

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.015

直接驱动式共轨系统可控针阀 升程的驱动电路研究

杨腾飞, 周文华*, 张 岳

(浙江大学 能源工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对柴油发动机喷油速率的控制问题,对喷油速率的控制方式进行了归纳总结,对直接驱动式共轨系统的特点和优势,以及直驱喷油器针阀的控制方式进行了分析,对于压电执行器的驱动电路以及充放电控制策略进行了分析,将可变电阻这一思路引入到电压反馈电路中,设计出了驱动电路的可变反馈模块,通过电控单元控制反馈电阻的选取,实现了在燃油喷射过程中对压电执行器驱动电压以及针阀升程的阶梯控制。对驱动电路进行了仿真优化设计,并利用压电执行器来对驱动电路进行了试验验证。研究表明,压电执行器完全充放电时间在 $120\ \mu\text{s}$ 左右,喷油过程中驱动电压的变化可在 $100\ \mu\text{s}$ 内实现,满足共轨系统对针阀的响应要求,所设计的驱动电路能够在燃油喷射过程中通过改变驱动电压来控制喷油速率。

关键词:直接驱动;压电执行器,驱动电路;针阀升程

中图分类号:U463;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0078-04

Study of drive circuit for the control of needle lift of direct acting common rail system

YANG Teng-fei, ZHOU Wen-hua, ZHANG Yue

(Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the control of the injection rate of diesel engine, control methods of injection rate were summarized. Based on the analyses of the advantages of direct acting common rail system and the control method of needle of the direct acting piezoelectric injector, the charge and discharge strategies were analyzed and a drive circuit was designed. The thought of variable resistance was applied to the design of the voltage feedback circuit to control the driving voltage. By choosing the feedback resistances, the stair-like control of driving voltage and needle lift were realized. The drive circuit designed was optimized by simulation and verified by experiment, using the existing piezoelectric actuator. The results show that the charge period and discharge period are both about $120\ \mu\text{s}$. The change of driving voltage between different values is in $100\ \mu\text{s}$, which meets the requirement of the needle lift. The drive circuit can control the injection rate by changing the driving voltage during the injection process.

Key words: direct acting; piezoelectric actuator; drive circuit; needle lift

0 引 言

直接驱动式共轨系统比传统的共轨系统在技术上有很大突破,因为压电执行器不是通过开关控制阀,进而通过液力过程来控制针阀,而是直接通过行程放大

来驱动针阀。这种新型共轨系统的具有响应更快、喷油更精确、能耗更小等明显的优势,而且能够成比例控制针阀升程,使得通过针阀升程来控制喷油规律得以实现,是共轨系统未来发展的主要趋势之一^[1-2]。

高压共轨系统可通过控制共轨压力和针阀升程来

收稿日期:2014-10-13

作者简介:杨腾飞(1990-)男,江西贵溪人,主要从事发动机电控技术方面的研究。E-mail: ytf0801@163.com

通信联系人:周文华,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail: zhouwh999@126.com

控制喷油规律,由于针阀升程的控制难以实现,国内外对喷油速率的研究主要集中在共轨压力的影响上。F. Atzler 等人^[3]通过进行仿真和试验研究了多次喷射形式和喷油速率形状对于发动机排放的影响。Brian Fisher 等人^[4]利用自己设计的测量装置,研究了喷油压力、喷油速率形状等对于喷雾长度的影响规律。北京理工大学苏海峰、张幽彤等人^[5]对共轨喷油器喷射特性进行了试验和仿真研究,获得不同喷油压力和脉宽下的喷油规律。对于喷油速率的控制,也是通过控制共轨压力来实现的,如 Susumu Kohketsu 等人^[6]提出的设置低压和高压两套共轨通路,通过切换高、低压通路来控制喷油速率,这种控制方式不仅机械结构复杂,而且不够灵活。

直接驱动式共轨系统由于其明显的优势,能够精确控制针阀升程,以此控制喷油速率,实现对喷油规律更加灵活地控制。针对针阀升程的研究是近几年才开展起来的。Raul Payri 等人以直驱压电晶体喷油器为对象,研究了不同针阀升程下的喷油和喷雾情况,结果表明:针阀升程对于喷孔上游的压力和喷雾液相长度有很大影响,增大针阀升程会增大喷雾扩散速率,尤其是喷射开始阶段针阀升程的影响更是主要的^[7-9]。在不同喷油量和喷油压力下,直接驱动式共轨系统的表现情况也有不同^[10]。结合共轨压力和针阀升程两方面的控制,能实现更灵活的喷油规律以及喷雾特性,改善发动机的效率和排放情况。

