

文章编号: 1000-8055(2005)01-0130-06

# 基于DSP和CAN总线的发动机 电子控制器核心电路模块研究

张天宏<sup>1</sup>, 牟路勇<sup>1</sup>, 丁毅<sup>1</sup>, 邓志伟<sup>2</sup>

(1 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2 中国航空动力控制系统研究所, 江苏 无锡 214063)

**摘要:** 为了满足复杂控制算法和分布式控制的需要, 提出一种基于数字信号处理器(DSP)和控制器局域网(CAN)总线的电子控制器核心电路模块的设计方案, 并进行了工程实现。阐述了硬件设计和软件设计中的关键技术问题, 并通过实物在回路仿真实验, 验证了本核心电路模块设计方案的可行性。该模块也可作为飞/推综合控制、分布式控制等需要高性能计算能力和实时数据通信能力的核心电路模块使用。

**关键词:** 航空、航天推进系统; 数字式发动机电子控制器; 数字信号处理器; 控制器局域网;  
实物在回路仿真

中图分类号: V 233.7

文献标识码: A

## Study of an Engine Electronic Controller's Core Circuit Module Based on DSP and CAN

ZHANG Tian-hong<sup>1</sup>, MOU Lu-yong<sup>1</sup>,  
DING Yi<sup>1</sup>, DENG Zhiwei<sup>2</sup>

(1 College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2 China Aviation Motor Control Institute, Wuxi 214063, China)

**Abstract:** To meet the demands of complex control algorithm and distributed control, a design scenario of the electronic core circuit module, which was based on DSP (Digital Signal Processor) and CAN (Controller Area Network), was proposed and realized for DEEC (Digital Electronic Engine Control). Several key problems of hardware and software design were expounded, and the hardware-in-loop simulation validated the feasibility of the module. This module can also be applied in integrated flight-propulsion control and distributed aeroengine control, where the high capability of arithmetic calculation and real-time communication are required.

**Key words:** aerospace propulsion system; Digital Electronic Engine Controller (DEEC); Digital Signal Processor (DSP); Controller Area Network (CAN);  
hardware-in-loop simulation

收稿日期: 2004-04-08; 修订日期: 2004-08-18

作者简介: 张天宏(1968-), 男, 江苏仪征人, 南京航空航天大学能源与动力学院副教授, 博士, 主要从事航空发动机控制与测试技术研究

电子控制器是全权限数字电子控制(Full Authority Digital Electronic Control, FADEC)系统中最核心的部分。航空发动机数字电子控制器(Digital Electronic Engine Controller, DEEC)需要在线、实时地获取发动机的状态信息, 并通过复杂的控制算法和逻辑处理, 产生控制决策, 这就要求 DEEC 的中央处理器具有很强的数值计算与处理能力。此外, 航空电子系统的数字化和分布式控制的发展趋势, 要求 DEEC 具有多节点、高速率、高度可靠的实时数据通信能力, 所以对数据通讯总线也提出较高的要求<sup>[1, 2]</sup>。

数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)是一种运算速度快、数值处理能力强的微型处理器, 目前已经在通讯、图象处理、工业控制等领域得到广泛应用<sup>[3]</sup>。CAN(Controller Area Network)总线是一种通信速率高、抗干扰能力强、使用成本低的现场总线, 国外已在尝试将其应用于航空发动机分布式控制系统中<sup>[4]</sup>。

鉴于 DSP 和 CAN 总线技术的先进性, 本文提出了基于 DSP 和 CAN 总线的电子控制器核心电路模块的设计方案。论文首先阐述了电子控制器核心电路模块在工程实现时的关键技术问题, 然后通过实物在回路的仿真实验, 验证了本核心电路模块设计方案的可行性。

1 核心电路模块的设计

1.1 总体设计

核心电路模块主要由 DSP, CAN, CPLD,

RAM, FLASH 及 JTAG 接口等组成<sup>[5]</sup>。DSP 芯片采用 TI 的 32 位具有浮点运算能力的 TM S320VC33-120 (VC33), 通过数据总线和地址总线与 SRAM, FLASH 及 CAN 控制器连接, 采用 CPLD 逻辑控制器实现各芯片间逻辑粘接。为了便于扩展, 将必要的数据信号、地址信号和控制信号经缓冲处理后引至扩展接口。整个电子控制器核心电路模块的硬件框图如图 1 所示。

