

基于自举电路的共轨喷油器驱动电路优化设计*

郭树满^{1,2} 苏万华¹ 刘二喜¹ 陈礼勇¹

(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072; 2. 华北水利水电学院机械学院, 郑州 450011)

【摘要】 共轨柴油机电控喷油器电磁阀的驱动电路一般采用 Peak & Hold 驱动方式, 在不同的阶段对电流变化的快慢要求不同。为满足喷油过程中对电流的变化要求, 从理论上分析电路的状态响应特性, 优化电磁阀驱动电路, 以提高电磁阀的响应速度, 设计了基于自举电路的喷油器驱动电路。试验结果表明, 在相同的驱动参数下, 优化后的驱动电路在喷油过程中保持阶段电流的波动幅值减小 50%, 而喷油器关闭过程的响应时间只需 20 μs, 实现了精确控制喷油量和喷油定时的目的。

关键词: 共轨柴油机 电控喷油器 电磁阀 续流电路 自举电路

中图分类号: TK423.8⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0011-05

Optimization Design of Common-rail Injector Driving Circuit
Based on Bootstrap Circuit

Guo Shuman^{1,2} Su Wanhua¹ Liu Erxi¹ Chen Liyong¹

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China 2. Department of Mechanical Engineering, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract

The driving mode of Peak & Hold current shape is adopted in common rail diesel electronic control injector driving circuit. The requirements of current change are different in different stages. In order to meet the changes in the injection process, the state responses characteristics of the circuits to optimize the circuit and improve the response speed of electronic valve were analyzed theoretically. The driving circuit was designed based on the bootstrap circuit. The results showed that the fluctuations amplitude of the current in the hold stage reduced by 50% under the same driving parameters in the optimized circuit, and the response time was only 20 μs in the injector closing process, which realized the purpose of precise control of the injection quantity and injection timing.

Key words Common rail diesel, Electronic control injector, Solenoid valve, Freewheeling circuit, Bootstrap circuit

引言

共轨式电控燃油喷射系统是通过驱动电路对喷油器高速电磁阀进行控制实现对喷油量、喷油定时和喷油速率的控制, 实现柴油机排放性能、动力性能和经济性能的最佳匹配。因此, 喷油器驱动电路响应快慢影响着控制精度, 从而影响着发动机的性能。

为了满足高速电磁阀在喷油过程中的响应特性, 理想喷油器驱动电路是采用 Peak & Hold 驱动方式^[1], 有不同的驱动电路可实现这种驱动方式^[2~8]。

本文根据喷油过程中对电流的变化要求来优化喷油器驱动电路, 在不提高 PWM 频率的情况下, 减小保持阶段电流的波动, 同时优化续流电路, 提高电磁阀的关闭响应特性, 实现精确控制喷油的目的。

收稿日期: 2011-10-10 修回日期: 2011-12-04

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2007CB210001)

作者简介: 郭树满, 博士生, 华北水利水电学院讲师, 主要从事内燃机电子控制研究, E-mail: guoshuman@eyou.com

1 Peak & Hold 方式对驱动电流的要求

对于 Peak & Hold 驱动方式来说,典型驱动电流如图 1 所示,在喷油器开启阶段,对电磁阀线圈以尽可能快的速率注入峰值电流,使其快速开启。开启后,较小的电流就可以维持其开启的状态,在释放阶段,为了减少电磁阀的释放延时,应快速抑制驱动电流,释放在电磁阀内的电势能,提高控制精度。在喷油过程中不同阶段对电流的下降速率有不同的要求,并不总是越快越好,而是在不同的阶段,期望不同的电流下降速率。

