文章编号　1004-924X(2017)03-0641-07

CO_2 探测仪反射镜组件设计

韦跃峰，蔺　超，薛　浩，郑玉权*
（中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033）

摘要：为了降低重力、力学试验、发射条件以及因材料线胀系数差异导致的热变形对 CO_2 探测仪反射镜面形产生的影响，从反射镜组件材料选择、结构设计和配合方式几个方面进行了分析。采用 SiC 材料制作反射镜，结合反射镜的环形支撑方式，通过有限元分析对镜体进行轻量化设计。选取线胀系数较小的殷钢材料，利用三角形结构的稳定性和双脚架柔性结构的灵活性设计出简易可靠的反射镜支撑结构。反射镜与支撑结构接触面为 1∶50 的锥度面，通过环氧树脂进行胶接。在严格的工艺条件控制下，对反射镜组件进行精密加工和装配。对反射镜组件进行力学试验测试，结果表明在 X 向、Y 向、Z 向的一阶频率分别为 445，423 和 444 Hz，与有限元分析结果接近。试验后镜面面形变化量 PV 值小于 1/10λ，RMS 值小于 1/30(λ=632.8 nm)。证明了 CO_2 探测仪反射镜组件结构设计与装调的合理性，满足空间高光谱成像要求。

关　键　词：轻型反射镜；轻量化；柔性支撑；力学试验
中图分类号：　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20172503.0641

Design of mirror subassembly in CO_2 sounder

WEI Yue-feng, LIN Chao, XUE Hao, ZHENG Yu-quan*

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn*

Abstract: To lower the impact of thermal deformation due to gravity, mechanical test, launching environment and linear expansion coefficient difference of the material on mirror surface of the CO_2 sounder, an analysis was conducted in material selection, structural design and cooperation mode of the mirror subassembly. In the analysis, SiC material was adopted for mirror making, and light weight design was carried out in the mirror body through finite element analysis based on ring-shaped support mode of the mirror; then invar materials with relatively small liner expansion coefficient were selected to design simple and reliable mirror support structure based on stability of the triangle structure and flexible structure of the bipod; the mirror and support structure formed a 1∶50 taper surface through epoxy resin adhesive. Then in strict process conditions, precise machining and assembly and mechanical test were conducted in the mirror subassembly. The results show that primary frequencies in the X direction, Y direction and Z direction are respectively 445 Hz, 423 Hz

收稿日期：2016-06-21；**修订日期**：2016-07-25.
基金项目：国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA12A102，No. 2013AA122001，No. 2015AA123801-02)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

and 444 Hz, approximate to results from the finite element analysis. After such test, the mirror surface shape variation PV is lower than 1/10λ, with a RMS value lower than 1/30λ (λ=632.8 nm). It proves that structural design and adjustment of the CO_2 sounder mirror subassembly, which are reasonable, can meet the requirements of imaging spectrometer.

Key words: light weighted mirror; light weight; flexible support structure; mechanical test

1 引 言

随着二氧化碳等吸热性较强的温室气体排放量不断增加,导致全球温室效应不断增强,已经影响到生态的平衡性和人类的生产活动。各国已针对 CO_2 的监测提出了多种方法,已研制并发射了多颗探测卫星[1]。为了精确监测我国以及其它重要地区的 CO_2 分布情况并提高国际话语权,中科院长春光机所在 863 计划的支持下开展了全球 CO_2 探测技术的研究,成功研发了高空间与高光谱分辨率 CO_2 探测仪。探测仪采用光学遥感技术,利用气体分子吸收池原理,通过对大气气体的吸收光谱分析,精确反演出大气中的 CO_2 气体含量。探仪器采用大面积光栅分光方式,由指向镜机构、望远镜系统以及 760,1 610 和 2 060 nm 3 个通道组成。空间分辨率为 2 km×2 km,空间覆盖范围≥20 km。

探测仪在外太空运行时,会受到低温、真空、空间外热流等环境因素影响[2]。由于大多数空间探测仪反射镜材料与支撑结构材料不同,使得整体的热膨胀系数不一致,在环境温度发生波动时会使局部发生膨胀或收缩。同时反射镜受地面重力和振动等因素干扰,会导致反射镜镜面面形发生变化,影响整个光学成像系统[3-5]。

