

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.06.007

基于 BM3803 的步进电机控制系统设计与实现

许 权^{1,2}, 黄书华^{1*}, 司福祺¹, 韩春慧^{1,2}, 张 坤^{1,2}, 鲁月林^{1,2}, 刘文清¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室 安徽 合肥 230031;

2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 针对星载大气痕量气体差分吸收光谱仪太阳定标光路切换转动部件的实现, 提出了基于 BM3803 的步进电机控制系统, 通过步进电机带动扭簧转动凹面反射镜, 实现光路的切换。设计了基于国产航天芯片 BM3803FMGRH 和专用驱动芯片 LMD18200 的步进电机开环控制系统, 给出了基于 BM3803FMGRH 的控制电路和搭建了 LMD18200 的驱动电路, 编写了步进电机的控制程序。当步进电机转动 89 步时, 扭簧旋转角度为 80.1° , 微动开关导通, 光路切换成功。为后续星载差分吸收光谱仪的设计提供参考。

关键词: 星载差分吸收光谱仪; 光路切换; BM3803; 步进电机

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)06-0463-011

Design and Implementation of Stepping Motor Control System Based on BM3803

XU Quan^{1,2}, HUANG Shuhua^{1*}, SI Fuqi¹, HAN Chunhui^{1,2}, ZHANG Shen^{1,2},
LU Yuelin^{1,2}, LIU Wenqing¹

(1 Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, 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)

Abstract: Aiming at the realization of the sun-calibrated optical path switching component of the space-borne differential optical absorption spectrometer, a stepping motor control system based on BM3803 is proposed. The switching of the optical path can be realized by rotating the concave mirror with torsion spring driven by the stepping motor. Firstly, the open-loop control system of stepping motor based on domestic aerospace chip BM3803FMGRH and special drive chip LMD18200 is designed. Then the control circuit based

基金项目: Supported by National Key Research and Development Program of China (国家重点研发计划项目, 2017YFB0503901, 2016YFC0200401)

作者简介: 许 权 (1992 -), 男 (汉族), 湖北黄梅人, 硕士研究生, 主要从事步进电机控制、步进电机软硬件设计研究。

E-mail: qxu@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清 (1954 -), 男, 江苏徐州人, 博士, 院士, 博士生导师, 主要从事环境监测技术和应用方面的研究。

E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2019-02-26; **修改日期:** 2019-04-29

* **通信联系人.** E-mail: hsh@aiofm.ac.cn

on BM3803FMGRH and the drive circuit of LMD18200 are constructed, and the control program of stepper motor is programmed. When the stepping motor rotates 89 steps, the torsion spring rotates at an angle of 80.1° , the micro switch is turned on, and the optical path is switched successfully. It provides a reference for the design of the subsequent space-borne differential absorption spectrometer.

Key words: spaceborne differential optical absorption spectrometer; optical path switching; BM3803; stepper motor

1 引言

星载大气痕量差分吸收光谱仪的光谱仪在轨定标光谱, 能够为天底推扫测量的紫外 / 可见光光谱的反演提供参考, 保证了星上遥感观测数据的准确性^[1-4]。光路切换转动部件实现凹面反射镜旋转入主光路与旋转出主光路的功能。电机的转动能够带动扭簧将凹面反射镜旋转入主光路, 以实现太阳光或者卤钨灯对光谱仪的定标, 同时凹面镜安装挡板将来自主镜的地球光遮挡。

