

# 压电喷射系统执行器驱动仿真及试验研究

宋国民, 寇 伟, 高 巍, 沈 妍

(无锡油泵油嘴研究所, 江苏无锡 214063)

**摘 要:** 在压电共轨喷射系统研究的基础上, 对压电执行器不同驱动方式进行分析, 并利用 PSPICE 软件进行电路仿真分析, 最后进行了系统油泵台架试验。结果表明, 设计的驱动电路具有良好适应性, 能灵活调整压电执行器驱动特性, 为下一步压电式共轨系统应用奠定了基础。

**关键词:** 压电执行器; 共轨; 喷油器; 仿真

**中图分类号:** TK421.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4357(2010)04-0010-04

## Simulation and Experimental Study of Actuator Driving for Piezoelectric Injection System

Song Guomin, Kou Wei, Gao Wei, Shen Yan

(Wuxi Fuel Injection Equipment Research Institute, Jiangsu Wuxi 214063)

**Abstract:** Driving modes of piezoelectric injector were analyzed based on the study of common rail system with piezoelectric actuator, and simulation software of PSPICE was used to analyze driving circuit. Finally fuel test bench experiments were carried out. It was showed by the results that the driving circuit had good adaptability, and driving performance of piezoelectric actuator could be adjusted flexibly. Therefore it lays a foundation for application development of piezoelectric common rail system.

**Keywords:** piezoelectric actuator; common rail; injector; simulation

## 1 前 言

自从内燃机诞生以来, 对节能和环保的追求就成了推动内燃机不断发展的驱动力。在能源越来越紧张的今天, 柴油机由于燃烧效率高, 因而应用范围越来越广泛。为解决排放及喷射压力提高后柴油机的振动、噪声问题, 多次喷射技术被广泛地应用到直喷式柴油机系统。为提高喷射系统执行器响应速度, 压电执行器喷射系统应运而生, 相对电磁式执行器具有更高的喷油器开关速度, 从而使燃油系统喷射结束及喷射过程得到更高的控制灵活性, 为内燃机性能提高奠定了基础<sup>[1]</sup>。

## 2 压电执行器驱动

压电晶体执行器是利用材料压电效应进行工作的, 压电效应的原理如下: 对压电材料施加压力, 便会产生电位差(正压电效应); 反之, 施加电压则产生机械应力(称为逆压电效应)。压电执行器是利用材料的逆压电效应, 将电能转变为机械能或机械运动<sup>[2]</sup>。主要以聚合物双晶片为基础, 包括利用横向效应和纵向效应两种方式, 基于聚合物双晶片开展的驱动器应用研究包括显示器件控制、微位移产生系统等。压电执行器采用具有高压电应变常数的压电陶瓷材料, 经叠层工艺制作的独石型压电叠层器件。压电执行器在电场的作用下产成形变,

收稿日期: 2009-09-23; 修回日期: 2009-10-26

基金项目: 江苏省基础研究计划(自然科学基金)资助项目, 项目编号: BK2008535。

作者简介: 宋国民(1972-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为发动机电子控制、故障诊断技术及现场总线通讯, Email: sgm@wferi.com。

在弹性限度范围内, 该形变与外加电场呈线性关系, 当电场极性改变时, 执行器的形变方向也随之发生改变, 执行器变形量用公式可表示为<sup>[3]</sup>:

$$S = ME^2 + dE \quad (1)$$

其中,  $d$  为压电系数;  $M$  为电致伸缩系数;  $E$  为电场强度。

通常在压电陶瓷材料中, 压电系数  $d$  与  $M$  相比要大几个数量级, 因此, 根据式(1)的简单估算可按下式进行。

$$S = dE \quad (2)$$

压电式执行器作为一种新型敏感材料, 在共轨系统中的应用优势在于: 由于压电石英晶格组成的执行器形变速度很短, 通常在  $100 \mu\text{s}$  以内, 且压电晶体驱动时的变形力与常规电磁阀相比要大一个数量级, 因此, 压电执行器共轨喷油器的开关响应速度比电磁式更快, 这样对于同样的燃油喷射量, 只需更短的喷油持续时间, 提高了喷油系统的响应速度。

