

空间相机大口径反射镜轻量化技术及应用

伞兵, 李景林, 孙斌

(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: 空间相机反射镜尺寸和质量对系统的光学性能、机械性能和热稳定性等具有重要影响, 因此对其进行轻量化设计具有重要意义。文中从材料的选择、背部基体形状、轻量化孔形式、支撑方式对某空间大口径反射镜进行了详细的结构设计, 采用理论论述与有限元分析相结合的方法, 提出了一种背部开放式、三角形孔的轻量化结构形式, 通过合理设计反射镜支撑点数目和位置, 使反射镜组件在重力工况下, 镜面面形精度达到成像质量要求, 即 PV 值不大于 63.2 nm。

关键词: 空间相机; 反射镜; 轻量化

中图分类号: V443.5; TH703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3043-06

Light-weight technology and its application of large-aperture mirror in space camera

San Bing, Li Jinglin, Sun Bin

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

Abstract: In order to reduce the influence of the mass and sizes of mirrors on the quality of space camera, such as optics quality, mechanics quality and stability of thermal dimension of structure, the necessity of lightweight for mirrors was introduced. Material selection, substratum's back shape, lightweight pattern and support pattern were taken into account in the design of large-aperture mirror in space camera. A new design with open bottom, triangular aperture was proposed based on theoretical and finite element analysis. Through the rational design of support structure parameters, the surface accuracy of mirror meets the needs of the imaging quality ($PV \leq 63.2 \text{ nm}$) under environment of gravity.

Key words: space camera; mirror; light-weight

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-03-07

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 伞兵(1978-), 女, 硕士, 主要从事空间相机光机结构设计方面的研究。Email: san_bing@163.com

0 引言

当前,遥感技术已成为在国民经济发展和国家安全保障等方面的重要技术手段,在城市建设、资源勘测、防灾减灾、军事侦察等方面正在发挥巨大的作用。空间遥感相机已成为人类观测地球、认识宇宙的重要工具。随着遥感观测需求的增加,对遥感相机也提出了更高的要求,空间光学传感器不仅要具有较高的分辨率、较大的视场和高的可靠性,还应具有较轻的质量。由于承载相机的运载火箭的推力有限,且单位载荷的发射成本十分昂贵。因此,在保证相机结构具有足够高的动、静态刚度及相机镜头具有良好的成像质量的前提下,对相机结构特别是作为结构中关键组成部分的反射镜进行轻量化设计具有重要意义。

选择性能优异的材料及合理、有效的轻量化结构是反射镜镜坯实现轻量化的两种常用方法。此外,采用能动薄反射镜技术也可以实现反射镜轻量化^[1]。目前,该项技术成功应用到工程实践中的案例较少,各国均在开展针对此项技术的研究工作。在工程实践中,常采用机械法、焊接法及熔铸法对镜坯进行轻量化。焊接法和熔铸法的主要优点是镜坯轻量化率较高,结构刚度较大,镜面面形较高。这两种方法是国外对大口径反射镜镜坯进行轻量化常采用的方法。国内由于对该项技术的研究起步较晚,并且受到技术水平的限制,常采用机械加工的方法对镜坯进行轻量化^[2-3]。

文中以一口径为 2.4 m,材料为 SiC 的反射镜为例,提出了一种平背、背部开放、三角形轻量化结构形式。该轻量化结构形式为大口径 SiC 反射镜的轻量化设计提供了借鉴经验。

1 反射镜轻量化的必要性

空间相机反射镜轻量化设计具有重要的意义,主要体现在以下几个方面:

(1) 提高系统的光学性能。图 1 是望远系统的角分辨率与其口径尺寸关系的对数曲线图^[4]。从图 1 中可以看出,反射镜口径小于 500 mm 时,光学系统的分辨率随着反射镜口径的增大而提高;当反射镜口径在 500~2 400 mm 之间增大时,分辨率的提高并不十分显著;当反射镜口径超过 2 400 mm 后,光学系

