

大口径 SiC 轻量化反射镜组件的结构设计

徐 宏¹, 关英俊²

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012)

摘 要: 针对某空间相机 1.1 m 口径反射镜的光机结构设计任务, 为降低反射镜的重量, 提高其环境适应性, 设计了一种重力变形小、抗振性强、热尺寸稳定性高的空间反射镜结构系统。首先, 详细分析了反射镜及支撑结构选材依据及应考虑的主要因素。然后, 提出一种背部半封闭式扇形轻量化孔的反射镜轻量化结构方案, 并利用参数化建模分析的方法对其结构参数进行了优化设计。采用背部三点柔性支撑方式对反射镜进行支撑, 通过柔性铰链的柔性来调节由于装配中的过定位和热环境变化导致的反射镜面形精度降低问题。最后, 对反射镜组件的力学和热特性分析结果表明, 反射镜在 X 向 1 g 重力作用下反射镜面形精度 PV 为 62.4 nm, RMS 为 5.7 nm, 在 20±4 °C 环境温度变化范围内面形精度达到 PV 为 61.7 nm, RMS 为 6.3 nm, 反射镜组件基频为 150 Hz, 能够满足静态刚度、动态刚度和热尺寸稳定性的设计指标要求。

关键词: 反射镜组件; 空间相机; 轻量化; 柔性支撑; 有限元分析

中图分类号: V447.3; TH703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)S-0083-06

Structural design of large aperture SiC mirror subassembly

Xu Hong¹, Guan Yingjun²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: For some 1.1 m diameter space mirror opto-mechanical design task, in order to decrease the weight of the mirror, improve its environmental adaptability, a small gravity deformation and strong vibration resistance, high thermal stability of space mirror structure system was designed. Firstly, mirror and support structure material selection principles and the matters needing attention were analyzed in detail. Then, a semi-closed back with a fan-shaped lightweight hole mirror lightweight structure schemes was proposed, and by using the method of parametric modeling, analysis of its structural parameters optimization design was carried out. The back three-point flexible support scheme was used to support the mirror. By adjusting the flexibility of flexure hinge can solve the problem of mirror surface figure accuracy degradation caused by assembly position and thermal environment change. Finally, on the mechanical and thermal properties of the mirror subassembly analysis results show that, the surface figure accuracy of the mirror was PV 62.4 nm and RMS 5.7 nm under load case of 1 g gravity in the direction of X axis, in the 20±4 °C environment temperature range the surface figure accuracy reached PV 61.7 nm,

收稿日期: 2014-10-10; 修订日期: 2014-11-15

基金项目: 国家 863 计划(2009AA7020107)

作者简介: 徐宏(1961-), 女, 副研究员, 主要从事空间光学遥感器结构设计方面的研究。Email: xuhongciomp@sina.com

通讯作者: 关英俊(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事空间光学遥感器结构优化设计方面的研究。Email: gjy5460@sohu.com

RMS 6.3 nm, and the fundamental frequency of the mirror subassembly was 150 Hz which can satisfy the static stiffness, dynamic stiffness and thermal dimensional stability index requirements.

Key words: mirror subassembly; space camera; lightweight; flexure support; finite element analysis

0 引言

空间对地观测技术近年来得到长足的发展,随着人们对分辨率要求的不断提高,长焦距、大口径成为空间相机的一个发展趋势^[1]。大口径反射镜是反射式空间光学系统的核心光学元件,其轻量化设计和支撑结构的设计是整个空间相机光机结构设计的难点,已越来越多地受到空间相机光机结构研究人员的重视^[2-6]。在空间光学领域,通常认为口径超过 500 mm 的反射镜即属于大口径反射镜。大口径空间反射镜的设计难点在于在设计阶段要充分考虑反射镜组件所要经历的地面加工、检测、装调、运输、环境试验以及发射运载和空间冷黑、微重力等应用环境,并满足反射镜能经受住上述环境考验,在空间应用环境下保持设计指标要求的面形和位置精度^[7]。

文中以某口径为 1.1 m 的圆形空间反射镜为例,从反射镜材料的选择、反射镜轻量化设计、反射镜的支撑结构设计等方面对大口径空间反射镜组件的结构设计问题开展研究。通过设计、分析和优化最终得到了一种背部半封闭式的采用扇形轻量化孔的轻量化反射镜结构,并利用背部 3 点柔性支撑技术对反射镜进行了有效支撑,使反射镜组件在力、热载荷工况下均满足设计指标要求。

