

引用格式:单彦虎,魏淑稳,杨玉华,等.针对FADS的在应用编程的数据解算卡设计[J].电光与控制,2019,26(9):103-106. SHAN Y H, WEI S W, YANG Y H, et al. Design of data solution card for FADS in application programming[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(9):103-106.

针对 FADS 的在应用编程的数据解算卡设计

单彦虎, 魏淑稳, 杨玉华, 焦新泉

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室,太原 030051)

摘要:针对嵌入式大气传感器系统算法软件更新困难的问题,设计了一种专用于嵌入式大气传感器系统的在应用编程的数据解算卡。该数据解算卡以 DSP + FPGA 结构为核心,利用特殊的中断控制逻辑保证 I²C 传输过程不被打断,利用 Flash 的扇区结构可靠地实现在应用编程。试验仿真结果表明,该数据解算卡能够简单、快捷地实现解算软件的在应用编程,满足常用嵌入式传感器系统算法软件运行要求。

关键词:嵌入式大气传感器系统; DSP + FPGA; 在应用编程; Flash; 中断控制

中图分类号: TN4

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.09.021

Design of Data Solution Card for FADS in Application Programming

SHAN Yan-hu, WEI Shu-wen, YANG Yu-hua, JIAO Xin-quan

(Science and Dynamic Testing of Education Key Laboratory of North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem of difficulty in updating the algorithm software of embedded atmospheric sensing system, a data solving card is designed, which can update program in application. With DSP + FPGA structure as the core, the data solving card ensures the I²C transmission process is not interrupted by use of special interrupt control logic. The sector structure of Flash is used for reliable implementation of in-application programming. The simulation results show that the data solving card can realize the in-application programming of the calculating software in a simple and quick way, and meet the running requirements of common embedded sensor system algorithm software.

Key words: embedded atmospheric sensing system; DSP + FPGA; in-application programming; Flash; interruption control

0 引言

随着现代飞行器向高机动性、高速度的方向不断发展,飞行控制系统欲求对飞行器的空中姿态有更严格的把控,需要获取更精确、实时性更高的大气数据参数,这对嵌入式大气传感器系统(FADS)的精度和可维护性提出了更高的要求。嵌入式系统的微控制器一般在设备内部,而且升级软件需要专门的烧录器,现场应用的可操作性较低^[1]。针对FADS算法软件的研究已经趋于成熟,因此本文不做过多介绍。首先对三点法进行了简单介绍,然后从硬件电路设计角度入手设计了一种针对FADS的数据解算卡,该数据解算卡满足复杂的算法解算要求,同时兼顾灵活性,专用的大气参

数解算平台还可缩短大气参数的获取延时。

1 FADS 算法介绍

FADS最早是美国国家航空航天局(NASA)提出的一种为了测量航天飞机进入大气层时的数据的测量系统,它采用嵌入式传感器阵列测量飞行器头部表面的压力分布,经过算法解算间接获得马赫数、大气密度等大气数据。钝头体飞行器FADS中常用的算法包括加权最小二乘法、三点法、神经网络算法,它们的优缺点如表1所示。由表1可知,三点法是目前最为稳定并且得到充分验证的FADS算法,即使是相对成熟的FADS算法,也需要大批量的风洞试验校准,这就意味着FADS在真正用于实际飞行之前,必须进行风洞试验校准^[2-3]。三点法的理论基础是将飞行器的头部近似为一个球体,在FADS系统的动力学模型中,选取任一测压孔将其定义为测压孔*i*,由球体势流模型压力系

收稿日期:2018-10-15

修回日期:2019-06-03

作者简介:单彦虎(1985—),男,江苏无锡人,博士,讲师,研究方向为动态测试、微系统及集成技术、信号处理。

数公式可以推导出测压孔 i 的表面压力分布^[4-5]为

$$P_i(\theta_i) = q_c(\cos^2 \theta_i + \varepsilon \sin^2 \theta_i) + P_\infty \quad (1)$$

式中： θ_i 为测压孔 i 的入射角； q_c 为动压； P_∞ 为静压； ε 为形压系数，与马赫数 Ma 和该点气流入射角 θ_i 有关。 θ_i 与当地攻角 α_c 、当地侧滑角 β_c 的函数关系为

$$\cos \theta_i = \cos \alpha_c \cos \beta_c \cos \lambda_i + \sin \beta_c \sin \phi_i \sin \lambda_i + \sin \alpha_c \cos \phi_i \sin \lambda_i \quad (2)$$

式中： ϕ_i 为该测压点的圆周角； λ_i 为该测压点的圆锥角。

设机体头部传感器阵列存在任意 3 个测压孔 i, j, k ，用 3 点的数据进行解算，即

$$\frac{P_i(\theta_i) - P_j(\theta_j)}{P_j(\theta_j) - P_k(\theta_k)} = \frac{q_c(\cos^2 \theta_i + \varepsilon \sin^2 \theta_i) + P_\infty - [q_c(\cos^2 \theta_j + \varepsilon \sin^2 \theta_j) + P_\infty]}{q_c(\cos^2 \theta_j + \varepsilon \sin^2 \theta_j) + P_\infty - [q_c(\cos^2 \theta_k + \varepsilon \sin^2 \theta_k) + P_\infty]} \quad (3)$$

根据式(1)、式(2)可将式(3)简化并最终得出攻角、侧滑角、静压和动压的计算公式。飞行器头部传感器阵列的设置 5 个，为了抑制系统工作和环境噪声，解算侧滑角时，应选取多种不同的 3 点组合，每种组合求出攻角和侧滑角的值后再取平均数，将取得的平均数作为最终攻角和侧滑角的值^[4]。

表 1 FADS 常用算法比较

Table 1 Comparison of FADS algorithms

算法	优点	缺点
加权最小二乘法	算法与测压孔无关，失效处理简单	采用迭代法实现，收敛性不好控制
三点法	精度高，经过证明不存在稳定性问题	过度依赖 FADS 的动力学模型，测压孔选取不当会造成病态算法
神经网络算法	求解过程不需要修正，实时性好	需要大量的数据进行训练

2 数据解算卡硬件设计

FADS 运算过程由于受算法法则和大气数据计算机性能的限制，将花费一定时间，所以通过 FADS 获取的大气参数延时比较明显^[6]。为了实时精确地获得大气参数，除了要根据特定飞行器基于 FADS 的压力模型选择一个合适的算法之外，建立一个专用的硬件解算平台也是十分必要的。本文采用 DSP + FPGA 框架设计了如图 1 所示的数据解算卡。

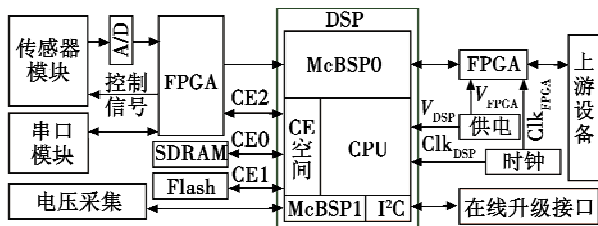


图 1 数据解算卡原理框图

Fig. 1 Structure diagram of data solution card

本文选用美国 TI 公司 TMS320C6713B 型号(以下简称 6713B)的 32 位浮点型低功耗 DSP，以及美国 Xilinx 公司 XC3S200 型号的低功耗 FPGA。芯片 6713B EMIF 具有很强的接口能力，可以访问 8/16/32 位宽度的存储器。4 个 CE 空间通过复用 EMIF 的地址和数据线来控制外部存储器，以达到外部存储器的扩展需求。

美国镁光公司 MT48LC2M32B2TG 型号高速 SDRAM 的最高工作频率可达 143 MHz，行地址总线位宽 11 位，列地址总线位宽 8 位，4 个 bank，单片容量 64 MiB^[7]，可以与芯片 6713B 的 EMIF 总线兼容，满足本文数据解算卡的数据动态缓存需求。美国飞索半导体公司的 S29AL032D 异步 Flash 存储器数据总线宽度为 16 位，存储容量为 32 MiB，满足本文解算卡的程序存储需求。芯片 S29AL032D 起始的 1 KiB 空间存放 Boot 程序，其余空间存放用户程序，该芯片地址总线位宽为 22 位，最大寻址空间 4 MiB，考虑到芯片 6713B 的地址总线位宽为 20 位，并且 FADS 算法程序大小不会超过 200 KiB，基于此，6713B 与外扩 Flash 的接口设计如图 2 所示。

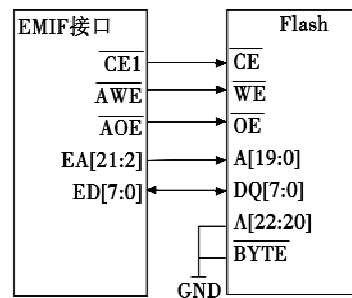


图 2 非易失存储器接口设计

Fig. 2 Connector of Flash

芯片 6713B 的 EMIF 接口常用于进行缓存和其他功能接口的扩展，包括共用地址和数据总线的 4 个 CE 空间，通过 CE 接口进行片选控制。本文使用 CE0 空间控制 SDRAM 用作数据存储器，实现数据动态缓存；CE1 空间控制外部 Flash 用作程序存储器，实现程序的自举引导；CE2 空间通过 FPGA 用作串口的扩展，可以扩展多种串口类型，用作与外围器件的通信。

