

## 计算全息板干涉检测工业镜头凸自由曲面 (特邀)

朱德燕<sup>1,2</sup>, 唐骏伟<sup>1,2</sup>, 国成立<sup>3</sup>, 李元正<sup>3</sup>, 赵烈烽<sup>3</sup>

1. 南京航空航天大学 航天学院, 江苏南京 211106;
2. 南京航空航天大学 空间光电探测与感知工信部重点实验室, 江苏南京 211106;
3. 浙江舜宇光学有限公司, 浙江余姚 315400)

**摘要:** 工业镜头元件口径小、数量多、精度要求高, 将自由曲面用在镜头凸面上会导致面形复杂、偏离量大, 对表面面形检测提出了很高的挑战。提出了基于计算全息板 (Computer-Generated-Hologram, CGH) 的干涉检测方法, 并利用 Zemax 对光路进行优化设计, 建立了镜头装夹误差对检测结果的影响分析模型, 提出了镜头高精度干涉检测方案, 并结合实验验证了分析模型和检测方案的可靠性。实验结果表明: 利用 CGH 可实现凸自由曲面工业镜头的全口径干涉检测, 检测结果为 0.57  $\mu\text{m}$  PV (满足镜头检测需求), 并结合轮廓仪对比验证了干涉测量的可靠性。

**关键词:** 干涉检测; 凸自由曲面; 工业镜头; 计算全息板

中图分类号: O439; O436.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220456

## Interferometric testing of convex freeform surface in industrial lens based on Computer-Generated-Hologram (*invited*)

Zhu Deyan<sup>1,2</sup>, Tang Junwei<sup>1,2</sup>, Guo Chengli<sup>3</sup>, Li Yuanzheng<sup>3</sup>, Zhao Liefeng<sup>3</sup>

1. Aerospace Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Key Laboratory of Space Photoelectric Detection and Perception (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing 211106, China;
3. Zhejiang Sunny Optical Company, Yuyao 315400, China)

**Abstract:** Industrial lens elements have small aperture, large quantity and high precision requirements. Using free-form surface on the convex surface of lens will lead to complex surface shape and large deviation, which poses a high challenge of surface testing. An interferometric testing based on CGH was proposed. By using the Zemax software, we optimized the optical design, established the model to analyze the influence by the calibrating errors of industrial lens, and proposed an interferometric testing scheme of industrial lens. An experiment by testing a freeform surface of industrial lens was provided to demonstrate the reliability of the model and scheme. The experimental results show that CGH can realize the full aperture interference testing of convex free-form surface industrial lens, and the testing result is 0.57  $\mu\text{m}$  PV which meets the needs of lens testing and verifies the reliability of interferometry by comparing with profilometer.

**Key words:** interferometric testing; freeform surface; industrial lens; CGH

收稿日期: 2022-06-30; 修订日期: 2022-08-30

作者简介: 朱德燕, 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为空间光电探测系统的设计与检测。

## 0 引言

自由曲面具有多自由度、强像差校正能力,用于工业镜头中可有效减少镜头元件数目,提高系统性能与集成能力,增强成像质量,成为当前工业镜头元件面形的发展趋势。由于工业镜头尺寸较小,批量化生产对检测的效率要求高<sup>[1-3]</sup>。将自由曲面设计在工业镜头的凸面时,会导致元件表面面形复杂,与最接近球面偏离量大,给面形检测造成了很大的困难<sup>[4-6]</sup>。因此,实现工业镜头凸自由曲面的高精度快速全口径检测,成为限制自由曲面应用在工业领域中的一个重要问题。

