

用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估

高松涛^{1,2} 隋永新^{1*} 杨怀江¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 计算全息图(CGH)作为零位补偿器,越来越广泛地应用于高精度非球面检测领域。CGH 的设计、编码、加工和装调等误差,直接限制了非球面的检测精度。提出一种切实可行的检测非球面的流程与方法,完成了对 CGH 基底的标定、参考镜的绝对标定和 CGH 的畸变校正,实现对非球面的高精度检测。除了采用传统的平方根之和(RSS)误差合成分析方法外,还通过与无像差点法测量结果的对比,从实验上获得了此方法的测量精度。实验结果表明,利用 CGH 对非球面进行检测的精度可以达到 3.9 nm[均方根(RMS)值]。

关键词 测量;非球面检测;计算全息图;绝对标定

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0612003

High Precise Testing of Asphere with Computer-Generated Hologram and Error Evaluation

Gao Songtao^{1,2} Sui Yongxin¹ Yang Huaijiang¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Computer-generated hologram (CGH) is more and more popularly applied in the high-precision testing of asphere as high-accuracy null compensator. The errors of design, coding, fabrication and alignment restrict the testing precision. A practicable method to test the asphere precisely is presented, and the calibration of CGH substrate, the calibration of reference surfaces, as well as distortion correction to improve the testing precision are accomplished. In order to obtain the measurement precision, in addition to the traditional root square sum (RSS) error analysis, the testing precision is directly evaluated through experimental comparison with the method of aberration free image conjugate point. The experimental result shows that the testing precision of asphere with CGH could reach 3.9 nm [root mean square (RMS)].

Key words measurement; asphere testing; computer-generated hologram; absolute testing

OCIS codes 120.2880; 120.3940; 050.1380; 090.2880

1 引言

在光学设计中,单个球面可以供优化的自由度只有曲率半径;而非球面除了顶点曲率半径之外,还有二次曲面常数和高阶项系数。由于非球面比球面拥有更多的设计自由度,所以在高精度的相机和光刻物镜中,都普遍采用非球面元件来减小系统的复

杂度,并提高系统的成像质量^[1,2]。虽然非球面有优良的光学性质,但是非球面检测,特别是高精度非球面检测,一直是光学检测领域的一个难题,也是制约非球面元件应用的关键因素。对于非球面偏离度较小的非球面,可以采用环带拼接法^[3]或子孔径拼接法^[4]进行检测,但检测精度往往受制于机械定位

收稿日期: 2012-10-15; 收到修改稿日期: 2012-12-28

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)资助课题。

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

导师简介: 杨怀江(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事高精度光学加工和检测技术等方面的研究。

E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: suiyx@sklao.ac.cn

误差和干涉仪的非共光路误差。如果非球面是二次曲面,也可以采用无像差点法^[5]进行检测,但往往会引入中心遮拦;而对于高次非球面,则采用零位补偿法进行检测。

零位补偿法一般采用补偿镜或者计算全息图(CGH)作为补偿器,使干涉仪发出的球面波转化为与被测非球面相匹配的非球面波,从而实现非球面的零位检测。由于零位补偿器放置于测试光路中,所以补偿器的设计、加工和装调误差,往往制约了零位补偿法的测量精度。通常的补偿镜一般由两片或者三片透镜组成^[6];对于高精度补偿镜,加工和装调都极为困难,成本极高。CGH作为新兴的二元光学衍射元件,经过图形编码之后,由激光直写或者电子束刻蚀的方法制备^[7],制作精度很高,并且使用方便。因此,在非球面检测领域,往往使用CGH作为补偿器来实现对非球面的高精度检测。

Schreiner等^[8]给出了CGH相位的计算方法,但CGH基底的面形误差对此种调节方法的影响较大,而且他们并未评估此种方法的测量精度。Zhou等^[9]采用线性光栅模型分析了CGH的各种加工误差对非球面测量精度的影响,并且提出了CGH基底的标定方法,但其直接通过平方根之和(RSS)误差合成的方法计算总的测量误差,未对各项误差进行相关性分析,也未考虑CGH的装调误差。Kim等^[10,11]通过采用CGH法与抛物面的无像差点法相对比的方法,从实验上验证了CGH法的正确性,但并未提及对测量过程中畸变的校正,也未对各个参考面和CGH基底进行绝对标定,同时两种测量结果也未进行“点对点”比对。针对前人工作中的问题,本文对顶点曲率半径为100 mm、口径直径为75 mm的抛物面,设计了零位检测的CGH和辅助装调的CGH,给出了CGH调节方案,并采用RSS误差合成的方法给出了非球面检测的误差;而后提出了高精度检测非球面的流程与方法,完成了CGH基底的标定、参考镜的标定、CGH的精密调节和CGH的畸变校正,从而实现了对非球面的高精度检测。通过与无像差点法的比对,从实验上获得了CGH测量非球面的精度。

