

# 双激励源压电陶瓷超声换能器的共振频率特性分析

林书玉

(陕西师范大学应用声学研究所,陕西省超声学重点实验室,陕西西安 710062)

**摘 要:** 本文对具有两组压电陶瓷激励元件的夹心式功率超声压电换能器进行了理论及实验研究。当换能器中的两组压电陶瓷元件分别被激励时,换能器可以产生两组不同的共振及反共振频率。利用换能器的梅森等效电路,得出了其频率方程。探讨了换能器的共振频率及反共振频率与其几何尺寸及电学边界条件的依赖关系。研究表明,换能器的共振频率不仅与其几何形状和尺寸有关,而且与电学边界条件有关。在同样的几何尺寸下,电端开路时的共振及反共振频率大于电端短路时的共振及反共振频率。在两种电学边界条件下,换能器的共振及反共振频率与几何尺寸之间的依赖关系是相似的,即当换能器圆锥前盖板的半径比增大时,换能器的共振及反共振频率总是降低的。

**关键词:** 双激励源换能器;机电等效电路;共振频率

**中图分类号:** O426.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 11-2504-06

## Analysis on the Resonance Frequency of Sandwich Ultrasonic Transducers with Two Sets of Piezoelectric Ceramic Elements

LIN Shu-yu

(Institute of Applied Acoustics, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

**Abstract:** The sandwich ultrasonic transducer with two sets of piezoelectric ceramic elements is studied. When the active piezoelectric ceramic elements are excited separately, two resonance frequencies can be obtained. Based on the Mason electro-mechanical equivalent circuit, the resonance frequency equations are derived. The dependency of the resonance frequency on the geometrical dimensions and the electric boundary conditions is analyzed. It is shown that the resonance frequency of the transducer at electric short circuit is low than that at electric open circuit. At both electric boundary conditions, the resonance frequency is decreased when the radial dimension is increased.

**Key words:** sandwich transducer with two sets of piezoelectric elements; electro-mechanical equivalent circuit; resonance frequency

### 1 引言

在功率超声和水声学领域,夹心式压电陶瓷换能器(又称为朗之万换能器或复合换能器)获得了广泛的应用。它具有功率大、电声效率高、机械强度高以及结构及性能参数易于优化设计等特点<sup>[1~5]</sup>。传统的夹心式压电陶瓷换能器只有一组压电陶瓷元件,对应于换能器某一振动模式的某一阶次振动,只存在一个共振频率,而且这一共振频率仅由换能器的材料参数和几何尺寸所决定。一般来说,当换能器的设计及装配完成以后,其共振频率随之确定。随着超声技术的发展,一些新的超声应用技术对换能器的频率提出了更多的要求<sup>[6,7]</sup>,例如,在精密超声清洗技术中,为了改善产品的清洗质量、避免清洗死点,提出了宽频及多频超声清洗等技术。另外,

在超声化学领域,不同的化学反应对超声频率的要求也是不同的,这就需要探讨超声化学反应对频率的依赖性,因而需要对多频及宽频换能器进行研究。

关于宽频以及复频超声的产生,目前主要有以下几种方法:(1)借助于压电陶瓷材料的压电效应,在压电陶瓷换能器的输入及输出电端增加电阻抗元件;(2)利用换能器的多模态耦合,可以设计复频和宽频超声换能器<sup>[8,9]</sup>;(3)利用阻抗变换原理来拓宽换能器的频带<sup>[10,11]</sup>;(4)采用多激励源的方法来实现夹心式换能器的复频或宽频工作。

本文探讨了具有两组压电陶瓷元件的夹心式换能器,分析了换能器的几何尺寸和电边界条件对其频率特性的影响,得出了一些具有一定参考价值的研究结果。

## 2 具有两组压电陶瓷激励元件的夹心式换能器的振动特性

图 1 所示是一个具有两组压电陶瓷激励元件的夹心式换能器。图中  $l_1, l_2$  及  $l_3$  分别表示换能器中金属圆柱后盖板、中间金属圆柱以及金属圆锥前盖板的长度； $R_1$  和  $R_2$  表示金属圆锥前盖板的两端半径；两组压电陶瓷元件分别由两片厚度为  $l_0$  的压电陶瓷元件组成。在实际应用时，两组压电元件分别单独激发，因而可产生两组共振频率。当一组陶瓷元件被激发时，另一组元件可处于短路或开路状态。基于换能器的一维振动理论，可以得出图 1 所示换能器的机电等效电路图 2。为了简化分析，忽略了换能器前后辐射面的机械负载阻抗。

