

# 一种新型的径向振动高频压电陶瓷复合超声换能器

林书玉, 曹 辉

(陕西师范大学应用声学研究所, 陕西西安 710062)

**摘 要:** 本文研究了一种新型的径向振动压电陶瓷高频复合超声换能器. 该换能器由一个压电陶瓷圆环和一个嵌于其内部的金属圆盘复合而成. 首先对压电陶瓷圆环及金属圆盘的径向振动进行了简单分析, 推出了其机电等效电路和共振频率方程, 分析了压电陶瓷圆环的几何尺寸对其共振及反共振频率的影响. 在此基础上, 分析了由压电陶瓷圆环和金属圆盘组成的复合换能器的径向振动, 得出了其复合机电等效电路和共振频率方程. 研究分析表明, 对于具有相同外半径的压电陶瓷圆盘和压电陶瓷圆环, 压电陶瓷圆盘的径向振动共振频率高于压电陶瓷圆环的径向共振频率, 并且, 压电陶瓷圆环的内半径越大, 其径向共振频率越低. 当在压电陶瓷圆环内部嵌入一金属圆盘而组成一径向复合超声换能器时, 其径向共振频率高于压电陶瓷圆盘的径向共振频率, 从而达到了提高换能器共振频率的目的. 研制了一些径向复合高频超声换能器, 并对其共振频率进行了测试, 测试数据证明了理论结果的正确性.

**关键词:** 径向振动; 机电等效电路; 压电陶瓷; 高频超声换能器; 共振频率

**中图分类号:** O426.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)05-1004-05

## A New Type of Piezoelectric Composite Transducers with High Frequency in Radial Vibration

LIN Shuryu, CAO Hui

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

**Abstract:** A new type of piezoelectric composite ultrasonic transducers with high frequency in radial vibration is studied. It is composed of a piezoelectric ceramic ring and a metal disk which is inserted in the inner of the ceramic ring. First, the radial vibration of a piezoelectric ring and a metal disk is analyzed; its electro-mechanical equivalent circuit and the resonance frequency equation are obtained. It is illustrated that when the radius ratio is increased, the resonance and anti-resonance frequency of a piezoelectric ceramic ring is decreased. This means that the resonance frequency of a piezoelectric disk is larger than that of a piezoelectric ring with the same outer radius. Then, the radial vibration of the composite transducer is studied; its compound electro-mechanical equivalent circuit and the frequency equation are given. It is shown that when a metal disk is inserted into the center of a piezoelectric ring, its resonance frequency is higher than that of a piezoelectric ring or a disk. This means that the composite radial piezoelectric transducer can produce radial vibration at high resonance frequency. Experiments show that the measured resonance frequency is in a good agreement with the theoretical results.

**Key words:** radial vibration; electro-mechanical equivalent circuit; piezoelectric ceramic; transducer with high frequency; resonance frequency

## 1 引言

压电陶瓷振子, 例如压电陶瓷圆盘、压电陶瓷圆环以及压电陶瓷圆管等, 是超声及水声换能器、压电陶瓷滤波器、压电传感器、压电谐振器以及压电陶瓷变压器等器件的主要组成部分. 对于不同的应用, 压电陶瓷振子的振动模式是不同的, 常用的压电陶瓷振子的振动模式包括伸缩振动模式、剪切振动模式以及弯曲振动模式

等<sup>[1~6]</sup>. 一般情况下, 压电陶瓷振子的振动模式主要是由振子的几何形状、极化方向以及外加电场的激励方向所决定的. 当压电陶瓷振子的振动模式及几何尺寸给定以后, 其共振频率基本上随之确定. 如果需要改变压电陶瓷振子的共振频率, 就必须改变振子的几何尺寸. 例如, 对于压电陶瓷薄圆环的径向振动, 其共振频率主要由圆环的半径所决定, 半径越大共振频率越低.