2 CGH的设计及RSS误差分析

2.1 非球面方程

通常意义上的非球面一般指偶次非球面,其方程为

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

式中 Z 为矢高, 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, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

当 $\kappa = 0$,并且 $A_n = 0$ 时,非球面退化为球面;若 $\kappa \neq 0$,并且 $A_n = 0$,此时的非球面也称作二次非球面。由于非球面比球面有更多的设计自由度,因此在高精度光学系统中,多采用非球面技术来降低系统的复杂度并提高成像质量^[2]。

2.2 CGH的设计

CGH作为二元衍射光学元件,基于衍射理论的光栅方程是其设计的基础:

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

式中如图1所示, n_1 和 n_2 为两种介质的折射率, M 为CGH的衍射级次, λ 为光波波长, d 为CGH刻线的空间周期, f 为CGH刻线的空间频率。文献[11~15]论述了CGH相位的计算,本文不再重复,重点放在CGH的布局及调节方案的设计上。

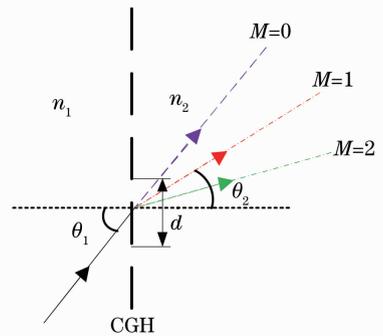


图1 光栅方程示意图

Fig. 1 Schematic of grating equation

CGH的功能区的设计及布局决定了CGH的调节方法与调节难度,同时也决定了CGH位置的调节精度。为了方便CGH的装调及提高测量精度,CGH上除了刻蚀用于零位补偿的区域外,还刻蚀有辅助装调的区域,其布局如图2(a)所示。CGH共设计了三个功能区,最外环为CGH倾斜调整区,用于辅助装调CGH的倾斜,采用反射型CGH,调节方案如图2(b)所示;中间环为CGH离焦调整区,用于辅助装调CGH的离焦,调节方案如图2(c)所示;最内圈为零位补偿区域,用于将球面波转化为与非球面相匹配的非球面波,从而实现零位检测,如图2(d)所示。图中TS为干涉仪的球面标准具,RF为平面反射镜。

