

空间相机快速反射镜的结构轻量化设计

汪奎^{1,2}, 辛宏伟¹, 徐宏¹, 任天赐^{1,2}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对空间相机快速反射镜的工作条件和工作要求, 提出了快速反射镜的结构轻量化设计方案。以 100 mm 口径圆形反射镜为研究对象, 设计了利用加强筋减重的反射镜轻量化结构, 并提出了基于镜面抗弯刚度等效的等效标准圆镜厚度的计算方法; 分别设计了基于镶嵌体结构的背部三点支撑方案和背部中心支撑方案, 有限元对比分析的结果表明, 采用背部中心支撑方案可以避免镜座与反射镜之间因温度变形不协调引起的多个支撑点相互干涉, 镜面面形精度较高, 并且由于结构简单, 其摆动组件的总质量更轻; 为了进一步提高快速反射镜结构的综合性能, 同时以摆动组件的总质量及镜面面形的均方根值为优化目标, 对背部中心支撑方案下快速反射镜的主要结构参数进行了多目标优化, 优化结果显示, 加强筋的高度和镶嵌体的壁厚对结构综合性能的贡献最大; 最终优化方案下快速反射镜的摆动组件总质量仅为 95.75 g, 结构的一阶谐振频率为 217 Hz, 在 -8 °C 温度载荷的作用下, 镜面面形的 RMS 为 7.26 nm, 满足设计要求的同时, 反射镜实现了 40.4% 的轻量化率。

关键词: 快速反射镜; 轻量化; 背部中心支撑; 对比分析; 有限元仿真; 多目标优化

中图分类号: V443.5; TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0418001

Lightweight design of fast steering mirror for space cameras

Wang Kui^{1,2}, Xin Hongwei¹, Xu Hong¹, Ren Tianci^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the working conditions and working requirements of the fast steering mirrors for space cameras, a lightweight scheme for fast steering mirrors was proposed. Taking the mirror with a diameter of 100 mm as the research object, the lightweight structure based on ribs was designed, and the calculation method of the equivalent thickness of standard circular mirror was proposed. Two supporting methods of the mirror, rear support with three points or rear support with a central point, were designed separately, and the results of the contrastive analysis indicate that mirror supported with a central point can avoid mutual interference between multiple support points, which is caused by inconsistent temperature deformation of the holder and the mirror. The accuracy of the mirror surface is higher, and because of its simple structure, the total mass of the wobble assembly is lighter. In order to achieve the

收稿日期: 2018-11-18; 修订日期: 2018-12-14

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500100)

作者简介: 汪奎(1994-), 男, 硕士生, 主要从事空间相机光机结构的优化设计方面的研究。Email: lightningwings@qq.com

导师简介: 辛宏伟(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要从事空间相机光机结构方面的研究。Email: xinhwciomp@sina.com

best overall performance of the fast steering mirror structure, a multi-objective optimization of the main structural parameters was executed, the total mass of the wobble assembly and the RMS value of the mirror surface were simultaneously used as the optimization goals. The optimization results showed that the rib height and the adapter thickness contributed the most to the overall performance of the structure. The total mass of the wobble assembly under the optimized scheme is only 95.75 g, and the first-order resonant frequency of the structure is 217 Hz, the RMS of the mirror surface is 7.26 nm under the condition of $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature load, which meets the design requirements while achieving a 40.4% reduction in the weight of the mirror.

Key words: fast steering mirror; lightweight; rear support in center; contrastive analysis; finite element simulation; multi-objective optimization

0 引言

空间相机成像期间,卫星平台相对于地面的高速运动、飞行姿态调整等因素引起的像移需要进行补偿之后才能得到清晰的遥感图像^[1]。快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)由反射镜、柔性支撑、控制系统、伺服电机和位移传感器等部分组成,通过实时调整反射镜的摆角改变光学系统中的光路方向,可以实现跟踪、定位和光学稳像等功能,是空间相机常用的像移补偿机构^[2-3]。

