

文章编号 1004-924X(2019)03-0630-07

## 星载差分吸收光谱仪摆镜控制系统设计

鲁月林<sup>1,2</sup>, 王煜<sup>1\*</sup>, 司福祺<sup>1</sup>, 薛辉<sup>1</sup>, 陈军<sup>1</sup>, 江宇<sup>1</sup>, 刘晓磊<sup>3</sup>, 陈卓一<sup>3</sup>

- (1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;
3. 中国空间技术研究院 总体部, 北京 100094)

**摘要:**针对差分吸收光谱仪搭载于地球同步轨道卫星时对地成像的要求,设计了一种扫描摆镜转动控制系统。从摆镜控制结构设计、控制电路设计两个方面阐述了摆镜系统的方案。摆镜系统受载荷主控器控制,接收控制指令并回传当前摆镜位置状态,通过 LMD18200 驱动芯片进行功率输出,由步进电机和谐波减速器构成的驱动器驱动摆镜转动,编码器读取摆镜角度信息。给出了 PWM(Pulse Width Modulation)波占空比的测定办法,并提出通过回转到成像起始点之前的方式,消除回程误差对成像区域步距不确定性的影响。实验结果表明该系统的步距角均值偏差小于 1",最大偏差小于 5",标准偏差小于 2"。该光谱仪摆镜控制系统满足步距精度指标要求。

**关键词:**差分吸收光谱仪;扫描摆镜;回程误差;步距精度

**中图分类号:**TH744 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192703.0630

## Design of scanning mirror control system for satellite-borne DOAS spectrometer

LU Yue-lin<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1\*</sup>, SI Fu-qi<sup>1</sup>, XUE Hui<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>,  
JIANG Yu<sup>1</sup>, LIU Xiao-lei<sup>3</sup>, CHEN Zhuo-yi<sup>3</sup>

- (1. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*
  2. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*
  3. *Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)*
- \* *Corresponding author, E-mail: yuwang@aiofm.ac.cn*

**Abstract:** To meet the requirement of step accuracy for the scanning mirror of a Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) mounted on a geosynchronous orbit satellite, the design of a scanning mirror control system with high accuracy is proposed that specifically considers structural and circuit design aspects. In this scheme, the scanning mirror system was controlled by the master controller that received instructions and sended back information about the current position of the scanning mirror. The scanning mirror controled circuit outputs power through the LMD18200 driver chip.

**收稿日期:**2018-10-11;**修订日期:**2018-11-09.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 41605017);国家重点研发计划项目资助(No. 2016YFC0200401; No. 2017YFB0503901)

Then, the driver consisting of a stepping motor and harmonic reducer drove the scanning mirror to rotate, and the encoder readed the position information of the scanning mirror. In this study, a method of setting the duty cycle of the PWM was proposed, and the control and elimination methods of the harmonic gear transmission hysteresis were studied. Experimental results show that the mean deviation of the step angle of the system is less than  $1''$ , the maximum deviation is less than  $5''$ , and the standard deviation is less than  $2''$ . This control system design satisfies the requirements of step accuracy for the scanning mirror and provides a reference for related applications on subsequent satellite payload.

**Key words:** Differential Optical Absorption Spectroscopy(DOAS); scanning mirror; return error; step accuracy

## 1 引言

星载差分吸收光谱仪采用面阵探测器作为散射光信号收集单元,面阵探测器的一维为光谱维,另一维为空间维,覆盖一定宽度的条形区域<sup>[1-4]</sup>。星载差分吸收光谱仪应用于地球同步轨道卫星时,需要扫描摆镜将地面不同位置的光信息反射到主光路,获取区域信息。摆镜系统的性能、功能是影响成像仪正常工作的重要因素<sup>[5-7]</sup>。

目前应用中的摆镜有两种工作模式,连续扫描型和固定步距型。连续扫描型的摆镜需要控制角速度的精度,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>[8]</sup>, EOS-TERRA 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS 角速度误差为  $2.1 \text{ mrad/s}$ <sup>[9]</sup>。固定步距型摆镜主要针对定点成像的需求,如由西光所研制的月基望远镜反射镜采用蜗轮蜗杆加步进电机驱动方式,达到了优于  $60''$  的单轴指向精度<sup>[10]</sup>。