压电晶体作为特殊的执行器, 驱动方式也有别于常规的电磁式执行器, 驱动工作原理类似电容, 因此, 驱动过程中需高端、低端开关配合控制, 以达到控制执行器电流的目的。由于压电执行器电容感抗很小, 通常电容容量不高于  $10 \mu\text{F}$ , 因而, 驱动电路设计必须严格控制回路充电电流, 电流太大易导致执行器击穿, 同时也会影响执行器系统的可靠性; 驱动电流过小, 则喷油器系统响应慢, 影响系统性能, 压电执行器最常见的两种驱动方式如图 1 和 2 所示。

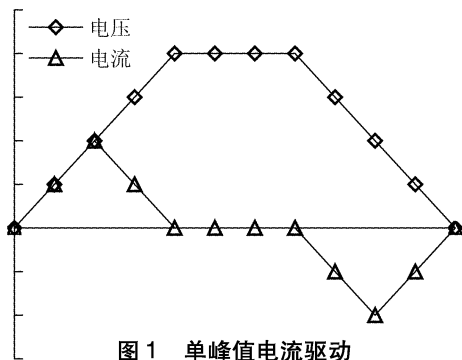


图 1 单峰值电流驱动

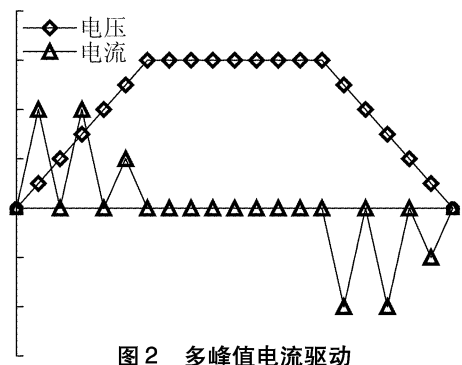


图 2 多峰值电流驱动

图 1 所示的单峰值电流驱动方式最容易实现, 控制过程类似两个轮流切换的开关, 但由于驱动控制中可调参数较少, 且回路电流无法通过软件进行有效控制, 因此, 性能优化难度较大; 图 2 所示的多峰值驱动方式, 可灵活调整驱动过程中加载在压电执行器上的电压, 同时可控制充电过程中的充电电流, 因此, 控制实现上具有较大的柔度, 以便优化压电喷射系统的性能, 因此, 在实际中被广泛采用, 本文研究也是基于这种方式展开, 压电执行器系统驱动的基本原理如图 3 所示。

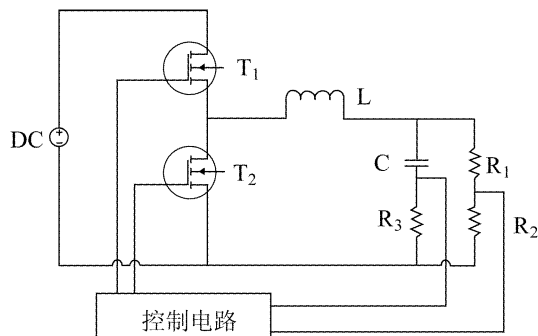


图 3 压电执行器驱动基本原理

在上图中,  $T_1$  及  $T_2$  为压电执行器充、放电开关 MOS 管; 电感  $L$  串联在充、放电回路中, 通过控制电路输出的 PWM (Pulse Width Modulation) 信号调整充放电过程中的电流幅值; 电阻  $R_1$  及  $R_2$  组成的负载网络用于测量压电执行器  $C$  的电压, 即根据发动机工况控制压电执行器所需的充电电压, 以便优化系统性能; 采样电阻  $R_3$  用于测量回路充、放电电流, 用于电路保护功能开发。

