

文章编号 1004-924X(2008)08-1533-07

# 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计

闫 勇<sup>1,2</sup>, 贾继强<sup>1</sup>, 金 光<sup>1</sup>

(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:**从空间反射镜主反射镜组件的轻质化设计入手,从结构材料的选择、主镜轻量化形式的确定以及支撑结构的合理设计三个角度系统地进行了一体化结构-热设计。针对某型卡塞格林系统  $\Phi 650$  mm 口径主镜进行了轻质化设计,三点为主多点为辅的支撑方案可在保持组件结构刚度满足力学要求的同时,使反射镜具有良好的热尺寸稳定性。综合考虑加工和工作状态后,最终确定了一种满足设计要求的整体优选方案。分析计算确认,主镜组件镜面综合面形误差 PV 值均  $< \lambda/10$ ,各项指标完全满足光学系统对主反射镜的设计要求。

**关键词:**空间相机;轻质反射镜;主反射镜;支撑

**中图分类号:**V475.3;TH703 **文献标识码:**A

## Design of new type spaceborne lightweighted primary mirror support

YAN Yong<sup>1,2</sup>, JIA Ji-qiang<sup>1</sup>, JIN Guang<sup>1</sup>(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,**Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In order to satisfy the development requirement of spaceborne telescope primary mirror, a design of lightweighted primary mirror sub-assembly structure was presented. The influences of the material thermal math, lightweight pattern and the optimal support structures were considered during the mechanical/thermal design process. A high resolution Cassegrain optical payload with  $\Phi 650$  mm primary mirror was designed, in which its specially support system could keep both high rigidity of structure and fine stability of thermal dimension. By considering the telescope manufacture and work station, the reasonable and optimal structure of the primary mirror sub-assembly was taken finally, analyzed results show its PV is less than  $\lambda/10$ , which can satisfy the requirement for the high resolution satellite primary mirror design.

**Key words:** space camera; lightweight mirror; primary mirror; support

## 1 引言

随着空间相机地面幅宽和分辨力的不断提高,长焦距、大视场和大通光口径成为当前空间相机发展的必然趋势,然而不断增加的重量增进了相机的精度、尺寸稳定性、重量等与其应用需求之间的矛盾。同时,大口径光学主反射镜口径的不断增加,也使得镜面受重力和温度梯度的影响更加明显,为了更好地满足大口径光学系统的高性能要求,采用新型轻质材料、选择合适轻量化的镜体结构形式和选用高性能的支撑结构是当前反射镜组件设计的重要途径<sup>[1]</sup>。

本文以某型卡塞格林式光学系统主镜组件级轻量化及反射镜与支撑背板间的热匹配为目标,设计了一种新型轻质大口径反射镜支撑结构,并进行了结构-热的优化研究。

## 2 材料的选择

严酷的力学环境和波动较大的温度环境是空间光学传感器研制过程中所普遍面临的难题,为了确保光机结构件的可靠性、改善温度对系统成像质量的影响,在空间传感器结构件材料的选择上应遵循如下原则<sup>[2-3]</sup>。

(1) 具有优良的结构刚度和强度。保证相机的结构能适应严酷的运载力学环境,构件不产生微屈服;保证在重力场和微重力场两种不同的力学环境变换下,相机结构的变形不会引起光学元件的面形精度和各元件之间相对位置变化超出由光学设计规定的允许值。

(2) 具有高的热稳定性,保证在空间温度变化很大的条件下相机反射镜及支撑结构的热畸变满足公差要求,合理地选择材料,特别要注意各个反射镜及其支撑结构材料之间的线膨胀系数的匹配。

考虑到镜体材料的综合性能、技术成熟度、经济合理性等因素,镜体材料选用凝胶注模 SiC (RB-SiC)。凝胶注模成型工艺易于制造形状复杂的镜体结构,利于镜体的轻量化设计。钛合金 (TC4) 和 4J36 作为主镜组件常用的结构件材料,质量较重,为了进一步减轻主镜组件质量,

