中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

基于计算全息图零位补偿的同轴高次非球面干涉检测技术研究

王慎 刘泉 国成立 闫力松

CGH null compensation testing of high-order coaxial aspherical surfaces

WANG Shen, LIU Quan, GUO Cheng-li, YAN Li-song

引用本文:
王慎, 刘泉, 国成立, 闫力松. 基于计算全息图零位补偿的同轴高次非球面干涉检测技术研究[J]. 中国光学, 2025, 18(2): 237-244. doi: 10.37188/CO.2024-0152
WANG Shen, LIU Quan, GUO Cheng-li, YAN Li-song. CGH null compensation testing of high-order coaxial aspherical surfaces[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(2): 237-244. doi: 10.37188/CO.2024-0152

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024-0152

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

计算全息法标定单光楔补偿检测系统误差

Calibration of single optical wedge compensation test system error by computer generation hologram

中国光学（中英文）. 2022, 15(1): 90 https://doi.org/10.37188/CO.EN.2021-0004

大型光学红外望远镜拼接非球面子镜反衍补偿检测光路设计

Optical testing path design for LOT aspheric segmented mirrors with reflective-diffractive compensation

中国光学（中英文）. 2021, 14(5): 1184 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0218

非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用

Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology

中国光学（中英文）. 2022, 15(2): 161 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0143

变步长搜索的计算全息图编码方法

CGH encoding with variable step size search

中国光学（中英文）. 2021, 14(2): 368 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0124

光学自由曲面自适应干涉检测研究新进展

Research advances in adaptive interferometry for optical freeform surfaces

中国光学（中英文）. 2021, 14(2): 227 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0126

二元计算全息法产生复杂无衍射光束

Complex non-diffraction beams generated using binary computational holography

中国光学（中英文）. 2022, 15(1): 14 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0061

文章编号　2097-1842(2025)02-0237-08

基于计算全息图零位补偿的同轴高次非球面干涉检测技术研究

王　慎[1], 刘　泉[2,3*], 国成立[3], 闫力松[4*]
（1. 中国人民大学, 北京 100872;
2. 浙江大学 光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310058;
3. 浙江舜宇光学有限公司, 浙江 余姚 315400;
4. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074）

摘要: 为了解决同轴高次非球面的高精度面形检测问题, 本文提出了一种基于 CGH 的同轴高次非球面零位补偿检测设计方法。利用所提方法, 可以实现同轴非球面补偿设计中各衍射级次的有效分离, 可实现对于待测镜面的零位补偿设计。结合工程实例, 本文对一口径为 260 mm 的同轴高次非球面反射镜实现了零位补偿检测设计。从 CGH 设计结果可以看出, 基于本文检测设计方法, 其理论设计检测残差(RMS 值)可以达到 0 nm。此外, 还完成了对于该同轴高次非球面反射镜的实际检测。针对检测过程中的误差源进行了误差分析, 以验证本方法的可靠性与精度。

关　键　词: 光学检测; 补偿; 计算全息; 同轴高次非球面
中图分类号: O439;O436.1　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2024-0152　　**CSTR:** 32171.14.CO.2024-0152

CGH null compensation testing of high-order coaxial aspherical surfaces

WANG Shen[1], LIU Quan[2,3*], GUO Cheng-li[3], YAN Li-song[4*]
(1. *Renmin University of China*, *Beijing* 100872, *China*;
2. *College of Optical Science and Engineering*, *Zhejiang University. Hangzhou* 310058, *China*;
3. *Zhejiang Sunny Optics CO.*, *Ltd. Yuyao* 315400, *China*;
4. *School of Optical and Electronic Information*, *Huazhong University of Science and Technology*, *Wuhan* 430074, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *gx_liuq@sunnyoptical.com*; *yanlisong@hust.edu.cn*

Abstract: In order to solve problems involved in high-precision surface map testing of coaxial high-order

收稿日期: 2024-09-23; **修订日期:** 2024-10-14
基金项目: 国家重点研发计划(No. 2022YFC2203904); 武汉市知识创新专项项目(基于时频空编码自由曲面高精度面形检测技术研究); 宁波市重点研发计划(No. 2024T007)
Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC2203904); Wuhan Knowledge Innovation Special Project (Research on high-precision surface shape detection technology based on time-frequency and space-bound freeform surfaces); Key Research and Development Program of Ningbo (No. 2024T007)

aspherical surfaces, this paper proposes a null compensation testing method based on CGH. Based on this method, the separation of the diffraction order in the coaxial aspherical compensation design can be effectively realized, and the null compensation design of the mirror to be measured can also be realized. Combined with engineering examples, this paper realizes a null compensation testing design for a coaxial high-order aspherical mirror with a 260 mm aperture. The CGH design results show that the theoretical design testing residual (RMS value) can reach 0 nm based on the designed method. The practical testing of the coaxial high-order aspherical mirror is also completed. To further analyze the testing results, error analysis is carried out on the error source in the testing process, to verify the reliability and accuracy of the method.

