

# 一种3-3连结复合压电宽带发射换能器的研究

袁易全

(南京工学院)

本文介绍了一种3-3连结复合压电宽带发射换能器。探讨了它的结构设计及计算方法。进行了实测与应用,作出了优缺点评价。换能器中心频率200~500KHz,带宽Q为2.0~2.8。最大发送响应149.7dB。横向耦合小,波形简单,余振短。在高分辨率检测技术中有独特的应用。

The Investigation on a Wide-Band 3-3 Connective Composite Piezoelectric Transmitting Transducer

Yuan Yiquan

(Nanjing Polytechnic Institute)

Abstract

A 3-3 connective composite piezoelectric transmitting transducer is introduced in this paper. The construction, calculation and design method are discussed. The measuring result and application effect have been evaluated. The central frequency of the transducer is 200-500 KHz. The quality factor Q is 2.0-2.8, and the max. transmitting response is 149.7 db. The transducer has a minimal transverse coupling and simple wave shape, and is very short the after-pulse. It can be used in the high resolution detecting equipment.

---

这项工作是笔者1983年在加拿大多伦多市Huntec公司进行合作研究时完成的。笔者深切感谢公司董事长Hatchins先生和主管经理Ross博士对这项工作的支持和帮助。

## 参 考 文 献

- (1) 张叔英“海底任意倾斜层的声速测量( $T^2-X^2$ 法的分析)”, 声学学报1988年待发表
- (2) Bryan G.M., "Sonobuoy Measurements in Thin Layers", in Physics of sound in Marine Sediments, edited by Hampton L. (Plenum Press, New York, 1974), 119-130.
- (3) Whalen A.D., "Detection of Signal in Noise" Chap.10, (Academic Press, New York and London, 1971)
- (4) Hamilton E.L., "Geoacoustic Modelling of the Sea Floor", J. Acoust. soc Am, 68(1980), 1313-1340

# 一、前言

近三十年, 实心PZT压电陶瓷换能器在水声及超声检测领域作为换能器材料发挥了巨大的作用。但它的声阻抗率比水大20多倍, 处于严重失配条件下工作, 为解决宽带发射, 许多著者研究多层匹配层, 性能喜获改善<sup>[1]</sup>, 但未根本解决问题而新添了许多复杂的工艺, 严重影响广泛推广。

七十年代初, 美国宾州大学<sup>[2,3]</sup>开始研究了两相复合压电换能材料。八十年代开始进入实用阶段<sup>[4]</sup>。其中3—3连结PZT聚合物复合的压电材料, 是工艺上研制比较容易, 而且便于大规模生产的一个品种。

3—3连结复合压电元件比实心压电陶瓷有以下优点: (1)静水压灵敏度高,  $d_{33}$ 值大于  $10^{-11} \text{m}^2/\text{N}$  (详见表1); (2)声速和体密度低; (3)材料机械品质因数低; (4)抗机械冲击力性能强。近年来, 在美国、日本等国主要将它应用于接收型换能器和传感器。本文探讨了3—3连结复合压电材料应用于发射型换能器。研究了它的结构、设计计算方法; 测量了它的发射特性; 例举了某些应用效果; 作出了若干评价。指出: 在某些

小功率的高分辨率水下检测技术方面, 3—3连结复合压电发射换能器有它独特的实用价值。

表1 3—3连结复合材料与PZT、PVF<sub>2</sub>性能比较

物理参数	PZT与硅橡胶复合压电材料	PZT实心压电陶瓷	PVF <sub>2</sub> 压电薄膜
密度( $10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ )	3.2	7.8	1.8
$\epsilon T_{33}/\epsilon_0$	206	1150	10
$\tan \delta$ %	1.4	0.4	0.08
$d_{33}(\text{PC}/\text{N})$	209	215	14
$g_{33}(10^{-9} \text{V} \cdot \text{m}/\text{N})$	114	21	158
$d_{31}g_{31}(10^{-15} \text{m}^2/\text{N})$	14168	178	
Kp	0.17	0.49	
Kt	0.45	0.45	0.19
Q值	9—12	580	10
声速(m/s)	1496	4500	2260