为实现对直接驱动式共轨系统针阀升程的控制,深入探索这种控制方式对发动机性能潜力的发挥,本研究根据直驱压电式共轨系统压电执行器的特点,分析压电执行器的驱动电路以及控制策略,探讨可控驱动电压的实现方式,将可变电阻值这一思路引入电压反馈电路中,设计可变驱动电压的驱动电路,并通过仿真优化和试验验证,为针阀升程的控制找到可行的途径。

1 直接驱动式共轨系统针阀控制分析

直接驱动式共轨喷油器中,压电执行器通过一个液力放大系统直接驱动针阀升程的运动,压电执行器的位移和针阀的运动之间存在一定的放大比例关系,通过对压电执行器的位移控制,可实现对针阀升程的控制,得到所需的升程大小。

压电材料的位移与电压的一般关系式为:

$$\Delta L = d_{33} \times U \quad (1)$$

式中: ΔL —压电材料位移, d_{33} —压电材料压电应变常数, U —压电材料两端电压。

从上述关系式可知,压电执行器的位移和驱动电压之间存在线性关系,通过控制压电执行器的驱动电压,可以控制压电执行器的位移,从而控制针阀升程。

2 压电执行器驱动电路设计

压电执行器的驱动电路如图1所示。它由一个DC/DC升压模块将车载电瓶电压升高到驱动执行器所需电压值,充电控制模块和放电控制模块实现压电执行器的充放电控制。电控单元根据发动机的运行状况,向DC/DC升压模块、充放电模块以及选缸模块发送信号,使各个模块处于对应的状态,同时接收来自电流和电压反馈模块的信号,控制充、放电过程。对驱动电压的控制通过可变的反馈模块来实现。

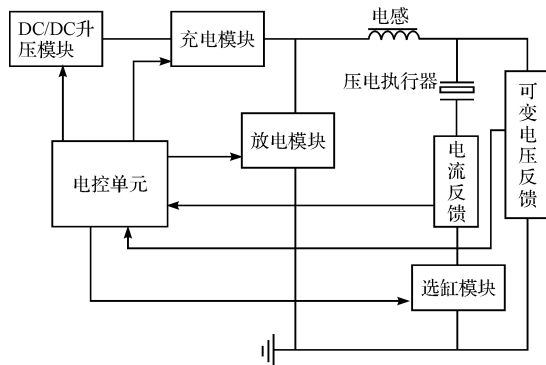


图1 压电执行器控制电路

2.1 充、放电模块电路

驱动电路的充放电电路如图2所示。M3导通表示该缸喷油器工作,充电过程如图2(a)、图2(b)所示。当M1导通,M2断开时,电流方向由高压电容经过M1、电感L到压电执行器,向执行器充电,同时电感储存能量,(如图2(a)所示);当M1断开,M2断开时,由于电感电流不能突变,将经由D2、L回路继续向压电执行器充电(如图2(b)所示)。放电过程如图2(c)、图2(d)所示,放电开始时,M1断开,M2导通,压电执行器通过L、M2组成的回路放电,电感储存能量(如图2(c)所示);当M1断开,M2断开时,由于电感电流方向不变,压电执行器通过L、D1回路向高压电容充电,实现放电能量回收(如图2(d)所示)。

2.2 充、放电控制策略

2.2.1 充电控制策略

压电执行器的工作需要响应迅速,在很短的时间内达到所需电压值,这要求充电过程中有大的充电电

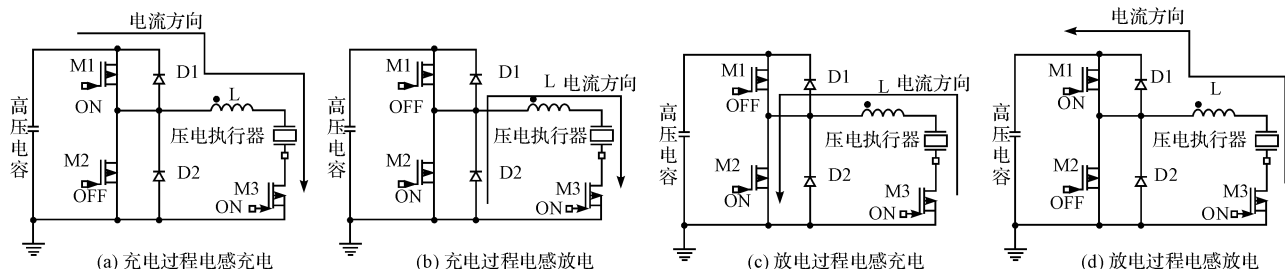


图 2 压电执行器充放电过程

流。但是,充电电流过大会造成压电执行器的损坏。因此,充电过程中,充电电流应稳定在一个较高范围,但不能超过一定限值。本研究采取的充电控制策略是通过控制 M1、M2 的通断来控制充电电流:开始充电时,M1 导通,M2 断开,充电电流增大,当电流达到预设上限时,M1 断开,M2 断开,电感 L 放电,充电电流减小,当电流下降到设定值时,回到上一过程。以上过程不停重复,直到压电执行器的电压达到设定值时停止充电。

