

航天相机碳纤维外罩结构及模态分析和试验

初昶波, 柴文义, 张昊苏, 贺天兵, 汶德胜

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 采用高强度的碳纤维复合材料 T300 设计、制造了具有较复杂外形和多级斜挡光环的航天相机外遮光罩, 并简要介绍了制造工艺过程。运用有限元法完成了模态分析, 利用现有工装联接碳纤维外罩完成了模态测试, 得到了其径向模态及其振型, 并给出了试验频响函数图。通过比较有限元分析和试验测试数据表明, 有限元分析模型与实际产品各阶模态误差均在 2.3% 以内。由此可见, 碳纤维外罩结构合理, 采用的有限元分析方法可行, 该方法如扩展到大型航天相机动力学建模过程, 将对设计相机整机结构具有指导意义。

关键词: 模态试验; 航天相机; 碳纤维外罩

中图分类号: TP7; O439 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)04-1033-05

CFRC outer baffle structure & modal analysis and test of space camera

Chu Changbo, Chai Wenyi, Zhang Haosu, He Tianbing, Wen Desheng

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

Abstract: Outer baffle of space camera was designed and manufactured with more complicated shape and multilevel inclined vanes using high strengthened carbon fiber reinforced composite (CFRC) T300. Meanwhile the manufacturing process was introduced briefly. Modal analysis was finished with finite element method (FEM). Fixing the outer baffle on an existing fixture the modal test was finished and the radial modes and shapes were obtained, the test frequency response function map was also presented. Comparing the finite element analysis (FEA) and testing data it is indicated that the error of every mode is less than 2.3% between the FEA model & the fact product. It can be seen that the structure of CFRC outer baffle is reasonable and the FEM is feasible. Used into the kinetic modeling process of the space camera, the FEM could have guidance significance to the design of the whole structure of camera.

Key words: modal test; space camera; CFRC outer baffle

收稿日期: 2012-08-20; 修订日期: 2012-09-23

基金项目: 国家 863 计划(2011AA7085020)

作者简介: 初昶波(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事航天相机结构方面的研究。Email: cbchu@opt.ac.cn

0 引言

外遮光罩在航天相机中作为光机镜头的一部分,因为是纯结构件,在相机整体结构中的重要性不如镜头部分和焦面组件。但在特殊使用环境中,如天基暗目标成像时对航天相机的杂光设计提出了非常高以致苛刻的要求^[1],相机外罩结构变得复杂,如长度加长、挡光环增多或变倾斜等,此时的外遮光罩结构复杂、在相机总长度占比重较大,直接影响到整个相机的质量、静力学和动力学特性,因此在结构设计时有必要对此零部件进行详细的刚度分析和计算。

国内在碳纤维外遮光罩结构优化设计和有限元分析方面开展了大量工作,并进行了动力学试验验证^[2-5]。笔者认为,当航天相机外遮光罩结构复杂、基频过低不利于整个相机的结构刚度时应对其刚度引起足够的重视。

1 结构设计

航天相机外遮光罩作为相机光能量的入口,其设计要求主要有以下四点:光学系统消杂光、强度、刚度、质量。外遮光罩外形、长度和内挡光环数量等具体设计参数直接影响光学系统的消杂光效果。遮光罩外形可以是直方筒形、锥方筒形、圆筒形、圆锥筒形,有时为了加工和制造方便,圆锥筒形可以改良成阶梯状的圆筒形;内挡光环可以是直环或是带一定角度的斜环。力学特性方面,强度对于航天产品是基本要求,满足刚度要求才是真正的设计难点。一般外罩在满足前两项要求后需进行材料选择和质量复核,以保证其质量最小。

多级型遮光罩可以获得更高的视场外杂散光抑制效果^[6],文中设计的空间相机外罩共有 3 级,呈阶梯状。21 个挡光环中除最外端的 1 个环为直环外,其余全部与罩体倾斜,斜挡光环使入射杂光的反射光线和一部分散射光线在挡光环与遮光罩内壁的空间内多次衰减无法出射,剩余的散射光线也大多逆向光学系统传播,大大削弱了到达探测器的杂散光^[7]。挡光环外径共有 3 种,其中外径 212 mm 的有 3 个,外径 248 mm 的有 4 个,外径 280 mm 的有 14 个。罩体总长 600 mm。刚度设计需满足卫星对相机提出的基频大于等于 100 Hz 的要求。