Key words: optical testing; compensation; computer generated hologram; high-order coaxial aspherical surface

1 引 言

与球面光学系统相比，非球面光学系统具有系统自由度高、系统光学元件数量少，设计结果更优等优势，是新一代高性能光学系统的核心部件。其目前已经在空间光学、AR、VR、光刻光学、照明光学、激光聚变等领域得到了广泛应用。光学检测技术是光学制造的基础。高精度非球面光学元件的制造，需要经过从铣磨、研磨、粗抛光到精抛光等一系列不同的加工工艺，在不同阶段需要利用不同的检测手段以完成镜面面形检测。在铣磨阶段，通常采用机床自带的测量装置完成面形检测，对于口径为 0.2~2 m 量级的光学元件，其加工面形误差峰谷值（peak-to-valley values, PV）在 10~50 μm 间。在研磨及粗抛光过程中，通常利用三坐标测量、摆臂轮廓测量等方式完成面形检测。该阶段光学元件面形误差 PV 值通常在 1~30 μm 内。在精抛光过程中，通常利用干涉测量的方式完成最终面形检测。

针对高次同轴非球面，常用的干涉测量方法包括补偿镜法、环带拼接法、子孔径拼接法、基于计算全息图（computer generated hologram, CGH）的零位干涉法等。补偿镜法通常被认为是非球面检测中精度较高的一种方法，它依赖于特制的补偿光学系统（如 Offner 补偿镜）从而实现对非球面球差和高阶球差的校正。补偿镜的精度需要靠绝对精度来保证，在实际操作中极大地增加了加工难度和成本。环带拼接法与子孔径拼接法类似，都是通过多个位置的测量来“拼接“出非球面面形。区别在于环带拼接法通过非球面沿光轴方向的移动实现测量，而子孔径拼接法则需要非球面进行平移和倾斜移动。在子孔径拼接过程中，对准误差的积累和拼接算法的复杂性往往限制了最终结果的精度。

计算全息补偿技术（computer generated hologram, CGH）凭借其设计的灵活性，可以产生任意形状的波前，常应用于非球面及自由曲面的补偿干涉测量。其中，亚利桑那大学的 Zhou P 和 Burge 等人对 CGH 非球面检测进行了详细的误差分析[1]。西安工业大学的李世杰等人对离轴非球面混合补偿方法进行了研究[2]。浙江大学的梁子健等人提出了一种基于迭代跟踪的双约束搜索方法对 CGH 零位补偿的最优载波频率进行求解[3]。南京理工大学沈华等人设计并制造了自由曲面 CGH[4]。韩国标准科学研究院的 Yang Ho-Soon 等人利用一块 CGH 实现了高陡度凸非球面的补偿测量[5]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所（简称长春光机所）孙强等人提出了一种新型 CGH 设计方法并实现了高陡度凸非球面的面形测量[6]。德国 Stuttgart 大学的 Peterhansel S 等人详细分析了非球面检测中 CGH 高线密度对检测精度的影响[7]。成都精密光学工程研究中心的崔建朋等人利用 CGH 补偿实现了长焦距大口径光学镜面中频误差的测量[8]。长春光机所李明茁等人针对 CGH 零位补偿检测提出了一种基于椭圆高斯模型的高精度解析模拟表达方法[9]。常州工学院的徐秋云等人针对大口径非球面反射镜零位补偿器的误差标定方法进行了详细研究[10]。浙江大学杨甬英等人详细总结了非球面的干涉检

测方法[11]。中国科学院上海光学精密机械研究所的胡晨等人利用 CGH 实现了大口径长焦距离轴抛物面反射镜测量[12]。华中科技大学的闫力松等人针对长焦距非球面提出了一种基于 CGH 的混合补偿检测方法[13]。北京空间机电研究所的王兆明等人基于 CGH 提出了一种两面共体非球面反射镜光轴一致性高精度测量方法[14]。西安空间无线电技术研究所的刘佳妮等人提出了一种基于 CGH 的小口径深度凸非球面的高精度面形检测方法[15]。长春光机所王孝坤等人针对大口径凸非球面的面形检测提出了一种基于 CGH 与子孔径拼接的混合补偿检测方法[16]。

