

高压大电流压电陶瓷恒流驱动电路设计*

黄俊媛 张 伟 蒋布辉

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要:压电陶瓷驱动器大都采用高压运放对压电陶瓷控制电压,进行电压幅值和功率放大,对电压的控制精度高,广泛应用于驱动电源当中。由于自身耗散功率的限制,压电陶瓷驱动电源的高压运放输出功率有限,无法灵活调整。提供了一种高压大电流压电陶瓷恒流驱动电路。基于单片机控制、光电隔离、高精度数模转换、功率放大、MOSFET 恒流放大以及数字闭环控制等技术,实现了压电陶瓷恒流大电流驱动,输出电流最高可达十几安培,输出电压可以高达几百甚至上千伏。同时,通过电流和电压数字的闭环反馈调节还实现了压电陶瓷充放电电流和电压控制。

关键词:压电陶瓷;恒流驱动;高压;大电流;闭环反馈调节

中图分类号: TN384, TP273.1 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.05.011

Design of constant current drive circuit for high voltage and high current piezoceramics

HUANG Junyuan, ZHANG Wei, JIANG Buhui

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, CHN)

Abstract: Piezoelectric ceramic drivers mostly use high-voltage operational amplifiers to amplify the voltage amplitude and power of the piezoelectric ceramic control voltage, which has high voltage control accuracy and is widely used in driving power supplies. However, due to the limitation of its power dissipation, the output power of the high-voltage op-amp of the piezoelectric ceramic drive power supply is limited and cannot be adjusted flexibly. This article provided a high-voltage and high-current piezoelectric ceramic constant current drive circuit. Based on single-chip control, photoelectric isolation, high-precision digital-to-analog conversion, power amplification, MOSFET constant current amplification, digital closed-loop control, and other technologies, the piezoelectric ceramic constant current high current drive was realized, the output current could reach more than ten amperes, and the output voltage could be up to several hundred or even thousands of volts. At the same time, the charging, discharging current, and voltage control of piezoelectric ceramic was also realized through the closed-loop feedback regulation of current and voltage digital.

Keywords: piezoelectric ceramics; constant current drive; high voltage; high current; closed-loop feedback adjustment

在电介质的极化方向施加电场,电介质一定方向上会产生机械变形或机械压力,当撤去外加电场时,这些变形或应力也会随之消失,这种对电介质施加交变电场引起电介质机械变形的现象,称为逆压电效应^[1]。利用压电陶瓷的逆压电效应可以制成微位移执行器件,具有分辨率高、频响高、推力大、无噪声、不发热及不易受外界电磁场干扰等优点^[2],广泛应用于微位移输出装置、阀控制、力发生装置、

机器人、微型机械制造和超精密加工等重要领域^[3-5]。

随着压电陶瓷的广泛应用及高精度定位需求的增加,对压电陶瓷驱动电源也提出了较高要求。目前,压电陶瓷驱动器大都采用高压运放对压电陶瓷控制电压进行电压幅值和功率放大,高压运放的输出直接驱动压电陶瓷,具有压电陶瓷电压控制精度高的优点^[6-7]。但是,受自身耗散功率的限制,高压运放的输出功率有限,且最高工作电压由高压运

* 国家自然科学基金资助项目(51775304, 51975036)

放本身决定,无法灵活调整^[8]。压电陶瓷可近似等效为电容,采用恒流源驱动可以实现压电陶瓷的线性充放电,充放电时间和电压的可控制好,而且电路结构简单,稳定性好^[9]。目前常见的恒流源驱动电源输出电流都比较小,电压也比较低。中国科学技术大学的金学健等提出了一种改进的恒流源压电陶瓷驱动电源,在静态功耗一定的情况下,提高了其动态输出能力及竞争能力,压电陶瓷驱动电源的样机具有2.4~300 V的输出电压范围,在静态恒定电流为0.1 A时,动态输出电流最大仅0.44 A^[10]。合肥工业大学的吴薇设计了一个可编程、稳定性好、响应速度快的压电陶瓷驱动电源系统,测试的高压电路电压输出只能稳定在8.93~86.95 V的电压范围内,低压电路电压输出也只稳定在36.81~55.75 V的电压范围内^[11]。对于具有较高机械性能,如叠堆型的压电致动器,由于其电容值很大(微法级),为获得高的频率响应,驱动电源必须能够提供很大的瞬时充放电电流和高驱动电压,而现有基于恒流源的驱动电源已很难满足这样的要求。

