

高压共轨柴油机国产芯片控制系统研究

杨博, 吴欣宸, 董霏, 刘兵

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对现有高压共轨柴油机电控单元高度依赖进口芯片、自主不足的问题,提出了基于全国产芯片的高压共轨柴油机电控单元方案。所设计的国产控制单元选用兆易创新的 GD32F450 芯片为控制核心,承担发动机数据采样、处理、存储与控制任务。首先,采用 Boost 升压电路提供喷油器峰值电流,利用分立器件设计双边驱动与电流反馈电路,在不依赖进口专用芯片的条件下,对喷油器驱动电流进行闭环控制;然后,基于 FreeRTOS 操作系统,开发高压共轨柴油机底层驱动软件,实现对不同任务调度周期的精准控制;最后,对所设计的电控单元进行了实验验证。结果表明,所设计的国产高压共轨柴油机电控单元功能齐全、工作稳定,双边驱动电路典型峰值电流为 22 A,维持电流为 10 A,最小喷射间隔时间为 200 μ s,多次喷射性能与 Bosch 系统相当。发动机不同转速条件下任务调度周期精准、实时性好,研究证实了高压共轨柴油机电控单元全国产化方案的可行性,对推动柴油机电控技术自主可控提供了有益参考。

关键词: 高压共轨柴油机;电子控制单元;国产芯片;底层软件;FreeRTOS 操作系统

中图分类号: TK323 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202406005 **文章编号:** 0253-987X(2024)06-0043-10

Research on Domestic Chips Control System of High-Pressure Common-Rail Diesel Engine

YANG Bo, WU Xincheng, DONG Pei, LIU Bing

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the problem that the high pressure common-rail diesel engine control unit (ECU) is highly dependent on imported chips and lack of independence, an ECU scheme based on fully domestic chips is proposed. The domestic micro-controller named GD32F450 produced by Gigadevice is adopted as the core of engine data sampling, processing, storage and control tasks. The Boost circuit is employed to provide the peak current of diesel injector. A double-side drive circuit with current feed-back functional module is designed using domestic discrete electrical devices and the drive current of the diesel injectors is controlled in the way of closed-loop without imported application specific integrated chip. Moreover, the bottom driving software of high pressure common-rail diesel engine is developed based on FreeRTOS and the execution period of different tasks has been precisely controlled. Finally, the ECU scheme is verified by experiments. The results show that the developed domestic ECU of a high pressure common-rail diesel engine proposed in this paper is full-featured and works stable. Additionally, the typical

peak current and hold current of the double-side drive circuit is 22 A and 10 A, respectively. The minimum interval time of multi-injection is 200 μ s and it is comparable to the Bosch system in terms of the multi-injection characteristics. The tasks execution period is controlled precisely and the bottom driving software has good real-time performance at varying engine speeds. This research confirms that the feasibility of the high pressure common-rail diesel engine ECU scheme based on fully domestic chips and provides a reference for promoting the self-developed engine ECU technology.

Keywords: high-pressure common rail diesel engine; engine control unit; domestic chips; underlying software; FreeRTOS operating system

柴油机高压共轨燃油系统与传统的泵-管-嘴脉动供油系统不同,通过引入共轨油管,将燃油压力与发动机转速解耦,实现了对燃油喷射压力在一定范围内的自由控制^[1]。高压共轨系统中,燃油通过高压油泵加压,随后送入共轨油管,控制高压油泵的供油量即可改变或维持共轨管的燃油压力,基本不受发动机转速变化的影响,喷射压力控制精度高、压力稳定性好^[2-3]。高压共轨技术自问世以来,因其优异的供油特性受到产业界与研究人员青睐^[4-6]。

德国 Bosch 公司的 CR 系统已经在全球市场获得成功,证明了高压共轨系统的成熟性^[7]。中国作为仅次于欧洲的第二大共轨系统市场,随着排放法规的日益严苛,对高压共轨系统的需求急剧上升^[8-9]。

国内对柴油机高压共轨控制系统的研究起步较晚,大多直接采用国外厂商的硬件以及底层软件。同时,由于材料、工艺、油品、芯片等问题,导致高压共轨燃油系统领域与国外存在较大差距。近年来,通过国内相关高校与企业的不懈努力,取得了一些显著成果,常州易控汽车电子拥有商用车动力系统全栈控制解决方案,具有先进的共轨压力控制技术^[10],曾联合东风商用车技术中心开发了基于缸压曲线的燃烧始点实时检测算法^[11],与山东大学合作开发了基于等效等熵指数的燃烧实时反馈控制策略^[12],为高压共轨柴油机电控系统国产化做出重要贡献;辽宁新风与德国利勃海尔旗下的 CRT 共轨技术公司合作开发生产了具有世界一流水平,适合中国柴油机的电控高压共轨系统^[13];卓品智能科技无锡有限公司量产了多款电控产品,旨在打破国外垄断并实现国内发动机电子控制单元(ECU)的全面切换^[14]。但是,目前国内自主的高压共轨柴油机 ECU 主要侧重控制策略自主开发方面,系统硬件与底层软件都是基于成熟的进口芯片设计,为了获得完全自主可控的电控软、硬件平台,研究国产芯片替

代方案具有重要的工程与社会价值。

国外汽车芯片研发、生产起步早,产业体系更加完善,形成了较高的行业壁垒^[15-16]。在国际供应链稳定性恶化与国内产业政策的激励下,国内涌现出一批优秀的汽车芯片企业。具体而言,多种 8 位汽车芯片已经实现国产替代,32 位芯片已有企业实现小批量产,大部分芯片公司已通过 AEC-Q100 认证,少部分厂商通过 ISO-26262 认证^[17]。合肥工业大学利用兆易创新 GD32 芯片完成车载综合电源系统的设计^[18],哈尔滨工业大学构建了一个完全国产化的飞行器控制系统^[19],基本实现了飞控系统的国产化。

