

喷油器电磁阀电流反馈驱动控制研究

刘 鹏

(海军驻洛阳四〇七厂军事代表室, 河南 洛阳 471039)

摘 要: 采用 Simulink 建立了喷油器电磁阀的数学模型, 根据电流反馈控制思路开展喷油器驱动控制技术研究。设计了电流反馈控制型高低压分时驱动电路, 并采用 Multisim 软件对该驱动电路进行仿真。仿真结果表明: 该电路可通过峰值电流、维持电流反馈回路自动控制驱动电流的大小。针对某型喷油器进行了驱动试验, 结果表明: 喷油器电磁阀模型准确, 电流反馈控制驱动电路性能优良。

关键词: 共轨喷油器; 电磁阀; 驱动控制; 电流反馈

中图分类号: TK423.8⁺4; **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)03-0017-04

Research on Current Feedback Driving Control of Injector Solenoid Valve

Liu Peng

(Military Representative Office of Navy in 407 Factory, Henan Luoyang 471039)

Abstract: The mathematical model of injector solenoid valve was established using Simulink, and the method of current feedback control was applied to research the injector driving control technology. The high and low voltage time-sharing driving circuit was designed with current feedback control technology, and using Multisim to simulate the driving circuit. The simulation results show that the driving current can be adjusted automatically according to the pre-set peak current and holding current feed back circuit. The driving experiment on certain injector were carried out. The experimental result verifies the precision of the model of injector solenoid valve and good performance of driving circuit.

Key words: common rail injector; solenoid valve; driving control; current feedback

0 引 言

电控喷油器结构复杂, 涉及到电、磁、液力和机械等多个学科, 其中, 控制燃油喷射开始和结束的控制电磁阀对喷油器的运动特性具有重大影响^[1]。电磁阀可靠动作是保证灵活、精确控制喷油的关键, 其工作须要阀体、线圈和驱动电路的完整配合, 因此, 性能优异的驱动电路是电磁阀正常工作的前提。

目前, 设计喷油器电磁阀驱动电路时多采用开环控制技术, 通过微控制器直接发出 PWM (脉冲宽度调制) 信号控制电磁阀的开闭。由于电磁阀

的电磁力与驱动电流直接相关, 若采用开环控制, 驱动电流易受驱动电压影响; 此外, 电磁阀电参数的偏差, 也会导致喷油量不一致^[2]。因此, 有必要在电磁阀的驱动回路中引入电流反馈, 提高驱动电流的一致性, 增强驱动电路的可靠性。

本文首先分析喷油器电磁阀的原理并建立数学模型; 然后针对电流反馈控制的思路, 通过 Stateflow 建立状态图模型, 在此基础上, 设计基于电流反馈控制的高低压分时驱动电路; 最后通过试验测试驱动电路的性能。

1 喷油器电磁阀数学模型

本文按照电磁阀结构将其划分为：电路子系统、磁路子系统、机械运动子系统和液力子系统，各子系统的相互联系如图 1 所示。电路子系统通过 $d\varphi/dt$ 决定磁路子系统的变化，磁路子系统的变化又影响电路子系统电流 i 的变化；机械子系统决定于磁路子系统的电磁力 F_{mag} 和液压子系统的液压力 F_h ；液压子系统和磁路子系统又与电磁阀衔铁的位移 x 、速度 dx/dt 、加速度 d^2x/dt^2 有关。

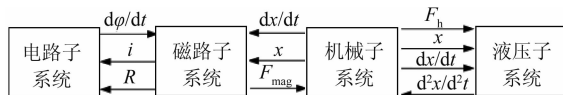


图 1 电、磁、机、液子系统作用图

当外界对截面积为 S_a 的电磁阀线圈励磁时，在线圈上施加的电压 U_c 应与线圈电阻上的压降、磁通 φ 和线圈匝数 N 变化引起的感应电压之和相等，即：

$$U_c = Ri + N \frac{d\varphi}{dt} \quad (1)$$

考虑到线圈与衔铁之间的气隙 δ 、真空磁导率 μ_0 和线圈中电流 i ，线圈通电后产生的电磁力 F_{mag} 为：

$$F_{\text{mag}} = \frac{\mu_0 (iN)^2 S_a}{2\delta^2} \quad (2)$$

电磁阀所受的液压力是控制腔和电磁阀腔燃油对阀芯的液压力，由于电磁阀采用球阀密封，当球阀运行时，出油阀的截面积 A 会发生变化。截面积 A 和液压力 F_h 为：

$$A = \begin{cases} \pi x^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha + \pi d_b x \sin \alpha \cos \alpha, & A \leq A_{\text{out}} \\ A_{\text{out}} = \frac{\pi}{4} d_{\text{out}}^2, & A \geq A_{\text{out}} \end{cases} \quad (3)$$

$$F_h = A |p_{\text{con}} - p_{\text{sol}}|$$

式中： p_{con} 为控制腔压力； p_{sol} 为电磁阀腔内压力； x 为小球位移； d_b 为小球直径； d_{out} 为出油孔直径； α 为球阀座锥面半锥角。

