

文章编号 1004-924X(2009)11-2800-06

空间光学遥感器偏流机构控制单元的 闭环实时模拟检测

于 平, 吴伟平

(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:为了精确监视空间光学遥感器偏流机构控制单元的工作状态, 测试其功能、性能和可靠性, 提出了一种闭环实时高速检测控制单元的方法。结合计算机技术, 设计了检测系统。使用该系统分析控制脉冲, 根据偏流机构的控制策略形成模拟编码器信息, 并将其反馈给控制单元, 实现对偏流控制策略、驱动能力和错误处理的检测。对脉冲频率为 1.2 kHz、编码器最小反馈间隔为 10 ms 和反馈偏差在 ± 1 码值之内的偏流控制系统进行了检测, 结果表明, 此方法可实时准确地监视空间光学遥感器偏流控制单元的工作状态, 覆盖全部控制策略路径, 完全满足偏流控制单元的闭环实时检测需要。

关键词:空间光学遥感器; 偏流角; 闭环检测; 实时模拟

中图分类号: TP73; V243.5 **文献标识码:** A

Closed-loop simulation and testing of control cell of drift angle for space optical remote sensor in real time

YU Ping, WU Wei-ping

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

Abstract: In order to monitor the working state of a control cell of drift angle for an optical remote sensor and to test its function, performance and reliability, a closed-loop test method for the controlling cell of adjusting drift angle in real time was given. Using this method and the computer technology, a testing system was designed to analyse the controlling signals and form the information of a coder by the control tactic of drift angle. Then, the information of the simulation coder was feededback to the controlling cell to realize the tests for the control tactic, driving ability and the error disposal. The controlling cell of adjusting drift angle was tested in a work frequency of 1.2 kHz, a least interval of coder feedback of 10 ms and the warp of feedback less than ± 1 code. The experimental results show that the testing system can exactly monitor the working state of the controlling cell of drift angle for the remote sensor and can cover the entire path in the control tactic, which totally satisfies the re-

收稿日期: 2008-12-09; 修订日期: 2009-02-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60538020)

quirements of the controlling cell of drift angle for closed-loop and real time testing.

Key words: space optical remote sensor; drift angle; closed-loop test; simulation in real time

1 引言

空间光学传感器常采用 TDI-CCD 线阵推扫成像技术。在对高速动态目标成像时,TDI-CCD 线阵移动方向和行转移频率必须与目标像移的方向和速度相匹配,否则将对成像的质量造成影响。由于卫星的高速运动、姿态机动和成像目标随地球的自转等因素的影响,导致 TDI-CCD 线阵移动方向与目标像移的方向难以完全一致,一般会存在一定的角度偏差(称为偏流角),因此成像时应驱动偏流角(以下简称调偏流)调整机构,最大限度地减小偏流角,以保证成像的质量。

随着空间应用对空间光学传感器分辨率要求越来越高,连续成像时间不断加长,对调偏流的精度和性能要求也不断提高。目前对调偏流控制单元的检测主要依靠驱动实际电机,检查编码器反馈状态,辅以示波器等通用测试设备来完成,但这种方法难以在系统集成环境下模拟电机、编码器的错误状态,检验各种调偏流策略下控制单元的可靠性和驱动能力。为此,本文根据实际检测工作中遇到的问题 and 解决经验,总结出一种符合实际需要的闭环实时模拟检测方法,并研制了专用调偏流控制单元检测设备以满足检测工作的需要。

2 闭环实时模拟检测原理

2.1 调偏流控制原理

空间光学传感器调偏流部件的结构如图 1 所示,它由偏流控制单元(包括微处理器、电机驱动电路、RS-422 通信接口)、偏流机构和固定在其上的 TDI-CCD 组件(包括步进电机、编码器)等组成。

在准备成像前,微处理器根据卫星平台提供的当前轨道参数和姿态参数等信息,计算出当前偏流角,再根据控制策略换算成步进电机驱动脉冲数,驱动电路依据此脉冲数控制步进电机转动,

