

矩形反射镜结构支撑技术研究

李海星 丁亚林 张洪文

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 大尺寸矩形反射镜结构支撑是离轴三反消像散(TMA)光学遥感器研制过程中的关键技术难点之一。以某临近空间光学遥感器的760 mm×320 mm三镜为研究对象,系统分析了环境温度对反射镜面型影响的本质原因,得出了温度适应范围与热膨胀系数差(反射镜与支撑结构)、反射镜接口承载能力、柔性支撑刚度之间的关系,形成了一套大口径光学反射镜结构支撑设计思路。提出了一种基于圆切口柔性铰的两轴正交反射镜柔性支撑结构,利用有限元对反射镜组件的光学面型和模态频率进行了仿真分析,通过正弦扫频实验对反射镜组件的结构频率进行了实际验证。在1g重力和10℃温度载荷的共同作用下,反射镜光学面型的最大均方根差(RMS)为13.4 nm,满足所提出的 $\lambda/45$ ($\lambda = 632$ nm)指标要求。反射镜组件最低阶模态频率的分析值和实验值分别为128.67 Hz和124.1 Hz,满足所提出的不低于100 Hz指标要求。

关键词 光学器件; 光学遥感器; 反射镜; 结构支撑; 离轴三反; 柔性支撑

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0523002

Support System Study of Rectangular Mirror

Li Haixing Ding Yalin Zhang Hongwen

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

Abstract Support system design for large size rectangular mirror is one of the most challenging technical points during development of off-axis three-mirror anastigmatism (TMA) optical imaging sensor. The rectangular third mirror with the size of 760 mm×320 mm is the study object. Key mechanism of the temperature effect on the mirror's optical surface deformation is studied thoroughly. The relationships between temperature range and the mirror blank's and back support part's linear expansion coefficient difference, mirror blank's capacity on interface mechanical load, rigidity of the flex structure which connects mirror blank and back support part, are established. During development of the mirror support system, a two-axis flex support structure which is composed of two perpendicular single axis circular flexures is proposed, and finite element analysis (FEA) is also employed to evaluate the mirror's optical surface error and model frequency of this mirror sub-assembly. In the mean time, sine scan test is used to verify the FEA result of mirror sub-assembly's model frequency. Under combination of 1g self gravity load and 10℃ temperature variation, the maximum FEA value of the mirror optical surface root-mean-square(RMS) error is 13.4 nm, and it meets the proposed requirement $\lambda/45$ ($\lambda = 632$ nm). FEA result and test value of the lowest model frequency of the mirror sub-assembly are 128.67 Hz and 124.1 Hz, respectively, it is higher than the proposed requirement of 100 Hz and meets design objective.

Key words optical devices; remote sensing; mirror; support structure; off-axis three-mirror anastigmatism; flexure support

OCIS codes 230.4040; 280.4788; 120.0280; 120.4640

1 引言

离轴三反消像散(TMA)光学系统具有无遮拦、大视场、传函高、结构简单等优点,是长焦距大视场航空航天光

收稿日期: 2014-11-24; 收到修改稿日期: 2015-01-15

基金项目: 国家863计划(2007AA701203)

作者简介: 李海星(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事航空光学遥感器光机结构设计及力学分析。

E-mail: windchaser_lhx@163.com

学遥感相机的重要发展趋势^[1-3]。大口径矩形反射镜是离轴三反消像散(TMA)系统中的核心元件,其工作性能对整个系统的成像质量有着重要影响。反射镜组件需要经历遥感器发射和实际工作过程中的冲击、振动以及环境温度变化的考验^[4-6],因此,大口径矩形反射镜组件设计是离轴TMA光学遥感相机研制过程中的重要技术难点之一。

在大口径矩形反射镜组件研制过程中,反射镜体需要具有足够的刚度来抵抗自身重力、温致接口机械载荷和加工装配应力所引起的结构变形;结构支撑需要具有合适的刚度,使得反射镜组件具有一定的抵抗外界机械振动的能力;由于反射镜在光学加工、检测、系统装调和实际工作状态下的力学和温度环境也有所不同,反射镜的结构支撑系统需要通过合适的刚度配置来保证反射镜光学面型精度稳定性^[7]。因此,大口径反射镜结构支撑系统设计可视为一个约束条件下的复杂多参优化过程。

