

压电超声马达简介¹⁾

周铁英 董蜀湘 刘呈贵

(清华大学物理系,北京 100084)

近年来压电超声马达很引人注目。传统的马达是利用电磁力驱动的,而压电超声马达则是利用压电或电致伸缩材料作为驱动源,直接推动可运动的部件产生直线的或旋转的运动。本文重点介绍压电蠕动马达和超声行波马达的原理和简单结构。

压电蠕动马达 (inchworm motor) 和超声行波马达^[1,2] (ultrasonic traveling waves motor) 是 70 年代末,80 年代初发展起来的新型马达。它们是利用具有压电效应或电致伸缩效应的材料制作的。其主要特点是:(1)具有低转速高转矩;(2)不受磁场和放射线影响,也不产生磁干扰;(3)效率可达 50% 左右;(4)小型轻量,结构简单,容易制作,响应速度快,易控制。

压电蠕动马达已成功地应用到电子显微镜和隧道电子显微镜的扫描系统中,超声行波马达已广泛应用到透镜自动聚焦系统中。

压电效应和电致伸缩效应都是机电耦合效应。电介质晶体在外电场作用下,应变 S 和电场 E 的关系可表示为

$$S = d \cdot E + M \cdot E^2,$$

式中第一项代表逆压电效应, d 为压电常数;第二项代表电致伸缩效应, M 为电致伸缩系数。逆压电效应只存在于无对称中心的晶体中,电致伸缩效应则是所有电介质,不论是非晶物质或晶体,也不论是中心对称的晶体或极性晶体都具有这种性质。

利用逆压电效应和电致伸缩效应已研制成数十种不同结构的超声马达。仅 1987 年以后,申请的有关超声马达专利就有数百个(其中大部分为日本专利)。本文重点介绍压电蠕动马达和超声行波马达。其余各种马达原理都以这两种马达的原理为基础。有兴趣者可以查阅有关文献和专利。

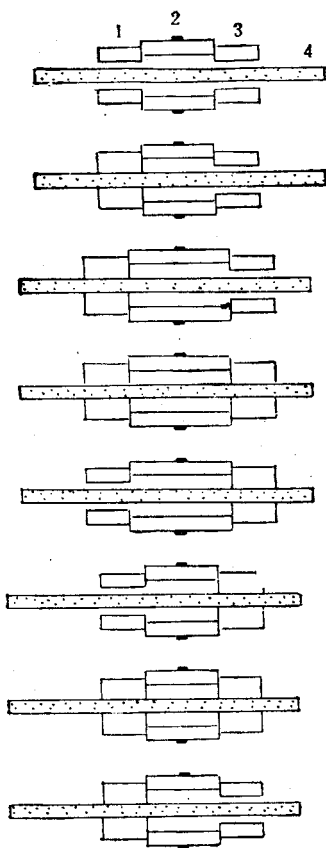
一、压电蠕动马达

1978 年美国首先研制成一种独特的直线马达,因为它的运动形态酷似蚯蚓等动物的蠕动,故取名为蠕动马达。图 1(a) 是其简单结构。该马达主要由导轴 4 和套在轴上的压电管组成。压电管的内壁为共同的地电极,管的外壁是分成相互隔离的三部分电极。1, 3 为环形钳位器, 2 为管形伸缩器。环形钳位器利用压电元件的逆压电效应产生的径向模式(即加直流正电压时),管沿径向收缩抱紧导轴;加负电压时管沿径向放松,使与导轴间有滑动的间隙。管形伸缩器利用的是压电管的长度模,加正电压时管沿轴向伸长,加负电压时管沿轴向缩短。

