

基于 MotoTron 平台的二冲程煤油发动机 控制器开发

柯 昶, 黄 英, 赵振峰, 韩 恺, 李 鸿
(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘 要: 为实现某二冲程航空煤油发动机控制器的快速开发和策略验证,结合 MotoTron 快速控制原型开发平台丰富的软硬件资源,依据空气辅助缸内直喷与双火花塞点火的系统设计需求,开发了一套利用 8 缸机程序控制 4 缸机的发动机控制器。分析了基于快速控制原型软件架构的控制软件设计方法,利用开发软件 MotoHawk 配置底层程序和搭建发动机控制系统,并结合 Matlab/Simulink 建立上层控制策略,实现了完整的控制系统开发。在台架上进行了冷起动测试,发动机起动后转速较平稳,点火提前角、喷油提前角和喷油脉宽的调节过程符合控制策略设计,空燃比控制稳定,空燃比误差在 10% 以内。发动机顺利过渡到正常工况,验证了冷起动控制策略的可行性,实现了控制器的基本功能,控制器设计满足要求。

关 键 词: 控制器开发; 二冲程; 煤油发动机; MotoTron 平台; 快速控制原型

中图分类号: V234; TK46 **文献标志码:** A

Development of two-stroke kerosene engine controller based on MotoTron platform

KE Chang, HUANG Ying, ZHAO Zhenfeng, HAN Kai, LI Hong
(School of Mechanical Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to realize the rapid development and strategy verification of the two-stroke kerosene aviation engine controller, in combination with the rich software and hardware resources of the MotoTron rapid control prototype development platform, based on the system design requirements of air-assisted direct injection and dual-spark plug ignition, an engine controller for controlling the four-cylinder engine using an eight-cylinder program was developed. The design method of control software based on the rapid control prototype software architecture was analyzed, and the development software, MotoHawk was used to configure the underlying program and build the engine control system. Then, in combination with Matlab/Simulink, the upper control strategy was established to completely develop the whole control system. The cold start bench tests were carried out, during which the speed of the engine was stable, the adjustment processes of the ignition advanced angle, the injection advance angle and the injection pulse width were in accordance with the control strategy. And the air-fuel ratio control was stable, with the error within 10%. The smooth transitions of the engine to normal conditions verified the cold start control strategy. And the funda-

mental functions of the controller had been realized, showing that the controller design could meet the requirements.

Key words: controller development; two-stroke; kerosene engine; Mototron platform; rapid control prototype

现代发动机控制器的功能日益复杂,传统的控制器开发模式开发周期长,仿真与实现阶段脱离,程序的可读性和可移植性较差,因此难以快速、灵活地进行流程化开发。为提高控制器开发效率,图形化建模、快速原型和代码自动生成等先进开发技术加入到了开发流程中,快速、简易的 V-模式开发流程应运而生。V-流程的特点是无论开发、编程或测试,总是在同一环境下工作,开发过程的每一步都可以得到验证^[1],加快了开发进程。

利用快速控制原型开发平台实现功能的有效验证是 V-流程的重要环节。目前快速原型控制开发技术已在发动机控制器的开发中得到了广泛应用^[2-4],典型的快速控制原型平台包括德国 dSPACE 公司的 Micro_autobox 系列产品,美国 Pi Innovo 公司的 OpenECU,德国 Schaeffler 公司的 PROtroniC 型 TopLINE 等。其中一些快速控制原型系统提供产品级的控制器硬件,支持控制程序代码自动生成,且代码的成熟度和应用性接近于产品化要求,经过硬件在环和台架试验验证后的成熟代码可以直接刷入产品级控制器实现量产,与其他快速原型控制器相比,大大缩短了研发周期,减少研发成本。

本文采用的 MotoTron 快速原型开发平台采用产品级的控制器硬件,且支持较多类型发动机的控制,目前在汽油机控制领域有较多应用。张虎^[5]等基于 MotoTron 平台开发了面向实际应用的汽油发动机快速原型控制器,并通过台架起动试验验证了发动机各控制模块的功能;陆文昌等^[6]基于 MotoTron 平台进行了电子节气门控制系统的设计与试验研究,完成了控制算法设计和控制策略的验证;何兴^[7]利用 MotoTron 平台进行了汽油机油膜补偿器的开发,并进行了试验验证;王连旭^[8]基于 MotoTron 平台完成了对纯电动汽车的整车控制器的设计与开发。可见 MotoTron 快速控制原型平台用于汽油机控制器开发的技术已经趋于成熟,但目前鲜有针对二冲程煤油发动机控制器开发的研究,而以煤油为燃料的动力机械在航空及农业领域应用广泛,其中点燃式煤油活塞发动机在无人机领域的应用具有重

要意义。另外二冲程发动机由于煤油燃料特性存在冷起动困难、爆震严重等控制难点,需要采取特殊的设计加以应对,使得该类型发动机的控制器与传统的汽油发动机控制器相比具有特殊性。同时,采用快速控制原型这种底层程序只适合传统发动机的平台来开展该类控制器开发更具挑战性。另外前文基于快速控制原型的论文中,鲜有对快速控制原型软件架构的分析以及接口软件设计开发思路的介绍,而在快速控制原型的用户说明里也没有明确的说明,导致应用方面的困难。

本文基于 MotoTron 平台针对一款二冲程航空煤油发动机进行控制器的开发,同时分析了基于快速控制原型软件架构的控制软件设计方法。根据空气辅助式燃油喷射(即夹气燃油喷射)与双火花塞点火的系统设计方案,完成了控制器的设计,并在台架上对控制器的基本功能和冷起动控制策略进行了试验验证,验证了 MotoTron 平台用于二冲程煤油发动机控制器开发的有效性和可靠性。

1 二冲程煤油发动机控制器总体方案设计

本文的控制对象是某二冲程航空煤油发动机,该款发动机为水平对置四缸发动机,采用自然吸气、缸内直喷,发动机参数见表 1。

表 1 发动机参数
Table 1 Parameters of the engine

参数	数值及详情
缸径/mm	78
冲程/mm	64
缸数	4
压缩比	8.0
类型	水平对置二冲程

相比汽油燃料,煤油具有闪点高、挥发性弱且黏度较高的理化特性,致其难以形成雾化良好的混合气,从而造成冷起动困难、爆震严重等问题^[9],因此一般的进气道喷射结合单火花塞点火

系统已经无法满足需求。针对所研究的二冲程煤油发动机,在燃油喷射系统和点火系统上要有特殊的设计。本文首先结合煤油作为燃料的特点提出空气辅助式燃油喷射(即夹气燃油喷射)和双火花塞点火的系统设计,再结合控制器硬件配置与软件系统结构提出完整的控制器设计方案。

1.1 夹气燃油喷射系统设计

为改善煤油雾化效果,提高混合气质量,该发动机采用夹气燃油喷射系统,且采取缸内直喷的方式^[10-11]。工作原理是将有一定压力的空气与煤油在混合腔进行预混合形成混合气,混合气喷出后利用压缩空气的膨胀破碎作用使得煤油液滴获得高质量的雾化效果,原理如图 1 所示。

