第 38 卷 第 12 期
2011 年 12 月

中 国 激 光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol. 38, No. 12
December, 2011

# 计算全息法标定抛物面精度分析

谷勇强[1,2] 苗二龙[1] 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]中国科学院研究生院，北京 100049

**摘要** 非球面高精度检测是目前光学检测研究的热点和难点之一。计算全息(CGH)技术是非球面检测的重要方法，但检测精度受到许多因素的影响。对 CGH 检测抛物面的误差进行了深入研究。应用 Zemax 软件对各种检测误差进行模拟计算，利用 CGH 对抛物面面形进行实际测量，对测量结果中较大的透射波前误差、彗差、球差等进行分析，并将 CGH 法与共焦小球法的检测进行了结果对比。结果表明，CGH 法的设计和制造精度很高，标定基底的透射波前后，理论检测误差均方根(RMS)值低于 4.2 nm。实际检测中，CGH 的离焦和抛物面偏心会造成较大的测量误差，精密调整后的测量误差 RMS 值优于 4.5 nm。

**关键词** 测量；计算全息法；抛物面测量；精度分析；Fizeau 干涉仪

**中图分类号** O438.1；O439 **文献标识码** A **doi**：10.3788/CJL201138.1208005

# Accuracy Analysis on Paraboloid Calibration with Computer-Generated Holography

Gu Yongqiang[1,2] Miao Erlong[1] Gao Songtao[1,2] Sui Yongxin[1] Yang Huaijiang[1]

[1] *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*
[2] *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

**Abstract** Aspheric surface test is one of the priority research areas for high precision optical surface measurement. Computer-generated holography (CGH) is an important method to test aspheric surface, but its measurement accuracy is restricted by lots of influent factors. This paper focuses on the error analysis of paraboliod surface test with a corresponding CGH. Measurement errors are calculated by Zemax software. A paraboliod is practically tested by a corresponding CGH, and the mainly measurement errors, such as the CGH substrate′s transmitted wavefront error, coma and sphere a berration are analyzed. The measurement results are compared with confocal ball method. Analytical and experimental results indicate that CGH design and fabrication can achieve very high accuracy. After the calibration of CGH substrate′s transmitted wavefront, the root mean square (RMS) value of theoretic test accuracy is better than 4.2 nm. Defocus of CGH and decentration of paraboloid result in the major measurement error. After fine adjustment, the RMS value of practical measurement error will be better than 4.5 nm.

**Key words** measurement; computer-generated holography; parabolic measurement; accuracy analysis; Fizeau interferometer

**OCIS codes** 120.6660; 090.1760; 090.2880

**收稿日期**：2011-07-08；**收到修改稿日期**：2011-09-16

**基金项目**：国家科技重大专项 02 专项(2009ZX02205)资助课题。

**作者简介**：谷勇强(1982—)，男，博士研究生，助理研究员，主要从事高精度光学加工方面的研究。
E-mail：yqgu82@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、检测以及网络信息安全等方面的研究。
E-mail：yanghj@sklao.ac.cn

* **通信联系人**。E-mail：suiyx@ciomp.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 1 引　言

非球面元件因其可以降低光学系统的复杂性和改善系统成像质量，应用越来越广泛，但是高精度的非球面面形检测仍然是目前研究的热点和难点[1]。最常用的检测方法有零位补偿镜法[2]、计算全息(CGH)法[3~7]、子孔径拼接法[8~10]、轮廓法等。其中零位补偿镜法要研制可以产生与被测面匹配波前的光学系统，本身比较复杂，检测精度受自身精度影响很大；子孔径拼接法受限于位移控制精度以及拼接算法，Zygo 公司开发的环带拼接法[11]能对陡度较低的轴对称非球面进行检测，但检测精度不高；轮廓法检测精度很低，一般只能用于非球面铣磨和粗抛阶段的检测，荷兰 NTO 公司开发的非接触轮廓法检测精度峰谷(PV)值能够达到 $\lambda/20$，但是整套检测系统极其复杂，并且对国内禁售。CGH 技术因对全息技术研究的深入[12,13]，以及刻蚀工艺的逐渐成熟而开始占据非球面检测的主导地位，国内中国科学院长春光学精密机械与物理研究所[14,15]、南京理工大学[16]、北京理工大学[17]等已经开展了很多研究。

