

文章编号 1004-924X(2008)08-1560-06

空间相机外遮光罩结构与优化

贾学志^{1,2}, 金光¹, 张雷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 研究生院, 北京 100039)

摘要: 选择以碳纤维复合材料和钛合金为主要材料设计了某空间相机外遮光罩,介绍了遮光罩的结构特点,探讨了基于有限元法的结构优化设计理论和方法并对该外遮光罩进行了优化。以外遮光罩质量最轻为优化目标,选择遮光罩的径向厚度和光阑厚度为设计变量,以基频和自重变形为约束条件,进行最优化分析。优化结果表明,在保证外遮光罩基频基本不变的情况下,相机外遮光罩的质量由7.2 kg减少到4.4 kg,较优化前减少了38.9%。最后用有限元法对优化结果进行了静力学和动力学校核,结果比较理想,可满足设计要求。

关键词: 空间相机;外遮光罩;结构优化;有限元分析

中图分类号: V475.3 **文献标识码:** A

Design and optimization of lightweight outer baffle for space camera

JIA Xue-zhi^{1,2}, JIN Guang¹, ZHANG Lei¹(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China;*2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The structure of the outer baffle designed for a space camera was investigated. In order to achieve the minimum weight, the carbon fibre composite and TC4 were chosen as the main material, and the finite element optimization method was used for the design of the outer baffle. According to the dimension of baffle, the inequalities relating to baffle's mode and camera parameters were given in this work, the thicknesses of the outer baffle and diaphragm could be determined. The optimization results show a reduction of weight from 7.2 kg to 4.4 kg, which is lighter 38.9% than that of original one. Moreover, the modes of the outer baffle change a little, while the impulsion in the launch progress is reduced. Finally, the static and dynamic analysis was afforded by finite element method, and the results satisfy the requirement of design in production.

Key words: space camera; outer baffle; optimum structure design; finite element analysis

1 引言

外遮光罩是空间相机光学系统的重要组成部分,它既能遮挡部分地气光和其它杂光进入窗口玻璃和相机镜头中,又可利用表面材料特性,最大限度地吸收已进入遮光罩的杂散光,能够保证较高的信噪比,对长焦距、大口径、宽视场的反射式光学系统提高成像对比度、改善成像质量、发挥详查相机的功能具有重要意义^[1]。

由总体设计可知,该外遮光罩直接暴露在太空中,空间环境条件非常苛刻,此外,在相机运输及火箭发射的过程中,外遮光罩的力学环境(如静力过载、动载荷冲击、随机振动)也非常残酷。苛刻的环境对该遮光罩提出了多方面的要求,不仅要求其具有足够的强度和刚度,还必须具有非常高的可靠性。高的可靠性从某种角度上而言将导致外遮光罩的质量增加,而这与运载和发射费相矛盾,因此,对外遮光罩的结构优化非常必要了。除此之外,该外遮光罩前端需要放置5~10 kg卫星部件,总体要求其放置卫星部件后的固有频率 >40 Hz。本文针对上述问题,采用有限元方法对外遮光罩进行了结构优化,减轻了遮光罩的质量,优化结果满足了工程实际需要,并已投入生产。

2 外遮光罩结构设计

2.1 外遮光罩材料选择

在设计外遮光罩结构之前首先需要考虑的是外遮光罩的材料问题。通过对比分析各种材料的加工性能及比刚度等,最终选择碳纤维复合材料作为外遮光罩的主要材料,钛合金(TC4)作为连接部位的首选材料。这两种材料是航天产品中多次使用的材料,其突出的特点有:工艺成熟,质量

表1 碳纤维和钛合金材料参数表

Tab. 1 Properties of titanium and carbon-fibre

名称	弹性模量 (GPa)	泊松比	密度 (kg/m ³)	热膨胀 系数(K)	屈服应力 (MPa)
碳纤维	140	0.3	1 600	0.3	482
钛合金	110	0.29	4 400	8.9	138

稳定,比刚度高,密度和膨胀系数小,能在空间环境中正常使用等,并且TC4能弥补碳纤维复合材料机械切削加工工艺差的缺点,避免产生电化学腐蚀。两种材料的参数见表1^[2]。

