

# 基于 FPGA 与 DSP 的发动机参数采集系统设计

孙文莉, 王海涛, 蔡磊

(上海航空测控技术研究所 故障诊断与健康管理工作航空科技重点实验室, 上海 201601)

**摘要:** 介绍可编程逻辑器件 (FPGA) 与数字信号处理器 (DSP) 在航空发动机参数采集系统中的应用研究; 文章以 EP4CE115F23I7 可编程逻辑器件与 TMS320VC5416 数字信号处理器为核心设计、开发发动机参数采集系统; 采用模块化设计, 根据电路功能将发动机参数采集系统硬件分解为 AD 信号采集模块、通讯模块、离散量控制模块、数据处理模块以及参数记录模块; FPGA 软件方面采用应用广泛的 VERILOG 语言, DSP 软件采用 C 语言与汇编语言混合编程; 并将发动机参数采集系统成功应用于某型直升机, 效果良好。

**关键词:** FPGA; DSP; 发动机; 参数采集

## Design of Engine Parameter Acquisition System Based on FPGA and DSP

Sun Wenli, Wang Haitao, Cai Lei

(Shanghai Aero Measurement—Controlling Research Institute, Shanghai 201601, China)

**Abstract:** This paper introduces the application and research of programmable logic device (FPGA) and digital signal processor (DSP) in aero—engine parameter acquisition system. The engine parameter acquisition system is designed based on EP4CE115F23I7 programmable logic device and TMS320VC5416 digital signal processor. The hardware of the engine parameter acquisition system is decomposed into AD signal acquisition module, communication module, discrete quantity control module, data processing module and the parameter record module. FPGA software uses VERILOG language, DSP software using C language and assembly language mixed programming. The engine parameter acquisition system is successfully applied to a certain type of helicopter, and the effect is very good.

**Keywords:** FPGA; DSP; parameter acquisition

## 0 引言

随着航空技术和计算机技术的不断发展, 人们对飞机的性能提出更高要求, 而发动机作为飞机的核心装置, 在整个飞机系统中扮演重要角色。发动机工作时, 各部件承受着非常高的机械应力和热应力, 为保证发动机安全、可靠、稳定地工作, 必须对航空发动机参数、燃油系统参数、滑油系统参数等进行精确测量、显示、控制<sup>[1]</sup>。传统的机械式仪表已经逐渐被数字显示仪表所替代, 嵌入式系统越来越多地应用到航空仪表之中。因此, 迫切需要研究一套具有高通用性、高可靠性及安全性的发动机参数采集系统<sup>[2]</sup>。近年来, 数字信号处理器 (DSP) 由于其速度快、精度高、稳定性好被越来越多地应用于航空电子设备中。本文采用 FPGA 与 DSP 为核心的系统方案, 设计出发动机参数采集系统, 并成功应用于某型号直升机, 获得批量生产。

## 1 整体设计

发动机参数采集系统 (以下简称“发参采集器”) 主要

由 7 块板卡组成: 二次电源板、电源板、AD 板 1、AD 板 2、DIO 板、主控板和底板。整体结构如图 1 所示。

由图 1 可以看出信号流向。其中 20 路模拟信号和 7 路频率信号经过信号调理, 由发参采集器进行数据采集。发参采集器通过光隔离实现 18 路离散量输入和 12 路离散量输出。发参采集器通过 ARNIC429 接口与 EECU 左、EECU 右实现全双工通讯, 与告警控制盒、三轴大气数据系统计算机 (以下简称大气计算机) 实现单工接收通讯。发参采集器通过 RS-422 接口, 与综合控制显示计算机实现全双工通讯, 发送信息到多功能显示器 2 和 4、以及飞行参数采集器, 单工接收燃油计算机信息。另外, 还有一路备用发送接口。将需要存储的信息保存至 EEPROM 中, 通过自检接口与上位机通讯, 实现系统自检和校正等维护功能, 自检口采用 RS232 接口。