本文对使用 CGH 检测非球面的测量误差进行深入研究。首先利用软件模拟计算影响检测精度的各种因素导致的测量误差，进而利用 Fizeau 干涉仪和 CGH 对抛物面进行实际面形测量，重点对 CGH 离焦、抛物面偏心等实际检测过程中对测量精度影响较大的因素进行分析，并将实验结果与模拟计算或者共焦小球法的检测结果进行对比，最后利用误差合成理论，给出使用 CGH 法检测抛物面能够达到的精度，并明确了制约 CGH 实际检测精度的主要因素。

## 2 原　理

### 2.1 计算全息法检测

从 Fizeau 型相移干涉仪标准镜参考面出射的球面波到达 CGH 后产生衍射，衍射波前与被测非球面的面形耦合，经被测非球面反射后，沿出射光原光路返回，并与干涉仪参考面的反射光束形成干涉。CGH 的原理如图 1 所示。

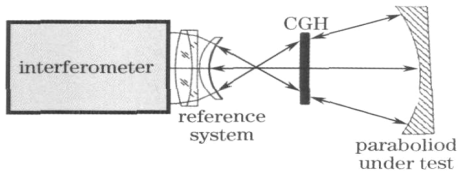


图 1　计算全息法原理图

Fig. 1　Principle of CGH methods

### 2.2 共焦小球法检测

为实现与 CGH 法检测非球面结果的对比，根据被测非球面为抛物面的特点，采用共焦小球法对被测面进行面形检测，检测原理如图 2 所示，TF 表示透射平面。干涉仪标准镜参考面出射的平面波经抛物面反射后形成会聚波，被处于抛物面焦点处的小球后反射回抛物面，被抛物面再次反射后按原光路返回干涉仪，并与干涉仪参考面直接反射光形成干涉。

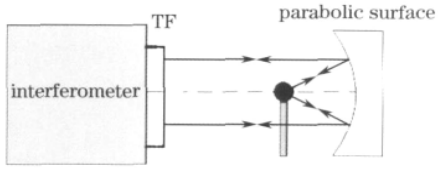


图 2　共焦小球法原理图

Fig. 2　Principle of confocal sphere methods

## 3 计算全息法误差分析

### 3.1 CGH 设计与调整

委托美国亚利桑那大学 AOM 的赵春雨博士制作的 CGH 由外、中、内 3 个环带组成。干涉仪出射光被 CGH 外环反射后按原光路返回，并与标准镜参考面的反射光形成干涉条纹，用于调整 CGH 的倾斜；干涉仪出射光经 CGH 中环衍射后变成平行光，被平面镜反射后按原光路返回，与标准镜参考面反射光形成干涉，用于调整 CGH 的离焦(轴向位

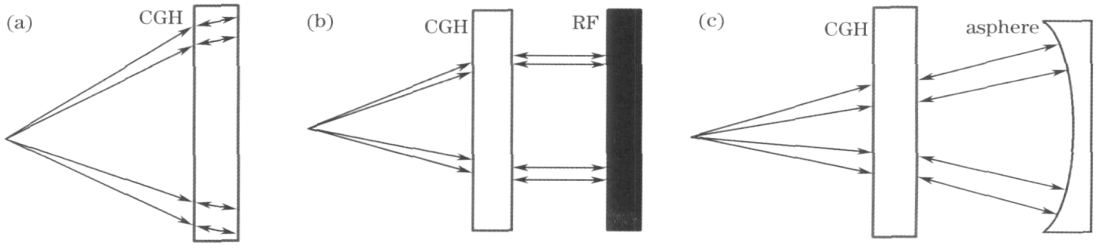


图 3　CGH 的衍射光路图。(a)外环；(b)中环；(c)内环

Fig. 3　General view of CGH diffraction wavefronts. (a) External ring; (b) middle ring; (c) internal ring