2.2.2 放电控制策略

放电过程的控制策略和充电过程类似,开始放电时,M1 断开,M2 导通,压电执行器通过 L、M2 回路放电,放电电流增大,电感 L 储存能量,当放电电流达到预设限值时,M1 断开,M2 断开,压电执行器通过 D1、高压电容回路放电,实现放电能量回收,放电电流减小,当电流下降到设定值时,回到上一过程。通过以上过程的不停重复直到压电执行器放电到设定值。

3 压电执行器驱动电压可控设计

压电执行器的驱动电压的控制可以通过可变的电压反馈放大模块来实现。控制电压的变化可以用最小值到最大值之间的连续控制,这种方法理论上可以实现中间任一电压值的控制;另一种控制方式为分梯度控制,即在所需控制电压范围内选取一些合适的电压值,在充放电过程中,让驱动电压位于这些值上,这种控制方式比较容易实现。综合考虑具体发动机要求、成本以及复杂程度等因素,选择梯度控制方式。

驱动电压的梯度控制通过在电压反馈电路中加入一个可变电阻模块,通过选取不同的反馈放大系数,来获得不同电压值。可变电阻模块电路如图 3 所示。通过选取不同开关的开闭,可以改变接入电压反馈电路的电阻值,从而改变反馈放大系数。开关的选取可以通过多路开关芯片实现,电控单元通过向多路开关发送信号控制来选通开关。一个开关通路对应一个压电执行器的电压值,可根据实际需要选取开关数量,必要时也可使用几个多路开关联合工作。对于不同的压电

喷油器,需要不同的驱动电压值组合,只需更改可变电阻模块中电阻值即可满足不同喷油器的需求。

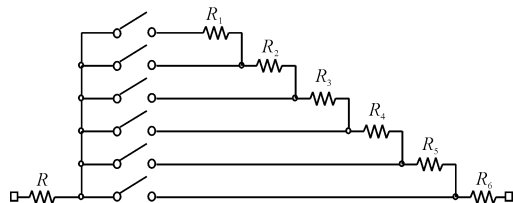


图 3 可变电阻模块

通过不同的开关选取,可得到相应的压电执行器驱动电压。若充、放电速度足够快,通过在燃油喷射过程中改变开关选择,可以实现压电执行器在不同驱动电压之间转换,也即针阀升程的变化,从而实现灵活的喷油规律。例如一种典型的喷油规律,初期小喷油速率,然后以最大速率喷油,喷油结束后迅速断油,通过对驱动电压的控制很容易得到实现,喷油初期利用小驱动电压,然后驱动电压达到最大,针阀升程最大,达到最大的喷油速率,喷油结束时放电直到针阀落座。这种基于针阀升程的控制方式比基于共轨压力的控制方式响应更快,更具灵活性。

4 结果分析

本研究利用自有的压电执行器,压电执行器长度 60 mm,通过测量计算,选取 3 μF 的等效电容替代压电执行器对电路进行仿真分析,进行电路优化设计,并对压电执行器进行试验验证。

压电执行器先充电到 200 V,再直接放电到结束的电流与电压随时间变化图如图 4 所示。从图 4 中可以看出,直接充电时间大约在 120 μs 左右,放电时间也在 120 μs 左右,能够达到很好的响应速度;且试验中测得压电执行器电压与期望值非常接近,满足对压电执行器提出的要求。

压电执行器阶梯充放电如图 5 所示。其驱动规律是先让压电执行器电压上升到 100 V,一段时间后让其再上升到 200 V 并保持至喷油结束,压电执行器迅速放电至电压下降到最低。从结果可以看出,0 ~

