

## 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)

王兆明, 栗孟娟, 于秋跃, 李春林, 赵子跃, 王经华, 吕天斌, 张兆健, 于长锁

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** 同轴四反式光学系统的研制可采用非球面主镜和四镜一体化成型制造法, 该方法极大地降低了系统零件复杂度, 同时减轻了整机质量, 提高了装机效率, 但对后期光学系统装调的自由度产生了约束, 因此, 在镜面制造过程中, 两者的光轴一致性需要精确测量及控制。在现有干涉测量法的基础上, 提出了一种检测两面共体非球面镜光轴一致性的方法。在干涉检测光路中, 两个非球面表面的光轴通过精密调整和严格标定后分别引出到两个计算全息片 (CGH) 补偿器上, CGH 经过设计后, 其特定区域可发出平行光, 经另一片 CGH 反射后在干涉仪中形成表征两片 CGH 夹角的干涉条纹, 解算干涉条纹的波前倾斜可得出两非球面的光轴偏差, 对一两面共体待测非球面光学零件进行了 CGH 设计和检测光路的误差分析, 显示测试精度可以达到  $1''$ 。设计投产了 CGH 补偿器, 搭建干涉检测光路, 完成了光轴一致性的测量, 数据处理解析出的波前倾斜为  $(1.544\lambda, 0.441\lambda)$ , 计算出光轴夹角为  $(0.007 0^\circ, 0.002 0^\circ)$ , 使用经纬仪复测的两片 CGH 的夹角为  $(0.007 1^\circ, 0.001 9^\circ)$ 。使用轮廓仪法对干涉测量法结果进行了比对验证, 分别扫描主镜和四镜的面形轮廓, 统一坐标系后, 主镜和四镜的光轴夹角为  $(0.007 1^\circ, 0.002 0^\circ)$ , 三者显示出较高的一致性。该方法具有直观性强、检测精度高的优点。

**关键词:** 光学检测; 光轴一致性测量; 计算全息; 两面共体非球面

**中图分类号:** TB96 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230476

### 0 引言

随着轻小型卫星技术的不断发展, 轻小型、低成本、批量化光学载荷研制的需求日益迫切, 成为空间光学领域一个新的研究热点<sup>[1-6]</sup>。同轴四反式光学系统可采用非球面主镜和四镜一体化成型制造法, 该方法极大地降低了系统零件复杂度, 同时减轻了整机质量, 提高了装机效率。但是, 主镜和四镜一体化成型制造法对后期光学系统装调的自由度产生了约束, 因此, 在镜面制造过程中, 两者的光轴一致性需要精确测量及控制。

传统的两个非球面光轴夹角测量方法主要有三种, 分别为定心仪法<sup>[7-8]</sup>、轮廓扫描法<sup>[9-11]</sup>、干涉测量法<sup>[12-15]</sup>。定心仪法通过寻找自准直望远镜出射光经被测面反射球心像的方法确定光轴, 主要适用于球面透镜光轴测量。当测量非球面时, 通过测量非球面不同环带返回的球心像来拟合光轴, 由于非球面不同, 环带顶点曲率半径差异较小, 拟合的光轴基线较短,

测量精度较低, 不适用于非球面光轴测量。

轮廓测量法通过轮廓扫描仪探针扫描获得镜面的矢高轮廓数据, 然后数据拟合计算出光轴夹角, 该方法在测量两面共体非球面反射镜光轴一致性时, 需要在不同机械基准下两次扫描不同反射镜的面形, 不同基准下的误差传递过程需要严格控制, 且该方法下被测非球面口径会受轮廓仪量程的限制。

干涉测量法利用激光干涉仪结合补偿光学元件 (平面反射镜、零位补偿器或计算全息片 (CGH)) 测量非球面光轴, 具体为: 在检测光路中将非球面光轴引出到补偿光学元件上, 再使用激光跟踪仪等测量仪器测量光轴相对于机械基准的偏差, 其测量精度受制于机械基准的加工精度及测量仪器的检测精度。

在现有干涉测量法的基础上, 文中提出了一种检测两面共体非球面镜光轴一致性的方法。利用 CGH 补偿器和被测非球面在干涉检测光路中光轴一致的特性, 将两个非球面的光轴通过精密调整和严格标定后引出到对应的 CGH 补偿器上, 然后又利用 CGH

