

# 压电驱动无针注射器脉冲电源设计\*

梁 莉, 董义奎, 张铁民

(华南农业大学工程学院 广州, 510642)

**摘要** 针对压电驱动无针注射对电源的需求, 设计了与压电无针注射器配套的脉冲电源, 该脉冲电源的驱动控制系统由电池提供 12 V 的直流电压, 通过 Buck 与推挽电路级联电路升压后整流滤波输出 0~400 V 直流可调电压, 由反馈电路对输出电压进行校正, 最后全桥逆变电路实现输出频率与占空比可调, 且输出电压在 0~400 V 随占空比的改变成线性变化的瞬时高压脉冲信号。实验结果表明, 该脉冲信号稳定可靠, 输出纹波在范围 0.5% 以内, 满足了压电驱动无针注射电源需求。

**关键词** 无针注射; 脉冲电源; 可调电压; 频率可调

**中图分类号** TN86

## 引 言

无针注射用于疫苗注射, 可以消除针刺带来的感染, 大幅降低疫病发生, 缩短注射时间, 减少创伤, 提高注射效率和疫苗的吸收率, 世界卫生组织呼吁大力发展无针注射技术。无针注射的动力驱动直接影响到注射效果, 以压电陶瓷作为动力很容易进行通断控制, 反应灵敏, 可以有效控制注射深度。压电陶瓷驱动电源分为电流型和电压型。电流型驱动电源可以改善压电陶瓷的迟滞和蠕变, 但是电路比较复杂, 充电电流小, 响应时间长。电压型驱动电源功耗小、效率高, 但是电源输出纹波较大, 频响范围较窄<sup>[1-4]</sup>。

根据压电驱动无针注射需求, 采用 PWM 控制技术设计组合式脉冲电源, 输出 0~400 V 电压幅值和频率可调的小电流连续的瞬时高压脉冲信号, 输出信号稳定可靠, 以精确控制注射用量。

## 1 驱动电源主电路设计

由电池提供 12 V 的直流电压, 通过 Buck 与推挽电路级联电路升压后整流滤波输出 0~400 V 直流可调电压, 经过全桥逆变电路输出脉冲电压。微处理器的输出经过光耦驱动为 Buck 与推挽级联电路和全桥逆变电路提供驱动控制信号, 反馈电路对输出电压进行校正, 系统主电路组成如图 1 所示。

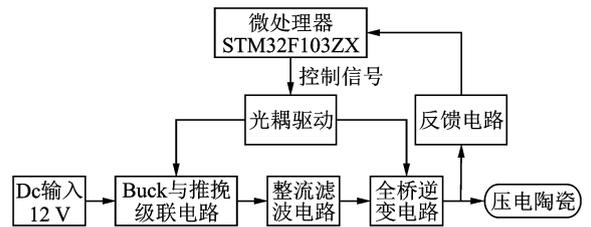


图 1 驱动控制系统硬件结构框图

Fig. 1 Drive control system block diagram

## 2 硬件电路设计

### 2.1 基于推挽电路的脉冲电源电路

基于推挽电路的脉冲电源由 Buck 电路、推挽电路、整流滤波和反馈电路组成, 如图 2 所示。

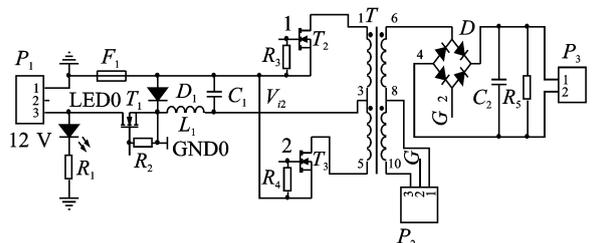


图 2 基于推挽电路的脉冲电源电路原理图

Fig. 2 The power supply circuit principle diagram of push-pull circuit based on pulse

#### 2.1.1 Buck 与推挽级联电路

Buck 与推挽级联电路由 MOS 管、二极管、电

\* 广东省科技计划资助项目(2018B030311028, 2014A020208090); 广州市科技计划资助项目(201510010227)  
收稿日期: 2017-02-05; 修回日期: 2017-04-12

