

小型反射镜周边支撑技术

谭进国^{1,2}, 何欣¹, 刘强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: 从满足空间光学遥感器反射镜在复杂的工况下综合面形误差要求的角度出发, 介绍了小型凸非球面反射镜材料及支撑方式的选择; 根据反射镜的定位原理进行反射镜支撑结构的设计; 采用 CAD/CAE 工程分析软件从支撑结构的材料及支撑方式进行分析和优化, 设计一种有效的反射镜周边支撑结构, 使反射镜面形误差变化量 PV 值小于 $\lambda/10$, RMS 值小于 $\lambda/50$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。最后, 测试反射镜在力学环境试验前后的面形变化, 证明该结构满足设计要求。

关键词: 小型反射镜; 周边支撑; 柔性结构

中图分类号: TH122 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.016

Circumjacent support technique of minitype reflector

TAN Jin-guo^{1,2}, HE Xin¹, LIU Qiang¹

(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: In order to meet the requirements of the integrated precision of the reflector used for space remote sensor, the choices of the minitype reflector which has a convex aspherical surface and the supporting way are introduced. According to the positioning principle of the reflector, a kind of supporting structure is designed. CAD/CAE engineering software is used to analyze and optimize the supporting structure's materials and the supporting way. At last, a kind of effective circumjacent support structure is designed. The surface deformation is less than $\lambda/10$ (PV) and $\lambda/50$ (RMS) ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$). Finally, the change of reflector surface deformation is tested by the mechanical environment test. It is proved that the structure of the reflector meets the demand of the optical designer.

Key words: minitype reflector; circumjacent support; flexible structure

1 引言

随着空间遥感事业和航天工业的发展, 空间遥感器的应用领域逐渐在拓展, 同时对空间遥感器的分辨率提出更高的要求。由于反射镜的面形和位置精度直接影响光学系统的成像质量, 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。

本文研究的反射镜是某型号空间遥感器的次镜。该遥感器采用离轴三反光学系统, 次镜是组成光学系统的第二块反射镜, 它的面形精度、位置精度和稳定性直接影响系统的成像质量, 因此该反射镜的支撑方式是本文的主要研究内容。文中论述的反

射镜有效通光口径为 $166 \text{ mm} \times 95 \text{ mm}$, 镜面面形精度达到 $PV \leq \lambda/10$, $RMS \leq \lambda/50$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 环境温度 $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

反射镜的支撑在保证反射镜在加工、系统装调等不同重力状态下的位置及面形精度的稳定性的同时, 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产生的影响。同时为了承受发射阶段产生的冲击和振动, 需要反射镜具有良好的

作者简介: 谭进国(1978-), 男, 硕士研究生, 主要从事空间光学遥感器结构设计。E-mail: tanjinguo@126.com
收稿日期: 2011-03-28; 修订日期: 2011-04-24

动态性能。

2 反射镜组件设计

2.1 反射镜材料的选取

空间反射镜材料的选用原则上应满足:可以抛光并能镀高反射率膜层;各向同性,尺寸稳定;抗辐照符合空间环境下的使用要求;比刚度大、热畸变小。常用的反射镜材料性能指标如表1所示^[1]。

表1 常用光学材料属性

Tab.1 optical material attribute in common use

参数	SiC	Be	Al	Zerodur	ULE	熔石英
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3050	1840	2710	2530	2200	2230
弹性模量 E / GPa	407	303	69	90.6	67	64
泊松比	0.16	0.12	0.33	0.24	0.17	0.2
导热率 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	180	216	167	1.64	1.3	1.13
线胀系数 $\alpha / (10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	2.4	11.5	23.9	0.05	0.03	3.25
比热 $C_p / (\text{J}/\text{kg}/\text{K})$	680	1925	896	821	778	726
比刚度 $E/\rho / (10^6 \text{ m})$	13.3	16.8	2.6	3.7	3.1	2.9
热扩散率 $D / (\text{m}^2 / \text{s} \times 10^{-6})$	84.30	60.98	68.78	0.79	0.76	0.70
热畸变 $\alpha/\lambda / (10^{-8} \text{ m}/\text{W})$	1.2	5.3	14.3	3.0	2.3	288
瞬态畸变 α/D	0.03	0.19	0.35	0.06	0.04	4.66

