

The background of the cover features a series of concentric circles drawn in a light blue or grey ink, centered on the page. The circles vary in thickness and are spaced out, creating a ripple effect that suggests sound waves or a target. The overall aesthetic is that of a technical or scientific publication from the mid-20th century.

声学译丛

# 水声学

(水声换能器专辑)

# 3

上海市物理学会声学工作委员会主编  
上海市科学技术翻译馆出版

声学译丛 (总第22号)

水 声 学

(3)

(水声换能器专辑)

上海市物理学会声学工作委员会主编

上海市科学技术编译馆出版

(上海南昌路59号)

商务印书馆上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本787×1092 1/16 印张4 1/2 字数140,000

1965年7月第1版 1965年7月第1次印刷

印数 1-1,100

编号 15·302 定价(科七) 0.65元

## 目 录

1. 声纳换能器的设计倾向和问题.....R. S. Woollett.....(1)
2. 水中互易校正用薄壁钛酸钡圆管辅助水声收发器.....奥岛 基良 .....(8)
3. 线锥型水声换能器的研究.....D. L. Raird 等.....(15)
4. 开口式压电陶瓷圆管水声换能器的性能.....G. W. McMahon.....(20)
5. 深水水听器 .....A. B. Фурдыев .....(24)
6. TA 型钛酸钡水听器的频率特性.....塘 正夫 .....(26)
7. 声学换能器的衍射常数.....T. A. Henriquez.....(34)
8. 用压电换能器的一般等效电路分析终端电阻  
和力阻对损耗和带宽的影响.....R. N. Thurston .....(36)
9. 铁电陶瓷.....A. Kremheller 等 .....(45)
10. 用非声学方法测量压电水听器的灵敏度.....F. W. Raymond.....(52)
11. 换能器空化极限的近场效应.....C. H. Sherman .....(55)
12. 由近场的测量确定大型水声换能器的远场特性.....D. D. Baker.....(59)
13. 声纳发射器基阵中反常速度分布的诊断与矫正.....D. L. Carson .....(65)
14. 用同步解调法改进换能器阵列的指向性.....D. G. Tucker .....(70)

# 声納換能器的設計傾向和問題

R. S. Woollett

## 引言

因为很多声納的頻率已下降而进入声頻範圍，声納这一論題放在超声學內或許已經不很恰当了，但正是这种較低頻率的工作，要在下面概述中予以強調。可理解到超声工程所指的是整个声学工程範圍，而超声的限制仅是一种傳統习惯。

回声測距声納的早期設計傾向是在超声頻範圍內的，因为这种方法容易从小而坚实的換能器基陣中获得很尖銳的指向性声束。但产生了这样一种疑問：为什么声納不能老是单独地留在这些高頻內。在图1中，哈頓(Horton)給出了海洋中声波傳播損失的标称值<sup>[1]</sup>。图中以頻率為参数，繪出了傳播損失与距离的关系。在这些曲綫中，頂上的那条直綫表示由于声波扩散造成的傳輸損失，而下面各曲綫则表示由于海水的吸收及散射的附加損失。很明显，傳播損失对頻率有显著的依賴关系。

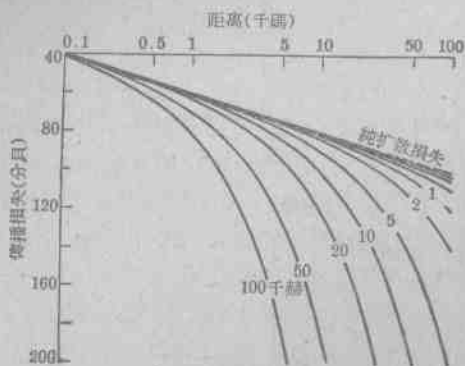


图1 傳播損失的工作值

第二次世界大战时，回声測距声納的射程仅一、二哩，从图1中可看出，在較低的超声頻率範圍內对这种形式的工作性能是很适合的。但如果我們要发射一个信号至100千碼时，則可看出，在次声頻上，只有扩散損失才是主要的，在平均情况下的傳播損失要比5千赫的損失少100分貝。在探求远距离問題上，不仅只考虑傳播損失問題；頻率对于海洋噪声、混响以及目标的散射截面的依賴关系也必須加

以計算，但可从图1中得出結論，超声頻必須舍弃，而其余仍屬有效。

本文主要論述主动式声納的換能器。在主动式声納中产生强功率声信号方面存在着許多要求解決的問題。在被动式听音系統中应加研究的問題并不严重，并已有論述在前<sup>[2]</sup>。

## 低頻用換能器

在海洋声学的研究方面要創設低頻声源时，其技术用途就必须与一般的超声換能器不同。超声声納換能器經常采用半波长晶体或陶瓷棒作单面辐射，但如果想采用象1千赫这样的一只諧振子，就会遇到如图2指出的这种情况，这个鈦酸鋇棒已重得难以搬动。在大多数的声納应用方面，为了定向辐射而需要很大的辐射面积；如果用鑲嵌法集合这些棒来取得这样大的辐射面积，那么換能器就非常笨重。

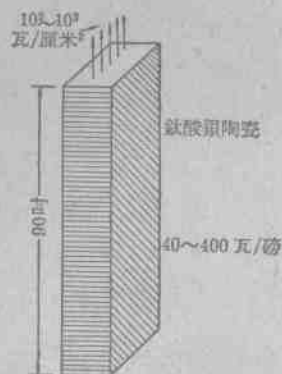


图2 1000 赫半波长棒

当然这个換能器对强功率而言是很好的。在基陣中，若对棒有适当的冷却，則其辐射端的声强可达到100~1000瓦/厘米<sup>2</sup>。在通常的声納中不需要这样高的表面声强，故应探求另一种形式的諧振子，使在它的辐射面的后面的有效材料較少。同时在可能时应该保持适当的棒的功率-重量比，即1千赫时应为40~400瓦/磅。象图2这样大块的压电陶瓷諧振子难以获得，甚至连能否設想到它还可能是一个疑

間。可是，大的陶瓷諧振子也可用許多小塊陶瓷膠合而成，因而象這樣大的尺寸並不是最大限額。

一種減少輻射口徑后面的有效材料的方法，是在換能器中只採用一段象圖2中截面較短的棒，而在它的兩端加上截面比它大得多而且很重的質量負載。為此可保持諧振條件，并使這樣結合的諧振子較短、較輕且需要的功率較少。

如果不採用半波長伸縮式棒或雙端質量負載棒，而採用彎曲式陶瓷棒，那麼也可做出較輕的諧振子。可以把大的壓電陶瓷圓片或棒做得使它彎曲式振動，而從它們的主表面輻射聲波。其它類似於這些結實諧振子的是一種由集總質量及彈簧裝配而成，而用磁力或水力激勵器來策動的構件。我們將對其中某些處理方法進行較為詳細的敘述，並從壓電彎曲式圓片換能器開始。

圖3所示為彎曲式圓片換能器的原理圖。這種換能器是雙圓片平衡式振子，它象一個體積位移器或單極子那樣振動着。這種雙圓片構件的每一片實際上是三明治式的三層圓片，它的中間一層是金屬，而兩片壓電陶瓷片膠合在此金屬的兩面。對夾片的電氣連接的排列，要使電激勵在它兩面的兩塊陶瓷層中所造成的壓電應變的方向正好相反。這兩種相反的應變使圓片彎曲變形。從平衡式換能器兩彎曲振動圓片所輻射的聲波在聲學上是同相的。

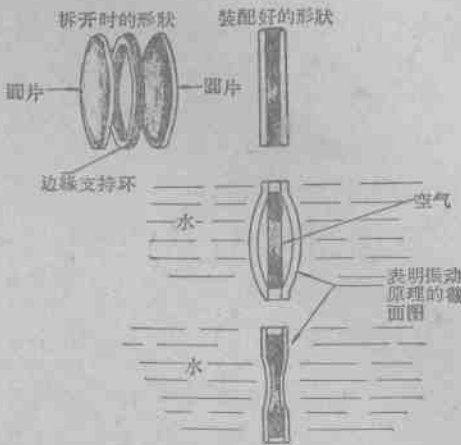
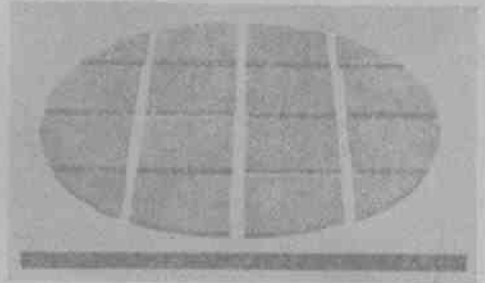