传统轮廓测量仪,如 Lumphoscan 和 UA3P 可实现对 200 mm 及以下口径的自由曲面高达 60 nm RMS 非接触检测。但轮廓测量需要逐点扫描光学元件表面,检测时间长,不适于批量化工业领域相对大口径光学元件的检测<sup>[7]</sup>。干涉检测可一次检测出面形,满足批量化光学元件对检测时间的需求。由于算全息板 (Computer-Generated-Hologram, CGH) 可设计生成任意面形,国内外普遍采用 CGH 补偿干涉检测自由曲面。亚利桑那大学的 James H.Burge 团队利用 CGH 实现了 GMT、EELT 主镜优于 10 nm RMS 的干涉补偿检测;赵春雨博士将 CGH 基板误差标定后提高检测精度到优于 6 nm 的精度;周平博士对 CGH 干涉检测的误差进行分析与标定<sup>[8-9]</sup>;南京理工大学利用相位型 CGH 测量自由曲面,实现了 60 nm RMS 的干涉测量<sup>[10]</sup>;国防科技大学采用两块 CGH 相对旋转补偿彗差和像差,用于扩展面形检测动态范围并实现了离轴子孔径像差的补偿<sup>[11-12]</sup>;清华大学利用计算全息技术测量矩形孔径自由曲面,面形检测精度可达 440 nm PV<sup>[13]</sup>;中国科学院光电技术研究所针对凸非球面检测所需的 CGH 设计和制作进行了相关研究,并利用 CGH 测量元件面形<sup>[14]</sup>。目前,前人的研究主要集中在利用 CGH 检测自由曲面,并对检测精度进行分析与标定上<sup>[4-11]</sup>。工业镜头凸自由曲面的精度要求一般为优于 1 μm PV,远低于传统 CGH 的设计和加工精度(通常优于 0.1 μm PV)。在检测工业镜头凸自由曲面时,传统的零条纹状态检测得到的结果不一定是面形真实结果。因此,关于利用 CGH 实现工业镜头凸自由曲面的准确面形测量问题,相关研究尚属空白。

文中针对工业镜头凸自由曲面,优化设计结合 CGH 的干涉检测光路,建立工业镜头装夹误差对检测结果的影响分析模型,提出面形检测方案并实验验证了模型和方案的有效性。

## 1 凸自由曲面检测原理

CGH 干涉检测凸自由曲面的原理如图 1 所示。

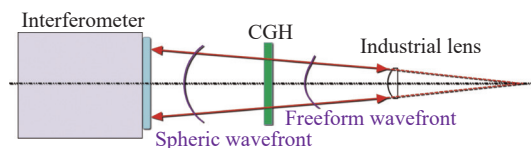


图 1 CGH 干涉检测凸自由曲面示意图

Fig.1 Layout of convex freeform surface interferometric testing by CGH

干涉仪发出球面波前,由 CGH 衍射变为与待测工业镜头的凸自由曲面匹配的自由区面波前,沿自由曲面法线入射。经凸自由曲面反射后反射回 CGH,再由 CGH 衍射变为含自由曲面面形误差信息的球面波前,返回至干涉仪进行检测。

对于凸面检测,需要满足两个条件:干涉仪  $F$  数 ( $f/D$ ) 需小于自由曲面  $F$  数,实现自由曲面全口径检测;干涉球面波的端面至球心的间距需大于自由曲面的曲率半径,保证自由曲面与干涉仪标准镜间距合理,如图 2 所示。

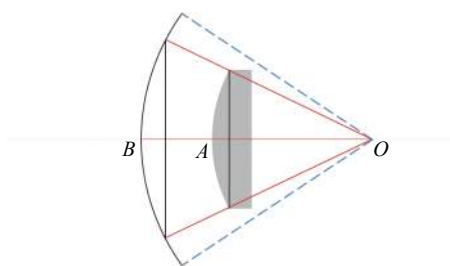


图 2 凸面干涉检测的要求

Fig.2 Requirements for interference testing of convex surfaces

图 2 中灰色凸面为待测球面,  $O$  点为球面球心。实际检测时需提供会聚球面波前,球面波球心与  $O$  点重合,  $B$  点为提供会聚波前的物理端面,  $A$  点为待测面顶点。会聚波前的张角需大于被测球面波  $R$  数对应张角才可全口径测量,即蓝色虚线张角需大于红色实线张角。  $B$  点至  $O$  点距离需大于  $A$  点至  $O$  点距离,否则  $B$  点与  $A$  点干涉,无法检测。

