

文章编号: 1672-8785(2015)12-0027-05

空间遥感器长条形平面镜的 背部支撑技术

谭进国

(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: 某空间遥感器的大长宽比长条形平面镜的要求是在尽量减小重量的前提下, 在工作温度为 $20\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 反射镜的面形误差变化量 (Root Mean Square, RMS) 值小于 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。介绍了反射镜材料和支撑结构材料的选择; 对反射镜的轻量化及支撑方式进行了分析。根据反射镜的外形特点, 增加了镜背的局部宽度, 并将其设计成了背部三点支撑形式。通过有限元分析, 优化并确定了反射镜及其柔性支撑结构。反射镜位移及面形的分析结果满足设计指标要求。最后, 通过力学环境试验测试了反射镜组件模拟件的力学特性, 证明该结构能满足设计要求。

关键词: 长条形平面镜; 背部支撑; 柔性支撑结构; 有限元分析

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.12.005

Backside Support Technique of Rectangular Plane Mirror for Space Remote Sensor

TAN Jin-guo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The requirement of the large aspect-ratio rectangular plane mirror for a certain space remote sensor is that its weight should be reduced as much as possible and its surface deformation error (RMS) should be less than $\lambda/50$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) at the operation temperature of $20\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. The material selection of the mirror and its supporting structure is presented. The weight reduction and supporting modes of the mirror are analyzed. According to the shape features of the mirror, the local width of the back of the mirror is increased and the backside of the mirror is designed to have three supporting points. Through finite element analysis, the mirror and its flexible supporting structure are optimized and determined. The analysis results show that the displacement and surface deformation of the mirror meet the design requirements. Finally, the dynamic characteristics of a simulated mirror assembly is tested in a mechanical environment experiment. It is shown that the structure of the mirror meets the design requirements.

Key words: rectangular plane mirror; backside support; flexible supporting structure; finite element analysis

收稿日期: 2015-11-03

作者简介: 谭进国 (1978-), 男, 黑龙江鹤岗人, 硕士, 主要从事空间光学遥感器的结构设计研究。

E-mail: tanjinguo@126.com

0 引言

离轴三反消像散非球面 (Three Mirror Anastigmat, TMA) 光学系统在空间遥感器中得到了广泛的应用,它具有组件少、无遮拦、焦距长、视场大、波段宽、抑制杂光能力强和调制传递函数高等优点^[1]。本文论述的长条形平面镜是离轴三反消像散非球面光学系统的调焦镜,它要在满足力学环境及空间热环境考验的前提下,保证平面镜的成像质量,同时要求组件的重量尽量轻,以减缓整机重量控制的压力。保证平面镜的面形精度和减轻组件的重量是这个反射镜组件设计的难点。

本文讨论的平面镜的通光口径为 656 mm×110 mm,要求镜面的面形精度达到 $RMS \leq \lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm),环境温度为 20 ± 5 °C。为了满足上述要求,对反射镜及其支撑结构进行了设计。

1 反射镜的设计

1.1 反射镜材料的选取

反射镜材料主要需满足高比刚度和高热稳定性的要求,以确保其受力及受热后结构及镜面面形的稳定性。比刚度 (E/ρ) 和导温系数 (λ/α) 两个物理量的数值越大,材料的性能就越好^[1]。

SiC 具有较高的弹性模量、高比刚度和良好的尺寸稳定性;同时以 SiC 作为反射镜基体的光学加工及镀膜等工艺非常成熟。因此,选择 SiC 为镜坯材料。

1.2 平面镜的设计

平面镜的设计包括轻量化的设计和支撑点的设计。轻量化的目的是减少反射镜因自重引起的变形,降低反射镜在厚度方向上的热阻。反射镜轻量化设计的内容包括轻量化形式、径厚比和镜面厚度。

SiC 反射镜常用的轻量化孔结构有三角形孔、四边形孔和六边形孔。根据文献 [2] 的分析,在轻量化孔内接圆直径相同的情况下,三角形孔的结构刚度最好,频率最高;并且三角形孔的网格效应低于四边形孔和六边形孔^[2]。因此,选用开放式三角形孔的轻量化结构。

根据平面镜的有效通光孔径,考虑到光学加工余量,平面镜镜面的尺寸设计为 676 mm×130 mm。然后通过径厚比的设计确定平面镜的厚度。径厚比与材料的比刚度、支撑方式、轻量化形式等有关。根据反射镜的结构特点,用矩形反射镜的径厚比与自重变形的经验公式进行模拟计算。

$$\delta = \frac{0.1422wb^4}{Et^3(1+2.21\alpha^3)} \quad (1)$$

式中, δ 为最大自重变形,单位为 m; w 为反射镜的重量,单位为 N; E 为材料的弹性模量,单位为 pa; t 为反射镜的厚度,单位为 m; a 为反射镜的长度,单位为 m; b 为反射镜的宽度,单位为 m; 其中, $\alpha = b/a$ 。然后,根据支撑点的数量及位置通过有限元分析方法计算优化镜体的厚度。

