

· 内 部 ·

近代水声换能器及基阵的发展概况

昆 明 720 情 报 室

1977 年

近代水声换能器及基阵的发展概况

哈船院五系 周福洪

(一) 近代声纳技术对水声换能器及基阵的特性指标的要求:

水声换能器及基阵是声纳站的一个重要组成部分,因此它们的特性指标应该适应近代声纳技术指标的要求。近代声纳在应用水声物理及信息论的研究成果,以及引进计算机的新技术,在最近十年中,它已获得了迅速的发展。在近几年中,有人试制了一部声纳站,在实地使用中获得了较好的效果。依据水声物理及声纳信号分析的研究结果,在这部声纳中设计有几种不同的发射波形,以便它能机动灵活地适应各种不同海貌(海面波浪及海底地貌)和水文情况下声波的传播与检测;同时它应用了计算机的技术,它具有迅速处理信息的能力,并且它能使辐射及接收波束均可在大角度扇面内进行扫描,从而大大提高了该站测距、测向精度和搜索率。在下面我们将简要地阐明在声纳中运用上述的技术措施时,它要求水声换能器和基阵应具备那些特性。

(I) 依据水声物理中对于声波在海洋内各种方式传播现象的探讨,人们发现利用低频的声波对远距离目标和噪声源的检测有着明显的优越性。尤其是远程的 回声测距站,它不仅要求声信号工作在低频,并要它能辐射一定大小的声源级。亦即它要求声纳基阵装备低频大功率、高效率的辐射换能器的基元。为了提高声波向水介质中辐射的比声功率,常将声源放到较大深度的海洋中或将它放在加压的导流罩中,当声源和接收阵置于较深的海洋位置时,声纳站能更有效地利用声道效应,使作用距离增大。以上情况对于水声工作者是众所周知的事实,我们就不作过细的解释。但根据上述情况,归结起来,它要求水声换能器或基阵应具有低频、大功率、高效率并能有耐高静水压等工作特性。

(II) 根据近代信息论的原理,特别是在它的内容中有关信号处理应用到水声抗干扰技术时,我们可以发现,如果声纳站发射某种特定的波形的声信号,而它的接收部分采用相关接收器时,它就能从水声技术中所特有的混响干扰背景中检测到目标的回波声信号。在采用上述的技术措施时,它不仅要求换能器具有平坦的接收响应,同时要求换能器有宽阔的发送响应。在下面,我们扼要地说明一下,如何在利用上述的水声信号处理时,换能器的收发响应必需都是宽带的。当声纳站发送一个等幅波正弦填充的矩形脉冲时,对于用匹配滤波器的信号处理而言,大家知道,它能获得最好的输出信噪比可由下

式给定

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out} = \frac{2E}{\eta} \quad (1-1)$$

式中 E 是被检测到的目标回波的能量，
 η 是每单位带宽的噪声能量。

从上式我们可看出，若想使接收器的输出信噪比增大，就必需使 E 的值尽可能地增加。要使 E 变大，就要提高声纳站的辐射声源级，其有效的方法是提高换能器单位面积的辐射声功率，在水介质中，由于受到空化效应的限制，不能无限增大辐射的比功率。为了增加辐射声能，对于正弦填充的矩形脉冲，我们可以在不产生空化的条件下，通过延长脉冲持续时间来提高辐射的总声能。但是，由于水声在海洋中传播时存在着混响现象，当辐射脉宽延长时，海洋中产生的混响干扰亦随之增加。当脉冲长度达到一定的数值时，混响背景变得与环境噪声背景相等，从这点起，再增加发射脉宽，干扰信号将以混响干扰起主导作用，在此时(1-1)式中的 η 将由混响级来决定。在混响背景下，延长发送信号的脉宽，被检测到的回波信号能量和每单位带宽的噪声能量将以相同的速率进行增加。换言之，在混响背景中，延长发送信号的脉宽，不可能增加信噪比。为了解决上述问题，人们就设想，若发射一个宽带的长脉冲，当脉冲长度增加到使每单位带宽的混响级恰好等于每单位带宽的噪声级，如果还要增加辐射能量，那么可以通过增加发射脉冲的带宽，因为发射脉冲的带宽增加一倍，则每单位带宽的混响差不多将减半，从而提高其信噪比。为了比较全面地分析几种不同声纳信号抑制混响的本领。人们常引进一个称作声纳信号的模糊度函数的物理量，它是声纳信号通过重复匹配滤波器和平方律检波器所输出的总的响应函数。我们可以用图(1-1)来表示它的物理图形。

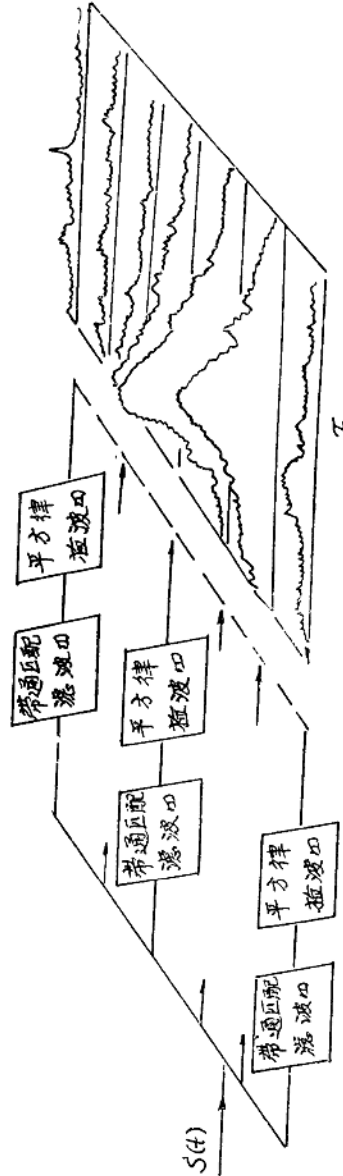
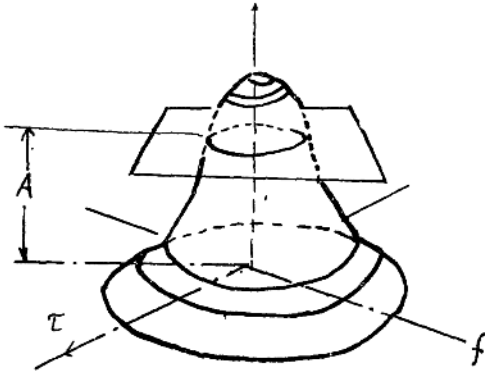