柴油高压共轨系统国产化方案中除了主控芯片之外,最大的难点在于喷油器驱动芯片的替代。目前共轨系统主要采用进口专用喷油器驱动芯片,典型的有 L9781、MC33816、CY335^[20-22],国内芯片公司鲜有涉及这方面的研究,因此全国产芯片方案中专用驱动芯片的国产替代成为本文介绍的重点。

本文旨在设计高压共轨柴油机全国产化芯片电控单元解决方案,主要集中在 ECU 硬件层与驱动层。主控芯片采用国产厂商兆易创新的 32 微控制器,应用国产芯片分别设计电源模块、传感器信号处理模块、执行器驱动模块和通信模块,然后设计底层驱动软件与人机交互软件,最后开展实验验证与系统性能分析。

1 高压共轨柴油机 ECU 架构概述

高压共轨柴油机 ECU 架构如图 1 所示,硬件层主要包含主控芯片、负责数据采集的传感器接口电路、负责驱动执行器工作的驱动电路;驱动软件层与应用层共同组成了高压共轨柴油机电控系统的软件系统,应用层依据控制策略与标定数据计算最佳喷油、泵油等参数,驱动软件层负责准确执行上述动作,同时采集、处理传感器数据后供应用层使用;数

据交互层为虚拟层,实际工程应用中表现为应用层与驱动软件层的数据输入与输出接口,以此保证 ECU 内存数据的高效、准确利用。

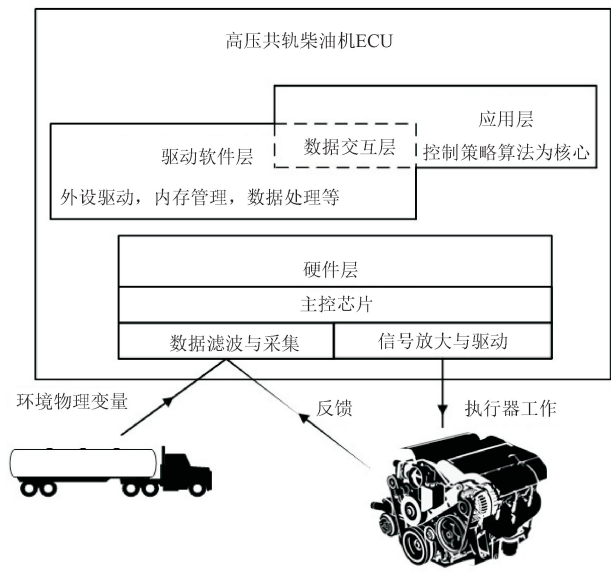


图 1 高压共轨柴油机 ECU 架构

Fig. 1 ECU architecture of high pressure common rail diesel engine

2 ECU 硬件设计

高压共轨柴油机电控单元的主要功能包括: 依据曲轴与凸轮轴信号进行发动机曲轴实时转角与转速计算; 监测加速踏板开度、共轨压力、冷却水温、进气温度等物理量; 基于发动机运行工况与环境状态计算喷油量、喷油正时、轨压修正等关键控制量; 精准可靠的执行上述控制量等。具体来说, 硬件方面, 需要高精度、浮点算力强的芯片作为逻辑控制核心, 精准、可靠的驱动模块作为系统稳定运行的保障, 多路、准确的模数转换模块(ADC)作为发动机工作状态监测的基础; 软件方面, 控制量计算与状态量采集需要较高的实时性, 以避免发动机高速状态下执行器工作不稳定, 漏喷等造成发动机转速震荡甚至熄火。高压共轨柴油机硬件系统框图如图 2 所示, 全国产芯片的高压共轨喷油器驱动模块设计是 ECU 国产化的难点与重点。

2.1 主控芯片选型

主控制器选用国产厂商兆易创新公司的 GD32F450 型号 32 位微控制器, 最高频率可达 200 MHz 该芯片采用 ARM 公司开发并向全世界厂商开放商业授权的 Cortex-M4 内核, 芯片集成丰富的外设资源 ADC、DMA、TIMER、CAN、SPI 等,

1 024 KB 的 Flash 与 256 KB 的 SRAM 为控制系统提供充足的运算和存储空间, 内置硬浮点运算单元 FPU, 为复杂上层控制策略的实现提供算力支撑。

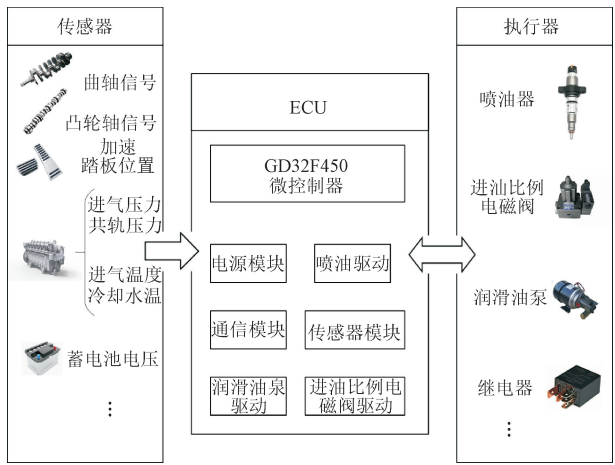


图 2 高压共轨柴油机控制单元框图

Fig. 2 High pressure common rail diesel engine ECU diagram

2.2 传感器接口电路

传感器接口电路是传感器信号与 ECU 主芯片之间的电路, 具有信号滤波、诊断并传递信号到微控制器 ADC 模块的作用。冷却水温、进气温度等传感器接口电路集成了滤波电路, 保证采集电压信号的稳定性; 曲轴位置传感器采集的原始信号接近正弦信号, 微处理器无法直接处理, 因此设计了差分比较输入电路, 将原始的正弦信号转化为方波信号, 在提高信号稳定性的同时, 保证微处理器可以精准高效的获得曲轴位置信息, 如图 3 所示。

