

离轴三反空间相机外遮光罩组件的研制

李志来

(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: 杂散光抑制对提高空间相机的成像品质起着至关重要的作用。通过合理地设置外遮光罩可以有效地抑制杂散光。为了满足空间相机外遮光罩轻质、高刚度、高强度和高尺寸稳定性的要求, 选取增强基碳纤维复合材料作为空间相机外遮光罩的材料, 并提出了相机主支撑结构与外遮光罩独立安装的设计思想, 从而最大限度地降低了外遮光罩变形对光学元件尺寸稳定性的影响。利用有限元分析技术对外遮光罩结构进行了热特性及动态特性分析, 并对结构参数进行了优化设计, 最终得到了质量为 5.2 kg、一阶固有频率为 113 Hz 的外遮光罩结构。动力学试验测试结果表明, 外遮光罩一阶谐振频率为 106.8 Hz, 在正弦振动和随机振动试验中加速度放大倍率小于 10 倍, 最大应力为 86.6 MPa, 远远小于碳纤维复合材料屈服应力, 结构刚度、强度完全满足设计指标要求。

关键词: 空间相机; 外遮光罩; 杂散光; 有限元分析; 动力学试验

中图分类号: V245.6; TH703

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102712.0099

Research on Outer Baffle Component of Three-mirror Off-axis Space Camera

LI Zhi-lai

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

Abstract: Stray light prevention of space camera to improve the imaging quality played a vital role. Through properly setting the outer baffle, the stray light could be effectively restrained. In order to satisfy the requirements of lightweight, high stiffness, high strength and high dimensional stability, carbon fiber composite material was selected as the outer baffle of space camera materials. A design idea of independent installation of outer baffle and main support structure of space camera were proposed, thus the influence on the optical elements by outer baffle was reduced extremely. By adopting finite element analysis technique, thermal and dynamic characteristics of outer baffle were analyzed in detail and the structure parameters were optimized. The final design scheme showed that the mass was 5.2 kg and the first order natural frequency was 113 Hz. Dynamic test results indicated that the first order natural

frequency was 106.8 Hz, the magnification of acceleration response was less 10 times and the maximum stress was 86.6 MPa in the sinusoidal and random vibration test, which met the design requirements.

Keywords: space camera; outer baffle; stray light; finite element analysis; dynamic test

1 引言

杂散光抑制已成为空间遥感相机研制的关键技术之一,能否有效地对杂散光进行抑制直接关系到空间遥感相机的成像品质。合理地设置外遮光罩是进行空间相机杂散光抑制的首要措施,它既能直接遮挡部分地气光和其他杂光进入相机镜头,又可利用其表面材料特性和遮光罩内部设置的光阑对已进入遮光罩的杂散光进行吸收,从而提高相机的信噪比^[1-4]。近年来,离轴三反空间光学系统以其视场大、相对孔径大和光学系统无中心遮拦等优点得到了世界各空间大国的重视,相对于同轴系统来说,离轴三反空间相机的外遮光罩结构形状不规则,这给外遮光罩的研制带来了很大的困难^[5-7]。从功能的角度讲,遮光罩的长度越长越好,但长度过长将增加重量,动态刚度降低,在发射运载动力学环境下容易破坏;遮光罩长度过短则将起不到有效抑制杂光的作用。

本文利用有限元及优化设计理论对离轴三反空间相机外遮光罩从材料选择、结构布局、安装方式以及结构参数优化等角度进行了详细的设计。通过优化,得到了满足设计指标要求的外遮光罩结构形式,并进行了动力学试验。试验测试结果表明,所设计的外遮光罩结构完全满足空间应用要求,设计分析模型准确有效。

2 外遮光罩结构设计

2.1 外遮光罩材料选择

外遮光罩结构设计首先考虑的就是材料选择问题。为了满足系统质量要求、刚度、强度和热性能要求,遮光罩必须选择具有低密度、高弹性模量、

高热导率和低线膨胀系数的材料制作。综合考虑这些材料特性,现阶段最优的材料是碳纤/环氧树脂基复合材料。该材料具有密度小、高强度、高模量、耐疲劳、振动性能优异、吸能减振性好、成型工艺好、尺寸稳定性和空间环境污染小等一系列优点。碳纤/环氧树脂基复合材料属性见表1。

表1 碳纤维材料属性

材料	密度 $\rho/10^{-6} \text{ kg/mm}^3$	弹性模量 E/GPa	线胀系数 $\alpha/10^{-6}/\text{C}$	泊松比 μ
T700	1.6	60	1	0.28