1.2 硬件设计中的关键技术问题

1.2.1 DSP 应用系统

VC33 芯片具有 24 位地址总线、32 位数据总线和 34 K 字(32 bits)内部 RAM。本文的 DSP 应用系统的特点是: 外接 12 MHz 晶振, 经内部锁相环 5 倍频后得到 60 MHz 系统时钟; NT1 控制上电程序加载, NT2 用于 CAN 总线通信; NT0, NT3, XF0, XF1, DR0 和 DX0 引至扩展接口; XF0 接 LED, 作为运行状态指示; 程序加载采用 MCBL(Microcomputer Boatload)模式。

扩展外部 RAM 的目的是加载大容量的运行程序和存放运行过程参数。根据文献[6]并考虑到 VC33 的特点, 外部 RAM 应具有 150 K 字以上的存储空间和 15 ns 以内的访问速度。本文选用 CY7C1041V 33 作为外部 RAM, 它具有 256 K (16 bits)的存储空间和 7 ns 的访问速度。利用 4 片 CY7C1041V 33 构成了 2 组共 512 K 字的外部 RAM 存储空间: SRAM 0: 0x1000~ 0x3fff; SRAM 1: 0x4000~ 0x7fff。

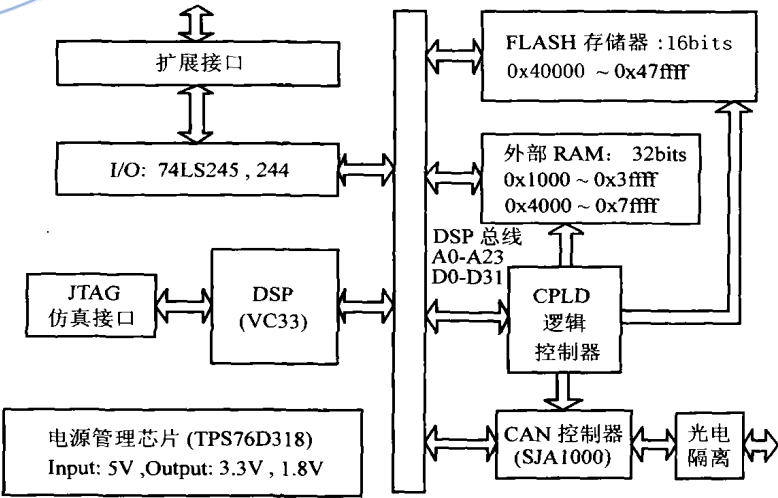


图 1 电子控制器核心电路模块硬件框图

Fig 1 The hardware scheme of DEEC's primary module

FLASH 用于存放控制器的运行程序。在 DSP 系统上电或复位后,在 Boot Loader 模式下,由 DSP 将程序从 FLASH 加载到相应的内部或外部 RAM,并从指针指向的代码开始运行程序。本文选择 HY29LV800BT 作为核心模块的程序存储器。HY29LV800BT 是 16 位数据总线的 8 Mbit 可擦写快速闪存,换算为 32 bits 的存储容量为 256 K 字,访问速度达到 70 ns,可以满足程序存储的要求。分配给 FLASH 的地址空间为: 0x400000~0x47ffff。

为了增强控制器电路设计的灵活性,提高电路的集成度,本文采用 CPLD 逻辑控制器 MACH4A5 实现 DSP 应用系统中各个电路间的逻辑粘接,实现地址译码、读写控制、时序控制等功能。MACH4A5 具有 32 个独立的 D 和 2 个时钟端口,内部处理速度高达 10 ns。此外,该芯片还具有总线友好的特点,可直接与 3.3 V 和 5 V 的逻辑器件接口。根据要求的逻辑和时序,采用 HDL (Hardware Description Language, 集成电路硬件描述语言) 编程固化。

DSP 系统的具体运行过程为: 上电或复位后,在 RAM 中开辟程序运行所需的数据和代码空间; DSP 芯片的 Boot Loader 将 FLASH 中的程序加载到指定的 RAM 空间中运行。由于片内 RAM 比片外 RAM 的存取速度快,所以将全局变量、动态变量和系统堆栈等分配在片内 RAM,其他变量和代码分配在片外 RAM,以提高控制器的整体性能。

