

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.08.026

基于双 DSP 架构的微小型无人机飞行控制系统

谷新宇, 李宗伯

(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为对无人机进行控制和管理, 针对某型微小型无人机设计了一套自动飞行控制系统。系统硬件主要由飞行控制计算机、导航计算机、舵机和传感器等组成。系统采用双 DSP 的系统架构, 将飞行控制与任务管理功能分开, 选用 2 片 TMS320 系列的 C2000 系列 C2809 微计算机进行同步运算和控制, DSP 芯片之间采用异步通讯方式进行数据传输。经过地面实物调试和飞行试验, 该硬件结构能满足飞控系统需求, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 无人机; 嵌入式计算机; DSP; 飞行控制

中图分类号: V279; TP273 **文献标识码:** A

Micro Unmanned Flight Control System Based on Dual DSP Architecture

Gu Xinyu, Li Zongbo

(Dept. of Computer Science & Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the control and management of the unmanned, design an automatic flight control system aim at a micro unmanned. It is composed of the flight control computer, navigation computer, steering gear, sensors and other components. The flight control and mission management functions separately, dual DSP system architecture use two TMS320 C2000 series C2809 micro-computer synchronization operation and control, DSP chip with asynchronous communication between data transmission. Through ground physical debugging and flight testing, the hardware architecture to meet the needs of the flight control system, which has some value in engineering.

Keywords: unmanned; embedded computer; DSP; flight control

0 引言

飞行控制系统是无人机的控制、管理和计算中心, 系统硬件主要由飞行控制计算机、导航计算机、舵机和传感器等组成。故针对某型微小型无人机提出一种双 DSP 的系统架构, 将飞行控制与任务管理功能分开, 并综合无人机各控制子系统功能和性能, 完成其接口电路的设计。

1 系统硬件的设计要求

微小型无人机飞控系统硬件的设计应该满足以下要求:

- 1) 控制器体积要小, 能安装在机舱内狭小的空间;
- 2) 重量轻, 小于飞机的允许载荷;
- 3) 控制器能耗低, 巡航时间内所耗能量不超过机载蓄电池储存能量;
- 4) CPU 运算速度快, 能在一个任务周期(40 ms)内完成控制输出的计算, 并且控制输出精度高、稳定性好;
- 5) 可靠性高, 持续稳定工作时间长;
- 6) 存储空间大, 可满足复杂控制程序存储和试

飞所需辨识数据存储的要求。

2 系统硬件配置

将飞控计算机分成 DSP 插件板和传感器插件板 2 部分。各板卡通过螺柱连接在壳体上。

硬件配置的原则是: 提高空间利用率, 采用 2 块线路板组合使用的方式; 尽量多采用串行 SPI 总线, 少采用总线结构, 以减小线路板体积, 降低干扰; 为将信号间的干扰降到最低, 需要将模拟量和数字量尽量分开布置; 系统连接必须具有高可靠性。

2.1 DSP 插件板组成与功能

DSP 插件板是飞控系统的中枢, 主要用于小信号的幅值、功率隔离放大, 大信号的幅值衰减, 输出 PWM 信号驱动舵机, 同时, 需要实时采样监控电源电压、电动机电流等信号。其背面布置压力传感器的调理电路、串口转换芯片和串口驱动芯片, 正面布置导航 CPU 和飞控 CPU 等。

DSP 插件板的电路结构框图如图 1, 其主要功能包括:

- 1) 使用串口与电子罗盘、GPS 接收器、三轴惯性传感器、任务设备、机载测控设备、数据注入口

收稿日期: 2010-03-01; 修回日期: 2010-04-23

作者简介: 谷新宇(1977-), 男, 湖南人, 从事嵌入式系统的研究。

通信;

2) 监控并处理从传感器插件板输入的任务电池电压信号、任务电池放电电流信号、动力电池电压信号和动力电池放电电流信号等;