2.2 外遮光罩结构形式

根据光学系统提出的要求及相机主体结构的结构布局,设计出的外遮光罩结构形式如图1所示。

其主要由相机整体结构外部蒙皮、光线入口处遮光罩及内部光阑组成。外遮光罩尺寸为820 mm×805 mm×550 mm,通过在其内部设置环形加强筋,一方面起到了增强结构强度和刚度的作用,另一方面,环形加强筋也起到光阑的作用,能够对已进入遮光罩的杂散光起到有效抑制的作用。初始设计方案考虑将外遮光罩与相机主体支撑结构通过螺钉连接固定安装为一体,但通过有限元分析,计算所得外遮光罩在温度变化环境工况下,遮光罩自身变形将

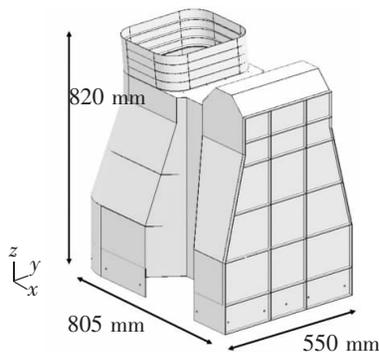


图1 外遮光罩结构形式

会对光学镜头面形精度和位置精度产生较大影响,从而降低成像质量。为了避免外遮光罩组件将自身温度变化所产生的变形传递到光学元件上,本文提出了一种外遮光罩与相机主支撑结构独立安装的结构形式,从而最大限度地降低了外遮光罩受热变形对相机本体结构的影响。具体方式为外遮光罩只在底部边缘位置与相机后框架进行螺钉连接,其余部位均不与相机主体结构相连。但此种安装方式将导致外遮光罩整体刚度降低,连接部位在动力学环境中局部应力过大,因此,为了保证其强度和刚度要求,必须进行充分的工程分析与试验验证,优化出合理的结构参数。

3 有限元分析与结构优化设计

系统对外遮光罩的质量、强度和刚度提出了严格的要求,要求外遮光罩总体质量不超过 6 kg,遮光罩整体一阶固有频率 > 100 Hz,在发射运载过程中的过载、低频正弦以及随机振动等动力学环境中结构不破坏。这一系列设计指标的快速、可靠实现只有通过科学准确的有限元分析及结构优化设计才能得到保证。

3.1 有限元模型的建立

外遮光罩结构属于薄壳结构,在有限元前处理软件 MSC/Patran 中利用壳单元划分网格单元,有限元模型如图 2 所示。

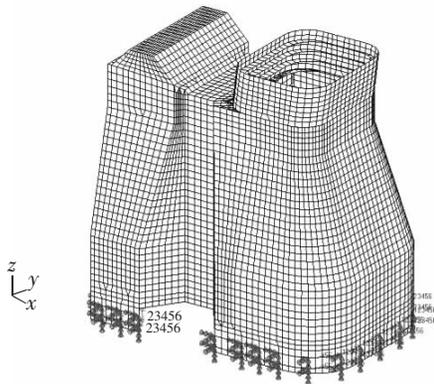


图2 外遮光罩有限元模型

外遮光罩所用的碳纤/环氧树脂基复合材料 T700 的材料属性见表 1,约束定义为外遮光罩底部与相机

后框架连接部位的 6 自由度全约束。在此模型的基础上对外遮光罩进行了模态分析和强度分析。

3.2 外遮光罩结构参数优化

结构优化从本质上讲属于数学规划范畴,结构优化设计的数学表达式为^[8]:

设计向量 $X=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$, 状态向量 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_m)^T$, 优化设计的目的是最终使得目标函数 $\psi(X, Y)$ 取得最小值,并且满足状态方程:

$$f_i(X, Y) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

约束方程:

$$g_i(X, Y) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

在结构优化设计的数学描述中主要涉及 3 个要素,即设计变量、约束条件和目标函数。本文所研究的空间相机外遮光罩结构构型已经根据空间相机主体结构基本确定,所要优化的设计变量主要是其截面尺寸,即外遮光罩和内部光阑的壳体厚度 $X=(x_1, x_2)$ 。约束条件定义为外遮光罩的一阶固有频率和壳体的厚度范围,具体为: $1 \text{ mm} \leq x_1 \leq 6 \text{ mm}$; $0.5 \text{ mm} \leq x_2 \leq 4 \text{ mm}$; $100 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 150 \text{ Hz}$ 。目标函数则定义为组件质量最轻,即 $\min \psi(X, Y)$ 。其中, x_1, x_2 分别为外遮光罩和内部光阑板的厚度, f_1 为外遮光罩一阶固有频率。通过多次迭代优化,最终得到的优化结果如下:外遮光罩与相机后框架连接段厚度为 5 mm,外遮光罩主体部分厚度 2.5 mm,遮光罩最前端入光口段厚度 2 mm,所有光阑板厚度均为 1 mm。得到的外遮光罩组件的结构重量为 5.2 kg。

