

基于 CAN 总线通信的反作用飞轮 控制系统设计与实现

李胤^{1,2} 武俊峰¹ 王辉^{1,2} 吴一辉¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院 北京 100039)

摘要: 针对卫星高小型化、可靠性通信等要求,提出了一种以 FPGA 为主控制器,基于双路切换 CAN 总线通信的反作用飞轮控制系统的设计与实现方法。对 CAN 总线收发、报文解析、力矩与速度控制以及控制量测量等功能进行了模块化设计。对原理样机进行了测试实验,实验结果表明该系统具有良好的速度控制特性、力矩控制特性以及稳定的通信性能。所提出的报文解析方法,使上位机可以方便地通过可切换的双路 CAN 总线对反作用飞轮进行实时可靠地控制、遥测数据采集以及相关的故障处理。

关键词: 反作用飞轮;CAN 总线;模块化设计;闭环控制

中图分类号: TM33 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 210.7020

Design and implementation of a reaction flywheel control system based on CAN bus communication

Li Yin^{1,2} Wu Junfeng¹ Wang Hui^{1,2} Wu Yihui¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: According to the miniaturization, high reliability communication requirements of satellites, proposing a design and realization method of a reaction flywheel control system used FPGA as the controller and based on dual-switching CAN bus communication. Designing the modules of CAN bus transceiver, message parsing, torque control, speed control and control measurements and some other functions. Through experimenting on the prototype, the experimental results show that the system has the characteristics of good performance and stability in speed control mode and torque control mode and good communication performance. The proposed message parsing method makes the computer fulfill the reaction flywheel reliable and real-time control, telemetry data acquisition and fault handling through the dual-switching CAN bus easily.

Keywords: reaction flywheel; CAN bus; modular design; closed-loop control

1 引言

反作用飞轮与卫星之间通过动量矩交换来实现对卫星姿态的精确控制,已经成为卫星姿态控制系统的重要执行元件。针对卫星的小型化、低功耗、高精度控制和高可靠性等需求,研发功能完善的飞轮控制系统有着十分重要的意义。

由于数字控制系统的集成特性,它可以提高处理速率,延长使用寿命,因此相关研发成为了热点^[1]。目前数字控制系统的研发往往倾向于选择传统的单片机或者 DSP 芯

片作为主控制器^[2-3],这些方案带来的问题是各个任务串行运行^[4],系统的控制特性会因此受到限制,而且对单一任务的修改相对复杂。与传统的飞轮控制系统相比,基于 FPGA 的模块化的设计能够对某些非理想因素进行克服和补偿,因而能够大幅度地提高卫星姿态控制系统的控制精度,并且提高系统的可靠性。基于 FPGA 的模块化设计,有利于缩短研发周期,使系统程序具有很强的可移植性。此外,目前常用的 RS232、RS485 等串行通信总线,上位机与其从节点之间只能构成单主多从的模式,而 CAN 总线可以构成多个主节点的模式,并且具有数据传输速率快、实

时性好、可靠性强、连接使用简单方便等特点^[5-7]。因此研发带有此类接口的数字控制系统对提高卫星姿态控制性能来说有着重要的意义。

提出了一种基于 CAN 通信的反作用飞轮的设计与实现的方法。模块化设计了经典的力矩环 PI 控制器,变结构 PI 速度环控制器,能够进行双路切换的 CAN 总线收发以及报文解析等功能。

2 CAN 总线通信接口设计

2.1 硬件设计

CAN 总线通信的硬件设计采用双冗余度总线拓扑结构。选用 ACTEL 公司 flash 型 FPGA 芯片 APA600 作为主控制器,与传统的 RAM 型 FPGA 相比具有很强的抗单粒子反转的能力,因此即使在恶劣环境下也能够满足系统的误码率指标和可靠性。CAN 总线控制器选用 SJA1000, CAN 总线收发器选用 PCA82C250^[8],通过电平转换芯片 74LV164245 进行电平转换。双冗余度的 CAN 总线通信接口的电气结构如图 1 所示。