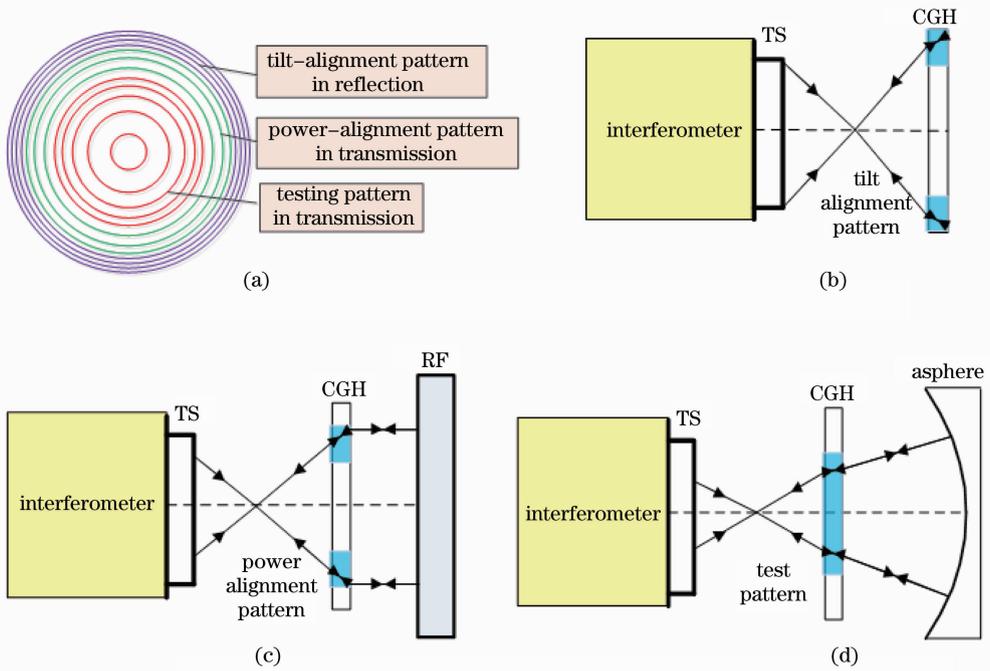


图2 (a) CGH 功能区的布局; (b) CGH 倾斜调整示意图; (c) CGH 离焦调整示意图; (d) 用 CGH 测量非球面示意图
 Fig. 2 (a) Layout of functional areas of CGH; (b) schematic of tilt alignment; (c) schematic of defocus alignment;
 (d) schematic of measuring the asphere with CGH

2.3 CGH 的误差分析

针对 2.2 节的 CGH 的设计方案和装调方案, 本实验所需 CGH 的 RSS 误差分析如表 1 所示。

表 1 用 CGH 测量非球面的 RSS 误差分析

Table 1 RSS error analysis of testing asphere with CGH

Contributor	Surface error / nm
Design residual	0
Wavelength uncertainty of 0.01 nm	0.1
Encoding error	0.6
Patterning error ¹	0.4
Substrate thickness ²	0.1
Substrate wedge ³	0.1
1 λ transmission power	0.5
CGH tilt ⁴	0
CGH defocus ⁵	0.8
Residual after subtracting substrate's transmitted wavefront error (TWE) ⁶	0.9
Transmission sphere calibration	0.5
Measurement noise	0.5
Total RSS	1.8

¹This is conservative. There is about 12 nm RMS as-measured writing error over the minimum fringe spacing of 10 μm . ²As-measured thickness was used in design prior to fabrication, and the measurement uncertainty is about 0.002 mm. ³Uncertainty of 1.5 μrad or 1 λ surface-surface tilt fringes. ⁴Assuming tilt alignment wavefront of 1 λ peak-to-valley (PV); ⁵Assuming focus alignment wavefront of 0.3 λ PV. ⁶Assuming 3.4 μrad TWE slope error and 0.2 mm mapping error.

3 用 CGH 测量非球面的流程

用 CGH 对非球面进行检测时, CGH 刻线的位置误差、CGH 基底的面形误差、干涉仪参考镜的面形误差、CGH 位置的调节误差和 CGH 的成像畸变等, 都会限制非球面的检测精度。其中, CGH 基底的面形误差、参考镜误差和 CGH 的畸变, 都可以进行标定; CGH 的调节误差, 则可以利用所设计的辅助调节 CGH 进行精心调节。为了提高非球面的测量精度, 采用以下检测流程。

1) CGH 基底的标定。

由于 CGH 处于检测光路中[如图 2(d)所示], CGH 基底的面形误差和折射率均匀性都会影响透射波前, 从而影响非球面的测量精度。由于 CGH 的 F 数较小(0.75), 故采用 CGH 的零级衍射光在平行光路中进行标定^[16], 如图 3(a)所示。CGH 放入平行光路中进行一次测量, 将 CGH 从平行光路中取出之后, 再进行一次测量, 两次测量的偏差即为 CGH 基底透射波前的误差, 标定结果如图 3(b)所示, 图中 TF 为干涉仪的平面参考镜。

2) 参考球面镜(TS)的标定。

实验所采用的 TS 为 Zygo 的球面标准具, 标称面形的 PV 值为 $\lambda/20$ 。对参考镜的标定, 一般都采用绝对检测的方法。对于球面参考镜, 可以采用

