

二冲程点燃式重油发动机控制系统硬件在环研究

杨豪杰, 暴秀超*, 张龙辉, 胡 洋

西华大学汽车与交通学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年8月23日; 录用日期: 2025年9月13日; 发布日期: 2025年9月25日

摘 要

随着电子信息技术和现代控制理论持续发展, 对发动机精确控制的要求愈发严苛。本文针对发动机控制系统的需求, 利用GT-Power软件搭建二冲程发动机模型, 通过对比验证, 动力性最大误差不超过5%。并结合已设计好的基于MC9S12XS128主控芯片的发动机ECU控制器和Simulink软件环境下搭建的应用层控制软件, 将GT-Power发动机模型与应用层控制软件进行联合仿真, 对控制软件进行了初步验证, 也为后续控制策略的设计和优化提供了基础条件。其次, 为进一步验证控制系统实际性能, 本文搭建了发动机控制系统硬件在环平台, 分别测试信号接口模拟器的模拟电压信号和发动机ECU控制器的控制信号。测试结果表明, 信号接口模拟器的模拟电压信号准确, 所设计的控制系统实时性好, 准确性较高。

关键词

二冲程, 发动机控制系统, 硬件在环

Hardware-in-the-Loop Research on Control System of Two-Stroke Spark Ignition Heavy Fuel Engine

Haojie Yang, Xiuchao Bao*, Longhui Zhang, Yang Hu

School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu Sichuan

Received: August 23, 2025; accepted: September 13, 2025; published: September 25, 2025

Abstract

With the continuous development of electronic information technology and modern control theory,

*通讯作者。

文章引用: 杨豪杰, 暴秀超, 张龙辉, 胡洋. 二冲程点燃式重油发动机控制系统硬件在环研究[J]. 动力系统与控制, 2025, 14(4): 316-326. DOI: 10.12677/dsc.2025.144032

the requirements for precise engine control have become increasingly stringent. Addressing the requirements of the engine control system, a two-stroke engine model was constructed using GT-Power software. Through comparative verification, the maximum error in power performance was found to not exceed 5%. And combining the already designed engine ECU controller based on the MC9S12XS128 main control chip with the application layer control software built in the Simulink software environment, co-simulation of the GT-Power engine model with the application-layer control software was conducted, providing preliminary verification of the control software and establishing a foundation for the subsequent design and optimization of control strategies. To further validate the practical performance of the control system, a hardware-in-the-loop (HiL) platform for the engine control system was built. This platform was used to test the simulated voltage signals of the signal interface simulator and the control signals of the engine ECU controller, respectively. The test results show that the simulated voltage signals from the signal interface simulator are accurate, and the designed control system exhibits good real-time performance and high accuracy.

Keywords

Two-Stroke, Engine Control System, Hardware-in-the-Loop

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. 引言

目前, 随着电子信息技术和现代控制理论持续发展, 对发动机精确控制的要求愈发严苛。我国小型二冲程航空重油发动机及其控制系统领域, 因面临国外技术封锁, 亟待自主研发成熟、稳定的产品。空气辅助燃油喷射技术具备独特优势, 能灵活实现缸内直喷, 并对分层燃烧进行精准控制。这一技术优势, 或将为我国小型二冲程点燃式重油发动机控制系统的自主研发, 提供可行的技术路径。因此, 为保证小型重油发动机稳定运行, 提升动力性, 开发精确可靠的控制系统是必不可少的重要一环[1]-[3]。

点燃式活塞发动机常用燃料为汽油, 通过对比汽油和航空重油的理化特性。可知目前限制航空重油活塞发动机发展的技术难点主要有两方面: 一方面, 航空重油与汽油相比, 具有辛烷值低、自燃温度低的特点, 导致其爆震倾向明显, 限制发动机功率输出; 另一方面, 航空重油饱和蒸气压低、运动黏度高, 导致其蒸发性能差、雾化困难, 由此带来航空重油活塞发动机起动困难、油耗增加等问题, 除了重油燃料本身的特性对应用于点燃式活塞发动机上带来的技术难点外, 活塞式发动机本身的工作模式导致的功率下降问题也是一大难点, 总结包括燃油供应和雾化技术、快速冷启动技术、重油爆震抑制技术、高空增压功率恢复技术等[4]。

在发动机控制系统研究领域, 南京航空航天大学聚焦于航空发动机领域常用的数字信息处理技术以及 VXWorks 实时平台展开了深入探究。该校借助 MATLAB 软件及其自动代码生成功能, 针对机载嵌入式控制算法的快速开发这一关键方向开展了系统性研究[5]。在 ISO 26262 标准框架下, 龚鸿炜等人着手开发空气辅助喷射发动机电控系统, 充分考虑了软件上的安全性以及可扩展性[6][7]。李鸿研究团队搭建二冲程直喷燃油发动机模型, 围绕发动机空燃比控制方法展开研究。研究发现, 所设计的控制器能够实现对空燃比的控制, 满足基本控制要求, 但控制过程中产生的误差较大, 在一定程度上限制了该控制器在精准调控场景下的应用[8]。此外, 为了促使发动机控制器得以快速开发, 同时确保控制策略能得到有效验证, 柯昶研究团队运用 MotoTron 快速控制原型平台, 开发出一套可运用 8 缸机程序对 4 缸机实施控

