

doi: 10.3788/gzxb20124111.1321

# 月基极紫外相机反射镜组件的设计

杨亮, 李朝辉, 张立平, 乔克

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘 要:** 为了使月基极紫外相机反射镜组件在月球环境下具有良好的力学和热学稳定性, 从而保证相机的成像质量, 本文针对月基极紫外相机所处的严酷的力学和温度条件, 设计了一种满足月球环境的反射镜组件结构. 通过对反射镜组件有限元模型的重力分析、热载荷分析、动态刚度分析以及结构强度分析, 结果表明反射镜组件的一阶谐振频率达到 354 Hz, 在 1 g 重力作用和  $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$  均匀温变作用下镜面综合面形误差 RMS 值分别达到 3.62 nm 和 2.46 nm, 满足反射镜面形要求. 最后, 通过静力学面形检测、力学试验、温度适应性试验及成像分辨率测试, 结果显示反射镜镜面面形精度 RMS 值优于 14 nm, 反射镜组件的设计满足总体指标, 验证了该方案的合理性.

**关键词:** 反射镜; 柔性支撑; 有限元; 月基

**中图分类号:** V476.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)11-1321-6

## 0 引言

月基对地观测极紫外相机是嫦娥三号有效载荷之一, 它将在月球表面对地球周围等离子体层产生的 30.4 nm 极紫外波段辐射进行全方位、长期的观测研究. 这对于精密磁暴预测、空间天气预报、地球空间环境研究、自然灾害预测具有非常重要的意义<sup>[1]</sup>.

反射镜是极紫外相机光学系统的关键部件之一, 其面形精度将直接决定着整个系统的性能. 相机在登月过程中过载冲击、振动等动力学环境下, 以及在月昼、月夜极大温度变化范围下, 将使反射镜面形严重超差, 影响整个系统的成像质量. 为了降低反射镜在空间环境下的面形误差, 国内外科技人员采用先进光学材料、优化支撑结构、组件材料匹配、实施主动光学控制等多种方式, 但针对月球如此恶劣温度和力学环境下反射镜组件设计的报道非常少<sup>[2-5]</sup>.

系统总体要求反射镜组件在  $-35^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$  的温度范围内工作, 在重力作用以及环境温度  $50^{\circ}\text{C}$  变化时, 镜面面形精度 RMS 值优于 14 nm, 反射镜组件的一阶谐振频率不低于 200 Hz.

本文针对月基极紫外相机中反射镜组件所处的严酷的力学及温度条件, 通过反射镜的设计、支撑方案的确定、反射镜筒的设计、组件的有限元分析, 以及试验的验证, 设计了一种满足月球力学、温度环境以及重量要求的反射镜组件方案.

## 1 结构设计

反射镜组件作为极紫外相机成像单元的重要部件之一, 其性能的好坏将直接影响最终成像的质量. 反射镜组件由反射镜、反射镜柔性支撑、反射镜镜筒三部分组成, 通过环氧树脂将反射镜背部中心凸台与反射镜柔性支撑内环粘接, 反射镜柔性支撑再通过 6 个螺钉与反射镜镜筒下法兰镶嵌环连接. 反射镜组件整体结构如图 1.

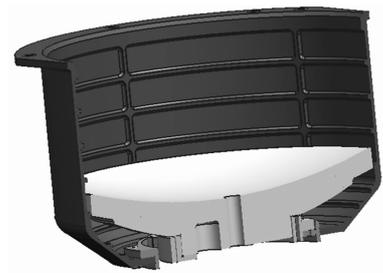


图 1 反射镜组件整体结构图

Fig. 1 Overall structure of reflector subassembly

### 1.1 反射镜的设计

由于相机对 30.4 nm 极紫外辐射成像, 该波段没有可用的透光材料, 因此, 相机光学设计需选用反射式光学系统. 相机的工作环境温度范围从  $-35^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$ , 变化范围较大, 需要采用零膨胀光学材料来消除温变的影响, 同时要求选用的光学材料表面粗糙度可以抛光到 0.4 nm 以下, 从而便于镀超光滑多层反射膜.

