

一种实验相控阵声成象换能器的结构和性能*

[美] J. 弗莱明·迪亚斯

(惠普公司, 加州)

本文介绍一种用于心脏成象的相控阵换能器中 PZT 基元的电连接技术。该换能器采用叠层结构, 将表面镀有金属的 PZT 基片通过具有适当声阻抗的氧化铝衬底与吸声材料相粘接。PZT 基片被切割成一个基元阵, 一层与声透镜外形相同的金属箔粘在基元的顶部, 作为公共接地极。换能器外面罩有一个氧化铝盒, 对于 PZT 基元的电连接是通过氧化铝盒两侧的丝网印刷导线来实现的。将此叠层式换能器组件装在亚麻电木壳内, 然后注入硅橡胶, 加以密封。

本文还介绍了我们所采用的吸声材料表面的加工技术, 采用这一技术能够增加换能器的带宽。最后, 我们给出了该换能器在探测水中点目标时所获得的脉冲-回波响应。

引 言

在两维超声图象设备中, 常用相控阵换能器照射身体器官使之成象。比如, 在心脏成象时, 超声声束通过肋骨之间的窄缝而进入胸腔。由于窄缝限制了与人体相接触的换能器面的尺寸, 因此, 为了获得心脏的全视图, 换能器必须进行扇形扫描。

声成象换能器包含一个压电基元阵, 一般由 PZT 一类陶瓷所制成, 设置在平坦的表面上, 能够以垂直于该表面的方向辐射声束。在激励这些基元时, 引入适当的时延, 即能使波束产生扇形扫描, 同时, 保持在预定的距离上聚焦。由于基元具有双向作用, 在径向将产生两个反向的波束, 因此, 为了获得良好的纵向分辨力, 必须把其中一个波束吸收掉, 使其能量耗散在吸声背衬中。

如果希望换能器具有最大带宽, 则吸声材料的声阻抗必须与 PZT 基元的声阻抗相匹配。当采用钨-乙炔基这类导电性背衬时,

必须在 PZT 和背衬之间插入用非导电材料制成的中间层。而这个中间层本身又必须在声学上匹配, 以使声波通过界面时达到最大的能量传递。关于声成象换能器的特殊问题已由 Karrer 等人作过讨论, 更为详尽的探讨是由 Kino 和 Desilets 给出的。我们所研制的相控阵换能器包括以下几个部分:

1. 具有适当声阻抗的氧化铝界面衬底。
2. 与氧化铝界面衬底刚性连接的氧化铝盒。换能器阵的基元可以通过盒子两侧的丝网印刷导线与外界(电缆)相连接。
3. 用于吸收反射辐射声能的钨-乙炔基背衬。它被嵌在氧化铝盒内, 并且粘接在氧化铝界面衬底的下面。
4. 与氧化铝界面相粘接的 64 个 PZT 基元组成的基阵。每个 PZT-5H 基元为 0.24 毫米宽, 14 毫米长, 0.48 毫米厚。相邻两个基元中心的间距是 0.3 毫米, 在 2.5 兆赫时约为 $\lambda/2$ 。
5. 一张黄铜箔, 粘接在 PZT 基元的上面。

* 本文摘译自 [美] Ultrasonic Imaging 3, 352—368 (1981).

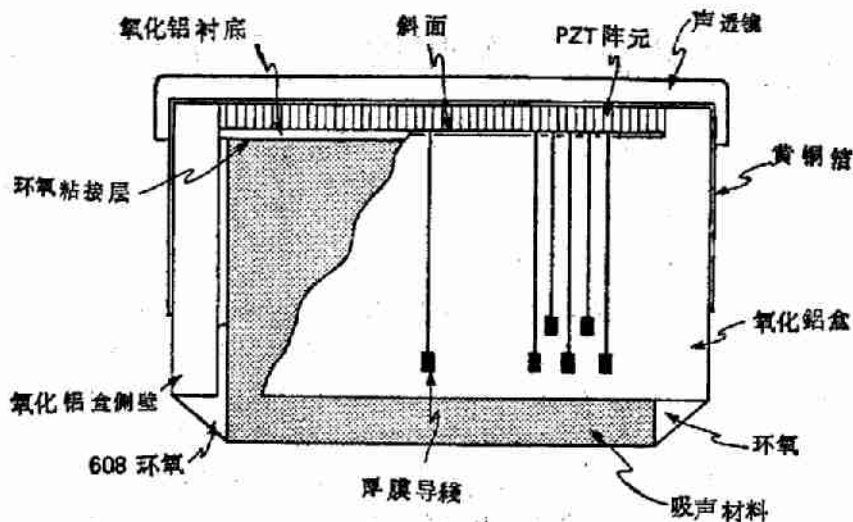


图1 换能器组件的部分截面图(说明吸声材料与氧化铝衬底之间的连接情况)

