

# 基于电流控制的压电陶瓷驱动电源 及其试验研究\*

陈立国 荣伟彬 汝长海 张国平 孙立宁  
(哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150001)

摘要: 压电陶瓷致动器在电场驱动下会产生迟滞和蠕变现象, 降低了定位精度。根据压电陶瓷致动器的位移与电荷量之间具有线性关系, 研制了基于电流控制的压电陶瓷驱动电源。通过控制压电陶瓷的充电电流来控制其运动速度, 从而控制其位移量。设计特殊电路和有针对性的控制算法, 实现对压电陶瓷的快速驱动与高精度定位的结合。试验结果表明, 利用该电源可实现对压电陶瓷的线性驱动和快速精密定位。

关键词: 压电陶瓷致动器 驱动电源 电流控制 迟滞 蠕变

中图分类号: TP242.2

## 0 前言

压电陶瓷微位移器具有体积小、位移分辨率高、频响高、无噪声和不发热等特点, 是一种理想的微位移元件。压电陶瓷驱动电源的研究一直被各国学者关注, 按照驱动原理的不同, 可以分为电压控制型驱动电源和电荷控制型驱动电源。其中前者是目前市场上的主流产品。

电压控制型压电陶瓷电源具有较高的频率响应特性, 但由于压电陶瓷的位移与输入电压之间存在迟滞、蠕变等现象, 要实现线性化, 算法复杂, 加大了对压电陶瓷位移的控制难度; 电荷控制型驱动电源是利用压电陶瓷位移与其上的自由电荷之间的线性关系, 采用电路控制施加在压电陶瓷两端的充电电荷, 从而实现线性驱动。

电压控制型压电陶瓷电源原理上的缺陷使得电荷控制型驱动电源发展也越来越受关注, 并且不断取得进展。杨宜民等<sup>[1]</sup>用集成元件代替分立元件构成恒流源电路, 用 EMM(Exact model matching)法进行动态特性校正, 获得了小于 10 nm 的分辨率, 35 nm 的重复性, 0.8% 的线性度以及 80 Hz 的带宽。PEKKA 等<sup>[2]</sup>提出了用非恒流的电流反馈控制, 加上前馈补偿和功率损耗补偿, 可大幅度减小迟滞和蠕变。德国学者 FLEMING 设计了一种新型电流源, 该电流源具有高精度、零直流补偿以及电荷和电流超低频率校正等特性<sup>[3]</sup>。电流控制型压电陶瓷驱动电源的研究已成为该领域新的研究热点。

针对电压控制型压电陶瓷电源的迟滞、蠕变的

缺点, 采用电流控制原理, 设计新型压电陶瓷驱动电源, 并对压电陶瓷的驱动与控制技术进行试验研究。

## 1 压电陶瓷的位移—电荷线性模型

### 1.1 位移—电荷模型

堆叠式压电陶瓷位移量与充电电荷间的线性关系<sup>[3]</sup>

$$\Delta l = nd \left( \frac{1}{E_{33}} - \frac{d_{33}^2}{e_{33}} \right) p + \frac{dd_{33}Q}{e_{33}A} \quad (1)$$

式中  $\Delta l$  ——压电陶瓷的位移(m)

$n$  ——叠堆式压电陶瓷的层数

$d$  ——每一层压电陶瓷片的厚度(m)

$E_{33}$  ——厚度方向上的弹性模量(Pa)

$d_{33}$  ——纵向压电应变系数(C/m)

$e_{33}$  ——恒定压强下的介电常数( $C^2/(N \cdot m^2)$ )

$p$  ——压强(Pa)

$Q$  ——堆叠式压电陶瓷总的自由电荷量(C)

$A$  ——压电陶瓷片的面积( $m^2$ )

式(1)表明, 压电陶瓷的位移同两端的自由电荷量以及受力成正比。可见, 只要控制对压电陶瓷的充电电荷量, 并且能计算出压电陶瓷的受力, 就能准确控制压电陶瓷的位移。

### 1.2 压电陶瓷工作台的位移公式

压电陶瓷微位移工作台是采用两层平行板柔性铰链机构设计的具有纳米级定位精度的微位移工作台。两层平行板弹性移动幅的驱动力与位移之间为线性关系, 其模型如下<sup>[4]</sup>

$$\Delta l = \frac{FL^3}{4Ebt^3} \quad (2)$$

式中  $F$  ——工作台在位移方向上的受力(N)

\* 国家自然科学基金资助项目(60274053)。20050129 收到初稿, 20050811 收到修改稿

$L, b, t$ ——工作台的结构参数(m)

