

1-3 型压电复合材料非均匀振动换能器的研究 *

刘殿锋

李明轩

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

1996 年 3 月 14 日收到

摘要 通过调整 1-3 型压电复合材料换能器中压电相的分布, 可以控制换能器辐射面上振动幅度和相位的分布, 从而获得具有特殊性能的声场. 作为辐射源表面振动速度等相位不等幅和等幅不等相位的两种典型情况, 本文对边缘高斯型换能器和 Fresnel 聚焦换能器进行了实验研究, 讨论了其声场特性.

关键词 1-3 型复合材料, 非均匀振动换能器

Investigation of 1-3 piezo-composite nonuniformly-vibrating transducers

Liu Dianfeng, Li Mingxuan

(Institute of Acoustics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract Presented is the investigation of 1-3 inhomogeneous piezo-composite materials which have arbitrary spatial velocity distribution when excited uniformly. As special cases, we have studied experimentally the sound fields of an edging-Gaussian-distribution transducer and a Fresnel transducer. The method of manufacturing the transducers using inhomogeneous 1-3 piezo/epoxy composites is discussed.

Key words 1-3 piezo-composites, nonuniformly vibrating transducers

1 引言

1-3 型复合材料换能器自从问世以来就得到了广泛的应用. 它具有较高的厚度机电耦合系数、较低的声阻抗、较小的介电常数和较小的机械品质因子, 适合制作高灵敏度宽带换能器. 中科院声学所八室一直致力于压电复合材料换能器的理论与实验研究, 先后利用 1-3 型压电复合材料研制成功了压电相均匀分布的换能器、高斯型换能器以及球面聚焦换能器^[1], 其时域和频域特性非常好. 根据我们实验室的排列—浇灌法制作 1-3 型复合材料的工艺特点, 可以通过控制 PZT 相的分布来实现各种

特定的非均匀激发.

圆形轴对称换能器表面振动速度分布 $U_0(R)$ 是一个复函数, 它由振速的幅度和相位两部分组成:

$$U_0(R) = U(R) \times e^{-jk\varphi(R)} \quad (1)$$

其中 $U(R)$ 为换能器辐射面的振速幅度, $\varphi(R)$ 表示振速的相位因子, R 为换能器辐射面径向参变量. 改变 $U(R)$ 、 $\varphi(R)$ 即可获得各种特定的非均匀振动.

$U_0(R)$ 的幅度变化可以通过控制压电相的体积百分比来实现. 尽管选用同样的 PZT 柱,

* 国家自然科学基金资助项目

在制成换能器后，整个辐射面加的也是一致的电压激励，但是由于 PZT 柱分布的体积百分比不同，在 PZT 柱密的地方振动会强一些；反之，在 PZT 柱疏的地方，振动会弱一些，这样通过调整 PZT 柱的体积密度可以使换能器表面振幅的分布按所要求的函数变化。

在 1-3 型压电复合材料平面辐射源上实现任意相位分布是困难的，但是我们可以很容易地在同一个辐射面上同时获得正反两种相位的分布。同样的 PZT 柱经极化后，按极化方向相反的方式排列，换能器加同相的电压激励，即可在其辐射面上获得相位相反的振动。在特殊声场的实现中，相位的正反搭配是一种比较有用的方法。

按照这个思路，我们制备出横向不均匀的压电复合材料。作为初步探索，本文利用 1-3 型 PZT/ 环氧树脂复合材料制作了边缘高斯型换能器以及 Fresnel 换能器，对其空间声场进行了实验研究。

2 1-3 型非均匀复合材料换能器的结构特点

1-3 型压电复合材料的结构如图 1 所示。将 PZT 细棒以一定的分布方式排成阵列，在其间浇灌环氧树脂，这样做成的材料其压电相是一维连通的，聚合物相是三维连通的。