本文针对同轴高次非球面镜的 CGH 补偿设计方法进行深入探讨, 同时结合工程实例, 验证了本文所述方法的有效性与精度。CGH 设计优化内涵包括衍射杂光的分离与去除, 畸变控制以及全息条纹密度的降低。通常需要加载离焦或者倾斜载频来去除衍射杂光, 但是载频过大又会使得全息条纹密度增大, 导致 CGH 加工难度增加。对于口径相同的非球面, 随着其 F#减小, 衍射杂光分离所需的载频相应增加, 畸变控制难度也会变大。不同于常规利用 CGH 检测非球面时将 CGH 与待测非球面在检测光路中放置于干涉仪焦点的同一侧, 本文通过把二者放置在干涉仪焦点的两侧, 以显著减少衍射杂光对检测结果的影响。此外, 通过同时加载离焦和倾斜载频的方式, 避免了单纯加载离焦载频可能导致的近轴环带杂光和非球面边缘畸变过大的问题, 同时解决了单纯加载倾斜载频时不同级次的焦点在同一焦平面附近, 导致检测时无法确定所需级次的问题。本文的具体安排如下: 在本文的第二部分, 详细介绍了 CGH 补偿设计方法的理论模型, 具体包括如何规划 CGH 主区域与辅助区域, 从而实现检测中各光学元件的精确对准, 如何设计主区域与补偿区域, 如何实现相干检测中衍射级次分离设计等; 第三部分, 对同轴高次非球面反射镜进行了实验检测与分析; 第四部分给出了文章的相关结论。

2　CGH 设计方法模型

CGH 以衍射原理为基础, 可以生成与待测非球面严格一致的理想非球面波前(一般选用+1 级次), 从而实现对于待测非球面光学元件的零位补偿检测。鉴于 CGH 的设计灵活性, 可以在同一块 CGH 检测模块上设计不同的功能区域, 从而实现待测非球面零位补偿、干涉仪与 CGH 光路对准设计、CGH 基准投射设计等不同功能。

CGH 补偿高次非球面检测的常见光路图如图 1 所示。CGH 和待测非球面位于干涉仪焦点同侧。干涉仪球面波先通过 CGH, 形成多个衍射级次照射到非球面, 再反射回来二次经过 CGH, 最终到达干涉仪。以整数 m 表示不同的衍射级次, 则两次经过 CGH 后在干涉仪交点处的衍射杂光级次为(m, m'), 其中 m 和 m'不为+1。通过干涉仪焦平面处的针孔, 可以将衍射杂光遮挡, 只让特定级次通过。

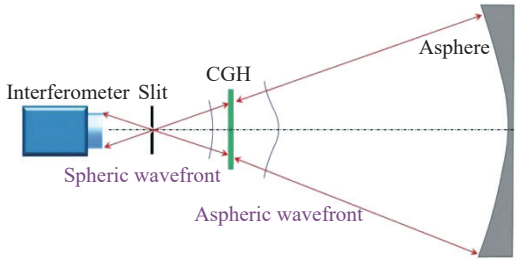


图 1　CGH 补偿凹面镜示意图

Fig. 1　Schematic diagram of CGH compensating concave mirror

由于第一次衍射产生的所有级次杂光都可能经过 CGH 二次衍射, 导致杂光种类更多, 分析工作较为复杂。本文把 CGH 和待测非球面放置在干涉仪焦点的两侧, 第一次衍射产生的杂光级次经过针孔时部分光线被遮挡, 仅有选定的+1 级次照射到待测面上, 这样就显著减少了衍射杂光的数量。

本设计中待测高次非球面反射镜的面形表达式如式(1)~式(2)所示, 相关参数如表 1 所示。

$$z=\frac{s^2/r}{1+[1-(k+1)(s/r)^2]^{1/2}}+A_4s^4+A_6s^6+\cdots \quad (1)$$

$$s^2=x^2+y^2 \quad , \quad (2)$$

其中 z 为光学镜面的矢高, x、y 分别为镜面水平方向坐标, k 为二次曲面常数, r 为镜面顶点曲率半径, A_4 与 A_6 分别为非球面高次项系数, D 为待测光学镜面口径。为了实现对表 1 所示待测高次非球面完成零位补偿检测, 设计了 CGH 补偿检测光路, 检测光路图如图 2 所示。

表 1 待测高次非球面镜基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the high-order aspherical mirror

参数项	参数数值
D/mm	260
r	-4.62×10^{2}
k	1.192×10^{-1}
A_4	2.936×10^{-11}
A_6	2.875×10^{-15}

