

横波换能器的研制

栾桂冬

(北京大学无线电系)

1987年9月5日收到

本文从压电介质的基本方程出发,推导了厚度切变模横波换能器的梅森等效电路。进一步得出了适于工程应用的等效电路。介绍了有关晶片电弹常数的测量原理和换能器的研制工艺。

一、引言

比起纵波来,横波速度低(约为纵波的一半)、衰减常较小,用它来进行超声检测可以缩小检测盲区、增加检测距离。横波有偏振方向,可以从其回波信号中获得更多信息。因而横波换能器在超声检测中有着广泛应用。不过横波换能器的制造工艺较为复杂,理论分析也不如纵波换能器那样为人们所熟悉。本文从压电介质的基本方程出发,推导了厚度切变模横波换能器稳态情况下的梅森等效电路,得出了适用于工程上应用的简化的等效电路。介绍了为进行该种换能器的理论计算所需要的有关电弹常数的测量原理。对研制工艺也作了简单介绍。

二、等效电路

对如图1所示的电场平行于波的传播方向的厚度切变晶片选用h-型压电方程较为方便。若厚度远小于其他两个方向的线度,则压电方程简化为^[1]

$$T_3 = c_{55}^D S_3 - h_{15} D_1 \quad (1)$$

$$E_1 = -h_{15} S_3 + \beta_{11}^S D_1 \quad (2)$$

运动方程简化为

$$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial T_3}{\partial x} \quad (3)$$

式中 ξ 为 x 方向的位移。

应用声学

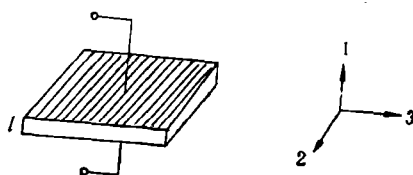


图1 电场平行于波的传播方向的厚度切变晶片

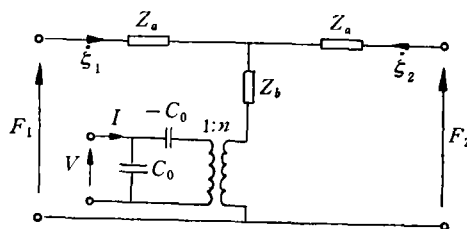


图2 厚度切变模晶片的梅森等效电路

经简单运算可得如下电和机械振动方程式^[2-3]

$$I = j\omega C_0 V - n(\xi_2 + \xi_1) \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \left(Z_b - \frac{n^2}{j\omega C_0} \right) (\xi_2 + \xi_1) + Z_a \dot{\xi}_1 + nV \\ F_2 &= \left(Z_b - \frac{n^2}{j\omega C_0} \right) (\xi_2 + \xi_1) + Z_a \dot{\xi}_2 + nV \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中

$$Z_a = j\rho v^D S \tan \frac{kl}{2}, \quad Z_b = \frac{\rho v^D S}{j \sin kl}$$

$$C_0 = \frac{S}{\beta_{11}^S l} \quad (6)$$

$$n = h_{15} C_0 \quad (7)$$

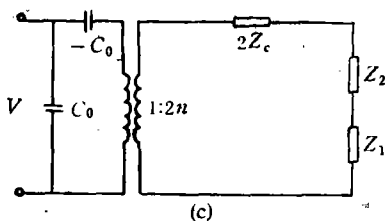
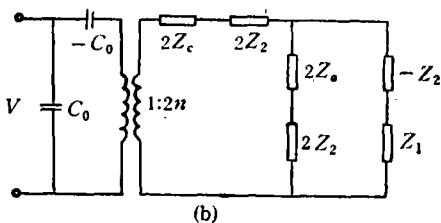
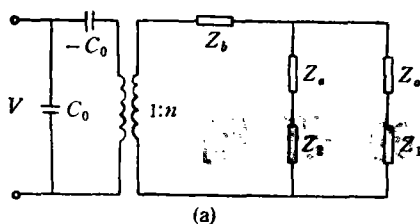


