

摘要：微纳米级精密定位技术在前沿科学研究和尖端工业生产中得到越来越广泛的应用，其中具有高分辨率的微位移技术是微纳操作的关键。不同于传统的齿轮传动或螺距调节，本文利用压电陶瓷优异的压电特性，结合仿生学原理模拟鳞翅目（Lepidoptera）幼虫的爬行方式，制作出一款简易的微位移精密定位装置，在单片机的控制下选择微位移方向并指定移动步数，实现二维平面微纳米级定位。经测试，装置的平均位移量是微纳米级别，且与电压值呈良好的线性关系。整套装置成本较低，有一定的创新性，对于学习压电陶瓷和单片机的相关知识及应用具有指导意义。

关键词：压电陶瓷；微位移；定位；仿生；单片机

中图分类号：TP212.9 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2020)07-0031-06

收稿日期：2020-05-08

使用压电陶瓷制作仿生精密定位装置

王逸勳

北京林业大学理学院，北京 100083

一、引言

如今，随着科技的飞速发展，科学研究对象从宏观领域深入到了微观世界。在纳米生物工程、机电系统（MEMS）、超精密加工及机械微组装等技术领域，微纳米定位技术成为国内外的研究热点^[1]。其中，具有高分辨率的微位移技术是微纳操作的关键。传统的位移一般是通过齿轮或螺距来达到微小控制（齿轮通过齿轮啮合传递扭矩实现传动；螺距的原理即螺杆在螺母中旋转一周，便会沿着旋转轴线方向前进或后退一个螺距的距离），但二者都只是紧密连接，很难达到分子级别的精度要求，而一些压电材料，如压电陶瓷，则具有极高的分辨率，且体积小、质量轻、动态响应快、不易受外界电磁场干扰，被广泛应用于超精密定位系统中^[2]，是理想的微位移器件。本文利用压电陶瓷并结合仿生学原理制作了一款简易的二维平面精密定位装置。

二、压电陶瓷工作原理

目前市面上常见的压电陶瓷是由钛酸铅

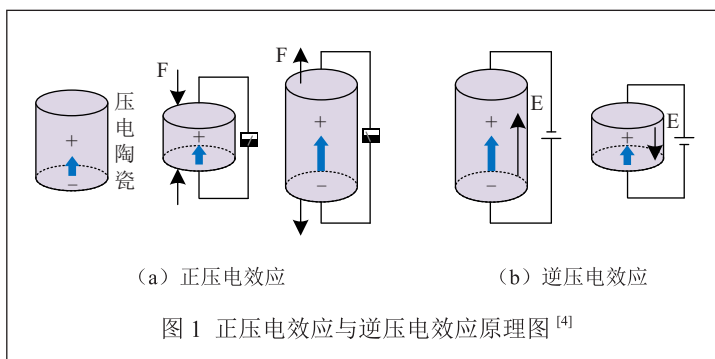
和锆酸铅组成的多晶固溶体，简称PZT（锆钛酸铅压电陶瓷），是具有压电效应的压电材料。在经过极化处理的陶瓷体上沿其极化方向施加一个机械力（或释放压力）时，陶瓷体就会产生充（放）电现象，即正压电效应^[3]，如图1（a）；反之，若在陶瓷体上施加一个与极化方向相同（或相反）的电场，则会引起陶瓷片伸长（或缩短）的形变，即逆压电效应^[3]，如图1（b）。

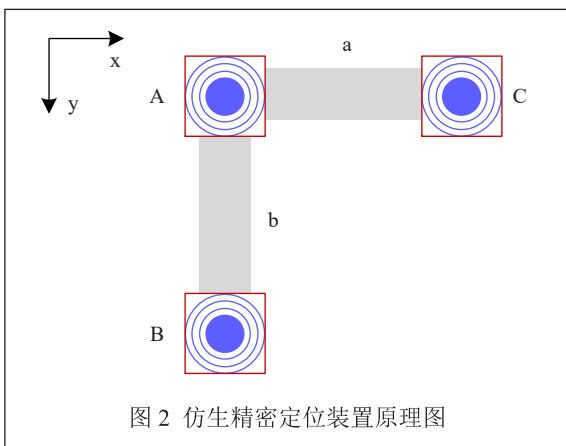
正压电效应和逆压电效应可以分别表示如下^[3]：

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (1)$$

其中： D —电位移；

d —压电常数；





T —应力；

ε^T —自由介电常数；

E —电场强度。

$$X = \chi^E T + dE \quad (2)$$

其中， X —应变；

χ^E —弹性常数。

利用压电陶瓷的逆压电效应可产生微位移^[3]。

三、装置设计

1、系统硬件

整套仿生精密定位装置如图 2 所示。其中 A、B、C 是三块相同的电磁铁（将 0.2mm 漆包线缠绕在直径 1.5mm 细铁丝上，套在 ABS 材料空心方管里制成），a、b 是两片相同的压电陶瓷，电磁铁和压电陶瓷之间采用刚性连接。图中省略了电源，整个“L 型”装置