3.3 模态分析

模态分析是考查结构动态刚度的主要方法,主要是提取结构低阶固有频率和相应的振型,从而找出结构的薄弱环节。从图 3 所示的外遮光罩的前四阶模态可以看出,组件一阶固有频率为 113 Hz,其振型表现为遮光罩内部光阑板的局部振动,二阶振型和三阶振型分别表现为侧板和内部光阑板的局部振动,四阶固有频率为 171 Hz,振型为外遮光罩的整体振动模态。因此,可以看出外遮光罩的整体动态刚度足够高。

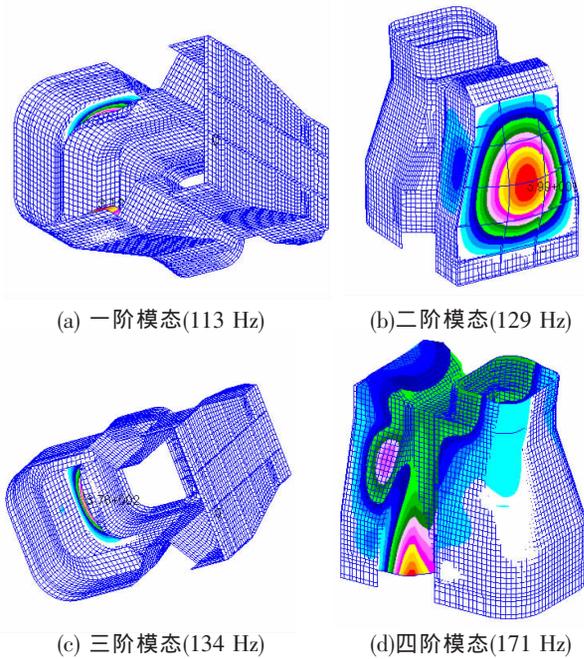


图3 外遮光罩组件前四阶模态

3.4 强度分析

由于外遮光罩结构沿3个轴向的基频都远高于100 Hz,因此在正弦振动中不会发生共振,鉴于此在强度分析中只考虑过载的应力响应。组件加速度的试验条件见表2。

表2 过载试验条件

试验项目	加速度	备注
z轴	16 g	纵向为发射方向
x, y轴	2 g	与发射方向垂直
加载速度		0.5~1.0 g/s
保持时间	5 min	当过载值达到要求后的持续时间

为了保险起见,在横向中采用10 g的输入进行分析。外遮光罩结构的过载分析结果见表3。

表3 过载分析结果

加载方向	最大应力(MPa)	安全裕度	发生位置
Z向(16 g)	34.6	18.3	固定点
X向(10 g)	7.7	78.9	固定点
Y向(10 g)	5.2	127.2	固定点

分析结果表明,外遮光罩结构在3个方向过载载荷作用下的最大应力为34.6 MPa,远远小于T700的抗拉强度800 MPa,因此外遮光罩在过载工况下不

会破坏,并且具有足够的安全裕度。

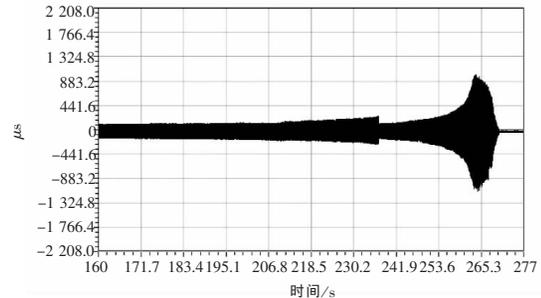
4 动力学试验

为了校正有限元分析模型,同时也为了考核外遮光罩结构件抗动力学干扰的能力,对试制的外遮光罩组件在V946振动台上进行了动力学试验。动力学试验的项目主要包括:0~2 000 Hz频率范围内的0.2 g正弦频率特性扫描;0~100 Hz的低频正弦振动试验和10~2 000 Hz的随机振动试验。0.2 g正弦频率特性扫描试验主要为了测试外遮光罩组件在0~2 000 Hz频段内的所有频率特性,可以初步得到组件的前几阶谐振频率和结构动力加速度响应的放大倍数。正