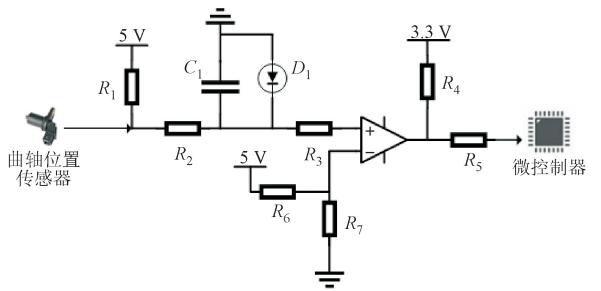


图 3 曲轴位置信号接口电路

Fig. 3 Crankshaft position signal interface circuit

考虑到高压共轨柴油机运行过程中对于大量物理量的监测、反馈需求, 本文将一路微控制器通道设计为多路传感器接口, 具体方法如下: 采用国产 8 选 1 模拟开关芯片, 通过 3 个引脚的组合开关实现 8 路传感器采样, 提升了芯片资源利用率。

2.3 执行器驱动电路

驱动电路负责将微处理器的控制逻辑信号转换为可以驱动执行器工作的驱动信号。高压共轨柴油机主要执行器有进油比例电磁阀、喷油器等,根据不同执行器的工作需求设计驱动电路。单边驱动包括低边驱动与高边驱动,如图 4 所示。

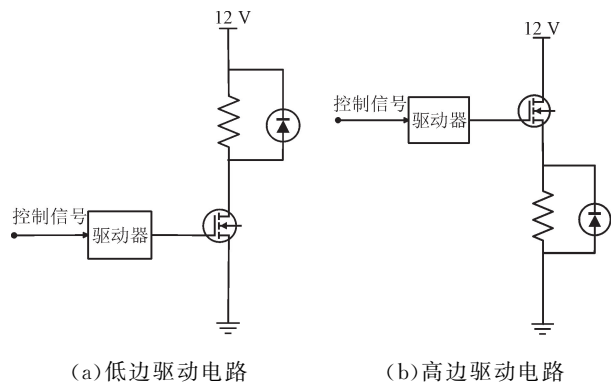


图 4 单边驱动电路

Fig. 4 Single-side drive circuit

低边驱动的 MOS 管位于负载与地之间。栅极为高时, MOS 管导通, 电流经过负载再流过 MOS 管后接地; 栅极为低时, MOS 管截止, 电路关断。利用 MOS 管能够高频率开关的特性, 可以控制流过负载的平均电流, 进而控制负载的功率。

高边驱动电路与低边驱动电路结构类似, MOS 管位于负载与电源之间。只有栅极为高时 MOS 管导通, 有电流回路, 此时由于 MOS 管导通内阻很小, 源极与漏极几乎相等等于电源电压, 栅极的电压为整个高边驱动电路中最高的点。因此, 高边驱动电路必须采用专门的浮动栅极驱动电路, 这样才能保证 MOS 管的导通与关断, 高边驱动用于驱动润滑油泵工作。

为了使共轨喷油器能够快速打开与关闭, 高速电磁阀需要瞬态大电流驱动, 通常超过 20 A, 供电电压 12 V 无法满足喷油器开启过程对瞬态大电流的需求, 因此在喷油器驱动模块设计了 Boost 升压电路, 如图 5 所示, 以电流模式控制器 EG1252 为核心, 通过控制 MOS 管导通与关断时间比例控制输出电压。

MOS 管导通时电源给电感充电, 截断时电感与电源一同给负载放电, 导通和截止时电感 L 中电流的变化量为

$$|\Delta i_{on}| = \frac{U_{in}}{L}DT \quad (1)$$

$$|\Delta i_{off}| = \frac{(U_{out} - U_{in})}{L}(1 - D)T \quad (2)$$

式中: U_{out} 为升压电路的输出电压; U_{in} 为供电电压; D 为 MOS 管的占空比; T 为开关周期; L 为电感。

升压电路达到稳态时, MOS 管导通与关闭状态下流过电感的电流变化量相等, 将式 (1)、(2) 联立可得

$$U_{out} = \frac{U_{in}}{1 - D} \quad (3)$$

通过控制占空比 D 即可得到需要的电压, 从而为喷油器油针开启阶段提供所需的峰值电流。

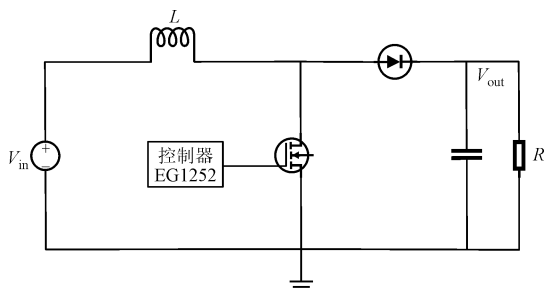


图 5 Boost 升压电路

Fig. 5 Boost circuit

高压共轨喷油器在使用中要求快速打开与精准关闭, 通常采用所谓的“Peak-Hold”电流控制, 单边驱动电路无法满足需求, 因此除了升压电路之外, 还需要采用双边驱动电路, 电路原理图如图 6 所示, 图中 V_{Boost} 为升压后的电压, 提供喷油器打开阶段的瞬态峰值电流, 12 V 电源提供除峰值阶段之外的电流。双边驱动电路工作过程如下: 喷油器选通 MOS 管 Q3 或者 Q4 打开 (Q3, Q4 不能同时打开), MOS 管 Q1 和 Q2 同时打开, V_{Boost} 和 12 V 电源向喷油器同时供电, 高速电磁阀在瞬态峰值电流作用下快速打开, 喷油器油针两端压力失去平衡, 油针在上下压差作用下迅速抬升; 峰值电流维持阶段, 油针抬升之后, 需要较大电流稳定高速电磁阀的开启状态, 峰值电流调制信号控制 MOS 管 Q1 快速开关, 维持电流在设定的峰值保持电流附近, 实现喷油器的稳定开启; 保持阶段, 喷油器完全开启并且稳定之后, 维持高速电磁阀电枢稳态位置所需电磁力变小, 电流可以相应降低, V_{Boost} 电源不再需要供电, Q1 关断, Q2 在调制信号控制下对流过喷油器的电流进行控制, 维持喷油器的稳定工作; 关断, 当预定喷油脉宽完成, 喷油器油针需要快速落座, 此时电源端 MOS 管 Q2 与选通端 MOS 管 (Q3 或 Q4) 同时关断, 高速电磁阀关断, 油针两端压力恢复平衡, 在回位弹簧力作用下落座, 喷油器停止工作。流过喷油器的电流理论波形^[23]如图 7 所示。

