

文章编号 1000-5013(2003)01-0080-07

# 多振动片式超声波电机的设计制作

石顺桥 洪尚任 许芦君

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362011)

**摘要** 在单片式驻波回旋型超声波电机研究的基础上, 设计制作一台多振动片式驻波回旋型超声波电机的样机. 通过样机实验及实验所得到的数据, 绘出它的一些重要的特性曲线. 在此基础上, 研究它的基本特性, 为以后同类电机的研究和制作提供必要的数据.

**关键词** 超声波马达, 压电效应, 换能器, 多振动片, 特性曲线

中图分类号 TM 359.902

文献标识码 A

超声波电机作为一种具有开发潜力和广阔应用前景的新型驱动器<sup>[1,2]</sup>, 仍处在一个探索和完善的阶段. 超声波电机是利用压电陶瓷的压电效应及弹性体的机械振动, 通过转子与定子间的摩擦力驱动转子转动的. 由于压电陶瓷的极化形式多样, 弹性体的振动模式也具有多样性, 可采用不同的振动模态来产生驱动力, 因而可以研制出多种不同结构的超声波电机. 本文设计的是一种新型的超声波电机——多振动片式驻波回旋型超声波电机. 它是基于对单片式驻波回旋型超声波电机研究的基础上进行设计制作的. 理论上分析, 与单片式同类电机相比, 这种新型马达转速平稳, 波动小. 由于压力均匀分布在多个振子上, 减小了振子的磨损, 提高了它的使用寿命; 同时也提高了输出转矩. 这种电机是利用纵-弯振动的合成形成了振动片上的椭圆运动, 达到输出运动的目的. 其中振动片随着与之相连的定子部分(压电陶瓷和弹性体)做纵向振动, 而定子部分的纵振动是依靠压电陶瓷的逆压电效应, 压电振子会产生厚度方向的振动, 再激励与之相连的弹性体的纵向共振. 通过实验, 对样机的基本特性进行了探讨, 为同类电机的进一步研究打下良好的基础.

## 1 压电换能器与超声变幅杆的研究与设计

振动片式超声波电机的结构原理, 如图1所示. 它是一种纵-弯复合型的驻波电机. 它的定子部分包括有压电换能器、变幅杆和振动片. 其中压电换能器是将电能转换为机械振动能的部件, 变幅杆是将该机械振动振幅放大的结构, 最前端与转子直接接触的是定子振动片, 它是实现纵-弯振动合成形成椭圆运动并推动转子运动的部分. 所以采用分割设计法(即分别设计纵振动与弯曲振动系统的方法), 研究和设计振动片式超声波电机的压电换能器和变幅杆.

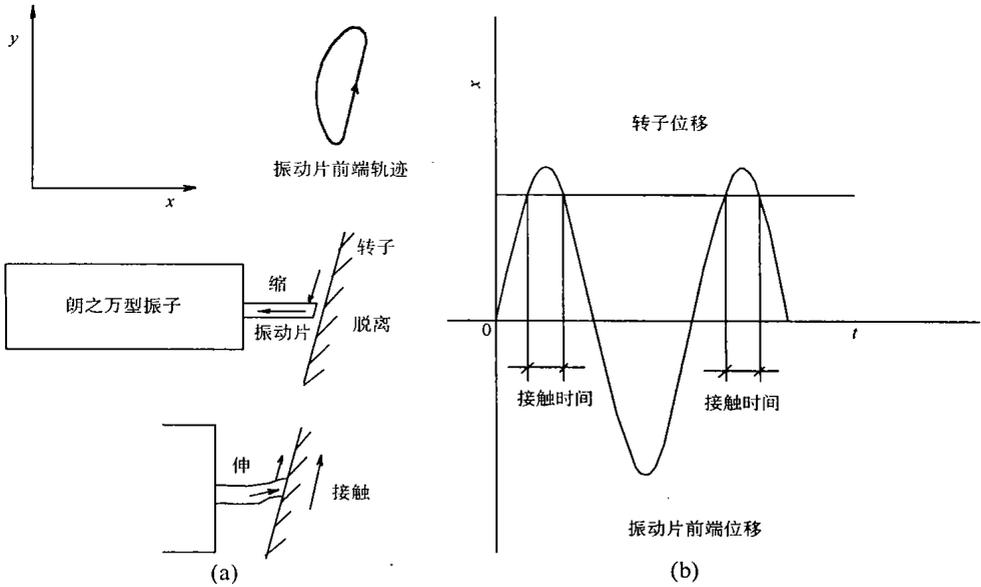


图 1 驻波型超声波电机的动作原理

### 1.1 压电换能器的研究与设计

振动片式电机的压电换能器是需要实现纵振动的换能器, 所以选择厚度振动模态(TE型)的压电振子.