主要板卡功能介绍: 二次电源板主要提供电源的尖峰浪涌抑制, 当外部供电电源的电压低于 18 V 时, 二次电源启动。除为本系统供电外, 还能输出 2 路 21 VDC±1 V 电源。二次电源板电源输入为两路, 第一路为正常的供电, 第二路为应急供电; 电源板为整个系统提供电源, 将机载电源转为 ±15 VDC, 为传感器和模拟板供电, 转为 5 V

收稿日期: 2018-11-14; 修回日期: 2018-12-19。

作者简介: 孙文莉 (1985-) 女, 江苏人, 硕士, 工程师, 主要从事信号与信息处理方向的研究。

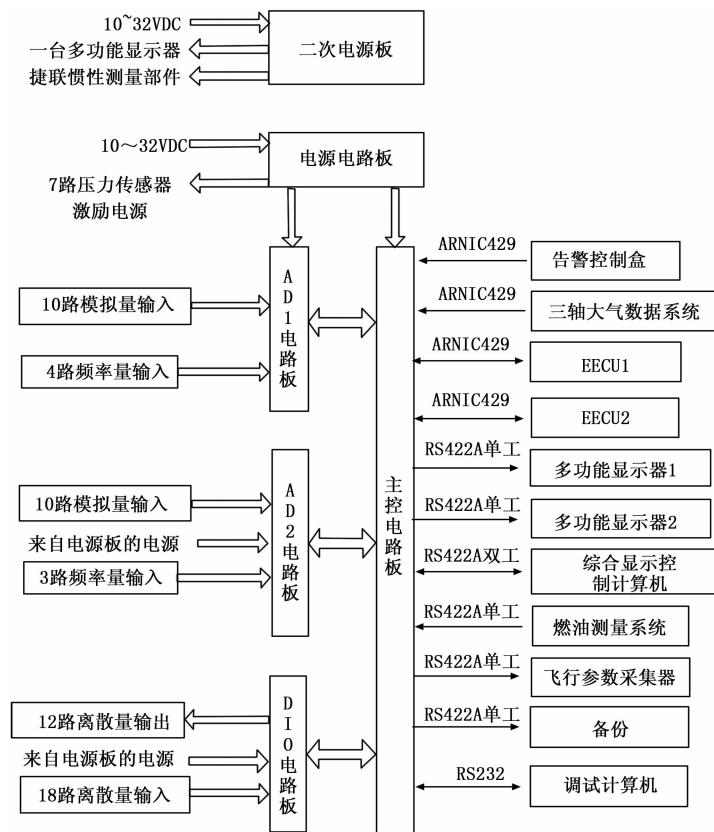


图 1 整体结构框图

DC, 为主控板、DIO 板及 AD1 板和 AD2 板供电; 两块 AD 板 PCB 设计相同, 通过底板分配处理不同的信号, AD 板将模拟信号和频率信号转化为标准信号, 供采主控板采集, 其中, 频率信号转化为 0~3.3 V 的标准方波, 供主控板采集, DI 信号隔离后供采集板采集; 主控板主要实现 ARINC429 总线接收和发送数据, RS422 总线接收和发送数据, 采集模拟量和离散量输入数据、频率数据, 并控制离散量的输出, 上位机自检等。主要功能器件: FPGA 采用 EP4CE115F23I7, 该器件在其它产品型号应用较为广泛。DSP 选用 TI 公司的 TMS320VC5416, 该芯片在其它课题中已成功应用。ARINC 429 的接口芯片采用 HOLT 公司的 HI-3593PQI, 该芯片为工业级芯片, 温度范围: -40~+85 °C。52 脚 PQFP 封装, 节省 PCB 空间, 同时 HI-3593PQI 自带自检功能, 使用控制寄存器中的 SELF TEST 位, 就可以实现芯片的自收自发, 实现自检。422 总线通讯设备需求为 4 发 2 收, 采用 HOLT 公司的 HI-4850, 该芯片每片自带一路收发, 设计采用单独接口设计, 每一个接口对应一组 422 接收或发送; DIO 板输入输出离散量, DIO 板主要功能是对 DI、DO 信号的隔离, 选用高速光耦实现; 底板为内部各个电路板之间以及外部信号至内部电路板的信号连接通路。

