

文章编号 1674-2915(2012)06-0590-06

# 基于碳纤维复合材料的月基极紫外 相机照准架结构设计

王 智

(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:**为了减少月基极紫外相机的质量并保证相机的二维转动机构在卫星发射、地月变轨及月表着陆过程中受到大量级振动冲击以及月表超大温差环境下能正常工作,设计并研制了基于碳纤维复合材料(CFRP)的照准架结构。首先,设计了基于金属材料和CFRP的不同照准架结构,通过有限元法对不同材料的照准架进行分析对比,证明了CFRP照准架的优越性。温度和力学验证试验表明:基于CFRP的照准架质量小于其它材料的照准架,其刚度和热稳定性能满足极紫外相机环境适应性的要求。

**关键词:**极紫外相机;碳纤维复合材料(CFRP);照准架;环境适应性

**中图分类号:**V476.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20120506.0590

## Design of collimation frame structure for lunar-based extreme ultraviolet camera based on carbon fiber reinforced plastics

WANG Zhi

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

\* Corresponding author, E-mail: wz070611@126.com

**Abstract:** To lighten the weight of a lunar-based Extreme Ultraviolet(EUV) camera and to ensure the function of the collimation frame structure of the EUV camera under the conditions of the large level vibration caused by satellite launching, earth-moon orbit transfer, moon landing and the large temperature difference on the lunar surface, a collimation frame structure based on Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP) is designed. Firstly, different collimation frames are designed based on metal materials and the CFRP, and the superiority of the collimation frame based on the CFRP is verified by finite element analysis. Finally, the experiments on temperatures and mechanics are performed, and the experiment results show that CFRP collimation frame has a lighter weight and its stiffness and thermal stability meet the requirements of environmental adaptation.

**Key words:** Extreme Ultraviolet(EUV) camera; Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP); collimation frame; environmental adaptative capacity

收稿日期:2012-09-11;修订日期:2012-11-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61108066)

## 1 引言

对地球周围等离子体层结构和辐射特性的研究是“嫦娥三号”工程任务的一个重要科学目标,月基极紫外相机就是针对这一科学目标而研制的有效载荷。极紫外相机安装在月球着陆器的顶部,随月球着陆器经历卫星发射、地月变轨,最后着陆在月球表面北纬 44° 虹湾地区,对地球等离层体的结构和辐射特性进行观测研究。为了实现在月球表面对地球等离层体的探测,极紫外相机的光学系统需具有小尺寸、大视场,并设计为正入射结构和多层膜单反射镜和球面光子探测器的结构形式<sup>[1]</sup>。为了实现对地球寻找,极紫外相机的跟踪机构采用俯仰-方位模式,而照准架是实现俯仰、方位转动的关键支撑部件。照准架的刚度、强度以及热尺寸稳定性直接影响到整机的刚度及转动性能,因极紫外相机需要承受月表着陆过程的大量级振动冲击以及月表昼夜高达 300 °C 的温差,而极紫外相机没有主动温控资源,仅有保温措施,这种情况下,照准架的环境适应性对相机能否实现对地球的捕获起到关键作用。

为了满足嫦娥三号对极紫外相机提出的质量尽量轻的要求,照准架的材料必须采用性能优异的轻质结构材料,碳纤维复合材料(CFRP)是目前实现这一要求的最佳选择。CFRP 是 20 世纪 60 年代崛起的一种新型结构材料<sup>[2-4]</sup>,CFRP 以其比强度高、比模量高、密度小、高温性能好、性能可设计,热稳定性好等优点,与铝合金、钛合金、合金钢一起成为航空航天领域四大结构材料。CFRP 在国外航天领域的应用主要体现在卫星结构、运载火箭、精密支撑结构件及光学镜体几个方面:如美国应用技术卫星(ATIS-F)上的天线支撑桁架,日本 M-5 火箭发动机的壳体,美国哈勃望远镜的主支撑结构,以及欧洲空间局采用高模量碳纤维/环氧复合材料制造成功的镜面。

我国在航天领域对 CFRP 的研究始于 20 世纪 70 年代,该材料在我国卫星的结构件、大型运载火箭及空间相机上有着广泛应用,如:我国自行研制卫星的主体骨架结构、外壳结构、太阳能电池板组件、天线结构等,另外在运载火箭的承力结构