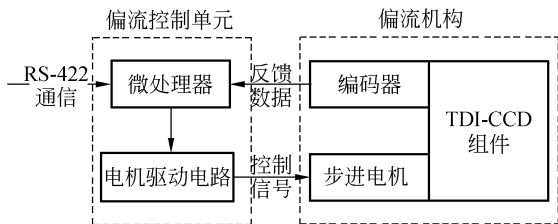


图 1 调偏流部件结构

Fig. 1 Construction of adjusting drift angle part

使偏流机构带动 TDI-CCD 组件旋转,达到补偿偏流角的目的。步进电机转动的同时,微处理器读取编码器当前值。根据编码器当前值确定偏流角是否已达到指定位置。如未达到,则重复以上步骤继续调整,直到满足指标要求;如已达到,则完成调偏流任务,可开始成像任务。

由于连续成像时间的延长,导致成像前调整好的 TDI-CCD 线阵移动方向,在成像的过程中随卫星、地球间的相对运动产生了偏移,使偏流角再次超出指标要求。这就要求能够迅速准确地微调偏流。当执行微调偏流功能时,偏流控制单元与编码器的通信更加频繁。电机控制策略更加复杂。这对模拟检测偏流控制单元的系统提出了更高的要求。

2.2 实时模拟检测原理

系统模拟是指通过系统模型的实验去研究一个已经存在,或是正在研究设计中的系统的具体过程,它集成了计算机技术、图形图像技术、自动控制技术等多学科高技术,并以数学理论、相似原理、信息技术、系统技术及应用领域有关的专业技术为基础,利用系统模型对实际的或设想的系统进行综合研究。它不是系统原型的复现,而是按研究的侧重或实际需要,对系统进行简化提炼,以利研究者抓住问题的本质。在空间光学传感器调偏流控制单元检测中,详细分析调偏流控制原理,构建了实时模拟调偏流检测模型,如图 2 所示。

实时模拟调偏流检测系统主要由电压调理模块、数据采集模块、数据处理模块、模拟反馈模块 4 部分组成。电压调理模块模拟电机负载检测驱动能力,并将驱动信号按固定比例调整到数据采集模块允许的电压范围内。数据采集模块将模

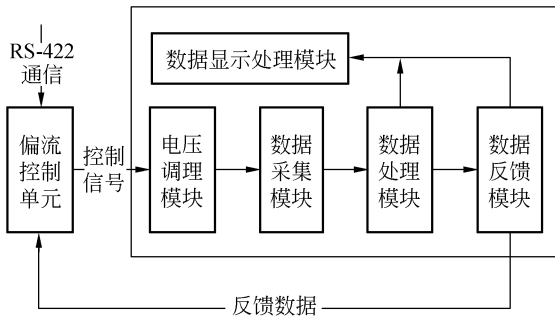


图 2 实时模拟调偏流检测模型

Fig. 2 Model of testing system of adjusting drift angle

拟信号转换成数字信号后,进入数据处理模块形成检测信息和反馈信息^[1-2],模拟反馈模块仿真编码器将反馈数据送回偏流控制单元完成闭环模拟功能^[3-4]。同时系统将反馈数据和检测信息送入数据显示处理模块,根据控制策略分析后形成最终的检测结果。

3 检测系统实现

3.1 系统方案的选择

为实现对偏流角的微调,根据实际系统的分析和实验,采用 1.2 kHz 的电机驱动脉冲,两次编码器反馈的最小间隔应达到 10 ms,反馈的响应时间不超过 2 ms,反馈值的偏差在±1 码值之内。当采用四相八拍的步进电机,偏流机构速比为 0.532 时,为将偏差限制在±1 码值之内,需每隔 $1/1.2 \text{ kHz} = 833.3 \mu\text{s}$ 将采集的数据经过分析后,及时送入模拟反馈模块,更新待反馈的数据。