反射镜作为高光谱探测仪的核心部件,面形精度和位置精度将直接影响系统的光谱成像质量。因此对反射镜组件的合理化设计与装调变得越来越重要。本文从反射镜组件材料选择、结构设计、支撑方式的确定等方面分析,通过有限元方法对组件结构进行优化,并通过实际振动试验检验反射镜组件的综合性能,设计出满足空间高质量成像和地面相关力学测试要求的反射镜组件。

2 望远镜主镜设计

2.1 光学系统

望远镜系统采用带有中间像面的双抛物面同轴无焦全反射式系统,由主反射镜、三角形反射镜和次反射镜等组成,如图 1 所示。主镜反射的光线经三角形反射镜反射在次镜上,经次镜反射后进入内部光学系统。光束经过无焦光学系统后,尺寸降到原尺寸的2/3,有效减小了后续光学元件的结构尺寸,提高了整体光机结构的稳定性与可靠性。

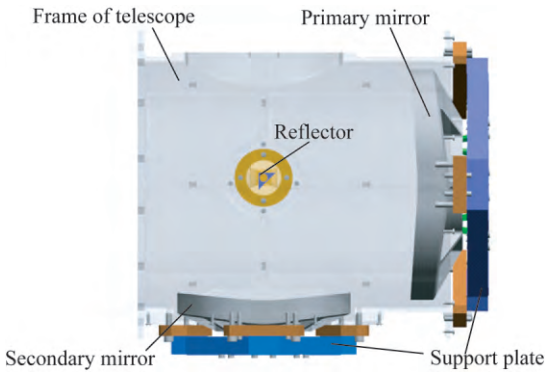


图 1 望远镜系统结构图

Fig. 1 Optical construction of telescope

2.2 主镜材料选择

主镜材料应满足热稳定性好,受到高辐射、高真空等空间环境影响不易产生畸变;良好的刚度和强度,可抵抗一定范围内的振动或冲击力。

几种常用的反射镜材料如表 1 所示。Fused silica、ULE 和 Zerodur 都属于玻璃材质,线膨胀系数较小,但结构强度较弱。Be 的综合性能较高,但材料毒性较大、难加工且成本较高。

SiC 材料具有良好的导热性能、低变形、较高的结构强度、无毒性等优点,同时还具有高强度和

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高反射，需要的镜面厚度小，具有成熟的加工工艺等优点。本文所用主镜尺寸较小，从材料属性、生产工艺和安全等方面进行综合分析，选择 SiC 材料制作望远镜主镜。

表 1　常用反射镜材料性能

Tab. 1　Commonly-used optical material property

Materials	Density ρ/(g/cm^3)	Modulus E/GPa	Thermal coefficient K/(W/m·K)	Expansion coefficient α/(10^{-6}/K)	Poisson's ratio	Ecific stiffne /(GPa·cm^3/g)
Fused silica	2.19	72	1.4	0.5	0.17	2.9
ULE	2.21	67	1.31	0.03	0.17	3.1
Be	1.85	287	0.043	11.4	0.043	16.8
SiC	3.05	392	156	2.5	0.25	13.3
Zerodur	2.53	90.6	1.64	0.05	0.24	3.7

2.3　主镜结构设计

主镜镜面在自重的影响或受到外力时会发生变形，影响成像质量。因此需对主镜进行合理的轻量化，在保证整体刚度前提下，最大限度降低主镜的重量。反射镜的径厚比直接影响到主镜的整体性能，合理的径厚比不仅可以提高镜体的结构稳定性，同时可以最大限度的减轻主镜重量，便于主镜组件整体的结构优化。Roberts 等人通过对反射镜径厚比 dr 与自重下变形之间关系的研究，归结出设计径厚比经验公式[6-7]：

$$\delta=\frac{3\rho g a^4}{16Et^2}=\frac{3\rho g \mathrm{d}r^2}{256E}, \tag{1}$$

