

文章编号 1004-924X(2011)04-0797-08

# 五相混合式步进电动机在空间扫描驱动机构中的应用

李先峰, 颜昌翔, 于 平

(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:**介绍了采用步进电动机、谐波减速器和绝对式编码器构成的扫描镜驱动机构进行成像光谱仪运动补偿的方案。说明了选用五相混合式步进电动机的合理性,研究了五相混合式步进电动机在该应用中的特殊要求,驱动技术和控制实现方法。首先,指出了扫描镜和相应驱动方案对步进电动机的特殊要求。接着,针对扫描镜低速运动补偿和高速运行回归初始位置两种工况,提出了一种基于隔相五边形绕组联结方式的新型驱动方法,即调频调压结合恒频变脉宽调制(PWM)的方法,重点分析了该驱动方式对扫描机构运行性能的影响。最后,利用相关测试设备和相应方法对扫描镜的运行精度进行了实验测量。结果表明:扫描镜在以  $0.1\sim 0.5(^{\circ})/s$  低速进行匀速运行和跟踪给定运动补偿曲线运行两种情况下,角速度的均方根误差均  $< 5.5\%$ ,基本满足一般成像光谱仪对扫描机构的工程应用要求。

**关键词:**空间扫描驱动机构;成像光谱仪;运动补偿;五相混合式步进电动机

**中图分类号:** TP73; TM383.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0797

## Application of five-phase hybrid stepping motor to spatial scanning drive system

LI Xian-feng, YAN Chang-xiang, YU Ping

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

**Abstract:** A scheme for the motion compensation of imaging spectrometers by using a scanning mirror drive system consisting of a step motor, a harmonic reducer and an absolute encoder was introduced. The rationality of selected five-phase hybrid stepping motor in the system was illustrated. On the particularity of the five-phase hybrid stepping motor, its drive technology and control methods were studied. Firstly, the special requirements of the scanning mirror and the drive method for step motor were pointed out. Then, for the two operating conditions which scanning mirror ran in low-speed and in high-speed to the initial position, a new drive method based on the new pentagon winding connection was proposed. Furthermore, the influence of the drive method on the enhancing performance of scanning system was analyzed. Finally, the related equipment and appropriate measuring methods were used to achieve the precision of scanning mirror motion. Obtained results show that the Root Mean Square Error (RMSE) of angular velocity is less than  $5.5\%$  in scanning mirror at low speed of  $0.1\sim 0.5(^{\circ})/s$  in uniform speed motion and given tracking compensation curves. The imaging spectrometer can

收稿日期:2010-04-23;修订日期:2010-09-13.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. O5001SA050)

basically meets the requirements of scanning applications.

**Key words:** spatial scanning drive system; imaging spectrometer; motion compensation; five-phase hybrid stepping motor

## 1 引言

为了满足成像光谱仪降低探测器的工作帧频,提高信噪比的要求,多需要使用光学补偿技术,而利用扫描镜进行运动补偿是常见的方法之一<sup>[1]</sup>,好的扫描镜驱动机构应具备低速、大惯量、高精度及高可靠性等特点。采用步进电动机、谐波减速器和绝对式编码器组成的驱动机构<sup>[2]</sup>是一种新型的空间扫描驱动机构方案,与基于有限转角直流量矩电机的驱动机构方案<sup>[3-4]</sup>相比,该方案具有体积重量小、能够机械自锁,控制简单,工作可靠,输出力矩大等优点,可满足航天轻量化和高可靠性设计的要求。

这种方案对步进电动机的性能要求很高,主要体现在需要步进电动机在较宽频域内都能保持一定的牵出转矩,并且在低速时具有良好的运行平稳性。这里选用的五相混合式步进电动机是一种高性能电机,与航天领域广泛应用的两相(或四相)<sup>[5]</sup>混合式步进电动机比较,二者的主要区别为结构和相数的差别,即二相混合式步进电机为定子八极/转子 50 齿,五相混合式步进电机则为定子十极/转子 50 或 100 齿。电机自身结构导致的固有特点使得五相混合式步进电机比两相混合式步进电机的分辨率高。上述的差别对电机的运行性能有着不同的影响,相数和定子磁极的结合方式不同对转子的吸力发生了变化,由此使运行性能显著提高,表现在分辨率提高,起动-停止频率提升,运行频域增宽,运行的平稳性增强,定位转矩减小<sup>[6]</sup>。