针对高机械性能、大电容值的压电陶瓷采用小电流恒流电源进行驱动时,存在的动态响应速度慢等问题,本文提供了一种高压大电流压电陶瓷恒流驱动电路。基于单片机控制、光电隔离、高精度数模转换、功率放大、MOSFET恒流放大,数字闭环控制等技术,实现了压电陶瓷恒流大电流驱动,输出电流最高可达十几安培,大大提高了系统的动态响应特性,而且输出电压根据选择的MOSFET功率管耐压值可以高达几百甚至上千伏。

1 系统组成

高压大电流压电陶瓷恒流驱动电路主要由主电路和控制电路两部分组成,如图1所示。

其中,主电路主要由压电陶瓷PZT、充电电源+VCC、MOSFET功率管T1、MOSFET功率管T2和放电电源-VEE组成,主要功能是实现压电陶瓷的高压大电流恒流充电和放电。控制电路主要由DSPIC30F5013单片机控制电路、光电隔离电路I、高速高精度DA转换电路I、OPA548功率放大电路I、光电隔离电路II、高速高精度DA转换电路II、OPA548功率放大电路II、电流信号传感及调理电路、电压信号传感及调理电路组成。

DSPIC30F5013单片机控制电路分别输出两组SPI串行通讯信号,其中SPI串行通讯I信号连接至光电隔离电路I,通过光电转换实现信号隔离,隔离后的串行通讯信号再连接至高速高精度DA转换电路I,将数字信号转换成模拟电压信号 V_{in1} 输出,该信号 V_{in1} 再输入OPA548功率放大电路I进行功率放大,峰值输出电流可达5 A,放大后的信号 V_{d1} 再连接至MOSFET功率管T1的门极,实现MOSFET功率管T1的驱动;同样地,SPI串行通讯II信号连接至光电隔离电路II,通过光电转换实现信号隔离,隔离后的串行通讯信号再连接至高速高精度DA转换电路II,将数字信号转换成模拟电压信号 V_{in2} 输出,该信号 V_{in2} 再输入OPA548功率放大电路II进行功率放大,然后再连接至MOSFET功率管T2的门极,实现MOSFET功率管T2的驱动。

