

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106721

航空活塞发动机电控硬件的模块化设计与实现^{*}

徐劲松 黄国勇

(昆明理工大学 民航与航空学院 昆明 650500)

摘要: 针对高压共轨型航空活塞发动机电控单元硬件电路,采用模块化设计方法有助于电控硬件系统适应功能集成芯片的发展趋势。以英飞凌 32 位微控制器芯片为核心,从整体到细节对 3.3 V 和 5 V 电源供电稳压、MCU 晶振供电、0~5 V 传感器信号调理、执行器高低边功率驱动、PCB 电路板布局等进行了模块化电路设计。经过 PCB 印刷电路板制板和电子元器件的手工焊接,在发动机台架上进行了电路硬件系统的实验验证。实验结果中重点分析了曲轴凸轮轴传感器信号调理模块的 0~3.3 V 电压限幅和变频方波变换、高压泵油量计量电磁阀高边 MOS 管满足最大 5 A 的功率驱动和喷油器 24~48 V 混合半桥 MOS 管驱动 Peak-Hold 型瞬态电流。其整体实验效果好,符合应用要求。

关键词: 高压共轨型航空活塞发动机;电控硬件电路系统;功能模块化;信号调理;执行器功率驱动

中图分类号: TP216.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Modular design and implementation of electronic control hardware for the aero piston engine

Xu Jinsong Huang Guoyong

(Faculty of Civil Aviation and Aeronautics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The modular design method is adopted for the hardware circuit of electronic control unit on the high pressure common rail aero piston engine, which is helpful for the electronic control hardware system to adapt to the development trend of functional integrated chip. As the core of Infineon 32-bit microcontroller chip, it was modularly designed from the whole to the details by including the 3.3 V and 5 V power supply, MCU crystal oscillator power supply, 0~5 V sensor signal conditioning, high and low side power driving of the actuators, PCB layout and so on. After PCB printed circuit board and manual welding of electronic components, the circuit hardware system was verified on the engine bench. In the experimental results, it was analyzed that the 0~3.3 V voltage limiting and variable frequency square wave conversion of the signal conditioning module of crankshaft and camshaft sensor, the maximum 5 A power driving of the high-side MOS tube of the high pressure pump metering solenoid valve and the driving Peak-Hold transient current of the 24~48 V hybrid half-bridge MOS tube of the fuel injectors.

Keywords: high pressure common rail aero piston engine; electronic control hardware circuit system; functional modularization; signal conditioning; power driving of the actuators

0 引言

随着《中国制造 2025》的实施,国家工业和信息化部装备工业司提出:重点发展 200 kW 级航空活塞发动机^[1],并要求在面向航空发动机的民航和通航领域不断提升自主创新设计水平和系统集成能力。如果一台发动机的电子控制单元(electronic control unit, ECU)能根据飞行员的指令控制发动机的整个工作过程(从起动到停车)就认为具有全权

限^[2],该控制系统称为全权限数字电子控制(full authority digital electronics control, FADEC)。航空活塞发动机主要有两种机型:点燃式活塞发动机和压燃式活塞发动机;压燃式活塞发动机通常采用高压共轨机型,较高的燃油喷射压力能够使喷入气缸中的油滴与空气进行很好的雾化和燃烧,且喷油压力的大小可独立于发动机的转速进行控制。

模块化设计是一种系统性的概念,是对功能模块进行分离和重组的过程,各模块之间的关系既相互依赖又相互

收稿日期:2021-05-18

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61863017)项目资助

独立,它将一定数量的元器件、组件制成具备特定功能的系列化标准模块,具有一定的适应能力和扩展能力。

目前,针对航空活塞发动机电控硬件电路的研究报道很少,仅有一些针对车用发动机电控核心硬件,但两者之间也有可借鉴的地方,主要有:1) 针对发动机喷油器电磁阀,运用可编程逻辑器(programmable logic controller, PLC)的逻辑门资源,产生脉宽调制(pulse width modulation, PWM)信号进行高-低压分时的功率驱动和故障诊断^[3]。2) 运用电路中的分立元件搭建小功率航空活塞发动机的电容点火升压电路,其目的是实现可变频的 PWM 脉宽信号对升压充电电容的激励作用^[4]。3) 以飞思卡尔 16 位 MC9S12DP512 微控制器(micro control unit, MCU)为 ECU 主芯片,对点燃式活塞发动机的主控电路、电源模块、信号处理模块、喷油器驱动电路进行了设计^[5-6]。4) 采用 32 位飞思卡尔或英飞凌的 MCU 微控制器,对高压共轨柴油机电控系统进行硬件电路设计^[7-9]。

本文针对压燃式航空活塞发动机电控硬件电路系统进行可靠性分析,围绕英飞凌 32 位 MCU 芯片采用功能模块化的设计方案进行了硬件系统的设计与实现,论文重点阐述了模块化设计中的传感器信号调理、电源供电调压、执行器功率驱动、印刷电路板(printed circuit board, PCB)模块化布局等内容,并对整个 PCB 电路板进行了发动机台架实验验证,分析了曲轴凸轮轴信号调理和执行器功率驱动的实验结果,系统运行效果良好,可为科研同行的自主创新提供一定的应用参考。

1 硬件电路的可靠性

1.1 电控单元硬件的可靠性分析

安装在固定翼螺旋桨飞机上的活塞发动机所处外界环境较为恶劣,要求电控电路板上的电子器件能承受 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化^[10]、 $0\sim 2\text{ kHz}$ 范围内的振动,芯片选型要求高,电子元器件的性能参数要稳定。

