

## 4 实验

为了验证上述理论的正确性,我们用 45 号钢加工了两个变幅杆,设计频率为 20kHz,粗段截面直径为 25mm,细段直径为 15mm 振动模式分别选二偶二偶组合,一奇一奇组合,从上表中可查得两段长为:二偶 77.4mm 和 62.6mm,一奇 54.5mm 和 44.6mm,测量其共振频率时为验证其准确度,我们不采用直接将变幅杆接到换能器上来测其共振频率的办法,而对变幅杆单独测试,采用一端以压电振动横向激发,另一端以压电拾振仪或静电拾振器接收,从灵敏电压表或示波器上判定变幅杆是否达到谐振。实验中两杆分别在频率为 20.6kHz 和 19.6kHz 时达谐振,可以看出上述方法虽有一定的近似,但却有较高的精确度,是一种行之有效的设计方法。

参考文献

- 1 姜健. 关中原译. 超声波焊接. 国防工业出版社, 1963: 196 ~ 208
- 2 赵继等. 超声振动切削系统弯曲振动刀杆的谐振模式. 声学学报, 1992; 17(1): 22 ~ 29
- 3 Eiji Mori et al. Ultrasonic International 1989 conference Proceedings. 256 ~ 261
- 4 林书玉. 夹心式弯曲振动换能器的研究. 声学技术, 1993; 12(3): 26 ~ 30
- 5 钱培风. 结构动力学. 中国工业出版社, 1966: 173 ~ 180
- 6 J. Miklowitz, Journal of Applied Mechanics, 1953; Dec: 511 ~ 514
- 7 林仲茂. 超声变幅杆的设计. 科学出版社, 1981
- 8 栾桂冬等. 压电换能器和换能器阵. 北京大学出版社, 1990: 231 ~ 241

## A3 夹心式压电超声扭转换能器的研制

林书玉 张福成 郭孝武

(陕西师范大学应用声学研究所, 西安 · 710062)

本文对夹心式压电超声扭转振动换能器进行了理论及实验研究, 得出了对称型扭转振动夹心换能器的共振频率设计方程, 给出了频率方程式中一些主要的物理量的具体表达式。在此基础上, 实际设计并制作了一个夹心扭转振动换能器, 并对其所有的电声参数进行了测试。

关键词: 夹心扭转振动换能器 频率方程 电声参数

## Design of sandwiched piezoelectric ultrasonic torsional transducer

LIN Shuyu ZHANG Fucheng GUO Xiaowu

(Applied Acoustics Institute, Shaanxi Teachers University, Xian · 710062)

The sandwiched piezoelectric ultrasonic torsional transducer was studied theoretically and experimentally. The resonance frequency equation for the symmetrical transducer was given, and the expressions for some important parameters of the torsional transducer were obtained. A transducer of this type was designed and made. The measured results for all its electro-mechanical parameters were given.

**Key words:** sandwiched torsional transducer, resonance frequency equation, electro-mechanical parameter

## 1 引言

夹心式扭转振动超声换能器是一种新型的功率超声换能器。随着超声技术的发展, 这种换能器在超声塑料焊接、超声加工、超声疲劳实验以及超声马达等方面获得了越来越多的应用。从原理上讲, 这种换

能器的理论及工程设计与一维纵向夹心式超声换能器相似。但在具体的设计及研制过程中, 尚有许多不同之处, 例如, 如何计算压电陶瓷晶片中扭转振动的传播速度以及怎样实现压电陶瓷圆环中的圆周方向极化等, 这些问题都对扭转换能器的具体设计及性

能改善有着很大的影响。因此有必要进一步从理论及实验方面加以深入探讨。本文首先根据纵向夹心换能器的一维设计理论得出扭转换能器的频率方程,然后对式中的有关性能参数进行探讨,并给出压电陶瓷晶片中扭转振动传播速度的精确及近似表达式。最后实际设计并制作了一个夹心式扭转振动超声换能器,并给出了该换能器有关的电声参数的实验结果。