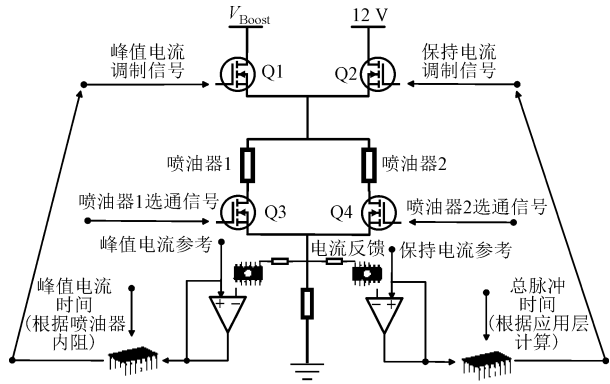


图 6 双边驱动电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of double-side drive circuit

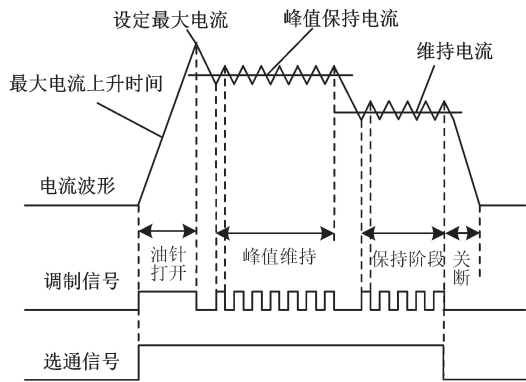


图 7 双边驱动电路波形示意图

Fig. 7 Waveform diagram of double-side drive circuit

2.4 通信电路

此国产 ECU 设计了 2 路 CAN 收发电路,国产芯片 SIT1040QT 负责将外部 CAN 设备的差分信号与芯片内 CAN 控制器的 TTL 电平相互转换。这样设计方便 ECU 进行发动机数据标定,也为后续 CAN 总线通信开发的引导程序 Bootloader 打好硬件基础。

3 驱动软件设计

3.1 操作系统移植与应用

采用嵌入式开源操作系统 FreeRTOS,兼顾轻量化与实时性,FreeRTOS 依靠系统时钟 systick 作为任务调度节拍,控制逻辑简单,相对传统的前后台开发模式提高了电控系统的实时性与可靠性,符合高压共轨柴油机电控单元未来的发展要求。

将 FreeRTOS 内核文件移植到底层软件文件夹中,针对 GD32F450 芯片的 ARM 架构与存储结构^[24-25]裁剪 FreeRTOS_config.h 文件,实现 FreeRTOS 系统的移植。

FreeRTOS 任务中,优先级数字越大代表任务优先级越高。FreeRTOS 任务设置参数如表 1 所示,设置上层控制策略运算优先级最高,四冲程发动机转速 6 000 r/min 下每转 10 ms,一个工作循环周期为 20 ms,设置控制策略任务调用周期 5 ms,保证高转速下控制策略有足够的时间执行计算任务;加速踏板角度作为控制策略任务的重要输入参数,保持与控制策略一致的运行周期,提高油门响应速度与控制策略计算准确度;对于高压共轨柴油机,共轨压力是需要较高频率监测的变量,与其余变化速率较快的变量在 MediumFreqAdTask 中计算;温度等变化速率较慢的变量统一设置为 200 ms 周期的低频任务(LowFreqAdTask);还有一些与诊断、保护相关的非实时性功能(OtherTask),优先级最低,调用周期为 500 ms。

表 1 FreeRTOS 任务设置参数

Table 1 Parameter of FreeRTOS task setting			
任务名	内容	周期/ms	优先级
EngineControlTask	控制策略	5	5
ApsAdTask	加速踏板角度计算	5	4
	高压共轨压力,海拔		
MediumFreqAdTask	高度,进气压力,蓄电池电压计算	20	3
LowFreqAdTask	缸温,冷却水温,进气温度	200	2
OtherTask	其他任务	500	1

FreeRTOS 中断主要是曲轴与凸轮轴位置传感器信号产生,这是发动机正时同步和后续工作的基准,因此其中断优先级设置为最高。其次的中断优先级为程序运行过程中产生的溢出中断、通讯中断等,视具体程序功能需求调整。

3.2 传感器驱动软件

GD32F450 片上集成 ADC 模块,最大支持 12 位分辨率采样。本文使用的传感器分为无源式传感器、有源式传感器两类,传感器接口电路如图 8 所示。

采用热敏电阻测量冷却水温度、进气温度,内部电阻阻值随温度变化。把传感器与分压电阻串联接入 5 V 电源与地之间,接口电路如图 8(a)所示。对分压值进行采样,利用采样得到的分压值计算对应的热敏电阻阻值,再由电阻值查表计算当前温度值。

测量压力、加速踏板角度等变量的传感器可以直接输出电压信号,接口电路只需要滤波、限流即可,如图 8(b)所示。根据 ADC 模块测量到的实时电压信号,结合电压值与物理量之间的对应关系即

可获得物理量的实时值。

由于发动机运行过程中各物理量变化速率不一致,为了节约微控制器资源,降低 ECU 运行功耗,利用 FreeRTOS 模拟多线程的特性,设置各传感器的采集频率与优先级,具体参数见表 1。