针对某工业镜头凸自由曲面进行 CGH 干涉检测,该自由曲面的同轴母镜为高次非球面,参数方程如公式 (1) 所示,具体如表 1 所示。

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + z_4r^4 + z_6r^6 + z_8r^8 + z_{10}r^{10} + z_{12}r^{12} \quad (1)$$

表 1 自由曲面参数

Parameter	Value
Radius of curvature $R/\text{mm}$	-1.04e+002
$k$	0
$R_{ex}/\text{mm}$	50/2
$R_{ey}/\text{mm}$	50/2
$x$ axis decenter/ $\text{mm}$	0
$y$ axis decenter/ $\text{mm}$	-5
$Z_4$	-2.74e-007
$Z_6$	2.62e-011
$Z_8$	7.11e-015
$Z_{10}$	-3.45e-016
$Z_{12}$	4.58e-019

该自由曲面最接近球面曲率半径为 107.7 mm,与最接近球面的偏差约  $32\lambda$  PV ( $\lambda=632.8$  nm),如图 3 所示。

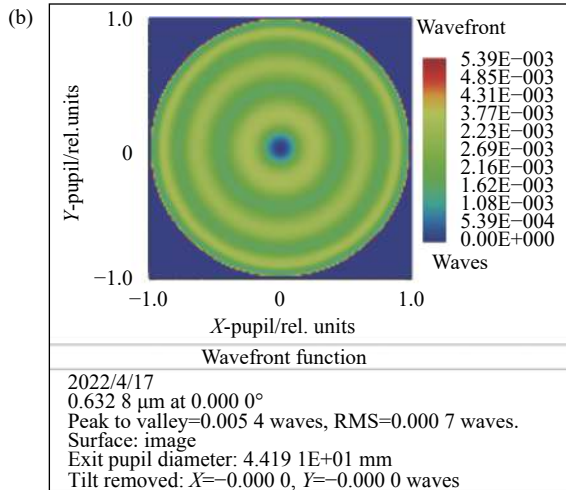
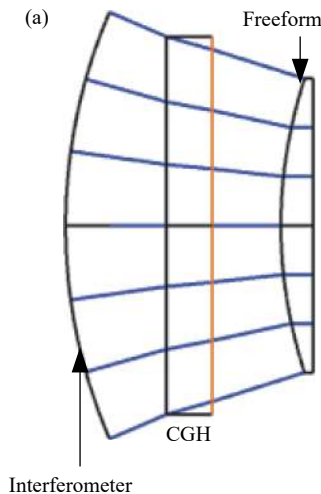


图 4 主区域设计结果。(a) 光路;(b) 波像差

Fig.4 Design result of main section. (a) Optical layout; (b) Wavefront aberration

检测光路左侧为干涉仪对应端面,中间为 CGH,右侧为待测面。波像差设计残差为  $0.0054\lambda$  (3.42 nm) PV,满足检测需求。CGH 相位面的相位如图 5 所示。CGH 的作用是改变波前的曲率半径,因此 CGH

因此,干涉仪的标准镜参数需满足: $F$  数小于 2.1,标准镜端面至焦点的距离需大于 107 mm。结合 Zygo 干涉仪标准镜参数,可供选择的干涉仪球面标准镜参数为 4 in (1 in=2.54 cm)  $F$  数 1.5。