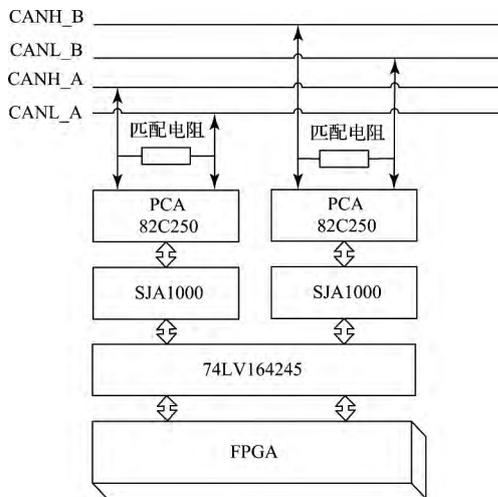


图 1 双冗余度的 CAN 总线通信接口电气结构

2.2 软件设计

CAN 总线通信接口的软件主要包括 SJA1000 初始化模块、CAN 总线数据发送模块、CAN 总线数据接收模块和报文解析模块 4 个功能模块。它们之间的信号流图如图 2 所示。

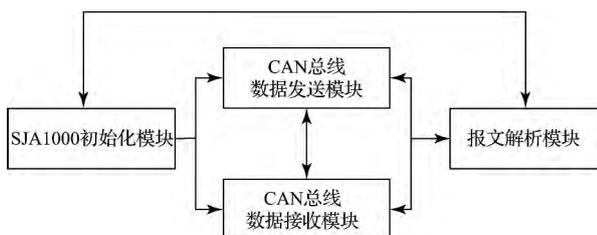


图 2 CAN 总线通信功能模块间的信号流

SJA1000 的读写时序为 Intel 总线时序, FPGA 对其的

读写需要将 8 路数据线 (AD0~AD7) 设置为双向数据 I/O^[9]。在 ALE 为高电平时锁存需要读写的寄存器地址,在 ALE 和片选信号均为低电平时,根据读写信号来从 SJA1000 的 FIFO 中读出或写入数据。下面对 4 个功能模块进行说明:

1) SJA1000 初始化模块:该模块完成对当前正在使用的 CAN 控制器 SJA1000 的初始化过程,根据报文解析模块解析出的上位机总线切换命令选择当前通信所用总线,此时另外一路 CAN 总线控制器则被置为无效状态。在初始化过程中完成对总线滤波方式、滤波寄存器、通信波特率、总线电平和接收中断方式的设置。在复位过程中,通过查询状态寄存器判断是否完成设置。在完成初始化后根据报文解析模块的握手信号选择进入发送状态还是接收状态,若握手信号表明在本次总线切换之前有未发送完的数据,则进入发送状态,否则进入接收状态。

2) CAN 总线数据发送模块:按照报文解析模块的指令向上位机发送数据。首先判断报文解析模块是否给出发送指令信号,然后通过读取状态位来判断本节点是否处于未完成发送或接收状态,并监听当前总线是否处于非空闲状态,最后通过向控制器写入帧格式、帧 ID 和数据,并请求发送该数据帧,该模块可以连续发送多个数据帧。当所要求的数据发送完成后,若无总线切换指令,则自动转入接收状态。

3) CAN 总线数据接收模块:该模块用来完成对上位机指令的接收。查询 CAN 总线控制器接收中断标志位,若接收中断标志位置位,则暂时关断接收中断,依次接收上位机指令的帧 ID 和数据,然后清空接收区 FIFO 缓存,复位总线仲裁寄存器和总线错误状态寄存器。若无总线切换指令则转入发送状态。

4) 报文解析模块:完成解析上位机发出相关指令的功能。飞轮采用扩展帧、双滤波通信模式,利用扩展帧 ID 和数据域的内容来定义不同的指令帧。上位机可以向反作用飞轮发送启动指令帧、关闭指令帧、力矩目标值设定指令帧、力矩控制参数调整指令帧、速度目标值设定指令帧、速度控制参数调整指令帧、总线切换指令帧、总线测速指令帧等。报文解析模块通过解析上位机的指令完成对反作用飞轮的相关控制和参数设定。上位机所发出的指令帧以及飞轮执行响应动作如表 1 所示。

表 1 上位机指令帧及飞轮执行响应动作

指令帧名称	飞轮执行响应动作
启动指令帧	开启全局使能,正常工作
关闭指令帧	关断所有功率桥臂
力矩目标值设定指令帧	改变输出力矩目标值
力矩控制参数调整指令帧	设定力矩环控制系数
速度目标值设定指令帧	改变飞轮转速目标值
速度控制参数调整指令帧	设定速度环控制系数
总线切换指令帧	根据指令切换工作总线
总线测速指令帧	向上位机返回遥测参数