收稿日期: 2023-08-03; 修订日期: 2023-09-15

作者简介: 王兆明, 男, 工程师, 硕士, 主要从事大口径非球面加工与检测方面的研究。

的平面特性,通过 CGH 之间形成的干涉条纹解算出彼此的夹角关系,从而得到共体非球面两面之间的光轴偏差。经分析,该方法的测量误差可控制在 1"。该方法具有直观性强、检测精度高的优点。

### 1 检测原理

检测原理图如图 1 所示。图 1(a)为用 CGH 分别测量共体非球面反射镜两个表面的光路。待测共体非球面反射镜表面分别为 S1 和 S2,干涉仪 1 和 CGH1 测量非球面 S1 的表面面形,在干涉测量光路

中,严格控制初级像差后,CGH1 和非球面 S1 的光轴将达到高度一致。同理,CGH2 和非球面 S2 的光轴也将一致,即 CGH1 和 CGH2 的光轴可分别表征 S1 和 S2 的光轴。设计时,CGH1 和 CGH2 的光轴都垂直于其光学表面。图 1(b)为测量两个 CGH 之间夹角的干涉测量光路。CGH 在经过设计后,可使得干涉仪 1 发出的标准球面测试光波经 CGH1 后特定区域被调制为标准平面光波,光波经过 CGH2 后自准直返回,形成干涉条纹,解析干涉条纹波前倾斜,得到两 CGH 的夹角值  $\theta$ 。

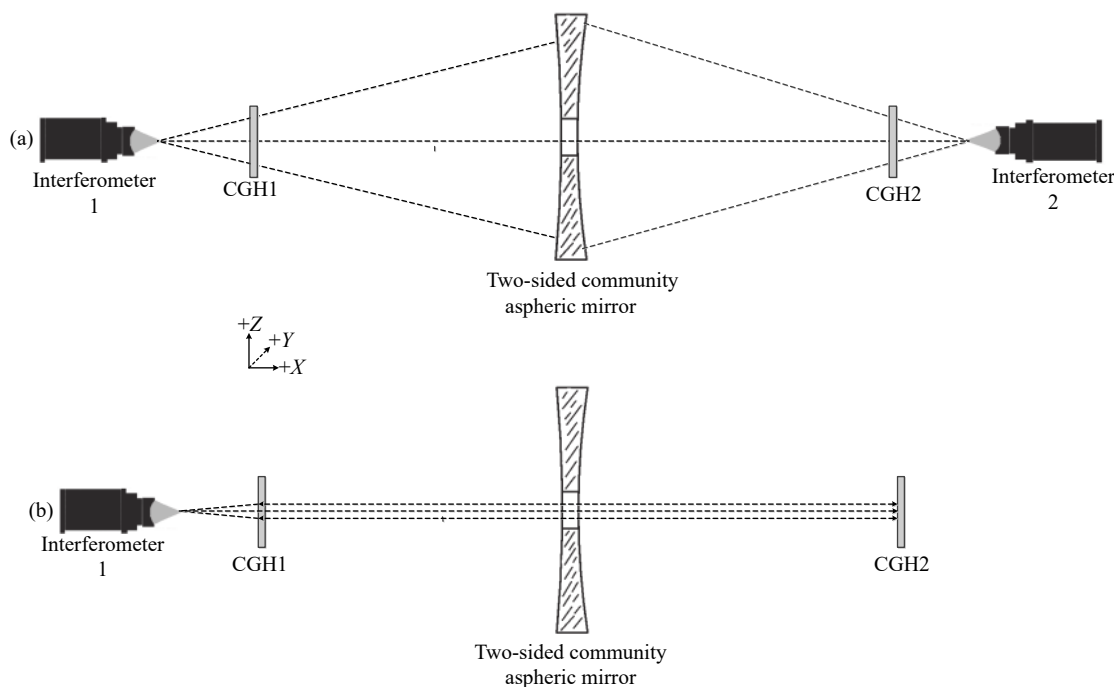


图 1 测量方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of testing system

如图 2 所示,依据非球面 S1、S2 的几何参数以及装置中光学元件的位置关系,将 CGH1、CGH2 上划分不同区域,包括零位测试区域 A、对准区域 B、夹角测试区域 C。区域 A 用于测量两面共体非球面光学零件的表面面形误差,激光干涉仪发出的标准球面测试光波经过区域 A 后被调制为非球面光学零件表面一致的波前,从而形成干涉测量条件。激光干涉仪发出的标准球面测试光波经过区域 B 后自准直返回,形成干涉条纹,用于激光干涉仪和 CGH 补偿器的辅助对准。区域 C 用于测量 CGH1 和 CGH2 的夹角。