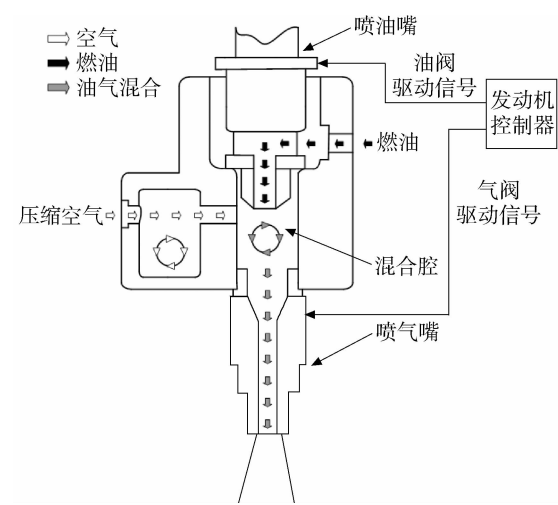


图 1 夹气燃油喷射系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air-assisted injection system

燃油量和空气量的精确控制通过控制器输出的油阀驱动信号和气阀驱动信号来实现,即对于 4 缸机而言,每缸需要两路喷射驱动信号来分别实现喷油嘴和喷气嘴的驱动。图 2 为夹气燃油喷射系统的驱动信号时序示意图,其中 T1、T2 分别为油阀与气阀驱动信号的脉宽,油阀信号结束与气阀信号开始之间的间隔 T3 称为油气间隔,它会影响混合气的形成和喷雾发展状态。油嘴与气

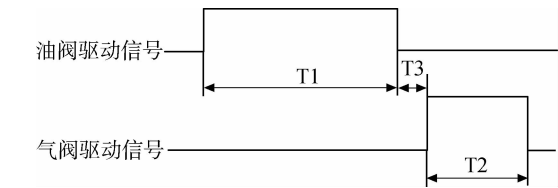


图 2 夹气燃油喷射系统驱动信号时序示意图

Fig. 2 Schematic diagram of timing of drive signals in air-assisted injection system

嘴均采用低阻型喷射器,驱动方式为 Peak-Hold 模式。

1.2 双火花塞点火系统设计

由于煤油的自燃温度远远低于汽油,在采用火花塞点火的发动机上更加容易发生爆震,抑制活塞式煤油发动机在大负荷工况下的爆震是一个亟待解决的难题^[12]。传统的抑制爆震的方法包括混合气加浓和推迟点火。由于煤油的自燃点比汽油低 140℃左右,混合气变浓并不足以使缸内温度下降至不引起末端混合气自燃;而推迟点火提前角会导致燃烧等容度下降,大量热量在活塞下行做功时释放,做功效率低,燃烧热效率下降,影响输出功率。

采用双火花塞点火可以有效缩短火焰传播距离,提高燃烧的等容度,提高燃烧热效率,对爆震有一定的抑制作用。并且煤油发动机工作受到点火能量的影响较大,适当提高点火能量可以改善发动机性能,采用高能点火系统对于煤油发动机很有必要。系统采用电感放电式的点火系统满足高能点火的需求,同时采用双火花塞点火系统^[13-14]。

4 缸机双火花塞点火系统的点火信号示意图如图 3 所示,其中数字标号对应气缸缸号。对置二冲程发动机的点火顺序为 1、2 缸同时点火,经过 180°曲轴转角间隔后 3、4 缸同时点火。控制器输出 4 路点火信号,4 个缸的上止点位置相对于 1 缸上止点位置延后的曲轴转角分别为 0°、0°、180°、180°,即表示不考虑点火提前角时 1、2、3、4 缸点火信号的相位关系。关于 4 个点火信号的相位与输出控制,通过编程实现,将在后面的软件设计中介绍。

1.3 控制系统整体结构

如图 4 所示为基于 MotoTron 平台,结合功能需求提出的控制系统整体结构简图。二冲程发动机控制系统的输入信号包括:曲轴位置信号、节气门位置信号、冷却液温度、缸头温度、排气温度和爆震信号等。输入信号通过硬件端口进行采集,经硬件处理电路后输入至软件系统。硬件输出端口输出的控制信号主要包括:8 路喷油器驱动信号、4 路点火线圈驱动信号、氧传感器加热驱动信号等。

另外控制系统需两路 CAN(controller area network)通道,一路连接控制器硬件与上位机,实现控制器实时代码刷写,且上位机通过 CAN

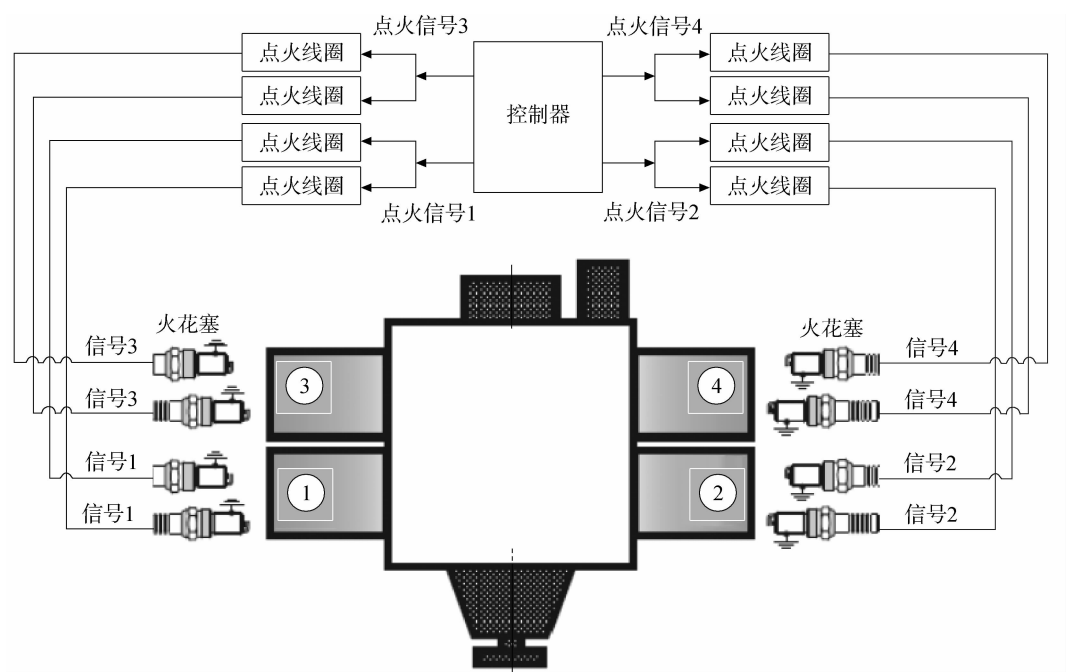


图 3 双火花塞点火系统点火信号示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the signals of dual-spark plug ignition system