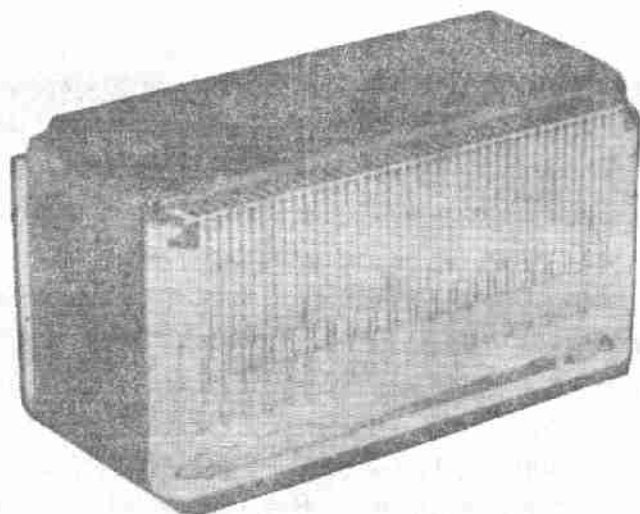


图2 制成的换能器组件(声透镜以及具有同样外形的黄铜箔粘接在PZT阵元上。黄铜箔本身弯曲向下,用作基元的接地点)

6. 一个与黄铜箔相粘接的声透镜,它是一种环氧在 100°C 温度下硫化40分钟后得到的模制品。此透镜具有一定曲率,使声束在人体内部7厘米处产生弱聚焦。

图1为叠层式换能器组件的局部截面,图2则是一个完整的换能器组件的照片。总的尺寸是3厘米 \times 1.4厘米 \times 1.8厘米,与人体相接触的表面为2.8厘米 \times 1厘米。此组件的外面围以亚麻电木框架。框架的凹进处

镀上铜,形成0.1毫米厚的屏蔽层,以防止外界电场的干扰,也可作为共同的电气接地点。与外界(整机)的连接是经由一条64芯电缆实现的,每根芯线都是独立屏蔽的。换能器组件与电缆之间则通过一块印刷电路板相连接,印刷电路板也可起张力缓冲器的作用。最后,将硅橡胶密封剂注入电木框架中,加以密封;密封剂是一种化合物,常用于汽车引擎中作为固位用的填料。

本文将描述这种实验换能器以及采用氧化铝盒结构连接 PZT 基元的技术。我们也将说明怎样配制氧化铝衬底的成分，以精确地与 PZT 的声阻抗相匹配。而且，还要介绍研磨吸声材料表面的技术，以便获得薄的粘接层，使换能器具有良好的脉冲响应。最后，我们给出这种实验换能器对于水中一个点目标成象时的电响应。

氧化铝界面衬底

如前所述，界面衬底必须是一种绝缘体，并且，它的一边必须与 PZT 阵元声匹配，另一边与钨-乙炔基背衬声匹配。钨-乙炔基背衬的典型声阻抗为 26×10^6 瑞利。我们由实验确定，氧化铝配方制品的声阻抗是三氧化二铝 (Al_2O_3) 含量百分比的函数。配方中的其他成分都是氧化物，有二氧化硅，氧化镁和氧化钙等，它们均为助溶剂，加入之后可改善制作和燃烧特性。这种陶瓷在炉中燃烧之后，剩下几乎都是 Al_2O_3 以及空隙。由于空隙的存在，引起了密度的改变，由此而导致声阻抗的变化。

通过对于在 Al_2O_3 含量的高端测得的数据进行直线回归拟合，可得到下列关系式：

$$Z_0 = [0.67(Al_2O_3 \text{ 的百分比}) - 26.36] \cdot 10^6 \quad (1)$$

图 3 是根据上述表达式绘制的曲线。由图可见， Al_2O_3 含量为 85% 时，相应的声阻抗是 29×10^6 瑞利。Hanafy 曾经对于含有 85% Al_2O_3 的 Coors 陶瓷 (AD85) 作过测量，其结果与上述直线拟合十分符合。图 3 中圆括弧内的数字对应于陶瓷中的径向声速 V ，AD85 的径向声速是 8500 米/秒。其波长 $\lambda = V/f_0$ ，当 $f_0 = 2.5$ 兆赫时， $\lambda = 3.4$ 毫米。由此得知，我们可以选用较厚的氧化铝衬底。这一点在设计氧化铝盒结构时是特别有用的；考虑到强度因素，可选取衬底厚度大于 $\lambda/4$ 。在上面实例中，我们已经根据这一简单准则，选用了市售铝配方制品 AD85，以与 PZT 和钨-乙炔基背衬的声阻抗良好匹配。

