

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209510

小卫星空间跟踪遥感相机二维摆镜组件优化设计*

张成成^{1,2}, 何斌¹, 吕阳^{1,2}, 聂婷¹, 贺玉坤^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:根据某空间跟踪遥感相机光学系统特性和工作指标要求,为了达到节约空间、保证相机成像质量的目的,设计了一种适用于小卫星平台的二维摆镜,并对口径为300 mm的空间相机用摆镜进行了轻量化设计。以镜体厚度、切角大小、边缘厚度、镜面厚度及轻量化筋的厚度为设计变量,以面形峰值PV不大于63 nm和均值方根RMS不大于12 nm为边界条件进行了优化,针对单点支撑孔径的参数设计提出了一种将质量、面形峰值PV和均值方根RMS在一定平衡下尽可能小的多目标优化方法。最终优化的反射镜质量仅为0.84 kg,轻量化率达到76%。单点柔性支撑结构采用3个相隔120°布置的回形梁作为柔性铰链,与镜座采用一体化设计,结构简单,减少了摆镜组件的转动惯量,提高跟踪相机的响应度。对优化后的摆镜组件进行空间环境校核,摆镜在空间XY微重力工况下的面形RMS值小于6 nm,Z向重力、-50℃载荷及3.5 rad/s旋转惯性载荷条件下的面形RMS均小于12 nm,组件基频为326 Hz,最后对面形精度和摆镜定位精度进行了实验验证,证明了该方案的可行性。

关键词:空间跟踪相机;二维摆镜;轻量化;优化设计;有限元分析

中图分类号: TH122 V443+.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.20

Optimization design of two-dimensional scanning mirror component of small satellite space tracking remote sensing camera

Zhang Chengcheng^{1,2}, He Bin¹, Lyu Yang^{1,2}, Nie Ting¹, He Yukun^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: The optical system characteristics and working index requirements of a certain type of space tracking remote sensing camera are considered. To save space and ensure the image quality of the camera, a two-dimensional scanning mirror suitable for small satellite platform is designed, and the light weight of the scanning mirror for the 300 mm space camera is realized. The thickness of mirror body, the cutting angle, the thickness of edge, the thickness of mirror surface and the thickness of lightweight reinforcement are taken as the design variables. The target value of peak PV is smaller than 63 nm and that of RMS is smaller than 12 nm. These two values are taken as the optimal boundary condition. A multi-objective optimization method is proposed to minimize the mass, surface peak PV and mean root RMS under certain equilibrium for the parameter design of single point support aperture. The weight of the optimized mirror is only 0.84 kg, and the lightweight ratio reaches 76%. The single point flexible support structure uses three loop beams spaced 120° apart as the flexible hinge, and utilizes the integrated design with the mirror seat. The simple structure reduces the moment of inertia of the scanning mirror component and improves the response speed of the tracking camera. The space environment of the optimized scanning mirror component is checked. The RMS value of the surface shape of the scanning mirror is less than 6 nm in XY microgravity; the RMS value of the surface shape of the scanning mirror is less than 12 nm in Z gravity, -50℃ load and 3.5 rad/s rotational inertia load; the fundamental frequency of the component is 326 Hz. Finally, the experiment evaluation of the surface shape accuracy and the positioning accuracy of the scanning mirror proves the feasibility of the scheme.

Keywords: space tracking camera; two-dimensional scanning mirror; lightweight; design optimization; finite element analysis

0 引言

在空间遥感相机系统中,推扫成像与摆动扫描成像是空间遥感相机两种普遍采用的成像方式。推扫成像结构简单,但视场受像面大小限制,而且对卫星的飞行速度和轨道高度等要求严格;摆动扫描空间相机在光学镜头视场不变的情况下扩大视场范围^[1]。现有摆镜大多为一维摆扫,只能对特定的幅宽进行成像,成像范围受到一定限制,且无法对感兴趣的目标进行搜索与跟踪。

目前常用的摆扫方案主要分为平面反射镜摆扫、望远镜系统摆扫和整机摆扫。但是,望远镜摆扫和整机摆扫因运动部件体积和质量大,机动响应慢,控制难度较大。而基于平面反射镜的二维摆镜具有精确控制光束指向、稳定光束成像质量和补偿大气抖动及平台振动引起的光束偏转等功能,已被广泛应用于自适应光学、激光通信、天基目标监视和空间对地观测等领域^[2]。

因此,采用二维摆镜可实现对地物或空间目标的巡视跟踪,与一维摆镜相比,小卫星跟踪遥感相机二维摆镜的应用环境更加恶劣,设计要求更加苛刻,主要有如下几个特点:

1) 承受旋转运动和惯性载荷:为实现对地或空间目标的搜索、跟踪和连续成像,要求摆镜具有承受旋转运动和惯性载荷的作用;