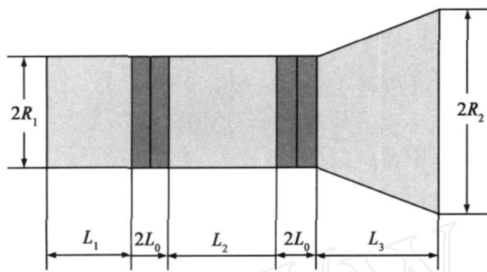


图1 具有两组压电陶瓷激励元件的夹心式超声换能器

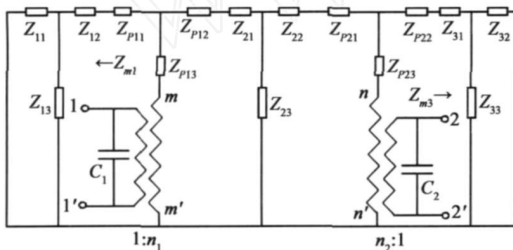


图2 具有两组压电陶瓷激励元件的夹心式换能器的机电等效电路

图中  $C_1, C_2$  和  $n_1, n_2$  表示两组压电陶瓷元件的钳定电容和机电转换系数， $C_1 = p_1 \frac{T}{s_{33}} (1 - K_{33}^2) S_1 / l_0$ ， $C_2 = p_2 \frac{T}{s_{33}} (1 - K_{33}^2) S_1 / l_0$ ， $p_1$  和  $p_2$  表示压电元件的数目。在本文中， $p_1 = p_2 = 2$ 。 $S_1$  和  $S_2$  为元件的截面积， $l_0$  是压电元件的厚度， $n_1 = d_{33} S_1 / (s_{33}^E l_0)$ ， $n_2 = d_{33} S_1 / (s_{33}^E l_0)$ ， $d_{33}$ ， $\frac{T}{s_{33}}$ ， $K_{33}$  和  $\frac{E}{s_{33}^E}$  分别表示压电常数、自由介电常数、机电耦合系数和弹性柔顺常数， $Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}, Z_{21}, Z_{22}, Z_{23}, Z_{31}, Z_{32}, Z_{33}$  分别表示金属后盖板圆柱、中间金属圆柱以及金属圆锥前盖板的等效机械阻抗，其表达式为，

$$Z_{11} = Z_{12} = jZ_1 \tan(k_1 l_1 / 2) \tag{1}$$

$$Z_{13} = Z_1 / [j \sin(k_1 l_1)] \tag{2}$$

$$Z_{21} = Z_{22} = jZ_2 \tan(k_2 l_2 / 2) \tag{3}$$

$$Z_{23} = Z_2 / [j \sin(k_2 l_2)] \tag{4}$$

$$Z_{31} = -jZ_3 [(S_2 / S_1)^{1/2} - 1] / (k_2 l_2) - jZ_3 \cot(k_2 l_2) + jZ_3 (S_2 / S_1)^{1/2} / [\sin(k_2 l_2)]$$

$$= jX \tag{5}$$

$$Z_{32} = -jZ_4 [(S_1 / S_2)^{1/2} - 1] / (k_2 l_2) - jZ_4 \cot(k_2 l_2) + jZ_3 (S_2 / S_1)^{1/2} / [\sin(k_2 l_2)]$$

$$= jY \tag{6}$$

$$Z_{33} = -jZ_3 (S_2 / S_1)^{1/2} / [\sin(k_2 l_2)] = jZ \tag{7}$$

在上述各式中，

$$Z_1 = \rho_1 c_1 S_1, Z_2 = \rho_2 c_2 S_1, Z_3 = \rho_3 c_3 S_1, Z_4 = \rho_3 c_3 S_2,$$