圖3 振動方式的誇張概念

直徑大於6吋的壓電片的价格上升很快，但大片可以很經濟地由分片來組成，如圖4所示。如果將這些小塊小心地用強粘性環氧樹脂膠合，則分片拼成的圓片能象整塊那樣堅實，而接縫對它的彈性性能的影響並不顯著。將這個鑲嵌體膠合在中間的金属層上，而在另一面膠上另一片相同的陶瓷圓片，



由方塊修剪而拼成

圖4 組成圓片的陶瓷分片



圖5 美國海軍水聲研究所製的彎曲式圓片換能器線陣



圖6 彎曲式棒狀諧振子

組成三層圓片。

圖5所示為一個由6只雙圓片彎曲式換能器組成的線陣，它是由美國海軍水聲研究所作為海洋聲學研究的實驗聲源。這個線陣在800赫時的輸出是2千瓦。圓片諧振子裝在聚氨基甲酸酯塑料板內，並以壓縮空氣來補償周圍的靜水壓力。

彎曲式棒亦可製成良好的低頻換能器元件。圖6所示為一種換能器中所用的彎曲式棒狀諧振子。與上述的圓片相似，棒是由兩層陶瓷製成的，受到極性相反的策動而彎曲。每層由許多小陶瓷片膠合而成。棒的邊緣由金属連接杆拉緊來加強結構強度。裝好的棒組件的末端是架架的，但可以旋轉。圖7所示為完整的Minneapolis-Honeywell換能器，它可作為研究用聲源。三只矩形箱內都裝入了雙層彎曲式棒，布設得使其能象體積位移器那樣振動。在它的110赫諧振頻率上可有4千瓦的輸出功率。

一種不同於這些新式的彎曲式陶瓷換能器而具有悠久历史的低頻換能器是電磁式或可變磁阻式換



图7 Minneapolis-Honeywell 换能器

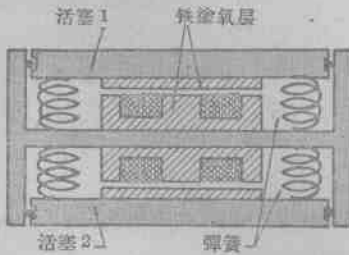


图8 可变磁阻式换能器(体积位移器)

能器。图8所示为这种换能器的工作原理。当然，基本上它是老式电话接收器的一种水声翻版。这种型式是一个具有双辐射面活塞的平衡式振子。磁力透过空气隙对两个活塞的策动是一致的，因而它们的体积位移是相加的。为了获得线性工作，用直流磁化电流附加在交流信号上；如果省去了直流偏磁，则换能器起着倍频器的作用；而且在机械谐振频率的一半时受到一个信号的激励。可变磁阻式换能器通常用在几千赫以下，这样可使涡流损失保持很小。由于它是一个集总参数系统，在此低频范围内设计成任何谐振频率是很容易完成的。

在低频上，标准的机电能量的转换方法并不象超声领域那样独一无二，就是说还有许多其它产生振动的方法值得重视，其中的水力学换能法<sup>[3]</sup>是很有前途的。这种方法是利用压力把静液流中有效能量转换为声信号能量。这种水力学换能器的外形

类似于水力伺服系统，但其用途在于产生交变位移，而不是位置的控制。图9是这种水力学换能器的原理图，图中未列入功率能源。图11为400赫并具有7瓦输出功率以及通带约为25%的研究用水力学声源。还有一些研究用的水力学声源已被研制出来。

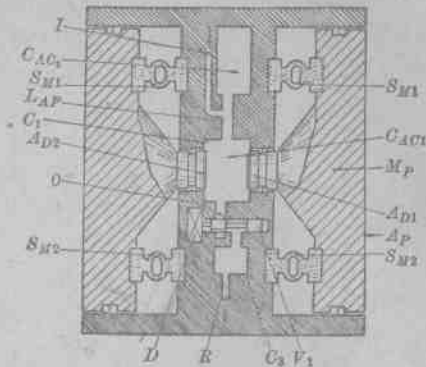


图9 换能器简图



图11 通用动力学-电子学水声换能器

## 深水换能器

前述换能器是考虑在1000呎左右的中等水深之用。由于深海潜水艇(如深水调查船)的出现，提出了使换能器在直至海底的任何深处都能工作的要求。海底电缆测量船亦能到达很深的水区，因而需要声学探测用的换能器。为此，所需的换能器就必须能得住高达15000磅/吋<sup>2</sup>的静水压力。

图12说明了要求在相当深度工作时的换能器所产生的问题。谐振子的辐射面受到了很大的静水压力。过去处理这类静水压力的通常手段曾经是追求所谓“压力释放”材料，它可以抗衡这种压力，并提供谐振子以很低的机械阻抗，所以保留了对外壳的

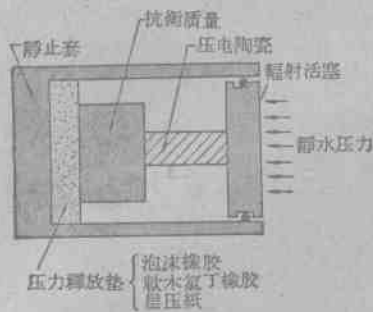


图 12 压力释放问题

去耦作用。由于存在大的阻抗失配，这种材料就要对机械振动呈现不显著的反压力。泡沫橡胶有许多气腔，可用作良好的失配材料，但在静水压力下会很快地溃裂。有一种软木与氯丁橡胶的混合物 (Corprene)，在 100 呎水深级用的换能器上是有用的。层压纸构成的压力释放材料，在它还没有变得太硬而不能起显著的隔声作用之前，可使换能器工作至 1000 呎的水深级。

当然，最佳而有效的压力释放材料是压缩空气。假使省去如图 12 中的压力释放垫而代以压缩空气，将它充入外壳内使它与周围的水维持相同的压力，那么就可以在所有的水层中都取得良好的性能。随着深度而变化的气体阻抗能使换能器的谐振频率稍为变动（也正象上述的其它几种压力释放材料那样），但气体系统主要的缺点是难以达到高度的可靠性。图 5 中的弯曲式圆片换能器及图 11 中的水力声学换能器，都采用了气体压缩补偿系统。

在很深的水层处，多孔式或层积式固体压力释放材料是无效的，而上述的气体压缩系统也变得不实用。因此，必须去采取如图 13 所示的充液式换能器。多数能选用的可压缩的液体，其压缩率仅为水的两倍左右，最常用的一种是硅质流体。图 13 中的换能器采用弯曲式圆片作为活动元件。这个设计具

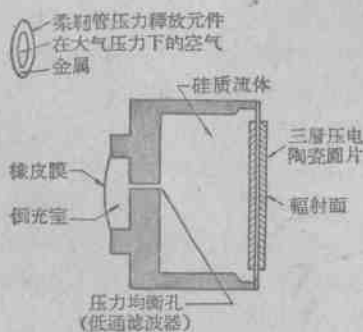


图 13 充液式换能器

有许多引人注目的特点，已在另一文献<sup>[4]</sup>中详细讨论。封闭在外壳内的液体增加了振动系统的硬度，因而提高了换能器的谐振频率，并降低了它的机电耦合系数。经过适当的设计，这些影响可以达到允许的限度。在外壳的背面装了一只贮油器及压力均衡系统，用来补偿壳内的油的静压力。当外壳的深度加倍时，可用海水代替油来充入换能器。

如果将柔韧金属腔浸在外壳内的液体中，可增加液体的有效压缩率。通常，用在这方面的金属腔类似于图 13 顶部所示的柔韧管<sup>[13]</sup>。这是两端封闭的椭圆形金属管。象图 7 的 Minneapolis-Honeywell 弯曲式棒状换能器，在它的棒列之间的空隙内就装有这些柔韧管，它们是浸在油中的。用了这些管子后，虽然又在系统中引进了空气，但这气体是完全密封在全金属的空腔内的，故不存在可靠性问题。然而，柔韧管在这方面的应用仅在几千呎深处有效；而真正的深水换能器只能全用液体。

图 13 的换能器的外形很象装在封闭箱内的无线电扬声器。在这两种箱中，封闭部分的作用是在于防止振子背面的声辐射干扰振子正面的直接声辐射。可能指望利用高保真度扬声器技术的一切宝贵知识来解释深奥的换能器问题。虽其运用原理相同，但是水与空气之间的声阻抗差异极大 (3600:1)，设计参数数量级相差如此大，以致很难直接转换设计的概念。例如用低频反射相位转换器的原理，使封闭箱内部释放一部分声能来增强扬声器前面声音的方法，尚未在水声学中采用。