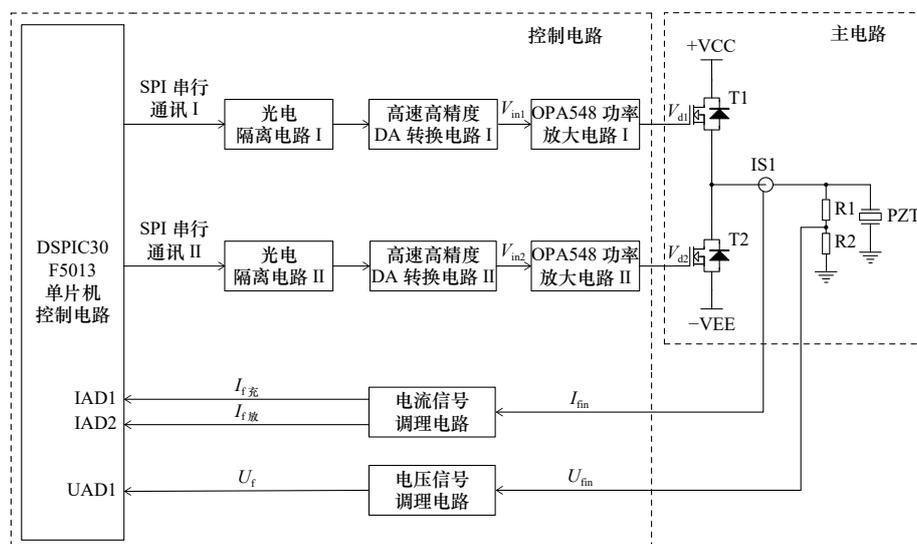


图1 高压大电流压电陶瓷恒流驱动电路组成

2 主电路设计

在图1中, 压电陶瓷恒流驱动主电路主要由压电陶瓷 PZT、MOSFET 功率管 T1 和 MOSFET 功率管 T2 组成。其中, MOSFET 功率管 T1 的源极与 MOSFET 功率管 T2 的漏极相连, 然后再连接至压电陶瓷 PZT, 压电陶瓷充电电源 +VCC 连接在 MOSFET 功率管 T1 的漏极, 压电陶瓷放电电源 -VEE 连接在 MOSFET 功率管 T2 的源极。

当 DSPIC30F5013 单片机控制电路控制驱动电压信号 V_{d1} 使 MOSFET 功率管 T1 工作在恒流放大状态, 且控制驱动电压信号 $V_{d2}=0$ 使 MOSFET 功率管 T2 关闭, 压电陶瓷充电电源 +VCC 对压电陶瓷 PZT 进行恒流充电, 充电电流的大小由驱动电压信号 V_{d1} 的大小和 MOSFET 功率管 T1 的转移特性曲线决定; 同样地, 当 DSPIC30F5013 单片机控制电路控制驱动信号 $V_{d1}=0$ 使 MOSFET 功率管 T1 关闭, 且控制驱动信号 V_{d2} 使 MOSFET 功率管 T2 工作在

恒流放大状态, 压电陶瓷 PZT 通过 MOSFET 功率管 T2 对压电陶瓷放电电源 -VEE 恒流放电, 放电电流的大小由驱动电压信号 V_{d2} 的大小和 MOSFET 功率管 T2 的转移特性曲线决定。

3 控制电路设计

3.1 DSPIC30F5013 单片机控制电路

为了实现压电陶瓷充放电电流的控制, 采用 DSPIC30F5013 单片机设计了压电陶瓷大电流恒流充放电控制电路, 如图2所示。DSPIC30F5013 是一款将高性能 16 位单片机同数字信号处理器 (DSP) 的功能结合在一起的器件, 同时具有单片机控制功能强和 DSP 数字信号处理能力强的优点。

在图2中, DSPIC30F5013 单片机控制电路主要是输出两组高速 SPI 串行通讯信号, 其中, SPI 串行通讯 I 包括 3 路信号 SS1、SCK1 和 SDO1, SPI 串行通讯 II 包括 3 路信号 SS2、SCK2 和 SDO2。同时, 通过 3 路 AD 转换通道 IAD1、IAD2 和 UAD1