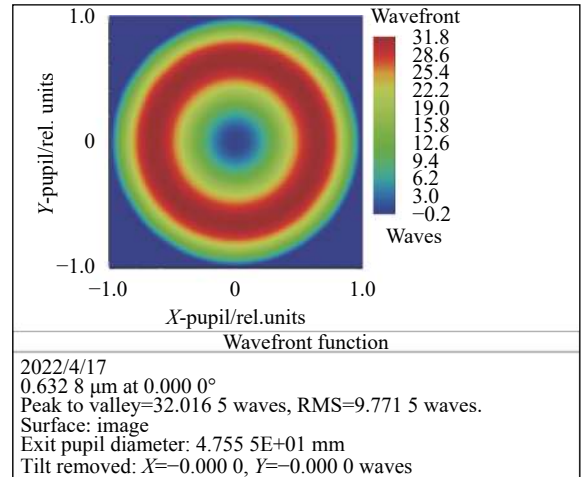


图 3 自由曲面与最接近球面的偏差

Fig.3 Deviation between freeform and best fitting spheric surface

设计得到的主区域检测光路和波像差设计残差如图 4 所示。

承载的主要是较大 power 载频。CGH 类似于菲涅耳波带片,其等相位面即为同心圆环。CGH 的边缘条纹密度约 127 lp/mm,线宽约 3.9 μm,线宽相对较宽,可实现高精度加工。

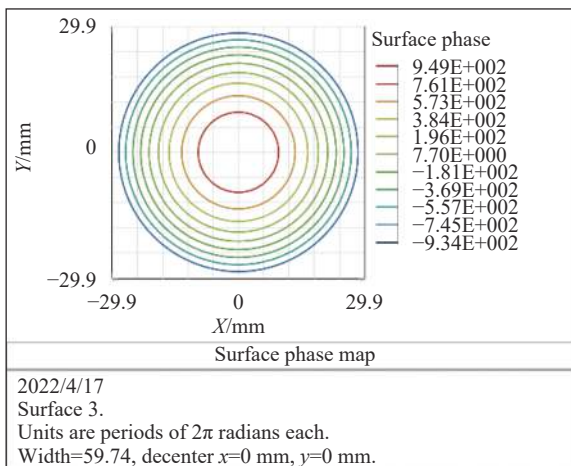


图 5 主区域的等相位面

Fig.5 Isophase surface of main region

## 2 干涉检测设计与实验

利用 CGH 检测工业镜头凸自由曲面时,需将 CGH 和工业镜头分别放置在检测光路中的正确位置。由于 CGH 离干涉仪标准镜距离短,且 CGH 不需要更换。因此,设计工装将 CGH 夹持在干涉仪标准镜上,保证 CGH 位置不动。针对批量化生产的工业镜头凸自由曲面,需要不断更换镜头凸自由曲面,进行干涉检测。

### 2.1 对准区域的设计

除设计用于检测待测面形的主区域外,CGH 还需设计对准区域。对准区域用于与干涉仪对准,设计光路如图 6 所示。

右侧为干涉仪焦点,左侧为干涉仪参考面,中间

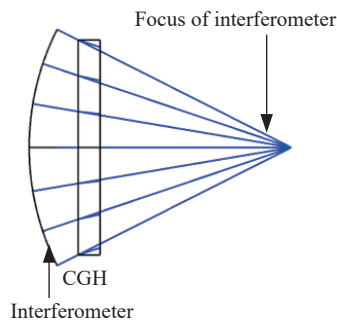


图 6 对准区域设计结果

Fig.6 Design result of alignment section

侧为 CGH。干涉仪发出球面波,经 CGH 衍射后沿原路返回至干涉仪,形成干涉条纹,可根据干涉条纹对准 CGH。实际 CGH 区域分布如图 7 所示。

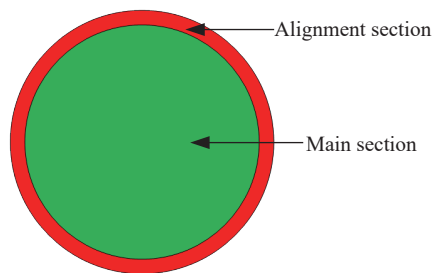


图 7 CGH 区域分布

Fig.7 Regional distribution of CGH

其中主区域为直径 72 mm 的圆形区域,对准区域为直径 73~90 mm 的环形区域。CGH 衍射时,除了所需待测面波前,还会产生其他衍射级次,可能与检测波前混叠到一起影响检测,图 8 为各衍射级次分离情况。

