

文章编号 1004-924X(2022)02-0170-08

天问一号高分辨率相机反熔丝 FPGA 软件系统设计

张博威¹, 王 栋^{1*}, 何云丰¹, 闫得杰¹, 关海南¹, 吴凡路^{1,2}
(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. 中国科学院 月球与深空探测重点实验室, 北京 100101)

摘要: 天问一号执行的任务属于深空探测任务, 其上高分辨率相机主控单元工作时间较长, 为了提高主控 FPGA 的抗单粒子效应及可靠性, 选用反熔丝 FPGA 进行软件系统设计。其中, 主控 FPGA 管理的调焦单元、时间码守时校时等功能为安全关键项目。为提高软件的健壮性, 主控 FPGA 根据调焦机构的光机结构, 设计基于加减速曲线的二细分控制方法, 在满足调焦速度的前提下, 避开机构共振频率, 实现步进电机驱动调焦机构平稳的运转; 同时, 天问一号环绕器在环火段位置时, 高分相机需要执行拍摄任务, 拍摄指令为延时指令, 对时间有较高要求, 在此基础上主控 FPGA 设计时间码守时校时功能, 确保高分相机在任务段精确执行拍摄任务。实验结果表明: 调焦机构速度爬升时间为 112.2 ms; 时间守时的精度为 1.25 s。实现了调焦单元的平稳运行和可靠的守时系统。

关键词: 反熔丝 FPGA; 步进电机; 加减速曲线; 星时管理

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223002.0170

Design of Tianwen-1 high-resolution camera anti-fuse FPGA software system

ZHANG Bowei¹, WANG Dong^{1*}, HE Yunfeng¹, YAN Dejie¹, GUAN Hainan¹, WU Fanlu^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100101, China)

* Corresponding author, E-mail: wangd@ciomp.ac.cn

Abstract: In the context of deep-space exploration, such as the Tianwen-1 mission, reliability over a long working time is an essential requirement for the main control unit of the high-resolution camera. To improve the anti-single event effect and reliability of the master FPGA, an anti-fuse FPGA is used for the software system design. Functions such as focusing unit control, time code punctuality, and time correction, managed by the master FPGA, are safety-critical items. To improve the robustness of the software, the main control FPGA design employs a two-division control method based on the acceleration and deceleration curve for the optical-mechanical structure of the focusing mechanism. A stepper motor driver is

收稿日期: 2020-09-21; 修订日期: 2020-11-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 42001345); 中国科学院月球与深空探测重点实验室开放基金资助项目 (No. LDSE201901)

used to match the focusing speed and avoid the resonance frequency of the mechanism, for the focusing mechanism to run smoothly; at the same time, when the Tianwen-1 surround is in the ring fire section, the high-resolution camera needs to perform shooting tasks by following delayed commands, creating a requirement for highly accurate timing. Thus, the master control FPGA design must ensure time code punctuality and timing function such that the high-resolution camera accurately executes the shooting task. The experimental results show that the movement time of the focusing mechanism is 112.2 ms and the accuracy of time keeping is 1.25 s. The design satisfies the requirements of a stable operation of the focusing unit and reliable timing.

Key words: anti-fuse FPGA; stepper motor; acceleration and deceleration curve; star time management

1 引言

环绕器有效载荷分系统高分辨率相机(以下简称高分相机)是“天问一号”火星探测环绕器上安置的有效载荷之一,其主要科学任务是获取火星表面重点区域的高分辨率影像,观测火星表面地质现象的形成和变化过程,为着陆探测优选合适区域提供基础数据和科学依据。

高分辨率相机软件系统配置项划分的原则是以电子学子系统硬件功能需求来划分。分系统电子学上分为主控及存储处理子系统和成像子系统。其中高分辨率相机主控接口扩展逻辑FPGA属于主控及存储处理子系统,安装在高分相机主控箱内的主控板上。主要完成RS422通信、1553B通信控制、EMIF地址译码、调焦控制、编码器采集、热控采集等功能。

主控接口扩展逻辑FPGA和存储处理FPGA、成像控制FPGA、载荷控制器FPGA之间采用RS-422串行通讯和选通信号进行信息交互,接收由载荷控制器FPGA发出的秒脉冲信号和遥控指令,采用差分传输方式采集绝对编码器数据,按一定占空比的斩波信号对步进电机实现启动和转向控制,与主控DSP之间采用地址译码的形式进行数据的交互,接收看门狗复位处的复位信号,采集16路热控温信号和4路热控测温信号并通过热控开关实现加热功能^[1-5]。