由于平面镜的长宽比较大,达到 5.2:1,用中心单点支撑无法满足要求。若选择 4 个支撑点,在宽度方向一侧的两个支撑点需通过连接环节变成一个连接点,与另外两点构成 3 点支撑。由于平面镜的宽度为 130 mm,宽度方向上两个支撑点的距离只有 66 mm,无法排布连接零件,需增加平面镜的局部宽度。另外,反射镜组的重量较重,因此,4 个支撑点不适合本文论述的平面镜的支撑。若采用 3 个支撑点,宽度方向上支撑点的距离不变。虽然有限元分析结果仍不满足指标要求,但增加单点处的局部宽度,增加宽度方向上支撑点的距离,即可满足要求。

根据上述方案进行平面镜设计,再利用有限元方法的多次迭代优化,最终确定平面镜的尺寸为 676 mm×160 mm,整体厚度为 68 mm,镜面的厚度为 5 mm,加强筋的厚度为 4 mm,轻量化后平面镜重 6.1 kg;支撑点长度方向上的距离为 300 mm,宽度方向上的距离为 95.5 mm。平面镜的结构如图 1 所示。



图 1 反射镜的轻量化结构

2 平面镜的支撑结构设计

反射镜的支撑结构在满足支撑刚度的前提下要尽量减少重量。其次, 反射镜的支撑结构要保证反射镜在空间环境下具有良好的热尺寸稳定性。支撑结构的设计原则是尽量减小支撑结构本身和外部环境变化对反射镜的面形精度及位置精度的影响。

2.1 支撑结构材料的选择

支撑结构的设计首先要考虑材料的匹配性。与反射镜粘接的柔性结构件应选择可调整线胀系数的钢 (4J36), 并将其线胀系数调整成与 SiC 的线胀系数相近, 以减小外界温度变化时不同材料间的热特性差异对反射镜面形的影响。为进一步减少反射镜组件的重量, 经分析, 仍采用钢作为与反射镜粘接的零件, 采用密度相对较小的钛合金 (TC4) 作为提供柔性功能的零件, 两个零件通过螺钉连接。柔性结构件再与三角板连接, 组成反射镜组件。三角板要具有一定的刚度, 以保证整个组件的稳定性。因此, 选择高比刚度、高尺寸稳定性、线胀系数较小的铝基复合材料 (高体份 SiC/Al) 为三角板材料。支撑结构的材料属性见表 1。

表 1 反射镜支撑结构的材料属性

参数	4J36	TC4	SiC/Al
密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	8010	4.44	2940
弹性模量 $E(\text{GPa})$	141	109	180
泊松比	0.25	0.34	0.20
导热率 $\rho(\text{W/mK})$	14.7	6.8	140
线胀系数 $\alpha(10^{-6}/\text{K})$	2.4	9.1	8.1

2.2 柔性结构的设计

在反射镜的支撑结构中采用柔性环节, 一方面可以隔振; 另一方面可以有效降低组件装配、材料热性能不匹配等因素对反射镜面形的影响, 在温度变化时可通过柔性环节的变形进行补偿。但这些是建立在降低结构件本身刚度的基础上的。形成柔性环节的部位多为薄壁结构, 在卫星发射过程中的振动、冲击和过载等动力学环境很容易使柔性环节发生塑性变形甚至

断裂^[3]。因此, 柔性结构的设计必须依靠合理的结构设计、有限元方法分析以及动力学试验。

反射镜采用背部三点支撑, 与反射镜背部粘接的钢零件与柔性结构件连接, 柔性结构件再与三角板连接, 符合三点确定一个平面原理。柔性结构件的柔度设计是设计的难点, 需要同时满足反射镜组件的谐振频率和热载荷条件下镜面面形 RMS 值变化量的要求。

参考文献 [1], 柔性结构件采用一种双轴圆弧柔性铰链结构, 柔性铰链的转角计算公式为

$$\theta = \int_0^\pi \frac{12r \sin \alpha}{Eb(2r+t-2r \sin \alpha)^3} d\alpha \quad (2)$$

在弯矩 M 的作用下, 得到转角刚度:

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

式中, b 为铰链的厚度; r 为柔性铰链的圆弧半径; t 为柔性铰链最薄处的厚度。

用 Romberg 数值积分方法对式 (3) 进行积分, 可以得到不同的 r 、 t 值及柔性铰链的转角刚度 K 值。将计算结果绘制成曲线, 表达三者之间的关系, 如图 2 所示^[4]。