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

置)；CGH 内环用于实际检测，干涉仪出射光经过 CGH 内环衍射后产生与被测非球面耦合的理想探测波前，经非球面反射后按原光路返回，与参考球面反射光形成干涉。图 3 为 CGH 的理想调整以及检测光路图，RF 表示反射平面。

### 3.2 CGH 误差

CGH 法检测非球面面形的测量误差主要来源于 3 个方面：干涉仪标准镜参考面面形及检测环境、CGH 的设计和制造、CGH 以及被测镜的位置。

高精度标准镜参考面的面形精度均方根(RMS)值优于 3 nm，对其进行绝对标定后 RMS 值能达到 1.5 nm 或更低；环境引起的测量误差跟环境控制精度以及干涉腔腔长有关，使用 CGH 进行非球面面形检测时，干涉腔腔长一般较长，在对于环境振动、空气温度等进行严格控制后，检测环境引起的测量误差 RMS 值小于 1.5 nm。

CGH 的设计和制造中，由设计、刻蚀、CGH 基底厚度等引起的测量误差很小；CGH 基底的透射波前误差比较大，但可以通过标定消除。CGH 设计和制作工艺较好的情况下，这些误差的 RMS 值总和小于 2 nm。

CGH 以及被测非球面的位置偏差，包括 CGH 的倾斜、离焦以及被测非球面的偏心等引起的测量误差与其偏差量有关，实际检测过程中经常会引起较大的测量误差。利用 Zemax 软件模拟计算结果显示，CGH 的倾斜对测量精度影响较小，倾斜不超过 1λ(激光器波长 λ 为 632.8 nm)时的测量误差 RMS 值低于 0.5 nm；CGH 的离焦及被测非球面的偏心对测量精度影响比较大，需要进行具体分析。

#### 3.2.1 CGH 离焦对检测精度的影响

模拟计算显示，CGH 离焦小于 0.3λ 时测量误差很小，RMS 值低于 1 nm；CGH 离焦增大时，测量误差尤其是球差明显增加。CGH 的离焦与球差的 RMS 值之间的关系如图 4 所示。当 CGH 离焦 2 μm时测量球差 RMS 值达到 14 nm，证实 CGH 的离焦会引起很大的球差，对检测精度影响很大，在实际检测过程中必须严格控制。

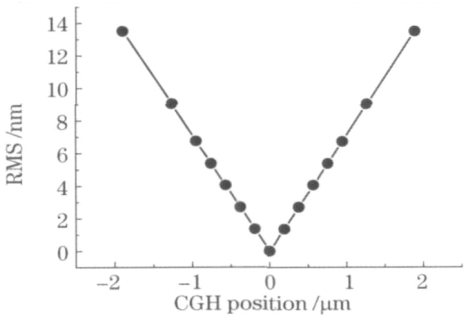


图 4 CGH 离焦与测量球差的关系

Fig. 4 Relationship between CGH defocus and measurement sphere aberration

#### 3.2.2 非球面偏心对检测精度的影响

被测非球面的偏心对检测精度的影响也很大。针对抛物面，计算机模拟计算结果显示，CGH 衍射波前与被测抛物面中心有偏差时，产生的测量误差主要为彗差。抛物面偏心 0.1 μm 时，测量彗差的 RMS 值为 2 nm；偏心 0.5 μm 时，彗差 RMS 值达到 10 nm，如图 5 所示。