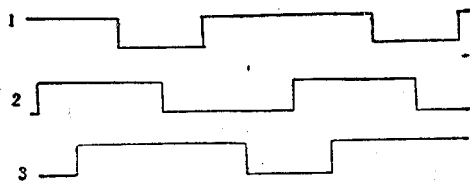
马达的蠕动过程如下:由时序脉冲电压控制[见图 1(b)],当 1 加正电压脉冲抱紧导轴时,3 加负电压脉冲放松导轴,同时 2 加正电压脉冲使其伸长。之后,3 加正电压脉冲抱紧导轴,1 加负电压脉冲放松导轴,同时 2 加负电压脉冲使其缩短。如果导轴固定不动,压电管沿导轴向右蠕动一步。至此完成一步运行。时序脉冲电压不断循环加到蠕动马达上,压电管就不断沿导轴向右蠕动。如果将时序脉冲的时序颠倒过来,则压电管就沿导轴向左蠕动。

如果将压电管固定不动,那么在时序脉冲

1) 本文为国家自然科学基金资助。



(a)



(b)

图1 蠕动马达原理图

(a) 蠕动马达结构; (b) 蠕动马达时序脉冲

的控制下, 导轨相对压电管可以向左或向右蠕动。

压电蠕动马达的蠕动速度 v 与最小步距 δ , 工作频率 f (即时序脉冲的循环速率) 有关。假如步距 $\delta = 4 \text{ nm}$, 工作频率 $f = 1000 \text{ Hz}$, 则蠕动速度 $v = f \cdot \delta = 4 \mu\text{m/s}$; 假如 $\delta = 1 \mu\text{m}$, $f = 1000 \text{ Hz}$, 则 $v = 1 \text{ mm/s}$ 。一般压电材料的压电常数 d 为 10^{-10} m/V 量级。若压电管厚 $d = 10^{-3} \text{ m}$, 所加正电脉冲幅值 $V_m = 400 \text{ V}$, 则

电场强度 $E = \frac{V_m}{d} = 4 \times 10^5 \text{ V/m}$ 。由计算得

到, 压电效应产生的相对应变 $S = d \cdot E = 4 \times 10^{-5}$; 若压电管长 $L = 10^{-2} \text{ m}$, 则得 $\delta = S \cdot L = 0.4 \mu\text{m}$ 。如果选用不同的压电或电致伸缩材料, 设计不同的结构尺寸, 施加不同的脉冲电压可以获得不同的步距 δ (亦称为分辨率)。工作频率 f 的选择则要考虑材料的电滞后效应。

这种蠕动马达可以获得很高的分辨率、很低的运行速度而不需要减速机构, 在精密机械行业和高技术领域得到了广泛应用。如在1986年获得诺贝尔物理学奖的扫描隧道显微镜中, 就使用了压电蠕动马达带动探针, 利用微机控制扫描, 可以很快地描绘出多种物质的表面原子结构。电子束加工系统、超导丝控制系统中也都装有这种蠕动马达。

目前美国 Burleigh 公司已有蠕动马达商品出售, 其性能指标如下:

- (1) 时序脉冲电压工作频率 800—1000 Hz;
- (2) 脉冲电压幅值 500V;
- (3) 直线蠕动速度 0—2mm/s;
- (4) 机械分辨率 4nm;
- (5) 推力 1kg;
- (6) 行程 50, 100, 150, 200mm;
- (7) 售价 \$ 2000—8000/只。

改进型的蠕动马达多在以下几方面考虑:

- (1) 为了减小驱动电压幅值, 增大推力, 采用圆环片层叠式结构组成伸缩器。
- (2) 为了降低加工工艺的要求, 降低成本, 延长使用寿命, 采用其他钳位方式, 如静电式、超声振动式。

利用直线蠕动马达原理研制的蠕动旋转马达, 预期不久将会有产品问世。

二、超声行波直线马达

早期报道的超声行波马达原理如图2(a)所示。它利用工作频率为数十千赫兹的朗之万超声振子激励一根细长杆(杆截面积 $h \times d \cong$

3 × 6mm², 长 500mm), 在杆中产生弯曲波, 杆的另一端则选择一合适的位置固定一个完全相同的朗之万振子吸收弯曲波, 以便在杆中形成纯弯曲行波。

解在各向同性的固体中弯曲波或不对称兰姆波波动方程, 得到杆中质点运动的轨迹方程为

$$\frac{u^2}{(Azk)^2} + \frac{w^2}{A^2} = 1,$$

这里 u, w 分别是质点纵向和横向位移, z 是横向坐标, A 是常数, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 是波长。显然这是一椭圆, 其旋转方向为逆时针。仅考虑杆的上表面的质点, 则其运动状态由图 2(b) 可以更直观地说明。