## 2 夹心式扭转振动超声换能器实际设计中扭转振动速度的考虑

根据纵向换能器的一维设计理论,对于对称型均匀圆截面夹心式扭转换能器,其共振频率的设计方程为:

$$\operatorname{tg} k_0 l_0 \operatorname{otg} k_1 l_1 = Z_0 / Z_1 \quad (1)$$

式中  $l_0$  为换能器中圆周方向极化的压电陶瓷片总长度的一半,  $l_1$  为换能器前盖板或后盖板的长度,  $Z_0 = \rho_0 c_0 S_0$ ,  $Z_1 = \rho_1 c_1 S_1$ ,  $k_0 = \omega / c_0$ ,  $k_1 = \omega / c_1$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_1$ ,  $S_0$ ,  $S_1$  分别为压电陶瓷晶堆及换能器盖板的体密度及截面积,  $c_1$ ,  $c_0$  为扭转振动在均匀截面细杆及压电陶瓷晶堆中的传播速度,  $c_1 = (G_1 / \rho_1)^{1/2}$ ,  $G_1$  为换能器盖板材料的切变模量,对于  $c_0$ , 其表达式比较复杂。由文献 [1] 知,压电陶瓷片中扭转振动的传播速度不仅与其材料参数有关,而且与其截面形状有关,其具体表达式为:

$$c_0 = c_D [1 - (K_{15}^I)^2]^{1/2} \quad (2)$$

式中  $c_D = [1 / (S_{55}^D \rho_0)]^{1/2}$  称为压电陶瓷细长杆中扭转振动的传播速度,  $S_{55}^D$  为压电陶瓷的开路弹性常数,  $K_{15}^I$  为压电陶瓷细长棒扭转振动的机电耦合系数,其具体表达式为:

$$K_{15}^I = K_{15} / \tau \quad (3)$$

式中  $K_{15} = g_{15} / (S_{55}^E \beta_{11}^T)^{1/2}$  称为压电陶瓷矩形厚板的厚度剪切机电耦合系数,  $\tau$  是一个仅与压电陶瓷的截面形状有关的参数,称为截面扭转形状系数,其表达式为:

$$\tau = (S_0 I_p / W^2)^{1/2} \quad (4)$$

式中  $S_0 = \pi(R^2 - r^2)$ ,  $I_p = \pi(R^4 - r^4) / 2$  为压电陶瓷片的截面极惯性矩,  $W = \int r ds = 2\pi(R^3 - r^3) / 3$ ,  $R$  和  $r$  为压电陶瓷片的内外半径。把上述参数代入 (4) 式可得:

$$\tau = \left[ \frac{9(R^2 + r^2)(R + r)^2}{8(R^2 + Rr + r^2)^2} \right]^{1/2} \quad (5)$$

对于实心圆柱  $r/R = 0$ , 代入 (5) 式可得:

$$\tau = (9/8)^{1/2} \quad (6)$$

对于薄壁圆环,  $r/R = 1$ , 代入 (5) 式可得:

$$\tau = 1 \quad (7)$$

由此可得压电陶瓷晶片截面扭转形状系数的取值范围为:

$$1 \leq \tau \leq (9/8)^{1/2} \quad (8)$$

由 (8) 式可以看出,  $\tau$  的取值范围很窄, 即形状的影响很小。由此可以得出以下关系, 即  $\tau = 1$ ,  $K_{15}^I = K_{15}$ , 代入 (2) 式可得:

$$c_0 = c_D (1 - K_{15}^2)^{1/2} \quad (9)$$

由  $K_{15}$  的表达式, 上式可化为:

$$c_0 = [1 / (S_{55}^E \rho_0)]^{1/2} \quad (10)$$

(10) 式就是扭转振动在压电陶瓷晶堆中传播速度的近似表达式。对于一些要求比较严格的场合, 应利用扭转振动传播速度的精确表达式即 (2) 式, 此时压电陶瓷的截面形状及材料都影响其扭转振动传播速度。

## 3 实验

夹心式压电超声扭转振动换能器是一种新型的换能器, 有关的实验测量数据比较少。本文作者设计并制作了一个夹心扭转换能器, 并对其有关的性能参数进行了实验测试, 所得结果对于此类换能器的性能研究及探讨具有一定的参考指导作用。

### 3.1 夹心式扭转振动换能器的制作

本文研制的换能器属于对称型均匀截面扭转换能器。中心螺钉将前后金属圆柱与中间的压电晶片紧固在一起。换能器前后盖板的材料为杜拉铝, 其几何尺寸为:  $R = 5.5 \text{ mm}$ ,  $l = 14 \text{ mm}$ 。压电陶瓷为两片圆周方向极化的环形晶片, 其几何尺寸为  $R = 5 \text{ mm}$ ,  $r = 3 \text{ mm}$ ,  $l_0 = 2.8 \text{ mm}$ 。本文采用的圆周极化的压电陶瓷圆环是日本富士株式会社研制的, 每一个圆环由 4 片扇形组成, 其性能参数为:  $\rho_0 = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $K_{15} = 0.7$ ,  $N_{15} = 960$ ,  $d_{15} = 510 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ ,  $g_{15} = 36.4 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m/N}$ ,  $S_{55}^E = 38.46 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ 。

