

文章编号 1004-924X(2017)03-0697-09

空间相机碳纤维框架的设计与优化

杨 帅^{1,2,*}, 沙 巍¹, 陈长征¹, 张星祥¹, 任建岳¹

(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 100039)

摘要:设计了一个应用于轻小型空间相机的碳纤维框架。根据光学系统中各光学元件的空间分布特点,通过比较选择结构性能和工艺性能优异的 M40J 碳纤维复合材料完成了相机框架的结构设计,并使用 TC4 预埋镶嵌的方法解决了碳纤维框架接口精度低的问题。对碳纤维框架进行区域划分,采用集成仿真与优化设计方法、遗传算法全局寻优与单纯型下山法局部寻优的组合优化策略对碳纤维框架各区域结构参数进行优化设计。经过优化,碳纤维框架包含 TC4 预埋件的总质量为 15.6 kg,仅占相机整机质量的 18.4%,相机的一阶频率达 104.8 Hz。最后通过力学环境试验得到相机整机一阶频率为 102 Hz,与仿真结果相符,进一步验证了设计的合理性和正确性。文中提出的碳纤维框架方案对轻小型空间相机设计有一定的借鉴意义。文中所采用的优化方法可广泛应用于空间相机光机结构设计中,能大幅度提高设计效率,缩短研制周期。

关键词:空间相机框架;碳纤维复合材料;集成优化;组合优化策略

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172503.0697

Design and optimization of carbon fiber framework for space camera

YAHG Shuai^{1,2,*}, SHA Wei¹, CHEN Chang-zheng¹, ZHANG Xing-xiang¹, REN Jian-yue¹

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

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: yangshuai308@126.com

Abstract: In this paper, a CFC framework applied to light-small space camera was designed. Selected, through comparison, the M40J carbon fiber composite with excellent structural performance and processing property to complete structural design of the camera framework based on spatial distribution characteristics of each optical element in the optical system, and then used TC4 embedded parts to solve the problem of low interface accuracy of CFC framework; carried out regional division in the CFC framework, and then conducted parameter optimization design in each regional structure of the framework combining global optimization by integrated optimization method, optimization design method and genetic algorithm with local optimization by downhill method. After such optimization, the CFC framework was 15.6 kg, accounting for 18.4% of the entire camera, with a first-order frequency of 104.8 Hz. Finally, a mechanical environment test was conducted, obtaining a first-order frequency of the entire camera consistent with the simulation results, namely 102 Hz, which further

收稿日期:2016-08-10;修订日期:2016-09-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

verified the reasonability and correctness of the design. CFC framework put forward in this paper is of certain reference significance to light-small space camera design, and the optimization method adopted herein, which is widely applied to optical-mechanical structure design of space camera, can substantially improve the design efficiency and shorten the development cycle.

Key words: framework of space camera; carbon fiber composite; integrated optimization; combined optimization strategy

1 引言

轻小型卫星具有成本低、研制生产周期短和发射方式灵活等优点,近年来需求旺盛,行业发展迅猛。轻小型卫星的主要需求是进行高分辨率光学遥感成像,因此搭载空间光学遥感相机是轻小型卫星的重要应用方式^[1-3]。

轻小型卫星所搭载的空间光学遥感相机(以下简称“轻小型空间相机”)与传统大中型卫星平台所搭载的空间光学遥感相机相比,其轻量化水平要求更为苛刻^[4]。光机结构重量通常占整机重量的 80% 以上,因此轻小型空间相机的轻量化设计主要针对光机结构进行。按照功能性,可将轻小型空间相机光机结构分为参与成像部分和不参与成像部分。参与成像的结构包括各反射镜组件和探测器组件等,为了保证成像质量,这些组件的材料选择(光学材料种类有限)和轻量化程度(力学和稳定性要求)都受到了限制,可进行优化改进的区间较小。不参与成像的结构主要有主体框架、外遮光罩、内遮光罩、光阑(如视场光阑、孔径光阑等)及挡光环等,其中框架为参与成像的结构提供安装平台并保证轻小型空间相机满足静/动力学要求,遮光罩及挡光环用来遮拦非成像杂散光。一般来说,框架占光机结构总重的 50% 左右,可供选择的材料相对较多,优化区间更大,对其进行轻量化设计可有效降低轻小型空间相机质量^[5-6]。