径向振动压电陶瓷圆盘和圆环是超声及水声技术

中比较常用的压电器件,既可以作为压电陶瓷材料参数的标准测试振子,也可以用作换能器的有源器件.文献[7,8]曾对压电陶瓷圆环的径向振动进行了探讨,得出了其共振频率方程.最近,在水声及超声领域,一种称为钹式换能器的模式转换型换能器受到了人们的重视<sup>[9~11]</sup>.钹式换能器由两片金属平顶锥壳夹着一片压电陶瓷圆盘构成.当压电陶瓷圆盘被激励而产生径向振动时,通过金属平顶锥壳与压电陶瓷的耦合作用可将径向振动转换为金属平顶锥壳的弯张振动模式,并产生较大的轴向位移.

针对钹式换能器中压电陶瓷圆盘的径向振动,我们设想可否将钹式换能器中的压电陶瓷圆盘换成压电陶瓷圆环或者压电陶瓷圆环与金属圆盘的复合体,目的在于能够对钹式换能器的性能改善有所帮助.基于这一考虑,本文提出了一种新的径向振动压电陶瓷复合超声换能器,得出了其机电等效电路及频率方程.分析表明,与具有相同外半径的压电陶瓷圆盘或压电陶瓷圆环相比,由压电陶瓷圆环与金属圆盘组成的复合换能器具有更高的共振及反共振频率.

## 2 径向振动压电陶瓷高频超声换能器的理论分析

图1所示是一个由压电陶瓷圆环和金属圆盘组成的径向复合高频超声换能器.其中金属圆盘的半径和厚度分别是 $R_1$ 及 $h$ ,厚度方向极化的压电陶瓷圆环的内外半径及厚度分别是 $R_1$ ,  $R_2$ 及 $h$ ,  $E_3$ 是外部激励电场.在外部电场的激励下,换能器可能产生两种振动模式的振动,分别是径向振动及厚度振动.当换能器的半径远大于其厚度时,径向振动的共振频率远小于厚度振动的共振频率.在下面的分析中,将对其径向振动进行分析.

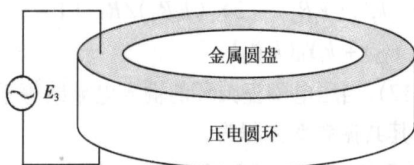


图1 压电陶瓷圆环和金属圆盘组成的径向复合高频超声换能器

### 2.1 压电陶瓷薄圆环的径向振动及其机电等效电路

图2所示是一个厚度方向极化的压电陶瓷薄圆环,其中 $F_{r1}$ ,  $v_{r1}$ 及 $F_{r2}$ ,  $v_{r2}$ 分别是压电陶瓷圆环内外表面的径向外力及振动速度.对于薄圆环,其径向振动的运动

$$T_r = v_{r2} \cdot \frac{J_1(k_{r0}R_1)[k_{r0}Y_0(k_{r0}r) - Y_1(k_{r0}r)(1 - v_{12})/r] - Y_1(k_{r0}R_1)[k_{r0}J_0(k_{r0}r) - J_1(k_{r0}r)(1 - v_{12})/r]}{j\omega[J_1(k_{r0}R_2)Y_1(k_{r0}R_1) - J_1(k_{r0}R_1)Y_1(k_{r0}R_2)]s_{11}^E(1 - v_{12}^2)} + v_{r1} \cdot \frac{J_1(k_{r0}R_2)[k_{r0}Y_0(k_{r0}r) - Y_1(k_{r0}r)(1 - v_{12})/r] - Y_1(k_{r0}R_2)[k_{r0}J_0(k_{r0}r) - J_1(k_{r0}r)(1 - v_{12})/r]}{j\omega[J_1(k_{r0}R_2)Y_1(k_{r0}R_1) - J_1(k_{r0}R_1)Y_1(k_{r0}R_2)]s_{11}^E(1 - v_{12}^2)} - \frac{d_{31}E_3}{s_{11}^E + s_{12}^E} \quad (10)$$