注: 本数据部分由中国科学院上海硅酸盐研究所提供

## 二、发射换能器结构

3—3连结复合宽带发射换能器的结构如图1所示。图中1, 金属外壳; 2, 透声保护层; 3, 3—3连结复合材料晶片; 4, 声阻抗背衬; 5, 支撑架; 6, 引出电极线; 7, 末端电缆; 8, 去耦材料。

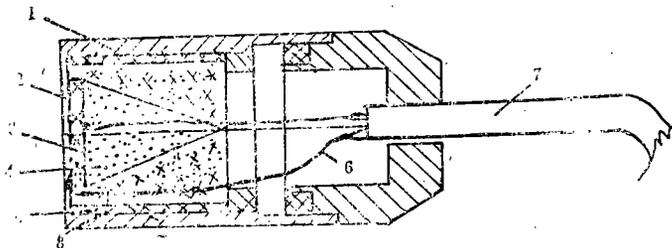


图1 3—3连结复合压电发射换能器结构

## 三、设计原理

3—3连结PZT与硅橡胶两相以50%比例复合, 经混料、成形、烧结、被银及活化。

这种复合体在微观结构上是随机不均匀的。但在宏观上实验已证明, 具有随机均匀的物理特性, 如表1所测定的数据。正因为这样, 实心压电陶瓷换能器的设计计算理论, 应该适用于它。尤其因它的横向耦合很小(如表1

所示 $K_p$ 仅0.17), 所以设计计算时, 更易于用一维理论近似。

设计计算宽带压电换能器的成功方法, 已由Krimholtz、Leedom及Mallhaei(简写K·L·M)<sup>[5]</sup>的声传输线的物理模型等效图给出, 如图2所示。

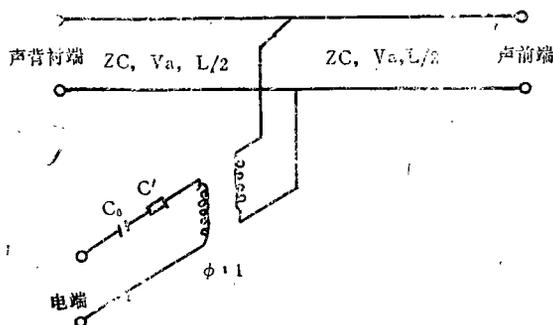


图2 K·L·M声传输线模型

其中图2的电力转换系数为 $\phi$ <sup>[5]</sup>

$$\phi = K_T (\pi \omega_0 C_0 z_0)^{1/2} \text{Sinc} \left( \frac{\omega}{2\omega_0} \right) \quad (1)$$

式中 $\text{Sinc} x = \text{Sin}(\pi x) / \pi x$ ,

图中静态电容 $C_0 = \epsilon^s A / l$ ; 特性阻抗 $Z_c = Z_s \cdot A$ ; 声阻抗率 $z_s = \rho \cdot V_s$ ; 有效机电耦合系数 $K_T^2 = d^2 / S^D \epsilon^s$ ,  $l$ 为压电晶片厚度;  $A$ 为换能器辐射面积;  $\epsilon^s$ 为夹紧介电常数;  $\rho$ 为密度;  $S^D$ 为柔性常数;  $V_s$ 为声速;  $d$ 为压电常数; (本设计即 $d_{33} = 209 \text{PC/N}$ );  $\omega_0$ 为换能器半波长谐振频率( $\pi V_s / l$ );  $R_0$ 为换能器的介质损耗阻(由 $\text{tg} \delta$ 计算获得);  $R_m$ 为换能器的机械损耗阻。

图2中附加电容 $|C'| \gg |C_0|$ <sup>[5]</sup>, 故对换能器工程设计影响甚小, 可忽略不计。

本设计的换能器去耦材料暂采用空气背衬, 其声前端为水(轻负载)。故晶片等效质量 $M$ 为

$$M = \frac{\pi Z_c}{2\omega_0} = \frac{1}{2} \rho l A \quad (2)$$

在这种条件下, 机械振动引起的等效阻抗称动态阻抗(忽略机械摩擦损耗)为

声学技术

$$2Z_c / j \tan k l / 2 = j 2Z_c \tan \frac{\Delta \omega \pi}{2\omega_0} \quad (3)$$

$$\text{式中 } \omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{\pi V_s}{l} \quad (4)$$

