

## 空间反射镜的轻量化及支撑设计研究

陈洪达<sup>1,2</sup>, 陈永和<sup>1</sup>, 史婷婷<sup>1</sup>, 刘晓华<sup>1</sup>, 傅雨田<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 大型空间遥感仪器为适应苛刻的发射和工作环境, 通常要求具有很高的热、力学性能, 并且对重量有严格限制。这对大口径反射镜及其支撑结构的质量、刚度和环境适应性提出了很高的要求。针对某型号  $\Phi 620$  mm 口径光学遥感仪器的主镜及支撑结构进行了详细的分析计算、设计和试验验证。通过对比多种支撑方式的不同特性, 选择了符合仪器要求的质量轻、刚度高的中心支撑; 并利用等强度原理设计了放射状轻量化形式; 在支撑环节上, 利用柔性材料解决了因温度变化产生的局部接触应力增加的问题, 有效减小了结构对光学镜面的影响。经测试反射镜重 15.2 kg, 轻量化率 71.2%, 支撑零件 3.5 kg; 组件一阶模态 420 Hz; 面形精度优于 0.03  $\lambda$ RMS, 满足仪器要求。目前该仪器已投入使用, 在轨性能良好。

**关键词:** 反射镜支撑; 轻量化; SiC; 中心支撑

**中图分类号:** V443.5; TH703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0535-06

## Lightweight and mounting design for primary mirror in space camera

Chen Hongda<sup>1,2</sup>, Chen Yonghe<sup>1</sup>, Shi Tingting<sup>1</sup>, Liu Xiaohua<sup>1</sup>, Fu Yutian<sup>1</sup>

- (1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The large space remote sensing instrument has high requirements for heating and mechanical characteristics, as well as strict limitation in weight, to adapt to severe launching and working environment. Thus the mirror and supporting system is stringent in weight, rigidity and environmental flexibility. The paper analyzed, designed and demonstrated the parameters of a  $\Phi 620$  mm remote sensing mirror and its mounting structure. The central mounting system was served to meet the light weight and rigidity requirements compared with the other mounting methods. Radical weight-reduction slot morphology was developed in accordance with equal strength principle. The partial contact stress would increase as temperature changed. A flexible material was utilized to solve the problem, which would

收稿日期: 2013-06-10; 修订日期: 2013-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(40776100)

作者简介: 陈洪达(1983-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事空间反射镜支撑、运动部件设计开发方面的研究。

Email: chenhongda@mail.sitp.ac.cn

导师简介: 刘晓华(1971-), 男, 研究员, 博士, 现主要从事光学精密机械、光学遥感仪器方面的研究。Email: xhliuz@mail.sitp.ac.cn

mitigate the structure effect to optical mirror. The results show that the weight of mirror is 15 kg and mounting accessory is 3.5 kg, with the weight reduction rate of 71.2%. The first mode is 420 Hz; The profile accuracy of mirror is 0.03  $\lambda$ RMS. The technical parameters are stable and satisfied with the optical system requirements under various tests. The primary mirror project is implemented in the space and attains the expected goal.

**Key words:** primary mirror mounting; lightweight; SiC; center mounting

## 0 引言

随着我国空间对地遥感技术的发展, 遥感仪器地面分辨率和探测灵敏度不断提高, 其口径不断增大, 重力、空间外热流以及发射过程中的冲击振动等因素对光学系统的影响也更为突出。大口径反射镜作为光学系统的核心部件, 其轻量化和支撑设计越显重要, 是保证反射镜面型的关键技术。

文中涉及的是某型号口径为  $\Phi 620$  mm 的同轴光学仪器。该仪器质量限制严格, 且安装平台在发射过程中, 低频和中频段有较大的振动输入, 因此要求反射镜组件质量轻、刚度高。文中在充分考虑平台特殊性的基础上, 从反射镜的材料选择, 支撑方式选择、轻量化形式和支撑组件设计等方面进行了详细的分析, 以保证反射镜组件满足仪器要求。

## 1 $\Phi 620$ mm SiC 反射镜镜体设计

### 1.1 镜体材料选择

反射镜材料的选择要考虑比刚度( $E/\rho$ )、导温系数( $\lambda/\alpha$ )和稳定性三个指标, 分别表征的是力学性能、热学性能和使用寿命。