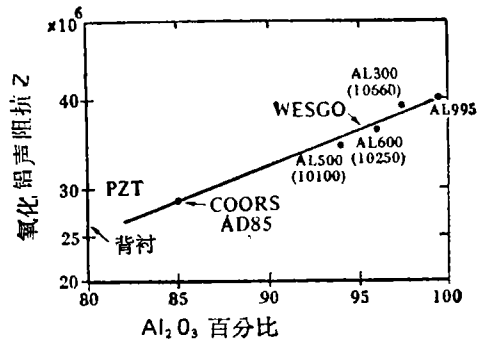


图 3 Al_2O_3 含量对于氧化铝衬底的声阻抗的影响。Coors AD-85 的声阻抗大致与铝 [23(10)⁶ 瑞利]、铸铁 [31(10)⁶ 瑞利]、PZT-5H [30~34(10)⁶ 瑞利] 和钨-乙炔基背衬 [25~30(10)⁶ 瑞利] 相匹配。

钨-乙炔基吸声材料

Larson 和 Leach 已经详细地介绍了钨-聚乙烯氯化物吸声背衬的构造。其制作过程包括：将粒子大小不同的钨粉末与聚乙烯化合物填料混和，并且在每平方呎 3500 磅的压力和 305°F 条件下硫化。大约 15 分钟之后，当温度下降到 200°F 时，将此合成材料喷射出来，冷却后作为固态的吸声材料。这种吸声材料的声阻抗约为 $25 \sim 30 \times 10^6$ 瑞利，对于 2.5 兆赫、1.2 微秒脉冲的平均衰减量为 20 分贝/厘米。Larson 等人的实验表明，在上述阻抗范围内，声衰减量随硫化温度而单调增加，大约在 300°F 处，阻抗有一个峰值。

当吸声材料的毛坯被倒出模子时，其表面由于冷却时产生的内压力而变得弯曲，而且，倘若仔细地观察一下这一表面，即可发现其上有一个乙炔基薄层，此薄层的声阻抗比 PZT 小得多。由于这一薄层的存在，致使到达界面的全部能量不能耦合到背衬中，因此，这种换能器就象是无背衬的那样，带宽仅 30%。

为了改善带宽，我们发展了一种简单的技术，即研磨并打光声背衬的表面，但又不让钨粉粒子脱离其周围的乙炔基填料。具体地说，用一层充满着 6 微米厚的金刚砂的聚酯薄膜（即金刚砂纸）进行研磨。研磨时，把

一张湿的金刚砂纸复盖在普通的花岗石上，通过压榨，去除过量的水分。手持背衬，将背衬在金刚砂纸上磨动。在磨动过程中，不断地用肥皂水润滑背衬的表面。通常可将背衬做得稍大一些，这样，用金刚砂纸研磨和打光之后，便缩小到原定的尺寸。这一过程可使背衬表面的不平整度不大于 ± 0.5 微米，而且磨平了钨粉粒子的顶部，以便为各个基元提供稳固的粘接基础。采用这一技术之后，能实现比较均匀的粘接，以限制基元声输出的大量扩散。扩散对于旁瓣强度的作用已由Bates作了简要的讨论。

实验换能器

我们研制了一个实验用的换能器，用以测试研磨技术对于声响应的作用。这个换能器是这样做的：将0.25毫米厚的氧化铝衬底粘接在经过研磨的背衬的表面上，然后，把0.66毫米厚的PZT—5H矩形谐振器粘接在铝衬底上。氧化铝衬底的上表面镀上一层0.11毫米厚的铜，并敷上一层金，以防止铜

的氧化。

为了获得宽带换能器，粘接层的厚度应在2~4微米范围内。这种薄粘接能否成功，将取决于环氧混合物是否具有低的粘性。粘接的厚度还与锯成基阵之前的基片的尺寸直接有关，并与粘接过程中所加压力的大小、以及加压时间的长短成反比。Sittig等人和Herriot等人进一步讨论了如何获得亚微米厚度的粘接问题。

图4给出了输入阻抗 Z_{in} ，它是PZT锯成基元阵之前激励频率的函数。正如预期的那样，中心频率附近的过渡是渐变的，没有任何瞬变的迹象。 f_0 以下那部分曲线与计算得到的换能器电容 C_0 的容抗相匹配，虽然在0.9兆赫处出现了不合逻辑的低频声图。在图中， Z_{in} 的实部是用Hewlett-Packard公司的矢量阻抗计测得的。测量时，每调整一个频率，便用外接电感器使电抗失谐，然后记下读数。由图可以明显地看到宽带趋势。该图也表明，PZT和经过电镀的氧化铝衬底