统的分辨率随着口径的增大反而下降。在工程实践中,当反射镜口径大于 500 mm 时,提高分辨率的最有效、应用最广泛的方法就是对反射镜进行轻量化设计。

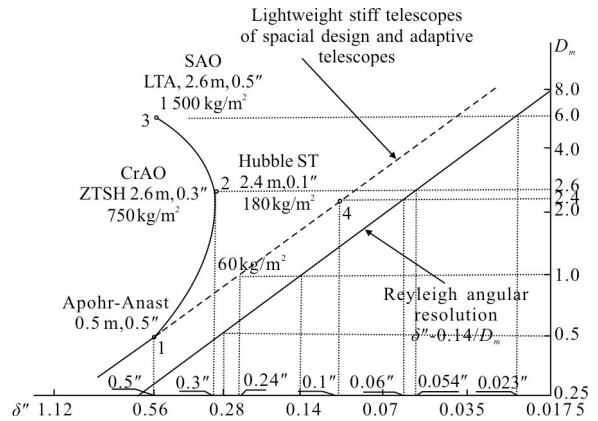


图 1 望远系统的角分辨率与其口径尺寸关系的对数曲线图

Fig.1 Angular resolution vs dimension of telescope system

(2) 提高系统的机械性能。从动力学角度考虑,由于 $f_n \propto \sqrt{K/M}$,在结构刚度相同的情况下,反射镜质量 M 的减小有利于提高反射镜和整个系统的结构频率,提高其抵抗外界振动的能力。从静力学角度考虑,对于外轮廓为圆形的实体反射镜,当重力沿光轴方向作用时,反射镜的变形最大量与其支撑方式有关,并且正比于镜坯直径的四次方,反比于厚度的平方。若要求反射镜的变形保持一定值,随着反射镜口径的增大,反射镜的厚度必须大幅增加,这必然引起重量的增加。因此,对于大口径反射镜必须采取轻量化措施,并选取适当的支撑方式。

(3) 提高热稳定性。空间热环境十分恶劣和复杂,温度的变化将会导致反射镜面型发生扭曲、畸变,使反射镜的面形精度降低,这是影响遥感器成像质量的主要因素,其中温度变化既包括温度水平的变化也包括各种温度梯度^[5]。反射镜存在轴向温度梯度时,其曲率半径和焦距均会发生变化;反射镜存在径向温度梯度时,可能导致镜面产生不对称变形,上述两种情况均会对面形精度产生影响。因此,通过对大口径反射镜进行轻量化设计,可以减小其热惯性,提高其热稳定性。

(4) 降低发射成本。由于运载火箭的运力有限,因此空间反射镜的发射成本十分昂贵,据推算可达 9 000~20 000 美元/kg 之间。目前,运载火箭运力提升

有限,因此对反射镜进行轻量化十分必要,由此带来的经济效益十分可观。

2 大口径反射镜轻量化设计

2.1 镜坯材料选择

镜坯材料的选择主要考虑反射镜受力和受热后结构和镜面面形的稳定性,因此主要考察材料的力学性能和热性能指标。比刚度是衡量材料力学性能重要指标之一,其定义为材料的弹性模量与密度的比值,即 E/ρ 。从比刚度的定义式中可以看出,具有高比刚度的材料具有较大的弹性模量和较小的密度。对材料的热性能影响较大的因素主要有三项,分

别为材料的热膨胀系数、导热系数及比热容。将导热系数与热膨胀系数的比值,即 λ/α ,作为衡量材料热稳定性的指标。该比值越大,材料的热稳定性越好。材料的各项性能并不均衡,为了对材料的性能进行综合评判,可以采用综合品质因子对不同材料的综合性能进行比较,材料综合品质因子定义如下:

$$\text{材料综合品质因子}=(E/\rho)\cdot(\lambda/\alpha) \quad (1)$$

此外,材料的辐射稳定性、机械加工性能及加工成本也是材料选择时需考虑的因素。

几种常用的光学元件材料如表 1 所示。从表 1 中可以看出,SiC 的综合性能最优,具有明显优势。因此,选用 SiC 作为反射镜基体材料。

表 1 常用反射镜材料的性能和综合品质因数

Tab.1 Performance and quality factors of rational materials for mirror

No.	Material	Density ρ /g·cm ³	Elastic modulus E /GPa	Specific stiffness E/ρ /GN·m·g ⁻¹	Thermal expansion coefficient α /(10 ⁻⁶ /K)	Thermal conductivity λ /m·K	Specific heat capacity c / J·(kg·K) ⁻¹	Thermal stability λ/α	Integrated quality $(E/\rho)\cdot(\lambda/\alpha)$
1	Fused silica	2.19	72.00	32.88	0.50	1.40	750.00	2.80	92.05
2	Zerodur	2.53	91.00	35.97	0.05	1.64	821.00	32.80	1 179.76
3	Be	1.85	287.00	155.14	11.40	216.00	1 925.00	18.95	2 939.40
4	Si	2.33	131.00	56.22	2.60	137.00	710.00	52.69	2 962.53
5	SiC	3.20	400.00	125.00	2.40	155.00	650.00	64.58	8 072.92

2.2 基体形状选择

光学元件一般可分为反射面和除反射面以外的基体两部分。在光学系统设计过程中,反射面的外部形状和尺寸已经由光学设计人员确定,而反射镜的基体则由结构设计人员根据实际情况设计确定。基体背部形状有双凹形、平背形、单拱形、双拱形等^[6]。基体背部的轻量化孔主要有开放型、封闭型、双开放的封闭型和组合型。其中,开放型的工艺性最好,可通过基体一次成型或后期机械加工成型^[7]。文中所论述的反射镜口径为 $\varphi 2.4$ m,采用平背、背部开放式结构。

2.3 反射镜轻量化设计

反射镜的轻量化设计主要包括反射镜的镜厚比、轻量化孔形式、支撑点位置及数目设计。

(1) 镜厚比

对于边缘为圆饼形的反射镜,Robert^[8-10]等人对其径厚比 D/t 与自重变形 δ 的关系,并给出了经验公式:

$$\delta = \frac{3\rho g a^4}{16Et^2} = \frac{3\rho g (D/t)^2 D^2}{256E} \quad (2)$$

式中: δ 为最大自重变形; ρ 为材料密度; g 为重力加速度; r 为圆形反射镜半径, $r=D/2$; E 为弹性模量; t 为圆形反射镜厚度。根据经验公式(2)并结合反射镜的尺寸特点,初步确定反射镜中心厚度为 300 mm,待反射镜轻量化结构确定后,结合有限元分析对比结果再做调整。

(2) 轻量化孔的形式

反射镜常用的轻量化孔的形式主要有三角形、六边形、正方形、圆形、扇形和异形蜂窝等,部分反射镜轻量化孔形式如图 2 所示。六边形、三角形、圆形和扇形是圆形反射镜轻量化孔常采用的形式。

中国科学院上海技术物理研究所的俞天野^[11]和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的郭喜庆^[12]对三角形、正方形、六边形等轻量化孔结构形式进行了分析。对于基体背部的轻量化孔采用开放型结构的反射镜,在轻量化孔几何尺寸相同的前提下,虽然质量较后两者略有增加,但反射镜面形精度要