要稳定、有效地补偿空间相机工作时的低频像移,快速反射镜需要满足几个工作要求^[4]:

(1) 响应速度快:空间相机工作时,单次曝光时间较短,为了补偿高频像移,快速反射镜需要远高于快门速度的响应速度;

(2) 定位精度高:快速反射镜的定位精度直接影响像移补偿的效果,高定位精度才能确保空间相机得到高分辨率的遥感图像;

(3) 控制带宽大:因为空间相机快速反射镜的工作环境复杂,系统会受到诸如温度变化、卫星平台振动等各个因素的扰动,需要较大的控制带宽以保证整个光学系统持续稳定工作。

反射镜作为 FSM 机构的核心元件,是影响整机性能的关键。在快速反射镜结构设计的过程中,对反射镜静态刚度和结构动态响应性能都有严格的要求。满足镜面刚度要求的前提下尽可能减轻镜体和镜座的质量有利于减小摆动组件的转动惯量、提高快速反射镜的响应速度和谐振频率;另一方面,因为快速反射镜工作在空间相机内部的狭窄空间内,没

有条件配备独立的温控装置,机构一般处在 $10\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变化温度场中,这也对反射镜尺寸的热稳定性提出了挑战,故减小温度载荷对镜面面形精度的影响也是结构设计重点^[5]。

本次以 100 mm 口径的圆形反射镜为研究对象,工作时镜面的面形精度要求为 $\text{RMS}<\lambda/30(\lambda=632\text{ nm})$,考虑到镜面加工时的面形误差,设计阶段镜面 RMS 应控制在 12 nm 以下^[6]。此外,结构的一阶谐振频率应高于 200 Hz,以满足发射以及在轨工作时的动态稳定性要求。根据快速反射镜的工作要求,选择各结构的材料属性列于表 1。

表 1 快速反射镜主要结构的材料属性

Tab.1 Material properties of the main structure of the fast steering mirror

Structure	Materials	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	E/MPa	μ	α/K^{-1}	Reference
Mirror	SiC	3.11	3.73×10^5	0.17	2.7×10^{-6}	[7]
Support	Tc4	4.43	1.09×10^5	0.34	8.5×10^{-6}	[8]
Adhesive	RTV	1.09	2.2	0.49	270×10^{-6}	[9]

1 反射镜的轻量化设计

反射镜的轻量化设计是指在不影响反射镜工作口径并保证镜面轴向刚度要求的前提下,通过合理地改进镜体结构以减轻镜体质量的设计过程^[10]。

标准圆形反射镜的挠性变形在力学上可以抽象成圆形薄板的弯曲问题,根据弹性板弯曲变形的 Reissner 理论^[11]有:

$$\nabla^2\omega=\frac{q}{D} \quad (1)$$

式中: $D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$ 为圆镜的抗弯刚度, t 为镜厚, E 为反射镜材料的弹性模量, μ 为泊松比; q 为镜面单位面积承受的轴向载荷, 包括体力 and 面力; ω 为中性面的挠曲函数。若以光轴为 z 轴建立柱坐标系, 则圆镜受对称力和对称约束时 $\frac{\partial \omega}{\partial \theta} = 0$, 代入公式(1)后展开得:

$$\frac{d^4 \omega}{dr^4} + \frac{2}{r} \frac{d^3 \omega}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \omega}{dr^2} + \frac{1}{r^3} \frac{d\omega}{dr} = \frac{q}{D} \quad (2)$$

该微分方程的通解为:

$$\omega = C_1 \ln r + C_2 r^2 \ln r + C_3 r^2 + C_4 + \omega^* \quad (3)$$

式中: ω^* 为满足公式(2)的一个特解, 需要引入四个边界条件消除系数。对于半径为 R 的圆镜, 边缘固支的情况下可取特解 $\omega^* = \frac{q}{64D} r^4$, 由 $r=0$ 时 ω 存在可知 $C_1=0$; 引入几何边界条件:

$$\omega|_{r=R}=0; \frac{d\omega}{dr}|_{r=R}=0 \quad (4)$$

引入力边界条件:

$$Q_z|_{r=R} = -D \left[\frac{d^3 \omega}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2 \omega}{dr^2} \right] |_{r=R} = -\frac{q\pi R^2}{2\pi R} \quad (5)$$