水平放置在光滑的铁板上。

2、工作原理

(1) 仿生背景

鳞翅目 (Lepidoptera) 是昆虫纲 (Insecta) 的第二大目，包括蛾、蝶两类^[6]。成虫体、翅及附肢均密被鳞片；口器虹吸式^[7]，呈卷须状。幼虫蠕式，多足型，胸部 3 节，具 3 对胸足，腹部 10 节，腹足 2~5 对，常 5 对，腹足具趾钩^[7]。鳞翅目幼虫的爬行方式为蠕动，通过胸足和腹足交替抓地，身体弯曲向上弓起，呈拱桥状，类似中文汉字的“几”，一展一弓，实现向前移动，如图 3 所示。

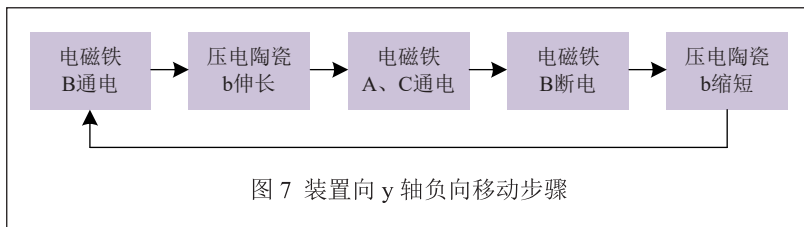
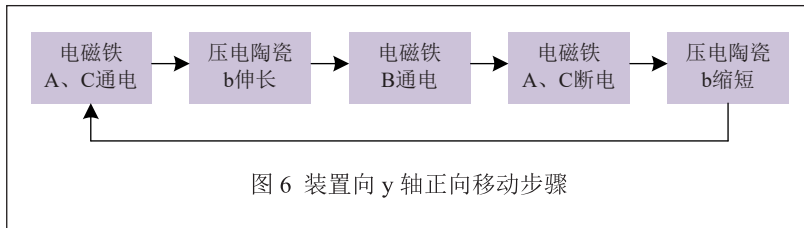
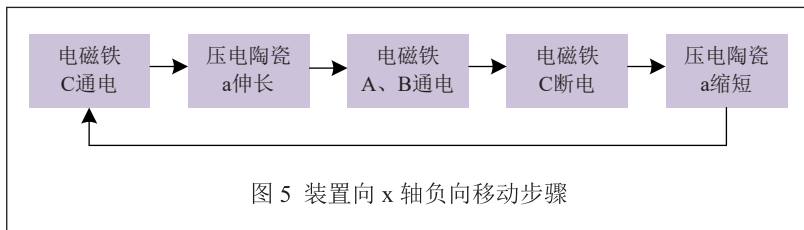
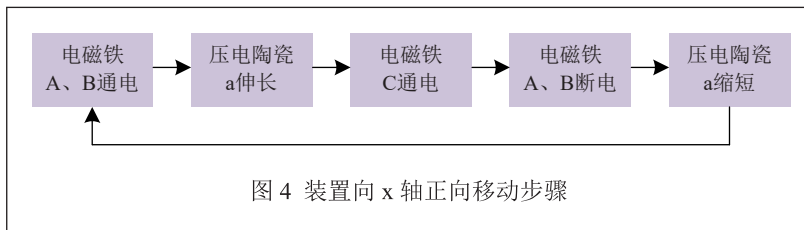
(2) 仿生原理

类似于鳞翅目幼虫的爬行方式，该装置利用仿生学原理，通过压电陶瓷的伸缩和电磁铁吸力的有无不断交替的方式实现 X-Y 二维平面的微移动，该种高精度驱动类似于尺蠖电机，其精密定位方式可以形象地称为“毛毛虫微位移定位法”。