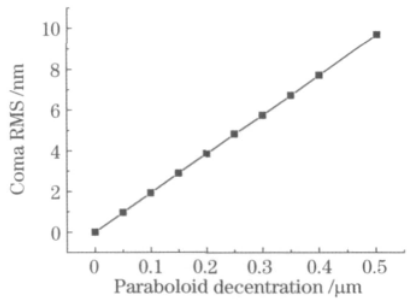


图 5 抛物面偏心与测量彗差的关系

Fig. 5 Relationship between paraboloid decentration and coma aberration

由于以上误差基本互相独立，可以利用误差合成公式进行计算，即

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \cdots}. \tag{1}$$

理论上，当各因素导致的测量误差分别为以下值时：标准镜参考面面形 RMS 值为 3 nm，环境引起的测量误差 RMS 值为 1.5 nm；CGH 设计和制作引起的测量误差 RMS 值为 2 nm；CGH 倾斜引起的测量误差 RMS 值为 0.5 nm；离焦引起的测量误差 RMS 值为 1 nm；被测非球面偏心引起的测量误差 RMS 值为 1 nm；利用 CGH 检测非球面面形的测量误差 RMS 值约为 4.2 nm。

## 4 实 验

利用 CGH 对被测抛物面进行面形检测，并重点针对实际检测过程中由于检测环境、CGH 基底透射波前、抛物面位置偏差以及 CGH 离焦等主要精度影响因素展开实验和分析。实验采用的干涉仪为 Zygo 公司的 VeriFire AT+相移式 Fizeau 干涉仪；被测非球面为抛物面，口径 70 mm，顶点曲率半径 100 mm；CGH 的整体尺寸约 150 mm，有效利用口径为 80 mm，其实物图如图 6 所示。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

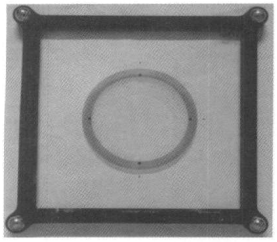

图 6　CGH 图

Fig. 6　Picture of CGH

### 4.1　检测环境

检测环境是影响测量精度的重要因素之一。将干涉仪标准镜、CGH 以及被测抛物面安装调整完毕后进行多次测量，通过测量结果的变化情况分析检测环境对测量精度的影响。图 7 为 4 次测量结果。将 4 次结果做平均，然后分别与其中的单次测量结果做差，RMS 值的差值不超过 0.25 nm，证实本实验中检测环境引起测量误差很低，RMS 值小于 0.5 nm。

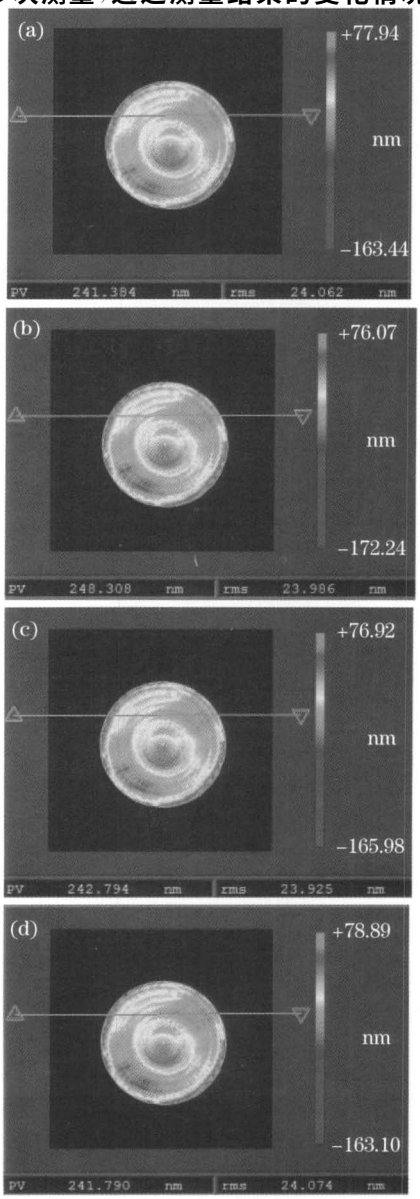


图 7　环境引起的测量重复性

Fig. 7　Measurement repeatability caused by environment

### 4.2　CGH 基底透射波前标定

根据 3.2 节的分析，CGH 基底的透射波前误差较大，在利用 CGH 进行非球面面形检测前需要先进行标定。测试方法如图 8 所示，首先测试仅含透射平面和反射平面时的波前，然后测试含 CGH、TF 和 RF 的波前，将两次测试结果相减即可得到 CGH 基底的透射波前误差。测试结果如图 9所示，CGH 的基底透射波前误差 RMS 值为6.4 nm，与 CGH 厂家给出的结果基本相同，故可以通过标定去除。

