

基于光学定心加工的紫外月球敏感器的装调方法

韩娟^{1,2} 陈建军¹ 李智勇¹ 李小燕¹ 段嘉友¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

²西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 嫦娥卫星中的紫外月球敏感器是一种以月球为姿态参考源的大视场成像式光学姿态敏感器。为了提高敏感器的环形视场和中心视场的高同轴度和对称度,需要对敏感器中的八棱锥反射镜进行高同轴度的法兰孔(内孔)加工,并与广角物镜进行高同轴度的精密装配。目前八棱锥反射镜的法兰孔(内孔)加工采用修切垫圈的方法完成,该方法装调反复、精度低。提出一种八棱锥反射镜高精度光学定心加工方法,该方法能够快速准确地找出其均方中面,并实现法兰孔的精密加工。在完成广角物镜定心加工后,可实现二者的高同轴度装配。装调结果证明,八棱锥8个反射像的误差达到 $17.3''$,优于设计值 $30''$,法兰孔的同轴度和安装端面的跳动量均优于 0.005 mm 。整机装调后,八棱锥反射镜8个视场和物镜中心视场的对称度达到 0.01 mm 。该敏感器的装调在卫星绕月飞行中得到成功验证。

关键词 探测器; 紫外月球敏感器; 光学装调; 光学定心加工; 均方中面

中图分类号 TN23

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.012203

An Alignment Method of Ultraviolet Lunar Sensor Based on Lens Centering

Han Juan^{1,2} Chen Jianjun¹ Li Zhiyong¹ Li Xiaoyan¹ Duan Jiayou¹

¹*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

²*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China*

Abstract Ultraviolet lunar sensor, a part of CE lunar orbiting satellite, is a wide-field of view optical image sensor that references to the attitude of the moon. In order to ensure high coaxiality and symmetry of both annular and central fields, high coaxiality machining of the flange hole (central hole) for the octahedral pyramid mirror of the Ultraviolet lunar sensor is needed. Furthermore, high coaxiality assembly of the octahedral pyramid mirror and the objective lens are needed. The conventional method achieves the goal by changing washer thickness. It has obvious disadvantages such as alignment iteratively and lower precision. This paper presents a high-precision lens centering method for octahedral pyramid mirror. This method can find mean square neutral surface quickly and accurately, and realize precision machining of the flange hole (central hole). After the lens centering of the objective lens, the high coaxiality assembly of the octahedral pyramid mirror and the objective lens can be achieved. Experimental results demonstrate that the reflection image error of octahedral pyramid is $17.3''$, it's better than expected value $30''$, and the coaxiality of flange hole and the end face runout are less than 0.005 mm . The symmetry for the field of view of the octahedral pyramid relative to the center field of view of the objective lens reaches 0.01 mm . This alignment of sensor has got verified successfully at CE-1 spacecraft's space mission.

Key words detectors; ultraviolet lunar sensor; optical alignment; lens centering; square central neutral surface

OCIS codes 040.7190; 120.4610; 220.1140; 220.4840

1 引言

探月工程是继载人航天工程之后我国航天领域又一重大项目。嫦娥一号卫星是这项重大工程的第一

收稿日期: 2014-07-01; 收到修改稿日期: 2015-07-15; 网络出版日期: 2015-12-18

基金项目: 国家973计划(2009CB724006)

作者简介: 韩娟(1977—),女,硕士研究生,主要从事光学仪器装调方面的研究。

E-mail: hanjuan7927@sohu.com

导师简介: 段嘉友(1941—),男,研究员,主要从事光学仪器装调方面的研究。E-mail: duanjy1224@sohu.com

步。由于飞行任务的特殊性,要求嫦娥卫星有不同以往卫星的新功能和关键技术,其中之一就是紫外月球敏感器^[1]。它是空间观测的“眼睛”,具有举足轻重的作用。

嫦娥卫星首次采用一种全新的光学姿态敏感器——紫外月球敏感器。它是一种以月球为姿态参考源的大视场成像式光学姿态敏感器^[2-3]。它主要用于环月期间测量月球探测器相对于轨道坐标系的俯仰和滚动姿态角^[4-5]。由于紫外月球敏感器是一个全新的光学系统,对它的相关装调方法国内暂无发表文章和报道,因此其光学装调将迎来新的挑战。本文通过高精度光学定心方法解决了紫外月球敏感器中多视场光学系统像点高度共点问题,该敏感器的装调在卫星绕月飞行中得到成功验证。