优于二者,因此,可以采用三角形孔作为文中反射镜轻量化孔结构形式。

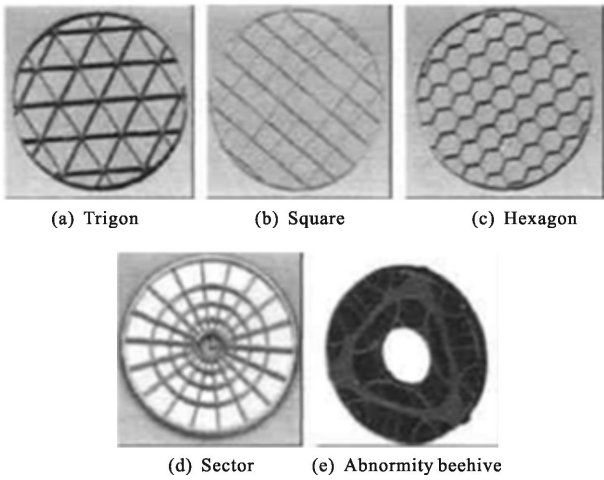


图 2 反射镜轻量化孔形式
Fig.2 Lightweight pattern of mirror

(3) 支撑点位置及数目

反射镜按支撑点位置的不同分为三种,分别是周边支撑、背部支撑及侧面支撑^[12]。周边支撑方式的定位基准一般为反射镜的背部和侧面。该支撑方式的优点是结构简单,但存在支撑结构外形尺寸较大的缺点,因此该支撑方式仅适用于外形尺寸较小的反射镜。背部支撑是在镜子背部设置定位盲孔,通过与反射镜线胀系数相匹配的柔性过渡件将反射镜与支撑件联接在一起。该支撑结构可消除因装配和温度梯度产生的应力。支撑点的数目根据反射镜外轮廓尺寸来确定,一般为三点、六点、九点等。背部支撑方式适用于圆形或长宽比较小的长条形反射镜。侧面支撑是以反射镜两侧面作为定位基准的。通过对反射镜进行合理的轻量化设计及设置柔性结构,可有效的消除重力及其它环境工况对反射镜面形精度的影响。侧面支撑适用于大口径的大长细比反射镜^[13-15]。对于文中的大口径圆形反射镜采用背部支撑方式较为合适,该支撑方式所需最少支撑点数目可根据 Hall^[16]给出的经验公式确定。

$$N = \frac{1.5r^2}{t} \sqrt{\frac{\rho g}{E \delta}} \quad (3)$$

式中: r 为圆形反射镜半径; t 为圆形反射镜厚度; ρ 为材料密度; g 为重力加速度; E 为弹性模量; δ 为最大自重变形。当反射镜重力变形小于 $\lambda/10$ ($\lambda=632.8\text{nm}$)时,由公式(3)计算得到反射镜所需最少支撑点数目 $N=8$ 。

3 有限元分析

利用有限元法分析软件对初步轻量化的反射镜不同厚度对面形的影响分析如表 2 所示,分析云图如图 3 所示。从表 2 中可以看出,在镜面厚度为 300 mm 时,面密度接近 100 kg/m^2 。当镜面厚度大于 300 mm 后,反射镜面密度增加明显,但镜面面形变化却不显著,因此初步确定反射镜厚度为 300 mm,待反射镜具体轻量化结构形式确定,并利用有限元软件优化分析后,最终确定反射镜具体的结构参数。

表 2 反射镜不同厚度对面形的影响

Tab.2 Errors of mirror surface under different thicknesses

Thickness /mm	PV/ μm	RMS/ μm	Density / $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$
200	7.610 723e-005	1.810 810e-005	7.415 5166e-5
300	5.828 724e-005	1.317 579e-005	1.000 7519e-4
400	5.869 812e-005	1.264 538e-005	1.260 1733e-4
500	5.414 886e-005	1.216 236e-005	1.522 9122e-4
600	5.721821e-005	1.272927e-005	1.7821125e-4

