# 基于 A3PE3000L 的磁力矩器控制系统设计\*

周美丽 朴永杰 张贵祥 章家宝 冯汝鹏

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘 要:针对空间环境辐射源带来高能带电粒子会使卫星长开机部件控制器出现单粒子现象,工作异常,应用于某型 号低轨卫星的磁力矩器控制系统,采用 ACTEL 公司的 Flash 型 FPGAA3PE3000L 作为控制器,具有对单粒子事件免 疫、低功耗、低成本等优点。文中介绍了该控制系统组成,包括 A3PE3000L 的主要资源、A3PE3000L 与中心计算机通 过 RS422 总线的通信电路、驱动电路等,并经过了实验验证。目前,该方案已应用于某航天任务,实践证明,本系统性 能良好,并且在轨实验状态稳定,具有很高的可靠性。 关键词:FLASH 型 FPGA:低轨卫星;磁力矩器控制

**中图分类号: V448.22** 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.80

# Design of control system based on A3PE3000L used in magnetorquer

Zhou Meili Piao Yongjie Zhang Guixiang Zhang Jiabao Feng Rupeng (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun130033, China)

**Abstract**: A3PE3000L is the Flash-based architecture FPGA produced by ACTEL company, and is successfully applied in the magnetorquer controller as a actuator of some low earth orbit satellite because of low power, low cost and immune to single event effects (SEEs). This paper introduce the composition of control system, include FPGA main resources, drive circuit design, interface circuit for RS 422 protocol etc, and the experimental results of the control system prove the reliability. This design is currently applied in some space mission. The control system is proven to be of good performance, have normal test condition and high reliability on-orbit.

Keywords: flash-based architecture FPGA; low earth orbit satellite; magnetorquer control

## 1 引 言

空间环境中存在来自宇宙射线、太阳耀斑等辐射源的 许多高能带电粒子。单个高能粒子入射到半导体器件中, 使半导体材料发生电离从而引发的一系列效应,称为单粒 子效应。包括单粒子翻转(SEU)、单粒子锁定(SEL)和单 粒子烧毁(SEB)<sup>[1]</sup>等。低轨卫星通过南北极和南大西洋异 常区等位置时,星载部件控制器很容易发生单粒子翻转和 单粒子锁定事件<sup>[2]</sup>。因此卫星上的长开机部件,需要具有 抵抗单粒子事件或者能够自动解除单粒子效应的能力。对 于低成本卫星,采用具有抗辐照指标的高等级器件,几乎遥 不可及,只能另辟蹊径。

现场可编程门阵列(FPGA)利用硬件并行的优势,在 每个时钟周期内完成更多的处理任务,具有超强的计算能 力,因此逐渐成为现代电子产品中的核心部件。其内部大 面积为存储单元,构成了 FPGA 特有的配置存储器结构。 根据配置存储器的实现工艺可以将 FPGA 分为以下

收稿日期:2016-05

\*基金项目:国家自然青年基金(61503360)项目资助

几类[3-4]:

1)SRAM 型 FPGA

存储单元采用 CMOS 工艺的 SRAM 结构,单粒子事件发生在 SRAM 型的 FPGA 上时,可能会改变配置单元的状态,因此会以无法预测的方式改变逻辑、布线和 IO 的状态,后果非常严重。

2) 反熔丝型 FPGA

反熔丝 FPGA 能够完全抵抗单粒子事件,但只能进行 一次编程,一旦出现设计错误就必须更换器件,并且价格都 昂贵,很难应用于低成本卫星上。

3)浮栅存储器型 FPGA

浮栅存储器型 FPGA(EEPROM、EPROM、FLASH) 具有非易失性和可重配置性,还可以重复编程,极大的节约 了成本,缩短了开发周期<sup>[5]</sup>。

A3PE3000L 是 Actel 公司的 Flash 型 FPGA, Flash 开 关作为基本编程单元遍布整个器件,提供非易失性和可重 新配置编程信息<sup>[6]</sup>。一旦 FPGA 被编程, Flash 配置单元 就不能被高能粒子改变,因此其对单粒子事件免疫,已应用 于多颗卫星和航天器中[7]。

Flash 型 FPGA A3PE3000L 的具有单粒子免疫优点, 该系列 FPGA 还有抗辐照指标的型号: RT3PE3000L<sup>[15]</sup>, Flash型 FPGA 给了星载设备控制器一个更稳定可靠的 选择。

鉴于 A3PE3000L 优秀的性能及超高性价比,并且低 轨卫星相对中高轨卫星受到的高能粒子辐射强度低很多, 某型号低轨卫星采用其作为磁力矩器控制系统的控制器, 文中首先介绍了该控制系统的组成、A3PE3000L的主要资 源及优点,然后描述了系统硬件实现原理,再讲解了控制系 统软件设计,最后通过分析实验结果,验证了系统可操作性 和精度指标。