1-3 型复合材料换能器的性能主要取决于以下几个方面 [2]：

- (1) PZT 柱的宽度 w 与高度 t 之比；
- (2) PZT 相的体积百分比；
- (3) 压电陶瓷材料的性能；
- (4) 非压电相（聚合物）的材料性能。

在设计复合材料的过程中，首先需要确定的两个参数是 $w:t$ 的值和体积百分比 V ，它们直接影响到换能器的性能和制作工艺要求。

3 边缘高斯型换能器

3.1 换能器的设计与制作

普通 1-3 复合材料换能器是在环氧基底上均匀地排列 PZT 柱，当 PZT 柱横向尺寸足够小时，复合材料可以看成是各向同性的。理论和实验都证明，1-3 型复合材料换能器的性能与 PZT 相的体积百分比有关。

设 PZT 相在复合材料中的体积百分比为 V ，则压电复合材料的主要参数为 [3]

$$\begin{aligned} \overline{c_{33}^E} &= V \left[c_{33}^E - \frac{2(1-V)(c_{13}^E - c_{12})^2}{V(c_{11} + c_{12}) + (1-V)(c_{11}^E)} \right] \\ &\quad + (1-V)c_{11} \\ \overline{e_{33}} &= V \left[e_{33} - \frac{2(1-V)e_{31}(c_{12}^E - c_{12})^2}{V(c_{11} + c_{12}) + (1-V)(c_{11}^E + c_{12})} \right] \\ \overline{\epsilon_{33}^s} &= V \left[\epsilon_{33}^s + \frac{2(1-V)e_{31}^2}{V(c_{11} + c_{12}) + (1-V)(c_{11}^E + c_{12})} \right] \\ &\quad + (1-V)\epsilon_{11} \end{aligned} \quad (2)$$

因为环氧树脂的弹性系数 $(C_{11} + C_{12})$ 比 PZT 的弹性系数小得多且 $\epsilon_{11} \ll \epsilon_{33}^s$ ，因此当 V 小于 50% 时， $V(C_{11} + C_{12})$ 、 VC_{11} 和 $V\epsilon_{11}$ 项在上述各式中可以忽略。于是根据方程 (2)，压电复合材料的主要参数可近似表示为：

$$\begin{aligned} \overline{c_{33}^E} &\approx c_{11}V \left[c_{33}^E - c_{11} - \frac{2(c_{13}^E - c_{12})^2}{c_{11} + c_{12}} \right] \\ \overline{e_{33}} &\approx V \left[e_{33} - \frac{2(e_{13} - (c_{13}^E - c_{12}))}{c_{11} + c_{12}} \right] \\ \overline{\epsilon_{33}^s} &\approx V \left[\epsilon_{33}^s + \frac{2(e_{31}^2)}{c_{11}^E + c_{12}^E} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

材料选定后，PZT 相和环氧项的各项物理参数即为确定值，式 (3) 表明， $\overline{e_{33}}$ 与 PZT 相的体积比近似成正比。要获得表面振速分布中间弱、边缘强的边缘高斯型换能器，其表面振动分布应为 (图 2)：

$$U(R) = A_1 \times e^{-B(\frac{R-a}{a})^2} \quad (4)$$

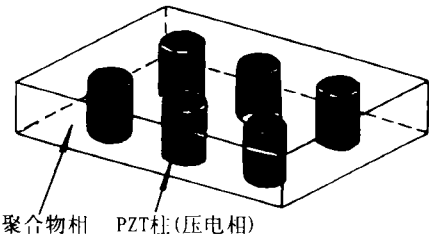


图 1 1-3 型压电复合材料换能器的结构

相应的 PZT 相的体积百分比为:

$$V(R) = A_m e^{-B(\frac{R-a}{a})^2}$$

(5)

A_m 为边沿处 PZT 相的体积比, 是体积比的最大值.