$E'$ ——工作台材料的弹性模量(Pa)

为了方便,取常数  $K(\text{m/N})$ ,将方程简记为

$$\Delta l = KF \quad (3)$$

结合式(1)和(3),并考虑

$$F = PA \quad (4)$$

便可得出压电陶瓷位移的方程呈如下形式

$$\Delta l = kQ \quad (5)$$

式中  $k$ ——常数(m/C)

为实现对压电陶瓷位移的线性控制,必须使压电陶瓷电源能够控制对压电陶瓷的充电电荷量。而如果压电陶瓷的驱动电源能够实现对压电陶瓷充电电荷量的控制,那么对压电陶瓷位移量的控制将会非常容易实现,从而大大简化控制算法。因此,研制能够控制压电陶瓷充电电荷量的驱动电源具有重要意义。

## 2 基于电流控制的压电陶瓷驱动电源

### 2.1 驱动原理

图 1 为采用 APEX 公司生产的高压功率运放 MP38 作为核心驱动部件所设计的压电陶瓷电源主电路模块,压电陶瓷的电荷量  $Q$  满足如下关系式<sup>[5]</sup>

$$Q = \int i dt = \int \frac{u}{R} dt \quad (6)$$

式中  $i$ ——压电陶瓷充电电流

$t$ ——压电陶瓷充电时间

$u$ ——输入控制电压

$R$ ——反馈电阻

根据式(5),压电陶瓷位移可表示为

$$\Delta l = kQ = k \int i dt = k \int \frac{u}{R} dt \quad (7)$$

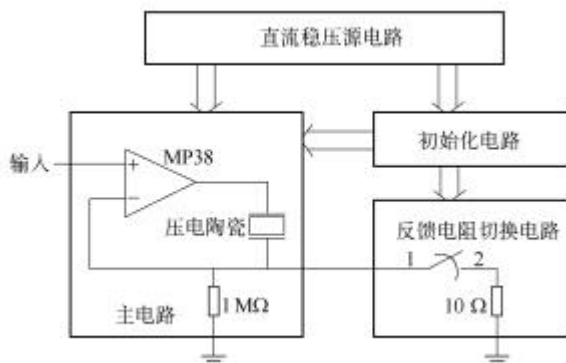


图 1 电源功能框图

由式(7)可知,通过控制压电陶瓷充电电流可以控制压电陶瓷的位移。压电陶瓷的充电电流和高压运算放大器正相输入端的电压成比例,比例系数就

是反馈电阻的阻值。由于这种驱动电源对充电电流进行控制,可称之为基于电流控制的压电陶瓷电源,或电流控制型驱动电源。它是电荷控制型电源的一种形式,其实质是通过控制压电陶瓷的速度来控制压电陶瓷的位移。

### 2.2 电源对压电陶瓷充电电流的分辨率

由式(5)和(6)可知,电源驱动压电陶瓷产生位移的位移分辨率,取决于电源对电荷的分辨率;而电源对电荷的分辨率受最小充电电流和最短充电时间的影响。在单位充电时间一定时,若不考虑干扰的影响,电源对电流的分辨率决定了对压电陶瓷的位移分辨率。

由于基于电流控制的工作方式要求对压电陶瓷的充电电流能够精确控制,这就对图 1 中输入端的电压分辨率提出了很高的要求,在输入电压的分辨率一定的情况下,要提高对电流的分辨率,就必须在电流一定的情况下提高反向输入端的反馈电压值。因此,需要寻找一种方法来放大流过反馈电阻的电流信号,再将这个放大的信号送给高压运算放大器的反相输入端。

采用反馈电阻切换电路兼顾电源的高分辨率和高动态响应性能。在要求高响应速度的时候采用小阻值的反馈电阻,当需要对电荷量做精确控制的时候,切换至大阻值的反馈电阻。

电路中的开关采用 MAXIM 公司的模拟开关 MAX4623 实现。多个模拟开关并联可以承受较大的充电电流。模拟开关的响应时间为 200 ns,漏电流不超过 0.02 nA(典型值),不影响定位精度。

采用切换反馈电阻的方法,可以使电源对充电电流的分辨率大大提高,从而提高了对位移的分辨率。假设以  $100 \mu\text{s}$  为一个时间单位,反馈电阻的阻值是  $1 \text{ M}\Omega$ ,则对于分辨率为 12 bit、输出范围是  $\pm 10 \text{ V}$  的控制信号而言,它对充电电荷的分辨率是

$$100 \times 10^{-6} \times \frac{20}{2^{12} \times 10^6} = 4.88 \times 10^{-13} \text{ C} \quad (8)$$