考虑到电磁阀弹簧的预紧力 F_{pre} 和阻尼系数 λ_x ，电磁阀的运动方程为：

$$F_{\text{mag}} - F_{\text{pre}} + F_h - \lambda_x \frac{dx}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (4)$$

综上所述，使用 Simulink 建立电磁阀的数学模型，如图 2。由式 (2) 和图 2 可知，其在运动过程中的电磁力与加载在线圈上的激励电压、线圈截面积和阀芯的位移有关。对于确定的电磁阀，线圈中电流极大地影响电磁力的大小。

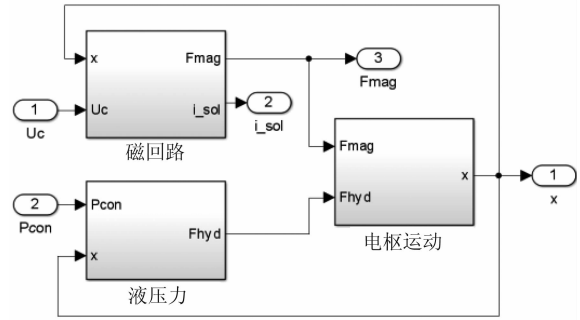


图 2 电磁阀的 Simulink 模型

2 电流反馈驱动控制模型

分析电磁阀的数学模型可知：对于确定的电磁阀，控制电磁阀工作的关键在于保证线圈产生足够的电流。初始状态，需要较大的电流确保线圈产生足够大的电磁力快速吸合衔铁；当衔铁吸合后，可以适当减小电流降低电源消耗。为达到上述目标，设计采用高低压分时驱动电路，其核心在于在不同阶段给线圈提供不同的激励电压，从而获得“峰值-维持”电流。典型的驱动电路如图 3 所示。

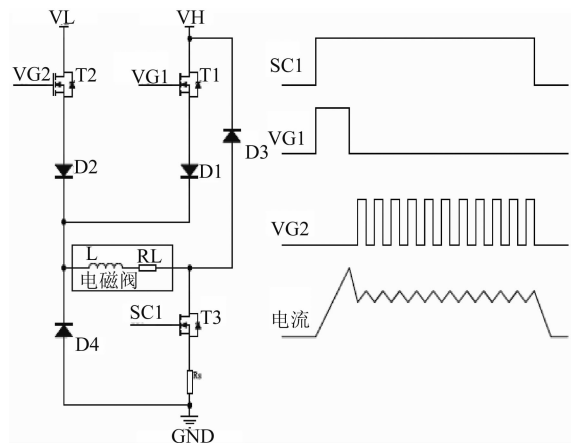


图 3 典型的高低压分时驱动电路示意图

为达到自动控制电流大小，产生“峰值-维持”电流的目的，考虑将线圈中的电流实时反馈给驱动电路。图 4 是利用 Simulink 设计的驱动电路模型与电磁阀数学模型连接后的效果图；图 5 是控制信号和线圈电流以及球阀升程的仿真结果。

