

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005339

一种无人机飞控计算机硬件平台的设计实现

罗霄^{1,2} 薛亚洲^{1,2} 张乐²

(1. 中国飞行试验研究院 西安 710089; 2. 西安远方航空技术发展有限公司 西安 710089)

摘要: 在对无人机飞控计算机技术发展应用叙述的基础上,设计了一款基于 Zynq 平台的应用于小型无人机的飞控计算机硬件平台。该硬件平台采用 SOC 处理架构,通过在单芯片上集成的双 ARM 硬核与外围 FPGA 实现了硬件外设的硬实时处理,极大地减轻了软件负担。对硬件平台的电源设计,气压高度、空速设计,接口设计等硬件单元进行了详细的描述。各项试验结果表明,此种架构的无人机飞控硬件平台集成度更高,尺寸更小,拓展能力极强,各设计单元均能实现预期目标且适用于恶劣的工作环境,对固定翼飞机具有很好的通用性。

关键词: 无人机;飞行控制系统;Zynq;SOC

中图分类号: TP3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design and implementation of a small UAV flight control computer hardware platform

Lu Xiao^{1,2} Xue Yazhou^{1,2} Zhang Le²

(1. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China; 2. Xi'an Yuanfang General Aviation Technology Development Company Limited, Xi'an 710089, China)

Abstract: Based on the development and application of UAV flight control computer technology, designs a flight control computer hardware platform for small UAVs based on Zynq platform. The hardware platform adopts SOC processing architecture, realizes hard real-time processing of hardware peripherals through dual ARM hard cores and peripheral FPGA integrated on a single chip, which greatly reduces the software burden. Describes in detail the power supply design, air pressure altitude, airspeed design, interface design of the hardware platform. Various test results show that the UAV flight control hardware platform of this architecture has higher integration, smaller size, and strong expansion capability. Each design unit can achieve the expected goals and is suitable for harsh working environments. It has good versatility for fixed-wing aircraft.

Keywords: UAV; flight control system; Zynq; SOC

0 引言

无人机^[1]是一种由多种动力驱动,可重复使用的无人驾驶航空器的简称。与有人驾驶的飞机相比,它具有低成本、高灵活、使用方便等特点,广泛应用于军事、民用和科研等领域。随着科技的飞速发展,无人机在未来的战争中必将扮演着重要的地位。

无人机飞控计算机^[2](无人机飞控)是无人机系统的核心,它担负着传感器数据采集、航姿评估、控制律解算与飞行任务的调度与管理等重要任务。无人机飞控硬件架构的发展也经历了从单片机、DSP 到 MCU+PPGA、SOPC 等发展阶段,以单片机^[3-4]作为主控架构的无人机飞控系统只能通过串口接收指令并控制数量较少的舵机,并且可扩展

性差、精度低,易出现控制不协调;而以 DSP^[5]作为主控架构虽然解决了精度的问题,但是由于其接口固定,可扩展性较差;随着可编程逻辑器件的发展,MCU+FPGA 主从控制架构^[6]应运而生,高精度 MCU 进行飞行任务调度与控制律解算,FPGA 作为其余硬件的通信接口,此架构解决了可扩展性的问题并且极大的提升了无人机飞控的性能,但此种架构仍然具有功耗高、尺寸大、可靠性不高的问题;而 SOPC 平台^[7]是一种具有可重构功能的飞控平台,可以在 FPGA 内部构造处理器软核与 DSP 数据处理模块,使得体积更小,集成度更高,但是所构建的软核也存在程序运行不稳定,可靠性不高等问题。

目前,我国已经具备了自行设计和批量生产无人机的能力^[8],而在未来小型无人机则肩负着精确打击和跟踪任

收稿日期:2020-11-09

• 50 •

务^[9]，这就对小型无人机飞行控制器提出了更高的要求，因此设计一款尺寸小、低功耗、扩展能力强、可靠性高的小型无人机飞控硬件平台具有极其重要的意义。

1 Zynq-7000 平台简介

本文设计以 Xilinx Zynq-7000^[10]系列的 XC7Z020 芯片作为主控，与 SPOC 不同，该芯片内部集成了双核 ARM Cortex-A9 处理器(PS)并在其周围覆盖了相当量的可编程逻辑资源和 DSP 资源(PL)。XC7Z020 将 CPU 硬核、可编程逻辑资源和外设集成在一个芯片内，使其具有了处理器和 FPGA 双重特性，特别适用于主从软硬件协同设计。