另外,由图2可以看出,在压电陶瓷圆环的内外表面,径向外力满足的边界条件为: $F_{r1} = -S_1T_r|_{r=R_1}$ ,  $F_{r2} =$

方程为

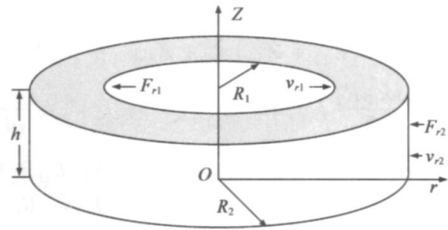


图2 厚度方向极化的压电陶瓷薄圆环

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial T_r}{\partial r} + \frac{T_r - T_\theta}{r} \quad (1)$$

其中 $\rho_0$ 是压电材料的密度,  $\xi = \xi_0(r) \exp(j\omega t)$ 是径向振动位移,  $T_r$ 及 $T_\theta$ 为径向及切向应力,  $r$ 是径向坐标,  $t$ 是时间.另外,压电圆环径向振动的压电方程为,

$$S_r = s_{11}^E T_r + s_{12}^E T_\theta + d_{31} E_3 \quad (2)$$

$$S_\theta = s_{12}^E T_r + s_{11}^E T_\theta + d_{31} E_3 \quad (3)$$

$$D_3 = d_{31} T_r + d_{31} T_\theta + \epsilon_{33}^T E_3 \quad (4)$$

式中 $s_{ij}^E$  ( $i, j = 1, 2$ )是弹性柔顺常数,  $S_r$ 及 $S_\theta$ 表示径向及切向应变,  $d_{31}$ 是压电应变常数,  $E_3$ 及 $D_3$ 分别是电场强度及电位移,  $\epsilon_{33}^T$ 是介电常数.利用上述公式,径向运动方程(1)可化为下面的形式,

$$d^2 \xi_0 / dr^2 + (d\xi_0 / dr) / r - \xi_0 / r^2 + k_{r0}^2 \xi_0 = 0 \quad (5)$$

其中 $k_{r0} = \omega / V_{r0}$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $V_{r0} = \left[ \frac{1}{s_{11}^E \rho_0 (1 - v_{12}^2)} \right]^{1/2}$ ,  $V_{r0}$ 是压电陶瓷圆环中的径向振动速度,  $v_{12} = -s_{12}^E / s_{11}^E$ .方程(5)是一个贝塞尔方程,其解为,

$$\xi_0(r) = A_0 J_1(k_{r0}r) + B_0 Y_1(k_{r0}r) \quad (6)$$

其中 $A_0$ 及 $B_0$ 是待定常数.由上式可得出径向振动速度 $v_{r0}$ 为,

$$v_{r0} = j\omega [A_0 J_1(k_{r0}r) + B_0 Y_1(k_{r0}r)] \quad (7)$$

由图2可以看出,  $v_{r0}|_{r=R_1} = v_{r1}$ ,  $v_{r0}|_{r=R_2} = -v_{r2}$ .由此可以得出待定常数的表达式为,

$$A_0 = -\frac{1}{j\omega} \cdot \frac{v_{r2} Y_1(k_{r0}R_1) + v_{r1} Y_1(k_{r0}R_2)}{J_1(k_{r0}R_2) Y_1(k_{r0}R_1) - J_1(k_{r0}R_1) Y_1(k_{r0}R_2)} \quad (8)$$

$$B_0 = \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{v_{r2} J_1(k_{r0}R_1) + v_{r1} J_1(k_{r0}R_2)}{J_1(k_{r0}R_2) Y_1(k_{r0}R_1) - J_1(k_{r0}R_1) Y_1(k_{r0}R_2)} \quad (9)$$

利用上述各式,可以得出压电陶瓷圆环中径向应力 $T_r$ 的表达式为,

$-S_2 T_r|_{r=R_2}$ . 其中 $S_1 = 2\pi R_1 h$ ,  $S_2 = 2\pi R_2 h$ .  $S_1$ 和 $S_2$ 分别是压电陶瓷圆环的内外表面积.利用上述的径向外

力边界条件, 可得下面式子,

$$F_{r1}^{\parallel} = (Z_{1p} + Z_{3p})v_{r1}' + Z_{3p}v_{r2}' + N_{31}V_3 \quad (11)$$

$$F_{r2}^{\parallel} = (Z_{2p} + Z_{3p})v_{r2}' + Z_{3p}v_{r1}' + N_{31}V_3 \quad (12)$$