SiC 比刚度, 仅次于金属铍, 相比于微晶玻璃等其他材料, 可有效提高组件刚度和轻量化水平。同时它具有较高的导温系数, 有利于减小镜体温度梯度和热变形, 提高仪器的环境适应性; 此外其物理、化学性质稳定, 能够抵抗长期宇宙射线辐照, 通过考察空间应用案例, SiC 可满足空间环境的各项要求。美国的 MICAS 和 GEO<sup>[1-2]</sup>, 欧洲的 Herschel 等空间望远镜的反射镜已经在轨运行多年<sup>[3]</sup>。国内由上海硅酸盐研究所研制的 SiC 镜体也已经成功应用于多个空间遥感仪器中<sup>[4]</sup>。该研究采用的 SiC 材料属性如表 1 所示。

表 1 SiC 材料属性

Tab.1 Properties of SiC

Density( $\rho$ )	Young's modulus( $E$ )	Modulus-to-density ratio( $E/\rho$ )
3.05 g/cm <sup>3</sup>	400 GPa	12.6 $\times 10^6$ m
Thermal conductivity( $\lambda$ )	CET( $\alpha$ )	Coefficient of temperature conductivity( $\lambda/\alpha$ )
185 W/mK	2.5 $\times 10^{-6}$ K <sup>-1</sup>	2.5 $\times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s

### 1.2 支撑方式选择

在空间领域, 背部多点支撑是大口径反射镜安装的主要方法, 它理论成熟、应用范围广。根据 Hindle 的理论<sup>[5]</sup>, 相比其他方式, 背部多点支撑面形精度更高, 但除面形外, 还需考虑质量、刚度、热适应性等相关因素。背部多点支撑是多层桁架结构, 体积大, 质量大; 每一层桁架是由多组悬臂梁构成, 且通常内含挠性或运动部件, 因此整体刚度较低<sup>[6-8]</sup>。欧洲的同温层观测中红外天文望远镜(SOFIA)主镜直径 2.705 m, 材料是微晶玻璃, 采用 18 点背部支撑, 该仪器安装在改装的波音 737 飞机中, 气流造成的振动扰动频率达 100 Hz。为了避免共振, 研究人员将支撑组件的一阶模态提高到 240 Hz, 但其支撑环节较为复杂, 组件总质量达 1 940 kg, 其中主镜 850 kg, 支撑结构 1 090 kg<sup>[9]</sup>。

中心支撑的研究起步较早, 已广泛应用于空间、地面各类光学仪器中, 它结构简单、质量轻、刚度, 满足本反射镜支撑的需求。然而它在镜体形式、口径和工作环境方面存在一些限制条件: (1) 反射镜重心须在中心支撑面内, 即镜面以下, 否则在重力作用下, 镜面会产生像散; (2) 因支撑零件与反射镜的线膨胀系数不同, 在温度变化时会造成局部接触面应力增加, 面形质量下降。针对  $\Phi 620$  mm SiC 反射镜, 通过合理的镜体和轻量化设计, 将反射镜重心调整到支撑零件上; 并用柔性材料和热控措施提高热适应性。根据仪器边界条件, 采用了中心完全固定, 背

部法向固定的方式,形式如图1所示。

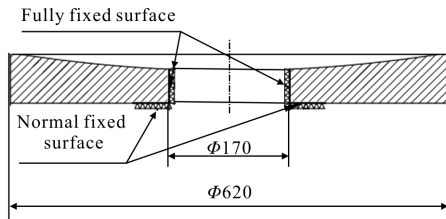


图1 反射镜中心支撑示意图  
Fig.1 Center mounting for mirror

### 1.3 反射镜镜体轻量化设计

反射镜的轻量化及支撑设计应遵循相互适应的原则,不同的支撑方案应有不同的轻量化形式与之匹配。首先根据系统光学指标和使用环境,确定反射镜支撑方案,然后进一步进行轻量化设计。