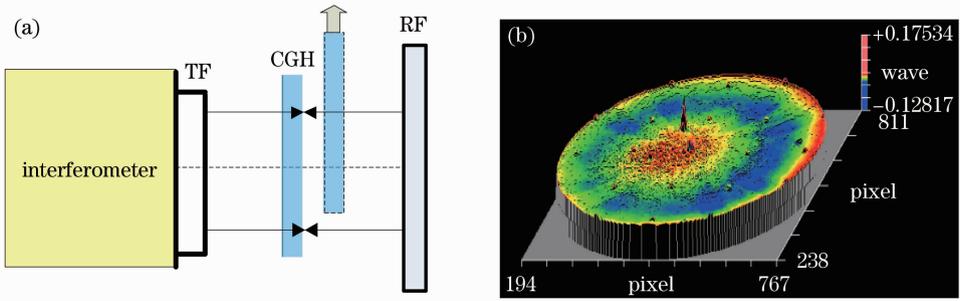


图 3 (a) CGH 基底标定示意图; (b) CGH 基底标定结果, PV 为 192 nm, RMS 为 5.8 nm

Fig. 3 (a) Schematic of CGH substrate calibration; (b) result of CGH substrate calibration. The PV is 192 nm, and RMS is 5.8 nm

随机小球平均法^[17]、三位置法^[18]和旋转平移法^[19]等方法进行绝对标定。

3) CGH 的调节。

CGH 位置精度直接限制了测量的精度。利用光学设计预先设定的功能环,可以通过干涉图来精确调节 CGH 的倾斜和离焦,如图 4 所示。具体调节方法如下:①利用图 2(b)所示的方案图,根据图 4(a)外圈的倾斜调整环来调节 CGH 的倾斜,使外圈干涉图的条纹最少;②利用图 2(b)所示的方案图,根据图 4(a)内圈的离焦调整环来调节 CGH 的离焦,使内圈干涉图的条纹最少;③利用图 2(d)所示的方案图,根据图 4(b)中心区域的干涉图来调节非球面,使中心区域干涉图的条纹最少,从而实现非球面的零位检测。图 4(b)外圈的干涉图为 CGH 的倾斜调节干涉图,根据干涉图的条纹可以看出当前 CGH 的位置调节已经非常精确。

4) 畸变校正。

对于商用的干涉仪,系统的成像畸变一般都比较小(约 0.5%)。但是,由于 CGH 的自由度都用于进行相位补偿,并没有多余的自由度用于像质优化,因此,加入 CGH 之后,干涉仪系统的成像质量会严

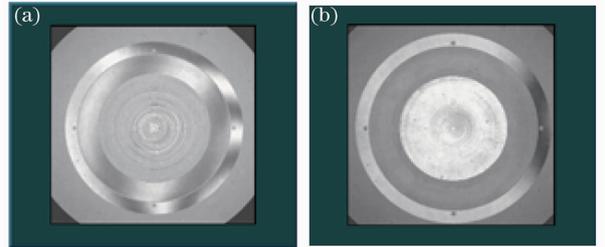


图 4 利用 CGH 上的辅助调节环来调节 CGH 和非球面。
(a) CGH 的倾斜调整环和离焦调整环的干涉图;
(b) CGH 的倾斜调整环和非球面的干涉图

Fig. 4 Using the alignment pattern to align the CGH and asphere. (a) Interferogram of tilt-alignment pattern and power-alignment pattern; (b) interferogram of tilt-alignment pattern and asphere

重下降,并产生明显的畸变,如图 5(a)所示。成像畸变会使系统的低阶像差衍生为高阶像差^[20],并限制加工的精度。考虑系统的对称性,可以采用以下畸变校正模型,通过最小二乘法进行畸变校正:

$$\begin{cases} x = x_0 + (x_0 - x_d)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) \\ y = y_0 + (y_0 - y_d)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 (x_0, y_0) 是畸变之前的坐标点, (x, y) 是畸变之后的坐标点, (x_d, y_d) 是畸变中心, K_2, K_4 为径向畸变

