小型反射镜中心支撑技术

北京锦坤科技有限公司 www.jonkon.com.cn

谭进国 1，2，何欣 1，付亮亮 1
(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. 中国科学院研究生院，北京 100039)

摘要： 所述空间遥感器反射镜的工作温度为 18±15℃，要求反射镜在此复杂工况条件下满足设计要求。介绍了反射镜材料和支撑结构材料的选择；对反射镜的支撑方式、轻量化等方面进行了分析讨论；根据反射镜柔性支撑结构的设计原理，采用 CAD/CAE 工程软件进行了分析及优化，通过有限元法优化设计了一种反射镜中心支撑的柔性结构，在此温度变化范围内，反射镜面形误差变化量 PV 值小于 λ /10、RMS 值小于 λ /40(λ=632.8 nm)。最后，通过力学环境实验测试反射镜面形变化量和反射镜组件模拟件的动态特性，证明该结构满足设计要求。

关键词： 中心支撑； 小型反射镜； 柔性结构
中图分类号： TH122 文献标志码： A 文章编号： 1007-2276(2010)06-1070-05

Support technique in centre of minitype reflector

TAN Jin-guo1,2, HE Xin1, FU Liang-liang1
(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China ；
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The working temperature of space remote sensor reflector is 18 ±15 ℃ in this article, and the reflector in the complex working condition needs to meet the design requirements. The choices of the reflector materials and the supporting structure materials were introduced. The supporting way and the lightweight structure of the reflector and so on were discussed. According to the design principles of the flexible supporting structure of the reflector and using CAD/CAE engineering software for analysis and optimization, a kind of reflector flexible structure of centre support was designed by means of finite element method (FEM). Surface deformation less than λ /10 (PV) and λ /40 (RMS) (λ =632.8 nm)in this temperature range. Finally, the changes of reflector surface deformation and the dynamic characteristic of reflector component simulators were tested by the mechanical environment test. The conclusion is proved that the structure of the reflector meets the demand of the optical design.

Key words: Centre Support; Minitype reflector; Flexible structure

0 引言

随着空间遥感事业的发展，空间遥感器的应用越来越广泛，同时也对遥感器的成像质量提出更高的要求。由于反射镜的微小变形都会影响遥感器的成像质量，因此，反射镜的支撑技术成为研制空间光学遥感器的关键技术之一。由于反射镜是成像系统的关键部件，它的精度与稳定性直接影响成像质量，因此，反射镜的支撑技术成为工程应用的关键技术之一。此文研究的反射镜是某型号空间小型遥感器的主镜。其外形尺寸为 184 mm×153 mm×30 mm， 镜面面形精度达到 PV≤λ/10，RMS≤λ/40(λ=632.8 nm)，环境温度为 18 ±15℃。反射镜的支撑要保证反射镜在同一状态下的位置及面形精度的稳定性，同时，要有效减小与其连接的部件因外部环境变化产生的变形对镜面精度的影响。此外，还需要反射镜具有良好的动态性能，可承受发射阶段产生的冲击和振动。

1 组件设计

1.1 材料的选取

空间反射镜材料的选取原则上应满足： 可以抛光，并能镀高反射率膜层；各向同性，尺寸稳定；抗照，符合空间环境下的使用要求；比刚度大、热畸变小；可以制成轻质镜坯结构。常用的反射镜材料性能指标见表 1[1]。

表 1 常用光学材料属性

Tab.1 Optical material attribute in common use

Parameter	SiC	Be	Al	Zerodur	ULE	Fused silica
Density ρ/kg·m^{-3}	3 050	1 840	2 710	2 530	2 200	2 230
Modulus E/GPa	407	303	69	90.6	67	64
Poisson's ratio	0.16	0.12	0.33	0.24	0.17	0.2
Thermal conductivity λ/W·mK^{-1}	180	216	167	1.64	1.3	1.13
Expansion coefficient α/10^{-6}·K^{-1}	2.4	11.5	23.9	0.05	0.03	3.25
Specific heat C_p/J·kg^{-1}·K^{-1}	680	1 925	896	821	778	726
Ecific stiffne E/ρ/10^6 m	13.3	16.8	2.6	3.7	3.1	2.9
Thermal diffusivity D/m^2·sx10^6	84.30	60.98	68.78	0.79	0.76	0.70
Thermal distortion α/λ/10^{-8}m·W^{-1}	1.2	5.3	14.3	3.0	2.3	288
Transient distortion α/D	0.03	0.19	0.35	0.06	0.04	4.66

从表中可以看出， SiC 和 Zerodur 的综合性能高于其他材料。SiC 具有优秀的比刚度、导热率和热畸变指标，但它也存在较明显的劣势，即材料硬度高，导致加工效率低；材料致密性差，要进行表面改性来提高抛光后的表面粗糙度；生产成本高，加工周期长。与 SiC 相比，Zerodur 的比刚度只有 SiC 的 1/4，导热率小，受外界环境因素影响的概率较大，但其自身综合性能较好，采购渠道通畅，加工工艺成熟，面形抛光周期短。综合对比两种材料后，选取 Zerodur 作为反射镜材料。在结构材料的选择上，考虑到与反射镜粘接的支撑结构由于膨胀系数不匹配会对反射镜面形产生影响， 故支撑结构选择与反射镜匹配的超低膨胀合金；其他支撑材料选用比刚度相对较高、膨胀系数较小的钛合金。由于要求本反射镜在环境温度变化范围较大时仍能满足位置及面形精度要求，所以，仅从材料的膨胀系数匹配上设计还远远达不到要求，还需要选择合适的支撑方式以及对支撑结构进行优化设计，以提高反射镜对大范围温度变化环境的适应能力。

1.2 支撑方式的选择

常用的反射镜支撑方式有周边支撑、侧面支撑、背部支撑及中心支撑等。根据反射镜的结构特点及空间尺寸的限制，选用中心支撑方式。所谓中心支撑，是以光学反射镜的中心孔为定位基准的一种支撑方式。这种支撑方式主要采用胶接的方式在中心孔处放置与光学反射镜线膨胀系数相匹配的柔性支撑结构。共有两种约束形式：一种是反射镜中心完全约束；另一种是反射镜由中心殷钢筒支撑，中心筒的背部由钛合金板支撑。文中的反射镜采用中心支撑的第二种形式，与反射镜粘接的支撑环材料采用与 Zerodur 线膨胀系数比较接近的超低膨胀合金，粘接剂选择强度高、凝固应力小的光学环氧树脂胶，支撑环的背部用钛合金三角板支撑。其中，将支撑环设置为应力释放的柔性环节，用来减小组件装配和环境温度变化产生的应力对镜面面形的影响。初步确定反射镜组件如图 1 所示，各个零件需要进一步详细设计。

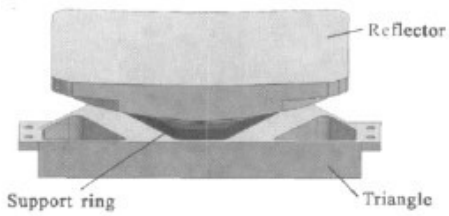

图 1 反射镜组件示意图

Fig.1 Sketch map of reflector components

1.3 组件的设计

1.3.1 反射镜的设计

反射镜是光学系统成像的重要元件，它要有足够的刚度保证自身稳定性，同时，质量要尽量轻，因此，要对反射镜进行轻量化设计。镜厚比与自重变形的经验公式为：

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

式中：δ 为最大自重变形，m；ρ 为材料密度，kg/m3；a 为圆盘半径=D/2，m；t 为圆盘厚度，m；E 为材料弹性模量，Pa。反射镜的自重变形与材料比刚度(E/ρ)的一次方成反比，与径厚比及口径的平方成正比。以反射镜的对角线为直径，以面形精度为目标进行计算，得到反射镜镜厚比为 7.5。反射镜的轻量化设计综合考虑镜坯的支撑结构形式、轻量化及镜面加工工艺等因素，通过工程分析对镜面厚度、筋的宽度进行优化设计，得到如图 2 所示的轻量化后的反射镜，图中的中心盲孔为与支撑结构粘接的孔。反射镜的轻量化率为 50%。

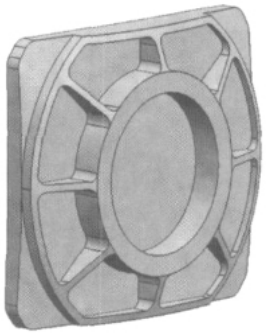

图 2 反射镜示意图

Fig.2 Sketch map of reflector

1.3.2 支撑环的设计[2-7]

支撑环的设计是反射镜组件设计中的难点。它作为反射镜与三角板的连接环节， 首先要提供足够的刚度，减小反射镜在加工和检测两种状态下由重力产生的变化，同时要保证反射镜的相对位置精度；其次，支撑环要有足够的柔性，在环境温度±15 ℃范围内，低体分硅铝合金框架因温度变化产生的变形要通过三角板及支撑环得到有效释放，保证反射镜的位置精度和面形精度在允差范围内；在满足以上两点的同时，反射镜组件要有良好的动态特性， 在经过发射阶段产生冲击和振动后，仍能满足光学系统对反射镜成像质量的要求。基于上述要求，将支撑环分为三部分设计：上部设计成圆环状，与反射镜背部中心孔粘接，提供给反射镜足够的刚度，减小因轻量化引起自身刚度下降的影响；下部与三角板连接，采用圆形或三角形结构，通过计算分析确定；中部为柔性铰链结构，有效减小组件对外连接产生的应力以及框架、三角板等其他零件因温度变化产生的变形对镜面面形的影响。柔性铰链结构具有体积小、无机械摩擦、无空回及运

动灵敏度高等优点，其几何尺寸如图 3 所示。图中，b 为柔性铰链宽度、t 为最小厚度、R 为切割圆半径、h 为高度、θm 为圆心角。图 3

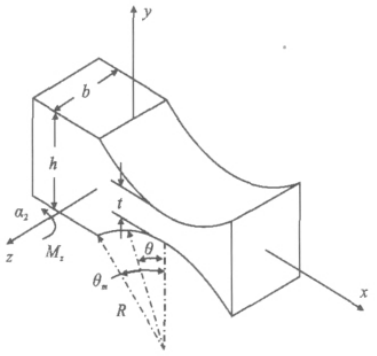

图 3 柔性铰链结构参数

Fig.3 Structure parameter of the flexible link

柔性铰链的转角可近似认为由多段弯曲变形累积而成。先求出在弯曲时微小段的曲率，再根据公式 y=f(x)上任意一点的曲率表达式，考虑转角小的因素，得出公式为：

$$\frac{M(x)}{EJ(x)}=\frac{d^2y}{dx^2}$$

式中：M(x)为微元所受的力矩；E 为铰链材料的弹性 1072 第 6 期模量；J(x)为微元的惯性矩。当转角很小时，$\theta \approx \tan\theta = \frac{dy}{dx}$，将直角坐标转化为极坐标， 用积分方法可以求出柔性铰链的转角 θ ，最后得出，在弯矩 M 作用下的转角刚度为：

$$K=\frac{M}{\theta}\frac{1}{\int_0^{\pi}\frac{12R\sin\alpha}{Eb(2R+t-2R\sin\alpha)^3}d\alpha}$$

式中：b 为铰链厚度；R 为柔性铰链的圆弧半径；t 为柔性铰链最薄处厚度。通过上述理论公式，用计算机仿真的方法调整工作截面，改变弹性和刚度，以满足设计要求。按常规设计思路，支撑环的下部通常设计成圆环结构，如图 4(a)所示，但是文中的反射镜组件要求适应大范围温度变化， 计算分析时不能满足设计要求，所以将下部设计成近似三角形环结构，如图 4(b)所示[8]。这两种方案中，支撑环中部均为相对轴线均布的三组柔性片结构。

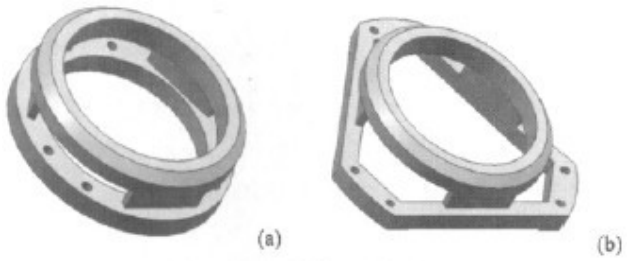

图 4 支撑环结构示意图

Fig.4 Sketch map of support ring structure

为对比两种方案的差异，选择对反射镜面形影响最大的工况进行分析，即静力学加 15 ℃温升，镜面面形的 PV 及 RMS 值的分析结果如表 2 所示。此时，三组柔性片的宽度取 30 mm，在径向上的厚度取 3 mm，高度取 10 mm。对比分析结果可以看出：在环境温度变化较大时， 三角形环结构对反射镜面形影响较小；第二种支撑方案的计算结果在允差范围内。所以反射支撑环采用第二种方案。表 2 反射镜重力加 15 °C 温升条件下的镜面面形精度

Tab.2 Reflector's surface figure precision caused by the gravity and 15 ℃ temperature changed

Conditions	Scheme 1		Scheme 2	
	PV/nm	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm
G_x+15°C	116	21.9	58.4	10.2
G_y+15°C	125	24.8	54.2	10.6
G_z+15°C	104	20.8	40.7	8.9

由于对支撑环的柔性化设计，必定损失反射镜组件的动态刚度， 为了预示反射镜组件的动态性能，对其进行动力学约束模态分析，分析结果如表 3 所示。

表 3 反射镜组件约束模态

Tab.3 Restricting mode of reflector components

Degree	Frequency/Hz
1	410
2	440
3	542

2 实验验证

为了检验支撑环的刚度及测试反射镜组件的动力学性能， 将反射镜制作实验件进行力学环境实验。反射镜采用硬铝(2A12)材料代替 Zerodur， 只用于模拟质量特性； 支撑环的材料是超低膨胀合金(4J32)；三角板的材料是钛合金(TC4)，其结构、尺寸、精度及装调工艺与正式件完全相同。力学环境实验需要进行 X、Y、Z 3 个方向的振动测试。依次在每一个方向进行 0.2 g 的力学特性扫描，测定 0～2 000 Hz 内的响应频率；然后进行正弦振动和随机振动实验；再进行 0.2 g 的力学特性回扫，对比两次 0.2 g 力学特性扫描数据。经振动测试，反射镜的一阶谐振频率为 394 Hz，正弦振动在 0～100 Hz 内无谐振响应，实验结果与设计分析结果基本符合，对比每个方向的两次 0.2 g 特征扫描数据，发现反射镜组件的动态响应未发生变化。为测试力学实验对反射镜面形的影响以及检验组件的抗振性能， 在反射镜镜面完成近似抛光后，将组件安装到框架上进行整机的验收级振动实验，实验前后分别对反射镜的面形进行检测。反射镜面形的 RMS 值由实验前的 0.238 λ 变为 0.242 λ ， 变化在 1.6%之内，可以判定：反射镜组件具有足够的抗振性能。

3 结论

根据设计输入条件，综合考虑反射镜面形精度的影响因素，选择合理的支撑方式，确定反射镜及支撑结构的材料。通过对支撑结构的设计，在满足支撑刚度的前提下，减小由于环境温度变化、其他零件产生的变形对反射镜面形的影响。通过工程分析软件优化柔性环节设计，并计算出反射镜在各工况条件下的数

值。通过试验件确定组件的力学性能；并在正式件近似球面抛光完成后进行力学实验，对比实验前后的反射镜面形，最终判定该支撑结构能有效减小反射镜因外界环境及自身重力引起的面形变化。

参考文献：

[1] FU Liang-liang，HE Xin， LIAN Feng-hui. Design and analysis of minitype reflector mirror supporting structure project [J].Optical Technique (付亮亮， 何欣，廉凤慧．小型反射镜支撑方案设计与分析． 光学技术), 2008, 30(4): 532-534.

[2] WANG Fu-guo, YANG Hong-bo, YANG Fei, et al. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors [J]. Infrared and Laser Engineering (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．红外与激光工程), 2007, 36(6): 877-880.

[3] XU Hong， WANG Xiang -jun. Applications of multispectral/ hyperspectral imaging technologies in military [J]. Infrared and Laser Engineering(许洪，王向军．多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用．红外与激光工程), 2007, 36(1): 13-17.

[4] CHEN Xiao -juan. Design and stability study of the reflector mirror support for the large larse facility [J]. Optics and Precision Engineering (陈晓娟．大口径反射镜支承设计．光学精密工程), 2008, 16(2): 179-183.

[5] YAN Yong, JIA Ji -qiang, JIN Guang. Design of new type spaceborne lightweighted primary mirror support [J]. Optics and Precision Engineering(闫勇，贾继强，金光．新型轻质大口径空间反射镜支撑设计．光学精密工程), 2008, 16(8): 1533-1539.

[6] GUO Jiang, HE Xin. Design on support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. Optics and Precision Engineering (郭疆， 何欣．大口径空间遥感相机主反射镜支 撑设计．光学精密工程)，2008, 16(9): 1642-1647.

[7] 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 (王忠素， 翟岩， 梅贵.遥感器反射镜柔性支撑的设计．光学精密工程)，2010, 18

(8): 1833-1841.

[8] YODER Jr P R. Opto -Mechanical System Design [M]. 3rded. US: SPIE Press, 2006: 557-561

将拓扑优化软件与 NASTRAN 的结构分析功能相结合，对空间光学遥感器结构进行拓扑优化，并将拓扑优化的结果用软件 MSC．PATRAN 显示， 结果直观，容易掌握。

参考文献：

[1] WU Qing-wen． Light-weight technology and its application of primary mirror in space camera [J]. Optics and Precision Engineering(吴清文． 空间相机中主镜的轻量化技术及其应用． 光学精密程),1997，5(6)： 69-80．

[2] WU Qing -wen，YANG Hong -bo，YANG Jin -song，et al． Design and analysis for primary mirror and its support of space camera[J]． Optical Technique (吴清文， 杨洪波， 杨近松， 等．空间相机中主镜及其支撑方案设计与分析方法．光学技术)， 2004，30(2)： 152-156．

[3] GUAN Ying -jun， XIN Hong -wei， ZHAO Gui -jun， et al．Topologic optimization design for main supporting structure ofspace camera [J]． Optics and Precision Engineering (关英俊， 辛宏伟， 赵贵军， 等． 空间相机主支撑结构拓扑优化设计．光学精密工程)，2007，l5(8)： 1157-1163．

[4] WANG Wei, YANG Wei, CHANG Nan, et al. Based on MSC. PATRAN/NASTRAN variable density method Topology optimization system[J]. Mechanical Design(王伟，杨伟，常楠，等．基于 MSC．PATRAN

／ NASTRAN 的变密度法拓扑优化系统. 机械设计), 2008,5: 5-8.
[5] SUI Yun-kang, DU Jia-zheng, PENG Xi-rong. MSC. NastranFinite Element Dynamic Analysis and Optimal Design andPractical Tutorial [M]. Beijing: Science Press (隋允康，杜家政，彭荣．MSC．Nastran 有限元动力分析与优化设计实用教程. 北京：科学出版社), 2004.
[6] CHANG Jun，WENG Zhi -cheng． Design of optical system in wide cover，abaxial space camera [J]． Optics and Precision Engineering(常军，翁志成.宽覆盖离轴空间相机光学系统的 设计. 光学精密工程)，2003，11(1)： 55-57.
[7] ZHANG Xue-jun, LI Zhi-lai, ZHANG Zhong-yu. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material [J].Infrared and Laser Engineering(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. 红外与激光工程), 2007, 36(5)： 577-582.
[8] YAN Yong, JIN Guang, YANG Hong-bo. Lightweight structural design of space mirror [J]. Infrared and Laser Engineering
(闫勇， 金光， 杨洪波. 空间反射镜结构轻量化设计. 红外与激光工程)， 2008， 37(1)： 97-101.

北京锦坤科技有限公司 www.jonkon.com.cn