1.1.1 纵向复合换能器的设计原理 通常所用的纵向复合换能器都是半波谐振元件, 原理简图如图 2 所示, 其两端面上的振幅最大. 它的主要设计参数有振子的谐振频率、振速、应力分布

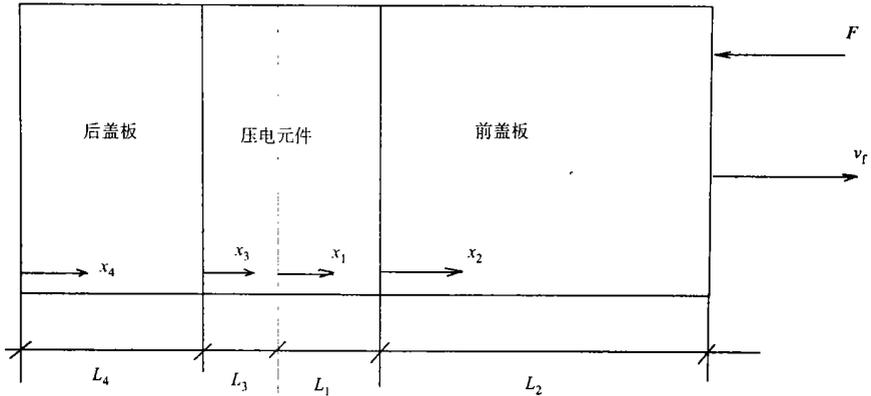


图 2 复合换能器的原理图

等. 一般采用弹性体的纵振动理论来求解这些参数<sup>6)</sup>. 即是将压电陶瓷元件看成连续的弹性介质, 分别建立它们的弹性方程, 再利用边界条件, 解出各设计参数. 半波谐振子输出端的振幅最大, 振速也最大, 节面(振幅为零)位置在 1 与 3 的接合处.

1.1.2 纵向复合式换能器的结构与工艺 纵向复合式换能器是将压电片夹在非压电材料的背板和面板之间, 使得整个换能器在较低的共振频率下工作. 在本样机中使用的复合换能器

结构,常被称为朗之万型换能器或夹心式换能器.这种结构的纵向复合换能器,首尾是两块金属盖板,中间是压电陶瓷元件堆.它一般是纵向极化的带孔圆片或圆管,本文中选用带孔圆片.用螺杆将这3部分紧紧压牢.此结构利用预紧力螺杆施加预紧力,这可以增强换能器的稳定性.另外,还可以避免陶瓷膨胀而造成的破裂.调整首尾金属盖板材料和尺寸,就可调整换能器的带宽、前后振速比和有效机电耦合系数等性能参数.依据等效声学原理,本文设计的换能器所采用的各材料的参数,如表1所示.表中 $\rho$ 为材料密度, $C$ 为声音在材料中的传播速度.压电

表1 材料参数

部件名称	材料	$\rho/\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$C/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho C/\text{Gg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$
压电陶瓷	P-8	7.5	3.30	25
预紧力螺杆	45# 钢	7.8	5.15	40
前盖板	硬铝 LY12-CZ	2.7	5.10	14
后盖板	45#	7.8	5.15	40

陶瓷堆的总长度 $L$ 为压电陶瓷片、薄铜电极、胶合层的厚度之和.选择压电陶瓷晶堆的中间位置作为节面位置,就可得到 $L_1$ 和 $L_3$ 的长度为

$$L_1 = L_3 = \frac{L}{2}. \quad (1)$$

由已知的参数求得压电换能器各部分的尺寸,如表2所示.