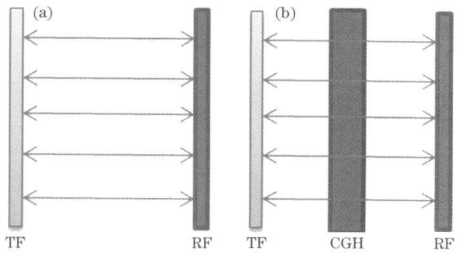


图 8　基底透射波前误差标定。(a)空腔；(b)有 CGH

Fig. 8　Calibrating of substrate's transmitted wavefront error. (a) Without CGH; (b) with CGH

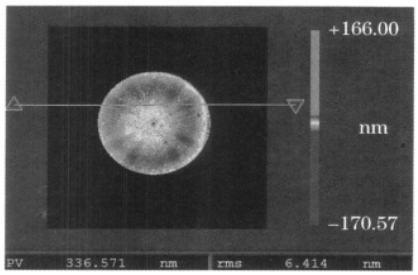


图 9　CGH 基底的透射波前误差

Fig. 9　CGH substrate's transmitted wavefront error

### 4.3　抛物面偏心

根据 3.2.2 节的分析，抛物面偏心会引起测量彗差。利用 CGH 对抛物面面形进行检测时，需要调整被测抛物面的位置，使测量结果中最佳拟合的彗差最小。根据此原则，在保证抛物面不发生旋转的情况下，精密调整抛物面的位置进行多次测量。提取测量的平均结果并拟合彗差，如图 10 所示。彗差的 RMS 值为 1.34 nm，证实实际检测时，彗差可以控制 RMS 值在 1.5 nm 以内。

多次测量的平均结果与单次测量结果相减，差值的 RMS 值在 0.7～3.6 nm 之间，结果如图 11 所

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

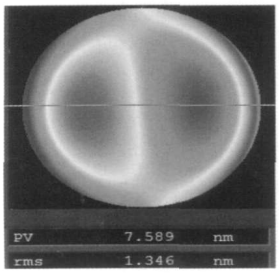


图 10 测量误差中的彗差

Fig. 10 Measurement error caused by coma

示；去除最佳拟合的彗差后，差值的 RMS 值降至 0.7～1.7 nm。证实被测抛物面偏心会引起一定的测量误差，而彗差是其中最主要的组成部分。

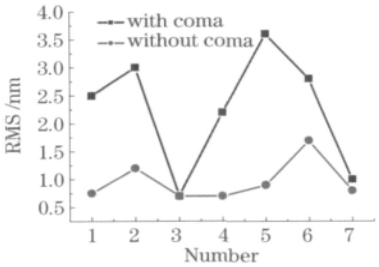


图 11 包含及不含彗差时的测量重复性

Fig. 11 Measurement repeatability with/without coma

### 4.4 CGH 离焦误差

根据 2.2 节的模拟计算，CGH 离焦比较大时测量球差迅速增加。某次检测结果如图 12 所示，面形 RMS 值为 17.2 nm，而球差的 RMS 值达到11.9 nm，是测量结果的最主要组成部分。

产生球差的主要原因一是 CGH 位置的偏离，二是被测抛物面的面形误差。利用 2.2 节的共焦小球法对抛物面进行标定，检测结果面形 RMS 值为 16.6 nm，其中球差的 RMS 值为 5.9 nm，远低于 CGH 法的检测结果，见图 13。实验结果表明被测抛物面面形误差的球差 RMS 值约为 5.9 nm，其余约6 nm的球差 RMS 值来自 CGH 法的测量误差，即由 CGH 的离焦引起。根据误差合成公式进行分析，在去除测量球差后，CGH 法的检测结果为 16.2 nm，与共焦小球法的检测结果16.6 nm非常接近。

