

基于恒流源的改进型压电陶瓷高压驱动电源

金学健,曹龙轩,冯志华

(中国科学技术大学 工程科学学院,安徽 合肥 230022)

摘 要:恒流源压电陶瓷驱动电源具有结构简单及频响好等优点,但静态功耗高是其突出缺点。该文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。该改进型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,动态输出电流最大可达 0.44 A。基于恒流源的高压驱动电源,驱动电压主要由驱动管的耐压决定,原理上可得到远高于现有高压运放的水平,在高压压电陶瓷驱动方面有广阔的前景。

关键词:压电陶瓷;驱动电源;静态功耗;输出电流;高压

中图分类号: TN722

文献标识码: A

An Improved Piezoelectric Ceramic High Voltage Driving Power Based on Constant Current Source

JIN Xuejian, CAO Longxuan, FENG Zhihua

(Dept. of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China)

Abstract: The piezoelectric ceramic driving power based on constant current source has the advantages of simple structure and good frequency response, but the outstanding shortcoming is that the static power consumption is usually very high. An improved piezoelectric ceramic power based on constant current source is presented in this paper. The dynamic output capability is greatly improved with certain static power consumption, enhancing the competitive ability significantly. A prototype device with an output voltage range of 2.4~300 V is designed. The maximum dynamic output current is 0.44 A when the static constant current is 0.1 A. The driving voltage of a high-voltage driving power based on constant current source is mainly determined by the pressure of the drive tube. In principle, it can be much higher than the existing high-voltage operational amplifier level. Hence, the improved piezoelectric ceramic power has broad prospects in the area of driving high-voltage piezoelectric ceramic.

Key words: piezoelectric ceramics; driving power; static power consumption; output current; high voltage

0 引言

压电陶瓷致动器因体积小,响应迅速及输出力大等优点,在微位移输出装置、冲击马达及光学扫描等领域^[1-2]得到广泛应用。压电致动器的位移精度与频响特性主要取决于其驱动电源的动态性能。因此,压电陶瓷的驱动电源技术^[3-8]逐渐成为当前研究的热点。

目前,国内压电陶瓷驱动电源可分为电压控制型和电流控制型^[9]两种。其中电压控制型应用广,它是依据压电陶瓷输出位移与驱动电压近似成正比的原理设计而成。误差放大式^[6]驱动电源作为电压

控制型的一种,因其反馈电压直接取自负载(压电陶瓷)上的电压,能精确控制输出端电压的精度,所以是目前压电陶瓷驱动电源的主要形式。现有基于恒流源的驱动电源^[10-11]属于误差放大式,结构简单,稳定性好,但静态功耗高,且输出电流受恒流源大小的限制,频响特性一般。对于具有较高机械性能,如叠堆型的压电致动器,因为其电容值很大(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。因此,本文提出了一种基于恒流源的改进型压电陶瓷高压驱动

收稿日期:2016-12-06

基金项目:国家科技支撑计划基金资助项目(2015BAK34B02)

作者简介:金学健(1991-),男,江苏南京人,硕士生,主要从事压电陶瓷驱动电源的研究。通信作者:冯志华(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事压电致动器与传感器、压电变压器、涡流传感、探针显微及微磁场探测的研究。E-mail:fff@ustc.edu.cn。

电源,在静态功耗一定的情况下,其在动态输出电流和高压驱动能力上与目前常用的压电陶瓷驱动电源^[8,10-11]相比,具有明显的优势,且结构简单,价格低。

1 现有基于恒流源驱动电源及问题

这里给出两种基于恒流源驱动电源的结构。图1为文献[10]列出的并联稳压电路结构,调整管 T_1 与负载(压电陶瓷)并联后,串于该恒流源电路中,流过 T_1 和负载的电流之和为一定值,通过调整 T_1 中的电流就可达到调节负载上电压的目的。图2为文献[11]提出的一种驱动电源结构,由功率放大电路和恒流源电路组成。该恒流源电路正常工作时,恒流值为50 mA,作用是帮助负载压电陶瓷泄放电荷。功率放大部分中, R_6 和 R_7 决定放大倍数,驱动压电陶瓷的电压 $V_{out} = -(V_{in}/R_6)(R_6 + R_7)$ 。该驱动电源配合高速运放OP467,驱动 $230 \times (1 \pm 0.1)$ pF容性负载时,最高频响可达60 kHz,对一些需要利用冲击原理且等效电容值小的压电陶瓷器件可提供很好的驱动效果。