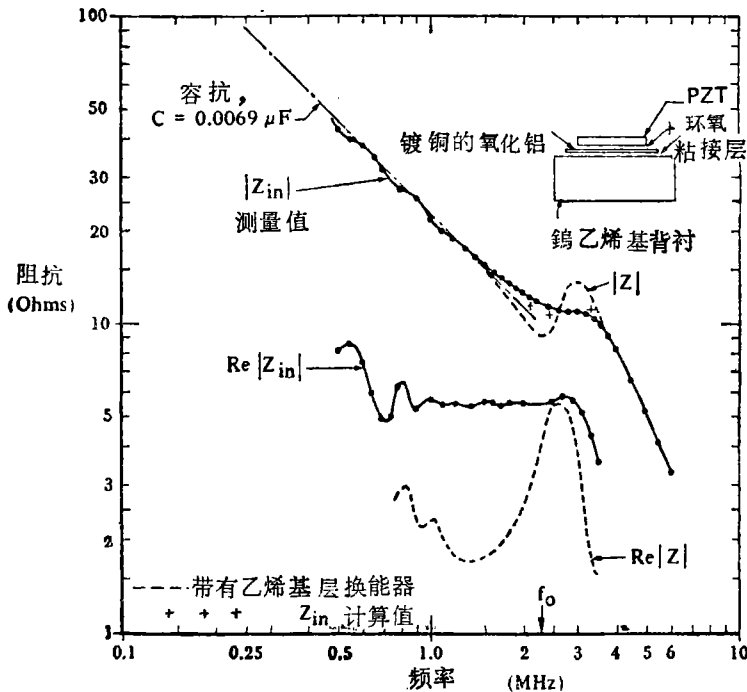


图4 去除乙烯基层对于未切割换能器(即未锯成基元阵的换能器)的影响(为了比较起见，图中标明了0.008微法电容的容抗计算值。虚线表示另一个未被去除乙烯基层的换能器的阻抗)

以及钨-乙烯基背衬之间的粘接是高质量的。图4中的虚线表示一个早先使用的实验换能器的窄带响应，其中的乙烯基层未被去除。以符号“+”表示的输入阻抗计算值与实验结果十分吻合。

换能器组件的装配

在研磨好的声背衬表面上密密地涂上环氧以后，将声背衬插入盒内。实际的粘接过程是：对氧化铝衬底的顶部施加均匀的压力（以6—8小时为一个周期），并且使装配温度上升至50°C。用Dexter公司出品的608块状纯环氧将背衬固定在盒中。此环氧在盒壁与背衬壁之间潜伸开来，如图1所示。硫化时，须防止由背衬引起的动力荷载损坏PZT基元及氧化铝衬底。

应用真空沉淀技术，在PZT衬底上镀上铬-金厚膜。将PZT粘接于经过电镀的氧化铝衬底之前，要小心地研磨衬底，直到铜镀层厚度减薄到0.01毫米为止，消除粘接背衬时产生的任何变形。这时，可用棉花棍蘸上丙酮和酒精，仔细地擦干净刚研磨好的表面。PZT则按常规程序加以清洗，并用前述方法把它粘到氧化铝衬底上。

换能器组件的声响应如图5所示。此响应并没有因为加上了刚性的氧化铝衬底而变差。输入阻抗曲线几乎与图4所示实验换能器的输入阻抗曲线相同。图6为两个组件的脉冲响应，是在水中通过放在距离换能器面21厘米处的光学平面的反射测得的。脉冲宽度小于1微秒，有微弱的振铃现象。这些响

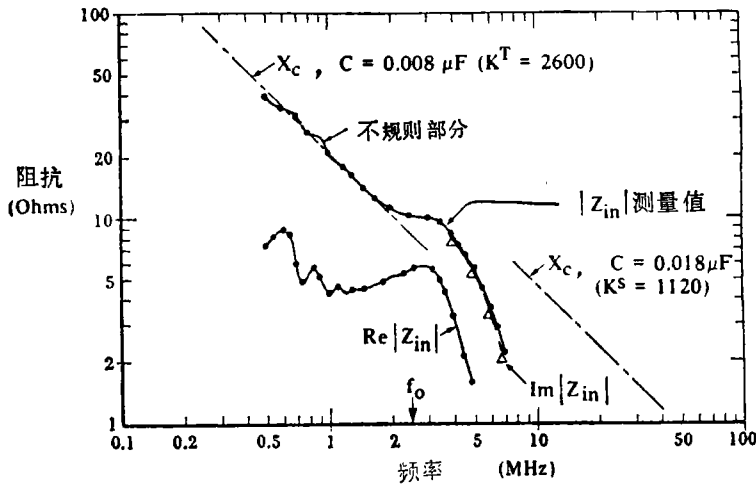


图5 未切割的换能器装入氧化铝盒后的声阻抗(为比较起见，图中也标明了0.018微法电容器的容抗计算值)