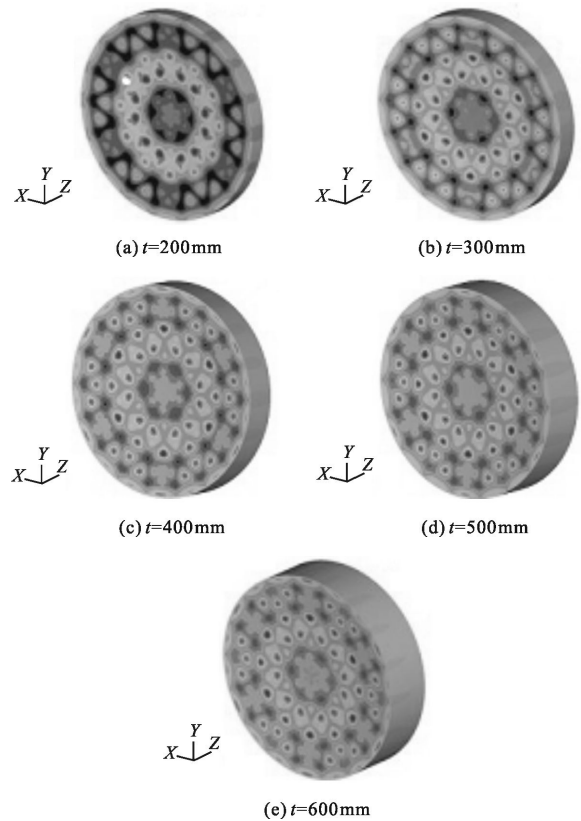


图 3 不同厚度对面形的影响分析云图

Fig.3 Cloud charts of surface shape results for different thickness

公式(3)只是给出了反射镜最少支撑点数目计算公式,并未给出满足面形要求条件下的支撑数目和位置,采用参数优化设计方法,逐步优化和改进支撑点的位置,最终确定反射镜支撑点数目和位置。表3为不同数目支撑点对反射镜面形精度分析。

从表3中可以看出,单纯增加支撑点的数目从3~48,反射镜的面形精度仍未达到设计要求($PV < \lambda/10$, $\lambda=632.8\text{ nm}$),并且随着支撑点数目的增加,反射镜组件的重量将大幅增加。由此可见,该支撑结构形式不适用于文中。

表 3 不同支撑点数对镜面面形误差的影响

Tab.3 Errors of mirror surface under different support pattern

The number of support pattern	PV/nm	RMS/nm
3	2 380.092	507.151 7
6	798.547 2	191.017 1
9	1 025.923	216.972 4
12	1 204.870	211.482 8
18	751.389 9	177.365 6
24	439.405 3	62.172 4
36	211.350 1	24.758 7
48	103.34	20.359 8

借鉴国内外其他大口径反射镜支撑方法,文中的大口径反射镜采用多点多层支撑结构形式。有限元模型如图4所示。

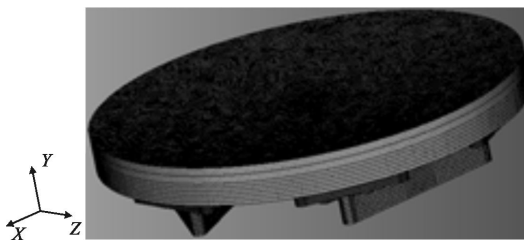


图 4 反射镜组件有限元模型

Fig.4 Finite element model of mirror component

边界条件及载荷工况:边界条件定义为反射镜背板与相机框架联接结点六自由度全部约束,分别在X、Y、Z三个轴向施加1g重力载荷及组件整体施加4℃均匀温升载荷。

表4为反射镜组件在重力和均匀温升载荷工况下反射镜镜面面形。

表 4 重力和温升工况下反射镜面形误差

Tab.4 Errors of mirror surface under gravitational distortion and 4℃ uniform temperature rise

Mirror component	RMS/nm	PV/nm
X direction	5.76	37.68
Y direction	5.77	41.67
Z direction	11.85	61.98
4℃ uniform temperature rise	7.78	41.9

反射镜在静态载荷作用下最大面形精度峰谷值(PV)为61.98 nm,最大均方根值(RMS)为11.85 nm,满足光学设计要求: $PV \leq 63.2\text{ nm}$, $RMS \leq 12.6\text{ nm}$ 。

4 结 论

文中从工程实践出发,介绍了大口径反射镜轻量化的必要性,并针对某空间大口径反射镜轻量化要求,提出了一种背部开放式、三角形轻量化结构形式。利用有限元软件,对采用多点多层支撑结构的轻量化反射镜分析,其面形精度能够满足成像要求。