2) 承受温度载荷:由于摆镜置于光学遥感仪器前端的镜筒之外,不能进行热控包覆,因而不能配备独立的温控装置,需承受较大温度载荷^[3-4];

3) 具有快速响应性:空间相机工作时除了补偿高频相移外,还要确保相机能够快速地搜索和实时的跟踪目标,因而需要摆镜具有较高的响应速度^[5-6]。

本文为满足某小卫星跟踪相机的研制需求,在体积和质量方面的严格要求下,设计具有重量轻、体积小、精度高适用于小卫星星座平台的二维摆镜组件。因此,在满足光学系统要求和给定空间环境的条件下为最大限度减少摆镜体积质量,成为小卫星跟踪相机设备研制的一个急需解决的问题。

1 反射镜轻量化设计

1.1 技术要求

该小卫星跟踪空间相机要求摆镜机构的二维摆动范围不小于 $\pm 15^\circ$,摆镜摆动 15° 的时间不大于1 s。相机跟踪目标时,为保证成像质量,要求摆镜转动速率稳定性曝光时间内小于 $1/5$ 个像元,定位精度优于 0.01° ,跟踪相机要求通光口径不小于210 mm,光学系统要求反射镜在

自重变形工况下面形误差 $PV \leq \lambda/10$, $RMS \leq \lambda/50$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),工作环境的温度载荷 -50°C 。根据以上要求,以 45° 为中心摆动 $\pm 15^\circ$ 成像,则反射镜直径尺寸至少为300 mm。在满足以上空间环境的条件下,为了节约小卫星相机的空间尺寸和减少整机质量,需对反射镜进行轻量化。跟踪相机摆镜工作示意图如图1所示,摆镜通过俯仰和方位两个方向的扫描将地物或空间目标扫描到光学系统,通过光学系统投射到面阵CCD上,实现对地面或空间的搜索、跟踪和连续成像。

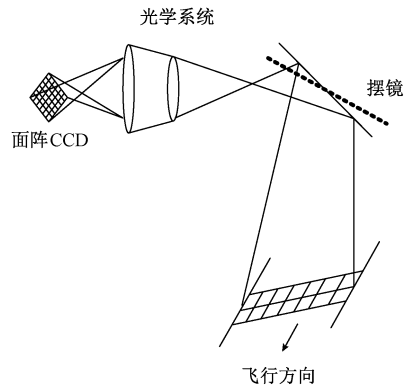


图1 摆镜成像示意图

Fig. 1 Image diagram of the scanning mirror

1.2 材料选择

反射镜材料的选择有铍(Bo)、硅(Si)、铝(Al)、光学玻璃(K9)、熔石英(SiO_2)、碳化硅(SiC)等。

铍(Bo)的密度最低、比刚度高、弹性模量高,可以作为反射镜的材料的一种较优选择,但属于有毒材料,加工成本高,且线膨胀系数和热畸变较大,因此加工难度大,空间应用较少;像熔石英(SiO_2)这样的玻璃陶瓷材料热膨胀系数接近于0,并且抗热变能力强,但其刚度仅为碳化硅(SiC)材料的 $1/4$,而且抗断裂韧性低于碳化硅;近些年铝(Al)合金以其灵活的加工方式和快速的制培土能力,作为中小口径反射镜的研究发展迅速,并且引起微纳卫星研究者的重视,但其自身弹性模量较低,轻量化程度不高,且打孔轻量化残余应力较大,即使在高效处理后也难以保证其光学镜面精度;相比其他材料,碳化硅(SiC)弹性模量、比刚度极高,有利于抑制反射镜因自身重力产生的面形变化,也可高度轻强量化,同时具有导热率高、热畸变低等特性,可以减少反射镜体温度梯度的变化^[7-8]。目前常用空间环境应用的反射镜材料属性如表1所示。

选取弹性模量大、比刚度极高的碳化硅(SiC)作为反射镜材料。选取密度相对较低、弹性模量较大的钛合金(TC4)作为反射镜背部柔性支撑材料。

表1 常用空间反射镜材料属性
Table 1 Material properties of common space mirrors

材料名称	密度 ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量 E / GPa	比刚度 (E/ρ) / 10^6 m	线胀系数 α /($10^{-6}/\text{K}$)	导热率 λ /($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	热畸变 (α/λ) /(10^{-8} m/W)
SiO ₂	2.19	72	32.8	0.5	1.40	35.714
K9	2.53	81	32.0	7.5	1.64	30.490
Si	2.33	131	56.2	2.6	137.00	18.980
SiC	3.00	350	116.7	2.6	140.00	18.570
Bo	1.85	287	155.1	11.4	216.00	52.780
TC4	4.40	114	25.9	9.1	7.40	1 229.730
Al	2.70	68	25.2	25.0	167.00	149.700
Mg ₄ Al ₃	1.80	40	22.2	25.2	201.00	125.370
SiC/Al	3.00	180	60.0	8.0	225.00	35.560