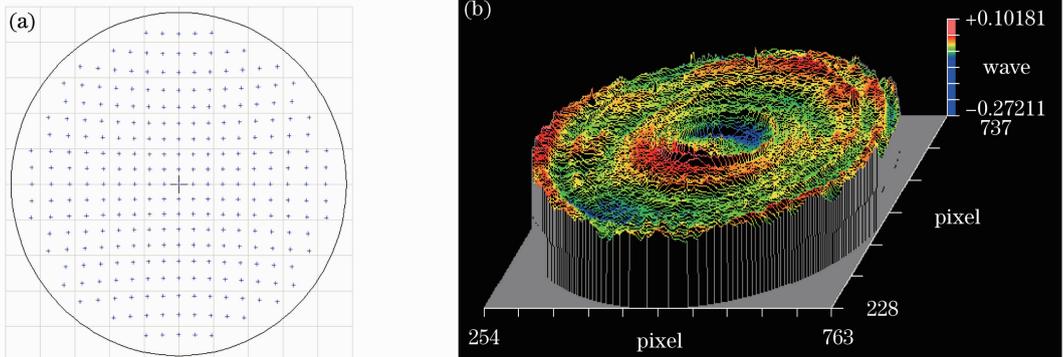


图 5 (a) CGH 的畸变; (b) 畸变校正之后,非球面的检测结果。PV 为 236 nm, RMS 为 12.6 nm

Fig. 5 (a) Distortion of CGH; (b) testing result after correcting distortion. The PV is 236 nm, and RMS is 12.6 nm

系数, $r = \sqrt{(x_0 - x_d)^2 + (y_0 - y_d)^2}$ 。完成畸变校正之后, 最终的非球面检测结果如图 5(b) 所示。

4 CGH 测量非球面的误差评估

当前, 对 CGH 的误差评估一般采用光学仿真和经验估算的方法^[9], 如 2.3 节中的表 1 所示。这类方法首先要逐个分析可能引起测量误差的误差源, 而后通过仿真或者经验值估算, 分析此误差源可能对测量结果造成的影响, 最后通过误差合成的方法, 计算得出测量的总的误差。此方法计算简单, 但是往往需要一些经验值作为输入, 如 CGH 的倾斜量和离焦量; 另外, 进行误差合成的时候, 将各个误差视为相互独立, 并未进行相关性分析。其实, 表 1 中有些分项误差是可能相互耦合的, 例如基底的厚度误差、基底的曲率误差(由基底的曲率引入的透射波前的能量)和 CGH 的装调误差。如果基底的实际厚度偏离设计值, 除了可以直接引起非球面的测量误差外, 若采用图 2(b) 和 (c) 所示方案对 CGH 进行调节, 则必然会引入 CGH 的调节误差, 从而间接地引起非球面的测量误差; 同理, 基底的曲率误差也会引入相同的效果。对于此种存在相互耦合的误差项, 需进行相关性分析, 而不能直接进行 RSS 误差合成。但是, 由于整个模型及 CGH 的衍射过程非常复杂, 很难从理论上对各个误差项进行相关性分析。采用蒙特卡罗仿真分析法可以避开相关性分析, 直接获得最终的误差, 但需要明确各个分项误差的误差量及分布类型, 这在实际中也是比较困难的; 若能直接与其他公认的方法相对比, 则可以从实验上获得 CGH 的检测精度。

为了能比较精确地评估 CGH 的测量误差, 同时验证表 1 中所示评估方法的准确性, 利用无像差点法对此非球面(抛物面)进行第二次检测。无像差点法不需要补偿器, 如果能准确标定无像差点法的

参考面, 则此方法测量的结果可视为测量基准, CGH 法测量的结果与此结果的偏差可视为 CGH 法测量的误差。

4.1 无像差点法测量抛物面

无像差点法检测的装置图如图 6(a) 所示, 从干涉仪中出射的平行光, 经过抛物面(被测非球面)的反射, 会聚于抛物面的焦点处; 将高质量的钢球的球心与抛物面的焦点重合, 这样光会沿原路返回。(考虑到光线在抛物面上经过两次反射, 为了增强干涉图的对比度, 因此选择钢球作为反射体。)

对于图 6(a) 所示的检测方案, 设参考平面镜、抛物面和钢球的面形分别为 $W_{TF}(x, y)$, $W_P(-x, y)$ 和 $W_B(x, y)$, 设干涉仪直接测量的面形为 W , 则有

$$W = 2W_{TF}(x, y) + 2W_B(x, y) + 4W_P(-x, y) \times I_{\text{Intf}}(-x, y), \quad (4)$$

即

$$W_P(-x, y) = \frac{W - 2W_{TF}(x, y) + 2W_B(x, y)}{4 \times I_{\text{Intf}}(-x, y)}, \quad (5)$$

式中 $I_{\text{Intf}}(-x, y)$ 为干涉测量的角度因子。角度因子可以通过图 6(b) 所示的示意图来计算, 图中 P 为抛物面上的任意一点, F 为抛物面的焦点, PN 为 P 点的法线, 则有

$$\theta = \arctan\left(\frac{dz}{dx}\right) = \arctan\left(\frac{2s}{R}\right), \quad (6)$$

$$I_{\text{Intf}}(x, y) = I_{\text{Intf}}(\sqrt{x^2 + y^2}) = \cos \theta = \cos\left[\arctan\left(\frac{2\sqrt{x^2 + y^2}}{R}\right)\right], \quad (7)$$