可得:

$$\omega = \frac{q}{64D} (R^2 - r^2)^2 \quad (6)$$

当 q 为轴向重力场时, 将 $q = \rho g t$ 和 $D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$

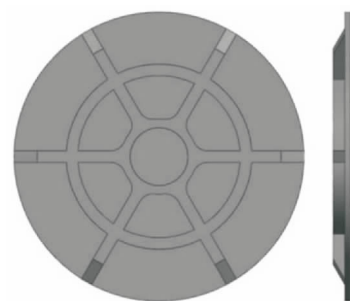
代入上式得:

$$\omega = \frac{3\rho g(1-\mu^2)}{16Et^2} (R^2 - r^2)^2 \quad (7)$$

由公式(6)可知, 边缘固支条件下标准圆镜受均布轴向载荷 q 作用时, 镜面的挠度 ω 与圆镜的抗弯刚度 D 成反比。若圆镜采用图 1(a)所示轻量化结构, 则加强筋的引入可提高镜面的抗弯刚度, 减小镜面的挠性变形, 进而可以采用更小的镜面厚度。试取镜面厚度为 2 mm, 加强筋的高度和厚度均为 4 mm, 利用有限元软件 MSC.Patran 分析边缘固支、轴向重力场作用下图 1(a)中反射镜的受力变形情况, 得到了图 1(b)所示的镜面节点轴向位移云图。

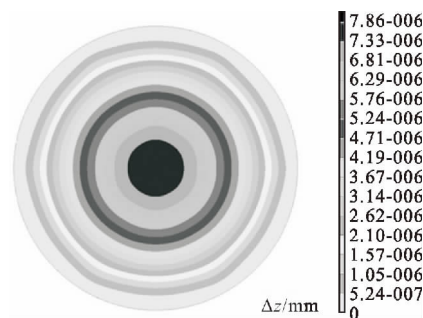
可以看到, 反射镜镜面的轴向位移云图呈圆环状, 中心点的挠度为 $\omega|_{r=0} = 7.86 \text{ nm}$, 利用中心点挠度等效的方法求反射镜的等效标准圆镜厚度 t_m , 将 $\omega|_{r=0} = 7.86 \times 10^{-6} \text{ mm}$ 代入公式(5), 求得 $t_m = 3.44 \text{ mm}$; 3.44 mm 厚标准圆镜的质量为 84 g, 而采用上述轻量

化方案的反射镜质量为 71.2 g, 实现了约 15.2% 的轻量化率。可见, 基于此种结构方案可以实现反射镜的轻量化设计。



(a) 镜体轻量化结构

(a) Lightweight structure of mirror



(b) 镜面轴向位移云图

(b) Axial displacement fringe of mirror surface

图 1 反射镜的轻量化方案及仿真结果

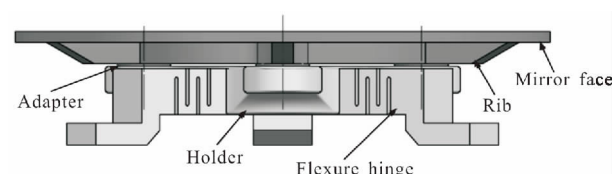
Fig.1 Lightweight scheme and simulation results of the mirror

2 反射镜支撑方案的设计

工程中常用的反射镜的支撑方式主要有侧面支撑、背部三点支撑和背部中心支撑三种^[12]。侧面支撑以反射镜的侧面为定位基准, 结构简单, 但镜框的径向尺寸较大, 不适用于对空间紧凑性有要求的快速反射镜机构; 背部三点支撑常用于大口径反射镜, 支撑稳固可靠, 有利于减小大口径反射镜的重力变形; 背部中心支撑常用于小口径的反射镜, 优点是结构简单, 温度变化时产生的热应力较小^[13]。