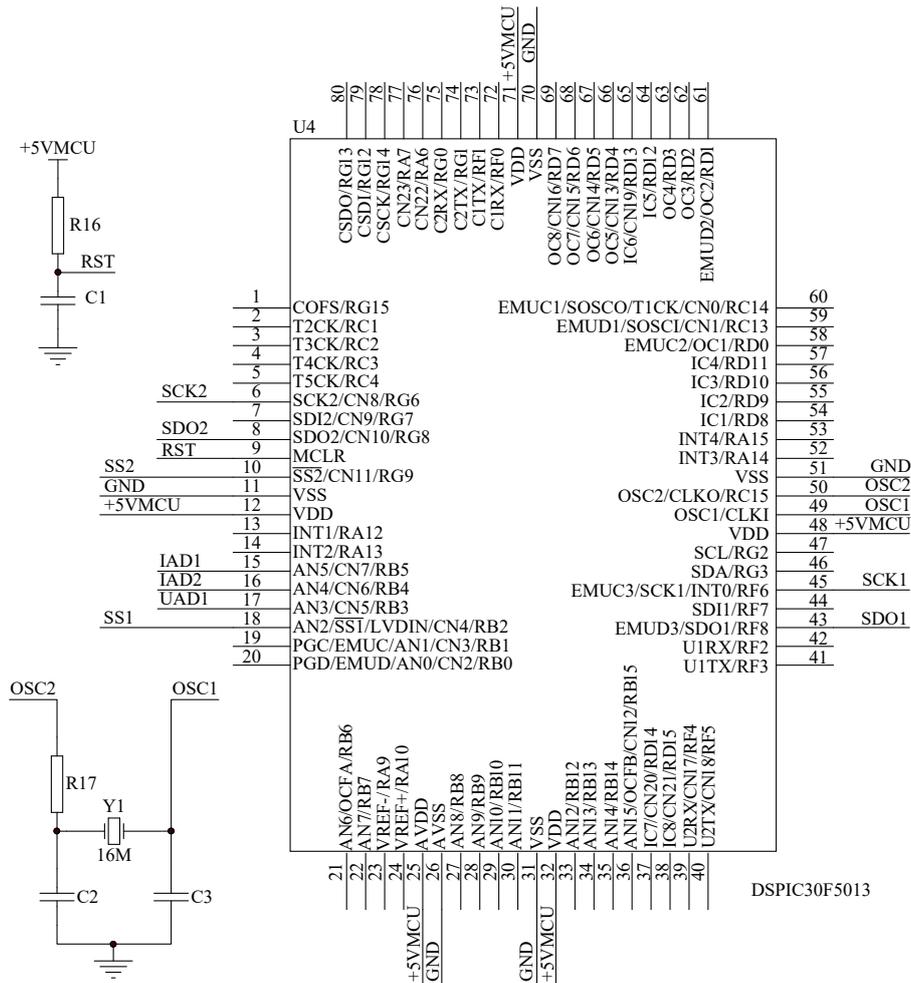


图2 DSPIC30F5013 单片机控制电路

接收压电陶瓷的充电电流 $I_{f充}$ 、放电电流 $I_{f放}$ 和充放电电压信号 U_f ，实现恒流和电压精确控制。

3.2 光电隔离电路

两组 SPI 串行通讯信号分别通过光电隔离电路进行光电隔离。光电隔离电路 I 和光电隔离电路 II 均由 3 组相同的光电隔离单元组成，其中光电隔离电路 I 的工作原理图如图 3 所示。

