面非球面的参数为:孔径 $D = 100 \text{ mm}$,球面半径为 500 mm,非球面系数为 1

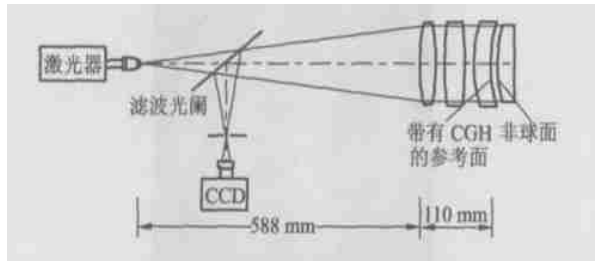


图 4 检测凸非球面的光学系统结构图

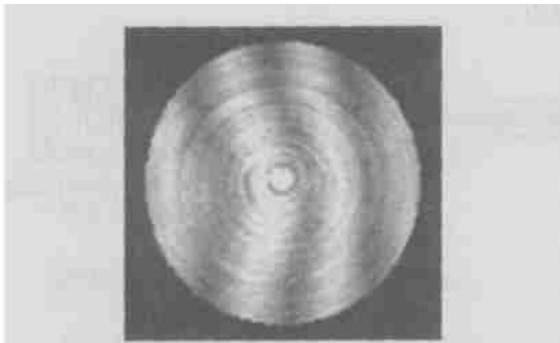
Fig. 4 Configuration for CGH measurement of convex aspheric

5 凸非球面检测结果

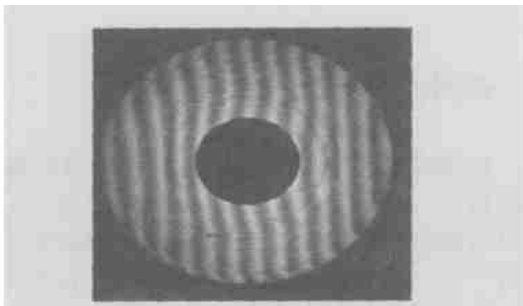
在完成光学设计后,利用自行研制的激光直写设备,在口径为 110 mm,曲率半径为 504 mm 的凹透镜表面上制作了用于凸面非球面检测的全息图^[12-13]。其线宽在 40 μm 到 800 μm 之间。在完成制作后,对制作结果进行了测定,其线宽误差为 0.8 μm 。在完成辅助光学元件和计算全息图制作的基础上,利用如图 4 所示的光路,进行了非球面的实际检测^[14],试验中被检非球面是利用金

刚石车床直接车削而成,口径大于 100 mm,与最接近球面的最大偏离量为 40 μm。

实验过程中,主要解决两大问题,一是实现全口径检测,即中心部位的检测。二是调节误差的消除。为了全口径检测待测非球面,采用了两步测量法^[15]。两步测量法的实质是利用两个不同口径的小孔进行滤波,分别检测凸非球面的中心部分和周边部分。首先根据所设计的光学系统的参考波与检测波在像面处的空间频率,确定出在中心一定范围内可以实现全口径检测的小孔的直径(一般未被检测部分小于检测部分的 4% 即可认为是全口径检测),将此小孔放到频谱面上滤波,并进行第一步测量,便可得到中心部分的面形质量。再根据所设计的光学系统的参考波与检测波在像面处的空间频率,确定出可以检测其他部位的小孔的直径,再将此小孔放到频谱面上滤波进行第二步测量。综合两次检测结果,便实现了全口径的检测。图 5 为利用两步测量法分别得到的中心部分和周边部分的干涉图,显然因其他级次相混叠而造成的中心亮斑已经很小了,完全可以忽略。



(a) 中心部位的干涉图
(a) Interferogram for center

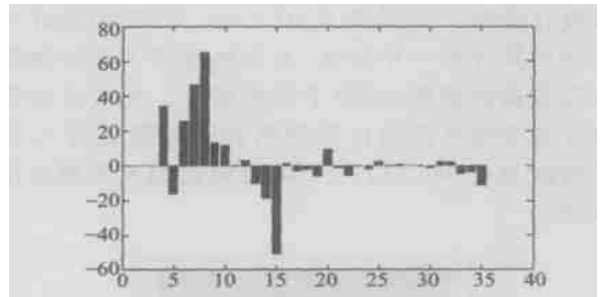


(b) 边缘部位的干涉图
(b) Interferogram for margin

图 5 两次检测干涉图

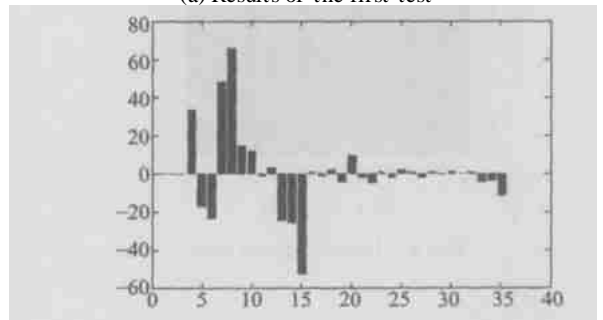
Fig. 5 Interferogram of two mensUREMENTS