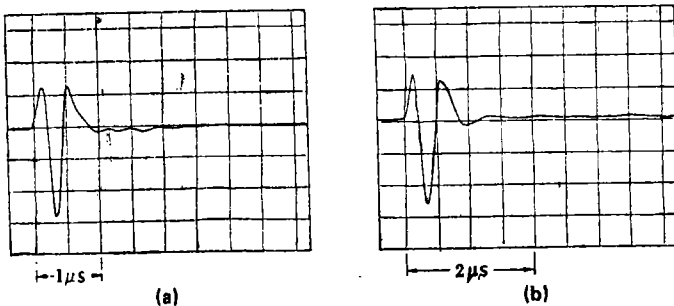


图6 两个未切割换能器的脉冲响应(其中具有图a所示脉冲相应的换能器的阻抗特性已在图5中给出。测量时，两个换能器均以0.2微秒脉冲激励，发射脉冲被放在离开换能器面21厘米处的光学平面所反射。图中纵坐标是每格0.5伏，横坐标是每格0.5微秒)

应曲线也表明，背衬界面与镀铜的氧化铝衬底以及未切割的 PZT 是匹配的。

沿着两个敷层所刻划的线条，锯开 PZT 基片，即可得到一个阵元。要锯透氧化铝，以消除基元之间的声耦合。接着，将一个个 PZT 基元分别与 64 根丝网印刷导线相连接。再用一点环氧，并采用与前述相同的程序，把一片铜箔粘接于 PZT 基元的顶部，至此，组件即告完成。基元之间的空间已为空气所占据。然后，如图 7 所示，把这个组件经由印刷线路板与主电缆相连接，并且封装于亚麻电木框架内。

换能器性能

利用 Karrer 等人介绍的实验成象系统，我们对换能器进行了测试。图 8 为测试方案简图，说明在发射和接收这两种工作状态

下的系统设置。在发射状态下，如果对送至换能器的激励脉冲加以适当相控，便能使超声波束以 θ_1 方向传播。在接收状态下，发射机不工作，由接收机收到断断续续的反射声波。在接收机电路中对于各个基元的输入脉冲进行适当时延，使基阵的指向转移到 θ_1 方向上，并使基阵在预选的聚焦区聚焦。最后，各脉冲在时间上实现了同步，叠加而成的输出脉冲被送到阴极示波管 (CRT) 上用作调辉。在其他方向上重复上述过程，这样便实现了完整的扇形扫描。电子扇形扫描的原理已由 Burckhardt 和 Tucker 等人作过介绍。