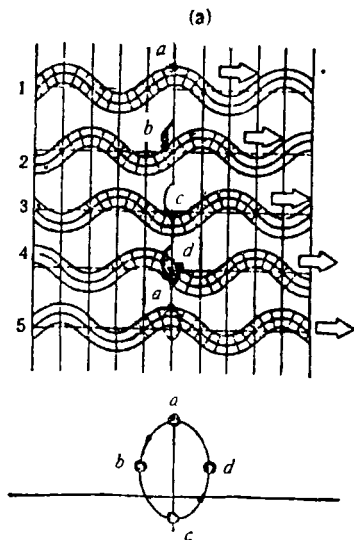
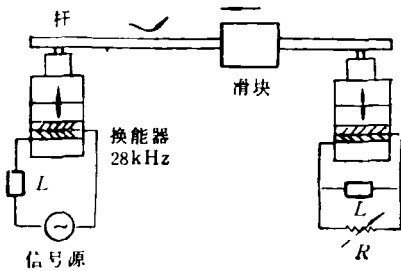


图 2 超声行波直线马达原理

- (a) 激发弯曲行波方式;
- (b) 行波状态下杆表面粒子运动轨迹

在弯曲行波传播过程中, 不同时刻 (1, 2, 3, 4 和 5), 杆表面某一质点 (如图中实心点) 按 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$ 的顺序运动, 这正说明实心点在一周期内的运动轨迹是一椭圆, 其旋转方向是逆时针的。

如果将一可运动的物体 (滑块), 在一定压力下使其和传播弯曲行波的杆表面接触, 由于表面粒子椭圆运动产生的摩擦力将推动滑块向波传播方向的反方向运动。如果滑块和杆之间无相对滑动, 则滑块运动的最大速度为

$$v_m = |\dot{u}_m| = Azk\omega \Big|_{z=\frac{h}{2}} = \frac{1}{2} Ahk\omega,$$

式中 ω 是角频率, h 为杆的厚度。如果 $A = 10^{-6}$ m, $h = 4 \times 10^{-3}$ m, 弯曲行波速度取 $c = 2000$ m/s, 振动频率 f 取 20 kHz, 则滑块相对杆的移动速度约为 0.016 m/s。

改变电激励功率, 就可以使振幅幅值 A 改变, 从而可以改变滑块运动速度。

三、超声行波旋转马达

目前已研制出数种超声行波旋转马达^[3]。它们激发行波的方式与直线行波马达不同。为了便于从原理上介绍, 我们以一种结构比较简单的平面圆环形超声行波旋转马达为例来说明。图 3(a) 为这种马达的剖面图, 图 3(b) 为压电体的电极配置图。

由图 3(a) 可见, 马达由压电圆环、弹性体转子、弹性环定子、轴和加压机构组成。压电环粘结在弹性环定子的下部。在交变电压的激励下, 压电环可以沿圆周方向伸长或缩短。由于弹性环的长度不变, 当压电环伸长或缩短时就会驱使弹性环产生弯曲振动, 这样在弹性环定子中激发出了弯曲波。

由图 3(b) 可见, 圆环的总周长为弯曲波波长 λ 的四倍。粘结在弹性环定子上的压电环的表面电极分割成八段。其端子 1 中的三段电极长都为 $\frac{\lambda}{2}$, 极化方向分别为“—”, “+”, “—”; 端子 2 中的三段电极长也都为 $\frac{\lambda}{2}$, 极化方向分别

