

航空重油夹气直喷驱动系统设计及实验验证

雷鸿运, 暴秀超*, 黄 曦, 胡 洋, 张龙辉, 殷文程

西华大学汽车与交通学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年9月27日; 录用日期: 2025年10月17日; 发布日期: 2025年10月30日

摘 要

夹气直喷技术可有效地改善航空重油发动机的燃油经济性和排放性能, 而目前对于夹气直喷技术的研究主要集中于喷雾特性研究, 电喷驱动方面的研究尚为罕见。为此开发了夹气直喷喷射驱动系统, 并通过流量特性及喷雾特性实验对驱动系统进行验证。夹气直喷喷射驱动系统硬件设计主要包括驱动电路设计, BUCK-BOOST升压电路及控制器选型, 其中驱动电路设计是硬件设计的重点, 分别对喷油电磁阀(喷油喷嘴)和直喷电磁阀(直喷喷嘴)进行驱动电路设计; 直喷电磁阀的电流驱动可加快电磁阀响应时间, 保证燃料供给的及时性与稳定性。本文简要介绍了直喷电磁阀电流驱动的工作过程, 该电路可通过峰值电流、维持电流有效地控制直喷喷射驱动系统。针对喷油器进行了驱动试验, 结果表明: 升压电路升压稳定, 夹气直喷喷射驱动系统控制电流准确, 驱动电路性能优良。软件设计分为驱动程序开发和夹气直喷喷射参数控制软件开发, 驱动程序主要运用单片机的PIT及中断模块, 再结合夹气直喷技术工作原理对喷射时序进行精确控制; 参数控制软件基于LabVIEW平台开发, 通过串口通信对控制器进行实时控制。实验表明, 喷油脉宽与喷油量呈线性变化关系; 喷雾实验表明, 在不同燃油压力下喷雾贯穿距离变化符合一般规律。

关键词

夹气直喷, 驱动电路设计, 电流驱动, 喷雾特性

Design and Experimental Verification of Air-Assisted Injection Drive of Aviation Heavy Oil

Hongyun Lei, Xiuchao Bao*, Xi Huang, Yang Hu, Longhui Zhang, Wencheng Yin

School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu Sichuan

Received: September 27, 2025; accepted: October 17, 2025; published: October 30, 2025

*通讯作者。

文章引用: 雷鸿运, 暴秀超, 黄曦, 胡洋, 张龙辉, 殷文程. 航空重油夹气直喷驱动系统设计及实验验证[J]. 动力系统与控制, 2025, 14(4): 493-504. DOI: 10.12677/dsc.2025.144048

Abstract

The air-assisted direct injection (AADI) technology can effectively improve the fuel economy and emissions performance of aviation heavy oil engines. Currently, research on AADI technology mainly focuses on spray characteristics, while studies on electronic fuel injection drive systems are rare. Therefore, an AADI fuel injection drive system was developed and validated through flow characteristics and spray characteristics experiments. The hardware design of the AADI injection drive system includes the drive circuit design, a BUCK-BOOST boost circuit, and controller selection. Among these, the drive circuit design is the key focus of the hardware design. The drive circuits for both the fuel injector (fuel nozzle) and the direct injection solenoid valve (direct injection nozzle) were designed separately. The current drive for the direct injection solenoid valve can accelerate the valve's response time, ensuring timely and stable fuel delivery. This paper briefly introduces the working process of the direct injection solenoid valve current drive, which effectively controls the AADI injection drive system through peak current and holding current. Experiments on the injector drive show that the boost circuit is stable, the AADI injection drive system controls the current accurately, and the drive circuit performs excellently. The software design is divided into drive program development and AADI injection parameter control software development. The drive program primarily uses the microcontroller's PIT and interrupt modules, combined with the operating principles of the AADI technology, to precisely control the injection timing. The parameter control software is developed on the LabVIEW platform, and real-time communication with the controller is achieved via serial communication. Experiments indicate that the relationship between injection pulse width and injected fuel volume is linear. Spray experiments show that the spray penetration distance varies in accordance with general principles under different fuel pressures.

Keywords

Air-Assisted Injection, Drive Circuit Design, Current Drive, Spray Characteristic

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

为积极响应并全面落实加快推动“双碳”战略的部署要求,提升航空重油发动机的动力性能、燃油经济性并降低排放,已成为当前航空发动机领域备受瞩目的关键议题[1]。

电控喷油器作为发动机燃油喷射系统的核心部件,其性能优劣直接影响着发动机的整体表现,因而成为众多学者深入研究的焦点[2]。回顾过往研究,在高压电控喷油器方面成果颇丰。文献[3]提出基于 ARM Cortex-M4 内核单片机及 LabVIEW 软件的检测系统,能够高效自动地检测电控喷油器的流量特性与动态响应,为高压电控喷油器的性能评估提供了有效手段。文献[4]针对缸内直喷技术,采用 Peak & Hold 电流驱动模型,并基于 ACS755XCB-050 集成芯片设计电流反馈控制驱动电路,实现了对电磁阀动作的精准驱动以及喷油量的有效控制,在高压环境下提升了喷油控制的精度。文献[5]聚焦直喷汽油机高压喷油器,借助 Multisim 仿真软件结合发动机运行工况优化升压电路参数,使驱动电路能够产生 Peak & Hold 驱动电流波形,且驱动电流可在 200 μ s 内从 0 A 迅速提升至峰值电流 16 A,显著提高了高压喷油器的响应速度。文献[6]同样针对缸内直喷技术,运用典型 Peak & Hold 电流模型设计节能型释能回路,不仅使喷油器在关闭后能快速泄流,还通过电流反馈技术实现了喷油器短路、断路诊断功能,进一步增强

