

文章编号: 1672-8785(2014)09-0015-04

空间相机用大口径圆形主反射镜设计

王忠善 何 欣 付亮亮

(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: 主镜是空间相机的主要成像部件, 其面形误差和位置误差将会决定成像质量。设计了一种孔径为 $\Phi 660$ mm 的圆形主镜组件。通过对比 6 点定位原理实现反射镜体的全约束, 并经三点在背部支撑主镜, 其中每点均为多层柔性结构。合理分配每点支撑的自由度及刚度, 同时卸载温度变化时由于材料的线胀系数不同而传递到反射镜上的应力, 使反射镜变形均匀。有限元分析结果表明, 本文设计的主镜组件的面形误差 RMS 值达到 $1/50\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm), 一阶模态达到 249 Hz, 并具有良好的动态刚度。

关键词: 空间相机; 主镜; 温度适应性; 有限元分析

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.09.004

Design of Large Size Circular Primary Mirror of Space Camera

WANG Zhong-shan, HE Xin, FU Liang-liang

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

Abstract: A primary mirror is a main imaging part of a space camera. Both its surface figure error and position error will decide the quality of imaging. A circular mirror assembly with an aperture of $\Phi 660$ mm is designed. It is restricted completely according to the six-point orientation principle. Its backside is supported by three fixers which are flexible multilayer frameworks. By reasonably distributing the freedom and rigidity of each supporting fixer and unloading the stress due to different expansion coefficients of different materials when temperature is changing, the distortion of the primary mirror assembly is symmetrical. The Finite Element Method (FEM) analysis result shows that the primary mirror assembly has a surface figure error (root-mean-square (RMS) value) up to $1/50\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm), a first mode of 249 Hz and good dynamic rigidity.

Key words: space camera; primary mirror; temperature adaptability; FEM analysis

0 引言

随着空间相机分辨率的不断提高和地面覆盖宽度的不断扩大, 大口径、长焦距光学系统已经成为空间相机的主流系统。此类光学系统需要具有大口径主镜, 以保证相机质量不断得

到提高。这就与日益严格的相机精度、成像质量等要求形成矛盾。此外, 主镜是光学系统中用于保证成像质量的最关键部件。由于口径不断增加, 主镜自身的重量不断增加, 温度对主镜面形及位置精度的影响也越加明显。所以, 选择材料

收稿日期: 2014-07-04

作者简介: 王忠善 (1983-), 男, 黑龙江延寿人, 助理研究员, 主要研究方向为空间光学遥感结构设计技术。

E-mail: hitwzs@126.com

质轻、合理优化的轻量化结构以及合理的约束定位支撑并同时考虑结构及热特性的一体化设计是大口径主镜设计的必然趋势。本文设计了一种孔径为 $\Phi 660$ mm 的圆形主镜组件。

1 材料选择

在选择反射镜的镜体材料时,一般应考虑力学特性、热稳定性和加工工艺性等因素。表 1 列出了常用光学反射镜镜体材料的性能参数。

从表 1 中可以看出, SiC 和 Be 在强度、刚度以及热稳定性等多项指标上具有明显优势。但是 Be 有剧毒且成本高,所以无法推广使用。

而 SiC 材料则具有弹性模量高、比刚度高、导热率高、线胀系数较低以及热稳定性能优良等特点。另外, SiC 镜体的成型方法灵活,制造工艺成熟,有助于实现较高的轻量化率。因此, SiC 材料具有明显的综合优势,是一种理想的空间相机反射镜材料。

通过对比常用材料的各项性能指标,并综合考虑力学热学性能和加工工艺性等因素,我们选用特殊匹配线胀系数的钢钢作为反射镜支撑结构的材料,并选用比刚度高、导热性好、线胀系数低的高体分 SiC/Al 复合材料作为支撑背板的材料。

表 1 常用反射镜镜体材料的性能参数

材料	弹性模量 E (GPa)	密度 ρ (g/cm ³)	比刚度 E/ρ (kNm/g)	导热率 λ (W/mK)	线胀系数 α (10 ⁻⁶ /K)	热稳定性 λ/α (10 ⁶ W/m)
SiC	420	3.14	133.8	180	2.40	75
Be	303	1.84	164.7	216	11.5	18.8
Al	69	2.70	25.6	167	23.9	7.0
Zerodur	93	2.53	36.8	1.64	0.05	32.8
ULE	67	2.20	30.5	1.3	0.03	43.3
熔石英	74	2.23	33.2	1.13	0.55	2.1

2 支撑方式和支撑点的选择

本文所研究的空间相机主镜具有尺寸大和精度高等特点,其支撑结构设计主要考虑以下几个因素:(1) 定位合理。支撑结构的总体组合需要约束反射镜镜体的 6 个自由度,以免由于过定位而产生装配应力。每个支撑自由度的分配要合理,使刚度分配均匀。(2) 质量轻。为了实现重量最小,必须选择合理的支撑方式和轻量化结构形式。(3) 力学特性。要求支撑结构具有足够高的刚度和强度,以保证主镜组件合理避开相机主体的固有频率,降低反射镜组件的振动响应,提高稳定性。(4) 温度适应性。无论地面装调还是在轨工作时,反射镜都要经历环境温度变化,这就要求支撑结构具有一定的柔性,以消除由于不同材料的线胀系数差别而产生的热应力,从而保证光学元件的变形量处在设计容

