

压电喷油器执行器驱动控制电路改进设计

刘楠¹, 刘振明^{2*}, 童大鹏¹

(1. 海军士官学校 机电系, 安徽 蚌埠 233012; 2. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:针对自行研制的压电喷油器和执行器,通过设计压电执行器两端电压补偿控制策略,采取六阶段电路驱动控制方法,实现了压电喷油器内部执行器两端驱动电压的闭环补偿控制和基于三角波形驱动电流的充放电过程,提高了电路能量利用率,降低了电路峰值电流。同时对驱动电路进行试验。试验表明,改进驱动控制方式后,电路充电时间缩短了0.06 ms,放电时间略微缩短了0.01 ms,满足执行器达到最大位移的最小脉宽缩短到0.3 ms,峰值电流降低了3 A,由此表明电路响应速度和安全性得到了进一步提高。

关键词:压电喷油器;执行器;驱动电路;驱动控制策略

中图分类号:TK423.84 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2024)06-219-08

Improved design of piezoelectric injector actuator drive control circuit

LIU Nan¹, LIU Zhenming^{2*}, TONG Dapeng¹

(1. Mechanical and Electrical Department, Naval Noncommissioned Officer School, Bengbu 233012, China;

2. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: For the self-developed piezoelectric injector and actuator, a compensation control strategy based on voltage feedback was designed, a six-stage circuit driving mode was adopted, and the closed-loop compensation control of the driving voltage at both ends of the actuator inside the piezoelectric injector, charge and discharge process based on triangular waveform driving current were realized. It improved the utilization rate of circuit energy and reduced the peak current. At the same time, the drive circuit was tested. Test shows that the charging time is shortened by 0.06 ms, the discharge time is slightly shortened by 0.01 ms, the minimum pulse width for the actuator to reach the maximum displacement is shortened to 0.3 ms, and the peak current is reduced by 3 A, which verifies that the drive circuit has improved in response speed and safety.

Keywords: piezoelectric injector; actuator; drive circuit; drive control strategy

高压共轨系统具有喷射压力高、喷油速率可调的特点,已成为柴油机燃油喷射系统的主流^[1-2]。压电喷油器执行器由于体积小、输出力大和响应速度快等优点,为实现灵活多变的高压力燃油喷射提供了有效的技术支持^[3-5]。然而,由于喷油器内部变温(-30~150℃)、变负载(60~200 MPa)和强电场(>1.5 kV/mm)的影响,压电执行器输出位移的精确度降低^[5],最终导致燃油喷射系统的不稳定^[6-7],因此需对其驱动控制电路进行设计改进以提高工作性能。

目前,国内外通常从电荷驱动、基于迟滞逆模型的前馈控制以及复合闭环控制等方面开展压电执行器的驱动控制研究,但通常适用于准静态过

程的高精度定位^[8-10],不适用于喷油器内部压电执行器高频动态的驱动控制。与常用喷油器电磁阀线圈呈现的感性负载特性不同,压电执行器在电路上呈现近似电容的电气特性。执行器的电容特性使得其在充电的瞬间产生较高的峰值电流,这虽然有利于执行器的快速响应,但增加了执行器发生断裂和打火的风险,且过高的电流会导致电路中的晶体管被击穿。此外,受喷油器工作温度、负载影响,压电陶瓷压电性和介电性都发生改变^[11],执行器两端施加电压不稳、输出位移波动增大,降低了喷油器的精确度。

因此,本文通过制定基于电压反馈的补偿控制策略和精确可靠的六阶段电路驱动模式,设计

收稿日期:2022-03-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51879269)

第一作者:刘楠(1991—),男,山西永济人,讲师,博士,E-mail:junjiaoln@163.com

*通信作者:刘振明(1978—),男,河南新乡人,副教授,博士,博士生导师,E-mail:15927668186@163.com

引用格式:刘楠,刘振明,童大鹏.压电喷油器执行器驱动控制电路改进设计[J].国防科技大学学报,2024,46(6):219-226.

Citation:LIU N, LIU Z M, TONG D P. Improved design of piezoelectric injector actuator drive control circuit[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(6): 219-226.

压电执行器闭环补偿控制电路,并对驱动电路进行测试,以实现压电执行器两端驱动电压的闭环补偿控制和基于三角波形驱动电流的充放电过程,目的在于:①避免温度升高或负载增加导致的压电执行器电容增加,进一步造成其两端电压降低和位移量减少;②降低充放电过程峰值电流,提高充放电效率;③设计能量回馈电路,有效地提高驱动电路的能量利用率。

1 电路总体方案设计

1.1 电路基本功能需求

为实现电控共轨柴油机喷油器的多次喷射过程,驱动电路需满足以下要求,:

- 1)能够输出 0 ~ 140 V 稳定可调的负载电压;
- 2)电流峰值要低于压电执行器的工作安全电流,避免材料被击穿;
- 3)充放电时间尽可能缩短以满足小脉宽驱动控制;
- 4)充放电过程中供电端电压需稳定控制;
- 5)电路工作频率不低于 1 kHz,实现主机一个工作循环最少 3 次的燃油喷射。