了高压电控喷油器系统的可靠性与稳定性。

然而,上述研究主要集中于高压电控喷油器领域。对于低压电控喷油器,相关研究相对较少且多侧重于喷雾特性,电控技术方面的探索较为匮乏[7]-[9]。文献[10]虽针对低压电控喷油器分析了喷油脉冲作用下衔铁组件的运动历程以及线圈电流的变化规律,证实了衔铁组件运动过程中特征位置出现时刻与线圈电流突变时刻的一致性,但未能深入涉及低压电控喷油器在复杂工况下的驱动控制策略。重油通过喷油器在混合腔中与空气充分混合后,再经直喷喷嘴进入气缸,这种混合方式使混合气得到充分雾化,极易点燃,从而有效提升了燃油经济性并降低了排放[11]。但传统的“高压直喷”相比,夹气直喷在驱动控制上面临着一系列独特且严峻的挑战。

其一,双阀门时序协同问题。夹气直喷系统通常包含进气阀门和喷油阀门,这两个阀门的动作时序需要高度精准协同。进气阀门需在恰当的时刻开启,以确保足够的空气进入混合腔与重油混合;而喷油阀门则要根据进气量和发动机工况,精确控制喷油时刻和喷油量。若时序配合不当,可能导致混合气比例失调,要么空气过多使燃油无法充分燃烧,降低发动机动力;要么燃油过多造成燃烧不充分,增加排放和油耗。传统的“高压直喷”系统一般只有一个喷油阀门,不存在如此复杂的双阀门时序协同问题,因此夹气直喷在驱动控制上对时序精度的要求更高,实现难度更大。

其二,低压大流量下的电流特性问题。夹气直喷工作在低压环境下,但需要实现大流量的燃油喷射,这对驱动电路的电流特性提出了特殊要求。在低压条件下,要驱动喷油器实现大流量喷射,需要提供足够大的电流以产生强大的电磁力来克服喷油器的开启阻力。

鉴于夹气直喷技术在航空重油发动机领域的广阔应用前景以及其在驱动控制上面临的上述挑战,本研究具有显著的必要性和重要贡献。本文旨在设计航空重油夹气直喷驱动系统,通过深入研究双阀门时序协同控制策略和低压大流量下的电流特性优化方法,解决夹气直喷驱动控制中的关键问题。并借助半物理仿真实验、流量特性测试实验及夹气直喷喷雾实验,对所设计的驱动模块进行全面测试与验证,为航空重油发动机夹气直喷技术的实际应用提供理论支持和技术保障,推动航空发动机技术向更加高效、环保的方向发展。

2. 夹气直喷驱动系统整体设计

夹气直喷驱动系统设计主要涉及硬件和软件。硬件部分主要包括上位机、控制器、喷油及直喷驱动电路、夹气喷射喷嘴等。根据控制精度和实时性要求对控制器进行选型,基于夹气直喷技术原理并结合电磁阀驱动响应特性,设计驱动电路。软件设计包括夹气直喷喷射参数控制软件及驱动程序,运用控制器的 PIT 及中断模块,结合喷油、预混、直喷时序要求编写驱动控制程序;并基于 LabVIEW 开发夹气直喷喷射参数控制软件。本文设计的夹气直喷驱动系统如图 1 所示,上位机软件通过串口通信实现对控制器实时控制,控制器执行驱动程序作用于各驱动电路实现对喷油喷嘴及直喷喷嘴电磁阀的控制,最终设计的夹气直喷驱动系统可实时、准确、可靠地控制夹气直喷喷射系统。

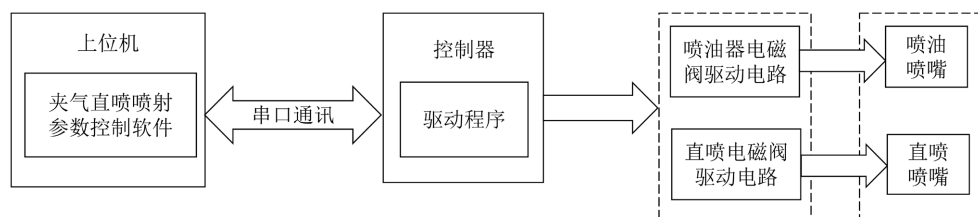


Figure 1. Overall design of the air-injection direct injection drive system

图 1. 夹气直喷驱动系统整体设计图

3. 硬件设计

夹气直喷驱动系统硬件设计对象主要包括驱动电路及控制器。在进行硬件设计之前，首先要了解夹气直喷系统喷射总成的特点，然后掌握电磁阀驱动响应特性，最后在此基础上分别对喷油电磁阀和直喷电磁阀进行驱动时序和驱动电路设计，以及控制器的选型。

3.1. 夹气直喷系统喷射总成介绍

夹气直喷喷射系统主要由喷油器、混合腔、直喷喷嘴、进气口、进油口组成。此喷油系统由广西银翼动力科技有限公司设计提供。夹气直喷喷射系统由油路和气路构成，空气通过压缩机后获得稳定的压力进入到混合腔，航空重油经输油泵将从油箱输送到油轨中，采用油压阀保持燃油压力。喷油器将具有稳定压力的重油喷入混合腔中与具有稳定压力的空气预混合后，混合气再通过直喷喷嘴促进空气与液体相互作用，使得燃油膨胀、分裂成细小液滴，混合气得到充分雾化如图 2 所示[12] [13]。

