



Barker 码体波脉冲压缩换能器的研究

何 菁 李 明 轩

(中国科学院声学研究所)

1989 年 9 月 12 日收到

本文从压电圆片二维等效电路出发,导出了多层结构的传输矩阵。对 PZT,PT 做成的多层编码发射和多层倒置接收换能器,在阶跃电脉冲激励下实现了 Barker 码脉冲压缩。从理论和实验上分析讨论了径向模、背衬、负载、粘接层、介电损耗和机械损耗等对压缩效果的影响。理论与实验结果基本符合。在解决了某些工艺困难之后,作出了 PZT 和 PT 的 Barker 码体波脉冲压缩换能器。

一、引 言

超声检测中既要求有大的探测深度又要有高的分辨率,这两项要求常常是相互矛盾的。为解决这个问题,多年来主要是在换能器和信号处理两个方面进行了大量的工作。

从换能器角度,要求换能器有尽可能高的电声转换效率同时具有宽带特性,但这两个要求通常是不可兼得的。脉冲压缩技术,是可以同时获得高的穿透力和高分辨率的有效方法。目前发展的一些应用于超声检测脉冲压缩系统^[1-4],信号展宽和压缩是通过电子设备完成的,比较复杂,成本高。

声表面波技术的发展,可以把信号展宽和压缩过程通过一个表面波器件来完成。在体波超声检测中,能否也类似于声表面波叉指换能器的作法,做一对多层结构的体波换能器来实现脉冲压缩,我们很早就萌发了这样一个想法。K. M. Sung^[5] 1984 年做出了石英多片结构换能器,实现了体波的脉冲压缩。不过 K. M. Sung 的工作是在忽略了径向振动^[6]和声电再生机电转换^[7],只取表面换能近似在弱耦合的

应用声学

石英压电片上作出的。不但缺乏实用性,而且显得粗糙。本文从压电圆片二维等效电路出发,导出了多层结构的传输矩阵,对 PZT 等强耦合压电材料做成的单发单收换能器实现了 Barker 码脉冲压缩。并从理论和实验上分析讨论了径向模、背衬、负载、粘接层、介电损耗和机械损耗等对压缩效果的影响。理论和实验结果基本相符合。在解决了某些工艺困难之后,作出了 PZT 和 PT 等 Barker 码体波脉冲压缩换能器。

二、多层结构传输矩阵

为了讨论考虑径向振动影响在内的多层结构换能器的发射和接收问题,对于单一压电圆片,我们采用了二维等效电路^[6],压电圆片如图 1 所示,它的二维等效电路如图 2 所示。取径向负载为空气,则 $F_{111} = 0$,由此得

$$U_{111} = \frac{Z_c}{Z_s} (U_1 + U_{11}) - \frac{n_r}{Z_s} V$$

$$F_1 = \left(-\frac{n_z^2}{j\omega c_0} + \frac{Z_r}{j \sin k_z l} - \frac{Z_c^2}{Z_s} \right)$$

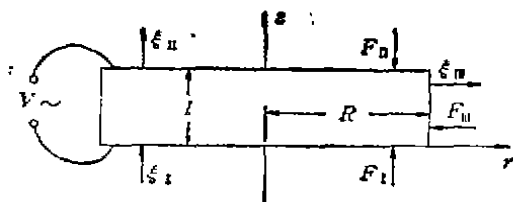


图1 单一压电圆片

$$F_{II} = \left(-\frac{n_z^2}{j\omega c_0} + \frac{Z_T}{j \sin k_z l} - \frac{Z_c^2}{Z_s} \right) \cdot (U_I + U_{II}) + \left(n_z - n_r \frac{Z_c}{Z_s} \right) V + jZ_T \operatorname{tg} \frac{k_z l}{2} U_{II}$$

$$\cdot (U_I + U_{II}) + \left(n_z - n_r \frac{Z_c}{Z_s} \right) V + jZ_T \operatorname{tg} \frac{k_z l}{2} U_I$$

$$I = (j\omega c_0 + n_r^2/Z_s)V - \left(n_z - n_r \frac{Z_c}{Z_s} \right) (U_I + U_{II})$$

