

## 基于干涉测量的 $\Phi 1.3\text{ m}$ 非球面反射镜定心

王 聪, 陈佳夷, 栗孟娟, 王海超, 李 斌

(北京空间机电研究所 国防科技工业光学超精密加工技术创新中心(先进制造类)  
先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094)

**摘 要:**  $\Phi 1.3\text{ m}$  凹椭球面反射镜是某遥感器光学系统的主镜, 其定心精度要求苛刻。由于该反射镜口径大、顶点曲率半径长, 利用定心仪法进行定心的实现难度大, 精度低。通过分析非球面的两种偏心之间的补偿现象, 可知激光跟踪仪接触测量定心的精度仅为  $0.15^\circ$ 。三坐标仪接触测量定心的精度能够达到  $0.005^\circ$ , 不过其量程受限, 且在光学加工时的反复搬运会造成不便。利用 Offner 零位补偿检验光路进行干涉法定心, 干涉法将反射镜偏心转换为检测系统波前的初级像差, 同样可以达到  $0.005^\circ$  的精度。该检测方法的误差来源主要是干涉仪焦点位置误差, 是系统误差, 可以通过旋转反射镜进行多次定心测量的方法予以消除。完成了该反射镜的定心, 其结果与三坐标仪的测量结果对比, 两种偏心的最大偏差仅为  $0.023\text{ mm}$  和  $0.002^\circ$ 。实现了大口径凹非球面反射镜的原位定心测量。

**关键词:** 光学检测; 定心; 零位检验; 激光跟踪仪

**中图分类号:** TB96    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0113001

## Centering of $\Phi 1.3\text{ m}$ aspheric reflector based on interferometry

Wang Cong, Chen Jiayi, Li Mengjuan, Wang Haichao, Li Bin

(Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Optical Ultraprecise Processing Technology  
Innovation Centre for Science and Technology Industry of National Defense (Advanced Manufacture),  
Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:**  $\Phi 1.3\text{ m}$  concave ellipsoid reflector is the primary mirror of a remote sensor optical system, and its centering accuracy is demanding. Because the reflector had large aperture and long curvature radius of the vertex, it is difficult to center by centering instrument method, and the accuracy was low. By analyzing the compensating phenomena between the two kinds of off-center of aspheric surface, it could be seen that the accuracy of contact measurement centering by laser tracker was only  $0.15^\circ$ . The accuracy of contact measurement centering by three-coordinate instrument measuring instrument can reach  $0.005^\circ$ , but its range was limited, and repeated handling in optical processing will cause inconvenience. The Offner zero compensation test was used to verify the optical path for interference centering. The interference method converts the eccentricity of the mirror into the primary aberration of the detection system wavefront, which can also achieve an accuracy of  $0.005^\circ$ . The error source of this method was

收稿日期: 2019-10-05; 修订日期: 2019-11-15

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500802)

作者简介: 王聪(1985-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事光学加工与检测方面的研究。Email: 272411076@qq.com

mainly the focus position error of interferometer, which was a systematic error. It could be eliminated by multiple centering measurements with rotating mirrors. The maximum deviation of off-center was only 0.023 mm and 0.002°, compared with the results measured by the three-coordinate instrument. The in-situ centering measurement of large aperture concave aspheric mirror was realized.

**Key words:** optical inspection; centering; null compensation test; laser tracker

## 0 引言

随着对地观测遥感器的分辨率的日益提高,近年来大口径、长焦距的共轴全反射式光学系统在遥感器设计中被频繁采用<sup>[1]</sup>。这种类型光学系统的基准通常为二次或高次凹非球面圆对称主镜反射镜。非球面反射镜常用于近衍射极限光学系统中,因此对其光学加工与检测的精度要求非常高。在非球面定心工艺环节中,不但提出了光轴与机械基准轴平行的要求,且要求非球面顶点必须位于机械基准轴上<sup>[2]</sup>。

定心仪法、接触法、干涉法是非球面定心的常用测试方法。定心仪法是用一个自准直调焦望远镜分别对两个环带的镜面曲率半径中心进行定心,使两个中心的自准像绕基准轴旋转且保持不动,在理论上类似于对近同心的弯月形透镜的定心。由于非球面的各环带曲率半径中心差异太小,导致测量基线太短,因此定心准确度较低。接触法是使用三坐标仪或者激光跟踪仪,在机械基准坐标系下对镜面进行接触式扫描,拟合镜面方程后得到光轴与机械轴之间的偏差数据。但是这种定心方法存在一定局限性。计量级三坐标设备精度高,但受量程限制,且不能实现反射镜加工过程中的在位检测。激光跟踪仪使用灵活,但是设备精度低,测量误差较大。干涉法是使用激光干涉仪测试大口径非球面反射镜,通过波前像差数据结果对光学系统进行调整,使干涉仪、补偿器、反射镜的光轴一致,再测量光轴与机械轴之间的偏差<sup>[3]</sup>。