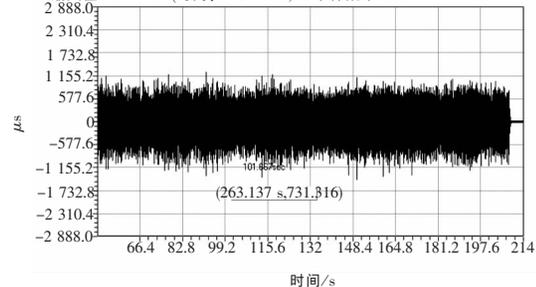
(a) 外遮光罩振动试验

文件: Y-JIANDINGJI-SINE.TIM 通道: 1
最大值=1 104.13 (时间: 264.270 s) 采样频率=400.00 Hz



(b) 正弦振动的应力测试结果

文件: Y-JIANDINGJI-SINE.TIM 通道: 1
最大值=1 444.40 (时间: 149.740 s) 采样频率=8 064.00 Hz



(c) 随机振动的应力测试结果

图4 外遮光罩组件动力学试验测试

弦振动试验主要考核低频正弦振动条件下结构的加速度响应和应力响应水平;随机振动试验主要模拟在发射运载阶段的噪声振动对结构的影响,其主要考核结构的均方根加速度响应以及易破坏部位的应力情况。

0.2 g 特征频率扫描试验测试结果显示,外遮光罩组件一阶谐振频率为 106.8 Hz,有限元分析结果为 113 Hz,分析误差为 5.8%,在分析误差允许的范围内。在随机振动中,均方根加速度响应为 49 g_{rms} ,相对于输入的 8.2 g_{ms} ,其放大倍率为 5.97 倍,满足加速度放大倍率<10 的要求。从低频正弦振动和随机振动的应力测试结果来看,在低频正弦振动中,由于遮光罩组件一阶固有频率高于 100 Hz,在 0~100 Hz 频段内结构没有发生共振,其最大应力发生在频率达到 100 Hz 时,具体位置为入光口遮光罩与主体遮光罩结构部位,其应力水平按 $\sigma=E\varepsilon$ 计算,最大微应变为 1 104,弹性模量 60 GPa,换算得到最大应力为 66.2 MPa,而在随机振动过程中的最大应力如图 4(c) 所示的测试结果为 86.6 MPa,远远小于 T700 的抗拉强度 800 MPa。振动后察看外遮光罩没有发生破坏或局部撕裂现象,证明该结构强度足够大,能够适应发

射运载阶段的动力学环境。

5 结 论

本文针对某离轴三反空间相机外遮光罩,从结构材料选取、结构参数优化设计、有限元分析及动力学试验测试等方面进行了深入的研究,得到了一种采用碳纤/环氧树脂基复合材料的外遮光罩结构形式。通过采用外遮光罩与相机本体独立安装的装配方式,最大限度地降低了外遮光罩对光学元件面形精度和位置精度的影响;通过采用结构优化设计方法,确定了外遮光罩及内部光阑各部分的结构尺寸。有限元分析与动力学试验测试结果表明,外遮光罩结构一阶固有频率为 106.8 Hz,有限元分析误差为 5.8%,满足分析精度要求;过载工况下最大应力为 34.6 MPa;正弦振动和随机振动环境下结构最大应力为 86.6 MPa,远远小于碳纤材料抗拉强度 800 MPa;加速度响应倍率<10 倍;结构具有足够高的刚度、强度;结构最终设计质量为 5.2 kg,达到了结构质量<6 kg 的设计指标要求。该外遮光罩已成功应用于空间相机。

参考文献

- [1] 盛磊,陈萍,孙东华. 轻型空间相机遮光罩组件的研制[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(2): 41-45.
- [2] 李芸,相里斌,李立波. 一种新型空间相机遮光罩的设计与仿真[J]. 光电工程, 2010, 37(7): 41-44.
- [3] 陈立恒,吴清文. 高分辨率空间相机遮光罩结构参数的有限元分析[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 445-448.
- [4] 颜昌翔,许杰,彭岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 289-293.
- [5] 刘磊,高明辉,李丽富,等. 大视场空间相机轻型遮光罩的研制[J]. 光学技术, 2009, 35(6): 822-824.
- [6] Stephen M P. A stray light analysis of the apache point observatory 3.5-meter telescope system[J]. SPIE, 2003, 4842: 128-138.
- [7] Sholl M J, Grochocikfs, Fleming J C, et al. Stray light design and analysis of SNAP telescope[J]. SPIE, 2007, 6675: 66750C.
- [8] 贾学志,金光,张雷. 空间相机外遮光罩结构设计优化[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8): 1560-1565.

作者简介:李志来(1965-),男,汉族,吉林镇赉人,研究员,主要从事空间光学遥感器结构技术方面的研究。

E-mail: lizl2004@sohu.com.