1.3 超轻量化反射镜初始结构

轻量化 SiC 反射镜的支撑方式和结构形式直接影响反射镜材料的分布,表现出反射镜的刚度差异。

在空间领域,反射镜背部支撑方式多采用多点支撑,是大口径反射镜背部支撑的主要方式,其特点是能够保证较高的面形精度,但背部多点支撑结构复杂、体积和质量较大,转动惯量较大,不符合小卫星跟踪相机要求响应快的特点;相比之下,中心单点支撑方式结构简单、质量小、刚度较高,温度变化时产生的热应力小,且通过结构设计优化能保证其较高的面形精度。

目前,常用的轻量化孔的结构形式有三角形、四边形、蜂窝形、扇形和复合形等。其中三角形结构稳定,力学性能较好,能够保证较好的刚度;四边形较三角形轻量化程度较高,结构简单易于加工,常用在长条形反射镜,扇形轻量化程度高,但应力效果不佳^[9-10]。

综上,为保证该摆镜在自重变形、温度变化和旋转运动时都具有良好的面形精度及稳定性,在摆扫反射镜初始结构设计时采用背部中心单点支撑方式,轻量化孔采用三角形和扇形的开放式复合形式,根据以往空间反射镜的设计经验,并考虑空间微重力条件下的面形影响,将反射镜支撑孔径 (hole radius) 设为 50 mm,支撑孔壁厚 (hole thickness) 设为 8 mm,轻量化筋厚度 (rib thickness)、镜面厚度 (face thickness)、外壁厚 (side thickness) 和镜体高度 (height) 的初始值分别设为 4 mm 和 30 mm,其结构形式如图 2 所示。

2 反射镜超轻量化设计

2.1 反射镜轻量化设计

图 3 为多目标集成优化设计流程,根据空间环境的使用要求选择合适材料,确定初始结构形式,并根据使用

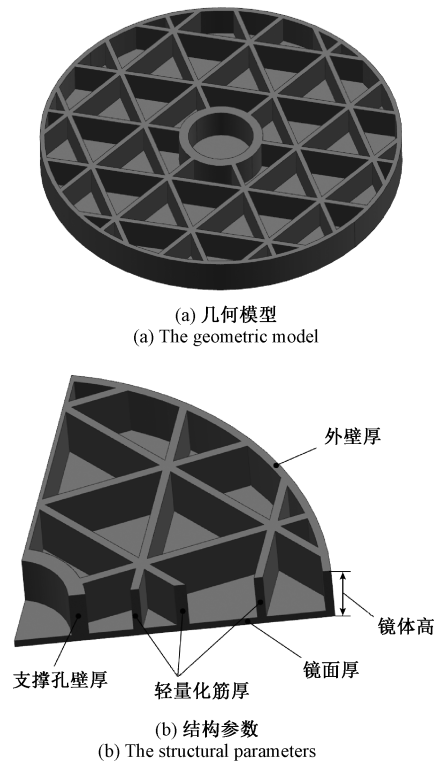


图2 摆镜初始结构

Fig. 2 Initial structure of the scanning mirror

要求指定相应设计变量和约束条件;然后选用合理的优化算法进行多变量优化设计;并对设计结果进行空间环境的校核;最后通过仿真分析对摆镜设计结果进行评估,验证其轻量化结果是否满足空间环境的使用要求。

在 UG 软件中建立如图 2(a) 所示的摆镜初始模型,借助 Hypermesh 软件划分 2D 有限元模型如图 4 所示。在轻量化网格确定后,摆镜重量主要受镜体厚度 H (height)、切角 α 、镜面厚度 F_f (face thickness)、轻量化筋

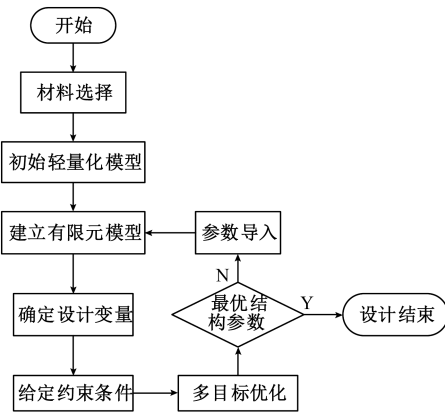


图 3 多目标集成优化流程

Fig. 3 Flow chart of multi-objective optimization

厚度 R_i (rid thickness)、支撑孔壁厚 H_i (hole thickness) 和外壁厚 S_i (side thickness) 等因素的影响。以此作为优化设计变量,以光轴方向的微重力条件下的反射镜面行精度 ($PV < 63 \text{ nm}$, $RMS < 12 \text{ nm}$) 作为边界条件,并以最小摆镜质量作为目标进行反射镜的轻量化设计。