第一作者: 杨亮(1982-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为空间遥感器结构设计. Email: hgdhit@163.com

收稿日期: 2012-07-08; 修回日期: 2012-08-23

微晶玻璃有着较高的抛光面形精度、良好的光学加工性、面形抛光周期相对较短、膨胀系数接近零、适合大温差工作环境、材料自身其它综合性能好等优点<sup>[6]</sup>,可以满足极紫外相机反射镜的要求,因此选用德国 SCHOTT 公司的微晶玻璃作为反射镜的光学材料,但微晶玻璃存在着比刚度相对较小,热导率小等问题,因此,在设计 and 研制过程中,需要考虑热学和力学的影响,并采取相应的结构和工艺措施来避免其影响。

由于反射镜背部结构不参与成像,因此可以对其进行轻量化设计,对反射镜进行轻量化,一方面可以提高反射镜的比刚度,降低反射镜自身重力对镜面面形的影响,另一方面可以减少反射镜支撑结构的质量,进而降低整个反射镜组件的质量。

通过综合考虑镜坯的尺寸特性,轻量化后刚度情况,轻量化加工工艺等多方面因素,反射镜采用背部环形开放式轻量化形式,为增强刚度在围绕背部中心凸台处附加了均匀分布加强筋的结构。

## 1.2 反射镜的支撑设计

反射镜的支撑结构一方面要保证反射镜组件在不同重力方向下反射镜的面形精度,另一方面,当外界环境变化时,要能有效地减少各部件受外界环境变化产生的变形对镜面面形精度的影响。

反射镜支撑方式按与反射镜接触点的位置分为周边支撑、中心支撑和背部支撑等。由于反射镜的包络尺寸为  $\varphi 191$ , 尺寸不大,所以反射镜采用中心支撑方式,反射镜支撑结构采用一定形式的轻量化结构,以便减轻质量。反射镜及支撑结构如图 2。



图 2 反射镜及支撑结构

Fig. 2 The reflector and the support structure

由于反射镜选用的材料为德国 SCHOTT 的微晶玻璃,其线膨胀系数可以做到  $0 \pm 0.05 \times 10^{-5} / \text{K}$ , 因此,选择线胀系数可达到  $0 \pm 0.1 \times 10^{-6} / \text{K}$  超低线胀系数的钢材作为反射镜支撑的材料,二者的线胀系数可以很好地匹配。当温度变化时,反射镜组件各材料之间的线膨胀系数相匹配,可以减少支撑结构的热变形直接传递到反射镜上,造成反射镜面形

精度的降低。

然而,由于钢材材料的导热性稍差,在温度变化较大的情况下容易在短时间内产生温度梯度,影响反射镜面型准确度。柔性支撑是反射镜组件中的一个重要环节,它不但可以隔震、消除部分装配应力,同时可以吸收温度变化下材料热特性不匹配产生的能量<sup>[7-10]</sup>。但是,在增加柔性的同时应避免柔性环节造成整体刚度降低,镜面倾角超差以及柔节自身破坏等问题。

本相机反射镜支撑采用三处狭缝的柔性结构,根据理论计算和有限元分析的方法,调整柔节处的工作截面,最终确定柔节弹性和刚度的最优值参量。反射镜的柔性支撑结构示意图如图 3。

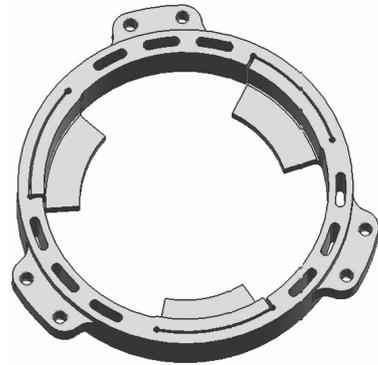


图 3 反射镜柔性连支撑结构

Fig. 3 The flexure support structure

反射镜支撑用电火花加工三处沿圆周均布的狭缝,从而将支撑环分成内环和外环两部分。内环采用环氧树脂胶将三处粘接区与反射镜背部中心侧面粘接。通过螺钉将外环固定在反射镜镜筒下法兰镶嵌环上。当温度变化时,反射镜支撑变形带动外环产生变形,产生的微小变形通过柔节吸收,不会传到内环上,所以反射镜不会承受外环变形产生的应力。反射镜变形以及胶结产生的应力也将通过柔节吸收。反射镜支撑设计的柔性环节消除了温度变化的影响,以及装配应力的影响,从而保证热环境下反射镜的面形精度。