感、电容和变压器组成。12 V 的直流输入通过调节 MOS 管  $T_1$  占空比控制 Buck 电路输出 0~12 V 直流电压, Buck 输出电压作为推挽电路的输入电压(即  $V_{i2}=0\sim 12\text{ V}$ )。由于推挽电路互补,为避免两个开关管同时导通,所以两个 MOS 管  $T_2$  和  $T_3$  的占空比  $0<\alpha<50\%$ 。 $T_2$  和  $T_3$  断态时承受的峰值电压均为两倍的  $V_{i2}$ , 并且还要留有裕量,同时考虑无针注射功率较小, Buck 输出电流不超过 2 A。为此,选用 MOS 管选择型号为 FU120, 同理,  $T_1$  也选用 FU120<sup>[5]</sup>。

### 2.1.2 整流滤波电路

整流电路是由 4 个整流二极管组成全桥整流, 因为输出最高电压  $U_0$  在 400 V 左右, 经过整流桥反向电压为

$$U_R = \sqrt{2}U_0 \quad (1)$$

留一定的裕量, 取  $U_R \geq 600\text{ V}$ , 而 DB107 能承受的最大反向电压为 1 kV, 完全满足要求。滤波电容  $C_2$  为电解电容且电容值为  $22\ \mu\text{F}/630\text{ V}$ 。

### 2.1.3 全桥逆变电路设计

全桥逆变电路由 4 个 MOS 管构成 H 桥, 如图 3 所示, 通过 PWM 控制开关管( $T_4 \sim T_7$ )的通断, 实现单/双相之间的转换, 其中: HDC 为直流输入正极; LDC 为直流输入负极。

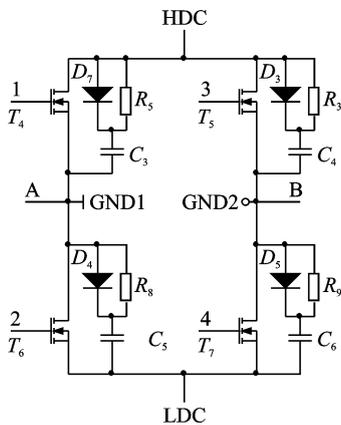


图3 全桥逆变电路

Fig. 3 Full-bridge inverted circuit

MOS 管在开关过程中会产生瞬态冲击高压, 为了减少产生的电压应力, 采用了 RCD(电阻  $R_s$ 、电容  $C_s$  和二极管  $VD_s$  的英文首字母)缓冲电路对其进行保护。由于电路工作在较高频状态, 因此选用玻璃钝化的超快速二极管 BYV26D 快速恢复, 电容  $C_3$  使绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, 简称 IGBT)电压在  $t_f$  时间内快速上升

到  $2V_{\text{HDC}}$ 。

$$C_3 = \frac{\left(\frac{I_p}{2}\right)t_f}{2V_{\text{HDC}}} \quad (2)$$

其中:  $I_p$  为全桥逆变电路的输入电流;  $t_f$  为 IGBT 电流从初始值下降到零的时间;  $V_{\text{HDC}}$  为输入电压, 经计算电容取 220 pF。

存储在电容中的大部分电量被电阻消耗, 为避免电容饱和, 在下一个关断前要求电容剩余的电量不得超过所充电荷的 5%, 因此选择电阻为  $30\ \Omega$ <sup>[6-8]</sup>。

## 2.2 光耦驱动电路设计

### 2.2.1 Buck 驱动电路

如图 4 所示, 通过 TLP251 给 Buck 电路的 MOS 管  $T_1$  加入驱动信号。STM32 的 2 号引脚给 TLP251 输入 PWM1, TLP251 的 6 号引脚提供给 MOS 管  $T_1$ , 驱动 MOS 管  $T_1$  的开关。 $R_{10}$  为栅极电阻, 取值在  $10\sim 30\ \Omega$  之间, 如果过高会导致上升时间很长, 过低会导致过阻尼, 故取中间值  $R_{10} = 20\ \Omega$ ,  $R_2$  为 MOS 管的栅极保护电阻, 用来调节开关速度, 减少栅极出现振铃现象。减小 EMI 可对栅极电容充放电起限流作用, 减慢开关速度保证了栅极稳定, 取值  $20\ \text{k}\Omega$ ,  $R_{11}$  为限流电阻, 取  $R_{11} = 1\ \text{k}\Omega$ 。