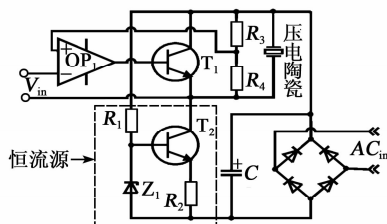


图1 文献[10]列出的并联稳压电路结构

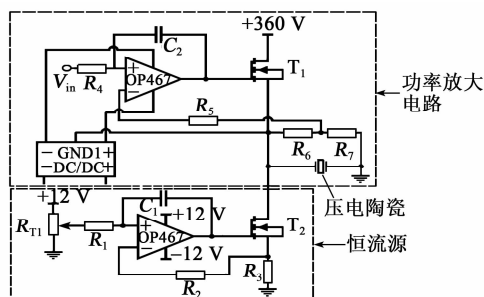


图2 文献[11]提出的一种驱动电源结构

图1、2都存在静态功耗高,效率低的问题。对于图1所示结构,压电陶瓷充放电电流小于恒流值,那么,当动态应用驱动大容量负载时,由于瞬时输出电流能力不高,频响较低,驱动效果不理想。对于图2所示电路结构,压电陶瓷放电时,泄放电流受恒流值50 mA的限制,当用方波驱动时,其下降速率不高,若尝试提高恒流值去解决此问题,又与静态功耗矛盾。

基于恒流源的压电陶瓷驱动电源结构简单,工

作稳定性好,几乎不发生自激现象,因而应用较少。因此,有必要对恒流源电路进行改进,在静态功耗一定的情形下,提升动态输出电流,提高带载能力。

2 改进型驱动电源的工作原理

如图3所示,改进型驱动电源主要由恒流源及线性高压放大电路两部分组成。其中,线性高压放大电路是将输入信号以一定放大倍数不失真放大;恒流源部分的作用则是帮助压电陶瓷快速充放电。驱动电源(直流300 V)可由实验室的高压直流稳压电源直接提供,也可由专用的DC/DC模块获得。

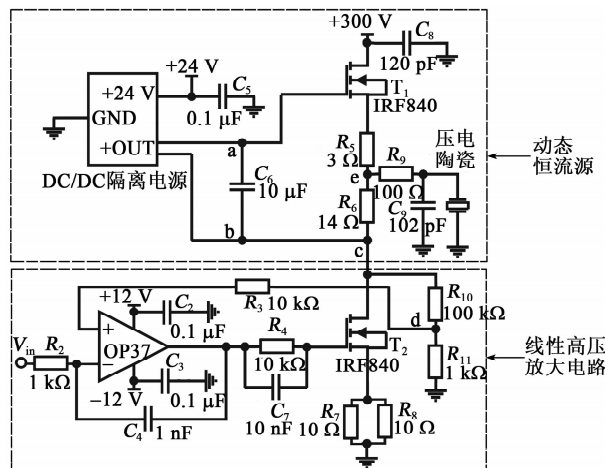


图3 驱动电源电路

2.1 动态恒流源电路

如图3所示,基本的恒流源电路由 T_1 、 R_5 、 R_6 、DC/DC隔离电源组成。隔离电源输出 V_{ab} 为+5 V,c点为悬浮地。静态工作时,不考虑从 R_9 引出的电流,观察放大电路中调整管 T_2 通过c点吸收的电流,可得到在很大的工作区间内,c点的电位基本不影响通过c点的电流 I_c 。联立式 $V_{ab} = I_c(R_5 + R_6) + V_{GS}$ 和 $I_c = (V_{GS} - V_{GS(TH)}) \cdot g_{fs}$ (其中, V_{GS} 为 T_1 管的栅源电压; $V_{GS(TH)}$ 为 T_1 管的栅源阈值电压; g_{fs} 为跨导),取 $V_{GS(TH)} = 3.0$ V, $g_{fs} = 5.0$ S,可计算出静态恒定电流 $I_c \approx 0.1$ A。