1.2 设计方案

根据功能需求,进行压电驱动电路设计,图 1 所示为驱动电路示意图,设计方案包括:

1)控制电路设计:包括单片机系统、升压补偿控制电路、充放电控制电路。单片机根据设定的驱动电压、脉宽和间隔等参数控制升压和充放电电路的工作,通过处理反馈的驱动电压信号,改变升压占空比,实现充放电过程的恒压控制。

2)升压电路设计:考虑到喷油器匹配整机工作时没有高压电源,通过升压电路升压,并通过电容进行滤波储能,以此为执行器提供 0 ~ 140 V 的可调电压。

3)充放电功率电路设计:利用脉冲波形驱动电路对单片机发出的脉冲信号进行放大,并控制充放电电路中功率开关管的通断来完成执行器的充放电。

4)过流保护电路:通过监测充放电过程的驱动电流,控制电路中金属氧化物半导体场效应管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 功率开关管的通断来保护电路的安全。

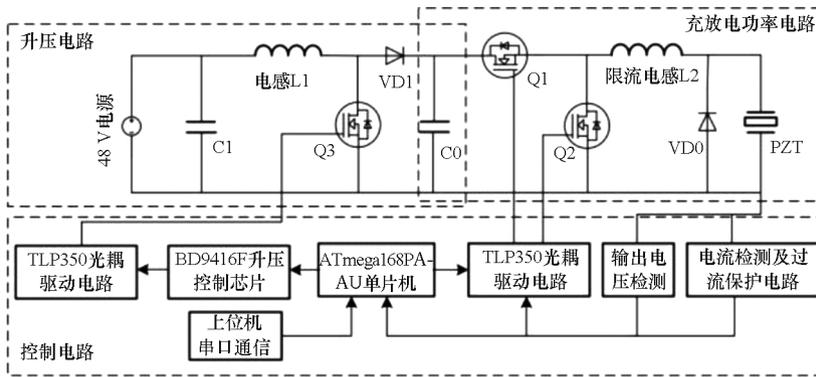


图 1 压电执行器驱动电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of driving circuit of piezoelectric actuator

2 驱动电路的实现

根据设计方案,设计并研制出以单片机系统为控制核心、以 MOSFET 为功率开关器件的压电执行器驱动控制电路。该系统主要由单片机系统、升压补偿控制电路、功率电路、电流检测及过流保护电路四大部分组成。

2.1 单片机系统

单片机系统以 ATmega168PA-AU 为控制核心,其 I/O 脚输出各种控制信号,输入采集的模拟信号和数字信号,通过编制的控制程序进行有序的工作。如图 2 所示为设计的基于 ATmega168PA-AU

的各功能引脚信号名称。

2.1.1 数字量 I/O 输出

输出通道根据工作时序产生不同的时序波形,包括 PD0 ~ PD1、PD4 ~ PD7、PB0 ~ PB1、PC4 ~ PC5。各输出信号包括:报警电路复位、置位和启动、升压电路和电流检测芯片的启动、升压电路电压调整信号、控制 MOSFET 管 Q1 和 Q2 导通的脉冲信号等。