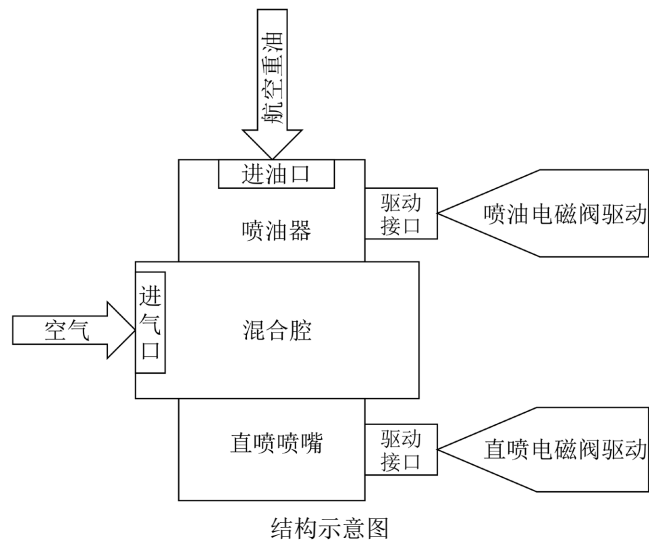


Figure 2. Structural diagram of air-entrained direct injection system
图 2. 夹气直喷喷射系统结构示意图

3.2. 电磁阀驱动响应特性分析

夹气直喷技术实现的关键是控制喷油及直喷电磁阀快速开启和关闭，使电磁阀具备高速通断能力[14]。根据夹气直喷驱动系统响应特性，电压驱动型电路的驱动电流应具有如图 3 所示电流变化特性。

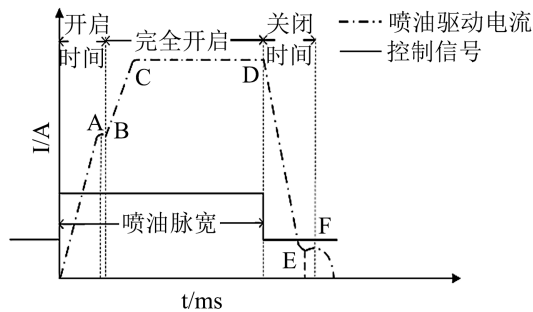


Figure 3. Voltage drive current change curve
图 3. 电压驱动电流变化曲线图

电磁阀响应特性可根据驱动电流变化分为四个部分。开启阶段(OB 段),电磁阀组件迅速上升,工作气隙变小,因电感作用使电流微变,直到触及铁芯的底部。完全开启(BD 段),当电磁阀达到最大升程时,线圈电流从 IB 逐渐增大到最大 IC,并持续到控制信号变化(D 点)。关闭阶段(DF 段)当控制信号变为低电平时(D 点),因电感作用使电流缓慢下降,气隙磁通也由稳定值开始下降,当下降到所产生的电磁吸力不足以克服弹簧力等作用力时(E 点),衔铁及钢球组件将准备复位。在衔铁复位运动阶段(EF 段),由于电感的变化使线圈中的电流稍有微小增加,最终下降为零[15]。

结合上述电磁阀驱动响应特性和该夹气直喷喷射系统特点,设计的驱动电流需满足以下要求:驱动电流总体变化趋势应同上述一致;驱动电流与控制信号具有对应关系:喷油信号从低电平变为高电平时,电磁阀开始动作电流开始升高,当喷油信号从高电平变化为低电平时针阀开始闭合电流开始下降[16][17];在 12 V 电压下,要使电磁阀快速开启并保持在开启状态,开启时间及保持电流值需满足的要求如表 1 所示。

Table 1. Required values of each solenoid valve control parameter
表 1. 各电磁阀控制参数要求值

控制参数	开启时间 TOC	保持电流 ICD
喷油电磁阀	$\leq 1.3\text{ ms}$	0.8~1 A
直喷电磁阀	$\leq 1.4\text{ ms}$	2.4~2.8 A

3.3. 电磁阀驱动电路原理分析

本文所使用的单缸航空煤油夹气喷射系统中的直喷喷嘴驱动电路结构如图 4 所示,采用高低电源分时驱动方式,其中+12 V 为蓄电池电压,V_BOOST 为升压电路 BUCK-BOOST 电路转换后的电源。单个直喷喷嘴驱动由高端驱动模块和电流采样电路模块组成,由于不存在选缸信号,因此本文舍弃了低端驱动模块的设计。采用双电源驱动电磁阀的优点在于,在电磁阀打开初期,由升压电路 V_BOOST 电源供电,这是因为电磁阀开启时内部通过的电流较小,电磁阀处于不完全开启的状态,因此需要较高的电压快速拉升电磁阀内部通过的电流,使电磁阀迅速开启,缩短电磁阀的响应时间。而直喷喷嘴电磁阀是感性元件两端会产生与蓄电池电压反向的瞬时高压,为防止电路损坏,需要并联一个泄流二极管,在直喷喷嘴电磁阀两端形成局部回路,从而将内存的电能转化为热量散发出去。

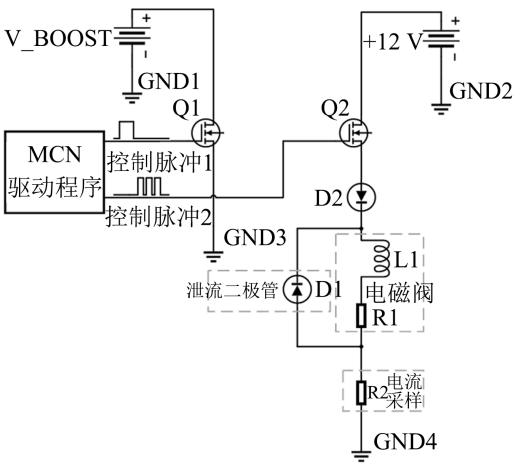


Figure 4. Direct injection nozzle drive circuit design principle
图 4. 直喷喷嘴驱动电路设计原理