由于凸非球面不同于球面,在调节过程中,倾斜与偏心均会造成慧差,所以非球面检测过程中的调节误差基本为慧差。慧差是一种非旋转对称误差,为了消除因调节而产生的慧差,采用了旋转相减法,对凸非球面进行两次测量^[16]。在实验中,调节好后记录下用 Zernike 多项式表示的检测结果。然后,将凸非球面相对于第 1 次旋转 180°,并且保持第 1 次的调节状态,记录检测结果。对两次检测结果进行处理即可得到调节过程中的慧差。图 6 为两次检测 Zernike 多项式的系数。而图 7 为处理后的 Zernike 多项式的系数。Zernike 多项式中第 6, 7, 13, 14, 22, 23, 33, 34 为



(a) 第 1 次检测结果

(a) Results of the first test



(b) 旋转 180 后的检测结果

(b) Results of the second test after rotating 180°

图 6 检测结果

Fig. 6 Results of the test

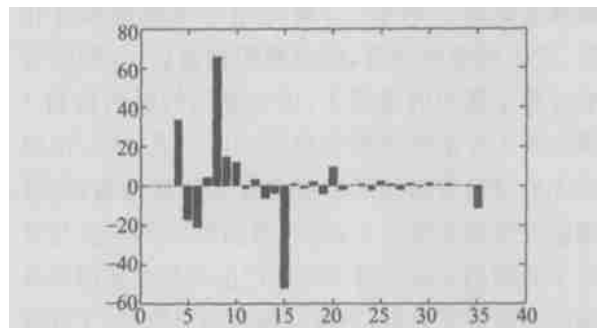


图 7 处理后的结果

Fig. 7 Results after processing

慧差,可以看出处理后的慧差大大减小。

6 结 论

本文简要分析了利用曲面计算全息图检测非球面的特点,通过与传统的方法对比,证明了该方法的优越性,并给出了实例。利用激光直接写入设备,制作出了计算全息,建立了凸面非球面的检测装置,对凸面非球面进行了实际检测。由于金

刚石车削凸面非球面的精度有限,本文的实验只是验证了利用曲面计算全息图检测凸非球面可行性的。同时也提出并验证了检测中心部分和消除调整误差的方法。曲面计算全息图检测非球面所能达到的检测精度以及曲面计算图的制作误差对检测面形精度的影响等问题的探讨,需要有面形精度很好的待检非球面。我们已经设计搭建了另一套检测系统,系统中待测面为凸球面,由于凸球面的精度很高,可以验证该方法的检测精度。

参考文献:

- [1] WYANT J C. Interferometric testing of aspheric surfaces[J]. *SPIE*, 816:19-39. (1987)
- [2] OFFNER A, MALACARA D. Malacara, Null tests using compensators[M]. Wiley, New York, 1992.
- [3] MERCIER R. Holographic testing of aspherical surfaces[J]. *SPIE*, 1997, 136:208-214.
- [4] WYANT J C, BENNETT V B. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts[J]. *Appl. Opt.*, 1972, 13(11):2833-2839.
- [5] BURGE J H. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics[J]. *SPIE*, 1995, 2576:258-269.
- [6] BURGE J H, ANDERSON D S. Full aperture interferometric test of convex secondary mirrors using holographic test plates[J]. *SPIE*, 1995, 2199:181-192.
- [7] FOULDE M, FERCHER A F, TORGE R. Optical testing by means of synthetic holograms and partial lens compensation [J]. *Opt. Commu*, 1973, 7(4):363-365.
- [8] WYANT J C, NEILL P K O. Computer generated hologram; Null lens test of aspheric wavefronts[J]. *Appl. Opt.*, 1974, 13(12):2763-2769.
- [9] 刘华, 卢振武, 李凤有, 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.
- [10] SASIAN J M. Design of null lens correctors for the testing of astronomical optics[J]. *Opt. Eng.*, 1988, 27(12):1051-1056. (in Chinese)
- [11] 常军, 李凤有. 利用计算全息图检测大口径凸面非球面[J]. *光学学报*, 2003, 23(10):1266-1268.
- [12] XIE Y J, LU ZH W, LI F Y, et al. Lithographic fabrication of large diffractive optical elements on a concave lens surface [J]. *Opt. Express*, 2002, 10(8):1043-1047. (in Chinese)
- [13] XIE Y J, LU ZH W, LI F Y. Lithographic fabrication of large curved hologram by laser writer[J]. *Opt. Express*, 2004, 12(9):1180-1184.
- [14] 卢振武, 李凤有, 刘华, 等. 利用曲面计算全息图进行凸面非球面检测[J]. *光电子 激光*, 2004, 15(9):1088-1090.
- [15] LIU H, LU ZH W, LI F Y, et al. Testing aspheric in interferometric setups: removal of adjustment errors from measurement result[J]. *Opt. Commu*, 2004, 242:339-344. (in Chinese)
- [16] LIU H, LU ZH W, LI F Y, et al. Full-aperture measurement of convex surfaces in interferometric test using holographic test plate[J]. *Opt. Commu*, 2004, 241:231-236. (in Chinese)

作者简介:卢振武(1955-),男,吉林人,研究员,博士生导师,主要研究方向为衍射光学、光学检测和光信息处理。