制的控制器。并通过一系列验证测试，充分证明了该控制器在实际应用中的可靠性[9]。胡春明研究团队聚焦二冲程航空活塞发动机开展研究工作，构建发动机模型与空燃比控制模型。通过运用递归神经网络对进气量予以预测，同时依据喷油模型，针对发动机在瞬态工况时的空燃比控制展开了深度探究。此次研究致力于在复杂的瞬态工作状态下，实现对二冲程航空活塞发动机空燃比的精准调控，有望为该领域的技术革新提供新的理论与方法支撑[10]。张丁根研究团队改进了小型二冲程航空汽油发动机的电控系统的控制策略，使其更为精准控制发动机的喷油点火[11] [12]。

综上所述，国内航空重油发动机控制研究刚起步，仅实现基本控制功能，技术深度和广度有待提升。因此，需搭建更精准、实时的二冲程发动机模型，开发控制器软硬件优化控制，通过硬件在环测试验证。在此基础上，开发具备二次开发功能的空气辅助喷射小型二冲程点燃式重油发动机控制系统意义重大。

2. 发动机模型搭建及其联合仿真

本文应用 GT-SUITE 系列软件之一的 GT-Power 软件搭建发动机模型，发动机仿真模型与发动机真实台架实验相比具有如下优势[13]：

- 1) 代替许多难以实施或无法实施的实验。
- 2) 解决一些大型的复杂的系统问题。
- 3) 节约研发成本。
- 4) 避免在实际的实验过程中对人体和财产造成伤害。

根据已有原型机参数数据，选取建模所需的部分，为后面建模做数据准备，下表 1 为主要建模参数。

Table 1. Main geometric parameters of the prototype

表 1. 原型机主要几何参数

参数名称	参数值
排量/cc	75
冲程/mm	40
缸径/mm	49
连杆/mm	76.55
压缩比	8.4
功率/kw	3.3
扭矩/n·m	5.59

2.1. 发动机模型搭建

根据原型机的数据，需要对气体环境、进排气管道及接头、发动机结构参数、燃烧及传热、摩擦损失等进行设置。其中，为了能够准确模拟发动机进气、燃烧对发动机动力性的影响，需要对进排气口模块、曲轴摩擦损失模块、燃烧及传热模块等进行具体参数设置。模型中气缸内工作过程采用零维模型；管道内的流动采用一维非定常流动模型；燃烧模型采用点燃式韦伯模型；传热模型采用半经验公式 Woschni 模型；扫、排气口的流通面积和开启关闭正时根据实体发动机测量计算获得。

在设置完成后，连接各模块，构建起 GT-Power 一维性能仿真模型。图 1 所示即为本次研究搭建的发动机一维性能仿真模型，该模型将为后续开展发动机动力性能分析，提供直观、有效的数据支持与模拟依据[14]。

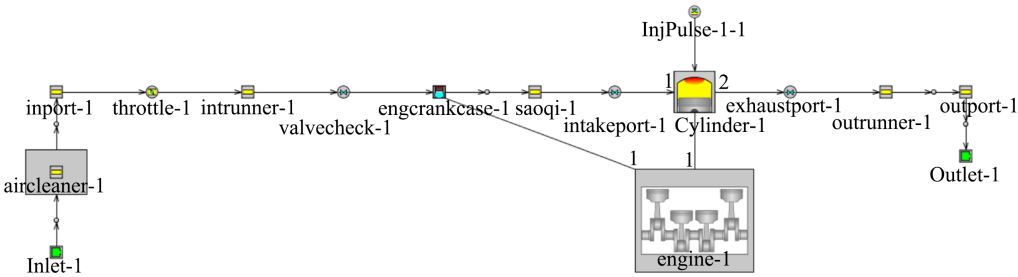


Figure 1. GT-Power engine simulation model
图 1. GT-Power 发动机仿真模型

2.2. 发动机模型验证

在完成整机仿真模型的搭建后，有必要将模型仿真结果与发动机台架试验的实测数据进行对比分析，以此验证模型的正确性。为有效验证所搭建的发动机模型的准确性，利用所建立的发动机模型，对节气门开度 50%、转速在 3000 rpm 至 5500 rpm 范围内的 6 个稳态工况点展开仿真计算。随后，将各工况下仿真模型输出的扭矩和功率，与原型机对应的发动机扭矩和功率进行对比分析，具体结果如图 2 和图 3 所示。对比结果表明，发动机仿真模型在扭矩和功率方面，整体偏差能够控制在 5% 的误差范围内。这一结果充分说明，所搭建的发动机模型能够模拟发动机实际动力性能，该模型可进一步应用于联合仿真计算，为后续深入研究发动机性能提供可靠的支持。