其中  $F_{r1}^{\parallel} = \frac{\mathcal{T}_{kr0}R_2}{2}F_{r1}$ ,  $F_{r2}^{\parallel} = \frac{\mathcal{T}_{kr0}R_1}{2}F_{r2}$ ,  $v_{r1}' = \frac{2}{\mathcal{T}_{kr0}R_2}v_{r1}$ ,

$$Z_{1p} = \frac{\pi^2(k_{r0}R_2)^2Z_{01}}{4j} \left[ \frac{Y_1(k_{r0}R_2)J_0(k_{r0}R_1) - J_1(k_{r0}R_2)Y_0(k_{r0}R_1)}{J_1(k_{r0}R_2)Y_1(k_{r0}R_1) - J_1(k_{r0}R_1)Y_1(k_{r0}R_2)} + \frac{1-v_{12}}{k_{r0}R_1} \right] - j \frac{Z_{01}}{2} \frac{\mathcal{T}_{kr0}R_2}{J_1(k_{r0}R_2)Y_1(k_{r0}R_1) - J_1(k_{r0}R_1)Y_1(k_{r0}R_2)} \quad (13)$$

$$Z_{2p} = \frac{\pi^2(k_{r0}R_1)^2Z_{02}}{4j} \left[ \frac{Y_1(k_{r0}R_1)J_0(k_{r0}R_2) - J_1(k_{r0}R_1)Y_0(k_{r0}R_2)}{J_1(k_{r0}R_2)Y_1(k_{r0}R_1) - J_1(k_{r0}R_1)Y_1(k_{r0}R_2)} - \frac{1-v_{12}}{k_{r0}R_2} \right] - j \frac{Z_{02}}{2} \frac{\mathcal{T}_{kr0}R_1}{J_1(k_{r0}R_2)Y_1(k_{r0}R_1) - J_1(k_{r0}R_1)Y_1(k_{r0}R_2)} \quad (14)$$

$$Z_{3p} = j \frac{Z_{01}}{2} \frac{\mathcal{T}_{kr0}R_2}{J_1(k_{r0}R_2)Y_1(k_{r0}R_1) - J_1(k_{r0}R_1)Y_1(k_{r0}R_2)} \quad (15)$$

其中  $Z_{01} = \rho_0 V_{r0} S_1$ ,  $Z_{02} = \rho_0 V_{r0} S_2$ . 令流过压电陶瓷圆环的电流为  $I_3$ , 利用公式  $I_3 = dQ/dt = j\omega Q$ ,  $Q = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} D_3 r dr$ , 可以得出电流  $I_3$  的表达式为

$$I_3 = j\omega C_{0r} V_3 - N_{31}(v_{r1}' + v_{r2}') \quad (16)$$

式中  $C_{0r} = \frac{\mathcal{E}_{33}^x S}{h} \cdot \left[ 1 - \frac{2d_{31}^2}{\mathcal{E}_{33}^x (s_{11}^E + s_{12}^E)} \right]$  为静态电容,  $S = \pi$

$(R_2^2 - R_1^2)$  是压电陶瓷圆环的横截面积. 利用式 (11), (12) 及 (16), 可以得出径向振动压电陶瓷圆环的机电等效电路如图 3 所示. 图中,  $F_{r1}^{\parallel} = n_1 F_{r1}$ ,  $F_{r2}^{\parallel} = n_2 F_{r2}$ ,  $v_{r1}' =$

$$Y = \frac{j\omega \mathcal{E}_{33}^x S}{h} \times \left\{ 1 - k_p^2 + k_p^2 \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \times \frac{[R_2 J_1(k_r R_2) - R_1 J_1(k_r R_1)] [Y(R_1) - Y(R_2)] + [R_2 Y_1(k_r R_2) - R_1 Y_1(k_r R_1)] [J(R_2) - J(R_1)]}{J(R_2) Y(R_1) - J(R_1) Y(R_2)} \right\} \quad (17)$$