摆镜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>[11]</sup>。二是使用有限转角力矩电机和高精度旋转变压器作为执行与测量元件,采用位置环与速度环双闭环

控制<sup>[12]</sup>。

针对搭载于地球同步轨道卫星的差分吸收光谱仪的成像需求,分析了其对摆镜的指标要求。介绍了摆镜的结构设计和控制电路设计,并通过搭建实验平台,寻找最优控制方案和控制参数。分析并测定了 PWM 波占空比以及运动起点的合适值。最终通过摆镜步距角的测定,验证了整套系统的性能符合要求。

## 2 任务需求分析

该光谱仪对地保持相对静止,每次成像时只能将一个条带的光信息投射到 CCD 上,为了获得地面区域范围内的光信息,需要使用摆镜进行摆扫。所述光谱仪光路组成如图 1,来自地球的光通过摆镜反射后,离轴三反镜将外界光信息收集后会聚进入光谱仪入射狭缝,利用 Offner 成像光谱仪色散后成像到面阵探测器,从而获取高光谱、高空间分辨率的光谱信息。摆镜扫描示意图如图 2 所示,东西方向条带的光线经过摆镜反射到光学系统,进行光谱维展开,投射到面阵 CCD 上。南北方向地面光信息通过摆镜的转动,分时进入 CCD。光谱仪的成像指标中,地理分辨率、多帧叠加精度和条带拼接精度对摆镜的工作提出了要求。

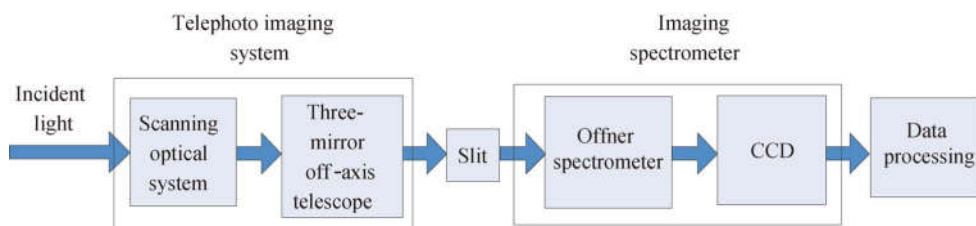


图 1 星载差分吸收光谱仪光路组成

Fig. 1 Composition of satellite-borne DOAS spectrometer

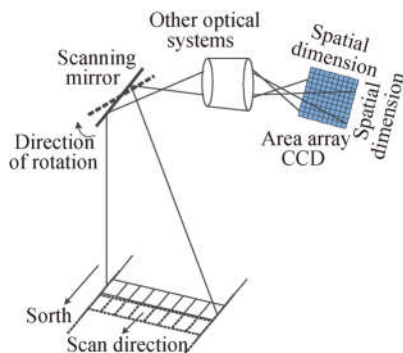


图 2 摆镜对地扫描示意图

Fig. 2 Schematic of scanning mirror

### 2.1 扫描方向空间分辨率分析

扫描方向的空间分辨率即地理成像条带之间的间隔距离由每次摆镜转动导致的入射光改变角决定:

$$\Delta\alpha = \frac{\delta}{H}, \quad (1)$$

其中:  $\Delta\alpha$  为空间分辨率对应的入射光转角;  $\delta$  为空间分辨率 (7.5 km);  $H$  为卫星轨道高度 (35 786 km)。根据光的反射定律, 摆镜的步距角应为入射光单次改变角的 1/2, 即 21.6"。为了保证扫描方向空间分辨率的偏差小于 5%, 要求步距角均值偏差小于 1"。

### 2.2 多帧叠加匹配精度分析

由于该光谱仪位于地球同步轨道, 接收到的光强弱, 数据反演时需要每个位置的成像进行多帧叠加。对多帧叠加匹配精度要求优于 0.5 像元, 即单景成像时光轴指向偏差小于 21.6"。单景成像 16 帧, 单帧 1 s, 共计 16 s。该光谱仪搭载于高姿态稳定度的卫星平台, 其稳定度指标为  $1 \times 10^{-4} (^{\circ})/s$ 。因此单景成像期间平台不稳定最大能造成光轴指向偏差为 5.8"。为了保证单景成像时光轴指向偏差远小于 21.6", 该设计中要求摆镜偏移造成的光轴偏差小于 2.4", 即 16 s 内摆镜偏移小于 1.2"。

