

doi:10.3788/gzxb20174605.0522001

大型离轴三反空间相机前框架优化设计与试验

魏磊^{1,2}, 张雷^{1,3}, 解鹏¹, 陈苏⁴

(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 100039)

(3 长光卫星技术有限公司, 长春 130000)

(4 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要: 为了保证某离轴三反光学系统空间相机光机结构的高稳定性与高准确度, 针对该光学系统中次镜、折叠镜组件轴向空间位置接近的特点, 设计了次镜、折叠镜组件一体化的前框架结构, 并提出了一种结合了自由模态与约束模态的拓扑优化方法来优化相机的前框架结构. 将优化后的前框架模型带入整个相机, 并对整机进行有限元分析. 结果表明, 光轴呈水平状态, 次镜、折叠镜相对主镜的倾斜分别为 $9''$ 与 $22.4''$, 次镜相对于主镜的偏心为 0.021 mm , 均在光学系统公差要求范围内. 此外, 对前框架结构进行自由模态分析与试验, 结果验证了优化方法的正确性. 所提出的拓扑优化方法可以有效避免基于约束模态拓扑优化方法约束点之间不存在联系的缺陷, 能够为高分辨、宽视场空间相机光机结构的设计提供参考.

关键词: 离轴三反空间相机; 前框架; 拓扑优化; 模态测试; 一体化结构

中图分类号: V423.4+3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)05-0522001-8

Optimization Design and Test for the Front Frame of a Large Off-axis TMA Space Camera

WEI Lei^{1,2}, ZHANG Lei^{1,3}, XIE Peng¹, CHEN Su⁴

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

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(3 Chang Guang Satellite Technology LTD. Co, Changchun 130000, China)

(4 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: To guarantee the high stability and high precision of an off-axis three-mirror optical system space camera, a integration front frame structure was designed to support the second mirror and folded mirror according to the characteristics of the same height of second mirror and folded mirror in optical axis direction, and a topology optimization method based on constraint mode and free mode was proposed to optimize the front frame structure. Then, the integrated structure was assembled into the entire camera after optimization, and the finite element analysis of static was carried out. The results show that the camera maintains excellent static performance with the optical tilt between the primary mirror and secondary mirror being less than $9''$ and the optical tilt between the primary mirror and fold mirror being less than $22.4''$, the optical eccentricity between the primary mirror and secondary mirror being less than 0.021 mm , meeting the tolerance requirement of system. By free modal analysis and test to the integrated front frame structure, the results verify the correctness of the design method. The proposed topology optimization method can efficient avoid the defect of topology optimization based on constraint

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41501383)和国家重点研发计划(No. 2016YFB0500904)资助

第一作者: 魏磊(1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空间相机主支撑结构技术. Email: weilei0906@163.com

导 师: 张雷(1982—), 男, 副研究员, 博导, 主要研究方向为空间遥感器总体技术. Email: 18686344285@163.com

收稿日期: 2016-10-30; 录用日期: 2017-02-10

<http://www.photon.ac.cn>

0522001-1

modal frequency that there is no relationship between the constraint points. It can provide reference for design the space camera with high-resolution and wide field.

Key words: Off-axis three mirror anastigmatic space camera; Front frame; Topology optimization; Modal test; Intrgrated structure

OCIS Codes: 220.4830; 220.4840; 280.4788; 350.6090; 350.4600

0 引言

随着空间技术的不断发展,空间相机的技术指标要求不断提高,综合高分辨率与大幅宽的空间相机成为未来的发展方向.离轴三反(Three Mirror Anastigmatic, TMA)光学系统具有大口径、宽视场、长焦距等优点,符合人们对空间光学遥感相机新的需求,被广泛应用于空间相机中.例如日本 ALOS-3^[1]卫星,其光学主载荷采用离轴三反光学系统,其星下点分辨率达 0.8 m,地面幅宽达 50 km;美国的 EO-1 卫星^[2]主载荷也采用了离轴三反光学系统,其星下点分辨率达 15 m,地面幅宽为 183 km.国内科研人员也对离轴三反空间相机做了深入的研究,中科院长春光机所辛宏伟^[3]、郭疆^[4]等分别对桁架式、承力筒式离轴三反空间相机主支撑结构进行了相关的研究.