从设计要求看,该外遮光罩外形呈阶梯状,相对

细长,对提高其刚度和基频增加了难度,需认真选择材料进行刚度设计。

外罩的制造材料主要有铝合金和碳纤维两种。铝合金价格便宜,对于较小尺寸外罩,一般用铝棒材直接加工,罩体和挡光环均通过车削一次成型;大尺寸外罩用薄铝板铆接制成,钣金用薄铝板一般用锻铝或防锈铝,其比强度低,且由于铆条和接缝的存在降低了整体强度。碳纤维复合材料具有金属材料不可比拟的优点:一是比强度和比模量高;二是减振性能好。承力结构的自振频率除与结构形状有关外,还与结构材料比模量的平方根成正比。由于复合材料的比模量高,其结构具有较高的自振频率。同时,复合材料中聚合物基体和界面尤其是高韧性的树脂和橡胶基体具有显著的振动阻尼特性,高的自振频率和阻尼决定了复合材料有很强的吸振能力。

基于强度、刚度和质量要求,外罩材料一般选用碳纤维布铺成,而基于成本考虑,一般选择高强度而不是高模量的碳纤维布。高强度碳纤维布有 T300、T500、T700 等,其中 T300 工艺成熟,性价比最高,完全可以满足航天相机振动环境的要求。

因为单层预浸布厚度为 0.3 mm,遮光罩筒厚度设计为 1.2 mm,筒内嵌有 21 个厚 0.6 mm 的挡光环,挡光环倾斜角度由光学设计提供,从 30°依次增大至 90°。为了增加挡光环和遮光罩筒之间联接强度,在两者之间采用胶接加铆接的方法进行联接,联接长度为 10 mm。遮光罩筒由三段直筒组成,在联接法兰与第二个直筒之间、第二个直筒与第三个直筒即大端筒体之间沿周向分别有 7 条厚 1 mm 的轴向直筋和斜筋起加强作用。整个外遮光罩可用 7 个 M4 螺钉通过玻璃钢隔热垫与镜筒相连。外遮光罩的结构简图如图 1 所示。整个外遮光罩质量为 2.1 kg。

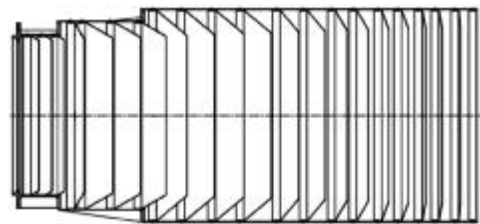


图 1 碳纤维外遮光罩结构图

Fig.1 Structure drawing of CFRC outer baffle

2 有限元分析

模态是动力学分析的基础, 碳纤维外罩作为航天相机一个重要的结构件有时占整个相机的体积比较大, 因此, 对其进行模态分析并掌握其振型对于分析相机整体模态, 从而分辨整体或局部模态具有极其重要的意义。

进行动力学模态分析时, 首先建立了有限元模型, 建模和分析软件采用 MSC.Patran & Nastran, 模型采用二维板壳单元和三维实体单元, 共有 10614 个实体单元、125535 个壳单元和 141348 个节点。为了分析方便, 在外罩体和挡光环连接处采用节点协调的刚体连接, 碳纤维外罩的有限元模型如图 2 所示。经分析得出碳纤维外罩在 600 Hz 以内的模态和振型如表 1 所示, 可以看出, 外罩模态前两阶和第三、四阶以及第五、六阶模态两两频率相近, 且其振型两两相互正交, 如图 3 所示。



图 2 碳纤维外遮光罩有限元模型
Fig.2 FEM of CFRC outer baffle

表 1 碳纤维外遮光罩模态和振型

Tab.1 Modes and shapes of CFRC outer baffle

Mode No.	Frequency/Hz	Mode shape
1	110.34	Bend
2	110.35	Bend
3	370.98	Breath
4	371.02	Breath
5	561.79	Breath
6	564.22	Breath

