rsital Stuttgartam Institut für Verbrennungsmotorend und kraftfahrwesen. Tagung Nr. E-30-202-056-4 "Akustik und Aerodynamik des Kraftfahrzeugs" im Haus der Technik e. V., Essen 1. Februar 1994.

- [3] Ackermann, U.: Modelluntersuchungen zur Auslegung eines Akustik-Windkanal, Technisches Messen 57/1990, Heft 12, S. 457-467.
- [4] Fuchs, H.V.; Ackermann, U.; Rambausek, N.: Membran-Absorber für Technischen Schallschutz. IBP Mitteilung 24 (1987), Nr. 135.
- [5] ISO 3745. Determination of sound power levels of nois esources-Precision methods for anechoic

and semi-anechoic rooms.

- [6] DIN 45635 Teil 1, Anhang B. Geräuschmessung an Maschinen, Anforderung an die Messumgebung und Eignungsprüfung.
- [7] Diestel HG. Messungdesmittleren Refleksionsfaktors der Wandauskleifung in einem reflexionsarmen Raum. Acussica, 1968, 20:s. 101-104.
- [8] Diestel HG. Zur Schallausbreitung in reflexionsarmen Raumen. Acustica, 1962, 12:S. 113– 118.
- [9] Kuttruff H, Bruchmuller HG. Zur Messtechnischen Überprufung reflexionsarmer Räume. Acustica, 30:S. 343-349.

# 一种非均匀厚度压电复合材料片宽带 换能器的实验研究\*

取学仓 杨玉瑞 党长久 李明轩 (中科院声学所 北京 100080) 1993年11月3日收到

摘要 本文利用 1-3 压电复合材料作为换能元件,通过特殊工艺制备成一面是平面、一面是球面的非均 匀厚度压电振子.这种压电晶片加上激励电压后,不同厚度处以不同的共振频率振动,从而使压电晶片 的振动频带加宽.本文介绍了这种压电晶片的机电特性,以及用这种压电晶片制成的宽带聚焦超声换能 器的脉冲回波特性.此外,文中还对这种换能器与均匀厚度压电晶片换能器的脉冲回波特性进行了比较. 关键词 换能器 压电复合材料 非均匀厚度压电片

# Laboratory investigation of a wideband transducer using nonhomogeneousthickness piezocomposite material

Geng Xuecang Yang Yurui Dang Changjiu Li Mingxuan (Institute of Acoustics Academia Sinica, Beijing 100080)

**Abstract** It is described in this paper that a nonhomogeneous-thickness transducer with one face being plane whereas the other concave was manufactured by using 1-3 piezocomposite material. The bandwidth of the transducer, excited by an electrical impulse, is increased because of the different resonant frequencies corresponding to the different thicknesses in the piezocomposite. Also presented are the electromechanical coupling characteristics of the uneven piezocomposite plate, the pulse echo characteristics of a wideband ultrasonic focusing transducer and comparisons of the pulse echo characteristics of transducers with respectively nonhomogeneous and homogeneous thicknesses.

Key words Transducers, Piezocomposites, Piezoelectric plate of nonhomogeneous thickness

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目。

# 1 引言

在水浸无损探伤、超声成像、声波测井及超 声医学等领域,宽带窄脉冲超声换能器有着广 泛的应用前景,为了提高换能器的带宽,通常采 用在换能器的前表面加阻抗匹配层及在后表面 加背衬吸声块技术"1."。一般而言,加背衬吸声 块可以得到较高的相对带宽,但由于有很大一 部分声能传入后背衬,换能器的灵敏度往往很 低,尤其是对于负载较轻的情况(例如水介质) 更是如此。声阻抗匹配层技术较好地解决了高 声阻抗的压电晶片向低声阻抗介质 的 辐射问 题,使换能器的灵敏度及带宽都有所增加,但加 一层阻抗匹配层,换能器的脉冲仍不够窄。从 理论上讲,加两层、三层或更多层匹配层可以使 换能器的相对带宽提高到80%,实际上由干工 艺复杂及匹配层阻抗不易达到理想值,加上粘 结层的影响,相对带宽并不能达到理论值。此 外,从现已发表的文章看,阻抗匹配层虽然提高 了相对带宽,但由于频谱不是高斯型分布,而是 有一些起伏,尽管相对带宽大,而脉冲并不窄。 因此很难实现宽带窄脉冲。

由于 1-3 压电复合材料具有较高的厚度机 电耦合系数  $k_i(\sim 0.6-0.7)$ ,较小的平面机 电耦合系数  $k_p(<0.3)$ ,较低的特性阻抗  $\rho_c$ ( $\sim 8-16MRayls$ ),以及较低的机械品质因子  $Q_M(\sim 10)$ ,它是高灵敏度宽带窄脉冲换能器的 理想材料.