3 反作用飞轮系统设计

3.1 控制器功能模块划分

由于采用 FPGA 作为主控制器,所有的功能均以模块化的形式实现。根据系统的输入输出接口要求,FPGA 控

制器的功能模块如图 3 所示。

FPGA 前端的输入信号包括从前端上位机通过 CAN 总线发送的控制指令帧,外部晶振产生的时钟信号,霍尔信号和 A/D 采样模块采集的电流信号以及外围芯片反馈信号。FPGA 控制器要完成以下工作:

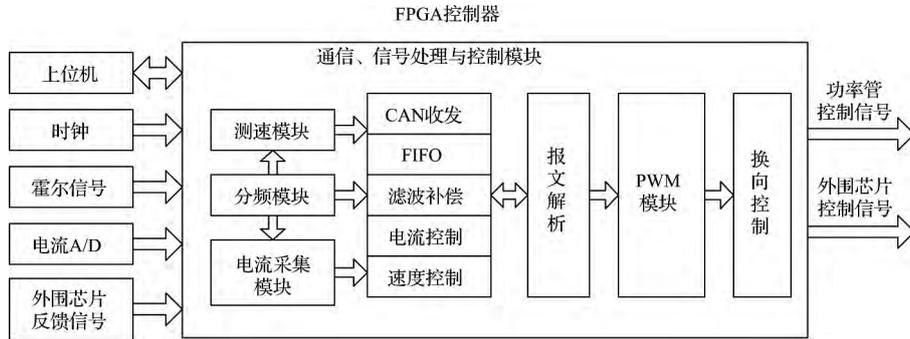


图 3 FPGA 控制器的功能模块

- 1)根据采集的霍尔信号,控制飞轮换相,并计算当前转速;
- 2)控制 A/D 采样模块,以获取电流采样值;
- 3)利用控制算法,通过改变 PWM 斩波,对飞轮母线电流进行调节,进而控制飞轮的输出转矩和转速;
- 4)实现与上位机之间的通信,并根据接收到的指令帧来完成上位机所要求的功能;
- 5)输出对各外围芯片的控制信号。

3.2 控制算法实现

反作用飞轮系统的控制算法信号流如图 4 所示,由内外 2 个闭环构成,内环为力矩环,采用传统的 PI 控制器进行调节。外环为速度环,采用变结构 PI 控制器^[10]调节速度。

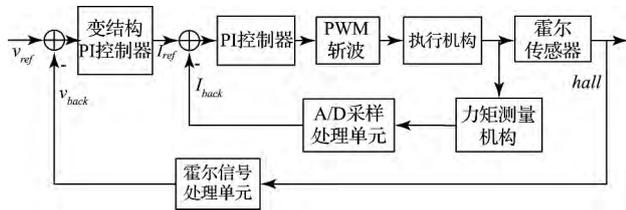


图 4 反作用飞轮系统的控制算法信号流

力矩环采用电流传感器^[11]作为测量机构,电流传感器采集的电流波形比较平滑而且能够实现测量电路与功率驱动电路之间的隔离。由于力矩环的调整速度非常快,设计采用了传统的 PI 控制器,可以充分满足设计要求,也节省了硬件资源。速度环调整相对较慢,因此速度环控制器采用变结构积分控制器来改善常值积分分离控制器在稳态的误差特性,与传统的 PI 控制器相比,能减小超调量,而且具有更快的响应时间。设控制器的切换带为 Δ ,系统的

控制器采用以下的控制函数:

$$u = \begin{cases} |u'| \operatorname{sgn}(s(x)) & s(x) > \Delta \\ |u'| \operatorname{sgn}(v_{ref}) & -\Delta < s(x) < \Delta \\ |u'| \operatorname{sgn}(s(x)) & s(x) < -\Delta \end{cases} \quad (1)$$

$$s(x) = v_{ref} - v_{hack} \quad (2)$$

$$u' = K_p e(k) + K_I \left\{ \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + f[e(k)]e(k) \right\} \quad (3)$$

式中: v_{ref} 为目标转速, v_{hack} 为反馈值转速, K_p 和 K_I 分别为比例系数和积分系数,其中 $K_I = K_p T / T_I$, T 为采样时间, T_I 为积分时间。 $f[e(k)]$ 为可变的附加项系数,用以消除稳态误差。此处设 $f[e(k)]$ 在切换带内随着误差减小而线性增大。