离轴TMA系统在国内外航天光学遥感器领域均有应用,如大口径反射镜如QUICKBIRD-2的600 mm口径主镜,以及国内航天遥感器使用的660 mm×300 mm矩形反射镜^[5],但是在国内航空和临近空间光学遥感器上的应用并不多见。本文以某临近空间光学遥感器的760 mm×320 mm矩形三镜为研究对象^[8],从温度适应性角度出发,对反射镜的温度适应范围与材料热膨胀系数(CTE)、反射镜承载能力和柔性支撑刚度配置之间的关系进行了理论分析,提出了一种由两个正交的圆切口单轴柔性铰组成的两轴柔性支撑结构,借助有限元手段对该反射镜组件进行了变形分析和模态评估,通过正弦扫描实验对模态分析结果进行了验证。结果满足所提出的10℃温差光学面型的均方根差(RMS)优于 $\lambda/45$ ($\lambda = 632 \text{ nm}$)的光学指标要求,和反射镜组件一阶频率不低于100 Hz的结构刚度要求。

2 设计流程

从设计角度来看,反射镜结构支撑系统设计是一个以光学面型为核心设计目标的多循环迭代过程,其基本研制流程如图1所示。其中反射镜光学面型是核心设计目标,温度适应范围和组件刚度是非核心设计目标。首先需要根据光学设计要求、材料可获取性和实际加工能力,从结构轻量化、环境适应性、长期稳定性等层面对反射镜组件进行材料选择。然后根据设计空间、质量要求等约束条件对反射镜和支撑结构进行布局设计和拓扑优化,并依据力学原理对支撑位置进行合理化设计。在获得反射镜和支撑结构的基础上,对柔性支撑进行初步设计,并利用工程分析手段对整个组件进行力学和温度变形分析。以光学面型为主判据进行结果评估,若不满足要求,需要对柔性支撑及其布局进行修改,重复工程分析。直至所提出的设计目标满足要求,方可进入后续的结构详细设计阶段。

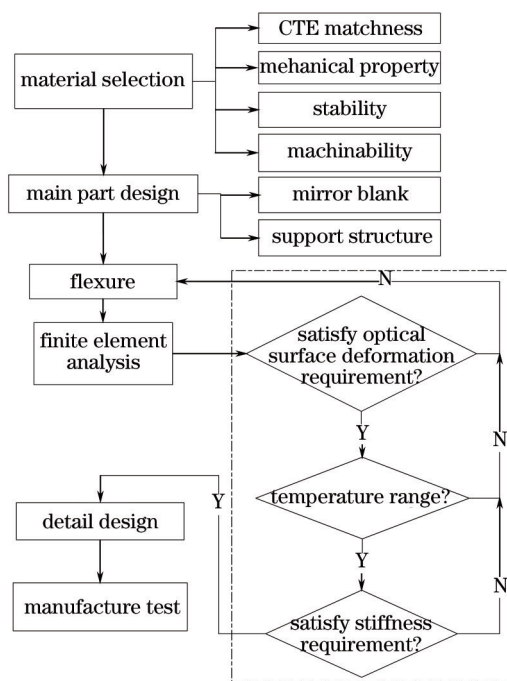


图1 反射镜结构支撑系统研制流程

Fig.1 Development process of mirror support system

此过程的很大一部分时间消耗在协调柔性支撑刚度配置与反射镜光学面型、环境适应性以及组件刚度问题上。并且温度适应性和组件刚度对柔性支撑的刚度提出了相反的要求,大的温度适应范围和高的组件刚度难以同时达到要求。因此,系统分析温度适应性问题对减少反射镜组件的设计工作量具有重要意义。