2.1.2 数字量 I/O 输入

数字量输入通道接收外部信息,根据不同信息的来源,采用查询或中断的方式处理信息的需求。数字量输入通道包括 PD2 ~ PD3、PB2 ~ PB5,

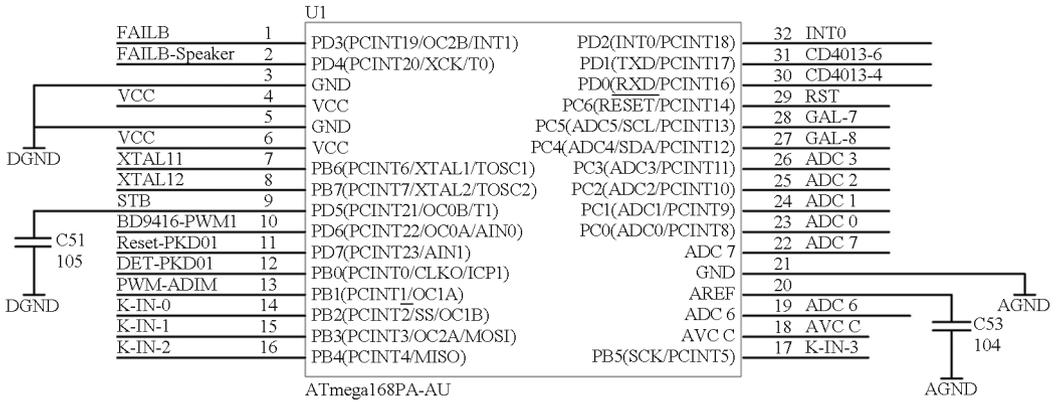


图 2 基于 ATmega168PA-AU 的控制电路图

Fig.2 Control circuit based on ATmega168PA-AU

其功能为:外部中断信号输入、升压电路的过载保护、四位功能拨码开关 S1 的码值输入等。其中拨码开关用于单脉冲和多脉冲工作方式选择,如图 3 所示。

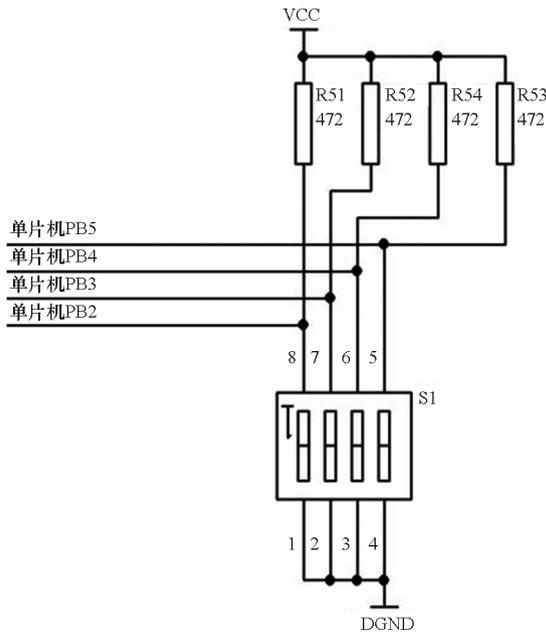


图 3 拨码开关与单片机连接图

Fig.3 Connection diagram of the dial switch and single chip

2.1.3 模拟量输入和模/数转换

模拟量输入通道中,ADC0 ~ ADC3 用于脉冲宽度和脉冲间距的调整,ADC6 用于负载输出电流的测量,ADC7 用于执行器驱动电压测量,如图 4 ~ 6 所示。

2.2 基于三角波形驱动电流的功率电路

2.2.1 设计原理

充放电电路设计时,如果利用高压电源直接向执行器进行充电,能量损失可达到一半以上^[12],因此增加了用于能量转换的电感,不考虑转换过程的热量损耗,加入电感后可使电源能量

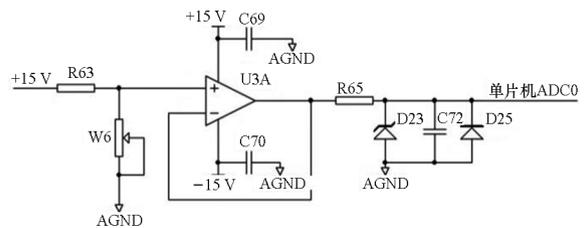


图 4 人工可调参数值模拟量输入通道

Fig.4 Analog input channel with adjustable parameter values

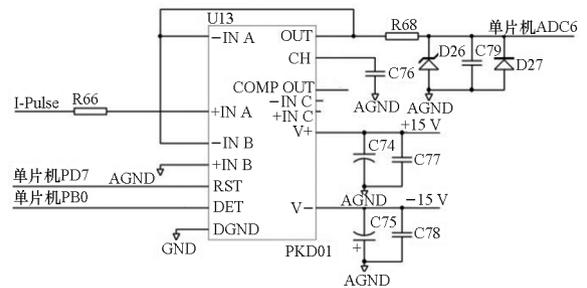


图 5 电流采样模拟量输入通道

Fig.5 Analog input channel for current sampling

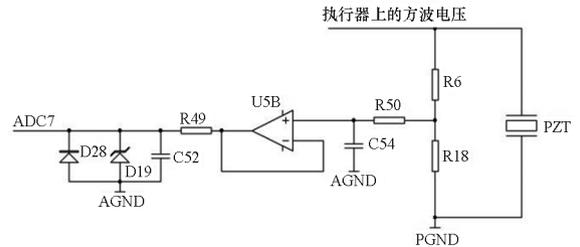


图 6 执行器驱动电压采样模拟量输入通道

Fig.6 Analog input channel for actuator drive

voltage sampling

基本完全转移到压电叠堆执行器中,且实现限流缓冲作用。

在充放电过程中,单片机发出的脉冲控制信号通过光电耦合器来驱动 MOSFET 管 Q1 和 Q2 的通断,从而实现能量在电源、电感和执行器之间的转换。采用包含六个工作阶段的电路驱动模

式,充放电过程如图 7 所示,其工作原理为:

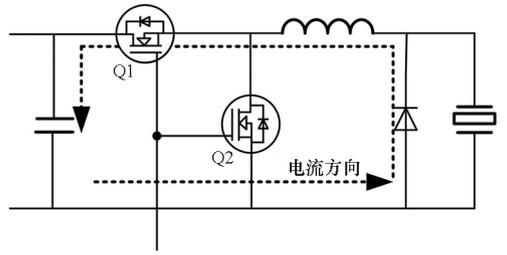
1) 充电初始阶段:如图 7(a) 所示, MOSFET 管 Q2 关断,在充电脉冲起始时刻, MOSFET 管 Q1 导通,此时升压电路的输出电容 C0 对限流电感 L2 和执行器充电,充电电流近似线性增长。