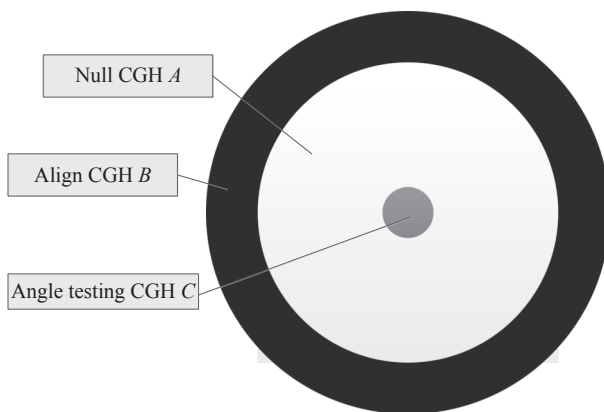


图 2 CGH 区域分布图

Fig.2 Schematic diagram of CGH area

$$\theta = \arctan\left(\frac{2T}{D} \cdot \lambda\right) \quad (1)$$

式中:  $D$  为 CGH 补偿器表面区域  $C$  的口径;  $\lambda$  为干涉仪的激光;  $T$  为波前倾斜量, 可分解成水平和垂直两个分量 ( $T_x, T_y$ ), 对应 Zernike 多项式对波前数据进行拟合的第二项和第三项系数。

## 2 检测光路设计

针对一两面共体待测非球面反射镜进行了 CGH 补偿器的设计, 待测两面共体非球面光学零件的非球面光学表面 S1 口径  $\Phi 500$  mm, 顶点曲率半径  $R_0=560$  mm, 非球面系数  $K=-0.88$ ; 非球面光学表面 S2 口径  $\Phi 420$  mm, 顶点曲率半径  $R_0=1558$  mm, 非球面系数  $K=-3$ 。

CGH 补偿器到非球面光学表面距离在数值上一

般不超过非球面光学表面的顶点曲率半径  $R$ , 在该范围内, CGH 补偿器到非球面光学表面的距离越近, 所需的测试区域  $A$  的口径越大。该距离在选择上应尽量使得 CGH 补偿器区域  $B$  的口径不大于 100 mm。CGH 补偿器到干涉仪的距离影响 CGH 补偿器加工的最小特征尺寸。设计选择合适的距离使得最小特征尺寸不小于 5  $\mu\text{m}$ 。

根据待测两面共体非球面光学零件中非球面光学表面 S1、S2 的几何参数, 使用光学设计软件 Zemax 进行仿真设计。设置激光波长为 632.8 nm, 非球面光学表面 S1 与 CGH1 距离为 500 mm, CGH1 与干涉仪 1 的距离为 150 mm, CGH 补偿器的材料为熔融石英, 厚度为 6.35 mm。CGH1 对准区域  $A$ 、测试区域  $B$ 、基准区域  $C$  参数如表 1 所示。

表 1 主镜 CGH 参数

Tab.1 CGH parameters of the primary mirror

Area	Aperture/mm	Binary2 polynomial coefficients				
		A4	A6	A8	A10	A12
A	16-80	-7.195E+004	1.987E+003	-1.074E+002	5.878E+000	0
B	80-120	5.057E+001	-2.035E-002	7.053E-006	-1.387E-009	1.104E-013
C	0-16	-1.30E+003	3.448E-001	0	0	0

设置非球面光学表面 S2 与 CGH2 距离为 1000 mm, CGH2 与干涉仪 2 的距离为 240 mm, CGH 补偿器的

材料为熔融石英, 厚度为 6.35 mm; CGH2 对准区域  $A$ 、测试区域  $B$  参数如表 2 所示。

表 2 四镜 CGH 参数

Tab.2 CGH parameters of the fourth-mirror

Area	Aperture/mm	Binary2 polynomial coefficients				
		A4	A6	A8	A10	A12
A	16-70	-8.213E+004	2.156E+003	-1.129E+002	3.788E+000	0
B	70-115	6.184E+001	-3.051E-002	7.361E-006	-2.237E-009	6.345E-013