由于利用级数恒等式

$$\tan x = x + \frac{1}{3} x^3 + \frac{2}{15} x^5 + \dots (|x| < \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

$$\text{故 } 2Z_c / j \tan k \frac{l}{2} \approx j \pi Z_c \left( \frac{\Delta \omega}{\omega_0} + \frac{\pi^2 (\Delta \omega)^3}{12 \omega_0^3} + \dots \right) \quad (6)$$

式中:  $\omega = \Delta \omega + \omega_0$  代表在基波附近的频率。

倘若在基波附近, 将上述分布参数等效于一个集中参数, 就应该和一个 $L_m$ (电感)、 $C_m$ (电容)串联网络阻抗等效。取一级近似, 就有

$$C_m = \frac{2}{\pi \omega_0 Z_c} \quad (7)$$

$$L_m = \frac{\pi Z_c}{2\omega_0} = \frac{1}{2} \rho l A \quad [\text{见式(2)}]$$

以下若考虑存在机械阻实部时, 动态电阻抗应等于RLC串联网络, 如图4所示。而机械阻(纯阻) $R_m$ 应为

$$R_m = \frac{1}{\omega_0 C_m Q_s} = \frac{\pi Z_c}{2Q_s} \quad (8)$$

式中,  $Q_s$ 为换能器声端机械品质因数。



图3 两端自由晶片集中参数等效图

按照等效图2, 当 $Z_L, Z_R \ll Z_c$ 时, 在谐振点附近, 等效图中心点的输入机械纯阻可计算获得为

$$R_m = Z_c^2 / (Z_L + Z_R) \quad (9)$$

式中,  $Z_L, Z_R$ 分别表示为声端面前、后负载声阻抗。当晶片厚度中心离声端面为四分之一波长的声传输线时, 晶片引入到声端前、

后负载面上的抗分量(即虚部)为零。按声传输线原理

$$R_{mL} = \frac{Z_C^2}{Z_L} \quad (\text{声前端反映阻抗}) \quad (10)$$

$$R_{mR} = \frac{Z_C^2}{Z_R} \quad (\text{声后端反映阻抗}) \quad (11)$$

$R_{mL}$ 与 $R_{mR}$ 分别为声端前、后理想条件下匹配反映阻(实部), 并联结果, 可运算得

$$\frac{1}{R_{mL}} + \frac{1}{R_{mR}} = \frac{1}{R_m} \quad (12)$$

故获得(即证明)恒等式(9)。并由(8)式可推知

$$Q_a = \frac{\pi}{2} \frac{(Z_L + Z_R)}{Z_C} \quad (13)$$

声端阻抗在谐振点附近反映至电端值, 由等效图2计算得

$$R_{so} = \frac{4K_T^2}{\pi\omega_0 C_0} \frac{Z_C}{Z_L + Z_R} \quad (14)$$

故电端 $Q_e$ 值为

$$Q_e = \frac{1}{\omega_0 C_0 R_{so}} = \frac{\pi}{4K_T^2} \cdot \frac{Z_L + Z_R}{Z_C} \quad (15)$$

由此, 换能器的发射频响通带 $Q$ 值为

$$Q = \frac{Q_a \cdot Q_e}{Q_a + Q_e} \quad (16)$$

倘为获得最佳宽带设计, 应满足

$$Q_e = Q_a$$

即由(13)、(15)式相等, 可获恒等式

$$K_T^2 = \frac{1}{2} \quad \text{或} \quad K_T = 0.707 \quad (17)$$

的结论。但由表1可知, 3—3连结复合压电材料的 $K_T = 0.45$ , 故无法获得最佳宽带设计。

## 四、测量结果

本文设计了两种晶片的换能器, 测量结果见表2、3和图4、5。

表2 3—3连结复合压电发射换能器典型

测量数据

型号	Q	尺寸 (mm)	背衬情况	中心频率 (KHz)	发射电压* 最大响应 (dB)
8528	2.8	φ11×2.3	空气	200KHz	120
8531	2.1	φ12.6×1.8	高阻抗	400KHz	134.9
8535	2.0	φ12.6×1.8	接近匹配	500KHz	148.9

