

一种高分辨率压电陶瓷驱动电源设计方案

根据压电陶瓷微位移器对驱动电源的需求,设计了压电驱动电源系统的方案。该方案先介绍了电源系统中的数字电路部分和模拟电路部分,并对驱动电源的精度与稳定性进行了分析与改进。最后对驱动电源的性能进行了实验验证。实验结果表明:该设计方案的电源输出电压噪声低于 0.43 mV、输出最大非线性误差低于 0.024%、分辨率可达 1.44 mV,能够满足高分辨率微位移定位系统中静态定位控制的需求。

0 引言

压电陶瓷驱动器(PZT)是微位移平台的核心,其主要原理是利用压电陶瓷的逆压电效应产生形变,从而驱动执行元件发生微位移。压电陶瓷驱动器具有分辨率高、响应频率快、推力大和体积小等优点,在航空航天、机器人、微机电系统、精密加工以及生物工程等领域中得到了广泛的应用。然而压电陶瓷驱动器的应用离不开性能良好的压电陶瓷驱动电源。要实现纳米级定位的应用,压电陶瓷驱动电源的输出电压需要在一定范围内连续可调,同时电压分辨率需要达到毫伏级。因此压电陶瓷驱动电源技术已成为压电微位移平台中的关键技术。

1 压电驱动电源的系统结构

1.1 压电驱动电源的分类

随着压电陶瓷微位移定位技术的发展,各种专用于压电陶瓷微位移机构的驱动电源应运而生。目前驱动电源的形式主要有电荷控制式和直流放大式两种。电荷控制式驱动电源存在零点漂移,低频特性差的特点限制其应用。而直流放大式驱动电源具有静态性能好、集成度高、结构简单等特点,因而本文的设计原理采用直流放大式压电驱动电源。直流放大式电源的原理如图 1 所示。

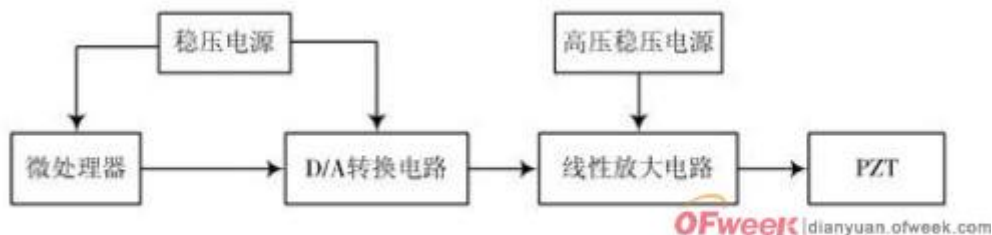


图 1 直流放大式压电驱动电源原理图

1.2 直流放大式压电驱动电源的系统结构

驱动电源电路主要由微处理器、D/A 转换电路和线性放大电路组成。通过微处理器控制 D/A 产生高精度、连续可调的直流电压(0~10 V),通过放大电路对 D/A 输出的直流电压做线性放大和功率放大从而控制 PZT 驱动精密定位平台。

该设计中采用 LPC2131 作为微处理器，用于产生控制信号及波形；采用 18 位电压输出 DA 芯片 AD5781 作为 D/A 转换电路的主芯片，产生连续可调的直流低压信号；采用 APEX 公司的功率放大器 PA78 作为功率放大器件，输出 0~100 V 的高压信号从而驱动 PZT。为实现高分辨率压电驱动器的应用，压电驱动电源分辨率的设计指标达到 1 mV 量级。

2 基于 ARM 的低压电路设计

2.1 ARM 控制器简介

压电陶瓷驱动电源中 ARM 控制器主要提供两方面功能：作为通信设备提供通用的输入/输出接口；作为控制器运行相关控制算法以及产生控制信号或波形实现 PZT 的静态定位操作。针对如上需求，本设计采用 LPC2131 作为主控制器，LPC2131 是 Philips 公司生产的基于支持实时仿真和跟踪的 32 位 ARM7TDMI-S-CPU 的微控制器，主频可达到 60 MHz；LPC2131 内部具有 8 KB 片内静态 RAM 和 32 KB 嵌入的高速 FLASH 存储器；具有两个通用 UART 接口、I2C 接口和一个 SPI 接口。由于 LPC2131 具有较高的数据处理能力和丰富的接口资源使其能够作为压电驱动电源的控制芯片。