2) 充电续流阶段:如图 7(b) 所示, Q2 关断,充电脉冲结束后,控制 Q1 关断,充电电流达到最大,流经限流电感 L2 的充电电流无法突变, Q2 中反向并联的体二极管导通,为充电电流提供续流回路,继续对执行器充电,直到限流电感 L2 的电流减小到零,执行器两端电压最大。

3) 电压维持阶段:通过恒压控制保证执行器的输出位移保持不变。

4) 放电初始阶段:如图 7(c) 所示, Q1 关断,控制 Q2 导通,此时执行器经 L2、Q2 回路放电,执行器等效电容储存的电能向限流电感 L2 放电,放电电流逐步增大。

5) 放电回馈阶段:如图 7(d) 所示, Q1 关断,当放电电流达到峰值时,控制 Q2 断开,由于电感的感抗作用,放电电流下降缓慢, Q1 体二极管导



(d) Q1 和 Q2 关断(放电)
(d) Q1 and Q2 turn off (discharging)

图 7 充放电过程电流示意图

Fig. 7 Schematic diagram of current flow during charging and discharging process

通,持续放电,电感 L2 通过 Q1 回路向 C0 充电。除了执行器等效电阻和电感 L2 的等效电阻以及开关管导通电阻消耗部分能量外,把执行器余下的能量回馈到前级供电电源,提高能量利用效率。

6) 休止阶段:完成电流的放电和电能回收后,电路停止动作。

2.2.2 基于 MATLAB/Simulink 的充放电仿真分析

用 MATLAB/Simulink 对上述充放电电路进行仿真计算,仿真模型包括直流电源、MOSFET 开关管 Q1 和 Q2、脉冲信号发生器、限流电感、电阻、二极管以及电容器等元器件,利用电容器近似代替压电执行器,仿真模型如图 8 所示。

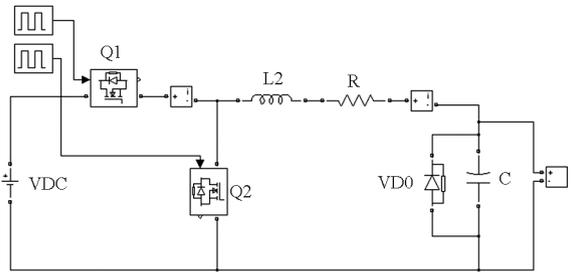
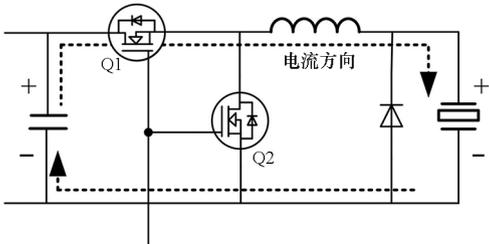


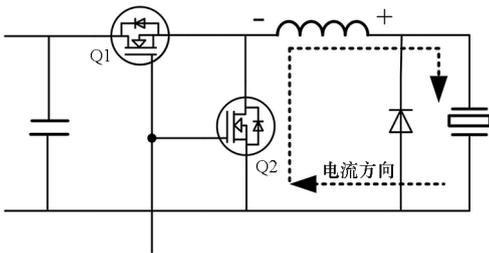
图 8 基于 MATLAB/Simulink 的充放电电路仿真模型
Fig. 8 Simulation model of charging and discharging circuit based on MATLAB/Simulink

利用建立的电路仿真模型对充放电过程进行仿真,以此来分析电路的可行性。

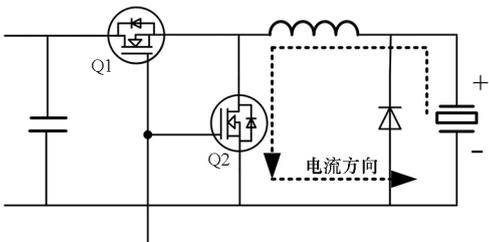
电路参数设计时,考虑驱动电压上升和下降时间不超过 0.2 ms,充电峰值电流小于 20 A,压电执行器两端的驱动电压保持在 140 V 左右,电路总等效电阻为 1 Ω(包括压电执行器等效电阻、电感线电阻、功率 MOSFET 导通电阻)等。综合上述因素,采用参数扫描法选定限流电感 L2 为 1 mH,开关周期为 1 ms。对执行器充电时, Q1 导通时间为 0.08 ms,为维持电容两端电压在 140 V,需充电电压为 165 V;在执行器放电时, Q2



(a) Q1 导通, Q2 关断
(a) Q1 turns on and Q2 turns off



(b) Q1 和 Q2 关断(充电)
(b) Q1 and Q2 turn off (charging)