这时图2可简化为一维等效电路形式，对于多层结构，其电学并联等效线路如图3所示，其电

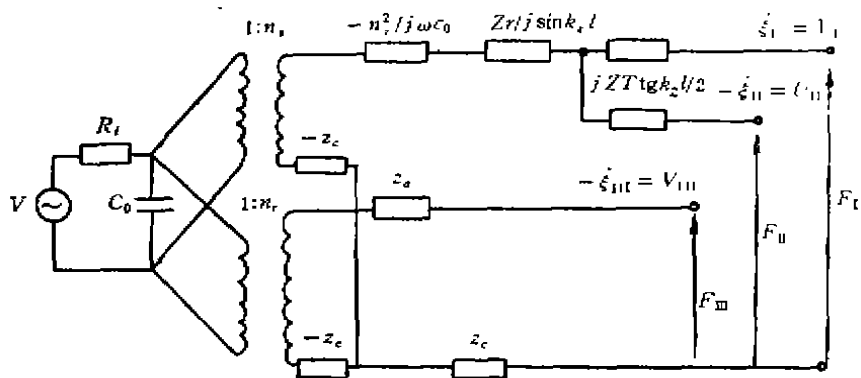


图2 压电圆片的二维等效电路

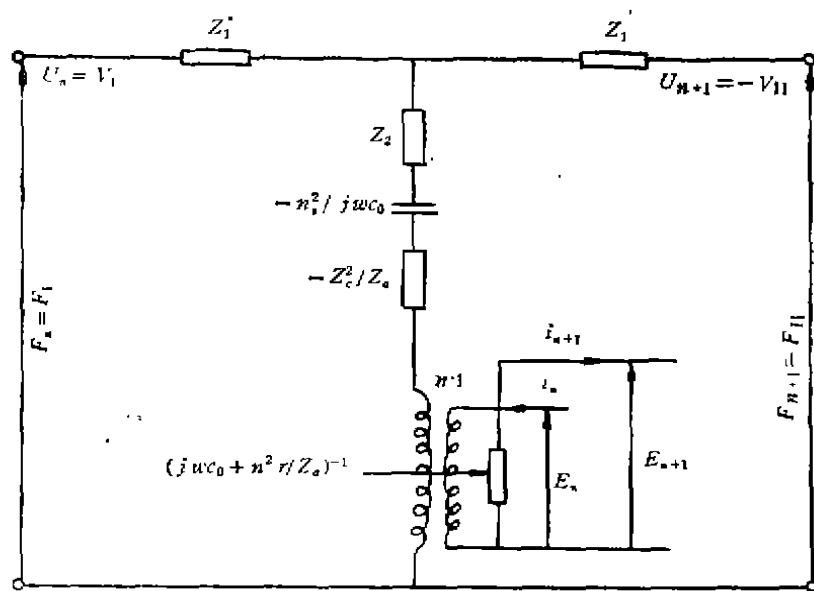


图3 电学并联时的等效电路

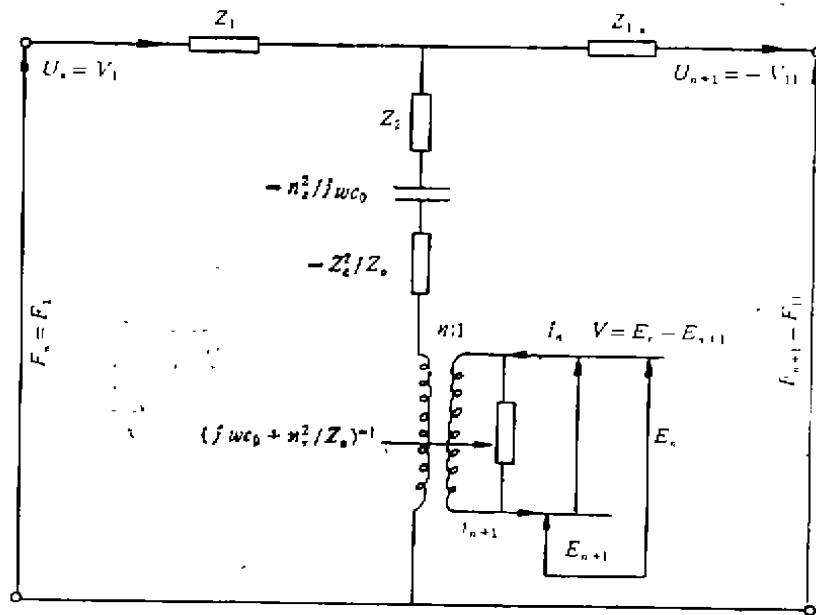


图4 电学串联时的等效电路

学串联等效线路如图4所示。

图中 $Z_1 = jZ_1 \tan \frac{k_z l}{2}$, $Z_2 = Z_T / j \sin(k_z l)$, c_0 是静电容, 定义传输矩阵 $(T)_n$ 为

$$\begin{pmatrix} F_n \\ U_n \\ E_n \\ i_n \end{pmatrix} = (T)_n \begin{pmatrix} F_{n+1} \\ U_{n+1} \\ E_{n+1} \\ i_{n+1} \end{pmatrix}$$

对于图3并联时 $E_n = E_{n+1}$, 可求得

$$(T)_n = \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z'_1}{Z} & \frac{Z'_1 + 2ZZ'_1}{Z} & -\frac{Z'_1}{Z} & 0 \\ \frac{1}{Z} & 1 + Z'_1/Z & -\frac{n}{Z} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{n}{Z} & -\frac{nZ'_1}{Z} & Z'_1 + \frac{n^2}{Z} & 1 \end{pmatrix}$$