表2 压电换能器各部分的尺寸

尺寸	压电陶瓷堆	前盖板	后盖板
轴向尺寸/mm	$L = 28.51$	$L_2 = 52.53$	$L_4 = 36.00$
径向尺寸/mm	$D = 50, d = 20$	$D = 50$ (有M18螺纹孔)	$D = 50, d = 20$

1.1.3 压电陶瓷元件的尺寸确定 通过对压电陶瓷的分析,选择性能优异的锆钛酸铅压电陶瓷材料中的P-8型.它的主要特点是介电损耗小,机械损耗小,性能较稳定,主要参数如表3所列.表中 $\epsilon_3$ 为介电常数, $\text{tg}\delta$ 为介电损耗系数, $N_1$ 为频率常数(它是一个只与材料本身有关的量), $K_1$ 为机电耦合系数, $d_{33}$ 为压电常数, $Q_m$ 为机械品质因数.下面介绍本文压电陶瓷元件的尺寸.这里取外径为 $D = 50$  mm,每片厚度 $t = 7$  mm,内径 $d = 20$  mm,片数 $m = 4$ .

表3 压电陶瓷材料参数

$\epsilon_3$	$\text{tg}\delta/(\%)$	$N_1/\text{Hz} \cdot \text{m}$	$K_1/(\%)$	$d_{33}/\text{pm} \cdot \text{V}^{-1}$	$Q_m$
1 000	0.3	2 000	64	225	1 200

## 1.2 超声变幅杆的研究与设计

在振动片式超声波电机的变幅杆可以将压电换能器传出的较小的振幅加以放大,使固接在端面的振动片得到足够大的纵向振幅和振动能量,推动转子转动.在这里,为了配合多振动片的输出形式,选择了内圆锥形的变幅杆.在参数的确定方面对于内圆锥形的变幅杆,利用振动学知识可求得频率方程和各参数的表达式.其中频率方程为 $\beta L = \pi$  半波谐振长度 $L = \frac{\lambda}{2}$ .

$\frac{3.4116}{\pi} (\lambda = \frac{C}{f_0})$ . 位移节点长度 $x_0$ 的表达式为 $\text{tg}kx_0 = \frac{kl(R_1 - R_2)}{(R_3 - R_2)}$ , 放大系数 $M_p$ 为

$$M_p = \frac{1}{(R_1 - R_3) [(R_1 - R_2) \cosh kl + \frac{(R_3 - R_2)}{kl} \sinh kl]}.$$

在上述各式中,  $\beta = 2\pi f_0 l / C$ ;  $R_1, R_2, R_3$  分别为变幅杆的输入端、输出端、节点处的半径;  $k$  为波数,  $f_0$  为共振频率,  $C$  为波速. 输入端直径与压电换能器输出端的一致,  $D_1 = 50 \text{ mm}$ . 取  $M_p = 4$ , 代入到上述的各公式中, 可得变幅杆各部分的长度和输出端的直径, 结果见表 4. 表中  $D_1$  为输入端直径,  $D_2$  为输出端直径,  $x_0$  为位移节点长度.

表 4 变幅杆的设计参数值

$D_1 / \text{mm}$	$D_2 / \text{mm}$	$L / \text{mm}$	$x_0 / \text{mm}$
50	50	138.5	57.3

通过对压电换能器和变幅杆设计, 得到实验装置中超声波振动系统(不包括振动片)的总体结构, 如图 3 所示. 压电换能器的前盖板与变幅杆的材料相同, 所以作为一体, 这样可以保证良好