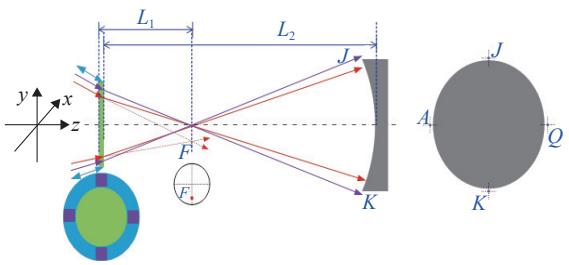


图 2 检测光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical path parameters

检测时，干涉仪焦点位于图 2 所示 F 处，干涉仪焦点距离 CGH 前表面距离为 L_1，CGH 后表面与主镜中心距离为 L_2。每一条入射光线均沿非球面法线入射，同时沿法线出射，返回干涉仪后与参考光形成干涉条纹。

在测试待测非球面时，为了使各光学元件的位置关系准确且是严格对准的，同时在 CGH 上设计了不同的辅助功能区域，如图 3(彩图见期刊电子版)所示。

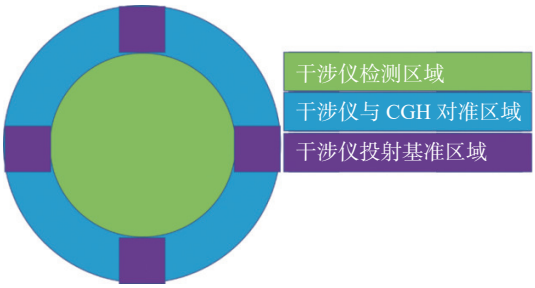


图 3 CGH 区域分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the regional distribution of CGH

CGH 上共规划 3 种功能区域，分别为干涉仪检测区域、CGH 与干涉仪对准区域及干涉仪透射基准区域。其中绿色部分为干涉仪检测区域，用来实现对非球面的零位补偿测量；蓝色部分为干涉仪与 CGH 对准区域，用来实现 CGH 与干涉仪的精确对准；紫色区域为干涉仪投射基准区域，其将在待测镜面的四周形成 4 个基准，以指导待测镜面的位置摆放，具体如图 2 中 A、K、Q、J 所示 4 个投射基准位置。检测光路的基本数据如表 2 所示。

表 2 检测光路基本参数

Tab. 2 Basic parameters of the detection optical path

参数	数值
CGH基板	直径为100 mm；厚度为15.07 mm；距离L_1= 93.76；L_2= 496 mm
干涉仪焦点坐标	F(0, −4)，单位mm
光阑参数	距离CGH后表面76.5 mm；直径1 mm
辅助对准区域(蓝色)	辅助CGH和干涉仪之间对准；辅助CGH和平面镜直接对准；衍射级次5级
基准投射区域(紫色)	在被检面处投射参考光斑；衍射级次1级
所投射4个光斑坐标	J(0, 132.14)，Q(132.14, 0)，K(0, -132.14)，A(−132.14, 0)，单位mm

CGH 主区域设计是光路设计中的核心内容。要实现主区域的设计，需要对待测同轴非球面反射镜进行零位补偿，即使得通过 CGH 衍射所形成的波前与待测镜面的几何形状严格相符。

本工程实例中的主区域光学设计结果如表 3 所示。

表 3 主区域光学设计结果

Tab. 3 Optical design results of main area

参数	数值
区域范围	半径为25.07 mm的圆
检测范围/mm	260
条纹密度估算/(lp·mm^{-1})	平均值为76，最密处为117.5
干涉仪焦点坐标	F(0, −4)，单位mm
Zernike拟合残差	rms0.0000λ@632.8 nm

主区域设计拟合残差如图 4(彩图见期刊电子版)所示。考虑到 CGH 制作时需要考虑设备的实际加工能力，通常采用条纹密度设计结果进行评价。本设计中，条纹密度估算结果平均值为 76 lp/mm，最密处为 117.5 lp/mm，设计结果如图 5(彩图见期刊电子版)所示，采用了 1∶100 比例。