通过对于水槽中一个点目标进行测量，

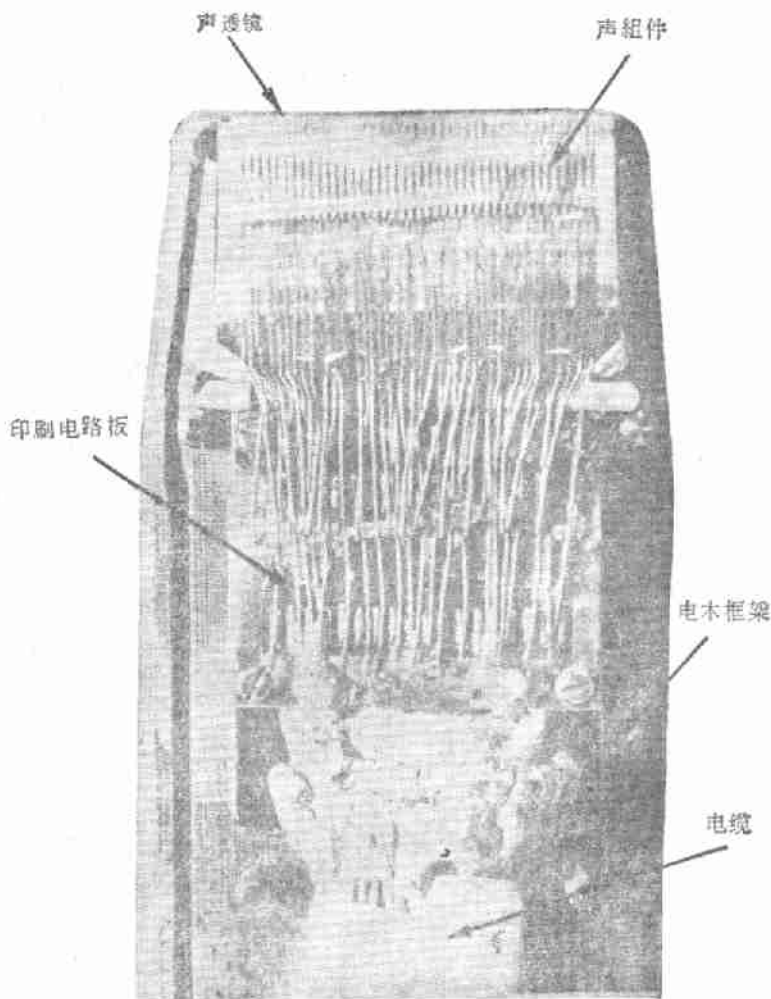


图 7 换能器封装情况(声组件经由印刷电路板与电缆相连接)

便可获得换能器的方向性图。此换能器的电聚焦点设置在距离换能器面 7 厘米处。将扫描方向固定于 θ_1 ，并让换能器绕“A”点作机械旋转，当旋转角度与扫描角 θ_1 一致时，即可观察到一个峰值输出。若使换能器朝 θ_1 的两侧旋转，输出便下降。接着，用电控方法使方向从 0° 改变到 45° ，并且扫描角每变化 15° ，即重复机械转动一次。这样，我们便获得了辐射指向性图中的各个峰值，如图 9 所示。在 45° 处，峰值仅下降 4.6 分贝，这是相当不错的。我们做了几个换能器，在 45° 上的峰值下降量为 3.5 分贝至 5 分贝不等。看来，下降量的大小是扫描角的函数。连续线

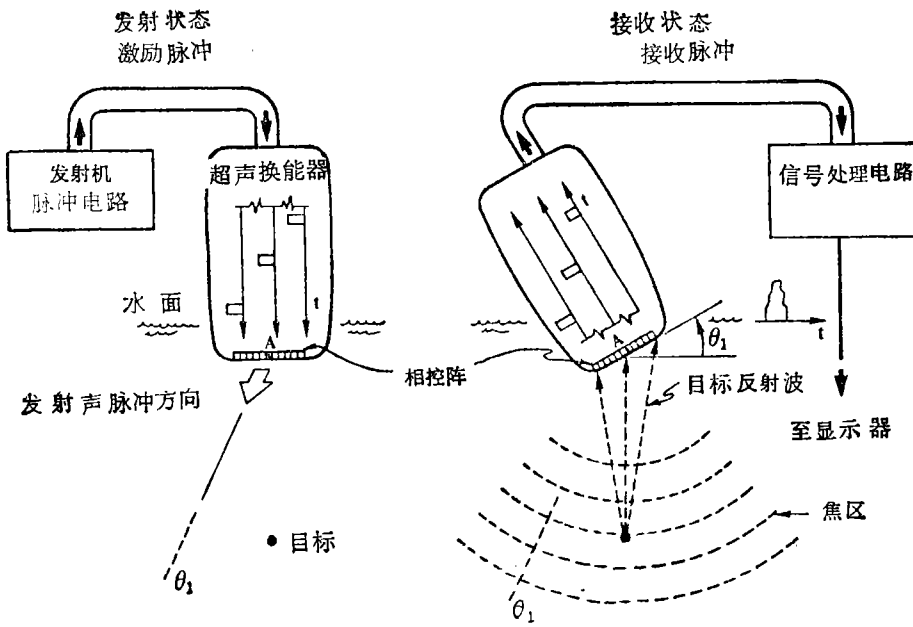


图8 相控阵成像系统的简化方框图

阵的归一化单向指向响应已由 Tucker 给出： 式中

$$D(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{a\pi}{\lambda}\sin\theta\right)}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\sin\theta\right)} \times \frac{\sin\left[\frac{nd\pi}{\lambda}\left(\sin\theta \pm \frac{\Phi\lambda}{2\pi d}\right)\right]}{\sin\left[\frac{d\pi}{\lambda}\left(\sin\theta \pm \frac{\Phi\lambda}{2\pi d}\right)\right]} \quad (2)$$

- λ —介质中的声波波长；
 - a —阵元的宽度；
 - d —两阵元中心的间距；
 - Φ —为达到所需波束偏转角而要求的相邻两基元之间的相移；
 - n —连续排列的基元数目；
 - θ —偏转角。
- 第一项是宽度为“a”的单个基元的响应，

换能器机械转动角(度)