Cortex-A9 处理器支持单精度和双精度的向量浮点运算，主频最高可达 1 GHz，每个 CPU 具有独立的 32 kB 的一级缓存并共享 512 kB 的二级缓存，此外还集成了 DDR3 控制器、DMA 控制器、丰富的外设接口和数量庞大的 GPIO。PL 部分则集成了约 85k 的可编程逻辑资源和 220 块可编程的 DSP 资源，其理论上进行 FIR 解算时峰值性能可以达到 276G-MACs(每秒 10 亿次乘法累计)。PS 与 PL 部分则同步内部专用互联总线进行通信。

2 硬件平台设计

2.1 硬件总体架构

如图 1 所示，可以看出该无人机飞控控制系统的硬件采用主从协同设计，由双核 ARM 作为主处理器，一个 ARM 负责时间任务调度软件与控制律解算，另一个 ARM 负责与外部单元进行数据交换；外部覆盖的 FPGA 资源则作为辅助进行通信接口、系统监控、导航参数接收、传感器信号解算等的实现。此种设计方法不但可以使主计算芯片专门用于处理控制律算法，还充分利用了 FPGA 资源的可扩展性，极大提高了系统性能。目前，该硬件平台内集成了：

- 1) 10 路 PWM 输出接口；
- 2) 5 路标准 RS-232 接口，2 路标准 RS-422 接口，1 路 TTL 电平接口；
- 3) 1 路 S-Bus 通用接口；
- 4) 4 路离散量输出接口；
- 5) 6 路传感器信号采集接口；
- 6) 高度、速度测量单元；
- 7) 惯导航数据接收单元。

2.2 接口电路设计

1) 舵机控制接口

由于舵机属于感性负载，在舵机运行时需要较大的电流且容易产生电磁冲击，在进行舵机控制电路设计时必须采用隔离设计。本文选取了凌特公司的 LTM8046 隔离电源芯片与 ADI 公司的 ADuM7640 六通道数字隔离器进行 PWM 信号隔离设计。PWM 通过 Verilog 硬件描述语言在“PL”资源内实现，具有 10 ns 的精度。当控制律算法解算

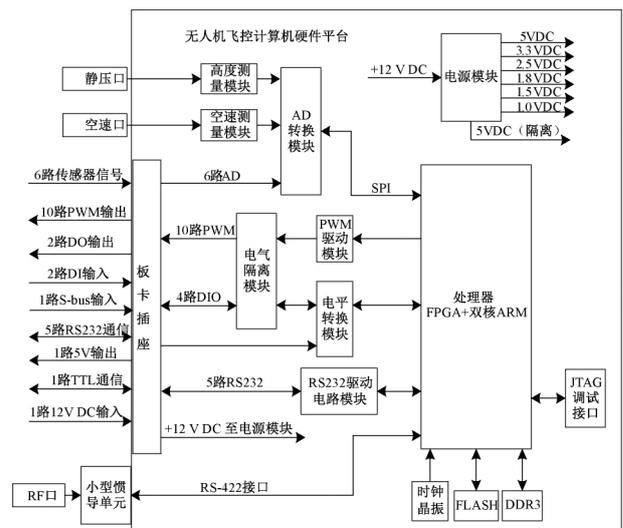


图 1 无人机飞控计算机硬件总体架构

出舵机驱动值后，此信号经过电平转换、信号驱动、隔离输出后产生一个可以驱动后端舵机的 PWM 脉宽。图 2 所示为 PWM 输出接口原理。

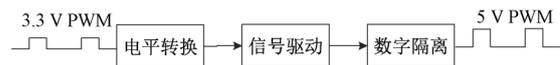


图 2 PWM 输出接口原理

2) 串行通信接口

串行通信接口实现机载任务设备与无人机飞控的数据通信，包括惯导单元数据接收、数据卸载、半物理仿真、地面站通信、自主降落等。根据不同设备串行通信协议的不同，在“PL”内部实现了标准串口、高度定制与自由可扩展的融合。定制接口不仅实现了数据的接收，同时包含有效数据的提取与缓存，“PS”资源无需任何配置即可通过内部互联 AXI 总线读取有效数据。本文所使用的串行通信接口资源分配如表 1 所示。