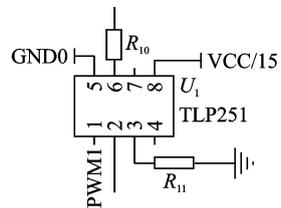


图4 Buck 电路驱动电路

Fig. 4 Buck circuit drive circuit

### 2.2.2 推挽和全桥驱动电路

如图 5 所示, 采用具有自举功能的 NCP5181 作为推挽电路和全桥电路的驱动器, 控制 MOS 管的开关, NCP5181 为一款相互独立的互补输出芯片, 其 1 号和 2 号引脚接受输入信号, 4 号和 7 号引脚是作为输出,  $C_7$  为自举电容, 用作抬升电压, 取值为  $0.1\ \mu\text{F}$ ;  $D_8$  为续流二极管, 选择高速开关管 FR107;  $D_6$  和  $D_7$  加速 MOS 管的放电, 选择 1N4148; 电阻  $R_{12}$  和  $R_{13}$  为栅极电阻, 取值均为  $20\ \Omega$ 。

## 2.3 反馈电路设计

如图 6 所示,  $V_0$  为输出电压, VCC 为芯片供电

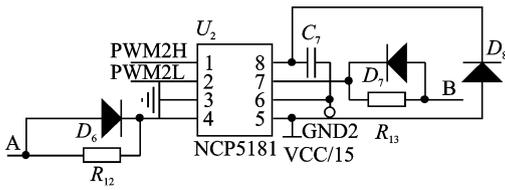


图 5 推挽和全桥驱动电路

Fig. 5 Push-pull and full-bridge drive circuit

电压,采样电路  $R_{19}$  的取值要考虑:a. TL431 参考输入端的电流一般为  $2 \mu\text{A}$  左右,为了避免此端电流影响分压比和噪音的影响,一般取流过电阻  $R_{19}$  的电流为参考段电流的 100 倍以上,所以此电阻要小于  $2.5 \text{ V}/200 \mu\text{A}=12.5 \text{ k}\Omega$ ; b. 待机功耗在满足小于  $12.5 \text{ k}\Omega$  的情况下尽量取大值<sup>[6, 9]</sup>。这里采用滑动变阻器  $R_{18}$  和  $R_{19}$  根据需要进行适当的调节。

由于 TLP431 的死区电流为  $1 \text{ mA}$ ,也就是  $R_{15}$  的电流接近于零时,也要保证 TLP431 有  $1 \text{ mA}$ ,所以  $R_{16} \leq V_0/1 \text{ mA}$ , $R_{14}$  取  $1 \text{ k}\Omega$ ,补偿电路电容  $C_9 = 0.02 \mu\text{F}$ <sup>[5, 8-9]</sup>。

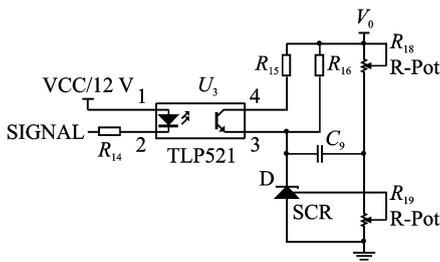


图 6 反馈电路

Fig. 6 Feedback circuit

### 3 驱动电源软件设计

#### 3.1 总体软件设计

采用 STM32F103ZX 作为控制芯片,系统的软件结构框图如图 7 所示。TIM1 和 TIM8 输出 2 路 PWM,TIM2 输出 1 路 PWM。

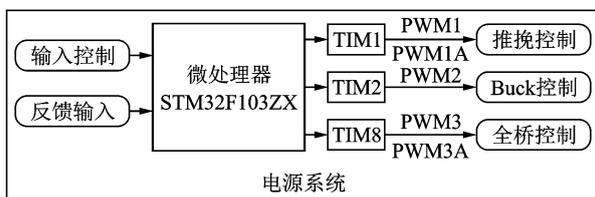


图 7 软件结构框图

Fig. 7 Software block diagram

系统上电后,首先进行系统初始化,开启中断服务函数;并进行开机检测是否正常,若正常则启动脉冲电源,否则进入异常处理<sup>[10]</sup>;对压电陶瓷形变进行控制,若无针注射量实验值与理论值相等,工作正常,若无针注射量的实验值与理论值存在偏差,工作不正常,马上结束程序。实时判断系统工作是否在正常状态,若不正常则进入异常处理,以保证系统安全,系统总体软件控制流程图如图 8 所示。实验注射量是每次注射用量筒测得,理论注射量=压电陶瓷的变形量 \* 安瓿的横截面积。