星载差分吸收光谱仪光路切换转动机构作为重要的光谱仪定标机构, 对光谱仪数据的准确性和可靠性有重要影响。通过步进电机带动凹面反射镜旋转出主光路, 实现光谱仪定标。控制系统采用现场可编程门阵列 (Field-programmable gate array, FPGA) 和数字信号处理 (Digital signal processing: DSP) 电路在星载设备上已数见不鲜, FPGA 控制驱动步进电机较为复杂, 尤其是在轨注数以修改驱动参数, 并且星载设备上的反熔丝 FPGA 芯片进口受限, 价格昂贵。而 DSP 作为步进电机的驱动控制, 抗辐照性能略有不足, 而且体积较大。由于信息处理箱体积的限制以及载荷的重量限制, 采用国产微处理器 BM3803FMGRH, 该芯片的较高抗辐照性能能够弥补 DSP 的缺点, 该芯片控制较为简单, 没有 FPGA 复杂的控制逻辑, 体积较小、重量轻并且成本较低。该处理器是基于可扩展处理器架构第 8 版 (Scalable processor architecture version 8, SPARC V8) 体系架构的 32 位抗辐射加固微处理器, 支持可编程只读存储器 (Programmable read-only memory, PROM) 静态随机存取存储器 (Static random access memory, SRAM)、同步动态随机存取却 Synchronous dynamic random-access memory, SDRAM) 和输入 / 输出 (Input/output, I/O) 映射空间访问的存储器控制器, 2 个 24 位定时器, 1 个看门狗, 3 个串行通信接口, 支持外部可编程输入端口的中断控制器, 32 个通用 I/O 接口。具有三模冗余、纠一检二的错误检测与纠正 (Error detection and correction, EDAC) 解编码以及奇偶校验等抗单粒子翻转效应的容错设计。有较高的性能, 较好的抗辐照性能, 能够满足设计要求, 可以作为步进电机的控制系统^[5-6]。LMD18200 是高性能 H 桥电机驱动芯片, 由两片驱动芯片组成一组, 驱动四线步进电机。

在光路切换系统中, 凹面反射镜的旋转需要有足够的力矩, 带动扭簧旋转到指定位置。由于步进电机具有开环控制精确、无累计误差、转速要求不高以及力矩较大的特点^[7-10], 能够较好地实现凹面反射镜的旋转。

2 系统原理分析

星载大气差分吸收光谱仪光路切换示意图如图 1 所示, 光路切换部件实现将凹面反射镜旋转入主光路与旋转出主光路的功能。当凹面镜旋转出主光路后, 通过反射太阳光或者卤钨灯光实现光谱仪定标, 同时凹面反射镜安装挡板将来自主镜的地球光遮挡; 当凹面镜旋转出定标光路后, 光谱仪可工作于对地观测模式。

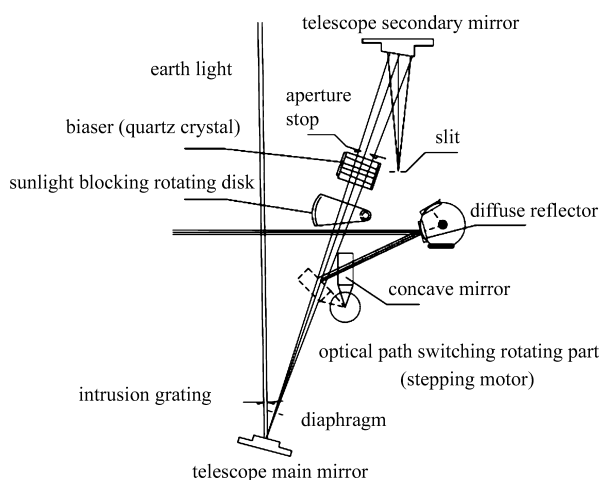


图 1 星载大气差分吸收光谱仪的光路切换转动部件示意图

Fig.1 Schematic diagram of optical path switching rotating parts of space-borne atmospheric differential optical absorption spectrometer

切换部件中带动扭簧转动的电机为步进电机, 步进电机基本理论方法已比较成熟, 步进电机的常用驱动方式包括脉冲宽度调制、电流细分驱动和加速减速法等。

BM3803FMGRH 作为步进电机的控制芯片, LMD18200 作为步进电机的驱动芯片, 驱动电机带动凹面反射镜转动。当主控板接收到转动指令之后, 电机开始转动并带动扭簧档杆至目标位置触发微动开关, 微动开关产生反馈脉冲至主控板, 电机保持, 等待回转指令, 从而完成光路的切换, 系统原理框图如图 2 所示。