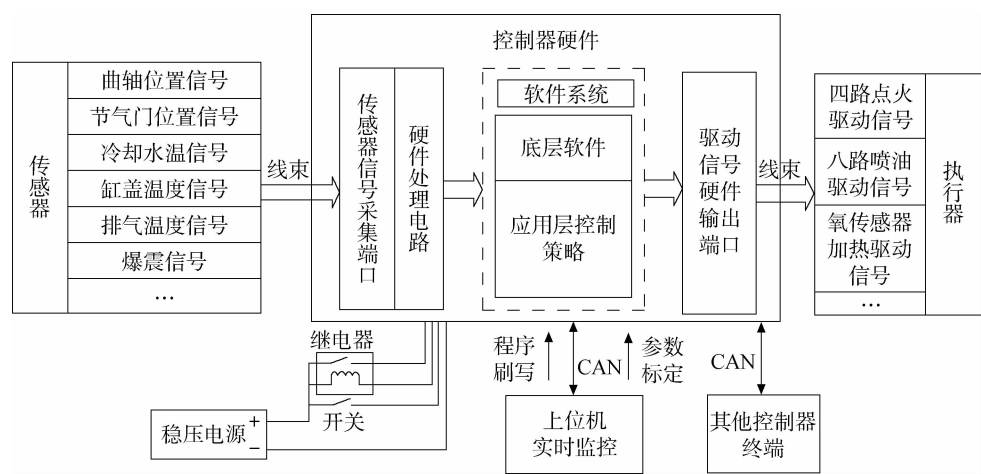


图 4 控制系统整体结构简图

Fig. 4 Overall structure of control system

通道实时监测数据与标定参数;另一路实现控制器与总线网络中其他控制器终端的信息交换。

为了防止控制器上电复位导致执行器不在指定时刻工作,需要在执行器前添加继电器。开关的闭合控制继电器线圈是否上电,当继电器线圈上电后将继电器常开开关吸合,则控制器内部驱动与稳压电源正极导通。开关闭合到继电器上电的时间间隔由控制器软件层控制。

1.4 控制器硬件选型

本系统采用 MotoTron 128 型快速原型控制器,该控制器采用飞思卡尔的 32 位 MPC565 处

理芯片,计算频率可以达到 56 MHz,工作电压为 9~32 V。控制器提供了丰富的传感器信号输入接口,并提供处理电路。控制器输出有 Peak-Hold 喷油器驱动输出,并提供了高、低两种峰值电流模式的选择、TTL(transistor-transistor logic)电平点火线圈驱动信号输出、主继电器驱动输出等,并有两路高速 CAN 通道接口。

控制器的软件设计也是方案设计的一部分,由于 MotoTron 平台有区别于传统 ECU(electronic control unit)软件的系统架构,且其是该控制器软件设计的基础,将在后文具体介绍。

2 控制器软件设计

2.1 MotoTron 的软件系统架构

AUTOSAR(automotive open system architecture) ECU 软件设计思想是现在国际上广泛使用的软件设计理念,它通过对 ECU 软件进行明确的功能层次和模块化分,对软件各层和各模块的接口作明确的定义,将各模块作为独立的功能单元进行封装,来减少各软件模块间的耦合,使不同公司 ECU 软件模块的互换和重用成为了可能^[15]。AUTOSAR 架构将软件分为 4 个层次,应用层、运行环境层、基础软件层和微处理器抽象层,但是这种分类复杂,实际推广应用还需要一定的时间。

目前常见的 ECU 软件架构如图 5 所示,将软件分为应用层和基础软件层。应用层包括发动机电子控制的各个功能,如工况判断,传感器信号采集,转速计算,输出驱动和控制参数计算等功能,同时为用户保留接口,方便后期添加其他复杂任务。基础软件层分为 4 层:操作系统层、标定服务层、复杂设备驱动层和微控制器驱动抽象层。操作系统层处于应用层和底层中间,为上层和下层提供不同的服务,可以实现对系统资源的管理如中断、定时器等的管理,对多任务的调度,按照用户的需求对任务优先级进行设定等;标定服务层可以集成 CCP(CAN calibration protocol)等主流的标定通讯协议,方便与上位机标定软件连接;复杂设备驱动层处理涉及严格时序的任务,如对发动机曲轴和凸轮轴传感器信号进行解码,喷油器驱动信号输出;微控制器驱动抽象层包括微控

制器驱动、存储驱动、通信驱动和 I/O(input/output)驱动。

MotoHawk 是 MotoTron 的 ControlCore 软件架构和产品级控制器硬件下的系统开发软件,可与 Matlab/Simulink 无缝对接开发控制策略,其软件系统的架构如图 6 所示。与典型的 ECU 软件架构对比,为了模块化编程的便利,将系统分为底层程序(background)与上层程序(foreground)两部分。

典型 ECU 软件架构中的基础软件层的功能包含于 MotoHawk 的底层程序中,底层程序面向用户提供相应的模块对基础软件层程序的相关参数进行配置,用户不允许对基础软件层的程序进行改写。底层程序提供的模块包括

- 1) 控制器型号选择 对控制器硬件版本进行选择,并设置 FLASH(flash memory)、EEPROM(electrically erasable programmable read only memory)等存储驱动的相关参数;
- 2) 编译器选择;
- 3) CAN 通讯参数的设置 选择 CAN 收发数据的波特率,选择 CAN 通道,定义通讯协议等;
- 4) 中断触发周期的设置;
- 5) 主继电器通电延迟时间设置;
- 6) CCP 协议参数设置 设置 CCP 处理程序的通信地址,CCP 通信的 ID(identity document)等。

上层程序由两部分组成,包括用户开发的主体控制程序以及一些功能模块的设置。主体控制程序也即应用层程序,用来实现控制算法及复杂的控制逻辑,本文中主要是工况判断、喷油喷气控