2 紫外月球敏感器的光学系统

紫外月球敏感器的光学系统的成像质量直接影响敏感器获取图像的质量。在嫦娥一号卫星中卫星轨道为200 km,此时月球圆盘的视张角为 127.48° 。由于紫外月球敏感器是成像式敏感器而非扫描系统,所以对整个月球圆盘成像,其光学系统的视场角应大于月球视张角。要实现如此大的视场角,同时又要保证良好的成像质量,光学设计和加工装调的难度都很大^[1]。

嫦娥一号卫星中,紫外月球敏感器的光机组合件作为一组合式光学系统^[6],包括紫外广角物镜、八棱锥反射镜、平面镜、支架、镜座、本体等构成。紫外广角物镜的视场为 70° ,其中八棱锥反射镜与平面反射镜构成一个二面反射镜组,将紫外物镜的视场进行分割和转移,使组合式光学系统具有视场角 30° 的中心视场以及视场角 $120^\circ\sim 160^\circ$ 的环形视场。在二面反射镜镜组的作用下,紫外月球敏感器的视场被分为了8个互不重叠的子视场和1个中心视场。在嫦娥一号卫星中要求使子视场的对称中心和中心视场的中心重合,这是敏感器光学系统成像好坏的关键,为了达到这一同轴精度,设计要求八棱锥反射镜8个面自准像的误差优于 $30''$,且8个子视场和中心视场对称度达到 0.01 mm 。图1、图2分别为紫外敏感器的环形子视场图和光学系统示意图。

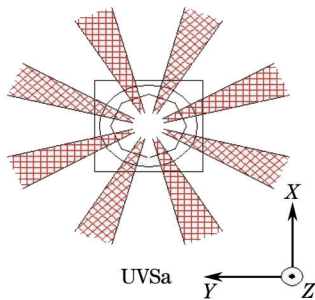


图1 紫外敏感器光机组合件的环形子视场图

Fig.1 Annular field of ultraviolet lunar sensor assembly

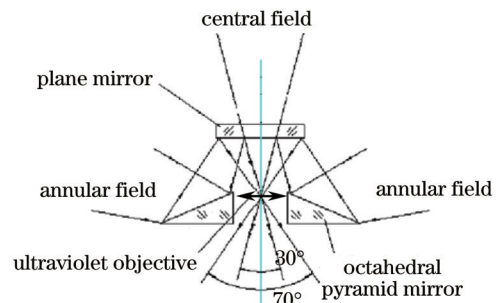


图2 紫外月球敏感器的光学系统示意图

Fig.2 Optical system of ultraviolet lunar sensor

3 紫外敏感器光学系统中的装调难点

二面反射镜组是多视场光学系统,由平面反射镜和八面棱锥反射镜组成,如图3所示。对于多视场光学系统需要对系统各反射面角度误差和其均方中面进行优化。所谓均方中面就是采用均方值法确定棱锥各

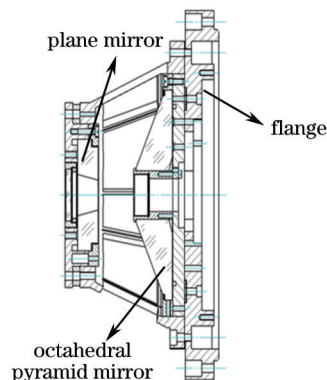


图3 二面镜组件结构简图

Fig.3 Double mirror structure diagram

反射面相对棱锥基准面角度偏差的中值面。各反射面角度偏差与均方中面将直接影响此光学系统的图形还原精度,所以两者优化将是紫外敏感器光学系统的装调难点。

在棱锥各反射面角度偏差的控制上,紫外月球敏感器的棱锥平面反射镜与背部基准面的最小误差仅靠光学零件加工保证。一旦加工成形,难以提高各像点在靶面的共点性。基于现有多角度反射镜的光学件结构,只能尽可能提高加工精度。

利用均方中面,调整各反射面与基准面的角度误差,使误差可以进一步减小,提高各像点在靶面的共点性。因此如何确定均方中面是提高整个敏感器光学系统精度的关键。

4 紫外月球敏感器的装调

在实验阶段,采用了修切垫圈的方法,使八棱锥反射镜的对称中心与物镜光轴重合,即根据8个反射图像的对称位置在八棱锥反射镜的相应反射面的背部加垫不同厚度的修切垫圈。虽然也达到了调整同心度的要求,但同心精度不是很高,装调有反复且周期较长。另外由于垫圈的厚度不同,八棱锥反射镜和机械底板连接后非面接触,使得应力作用于八棱锥,造成了棱锥反射面的面形变化。这种方法给系统引入了光学件变形和系统的不稳定。随着温度变化系统的成像质量有明显的改变,光学系统经不起环境实验和航天振动实验的考验。