电路板上的时钟晶振电路模块、微控制器芯片等核心模块容易受到干扰,出现工作异常。因此,布线时要尽量远离电路板中的大电流或高电压模块,主要有:DC-DC 电源(direct current, DC)转换组件、执行器功率 MOS 管(metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET)等。此外,电路板中的强/弱电信号综合布线、共地端、敷铜隔离等设计因素的合理性也必须综合考虑。

1.2 提高硬件电路可靠性的方法

硬件电路的设计可通过设置干扰源隔离区、滤波电路等方法来消除干扰源,减小干扰对电路板的入侵。提高 ECU 硬件电路的可靠性主要考虑以下几个方面:

1) 集成芯片应该尽量选用汽车级或航空军工级。通常,MCU 主芯片选用恩智浦(NXP)或英飞凌(Infineon)的微控制器,本设计选用英飞凌 32 位 MCU 芯片。

2) 在电瓶电源的稳压或降压模块中可增加共模和差模

噪声抑制功能。

3) 电子元器件的选取。一般电阻器尽量选用温漂系数小的金属膜贴片电阻,滤波电路使用压敏电阻抑制尖峰或浪涌电压,低频或旁路电路使用纸介电容,高频或高压电路使用云母电容或陶瓷电容,电源滤波或退耦电路使用电解电容,信号滤波电路使用铝电解电容,振荡电路使用磁珠消除 PCB 板传输线路上的超高频信号等。

4) 布线时的接地要求。PCB 板中的高频电路使用多点就近接地,低频电路使用单点接地;区分功率地端和信号地端,在功率地端设置粗线径接地,放大器的地线一定要远离功率地端;可进行网状数字地端布线,且各种地端不能混用。

5) 硬件冗余设计。FADEC 系统从安全性的角度采用双 ECU 硬件电路板设计,即:一个是工作 ECU 电路板,另外一个备用 ECU 电路板,这两个电路板的设计相同,可自动切换,且配备两套冗余曲轴和凸轮轴信号传感器。

2 硬件电路的模块化设计

如图 1 所示,根据被控对象的功能需求进行发动机电控单元硬件模块化设计,总架构中包括:电源供电模块、微控制器时钟晶振模块、传感器信号调理模块、功率驱动模块等,再把这些功能模块分别引入到英飞凌 32 位 MCU 对应的 I/O 端口(input or output port, I/O),由底层软件程序进行计算后,与上层控制策略程序进行数据交互,最后由底层程序产生 PWM 变频输出信号给功率驱动控制器。

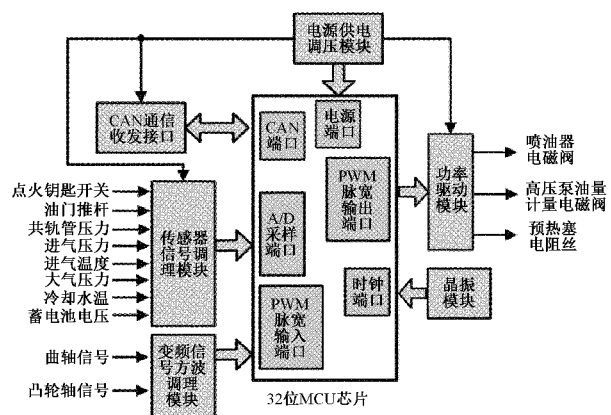


图 1 电控单元的硬件模块化总架构

2.1 MCU 供电模块设计

MCU 供电是把电瓶供电电压转换为 MCU 芯片正常工作所需的电压值,具有一定的稳压功能。供电模块要为英飞凌 32 位 MCU 芯片系列^[11]提供两种直流电压等级:3.3 V 和 5 V,再由 MCU 芯片中的嵌入式电压调节器(embedded voltage regulators, EVR)转变为 1.3 V 的内核工作电压。把 MCU 芯片的 A/D 采样(analog and digital sampling, A/D)端口电压设置为标准模拟量 5 V 电压等级,其他 I/O 接口设为 3.3 V 电压。

英飞凌公司为32位MCU芯片配备了TLE7368系列DC-DC降压供电芯片^[12],其工作电压范围4.5~45 V,能为MCU的I/O端口提供3.3 V和5 V、电压误差率为±2%,最大负载驱动电流达到800 mA,具有过压、欠压自检功能。如图2所示,参考芯片手册设计电路和元器件参数:18~220 μH之间的电感值,稳压输出端电容值大于20 μF等。

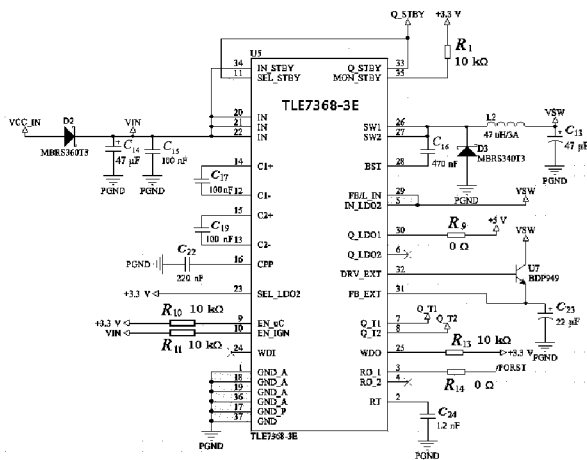


图2 MCU供电模块电路原理图

2.2 MCU晶振电路模块设计

英飞凌MCU芯片内部时钟的主频电路是一个皮尔斯振荡器(Pierce oscillator),可由外部4~25 MHz的石英晶体或2~40 MHz的陶瓷谐振器提供时钟源,再由不同MCU系列芯片升频为133~300 MHz的工作主频。