3 结构支撑设计

3.1 组成及材料选择

反射镜组件基本构成如图2所示,包括反射镜、接口镶嵌件、柔性支撑和支撑结构4个主要部分,反射镜与支撑结构在 P_1 、 P_2 、 P_3 3个位置处通过接口镶嵌件和柔性支撑联接,接口镶嵌件主要是解决非金属反射镜与金属支撑结构机械联接以及接口部位热膨胀系数匹配问题^[9]。

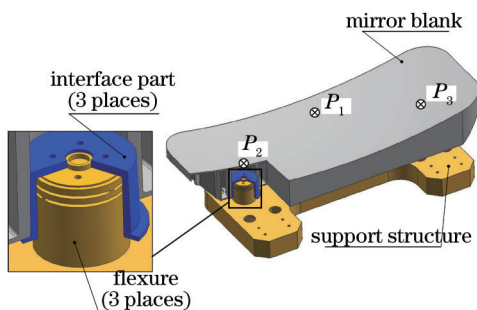


图2 反射镜组件结构组成

Fig.2 Mirror sub-assembly structures

反射镜组件选材需要综合考虑比刚度(E/ρ)、热膨胀系数(α)、导热率(k)、比热容(C)、材料长期稳定性和光学加工性等因素^[10],各元件选材时会因其角色不同而有所侧重。基本原则如下:

1) 反射镜选材主要考虑比刚度、光学加工性、传热性能和长期稳定性等,比刚度值高、热膨胀系数小、导热率和比热容相对较大者比较理想;

2) 镜体接口镶嵌件是反射镜与其余部件的过渡件,故选材时重点考虑和镜体材料热膨胀系数的匹配性,与反射镜材料热膨胀系数差异越小越好;

3) 柔性支撑主要是协调反射镜和支撑结构之间的温度变形差异,降低作用于反射镜接口部位的机械载荷,选材时重点考虑材料的弹性持久稳定性、疲劳强度、热膨胀系数等;

4) 支撑结构除了为反射镜提供支撑之外,还需要抵抗机身变形和温度变形差异(机身和反射镜支撑结构之间)所产生的机械应力,选材时重点考虑与反射镜材料的热膨胀系数匹配和比刚度,此外还需考虑机械加工性能和装调方便性。

在现有条件下,所选取的反射镜组件材料及其性能见表1所示。SiC具有高的比刚度值,将其用于反射镜有利于结构轻量化,同时由于热膨胀系数小、导热率和比热容比较大、反射镜的热敏感性小、环境适应能力优异,除此之外,SiC长期稳定性和光学可加工性优良,适用于光学反射镜。铁镍合金4J32的最大优势在于其热膨胀系数可以定制为与反射镜相同,因此,它是反射镜镜体接口镶嵌件最理想的选择。TC4密度小、材料屈服强度高、线膨胀系数与反射镜相差较小,适用于柔性支撑及支撑结构。

表1 反射镜组件材料性能

Table 1 Material properties of the mirror sub-assembly

Material	Density ρ /(g/cm^3)	Young's modulus E /GPa	Poisson's ratio μ	Specific stiffness E/ρ /($10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{g}$)	Thermal conductivity k /[$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]	CTE α /($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	Specific heat C /[$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]	Application
SiC	3.05	330	0.20	10.8	185	2.5	670	Mirror blank
4J32	8.1	141	0.25	1.74	0.0139	0.05~7.5	515	Interface part Flexure,
TC4	4.44	114	0.34	2.57	6.8	8.9	611	support structure

3.2 温度适应性分析

反射镜组件的温度适应能力主要取决于反射镜的结构刚度、支撑点位置参数、反射镜和支撑结构的热膨胀系数差和柔性支撑刚度配置,同时还受整机对反射镜组件最低结构频率,以及光学设计所允许的最大反射镜面型变化的约束。因此,反射镜组件的温度适应能力可简化为一个含有4个变量和两个约束条件的多元函数,形式如下:

$$\begin{aligned} M_{\text{Temp}} &= f(K_{\text{MB}}, L_p, \Delta\alpha, K_F) \\ C_{\text{constr1}} &= \min(f_{\text{freq/sub}}) \quad , \\ C_{\text{constr2}} &= \max(R_{\text{RMS/opti}}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 K_{MB} 是反射镜的结构刚度, L_p 是支撑点间距, $\Delta\alpha$ 是反射镜和支撑结构的热膨胀系数差, K_F 是柔性支撑的刚度。