本文针对五相混合式步进电动机在成像光谱仪扫描镜驱动机构中应用的特殊性,对其关键技术进行了分析,提出了一种适用于成像光谱仪扫描镜运动补偿的电机驱动方式,并结合原理样机的试验,验证了在该驱动方式下系统具有良好的运行性能和较高的稳定精度。

## 2 成像光谱仪的扫描驱动机构运行对电机的特殊要求

扫描镜在成像光谱仪中的工作原理<sup>[7]</sup>是:在光谱仪成像过程中,扫描镜从初始位置轴向逆着卫星运行方向反扫旋转,进行有限角度的低速平稳运动,确保地面目标在探测器上有一定的驻留时间,从而完成对光学系统的运动补偿;成像过程结束后,扫描镜快速返回至初始位置,为下次成像做准备。

因此,应用基于步进电动机的空间扫描驱动机构时需要注意:

(1)在低速运行时,为了提高扫描镜的运行平稳性,即使采用了减速机构这种机械阻尼的方法,仍需要进一步改进电子阻尼形式,譬如采用合适的绕组联结方式和相应的驱动技术,进而改善电机绕组的电流波形,以防止电机振荡和失步等;

(2)在到达扫描终止位置后的返回瞬间,电机和驱动电路构成的步进电机系统应有很高的启动频率,并在高速返回的过程中,电机仍能够提供一定的输出力矩。

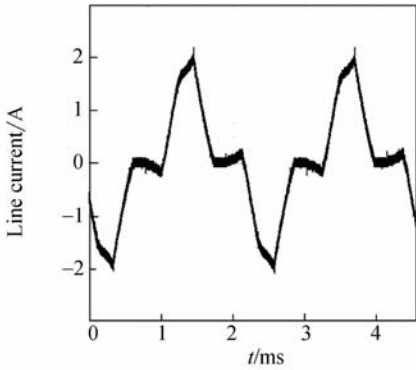
此外,为了满足成像光谱仪对成像质量的要求,对扫描镜在运动补偿过程中低速运动的平稳性进行评价和测量也是系统应用的关键。

## 3 五相混合式步进电动机的驱动方式设计

### 3.1 绕组联结方式的选定

五相混合式步进电动机的绕组联结方式对电机的运行平稳性有直接的影响。这里采用五相绕组按照  $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow B \rightarrow D$  首尾串联顺序构成的隔相五边形联结方式,功率拓扑采用五相半桥结构,





(b) 线电流

(b) Line current waveform

图 3 高速运行时相电流和线电流波形

Fig. 3 Phase current and line current waveforms from high-speed run motor

### 3.2.2 改善低速运行性能的新型驱动方法

仅靠调频调压的方法难以满足电机低速运行时的平稳性要求。当步进频率与系统固有振荡频率相等或存在倍数关系时,容易引起振荡,严重时导致失步。一般情况下,步进频率和固有振荡频率的关系,

$$f_{\text{step}} = f_n / k \quad k=1, 2, \dots, \quad (2)$$

式中,  $f_{\text{step}}$  为步进频率,  $f_n$  为固有振荡频率。

这种低频振荡产生的原因是由于电机转子达到平衡位置时具有多余的动能,需要通过增加阻尼的办法来削弱这部分能量。在应用中,连接电机与负载的大速比谐波减速器已构成机械阻尼,但即使在电机四-五通电半步工作方式下,对输出端的扫描镜速度稳定性的改善效果仍不理想。从相电流的波形上观察,相电流成梯形波,且变化率较大,电机转子仍然产生多余动能。