$$k_1 = \omega / c_1, k_2 = \omega / c_2, k_3 = \omega / c_3, c_1 = (E_1 / \rho_1)^{1/2},$$

$$c_2 = (E_2 / \rho_2)^{1/2}, c_3 = (E_3 / \rho_3)^{1/2},$$

$E_1, E_2, E_3, \rho_1, \rho_2, \rho_3$  以及  $c_1, c_2, c_3$  表示材料的杨氏模量、密度和声速， $k_1, k_2, k_3$  是波数， $\omega = 2\pi f$  表示角频率。

$Z_{p11}, Z_{p12}, Z_{p13}$  和  $Z_{p21}, Z_{p22}, Z_{p23}$  表示两组压电陶瓷元件的等效机械阻抗，其具体的表达式为，

$$Z_{p11} = Z_{p12} = jZ_0 \tan(p_1 k_0 l_0 / 2) \tag{8}$$

$$Z_{p13} = Z_0 / [j \sin(p_1 k_0 l_0)] \tag{9}$$

$$Z_{p21} = Z_{p22} = jZ_0 \tan(p_2 k_0 l_0 / 2) \tag{10}$$

$$Z_{p23} = Z_0 / [j \sin(p_2 k_0 l_0)] \tag{11}$$

式中， $Z_0 = \rho_1 c_0 S_1, Z_0 = \rho_2 c_0 S_1, k_0 = \omega / c_0,$

$$k_0 = \omega / c_0, c_0 = [1 / (s_{33}^E \rho_1)]^{1/2},$$

$$c_0 = [1 / (s_{33}^E \rho_2)]^{1/2},$$

$\rho_1, \rho_2$  和  $c_0, c_0$  表示压电陶瓷材料的密度和声速， $k_0,$

$k_0$  表示波数。利用图 2，可以得出金属圆柱后盖板以及金属圆锥前盖板的输入机械阻抗为，

$$Z_{m1} = jZ_1 \tan(k_1 l_1) = jD \tag{12}$$

$$Z_{m3} = j \frac{Z_3}{k_3 l_3 F} \cdot \frac{k_3 l_3 - [1 + k_3^2 l_3^2 F(F+1)] \tan(k_3 l_3)}{\tan(k_3 l_3) - k_3 l_3 (F+1)}$$

$$= jB \tag{13}$$

式中  $F = R_1 / (R_2 - R_1)$ 。在下面的分析中，主要考虑两种情况：(1) 当第一组压电陶瓷元件被激励时，第二组压电陶瓷元件处于短路或开路状态；(2) 当第二组压电陶瓷元件被激励时，第一组压电陶瓷元件处于短路或开路状态。

### 2.1 第一组压电陶瓷元件被激励

在这种情况下，第一组压电陶瓷元件的两个电端 1-1' 与超声电源相连，而第二组压电陶瓷元件的两个电端 2-2' 分别处于短路或开路状态。

#### 2.1.1 第二组压电元件短路

在这种情况下，第二组压电陶瓷元件的两个机械端  $n-n'$  间的机械阻抗为，

$$Z_{nn} = 0 \tag{14}$$

利用图 2，可以得出第一组压电陶瓷元件两个机械端  $m-m'$  之间的机械阻抗为，

$$Z_{mm} = jI - \frac{Z_0}{\sin(p_1 k_0 l_0)}$$

$$+ \frac{(Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) + C)(Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) + D)}{2 Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) + C + D} \Bigg] \\ = jE \quad (15)$$

式中,

$$E = - \frac{Z_{01}}{\sin(p_1 k_{01} l_0)} \\ + \frac{(Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) + C)(Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) + D)}{2 Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) + C + D} \quad (16)$$

$$C = Z_2 \tan(k_2 l_2/2)$$

$$- \frac{Z_2/\sin(k_2 l_2) [Z_2 \tan(k_2 l_2/2) + A]}{A + Z_2 \tan(k_2 l_2/2) - Z_2/\sin(k_2 l_2)} \quad (17)$$

$$A = Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2)$$

$$- \frac{Z_{02}/\sin(p_2 k_{02} l_0) [Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) + B]}{B + Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) - Z_{02}/\sin(p_2 k_{02} l_0)} \quad (18)$$