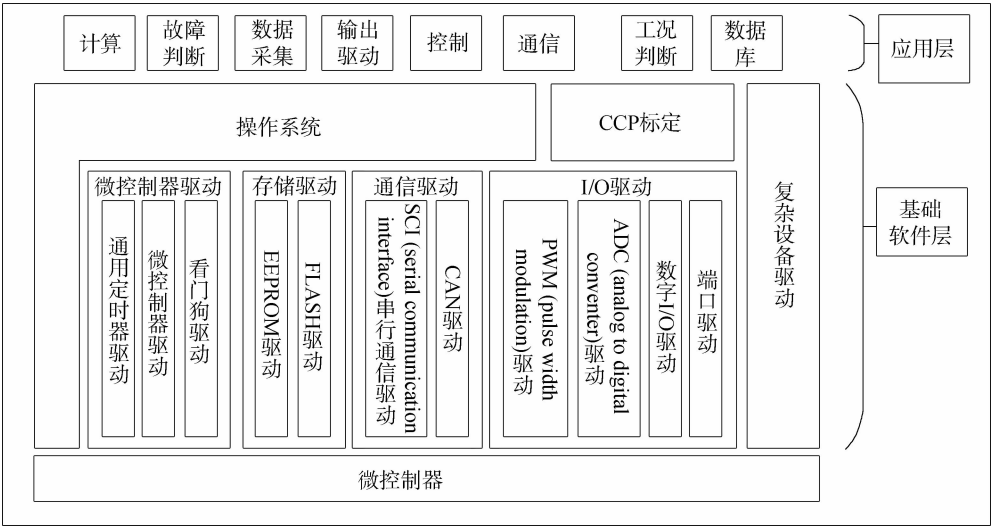


图 5 ECU 软件架构

Fig. 5 ECU software architecture

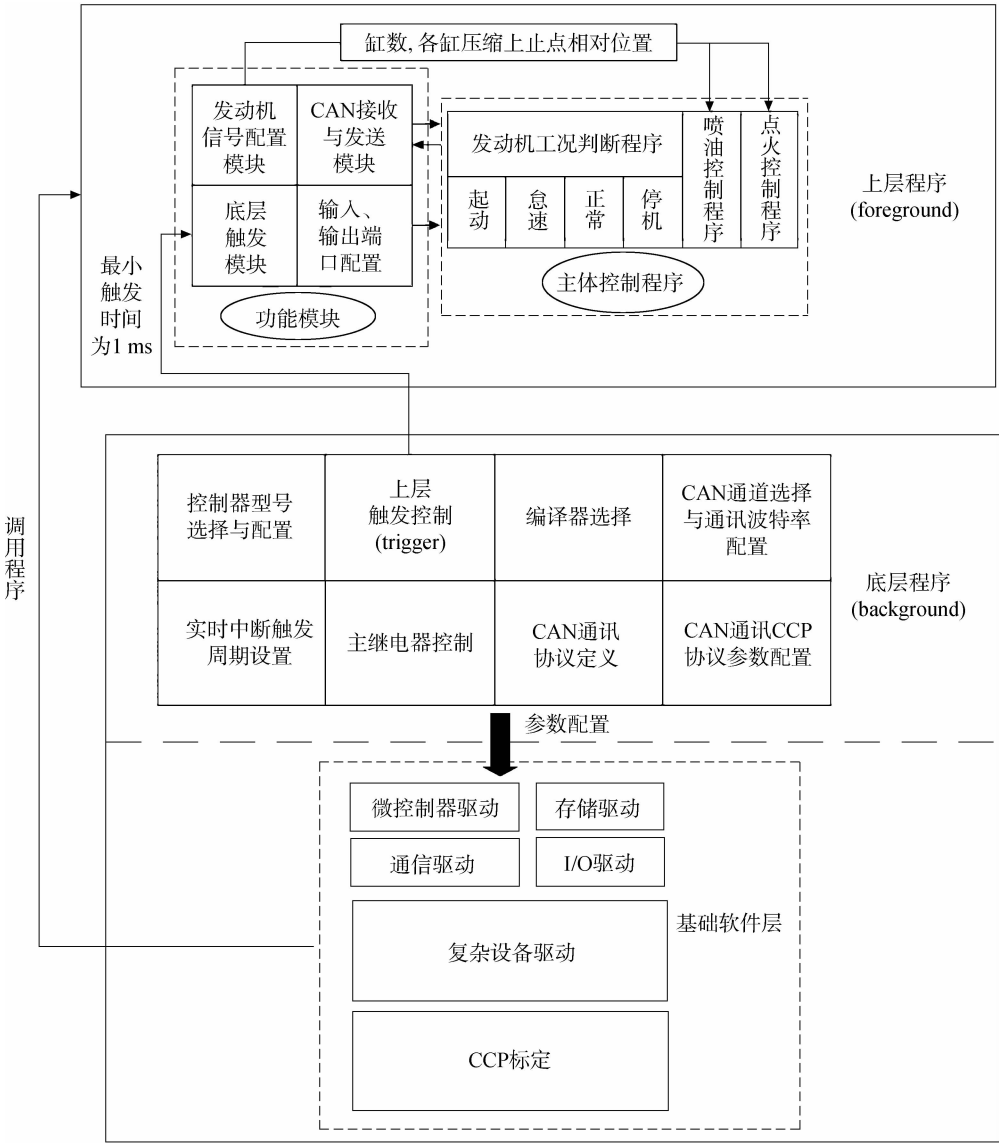


图 6 MotoHawk 软件系统架构

Fig. 6 MotoHawk software system architecture

制以及点火控制等。功能模块设置的目的是通过调用基础软件层的程序来完成上层软件模块的调度、通信及 I/O 端口控制功能。功能模块包括

1) 发动机信息的配置 针对传统的发动机控制,MotoHawk 开发了驱动模块库,用来实现对不同形式曲轴信号盘的识别和不同类型发动机的喷油、点火正时控制。针对特定的发动机应用可以通过配置信息的设置来选择对应的基础软件层程序。设置的信息包括发动机缸数、冲程、同步信号盘齿型与各缸上止点相对位置等;

2) CAN 收发信息的处理 通过调用基础软件层相关程序,实现 CAN 通信功能;

3) 各输入输出接口的配置 MotoHawk 针对 I/O 驱动开发了驱动模块库,上层程序通过调用基础软件层的 I/O 驱动程序可实现信号采集

以及控制指令对硬件端口的信号输出,如喷油喷气以及点火控制信号的输出;

4) 底层触发模块 按照控制策略的要求,应用层软件模块在运行过程中需要进行实时调度,从而满足算法实时性的要求。区别于实时多任务操作系统的调度方式,MotoHawk 采用了时间片式的软件模块调度方式,时间片的长短由底层程序决定,最短为 1ms。

主体控制程序建立于 MotoTron 软件系统架构的基础上,其中相位判断与同步、夹气喷射、点火控制等部分是控制器软件设计的重要内容,且与底层驱动密切相关,下文将重点介绍,而控制程序与控制策略的 Simulink 实现较为简单,不做详细阐述。

2.2 相位判断和同步

对喷油、点火正时的控制是发动机控制的重要功能,该功能是通过曲轴信号盘的检测来实现的。本文控制对象为二冲程煤油机,因此不需要凸轮轴信号。

MotoHawk 将相位判断与同步程序封装在上层软件的 Encoder Definition 模块(即发动机信息配置模块)中,MotoTron 平台提供的二冲程曲轴信号盘的类型有 60 缺 6 齿型、36 缺 2 齿型、34 缺 2 齿型、32 缺 2 齿型等,考虑控制精度以及信号盘加工的便利,本系统采用 36 缺 2 齿型。

MotoHawk 同步程序会把检测到的曲轴信号盘缺齿位置作为同步点,随着信号盘的转动,当程序检测到一个同步点后会根据信号盘的类型预测下一个同步点的位置,如果实际位置与预测位置存在误差将会重新同步。

同步程序执行过程如图 7 所示,通过上层软件的 Encoder State Get 即同步状态采集模块对同步状态进行监测,模块输出值为底层编码器同步算法执行的当前状态。监测的状态包括:①是否检测到转速。模块输出值为 1 表示没有检测到转速,通常指转速低于 60 r/min;②检测到转速后曲轴信号是否同步成功。模块输出值为 2 表示已检测到转速,但系统并未同步,输出值为 3 则曲轴信号同步,凸轮轴状态未知,即二冲程程序同步成功;③曲轴信号同步后凸轮轴信号是否同步成功。模块输出值为 4 则曲轴信号与凸轮轴信号均同步,此时对于任一类型的发动机均视为同步完成。

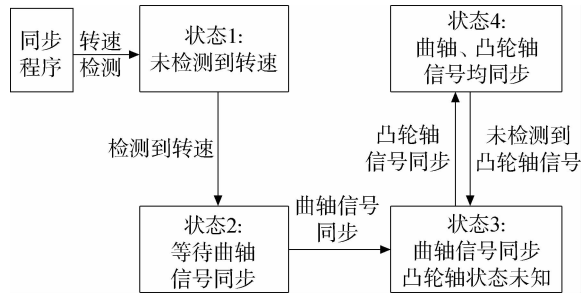


图 7 同步程序执行示意图
Fig. 7 Schematic diagram of execution processes of synchronization program

在实际应用中,快速控制原型系统同步功能的容错性与可靠性是考量系统设计水平的重要指标,且曲轴及凸轮轴信号的质量以及发动机起动过程的平稳性也会影响同步过程。为保证同步可靠,在上层程序的设计过程中,通过获取同步状态

信息判断同步是否成功,即在连续两个工作循环下均检测到同步状态为 3 才视为同步成功,从而转入后续的工况控制。

如图 8 所示,信号盘同步成功后,底层相位判断程序默认缺齿后检测到的第一个上升沿(或下降沿)为 0 号齿,然后需通过上层的 Encoder TDC (top dead center) Offset 即上止点偏移量设置模块设置实际上止点位置以完成曲轴信号盘与实际 1 缸上止点位置的同步过程。由于实际上止点位置与曲轴位置传感器安装位置有关,若实际上止点位置在第 16 号齿即 0 号齿之前 200°时,则 Encoder TDC Offset 模块输入值为 200。