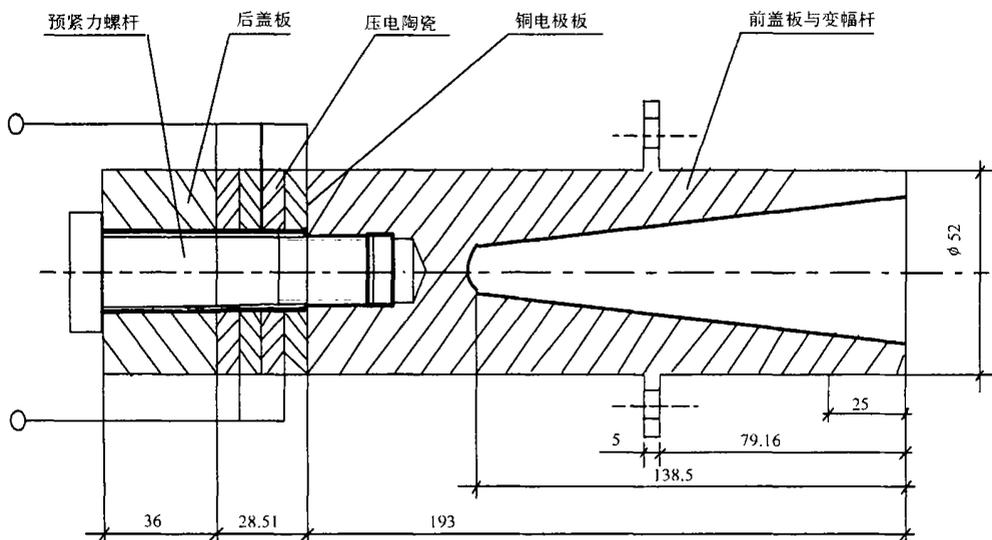


图 3 压电换能器与变幅杆的结构总图

的传声效果. 变幅杆截面处的凸沿是用来与支架相连接, 用作整个装置的固定. 变幅杆的输出端的螺纹是用来连接振动片的.

## 2 振动片的研究与设计

### 2.1 厚度与长度尺寸的确定

根据弹性振动理论分析, 可得振动片厚度与长度间的关系式<sup>[4,5]</sup>为

$$\frac{t}{l^2} = \frac{4\pi f_0^2}{(1.875)^2} \frac{3\rho}{E} \quad (2)$$

我们选一种新型的模具钢 LD 钢作为振动片的材料, 其中  $E = 0.22 \text{ TPa}$ ,  $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 振动频率  $f_0 = 20 \text{ kHz}$ . 计算出几组  $t$  和  $l$  的对应值, 如表 5 所示.

### 2.2 振动片的阵列

表 5  $t$  和  $l$  的对应值表

$t / \text{mm}$	0.20	0.50	0.75	1.00	1.20
$l / \text{mm}$	2.93	4.63	5.67	6.55	7.18

本文研究的是多振动片式驻波超声波电机. 将单个的振动片环形的阵列在加工出来的

基体上,就可以构成多振动片式超声波电机.考虑到要使用线切割加工,为了加工的方便,应该使振动片的片数为偶数.根据这个要求,在振动片的阵列方式和个数上,选择的是沿基体的内圈,偶数个阵列(本文选择18个振动片).以上讨论了定子振动片的理论与设计.根据对单振动片式的样机实验结果<sup>6)</sup>,在本文中的定子振动片的设计参数,是采用平行四边形结构.其厚度定为1.0 mm,长度定为6.55 mm,宽度是5 mm,倾斜的角度为4°;沿基体环形阵列切制18个振动片.

### 3 实验研究与分析

#### 3.1 实验方案

实验采用的超声波发生器型号是J93025,可产生高频交变电信号.其频率范围是 $f = 16 \sim 24$  kHz,输出功率可调,且最大功率为250 W.采用PB-2型数字频率计测量并显示超声波发生器的交变电信号的频率值,通过它可测得该实验共振系统的共振频率.由于无法直接在定子和转子间施加预压力,因此决定采用直立的方式进行实验.这样,可利用转子的自重及在其上施加一定的重物进行施加预压力.不过,这就无法直接测量样机的输出转矩.本文主要是对样机的基本特性进行实验研究,基本特性主要是指一些外部的输入因素对电机输出特性的影响.

3.1.1 频率-转速特性 对于多振动片式超声波电机,根据设计原理,可知整个超声振动系统(包括振动片)的设计都是基于共振设计的,且共振频率即为工作频率(本文中是按20 kHz设计的).当频率发生变化时,它的振动状态也会发生变化,必然导致输出特性(转速和力矩)的变化.通过实验来测试频率-转速特性,可以获得该系统输出转速随实际的工作频率的变化趋势.在输入电压为80 V时,选择3个不同的预压力进行测试,实验结果如图4所示.