由此可以得出第一组压电陶瓷元件的输入电阻抗为,

$$Z_{i1} = j \frac{E}{n_1^2 - C_1 E} \quad (19)$$

利用式(19),可以得出换能器的共振频率方程,

$$\frac{Z_{01}}{\sin(p_1 k_{01} l_0)} \\ = \frac{(Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) + C)(Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) + D)}{2 Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) + C + D} \quad (20)$$

反共振频率方程,

$$n_1^2 - C_1 E = 0 \quad (21)$$

### 2.1.2 第二组压电陶瓷元件开路

在这种情况下,第二组压电陶瓷元件的两个电端 2-2' 处于开路状态,在其两个机械端  $nrn$  的反射机械阻抗为,

$$Z_{nm} = \frac{n_2^2}{j C_2} \quad (22)$$

利用相同的方法及步骤,可以得出在开路情况下换能器的共振及反共振频率方程,其具体的表达式与式(20)及式(21)类似,唯一不同之处需要把参数  $A$  的表达式换成下面的形式,

$$A = Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) \\ - \frac{[Z_{02}/\sin(p_2 k_{02} l_0) + n_2^2/(C_2)] [Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) + B]}{B + Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) - Z_{02}/\sin(p_2 k_{02} l_0) - n_2^2/(C_2)}$$

### 2.2 第二组压电陶瓷元件被激励

在这种情况下,第二组压电陶瓷元件的两个电端 2-2' 与超声电源相连,而第一组压电陶瓷元件的两个电端 1-1' 分别处于短路或开路状态.

#### 2.2.1 第一组压电陶瓷元件短路

在这种情况下,第一组压电陶瓷元件的两个机械端  $mrn$  处于短路状态,其机械阻抗为,

$$Z_{nm} = 0 \quad (23)$$

利用图 2,可以得出第二组压电陶瓷元件两个机械端  $nrn$  之间的机械阻抗为,

$$Z_{nm} = jI - \frac{Z_{02}}{\sin(p_2 k_{02} l_0)} \\ + \frac{(Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) + C)(Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) + B)}{2 Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) + C + B} \Bigg] \\ = jE \quad (24)$$

式中,

$$E = - \frac{Z_{02}}{\sin(p_2 k_{02} l_0)} \\ + \frac{(Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) + C)(Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) + B)}{2 Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) + C + B} \quad (25)$$

$$C = Z_2 \tan(k_2 l_2/2)$$

$$- \frac{Z_2/\sin(k_2 l_2) (Z_2 \tan(k_2 l_2/2) + A)}{A + Z_2 \tan(k_2 l_2/2) - Z_2/\sin(k_2 l_2)} \quad (26)$$

$$A = Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2)$$

$$- \frac{Z_{01}/\sin(p_1 k_{01} l_0) [Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) + D]}{D + Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) - Z_{01}/\sin(p_1 k_{01} l_0)} \quad (27)$$

由此可以得出第二组压电陶瓷的输入电阻抗为,

$$Z_{i2} = j \frac{E}{n_2^2 - C_2 E} \quad (28)$$

利用式(28),可以得出换能器的共振频率方程为,

$$\frac{Z_{02}}{\sin(p_2 k_{02} l_0)} = \\ \frac{(Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) + C)(Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) + B)}{2 Z_{02} \tan(p_2 k_{02} l_0/2) + C + B} \quad (29)$$

反共振频率方程为,

$$n_2^2 - C_2 E = 0 \quad (30)$$

#### 2.2.2 第一组压电陶瓷元件开路

在这种情况下,第一组压电陶瓷元件机械端的反射阻抗为,

$$Z_{nm} = \frac{n_1^2}{j C_1} \quad (31)$$

利用相似的程序,也可以得出这种情况下的共振及反共振频率方程,其基本形式是类似的,不同之处需要将式(26)和(27)中的参数  $A$  换成下面的形式,

$$A = Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) \\ - \frac{[Z_{01}/\sin(p_1 k_{01} l_0) + n_1^2/(C_1)] [Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) + D]}{D + Z_{01} \tan(p_1 k_{01} l_0/2) - Z_{01}/\sin(p_1 k_{01} l_0) - n_1^2/(C_1)} \quad (32)$$