- 3) 采集大气动压信号、大气静压信号;
- 4) 处理并监控电机转速信号;
- 5) 输出开伞控制信号;
- 6) 输出舵机控制信号和电动机调速信号。

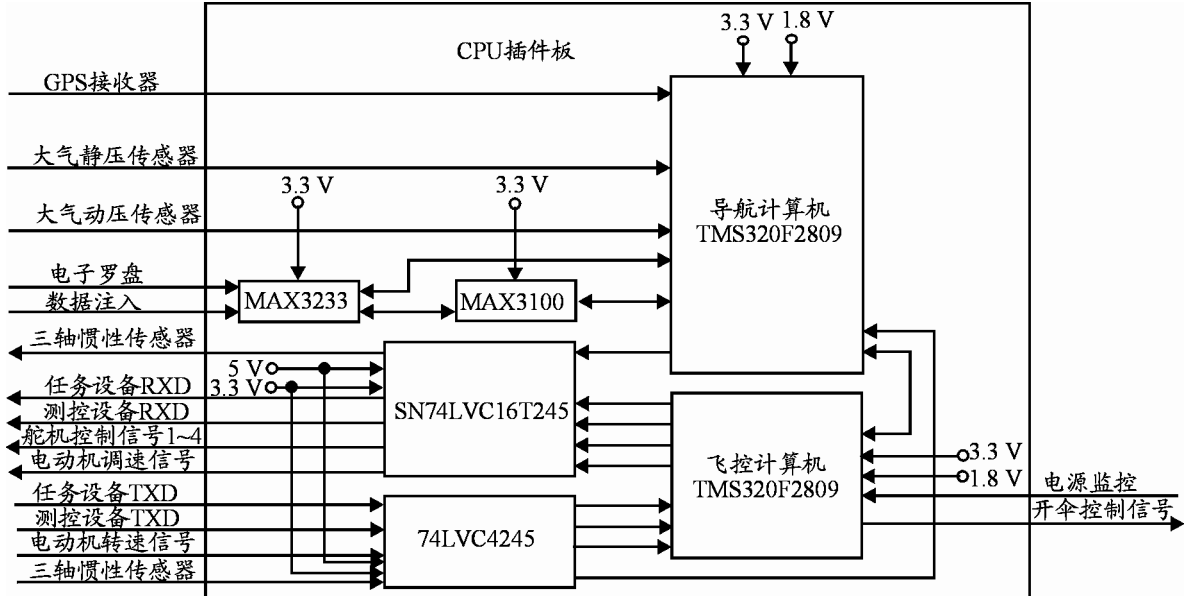


图 1 DSP 插件板的电路结构框图

2.2 传感器插件板的组成与功能

传感器插件板上集成了飞控系统所需的全部传感器,板卡正面布置动压传感器、静压传感器、GPS、三轴加速度和三轴角速度集成惯性测量单元;背面布置二次电源(3.3 V),串口扩展芯片等。传感器插件板的主要功能有:

- 1) 采样大气动压信号、大气静压信号;
- 2) 采样三轴加速度信号、三轴角速度信号、航向信号和位置信号;
- 3) 为所有传感器和芯片提供适合其工作的电源。

传感器插件板的电路结构框图如图 2。

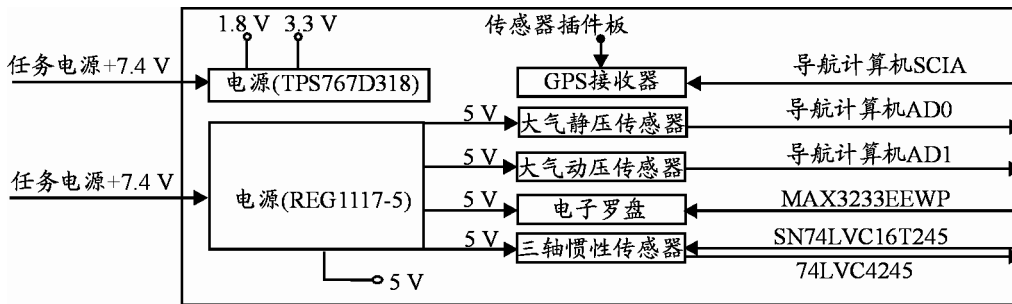


图 2 传感器插件板的电路结构框图

3 器件的选型

该飞控计算机的机载传感器和舵机执行机构选用的货架产品,见表 1。为简化系统,传感器输出采用直流输出或串口输出。姿态、高度等尽可能有冗余监控,以提高系统可靠性。由于该无人机体积小,重量、成本要求严格,MEMS 传感器的温漂误差和零位随机偏移较大,需对传感器数据进行误差修正、滤波和补偿等,使其达到准确测量飞机六自由度运动参数,精确控制飞行姿态,以满足飞行稳定性和导航精度等各项技术指标的要求。