### 2.3 条带拼接精度分析

对条带间拼接精度要求优于 0.5 像元, 即相邻成像条带光轴的步进偏差小于 21.6"。影响条带间光轴指向误差因素主要是卫星平台姿态稳定度误差、摆镜角度偏移和摆镜步进角偏差。姿态稳定度对光轴指向角的影响为 5.8", 影响较大。但该平台具备测量频率大于 15 Hz, 测量精度为

3.6" 的高精度测量能力, 测角数据可用于条带拼接。因此对摆镜造成的光轴偏差的要求是小于 18"。

该设计中要求摆镜步进角最大偏差 5"。加上摆镜偏移最大量 1.2", 此时由摆镜造成的最大光轴偏移为 14.4" 满足系统需求。

## 3 摆镜系统方案

### 3.1 摆镜结构

根据上述对成像任务需求的分析, 需要摆镜达到 16 s 内优于 1.2" 的稳定性, 因此选择步进电机作为驱动电机。其他电机如力矩电机, 音圈电机等均无法实现稳定静止定位。摆镜的步距角为  $0.006^{\circ}$ , 需使用减速器将角度缩小。考虑到谐波齿轮传动具有传动比大、精度高、空程小、效率高、体积小以及传动平稳等优点, 并已广泛用于航天器机构中, 它与步进电机配合, 一般是低速驱动机构的最佳选择。选用  $0.9^{\circ}$  步距角的步进电机与 150:1 减速比的谐波减速器构成驱动机构。驱动器的输出轴驱动摆镜, 并使用长春光学精密机械研究所研制的 21 位绝对值编码器实时获取输出轴角度位置。

图 3 为扫描摆镜系统结构图, 摆镜控制电路板接收载荷主控器的命令信号, 驱动电机转动, 并读取编码器的角度信息发送到载荷主控器。

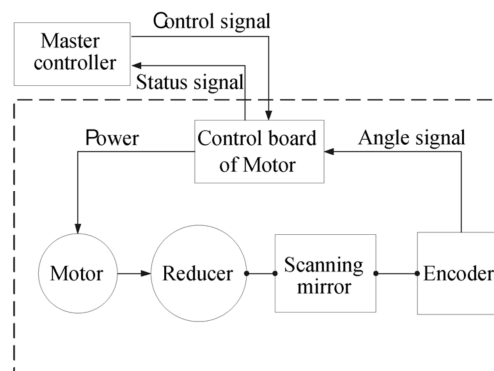


图 3 扫描摆镜系统控制系统结构

Fig. 3 Structure block of scanning mirror system

### 3.2 电路设计

图 4 为步进电机控制电路, 该电路以 FPGA 为核心, 通过 RS422 接口与载荷主控器和编码器通信, 通过 LMD18200 芯片驱动步进电机。

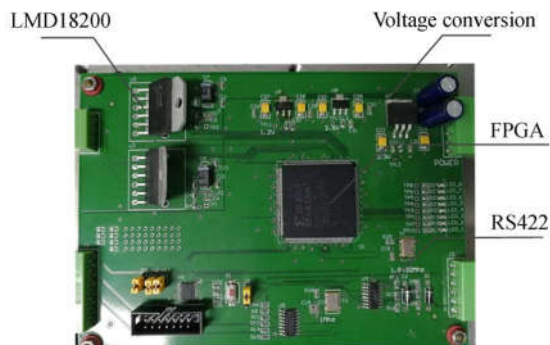


图 4 步进电机控制电路

Fig. 4 Control circuit of step motor

图 5 为 FPGA 内部逻辑结构。串行通信模块接收主控指令进行译码,读取转动方向、转动步数、驱动电流及转动速度的信息发送到中心控制模块,接收中心控制模块发来的状态信息(编码器数据,过热信号)回传到主控器。编码器数据处理模块读取编码器的位置信息并发送到中心处理模块。驱动逻辑产生模块根据转动命令,产生相应时序逻辑,通过 LMD18200 芯片驱动步进电机。