2 主控FPGA系统构成及其工作原理

2.1 主控FPGA系统的运行环境

图1为主控接口扩展逻辑FPGA外部接口。

芯片选用ACTEL公司的反熔丝器件A54SX72 A-1-CQ208M,此芯片具有108 000个系统门。FPGA与CPU接口关系为20根地址线、32根数据线、以及CPU读写片选等信号。该FPGA主要用于产生CPU外围设备读写、片选等接口信号,产生调焦步进电机驱动的控制信号,产生16路热控控制信号,程控指令的锁存与处理,实现四路RS-422接口,实现CPU与1553B之间的接口。

其中,主控FPGA与步进电机和绝对编码器之间的通信构成调焦单元,主控FPGA与主控DSP和秒脉冲电路构成星时管理模块。

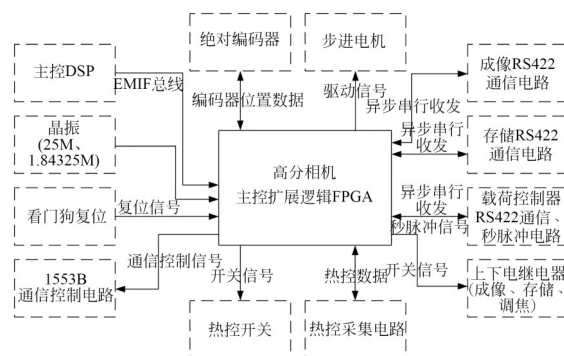


图1 主控接口扩展逻辑FPGA外部接口

Fig. 1 Main control interface extended logic FPGA external interface

2.2 主控FPGA系统的工作原理

相机控制器单元采用抗辐照的DSP+FP-GA的构架组成核心处理器控制单元,完成系统的运控管理、内外部通信管理、主动热控策略的控制、调焦位置的计算、像移补偿参数及偏流角的计算、成像子系统控制、存储及处理子系统控制;为了降低由于平台姿、轨参数广播延时带来

的像移补偿误差,高分相机的控制系统接收载荷控制器转发的环绕器平台姿态参数、轨道参数以及雷达测高参数。相机控制器通过 1553B 总线接收有效载荷管理单元的数据注入,作为一个 RT 地址接入有效载荷通信数据网,根据接收的工作命令进行相应工作。相机控制单元与成像子系统、调焦编码器、存储处理单元采用 RS422 串行通信进行信息传递。

高分辨率相机主控接口扩展逻辑 FPGA 属于相机主控单元,安装在高分相机主控箱内的主控板上。图 2 为主控接口扩展逻辑 FPGA 运行环境图,高分相机主控箱是相机的综合控制和功能管理中心,负责对高分相机进行管理和控制,通过外部的数据和控制接口的输入指令及参数完成 CCD/CMOS 成像控制、存储处理控制、调焦控制、调光控制、热控控制等规定的功能。^[6-7]