表 1 传感器和执行机构选型表

序号	名称	型号
1	三轴陀螺和加速度计	ADIS16355
2	磁航向罗盘	ZCC220-232Z
3	差压传感器模块	ASDXL05D44D
4	绝压传感器模块	ASDX015A24R
5	GPS 模块	GPS-1055
6	电流传感器	ACS750xCA-050
7	左副翼舵机	
8	右副翼舵机	
9	升降舵机	HS-5125MG
10	方向舵机	
11	开伞舵机	

姿态传感器采用三轴角速率陀螺, 经解算完成姿态角输出。在上电初始阶段, 飞机处于水平状态, 由磁航向传感器给出基准航向, 在此基础上飞控计算机采样三轴角速率陀螺和线加速度计的输出信号, 经过温度补偿、零位补偿、误差滤波处理得到接近真实的角速率数据, 根据角速度与三轴角度之间的投影、积分关系连续解算出飞机的实时姿态角。系统采用三轴角速率陀螺和线加速度计集成测量模块, 选用 AD 公司的 ADIS16355。

航向传感器采用 ZCC220-232Z 电子罗盘。该罗盘以数字方式输出航向信号, 其工作原理是通过磁传感器感应地球磁场的磁分量, 从而得出方位角度, 同时, 还可以输出姿态信号, 数字信号接口可以与姿态传感器测量的姿态角形成姿态冗余, 提高系统可靠性, 在飞机上电时作为解算姿态的初始基准和飞行中姿态校准的依据。

绝对压力传感器采用 InvenSense 公司的 ASDX015A24R, 其内部有一个真空基准, 测量后输出的电压与绝对压力基准电压值成正比, 用以换算出系统当前相对海平面的高度。它内部采用 5 V 电源供电, 双列直插式封装, 内置的专用集成电路 (ASIC) 可进行误差校准和温度补偿, 提供有关传感器偏置量、灵敏度、温度系数和非线性的数字校正。ASDX015A24R 有一个模拟量电压输出接口, 输出的电压模拟量在补偿供电范围内与供电电压成线性比例关系。

ASDXL05D44D 是双向压差传感器, 用来测量气压的差值, 换算出飞机的空速。其基本工作原理是通过外部两个通气孔将压力施加在检测膜片的两边, 通过检测膜片的变形和专用感应电路的测量形成相对压力差值的模拟量电压输出信号。在系统中, 下端的 P2 通气孔作为基准正压测量孔, 裸露在机身中, 用以测量飞机当前的气压基准值; 上端的 P1 通气孔作为负压测量孔, 通过橡胶皮管与安装在机翼外部的空速铜管相连, 接通飞机外部的气流, 用于测量当前飞机外部的压力; 得到机身外部与内部的压力差后, 通过换算就可得到出飞机当前飞行的空速信息。

GPS 接收机提供无人机的位置信息, 同时也可与高度 (绝对压力)、空速 (相对压力) 传感器构成高度、空速冗余, 由 GPS 接收机提供的飞机经纬度、地速、高度等信息与姿态传感器解算的姿态角构成 MIMU/GPS 组合导航运算系统。系统选用

GPS-1055 模块, 其定位精度小于 10 m, 数据更新率大于 1 次/s, 20 个通道, 热启动时间 1 s, 冷启动时间 42 s。

该无人机动力系统采用外转子电动机驱动, 可实时监控电动机的电压和电流信号, 从而得到动力系统的输出功率, 对于保持和控制飞行高度和飞行速度具有重要意义。动力系统的电压信号采集使用电阻分压的形式, 较为简单。电流采样则使用基于 MEMS 技术的线性霍尔式电流传感器, 体积小、重量轻、功耗低。飞控系统选用 Allegro 公司的 ACS750xCA 系列 50A 电流传感器, ACS750xCA 系列具有带温度自校正和增益补偿功能, 采样电压线性输出, 3 kV 浪涌电压有效抗雷击和可靠性高等技术特点。