离轴三反光学系统一般是由 3 块反射镜组成,但本文研究的光学系统由于焦距过长,需要添加一块平面反射镜来折反光路,光学系统由 4 块反射镜组成,其中主镜、三镜、折叠镜均为长条镜,尺寸较大,次镜为圆形镜,尺寸相对较小^[5].日本的 ALOS-3 卫星主载荷^[1]、美国的 EO-1 卫星主载荷^[2]其光学系统均是由 4 块反射镜组成.通常为了使空间相机结构紧凑,设计时将主镜、三镜、焦平面位于空间相机的一端,次镜、折叠镜位于相机的另一端^[6-9].其中,主镜、三镜、焦平面组件的支撑结构称为相机的后框架,次镜、折叠镜组件的支撑结构称为相机的前框架.

由于光学系统对次镜、折叠镜相对于主镜的光学偏心与倾斜要求不同,通常大部分离轴三反光学系统空间相机的次镜组件与折叠镜组件需要相互独立支撑,以避免相互影响.此外,为了在有限空间内保证各镜子组件的支撑刚度,其支撑结构不仅容易阻挡光学系统的有效光路,而且会造成光机结构尺寸较大.鉴于此,根据由 4 块反射镜组成的离轴三反空间相机光学系统的特点,本文提出次镜、折叠镜组件一体化支撑的前框架方案,并提出一种基于结合自由模态与约束模态的拓扑优化方法来优化离轴三反空间相机前框架结构.

1 前框架结构的确定与材料选择

1.1 光学系统与相机初步结构

本文研究的离轴三反光学系统如图 1.因为系统分辨率较高、视场角较大,造成了折叠镜长度超过 1 200 mm,长宽比超过 5 : 1,组件质量达 42 kg.空间相机次镜组件质量为 3 kg,质量相对较小.光学系统公差要求见表 1.根据该光学系统次镜、折叠镜轴向空间位置接近的特点,同时为了减小光机结构的包络尺寸以及质量,前框架采用一体化设计方案,用桁架式结构作为相机的主支撑结构.整个相机支撑方案如图 2.

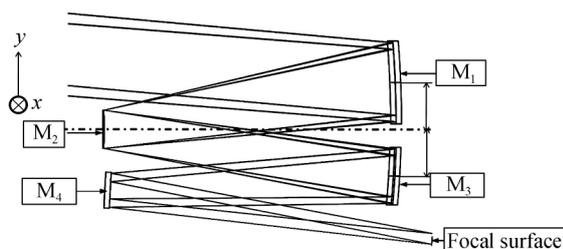


图 1 光学系统
Fig. 1 Optical system layout



图 2 光机结构简图
Fig. 2 Structure of space camera

表 1 光学公差要求

Table 1 Requirement of optical tolerance

Mirror	Eccentric			Tilt			Face shape precision
	$\Delta X/\text{mm}$	$\Delta Y/\text{mm}$	$\Delta Z/\text{mm}$	$\theta_x/(\text{''})$	$\theta_y/(\text{''})$	$\theta_z/(\text{''})$	RMS/ $(\lambda=632\text{ nm})$
Primary mirror	Datum	Datum	Datum	Datum	Datum	Datum	$\lambda/50$
Second mirror	0.03	0.03	0.04	13	13	20	$\lambda/50$
Folded mirror	none	none	none	30	30	none	$\lambda/50$

1.2 前框架的材料选择

空间相机常用的材料见表 2。碳纤维材料拥有较高的比刚度与比强度,常用于杆类等简单几何零件的制造,但对于比较复杂的板类结构,很难做到碳纤维处处连续,从而大大削弱了碳纤维复合材料的优势。此外,碳纤维复合材料制备复杂板类结构时,需要镶嵌大量的金属埋件,从而在质量上相比于其他材料的优势也会下降。低体份与高体份铝基碳化硅复合材料(SiC particulate reinforced aluminum, SiC/Al)比金属材料的比刚度高,但机械加工难度较大,费用较高,零件几乎不可修复,且目前的材料制备能力很难加工尺寸超过 1 200 mm 的板类零件^[10-12]。钛合金材料虽然比刚度略低于 SiC/Al 复合材料与碳纤维复合材料,但由于成熟的加工工艺,被广泛应用于航空航天领域结构件的制备。所以,综合考虑加工工艺性及材料的性能,采用钛合金材料进行相机前框架的制造。