\* 0dB = 1V/μPa

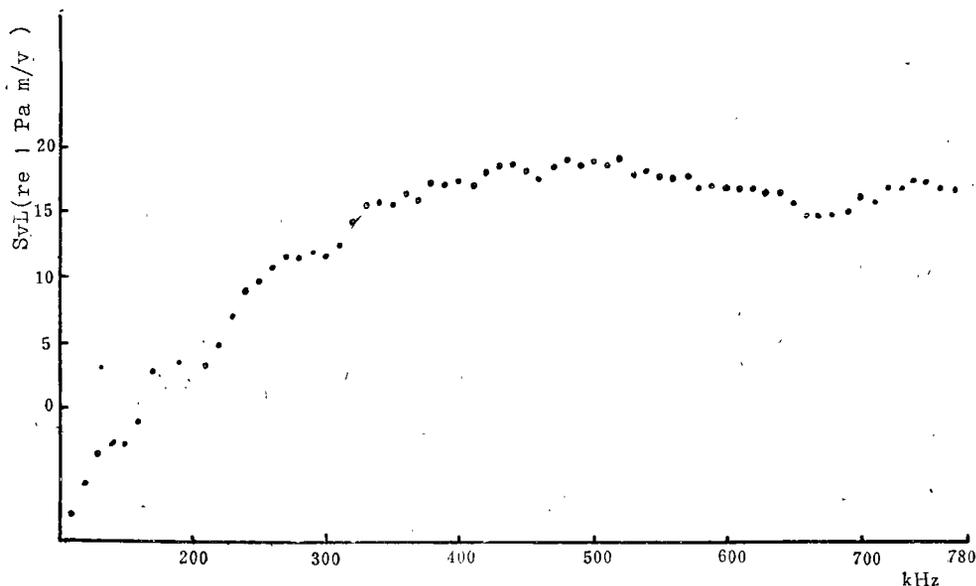


图4 8535号换能器的发射电压响应(由中科院声学所东海站提供)

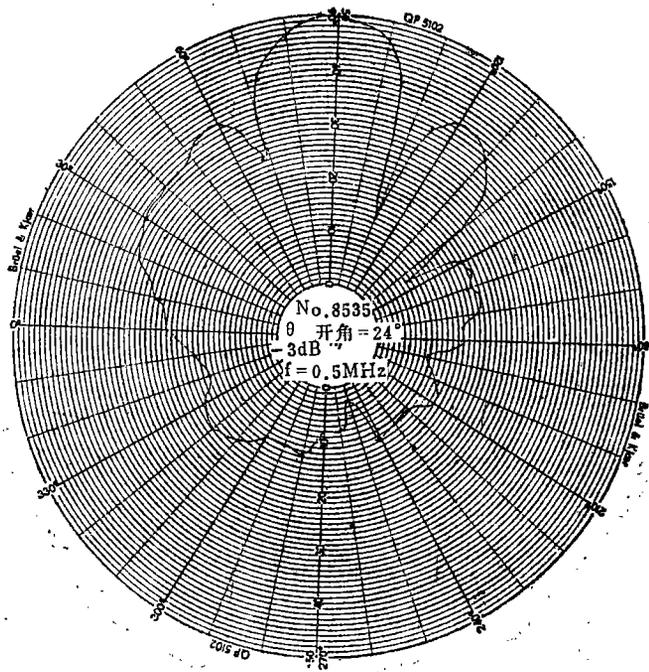


图5 8535号在 $f = 0.5\text{MHz}$ 时的方向性图(由国家计量局成都计量测试研究所提供)

### 表3 测试结果

电缆末端水听器自由场发送电压响应级 $S_V$ (dB)(参考值为 $1\mu\text{Pa}/\text{V}$ )的频率响应

频率(兆赫)	$S_V$ (dB)	频率(兆赫)	$S_V$ (dB)
0.2	/	0.63	146.5
0.25	/	0.7	145.8
0.3	132.7	0.8	143.9
0.315	133.7	0.9	140.7
0.35	138.0	1.0	136.6
0.4	142.3	1.25	115.8
0.45	146.4	1.5	135.3
0.5	148.9	1.6	138.5
0.55	148.4	2.0	134.6
0.6	146.6	/	/