干涉仪光波经过 CGH 后分解为多个衍射级次, 一般利用 (1, 1) 级衍射光作为检测光波。其他衍射级次的光波经过镜面反射部分返回干涉仪, 在干涉条纹中产生鬼像, 影响检测结果。利用 Zemax 多重结构的

方法对 CGH 的非工作衍射级次的杂光进行了分析, 如图 3 所示。可以看出, 检测系统设计上的旋转对称性导致杂光难以完全消除, 但杂光反应在镜面上的分布已经很小。

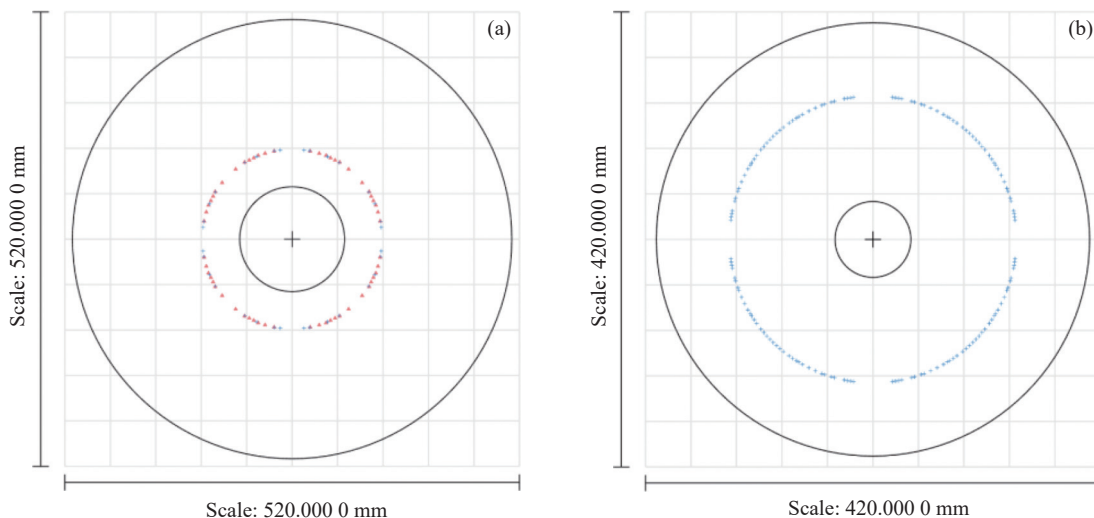


图 3 非工作衍射级次杂光在非球面 S1 和 S2 的分布

Fig.3 Distribution of non working diffraction level stray light on aspheric surfaces S1 and S2

### 3 误差分析

干涉测试光路中,影响光轴一致性测量的误差源主要有 CGH 制造误差 $\delta_1$ 、光路失调误差 $\delta_2$ 、CGH1 和 CGH2 之间夹角测试误差 $\delta_3$ 。

CGH 制造误差分为刻蚀误差和基板楔角误差。针对刻蚀误差,由于零位 CGH 采用离焦载频,刻蚀呈现旋转对称性,这种 CGH 刻蚀误差在工艺上主要表现为像散,不引入光轴测量误差。CGH 基板制造工

艺可保证楔角误差为  $0.5''$ ,即  $0.000\ 14$ ,引入的 CGH 制造误差 $\delta_1$ 为  $0.000\ 14$ 。

光路失调误差可分为干涉仪与 CGH 失调误差,CGH 与被测非球面失调误差。针对干涉仪与 CGH 失调误差,对 CGH1 和 CGH2 的对准区域 B 进行了仿真分析,CGH 与干涉仪失调量为  $0.000\ 14$ 时,对准区干涉条纹分别为三根和两根,如图 4 所示。因此,调整对准 CGH 使其对准区干涉条纹接近零条纹,实现干涉仪和 CGH 的高精度对准,引入的光轴偏差基本可以忽略。

