

# 高频宽带发射换能器的研制\*

## THE DESIGN OF HIGH FREQUENCY WIDE-BAND TRANSMITTING TRANSDUCER

王清池

(厦门大学海洋系 361005)

**关键词** 径向振动,厚度振动,换能器,耦合

在水声领域中,宽频带换能器是一个极其重要的研究方向。许多学者利用压电陶瓷圆柱各种振动模式的耦合,研究设计出各种类型的宽带换能器。McMahon 1964年采用开口式压电陶瓷圆管,利用液柱共振频率与圆管径向共振频率相耦合设计宽带自由溢流式换

能器。袁易全 1983年,利用有限长压电薄圆管的径、长耦合设计宽频带发射换能器。上述学者均是对低频

---

\* 福建省自然科学基金资助项目 B9910006号。

收稿日期:2000-01-03;修回日期:2000-02-24

宽带换能器进行研究。在作者承担的利用超声波辐射提高海水鱼类精子受精能力的研究课题中,需要应用水平方向性均匀、高频宽带发射器。为此,通过合理地设计换能器的结构尺寸,采用在电场作用下,激发径向极化薄壁压电陶瓷圆管的厚度振动模式和径向振动模式的谐波,利用这两种振动模式相耦合,得到高频较宽的频率响应和均匀的水平方向性。

## 1 振动模式的分析

径向极化薄壁压电陶瓷圆柱在电场激励下,可激发轴向、径向、厚度等振动模式,工作于哪种振动模式,取决于圆柱型压电陶瓷的尺寸设计。

### 1.1 径向振动模式

圆柱的径向振动由圆柱的平均半径  $a$  和材料特性决定,其径向的谐振频率为

$$f_r = \frac{1}{2\pi a} \left( \frac{Y^E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{C_r}{2\pi a} \quad (1)$$

式中,  $a$  为圆柱的平均半径,  $Y^E$  为压电陶瓷的弹性模量,  $\rho$  为压电陶瓷材料密度,  $C_r$  为压电圆柱的径向声速。

由(1)式可知,圆柱径向振动的谐振频率与圆柱的平均半径成反比。

### 1.2 厚度振动模式

压电陶瓷圆柱薄壁厚度振动模式的反谐振频率为

$$f_{ta} = \frac{C_t}{2d} \quad (2)$$

式中,  $C_t$  为压电陶瓷圆柱薄壁厚度方向的声速,  $d$  为圆柱的壁厚。

圆柱薄壁厚度振动模式的谐振频率与反谐振频率之间的关系为

$$K_1^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_{tr}}{f_{ta}} \text{ctg} \left( \frac{f_{tr}}{f_{ta}} \frac{\pi}{2} \right) \quad (3)$$

式中,  $K_1$  为压电陶瓷厚度振动的机电耦合系数。当圆柱的材料参数和尺寸确定后,通过(2)、(3)式可以计算出圆柱厚度振动的谐振频率  $f_r$ 。

### 1.3 轴向振动模式

压电陶瓷圆柱的轴向振动由圆柱的高度  $l$  和材料的特性确定,其轴向的谐振频率为

$$f_l = \frac{C_l}{2l} \quad (4)$$

式中,  $C_l$  为压电陶瓷的轴向声速。

## 1.4 径长耦合振动

由换能器理论可知<sup>[1]</sup>,当圆柱的高度为  $l$  与平均半径  $a$  的比在  $2 \leq (\frac{l}{a}) \leq 5$  情况下,圆柱的轴向振动与径向振动产生径长耦合振动,其频率方程为

$$(\omega^2 - \omega_r^2)(\omega^2 - n^2 \omega_l^2) = \sigma^2 \omega^2 \quad (5)$$

式中,  $\omega_r$  为圆柱的径向谐振角频率,  $\omega_l$  为圆柱轴向谐振角频率,  $\omega$  为圆柱径长耦合振动的角频率,  $\sigma \approx 0.31$  为压电陶瓷材料的泊松比。  $n = 1, 3, 5, \dots$  (当  $n = 1$  时为基频)。

根据式(5),画出当  $n = 1, 3$  时,  $(\frac{\omega}{\omega_r})$  随  $(\frac{l}{a})$  的变化曲线,如图1所示<sup>[2]</sup>。在图1范围内可由圆柱的具体尺寸求得谐振频率。图中阴影区为耦合临界区。当  $(\frac{l}{a}) < 2$  或  $(\frac{l}{a}) > 5$  时,径长耦合振动减弱,并分裂成轴向本征频率及径向本征频率。当外加电场工作频率与轴向本征频率相同时则产生轴向谐振。同理,当外加工作频率与径向本征频率相同时,则产生径向谐振。

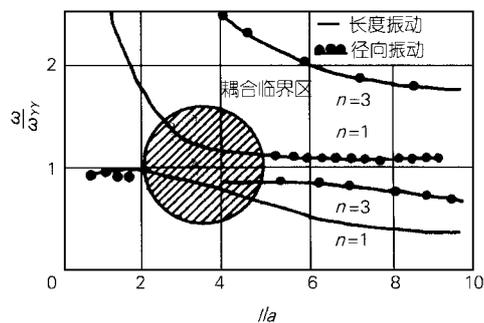


图1  $(\frac{\omega}{\omega_r})$  与  $(\frac{l}{a})$  的关系曲线

## 2 实例

由圆柱振动模式的分析可知,通过合理地设计圆柱压电陶瓷的结构尺寸,采用圆柱压电陶瓷的薄壁厚度振动模式可获得高频振动。再利用径长耦合振动的谐波与其产生耦合,可实现高频宽带的目的。