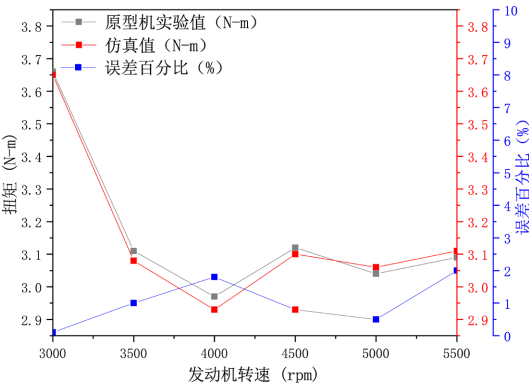


Figure 2. Engine torque comparison results
图 2. 发动机扭矩对比结果

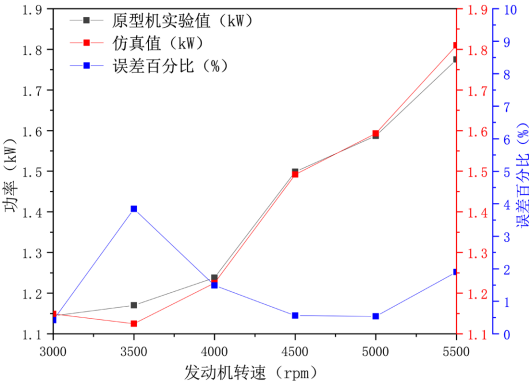


Figure 3. Engine power comparison results
图 3. 发动机功率对比结果

2.3. 发动机模型与应用层控制软件联合仿真

Simulink 作为一款功能强大的动态系统建模工具，在发动机应用层控制软件开发中得到广泛应用。GT-Power 通过自带模块，预留了与 Simulink 的联合仿真接口。在连接过程中，发动机模型的信号借助传感器、执行器，经 GT-Power 软件中的 SimulinkHarness 模块传输至 Simulink 控制模型，实现发动机模型与应用层控制软件的联合计算，如图 4 和图 5 所示。这一联合仿真框架，为发动机控制策略的研发和验证提供了高效、安全的技术路径，有助于优化发动机控制系统设计，提升系统性能与可靠性。