2.2 D/A 电路设计

由于压电驱动电源要求输出电压范围为 0~100 V，分辨率达到毫伏级，所以 D/A 的分辨率需达到亚毫伏级。本设计采用 AD5781 作为 D/A 器件。AD5781 是一款 SPI 接口的 18 位高精度转换器，输出电压范围 -10~10 V，提供 ± 0.5 LSB INL， ± 0.5 LSB DNL 和 7.5 nV/Hz 噪声频谱密度。另外，AD5781 还具有极低的温漂（0.05 ppm/°C）特性。因此，该 D/A 转换器芯片特别适合于精密模拟数据的获取与控制。D/A 电路设计如图 2 所示。

在硬件电路设计中，由于 AD5781 采用的精密架构，要求强制检测缓冲其电压基准输入，确保达到规定的线性度。因此选择用于缓冲基准输入的放大器应具有低噪声、低温漂和低输入偏置电流特性。这里选用 AD8676，AD8676 是一款超精密、36 V、2.8 nV/Hz 双通道运算放大器，具有 0.6 μ V/°C 低失调漂移和 2 nA 输入偏置电流，因而能为 AD5781 提供精密电压基准。通过下拉电阻将 AD5781 的 CLR 和 LDAC 引脚电平拉低，用于设置 AD5781 为 DAC 二进制寄存器编码格式和配置输出在 SYNC 的上升沿更新。

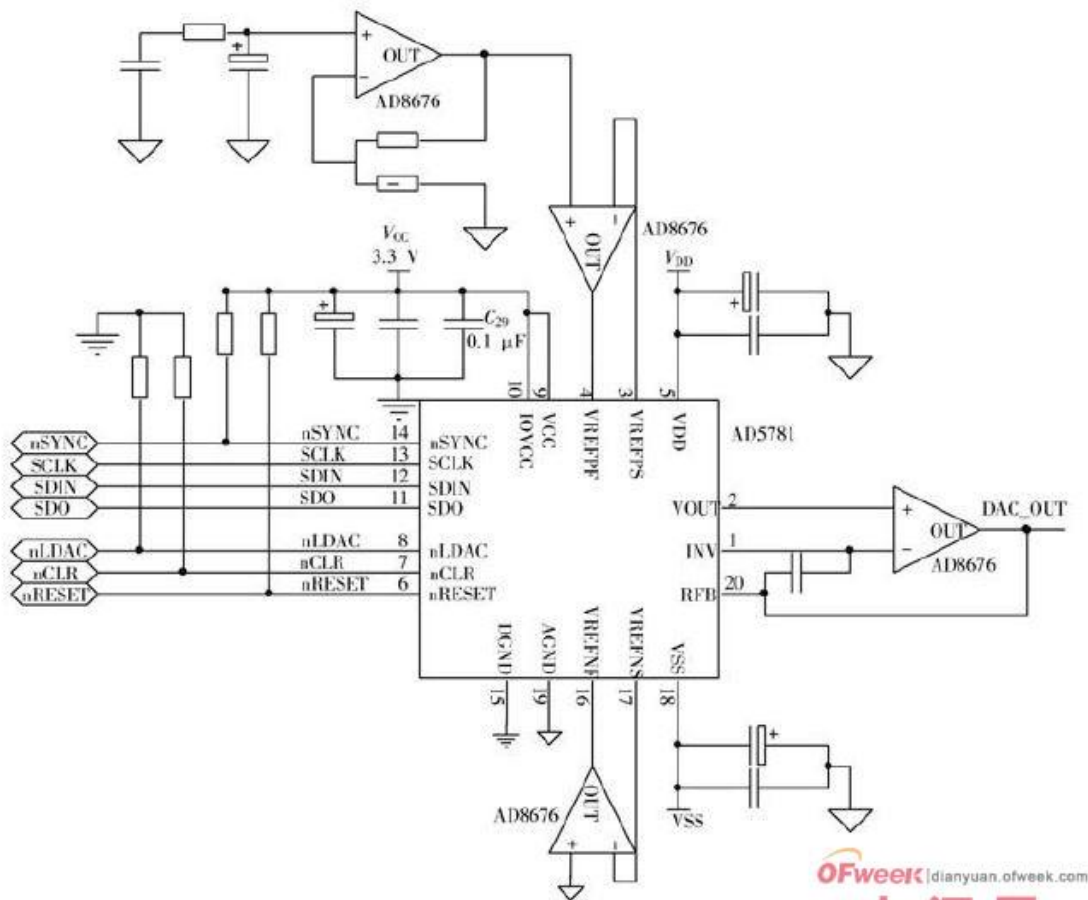


图2 AD5781 硬件设计电路图

在 ARM 端的软件设计中，除正确配置 AD5781 的相关寄存器外，还应正确配置 SPI 的时钟相位、时钟极性和通信模式。正确的 SPI 接口时序配置图如图 3 所示。