表 2 常用的光机结构材料

Table 2 Opto-mechanical materials in common use

Material	CFRP/M40	SiCp/Al(35%)	SiCp/Al(55%)	ZTC4
Density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.6	2.8	2.9	4.4
Elastic modulus/Mpa	Depends on the laminate angles	97.5	180	114
Specific stiffness	Depends on the laminate angles	35.1	61.2	25.9
Thermal expansion coefficient/ $(\times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	Depends on the laminate angles	16	8	9.1
Thermal conductivity/ $(\text{W} \cdot \text{M}^{-1} \cdot \text{K})$	Depends on the laminate angles	155	235	7.4
Thermal distortion coefficient/ $(\times 10^{-8} \cdot \text{K}^{-1})$	Depends on the laminate angles	10.3	3.4	123

2 前框架结构优化设计

空间相机镜子组件支撑结构优化设计通常是一个综合考虑结构刚度与质量因素的过程,需要设计人员不断迭代修改。以往的设计过程很大程度上需要依靠设计人员的经验与类比进行优化设计,整个过程繁琐、周期长且不易取得最优解。采用基于结构刚度的拓扑优化方法,将结构刚度从被动校核改为了主动设计,从根本上去寻找支撑结构中最优的材料分布,使得结构在满足支撑刚度的基础上得到最小的质量。

传统的结构件拓扑优化方法中,为了追求在有限质量内的一阶频率最大,大多基于约束模态建立优化响应函数,优化过程中,以一阶约束模态最大作为优化目标,以质量或体积作为约束条件,从而提高结构件的基频。图 3 为拓扑优化的基本流程。

根据连续体拓扑优化思想,目前的拓扑优化方法主要采用变密度法与均匀化法^[13-14],其中均匀化法主要用于拓扑优化算法的研究,变密度法由于其程序实现简单,计算效率高,已经被广泛应用于实际的结构拓扑优化之中。变密度法的基本思想是人为引进了一种假想密度可变的材料,其相对密度(伪密度)和弹性模量之间的关系也是假定的。以每个单元的伪密度为设计变量,将结构拓扑优化问题转化为材料分布问题。变密度法中的伪密度是指密度和材料之间的一种对应关系。优化算法通过引进惩罚因子对中间密度进行惩罚,使中间密度向 0 到 1 聚集,拓扑优化后的结果便能很好地逼近实体与孔洞分明的 0 到 1 优化结果。因此,优化模

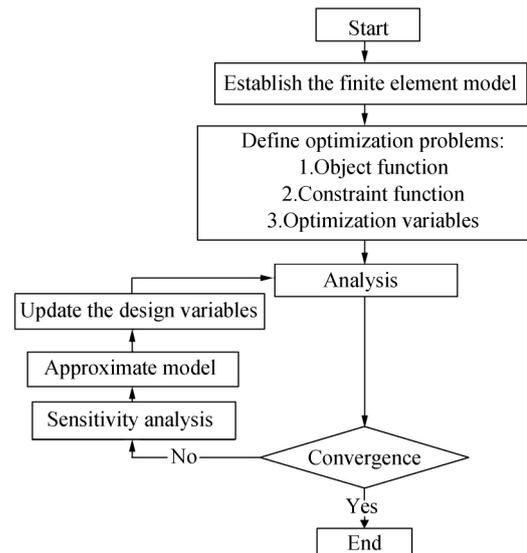


图 3 拓扑优化流程

Fig. 3 Flowchart of topology optimization method

型的设计变量就为设计区域每个单元的伪密度,可表达为

$$\mathbf{X} = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_e \dots \rho_n)^T \quad (1)$$

式中, ρ_e 表示第 e 单元的单元密度, \mathbf{X} 表示设计变量.