对于图4串联时 $i_n = i_{n+1}$, 可求得

$$(T)_n = \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z'_1}{y_1} & 2Z'_1 + \frac{Z_1'^2}{y_1} & 0 & -\frac{nZ'_1}{Z_3 y_1'} \\ \frac{1}{y} & 1 + \frac{Z'_1}{y_1} & 0 & -\frac{n}{Z_3 y_1} \\ \frac{n}{y_1 Z_3} & \frac{nZ'_1}{y_1 Z_3} & 1 & \frac{1}{Z_3} - \frac{n^2}{Z_3'^2 y_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

应用声学

式中

$$Z = \frac{Z_T}{j \sin k_z l} (1 - s) - \frac{Z_c^2}{Z_s},$$

$$Z'_1 = \frac{Z_T (\cos v - 1)}{j \sin v},$$

$$Z'_3 = j\omega c_0 + \frac{n_r^2}{Z_s}, \quad y_1 = Z + \frac{n^2}{Z_3},$$

其中

$$s = \frac{k_z^2 \sin v}{v}, \quad v = \frac{\pi f}{f_0}, \quad n = n_x - n_r, \quad \frac{Z_c}{Z_s},$$

$$Z_T = (\pi R^2) \rho V_z, \quad V_z = \left(\frac{c_{33}^E}{\rho_D} \right)^{1/2} \text{ (纵向波速度),}$$

$$Z_R = (2\pi R) \frac{c_{13}^E}{j\omega},$$

$$Z_s = -jZ_R \frac{J_0(k_r R)}{J_1(k_r R)} - \frac{2\pi l}{j\omega} (c_{11}^E - c_{12}^E),$$

$$n_z = \frac{\pi R^2}{l} l_{33} \text{ (纵向机电转换系数),}$$

$$n_r = 2\pi R l_{31} \text{ (径向机电转换系数),}$$

$$k_z = \frac{\omega}{V_z} \text{ (纵波波数),}$$

$k_r = \frac{\omega}{V_r}$ (径向波波数), k_z 是纵向机电耦合系数, k_r 为径向机电耦合系数, $f_0 = V_z/2l$, 是

纵向共振频率, c_{mn}^D 和 c_{mn}^E 分别为压电片电位移不变和电场强度不变时的劲度常数。

对于纯力学层,忽略径向振动后, $(T)_n$ 可简化为

$$(T)_n = \begin{pmatrix} \cos \nu & jZ_T \sin \nu \\ j \sin \nu / Z_T & \cos \nu \end{pmatrix}$$

对于电极间粘接层,若电学并联,则

$$(T)_n = \begin{pmatrix} \cos \nu & jZ_T \sin \nu & 0 & 0 \\ \frac{j \sin \nu}{Z_T} & \cos \nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & j\omega C'_0 & 1 \end{pmatrix}$$

若电学串联,则

$$(T)_n = \begin{pmatrix} \cos \nu & jZ_T \sin \nu & 0 & 0 \\ \frac{j \sin \nu}{Z_T} & \cos \nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1/j\omega C'_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

式中 C'_0 为粘接层电容。

为便于计算,我们进一步简化上述矩阵,

定义 $(A)_c$ 为 $\begin{bmatrix} V \\ i \end{bmatrix} = (A)_c \begin{bmatrix} F_{n+1} \\ U_{n+1} \end{bmatrix}$, $(A)_c =$

$\begin{pmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{pmatrix}$, F_{n+1} 和 U_{n+1} 分别是负载面上总的

作用力和速度, V 和 i 分别是加在压电片上的电压和流入压电片的电流。总传输矩阵 $T =$

$\prod_{n=1}^{N_c} (T)_n$, 由电学串联条件可得 $(A)_c$ 为

$$A_c = T_{11} - T_{31}(T_{21}Z_B + T_{11})/(T_{23}Z_B + T_{13})$$

$$B_c = T_{32} - T_{33}(T_{22}Z_B + T_{12})/(T_{23}Z_B + T_{13})$$

$$C_c = T_{41} - T_{44}(T_{21}Z_B + T_{11})/(T_{23}Z_B + T_{13})$$

$$D_c = T_{42} - T_{44}(T_{22}Z_B + T_{12})/(T_{23}Z_B + T_{13})$$

由电学并联条件可得 $(A)_c$ 为

$$A'_c = T_{11} - T_{31}(T_{21}Z_B + T_{11})/(T_{23}Z_B + T_{13})$$

$$B'_c = T_{32} - T_{33}(T_{22}Z_B + T_{12})/(T_{23}Z_B + T_{13})$$

$$C'_c = T_{41} - T_{43}(T_{21}Z_B + T_{11})/(T_{23}Z_B + T_{13})$$

$$D'_c = T_{42} - T_{43}(T_{22}Z_B + T_{12})/(T_{23}Z_B + T_{13})$$

上述公式中 Z_B 为背衬阻抗。

• 4 •

三、计算机模拟与实验验证

在我们研制的 Barker 码脉冲压缩换能器中,相邻层之间均采用电学串联,压电片的极化极性是按照 Barker 码排列的,在计算中是通过改变 k_i 的符号来表示其极性, Barker 码列如表 1 所示。作脉冲压缩工作简图如图 5 所示,图中 R_i 是激励源内阻, V 是激励源信号, V_0 是接收信号, R_0 是接收器的输入阻抗,忽略负载介质中传输响应则有