在设计中取 $A_m = 60\%$, 当换能器径向尺寸确定之后, 高斯函数中系数 B 的选取直接关系到换能器边缘环宽, 在实验中取 $B=0.62$, $a=10\text{mm}$, PZT 相的体积比为:

$$V(R) = 0.6 \times e^{-0.62(\frac{R-10}{10})^2}$$

(6)

换能器设计为 1MHz, 选用 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 的 PZT 柱, 按径向 0.5mm 的尺寸将 $V(R)$ 离散化. 表 1 给出了 PZT 柱的径向分布.

按表中参数排列 PZT 柱, 晶片做好后, 加匹配层、匹配电感、背衬、保护膜, 即完成了边缘高斯型换能器的制作.

表 1 边缘高斯型换能器结构参数

环的位置 $R_n - R_0$ (mm)	PZT 相体积百分比 V	PZT 柱的个数
6.0-6.5	1.6%	3
6.5-7.0	4%	6
7.0-7.5	8%	12
7.5-8.0	20%	28
8.0-8.5	40%	56
8.5-9.0	52%	70
9.0-9.5	68%	95
9.5-10.0	80%	110

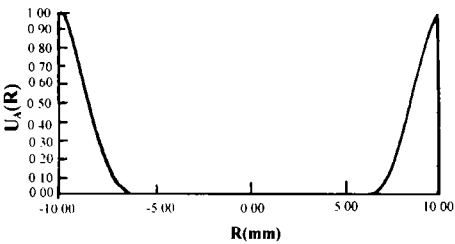


图 2 边缘高斯型换能器表面振幅分布
(已归一化, $U_A(R)$ 为 $U(R)/A_1$)

3.2 测试结果

采用小球反射法, 将换能器固定于水槽中, 小球安装在扫描架上. 由计算机中的扫描控制板驱动步进电机, 在 X-Y 平面内按扫描控制程序指定的轨迹逐点扫描.

利用 1-3 型压电复合材料制作的边缘高斯型换能器的声场具有明显的轴上聚焦特性, 图 3 为 $Z=30\text{mm}$ 处的平面上换能器径向声压变化, 图 4 为边缘高斯型换能器的空间声场分布. 取最大幅度下降 3dB 为标准, 测得换能器的聚焦范围长达 45mm , 焦柱直径为 3mm (图 5). 实验测量所得的换能器的回波波形比我们用同样材料制作的 PZT 相均匀分布的晶片的回波脉冲长、带宽窄.

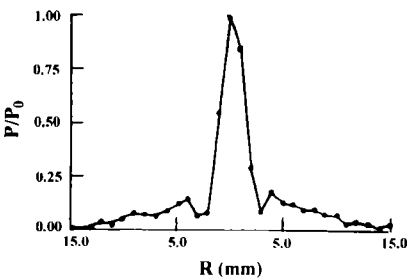


图 3 $Z=30\text{mm}$ 处的平面上换能器径向声压变化
(已归一化, P 代表声压值, P_0 为 $R=0$ 处的声压值)

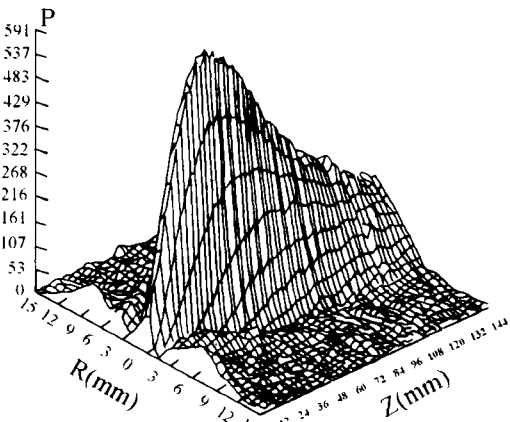


图 4 边缘高斯型换能器的空间声场分布
(Z 为测量点距换能器辐射面的轴向距离)

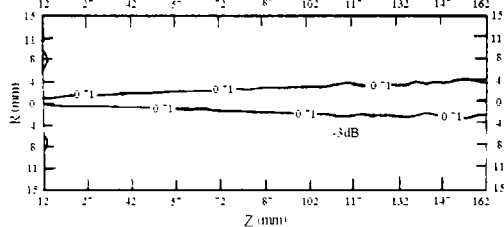


图 5 换能器的聚焦效果 (-3dB 等声压分布)