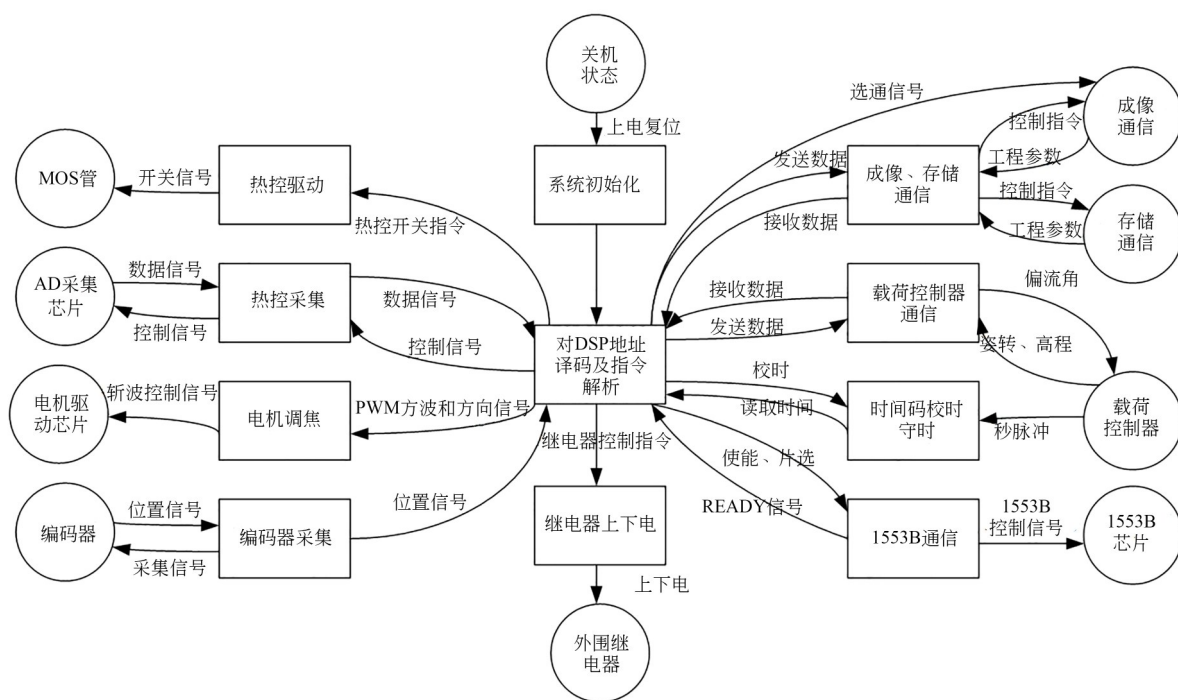


图2 主控接口扩展逻辑FPGA运行环境

Fig. 2 Main control interface expansion logic FPGA operating environment diagram

3 调焦单元步进电机控制算法

3.1 调焦单元的设计

为了能适应运载条件、空间环境以及探测轨道变化对高分相机成像质量的影响,高分相机设置了调焦功能,通过对地面站接收到的图像进行质量评估,采取地面注入方式进行在轨调焦,或根据高分相机温度水平以及探测距离进行在轨调焦^[8-10]。

相机控制器的FPGA作为调焦控制的核心单元,读取编码器信息,判断调焦位置是否到达,如果调焦位置未到,则控制驱动器,使得步进电机转动,从而带动调焦镜到达期望调焦位置。

高分相机的调焦采用德国Phytron公司的宇航级两相混合式步进电机和以色列Netzer公司

的成熟产品18位绝对式编码器以闭环的方式实现。

考虑到调焦控制是短期的任务行为,且执行次数很少,风险可控,因此根据系统总体设计,对调焦电机不进行备份设计和双绕组设计,对应主控单元中的电机驱动部分也不进行备份,编码器虽然也不进行备份设置,但主控单元中的编码器接收通信电路进行了备份设计,以应对通信失效。系统总体功能框图如图3所示。

3.2 基于S型曲线的2细分控制模式

主控FPGA根据地面发送的信息发送斩波脉冲信号和方向信号,控制电机转动。该步进电机采用半步控制的方式(0.9°),在启停位置加入S形加减速曲线为基础,用四相八拍的2细分工