光学定心加工是基于光学成像原理,将光学件光轴、与光学件配合的机械件轴线和车床旋转主轴联系起来,利用车削,使得光学件光轴和其配合的机械件轴线能高度同轴^[7-9]。

通过与传统方法的比较,最终采用了高精度光学定心的方法确定八棱锥反射镜的均方中面,从而舍弃原来分别调整反射镜各平面夹角误差的方法,不仅提高了各像点在靶面上的共点性,而且可以简化结构,降低成本。

4.1 八棱锥反射镜的光学定心加工

在八棱锥反射镜实际装调时,将自准直方法检测和光学定心加工方法相结合,通过连接工装将八棱锥反射镜组安装到光学定心车床上。将八棱锥的8个面分别标记,使用千分表测量安装物镜的法兰孔。当车床旋转时,通过自准直光管分别记下8个面的8个自准像误差,并计算均方中面。依据均方中面位置,多次调整多维定心调节卡盘的平移和倾斜,使自准直光管中心处于自准像的均方中面上。通过多次调整,最终使得千分表测量的法兰连接面和法兰孔的跳动量优于0.02 mm,同时八棱锥的8个反射面自准像变化量与均方中面的误差优于30"。符合要求后加工八棱锥与物镜的安装法兰孔。图4为八棱锥反射镜的光学定心加工示意图。

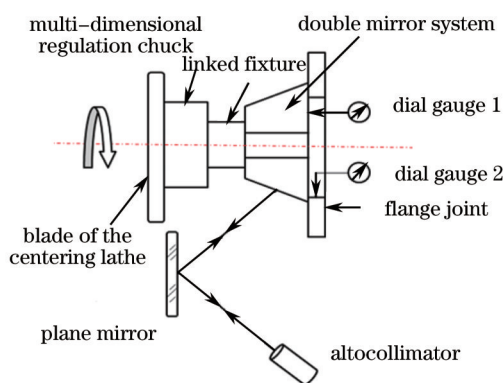


图4 八棱锥反射镜的光学定心加工示意图

Fig.4 Lens centering of octahedral pyramid mirror

4.2 整机的装调、检测

紫外广角物镜与八棱锥反射镜沿光轴方向的相对位置,直接关系到物方视场角 $2w \geq 70^\circ$ 及环形视场角 $120^\circ \sim 160^\circ$ 技术指标的实现。为了保证物镜光轴与二面镜系统对称中心实现共轴度优于0.01 mm,物镜进行高精度光学对心加工,配合的圆柱面和连接面以光轴为准加工而成。通过该方法实际加工完成后,使物镜光轴与其物镜框外圆高度同心,同心度和端面跳动量均优于0.005 mm。高精度光学定心加工后的物镜安装

到八棱锥反射镜组件的法兰孔内,如图5所示。通过读数显微镜实测焦平面上被分割的8个图像,8个图像的对称度达到0.01 mm。

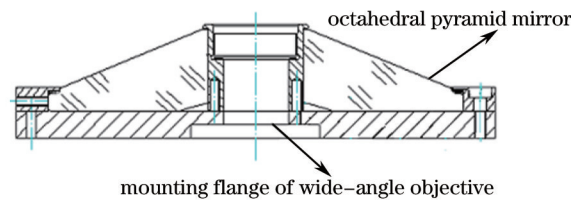


图5 广角物镜定心加工安装法兰示意图

Fig.5 Lens centering installation of wide-angle objective

5 装调结果

通过对八棱锥反射镜的光学定心加工,最终使得其8个面自准像的误差为17.3",优于设计值30",法兰孔同心度和连接端面的跳动量均优于0.005 mm。表1是光学定心过程中,3次对八棱锥8个面自准像的装调数据。图6是车削后8个反射面自准像相对中值的误差图。

表1 八棱锥8个反射面自准像的装调数据

Table 1 Testing data of view of octahedral pyramid mirror

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
First time	-48.4"	-28.4"	-40.4"	16.4"	-24.2"	0.4"	-16.1"	-23.6"
Second time	-1.8"	13.6"	-8.4"	0"	-13.2"	14.6"	0.3"	8.9"
Third time	0"	17.2"	-1.3"	3.4"	-2.1"	17.3"	6.6"	15.8"

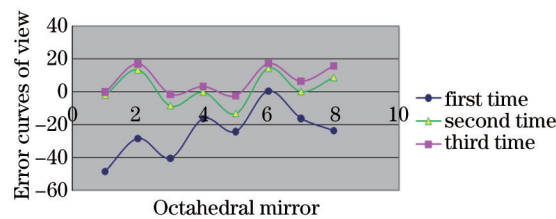


图6 八棱锥8个反射面自准像的误差图

Fig.6 Error curves of view of octahedral pyramid mirror

通过对广角物镜的定心加工和整机的装调检验,使得八棱锥反射镜的8个子视场和物镜中心视场对称度达到0.01 mm。图7为紫外月球敏感器焦面上被分割的8个图像照片,图8为嫦娥紫外月球敏感器所拍摄月球照片。

