

## 基于超声电机的轻型指向机构及其指向误差分析

田 咪,何志平,陈 凯,吕 刚,王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术重点实验室,上海 200083)

**摘 要:** 在探月工程中,为了实现基于空间应用光谱仪的多目标光谱探测,需要设计满足轻小型和高可靠性的二维指向机构。目前,超声电机作为驱动源,精密电位计作为一种位置传感器,因其自身的优良性能正逐步应用于精密仪器和定位技术中。基于此,设计了由超声电机、精密电位计和扫描镜组成的二维指向机构,并以一维指向模型为工程样机,通过设计闭环控制电路和指向控制机制进行功能测试,验证了该机构空间应用的可行性。为了测量精度,搭建实验室测试平台,并进行多次指向试验,通过对测试结果进行分析,提出提高指向精度的方案。

**关键词:** 二维指向; 超声电机; 精密电位计; 精度分析

**中图分类号:** TP23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2200-06

## Lightweight pointing mechanism and its pointing error analysis based on ultrasonic motor

Tian Mi, He Zhiping, Chen Kai, Lv Gang, Wang Jianyu

(Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** In the lunar exploration project, in order to achieve multi-target spectrum detection based on space applications, designing a lightweight and highly reliable two-dimensional pointing mechanism is needed. Currently, the ultrasonic motor as a driving source and the precise potentiometer as a position sensor, are gradually applied in precise instruments and positioning technologies due to their excellent performance. Based on this, a two-dimensional pointing mechanism consisting of ultrasonic motor, precise potentiometer and scanning mirror was designed. Besides, in order to validate feasibility of the two-dimensional pointing mechanism in space applications, one-dimensional pointing mechanism model was designed and assembled as the engineering prototype, and functional test was conducted based on the closed-loop control circuit and pointing control mechanism. In order to meet the demand of accuracy test, laboratory test platform was built, several pointing experiments were carried out to measure and solutions to improve accuracy were put forward through error analysis of the test results.

**Key words:** two-dimensional pointing mechanism; ultrasonic motor; precise potentiometer; accuracy analysis

收稿日期:2014-11-05; 修订日期:2014-12-13

基金项目:国家自然科学基金(21105109)

作者简介:田咪(1989-),女,博士生,主要从事多目标光谱探测方面的研究。Email:yzstm1989@163.com

导师简介:王建宇(1959-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事物理电子学和成像光谱技术等方面的研究。

Email:jywang@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

宇宙飞船、人造卫星、运载火箭以及各种电子设备、精密仪器等高新技术产品的发展对轻型电机提出了进一步的需求,促进了轻型指向机构及定位技术相关研究的广泛开展。超声电机(ultrasonic motor, USM)作为新型的微特电机,与传统的电磁电机相比,不仅扭矩/质量比大、结构紧凑、体积小、重量轻,而且具有断电自锁、输出大力矩和响应速度快等优点,适合航空航天领域的使用<sup>[1-2]</sup>。

超声电机运行机理包括压电材料的能量转换,以及机械能的磨擦传递。两者均存在非线性效应且其特性随温度、负载等运行条件的变化而变化,给基于超声电机的指向定位控制带来困难。目前,国内外已经提出的控制方法主要有模糊/自适应 PID 算法、神经网络算法等<sup>[3-5]</sup>,这些方法不需要建立电机的数学模型,但无法满足高效、稳定和大量程的控制系统的要求<sup>[6]</sup>。除此之外,超声电机也可结合测角器件实现闭环定位,如利用光栅编码器进行定位,这种定位方式精度高、反应灵敏<sup>[7]</sup>,但是光栅编码器对应用环境要求较高,不适合航空航天等恶劣环境应用。精密电位计作为一种位置传感器,可在广泛领域内实现精密位置定位,例如,基于精密电位计的电传操纵系统的定位是无人机 UAV 飞行控制的保障<sup>[8]</sup>。