舵机是飞机的执行机构, 计算机根据航线信息和飞机的姿态信息, 按照控制律解算出当前各个舵面的偏移量, 以达到控制飞机飞往预定目标的目的。全机共有五路舵机: 左副翼舵机、右副翼舵机、升降舵机、方向舵机和回收开伞舵机。综合体积、功耗和扭矩等因素, 系统选用韩国 Hitec 公司 HS-5125MG 型数字式舵机。外接线分别为电源线、地线、信号线。

飞行控制计算机采用双 DSP 架构, 将传感器信号处理和导航功能与飞行控制率解算、任务管理和飞行状态监控等功能分开, 采用双 DSP 架构有利于节约计算资源和提高计算速度。选用 2 片 TMS320 系列的 C2000 系列 C2809 微计算机进行同步运算和控制, DSP 芯片之间采用异步通讯方式进行数据传输。DSP 使用哈佛结构, 是一种并行体系结构, 程序和数据有着独立的存储器空间, 程序和数据独立编址、独立访问。且在 DSP 中设置了数据和程序 2 套总线, 使得取指令和执行能完全重叠运行, 提高了数据吞吐量。

4 飞控计算机接口电路设计

飞控计算机硬件接口的功能是: 无人机的姿态和位置信息由导航 CPU 通过 SPI 串行口发送给飞控 CPU, 飞控 CPU 根据姿态和位置信息进行控制律解算, 控制指令以 PWM 波的形式输出, 经电平转换后输送到飞控系统舵机。监控信号为模拟量, 需要经过 A/D 转换为数字信号, 再进入飞控 CPU。飞控 CPU 与任务设备之间通过 SCI 串口进行通信。

飞控系统硬件接口结构图如图 3。

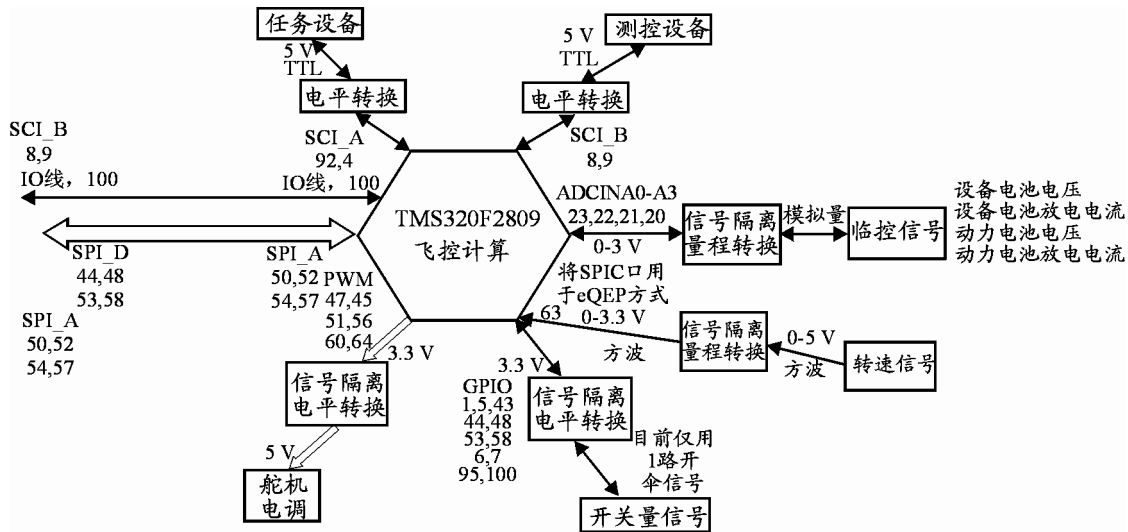


图 3 飞控系统硬件接口结构图

接口电路由 6 个模块组成：电源模块、时钟模块、调试接口、A/D 转换模块、通信模块和 PWM 发生器。

4.1 电源电路

电源系统为整个系统提供能量，是系统正常工作的保障^[1]。系统使用的电源有：模拟 5 V、数字 3.3 V、模拟 3.3 V、数字 1.8 V、模拟 1.8 V。DSP 及外设供电电源为 3.3 V，内核供电电源为 1.8 V。