其中：δ 为自重下镜面的最大变形量；ρ 为镜体材料密度；E 为镜体材料弹性模量；g 为重力加速度；t 为镜体的厚度。

当主镜的镜面变形量符合设计要求，即$1/10\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm)时，通过式(1)求得此时径厚比为 7.5。考虑到主镜结构的轻量化以及支撑等因素，设计了图 2 所示的主镜结构。通过 UG 有限元和 Matlab 软件对主镜结构进行优化，综合选取厚度值。在相同约束和加载条件下，对不同厚度镜面和不同厚度加强肋的主镜分析。通过对比模态以及镜面的 RMS 值的变化，最终将镜面的中心厚度确定为 7.5 mm，同时将径厚比修改为 7，加强肋的厚度为 4 mm。依据镜面的弧度对镜体中心及边缘进行了不同深度的轻量化，使整体镜面厚度尽可能均匀。主镜与支撑结构的配合面为 1∶50 的锥度面，相比于柱面配合方式提高了接触面的配合精度，同时也便于接触面的精密研磨。

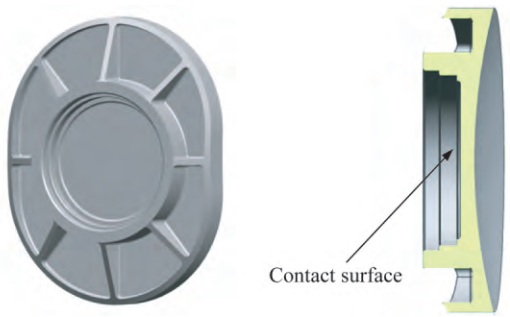


图 2　主镜结构

Fig. 2　Structure of primary mirror

3　主镜支撑结构设计

3.1　支撑材料选择

在主镜受力发生变化时，主镜系统相对于载荷其他系统的相对位置变化必须控制在要求范围内。支撑结构需要足够的刚度保证系统成像的稳定性，并且在变形后要有一定恢复能力，避免发生离轴或离焦[8]。当外界温度发生变化时，由于主镜材料与支撑结构材料的线膨胀系数不同，也会引起主镜面形的变化，因此支撑结构必须选取与主镜线膨胀系数相差较小的材料。所以，选择机械特性和线膨胀系数相差较小的殷钢(4J32)制作主镜支撑结构。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.2 支撑结构和背板设计

在设计支撑结构时，要使用最少的支撑点，从而保证主镜在复杂的工作环境中面形变化最小。常用的支撑方式主要有中心支撑、周边支撑和背部支撑等[9]。本文所用主镜尺寸较小且镜面为抛物面，对定位精度要求高。同时主镜受到望远镜框架结构和空间的限制不适合使用周边支撑，因此选择背部支撑方式。

双脚架挠性结构常被用于反射镜的支撑设计，六条长度可调整的挠性支撑杆构成 3 组双脚架，被固定在反射镜的背面或周围。通过调整双脚架的两条支撑杆的角度，可使瞬时支点出现在反射镜的中性面重心处，避免力矩耦合到反射镜中[10-12]。

应用上述理论通过对双脚架挠性结构进行改造，设计了适合轻型反射镜使用的简易挠性支撑结构，如图 3 所示。采用一体化加工，上部采用圆环结构，在保证较高的刚度和热稳定性的同时，环形的支撑结构最大限度地避免了传递过程中应力的集中，将作用力均匀地分散，避免在主镜上出现应力集中情况。中间过渡处为简易挠性支撑结构，在满足主镜变形要求下，最大限度地简化结构并降低了整体重量。对不同厚度和角度的柔性结构分析，最终确定 3 组柔性结构的厚度为 3 mm，倾角为 67°。考虑到与背板的连接，同时兼顾组件整体力学传递，将支撑结构下部设计成等边三角形。