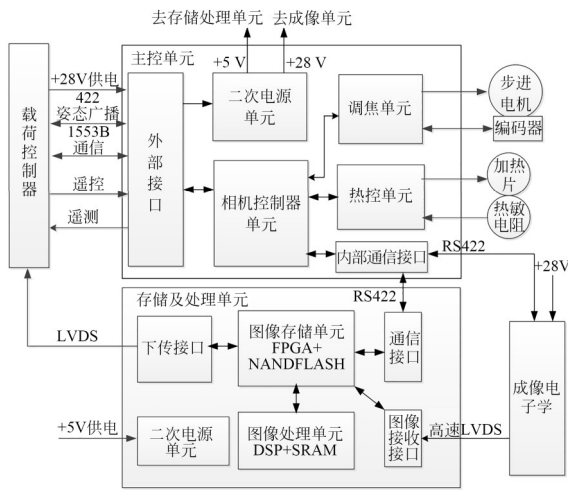


图 3 系统总体功能框图

Fig. 3 System overall functional block diagram

作方式转动。电机相电流的大小采用斩波控制的方式,而实际输入给步进电机的信号是从LMD18200输出的,设备采用的步进电机有A、B、C、D四相,其中A、B相连,C、D相连;以A、B两相为例,当PWM_A的占空比为70%(70%为电机相对调焦机构留有5倍裕量的力矩大小,占空比误差范围为±5%),DIR_A为‘1’,则A、B之间占空比为70%,相电流方向为A流向B;当PWM_A的占空比为70%,同时DIR_A为‘0’,则A、B之间占空比为30%,相电流方向为B流向A。按照以上关系,LMD18200按照电机控制时序,输出占空比信号,并控制电流方向信号,实现步进电机正反转。其中,电机正转按0,1……7,0的方向,反转按7,6……0,7的方向。当正向运动时,电机顺时针旋转,编码器数值增大;当反向运动时,电机逆时针旋转,编码器数值减小。

由于调焦方案选用的德国Phytron电机电阻较小,为了实现电机的开环控制,需采用恒流斩波控制方式,输出驱动步进电机的四相八拍时序。以下计算占空比及设计驱动波形。

以AB相为例,如图4所示为步进电机AB相电路图。

$$U=iR+L\frac{di}{dt}.$$

以上式来确定到达额定电流所需时间 t_0 。驱动波形及电流示意图见图5。如采用+15V电压驱动试验用电机,在 $0\sim t_0$ 时间内,以+15V电压驱动电机, $t_0\sim t_1$ 阶段以恒定占空比驱动电机

($2.5\times0.35/15$)。表1为电机四相八拍工作时序表。调焦电机模块内部单元结构图如图6所示。

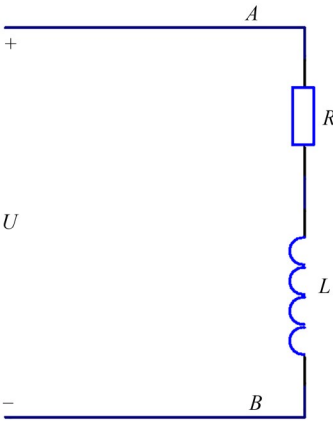


图 4 步进电机 AB 相电路

Fig. 4 System overall functional block diagram

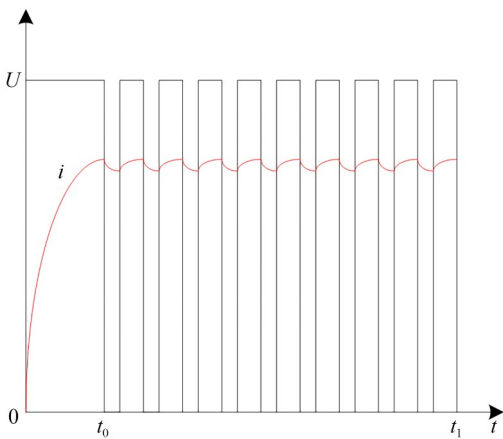


图 5 驱动波形及电流示意图

Fig. 5 Schematic diagram of driving waveform and current

表 1 电机四相八拍工作时序表				
Tab. 1 Motor four-phase eight-beat work timing table				
STEP	电机相电流方向			
正转	A	B	C	D
0	→			→
1	无			→
2	←			→
3	←			无
4	←			←
5	无			←
6	→			←
7	→			无