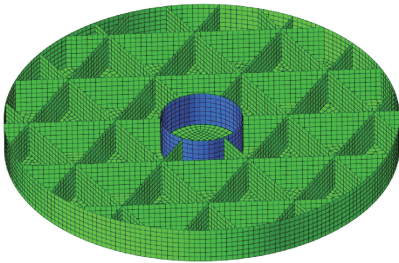


图 4 初始摆镜有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the initial scanning mirror

可以得出镜体厚度与反射镜质量成线性正相关,与面形精度成反相关,切角在一定范围内与质量及面形精度成正相关,而镜面厚、支撑孔厚及轻量化筋厚与质量及面形之间为非线性关系。整个反射镜的轻量化优化设计属于非线性多变量优化问题。其数学模型可描述为:

$$\min \text{mass} = f(H, \alpha, F_i, R_i, H_i, S_i);$$

$$\text{s. t. } PV \leq 42, RMS \leq 12, -15 \leq H \leq +15, 0.26 \text{ rad} \leq \alpha \leq 1.57 \text{ rad}, 2 \leq F_i \leq 5, 2 \leq R_i \leq 6, 2 \leq H_i \leq 8, 2 \leq S_i \leq 6$$

其中, PV 和 RMS 分别表示反射镜在 Z 向微重力工况下的面形峰值和均值,单位为纳米 (nm),切角单位为弧度 (rad),其他单位为毫米 (mm)。

采用全局响应面算法和多岛遗传算法求解该多目标优化问题。该算法适应性强、计算效率高,具有比传统算法更优的求解能力,特别适用于求解该类多目标非线性的复杂问题^[11]。

2.2 优化结果

优化后的模型如图 5 所示,图 6 给出了反射镜优化迭代过程。表 2 列出了各结构变量的初始值、取值范围及最终优化结果,可以看出经过优化后的反射镜镜体厚度为 25 mm,切角角度为 21.06° ,摆镜镜面、轻量化筋和镜面边缘厚度均为 2 mm,支撑孔厚度为 4 mm,反射镜质量由优化前的 3.5 kg 变为 1.23 kg。

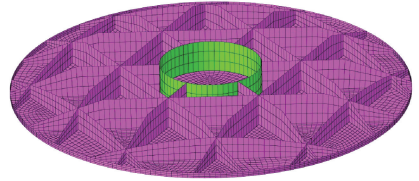


图 5 优化后的摆镜模型

Fig. 5 The optimized model of the scanning mirror

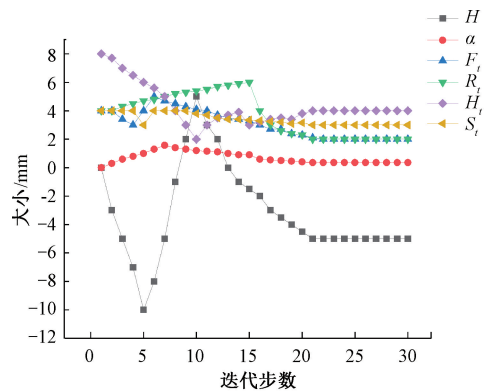


图 6 摆镜迭代优化过程

Fig. 6 Scanning mirror iterative optimization process

表 2 设计变量及优化结果

Table 2 Design variables and optimization results

变量	范围	初始值	优化值
H	$[-15, 15]$	0	-5
F_i	$[2, 5]$	4	2
R_i	$[2, 6]$	4	2
S_i	$[2, 6]$	4	2
H_i	$[2, 10]$	8	4
α/rad	$[0.26, 1.57]$	0	0.35
PV/nm	-	114.56	62.95
RMS_z	-	74.35	11.56
mass/kg	-	3.5	1.23

在以上参数优化后,由于支撑孔的直径变化也会影响面形精度,所以在摆镜轻量化设计过程中将支撑孔的直径 d 也作为设计变量,如图 7 所示。

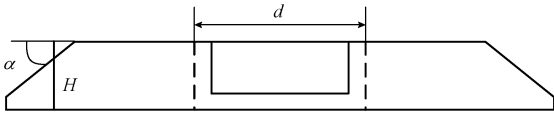


图7 摆镜背部轻量化形状控制图

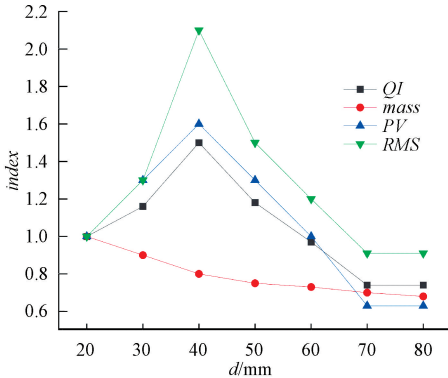
Fig. 7 Scanning mirror lightweight shape control diagram