3.1.2 电压-转速特性(在实际工作频率下测试) 多振动片式是利用压电陶瓷来实现换能的.根据压电陶瓷的压电性能可知,当外加电场的电压发生变化时形变也会发生变化,会导致整个振动系统的纵向振动的振幅发生改变,而影响到输出特性.通过上面的实验测得实际的工作频率.在此频率下,选择与上面的实验同样的3个不同的预压力测试电压-转速特性,以获得输出转速随输入电压的变化趋势.实验结果如图5所示.

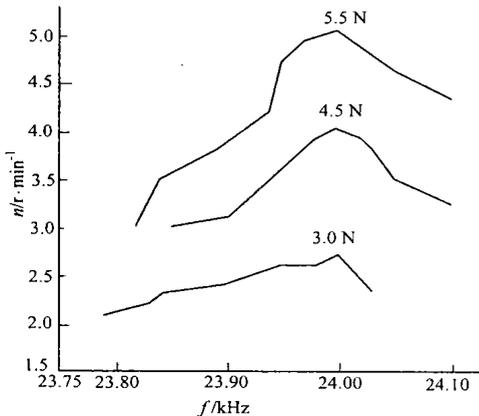


图4 频率-转速特性

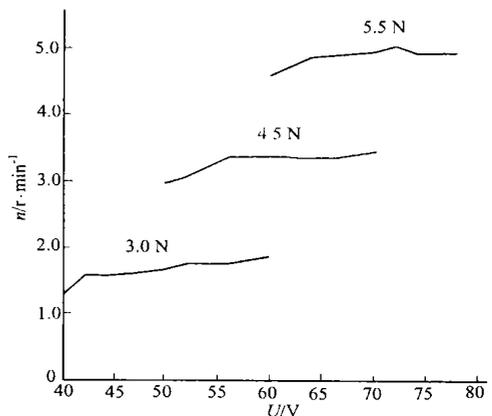


图5 电压-转速特性图

3.1.3 预压力-转速特性(在实际工作频率下测试) 在实际的工作频率(24 kHz)下,测得的预压力与转速的特性曲线图(图 6).由图可见,随着预压力的增大,电机的转速也随之增大,但在到达最高点后开始下降.

3.1.4 预压力-功率特性(在实际工作频率下测试) 在实际的工作频率(24 kHz)下,测得的预压力与功率的特性曲线图(图 7).由图可见,随着预压力的增大,电机的功率也随之增大.但在到达最高点后也开始下降.