从模态分析的结果可以看出, 遮光罩的基频较高, 满足卫星对相机提出的基频要求, 说明该结构具有良好的刚度。各阶频率之间无密频现象, 说明遮光罩结构设计合理。

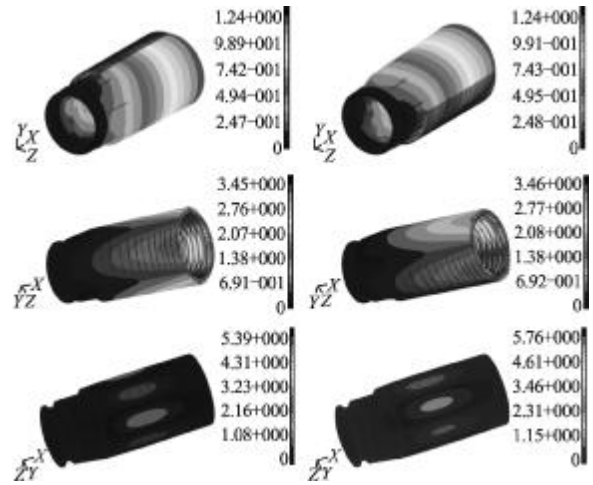


图 3 碳纤维外罩振型图

Fig.3 Mode shapes maps of CFRC outer baffle

3 制造

2006 年盛磊详细介绍了美国发射的火星勘测轨道飞行器(MRO)上的沥青基碳纤维轻型遮光罩的工艺制造过程, 成型模具使用铝材制成^[6]。目前国内制造碳纤维产品普遍使用钢制模具。该项目中外罩制造基体材料为商品化的 T300 单层预浸布。整个碳纤维外遮光罩为三级长圆形筒, 由于挡光环的存在内部结构呈现复杂化, 无法一次成形。因此, 需遮光罩筒和挡光环分别制造完成后再进行胶接和铆接以保证两者之间的连接强度。其中遮光罩筒外的直筋和斜筋先铺层吸胶后再与筒体共固化; 遮光罩筒和挡光环需加工不同的模具用于铺层、脱模和成型固化。21 个挡光环中, 同一倾斜角度的可以使用同一模具以减小成本。在遮光罩筒和挡光环的装配过程中还需多种工装用于保证挡光环之间间隔的精度要求。整个碳纤维外遮光罩的成型工序流程如图 4 所示。

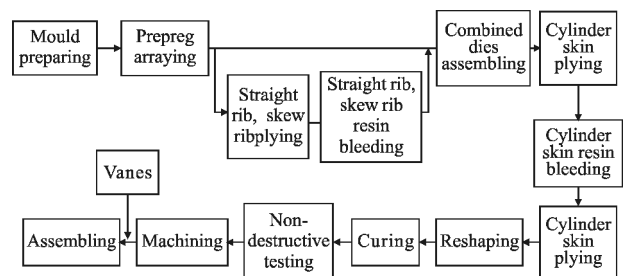


图 4 成型工序流程图

Fig.4 Flow chart of molding procedure

4 试验测试

碳纤维外罩结构复杂,在有限元建模过程中存在诸多简化。为了掌握外罩实际产品的动力学特性,为整个相机的预计模态特性提供数据支撑,并为修正外罩线性模型提供依据,从而为修正整个相机模型奠定基础,在相机总装之前,对碳纤维外罩采用冲击激励法进行了模态测试。模态测试系统如图 5 所示,主要由外罩、工装、固定平台、数据采集前端、模态试验分析系统、冲击锤和加速度传感器组成。

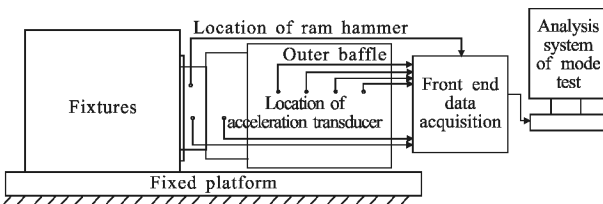


图 5 模态测试系统组成图

Fig.5 Constitutional diagram of modal test system

为了避免由于连接工装刚度不足影响对外罩模态结果的判断,外罩通过法兰固连在高刚度的工装上,工装连接在一个刚度极高的固定平台上。加速度传感器粘结在需测量的外罩位置上后用冲击锤在靠近外罩与工装连接法兰的筒体附近沿径向给予脉冲力激励,此时冲击锤的激励力和加速度传感器的测量结果通过数据采集前端采集到模态试验分析系统中进行数据处理,并给出激励与响应的频率响应函数(FRF)来识别其模态参数。

模态测试前,首先根据外罩的形状尺寸划分了节点,如图 6 所示,其中沿周向 8 等分,沿轴向 7 个节点,共划分 56 个节点。测试时,加速度传感器采用美国 PCB 公司的 333B30,冲击力锤采用美国 PCB 公

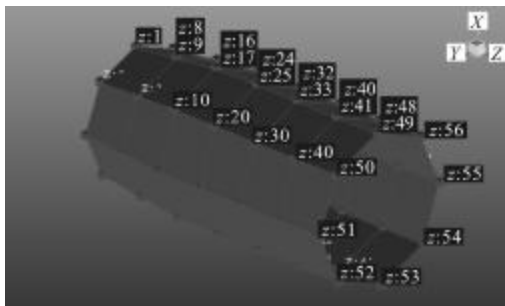


图 6 遮光罩节点划分图

Fig.6 Node partition map of outer baffle

司 086C03,数据采集前端采用 LMS-SCADAS III,模态试验分析系统采用 LMS-Test.Lab。由于模态测试仪通道和传感器数量限制,56 个节点的测量分成 8 次完成,每次将 7 个传感器用专用蜡分别粘结在沿外罩轴向 7 个节点上。

模态测试结束后,通过模态试验分析系统进行数据分析得到碳纤维外遮光罩在 600 Hz 以内的模态参数如表 2 所示,各阶频率对应的振型如图 7 所示,试验得到的激励与响应的综合频响函数图如图 8 所示。