若采用计算机结合数据采集卡、串口卡的设计,计算机需要每隔 $833.3 \mu\text{s}$ 分析一次采集到的数据,并及时将结果发送给反馈线程。当反馈线程收到偏流控制电路要求反馈的命令时,需要在 2 ms 内打包最新的数据并完成反馈。设分析数据占用 CPU 时间为 t_1 ,偏流控制单元发出要求反馈数据的命令到接收到反馈的时间为 t_2 ,且

$$t_1 + t_2 < 833.3 \mu\text{s} \quad (1)$$

检测系统须满足公式(1)才能够保证反馈命令得到及时响应且反馈码值的偏差满足要求。在表 1 所示的仿真环境下实际测量 t_2 至少需要 $940 \mu\text{s}$ (如图 3 所示)。此外,计算机还需完成准实时

显示和存储的功能,这需要占用大量处理器时间^[5]。

表 1 计算机反馈时间测试环境

Tab. 1 Environment of testing feedback time in PC

| 操作系统 | CPU | 内存 | 软件 |
|------------|-----------------|------|--------|
| Windows XP | Intel P 3.4 GHz | 1 GB | 通信仿真软件 |

因此需要将各个紧急的任务从计算机中分离出来,选择采用 FPGA(Field Programmable Gate Array,即现场可编程门阵列),将分析、反馈算法用逻辑电路并行完成,检测的结果发送给计算机系统,由计算机完成显示、存储等后处理的功能。

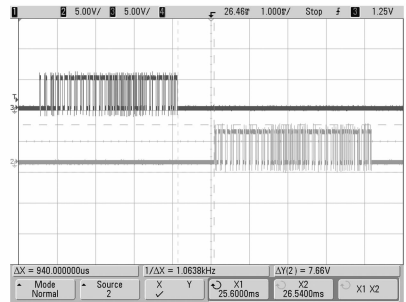


图 3 实测反馈的响应时间

Fig. 3 Time interval of feedback in real time

3.2 检测系统的设计

系统硬件的基本结构如图 4 所示,AD 芯片在 FPGA 的控制下采集经过分压调理后的控制信号,并在 FPGA 中处理后形成待反馈数据和检测数据,待反馈数据按协议通过串行接口实时传送给偏流控制单元,检测数据一旦充满缓冲,立即通过串行接口将数据传送给计算机系统^[6-7]。

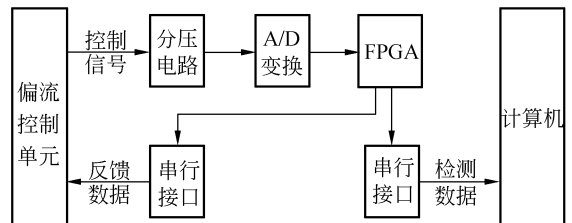


图 4 嵌入式板卡硬件结构示意图

Fig. 4 Sketch of hardware in embedded board

检测系统采用 Xilinx 公司的 Spantan-II (XC2S200)作为核心处理器件,支持系统时钟频

率达 200 MHz, 满足控制和处理的实时性要求, 且开发投资小, 性价比很高^[8]; AD 采样采用 MAX1308, 量化位数为 12 位, 四通道转换速率 1.26 μs, 对未来的扩展留有一定的余地; 通信芯片采用 MAX489, 支持 RS-422 和 RS-485 通信协议, 最高通信速度可达 250 kb/s; 计算机通过 CP132v 可变波特率串口卡接收检测数据。