直喷喷嘴的工作过程如下, 首先, 由驱动程序发出 PWM 信号控制 MOSFET 的导通。初期, Q1 和 Q2 打开, 使直喷喷嘴同时接到+12 V 和 V_BOOST 电源, 当直喷喷嘴流过电流达到峰值后, 断开 Q1, 此时由蓄电池电源维持电流, 单个工作周期结束后, 断开 Q2, 直喷喷嘴停止工作。PWM 控制信号和工作电流如图 5 所示。

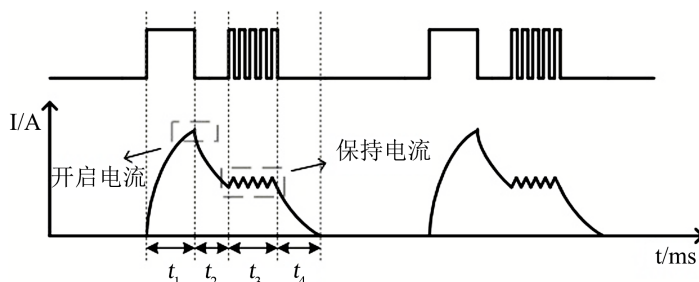


Figure 5. Schematic diagram of direct injection nozzle working current
图 5. 直喷喷嘴工作电流示意图

3.4. 驱动电路设计

根据夹气直喷技术原理驱动电路设计主要分为两部分, 其一是喷油驱动电路, 其二是直喷驱动电路作用于直喷电磁阀。根据表 1 对夹气直喷电磁阀驱动电流要求: 喷油驱动保持电流介于 0.8~1 A, 电磁阀电阻为 12 Ω , 因此设置电源电压为 12 V 即可。直喷驱动保持电流介于 2.3~2.8 A, 由于直喷喷嘴为低电阻型电磁阀, 其阻值为 1.8 Ω , 因此可以设计为电流驱动型。

由于喷油驱动电路设计较为标准单一, 本文不再阐述。本文对直喷电磁阀驱动电路设计原理进行详细介绍: 图 6 为直喷喷嘴 V_BOOST 高端自举驱动电路原理图设计, 采用英飞凌公司的 IR2110STRPBF 芯片进行设计。其中, 传入 HIN 引脚的 PWM 信号控制 MOS 管 Q1, 传入 LIN 引脚的 PWM 信号控制 MOS 管 Q2, 高电平有效。当 Q2 导通, Q1 截止时, 12 V 电源经过二极管 D2 给电容 C22 充电, 同时 D2 能够将 Q1 源极与电源断开, 对电源起保护作用; 当 Q1 导通, Q2 截止时, 由于芯片内部 VB 和 HO 引脚短接, 从而将 C22 直接并联在 MOS 管 Q1 的栅极和源极间, 利用电容两端电压不能突变的原理, 将 12 V 电压自举, 从而使 Q1 稳定导通。12 V 高端自举驱动电路原理图设计与 V_BOOST 高端自举驱动电路原理图设计原理相似, 具体不再描述。

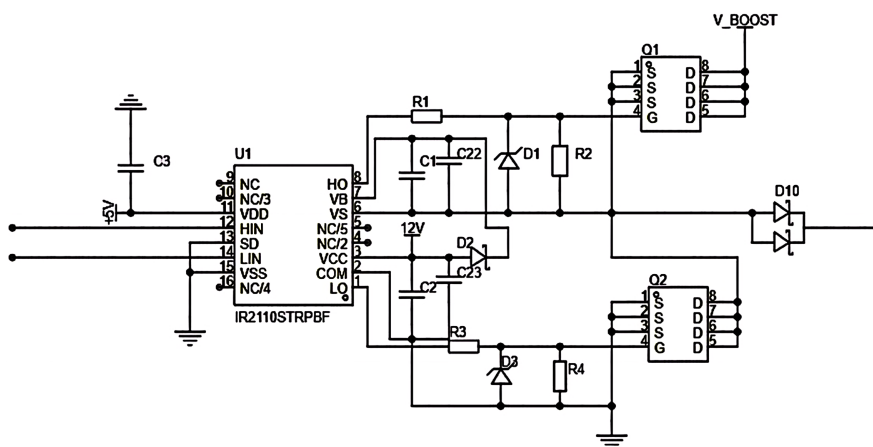


Figure 6. Direct injection solenoid valve drive circuit
图 6. 直喷电磁阀驱动电路

3.5. 控制器的选型

电控喷油器喷射时间控制在毫秒级之间,因此所选控制器需具备非常高的实时性及精确性[18]。控制器是整个夹气直喷驱动硬件设计的核心,针对夹气直喷驱动控制的性能要求选用了一款型号为MC9S12XS128单片机,由 Freescale 公司推出的 S12XS 系列单片机中的一款增强型 16 位单片机,采用 CPU12XV2 内核,可运行在 40 MHz 总线频率以上,在汽车电子、工业控制等领域应用广泛。所应用到控制器相关功能模块包括:锁相环模块(PLL)、中断系统、周期性定时器模块(PIT)、串行通信模块(SCI)等。

4. 软件设计

夹气直喷驱动系统软件设计主要包括驱动程序、夹气直喷喷射参数控制软件等。根据夹气直喷技术特点,首先对喷射时序进行设计;并基于所选 MC9S12XS128 控制器设计驱动控制程序;基于 LabVIEW 开发了夹气直喷驱动程序,通过串口通信实现对控制器进行实时控制。