1 反射镜材料选择

由于反射镜材料的密度、泊松比、弹性模量、热胀系数和热导率等力学和热物理性能直接关系到反射镜在静态和动态环境下的固有特性,所以结构设计之初首要考虑的就是材料选择问题。反射镜材料应满足以下基本要求:(1) 反射镜材料应对外界力载荷和温度载荷的变化不敏感,各向同性且具有高度的尺寸稳定性;(2) 良好的可加工性,能够获得高质量的抛光表面并且能够镀制满足反射特性的反射膜;(3) 材料应具备轻质高弹性模量特性,易于实现反射镜轻量化构型设计,具有较小的热胀系数和较高的热导率,使反射镜具有较高的热尺寸稳定性。除了分析比较以上性能之外,还需考虑价格和进货渠

道等因素。目前常用于制作空间反射镜的材料有微晶玻璃(Zerodur)、超低膨胀玻璃(ULE)、铍(Be)、铝(Al)、硅(Si)、融石英(Fused silicon)、碳化硅(SiC)等。SiC 的综合性能具有明显的优势,具有较高的弹性模量、适中的密度、较小的热胀系数、较高的热导率,这些物理性能使得 SiC 镜坯具有良好的抗重力变形能力和热稳定性,其比刚度仅次于 Be,热稳定性高于其他传统光学材料。SiC 镜坯通过表面改性技术再经抛光工艺可以得到超光滑的光学表面,且可以采用凝胶注模成型技术快速地制作形状复杂的大口径轻量化反射镜素坯,大大缩短了反射镜制作时间,显著地降低了反射镜制作成本。所以文中选择 SiC 作为制作反射镜的材料。

2 轻量化设计

空间相机是空间对地观测的重要有效载荷,为降低发射费用,在进行空间相机光机结构设计时应遵循的一个重要原则就是在满足仪器性能指标要求下做到质量最轻。长焦距大口径全反射式空间光学系统中的大口径反射镜的镜体轻量化设计是整个空间相机光机结构轻量化设计的最基本环节^[8]。合理有效的反射镜轻量化设计就是在满足良好成像要求的前提下尽可能多地去除镜体中不参与成像的光学材料,通常的做法是在优化反射镜背部形状的基础上开设如三角形、四边形、六边形、圆形、扇形等各种轻量化孔。在选择轻量化孔结构形式之后,再对支撑方式、支撑点位置、镜体厚度、反射面板厚度、支撑孔壁厚、轻量化孔筋板厚度、后面板厚度等反射镜具体结构参数进行优化设计。

2.1 轻量化结构形式

目前,常用的反射镜轻量化结构形式有背部开放式、背部半封闭式、背部封闭式和泡沫夹层式等几种形式。在等刚度的情况下背部封闭式结构一般可比背部开放式结构厚度薄 20%左右,且反射镜背部面板能够使反射镜具有更优的热特性,能够更快速地消除反射镜温度梯度,从而提高反射镜的热稳定性。而背部半封闭式结构就是在背部面板上开一些

工艺孔,通常这些工艺孔并不影响反射镜结构刚度,且具有一定的减重效果,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所采用凝胶注模成型技术能够快速制作形状复杂背部半封闭式的轻型反射镜素坯,然后对反射镜素坯进行反应烧结从而获得近净成型的轻量化反射镜,因此文中选取这种背部半封闭式的反射镜轻量化结构形式。

郭喜庆^[9]对各种轻量化孔进行了详细地对比分析,根据文中所研究口径为 1.1 m、曲率半径为的圆形反射镜的结构特点,为使反射镜获得最大的轻量化率,主要对反射镜采取扇形轻量化孔的结构形式进行了研究。反射镜中心部位预留一个直径为 100 mm 的中心盲孔,向外按等间距均匀分布 5 层环形筋,反射镜采用背部 3 点支撑方案,在反射镜背部按 60° 均匀分布 6 个支撑孔。轻量化反射镜具体结构形式如图 1 所示。