式中 R 为抛物面的顶点曲率半径, $s = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

根据(5)式, 为了求解抛物面的面形 W_P , 还需要获得平面镜的面形 W_{TF} 和钢球的面形 W_B , 即需要对平面参考镜和钢球进行绝对标定。传统上, 平面参考镜都采用三平板法进行标定; 但是仅仅能够

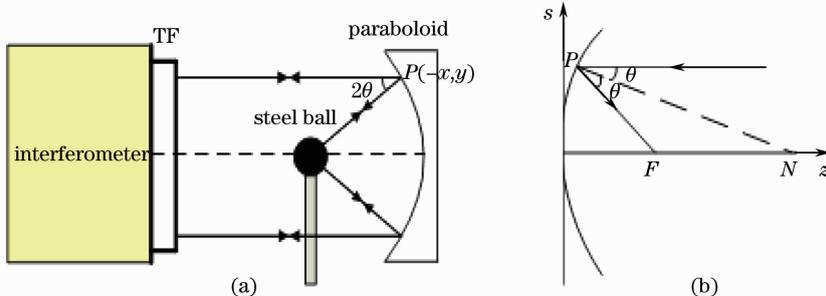


图 6 (a) 无像差点法检测方案的示意图; (b) 角度因子计算的示意图

Fig. 6 (a) Layout of the method of aberration free image conjugate point; (b) layout for calculating the angle factor

标定过平面中心沿 x 方向或者沿 y 方向的一条直线上的面形,不能获得整个平面的面形。如果采用传统的三平板法,然后再加上旋转标定的方法,则可以实现对整个平面的标定,标定结果如图 7(a)所示。

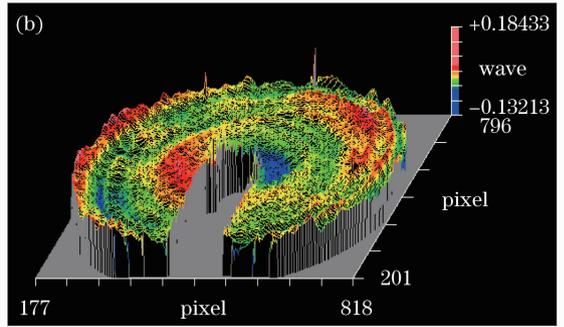
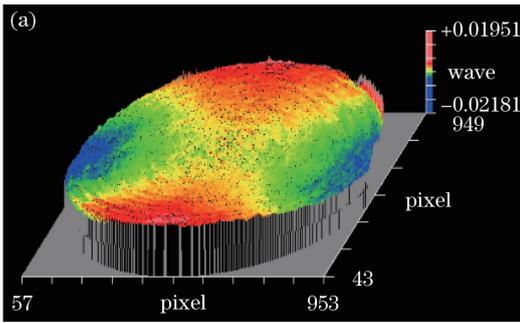


图 7 (a)参考平面镜的标定结果,面形的 PV 值为 26 nm,RMS 值为 1.3 nm;(b)无像差点法的检测结果,面形的 PV 值为 200 nm,RMS 值为 12.4 nm。图中的数据缺失是钢球和支撑杆的遮拦所致

Fig. 7 (a) Calibrating result of TF. The PV is 26 nm and RMS is 1.3 nm; (b) result of method of aberration free image conjugate point. The PV is 200 nm and the RMS is 12.4 nm. The obscured area is caused by the steel ball and pillar

4.2 CGH 法与无像差点法的对比

无像差点法与 CGH 法完全独立,并且不需要补偿器,可能引入误差的参考面都采用绝对标定的方法进行了标定,因此无像差点法的测量结果可以作为测量的基准,CGH 法测量结果与无像差点法的偏差可以视为 CGH 法的测量误差。