优化过程中单元的刚度矩阵 \mathbf{K}_e 与体积 V_e^s 可以表示为

$$\mathbf{K}_e = (\rho_e)^p \mathbf{K}^0, e = 1, 2, 3 \dots n \quad (2)$$

式中, n 表示单元总数, p 为惩罚因子, \mathbf{K}^0 、 V^e 表示为给定材料 ($\rho = 1$) 的单元刚度矩阵与实心单元材料的体积. 惩罚因子一般取 2 到 4 之间的实数, 本文取为 3.

采用基于结合自由模态与约束模态的拓扑优化方法优化前框架结构. 基于自由模态的拓扑优化方法可以避免基于约束模态优化的结构体支撑点之间存在联系的缺陷, 能够设计出较为合理的结构形式.

2.1 优化的数学模型

以频率最大化作为拓扑优化的目标函数, 以结构的体积作为优化的约束函数^[15] (以体积作为约束函数的优化模型可以在后续进行尺寸与形状优化). 其数学模型为

$$\begin{aligned} \max &= \beta \\ \text{s. t.} & \left\{ \begin{array}{l} [\alpha]^i \lambda_i \geq \beta, i = 1, \dots, N_{\text{dof}} \\ (\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \boldsymbol{\Phi}_i = 0 \\ \sum_{j=1}^N V_j x_j - V \leq 0, j = 1, \dots, N \\ 0 < x_j < 1 \end{array} \right. \end{aligned} \quad (3)$$

式中, \mathbf{K} 为一体化支撑结构的刚度矩阵, \mathbf{M} 为其质量矩阵, V 为支撑结构的体积. $\boldsymbol{\Phi}_i$ 是第 i 特征值 λ_i 相关的特征向量. x 为设计变量, j 为单元数目, $i = 1 \dots, N_{\text{dof}}$ 为特征问题的所有模态. β 为指定可能发生的频率值, α 为迭代常量, 优化过程中 α 取 0.95.

2.2 优化过程与模型提取

借助 OptiStruct 软件采用序列近似图规划法求解拓扑优化问题^[15]. 优化分为两部分, 一部分为基于自由模态的拓扑优化, 另一部分为基于约束模态拓扑优化. 针对这两种优化方法, 分别建立如图 4 所示的有限元 (Finite Element, FEM) 优化模型. 图 4 (a) 为基于自由模态的有限元优化模型, 所以整个模型没有约束; (b) 为基于约束模态的有限元优化模型, 约束 8 根桁架杆底端 6 个自由度均为 0.

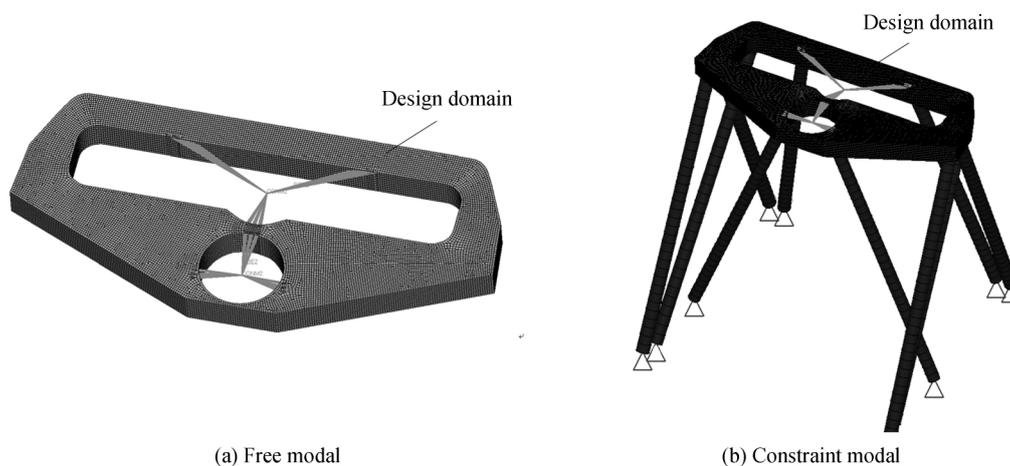


图 4 优化的有限元模型
Fig. 4 FEM mode of topology optimization

自由模态的优化函数为:

- 1) 目标函数: 一体化支撑结构的第 7 阶自由模态最大化;
- 2) 约束响应: 一体化结构体积分数小于等于 50%;
- 3) 响应函数: a 一体化结构的体积分数; b 一体化结构的第 7 阶自由模态 (前 6 阶模态为结构的刚体平动).

