

文章编号 1004-924X(2011)11-2703-06

## 成像光谱仪运动补偿扫描镜的研制

汪逸群<sup>1,2\*</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 颜昌翔<sup>1</sup>, 贾平<sup>1</sup>

(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:** 基于光、机、电一体化的设计思想, 研制了一套高精度扫描镜机构, 用于提高空间相机对某些特定暗目标的观测能力。首先, 根据相机总体下达的性能指标, 讨论了可行的驱动方案, 确定了以步进电机为核心的系统控制方法。然后, 介绍了驱动单元、精密轴系和扫描镜支撑结构 3 项关键技术。最后, 给出了扫描镜机构的工程分析结果并进行了相关例行试验。试验结果表明: 设计的扫描镜机构定位误差优于  $40''$ , 在工作速度范围内相对速度精度优于 7% (均方根值), 主轴径向跳动误差为  $2\ \mu\text{m}$ , 满足了空间相机对扫描镜机构在稳定性、位置和速度精度、体积、重量等方面的要求。

**关键词:** 扫描镜; 成像光谱仪; 空间相机; 碳化硅镜; 速度精度; 位置精度

**中图分类号:** V243.5; TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111911.2703

## Development of high-precision scanning mirror assembly of imaging spectrometer

WANG Yi-qun<sup>1,2\*</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, YAN Chang-xiang<sup>1</sup>, JIA Ping<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

\* Corresponding author, E-mail: hitwya@yahoo.com.cn

**Abstract:** On the basis of a design idea integrated with optical, mechanics and electronics, this paper presents the techniques of a fine scanning mirror assembly with high resolution for space optics remote sensors. Firstly, the driving scheme of the system is discussed according to the configuration of a camera, and the step motor is chosen as a core of the control system. Then, three parts of mirror assemblies: integrated driving module, fine shafting and SiC pointing mirror subassembly are introduced. Furthermore, the accuracy of the pointing mirror assembly is tested. According to the test results, the angle precision of is better than  $40''$ , the precision relative angle rate (rms error) is under 7% at the working speed and the main shafting radial run-out error is  $2\ \mu\text{m}$ . The results prove that the pointing mirror assembly satisfies all the requirements of the optical remote sensor.

**Key words:** scanning mirror; imaging spectrometer; space camera; SiC mirror; position accuracy; speed accuracy

收稿日期: 2010-11-16; 修订日期: 2011-01-16.

基金项目: 国防预研基金资助项目 (No. O5001SA050)

## 1 引言

扫描镜是空间光学遥感器的关键部件之一,常用于对地扫描成像、对地物进行运动补偿、扩大视场范围、引入定标源等场合<sup>[1]</sup>。为了获取高质量的图像,遥感器通常对扫描镜的位置精度和速度精度提出了很高的要求。例如全球臭氧监测实验仪器(GOME)的角速度误差为 $1\text{ mrad/s}$ <sup>[2]</sup>,EOS-TERRA 卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)角速度误差为 $\pm 2.1\text{ mrad/s}$ <sup>[3]</sup>,ADOES-II 卫星上的扫描装置的方位轴转速误差为 $\pm 0.015(^{\circ})/\text{s}$ <sup>[4]</sup>。

某高光谱成像仪中的扫描镜主要用于对地物进行运动补偿,以降低对探测器高帧频的要求,另外还用于星上定标引入定标源。在运动补偿过程中,扫描镜始终处于加速—低变速—减速的状态,补偿完毕后要求扫描镜以最快速度返回初始位置,准备下一次拍摄任务<sup>[5]</sup>。在整个过程中扫描镜需要按照预先设定的角度—速度曲线运动,位置误差和速度波动都会造成图像的模糊不清。在星上定标时要求扫描镜具有一定的定位精度,保证开启定标灯时,定标灯光线能顺利到达光谱仪焦面。

本文基于光、机、电一体化的设计思想、研制了结构紧凑、质量轻、定位精度高、速度稳定性好的扫描镜。采用了新颖的驱动模块作为动力源,实现了严格体积重量限制下的大扭矩输出和精确定位。通过选用铁镍合金材料和合理设计支撑保证了扫描镜支撑结构具有良好的环境适应性。研制了一套基于 P4 级轴承的精密轴系,将驱动模块与扫描镜支撑结构联接起来,从而实现扫描镜高精度的低变速平稳运行。试验结果证明,该扫描镜达到了成像仪总体提出的各项指标要求,能够满足高质量的成像要求。