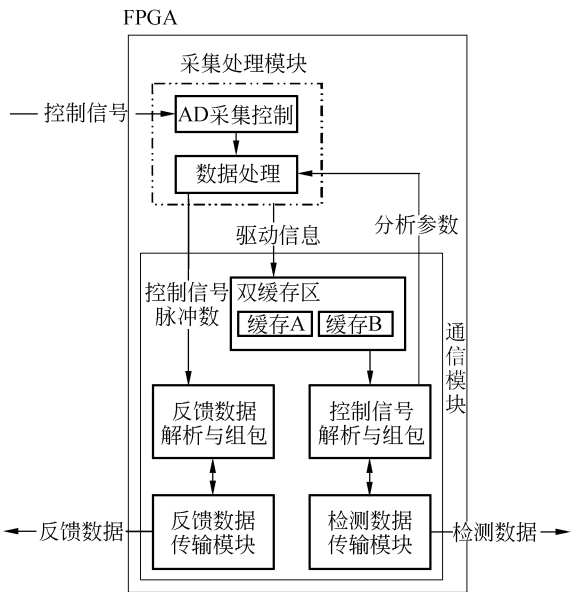


图 5 FPGA 内部模块功能
Fig. 5 Function in FPGA

其中 FPGA 内部功能模块主要包括两大模块, 即采集处理模块和通信模块 (如图 5 所示)。采集处理模块控制高速 AD 芯片采集控制信息, 经处理得到调偏流控制单元发出的脉冲数和电机转向、幅值等驱动信息。系统满负荷运行时, 每 833.3 μs 更新一次脉冲数, 并产生一条驱动信息。如果实时将驱动信息发送给计算机, 频繁的发送不利于计算机对数据的接收、显示和存储, 因此必须加入缓存机制。缓存的大小应使得驱动信息的发送间隔 > 10 ms, 以利于计算机的处理, 即每次发送的缓存应 > 10 ms / 833.3 μs = 12 个驱动信息的存储空间。驱动信息被送入通信模块的缓冲区中, 由于缓存发送时仍会有新的驱动信息到来, 因此采用双缓存轮转的机制, 当一块缓存占满时由通信模块通过串口将缓存内的数据发送到计算机, 同时使用另一块缓存接收新的驱动信息。若串口的通信频率过低, 无法将产生的驱动信息及时发送到计算机, 将被后续的数据覆盖掉。因此串口的通信频率需满足如下条件: 当串口通信

频率为 K , 每条驱动信息占用 m 个字节, 串口通信采用 1 位起始位, 8 位数据位, 1 位停止位, 通信协议使用 1 个字节的同步头和 1 个字节的地址。收到 n 个脉冲的时间 t_a , 发送 n 个脉冲驱动信息的时间 t_b 。其计算公式如公式 (2) 和公式 (3) 所示:

$$t_a = \frac{n}{1.2 \text{ kHz}}, \quad (2)$$

$$t_b = \frac{(n \times m + 2) \times 10}{K}. \quad (3)$$

当满足 $t_a > t_b$ 时双缓存机制可工作, 否则会出现数据的丢失和被覆盖的现象。为保证系统的稳定运行和可靠性, 设计时采用 $t_a - t_b > 1 \text{ ms}$ ^[9]。当通信模块收到偏流控制单元发出的要求反馈编码器值的命令, 立即将当前收到的脉冲数换算成检测所需的编码器值加上同步头、地址和校验和等信息打包成反馈数据包, 送回偏流控制单元, 硬件的并行处理保证响应速度满足指标要求。

3.3 FPGA 控制及算法实现

分析模块采用状态机保证分析逻辑的执行顺序, 系统由初始状态启动, 在时钟沿的触发下循环, 其循环过程主要包括: 初始状态 → 缓存采样信息 → 初始化变量 → 判断电平高低 → 判断控制脉冲相位 → 判断转向并缓存数据 (若转向正常, 则更新编码器值, 并将驱动信息压入缓存; 若转向异常, 则仅将驱动信息压入缓存) → 返回初始状态。

由于采用双缓存机制, 数据的缓存需要与传输并行执行, 采用了双状态机来完成。其中状态机 a 完成对驱动信息的存储 (如图 6), 置 A 或 B 缓存满的标志。状态机 b 完成对缓存数据的传输