图 8 中不同颜色代表不同衍射级次,蓝色为需要

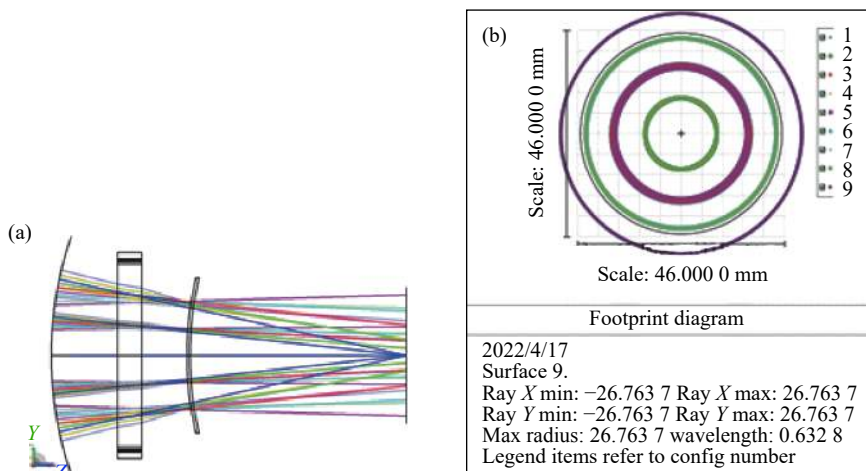


图 8 衍射级次分离结果。(a) 光路;(b) 分离结果

Fig.8 Separation results of diffraction order. (a) Optical layout; (b) Separation results

的衍射级次, 聚焦于标准镜焦点。而其他衍射级次的杂散光在焦点处为较大尺寸的弥散斑, 会被干涉仪内部小孔过滤大部分, 对检测影响较小。

### 2.2 检测位姿公差分析

针对利用 CGH 检测工业镜头凸自由曲面的位姿调整状态未知的问题进行优化分析, 首先建立位姿公差对检测波像差的影响分析模型, 公差输入如表 2 所示。

将各位姿公差代入检测光路的 Zemax 文件, 可得

各公差导致的面形误差如图 9 所示。

表 2 CGH 位姿公差

Tab.2 Position and orientation tolerances of CGH

Tolerances	Value
Decenter $x/\mu\text{m}$	5
Decenter $y/\mu\text{m}$	5
Decenter $z/\mu\text{m}$	5
Tilt $x(^{\circ})$	5
Tilt $y(^{\circ})$	5
Tilt $z(^{\circ})$	5