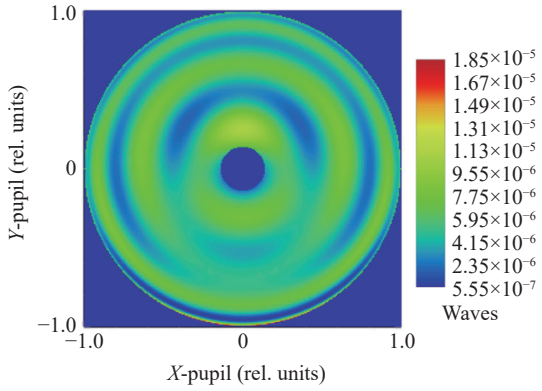


图 4　主区域拟合残差

Fig. 4　Fitting residuals for the main region

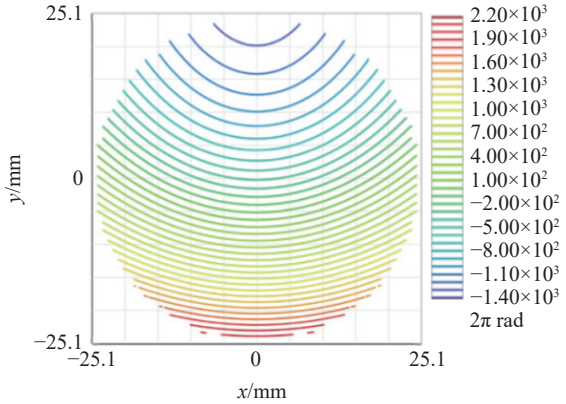


图 5　CGH 主区域条纹图

Fig. 5　Stripe diagram of the main region

辅助对准区域中干涉仪与 CGH 对准区域用以实现干涉仪及 CGH 的精确对准, 该区域对应图 3 中蓝色区域, 其具体设计结果如下:

(1)区域范围: 环形, 内径为 25.2 mm, 外径为 31.47 mm; (2)衍射级次为 5 次; (3)条纹密度估算: 条纹密度≤257 lp/mm; 最小条纹尺寸为 1.95 μm; (4)CGH 辅助对准区域条纹图如图 6(彩图见期刊电子版)所示, 采用了 1∶5 000 比例。

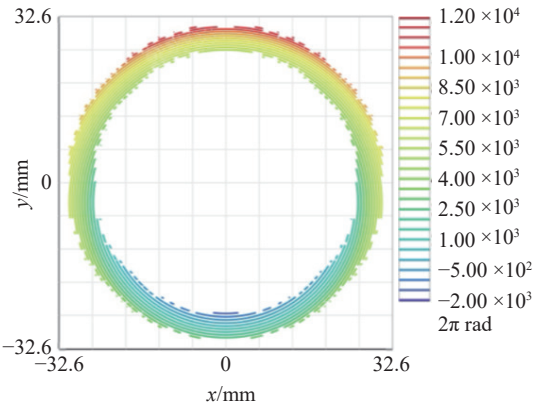


图 6　CGH 辅助对准区域条纹设计图

Fig. 6　CGH assisted alignment area stripe design

在 CGH 设计过程中, 同时应充分考虑到各衍射级次的分离。如果 CGH 各衍射级次在干涉检测中没有实现完全分离, 则在检测过程中会形成杂散光, 从而影响待测镜面的面形检测精度。

本文待测同轴高次非球面镜检测中主区域补偿检测利用的工作衍射级次为 (−1, −1) 级。除工作级次外, 该检测光路中最强的 9 个衍射级次分别为: (−1, 0), (−1, 1), (0, −1), (0, 0), (0, 1), (1, −1), (1, 0), (1, 1)。对上述 9 个衍射级次的模拟分析结果如图 7~图 8(彩图见期刊电子版)所示。