图3 发射时梅森等效电路的简化

$$k = \frac{\omega}{\nu^D}, \quad \nu^D = \sqrt{\frac{C_{55}^D}{\rho}} \quad (8)$$

其中, S 为电极面积 (等于辐射面积), ξ_1, ξ_2 ; $\dot{\xi}_1, \dot{\xi}_2$; F_1, F_2 分别为 $x=0, x=l$ 面的位移、振速和外力。

由(4)、(5)可得厚度切变模晶片的梅森等效电路,如图2所示。

为了实用的方便,下面利用诺顿(Norton)恒等电路将梅森等效电路作简化^[4]。

当换能器工作于发射状态时,梅森等效电路成为图3(a)。 Z_1, Z_2 分别为负载介质和背衬的声特性阻抗。图3(b)为采用诺顿恒等电路时的发射等效电路,其中

$$Z_c = -j\rho\nu^D S \cot \frac{kl}{2}$$

在反共振频率附近

$|2Z_s + 2Z_2| \gg |Z_1 - Z_2|, 2Z_s + 2Z_2$ 机械分支可以认为开路,则得到图3(c)。在处理

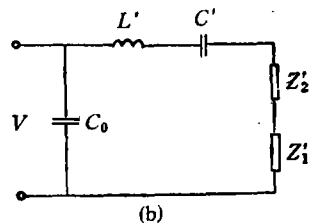
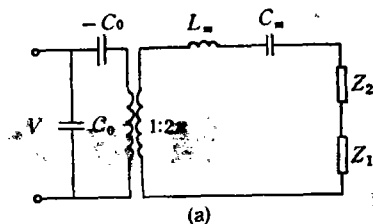


图4 晶片发射时在反共振频率附近的等效电路

实际问题时,图3(c)的等效电路比图3(a)要方便。

在反共振频率附近,等效电路还可进一步简化。例如在反共振基频 $f_a = \nu^D/2l$ 附近,图3(c)中的阻抗 $2Z_c$ 可近似用一串联的 LC 电路来表示,如图4(a)所示。图中

$$C_m \approx \frac{2}{\pi^2} \frac{l}{c_{55}^D S} \quad (9)$$

$$L_m \approx \frac{1}{2} \rho l S = \frac{1}{2} \times (\text{晶片质量}) \quad (10)$$

$$\omega_a^2 = \frac{1}{L_m C_m} \quad (\text{即 } f_a = \frac{\nu^D}{2l}) \quad (11)$$

将机械一方转换到电的一方,则图4(a)可进一步画成图4(b)。图中

$$L' = L_m/4\pi^2 \quad (12)$$

$$C' = 4\pi^2 C_0 C_m / (C_0 - 4\pi^2 C_m) \quad (13)$$

$$Z'_2 = Z_2/4\pi^2$$

$$Z'_1 = Z_1/4\pi^2$$

由图可得共振频率

$$f_r = f_a \left(1 - 4\pi^2 \frac{C_m}{C_0}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

可有

$$(f_r - f_a)/f_a \approx -2\pi^2 C_m/C_0 = -\frac{4}{\pi^2} k_{15}^2 \quad (15)$$