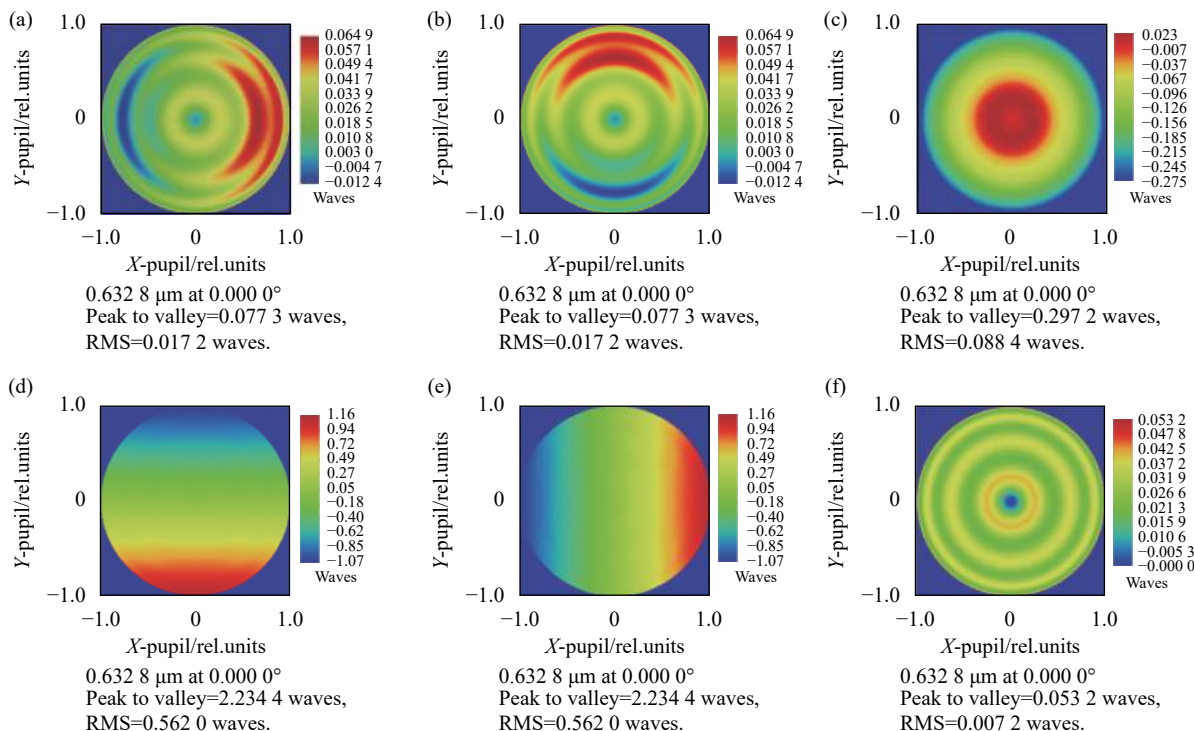


图 9 公差导致的面形误差。(a)  $x$  方向  $1\mu\text{m}$  误差; (b)  $y$  方向  $1\mu\text{m}$  误差; (c)  $z$  方向  $1\mu\text{m}$  误差; (d)  $x$  方向  $1^{\circ}$  误差; (e)  $y$  方向  $1^{\circ}$  误差; (f)  $z$  方向  $1^{\circ}$  误差  
Fig.9 Surface-shape error by tolerances. (a)  $1\mu\text{m}$  errors in  $x$  direction; (b)  $1\mu\text{m}$  errors in  $y$  direction; (c)  $1\mu\text{m}$  errors in  $z$  direction; (d)  $1^{\circ}$  errors in  $x$  direction; (e)  $1^{\circ}$  errors in  $y$  direction; (f)  $1^{\circ}$  errors in  $z$  direction

由图 9 可得各个误差导致的波像差, 将该波像差结果代入干涉测量软件 Metropro, 可得波像差的 Zernike 系数。结合得到的 Zernike 系数和 Zernike 表达式, 可得每微米偏心和每秒倾斜导致的波像差为:

$$\Delta W_{\text{decenter-x}} = 0.029\rho\cos\theta - 0.000\ 007\rho^2\cos 2\theta - 0.000\ 006\rho^2\sin 2\theta - 0.01(3\rho^2 - 2)\sin\theta - 0.000\ 003\rho^3\cos 3\theta + 0.000\ 008\rho^3\sin 3\theta \quad (2)$$

$$\Delta W_{\text{decenter-y}} = 0.029\rho\sin\theta - 0.000\ 007\rho^2\cos 2\theta - 0.000\ 006\rho^2\sin 2\theta - 0.01(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1) - 0.000\ 003\rho^3\cos 3\theta \quad (3)$$

$$\Delta W_{\text{decenter-z}} = 0.153\rho^2\cos 2\theta - 0.001\rho^3\cos 3\theta \quad (4)$$

$$\Delta W_{\text{tilt-x}} = -1.124(2\rho^2 - 1) + 0.000\ 002\rho^2\cos 2\theta - 0.000\ 001\rho^2\sin 2\theta + 0.01(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1) - 0.000\ 000\ 05\rho^3\cos 3\theta - 0.000\ 001\rho^3\sin 3\theta \quad (5)$$

$$\Delta W_{\text{tilt-y}} = 1.124\rho\sin\theta + 0.000\ 002\rho^2\cos 2\theta + 0.000\ 001\rho^2\sin 2\theta - 0.014(3\rho^2 - 2)\sin\theta - 0.000\ 000\ 005\rho^3\cos 3\theta - 0.000\ 001\rho^3\sin 3\theta \quad (6)$$

$$\Delta W_{\text{tilt-z}} = -0.000\ 3(2\rho^2 - 1) - 0.000\ 5(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1) \quad (7)$$