文中研究基于超声电机的轻型指向机构的工程化应用,以二维目标可选光谱探测为应用需求,采用超声电机结合精密电位计进行角度测量,设计灵巧性的二维指向机构及控制机制,满足中小型、高可靠的同时满足航空航天领域指向定位需求。

## 1 轻型指向机构设计

### 1.1 应用背景及总体设计

光谱仪通过获取被探测目标的光谱信息进而分析物质成分,其工作原理如图 1 所示,光源发出的光经物质表面反射后,通过二维指向机构上的扫描镜反射,进入光谱仪,经过探测器光电转换后进行信号处理,得到被探测物质的光谱曲线;通过二维指向机构程控选择探测目标,可实现范围内不同位置物质的光谱探测,进而实现物质识别及其组成成分分析的应用目标<sup>[9]</sup>。

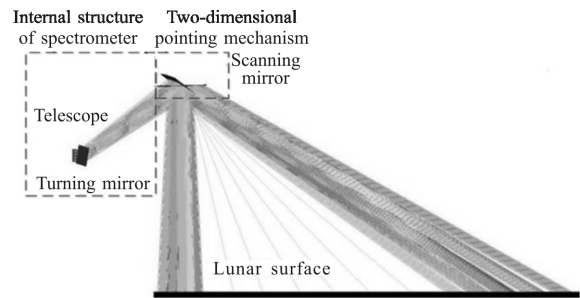


图 1 光谱仪二维目标可选探测工作原理

Fig.1 Spectrometer operating principle with two-dimension optional target

凝视型成像光谱仪工作时,通常安装于静止平台,为实现多目标探测的同时满足轻小型要求,设计基于超声电机驱动的轻型指向机构,采用超声电机结合精密电位计角度测量,实现二维精确指向及定位。基于超声电机的二维指向机构示意图如图 2 所示,使用超声电机驱动俯仰和方位轴转动,从而实现指向镜的二维指向变化,在较大目标区域范围内实现目标可选探测。表 1 为二维指向机构的性能参数(其中最小转动角度定义为目标位置与当前位置的最小角度间隔)。

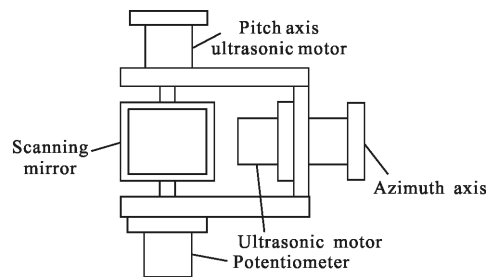


图 2 基于超声电机及电位计的二维指向机构示意图

Fig.2 Diagram of two-dimensional pointing mechanism with USM and potentiometer

表 1 二维指向机构性能参数

Tab.1 Performance parameters of two-dimensional pointing mechanism

Weight/g	Pointing range/(°)	Min move angle/(°)	Pointing accuracy/(°)
860	Azimuth axis: -30~+30 Pitch axis: 0~30	0.488	±0.244

1.2 超声电机及精密电位计

根据应用需求及指标要求,设计基于超声电机的轻型二维指向机构,为确定设计状态,研制一维指向机构工程样机进行性能验证。如图 3 所示,工程样机实现一维指向,超声电机为驱动源,选取南京航空航天大学研发、上海技术物理研究所装配的宇航级旋转型行波超声电机 TRUM-30 (以下简称电机/USM);精密电位计选择福州世新电子生产的精密旋转型电位计(以下简称电位计),两者具体指标如表 2、表 3 所示。