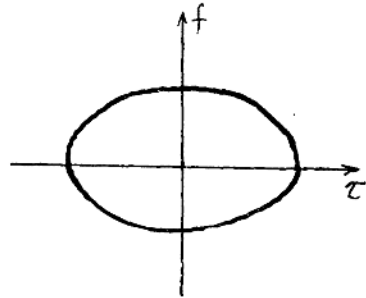
图 1-1 模糊度函数的总响应

为了便于说明问题，我们首先看一个理想的模糊度函数在 f, τ 坐标系中的图形。如图(1-2)所示。 $X(\tau, f)$ 为模糊度函数， f 为有多普勒漂移后的频率。 $f = f_0(1 + \frac{2v}{c})$ 。

f_0 为发射脉冲频率， v 为目标的运动速度， c 为声速， $\tau = \frac{2R_0}{c}$ ， R_0 为目标的距离。



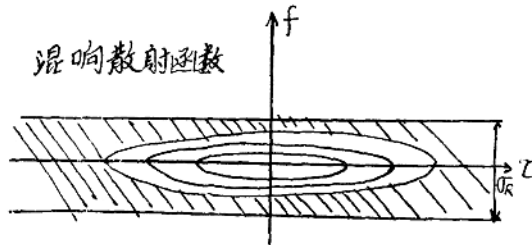
图(1-2) 理想模糊度函数



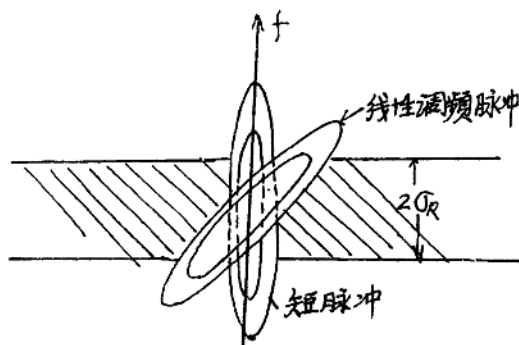
图(1-3) $X(\tau, f) = A$ 的模糊度图

平方律检波器的阈可看作与 τ, f 轴平行的平面。若令 $X(\tau, f) = A$ ，我们立刻可以求出， $X(\tau, f)$ 与原点垂距为 A 的截线，如图(1-3)所示，图(1-3)所表示的曲线称为 $X(\tau, f) = A$ 的模糊度图。

根据人们对于各种不同声纳波形的研究，它们各个相对应的模糊度图将如(1-4a)~(1-4e)所示。图(1-4a)表示目标速度为零或极低时，长脉冲正弦填充信号的模糊度图。其阴影区为混响散射区，因为混响特点是由大量运动很小的或者没有运动的物体所产生的散射波形成的，因此它们沿着延迟多普勒平面的延迟轴平行成束分布。混响散射函数与长脉冲相重叠的区域，表示这部分混响噪声将同时通过相关信道，因此对于低多普勒目标，应用等辐长脉冲信号不能增加信噪比。

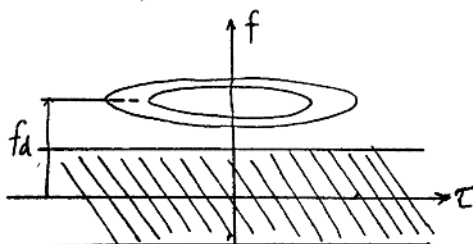


(1-4a) 低多普勒目标，长脉冲模糊度图



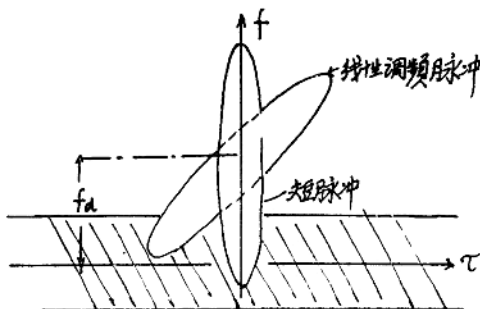
(1-4b) 低多普勒目标, 对于线性调频脉冲及短脉冲的模糊度图

图(1-4b)表示低速目标或静止目标, 使用线性调频脉冲或短脉冲时的模糊度图, 从图上我们可以看出这两种脉冲信号的模糊度图与混响散射区复盖的面积比长脉冲的来得小, 因此使用这两种脉冲信号, 信噪比有所提高。

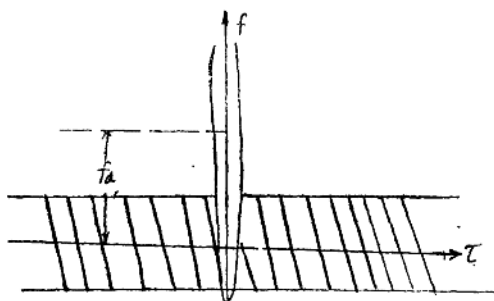


(1-4c) 高多普勒目标, 长脉冲模糊度图

图(1-4c)表示高速运动目标运用长脉冲时的模糊度图。因为目标有足够的多普勒频移, 因此目标信号完全可以避开混响背景。换言之, 可以用滤波器的方法将混响抑制而让信号通过。图(1-4d)表示高速运动目标在用线性调频和短脉冲信号时的模糊度图。这两种信号的模糊度图都与混响有重叠部分, 因而它比长脉冲差。图(1-4e)表示高速运动目标在用极短脉冲时的模糊度图。对于近距离快速目标宜用极短脉冲, 由于它的模糊度图与混响背景复盖很小, 故它有相当大的抗混响作用。



