

飞行器执行机构控制型 SOC 芯片设计

周华俊^{1,2} 孙丹峰^{1,2} 周明玮³

(1. 上海航天控制技术研究所 上海 201109; 2. 上海惯性工程技术研究中心 上海 201109;
3. 中国空间技术研究院通信卫星事业部 北京 100094)

摘要:针对目前用于航天飞行器的关键控制器芯片国产化不高、严重依赖进口受制于人的问题,分析航天产品对器件的特殊要求和芯片的功能需求,设计了一款基于 SPARC V8 内核的卫星执行机构控制器主芯片 SOC812A,详细介绍了 SOC812A 芯片的结构和设计流程,通过搭建直流无刷电机控制系统验证 SOC812A 芯片的性能,最后通过实际项目验证了此款芯片在航天控制器中的应用情况,应用情况表明, SOC812A 芯片大大提高了电子线路的集成化,并且执行机构的控制精度也得到了提升。

关键词: SPARC V8; 航天器 SOC; 执行机构

中图分类号: V441 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5060

SOC design for spacecraft control actuator

Zhou Huajun^{1,2} Sun Danfeng^{1,2} Zhou Mingwei³

(1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;
2. Shanghai Engineering Technology Research Center of Inertia, Shanghai 201109, China;
3. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: At present, the key chip for spacecraft localization is not high localization and heavily dependent on imports. Through analyzing the space environment and functional requirements of the chip, This paper designed SOC chip based on SPARC V8, which is used in satellite control system, first described the architecture and design process of SOC812A, Then validated its application in aerospace control actuator through current project. The application shows that SOC812A greatly improved the integration of electronic circuits and And actuator control accuracy had also been improved.

Keywords: SPARC V8; spacecraft SOC; control actuator

1 引言

SOC 是基于 IP 核复用的芯片级系统设计方法,它在一个芯片上集成信息采集、处理、存储、输出等功能模块,通过加载应用软件实现复杂的物理技术^[1]。SOC 技术近年来已经成为航天领域的热点。一方面,该技术能够显著提高星载或弹载电子系统的功能密度,从而降低系统质量、体积与功耗,满足对重量、功耗等指标敏感的新型飞行器需求;另一方面,在 SOC 设计中可以充分考虑系统防护性能与自恢复性能,有利于提高系统可靠性。此外,国内一些专家还希望以突破航天领域的 SOC 技术为契机,以点带线,实现国产大规模集成芯片技术的跨越式发展,从而摆脱关键元器件严重依赖进口受制于人的局面^[2]。基于以上的因素,803 所早在 2007 年就开始从事这方面的工

作,且在今年已经研制出了一款用于工程的 SOC 芯片—SOC812A,可以应用于卫星执行机构反作用飞轮控制器中,应用后能极大地减少控制器电路印制板的大小。

2 SOC812A 架构介绍

2.1 架构介绍

SOC812A 芯片是一款专门为卫星执行机构“反作用飞轮控制器”而设计研制的专用片上系统芯片,其以 32 位高性能的 SPARC V8 位 RISC 整型单元为主控内核,同时集成了在线硬件调试支持单元、中断控制器、定时器等 IP 核。此外为了满足“反作用飞轮控制器”的特殊应用要求, SOC812A 芯片内部还特地集成了可编程模数转换器、可编程电机控制器^[3]、可编程传感器控制器。SOC812A 芯片的内部结构如图 1 所示。