在实际调节过程中因人眼分辨率有限，一般借助 CGH 中环产生的干涉条纹的最佳拟合离焦的 RMS 值判断。利用 Zemax 软件模拟计算，当 CGH 中环产生的干涉条纹的最佳拟合离焦的 RMS 值变化 100 nm 时，CGH 的离焦变化约为 1 μm，由此造成的测量结果的球差的 RMS 值约 7 nm。为保证检测精度，根据 CGH 中环产生的干涉条纹的最佳拟合离焦的 RMS 值调节 CGH 时，最佳拟合离焦的 RMS 值要小于 30 nm，即 CGH 离焦小于 0.3 μm，由此导致的测量球差 RMS 值低于2 nm。

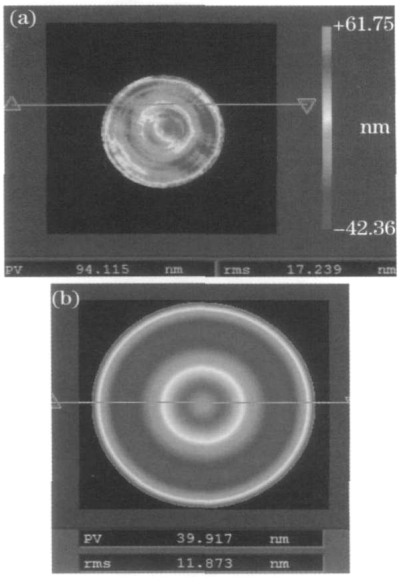


图 12 (a) CGH 测量结果；(b)球差

Fig. 12 (a) CGH measurement results; (b) sphere aberration

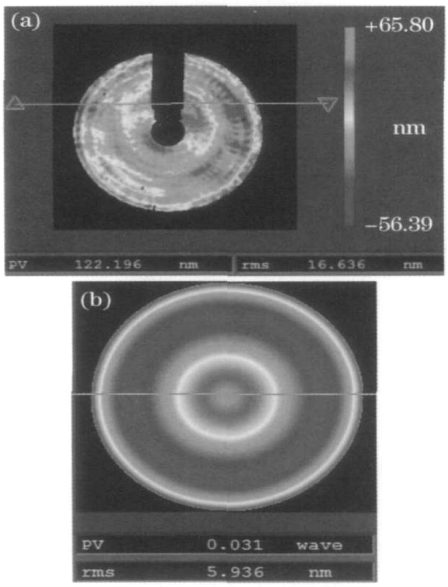


图 13 (a)共焦小球测量结果；(b)球差

Fig. 13 (a) Confocal ball measurement results; (b) sphere aberration

## 5 分 析

根据模拟计算与实际检测结果，利用误差合成公式计算 CGH 用于非球面检测时的实际测量误

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

差。CGH 的设计制作等引起的 RMS 值测量误差 2 nm；标准镜参考面面形 RMS 值误差3 nm；CGH 基底透射波前 RMS 值误差0.5 nm；实际检测过程中环境导致的 RMS 值测量误差 0.5 nm；CGH 离焦导致的测量球差 RMS 值为 2 nm；被测抛物面偏心引起的测量彗差 RMS 值为 1.5 nm；CGH 法测量抛物面的总误差 RMS 值约为 4.5 nm。参考面面形误差是测量误差的最主要来源之一，若能够利用绝对检测技术对参考面面形进行标定，或者使用更高面形精度的参考面，使参考面面形误差 RMS 值降到 1.5 nm 以内，则 CGH 法检测抛物面的误差 RMS 值可以降低至 4 nm 以内。

## 6 结　论

从理论和实验两方面对利用 CGH 法检测抛物面的各种误差进行了深入分析。结果表明，CGH 的理论检测精度很高，标定 CGH 基底的透射波前误差后，测量误差 RMS 值约 4.2 nm。实际使用 CGH 进行检测的过程中，CGH 以及被测非球面的位置调整等引入的测量误差较大，根据实验结果以及分析，最终的测量误差 RMS 值达到 4.5 nm，略大于理论计算结果；若采用更高精度的标准镜参考面或对其进行绝对标定，则测量误差 RMS 值能降至4 nm以内，证实利用 CGH 法可以实现高精度的非球面检测。