以反射镜最小质量作为优化目标,但这样会导致过于追求轻量化而使镜面面形降低,为了解决此问题汪奎等^[12]引进了性能指数 QI (quality index) 来作为优化结果的评判指标,在此基础上引进面形峰值,重新定义 QI 。初次优化后的反射镜质量为 1.23 kg, 镜面面形要求 PV 不大于 63.8 nm, RMS_z 值在 12 以内, 据此 QI 公式可重新定义为:

$$QI = \frac{1}{3} \left(\frac{mass}{1.23} + \frac{PV}{63} + \frac{RMS_z}{12} \right) \quad (1)$$

在预选尺寸范围内对反射镜结构参数取值,并进行有限元仿真和平面拟合后绘制 QI 随每个参量变化的趋势绘图得出结论。 QI 取值越低优化效果越好。

由图 8 可以得出,摆镜支撑孔径为 70 mm 时,优化性能指标参数 QI 取最小值 74%, 质量达到 0.84 kg, 轻量化率为 76%。

图8 支撑孔径对 QI 指数的影响趋势Fig. 8 Influence trend of support aperture on QI index

3 空间环境工作的摆镜校核

3.1 柔性支撑结构

为了节约该摆镜的安装空间、降低整机质量及满足跟踪相机快速响应的特性,柔性支撑结构采用 3 个相隔 120° 回形梁的柔性铰链,采用与镜座一体化的设计,材料为钛合金(TC4),其结构如图 9 所示。摆镜背部的镶嵌体与一体化镜座直接相连^[12],采用适当厚度的环带胶结法连接,这样的连接方式不仅简单有效,适应性强,连接刚度较好,而且温度变化时可以有效补偿镜座与摆镜之间因材料不同及装配应力而产生的不协调形变^[13-14]。这

种方案的摆镜组件总体质量更轻,转动惯量较小,可以满足小卫星跟踪相机快速响应的特性,其装配图如图 10 所示。

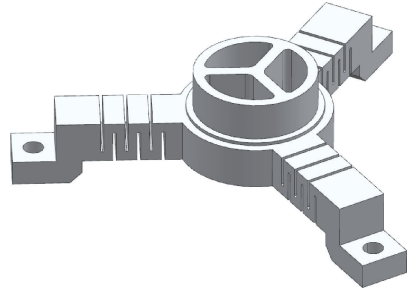


图9 柔性一体化镜座

Fig. 9 Flexible integrated mirror holder

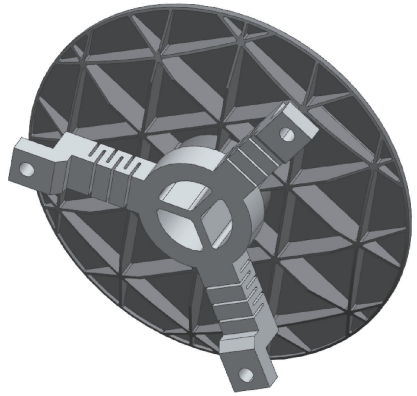


图10 摆镜组件装配图

Fig. 10 Assembly drawing of swing mirror

3.2 静力载荷验证

对摆镜在轨工作中所受各种载荷进行分析,并验证其在优化后对空间应用的适应能力。根据摆镜的空间应用状态对摆镜分别施加不同的载荷,包括施加微重力(XY 方向和 Z 光轴方向)、 -50°C 温度载荷和 3.5 rad/s 旋转惯性载荷,并计算其摆镜面形拟合云图 11 所示。

计算结果如表 3 所示,从结果来看,摆镜在空间 XY 微重力工况下的面形 RMS 值小于 6 nm, Z 向重力、 -50°C 载荷及 3.5 rad/s 旋转惯性载荷条件下的面形 RMS 均小于 12 nm,可以满足空间环境条件的工作要求。

表3 各空间载荷下的摆镜面形结果

Table 3 The mirror shape results of the various spatial loads

序号	工况	载荷	PV/nm	RMS/nm
1	XY 向重力 G	1 g	25.62	5.58
2	Z 向重力 G	1 g	40.49	11.81
3	温度 T	-50°C	55.35	11.26
4	旋转惯性 ω	3.5 rad/s	35.29	11.02