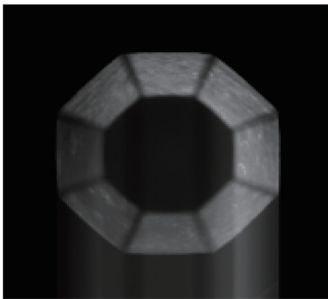


图7 紫外月球敏感器被分割的焦面图像照片

Fig.7 Picture of ultraviolet lunar sensor's focal plane

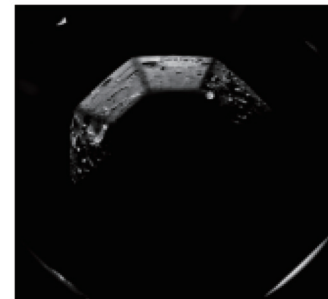


图8 嫦娥一号紫外月球敏感器所拍摄月球照片

Fig.8 Picture of the moon shot by the sensor

6 结论

通过高精度光学定心方法解决了紫外月球敏感器中多视场光学系统像点高度共点问题,使八棱锥反射镜的8个子视场和物镜中心视场对称度达到0.01 mm,并且八棱锥反射镜8个面自准像的误差为17.3",优于设计值30",法兰孔同心度和连接端面的跳动量均优于0.005 mm。最终该光学系统的敏感器在卫星绕月飞

行中得到成功验证。

参考文献

- 1 Huang Xin, Wang Li, Lu Xin. An ultraviolet lunar sensor for CE-1 spacecraft[J]. Aerospace Control and Application, 2008, 34(1): 51-55
黄欣, 王立, 卢欣. 嫦娥一号卫星紫外月球敏感器[J]. 空间控制技术与应用, 2008, 34(1): 51-55.
- 2 Geng Jianzhong, Xiao Yelun, Han Chao. Satellite autonomous navigation based on ultraviolet sensors. [J]. Aerospace Control, 2007, 25(2): 47-51.
耿建中, 肖业伦, 韩潮. 基于紫外敏感器的卫星自主导航方法研究[J]. 航天控制, 2007, 25(2): 47-51.
- 3 Wang Li, Hao Yuncai. Attitude determination algorithm used by lunar satellite's imaging sensor[J]. Chinese Space Science and Technology, 2006, 12(6): 14-17.
王立, 郝云彩. 环月卫星成像敏感器对月姿态确定算法[J]. 中国空间科学技术, 2006, 12(6): 14-17.
- 4 Hao Yuncai, Wang Li. Several critical problems about ultra-violet lunar sensor for lunar exploration mission[J]. Aerospace Control, 2005, 23(1): 87-91.
郝云彩, 王立. 紫外月球敏感器的几个关键问题[J]. 航天控制, 2005, 23(1): 87-91.
- 5 Ye Shenglong, Wei Xinguo, Fan Qiaoyun, *et al.*. Operation mode design of multi-FOV star sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(10): 1244-1247.
叶生龙, 魏新国, 樊巧云, 等. 多视场星敏感器工作模式设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(10): 1244-1247.
- 6 Wei Chunling, Li Yong, Chen Yiqing. Spacecraft autonomous navigation based on ultraviolet sensors[J]. Aerospace Control, 2004, 22(3): 35-39.
魏春岭, 李勇, 陈义庆. 基于紫外敏感器的航天器自主导航[J]. 航天控制, 2004, 22(3): 35-39.
- 7 Zhou Fengli, Xu Zhaodong. Research and application of lens centering technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S2): 135-138.
周凤利, 许照东. 透镜定心技术的技术和研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(增2): 135-138.
- 8 Yang Licheng, Ling Ning. Development of a high precision eccentricity error measurement with a thrust-shaft system [J]. Opto-electronic Engineering, 2005, 32(6): 39-42.
杨李成, 凌宁. 利用平面止推轴系研制高精度定心仪[J]. 光电工程, 2005, 32(6): 39-42.
- 9 Han Juan, Duan Jiayou, Chen Jianjun, *et al.*. An alignment of primary and secondary mirror for optical system in large telescopic[J]. Chinese J Lasers. 2012, 39(7): 0716001.
韩娟, 段嘉友, 陈建军, 等. 大口径望远镜系统中主次镜系统的装调方法[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0716001.

栏目编辑: 韩峰