3) AD 转换接口

无人机在自主飞行时还需要采集前端传感器产生的多路模拟信号。慢变的模拟量信号经过一个截频为 20 Hz 的二阶低通滤波电路后进入 AD 转换芯片。本文选取的是 ADI 公司 AD7689，它是一款具有 8 路模拟量输入通道，16 位的采样精度，最高达 250 kHz 采样频率的逐次逼近型模数转换器，最小有效位的量化单位为 0.076 mV，模拟部分与数字部分采用不同电压供电。AD7689 数字接口为标准 SPI 接口，控制时序与采集时序均通过 Verilog 硬件描述语言在“PL”资源内编程实现。图 3 所示为 AD 转换电路原理。

4) 遥控解码接口

手动遥控是无人机飞控系统研制过程中的重要环节。在自主飞行试验遇到突发紧急情况时，可以快速切换至手

表 1 串口通信接口资源分配

串口号	电平标准	芯片	通信速率	用途	备注
COM1	RS-232	SP3243EEA	≧115 200 bit/s	半物理仿真	标准串口
COM2	RS-232	SP3243EEA	≧115 200 bit/s	地面站	标准串口
COM3	RS-232	SP3243EEA	≧115 200 bit/s	声波测距雷达	定制
COM4	RS-232	SP3243EEA	≧115 200 bit/s	备用	标准串口
COM5	RS-232	SP3243EEA	≧115 200 bit/s	备用	标准串口
COM6	RS-422	MAX3490	≧1 Mbit/s	数据卸载	标准串口
COM7	RS-422	MAX3490	≧1 M	惯导数据接收与解算	高度定制
COM8	TTL	ADuM7643	≧115 200 bit/s	备用	标准串口

