

# 基于 PA85A 的高精度动态压电陶瓷驱动电源设计

徐 辽<sup>1,2</sup>, 范青武<sup>1,2</sup>, 刘旭东<sup>1,2</sup>, 张 恒<sup>1,2</sup>, 张跃飞<sup>3</sup>

(1. 北京工业大学 信息学部, 北京 100024; 2. 数字社区教育部工程研究中心, 北京 100024;

3. 北京工业大学 固体微结构与性能研究所, 北京 100024)

**摘 要:**压电陶瓷作为原子力显微镜系统中的执行器件,能够快速跟踪测量样品的形貌。为提高压电陶瓷驱动器的定位精度与响应速度,根据电压控制型驱动电源的原理,以 PA85A 高压运放为核心器件,设计了一种高精度动态压电陶瓷驱动电源。分析了影响系统精度与动态性能的因素,采用相位补偿法,提高了系统的稳定性。实验结果表明,该电源具有精度高,动态响应快,稳定性强的特点,能有效用于原子力显微镜系统中。

**关键词:**压电陶瓷;电压控制;高压运放;驱动电源;高精度动态

**中图分类号:**TN384;TM282;TP29 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2018.04.021

## Design of High-precision Dynamic PZT Driving Power Based on PA85A

XU Liao<sup>1,2</sup>, FAN Qingwu<sup>1,2</sup>, LIU Xudong<sup>1,2</sup>, ZHANG Heng<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuefei<sup>3</sup>

(1. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China;

2. Engineering Research Center of Digital Community, Ministry of Education, Beijing 100024, China;

3. Institute for Microstructure and Properties of Advanced Materials, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China)

**Abstract:** The piezoelectric ceramic, as an actuator in the atomic force microscope (AFM) system, can quickly trace the appearance of the measured sample. In order to improve the positioning accuracy and response speed of PZT actuators, according to the principle of the voltage-controlled driving power, a high-precision dynamic PZT driving power was designed based on the high voltage operational amplifier PA85A. The factors that affect the accuracy and dynamic performance of system were analyzed; the method for phase compensation was adopted to improve the stability of the system. The results show that this power has the features of high-precision, fast dynamic response, high stability, which can be effectively applied to the AFM system.

**Key words:** piezoelectric ceramic; voltage control; high voltage operational amplifier; driving power; high-precision dynamic

## 0 引言

随着科学技术水平的高速发展,所研究的对象也从宏观世界发展到了微观世界,亚微米及纳米级定位技术已成为纳米生物工程、航空航天、机器人等领域的关键技术<sup>[1-2]</sup>。压电陶瓷驱动器具有位移分辨力高,频响高,推力大,不易受外界电磁场干扰等优点,广泛应用在超精密定位系统中。压电陶瓷驱动器定位精度和速度与其驱动电源的动、静态性能有关<sup>[3-4]</sup>。目前,国内设计的压电驱动电源多数采用分立元件搭建,对输出电压的控制性强、输出功率大,但使用元件较多,复杂度高,电路易振荡<sup>[5]</sup>。国际上多采用高水准的功率放大器来制作驱动电源,采用互补的 AB 类功率放大器外接负反馈来实现压

电陶瓷的驱动<sup>[6]</sup>。设计出精度高、响应速度快、稳定性强的驱动电源对精密定位系统具有重要的理论意义与实用价值。

## 1 驱动电源原理分析

压电陶瓷驱动电源主要分为电荷驱动与电压驱动两种类型。电荷驱动型电源低频特性差,存在零点漂移的缺点<sup>[7-9]</sup>。电压驱动型包括基于直流变换原理的开关式驱动电源和直流放大式驱动电源两种。开关式驱动电源效率高,但频响特性差,输出纹波偏大,直流放大式驱动电源输出纹波小、频响范围宽。直流放大式又分为电压跟随型、误差放大型和高压运放型<sup>[10]</sup>。本文采用直流放大式的结构设计压电陶瓷驱动电源,其核心电路采用高压集成运放,

收稿日期:2017-09-01

基金项目:科技部国家重大科学仪器设备开发专项基金资助项目(2012YQ03007508)