在上面的两种情况下,对应不同的电学边界条件,给出了换能器的共振及反共振频率方程.基于换能器的频率方程,当换能器的材料及几何尺寸确定以后,就

可以得出其共振及反共振频率。

### 3 换能器共振频率与其几何尺寸的关系研究

利用上面得出的频率方程,就可以得出换能器的共振频率及反共振频率,因而就可以探讨换能器的几何尺寸以及电学边界条件对换能器共振频率的影响。然而,由于换能器的频率方程是非常复杂的超越方程,其解析解是不可能得到的,因此必须利用数值计算方法。本文利用数学软件 MATHEMATICA 程序对换能器的频率方程进行了数值求解。图 3,图 4,图 5 及图 6 描述了换能器的共振及反共振频率与其几何尺寸之间的依赖关系。换能器的金属材料是杜拉铝,其材料参数为:

$$\begin{aligned} \rho_1 = \rho_2 = \rho_3 &= 2700\text{kg/m}^3, \\ E_1 = E_2 = E_3 &= 7.023 \times 10^{10}\text{N/m}^2, \\ c_1 = c_2 = c_3 &= (E_1/\rho_1)^{1/2} = 5100\text{m/s}. \end{aligned}$$

压电材料采用标准的 PZT-4,其参数为:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 7500\text{kg/m}^3, s_{33}^E = 15.5 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{N}, \\ c_{01} = c_{02} = c_{03} &= [1/(s_{33}^E - d_{33}^T)]^{1/2} = 2933\text{m/s}, \\ K_{33} &= 0.7, \frac{T}{s_{33}^E} = 1300, \rho_0 = 8.842 \times 10^{-12}\text{F/m}, \\ d_{33} &= 496 \times 10^{-12}\text{C/N}. \end{aligned}$$

换能器的几何尺寸为:

$$\begin{aligned} R_1 = 0.02\text{m}, l_1 = l_2 = l_3 &= 0.02\text{m}, l_0 = 0.005\text{m}, \\ p_1 = p_2 = 2, R_2 &= R_1, \rho = R_2/R_1 \end{aligned}$$

是换能器金属前盖板的两端半径比。图中  $f_r$  及  $f_a$  分别表示换能器的共振及反共振频率。

由上述结果可以看出,当换能器的纵向尺寸固定以后,换能器的横向尺寸影响换能器的共振频率。在电端短路的情况下,换能器的两个共振频率是相同的;而在电端开路的情况下,换能器的两个反共振频率是相

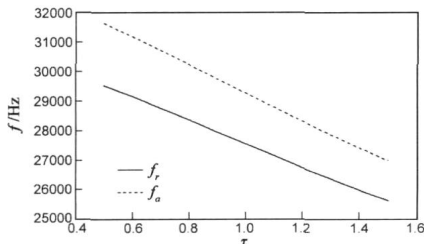


图3 换能器的共振及反共振频率与其半径比的依赖关系 (第一组压电陶瓷被激励, 第二组压电陶瓷短路)

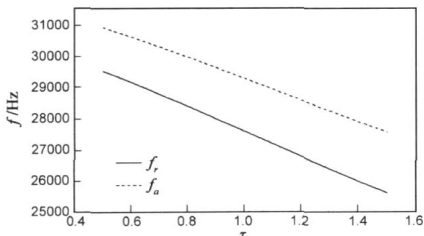


图4 换能器的共振及反共振频率与其半径比的依赖关系 (第二组压电陶瓷被激励, 第一组压电陶瓷短路)

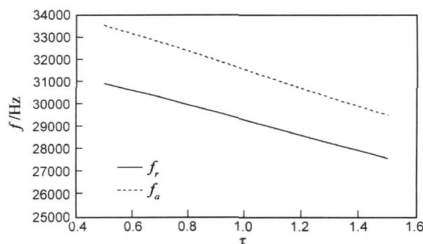


图5 换能器的共振及反共振频率与其半径比的依赖关系 (第一组压电陶瓷被激励, 第二组压电陶瓷开路)