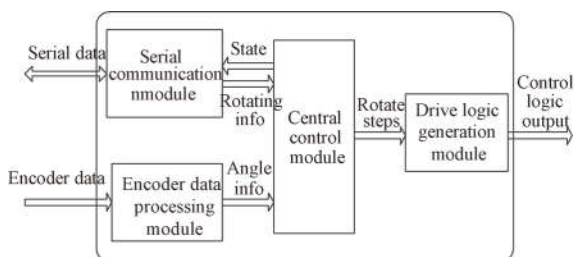


图 5 FPGA 逻辑模块结构

Fig. 5 Logic structure block of FPGA

## 4 控制方案与参数设定

### 4.1 实验系统搭建

为了寻找摆镜的最优控制方法,并检测该摆镜动作精度,搭建了图 6 所示的实验系统。电脑端上位机模拟星载主控器向电机控制电路发送控制指令,控制摆镜转动并通过光电自准直仪(分辨率为 0.005",精度为 0.1")来测量摆镜的角度信息。

### 4.2 驱动占空比设定

摆扫机构在完成扫描测定过程中,主要承受惯性加速力矩、负载力矩和摩擦力矩。步进电机

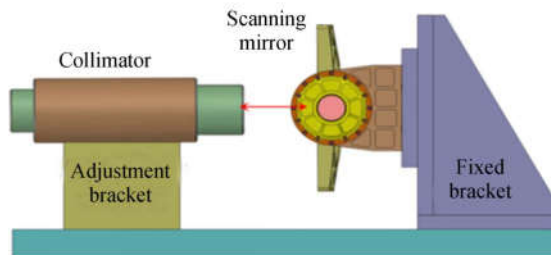


图 6 摆镜测试系统

Fig. 6 Test system of scanning mirror

通过谐波减速器进行转角输出,为计算所需的电机输出转矩,应将负载峰值力矩折算到电机轴上。首先计算摆镜组件的峰值力矩。摆镜的惯性力矩为:

$$M_J = (J_1 + J_2) \cdot \alpha = 8.5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}, \quad (2)$$

式中:  $J_1$  为摆镜组件转动惯量,  $J_2$  为谐波输出组件转动惯量,  $\alpha$  为摆镜端角加速度。摆镜组件重量为 2.4 kg,偏心 0.1 mm,由此产生的偏心距为 2.4 N · mm;编码器启动力矩为 8 N · mm;故负载力矩  $M_L$  为 10.4 N · mm。

摆镜摩擦力矩  $M_f$  由固定端摩擦力矩,游动端摩擦力矩以及谐波齿轮摩擦力矩,经测算约为 606.5 N · mm。因此电机轴上的峰值力矩  $M_p$  为:

$$M_p = M_J + M_L + M_f = 616.9 \text{ N} \cdot \text{mm}, \quad (3)$$

折算到电机端的阻力矩为:

$$M_1 = (M_p / \eta) / i = 13.7 \text{ N} \cdot \text{mm}, \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为传动效率,  $i$  为传动比。该方案中使用的电机的摩擦力矩和惯性力矩很小,均可以忽略。另外,又知谐波减速器启动力矩为 9.5 N · mm,故电机输入端负载力矩为 23.2 N · mm。

为了保证摆镜能够正常转动,需要设定合适的电机输出力矩。提高驱动电流可以增加输出力矩,但增大绕组内电流会产生更多的热量,加剧磨损。因此选择合适的驱动电流,对于摆镜正常平稳转动以及提高寿命至关重要。

LMD18200 芯片输出到步进电机绕组的电流是通过 PWM 波占空比进行调节。该系统中电机的标准驱动电压为 12 V,不同占空比电机的输出力矩前期实验已测试,现直接给出。计算不同占空比时的力矩裕度测定在不同占空比下摆镜转动失步的概率。由上位机分别发送 100 次转动 1 步的指令,使用自准直仪观测每一次接受指令后,摆镜输出端是否失步。表 1 为不同占空比下摆镜失