在这些参数中, K_{MB} 体现了反射镜本身抵抗结构变形的能力, L_p 和 $\Delta\alpha$ 的乘积是反射镜和支撑结构二者的支撑点温致错位量敏感度系数, K_F 是反射镜与支撑结构在各支撑点处的联接元件的刚度,对于同样的温致错位量, K_F 越大,反射镜接口部位的温致载荷越大,反射镜面型变化也就越大。

为了分析各种参数的影响,建立如图3所示的简化分析模型。反射镜和支撑结构之间在 $P_i(i=1, 2, 3)$ 3个支撑点处通过3个柔性支撑(flexure-1、2、3)相连并形成初始支撑三角 $\Delta 123$,假设整个组件在接口位置 $-P_i$ 固定不动,整个组件以 P_1 为中心发生温度变形。

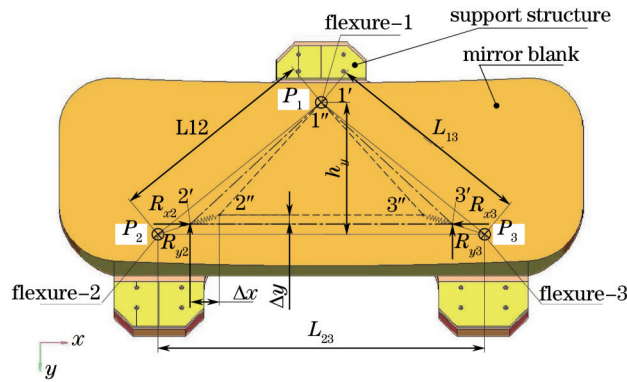


图3 简化的温致接口机械载荷分析模型

Fig.3 Simplified temperature induced interface load analysis model of the mirror sub-assembly

在均匀温度变化 ΔT 的作用下,由于反射镜和支撑结构的热膨胀系数不同,初始的支撑三角 $\Delta 123$ (反射镜与支撑结构无错位)会分别变为 $\Delta 1'2'3'$ (反射镜)和 $\Delta 1''2''3''$ (支撑结构),从而会产生错位现象。在图3所示 xy 平面内,由于柔性支撑的刚度远小于反射镜和支撑结构,因此,可忽略柔性支撑的反作用力对支撑三角的影响。可把柔性支撑视作一个面内弹簧联接,支撑三角错位量和反射镜接口部位温致机械载荷计算分别为

$$\begin{Bmatrix} \Delta L_{12} \\ \Delta L_{13} \\ \Delta L_{23} \end{Bmatrix} = (\alpha_M - \alpha_B) \begin{Bmatrix} L_{12} \\ L_{13} \\ L_{23} \end{Bmatrix} \Delta T = \Delta\alpha \cdot \vec{L}_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$\begin{cases} R_{x2} = R_{x3} = K_x \cdot \Delta x = K_x \cdot \Delta L_{23} / 2 \\ R_{y2} = R_{y3} = K_y \cdot \Delta y = K_y \cdot h_y \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\Delta\alpha$ 是反射镜和支撑结构的热膨胀系数差, L_p 是支撑点位置向量, K_x 和 K_y 分别是柔性支撑在 x 和 y 两个方向的刚度,等同于(1)式中的 K_F ; Δx 和 Δy 分别为反射镜和支撑结构上的支撑点 P_2 和 P_3 在 x 和 y 方向温度变形错位量。