图 14 所示的一种分布参数式相位转换器对水声方面很有用，半波长的声学传输线从振动圆片背部到辐射面附加了 180° 相移，因此当声波从管的开口端发出时，它与圆片前面发射的直达波同相。可

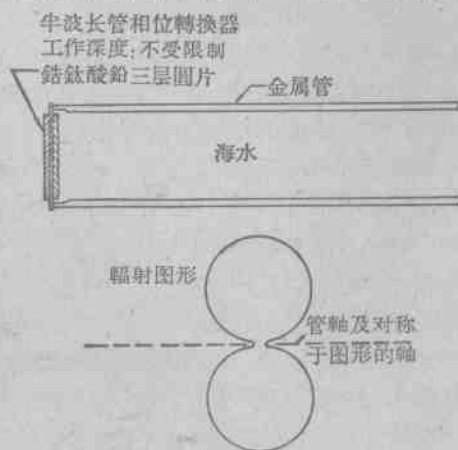


图 14 半波长管相位转换器

以认为,这种设备具有圆环辐射图案,因为这声场是相隔半波长的两个同相声源。因为这种换能器必须有很厚的金属管壁来作为一个有效的波导管,故必然是很笨重的。

用图 13 及 14 中所示的方法,从换能器振动元件的内表面来控制其辐射时要附加重量,这使换能器的性能稍有调和;因而象这样的处理方法是否真需要是值得重新探讨的。图 15 所示为几种不同相的振动面而允许有相互声学影响的换能器。在弯曲式圆片型中,环形质量  $M_2$  比有效的圆片质量  $M_1$  要大得多,它是用来保持在圆片边缘上的单波节环的。在可变磁阻式换能器中,辐射质量  $M_1$  完全封闭了活动机构,形成一只坚固的盒子。这封闭盒可以做得足以抗衡很大的静水压力。抗衡质量  $M_2$  在一个封闭的气隙中运动,这气隙保持在大气压力状态而与周围的静水压力无关。在自由液流环中,则依照其径向基谐方式振动,它们的内表面的运动和外表面的运动有  $180^\circ$  的声学反相。这种环可由压电陶瓷制成,或用磁致伸缩的金属卷成。而磁致伸缩式很适于做很大的尺寸,以供低频之用。

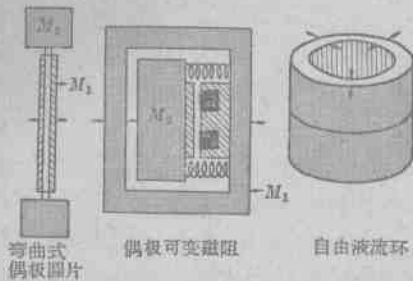


图 15 不用压力释放材料的换能器

所有这三种换能器中,由于不同相位表面所辐射的声波之间的有害的干扰,因而使辐射阻抗趋于下降,并严重地影响辐射图案。例如图 15 中的弯曲式圆片及可变磁阻式换能器给出的是偶极型图案(若不用抗衡质量  $M_2$ ,则这种圆片的辐射图案就象四极型的)。尽管有这些缺点,仍可从这几种换能器中取得有用的性能。如果将它们靠紧排列成一基阵,并构成两组平行但分开的不同相位辐射面,则偶极型的性能可以得到改善。

### 功率、效率及频带宽度问题

除了研制最适用于低频的换能器型式和寻求深水用的换能器的制造方法以外,还应使换能器在高效率及在重要的频带宽度上能产生大量声功率。很明显,即使在低频上减少了传播损失,但在远距离工

作还是需要强功率的。制造越来越大的换能器基阵,可允许将总功率提高到预定值。换能器设计者对靠基阵达到的总功率不如对组成基阵的单个换能器的可能功率那样关心。

一种有关的功率标准是从换能器表面可获得的声强,即换能器激励到它的极限时每单位辐射面积的平均功率<sup>[3]</sup>。在这里当然可以进入空化极限。表层海水在低声频时无显著的抗张强度;因而换能器在忽略深度时的声强上限为  $1/3$  瓦/厘米<sup>2</sup>。但当换能器的深度达几千呎时,即使如图 2 的半波长棒辐射 1000 瓦/厘米<sup>2</sup>亦不致空化,这是由于静水压力对海水有很大的偏压所致。在超声频上,象这样高的声强当然会在介质中引起严重的非线性效应,而在低声频中这些效应就不严重。然而,通常辐射面积主要的是要满足基阵的指向性要求,因而它的声强在  $1 \sim 10$  瓦/厘米<sup>2</sup> 内时已可满足对总功率的要求。

另一种功率标准是将功率输出除以换能器的重量,而常以瓦/磅来表示。当一给定的设计以频率标度时,它的瓦/磅数字直接与频率成正比。对不同的换能器用瓦/磅基准来进行确切的比较的确是困难的,因为除功率外,重量还取决于测深能力、寿命要求以及频带宽度等许多因子。同时在这类换能器的重量与金属支架重量之间很难看得出有显著的区别,但或许仍然可提出几个可采取的通用指标:100 赫时为 1 瓦/磅;1 千赫时为 10 瓦/磅;10 千赫时为 100 瓦/磅。在良好的条件下,可以超过这个指标(参看图 2)。

普通的电声换能器由机械极限和电气极限二者限制了它的功率输出。由于声纳信号的重复频率很低,所以温升不是主要的限制。在压电及磁致伸缩换能器中,电气极限主要决定于材料的电能或磁能的贮存能力以及机电耦合系数。就陶瓷材料来说,机械极限是以能承受的破裂为限,而就磁致伸缩换能器或采用高应力弹簧的换能器来说,则是材料的疲劳程度。压电陶瓷的低抗张强度严重地限制了功率,原因在于通常的预应力技术不能使陶瓷维持在整个振动周期内的压缩<sup>[4]</sup>。

如果用经过预压的锆钛酸铅陶瓷作换能器,则任何电声换能器可获得最高的固有功率潜力。磁致伸缩及可变磁阻换能器具有足够的功率潜力,所以用在声纳中仍然是有利的,而它们的特殊性能无疑在某些应用中是比较好的。水力声学换能器的历史不长,相对于电声型式,它的潜力还难全面估价。但理论研究指出,它将在低频声纳中占优势。



新式声纳在谐振时，决定换能器效率的主要损失通常是机械的，而不是电的。压电陶瓷的电损失很低，而在磁场内工作的换能器中，当下降至较低频率时，就降低了涡流损失。换能器在把机械能转换成声辐射之前，其防水材料及密封胶吸收掉可观的机械功率，但换能器的效率通常大于50%。

在谐振时的有效频带宽度主要取决于机电耦合系数的大小，然而为了最佳的结果应满足这样的附加要求，即机械值应与机电耦合系数的倒数同级。在采用了最新的陶瓷后可以达到的频带宽度是：弯曲式圆片为40%，弯曲式棒为50%。不过为了获得深水探测能力起见，这些数值应略有减小。

### 换能器基阵中的相互影响

如前所述，为了取得所需的指向性及总功率，换能器常被做成多元基阵。可以证明，基阵的环境对单个换能器是有害的。图16给出了在声束偏离垂直轴 $29^\circ$ 时半个矩形基阵上的计算等压线<sup>[10]</sup>。这个基阵用圆形活塞振子紧贴装配而成，并由同一速度振幅 $U$ 所策动，但为了声束偏转的要求而具有不同的速度相位。可以看出，它的压力变化颇大，因而有两个实际效应：1)在压力峰值时开始空化，因而限制了它的功率输出，比这基阵发射平面波时可能达到的输出功率低<sup>[11]</sup>；2)介质的反作用力对各只活塞都不相同，因而难以达到对这基阵所规定的恒定速率。