(1-4d) 高多普勒目标, 线性调频及短脉冲模糊度图



(1—4e) 高多普勒目标, 极短脉冲模糊度图

通过以上分析, 根据使用的不同情况, 声纳设备可通过不同波形的选择, 使其能获得较好的抗混响能力。但是, 它要求换能器不仅有宽带的接收响应, 且要求它具有宽带的发射响应, 因此它要求换能器具有较低的机械Q值

(二) 当前国内外水声换能器的研制概况

依据前节的讨论, 为了使声纳能在各种水文海貌情况下皆有良好的工作特性, 它要求水声换能器具备低频、高效率, 大功率, 宽带响应、耐静水压的特性。我们想从下列二个方向的问题来进行探讨: (I) 对目前已经大量使用的换能器, 按照近代声纳的要求, 对它们进行评价, 并指出它们存在的问题, 及其改进的方法。(II) 当前国内外对新型换能器的研制动态及其尚待解决的问题。

(I) 对目前广泛使用的换能器的评价:

在当前国内外广泛使用的换能器有下列几种: 属于压电换能器的有: (1) 复合棒 (包括马塞型, 它适用于低频)、(2) 弯曲圆盘型、(3) 圆柱形 (包括镶嵌式)。属于磁致伸缩换能器的有: (4) 变压器型 (包括 π 型), (5) 叠片圆柱型等。对于上述五种类型的换能器, 我们想从近代声纳所要求的特性指标对它们进行简略的评价。

依据 Wollett 的研究, 任何一种谐振式的换能器, 它在大功率辐射情况下常受三方面的限制:

(A) 电极限功率。辐射声功率主要决定于换能器能够贮存的最大电能 U_e 。辐射声功率与贮存电能的关系为

$$P_a = \eta_{ma} \omega_r \frac{k_{eff}^2}{1 - k_{eff}^2} Q_m U_e \quad (2-1)$$

P_a 为在谐振时辐射的声功率, η_{ma} 为机声效率, ω_r 为谐振频率, k_{eff}^2 为换能器的有效机电耦合系数, Q_m 为换能器的机械品质因数, U_e 为换能器的最大贮存的电能。对于电场型的换能器由下式确定:

$$U_e = \frac{1}{2} |E|^2 C_0 \quad (2-1a)$$

C_0 为静态电容, E 为工作电压 (最大允许工作电压)

对于磁场型的换能器由下式决定

$$U_e = \frac{1}{2} |I|^2 L_0 \quad (2-1b)$$

I 为工作电流 (最大允许工作电流), L_0 为静态电感。 U_e 主要决定于换能材料的特性。如表 (2-1) 所示:

表 (2-1) 换 能 材 料 特 性

| | 镍(Ni) | Permender | 镍铁淦氧 | ADP | BT | PZT |
|--------------------|-------|-----------|------|-----|-----|------|
| $U_{emax} / J/m^3$ | 200 | 400 | 90 | 200 | 400 | 1200 |

依据上表, 我们看出压电陶瓷的贮存电能较大, 对于经过热、强场老化处理的压电陶瓷, 在一般情况下, 作较大声功率的辐射时, 它是不会超过电限制的功率极限的。

(B) 机械极限功率

在换能器作大功率辐射时, 在它的机械振动系统中可能出现大的动态应力。当动态应力加上静态应力 (如换能器工作在深海时) 超过材料的应力极限, 换能器就要振裂。机械极限的辐射声功率与最大能承受的机械能有关, 它由下式决定

$$P_a = \frac{\dot{\eta}_{max} \omega_r U_m}{Q_m} \quad (2-2a)$$

其中

$$U_{mmax} = \frac{T_{max}^2 V}{2\rho c^2} \quad (2-2b)$$

U_{mmax} 为能承受的最大机械能。

T_{max} 为最大能承受的应力, V 为材料的体积, ρ 为材料的密度, c 为声速, 对于各种材料单位体积具有的最大承受机械能如表 (2-2) 所示。

表 (2-2) 能 承 受 的 最 大 机 械 能

| | 镍(Ni) | Permender | 镍铁淦氧 | ADP | BT | PZT |
|-----------------|-------|-----------|------|------|------|------|
| $U_m / U J/m^3$ | 4000 | 4000 | 450 | 2000 | 2000 | 3000 |

请注意: 上表仍是换能材料允许承受的机械能量。对于换能器来讲, 它还与它的机械结构有关, 例如弯曲圆盘压电换能器, 如果它的内部没有液腔 (用它来平衡静水压力), 那么它实际能承受的机械能量仅有压电材料允许的机械能量的十分之一。

在不考虑空化极限的情况下, 在大功率辐射时, 一般情况我们选用上述两种情况中的低限来作为我们最大可能辐射的声功率。但是, 请大家参看 (2-1) 式及 (2-2a) 式。电极限功率和机械极限功率都随机械品质因素而变, 如果我们调节换能器的 Q_m 值, 使

得其电极限功率与机械极限功率相等。

$$\eta_{ma}\omega_r \frac{k_{eff}^2}{1-k_{eff}^2} Q_m U_{emax} = \eta_{ma}\omega_r \frac{U_{mmax}}{Q_m}$$

因此我们得

$$Q_{mopt} = \left(\frac{1-k_{eff}^2}{k_{eff}^2} \frac{(U_m)_{max}}{(U_e)_{max}} \right)^{1/2} \quad (2-3)$$

在这种情况下机械品质因素称为最佳机械品质因素。在此时，换能器辐射的功率既不超过电极限功率，又不超越机械极限功率。在实际工作的情况中， Q_m 的调节是通过基阵中换能器之间的互阻抗来进行的。在进行大功率辐射基阵设计时，对每个辐射换能器在基阵上位置的配置，人们常利用（2—3）式作为判据，使在有互阻抗影响作用时，对每个换能器在作大功率辐射时，使每个换能器的 Q_m 值基本上等于 Q_{mopt} ，那么它就可以稳定可靠地大功率辐射。另外 Q_m 是决定谐振换能器的带宽的，为了宽带辐射，它尽可能地使 Q_m 变低。