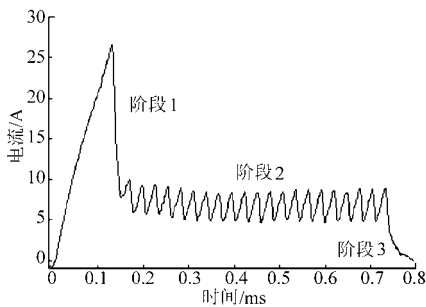


图 1 Peak & Hold 电流波形图

Fig.1 Current waveform of Peak & Hold

当喷油器完全打开后,磁路气隙减小,磁阻降低,仅需较小的电流就可以维持打开状态,过高的电流会导致发热并烧毁喷油器,因此需要将其降低到保持阶段的电流,即如图 1 中阶段 1 所示,该阶段的电流下降速率应尽量缓慢,否则有可能导致喷油器关闭。保持阶段,即图 1 中阶段 2 所示,喷油器电流已下降到一个合适值,需要保持在一个合适范围使喷油持续打开。此时希望电流波动小,较大的波动会导致喷油关闭,所以电流下降速率越小越好。喷油器关闭阶段,即图 1 中阶段 3 所示,此时希望电流下降越快越好,使喷油器迅速关闭,以提高控制精度。所以最理想的喷油器续流电路应当在阶段 1 与阶段 2 中下降速率较慢,在阶段 3 中下降速率要快。电流下降速率快慢取决于喷油器关闭后电磁阀线圈内能量释放的快慢,即续流电路的结构。

2 续流电路优化设计

Peak & Hold 驱动方式的实现方法有单电源法和双电源法^[9~10]。双电源法在开启阶段采用高压驱动,在保持阶段采用 PWM 调节的低压驱动,而低压会随着使用时间的延长,电压有较大的波动从而导致喷油量有变化,为了保持相同的喷油量,需对驱动脉宽进行修正。因此,本文采用 DC/DC 升压后的单电源法驱动,该方法不受电源电压波动的影响,虽然 DC/DC 升压电路要提供全部喷油器驱动的能量,

对喷油放电后的电压恢复响应有更高的要求。但经测试,所开发的控制系统,喷油放电后 DC/DC 电压恢复时间不到 2 ms,电压恢复响应满足高速电控柴油机喷油要求。

2.1 单电源单开关驱动法

单电源法实现 Peak & Hold 驱动的最简单电路如图 2 所示。

二极管 D1 和电阻 R3 组成续流电路,喷油器简化为电感 L 和电阻 R1,R2 为取样电阻。输入由主脉宽、零脉宽和 PWM 波组成的驱动波驱动 MOS 管 Q1 即可,由 KVL 定律和电路初始状态条件可得开启阶段的状态响应方程(忽略 MOS 管导通压降)

$$t = \frac{L}{R_1 + R_2} \ln \frac{U}{U - I(R_1 + R_2)} \quad (1)$$

式中 U ——DC/DC 升压后的电压

L ——喷油器电磁阀电感

关闭响应方程为(电流从 I_a 减小到 I_b ,忽略二极管压降)

$$t = -\frac{L}{R_1 + R_3} \ln \frac{I_b}{I_a} \quad (2)$$

式中 I_a ——关闭前电流 I_b ——关闭后电流

对于特定的喷油器来说, L 和 R_1 均为定值,由式(1)可知随着驱动电压的增大响应加快,因此驱动时一般采用 DC/DC 升压电路驱动,同时减小回路中的电阻也有助于加快响应。

2.2 单电源双开关驱动法

单电源单开关驱动电路在实际中很少采用,一方面喷油器不工作时一直和电源相接,不安全;另一方面,若某驱动通道出现过载等故障时会影响其他控制通道,因此一般采用的驱动电路如图 3 所示。

该电路可以对 Q1 和 Q2 分别输入如图 4a 和图 4b 的驱动波,均可实现 Peak & Hold 驱动。这两种情况电路的响应特性相同,关闭响应方程为式(2)。经测试这种驱动电路的电流变化满足阶段 1