## 1.3 反射镜镜筒的设计

作为连接反射镜组件与焦面探测器之间的主要受力构件的反射镜镜筒,不但应具有良好的强度和刚度,而且应具有良好的尺寸稳定性,以保证反射镜的位置和面形精度,以及与焦面探测器的位置准确度。

碳纤维材料综合性能优良,材料密度小,比刚度大,线膨胀系数小,尺寸稳定性好,已广泛应用于国内外多种航天仪器<sup>[11]</sup>,因此选用碳纤维作为反射镜镜筒材料。表 1 给出了两种型号碳纤维材料的性能参量。

表 1 两种碳纤维材料特性表  
Table 1 Properties of carbon fibre

| Type  | Density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Strength/<br>Mpa | Modulus/<br>Gpa | Elongation/<br>% | Thermal<br>expansion<br>coefficient/<br>(×10 <sup>-6</sup> /°C) |
|-------|---------------------------------|------------------|-----------------|------------------|---|
| M40JB | 1.78                            | 4500             | 384             | 1.2              | -1.23   |
| T700  | 1.78                            | 5000             | 235             | 2.1              | -0.74   |

由于 M40JB 型号的碳纤维强度高、延伸率低,所以反射镜镜筒选用 M40JB 碳纤维复合材料,镜筒结构如图 4 所示,反射镜镜筒上端法兰通过 6 个通孔与中筒连接,下端法兰通过钛合金镶嵌环与反射镜柔性支撑联结.在镜筒内部加 5 条环形筋以及 6 条从上至下的立筋,加强反射镜镜筒的强度.



图 4 反射镜镜筒结构  
Fig. 4 The structure of the reflector drawtube

## 2 工程分析

为了检验反射镜组件结构的刚度和强度,以及重力和温度对镜面面形的影响,对反射镜组件进行有限元分析.图 5 为有限元模型. X 向为光轴方向.反射镜组件的约束与实际安装状态一致,在镜筒上法兰与中筒连接的安装孔位处各节点六自由度全约束.

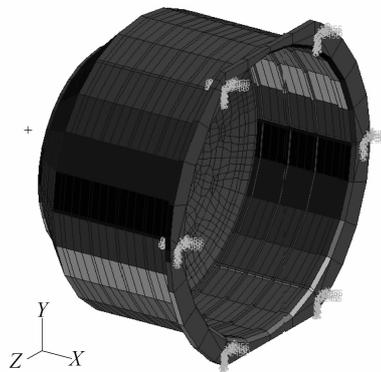


图 5 反射镜镜筒有限元模型  
Fig. 5 The finite element model of the drawtube

### 2.1 重力分析

考察在地面装调状态下,反射镜在重力载荷下的镜面面形精度情况,分析结果如表 2.

表 2 重力载荷下反射镜镜面面形精度结果  
Table 2 Surface accuracy under action of the gravity load

|   | PV/<br>nm | RMS/<br>nm | Eccentricity/ $\mu\text{m}$ |            |            | Lean/( $''$ ) |            |
|---|-----------|------------|-----------------------------|------------|------------|---------------|------------|
|   |           |            | $\Delta X$                  | $\Delta Y$ | $\Delta Z$ | $\theta_y$    | $\theta_z$ |
| X | 4.21      | 0.70       | 11.66                       | -2.36      | -0.02      | 0.30          | 0.18       |
| Y | 16.94     | 3.06       | -0.94                       | 58.27      | -0.51      | -0.38         | 52.71      |
| Z | 17.34     | 3.62       | -0.06                       | -0.02      | 22.02      | -64.94        | 0.67       |

从表 2 中看出,在三个方向微重力载荷下反射镜镜面面形精度均满足要求,最大 RMS 在 Z 向重力载荷作用下,其值为 3.62 nm.