综上所述,要设计宽带窄脉冲超声换能器 必须寻找新的方法.本文利用压电复合材料作 为换能元件,通过特殊工艺制备成一面是平面, 另一面是球面的非均匀厚度压电振子.由于压 电晶片的厚度沿径向逐渐增加,加激励电压后, 不同厚度将以不同的频率振动.因为压电复合 材料中的 PZT 柱只带动周围一小部分环氧树 脂振动,各个细棒之间的相互耦合很小,整个 压电振子就以很宽的频谱振动,从而使换能器 的频带加宽.

• 22 •

# 2 非均匀厚度与均匀厚度压电复合材料 晶片的性能比较

利用已经提出的一种制作 1-3 压电复合材 料的方法<sup>[3]</sup>,制作出厚度:为 2.48mm,直 径 为 25mm,PZT 相体积百分比为 40% 的两 片 性 能完全相同的压电复合材料晶片。把其中一片 通过特殊工艺制备成一面是球面,另一面是平 面的非均匀厚度压电晶片,球面直径为 57mm, 中心厚度为 1mm,其形状如图 1 所示。另一 片作为对照,仍保持为均匀厚度的圆盘。



图1 非均匀厚度压电晶片外形示意图

用 HP4092A 阻抗分析仪测量两片压电晶 片的阻抗特性,其机电特性如表1 所示。

表 1 显示,非均匀厚度压电复合材料晶片 的机械品质因子 Q<sub>M</sub> 仅为 1.5,其在空气中振 动的相对带宽将达到 67%,非均匀晶片在空气 中振动的相对带宽仅为 12%。可见,非均匀厚 度晶片振动的相对带宽确实提高了许多。

表1 压电晶片的机电特性:

	频率f。 (kHz)	k,	Q <sub>м</sub>	特性阻抗 P. (MRayls)
均匀厚度	620	0.67	8.3	14.4
非均匀厚度	1130		1.5	14.4

## 3 换能器的制备及性能

为了便于与均匀厚度压电晶片比较,用相同的工艺制作了均匀厚度与非均匀厚度压电晶 片换能器.换能器的结构示意图为图 2.其中匹 配层或保护膜为环氧树脂,其特性阻抗为 2.88 MRayls. 背衬为环氧树脂与钨粉的混合物,声 阻抗为 8MRayls.

测量换能器脉冲回波特性的测量系统如图 3 所示,反射块为钛试块,超声分析仪输出负尖 脉冲.下面分几种不同情况对换能器的脉冲回

14 卷 2 期



图 2 换能器结构示意图 (a)非均匀厚度晶片换能器 (b)均匀厚度晶片换能器



#### 图 3 测量系统示意图



(a) 换能器 A 的脉冲回波波形, V<sub>PP</sub> = 0.8V
(b) 换能器 B 的脉冲回波波形, V<sub>PP</sub> = 0.7V

波特性及脉冲频谱进行研究. 为了叙述方便, 把非均匀厚度晶片换能器简称为换能器 *A*,把 均匀厚度晶片换能器简称为换能器 *B*.

### 3.1 换能器 A 的聚焦特性

由于用换能器A的凹面作为发射面,因此

应用声学

其声场具有聚焦特性。从理论上讲,换能器*A*的辐射面为等相振动面,其焦点应在其几何球心。但是,压电晶片的厚度是非均匀的,各点的振动频率不一样,会对焦距的长短有影响。我们用脉冲反射法测量换能器*A*的脉冲回波幅

#### • 23 •

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图 5 脉冲回波频谱 (a)换能器A的脉冲回波频谱,中心频率为 1.29MHz,相对带宽为 64% (b)换能器 B的脉冲回波频谱,中心频率为 659kHz,相对带宽为 22%。



图 6 加匹配层时的脉冲回波波形

(a) 换能器 B 加一层阻抗匹配层时的脉冲回波波形,  $V_{PP} = 0.95V$ 

(b)换能器 B 加一层阻抗匹配层时的脉冲回波频谱,中心频率为 580kHz,相对带宽为 33%。

度,确定出幅度最大值时换能器表面离反射面 的距离大约为35mm,比球面半径28.5mm 要 大一些.精确的焦距需要考虑振动频率及振动 幅度的影响.

## 3.2 空气背衬、水负载时换能器的脉冲特性

用图 3 所示的测量系统测量两种换能器的 脉冲回波特性. 换能器前表面直接和水耦合、 后表面为空气,换能器表面离反射面之间的距 离为 35mm (即换能器 A 的焦点处). 图 4(a) 和 (b) 是用数据采集系统得到的换能器 A 和换

• 24 •

能器 B的脉冲回波波形. 图 5(a)和(b)分别为 图 4(a)和(b)通过傅里叶变换后的频谱特性. 从图中可以看出,换能器 A的脉冲回波幅度略 高于换能器 B,其脉冲宽度要比换能器 B小得 多,即其频带宽度要比后者大将近两倍(64%: 22%),充分说明了非均匀厚度压电晶片大大增 加了换能器的带宽. 图 6(a)和(b)还示出了换 能器 B加一层匹配层时在水中的脉冲回波波形 及频谱. 图中显示回波首波幅度有所增加,带 宽也相应增加到 33%,但仅为换能器 A 相对带