步率,从中可看出,为了避免摆镜转动时失步,占空比需大于 20%。该设计中,设定占空比为

30%。此时力矩裕度为 1.78,满足航天应用中步进电机的力矩裕度的要求。

表 1 不同占空比下摆镜失步率

Tab. 1 Out-of-step rate with different duty cycles

占空比/%	5	10	15	20	25	30	35	40
驱动力矩/(N·mm)	10.76	22.46	33.92	44.36	56.78	64.4	72.57	81.29
力矩裕度	<0	<0	0.46	0.91	1.45	1.78	2.13	2.50
失步率/%	100	100	36	0	0	0	0	0

### 4.3 运动起点设定

控制摆镜正反转动两次,对角度位置和步距角进行记录。由图 7 可以发现,每次转动方向改变后,步距角误差明显变大,并且在继续同向转动过程中逐渐减小。

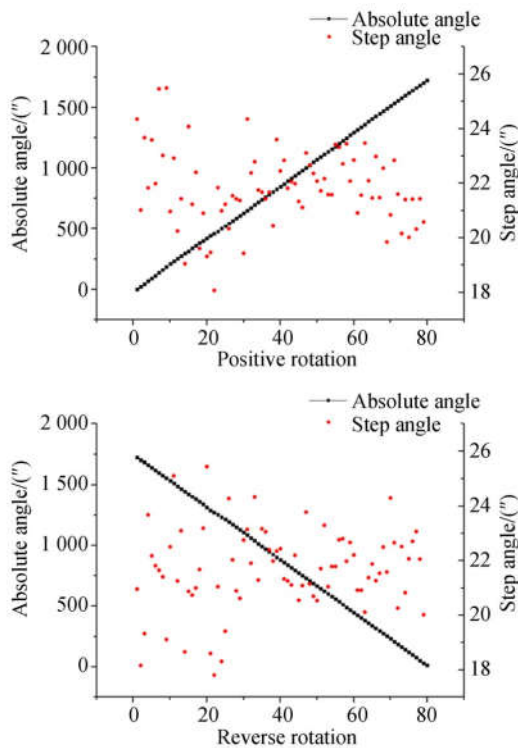


图 7 往返运动步距角记录图

Fig. 7 Round-trip motion step angle record

由于减速器的存在,步进电机本身的步进偏差对输出端的影响极小。转动过程中输出端步进误差的最大来源是换向时谐波减速器的回程误差。谐波减速器的回差包含:输入轴、输出轴以及零部件(不包括波发生器在内)产生的弹性变形回差;柔轮、刚轮与波发生器加工制造和安装误差以

及发生器由于负载的影响而产生的弹性变形引起的回差;负载条件下柔轮扭转变形引起的回差。

换向后一定步数内,由于谐波的弹性变形等原因会造成步距的不稳定,但是当同向走出这段区域后变形对步距的影响可以忽略不计。为了避免回程误差对成像区的影响,应该按照图 8 所示,每次转动从运动起始点开始,转动过成像区后反向回到起始点。等待下一次指令重新开始转动。图中  $\varphi_o$  为输出轴角度的,  $\varphi_i$  为输入轴角度,  $i$  为减速比。

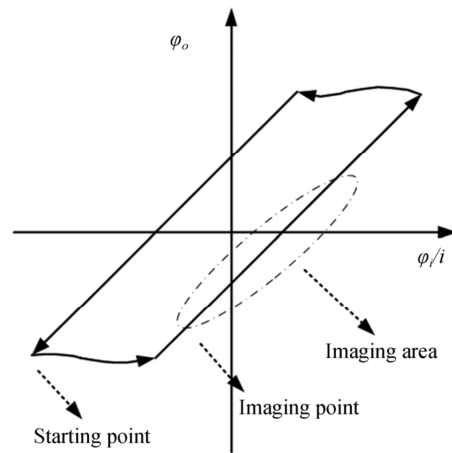


图 8 输入转角与输出转角的曲线

Fig. 8 Curve of input angle and output angle

为了使成像时,摆镜步距角的偏差尽可能小,需要寻找最佳的运动起始点。将成像起始点计为 0,分别将运动起始点设为 -5, -10, -15, -20, -25, -30。计算成像区域(80 步)的步进角标准偏差  $\sigma_i$ ,如图 9 所示。注意在测量角度的过程中,当超出自准直仪的量程时需要重新调整自准直仪光轴的位置,直至十字光斑出现在正中心的位置。