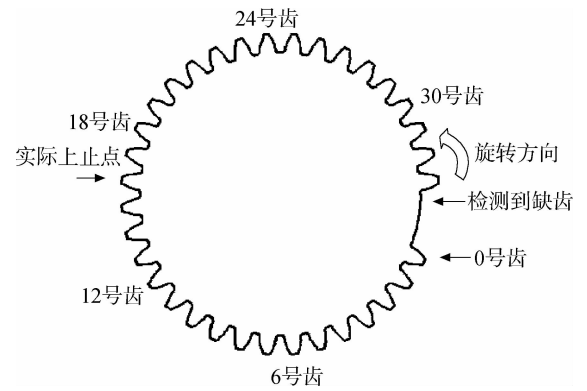


图 8 36 缺 2 齿型的曲轴信号盘同步过程示意图
Fig. 8 Schematic diagram of synchronization process of the 36 missing 2-toothed crankshaft timing gear

2.3 夹气喷射及双火花塞点火控制的实现

为了提高点火性能,增强燃油雾化效果,系统采用夹气喷射和双火花塞点火。由于 MotoHawk 软件系统是模块化编程,其根据不同的发动机类型提供有相应的基础软件模板,而提供的 4 缸机控制程序不支持燃油二次喷射和双火花塞点火,因此控制对象虽然是 4 缸机,但需要采用非标准型的编程模式。二冲程夹气喷射煤油发动机有 8 个喷嘴,包括 4 个油嘴和 4 个气嘴,由于在 MotoHawk 软件系统中只有 8 缸机程序支持 8 个喷嘴的控制,因此需在发动机信息配置模块中调用 8 缸机程序,并配置 8 缸上止点的相对位置以实现 4 缸对置二冲程发动机合理的喷油、喷气和点火正时控制。

将 1 缸上止点位置作为基准,默认其为参考 0°,在发动机信息配置模块设置其余各缸相对其到达上止点延后的曲轴转角,根据被控发动机各缸上止点的相对位置关系,设计 8 缸机各缸的上止点与 1 缸上止点的相对位置分别为 0°、0°、180°、180°、0°、0°、180°、180°,即第 1、2、5、6 缸

同时到达上止点,180°曲轴转角之后第 3、4、7、8 缸同时到达上止点。

控制器底层程序通过识别 8 缸机各缸上止点的相对位置来控制点火与喷油的正时驱动。如图 9 所示,用 8 缸机的前 4 缸点火驱动信号依次提供 4 缸机的点火驱动。对于配置的 8 缸机而言,1、2 缸同时到达上止点,180°曲轴转角后 3、4 缸同时到达上止点,因此点火正时刚好符合对置二冲程 4 缸机的点火相位。由于 5、6、7、8 缸的点火信号与前 4 缸信号完全相同,因此在接线时只用到前 4 缸信号即可实现点火正时控制。

针对喷油和喷气控制,如图 9 所示,利用 8 缸

机前 4 缸喷射驱动信号提供喷油驱动,后 4 缸驱动信号提供喷气驱动。由于 8 缸机的 1、2、5、6 缸到达上止点时刻相同,将第 1、5 缸信号作为 1 组分别提供 4 缸机 1 缸的喷油、喷气驱动,第 2、6 缸信号作为 1 组分别提供 4 缸机 2 缸的喷油、喷气驱动,即对于 4 缸机而言,1、2 缸的喷油(喷气)信号的基准(即上止点位置)是一致的,因此可实现 1、2 缸同时喷射。4 缸机的 3、4 缸同理,并且第 1、2 缸与 3、4 缸喷油(喷气)驱动的正时刚好相差 180°曲轴转角。

最终点火与喷油、喷气信号分配如图 10 所示。其中 8 缸机的 1~4 缸点火驱动依次提供点火

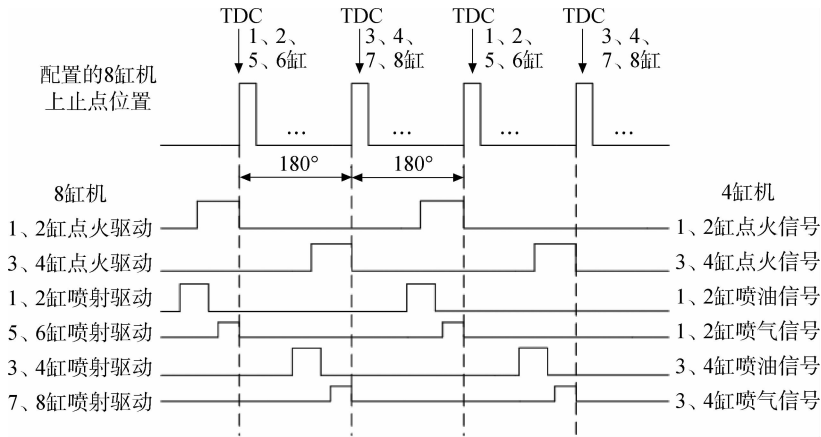


图 9 8 缸机各驱动信号分配示意图

Fig. 9 Schematic diagram of distribution of drive signals of 8-cylinder engine

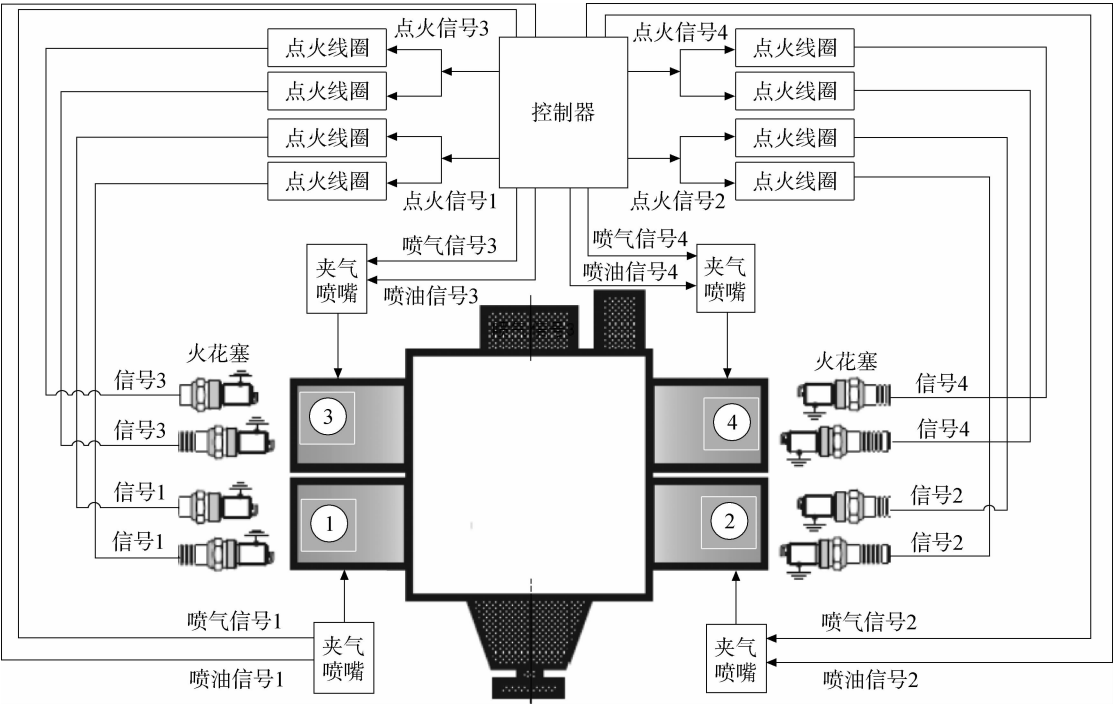


图 10 点火、喷油及喷气信号分配示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the ignition, fuel and air injection signals