主镜背板选用了新型高比刚度、高热导率的高体分 SiC/Al 复合材料,较同等刚度钛合金件相比,主镜组件可减重 40% 以上。本方案中各种材料的性能参数如表 1 所示<sup>[4]</sup>。

表 1 主镜组件材料属性

Tab. 1 Material properties of primary mirror sub-assembly

材料	密度 $\rho$ ( $10^{-6}$ kg/mm <sup>3</sup> )	弹性模量 $E$ (GPa)	泊松比 $\mu$	线胀系数 $\alpha$ ( $10^{-6}$ /°C)
RB-SiC	3.05	400	0.18	2.5
4J36	8.1	141	0.25	2.5
SiC/Al	2.94	180	0.20	8.1

## 3 主镜轻量化结构的确定

本文涉及镜体为空间某高分辨同轴 TMA 光学传感器  $\Phi 650$  mm 口径 SiC 主镜(通光口径  $\Phi 160$  mm),要求该主镜采用轻量化设计,镜面变形要满足  $PV \leq \lambda/10$ ,  $RMS \leq \lambda/50$ 。反射镜轻量化结构的优劣直接决定了反射镜面形质量的优劣,且轻量化孔的内切圆尺寸和轻量化孔的高度分别与加工时作用在镜面上的压力和镜面自重所引起的镜体变形密切相关。在加工过程中,为了使轻型反射镜单个蜂窝单元的最大变形量达到一个允许的值,必须设计相应的镜面厚度  $t_f$ ,由 Vukobratovich 的推论可知<sup>[5-6]</sup>:

$$\delta = \frac{12\psi p B^4 (1 + \mu^2)}{Et_f^3}, \quad (1)$$

式中, $p$  为加工反射镜镜面时均匀分布于蜂窝单元上的压力, $B$  为蜂窝孔内接圆直径, $\psi$  为与蜂窝孔形状有关的形状因子,且  $\psi_{tri} = 0.00151$ ,  $\psi_{squ} = 0.00126$ ,  $\psi_{hex} = 0.00111$ 。如图 1 所示,在轻量化孔内接圆直径相同的情况下,三角形孔、四边形孔、六边形孔的镜面变形量相差不大,镜体刚度顺次逐渐有所改善。

假设加工反射镜镜面时施加的压力约为 67 kPa,轻型反射镜蜂窝内接圆直径为 40 mm, $E$  和  $\mu$  值见表 1。要使  $\delta < \lambda/10$  ( $\lambda = 632$  nm),则各种轻量化形式所需要最小面板厚度如表 2 所示。

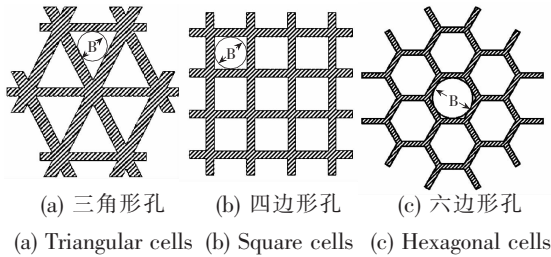


图 1 典型轻量化孔结构

Fig. 1 Lightweight hole shapes

表 2 不同轻量化结构所需最小面板厚度

Tab. 2 Facesheet thicknesses of different structure forms

Structure forms	Triangular	Square	Hexagonal
$\psi$ value	0.001 51	0.001 26	0.001 11
Facesheet thickness / mm	4.2	4.7	5.6

轻量化反射镜结构设计参数主要包括<sup>[7]</sup>:轻量化孔的形状、镜体厚度、反射镜面板厚度等。不同的轻量化形式,其轻量化率、1g 重力条件下镜面的法向最大变形量及固有频率不同。出于定位考虑,圆形反射镜一般不选用四边形单元,其轻量化率极低。本文设定在满足加工约束且初始的镜体主要结构参数如镜体厚度、面板厚度、筋厚度、内切圆直径相同的情况下,对三角形和六边形轻量化孔方案进行了对比,两种方案的结构性能见表 3。