件上,如卫星接口支架、梁、有效载荷支架等均有应用。在空间传感器领域,CFRP 主要被应用在遮光罩、传感器支架、光阑板等强度要求较高的结构件中。

CFRP 在有较高刚度要求,尤其是在大量级力学环境、超大温差环境下应用在二维转动机构的照准架上尚属少见,因为月表环境条件对照准架的刚度、热稳定性要求非常高,照准架的刚度以及热稳定性决定着俯仰转动机构的成败。月基极紫外相机的镜头安装在俯仰转动机构中,因此,照准架刚度和热稳定性更关系着相机探测任务的成败,CFRP 在月基极紫外相机照准架上的成功应用,是 CFRP 在空间传感器领域的又一个重要的里程碑。本文从实际应用出发,设计并研制了基于 CFRP 的月基极紫外相机照准架,利用有限元分析的方法对不同材料的照准架进行分析对比。验证试验表明,基于 CFRP 的照准架的刚度、热稳定性能够满足极紫外相机的环境适应性要求,且质量小于其它金属材料。

## 2 设计<sup>[5-6]</sup>

### 2.1 极紫外相机照准架设计原则

照准架是连接极紫外相机方位轴系、支撑俯仰轴系的结构件,其刚度和热尺寸稳定性是影响相机跟踪性能的关键。因此,为了确保极紫外相机在月表复杂的空间环境以及恶劣的温度条件下

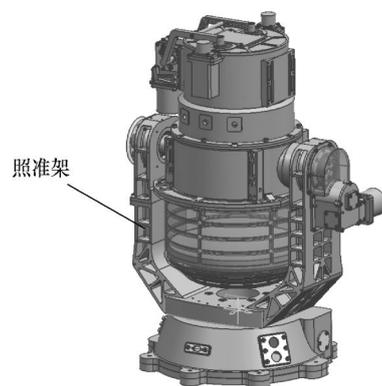


图1 极紫外相机光机结构模型

Fig. 1 Model of optical-mechanical structure for EUV camera

能正常工作,要求照准架具有足够的刚度、强度以及良好的热尺寸稳定性;保证相机镜头绕俯仰轴转动 $0 \sim 90^\circ$ ;同时要求结构的质量尽量轻(见图1)。

## 2.2 极紫外相机照准架结构设计方案

根据照准架设计原则,采用了金属材料 and 碳纤维复合材料两种结构形式,并对它们进行了工程分析比较。

### (1) 采用金属材料的照准架结构设计

采用金属材料的照准架结构设计如图2所示。为方便俯仰轴系的反复安装拆卸,照准架为分体式设计,由螺钉和销钉联接,俯仰轴系两端有钛合金(TC4)镶嵌件用以安装轴承。由于照准架的主要受力区在左右两侧的根部位置,所以根部设计成斜面,采用米字筋的加强方式增加其根部强度。考虑极紫外相机俯仰、方位轴系的工作温度为 $-50 \sim +70^\circ\text{C}$ ,照准架的质量尽可能小,采用了7A09和MB25两种金属材料。