### 2.2 热载荷分析

考察在 50°C 均匀温降载荷作用下反射镜镜面面形精度情况,分析结果如表 3 所示.其中  $\Delta T$  为 50°C 均匀温降.

表 3 热载荷下反射镜镜面面形精度结果  
Table 3 Surface accuracy under temperature changes

| $\Delta T$ | PV/<br>nm | RMS/<br>nm | Eccentricity/ $\mu\text{m}$ |            |            | Lean( $''$ ) |            |
|------------|-----------|------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|------------|
|            |           |            | $\Delta X$                  | $\Delta Y$ | $\Delta Z$ | $\theta_y$   | $\theta_z$ |
| 50°C       | 11.38     | 2.46       | -343.53                     | 7.59       | 12.59      | 7.62         | 18.86      |

从表 3 中看出,在 50°C 均匀温降载荷作用下反射镜组件面形精度 RMS 值为 2.46 nm,满足技术指标要求.

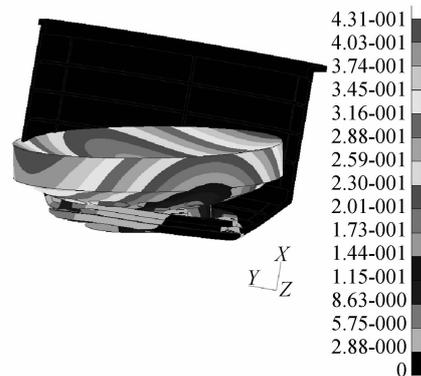
### 2.3 动态刚度分析

表 4 给出了反射镜组的前三阶模态结果.从中可以看出,反射镜组件一阶模态 354 Hz,大于要求的 200 Hz,满足结构动态刚度要求.

表 4 反射镜组件模态分析  
Table 4 Modal analysis of reflector assembly

| Modes | Frequency/HZ | Description of modes                            |
|-------|--------------|---|
| 1     | 353          | Rotation around the 45°-axis of +Y and -Z plane |
| 2     | 354          | Rotation around the 45°-axis of +Y and +Z plane |
| 3     | 463          | Vibration along the X-axis                      |

图 6 为反射镜组件三阶模态振型图.



(a) First resonant frequency

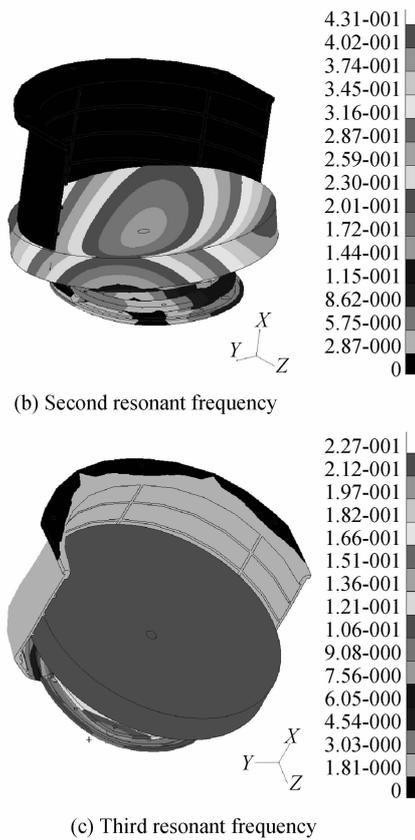


图 6 模态振动示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of the frequency modes

### 2.4 结构强度分析

通过反射镜组件在过载状态下的结构强度分析,反射镜组件各材料在过载状态下的最大应力值远小于材料许用应力,结果表明组件材料是安全的,反射镜组件的结构强度满足要求.

## 3 实验验证

### 3.1 反射镜组件静力学面形检测

为了检测重力作用对反射镜组件中反射镜面形精度的影响,进行了垂直于光轴的两个正交方向的静力学面形对比试验.首先,将反射镜组件固定在检测工装上,定义具备理想的面形精度的抛光检测方向为 $0^\circ$ ,通过ZYGO干涉仪检测面形.然后,定义将反射镜组件绕光轴旋转 $90^\circ$ 后为 $90^\circ$ 检测方向,再次通过干涉仪检测面形.