当然，声场同时将所有换能器作声学耦合，而这个耦合就用互辐射阻抗来描述。图17表明一个3换能器基阵的完全网络。如换能器多于三只，这种

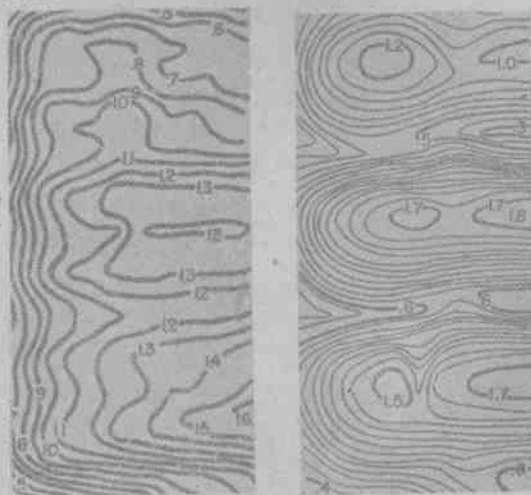


图16 半个基阵上的表面等压线

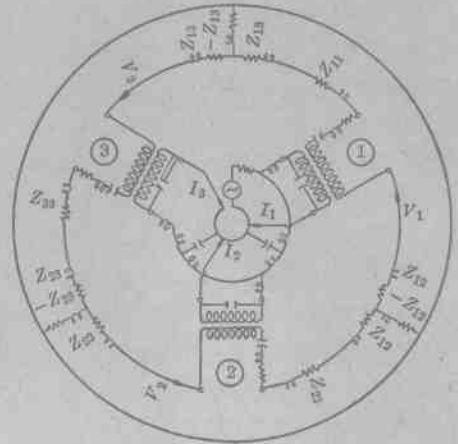


图17 3换能器基阵

图就很难画了。在这个转盘形图的轴心有一个公共电源，它通过一个相位网络供给三只换能器。转盘的三个半径是换能器的机电线路。假定这些换能器是压电式的，并且每只都装着一个串联调谐电感。转盘形图的边缘表示与水相耦合；网络部分的阻抗是换能器的本身辐射阻抗及互辐射阻抗。若在各对换能器之间的间隔不同，则三个互辐射阻抗( $Z_{12}$ ,  $Z_{13}$ ,  $Z_{23}$ )完全不同，且每只换能器将以不同的速率振幅振动。如果换能器具有相同的结构及相同的反射条件，则其本身辐射阻抗相同。

可以看出，即使是去分析这类简单的三元基阵也很费力。且在实际上，在基阵内可能有成百个换能器元件。幸而现代数字计算机已能应付这类复杂的网络。然而从这类网络中取得阻抗值是个较为根本的问题。通过充分的努力，可以对换能器电路的参数估计得很好，但对本身辐射阻抗及互辐射阻抗的估计却是个困难的声场问题。在某些常用基阵的几何图形及反射条件下，由于数学上的困难，似乎还难以计算辐射阻抗值。但是如果为了减轻数学上的困难而去研究设计好的基阵，就能熟悉换能器相互影响的实际结果，从而也许能找出解决由这些相互影响引起工作困难的方法来。

一种简化的基阵分析法，是假定所有的换能器具有同样振幅的内部策动力。在图17所示的系统中，如果每只换能器由各别的放大器所策动，就可以取得这个条件。于是送到各只换能器输入端的电压可加以直接控制，并使这些电压大小相等而内部策动力亦相等。图18表明休曼(Sherman)<sup>[12]</sup>所制的这类七元基阵策动条件的计算值。已发现在采用某些尺寸及间距的活塞时出现了强烈的相互影响。例

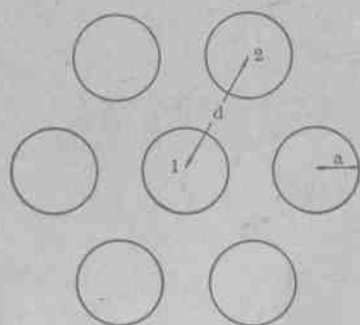


图 18 基阵的几何图形

如，有可能安排得使中心活塞具有负辐射电阻的情况。负号说明了中心活塞从声场吸收功率，而不是输送功率给声场。

已经对在紧接条件下(活塞彼此邻接,  $d=2a$ )改变活塞尺寸(以波长计)时相互影响的基阵作了研究。图 19 表明中心活塞与周围活塞的速率比与活塞尺寸的关系。因为基阵是对称的, 所以外圈活塞的速率都相同。这三条曲线代表不同的机电效率  $\eta_{me}$ , 而这效率是换能器内部力阻的一种度量。可以看出, 当所有换能器具有相同的内部策动力时, 基阵中小尺寸活塞的速率比可达 3 以上。对这些小尺寸活塞, 中心换能器功率的机械极限(即速率极限), 比周围换能器要早达到。反之, 对大活塞, 中心与周围活塞的速率差距却很微小。可以从这些结果中推知, 如果所用的各换能器的直径大于  $3/8$  波长, 则可避免基阵中许多麻烦的相互影响。

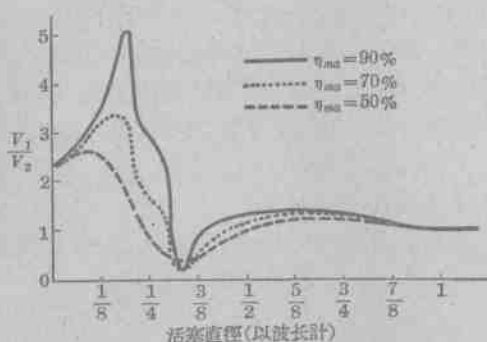


图 19 中心活塞速率与外圈活塞速率比与  $ka$  的关系  
(当活塞直径大于  $3/8$  波长时, 活塞速率比小于 2)

## 参考文献

- [1] J. W. Horton, "Fundamentals of Sonar", U. S. Naval Institute, Annapolis, Md., 1957.
- [2] J. M. Ide, "Development of underwater acoustic arrays for passive detection of sound sources", Proc. IRE, Vol. 47, pp. 864~866, May, 1959.
- [3] J. V. Bouyoucos, "Hydroacoustic Transduction—A Survey", Journal of Underwater Acoustics (U. S. Navy), Vol. 11, pp. 327~367, July, 1961.
- [4] S. Wisotsky, "Hydroacoustic Transducer", Journal of Underwater Acoustics (U. S. Navy), Vol. 11, pp. 575~620, Oct. 1961.
- [5] R. Berman, "Hydroacoustic Transducers", Journal of Underwater Acoustics (U. S. Navy), Vol. 11, pp. 361~367, July, 1961.
- [6] F. H. Johnson and R. S. Woollett, "A flexural ceramic disk transducer for deep water operation", 1963 IEEE Internat'l Convention Record, pt. 9, pp. 60~64.
- [7] W. J. Toulis, "Acoustic refraction and scattering with compliant elements", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 29, pp. 1021~1033, Sept. 1957.
- [8] R. S. Woollett, "Theoretical power limits of sonar transducers", 1962 IRE Internat'l Convention Record, pt. 6, pp. 90~94.
- [9] H. B. Miller, "Origin of mechanical bias for transducers", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, p. 1455, Sept. 1963.
- [10] C. H. Sherman and D. F. Kass, "Near Field Sound pressure of Arrays of Pistons", USN USL Rept. No. 495, Feb. 20, 1961.
- [11] C. H. Sherman, "Effect of the near field on the cavitation limit of transducers", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, pp. 1409~1412, Sept. 1963.
- [12] C. H. Sherman, "Example of Interaction Effects in Transducer Arrays: Part III", USN USL Tech. Memorandum No. 912-82-62, Sept. 25, 1962.

(节译自美国《IEEE Transactions on Ultrasonics Engineering》1963 年第 UE-10 卷第 3 期第 116~124 页, 水产部渔业机械仪器研究所编译组供稿, 于露南校)

# 水中互易校正用薄壁鈦酸鋇圓管 輔助水聲發收器

奧島 基良

## 一、引言

水聲用超聲發收器的電壓靈敏度一般是用三個發收器借助互易法在消聲水槽內進行校正的。互易法在原理上只要使用三個相同形式的待校正換能器就能進行校正。但在作寬頻帶的互易校正時，會感到靈敏度不夠，實際使用上不夠方便。因此，作者設計製作了三種校正用輔助換能器，其中只要一種換能器為發收兩用即可，其餘兩種一為發射專用，一為接收專用。故發射專用和接收專用換能器的發射和接收靈敏度都可較高，而且頻率特性平直；發收兩用換能器的發收靈敏度亦不太低，頻率特性也較平直。如各置這三種換能器，在校正其他發收器靈敏度時，可當作輔助發收器來配合使用，這樣就方便多了。

內表面聲屏蔽、外表面接收聲波的那種薄壁鈦酸鋇圓管接收器的頻率特性如下：在頻率低於徑向共振頻率時，即在“勁度控制”範圍內，接收靈敏度較高，頻率特性亦平直，故不僅可作為水聽器用，而且作上述校正用接收器亦很適宜。為了使接收器在水中工作穩定，作者製作了一種外徑為 10.8 毫米的鈦酸鋇圓管隔著厚 0.1 毫米金屬鈦薄壁圓管內壁的接收器，這種接收器的接收靈敏度在頻率為 140 千赫以下時約 -110 分貝（零分貝等於 1 伏/微巴），且很平直。