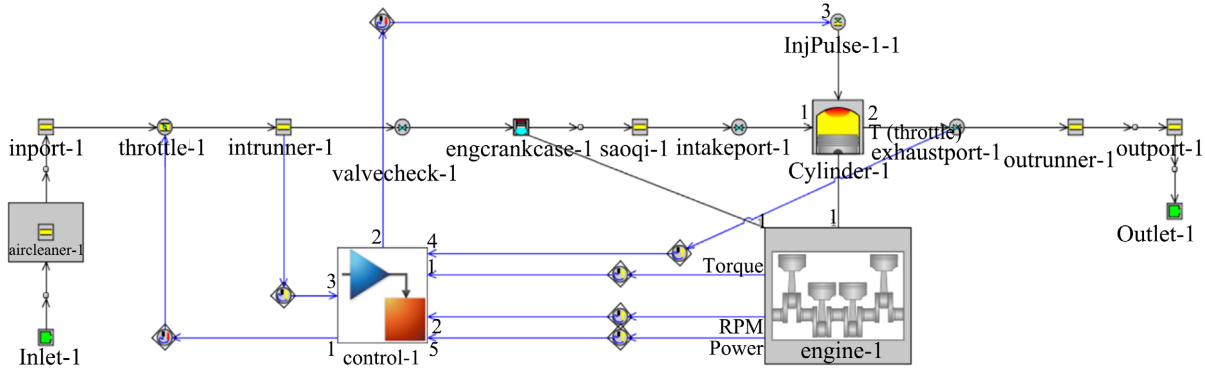


Figure 4. GT-Power co-simulation interface configuration
图 4. GT-Power 联合仿真接口配置

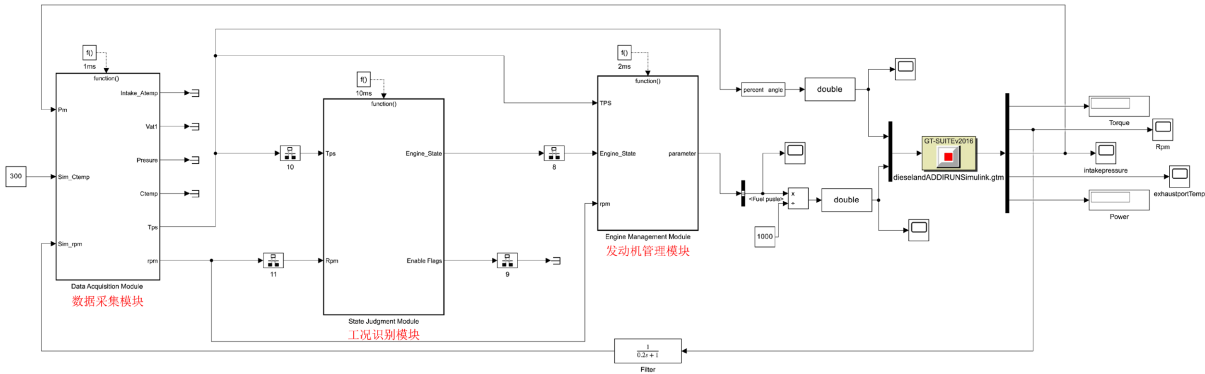


Figure 5. Simulink co-simulation interface configuration
图 5. Simulink 联合仿真接口配置

以搭建好的怠速工况控制模型为例，在将联合仿真接口配置好并进行连接后，对上文所搭建的 PID 闭环控制模型进行发动机怠速稳定性验证。由于条件有限，在怠速工况仿真中实际只对喷油量和节气门开度进行了修正，实现基本转速控制。设置目标转速为 2300 rpm，仿真时间为 10 s，如图 6 所示，为转速 PID 闭环控制曲线。仿真结果如下：发动机起动转速为 900 rpm，经 PID 控制后，峰值转速为 2320 rpm，最后转速稳定在 2304 rpm。因此，所使用的 PID 控制响应速度较快，稳态误差仅 0.17%，超调量 < 1%，可用于控制怠速工况的发动机转速。