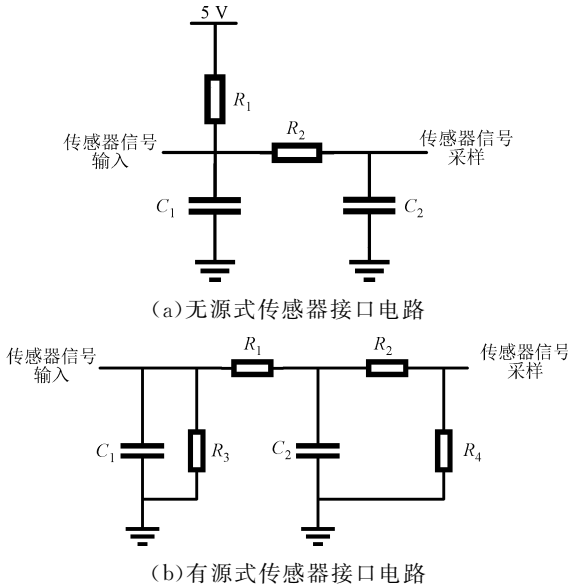


图 8 传感器接口电路
Fig. 8 Sensor interface circuit

3.3 执行器驱动软件

高压共轨柴油机的主要执行器有进油比例电磁阀、喷油器、润滑油泵等。对于微控制器来说,单脉冲可驱动喷油器喷油;调整 PWM 波占空比可以控制进油比例电磁阀开关时间占比,输出脉冲经过单边驱动电路可控制滑油泵按一定频率泵出润滑油。本文利用定时器为硬件基础,触发-延时为软件策略对执行器进行控制。

若要执行喷油动作,应用层控制策略根据发动机运行工况参数,计算出喷油正时和喷油脉宽。底层喷油驱动软件以上述两个参数为输入,基于实时曲轴位置的触发-延时算法获得最终喷油动作的触发信号与延时时间。触发-延时控制原理图如图 9 所示,以喷油正时所在信号齿前两齿作为触发齿,所谓触发齿为 ECU 定时器开始计时的信号齿,根据触发齿与喷油正时的角度差,再结合瞬时转速计算出延时时间,延时时间内保持低电平,延时时间结束即喷油正时,输出单脉冲。

基于曲轴位置的触发-延时具体方法如下

$$N_t = (A_s/A_t) - 2 \quad (4)$$

$$T_d = \left(\frac{A_s}{A_t} - N_t\right) T_t \quad (5)$$

$$T_t = \frac{60\,000}{V_e N} \quad (6)$$

式中: N_t 为触发齿齿号; A_s 为脉冲起始角度; A_t 为每个齿的角度; 符号“/”代表取整; T_d 为延时时间, ms; T_t 为转过 1 个齿的时间, ms; V_e 为发动机转速; N 为曲轴信号盘齿数。

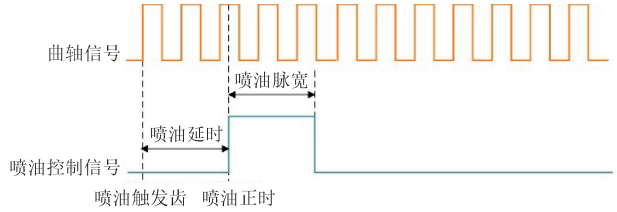


图 9 触发-延时控制原理图
Fig. 9 Trigger-delay control schematic

共轨压力主要由进油比例电磁阀的驱动波形占空比和喷油量共同决定。因此,轨压的调控采用 PID 闭环算法,控制框图如图 10 所示,进入共轨油管的燃油量由进油比例电磁阀控制,实际轨压以安装在共轨油管上的轨压传感器进行闭环反馈,根据目标轨压与反馈轨压的差值不断调整控制进油比例电磁阀的 PWM 占空比,直至实际轨压与目标轨压差值足够小为止,可以实现对共轨压力的闭环控制。

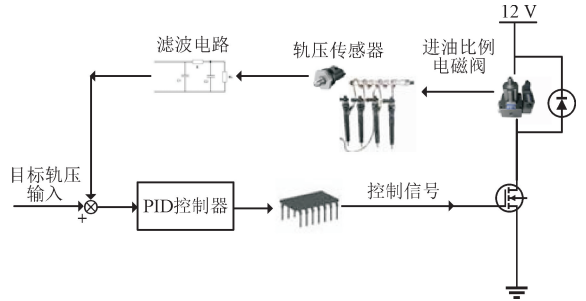


图 10 共轨压力闭环控制
Fig. 10 Common rail pressure closed-loop control

4 实验验证与分析

4.1 传感器接口电路实验结果与分析

本文实验设备如图 11 所示,使用 JSD6600 信号发生器产生正弦信号模拟曲轴位置传感器信号输出,直流电源为控制系统提供 12 V 电压,示波器与电流钳分别测量信号处理结果与喷油器驱动电流波形。实验使用 Bosch 公司的 CRI2-20 喷油器,其内阻为 25 mΩ,支持最小喷油间隔 200 μs。

曲轴传感器接口电路作为信号变化频率最快、对发动机控制策略影响最大的输入源,对信号的稳定性和准确性要求最高,因此首先以曲轴传感器为例,验证传感器接口电路模块的性能。

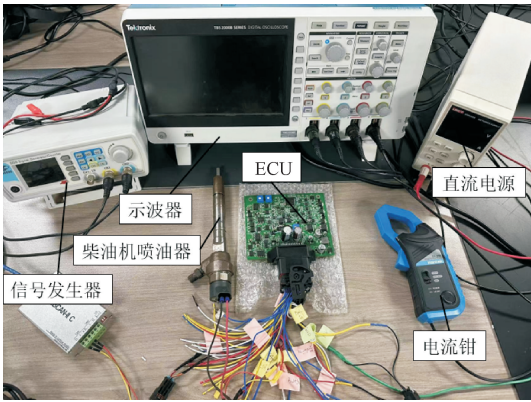


图 11 实验验证设备

Fig. 11 Experimental verification equipment

曲轴信号滤波电路波形图如图 12 所示。通道 1 为信号发生器模拟的曲轴传感器正弦信号,通道 2 为接口电路处理后可近似看作方波的信号,实验测量二者相位差在 $20\ \mu\text{s}$ 内,对应 $9\ 000\ \text{r/min}$ 时 1° 以内的相位差,可以满足发动机控制控制的需要。