如图3所示,使用20 MHz的石英晶体振荡器Y1,消除电路中的谐波影响由两个电容 C_{25} 和 C_{26} 完成,连接MCU芯片的时钟接口管脚是XTAL1和XTAL2。

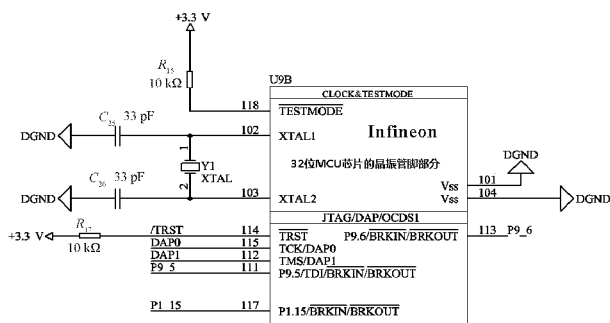


图3 MCU时钟晶振电路图

2.3 其他外围供电模块设计

为外围芯片单独设计3.3 V和5 V的供电模块,可选用英飞凌TLE4284 DVxx系列NPN型集成稳压芯片,DVxx型号表示选用的输出电压等级,可分为1.5 V、1.8 V、2.6 V、3.3 V和5.0 V;最大输出电流为1.0 A;最大芯片工作电压为40 V,该芯片集成了短路保护和过温保护。其电路接线如图4所示, V_1 是电瓶电压, V_Q 是芯片输出电压。

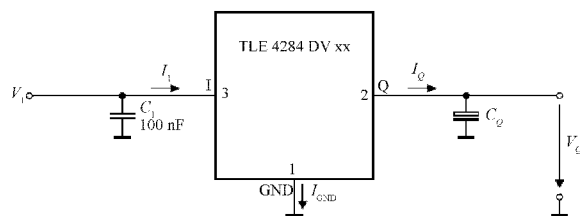


图4 TLE4284系列外围芯片供电模块图

2.4 传感器信号调理模块

发动机传感器信号有3种类型:0~5 V的模拟量信号、开关量信号和变频信号,首先在调理电路中进行低通滤波、限幅或PWM脉宽调制变换等,然后把调理过的信号引入到MCU芯片的对应接口(如图1所示)。

1) 模拟量信号调理模块

这些传感器的模拟量信号是标准0~5 V,属于低频信号,可选用低通滤波器。如图5是一个无源低通滤波器的温度传感器信号调理电路设计:如出现输入不确定信号时,由上拉钳位电阻 R_{65} (2 kΩ)进行高电平钳位,增强抗干扰能力;滤波电容 C_{60} 、 C_{61} 与电阻 R_{66} 组成的低通滤波器可滤除高频噪声信号;图中的AN19表示接入MCU芯片的A/D采样19号管脚。英飞凌32位MCU的A/D采样参数^[11]中的最高采样频率 f_{ADC} 为100 MHz,12位A/D采样、转换和同步的时间为980 ns,10位A/D采样、转换和同步的时间为740 ns,芯片性能优越。

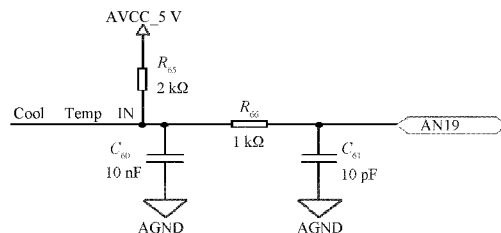


图5 模拟量输入信号的低通滤波电路

2) 开关量信号调理模块

如果开关量信号(点火钥匙开关等)的电压等级不符合MCU的端口电压幅值,则需要通过降压、限流和滤波处理。图6是点火钥匙开关量的调理电路,首先通过电阻 R_{37} 和 R_{38} 进行串联分压,再由稳压二极管 D_{38} 钳位至电压3.3 V后,经滤波电容 C_{92} 进行滤波,电阻 R_{39} 是把钳位电压的电流限制到3.3 mA之内。为在MCU中产生一个有效下降沿触发点火程序,可用反相器U18A进行高低电平转换。

3) 变频信号调理模块

曲轴/凸轮轴传感器信号是一个随发动机转速变化的变频信号,需要实时转换为PWM变频脉宽信号后,引入MCU芯片,再由程序实时判断发动机的活塞位置。该传感器有两种类型:磁电式和霍尔式。磁电式是利用电磁感应原理,将发动机转速变为感应电势输出,且感应电势的幅

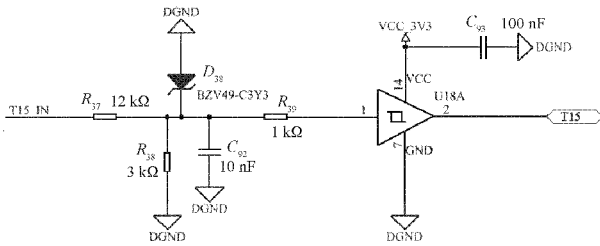


图 6 开关量输入信号的调理电路

值和频率会随着转速的增加而升高，是一个变频变幅正弦信号。霍尔式是利用霍尔效应产生霍尔电压，该电压幅值不受转速的影响，是一个变频方波信号。

曲轴飞轮盘的齿数通常为 $60 - 2 = 58$ 个齿(有两个缺齿)，每个齿间隔 6° 。当曲轴转速增加时，磁电式曲轴传感器的感应电势幅值不断升高，最高可达 $\pm 10\text{ V}$ ，要由钳位二极管进行电压限幅。如图 7 所示，采用意法半导体公司的 LM193 迟滞比较器^[19]的同相端接收曲轴电压信号(图中用变量 CrankSFT_IN 表示)，输出端和同相端之间连接反馈电阻 R_{39} ，反相端接参考电压 3.3 V ，电阻 R_{76} 和 R_{73} 的分压可使得迟滞比较器的上限阈值电压($V+$)为 0.5 V ，下限阈值电压($V-$)为 0 V 。曲轴传感器的原始输出信号由钳位二极管 D_{37} 限幅至 3.3 V 。比较器的 3.3 V 工作电压限定了输出方波信号高电平为 3.3 V ，与 MCU 的 PWM 脉宽输入端口电压等级一致。磁电式凸轮轴传感器的调理电路是相同的，不再重复阐述。