为了提高电机的低速运行性能,需要改进驱动方式以改善相电流波形。因此,首先建立了五相混合式步进电动机数学模型。

五相混合式步进电动机的绕组端电压方程为:

$$V_k = Ri_k + L \frac{di_k}{dt} + M \sum_{\substack{j=a \\ j \neq k}}^e \frac{di_j}{dt} + u_k(t). \quad (3)$$

式中,  $R$  为相绕组电阻;  $L$  为相绕组自感;  $M$  为相绕组间互感;  $k$  为  $a, b, c, d, e$  相;  $u_k(t)$  为转子在相绕组中感应的旋转电势。

五相混合式步进电动机的旋转电势  $u_k(t)$  近似正弦波,可用正弦函数表示,

$$u_k(t) = k_c \omega_m \sin(\omega t - \delta - \theta_k), \quad (4)$$

式中,  $k_c$  为旋转电压系数;  $\omega_m$  为机械角速度;  $\delta$  为超前/滞后角,即相电压基本分量超前或滞后旋转电压的角度;  $\theta_k$  为旋转电压初始角。

每相绕组电流对应的转矩方程可以描述成:

$$\begin{aligned} T_A &= K_T I_A \sin \theta \\ T_B &= K_T I_B \sin(\theta - 2\pi/5) \\ T_C &= K_T I_C \sin(\theta - 4\pi/5), \quad (5) \\ T_D &= K_T I_D \sin(\theta - 6\pi/5) \\ T_E &= K_T I_E \sin(\theta - 8\pi/5) \end{aligned}$$

式中,  $K_T$  为转矩常数;  $\theta$  为转子电角位移。

由此,需在五相绕组中分别通以相位差为  $2\pi/5$  且幅值相同的正弦电流,在电机内建立均匀的圆形旋转磁场,各相绕组的合成磁势矢量在空间做幅值恒定的旋转运动。而在实际的多相电机应用中,电机相数增多给驱动系统的设计带来了更多的困难,难以直接实现这种正弦波电流很难,往往是利用梯形电流来近似。

当绕组线电压和线电流参考方向如图 2 中所示时,相电流为:

$$\begin{aligned} i_{ac} &= i_a - i_c \\ i_{ce} &= i_c - i_e \\ i_{eb} &= i_e - i_b, \quad (5) \\ i_{bd} &= i_b - i_d \\ i_{da} &= i_d - i_a \end{aligned}$$

因此,

$$i_{ac} + i_{ce} + i_{eb} + i_{bd} + i_{da} = 0, \quad (6)$$

电机在绕组隔相五边形联结方式下合成的力矩矢量图如图 4 所示,假设每相绕组通额定电流  $I_o$  时产生的单位转矩大小为  $T$ ,则

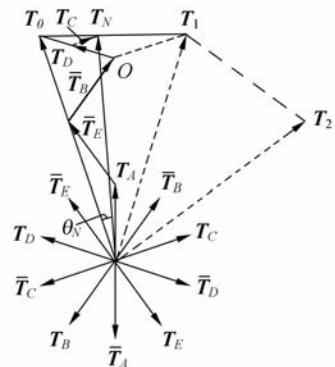


图 4 合成转矩矢量图

Fig. 4 Schematic of torque vector synthesis

$$T_A = T_B = T_C = T_D = T_E = T, \quad (7)$$

图4中的  $T_N$  为合成转矩,在一般整步四-四通电十拍工作方式下,绕组的通电状态为:

$$A\bar{B}C\bar{D} \Leftrightarrow \bar{B}C\bar{D}E \Leftrightarrow C\bar{D}E\bar{A} \Leftrightarrow \bar{D}E\bar{A}B, \dots,$$

$T_N$  将以整步距角按顺序直接从  $T_0$  跳变至  $T_1$ ,  $T_1$  跳变至  $T_2 \dots$ , 这种转矩的跳变使电机转子产生多余动能,表现在绕组电流上的波形有较大的变化率。

由于绕组采用隔相五边形连接,相电流相互关联,根据整步通电十拍工作方式,将一个步距角行程周期分为十步,由式(5)、(6)可推导出相电流的参考波形<sup>[10]</sup>如图5所示。