收稿日期:2016-04

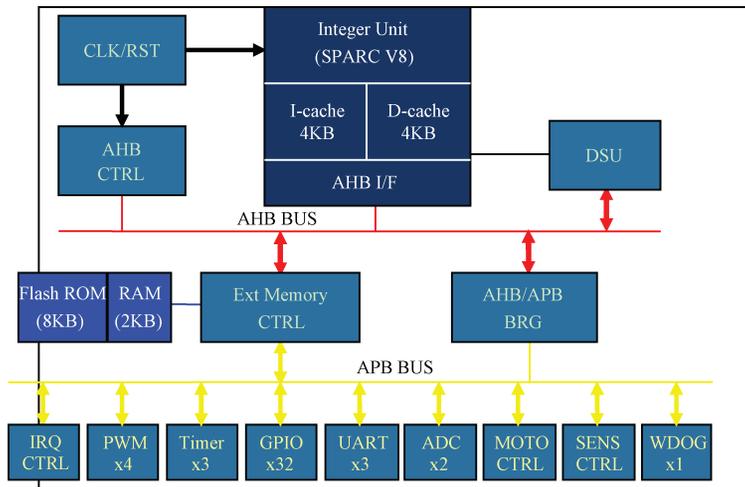


图1 SOC812A 功能结构

2.2 主要模块简介

2.2.1 总线结构

SOC812A 芯片采用可裁减的总线式结构^[4], 选用 ARM 公司的 AMBA2.0 总线作为 SOC 内部总线, 总线上各个模块采用统一的接口方式和总线连接, 从而实现了模块开发的标准化, 降低了开发的工作量。其中, 采用 AHB 用于高性能、高速系统模块之间的通信, 如处理器之间、存储器控制器之间的高速通信^[5]。而 APB 总线用于低功耗的系统模块之间的互连。采用 APB 总线不仅可以降低系统功耗, 同时还降低了模块接口的复杂程度。APB 总线和 AHB 总线之间用一个桥接器 (AHB/APB-Bridge) 进行连接^[6]。SOC812A 绝大部分低速外部设备则连接在低带宽总线 APB 上^[7]。

2.2.2 高速缓存

在 SOC812A 中, IU 采用流水线工作方式, 各级流水线的执行在时间上是重叠的, 这样必然导致读指令和写数据时出现访问存储器的冲突, 造成流水线结构相关。为避免冲突的发生, 采用了 ICache (指令 Cache), DCache (数据 Cache) 分开的双 Cache 结构——哈佛体系结构^[8]。在这种结构中设置两个独立的存储器分别存放指令和数据, 使指令访问和数据访问的操作可以并行执行, 最大限度地减少了存储器访问冲突^[9]。

2.2.3 中断控制器

SOC812A 芯片内部集成一个一级中断控制器和一个二级中断控制器, 其中一级中断控制器最多可以支持 15 个中断源, 而二级中断控制器最多可以支持 32 个中断源。SOC812A 包括 4 路可软件配置的外部中断输入, 其支持高电平、低电平、上升沿和下降沿 4 种触发模式, 软件可配置。SOC812A 芯片中断控制器 (一级中断控制器) 把芯片内部和外部的所有中断按照优先级先后的顺序排列, 并传送给 IU。SOC812A 总共一级中断控制器支持 15 个

中断^[10]。

当一个中断产生时, “中断悬挂寄存器”中相应的位被置‘1’。悬挂的位与“中断屏蔽寄存器”相“与”后转送到优先级选择器。每一个中断均可以通过软件配置“中断优先级配置寄存器”被配置为 2 个优先级级别之一。级别 2 的优先级高于级别 1。在每个级别中, 中断又按照硬件优先级先后的顺序区分。中断 15 的优先级最高, 中断 1 的优先级最低。级别 1 中优先级最高的中断被送往 IU, 如果级别 2 中没有中断, 则级别 1 中优先级最高的中断被送往 IU, 当 IU 响应该中断后, “中断悬挂寄存器”中相应的位将自动被清‘0’。

通过设置“中断强制寄存器”的相应位, 中断也可被强制产生。在此情况下, IU 相应中断后, 会先清除“中断强制寄存器”中的相应位, 然后再清除“中断悬挂寄存器”中的相应位。其中 15 号中断为不可屏蔽中断。它无法通过设置中断屏蔽寄存器进行屏蔽。在一些需要紧急处理的场合, 例如掉电, 这个中断是非常有用的。15 号中断处理程序需要防止由于中断多次重入造成的堆栈溢出。

2.2.4 异步通信接口

SOC812A 芯片内部集成 2 个普通通用异步串口和 2 个 16550 兼容的通用异步串行通信接口模块。2 个普通通用异步串口主要用于系统调试。16550 兼容的串口通信速率需大于 1 Mbps, 接收和发送缓存容量均为 64 Byte。SOC812A 片内普通通用 UART 支持 8 位数据, 一个可选的奇偶校验位, 一个停止位。每个 UART 有一个 12 位的时钟分频器, 用来控制波特率。通过设置“UART 控制寄存器”的“TE”位来使能发送操作。当准备发送时, 数据从“发送保持寄存器”送到“发送移位寄存器”, 被转换成串行数据流, 通过 TXD 引脚输出^[8]。UART 控制器自动在 8 位数据的前面加上 1 位起始位, 在其后面加上 1 位可选的奇偶校验位和 1 位停止位。