式中  $k_p^2 = \frac{2d_{31}^2}{\mathcal{E}_{33}^x (s_{11}^E + s_{12}^E)}$ ,  $k_p$  是径向振动压电陶瓷圆环的

机电耦合系数.  $J(R_1)$ ,  $J(R_2)$ ,  $Y(R_1)$ ,  $Y(R_2)$  是四个引入的函数, 其具体表达式为,

$$J(R_1) = [k_r J_0(k_r R_1) - 2J_1(k_r R_1)/R_1] (1 - v_{12}) / (1 + v_{12}) + k_r J_0(k_r R_1)$$

$$J(R_2) = [k_r J_0(k_r R_2) - 2J_1(k_r R_2)/R_2] (1 - v_{12}) / (1 + v_{12}) + k_r J_0(k_r R_1)$$

$$Y(R_1) = [k_r Y_0(k_r R_1) - 2Y_1(k_r R_1)/R_1] (1 - v_{12}) / (1 + v_{12}) + k_r Y_0(k_r R_1)$$

$$1 - k_p^2 + k_p^2 \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \times \frac{[R_2 J_1(k_r R_2) - R_1 J_1(k_r R_1)] [Y(R_1) - Y(R_2)] + [R_2 Y_1(k_r R_2) - R_1 Y_1(k_r R_1)] [J(R_2) - J(R_1)]}{J(R_2) Y(R_1) - J(R_1) Y(R_2)} = 0 \quad (19)$$

令  $\tau = R_1/R_2$ , 利用式 (18) 及 (19), 可以得出径向振动压电陶瓷圆环的共振及反共振频率与其半径比的关系曲线如图 4 所示, 图中  $f_r$  及  $f_a$  分别表示其共振及反共振

$v_{r2}' = \frac{2}{\mathcal{T}_{kr0}R_1}v_{r2}$ ;  $N_{31} = \pi^2 k_{r0}R_1R_2 \cdot \frac{d_{31}}{s_{11}^E + s_{12}^E}$ ,  $N_{31}$  是径向振动压电陶瓷圆环的机电转换系数.  $V_3 = E_3 h$ ,  $V_3$  压电陶瓷两端的电压.  $Z_{1p}$ ,  $Z_{2p}$ ,  $Z_{3p}$  三个机械阻抗, 其具体表达式为,

$$= v_{r1}/n_1, v_{r2}' = v_{r2}/n_2, n_1 = \frac{\mathcal{T}_{kr0}R_2}{2}, n_2 = \frac{\mathcal{T}_{kr0}R_1}{2}.$$

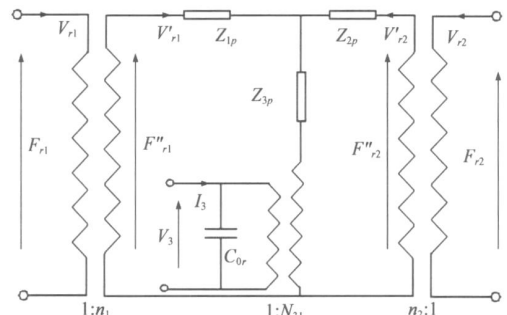


图 3 径向振动压电陶瓷薄圆环的机电等效电路

利用图 3, 当压电陶瓷圆环的内外表面空载时,  $F_{r1}$  及  $F_{r2}$  等于零, 其机械端短路, 由此可得其输入电导纳为,

$$Y(R_2) = [k_r Y_0(k_r R_2) - 2Y_1(k_r R_2)/R_2] (1 - v_{12}) / (1 + v_{12}) + k_r Y_0(k_r R_2)$$

利用式 (17), 当压电陶瓷圆环的输入电导纳等于无穷大时, 可得其共振频率方程为,

$$\frac{k_r R_2 J_0(k_r R_2) - (1 - v_{12}) J_0(k_r R_2)}{k_r R_1 J_0(k_r R_1) - (1 - v_{12}) J_1(k_r R_1)} = \frac{k_r R_2 Y_0(k_r R_2) - (1 - v_{12}) Y_0(k_r R_2)}{k_r R_1 Y_0(k_r R_1) - (1 - v_{12}) Y_1(k_r R_1)} \quad (18)$$

当压电陶瓷圆环的输入电导纳等于零时, 可得其反共振频率方程为,

频率.