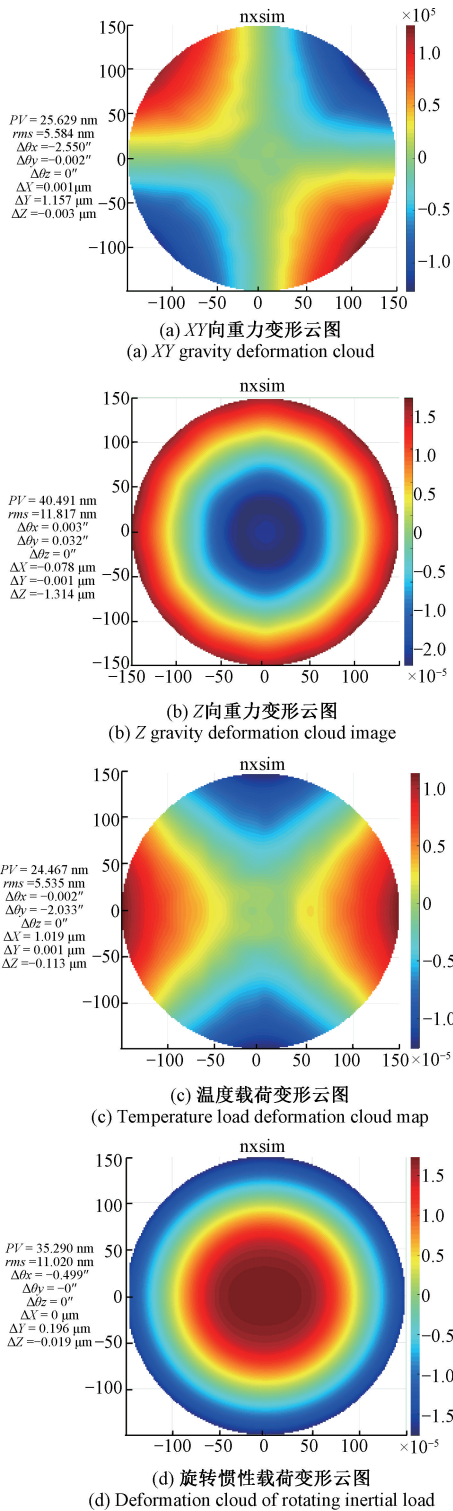


图 11 不同载荷下的摆镜面形

Fig. 11 Mirror shape of pendulum under different loads

3.3 模态分析验证

为了评估摆镜在颠簸运输和发射振动载荷过程中的适应能力,需要计算摆镜的基频和振型。在运输或发射过程中,将摆镜的转轴锁死。对应摆镜的模态分析中将其支

撑点的位置进行固定约束。表 4 列出了摆镜的前 5 阶模态分析结果及模态振型。其中一阶模态为 326 Hz,显著高于国内一般火箭发射过程的谐振频率 100 Hz,可以有效防止与相机其他结构发射共振,满足设计及使用要求。

表 4 摆镜组件的前 5 阶模态

Table 4 The first 5 modes of the swing mirror assembly

模态	频率	振型图
1	326	
2	336	
3	357	
4	529	
5	657	

4 实验测试

4.1 面形精度测试

为验证设计和有限元分析的准确性与可靠性,制作了反射镜镜坯如图 12 所示,利用干涉仪对反射镜面形

精度进行检测,如图13所示,反射镜面形精度RMS为 0.016λ ,仿真数据为 5.58 nm 。通过将重力翻转 180° 来验证摆镜入轨后面形精度的变化,翻转后的面形精度RMS为 0.017λ ,变化量为 0.001λ ,可以推断摆镜入轨后面形精度满足使用要求。

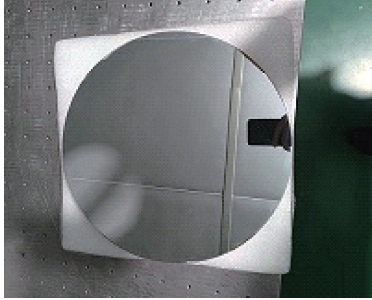


图12 $\Phi 300\text{ mm}$ 摆镜镜培

Fig. 12 $\Phi 300\text{ mm}$ scanning mirror blank

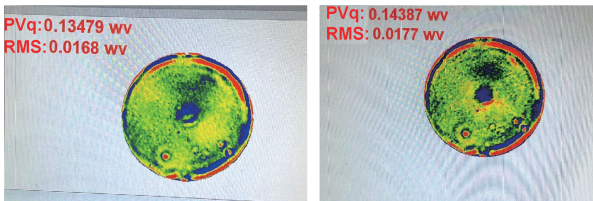


图13 镜面干涉仪检测图

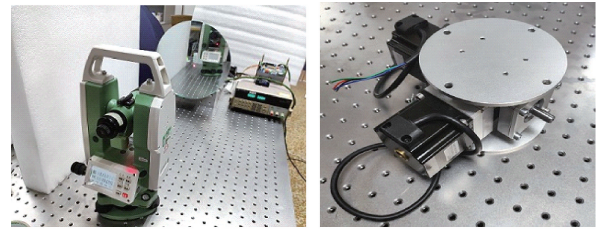
Fig. 13 Test drawing of the mirror interferometer