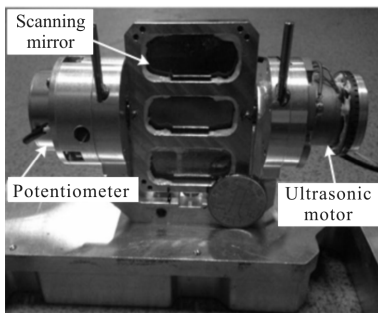


图 3 一维指向工程样机实物图

Fig.3 Picture of one-dimensional pointing mechanism

表 2 超声电机性能参数

Tab.2 Performance parameters of ultrasonic motor

Type	Weight/g	Rated torque /Nm	Self-locking moment/Nm
TRUM-30	58	≥0.05	≥0.1

表 3 电位计性能参数

Tab.3 Performance parameters of potentiometer

Type	Weight/g	Effective electrical angle/(°)	Total resistance /kΩ	Independent linearity
CP-25	28	100	2	0.2%

2 二维指向控制机制

如图 4 所示为一维转动模块指向机构及其控制机制框图,主要包括超声电机、电位计、驱动电路、测角电路和 FPGA 控制等。其控制机制简述如下:(1) 当获得需要指向的角度位置后,FPGA 判断转动方向并产生超声电机的驱动信号;(2) 驱动电路处理驱动

信号,输出一组高压的正弦波信号至超声电机,驱动电机转动;(3) 测角电路通过电位计的模拟分压输出来测量指向机构的当前位置,反馈给 FPGA;(4) FPGA 根据测角电路的测量数据,与目标位置比较,做出到位或继续转动的判断。判断标准为扫描镜的当前位置是否处于停转区间内,如图 5 所示,假定有效电气角度内某一点为目标位置,设定该目标位置两侧一定角度范围为停转区间,区间长度为  $2\lambda$ (两侧各  $\lambda$ ) 当电机位置处于该区间时,电机停止转动,FPGA 做出指向机构到达目标位置、即到位判断。

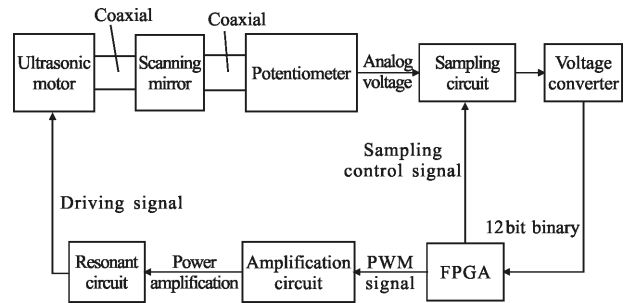


图 4 指向机构控制机制框图

Fig.4 Diagram of pointing mechanism and control mechanism

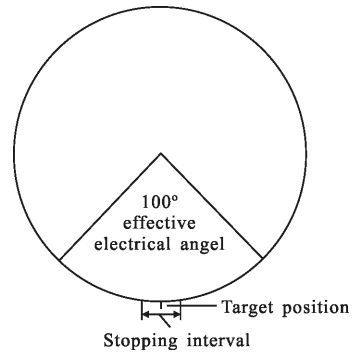


图 5 停转区间示意图

Fig.5 Diagram of stopping interval

二维指向机构分别由俯仰轴和方位轴对应一维转动模块并联实现,通过分时工作及闭环控制,使用上述相同的控制机制,实现二维指向与定位。基于一维转动模块,二维指向具体控制流程如图 6 所示,上电复位后,首先 FPGA 判断电机的当前位置是否处于停转区间,YES 则 FPGA 不输出驱动信号,NO 则 FPGA 对当前位置与停转区间进行比较,判断电机转动的方向,然后输出固定时长 T 的驱动波形,使电机转过固定步长,转动完成,FPGA 再次进行当前位置与目标位置的比较,重复转动-停止-判断-是否转