表 3 两种轻量化结构性能对比

Tab. 3 Comparison of two structural forms

Structure forms	Triangular	Hexagonal
Lightweight ratio/%	70	67
Maximal displacement/nm	14.2	20.1
First-order natural frequency/Hz	3 021.2	2 531.4
Von mises stress/MPa	0.026	0.035

目前反射镜的轻型结构主要有底面局部开口型和底面开口型<sup>[8-10]</sup>,其中前者受力后镜面的变形量较之同样厚度的实心镜要小;就轻量化率而言,当轻量化孔的内切圆直径相同时,六边形孔轻

量化率最低,三角形孔其次;就结构刚度而言,三角形孔的频率最高,其结构刚度最好,六边形次之。另外,由于应力值远小于材料的断裂强度,1g 条件下的应力可以不予考虑,应力主要在定位孔处集中。通过计算分析比较,三角形孔的综合条件较为合理,且具有较好的加工性,故本文中的反射镜优先采用了底部局部开口的三角形轻量化孔形式。同时,为了最大限度的减轻 SiC 主反射镜的重量,镜体采用了双弧线型结构,在保证主镜整体刚度不变的同时轻量化率进一步提高,主镜轻量化结构如图 2 所示。

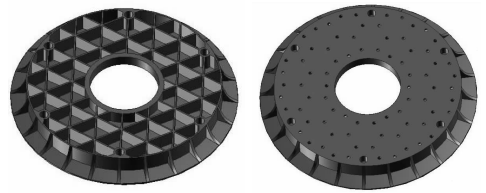


图 2 主镜轻量化模型

Fig. 2 Lightweight primary mirror model

#### 4 支撑方案确定

对于空间相机而言,不同的主镜口径所带来的不仅是光学元件对支撑应力敏感程度的不同,同时引入制造技术及总成本的不同。主镜的口径越大,所需投入的人力物力越多。一般来说,仪器重量大约与主镜口径的 2.4 次方成正比,而价格大约与口径的 2 次方成正比。当主镜口径 > 500 mm 时,采用常规的三点支撑技术对于减轻反射镜重量,保证整机质量不超标具有很大的难度,与此同时为了保证该某型卡塞格林式光学系统(如图 3 所示)的可靠性,满足组件质量轻小要求,主镜组件设计采用了大径厚比的多点柔性支撑形式。

由 Nelson<sup>[11]</sup>  $\omega(\rho, \theta) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i w_i(n_i, \beta_i, \rho, \theta - \theta_i)$ ,可知反射镜镜面面形与支撑环的数目及支撑点的个数密切相关,通过增加支撑点的个数及支撑环的数目可以在减小反射镜径厚比  $D/t$  的前提下有效地保证反射镜的镜面面形。为此,在本方案的设计过程中系统地研究了  $\Phi 650$  mm 口径

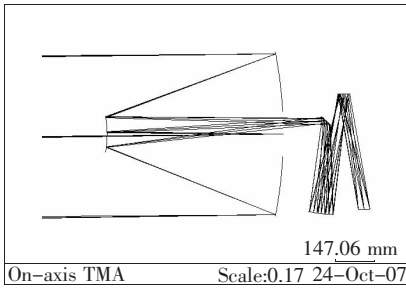


图 3 光路图

Fig. 3 Optial patch

主反射镜中心芯轴固定时,各个不同的辅助支撑点位置的变化对镜面变形的影响,并且通过有限元法对支撑点的位置进行了进一步的优化设计,最终确定背部各辅助支撑点均布于  $0.681R$  处时为最佳支撑部位,采用六点支撑方式,径厚比为  $12:1$ ,仍能满足光学系统成像要求。此时,反射镜质量与相同镜体结构径厚比为  $9:1$  的反射镜相比质量减轻了  $25\%$ ,图 4 所示为  $\Phi 650$  mm 口径主反射镜裸镜支撑时的  $1g$  重力变形云图。