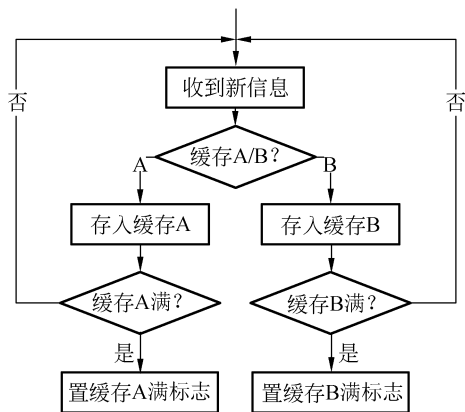


图 6 存储数据的流程
Fig. 6 Flow of data storage

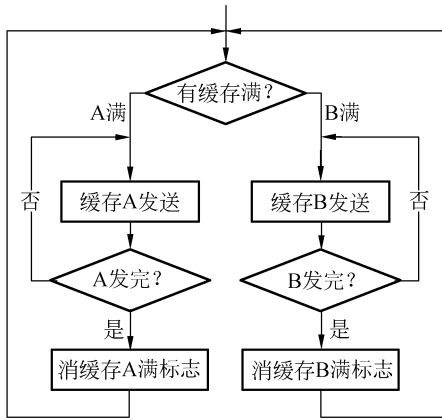


图 7 发送数据的流程

Fig. 7 Flaw of data send

(如图 7), 传输完成后清缓存满标志。状态机 a, b 通过 A, B 缓存的状态标志来协同工作, 两者稳定协同工作的关键是系统满足 $t_a > t_b$ 的要求, 保证了状态机 a 不会用已满的缓存存储新数据, 因此不会发生数据覆盖的错误。

4 实验结果

对系统分别在实际应用环境和仿真环境进行了实验。实际应用环境采用某空间光学遥感器的调偏流控制单元。通过对调偏流策略路径的覆盖测试, 对系统偏流角进行长调、微调, 实际测得反馈响应时间 $< 70 \mu\text{s}$, 反馈偏差 ± 1 码值, 分析得到的控制脉冲数和电机转向与偏流控制单元发出的实际值一致, 调偏流策略覆盖率达到 100%。

由于实际调偏流单元在实际工作中大部分为微调, 不会对检测系统造成大的压力, 因此采用仿真环境, 对系统做强度测试, 模拟偏流控制单元发

表 2 模拟编码器反馈数据(部分)

Tab. 2 Feedback data of coder simulated

| time | data |
|-------------------------|----------------|
| 2008:10:18:15:04:30:322 | 7e 17 80 00 15 |
| 2008:10:18:15:04:30:322 | 7e 17 7f ff 13 |
| 2008:10:18:15:04:30:342 | 7e 17 7f f9 0d |
| 2008:10:18:15:04:30:353 | 7e 17 7f f2 06 |
| 2008:10:18:15:04:30:363 | 7e 17 7f ec 00 |
| 2008:10:18:15:04:30:373 | 7e 17 7f e5 f9 |
| 2008:10:18:15:04:30:383 | 7e 17 7f df f3 |
| 2008:10:18:15:04:30:393 | 7e 17 7f d9 ed |
| 2008:10:18:15:04:30:403 | 7e 17 7f d2 e6 |
| 2008:10:18:15:04:30:503 | 7e 17 7f cc e0 |

出 1.2 kHz、持续时间 20 min、使电机反向旋转的控制脉冲, 利用串口卡以 10 ms 的周期发送要求编码器反馈的命令, 模拟编码器反馈的结果如表 2 所示, data 项的第三、第四字节为编码器值, 模拟编码器的初始值为 8000(十六进制), 除收到控制脉冲后的首次反馈外, 其余反馈均间隔 6 或 7 个码值, 经计算符合控制脉冲的频率和偏流机构减速比, 整个检测过程数据均正常, 未发生数据覆盖的错误。

5 结论

应用该实时闭环模拟检测方法, 精确地模拟了微调偏流时编码器的反馈功能, 并对调偏流控制策略进行了全面的验证, 满足了检测偏流控制单元功能和性能指标的要求。在后续的开发中, 考虑使用 PCI 代替串口通信, 将会极大增加系统的数据交互能力, 使其在功能和可扩展性等方面得到有力的提升。