### 3 驱动系统仿真分析

通常 ECU 开发先根据设想的电路原理布板, 然后焊接调试优化系统, 最终定型。常规的开发思路显然存在如下不足, 即调试工作量很大, 且结果与开发人员的经验密切相关。随着 EDA (Electronics Design Automation) 技术的发展, 各种先进的分析和模拟软件应运而生。目前在电路仿真领域, 最为流行的就是 orCAD PSPICE (Popular Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), 它是美国加州大学伯克利分校于 1972 年开发的电路仿真程序。利用 PSPICE 对电路进行模拟仿真, 其作用是对电路功能进行验证, 主要用途是检查电路设计中存在的问题, 并对其进行修改及性能优化。利用 PSPICE 仿真软件, 可节省实验资金, 并大大提高开发效率。PSPICE 电路仿真分析步骤如图 4 所示<sup>[4]</sup>。

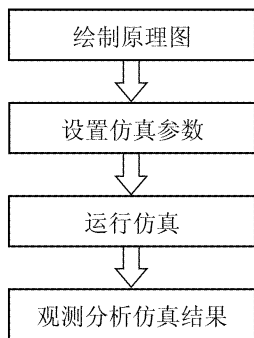


图 4 PSPICE 电路仿真分析步骤

在压电式共轨系统中，最主要的核心电路是压电执行器驱动波形控制，这也是与电磁式共轨系统的根本区别所在。由于电磁线圈属于感性负载，而压电执行器属于容性负载，两者在驱动原理上存在较大差别。因此，本文重点对压电执行器电压及电流控制波形进行仿真计算，以便对相关设计参数进行优化。根据图 3 所示的压电执行器驱动示意图，建立了 PSPICE 仿真模型，分别对单峰值及多峰值电流驱动进行了仿真计算，压电执行器的单峰值电流驱动计算结果如图 5 及图 6 所示。

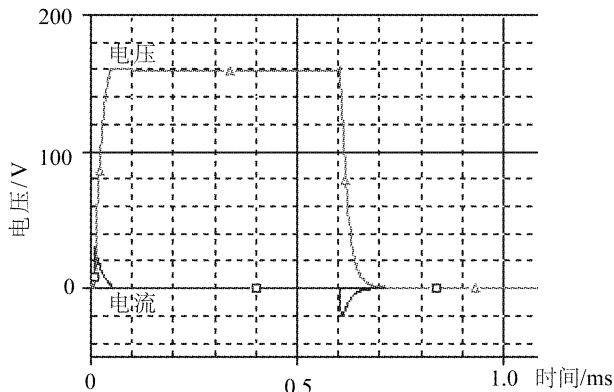


图 5 单峰值电流驱动波形

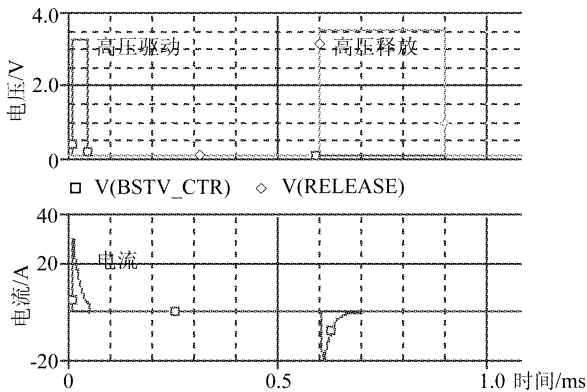


图 6 单峰值电流驱动控制信号

从图 5 的仿真结果可见，压电执行器在单峰值电流驱动时，工作过程类似给电容充电，即有

“先急后缓”的趋势，驱动过程中的控制信号如图 6 所示。由于单峰值电流时驱动信号始终有效，因此，会导致驱动过程中电流形成一尖峰，其回路电流完全取决于回路阻抗及压电执行器的参数，无法通过软件及硬件的有效配合进行实时参数调整。这种驱动方式由于回路电流不受控制，因此，无法对执行器进行有效保护，在实际产品应用中易导致执行器断裂故障，通常产品设计中不采用这种方式驱动。而在执行器驱动关闭，即高压放电过程中，由于放电信号始终有效，导致放电过程中的电流同样具有“先急后缓”的趋势，容易导致放电初期电流过大，从而引起执行器断裂故障。因此，在实际应用中主要以多峰值电流驱动为主，图 7、8 给出了多峰值电流驱动分析结果。