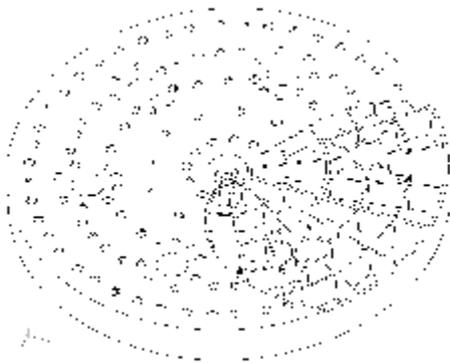


图 1 轻量化反射镜结构示意图

Fig.1 Scheme of lightweight mirror structure

2.2 镜体结构参数优化

反射镜轻量化结构形式确定后,接下来的工作就是建立轻量化反射镜的参数化模型进而对镜体结构进行参数优化。镜体参数优化以自重作用下镜面面形 PV 和 RMS 值为约束条件,该反射镜的面形精度要求, $PV \leq \lambda/10$, $RMS \leq \lambda/40$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。设计变量包括反射镜前面板厚度 t_f 、后面板厚度 t_b 、环形筋厚度 t_c 、径向筋厚度 t_r 、支撑孔壁厚 t_h 、支撑半径 R 、镜体最薄处厚度 H 、支撑孔周边加强筋厚度 t_a 、外环厚度 t_w 、各环形筋均值间隔 B 。以镜体质量最小化为设计目标对镜体进行参数优化。综合考虑工艺性最终确定轻量化反射镜的结构参数见表 1。

表 1 轻量化反射镜的结构参数(单位: mm)

Tab.1 Structural parameters of the lightweight mirror(Unit: mm)

t_f	t_b	t_c	t_r	t_h	R	H	t_a	t_w	B
5	5	5	6	8	350	72	5	8	92

优化后的轻量化反射镜质量为 64.5 kg,其减重率达到 76%。此反射镜采用背部 3 点支撑方式,在光轴水平方向(X 向重力)装调与检测的工况下,通过有限元分析及面形数据处理可求得面形 PV 为 12.2 nm, RMS 为 1.5 nm。由此可见,该轻量化反射镜结构具有足够的抗自重变形能力,可以进行后续的支撑结构设计。

3 反射镜支撑结构的设计

3.1 反射镜支撑结构方案

反射镜轻量化结构初步确定后,针对于该反射镜按背部 3 点柔性支撑方案设计支撑结构。支撑结构设计中要注意各构件材料的线胀系数应尽量相匹配,减小由温度梯度引起的光学元件面形或各光学元件间尺寸的变化^[10]。图 2 所示为反射镜支撑结构示意图,在该反射镜组件中共包括 4 部分结构。3 个由殷钢材料(4J36)制成的锥套通过胶粘剂与反射镜(RB-SiC)背部的 3 个 120° 均布的支撑孔联接;3 个由钛合金材料(TC4)制成的柔性支撑结构的底面通过螺钉分别与锥套联接;柔性结构的顶面则通过螺钉与用铸钛合金(ZTC4)支撑的背部支撑三角板联接。



图 2 反射镜支撑结构示意图

Fig.2 Scheme of lightweight mirror subassembly support structure

在反射镜组件结构设计中,支撑结构的材料选

择对反射镜组件的力学和热特性至关重要。与反射镜直接接触的锥套作为镶嵌件其材料必须选择与反射镜线胀系数相近且强度和刚度较大的材料,柔性支撑结构和背部支撑三角板的结构材料则要求尽量选择工艺成熟且高强度、高刚度、轻质的航天结构材料。反射镜组件所用的材料属性见表 2。

表 2 反射镜组件结构材料属性

Tab.2 Material properties of the mirror subassembly

Materials	$\rho/g \cdot mm^{-3}$	E/GPa	$\alpha/10^{-6} \times K^{-1}$	μ	Part
RB-SiC	3.06	350	2.4	0.18	Mirror
4J36	8.10	140	2.4	0.25	Inserts
TC4	4.44	109	8.9	0.34	Flexure hinge
ZTC4	4.40	114	8.9	0.29	Mounting plate