测试条件: 水深0.6米  
水温22℃

\*测试单位同图5

## 五、测量评价及应用选例

8528型号换能器晶片较厚(2.3mm), 直径小, 故电容量较小。带上电缆(2m长电缆其电容约210PF)

$$f_0 = 200\text{KHz}, G_T = 12.0\mu\Omega, C_T = 244\text{PF}$$

$$Q_s = \omega_0 C_T / G_T = 25.6$$

不带电缆时

$$C_T' = C_T - 210\text{PF} = 34\text{PF}$$

$$Q_e' = \omega_0 C_T' / G_T = 3.56$$

8535型号换能器晶片较薄(1.8mm), 直径大, ( $\phi 12.6\text{mm}$ ), 故电容量大, 带上2m电缆时

$$f_0 = 500\text{KHz}, G_T = 83.2\mu\Omega, G = 348\text{PF}$$

$$Q_s = \omega_0 C_T / G_T = 13.4$$

不带电缆时

$$C_T' = C_T - 210\text{PF} = 138\text{PF},$$

$$Q_s' = \omega_0 C_T' / G_T = 4.33$$

以上两类换能器由于3—3连络复合后电容量小, 故电品质因素 $Q_s$ 均较大。实测 $Q$ 值较低是由于各种损耗阻存在。因此, 直接影响带宽和发射响应值降低。克服的办法可设置匹配网络, 给予解决。其调整范围, 可以使

发射频响Q值从13.4调整至4.33。故这种换能器及系统在水中具有宽带、低Q值的优点。这是其它高频换能器所不及的。宽带的条件,使发射时间波形特性为窄脉冲、短余振,方向性开角大,0.5 MHz时,  $\theta_{-3dB}$  为24°。例如,将3—3连结复合压电换能器在1微秒脉冲电压激励下发射声波,可获得17~12微秒宽的水下窄脉冲声能(包括余振),它能分辨水中1公分厚的石蜡板。这种波形相当简单,甚至能清楚反映两种波之间的干涉现象。在实验中能够清晰地反映出叠放在一起的铝板与有机玻璃板分界处的绕射波与界面反射波之间的干涉现象。传统实心PZT探头是无法记录下这种物理现象的。

## 六、结 论

1)3—3连结的PZT与硅橡胶复合压电换能器具有机械Q值低,在水中的发射频带宽的显著优点;

2)3—3连结复合压电换能器由于介电常数低其电容量小,电阻抗高且电Q值高,故发射电压响应值低,采用匹配网络可适当提高发射功率和带宽。它比较适用于水下小功率高分辨率检测技术领域;

3)3—3连结复合压电换能器的静水压电灵敏度( $d_{11} = d_{33} + 2d_{31}$ )很高。故它有较高的

压电接收灵敏度。这样,它可以收、发两用,成为宽带可逆式压电高频(200KHz至500KHz)换能器;

4)3—3连结复合压电换能器 $K_p$ 值低,故横向耦合低;收、发脉冲时间波形简单、余振小,故其检测分辨率高,耦合干涉小。方向开角大。

5)3—3连结复合压电换能器便于批量生产,材料工艺不复杂;研制宽带换能器工艺简单,是极有发展前途的一种新颖换能器。

本研制工作得到中国科学院声学所东海站许振夏研究员大力支持,在此表示致谢。

## 参考文献

- [1] C. S. DeslLers, J. D. Fraser, and G. S. Kino, IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol. SU-25, 3(1978), 115
- [2] R. E. Newham, D. P. Skinner, and L. E. Cross. Mat. Res. Bull, 13(1978), 525
- [3] R. E. Newham, D. P. Skinner, K. A. Kicker, Ferroelectrics, VOL, 3(1980), 49
- [4] 袁易全、殷庆瑞: "一种3-3连结的PZT/硅橡胶复合型发射声源"声学电子工程, No. 1(1987)1,
- [5] R. Krimholtz and G. Matthaei, IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, SU-18(1971), 128
- [6] O. E. Mattiat, ULTRASONIC TRANSDUCER MATERIALS, 林仲茂译, 科学出版社(1979), 81