许的范围内。即在合理分配每个支撑自由度的同时,充分考虑支撑结构的温度适应性。(5) 工艺性好。支撑结构应具有良好的加工及装配工艺性。

反射镜主要有中心支撑方式、侧面支撑方式、周边支撑方式和背部支撑方式四种。对于大口径反射镜,通常采用刚度较高的背部支撑方式。此时,镜面在重力作用下的变形量 δ 具有以下经验公式^[1]:

$$\delta = \frac{3\rho g r^4}{16Et^2} \quad (1)$$

式中, δ 为能够接受的镜面最大变形量 PV 值, PV 值取 $\lambda/10$; E 为材料的弹性模量; ρ 为材料密度; g 为重力加速度; r 为反射镜的半径; t 为反射镜的厚度。根据式 (1) 便可推算出 t 约为 51 mm。

支撑点数量对反射镜的镜面变形影响较大。将最少支撑点数定义为 N ，其具有以下规律^[2]：

$$N = \frac{1.5r^2}{t} \sqrt{\frac{\rho g}{E\delta}} \quad (2)$$

将主镜的各个参数代入式 (2)，可推算出 $N = 3.48$ 。由于上述经验公式的计算结果并未考虑反射镜镜体的轻量化，而且根据反射镜全运动学安装原理中的自由度分配以及结构支撑分布等因素，若选用 4 点支撑方式，则必须采用多层支撑形式，但这会造成支撑结构尺寸大、质量大、刚度低以及装配难度大等缺点。因此，本文选用背部 3 点支撑方式。

3 主镜组件的结构设计

基于镜坯加工性能及进货渠道，反射镜的轻量化结构选择背部敞开式三角形轻量化结构。三角形孔的刚度最好^[3]，且轻量化率较高，机械加工工艺性好。图 1 所示为主镜的轻量化结构。

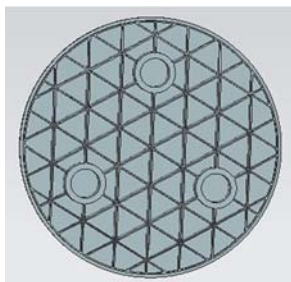


图 1 主镜的轻量化结构

3 点支撑组合结构应全面约束反射镜镜体的 6 个自由度，因为欠约束将会引起主镜位置

不准确、动态刚度过低、振动响应过大甚至损坏等问题。同时，为了避免由于过定位而产生的装配应力^[4-5]，每个支撑自由度的分配要合理，使刚度分配均匀。另外，在考虑温度变化时，由于主镜变形关于镜面中心对称，3 个柔性铰链的布置也应关于镜面中心对称。图 2 所示为我们设计的柔性支撑结构及其布置图。

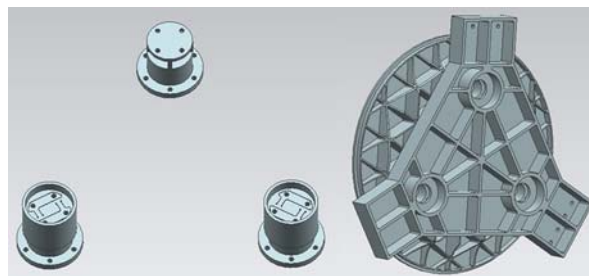


图 2 支撑结构图

每个柔性支撑由顶端的一个万向柔节构成，它和与其连接的粘接套一起实现 Z 向即轴向和切向的位移约束。其他方向则通过柔性铰链释放约束。这样 3 点对称布置的组合支撑共同实现了主镜 6 个自由度的全约束。同时 120° 对称布置的 3 点支撑皆允许沿径向的位移，能够有效释放反射镜所受的温度应力，并使变形对称均匀。

4 有限元分析

通过 Patran/Nastran 有限元分析软件创建有限元模型。表 2 列出了重力作用及重力温度耦合作用下的面形计算结果。表 3 和图 3 分别所示为模态分析结果和振型图。

表 2 由重力及热力耦合引起的反射镜面形误差

工况		重力			重力加 5℃ 温升			允差
重力方向		X 向	Y 向	Z 向	X 向	Y 向	Z 向	
镜面刚体位移 (μm)	ΔX	2.1	2.4	0.6	2.9	3	1.5	40
	ΔY	2.2	2.3	0.7	3.2	3.5	1.6	40
	ΔZ	0.3	0.3	1.8	0.9	0.8	3.2	40
镜面倾斜角 (″)	θ _x	0.3	2.1	0.6	0.8	3.2	1.3	20
	θ _y	1.9	0.5	0.7	3.1	0.9	1.0	20
	θ _z	1.0	0.98	0.9	1.8	1.2	1.3	20
PV (nm)		42.3	43.2	49.4	56.6	54.8	59.4	63.28
RMS (nm)		7.5	7.6	8.2	11.1	10.5	12	12.66

