

文章编号: 2095-4980(2014)01-0123-04

## 基于 DSP28335 双核飞控计算机的实现

罗秋凤<sup>a</sup>, 高 振<sup>b</sup>, 李 勇<sup>b</sup>

(南京航空航天大学 a.无人机研究院; b.自动化学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 针对无人机(UAV)飞控计算机的接口丰富、浮点运算效率高、可靠性高等要求, 设计了一种基于双 TMS320F28335(简称 DSP28335)架构设计的无人机飞控计算机, 一核专用于导航信息的解算和传感器信息的综合处理, 另一核专用于控制律解算和机载任务管理。借助此双 CPU 架构, 实现了飞控计算机强大的运算与信息处理能力, 以及丰富的片上资源, 并且电路结构简化, CPU 降额使用, 系统可靠性高。该双核飞控计算机被成功应用于某微型测姿系统的组合导航信息采集处理及 Kalman 滤波算法的姿态漂移校正。

**关键词:** 飞控计算机; TMS320F28335 处理器; 双核架构; 无人机

**中图分类号:** V247.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201401.0123

## Implementation of flight control computer based on dual DSP28335

LUO Qiu-feng<sup>a</sup>, GAO Zhen<sup>b</sup>, LI Yong<sup>b</sup>

(a.Department of UAV; b.Department of Automation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the requirements of rich interfaces, enhanced floating-point calculation and high reliability for Unmanned Aerial Vehicle(UAV) flight control computer, a kind of UAV flight control computer based on dual Digital Signal Processor(DSP) TMS320F28335(abbr. DSP28335) is proposed. The one DSP is used for comprehensive treatment of navigation and sensor information, and the other is dedicated to control law calculating and airborne mission management. Powerful computing and information processing capacity, rich on-chip resources and high reliability for its simplified circuit and CPU derating use are implemented with the dual-core design. The proposed computer has been successfully applied to the collecting and processing of navigation information and gyroscope drift compensation of Kalman filtering algorithm in a real-time Micro Electro Mechanical Systems(MEMS).

**Key words:** flight control computer; TMS320F28335; dual-core frame; Unmanned Aerial Vehicle

随着无人机的侦查、干扰、攻击、零伤亡等优势发挥, 无人机系统<sup>[1]</sup>在现代战争扮演着越来越重要的角色。无人机自动驾驶、自主导航与任务管理功能的实现全部依赖于飞行控制计算机(以下简称飞控计算机)。目前飞控计算机微处理器<sup>[2]</sup>选型主要集中在 DSP, ARM, X86, powerPC 四种系列, 虽然它们的片上接口资源各有侧重, 但工作频率大多在数百兆赫兹(Hz), 能够执行非常复杂的控制与数据处理算法。而接口资源与运算处理能力较弱的 8 位或 16 位单片机系列主要适用于小型、控制精确度不高、任务简单的飞行控制系统。飞控计算机性能要求主要体现在两方面: 一是强大的运算处理能力, 完成飞行控制律的实时解算、自主导航算法的实时解算以及多传感器信息的实时处理; 二是种类与数量齐备的接口资源, 以挂载各种机载设备, 实现同外界的信息交换。与通用型嵌入式微处理器相比, DSP<sup>[3]</sup>采用了独特的体系结构, 如具备硬件乘法器、哈佛结构并提供独立的双总线结构等, 是目前公认的执行数据处理效率最高的嵌入式微处理器。本文选用 TI 公司 C2000 系列 DSP 芯片的新成员 TMS320F28335<sup>[4]</sup>(以下简称 DSP28335, 或 DSC28335)作为飞控计算机的核心处理器。

### 1 飞控计算机核心系统设计

DSP28335 采用(C28X+FPU)架构, 继承了 C28X 内核高效、可靠的优秀品质<sup>[4]</sup>。在此基础上, 引入硬件浮点

收稿日期: 2013-03-23; 修回日期: 2013-05-02

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2010503); 南京航空航天大学基本科研业务专项研究基金无人机关键技术专项(NP2011006)

运算单元(Floating Point Unit, FPU), 彻底改变了 C28X 系列不支持浮点运算指令的被动局面, 显著提高了执行浮点运算的精确度和速度, 使其在无人机飞行控制领域的应用更具优势。

### 1.1 双核处理平台设计

双核处理平台是核心系统硬件平台的基础, 提供了飞控软件存放与运行的载体, 决定了核心系统所能达到的运算处理性能。具体而言, 双核处理平台主要负责承载双 CPU 基本辅助电路, 确保双 CPU 能够稳定运行; 实现双 CPU 之间高速、可靠的数据通信; 实现随机存储空间和非易失性存储空间的扩展。针对以上任务分配, 相应地将双核处理平台结构设计如图 1 所示。