由于引入了恒流源,无论输出电压多大,电源都是以一个固定的功率做功。不像一般的AB类线性放大电路,其静态功耗只占有有用功耗的一小部分。为能提高恒流源放大电路的性能,这里引入动态恒流源的概念。负载的引出不是从一般结构的c点,而是从 R_5 和 R_6 的中间引出。这样,在静态时,功耗是恒定电流与电源电压的乘积;但在动态时,恒定电流是变化的,输出电流远大于静态恒定电流,达到了动态调整功耗的目的,此种电路特性与图1、2两

种电源不同。

2.2 线性高压放大电路

如图 3 所示,线性高压放大电路主要由 OP37、 T_2 (IRF840)和反馈电阻 R_{10} 、 R_{11} 、 R_3 组成。其中,调整管 T_2 具有电流负载能力大,速度快(纳秒级)等优点,OP37 的电压转换速率也达到了 $17 \text{ V}/\mu\text{s}$,均有利于提升电路的频率响应特性。分析线性放大电路时,恒流源相当于一个很大的动态电阻,使得在很小的电流变化下都能得到很大的电压放大倍数。假设运放的增益无穷大,OP37 正反向输入端电压相等,即 $V_{in}=V_d$,此时, $V_c=V_{in}(1+R_{10}/R_{11})$,负载压电陶瓷上的电压近似等于 V_c ,则调节输入电压的大小可调节输出电压的大小。同时,为获得最大的输出电压幅值,输入信号应加上 1.5 V 直流偏置。由于 R_6 、 R_7 、 R_8 和 T_2 上存在压降,输出电压不可能为 0,经实验测得输出电压约为 $2.4 \sim 300 \text{ V}$ 。

3 电路结构的改进与实验对比

3.1 电路的改进

为更直观看出改进型驱动电源的输出性能得到改善,针对图 3 所示驱动电源的输出位置的不同,讨论两种电路结构。

1) 结构 1。驱动电源的输出从 c 点引出,此结构代表一般恒流驱动电路。

2) 结构 2。将输出从 2 个提升电阻 R_5 和 R_6 间 e 点引出驱动压电陶瓷,此结构代表改进后的驱动电路。

3.2 最高工作频率的改善情况

图 4 为 2 种电路结构在不同负载下最高工作频率的对比。给定驱动电源的输入电压峰-峰值为 2.8 V ,输出电压峰-峰值约 280 V 。在容性负载分别为 11 nF 、 22 nF 、 44 nF 、 66 nF 和 100 nF 的情况下,分别测试两种电路结构的频响曲线,并记录各个不同容性负载在输出不失真情形下的最高频响。