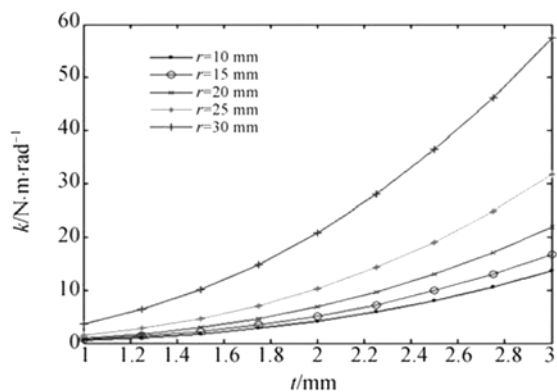


图 2 转角刚度 K 和 r 、 t 的曲线关系

设计时, 先确定 r 值的大小, 然后再调节 t 值。经有限元方法分析优化, 柔性结构件 r 值取为 1 mm, t 值取为 3.5 mm。

设计的柔性结构件如图 3 所示。将各零件装配形成图 4 所示的反射镜组件, 重 9.6 kg。

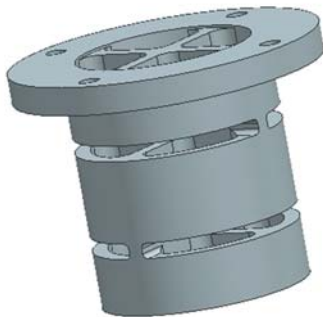


图 3 柔性结构件

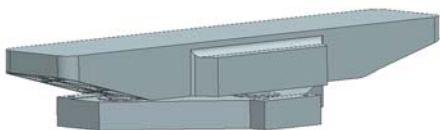


图 4 反射镜组件

3 有限元分析

采用有限元分析方法指导反射镜及其支撑结构的优化设计,通过局部优化或改进设计方案,使反射镜的面形及位置变化量满足设计指标要求。

分析时,利用有限元处理软件 MSC.Patran 建立反射镜组件的有限元模型。材料的属性见表 1。反射镜组件的边界条件定义为背板上的 6 个螺钉孔的 6 个自由度全约束。选择影响反射镜面形最大的工况,即自重加 5 °C 温升。经过不断迭代优化,最终设计的分析结果见表 2。

表 2 5 °C 温升和自重变形引起的反射镜误差

重力方向		X	Y	Z	允差
镜面刚体位移 (mm)	Δx	-6.822	-8.602	-8.964	± 30
	Δy	0.102	2.646	0.021	± 30
	Δz	-6.636	-8.542	-6.628	± 15
镜面倾斜角 (")	θ_x	0.280	-0.618	0.406	± 10
	θ_y	0.540	-0.015	1.082	± 10
RMS(nm)		4.836	7.012	12.124	12.656

表 2 中,反射镜的面形和位置变化量均满足指标要求。

对反射镜组件进行了约束模态分析,前三阶的分析结果见表 3。

表 3 反射镜组件的约束模态

阶数	频率
1	320
2	370
3	410

一阶固有频率为 320 Hz 时,反射镜组件具有足够高的动态刚度,能够避免与遥感器整机和卫星产生共振。

4 试验验证

对反射镜组件进行动力学环境试验,进一步测试反射镜组件的动力学性能。首先,验证有限元分析的有效性及准确性,测试反射镜组件的动态加速度的放大倍率,对柔性支撑结构进行考核。

动力学试验采用反射镜组件的模拟件。反射镜的材料是硬铝 (2A12),与 SiC 反射镜的质量特性一致;其他零件与正式件的结构、尺寸和精度完全相同。

动力学试验的步骤为首先进行 0.2 g 特征频率扫描;然后进行正弦试验和随机振动试验;最后再进行 0.2 g 特征频率扫描。试验方向为 X、Y、Z 三个方向。其中,首次 0.2 g 特征频率扫描的目的是测试反射镜组件 0~2000 Hz 范围内的全部动态特性;第二次 0.2 g 特征频率扫描的目的是测试反射镜组件结构动态特性是否有明显变化。

通过测试,反射镜组件的一阶固有频率为 315.80 Hz,这表明模态数值与工程分析结果接近;前后两次 0.2 g 特征频率扫描的频率无明显漂移,放大倍率相同,反射镜组件没有发生结构变形。该试验证明,反射镜组件具有足够高的动态刚度,柔性支撑结构的强度能满足设计及使用要求。

5 结论

根据某空间遥感器调焦镜的设计要求,进行了反射镜的轻量化及支撑结构设计。根据反射镜的外形特点及用经验公式进行计算,得出反射镜应采用背部三点支撑方式并增加局部宽度;