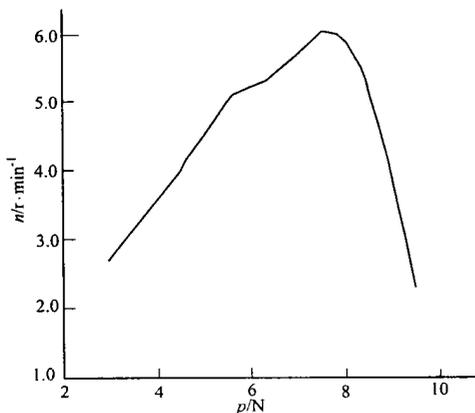


图 6 预压力-转速特性图

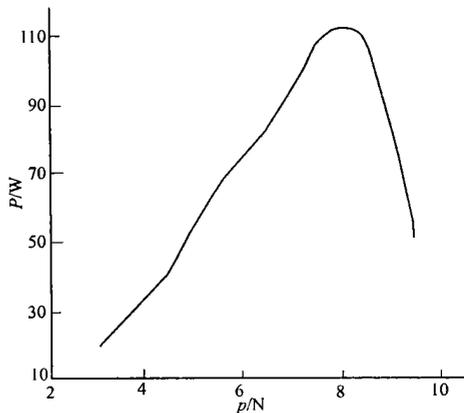


图 7 预压力-功率特性图

## 3.2 实验结果分析

3.2.1 转速分析 (1) 当振动系统达到共振时,其振幅(纵向振幅与弯曲振幅)会达到最大值,所以输出转速也会达到最大值;反过来,依据转速图也可以确定该系统的实际共振频率.根据图 4 可以确定该样机的实际共振频率在 24 kHz 左右,与设计的工作频率 20 kHz 有 20% 的误差.导致频率误差的原因:(a) 分割设计法本身有一定的近似设计,这会导致误差;(b) 材料的优劣及加工的误差会导致频率误差;(c) 支撑固定与连接装置也会影响振动系统的振动而导致误差.(2) 输入电压增大,输出的转速随之增大.当电压增大到一定值后,转速达到一恒定值(即输出功率达到最大),之后不再有什么大的变化.根据压电陶瓷材料的性质,由压电系数可知当加在它上面的电压增大时,其形变也增大,使得整个超声振动系统的纵振动幅也随着增大.纵向振动的振幅增大可引起挠曲响应增大,所以输出转速也会增大.又因为压电陶瓷存在介电损耗,随电压增大而增大.所以,当输入电压达到一定值后,压电振子的振幅不再变化,输出转速也不再变化.

3.2.2 预压力分析 (1) 随预压力的增大,转速达到恒值时的输入电压升高.施加预压力会引起振动片的纵向形变.当预压力增大时,形变增大,对应所需的振幅也要增大,故所需的输入电压值必然要升高.预压力与电压这两个外部因素相互间是有影响的,即预压力增大,所需的输入电压值也增大,输出转速增加.这两个输入因素相互配合可以获得较大的输出功率.(2) 不同的预压力,对应不同的输出特性,但变化趋势基本一致,且存在某一最佳预压力.

## 4 结束语

波电机的设计制作与实验分析. 从电机的结构设计制作入手, 研究了电机定子部分的压电换能器与变幅杆, 得到了设计制作的参数. 研究定子振动片的设计原理和结构方案, 确定了振动片的设计制作参数. 进行样机的实验研究, 并结合得到的数据进行了分析. 由实验得到了如下多振动片式驻波超声波电机的一些基本特性. (1) 频率-转速特性. 频率越接近共振频率, 转速越快, 输入频率和系统的共振频率相同时, 转速达最大值; 由此反过来, 则提供了一种确定系统共振频率的实验方法. (2) 电压-转速特性. 输入电压增大, 输出的转速随之增大. 当电压增大到一定值后, 转速达到一恒定值. (3) 预压力-转速特性. 随着预压力的增大, 电机的转速也随之增大. 但当预压力达到某值后, 转速又开始下降. (4) 预压力-功率特性. 随着预压力的增大, 电机的功率也随之增大. 但在到达某一最大值后, 又开始下降.

### 参 考 文 献

- 1 见城尚志, 指田年生. 超音波モータ入门[M]. 东京: 综合电子出版社, 1993. 99~118
- 2 洪尚任. 超声波马达[J]. 自动化仪表, 1996, 17(10): 1~4
- 3 陈桂生. 超声换能器设计[M]. 北京: 海洋出版社, 1984. 197~210
- 4 许芦君. 压电回旋型超声波电机的理论分析与设计制作[D]: [硕士学位论文]. 泉州: 华侨大学机电及自动化学院, 2002. 49~54
- 5 徐方迁, 程存弟, 贺西平. 超声马达振动片的理论与设计[M]. 声学学报, 1995, 20(3): 199~205
- 6 石菊荣. 振动片式超声波马达的理论与实验研究[D]. [硕士学位论文]. 泉州: 华侨大学机电及自动化学院, 1999. 54~71

## Designing and Manufacturing Ultrasonic Motor with Multiple Reeds

Shi Shunqiao    Hong Shangren    Xu Lujun

(College of Electromech. Eng. & Auto., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

**Abstract** Proceeding from the study on standing-wave rotary ultrasonic motor with single reed, the authors design and manufacture a sample machine of standing-wave rotary ultrasonic motor with multiple vibrating reeds. some of its important characteristic curves are drawn by means of experiment on sample machine and data from experiment. And then, its basic performance is investigated, and necessary data and reference material are offered for studying and manufacturing of similar motor hence forth.

**Keywords** ultrasonic motor, piezoelectric effect, transducer, multiple vibrating reeds, characteristic curve