某空间相机的主镜为凹椭球面反射镜,其口径为 1 300 mm,顶点曲率半径  $R=3\ 477.2\text{ mm}$ ,非球面系数  $K=-0.983$ 。如果采用定心仪法,则定心仪的高度至少在大约 4 m 以上,转台直径在 1.3 m 以上,实现难度较大。针对另外两种方法,有必要首先讨论接触

法、干涉法对该大口径椭球面进行偏心测量的精度与误差来源。

## 1 非球面反射镜的偏心定义方法

以  $0 < e^2 < 1 (e^2 = -K)$  的椭球面为例,如图 1 所示,以其光轴为  $y$  轴,光轴与镜面交点(光学顶点)为原点建立  $XOY$  坐标系,椭球面镜面方程为<sup>[4]</sup>:

$$y = \frac{R - \sqrt{R^2 - (1 - e^2)x^2}}{1 - e^2} \quad (1)$$

假设其结构顶点为  $O'$ ,建立以其结构顶点与旋转对称中心的连线为  $y'$  轴、结构顶点为原点的坐标系  $X'O'Y'$ 。 $X'O'Y'$  坐标系与  $XOY$  坐标系之间的转换参数可以用来表示非球面反射镜的偏心。

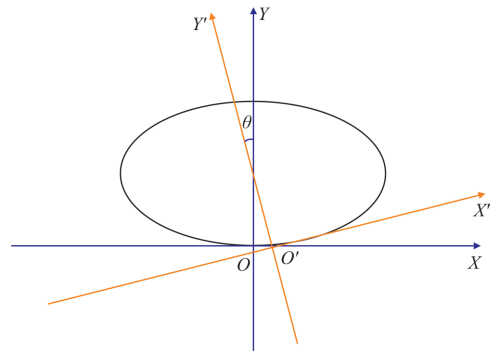


图 1 二次曲线的坐标系定义

Fig.1 Definition of coordinate system of the quadratic curve

坐标系  $X'O'Y'$  到坐标系  $XOY$  的转换公式为:

$$\begin{cases} x = x' \cos\theta + y' \sin\theta + a \\ y = y' \cos\theta - x' \sin\theta + b \end{cases} \quad (2)$$

可以定义偏心的角量为  $\theta$ ,偏心的线量为  $a$ 。二者结合,就完全表征了非球面反射镜的偏心情况。不论是角量还是线量的偏心,其都会造成反射镜矢高与理想镜面矢高间的偏差(即  $y$  坐标值差)  $\Delta y = y - y'$ 。

如图 2 所示,单一的角度或者线量偏心,都非常容

易检测出来。非球面的加工工艺决定了两种偏心同时存在,因此有必要研究二者同时存在时的矢高偏差情况。

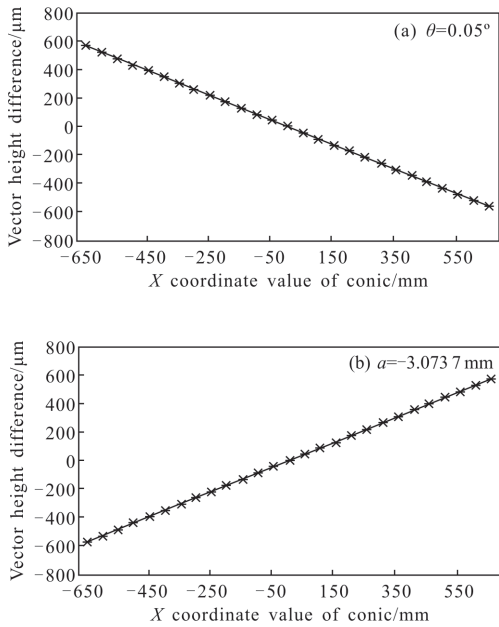


图 2 单一偏心的矢高差

Fig.2 Vector height difference of single off-center

## 2 非球面反射镜的偏心补偿现象分析

对于球面反射镜,其光轴是球心与镜面任一点的连线,有无穷多个。按照上节的定义,在每一个以光轴为 Y 轴,光轴与镜面的交点为原点的坐标系下,球面反射镜曲线方程均为球面标准方程。