动这一过程,直至电机到达停转区间,FPGA 进程终止。

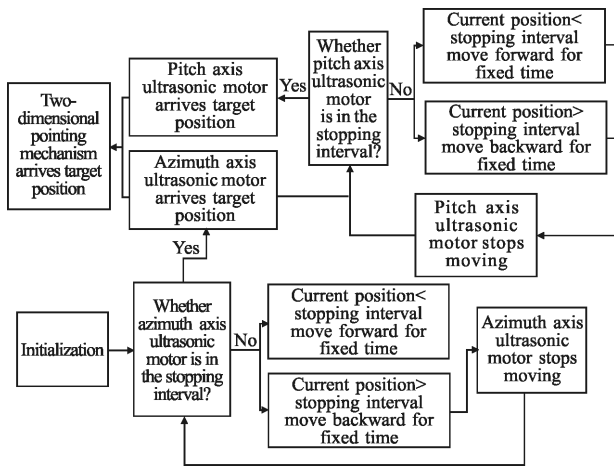


图 6 指向机构控制流程

Fig.6 Control process of pointing mechanism

### 2.1 驱动电路

超声电机驱动电路的功能为：根据输入的指向指令,输出一组高压的正弦波信号至超声电机,驱动电机转动。如图 7 所示,驱动电路接收 FPGA 输出的四路 PWM 波型(A, An, B, Bn),其中 A 与 An 相位相差  $\pi$ , B 和 Bn 相位相差  $\pi$ , A 与 Bn 相位相差  $\pi/2$ ,经过驱动电路中的 UC1708 芯片和 MOSFET 后送入变压器,经电感谐振后驱动电机转动。

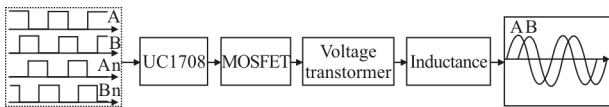


图 7 驱动电路示意图

Fig.7 Diagram of driving circuit

### 2.2 测角电路

测量电位计的当前时刻的分压输出表征电机的当前位置(与采样频率相关)传送至 FPGA, FPGA 通过判断是否到达停转区间来控制电机的转停。如图 8 所示,测角电路以数字电路为主,电位计的模拟分压输出通过 LC 滤波电路滤除交流噪声,进入 AD 芯片进行采样,将模拟电压变为 N 位二进制数字信号,经电压转换芯片将数字信号逻辑值+5 V 转换为+3.3 V 后,送入 FPGA。进行指向机构是否到位判断时, FPGA 根据控制模块中设置的是否到位判断标准来判断是否输出 PWM 驱动波形,进而实现超声电机转停的控制。

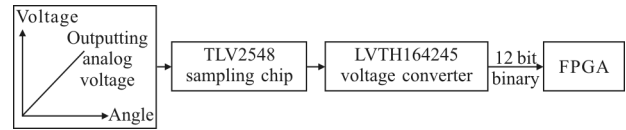


图 8 测角电路示意图

Fig.8 Diagram of measuring angle circuit

## 3 实验及分析

### 3.1 测试方法及装置

为确定设计的正确性和工程样机的主要性能,设计如图 9 所示的测试方案及测试装置。测试方法为:稳压电源为电路板提供稳定的直流电源,PC 机的上位机控制软件向 FPGA 控制板发送指向指令, FPGA 根据指令中指向的目标位置,通过一维指向机构控制电路驱动电机到达指向位置。电机指向过程中, FPGA 将电机当前位置读出给 PC 机, PC 机在上位机软件中以当前角度信息显示。实验平台实物图如图 10 所示。