4.2 定位精度实验

为了进一步验证摆镜机构的指向精度,搭建摆镜闭环控制系统^[15]。硬件主要为以DSP为核心的控制板,还包括一些外围电路和接口,位置传感器采用高分辨率绝对值式编码器读取位置信号,送入DSP作为反馈。控制时对编码器产生的数字信号进行处理,改变DSP管理器对应的寄存器值,从而得到周期和方向不同的PWM信号。本次实验中,借助自准直电子经纬仪来测量摆镜的角度信息。由于方位轴与俯仰轴具有对称性,实验只对俯仰方向进行检测即可。

如图14所示,试验当中,控制电机旋转一个较小的角度,借助光电自准直经纬仪测量指向机构实际旋转的角度并与给定角度相比较,观察指向机构的定位精度是否达到精度要求。实验过程中选择控制电机旋转 0.01° 、 0.02° 和 0.03° 并进行多次重复测试,记录每次旋转的实际角度。考虑装配误差,每隔 1.5° 进行一次试验,实验记录如表5所示。

对表5误差进行统计,最终得到的角度变化量的残差如图15所示。根据统计结果可判断摆镜定位精度是否满足指标要求。



(a) 实验图 (b) 二维转台
(a) The experimental diagram (b) Two-dimensional turntable

图14 摆镜定位精度实验图

Fig. 14 Experiment on positioning accuracy of scanning mirror

表5 定位精度测试数据

Table 5 Position accuracy test data

实验 次数	0.01°		0.02°		0.03°	
	角度/($^\circ$)	误差/($''$)	角度/($^\circ$)	误差/($''$)	角度/($^\circ$)	误差/($''$)
1	45	9	64	-8	114	6
2	49	13	81	9	102	-6
3	47	11	80	8	111	3
4	44	8	67	-5	103	-5
5	28	-8	78	6	110	2
6	21	-15	79	7	105	-3
7	30	-6	68	-4	112	4
8	50	14	66	-6	101	-7
9	27	-9	79	7	105	-3
10	24	-12	83	11	112	4

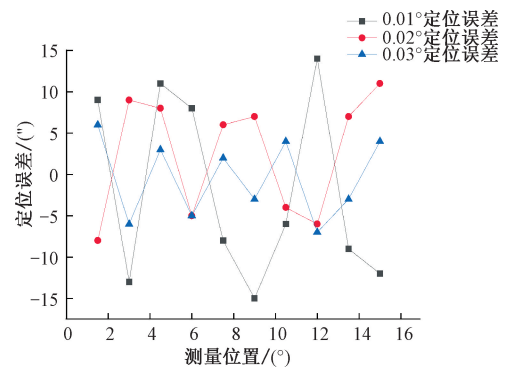


图15 角度变化量的残差

Fig. 15 Residual of change in angle

根据图15的统计结果可以得出,控制电机旋转一个角度和通过光电自准直经纬仪测量的旋转角度之间的误差随着测量角度的增加,测量精度误差越小,但最大误差均不超过 $18''$ 。因此,摆镜指向精度满足小于 0.01° 的指标要求。

5 结 论

用于小卫星跟踪相机的二维摆镜相比传统摆镜对其工作环境提出了更高的要求。反射镜由于其工作范围大,机动速度快,不仅承受一定的旋转运动和惯性载荷,而且由于摆镜不能配备独立的温控装置,需承受较大温度载荷。通过对反射镜结构的优化设计和支撑方案的改进,确立背部了单点支撑方案,柔性铰链、镜座一体化的设计方案,摆镜组件转动惯量较小,动态性能更优。

在确定反射镜支撑孔径参数的过程中引入性能指标参数 QI,将质量、面形均值 RMS 和面形峰值 PV 3 个设计指标纳入 QI,较单一目标优化更加合理,可以平衡 3 个指标的互相影响,提高优化效率。最终反射镜的质量仅为 0.84 kg,轻量化率达到了 76%。

最后通过摆镜组件在空间微重力、低温及转动等惯性载荷的作用下对轻量化摆镜进行了面形、峰值等参数的校核,其结果 $PV \leq \lambda/10$, $RMS \leq \lambda/50$,均满足摆镜的设计要求,并对摆镜进行面形精度检测,验证了其入轨后面形精度满足指标要求;搭建了二维摆镜闭环控制实验,验证了摆镜定位精度达到了设计要求。为同类型的小卫星跟踪相机的摆镜组件优化设计提供了思路。

参考文献

- [1] 李颐,刘伟,谭亚雄,等. 机载摆扫式光谱仪高转速三面摆镜设计与优化[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2675-2683.
- LI Y, LIU W, TAN Y X, et al. Design and optimization of high-speed swing mirror with three reflectors on air borne whiskbroom scanning spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(11): 2675-2683.
- [2] 刘云猛,张宝龙. 空间遥感器二维扫描指向镜的轻量化设计及应用[J]. 红外技术, 2007(12): 688-691.
- LIU Y M, ZHANG B L. Light-weight design and application of two-dimensional scan pointer mirror in space remote sensor [J]. Infrared Technology, 2007(12): 688-691.
- [3] 沈凯,何欣,张星祥. 低温反射镜组件结构设计与支撑特性分析[J]. 红外技术, 2021, 43(12): 1172-1176.
- SHEN K, HE X, ZHANG X X. Structural design and

support characteristics analysis of cryogenic mirror assemb[J]. Infrared Technology, 2021, 43(12): 1172-1176.