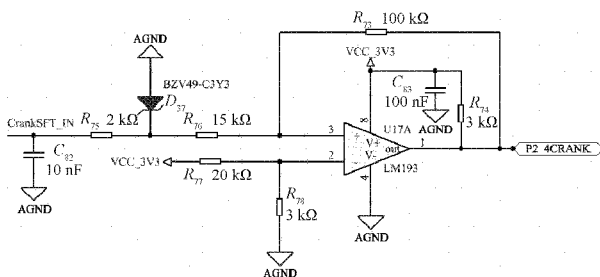


图 7 曲轴传感器的调理电路

2.5 执行器功率驱动模块

通过高电压、大电流的功率 MOS 管对执行器电磁阀进行功率驱动，MCU 芯片提供 PWM 变频脉宽驱动控制信号。喷油器电磁阀和高压泵油量计量电磁阀属于电感性负载，预热塞属于电阻性负载，应采用不同的驱动方法。

1) 发动机执行器的功率驱动方案

功率驱动主要有 3 种方法：高边驱动、低边驱动和半桥驱动。

(1) 高边功率驱动方案

如图 8 所示，把功率 MOS 管放在执行器的上端称为高边功率驱动，且在电磁阀两端接一个续流二极管 D 。当 N 沟道 MOS 管(简称 NMOS 管)的栅源极电压 V_{GS} 为高电平时，电流从 V_b 端经 MOS 管的漏源极流过电磁阀；当 V_{GS}

为低电平时，MOS 管断开，续流二极管 D 对突变的电磁阀感应电势构成回路，快速消耗感应电势。

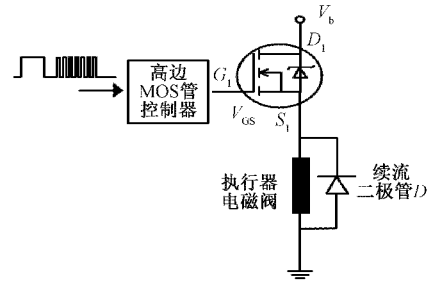


图 8 高边 NMOS 管功率驱动方案

(2) 低边功率驱动方案

如图 9 所示，把功率 MOS 管放在执行器的下端称为低边功率驱动，且在电磁阀两端接一个续流二极管 D 。它的导通方式与高边功率 MOS 管驱动的工作原理相似，不再重复阐述。

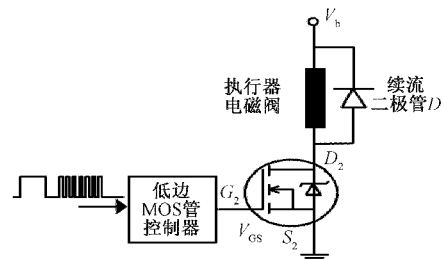


图 9 低边 NMOS 管功率驱动方案

(3) 半桥功率驱动方案

半桥功率驱动是结合了高边和低边功率驱动特点，高/低边 MOS 管控制器分别接收 MCU 的 PWM 变频脉宽调制信号，从而控制 MOS 管的通断状态。用两个 NMOS 管来控制执行器电磁阀的通断能实现更加复杂的控制逻辑，也有应用于双燃料发动机燃气喷射电磁的驱动^[11]。

如图 10 所示，当高边 MOS 管控制器接收到高电平脉宽信号时，高边 MOS 管打开；而低边 MOS 管控制器接收可变脉宽信号，从而实现负载通电。低边可变脉宽信号是为了控制流过负载的电流幅值，使其符合负载通电时的电流特性要求。

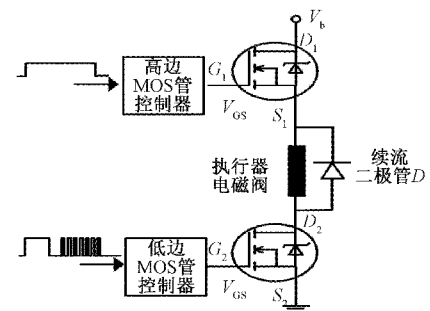


图 10 半桥 NMOS 管功率驱动方案

2) 喷油器电磁阀的功率驱动模块

喷油器电磁阀的通断是实现电控发动机燃油喷射的一个重要环节,其功率驱动必须符合喷油器电磁阀的工作特点。如图11所示,喷油器电磁阀的驱动电流、针阀升程 h 和喷油量之间的驱动特性可分为以下5个阶段:

(1) 电磁阀通电阶段,采用48 V以上高压驱动电磁阀线圈,促使电流快速上升到电磁阀开启的Peak峰值电流18 A,需与硬件电流检测闭环控制相配合。电流上升率越大,电磁阀的开启准备时间越短,通常要求在100 μ s之内。