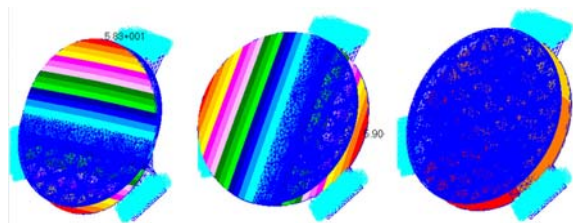


图 3 前三阶振型图

表 3 反射镜组件的模态分析结果

模态	频率 (Hz)	振型描述	振型图
一阶	249	反射镜沿 X 轴平动	图 3
二阶	251	反射镜沿 Y 轴平动	图 3
三阶	316	反射镜绕 Z 轴转动	图 3

从计算结果中可以看出,主镜组件具有较高的一阶谐振频率,比相机系统的基频高 3 倍以上。另外,该组件还具有很好的动态刚度,能够有效避开机身组件的固有频率,从而防止共振发生。在重力作用以及重力加 5℃温升的温度范围内,主镜的转角和位移均符合光学系统的公差要求,其面形误差也在允差范围内。

(上接第 9 页)

当被测物体的表面温度远远大于环境温度时,获得了一种计算目标真实温度的数学模型。为了有效地降低环境辐射对表面发射率测量的影响,布置了背景屏蔽装置。在此基础上,设计了发射率测量实验,实验误差主要来自对标定数据和发射率求解的拟合。为了减小拟合误差,增加了实验次数,缺点是需要进行大量测试实验。结果表明,发射率的实验结果准确,实验所需的配套设备易于获取,试验步骤简单。该方法具有很强的可操作性和良好的实际应用价值。

参考文献

- [1] 张晓龙,刘英,孙强.高精度非制冷长波红外热像仪的辐射定标[J].中国光学,2012,5(3):236-240.
- [2] Evangelos T, Frank J C, Leon J R, et al. The Latest measurement Techniques at NPL for the Char-

5 结束语

设计了某空间相机中孔径为 $\Phi 660$ mm 的圆形主镜组件。通过 3 个多层柔性铰链结构在背部支撑主镜。平均分配每点支撑的刚度及位置,使该组件在温度升高或者降低时的主镜变形以主镜中心为对称中心。有限元分析结果表明,该支撑结构的一阶频率达到 249 Hz,能够合理避开机身组件的固有频率,可以保证主镜组件不发生共振;面形误差的 RMS 值优于 $1/50\lambda$,满足光学系统的设计要求。

参考文献

- [1] Friedman E. Photonics Rules of Thumb [M]. New York: McGraw Hill, 2003.
- [2] Yoder P. Opto-mechanical System Design [M]. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [3] 李宗轩,张雷,姚劲松,等. Cartwheel 型双轴柔性铰链设计[J].光学精密工程,2013,21(9): 2317-2325.
- [4] 马立,谢伟,刘波,等. 柔性铰链微定位平台的设计[J].光学精密工程,2014,22(2): 338-345.
- [5] 刘巨,董得义,辛宏伟,等. 大口径反射镜组件温度适应性[J].光学精密工程,2013,21(6): 1488-1495.
- [6] Friedman E. Photonics Rules of Thumb [M]. New York: McGraw Hill, 2003.
- [7] Yoder P. Opto-mechanical System Design [M]. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [8] 李宗轩,张雷,姚劲松,等. Cartwheel 型双轴柔性铰链设计[J].光学精密工程,2013,21(9): 2317-2325.
- [9] 马立,谢伟,刘波,等. 柔性铰链微定位平台的设计[J].光学精密工程,2014,22(2): 338-345.
- [10] 刘巨,董得义,辛宏伟,等. 大口径反射镜组件温度适应性[J].光学精密工程,2013,21(6): 1488-1495.
- [11] 李云红. 基于红外热像仪的温度测量技术及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 2010:22-25.
- [12] 陈朝阳,行小帅,李月. 共轭梯度 BP 算法在 Matlab 7.0 中的实现[J].现代电子技术,2009(18):125-126.
- [13] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [14] 戴景民,宋扬,王宗伟. 光谱发射率测量技术[J].红外与激光工程,2009,38(4):710-715.
- [15] 刘连伟,杨淼淼,帆宏杰,等. 一种表面发射率的测量方法研究[J].激光与红外,2014,44(2):153-156.
- [16] 罗晓春,孙继银. 物体表面发射率的测量方法[J].自动测量与控制,2007,26(8):72-74.
- [17] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J].红外技术,1999,21(4):20-23.
- [18] 吴晗平. 红外辐射大气透射率的工程理论计算方法研究[J].光学精密给出,1998,6(4): 35-43.