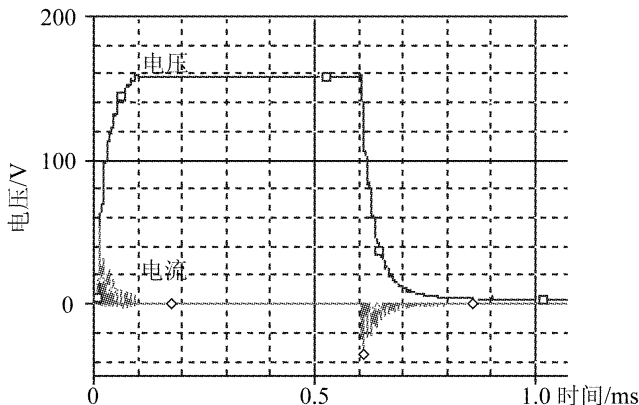


图 7 多峰值电流驱动波形

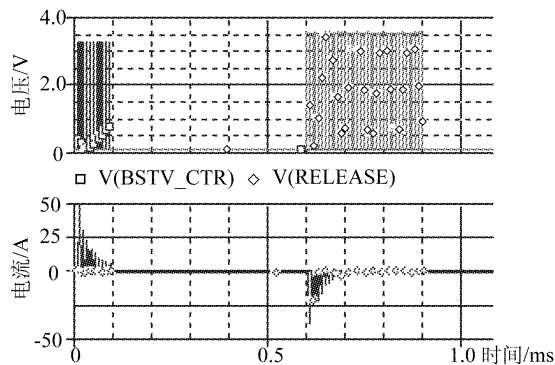


图 8 多峰值电流驱动控制信号

在图 7 中，多峰值电流驱动时电压上升受到了控制，因此较为缓慢，且上升速率可通过软件优化调整，同时驱动过程中的平均电流也得到了有效控制。图 8 中高压驱动采用 100 kHz 频率占空比为 10% 脉冲信号，高压释放采用 100 kHz 频率 20% 占空比脉冲信号，从仿真曲线可见，通过驱动及释放 PWM 信号的调整可有效控制执行器驱动特性，从而为压电式执行器系统性能开发及优化奠定基础。

## 4 试验及分析

为验证压电执行器驱动系统性能, ECU 开发完成后, 在法国 EFS 单次喷射试验台分别测量不同工况下喷油器的喷射特性, 主要对喷油系统各工况点的油量、稳定性及系统响应时间等指标进行测量, 根据这些指标对执行器性能进行评判, 图 9 给出了设计完成的 ECU 单峰值电流驱动波形, 图 10 给出了多峰值电流驱动时的执行器驱动波形。