(2) 针阀座开启上升阶段,要求驱动电流在18 A附近保持400 μ s,喷油器电磁阀全部打开。

(3) 喷油器已开启喷油时要减小驱动电流,使其从Peak电流峰值下降到Hold电流维持值。

(4) Hold电流值是维持喷油器处于开启状态的最小电流,且下降到Hold电流值能为后续实现电磁阀的快速关断,使线圈电流快速降为0 A。

(5) 电磁阀快速关断。当电磁阀线圈电流下降至0 A时,电磁阀逐渐关闭。

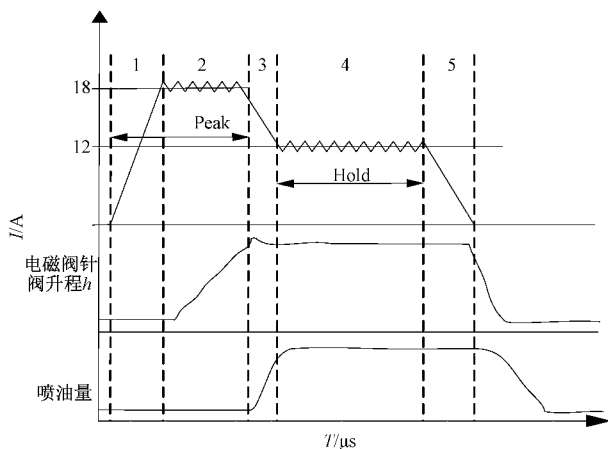


图11 喷油器电磁阀的驱动特性

如图12所示,选用英飞凌TLE8386-2EL低端感应升压控制器^[15]对电瓶电压进行48 V增压,该芯片接收PWM可变脉宽的频率范围是100~700 kHz,并具备输出过电压保护和过温关断等保护功能。 V_{IN} 是电瓶供电端,电感线圈 L_{BOOST} 对增压储能电容 C_{OUT} 进行增压充电, V_{BO} 是增压48 V的输出端。

如图13所示,设计了喷油器电磁阀改进型混合半桥功率驱动方案。为了满足前面描述的喷油器驱动电流特性,MCU给高边MOS管控制器提供变频脉宽信号完成电磁阀供电模式的增压48 V和电瓶24 V自动切换,MCU输出的另外四路脉宽信号分别连接4个低边MOS管控制器,从而决定哪个喷油器电磁阀通电。喷油器电磁阀线圈属于电感性负载,在通/断电时会产生反向感应电势,为避免A点负电压的产生,可由二极管D1的单向导通特完成;在B1~B4点附近的多余电压由稳压二极管吸收和自消耗掉,

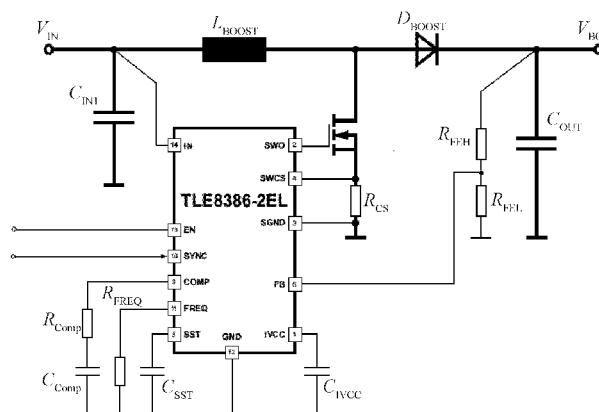


图12 TLE8386芯片的48 V增压电路

还能避免MOS管的栅极耐压值超压。喷油器电磁阀的Peak-Hold电流值可由检测电阻20 m Ω 与共模差分电流检测放大器LT6105芯片^[16]相配合完成检测。当获得该电流的实时转换电压值后,再引入MCU的A/D采样端口,从而构成喷油检测电流的闭环控制。

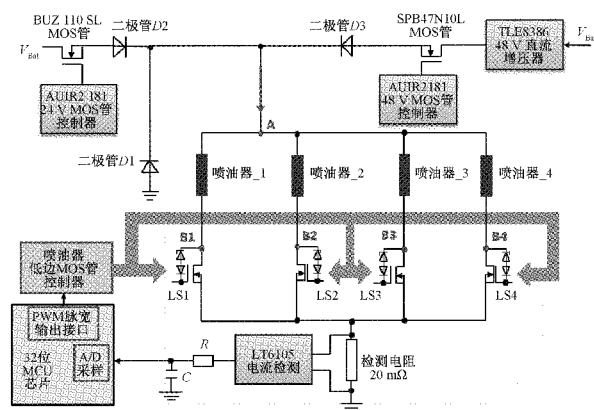


图13 喷油器混合半桥MOS管驱动方案

3) 高压泵油量计量电磁阀功率驱动模块

如图14所示,通过控制常开型高压泵电磁阀的驱动电流来控制高压泵的开度,从而实现共轨管进油量与共轨燃油压力的控制。

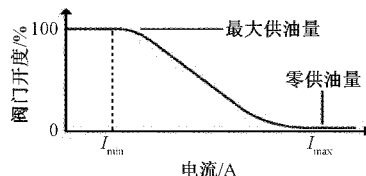


图14 高压泵油量计量电磁阀驱动电流特性

如图15所示,采用英飞凌的BTS3060TF芯片完成低边功率驱动,其最大工作电压为42 V,PWM脉宽输入端最大电压为5.5 V,额定驱动输出电流为3 A,具备过温、过压、欠压、过流及短路保护。使用20 m Ω 的电流检测电阻与电流检测放大器LT6103芯片、MCU的A/D采样端口

共同组成电流检测闭环电路,再与共轨燃油压力传感器组成轨压复合控制策略^[17],与 MCU 的上层控制软件程序实现共轨燃油压力的精确控制,从而获得发动机不同工况下较好的燃油喷射雾化和燃烧效果。