利用干涉图上的标记点,将 CGH 法的结果与无像差点法的结果点对点做差,结果如图 8 所示,可以看出,CGH 法的检测精度可以达到 3.9 nm (RMS)。

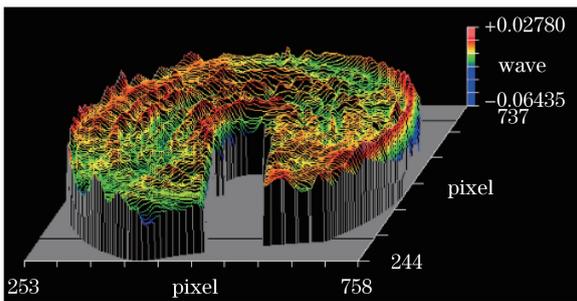


图 8 CGH 法与无像差点法的对比结果。面形的 PV 值为 58.3 nm,RMS 值为 3.9 nm

Fig. 8 Comparison between the method of CGH and aberration free image conjugate point. The PV is 58.3 nm and RMS is 3.9 nm

5 结 论

本文提出了一种切实可行的高精度检测非球面的流程与方法,完成了参考镜的绝对标定、CGH 的精密调节、CGH 的基底标定以及 CGH 的畸变校

正。对于钢球的面形,则可以通过随机小球法^[17]进行平均,即测量时随机旋转小球,然后将所有的测量结果相加,从而抵消小球面形的影响。无像差点法测量的最终结果如图 7(b)所示。

正。为了获得 CGH 测量非球面的检测精度,除了采用传统的 CGH 误差分析方法外,还通过与无像差点法直接对比,从实验上获得非球面的测量精度。实验结果表明,利用 CGH 对非球面进行检测的精度可以达到 3.9 nm(RMS)。

致谢 感谢美国亚利桑那大学赵春雨的热心帮助。

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 M. F. Küchel. Interferometric measurement of rotationally symmetric aspheric surfaces [C]. *SPIE*, 2009, **7389**: 738916
- 4 P. Murphy, J. Fleig, G. Forbes. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres [C]. *SPIE*, 2006, **6293**: 62930J
- 5 J. C. Wyant. Interferometric testing of aspherical surfaces [C]. *SPIE*, 1987, **816**: 19~39
- 6 Meng Xiaochen, Hao Qun, Zhu Qiudong *et al.*. Optimization design of partially compensating lens based on Zemax [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622002
孟晓辰,郝群,朱秋东等.基于 Zemax 的部分补偿镜的优化设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0622002
- 7 J. Fan, D. Zaleta, K. S. Urquhart *et al.*. Efficient encoding algorithms for computer-aided design of diffractive optical elements by the use of electron-beam fabrication [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2522~2533
- 8 R. Schreiner, T. Herrmann, J. Röder *et al.*. Design considerations for computer generated holograms as supplement to Fizeau interferometers [C]. *SPIE*, 2005, **5965**: 59650K
- 9 P. Zhou, J. H. Burge. Fabrication error analysis and experimental demonstration for computer-generated holograms [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(5): 657~663

- 10 T. Kim, J. H. Burge, Y. Lee *et al.*. Null test for a highly paraboloidal mirror [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43** (18): 3614~3618
- 11 Wang Xiaopeng, Gao Zhishan, Ma Jun *et al.*. 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, 马骏等. 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
- 12 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*, 2008, **28**(7): 1313~1317
- 13 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
- 14 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): 1768~1771
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): 1768~1771
- 15 Ren Jianfeng, Guo Peiji. Design of original structure of illuminating system in off-axis convex aspherical lens testing system with computer-generated hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0222002
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*, 2012, **32**(2): 0222002
- 16 Zhou Ping. Error Analysis and Data Reduction for Interferometric Surface Measurements[D]. Tusson: University of Arizona, 2009. 147~153
- 17 U. Griesmann, Q. Wang, J. Soons *et al.*. A simple ball averager for reference sphere calibrations [C]. *SPIE*, 2005, **5869**: 58690S
- 18 K. Creath, J. C. Wyant. Testing spherical surfaces: a fast, quasi-absolute technique [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31** (22): 4350~4354
- 19 D. Su, E. Miao, Y. Sui *et al.*. Absolute surface figure testing by shift-rotation method using Zernike polynomials [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(15): 3198~3200
- 20 Liu Manlin, Yang Wang, Xu Weicai. Calibration of measuring error caused by interferometric imaging distortion [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(10): 2349~2354
刘满林, 杨旺, 徐伟才. 干涉仪成像畸变引起的测量误差的校正方法[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(10): 2349~2354

栏目编辑: 何卓铭