作者简介:徐辽(1991-),男,安徽省宿州市人,硕士生,主要从事压电陶瓷驱动电源的研究。范青武(1977-),男,山西平遥人,副教授,博士,主要从事智能优化控制、纳米操作技术与仪器制造等方面的研究。

该结构简单、可靠、集成度高,其原理如图 1 所示。

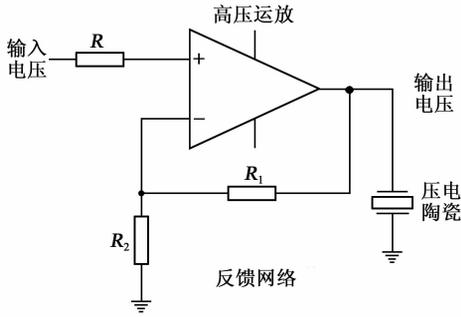


图1 高压放大驱动电源原理图

设计的驱动电源技术要求:

- 1) 输出电压 0~100 V 连续可调。
- 2) 可输出不同频率的正弦波、三角波、方波等电压信号。
- 3) 输出正弦信号电压频率 0~10 kHz 范围内可调。
- 4) 为适应高频响应的要求,能够输出足够的驱动电流,最大输出驱动电流不应小于 150 mA。
- 5) 输出电压分辨率小于等于 10 mV。

## 2 关键技术分析

### 2.1 高压运放的选择

正确的选择高压运放,对驱动电源的设计至关重要。根据驱动电源的技术要求,高压运放应该满足以下性能:

- 1) 最大输出电压  $U_{\max} \geq 100$  V。
- 2) 最大输出电流  $I_{\max}$ ,本设计使用的压电陶瓷等效电容  $C = 25$  nF,电源输出正弦信号最大频率  $f_{\max} = 10$  kHz,则

$$I_{\max} = 2\pi f_{\max} C U_{\max} = 157(\text{mA}) \quad (1)$$

- 3) 运放失调电压,高压运放闭环增益选择 10 倍,根据失调电压 < 分辨率/增益,则运放失调电压应小于 1 mV。

- 4) 压摆率 SR,根据最高输出频率与最大输出电压计算

$$SR = 2\pi f_{\max} U_{\max} = 6.28(\text{V}/\mu\text{s}) \quad (2)$$

根据以上计算数据,同时考虑放大器的内部损耗,选用美国 APEX 公司生产的高压集成运算放大器 PA85A,双端供电时输出电压可达  $\pm 225$  V,输出电流可达 200 mA,加外部补偿电容下的压摆率为  $400$  V/ $\mu$ s。最大输入失调电压 0.5 mV,具有很高的电源电压抑制比。PA85A 内部由运算放大电路、功率放大电路及保护电路组成,提高了电路集成度,增强了电路可靠性,减小了体积。

### 2.2 闭环增益对精度与稳定性的影响

驱动电源设计的关键是保证系统的输出精度、

稳定性与响应速度。高压放大电路选择同相输入的方式,所以反馈系数  $F$  是闭环增益  $A_{\text{CL}}$  的倒数。运放的稳定性与  $F$  直接相关, $F$  越小运放越稳定,即闭环增益越大系统越稳定。图 2 为放大器稳定性与  $F$  之间的关系。由图可知,减小  $F$  使得环路增益曲线下移,穿越频率由  $f_1$  变为  $f_2$ ,相位裕度由  $\gamma_1$  变为  $\gamma_2$ ,相位裕度增加,即系统稳定性增加,但系统带宽减小,系统带宽与稳定性是相互矛盾的。

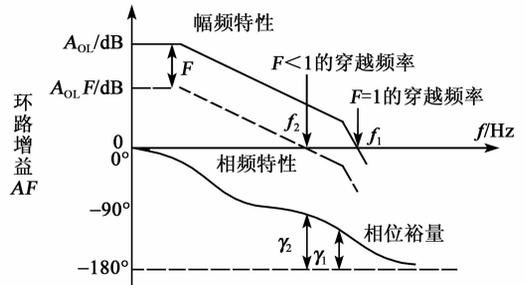


图2 放大器稳定性与反馈系数之间的关系

然而,闭环增益的大小也影响系统的输出精度,即

$$A_{\text{CL理想}} = \frac{1}{F} \quad (3)$$

$$A_{\text{CL实际}} = \frac{A_{\text{OL}}}{1 + A_{\text{OL}} F} \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{A_{\text{CL实际}} - A_{\text{CL理想}}}{A_{\text{CL理想}}} = -\frac{1}{1 + A_{\text{OL}} F} \approx -\frac{1}{A_{\text{OL}} F} \quad (5)$$