目前,空间相机主体框架的结构形式主要有整体式、桁架式和组合式等。其中,整体式框架的结构刚度最优,主要有薄壁圆筒式结构和整体铸造框架结构等,多应用于中小型空间相机,如 Worldview-1 和 Geoeye-1 等;桁架式支撑方式可实现高度轻量化,但在结构刚度方面则有所牺牲,目前多用于大型同轴相机,如哈勃空间望远镜(HST)、多反射镜式望远镜(MMT)等;组合式支撑方式更多地应用于大型离轴三反式空间相机,

采用桁架杆与框架组合支撑的方式可兼顾二者的优点,其典型代表为 LandSat-7 空间相机。对于轻小型空间相机,考虑到其整机尺寸及对框架结构刚度的要求,主体框架宜采用整体式结构形式^[7]。

选用合适的低密度结构材料是空间相机光机结构轻量化的重要方法。碳纤维复合材料具有密度低、比刚度高、线膨胀系数小和设计性强等优点,是空间相机光机结构一体化设计的理想材料^[8]。

目前,碳纤维复合材料在国外已经被广泛应用于地基、天基光学仪器中,在空间相机中的在轨应用已有相关报道,例如美国的 HiRISE 高分辨率相机,其主承力板、桁架杆、遮光罩等主要支撑结构产品均采用碳纤维复合材料^[9]。国内碳纤维复合材料的应用水平较低,在空间光学相机中仍主要用于制作支撑杆、光阑外罩和承力筒等部件^[10]。

本文针对某轻小型空间相机,设计了以 M40J 碳纤维复合材料为结构材料的相机框架。采用集成仿真与优化设计方法对碳纤维框架结构参数进行优化,通过计算机辅助分析计算检验设计的合理性,最后通过整机地面力学环境试验进一步验证优化设计结果。

2 光学系统描述

空间光学相机采用 Cook-TMA 离轴三反射式光学系统,焦距为 875 mm,工作波段为 480~850 nm。光学系统由 4 块反射镜组成,主镜、三镜均为凹的非球面镜,有效口径分别为 588 mm×142 mm 和 605 mm×174 mm,次镜为一个有效口径为 86 mm×86 mm 的凸扁椭球面镜,并通过一块有效口径为 552 mm×101 mm 的平面折叠镜折转光路,将光学系统包络尺寸压缩到 605 mm×500 mm×630 mm,其中主次镜间距为 485 mm。图 1 所示为空间相机光学系统图,此光学系统无

中心遮拦、无中间像,可以实现视场角为 $34^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的大视场成像^[11]。通过优化,在奈奎斯特频率处,光学系统的传递函数 MTF 为 0.46,可实现近衍射极限成像。

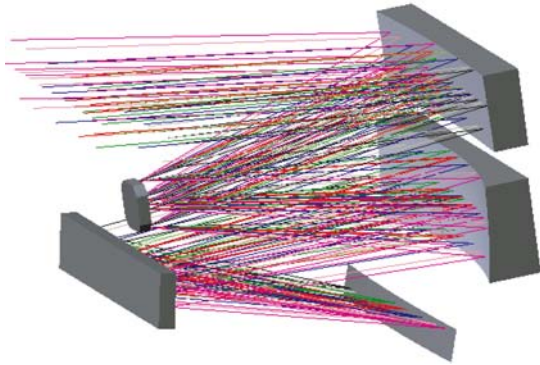


图 1 离轴三反式光学系统

Fig. 1 Off-axis three-mirror reflective optical system

在空间相机光机支撑结构中,影响光学元件面形公差的主要因素为反射镜的支撑结构,而影响光学元件位置公差的因素有相机框架的结构刚度、框架的热适应性以及各反射镜的支撑结构刚度与装调精度等。因此,在相机框架设计过程中主要考虑其对光学零件位置公差的影响。