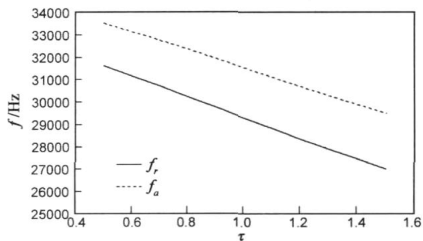


图6 换能器的共振及反共振频率与其半径比的依赖关系 (第二组压电陶瓷被激励, 第一组压电陶瓷开路)

同的。在同样的几何尺寸下,电端开路时的共振及反共振频率大于电端短路时的共振及反共振频率。在两种电学边界条件下,换能器的共振及反共振频率与几何尺寸之间的依赖关系是相似的,即当换能器前圆锥盖板的半径比增大时,换能器的共振及反共振频率总是降低的。

根据上述分析可以看出,具有两组压电陶瓷激励元件的夹心式换能器具有两个共振频率。当换能器的几何尺寸及电学边界条件不同时,换能器的共振频率是不同的。因此,通过合理选择换能器的几何尺寸和电学边界条件,可以改变换能器的共振频率特性,从而设计具有多个频率或宽频带的换能器。

### 4 实验

为了验证文中的理论分析,设计并加工了三个具有两组压电陶瓷激励元件的夹心式换能器,其几何尺寸如表 1 所示。利用 Agilent 4294A 精密阻抗分析仪对换能器的共振频率进行了测试,结果见表 2 及表 3。表中  $f_{r1}, f_{a1}$  和  $f_{r1m}, f_{a1m}$  表示当第一组压电陶瓷元件被激发时,换能器共振及反共振频率的理论计算及实验测量值;  $f_{r2}, f_{a2}$  和  $f_{r2m}, f_{a2m}$  表示当第二组压电陶瓷元件被激发时,换能器共振及反共振频率的理论计算及实验测量值。  $r_1 = |f_{r1} - f_{r1m}|/f_{r1m}, a_1 = |f_{a1} - f_{a1m}|/f_{a1m}, r_2 = |f_{r2} - f_{r2m}|/f_{r2m}, a_2 = |f_{a2} - f_{a2m}|/f_{a2m}$ 。

表 1 具有两组压电陶瓷元件的夹心式换能器的几何尺寸

No.	$l_1$ (mm)	$l_2$ (mm)	$l_3$ (mm)	$R_1$ (mm)	$R_2$ (mm)	$l_0$ (mm)	$p_1$	$p_2$
1	20	20	20	20	16	0.8	5	2 2
2	20	20	20	20	20	1.0	5	2 2
3	20	20	20	20	26	1.3	5	2 2

表 2 电端短路时换能器共振及反共振频率的理论及实验测试值

No.		$f_{r1}$ (Hz)	$f_{ar1}$ (Hz)	$f_{r2}$ (Hz)	$f_{ar2}$ (Hz)	$f_{r1m}$ (Hz)
1	0.8	28396	30248	28396	29973	27494
2	1.0	27588	29287	27589	29287	26340
3	1.3	26388	27881	26388	28245	25119
$f_{ar1m}$ (Hz)	$f_{r2m}$ (Hz)	$f_{ar2m}$ (Hz)	$r_1$ (%)	$a_1$ (%)	$r_2$ (%)	$a_2$ (%)
28772	27241	28326	3.28	5.12	4.24	5.81
28112	26737	28269	4.74	4.18	3.19	3.60
26148	24897	26973	5.05	6.63	5.97	4.72