根据上述原理,利用有限元的拓扑优化方法,得到在轴向和径向重力的作用下镜子的优化结果。图2中深色部分是需去除的材料,可知中心较厚、边

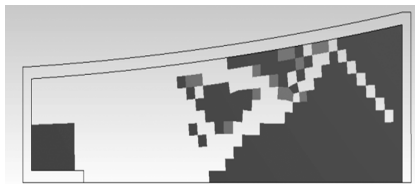


图2 优化计算结果(深色部分为需要去除的部分)  
Fig.2 Result of shape optimization

缘较薄的镜体适合中心支撑,即背部为锥形、拱形或者抛物面的反射镜。这与等强度梁的设计原则相近。中心支撑的反射镜从中心到边缘类似于多个悬臂梁,梁上有变化的分布载荷。其挠曲方程为:

$$v = \int \left( \frac{M}{EI} \right) dx dx + Cx + D \quad (1)$$

式中: $M = \int p(x)xdx$  为梁所承受的扭矩; $p(x)$ 为分布载荷的密度; $EI$ 为抗弯刚度; $C$ 、 $D$ 为常量。

由公式(1)可知,若 $p(x)$ 是减函数,则 $EI$ 就可以相应变小,这样反射镜的轻量化程度也就越高。背平形主镜采用三角形、六边形减重槽<sup>[10-11]</sup>,其 $p(x)$ 可近似为常量,背部锥形或者其他形状的反射镜其 $p(x)$ 是减函数,所以反射镜可以更轻,即使质量相同,背部呈锥形的反射镜整体刚度也更高,面形更好。

在项目研究的阶段背锥主镜加工存在困难,为简化技术难度,选择了传统的背平形反射镜。为得到面密度 $p(x)$ 递减的镜体,设计了一种放射状减重槽,其中心部分密度减重筋密集,边缘变稀疏,如图3所示。反射镜轻量化后质量为15.2 kg,轻量化率达到71.2%,径厚比为8.86,面密度为49.7 kg/m<sup>2</sup>。

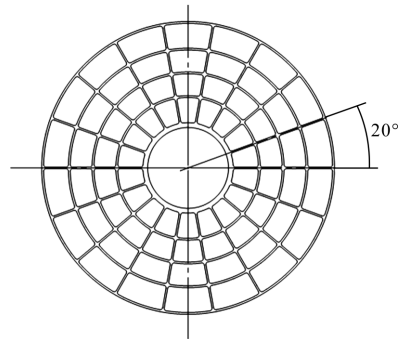


图3 减重槽形式  
Fig.3 Lightweight pattern

## 2 反射镜中心支撑设计

### 2.1 径向支撑设计

中心支撑筒约束反射镜的径向方向,两者之间的配合在宏观上存在间隙,而在接触面上又存在微观的特征,因此轴孔的接触情况是离散的小区域,且不可预测,这会造成组件刚度降低和镜面无法控制的变形。根据计算,若中心孔完全约束,面形精度为0.012 λRMS,若仅固定三个节点,则下降为0.071 λRMS。因此设计了一种可控制接触面面积和部位的支撑方式,主要利用的是柔性材料的弹性变形和胶的流动性特性,其中柔性材料既增加接触面积,又可通过自身热变形,提高热适应性。

首先依据配合间隙,调整柔性垫片厚度,修正宏观误差;然后在粘结槽中注胶,填补微观的间隙。支撑筒采用线胀系数为0.5×10<sup>-6</sup>/K的4J32材料,与SiC的2.5×10<sup>-6</sup>/K相近,可在一定程度上提高热稳定性。根据Vukobratovich的推导<sup>[12]</sup>,柔性材料存在一个径向消热差的最优厚度,计算公式为:

$$t_e = \frac{(D_G/2)(1-v_e)(\alpha_M - \alpha_G)}{\alpha_e - \alpha_M - v_e(\alpha_G - \alpha_e)} \quad (2)$$

式中:支撑筒直径 $D_G=170$  mm;支撑筒线胀系数 $\alpha_G=0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;反射镜线胀系数 $\alpha_M=2.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;柔性材料的线胀系数 $\alpha_e=75 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;柔性材料的泊松比

$\nu_e=0.43$ , 弹性模量为 689 MPa; 计算得到柔性材料的最佳消热厚度  $t_e$  为 0.857 mm, 取 0.8 mm, 修配后略有不同。设计优化后的方案如图 4 所示。