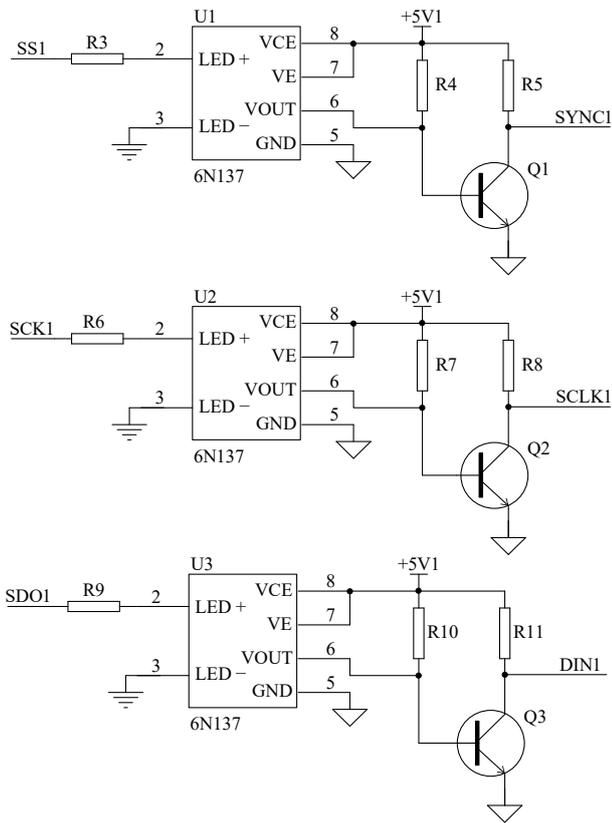


图 3 光电隔离电路 I

在图 3 中，SPI 串行通讯 I 的数字信号 SS1、SCK1 和 SDO1 分别通过独立的光电隔离单元进行隔离，实现低压端和高压端的数字信号的隔离传输。

3.3 高速高精度 DA 转换电路

高速高精度 DA 转换电路 I 和高速高精度 DA 转换电路 II 均采用 DAC8560 转换电路，DAC8560 是一款低功耗、电压输出、单通道，16 位及 3 线制串行 DA 转换电路，串行通讯速率 30 MHz，可以实现 DA 输出电压的快速设置。其中，高速高精度 DA 转换电路 I 的工作原理如图 4 所示。

在图 4 中，经光电隔离电路 I 传输过来的 SPI 串行通讯信号 DIN1、SCLK1 和 SYNC1 输入 DAC8560 DA 转换电路后转换成模拟电压信号 V_{in1} 输出。

3.4 功率放大电路

OPA548 功率放大电路 I 和 OPA548 功率放大电

路 II 具有相同的电路结构，由集成功率放大器 OPA548 和反比例放大电路组成。其中，OPA548 功率放大电路 I 的工作原理如图 5 所示。

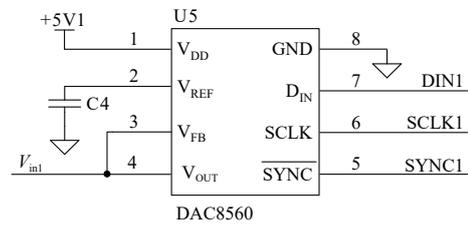


图 4 高速高精度 DA 转换电路 I

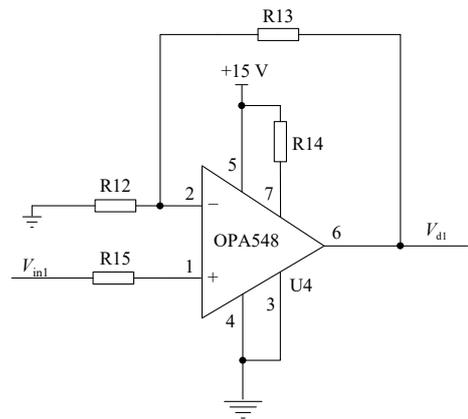


图 5 OPA548 功率放大电路原理图

在图 5 中，输入的模拟电压信号 V_{in1} 经 OPA548 功率放大电路放大转换成 V_{d1} ，实现电压和驱动电流的放大，再连接至 MOSFET 功率管 T1 实现恒流驱动输出。

3.5 转移特性曲线

为了满足压电陶瓷 PZT+200 V 充电电压、-30 V 放电电压的要求，MOSFET 功率开关管采用 FAIRCHILD 公司的 FDA38N30 N 沟道 MOSFET，最高耐压值为 300 V，最大输出电流为 38 A。该 MOSFET 功率开关管的转移特性曲线如图 6 所示，当栅源电压 V_{GS} 为 0~4 V 时，充放电电流 I_D 为 0 A；当栅源电压 V_{GS} 为 4~6 V 时，充放电电流 I_D 为该电压值对应的电流值。

3.6 电压电流闭环控制

因此，根据图 6 的转移特性曲线，DSPIC30F5013 单片机控制电路通过光电隔离电路、串行 DA 转换电路和功率放大电路，将 MOSFET 功率管的栅源电压 V_{GS} 设置成 4~6 V 的某一电压值时，则可以实现充放电电流 I_D 的恒定输出。通过栅源电压 V_{GS} 和充放电电流 I_D 的标定，则可以实现准确的充放电电流控制。

