

# 一种高效率线性压电陶瓷驱动电源设计

王乐蓉, 韩 森

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘 要:**为改善压电陶瓷驱动电源的静态功耗和动态性能,提出了可变静态工作点和工作电压的高压放大器。首先使用恒流源结构的放大器构成典型的高压放大器,然后通过比例微分电路动态调整放大器的工作电流,最后利用多组抽头电源给高压放大器分段供电,进一步降低系统功耗。实验结果表明,放大器在 10 mA 静态电流下,可以动态输出 400 mA 电流;放大器工作电压可以根据输出电压大小在 50 V、100 V、150 V、210 V 之间自动切换。放大器在很低的静态电流下可以获得很好的动态特性,满足设计要求。

**关键词:**压电陶瓷;高压放大器;低功耗;微分电路;动态恒流源;分段供电

**中图分类号:**TN384;TM282;TP273.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2020.03.007

## Design of a Linear Piezoelectric Ceramic Drive Power Supply with High-efficiency

WANG Lerong, HAN Sen

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:**In order to improve the static power consumption and dynamic performance of piezoelectric ceramic drive power supply, a high-voltage amplifier with variable static operating point and operating voltage is proposed. First, an amplifier with a constant current source structure is used to construct a typical high-voltage amplifier. Then, the working current of the amplifier is dynamically adjusted by a proportional differential circuit. Finally, the multiple sets of tap power are used to supply power to the high-voltage amplifier in sections to further reduce system power consumption. The experimental results show that the amplifier can dynamically output 400 mA at 10 mA quiescent current; the working voltage of the amplifier can be automatically switched among 50 V, 100 V, 150 V, and 210 V according to the output voltage. The amplifier can obtain excellent dynamic characteristics at a very low quiescent current, which can meet the design requirements.

**Key words:**piezoelectric ceramic; high-voltage amplifier; low power consumption; differential circuit; dynamic constant current source; sectional power supply

### 0 引言

压电陶瓷具有体积小、位移分辨率高、频响高、无噪声等特点,是理想的纳米级微位移执行器件。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<sup>[1]</sup>。压电陶瓷自身具有磁滞和蠕变特性,使其难以开环形式应用于精密位移控制领域,如高精度移相等<sup>[2]</sup>。为了提高控制精度,普遍使用位移反馈构建闭环控制与前馈补偿控制相结合的方式,达到高精度驱动的目的<sup>[3]</sup>。采用高压运放的驱动器输出精度高,但输出功率有限,且最高工作电压由高压运放本身决

定,无法灵活调整<sup>[5-6]</sup>。恒流源高压放大器存在静态功耗与动态响应之间的矛盾,文献[7]的动态恒流源放大器电流动态调整范围仍不够大。文献[8]的多单元浮地级联式压电陶瓷驱动电源基本单元由甲、乙类功放构成,也存在功耗和动态响应平衡问题。放大器在良好的动态性能时尽可能地提升工作效率,这不仅可以降低电源自身的发热,减轻功率器件的负荷,同时也符合现代节能环保的要求。

### 1 压电陶瓷驱动系统

压电陶瓷因自身具有的迟滞性、非线性、蠕变性而无法直接精确控制压电陶瓷的位移,因而产生了

收稿日期:2019-12-10

基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(No. 2016YFF0101903)

作者简介:王乐蓉(1998-),女,陕西西安人,硕士生,主要从事精密测试技术与装置的研究。通信作者:韩森(1961-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,博士,主要从事光学干涉计量的研究。E-mail: senhanemail@126.com。

一系列矫正措施来修正压电陶瓷的驱动误差<sup>[9]</sup>。典型的修正系统如图1所示。控制系统给驱动电源提供信号电压,使压电陶瓷动作。同时,根据位移检测装置的反馈信号,通过一定的修正算法求出能使压电陶瓷的实际位移和目标位移一致的修正波形,将修正后的驱动波形注入驱动电源,达到高精度驱动的目的。压电陶瓷驱动电源承载着将控制器给出的信号电压转换成等比例的高压,驱动压电陶瓷执行机械位移的功能,在整个环节中起着关键作用。

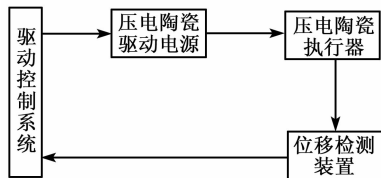


图1 压电陶瓷驱动控制系统

### 1.1 放大器的结构

驱动电源的基本拓扑结构是一个恒流源结构的放大器,如图2所示。放大器工作在甲类状态,在整个信号周期内功率器件不会出现截止电流,不存在交越失真,输出精度高。这类放大器能向负载提供的最大电流为恒流源电流 $I$ ,当接入阻抗为 $R_L$ 的负载时,电路中消耗的功率 $P$ 为

$$P = V_{cc} \times I - \frac{V_{out}^2}{R_L} \quad (1)$$

式中: $V_{cc}$ 为电源电压; $V_{out}$ 为输出电压。当 $I$ 较大时,电路中消耗的功率将增加; $I$ 较小时易出现截止失真。

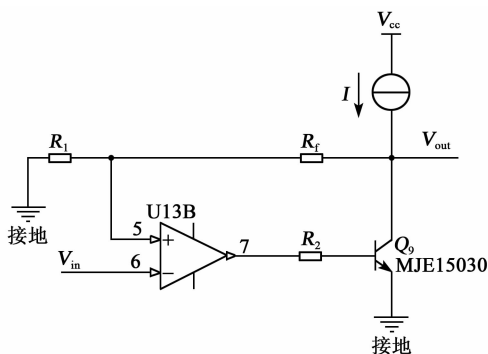


图2 驱动电源基本结构

### 1.2 驱动电源的动态稳定性及其补偿

图3是一个典型的同相放大器的传输模型。其中 $A$ 为放大器开环增益, $\beta$ 为反馈系数,放大器的闭环传递函数为

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1 + A \times \beta} \quad (2)$$

式中 $A \times \beta$ 为环路增益。若 $A \times \beta = -1$ ,分母为0,则

$\frac{V_o}{V_i} = \infty$ ,放大器不稳定。在环路增益为0时,环路增益相位余量大于 $45^\circ$ ,电路的临界阻尼才能表现良好。

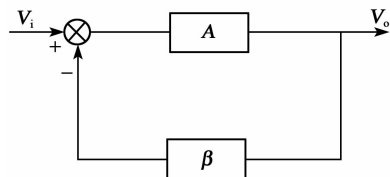


图3 放大器传输模型

接入容性负载后,放大器输出带宽和压摆率会降低,同时反馈环路有额外的相位滞后,降低了放大器的相位余量。放大器的输出阻抗是影响容性负载能力的重要因素之一,减小输出阻抗可以降低容性负载对相位延迟的影响。另外,增加补偿回路也是一种常用办法,其中环内补偿应用最广。其等效模型如图4所示,其中 $R_f$ 、 $R_L$ 是反馈回路, $C_L$ 是负载电容, $R_x$ 和 $C_x$ 是补偿回路。当满足 $R_f \gg R_o$ 、 $R_L \gg R_o$ 、 $R_L \gg R_o$ 时, $R_x$ 、 $C_x$ 分别为

$$R_x = \frac{R_o \times R_L}{R_f} \quad (3)$$

$$C_x = \frac{R_o + R_x}{R_f} \times C_L \quad (4)$$

式中 $R_o$ 为放大器输出阻抗。使用器件官方的SPICE模型对电路进行模拟,得到 $R_o$ 的大概值。通过实际电路调试得到具体的 $C_x$ 、 $R_x$ 值。 $C_L$ 可通过压电陶瓷的数据手册获取,也可通过万用表测试得到。

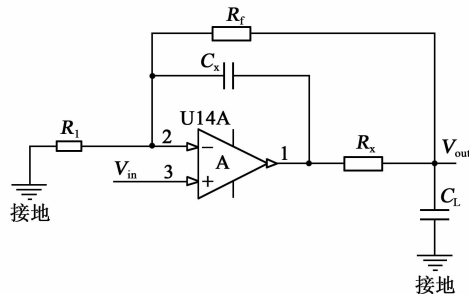


图4 放大器补偿回路

## 2 分段供电式动态电流源驱动器

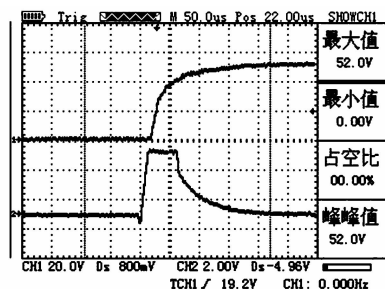
### 2.1 动态电流源放大器

若图2中 $I$ 值动态可调,可使放大器在静态时工作在较小电流,动态时工作在较大电流下。图5为动态电流源放大电路。由图5可见,输入信号分为两路:一路进入放大器放大输出,一路经过比例微分电路检出输入信号的变化率,以此调整放大器工作电流。容性负载只在充放电时有电流流过,电压

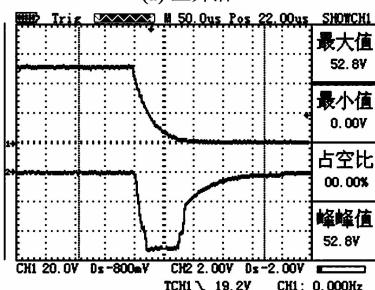


### 3.1 阶跃响应特性测试

图8为阶跃响应测试曲线,测试负载为 $0.1\ \mu\text{F}$ 电容。输出电压从0上升到50 V,需要 $150\ \mu\text{s}$ ;从50 V下降到0,需要 $100\ \mu\text{s}$ 。由图可见,信号无过冲和振铃。



(a) 上升沿

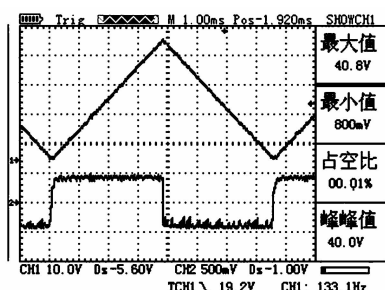


(b) 下降沿

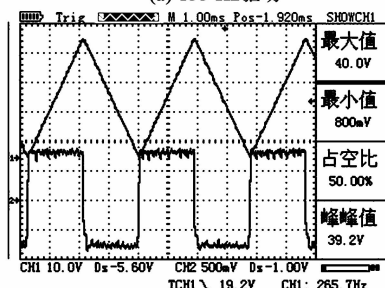
图8 阶跃响应测试

### 3.2 电流调整测试

图9为在三角波激励下,输出信号和电流源调整电路输出波形之间的关系。由图可见,电流调整电路能有效地根据输入波形变化率来调整放大器的工作电流,在调整范围内输出波形不失真。测试负载为压电陶瓷器件。



(a) 133 Hz驱动



(b) 265 Hz驱动

图9 放大器恒流源电流和输出波形

### 3.3 分段电压测试

图10为在幅度为120 V的三角波输出下,放大器电源电压的周期性调整波形,放大器电源电压在50 V,100 V,150 V之间自动切换。测试负载为压电陶瓷器件。

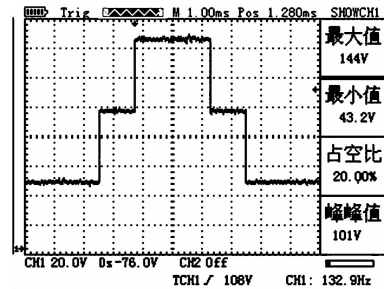


图10 分段电源电压波形

## 4 结束语

在保证压电陶瓷驱动器输出动态特性的前提下,尽可能地提升电源利用率,这不仅可以降低电源自身的发热,减轻功率器件的负荷,同时也符合现代节能环保的要求。本文设计的高压放大器工作在低失真的甲类状态,当输入信号无变化时,放大器工作在10 mA静态电流的低功率状态;当输入信号变化时,微分电路根据输入信号的变化率动态增加放大器工作电流,加速容性负载的充放电速率。放大器最大输出电流可达400 mA。同时使用50 V、100 V、150 V、210 V电源对放大器分段供电,电源在输出电压较低时自动降低供电电压,在输出高电压时自动切换至高压档,提升放大器的动态效能。最终驱动电源最小静态功耗为3 W,最大动态输出功率为80 W。电源在效能、响应时间、带载能力等方面均表现良好。

### 参考文献:

- [1] LIUY T, FUNG R F, HUANG T K. Dynamic responses of a precision positioning table impacted by a soft-mounted[J]. Piezoelectr Actuator Precision Eng, 2004 (8): 252-260.
- [2] SEO S Y, YOO S S, MISHRA D, et al. Exact piezoelectric solution for misfitted inclusion in finite spherical matrix; Applications to quantum dot core/shell crystals[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 94: 158-169.
- [3] 朱炜. 压电陶瓷堆叠执行器及其系统的迟滞现象模拟、线性化及控制方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [4] 林广升, 陈华. 基于LTC6090的桥式压电物镜驱动器驱动电源设计[J]. 广西大学学报(自然科学报), 2015, 40(3): 745-748.

- LIN G S, CHEN H. Design of a bridge power supply for piezoelectric objective lens actuator based on LTC6090[J]. Journal of Guangxi University(Nat Sci Ed), 2015, 40(3): 745-748.
- [5] 徐辽, 范青武, 刘旭东, 等. 基于 PA85A 的高精度动态压电陶瓷驱动电源设计[J]. 压电与声光, 2018, 40(4): 566-567.
- XU L, FAN Q W, LIU X D, et al. Design of high-precision dynamic PZT driving power based on PA85A[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(4): 566-567.
- [6] 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.
- JIN X J, CAO L X, FENG Z H. An improved piezoelectric ceramic high voltage driving power based on constant current source[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(5): 776-779.
- [7] 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): 598-605.
- LIU X D, FU Q, LAI Z L. High-voltage power amplifier based on multi-unit cascade for piezoelectric actuators[J]. Opt Precision Eng, 2012, 20(3): 598-605.
- [8] 范伟, 林瑜阳, 李钟慎. 基于 BP 神经网络的压电陶瓷蠕变预测[J]. 计量学报, 2017, 38(4): 431-433.
- FAN W, LIN Y Y, LI Z S. Prediction of the creep of piezoelectric ceramic based on BP neural network optimized by genetic algorithm[J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(4): 431-433.
- [9] 李朋志, 葛川, 苏志德, 等. 基于动态模糊系统模型的压电陶瓷驱动器控制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 394-399.
- LI P Z, GE C, SU Z D, et al. Control of piezoelectric ceramic actuator via dynamic fuzzy system model[J]. Opt Precision Eng, 2013, 21(2): 394-399.
- 
- (上接第 311 页)
- devices and materials[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2002, 50(3): 721-737.
- [9] GARDNER D S, SCHROM G, PAILLET F, et al. Review of on-chip inductor structures with magnetic films[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4760-4766.
- [10] NEGAR R, BARAANI D M, ZHOU Jin, et al. Analysis and design of commutation-based circulator-receivers for integrated full-duplex wireless[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(8): 2190-2201.
- [11] AYASLI Y. Field effect transistor circulators[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(5): 3242-3247.
- [12] CARCHON G, NANWELAERS B. Power and noise limitations of active circulators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(2): 316-319.
- [13] FLEURY R, SOUNAS D L, SIECK C F, et al. Sound isolation and giant linear nonreciprocity in a compact acoustic circulator[J]. Science, 2014, 343(6170): 516-519.
- [14] ESTEP N A, SOUNAS D L, SORIC J, et al. Magnetic-free non-reciprocity and isolation based on parametrically modulated coupled-resonator loops[J]. Nature Physics, 2014, 10(12): 923-927.
- [15] SOUNAS D L, CALOZ C, ALÙ A. Giant non-reciprocity at the subwavelength scale using angular momentum-biased metamaterials[J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 2407.
- [16] KORD A, SOUNAS D L, ALU A. Pseudo-linear time-invariant magnetless circulators based on differential spatiotemporal modulation of resonant junctions[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(6): 2731-2745.
- [17] YU Yao, MICHETTI G, KORD A, et al. Magnetic-free radio frequency circulator based on spatiotemporal commutation of MEMS resonators[C]//Northern Ireland: IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Belfast, 2018: 154-157.
- [18] RINALDI M, CASSELLA C, ALU A, et al. Microelectromechanical resonant circulator; US20180138889A1[P]. 2018-05-17.
- [19] TORUNBALCI M M, SRIDARAN S, RUBY R, et al. Mechanically modulated microwave circulator[C]//Berlin, Germany: 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors, 2019: 713-716.