這類接收器如用作發射器，則在共振頻率以上，即在“質量控制”範圍的發射靈敏度必然平直。如要降低發射器的共振頻率，它的尺寸當然要變大。作者用外徑 65 毫米、長 30 毫米的鈦酸鋇圓管製成發射器，這種發射器在頻率為 15 千赫以上時的發射靈敏度約為 31 分貝（零分貝等於 1 微巴/伏，距離 1 公尺），且很平直。

由於上述換能器的鈦酸鋇元件減薄時，換能器的機械共振  $Q$  亦隨之變得很小，故在共振頻率附近使用時，發收靈敏度都比較高，且很平直，因此很適

宜作發收共用。但這類換能器靈敏度較高的頻率範圍不太寬，故製備四個構造和發射器相同，但在 15 千赫到 140 千赫內有不同共振頻率的發收共用換能器（共振頻率分別約為 30、40、70 及 100 千赫）。

適當使用這些輔助換能器，可使 15~140 千赫範圍內的各種換能器的靈敏度比較容易進行校正。

## 二、鈦酸鋇圓管換能器的接收靈敏度

如圖 1 所示，把長  $l$ 、外半徑  $R$ 、壁厚  $h$  的鈦酸鋇圓管（假定  $h \ll R$ ， $l \lesssim 2R$ ）放在無限長的半徑為  $R$  的圓形剛性聲障棒之間，鈦酸鋇元件的內壁和上下兩端面皆處於自由狀態，而電極被覆於圓管的內外壁，並在半徑方向極化，當平面聲波從垂直於圓管軸的方向入射時，元件的接收靈敏度  $M'_0$  可由下式表示。

$$M'_0 = \left| \frac{\dot{E}'_0}{\dot{p}_0} \right| = \left| \frac{\dot{p}}{\dot{p}_0} \cdot \frac{\dot{F}}{\dot{p}} \cdot \frac{\dot{F}'}{\dot{F}} \cdot \frac{i}{\dot{F}'} \cdot \frac{\dot{E}'_0}{i} \right| \quad (1)$$

式中  $\dot{p}_0$  是未放置接收器以前的平面聲場聲壓， $\dot{E}'_0$  是元件兩端開路時的壓電電壓， $\dot{p}$  是元件接收聲波的表面為剛性時加於其上的平均聲壓， $\dot{F}$  是加於接收聲波的表面上的總力， $\dot{F}'$  是  $\dot{F}$  中使鈦酸鋇元件變形的有效分量， $i$  是由  $\dot{F}'$  產生的單位截面上的切應力。

### 衍射常數、指向性

(1) 式中的右邊的第一個因子  $\dot{p}/\dot{p}_0 = \alpha$  稱為衍

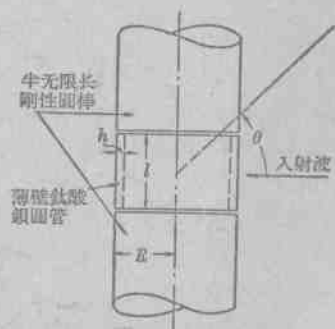


圖 1 薄壁鈦酸鋇圓管換能器

射常数，福島等<sup>[2,3]</sup>得出任一方向入射的平面波的  $\alpha_\theta$  值为：

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)_\theta = \alpha_\theta = \left[ J_0(k_w R \cos \theta) - J_1(k_w R \cos \theta) \right. \\ \left. \times \frac{H_0^{(2)}(k_w R \cos \theta)}{H_1^{(2)}(k_w R \cos \theta)} \right] \frac{\sin(k_w l \sin \theta)}{k_w l \sin \theta} \quad (2)$$

式中  $k_w$  是水中的波数， $\theta$  是声入射方向和与圆管的轴垂直的平面间的夹角。当  $\theta=0$  时，即声波以垂直于圆管的轴入射时，(2)式变为下式：

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)_{\theta=0} = \alpha_0 = J_0(k_w R) - J_1(k_w R) \frac{H_0^{(2)}(k_w R)}{H_1^{(2)}(k_w R)} \quad (3)$$

图2表示(3)式的关系。可见， $k_w R=1$  时， $\alpha_0$  比低频时的值约低 0.7 (即 3 分贝)， $k_w R=3$  时，约低 0.45 (即 7 分贝)。在更高频率下，可看出  $\alpha_0$  值随频率的平方根成反比下降 (约每倍频程 -3 分贝) 如把(2)式看作为  $\theta$  的函数，则此式可用以表示圆管的轴所在的平面内的换能器指向特性。理论上，与轴垂直的平面内没有指向性。

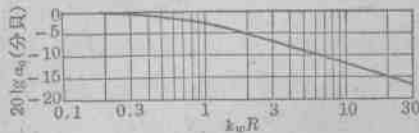


图2 图1所示换能器的衍射常数

$k_w$  = 水中的波数

$R$  = 薄壁钛酸钡圆管的外半径

$$\alpha_0 = J_0(k_w R) - J_1(k_w R) \frac{H_0^{(2)}(k_w R)}{H_1^{(2)}(k_w R)}$$

(1)式右边第二个因子  $\hat{F}/\hat{p}$  是钛酸钡圆管的表面积  $S$ ，即：

$$\frac{\hat{F}}{\hat{p}} = S = 2\pi Rl \quad (4)$$

机械阻抗、共振频率、辐射阻抗、机械  $Q$

(1)式右边第三个因子  $\hat{F}'/\hat{F}$  可由下式表示：

$$\frac{\hat{F}'}{\hat{F}} = \frac{s}{j\omega z} = \frac{s/j\omega}{\hat{s}_r + r + j\omega m + \frac{s}{j\omega}} \quad (5)$$

式中  $\hat{s}$  是钛酸钡外部看入的力阻抗， $\hat{s}_r = r_r + jx_r$  是辐射阻抗， $r$ 、 $m$  和  $s$  分别是由外部看入的钛酸钡元件的内部力阻、等效质量和等效劲度， $\omega = 2\pi f$  是角频率。当钛酸钡元件很薄时 ( $h \ll R$ )， $m$  和  $s$  可由下式给出：

$$m = 2\pi Rlh\rho = Sh\rho, \quad s = \frac{2\pi lhE}{R} \quad (6)$$

式中  $\rho$  是钛酸钡密度， $E$  是钛酸钡的杨氏模量。(6)

式在工作频率范围比圆管纵向共振频率  $f_1 = c/2l$  低很多 ( $c$  是钛酸钡声速) 的条件下才能适用。

根据(6)式可得径向共振频率  $f_R$  为：

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m}} = \frac{c}{2\pi R} \quad (7)$$

如  $c = 4.26 \times 10^5$  厘米/秒， $c_w = 1.45 \times 10^5$  厘米/秒 (为水中声速)，则在  $f_R$  时的水中  $k_w R$  为

$$(k_w R)_{f_R} = \frac{2\pi f_R}{c_w} R = \frac{c}{c_w} \approx 3.0 \quad (8)$$

辐射阻抗密度  $\hat{s}_r/S$  的值已由福島等<sup>[2,3]</sup>求出，当  $k_w R=3$  时，如  $l > R$ ，则辐射阻抗密度中的力阻分量  $r_r/S > 0.9\rho_w c_w$ ，力抗分量  $x_r/S < 0.4\rho_w c_w$ 。

一般说来，钛酸钡元件的内部力阻  $r$  (包括支撑元件引起的力阻增加部分) 比辐射阻抗中的力阻分量  $r_r$  小很多，而辐射阻抗中的力抗分量  $x_r$  亦可认为比  $\omega m$  小很多，故共振时的机械  $Q$  可由下式给出：

$$Q \approx \frac{\omega R m}{r_r} \approx \frac{2\pi f_R S h \rho}{\rho_w c_w S} = \frac{\rho c}{\rho_w c_w} \cdot \frac{h}{R} \quad (9)$$

当  $\rho c = 2.34 \times 10^6$ ， $\rho_w c_w = 1.45 \times 10^5$  达因/克因·厘米<sup>2</sup>时， $Q$  为：

$$Q \approx 16 \times \frac{h}{R} \quad (10)$$

因此可减小元件壁厚  $h$  来降低机械  $Q$ 。

如把(5)式的关系用  $Q$  和  $\Omega (= f/f_R)$  表示，可得：

$$\frac{F'}{F} = \frac{s}{z} \approx \frac{\frac{s}{\omega}}{\sqrt{(\rho_w c_w S)^2 + \left(\omega m - \frac{s}{\omega}\right)^2}} \\ = \frac{1}{\sqrt{(1-\Omega)^2 + \frac{Q^2}{\Omega^2}}} \quad (11)$$