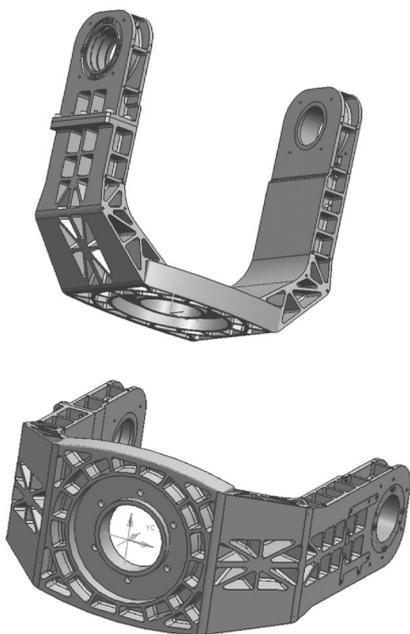


图2 金属材料照准架结构设计图

Fig.2 Collimation frame structure based on metal material

### (2) 基于CFRP的照准架结构设计

基于CFRP的照准架结构设计如图3所示,该CFRP照准架也采用分体式设计。考虑CFRP

的工艺可实施性,照准架两侧的减重方式采用方形孔的形式。俯仰轴系两端、俯仰减速箱固定处、与方位轴系连接处均采用钛合金(TC4)镶嵌的方

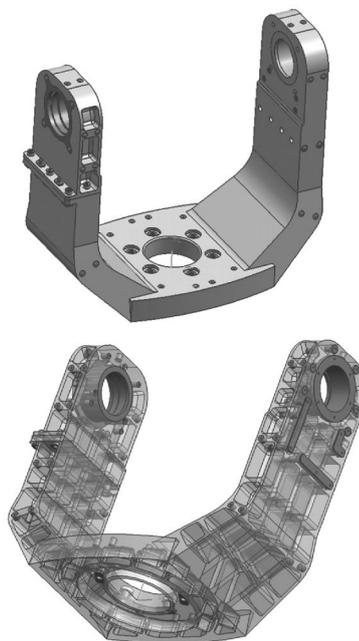


图3 基于CFRP照准架结构设计图

Fig.3 Collimation frame structure based on CFRP

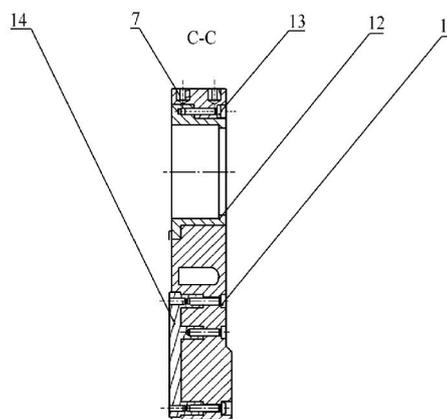


图4 镶嵌件的连接方式

Fig.4 Joint mode of inserts

式,主要受力区域采用粘接和螺钉固定的方式(见图4,序号7,12,14为TC4镶嵌件,序号11,13为螺钉),以保证其可靠性。照准架底部的减重方式同图2,这里只考虑CFRP的工艺可实施性,加大了减重孔的尺寸。另外,为了增加照准架整体的刚度,照准架的两侧设计有蒙皮。

### 3 工程分析

通过有限元分析方法对采用金属材料和CFRP材料的照准架进行了分析比较,主要比较

了模态、重量以及整机的模态,选取了一种最优的设计方案。

金属材料照准架的分析结果分别如图5和表1所示。

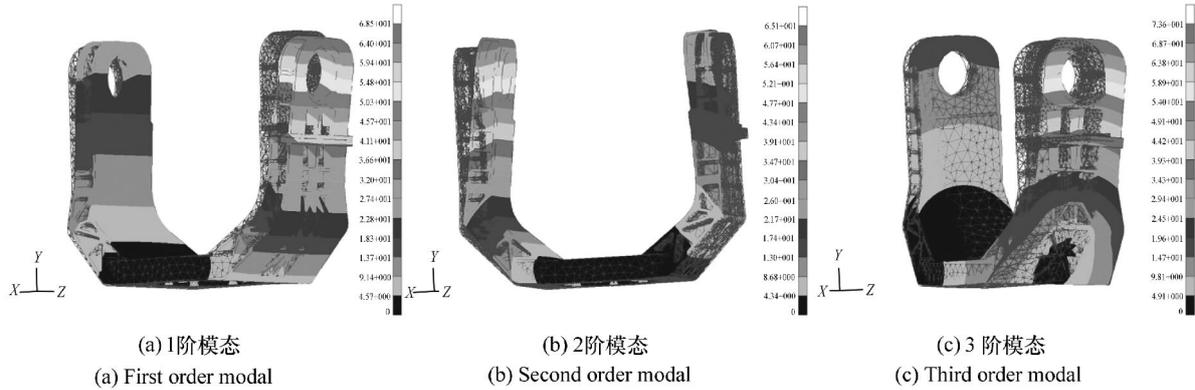


图5 金属材料照准架模态图

Fig. 5 Modals of metal material collimation frame

表1 质量及模态

Tab. 1 Weight and modal

材料	质量/kg	模态/Hz		
		1阶	2阶	3阶
镁合金(MB25)	1.738	245.43	262.47	443.71
铝合金(7A09)	2.630	253.41	271.01	458.15
CFRP(M40JB)	1.87	290.88	317.49	501.44
整机(MB25照准架)		45.43	48.14	120.24
整机(7A09照准架)		50.50	51.41	132.36
整机(M40JB照准架)		51.78	56.26	86.47