当装置向 x 轴正向移动时，电磁铁 A 和 B 通电产生吸力，暂时固定于铁板上，给压电陶瓷 a 施加一个与极化方向相同的电场，让其伸长；第二步，电磁铁 C 通电固定，A 和 B 断电，吸力消失，给压电陶瓷 a 施加一个与极化方向相反的电场，让其缩短；后电磁铁 A 和 B 通电固定，如此循环，实现 x 轴正向微位移，如图 4 所示。

同理，当装置向 x 轴负向移动时，电磁铁 C 通电产生吸力，暂时固定于铁板上，给压电陶瓷 a 施加一个与极化方向相同的电场，让其伸长；第二步，电磁铁 A 和 B 通电固定，C 断电，吸力消失，给压电陶瓷 a 施加一个与极化方向相反的电场，让其缩短；后电磁铁 C 通电固定，如此循环，实现 x 轴负向微位移，如图 5 所示。

当装置向 y 轴正向移动时，电磁铁 A 和 C 通电产生吸力，暂时固定于铁板上，给压电陶瓷 b 施加一个与极化方向相同的电场，让其伸长；第二步，电磁铁 B 通电固定，A 和 C 断电，吸力消失，给压电陶瓷 b 施加一个与极化方向相反的电场，让其缩短；后电磁铁 A 和 C 通电固定，如此循环，实现 y 轴正向微位移，如图 6 所示。



同理，当装置向 y 轴负向移动时，电磁铁 B 通电产生吸力，暂时固定于铁板上，给压电陶瓷 b 施加一

个与极化方向相同的电场，让其伸长；第二步，电磁铁 A 和 C 通电固定，B 断电，吸力消失，给压电陶瓷 b 施加一个与极化方向相反的电场，让其缩短；后电磁铁 B 通电固定，如此循环，实现 y 轴负向微位移，如图 7 所示。

3、核心控制模块

核心控制模块采用搭载了 ATmega328 芯片的 Arduino UNO R3 单片机开发板，对电磁铁和压电陶瓷利用继电器进行电路通断控制，并且通过外接矩阵键盘和液晶显示屏实现微位移方向的确定和位移量的显示，其中压电陶瓷两端的电压由一个可调 DC-DC 高压升压电源模块供给。

4、实物效果

实物装置如图 8 所示，电磁铁和压电陶瓷组成的微位移模块如图 9 所示。

四、微移动算法设计

在设计算法时，为防止电磁铁的吸放与压电陶瓷伸缩出现不同步的情况，以 x 轴正向移动为例，将电磁铁 A、C 和压电陶瓷 a 在一个位

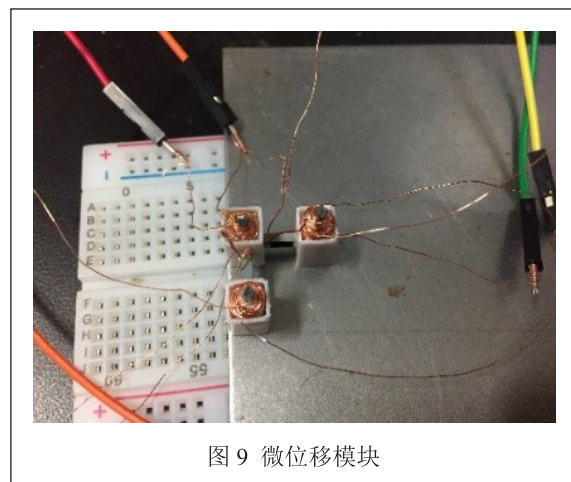
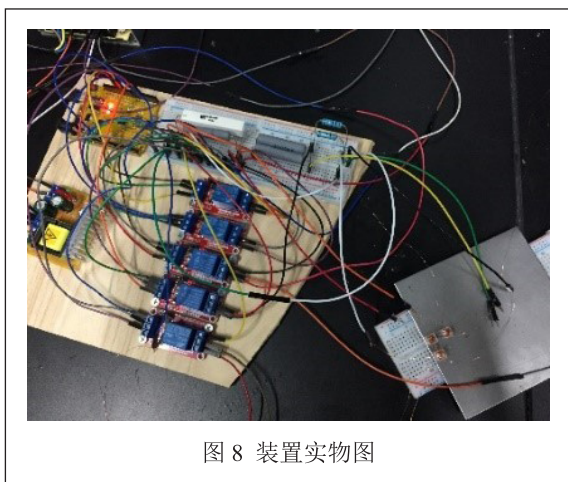