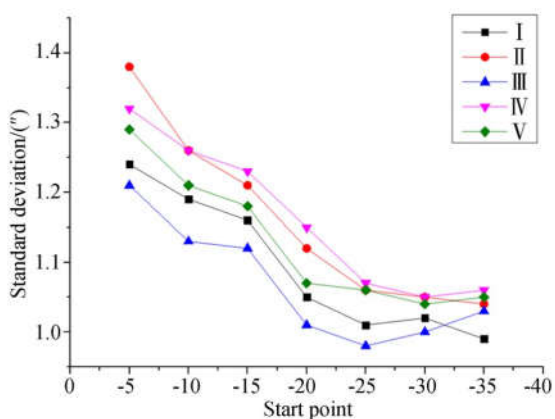


图 9 运动起点与成像区步距角标准差关系图

Fig. 9 Standard deviation of step angle of imaging area with different start position

当运动起点设定为-25 以上(运动起点在成像起点前 25 步),步距误差基本保持不变,之后的步距趋于稳定。因此,为了使成像区域的步距角误差尽可能小,设定运动起点为-30。即摆镜的运动方式为,从运动起点出发,正向转动 30 步,到达成像原点后一步一停地转动,光谱仪开始成像。到达终点后,反向连续转动返回运动起点,保持静止并等待下一次的控制命令。

该运动方式可以有效地避免回程误差产生的步距不确定性误差。但是由于齿轮间隙的存在和其他原因,每次成像起点有一定的不确定性。而光谱仪成像只要覆盖目标区域,分辨率达到要求即可,引入起点的不确定对成像影响不大。通过

编码器读取摆镜当前的角度值,可以把起点的不确定性缩小在 1 步以内。

### 5 摆镜控制精度结果

影响摆镜步进角误差的主要因素有电机步进角误差、谐波传动误差、轴系加工误差、轴系装配误差及轴承精度等因素。步距角误差受电机制作工艺水平的限制,它是电机本身的固有特性,难以消除。谐波传动误差的误差源主要有发生器的径向尺寸误差、刚轮的运动误差、柔轮的运动误差以及输出轴的径向跳动误差。由于影响摆镜步进角误差的因素很多,并且相互之间没有关联,可认为其服从正态分布。因此可以直接通过实验,测定摆镜步距角的方法来测定该控制系统能否满足任务的参数需求。

根据上述测定结果,该摆镜的最优控制参数为:设定 PWM 波占空比 30%,运动起点-30 步。从运动起点出发,转动到成像起点后使用自准直仪记录每次摆镜转动到位时的角度值,直至运动到成像终点后连续反向转动回到运动起点。总计进行 10 次实验,记录每次实验中成像区所有步距角的值,并计算步距均值,最大偏差,标准偏差见表 2。步距角的均值在  $21.6'' \pm 1''$  范围内;步距角的最大偏差为  $3.84''$ ,在  $\pm 5''$  范围内;步距角的标准偏差小于  $2''$ ,均满足成像系统对于扫描摆镜的指标要求。

表 2 步距角实验结果

Tab. 2 Results of step angle experiment

( $''$ )

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
步距角均值	21.64	21.02	21.77	21.90	21.52	21.98	21.36	21.80	21.48	21.72
步距角最大偏差	3.73	-3.56	2.89	3.28	-2.51	3.84	-3.14	3.58	3.42	2.97
步距角标准偏差	1.07	0.98	1.12	1.02	0.94	0.84	1.15	1.14	1.05	1.10

### 6 结 论

本文提出了一种应用于地球同步轨道卫星对地摆扫成像、状态可监测的高精度扫描摆镜转动控制系统设计方案。以 FPGA 为核心控制芯片, LMD18200 为步进电机驱动芯片,由步进电机和谐波减速器构成驱动机构带动摆镜转动,使用编码器读取摆镜的角度信息。通过计算电机力矩裕