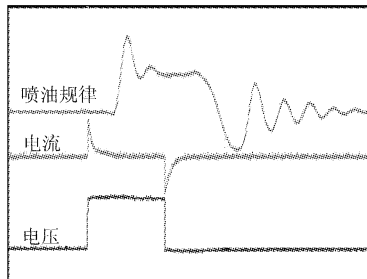


图 9 单峰值电流驱动喷油规律

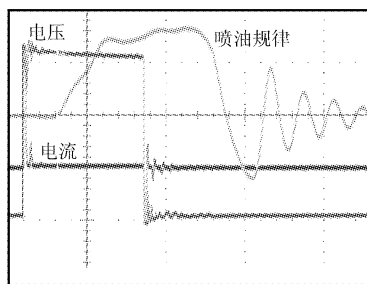


图 10 多峰值电流驱动喷油规律

从图中可见, 不同驱动方式得到的喷油规律存在明显差别, 单峰值电流驱动时, 驱动初期喷油规律上升过急, 而多峰值电流驱动时由于驱动过程电流得到了有效控制, 使得压电执行器电压上升斜率在一定范围内受控。同时喷油器规律初期也较为缓慢, 符合“先缓后急”的喷油规律趋势, 为发动机性能优化匹配提供了可能。而从实际性能开发的角度而言, 在保证系统可靠性的前提下, 期望有较大驱动电流, 以提高喷射系统响应特性, 图 11 ~ 图 13 分别给出了 160 V 高压时自主压电式喷油器特性参数。

从以上压电式共轨喷油器的试验性能参数可见, 自主开发的压电式共轨喷油器具有较好的稳定性及开启延迟, 性能优于同类电磁式执行器共轨喷油器产品, 因而, 能满足实际应用需求。该项目的下一阶段主要工作是针对小批量压电式喷油器系统的油量一致性进行攻关, 以便尽早实现压电式共轨产品的市场应用。

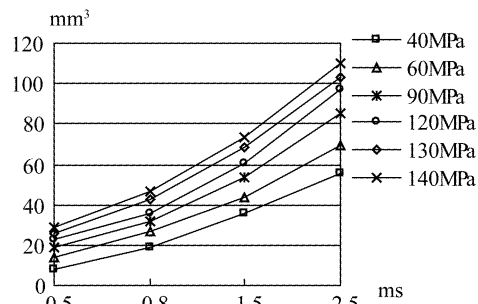


图 11 160 V 驱动电压喷油特性

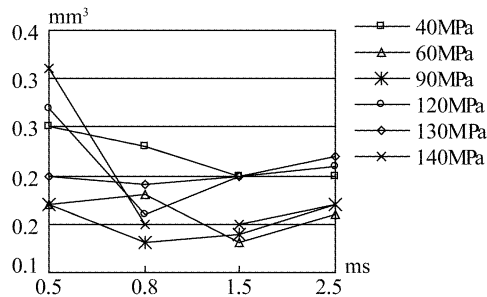


图 12 160 V 驱动电压驱动方差

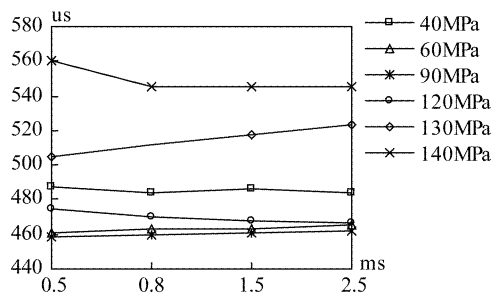


图 13 160 V 驱动电压驱动开启延迟

## 5 结论

苛刻的环保要求和日益严峻的节能任务给柴油机供油系统提出了更高的要求, 压电执行器作为快速响应执行器的一种, 其优势越来越明显, 被公认为是未来共轨执行器的重要发展方向之一, 本文对压电执行器的驱动电路进行了仿真分析, 并进行了性能试验, 为压电式喷射系统的产品性能提高及市场应用奠定了基础。

### 参考文献

- [1] 宓浩祥, 袁陆. 采用压电石英执行器的电控共轨喷射系统[J]. 现代车用动力, 2004(1): 12-17.
- [2] 庄福如, 潘铁政, 吴小勇, 等. 柴油机共轨压电晶体喷油器及驱动电路研究[J]. 现代车用动力, 2008(3): 11-16.
- [3] 宋国民, 高崴, 张建刚, 等. 共轨压电执行器驱动开发及试验分析[J]. 内燃机工程, 2009, 30(2): 53-56.
- [4] 宋国民, 王宁, 张爱云, 等. PSICE 仿真平台在共轨 ECU 设计中的应用[J]. 现代车用动力, 2009(3): 13-17.