

文章编号 1004-924X(2009)12-2997-04

# 高集成度新型摆镜驱动模块的研制

汪逸群<sup>1</sup>, 颜昌翔<sup>1</sup>, 谢 涛<sup>2</sup>, 刘长顺<sup>1</sup>, 何 欣<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. 吉林省农业机械研究院, 吉林 长春 130032)

**摘要:**研制了一种高集成度的摆镜驱动模块,用作空间光学遥感器摆镜机构的动力单元。基于光、机、电一体化的设计理念,选择合适的步进电机,研制了大速比的谐波减速器和 16 位光电编码器,从而构制了紧凑型驱动模块。对该模块的轴系精度、位置精度和速度精度分别进行了分析和测试,测试结果显示,轴系径向跳动 $<3\ \mu\text{m}$ ,端面跳动 $<1\ \mu\text{m}$ ,定位精度 $<40''$ ;理论速度为  $0.1^\circ/\text{s}$  时相对速度精度为 19%, $5^\circ/\text{s}$  时相对速度精度为 6.8%。试验结果表明,该驱动模块质量轻、输出力矩大、传动精度高,满足摆镜机构对驱动系统的指标要求。

**关键词:**光学遥感器;摆镜;步进电机;谐波传动;驱动模块;精度分析

中图分类号:TP73;TM383.6 文献标识码:A

## Development of high integration driving module for scanning mirror

WANG Yi-qun<sup>1</sup>, YAN Chang-xiang<sup>1</sup>, XIE Tao<sup>2</sup>, LIU Chang-shun<sup>1</sup>, HE Xin<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Jilin Academy of Agricultural Machinery, Changchun 130032, China*)

**Abstract:** An high integration driving module for scanning mirrors is developed to use in space optical remote sensors. Based on the design idea of the integration of optics, mechanics and electronics, a stepper motor is selected and a harmonic reducer and a 16 bit encoder are developed to make up the compact drive module. Then the shafting precision, position precision and speed precision of the module are analyzed and tested. According to test results, the shafting radial error, shafting end error and the position precision are less than  $3\ \mu\text{m}$ ,  $1\ \mu\text{m}$  and  $40''$ , respectively. Moreover, the measured results indicate that the relative speed precisions are 19% and 6.8%, respectively, when the speeds are  $0.1^\circ/\text{s}$  and  $5^\circ/\text{s}$ . These results prove that the driving module has advantages in light weight, powerful moment and higher precise, and is suitsable for driving the scanning mirror.

**Key words:** optical remote sensor; scanning mirror; stepper motor; harmonic transmission; driving module; precision analysis

## 1 引言

现代高分辨率空间相机具有通光口径大、成像焦距长、规划频率高、瞬时视场小等特点<sup>[1-5]</sup>,加之飞行器速度很高,因此探测器上每个像元接受地面目标辐射的时间(积分时间)很短。为增加积分时间,通常在望远系统前端加一摆镜,实现对某些特定目标的运动补偿。实践证明,摆镜运动补偿的位置和速度精度直接影响成像质量,因此其驱动单元的设计变得至关重要。

目前,国内外常见的驱动方案主要有两种:一是利用编码器提供所需的位置反馈信号,由步进电机经减速器减速后驱动摆镜,比较典型的是法国 SPOT-5 卫星遥感系统中的指向镜驱动控制模块<sup>[6]</sup>。二是有限转角直流无刷力矩电机直接驱动摆镜,利用速度和角度传感器来实现双闭环控制,如哈尔滨工业大学研制的导弹预警卫星上的摆镜机构<sup>[6-7]</sup>。这两种驱动装置各有优缺点,在国内外航天遥感系统中都得到了广泛的应用。目前的文献资料表明,这些驱动装置中的电机、减速器和传感器等元件均为单独设计、制造和装调,难于实现体积小、重量轻、精度高和可靠性高的技术要求。

本文为满足轻型高分辨率空间相机研制的需要,基于模块化的设计理念,依据高集成度光、机、电一体化的设计思想,利用我所精密数控步进谐波传动和光电编码器等技术基础和优势,经长期反复试验研究,研制成了具有高集成度的新型摆镜驱动模块。

## 2 驱动模块设计

如图 1 所示。驱动模块外径为 87 mm、长度为 115 mm、质量为 1.52 kg、最大输出力矩为 16.95 N·m。

如图 2 所示,驱动模块主要由高分辨率精密步进谐波传动装置和绝对式编码器组成,它们同轴安装。这种结构使得驱动模块可独立调试,极大地方便了调试工作。此外,由于采用了大速比的减速器,该驱动模块具有机械自锁功能,这对空间活动部件来说是一个非常重要的优点。