式中

$$k_{15} = h_{15}/\sqrt{\beta_{11}^S c_{55}^D} \quad (16)$$

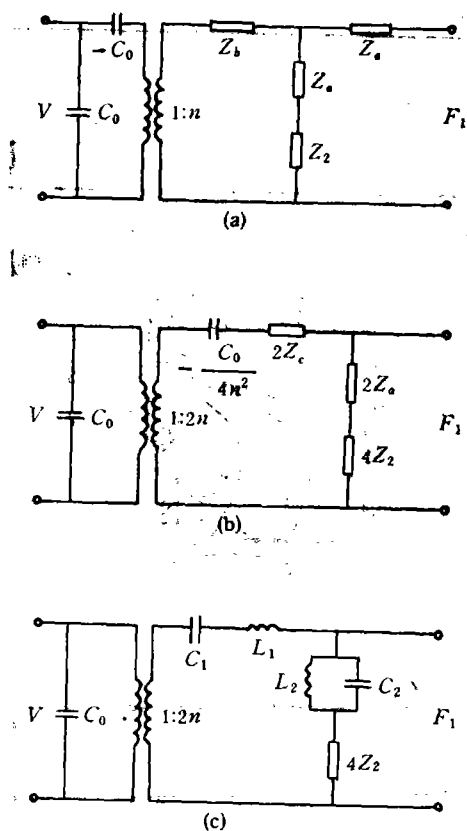


图5 单面接收时梅森等效电路的简化

为厚度切变机电耦合系数。(15)的共振频率和反共振频率之间的关系是在近似条件下得出的,后面将要推导它们之间的精确关系。需要注意的是,由 ν^D 算出的 $\frac{1}{2}$ 波长对应的是反共振频率,而不是共振频率。图4可以方便地用来计算换能器的发射参数。例如,共振时对辐射面的推力为

$$F_1 = 2nVZ_1/(Z_2 + Z_1)$$

可见,在稳态工作时,为了有好的辐射,背衬的阻抗 Z_2 应较小。

当换能器单面接收时,图2可以化成图5(a)。利用诺顿恒等电路,考虑到在反共振频率附近,

$$\tan \frac{kl}{2} \gg Z_2$$

则,图5(a)成为图5(b)。图中

$$Z_c = -j\rho\nu^D S \cot \frac{kl}{2}$$

应用声学

在反共振频率附近,图5(b)还可进一步简化成图5(c),图中

$$C_1 = \frac{C_0 C_m}{C_0 - 4\pi^2 C_m},$$

$$L_1 = L_m,$$

$$C_2 = \frac{l}{8Sc_{55}^D}, \quad L_2 = \frac{8}{\pi^2} \times (\text{晶片质量})$$

$$\omega_a^2 = \frac{1}{L_2 C_2}$$

在反共振频率附近单面接收时,用该图计算较为方便。由图可见,在反共振频率接收时,换能器有最大的响应。

在以上讨论中未考虑介电、机械和压电损耗,当考虑损耗时应将有关电弹常数换成复数^[2-3]。

三、有关电弹常数的测量

对压电陶瓷来说,材料参数随组分和工艺过程有很大关系。即使同一工序生产的样品,它们的材料参数也有差别。厚度切变模陶瓷晶片在磨去极化电极和镀激励电极的过程中都可能产生退极化,其材料参数往往不如最佳值。因而需要对实际使用的晶片进行测量。虽然已经推荐了压电陶瓷电弹常数的标准测量方法^[5-7],然而换能器的研制者希望有更直接和简单的方法测量理论计算所需要的电弹常数。

通过对自由振动晶片的分析,可以得到测量有关电弹常数的方法。晶片作自由振动时,可令图2中 $F_1 = F_2 = 0$,得到自由振动晶片的等效电阻抗

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} \left(1 - k_{15}^2 \frac{\tan \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}} \right) \quad (17)$$

当 $kl/2 = \pi/2$ 时, $Z \rightarrow \infty$,晶片处于反共振状态,可得反共振频率

$$f_a = \frac{\nu^D}{2l} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{c_{55}^D}{\rho}} \quad (18)$$

当测出反共振频率 f_a 并已知晶片密度 ρ 和晶片厚度 l 时,可算出 c_{55}^D 。当共振时, $Z = 0$,得

表1 PZT 陶瓷的测量和计算结果

编号	尺寸 10^{-3}m	质量 10^{-3}kg	C_0 pF	f_r KHz	f_a KHz	ρ 10^3kg/m^3	CD_{33}^D 10^{10}N/m^2	k_{15} %	β_{15}^S 10^4m/F	h_{15} 10^4N/C
1	$10.98 \times 10.80 \times 0.315$	0.262	2690	3200	3427	7.01	3.27	39.2	1.40	8.39
2	$10.00 \times 10.10 \times 0.285$	0.212	4210	3478	3799	7.36	3.45	43.8	0.84	7.47

$$k_{15}^2 = \frac{\pi}{2} \left(\frac{f_r}{f_a} \right) \cot \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{f_r}{f_a} \right) \right] \quad (19)$$