接收灵敏度

(1)式右边第4个因子  $i/\hat{F}'$  是半径方向的力和圆周方向的力的转换比，即：

$$\frac{i}{\hat{F}'} = \frac{R}{h} \cdot \frac{1}{2\pi Rl} = \frac{1}{2\pi lh} \quad (12)$$

(1)式右边第5个因子  $\hat{E}'_0/i$  为：

$$\frac{\hat{E}'_0}{i} = g_T h \quad (13)$$

式中  $g_T$  是钛酸钡的横向振动电压输出系数。

将上面几个公式代入(1)式，则得接收灵敏度  $M'_0$  如下：

$$M'_0 = \alpha_0 2\pi Rl \frac{s}{z} \cdot \frac{1}{2\pi lh} \cdot g_T h = \alpha_0 \frac{s}{z} g_T R \quad (14)$$

式中  $\alpha_0$  及  $(s/\omega)/z$  用(3)式及(11)式表达。

低頻時  $\alpha=1$ ,  $z=s/\omega$ , 故低頻接收靈敏度  $M'_{00}$  為:

$$M'_{00} = g_T R \quad (15)$$

上式和 R. A. Langevin 在靜態時得出的數值一致<sup>[4]</sup>。

式  $M'_0/M'_{00} = \alpha_0 \cdot (s/\omega)/z$  可表示靈敏度的頻率特性, 如在共振頻率  $f_R$  時的  $h_w R$  為 3, 則  $Q=1, 2, 3, 4$  時的  $M'_0/M'_{00}$  值見圖 3 的上圖。由圖中可明顯地看出, 當  $Q$  為 2~3 時, 頻率低於共振頻率附近時的靈敏度特性很平直, 而高於共振頻率時, 靈敏度迅速下降。

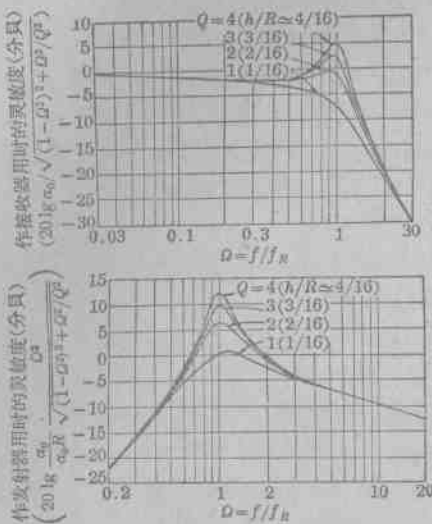


圖 3 圖 1 換能器的理論的頻率響應

由(15)式可以看出, 低頻時的接收靈敏度只與圓管半徑  $R$  成正比, 而與厚度  $h$  及長度  $l$  無關。故使圓管變薄、長度增長時, 電壓靈敏度不變, 但功率靈敏度 (= 電壓靈敏度 /  $\sqrt{Z_l}$ ) 會增大。

實際使用接收器時, 一般用屏蔽電纜連接, 靈敏度因而降低, 其下降值  $M_0/M'_0$  可由下式表示:

$$\frac{M_0}{M'_0} = \left| \frac{\frac{1}{j\omega C_1}}{Z'_l + \frac{1}{j\omega C_1}} \right| = \frac{Z_l}{Z'_l} \quad (16)$$

式中  $C_1$  是電纜電容,  $Z'_l$  是鈦酸鋇元件本身的自由阻抗,  $Z_l$  是接上電纜後的自由阻抗。低頻時  $Z'_l$  是容性的, 如其電容量用  $C'_l$  表示, 則低頻時靈敏度降低值  $M_{00}/M'_{00}$  可由下式表示:

$$\frac{M_{00}}{M'_{00}} = \frac{C'_l}{C'_l + C_1} = \frac{C'_l}{C_l} \quad (17)$$

式中  $C_l = C'_l + C_1$  是接上電纜後的總電容。在鈦酸鋇圓管很薄時, 因而機械  $Q$  為 2~3 之間時, 共振頻

率  $f_R$  附近的  $Z'_l$  和  $Z_l$  約為:

$$Z'_l \cong \frac{1}{\omega C'_l}, \quad Z_l \cong \frac{1}{\omega C_l} \quad (18)$$

故即使在共振頻率附近, 用(17)式代替(16)式引起的誤差亦極小。

### 概要

上述結果可簡述如下:

將圓管厚度減小, 可使共振的機械  $Q$  降低, 並能提高功率靈敏度。如把鈦酸鋇圓管的厚度  $h$  和半徑  $R$  的比, 選擇得使機械  $Q$  在 2~3 之間, 即  $h/R$  在 2/16 到 3/16 之間時, 則從低頻開始直到略大於圓管徑向共振頻率  $f_R = c/2\pi R$  的這一段頻率範圍內, 接收靈敏度  $M_0$  的頻率特性可以很平直, 此時用電容為  $C_l$  的電纜連接後的  $M_0$  值約為:

$$M_0 \cong g_T R \frac{C'_l}{C_l} = g_T R \frac{C'_l}{C'_l + C_1} \quad (19)$$

式中  $C'_l$  是鈦酸鋇元件本身的電容,  $C_l$  是連接電纜後的總電容。

鈦酸鋇圓管的長  $l$  和半徑  $R$  的比最好選擇得使縱向共振頻率  $f_l$  比徑向共振頻率少許高些, 即最好  $l$  比  $\pi R$  少許短些。

純鈦酸鋇的  $g_T$  值約為  $5.2 \times 10^{-6}$  伏/微巴·厘米, 含 8% 鈣的鈦酸鋇的  $g_T$  值約  $5.5 \times 10^{-6}$  伏/微巴·厘米。而鈦酸鋇元件的電容  $C'_l$  則為:

$$C'_l \cong \epsilon \frac{2\pi R l}{4\pi h} \times \frac{1}{9 \times 10^{11}} = \epsilon \frac{R l}{2h} \times \frac{1}{9 \times 10^{11}} \text{ (法拉)} \quad (20)$$

純鈦酸鋇的介電常數  $\epsilon$  [C. G. S.] 約為 1700, 含 8% 鈣的鈦酸鋇約為 1200。

### 三、鈦酸鋇圓管換能器的發射靈敏度

如把前面所述換能器作發射器用, 則根據互易原理, 發射靈敏度可由接收靈敏度求得。即假定換能器的輸入電壓為  $E_s$ , 與圓筒軸垂直的距離  $d$  處的聲壓為  $p_d$ , 則  $d$  處的發射靈敏度  $S_s$  為:

$$S_s = \frac{p_d}{E_s} = M_0 \cdot \frac{\rho_w f}{2d Z'_l} \times 10^7 \quad (21)$$

式中  $M_0$  是換能器作接收器用時的接近靈敏度, 可由(14)式和(16)式得出, 將這一  $M_0$  值代入(21)式後, 即得  $S_s$  為

$$S_s = \alpha_0 \frac{s}{z} g_T R \frac{\rho_w f}{2d Z'_l} \times 10^7 \quad (22)$$

如前面所述, 因為鈦酸鋇元件本身的自由阻抗  $Z'_l$  約等於  $1/\omega C'_l$ , 故機械  $Q$  為 1 時及共振頻率為  $f_R$  時

的发射灵敏度  $S_{SR}$  值为:

$$S_{SR} = a_{0R} g_T R \frac{2\pi f_R C_T^2}{2d} \rho_w f_R \times 10^7 \quad (23)$$

如用  $S_{SR}$  表示  $S_g$ , 则  $S_g$  变为:

$$S_g = \frac{a_0}{a_{0R}} \frac{w}{z} \left( \frac{f}{f_R} \right)^2 S_{SR} \quad (24)$$

又, 在  $f_R$  时的繞射率  $a_{0R}$  的值约为 0.45。图 3 的下图表示机械  $Q$  为 1、2、3、4 时  $S_g/S_{SR}$  的频率特性, 从图中可以看出, 在频率比  $f_R$  低时, 发射灵敏度  $S_g$  约和  $f^2$  成正比地增大; 频率比  $f_R$  高时, 约和  $\sqrt{f}$  成反比地降低。故在  $Q$  比 1 低时, 从共振频率附近到少許高些频率的这一频段内, 发射灵敏度变化不大, 故发射器在这一频率范围内使用很适宜。