度和测定不同 PWM 波占空比条件下摆镜失步率,确定了最佳占空比为 30%;分析回程误差对成像区步距角的影响,并对不同运动起点时步距角的精度进行测定,发现运动起点设为-30 步时,成像区域步距不确定性基本消除。实验数据显示该系统成像区的步距角均值在  $21.6'' \pm 1''$  范围内,最大偏差小于  $5''$ ,标准偏差小于  $2''$ 。该控制系统满足了任务指标要求,已通过预研阶段评审,为后续载荷上的相关应用提供参考。

## 参考文献:

- [1] 张泉, 黄书华, 田禹泽, 等. 星载差分吸收光谱仪噪声分析及处理方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(9):2976-2981.  
ZHANG Q, HUANG SH H, TIAN Y Z, *et al.*. Noise analysis and processing method of environment monitoring instrument [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(9):2976-2981. (in Chinese)
- [2] 周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11):2331-2337.  
ZHOU H J, LIU W Q, SI F Q, *et al.*. Stray light suppression of space-borne differential optical absorption[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11):2331-2337. (in Chinese)
- [3] 司福祺, 江宇, 江庆五, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(3):237-243.  
SI F Q, JIANG Y, JIANG Q W, *et al.*. Design of fore optical system in space-borne differential optical absorption spectrometer for atmospheric trace gas monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3):237-243. (in Chinese)
- [4] 赵敏杰, 司福祺, 陆亦怀, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱图像校正方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12):295-301.  
ZHAO M J, SI F Q, LU Y H, *et al.*. Spectral image correction method for space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12):295-301. (in Chinese)
- [5] 程海波, 刘学斌, 胡炳梁, 等. 星载超光谱成像仪摆镜地面检测系统设计[J]. 光子学报, 2006, 35(3):369-372.  
CHENG H B, LIU X B, HU B L, *et al.*. The design of rotation mirror detection system for image hyperspectrometer carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 35(3):369-372. (in Chinese)
- [6] 于洋, 王世勇, 蹇毅, 等. 面阵探测器连续扫描成像光学系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1):118002-0118002.  
YU Y, WANG SH Y, JIAN Y, *et al.*. Realization of an optical system based on continuous-scan focal plane array [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45(1):118002. (in Chinese)
- [7] 汪逸群, 刘伟, 颜昌翔, 等. 成像光谱仪运动补偿扫描镜的研制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11):2703-2708.  
WANG Y Q, LIU W, YAN CH X, *et al.*. Development of high-precision scanning mirror assembly of imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2703-2708. (in Chinese)
- [8] MILLER D C. Aviris scan drive design and performance [C]. *Imaging spectroscopy II. International Society for Optics and Photonics*, 1987, 834:55-63.
- [9] CALLIES J, Corpaccioli E, Eisinger M, *et al.*. Ozone monitoring by GOME-2 on the METOP satellites [C]. *Atmospheric Ozone. Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium, Sapporo*, 2000.
- [10] 黄静, 刘朝晖, 谢友金, 等. 月基光学天文望远镜反射镜转台的设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8):2173-2179.  
HUANG J, LIU ZH H, XIE Y J, *et al.*. Design of 2-D reflection mirror gimbal for lunar based astronomy optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2173-2179. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 毛博年, 孟新, 卞春江, 等. 二维耦合光学摆镜伺服控制系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2):544-548.  
MAO B N, MENG X, BIAN CH J, *et al.*. Servo control system in two-dimensional coupled optics swing mirror [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2015, 44(2):544-548. (in Chinese)

## 作者简介:



鲁月林(1992—),男,安徽铜陵人,博士研究生,2014年于中国农业大学工学院获得学士学位。主要从事航空航天光电子设计方面的研究。E-mail: yllu@aiofm.ac.cn

## 导师简介:



王煜(1971—),男,北京人,研究员,1993年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2005年于英国斯特莱斯克莱德大学获得博士学位,主要从事航空、航天遥感设备研究,承担星载光谱仪设备的电子系统研发工作。E-mail: yuwang@aiofm.ac.cn