以两个不同的光轴按照图 1 建立坐标系 X'O'Y' 和 XOY,其转换公式见公式(2)。求得:

$$\begin{cases} a = -R \sin \theta \\ b = -R + R \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

在在光轴旋转了角度  $\theta$  后,按照上式的坐标系平移量进行坐标系转换,得到的球面曲线方程是不变的。即在坐标系 X'O'Y' 和 XOY 下观测球面上的点, X 坐标相同的点,其 Y 坐标也是相同的。

非球面反射镜也存在类似的规律。但由于非球面反射镜的光轴唯一,在坐标系变换后得到的镜面曲线方程是存在偏差的。以文中所述的被测椭球面为例,把标准坐标系旋转  $\theta=0.05^\circ$ ,则补偿线量为  $a=-3.0345\text{ mm}$ ,修正后为  $-3.0737\text{ mm}$ 。此时比较镜面曲线与标准曲线的矢高差如图 3 所示,其中最大矢高差为  $2.45\text{ }\mu\text{m}$ 。

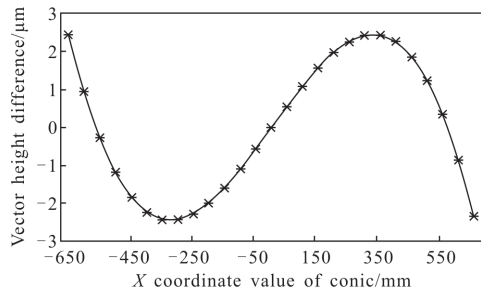


图 3 两种偏心同时存在的矢高差

Fig.3 Vector height difference of 2 kinds of off-center

表 1 给出了不同角量偏心下,经过线量补偿后得到的矢高差的最大残差。由此可见,最佳补偿线量、矢高差最大残差与角量偏心之间基本呈线性关系。

表 1 两种偏心最佳补偿后的矢高差最大值  
Tab.1 Maximum vector height difference after optimal compensation of 2 kinds of off-center

Angular off-center /( $^\circ$ )	Linear off-center /mm	Maximum of vector height difference/ $\mu\text{m}$
0.01	-0.615	0.51
0.05	-3.074	2.54
0.1	-6.148	4.95
0.2	-12.296	10.10
0.3	-18.448	15.43

在使用接触法进行非球面的轮廓测量时,测量数据拟合得到的非球面的残差(PV)与测量设备本身的固有精度基本相当<sup>[5]</sup>。Leitz PMM-C 24.16.10 计量级三坐标测量精度为  $(0.6+L/300)\text{ }\mu\text{m}$  (L 为测量距离,单位 mm),理论上能分辨的坐标系旋转误差为  $0.005^\circ$ 。徕卡 AT960 激光跟踪仪的测量精度为  $(15+6L/1000)\text{ }\mu\text{m}$  (L 为测量距离,单位 mm),其能分辨的坐标系旋转误差仅为  $0.15^\circ$ 。

三坐标设备的测量精度可以满足大口径反射镜的定心要求,但是受制于量程,且在光学加工过程中需要反复搬运反射镜,检测效率较低,存在安全隐患。

## 3 干涉法定心的原理与误差

Offner 零位补偿检验法<sup>[6]</sup>是凹非球面反射镜的传统检测方法之一。Offner 补偿器一般是由两片或者三片透镜组成的折射式光学系统,口径一般不超过  $100\text{ mm}$ 。 $\Phi 1.3\text{ m}$  椭球面反射镜的检测光路如图 4

所示。通过调整使干涉仪、补偿器、被测反射镜三者光轴重合,建立统一坐标系,使用激光跟踪仪测试补偿器光轴(即被测反射镜光轴)和被测反射镜的机械基准轴,利用坐标测量软件计算二者的偏心角  $\theta$  和偏心线量  $a$ ,即完成了被测反射镜的定心测量。