信号 1~4,8 缸机的 1~4 缸喷射驱动提供喷油信号 1~4,5~8 缸喷射驱动提供喷气信号 1~4。

2.4 点火提前角控制及点火信号驱动程序设计

1) 点火提前角控制策略

在发动机冷启动工况和正常工况采用不同的点火提前角控制策略。冷启动工况采用固定的点火提前角(θ_{ig}),待发动机启动成功后再根据缸体温度(t_{cyl})进行修正^[16]。但试验发现,在冷启动的电动机拖动阶段和启动阶段中 θ_{ig} 对 t_{cyl} 的依赖性低,因此在满足启动快速性和平稳性的前提下,采用固定 θ_{ig} 的即可。正常工况下 θ_{ig} 根据发动机转速和节气门开度查询保证理论空燃比的前提下,基于台架试验获得的转矩最大时的点火提前角脉谱图获得,如式(1)所示

$$\theta_{ig} = \theta_{map}(a,n) \tag{1}$$

式中 a 表示节气门开度(%), n 表示发动机转速(r/min)。

2) 点火控制信号驱动程序设计

根据不同工况的正时控制策略确定了点火提前角之后,需要调用上层软件模块库提供的输出接口模块,设计点火信号驱动程序,实现点火信号的输出。图 11 是点火控制信号示意图, U_s 代表 0~5 V 的开关控制信号,可以通过对初级线圈通电时间以及断电时刻的控制,实现点火能量以及点火正时控制。

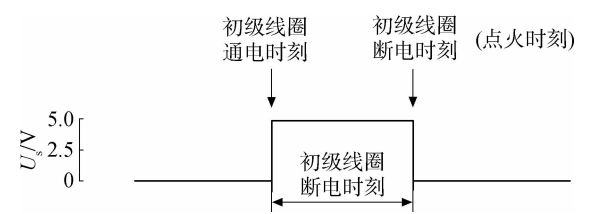


图 11 点火控制信号示意图

Fig. 11 Schematic diagram of ignition control signals

点火驱动信号通过上层功能模块中的点火驱动模块(spark sequence definition)产生,通常有两种控制模式:“角度-角度”控制模式和“角度-时间”控制模式。如图 12 所示,采用“角度-角度”控制模式时,将初级线圈通电时刻对应的曲轴转角和断电时刻对应的曲轴转角作为输入量,断电时刻即点火提前角由控制策略计算得到。为了保证通电时间以提供足够的点火能量,引入可标定量“线圈通电时间”,根据式(2)所示的转换方程将其换算为当前转速下对应的曲轴转角,再与点火提前角相加得到通电开始时刻对应的曲轴转角。

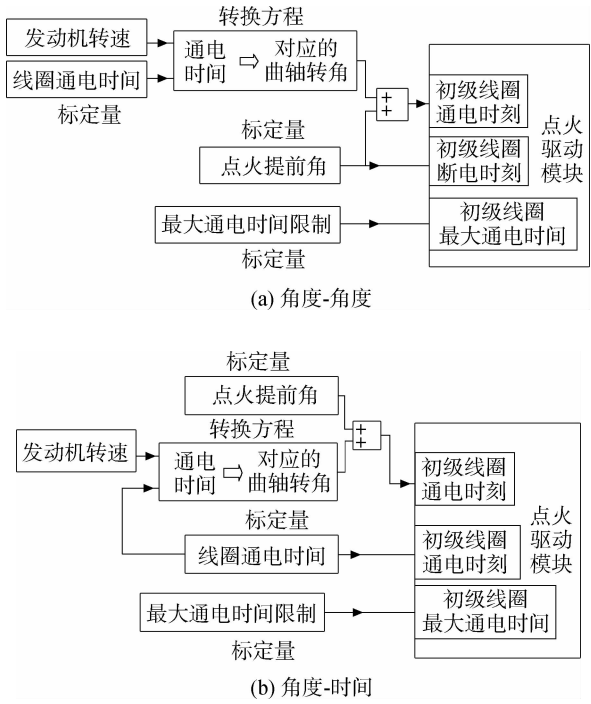


图 12 两种点火控制模式的参数计算示意图
Fig. 12 Schematic diagram of parameter calculation methods of two different ignition control modes

$$\theta = D \times \frac{6n}{1000} \tag{2}$$

式中 θ 为通电时间对应的曲轴转角($^{\circ}$); D 为通电时间(ms)。

“线圈通电时间”的引入可以保证初级线圈通电时间的准确控制,且具有可调性。但是“角度-角度”模式在控制器测试过程中发现,由于转速波动使得通电时刻对应的曲轴转角计算出现偏差,在发动机高转速工况下采用该模式时会有某些循环点火信号缺失,导致点火失败,发动机转速波动加剧。

采用“角度-时间”控制模式时,同样输入由式(2)和点火提前角计算得到的初级线圈通电时刻对应的曲轴转角,而另一个输入量是线圈通电时间,此时断电时刻即点火提前角的控制被算法自然保证。该模式保证了在任何工况下都不会有点火信号缺失的现象发生,但是当瞬时转速波动时,实际点火提前角的控制会存在偏差,尤其是在高转速下。该控制模式保证了点火控制的可靠性,提前角控制的偏差也在可接受的范围内。根据所选择的点火模块特性,这里初级线圈的通电时间设为 1 ms。

2.5 喷油、喷气控制及控制信号驱动程序设计

1) 喷油脉宽及喷油提前角控制策略
喷油提前角(θ_{mj})与喷油脉宽(D_{fuel})的控制策

略在冷起动工况和正常工况有所不同。

冷起动时,在电动机倒拖阶段缸内温度低, θ_{inj} 越小距离点火时刻越近,点火时刻在火花塞附近易形成良好的混合气,利于起动;此时燃油蒸发效果差,应采用较大的 D_{fuel} 以保证点火时刻的混合气能达到着火要求,避免循环失火。倒拖起动之后,随着缸体温度升高,缸内燃烧状态变好,这时 θ_{inj} 应增大以给燃油充分的时间吸收热量,蒸发形成易燃混合气;此时较大的 D_{fuel} 对 t_{cyl} 上升速率影响不明显,甚至导致燃烧恶化,需要降低 D_{fuel} 。因此冷起动阶段, θ_{inj} 和 D_{fuel} 都应根据 t_{cyl} 查询最佳值,如式(3)、式(4)所示

$$\theta_{inj} = \theta(t_{cyl}) \tag{3}$$

$$D_{fuel} = D(t_{cyl}) \tag{4}$$

正常工况下, θ_{inj} 采用定值,基本 D_{fuel} 根据发动机转速和节气门开度查询脉谱图得到。试验发现 t_{cyl} 与煤油雾化效果关系密切,需要根据 t_{cyl} 对基本 D_{fuel} 进行修正,引入随 t_{cyl} 变化的修正系数 $f(t_{cyl})$,最终 D_{fuel} 由式(5)决定

$$D_{fuel} = f(t_{cyl}) D_{map}(a, n) \tag{5}$$

2) 喷油、喷气控制的实现

根据控制策略确定了喷油脉宽、喷气提前角(夹气喷射的喷油正时)之后,需要调用上层软件中的喷射驱动模块(injector sequence definition),实现如图 13 所示喷油、喷气信号输出,其中油阀开启时刻和气阀开启时刻分别对应喷油、喷气提前角,而实际控制中燃油喷入气缸的时刻为气阀开启时刻。喷气信号开始时刻与喷油信号结束时刻的间隔为 1 ms。