(c) Q1 关断, Q2 导通
(c) Q1 turns off and Q2 turns on

导通时间为 0.12 ms,执行器等效电容为 7 μF,回路等效电阻为 1 Ω。仿真得到的压电执行器充放电电压和电流如图 9 所示。

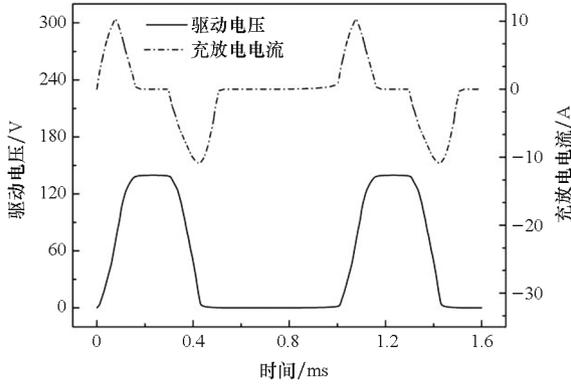


图 9 执行器充放电电压和电流

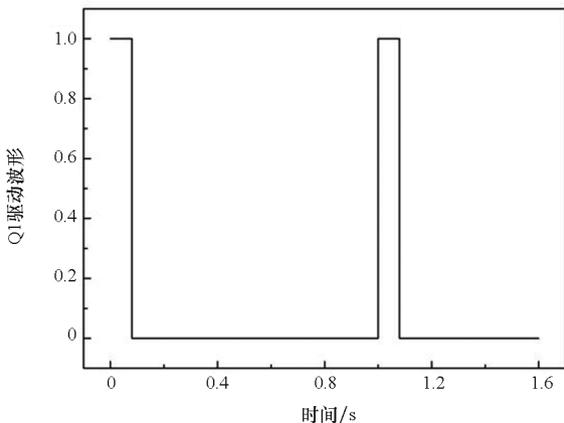
Fig.9 Charge and discharge voltage and current of actuator

从图 9 中可以看出,计算得到的充放电峰值电流为 10.5 A,执行器两端驱动电压脉冲上升和下降时间小于 0.2 ms(电压上升时间为 0.17 ms,下降时间为 0.12 ms),说明该电路可实现的最小驱动脉宽为 0.3 ms。驱动电压峰值维持时间为 0.22 ms,执行器工作周期为 1 ms,驱动电压和电流波形接近于理想驱动波形。

如图 10 所示为 Q1 导通 0.08 ms、Q2 导通 0.12 ms 时的驱动波形和流经 Q1 的电流,可以看出,流经 Q1 的电流波形为近似三角形,且负的三角形的波形面积略小于正的三角形面积,表明了执行器的等效电容的储能绝大部分回馈到了充电电源,可计算得到充电过程电源充电能量为:

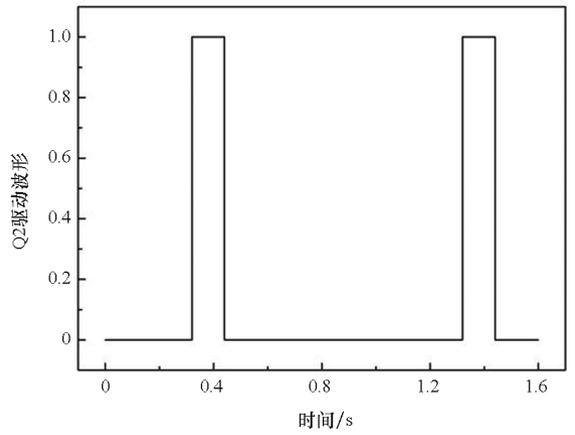
$$W_1 = \frac{U_{in} I_{inmax} T_{in}}{2} \quad (1)$$

式中, U_{in} 为充电电压(165 V), I_{inmax} 为充电峰值电流(10.5 A), T_{in} 为 Q1 充电电流时间(0.08 ms),则得到充电能量为 69.3 mJ。



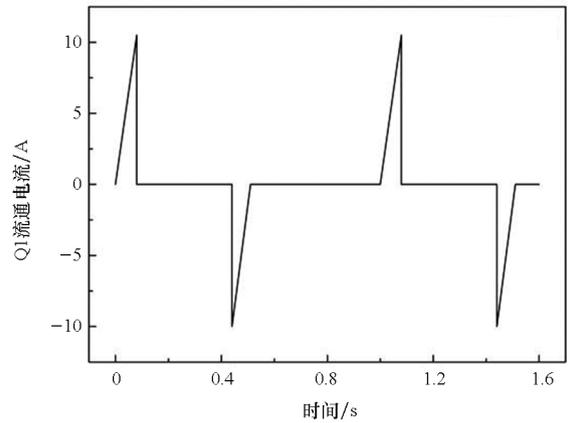
(a) Q1 驱动波形

(a) Waveform driving Q1



(b) Q2 驱动波形

(b) Waveform driving Q2



(c) 流经 Q1 的电流

(c) Current flowing through Q1

图 10 Q1 导通 0.08 ms、Q2 导通 0.12 ms 时的驱动波形和流经 Q1 的电流

Fig.10 Driving waveforms and current flowing through Q1 when Q1 conducts for 0.08 ms and Q2 conducts for 0.12 ms