约束模态的优化函数为:

- 1) 目标函数: 相机结构一阶约束模态最大化;
- 2) 约束响应: 一体化结构体积分数小于等于 50%;
- 3) 响应函数: a 一体化结构的体积分数; b 空间相机的一阶约束模态.

在满足约束方程的前提下, 分别经过 80 次、53 次迭代优化后, 优化模型收敛, 优化目标随迭代次数变化曲线如图 5, 可以看出, 优化目标均趋于收敛.

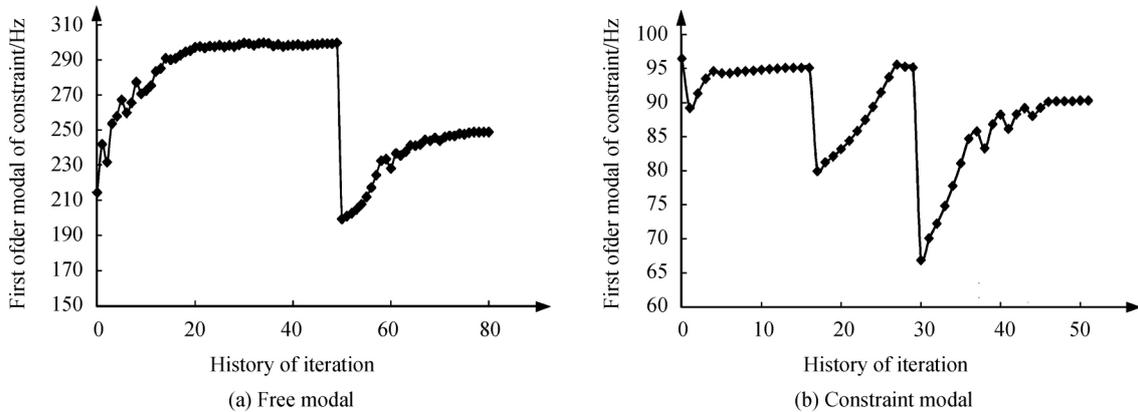


图 5 优化目标随迭代次数的曲线

Fig. 5 Objective function curve with the history of iterations

图 6 为拓扑优化结果云图, 其为去掉密度较小的单元后, 留下的结构最佳材料分布. 从图 6 可以发现:

- 1) 图 6(a) 所示的优化结果云图中, 单元的密度较为均匀, 材料基本保持连续. 同时, 结构内部出现较多空腔. 优化结果表明, 在前框架外包络不变的前提下, 内部应设计轻量化孔;
- 2) 图 6(b) 所示的优化结果云图中, 反射镜安装点与桁架杆相连接的 d 区域, 材料比较重要, 需要保留, 但是镜子安装点之间 a、b 区域却出现明显的断裂, 这是由于在建立优化模型时约束桁架杆的底端, 其自由度被限制为 0, 约束点之间不存在相对位移, 理想地加强了桁架杆的支撑刚度, 又由于以质量作为约束条件, 为了在有限质量内达到结构约束状态频率最高, 优化函数去掉了镜子安装点之间的材料. 但在现实状况下, 不存在约束点所有自由度绝对被限制的情况. 所以, 基于约束模态的优化方法明显存在缺陷.