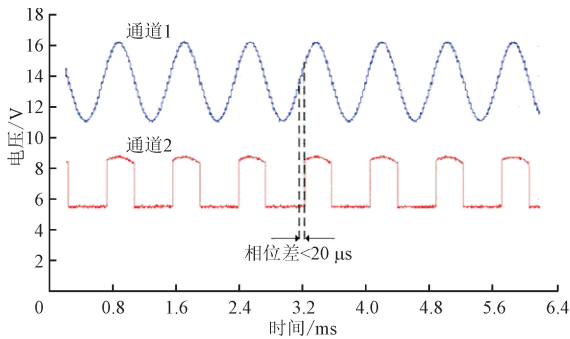


图 12 曲轴信号滤波电路波形图

Fig. 12 Crankshaft signal filter circuit waveform diagram

4.2 喷油器驱动电路实验结果与分析

双边驱动电路接入 CRI2-20 喷油器进行喷油模拟实验。利用电流钳与示波器测量喷油器工作电流,结果如图 13 所示,电流波形是典型的“峰值保持”形状:峰值段电流为 $22\ \text{A}$,维持段平均电流为 $10\ \text{A}$,电流上升时间与下降时间分别为 120 、 $80\ \mu\text{s}$,即电磁阀打开与关断所需最小时间约为 $200\ \mu\text{s}$ 。满足共轨喷油器油针提升与落座的要求,驱动能力达到设计要求。

多次喷射是高压共轨燃油喷射系统的基本功能。为验证国产系统的多次喷射性能,测量其 5 次喷射的电流波形,结果如图 14 所示。国产系统 5 次喷射条件下峰值电流、维持电流大小均与单次喷射一致,最小喷射间隔为 $200\ \mu\text{s}$,文献[26]中 Bosch 共

轨系统的 5 次喷射电流波形最小时间间隔为 $250\ \mu\text{s}$,国产系统性能与 Bosch 系统多次喷射性能接近,能够满足高压共轨柴油机的喷射需求。

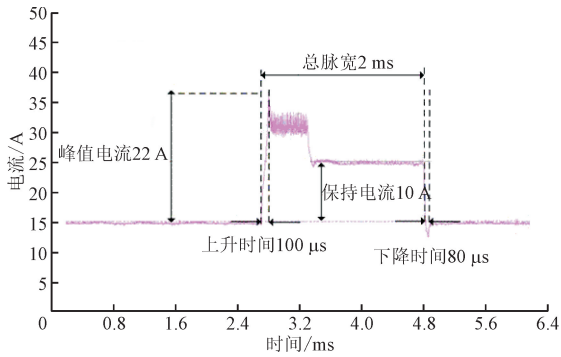


图 13 双边驱动电流波形图

Fig. 13 Double-side drive current waveform diagram

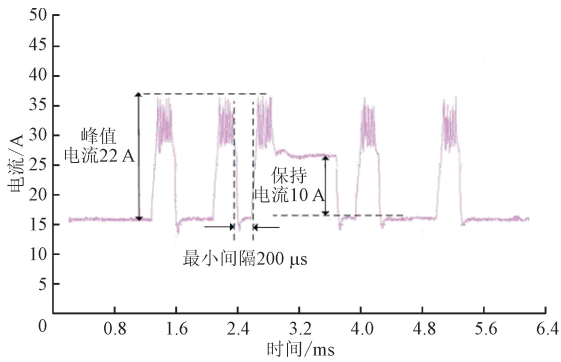
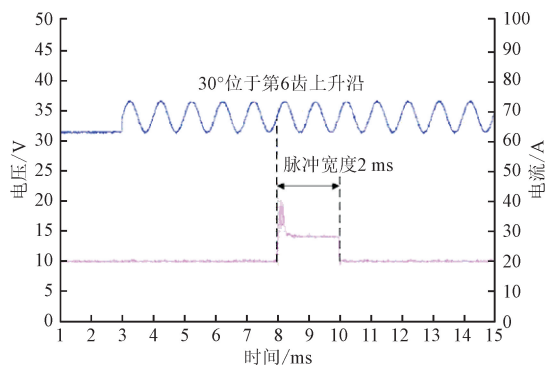


图 14 国产系统多次喷射电流波形

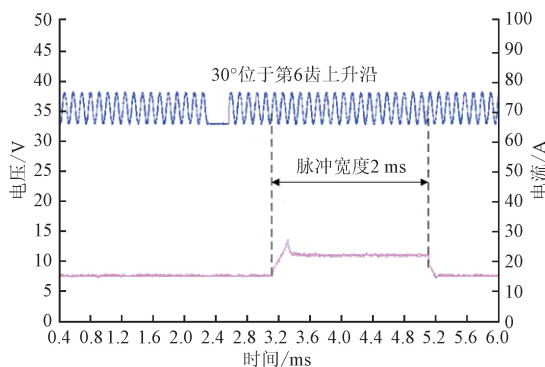
Fig. 14 Current waveforms with multiple injection of domestic system