表 2 遮光罩径向模态参数

Tab.2 Radial mode parameters of outer baffle

Mode No.	Frequency/Hz	Damp/%	Mode shape
1	110.608	0.84	Bend
2	379.467	0.50	Breath
3	565.386	0.73	Breath

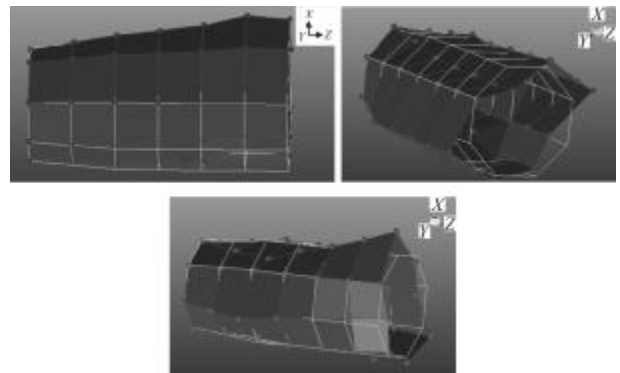


图 7 遮光罩前三阶模态振型

Fig.7 First three mode shapes of outer baffle

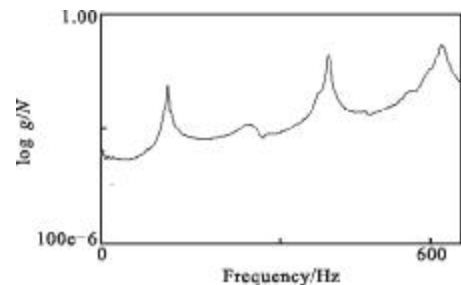


图 8 综合频响函数图

Fig.8 Map of synthetic frequency response function

通过比较表 1 和表 2 的数据可知,模态测试结果与有限元分析结果符合的很好,其中第一阶模态误差为 0.24%,第二阶模态误差为 2.24%,第三阶模态误差为 0.64%(正交模态算为同一阶)。显而易见,碳纤

维外罩是圆对称结构,理论分析的模态前6阶存在3个正交振型是正常现象;模态试验测试时激励力为X向,故600 Hz内模态和振型也只有对应3组。

5 结论

文中从设计要求和具体设计参数入手,采用高强度的碳纤维复合材料T300设计、制造了具有较复杂外形和多级斜挡光环的航天相机外遮光罩,并完成了模态分析和试验测试工作。通过比较分析和测试数据表明,有限元分析模型与实际产品模态误差在2.3%以内。由此可见,碳纤维外罩结构合理,采用的有限元分析方法误差很小,该方法如应用到大型航天相机动力学建模中,将对设计相机整机结构具有指导意义。

参考文献:

- [1] Liao Zhibo, Fu Ruimin, Zong Xiaoying. Design of specular baffle of star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 66-69. (in Chinese)
廖志波, 伏瑞敏, 宗肖颖. 星敏传感器反射式遮光罩设计[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 66-69.
- [2] Liu Lei, Gao Xinghui, Li Lifu, et al. Development of light baffle of space camera with large field of view [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(6): 822-824. (in Chinese)
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.
- [3] Jia Xuezhi, Jin Guang, Zhang Lei. Design and optimization of lightweight outer baffle for space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(6): 1560-1565. (in Chinese)
贾学志, 金光, 张雷. 空间相机外遮光罩结构与优化[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 1560-1565.
- [4] Li Zhilai. Research on outer baffle component of three-mirror off-axis space camera [J]. *OME Information*, 2010, 27(12): 99-103. (in Chinese)
李志来. 离轴三反空间外遮光罩组件的研制[J]. *光机电信息*, 2010, 27(12): 99-103.
- [5] Chen Liheng, Wu Qingwen. FEA of structure parameters of baffle for high resolution space camera[J]. *Optical Thchnique*, 2008, 34(3): 445-448. (in Chinese)
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.
- [6] Liao Zhibo, Fu Ruimin, Zong Xiaoying. Optimal designing of baffle of star sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4): 987-990. (in Chinese)
廖志波, 伏瑞敏, 宗肖颖. 星敏传感器遮光罩的优化设计[J]. *中国激光*, 2010, 37(4): 987-990.
- [7] Yang Lihua, Fan Xuewu, Yu Shunjing, et al. Design of a new-style vane[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(1): 29-33. (in Chinese)
杨利华, 樊学武, 余舜京, 等. 一种新型挡光环的设计[J]. *应用光学*, 2010, 31(1): 29-33.
- [8] Sheng Lei, Chen Ping, Sun Dong hua. Development of light baffle of space camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(2): 41-45. (in Chinese)
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.