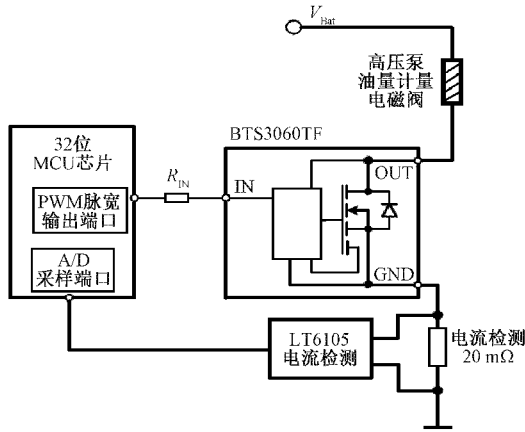


图 15 高压泵电磁阀的低边功率驱动方案

4) 预热塞功率驱动模块

预热塞执行器是使用热敏陶瓷作为发热体,其最大发热温度为 40 ℃,最大工作电压为 30 V,属于电阻性负载。如图 16 所示,选用英飞凌的 2 通道智能高边功率驱动 BTT6030-2ERA 芯片完成预热塞功率驱动,该芯片的 DEN 端是故障诊断使能端;DSEL 端是故障诊断选择通道输入端;IN0 和 IN1 是激活高边 MOS 管导通的输入端,且高电平有效;Out1 和 Out2 分别连接各自对应的预热塞。

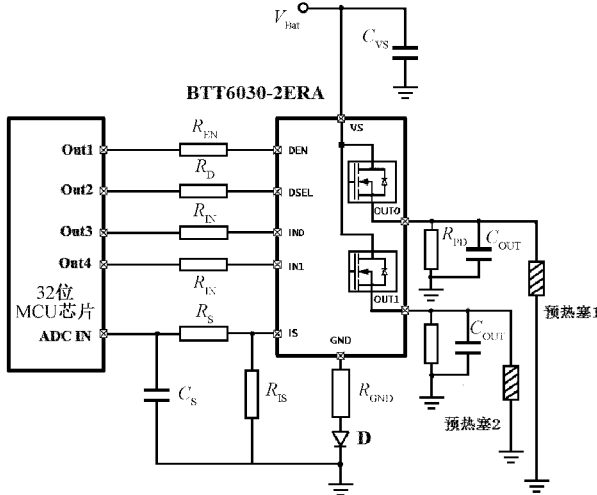


图 16 预热塞的高边功率驱动方案

2.6 ECU 电路板总体模块化布局与实现

ECU 电路板的模块化布局需要通观全局,把前面阐述的 ECU 功能模块化电路进行区域模块化布局,其优势是在将来芯片产品不断升级时,只需做局部调整即可满足需求。

如图 17 所示,在 ECU 模块化布局方案中,由于整个硬件系统的所有信号最终都要汇集到 MCU 芯片,应将 MCU

放在整个电路板的中心区。那些属于大功率、大电流的功率驱动模块和电源转换模块应放置在 PCB 电路板的最边缘区域,并在边缘最外区域设置一圈散热片进行散热。传感器信号调理模块放在 MCU 芯片与接插件针脚端口之间,使其尽快进入 MCU 芯片。

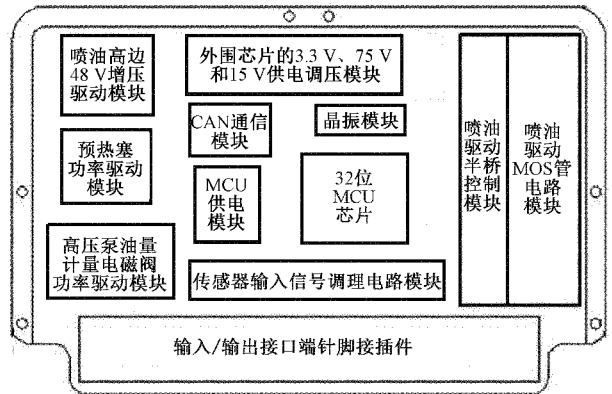


图 17 ECU 模块化电路板布局方案

按照 ECU 模块化电路板布局方案(图 17),使用 Altium Designer 软件设计了如图 18 所示的 6 层 PCB 板布线图,分别为:元器件焊接/布线正面层、小信号 GND 接地层(Ground, GND)、综合布线层、功率布线层、功率 GND 接地层、元器件焊接/布线背板层。

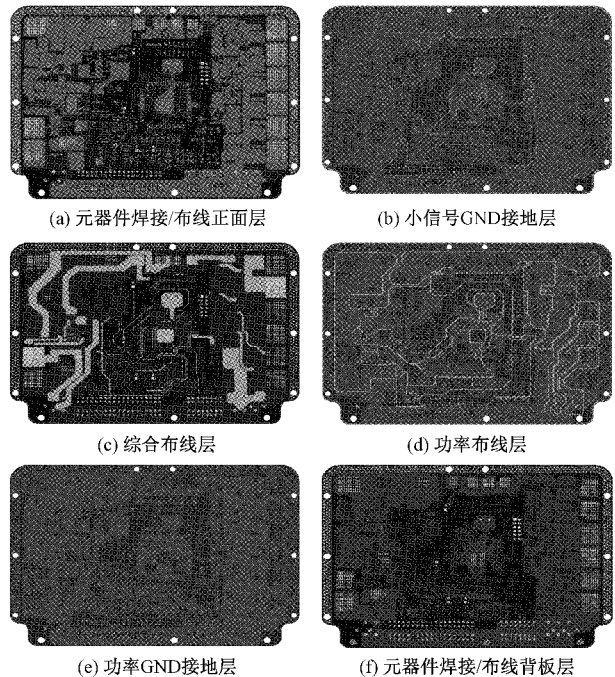
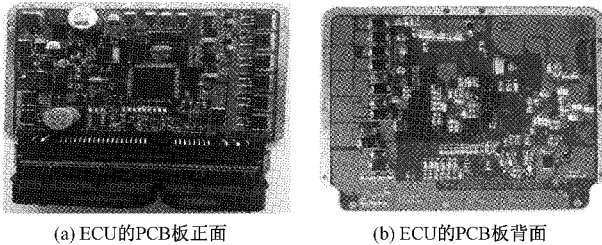