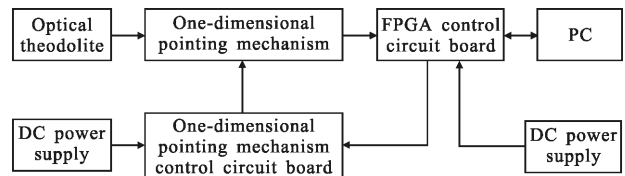


图 9 实验平台系统框图

Fig.9 System diagram of experiment platform

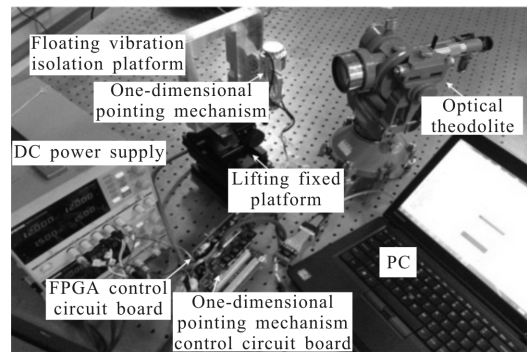


图 10 实验平台实物图

Fig.10 Picture of experiment platform

### 3.2 测试数据及分析

基于上述的指向机构控制策略,电机到达目标位置时,处于停转区间内,因此可以得到电机的理论指向精度计算公式为:

$$\Delta\theta = \frac{\pm\lambda}{2^N} \cdot \alpha \quad (1)$$

式中:  $\pm\lambda$  为停转区间两侧长度;  $N$  为采样芯片将模拟信号转换为数字信号的二进制位数;  $\alpha$  为电位计的有效电气角度范围。

基于该文研究在工程上的应用需求, 设定停转区间为  $\pm 10$ , 采样芯片为 TLV2548, 采样输出为 12 位二进制数, FPGA 输出驱动波形的固定时长  $T$  为 100 ms, 根据公式(1)可得理论指向精度为  $\pm 0.244^\circ$ 。实验中, 电机起始状态处于  $0^\circ$  位置, 令指向目标位置为  $30^\circ$ , 机构指向转动过程中, 根据 PC 机上位机软件接收到的指向机构每个时刻当前位置的角度信息, 绘制曲线图如图 11 所示, 整个指向过程共步进 38 次, 用时 52 s。

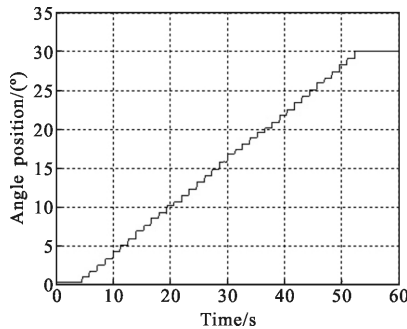


图 11 指向过程中角度位置曲线图

Fig.11 Graph of angle position in the pointing process

重复多次进行 (>100 次) 不同位置的指向指令, 驱动波形的固定时长不变的前提下, 测得指向机构每步的固定步长如图 12 所示, 通过计算, 固定步长的平均值为  $0.829^\circ$ , 不同位置上步长的值不同与等效负载不完全相同导致电机转速不同。

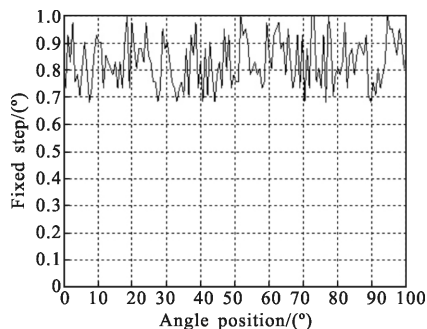


图 12 指向范围内不同位置固定步长

Fig.12 Fixed-step in different position within pointing range

基于搭建的实验平台, 在电位计的有效电气角

度内进行多次 (>100 次) 不同位置的指向操作并进行误差测量, 指向误差的测试结果统计如图 13 所示。

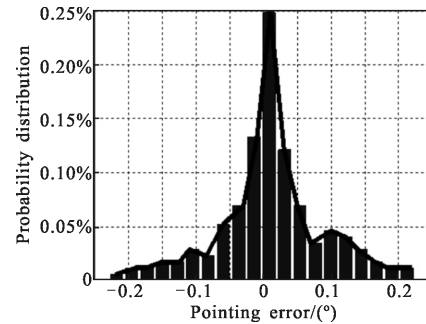


图 13 多次指向误差测试结果及统计分析

Fig.13 Analysis of error and measurement results from lots of pointing

根据误差测试结果, 通过对指向误差进行统计分析, 两侧误差最大值分别为  $-0.223^\circ$ 、 $0.225^\circ$ , 指向误差均值为  $\mu = 0.0103^\circ$ , 方差为  $\sigma^2 = 0.0789$ , 误差的概率分布近似服从正态分布, 与理论指向精度一致。