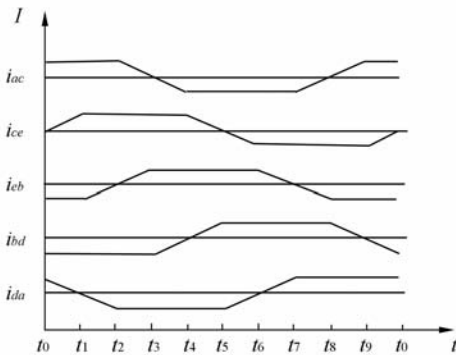


图5 相电流参考波形

Fig. 5 Reference waveform of phase current

以  $t_0 \sim t_1$  时段为例,当  $i_{ac} = I_o, i_{cb} = -I_o, i_{bd} = -I_o$  时,满足

$$i_{ce} + i_{da} = I_o, \quad (8)$$

即D相和C相绕组的电流  $i_{ce}$  和  $i_{da}$  分别从0到  $I_o$  和  $I_o$  到0线性变化。为了达到这种效果,在A,B,E对应的桥臂功率管信号正常通电逻辑时序下,D,C两相绕组对应的桥臂功率管信号做PWM斩波处理,在以O点为基准位置的  $T_D$  与  $T_C$  满足关系:

$$kT_C + (1-k)T_D = T_N. \quad (9)$$

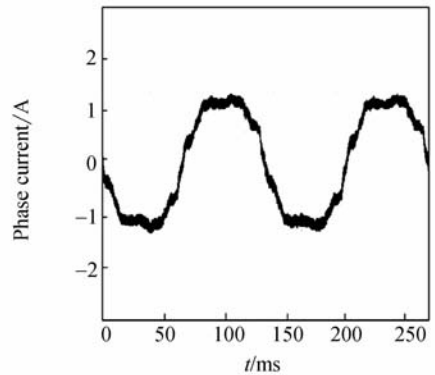
其中,  $0 \leq k \leq 1$ 。

这样,使相电流变化满足线性渐变的关系,合成转矩  $T_N$  将在  $t_0 \sim t_1$  时间内完成沿  $T_0 \rightarrow T_1$  方向渐变的过程。依次类推,即可完成合成磁场的圆旋运动。

采用图5所示的相位互差为  $2\pi/5$  的参考电流波与固定频率的三角波比较产生五路恒频变PWM信号,分别用来驱动功率桥的上半桥臂功率管,反相后的信号驱动下半桥臂功率管。当三

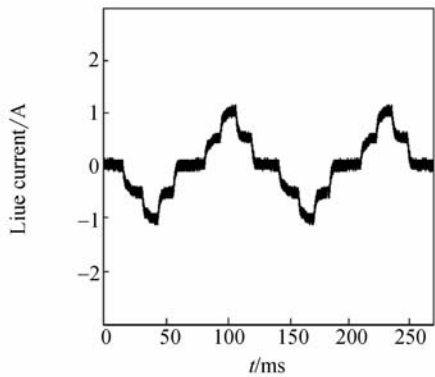
角波频率为16 kHz,电机输入频率为80 Hz时,使用该驱动方法所测得的相电流波形如图6(a)所示,与图2相比相电流更趋于正弦波,从线电流波形上更容易看出这种阶梯形渐变的变化特征,如图6(b)所示。

参考电流值的选取也是这种方法的关键。齿层比磁导动态分析法<sup>[11]</sup>虽然能够利用计算模型计算出电机牵入过程中每一瞬间的各相电流值,但计算复杂,且需要大量的电机基本参数。通过调频调压的试验方法,可以获得电机矩频曲线下对应的电流值大小,一般可以满足工程应用的需要。