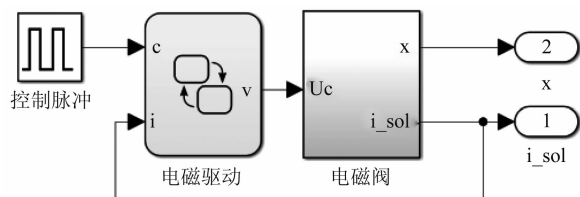


图 4 电磁阀驱动模型

由图 5 仿真结果可知，基于 Stateflow 设计的电

电磁阀驱动电路状态转换模型是可行的, 为后续设计驱动电路指明了技术方向。

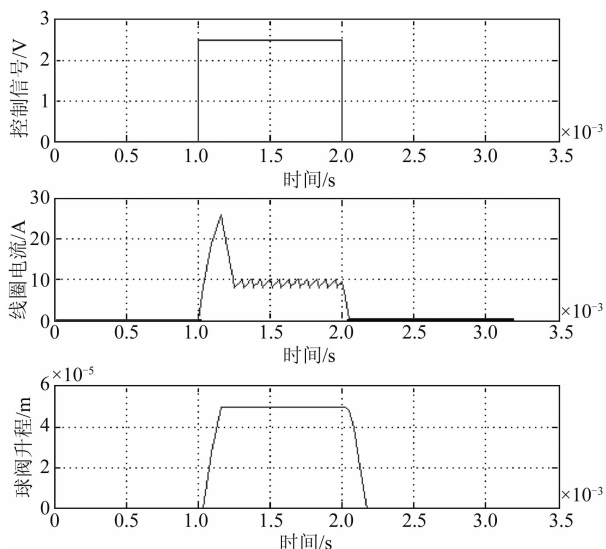


图5 电磁阀驱动仿真结果

3 电流反馈控制电路设计

为实现电磁阀的高低压分时驱动, 在一次喷油持续期内分时提供高电压 (通常为 80 ~ 110 V) 和低电压 (通常为 24 V), 因此, 须首先解决驱动电路中高压电源。BOOST 升压式 DC-DC 变换器可将较低的直流电压转换为较高的直流电压, 并且输出稳定, 响应快速, 节能效果明显^[3]。本文设计了可控的 BOOST 升压电路, 图 6 是其原理图。该升压电路的特点是: 可在驱动电磁阀工作期间不工作以降低电磁干扰^[4], 驱动结束后快速恢复到目标电压, 从而保证多次喷射的驱动需求。

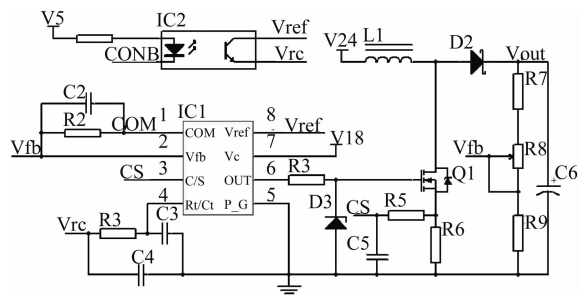


图6 BOOST 升压电路原理图

喷油器工作时, 由于电磁阀维持电流是通过一定频率控制开关管的通断实现的, 考虑使用比较器控制开关管工作。为降低开关管工作频率和电路功耗, 采用双门限比较器。

图 7 是基于电流反馈控制的高低压分时驱动电路。两个高位开关管 Q2 和 Q3 选用了 MOSFET, 采用自举电路浮动驱动技术。Vs 是电磁阀驱动电

流的采样电压, 输送给两个比较器 U1A 和 U1B。U1A 及 R10、R11、R12 组成了控制峰值电流的双限比较器。初始状态, Vs 为零, 当控制信号 CON 为高电平时, U1A 输出高电平 VHO, 开关管 Q2 导通, 电磁阀接通高压 VH, 电流快速上升。当驱动电流超过预设的峰值电流后, U1A 输出翻转为低电平, 开关 Q2 关闭, 电磁阀断电。U1B 及 R14 ~ R18 组成了控制维持电流的迟滞比较器。

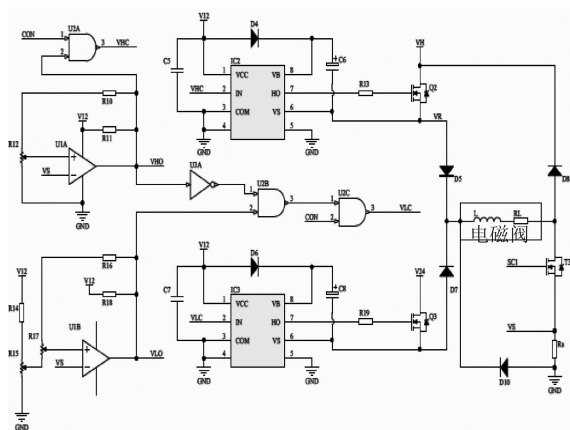


图7 基于电流反馈控制的驱动电路部分原理图

在图 7 中, 通过 R15 可调整维持电流的大小, 通过 R17 可调整 U1B 翻转的电压范围, 从而控制维持电流波动的上下限 (其意义在于: 可保证在维持电流条件下适当降低 Q3 的开关频率, 有利于降低 Q3 的功耗, 提升驱动电路的可靠性)。

图 8 是使用 Multisim 对高低压分时驱动电路进行仿真的结果。

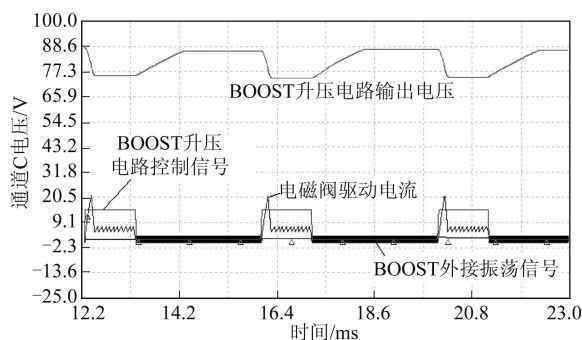


图8 基于电流反馈控制的驱动电路仿真

由图 8 可知, 设计的升压电路和高压分时驱动电路能够达到预期目的, 升压电路效果明显, 电磁阀获得了“峰值-维持”电流波形。

使用该电路时, ECU 只须发出一个喷油器电磁阀的控制信号 (图 7 中的 CON), 通过调整 R12、R15 和 R17, 驱动电路即可自动产生需要的“峰值-维持”电流, 提高了驱动电路的抗干扰性。