放电过程回馈能量为:

$$W_2 = \frac{U_{in} I_{out} T_{out}}{2} \quad (2)$$

式中, I_{out} 为放电峰值电流(10 A), T_{out} 为放电回馈时间(0.07 ms),则得到放电回馈能量为 57.75 mJ。

充放电过程的能量回馈率为:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} \quad (3)$$

通过上式可知,在将压电执行器视为纯电容的条件下,该电路的能量回馈率理论上可达到 83.33%,表明该电路可以有效地降低能量消耗。

2.3 升压补偿控制电路

Boost 升压电路是把蓄电池 48 V 电压提升到充放电电路需要的充电电压,其工作原理可简化

为图 11 所示。

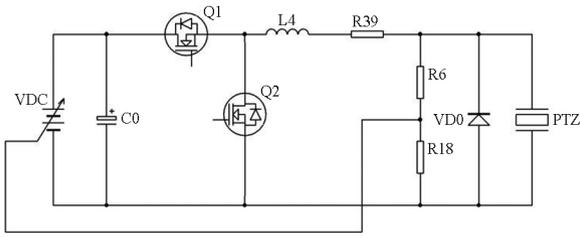


图 11 电路工作简图
Fig. 11 Circuit working diagram

在充电阶段,当设定执行器两端电压为140 V 时,由于电路分压,供电电压需超过 140 V 才能保证执行器两端电压为 140 V,而供电电压又受执行器等效电容大小的影响。仿真的结果表明,当电容为 7 μF 时,供电电压需达到 156 V 才能满足要求。

随着温度升高,执行器等效电容变化较大,如果此时升压电源保持固定值不变,压电执行器上获得的电压会明显改变,进一步使得执行器输出位移也将发生变化。为了解决这个问题,必须引入反馈调节,控制对象是执行器两端的电压,使其在参数变化时也能保持稳定。为此,供电电压需要作为可调节量参与控制,形成控制外环,内环则是升压电路内部的快速升压和稳压调节。因此设计的升压控制电路应具有快速调节输出电压的功能。

图 12 为升压补偿控制电路图,包括控制电路和以 Q3、L2、D4、C12 为主体的升压电路。通过对比执行器两端的电压与基准值的差值来实现电压的稳定控制,基准值由端子输入 0~3 V 直流信号进行调整,外环控制调节即通过该端子调节输出电压。

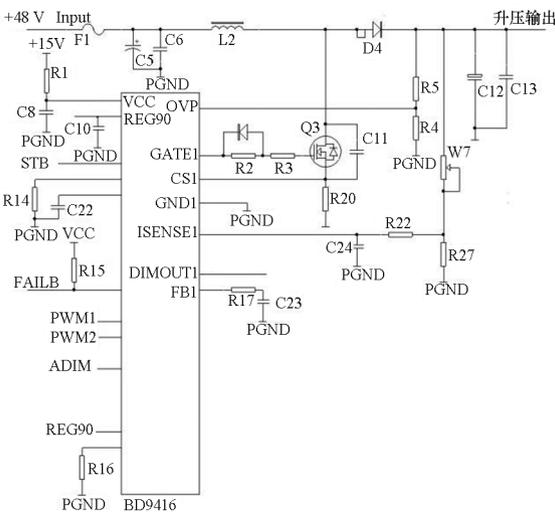


图 12 Boost 升压补偿电路原理图
Fig. 12 Design diagram of Boost compensation circuit

2.4 电流检测及过流保护电路

由于压电叠堆所处电场强度可达到 2 kV/mm, 为避免强电场下产生过高电流而击穿执行器,设计了电流检测及过流保护电路,如图 13 所示。

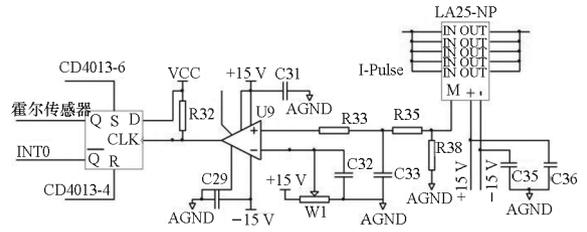


图 13 电流检测及过流保护电路
Fig. 13 Current detection and overcurrent protection circuit

通过信号采集与转换电路将通过执行器的电流值信号转化为电压信号,将该信号发送至比较器 U9, U9 的另一端采集电位器发送的安全电压设定值,当采集值超过设定的安全电压时,即表示电流过高;比较器输出高电平信号,发送至触发器,触发器发生一次翻转,输出电平信号发送给单片机,中断程序运行,此外还会发送给 GAL ATF16V8B10GC 逻辑电路,如图 14 所示,控制升压电路和充放电电路的 MOSFET 功率开关管立刻断开,停止电路工作。