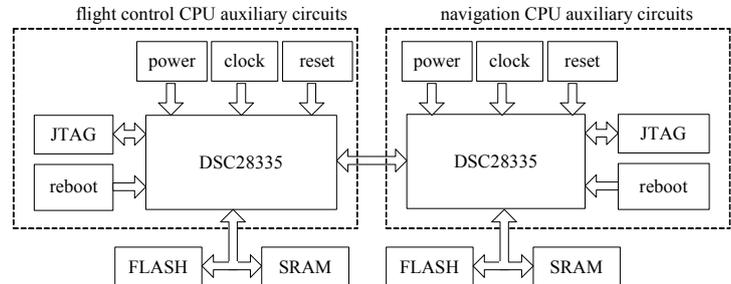


Fig.1 Structure of the dual-core platform

图 1 双核处理平台整体结构

#### 1.1.1 CPU 基本辅助电路

基本辅助电路可理解为确保 CPU 能够可靠运行的最简外围辅助电路。对 DSP28335 来讲, 此部分电路包括 5 部分, 即电源模块、时钟电路、复位电路、JTAG 仿真接口电路及引导模式选择电路<sup>[4]</sup>。

#### 1.1.2 基于 SPI 接口的双核通信

CPU 的分工协作离不开二者之间高效、可靠的数据通信。SPI 总线接口电路简单, 数据传输速度快, 可靠性高<sup>[5]</sup>。DSP28335 片上 SPI 模块遵循标准 SPI 通信协议, 采用 4 线制、主从式结构, 主机提供总线时钟, 可在任意时刻发起数据传输; 采用全双工通信, 在全速工作时, 波特率可达 30 Mbps。

#### 1.1.3 外部存储空间扩展

双 DSP28335 片上自带的 FLASH 存储空间适于存放程序代码, 而不适于实时备份重要数据。每片 DSP28335 分别扩展 1 MB 非易失性存储空间和 1 MB 随机存储空间。扩展逻辑接口由 DSP28335 片上的外部扩展接口(XINTF)实现。

##### 1) 非易失性存储空间扩展

选用 SST 公司的 SST39VF1601 芯片实现片外 FLASH 扩展。该芯片提供并行接口, 时序与 DSP 的 XINTF 时序兼容性好; 单字读取只需 70 ns, 并且具有噪声抑制功能。若片选信号或写使能信号的脉冲宽度小于 5 ns, 则被视为高频噪声, 器件不执行写操作; 当供电电压小于 1.5 V 时, 视为启动或掉电状态, 也不响应任何操作。

##### 2) 随机存储空间扩展

选取 ISSI 公司 IS61WV102416BLL 高性能 SRAM 芯片来实现存储器扩展功能。标准静态 RAM, 在 3.3 V 供电情况下, 访问周期仅为 8 ns。

### 1.2 基础接口资源模块设计

基础接口资源模块由双 DSP28335 片上外设资源提供, 可构成一个完整的无人机飞控计算机所需的全部种类的接口资源。基础接口资源配置如表 1 所示。由表 1 可知, 双核架构硬件平台只需辅以极少量的外围电路, 仅基础接口资源就可满足中小型无人机飞行控制系统的应用需求。充分体现了此架构在接口资源方面的优越性。

表 1 基础接口模块资源配置

Table1 Resource allocation of basic interfaces

interface resources	functions
32ch A/D	analog signal acquisition
6ch PWM	electro-mechanical actuator control
4ch UART	serial devices
40ch DI/O	DIO devices
2ch SPI	communication between dual DSP
6ch CAP	communication between DSP and MEMS sensor rotate speed measurement

### 1.3 扩展接口资源模块设计

为使核心系统所提供的接口资源在种类和数量上更加完备, 进一步设计了扩展接口资源模块: 8 路 A/D、8 路 D/A、8 通道串行接口。使核心系统具备模拟量输出功能, 并极大丰富异步串行接口数量, 以满足高性能无人机飞控计算机的应用需求。

#### 1.3.1 A/D 转换通道扩展

选用 MAXIM 公司的 MAX197 芯片实现上述 A/D 扩展。该芯片单片可提供 8 路采样通道, 每通道输入电压范围可设置为单极性 0 V~5 V, 0 V~10 V 和双极性  $\pm 5$  V,  $\pm 10$  V; 内部提供转换时钟和低温漂精准参考电压, 外围应

用电路简单; 12 位分辨力, 单通道转换时间  $6 \mu\text{s}$ , 满足机载模拟传感信号的采样要求。

### 1.3.2 D/A 转换通道扩展

当前, 采用模拟量控制方式的舵机控制回路仍十分普遍, 为使飞控计算机具有更好的通用性, 设计了 8 路 D/A 转换通道。DSP28335 片上没有 DAC 模块, 必须使用片外扩展。选用 BURR-BROWN 公司的 D/A 转换芯片 DAC725N 实现此功能。该芯片直接输出电压信号, 无需外接电流-电压转换电路; 12 位分辨力, 建立时间  $6 \mu\text{s}$ , 远高于无人机舵控回路对模拟量建立速度的要求; 支持单/双极性供电、单/双极性输出, 能够适应多种结构的后级信号调理电路。