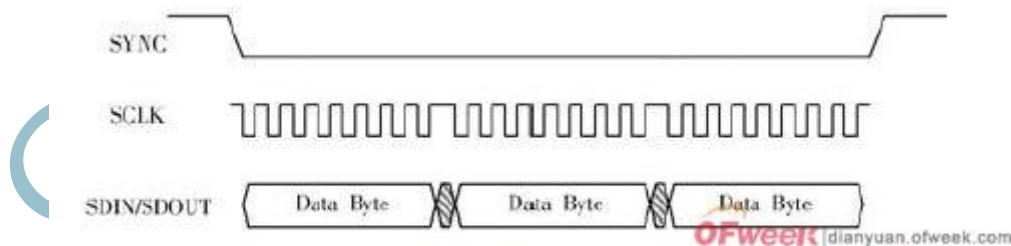


图3 主模式下的 SPI 通信时序图

3 高压线性放大电路设计

本文压电驱动电源采用直流放大原理，通过高压线性放大电路得到 0~100 V 连续可调的直流电压驱动压电陶瓷。放大电路决定着电源输出电压的分辨率和线性度，是整个电源的关键。

3.1 经典线性放大电路设计

放大电路采用美国 APEX 公司生产的高压运算放大器 PA78 作为主芯片。PA78 的输入失调电压为 8 mV, 温漂 $-63 \text{ V}/^\circ\text{C}$, 转换速率 $350 \text{ V}/\mu\text{s}$, 输入阻抗 108Ω , 输出阻抗 44Ω , 共模抑制比 118 dB. 基于 PA78 的线性放大电路设计如图 4 所示。配置 PA78 为正向放大器, 放大倍数为 $\text{Gain}=1+R_2/R_1$, 得到输出电压范围为 $0\sim 100 \text{ V}$ 。

如果运放两个输入端上的电压均为 0 V, 则输出端电压也应该等于 0 V. 但事实上, 由于放大器制造工艺的原因, 不可避免地造成同相和反相输入端的不匹配, 使输出端总有一些电压, 该电压称为失调电压。失调电压随着温度的变化而改变, 这种现象被称为温度漂移 (温漂), 温漂的大小随时间而变化。PA78 的失调电压和温漂分别为 8 mV、 $-63 \text{ V}/^\circ\text{C}$, 并且失调电压和温漂都是随机的, 使 PA78 无法应用于毫伏级分辨率的电压输出, 需要对放大电路进行改进。

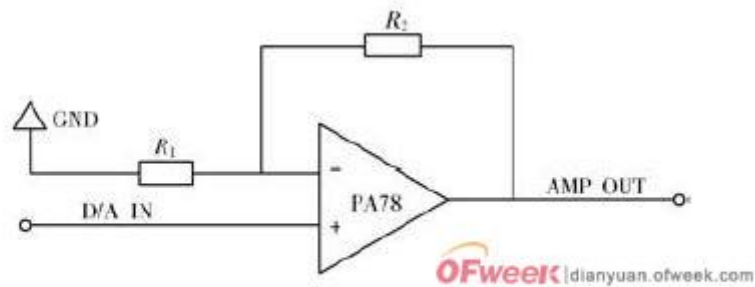


图 4 线性放大电路

3.2 放大电路的改进

这里将 PA78 视为被控对象 $G(S)$, 将失调电压和温漂视为扰动 $N(S)$, 这样就把提高放大器输出电压精度转化成减小控制系统的稳态误差的控制器设计的问题。在控制器的设计中常用的校正方法有串联校正和反馈校正两种。一般来说反馈校正所需的元件数少、电路简单。但是在高压放大电路中, 反馈信号是由 PA78 的输出级提供。反馈信号的功率较高, 为元件选型和电路设计带来不便, 故线性放大电路中不使用反馈校正法。而在串联校正方法中, 有源器件的输入不包含高压反馈信号, 所以该设计采用串联校正方法, 采用模拟 PI (比例-积分) 控制器 $G_1(S)$ 进行校正, 如图 5 所示。