(C) 声极限功率：

在高声强作用下，换能器表面要产生“空化”现象。克服“空化”效应的方法，可以通过在导流罩内加压，缩短辐射脉宽等办法来达到，这些都是大家知道的情况，我们不再赘述。在此处，我们感兴趣的问题是在宽带大功率辐射情况下，它单位面积能辐射多大的功率，从而估计它在何种深度不超过空化极限。换言之，在某种深度时，我们选用那种类型的换能器，它既不超过“空化”极限，又能宽带辐射。 Q_{mopt} 是大功率辐射换能器的基本参量。下面我们要找出单位面积辐射声功率与 Q_{mopt} 之间的关系。我们利用（2—1）式两边除以辐射面积 S 立刻就得到

$$\frac{P_a}{S} = \eta_{ma} \frac{k_{eff}^2 \omega_r}{1-k_{eff}^2} Q_{mopt} \frac{U_{emax}}{S} \quad (2-4)$$

现在我们来举一个具体例子来说明上述问题。例如 $\times \times$ 站的辐射器是由 N_i 叠片构成的圆柱型换能器，由于 N_i 的

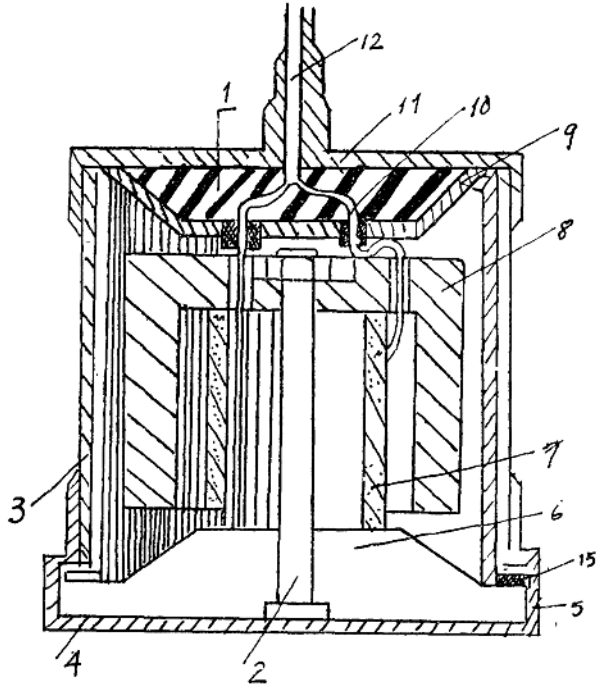
$$k_{eff}^2 = k = 0.3, \quad \frac{k_{eff}^2}{1-k_{eff}^2} (U_{emax}) = 20, \quad Q_{mopt} = 14.$$

对于它单位面积的辐射功率为42瓦/厘米²，它可以工作于深海，但它不是宽带辐射器。

从（2—1）式，我们看出换能器的电极限功率，不仅与贮能元件性能有关，还与换能器的有效机电耦合系数有关。由于换能器的结构形状不同，它的有效机电耦合系数亦是不同的。最佳的机械品质因数应该满足（2—3）式，但每一种结构形式的换能器有其机械品质因数。虽然通过互辐射等可以调节 Q_m 使它满足最佳的条件，但单个换能器固有的 Q_m 偏离最佳值太远时，则不可能调到最佳值。下面我们对常用的几种换能器的有效机电耦合系数及机械品质因数分别摘录如下：

（1）复合棒，为了满足它能工作在低频，常用马塞型，它的后部常用重金属做成尾锥，它用来控制机械 Q 值，其前部用轻金属做成辐射面，中间为压电陶瓷堆，它的有效机电耦合系数为

$$k_{eff}^2 = \frac{k_{33}^2}{1 + \frac{l_f}{l_1} \frac{A_1}{A_f} \frac{S_f}{S_1} + \frac{l_b S_b}{2l_1 S_1}} \quad (2-5)$$



图(2-1) 马塞型换能器

其中 $l_b = V_b / A_1$ 为后锥的等效长度, l_f 为前质量块的长度, A_f 为前质量块的横截面积, V_b 为后质量的体积, S_b 为后质量块的劲度, S_1 为陶瓷的劲度, S_f 为前质量块的劲度, $2l_1$ 为陶瓷的总长度, A_1 为陶瓷的横截面积, 它的等效质量为

$$\overline{M}_{eff} = M_b + M_f \frac{\sin^2 kq}{\sin^2 ka} + \frac{\rho A_1}{4k \sin^2 ka} [2k(a+q) - (\sin 2ka + \sin 2kq)] \quad (2-6)$$

其中 M_b 为后质量块的质量, M_f 为前质量块的质量, $(a+q) = 2l$, ρ 为陶瓷密度, k 为陶瓷内的波数, 它的谐振频率公式为

$$\rho c A_1 \cot kq = M_b \omega \quad (2-7a)$$

$$\rho c A_1 \cot ka = M_f \omega \quad (2-7b)$$

$$\text{而 } a + q = 2l \quad (2-7c)$$

因此它的机械 Q_m 值可以由下式确定

$$Q_m = \frac{\{M_b + M_b + M_f \frac{\sin^2 kq}{\sin^2 ka} + \frac{\rho A_1}{4k \sin^2 ka} [2k(a+q) - (\sin 2ka + \sin 2kq)]\}}{R_s} \eta_{ma} \quad (2-8)$$