$$V_0 = \left(\frac{V Z_E}{Z_E + R_i} \right) \cdot \left(\frac{Z_F}{Z_F A_c + B_c} \right) \cdot \left(\frac{R_0}{R_0 D_c - B_c} \right) M.$$

式中 $Z_E = \frac{A_c Z_F + B_c}{C_c Z_F + D_c}$. 在 V 的表示式中,第一项表示信号源内阻分压影响,第二项表示发射响应,第三项表示接收响应, M 为 $(A)_c$ 矩阵行列式。

表 1 Barker 码列

编码长度	编 码 元
1	+
2	+-, ++
3	++-
4	+++-, +++-
5	++++-
7	++++--+-
11	++++-----+-
13	+++++---+-+-

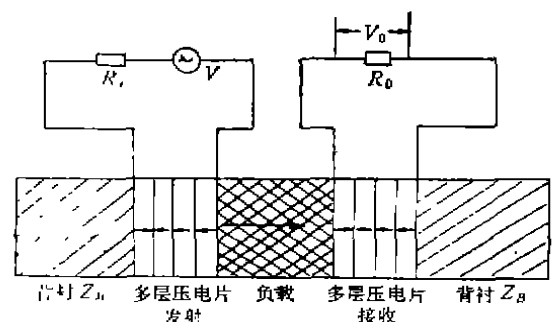


图 5 脉冲压缩工作示意图

为了验证理论,我们首先计算了 PZT 压电材料编码 1 和编码 4 的发射波形,编码 1 取 PZT 压电片厚为 1.3mm,直径 26mm,匹配背衬,钛负载,10V 阶跃脉冲激励。理论波形如图 6 (a)所示,采用厚片法接收^[9]得实验波形如图 6 (b)所示。编码 4,取 PZT 压电片厚为 0.65 mm 直径为 26mm、匹配背衬钛负载,10V 阶跃脉冲激励,压电片排列如图 7 (a)所示。理论波形如图 7 (b)所示,采用厚片法接收实验波形如图 7 (c)所示。从图 6 和图 7 不难看出,理论与实验结果基本相符。但从这些波形看与标准的方波 Barker 码列波形相比均有较大的畸变。

为了考查这种情况下是否还可以实现脉冲压缩,我们进一步计算了编码 3 和编码 5 的接收波形。编码 3,取 PZT 压电片厚为 0.65mm 直径为 26mm。匹配背衬钛负载,按图 8 (a)所示排列、在 10V 阶跃脉冲激励下,得理论波形如图 8 (b)所示,接收实验波形如图 8 (c)所示。编码 5,取 PZT 压电片厚为 2 mm 直径 20mm,匹配背衬钛负载,按图 9 (a)所示排列,在 10V 阶跃脉冲激励下,得理论波形如图 9 (b)所示,接收实验波形如图 9 (c)所示。