3 碳纤维框架的设计

3.1 框架结构材料的选择

高比刚度、低线膨胀系数、良好的稳定性和较好的工艺性是空间相机结构材料的目标^[12-13]。但在实践中找到一种满足全部要求的材料较为困难。表 1 所示为常见的空间应用结构材料。

表 1 空间光学相机典型结构材料

Tab. 1 Typical material of space optical camera structure

序号	材料	密度 ρ /(g/cm ³)	弹性模量 E/GPa	比刚度 E/ρ /(10 ⁷ N · mm/g)	比热容 C /(J/(kg · K))	热导率 λ /(W/(m · K))	线膨胀系数 α /(10 ⁻⁶ /K)
1	铝合金 LC9	2.80	71.00	25.36	904.00	142.00	23.60
2	钛合金 TC4	4.44	109.00	24.55	611.00	7.40	9.10
3	铸钛合金 ZTC4	4.40	114.00	25.91	577.00	8.80	8.90
4	铁镍合金 4J32	8.10	141.00	17.41	—	13.9	0.30~1.00
5	碳纤维 M40J	1.60	95.00	59.38	—	70	0~3

从表 1 可以看出,碳纤维复合材料 M40J 具有密度小和比刚度高等优点。同时,碳纤维复合材料具有较强的性能可设计性,碳纤维的含量、性能与铺设方式以及基体的性能等决定了碳纤维复合材料的物理性能^[14]。鉴于碳纤维复合材料具有优异的性能,选用 M40J 碳纤维复合材料来完成相机框架的结构设计。

对于在碳纤维框架各接口位置镶嵌的金属预埋件,选用 TC4 钛合金作为其结构材料。

3.2 框架结构方案设计

根据光学系统中各光学元件的位置分布情况指导相机框架的设计。首先,设计一个固定连接主镜和三镜的相对刚性结构(底部框架),用以保证主镜和三镜的相对位置关系。其次,设计一个固定连接次镜和折叠镜的相对刚性结构(顶部框架),用以保证次镜和三镜的相对位置关系。最

后,在顶部框架与底部框架之间设计一个连接刚度足够高的中部承力筒,用以保证顶部框架与底部框架的相对位置关系。图 2 所示为空间相机碳纤维框架的结构示意图。

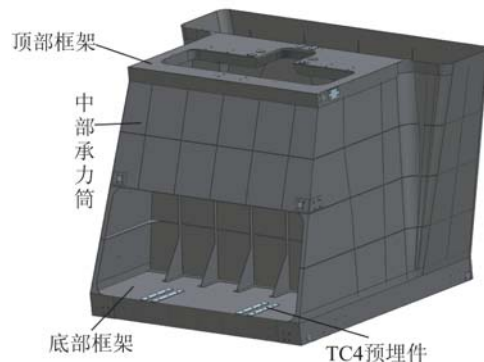


图 2 碳纤维框架结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of carbon fiber framework

3.3 预埋金属镶嵌件的设计

由于成型工艺的限制,采用碳纤维复合材料 M40J 制备的相机框架的表面精度较低,直接在相机框架上安装光学零件会产生安装应力,影响反射镜的面形精度。而碳纤维材料的特殊性又限制了不能直接对碳纤维框架表面进行机械研磨。为此在相机框架各接口位置镶嵌金属件,通过对金属镶嵌件接口面的研磨来实现光学零件的高精度安装。

为提高空间相机整机的轻量化率,将连接同一光学元件的安装基准面按照实际接触面的位置分体设计^[15],并且对各处金属预埋件进行轻量化设计。同时为了提高与框架结合界面的力学性能,在金属预埋件外轮廓增加多个轻量化孔洞,热压成型过程中,碳纤维材料向预埋件孔洞发生微量变形,热压后碳纤维材料硬化,结合界面可同时承受轴向和切向力,即提高了结合的稳定性。图 3 所示为底部框架一处钛合金预埋件的结构示意图,钛合金预埋件与碳纤维框架连接的各面均设有外轮廓孔,使结合效果更为稳定,结构的轻量化水平也更高。