3. 发动机控制系统硬件在环验证

3.1. 发动机控制系统硬件在环平台搭建

本文对信号接口模拟器的硬件部分完成了设计，如图 7 所示为本文所设计的信号接口模拟器框架图。

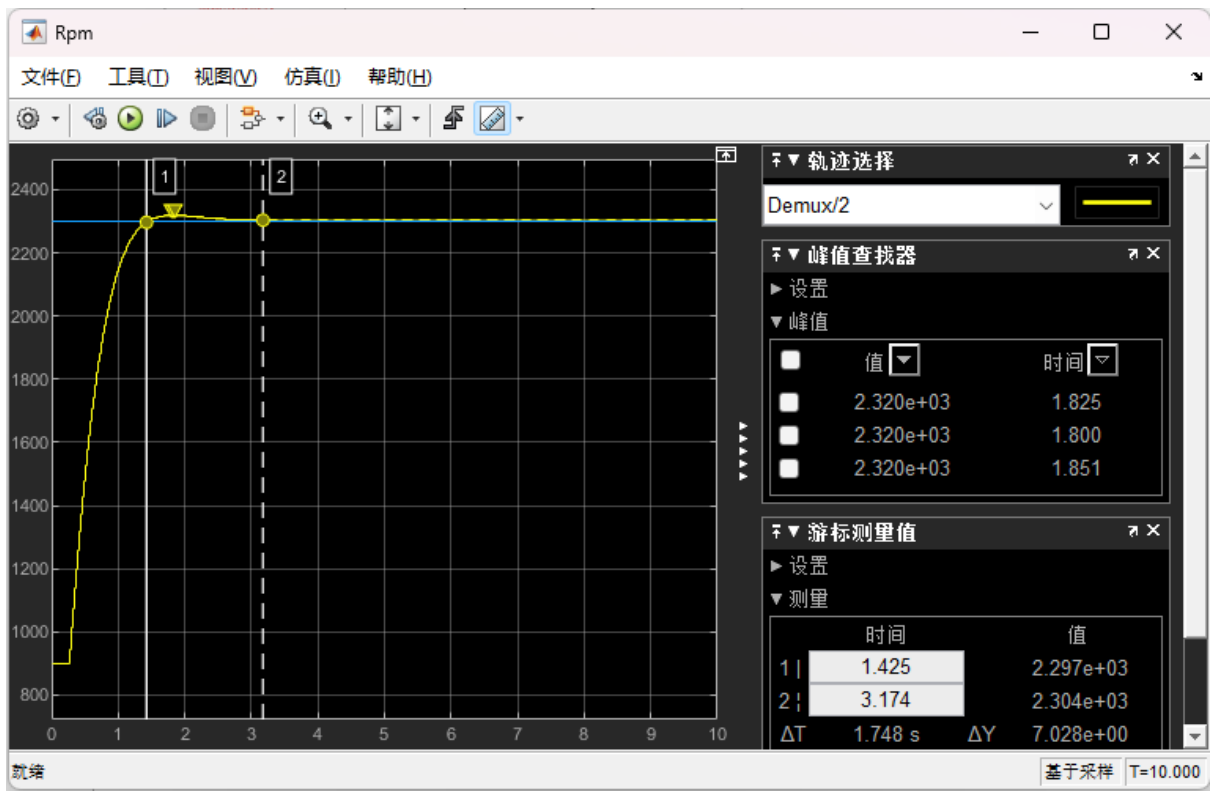


Figure 6. Joint simulation speed PID control verification
图 6. 联合仿真转速 PID 控制验证

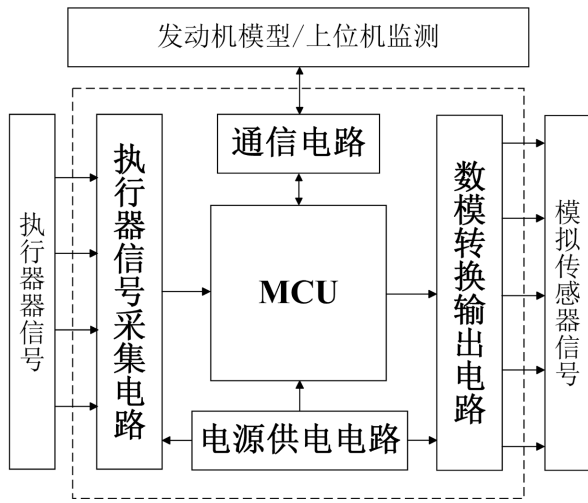


Figure 7. Signal interface simulator framework diagram
图 7. 信号接口模拟器框架图

要实现模拟传感器输出电压信号和采集执行器信号的功能,还需要在 Codewarrior 编译器手写适配的软件代码实现,运行流程如图 8 所示。信号接口模拟器的主要软件编写部分包括 CAN 模块的设置和模拟传感器输出设置。其中, CAN 接收模块将 Kvaser 传入的各传感器信号进行解析, CAN 发送模块将采集的执行器信号的脉宽值传回给发动机模型和上位机进行监测;模拟传感器输出设置主要对 DAC8554 芯片寄存器数据、输出电压值修正进行设置。

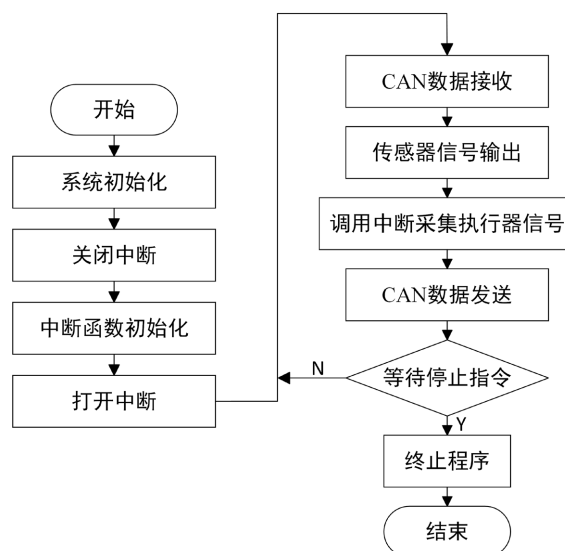


Figure 8. Main code running process
图 8. 主要代码运行流程

完成上述工作后，将发动机 ECU 控制器和信号接口模拟器接入工作电源，待上电正常后，运行发动机模型，通过 Kvaser 发送参数给信号接口模拟器，随后模拟成具体的传感器电压信号发送给发动机 ECU 控制器。发动机 ECU 控制器在接收到输入的传感器电压信号后，会立即启动其内部的处理分析程序，依据预先设定的算法和逻辑，判断发动机当前的运行状态，继而输出具体的执行器驱动信号。最后，执行器驱动信号经信号接口模拟器采集传回发动机模型及上位机软件监测，从而形成发动机控制系统的在环回路，在整个过程中，使用示波器来观察波形信号进行验证。本文将发动机 ECU 控制器、信号接口模拟器、kvaser、发动机模型相连，搭建发动机控制系统硬件在环平台，该平台的搭建为后续对发动机控制系统的台架性能测试、优化和改进提供了一个有效的实验环境，如图 9 所示。

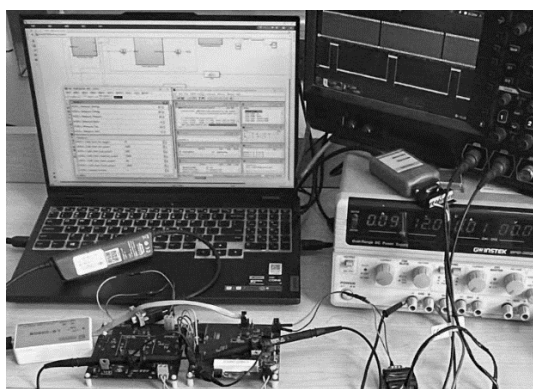


Figure 9. Engine control system hardware-in-the-loop platform device connection diagram
图 9. 发动机控制系统硬件在环平台器件连接图