其中 M_s , R_s 为共振质量和辐射声阻。

(2) 弯曲圆盘换能器

目前广泛使用的是三叠片弯曲圆盘换能器, 它的特点是谐振频率低, 它的体积小而重量轻。其结构如图 (2-2) 所示

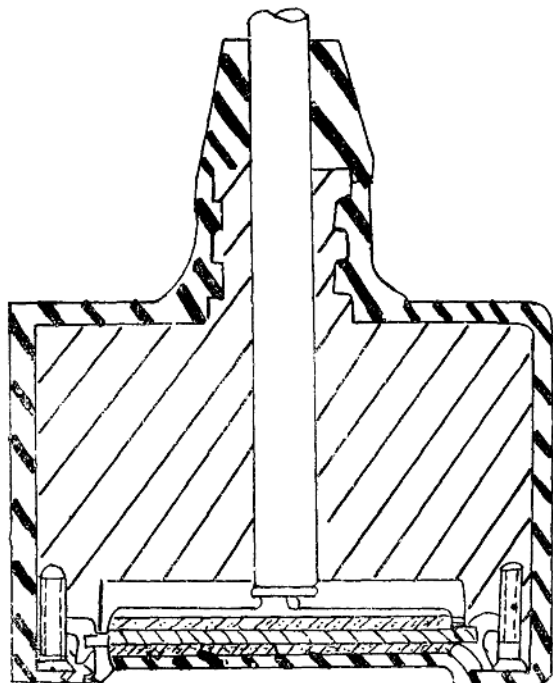


图 (2-2) 弯曲圆盘换能器

它在水中的谐振频率

$$f_{rw} = 813 \frac{h}{a^2} \sqrt{1 + 0.103 \frac{a}{h}} \quad (2-9)$$

它的有效机电耦合系数为 k_{eff}^2

$$k_{eff}^2 = \frac{0.591 k_p^2 [(h+m)^2 / (h^2 + mh + m^2)]}{1 + \frac{s_1^D (1 - \sigma^D) m^2 \lambda_m}{s_m (1 - \sigma_m^2) (h^3 - m^3) \lambda_D} - 0.103 k_p^2 \frac{(h+m)^2}{h^2 + mh + m^2}} \quad (2-9)$$

上式的详细说明请参阅船院编的水声换能器设计下册。

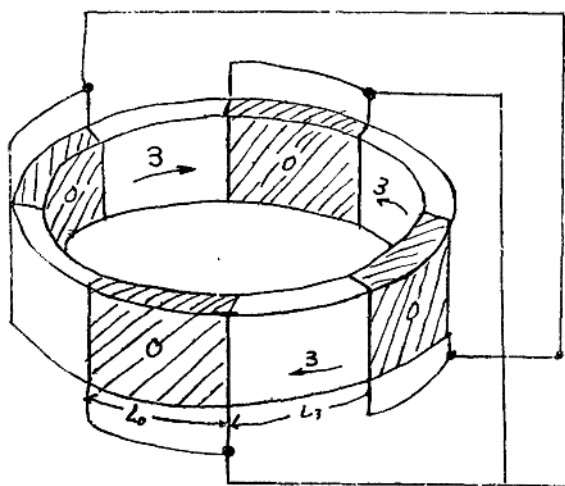
由于弯曲形变, 对于它能承受的机械能量约为 1000 焦耳/米³, 而它的最大电能约为 1200 焦耳/米³

它的机械品质因数

$$Q_m = \frac{[1.12\pi a^2(m\rho_m + \rho_o(h-m) + M_s)]\omega_{rw}\eta_{ma}}{R_s} \quad (2-10)$$

ρ_m , m 为金属板的密度和厚度, ρ_o 为陶瓷密度, h 为总厚度。

(3) 嵌镶圆柱换能器



图(2-3) 嵌镶圆柱换能器

当换能器工作在低频时, 要用大直径圆柱时, 最好用嵌镶形。因为大直径的陶瓷圆柱烧结很困难。

对于嵌镶换能器的结构如图(2-3)所示, 它在空气中的谐振频率将由下式确定

$$f_{ra} = \frac{L_0 + L_3}{2\pi a [(S_{03}L_0 + S_{33}^E L_3)(\rho_0 L_0 + \rho_3 L_3)]^{1/2}} \quad (2-11)$$

其中 L_0 , S_{03} , A 为金属的长度、劲度和横截面。 L_3 , S_{33}^E , ρ_3 为陶瓷的长度、劲度和密度。 α 为环的半径, ρ_0 为金属的密度, n 为金属或陶瓷的片数。

$$n = \frac{2\pi a}{L_0 + L_3}$$

它在水中的谐振频率

$$f_{rw} = \frac{1}{\sqrt{n(S_{03}L_0 + S_{33}^E L_3)[nA(\rho_0 L_0 + \rho_3 L_3) + M_s]}} \quad (2-12)$$

而它的机械 Q_m 值

$$(Q_m)_{水中} = \frac{\omega_{rw}[nA(\rho_0 L_0 + \rho_3 L_3)M_s]}{R_s} \eta_{ma} \quad (2-13)$$

它的有效机电耦合系数为

$$k_{eff}^2 = \frac{k_{33}^2}{1 + S_{03}L_0 S_{33}^E L_3} \quad (2-14)$$

依据(2-13)式, 我们可以看出, 当用黄铜作嵌镶材料时, 其机械 Q_m 值略有升高; 根据(2-14)式, 它的有效机电耦合系数略有降低。

对于磁致伸缩换能器, 除非做成自由溢流式, 它的 $Q_m \approx 4$ 。它可以作为较宽带的换能器。

如果用其他形式的磁致伸缩换能器, 则它们的 $Q_m \approx 10$, 因此用作宽带换能器较困难。故我们对磁致伸缩换能器不再详述了。

下面我们对于用PZT-4材料做成上述三种类型换能器的估算数据列表如下:

表(2-3) 三种压电换能器的估算数据

| 类型 | f_w | Q_m | Q_{mopt} | P_a 瓦/厘米 ² | 几何尺寸 | 重量 |
|------|-------|-------|------------|-------------------------|--|-------|
| 马塞型 | 5kc | 3-6 | 2.0 | 15 | $l_{总} \approx 20cm, S_{发} = 144cm^2$ | 10kg |
| 弯曲圆盘 | 5kc | 3-6 | 2.0 | ~1 | 厚 $\approx 0.57, S_{发} = 23cm^2$ | 2.5kg |
| 嵌镶圆柱 | 5kc | 3.1 | 2.0 | ~25 | $h = 10cm, t = 1.5cm, s \approx 630cm^2$ | 7kg |