(a) 相电流

(a) Phase current waveform



(b) 线电流

(b) Line current waveform

图6 低速运行时相电流和线电流波形

Fig. 6 Phase current and line current waveforms from low-speed run motor

## 4 试验与结果

### 4.1 试验测试系统的组成

为了验证扫描镜驱动机构的运行性能,采用

图 7 所示的检测系统对其角速度稳定性进行测试。

该检测系统由指向反射镜控制系统,被测扫描镜组件,24 位光电轴角编码器,PCI 板卡和计算机测试软件等构成。其中,编码器的测角精度为  $0.5''$ ;计算机测试软件包括上位机仿真指令测试软件和数据接收处理软件两部分,分别用来为扫描镜控制系统发送通讯指令,提供基准补偿曲线和接收编码器处理系统处理后的信号,完成角度和速度的换算处理及数据曲线的显示回放。

扫描镜系统利用 Xilinx 公司的 XCV300 型 FPGA 作为核心控制器,驱动电机采用某型号五相混合式步进电动机的主要参数为:基本步距角为  $0.36^\circ/\text{step}$ ,保持转矩为  $0.24 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,绕组电阻为  $2.2 \Omega$ ,绕组电感为  $4 \text{ mH}$ 。

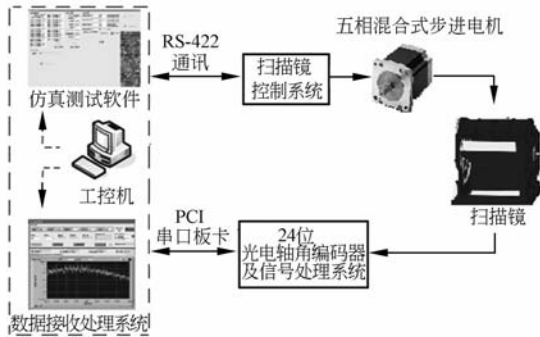


图 7 检测系统组成框图

Fig. 7 Block diagram of test system

## 4.2 扫描镜低速匀速运行

在扫描镜低速匀速运行的情况下,对系统跟踪  $0.1 \sim 0.5^\circ/\text{s}$  内多组匀速的理论角速度情况进行测量,采样时间为  $100 \sim 200 \text{ ms}$ ,其中部分数据的处理结果如表 1 所示。

表 1 低速匀速运行角速度测量结果

Tab. 1 Measured results of angular velocity in slow uniform motion

理论角速度 $/((^\circ) \cdot \text{s}^{-1})$	采样时间 $/\text{ms}$	实际测量角速度/ $((^\circ) \cdot \text{s}^{-1})$			最大相对误差 $\Delta_{\text{imax}}/(%)$	均方根误差 $\sigma/(%)$
		最大	最小	平均		
0.1	200	0.118	0.086	0.099 6	18.47	5.18
0.175	200	0.207	0.150	0.174 3	18.22	5.42
0.25	150	0.296	0.214	0.249	18.39	5.33
0.375	150	0.441	0.317	0.375 6	17.61	5.38
0.5	100	0.579	0.423	0.498	15.80	5.21

测量的结果也可以直接显示如图 8 的形式,该图反映的是角位置和角速度的关系,对应理论角速度为  $0.375^\circ/\text{s}$ 。表 1 和图 8 综合体现出角速度呈小幅周期性波动,平稳性良好。对应不同理论速度,计算每组角速度的均方根误差  $< 5.5\%$ 。

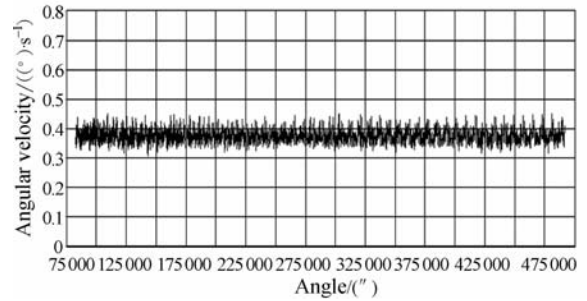


图 8 低速匀速运行实测的角位置-角速度曲线

Fig. 8 Measured angular position-velocity curve in slow uniform motion

为了比较提出的新型驱动方法在改善电机低速稳定性的优势,对应理论角速度为  $0.375^\circ/\text{s}$ ,在同样条件下实际测量了仅使用传统的调频调压驱动方法,电机四-五通电方式的试验数据结果。从图 9 可以直观看出来,角速度存在明显的振荡,而计算得到的均方根误差结果已高达  $13.7\%$ ,侧面反映了调频调压和恒频变 PWM 相结合的新型驱动方法较大程度地改善了扫描镜低速运行的性能。