CFRP照准架的分析结果如图6和表1所示。

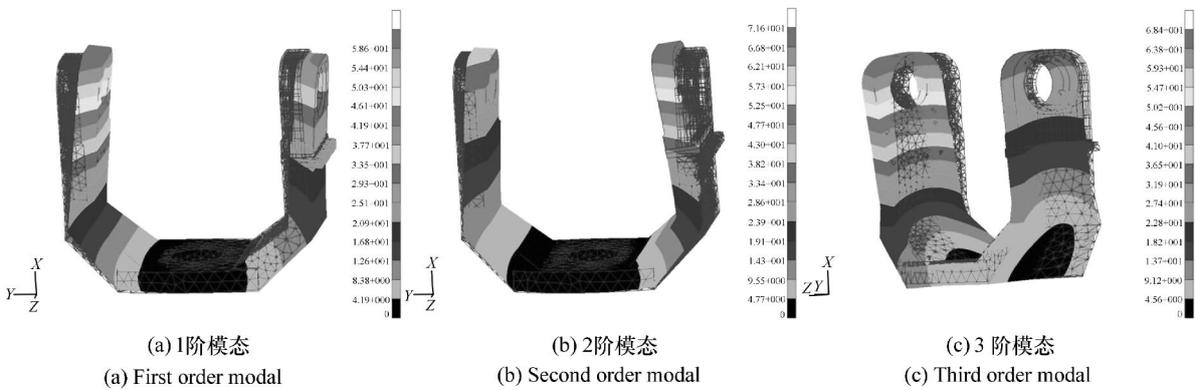


图6 CFRP照准架模态图

Fig. 6 Modals of CFRP collimation frame

表2 线膨胀系数  
Tab.2 Linear expansibility

材料	线膨胀系数 $\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ (-60 ~ 120 $^{\circ}\text{C}$ )
7A09	23.6
MB25	26.2 ~ 27.1
CFRP(M40JB)	1 ~ 3

从以上分析结果可以看出,CFRP 照准架相对于金属材料照准架无论是在自身的刚度还是对整机的刚度贡献,都有很明显的优势,且质量与镁合金(MB25)相当,比铝合金(7A09)轻了40%。在影响照准架温度适应性的线膨胀系数方面,从表2可以看出CFRP有绝对优势。因此,极紫外相机采用基于CFRP的照准架结构设计方案。

#### 4 验证试验

验证基于CFRP的照准架的结构设计,分析其是否合理,并考察CFRP照准架的环境适应性,主要是由温度载荷试验和力学振动试验来进行,在试验前、试验中和试验后,对极紫外相机上电,通过检查俯仰、方位转动机构是否能正常运转来判断。

##### 4.1 温度载荷试验

温度载荷试验主要是通过高低温存储试验来考察CFRP照准架结构温度适应性。按照试验

条件要求,俯仰机构的存储温度为 $-110 \sim +110^{\circ}\text{C}$ ,高、低温存储试验各4个循环,每个循环存储12h,如图7所示。

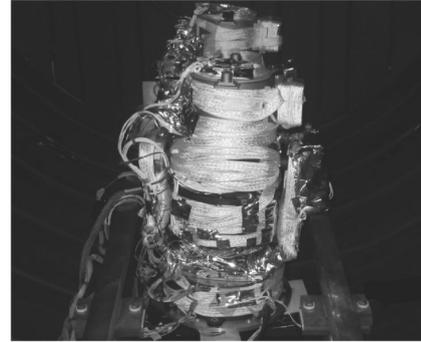


图7 高低温存储试验

Fig.7 Storage test of high and low temperatures

在高低温存储试验过程中,在各测试温度点给极紫外相机上电,俯仰、方位转动机构运转流畅,无卡滞现象,验证了CFRP照准架的温度适应性良好,满足相机指标要求。

##### 4.2 力学振动试验

通过对相机整机进行正弦、随机振动试验来考察CFRP照准架力学适应性。通过试验工装将整机固定在振动台上,按照表3的试验条件进行正弦、随机振动试验。图8为在振动台上进行极紫外相机力学振动试验的照片。