参考上表, 我们可以看出: 马塞型换能器可以作为深海大功率、线性调频用的辐射换能器。弯曲圆盘换能器如果没有液腔作为压力平衡器。它仅能作为浅海宽带辐射器, 它的辐射功率亦不大。如果利用液腔加声顺管来改进它的深海性能, 它仍是中等功率的辐射器。对于嵌镶式圆柱换能器, 它是一种较好的低频大功率深海宽带换能器, 特别是它的辐射面积大。如果嵌镶式圆柱换能器中的嵌镶块用Lucite材料(二甲基丙烯酸树脂), 它可以增加换能器的带宽, 又减轻它的重量。总的讲来: 马塞型和嵌镶型圆柱换能器既能工作在深海, 又是大功率辐射器, 并有一定带宽, 因此在一定频段内, 它们是较好的换能器。若工作频率再降低, 则它们的体积重量将变得更大。为了弥补以上缺点。最近人们研究了儿种新型的换能器, 我们将在下面作一些简单的介绍。

(I) 当前国内外对新型换能器的研究, 及其尚待解决的问题:

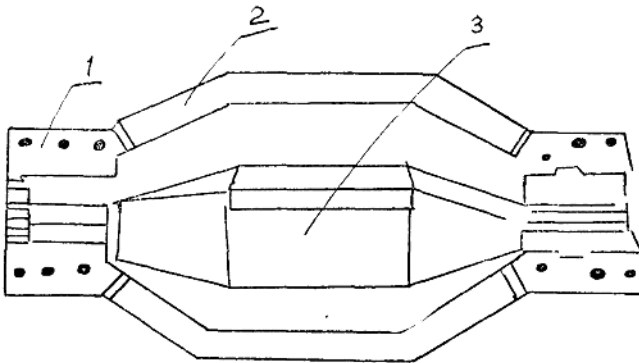
最近几年来, 国内外许多换能器工作者为了使换能器能工作在更低的频段, 从几百周到儿仟周。并且希望它们能具有宽带的工作特性。

人们经过多方探讨, 集中研究了下列儿种类型的水声换能器: (1) 弯曲伸张型的水声换能器, (2) 水力学型的换能器, (3) 超电型的电动式换能器, (4) 铁电反铁电相变换能器等四种新型换能器: 今作简介如下:

(1) 弯曲伸张型换能器

弯曲伸张型换能器是当前国内大力研究的一种新型换能器, 卓有成效。

弯曲伸张型换能器是综合纯弯曲换能器及马塞型换能器的优点而演变出来的一种新



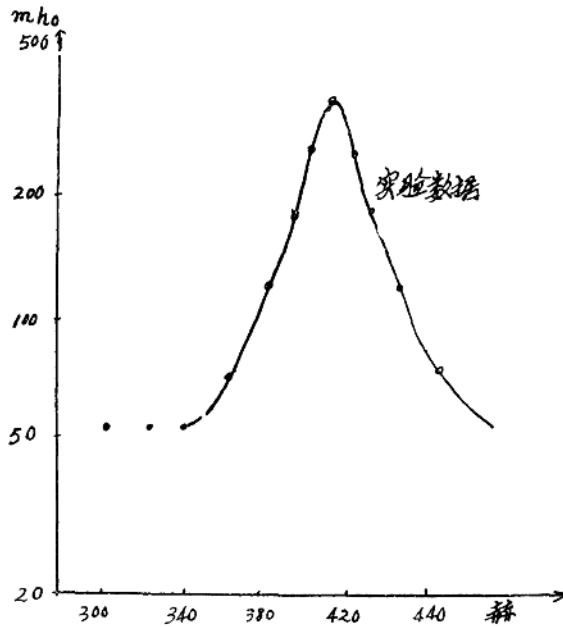
1.尾端 2.弯曲梁壳体 3.压电堆

图(2-4) I型弯曲伸张换能器

型换能器，如图(2-4)所示。弯曲伸张型换能器的工作原理简述如下：弯曲梁两端与内部的压电陶瓷堆通过尾端紧密相连。当压电陶瓷受外界电场作用时，压电陶瓷堆就产生伸张或收缩的振动。由于压电堆与弯曲梁之间紧密相连，当压电堆作伸张收缩振动时，它便激励弯曲梁产生弯曲振动，梁的弯曲振动是由压电堆伸缩引起的，因此这种换能器称谓弯曲伸张型换能器。

这种换能器的优点：由于金属的弯曲梁作弯曲振动，故它具有弯曲换能器低频谐振的特点。因金属梁的抗挠强度很大，如果压电堆已采取加预应力的措施，并用压电模量 d_{33} 的振动模式，那么它兼有马塞型大功率辐射的特点。如果弯曲梁与压电堆之间的空隙，在压电堆已进行水密的情况下，让液体进入弯曲梁与压电堆之间的空腔，则它可以作为深海大功率声源。

一个I型弯曲伸张换能器的实例：换能器全长89cm，外壳最大直径40.5cm，重135kg，谐振频率为420赫，脉冲声功率可达8千瓦，但从右图(2-5)图看出，它的频率响应较窄，不能满足宽带响应。



