

一种新型压电陶瓷驱动电源的研究*

周涛¹,王澄²,姜刚¹,汝长海¹

(1.苏州大学 江苏省先进机器人技术重点实验室,江苏 苏州 215021;

2.哈尔滨工程大学 自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对当前使用的压电陶瓷驱动电源大多存在的使用效率低、体积大等问题,提出了一种使用效率高、动态性能好的新型 PWM 压电陶瓷驱动电源。设计以 MSK4223 开关型运算放大器为核心,采用双路输出电压积分反馈的方法,提高了压电陶瓷微定位的精度,使用效率达到了 80% 以上,有效输出带宽可以达到 2 kHz,动态性能良好,发热量小,集成度也得到了明显提高。最后对电压反馈式开关型压电陶瓷驱动电源进行了性能测试,从而验证了在动态性能要求较高的环境下应用的可行性。

关键词: PWM; 动态性能; 电压反馈; 有效带宽; 效率

中图分类号: TN384

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)23-0016-04

Research on a new type of piezoelectric ceramic driving power supply

Zhou Tao¹, Wang Cheng², Jiang Gang¹, Ru Changhai¹

(1.Jiangsu Province Key Laboratory of Advanced Robot Technology, Soochow University, Suzhou 215021, China;

2.College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Currently, most of the piezoelectric ceramics driving power has low using efficiency, large volume and so on. The paper proposes a new PWM piezoelectric ceramic drive power with high efficiency and good dynamic performance. The design uses MSK4223 switch voltage feedback operational amplifier as the core, and adopts dual output voltage integral feedback method, to improve the precision of the piezoelectric ceramic positioning. The use efficiency is also increased by more than 80%, the effective output bandwidth can reach 2 kHz. It has good dynamic performance and less heat, the integration has been improved obviously. At last, the voltage feedback switch type piezoelectric ceramic driving power performance testing is carried out, which verifies the feasibility of application requires high performance in dynamic environments.

Key words: PWM; dynamic performance; voltage feedback; effective bandwidth; efficiency

随着科学技术的发展和研究领域的不断扩展,人们研究的对象从宏观领域逐步深入到了微观领域,并且许多领域越来越需要高速动态纳米定位系统,如微纳制造、微电子制造、汽车工业、生命科学、超精密加工与测量和纳米精密定位的光刻技术等。压电陶瓷是一种微驱动材料,具有体积小、位移分辨率高、频响高、无噪声、不发热、输出有效频带宽、使用寿命长、位移精度非常高、驱动能力可达几十牛到几百牛^[1-2]等特点,使得压电陶瓷在动态定位领域的应用越来越广泛。压电陶瓷的动态性能在很大程度上依赖于驱动器的性能,例如驱动电源的稳定性、带负载能力、使用效率、输

出有效带宽以及输出纹波等。因此,驱动电源的性能决定着纳米定位系统的性能^[3]。压电陶瓷的驱动方式主要有电压驱动型、电荷驱动型、混合驱动型和开关驱动型 4 种。由于电压驱动型^[4-5]具有迟滞影响,不适合动态性能要求较高的应用领域。电荷反馈驱动方式^[6-7]能够满足一些动态性能要求较高的环境,响应速度快,迟滞减少,但存在低频稳定性差、在静态工作下电荷泄露大,非线性以及零点漂移等缺点。混合驱动型是结合电压驱动型和电荷驱动型各自优点的一种驱动方式,但是效率低、体积大。开关驱动型^[8]是一种新型驱动方式,提高了使用效率。因此,针对目前使用的压电陶瓷驱动电源存在的使用效率低、体积大等问题,本文提出了一种

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174087)

PWM 开关型压电陶瓷驱动电源, 其使用效率高、动态性能好, 具有很高的实用应用价值。

1 开关型驱动电源

1.1 脉冲开关型驱动电源基本组成

传统开关型驱动电源基本上是由分立元件构成的。虽然基本上能实现对输入信号的脉宽调制, 但由于分立元件工作不稳定, 电路复杂、效率低, 而使用 PWM 集成运算放大器, 可以使电路设计比较简单, 能够比较快速高效地完成驱动电源的设计与制作。其工作效率高、体积小、散热方面设计简单, 甚至不需要散热器。PWM 集成运算放大器用模拟输入信号作为调制信号, 通过内部的锯齿波调制电路将模拟信号再转换成所需的 PWM 信号, 最后经过内部的桥式放大电路输出, 向负载提供输出信号, 输出电压随着供电电压的增大而增大, 频率与输入信号相同。输入信号经过 PWM 集成放大器放大之后, 输出调制脉冲信号, 再经过 LC 低通滤波电路处理, LC 滤波将脉冲信号解调为模拟信号之后, 便可直接驱动压电陶瓷负载。