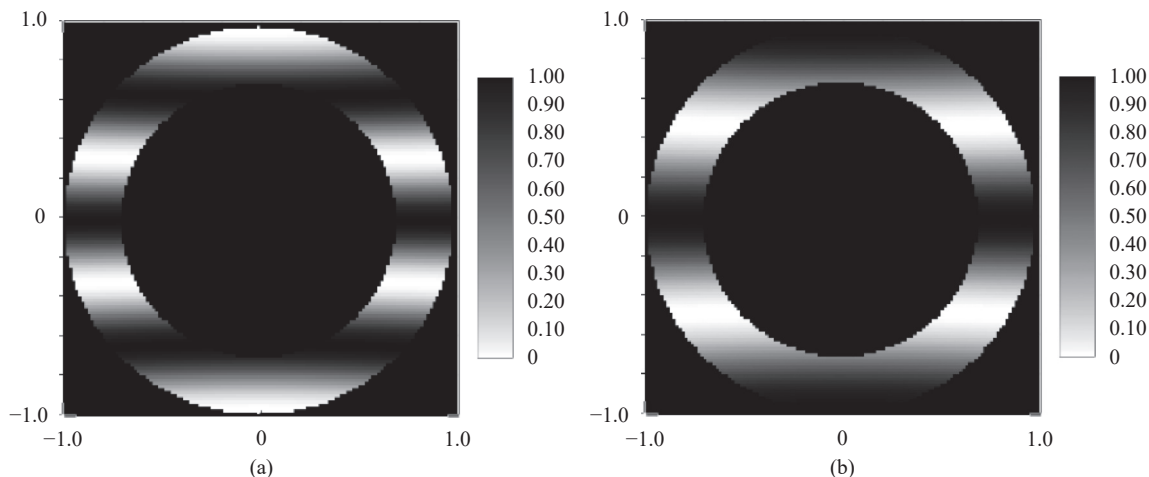


图 4 CGH1、CGH2 与干涉仪  $0.000\ 1^\circ$  的干涉条纹分布

Fig.4 Distribution of interference fringes when the angle between cgh and interferometer is  $0.000\ 1^\circ$

针对 CGH 与被测非球面失调误差,主要由干涉测试光路中难以完全消除彗差导致,通过六自由度电控平台做灵敏度测试,按干涉仪对于彗差的测试精度

为  $0.01\lambda$  计算,非球面 S2 光路失调误差为  $0.000\ 22$ ,非球面 S1 光路失调误差为  $0.000\ 03$ 。

针对 CGH1 和 CGH2 之间夹角测试误差,主要由



波前倾斜的测试不确定度引起, 对 CGH1 的区域 C 的测试灵敏度进行了仿真分析, 设置 CGH1 和 CGH2

的夹角为  $0.001^\circ$ , 仿真得到的波前倾斜 PV 值为  $0.44\lambda$ , 对应 Zernike 系数为  $0.22\lambda$ , 如图 5 所示。