发动机参数采集系统主要功能: 采集和处理发动机工作状态、燃油系统、液压系统、滑油系统、旋翼转速和电

源系统等信息并提供给综合任务系统, 为飞行员提供准确的发动机、燃油、液压、电源等各项参数指示。记录发动机工作历程及其它必要的信息。为 EECU 提供必要的参数, 并输出发动机告警信号。

### 1.1 FPGA 系统设计

FPGA 作为发动机参数采集系统的核心之一, 与电源系统、RS422 接收、发送电路、ARINC429 接收、发送电路、DSP 硬件系统以及外部接口模块紧密相连。主要功能包括: FPGA 硬件电路 (晶振电路、复位电路、程序配置电路等) 以及 Verilog HDL 实现的与 DSP 系统的 HPI 通信、2 路 RS422 数据的接收、4 路 RS422 数据的发送、4 路 ARINC429 数据的接收、2 路 ARINC429 数据的发送、12 路离散量输入信号的采集、7 路频率量的采集、4 片 AD 模拟量数据采集接口的实现、8 路离散量输出地控制以及监控 DSP 系统, 其功能框图如图 2 所示。

主要功能模块实现方式如下:

1) AD 控制模块: AD 控制模块每隔 20 ms 采集一次 16 路的模拟量值, 并将采集到的 16 路 16bits 信号存放在 RAM 中, 后端模块在 wrdone\_sig 为高时进行数据读取操作。AD\_Left 以及 AD\_Right 分别实现 2 块 AD 板模拟量的采集。

2) 422 接收模块: FMSR\_RX 及 IDCP\_RX 分别实现燃油测量计算机和综合显示控制计算机 RS422 数据的接收。燃油测量计算机的通讯周期 80 ms, 通讯速率为

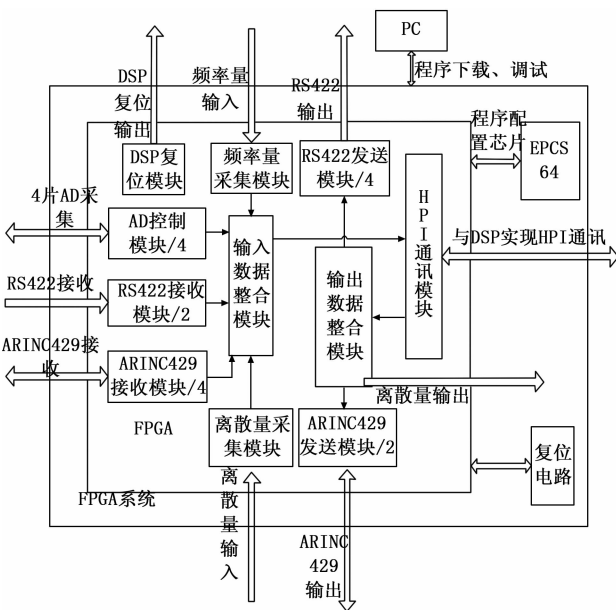


图 2 FPGA 系统功能框图

9600bit/s, 偶校验; 综合显示控制计算机通讯周期 80 ms, 通讯速率为 38400bit/s, 奇校验。

3) 429 接收模块: EECU1\_RX、EECU2\_RX、ADC\_RX 和 GJ\_RX 分别实现 EECU1、EECU2、告警控制盒以及大气数据计算机 ARINC429 数据的接收, SPI 的采样频

率 SCLK 设置为 1 MHz。

4) 离散量采集模块: DIN 实现离散量的采集。

5) 频率量采集模块: duty 实现频率量采集, 其中包括 5 通道频率量以及 2 通道的占空比采集。

6) 输入数据整合模块: In\_sum 实现输入信号: 离散量、频率量、RS422 信号数据、ARINC429 信号数据以及迷你量数据的特定格式的整合在一个 RAM 中, 当 In\_sum\_Done\_Sig 为高时, 后端的 HPI 模块可以将此刻整合的数据发送给 DSP。