4.1. 时序设计

根据夹气直喷喷油器的工作原理,通过控制喷油脉宽及直喷脉宽确定喷油量及喷气量,控制直喷针阀开启时刻确定夹气直喷喷射正时,控制喷油与直喷间隙时间实现对混合气预混时间的控制。

图 7 为完成一次夹气直喷喷射控制时序图。重油经夹气直喷喷嘴形成喷雾的过程中,首先通过喷油器喷入预混腔,此时需先对喷油电磁阀输入高电平,喷油脉宽 T1 决定喷油嘴开启时长;当固定压力的重油与空气喷入预混腔后,将进行预混合,T2 决定重油与空气在混合腔内的预混时间;混合 T2 时间后将直喷喷嘴打开,此时通过控制器输出脉宽 T3,即决定直喷喷嘴开启时长[19]。在直喷喷嘴开启的同时触发高速摄像机,T4 与 T3 的脉宽一致,使其对夹气直喷喷射整个过程进行捕捉。

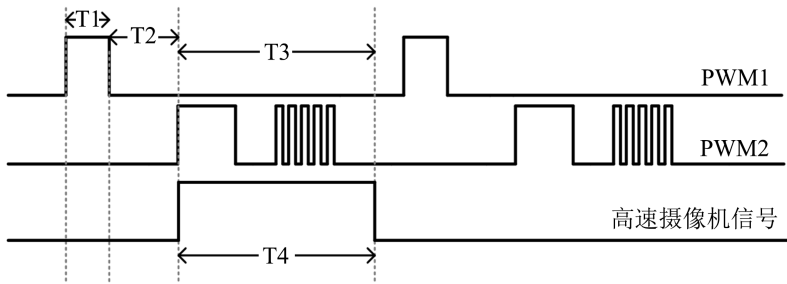


Figure 7. Timing diagram of each control signal of air injection
图 7. 夹气喷射各控制信号时序图

4.2. 驱动程序设计

设置锁相环(PLL)总线频率为 32 M,设置 I/O 口 PORTB 中的 0、1、2 口分别输出喷油器控制信号、直喷喷嘴控制信号及高速摄像机触发信号。周期性定时器(PIT)对超时周期进行设置,从而触发中断。程序设计主要采用主程序及中断程序结构模式,主程序流程如图 8 所示。

5. 实验验证

通过实验对所设计的夹气直喷驱动系统进行验证,半物理仿真实验采集控制时序信号验证设计的驱动程序及上位机控制软件的可行性。测试各电磁阀两端的驱动电流、电压变化验证驱动电路设计的可靠性。半物理仿真实验初步确定设计的驱动系统可行性后,搭建夹气直喷喷射台架,通过进一步的流量特性及喷雾实验验证夹气直喷驱动系统的可行性。

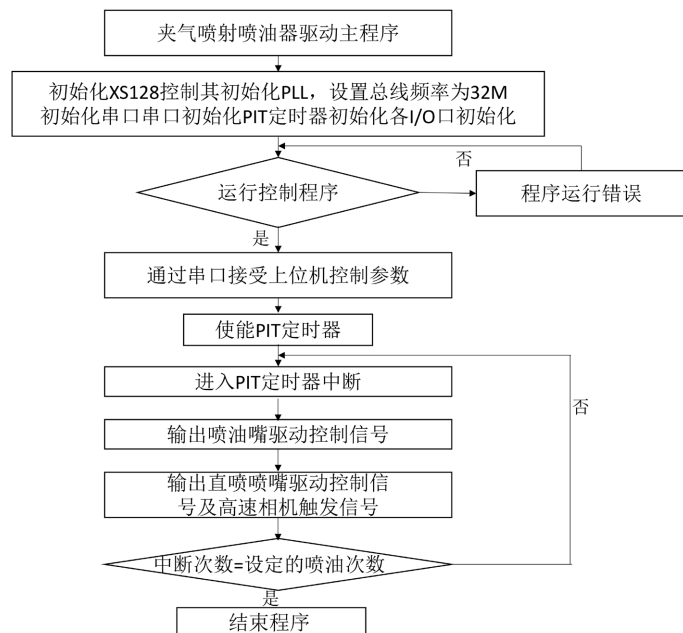


Figure 8. Air injection injector main program flow chart
图 8. 夹气喷射喷油器主程序流程图

5.1. 半物理仿真实验

利用半物理仿真实验对设计的夹气直喷电磁阀驱动系统进行相关测试, 验证所设计的驱动程序、驱动电路及上位机软件控制效果及实时性[20]。主要由夹气直喷喷油器、喷油及直喷驱动电路、控制器、夹气直喷喷射控制上位机、高速摄像机、示波器、电流卡钳、电源等组成。

将驱动控制程序烧写至控制器, 上位机设置喷油及直喷脉宽为 4 ms, 间隙为 1 ms, 多次喷射, 通过串口发送给控制器, 运行控制程序后向各驱动电路输出对应的控制信号, 从而触发喷油电磁阀、直喷电磁阀和高速摄像机。可调电源提供 12 V 电压。

航空发动机通常工作转速在 2000~6000 r/min, 该工况下对应喷油脉宽介于 2~5 ms, 因此分别测试 2 ms、3 ms、4 ms、5 ms 喷油脉宽下的驱动电流如图 9, 喷油驱动保持电流在 0.85~0.87 A 之间, 介于喷油驱动电流要求值 0.8~1 A 范围内, 可使喷油电磁阀正常开闭。