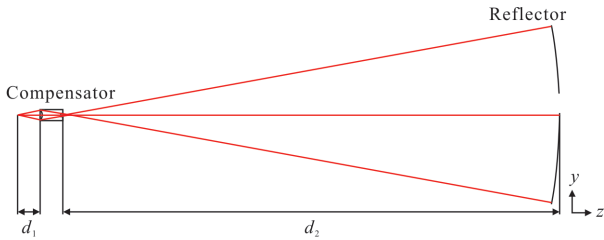


图 4 零位补偿检验光路

Fig.4 Null compensation test optical path

计算 Offner 零位补偿检验光路中的偏心补偿现象。假设被测椭球面在  $x$  方向倾斜  $0.02^\circ$ ,利用其在  $x$  方向的偏心进行补偿,使用光学设计软件以波前 RMS 值最优为优化目标,优化得到偏心为  $1.4725\text{ mm}$ ,波前残差为则尼克系数第 5 项( $0^\circ/90^\circ$ 像散),大小为  $-0.0169\lambda$ 。目前高精度激光干涉仪(ZYGO、4D 等)的测量精度能够达到  $0.001\lambda$ ,考虑到测试环境对测量重复性的影响,则尼克系数的重复精度优于  $0.005\lambda$ ,对应的角度误差为  $0.005^\circ$ ,与三坐标设备的定心精度相当。

在 Offner 零位补偿检验光路中,补偿器光轴测试精度误差和干涉仪焦点位置误差为测试误差的主要来源。

### 3.1 补偿器光轴测试

利用定心仪对 Offner 补偿器进行装校,通常可以达到  $1''$ 的装校精度<sup>[7]</sup>。为了得到检测光路中补偿器的光轴数据,必须事先利用激光跟踪仪引出其光轴。传统的做法是用激光跟踪仪测试补偿器的机械基准(即其圆柱面)。这种方法对补偿器的光轴与机械基准装校的一致性要求较高。也可以在定心仪转台上将补偿器光轴与转台的机械轴调整至同轴,测试转台机械轴从而得到补偿器的光轴。该方法既降低了补偿器的装校难度,又扩大了基准测量范围,可以提高光轴引出精度。

### 3.2 干涉仪焦点位置

理论上,干涉仪的焦点应位于补偿器的光轴上。在测量空间坐标系内,利用激光跟踪仪测试补偿器光轴,计算得到干涉仪焦点的坐标。将激光跟踪仪靶

球置于干涉仪焦点处,由于激光跟踪仪的靶球是一个经过抛光处理的、圆度非常好(Grade 50)的球体,当靶球(SMR)球心与干涉仪焦点位置重合时,可以形成干涉自准条纹。利用此原理把干涉仪焦点定位到相应坐标位置。干涉仪焦点的位置精度为  $0.02\text{ mm}$ ,换算成角量为  $25''$ 。

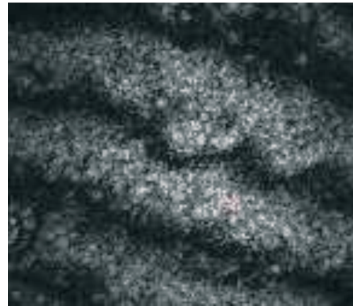


图 5 靶球的干涉条纹

Fig.5 Interference fringes of SMR

综上,干涉法定心的主要误差来源为干涉仪焦点位置误差带来的系统误差,可以通过旋转反射镜进行多次测试的方法消除该误差的影响。假设在初始方向测量得到的偏心角为  $\theta_1$ ,则  $\theta_1 = \theta + \theta_i$ ,其中  $\theta_i$  为干涉仪焦点位置误差带来的偏心角误差。将被测镜绕其机械轴旋转  $180^\circ$ ,此时偏心角  $\theta_2 = -\theta + \theta_i$ 。可以求得:

$$\begin{cases} \theta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \\ \theta_i = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \end{cases} \quad (4)$$

## 4 定心过程

由于  $\Phi 1.3\text{ m}$  椭球面反射镜口径大,自身重力对面形影响较大,需要对其重力进行卸载<sup>[8]</sup>,通常在光轴竖直状态下进行面形检测,如图 6 所示。在实际检测时,利用一个折转镜将系统光轴由水平折转为竖直方向。