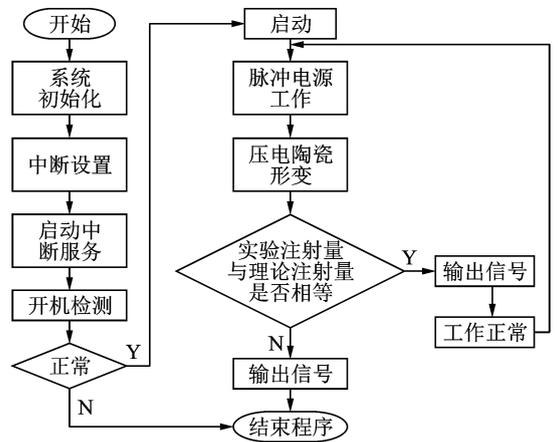


图 8 控制系统软件程序框图

Fig. 8 Control system software block diagram

#### 3.2 PWM 信号设计

采用 STM32F103ZX 的定时器 TIM1 和 TIM8,输出两路互补 PWM,控制 NCP5181 分别驱动推挽和全桥逆变电路。通用定时器 TIM2 输出一路 PWM,控制 TLP251 驱动 Buck 电路,用示波器测得 TIM1 和 TIM8 的互补输出波形如图 9 所示。图中横坐标表示时间/ $\mu\text{s}$ ,纵坐标表示电压/ $\text{V}$ 。TIM2 通过按键调节占空比,一次输入加 10%或者减 10%,呈梯形加减,得到  $\alpha = 40\%$ , $\alpha = 50\%$ , $\alpha = 60\%$  和  $\alpha = 70\%$  4 个输出波形,如图 10 所示。图中横坐标表示时间/ $\mu\text{s}$ ,纵坐标表示电压/ $\text{V}$ 。