图 7 为通过 ZYGO 干涉仪检测反射镜在 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 方向上的面形误差干涉仪检测图.

表 5 为两个方向通过ZYGO干涉仪检测的反射镜面形精度结果  
表 5 干涉仪检测的面形精度结果

| Type       | PV/nm  | RMS/nm | $\lambda$ /nm |
|------------|--------|--------|---------------|
| $0^\circ$  | 94.92  | 13.29  |               |
| $90^\circ$ | 101.88 | 13.92  | 632.8         |
| Change/(%) | 7.32   | 4.74   |               |

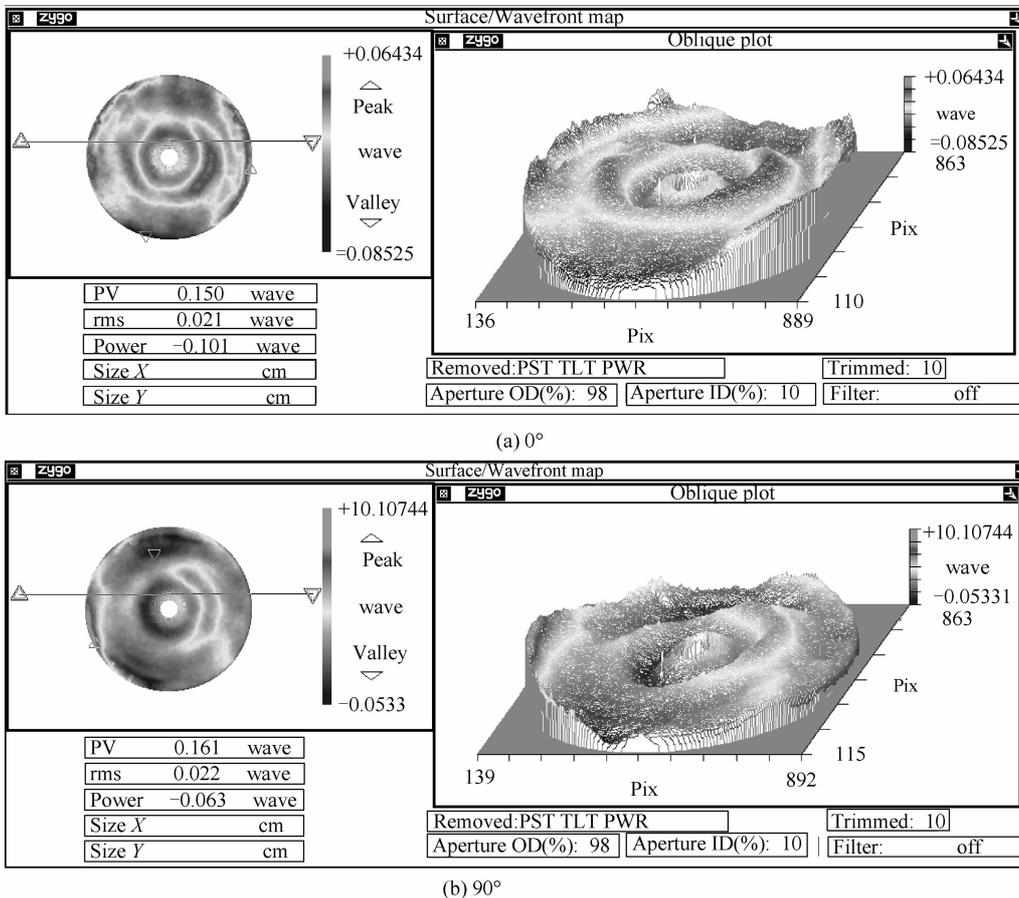


图 7 反射面形误差干涉检测图  
Fig. 7 Figure of reflective surface error

射镜面形精度结果.

从检测结果可以看出,反射镜组件从 $0^\circ$ 旋转到 $90^\circ$ 时,面形的PV值从94.92 nm变为101.88 nm,降低了7.32%,RMS值由13.29 nm变为13.92 nm,降低了4.74%,即增大0.63 nm变化量较小,满足总体指标要求.