图(2-5) I型换能器的频率响应

弯曲伸张换能器除掉上述 I 型的弯曲伸张换能器之外，按其性能和用途之不同，还有在其它四类弯曲伸张换能器，分述如下：

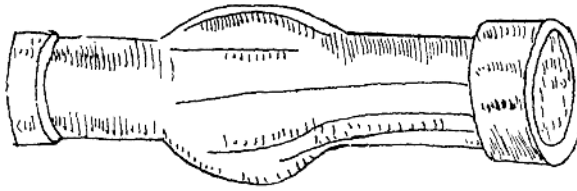


图 (2-6) II 型弯曲伸张换能器

II 型弯曲伸张换能器

其结构如图 (2-6) 所示：II 型在几何形状上与 I 型相类似，主要区别是 II 型换能器的外壳两端柱形尾部较长。它的工作频率的 1—15kc 内，同时它能作较大功率的辐射，它是一种较好的宽带大功率深海换能器。一个 II 型弯曲伸张换能器的实例：工作频率在 1.5—7.5kc，声功率的输出大于 30 仟瓦，换能器重量约 22.5kg—30kg。换能器全长 43cm，最大直径 19cm，外壳弯曲部分弦长 12.7cm，压电堆长 36cm，直径 7.6cm。

III 型弯曲伸张换能器和 I、II 型的形状相似，其结构如图 (2-7) 所示：

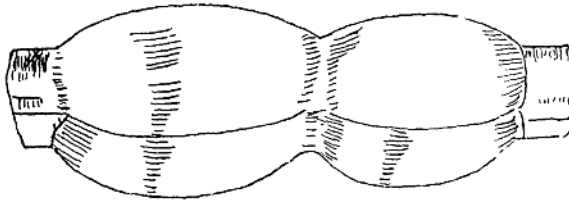


图 (2-7) III 型弯曲伸张换能器

它常用两个或两个以上的弯曲曲面相联接而成，其目的使其具有更宽的频带响应。

IV 型弯曲伸张换能器：它的结构如图 (2-8) 所示：

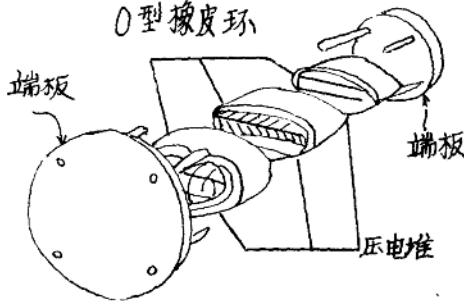


图 (2-8) IV 型弯曲伸张换能器

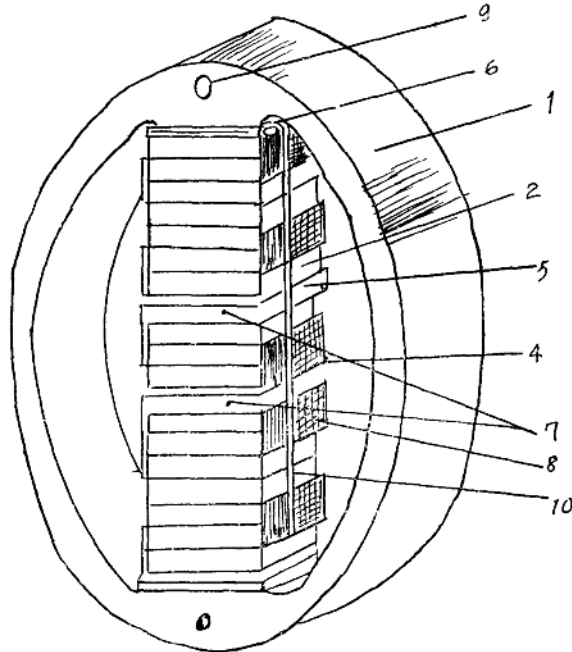
它是由多个短椭圆管组合而成。在每个椭圆形外壳中，沿长轴方向插入压电堆，当压电堆作伸张收缩振动时，激励椭圆管作弯曲振动，为了使这种换能器能作宽带辐射响应，常利用椭圆管的多模式的振动，今将一节椭圆管在空气中测出的各种模式的谐振频

率列表如下（表 2—4）。

表（2—4） 单节椭圆管各种模式的特征频率

| 参 考 | 理 论 值 Hz | 实 验 值 Hz | 百 分 差 |
|----------------|-------------|------------|-------|
| 壳体弯曲振动的基模 | 1432.8 | 1437 | +0.26 |
| 壳体弯曲振动二次模 | 7679.7 | 7550 | -1.7 |
| 壳体膜谐振的基模 | 11848 | 11127 | -6.5 |
| 压电堆的谐振频率 | 10495 | 10300 | -2.9 |
| 壳体和压电堆组合后第一谐频 | 4204 | 4114 | -2.2 |
| 壳体和压电堆组合后第一反谐频 | 4500 | 4394 | -2.4 |
| 壳体和压电堆组合后第二谐频 | 7983 | 8066 | +1 |
| 壳体和压电堆组合后第二反谐频 | 8050 | 8273 | +2.7 |
| 壳体和压电堆组合后第三谐频 | 11040 | 10718 | -3 |
| 壳体和压电堆组合后第三反谐频 | 12534 | 11786 | -6.1 |
| 在 $1kc$ 时的电容 | 0.05055 F | 0.0512 F | +1 |

当将这种换能器放在海洋中，它就变成宽带响应的收发换能器了，对于这种薄壁管Ⅳ型换能器不宜作深海换能器。最近为了使椭圆管Ⅳ型换能器能作更大效率的发射。同时为了便于散热，做出一种Ⅳ型弯曲伸张换能器的变型，它的结构如图（2—9）所示。



图（2—9） 弯曲伸张Ⅳ型的壳体（改进型）

1. 椭圆管外壳 2. 压电堆 3. 散热片（金属薄片） 4. 细金属网（散热网） 5. 不锈钢板
6. 绝缘片 7. 不锈钢板上的孔 8. 不锈钢板上的插脚 9. 外壳上的孔 01. 导线