DSP 处理器需要稳定的 3.3 V 和 1.8 V 供电。3.3 V 和 1.8 V 的电压通过 5 V 电压转换而来，转换芯片采用输出电流较大，输出电压精度高，驱动负载能力强稳定性高，体积小的 LM1117。LM1117 用 4 管脚 SOT-223 形式进行封装。

4.2 时钟模块

TMS320F28x 系列 DSP 处理器含有一个以 PLL 为基础的倍频模块，用来对原始时钟信号进行倍频，生成处理器工作所需要的时钟。原始的时钟信号可以来自于外部振荡器，也可由外接石英晶体配合内部振荡器生成^[2]。

采用内部振荡器方式，由一个 20 MHz 的有源晶振提供参考频率。晶振的输出 CLK 线越短，给 DSP 提供的时钟信号越好。故在 PCB 布局上应尽量使晶振靠近 DSP 的 CLK 输入管脚，连线不要拐弯，减小因干扰带来的波形失真^[3]。

4.3 调试接口

在系统运行时，测试调试接口并非必需，但在开发调试阶段则必不可少。TMS320F2808 支持 JTAG 边界扫描 (Boundary Scan) 技术。TI 的仿真

器带有 JTAG 口，可通过 JTAG 电缆把目标代码下载到 DSP 的 RAM 中执行。

4.4 A/D 转换模块

这里的 A/D 转换模块主要是指 DSP 处理器上 A/D 转换器所需要的外围电路。TMS320F2808 处理器带有一个 16 通道，12 位的模数转换器，可以配置为 2 个独立的 8 通道模块，也可以级联构成一个 16 通道模块。可灵活配置的自动排序转换功能是 28x 系列片上 A/D 转换器最大的特点。该功能可以通过寄存器随意设置转换序列，一旦收到开始转换信号，就会依次进行序列中所要求的转换，并把结果按先后顺序存储在结果寄存器中。自动排序转换功能还允许对同一个通道进行多次采样，完成过采样算法，以获得更高的采样精度^[2,4]。

TMS320F28x 系列 DSP 处理器片上 A/D 转换器还可以选择内部参考电压或者外部参考电压。其中，ADCLO 为 ADC 的基准电压值一般都设置为接地。

为获得更高精度的模数转换结果，在 PCB 板布线时，连接到 ADCINxx 引脚的模拟输入信号线要尽可能远离数字电路的信号线。为减少因数字信号的转换产生的耦合，需要将 ADC 模块的模拟电源和数字电源隔离^[2]。

为了获得指定的 AD 转换精度，在工艺上需要进行适当的电路板布置。ADCINxx 引脚最好不要运行在靠近数字信号通路的地方，因为数字信号线上的开关噪声会耦合到 AD 转换器输入端。地线屏蔽也能降低噪声。此外，可采取适当的隔离技术，将 AD 转换模块的电源引脚和数字部分隔离^[4]。

1) 不加电的测试

在电路板焊好之后,先用仪表测量电路。测试有无短路,断路现象,这是保证硬件能工作的基础。

经测试无短路、断路现象,电源输入端电阻为 100 MΩ,输出端电阻为 170 Ω。输入电阻很大而输出电阻小,符合原理。

2) 系统上电,对电源和晶振测试。先检查电源,电源管理芯片的输出电压 3.3 V、1.8 V 是否正常。然后观察晶振的输出波形。观测到 20 MHz 的正弦波波形,其波形输出稳定,纹波很小。

3) 硬件功能验证

硬件功能验证主要是检验 DSP 的各模块是否能够正常工作。

这些模块包括: PWM 波形生成模块、A/D 转换模块和通信模块。PWM 波形控制数字舵机, A/D 转换模块采集模拟信号,监控功能用。通信模块主要是 SCI 串口和 SPI 串口, SPI 用作双 DSP 交换数据, SCI 用作遥控遥测数据收发、任务设备管理等。其结果如下:在正确配置的情况下,每个 PWM 通道均可输出 PWM 波形,其占空比可调。