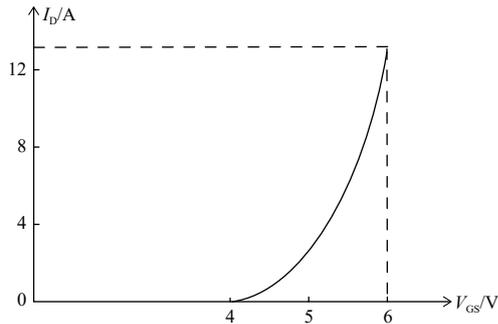


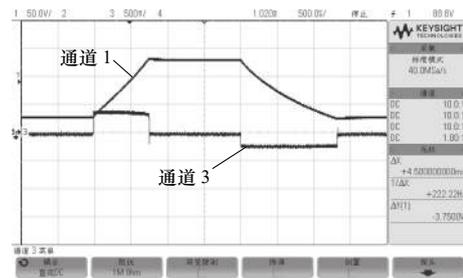
图6 MOSFET功率管的转移特性曲线示意图

同时，考虑到 MOSFET 功率开关管的转移特性曲线在不同工作温度下略有差异，设计了压电陶瓷充放电电流闭环调节回路及 DSPIC30F5013 单片机控制程序。在图1中，采用霍尔电流传感器 IS1 串联在压电陶瓷充放电电路中采集电流信号 I_{in} ，该信号经过电流信号调理电路后变为充电电流 $I_{f充}$ 和放电电流 $I_{f放}$ ，然后二者再连接至 DSPIC30F5013 单片机控制电路的 AD 采样端口进行模数转换。根据单片机采集的充放电电流反馈值与设定值进行误差计算，并对 MOSFET 功率开关管的驱动电压进行适当调整，达到补偿 MOSFET 工作温度变化导致的恒流充放电电流差异的目的，从而实现精确的恒流充放电，控制精度可达 0.1 A。

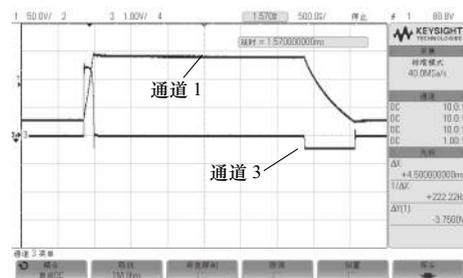
同样地，在图1中，通过电阻 R1、R2 采集压电陶瓷两端的电压信号 U_{in} ，然后再经电压信号调理电路进行处理输入单片机控制电路的 AD 采样端口进行模数转换得到压电陶瓷两端实时的电压反馈值，再通过内部的电压闭环调节程序实现精确的充放电电压控制，电压控制精度可达 1 V。具体方法是：实时检测压电陶瓷电压 U_{in} ，当该电压接近设定的压电陶瓷电压（比如 10 V）时，将充放电电流减小至 0.5 A，并实时比较反馈电压和设定电压的差值 ΔU ，当 $\Delta U \leq 1 V$ 时，关闭 MOSFET 功率管。

4 波形测试

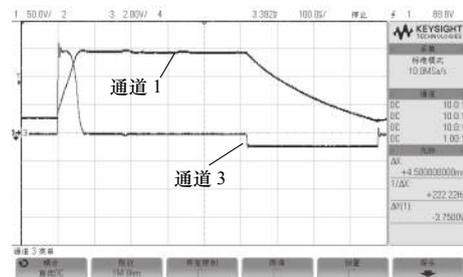
采用设计的高压大电流压电陶瓷恒流驱动电路对电容量为 $6.5 \mu F$ 的叠堆型压电陶瓷进行充放电试验，设置不同的恒流充放电电流，获得的压电陶瓷两端电压和充放电电流波形如图7所示。在图7中，示波器通道1为压电陶瓷两端的电压值，通道3采集的是压电陶瓷的充放电电流，通过串联在充放电回路中的 0.5Ω 精密电阻采样获得，实际的充放电电流为通道3的采样值除以 0.5Ω 。