7) HPI 通讯模块: HPI8 实现 FPGA 与 DSP 的 HPI 通讯, FPGA 将输入数据整合模块中的数据写入 DSP 的双口 RAM 后, 通过 int\_in 告知 DSP 进行数据处理, DSP 处理完成, 将处理完成的数据按照固定格式存放在双口 RAM 中, 通过 int\_out 中断告知 FPGA 进行数据的读取。

8) 输出数据整合模块: OUT\_sum 实现 FPGA 读取 DSP 处理后数据, 并按照协议格式将对外发送的数据存放在各自的 RAM 中以供后端模块读取; 该模块还实现离散量的输出控制。

9) 422 发送模块: IDCP\_TX、MFD1\_TX、MFD2\_TX 及 FADR\_TX 分别实现综合显示控制计算机、多功能显示器 A、多功能显示器 B 和飞行参数采集器的 RS422 数据的发送。IDCP\_TX 通讯周期 80 ms, 通讯速率 38400bit/s, 奇校验; MFD1\_TX 通讯周期 80 ms, 通讯速率 38400bit/s, 偶校验; MFD2\_TX 通讯周期 300 ms, 通讯速率 9600bit/s, 偶校验; FADR\_TX 通讯周期 80 ms, 通讯速率 38400bit/s, 偶校验。为保证每个包发出去数据的奇偶校验位都能够匹配, 在发送之前会有一个包数据的缓存。

10) 429 发送模块: EECU1\_RX、EECU2\_RX 分别实现 EECU1 和 EECU2 ARINC429 数据的发送, SPI 的采样频率 SCLK 设置为 1 MHz。

考虑产品系列化, 在采集板 FPGA 的选型上选择接口种类丰富, IO 口多的型号 EP4CE115F23I7<sup>[3]</sup>, 该芯片内含 504kbits 存储空间。用户 IO343 个, 支持 LVDS 总线通讯, 能够满足采集的各项要求。采用 quartusII 进行软件开发, 必要时使用 modelsim 进行仿真<sup>[4]</sup>。外围电路由 50 MHz 有源晶振电路和配置电阻构成, 按照 Altera 公司提供的参考原理图进行搭建 FPGA 系统电路。

## 1.2 DSP 系统设计

DSP 硬件系统包括与 FPGA 的 HPI 接口, EEPROM 自举电路, EEPROM 数据存储电路、RS232 串口实现及 DSP 最小系统, DSP 硬件系统功能如图 3 虚线框内所示。

DSP 硬件系统作为发动机参数采集系统的核心之一, DSP 主要实现如下功能:

1) 保证 DSP 能够正常运作;

2) 存储和读取发动机参数所需要的数据, 如发动机工作时间、飞行信息等;

3) 与编译平台(PC 机) 相连来下载 DSP 配置文件到

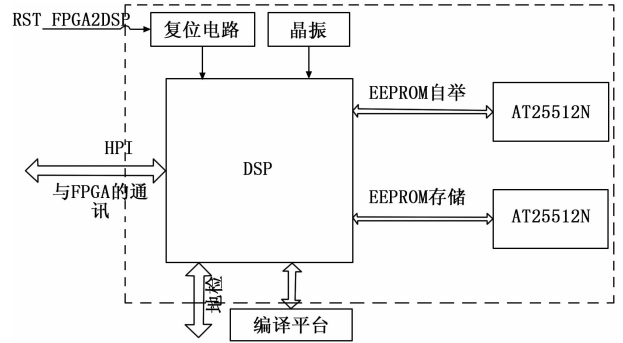


图 3 DSP 硬件系统功能框图

EEPROM 中<sup>[5]</sup>;