但是一般的集成开关型驱动电源只能用于开环控制压电陶瓷, 定位精度不高。在实际应用中需设计一些反馈电路来精确控制压电陶瓷的微位移。因此设计中采用电压反馈式电路, 在输出级部分采用一个两阶无源 LC 低通滤波器。在电压反馈通道上设计带有积分式低通有源滤波器的差分放大器。采用无源滤波器主要是考虑到从 PWM 模块反馈的脉冲放大信号经过电阻分压器之后得到的是电压小信号。另一方面是将反馈的脉冲信号解调之后的模拟信号与输入控制小信号作比较。最后, 误差积分器对滤波后的反馈电压和输入信号进行比较, 通过消除偏差电压来实现电压反馈的精确控制, 以克服电源电压和温度等一些参数变化对输出电压的影响。电压反馈式电路控制压电陶瓷两端的电压最终达到压电陶瓷致动器微米甚至纳米级的精密定位。

1.2 建模与分析

为分析电路方便, 采用电压反馈式的半桥简化电路模型, 如图 1 所示。

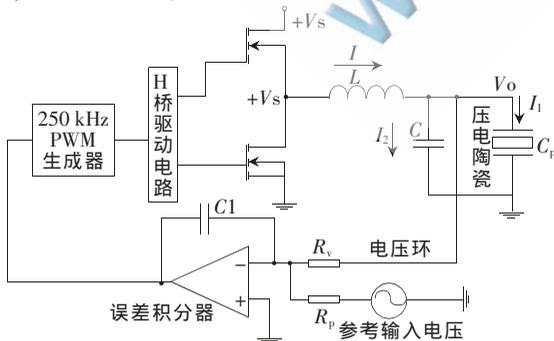


图1 电压反馈式半桥简化电路模型

由图1可得电感与两端电压之间的关系为:

$$L \frac{di(t)}{dt} = V_s(t) - V_o(t) \quad (1)$$

其中, $V_s(t)$ 为 MOS 功率管的供电电压, $V_o(t)$ 为压电陶瓷的驱动电压。压电陶瓷两端的电压与压电陶瓷充电电流之间的关系为:

$$i_1(t) = C_p \frac{dV_o(t)}{dt} \Rightarrow q_1(t) = \int i_1(t) dt = C_p V_o(t) \quad (2)$$

其中, $i_1(t)$ 为输出干路电流, C_p 为压电陶瓷等效电容, $q_1(t)$ 为压电陶瓷充电电荷。同理, 电容两端的电压与电容充电电流之间的关系为:

$$i_2(t) = C \frac{dV_c(t)}{dt} \Rightarrow q_2(t) = \int i_2(t) dt = C V_c(t) \quad (3)$$

其中, $i_2(t)$ 为 LC 滤波器的电容的充电电流, $q_2(t)$ 为 LC 滤波器的电容的充电电荷, C 为 LC 滤波器的电容。输出电压 V_o 节点的电流关系为:

$$i_1(t) + i_2(t) = i(t) \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得:

$$i_1(t) = i(t) - C \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (5)$$

对式(1)和式(5)分别进行拉氏变换, 可得:

$$I(s) = \frac{1}{sL} (V_s(s) - V_o(s)) \quad (6)$$

$$I_1(s) = I(s) - s \cdot C V_c(s) \quad (7)$$

L 为 LC 滤波器的电感, 利用以上推导可得电压闭环反馈电路结构图, 如图 2 所示。其中, K_v 为电压环的增益, K_w 为脉宽调制模块的增益, $V_i(t)$ 为输入参考电压信号。

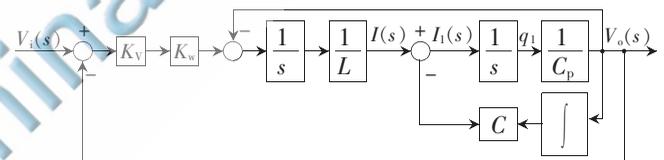


图2 电压闭环反馈电路结构图

1.3 开关型驱动电源硬件电路设计

PWM 集成运算放大器体积小、效率高且抗干扰性强。为了确保电压反馈式压电陶瓷驱动电源能够稳定工作, 精确控制压电陶瓷位移, 本设计采用以 MSK4223 为核心的 PWM 放大器, 通过电压反馈环来精确控制压电陶瓷位移。电压式反馈式开关型压电陶瓷驱动电源设计电路如图 3 所示。