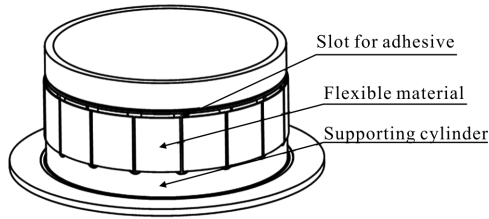


图 4 反射镜径向支撑方案

Fig.4 Radial mounting structure

## 2.2 轴向支撑

反射镜背部支撑平台是 TC4 材料, 线胀系数  $7.89 \times 10^{-6}/K$ , 与 SiC 相差较大, 不能粘接接触面, 因此仅用垫柔性材料将镜体与支撑零件隔离开。反射镜用螺母压紧, 预紧力控制在 8~10 N 之间, 作用在镜面的台阶上, 此时镜面 RMS 没有明显变化。螺母锁紧后, 第二个螺母涂覆防松胶并锁紧第一螺母。按照上述支撑方法计算反射镜在两个方向重力作用下面形 RMS 值分别为  $0.009 \lambda$  和  $0.012 \lambda$ 。此外柔性材料在重力作用下的变形会使反射镜产生刚体位移, 引起光路变化。通过分析得出: 在轴向、径向重力作用下, 反射镜最大总位移分别是  $0.585 \mu\text{m}$ 、 $0.463 \mu\text{m}$ , 对应的最大离轴量为  $0.398 \mu\text{m}$ 、轴向位移  $0.561 \mu\text{m}$ 、倾斜  $0.265''$ 。远小于光学系统的容差, 对仪器的 MTF 无实质影响。在试验检测过程中, 利用旋转设备的方式检测重力的影响, 譬如将设备沿轴向滚动  $90^\circ$ 、 $180^\circ$  或沿俯仰方向旋转  $90^\circ$  测量反射镜波前质量, 测量中未发现 MTF 有明显变化。

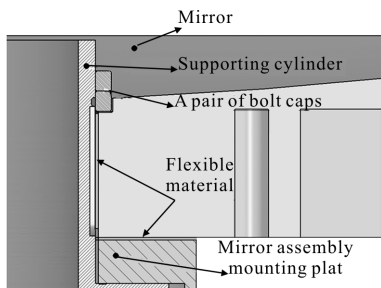


图 5 反射镜支撑方案

Fig.5 Cross-section diagram of mounting structure

## 2.3 热适应性分析

仪器的空间使用环境复杂, 地球和太阳辐照及

冷空间都会对仪器产生影响, 经计算每一轨道周期主镜及周边零件的温度交变范围在  $-5 \sim 30^\circ\text{C}$ 。柔性材料在上述温度范围内不能消除热差, 会引起反射镜应力急剧增加, 镜面质量下降。因此需了解不同温度下的面形精度, 以确定控温范围。组件在  $18^\circ\text{C}$  环境中装校, 用有限元软件模拟真实工作状态, 计算出不同温度情况下的面形质量情况, 如图 6 所示。根据结果, 温度应维持在  $15 \sim 21^\circ\text{C}$  之间, 对应的面形优于  $0.018 \lambda\text{RMS}$ 。图 7 分别是  $15^\circ\text{C}$ 、 $21^\circ\text{C}$  时计算分析镜面的变形情况。

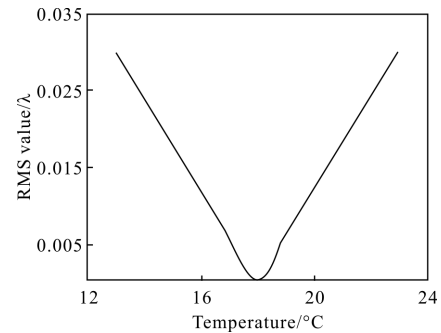


图 6 不同温度点的镜面精度

Fig.6 Value of RMS on mirror at different temperatures

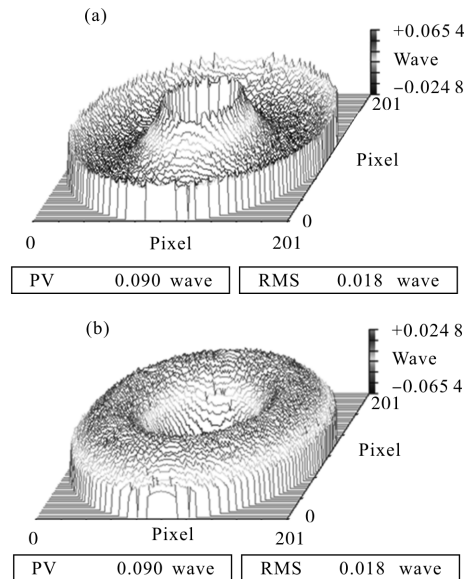


图 7  $15^\circ\text{C}$ 、 $21^\circ\text{C}$  时反射镜计算面形

Fig.7 Calculated WFE map of mirror at  $21^\circ\text{C}$  and  $15^\circ\text{C}$