## 2 扫描镜控制方案

### 2.1 扫描镜性能指标要求

扫描镜作为研制某型高光谱成像仪的关键技术之一,它的性能指标要求富有挑战性。首先,为了顺利引入定标源,要求其定位精度优于 $1'$ ,在工作速度范围内( $0.1\sim 0.8(^{\circ})/\text{s}$ )速度精度优于 $7\%$ ;

其次,在工作角度范围( $25^{\circ}$ )内,要求轴系径向跳动误差小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ ;最后,作为星上载荷,扫描镜机构有严格的质量限制,要求整机质量小于 $11\text{ kg}$ 。

### 2.2 驱动控制方案选择

为了保证扫描镜同时具有高的定位精度和速度精度,考虑了两种常见的空间活动机构驱动方案:方案一是通过有限转角直流无刷力矩电机直接驱动扫描镜,采用高精度的光电编码器或感应同步器进行位置反馈和速度反馈(数值差分),构成二环或三环闭环控制系统;方案二由精密步进电机、大速比减速器和位置传感器组成,实现位置闭环控制,通过调节发送给步进电机脉冲的频率来达到控制速度的目的。前一种方案机构元件少,传动精度高,但是传感器尺寸和质量大,控制调试困难;而后一种方案体积小、可靠性高、机械自锁,但是结构复杂,对步进电机性能要求较高。考虑到质量限制和研制周期短等因素,选择了第二种方案作为最终的驱动方案<sup>[6]</sup>。

扫描镜机构的整机方案如图 1 所示。经实测,该机构的性能指标为:整机质量 $10.7\text{ kg}$ ,扫描镜尺寸为 $240\text{ mm}\times 180\text{ mm}$ ,面形误差为 $1/50\lambda$ ,工作温度为 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ 。

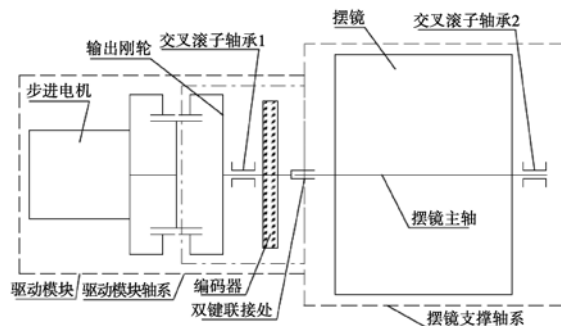


图 1 扫描镜结构图

Fig. 1 Scheme of scanning mirror

## 3 扫描镜设计

### 3.1 驱动模块设计

为了保证扫描镜准确地按照预设角度—速度曲线运动,研制了一套精密的紧凑型驱动模块,该模块包括一台五相步进电机、一只速比为 360 的谐波减速器和一套 16 位的光电轴角编码器。这 3 部分被集成在一个箱体内,外形尺寸为 $\Phi 87\text{ mm}\times 105\text{ mm}$ ,质量为 $1.52\text{ kg}$ ,而输出力矩可达 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

所选用的五相步进电机步距角为  $0.36(^{\circ})/\text{step}$ ,步距精度达到 3%,较普通步进电机有更出色的低速平稳性,实测数据表明该型电机在  $36(^{\circ})/\text{s}$  时转速稳定度达到 2.2%。针对步进电机在该转速下具有较好的速度平稳性,设计了一款减速比达到 360 的单级谐波减速器,以实现  $0.1(^{\circ})/\text{s}$  的最低工作转速。通过摩擦传动与谐波传动的结合来实现单级大速比,与同减速比的普通谐波减速器相比,这种结构质量轻且简单。为了实现扫描镜的位置闭环,在驱动模块中还集成了 16 位光电轴角编码器,编码器采用散装结构,最大限度地减少了零部件数量和重量。

### 3.2 扫描镜支撑方案

根据光学系统通光口径的要求,确定扫描镜的几何尺寸约为  $250\text{ mm}\times 180\text{ mm}$ ,质量为 1.9 kg,选用 SiC 材料制作镜坯,半封闭式轻量化结构,轻量化率约为 60%,如图 2 所示。常用的反射镜支撑方式主要有侧面支撑、背部支撑和周边支撑等 3 形式<sup>[7]</sup>。为减轻重量,采用了侧面支撑