式中:  $\Delta W_{\text{decenter-x}}$ 、 $\Delta W_{\text{decenter-y}}$ 、 $\Delta W_{\text{decenter-z}}$ 、 $\Delta W_{\text{tilt-x}}$ 、 $\Delta W_{\text{tilt-y}}$ 、 $\Delta W_{\text{tilt-z}}$  分别为  $x$  方向、 $y$  方向、 $z$  方向每微米



偏心和每秒倾斜导致的波像差。公式 (2)~(7) 中的各项系数是分析得到的波像差 Zernike 系数,  $\rho$  和  $\theta$  分别为归一化半径和角度。综合可得检测光路失调量导致的波像差  $\Delta W$  为:

$$\Delta W = \Delta W_{\text{decenter-x}} + \Delta W_{\text{decenter-y}} + \Delta W_{\text{decenter-z}} + \Delta W_{\text{tilt-x}} + \Delta W_{\text{tilt-y}} + \Delta W_{\text{tilt-z}} \quad (8)$$

### 2.3 干涉检测实验

利用对准区域将干涉仪和 CGH 的位置调到设计值, 保证对准区域的干涉图为零条纹后将 CGH 位置固定住。将镜头用夹具夹持, 测量镜头与 CGH 的距离保证在设计值附近, 同时利用光斑控制主区域的范围, 保证主区域的 CGH 返回的光点在光斑模式的中心位置。

由于  $x$  方向的偏心导致的像差表现为: 离焦、彗差 ( $x$  轴)、三叶草像差 ( $x$  轴)。  $y$  方向的偏心导致的像差表现为: 离焦、彗差 ( $y$  轴)、三叶草像差 ( $y$  轴)。  $z$  方向的偏心导致的像差表现为: 离焦、球差。  $x$  方向的

倾斜导致的像差表现为: 离焦、彗差 ( $y$  轴)。  $y$  方向的倾斜导致的像差表现为: 离焦、彗差 ( $x$  轴)。  $z$  方向的倾斜导致的像差表现为: 离焦、球差。因此, 分析主区域的像差情况, 结合各个位姿导致的像差, 分析失调量, 自动将主区域调整至接近零条纹, 检测实验如图 10 所示。

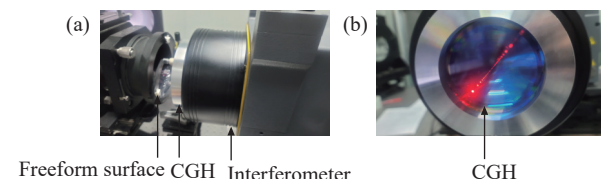


图 10 检测实验。(a) 实验光路; (b) CGH  
Fig.10 Experiment of testing. (a) Optical layout of experiment; (b) CGH

镜头凸自由曲面面形检测结果如图 11(a) 所示, 为  $0.57 \mu\text{m PV}$ 。为了验证干涉检测结果的可靠性, 采用 Lumphoscan 对该自由曲面进行轮廓测量, 测量结果如图 11(b) 所示, 为  $0.59 \mu\text{m PV}$ 。