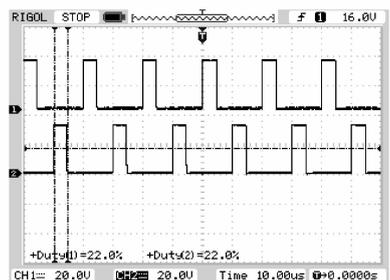


图 9 互补输出

Fig. 9 Complementary output

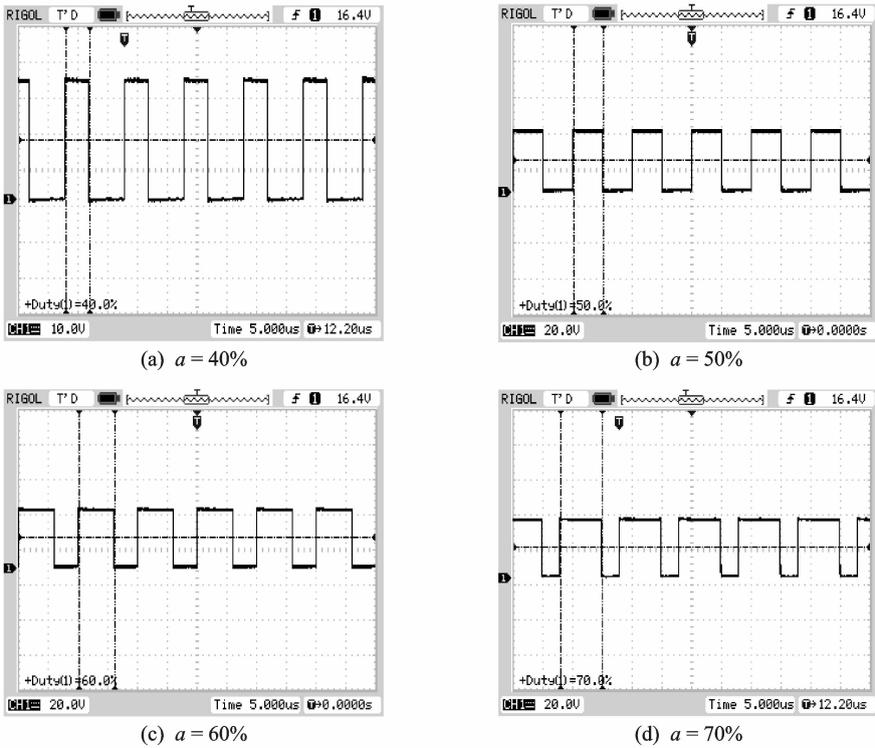


图 10 Buck 电路 PWM 输入波形图

Fig. 10 PWM input waveform of the Buck circuit

## 4 实验分析

实物图如图 11 所示。其中：直流电源提供 12 V 直流电；Buck 与推挽级联电路和整流滤波电路产生 0~400 V 可调直流电；全桥逆变电路将直流电转换成交流电输出；7805 稳压芯片给芯片供电；STM32 输出 PWM 调控输出；示波器测试输出波形；万用表测输出电压，实时观测比较。

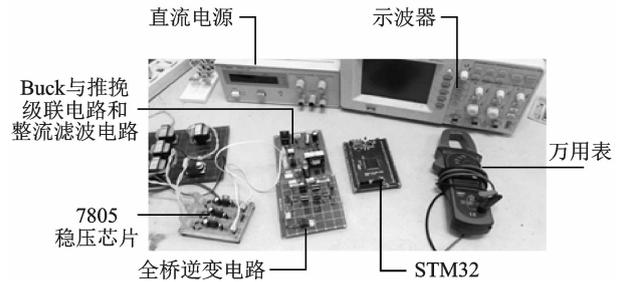


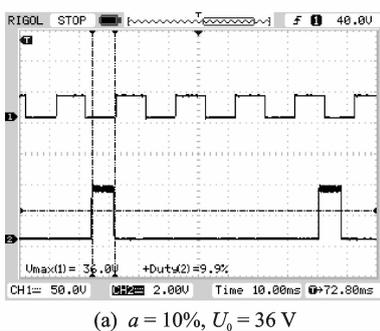
图 11 实物图

Fig. 11 Physical diagram

### 4.1 输出波形

#### 4.1.1 调幅输出波形

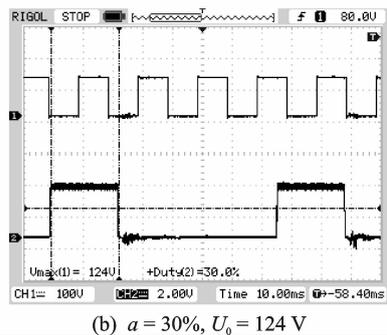
调节 Buck 电路的占空比  $a$ ，得到不同的输出电压  $U_0$ ，用示波器测其输出的脉冲波形，取  $a=10\%$ ， $a=30\%$ ， $a=60\%$  和  $a=90\%$ ，如图 12 所示。



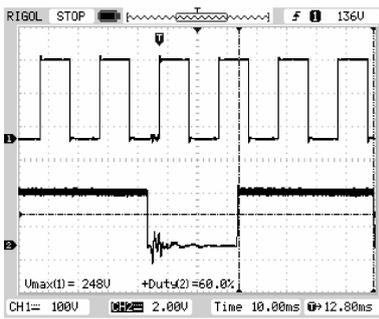
(a)  $a = 10\%$ ,  $U_0 = 36\text{ V}$

#### 4.1.2 调频和调占空比输出波形

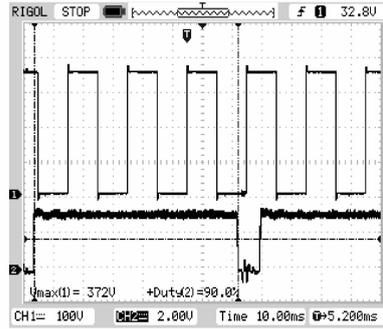
如图 13 所示，取 3 种波形的占空比都为 50%，频率分别为 100, 300 和 500 Hz。频率不同，单位时间内 3 个脉冲产生高电平的次数明显不同。