2.2 外遮光罩结构设计

所设计的外遮光罩组件如图1所示,主要由前筒,后筒,光阑,底口法兰,安装支脚,加强环,加强筋等组成。根据光学系统要求,该外遮光罩内径620 mm,总长度1 200 mm,其中前筒长度330 mm。此外,为了减少在地面成像实验中外遮光罩自重变形对光路的影响,光学系统对外遮光罩的自重变形量也提出了相应要求,即在地面自重变形量 ≤ 0.2 mm。总体对该外遮光罩的质量要求极为苛刻,即 ≤ 7 kg。在初步设计中选择外遮光罩遮光筒壁厚为2 mm,光阑厚度为3 mm。本结构的独特之处在于遮光筒采用分体结构,前后两筒的接口处留出桁架结构的窗口,可以将外遮光罩嵌入桁架结构中,大大减小遮光罩的尺寸,进而减轻外遮光罩质量^[3]。3个钛合金安装支脚沿圆周方向每隔120°安装在底口法兰上,通过钛合金螺钉将遮光罩组件与相机背板连接在一起,以减小遮光罩组件内部的温度变化产生的变形传递到精密的光学平台上^[4]。

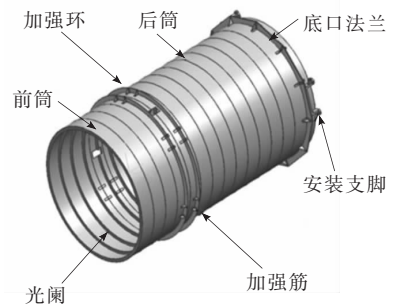


图1 外遮光罩结构示意图

Fig. 1 Structure of outer baffle

2.3 外遮光罩初步有限元分析结果

为考核外遮光罩承受发射过程中的动载荷能力,需要进行外遮光罩的动态响应计算,而且其动态响应的特性往往直接影响整个相机的动态响应特性。因此,外遮光罩结构的动态特性在相机的设计过程中就显得特别重要,而模态能从根本上反映结构的动态特性,同时模态计算也是深入动力学分析的起点。因此,在设计阶段,常常对外遮

光罩进行模态计算和以模态为目标的优化设计^[5]。考虑到工况中所列的各种情况,本文分别从静载荷,动载荷两个方面考察其分析结果。质量和一阶频率是该遮光罩设计需要考虑的两大主要因素。相机总体设计要求该遮光罩在尽可能低的质量条件下具有最高的一阶频率。初步设计的外遮光罩总质量为 7.2 kg,一阶频率为 53.5 Hz,遮光罩在地面自重情况下,最大变形量为 0.132 mm。遮光罩前五阶模态下的频率见表 2。

表 2 外遮光罩五阶模态下的频率

Tab. 2 Modes of the outer baffle

模态数	1	2	3	4	5
频率(Hz)	53.5	55	104	107	161

从以上分析结果可以看出,初步设计的外遮光罩在一阶频率和自重变形两方面是满足设计要求的,但在质量方面略大于总体要求的质量,不能满足设计要求。因此,需要对外遮光罩的结构进行优化,在保证基频和自重变形量满足设计要求的基础上减轻外遮光罩的质量,达到总体的要求。

3 外遮光罩结构的优化设计

3.1 结构优化设计的数学描述^[5]

结构优化设计的一般数学表达式为:

$$\text{设计向量: } \mathbf{X} = (x_1, x_2 \cdots x_n)^T,$$

$$\text{状态向量: } \mathbf{Y} = (y_1, y_2 \cdots y_n)^T,$$

$$\text{使目标函数: } \psi(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \text{ 最小。} \quad (1)$$

且满足:

状态方程:

$$f_k(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0 \quad (k = 1, 2, \cdots, m) \quad (2)$$

约束方程:

$$g_j(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \cdots, n) \quad (3)$$

在结构优化设计的数学描述中,主要涉及 3 大要素:设计变量、目标函数和约束条件。在一个结构优化设计方案中,根据具体情况,设计变量可以是各个构件的截面尺寸、面积、惯性矩等设计截面的几何参数,也可以是柱的高度、梁的间距、拱的矢高等结构总体的几何参数以及诸如材料的弹性模量等参数。目标函数代表设计中某个最重要的特征,大多数结构设计将结构最轻作为目标。

约束条件又分为边界约束和性能约束。边界约束一般用以限制设计变量的变化范围,或规定某组变量间的相互关系,一般呈现显约束的形式;性能约束是根据设计性能或指标而定的一种约束条件如工作应力、位移、振动频率、屈曲强度等,又称为状态变量,它是因变量,是设计变量的函数,性能约束通常是隐约束。因此优化问题本质上属数学规划范畴,且复杂的结构优化问题多属非线性规划^[6-8]。