式中: $A_{\text{CL}}$  为闭环增益; $A_{\text{OL}}$  为开环增益; $A_{\text{OL}} F$  为环路增益; $\epsilon$  为闭环增益误差。由式(5)可得出  $\epsilon$  与  $F$  成反比关系。对于给定的  $A_{\text{OL}}$ , $F$  越大,即  $A_{\text{CL}}$  越小,它偏离理想的误差越小,其精度越高,否则,精度越低。

综上所述,合理选择闭环增益,既要保证系统的输出精度又保证系统有足够的稳定性与带宽。

PA85A 集成运放提供外部补偿引脚,通过配置外部 RC 网络增加运放的稳定性,并扩展频带。根据 PA85A 的数据资料,相位补偿电容与电阻取值  $C_c = 10$  pF, $R_c = 330$   $\Omega$ ,由 PA85A 的小信号响应曲线知,当  $A_{\text{CL}}$  选择 10, $C_c = 10$  pF 时,PA85A 的闭环带宽约为 4 MHz,相位裕度约为  $50^\circ$ ,满足精度、稳定性与高带宽的要求。

### 2.3 容性负载的影响及稳定性补偿

带有容性负载的放大器易自激,其原因是集成运放的内部输出电阻与容性负载构成一个低通网络,此网络产生的附加相移将使放大器的相位裕度下降,从而导致放大器振荡,如图 3 所示。

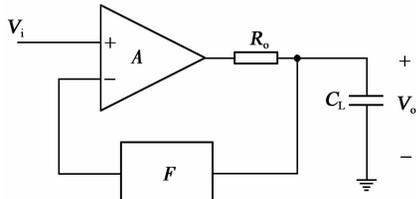


图3 运放带容性负载示意图

本驱动系统中,放大器输出电阻  $R_o = 50 \Omega$ , 压电陶瓷负载等效电容  $C_L = 25 \text{ nF}$ , 则由容性负载产生的附加极点频率  $f_p$  为

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_o C_L} = 127(\text{kHz}) \quad (6)$$

极点  $f_p$  对 PA85A 的开环增益曲线影响如图 4 所示,新增极点使开环幅频特性曲线在频率  $f_p$  处以  $-40 \text{ dB/十倍频}$  下降(见图 4 中虚线),与  $20 \text{ dB}$  闭环增益曲线的闭合速度为  $-40 \text{ dB/十倍频}$ ,电路可能会发生自激振荡,需要进行相位补偿。

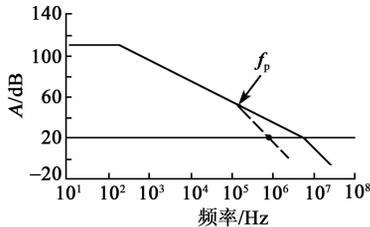


图4 负载极点对稳定性的影响

图 5 为采用带隔离电阻的电容反馈进行相位补偿。

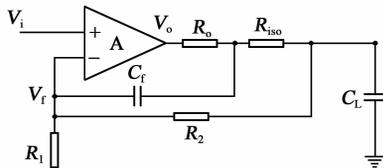


图5 带有隔离电阻的电容反馈补偿电路

图 5 中,  $C_f$  为反馈电容,  $V_o$  为运放内部输出电压,  $R_o$  为放大器输出电阻, 其值为  $50 \Omega$ ,  $R_{iso}$  为隔离电阻, 当  $R_1, R_2 \gg R_{iso}$ ,  $R_1, R_2 \gg R_o$  时, 电路产生高频极、零点  $f_{ph}, f_{zh}$  分别为

$$f_{ph} = \frac{1}{2\pi(R_o + R_{iso})C_L} \quad (7)$$

$$f_{zh} = \frac{1}{2\pi R_{iso} C_L} \quad (8)$$

低频极、零点  $f_{pl}, f_{zl}$  分别为

$$f_{pl} = \frac{1}{2\pi(R_o + R_2) // (R_1 + R_{iso}) C_f} \quad (9)$$

$$f_{zl} = \frac{1}{2\pi(R_1 + R_{iso}) C_f} \quad (10)$$

总的反馈函数中包含两对零极点, 如果令  $f_{ph} = f_{zl}, f_{zh} = f_{pl}$ , 则零点与极点相互抵消, 得到补

偿电阻和电容分别为

$$R_{iso} = \frac{R_1 R_o}{R_2} \quad (11)$$

$$C_f = \left( \frac{R_o + R_{iso}}{R_2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) C_L \quad (12)$$