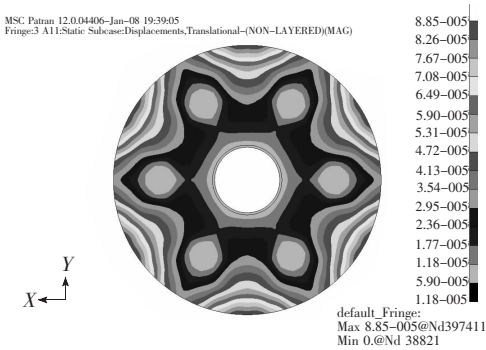
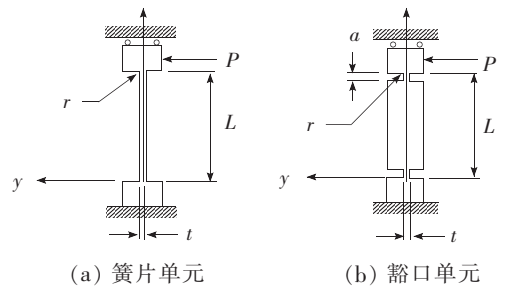


图 4 主镜重力变形图

Fig. 4 Deformation of primary mirror

由于高度的轻量化使主镜的比刚度在提高,但其结构绝对刚度却在下降,因此镜面对支撑应力的敏感度也在迅速增大,由此所致的镜面变形对于光学系统的成像质量影响极大,如何合理地设计约束方式,使主镜六个自由度全约束,又不过定位,是该方案设计的难点。为了合理地确保光学镜面的成像性能,本方案支撑组件设计中运用了运动学支撑原理。首先确定了三个主支撑点,用于对反射镜进行精确定位和调整,同时设置四个辅助支撑点用于调节反射镜面形并改善组件力学性能。

在支撑结构具体设计中采用了柔性环节,并把柔性化设计作为结构热匹配的修改方向,使得柔性支撑结构一方面起到隔振效果,另一方面可以解决很大一部分反射镜装配应力<sup>[12]</sup>。当温度变化时,光学元件与其支撑结构之间的热特性的不匹配可以通过柔性支撑的变形给予补偿,即当反射镜组件受热时,组件将产生热膨胀,由于支撑背板材料的线胀系数远远大于主镜材料的线胀系数,这将引起支撑的两端产生相对运动,支撑背板对支撑做功,而柔性支撑将通过自身变形,吸收大部分能量,从而保证镜面的面形质量。目前光学仪器中所用的柔性单元分为簧片单元和豁口单元两类,其结构如图 5 所示。根据不同的需求,将这些简单柔性单元按一定要求组合起来,便可构成具有特定功能的柔性支撑系统。豁口单元相对于簧片单元更适用于使用在有动态载荷和振动的环境中,图 6 所示为本方案所用豁口柔性支撑系统。



(a) Blade flexure element (b) Notch flexure element

图 5 基本柔性单元

Fig. 5 Basic flexure elements

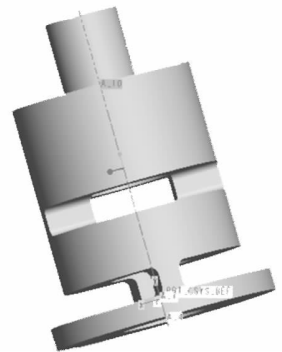


图 6 柔性结构

Fig. 6 Flexure mounting of mirror

不管是簧片单元还是豁口单元,柔性单元沿力的方向的变形都与其所受力的大小  $p$  成正比。

对于簧片单元,柔性单元的变形和柔性簧片的长度  $L$  的 3 次方成正比;而豁口单元的变形和豁口宽度  $a$  与中间刚性杆  $L$  的平方的乘积成正比,且他们的变形都与其刚度  $D$  成反比。在相关结构设计,柔性单元中薄弱环节处的应力以及柔性单元轴向方向上的变形是限制柔性结构应用的重要因素。在大部分柔性支撑设计中,由于对柔性支撑的轴向变形有着比较高的要求,因此,很多时候,柔性单元的基本尺寸受结构轴向尺寸的约束更加厉害。