在利用超声波辐射提高海水鱼类精子受精能力的研究课题中,高频宽带发射器采用 PZT-F 圆柱制成。圆柱的平均半径  $a = 6 \text{ mm}$ , 高度  $l = 25 \text{ mm}$ , 圆柱壁厚  $t = 2 \text{ mm}$ 。由(1)式~(4)式计算出有关特征频率,特征频率的计算值和测量值列于表1。



表 1 PZT 压电圆柱 ( $a = 6 \text{ mm}$ ,  $l = 25 \text{ mm}$ ,  $t = 2 \text{ mm}$ ) 的特征频率

类别	径向振动	轴向振动	厚度振动
	谐振频率	谐振频率	振动频率
	$f_{rr}(\text{kHz})$	$f_{tr}(\text{kHz})$	$f_{tr}(\text{kHz})$
计算值	85	68	715
测量值	89	70	724

由于选择压电陶瓷圆柱的高度  $l$  与平均半径  $a$  之比处于  $2 \leq (\frac{l}{a}) \leq 5$  区域, 圆柱的轴向振动与径向振动产生耦合, 处于临界耦合区。振动频率由薄壁圆柱的频率方程式 (5) 确定。实际测量压电陶瓷圆柱的径向谐振频率和其谐波的谐振频率分别为: 89、172、286、394、490、591、689、792 kHz ..... 689 kHz 的谐波振幅值较高, 衰减较小。为此, 可采用薄壁圆柱的薄壁厚度谐振与其径向振动高次谐波 689 kHz 两种振动耦合, 制成高频宽带发射器。

高频宽带发射器由 3 个平均半径  $a = 6 \text{ mm}$ , 高度  $l = 25 \text{ mm}$ , 壁厚  $t = 2 \text{ mm}$  的 PZT-F 压电圆柱构成。圆柱两端用反声材料屏蔽, 保持自由振动条件。圆柱外围均匀涂上一层环氧树脂层, 保证发射器径向辐射声波, 圆柱内壁为空气腔。在两个圆柱间有隔振和去耦的衬环, 隔除它们的相互影响。测量表明, 高频发射器在 698 ~ 711 kHz 频率范围内有平坦的响应。

### 3 方向性

细圆柱换能器的邻近区域判据为<sup>[3]</sup>

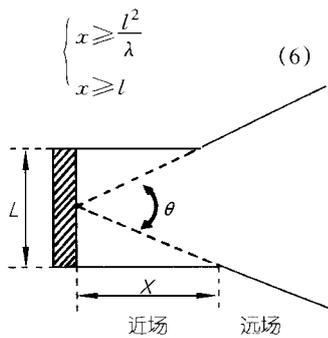


图 2 换能器的波束

式中,  $l$  为细圆柱的高度,  $\lambda$  为波长。若圆柱换能器的高度  $l = 75 \text{ mm}$ , 工作频率  $f = 700 \text{ kHz}$ 。由 (6) 式可求出其邻近区判据  $x \geq 2.6 \text{ m}$ 。因此, 利用超声波辐射提高海水鱼类精子受精能力的实验研究是在换能器的近场区域进行的。

换能器的方向性函数是对于远场而言, 而对于近场, 方向性角就失去了意义。Freedman 1960 年首先研究矩形换能器的近场理论问题。一种比较直观地表达从近场到远场的波束几何图如图 2 所示。由图 2 可得出:

$$\text{近场与远场的界限 } x = \frac{l}{\theta} \quad (7)$$

$$\text{换能器的半功率点束宽 } x_{0.7} = \frac{l^2}{\lambda} \quad (8)$$

$$\text{换能器的零点束宽 } x_0 = \frac{l^2}{2\lambda} \quad (9)$$

由图 2 可看出, 在近场区域内换能器的束宽约等于换能器的长度  $l$ 。对高频宽带发射器的近场方向性测量方法为, 由被测的高频宽带换能器发射高频脉冲, 在不同距离上沿着换能器的平行线, 用水听器测量声脉冲幅度的变化, 表 2 列出在不同距离上, 用圆柱压电陶瓷制成的高频发射器测得的半功率点束宽  $\Delta x_{0.7}$  的数据。测量表明, 在  $\frac{l^2}{\lambda}$  范围内换能器的半功率点的束宽约等于换能器的长度  $l = 7.5 \text{ cm}$ 。但在束宽之外, 仍存在声场, 不过衰减较快。水平方向性均匀, 不均匀性小于  $\pm 1.5 \text{ dB}$

表 2 高频发射器的半功率点束宽 (理论近场界限  $X = 2.6 \text{ m}$ )

距离 (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	4.0
半功率点束宽	7.2	7.6	7.4	7.4	7.1	8.7
$x_{0.7}(\text{cm})$						

### 4 结束语

4.1 通过合理地设计压电陶瓷圆柱的结构尺寸, 利用径向振动的谐波与薄壁厚度振动相耦合, 是实现高频宽带的一种有效途径。

4.2 为获得平坦的声压频率响应, 达到宽频带的目的, 还须研究发射机与换能器的匹配、补偿, 使发射机能输出宽频带电压。

4.3 研制的高频宽带发射换能器, 由于具有均匀的水平方向性和平坦的高频响应, 已提供“超声辐射提高海水鱼类精子受精能力”研究课题使用。

#### 参考文献

- 1 周福洪。水声换能器及基阵。北京: 国防工业出版社, 1984。87 ~ 90
- 2 袁易全。超声换能器。南京: 南京大学出版社, 1992。297 ~ 300
- 3 R.J. 鲍伯著, 郑士杰译。水下电声测量。北京: 国防工业出版社, 1977。137 ~ 147 (本文编辑: 张培新)