本设计中取  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 90 \text{ k}\Omega$ ,  $R_o = 50 \Omega$ ,  $C_L = 25 \text{ nF}$ ,  $R_{iso} \approx 5.6 \Omega$ ,  $C_f \approx 17 \text{ pF}$ 。

### 3 驱动电源总体设计

#### 3.1 驱动电源设计框图

驱动电源系统设计框图如图 6 所示。

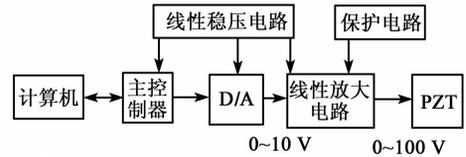


图6 压电陶瓷驱动电源系统结构框图

图 6 中, 线性稳压电路模块用于对整个电路系统供电, 主控制器接收计算机发送的命令, 输出有效的数字信号来驱动 D/A 转换器, D/A 转换器把数字信号转为模拟信号, 经滤波器滤波后输入到线性放大电路中, 最后由线性放大电路驱动压电陶瓷执行器输出位移。

#### 3.2 线性高压放大电路

线性高压放大电路如图 7 所示。

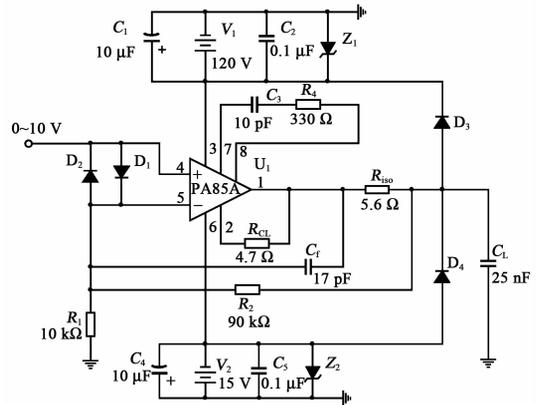


图7 线性高压放大电路

高压运放选择同相输入方式电压串联负反馈, 可以减少输入信号损失, 并提高带负载的能力。  $R_{iso}, C_f$  分别为补偿电阻、电容,  $D_1, D_2$  为输入端保护二极管, 可有效钳制差分输入电压, 防止差分输入电压过大会导致放大器内部器件遭到破坏。  $D_3, D_4$  是两个快速恢复二极管, 对运放输出端进行保护, 其反向耐压值应达到电源电压两倍, 同时在电源旁路加两个瞬态抑制二极管  $Z_1, Z_2$ , 防止瞬态高压信号对电源造成损坏。  $R_{CL}$  是限流电阻, 且

$$R_{CL} = \frac{0.7}{I_{Lim} - 0.016} \quad (13)$$

式中  $I_{Lim}$  为限制电流值。本设计中,采用  $4.7 \Omega$  的电阻将电流限制在  $165 \text{ mA}$ 。

#### 4 驱动电源性能测试分析

实验用压电陶瓷为 PI 公司生产的 PL022.30 多层压电陶瓷促动器,压电陶瓷工作电压为  $-20 \sim 100 \text{ V}$ ,负载电容  $25 \text{ nF}$ 。

##### 4.1 动态性能测试

主控制器控制 D/A 输出  $10 \text{ kHz}$  的正弦信号作为输入电压,电压峰值设为  $5 \text{ V}$ ,直流偏置  $5 \text{ V}$ ,使用示波器观察输入、输出电压波形,如图 8 所示,通道 1 为输入电压波形,通道 2 为输出电压波形,输出波形没有相移,驱动电源跟踪效果良好。