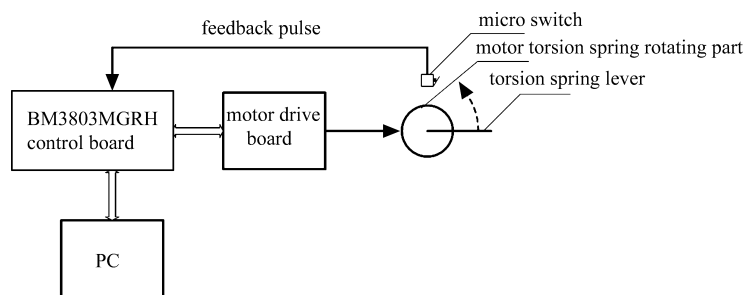


图 2 系统原理框图

Fig.2 System block diagram

系统主要包括 BM3803FMGRH 主控板、步进电机驱动器、步进电机及扭簧旋转部件。当主控板接受来自星载平台信号后, 主控板通过分析指令的功能产生脉冲宽度调变 (Pulse width modulation, PWM) 波以及相关控制信号送入驱动板, 驱动步进电机旋转到目标位置, 触发微动开关产生反馈脉冲, 反馈脉冲产生中断, 使电机保持。当定标完成后, 步进电机带动凹面反射镜回转至初始位置。

3 系统硬件电路设计

系统硬件电路的设计包括 BM3803FMGRH 控制电路、步进电机驱动电路以及电机扭簧转动部件, 实现凹面反射镜光路的切换。

电机扭簧转动部件包括凹面镜支撑组件、扭簧档杆、扭簧活动臂、力矩测试轮、微动开关以及扭簧弹簧支撑组件这几个部分成, 结构图如图 3 所示。

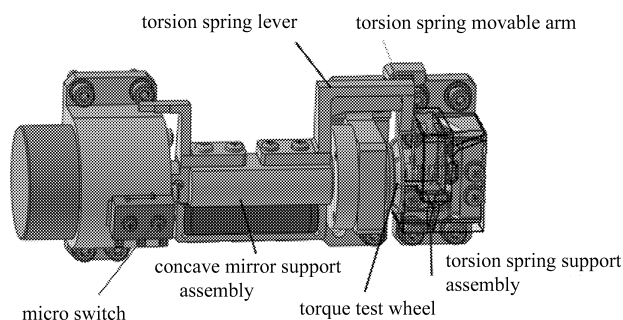


图 3 电机扭簧转动部件

Fig.3 Motor torsion spring rotating parts

电机带动扭簧转动的平稳性很高, 可以直接将凹面反射镜放置在凹面镜支撑组件上, 实现凹面反射镜的旋转。商用步进电机配线的四种颜色红、绿、蓝、黑分别代表电机绕组的 A+、A-、B+、B- 信号, 四相信号线直接连接到步进电机驱动板的电机驱动处, 由驱动器产生电机运转的电流信号, 如图 4 所示。而在航天步进电机的使用中, 是直接测量配线确定各相序。

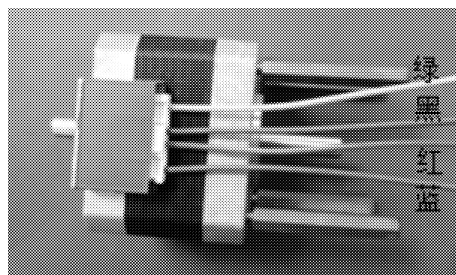


图 4 步进电机连线与相序

Fig.4 Stepper motor wiring and phase sequence

3.1 BM3803FMGRH 控制电路

系统采用的是 772 所的 BM3803FMGRH 国产芯片, 该芯片作为航天主流芯片, 得到了广泛的应用。主控芯片分析指令功能, 产生 PWM 驱动时序。主控芯片的外围电路图如图 5 所示。

控制电路由 BM3803MGHR 芯片、看门狗复位电路、线性电源稳压电路、晶振电路和存储器电路组成。晶振电路采用外部 10 MHz 晶振以及典型的 $0.1 \mu\text{F}$ 的去耦滤波电容。通过内部倍频模块, 处理器可获得 80 MHz 的主频。倍频模块通过拨码开关实现不同的倍频值。复位电路采用微处理器监控芯片 TP3823, 可以通过外部按键和内部看门狗复位, 提高了系统可靠性和工作效率。电源电路为 +5 V, 通过 LT1764 芯片转换为 1.8 V 和 3.3 V, 为处理器提供内核电源。通过处理器的通用型输入输出端口 (General-purpose input/output, GPIO) 作为电机驱动控制和反馈信号端口, 实现电机的驱动和微动开关的反馈信号控制。