从图 8 和图 9 可见,理论与实验基本相符,接收波形有明显的压缩效果。

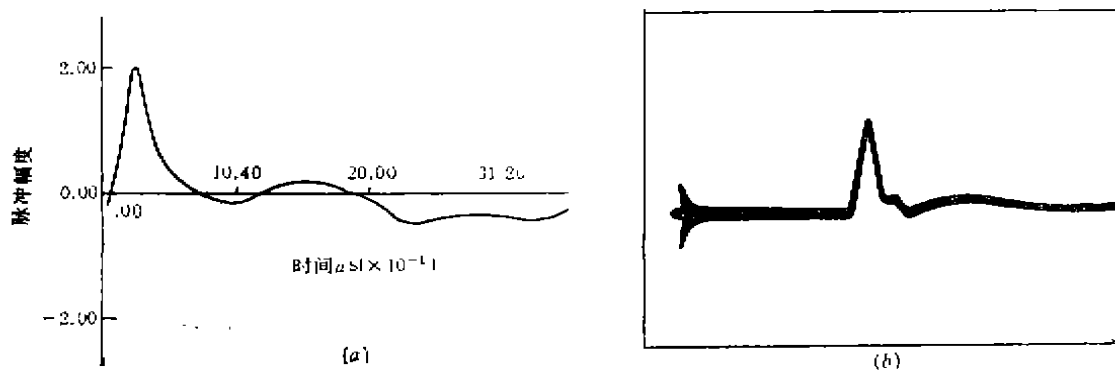


图 6 编码 1 理论与实验波形
(a) 理论波形 (b) 实验波形。

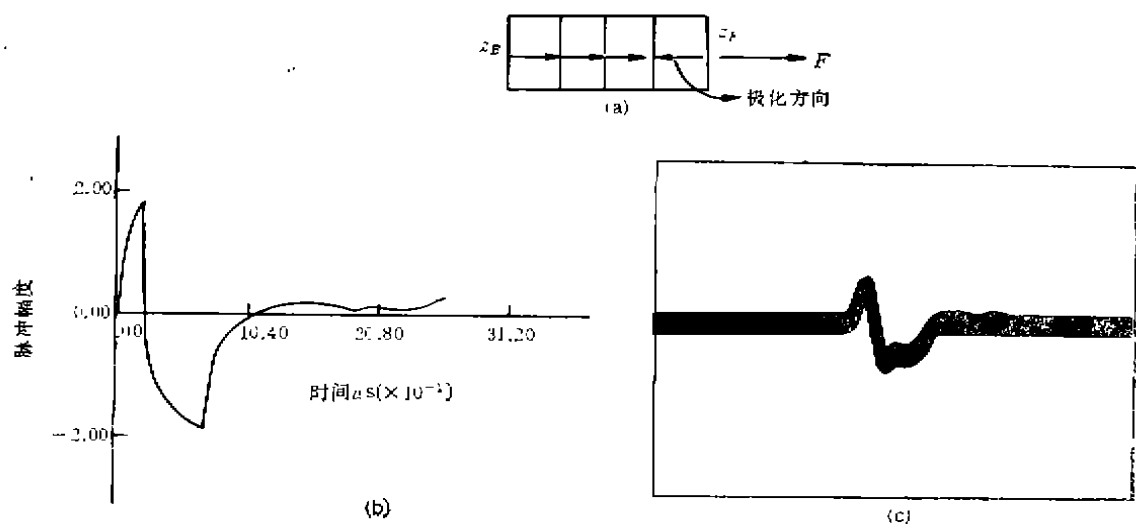


图 7 编码 4 理论与实验波形图
(a) 压电片排列 (b) 理论波形, (c) 实验波形。

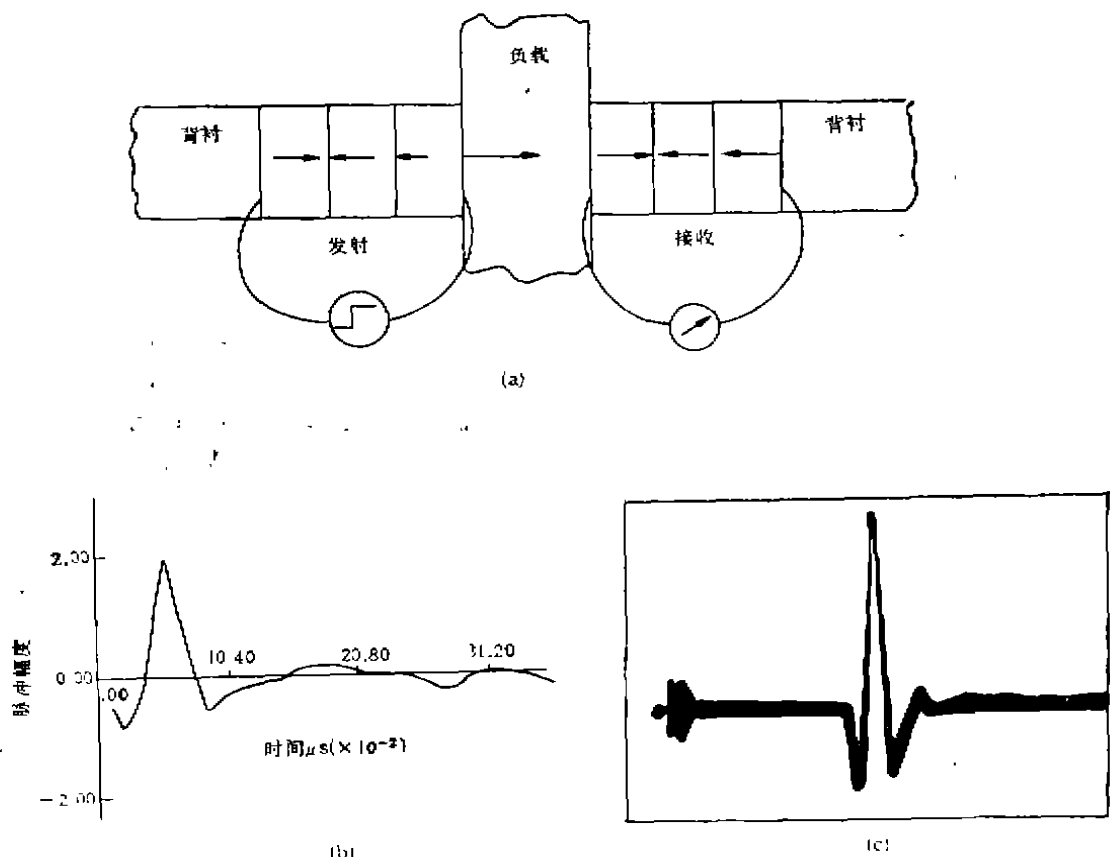


图8 编码接收理论与实验波形
(a) 发射接收编码排列 (b) 理论波形, (c) 实验波形

四、影响压缩效果的几个因素的讨论

影响脉冲压缩效果的因素很多,主要有背衬,负载,粘接层、径向振动,介电损耗和机械损耗,传输介质的损耗和远场声束扩散等。下面主要通过理论计算核算并附部分实验,就上述各因素对压缩效果的影响作些分析讨论。

1. 背衬和负载阻抗的影响

为了讨论背衬和负载阻抗的影响,我们对PZT压电片作成编码7发射接收系统进行了计算。结果表明,只有背衬与压电片阻抗匹配时压缩效果最好,接近匹配时稍好,远离匹配(过轻或过重)时压缩效果均不好。我们采用同样方法对编码7固定背衬,改变负载阻抗进行

计算,结果表明负载阻抗对压缩效果影响不大。过轻或过重时幅度减小,匹配时幅度最大。

2. 粘接层对压缩效果的影响

为了讨论粘接层厚度的影响,我们对编码7通过改变粘接层厚度的大量计算,结果发现粘接层越薄对压缩效果影响越小,粘接层越少影响也越小。计算结果表明,对于环氧树脂粘接层,厚度大于 $\lambda/100$ 时,一般压缩效果已很坏了。

3. 径向振动对压缩效果的影响

为讨论径向振动的影响,我们分别选取了弱径向机电耦合系数的PT(钛酸铅)压电材料和强径向机电耦合系数的PZT(锆钛酸铅)压电材料,对编码11进行了对比计算,对编码5进行了对比实验,其实验结果如图10所示。