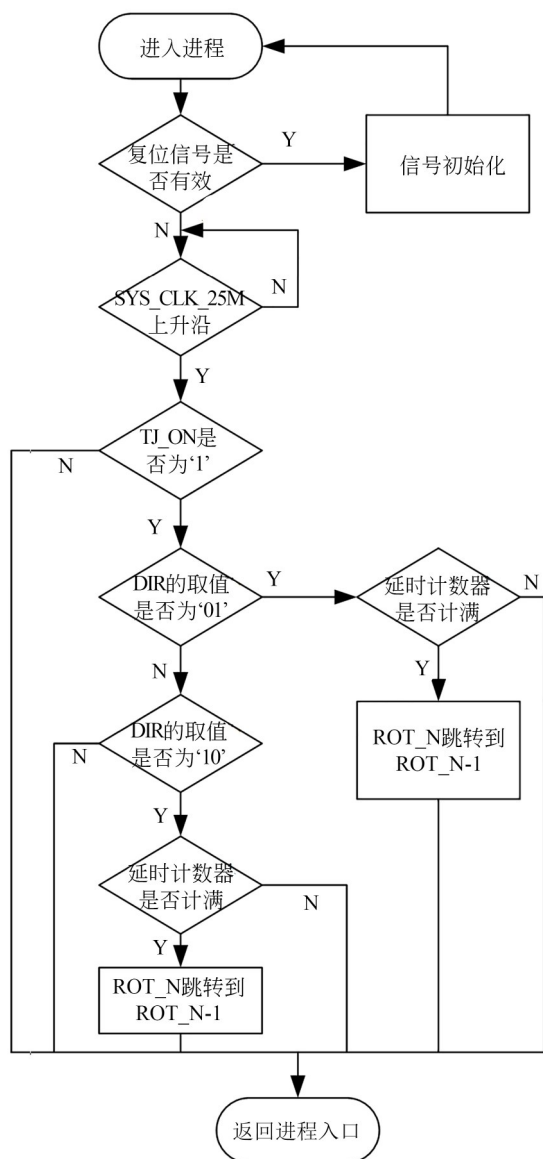


图 6 调焦电机模块内部单元结构

Fig. 6 Internal unit structure diagram of the focusing motor module

调焦模式开始时,调焦模块上电,主控 DSP 通过与主控接口扩展逻辑 FPGA 的地址译码控制调焦指令。当检测到调焦指令开时,电机开始转动;根据方向指令电机逆时针或顺时针转动,直到运行到目标步数。

4 时间码守时校时系统

星上的时间码由于经 1553B 传输,当高分相机接收到后,会产生时间的延迟,在此基础上加入了秒脉冲信号辅助修正^[11]。图 7 为秒脉冲接口时序图。

针对以上问题,主控 FPGA 设计一套守时校时策略,方法如下:

(1) 自守时功能,守时时钟 25 M,晶振误差为 ± 50 PPM ($\pm$ 百万分之 50),每计 1 s,误差在 $\pm 50 \mu\text{s}$ 之间;主时钟每周期为 40 ns,故 25 000 周期为 1 ms;自守时的时钟计数器分为 4 字节的秒寄存器和 2 字节的毫秒寄存器,高分相机的系统时间采用自守时的时钟计数器的时间。

(2) 校时功能,有两个校时影响因素,一个是秒脉冲信号,一个是 DSP 发送的平台时间码。当接收秒脉冲信号后,启动延时计数器计时;当收到 EMIF 写入的平台时间码时,FPGA 在收到平台时间码加上延时计数器计的值做为新的时间码,更新到自守时的时钟计数器中,同时清零延时计数器;