3.2 电机驱动电路

电机接口驱动采用的是德州仪器公司的高性能 H 桥直流电机驱动芯片作为步进电机的驱动, 该驱动控制简单、响应速度快、可对运行状态进行检测。该芯片集成有互补式金属氧化物半导体 (Complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 控制电路和金属氧化物半导体场效应晶体管 (Double-diffused metal oxide

semiconductor field effect transistor, DMOS) 功率器件, 连续额定输出电流达 3 A, 峰值输出电流可达 6 A, 峰值输出电压高达 55 V, 具有温度报警、短路和过热保护功能、兼容晶体管 - 晶体管逻辑 (Transistor-transistor logic, TTL) 和 CMOS 电平以及提供电流取样输出端。通过与主处理器 GPIO 端口的通讯, 接受来自处理器两组的 PWM、Direction 和 Brake 输出。驱动电路如图 6 所示。

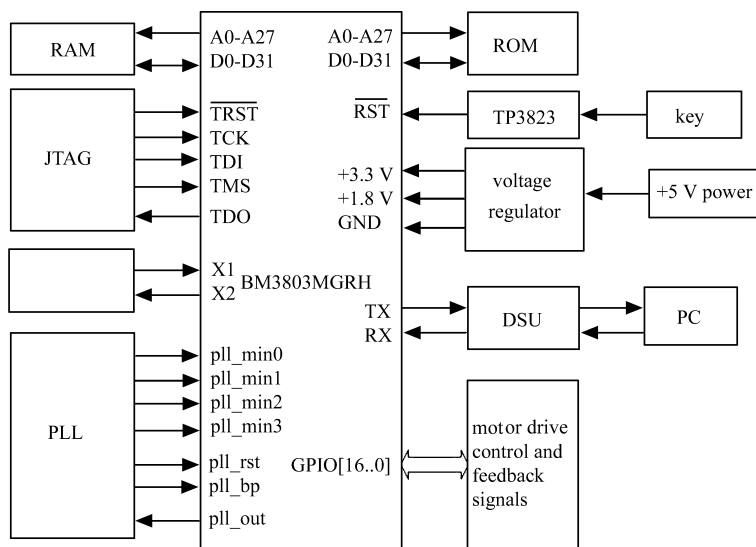


图 5 BM3803MGRH 控制电路框图

Fig.5 Block diagram of BM3803FMGRH control circuit

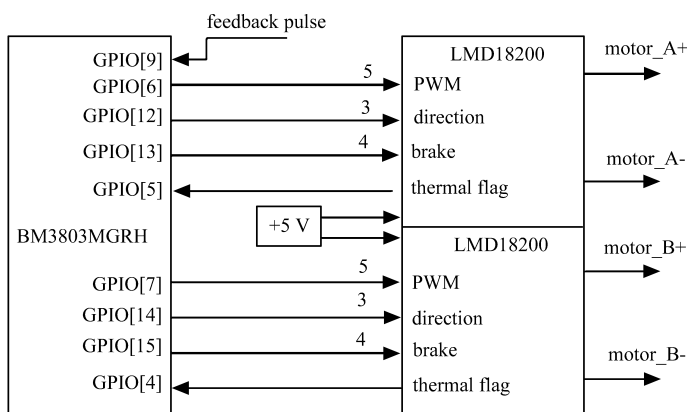


图 6 步进电机驱动电路功能框图

Fig.6 Functional block diagram of the stepper motor drive circuit

系统输入电源为 5 V, 直接作为驱动芯片 LMD18200 的供电电源。BM3803 发出脉冲指令进入驱动芯片, 而驱动芯片在接收到指令之后, 产生驱动信号控制步进电机的 A、B 相电流的流向和大小。从而驱动部件电机的转子进行转动。输入驱动芯片的 PWM 信号通过调整占空比实现步进电机电流大小的调节, 并与方向信号和停止信号一起, 控制电机的转动方向。在实际使用的时候, 脚 3 接方向信号, 脚 5 接 PWM 信号, 脚 4 接停止信号, LMD18200 控制信号和步进电机转向关系如表 1 所示。BM3803 的 GPIO[6]、GPIO[7] 作为 PWM 波的输出, GPIO[12]、GPIO[15] 分别作为 LMD18200 的方向和刹车控制信号。

表 1 LMD18200 控制信号和电机工作状态的关系

Table 1 Relationship between LMD18200 control signal and motor working state

PWM	direction	brake	active output drivers	motor working state
H	H	L	Source 1, Sink 2	forward
H	L	L	Sink 1, Source 2	reverse
L	X	L	Source 1, Source 2	stop
H	H	H	Source 1, Source 2	stop
H	L	H	Sink 1, Sink 2	stop
L	X	L	_____	_____