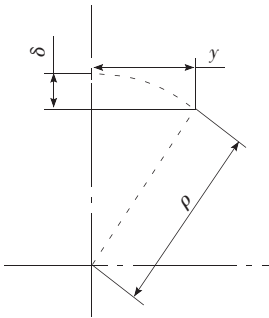


图 7 柔性单元等效长度

Fig. 7 Equivalent rigid lengths of flexures

如图 7 所示,柔性单元在力的作用下提供变形的时候,其自由端并不是完全的平动,而是一个曲线,对于简单柔性单元,由于其中间柔性部位刚度比较小,因此该曲率半径大小为中间柔性结构变形的积分,根据 Hatheway 的结论,该曲线曲率半径为:

$$\rho = \frac{5}{6}L. \quad (2)$$

在反射镜组件多点支撑方案设计中,为了确保各个支撑点的热匹配特性,在柔性连接部位需分别保证各支撑点在轴向与径向上的变形,目前多采用有限元法进行精确分析计算,其反射镜主件有限元模型如图 8 所示。

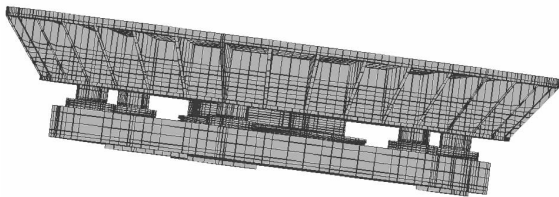


图 8 主镜组件有限元模型

Fig. 8 FEM model of primary mirror component

## 5 主镜组件结构—热优化

由于主镜组件的结构参数较多,在反射镜组件结构设计过程中,轻量化率、刚度和热稳定性这三个主要性能指标之间通常是互相矛盾的:提高轻量化率势必会削弱镜体的静、动态刚度,使得镜面的自重变形增大;同样,高的静态刚度也并非意味着镜体同时具有较高的热稳定性。为了较好地做到这三者的平衡,可以在反射镜结构设计过程中施以热优化手段,即在保证一定的轻量化率和较小的自重变形的前提下,以减小反射镜体的热变形为准则对某些结构尺寸参数进行二次优化设计,从而达到提高热稳定性的目的。为了确保本方案中柔性支撑的热稳定性,本文分别对柔性部位的各个参数对镜体热稳定性的影响规律做了初步的分析研究,并在此基础上利用有限元法对该方案主镜组件进行了系统的结构—热优化设计,图 9 所示为主镜组件设计优化流程图。

在完成对反射镜支撑结构的设计后,针对反射镜实际加工和工作的状态,利用 MSC. Patran 分别分析了该反射镜组件在受到 1g 重力,环境温度为  $(18 \pm 4)^\circ\text{C}$  时,反射镜组件的镜面综合面型误差及其频率特性,经最终分析计算确认,该主镜组件镜面综合面型误差 PV 值分别达到 62.5 nm、60.2 nm 和 59.4 nm,均  $< \lambda/10$ ;反射镜组件一阶频率达到 300 Hz 以上,远高于光学系统结构设计要求,其分析结果如表 4 所示,且主镜组件质量较常规三点支撑形式减少了 15%。

表 4 主镜组件变形

Tab. 4 Deformation figures of primary mirror sub-assembly

重力方向	镜面面形	
	PV/nm	RMS/nm
x 向	62.5	12.1
y 向	60.2	11.5
z 向	59.4	10.8
工况	a. 1g 重力; b. 初始温度: $18^\circ\text{C}$ c. 温度波动范围: $\pm 4^\circ\text{C}$	