4) 与 FPGA 完成 HPI 通讯。

DSP 芯片采用 TMS320VC5416PGE160<sup>[6,7]</sup>, 工作温度:  $-40^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ ; 具有接口丰富, 数据处理能力大等优点, 数据配置以及数据的存储都是用 AT25512N 的 EEPROM, 容量为 512Kbits。DSP\_JTAG 插件为 DSP 配置程序下载接口, 与 PC 相连完成配置文件下载以及程序在线的调试。复位电路在上电时采用 RC 复位, 调试过程中出现 FPGA 与 DSP 握手不成功, 通过 FPGA 对 DSP 进行复位得以解决。

## 2 软件设计

### 2.1 FPGA 软件设计

FPGA 实现功能如下:

1) AD 信号采集: 20 路模拟信号由信号调理板调理转换后, 通过两个 A/D 采样芯片扫描采集。每个循环要包括这 20 路模拟量的通道切换、采样保持、模数转换以及转换后数据的读取, 在 A/D 通道的控制上, 要包括通道的切换和 A/D 转换控制。通过 SPI 接口将 AD 转换后的信号进行整理, 并存入 RAM 缓存;

2) HPI 通讯: 通过 HPI 接口将经过整理以后的 AD 信号, 从缓存 RAM 中取出, 将数据发送给 DSP, 待 DSP 处理完成后, 将处理结果取回;

3) 离散量检测: 离散信号每个循环周期 20 ms 采集一次, 按字读取, 离散量输入通道设计有检测控制端, 当处于上电自检时, 软件控制在通道的入口处加入规定值来判断通道的工作正常与否。并做开关量防抖动处理。处理完成后写入离散量 RAM 缓存;

4) 频率量检测: 在采样信号作用下, 采集一个信号周期频率的高低电平数值, 存放在 RAM 中, 每隔 20 ms 读取信号高电平和低电平的计数值打包发送给 DSP 处理; 通道故障判别可以根据信号最大允许的变化范围以及所获取的信号可信度等条件来进行, 也可以以此来判别某一频率量采集通道工作状态正常与否的方法, 满足自检方面的要求(所有的频率量不都为零时, 判断每一路频率量与最大允许值关系, 超出最大范围, 报频率量自检故障)

5) 429 通讯:通过对 429 外部通讯 SPI 口的控制,将 429 芯片中数据接收缓存中的数据转存到通讯模块内部 RAM 接收缓存中。同时,将内部 RAM 发送缓存中的数据通过 429 外部通讯 SPI 口发送给 429 芯片对外发送。通过 2 路 ARINC429 输入接口接收左右发动机电调 EECU 数据,信息由 10 页 ARINC 信息组成,每页含 5 个字。每 20ms 向 EPU 发送一页,整个信息 200 ms 刷新一次。

6) 422 通讯:实现串口发送与串口接收功能模块,将串口接收到的数据转存到 RAM 接收缓存中,将 RAM 发送缓存中的数据通过串口发送模块对外发送;

7) 离散量控制模块:根据离散量控制条件,实现离散量的控制。

## 2.2 DSP 软件设计

DSP 软件部分主要包括自检、HPI 通讯模块、RS232 通讯模块、数据处理模块,历程参数记录模块。

DSP 实现功能如下:

1) 自检:自检主要分为上电自检、周期自检和维护自检三种。DSP 在三种自检状态下进行的自检项目是一样。当系统接收到自检信号或自检控制命令的时候,DSP 进行自检工作,自检结果通过 HPI 发送给信号采集功能模块;

2) HPI 通讯:通过 HPI 接口将信号采集模块发送过来的数据存入预先设定的 HPI 地址空间。信号采集模块发送的数据包括:模拟量、离散量、频率量等;

3) 232 通讯:实现串口发送与串口接收功能模块。系统通过 RS232 接口与地检设备相连,将地检口接收到的指令与校准系数进行解析及分发,并将采集器存储的数据通过串口发送模块传输给地检计算机进行分析;

4) 数据处理:将指定的 HPI 地址空间数据提取出来,按照相应的计算方法进行处理,并将处理后的结果按固定格式通过 HPI 发送回 FPGA。需要处理的数据包括:模拟量、频率量、离散量以及 EECU 数据;