(3)式中的 R_{x2} 、 R_{x3} 以及 R_{y2} 、 R_{y3} 是反射镜发生温度面型变化的主要因素,在反射镜结构、材料、接口位置一定的情况下,在所允许的反射镜面型变化约束条件下,所能承受的接口温致机械载荷是一定的。分析可知,为了提高反射镜组件温度适应范围,有两种途径可选,一是缩小(2)式中的热膨胀系数差 $\Delta\alpha$;二是减小(3)式中的柔性支撑刚度 K_x 和 K_y 。对反射镜支撑结构选材时,考虑结构轻量化和加工装调等因素,热膨胀系

数差很难做到零,因此,柔性支撑的刚度设计是解决温度适应性的主要可行途径。

3.3 反射镜接口机械载荷承载能力分析

反射镜所能承受接口机械载荷的大小是其自身刚度特性的反映,也就是(1)式中的 K_{MB} ,该参数对组件的温度适应能力、结构刚度以及柔性支撑的刚度配置起着至关重要的作用^[11-12]。

反射镜接口机械载荷可分为力和弯矩两大类,其中力使反射镜发生面内挤压或拉伸,弯矩使反射镜发生弯曲。为分析反射镜面型对每种接口机械载荷的承受能力,以单个反射镜为研究对象,建立了如图4所示的分析模型。

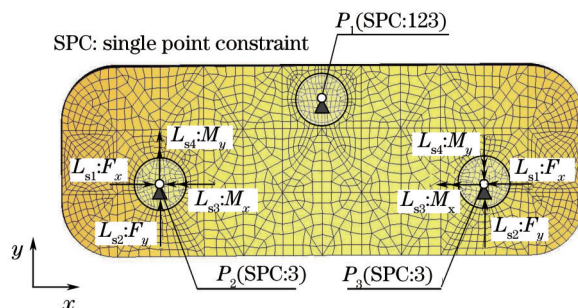


图4 反射镜接口载荷敏感性分析模型

Fig.4 Deforming sensitivity analysis model of mirror surface on interface mechanical load

在图4所示接口 P_1 处施加 xyz 三向平动自由度约束(SPC: 123), P_2 和 P_3 施加 z 方向平动自由度约束。创建了两个接口力分析工况(L_{s1} 、 L_{s2})和两个接口矩分析工况(L_{s3} 、 L_{s4})。分析得出反射镜光学面型RMS的变化趋势如图5所示。

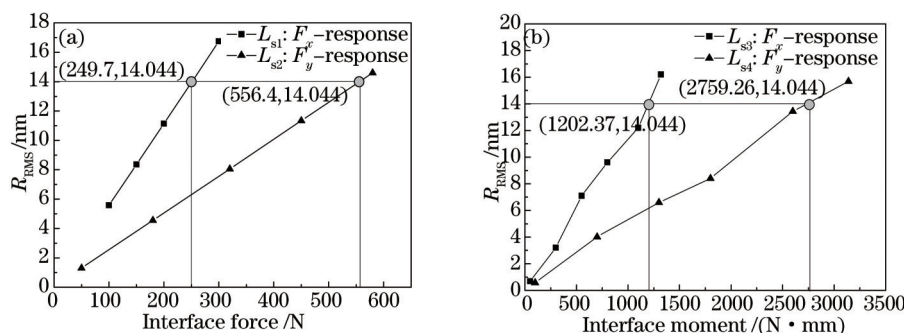


图5 反射镜光学面型RMS值与机械接口载荷关系。(a) RMS与接口力的关系 (b) RMS与接口距力的关系

Fig.5 RMS value trend of the mirror with the interface mechanical load. (a) RMS value versus interface force; (b) RMS value versus interface moment

对比分析可知:

1) 反射镜抵抗长向(x)接口力的能力低于其宽向,对于同样的最大允许光学面型RMS值 $\lambda/45$ ($\lambda = 632 \text{ nm}$),反射镜能承受的最大长向作用力为 249.7 N,宽向为 556.4 N;

2) 反射镜抵抗宽向弯矩的能力低于其长向,对于同样的最大允许光学面型RMS值 $\lambda/45$ ($\lambda = 632 \text{ nm}$),反射镜能承受的最大宽向弯矩为 1202.37 $\text{N}\cdot\text{mm}$,长向为 2759.26 $\text{N}\cdot\text{mm}$ 。