3.2 基于有限元法的结构优化设计方法

对有限元分析中常见的线弹性静力问题,最基本的状态变量就是结点位移,即

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}, \quad (4)$$

结构在离散化后须满足的状态方程就是整个结构的平衡方程:

$$\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R}, \quad (5)$$

即

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}\mathbf{Y} - \mathbf{R} = 0, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{K}, \mathbf{U}, \mathbf{R}$ 分别为修正后的整体刚度矩阵、结点位移列阵和载荷列阵。

针对设计点 $\mathbf{X}^{(0)}$,通过有限元分析求出(6)中的状态变量 $\mathbf{Y}^{(0)}$,使设计变量产生微小的改变,移动到新设计点 $\mathbf{X}^{(1)} = \mathbf{X}^{(0)} + \delta\mathbf{X}^{(0)}$,再通过有限元分析求出状态变量 $\mathbf{Y}^{(1)}$,则结点位移状态变量的改变量为 $\delta\mathbf{Y} = \mathbf{Y}^{(1)} - \mathbf{Y}^{(0)}$ 。应力状态变量可由 $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{E}\mathbf{B}\mathbf{U} = \mathbf{E}\mathbf{B}\mathbf{Y} = \mathbf{D}\mathbf{Y}$ 求出,其中 \mathbf{B}, \mathbf{D} 分别为应变和应力矩阵。

由于在设计点 $\mathbf{X}^{(0)}$ 及 $\mathbf{X}^{(1)}$ 均满足状态方程(6),因此精确到一阶增量,有

$$\Delta F^{(0)} = \left(\frac{\partial f}{\partial \mathbf{X}} \right)^{(0)} \delta\mathbf{X}^{(0)} + \left(\frac{\partial f}{\partial \mathbf{Y}} \right)^{(0)} \delta\mathbf{Y}^{(0)} = 0, \quad (7)$$

可得结点位移增量:

$$\delta\mathbf{Y}^{(0)} = -(\mathbf{K}^{-1})^{(0)} \left(\frac{\partial f}{\partial \mathbf{X}} \right)^{(0)} \delta\mathbf{X}^{(0)}, \quad (8)$$

因此在的邻域,目标函数的一阶增量(全微分)为:

$$\begin{aligned} \Delta\Psi^{(0)} &= \left(\frac{\partial\Psi}{\partial\mathbf{X}} \right)^{(0)} \delta\mathbf{X}^{(0)} + \left(\frac{\partial\Psi}{\partial\mathbf{Y}} \right)^{(0)} \delta\mathbf{Y}^{(0)} = \\ &= \left[\left(\frac{\partial\Psi}{\partial\mathbf{X}} \right)^{(0)} - \left(\frac{\partial\Psi}{\partial\mathbf{Y}} \right)^{(0)} (\mathbf{K}^{-1})^{(0)} \left(\frac{\partial f}{\partial\mathbf{X}} \right)^{(0)} \right] \delta\mathbf{X}^{(0)}. \end{aligned} \quad (9)$$

根据 $\Delta\Psi$ 和约束方程(3)判断是否满足约束条件,如不满足,修正设计变量 $\mathbf{X}^{(0)}$ 和步长 $\delta\mathbf{X}$,再次进行迭代计算,因此整个优化过程是一个分析

—评估—修正的循环过程,就是对于初始设计进行分析,对分析结果就设计要求进行评估,然后修正设计,这一循环过程重复进行直到满足所有的设计要求为止^[9-10]。

有限元法具有强有力的分析求解功能,若将有限元技术与优化设计方法结合起来,可以充分利用各自的优势,解决复杂结构的优化设计问题。结合有限元法的优化设计方法利用有限元软件强有力的求解功能和优化设计思想,寻求最佳设计方案及参数,实现了光机系统在复杂环境下的结构优化设计,达到优化设计的目标。简而言之,结构优化就是在计算机上实现自动修改分析模型参数以达到预期目标,并满足设计要求^[11]。

3.3 MSC/NASTRAN 的优化过程

针对该遮光罩的优化过程,考虑其技术指标(尤其是总体给的质量指标)、运载条件和经济性等因素,选择质量最小为目标函数 $\Psi(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$, 主要设计变量为外遮光罩和光阑的壁厚,优化的主要约束条件为外遮光罩的一阶固有频率和自重变形。在约束条件中,由于受到碳纤维材料加工条件的限制,需要约束外遮光罩和光阑的厚度,使其 ≥ 0.5 mm。