表 3 电端开路时换能器共振及反共振频率的理论及实验测试值

No.		$f_{r1}$ (Hz)	$f_{ar1}$ (Hz)	$f_{r2}$ (Hz)	$f_{ar2}$ (Hz)	$f_{r1m}$ (Hz)
1	0.8	29973	32371	30248	32371	28694
2	1.0	29287	31538	29287	31538	27836
3	1.3	28245	30291	27881	30291	26779
$f_{ar1m}$ (Hz)	$f_{r2m}$ (Hz)	$f_{ar2m}$ (Hz)	$r_1$ (%)	$a_1$ (%)	$r_2$ (%)	$a_2$ (%)
30558	28791	3667	4.46	5.93	5.06	5.56
29639	28052	29898	5.21	6.41	4.40	5.49
28967	26476	28823	5.47	4.57	5.31	5.09

从表中数据可以看出,换能器共振频率的理论计算值与测试值基本符合。频率的测试误差主要在于以下几个方面:(1)换能器材料参数的实际值与标称值不同。在上面的理论计算及设计中,所采用的换能器各组成部分的材料参数都是选自传统教科书中的数据,而实际设计的换能器的材料参数与这些标称值是有一定的差别的。为了尽量消除材料参数在换能器设计过程中带来的误差,最好对换能器各组成部分的材料参数,如声速、密度以及泊松系数等进行实际测试,然后利用测试得出的数据进行设计和计算;(2)理论计算未考虑换能器中预应力螺栓以及轴向预应力的影响,而在实际设计的换能器中,换能器中的轴向预应力是客观存在的。在本文设计的换能器中,换能器的各组成部分是通过中心预应力螺栓紧密地结合在一起的,预应力螺栓的作用是提供一个适当大小的轴向应力,以确保换能器中的压电陶瓷元件在膨胀时不发生破裂。理论及实验皆已证明,换能器的预应力大小不但影响换能器的共振频率,而且影响换能器的损耗及效率。实验已经证实,为了尽量减少预应力对换能器共振频率的影响,预应力应尽量大一些,但要保证不能使换能器中的压电陶瓷元件发生退机化。另外,在实际设计的换能器中,预应力螺栓的材料与换能器中金属盖板的材料是不同的,而在理论计算中并未考虑这一因素,因而也会造成一定的频率误差;(3)在换能器的理论分析及设计中,忽略了换能器中的机械及介电损耗的影响,而在实际的换能器中,各种损耗,例如金属及压电材料中的内耗产生的机械损耗、压电陶瓷中的漏电流产生的介电损耗、以及在换能器各组成部分的界面之间存在的声

波反射而出现的界面损耗等,是客观存在的。所有这些损耗都将引起换能器共振频率等参数的变化,从而导致理论值与实验值的不一致。

在上面的分析中,重点探讨了具有两组压电陶瓷元件的夹心式换能器的频率特性,以及换能器的几何尺寸和电学边界条件对其共振及反共振频率的影响。理论及实验结果表明,具有两组压电陶瓷元件的换能器可以产生两组不同的共振及反共振频率,而这两组频率的差值与换能器的几何尺寸和电学边界条件有关。因此,借助于改变换能器的几何尺寸和电学边界条件,可以实现换能器的复频工作或者宽频带工作。

目前,随着超声技术的发展,对复频以及宽频换能器的需求越来越多。在精密超声清洗技术中,利用复频换能器,借助于电子扫频技术,可以避免传统清洗技术中的清洗死点,提高清洗质量。在超声化学反应中,不同的化学反应存在一些最佳的反应条件,而超声频率是一个重要的参数。利用复频换能器可以在不改变换能器实际设计的情况下,在一定频率范围内利用一个换能器来探讨超声频率对化学反应的影响,避免了传统方法中需要采用多个不同频率超声换能器的情况,节约了成本和时间。目前,相对于传统的单频换能器而言,有关复频和宽频超声换能器的应用技术还不够普及,但可以预计,随着复频、宽频以及可调频率超声换能器技术的发展及完善,这一新兴的超声换能器技术必将在越来越多的超声技术中获得广泛的应用。

## 5 结论

本文研究了具有两组压电陶瓷激励元件的夹心式换能器,得出了其频率设计方程,探讨了换能器的共振及反共振频率与其几何尺寸和电学边界条件之间的依赖关系。总结全文可得以下结论。