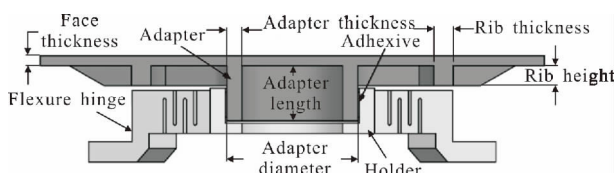
为了研究不同支撑方式对镜面面形精度的影响, 在采用了上述轻量化方案的反射镜底部引入镶嵌体(Adapter), 分别设计了背部中心支撑和背部三点支撑两种支撑方案。图 2(a)展示了背部三点支撑的结构示意图, 在镜面背部的圆周上等相位分布了三个镶嵌体; 图 2(b)为背部中心支撑的结构示意图,

一枚镶嵌体位于镜面背部的中心位置。镶嵌体与镜座(Holder)之间均采用环带胶接法连接,此种连接方式简单有效,适应性强,温度变化时可以在一定程度上补偿镜座与反射镜之间的不协调变形。胶层的厚度不宜过厚,这样会导致连接刚度下降,支撑稳固性降低;过薄则补偿变形的效果较差,文中设计两种支撑方式的胶层厚度均采用 0.3 mm^[14]。三个相隔 120° 布置的回形梁为柔性铰链,与镜座采用一体化设计。



(a) 背部三点支撑

(a) Rear support with three points



(b) 背部中心支撑

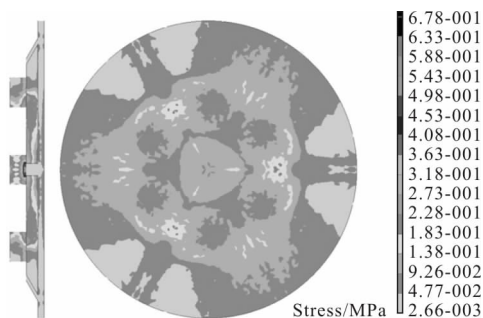
(b) Rear support with central point

图 2 反射镜的两种支撑方案

Fig.2 Two support schemes of the mirror

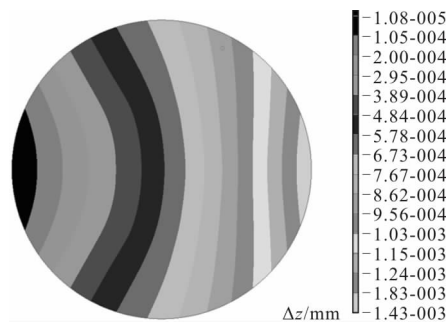
使用 MSC.Patran 建立两种结构方案的有限元模型,赋予的材料属性见表 1。根据空间相机快速反射镜工作时的实际工况,对模型施加的载荷条件为 $\Delta T = -8^\circ\text{C}$ 的温度载荷,三个柔性铰链底部施加固定约束。