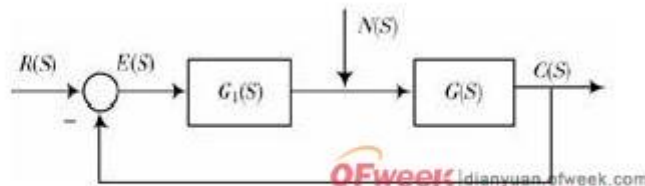


图 5 放大电路串联校正控制系统

成比例的反应输入信号 $e(t)$ 及其积分, 即:

$$c(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{K_I} \int_0^t e(t) dt \quad (1)$$

对式(1)进行拉普拉斯变换得：

$$C(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{K_I s} \right) E(S) \quad (2)$$

由式(2)观察可得，PI 控制器相当于在控制系统中增加了一个位于原点的开环极点，开环极点的存在可以提高系统的型别，由于系统的型别的提高可以减少系统的阶跃扰动稳态误差（对于线性放大电路，可视失调电压和温漂为阶跃扰动）。同时 PI 控制器还增加了一个位于复平面中左半平面的开环零点，复实零点的增加可以提高系统的阻尼程度，从而改善系统的动态性能，缓解由牺牲的动态性能换取稳态性能对系统产生的不利影响。

放大电路的设计中采用有源模拟 PI 控制器，改进后的线性放大电路如图 6 所示。其中 PI 控制器的放大器采用 AD8676，AD8676 的输入失调电压低于 $50 \mu V$ （满温度行程下），电压噪声 $\leq 0.04 \mu V$ (P-P) @0.1~10 Hz，因此适用于串联校正环节，以提高系统稳态性能、减小输出电压漂移。

3.3 相位补偿

从工程角度考虑，由于干扰源的存在，会使系统的稳定性发生变化，导致系统发生震荡。因此保证控制系统具有一定的抗干扰性的方法是使系统具有一定的稳定裕度即相角裕度。

由于实际电路中存在杂散电容，其中放大器反向输入端的对地电容对系统的稳定性有较大的影响。如图 6 所示，采用 C5 和 C6 补偿反向端的杂散电容。从系统函数的角度看，即构成超前校正，增加开环系统的开环截止频率，从而增加系统带宽提高响应速度。

PA78 有两对相位补偿引脚，通过外部的 RC 网络对放大器内部的零极点进行补偿。通过 PA78 的数据表可知，PA78 内部的零极点位于高频段。根据控制系统抗噪声能力的需求，配置 RC 网络使高频段的幅值特性曲线迅速衰减，从而提高系统的抗干扰能力。图 6 中，R4, C1 与 R5, C2 构成 RC 补偿网络。