表3 力学试验条件

Tab.3 Mechanical test conditions

正弦振动条件				
Z、Y方向		X方向		
频率/Hz	鉴定级	频率/Hz	鉴定级	
5 ~ 15	8.8 mm	5 ~ 20	5 mm	
15 ~ 30	8g	20 ~ 35	8g	
30 ~ 100	6g	35 ~ 70	15g	
		70 ~ 100	12g	
随机振动条件				
Z、Y方向		X方向		
频率/Hz	鉴定级	频率/Hz	鉴定级	
10 ~ 200	+6 dB/oct	10 ~ 200	+6 dB/oct	
200 ~ 1 500	0.16g <sup>2</sup> /Hz	200 ~ 1 500	0.25g <sup>2</sup> /Hz	
1 500 ~ 2 000	-12 dB/oct	1 500 ~ 2 000	-12 dB/oct	
总均方根加速度	16.3g	总均方根加速度	20.3g	

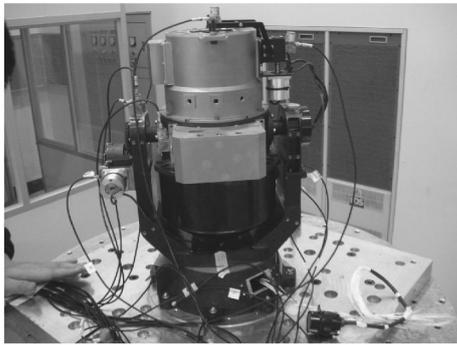


图8 极紫外相机振动试验照片

Fig. 8 Mechanical test photo of EUV camera

在力学振动试验前后,给极紫外相机上电,俯仰、方位转动机构运转流畅,无卡滞现象,验证了CFRP照准架的力学适应性良好,满足相机指

标要求。

## 5 结 论

嫦娥三号着陆器的月表着陆对极紫外相机的环境(温度、力学)适应性提出了苛刻的要求,极紫外相机中照准架结构设计及其环境适应性是影响相机转动机构的关键因素。考虑相机质量尽量轻的要求,设计了基于CFRP的照准架结构,与金属材料的照准架进行有限元分析对比表明,其无论从刚度、强度、环境适应性以及重量方面均有明显优势。验证试验(温度、力学)前后,相机俯仰、方位转动机构运转自如,无卡滞现象,满足相机指标要求,证明了基于CFRP的照准架结构设计满足极紫外相机的环境适应性要求。

## 参考文献:

- [1] 陈波,何飞.月基地球等离子体层极紫外成像仪的光学设计[J].光学精密工程,2011,19(9):2057-2062.  
CHEN B,HE F. Optical design of moon-based earth's plasmaspheric extreme ultraviolet imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(9):2057-2062. (in Chinese)
- [2] 李威,郭权锋.碳纤维复合材料在航天领域的应用[J].中国光学,2011,4(3):201-212.  
LI W,GUO Q F. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. *Chinese Optics*,2011,4(3):201-212. (in Chinese)
- [3] 田海英,关志军,丁亚林,等.碳纤维复合材料应用于航天光学传感器遮光镜筒[J].光学技术,2003,29(6):704-706.  
TIAN H Y,GUAN ZH J,DING Y L,*et al.* Carbon fiber composite material used in space optical instrument[J]. *Optical Technique*,2003,29(6):704-706. (in Chinese)
- [4] 陈绍杰.复合材料设计手册[M].北京:航空工业出版社,1990.  
CHEN SH J. *Design Handbook of Composite Material*[M]. Beijing:Aviation Industry Press,1990. (in Chinese)
- [5] 李威,刘宏伟.空间光学传感器中碳纤维复合材料精密支撑构件的结构稳定性[J].光学精密工程,2008,16(11):2173-2179.  
LI W,LIU H W. Structure stability of precision component made of carbon fiber composite in space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(11):2173-2179. (in Chinese)
- [6] 王智,李朝辉.月基极紫外相机光机结构设计[J].光学精密工程,2011,19(10):2427-2433.  
WANG ZH,LI ZH H. Design of optical-mechanical structure for lunar-based extreme ultraviolet camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(10):2427-2433. (in Chinese)

作者简介:王智(1978—),男,山东寿光人,博士,副研究员,主要从事航天光学传感器等方面的研究。

E-mail:wz070611@126.com