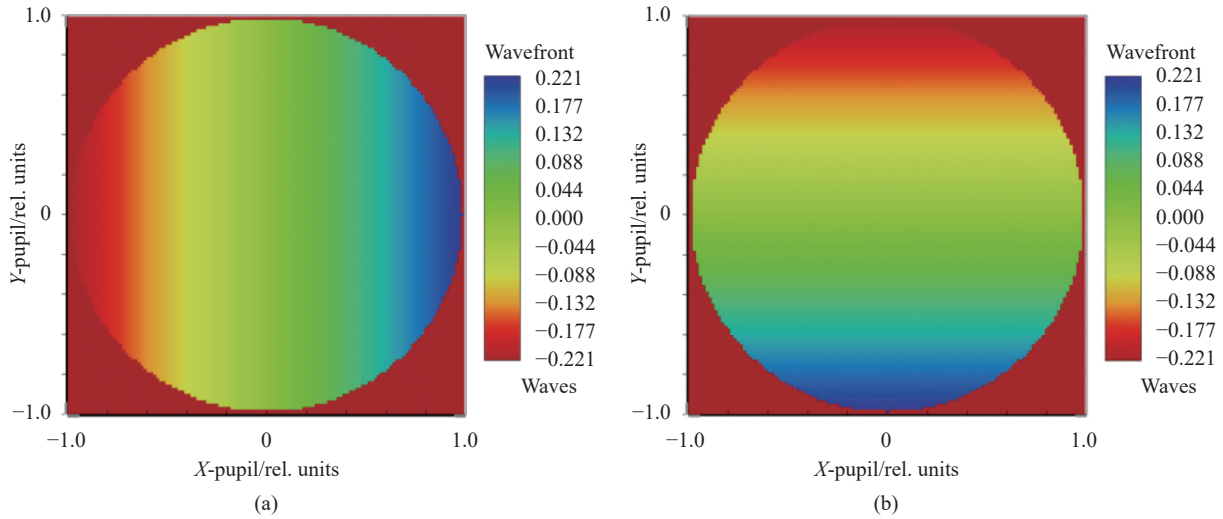


图 5 CGH1 和 CGH2 的夹角为  $0.001^\circ$  的波前仿真

Fig.5 Wavefront simulation when the angle between CGH1 and CGH2 is  $0.001^\circ$

由于波前倾斜的干涉测试精度为  $0.05\lambda(PV)$ , 对应夹角误差测量不确定度为  $0.00011^\circ$ 。波前倾斜量为实际倾斜量的 2 倍, 根据公式 (1), 对应的夹角误差  $\delta_3$  为  $0.000055^\circ$ 。综上, 整个检测光路的夹角测试误差为  $\sqrt{0.00014^2 + 0.00022^2 + 0.00003^2 + 0.000055^2} = 0.00027^\circ$ , 约合  $1''$ 。

#### 4 实验结果及验证

根据以上光路参数设计制造的 CGH1、CGH2, 搭建干涉检测光路进行了光轴一致性测试, 现场照片如图 6 所示, CGH1 区域 C 对应的干涉条纹如图 7 所示, 干涉仪数据理解析出的波前倾斜为  $(1.544\lambda, 0.441\lambda)$ , 根据公式 (1) 计算出光轴夹角为  $(0.0070, 0.0020)$ 。

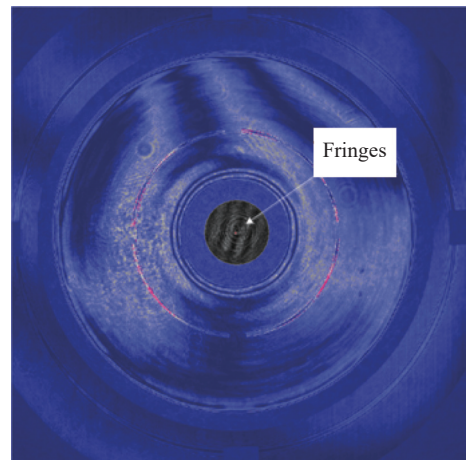


图 7 CGH1 的干涉条纹分布

Fig.7 Distribution of interference fringes in CGH1

为验证测量结果的准确性, 使用经纬仪测量了两片 CGH 的夹角, 记录如表 3 所示。

根据测量结果计算: 水平夹角为  $180.0071^\circ - 0^\circ = 0.0071^\circ$ , 垂直夹角为  $180^\circ - 90.4890^\circ - 89.5129^\circ = -0.0019^\circ$ , 与文中所用方法测量结果基本一致。

使用轮廓仪法对干涉测量方法结果进行了比对验证, 分别扫描主镜和四镜面形轮廓, 拟合出光轴相对于各自端面基准的夹角值  $(0.0036, 0.0005)$ , 三坐标测量机测量出主镜端面基准和四镜端面基准的夹角  $(0.0035, 0.0015)$ , 统一坐标系后, 主镜和四镜的光轴偏差为  $(0.0071, 0.0020)$ , 测量现场照片如图 8 所示。

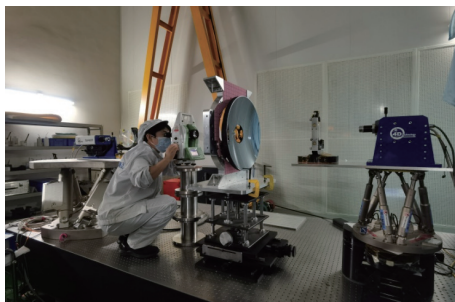


图 6 光轴偏差测量现场

Fig.6 Testing site of optical axis deviation

表 3 经纬仪测量结果

Tab.3 Theodolite measurement results

Measurement item		1st	2nd	3rd
CGH 1	Horizontal	0	0	359.999 8
	Vertical	89.512 9	89.512 9	89.512 9
CGH 2	Horizontal	180.007 2	180.007 1	180.007 0
	Vertical	90.489 0	90.489 1	90.489 0