#### 14 卷 2 期



图 7 加背衬时脉冲回波波形

(a) 换能器 A 加背衬时的脉冲回波波形, V<sub>PP</sub> = 0.4V
(b) 换能器 B 加背衬时的脉冲回波波形, V<sub>PP</sub> = 0.35V



#### 图 8 加背衬时脉冲回波频谱

(a)换能器 A 加背衬时脉冲回波的频谱,中心频率为 1.03 MHz,相对带宽 104%. (b)换能器 B 加背衬时的脉冲回波频谱,中心频率 800kHz,相对带宽为 54%.

宽的一半.这进一步说明用加匹配层来增加带 宽是很有限的.

#### 3.3 有背衬、水负载时的脉冲回波特性

应用声学

虽然换能器 A 的脉冲回波特性 有 很 大 改 善,但还不够理想.在这种情况下,唯一的选择 是加适当的背衬.本文用环氧树脂与钨粉的混 合物作为背衬,其特性阻抗为 8MRayls。两种 换能器的脉冲回波波形分别如图 7(a) 和(b)所 示,其频谱如图 8(a) 和(b).图中显示,脉冲长 度大大减小,同时回波幅度也相应减小.从图 中还可以看出,换能器A的脉冲回波波形已近 似一个周期,相对带宽达到104%;用一般均匀 压电片要在水中实现一个周期的脉冲回波波形 是非常困难的.换能器A不仅相对带宽高于换 能器B(104%:54%),而且回波幅度也略高于 换能器B.

# 3.4 换能器 A 的凹面用环氧树脂填平时的脉 冲回波特性

• 25 •

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图 9 换能器 A 凹面填平时在 40mm 厚聚苯乙烯塑料底面反射的脉冲回波及其频谱
(a)脉冲回波波形, V<sub>PP</sub> = 0.45V
(b)脉冲回波波形的频谱,中心频率为 830kHz,相对带宽为 70%。

为了能在固体材料上应用,我们把换能器 A的凹面用环氧树脂填平,成为接触式直探头. 从不同厚度的聚苯乙烯塑料块底面反射的回波 幅度大小测出其焦距大约为40mm,脉冲回 波 波形如图 9(a),图 9(b)为其频谱特性. 与图 7(a)、8(a)相比,脉冲变长,相对带宽变小,但 仍然比换能器 B的脉冲短,频带宽.

## 4 结论

本文通过对非均匀厚度压电晶片换能器脉 冲回波特性及声场聚焦特性的实验研究,得到 了一种具有实用价值的宽带窄脉冲聚焦换能 器.这种换能器不仅可以实现在水中聚焦,也

(上接第48页)

几千平方毫米的大范围发现数十微米的微小缺陷.

该项研究解决了高频窄脉冲超声无损检测、具有 高速功能的逻辑控制电路和软件等一系列技术关键, 已获得关于高频超声聚焦探头和微机控制精密扫描机 两项国家实用新型专利权.所完成的样机工作频率 20-120MHZ,最大扫描面积200mm×200mm,扫描 步长1-999μm可调,绝对定位精度不大于11μm.采 用先进的双 CPU 控制方式,汉化菜单选择方式输入 指令和参数.16 色伪彩色或灰阶显示图形,扫描结果 实时显示并有丰富的图像处理功能.C 扫描像有良好 的保真度.同时可以实现较大的"景深".专家们认为 可以实现在固体材料中聚焦.

从实验结果看,充分利用压电复合材料的特性进一步改善换能器的脉冲特性是可能的.

**致谢** 朱厚卿教授为测量压电晶片的性能提供 了很大的帮助,作者在此表示衷心的感谢.

#### 参、考文献

- [1] Kossoff G. IEEE Trans. On Sonics and Ultrasonics, 1966, SU-13 20.
- [2] Gou J H. IEEE Trans. On Sonics and Ultrasonics, 1979, SU-26 385.
- [3] 耿学仓、李明轩.应用声学,1991,10(5): 10.

该项目的研究成果在结构陶瓷材料超声无损检测设备 和方法方面处于国内外领先水平.该项成果,说明我 国的超声C扫描成像无损检测已从低频领域跃进到高 频高技术领域,具有较高的学术水平.

该项目所完成的精密高频超声C扫描成象检测系 统和方法,不仅适用于结构陶瓷材料,也适用于其它需 要高精度检测的场合,例如对某些先进复合材料的检 测,能解决一些其它检测方法不能解决的问题,可以成 为集成电路制造、材料结构分析、断裂力学、生物医学 工程等研究和生产领域的有力工具.

(中科院声学所 邓京军)

#### 14 卷 2 期

• 26 •