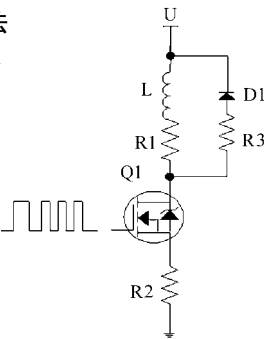


图 2 单电源法驱动示意图

Fig.2 Schematic diagram of single power driving

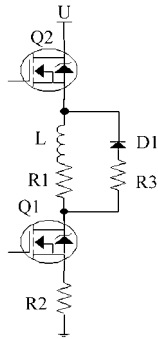


图 3 单电源双开关驱动示意图

Fig.3 Single-supply dual-switch driving schematic

和阶段2,但阶段3响应慢,控制精度差。虽然从式(2)可以看出,增大 R_3 ,关闭响应加快,当 R_3 无穷大,即没有续流回路支路时,响应最快,但此时电感线圈的感应电动势也最大,很可能会造成Q1雪崩式击穿,为此需要增加一些保护措施,又衍生出了其他续流电路。但在这些电路中阶段1和阶段2电流下降较快,在相同的PWM波驱动参数下,保持阶段的平均电流小,虽然可以调整驱动波参数,增大PWM波的频率,减少阶段2电流的波动,但PWM频率过大时,带来电磁干扰,增大元器件的损耗。因此,对图3电路进行改进,改进的电路如图5所示。

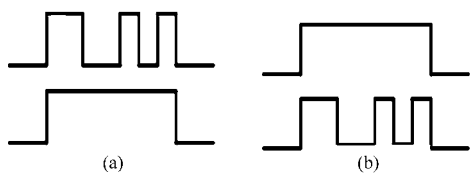


图4 驱动波
Fig.4 Driving waves

D2是为了防止关闭时,续流回路产生负过冲而造成功率驱动芯片自锁。该电路把自感应产生的能量部分释放到DC/DC电源里,此时驱动喷油器刚刚放电,有助于电压的快速恢复。

该电路对Q1和Q2输入不同的波形会有不同的关闭响应特性,当Q1、Q2输入如图4a所示的驱动波时,阶段1和阶段2的关闭响应方程为

$$t = -\frac{L}{R_1 + R_2} \ln \frac{I_b}{I_a} \quad (3)$$

阶段3的关闭响应方程为

$$t = -\frac{L}{R_1 + R_3} \ln \left(\frac{I_b(R_1 + R_3) + U}{I_a(R_1 + R_3) + U} \right) \quad (4)$$

当Q1、Q2输入如图4b的驱动波时,阶段1和阶段2的关闭响应方程为式(2),阶段3的关闭响应方程为式(4)。一般来说,取样电阻 R_2 较小,而 R_3 较大,由式(2)和式(3)可知,当电流由 I_a 下降到 I_b 时,采用如图4a所示的驱动波时,阶段1和阶段2关闭响应慢,电流下降的较缓,电流波动较小,因此采用图4a所示的驱动波较好。由式(4)求得的驱动回路电阻为0.5、2、5和10 Ω ,续流电压 U 从24V到120V时,电流从保持的10A降低到1A所需的时间如图6所示。

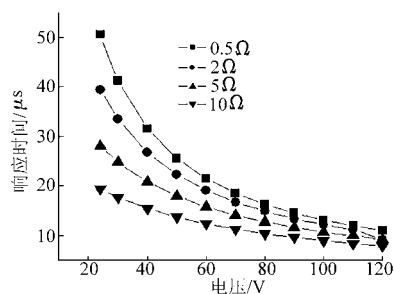


图6 响应特性曲线

Fig.6 Response characteristic curves

由图6可知,电流关断时间主要受续流回路中的能量回馈电压 U 的影响,同时和续流回路中的电阻也有关,回馈电压越大,关断时间越小,而电阻 R_3 越大,关断时间也越小,越有利于电磁阀关断,但这样会增加Q1漏端瞬变电压的峰值。在Q1管关断期间,感应电流回路中,感应电动势 e 为

$$e = -L \frac{di}{dt} = I_0(R_1 + R_3)e^{-(R_1 + R_3)/(Lt)} = e_{\max} e^{-(R_1 + R_3)/(Lt)} \quad (5)$$