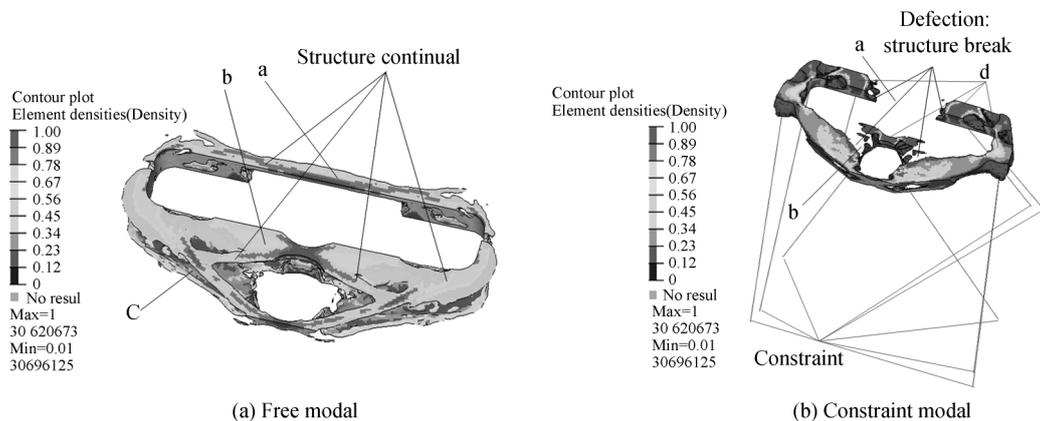


图 6 拓扑优化结果

Fig. 6 Result of topology optimization

为了得到合理的前框架结构, 必须结合基于自由模态与基于约束模态的拓扑优化结果各自的优点. 因此, 根据图 6 中拓扑优化结果, 从以下几点出发建立优化后的前框架几何模型:

- 1) 从图 6(b) 中结果可知, 需要加强镜子安装点 d 区域的局部刚度;
- 2) 从图 6(a) 结果可知, 需要将各个镜子安装点与桁架杆支撑点连接, 使得前框架整个结构比较连续;
- 3) 从图 6(a) 结果可知, 整个结构轻量化形式应为半封闭式的中空腔体;
- 4) 采用三角形轻量化形式(三角形轻量化孔刚度相对最高^[15]), 连接图 6(a) 与 (b) 中密度较大区域.

最终建立了如图 7 所示的空间相机前框架轻量化形式。

2.3 优化后有限元分析

为了验证设计的前框架是否满足相机性能要求,将图 7 所示的前框架结构带入整个相机模型,采用 Patran 软件对整个相机进行有限元网格划分,如图 8,并通过 Nastran 软件对整个相机结构进行静力学分析。



图 7 前框架一体化支撑结构
Fig. 7 Integration front frame structure

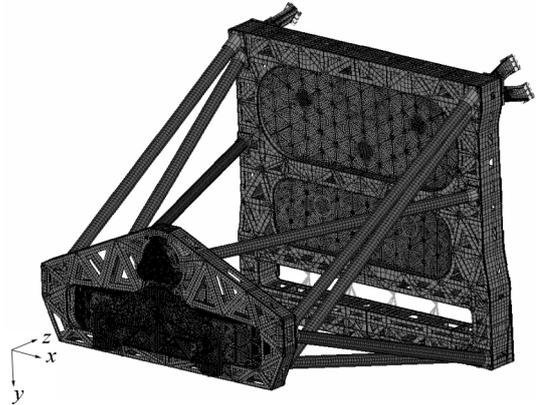


图 8 整机有限元模型
Fig. 8 FEM model of space camera

空间相机都在地面重力作用下装调与检测,且装调与检测状态均为光轴水平状态,重力方向为垂直于光轴方向,对于本文研究的空间相机即为 Y 向重力。在地面装调与检测的空间相机在太空无重力情况下其光学组件的位置准确度必须满足表 1 要求才可以正常成像,因此,要求相机结构具有良好的静力学尺寸稳定性,以克服地面重力对相机的影响。为了验证所研究前框架结构设计是否合理,有必要进行 Y 向重力条件下的整机有限分析,计算次镜相对主镜的刚体位移与倾斜是否在光学指标要求内。分析结果见表 3。

表 3 整机检测方向(Y 向)重力工况下,次镜、折叠镜组件光学性能分析结果

Table 3 Results of optical property analysis under gravity load in machine testing direction (Y direction)