## 2.4 反射镜动态特性分析

模态反映刚度水平, 组件的第一阶模态为 507.37 Hz, 高于平台共振峰, 但是它对着镜体沿轴向的旋转, 会引起柔性材料和胶的剪切失效, 是薄弱环节, 需要进一步分析在振动条件下的响应。第二到五阶

模态分别是 582.58 Hz、584.71 Hz、842.71 Hz、845.62Hz, 都是主镜自身的刚性变形, SiC 的刚度较高, 且高频段振幅小, 零件不会失效。根据正弦振动试验条件, 组件最大响应出现在 100 Hz, 此时胶和柔性材料上的最大应力是 0.062 9 MPa, 反射镜的最大应力为 3 MPa, 都处于安全范围内。

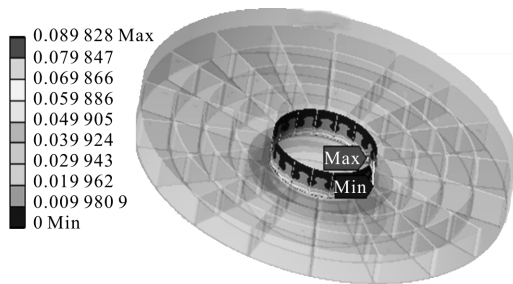


图 8 频率为 100 Hz 时的正弦载荷下的应力图

Fig.8 Stresses map of mirror and mounting parts under harmonic load at 60 Hz

### 3 测试结果

经测试反射镜加工误差 RMS 值为 0.014 λ, 反射镜装校后, 面形误差 RMS 值为 0.030 λ, 如图 9 所

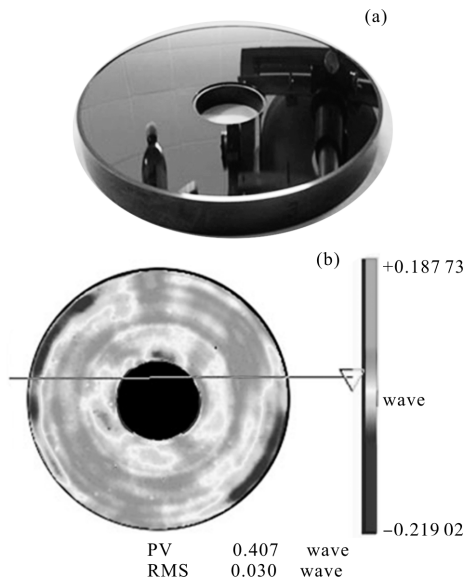


图 9 主镜实物和装校后波前实测结果

Fig.9 Mirror and Reflect WFE map after assembled

示。通过三个方向的正弦扫频得到主镜组件的一阶模态为 420Hz, 满足仪器需求, 如图 10 所示。该值小于计算结果, 通过分析得出反射镜背部的接触状态影响了组件的计算刚度。反射镜、垫片和支撑零件相互之间无粘接, 在零件产生弹性变形时, 三者间接触存

在非线性的情况, 即可相互分离或摩擦滑动。而在计算模态时将其简化为线性的不可分离接触, 提高了组件的刚度。此外计算时反射镜背部零件之间完全接触, 但因误差的存在实际情况下背部接触面积小于理论计算值, 也会引起组件刚度一定程度的下降。