由图 4 可以看出, 当半径比增大时, 压电陶瓷圆环的共振及反共振频率降低. 这就意味着压电陶瓷实心

圆盘(对应的半径比等于零)的共振频率高于具有相同外半径的压电陶瓷圆环的共振频率,压电陶瓷圆环的内半径越大,其共振频率越低。

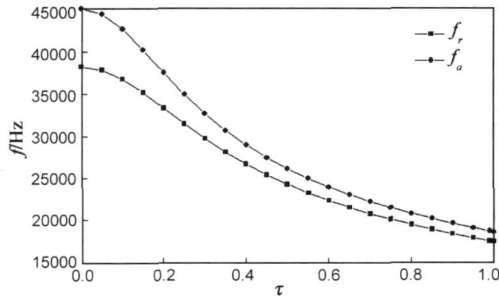


图4 径向振动压电陶瓷圆环的共振及反共振频率与其半径比的关系曲线

## 2.2 压电陶瓷圆环与金属圆盘组成的复合超声换能器的径向振动及其机电等效电路

利用上面得出的关于压电陶瓷圆环的机电等效电路以及金属圆盘的径向振动理论<sup>[12]</sup>,可以得出压电陶瓷圆环与金属圆盘组成的复合超声换能器的机电等效电路如图5所示。

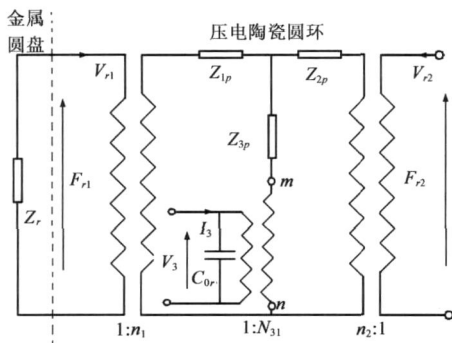


图5 压电陶瓷圆环与金属圆盘组成的复合超声换能器的机电等效电路

图中虚线右侧部分表示压电陶瓷圆环,虚线的左侧部分表示径向振动的金属圆盘。 $Z_r = \frac{Z_1}{j}$ 。 $\left[ \frac{J_0(kR_1)}{J_1(kR_1)} - \frac{1-v}{kR_1} \right]$ 表示金属圆盘径向振动的机械阻抗, $Z_1 = \rho V_r S_1$ ,  $S_1 = 2\pi R_1 h$ ,  $V_r = \left[ \frac{E}{\rho(1-v)^2} \right]^{1/2}$ ,  $V_r$ 表示金属圆盘中的径向振动传播速度, $E$ ,  $\rho$ ,  $v$ 分别表示金属圆盘材料的杨氏模量,密度及泊松比。利用图5,当换能器的外表面空载时, $F_{r2} = 0$ ,由此可得其机械阻抗 $Z_m$ 及输入电阻抗 $Z_e$ 分别为,

$$Z_m = Z_{3p} + \frac{(Z_{1p} + n_1^2 Z_r) Z_{2p}}{Z_{1p} + n_1^2 Z_r + Z_{2p}} \quad (20)$$

$$Z_e = \frac{V_3}{I_3} = \frac{Z_m}{N_{31}^2 + j\omega C_0 Z_m} \quad (21)$$

由式(21),可以得出其共振频率方程 $Z_e = 0$ 及反共振频率方程 $Z_e = \infty$ 。利用共振及反共振频率方程,可以得出

复合超声换能器的共振及反共振频率与其半径比( $\tau = R_1/R_2$ )之间的理论关系如图6所示。值得指出的是,此时的半径 $R_1$ 表示金属圆盘的半径。