式中 I_0 ——初始电流

$e_{\max}$ ——最大感应电动势

在关断的瞬间(即 $t=0$) I_0 取最大值,此时Q1漏端最大电压为

$$V_{\max} = U \left(1 + \frac{R_3}{R_1} \right) \quad (6)$$

为了使Q1关断时漏端电压的峰值不超过漏极-源极电压 $V_{(BR)DSS}$, R_3 须满足

$$R_3 \leq R_1 \left(\frac{V_{(BR)DSS}}{U} - 1 \right) \quad (7)$$

回馈电压越大响应越快,但已确定的驱动电路的驱动电压是固定的,因此可以采用在续流回路中加瞬态电压抑制二极管(TVS)来加速续流能量的快速消耗,续流电路如图7所示。

断开瞬间,电感线圈的反电动势大于钳位值,稳压管导通,电能迅速释放,电动势降低,此阶段响应方程为

$$t = -\frac{L}{R_1} \ln \left(\frac{U + V_c + I_b R_1}{U + V_c + I_a R_1} \right) \quad (8)$$

式中 V_c ——TVS钳位电压

对式(4)和式(8)进行定量分析,由式(8)得到的响应时间明显小于由式(4)得到的响应时间。当

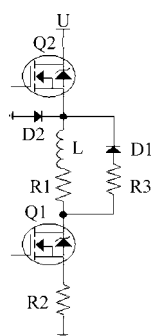


图5 改进后驱动
电路示意图
Fig.5 Schematic diagram
of driving circuit

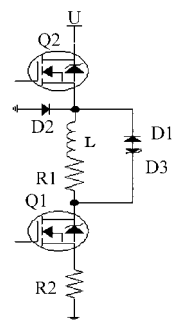


图7 TVS续流电路示意图
Fig.7 TVS freewheeling
circuit schematic diagram

电动势小于钳位值时,TVS 截止,续流电流为零,此时线圈内仍存有能量,但反电动势已降到 Q1 可以承受的范围。当 Q1 再次导通时,线圈能量释放。通过选择 TVS 不同的钳位值,可以确定不同的释放时间,但要考虑 Q1 的漏极-源极间电压 $V_{(BR)DSS}$ 。

3 驱动电路设计

基于以上分析,续流电路采用如图 7 所示的电路,设计时采用基于 IR2101 自举模式的驱动电路,如图 8 所示。

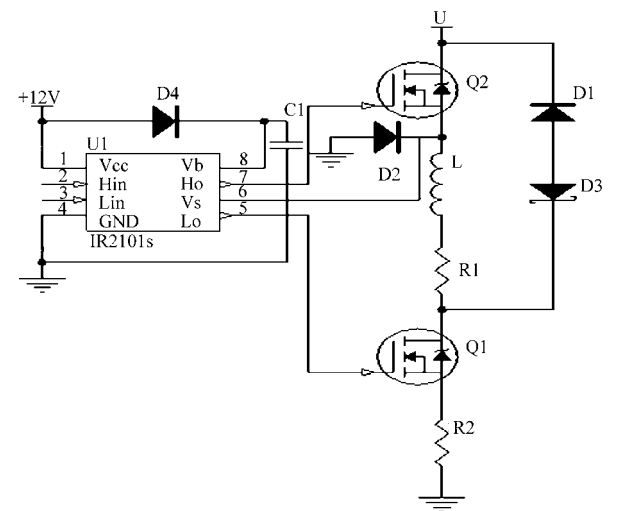


图 8 喷油器驱动电路示意图
Fig.8 Injector driving circuit schematic diagram

Hin 和 Lin 是高端和低端控制的逻辑输入。Ho 为高端 MOS 管 Q2 驱动输出,Lo 为低端 MOS 管驱动输出,C1 为自举电容,D4 为自举二极管,设计时应从功率器件的工作频率、开关速度、门极特性等方面进行选择,计算后调试而定,否则会影响高端 MOS 管的导通性能。