#### 2 控制系统组成

如图1所示,控制系统主要包括控制电路、驱动电路、 电流采集电路和磁力矩器。其中,控制器采用 A3PE3000L,负责与中心计算机进行 RS422 通信、PWM 控 制、AD采样控制与数据处理。驱动电路将控制器输出的 信号进行功率放大,用于驱动磁力矩器。



图 1 磁力矩器驱动系统

# 3 系统硬件实现原理

中心计算机通过 RS422 通信模块将磁矩指令进行电 平转换,送到控制器 A3PE3000L,控制器解析指令并输出 PWM 控制信号到驱动模块进行功率放大,最后输出给磁 力矩器负载。电流采集电路首先通过电流传感器将磁力矩 器上的电流转换成电压,然后利用差分放大器进行变换,最 后通过 AD 采集电路反馈给控制器进行闭环控制。

3.1 A3PE3000L 的主要资源

A3PE3000L 是 ACTEL 公司的 A3P 系列产品,质量等 级为军温级。主要资源及特点:

1)上电即行,支持 Level 0 上电即行分类标准。使用上 电即行 ISP Flash 开关作为编程单元,这些 Flash 单元遍布 整个器件,提供非易失性和可重新配置编程信息。不需要 引导 PROM,减小了系统复杂性,并且上电即行<sup>[8]</sup>。

2)低功耗:可选+1.2 V 和+1.5 V 内核电压<sup>[9]</sup>;

3) 大容量: 3M 的系统门数, 多达 620 用户 I/O, 504 kbit X 🗆 RAM;

4) 高性能: 350 MHz(1.5 V系统), 250 MHz(1.2 V系 统);

5)先进和专业的 I/O 组,700 Mbs 的 DDR,LVDS 兼容 的 I/Os,可编程输入延时,弱上拉、下拉等;

6) 可分租选择 I/O 电压: +1.5 V, +1.8 V, +2.5 V 和+3.3 V:

7)丰富的资源: 6个内部集成 PLL 的 CCC 模块; 4 608 bitRAM 模块,可配置成 4 608 bit×1,2 304 bit×2,  $1\ 152\ bit \times 4,512\ bit \times 9,256\ bit \times 18;$ 

8)IEEE 1149.1 标准 JTAG;

9)单粒子事件免疫,原因如下。

高层大气产生的高能中子袭击 SRAM FPGA 的配置 单元时,经常会导致固件错误。碰撞的能量可以改变配置 单元的状态,因此会以无法预测的方式改变逻辑、布线和 IO的状态。这些错误都是在 SRAM FPGA 中不可避免 的,并且产生的严重后果可能是导致一次完全的系统错误。 但这种单粒子锁定错误不会发生在 ProASIC3/EL 系列基 于 flash 的军级 FPGA 的配置存储上。该 FPGA 一旦被编 程, flash 配置单元就不能被高能粒子改变,因此对其免疫。 可恢复错误或者软件错误发生在用户 SRAM 中时, FPGA 框架中的 EDAC 电路很容易减少这种错误<sup>[10]</sup>。

# 3.2 422 通信

该机构通过 RS422 总线与中心计算机进行通信。使 用芯片为差分驱动器 DS26LV31 和差分接收器 DS26LV32,使用的电压均为 3.3 V,应用电路如图 2 和图 3 所示。



图 2 差分接收器应用电路

为了吸收信号的反射,依据 RS422 标准, RS422 在电 缆最远端需要跨接总线匹配电阻 R<sub>1</sub>。在发送器无信号输 出时,差分线呈不稳定状态,容易受到外界干扰,可能在接 收端产生变化,也可能触发串行通信接口接收干扰数据。 因此,为了使线路闲置时状态稳定,对正信号上拉同时对负 信号下拉,并通过在接收端增加上拉电阻 R<sub>2</sub>和下拉电阻



-----

 $R_3$  实现<sup>[11]</sup>。

为了提高 CMOS 电路抗闩锁能力,COMS 电路多余的 输入端不能悬空,所以设计时 DS26LV31 未用的输入端接 信号地,DS26LV32 未使用的差分正输入端接电源,差分负 输入端接信号地。除此之外,在+3.3 V 电源与芯片电源 管脚之间串入电阻,可以在闩锁发生时保护芯片不被损坏。 3.3 驱动控制电路

驱动控制采用的是 H 桥电路,当 CtrlA 为高电平、 CtrlB 为低电平时,V2 导通,H 桥 V4 和 V7 导通、V5 和 V8 截止;当 CtrlA 为低电平、CtrlB 为高电平时,V11 导通,H 桥 V4 和 V7 截止、V5 和 V8 导通;实现了电流的双向流 动。二极管 V1 和 V12 的加入,从硬件上防止 CtrlA 和 CtrlB 同时为高导致上下桥臂贯穿导通的可能性<sup>[2]</sup>。