图 6 零位补偿检验工位

Fig.6 Null compensation test station

定心流程如图 7 所示。

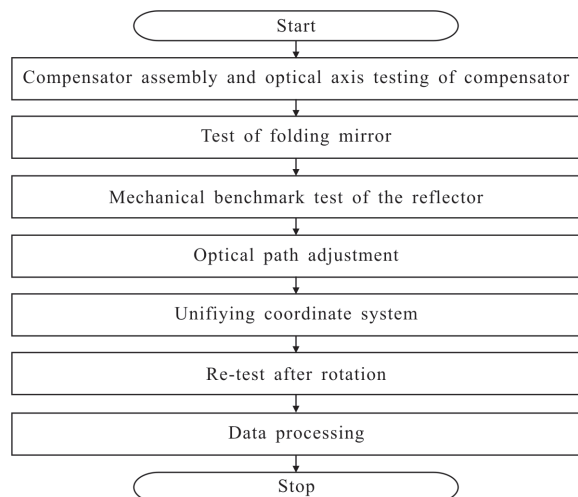


图 7 反射镜定心流程

Fig.7 Centering flow of reflector

(1) Offner 补偿器装校与光轴测量:对补偿器镜片玻璃进行折射率测试, 根据实测值对各镜片之间的间隔进行优化。在高精度定心仪上逐片安装镜片, 完成补偿器的装校。在补偿器镜筒外侧固定 3 个以上激光跟踪仪靶球(SMR), 并将补偿器固定在高精度定心仪上。定心仪的转台上亦可同时布置 2~3 个 SMR。转动转台, 所有 SMR 均会划出一个圆周轨迹, 所有圆周的圆点所拟合得到的直线, 即为转台机械轴, 也是补偿器的光轴。调整补偿器的偏心和倾斜, 使其光轴与定心仪转台机械轴同轴。此时对补偿器标记点进行测试<sup>[9]</sup>;

(2) 折转平面镜法线测量:用激光跟踪仪扫描折转平面镜的镜面, 拟合得到镜面平面及其法线。测试折转平面镜的标记点;

(3) 被测反射镜机械基准测试:用激光跟踪仪测试被测凹椭球面反射镜的机械基准, 包括侧圆柱面和镜面环口端面, 拟合得出机械基准轴和结构顶点。测试被测反射镜的标记点;

(4) Offner 零位检验光路调整:在垂直检测光路中放置激光干涉仪、补偿器、折转平面镜和被测反射镜。首先调整激光干涉仪和补偿器的位置关系, 使干涉仪焦点落在补偿器光轴上, 并且间距  $d1$  准确。然后保持二者位置关系不变, 调整被测反射镜的位置, 使干涉仪检测到的系统波前最小。此时波前应只残留像散;

(5) 局部坐标系恢复并统一坐标系:用激光跟踪

仪测试所有标记点。利用这些标记点将补偿器光轴、折转平面镜法线、被测反射镜的机械基准数据变换至主坐标系下。主坐标系为补偿器光轴为  $z$  轴、指定的方向为  $x$  轴、反射镜光学顶点为原点的坐标系;

(6) 反射镜旋转后再次测试:将反射镜绕其机械基准轴依次旋转  $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ , 重复步骤(3)~(5)的测试, 消除干涉仪焦点位置误差带来的系统误差, 以及反射镜自身残存的像散对定心的影响。有文献给出了剥离测试系统的像散与反射镜自身像散的具体方法<sup>[10]</sup>;

(7) 数据处理: 使用坐标测量软件 SA(Spatial Analyzer)进行数据处理。在每一个方向下, 计算出反射镜机械基准轴与反射镜光轴的偏心角量与线量, 再依据公式(4)进行计算。

## 5 实验数据

按照第 4 节所述进行  $\Phi 1.3\text{ m}$  椭球面的定心。使用的测量仪器主要有: 莱卡 AT960 激光跟踪仪, 单点测试精度  $(15+6L/1\ 000)\ \mu\text{m}$  ( $L$  为测量距离, 单位 mm); TRIOPTICS 公司 OptiCentric300 定心仪, 中心偏差测量精度  $0.5\ \mu\text{m}$ , 中心偏差测量重复性  $\pm 0.1\ \mu\text{m}$  或  $\pm 1''$ ; 4D 公司 Phasecame 6000 动态激光干涉仪, 面形测试重复精度  $0.001\lambda$  (RMS)。