图 18 PCB 板内部六层布线结构

区域布线过程中要注意:把 PCB 电路板中的接地端分为:电源功率地端、模拟信号地端和数字信号地端。元器件接地尽可能使用单点并接地法;高频电路和数字电路的接地走线尽量短,减小多点接地形成的地线电感。

如图 19 所示的实物是把 Altium Designer 软件生成的光绘格式文件,交给国内 PCB 制板商进行印刷电路制版后,自行手工焊接、调试,并在发动机台架上进行 ECU 电路板的实验验证。



(a) ECU的PCB板正面

(b) ECU的PCB板背面

图 19 ECU 的实物模块化 PCB 板

3 实验结果分析

以一台高压共轨四缸四冲程航空煤油活塞发动机进行地面台架实验(如图 20 所示),验证了自制 ECU 硬件模块化电路板的实际运行效果。实验过程中使用已研究和开发的 ECU 控制软件程序,由 Tasking 编译器生成“.hex”文件后,下载到该自制电路板中,通过示波器对 PCB 电路板中的相关信号进行观测。

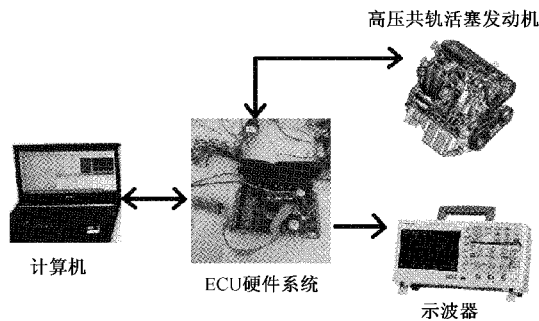


图 20 ECU 硬件系统的测试试验

3.1 曲轴和凸轮轴传感器信号实验分析

在传感器信号调理模块中,曲轴和凸轮轴传感器的输出信号变化较快,其它传感器的输出信号变化相对较缓慢。由于篇幅限制,仅对曲轴和凸轮轴传感器信号调理实验进行分析。

按照如图 7 所示的调理电路进行限幅和方波变换处理后,得到如图 21 所示的实验结果,其方波信号较好,然后引入到 MCU 的 PWM 脉宽调制输入端口,由底层判缸程序实时计算得到发动机任意气缸中活塞的精确位置。

3.2 喷油器电磁阀驱动实验分析

根据如图 13 所示的喷油器改进型混合半桥 MOS 管功率驱动方案,高边 48 V 和电瓶 24 V 功率驱动控制器、低边选缸功率驱动控制器都是接收 MCU 发出的可变频 PWM 脉宽调制信号,从而控制某喷油器电磁阀的通/断状态。

如图 22 所示,使用法国 CA 公司 E3N 型电流钳对喷

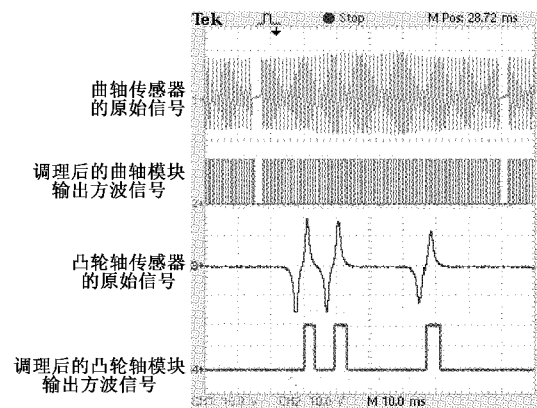


图 21 曲轴和凸轮轴信号调理的实验分析

油器预喷+主喷的多次喷射中 Peak-Hold 驱动电流进行检测,并把检测到的电流波形接入到示波器观测验证。高边 48 V 功率驱动控制器负责驱动喷油器的 Peak 电路,低边选缸驱动控制器负责选定哪个喷油器接通。由于是预喷+主喷,且预喷时间较短,由高边 48 V 驱动控制器和某一缸喷油器低边选缸控制器发出带高电平的信号,喷油器 Peak 电流时间大约为 350 μs 。在主喷时喷油器驱动电流才会出现 Hold 部分;当驱动电流由 Peak 向 Hold 下降过渡时,高/低边驱动信号都保持低电平,只有低边选缸信号一直保持高电平;当电流达到需要的 Hold 电流值时,低边 24 V 控制器收到 MCU 一段 PWM 脉宽信号,从而打开低边 MOS 管,低电平信号使其电流下降到 Hold 阶段,并保持约 200 ms。当 MCU 提供的 PWM 脉宽信号全部变为低电平时,关断 MOS 管,在 100 μs 之内, Hold 电流降为 0 A,喷油器电磁阀关闭,主喷结束。