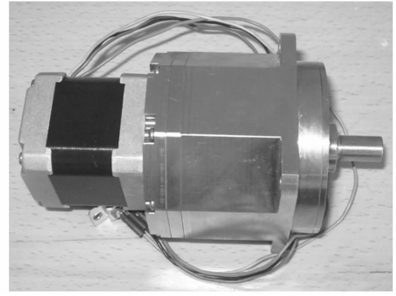


图 1 驱动模块实物照片

Fig. 1 Driving module

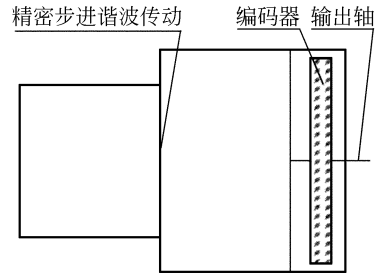


图 2 驱动模块结构示意图

Fig. 2 Structure of driving module

### 2.1 步进电机的选择

摆镜在运动补偿时是低速的变速运动,返程时是大加速度的高速运动,计算表明,高速返程时电机轴的输出扭矩最大,其值为:

$$T_M = 0.04 \text{ N} \cdot \text{m},$$

安全系数一般取 3,故电机在高速返程(运行频 2 kHz)时输出转矩应大于 0.12 N·m。综合考虑电机的输出力矩、转速范围、尺寸和质量,选定 42BYGH403 型二相步进电机,该电机步距角为 1.8°,矩频特性如表 1 所示。由表 1 可知,电机运行频率为 2 kHz 时输出力矩 > 0.15 N·m,满足摆镜的动力需求。

表 1 42BYGH403 型二相步进电机矩频特性

Tab. 1 Pulse-torque characteristics of 42BYGH403 stepper motor

| 频率/kHz) | 转矩/N·m |
|---------|--------|
| 0.04    | 0.40   |
| 0.20    | 0.30   |
| 0.60    | 0.34   |
| 1.00    | 0.32   |
| 1.40    | 0.24   |
| 2.00    | 0.15   |
| 2.20    | 0.12   |

## 2.2 谐波减速器的设计

摆镜运动补偿时速度为  $0.3^\circ/\text{s}$  左右,采用谐波减速器对步进电机减速后驱动负载。综合考虑电机的矩频特性和摆镜工况,设计了一款速比为  $i=360$  的谐波减速器。电机轴与波发生器之间为第一级减速,波发生器、刚轮(7级精度)、柔轮(6级精度)、输出刚轮(7级精度)构成高精度谐波传动实现第二级减速,由此使谐波减速器体积更小,重量更轻。此外,由多个滚子形成的波发生器使柔轮与刚轮同时啮合的齿数更多,可达  $40\% \sim 50\%$ ,这样传动精度更高,速度更平稳。

## 2.3 编码器的设计

编码器采用散装结构,以系统主轴为其旋转部分,码盘通过码盘座安装在轴肩上。主轴带动码盘转动时,码盘与狭缝产生相对运动,光电接收器件接收到的光通量可被调制,通过光电转换形成有一定变化规律的信号。编码器信号提取为一对一方式,即每路信号都有各自独立的发光和接收部分。码盘采用矩阵式编码方式,以减小编码器体积;狭缝采用整盘一体化设计。精码采用对径读数,可以消除因码盘偏心和轴向晃动带来的误差。编码器原始信号分辨率为  $42'$ ,经电子电路细分 128 份至  $19.775''$ ,为 16 位分辨率,测角精度为  $40''$ 。

## 3 精度分析与试验

驱动模块的精度包括轴系精度、位置精度和速度精度,下面分别进行分析和测试。

### 3.1 轴系精度分析与测试

驱动模块轴系由输出刚轮、输出轴和轴承组成。本文选用的 P4 级轴承,径向跳动误差  $< 3 \mu\text{m}$ ,轴向窜动误差  $< 3 \mu\text{m}$ 。输出刚轮与轴承距离较近,而编码器至轴承的距离为 15 mm,所以编码器安装点处的径向跳动误差由轴承精度决定,即为  $3 \mu\text{m}$ ,这与实测结果是一致的;而编码器安装点处的端面跳动误差是由轴承精度和安装精度决定的,经过精心装调可以降低输出轴的端面跳动误差,实测结果表明该处端面跳动误差  $< 1 \mu\text{m}$ ,因此轴系精度满足编码器的安装要求<sup>[8-9]</sup>。

### 3.2 位置精度分析与测试

根据控制策略,控制系统驱动电机旋转直至目标角度值与编码器实测值之差小于允差。因此,驱动模块的角位移误差取决于驱动模块步距角大小和编码器的测角精度。

根据电机参数和减速器速比可知,在不细分的情况下,驱动模块的步距角为:

$$\Delta\theta = 1.8/360 = 0.005^\circ = 18''$$

而编码器的测角精度为  $40''$ ,故驱动模块位置精度  $< 40''$ 。

测试位置精度是先通过高精度联轴节联接驱动模块输出轴与  $1.5''$  光电编码器,然后根据编码器输出值检测驱动模块的位置精度。结果显示实测角位置误差均值为  $30''$ ,可以满足相机总体的指标要求。