Mirror	Eccentric			Tilt			Face shape precision
	$\Delta X/\text{mm}$	$\Delta Y/\text{mm}$	$\Delta Z/\text{mm}$	$\theta_x/(\text{''})$	$\theta_y/(\text{''})$	$\theta_z/(\text{''})$	RMS/nm
Primary mirror	Datum	Datum	Datum	Datum	Datum	Datum	1.7
Second mirror	0.0004	0.021	—	9	9.18	0.3	3.9
Folded mirror	None	None	None	23.4	0.2	None	4.74

根据表 3 分析结果,相机在检测方向(Y 向)重力场条件下,各镜子面形 RMS 值均在 $\lambda/50$ ($\lambda=632\text{ nm}$) 以内,次镜、折叠镜相对于主镜的光学偏心与倾斜也均在光学指标范围内,证明了相机前框架具有足够的刚度可以保证相机抵抗地面重力对成像带来的影响。

3 有限元分析与试验验证

为了验证设计方法的合理性,进行相机自由模态分析与自由模态试验。

利用 Patran 软件对前框架进行有限元网格划分,并利用 Nastran 软件对其进行自由模态分析。对加工出的前框架结构采用软支撑锤击法进行自由模态试验,测试现场如图 9。



图 9 结构件自由模态测试
Fig. 9 Free modal test of structural prototype

0522001-6

对结构件进行模态拟合,其测试数据与拟合振型如图 10. 自由模态分析与测试结果对比见表 4.

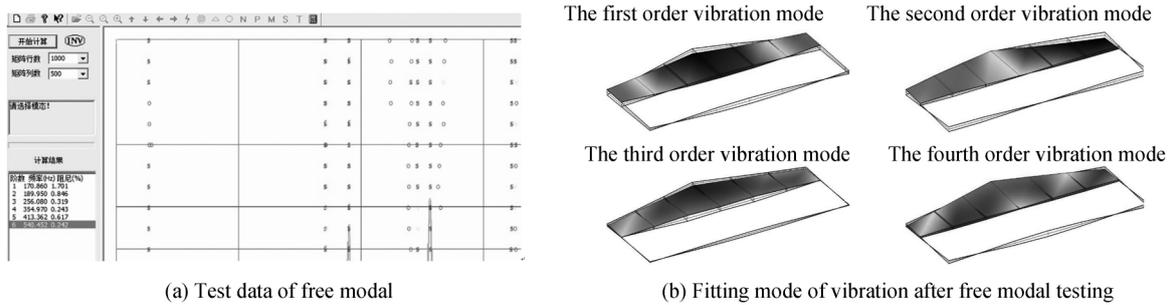


图 10 结构件自由模态测试数据与振型
Fig. 10 Test data of free modal and vibration of structural prototype

表 4 试验与分析数据对比

Table 4 Data comparison between tests and analysis

Comparison between free modal analysis and experimental results				
Modal data	Analysis	Test	Error/%	Vibration mode
1	161.4 Hz	170.86 Hz	5.5	Swing up and down along the Z axis
2	183.2 Hz	189.95 Hz	3.6	Twist around Y axis
3	235.4 Hz	256.08 Hz	8.1	Swing up and down along the Y axis
4	340.7 Hz	354.97 Hz	4.0	Swing up and down along the Z axis
5	398.1 Hz	413.36 Hz	3.7	Twist around the both sides of the frame in the XY plane
6	521.9 Hz	540.45 Hz	3.4	The frame swings around the center X axis

根据表 4 可知,有限元分析数据与自由模态测试数据误差大多在 5% 以内,个别数据误差在 5%~8% 之间. 由于前框架采用铸造工艺进行加工制造,其筋板厚度并非完全一致,同时试验时所选取的敲击点数量可能不够造成了分析与试验存在误差. 但是,误差均在 10% 以内,满足工程要求. 因此,本文的有限元模型较为准确,从而间接证明了所用优化设计方法的合理性.

4 结论

本文针对现有基于约束模态的拓扑优化方法的缺陷,提出了结合自由模态与约束模态的拓扑优化方法,并根据此方法优化设计了空间相机前框架一体化结构. 经过有限元分析,各反射镜相对于主镜的光学偏心与倾斜均在光学设计指标要求范围内. 经自由模态测试与有限元分析,验证了有限元分析的正确性及所用优化方法的合理性.