上述(22)~(24)式只在频率比鈦酸鋇圓管軸向的纵向共振频率  $f_1$  低时才成立。在  $f_1$  附近时, 由于受到圓管纵向共振的影响, 灵敏度特性会有起伏现象, 因此发射灵敏度比較平直的范围是在  $f_R$  附近至  $f_1$  以下的这一段。要使这一频段寬, 必須使  $f_1$  高, 即  $l$  要比  $\pi R$  充分小。

#### 四、放在金属容器中的鈦酸鋇圓管接收器(TT 130)

鈦酸鋇圓管作接收器用时, 要求机械  $Q$  为 2~3, 即管壁厚度和半徑比要為 2/16~3/16, 这样厚的圓管較易制作。

此外, 因鈦酸鋇元件浸水时会吸收水份, 使絕緣变坏, 因而使低频段灵敏度下降, 故元件要有防水結構。为此, 作者制作了把鈦酸鋇元件固定在金属容器內壁的全防水式接收器, 其构造见图 4。在消声水槽中作灵敏度校正时, 測得接收灵敏度在频率低于

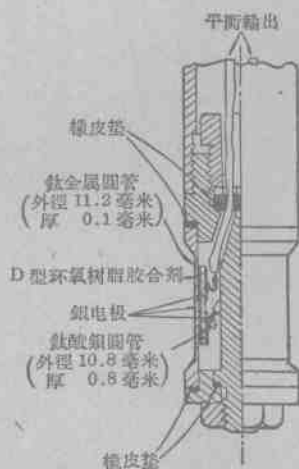


图 4 TT 130 型接收器的构造

140 千赫时很平直, 其数值约为 -110 分貝, 这大致滿足对寬带接收器的要求。

#### 接收器的构造和制作

声接收元件是含 8% 鈣的、外徑 10.8 毫米、厚 0.8 毫米、长 10 毫米的鈦酸鋇圓管, 用常溫下固化的环氧树脂把它粘在长 13 毫米、內徑 11 毫米、厚 0.1 毫米的鈦酸鋇圓管的內壁。

鈦酸鋇元件是用超声加工机<sup>[1]</sup>加工制造的, 元件是用双层軟鉄管制成的工具从厚 10 毫米的鈦酸鋇板上冲蝕下来的, 冲出一个薄圓管形元件的时间約 20 分钟。

在鈦酸鋇圓管的內外壁壁上銀电极, 內壁电极分成上下两部分, 間隔为 1 毫米, 并各焊上引綫。元件极化处理是在两根引綫間加上 1000 伏直流电压, 并在电場下冷却的方法进行。

鈦酸鋇圓管的外电极虽和鈦圓管外壁不連通, 但其間隙極小, 平均为 0.1 毫米, 故电容很大, 因此压电元件的輸出必須用平衡輸出法从两根引綫取得。这样做时, 由于可获得鈦酸鋇上下两部分輸出电压的相加值, 故电压灵敏度比单从元件內壁和外壁取得輸出电压时大 2 倍, 不过因元件的电容約減至原来的 1/4, 故功率灵敏度不变。

接收器装在長約 1 米的黃銅管的一端, 引綫从管內通出, 接在黃銅管上端的接头上, 連在接头上的电綫是長約 3 米、綫間电容为 100 微微法/米的双心屏蔽綫。

#### 接收灵敏度

图 6 是接收灵敏度的校正結果, 它是在消声水槽中配合下述 T 20、T 40、T 100 等发射器用互易法校正的。消声水槽內壁尺寸为 108×72×60 厘米, 并用长 20 厘米的松木楔覆上。

图 6 所示的理論值是根据下列考虑得出的:

虽然 Araldite 环氧胶合剂的弹性系数不明确, 但因金属鈦的弹性系数和鈦酸鋇的弹性系数近似, 故計算共振频率和机械  $Q$  时可认为都和鈦酸鋇的弹性系数一样, 因此从(7)式得出  $f_R = 133$  千赫(实测值为 127 千赫, 光是鈦酸鋇圓管的实测值为 130 千赫)。从(10)式得出  $Q = 3.1$ 。

压电元件放入金属鈦容器后会改变接收灵敏度, 故从(14)式和(17)式得出的接收灵敏度值需要修正, 修正量考虑如下:

(i) 假定材料中的应力和金属鈦、胶合剂及鈦酸鋇的各自厚度成比例地平均分布, 則灵敏度的減少为:

$$\frac{\text{鈦酸鋇厚度}}{\text{总厚度}} = \frac{0.8 \text{ 毫米}}{1 \text{ 毫米}} = 0.8 (-1.9 \text{ 分貝})$$

(ii) 鈦金屬圓管上下兩端支持部分的影响(长度  $b=1.5$  毫米, 厚  $0.1$  毫米的圓管部分)可认为只是使接收声波的表面积增加一些, 因为这部分虽是劲度控制, 但和胶合鈦酸鋇部分的劲度比較可认为充分小, 故可忽略。如面积增加部分是支持部分的面积  $2\pi Rb \times 2$  的一半, 则灵敏度随面积增加而提高的值为:

$$\frac{2\pi Rl + 2\pi Rb}{2\pi Rl} = 1 + \frac{b}{l} = 1 + \frac{1.5 \text{ 毫米}}{10 \text{ 毫米}} = 1.15 (1.2 \text{ 分貝})$$

(iii) 因鈦酸鋇元件的内壁电极被分为上下两部分, 故上下两部分串联时输出电压加倍, 因之灵敏度亦加倍(6 分貝)。

如  $Q=3.1$ ,  $g_T=4.3 \times 10^{-6}$  伏/微巴·厘米, 则由(14)式可得  $M'_0$  为:

$$\begin{aligned} M'_0 &= \alpha_0 \left( \frac{s/\omega}{z} \right)_{Q=3.1} g_T R \\ &= \alpha_0 \left( \frac{s/\omega}{z} \right)_{Q=3.1} \times 2.19 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

( $2.19 \times 10^{-6}$  伏/微巴等于  $-133.2$  分貝), 如包括杂散电容在内的电缆电容  $C_f=330$  微微法, 鈦酸鋇元件的电容  $C'_f=1170$  微微法(假定  $\epsilon=1500$ ), 则利用(17)式可得因电缆连接后的灵敏度下降为:

$$\frac{C'_f}{C_f} = \frac{1700}{1700+330} = 0.78 (-2.1 \text{ 分貝})$$

考虑上述修正量(i)、(ii)、(iii), 得总灵敏度的理论值为:

$$\begin{aligned} M_0 &= M'_0 \frac{C'_f}{C_f} \times (i) \cdot (ii) \cdot (iii) = \alpha_0 \left( \frac{s/\omega}{z} \right)_{Q=3.1} \\ &\quad \times 3.15 \times 10^{-6} [\text{伏/微巴}] \end{aligned}$$

故低频时的灵敏度为:

$$3.15 \times 10^{-6} \text{ 伏/微巴} (-110 \text{ 分貝})$$

比較接收灵敏度的测定值和理论值, 可知在低频时很相符, 但在共振频率附近, 测定值的灵敏度上升比理论值小, 几乎看不出上升。此外, 在测定值中还可看出, 在  $70$  千赫附近有  $3$  分貝下降的灵敏度谷。

## 五、鈦酸鋇圓管发射器(T20)

鈦酸鋇圓管作发射器用时, 希望机械  $Q$  在  $1$  以

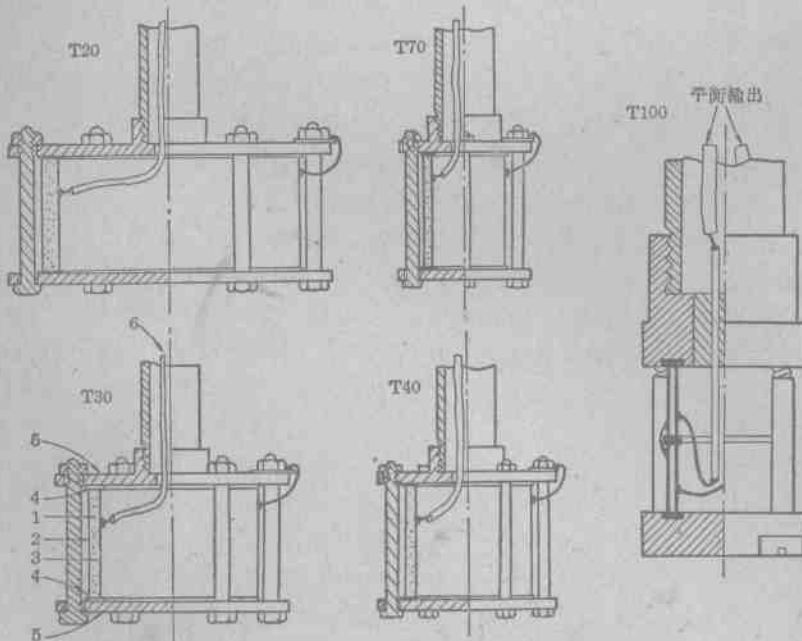


图5 T20、T30、T40、T70和T100换能器的构造

换能器名称	外径(毫米)	厚度(毫米)	长度(毫米)
T20	32.5	5	30
T30	22.5	3	30
T40	18	3	30
T70	11	2	30
T100	7.5	1	20