被测抛物面偏心引入测量彗差，经过精密调整后，彗差 RMS 值小于 1.5 nm。CGH 离焦引入很大的测量球差，离焦 2 mm 时球差 RMS 值为 14 nm，但根据共焦小球法的检测结果，抛物面面形本身也有很大的球差，故不能将测量结果中的球差全部去除，但通过精确调整 CGH 的离焦，可以使测量球差 RMS 值小于 2 nm。研究结果对利用 CGH 进行非球面检测的实际操作过程中，CGH 以及被测面的调整精度具有一定的指导意义；若要实现更高的检测精度，需要对这些方面进行更严格的控制，寻找更优的调整方法。

致谢　特别感谢美国亚利桑那大学 AOM 的赵春雨博士，赵博士在提供 CGH 的同时，对 CGH 的误差分析也给出了许多指导性意见和建议。

### 参　考　文　献

1 Zhu Yongjian, Pan Weiqing. Measurement of aspheric surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011202
朱勇建，潘卫清. 非球面面形测量技术[J]. 激光与光电子学进展，2010，**47**(1)：011202

2 Chen Xu, Liu Weiqi, Kang Yusi *et al*.. Design and tolerance analysis of Offner compensator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(1): 88～93
陈　旭，刘伟奇，康玉思 等. Offner 补偿器的结构设计与装调[J]. 光学 精密工程，2010，**18**(1)：88～93

3 J. S. Loomis. Computer-generated holography and optical testing[C]. *SPIE*, 1980, **215**: 59～69

4 J. H. Burge. A null test for null correctors: error analysis[C]. *SPIE*, 1993, **1993**: 86～97

5 J. H. Burge. Advanced Techniques for Measuring Primary Mirrors for Astronomical Telescopes[D]. Arizona: University of Arizona, 1993

6 J. H. Burge. Certification of null correctors for primary mirrors [C]. *SPIE*, 1994, **1994**: 248～259

7 Gufran S. Khan, Klaus Mantel, Irina Harder *et al*.. Design considerations for the absolute testing approach of aspherics using combined diffractive optical elements[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(28): 7040～7048

8 Y. M. Liu, N. L. George. Subaperture testing of aspheres with annular zones[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(21): 4504～4513

9 T. Marc. Subaperture metrology technologies extend capabilities in optics[C]. *SPIE*, 2005, **5965**: 59650B

10 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2022～2026
王孝坤，郑立功，张学军. 子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J]. 光学学报，2010，**30**(7)：2022～2026

11 Ichihara. Interferometer that measures aspherical surfaces, United States Patent, US 6456382 B2[P]. 2002

12 Feng Yuanming, Wang Xingping, Yang Huan *et al*.. Study of wavelength beam combining using off-axial holographic diffraction optical element[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1734～1738
冯远明，王兴平，杨　欢 等. 离轴型全息衍射光学元件多波长激光合束研究[J]. 中国激光，2010，**37**(7)：1734～1738

13 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

14 Li Fazhi, Luo Xiao, Zhao Jingli *et al*.. Test of off-axis aspheric surface with CGH[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(4): 709～716
黎发志，罗　霄，赵晶丽 等. 离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. 光学 精密工程，2011，**19**(4)：709～716

15 Xue Donglin, Zhang Ligong, Wang Shuping *et al*.. Research on off-axis conic asphere null testing using computer-aided alignment method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(3): 380～385
薛栋林，郑立功，王淑平 等. 离轴二次非球面补偿检验计算机辅助装调技术研究[J]. 光学 精密工程，2006，**14**(3)：380～385

16 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　俊 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

17 Kang Guoguo, Xie Jinghui, Liu Yi *et al*.. Design and error analysis of the CGH used for aspheric test [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 654～657
康果果，谢敬辉，刘　祎 等. 用于非球面检测的计算全息设计及其精度分析[J]. 光学技术，2007，**33**(5)：654～657

栏目编辑：何卓铭

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net