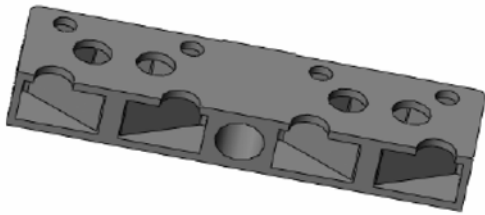


图 2 扫描镜剖视图

Fig. 2 Cutaway view of scanning mirror

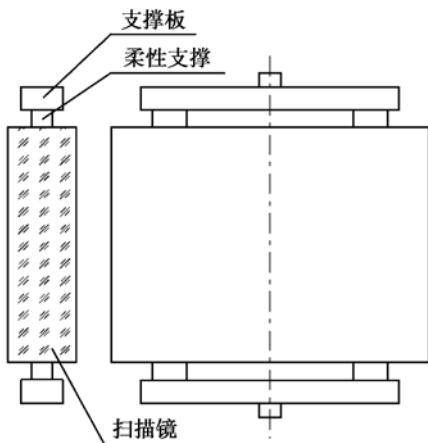


图 3 扫描镜支撑结构示意图

Fig. 3 Sketch map of scanning mirror support structure

的方式对扫描镜进行支撑,支撑方式如图 3 所示。在扫描镜的两侧面共设置有 4 个盲孔,在盲孔内放置由 4J32 材料制成的镶嵌块,通过光学环氧树脂粘接。两个支撑板通过柔节与镶嵌块联接,保证了扫描镜具有足够刚度的同时镜面面形符合光学设计的要求。两支撑板的轴头架设在轴承上以形成轴系。

### 3.3 扫描镜轴系设计

扫描镜轴系主要分两部分,驱动模块轴系和主支撑轴系,其中驱动模块轴系两轴系间通过键联接。本设计的新颖之处在于采用了单个交叉滚子轴承代替了一对传统轴承,这种轴承可以承受轴向载荷、径向载荷和其他任何方向的载荷。

扫描镜具有低速、间歇工作的特点,目前固体润滑在空间低速转动机构润滑中已应用成功,如遥感卫星的低速扫描机构、卫星天线驱动机构、太阳帆板转动机构等都采用了固体润滑。大量试验表明,金属基  $\text{MoS}_2$  溅射膜的使用寿命可以达到  $10^7$  次以上,因此轴承可以采用固体润滑方式。

### 3.4 扫描镜驱动电路

扫描镜驱动电路采用现场可编程门阵列(FPGA)作为核心处理器,集成了与上位机 RS-422 通讯、编码器信号处理、电机驱动算法及逻辑控制等功能环节。系统控制扫描镜低变速运动,采用插补法近似地拟合出其运动速度曲线。插补得到的特殊点的运动速度数据由上位机通过串行通信发送给扫描镜控制系统,控制系统经过计算处理得出对应速度下的脉冲频率信号,最后将控制信号输出到驱动模块从而带动扫描镜低变速转动。16 位绝对式矩阵编码器作为角度传感器,FPGA 实时采集处理扫描镜的位置信息以实现准确定位及位置闭环控制。扫描镜控制系统原理如图 4 所示。

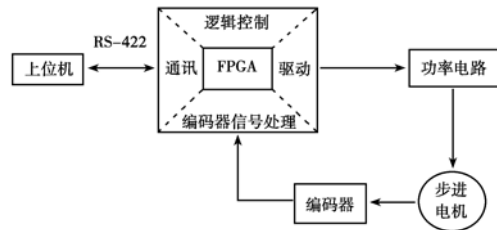


图 4 扫描镜控制系统框图

Fig. 4 Frame of control system for scanning mirror

## 4 工程分析结果

### 4.1 模态分析结果

扫描镜有限元模型根据三维实体模型构造,主要采用六面体单元及四边形单元对其进行有限元网格划分,拐角处采用楔形单元或三角形单元过渡。整个组件的有限元模型中共有 55 274 个节点,36 659 个单元,经过计算,扫描镜 3 个方向的一阶模态分别为:138, 231, 427 Hz;图 5、图 6 分别为扫描镜各阶基频的变形云图。模态分析结果表明各方向基频均满足卫星总体提出的要求。