本设计采用自整定与工程整定法结合的方法对控制器 PI 参数进行整定。根据归一化参数整定法^[12] 设定采样时间 T 与积分时间 T_I 之间的关系,通过对 K_p 的值进行在线整定,根据(4) 计算不同 K_p 下相同阶跃响应时间内偏差绝对值积分 IAE 的大小并以其为判据确定 K_p ,在此基础上对 K_I 的值进行微调。

$$IAE = \sum_{k=0}^{\infty} |e(k)| \quad (4)$$

4 实验结果

采取的对控制参数进行整定后的变速变结构转速阶跃响应曲线和普通的 PI 控制转速的阶跃响应曲线如图 5 和图 6 所示。可以看出以 5 000 r/min 为转速目标值时,本文所采取的方案转速的超调量减小了 80% 左右,进入指定稳态转速下的响应时间也缩短了 10 s 以上。飞轮在速度模式下利用高精度霍尔测速方法^[13-14] 进行测速,稳态时的控制精度可以达到 ± 1 r/min 以内。

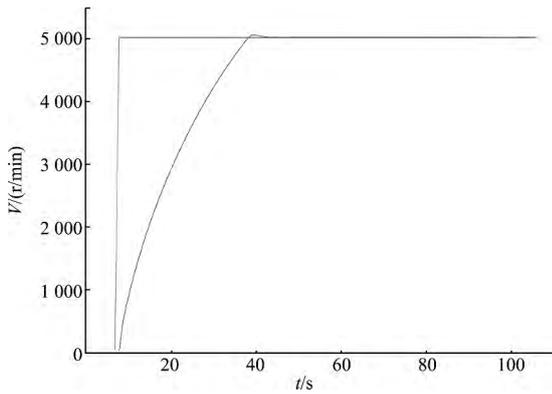


图5 参数整定后的变速变结构控制转速阶跃响应曲线

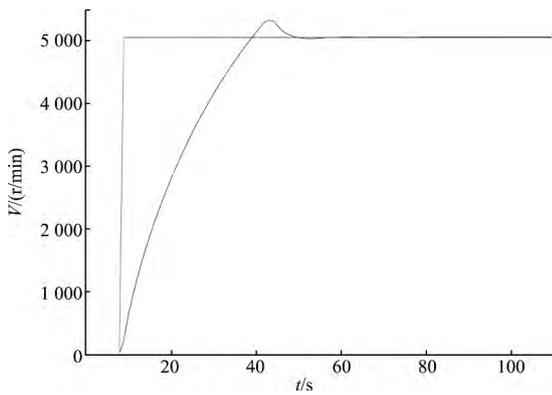


图6 普通PI控制转速阶跃响应曲线

此外对以电流传感器为测量机构的力矩模式进行了测试,图7所示为某加速指令下转速随时间变化曲线,转速与时间之间具有较好的线性关系,表明飞轮具有相对平稳的加速力矩。

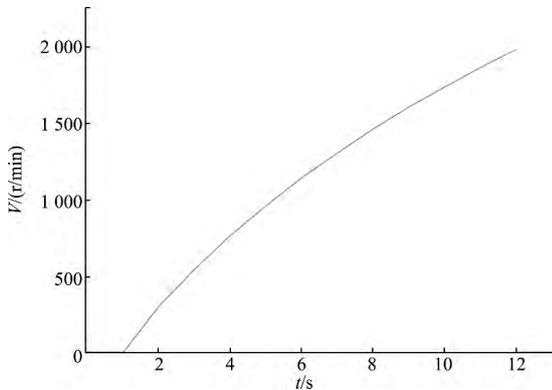


图7 力矩模式下转速随时间的变化曲线

图8所示为飞轮正常工作下CAN总线信号波形,由于电路采取功率部分与数字部分单点隔离,并且采用隔离式电流传感器进行母线电流采样,即使在飞轮向相反象限大力矩制动时,通信信号也不会受到干扰。图9所示为已