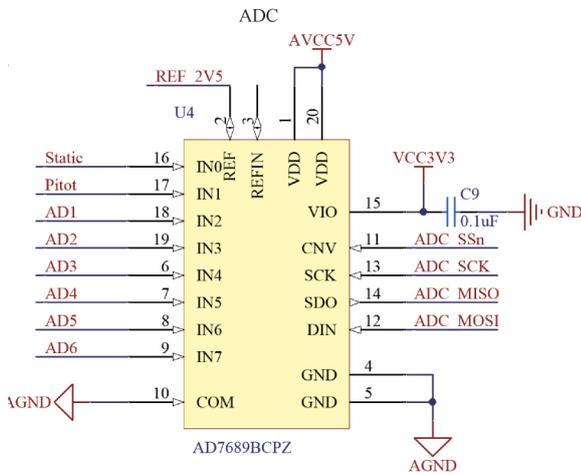


图 3 AD 转换电路原理

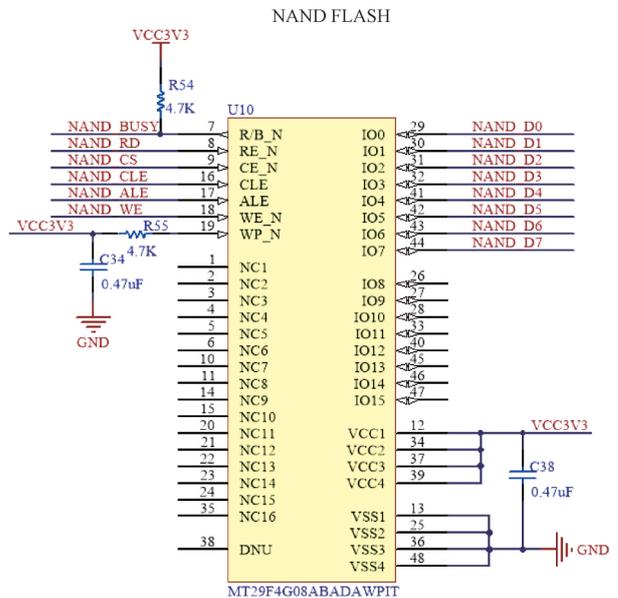


图 4 存储接口电路原理

动操控模式,进行无人机的安全着陆或使用紧急开伞指令,降低飞行试验风险。

S-Bus 总线^[11]是 Futaba 公司为遥控器和接收机设计的串行总线协议标准,通过总线数据解算可以获得遥控器上所有通道的数据,S-Bus 总线以 RS-232 硬件协议作为自己的硬件运行基础,使用 TTL 电平,波特率固定为 100 kbit/s。S-Bus 总线每帧数据有 25 Byte,数据从第 1~22 Byte,对应通道 1~16 的舵机控制数据。S-Bus 总线的接收与解码均通过 Verilog 硬件描述语言在“PL”资源内编程实现。

5) 存储接口

在无人机飞控研制试飞阶段,对控制律参数、导航姿态数据、航路信息等数据的存储与还原是非常关键的。本方案选取了型号为 MT29F4G08ABADAWP 的 Nand Flash^[12]作为系统存储芯片,其容量为 512 MB。除了系统本身启动文件外,余下的存储空间可以全部用来存储试飞数据,经估算,系统可以存储的飞行数据时间长达 4 h,满足无人机一架次飞行时长要求。处理器的“PS”资源自带 Nand Flash 控制器并提供了系统驱动函数与设计参考,方便对存储器的逻辑操作。图 4 所示为存储接口电路原理。

2.3 气压高度与空速模块设计

本文采用的大气数据传感器包括总压传感器和差压传感器,通过采集空气数据为无人机飞控提供气压高度和真空速信息。高度速度采集模块核心部分由信号敏感单元和信号转换单元组成。信号敏感单元采用硅压阻式压力敏感元件实现对表压、绝压的测量,该单元包含了一个绝对压力敏感元件和一个差压敏感元件组成。信号转换单元由电源变换电路、滤波电路、信号调理电路、零点、温度补偿电路、电压输出调节、A/D 采集电路组成。

压力敏感元件感受经传感器压力喷嘴引入的总压和静压,并将其转换为相应压力信号成正比的电压信号输出,压力传感器输出信号经电压输出可编程传感器调机芯片 PGA309 与 EEPROM 对其进行非线性校准^[13]、零点及灵敏度温度补偿后,信号转换电路进行信号滤波转换处理,输出与飞行器飞行气压高度和空速成比例的模拟信号 0.1~4.9 VDC,使其与数模转换芯片输入电压范围匹配^[14]。气压高度与空度模块原理如图 5 所示。

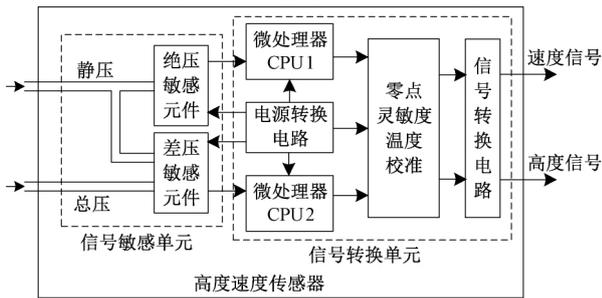


图 5 气压高度与空速模块原理

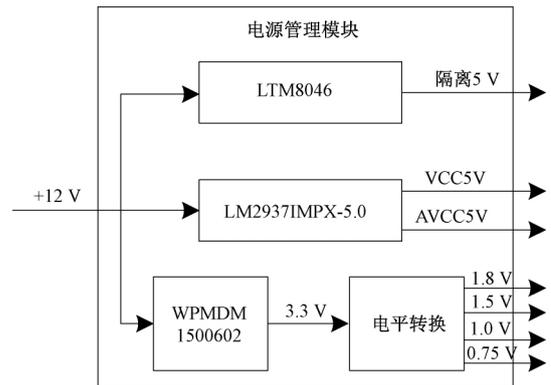


图 7 无人机飞控电源管理模块

2.4 电源模块设计

1) 电源监控设计

无人机系统采用蓄电池供电,蓄电池在使用过程中端口电压会逐渐降低,如果压降低于电源模块输入范围,则会造成整个电源系统输入异常,影响飞行安全,所以需要 对蓄电池输入的电压和电流进行实时监控。本文选择了 ADI 公司的数字电源监控芯片 ADM1191,ADM1191 是一款集成的电流传感放大器,通过一个片内 12 位 AD 转换器进行电流和电压的检测,结果通过 I2C 总线与处理器通信。ADM1191 电源监控芯片的解码通过 Verilog 硬件描述语言在“PL”资源内编程实现。图 6 所示为 ADM1191 的硬件连接原理图。