A/D 转换模块测试采用稳定的信号源产生 2.5 V 直流电压信号,作为参考电压,输入 A0-A7 通道和 B0-B7 通道, ADCL0 管脚接模拟地 AGND。

对 SCI 口的测试利用 DSP 的 SCIB 的 TX 口向外发送数据,循环发送:

```
FF FE FD FC FB FA F9 F8
FE FD FC FB FA F9 F8 F7
FD FC FB FA F9 F8 F7 F6
.....
01 00 FF FE FD FC FB FA
00 FF FE FD FC FB
```

用串口调试助手可以观察到传送的数据,说明 SCI 串口正常工作。

5.2 飞行试验内容及结果

全套试验设备由地面系统和飞机平台系统两部分组成。地面系统由地面天线、地面显示终端、视频显示终端和手控盒 4 套设备组成。地面显示终端为一台便携式计算机,由标准以太网线与地面天线相连、视频显示终端为一眼镜式显示器,由标准视频线与地面天线相连。飞机平台由飞控计算机、任务设备、机载测控设备、动力系统、5 路舵机和电气系统组成。由电气系统中的全机电缆与所有的设备互联。

飞行试验的内容有:测量爬升、下滑、左盘旋和右盘旋时飞机的俯仰角及舵偏角;测量飞机平飞

飞行空速,测量飞机各飞行状态下的飞行气压高度。检验爬升、下滑、左盘旋、右盘旋、平飞、直飞、停车、大马力、中马力、小马力、马力加、马力减等控制指令的实际效果。

01#至 03#原理样机共进行了 15 次验证性试飞,各项试飞中地面风速最大 5 m/s,最小 0.5 m/s,较全面地考核了微小型无人机的各项性能。各次飞行飞机均表现出良好的静稳定性,各舵面调整的幅度在允许范围内。飞机机动性良好,能进行各种螺旋特性飞行,大侧滑角协调转弯性能良好,飞机姿态随操作命令变换跟随性良好,均无过大和过于频繁的调整动作,飞机各操作舵面反应速度快,飞机响应性良好。

6 结论

综合地面和飞行试验的结果可知,基于双 DSP 架构的微小型无人机飞行控制计算机的硬件设计是成功的,与控制软件集成后能满足微小型无人机总体设计要求。该系统具有体积小、重量轻、集成度高、功耗低和便于维护等优点,是微小型无人机的一种有价值的工程实现方案,可为同类型的飞控系统研究提供参考。

参考文献:

- [1] 杨欣,王玉凤,刘湘黔. 电子设计从零开始[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] Texas Instruments Incorporated, TMS320C28X 系列 DSP 的 CPU 与外设(下)[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [3] 王金龙. DSP 设计与实验教程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [4] Texas Instruments Incorporated. TMS320x280x, 2801x, 2804x DSP, Analog-to-Digital Converter (ADC) Reference Guide[R]. Texas Instruments Incorporated, June 2009
<http://focus.ti.com/lit/ug/spru716c/spru716c.pdf>
- [5] Texas Instruments Incorporated. TMS320x280x, 2801x, 2804x Serial Peripheral Interface Reference Guide[R]. Texas Instruments Incorporated, February 2009.
<http://focus.ti.com/lit/ug/sprug72/sprug72.pdf>
- [6] Texas Instruments Incorporated. TMS320x280x, 2801x, 2804x DSP, SCI Reference Guide [R]. Texas Instruments Incorporated, May 2009.
<http://focus.ti.com/lit/ug/spru712g/spru712g.pdf>
- [7] Maxim Integrated Products. ±15kV ESD-Protected, 1μA, 250kbps, 3.3V/5V, DualRS-232 Transceivers with Internal Capacitors[R]. Maxim Integrated Products, 2004[19-1473]
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX3233E-MAX3235E.pdf>
- [8] 谢淑如. Protel PCB 99 SE 电路板设计[M]. 北京:清华大学出版社,2001.