喷油驱动电路除了驱动能力需要满足要求之外,喷油正时和脉宽控制精度也非常关键。以该喷油为例,设计如下两个实验:①上位机发送喷油指令,喷射正时为压缩上止点前 30° ,喷油脉宽 $2\ \text{ms}$,调节信号发生器频率为 16.67 、 $150\ \text{Hz}$,分别对应发动机模拟转速 $1\ 000$ 、 $9\ 000\ \text{r/min}$;②上位机发送喷油指令,第 1 次命令喷射正时为压缩上止点前 30° ,喷油脉宽 $2\ \text{ms}$,第 2 次命令喷射正时为压缩上止点前 55° ,喷油脉宽 $2.4\ \text{ms}$,调节信号发生器频率为 $100\ \text{Hz}$,对应发动机模拟转速 $6\ 000\ \text{r/min}$ 。实验①可反应发动机在不同转速下的喷油正时与脉宽控制精度,实验②可反应相同转速下不同正时与脉宽的控制精度。同理,控制进油比例电磁阀的脉冲信号也可通过频率与占空比反映其精度是否满足轨压控制的需求。

实验结果如图 15 所示,实验①中两种转速状态下,脉冲均按照上位机要求的 30° 喷油 2 ms 输出,测试中喷油器驱动电流波形稳定、声音清脆。



(a) 1 000 r/min 时脉冲波形图

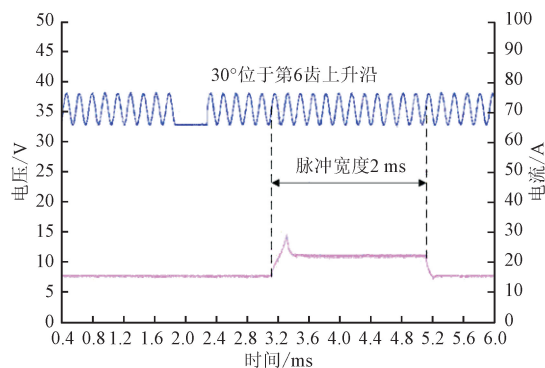


(b) 9 000 r/min 时脉冲波形图

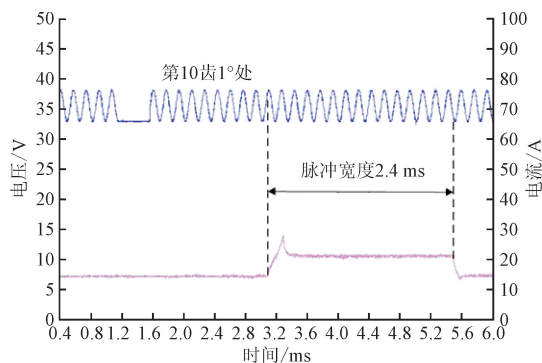
图 15 不同转速下脉冲正时示意图

Fig. 15 Schematic diagram of pulse on-time operation at different speed

实验②结果如图 16 所示,喷油脉宽控制精准,驱动电流波形完整,稳定,观察示波器波形与喷油器声音,未发生漏喷、多喷的情况,且长时间运行未发生喷油正时偏移。上述实验验证结果表明,高压共轨柴油机国产控制系统在不同转速度、不同负荷下的喷油正时与脉宽控制精度高,能够满足控制需求。



(a) 6 000 r/min 下喷油工况 1



(b) 6 000 r/min 下喷油工况 2

图 16 同转速下脉宽与正时示意图

Fig. 16 Schematic diagram of pulse width and timing at the same speed

4.3 任务周期验证与分析

任务调度的精准度关系到控制系统的控制精度与稳定性。在此对表 1 中各任务调度周期进行实验验证。在每个任务中设置一个空闲 IO 口,调用任务一次,对应的 IO 口电平翻转一次,两次电平翻转时间间隔即为该任务的调度周期,用示波器测量不同转速下各任务中调用的 IO 口相邻两次电平变化的时间间隔,即可获得各任务的实际调用周期。示波器测量结果如图 17 所示,通道 1~4 分别对应表 1 中 4 个任务,实测结果显示各电平翻转周期均与表 1 所设目标周期一致,不同转速条件下未出现周期波动等异常情况,表明基于 FreeRTOS 系统的底层驱动软件运行稳定、任务调度精准、实时性优良,满足高压共轨柴油机的控制需要。

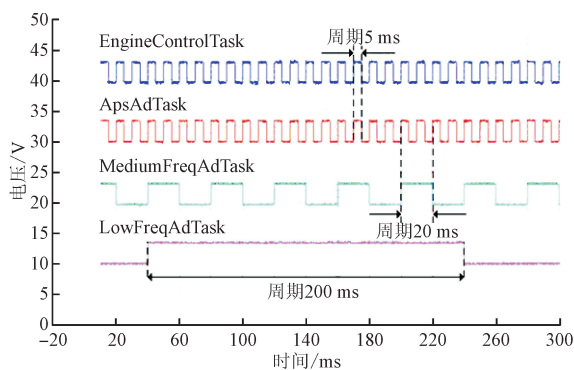


图 17 任务周期验证

Fig. 17 Verification of task cycle

5 结 论

本文提出了基于国产芯片的高压共轨柴油机电控系统方案,重点介绍了高压共轨喷油器双边驱动电路与基于 FreeRTOS 操作系统的底层软件开

发过程,并通过实验对本文开发的全国产发动机电控系统进行了验证,可得如下主要结论。

(1)本文开发的全国产芯片高压共轨柴油机控制系统功能齐全,运行稳定。双边驱动电路典型峰值电流 22 A,维持电流 10 A,最小喷射间隔时间 200 μ s,具备多次(5 次)喷射能力,喷射性能与 Bosch 系统相当。

(2)本文基于 FreeRTOS 操作系统开发的高压共轨柴油机底层驱动软件,控制逻辑简单,实时性好,稳定性高。任务调度周期由系统节拍控制,不受发动机转速变化的影响,能够更好地满足高压共轨柴油机对控制系统运算实时性的需求。

(3)本文提出的全国产芯片高压共轨柴油机电控系统方案合理可行、系统性能优良,能够满足高压共轨柴油机对控制系统软、硬件的功能需求,实现了全国产化替代的设计目标。

参考文献:

- [1] 许锋,隆武强. 内燃机原理教程 [M]. 2 版. 大连:大连理工大学出版社, 2015.
- [2] HE Zhixia, HU Bihe, WANG Jianquan, et al. The cavitation flow and spray characteristics of gasoline-diesel blends in the nozzle of a high-pressure common-rail injector [J]. Fuel, 2023, 350: 128786.
- [3] TONG Luo, TIANYU Jin, YU Sun, et al. Numerical research on influence of structural parameters of common-rail injector on injection rate of each nozzle hole [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2022, 85: 102158.
- [4] 王尚勇. 现代柴油机电控喷油技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- [5] 辛喆,李亚平,张云龙,等. 柴油机高压共轨系统轨压模糊控制与试验 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(S1): 34-41.
- XIN Zhe, LI Yaping, ZHANG Yunlong, et al. Fuzzy control and experiment of rail pressure for high-pressure common rail system of diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S1): 34-41.
- [6] WANG Haoping, TIAN Yang, ZHENG Dong. ESO-based iPI common rail pressure control of high pressure common rail injection system [J]. Studies in Informatics and Control, 2016, 25(3): 273-282.
- [7] 杜建华,蒋公见,蒋海牙. 国内外柴油机电控喷油技术的发展现状及前景 [J]. 自动化技术与应用, 2010, 29(8): 16-20.

- DU Jianhua, JIANG Gongjian, JIANG Haiya. Present and future development at home and abroad on EFI [J]. Techniques of Automation and Applications, 2010, 29(8): 16-20.
- [8] 中国内燃机工业协会. 内燃机行业“十四五”发展规划 [EB/OL]. [2023-07-29]. <https://www.chinacaj.net/ueditor/php/upload/file/20211115/1636964411177650.pdf>.
- [9] 聂建军. 柴油机高压共轨燃油系统的现状及发展趋势 [J]. 内燃机, 2009, 25(4): 6-9.
- NIE Jianjun. Trends and present status of the high-pressure common rail fuel injection system for diesel engine [J]. Internal Combustion Engines, 2009, 25(4): 6-9.
- [10] 熊杨,李中举,江泽军,等. 喷油压力对混合燃料燃烧影响的试验 [J]. 装备制造技术, 2018(5): 142-144.
- XIONG Yang, LI Zhongju, JIANG Zejun, et al. Test of the influence of injection pressure on the combustion of mixed fuel [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(5): 142-144.
- [11] 徐文俊,方成. 基于倒拖缸压曲线预测的压燃发动机燃烧始点实时检测算法 [J]. 车用发动机, 2020(1): 44-48.
- XU Wenjun, FANG Cheng. Real-time detection algorithm of combustion timing based on motoring cylinder pressure curve prediction in compression ignition engine [J]. Vehicle Engine, 2020(1): 44-48.
- [12] 王秀雷,方成,李国祥. 基于等效等熵指数的燃烧始点实时反馈与控制 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(4): 1160-1168.
- WANG Xiulei, FANG Cheng, LI Guoxiang. Real-time start of combustion feedback and control based on equivalent isentropic index [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2020, 50(4): 1160-1168.
- [13] 辽宁新风企业集团有限公司. 集成式柴油机高压共轨燃油喷射系统用高压油泵总成: CN201610025226. 6 [P]. 2016-04-20.
- [14] 江苏毅达资本. 毅达资本完成对卓品智能数千万元投资,服务 ECU 自主可控 [EB/OL]. (2020-09-21)[2023-07-31]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/257192833>.
- [15] AL-MOLA M H, MAILAH M, ABDELMASOUD S I. Experimental implementation of a vehicle anti-lock brake system employing intelligent active force control with a P-type iterative learning algorithm [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2023, 45(13): 2554-2565.

- [16] COPPOLA A, DE TOMMASI G, MOTTA C, et al. Double-layer control architecture for motion and torque optimisation of autonomous electric vehicles [J]. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2023, 21: 100866.
- [17] 李铮, 文清浩. 中国汽车芯片标准体系建设解读 [J]. *中国汽车*, 2023(1): 11-15.
LI Zheng, WEN Qinghao. China automotive chip standard system construction interpretation [J]. *China Auto*, 2023(1): 11-15.
- [18] 叶方圆. 基于 GD32F450 的车载综合电源系统设计 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [19] 李政. 一种国产化无人机飞行控制器硬件研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [20] 靖沛, 申立中, 姚国仲, 等. 基于英飞凌 TC275 单片机的高压共轨柴油机电子控制单元电源模块设计 [J]. *现代电子技术*, 2022, 45(3): 181-186.
JING Pei, SHEN Lizhong, YAO Guozhong, et al. Design of high-pressure common-rail diesel engine' electronic control unit power supply module based on Infineon TC275 microcontroller [J]. *Modern Electronics Technique*, 2022, 45(3): 181-186.
- [21] 苟金. 基于 MC33816 的高压共轨燃油喷射系统控制器开发 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [22] 朱晓明, 曾伟, 刘文辉, 等. 高压共轨喷油器智能驱动仪的开发研究 [J]. *现代车用动力*, 2015(4): 21-24.
ZHUXiaoming, ZENG Wei, LIU Wenhui, et al. Reach and development of high pression common rail injector intelligent driver [J]. *Modern Vehicle Power*, 2015(4): 21-24.
- [23] 王彪. 航空二冲程发动机夹气喷射电控系统的开发与研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- [24] 杜春雷. ARM 体系结构与编程 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [25] YIU J. The definitive guide to ARM cortex-M3 and cortex-M4 processors [M]. 3rd ed. Amsterdam: Newnes, 2013.
- [26] 唐永华, 张恬. Bosch 电控高压共轨系统的主要特点 [J]. *汽车与配件*, 2010(45): 45-46.
TANG Yonghua, ZHANG Tian. Main features of Bosch high pressure common rail system [J]. *Automobile & Parts*, 2010(45): 45-46.

(编辑 赵炜)