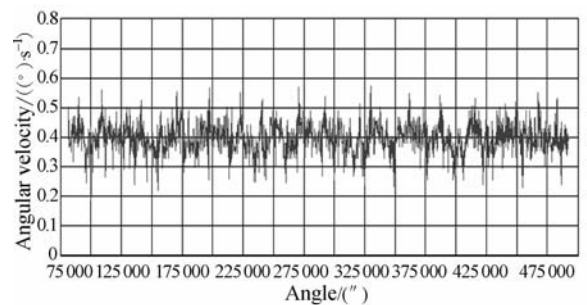


图 9 调频调压驱动下的实测角位置-角速度曲线

Fig. 9 Measured angular position-velocity curves using frequency and voltage modulation method

## 4.3 扫描镜按运动补偿曲线运行

在给定运动补偿曲线运行的情况下,电机运行跟踪此理论曲线,测量后的结果如图 10 所示。

曲线1为理论给定曲线,曲线2为实际测量曲线。以曲线上 $45''$ 间隔即取一数据进行误差比较计算,经数据统计后得到的角速度均方根误差 $<5.5\%$ ,符合一般成像光谱仪运动补偿的工程要求。

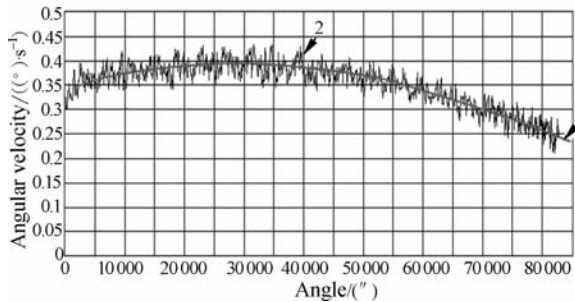


图10 运动补偿模式下实测的角位置-角速度曲线

Fig. 10 Measured angular position-velocity curves in motion compensation mode

## 参考文献:

- [1] 毕晓麟. 转动执行机构在国外航天遥感器中的应用[J]. 红外, 2006, 27(5): 21-26.  
BI X L. Research on application of rotation driving mechanism in foreign space remote sensors[J]. *Infrared*, 2006, 27(5): 21-26. (in Chinese)
- [2] 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): 2997-3000.  
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): 2997-3000. (in Chinese)
- [3] 尹达一. 有限转角驱动机构在国外航天遥感系统中的应用[J]. 红外, 2003(5): 5-10.  
YIN D Y. Application of finite angle driving mechanism to foreign space remote sensing systems [J]. *Infrared*, 2003(5): 5-10. (in Chinese)
- [4] 王劲强. 星载相机扫描镜控制系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.  
WANG J Q. *Research of control system for space-based Camera-scan Lens*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [5] 尹达一, 冯鑫, 郑列华, 等. 微特电机在卫星水色扫描仪中的应用[J]. 微特电机, 2008(8): 8-12.

## 5 结 论

本文在成像光谱仪的光学成像运动补偿的工程背景下,介绍了五相混合式步进电动机在新型空间扫描机构中应用的特殊性。为了满足应用要求,提出了一种新的五相混合式步进电机的驱动方法,并结合采用的特殊的绕组联结方式,分析了这种方法的工作原理和对驱动机构运行性能的影响。最后,通过对工程原理样机的试验测试,验证了扫描镜的运行平稳性精度。实验结果证明:在 $0.1\sim 0.5$  ( $^{\circ}$ )/s 低速匀速运行和跟踪运动补偿曲线运行两种工作情况下,扫描镜角速度的均方根误差都小于 $5.5\%$ ,能够基本满足一般成像光谱仪的工程要求。应用五相混合式步进电动机并使用文中所论述的驱动方法,在实际工程中有广泛的应用前景,适用于航天领域中需要的较为精密控制的场合。