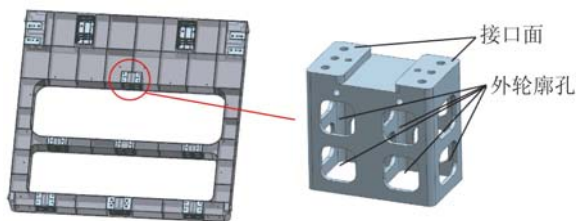


图 3 钛合金预埋件示意图

Fig. 3 Structure diagram of TC4 embedded part

为了进一步增加相机框架与金属镶嵌件连接的稳定性,在每个钛合金镶嵌件上增加刚性固定点,将相机框架与镶嵌件通过螺钉紧固,结构形式如图 4 所示。



图 4 碳纤维框架与钛合金预埋件的刚性固定点

Fig. 4 Rigid connector of carbon fiber framework and TC4 embedded part

4 碳纤维框架的集成优化

4.1 集成优化模型搭建

碳纤维框架结构是一种典型的薄壁多腔体结构,框架各处的受力情况不同,因此框架各区域的壁厚也应该根据受力情况有所区别。对已完成初步结构设计的碳纤维框架进行区域划分,以实现壁厚的参数化,在对壁厚参数进行集成优化时,需保证相机框架各项结构性能指标的前提下最大程度地降低框架质量。

(1) 设计变量

理论上,碳纤维框架区域划分越多,优化结果越好。但是综合考虑框架实际尺寸、模具制作难度、制作工艺、计算量以及框架的结构特征等可将其划分为 10 个区域。碳纤维框架区域划分方式如图 5 所示,表 2 所示为对以碳纤维框架各处壁厚参数为设计变量的描述。

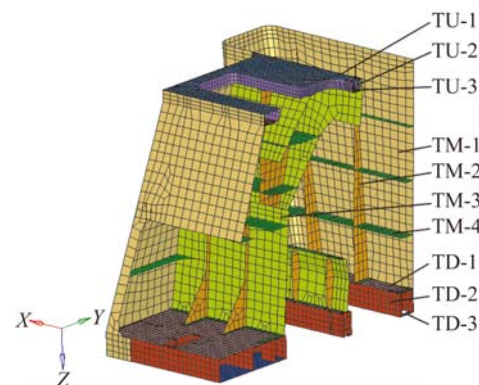


图 5 碳纤维框架区域划分

Fig. 5 Region division of carbon fiber framework

表 2 碳纤维框架各区域参数

Tab. 2 Properties of each framework region

设计变量	简介	初始值/mm	取值区间/mm
TU-1	顶部框架上面板	2	1.5~4
TU-2	顶部框架筋格	2	1.5~4
TU-3	顶部框架下面板	2	1.5~4
TM-1	中筒外圈	2	1.5~4
TM-2	中筒 X 向筋	2	1.5~4
TM-3	中筒 Y 向筋	2	1.5~4
TM-4	中筒 Z 向筋	2	1.5~4
TD-1	底部框架上面板	2	1.5~4
TD-2	底部框架筋格	2	1.5~4
TD-3	底部框架下面板	2	1.5~4

(2)优化约束

优化约束为相机整机一阶频率需大于100 Hz。

(3)目标函数

以整个碳纤维框架的质量最小作为优化目标,以达到降低空间相机质量的目的。

在对碳纤维框架的优化过程中,包含了以框架各区域壁厚为参数的10个设计变量,在每次优化循环中,需完成框架各区域壁厚参数的更新、碳纤维框架质量的统计以及相机整机模态的分析。针对上述优化问题,采用集成优化设计方法^[16],图6所示为计算流程及相关的软件工具。以Isight作为集成分析平台,联合Altair Hypermesh和Optistruct以及数据处理插件,通过不同学科间接口数据传输,构建了区域壁厚调整、模型更新、相机整机模态计算、框架质量统计以及计算结果反馈的优化循环回路,实现了求解计算的自动化,为快速获取最优的壁厚参数提供了基础。

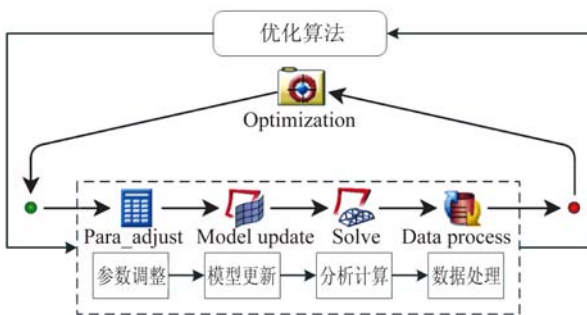


图6 集成优化分析
Fig. 6 Integrated optimization analysis

4.2 响应面分析

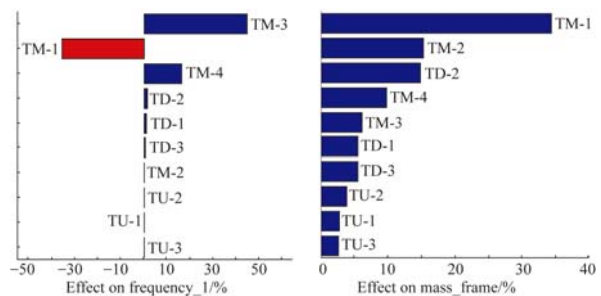
采用试验设计方法(DOE)对整个设计空间进行采样计算,使用优化拉丁超立方方法,对设计空间采样5 000个设计点,分别计算各设计点的响应。通过响应面模型(RSM),利用一阶多项式拟合设计空间,得到各设计变量对整机一阶模态和碳纤维框架质量的一阶响应面近似模型,多项式各项系数如表3所示。整机一阶模态拟合误差为2.6%,碳纤维框架质量拟合误差为0.2%,误差较小,近似模型具有较高可信度。

表3 一阶响应面近似模型多项式系数

Tab. 3 Polynomial coefficients of 1st order RSM

Term	Coefficient	Coefficient
Constant	88.984 486	0.005 399
TD-1	0.249 530	0.000 408
TD-2	0.374 013	0.001 090
TD-3	0.107 433	0.000 402
TM-1	-8.889 330	0.002 540
TM-2	0.064 704	0.001 131
TM-3	11.189 750	0.000 454
TM-4	4.020 046	0.000 720
TU-1	-0.011 315	0.000 201
TU-2	0.021 355	0.000 285
TU-3	0.003 200	0.000 188

各设计变量对整机一阶模态和碳纤维框架质量的帕累托贡献程度百分比如图7所示,正值表示正效应,负值表示负效应。可以看出,碳纤维框架中部承力筒对整机一阶模态和框架质量的影响较大,特别是中筒外圈厚度对框架质量的贡献最大,但对整机一阶模态却为负相关,而顶部框架和底部框架对整机模态和框架质量的贡献相对较小。



(a)对一阶模态的帕累托 (b)对框架质量的帕累托
(a)Pareto for Freq_1 (b)Pareto for Mass_Frame

图7 各设计变量的帕累托贡献

Fig. 7 Pareto plot of each design variable

4.3 优化策略

在对碳纤维框架各壁厚的优化过程中,由于设计变量较多,如果单纯采用局部优化算法会得到局部最优解而非全局最优解,如果单纯采用全局优化算法计算量会很大。为此,首先采用全局优化算法——遗传算法(Genetic Algorithm,GA)在全局设计空间中寻找最优区域,然后采用局部优化

算法——单纯型下山法 (Downhill Simplex, DS) 寻找最优解, 优化策略如图 8 所示。

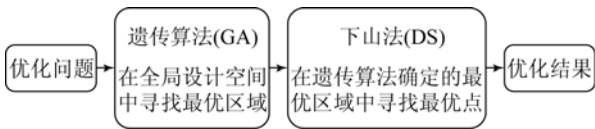


图 8 优化策略流程图

Fig. 8 Block diagram of optimization strategy

首先应用遗传算法, 以 100 为种群规模, 经过 10 次迭代得到优化结果, 接着将此结果传输到下山法模块作为其初始条件, 并继续迭代 200 次达到收敛。图 9 所示为优化过程, 左侧为 GA 迭代过程, 右侧为 DS 迭代过程。

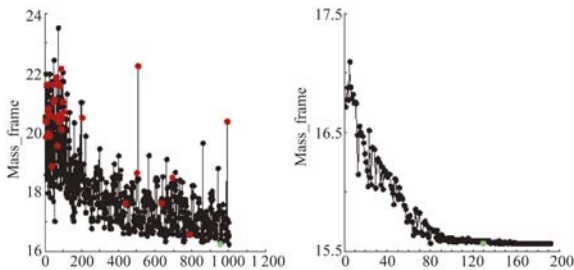


图 9 优化迭代过程

Fig. 9 Iteration process of optimization

表 4 所示为最终的优化结果, 并对各区域厚度的优化结果进行了取值规整处理。经过优化, 碳纤维框架包含钛合金预埋件的质量为 15.6 kg, 仅占相机整机质量的 18.4%。

表 4 优化结果

Tab. 4 Optimization result

设计变量	优化结果/mm	取值规整/mm
TU-1	2.054 94	2.0
TU-2	1.955 31	2.0
TU-3	2.066 22	2.0
TM-1	1.560 49	1.5
TM-2	1.511 91	1.5
TM-3	1.801 38	1.8
TM-4	1.773 50	1.8
TD-1	1.970 82	2.0
TD-2	1.504 86	1.5
TD-3	1.878 53	2.0

5 碳纤维框架分析与试验

5.1 设计分析

采用有限元仿真分析计算来检验相机碳纤维框架各区域壁厚的优化结果。根据碳纤维框架各区域厚度优化后的取整结果, 完成碳纤维框架的结构设计, 建立空间相机整机有限元模型, 如图 10 所示。

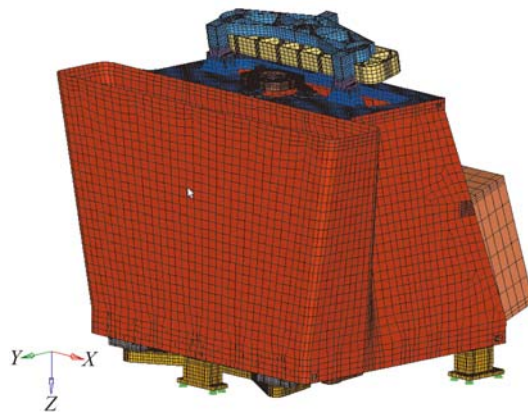


图 10 相机有限元模型

Fig. 10 FEM model of camera

对空间相机与卫星平台的接口位置施加固定约束, 分别计算空间相机整机在 Y、Z 向重力工况和 4 °C 温升工况下各个反射镜的面形精度及位置精度, 进一步通过光机集成分析, 计算在上述工况下空间相机的系统传函 MTF 值。有限元仿真分析计算结果如表 5 所示, 各个反射镜的面形精度和位置精度在各项工况下均满足设计指标要求, 空间相机系统传函 MTF 均未明显下降。有限元分析结果表明, 经过优化得到的碳纤维框架并未对空间相机的成像质量产生明显影响, 其静态结构刚度足够高, 满足空间相机成像质量要求。

固定约束空间相机与卫星平台的接口位置, 利用有限元分析对空间相机进行模态分析计算, 得到相机整机一阶自然频率为 104.8 Hz, 其振型如图 11 所示。经过优化得到的空间相机碳纤维框架结构刚度较高, 满足空间相机对机身框架的指标要求。

表 5 有限元分析结果

Tab.5 Finite element analysis result

工况	反射镜	镜面面形/nm		刚体位移/ μm			转角/ (\prime)		MTF
		PV	RMS	T_x	T_y	T_z	R_x	R_y	
Y 向重力	主镜	48.5	8.8	0	8.9	-0.7	-2.5	0	0.429
	次镜	34.3	7.3	0	13.2	-5.5	-5.6	0	
	三镜	47.1	9.3	0.1	10.3	-0.3	-1.6	0	
	折叠镜	38.5	7.3	—	—	—	—	—	
Z 向重力	主镜	58.7	11.9	0	-3.9	13.5	10.1	0	0.431
	次镜	7.8	1.9	0	-5.2	4.7	2.3	0	
	三镜	63.4	11.5	0	0.5	5.7	-1.3	0	
	折叠镜	33.2	6.5	—	—	—	—	—	
4 $^{\circ}\text{C}$ 温升	主镜	47.2	8.8	0	-10.4	14.6	5	0	0.427
	次镜	18.4	3.7	0.2	2.7	-41.7	-5.8	0.1	
	三镜	33.3	5.7	0	-10.4	14.8	-2.5	0	
	折叠镜	22.5	4.2	—	—	—	—	—	

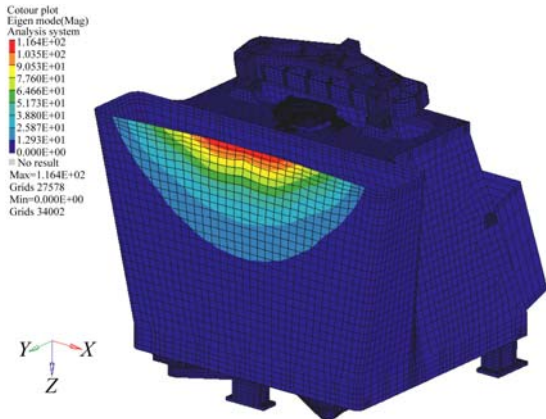


图 11 相机一阶振型

Fig. 11 First natural frequency of camera

5.2 试验验证

根据上述对碳纤维框架各区域厚度的优化结果,并结合碳纤维制备工艺性做出适当的结构优化,完成了相机框架的研制,图 12 所示为碳纤维框架中部承力筒示意图。



图 12 碳纤维框架中筒

Fig. 12 Middle part of carbon fiber framework

对装调完成的空间相机进行力学振动试验,图 13 所示为相机扫频振动试验响应曲线。相机的一阶固有频率达到 102 Hz,动态刚度较高,满足指标要求,与仿真计算结果吻合,进一步说明了设计的正确性。

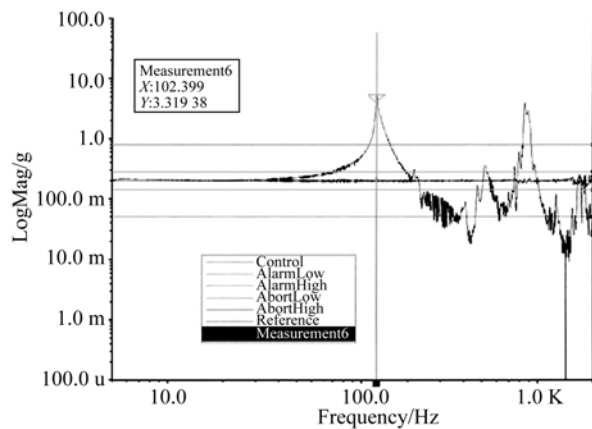


图 13 相机扫频振动试验响应曲线

Fig. 13 Response curve of sweep vibration experiment

6 结 论

根据空间相机光学系统中各光学元件的空间布局特点,通过比较选用 M40J 碳纤维复合材料,设计了应用于轻小型空间相机的碳纤维框架。使用集成优化设计方法、遗传算法全局寻优结合单纯型下山法局部寻优的优化策略对碳纤维框架各区域结构参数进行优化设计,并采用 TC4 预埋镶嵌的方法解决了碳纤维框架接口精度低的问题。经过优化,碳纤维框架包含 TC4 预埋件的总质量

为 15.6 kg, 仅占相机整机质量的 18.4%, 有限元分析计算得到空间相机的一阶频率为 104.8 Hz, 力学环境试验得到的整机一阶频率为 102 Hz. 试验结果与仿真计算结果吻合, 说明结构优化设计方法合理有效. 所提出的碳纤维框架, 解决了空间相机框架追求轻质量与高结构刚度相对立的

关系, 在兼顾空间相机整机结构稳定性的同时, 最大程度地减小了框架重量, 降低了发射成本. 文中所采用的集成仿真与优化设计方法、全局寻优与局部寻优相结合的优化策略可广泛推广到空间相机的设计过程中, 可大幅度提高设计效率, 缩短研制周期.

参考文献:

- [1] 魏磊, 金光, 谢晓光, 等. 对地观测微小卫星主承力结构的优化设计与试验[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3183-3191.
WEI L, JIN G, XIE X G, *et al.*. Optimized design of primary load-bearing structure for earth observation micro-satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11): 3183-3191.
- [2] KIRAN M, MICHAEL S, BYRON D, *et al.*. SkySat-1: very high-resolution imagery from a small satellite [C]. *Proc. of SPIE*, 9241, 92411E.
- [3] WANG Y, HUANG Y. Development and application prospects of modern small satellite technology [C]. *Proc. of SPIE*, 7651, 765126.
- [4] 陈永和, 陈洪达, 傅雨田. 适用于微小卫星平台的小型可见光相机设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2087-2092.
CHEN Y H, CHEN H D, FU Y T. Optical design of small-sized camera in visible for micro-satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2087-2092. (in Chinese)
- [5] 齐光, 许艳军, 刘炳强. 空间相机反射镜 SiC/Al 支撑板轻量化结构优化设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2214-2218
QI G, XU Y J, LIU B Q. Lightweight structure design of SiC/Al supporting plate of space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2214-2218. (in Chinese)
- [6] 李畅, 何欣, 刘强. 高体份 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
LI CH, HE X, LIU Q. 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. (in Chinese)
- [7] 梅贵, 翟岩, 苗健宇, 等. 离轴多反射镜系统支撑结构的设计与装调[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2280-2287
MEI G, ZHAI Y, MIAO J Y, *et al.*. Design and alignment of support structure for off-axis multi-mirror system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2280-2287. (in Chinese)
- [8] 安源, 贾学志, 张雷, 等. 基于碳纤维复合材料的空间相机高比刚度主承力板优化设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 416-422
AN Y, JIA X ZH, ZHANG L, *et al.*. Optimizing design of CFRP based main backbone with high stiffness ratio for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 416-422. (in Chinese)
- [9] MCEWEN A S. Mars reconnaissance orbiter's high resolution imaging science experiment (HiRISE) [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, E05S02.
- [10] 初昶波, 柴文义, 张昊苏, 等. 航天相机碳纤维外罩结构及模态分析和试验[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 1033-1037
CHU C B, CHAI W Y, ZHANG H S, *et al.*. CFRC baffle structure & modal analysis and test of space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1033-1037. (in Chinese)
- [11] 韩昌元. 高分辨力空间相机的成像系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2164-2172.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2146-2172. (in Chinese)
- [12] 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.
GUO J, SHAO M D, WANG G L, *et al.*. Design of optical-mechanical structure made of CFC in space remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 571-578. (in Chinese)
- [13] 任建岳, 陈长征, 何斌, 等. SiC 和 SiC/Al 在 TMA 空间遥感器中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2537-2543.
REN J Y, CHEN C Z, HE B, *et al.*. Application of SiC and SiC/Al to TMA optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2537-

2543. (in Chinese)

- [14] 林再文,刘永琪,梁岩,等. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用[J]. 光学精密工程, 2007,15(8):1181-1185.

LIN Z W, LIU Y Q, LIANG Y, *et al.*. Application of carbon fiber reinforced composite to space optical structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1181-1185. (in Chinese)

- [15] MARTIN R N, ROMEO R C. Lightweight optical

telescope structures fabricated from CFRP composites [J]. *Proc. of SPIE.*, 6665, 66650A.

- [16] 杨帅,沙巍,陈长征,等. 大口径离轴长条形反射镜的检测支撑机构[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2835-2842.

YAHG SH, SHA W, CHEN CH ZH, *et al.*. Detection support structure of large-aperture off-axis rectangular mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2835-2842. (in Chinese)

作者简介:



杨 帅(1988—),男,安徽安庆人,博士研究生,2011年中国科学技术大学获得学士学位,主要从事空间光学遥感器结构设计和仿真的研究。E-mail: yangshuai308@126.com

导师简介:



任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感器的研制和性能评价的研究。E-mail: reny@sohu.com