图 3 为背部三点支撑的有限元仿真云图,从分析结果来看,由于钛合金镜座与 SiC 反射镜的热膨



(a) 应力云图

(a) Stress fringe



(b) 镜面轴向位移云图

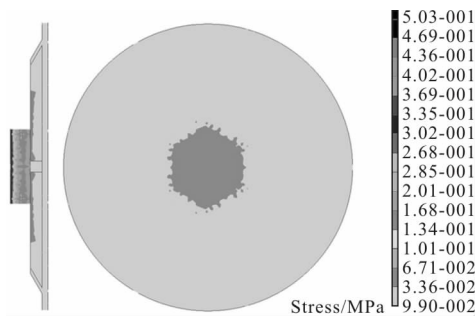
(b) Axial displacement fringe

图 3 背部三点支撑结构的有限元仿真

Fig.3 Finite element simulation of rear support with three points

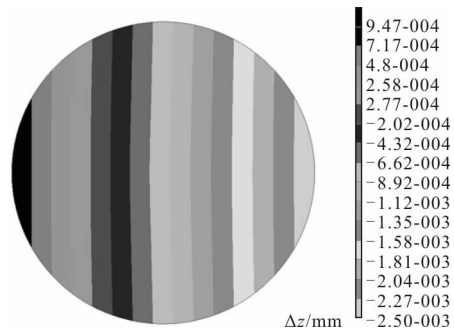
胀系数不同,温度变化时二者变形不协调,多个支撑点之间互相干涉导致反射镜产生了较大的热应力和附加变形。从应力云图中可以发现整个反射镜上都分布着较大的应力;位移云图显示,镜面节点的轴向位移沿镜面分布不均匀,经过平面拟合得到镜面的 RMS 为 51.46 nm,面形精度较低。

图 4 为背部中心支撑方案的有限元仿真结果。从



(a) 应力云图

(a) Stress fringe



(b) 镜面轴向位移云图

(b) Axial displacement fringe of mirror surface

图 4 背部中心支撑结构的有限元仿真

Fig.4 Finite element simulation of rear support with central point

应力分布云图可以看到,采用背部中心支撑方案后,胶接应力将主要分布于反射镜的镶嵌体和加强筋部分,而与支撑点相距较远的镜面部分,应力快速衰减到三个数量级以下。通过镜面节点的轴向位移云图可以看到,节点轴向位移沿镜面均匀分布,通过平面拟合算得镜面的 RMS 为 13.54 nm,镜面面形精度较高。

表 2 列举了两种支撑方案的摆动组件总质量(不含柔性铰链)、绕转动中心的两轴转动惯量,以及

表 2 两种支撑方案的分析结果对比

Tab.2 Analysis results of two support schemes

Supporting methods	Total mass of wobble assembly/g	Moment of inertia /kg·mm ⁻²	RMS/nm
Rear support with three points	101.2	60.65	51.46
Rear support with central point	89.21	55.03	13.54

镜面的 RMS。与背部三点支撑方案相比,采用背部中心支撑方案可以避免镜座与反射镜之间因温度变形不协调产生的多支撑点相互干涉,同时,胶层和镶嵌体为镜面提供了一个热应力的缓冲带,很大程度上隔离了热应力对镜面的影响。此外,由于结构简

单,背部中心支撑结构的摆动组件总质量更轻,两轴转动惯量更小,快速反射镜可以获得更好的动态性能。可见,采用轻量化结构的反射镜配合背部中心支撑方案更益于实现空间相机快速反射镜的高精度、轻量化设计。

3 结构参数的多目标优化

一般来说,快速反射镜的结构方案确定后,过于追求轻量化的结果往往是镜面面形精度的降低。为了实现高精度、轻量化的设计目标,应对快速反射镜的结构参数进行多目标优化,优化目标为摆动组件的总质量 M 和镜面 RMS 在一定的平衡下尽可能小,以寻找综合评价更优的结构^[15]。依据现有背部中心支撑方案的性能参数,对优化方案的性能进行加权计算后引进性能指数 QI (Quality Index):

$$QI = \frac{1}{2} \times \left(\frac{M}{89.21} + \frac{RMS}{13.54} \right) \times 100\%$$

则现有方案的 QI 为 100%, 优化方案的 QI 取值越小表明其综合性能越好(见图 5)。如图 2(b)所示,影响 QI 值的主要结构参数有镜面厚度(Face Thickness)、筋厚(Rib Thickness)、筋高(Rib Height)、镶嵌体壁厚(Adapter Thickness)、镶嵌体外径(Adapter Diameter)和镶嵌体长度(Adapter Length)。因为镶嵌体的长度变化