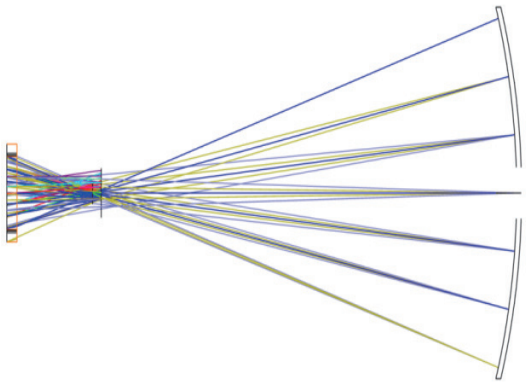


图 7　衍射级次分离光路图

Fig. 7　Optical path diagram of diffraction order separation

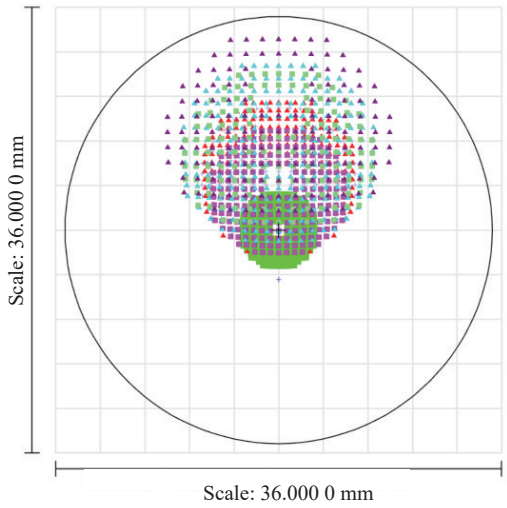


图 8　衍射级次分离示意图

Fig. 8　Schematic diagram of diffraction order separation

由图 7、图 8 可以看出, 通过同时加载离焦和倾斜载频的方式, 仅有选定级次在干涉仪焦平面汇聚, 且已经与其他衍射能量较强的级次充分分离。

3 同轴高次非球面检测实验及误差分析

基于工程实例，本文所述同轴高次非球面干涉检测实验光路图如图 9 所示。由图 9 可以看出，利用一块 CGH 基板即可以实现对于同轴高次非球面反射镜的全口径补偿测量。

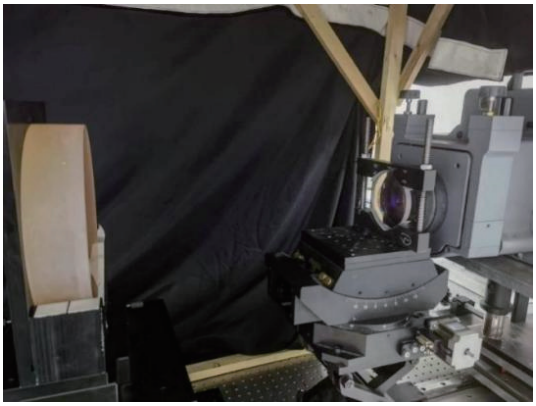


图 9 主镜 CGH 补偿检测光路图

Fig. 9 Optical path diagram of primary mirror CGH compensation testing

基于图 9 检测光路，得到相应的主镜检测结果，如图 10(彩图见期刊电子版)所示。检测结果中出现了部分衍射杂光(图中黑色竖线区域)。通过仿真光线追迹分析，确认其为(0, 2)和(2, 0)级次杂光与(1, 1)级次重叠造成的。根据 Lindlein N 对 CGH 检测非球面的衍射杂光理论推导，可知，(0, 2)和(2, 0)级次是最难分离的衍射级次[17]。当光栅占空比为 0.5 时，2 级衍射效率为零，即通常不需要考虑(0, 2)和(2, 0)级次的分离。但是由于 CGH 制造误差，特别是占空比误差的存在，导致干涉图质量降低。通过进一步增加 CGH 载频，或者优化 CGH 加工工艺，可以使相应的杂光问题得以改善。

为了进一步对检测结果进行分析，在 CGH 制造前，对 CGH 基板对应被检面有效口径范围内的 CGH 基板透射波像差进行测量，测量结果如图 11 所示。

从理论上对于主镜 CGH 补偿测试过程进行误差分析。误差源主要包括设计误差、编码误差、基板误差、刻划误差和位置失调误差 5 个方面，如表 4 所示。

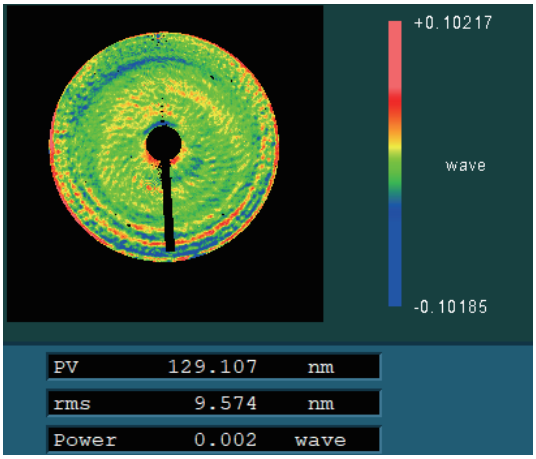


图 10 同轴高次非球面主镜面形检测结果

Fig. 10 The detection results of the coaxial high-order aspherical primary mirror surface