经完成相关实验的反作用飞轮样机。

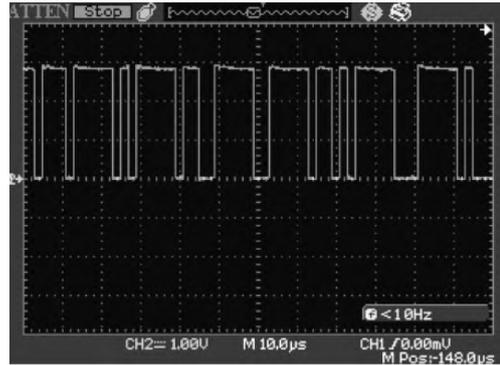


图8 飞轮正常工作下总线信号波形

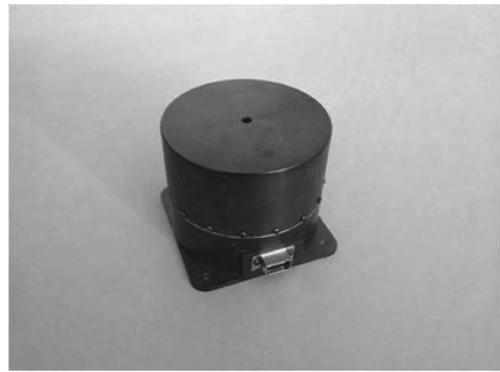


图9 反作用飞轮样机

5 结 论

提出了一种基于双路切换CAN总线通信的反作用飞轮软硬件设计与实现方法。控制系统采用FPGA作为主控制器,使得整个系统具有很强的可重构性。实验结果表明,该反作用飞轮具有很好的控制精度,上位机可以通过CAN总线实时可靠地对反作用飞轮进行相关模式下的控制、数据采集和故障处理。

参考文献

- [1] 刘忠国. 数字飞轮控制器的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 2-3.
- [2] 高文武. 无刷直流电机控制系统设计与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 3-4.
- [3] 周立媛, 韩文波, 薛书飞. 基于DSP2812的无刷直流电动机控制及其MATLAB仿真[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2013, 36: 59-61.
- [4] 王跃飞, 侯亮, 刘菲. 基于FPGA的汽车CAN网络实时管理系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(8): 721-722.

(下转第69页)

- [9] 谷卓,李书芳,曹珂. UHF 频段 RFID 射频自动测试系统设计[J]. 电子测量技术, 2009, 32(10): 92-94.
- [10] 徐朋豪,冯玉光,奚文骏,等. 基于 ZigBee 的无线温湿度采集系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(1): 33-36.
- [11] 焦尚彬,宋丹,张青,等. 基于 ZigBee 无线传感器网络的煤矿监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(5): 436-442.
- [12] 江岸,伍继雄,黄生叶,等. 改进的 RFID 二进制搜索防撞算法[J]. 计算机工程与应用, 2009(5): 229-231.
- [13] 中华人民共和国国家计量检定规程. JJG555-1996 非自动秤通用检定规程[S]. 北京: 国家技术监督局, 1996.

作者简介

宋可, 1990 年出生, 中国农业大学信息与电气工程学院, 在读硕士研究生。

杨璐, 1967 年出生, 中国农业大学信息与电气工程学院, 副教授。

E-mail: yanglumail@263.net

(上接第 63 页)

- [5] 郝勃,刘衍珩,曲良东,等. CAN 网络的分组合并策略研究及实现[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 2137-2139.
- [6] 贺方军,谢永成,李光升,等. 基于 CAN 总线的装甲车辆电气系统检测[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(6): 43-44.
- [7] 岳洋,兰国辉,周红进. 基于 GSM 和 CAN 总线的数据采集监控系统[J]. 电子测量技术, 2012, 35(10): 107-109.
- [8] 邵玉华. 基于 SJA1000 的 CAN 总线通信系统的设计[J]. 铁道通信信号, 2010, 46(3): 56-58.
- [9] 陈萍,姜秀杰. 基于 FPGA 的 CAN 总线通信系统[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(12): 2482-2484.
- [10] 武俊峰,吴一辉,安静,等. 姿控飞轮变结构变速积分控制的实现[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 150-153.
- [11] 李峰,吴一辉,武俊峰,等. 直流无刷电机高精度电流采样系统设计[J]. 电力电子技术, 2010, 44(5): 41-43.
- [12] 李嗣福. 计算机控制基础[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006: 170-173.
- [13] 徐春剑,吴一辉,武俊峰,等. 基于 FPGA 的高精度霍尔测速方法[J]. 仪表技术与传感器, 2009(10): 100-101.
- [14] 尹安东,朱云骁,江昊,等. CAN 总线混合调度算法在 HEV 控制系统中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(1): 31-36.

作者简介

李胤, 1985 年出生, 博士研究生, 研究实习员, 主要研究方向为卫星姿控飞轮控制系统设计。

E-mail: liyin@ciomp.ac.cn

武俊峰, 1981 年出生, 工学博士, 副研究员, 主要研究方向为卫星姿控飞轮控制系统设计。

E-mail: awublack@126.com

王辉, 1987 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为卫星姿控飞轮系统优化设计。

E-mail: wanghuihb@126.com

吴一辉(通讯作者), 1965 年出生, 工学博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为微光机电系统(MEMS)和精密机电系统。

E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn