

飞行控制计算机采集处理系统的设计与实现

罗秋凤¹, 王海涛², 蒋梦浩³

(1. 南京航空航天大学 无人机院, 江苏 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016;

3. 江西省武警总队, 江西 南昌 340010)

摘要:针对飞行控制计算机对无人机姿态和航迹信息采集处理的要求,给出了以DSP TMS320LF2407A为平台的模拟量、通信量、开关量采集处理的详细设计方案。方案中分别阐述了模拟量、通信量、开关量接口电路、片选控制逻辑和类8259中断控制逻辑的CPLD思想、硬件滤波和软件抗干扰思想。该采集处理系统硬件接口简洁、实时性强、抗干扰特性好,具有很强的工程应用性。

关键词:无人机;信号采集;DSP;CPLD

中图分类号:TP391.8;V249.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-8829(2010)08-0030-05

Design and Implement of Data-Acquisition for Flight Control System

LUO Qiu-feng¹, WANG Hai-tao², JIANG Meng-hao³

(1. Research Institute of Unmanned Aircraft, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Headquarters of Armed Police Force of Jiangxi Province, Nanchang 340010, China)

Abstract: To improve the data-acquisition performance of flight control system embedded in unmanned aerial vehicle (UAV), the design of a small UAV control computer data-acquisition system based on DSP (TMS320LF2407A) is proposed and implemented. It introduces the structure of the data-acquisition system for the analogue signals, the communications data and the switching discrete signals. The design scheme, hardware interfaces and the acquisition process of each module are described in detail. Because of the complex programmable logic device (CPLD) applications, chip-selection logic signal and similar 8259 interrupt logic extension are implemented simply in the data-acquisition system. The interface of the UAV data acquisition system based on DSP has the good characteristic of anti-interference. It also has the characteristics of real-time property, accuracy, stability. It has the strong ability of engineering application.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); data-acquisition; DSP; CPLD

无人驾驶飞机简称无人机或 UAV (unmanned aerial vehicle), 是一种由无线电遥控操纵或程序控制、无人驾驶的一种可重复使用的航空器, 适合于完成危险性大、机动性高等有人飞机难以完成的任务^[1-2]。

飞行控制计算机用于实现无人机从起飞到着陆全过程的飞行控制功能。飞行过程中, 飞行控制计算机实时采集来自机载传感器的模拟量和通信量, 例如无人机的飞行姿态信息 (俯仰角、滚转角、航向角及它们

的变化速率), 通过飞控内回路操纵相关的舵面, 完成无人机飞行姿态的操作与稳定; 采集处理导航系统 (或高度速度传感器) 测定的飞行高度、高度速率, 通过飞控外回路操纵升降舵, 完成飞行高度的操纵与稳定; 采集处理导航定位系统测定的经度、纬度、地速、高度与航迹角等信息, 依托于飞控内回路, 完成二维航迹的跟踪与稳定、飞行高度的操纵与稳定, 实现三维自主飞行。

此外, 飞行控制计算机采集与解码遥控遥测系统的通信量, 获取地面测控站的上传信息, 实施航路和参数的无线装订, 以及无人机的人工引导飞行; 采集与解码地检口的通信量, 完成对飞行控制计算机性能和功能的测试; 采集与变换各种开关离散量, 完成飞行安全

收稿日期: 2009-12-29

作者简介: 罗秋凤 (1970—), 女, 副教授, 主要从事检测技术与自动化装置的研究; 王海涛 (1968—), 男, 副教授, 主要从事光电检测技术研究。

控制、油门档位控制、指令操作盘响应和任务设备的管理。

1 信号采集系统的需求分析

一般来说,飞行控制计算机采集信息分为模拟量、通信量、离散量3大类。

模拟量信息包括:姿态传感器的输出信号(俯仰角、滚转角、偏航角、俯仰角速率、滚转角速率、偏航角速率)、执行机构的反馈信息(副翼舵反馈、升降舵反馈、方向舵反馈)、发动机转速以及温度、电源电压等。其中姿态传感器的输出信号或机载执行机构的反馈信息是无人机飞控内外回路控制率解算的基础,须用高分辨率的数模转换器进行采集,并进行低频滤波,以消除机内复杂电磁环境影响。

离散量信息包括:设备开关、武器投放、油门指令、指令盘指令、安全指令等。每一类指令都需要多路输入或输出的离散量控制信号。

通信量信息包括:导航系统、遥控遥测系统、地面检测系统、高度速度传感器、航向传感器等的通信信息,其中与导航系统、遥控遥测系统、地面检测系统通信的数据量大,要求通信波特率高,误码丢码率低。

2 信号采集系统的总体设计

飞行控制计算机采集处理系统^[3]构成如图1所示,采集处理核心CPU为DSP处理器TMS320LF2407A,其外围扩展了模拟量(AD&DA)板、通信量板、离散量调理板、和模拟量调理板。母板在各个模块之间起到一个“桥梁”作用,其他模块通过欧式连接器与母板相连,实现各个板卡间的信号传递、转接和集线等功能。

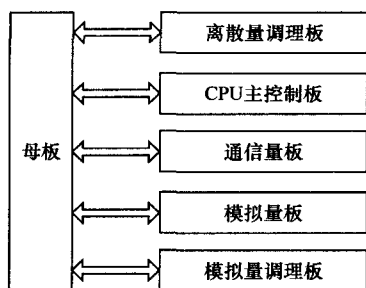


图1 信号采集系统的组成

CPU主控制板是整个飞行控制计算机硬件系统的核心模块,CPU采用的是TI公司16位定点低功耗的TMS320LF2407A^[4](以下简称“2407A”),最大运行速度可达到40 MIPS,指令周期25 ns(40 MHz),2407A集成了众多片内外设,包括:16通道的10位A/D转换器、控制器局域网(CAN)模块、串行通信接口(SCI)模块、16位的串行外设(SPI)接口模块、40个可单独编

程或复用的通用I/O引脚、5个外部中断、看门狗定时模块(WDT)等。主控制板上扩展了64 KW的IS61LV6416作为程序存储器,用于调试软件和机载软件的存储。另外,外扩了64 KW的NVS RAM数据存储器,用于掉电和过低电压时飞机姿态、三维航迹等重要数据的掉电保护。2407A丰富的片内资源和可扩展性,使得飞行控制计算机具有较强的实时性、较高的自主导航能力和成本低等特点。

由于飞行控制计算机的设计规模较大,逻辑控制较为复杂,因此在串口扩展板上采用了ALTERA公司的CPLD EPM7128SLC84来完成系统中各模块芯片的逻辑片选、译码,及外部中断的控制。

3 信号采集系统的详细设计

3.1 模拟量的采集

模拟量板主要完成无人机机载传感器的信号采集与转换功能。采用的模数转换器包括2407A片内的ADC和扩展的ADC芯片MAX197^[5],下面分别介绍。

3.1.1 模数转换器(ADC)介绍

2407A片内具有16路内置采样/保持(S/H)的10位模数转换模块(简称ADC),片内ADC具有软件启动式(用SOC SEQn位)、事件管理器式(EVA、EVB)、外部ADCSOC式的启动转换模式。多种启动转换方式可实现不同模拟信号不同采样频率的功能。无人机的发动机转速、电源电压、温度等采样精度要求不高的模拟量采用片内ADC来完成。

MAX197是8通道12位分辨率的并行接口ADC,+5 V单独供电,双极性采样,模拟量电平范围为 ± 10 V或 ± 5 V,ADC转换时间为6 μ s,采样速率可达100 kS/s^[5]。三态数据总线,“8+4”的总线复用模式。俯仰角、滚转角、偏航角、俯仰角速率、滚转角速率、偏航角速率和副翼舵反馈、升降舵反馈、方向舵反馈信号采用MAX197来完成这些模拟量的采集处理。

3.1.2 模拟量采集的硬件接口设计

MAX197的片选(CS)及读写信号(RD、WE)在EPM7128SLC84 CPLD中通过相应的译码选通电路选通;控制数据总线高/低字节输出允许信号(HBEN)在EPM7128SLC84 CPLD中由2407A的一个通用I/O引脚与其相连来控制该信号的高低电平;中断输出信号(INT)与2407A的外部中断引脚XINT2在CPLD中连接。MAX197的硬件接口原理如图2所示。

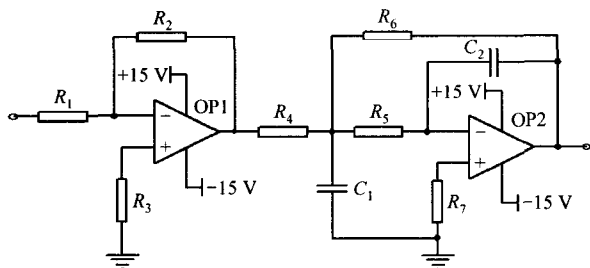
3.1.3 模拟量的调理

模拟量输入的幅值变换和硬件抗混叠滤波由模拟量调理板完成。无人机系统中的机载传感器和舵机等设备输出信号的电压范围一般为 $-15 \sim +15$ V,超过MAX197采样电压范围,因此在数据采集前要把这些

提高了系统效率。对 TL16C754 的 4 个通道 TX、RX 进行电平转换,可以扩展成 RS422 或 RS232。本系统设计成 3 个 RS422 口和 1 个 RS232 口,分别与遥控遥测系统、地检口、航向传感器、高度速度传感器实施通信。



图3为设计原理图,前级运放实施增益变换, $A_v = R_2/R_1$,后级运放实施二阶低通巴特沃斯滤波,通带内增益不变,截止频率 $f_c = 1/(2\pi \times \sqrt{C_1 \times C_2 \times R_5 \times R_6})$ 。二阶低通巴特沃斯滤波器在截止频率处增益变化很快,为了确保通带内增益不变,滤波频率在设计时应小于截止频率。

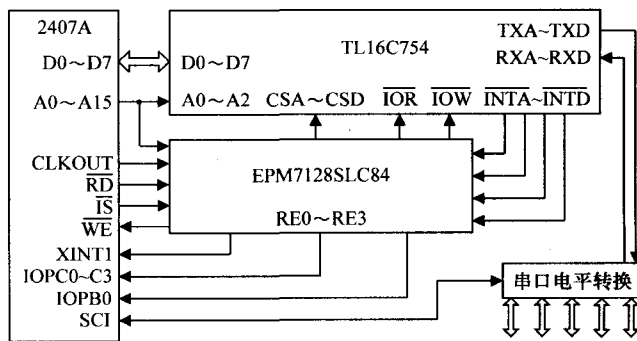


3.2 通信量的采集

3.2.1 串行通信接口简介

TL16C754 是 64 B FIFO 的 URAT, 相当于 4 个内含 FIFO 缓冲区的通用异步串口 8251, 输出电平与 2407A 兼容。在 FIFO 工作模式下, 每通道的发送和接收 FIFO 深度可设置, 减少了 CPU 的中断/查询频率,

图 4 中, TL16C754 的 8 位数据线和选择片内寄存器的 3 位地址线直接与 2407A 的数据和地址总线相连; TL16C754 的 4 个串行通道片选信号 (CSA ~ CSD) 和读写信号 (IOR、IOW) 通过相应的译码选通电路在 EPM7128SLC84 (CPLD) 芯片中控制; 4 个中断信号 (INTA ~ INTD) 在 CPLD 中经一个类 8259A 的中断控制器与 2407A 的外部中断 XINT1 相连。串口类传感器与飞行控制计算机通信过程中, 数据量大, 波特率高, 频繁地占用 CPU 时间。为了高效地管理各个外设的中断源, 用 CPLD 仿真中断控制器 8259A, 有效地解决了直接使用 8259A 芯片或软件进行中断扩展所带来的缺点, 并节约了开发成本。4 个中断源 INTA ~ INTD 向 DSP 提出中断请求, 经过类 8259A 内部判优以后, 向 DSP 的外部中断引脚 XINT1 发送中断请求信号, 同时也会向 DSP 的外部 IOPCO ~ IOPC3 端口发送中断类型码 RE0 ~ RE3。



3.3 离散量的采集

3.4 系统抗干扰措施

模拟量输入通道在 A/D 采样之前已经通过了前置硬件低通滤波处理,但仍旧不可避免地存在一些随机性干扰,因此本文把采样值又进行了数字滤波处理。处理方法是:每个通道采样 5 遍,去除其中的最大值和最小值,然后对剩下的数值取平均,最后将此平均值作

为最终有效值,供飞行控制计算机解算导航控制率使用。

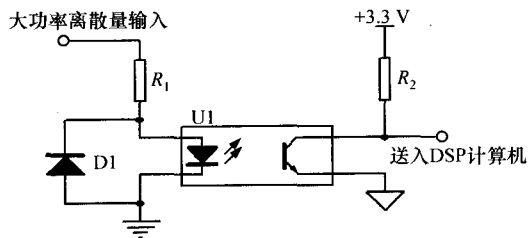


图5 离散量采集的硬件接口设计

CRC 校验又称循环冗余校验,是数字信号传输中用得较普遍的一种差错控制效验方法。它不但可以用于纠正独立的随机错误,也可以用于纠正突发错误。本文对串口通信数据有效性判断的主要措施是采用CRC 校验方法。首先构造一张256种组合的CRC 查询表^[7],然后通过查表的方式来进行CRC 校验计算。计算方法如式(1)所示。此方法比传统CRC 计算方法快4~10倍。

$$\text{CRC_Value} = (\text{accum} \ll 8) \oplus \text{crcstab}[(\text{accum} \gg 8) \wedge \text{data}] \quad (1)$$

式中,CRC_Value 为CRC 校验值;accum 为累加器值;crcstab 为CRC 校验表数组;data 为参与CRC 计算数。

离散量输入信号采取电平触发方式进行硬件抗干扰处理,同时采用软件方式抗干扰,机载软件对离散量

电平是否有效采取一定宽度时延方式检测,滤除了随机尖峰干扰。

4 实验结果

对飞控计算机多通道串口通信模块的性能验证重点在于扩展的4 串口通道,DSP 片上的串口通道性能不容怀疑。对扩展的4 串口通道分别考核了其4 串口并行工作条件下的发送或接收的单工通信方式的性能。在多串口单工通信考核通过后,再考核多串口双工通信性能。用4 台PC 机模拟串行外设,与DSP 飞控计算机进行大量高速的数据交换。在以频率为10 Hz、传输率为19.2 kb/s、奇偶校验、一次80~100 B 数据包、中断方式发送接收,串口连续传输200~300 万B 的多次拷机通信试验中,单工通信数据传送正确,误码率0,通信稳定可靠;双工通信数据传送正确,误码率0,丢码最多不超过500 B,丢码率在0.2‰以内。若双工通信连续拷机数据量减少到100 万以下,丢码现象几乎消失,偶尔丢几十字节。双工通信的丢码问题通过CRC 校验方式可以大大减弱。多次、长时间通信拷机试验表明,设计的通信模块工作性能稳定、可靠,符合飞控计算机的实际应用要求。图6 为一台PC 机通信结果,图7 为3 个串口通信计数器在DSP 内存的数据。

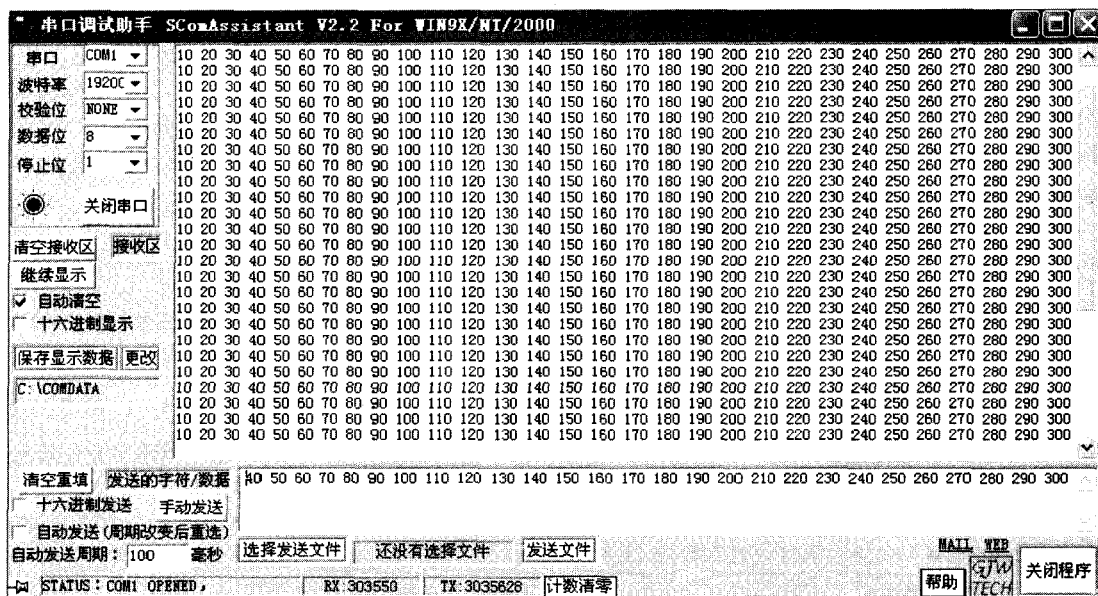


图6 PC 机模拟外设串口调试助手试验结果

使用定时器定时,启动片内外的模拟量采集模块对经调理电路调理的标准定值或正弦波形信号采样。试验结果表明,把调理电路统计在内,整个模拟量通道的采样精度约比理论值低20%左右,采样精度高。由于设计中考虑了通带内外增益突变问题,实际测试发现,信号在通带内没有衰减,滤波效果也非常好。因此

模拟量模块性能完全满足飞控计算机的设计要求。该离散量通道的设计方法已成功应用到多个型号的无人机飞控计算机中。

5 结束语

以TMS320LF2407A为核心的飞行控制计算机数

Name	Value	Type	Radix
receive_count_a	3062157	unsigned long	decimal
deal_count_a	306180	unsigned long	decimal
receive_count_b	3035828	unsigned long	decimal
deal_count_b	303550	unsigned long	decimal
receive_count_c	3055275	unsigned long	decimal
deal_count_c	305430	unsigned long	decimal

图7 DSP内存观察窗中3个串口的通信结果

据采集系统,充分发挥了DSP芯片强大的信号处理性能,扩展了多通道开关量、模拟量、通信量的数据采集模块,各模块自成一体独立制板,功能稳定可靠,易于维护,增强了飞行控制计算机的安全性、可靠性和维护性。同时该数据采集系统资源丰富,性能稳定,可以推广到不同的数据采集应用场合。

参考文献:

- [1] Fashlstrom P G, Gleason T J. 无人机系统导论[M]. 北京:电子工业出版社,2003:1-10.
- [2] 苏新兵,王建平,华江涛. 无人驾驶飞机综述[J]. 航空制造技术,2003,(9):28-30.
- [3] 江思敏. TMS320LF240x DSP 硬件开发教程[M]. 北京:机械工业出版社,2003-06.
- [4] Texas Instruments Incorporated. TMS320LF2407A, LF2406A, LF2403A, LF2402A, LC2406A, LC2404A, LC2402A DSP controller[Z]. 2002.
- [5] Maxim. MAX197 Multi-range (± 10 V, ± 5 V, $+10$ V, $+5$ V), single $+5$ V, 12-bit DAS with 8 + 4 bus interface[EB/OL]. <http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/1042>, 2001.
- [6] Texas Instruments Incorporated. TL16C554, TL16C554I asynchronous communications element[EB/OL]. <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/tl16c554.pdf>, 2001.
- [7] 刘会杰,张乃通. 基于查表法的快速CRC校验算法设计[J]. 通信技术,2002(4):8-10.
- [8] 王斌,罗秋凤,王海涛. 某小型无人机的飞行控制计算机的硬件设计[J]. 计算机测量与控制,2006,14(10).
- [9] Altera Coporated. MAX7000 programmable logic device family[EB/OL]. <http://www.altera.com/literature/ds/m7000.pdf>, 2003.
- [10] 刘和平,王维俊,江渝,等. TMS320LF240x DSP C语言开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [11] 黄郑,夏建刚. 在CPLD管理下实现高效多串口中断源[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2002,10(7):34-36.
- [12] 宋莹,高雪松,季晓勇. CPLD在DSP系统中的应用设计[J]. 电子技术应用,2004,30(8):65-69.
- [13] 黄郑,夏建刚. 在CPLD管理下实现高效多串口中断源[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2002,10(7):34-36.
- [14] 汤少维. 基于EPM7064的多串口管理系统设计[J]. 现代电子技术,2006,29(4):78-80.
- [15] 刘歌群,刘卫国,卢京潮. 无人机强实时性串行通信程序设计[J]. 计算机应用,2005,25(1):210-212.
- [16] 邵春声. TL16C554和DSP的串行通信[J]. 四川工业学院学报,2004,23(1):100-102.
- [17] 顾永建. 利用TL16C554实现主从式多机串行通信[J]. 电子世界,2004,(6):50-51.
- [18] 薛安国,吕运鹏,陈兴科,等. 小型无人机控制系统的飞行控制器设计[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版),2005,20(2):65-66.
- [19] 孙传友,孙晓斌,汉泽西,等. 测控系统原理与设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002:198-240.
- [20] 林晓春,过润秋. Altera EPLD系列器件EPM7128性能特点及应用[J]. 国外电子元器件,1998,(11):42-45.
- [21] 王克家,周宝宇. 用CPLD实现可变延时芯片的设计[J]. 应用科技,2001,28(4):12-13.

□

(上接第29页)

回波信号的起始点。

表1 χ^2 检验结果

	第1周期	第2周期	第3周期	第4周期	第5周期
S^2		4.40E-04	4.78E-04	0.0138	0.0689
σ_0^2	2.70E-04	2.70E-04	4.23E-04	4.59E-04	0.0133
$\frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2}$		39.126	27.168	721.05	124.33

3 结束语

采用数字信号处理的超声回波测量方法,基于ARM芯片的高性能,通过数字滤波器、假设检验,准确找到了超声回波信号的起始点。由于数值处理方法的灵活性,可方便地推广到其他物位测量及气体、液体的

流速测量中。

参考文献:

- [1] 张珂,俞国华,刘钢海. 超声测距回波信号处理方法的研究[J]. 测控技术,2008,27(1):48-50.
- [2] 唐慧强,黄惟一,李萍,等. 基于DSP的超声风速测量[J]. 东南大学学报(英文版),2005,21(1):20-23.
- [3] 龚志勇,程远,勾勇华,等. 采用DS18B20作温度补偿的超声波液位计[J]. 测控技术,2004,23(11):6-7.
- [4] Mitra S K. Digital signal processing a computer-based approach[M]. 3rd edition. McGraw-Hill Companies,2004-12.
- [5] 武卫华. 基于MATLAB的IIR数字滤波器的设计[J]. 自动化仪表,2003,24(7):19-22.
- [6] 余成波,陶红艳,杨菁,等. 数字信号处理及MATLAB实现[M]. 北京:清华大学出版社,2008.

□