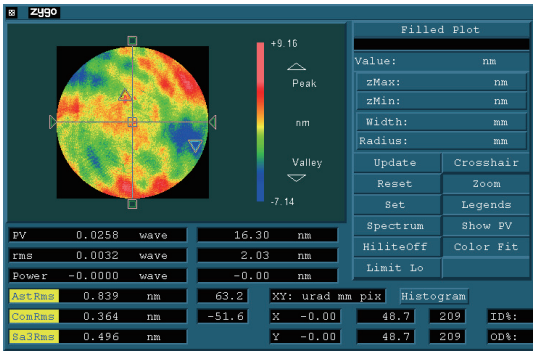


图 11 CGH 基板透射波像差结果

Fig. 11 Transmission wavefront aberration of CGH substrates

表 4 主镜 CGH 误差源

Tab. 4 CGH error sources of the primary mirror

误差项	数值(rms/λ)	备注
设计误差	0.000 00	
编码误差	0.000 10	
基板误差	0.002 7	假定补偿其Z9及以下低阶项
刻划误差	0.002 3	按位置误差$\sigma x=\sigma y$=30 nm
位置失调误差	0	检测时调整彗差到零
误差合成	0.003 55	以RSS方式合成上述各项

从本文第二部分可以看出，对主镜进行检测，其 CGH 设计误差 RMS 值为零；CGH 编码误差量级在 0.000 1λ；基板误差可以理解成包含两个部分，分别为透射波像差误差及基板厚度误差，该部分为 CGH 误差中的最主要误差，对于透射波像差，要求其基板透射波像差优于 0.01λ，从图 11 可以看到其实测值为 0.003 2λ，对于该部分误差，考

虑到中高频信息对于镜面横向对准精度要求很高，需要达到像素级别的对准精度，故在对准精度未达到要求时会造成标定去除错误，在考虑基板透射波像差标定时只考虑补偿其 Z9 及以下低阶像差。对于图 11 基板透射波像差结果，进行 Zernike 多项式拟合低通滤波后其 RMS 值为 0.002 7λ，该部分误差可以通过仿真在检测结果中进行标定去除；对于 CGH 基板厚度误差，同样可以根据标定设计厚度与实际厚度间的偏差，通过仿真将该部分波前误差进行标定去除；由于主镜 CGH 是基于已有基板进行加工的，基板厚度为 15.07 mm，CGH 设计基于该厚度完成，故其基板厚度偏差可以忽略。CGH 制造时刻划误差为 RMS 0.0023λ，该部分误差难以标定。位置失调误差包括 X、Y、Z 三个方向的平移和绕 XYZ 的旋转（Roll、Pitch 和 Yaw）。通过位置敏感度分析可知，X 和 Y 轴的平移量失调和绕 X 和 Y 轴的旋转主要引入倾斜、彗差和少量像散；Z 轴的平移量失调将引入离焦；而绕 Z 轴的旋转对于同轴非球面没有影响。实际测试过程中，会将彗差系数调整到零，同时最终结果会去除倾斜和离焦量，因此可以认为位置失调量对于误差的贡献为零。综合考虑上述各项误差，按照统计平方公差法 (Root-Sum-Squares, RSS）合成上述误差，如式（3）所示。则 CGH 标定前总误差 RMS 值为 0.003 55λ。

$$\mathrm{RMS}_{\text{误差合成}} = (\mathrm{RMS}^2_{\text{设计误差}} + \mathrm{RMS}^2_{\text{编码误差}} + \mathrm{RMS}^2_{\text{基板误差}} + \mathrm{RMS}^2_{\text{刻划误差}} + \mathrm{RMS}^2_{\text{位置失调误差}})^{1/2} \quad . \tag{3}$$

4　结　论

本文提出了一种可以高次同轴非球面的 CGH 零位补偿干涉检测设计方法。通过对 CGH 进行合理规划，有效规划主补偿区域与辅助功能区域，可以在检测中实现各检测元件的精确对准。同时在主区域设计时充分考虑各衍射级次分离，避免其他衍射级次光在检测时对设计应用的衍射级次产生难以消除的杂散光影响。同时在主区域与辅助区域设计时应考虑加工工艺的限制，控制条纹数密度。根据本文所述 CGH 设计方法及检测实验结果可以看出，该方法可以有效实现同轴高次非球面反射镜的 CGH 补偿设计及检测，根据误差分析结果，其可以有效应用于航空航天中非球面反射镜的高精度制造加工。

参考文献:

[1] ZHOU P, BURGE J H. Fabrication error analysis and experimental demonstration for computer-generated holograms [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(5): 657-663.

[2] LI SH J, ZHANG J, LIU W G, *et al*.. Measurement investigation of an off-axis aspheric surface via a hybrid compensation method[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(28): 8220-8227.

[3] LIANG Z J, ZHAO H Y, YANG Y Y. Solving optimal carrier frequencies of a CGH null compensator through a double-constrained searching method based on iterative ray-tracings[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(16): 4699-4709.