4 实验

采用设计的驱动电路进行实验,喷油器分别采用 BOSCH 第二代电控喷油器和 DENSO 喷油器,驱动电压 BOSCH 喷油器为 48V,DENSO 喷油器为 110 V,图 3 所示电路输入图 4b 驱动信号,图 7 所示电路输入图 4a 驱动信号进行对比实验,在确保保持阶段喷油完全打开的情况下,做两个不同电流值的对比实验,比较阶段 2 和阶段 3 的响应特性,电磁线圈中电流分别如图 9 所示。

从图 9a 可以看出,在相同的测试条件下,阶段 2 采用图 3 的驱动电路,电流波动将近 4 A,平均电流为 10.3 A;阶段 3,电流从平均值下降到 1 A 时的关闭响应时间为 80 μ s。而采用图 7 的驱动电路,保持阶段的电流波动为 2 A,平均电流为 11.7 A,阶段 3 关闭响应时间为 20 μ s。同时采用图 7 所示的驱动电路,喷油升压电路放电后电压恢复时间比图 3 所示的驱动电路快 0.3 ms。如图 9b 所示,当保持阶段采用较小的电流时,采用图 7 所示驱动电路,效果

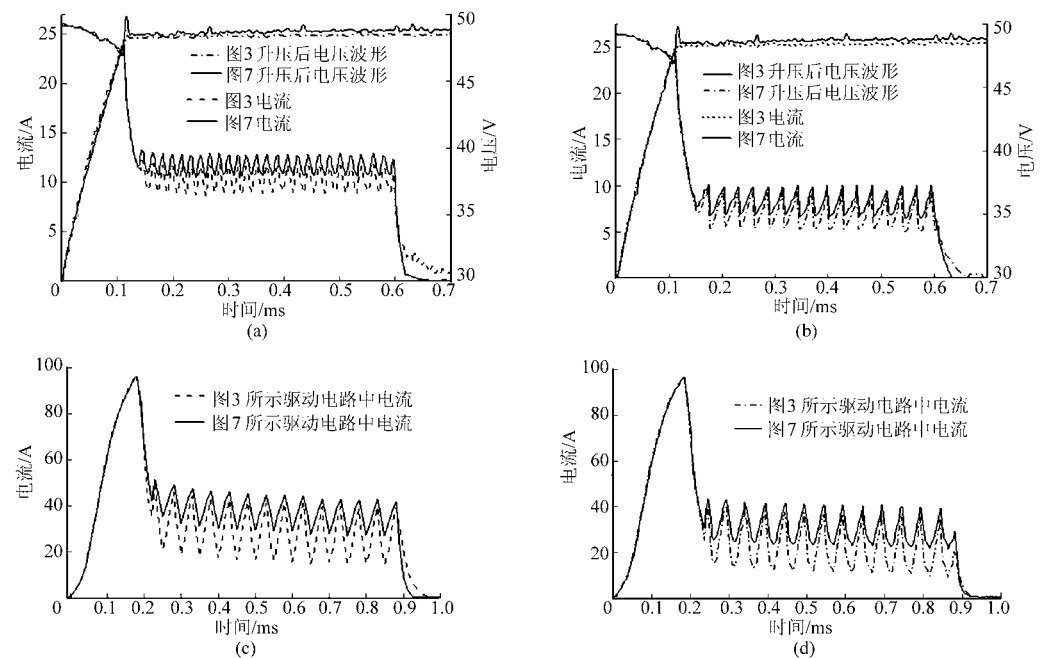


图 9 电流对比图
Fig.9 Current comparison diagrams
(a) BOSCH 喷油器,电流 1 (b) BOSCH 喷油器,电流 2 (c) DENSO 喷油器,电流 1 (d) DENSO 喷油器,电流 2