参考文献

[1] IWATA T. Advanced land observing satellite (ALOS): enabling technologies and platform performance[C]. SPIE, 2008, 9(12): 71060H.

[2] ZHANG Ke-ke, RUAN Ning-juan, FU Dan-ying. Analysis and consideration of development of oversea 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. 国外空间相机三反离轴相机发展分析与思考[J]. *航天器返回与遥感*, 2008, 29(3): 63-70.

[3] XIN H, LI Z. Structural design for lightweight off-axis TMA space telescope[C]. *International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, 2011: 1125 - 1128.

[4] GUO Jang, SHAO Ming-dong, WANG Guo-liang, et al. Design of optical-mechanical structure made of CFC in space remote sensing camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 571-578.
郭疆,邵明东,王国良,等. 空间遥感相机碳纤维机身结构设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 571-578.

[5] SHI Guang-hui. High resolution optical systems used to observation from the satellites to the earth and problems in design[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 7(2): 16-24.
史光辉. 卫星对地观测高分辨光学系统和设计问题[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(2): 16-24.

[6] LIU Lei. Focusing range of space off-axis TMA optical camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 631-636.
刘磊. 空间三反相机调焦范围的确定[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 631-636.

[7] YAO Gang, HUANG Ying, FU Dan-ying. An easily fabricated unobscured three-mirror reflective system with large FOV[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(5): 44-48.

- 姚罡,黄颖,傅丹鹰.一种易于制造、较大试场离轴三反光学系统设计[J]. 航天器返回与遥感,2010,**31**(5):44-48.
- [8] LI Chang, HE Xin. Design and optimization of trussed structure for space camera based on Rayleigh algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(9): 2405-2409.
刘畅,何欣.基于 Rayleigh 算法的空间相机桁架结构设计与优化[J]. 红外与激光工程,2012, **41**(9): 2405-2409.
- [9] SHA Wei, CHEN Chang-zheng, XU Yan-jun, *et al.* Integrated primary and tertiary mirror components from common base line of off-axis TMA space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(6): 1613-1619 .
沙巍,陈长征,许艳军,等.离轴三反空间相机主三镜共基准一体化结构[J]. 光学精密工程,2015, **23**(6):1613-1619.
- [10] LI Chang, HE Xin, LIU Qing. Design and topology optimization of space camera frame fabricated by high volume fraction SiC/Al composite material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(8): 2526-2531.
刘畅,何欣,刘强.高体分 SiC/Al 复合材料空间相机框架的拓扑优化设计[J]. 红外与激光工程,2014, **43**(8): 2526-2531.
- [11] GAO Ming-hui, ZHANG Jun, LI Jing-lin, *et al.* Feasibility analysis of high volume fraction SiC/Al mirror application in space optics[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(8): 1803-1807 .
高明辉,张军,李景林,等.高体份 SiC/Al 反射镜在空间光学应用可行性分析[J]. 红外与激光工程,2012,**41**(8):1803-1807.
- [12] JIN Peng, LIU Yue, LI Shu, *et al.* Aerospace applications of particulate reinforced aluminum matrix composites[J]. *Journal of Materials*, 2009, **23**(6): 24-27.
金鹏,刘越,李曙,等.颗粒增强铝基复合材料在航空航天领域的应用[J]. 材料导报,2009,**23**(6):24-27.
- [13] GUO Zhong-ze, ZHANG Wei-hong, CHEN Yu-ze. Review of topology optimization design[J]. *Journal of Machine Design*, 2007, **24**(8): 1-4 .
郭中泽,张卫红,陈欲泽.结构拓扑优化综述[J]. 机械设计,2007,**24**(8):1-4.
- [14] SHA Wei, CHEN Chang-zheng, ZHANG Xing-xiang, *et al.* Topological lightweight design of space mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(4): 35-39.
沙巍,陈长征,张星祥,等.空间反射镜轻量化结构的拓扑优化设计[J]. 光电工程,2009,**36**(4):35-39.
- [15] 洪清泉,赵康,张攀,等. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2012.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 41501383) and National Key Research and Development Plan of Ministry of Science and Technology(No. 2016YFB0500904)