(3) 当秒脉冲到来超过 1.25 s 后,主控接口扩展逻辑 FPGA 仍未收到校时时间码,延时计数器清零,时间系统按照内部自守时的时钟执行。

(4) 当只收到校时平台时间码时,秒脉冲信号缺失,采用校时平台时间码更新自守时计数器。

(5) 秒脉冲信号、平台时间码都缺失时,时间

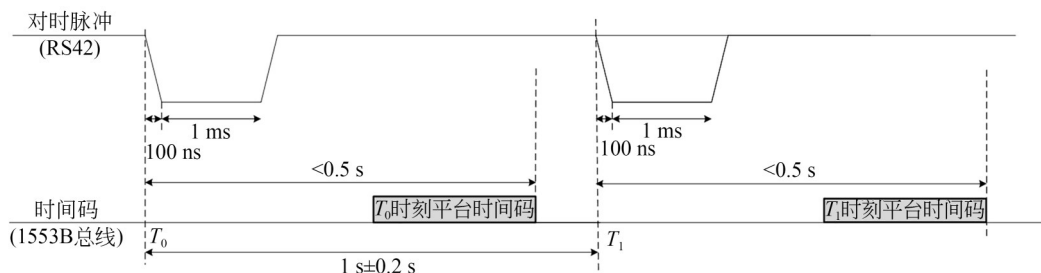


图 7 秒脉冲接口时序图

Fig. 7 Second pulse interface timing diagram

系统按照内部自守时的时钟执行。
时间码校时守时示意图如图 8。

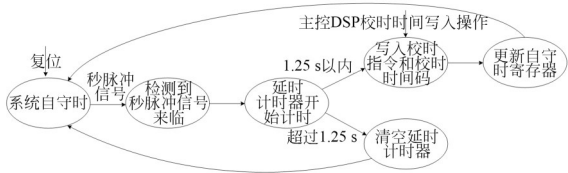
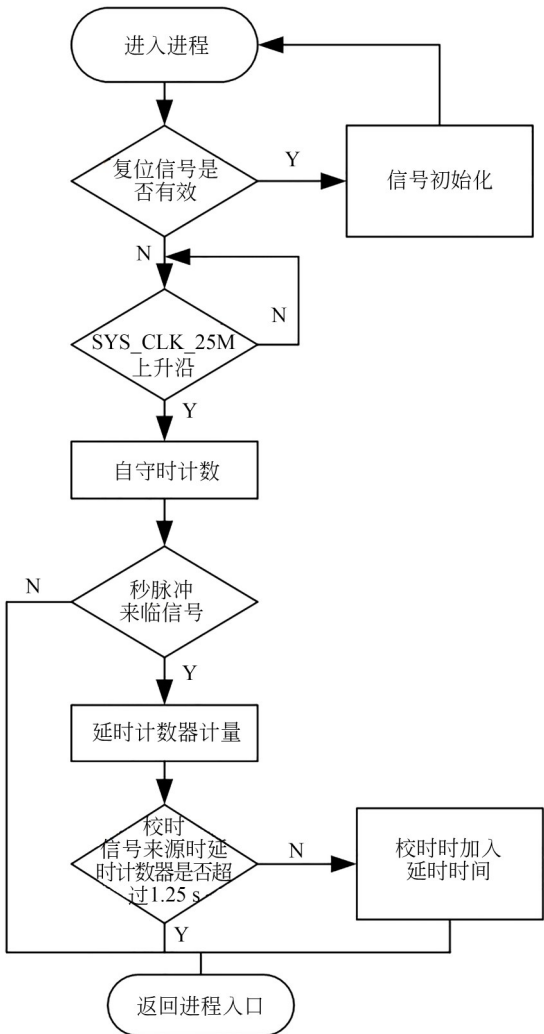


图 8 时间码校时守时示意图
Fig.8 Schematic diagram of time code correction and punctuality

时间码校时守时流程见图 9：
(1)复位初始化后，系统进入自守时状态，自守时秒计数器和毫秒计时器清零并开始计时，当检测到秒脉冲信号来临后，延时寄存器开始计时；



(2)当延时寄存器超过 1.25 s 后，主控接口扩展逻辑FPGA 仍未收到校时时间码标志信号，延时计数器清零，时间系统按照内部自守时的时钟执行。
(3)当延时寄存器在 1.25 s 内收到校时时间码标志信号，延时计数器清零，同时将延时计数器内的数值与校时时间码的时间相加，赋给自守时计数器。

5 测量实验与结果

为保证电机不产生“失步”现象，需要对电机的矩频特性进行测试。
为此，搭建了步进电机矩频试验测试环境，测量不同电流不同转速下的提起物块的质量。试验中采用+15 V 驱动电机，在 0~ t_0 时间内驱动电机， $t_0 \sim t_1$ 以恒定占空比控制电机。表 2 和图 10 是电机矩频特性的试验结果，由试验数据可知，在步进电机绕组电流为 0.56 A，转速为 10 转/分时，电机力矩为 0.165 N·m，且力矩大小受转速的影响并不大，由此可知电机实际力矩达到指标

表 2 不同电流不同转速下的提起物块的质量
Tab.2 Mass of the lifted block under different currents and different speeds

电流/A	半步时间/s	悬挂物块最大质量/g
0.18	0.003 125	350
0.18	0.006 25	550
0.18	0.012 5	600
0.18	0.025	650
0.18	0.05	650
0.18	0.1	650
0.44	0.003 125	1 250
0.44	0.006 25	1 400
0.44	0.012 5	1 450
0.44	0.025	1 450
0.44	0.05	1 450
0.44	0.1	1 500
0.56	0.003 125	1 400
0.56	0.006 25	1 550
0.56	0.012 5	1 650
0.56	0.025	1 650
0.56	0.05	1 650
0.56	0.1	1 700