3.4 柔性支撑

在获得反射镜所能抵抗的两类接口机械载荷能力基础上,柔性支撑刚度配置则决定了反射镜所能承受的温度变化范围。

提出了一种由两个正交圆切口单轴柔性铰组成的两轴柔性支撑,具体结构如图6所示。也对圆切口单轴柔性铰的柔度特性进行了系统的理论分析和实验研究^[13-14]。此柔性支撑的结构配置参数包括加载端分别距柔性轴1和柔性轴2的距离 L_1 和 L_2 。

在端部弯曲载荷的作用下,其自由端变形是由两个柔性铰轴的弯曲变形合成。为简化问题,假设在其自由端施加一弯曲力 F ,该柔性支撑的结构变形计算过程如下所述:

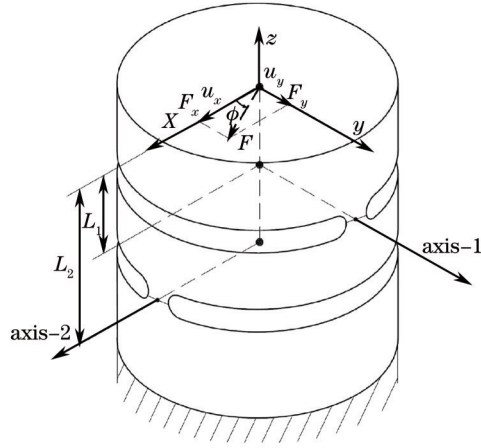


图6 两轴反射镜柔性支撑结构
Fig.6 Two-axis flexture structure for the mirror

1) 载荷分解

弯曲力 F 向相互正交的 x 轴和 y 轴进行分解, 得到分量 F_x 和 F_y :

$$\begin{cases} F_x = F \cdot \cos \phi \\ F_y = F \cdot \sin \phi \end{cases} \quad (4)$$

2) 弯曲变形计算

弯曲载荷分量 F_x 和 F_y 分别使柔性轴 1、柔性轴 2 发生弯曲转动, 自由端的弯曲变形计算为

$$\begin{cases} u_x = (L_1 - r + dc_m) \cdot F_x \cdot (L_1 - r) \cdot C_{\theta_z - M_z} + (L_1 - r + dc_f) \cdot F_x \cdot C_{\theta_z - F_y} \\ u_y = (L_2 - r + dc_m) \cdot F_y \cdot (L_2 - r) \cdot C_{\theta_z - M_z} + (L_2 - r + dc_f) \cdot F_y \cdot C_{\theta_z - F_x} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 dc_m 为纯弯曲等效转动半径, dc_f 为端部弯曲等效转动半径, $C_{\theta_z - M_z}$ 为纯弯曲柔度系数, $C_{\theta_z - F_y}$ 为端部弯曲柔度系数, 这些参数都是圆切口单轴柔性铰的数学模型参数。

4 工程分析

4.1 光学面型

利用 MSC/Nastran 软件对反射镜进行了结构变形分析, 通过处理反射镜表面节点变形, 得到反射镜面型值。所创建的有限元分析 (FEA) 模型如图 7 所示, 分析工况包括 3 个重力工况 (G_x 、 G_y 、 G_z)、一个降温工况 ($T-10$) 和降温 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 分别与 z 、 y 、 z 个方面重力的耦合工况 (G_x-T 、 G_y-T 、 G_z-T)。面型结果详见表 2 所示。

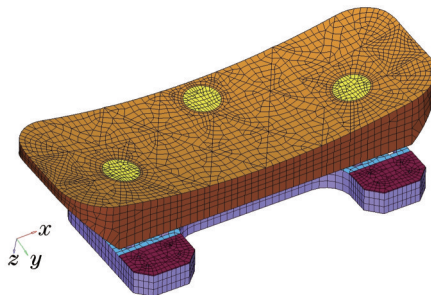


图7 反射镜组件有限元分析模型
Fig.7 FEA model of the mirror sub-assembly

结果表明:

- 1) 在自身重力作用下, 反射镜面型 RMS 最大值为 10.86 nm , 优于 $\lambda/50$ ($\lambda = 632\text{ nm}$), 满足设计要求;
- 2) 该反射镜组件在沿镜面法向 (z 方向) 1 g 重力和 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 温降耦合工况下的面型变化最严重, 该工况下面型 RMS 值为 13.40 nm , 满足所提出的 $\lambda/45$ ($\lambda = 632\text{ nm}$) 指标要求。

表2 反射镜面型分析结果

Table 2 FEA results of the mirror surface error

Load case	G_x	G_y	G_z	$T-10$	G_x-T	G_y-T	G_z-T
Peak valley /nm	30.16	45.14	47.00	43.45	57.14	59.87	71.14
RMS /nm	6.46	10.86	9.38	7.29	9.73	12.62	13.40

4.2 模态分析

模态频率是结构刚度的重要体现,反射镜组件的结构刚度对系统工作稳定性和整机刚度有着重要的影响,该组件的前两阶模态分析结果如图8所示。

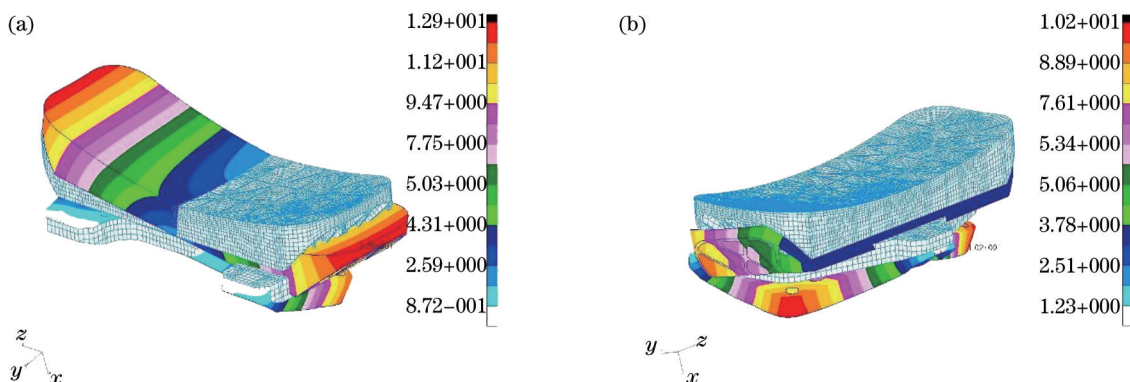


图8 反射镜组件模态分析结果。(a)一阶模态:频率为128.67 Hz;二阶模态:频率为133.66 Hz

Fig.8 Model analysis results of the mirror sub-assembly. (a) 1st model:frequency is 128.67 Hz; (b) 2nd model:frequency is 133.66 Hz
反射镜组件的前两阶模态频率值分别为128.67和133.66 Hz,满足所提出的指标。