### 1.2.2 CAN 总线接口

核心电路模块的 CAN 总线接口主要由 3 部分构成<sup>[7]</sup>: 独立 CAN 通信控制器 SJA1000、CAN 总线收发器 82C250 和高速光电耦合器 6N137。VC33 控制 SJA1000 实现初始化、数据发送和接收。SJA1000 的 AD0~AD7 可以直接挂接到 VC33 的数据总线 D0~D7 上,但 VC33 不提供地址锁存信号,这是 CAN 总线接口电路设计的难点所在。本文利用 CPLD 译码逻辑产生 SJA1000 的地址锁存信号 ALE、片选信号 CS 及硬件复位信号 RST,即将 ALE、CS 及 RST 分别虚拟为存储器地址,由 CPLD 根据 VC33 在读写控制时的访问地址产生相应的控制信号。SJA1000 的 ALE、CS 及 RST 分别映射为地址 0x80000、0x80001 和 0x80002。SJA1000 的 NT 引脚与 VC33 的 NT2 相连,从而实现中断方式的 CAN 通信。为了增强 CAN 总线节点的抗干扰能力,在

SJA1000 和 82C250 之间采用 6N137 进行电气隔离。

### 1.2.3 硬件设计中的主要抗干扰措施

为了使电子控制器在较复杂环境下能安全、可靠地运行,本文采取了以下的硬件抗干扰措施:

(1) 采用具有电源监视功能的电源管理模块。电源监视管理模块 TPS767D318 在提供 VC33 的核心电源 1.8 V 和逻辑电源 3.3 V 的同时,具有电压波动和掉电检测能力,即当电压下降超过 5% 时产生复位信号。DSP 利用复位信号对控制系统实施保护。

(2) CAN 总线中采用了电源和信号隔离技术。如上文所述,CAN 控制器 SJA1000 的收、发信号通过高速光耦 6N137 与收发器 82C250 相连;此外,总线接口电源由主电源经 5V 的 DC/DC 电源模块隔离获得。这样就很好地实现了 CAN 总线上各节点之间的电气隔离,增加了电子控制器总线通讯的抗干扰能力。

(3) 电源、地线的处理。设计中在电源、地线之间合理布置大量的去耦电容,并尽量增加电源、地线的宽度。在电路板上把没有布线的区域与地相连接作为地平面,并综合考虑它们之间互相干扰问题。

(4) 数字信号的精心布线。本核心电路模块中 DSP 的运行速度高,且信号线密集,因此高频数字信号的合理布线可以避免彼此之间的干扰和噪音的耦合。在布线中尽量走短线、少穿孔。另外,大面积的敷铜地面对高频信号线也起到保护作用。

### 1.3 软件开发中的关键技术问题

#### 1.3.1 总体设计

作为电子控制器的核心电路模块,可以利用 CAN 总线获取发动机的状态信息和油门操纵指令,DSP 根据既定的调节计划经过算法处理产生控制量,再通过 CAN 总线将控制量传输出去。

在本文的具体应用中,电子控制器核心电路模块与某双转子涡轮发动机的数学模型之间构成实物在回路仿真系统。控制器的主要任务是从模型计算机接收发动机的油门指令 ( $PLA$ )、低压转速 ( $N_L$ ) 及高压转速 ( $N_H$ )、进口压力 ( $P_{0i}$ ) 等信息,将数据解码后,由相应的控制算法计算得到发动机燃油控制量 ( $m_f$ ) 和低压转子指令转速 ( $N_{LR}$ ),将数据编码后传给模型以实现发动机的控制。

为了保证软件的可靠性,采取模块化、结构化

的设计方法, 并通过单元测试和模块测试确保程序正确运行。程序主流程如图 2 所示。

1.3.2 CAN 通讯程序设计

在电子控制器核心电路模块中实现 CAN 通讯, 最关键的是建立驱动函数和确定应用层协议。

(1) 驱动函数的建立

为了便于结构化编程和程序维护, 参照 PC 机上智能 CAN 卡驱动程序, 设计了以下的 CAN 通信函数:

初始化函数: InstallCANDriver——用于初始化 CAN 节点的各个寄存器, 设置中断向量和回调函数, 为 CAN 节点正常通讯做准备。

发送函数: SendCANFrame——用于发送 CAN 通讯包。

接收函数: ReadCANFrame——用于从缓冲队列中接收 CAN 通讯包。

除错函数: ClearError——用于 CAN 节点各寄存器的重新设置, 以清除某些偶然错误。

释放函数: UninstallCANDriver——用于在程序退出前释放 CAN 驱动程序所占用的系统资源。

(2) 应用层协议

数据通信的可靠性一方面来自 CAN 总线自身的强抗干扰和差错检测能力, 另一方面通过应用层协议来增强可靠性。本文采用的应用层协议是 CANopen, 该协议有四类通讯对象: 过程数据对象 PDO (Process Data Objects)、组态数据对象、节点保护对象以及用于同步、应急指示和时间标记的对象。这里主要采用其中第一类通讯对象, 即用 8 个字节的数据字段将 PDO 映像到单一的 CAN 帧; 每个 PDO 有唯一的标识符且只能通过一个节点发送, 其接收节点可不止一个。

根据 CANopen 协议中第一类通讯对象的要求, 在核心电路模块的 CAN 通讯程序中, 采用点对点的通讯方式, 每帧包含 8 个字节, 并对通讯数据进行编码和解码处理。

1.3.3 DSP 系统的软件应用问题

在开发 DSP 系统的软件过程中需要解决 2

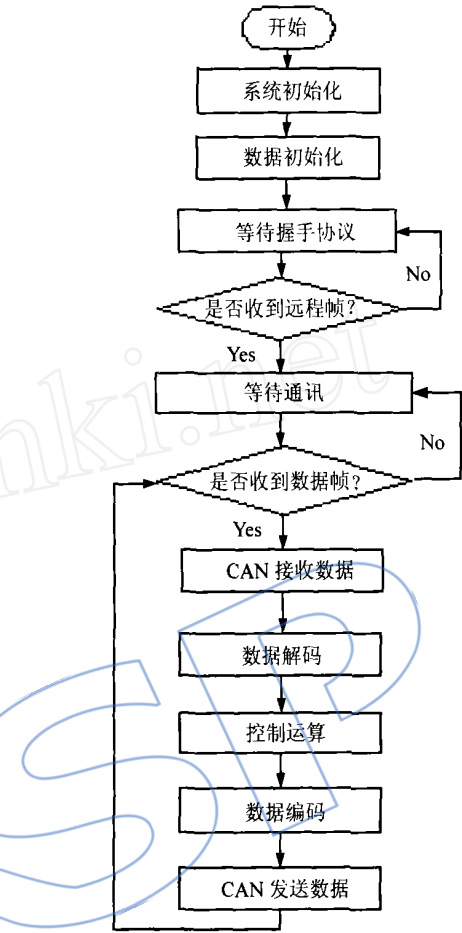


图 2 主程序流程图  
Fig 2 The flow chart of main procedure

个关键问题: FLASH 的烧写和 Boot Loader 模式的使用。

在 FLASH 烧写时, 16 位模式 (D0~D15) 和 8 位模式 (D0~D7) 的擦除和烧写命令不同, 且对目标代码文件的格式要求也不一样。一般开发系统只产生 8 位模式的目标代码文件, 故要从目标代码文件读取二进制代码以转换成 16 位格式的文件, 并且需要修改烧写程序。

在 Boot Loader 模式的使用过程中, 最关键的是如何正确编写 Boot Table, 也即如何添加文件头。程序调试中编写的 Boot Table 如下所示:

```
control out
- o control hex
- i
- romwidth 16
- memwidth 16

/* 输入的 OUT 文件 */
/* 输出的 16 进制文件 */
/* 要转换文件的格式 (intel) */
/* ROM 存储设备数据总线宽度 */
/* FLASH 存储设备数据位数 */
```

- cg 0x10f8

- e 0x8031d7

- boot

- bootorg 0x400000

/\* 设置主总线寄存器初始值 \*/

/\* 程序代码运行的入口地址 \*/

/\* 添加Boot- table \*/

/\* FLASH 存储设备起始地址 \*/



图 3 实物在回路仿真系统

Fig 3 The diagram of hardware-in-loop simulation system

## 2 电子控制器实物在回路仿真实验<sup>[8]</sup>

通过在 PC 机上运行某双转子涡喷发动机的部件级实时数学模型, 并利用智能 CAN 接口卡与核心电路模块之间的高速双向数据通信, 构成了电子控制器实物在回路仿真实验系统, 如图 3 所示。

仿真实验的主要目的是验证所设计核心电路模块的可行性, 因此本实验中只采用了较为简单的调节计划, 即研究发动机处于慢车以上工作状态时对低压转速的闭环控制。其调节计划是: 当油门指令变化时, 调节器产生跟踪油门指令且具有斜率限制的  $N_{LR}$ ; 调节器对  $N_L$  进行闭环控制, 并对  $N_H$  的最大值进行限制; 采用相似 PD 控制算法, 控制器参数根据进口条件适时调整。