对于一个等效电容值约  $2 \mu\text{F}$ ,最大位移为  $10 \mu\text{m}$  (此时电压约为  $100 \text{ V}$ )的堆叠式压电陶瓷来说,这样的电荷分辨率将形成高达  $2.44 \times 10^{-7} \mu\text{m}$  的位移分辨率。由于噪声信号等因素的存在,实际上是不可能达到这个分辨率的。只有压电陶瓷可输出的最小位移变化值小于位移传感器所能分辨的值,才能最大限度地发挥微位移传感器的分辨率。

### 2.3 压电陶瓷位移零点的可重复性

开环控制时,在电压控制的方式下,压电陶瓷在使用一段时间后,其内部剩余极化强度会产生变化,当电压为零时压电陶瓷的位移却不为零<sup>[3]</sup>。在

没有位移传感器参与控制的情况下,压电陶瓷位移零点的可重复性是无法直接实现的。比较简单实用的方法是在电路中增加一个初始化电路,当需要校正压电陶瓷的零点时,对压电陶瓷施加阻尼正弦电压,使得压电陶瓷的残余应力也在零值附近不停的振荡,最后收敛到零<sup>[3]</sup>,其原理如图2所示。

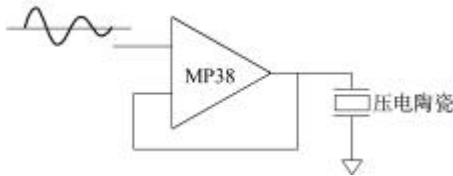


图2 初始化电路工作原理

在开环控制时,可以利用这一方法来实现可重复的“零点”。在实际的电路中,通过继电器的切换将高压运算放大器连接成电压跟随器的形式,并将压电陶瓷的一端接地;将阻尼正弦电压信号接至高压运算放大器的输入端,实现上述构想。

### 3 基于电流控制的微定位方法试验

为了测试电流驱动的压电陶瓷驱动电源的性能,以哈尔滨工业大学博实精密测控有限公司研制的一维精密定位工作台为控制对象设计了控制系统,图3为其组成框图。一维工作台由压电陶瓷作为驱动元件,采用研制的基于电流的压电陶瓷驱动电源,结合电容测微仪和数据采集卡构成闭环测试系统。

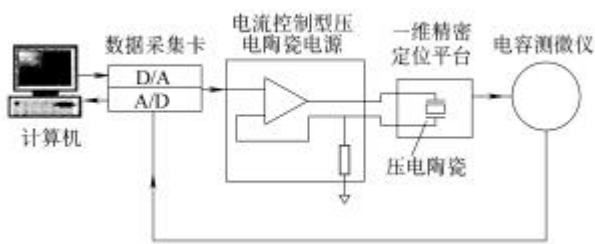


图3 微定位控制系统的组成框图

由于采用了电流控制的方式,压电陶瓷的位移—电荷模型变成非常简单的线性模型,这就大大降低了控制程序的设计难度。针对压电陶瓷的位移—电荷模型,结合电源本身的特性,采用开环控制与闭环控制相结合的复合控制方法,实现了快速的精密定位。同样,通过对压电陶瓷的漏电流进行补偿,在开环控制的试验中,也取得了较高的定位精度。

#### 3.1 开环控制

只要能充分补偿压电陶瓷的漏电流,并精确控制充(放)电的时间,就能精确控制压电陶瓷的位移。

(1) 压电陶瓷迟滞曲线。为了对比两种原理的

驱动电源的特性,首先采用哈尔滨工业大学博实精密测控有限公司研制的电压控制型压电陶瓷驱动电源对一维精密工作台进行位置开环控制,得到图4所示的迟滞环,迟滞量达到10%左右。

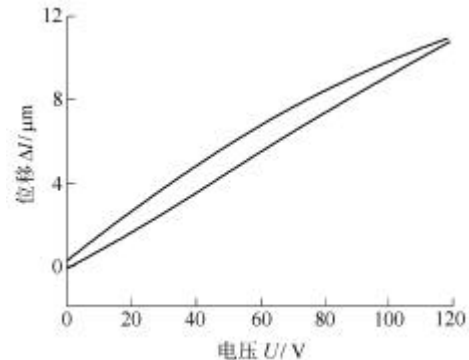


图4 电压控制型驱动电源驱动下的迟滞曲线

采用研制的电流控制型驱动电源,测量压电陶瓷迟滞曲线的试验过程如下:以恒定的充电电流(对电源施加恒定的输入控制电压)对压电陶瓷充电一段时间后,立刻以同样大小的电流放电,并持续同样的时间,在整个循环过程中,以固定周期检测压电陶瓷的位移量,得出的曲线如图5所示。