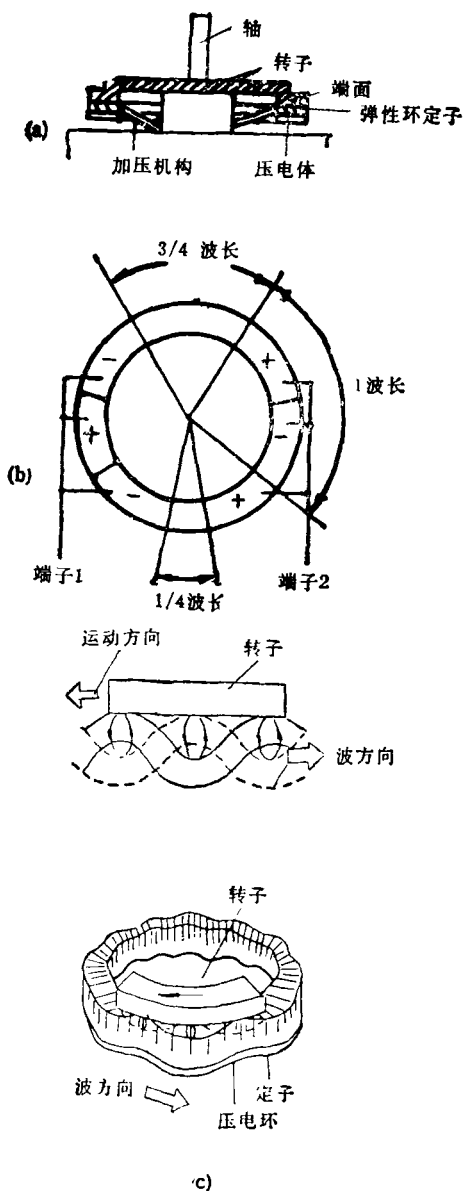


图3 超声行波旋转马达

(a) 超声行波马达剖面图；(b) 超声行波马达电极配置图；(c) 旋转驱动原理图

为“+”，“-”，“+”。两组端子之间相距为 $\frac{\lambda}{4}$ 和 $\frac{3}{4}\lambda$ ，且这两个间隔部分都不极化，没有压电效应。由波动方程可以推导出，当给端子1中的三段电极都加正弦电压 $\sin \omega t$ ，给端子2中的三段电极都加余弦电压 $\cos \omega t$ （使端子1与端子2所加电压的时间位相差为 $\frac{\pi}{2}$ ）时，有压

电效应的六段压电片产生伸长或缩短振动，并在弹性环定子中激发出弯曲波。弯曲波相互叠加的结果，将在弹性环定子中产生顺时针方向传播的弯曲行波。

设 z 为垂直于圆环平面的方向， θ 为沿周周的方向， R 为环的平均半径， h 为环的厚度，则弹性环表面粒子的 z 向位移 w 的表达式为

$$w = A \sin(\omega t - kR\theta),$$

圆周方向的位移 u 的表达式为

$$u = \frac{1}{2} Ahk \cos(\omega t - kR\theta),$$

则表面粒子的运动轨迹为

$$\frac{u^2}{(Ahk/2)^2} + \frac{w^2}{A^2} = 1.$$

此为一椭圆方程，表面粒子的旋转方向为逆时针。

图3(c)表明，与弹性环定子实行加压接触的转子端面受到表面粒子的逆时针旋转驱动。转子的转动方向与弯曲行波的传播方向相反。在无相对滑动的条件下，旋转的最大速度为

$$v_m = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{2} Ahk\omega.$$

由弯曲表面行波原理所研制的超声行波马达，旋转运行稳定，电机转换效率最高达50%。由于它的优良特性，使它在各种自动聚焦透镜系统中得到了广泛的应用。日本新生工业公司1983年试制的表面波型马达，外径约60mm，工作频率为44kHz，工作电压为4—10V，当电压为6.5V，转速为每分钟20次时，输出转矩为300g·cm，当转速为每分钟10次时，输出转矩为700g·cm，显示了高的转换效率。

本文仅简单介绍了最基本最典型的两类超声马达：压电蠕动马达和超声行波马达。

超声行波马达的研究主要集中在日本。日本的新生工业、索尼以及松下等40多家公司和数所大专院校竞相研究超声马达。超声马达的发展状况可以由图4概括说明，图中分A、B、C、D四阶段，D₁对应超声马达经济效益超过普通马达，D₂则相反，目前处在D的上升阶段。预计其市场可达上百亿或数千亿日元的需求