[4] SHEN H, ZHU R H, GAO ZH SH, *et al*.. Design and fabrication of computer-generated holograms for testing optical freeform surfaces[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(3): 032201.

[5] YANG H S, SONG J B, LEE I W, *et al*.. Testing of steep convex aspheric surface with a Hartmann sensor by using a CGH[J]. *Optics Express*, 2006, 14(8): 3247-3254.

[6] LIU H, LU ZH W, LI F Y, *et al*.. Design of a novel hologram for full measurement of large and deep convex aspheric surfaces[J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3120-3126.

[7] PETERHÄNSEL S, PRUSS C, OSTEN W. Phase errors in high line density CGH used for aspheric testing: beyond scalar approximation[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 11638-11651.

[8] CUI J P, ZHANG N, LIU J, *et al*.. Testing the mid-spatial frequency error of a large aperture long-focal-length lens with CGH[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9454-9463.

[9] LI M ZH, HU H X, ZHANG X J, *et al*.. Modeling and suppressing the wavefront degeneration in a CGH interferometric null test[J]. *Optics Express*, 2022, 30(23): 41508-41523.

[10] 徐秋云, 孔令臣. 大口径非球面反射镜零位补偿器误差标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(4): 0422001.
XU Q Y, KONG L CH. Error calibration method of null correctors for large-aperture aspherical mirrors[J]. *Laser &*

Optoelectronics Progress, 2024, 61(4): 0422001. (in Chinese).

[11] 梁子健, 杨甬英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 161-186.
LIANG Z J, YANG Y Y, ZHAO H Y, *et al*.. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 161-186. (in Chinese).

[12] 胡晨, 魏朝阳, 万嵩林, 等. 基于计算全息图的大口径长焦距离轴抛物面反射镜测量[J]. 中国激光, 2024, 51(11): 1101030.
HU CH, WEI CH Y, WAN S L, *et al*.. Measurement of large aperture long focus off-axis paraboloid mirror based on computer generated hologram[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(11): 1101030. (in Chinese).

[13] 张誉馨, 黎发志, 闫力松, 等. 结合 CGH 与辅助透镜的长焦距非球面反射镜检测 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9): 20220384.
ZHANG Y X, LI F ZH, YAN L S, *et al*.. Long focal length aspherical mirror testing with CGH and auxiliary lenses (*invited*)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220384. (in Chinese).

[14] 王兆明, 栗孟娟, 于秋跃, 等. 两面共体非球面反射镜光轴一致性高精度测量方法研究 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(9): 20230476.
WANG ZH M, LI M J, YU Q Y, *et al*.. Research on high precision testing method for mirror optical axis of two-sided community aspheric mirror (*invited*)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(9): 20230476. (in Chinese).

[15] 刘佳妮, 陈安和, 李智勇, 等. 小口径深度凸非球面的高精度面形检测[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9): 20220190.
LIU J N, CHEN A H, LI ZH Y, *et al*.. High-precision shape measurement technology for convex aspheric with small aperture and large convex asphericity[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220190. (in Chinese).

[16] 苏航, 王孝坤, 程强, 等. 子孔径拼接和计算全息混合补偿检测大口径凸非球面 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9): 20220576.
SU H, WANG X K, CHENG Q, *et al*.. Sub-aperture stiching and CGH mixed compensation for the testing of large convex asphere (*invited*)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220576. (in Chinese).

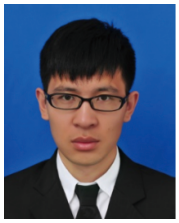
[17] LINDLEIN N. Analysis of the disturbing diffraction orders of computer-generated holograms used for testing optical aspherics[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(16): 2698-2708.

作者简介：

王　慎(1988—), 女, 黑龙江大庆人, 硕士, 讲师, 2011 年于美国密歇根大学获得硕士学位, 主要研究方向为检测技术研究。E-mail: 20190009@ruc.edu.cn

刘　泉(1990—), 男, 江西九江人, 博士, 高级工程师, 2021 年于德国图宾根大学获得博士学位, 主要研究方向为干涉补偿检测。E-mail: gx_liuq@sunnyoptical.com

国成立(1990—), 男, 吉林长春人, 博士, 高级工程师, 2018 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事成像及目视光学系统的加工、制造及检测等方面的工作。E-mail: gcl@sunnyoptical.com



闫力松(1988—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 副教授, 博士生导师, 2015 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要研究方向为干涉检测技术及其应用。E-mail: yanlisong@hust.edu.cn