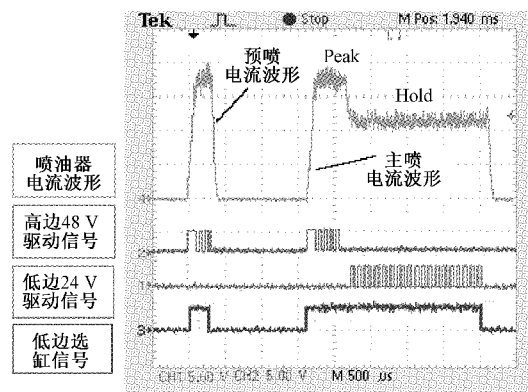


图 22 喷油器功率驱动模块的电流实验波形

3.3 高压泵油量计量电磁阀驱动实验分析

根据如图 15 的驱动方案,高压泵油量计量电磁阀的功率驱动器 (BTS3060TF 芯片) 接收到来自 MCU 芯片的 PWM 脉宽控制信号,在高电平时触发 BTS3060TF 芯片内部的集成功率 MOS 管导通(如图 23),电流流过油量计量电磁阀和 20 m Ω 的检测电阻,由电流检测芯片 LT6105 把检测电流转换为电压值送入到 MCU 的 A/D 采样端口,由

MCU 的底层积分程序计算得到流过该电磁阀的电流有效值,供上层轨压控制策略使用。

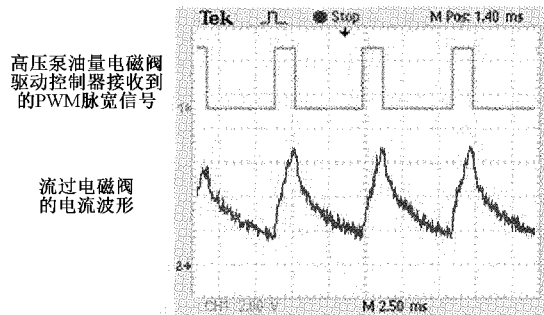


图 23 高压泵油量计量电磁阀模块的实验波形

4 结 论

1)以功能模块化为航空活塞发动机电控硬件电路系统的核心设计方案,针对英飞凌 32 位 MCU 芯片开展自顶而下的设计过程,详细介绍了电路板中的电源供电稳压、MCU 晶振供电、0~5 V 传感器信号调理、执行器高低边功率驱动、PCB 电路板布局等,降低了电路模块之间的耦合性,提高了芯片工作的抗干扰性。

2)在实验结果中重点针对曲轴凸轮轴信号调理、预喷+主喷的喷油器功率驱动和高压泵电磁阀功率驱动的实验波形进行了分析阐述,其结果符合预期,但实验波形中存在一些轻微的毛刺干扰,还可进一步改进 PCB 板大电流器件的抗干扰问题。

参考文献

- [1] 中国工业和信息化部装备工业司.《中国制造 2025》解读之:推动航空装备发展[EB/OL].(2016-05-12)[2016-05-12]. Http://www.gov.cn/zhuanti/2016-05/12/content_5072767.htm.
- [2] 姚华.航空发动机全权限数字电子控制系统[M].北京:航空工业出版社,2014.
- [3] 李克,苏万华,郭树满.高速电磁阀分时驱动电路可靠性与一致性研究[J].内燃机工程,2011,32(2):33-38.
- [4] 张奇,徐国强,杜发荣.小型航空活塞发动机点火系统优化设计[J].航空动力学报,2012,27(2):343-349.
- [5] 李庆峰,刘涛,肖进,等.基于 MC9S12 的自由活塞式内燃机电控系统的设计[J].内燃机工程,2011,32(1):19-23.
- [6] 赵雪峰,于秀敏,周骥,等.基于直喷式汽油机电控系统硬件开发与试验研究[J].内燃机工程,2011,32(2):39-42.
- [7] 郭修其.高压共轨 ECU 硬件系统及关键控制策略开发[D].杭州:浙江大学,2011.
- [8] 尹存源.高压共轨柴油机 ECU 硬件研究与开发[D].昆明:昆明理工大学,2015.
- [9] 冷易凌.高压共轨柴油机 ECU 硬件与底层驱动软件开发[D].镇江:江苏大学,2019.
- [10] GB/T 34954.1—2017.航空电子过程管理电子器件使用性能第 1 部分:温度升额[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [11] Infineon Technologies AG. TC21x/TC22x/TC23x Family 32-Bit Single-Chip Microcontroller User's Manual [EB/OL]. (2014-12) [2014-12]. Https://www.infineon.com/cms/cn/.
- [12] Infineon Technologies AG. TLE7368 Next generation microcontroller supply data sheet[EB/OL]. (2019-12-09)[2019-12-09]. Https://www.infineon.com/dcdc.
- [13] ST Microelectronics. LM193 Low-power dual-voltage comparators data sheet[EB/OL]. (2016-02-09)[2016-02-09]. Https://www.st.com/content/st_com/cn.html.
- [14] 徐升荣,曾洁,薛志红.双燃料内燃机燃气喷射阀的驱动控制电路设计[J].电子测量技术,2018,40(1):24-28.
- [15] Infineon Technologies AG. TLE8386-2EL Basic smart boost controller data sheet [EB/OL]. (2010-10-25) [2010-10-25]. Https://www.infineon.com/cms/cn/.
- [16] Analog Devices. LT6105 Precision extended input range current sense amplifier[EB/OL]. (2013-10-20) [2013-10-20]. Https://www.analog.com/cn/.
- [17] 徐劲松,申立中,王贵勇,等.高压共轨柴油机轨压复合控制策略的研究[J].内燃机工程,2012,33(2):54-59.

作者简介

徐劲松,工学博士,副教授,主要研究方向为航空发动机的燃烧与控制。

E-mail:372606249@qq.com

黄国勇,工学博士,教授,主要研究方向为航空发动机的控制与故障诊断。

E-mail:42427566@qq.com