参考文献:

- [1] Guo Shaowen, Wang Wuyi, Zhang Guangyu, et al. Lightweight mirror technology for space optical systems [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(4): 78-82. (in Chinese)
国绍文,王武义,张广玉,等.空间光学系统反射镜轻量化技术综述[J].光学仪器,2005,27(4):78-82.
- [2] Guo Xiqing, Wang Yueyong. Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy-caliber mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(6): 518-521. (in Chinese)
郭喜庆,王悦勇.大口径反射镜几种轻量化孔结构形式的分析[J].光学精密工程,2000,8(6):518-521.
- [3] Yan Yong, Jin Guang, Yang Hongbo. Lightweight structural design of space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 97-101. (in Chinese)
闫勇,金光,杨洪波.空间反射镜结构轻量化设计[J].红外与激光工程,2008,37(1):97-101.
- [4] Miroshnikov Michael M. Mirrors for optical telescopes [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(4): 701-710.
- [5] Gong Dun. The thermal effect on image quality of the remote sensor optical system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2010. (in Chinese)

- 巩盾. 温度对遥感器光学系统成像质量的影响 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [6] Zhang Jianhan, Fang Gang, Zhang Yumin. Study development of lightweight technology on borne mirror [J]. *Opt Instruments*, 2009, 31(3): 84–88. (in Chinese)
张剑寒, 方刚, 张宇民. 空间反射镜轻量化技术的研究进展 [J]. 光学仪器, 2009, 31(3): 84–88.
- [7] Wu Qingwen. Light-weight technology and its application of primary mirror in space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(6): 69–80. (in Chinese)
吴清文. 空间相机中主镜的轻量化技术及其应用 [J]. 光学精密工程, 1997, 5(6): 69–80.
- [8] Friedman E. *Photonics Rules of Thumb* [M]. New York: McGraw Hill, 2003.
- [9] Parks R E. Engineering with lightweight mirrors [C]// Proceedings of SPIE, 1990, 1236: 735–743.
- [10] Anderson D. Gravity deflections of lightweighted mirrors [C]// Proceedings of SPIE, 1982, 332: 424–435.
- [11] Yu Tianye, Jia Jianjun. Light weight design of large-diameter mirror [J]. *Infrared*, 2007, 28(8): 6–10. (in Chinese)
俞天野, 贾建军. 大口径主反射镜的轻量化方案设计 [J]. 红外, 2007, 28(8): 6–10.
- [12] Wu Qingwen, Yang Hongbo, Yang Jinsong, et al. Design and analysis for primary mirror and its support of space camera [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(2): 152–156. (in Chinese)
吴清文, 杨洪波, 杨近松, 等. 空间相机中反射镜及其支撑方案设计与分析方法 [J]. 光学技术, 2004, 30(2): 152–156.
- [13] Chen Wei, Ding Yalin, Hui Shouwen, et al. Design of kinematic mount for SiC scanning reflective mirror [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 161–166. (in Chinese)
陈伟, 丁亚林, 惠守文, 等. 碳化硅扫描反射镜支撑结构设计 [J]. 中国光学, 2012, 5(2): 161–166.
- [14] Shao Jun. Investigation on supporting structure of special reflector [J]. *Infrared*, 2006, 27(4): 36–41. (in Chinese)
邵军. 空间反射镜支撑结构研究概述 [J]. 红外, 2006, 27(4): 36–41.
- [15] Luo Tingyun, Zhang Fengqin, Fan Bin. Design and analysis of side support for large aspect ratio mirror [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(4): 66–70. (in Chinese)
罗廷云, 张凤芹, 范斌. 大长细比反射镜侧面支撑结构设计与分析 [J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(4): 66–70.
- [16] Friedman E. *Photonics Rules of Thumb* [M]. New York: McGraw Hill, 2003.