指向精度的改进方法有: (1) 结合应用场景的精度需求, 选取量化位数更高的采样芯片, 例如若采样量化值为 14 位二进制, 根据公式(1)则理论指向精度提高四倍; (2) 减小停转区间长度, 例如若停转区间为  $\pm 5$ , 根据公式(1)则理论指向精度可提高两倍。

## 4 结论

利用超声电机扭矩/质量比大、结构紧凑、体积小、质量轻等特点, 设计了超声电机结合电位计测角闭环控制的二维指向机构; 研制工程样机进行性能及工程化应用验证, 测试及分析结果表明, 设计可满足空间应用对轻小型指向电机的应用需求。该研究基于超声电机的指向机构, 具有体积小、质量轻、定位精度高、可靠性高的特点, 同时硬件设计和软件算法控制简单, 可满足航空航天领域对轻小型、高可靠指向定位机构的需求, 并为相关领域的应用提供技术参考。

## 参考文献:

- [1] Zhao Chunsheng. Ultrasonic Motors Technologies and Applications [M]. Beijing: Science Press, 2007: 1-7. (in Chinese)

赵淳生. 超声电机技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社,

- 2007: 1-7.
- [2] Zheng Wei, Zhu Chunling, Lu Dan, et al. Research on characteristic of traveling wave type rotary ultrasonic motors under high temperature [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2008, 28(21): 85-89. (in Chinese)  
郑伟, 朱春玲, 芦丹, 等. 高温环境下旋转型行波超声电机性能研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 85-89.
- [3] Zhai Shiwei. Research on nano-positioning system driven by macro/micro hybrid piezoelectric actuators [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)  
翟士伟. 全压电驱动纳米级宏/微定位系统的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [4] Jie Degang, Sun Lining, Qu Dongsheng, et al. Fuzzy-reasoning based self-tuning PID control for piezoelectric micro-displacement system [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(2): 145-147. (in Chinese)  
节德刚, 孙立宁, 曲东升, 等. 压电陶瓷微位移系统的模糊PID控制方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(2): 145-147.
- [5] Senjyu T, Miyazato H, Yokoda S. Speed control of ultrasonic motors using neural network [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1998, 13(3): 381-387.
- [6] Zhou Liping, Sun Zhijun, Zhang Quan, et al. A precision alignment control method of linear ultrasonic motors using the normal distribution theory [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(27): 60-65. (in Chinese)  
周丽平, 孙志俊, 张泉, 等. 一种应用正态分布理论的直线超声电机精密定位控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 60-65.
- [7] Cheng Xiaoli, Xie Jianying, Wang Lin, et al. Application of absolute encoder to motor position detection system [J]. *Control Engineering of China*, 2007, 14 (5): 549-554. (in Chinese)  
程晓莉, 谢剑英, 王林, 等. 绝对式编码器在电机定位中的应用 [J]. 控制工程, 2007, 14(5): 549-554.
- [8] Zhong Lunchao, Duo Yingxian, Wang Jianzhong, et al. The design and implementation of UAV-FBW system based-on potentiometer as displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(8): 1164-1167. (in Chinese)  
钟伦超, 朵英贤, 王建中, 等. 基于电位计式位移传感器的无人机电传操纵系统的设计与实现 [J]. 传感技术学报, 2013, 26(8): 1164-1167.
- [9] Huang Yi, Wang Shurong, Song Kefei, et al. Design of solar ultrasonic spectral radiometer and out-field experiments in Lijiang [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 530-533. (in Chinese)  
黄熠, 王淑荣, 宋克非, 等. 太阳紫外光谱辐射计的研制及丽江外场实验 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 530-533.