本优化设计的数学描述如下:

$$\begin{aligned} \text{目标函数:} & \quad \text{Min} \Psi(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \\ \text{设计变量:} & \quad \mathbf{X} = (x_1, x_2)^T \\ \text{约束条件:} & \quad 0.5 \leq x_1 \leq 3; \\ & \quad 0.5 \leq x_2 \leq 5; \\ & \quad 40 \leq f \leq 80; \\ & \quad l \leq 0.2. \end{aligned}$$

式中: x_1, x_2 分别为外遮光罩和光阑的壁厚; f 为外遮光罩的一阶频率; l 为外遮光罩的自重变形。

3.4 有限元优化结果

外遮光罩壁厚和光阑轴向厚度尺寸优化曲线如图2所示,目标函数变化曲线如图3所示。从图2中可得到优化后结果如下:外遮光罩遮光筒厚度为0.5 mm,光阑厚度为0.5 mm。从目标函数优化曲线得到优化后外遮光罩质量为4.4 kg。优化后前五阶模态频率见表3。

优化后外遮光罩质量4.4 kg,较优化前减少了2.8 kg,但前五阶频率变化不大,此外优化后外遮光罩自重变形0.126 mm,在光学系统要求范围内。综合上述可知优化后的外遮光罩在质量、基频和地面自重变形量3方面都满足设计要

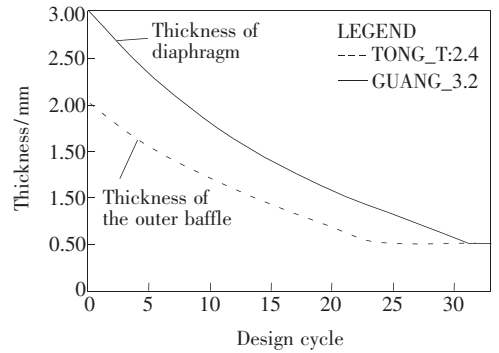


图2 设计变量在优化过程中的变化曲线
Fig. 2 Transformation curves of design parameter in optimization

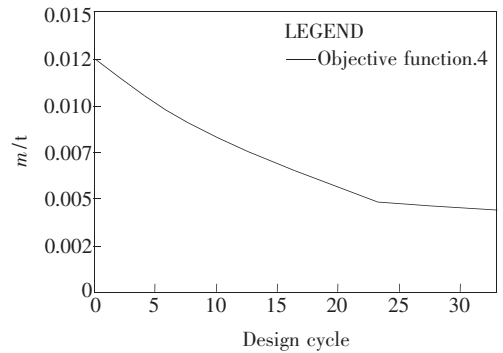


图3 目标函数优化曲线
Fig. 3 Optimization curve of object function

表3 优化后外遮光罩五阶频率

Tab. 3 Modes of outer baffle after optimization

模态数	1	2	3	4	5
频率(Hz)	52	72	89	103	170

求,且结果比较理想。

对优化后的外遮光罩进行随机振动分析。随机振动是一种只能在统计意义下描述的振动。随机激励通常以功率谱密度(PSD)函数的形式来描述,随机激励信号和响应点的PSDF曲线如图4,图5所示,输入点的RMS=8 g,自重变形量最大点的RMS=18.6 g,放大倍率为2.3倍,远远低于其他相机外遮光罩的放大倍率。随机振动响应曲线表明该外遮光罩具有较强的抗外部振颤的能力,对进入外遮光罩的光线影响较小,能够较好地满足光学系统的要求。综合上述,所设计的遮光罩较好地满足了设计要求。