5 实验验证

为验证该组件的模态频率分析结果,对反射镜进行了正弦扫频实验,实验现场如图9所示。

实验结果如图10所示,前两个谐振峰对应的频率分别为124.1 Hz和143.6 Hz,与分析结果的相对误差分别为+3.68%和-6.92%。



图9 反射镜组件正弦扫频实验

Fig.9 Sine scan test of the mirror sub-assembly

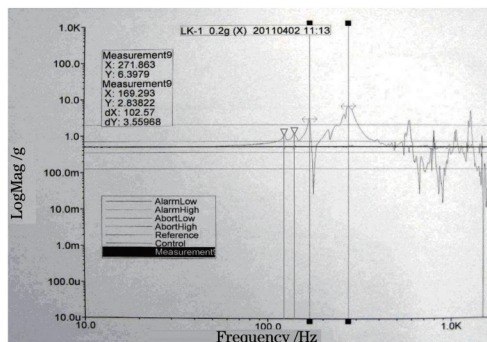


图10 正弦扫频结果曲线

Fig.10 Result of sine scan test

6 结 论

在临近空间离轴TMA光学遥感器的大尺寸矩形三镜结构支撑系统设计过程中,对反射镜组件的温度适应性进行了系统的分析,揭示了温度对反射镜光学面型影响的本质原因,从材料热膨胀系数匹配和柔性支撑刚度配置两个方面提出了解决方法,形成了一套大尺寸反射镜结构支撑系统设计思路。分析结果表明,该反射镜在1g重力和10℃温度变化共同作用下的最大面型变化为13.4 nm,满足所提出的 $\lambda/45$ ($\lambda = 632 \text{ nm}$)指标要求。同时对反射镜进行了模态分析和正弦扫频实验,组件最低阶模态频率的分析结果和实验值分别为128.67 Hz和124.1 Hz,二者相对误差为+3.68%,模态频率满足所提出的100 Hz指标要求。

参 考 文 献

- 1 Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Research of broad width off-axis three mirror optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013,33(7): 0722002.
林 晶, 崔庆丰, 朱 浩. 宽幅离轴三反光学系统研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0722002.
- 2 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822002.
朱 杨, 张 新, 伍雁雄, 等. 离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822002.
- 3 Zhang Keke, Ruan Ningjuan, Fu Danying. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2008, 29(3): 63-70.
张科科, 阮宁娟, 傅丹鹰. 国外空间用三反离轴相机发展分析与思考[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(3): 63-70.
- 4 Xin Hongwei, Guan Yingjun, Chai Fangmao. Design of main support of off-axis space remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6):1257-1263.
辛宏伟, 关英俊, 柴方茂. 离轴空间传感器主支撑结构设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1257-1263.
- 5 Li Zhilai, Xu Hong. Design of rectangular space mirror and its support structure[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1040-1046.
李志来, 徐 宏. 长条状空间反射镜及其结构支撑[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1040-1046.
- 6 Guo Jiang, He Xin. Design of support for primary mirror of space remote sensing camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1642-1647.
郭 疆, 何 欣. 大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1642-1647.
- 7 Li Zongxuan, Chen Xue, Zhang Lei, *et al.*. Design of cartwheel flexural support for a large aperture space mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2014,34(6): 0622003.
李宗轩, 陈 雪, 张 雷, 等. 大口径空间反射镜 Cartwheel 型柔性支撑设计[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622003.
- 8 Wu Xuefeng, Ding Yalin, Wu Qingwen. Thermal design for near space optical remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(5): 1159-1164.
吴雪峰, 丁亚林, 吴清文. 临近空间光学遥感器热设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1159-1164.
- 9 Liu Bo, Ding Yalin, Jia Jiqiang, *et al.*. Design and analysis of back embedded adhesive structure for mirror support[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 091201.
刘 波, 丁亚林, 贾继强, 等. 反射镜背部嵌套粘接支撑结构的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 091201.
- 10 Yoder P. Opto-mechanical Systems Design (2nd edition)[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1993.
- 11 David Chin. Optical Mirror-Mount Design and Philosophy[J]. Applied Optics, 1964, 3(7): 895-900.
- 12 Hans J. Kaercher, Peter Eisentraeger, Martin Süß. Mechanical principles of large mirror supports[C]. SPIE, 2010, 7733: 773320.
- 13 Li Haixing, Ding Yalin, Hui Shouwen, *et al.*. Design of compliance factor experiment setup for single-axis flexure hinge[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1553-1558.
李海星, 丁亚林, 惠守文, 等. 单轴柔性铰链柔度系数试验装置的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1553-1558.
- 14 Li Haixing, Ding Yalin, Shi Lei, *et al.*. Mirror support structure with two mutually perpendicular single-axis circular flexure hinges[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1765-1769.
李海星, 丁亚林, 史 磊, 等. 两轴正交圆切口单轴柔性铰反射镜支撑结构[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1765-1769.

栏目编辑: 张 雁