3.2. 模拟传感器信号验证

借助 Kvaser 设备发送节气门开度、压力、温度等关键参数数值，同时使用万用表电压档，对信号接口模拟器的输出端口进行测量。将信号接口模拟器测量值与对应传感器的理论输出值进行对比，计算误差进行验证。相关测试数据如表 2~4 所示。

Table 2. Throttle opening data comparison**表 2.** 节气门开度数据对比

节气门开度(%)	传感器理论输出值(V)	模拟电压值(V)	误差百分比(%)
10	0.682	0.683	0.15
20	1.109	1.11	0.09
30	1.536	1.537	0.07
40	1.963	1.962	0.05
50	2.39	2.39	-
60	2.817	2.816	0.04
70	3.244	3.245	0.03
80	3.671	3.672	0.03
90	4.098	4.099	0.02
100	4.525	4.526	0.02

Table 3. Intake pressure data comparison**表 3.** 进气压力数据对比

进气压力值(KPa)	传感器理论输出值(V)	模拟电压值(V)	误差百分比(%)
10	0.4	0.401	0.25
20	0.805	0.808	0.37
30	1.21	1.215	0.41
40	1.615	1.61	0.3
50	2.02	2.021	0.05
60	2.425	2.426	0.04
70	2.83	2.833	0.11
80	3.235	3.236	0.03
90	3.64	3.645	0.14
100	4.045	4.046	0.02

Table 4. Comparison of intake and cylinder head temperature data**表 4.** 进气、缸盖温度数据对比

温度(℃)	传感器理论输出值(V)	模拟电压值(V)	误差百分比(%)
30	3.09	3.096	0.19
50	2.12	2.121	0.05
70	1.32	1.321	0.08
90	0.79	0.791	0.13
110	0.47	0.471	0.21

由图中数据可知, 信号接口模拟器的电压输出值与相应传感器的理论电压输出值高度相符。细微偏差的产生, 推测源于测量仪器精度局限、环境因素干扰或其他信号的交叉影响。验证结果表明, 电压信号模拟正常, 误差范围被有效控制在 1% 以内。基于上述调试结果, 可以判定信号接口模拟器工作状态稳

定，能够满足本章前文所提出的性能指标要求，可应用于发动机硬件在环仿真系统试验，为后续的系统研究与测试提供可靠的技术支持。

3.3. 控制系统验证

本文依托发动机控制系统硬件在环平台，对控制系统实时性、准确性展开系统性验证。当发动机控制系统的 ECU 控制器接收到转速信号与节气门位置信号后，会基于预设的控制策略向执行器输出相应的控制信号。研究过程中，运用示波器对输出的点火信号、喷气、喷油信号以及对应曲轴位置关系，进行同步观测与对比。通过精确计算示波器所显示的信号参数值，并与理论设定值进行严格比对，从而验证发动机控制系统的稳定性、实时性及准确性。

在进行仿真试验时，选取稳定工况下转速 3000 rpm，节气门开度 20% 为例。由于空气辅助直喷喷嘴的驱动方式为电流驱动，实际测得 Peak 阶段能在 0.5 ms 内使得空气辅助直喷喷嘴完全打开，此驱动电路结构较为简单，容易实现，主要由 IR2104STRPBF 半桥驱动芯片、自举电容、NMOS 管、二极管、下拉电阻、限流电阻构成。采用经典的 Peak&Hold 驱动方式，通过基于转速 RPM 和负荷 Load 等，以曲轴角度为单位动态调整空气喷射的起始角度和持续时间，精准控制喷射相位与时长，使其与燃油喷射和燃烧过程完美协同，改善重油燃烧方面的效益。如图 10 所示为喷嘴控制信号和工作电流示意图，直喷喷嘴首先由驱动程序发出 PWM 信号控制 MOS 管导通，使直喷喷嘴接到升压电源，当直喷喷嘴流过电流达到峰值后，断开 MOS 管一端，此时由蓄电池电源维持电流，单个工作周期结束后，断开 MOS 另一端，直喷喷嘴停止工作。