从表1中的材料特性可以看出, 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。与SiC相比, Zerodur的比刚度只有SiC的1/4, 导热率小, 但Zerodur自身综合性能较好, 加工工艺成熟, 面形抛光周期短。

由于该反射镜为凸球面反射镜, 光学加工时采用 Offer 零位补偿器从反射镜背部透射进行面形检测, 材料自身的缺陷和不均匀性都会导致折射率变化, 影响最终检测结果。能满足上述要求的材料只有熔石英玻璃。反射镜选用的是德国 SCHOTT 公司生产的熔石英玻璃, 等级 Lithosil[™] Q1, 光学均匀性 2 ppm, 膨胀系数 $\alpha(25 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}) = 0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

2.2 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方式。根据反射镜外形特点及采用背部透射检测要求, 选用周边支撑方式。所谓周边支撑, 以光学反射镜的底面及某一长边的侧面为定位基准面的一种支撑方式。

2.3 反射镜的定位

反射镜的径厚比决定了反射镜的动静态刚度。根据 Roberts 等人研究了其径厚比 (D/t) 与自重变形的关系, 并给出了圆形反射镜的经验公式:

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

其中 δ 为最大自重变形 (m); ρ 为材料密度 (kg/m^3); g 为重力加速度; a 为圆盘半径 $= D/2$ (m); E 为材料弹性模量 (Pa); t 为圆盘厚度 (m)。

从公式可以看出, 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。本文所讨论的反射镜镜面尺寸为 $177 \text{ mm} \times 116 \text{ mm}$, 并不完全符合以上经验公式的要求, 我们以反射镜的对角线为直径, 以面形精度的 $PV \leq 1/10\lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 为目标进行计算, 可得反射镜厚度为 40 mm。

反射镜由于光学加工要求采用透射检验, 其本身不能做轻量化结构, 且镜体尺寸较小, 采用光学件常用的 6 点定位装卡固定方式, 即通过整体镜框约束反射镜的 6 个自由度。定位原理如图 1 所示^[2]。

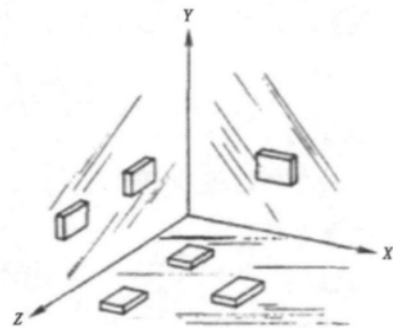


图1 反射镜的定位原理图

Fig.1 positioning principle of reflector

2.4 反射镜及支撑结构设计^[3-7]

为满足光学加工检测要求和定位要求, 反射镜设计成如图 2 所示的形式。其中反射镜的 3 个圆弧形底面和 2 个侧壁为定位面。

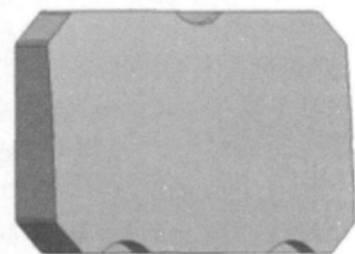


图2 反射镜示意图

Fig.2 sketch map of reflector

根据反射镜的外形特点, 反射镜的镜框设计成整体式镜框。依据图 1 所示的定位原理, 在镜框的内腔形成 6 个定位面, 其中有 3 个定位面定位反射镜背部, 有 2 个定位面定位反射镜侧壁长端面, 剩余 1 个定位面定位反射镜侧壁短端面。各定位面要有很高的面形精度并严格控制形位公差, 反射镜装入镜框中时, 反射镜的各端面要与定位面完全接触, 在

定位反射镜侧壁的定位面对应的另一侧,用弹性压片限制反射镜移动;定位反射镜背部的定位面对应的另一侧,用压片压紧反射镜,并通过修研压片与镜框间的调整垫控制压片的压紧程度。

整体式镜框采用比刚度较高、工艺性好的钛合金材料,通过机械加工成型而成,没有连接过度环节,结构一体性强,可靠性高。镜框如图3所示。

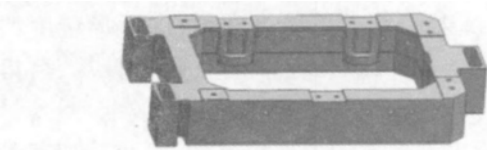


图3 镜框示意图(方案1)