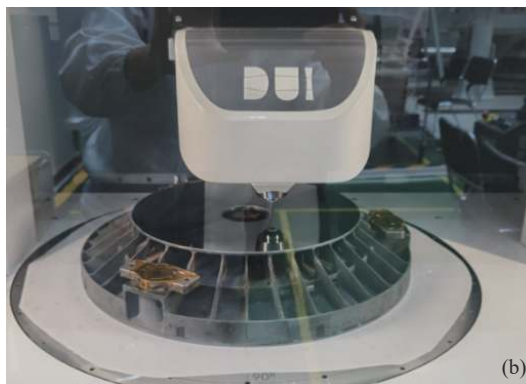


图 8 三坐标测量机 (a) 与轮廓仪测试现场 (b)

Fig.8 CMM (a) and profilometer measurement site (b)

## 5 结 论

提出了一种两面共体非球面反射镜光轴一致性检测方法,该方法将两个非球面表面的光轴通过精密调整和严格标定后引出到 CGH 补偿器上,CGH 特定区域发出平行光,经另一片 CGH 反射后在干涉仪中形成表征两片 CGH 补偿器夹角的干涉条纹,解算干涉条纹波前倾斜得出两非球面的光轴偏差。针对一口径  $\Phi 500$  mm 的两面共体非球面反射镜,设计研制了 CGH 片,搭建检测光路完成了测试,解算干涉条纹波前倾斜得到的光轴夹角为 (0.007 0, 0.002 0),使用经纬仪实测的两片 CGH 的夹角为 (0.007 1, 0.001 9),使用轮廓仪的检测结果为 (0.007 1, 0.002 0),三者显示出较高的一致性。对影响光轴测试精度的误差源进行了分析,该方法的检测精度为 0.000 27,具有直观性强、检测精度高的优点。

### 参考文献:

[1] Hu Yongfu, Xie Jing, Wu Jianfu. Design and verification of light and small push-broom and video integrated camera [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(2): 273-277. (in Chinese)

[2] Li Wei, Liu Xun, Zhang Weichang, et al. Space based edge intelligent remote sensing [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2022, 43(4): 1-11. (in Chinese)

[3] Jiang Haibin, Luo Shikui, Cao Dongjing. Technology of high-density and high-resolution camera of GF-2 satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(4): 25-33. (in Chinese)

[4] Cao Haiyi, Zhang Xinwei, Zhao Chenguang, et al. System design and key technologies of the GF-7 satellite [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2020, 40(5): 1-9. (in Chinese)

[5] Sun Li, Yang Jukui, Wang Yuzhao, et al. Design and implementation of the active-passive multi-channel LiDAR [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2022, 43(6): 27-35. (in Chinese)

[6] Zhao Yuchen, Hu Changhong, Lv Hengyi. Design of high-density coaxial four-mirror optical system with field-bias and multi-light-channel coupled [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20200197. (in Chinese)

[7] Zhou Yunyi, Lin Lina, Peng Zhangxian. Design of precision reflective centering instrument [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2020, 18(5): 68-74. (in Chinese)

[8] Chen Qinfang, Xu Changjie. Coaxial measurement of axisymmetric aspheric lens [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(6): 870-873. (in Chinese)

- [9] Fan Xinrui, Diao Xiaofei, Wu Jianwei. High-precision profile measurement method for axisymmetric aspheric mirror (*invited*) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220500. (in Chinese)
- [10] Jiao Songfeng, Xie Qiming, Liu Yao. Optical aspheric surface profile testing technology [J]. *Infrared Technology*, 2023, 45(5): 534-540. (in Chinese)
- [11] Henselmans R. Non-contact measurement machine for freeform optics[D]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2009.
- [12] Zhang Xuemin, Wei Ruyi, Yu Tao. A method to measure off-axis fabrication and off-axis angle of axis aspheric mirror precisely [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 0416001. (in Chinese)
- [13] Wang Cong, Chen Jiayi, Li Mengjuan. Centering of  $\Phi 1.3$  m aspheric reflector based on interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0113001. (in Chinese)
- [14] Li Bin, Chen Jiayi, Wang Haichao. Optical axis elicitation method for ellipsoidal mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 791-795. (in Chinese)
- [15] Ma Zhen, Li Yingcai, Fan Xuewu. Study on optical centering of aspheric mirror by interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(4): 1455-1458. (in Chinese)