图 4 H 桥电路

3.4 电流采集电路设计

电流采集芯片采用 ALLEGRO 公司的 ACS712。电流 传感器将磁电流信号转变为电压信号,再使用差分放大器 AD8227ARZ 对前端电压进行放大处理,使用电压跟随器 进行隔离、阻抗匹配,最后输出给 AD 采样电路。

1) 电流传感器

ACS712 内置有精确的低偏置的线性霍尔传感器电路,能输出与检测的交流或直流电流成比例的电压。具有低噪声,响应时间快(对应步进输入电流,输出上升时间为

 $5 \mu s$ ),50 kHz 带宽,总输出误差最大为 4%,高输出灵敏度 185 mV/A,使用方便、性价比高、绝缘电压高等特点<sup>[12]</sup>。 输出电压与输入电流关系:

$$V_{out} = 2.5 \pm 0.185 Ip$$
 (1)  
2)差分放大器

差分放大器使用的是 AD 公司的低功耗产品 AD8227, 其典型电源电流为 350  $\mu$ A,带宽为 250 kHz (G = 5),共模 抑制比为 100 dB (G = 5),输入噪声为。

增益范围:5~1 000,可通过调整增益电阻 R<sub>1</sub>调节。 计算公式如式(2)所示。

$$R_G = \frac{80 \text{ k}\Omega}{G-5} \tag{2}$$

设计中,由于磁力矩器工作电流不超过 0.2 A,为了尽 可能地放大电压中的有效部分,且保证放大后电压在 AD 采样范围内 0~5 V,将电流传感器的输出  $V_{out} = 2.5 \pm$ 0.185 $I_p$ 减去+2.4 V 电压后再输出给 AD 采样芯片,差分 放大电路如图 5 所示。



图 5 差分放大电路

3) AD 采样电路

AD 采样芯片使用 TI 公司的串行 AD——TLC2543, 具有 12 bit 分辨率,速度快,转换时间只有 10 μs,多达 11 通道模拟输入,单电源供电,减少了电源供电种类。

### 4 控制系统软件设计

控制系统软件在 LiberoSOC 中开发,开发语言为 Verilog HDL。

程序框图如图 6 所示。

对 FPGA 程序进行裕度安全性设计如下:

1)资源降额:实际资源占用率为 6.1%,小于要求 的 50%;

2)同步设计:所有模块均在系统时钟驱动下工作,采用 时钟使能方式控制不同工作速率的模块;

3)可靠复位:采用内部软件可靠复位实现所有寄存器 初始化;

4)可恢复性:设计中必须将状态机中无效状态的下一 个转移状态定义为复位初始状态;

5)关键变量处理:程序中的关键变量均采用三模 冗余<sup>[13-14]</sup>;

6)通过仿真验证和静态分析,确认了 FPGA 的时序 (处理、建立和保持时间)均满足要求。

年 伦:光电跟踪设备 GPS 时统系统的控制与显示



图 6 程序框图

#### 5 实验结果及分析

由于 A3PE3000L 应用在磁力矩器控制中,该部件依 靠电流驱动工作。实验测试 PWM 控制波形、磁力矩器工 作电流波形如图 7 和图 8 所示。得到部件的 PWM 占空比 和电流采样值的线性关系如图 9 所示,横坐标为 PWM 占 空比,纵坐标为电流采样值,曲线为电流采样值的拟合曲 线,可以看出 PWM 占空比和电流采样值具有很好的线性 度,误差小于 1%。



图 7 FPGA 输出的 PWM 控制波形



图 8 示波器实测的采样电压波形

实验结果表明该磁力矩器控制系统可操作性强,且具 有很高的精度指标。按照组件级验收实验要求,对整个控



图 9 PWM 占空比和电流采样值的线性关系

制系统进行航天器研制过程中的环境实验验证,结果确认 了该控制系统的软件和硬件设计均能满足要求,并且性能 稳定、工作可靠。

# 6 结 论

基于 A3PE3000L 的磁力矩器控制系统设计已应用于 某航天任务,实践证明,本系统具有较高的精度、稳定性,并 已通过正样产品验收。目前,在轨实验状态良好,具有很高 的可靠性。