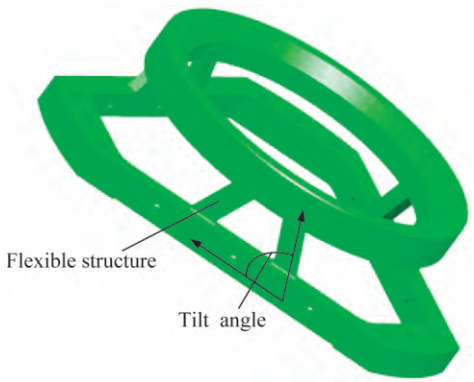


图 3 主镜支撑结构

Fig. 3 Support structure of primary mirror

为了将主镜精确地固定在望远镜上，设计了用于过渡的三角连接背板，如图 4 所示。

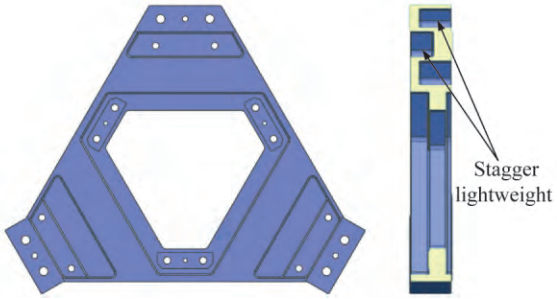


图 4 三角形背板

Fig. 4 Triangle support plate

背板外轮廓为三角形，内部为交叉的三角形安装面。通过三角形交叉安装方式，使得背板传递过来的外力不会直接冲击到主镜支承结构。外力必须传递到内部的三角形顶端后，才能传递给主镜支承结构，有效分散了外力的影响。通过对背板正反两面采用交替轻量化设计，使结构具有一定的挠性并且有效延长了单位长度内力的传递距离，削弱外力对主镜支撑结构的影响，提高了组件整体的稳定性。

3.3 主镜组件装调

首先以主镜配合面为基准，对支撑结构环形进行修配。之后对主镜进行改性试验，改性前后面型稳定，PV 保持在 1.5λ～1.7λ(λ=632.8 nm)，满足要求。

主镜改性完成后，在室温 20°时，使用环氧树脂胶将支撑结构与主镜黏接并进行固化，支撑结构与背板通过螺钉连接，使用销钉进行定位，如图 5 所示。完成后对主镜组件进行振动试验，最后对主镜镜面进行精细抛光。

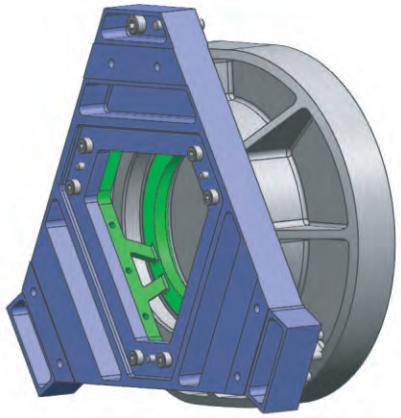


图 5 主镜组件配合示意图

Fig. 5 Sketch of primary mirror subassembly

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　主镜组件仿真分析与试验

4.1　有限元分析

对主镜组件整体进行有限元分析，验证整体的力学性能，如图 6 所示。三角背板与主镜支撑结构通过螺栓连接进行约束，主镜与支撑结构通过面对面黏接进行约束。整体施加 1 g 重量的载荷，温度为 −5°。

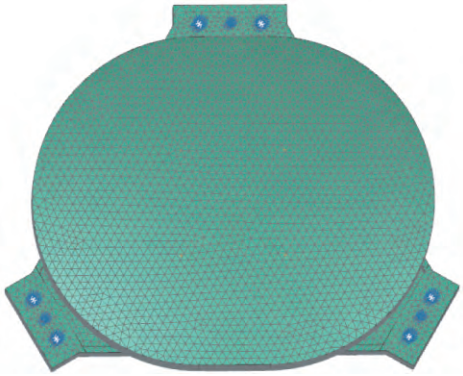


图 6　主镜组件有限元模型

Fig. 6　Finite element model of primary mirror subassembly

通过有限元分析，得到主镜组件的在 X、Y、Z 方向的一阶频率分别为频率 394，405 和 494 Hz，远大于载荷整体要求的 100 Hz，模态分析符合设计要求。

4.2　力学性能试验

为了验证主镜组件的力学性能，在主镜镀膜后，进行精抛之前进行了力学振动试验。主镜通过三角背板固定在振动平台上，主镜侧边黏贴加速度传感器后进行实验。试验分别对 X、Y、Z 方向进行 0.2 g 的振前扫频、0.2 g 的随机震动试验、0.2 g 的振后扫频。通过扫频试验，可以测得 0～2 000 Hz 内的响应频率，响应曲线如图 7～9 所示。

通过扫频试验知道主镜组件振动后，X 向、Y 向、Z 向的一阶频率分别为 445，423 和 444 Hz，与有限元分析结果接近。相对于震动试验前，组件一阶频率变化分别约为 2.3，11.1 和 5.8 Hz。试验前后频率相对变化分别为 0.51%、2.62%、1.30%，均小于 5%，证明主镜组件基频满足要求。

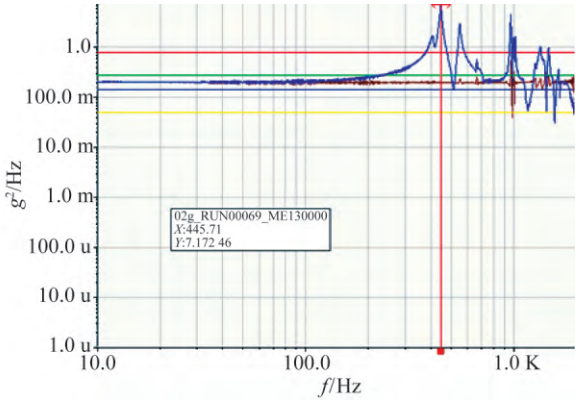


图 7　X 方向响应曲线

Fig. 7　Response curve of X direction

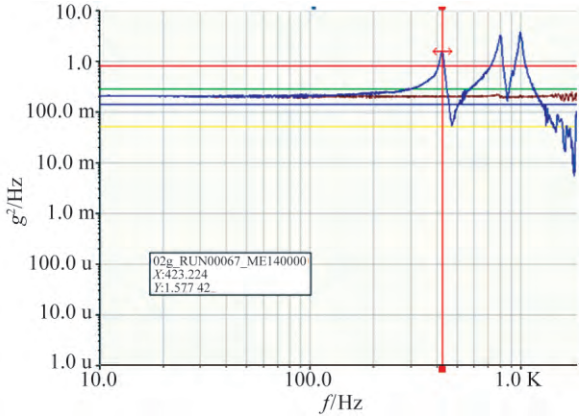


图 8　Y 方向响应曲线

Fig. 8　Response curve of Y direction

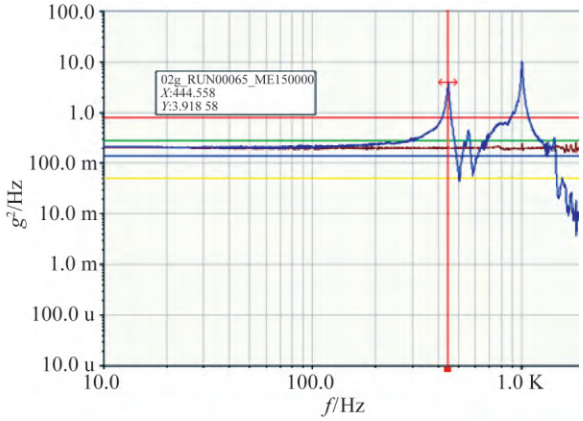


图 9　Z 方向响应曲线

Fig. 9　Response curve of Z direction

5　面形精度检测

使用 ZYGO 干涉仪对试验前与试验后的主镜镜面的 PV 值和 RMS 值进行检测。通过对比试验前后的结果，判定主镜组件对主镜面形的影响。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

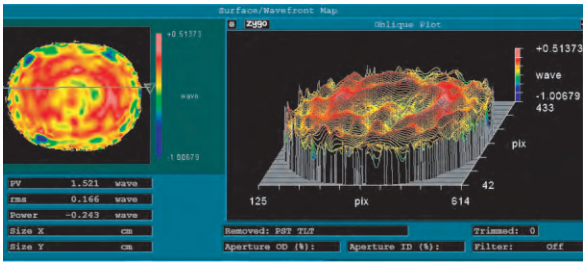


图 10 振动实验前面形检测

Fig. 10 Surface detection before vibrating test

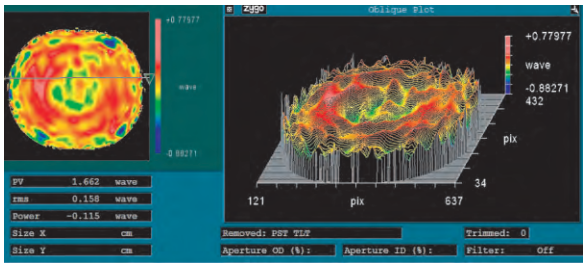


图 11 振动实验后面形检测

Fig. 11 Surface detection after vibrating test

振动试验前主镜的面形检测结果如图 10 所示：PV 为 1.521λ，RMS 为 0.164λ，其中 λ=632.8 nm。振动试验后主镜的面形检测结果如图 11 所示，PV 为 1.662λ，RMS 为 0.153λ，其中 λ=632.8 nm。通过试验前后的对比可知 PV 值变化优于 1/10λ、RMS 变化优于 1/30λ，变化均在要求范围内。

6 结 论

本文以高光谱 CO_2 探测仪反射镜面型精度为基础，结合仪器的空间工作条件和地面实验环境，设计了望远镜系统的主反射镜组件并进行精密的加工与装调。通过主镜组件实际振动试验分析，主镜组件一阶频率 423 Hz 远大于 100 Hz，主镜镜面 RMS 变化优于 1/30λ。试验分析结果证明了主镜组件整体设计合理，满足主镜成像精度要求。由于主反射镜结构较小，因此提到的反射镜组件的设计与装调应用范围有一定的局限性，对于类似的轻型反射镜组件的设计具有一定的借鉴与指导意义。

参考文献：

[1] 郑玉权，高志良. CO_2 探测仪光学系统设计[J]. 中国光学，2012，20(12)：2646-2653.
ZHENG Y Q, GAO ZH L. Optical system design of CO_2 sounder [J]. *Chinese Optics*, 2012, 20 (12): 2646-2653. (in Chinese)

[2] 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.
CHEN H D, CHEN Y H, SHI T T, *et al*.. Lightweight and mounting design for primary mirror in space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1070-1074. (in Chinese)

[3] 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.
GUO J, HE X. Design of support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1642-1647 (in Chinese).

[4] 丁延卫，刘剑，卢锷. 空间环境对光学成像遥感器尺寸稳定性的影响[J]. 光学 精密工程，2002，10(1)：106-109.
DING Y W, LIU J, LU E. Effect of space environment on the dimension stability of optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(1): 106-109. (in Chinese)

[5] 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.
FU L L, HE X, LIAN F H. Design and analysis of minitype reflected mirror supporting structure project [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(4): 532-534. (in Chinese)

[6] 齐光，王书新，李景林. 空间遥感器高体份 SiC/Al 复合材料反射镜组件设计[J]. 中国光学，2015，8(1)：99-106.
QI G, WANG SH X, LI J L, Design of high volume fraction SiC/Al composite mirror in space remote sensor [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 99-106. (in Chinese)

[7] 李志来，徐宏，关英俊. 1.5 m 口径空间相机主镜组件的结构设计[J]. 光学 精密工程，2015，23(6)：1635-1641.
LI ZH L, XU H, GUAN Y J. Structural design of 1.5 m mirror subassembly for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1635-1641. (in Chinese)

[8] 辛宏伟，刘巨，刘磊，等. 小型光学遥感器主镜室的光机结构[J]. 光学 精密工程，2015，23(4)：1027-1033.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

XIN H W, LIU J, LIU L, *et al*.. Support structure of primary mirror for small optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1027-1033. (in Chinese)

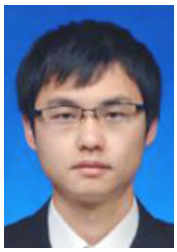
[9] 谭进国，何欣，付亮亮. 小型反射镜中心支撑技术[J]. 红外与激光工程，2010，39(6)：1070-1074.
TAN J G, HE X, FU L L. Support technique in center of minitype reflector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1070-1074. (in Chinese)

[10] 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.
WANG ZH S, ZHAI Y, MEI G, *et al*.. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1833-1841. (in Chinese)

[11] PARK K S, LEE J H, YOUN S K. Lightweight mirror design method using topology optimization [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(5), 053002-6.

[12] 张丽敏，王富国，安其昌，等. Bipod 柔性结构在小型反射镜支撑中的应用[J]. 光学 精密工程，2015，23(2)：438-443.
ZHANG L M, WANG F G, AN Q CH, *et al*.. Application of Bipod to supporting structure of minitype reflector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 438-443. (in Chinese)

作者简介：



韦跃峰(1989－)，男，吉林农安人，硕士，研究实习员，2012 年于长春理工大学获得学士学位，2014 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位，主要从事光谱仪器结构设计及光谱定标方面的研究。E-mail：wyflovezpp@126.com

蔺超(1984－)，男，内蒙古呼伦贝尔人，硕士，助理研究员，2007 年、2009 于吉林大学分别获得学士、硕士学位，主要从事光谱仪器结构设计及光谱定标方面的研究。E-mail：linchao@ciomp.ac.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net