注：H 表示高电平，L 表示低电平，X 表示任意电平。

步进电机的驱动芯片采用的是四线八拍控制，由于步进电机的转动是电流通过某一组绕组，产生了感应电动势，在与磁场的相互作用下开始转动。初始状态下，A+ 相通电产生保持力矩；当 B+ 相通电后，定子磁场旋转 90° ，吸引转子旋转 $1/4$ 齿距；A- 相通电、B- 相通电，定子磁场各旋转 90° ，吸引转子旋转 $1/4$ 齿距，4 步一个循环，每一次仅一组绕组通电，电机转动。A、B 相的通电次序如图 7 所示。

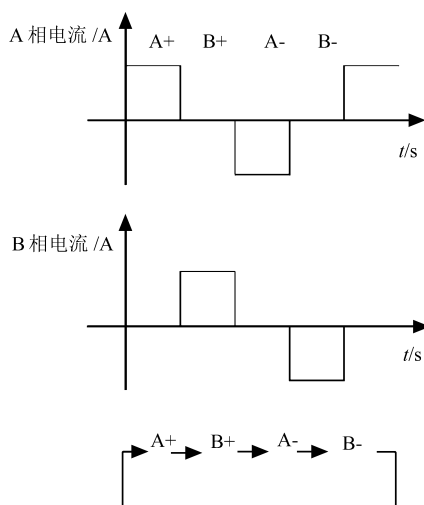


图 7 步进电机的 A 相和 B 相相序

Fig.7 Stepping sequence of the stepping motor A and B phases

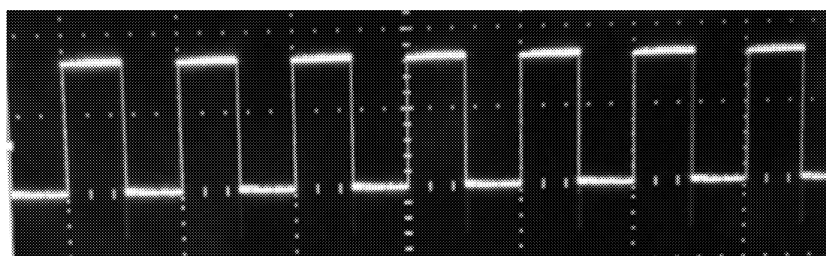


图 8 BM3803MGRH 产生的 PWM 波形 (频率为 10 K, 占空比为 50%)

Fig.8 PWM waveform of the drive motor generated by BM3803FMGRH (Cycle is 10 K, Duty cycle is 50%)