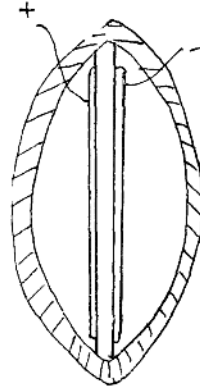
为了使这种类型换能器能强功率辐射，采取了以下措施：

(a) 为了克服压电陶瓷抗张强度低的性质，它在强功率振动时易被振碎，为了改善性能而加了预应力。预应力通过这样方法加上去的，首先在椭圆管短轴方向施加一个作用力，使长轴方向变大，这时把压电堆放进去，然后在元件与外壳接触位置处放入一塑料绝缘垫圈，塑料垫片的厚度尺寸可以用来调整预应力的多少。当椭圆管短轴方向的作用力去掉后，椭圆管恢复变形，这样便在压电元件堆上加上了预应力了。

(b) 为了克服在强功率辐射时，由于电滞损耗产生的热量，采用了散热措施。在薄陶瓷片之间加上金属热片，然后用细金属铜网孔散热片把它们连接起来，使热量迅速地逸散出去。

(c) 为了能控制换能器的 Q_m 值，可在椭圆管壁上沿母线方向打孔，以减轻其质量（减低 Q_m 值）或增加质量来增加 Q_m 值。这种换能器仍不适用于深海，因随着海深增加，预应力亦随之改变，工作性能不稳定。

V型弯曲伸张换能器，它是由一个薄压电圆片和两个局部球壳所构成。压电圆片同球壳的电绝缘是靠边缘处不涂电极来实现的。导线通过球壳上两个小孔把圆片电极引出来的。由于它的体积小，重量轻，频率低，因此它常用作声纳浮标上的换能器。



图(2—10) V型弯曲伸张换能器

(2) 水力学换能器

它是利用具有高压液体(1200大气压)中的有效能换成声信号能量的换能器。详细情况参看文献(*Journal of Underwater Acoustic Vol11, PP575—620*)人们已经做出了工作频率为400赫，具有7瓦的输出功率的换能器，它的 Q_m 约等于4。因此它是低频大功率的换能器

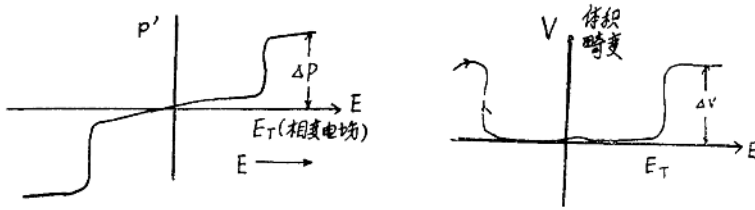
(3) 超导换能器

由于近代对超导电材料的研究获得很大的进展，人们已经能够利用超导电效应作出大功率的水声换能器。它是用多股钛酸钡绕制的超导线圈，将磁激励力加到交流激励的铜制线圈上(该铜制线圈牢固地连接在可移动的活塞上，将圆盘放在液氮中，线圈将承担相当于 2.2×10^4 高斯的磁场。这些数值说明，换能器在190赫的谐振频率时，它将获得大约 $210\text{db}/\mu\text{b}$ 的声源级。这种换能器的功率密度约为1瓦/磅/仟赫，压电陶瓷的功率密度约从4—15瓦/磅/仟赫。平均在10瓦/磅/仟赫左右。因此，利用超导电换能器，它的功率密度至少要比通常所设计的换能器的功率密度大出 10^2 倍。但这种换能器尚处于研制过程之中，离开实用阶段尚有一段距离。

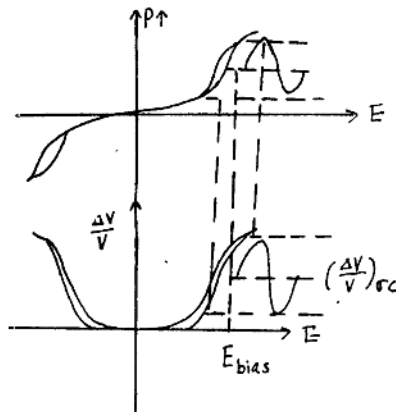
(4) 反铁电相变换水声换能器

在66年有人提出：如果反铁电陶瓷在室温条件下，它的反铁电相自由能与铁电相自由能相差不大时，则就有可能利用外加电场使它从反铁电相强迫转换成铁电相，在相变的过程中伴随着很大的体积形变，从而将电能换成机械能。由此可见，利用这种相变换

伴随体积变形的效应可以用来制作水声辐射换能器。其工作原理如图(2-11)及(2-12)所示。



图(2-11) 理想反铁电相变换的情况



图(2-12) 具有偏置电场反铁电相变换器示意图

由于反铁电陶瓷在电场作用下产生这种体积变形主要是由相变引起的，所以这种形变从本质上来看，它仅与相变过程有关。如果相变时间跟得上电场变化的时间，那么形变的大小应只与电场的大小有关，而与电场的频率无关。因而从原理上来讲，利用这种相变换伴随体积变化的效应，可以做无谐换能器(亦即可以做成宽带响应的辐射器)。依据实验数据，伴随相变它可以产生高达 10^{-3} 数量级的相对应变，因此它有大振幅的特点。特别是在低频时，提高振幅有利于增加辐射功率。最近几年，国内有些单位已做成反铁电相变换器，获得较好的效果，他们将反铁电陶瓷作为马塞型换能器的激励源。这个发射器的偏置电压为12—20千伏/厘米，在3.5—8kc内进行了试验。最佳条件下的电声效率为15—20%，输出声功率大于100瓦。对于这个换能器有一定的电声效率，它比Berlincourt所做的球形换能器(在 $R/\lambda=0.1$ 、于 10^3 赫时)的电声效率为8.2%有所提高，而这个反铁电相变换的马塞形换能器有明显地谐振特性，未能体现反铁电相变换效应的宽带特性。我们认为主要的问题在于马塞型换能器是单谐型换能器，因此它本身就限制了反铁电相变换效应所具有宽带特性的发挥。我们建议反铁电相变换器的机械振动系统应由多模波导(它具有宽带响应的特性)来组成，并且这种波导的特征阻抗应尽量满足最佳传输条件，使反铁电材料所具有的机械振动能最大限度地输到液体中并转