### 3.2 扭转振动换能器性能参数的测试

利用日本东京工业大学的换能器特性参数测试软件对试制的换能器进行了测试, 该测试软件可以自动测试换能器的频率特性及阻抗圆并能自动记录测试结果。测试仪器为惠普阻抗分析仪 (HP4194A Impedance/gain-phase analyser), 测试结果见图 1 及

图 2。图 1 所示为换能器的导纳及其相角的频率特性, 图 2 所示为换能器的导纳圆图。图中同时给出了换能器有关参数的测试值。在图 2 中,  $f_0$  为换能器的机械共振频率,  $f_1$  及  $f_2$  为半功率点频率,  $Q$  为换能器的空载机械品质因数,  $Y_{m0}$  为谐振时换能器的导纳,  $f_r$  及  $f_a$  为扭转变换能器的共振及反共振频率,  $C$  为低频电容,  $\tan\delta$  为换能器的介电损耗角正切。由上述实验结果, 还可以间接得出换能器其他的有关参数: 有效机电耦合系数  $K_{eff} = [1 - (f_r/f_a)^2]^{1/2} = 0.354$ , 频带宽度  $\Delta f = f_2 - f_1 = 0.0923\text{kHz}$ , 谐振阻抗  $R_m = 147.4\Omega$ , 动态电感  $L = 0.254\text{H}$ , 动态电容  $c = 61\text{pf}$ 。至此换能器的空载性能参数基本上完全确定。由上述结果可见, 该扭转变换能器的机械品质因数较高, 性能较好。如果加上适当的变幅杆及工具, 可望应用于超声焊接等功率超声应用技术中。

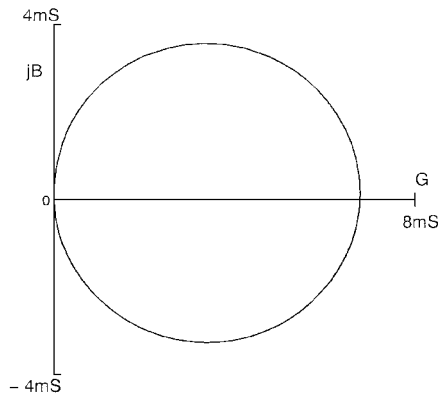


图 2 导纳圆的实验测试结果

$f_0 = 40.4341\text{kHz}$ ,  $f_1 = 40.3905\text{kHz}$ ,  $f_2 = 40.4828\text{kHz}$   
 $Y_{m0} = 6.78461\text{ms}$ ,  $Q = 438.071$ ,  $f_r = 40.4316\text{kHz}$ ,  $f_a = 43.2298\text{kHz}$   
 $C = 0.4786\text{nF}$ ,  $\tan\delta = 0.0697$ , (at 1 kHz)

#### 4 结论

本文研究了夹心式扭转振动超声换能器的性能, 探讨了晶堆中扭转振动的传播速度。实际设计并制作了一个夹心式扭转振动超声换能器, 给出了换能器有关性能参数的测试值。所得结果对于扭转振动超声换能器的研究有一定的参考价值。

#### 参考文献

- 1 LIN Shuyu. Study of the sandwiched piezoelectric ultrasonic torsional transducer. Ultrasonics, 1994; 32(6): 461 ~ 465.

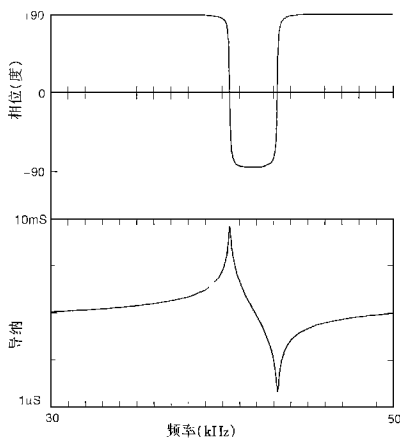


图 1 导纳频率特性曲线测试图

## A4 负载条件下功率换能器的特性研究\*

颜忠余 方启平 何北星 黄金兰 林仲茂

(中国科学院声学研究所 北京·100080)

本文给出 3 种换能器系统在有、有一定输入功率负载条件下输入电阻抗、电声效率的频率特性, 在某一工作频率处的功率特性, 并与线性理论结果的趋势相一致, 对大功率超声换能器的应用有一定指导意义。

关键词: 大功率换能器 强声场 声辐射功率

## The characteristics of high power ultrasonic transducer under loads

\* 本工作得到国家自然科学基金资助