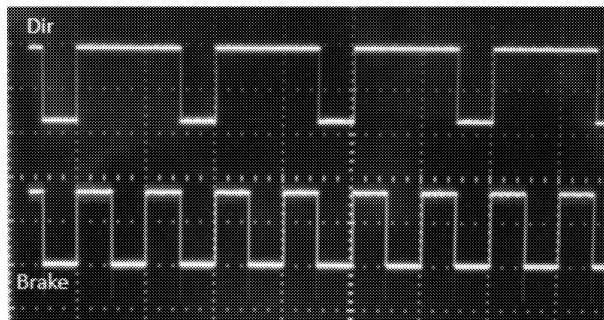


图 9 BM3803MGRH 产生的 Direction 和 Brake 时序

Fig.9 Direction and Brake timing generated by the BM3803FMGRH

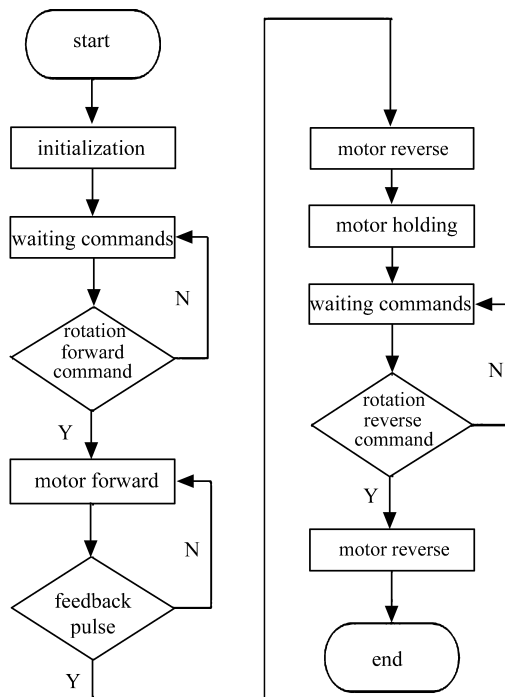


图 10 系统软件框图

Fig.10 System software flow chart

图 8 和图 9 分别为电转动时 BM3803FMGRH 产生的 PWM 波形以及 direction 和 brake 的时序图。可以看出控制板产生的 PWM、Direction 和 Brake 信号满足步进电机的控制时序, 完成了步进电机的驱动时序设计。

4 软件编程

整个系统需要完成的主要任务是: 旋转凹面反射镜到达指定位置; 控制板产生 PWM 波控制电机的运动以及与上位机的通讯。因此, 在 SPARC V8 兼容系列处理器的专用集成开发环境通过软件编程实现 BM3803 的控制功能。软件设计编程涉及到 BM3803 的 GPIO 端口、定时器、DSU 串口、存储器模块等。当系统上电后, 进行初始化, 同时定时器模块中的初始值设置为需要转动的脉冲个数初始值并设置 GPIO

的方向寄存器配置各个端口的输入输出, 电机转动部件在扭簧的保持力矩下, 停止在扭簧的不受力的零位置上, 然后上位机通过 DSU 串口发送旋转指令, BM3803FMGRH 接收到指令后, 产生 PWM、Direction 以及 Brake 脉冲, 驱动步进电机开始转动, 同时运行过程中 BM3803FMGRH 的 GPIO[9] 不断检测微动开关反馈的脉冲信号, 当接收到脉冲信号后, BM3803FMGRH 发送电机回转 10 步指令, 让凹面镜保持在当前光路位置; 等待 BM3803FMGRH 接收到定标完成指令后, 电机回转初始位置, 带动凹面反射镜旋转出主光路, 光谱仪开始采集地球光。软件流程图如图 10 所示。

由于步进电机在运输、火箭升空会受到振动、冲击的影响, 可能导致步进电机不在初始位置, 因此需要步进电机通过微动开关找到初始位置, 如图 11 所示, 为步进电机初始位置寻找和失步调整示意图。步进电机不在初始 0 位时, 步进电机启动后按照指令旋转, 将会到达目标位置触发微动开关, 即路线 1, 然后再按照路线 2 返回 89 步, 即可到达初始 0 位。当步进电机失步时, 按照同样运行流程。因此在步进电机上电前, 都需要进行初始位置确认。