### 3.3 速度精度测试

影响速度精度的因素较多,分析过程复杂,这里仅实测其大小。测试方法是根据  $1.5''$  编码器连续采集的角度值换算成速度值,测试结果如表 2 所示,结果满足相机总体提出的指标要求。

表 2 驱动模块速度精度测试结果

Tab.1 Test results of speed precision of driving module

| 理论速度<br>/ $(^\circ/\text{s})$ | 实测均速<br>/ $(^\circ/\text{s})$ | 绝对误差<br>/ $(^\circ/\text{s})$ | 相对误差<br>/ $\%$ |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
| 5                             | 4.84                          | 0.34                          | 6.8            |
| 0.5                           | 0.498                         | 0.07                          | 14             |
| 0.1                           | 0.100 3                       | 0.019                         | 19             |

## 4 结 论

本文介绍的高集成度摆镜驱动模块体积为  $\Phi 87 \text{ mm} \times 115 \text{ mm}$ ,质量为 1.52 kg,最大输出力矩达  $16.95 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,定位精度优于  $40''$ ,理论速度为  $0.1^\circ/\text{s}$  时相对速度精度为  $19\%$ , $5^\circ/\text{s}$  时相对速度精度为  $6.8\%$ 。该模块的研制成功为我国空间光学系统的摆镜机构提供了一种新型的驱动系统。根据具体应用场合改进设计后,也可用于其他空间活动部件的驱动单元,不仅缩短了航天产品的研制周期,节约了经费,而且提高了零部件的通用性,进而保证了型号任务的成功率。换装高精度的五相步进电机或者提高谐波齿轮的加工精度可以进一步提高驱动模块的位置和速度精度。

## 参考文献:

- [1] 韩昌元. 高分辨率空间相机的光学系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2164-2172.  
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2164-2172. (in Chinese)
- [2] 金光, 张亮, 胡福生. 大 F 数高分辨率空间望远光学系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 155-159.  
JING G, ZHANG L, HU F S. Investigation on space optical system of high F number and high resolution[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 155-159. (in Chinese)
- [3] 李幼平, 禹秉熙, 韩昌元, 等. 成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 974-979.  
LI Y P, YU B X, HAN CH Y, *et al.*. Tradeoff optimization design of optical configuration on imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 974-979. (in Chinese)
- [4] 郭疆, 何欣. 大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1642-1647.  
GUO J, HE X. Design of support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1642-1647. (in Chinese)
- [5] 李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统得光机结构设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2485-2490.  
LI ZH L, XUE D L, ZHANG X J. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2485-2490. (in Chinese)
- [6] GUEGUEN F, BETTES A, TOULEMONT Y, *et al.*. SPOT series camera improvement for the HRG, very high resolution instrument of SPOT5 [J]. *SPIE*, 1999, 3737: 301-312.
- [7] 王劲强. 星载相机扫描镜控制系统的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.  
WANG J Q. *Research of control system for space-based camera-scan lens* [D]. Changsha: National university of defense technology, 2004. (in Chinese)
- [8] 吴松涛. 导弹预警系统二维摆镜结构及其控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.  
WU S T. *The study of the two-dimension waving mirror structures and the control system for early warning systems of the missile* [D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2006. (in Chinese)
- [9] 李松, 张立平. 空间相机偏流调整旋转轴系的设计与精度分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 141-145.  
LI S, ZHANG L P. Design and accuracy for drift adjusting rotary axes of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 105-112. (in Chinese)
- [10] 王智, 张立平, 李朝辉, 等. 传输型立体测绘相机的调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1051-1056.  
WANG ZH, ZHANG L P, LI ZH H, *et al.*. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1051-1056. (in Chinese)

## 作者简介:



汪逸群(1983—), 男, 湖北鄂州人, 研究实习员, 2007 年于哈尔滨工业大学获硕士学位, 主要从事光学精密仪器方面的研究。E-Mail: hitwyq@yahoo.com.cn



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博士学位, 主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yanxcx@ciomp.ac.cn

谢涛(1963—), 男, 山东鱼台县人, 学士, 高级工程师, 主要从事加工机械方面的研究。E-mail: xie-jr33315@sina.com

刘长顺(1982—), 男, 辽宁丹东人, 学士, 研究实习员, 主要从事光电传感器方面的研究。E-mail: lcsnuua@163.com

## 通讯作者:

何欣(1970—), 男, 吉林长春人, 研究员, 主要从事遥感相机光机总体技术的研究。E-mail: hexinxp@yahoo.com.cn

(本栏目编辑: 严 寒)