3.2 柔性支撑结构设计

采用柔性支撑技术可以有效地解决大口径反射镜的过定位安装、热环境变化所导致的反射镜面形精度降低问题。在支撑结构中设置柔性环节,其本质是以牺牲反射镜组件的刚度为代价来改善反射镜的受力环境从而提高反射镜的面形精度。在支撑结构中设置柔性环节一方面有利于保证反射镜面形精度,另一方面也带来负面的影响,支撑零件刚度的降低会导致反射镜组件固有频率的降低,这样就加大了相机与运载工具发生共振的可能。在振动、冲击等动力学环境中,柔性支撑结构易发生塑性变形或断裂。塑性变形可导致反射镜的位置度误差加大,一旦反射镜的位置度超差将导致整个光学系统像质下降或无法正常成像。而断裂不仅造成相机本身破坏,还极有可能导致其他相关任务失败。所以柔性支撑结构的设计关乎整个任务的成败,是空间相机光机结构设计中的关键技术之一,成功的柔性支撑结构必须使反射镜组件同时满足静态刚度、动态刚度和热稳定的要求。

柔性铰链具有体积小、无机械摩擦、无间隙和灵敏度高等优点,被广泛应用到需要小角位移和高精度转动的场合。文中选择一种双轴圆弧柔性铰链作用反射镜的柔性支撑结构。如图 3 所示,该柔性支撑结构是由两个互成 90° 的单轴铰链组成,铰链的构成元素是由曲率相同的两段圆弧背对而组成,这种铰链的弹性弯曲轴的位置精度高,允许的侧向变形小,适合在较精密的部件上作为支撑结构。单轴半圆弧

柔性铰链在力矩 M_z 作用下的角位移为 α_z ,其转动刚度为^[11]

$$\frac{M_z}{\alpha_z} \approx \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad (1)$$

式中: E 为材料杨氏模量; b 为铰链宽度; t 为铰链最薄弱处厚度; R 为切割半圆弧半径。从公式(1)可知, t 对柔性铰链的转角刚度影响最大。根据各参数对柔性铰链的转角刚度的影响规律,借助于有限元分析软件来调节柔性铰链的结构参数。



图 3 柔性铰链支撑结构

Fig. 3 Flexure hinge support structure

为实现传力路径最短,背部支撑三角板与柔性支撑结构及相机主支撑结构的联接位置尽量对应布置,这样可以增大反射镜组件与相机主支撑结构的联接刚度。支撑结构设计中另外需要注意的一个重要方面就是反射镜的轴向支撑位置对反射镜在光轴水平时的自重变形影响显著,应尽量靠近中性面(光轴水平时,垂直光轴且经过反射镜重心的竖直平面)支撑,以使反射镜承受尽量小的弯矩和剪切应力,从而改善镜面的应力环境来保证其面形精度。

3.3 反射镜组件静态刚度及热弹性分析

静态刚度分析主要考查反射镜结构在空间微重力环境下的面形精度以及刚体位移是否超出位置度公差要求。由于反射镜在加工、检测、装调时均受到 $1g$ 重力作用,空间微重力环境相当于地面 $1g$ 重力的释放,所以应以 $1g$ 重力作为等效静态载荷。建立反射镜组件的精细三维有限元模型如图 4 所示。对背部三角板与相机主支撑结构的连接孔进行六自由度全约束,分别对反射镜组件在 X 、 Y 和 Z 方向施加 $1g$ 重力载荷,其分析结果见表 3。从分析结果可见,反射镜组件在 X 和 Z 向重力作用下反射镜面形精度和平均刚体位移均在设计指标范围内,且面

形 RMS 值具有充足的余量,为整机光机结构设计提供了有利条件,而 Y 向重力作用下的面形 PV 和 RMS 值均超差,由于该反射镜不采用光轴垂直检测,所以该指标不作为硬性指标,并不影响反射镜的实际空间应用,故认为该反射镜组件具有足够高的静态刚度。

反射镜组件结构类型及材料选取应使反射镜结构系统对温度变化不敏感,结构方案应尽量选取对称结构,避免因热弹性变形而导致的反射镜产生偏转,结构材料选取导热性好、线胀系数小的材料。文中的反射镜要求能够适应 $20\pm 4\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境温度变化,分析反射镜组件在 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 均匀温升工况下反射镜面形精度,其结果见表 3。分析结果表明,环境温度变化对此大口径反射镜的面形精度及位置精度的影响均满足光学设计指标要求。