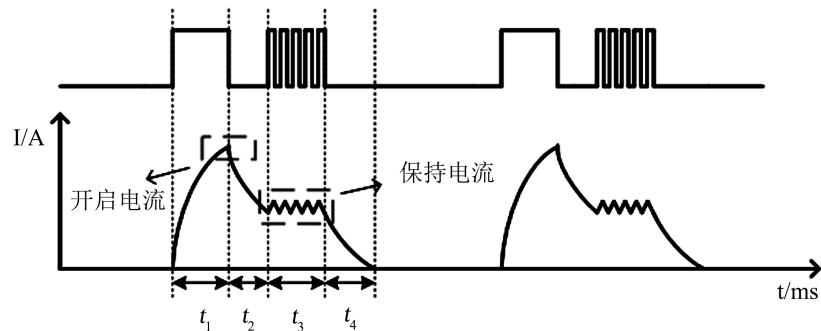


Figure 10. Schematic diagram of working current of direct injection nozzle
图 10. 直喷喷嘴工作电流示意图

因此，基于 MAP 设定点火提前角为 49°、喷气结束角为 60°，点火脉宽 5.55 ms、喷气总脉宽为 1.92 ms (喷气 Peak 脉宽 0.5 ms、喷气 Hold 脉宽 1.42 ms)、油气间隙 2.2 ms。示波器截取曲轴相位信号、点火相位信号、喷油相位信号及喷气相位信号如图 11 所示。以上执行器均由高电平信号控制，通过测量高电平脉宽，可以得出表 5。由表 5 所示，点火参数、喷气参数等实际值与设定值很接近，表明设计的控制系统具有稳定性、实时性及准确性。

Table 5. Control parameter error under the conditions of 3000 rpm speed and 20% throttle opening
表 5. 转速 3000 rpm、节气门开度 20% 工况下控制参数误差

控制参数	目标值	实际值	误差(%)
点火提前角(°)	49	49	-
点火充磁脉宽(ms)	5.55	5.51	0.72

续表

油气间隙(ms)	2.2	2.21	0.45
喷气结束角(°)	60	60	-
喷气总脉宽(ms)	1.92	1.93	0.52
喷气(Peak)脉宽(ms)	0.5	0.5	-
喷气(Hold)脉宽(ms)	1.42	1.43	0.70

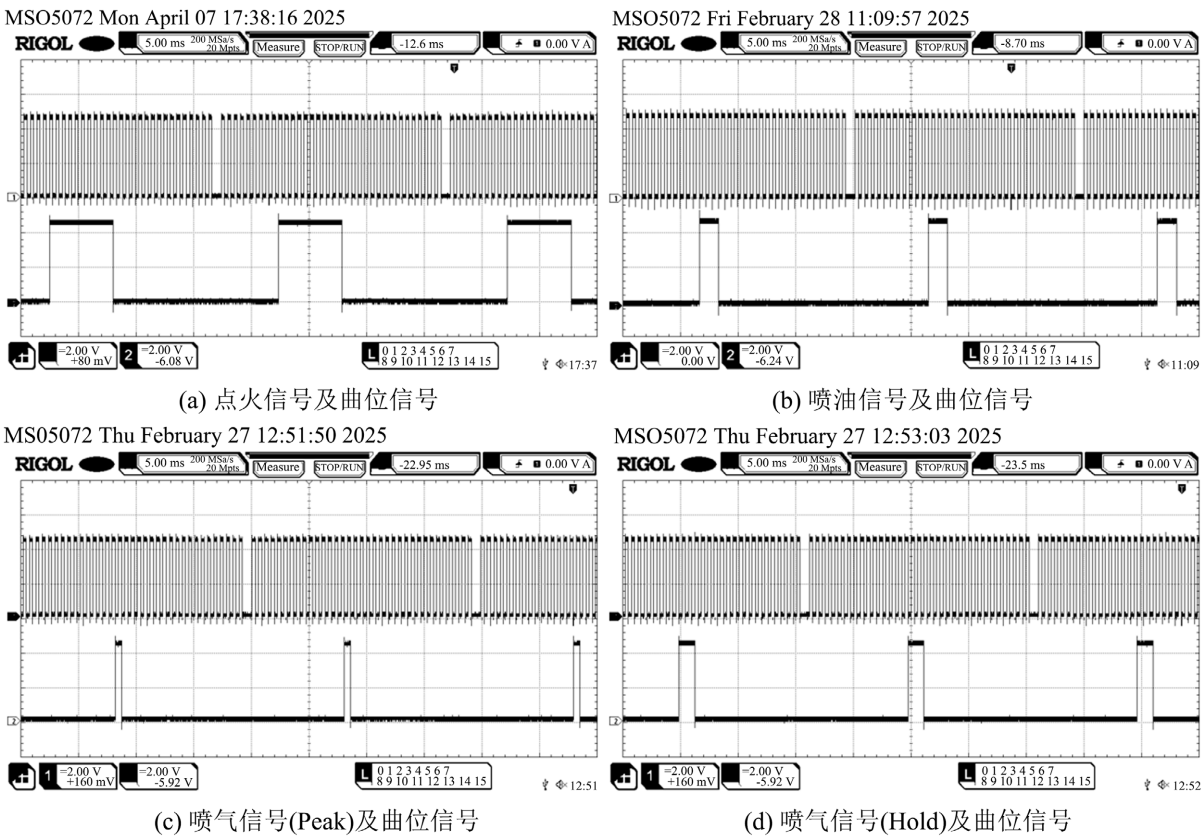


Figure 11. Verification of the relationship between actuator signal and crankshaft position signal
图 11. 执行器信号及曲轴位置信号关系验证