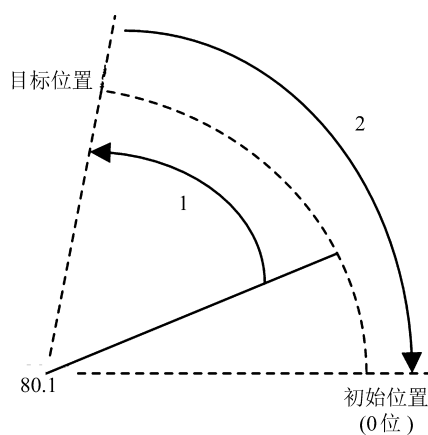


图 11 初始位置确认和失步调整

Fig.11 Initial position confirmation and out-of-step adjustment

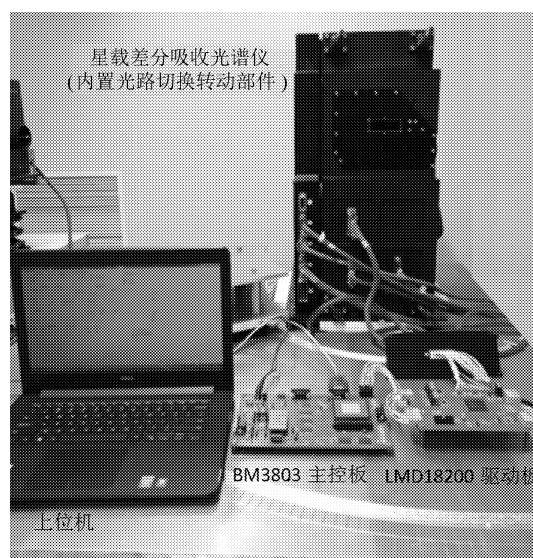


图 12 模拟光谱仪测试系统

Fig.12 Analog space-borne test system

5 实验验证与分析

通过上述硬件系统和软件系统设计, 搭建了基于 BM3803FMGRH 处理器的电机控制系统, 端模拟卫星平台, 搭建的模拟星载测试系统如图 12 所示。PC 端模拟卫星平台发送控制指令, 通过控制系统完成光路切换, 实现光谱仪的定标。图 13 所示为上位机界面图, 通过该界面, 能够调整步进电机实时状态并完成循环测试实验。首先在硬件上连接好电脑和主控板的串口线, 打开上位机界面, 打开串口, 设置好步进电机运行的参数, 包括转动步数、PWM、速度分频、起始相序、回退、定时时间等, 通过串口发送指令, 即可实现步进电机状态的调整。在参数设置中, 速度分频是为了调整步进电机的转速, 防止失步。起始相序是因为光路切换转动部件在固定好位置后, 步进电机的位置和转动步数也是确定的值, 因此设置好起始相序, 使步进电机从固定相序通电, 从而避免失步。当步进电机转动确定的步数后, 光路切换转动部件旋转出主光路后, 光谱仪开始定标。



图 13 上位机界面指令参数

Fig.13 Command parameters of host computer interface

5.1 步进电机的保持力矩

测试了不同 PWM 波不同占空比和电流的关系以及电机绕组电流和电机输出力矩的关系。如图 14 所示, 当占空比增大时, 电机绕组电流增大, 电机输出力矩也随之增大。

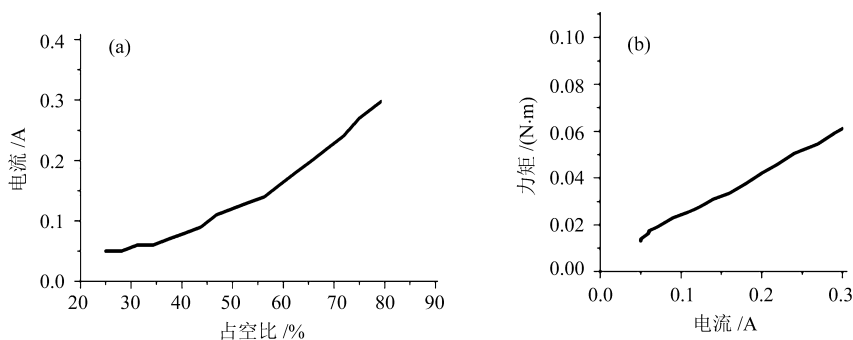


图 14 (a) 占空比和电流的关系图; (b) 电流和力矩的关系图

Fig.14 (a) Duty cycle vs current; (b) current vs torque

由于扭簧在转动的过程中, 力矩会不断的变化, 但是扭簧的最大阻力矩是确定的。因此, 为了克服扭簧的最大阻力矩, 通过调整步进电机的占空比, 带动不同质量的砝码转动, 获得了不同占空比下步进电机的保持力矩, 如表 2 所示

表 2 不同占空比电机的保持力矩

Table 2 Motor holding torque at different duty cycles

Duty cycles	Motor holding torque(g·cm)
10%	454
20%	680
30%	842

通过以上数据和图 14, 当占空比增大的时候, 步进电机的力矩增大。当占空比为 30% 的时候, 步进电机能够克服扭簧最大阻力矩 680 g·cm, 带动凹面反射镜转动。

5.2 光路切换部件可靠性测试

为了进一步的验证光切换部件的可靠性, 连续进行了三次循环测试实验以模拟光路切换部件的控制。实验主要测试的是步进电机的转动方向、步数、占空比、试验次数、微动开关导通及保持时间, 按照如下的流程进行重复性实验: 初始位置开始 - 顺时针旋转 89 步 - 压住微动开关并保持 2 s - 逆时针旋转 2 步 - 停留 300 s - 旋转出主光路停留 6 s。通过计数器统计每一次实验次数, 不同占空比和丢失步数统计如表 3 所示。

表 3 可靠性循环测试表

Table 3 Cycle Reliability Test Table

Experiment number	Duty cycle	Number of experiments	Number of Lost steps
1	30%	1000	0
2	40%	1000	0