### 1.3.3 多通道异步串行接口扩展

选择 TI 公司的 TL16C754<sup>[6]</sup>异步串行接口芯片。该芯片通信波特率可编程, 在 3.3 V 供电情况下, 波特率可达 2 Mbps; 发送和接收各有 64 个字节的 FIFO, 并支持 FIFO 中断功能, 可显著提高 CPU 程序的执行效率。

## 2 系统调试与性能验证

在核心系统的设计过程中, 首先以其中的飞控子模块为蓝本完成单核试验板的试制与调试, 据此对设计进行优化调整, 最终制成双核原理样机。搭建集成测试环境, 对双核原理样机多接口协同工作能力进行测试。将系统设计方案引入某无人机测姿系统, 完成课题设计方案的工程验证。

### 2.1 单核板验证

首先测试了 CPU 基本辅助电路的电源、时钟、复位电路情况, 满足要求。然后通过单精度浮点乘法程序和 IO 通道输出方波的程序, 验证了设计实现单核板的基本功能, 并测试到片上 FLASH 程序引导及启动速度为 5.5 ms。接着测试片上与扩展的 AD/DA 通道(位于扩展的模拟量扩展板上)的性能。经测试, 片上 A/D 转换通道的转换精确度能够达到 3.0 mV; 所有扩展 A/D 转换通道的转换精确度能够达到 6.7 mV。虽然片上 A/D 转换通道误差绝对值小, 但其输入量程小, 相比之下, 扩展 A/D 转换通道的误差百分比更小。D/A 转换通道精确度能够达到 5.8 mV。单核板验证实物图见图 2。

电源调试发现, 负责为 DSC28335 芯片提供 1.9 V 电压的低压差线性稳压芯片 TPS76701 其压差(输入电压-输出电压)是 1 V 左右, 当输入电压为 5 V 时, 由于压差大于 1 V, 芯片发热。后将输入电压换作 3.3 V, 芯片即可长时间稳定工作, 无发热现象。

在调试过程中, 起初忽略了对片上看门狗的屏蔽, 又没有执行相应的计数器清零操作, 导致程序不能正常运行, 程序指针总是陷入无效区域。后在系统初始化过程中加入了对片上看门狗的屏蔽操作, 程序能够正常运行。

### 2.2 双核板验证

双核板原理样机如图 3 所示。使用 PC 机作为上位机, 通过 RS-232 接口建立起上位机与双核原理样机的通信连接。由上位机发送指令, 对原理样机的 IO、A/D、D/A、COM 通道的接口资源进行包括启动、关断、修改工作模式等控制, 原理样机运行相关程序支持上位机的控制操作。测试结果表明: 同时启动 10 路离散量通道、8 路 PWM 通道、8 路 A/D 转换通道、8 路 D/A 转换通道和 4 通道串口, 在 2h 的运行过程中, 界面回显数据表明各通道符合设置的工作模式要求, 各串口也无丢码或错码, 双核原理样机具备良好的多接口协同工作品质。

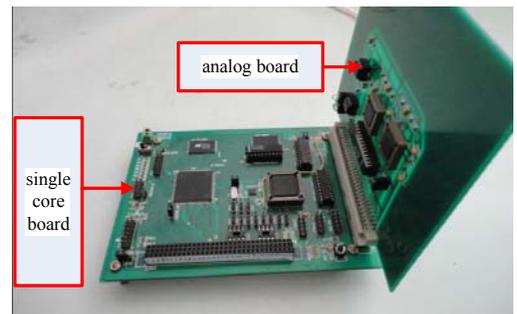


Fig.2 Single core board and analog board  
图 2 单核板与模拟量扩展板验证实物图

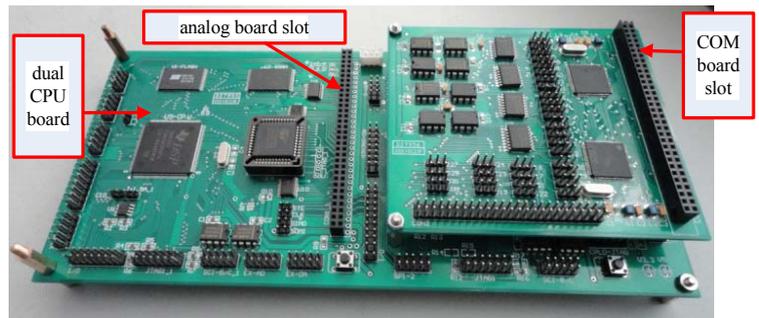


Fig.3 Dual core principle prototype  
图 3 双核原理样机图

### 2.3 工程应用验证

在某型无人机惯性测姿系统的研制中,以本文系统作为测姿系统算法执行的硬件平台,完成转台仿真的 MEMS<sup>[7]</sup>系统实现了四元数扩展卡尔曼滤波算法<sup>[8]</sup>,对 MEMS 陀螺漂移误差进行了在线最优估计和实时补偿。