3 在应用编程底层驱动软件设计

常用的 DSP 嵌入式程序在线升级方法不适用于 FADS 数据解算卡的应用场合，数据解算卡的算法程序更新方法要求安全、可靠、原程序可恢复。本文针对数据解算卡的应用场合结合程序存储器 Flash 内部结构，提出了一种在应用编程的方法对数据解算卡算法程序进行更新。在应用编程的本质是在用户程序中设置一个专用的程序更新模块，该模块主要用于接收新的程

序数据,并将接收到的程序烧写到数据存储单元中,系统正常运行时并不运行该程序模块^[8]。在应用编程的难点在于确保原有用户程序正确的情况下保证新程序的正确传输。

3.1 程序自启动设计

6713B 内部不存在 Flash,系统掉电后再次上电必须首先将程序搬到片内 RAM 上才能保证解算卡的正常运行^[9]。数据解算卡将 6713B 配置为 EMIFBoot 模式,在该模式下系统再次上电后,固化在芯片内部的 Boot 程序可从 CE1 处搬移 1 KiB 的程序到内部 RAM 上,1 KiB 的程序显然不能满足复杂算法的设计需求,因此需要编写二次 Boot 程序^[7],其原理是首先编写一个搬移程序即“启动程序”,并将启动程序放置在 Flash 的起始 1 KiB 处,然后启动程序再将用户程序搬移到片内 RAM 上,最终实现 FADS 算法程序的 Boot,具体实现过程见图 3。

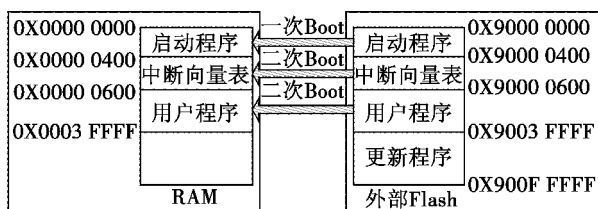


图3 程序 Boot 过程

Fig. 3 Boot process of software

3.2 程序传输控制与存储管理

芯片 6713B 的中断包括复位、不可屏蔽中断(NMI)、可屏蔽中断 3 种,其优先级依次减小。可屏蔽中断包括 12 个,彼此优先级也不相同。

本文使用芯片 6713B 的 I²C 模块作为在应用程序更新的数据传输通道,当 6713B 中的 I²C 模块准备好数据传输时,会给 CPU 发送一个可屏蔽中断,程序数据传输过程中断可能造成不可预估的错误,甚至导致更新后程序难以正常运行。理论上,CPU 在执行中断服务程序时,其他中断均被禁止。但是 I²C 模块只能触发可屏蔽中断,该中断优先级并非最高,能被 NMI 打断,NMI 通常用于向 CPU 发出严重硬件问题的警报,如电源故障^[10]。

缺省模式下芯片 6713B 并不支持可屏蔽中断的嵌套,本文的中断服务程序在末尾处对中断寄存器进行复位操作,保证了在硬件不发生严重错误的情况下,程序数据传输过程不会被其他可屏蔽中断打断。

本文借鉴文献^[5]的烧写防出错设计,将更新的程序烧写至 Flash 开辟的新程序专用分区,确认烧写完成且正确时再擦除现有应用程序,并将新程序烧写至应用程序块区,Flash 扇区管理如图 4 所示。

根据实际选用的 Flash 的扇区管理模式,开辟出一个专用于程序更新的扇区,保证在进行程序更新时现有用户程序的安全,避免了因程序更新导致整个设备软件系统的故障,系统上电时只搬移扇区 SA0 ~ SA3 处的程序。

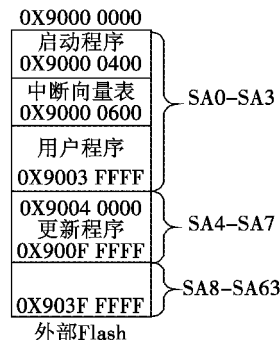


图4 Flash 内部程序存储结构

Fig. 4 Structure of software in Flash

3.3 在应用编程设计

本文规定程序数据传输时上位机为 I²C 总线主机,DSP 为从机。数据传输开始时主机首先发送“开始帧标志”(5A5A),从机接收到开始指令进行 Flash 扇区擦除,从机擦除完成后给主机发送一个擦除完成指令,然后主机开始数据传输,从机接收到“结束帧标志”(EB90)标志着数据传输完成,对比较验结果,如果数据传输成功,则将程序从 Flash 的备用存储区搬移至用户程序区,并向主机发送“程序更新成功标志”(54 AA FE 00),程序更新流程如图 5 所示。