- [4] 杨勋,徐抒岩,马宏财,等. 径向温度梯度对轻量化反射镜面形精度的影响[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1552-1560.
- YANG X, XU SH Y, MA H C, et al. Influence of radial temperature gradient on surface figure of light reflective mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(7): 1552-1560.
- [5] 陈长征. 空间相机用摆镜的轻量化优化设计及其对像质的影响分析[J]. 红外, 2014, 35(12): 23-28, 34.
- CHENG CH ZH. Optimization of pointing mirror for space camera and analysis of its effect on image quality degradation[J]. Infrared, 2014, 35(12): 23-28, 34.
- [6] 袁野,裘俊,王智磊,等. 结合面阵成像的摆镜扫描系统设计研究[J]. 上海航天, 2016, 33(6): 72-77.
- YUAN Y, QIU J, WANG ZH L, et al. Study on design of scanning mirror system for area array imaging [J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(6): 72-77.
- [7] 曹明辉,辛宏伟,陈长征,等. 微小型空间相机碳纤维整体式主框架轻量化设计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 54-61.
- CAO M H, XIN H W, CHEN CH ZH, et al. A lightweight design of carbon fiber integrated main frame for the micro space camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 54-61.
- [8] 凤良杰,成鹏飞,王炜. $\Phi 450$ mm 口径空间天文相机轻量化碳化硅主反射镜组件设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(2): 191-197.
- FENG L J, CHENG P F, WANG W. Design of $\Phi 450$ mm light-weighted SiC mirror subsystem in space-based astronomy telescope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(2): 191-197.
- [9] 曲慧东,魏加立,董得义,等. 长条形空间反射镜组件轻量化结构设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(6): 187-197.
- QU H D, WEI J L, DONG D Y, et al. Lightweight structural design of rectangular space mirror assembly[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(6): 187-197.
- [10] 徐广州,阮萍,李福,等. 空间稳像系统摆镜设计与

- 仿真[J]. 红外与激光工程, 2012,41(4): 958-965.
- XU G ZH, RUAN P, LI F, et al. Design and simulation of tilt mirror for space image stabilized system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012,41(4): 958-965.
- [11] 王上, 张星祥, 沙巍, 等. 一体化铝合金反射镜的拓扑优化设计与分析[J]. 红外技术, 2022, 44(1): 61-65.
- WANG SH, ZHANG X X, SHA W, et al. Topology optimization design and analysis of an integrated aluminum alloy mirror[J]. Infrared Technology, 2022, 44(1): 61-65.
- [12] 汪奎, 辛宏伟, 徐宏, 等. 空间相机快速反射镜的结构轻量化设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 177-183.
- WANG K, XIN H W, XU H, et al. Lightweight design of fast steering mirror for space cameras[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019,48(4): 177-183.
- [13] GAO J, SHEN H, LI J, et al. A flexible angle compensation method for freeform surface testing based on tip/tilt mirror[J]. Optics Communications, 2019, 444: 21-27.
- [14] UTO K, SEKI H, SAITO G, et al. Development of a low-cost hyperspectral whiskbroom imager using an optical fiber bundle, a swing mirror, and compact spectrometers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(9): 3909-3925.
- [15] 王帅, 曹玉岩. 音圈电机型快速反射镜的驱动控制系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1115-1121.

WANG SH, CAO Y Y. Design of control system for fast steering mirror driven by voice coil actuator[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7): 1115-1121.

作者简介



张成成, 2019年于东北农业大学获得学士学位, 现为中国科学院大学研究生, 主要研究方向为空间光学传感器结构设计、机电一体化。

E-mail: zcemail2022@163.com

Zhang Chengcheng received his B. Sc. degree from Northeast Agricultural University in 2019. He is currently a master student at University of Chinese Academy of Science. His main research interests include structure design and mechatronics of space optical remote sensor.



何斌 (通信作者), 1990年于北京理工大学获得工学博士学位, 2001年于中国科学院大学获得理学博士学位, 现为中科院长春光机与物理研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间遥感信息处理技术。

E-mail: hbbemail@163.com

He Bin (Corresponding author) received his Ph. D. degree in engineering from Beijing Institute of Technology in 1990, and received his Ph. D. degree in science from University of Chinese Academy of Sciences in 2001. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at CIOMP. His main research interest is space remote sensing information processing technology.