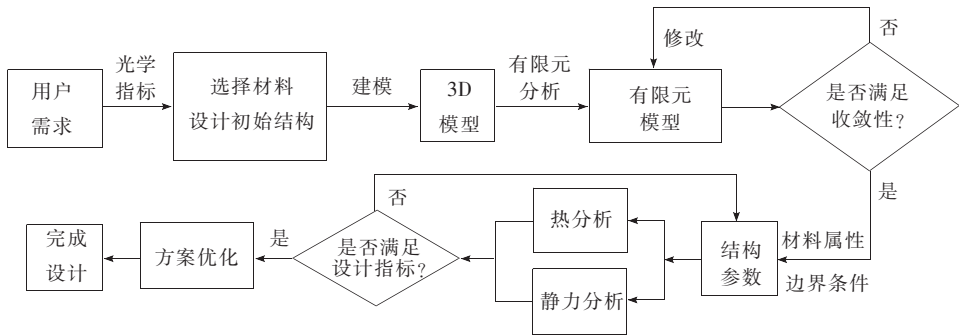


图 9 主镜组件设计优化流程图

Fig. 9 Optimum design flowchart of primary mirror sub-assembly

## 6 结 论

在当前空间反射镜口径越来越大,光学系统质量要求越来越苛刻的情况下,为了使结构设计

更好地满足光学系统要求,进行支撑系统与反射镜轻量化结构一体化的设计,实现主镜组件级质量最轻是一条行之有效的途径;三点为主,多点为辅的支撑形式亦可以为空间大口径光学反射镜支撑结构的设计提供一定的借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] 吴清文. 空间相机主镜力学温度场特性及轻量化研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 1999.
- [2] WU Q W. A study on the mechanical, thermal properties and lightweight of primary mirror in space camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 1999. (in Chinese)
- [3] YODER P. *Opto-mechanical Systems Design* [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1992.
- [4] 张学军. 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, 10(5): 577-582.
- [5] ZHANG X J. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 10(5): 577-582. (in Chinese)
- [6] 付芸. 航空遥感相机扫描反射镜支撑技术[J]. 光学精密工程, 2003, 11(6): 550-554.
- [7] FU Y. Scanning mirror supporting structure of aerial remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 550-554. (in Chinese)
- [8] VUKOBRATOVICH D. Introduction to optomechanical design [M]. *SPIE Short Course SC014*, 2003.
- [9] VUKOBRATOVICH D. Flexure mounts for high-resolution optical elements [J]. *SPIE Optomechanical and Electro-Optical Design of Design of Industrial Systems*, 1988, 959: 18-33.
- [10] 韩媛媛. 碳化硅反射镜轻量化结构优化设计[J]. 光电工程, 2006, 33(8): 123-126.
- [11] HAN Y Y. Optimum design of lightweight silicon carbide mirror [J]. *Opt-Electronic Engineering*, 2006, 33(8): 123-126. (in Chinese)
- [12] BARMES Jr W P. Hexagonal vs. triangular core lightweight mirror structure [J]. *Appl. Opt.*, 1972, 11(12): 2748-2751.
- [13] SHENG S C. Lightweight mirror structure best core shapes: a reversal of historical belief [J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27(2): 354-359.
- [14] MEHTA P K. Flexural rigidity characteristics of light-weighted mirrors [J]. *SPIE*, 1987, 748: 158-171.
- [15] NELSON J E. Telescope mirror supports: plate deflections on point supports [J]. *SPIE*, 1982, 332: 212-228.
- [16] 王祥生. 空间反射镜支撑设计与分析[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2007.

WANG X SH. *Design and analysis of space mirror supports* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)

作者简介:闫勇(1981-),男,山西离石人,在读博士研究生,主要研究方向为空间光学遥感器光机结构一体化设计及 CAD/CAE 工程分析。E-mail:clyy911@163.com

● 下期预告

## 自组织 LLE 算法及其在人脸识别中的应用

冯海亮,李见为,黄 鸿

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400030)

提出了一种自组织 LLE 算法(Self-Organized LLE,简称 SO-LLE),该算法不仅能自动确定数据点邻域选择、减少运算量,而且能有效的发现嵌入于高维人脸图像的低维子流形。本文对 SO-LLE 算法进行了详细的理论分析,并应用多种数据集进行了仿真实验和分析。在 Yale 和 PIE 人脸数据库上的仿真实验结果表明:SO-LLE 方法的平均识别率提高了 5%至 40%,可以有效的提高人脸识别的性能。