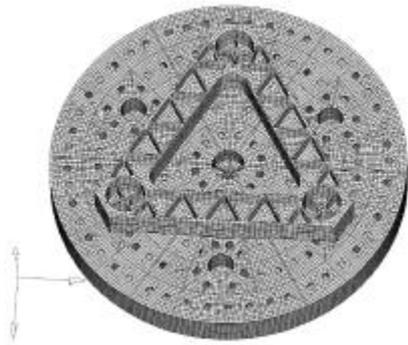


图 4 反射镜组件的有限元模型

Fig.4 Finite element model of mirror subassembly

表 3 反射镜组件静态刚度及热弹性分析结果

Tab.3 Analysis results of static stiffness and thermal elastic for mirror subassembly

Load cases	PV/nm	RMS/nm	T/ μm		
			X	Y	Z
Design index	63.28	15.82	30	100	30
Direction of gravity	X	62.4	5.7	8.5	0
	Y	243.5	56.4	0	4.6
	Z	62.8	6.5	0	0
$4\text{ }^\circ\text{C}$ temperature rise	61.7	6.3	-0.4	-20.7	6.7

3.4 反射镜组件模态分析

在长焦距、大口径空间相机发射运载过程中,来自火箭发动机不稳定燃烧而产生的推力脉动变化,旋转设备的不平衡转动,POGO 振动等会形成对相机的低频正弦激励,其频率范围大致为 $5\sim 100\text{ Hz}$ 。而

结构刚度薄弱环节往往在低频振动时响应较大,过大的振幅响应易于导致反射镜柔性支撑结构断裂或发生塑性变形而失效,所以要在满足反射镜结构系统静态刚度和热环境适应性的情况下尽量提高反射镜的动态刚度。反射镜结构系统在低频正弦激励力 $F_0\sin\omega t$ 作用下的响应可表示为:

$$y(t) = Ae^{-\xi\omega_d t} \sin(\omega_d t + \varphi) + \frac{F_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \sin(\omega t - \psi) \quad (2)$$

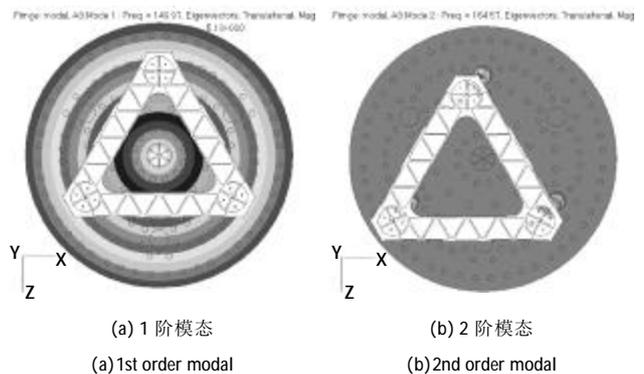
式中: ξ 为阻尼比; ω_n 为系统无阻尼固有频率; $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$ 为系统有阻尼固有频率; $\lambda = \omega/\omega_n$ 为频率比。公式(2)右端第 1 项为系统在阻尼作用下的衰减振动,第 2 项为低频正弦激励引起的受迫振动,由此可知,增大 ω_n 和 ξ 均可减小振幅,从而减小结构响应。对于反射镜结构系统,一般阻尼比较小,有效的提高反射镜结构系统抗振性措施就是提高系统的无阻尼固有频率 ω_n 。文中的反射镜结构系统要求组件的基频不低于 100 Hz 。在对反射镜背部支撑三角板进行约束的情况下,利用 Lanczos 法提取了反射镜组件的前 10 阶模态,其前 4 阶模态分析结果见表 4 和图 5。

从模态分析结果可知,反射镜组件的基频为 150 Hz ,其相应振型为反射镜绕光轴的转动,表明反射镜组件的动态刚度足够高,在低频正弦激励作用下不会与载体发生共振。

表 4 反射镜组件前 4 阶模态分析结果

Tab.4 First 4-order modes of mirror subassembly

Order	Natural frequency	Mode of vibration
1	150	Mirror around the Y axis rotation
2	164	Mirror in the XZ plane translation
3	165	Mirror in the XZ plane translation
4	198	Mirror around the Z axis rotation