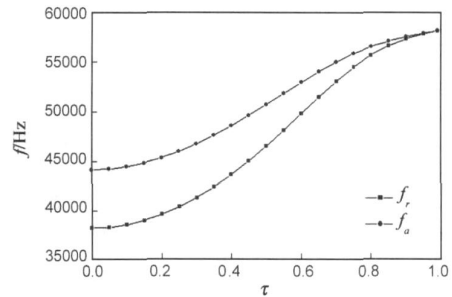


图6 压电圆环与金属圆盘组成的径向振动换能器的共振频率与其半径比之间的关系

图6压电圆环与金属圆盘组成的径向振动换能器的共振频率与其半径比之间的关系由图6可以看出,当径向复合超声换能器的半径比增大时,即金属圆盘的半径增大时,其径向共振及反共振频率升高,这意味着由压电陶瓷圆环和金属圆盘组成的径向复合超声换能器的共振频率高于具有相同外半径的压电陶瓷实心圆盘(半径比 $\tau = 0$ )的共振频率,也高于具有相同外半径的压电陶瓷圆环的共振及反共振频率。因此通过上述分析,我们可以得出如下结论:在不改变径向振动压电陶瓷圆环换能器的外半径的情况下,通过在压电陶瓷圆环内部增加一个金属圆盘,可以有效地提高换能器的共振频率,金属圆盘的半径越大,换能器的共振频率越高。

## 3 实验

为了验证文中得出的关于径向振动压电陶瓷复合超声换能器的设计理论,我们设计了一些压电陶瓷圆环和金属圆盘组成的复合超声换能器,并对其共振及反共振频率进行了测试。实验中所用的压电陶瓷圆环及金属圆盘的材料分别是PZT-4及45号钢,计算过程中采用的压电及金属材料参数的标称值为: $\rho_0 = 7500 \text{ kg/m}^3$ ,  $s_{11}^E = 12.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $s_{12}^E = -4.05 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $v_{12} = 0.33$ ,  $d_{31} = -123 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ ,  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 1300$ ,  $\epsilon_0 = 8.842 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ ,  $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ ,  $E = 2.09 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,  $v = 0.28$ 。为了便于比较,实验中选用的压电陶瓷圆盘及圆环具有相同的外半径及厚度。实验所用仪器为安捷伦公司的4294A Precision Impedance Analyzer,换能器的几何尺寸及理论计算和实验测试结果见表1所示。图中 $f_r$ 及 $f_a$ 是基于本文理论得到的换能器共振及反共振频率的计算值, $f_{mr}$ 及 $f_{ma}$ 是换能器共振及反共振频率的实验测试值。为便于进行比较,图中给出了三种径向振动压电陶瓷换能器的测试结果,这三种换能器分别是压电陶瓷实心圆盘,压电陶瓷圆环以及由压电陶瓷圆环和金属实心圆盘组成的径向振动复

## 合超声高频换能器.

表 1 径向振动压电陶瓷超声换能器的共振及反共振频率测试结果

换能器	$R_1$ (mm)	$R_2$ (mm)	$h$ (mm)	$f_r$ (Hz)	$f_a$ (Hz)	$f_{mr}$ (Hz)	$f_{ma}$ (Hz)
1 压电圆盘	0	20.0	5.0	57380	66795	56078	65143
2 压电圆盘	0	19.0	5.0	60400	70311	58462	68776
3 压电圆环	8.5	20.0	5.0	39068	42047	40451	42901
4 压电圆环	10.0	19.0	5.0	37484	40094	38201	40501
5 压电圆环 + 金属圆盘	8.5	20.0	5.0	66427	73642	64907	70033
6 压电圆环 + 金属圆盘	10.0	19.0	5.0	74760	81044	73051	75151

由表 1 中的理论及实验数据可以看出, 对于具有相同外半径的三类径向振动压电陶瓷超声换能器, 压电陶瓷圆环内部加金属圆盘组成的复合超声换能器的径向共振频率最高, 其次是实心压电陶瓷圆盘, 径向共振频率最低的是压电陶瓷圆环, 从而证实了压电陶瓷圆环加金属圆盘组成的复合超声换能器可以产生较高的共振频率, 而无需改变换能器的几何尺寸. 另外, 由表 1 中数据还可看出, 三类径向振动超声换能器的共振及反共振频率测试值与计算值符合很好, 从而也进一步证实了文中得出的关于压电陶瓷圆环与金属圆盘组成的复合超声换能器的设计理论的正确性. 关于共振及反共振频率的测试误差, 作者认为主要由以下原因造成. (1) 在理论计算中采用的压电陶瓷材料及金属材料的标称值与材料的实际值与差异. (2) 在压电陶瓷圆环与金属圆盘组成的复合超声换能器中, 二者的粘接程度可能会引起一部分频率误差.