(1) 对应每一振动阶次,具有两组压电陶瓷元件的夹心式换能器存在两个共振反共振频率。

(2) 换能器的共振频率不仅依赖换能器的纵向尺寸,还与其横向尺寸及电学边界条件有关。

(3) 在电端短路的情况下,换能器的两个共振频率是相同的,但换能器的两个反共振频率则不相同;在电端开路的情况下,换能器的两个反共振频率是相同的,而共振频率则是不相同的。

(4) 在同样的几何尺寸下,电端开路时的共振及反共振频率大于电端短路时的共振及反共振频率。在两种电学边界条件下,换能器的共振及反共振频率与几何尺寸之间的依赖关系是相似的,即当换能器前圆锥盖板的半径比增大时,换能器的共振及反共振频率总是降低的。

(5) 本文研究的具有两组压电陶瓷元件的换能器

可用于复频和扫频超声清洗技术中以及一些需要研究超声频率对不同超声处理过程影响的应用技术中,例如声化学反应、超声中药提取等。

(6) 复频换能器是一种新型的超声换能器,目前的研究工作主要还是处于实验室阶段。为了进一步提高其性能,需要从多个方面开展系统深入的理论与实验研究工作。目前,有关该领域的一些重要的研究工作包括,换能器的多模式耦合及相互作用、不同振动模式的有效激励和电匹配、以及换能器的几何尺寸和形状对其共振频率、频带宽度和电声效率的影响等。

#### 参考文献:

- [1] Johnson M P. Velocity control and mechanical impedance of single degree of freedom electromechanical vibrators [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1988, 84(6): 1994 - 2001.
- [2] Crombrugge M, Thompson W. Optimization of the transmitting characteristics of a Tonpiliz-type transducer by proper choice of impedance matching layers [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1985, 77(2): 747 - 752.
- [3] 隆志力, 吴运新, 韩雷, 钟掘. 热超声倒装键合换能系统多模态振动与有限元分析 [J]. 电子学报, 2008, 36(2): 255 - 260.  
Long Zhili, Wu Yunxin, Han Lei, Zhong Jue. Multiple modal vibration and FEM analysis of ultrasonic transducer for thermsonic flip chip bonding [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(2): 255 - 260. (in Chinese)
- [4] 林书玉, 曹辉. 一种新型的径向振动高频压电陶瓷复合超声换能器 [J]. 电子学报, 2008, 36(5): 1004 - 1008.  
Lin Shuyun, Cao Hui. A new type of piezoelectric composite transducers with high frequency in radial vibration [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(5): 1004 - 1008. (in Chinese)
- [5] 杨永德, 张云电. 高效率压电陶瓷超声推挤加工装置研究 [J]. 电子学报, 2005, 33(11): 1989 - 1991.  
Yang Yongde, Zhang Yundian. Investigation of high efficient piezoceramics ultrasonic broaching equipment [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(11): 1989 - 1991. (in Chinese)
- [6] Pugin B. Qualitative characterization of ultrasound reactors for heterogeneous sonochemistry [J]. Ultrasonics, 1987, 25(1): 49 - 55.
- [7] Beckett M A, et al. Impact of ultrasonic frequency on aqueous sonoluminescence and sonochemistry [J]. J. Phys. Chem. A, 2001, 105(15): 3796 - 3802.
- [8] Lin S Y. Effect of electric load impedances on the performance of sandwich piezoelectric transducers [J]. IEEE Transactions on UFFC, 2004, 51(10): 1280 - 1286.
- [9] Hasan A B, et al. Factors which determine the tunable frequency range of tunable transducers [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1996, 100(2): 840 - 847.
- [10] Coates R and Mathams R F. Design of matching networks for acoustic transducers [J]. Ultrasonics, 1988, 26(2): 59 - 64.
- [11] Hossack J A, Auld A. Improving the characteristics of a transducer using multiple piezoelectric layers [J]. IEEE Transactions on UFFC, 1993, 40(2): 131 - 139.

#### 作者简介:



林书玉 男, 教授, 博士研究生导师。1962年出生于山东省莱州市, 2002年于日本东京工业大学获得工学博士学位。主要从事压电陶瓷超声换能器以及超声电子学等方面的研究工作。  
E-mail: sylin@snnu.edu.cn