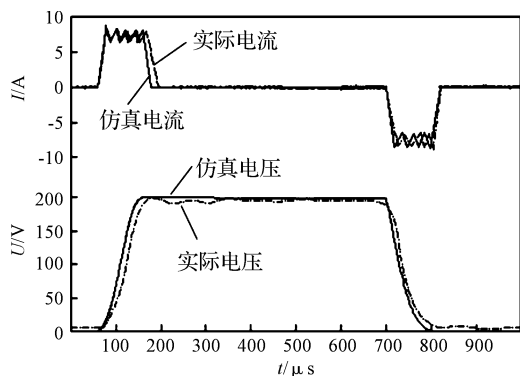


图4 压电执行器一次充、放电

100 V、100 V ~ 200 V 两段充电时间均在 100 μs 以内,且电压值非常稳定,这说明在喷油过程中,驱动电压的变化能在 100 μs 内完成,在一次喷油过程中,能够实现多次改变驱动电压值,从而获得不同的喷油速率。

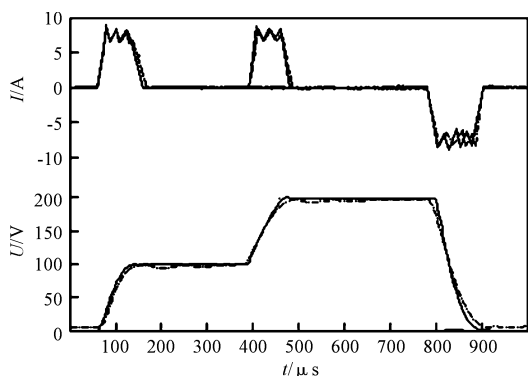


图5 压电执行器阶梯充放电

试验结果分析表明,笔者所设计的驱动电路能够实现在一次喷油过程中,对压电执行器电压,也即针阀升程进行梯度控制,从而实现可控的喷油速率。

5 结束语

本研究为充分利用直接驱动式共轨系统的优势,设计了可控针阀升程的驱动电路。

(1)设计压电执行器的驱动电路,在控制策略下充、放电时间约在 120 μs ,能够满足对压电执行器的响应需求。

(2)基于可变电阻选取的可变电压反馈控制模块,可实现对驱动电压的控制;针对不同压电执行器,只需改变反馈电阻值就可适应不同的电压要求。

(3)一次燃油喷射过程中,压电执行器驱动电压的变化在 100 μs 内,可实现驱动电压的多次改变。

(4)设计了可控电压驱动电路,能够控制喷射过程中针阀升程,为进一步探索针阀升程的控制对发动机性能的影响,发掘这种控制方式的潜力奠定基础。

参考文献 (References):

- [1] 吴憩棠. 德尔福全球先进的柴油共轨系统——德尔福(中国)投资有限公司柴油系统访问记[J]. 汽车与配件, 2009(5):32-33.
- [2] SCHÖPPE I D, ZÜLCH D I S, HARDY M, et al. Delphi common rail system with direct acting injector[J]. **MTZ worldwide**, 2008, 69(10):32-38.
- [3] ATZLER F, KASTNER O, ROTONDI R, et al. Multiple injection and rate shaping. Part 1: Emissions reduction in passenger car diesel engines[R]. SAE paper no. 2009-24-0004; 2009.
- [4] FISHER B, MUELLER C. Effects of injection pressure, injection-rate shape, and heat release on liquid length[J]. **SAE International Journal of Engines**, 2012, 5(2):415-429.
- [5] 苏海峰,张幽彤,王尚勇,等. 高压共轨喷油器喷射特性实验与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1):22-26, 30.
- [6] KOHKETSU S, TANABE K, MORI K. Flexibly controlled injection rate shape with next generation common rail system for heavy duty DI diesel engines[R]. SAE. 2000-01-0757, 2000.
- [7] PAYRI R, GIMENO J, VENEGAS O, et al. Effect of partial needle lift on the nozzle flow in diesel fuel injectors[R]. SAE. 2011-01-1827, 2011.
- [8] PAYRI R, GIMENO J, VIERA J P, et al. Needle lift profile influence on the vapor phase penetration for a prototype diesel direct acting piezoelectric injector[J]. **Fuel**, 2013 (113):257-265.
- [9] PAYRI R, GIMENO J, BARDI M, et al. Study liquid length penetration results obtained with a direct acting piezo electric injector[J]. **Applied Energy**, 2013 (106):152-162.
- [10] FERRARI A, MITTICA A. FEM modeling of the piezoelectric driving system in the design of direct-acting diesel injectors[J]. **Applied Energy**, 2012(99):471-483.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

杨腾飞,周文华,张 岳. 直接驱动式共轨系统可控针阀升程的驱动电路研究[J]. 机电工程, 2015, 32(1):78-81.

YANG Teng-fei, ZHOU Wen-hua, ZHANG Yue. Study of drive circuit for the control of needle lift of direct acting common rail system[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2015, 32(1):78-81.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>