另外, 关于径向振动高频压电陶瓷复合超声换能器的实际应用, 可概括为以下几个方面. (1) 作为一种新型的径向振动高频压电陶瓷换能器, 可用于压电陶瓷超声马达的定子, 同时也可以用于径向振动的压电致动器中. (2) 可用于水声及超声辐射器, 作为一种全方位的高频声波辐射源. (3) 本文提出的径向振动高频压电陶瓷换能器, 可用于钹式压电超声换能器的内部振源. 在相同的几何尺寸下, 利用文中提出的径向振动压电陶瓷复合超声换能器, 可以产生更高的共振频率.

## 4 结论

本文研究了一种由压电陶瓷圆环和嵌于其内部的金属圆盘组成的新型径向振动压电陶瓷高频超声换能器, 推出了其机电等效电路和共振频率方程, 分析了换能器的几何尺寸对其共振及反共振频率的影响. 研究表明, 对于具有相同外半径的压电陶瓷圆盘、压电陶瓷圆环以及由压电陶瓷圆环和金属圆盘组成的复合超声换能器, 它们的径向共振及反共振频率是不同的. 其中压电陶瓷实心圆盘的径向共振频率高于压电陶瓷圆环的径向共振频率, 压电圆环的内半径越大, 其径向共振

频率越低. 当在压电陶瓷圆环内部嵌入一金属圆盘而组成一径向复合换能器时, 其径向共振频率高于具有相同外半径的压电陶瓷圆盘的径向共振频率, 从而实现了在不改变换能器几何尺寸的情况下, 提高了换能器的共振频率. 同时实验测试数据也证明了理论结果的正确性.

## 参考文献:

- [1] Mason W P. Physical Acoustics[M]. Vol. 1, Part A, Academic Press, New York and London, 1964.
- [2] 张沛霖, 张仲渊. 压电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983. 178-208.
- [3] 王矜奉, 姜祖桐, 石瑞大. 压电振动[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 56-120.
- [4] 何芳钧. 压电陶瓷滤波器[M]. 北京: 科学出版社, 1980. 124-129.
- [5] 李远. 压电与铁电材料的测量[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 28-36.
- [6] 栾桂东, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
- [7] Stephenson C V. Radial vibrations in short, hollow cylinders of barium titanate[J]. J Acoust Soc Am, 1956, 28(1): 51-56.
- [8] Stephenson C V. High modes of radial vibrations in short hollow cylinders of barium titanate[J]. J Acoust Soc Am, 1956, 28(5): 928-929.
- [9] Tressler J F, Newnham R E. Capped ceramic underwater sound projector: The "cymbal" transducer[J]. J Acoust Soc Am, 1999, 105: 591-600.
- [10] Zhang J d, Hughes W J, Meyer Jr R J, Kenji U, Newnham R E. Cymbal array: a broad band sound projector[J]. Ultrasonics, 2000, 37: 523-529.
- [11] Sun C L, Guo S S, Li W P, Xing Z B, Liu G C, Zhao X Z. Displacement amplification and resonance characteristics of the cymbal transducers[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 121: 213-220.
- [12] 林书玉. 各向同性弹性薄圆盘的径向振动及其等效电路[J]. 陕西师范大学学报, 2001, 29(4): 31-35.

## 作者简介:



林书玉 男, 1963 年生于山东省莱州市, 教授, 博导, 2002 年 9 月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

曹 辉 男, 1969 年生于陕西省西安市, 副教授, 硕士研究生导师, 2004 年于陕西师范大学应用声学研究所获得理学博士学位. 主要从事超声马达以及激光超声方面的研究工作.

E-mail: caohui@snnu.edu.cn