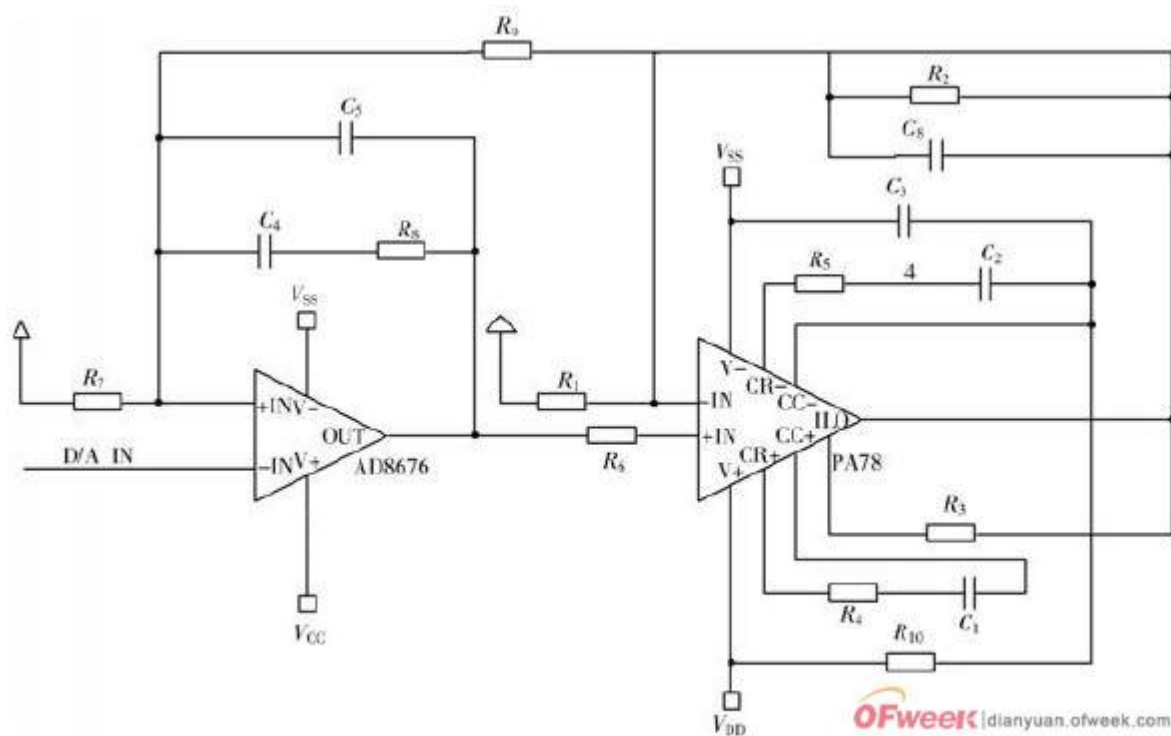
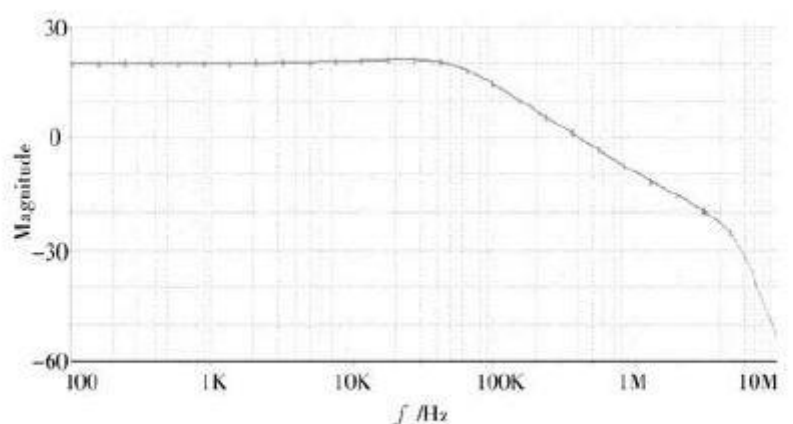


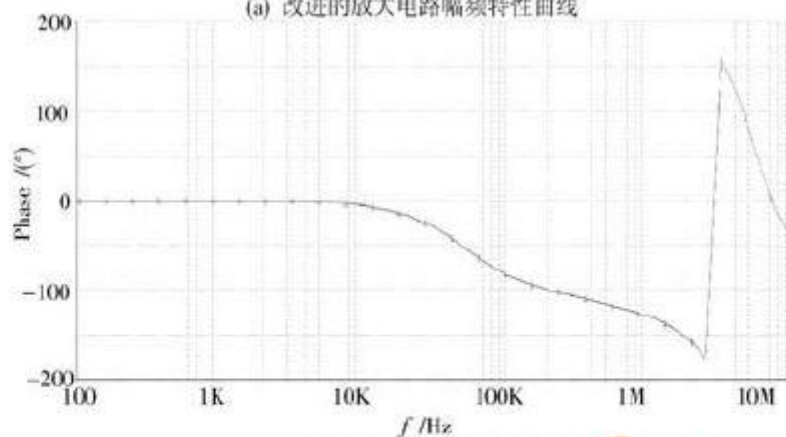
图6 改进后的线性放大电路

此外电路中 C3 的作用是防止输出信号下降沿的振动引起的干扰；R10 起到偏置电阻的作用，将电源电流注入到放大器的输出级，提高 PA78 的驱动能力。

将 PI 控制器的参数分别设置为 $K_P=10$ 、 $K_I=0.02$ ；超前校正补偿电容分别为 12 pF 和 220 pF；RC 补偿网络为 $R=10\text{ k}\Omega$ 、 $C=22\text{ pF}$ 。利用线性放大电路的 Spice 模型进行仿真得到幅频特性和相频特性曲线如图 7 所示。从图中观察可得，放大系统的带宽可达 100 kHz，从而保证了系统良好的动态特性，同时相角裕度 $\gamma > 60^\circ$ 使系统具有较高的稳定性（由于 PZT 的负载电抗特性一般呈容性，所以留有较大的相角裕度十分必要）。