4. 总结与展望

本文针对基于空气辅助缸内直喷的小型二冲程点燃式重油发动机控制系统的需求,利用 GT-Power 仿真软件搭建二冲程发动机模型,并在此基础上,搭建发动机控制系统硬件在环平台验证控制系统的可行性和准确性。主要工作总结如下:

- 1) 根据基于空气辅助缸内直喷的小型二冲程点燃式重油发动机的原型机试验数据,搭建 GT-Power 发动机模型,并通过原型机台架数据验证,动力性误差 $\leq 5\%$ (扭矩和功率),为控制策略开发提供了可靠性基础。
- 2) 首次集成 GT-Power 发动机模型与 Simulink 应用层控制软件,实现闭环联合仿真。验证了 PID 怠速控制算法的有效性,使其稳态误差仅有 0.17%,超调量 $< 1\%$ 。
- 3) 自主开发硬件在环平台,设计了基于 MC9S12XS128 的 ECU 控制器及信号接口模拟器,构建完

整 HiL 系统; 并验证传感器信号模拟精度误差 $\leq 1\%$, 包括节气门开度、温度和压力等信号, 执行器控制信号实时性误差 $\leq 0.7\%$, 包括点火和喷气脉宽等信号, 证实了系统实时性与准确性。

但同样本文仍存在一定的局限性与未来展望。本文所研究模型仅验证了稳态工况, 转速限于 3000~5500 rpm, 未覆盖瞬态工况, 如加减速、负载突变等工况, 后续可扩展 HiL 验证维度, 增加高动态工况测试, 并可集成故障注入功能, 验证系统鲁棒性; 其次, 硬件平台采用的芯片基础简单, 可采用多核处理器提升实时性, 支持更复杂控制算法, 并增强信号模拟器抗干扰能力, 适应航空复杂电磁环境。

参考文献

- [1] 乐文, 张哲, 甘斌林. 点燃式航空重油活塞发动机关键技术概述[C]//中国航天第三专业信息网, 中国航天科工集团有限公司, 中国航天科技集团有限公司, 洛阳市人民政府. 中国航天第三专业信息网第三十九届技术交流会暨第三届空天动力联合会议论文集——S03 吸气式与组合推进技术. 北京: 北京动力机械研究所, 2018: 332-340.
- [2] 魏民祥, 张凤娇, 王永伟, 等. 空气辅助缸内直喷发动机 ECU 设计与试验研究[J]. 公路与汽运, 2014(6): 1-4.
- [3] Zhang, T.Y., Zhang, F.J. and Zheng, P. (2019) Development of Electronic Control System and Experimental Study on Air-Assisted Fuel Injection Engine. *Proceedings of the 8th International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications*, Osaka, 16-19 March 2019, 99-104. <https://doi.org/10.1145/3323716.3323728>
- [4] 赵振峰, 王蕾. 航空重油活塞发动机技术难点与发展启示[J]. 航空动力学报, 2024, 39(4): 156-169.
- [5] 王建锋. 航空发动机快速控制原型与实时仿真技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [6] 龚鸿炜. 空气辅助喷射二冲程发动机电控系统平台开发[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [7] 周宇. 基于 ISO 26262 标准的空气辅助喷射发动机电控系统功能安全设计[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [8] 李鸿, 黄英, 赵振峰, 岳芸鹏, 王绪. 2 冲程直喷煤油发动机空燃比控制方法[J]. 航空发动机, 2021, 47(S1): 85-92.
- [9] 柯昶, 黄英, 赵振峰, 韩恺, 李鸿. 基于 MotoTron 平台的二冲程煤油发动机控制器开发[J]. 航空动力学报, 2020, 35(4): 832-843.
- [10] 胡春明, 张波, 刘娜, 宋玺娟, 杜春媛. 二冲程航空活塞发动机空燃比控制[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2757-2765.
- [11] 张丁根. 小型二冲程航空汽油发动机电控系统的设计[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 中原工学院, 2023.
- [12] 张丁根, 但永平, 刘冲. 小型二冲程航空汽油电喷发动机电控系统的设计[J]. 电工技术, 2023(12): 7-10.
- [13] 陈林林. 二冲程煤油发动机性能数值模拟与喷油控制研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [14] 姜峰, 袁旭辉, 胡玲玲, 等. 基于 GT-Power 对汽油机不同负荷运行特性的仿真分析[J]. 广西科技大学学报, 2025, 36(1): 1-7, 14.