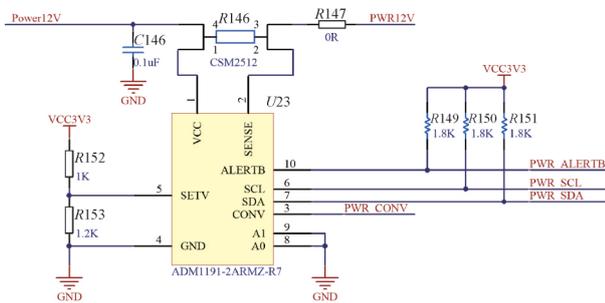


图 6 电源监控电路原理

2) 系统电源设计

电源模块电路为无人机飞控提供能量,是系统正常工作的保障,具有极其重要的地位,一个好的电源往往能使系统的故障减少 1/2 以上。飞控计算机采用外部一路独立的蓄电池供电,供电的标称电压为 +12 VDC。由于蓄电池电量有限,因此需要设计高品质的电源电路。

本文所需的工作电压分为 6 种: +5、+3.3、+1.8、+1.5、+1.0、+0.75 V,外部电源输入为 +12 V 直流电压。其中,5 V 电压分为给数字电路供电的数字 VCC5V 与给模拟电路供电的 AVCC5V,以及外部隔离电压 5 V。3.3 V 电压为数字 3.3 V 电压,主要给数字器件供电,满足接口电平需求以及实现 +1.8、+1.5、+1.0 和 +0.75 V 的变换。其余电源均为 Zynq 处理器所需的内核、DDR 等供电^[15]。图 7 所示为无人机飞控电源管理模块。

3 硬件调试

硬件调试分为电路板调试与系统测试两部分。电路板调试的目的是保证硬件设计的正确性与可靠性,提供各设计单元正常的工作环境。测试内容包括焊接检查、阻抗检查、电源检查、与通电检测。

系统测试包括对在“PL”编写的逻辑代码进行时序分析并结合底层驱动软件对所有外设进行功能调试。测试内容包括舵机驱动测试、串行通信接口测试、模数采集测试、S-Bus 总线接收测试、气压高度与空速解析测试等。在系统测试后对此硬件平台进行了高低温、振动、冲击等环境试验,确保其在恶劣环境下的工作稳定性。结果表明各项指标均与研制目标吻合。图 8 所示为无人机飞控硬件平台实物。

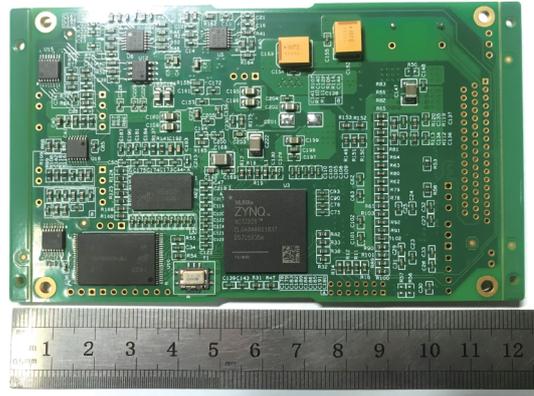


图 8 无人机飞控硬件平台实物

为了进一步验证此平台各硬件模块的协同工作情况与处理器性能,在其内部嵌入控制律算法并借助 MATLAB 软件对飞控系统进行了半物理仿真,验证了硬件协同能力与处理器性能。

随后,搭建了小型固定翼无人机系统,对此硬件平台进行了挂飞与控制两个阶段的飞行验证。在挂飞阶段对自研飞控与某公司货架产品的输出信号进行了存储与比

对,图 9 所示为无人机右升降副翼的舵机驱动对比图,浅色线为自研飞控控制律算法计算出的舵量值,深色线为原机飞控舵量输出值,二者基本吻合。最后,完成了自研飞控计算机的独立控制,进一步证明了该无人机硬件平台的可靠性与稳定性。