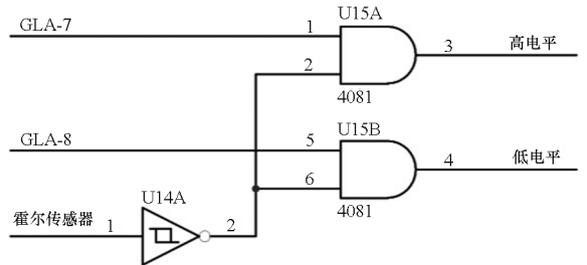


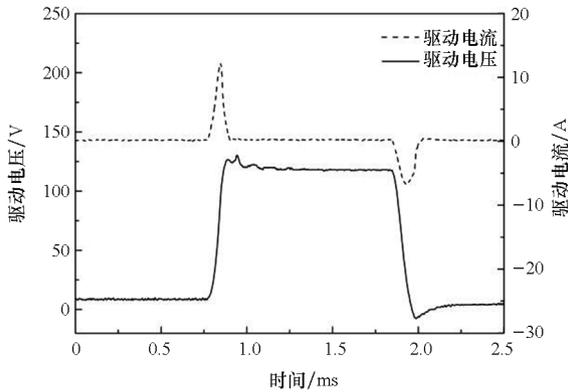
图 14 GAL ATF16V8B10GC 逻辑电路
Fig. 14 GAL ATF16V8B10GC logic circuit

3 压电执行器驱动电路测试

搭建测试系统对设计的驱动电路进行试验,利用 48 V 直流稳压电源供电,通过电路升压和调压控制最终输出电压为 120 V 和 140 V,压电执行器的工作脉宽为 1 ms。

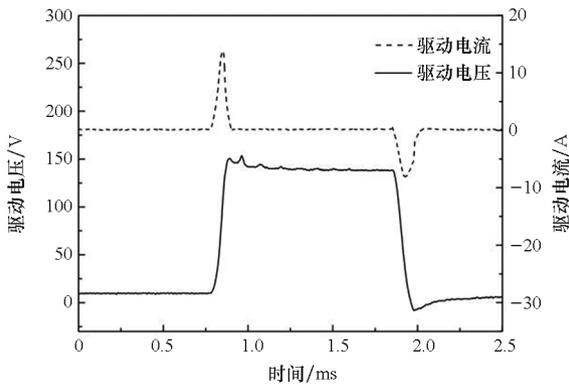
图 15 所示为压电执行器两端目标电压分别设定为 120 V 和 140 V 时的充放电过程曲线,从试验结果看出,目标电压由 120 V 升高至 140 V,电流峰值增加约 2.8 A,充放电时间基本不变,表明该电路可以较好地保持快速响应。此外,由于选取的电路电感值偏高,且放电过程 Q2 设定的导通时间较长于 Q1 的导通时间,因此充电过程

峰值电流略微偏高(约为 13.8 A),放电过程峰值电流较低(只有 6 A),远远满足低于 20 A 安全电流的设计要求。



(a) 目标电压 120 V

(a) Target voltage of 120 V



(b) 目标电压 140 V

(b) Target voltage of 140 V

图 15 压电执行器两端电流和电压试验波形

Fig. 15 Current and voltage test wave forms of piezoelectric actuator drive circuit

图 16 所示为驱动电压为 120 V 时原电路充放电过程曲线,和图 15(a)对比可以看出,改进前电流峰值达到了 17 A,但高峰值时间很短,不利于快速充电,电路被击穿的风险较高;改进后的电

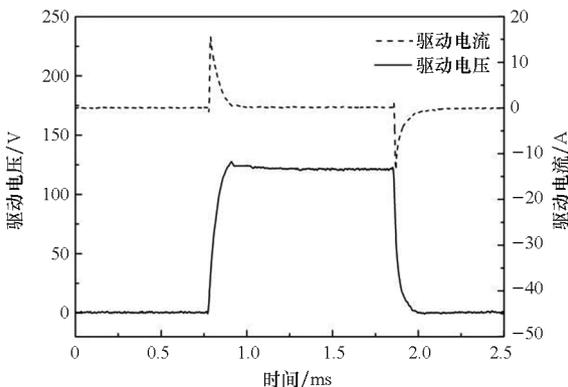


图 16 原电路充放电过程

Fig. 16 Charge and discharge process of the original circuit

路中电流峰值明显降低(约 3 A),充电时间略微有所缩短(约 0.06 ms),放电时间变化不明显,驱动电压维持较好。因原电路是通过直流稳压电源直接供电,不受升压电路影响,因此维持阶段的电压基本保持不变。

4 结论

利用 ATmega168PA-AU 单片机和功率 MOSFET 开关管,制定了基于电压反馈的补偿控制策略和六阶段电路驱动模式,设计了压电执行器闭环补偿控制电路,实现了压电执行器两端驱动电压的闭环补偿控制和基于三角波形驱动电流的充放电过程,试验表明:

1)改进后的驱动电路避免了因工作温度变化导致执行器等效电容变化、进一步影响两端驱动电压,降低了对压电执行器温度性能的要求,也降低了驱动电路及其控制程序的难度和要求,有利于加快压电执行器的实用化进程。

2)利用单片机对执行器驱动电压幅值进行采样和处理,发送调整信号给升压控制电路,通过调节升压电路的输出电压,可维持执行器驱动电压的稳定。

3)采取更为精确可靠的六阶段电路工作模式后,有效地降低了峰值电流,提高了执行器充放电效率,同时,电路的能量回馈率理论上可达到 83.33%。

4)压电驱动电路试验表明,改进后的电路充放电速度有所提高,充电时间缩短了 0.06 ms,峰值电流降低了 3 A,驱动电路在灵敏性和可靠性方面都有所改善。

参考文献 (References)

- [1] DEB P, PAUL A. Enhancing the usability range of acetylene in CI engines through split injection of high-reactive fuel under RCCI operation: optimized operability using an MCDM approach[J]. Energy, 2024, 308: 133073.
- [2] 毕玉华,张凯,黄粉莲,等. 国六柴油机轨压和喷油正时对柴油机性能的影响[J]. 内燃机工程, 2024, 45(3): 59-69.
BI Y H, ZHANG K, HUANG F L, et al. The influence of rail pressure and injection timing on the performance of a China VI diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2024, 45(3): 59-69. (in Chinese)
- [3] 刘楠,刘振明,龚鑫瑞,等. 压电驱动器动态特性试验研究[J]. 海军工程大学学报, 2019, 31(6): 51-55, 60.
LIU N, LIU Z M, GONG X R, et al. Experimental study on dynamic characteristics of piezoelectric actuator[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2019, 31(6): 51-55, 60. (in Chinese)
- [4] CHOI E, PARK J, HWANG J, et al. Injection rate

- measurements and machine-learning based predictions of ECN Spray A - 3 piezoelectric injector [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 254: 123827.
- [5] 刘振明, 刘晨, 刘楠, 等. 船用柴油机压电喷油器执行器动态特性试验研究[J]. *推进技术*, 2021, 42(11): 2625 - 2632.
- LIU Z M, LIU C, LIU N, et al. Experimental study on dynamic characteristics of piezoelectric injector actuator of marine diesel engines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(11): 2625 - 2632. (in Chinese)
- [6] 刘振明, 刘楠, 刘景斌, 等. 压电陶瓷温度效应对燃油喷射特性的影响仿真[J]. *内燃机学报*, 2020, 38(4): 326 - 333.
- LIU Z M, LIU N, LIU J B, et al. Simulation study of temperature effect of piezoelectric crystal on fuel injection characteristics[J]. *Transactions of CSICE*, 2020, 38(4): 326 - 333. (in Chinese)
- [7] 姚国仲, 路璐, 肖雨寒, 等. 压电喷油器驱动电路和策略的研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 47(5): 49 - 60.
- YAO G Z, LU L, XIAO Y H, et al. Driver circuit and strategy of piezo injector[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science)*, 2022, 47(5): 49 - 60. (in Chinese)
- [8] KANCHAN M, SANTHYA M, BHAT R, et al. Application of modeling and control approaches of piezoelectric actuators: a review[J]. *Technologies*, 2023, 11(6): 155.
- [9] 司马津甫, 赖磊捷, 李朋志, 等. 三自由度压电偏摆台耦合迟滞模型建模与逆补偿[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(20): 2964 - 2974.
- SIMA J F, LAI L J, LI P Z, et al. Coupled hysteresis model and its inverse compensation for three-degree-of-freedom tip-tilt-piston piezoelectric stage [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(20): 2964 - 2974. (in Chinese)
- [10] 王军, 熊庆辉, 金毅, 等. 电控喷油器压电堆执行器位移波动及其控制技术[J]. *北京理工大学学报*, 2019, 39(3): 248 - 254.
- WANG J, XIONG Q H, JIN Y, et al. Displacement wavelet of piezoelectric multilayer stack actuator and its control technology in fuel injector [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2019, 39(3): 248 - 254. (in Chinese)
- [11] 刘楠, 刘振明, 龚鑫瑞, 等. 压电驱动器陶瓷材料温度特性研究及模型修正[J]. *西北工业大学学报*, 2019, 37(5): 1011 - 1017.
- LIU N, LIU Z M, GONG X R, et al. Study on temperature characteristics of ceramic materials for piezoelectric actuators and model modification [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2019, 37(5): 1011 - 1017. (in Chinese)
- [12] 王旭建, 王新杰, 李峰. 引信用双工形压电驱动器的设计及其驱动特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(8): 135 - 144.
- WANG X J, WANG X J, LI F. Design and driving characteristics of duplex piezoelectric actuator for fuze [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(8): 135 - 144. (in Chinese)