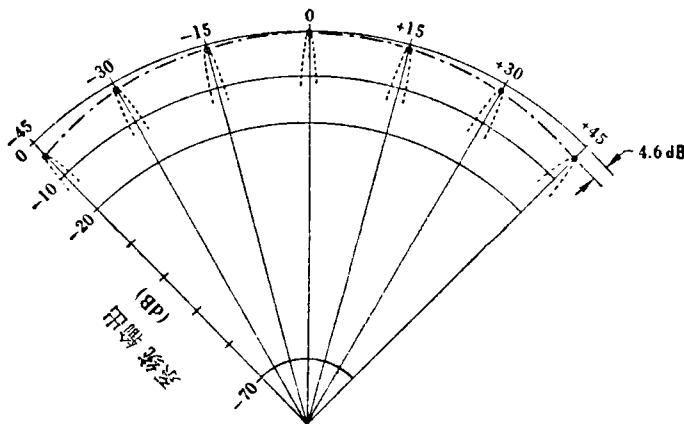


图9 与几个电控转动方向(0°, ±15°, ±30°, ±45°)对应的辐射指向性图(相应的程为 14 厘米)

它对第二项起调制作用，第二项则表示 n 个相邻基元排列成的基阵的响应。基阵响应所偏转的角度 θ 取决于基元间的相移量 Φ ；并且也与单个基元的响应有关。我们观察到，换能器辐射峰值响应是随着它偏离法线方向 ($\theta=0^\circ$) 而下降的。换能器的旁瓣级平均比峰值响应低 50 分贝。在 $\pm 45^\circ$ 搜索角内，没有出现副极大。

图 10 是在该系统的中频输出端上测得的换能器脉冲响应。用机械和电控方法使换能器对准针头目标，发射机以 2.25 兆赫的单周脉冲加以激励，输出脉冲宽度约为 1.25 微秒，这样在水中 7 厘米处便可获得 1 毫米的纵向分辨力。此外，在横向上，6 分贝分辨力是 2.5 毫米；在仰角方向上，为 3.5 毫米。

在发射状态，由于基元的激励，在背衬的表面产生表面声波，在黄铜箔中产生平面声波。结果是，在发射机关闭之后，这些波仍然来回传播，耦合到阵元之中。如果是强耦合的话，接收机通道将饱和。在监视接收机的波束输出时即可看到所谓“振铃”响应。通常把振铃时间定义为接收机的输出衰减 50 分贝所需花费的时间；在声成象中，它是扇形扫描顶点处出现的固定的图象杂波干扰和亮区的一种度量。

结论性评述

本文详尽地介绍了一种实用的、成象基阵中声基元的连接技术。由于工作环境十分干净，特别是对钨-乙烯基背衬的表面进行了仔细研磨，因此这种未切割换能器达到了相对带宽为 90% 的 3 分贝带宽。

在所做的大多数未切割换能器中，我们观察到中心频率附近存在两种倾向。在某些情况下，输入阻抗曲线有一个平坦段，如图 4 和图 5 所示。在另一些情况下，平坦被缓慢的倾斜所替代。图 6a 是相应于具有平坦段的阻抗曲线的脉冲响应，图 6b 则是具有一定

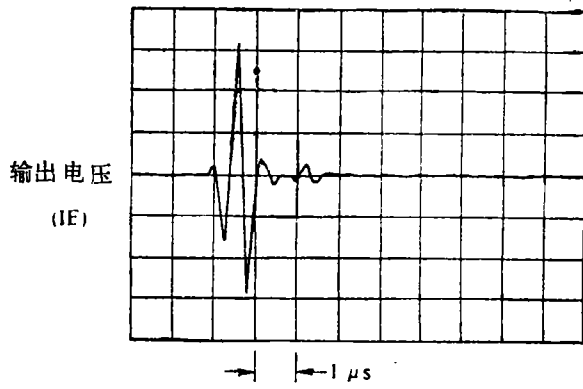


图 10 利用一个相控阵换能器在成象系统的中频输出端测得的整个脉冲响应

斜率的阻抗曲线的脉冲响应。不过，这些变化并不会引起换能器成象性能上的差别。

Wells 和 Jaffe 等人讨论了存在于压电陶瓷中的两种相对介电常数。在常压和低频条件下测得的相对介电常数用 K^T 表示，另一个是在恒定张力下(将压电陶瓷夹住)测得的，以 K^S 表示。两者之间的差别与电机耦合因子 k 有关，可用下式表示：