根据某型无人机气动模型,转台模拟出无人机在下滑、爬高、平飞、左转和右转等高动态环境下的三轴角速率、加速度和磁力计信息。已知,初始姿态角  $\theta=7.7^\circ, \gamma=0^\circ, \psi=149^\circ$ ,陀螺漂移白噪声均方差为  $5^\circ/\text{h}$ ,加速度计量测噪声均方差为  $0.0003\text{ g}$ ,磁力计量测噪声均方差为  $10^{-7}\text{ Gs}$ 。实验结果如图 4、图 5 所示。

工程实验结果表明, DSP28335 平台惯性测姿信息的解算精确度达到:俯仰角滤波精确度  $0.05^\circ$ ,滚转角滤波精确度  $0.01^\circ$ ,在线实时的算法执行速度达到每步循环仅  $6.7\text{ ms}$ ,远高于大多数飞控计算机的运行速度。

### 3 结论

本文基于双 DSP28335 架构完成了飞控计算机核心系统硬件平台的搭建,在无人机飞控计算机的自主研发道路上进行了有益探索,并在运算处理能力、接口资源和电路结构的简洁程度方面均具有较强的优势。工程应用证明,所建立的双核飞控计算机具有很高的实时性和浮点算法精度性能。

#### 参考文献:

- [1] David N Borys, Richard Colgren. Advances in Intelligent Autopilot Systems for Unmanned Aerial Vehicles[J]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2005, AIAA 2005-6482:15-18.
- [2] 顾瑞, 杨辉, 王鹏. 基于 OMAPL137 的无人机飞控计算机设计[J]. 航空兵器, 2012(5):61-64. (GU Rui, YANG Hui, WANG Peng. Design of UAV Flight Control Computer System Based on OMAPL137[J]. Aero Weaponry, 2012(5):61-64.)
- [3] 宁改娣, 杨拴科. DSP 控制器原理及应用[M]. 2 版. 北京:科学出版社, 2009. (NING Gaidi, YANG Shuangke. The Principle and Application of DSP Controller[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2009.)
- [4] Texas Instruments Corp. TMS320F28335 Digital Signal Controllers Data Manual[R]. 2007.
- [5] 高振, 罗秋凤. SPI 接口与 CRC 算法在双 DSP 数据通信中的应用[J]. 电子产品世界, 2011(1):46-48. (GAO Zhen, LUO Qiufeng. Implementation of SPI and CRC Algorithm in Data Communication between Two DSPs[J]. Electronic Engineering & Product World, 2011(1):46-48.)
- [6] Texas Instruments Corp. TL16C754A QUAD UART With 64-Byte FIFO[R]. 2000.
- [7] 李巍, 王杰. 弹上制导电子设备小型化的关键技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011, 9(5):537-540. (LI Wei, WANG Jie. Key technologies of miniaturization missile-borne guidance electronic equipments[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(5):537-540.)
- [8] 李世泽, 鄢丹青, 钟苏川, 等. 基于序列批处理 Kalman 滤波的跟踪算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010, 8(5):510-513. (LI Shizhe, YAN Danqing, ZHONG Suchuan, et al. Target tracking technology based on sequential block Kalman filter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010, 8(5):510-513.)

#### 作者简介:



罗秋凤(1970-),女,南京市人,硕士,主要研究方向为无人飞行器相关的自动检测与故障诊断, email: YQWL2002@126.com.

高振(1986-),男,山东省潍坊市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无人飞行器相关的自动检测。

李勇(1989-),男,合肥市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无人飞行器相关的自动检测。

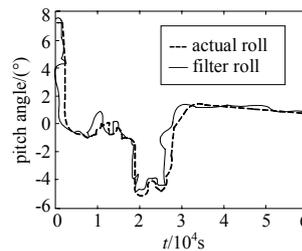


Fig.4 Pitch angle curve  
图 4 俯仰角曲线

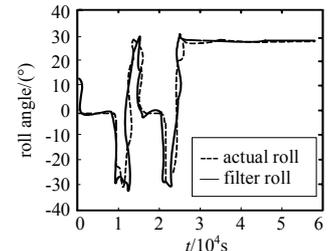


Fig.5 Roll angle curve  
图 5 滚转角曲线