2.2.5 PWM 脉冲发生器

芯片片内集成 4 个 32 位的 PWM 脉冲发生器,最小定时精度为 100 ns,支持独立中断,且中断可软件配置开关。各个定时器带有独立的输出信号,输出信号的周期可以软件设置,占空比和输出有效电平可以软件配置。预分频计数器 prescaler 在系统时钟信号的驱动下,进行递减 1 的动作,每次递减到全 0 时,输出一个脉冲 tick 给定时器 timer,同时重新载入寄存器 prescaler_value 的值,继续计数。若 control 寄存器的 EN=1,则 timer 被使能(起始计数值为 cycle_value 寄存器的值),其在 tick 的驱动下,进行递减 1 的动作。

2.2.6 电机控制器

芯片片内集成直流无刷电机控制器,通过电机控制器寄存器可以修改直流无刷电机控制参数^[11-12],实现直流无刷电机的闭环控制,基本可实现目前大部分飞轮的控制。直流无刷电机控制器主要包含光电编码器信号处理模块 AB4F,此功能模块主要完成对光电编码器两相输出 A、B 信号进行 4 倍频及电机转向提取,并计算倍频脉冲值及电机实时转速值;PWM 脉宽调制模块 PWM_CTRL,此功能模块产生用于电机调速的 PWM 载波控制信号^[13-14];直流无刷电机换相控制模块 BLDCM_CTRL,此功能模块产生用于电机转动换相的换相逻辑信号。除此之外,直流无刷电机控制器还包括数字滤波模块、时钟分频模块、速度采样模块和速度调节模块。

2.2.7 调试支持模块

SOC812A 芯片内部集成硬件调试支持单元模块,其包含两个部分:debug support unit(DSU)和 debug communication link(DCL)。DSU 可以将处理器置为调试模式,操作处理器的寄存器和 memory,DCL 将 DSU 同通用串行通信接口 UART 相连,并实现通信协议。其作为一个调试设备,DSU 通过 AHB 总线和整型处理单元进行通信,对整型处理单元的运行状态进行控制,实现硬件调试功能。DSU 与相配套的调试监控软件结合使用,可以实现以下功能,包括读写 CPU 中所有的寄存器和内存;内嵌跟踪缓存管理,可以跟踪 AMBA AHB 总线上的指令和数据;下载并运行应用程序;可以设置断点来调试程序;可以远程连接 GNU Debugger(GDB);可以自动检测 CPU 的集成外设和内存设置。

3 SOC812A 设计流程

3.1 实施技术途径

芯片的设计过程一般采用现代集成电路的设计中流行的自顶向下(Top-Down)正向设计流程,其大致可以分为如图 2 中所示的 13 个步骤。

需要特别说明的是,芯片的设计过程是一个反复修改、反复验证的过程,某一步骤出现问题,除了要在本步查找原因外,还可能回到上一步或上几步去查找原因。

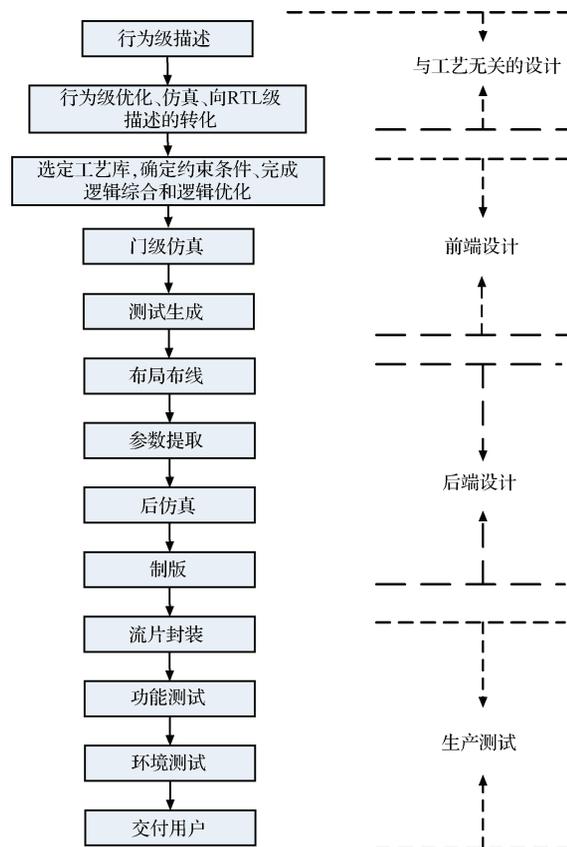


图 2 芯片的总体研制流程

3.2 产品生命周期

SOC 芯片整个设计过程可分 4 个阶段进行:

第一阶段:完成芯片的 RTL 建模及仿真,使其通过在 FPGA 平台上的功能验证。该阶段工作的完结以通过阶段评审为标志。

第二阶段:该阶段主要进行芯片在指定工艺下的逻辑综合、后端布局布线、后仿真。该阶段工作完结以后端设计通过评审为标志。

第三阶段:该阶段主要进行芯片的 MPW 流片、封装以及样品功能及环境测试等工作。该阶段工作完结以芯片完成测试并通过评审为标志。

第四阶段:项目研制总结。

4 SOC812A 应用验证

4.1 应用验证系统

为了验证 SOC812A 芯片的各项功能,搭建了直流无刷电机控制系统。其是专门针对 SOC812A 芯片的应用而开发的一套系统,系统模块关系如图 3 所示。此系统中,SOC812A 是整个开发系统的核心器件,担负所有的输入输出、数据处理和通信任务;用于调试的对象电机可以是实物电机或者是电机模拟系统,用于产生三相霍尔信号和位置信号;功率控制 H 桥模块用于产生驱动电机的 PWM 信号^[15]。如此就可以形成一个完整的飞行器执行机构控制系统。

4.2 应用效果

应用如图 3 所示的验证开发系统对实物电机进行了测试和验证,可以有效驱动装配直流无刷电机的反作用飞轮,可实现开环和闭环控制,转速精度也达到了相应的要求。

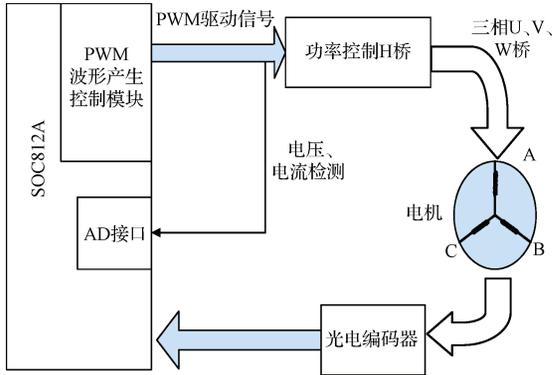


图 3 系统模块关系

SOC812A 芯片可替代原先控制器电路中的两路 AD 模块、串口发送和接收模块以及可编程逻辑阵列 FPGA 模块。可以有效提高了电子系统的功能密度,降低了控制器的空间和质量,由于器件的减少,从而也提高了系统的可靠性。实现了关键器件国产化,摆脱了关键元器件严重依赖进口的困局,整个反作用飞轮控制器都实现了器件的国产化^[16]。如图 4 所示为 SOC812A 芯片,如图 5 所示为是目前飞轮使用的控制电路板,红线部分电路可以用一片 SOC812A 代替。



图 4 SOC812A 芯片

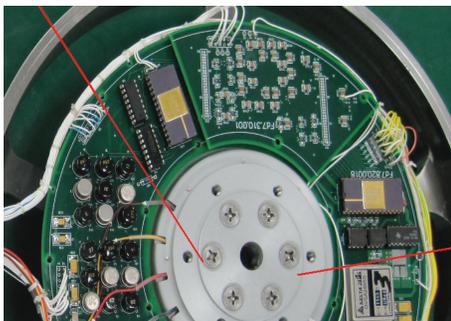


图 5 现用的飞轮控制器电路板

采用 SOC812A 芯片设计的反作用飞轮控制系统实现了对飞轮转速的精确控制,如图 6 所示为采用传统电路实现的反作用飞轮在 100 rpm(转/分)控制精度曲线图,如图 7 所示为采用 SOC812A 芯片后的反作用飞轮在 100 rpm(转/分)控制精度曲线图。从图中可以看到应用 SOC812A 芯片后转速的波动量从 0.25 rpm 提高到了 0.15 rpm,使得控制更加稳定。