$$K^S = K^T(1 - k^2) \quad (3)$$

当 k 为某值时， K^T 可能是 K^S 的两倍。在图 8 中，取 K^T 等于 2600，我们画出了与 PZT 基片尺寸相同的平板电容器的容抗。电容器的容量为 0.008 微法。除了寄生振动部分以外，在低于中心频率 f_0 的频段内，此容抗曲线与未切割 PZT 换能器的容抗曲线是符合的。已经发表的 K^T 值为 3400。可以预期，根据 PZT 的成分及极化程度的不同，PZT 的 K^T 值会有所变化。为了验证这里所用的 K^T 值，我们对 PZT-5H 基片作了去极化处理，并且测量了它的电容量和尺寸，最后得到的 K 值为 2100 (去极化时)。此值与 $K^T=2600$ 是接近的。而且，通过实验，我们确定了所用基片的居里温度。耦合系数 K^2_{eff} (按 25°C 时的值作了归一化处理) 与温度之间的关系，已经画成曲线，见图 11 所示。正如所预期的那样，比较彻底的去极化发生在 193°C ，这便是 PZT-5H 的居里温度。在图 5 中，我们

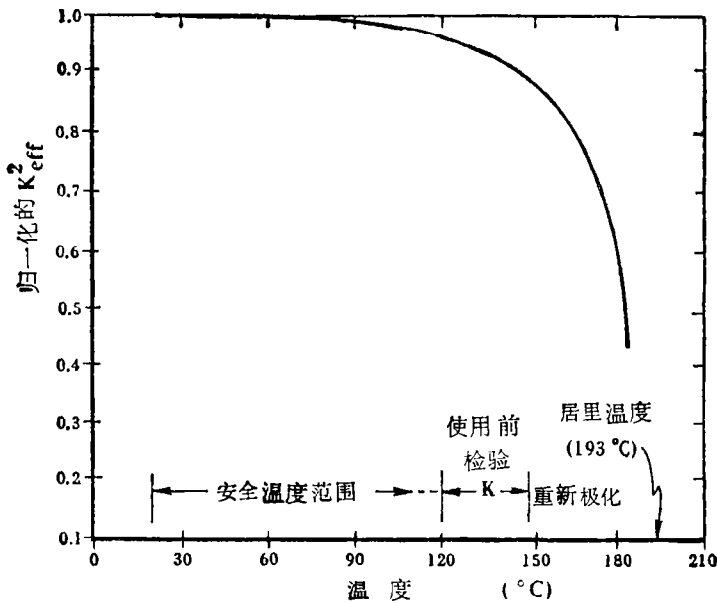


图 11 温度对 PZT—5H 的耦合系数的影响。不管怎样，如果将 PZT 加热至 120℃ 以上，则在使用前应作一次测量；必要时重新极化。

也标出了尺寸相同、但 $K^S = 1120$ 的电容器的容抗。与该电容器容抗的斜率 $1/f$ 相比较可知， Z_{in} 的高频段的斜率为 $1/f^{2.4}$ ，是比较陡峭的。在已经去极化的 PZT 基片中，从低频端到 6 兆赫范围内，相对介电常数假设为一个中间值：2100，超过此值者不取。前面这些图表，包括关于未切割换能器和切割换能器的，都可视之为有用的性能指南。

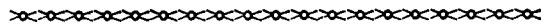
为了计算辐射峰值的周程下降量，我们只需要对 (2) 式中的单基元响应取平方，得到下列表达式：

$$R(\theta) = 20 \log \left[\frac{\sin\left(\frac{a\pi}{\lambda} \sin\theta\right)}{\left(\frac{a\pi}{\lambda} \sin\theta\right)} \right]^2 \quad (4)$$

将 $a = 0.24$ 毫米， $\lambda = 0.6$ 毫米， $\theta = 45^\circ$ 代入上式，即可得到 $R(45) = -2.6$ 分贝，与我们测得的数据非常符合。前面已经说过，不同的换能器，其周程下降量的变化范围为 3.5 至 5.0 分贝。如果我们将单基元响应表达式乘以 $\cos\theta$ 这项因子（这是 Selfridge 等人建议的），那末，在 45° 方位上，下降量的计算值

将增加 6 分贝。在我们早先做的换能器中，有一些的周程下降量为 6—8 分贝（在 45° 时），其原因一般可归结为阵元之间渗出了过量的环氧。

未切割换能器获得的宽带性能，单基元也能获得。由阻抗曲线可测量换能器的 3 分贝带宽，其相对带宽为 60%—80%。为了获得很宽的带宽，环氧粘接层的厚度须小于 2 微米。而且，在切割时，把钨粉粒子留在基元的下面，使之不受扰动，这也很有要紧。图 10 所示的短脉冲响应证实，成象换能器的单基元确实是宽带的。（陈克棠译 沈志华校）



编者说明

本刊 1982 年第一期第 47 页“放大器和扬声器的接口问题”一文，系朱国春同志根据芬兰技术中心奥塔拉教授于 1981 年 10 月来沪学术报告中的一部分整理编写，特此说明。

编者