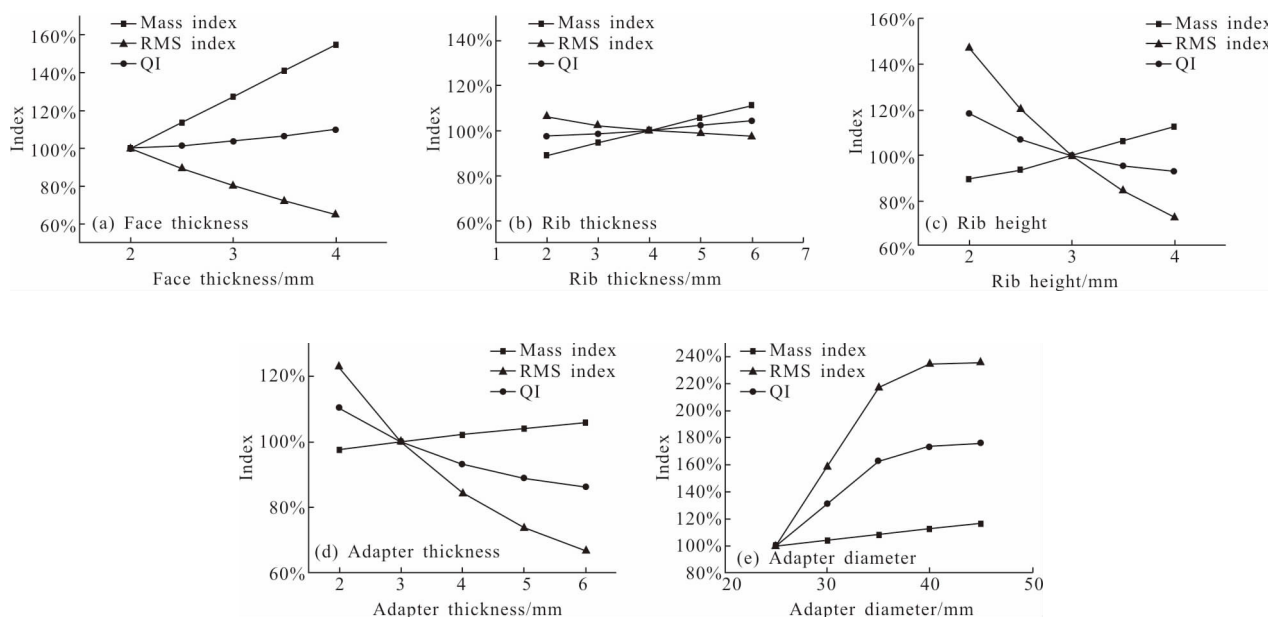


图 5 不同结构参数对 QI 指数的影响趋势

Fig.5 Influence of different structural parameters on quality index

会直接反映为摆动组件的质心到柔性铰链转动中心的距离变化, 增加镶嵌体的长度会增大摆动组件的转动惯量, 不利于快速反射镜动态性能的提高, 故镶嵌体长度的选定原则为确保胶接稳固性的前提下取最小值。

选取其余五个结构参数作为变量, 运用控制变量法, 在备选的尺寸范围内依次对每个反射镜的结构参数取不同的值, 进行有限元仿真和平面拟合后绘制 QI 随每个参量变化的折线图。

分析 QI 随各个结构参数的变化趋势可知, 镜面厚度的增加虽然能提高镜面刚度和工作载荷作用下镜面的面形精度, 但是同样也显著增加质量, 筋厚对摆动组件的质量和镜面 RMS 的影响都不明显, 这两个结构参数取较小值有利于获得较好的综合性能; 在一定范围内, 增加筋高和镶嵌体壁厚的值可以显著提高综合性能, 二者均在取值 6 mm 时开始对快速反射镜结构的综合性能贡献放缓; 镶嵌体外径的增加会引起快速反射镜结构综合性能的迅速恶化,

这是因为径向尺寸的增加会增大镶嵌体和镜座温度变形的不协调量, 导致热应力的增加, 同时, 加强筋在镜面背部的分布减少亦造成镜面刚度降低, 故镶嵌体外径取值应在保证结构连接可靠性的基础上尽可能小。