### 3.2 反射镜组件动力学试验验证

为了确定反射镜组件的结构参量以及在振动试验条件下抗干扰能力,进行反射镜组件力学试验.

首先在沿光轴方向进行0.2g的力学特性扫频,测定0~2 000 Hz内的响应频率,然后按空间环境试验条件进行正弦振动和随机振动,振动后再进行0.2g扫频.沿光轴方向力学后,翻转振动工作台,进行与光轴垂直的且正交的两个方向上的力学试验,步骤与光轴方向一致.

振动试验结果表明,反射镜的一阶振动频率为345 Hz,与分析结果基本相符.0.2 g扫频后,反射镜组件试验曲线特性良好,曲线没有密频现象.振动后反射镜组件的动态响应与试验前数据对比无明显变化,结构未破坏.力学试验后通过干涉仪检测反射镜面形,满足面形精度要求.

### 3.3 反射镜组件温度适应性试验

由于反射镜组件部位的工作温度范围为 $-35^\circ\text{C}\sim+70^\circ\text{C}$ ,工作温度较苛刻,为了验证工作温度对反射镜组件胶结强度和反射镜面形的影响,反射镜组件结构对空间热真空环境的适应性,进行了反射镜组件的温度适应性试验,即热真空试验,如图8.

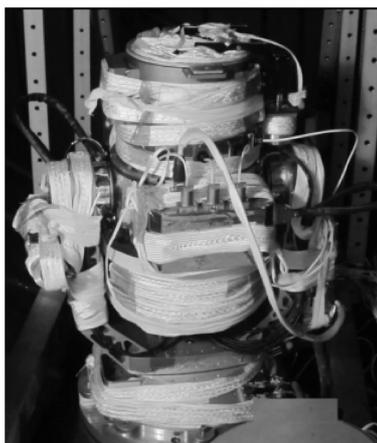


图8 热真空试验  
Fig.8 Thermal vacuum experiment

将反射镜组件连同整机一起置于真空罐中,控制真空罐的环境压力不大于 $1.3\times 10^{-3}$  Pa,在 $-35^\circ\text{C}\sim+70^\circ\text{C}$ 温度范围内对反射镜组件进行4次热真空高低温循环试验.高低温试验后,反射镜组件胶结没有破坏,通过干涉仪检测,与试验前反射镜面形变化很小,满足面形精度要求.热真空试验结果

表明反射镜组件具有良好的热尺寸稳定性.

### 3.4 反射镜组件成像分辨率测试

利用30.4 nm激光等离子体光源准直光束照射分辨率板,经过相机的反射镜反射,利用二维转台机构精确成像到球面探测器上,通过测量分辨率板的图像即可找到所能分辨的最小线对,实测结果表明探测器空间分辨率优于0.18 mm,即角分辨率为 $0.08^\circ$ .图9为实测成像图像.

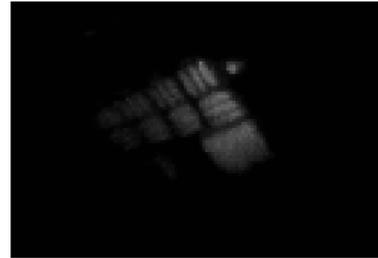


图9 成像分辨率图像  
Fig.9 Imaging resolution

## 4 结论

本文通过反射镜结构形式、反射镜柔性支撑以及反射镜镜筒方案的确定,进行了月基极紫外相机反射镜组件的设计,满足了月球恶劣环境下对镜面面形精度要求.通过有限元模型重力分析、热载荷分析、动态刚度分析以及结构强度分析得知,组件结构满足强度要求,反射镜镜面满足面形精度要求.最后,进行了反射镜组件的静力学面形检测、动力学试验以及温度适应性试验,结果表明反射镜镜面面形精度RMS值优于14 nm,组件的一阶谐振频率达到345 Hz,验证了实际方案与分析结果相符,说明此反射镜组件的设计满足总体指标,是合理可行的.