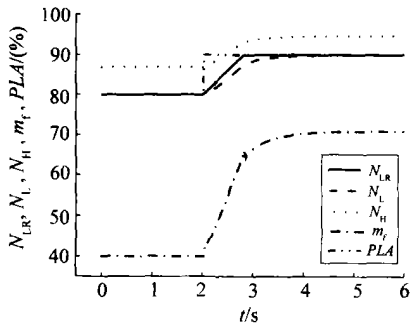


图 4 油门指令阶跃变化的加速控制过程

Fig 4 Acceleration process as PLA changes

(1) 油门指令阶跃变化的加速控制过程。在进口条件不变的情况下, 油门杆角度 PLA 从 80% 变化到 90% 时, 加速过程的仿真实验结果如

图 4。

(2) 进口条件变化的扰动调节过程。在油门指令不变的情况下, 假设飞行环境发生变化导致进口总压  $P_{01}$  从 62.072 kPa 变化到 47.512 kPa, 其调节过程的仿真结果如图 5 所示。

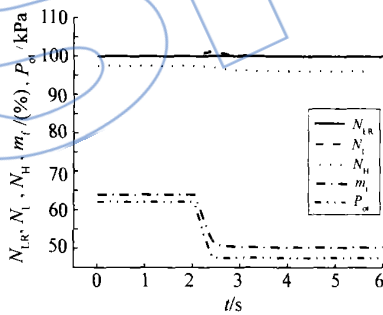


图 5 进口条件变化的扰动调节过程

Fig 5 Regulation process as intake disturbance happens

(3) 实验结果分析。上述实物在回路仿真实验的响应曲线可以看出: 从发动机输入参数改变到电子控制器控制  $N_L$  基本达到平衡, 中间的调节时间只有 2~3 s, 控制过程中低压转速  $N_L$  基本没有超调, 满足了发动机控制动态特性方面的要求; 此外,  $N_L$  的稳态误差在 0.3% 以内, 满足了发动机控制静态特性方面的要求。以上实验结果表明, 本文所设计的电子控制器核心模块能满足发动机控制的基本要求。

## 3 结 论

通过以上的实物在回路仿真实验, 验证了本文设计的电子控制器核心电路模块的可行性。本核心电路模块具有以下特点:

(1) 灵活性好, 因为JTAG 接口为应用程序的开发、调试和更新带来极大的方便。

(2) 计算能力强, 可实现需要复杂浮点运算的先进控制算法。

(3) 运算速度快, 可以保证复杂控制的实时性。

(4) 数据传输速度快, 通讯可靠性高。

(5) 扩展能力强, 可采用冗余及重构技术, 进一步提高系统可靠性。

目前, 该核心电路模块已经分别作为数字电子控制器的核心和飞/推综合控制优化计算机运用于“飞行/推进系统综合、分布式、智能控制系统仿真平台”<sup>[5,8]</sup>, 将来还可扩展智能传感器及执行机构, 实现航空发动机的分布式智能控制系统。

## 参考文献

- [1] 徐芸华, 樊思齐, 孟庆明, 等. 航空推进系统控制[M]. 西安, 西北工业大学出版社, 1999
- [2] 孙健国. 面向 21 世纪航空动力控制展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 97~102
- [3] SU Jian-guo. Prospects of the Aeroengine Control Development in the Early Time of the 21st Century[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2001, 16(2): 97~102
- [4] 马仁政, 陈明凯. DSP 技术在工业控制的应用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(S1): 153~156
- [5] Thompson H A. A CAN Bus-Based Safety-Critical Distributed Aeroengine Control Systems Architecture Demonstrator[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 1999, 23: 345~355
- [6] 牟路勇. 基于DSP 的航空发动机电子控制器设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004
- [7] Gilyard G, Ome J. Subsonic Flight Test Evaluation of a Performance Seeking control Algorithm on F-15A airplane[R]. AIAA-92-3743
- [8] 李炳生, 张波涛. DSP 与CAN 控制器的接口及实现[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 1999, 25(2): 187~189
- [9] 陈雪强. 基于DSP 和CAN 总线的飞/推综合控制优化计算机设计[D]. 南京, 南京航空航天大学, 2004