综上所述, 选取镜面厚度和筋厚的尺寸为 2 mm, 筋高和镶嵌体壁厚为 6 mm, 镶嵌体外径为 25 mm, 镶嵌体长度为 13 mm。最终方案的三维模型如图 6(a) 所示, 摆动组件总质量为 95.75 g; 图 6(b) 为工作载荷下镜面的轴向位移云图, 将变形后的镜面节点坐标导入 Matlab 中进行平面拟合, 去除刚体位移后绘制了图 6(c) 所示的镜面变形云图, 可以看到镜面面形较为理想, RMS 为 7.26 nm, PV 为 24.86 nm。模态分析的结果显示, 优化结构的一阶谐振频率为 217 Hz。利用前述方法计算反射镜的等效标准圆镜厚度为 4.85 mm, 轻量化率为 40.4%; 优化方案的 QI 值为 80.5%, 结构的综合性能得到了很大的提升。

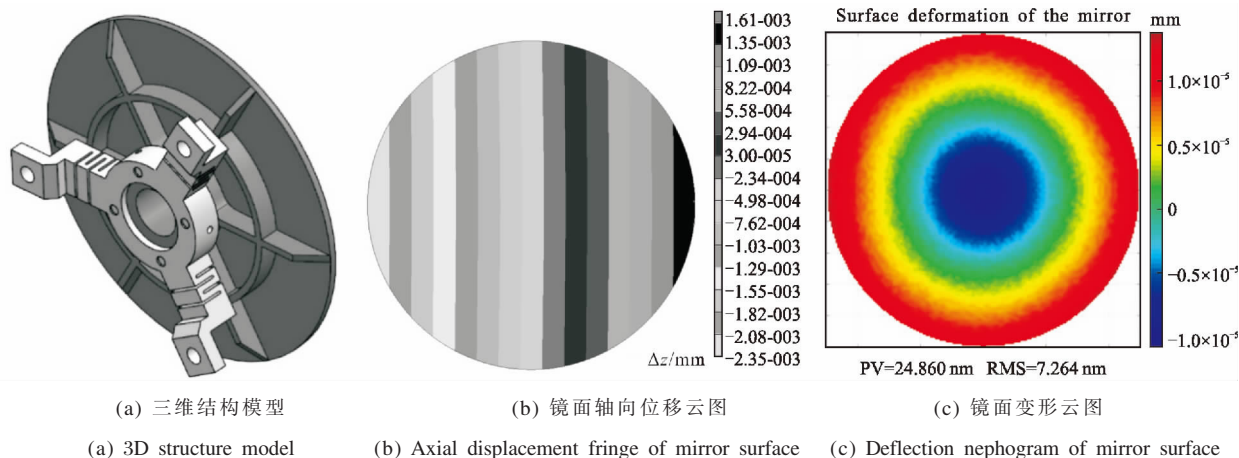


图 6 优化方案的结构模型及仿真结果

Fig.6 Structure model and simulation results of the optimized scheme

4 结 论

快速反射镜是空间相机中常用的像移补偿装置, 其工作性能将直接影响空间相机的成像质量, 镜体的静态刚度、镜面面形的热稳定性以及结构的动态响应性能都是结构设计阶段应考虑的问题。通过对反射镜结构和支撑方式的改进, 确立了基于加强

筋的反射镜轻量化结构和背部中心支撑方案。相比工程中常用的背部三点支撑方案, 背部中心支撑方案下热应力将主要分布于镶嵌体和加强筋部分, 对镜面面形的影响大大减小; 且因结构简单, 摆动组件质量较小, 动态性能得到改善。

为了进一步提高结构的综合性能, 引入综合性能指数 QI 定量评价优化方案, 对快速反射镜的主要结构参数进行了多目标优化。在选取的五个结构参

数中, 增加镶嵌体壁厚和加强筋高度最有利于提高镜面的面形精度, 且不会造成摆动组件总质量的显著提高。确定最终结构方案后, 对模型进行了静力学分析和模态分析, 结果表明, 在 -8°C 温度载荷的作用下, 镜面的 RMS 可达 7.26 nm , 结构一阶谐振频率为 217 Hz , 满足工程要求的同时, 反射镜实现了 40.4% 的轻量化率。

参考文献:

- [1] Du Yunfei, Liu Bo, Hu Bingliang, et al. A compensation method of image motion in full-frame CCD aerial camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(12): 2334–2336. (in Chinese)
杜云飞, 刘波, 胡炳梁, 等. 一种全帧型 CCD 航空相机像移补偿方法[J]. 光子学报, 2007, 36(12): 2334–2336.
- [2] Fu Chengyu, Jiang Lingtao. Image tracking system with a fine-steering-mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1994 (3): 1–8. (in Chinese)
傅承毓, 姜凌涛. 快速反射镜成像跟踪系统[J]. 光电工程, 1994(3): 1–8.
- [3] Loney G C. Design of a high-bandwidth steering mirror for space-based optical communications[C]//Active and Adaptive Optical Components. International Society for Optics and Photonics, 1992.
- [4] Xu Xinhang, Yang Hongbo, Wang Bin, et al. Research on key technology of fast-steering mirror[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1095–1103. (in Chinese)
徐新行, 杨洪波, 王兵, 等. 快速反射镜关键技术研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1095–1103.
- [5] Qin Chengyun, Sha Wei, Zhang Xingxiang, et al. Optimization of local space mirror surface shape influenced by temperature [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42 (2): 28–34. (in Chinese)
秦承运, 沙巍, 张星祥, 等. 针对温度影响的空间反射镜局部面形优化[J]. 光电工程, 2015, 42(2): 28–34.
- [6] Bao Qihong, Sha Wei, Chen Changzheng, et al. Lightweight and optimization design of rectangular reflective mirror supported in centre [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0718003. (in Chinese)
包奇红, 沙巍, 陈长征, 等. 中心支撑长条形反射镜轻型优化设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0718003.
- [7] Wang Fuguo. Analysis of influence of temperature and supporting methods on 1.2 m SiC primary mirror surface figure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(6): 933–936. (in Chinese)
王富国. 温度和支撑方式对 1.2 m SiC 主镜面形的影响分析[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 933–936.
- [8] Li Fu, Ruan Ping, Zhao Baochang, et al. Finite element analysis of the plane mirror fastened by adhesive[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(6): 896–899. (in Chinese)
李福, 阮萍, 赵葆常, 等. 胶固紧平面反射镜的有限元分析[J]. 光学技术, 2006, 32(6): 896–899.
- [9] Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, et al. Effect of temperature change on the surface accuracy of bonded lens [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38 (8): 201–206. (in Chinese)
王汝冬, 田伟, 王平, 等. 温度变化对胶粘结透镜面形精度的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 201–206.
- [10] 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.
- [11] Cao Tianjie. Discussions on the fundamental equations for axisymmetric thin circular plates [J]. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(4): 442–448. (in Chinese)
曹天捷. 圆薄板轴对称弯曲问题的基本方程讨论[J]. 力学与实践, 2016, 38(4): 442–448.
- [12] Xu Xinhang, Wang Bin, Qiao Jian, et al. Lightweight design of mirror in fast-steering mirror system [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 35–41. (in Chinese)
徐新行, 王兵, 乔健, 等. 快反系统中平面反射镜的轻量化设计[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 35–41.
- [13] Tan Jinguo, He Xin, Fu Liangliang. Support technique in centre of minitype reflector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1070–1074. (in Chinese)
谭进国, 何欣, 付亮亮. 小型反射镜中心支撑技术 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1070–1074.
- [14] Dong Deyi, Li Zhilai, Li Ruigang, et al. Simulation and experiment of influence of adhesive on reflective mirror surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2698–2707. (in Chinese)
董得义, 李志来, 李锐钢, 等. 胶层固化对反射镜面形影响的仿真与试验[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2698–2707.
- [15] Bao Qihong, Sha Wei, Chen Changzheng, et al. Characteristics of rear support in centre for space SiC mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(2): 22–31. (in Chinese)
包奇红, 沙巍, 陈长征, 等. 空间 SiC 反射镜背部中心支撑特性[J]. 光子学报, 2017, 46(2): 22–31.