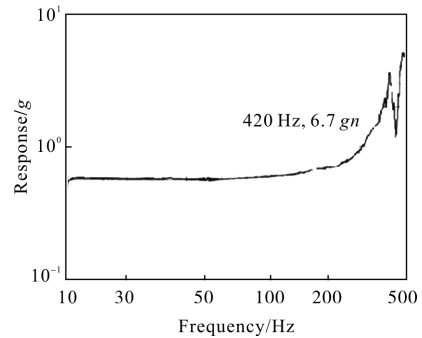


图 10 反射镜组件正弦扫频响应图

Fig.10 Harmonic response diagram of mirror assembly

通过仪器的变温调焦试验考察反射镜组件的热适应性, 测试结果表明仅存在随温度变化仪器焦平面沿轴向移动的现象, 轴上、轴外的传递函数无明显变化始终大于 0.4, 说明反射镜没有产生慧差、像散等影响仪器成像质量的像差, 满足要求。

### 4 结论

中心支撑可满足 Φ620 mm 的 SiC 反射镜支撑需求, 相比其他支撑方式有效降低了支撑零件的质量, 提高了刚度; 利用等强度原理设计的放射状减重槽形式, 与中心支撑的力学特性相符, 使分布载荷密度递减, 提高了反射镜的轻量化率和面形精度; 在支撑环节上, 柔性材料和胶分别填补了接触面的宏观和微观缝隙, 提高了组件整体刚度和热适应性。经各项试验和测试, 该反射镜组件质量 18.7 kg, 其中反射镜 15.2 kg, 轻量化率达 71.2%, 支撑零件 3.5 kg, 两者之比为 4.34; 一阶模态 420Hz; 面形精度 0.03 λRMS。

目前该仪器已在轨运行, 性能良好, 各项指标均达到预期, 满足空间环境要求。随着 SiC 加工水平的提高, 在未来研究中可进一步优化轻量化形式, 提高分布载荷密度的变化率, 如采用单拱形、双拱形反射镜等, 提高面形质量。

### 参考文献:

[1] Rob ichaud J. SiC optics for EUV, UV and visible space

- missions [C]//SPIE, 2003, 4854: 39-49.
- [2] Anapol M, Gardner L, Tucker T, et al. Lightweight 0.5 m silicon carbide telescope for a geo-stationary earth observatory mission [C]//SPIE, 1995, 2543: 164-172.
- [3] Sein E, Toulemont Y, Breysses J, et al. A new generation of large SiC telescopes for space applications [C]//SPIE, 2004, 5528: 83-95.
- [4] Han Yuanyuan, Zhang Yumin, Han Jiecai, et al. Development of the silicon carbide mirror and system in the world [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2005 (6): 59-63. (in Chinese)  
韩媛媛, 张宇民, 韩杰才, 等. 国内外碳化硅反射镜及系统研究进展[J]. 材料工程, 2005(6): 59-63.
- [5] Yoder Jr. P R. Mounting Optics in Optical Instruments[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2002.
- [6] Qi Guang, Li Jinglin, Wang Shuxin, et al. Lightweight structure design for rectangular SiC space mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(2): 43-47. (in Chinese)  
齐光, 李景林, 王书新, 等. 长条形 SiC 空间反射镜轻量化结构优化设计[J]. 光电工程, 2012, 39(2): 43-47.
- [7] Zhang Xuejun, Li Zhilai, Zhang Zhongyu. Space telescope a spherical mirror structure design based on SiC material [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 577-582. (in Chinese)  
张学军, 李志来, 张忠玉. 基于 SiC 材料的空间相机非球面反射镜结构设计 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 577-582.
- [8] Wang Fuguo, Yang Hongbo, Yang Fei, et al. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 877-880. (in Chinese)  
王富国, 杨洪波, 杨飞, 等. 大口径主镜轴向支撑点位置优化分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 877-880.
- [9] Bittner H, Erdmann M, Haberler P, et al. SOFIA primary mirror assembly: structural properties and optical performance [C]//SPIE, 2003, 4857: 266.
- [10] Yan Yong, Jin Guang, Yang Hongbo. Lightweight structural design of space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 97-101. (in Chinese)  
闫勇, 金光, 杨洪波. 空间反射镜结构轻量化设计 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 97-101.
- [11] Guo Xiqing, Wang Yueyong. Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy-caliber mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(6): 518-521. (in Chinese)  
郭喜庆, 王悦勇. 大口径反射镜几种轻量化孔结构形式的分析[J]. 光学精密工程, 2000, 8(6): 518-521.
- [12] Vukobratovich D, Fetterhoff K, Myers J. Bonded mounts for small cryogenic optics[C]//SPIE, 2000, 4131: 228.