5) 历程参数记录:通过 HPI 接口,将 FPGA 发送数据进行处理,并记录和储存发动机历程参数,包括:发动机工作实时间、直升机批号、涡轮循环数、飞行时间、起落次数等。记录能力为 200 组,记录空间自动管理,200 组数据记录满后自动从最老一组数据擦除并重新记录。也可由地面测试设备读出或擦除。

DSP 软件采用 C 语言和汇编混合编程。主要设计思想: DSP 上电与 FPGA 握手成功后进行自检,自检完成后,将 FPGA 传过来的数据进行相应处理,处理完成后,将处理结果存在外部 RAM 中,经由 DSP 的 HPI 接口供 FPGA 调用输出。当有外部中断触发时,响应外部中断。DSP 软件模块流程如图 4 所示。

## 3 试验结果与分析

发动机参数采集系统已成功完成与外部交联设备联试,并通过高温工作、高温贮存、低温工作、低温贮存、温度

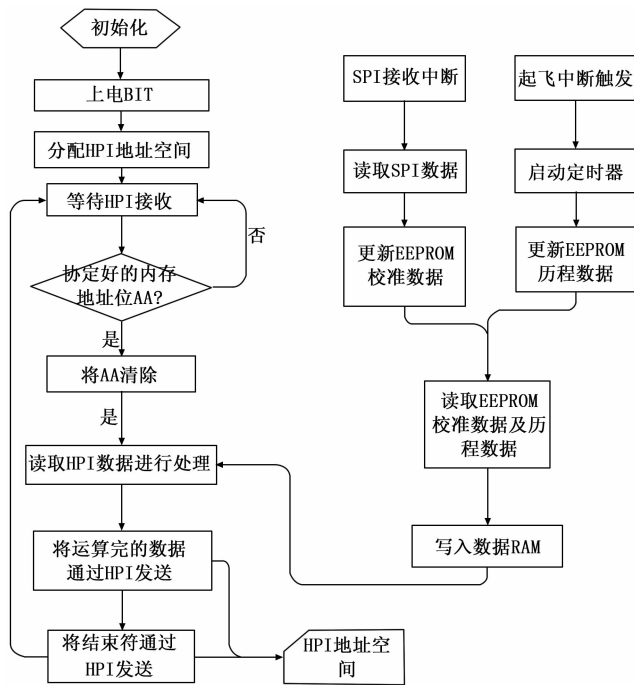


图 4 DSP 模块流程图

冲击、功能振动、冲击试验、电源特性试验及电磁兼容性试验,产品技术性能指标满足协议要求,并已在某型直升机上试飞成功。

## 4 结束语

本文采用 FPGA 与 DSP 对发动机参数采集系统进行了研究,并进行相关试验,试验结果表明采用 FPGA 与 DSP 对发动机参数可精确采集,控制。以该系统结构为基础的发动机参数采集系统成功应用于某型号直升机,已成功定型,并获得批量生产。

### 参考文献:

- [1] 李伟. 航空发动机参数显示技术发展趋势 [J]. 飞机设计, 2004: 35-37.
- [2] 刘轶, 陈明, 等. 基于数字信号处理器的航空发动机参数采集系统设计 [J]. 测控技术, 2005 (24): 16-18.
- [3] 杨雪峰, 等. 基于 FPGA 的 DSP 与 PC 机通讯设计 [J]. 伺服控制, 2008 (10).
- [4] 基于 FPGA 和 DSP 的硬件电路设计 [J]. 现代传输, 2002 (04).
- [5] 周向阳, 刘延冰, 等. DSP 和 PC 机的异步串行通信设计 [J]. 电测与仪表, 2001 (03).
- [6] TMS320C54x DSP Programmer's Guide (spru538.pdf) [Z]. Texas Instruments, 30 Jun 2001.
- [7] 刘艳萍. DSP 技术原理及应用教程 (第 2 版) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.