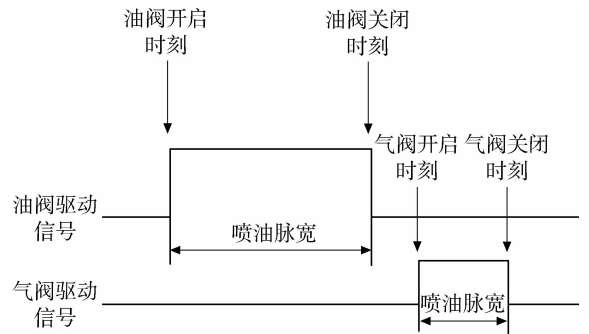


图 13 喷油、喷气信号时序示意图

Fig. 13 Schematic diagram of timing of fuel and air injection signals

喷射驱动模块的主要输入参数为各缸的喷油、喷气提前角(喷射起始时刻)和喷油、喷气脉宽(喷射脉宽),如图 14 所示,通过模块化编程依次

输入 1~4 缸的相应参数。根据文中第 2.2 节的喷射信号分配关系,控制器底层程序通过识别发动机信息配置模块中各缸上止点的相对位置(0° 、 0° 、 180° 、 180° 、 0° 、 0° 、 180° 、 180°)来控制喷油、喷气的正时驱动,同时通过编程实现油气间隔的控制。在控制程序中引入标定量喷油脉宽 $D_1(\mu s)$ 、油气间隔 $D_2(\mu s)$ 、喷气脉宽 $D_3(\mu s)$ 和气阀关闭提前角 A_1 (曲轴转角),其中 D_1 和 A_1 也可由控制策略给出,同时采集发动机转速 $n(r/min)$,则喷油提前角 A_2 、喷气提前角 A_3 可在程序中通过模块化编程由式(6)、式(7)计算得到

$$A_2 = (D_1 + D_2 + D_3) \times \frac{6n}{1000000} + A_1 \tag{6}$$

$$A_3 = D_3 \times \frac{6n}{1000000} + A_1 \tag{7}$$

模块化的 A_2 、 A_3 计算编程

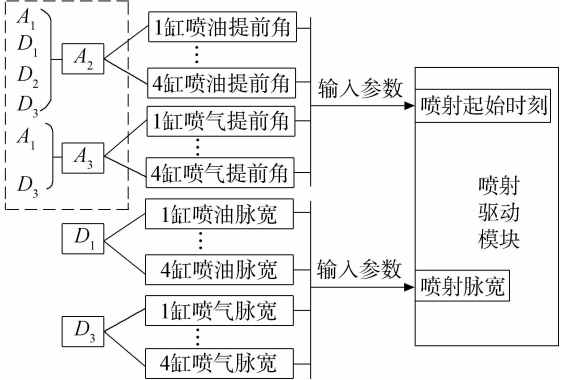


图 14 喷射驱动模块输入参数示意图

Fig. 14 Schematic diagram of input parameters of the injector sequence definition module

2.6 代码生成与下载

MotoHawk 内部集成了 Green Hills Software 编译器,当控制系统模型搭建完成并且检查通过后,编译器将 C 代码自动生成可供刷写的 .srz 文件,同时生成 .dll 和 .a2l 文件供在标定软件中调用^[17]。通过 MotoTron 平台自带的 MotoTune 软件进行程序的刷写和标定工作使用 Kvaser 公司的 USB(universal serial bus)-CAN 连接器连接上位机和控制器,通过 CAN 总线将 .srz 文件写入控制器,完成程序刷写。同时 MotoTron 平台支持 CCP 协议,采用 DAQ(data acquisition)变量测量模式标定。除了可以使用 MotoTune 进行标定外,该系统还能与常用标定软件,如 CANape、INCA 等无缝对接,极大便利了标定流程。

3 控制器功能实现

煤油在相同温度下其运动黏度远大于汽油并且饱和蒸汽压低,导致其难以像汽油一样快速形成混合气,造成冷起动困难^[18]。本文选用二冲程煤油发动机冷起动过程的台架试验验证控制器的基本功能和冷起动控制策略。发动机试验台架如图 15 所示。

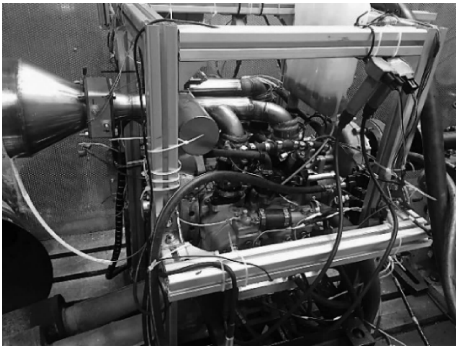


图 15 煤油发动机试验台架

Fig. 15 Experiment bed for the kerosene engine

在环境温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,大气压力为 98 kPa 的条件下进行发动机冷起动试验,图 16、图 17 分别为起动过程中发动机转速(n)、喷油提前角(θ_{inj})、点火提前角(θ_{ig})、喷油脉宽(D_{fuel})、缸体温度(t_{cyl})

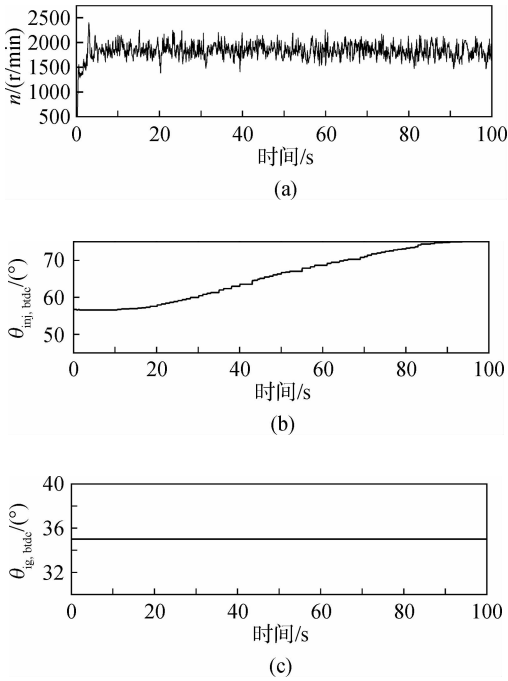


图 16 冷起动策略验证试验 n 、 $\theta_{\text{inj},\text{btdc}}$ 和 $\theta_{\text{ig},\text{btdc}}$ 变化曲线

Fig. 16 Variation of n , $\theta_{\text{inj},\text{btdc}}$ and $\theta_{\text{ig},\text{btdc}}$ in cold start strategy verification experiment