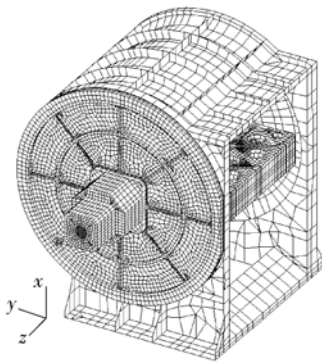


图 5 扫描镜的有限元模型  
Fig. 5 FEA model of scanning mirror

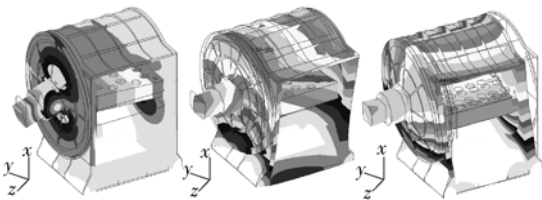


图 6 扫描镜 X, Y, Z 方向工作基频振型  
Fig. 6 X, Y, Z orientation vibration mode of nature frequency

### 4.2 温度适应性分析

扫描镜受到空间恶劣温度环境的影响,结构尺寸会发生变化,导致光学系统的视轴漂移以及镜面的波前畸变,从而严重影响分辨率以及成像质量。本文计算了 10℃ 温降(温降比温升对扫描镜面形的影响更大)工况下,扫描镜的面形变化为 PV 值 37.5 nm, rms 值为 3.7 nm; 10℃ 温降与 X 向自重耦合的工况下,扫描镜的面形变化为 PV 值 43.2 nm, rms 值 5.2 nm,均符合光学设计人员提出的指标要求。

## 5 试验结果

### 5.1 力学环境试验结果

采用了电磁振动台对扫描镜 3 个方向的基频特性进行了检测,如图 7 所示。检测结果为 X 向 124 Hz, Y 向 215 Hz, Z 向 403 Hz,与理论分析结果分别相差 10%, 7% 和 5%。

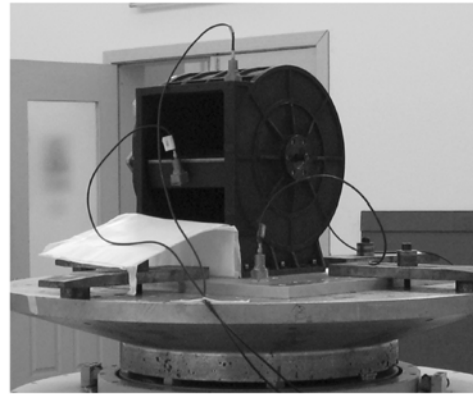


图 7 扫描镜力学环境试验  
Fig. 7 Mechanic environment test of scanning mirror

### 5.2 温度适应性试验结果

扫描镜的温度适应性试验在空调房间中进行,试验温度为  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ,试验结果表明,在测试温度范围内,扫描镜的面形均达到了光学设计人员所提出的要求。如图 8 所示为 15℃ 时扫描镜的变形,而高温 25℃ 时扫描镜的面形优于上述结果,高低温时的良好面形进一步验证了扫描镜的空间环境适应性。

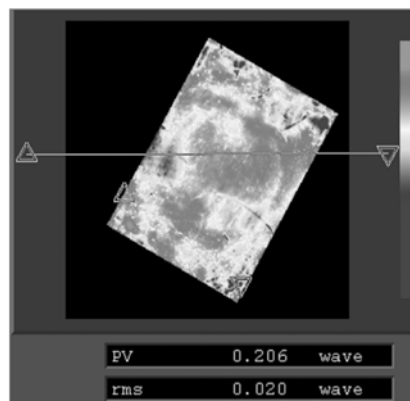


图 8 15℃ 时扫描镜的变形  
Fig. 8 Test result of scanning mirror deformation in 15℃

### 5.3 扫描镜精度测试结果

成像仪总体对扫描镜提出了位置和速度双重精度要求,其中位置精度要求为  $1'$ ,而速度精度要优于  $7\%$ 。对于位置精度采用了测角精度为  $1''$  的经纬仪进行检测,测试结果表明扫描镜定位精