参考文献:

- [1] 孙晓辉. 基于 FPGA 的多路 A/D 转换控制接口设计[J]. 电子测量技术, 2006, 29(2): 78-80.
SUN X H. Designing control interface of multiple analog to digital convertor based on FPGA [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2006, 29(2): 78-80. (in Chinese)
- [2] 杨守良. 基于 FPGA 的高速并行 A/D 采样控制电路的设计[J]. 重庆文理学院学报(自然科学版),

2006, 5(4): 52-54.

YANG SH L. The design of the A/D sampling control circuit basing on the high speed simultaneous FPGA [J]. *Journal of Chongqing University of Arts and Sciences(Natural Science Edition)*, 2006, 5(4): 52-54. (in Chinese)

- [3] 牛思先, 向征. 基于 RS-422/485 的串行异步通讯接口设计和应用 [J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(10): 2472-2474.

NIU S X, XIANG ZH. Based on RS-422/485

- UART interface design and application [J]. *Computer Engineering and Design*, 2007, 28(10): 2472-2474. (in Chinese)
- [4] 李友一. 空间相机中的偏流角控制[J]. 光学精密工程, 2002, 10(4): 402-406.
LI Y J. Study of the drift angle control in a space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4): 402-406. (in Chinese)
- [5] 胡君, 吴伟平. 光学成像传感器调焦控制电路仿真测试[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1503-1508.
HU J, WU W P. Testing and simulation of focusing circuit of optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1503-1508. (in Chinese)
- [6] 孙晓辉. 基于 CPLD 的 RS422 接口电路设计[J]. 航空计算技术, 2007, 37(5): 59-62.
SUN X H. Design of RS422 interface circuit based on CPLD [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2007, 37(5): 59-62. (in Chinese)
- [7] 蒋艳红. 基于 FPGA 的 UART 设计与应用[J]. 计算机工程, 2008, 34(21): 225-227.
JIANG Y H. Design and application of UART based on FPGA [J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(21): 225-227. (in Chinese)
- [8] 薛小刚, 葛毅敏. Xilinx ISE 9. x FPGA/CPLD 设计指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
XUE X G, GE Y M. *Xilinx ISE 9. x FPGA/CPLD Design Guide* [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2007. (in Chinese)
- [9] 费业泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
FEI Y T. *Error Theory and Precision Analysis* [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 2001. (in Chinese)

作者简介:



于平(1963—),男,吉林长春人,硕士生导师,研究员,1985年于长春光学精密机械学院获得学士学位,主要从事空间光学传感器嵌入式系统的设计。
E-mail: yuping0203@163.com



吴伟平(1980—),男,吉林长春人,助理研究员,2006年于吉林大学获得硕士学位,主要研究方向为智能控制与信息处理。
E-mail: raincomp@sina.com.cn

● 下期预告

发光二极管诱导荧光微芯片分析检测器的研制

廖锡昌^{1,2}, 郑慧斐³, 袁敏^{1,2}, 金庆辉¹, 赵建龙¹

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 南通大学附属医院, 江苏南通 226001)

以高功率发光二极管(LED)为激发光源,研制了一种新型的小型化LED诱导荧光检测器,用于微流控芯片分析检测。利用MOS管压控恒流原理,设计恒流驱动电路,使高功率LED发光稳定。通过设计和制造光学结构,成功将LED发散光聚焦成约 $3.5\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ 的线状光束,可方便地与微流控芯片中的微通道对准,避免了复杂的机械校准结构。光学系统体积大大减少,约为 $9.5\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 17\text{ cm}$ 。用荧光染料NBD和高密度脂蛋白评价该体系的性能,结果表明LED激发光源稳定,检测器重复性好;样品峰形良好,可用于微流控芯片毛细管电泳分析检测,基本实现了LED诱导荧光检测器的微型化。