(a) 改进的放大电路幅频特性曲线



(b) 改进的放大电路相频特性曲线

图7 改进的放大电路的幅频和相频特性曲线

4 驱动电源实验结果

实验用压电陶瓷驱动电源的稳压电源采用长峰朝阳电源公司的4NIC-X56ACDC 直流电源，输出电压精度 $\leq 1\%$ ，电压调整率 $\leq 0.5\%$ ，电压纹波 ≤ 1 mV (RMS)、10 mV (P-P)。测量设备采用 KEITHLEY 2000 6 1/2 Multimeter。

首先对 DAC 输出分辨率进行测量，ARM 控制器输出持续 5 s 的阶跃信号，同时在 DAC 输出端对电压信号进行测量，将测量结果部分显示见图 8。图 8 中显示 AD5781 的输出电压分辨率可达 3.89×10^{-5} V，即 $38.9 \mu\text{V}$ 。

在模拟电路中，噪声是不可避免的。对于压电驱动电源来说，噪声的等级限制了驱动电源的输出分辨率。

图 8、9 分别给出经典放大电路和改进后的放大电路的测试噪声。从图中可得通过使用 PI 控制器和相位补偿元件将压电驱动电源的输出噪声从 1.82 mV (RMS) 降低至 0.43 mV (RMS)。

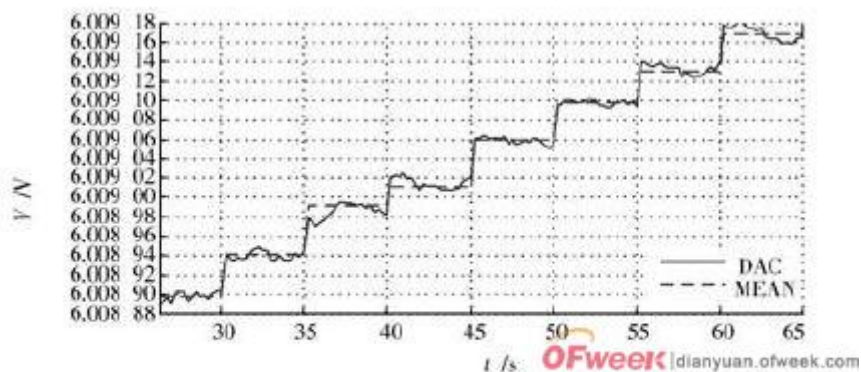
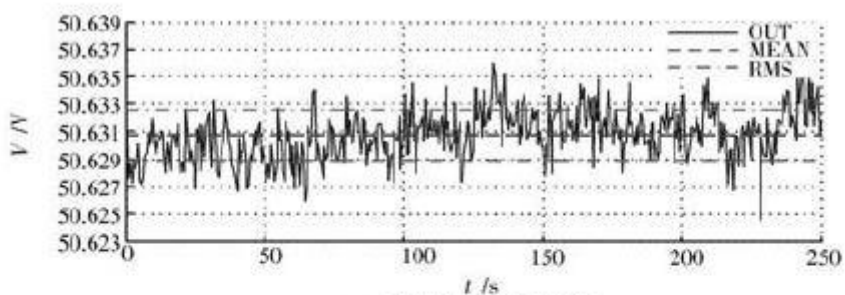
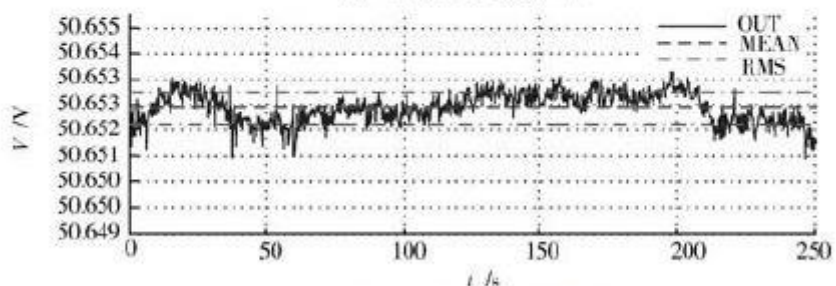