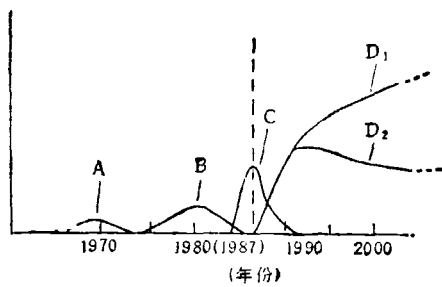


图4 超声马达的发展阶段

A. 基础研究; B. 基础研究, 专利登记;
C. 产品研制; D. 工业应用

量。

超声马达已取得相当成功的应用。日本在 EOS 650 和 620 型自动聚焦单透镜反射式照相机中已大量采用环形行波马达, 把马达转子与镜头支座接触, 加上电场便能驱动镜头, 从无限远调到 3m 只需 0.8s 即可使焦点重合, 使用寿命 100 万次。

利用装有超声马达的 EOS 系列自动聚焦单透镜反射式照相机, 研制成一种用作照相机测距的一维图像传感器。该传感器具有较高的灵敏度和较大的饱和输出功率与热噪声比。

扫描电子显微镜 (SEM) 的真空试料室内的试料架位置需调整, 这一部分正好处在电子束的下方, 不能使用电磁马达, 过去用手动控制, 现在采用超声马达驱动, 不仅省掉了复杂的传动机构, 减少了故障和手动的误差, 而且可实现自动驱动。

超声马达的低转速, 大转矩的优越性使之非常适用于直接驱动智能化机器人的关节。

由于超声马达不产生磁场, 因此在电子束曝光装置、磁记录仪以及信息处理机中磁头的驱动都可采用超声马达。

最近问世的复合振动式超声马达^[4-7]可用于捡字, 捡纸, 打印机的驱动等。

超声马达问世以来, 经过十多年的研究已取得了引人注目的进展。目前还面临着模拟各种动物的运动, 继续研究新的运行机理和新的结构的阶段。要取得更优良的运行性能还需要研制新的压电和电致伸缩材料以及新型耐磨材料。

我国《压电与声光》杂志曾登载过数篇介绍超声马达的文章^[8,9]。我们于 1989 年开始研究超声马达, 已在蠕动马达和行波马达的研究中取得一些进展。希望有更多的物理工作者投入到超声马达的基础研究和应用基础研究中来。

我们的工作也得到清华大学理学院基金的支持, 在此谨向支持我们工作的有关领导和同事致谢。

- [1] Minoru Kuribayashi et al., *J Acoust. Soc Am.*, **77-4** (1985), 1431.
- [2] Y. Tomikawa et al., *Japanese J. Appl. Phys.*, Suppl. **26-1** (1987), 194.
- [3] Takeshi Hatsuzawa et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **57-11** (1986), 2886.
- [4] Minoru Karosawa et al., *IEEE Trans. Ultra., Ferro. Freq. Control*, **SU-36-5** (1989), 517.
- [5] 中村 健太郎等, 日本音响学会講演論文集, 日本音响学会, (1989), 831.
- [6] 富川 義郎等, 日本音响学会講演論文集, 日本音响学会, (1989), 945.
- [7] 西田 一仁等, 日本音响学会講演論文集, 日本音响学会, (1990), 675.
- [8] 王大春, 压电与声光, No. 1(1986), 1-11.
- [9] 王大春, 压电与声光, No.2(1986), 1-7.

(上接第 318 页)

学、半导体和磁记录材料的研究上将会有很广泛的应用。AFM 以原子分辨水平测量物体表面的三维分布, 这对检查集成电路及模板, 激光唱片等产品的质量将成为有力的工具。原子力显微术将在我们所熟悉的一些现象(如摩擦、接触带电、弹性及湿度)的微观研究中, 给我们许

多新的知识。

- [1] 周肇威, 物理, **17-6**(1988), 351.

(刘维 根据 *Physics Today* 1990 年第 10 期第 23-30 页编译)