(b)  $a = 30\%$ ,  $U_0 = 124\text{ V}$



(c)  $a = 60\%$ ,  $U_0 = 248\text{ V}$



(d)  $a = 90\%$ ,  $U_0 = 372\text{ V}$

横坐标表示  $t/\text{ms}$ , 纵坐标表示  $U/\text{V}$

图 12 电路输出波形

Fig. 12 Circuit output waveform

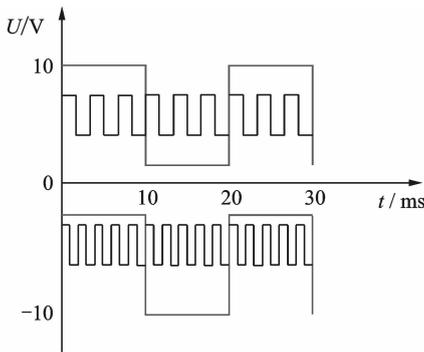


图 13 调频波形图

Fig. 13 FM waveform cycle waveform

如图 14 所示, 波形 A 是频率为 50 Hz、占空比为 50% 的方波, 波形 B 是频率为 100 Hz、占空比为 50% 的方波, 波形 C 是频率为 100 Hz、占空比为 80% 的方波。比较波形 A 和波形 B, 占空比一定时频率增加了一倍, 周期  $t$  为原来的一半, 相同的周期  $t$  内, 高电平触发的次数增加了一倍。比较波形 B 和波形 C, 频率一定时高电平触发的次数相同, 但是占空比越大, 每次触发时间越长。

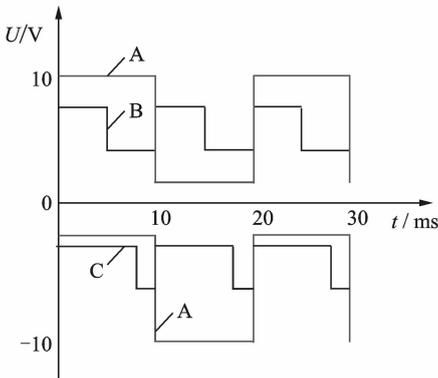


图 14 调占空比波形图

Fig. 14 Adjust the duty

## 4.2 实验数据

通过实验分别测得推挽电路占空比变化时对应的脉冲输出、脉冲电源输出频率与脉冲数脉冲宽度的关系和通过调节 Buck 电路得到最终脉冲电压输出数据。

### 4.2.1 推挽电路输出

通过死区调节推挽电路, 占空比从 5% 到 45%, 以 5% 为间隔, 10 V 直流输入, 得到相应的电压输出如表 1 所示。

表 1 推挽输出

Tab. 1 Push-pull output

推挽占空比/%	5	10	15	20	25	30	35	40	45
电压输出/V	364	362	360	360	360	360	344	340	340

### 4.2.2 脉冲电源输出频率

为防止两个管子同时导通, 导致瞬间短路, 烧毁 MOS 管, 选定输出占空比  $\alpha$  为 45%, 小于 50%, 输出频率为  $F_1$  时的脉冲数为 1 个, 通过程序控制全桥电路输出频率, 即脉冲电源的输出频率来实现改变输出脉冲数, 输出脉冲宽度和输出脉冲数为

$$D_n = \frac{\alpha}{F_n} \quad (3)$$

$$N_n = \frac{F_n}{F_1} \quad (4)$$

其中:  $D_n$  为第  $n$  次输出脉冲宽度;  $\alpha$  为输出占空比;  $F_n$  为第  $n$  次输出频率;  $N_n$  为第  $n$  次输出脉冲数。

### 4.2.3 脉冲电源输出幅值

推挽电路占空比为 30% 时, 实验测得 Buck 电路占空比取 10%, 20%, ..., 90% 等 9 组, 以 10% 递增的输出电压  $U_0$  的相关数据如表 2 所示。

表2 脉冲输出  
Tab.2 Pulse output

Buck 电路 占空比/%	10	20	30	40	50	60	70	80	90
输出电压/V	36	84	124	168	212	248	284	328	372