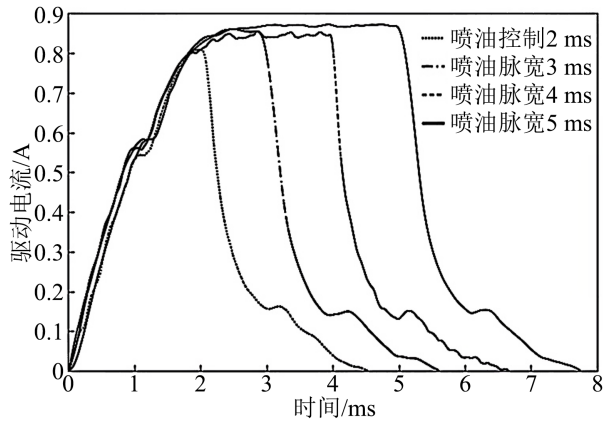


Figure 9. Changes in driving current under different injection pulse widths
图 9. 不同喷油脉宽下驱动电流相关变化

当航空发动机工作转速介于 2000~6000 r/min 范围时,该工况下对应直喷脉宽介于 2~5 ms,因此测试 2 ms 直喷脉宽下的驱动电流,直喷电磁阀也具有相似的驱动响应特性,直喷驱动保持电流介于 2.4 A 左右,理论情况下电压为 12 V,导线电阻约 $1.6\ \Omega$,直喷喷油器内阻 $1.8\ \Omega$,串联电阻 $1.2\ \Omega$,因此直喷保持电流约为 2.4 A,介于要求驱动电流值 2.3~2.8 A,可使直喷喷油器正常驱动(图 10)。

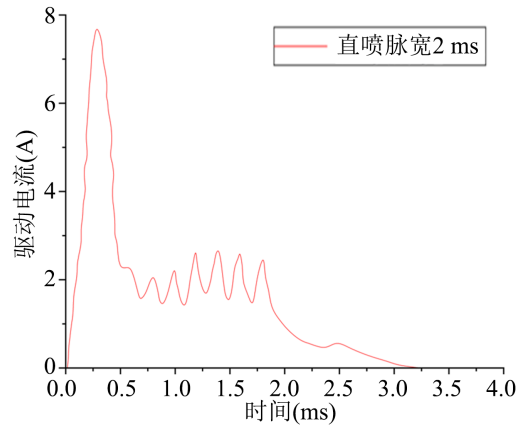
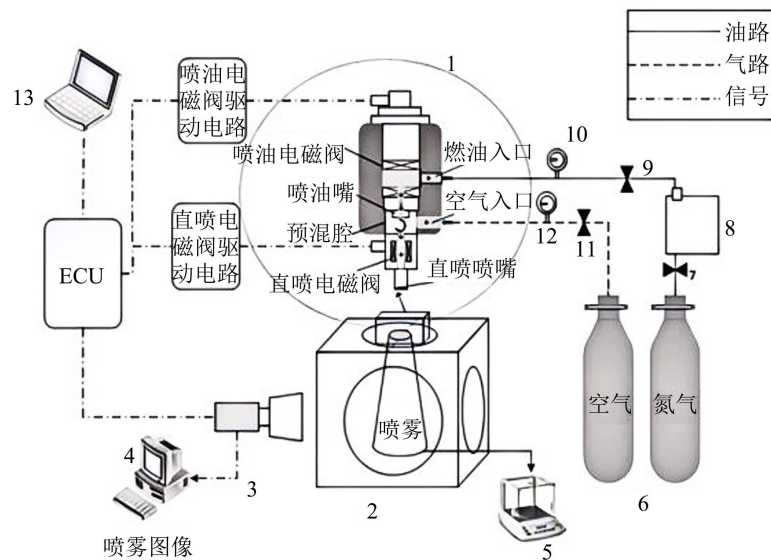


Figure 10. Changes in driving current injection pulse widths
图 10. 直喷脉宽下驱动电流相关变化

5.2. 夹气直喷系统喷射实验

通过搭建夹气直喷实验平台测量不同喷油脉宽下的喷油量及捕捉不同油压下的夹气直喷喷雾形态变化,从而进一步验证夹气直喷驱动控制系统。如图 11 为实验平台主要由控制器、驱动电路、夹气直喷喷雾控制上位机、高速摄像机、定容弹、空气及燃油压力调节阀、气瓶、油压及气压表、夹气喷射喷嘴、高精度电子天平组成。



1-夹气直喷喷嘴, 2-定容弹, 3-高速摄像机, 4-喷雾捕捉图形, 5-电子天平, 6-气瓶, 7-减压阀, 8-航空煤油, 9-油压阀, 10-油压表, 11-气压阀, 12-气压表, 13-夹气喷射直喷控制上位机

Figure 11. Schematic diagram of the air entrainment direct injection experimental platform
图 11. 夹气直喷实验平台示意图

5.2.1. 不同喷油脉宽下流量特性测试

喷油量稳定是电控喷油器主要性能要求之一，即在正常控制脉宽变化中，喷油流量与喷油脉宽成规律的线性变化[21][22]。因此需对夹气直喷射流量特性进行定量研究。本实验采用称重法，使用精度为 0.01 mg 的电子天平进行测量，将每组工况分别进行三次实验，取平均值作为单次喷射的流量质量[23]。保持燃油压力稳定，直喷脉宽 2 ms、油气间隙 2 ms、喷射次数 10 次；在此条件下分别测试喷油脉宽 2 ms、4 ms、6 ms、8 ms 下的喷油量，如图 12 为夹气喷油嘴流量特性曲线，设置 5% 的误差带，将曲线进行拟合后可表示为 $q = 0.813x - 0.5$ (q 为喷油量、 x 为喷油脉宽)，喷油量随着喷油脉宽的增大而增大；单次喷油流量与喷油脉宽呈线性变化，因此所设计的喷油器驱动控制满足流量特性一般规律。