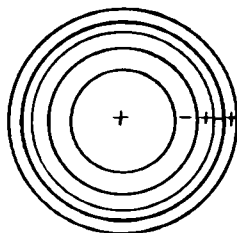


图 6 Fresnel 换能器的结构

4 Fresnel 聚焦换能器

4.1 换能器的设计与制作

根据 Fresnel 换能器的结构特点, 我们用 1-3 型压电复合材料制作了 1.5MHz、直径 30mm 的换能器, 其结构如图 6, 表 2 给出了换能器的结构参数.

表 2 Fresnel 换能器结构参数

环的位置 (内径 - 外径) (mm)	环宽 (mm)	PZT 数目	PZT 柱的极性
0.0-6.7	6.7	283	+
6.7-9.5	2.8	460	-
9.5-11.7	2.2	365	+
11.7-13.5	1.8	416	-
13.5-15.0	1.5	305	+

把事先极化好的 PZT 柱按要求的极性排列, 使得相邻两个圆环的极化强度方向相反. PZT 柱要均匀分布, 在设计中取 $V=65\%$, 计算出每个环内 PZT 细棒的数目如表 2 所示.

换能器的制作工艺流程与普通 1-3 型复合材料换能器一样, 所不同的仅在于相邻圆环的 PZT 柱反向排列.

4.2 测试结果

声场测量方法如上述, 结果发现换能器聚焦效果非常好 (图 7), 其焦柱长为 24mm, 焦斑直径为 2mm. 在聚焦区域外, 换能器的声压值衰减很快. 图 8 为换能器焦点处的径向声压分布, 图 9 为换能器焦点前后的声场. 和边缘高斯型换能器一样, 实测的脉冲回波波形不如 PZT 相均匀分布的复合材料的脉冲波形窄, 相对带宽也不是非常理想, 这可能是由于聚焦过程中干涉造成的.

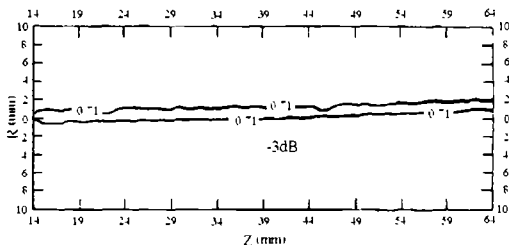


图 7 换能器的聚焦效果 (-3dB 等声压分布)

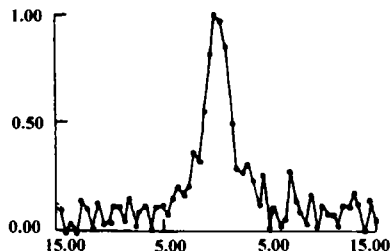


图 8 焦点处换能器的径向声压分布 (已归一化)

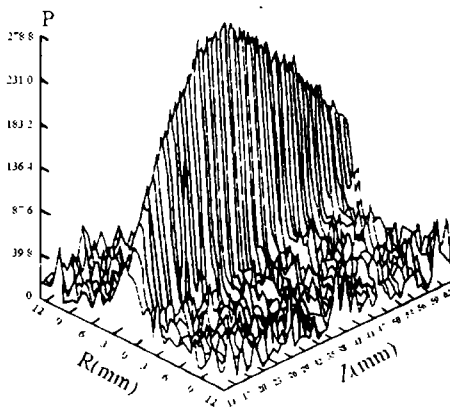


图 9 换能器焦点前后的声场
(Z 为测量点距换能器辐射面的轴向距离)

(下转第 42 页)