通过可靠性循环测试实验, 步进电机顺时针旋转 89 步 (每步转动 0.9°) 的时候, 扭簧旋转了 80.1° , 可以将凹面反射镜旋转进入主光路, 所选择的占空比较小, 是因为扭簧的力矩较大, 步进电机需要克服扭簧的力矩。在不同占空比下的 3000 次实验中, 丢失的步数 0 次, 失步率为 0。

6 结 论

光路切换转动部件是星载大气差分吸收光谱仪定标的重要部件, 步进电机的转动特性会影响到光谱仪定标的质量。基于 BM3803 的显著优点, 利用 LMD18200 对光路切换转动部件的电机控制系统进行了设计。首先介绍了光路切换部件在星载大气差分吸收光谱仪的工作原理以及电机控制系统的整体设计方案, 然后从硬件电路设计和软件设计两个方面详细叙述了星载大气差分吸收光谱仪凹面反射镜控制的实现过程。实验结果表明, 此电机控制系统能够驱动凹面反射镜稳定转动, 光路切换转动部件在电机转动 89 步, 扭簧转动的角度为 80.1° , 能够触发微动开关, 实现光谱仪的定标, 这些都为后续星载大气差分吸收光谱仪的设计提供一定的参考。

参考文献:

- [1] Si Fuqi, Jiang Yu, Jiang Qingwu, *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).

- 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.
- [2] Zhao Minjie, Si Fuqi, Jiang Yu, *et al.* Design of calibration mechanism on space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(12): 295-301(in Chinese).
- 赵敏杰, 司福祺, 江 宇, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪定标机构设计 [J]. 光学学报, 2015, **35**(12): 295-301.
- [3] Zhou Haijin, Liu Wenqing, Si Fuqi, *et al.* Spectral calibration for space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(11): 2881-2885(in Chinese).
- 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光谱定标技术研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(11): 2881-2885.
- [4] Xu Heyu, Zhang Liming, Si Xiaolong *et al.* Design and performance evaluation of solar attenuation screen [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, **35**(03): 359-365(in Chinese).
- 许和鱼, 张黎明, 司孝龙, 等. 太阳衰减屏的设计及性能评估 [J]. 量子电子学报, 2018, **35**(03): 359-365.
- [5] Li Wei, Liu Lihong, Mou Wenxiu *et al.* On-board Computer Standard Design and Realization Based on BM3803 [J]. *Spacecraft Engineering*, 2012, **21**(2): 68-72(in Chinese).
- 李 伟, 刘丽红, 牟文秀, 等. 基于 BM3803 的星载计算机标准化设计与实现 [J]. 航天器工程, 2012, **21**(2): 68-72.
- [6] Zhan Panpan, Guo Tingyuan, Gao Jianjun, *et al.* Plug-and-play on-board computer system design based on BM3803 processor [J]. *Spacecraft Engineering*. 2013, **22**(6): 92-96(in Chinese).
- 詹盼盼, 郭廷源, 高建军, 等. 基于 BM3803 处理器的即插即用星载计算机系统设计 [J]. 航天器工程, 2013, **22**(6): 92-96.
- [7] Lin Fang, Wang Yu, Fu Yibin, *et al.* Design of stepper motor control circuit for satellite based on FPGA [J]. *Chinese Space Science and Technology*. 2017, **37**(3): 77-85(in Chinese).
- 基于 FPGA 的星载步进电机控制电路设计 [J]. 中国空间科学技术, 2017, **37**(3): 77-85.
- [8] Wang Wei, Lu Yihuai, Lu Fan, *et al.* Design of moving mirror control system of Fourier transform infrared spectrometer based on DSP [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2015, **32**(1): 8-16(in Chinese).
- 王 伟, 陆亦怀, 陆 钊, 等. 基于 DSP 的傅里叶变换红外光谱仪动镜控制系统设计 [J]. 量子电子学报, 2015, **32**(1): 8-16.
- [10] Jiang Fanming, Wang Tao, Yao Weilin. Design of open loop space stepper motor driver based on antifuse FPGA [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2017, **44**(9): 54-59, 66(in Chinese).
- 蒋范明, 王 涛, 姚惟琳. 基于反熔丝 FPGA 的纯开环星载步进电机驱动器设计 [J]. 电机与控制应用, 2017, **44**(9): 54-59, 66.