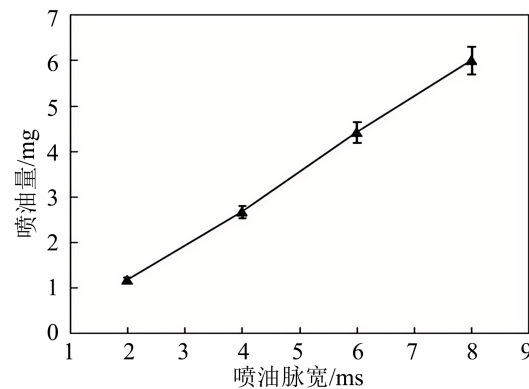


Figure 12. Changes in injection quantity under different injection pulse widths
图 12. 不同喷油脉宽下喷油量变化

5.2.2. 不同压力下夹气直喷射雾实验

设置相关控制参数：喷油脉宽 4 ms、油气间隙 2 ms、直喷脉宽 2 ms，通过高速摄像机捕捉不同油压下的喷雾变化，采用 MATLAB 对捕捉到的喷雾图像进行去背景、图像处理、提取后得到喷雾变化图 13 [24]。根据喷雾变化规律验证夹气直喷驱动控制在不同油压下的可行性。实验以直喷喷嘴开启时刻为零时刻，同时因为直喷脉宽为 2 ms，因此仅对 2 ms 内的喷雾图像进行捕捉。从喷雾整体变化来看，不同油压下喷雾形态变化趋势大致相同，呈现出“梭状”形态，但喷雾发展进程存在一定的差异。

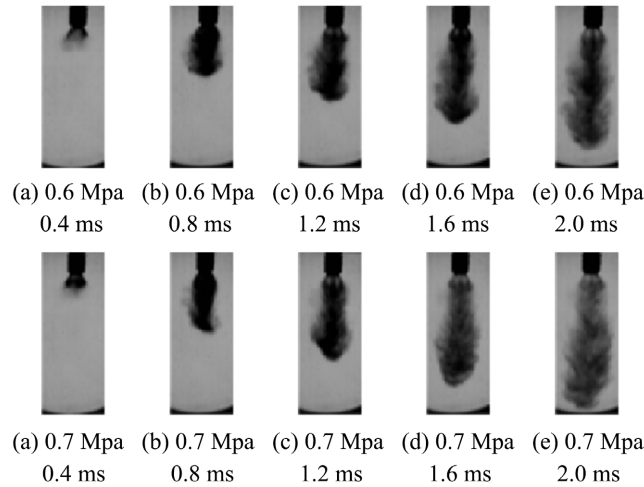


Figure 13. Spray patterns at different times under different oil pressures
图 13. 不同油压下不同时刻的喷雾形态

通过进一步边界计算后得到喷雾宏观特性参数,本次实验仅用于验证夹气喷射驱动系统,因此仅对喷雾贯穿距离进行分析。据文献[25]表明喷雾发展过程分为两阶段,第一阶段由燃油自身特性决定喷雾的发展,第二阶段则主要受到压力的影响,当喷油压力越大时,喷雾形成的初始动力将越大,因此在相同的阻力下,喷雾贯穿距离也越大。如图 14 所示,以 0.4 ms 作为两个阶段的时间界限:第一阶段喷雾贯穿距离在不同压力下变化保持一致;第二阶段在不同的油压下,喷雾贯穿距离开始随油压的增大而明显增大,对应增加了约 10 mm,两阶段的喷雾发展变化符合上述变化规律。

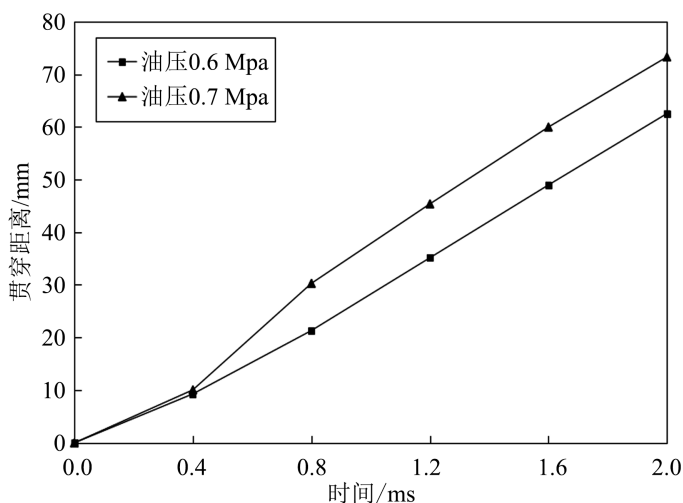


Figure 14. Changes in injection quantity under different injection pulse widths
图 14. 不同喷油脉宽下喷油量变化

6. 结论

本文根据夹气直喷技术原理结合电磁阀驱动响应特效,自行设计了夹气直喷喷射系统驱动电路,利用 MC9S12XS128 单片机器开发了相应的驱动程序和控制软件,实现对夹气直喷喷射系统的实时精确控制。得出的主要结论如下:

1) 采用 IR2101 驱动芯片、MOS 管等元器件完成了夹气直喷驱动系统电路设计,在 12 V 电压下,喷油针阀可在 1.28 ms 内完全开启,保持电流约为 0.84 A;直喷针阀可在 1.31 ms 内开启,保持电流约为 2.64 A,硬件电路在驱动信号的作用下可使电磁阀迅速开闭,满足电磁阀驱动响应特性。

2) 基于 LabVIEW 开发平台和单片机的 PIT 及中断模块,进行夹气直喷喷射参数控制软件及驱动程序的开发,该软件可以实时调节喷油及直喷脉宽、喷射次数等参数,经测试夹气直喷驱动系统运行稳定,可实现了对喷油电磁阀和直喷电磁阀时序的精确控制。

3) 经实验验证:据流量特性实验表明,喷油脉宽与喷油量呈线性变化关系;喷雾试验对不同油压下的喷雾变化进行捕捉,以 0.4 ms 为时间界限,分为两个变化阶段:喷雾贯穿距离在第一阶段变化相近;在第二阶段随油压的增大,喷雾贯穿距离也明显增大;两个阶段喷雾贯穿距离符合一般规律。

参考文献

- [1] 高宏力, 张付军, 王苏飞, 等. 航空煤油活塞发动机空气辅助喷射系统喷雾特性试验研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 927-937.
- [2] Wu, H., Zhang, F. and Zhang, Z. (2021) Fundamental Spray Characteristics of Air-Assisted Injection System Using Aviation Kerosene. *Fuel*, 286, Article 119420. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119420>

- [3] 唐超, 张振东, 丁力, 等. 电控喷油器流量特性及动态响应测试系统研究[J]. 机电工程, 2018, 35(3): 274-277.
- [4] 陈林, 董小瑞, 王艳华. 缸内直喷发动机高速电磁阀驱动电路设计[J]. 柴油机设计与制造, 2014, 20(2): 28-31+56.
- [5] 胡春明, 郭守昌, 崔润龙, 等. 直喷汽油机喷油器驱动模块的开发与优化[J]. 内燃机工程, 2014, 35(3): 83-88.
- [6] 张宝峰, 李金龙, 朱均超, 等. 直喷汽油机喷油器智能驱动模块设计[J]. 天津理工大学报, 2017, 33(6): 32-36.
- [7] 叶昌, 张振东, 程强. 低压电控喷油器无效喷油时间测量方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(21): 2962-2967.
- [8] 白洪林, 胡春明, 侯圣智, 等. 空气辅助喷射煤油和汽油的喷雾特性对比[J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(5): 428-434.
- [9] 雷威, 李建文, 李炎昊, 等. 油压力对汽油机电控喷油器流量特性影响的试验研究[J]. 军事交通学院学报, 2018, 20(8): 50-55.
- [10] Yang, T.Z., Xue, H.B., Zhao, H.J. and Yuan, L. (2014) Research on Software Development of Flow Characteristic Measuring System of Motorcycle Electronic Injector. *Advanced Materials Research*, **945**, 1627-1631. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.945-949.1627>
- [11] Hu, J.C., Liu, B.L., Zhang, C., Gao, H.L., et al. (2019) Experimental Study on the Spray Characteristics of an Air-Assisted Fuel Injection System Using Kerosene and Gasoline. *Fuel*, **235**, 782-794. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.083>
- [12] 周飞. 航空高速电磁阀驱动器的设计[J]. 航空制造技术, 2015(Z2): 106-107+119.
- [13] Zhou, D.F., Yu, X.M., Bao, L., Zhao, L.F. and Qi, W.Q. (2012) Design of Driving Circuit of GDI Injector and Experiment Verification. *Advanced Materials Research*, **566**, 3-6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.566.3>
- [14] 兰奇, 白云, 范立云, 等. 船用低速柴油机电控喷油器的动态响应特性研究[J]. 内燃机工程, 2020, 41(6): 55-64.
- [15] 李建文, 杨生辉, 舒华, 齐志鹏. 电喷发动机喷油电路波形的分析[J]. 汽车电器, 2002(S1): 9-11.
- [16] 卜建国, 周明, 温浩彦, 等. 柴油机高速电磁阀驱动电路响应特性研究[J]. 内燃机工程, 2017, 38(1): 2-6.
- [17] 王亦农. 一款提高喷油器喷射品质的驱动电路[J]. 汽车电器, 2013(8): 44-45+48.
- [18] 于洋, 胡伟. 柴油机燃油喷射系统电磁阀驱动电路设计与生产检测[J]. 中国新技术新产品, 2017(23): 60-62.
- [19] Jin, H., Wei, M., Liu, R., et al. (2021) Drive Control Experimental Studies on the Injection Characteristics of a Self-pressurized Injector. *IEEE Access*, **99**, 1.
- [20] Hu, Y.Z., Teng, Q. and Liu, J.S. (2011) Development of a Driver Circuit for GDI High Pressure Injector. *Electronic Design Engineering*, **19**, 139-141+144.
- [21] 沈跃, 黄忠裕, 刘慧. 基于 BOOST 电路的电磁阀流量控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 410-417.
- [22] 刘兴华, 李广荣. 高速开关电磁阀的研究及测试[J]. 内燃机工程, 2004(1): 38-42.
- [23] Naber, J.D. and Siebers, D.L. (1996) Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays. SAE Paper.
- [24] 刘威, 裴毅强, 秦静, 任源, 等. 汽油在超临界环境下的喷雾特性[J]. 内燃机工程, 2019, 40(3): 10-15.
- [25] 刘昌文, 李强, 刘丰年, 等. 气体喷射及环境背压对空气辅助喷雾特性影响研究[J]. 内燃机工程, 2021, 42(3): 1-7.