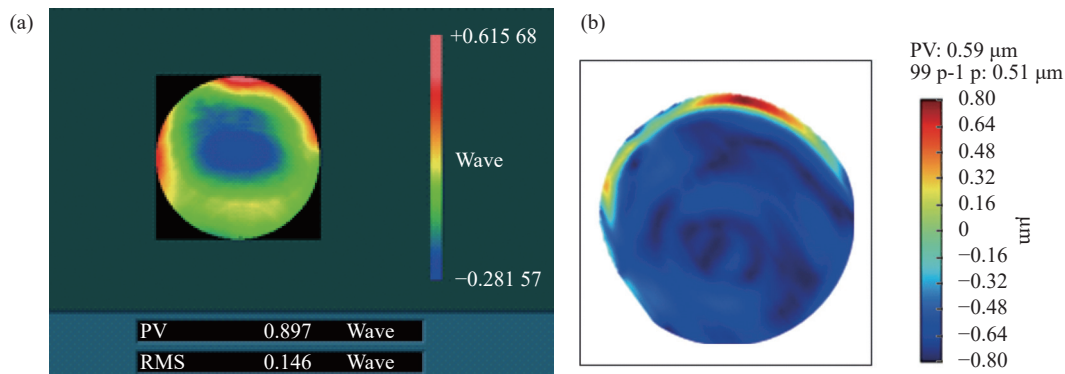


图 11 自由曲面检测结果。(a) 干涉测量; (b) 轮廓测量  
Fig.11 Testing result of freeform surface. (a) Interferometry; (b) Profile measurement

由图 11 可知: CGH 可以一次性完成对镜头凸自由曲面的全口径干涉检测, 满足工业镜头的面形检测需求 (优于  $1 \mu\text{m PV}$ )。CGH 的面形检测结果与轮廓测量结果相当, 验证了 CGH 检测的可靠性。

### 3 结 论

工业镜头中采用自由曲面的设计, 在提高系统性能、减少元件数量的同时, 给面形检测提出了很高的要求。文中提出了利用 CGH 高精度快速全口径干涉检测工业镜头凸自由曲面的方法, 分析了全口径干涉检测的设计要求, 设计了自由曲面干涉检测的主区域

和对准区域光路, 结合检测光路分析了镜头装夹误差对检测结果的影响, 提出了镜头高精度干涉检测方案, 成功地完成了检测实验并证明了该方法的有效性, 为工业镜头自由曲面全口径面形检测提供了新的方向。

### 参考文献:

[1] Malacara D. Optical Shop Testing [M]. Hoboken: A John Wiler & Sons, Inc, 1991: 486-496.  
[2] Liu Xin, Yang Zhongming, Liu Zhaojun, et al. Design of large aperture fast steering mirror surface figure test system [J].

- Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 20210514. (in Chinese)
- [3] Zhu Rihong, Sun Yue, Shen Hua. Progress and prospect of optical freeform surface measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0112001. (in Chinese)
- [4] Tang Jing, Zhang Jingxu, An Qichang, et al. Large aperture transmission optical element detection method based on dOTF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20200358. (in Chinese)
- [5] Li Fazhi, Zheng Ligong, Yan Feng, et al. Optical testing method and its experiment on freedom surface with computer-generated-hologram [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1052-1056. (in Chinese)
- [6] Hao Q, Ning Y, Hu Y, et al. Simultaneous phase-shifting interferometer with a monitored spatial light modulator flexible reference mirror [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(6): 1550-1557.
- [7] Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao, et al. Partial null lens for general aspheric testing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 322-325. (in Chinese)
- [8] Wenrui Cai, Ping Zhou, Chunyu Zhao, et al. Diffraction optics calibrator: Design and construction [J]. *Opt Eng*, 2013, 52(12): 124101.
- [9] Zhao Chunyu, Burge J. Optical testing with computer generated holograms: Comprehensive error analysis [C]//SPIE, 2013, 8838: 88380H.
- [10] Huang Ya, Ma Jun, Zhu Rihong, et al. Investigation of measurement uncertainty of optical freeform surface based on com-puter-generated hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1112007. (in Chinese)
- [11] Gan Zihao, Peng Xiaoqiang, Chen Shanyong. The key technology of CGH for complex surface inspection and calibration [J]. *China Metrology*, 2019(6): 80-83. (in Chinese)
- [12] Chen S, Zao C, Dai Y, et al. Reconfigurable optical null based on counter-rotating Zernike plates for test of aspheres [J]. *Opt Express*, 2014, 22(2): 1381-1386.
- [13] Su P, Kang G G, Tan Q F, et al. Estimation and optimization of computer-generated-hologram in null test of freeform surface [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(12): 1097-1100.
- [14] Feng Jie. Highly accuracy aspheric surface testing based on computer-generated hologram[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)