根据柔性铰链原理设计了柔性支撑结构件, 通过有限元方法优化设计并确定了柔性部位的尺寸。对反射镜组件进行了有限元分析, 在 5°C 温升和自重条件下, 反射镜的面形和位置变化量在允差范围内; 反射镜组件的一阶固有频率为 320 Hz , 远高于传感器和卫星的频率。测得反射镜组件的模拟件的一阶固有频率为 315.80 Hz , 有限元分析误差小于 5% 。通过有限元分析和力学试验验证, 反射镜及其支撑结构能满足设计

指标要求。

参考文献

- [1] 李志来, 徐宏. 长条形空间反射镜及其支撑结构设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(5): 1039–1047.
- [2] 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**(85): 1533–1539.
- [3] 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*, 2011, **40**(11): 1245–1249.
- [4] 谭进国, 何欣, 刘强. 空间传感器长条形反射镜背部支撑技术计 [J]. *红外*, 2012, **33**(8): 16–21.
- [5] (上接第 26 页)
- [6] 吴明明. 单晶硅片的超精密加工技术研究 [D]. 浙江: 浙江工业大学, 2005.
- [7] 吴亮亮. CdZnTe (211) B 衬底性能参数分析 [C]. 北京: 十一所学术交流会议论文集, 2014.
- [8] Oszwldowski M, Berus T. Doping of InSb Thin Films with Lead [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2000, **61**(6): 875–885.
- [9] Wade T L, Vaidyanathan R, Happek U, et al. Eletrochemical Formation of a III-V Compound Semiconductor Superlattice: InAs/InSb [J]. *J Electroanal Chem*, 2001, **500**(1–2): 322–332.
- [10] SEMI M40-0200. Guide for Measurement of Surface Roughness of Planar Surfaces on Silicon Wafer [S].
- [11] 胡晓亮, 苗利刚, 张倩. CMP 中晶圆抛光雾缺陷控制 [J]. *科协论坛*, 2012, **2**: 46–47.
- [12] 彭晶, 包生祥, 马丽丽. 单晶表面加工损伤的评价方法 [J]. *材料导报*, 2006, **20**(9): 101–104.
- [13] 郎艳菊. CZT 晶体加工表面/亚表面损伤研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [14] 许秀娟. 碲镉汞薄膜减薄工艺损伤层测试方法的研究 [C]. 北京: 十一所学术交流会议论文集, 2014.
- [15] 卜俊鹏, 郑红军. 超低亚表面损伤层 GaAs 抛光晶片的工艺 [J]. *半导体学报*, 2003, **24**(4): 465–468.
- [16] 张春平, 张光寅, 常甲辰, 等. InSb 表面损伤层的光谱特性和损伤层厚度的测量 [J]. *半导体学报*, 1986, **7**(2): 190–195.
- [17] 宋泉珍. 离子探针分析锑化铟器件表面沾污 [J]. *红外与激光技术*, 1987, **4**: 14–19.
- [18] 李仁. 半导体 IC 清洗技术 [J]. *半导体技术*, 2003, **28**(9): 44–47.
- [19] 王云彪, 赵权, 牛沈军, 等. LED 用 GaAs 抛光片清洗技术研究 [J]. *半导体技术*, 2009, **34**(5): 446–458.
- [20] Aureau D, Chaghi R, Gerard I, et al. Wet Etching of InSb Surfaces in Aqueous Solutions: Controlled Oxide Formation [J]. *Applied Surface Science*, 2013, **276**: 182–189.
- [21] 刘铭, 程鹏, 肖钰, 等. InSb 薄膜分子束外延技术研究 [J]. *激光与红外*, 2013, **43**(11): 1256–1259.
- [22] 刘铭, 周朋, 尚林涛, 等. 分子束外延 InAlSb/InSb 晶体的质量研究 [J]. *红外*, 2014, **35**(11): 15–19.
- [23] Weiss E, Klin O, Grossman S, et al. Hydrogen and Thermal Deoxidations of InSb and GaSb Substrates for Molecular Beam Epitaxial Growth [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2007, **25**: 736–745.
- [24] 翟树礼. 锑化铟表面腐蚀和清洗方法的俄歇评价 [J]. *红外与激光技术*, 1983, **3**: 39–44.
- [25] 任殿胜. 砷化镓表面特性及紫外光激发下表面氧化反应 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [26] Papis-Polakowska E. Surface Treatments of GaSb and Related Materials for the Processing of Mid-infrared Semiconductor Devices [J]. *Electron Technology: Internet Journal*, 2005, **37**: 1–34.
- [27] Mark J F, Rebecca M, Sasson A, et al. Scaling up Antimonide Wafer Production: Innovation and challenges for epitaxy ready GaSb and InSb substrates [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 801211.
- [28] Mark J F, Rebecca M, Sasson A, et al. Epitaxy Ready $4''$ GaSb Substrates: Requirements for MBE Grown Type II Superlattice Infrared Detectors [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76601K.