## Research on high precision testing method for mirror optical axis of two-sided community aspheric mirror (*invited*)

Wang Zhaoming, Li Mengjuan, Yu Qiuyue, Li Chunlin, Zhao Ziyue, Wang Jinghua,  
Lv Tianbin, Zhang Zhaojian, Yu Changsuo

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

### Abstract:

**Objective** When the aspheric primary mirror and fourth-mirror integrated molding manufacturing method is used in coaxial four-mirror optical system, the complexity of system parts and weight of the whole machine would be reduced, and the installation efficiency could be improved greatly. Besides, the degree of freedom is constrained in later optical system assembly, so the optical axis of the two aspheric mirror needs maintain a high degree of consistency in the mirror manufacturing process. On the basis of the existing interferometry method, a new method is proposed to measure the optical axis deviation of two-sided community aspheric mirror.

**Methods** Based on the existing interferometric measurement method, a method of calculating the optical axis consistency of CGH interferometric wavefront tilt is proposed. The principle of the measurement method is introduced in detail (Fig.1). Figure 1 (a) shows the CGH optical measurement system of the two-sided community aspheric mirror. The surface of the aspheric mirror to be measured is S1 and S2. Interferometer 1 and CGH1 are used to measure the surface shape of the aspheric surface S1. The optical axes of CGH1 and aspheric S1 will reach a high consistency after the primary aberration is controlled strictly in the interferometric measurement optical system. Similarly, the optical axes of CGH2 and aspheric S2 would also be consistent. The optical axes of CGH1 and CGH2 would respectively characterize the optical axes of S1 and S2. The optical axes of CGH1 and CGH2 are both perpendicular to their optical surfaces in the design model. Figure 1 (b) shows the interferometric optical system for measuring the angle between two CGHs. CGH1 is designed to emit parallel laser in a specific area, and after reflection by CGH2, an interference fringe representing the angle between two CGH compensators is formed in the interferometer. The optical axis deviation of the two aspheric surfaces can be obtained by solving wavefront tilt of the interference fringe (Eq.1).

**Results and Discussions** For a diameter  $\Phi 500$  mm two-sided aspherical mirror, the optical measurement model was designed and simulated, the design parameters were given (Tab.1-2). The diffraction stray light in the

measurement optical path was simulated and analyzed (Fig.3). The error sources affecting the measurement accuracy (Fig.4-5) were decomposed. The main error sources are CGH manufacturing error, optical path misalignment error, and angle measurement error between CGH1 and CGH2. Simulation analysis shows that the measurement accuracy is 1 s. Two CGH were designed and processed, and the interference measurement optical system was built (Fig.6). The optical axis angle was calculated as  $(0.007\ 0^\circ, 0.002\ 0^\circ)$  when the wavefront tilt was  $(1.544\lambda, 0.441\lambda)$ . The angle between the two CGH remeasured by theodolite was  $(0.007\ 1^\circ, 0.001\ 9^\circ)$ . The profiler method was used to compare and verify CGH measurement result, the surface contours of the primary mirror and the four mirrors was scanned respectively, and the optical axis deviation was  $(0.007\ 1^\circ, 0.002\ 0^\circ)$  after unifying in one coordinate system.

**Conclusions** In order to solve the problem of optical axis consistency measurement of two-sided aspherical mirror, a new method of calculating CGH interference wavefront tilt was proposed based on the existing interferometric method. The principle of the method was introduced, the simulation design and error analysis of the measurement optical system were carried out, which show 1 s accuracy. The optical system was built and the method of profilometer was compared to verify the measurement accuracy of the method. This method has the advantages of intuitiveness and high measurement accuracy, and has been successfully applied to the integrated molding manufacturing of coaxial four-trans optical system.

**Key words:** optical testing; optical axis testing; computer generated hologram; two-sided community aspheric