### 4.3 相关曲线

根据表2数据,当推挽电路的占空比一定时,得到 Buck 电路占空比与输出电压量之间的关系曲线如图15所示。通过 SPSS 统计分析软件进行回归线性分析得  $R^2=0.999$ 。

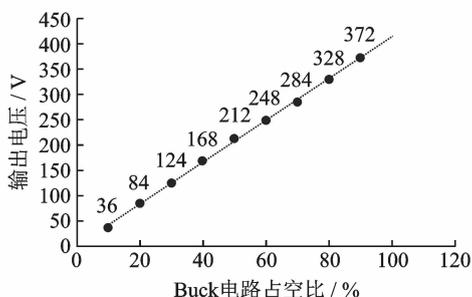


图15 Buck 电路占空比与输出电压的关系曲线

Fig. 15 Buck circuit duty cycle and the output voltage of the curve

## 5 结论

1) 设计了新型脉冲电源用来驱动压电动力的无针注射器,该脉冲电源可提供不同幅值、不同频率的脉冲动力源,且体积小,结构简单。

2) 输入12V直流电,通过 Buck 与推挽电路的级联电路输出0~400V可调的直流电,经过全桥逆变电路,最终输出幅值和频率可调的脉冲电。

3) 通过调节输出频率和占空比,改变输出波形的周期和导通时间,不仅提高输出效率,而且更加精确实现对无针注射器流量精准控制。

### 参 考 文 献

- [1] Hang T, Glaum J, Genenko Y A, et al. Investigation of partial discharge in piezoelectric ceramics[J]. Acta Materialia, 2016, 102: 284-291.
- [2] 张磊. 高压压电陶瓷驱动电源技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [3] Chen Haichu, Zhang Ruihua, Xiong Genliang, et al. Research on the piezoelectric driving micro-flux valve power supply[J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 58-60: 727-732.

- [4] Sun Yeming, Chen Guangming, Zeng Ping. Driving power supply of single-chamber and single-vibrator piezoelectric pump[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 442: 386-391.
- [5] Abdelbagi A M, Almuslet N A. Characterization of variable high voltage power supply designed and constructed for low pressure gas discharge[J]. International Journal of Emerging Sciences, 2011, 1(4): 735-744.
- [6] 廖贻泳. 基于 DSP 的压电电机数字驱动电源研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [7] 龙涛元, 张铁民, 廖贻泳. 宏微运动一体化压电直线电机驱动电路设计[J]. 中国电机工程学报, 2015 (S1): 184-189.  
Long Taoyuan, Zhang Tiemin, Liao Yiyong. Design of macro micro motion integrated piezoelectric linear motor drive circuit[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015(S1): 184-189. (in Chinese)
- [8] 张铁民, 许志林, 曹飞, 等. 宏微压电驱动器的电源设计与试验[J]. 压电与声光, 2015, 37(1): 167-171.  
Zhang Tiemin, Xu Zhilin, Cao Fei, et al. Design and experiment of a power supply to drive a macro-micro piezoelectric actuator[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(1): 167-171. (in Chinese)
- [9] 贺斌, 陈华, 谢红霞. 一种数控电位器调节的压电陶瓷驱动电源[J]. 压电与声光, 2012, 34(2): 253-256.  
He Bin, Chen Hua, Xie Hongxia. An piezoelectric ceramic driver power supply implemented by digital potentiometer regulation[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2012, 34(2): 253-256. (in Chinese)
- [10] Ahn S H, Ryoo H J, Gong J W, et al. Low-ripple and high-precision high-voltage DC power supply for pulsed power applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 3023-3033.



第一作者简介: 梁莉, 女, 1963年7月生, 高级实验师。主要研究方向为自动化检测与控制技术、机械设计。曾发表《圆环型压电蠕动泵的结构设计与仿真》(《农业工程学报》2012年第28卷第11期)等论文。

E-mail: ll-scau@163.com

通信作者简介: 张铁民, 男, 1961年11月生, 教授、博士生导师。主要研究方向为机电系统控制、压电驱动、机器人技术和智能检测与控制。

E-mail: tm-zhang@163.com