于是当测出共振频率 f_r 和反共振频率 f_a 时, 可算出厚度切变机电耦合系数 k_{15} 。 k_{15} 亦可由 (15) 式近似算出。低频时 (17) 成为

$$Z \rightarrow \frac{1}{j\omega C_0} (1 - k_{15}^2) \quad (20)$$

因此若已知 k_{15} , 由低频电容值可算出 C_0 。

用天平称出晶片质量, 用游标卡尺和螺旋测微器量出晶片尺寸, 用传输线法测出共振和反共振频率, 用电桥或其他电容测试仪器测出低频电容, 即可由 (6)、(16)、(18)、(19)、(20) 算出有关电弹常数。作为例子, 所用的两片 PZT 陶瓷的测量和计算结果如表 1 所示。由表中数据可见, 晶片的性能离最佳值还有较大差距, 且两片的电弹常数也存在较大差别, 这也说明了实际测量晶片的电弹常数的必要性。

四、换能器的研制

换能材料的选取, 当需要非常稳定的性能时, 可采用 AT 切或 Y 切的压电石英。前面的理论分析是对压电陶瓷而言的, 当分析石英时只需将常数和变量的下标加以变换即可。由于石英的压电效应较弱, 且阻抗较高 (特别在低频时) 不易与电路匹配, 若对材料的稳定性无特殊要求、频率不是很高 (例如 5MHz 以上) 时, 通常不选择它。压电陶瓷中, x 切偏铌酸铅适于作横波换能器, 但偏铌酸铅的烧结较为困难, 我们采用易于获得、价格低廉的 PZT 压电陶瓷作换能材料。

按照对辐射声场和工作频率的要求, 初步确定晶片尺寸。将晶片在 x 方向 (长或宽方向) 极化后, 磨去电极, 并在 x 方向 (厚度方向) 用真

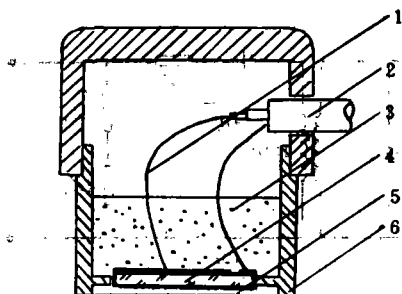
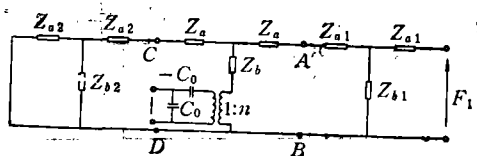


图6 换能器的结构



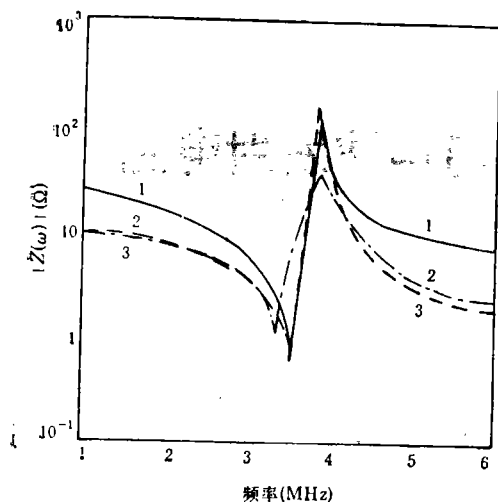


图8 空气中的阻抗曲线

式,只需将各参数分别加下标1和2即可。背衬的阻抗 Z_2 可化简

$$Z_2 = Z_{a2} + \frac{Z_{a2}Z_{b2}}{Z_{a2} + Z_{b2}} = j\rho_2 v_2 S \tan k_2 l_2$$