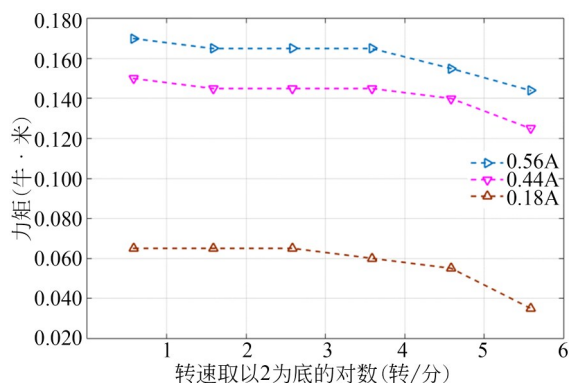


图 10 电机矩频特性曲线

Fig. 10 Motor torque frequency characteristic curve

与电机标称力矩指标一致。

在力矩满足的基础上,根据上述调焦机构的控制算法设计,设点击运行 100 步,结果如图 11~14。

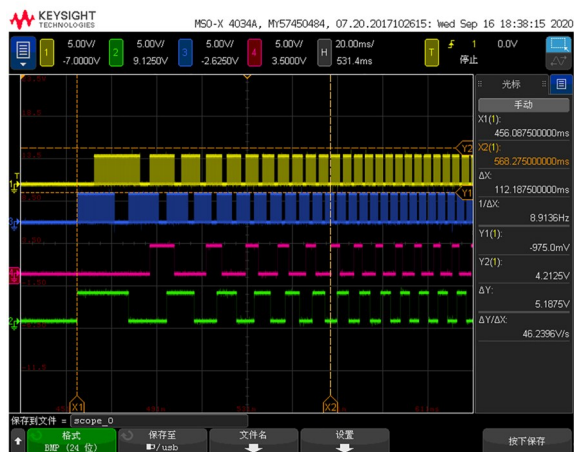


图 11 调焦电机加速段

Fig. 11 Focus motor acceleration section

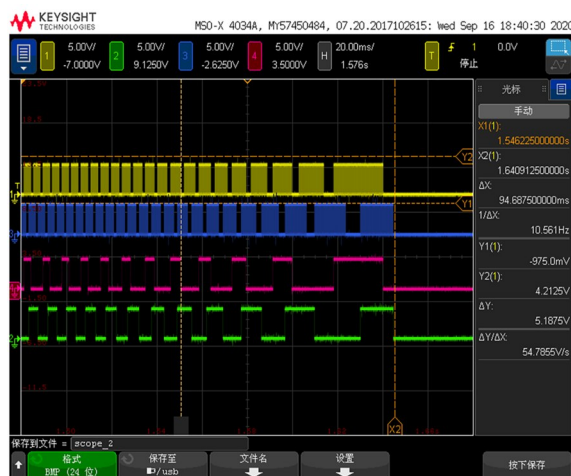


图 13 调焦电机减速段

Fig. 13 Focus motor deceleration section

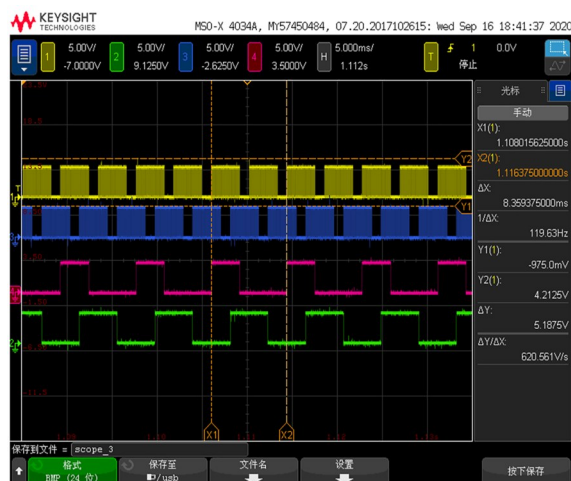


图 14 调焦电机匀速段

Fig. 14 Constant speed section of focusing motor

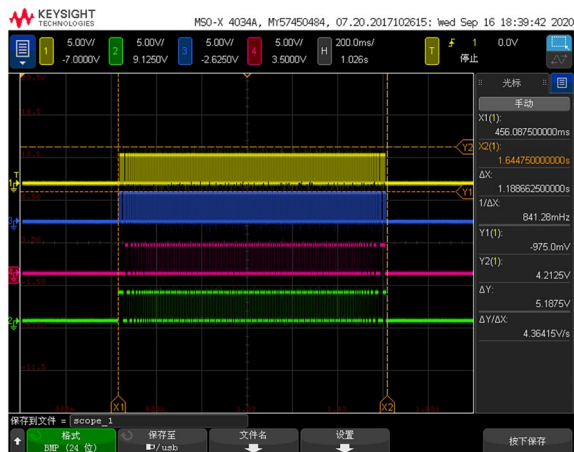


图 12 调焦电机调整时间

Fig. 12 Focus motor adjustment time

6 结 论

本文根据火星探测中对高分相机主控单元可靠性的要求,提出了基于反熔丝FPGA对调焦电机加减速和一种可靠的星时管理方法,并介绍了主控FPGA的软硬件结构和工作原理。研究了在减少结构振动的前提下快速调焦的控制方式,并提高了星时管理的鲁棒性。实验结果证明:调焦机构速度爬升时间为 112.2 ms;时间守时的精度为 1.25 s。

参考文献:

- [1] 陈昌亚,方宝东,俞洁. 远征火星[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.
CHEN C Y, FANG B D, YU J. *Expedition to Mars* [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 侯建文,张晓岚,王燕. 火星探测征程[M]. 北京:中国宇航出版社,2013.
HOU J W, ZHANG X L, WANG Y, et al. *Mars Exploration Journey* [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2013. (in Chinese)
- [3] 王维,董吉洪,孟庆宇. 火星探测可见光遥感相机的发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 208-214.
WANG W, DONG J H, MENG Q Y. Current status and developing tendency of visible spectral remote sensing camera for Mars observation[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 208-214. (in Chinese)
- [4] 王宇虹. 长征五号火箭成功发射天问一号火星探测器[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(4): 101, 2.
WANG H Y. The Lone March-5 rocket successfully launched the Tianwen-1 Mars probe[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2020(4): 101, 2. (in Chinese)
- [5] 禹应时. 基于FPGA的高速数据采集系统设计[D]. 北京:北京理工大学, 2011.