表 1 装置向 x 轴正向移动时三种元件的状态分类

元件 状态	电磁铁 A	电磁铁 C	压电陶瓷 a
1	吸住	不吸	断电
2	吸住	不吸	通电
3	吸住	吸住	通电
4	不吸	吸住	通电
5	不吸	吸住	断电
6	吸住	吸住	断电

表 2 装置向 x 轴负向移动时三种元件的状态分类

元件 状态	电磁铁 A	电磁铁 C	压电陶瓷 a
1	不吸	吸住	断电
2	不吸	吸住	通电
3	不吸	不吸	通电
4	吸住	不吸	通电
5	吸住	不吸	断电
6	不吸	不吸	断电

表 3 装置向 y 轴正向移动时三种元件的状态分类

元件 状态	电磁铁 A	电磁铁 B	压电陶瓷 b
1	吸住	不吸	断电
2	吸住	不吸	通电
3	吸住	吸住	通电
4	不吸	吸住	通电
5	不吸	吸住	断电
6	吸住	吸住	断电

表 4 装置向 y 轴负向移动时三种元件的状态分类

元件 状态	电磁铁 A	电磁铁 B	压电陶瓷 b
1	不吸	吸住	断电
2	不吸	吸住	通电
3	不吸	不吸	通电
4	吸住	不吸	通电
5	吸住	不吸	断电
6	不吸	不吸	断电

移周期内的状态分为 6 种，如表 1 所示，保证相邻状态之间切换时只有一个元件的状态发生改变。

同理，当装置向 x 轴负向移动时，电磁铁 A、C 和压电陶瓷 a 的 6 种状态如表 2 所示。

当装置向 y 轴正向和 y 轴负向移动时，电磁铁 A、B 和压电陶瓷 b 的 6 种状态分别如表 3、表 4 所示。

五、测试实验

本文使用的压电陶瓷为 P5-8Y 型压电陶瓷制动器，无负载自振频率为 40kHz，工作电压 0V~100V，自由电容 $3.28\mu\text{F} \pm 20\%$ ， $K_f=0.55$ ， $\epsilon T_{33}=900$ ， $Q_m=90$ ， $K_p=0.63\%$ ， $D_{33}=435 \times 10^{-12}\text{C/N}$ ，总厚度 1.65mm，行程 $5\mu\text{m} \sim 180\mu\text{m}$ ，自锁力 1200N~7800N。

通过多次测量压电陶瓷在不同电压下整套仿生精密定位系统向 x 轴正向位移 50 个周期的位移量 $X_i(i=1, 2, 3)$ ，并计算位移量平均值 \bar{X} ，得到如表 5 的实验数据。

利用位移量平均值 \bar{X} 除以 50 可以得到整套装置平均位移量 $X(X = \frac{1}{50}\bar{X})$ 随电压 V 的变化情况，并根据样本值计算出标准差 σ ，如表 6 所示。

可以看出平均位移量是微纳米级别，且与外加电压值呈正相关，经 Origin 软件拟合，两者线性度较好，大体为一条过原点的直线，如图 10 所示。因此，在精密定位过程中首先根据需求确定移动的步距大小，然后给压电陶瓷外与之加对应的电压值，在矩阵键盘上选择微位移方向（x 或 y）并输入步数，不断调整，最终可使得整套装置在经过多次微纳米级的位移后准确地移动到平面上的指定位置，实现二维平面的微纳米级定位。

六、结论

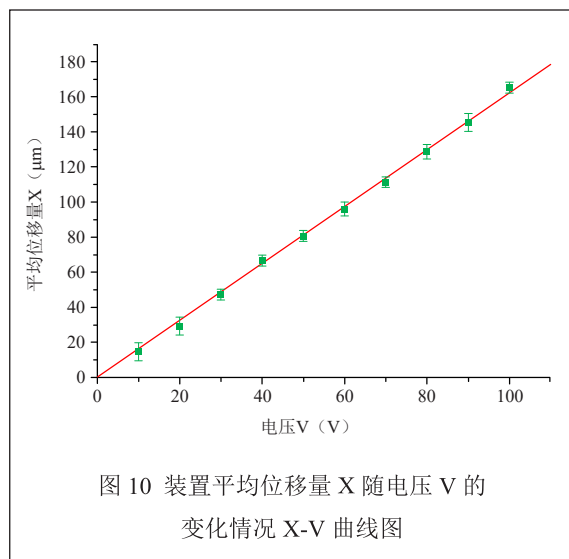
该款仿生精密定位装置巧妙利用压电陶瓷的压电特性，结合电磁铁吸力有无状态的不断切换，成功模拟出鳞翅目幼虫爬行时“一展一弓”的移动方式，并通过单片机的控制实现了在平面 x 或 y 方向上进行连续多次微位移。经过实验测试，装置的微位移量符合微纳米级别的要求，且与外加电压值呈线性正相关，因此，若能合理调节外加电压大小得到恰当的位移步