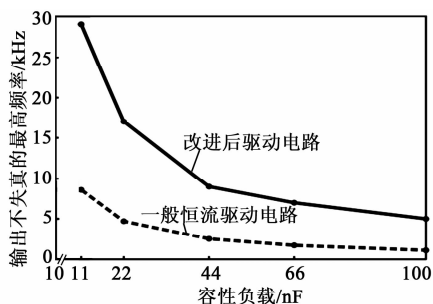


图 4 2 种电路最高工作频率比较

由图 4 可看出,改进后驱动电路的输出性能明显优于一般恒流驱动电路,驱动 100 nF 负载时,改

进后驱动电路的最高频响约是改进前的 5 倍,频率范围更宽。假设驱动电源在动态响应时输出电流峰值为 I_p ^[6],则

$$I_p = \pi \cdot f_{\max} \cdot C_L \cdot V_{p-p} \quad (1)$$

式中: $f_{\max}$ 为最高工作频率; C_L 为压电陶瓷等效电容; V_{p-p} 为输出电压峰-峰值。

在 C_L 与 V_{p-p} 相同的情况下, I_p 与 $f_{\max}$ 成正比。对于改进前电路,驱动电源在对负载电容充电时,充电电流经 R_5 、 R_6 和缓冲电阻 R_9 给电容充电,受到恒流源恒流大小的限制,电源输出电流小于 0.1 A ;而改进后的驱动电路工作时输出电流经 R_5 和 R_9 对负载电容充电,流过 R_6 的电流约为 0,又因为 V_{ab} 恒定为 5 V ,所以此时调整管 T_1 的 V_{GS} 增大,则输出电流 I_p 增大。由式(1)推出,该电路可提供更大的频响范围,克服了传统驱动电源动态输出电流值小及交流负载能力低的缺点。改进后电路,驱动 100 nF 负载时,频响达 5 kHz ,将此参数代入式(1)计算出该驱动电源的峰值输出电流达 0.44 A 。

3.3 高频正弦信号的改进情况

在给定正弦输入信号峰-峰值为 2.8 V ,频率为 5 kHz ,负载为 100 nF 的情况下,比较两种电路的输出性能。图 5 为两种电路相应的动态响应曲线。由图 5(a)可看出,在频率较高时,一般恒流驱动电路因其输出电流有限导致对负载的充放电时间增长,跟不上输入信号高频的变化,出现严重失真的现象,有向三角波波形变化的趋势。由图 5(b)可看出,在 5 kHz 频率下,正弦输出波形失真度很小,频响特性明显改善。

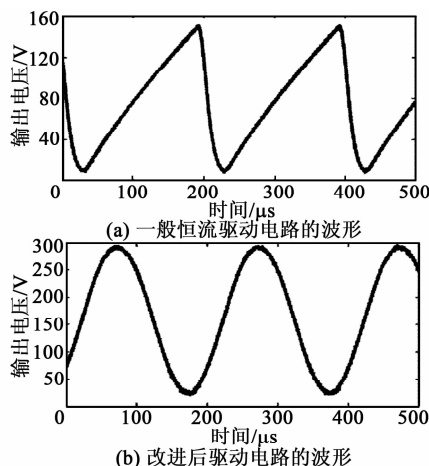


图 5 100 nF 下改进前、后电路的动态响应曲线

3.4 阶跃响应特性的改进情况

图 6 为两种驱动电源的阶跃响应特性曲线。测试条件为输入信号峰-峰值 1.0 V ,容性负载为

100 nF。由图 6(a)可看出,对于一般恒流驱动电路,其上升沿和下降沿均有较大的过冲,超调量大,同时上升与下降时间较长。由图 6(b)可看出,其上升时间约为 50 μs ,下降时间约为 30 μs ,并未出现较大超调或震荡现象,充分体现了改进后驱动电源的良好稳定性、快速响应特性及带载能力。

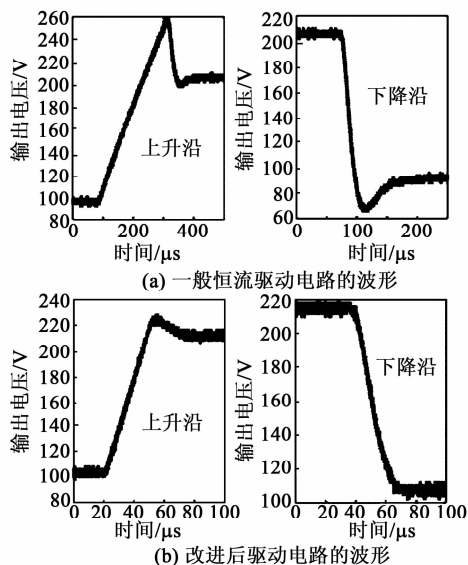


图6 阶跃响应特性曲线

4 结束语

本文提出的改进型压电陶瓷高压驱动电源,具有动态输出电流大,频响范围宽且价格低的特点,克服了传统驱动电源的不足。由恒流源电路结构的讨论可知,当适当提高隔离电源模块输出电压 V_{ab} 时, T_1 管栅源电压 V_{GS} 也有提升,恒流源的稳流值增大,能提供更大的充电电流。同时还可看出,适当提高图 3 中 R_6 的阻值不影响动态输出电流,但静态电流将减小,静态消耗也变小,解决了电源效率不高的问题。