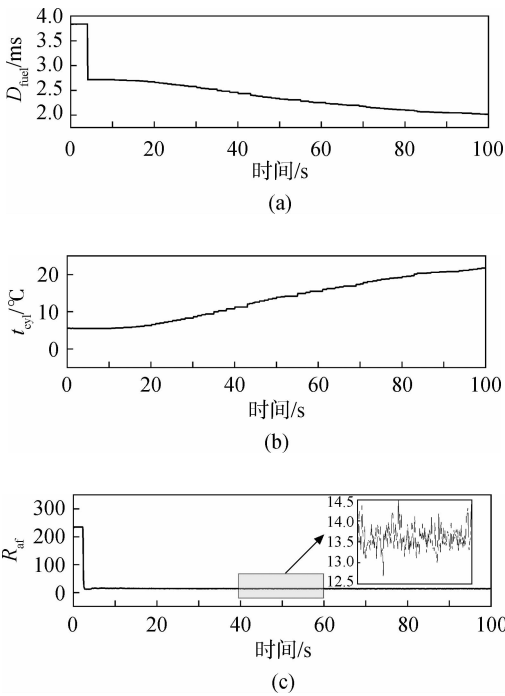


图 17 冷起动策略验证试验 D_{fuel} 、 t_{cyl} 和 R_{af} 变化曲线

Fig. 17 Variation of D_{fuel} , t_{cyl} and R_{af} in cold start strategy verification experiment

和空燃比(R_{af})的变化曲线,其中下标 btdc 代表压缩上止点前的曲轴转角。由图可知,发动机较快起动,转速平稳, θ_{ig} 、 θ_{inj} 和 D_{fuel} 三个控制参数的变化曲线符合控制策略设计,空燃比较为稳定,空燃比误差在 10% 以内,发动机顺利过渡到正常工况,验证了冷起动控制策略的可行性,说明控制器功能正常,达到设计要求。

4 结 论

基于 MotoTron 平台,结合二冲程航空煤油发动机在同步、喷油、点火控制上的特殊需求,采用非标准的编程模式开发了以八缸机程序控制四缸机的发动机控制器。分析了该款快速控制原型的软件架构,介绍了软件各层次功能、模块划分和接口软件设计开发思路,并提出基于该款快速控制原型软件架构的控制软件设计方法。依托 Mo-toTron 平台成熟的硬件设备和底层软件,基于 Matlab/Simulink 搭建发动机控制系统,建立了上层的控制策略。最后在台架上进行了冷起动试验,结果表明起动过程较为平顺,控制效果理想,验证了控制器的基本功能和冷起动控制策略的可行性。

参考文献:

[1] 戴海峰,魏学哲,孙泽昌. V-模式及其在现代汽车电子系统

开发中的应用[J]. 机电一体化,2006,12(6):20-24.

DAI Haifeng,WEI Xuezhe,SUN Zezhang. V-mode and its applications in development of modern automobile electronics systems[J]. Mechatronics,2006,12(6):20-24. (in Chinese)

[2] DAGCI O H,GANGOPADHYAY A,BROWN A W,et al. Development of a rapid prototyping controller-based full-authority diesel engine controller[J]. SAE(Society of Automotive Engineers) Transactions,2005,114(7):660-666.

[3] SCHUETTE F,BERNECK D,ECKMANN M,et al. Advances in rapid control prototyping:Results of a pilot project for engine control[J]. SAE(Society of Automotive Engineers) Transactions,2005,114(7):306-315.

[4] FERRARI A,GAVIANI G,GENTILE G,et al. Automatic code generation and platform based design methodology:an engine management system design case study[R]. Detroit, Michigan;SAE(Society of Automotive Engineers) World Congress,2005.

[5] 张虎,王存磊,张建龙,等. 基于 MotoTron 平台的汽油发动机控制器开发[J]. 上海交通大学学报(自然科学版),2014,48(6):845-849.

ZHANG Hu,WANG Cunlei,ZHANG Jianlong,et al. Development of a gasoline engine controller based on MotoTron[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University(Natural Science Edition),2014,48(6):845-849. (in Chinese)

[6] 陆文昌,高海宇,孟鑫,等. 基于 MotoTron 平台的 ETC 控制系统设计与试验研究[J]. 内燃机工程,2010,31(6):59-64.

LU Wenchang,GAO Haiyu,MENG Xin,et al. Rapid prototyping and validation for ETC system based on MotoTron development platform[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2010,31(6):59-64. (in Chinese)

[7] 何兴. 基于 MotoTron 平台的汽油机瞬态油膜补偿器研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2013.

HE Xing. Study on transient film compensator of gasoline engine based on MotoTron development platform[D]. Changsha:Changsha University of Science and Technology,2013. (in Chinese)

[8] 王连旭. 基于 Mototron 的纯电动汽车整车控制器设计与开发[D]. 长春:吉林大学,2013.

WANG Lianxu. Design and development of vehicle control unit of EV based on MotoTron[D]. Changchun:Jilin University,2013. (in Chinese)

[9] 曾强强. 航空重油内燃机夹气燃油系统设计及特性研究[D]. 北京:北京理工大学,2017.

ZENG Qiangqiang. Design and characteristic research of aircraft engine air-assisted fuel injection system[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2017. (in Chinese)

[10] 胡敬超. 二冲程缸内直喷航空煤油发动机夹气燃油系统特性研究[D]. 北京:北京理工大学,2019.

HU Jingchao. Study on the characteristics of an air-assisted fuel system in two-stroke in-cylinder direct injection aviation kerosene engine[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2019. (in Chinese)

[11] 高岩飞. 点燃式煤油发动机燃油雾化技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.

GAO Fei. Research on fuel atomization technology of ignited kerosene engine[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2010. (in Chinese)

[12] 王书典. 活塞式航空煤油发动机燃烧特性及爆震控制的研究[D]. 天津:天津大学,2015.

WANG Shudian. Research on combustion characteristics and knock control for direct injection piston aviation kerosene engine[D]. Tianjin:Tianjin University,2015. (in Chinese)

[13] 王瀚正. 点火能量对航空煤油发动机着火性影响及高能点火系统研究[D]. 北京:北京理工大学,2017.

WANG Hanzheng. Ignitability impact of ignition energy on aviation kerosene engine and high energy ignition system research. [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2017. (in Chinese)

[14] 杨光. 活塞式煤油发动机点火能量计算与试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.

YANG Guang. Calculation and experimental study on ignition energy of piston kerosene engine[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2013. (in Chinese)

[15] 郝东浩. 分层软件架构下柴油机电子控制软件开发研究[D]. 北京:北京理工大学,2014.

HAO Donghao. Development and research of diesel engine electronic control unit software based on layers software architecture. [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2014. (in Chinese)

[16] 刘锐,魏民祥,杨海青,等. 二冲程点燃式直喷煤油发动机冷启动控制策略[J]. 航空动力学报,2017,32(1):213-220.

LIU Rui,WEI Minxiang,YANG Haiqin,et al. Cold start control strategy of a two-stroke direct injection spark-ignited kerosene engine. [J]. Journal of Aerospace Power,2017,32(1):213-220. (in Chinese)

[17] 高海宇,陆文昌,商哲,等. 基于 MotoTron 平台的发动机 ECU 快速原型开发[J]. 柴油机设计与制造,2008,15(3):16-20.

GAO Haiyu,LU Wenchang,SHANG Zhe,et al. Rapid prototype development of engine ECU based on MotoTron platform[J]. Design and Manufacture of Diesel Engine,2008,15(3):16-20. (in Chinese)

[18] 胡春明,王赫,王阳,等. 点燃式煤油航空直喷发动机冷启动试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(1):82-87.

HU Chunming,WANG He,WANG Yang,et al. Study on cold start of spark-ignition kerosene direct injection aviation engines[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2019,52(1):82-87. (in Chinese)