#### 参考文献

- [1] 薛旭成,吕恒毅,韩诚山.空间电子系统 FPGA 抗单粒
  子闩锁设计[J].电子测量与仪器学报,2014,28(8):
  865-869.
- [2] 蒋轶虎. 宇航用 FPGA 单粒子效应监测方法及检测系 统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [3] 杨海钢,孙嘉斌,王慰.FPGA器件设计技术发展综述[J].电子与信息学报,2010,32(3):714-727.
- [4] 王忠明. SRAM 型 FPGA 的单粒子效应评估技术研 究 [D]. 北京:清华大学, 2011.
- [5] 陈晨. Flash型 FPGA 单粒子效应测试系统设计[J].
  电子测量技术,2014,37(9):70-78.
- [6] 广州周立功单片机发展有限公司. ProASIC3—
  Flash 架构 FPGA 的基础 [J]. 电子产品世界,
  2009(2): 97-98.
  (下转第153页)

• 123 •

## 刘振凯 等:基于 STM32L152 的低功耗超声波热量表的设计

功耗芯片使得整机功耗很低,在电池供电的情况下,可以工作9年左右。综上所述,本文设计的热量表达到了高精度、低功耗的要求,具有良好的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 卢秋林. 中国热量表行业现状及思考[J]. 轻工标准 与质量,2015(1):62-63.
- [2] 赵飞,仇国富. 超声波热量表的设计研究[J]. 机械制 造与自动化,2013,41(2):14-16.
- [3] 高正中,谭冲,赵联成,等. 基于 TDC-GP22 高精度低 功耗超声波热量表的设计[J]. 电子技术应用,2015, 41(7):61-63,67.
- [4] 梅彦平,张明君,王延平,等. TDC-GP21 在超声波热 量表中的应用[J]. 仪表技术与传感器,2012(2): 37-39.
- [5] 陈洁,余诗诗,李斌,等.基于双阂值比较法超声波流量计信号处理[J]. 电子测量与仪器学报,2013, 27(11):1024-1033.

(上接第123页)

- [7] 杨振雷,王晓辉,苏弘,等. 一种 Flash 型 FPGA 单粒 子效应测试方法设计及验证[J]. 核技术, 2015, 38(2): 020404-1-020404-7.
- [8] 卜雷雷. 基于 FPGA 的星载 RAM 抗 SEU 的研究与 设计[D]. 西安:电子科技大学,2010.
- [9] 广州周立功单片机发展有限公司. ProASICL 和 IGLOO + 系列——为特殊应用场合而设计的 FPGA[J].电子产品世界,2009(4):86-87.
- [10] 谢楠. 宇航用 FPGA 单粒子效应及监测方法研 究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [11] 张贵祥,金光.星载光学遥感相机图像模拟源的设计 与实现[J]. 计算机测量与控制,2009,17(7): 1368-1370.

(上接第 131 页)

- [15] 杨成,邢聪聪,邵帅.基于 STC89C52 单片机的多级控 制系统[J].电子技术与软件工程,2013 (5):53-54.
- [16] 周永龙,雷金奎. 基于 STM32 的数字舵机控制系统 的设计[J]. 计算机测量与控制,2011(1):66-68.
- [17] 郑毅,朱纪洪.用 MSP430 的舵机控制系统设计及实现[J].计算机测量与控制,2014(10):3181-3182.

- [6] 刘宇杰,李斌,刘振凯,等. 基于 TDC-GP22 的超声波 流量计设计[J]. 工业控制计算机,2015,28(3): 166-168.
- [7] CJ128-2007 中华人民共和国城建建设行业标准——
  热量表[S].
- [8] 陈建,孙晓颖,林琳,等. 一种高精度超声波到达时刻
  的检测方法[J]. 仪器仪表学报,2012,33(11):
  2422-2428.
- [9] 罗永刚,邹志远.基于 MBUS 的智集中器设计[J].测 控技术与仪器仪表,2013,39(10):72-75,79.
- [10] CJ/T188-2004 户用计量仪表数据传输技术条件[S].
- [11] JJG 225-2001 中华人民共和国国家计量检定规 程——热能表[S].

作者简介

刘振凯,硕士在读研究生,主要研究方向为超声波热量 表、嵌入式智能仪表。

E-mail:alexliu2360@126.com

- [12] 董建怀. 电流传感器 ACS712 的原理与应用[J]. 中国 科技信息,2010(5):92-96.
- [13] 黄锦杰. 抗单粒子翻转 SRAM\_based FPGA 测试系 统的研究与设计[D]. 上海:复旦大学,2011.
- [14] 柳振华. 三模冗余容错计算机的设计与实现[D]. 西 安:西安电子科技大学,2010.
- [15] Actel 推出以 Flash 为基础的 FPGA 适用于太空应 用[J]. 电子与电脑,2008(10):65.

## 作者简介

周美丽,1986年出生,硕士研究生,主要从事卫星姿态 控制系统执行机构控制的研究。

E-mail:zhoumeili2011@126.com

#### 作者简介

唐海洋,1990年出生,硕士研究生。主要研究方向电 力电子与电力传动。

E-mail:245862281@qq. com