Fig.3 sketch map of reflector frame(scheme 1)

为检验此种设计方案是否满足设计要求,通过PATRAN建模,NASTRAN求解的方法对镜面面形的PV及RMS值进行工程分析,选择工况为对反射镜面形影响最大的工况,即静力学加5℃温升,分析结果如表2所示。

表2 反射镜重力加5℃温升条件下的
镜面面形精度(方案1)

Tab.2 mirror's surface figure precision caused by the gravity and 5℃ temperature changed(scheme 1)

重力方向	X向	Y向	Z向	允差
PV/nm	18.50	64.30	32.90	63.30
RMS/nm	3.90	13.60	6.80	12.66

从表2中的分析数据可以看出,此种设计方案Y向重力下的镜面面形超出允差。因此要对镜框的材料和结构进一步优化设计。

在镜框的材料选择上,要尽量接近反射镜的膨胀系数,减少膨胀系数的差异将直接造成面形精度下降等因素,因此选择了可调膨胀系数的4J32。订购时针对熔石英的膨胀系数进行匹配,其膨胀系数经实测为 $\alpha_{(10-30\text{℃})} = 0.39 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 。

在镜框结构上,按功能上设计成三层结构,三层之间功能明确,但仍为整体结构件,具体设计为^[2]:上层为安装反射镜的腔体,实现反射镜的装卡定位功能,约束反射镜的6个自由度,具有可靠的定位精度;下层为矩形框结构,设有与外部其他设备连接的机械接口;上层通过3个具有适当柔性支撑板与下层结构相连接,可以在结构设计上消减由于与机身组件装配产生的装配应变和材料膨胀系数差异而产生的温度应变,同时可以起到缓冲减振的作用。其中反射镜的定位、装卡和紧固方式与方案1一致。该方案设计的镜框如图1所示,相同工况条件下的

镜面面形的PV及RMS的分析数值满足设计要求,具体的分析结果如表3所示^[8]。

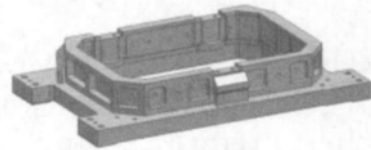


图4 镜框示意图(方案2)

Fig.4 sketch map of reflector frame(scheme 2)

表3 反射镜重力加5℃温升条件下的
镜面面形精度(方案2)

Tab.3 mirror's surface figure precision caused by the gravity and 5℃ temperature changed(scheme 2)

重力方向		X向	Y向	Z向	允差
镜面刚体位移/mm	Δx	0	0.22	0	20
	Δy	0.30	0.14	0.32	20
	Δz	0.76	0.68	2.31	40
镜面倾角/(")	θ_x	1.80	1.07	4.89	10
	θ_y	0.04	0.23	0.05	10
	θ_z	1.20	0.29	0.39	10
PV/nm		3.90	19.50	21.50	63.30
RMS/nm		0.70	4.60	4.50	12.66

表3中的分析数据满足指标要求,该方案设计可初步定为反射镜的支撑结构。为进一步验证,还需要对其进行动力学频率特性、响应特性分析,同时也可以预示反射镜组件的动态性能。反射镜组件前三阶的分析结果如图5和表4所示。

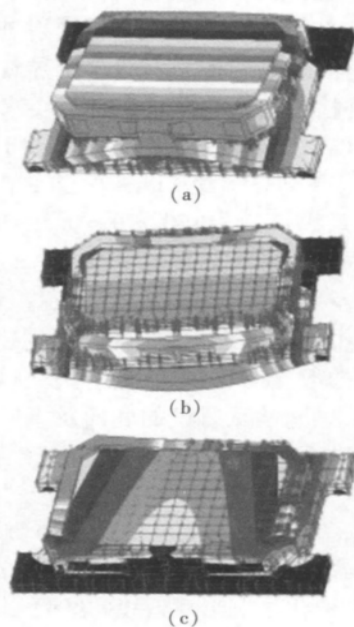


图5 反射镜组件的约束模态分析图

Fig.5 constrained modal analysis diagram of reflector components

表4 反射镜组件约束模态

Tab.4 restricting mode of reflector components

阶数	自然频率	振形描述
1	352	镜框单点支撑边沿竖直方向抖动
2	672	镜框双点支撑边沿竖直方向抖动
3	705	镜框两边对边相对扭动

从表4中的动力学模态分析结果可以得出:相对光学系统及卫星的固有频率,反射镜组件动态刚度较高,具有足够的抵抗低频振动的能力。通过反射镜组件的动力学模态分析后,确定反射镜选择方案2的支撑结构。

3 试验验证

为测试反射镜组件的动力学性能和检验反射镜镜框支撑方式的有效性,在反射镜抛光、镀膜并完成反射镜组件装配后,设计力学环境试验进行验证。试验前用干涉仪检测反射镜面形,用于试验后的数据对比。

力学环境试验需要进行 X 、 Y 、 Z 三个方向的振动测试。在一个方向进行 0.2 g 的力学特性扫描,测定 $0\sim 2000\text{ Hz}$ 内的响应频率;然后进行随机振动试验;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。然后进行其余两个方向的试验。

经振动测试,反射镜的一阶谐振频率为 393 Hz ,在 $0\sim 100\text{ Hz}$ 内正弦振动无谐振响应,对比每个方向的两次 0.2 g 特征扫描数据,反射镜组件的动态响应未发生变化。

力学试验完成后,对反射镜面形进行检测,反射镜面形的RMS值为 $0.02\lambda(1/50\lambda)$,与力学试验前反射镜面形检测结果一致,反射镜面形未发生变化,可以判定反射镜组件具有足够的抗振性能。

4 结论

根据反射镜的外形特点和光学加工检测要求,采用熔石英玻璃作为反射镜材料,反射镜选择周边支撑方式。以反射镜面形为设计输入条件,综合考虑反射镜面形精度的影响因素,通过工程分析软件进行分析优化,设计出满足分析要求的反射镜支撑结构。在反射镜抛光、镀膜并完成反射镜组件装配后,进行力学环境试验,确定组件的力学性能;对比试验前后反射镜面形,面形测试数值未发生变化,可以判定该反射镜支撑结构满足设计要求。

参考文献:

- [1] Fu Lianglaing, He Xin, Lian Fenghui. Design and analysis of minitype reflector mirror supporting structure project [J]. Optical Technique, 2008, 30(4): 532 - 534. (in Chinese)
付亮亮,何欣,廉凤慧.小型反射镜支撑方案设计与分析[J].光学技术,2008,30(4):532-534.
- [2] Yoder P R. Opto-Mechanical System Design [M]. 3rd ed., SPIE PRESS 2006: 373 - 375, 428 - 433.
- [3] Chen Xiaojuan. Design and stability study of the reflector mirror support for the large larse facility [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(2): 179 - 183. (in Chinese)
陈晓娟.大口径反射镜支承设计[J].光学精密工程,2008,16(2):179-183.
- [4] Yan Yong, Jia Jiqiang, Jin Guang. Design of new type spaceborne lightweighted primary mirror support [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(8): 1533 - 1539. (in Chinese)
闫勇,贾继强,金光.新型轻质大口径空间反射镜支撑设计[J].光学精密工程,2008,16(8):1533-1539.
- [5] Guo Jiang, He xin. Design on support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1642 - 1647. (in Chinese)
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.
- [6] Cui Yongpeng, He Xin, Zhang Kai. Characteristic analysis of reflector's material used by space camera [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(4): 418 - 421. (in Chinese)
崔永鹏,何欣,张凯.某空间用主反射镜的设计[J].激光与红外,2010,40(4):418-421.
- [7] Guan Yingjun, Xin Hongwei. Lightweight and support design for rectangular space mirror [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(11): 1245 - 1249. (in Chinese)
关英俊,辛宏伟.长条形空间反射镜轻量化及其支撑结构设计[J].激光与红外,2010,40(11):1245-1249.
- [8] Wang Zhongsu, 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. (in Chinese)
王忠素,翟岩,梅贵,等.空间光学传感器反射镜柔性支撑的设计[J].光学精密工程,2010,18(8):1833-1841.

更正

本刊2011年第8期P894页文章的作者单位所在地为重庆。
特此更正。