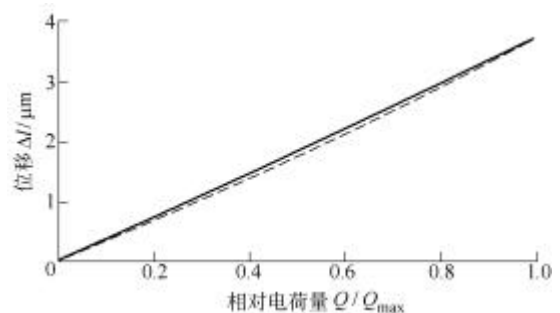


图5 对致动器充/放电的一个周期内测量的迟滞曲线

图5中循环时间为20 ms,位移范围是0~3.7 μm,迟滞仅为1.6%,线性度为2.7%。观察下降曲线(虚线)在横坐标零点时的位移也基本为零。图5中位移上升曲线与下降曲线间的位移差以及线性误差主要是由于对充电时间的控制不精确造成的。对比图4和图5可见,电流控制性压电陶瓷驱动电源有效地减小了压电陶瓷的迟滞和蠕变。这个试验也证实了中压电陶瓷位移—电荷的线性模型的正确性。

(2) 三角波形位移的输出。当压电陶瓷的充电电流为矩形波时,压电陶瓷的输出位移曲线为三角波形。

图6中所示是位移范围在1~2 μm之间,频率为250 Hz的三角波形位移曲线。图6中实线为实际曲线,虚线为理想的三角波形曲线。位移误差在±4 nm之内,轨迹误差曲线见图7。

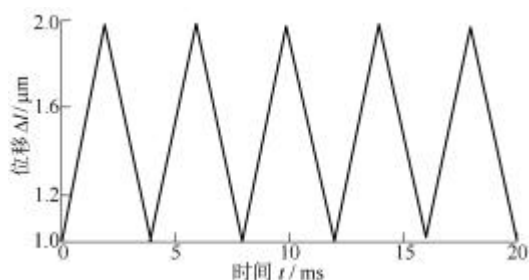


图 6 压电陶瓷致动器的三角波形位移

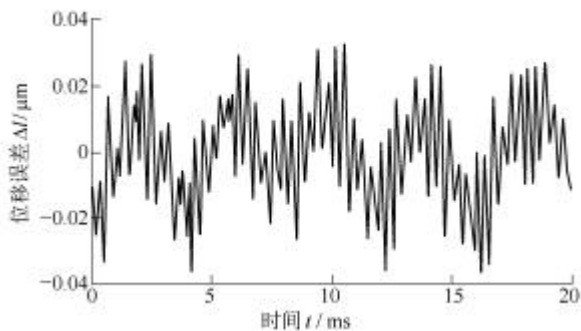


图 7 三角波形位移的误差

### 3.2 开环—闭环复合控制

复合控制方法是整个定位控制分成开环和闭环两个阶段, 兼顾高动态响应性能和高定位精度的控制方法。

复合控制方法控制规则如下。

(1) 当目标位移值与当前位移值的误差较大时, 采用开环控制, 并采用小阻值的反馈电阻(将开关闭合), 以最大的充(放)电电流快速纠正误差。充(放)电时间可由位移—循环次数关系计算得出。开环阶段相当于对陶瓷进行微分控制, 因为电荷量(或陶瓷位移)对时间的倒数正好是电流(速度)。

(2) 当目标位移与当前位移值的误差较小时, 采用闭环控制, 并采用大阻值的反馈电阻(将开关断开)。大的反馈电阻可以提高电源对充电电流的分辨率, 实现对位移的精确控制。闭环阶段可以采用常规数字 PID 控制、变速积分法 PID 控制等闭环控制方法。采用变速积分法 PID 控制的压电陶瓷微位移工作台阶跃响应曲线见图 8。其中位移保持阶段的部分曲线如图 9 所示。