(a) 0.8 A 恒流充电、0.5 A 恒流放电



(b) 5 A 恒流充电、1 A 恒流放电



(c) 12 A 恒流充电、2 A 恒流放电

图7 不同充放电电流下的压电陶瓷电压和电流波形

由图7可见，所设计的高压大电流压电陶瓷恒流驱动电路不仅能够实现小电流恒流充放电，而且能够以 12 A 甚至更高的大电流对压电陶瓷进行充放电，大大提高了压电系统的动态响应特性。

5 结语

(1) 基于 MOSFET 的转移特性曲线和恒流放大特性，提出了 DSP 数字控制电路、光电隔离电路、高速高精度 DA 转换电路、OPA548 功率放大电路串联的高精度大电流压电陶瓷恒流驱动电路结构，实现了十几安培的恒流大电流输出。

(2) 根据压电陶瓷的驱动电压选择响应的 MOSFET，可以减小恒流驱动电路静态功耗，实现几百伏甚至上千伏的驱动电压。

(3) 采用高速 SPI 串行 DA 转换电路，通讯速率可达 30 M，数模转换设定时间为 $10 \mu s$ ，可以实现 μs 级动态充放电电流，大大提高了压电陶瓷电压控制的灵活性。

参 考 文 献

[1] Ramegowda P C, Ishihara D, Takata R, et al. Finite element analysis of a

- thin piezoelectric bimorph with a metal shim using solid direct-piezoelectric and shell inverse-piezoelectric coupling with pseudo direct-piezoelectric evaluation[J]. *Composite Structures*, 2020, 245: 112284.
- [2] 刘向东, 傅强, 赖志林. 多单元浮地级联式压电陶瓷执行器高压驱动电源[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 597-606.
- [3] 王丹钰, 王安玖, 王五松, 等. 高温压电陶瓷材料的研究进展及应用[J]. *陶瓷学报*, 2021, 42(3): 376-388.
- [4] 林基艳, 林书玉, 王升, 等. 点缺陷正方晶格声子晶体的大尺寸压电陶瓷复合换能器[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2021, 51(9): 100-110.
- [5] 陈东生, 吉方, 蔡万宠, 等. 压电陶瓷驱动快刀机构的性能影响规律实验研究[J]. *制造技术与机床*, 2016(10): 87-90.
- [6] Cheng C A, Cheng H L, Chang C H, et al. A novel and cost-effective drive circuit for supplying a piezoelectric ceramic actuator with power-factor-correction and soft-switching features[J]. *Micromachines*, 2021, 12(10): 1229.
- [7] Guo H, Wang Y S, Yang C, et al. Vehicle interior noise active control based on piezoelectric ceramic materials and improved fuzzy control algorithm[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 150: 216-226.
- [8] 孙庆旭, 朱兴邦, 李超, 等. 一种压电陶瓷驱动电路设计[J]. *科技创新与应用*, 2020(34): 4-7.
- [9] 陈武, 李克天, 刘洪飞, 等. 基于压电陶瓷驱动的快刀伺服系统的研制[J]. *制造技术与机床*, 2014(6): 43-47.
- [10] 金学健, 曹龙轩, 冯志华. 基于恒流源的改进型压电陶瓷高压驱动电源[J]. *压电与声光*, 2017, 39(5): 776-779.
- [11] 吴薇. 程控可调压电陶瓷驱动电源系统设计[J]. *仪器仪表用户*, 2020, 27(8): 20-23.
- 第一作者: 黄俊媛, 女, 1993年生, 博士研究生, 主要从事特种焊接装备及控制研究。E-mail: jyhuang@buaa.edu.cn
- 通信作者: 张伟, 男, 1977年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为特种焊接装备及控制。E-mail: zhangweibh@buaa.edu.cn
- (编辑 高扬)
(收稿日期: 2022-01-18)
- 文章编号: 20220511
如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。