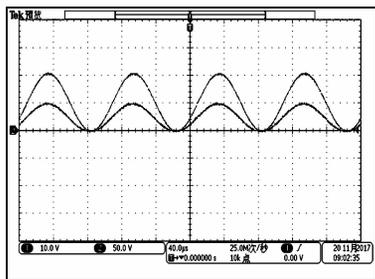


图 8 输入输出电压信号瞬态分析

##### 4.2 输出电压精度测试

将 D/A 输出电压  $0 \sim 10 \text{ V}$  作为输入电压,任选 5 组进行测量,比较实测输出电压与理论输出电压,对每组输出电压进行 20 次测量,如表 1 所示,测试结果表明电源的输出精度优于  $2 \times 10^{-4}$ 。

表 1 驱动电源输出电压精度测试

输入电压/V	理论输出电压/V	实际输出电压平均值/V	最大误差/mV
1.001 1	10.011	10.010	2
2.999 0	29.990	29.991	4
5.005 6	50.056	50.058	3
8.002 9	80.029	80.034	6
9.997 1	99.971	99.966	7

##### 4.3 阶跃响应测试

D/A 输出  $0 \sim 1 \text{ V}$  的阶跃信号作为驱动电源的输入电压,通过示波器观察输出电压,如图 9 所示,阶跃响应无超调,响应速度快,响应时间约为  $5 \mu\text{s}$ 。

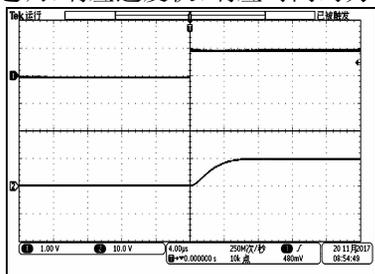


图 9 驱动电源阶跃信号测试

## 5 结束语

本文对集成运放 PA85A 构成的压电陶瓷驱动电源的动态性能进行研究,对影响驱动系统精度与动态性能的因素进行了分析,并提出了选择合适闭环增益与相位补偿的方法,最后通过实验进行验证理论设计,结果表明系统具有很高的精度与速度,具有较高的稳定性。响应速度快,无超调,动态性能良好,满足驱动压电陶瓷执行器在原子力显微镜系统中的要求。

## 参考文献:

- [1] 胡博,唐小萍,胡松,等.用于光刻投影物镜微调的压电陶瓷驱动器设计[J].压电与声光,2013,35(1):94-97. HU Bo, TANG Xiaoping, HU Song, et al. Design of piezoelectric ceramic driving power supply for fine-tuning of lithography projection lens[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(1): 94-97.
- [2] 李龙江.压电陶瓷驱动电源及其控制系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [3] 贾巍,范承玉.应用于快速倾斜镜的压电陶瓷驱动电源[J].量子电子学报,2015,32(2):235-240.
- [4] 葛川,李朋志,章明朝,等.基于 ARM 的高分辨率压电陶瓷驱动电源[J].现代电子技术,2013,36(14):166-170.
- [5] 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):392-395. LI Fuliang. A new power supply for piezoelectric ceramic based on PA85[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2005, 27(4): 392-395.
- [6] 王学亮,巩岩.光刻物镜中压电陶瓷驱动器的动态性能研究[J].光子学报,2012,41(9):1071-1075. WANG Xueliang, GONG Yan. Dynamic performance of the PZT driver used in a lithographic objective[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(9): 1071-1075.
- [7] 范伟,崔长彩,叶瑞芳.压电陶瓷驱动器电源控制系统研究[J].压电与声光,2011,33(6):946-949. FAN Wei, CUI Changcai, YE Ruifang. The research on PZT power supply temperature control system[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2011, 33(6): 946-949.
- [8] 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 supply for piezoelectric actuators[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2008, 30(3): 297-300.
- [9] 赵碧核,尹达一,曾攀.高精度大功率压电陶瓷驱动关键技术[J].压电与声光,2013,35(6):853-857. ZHAO Bishan, YIN Dayi, ZENG Pan. Key technology of high-precision and high-power piezoelectric ceramic drive[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(6): 853-857.
- [10] 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):48-49. LIU Yan, ZOU Wendong. A high driving power design for piezoelectric ceramic actuator[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2008, 30(1): 48-49.