输出电压可以通过电压反馈检测。由于 Output A 和 Output B 输出的是大电压信号, 因此, 需要通过电阻分压器降低检测电压之后, 小信号放大器才能处理。输出的电压信号通过由电阻 R_6 和 R_8 、 R_9 和 R_{10} 构成的电阻分压器之后可以缩小为原来的 $1/10$, 因此, 驱动电源的反馈电压增益为 -10 V/V 。A2 的同相输入端上, 通过电容 C_4 、 C_5 与电阻 R_5 、 R_7 组合, 构成一个二阶的 20 kHz 的积分低通滤波电路, 反相输入端, C_2 、 C_3 与 R_3 、 R_4 同理。A2 是一个共模输入电压限制的放大器。反馈点是

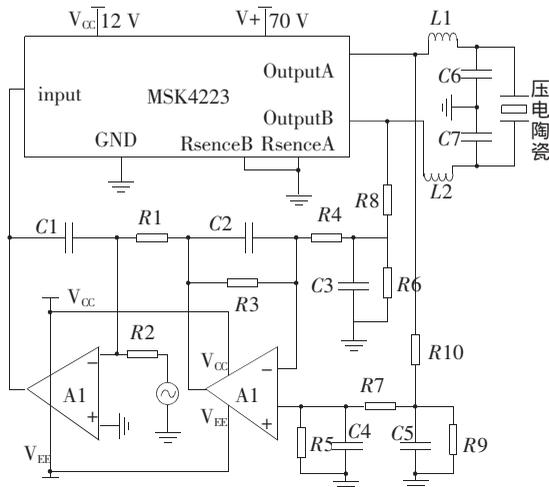


图3 电压反馈式电源电路图

从 Output A 和 Output B 输出端取得，而不是从负载取得的。PWM 方式反馈点在理论上也可以从负载选取，但在实际中却不行，因为由滤波元件所产生的相移会使得闭环稳定性变得很低。从输出取得的反馈点与负载取得的反馈点之间的差异就相当于由滤波电感产生的损耗。因此好的滤波设计会使这种损耗变得非常低。虽然 MSK4223 每半个 H 桥中都有感应电流的能力，由于采用的是电压反馈式，因此电流检测引脚连接在一起，直接接地。为了 MSK4223 实现 100% 调制，积分器 A1 的输出必须保证在 1.25 V~3.75 V 之间。A1 是一个高速精密运算放大器，它对于任何所需的直流增益可以运行，在反馈设计中当作积分器使用。A2 的输出信号可以提供所需的输入电压来驱动 MSK4223，从而形成闭环控制。使积分放大器 A1 的时间常数足够快，以尽可能提供所需带宽的频率响应，循环的精确性靠高增益来确保。总之，积分放大器 A1 和差分放大器 A2 将输入控制信号转变为对应的脉冲放大信号。MSK4223 通过内部比较器将积分放大器输出的信号与斜坡电压作比较来产生占空比信息。Output A 和 Output B 输出的信号经过 LC 低通滤波器将脉冲放大信号重新解调成正弦信号来驱动负载。

2 脉冲开关型驱动电源效率分析

PWM 开关型放大器具有使用效率高、节省成本和体积小等一系列特点。整个电路主要的损耗就集中在场效应管(或三极管)元件开关损耗和导通时饱和和压降引起的损耗。因此可以通过公式分析放大器内部使用效率与功耗。此次设计采用的是全桥开关型放大器，为了直观分析效率，使用半桥输出电路，全桥输出电路放大器内部功率损耗是半桥输出电路的两倍，如图 4 所示。

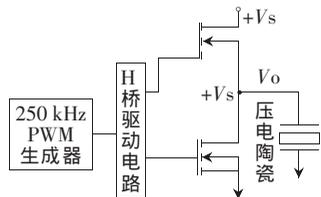


图4 MSK4223 开关型半桥输出电路

MSK4223 放大器内部的功率损耗为：

$$P = (V_s - V_o) \cdot I_o + V_s \cdot I_Q \quad (8)$$

其中， P 为 MSK4223 的内部功耗； I_o 为输出电流； I_Q 为静态电流； V_s 为供电电压； V_o 为输出电压。由式(8)可知，MSK4223 放大器内部的功耗由静态功率损耗和供电功率与输出功率之差两部分组成。由于静态功率损耗相对于 P 来说很小，可忽略不计。因此 MSK4223 放大器内部功率损耗可近似表示为：