如背衬为钨粉加环氧,且厚度 l_2 很大(大于10个波长)时,可认为 $Z_2 = \rho_2 v_2 S$ 。当保护膜很薄时

$$Z_{b1} \approx \frac{\rho_1 v_1 S}{jk_1 l_1}, Z_{a1} \approx j\rho_1 v_1 S \frac{k_1 l_1}{2}$$

由图7可以对换能器发射或接收时的有关性能参数进行计算。例如,可以用它来精确计算换能器的共振频率。使用了其电弹常数与表1中晶片1相同的晶片,晶片厚 $l = 2.83 \times 10^{-4} \text{m}$, $f_r = 3612 \text{kHz}$, $f_a = 3869 \text{kHz}$ 。当给晶片电镀上 $1.6 \times 10^{-3} \text{m}$ 厚的铜膜时,由图7计算得到的共振和反共振频率(空气中)分别为 $f_r = 3191 \text{kHz}$, $f_a = 3484 \text{kHz}$,而实测值为 $f_r = 3200 \text{kHz}$, $f_a = 3427 \text{kHz}$ 。如果考虑到常数的测量误差在第三位有效数字,理论和实验的结果是符合得相当好的。用保护膜的厚度来调节换能器的共振频率是一个行之有效的方法。

在不需要很精确计算的情况下,可用简化的等效电路对换能器的性能参数进行估算。由表1中晶片2的电弹常数可算出

$$C_m = 1.66 \times 10^{-11} \text{m/N}, L_m = 1.06 \times 10^{-4} \text{kg}$$

应用声学

$$L_1 = 2.69 \times 10^{-6} \text{H}, C_1 = 7.75 \times 10^{-10} \text{F}$$

图8为该晶片在空气中的阻抗曲线。图中曲线1是由简化等效电路图图4(b)计算的曲线,曲线2是实测的晶片阻抗曲线,曲线3是加环氧背衬后测量的阻抗曲线。比较曲线1和2可见在共振和反共振频率附近,测量值和理论计算值能较好一致。比较曲线2和3可见加背衬后带宽增加,共振时的阻抗增加,这是由简化的等效电路容易预见的。

五、结 语

选用PZT压电陶瓷作切变模横波换能器是可行的。若将陶瓷的工艺过程(主要是改善极化条件)加以改进,换能器的性能预期将有较大提高。对于晶片厚度远小于横向尺寸的晶片,对换能器的理论分析被实验证明是正确的。测量有关晶片电弹常数的方法简单可行,便于在一般实验室应用。本文的理论分析适用于稳态情况,对暂态效应将在另一篇文章中讨论。

六、致 谢

北京大学无线电系张金铎同志曾对初稿进行审阅,中国科学院声学研究所李明轩、刘献铎、王治庭等同志曾给作者多方面帮助,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] D. A. Berlincourt, D. R. Curran and H. Jaffe in W. P. Mason ed., Physical Acoustics, Vol. 1, Part A, Academic Press, New York and London, 1964.
- [2] 栾桂冬、张金铎,应用声学, 5-1(1986)12.
- [3] 栾桂冬、张金铎,应用声学, 5-2(1986)31.
- [4] L. Marton and C. Marton ed., Methods of Experimental Physics, Vol. 9, Ultrasonics, Academic Press, New York et al., 1981.
- [5] IRE Standards on Piezoelectric Crystals 1949, Proc. IRE, 37(1949), 1378.
- [6] IRE Standards on Piezoelectric Crystals 1958, Proc. IRE, 46(1958), 764.
- [7] IRE Standards on Piezoelectric Crystals 1961, Proc. IRE, 49(1961), 1161.