图8 DAC分辨率实验图



(a) 经典放大电路噪声图



(b) 改进后放大电路噪声图

图9 放大电路噪声图

图10给出了放大电路的输出分辨率，放大电路的分辨率决定了PZT的定位精度，如要实现纳米级的定位精度，驱动电源的分辨率需要达到毫伏级。图10中，输出电压的分辨率可达到1.44 mV。

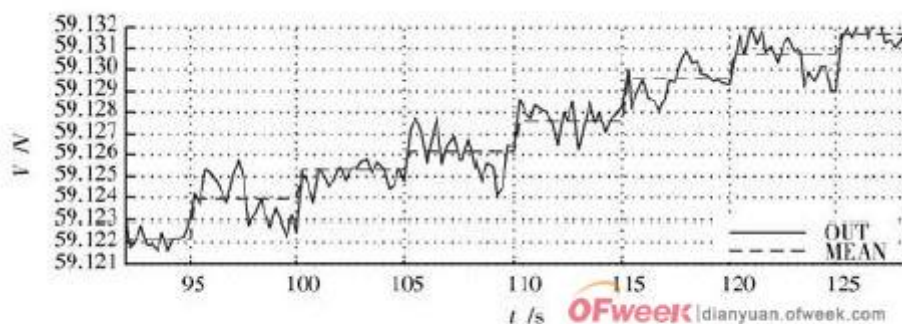
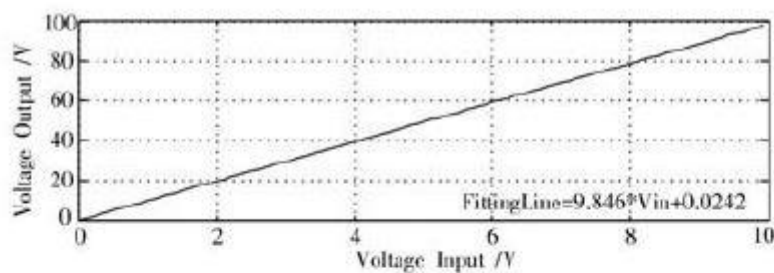


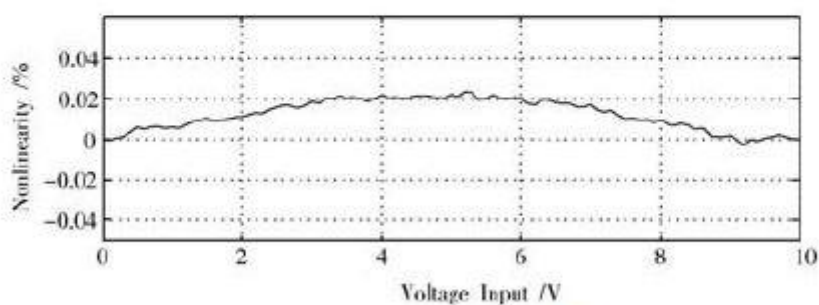
图10 放大电路分辨率实验图

最后, 给出驱动电源电压线性度曲线。线性度能够真实的反映出输出值相对于输入真值的偏差程度。

线性度曲线如图 11 所示。得到拟合直线 $Y_{fit}=9.846V_{in}+0.0242$, 最大非线性误差为 0.024%, 能够满足精密定位需求。



(a) 输出电压曲线



(b) 非线性度曲线

图11 输出电压曲线和非线性度曲线

5 结论

本文设计的基于 ARM 的高分辨率压电陶瓷驱动电源的方案, 该方案采用直流放大原理, 具有低电路噪声、高分辨率和低输出非线性度等特性, 同时驱动电源的带宽可达 100 kHz. 以上特性使本方案的压电驱动电源能够应用于纳米级静态定位的需求, 由于其性价比高、结构简单, 故具有很高的实用价值。而实验结果也表明: 本方案所设计的电源输出电压噪声低于 0.43 mV、输出最大非线性误差

低于 0.024%、分辨率可达 1.44 mV, 能够满足高分辨率微位移定位系统中静态定位控制的需求。

OFweek 电子工程网