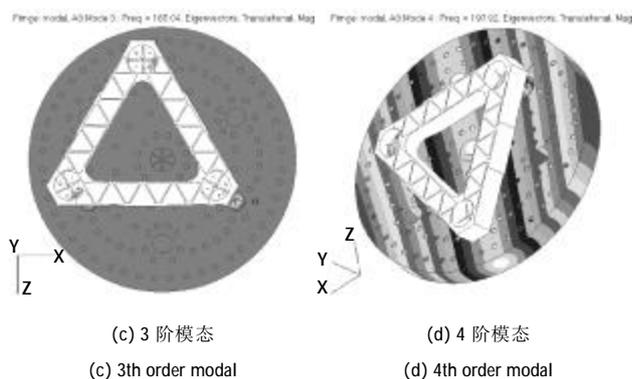


图 4 反射镜组件的前 4 阶模态

Fig.4 First 4th order modal of mirror subassembly

4 结论

文中针对某空间相机 1.1 m 口径反射镜光机结构设计任务,优选 RB-SiC 材料,提出一种采用半封闭平背结构且背部开设扇形轻量化孔的反射镜轻量化结构方案,通过优化设计反射镜结构参数最终得到了质量为 64.5 kg,减重率达 76%的轻量化反射镜结构。采用背部 3 点支撑方案对反射镜进行支撑结构设计,设计了一种双轴柔性铰链结构,使反射镜在检测、装调方向自重作用下的面形精度达到 PV 为 62.8 nm, RMS 为 6.5 nm, 4 °C 均匀温升工况下反射镜面形精度达到 PV 为 61.7 nm, RMS 为 6.3 nm, 满足静态刚度和热尺寸稳定性的要求。反射镜组件的基频为 150 Hz, 满足动态刚度指标要求。该反射镜结构系统的设计可为 1 m 量级的空间反射镜轻量化及支撑结构设计提供一定的借鉴和参考。

参考文献:

- [1] Li Wei, Liu Hongwei, Guo Quanfeng, et al. Combined supporting structure of thin wall joint cylinder and supporting bar between primary mirror and second mirror in space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(12): 2633-2641. (in Chinese)
李威, 刘宏伟, 郭权锋, 等. 空间相机主次镜间的薄壁筒和支杆组合支撑结构[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(12): 2633-2641.
- [2] Zhang Xuejun, Li Zhilai, Zhang Zhongyu. Space telescope aspherical 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.
- [3] Yang Jiawen, Huang Qiaolin. Optimized design of structure parameters for large aperture mirrors[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2011(4): 77-83. (in Chinese)
杨佳文, 黄巧林. 大口径反射镜结构参数优化设计[J]. *中国空间科学技术*, 2011(4): 77-83.
- [4] Guo Wancun, Wu Qingwen, Yang Jinsong, et al. Optimum design of active supporting system for a 2 m primary mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1480-1484. (in Chinese)
郭万存, 吴清文, 杨近松, 等. 2 m 主镜主动支撑优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1480-1484.
- [5] Xu Wei, Wu Qingwen, Zhai Yan, et al. Optimal design and analysis of long circular reflector subassembly in the space optical remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 752-757. (in Chinese)
徐炜, 吴清文, 翟岩, 等. 空间光学遥感器长圆形反射镜组件优化设计与分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 752-757.
- [6] Chen Hongda, Chen Yonghe, Shi Tingting, et al. Lightweight and mounting design for primary mirror in space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 535-540. (in Chinese)
陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间反射镜的轻量化及支撑设计研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 535-540.
- [7] Ren Jianyue, Chen Changzheng, He Bin. Application of SiC and SiC/Al to TMA optical remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2537-2543. (in Chinese)
- [8] Zhang Ge, Zhao Wenxing. Analysis on structural parameters of light-weight mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(1): 48-53. (in Chinese)
- [9] Guo Xiqing, Wang Yueyong. Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy-caliber mirror [J]. *Opt Precision Eng*, 2000, 8(6): 518-521. (in Chinese)
- [10] Lu E, Yan Changxiang, Wu Qingwen, et al. Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(5): 364-376. (in Chinese)
- [11] Yang Shuying. Analysis of geometrical parameters of circular arc flexible hinge influence on its rigidity [J]. *Coal Mine Machinery*, 2008, 29(7): 81-82. (in Chinese)