4 驱动电路试验研究

借助测试仪器 Tektronix TDS 2024C, 针对某型喷油器开展了驱动电路性能测试。通过调整图6中的可变电阻 R8, 将 BOOST 转换电压设定为 85 V; 通过调整图7中电位器 R12 和 R15, 将电磁阀峰值电流设定为 23 A, 维持电流设定为 9 A。驱动测试结果见图9。

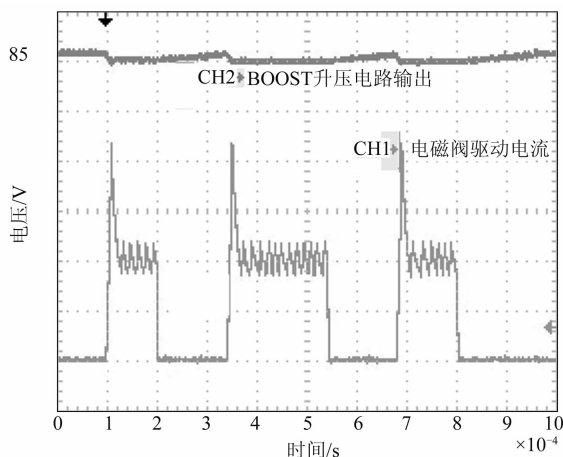


图9 高低压分时驱动电路测试结果

图9中, CH2 表示 BOOST 升压电路的电压变化 (目标电压为 85 V); CH1 是驱动回路中 $0.1\ \Omega$

采样电阻上的电压, 100 mV 代表 1 A 驱动电流。测试结果表明: 电磁阀通电后, 驱动电流达到 23 A 时 BOOST 电压下降了 5 V 左右; 当电磁阀断电后, 电压 0.6 ms 后即恢复到 86 V, 达到预期目标。

5 结 论

通过分析喷油器电磁阀数学模型, 开展了以电流为目标的驱动控制理论研究。借助仿真软件设计了采用电流反馈控制的高低压分时驱动电路, 并获得了满足要求的驱动电流。试验结果表明: 所设计的驱动电路达到了预期目标。

参考文献

- [1] 安士杰, 欧阳光耀. 电控喷油器控制电磁阀理论与试验研究 [J]. 内燃机学报, 2003, 21 (5): 356-360.
- [2] 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.
- [3] 刘仁喜. 高压共轨电控系统喷油器驱动电路优化 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [4] 丁珏, 曾伟, 沈妍, 等. 共轨电控单元新型升压及电流闭环控制电路设计 [J]. 现代车用动力, 2012 (1): 46-50.

(上接第9页)

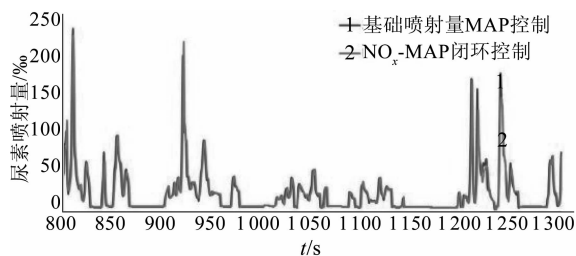


图11 WHTC 试验尿素喷射量 (PWM) 过程数据

4 结 论

本文提出的基于 NO_x -MAP 的 SCR 闭环控制方法是在柴油机各工况点依次增加尿素喷射量, 找出催化器下游 NO_x 最小值及与之对应的尿素喷射量, 分别形成柴油机全工况目标 NO_x -MAP 图和基础尿素喷射量 PWM-MAP 图; 依据催化器 NO_x 转化率特性曲线确定温度修正系数 T-MAP 图; 通过 PID 控制算法计算尿素喷射量校正值, 在对应工况尿素

喷射量的基础上进行校正, 实现对与 NO_x 去除量相适应的尿素喷射量的精确控制。从而达到了有效降低 NO_x 排放的同时减少因不恰当的尿素喷射导致的 NH_3 逃逸的目的, 使车用柴油机 NO_x 排放值满足国六标准。

参考文献

- [1] 环境保护部大气环境管理司. 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法 (中国第六阶段) (征求意见稿) [R]. 2016.
- [2] 胡静, 赵彦光, 陈婷, 等. 重型柴油机尿素-SCR 闭环控制系统的研究 [J]. 汽车工程, 2011, 33 (6): 482-485.
- [3] 李朋. 柴油机 SCR 系统闭环控制研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [4] 张涛. 机电控制系统 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.