科学中引人注目的研究方向。

除以上介绍的几种生理信号(或振动信号)之外,其它许多生理声信号在临床上也具有十分广泛的应用,如牙齿叩击诊断仪在牙科中有应用价值。诊断时,医生只用金属小槌轻轻叩击牙齿,各种振动信号便会通过检测系统传到诊断仪中,这种具有先进信号处理技术的诊断仪可帮助医生更快、更准确地诊断牙病,如龋齿、牙周病、冠周炎、牙髓炎,牙槽脓肿等。又比如,吞水音图诊断是近年研究的一种用于消化道功能状态诊断的新型方法^[6],而肠鸣音是消化道疾病临床诊断中的一项特殊体征。总之,生理声信号检测与处理在临床诊断与监护中具有重要的应用价值。

3 结束语

从学科发展的角度来看,生理声信号检测、处理、声发生机理、声传播机理等方面的问题还没有完满地解决,因此,目前,生理声信号分析仍然是非常活跃的研究领域,有许多重要问题有待于不同学科领域的科学工作者通力合作来解决。应当看到,当人们弄清各种生理声信号的发生机理、传播机理、信号特征与临床病理、生理之间的相关性之后,生理声信号分析将具有广泛的应用前景。

~~~~~

(上接第 14 页)

5 结论

改变压电相的体积百分比可以改变换能器辐射面的振动幅度,改变压电相的极化方向可以改变换能器辐射面的相位,二者结合可以很方便地得到表面振动为某些特殊函数分布的换能器。与常规压电陶瓷换能器通过改变电极配置、设计特殊形状的辐射面等方法相比,本文所讨论的制作方法有明显的优点,它不仅制作起来灵活、方便,而且能够通过压电相和非压电相材料、结构的选择使复合材料具有特殊的物理性能。

借鉴常规探头的制作经验和复合材料的工

参 考 文 献

1 Murphy R L. *Thorax*. 1981, **36**: 99-107.  
2 Malone M. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 1993, **31**(2): 85-96.  
3 Ploysongsang Y. *J.Appl.Physiol.*, 1989, **66**(5): 2061-2070.  
4 Mussell M J. *Med. and Bio.Eng. and Comput.*, 1992, **30**(2): 129-139.  
5 Rangayyan R M, Lehner R J. *CRC Crit Rev. Biomed.Eng*, 1988, **15**: 221-236.  
6 陈荔香. 吞水音图诊断, 济南, 山东大学出版社, 1988.  
7 Wei L Y, Chow P. *IEEE.BME*, 1985, **32**(3): 245-246.  
8 王炳和等. 科学通报, 1993, **38**(22): 2099-2103.  
9 Zyer N K. *IEEE BME*, 1986, **33**(12): 1141-1145.  
10 Ramamoorthy P. *Proc.IEEE ICASSP* 1987, 1509-1512.  
11 Soarfflet N. *IEEE BME*, 1990, **37**(4): 384-390.  
12 汪晨等. 中华麻醉学杂志, 1994, **14**(2): 99-101.  
13 Zhang Y T. *IEEE BME*, 1994, **41**(2): 181-191.  
14 Durand L G. *IEEE Trans. BME*. 1990, **37**(12): 1121-1129.  
15 Akay M. *IEEE Trans. BME*, 1992, **39**(2): 176-184.  
16 Wood J C. *IEEE BME*, 1992, **39**(7): 730-740.  
17 Guo Z. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1994, **42**(7): 1700-1707.  
18 Whitehead M L. *IEEE Eng. Med. and Bio. Magazine*, 1994, **13**(2):210-216.

艺特色,结合换能器阵的设计思路,利用压电复合材料制作非均匀振动换能器的研究有着广阔的前景。

致谢 中科院声学所八室杨玉瑞老师在换能器的制作中给予了很多帮助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

1 耿学仓,李明轩. 应用声学, 1991, **10**(5):10-14.  
2 Wallace Arden Smith. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1989, 755-766  
3 Smith W A, Auld B A. *IEEE Trans., Ultrason., Ferroelec., Freq., Contr.*, 1991, 38:40-47