当然,基于恒流驱动的最大好处是,易得到异常简单的超高压驱动电源。现有的 APEX 高压运放最大输出电压为 1 200 V(PA89)^[12];而使用这里的恒流源原理可制作远大于这个值的放大器,只要有足够高耐压的场效应管即可。IXTL2N450 的耐压已高达 4 500 V^[13]。另外,还可使用场效应管串联法进一步提高输出电压^[14]。

参考文献:

[1] MA Li, XIAO Jintao, ZHOU Shasha, et al. A piezoelectric inchworm actuator of linear type using symmetrical lever amplification[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems, 2015, 229(4): 172-179.

[2] GILCHRIST K H, DAUSCH D E, GREGO S. Electromechanical performance of piezoelectric scanning mirrors for medical endoscopy[J]. Sensors and Actuators, 2012, 178: 193-201.

[3] JENG S L, TUNG Y C. A multicell linear power amplifier for driving piezoelectric loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(10): 3644-3652.

[4] 丁文明,王代华. 一种压电陶瓷执行器动态驱动电源[J]. 压电与声光, 2008, 30(3): 297-300.
DING Wenming, WANG Daihua. A dynamic power supply for piezoelectric actuators[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2008, 30(3): 297-300.

[5] 王志亮. 高频响低纹波压电陶瓷电源研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[6] 钟文斌,刘晓军,卢文龙,等. 一种误差放大式压电陶瓷驱动电源的研制[J]. 压电与声光, 2014, 36(2): 311-313.
ZHONG Wenbin, LIU Xiaojun, LU Wenlong, et al. Development of an error amplifier based piezoelectric ceramic actuator[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2014, 36(2): 311-313.

[7] 刘岩,邹文栋. 一种高速压电陶瓷驱动器驱动电源设计[J]. 压电与声光, 2008, 30(1): 48-52.
LIU Yan, ZOU Wendong. A high-speed driving power design for piezoelectric ceramic actuator[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2008, 30(1): 48-52.

[8] 张振鹏,张剑,赵洪,等. 基于 PA78 的快速响应压电陶瓷驱动电源的研制[J]. 压电与声光, 2007, 29(4): 420-422.
ZHANG Zhenpeng, ZHANG Jian, ZHAO Hong, et al. Development of a PZT power supply with quick response based on PA78[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2007, 29(4): 420-422.

[9] 荣伟彬,邹翊,徐敏,等. 基于电流控制的压电陶瓷驱动器[J]. 纳米技术与精密工程, 2007, 5(1): 38-43.
RONG Weibin, ZOU Xuan, XU Min, et al. Piezoelectric driver based on current control[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2007, 5(1): 38-43.

[10] 冯志华,廖波. 几种压电陶瓷高压驱动电源的构成及比较[J]. 机械与电子, 1996, 19(1): 34-36.

[11] 王元生,芦志强,王雨. 高速压电陶瓷驱动电源[J]. 现代电子技术, 2009, 32(14): 180-181.

[12] Apex Microtechnology Corporation. High voltage power operational amplifiers PA89 • PA89A [EB/OL]. <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/ApexMicrotechnologyCorporation/mXvssry.pdf>, 2015.

[13] Ixys Corporation. High voltage power Mosfetix-tl2N450 [EB/OL]. <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/524704/IXYS/IXTL2N450.html>, 2013-10-10.

[14] 郭翔,江磊,范青. 基于 MOS 管串联开关的高压脉冲电源设计[J]. 电源学报, 2013, 1(1): 121-124.