$$P = (V_s - V_o) \cdot I_o \quad (9)$$

通过式(8)可得 MSK4223 开关式放大器的效率 η ：

$$\eta = \frac{V_o \cdot I_o}{V_s \cdot I_o + V_s \cdot I_Q} \quad (10)$$

由于供电电源静态功率可以忽略不计，可得开关放大器的近似效率 η 为：

$$\eta \approx \frac{V_o}{V_s} \quad (11)$$

通过式(11)可知，输出电压 V_o 越接近供电电压 V_s ，效率就会越高。PWM 放大器的优点就是输出总是接近供电电压或者接近于零。由于在输出电压的过程中压降很小，因此，开关放大器的效率要比线性放大器高。PWM 放大器的输出效率值通常可以达到 80%~95%。虽然 PWM 开关放大器的技术目前相对还不成熟，但当线性放大器和 PWM 放大器传送最大输出时，它们的效率几乎是相同的。典型来说，在输出电流相近的情况下，相比线性放大器来说，PWM 放大器大约只有 1/3 或者更少的压降。静态功耗只是总体功率的一小部分。功耗的计算只包括输出电流和放大器所有的阻抗。另外，PWM 开关放大器可以改善体积和硬件成本，提高便携性，因为其静态功耗低、发热少，不需要安装多个散热模块。

3 脉冲开关型驱动电源实验研究与结果

由于设计是以 PWM 放大器为核心的开关型压电陶瓷驱动电源全桥方式输出，因此，AOUT-BOUT 电压经 LC 低通滤波后的电压即为压电陶瓷两端的电压，并且为悬浮电压。选用隔离差分探头进行测量，确保更精确测量压电陶瓷两端电压信号并传送到示波器的输入端。由于压电陶瓷相当于容性负载，为了测试开关型压电陶瓷驱动电源动态性能和最大有效带宽，使用高精度的 CBO 电容来模拟压电陶瓷。对该电源输入阶跃信号，对应的阶跃响应如图 5 所示。上升时间大约为 150 μ s。

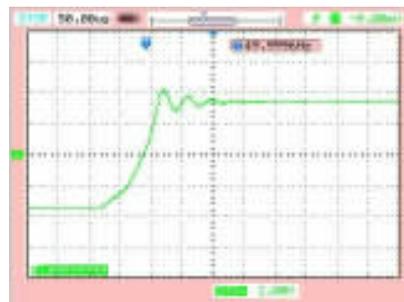


图5 阶跃信号响应曲线

驱动电源调制后的输出脉冲是一些不同占空比的波形。图6给出了2 kHz时占空比为90%的波形,反馈积分差分放大器的截止频率是20 kHz,理论上,PWM模块可以调制至少10 kHz的输入正弦信号,但由于反馈元件参数较难匹配,随着输入正弦信号频率的增加,最终跟随输入正弦信号的输出放大信号调制频率为2 kHz。



图6 频率2 kHz占空比90%波形

开关型压电陶瓷驱动电源输出调制脉冲需经过LC低通滤波解调成正弦信号才能驱动压电陶瓷。实验中,等效压电陶瓷负载电容容量为1 μF 时,由于LC低通滤波参数比较难匹配,解调后的带载信号不是理想的正弦信号,波形有轻微的畸变。带载2 kHz输出波形如图7所示。



图7 带载2 kHz输出波形

压电陶瓷的动态应用场合越来越多,通过分析目前使用的驱动电源存在的使用效率低、体积大等问题,提出了一种使用效率高、动态性能好的PWM压电陶瓷驱动电源,使用效率提高到80%以上,有效输出带宽可以达到2 kHz,体积小,集成度也有了明显提高。

参考文献

- [1] INOKUMA T, TAKETA Y. Control of electrical properties of RuO₂ thick film resistors[J]. Active and Passive Elec Comp, 1987(12):155-166.
- [2] JOSHI A G, SHARM A D, SARMA G H. An approach to ensure stability of precision laser trimmed thick film resistors[J]. Microelect and Reliability, 1983,23(1):161-165.
- [3] 周亮,姚英学,张宏志.低波纹度快速响应压电陶瓷驱动电源的研制[J].压电与声光,2000,22(4):237-239.
- [4] 李福良.基于PA85的新型压电陶瓷驱动电源[J].压电与声光,2005,27(4):392-394.
- [5] 黄春,汝长海,叶秀芬,等.基于补偿技术的宽频带压电陶瓷驱动电源[J].压电与声光,2009,31(3):150-153.
- [6] 汝长海,荣伟彬,孙立宁,等.基于电荷控制压电陶瓷驱动方法的研究进展[J].压电与声光,2004,26(1):83-86.
- [7] NORAS M, MCANN P, KIERES J. A charge feedback controller for a piezoelectric voltage amplifier/driver[J]. Heterogeneous Ingegration of Materials for Passive Components and Smart Systems, MRS Symposium Proceedings, 2007:969.
- [8] Ting Yung, JAR H C, Lin Chungyi, et al. A new type of parts feeder driven by bimorph piezo actuator[J]. ELSEVIER, 2005,43(7):566-573.

(收稿日期:2013-08-04)

作者简介:

周涛,男,1987年生,硕士研究生,主要研究方向:微纳米驱动及自动化控制。