### 参考文献

- [1] HE Fei, ZHANG Xiao-Xin, CHEN Bo, *et al.* Calculation of the extreme ultraviolet radiation of the earth's plasmasphere [J]. *Science China*, 2010, **40**(1): 71-76.  
何飞,张效信,陈波,等.地球等离子层极紫外波段辐射特性计算[J].中国科学,2010,**40**(1):71-76.
- [2] DUAN Xue-ting, ZHOU Ren-kui, WU Ming-yuan, *et al.* Distortion alignment method for center shaft supporting large aperture mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **95**(12): 95-98.  
段学霆,周仁魁,吴萌源,等.中心轴支撑大口径反射镜面形装调控制方法[J].光子学报,2011,**95**(12):95-98.
- [3] WANG Fu-guo, LI Hong-zhuang. Ability of the thin mirror active opticals to correct optical astigmatism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 871-875.  
王富国,李宏壮.薄镜面主动光学对光学像差的校正能力分析[J].光子学报,2010,**39**(5):871-875.
- [4] RISSÉ S, GEBHARDT A, DAMM C, *et al.* Novel TMA telescope based on ultra precise metal mirrors [C]. *SPIE*, 2008, **7010**: 1-8.
- [5] WU Xiao-xia, YANG Hong-bo. Optimal design of support system for the large aperture sphere mirror [J]. *Acta*

- Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 129-132.  
 吴小霞, 杨洪波. 大口径球面镜支撑系统的优化设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(1): 129-132.
- [6] LIU Qiang, HE Xin, TAN Jin-guo, *et al.* Investigation on mirror supporting structure of four-mirror reflective anastigmat optic system[J]. *Optical Technical*, 2010, **36**(4): 489-494.  
 刘强, 何欣, 谭进国, 等. 离轴四反光学系统反射镜支撑技术研究[J]. 光学技术, 2010, **36**(4): 489-494.
- [7] LOBONTIU N, PAINE JSN, OMALLEY E, *et al.* Parabolic and hyperbolic flexure hinges: flexibility, motion precision and stress characterization based on compliance closed-form equations [J]. *Precision Engineering*, 2002, **26**(2): 183-192.
- [8] WANG Zhong-su, ZHAI Yan, MEI Gui, *et al.* Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1833-1841.  
 王忠素, 翟岩, 梅贵, 等. 空间光学遥感器反射镜柔性支撑的设计[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(8): 1833-1841.
- [9] FU Liang-liang, HE Xin, LIAN Feng-hui. Design and analysis of minitype reflected mirror supporting structure project[J]. *Optical Technical*, 2008, **34**(4): 532-534.  
 付亮亮, 何欣, 廉凤慧. 小型反射镜支撑方案的设计与分析[J]. 光学技术, 2008, **34**(4): 532-534.
- [10] GUO Jiang, HE Xin. Design of support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1642-1647.  
 郭疆, 何欣. 大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(9): 1642-1647.
- [11] LIN Zai-wen, LIU Yong-qi, LIANG Yan. Application of carbon fibre reinforced composite to space optical structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(8): 1181-1185.  
 林再文, 刘永琪, 梁岩. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(8): 1181-1185.

## Design of Reflector Subassembly for Lunar-based Extreme Ultraviolet Camera

YANG Liang, LI Zhao-hui, ZHANG Li-ping, QIAO Ke

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to get fine stability of the optical reflector of space remote sensor under the lunar-based environment of force and thermal constraints, base on the inclement environment of force and thermal constraints where lunar-based extreme ultraviolet camera is under, a reflector subassembly meeting lunar-based environment is designed. The finite element analysis of the reflector subassembly show that the first resonant frequency of the reflector subassembly is 354 Hz, the RMS value is 3.62 nm and 2.46 nm under 1 g gravity and  $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$  temperature change, the result shows the surface accuracy of reflector meets the needs of imaging quality. At last, through the statics surface accuracy detection, mechanical testing temperature tolerance test and imaging resolution test, the result shows RMS value is less than 14nm and meets the design require. It demonstrates that the reflector subassembly structure is reasonable.

**Key words:** Reflector; Flexible supporting; Finite element; Lunar based