理论与实验结果表明,弱径向振动的压电

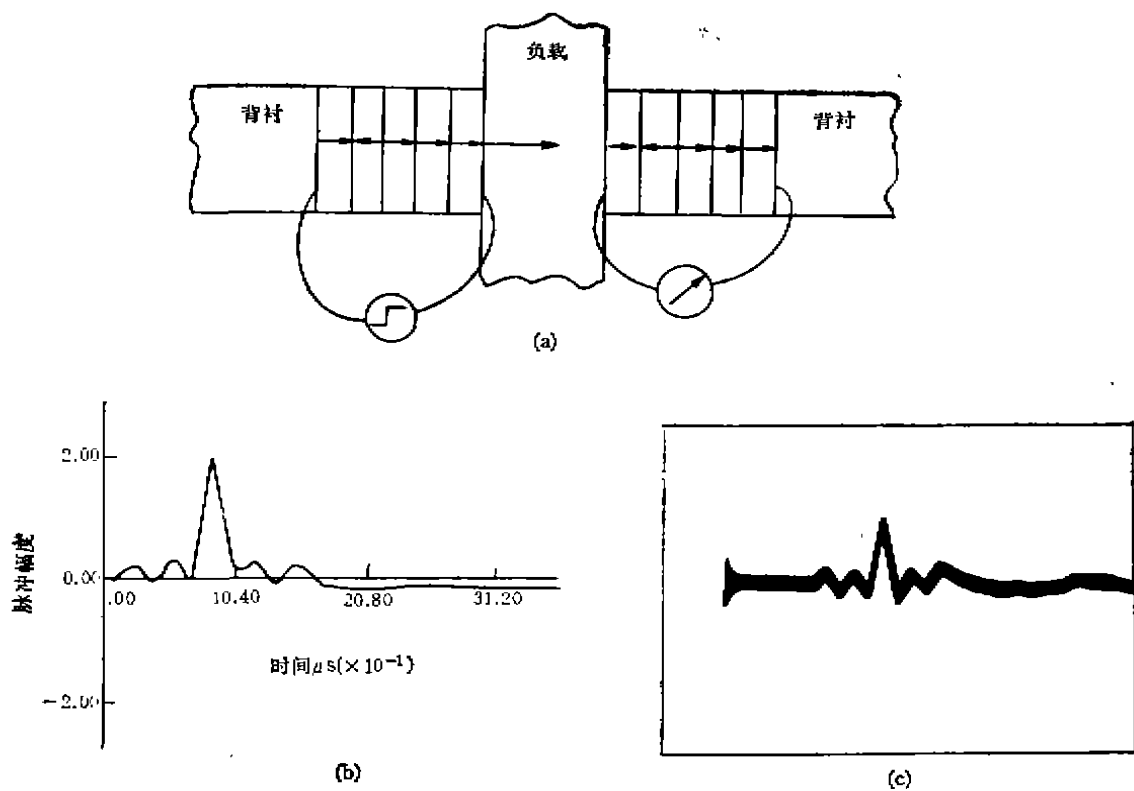


图9 编码5接收理论与实验波形
(a) 编码5发射接收编码排列, (b) 理论波形, (c) 实验波形

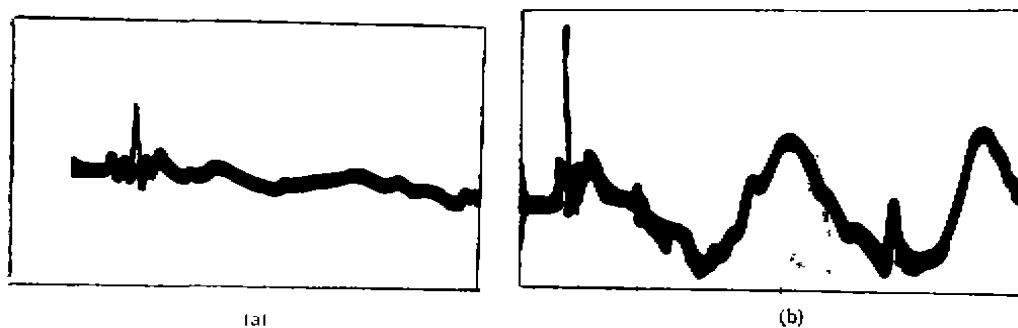


图10 编码5匹配背衬, 钛负载时 PT 和 PZT 材料实验波形
(a) PT 压电材料, (b) PZT 压电材料。

材料 PT 波形基线基本比较平直, 而强径向振动的压电材料 PZT 的波形中除有压缩波形外, 还附有一低频的振荡, 但并不影响纵向脉冲波波的压缩。不过在实际工作中, 还是以选取弱径向机电耦合系数的压电材料为宜, 它可减小或避免径向振动的干扰。

4. 压电片介电损耗和力学损耗的影响

应用声学

为了讨论压电片材料介电损耗和机械损耗对压缩效果的影响, 我们选取了 PVDF 材料编码7进行了对比计算, 结果表明, 压电材料介电损耗和机械损耗对压缩效果均有一定影响, 但仍有明显的压缩效果。这种影响在工程上似乎是可以允许的。

5. 传输介质的影响

本文所研究的这种 Baker 码体波脉冲压缩换能器,应用前景尚还很难预料,为了探讨应用的可能性,这里对传输介质的影响作了初步的实验,其中包括考虑远场声束扩散影响实验、有较强衰减的影响实验和分层负载的影响实验。