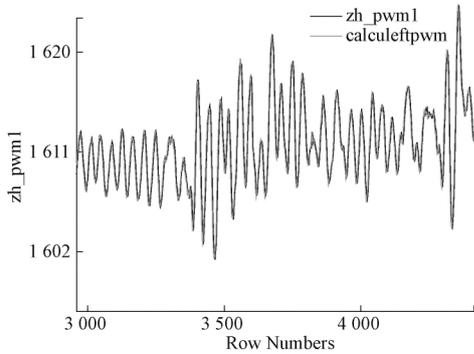


图 9 右升降副翼舵机驱动对比

4 结 论

本文设计实现了一款基于 Zynq-7000 的无人机飞控硬件平台,相对于传统的无人机飞控硬件设计方法,单芯片集成了“ARM+FPGA”的主控架构充分利用了 FPGA 的硬件资源,极大缓解了 ARM 处理器的工作负担,使其可完成更加精密的控制与复杂的算法。该硬件平台经过系统调试、半物理仿真与模型机飞行验证表明,该硬件平台各项功能指标均能达到设计目的要求,各模块工作正常,具有集成度高,数据处理能力强,接口资源丰富且尺寸小、功耗低、适用于严苛环境等特点。

参考文献

- [1] 张云秀,曾庆达,张炜. 无人机发展综述[J]. 河南科技, 2017(9):58-59.
- [2] 王泓淼. 无人机飞控计算机自动测试软件设计与实现[J]. 信息与电脑(理论版), 2019(16):124-125.
- [3] 肖虹. 基于 C8051 单片机的无人机飞控系统硬件平台的设计与开发[J]. 信息通信, 2016(2):49-50.
- [4] 甘韦飞,郑鹏辉. 基于 STM32 监控系统中无人机的设计[J]. 电子设计工程, 2020, 28(21):188-193.

- [5] 胡勇,丁万山. 基于 DSP 架构的某型无人机飞控系统硬件平台的设计[J]. 航空计测技术, 2004(5):35-38.
- [6] 刘念,周炎,祖家奎. 小型无人直升机分布式飞控系统的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2019, 42(10):120-125.
- [7] 于晓洲,周凤岐,黄河. 基于 SOPC 技术的无人机飞控系统硬件平台设计[J]. 火力与指挥控制, 2006(12):48-50.
- [8] 王立磊,魏启航. 对我军无人机力量建设的几点思考[J]. 兵工自动化, 2020, 39(10):1-5.
- [9] 苗壮,孙盛智,段炼,等. 军用无人机关键技术发展应用及主要作战样式研究[J]. 飞航导弹, 2020(9):52-56.
- [10] 樊稳茹,孟武亮,范达. Zynq-7000 最小系统设计及无 DDR3 固化运行方法[J]. 信息与电脑(理论版), 2017(7):136-137.
- [11] 张雨辰,孙琛,秦生辉. 基于 MSP430 的四旋翼飞行器的 S-BUS 通信协议的设计与实现[J]. 中小企业管理与科技(中旬刊), 2018(4):187-188.
- [12] 李秋华,周强,文继峰,等. 一种 NandFlash 的实时数据存储方案设计[J]. 工业控制计算机, 2016(7):70-71.
- [13] 王安,阎文字. 基于 AT89C58 和 PGA309 的传感器信号校准系统设计[J]. 现代电子技术, 2013(7):119-122.
- [14] 李彦芳,杨晓斌,郑璐,等. 一种高精度压力传感器的设计实现[J]. 电子设计工程, 2016(22):161-163.
- [15] 王丽英. 简化高性能 FPGA 的供电[J]. 今日电子, 2014(2):23.

作者简介

罗霄,工学学士,工程师,主要研究方向为机载测试设备研制。

E-mail:lx_cfte@163.com

薛亚洲(通信作者),工学硕士,工程师,主要研究方向为机载测试设备研制。

E-mail:xueyazhou12@163.com

张乐,工学学术,工程师,主要研究方向为机载测试设备研制。

E-mail:antiminds@163.com