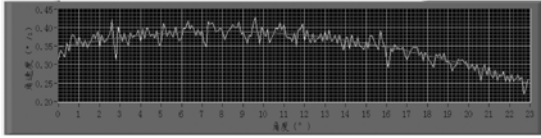


图 9 实测扫描镜运动补偿曲线

Fig. 9 Motion compensation curve of actual scanning mirror

度优于  $40''$ ,满足成像要求。对于速度精度本文采用了  $1.5''$  光电轴角编码器对扫描镜的转速精

度进行了测试,检测结果如图 9 所示。整个运动补偿范围内,扫描镜的速度均方根误差为  $5.3\%$ ,满足成像要求。

## 6 结 论

本文根据星载高光谱成像仪对地运动补偿的需求,研制了一套高精度扫描镜。根据成像仪总体提出的性能指标要求,提出了基于五相步进电机和大速比谐波减速器的扫描镜控制方案,并给出了设计方案及工程分析结果。对扫描镜的各项性能指标进行实际检测,测试结果表明扫描镜面形优于  $1/50\lambda(632.8\text{ nm})$ ,温度适应范围宽,基频满足卫星总体提出的要求,扫描镜定位精度优于  $40''$ ,速度均方根误差为  $5.3\%$ ,满足成像要求。

### 参考文献:

- [1] YUAN L, GAO W J, W SH T. Research on design and manufacture of space remote sensor's big lighten scan mirror[J]. *Advanced Optical Manufacturing and testing Technology, Proceeding of SPIE*, 2000.
- [2] M D C. Aviris scan drive design and performance [J]. *SPIE*, 1988, 834: 55-62.
- [3] CALLIES J, CORPACCIO L E, EISINGER M, *et al* Ozone monitoring by GOME-2 on the metop satellites Proc[C]. *The 2000 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' conference*. Bologna: EUMETSAT, 2000: 201-208.
- [4] 童子磊. 摆镜扫描的重复控制系统[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(3): 229-230.  
TONG Z L. Repetitive control system of scan for oscillating mirror[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, 25(3): 229-230. (in Chinese)
- [5] 李欢, 向阳, 冯玉涛. 运动补偿成像光谱仪的地面分辨率[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 745-747.  
LI H, XIANG Y, FENG Y T. Ground resolution for imaging spectrometer with motion compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 745-747. (in Chinese)
- [6] 汪逸群, 颜昌翔, 谢涛, 等. 高集成度新型摆镜驱动模块的研制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12): 2997-2999.  
WANG Y Q, YAN CH X, XIE T, *et al.*. Development of high integration driving module for scanning mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2997-2999. (in Chinese)
- [7] 付芸, 徐长吉, 丁亚林. 航空遥感相机扫描反射镜支撑技术[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6): 550-553.  
FU Y, XU CH J, DING Y L. Scanning mirror supporting structure of aerial remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 550-553. (in Chinese)

### 作者简介:



汪逸群(1983—),男,湖北鄂州人,博士研究生,助理研究员,2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事空间精密扫描机构设计与检测的研究。E-mail: hitwyq@yahoo.com.cn



刘伟(1967—),男,吉林长春人,博士,高级工程师,硕士生导师,主要从事光机结构的设计工作。E-mail: 2400@163.com



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,博士,研究员,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得工学博士学位,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yanx@ciomp.ac.cn



贾平(1964—),男,吉林延吉人,博士,研究员,主要从事航空成像与测量仪器技术方面的研究。E-mail: jiap@ciomp.ac.cn

● 下期预告

## 机载导航白天星敏感器探测性能及实验研究

钟 兴,金 光,曲宏松

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

针对机载导航白天星敏感器的探测性能进行了理论分析和试验研究,建立了白天观星的信噪比和调制度在噪声影响下的数学模型,对比了焦距一定,不同入瞳直径和入瞳直径一定,不同焦距情况下的计算结果,归纳了光学系统的性能要求及系统参数对探测效果的影响,得出光学系统相对孔径 1/15 较为合适的结论。在此基础上提出了用于 3 等星全天时观测的白天星敏原理样机的光机及电子学处理的总体方案。利用相对孔径 1/15 的望远物镜进行地面实验获得了对北极星从日出到正午的持续观测结果,对比了不同时刻星点图像的亮度和对比度变化,随着太阳高度角增大,星点图像的对比度由早上 5:00 的 1.55 下降到正午 12:00 的 1.2 左右,并据此换算出样机方案的探测性能指标,采用口径  $\Phi 70$  mm,相对孔径 1/15 光学系统可满足对 3 等星的探测最小调制度 0.03 的要求。同时给出了采用多帧累积和滤波的处理方法对实验所得图像的处理结果,表明理论分析正确,方案合理可行。本文可为小型化高精度机载导航星敏的研制提供一定的参考。