零位补偿检验系统波前的面形如图 8 所示。

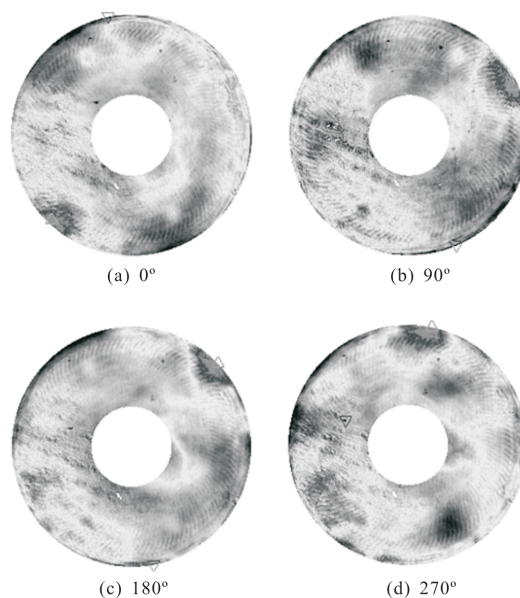


图 8 零位补偿检验系统波前

Fig.8 Wavefront of null compensation inspection system

其中角量偏心和线量偏心的数据见表 2。

表 2 定心数据

Tab.2 Centering data

Test direction of reflector	Angular off-center @x/(°)	Linear off-center @x/mm	Angular off-center @y/(°)	Linear off-center @y/mm
0	0.006	-0.328 82	0.018	-1.075 49
90	-0.023	1.147 95	0.007	-0.364 34
180	-0.002	0.087 52	-0.022	1.317 49
270	0.017	-1.124 65	-0.005	0.385 56

利用公式(4)进行处理,可得该被测椭球面镜的偏心数据(0°方向): $x$ 方向角量偏心和线量偏心分别为 $0.005^\circ$ 和 $-0.292\text{ mm}$ , $y$ 方向分别为 $0.020^\circ$ 和 $-1.166\text{ mm}$ 。

用 Leitz PMM-C 24.16.10 计量级三坐标机接触法测量该椭球面反射镜的偏心。测量结果: $x$ 方向的角量偏心和线量偏心分别为 $0.003^\circ$ 和 $-0.311\text{ mm}$ , $y$ 方向分别为 $0.022^\circ$ 和 $-1.143\text{ mm}$ 。对比干涉法定心结果与三坐标机测量定心结果,角量偏心和线量偏心的最大偏差为 $0.002^\circ$ 和 $0.023\text{ mm}$ 。

实验数据及对比测试表明,干涉法定心的精度与第 3 节分析结果一致,系统误差去除方法有效。

## 6 结 论

文中针对 $\Phi 1.3\text{ m}$ 口径凹椭球面反射镜在光学加工过程中的定心测量需求,分析了旋转对称非球面机械基准轴与光轴之间的角量偏心和线量偏心之间的补偿关系,评价了各种定心方法的优劣。采用干涉法完成了 $\Phi 1.3\text{ m}$ 椭球面的定心测量,并与三坐标接触法定心结果进行对比验证。实验结果表明:干涉法定心测量精度高,测量过程简便,用时短,可以避免被测镜反复搬运造成安全隐患,且不受测量设备的量程限制,可以实现大口径反射镜在加工过程中的在位定心测量。

## 参考文献:

- [1] Li Xuyang, Yang Hongtao, He Tianbing, et al. Design of a new type on-axis three-mirror-anastigmat optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(1): 31-35. (in Chinese)
- [2] Ma Zhen, Li Yingcai, Fan Xuewu, et al. Study on optical centering of aspheric mirror by interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(7): 1455-1458. (in Chinese)
- [3] Guo Lingling, Ren Jianyue, Zhang Xingxiang, et al. Calculation method of geometrical parameters of large diameter off-axis aspheric optical elements: China, 103591888[P]. 2013-10-28. (in Chinese)
- [4] Pan Junhua. The Design, Manufactory and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004: 2-5. (in Chinese)
- [5] Qiu Gufeng, Guo Peiji, Xie Bin, et al. Mathematical model of contacting aspheric surface contour measurement [J]. *Opt Precision Eng*, 2007, 15(4): 492-498. (in Chinese)
- [6] Li Kexin, Yuan Liyin, Hao Peiming, et al. Design of null compensator to concave aspheric mirror with large diameter and large relative aperture[J]. *Optical Instruments*, 2009, 31(4): 44-48. (in Chinese)
- [7] Fan Junling. The research on the testing methods of large aperture aspheric mirror [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 34-36. (in Chinese)
- [8] Li Ling, Zhao Ye. A Gravity unloading method of on-ground alignment for large aperture remote sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(5): 69-76. (in Chinese)
- [9] Li Ling, Wang Yun, Liao Zhibo, et al. High precision online measurement technology in assembly and adjustment of Gf-4 camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(5): 77-85. (in Chinese)
- [10] Guo Peiji, Yu Jingchi. Improving precision of null lens method with correction technique [J]. *Opt Precision Eng*, 2006, 14(2): 202-206. (in Chinese)