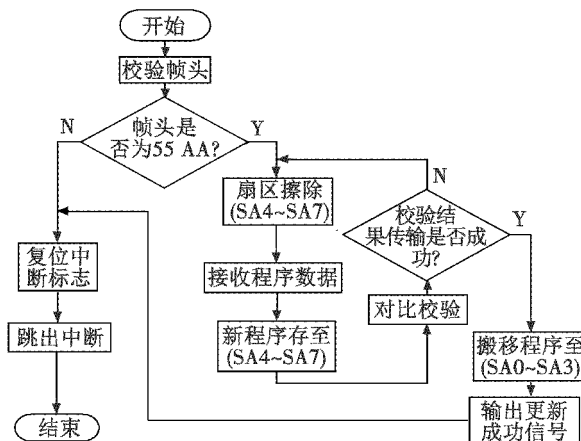


图5 程序更新流程

Fig. 5 Flow diagram of software updating

为了保证数据传输的正确性,本文借鉴文献^[11]中提出的一种基于 ASCII 校验和的数据校验方法来确保数据传输的正确性。ASCII 校验和就是将数据的 ASCII 码之和作为数据传输的校验字,这种校验方法结构简单、实现方便。

4 功能验证

为了验证数据解算卡可以满足 FADS 各种算法需求,本文选取基础最为稳定的三点法作为验证算法,将基于三点法的算法软件加载到数据解算卡中,采用 Matlab 仿真的模拟数据作为原始输入,运算结果与仿真结果相同,数据解算卡基本功能得到验证。

采用自编的 I²C 串口测试程序作为上位机测试程序,将程序文件编译为“bin”文件后,计算“bin”文件的 ASCII 之和作为校验码,在程序传输完成之后,DSP 从 Flash 对应扇区读出对应的程序文件,并计算 ASCII 之和与校验码进行对比,返回传输成功指令字。根据前文分析,若主机接收到“55 AA FE 00”,表明程序更新成功,图 6 中的指令回读区收到“55 AA FE 00”,表明数据解算卡在应用编程成功。



图 6 上位机界面

Fig. 6 Interface of upper computer software

5 结论

本文针对大气数据获取过程的 FADS,采用 DSP + FPGA 结构,DSP 作为算法运行平台,FPGA 作为数据整理与采集平台,设计了一种可在应用编程的数据解

算卡,作为一种专用的数据解算平台,有效地缩短大气参数获取延时,本文设计的数据解算卡具备在应用编程的功能,大大简化了 FADS 算法软件的更新流程,一定程度上缩短了大气数据采集系统的开发周期。

参考文献

- [1] 詹圣益. 嵌入式软件在线升级的设计及实现[D]. 上海:上海交通大学,2014.
- [2] 王鹏,金鑫,张卫民,等. 锥头机体用 FADS 系统的校准[J]. 实验流体力学,2016,30(2):97-102.
- [3] 张勇,肖前贵,陆宇平,等. 一种适用锥头体的嵌入式大气数据传感系统改进校准算法[J]. 计算机测量与控制,2014,22(5):1513-1515.
- [4] 秦菲. 基于 FADS 系统的数据解算卡的设计与实现[D]. 太原:中北大学,2018.
- [5] 刘浩,李荣冰,刘建业,等. 基于串口通信的 DSP 在线烧写技术研究[J]. 电子测量技术,2017,40(7):184-187.
- [6] 温瑞珩,郑守铎,叶玮. 嵌入式大气数据传感技术的发展现状[J]. 电光与控制,2008,15(8):53-56.
- [7] 单彦虎,谢璐,杨玉华,等. 基于 DSP + FPGA 的飞控系统硬件平台设计[J]. 火力与指挥控制,2017,42(11):169-173.
- [8] 雷卫延,敖振浪,周钦强. 基于 STM32 的在应用编程(IAP)开发[J]. 电子测量技术,2015,38(5):62-66.
- [9] 官琴,赖文娟,张筱波. 一种基于 TMS320C6713 串口烧写 FLASH 实现自启动的方法[J]. 兵工自动化,2014,33(2):91-92,96.
- [10] 刘伟. DSP 原理与应用[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2012.
- [11] 卢峥,程涛,李坤贺,等. 一种基于串口的 DSP 程序烧写的方法[J]. 兵工自动化,2014,33(12):59-62.