表 5 装置向 x 轴正向位移 50 个周期的位移量数据记录

电压 V/V	第一次实验位移量 X_1/cm	第二次实验位移量 X_2/cm	第三次实验位移量 X_3/cm	位移量平均值 \bar{X}/cm
10	0.07	0.10	0.05	0.073
20	0.17	0.15	0.12	0.147
30	0.22	0.25	0.24	0.237
40	0.32	0.35	0.33	0.333
50	0.40	0.42	0.39	0.403
60	0.48	0.46	0.50	0.480
70	0.57	0.56	0.54	0.557
80	0.62	0.65	0.66	0.643
90	0.75	0.73	0.70	0.727
100	0.84	0.83	0.81	0.827

表 6 装置向 x 轴正向位移 1 个周期的位移量数据记录

电压 V/V	平均位移量 $\bar{X}/\mu m$	标准差 $\sigma/\mu m$
10	14.7	5.033
20	29.3	5.033
30	47.3	3.055
40	66.7	3.055
50	80.7	3.055
60	96.0	4.000
70	111.3	3.055
80	128.7	4.163
90	145.3	5.033
100	165.3	3.055



距, 多次位移后便可以较好地完成微纳米级二维平面定位。此外, 可以根据需要选用分辨率更高的压电陶瓷种类和型号获取更加微小的步距。整套仿生精密定位装置结构简单、成本较低、创新性强、稳定性好, 对于学习压电陶瓷的相关知识和单片机的基本代码编写有一定的指导性作用。

参考文献

- [1] 刘锦勇, 杨湛, 陈涛, 等. 面向三维组装的微纳平台设计与研究 [J]. 压电与声光, 2016, 38(4): 548-552.
- [2] 范青武, 徐辽, 刘旭东, 张恒, 张跃飞. 基于应变式传感器的压电陶瓷定位系统设计 [J]. 传感技术学报, 2018, 31(11): 1770-1774.
- [3] 王建林, 胡小唐, 杨勇, 张国君. 压电陶瓷用于纳米定位系统的研究 [J]. 航空精密制造技术, 1997, (02): 8-10.
- [4] 张雁南. 压电陶瓷微定位平台迟滞建模及自适应控制方法研究 [D]. 吉林大学, 2019.
- [5] (美)B. 贾菲著, 林声和译. 压电陶瓷 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [6] 中国农业百科全书总编辑委员会昆虫卷编辑委员会, 中国农业百科全书编辑部. 中国农业百科全书: 昆虫卷 [M]. 北京: 农业出版社, 1990.
- [7] 张巍巍, 李元胜. 中国昆虫生态大图鉴 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2011.

Making Precision Positioning Device by Piezoelectric Ceramics

WANG Yi-meng

(College of Sciences, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Micro-nano precision positioning technology has been applied to the frontier scientific research and advanced industrial production more and more widely, among which high resolution micro-displacement technology is the key to micro-nano operation. Unlike traditional gear drive or pitch adjustment, this paper

makes use of the excellent piezoelectric characteristics of piezoelectric ceramics and simulates the crawling mode of Lepidoptera larvae with biomimetic principles to make a simple micro-displacement and precision positioning device. Under the control of single chip microcontroller, selecting the direction of micro-displacement and specifying the number of moving steps can achieve two-dimensional planar micro-nano positioning. After testing, the average displacement of this device is micro-nano level, and has a good linear relationship with the voltage value. The whole device has low cost and certain innovation, which is of guiding significance for learning the related knowledge and application of piezoelectric ceramics and single chip microcontroller.

Key words: piezoelectric ceramics; micro-displacement; positioning; bionics; single chip microcomputer

作者简介

王逸劭：北京林业大学理学院，大学本科，主要研究方向为传感器原理及应用、单片机编程开发等。

通信地址：北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学
邮编：100083

邮箱：wym628@126.com