明显优于图3所示的驱动电路。

当喷油器为DENSO喷油器时,由图9c可以看出,阶段2采用图3所示的驱动电路,电流波动为25 A,平均电流为28.6 A,阶段3关闭响应时间为60 μ s,而采用图7的驱动电路,保持阶段的电流波动为15 A,平均电流为34 A,阶段3关闭响应时间为35 μ s。如图9d所示,当保持阶段采用较小的电流时,采用图7所示的驱动电路明显优于采用图3所示的驱动电路。

由此可以看出,优化后的驱动电路实现了阶段2电流波动小、阶段3关闭响应快的特性,提高了喷油的稳定性和控制精度。

5 结论

(1)除了喷油器结构以外,喷油器控制精度主要受驱动电路的响应特性的影响,开启阶段响应主要受驱动电压和回路中的电阻影响。不同的续流回路对保持阶段的电流波动以及喷油器关闭阶段的响应特性有较大的影响,续流回馈电压越大,关闭响应越快。

(2)采用瞬态电压抑制二极管优化设计的续流电路满足喷油过程中对电流变化的要求,提高了喷油过程中保持阶段电流的稳定性和关闭阶段的响应特性,提高了控制精度。

参 考 文 献

- 1 Peak and hold current shape generated by TriCore derivative TC1775 [S]. Application Notes V2.1, 2002.
- 2 Mooney J D. Drive circuit modeling and analysis of electronically controlled fuel injectors for diesel engines [C]. SAE Paper 2003-01-3361, 2003.
- 3 Li Jin, Zhang Kexun. Solenoid valve driving module design for electronic diesel injection system [C]. SAE Paper 2005-01-0035, 2005.
- 4 尤丽华,孙晓琴,唐雄辉,等.电控组合泵喷油驱动电路设计及试验分析[J].内燃机工程,2009,30(6):52~57.
You Lihua, Sun Xiaoqin, Tang Xionghui, et al. Design and experimental analysis of driving circuit for fuel injection valve of electronically controlled assembly pump[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(6): 52~57. (in Chinese)
- 5 刘建成,王立德,刘彪.基于DSP的柴油机喷油电磁阀驱动电路的设计[J].内燃机,2007(1):14~17.
Liu Jiancheng, Wang Lide, Liu Biao. Design of driving circuit for oil injection solenoid based on DSP [J]. Internal Combustion Engines, 2007(1): 14~17. (in Chinese)
- 6 王洪荣,张幽彤,王军,等.高性能共轨柴油机电控单元的开发研究[J].北京理工大学学报,2007,27(7):580~584.
Wang Hongrong, Zhang Youtong, Wang Jun, et al. Electronic control unit for high pressure common rail system diesel engines[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(7): 580~584. (in Chinese)
- 7 张兴春,张幽彤,丁晓亮,等.压电式高压共轨喷油器的驱动研究[J].内燃机工程,2011,32(3):53~57.
Zhang Xingchun, Zhang Youtong, Ding Xiaoliang, et al. Research on drive circuit of piezoelectric injector for common rail system[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(3): 53~57. (in Chinese)
- 8 任卫军,史先信,焦生杰,等.高压共轨柴油机喷油器零油量标定策略[J].农业机械学报,2011,42(9):35~39.
Ren Weijun, Shi Xianxin, Jiao Shengjie, et al. Zero fuel auto-learning calibration of injector in high pressure common rail diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 35~39. (in Chinese)
- 9 徐权奎,祝轲卿,陈自强,等.基于PSPICE的电控柴油机电磁阀驱动电路仿真设计[J].农业机械学报,2008,39(2):15~19.
Xu Quankui, Zhu Keqing, Chen Ziqiang, et al. Design of solenoid driving circuit module for electronically controlled diesel engine based on circuit simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 15~19. (in Chinese)
- 10 刘振明,李珩,欧阳光耀.电控喷油器电磁阀驱动电路的改进设计及试验研究[J].车用发动机,2009(1):1~3.
Liu Zhenming, Li Heng, Ouyang Guangyao. Improved design and experimental study on solenoid valve drive circuit for electronically controlled injector [J]. Vehicle Engine, 2009(1): 1~3. (in Chinese)