选取 PZT 压电片厚为 0.65mm 直径为 20mm,负载钢厚为 100mm(近场距离约为 50mm),编码 3 的实验结果,如图 11 所示。

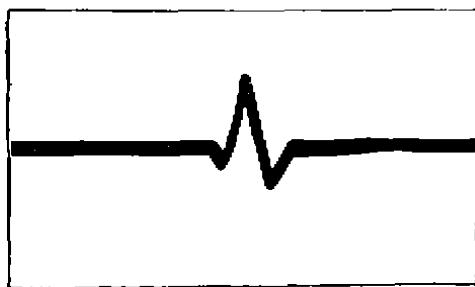


图 11 编码 3 远场实验波形

从图中波形可见,远场有声束扩散情况下,仍有压缩效果。

为了考查传输介质损耗的影响,我们选取了有机玻璃作为负载传输介质,取 PT 压电片厚为 2mm 直径为 20mm,编码 5 得实验波形如图 12 所示。

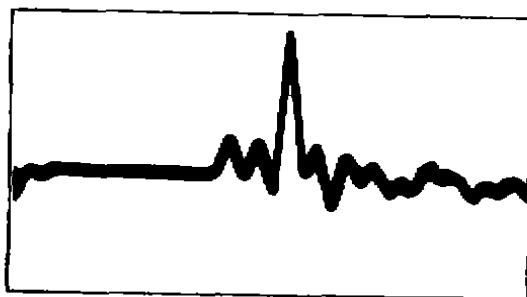


图 12 编码 5 有机玻璃负载实验波形

从图中波形可见,尽管有机玻璃衰减较大,但仍有明显的压缩效果。

图 13 为取负载为钛(20mm)和有机玻璃(20mm)两层介质作为传输介质,PZT 压电片厚为 0.65mm 直径为 26mm,编码 3 所得实验波形

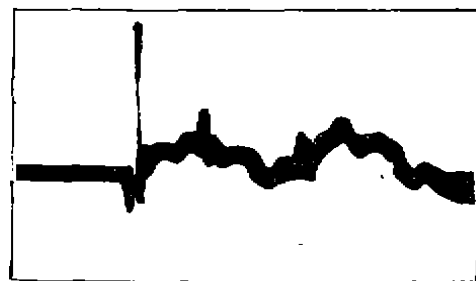


图 13 编码 3,负载为钛和有机玻璃两层介质的实验波形

图中波形显示有明显的压缩效果,并有层间回波显示。

从上面的这些实验,虽然还不能肯定这种体波脉冲压缩换能器有其应用的光明前景,但起码使我们看到了有应用的可能性。

五、结 论

1. 本文从压电圆片二维等效电路出发,导出了多层结构的传输矩阵,并对收发系统进行了 Barker 脉冲压缩计算和实验验证,理论结果与实验结果符合较好。

2. 理论与实验均表明,对于强机电耦合的压电材料 PZT 和 PT 等,尽管有声电再生机电转换的影响,仍可以作出较好的脉冲压缩结果。

3. 多层压电体实现体波 Barker 码脉冲压缩的条件是作到背衬与压电片阻抗匹配或接近匹配,并且粘接层要求薄。一般不应超过粘接层内波长的一百分之一。这些条件在工艺上实现都是较为困难的,我们在解决了这些工艺难点之后作出了较好的 Barker 码体波脉冲压缩的结果。

4. 压电体介电损耗和机械损耗,径向模振动、负载传输介质的损耗及远场声束扩散等,对压缩效果均有影响,但仍可以给出明显的压缩效果,在分层负载传输介质情况下,还可看到层间回波,这些结果为这种换能器的应用提供了一种可能。

本工作得到应崇福教授的关心和指导和张

海澜、杨玉瑞、许建平同志的大力帮助、在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Lam F. K. and Szilard J., *Ultrasonics*, 14-3 (1976), 111-114.
- [2] Furgason E. S., et al., *Ultrasonics*, 13-1 (1975), 11-17.
- [3] Lee B. B. and Furgason E. S., *Ultrasonics*, 21-4(1983), 153-161.
- [4] Lam F. K. and Hui M. S., *Ultrasonics*, 20-3 (1982), 107-112.
- [5] Sung K. M., *Ultrasonics*, 22-2(1984), 61-68.
- [6] 应崇福,张海澜,李明轩,声学学报 9-1(1984),1-11.
- [7] Zhang H. L., Li M. X. and Ying C. F., *J. Acous. Soc. Am.*, 74-4(1983), 1105-1114.
- [8] Ying C. F., Li M. X. and Zhang H. L., *Ultrasonics*, 19-4(1981), 155-158.

超声脉冲回波谱分析全自动化 测量系统的研制*

毛伟年 王新龙 张卫 陈兆华 叶式公 冯若

(南京大学声学研究所)

1989年9月18日收到

本文报道了一种全自动化超声脉冲回波谱分析测量系统。该系统具有对超声回波信号进行快速选择性采样、存贮、数字分析与处理及微机程序软件控制三维机械扫描等功能,可对生物组织样品的超声衰减系数谱、背向散射系数谱及回波谱自相关进行测量与分析。对一系列哺乳动物软组织样品所做的实验研究表明,该测量系统给出了令人满意的研究结果。

一、引 言

目前在医学临床上广泛应用的A型、B型超声诊断仪都是基于超声脉冲回波检测技术的。A型和B型超声诊断仪仅仅利用了超声脉冲回波的幅度参数来提取诊断信息。然而实际的回波信号不仅在幅度上包含有被测组织的某些信息,而且在其频谱分析中可能包含有更丰富的、更能表征组织结构特征的信息,因此通过对超声脉冲回波信号进行宽带频谱分析可以获得更多反映组织特征的信息,增加诊断信息量、扩大诊断范围、提高临床确诊率,为发展新型的定量超声诊断技术探索途径。

来自人体软组织的超声背向散射信号是B型超声诊断仪用于断层成像的主要信号,为进行生物组织超声背向散射谱的研究,我们研制、建立了一套超声脉冲回波谱分析全自动化测量

系统。该系统具有对超声回波信号进行快速采样、记录、数字分析与处理及程控机械扫描,以测量生物组织的超声衰减系数谱、背向散射系数谱及对回波频谱进行自相关分析等功能。利用该测量系统对动物软组织进行了一系列有关超声散射回波谱分析研究,取得了令人相当满意的结果。

二、测量系统的总体构成

整个测量系统包括硬件和软件两大部分。硬件主要由以下几部分组成:宽带脉冲激励单元,宽带超声脉冲发、收换能器,宽频带、高增益接收放大器及门电路,数字采样器及微型计算机控制和数据分析处理系统,微机控制的三维机械扫描系统及测量水槽等,如图1所示。

* 国家自然科学基金资助的课题