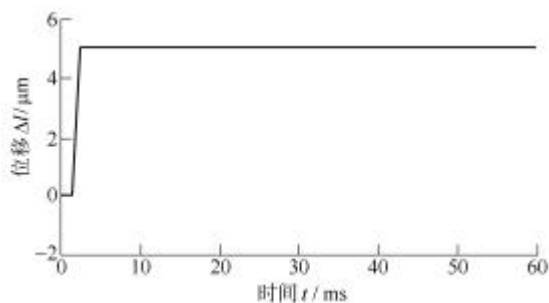


图 8 采用变速积分法 PID 控制的阶跃响应曲线

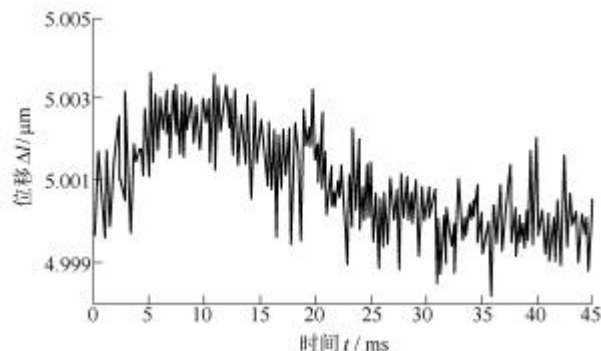


图 9 位移保持阶段的位移曲线

试验数据表明, 变速积分 PID 控制的阶跃响应稳定时间是 2.5 ms, 定位误差在  $\pm 4$  nm 之内。

### 3.3 两种电源控制性能比较

在相同条件下, 分别采用电压控制型和电流控制型驱动电源控制压电陶瓷作 0~5 μm 的阶跃输出。采用哈尔滨工业大学博实精密测控有限公司的集成式精密定位控制器(PPC)进行试验研究, 控制器在闭环时采用 PID 控制。令其控制压电陶瓷做 0~5 μm 的阶跃输出, 并调整电源参数使其不出现超调。所得的试验数据如表所示。

表 几种不同控制方法的性能比较

	稳定时间 $t$ /ms	定位误差 $e$ /nm
电流控制(开环)	2.5	$\pm 15$
电流控制(复合控制)	2.5	$\pm 4$
电压控制(闭环 PID)	8.0	$\pm 4$

可见, 采用基于电流控制的压电陶瓷驱动电源, 可以使压电陶瓷的阶跃响应的稳定时间缩短 68% 以上。由于采用闭环控制, 定位精度取决于传感器的精度, 因此电流控制电源在定位精度上并没有提高。

## 4 结论

根据压电陶瓷的位移—电荷模型设计了基于电流控制的压电陶瓷驱动电源。经测试, 利用该电源驱动压电陶瓷位移, 迟滞仅为 1.6%, 验证了位移—电荷模型的正确性。建立了压电陶瓷精密定位系统, 基于电流控制进行了开环控制以及开环—闭环复合控制等控制方法的试验研究, 获得了较高的控制精度和动态响应性能。

### 参 考 文 献

[1] 杨宜民, 松岛皓三. 微机器人的机构和控制系统基础研

究[J]. 机器人, 1988, 2(4): 13-16.

- [2] PEKKA R, PASI K. Current control of piezoelectric actuator with power loss compensation[C]// Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL, Lausanne, Switzerland, 2002: 1 948-1 952.
- [3] JOHN A, EPHRAHIM G, DAVID V. Precision position control of piezoelectric actuators using charge feedback[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1995, 18(5): 1 068-1 073.
- [4] 曲东升. 纳米级精密定位系统关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
- [5] DORLEMANN C. New high speed current controlled amplifier for PZT multilayer stack actuators[C]// Conference of Proceedings on Actuator, 2002: 395-398.
- [6] KATSUSHI F, MITSUNORI U. Displacement control of piezoelectric element by feedback of induced charge[J]. Nanotechnology, 1998, 9: 93-98.

## CURRENT CONTROLLED AMPLIFIER FOR PIEZO ACTUATOR AND ITS EXPERIMENTAL RESEARCH

*CHEN Ligu RONG Weibin RU Changhai  
ZHANG Guoping SUN Lining*

*(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology,  
Harbin 150001)*

**Abstract**: Piezoelectric actuator controlled by electric field shows serious hysteresis and creep phenomena, which severely degrades the positioning accuracy. A piezoelectric ceramic driver based on current control is designed using the linear relationship between the displacement of the piezo actuator and the free charge on it. The displacement of the piezo actuator is controlled by controlling its velocity through controlling the current of the piezo actuator. Special circuits and pertinent control algorithm realize the combination of quickly driving and precising positioning. The experimental data show that piezo driver can perform linearly driving and quickly precising positioning of piezo actuator.

**Key words**: Piezo actuator Piezo driver

Current control Hysteresis Creep

作者简介: 陈立国, 男, 1974年出生, 博士, 讲师。主要从事微驱动、微操作技术及机器人视觉技术的研究。

E-mail: clg@hit.edu.cn