YU Y S. *Design of High-speed Data Acquisition System Based on FPGA* [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [6] 刘海堂. 揭秘反熔丝FPGA的安全性[J]. 信息通信, 2017, 30(10): 36-38.
LIU H T. Uncovering the security of anti-fuse FPGA[J]. *Information & Communications*, 2017, 30(10): 36-38. (in Chinese)
- [7] 王刚,李平,李威,等. 反熔丝的研究与应用[J]. 材料导报, 2011, 25(11): 30-33.
WANG G, LI P, LI W, et al. Research and application of antifuse[J]. *Materials Review*, 2011, 25(11): 30-33. (in Chinese)
- [8] 姜志国,韩冬兵,袁天云,等. 基于全自动控制显微镜的自动聚焦算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(4): 396-401
JIANG Z G, HAN D B, YUAN T Y, et al. Study on auto focusing algorithm for automatic microscope [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(4): 396-401 (in Chinese)
- [9] 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.
JIANG F M, WANG T, YAO W L. 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)
- [10] 吴晓波,安文斗,杨钢. 图像测量系统中的误差分析及提高测量精度的途径[J]. 光学精密工程, 1997, 5(1): 133-141.
WU X B, AN W D, YANG G. Error analysing and approaches of improving measuring precision in image measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(1): 133-141. (in Chinese)
- [11] 薛芳侠,姚益平,谢虹,等. 分布交互式仿真中的高性能时钟设计问题研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23(5): 115-118.
XUE F X, YAO Y P, XIE H, et al. Design of high performance clock used in distributed interactive simulation system [J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(5): 115-118. (in Chinese)

作者简介:



张博威(1988—),男,辽宁葫芦岛人,硕士,助理研究员,2011年、2015年于东北大学分别获得学士、硕士学位,主要从事航天运动控制系统设计等方面的研究。E-mail: avkatdongda@163.com



王栋(1979—),男,山西阳泉人,博士,研究员,硕士生导师,2002年于长春理工大学获得学士学位,2007年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事空间光学遥感器总体设计、空间电子学总体设计、数字图像处理等方面的研究。E-mail: wangd@ciomp.ac.cn