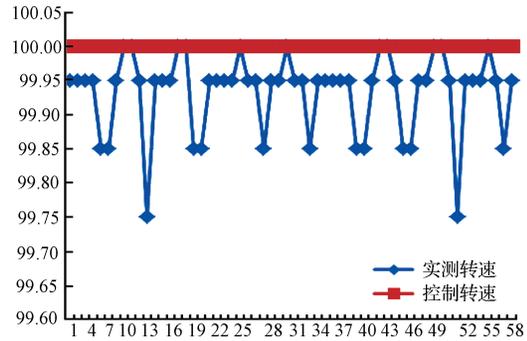


图 6 应用传统电路飞轮实测转速

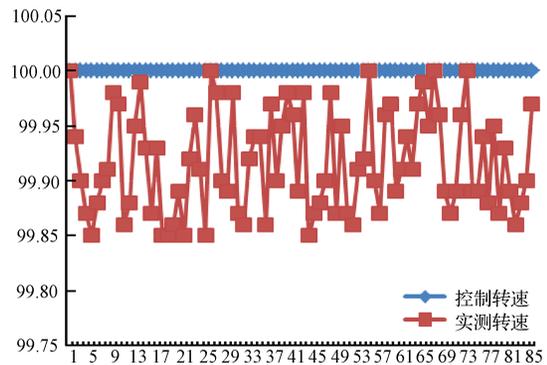


图 7 应用 SOC812A 芯片后的飞轮实测转速

5 SOC 存在问题

SOC 在带来很大好处的同时也存在着问题需要去解决,SOC 产品从研制到最后验证完毕可以使用需要很长一段时间,而如今科技日新月异,发展极快,卫星产品对产品性能的要求也会一直在增加,因此需要前瞻性规划论证,确保满足航天产品未来型号的应用需求。航天元器件产品需要高可靠性,空间环境恶劣,因此比起普通地面上使用的元器件需要增加抗辐照特性和抗单粒子翻转能力,目前国内的厂商在抗辐照特性上能达到相应的指标,而在工艺上对单粒子翻转进行防护还未突破,一般通过 EDAC 校验从系统级进行防护,系统级的防护能满足大多数中低轨产品的需求。

6 结论

本文针对目前用于航天飞行器的关键控制器芯片国产化不高、严重依赖进口受制于人的问题,设计了一款基于 SPARC V8 内核的卫星执行机构控制器主芯片

SOC812A,以 SOC812A 为核心控制器芯片设计了反作用飞轮控制系统,相比传统的控制系统大大提高了电路的集成度和功率密度,设计的反作用飞轮控制精度也有所提高,SOC 技术是实现电子线路小型化、系统化和航天元器件国产化的有效途径。

参考文献

- [1] 张艳,胡桂. SOC 设计中的核心技术[J]. 微计算机信息,2007,23(29):110-112.
- [2] 晋文亮. 国外航天元器件发展现状与思考[J]. 航天标准化,2009,5(3):45-48.
- [3] 刘兆卿,王喜太,王森. 基于 DSP 无刷直流电机控制系统的研究及其仿真[J]. 微计算机信息,2011,27(9):102-104.
- [4] 姜岩峰,张东,生晓坤. SOC 芯片内嵌模数转换器的验证测试[J]. 电子测量技术,2011,34(12):3-7.
- [5] 贺显龙,雷加. 层次型 IP 核测试环单元的设计[J]. 国外电子测量技术,2010,29(5):56-59.
- [6] 邓立宝,张保权,边小龙,等. 一种“基准量+裕量”拆分重组的扫描链平衡算法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(10):2363-2371.
- [7] XING H Y, ZHANG Q, LU CH X. Adaptive stochastic resonance method for weak signal detection based on particle swarm optimization[J]. Instrumentation, 2015,2(2):3-10.
- [8] 杜颖才,王希军,王树洁,等. 增量式编码器自动检测系统[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(11):993-998.
- [9] 赵品志,崔乃政,刘亚静,等. 基于 FPGA 的单芯片交流伺服驱动系统[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(3):428-431.
- [10] 贺卫东,段哲民,龚诚. 基于 FPGA 的大点数 FFT 算法研究[J]. 电子测量技术,2007,30(11):14-16.
- [11] 郭丹蕊,林晓焕. 基于 DSP 的无刷直流电机控制系统研究[J]. 国外电子测量技术,2016,35(2):98-101.
- [12] 陈启宏,伊小素,王明,等. 基于 AMBA 总线的 SpaceWire 控制模块 IP 核设计[J]. 电子测量技术,2016,39(3):80-84.
- [13] 童良忠,陆永平,李铁才. 方波驱动无刷直流电动机的模型及仿真[J]. 微电机,1991(2):3-7.
- [14] 温嘉斌,赵成,张羽. 螺杆泵用无刷直流电机控制系统的设计[J]. 哈尔滨理工大学学报,2012,17(2):80-83.
- [15] 邵英秋,程德福,王言章,等. 高灵敏度感应式磁传感器的研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(2):349-355.
- [16] 赵凯辉,陈特放,张昌凡,等. 永磁同步牵引电机无速度传感器转矩精确控制[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(1):38-47.

作者简介

周华俊,硕士毕业,上海航天控制技术研究所工程师,上海惯性工程技术研究中心成员,受上海惯性工程技术研究中心支持,主要研究方向为卫星姿轨控系统执行机构的研制。

E-mail:904469053@qq.com