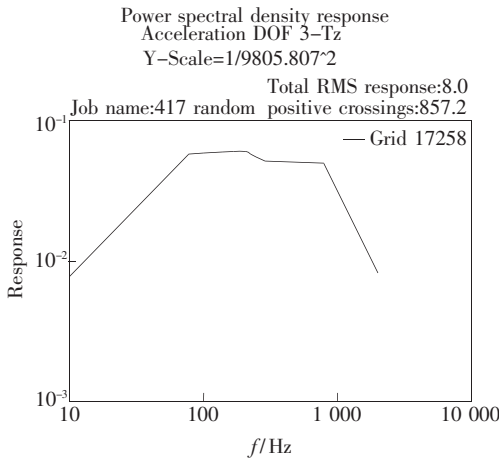


图 4 随机振动输入 PSDF 曲线图

Fig. 4 PSDF curve of random vibration

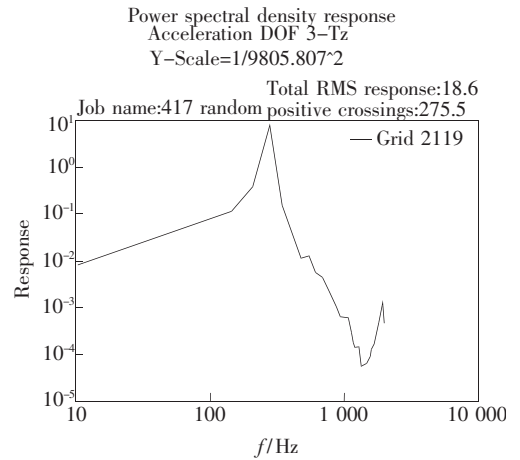


图 5 自重变形最大点随机振动响应曲线

Fig. 5 PSDF curve of random vibration on the point of the largest distortion

4 结 论

在传统设计中,为了减少计算和设计工作量,对遮光罩径向厚度和光阑厚度往往根据经验设计,这显然会造成较大的材料浪费。本文采用有

限元优化方法可以在保证刚度的情况下大大减少遮光罩的质量。在满足一阶频率 >50 Hz的前提下,采用碳纤维复合材料制作的外遮光罩壁厚可以达到 0.5 mm;优化后整个外遮光罩的质量仅为 4.4 kg,较优化前减少 38.9%,按照优化后的尺寸设计的外遮光罩已经投入生产。

参考文献:

- [1] 丁福建,李英才.外遮光罩工程分析及其结构动力优化[J].光子学报,1999,28(1):75-79.
DING F J, LI Y C. The design and dynamical analysis of a lightweight outer baffle [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999,28(1):75-79. (in Chinese)
- [2] 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 fibre reinforce composite for space-based to space optical structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8):1181-1185. (in Chinese)
- [3] DENNIS G, JIM B, JOE D, *et al.*. Overview of the optical design and performance of the high resolution science imaging experiment (HiRISE)[J]. *SPIE*, 2005,5874:58740K-1-58740K-10.
- [4] 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.
SGENG L, CHEN P, SUN D H. Development of light baffle for space camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2006,27(2):41-45. (in Chinese)
- [5] 陈长征,赵玲玲,刘磊,等.空间遥感器支撑桁架的模态计算与试验[J].光学精密工程,2007,15(8):1164-1169.
CHEN CH ZH, ZHAO L L, LIU L, *et al.*. Modal calculation and test of truss in space remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8):1164-1169. (in Chinese)
- [6] ROBERT D C, DAVID S. *Malkus Concepts Applications of Finite Element Analysis* [M]. Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [7] GENBERG V. Optimum design of lightweight mirrors[J]. *SPIE*, 1998,1993:60-71.
- [8] DOYLE K B. Design of optical for maximum fundamental frequency[J]. *SPIE*, 1998,1993:50-59.

- [9] 王辉明, 赵文, 乐凤江. 基于有限元分析的平面桁架结构优化设计研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2004, 21(4):434-437.
WANG H M, ZHAO W, LE F J. Research on truss structural design of optimization based on finite element analysis [J]. *J. Xinjiang University (Natural Science Edition)*, 2004, 21(4):434-437. (in Chinese)
- [10] 关英俊, 辛宏伟, 赵贵军, 等. 空间相机主支撑结构拓扑优化设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8):1157-1163.
GUAN Y J, XIN H W, ZHAO G J, *et al.*. Topologic optimization design for main supporting structure of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1157-1163. (in Chinese)
- [11] 杨剑, 张璞. 新编 MD Nastran 有限元实例教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
YANG J, ZHANG P. *Instance Tutorial of MD Nastran* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:贾学志(1980—),男,博士生,主要从事空间相机整体结构研究。E-mail:xuezhi0817@163.com

导师简介:金光(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感器总体研究工作。E-mail:jing@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑 严寒)

● 下期预告

星载嵌入式软件测试过程模型

陈佳豫^{1,2}, 邢忠宝¹, 刘金国¹, 孔德柱^{1,2}, 徐东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 研究生院, 北京 100039)

在 W 模型和 X 模型的基础上, 针对星载嵌入式软件的特点, 给出一种适用于星载嵌入式软件测试过程模型——蝴蝶模型。该模型不仅完整体现了对整个开发活动的测试, 而且支持迭代及变更, 尤其适用于星载嵌入式软件的研制需要经历多个周期的特点, 在尽早发现卫星型号产品软、硬件设计缺陷, 缩短星载嵌入式软件研制的周期, 降低软、硬件的成本, 提高星载嵌入式软件的可靠性等方面, 都有着明显的优点, 适用于星载嵌入式软件研制的整个过程。