- YIN D Y, FENG X, ZHENG L H, *et al.*. Small and special electrical machines of COCTS on satellites for space applications[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2008(8): 8-12.
- [6] 王宗培, 赵书韬, 任雷, 等. 混合式步进电动机的研究(1)、(2)[J]. 电工技术杂志, 1998(3): 3-6. 1998(4): 5-7.  
WANG Z P, ZHAO SH T, REN L, *et al.*. Study of hybrid stepping motor(1), (2)[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 1998(3): 3-6. 1998(4): 5-7. (in Chinese)
- [7] 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): 745-749.  
LI H, XIANG Y, FENG Y T. Ground resolution for imaging spectrometer with motion compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 745-749. (in Chinese)
- [8] 陈敏祥. 五相混合式步进电动机驱动新技术[J]. 电机与控制学报, 1998, 2(1): 38-41.  
CHEN M X. A new driving technique of 5 phase hybrid step motor[J]. *Electric Machines and Control*, 1998, 2(1): 38-41. (in Chinese)
- [9] 蔡巍, 乔鸣忠, 张晓峰. H桥型五相感应电机 SVPWM 控制技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(4): 33-38.  
CAI W, QIAO M ZH, ZHANG X F. SVPWM

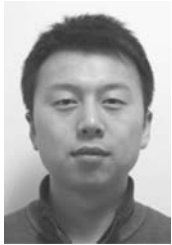
control technique for five-phase H-bridge induction motor[J]. *Proceedings of the CSU-EPSSA*, 2008, 20(4):33-38. (in Chinese)

- [10] WEERAKOON T S, SAMARANAYAKE L. Development of a Novel Drive Topology for a Five Phase Stepper Motor[C]. *Industrial and Information Systems*, 2008. *ICIIS 2008. IEEE Region 10 and the Third international Conference on Digital Object Identifier*. 2008:1-6.

[11] 童怀, 王宗培. 五相混合式步进电机牵入特性的齿层比磁导分析模型[J]. *中国电机工程学报*, 1994, 14(1):20-26.

TONG H, WANG Z P. Five-phase hybrid stepping motor pull-in characteristics of tooth level permeability model[J]. *Chinese Society for Electrical Engineering*, 1994, 14(1):20-26. (in Chinese)

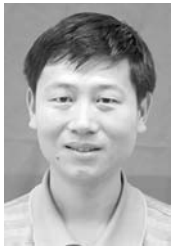
#### 作者简介:



李先峰(1983—),男,吉林梨树人,研究实习员,2009年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事空间遥感器中的运动机构控制方面的研究。E-mail: pioneer@126.com



于平(1963—),男,吉林长春人,研究员,1985年于长春光学精密机械学院获得学士学位,主要从事空间光学遥感器嵌入式系统的设计。E-mail: yu-ping0203@163.com



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,博士,研究员,2001年于中科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: yanex@ciomp.ac.cn

#### ●下期预告

## 仿生复眼接收系统设计与实验

谭雪春,武志超,梁柱

(长春理工大学理学院,吉林长春130022)

以生物视觉成像和目标识别为研究背景,深入研究了光学复眼的结构与拼接以及光纤耦合及光信号接收成像技术,设计了一种可应用于凝视激光雷达的新型光学复眼接收系统。该系统通过模仿昆虫复眼结构形式,拟由16个透镜阵列构成,全视场角为 $2^\circ$ 。利用光纤耦合技术接收光信号,并对复眼探测结果进行了实验研究和分析。结果表明,该接收系统能够准确地反映探测目标轮廓,探测距离可达200m以上,在实验室获得了20 frame/s的距离图像,像点点阵间距为 $1.72\text{ m}\times 1.72\text{ m}$ 。该系统可以满足导弹末制导使用或是低空飞行器下视地形匹配,具有广阔的应用前景。