- 1—薄壁鈦酸鋇圓管;
- 2—銀外电极(外涂树脂);
- 3—銀内电极;
- 4—橡皮垫;
- 5—黃銅圓盖(厚3毫米);
- 6—不平衡輸出

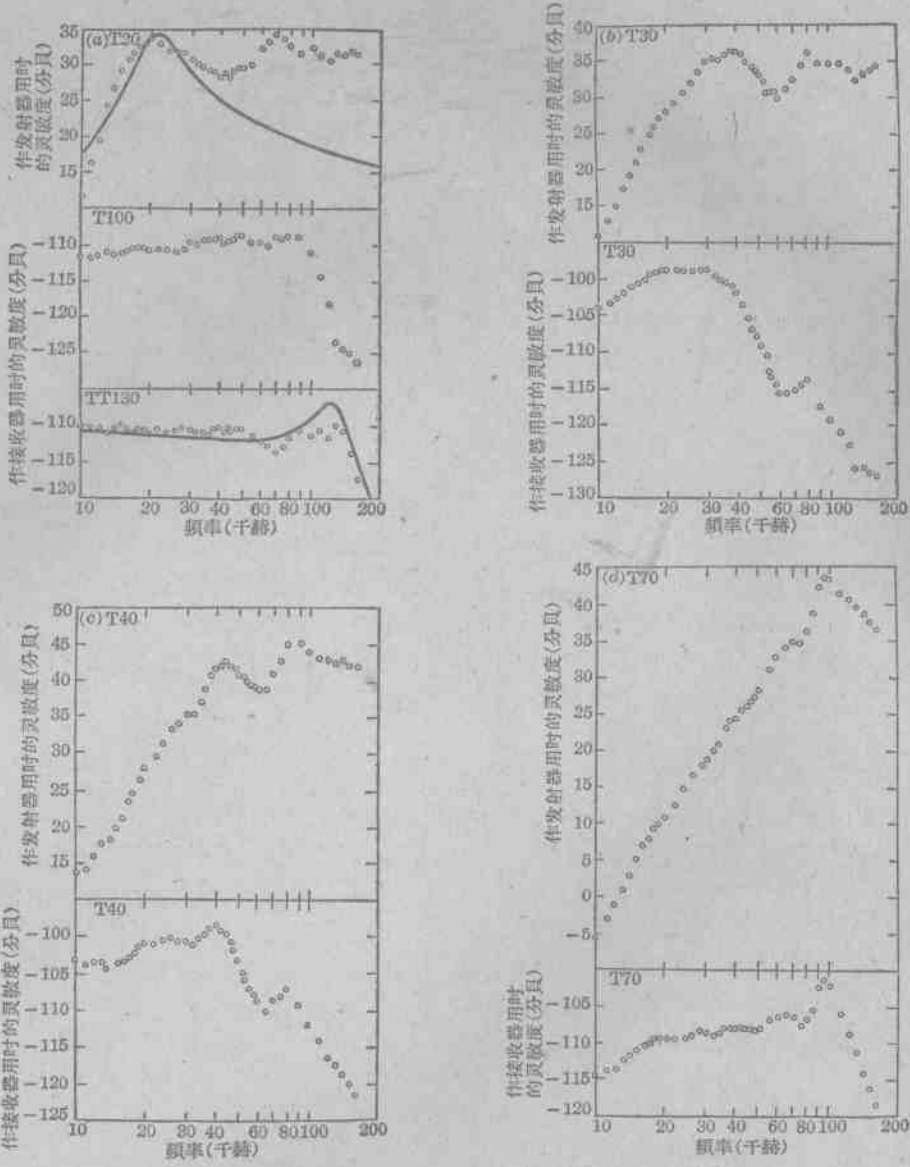


图6 T20、T30、T40、T70、T100和TT130换能器的频率响应

用作发射器时的零分贝为1微巴/伏(在距离1米处); 用作接收器时的零分贝为1伏/微巴

下,即圆管厚度小于半径的1/16,但这样薄的钛酸钡圆管制作很困难。作者使用的元件,外径为32.5毫米,厚5毫米,即 $h/R=5/32.5$ , $Q \approx 2.5$ 。

钛酸钡元件作发射器用时,是在比共振频率高的频率范围使用的,故它的自由阻抗较低,因此,即使不象接收器那样完全防水,工作仍能很稳定。故换能器可如图5那样制作,即在钛酸钡元件两端用橡皮垫和黄铜圆盖挟紧,并仅仅在元件外面涂上树脂作为防水处理。

图6是在消声水槽内获得的发射灵敏度的校正结果。可见频率高于共振频率时(约20千赫),理论

值降低很快,但实测值直至160千赫还很平直,约为 $31 \pm 3$ 分贝。特别在频率高于钛酸钡圆管纵向共振频率附近时(约70千赫),实测值竟比理论值大10分贝以上。而在测定下述T30、T40收发器时,亦发现同样倾向。其原因还不很明了,一般在频率高于元件纵向共振频率时,灵敏度有增高现象。由于这种现象能补偿因衍射效应①产生的灵敏度下降,而使发射灵敏度的频率特性大致平直。从而反是好现象。

① 因发射时相当于接收时的“衍射效应”这一名词的适当术语还没有,故根据发射、接收可逆原则,在发射时仍称其为“衍射效应”



在和圓管軸垂直的平面內，照理應無指向性，但實際測定中卻發現，在頻率高于徑向共振頻率處（約 20 千赫）有不到  $\pm 3$  分貝的起伏。

## 六、發收兩用換能器 (T30、T40、T70、T100)

對發收兩用換能器所要求的特性是，發收靈敏度都要較高，而且平直。上述已指出，薄壁鈦酸鋁圓管的機械共振  $Q$  可作得很小，故在共振頻率附近使用這類元件時，可獲得大致滿足上述特性的發收器，但在頻率低于共振頻率附近時發射靈敏度要下降，而在高于共振頻率附近時接收靈敏度亦要下降，故發、收二者都滿意的頻率範圍在共振頻率附近 1 倍頻程左右。

由於前述 T20 發射器和 TT130 接收器的發、收靈敏度平直頻率範圍為 15~140 千赫，故和它們配合使用的發收兩用換能器不能單用一個，因此制作了 4 個發收器，它們在 15~140 千赫頻率範圍內有不同的共振頻率，各自分擔這一頻率範圍的一部分。

作者所制作的 4 個發收器 T30、T40、T70、T100 的共振頻率各約 30、40、70、100 千赫，它們的構造和前述 T20 發射器大體相同（見圖 5）。

發收靈敏度的測定值見圖 6，可見 T30、T40 和 T100 三種換能器大致顯示出所希望的特性，只有 T70 在 100 千赫附近有稍微尖銳的靈敏度峰值。不過用這 4 個發收器想把 15~140 千赫這一頻率範圍分開測定是大體能做到的。

## 七、結 論

為了使水中超聲用發收器的靈敏度容易校正，作者制作了用薄壁鈦酸鋁圓管作為壓電元件的輔助發收器。

本文在理論上探討了接收靈敏度和發射靈敏

度，得出接收器的機械  $Q$  約為 2~3 時，即鈦酸鋁圓管的厚度和半徑比約為 2/16~3/16 時，可抵消因衍射效應引起的靈敏度下降，以及幾乎可不顯出因共振引起的靈敏度降值，故使徑向共振頻率附近以下的頻率的接收靈敏度的頻率特性大致平直。

在頻率較共振頻率高時，隨着頻率的升高，發射器的發射靈敏度照理應因衍射效應而以每倍頻程 -8 分貝的比例下降。但這種想法和作者制作的發射器實驗結果比較，反而在數十千赫以上時實驗值有 10 分貝以上的升高，這對發射器來說倒是很合適的。造成這種理論和實際不符的原因還不太明了，好像和鈦酸鋁圓管的縱向共振有關。

測定 T20 發射器、TT130 接收器、T30、T40、T70、T100 發收兩用換能器的發、收靈敏度結果表示，T20 的發射靈敏度和 TT130 的接收靈敏度在 15~140 千赫範圍內都比較高，並且平直。至於 T30 等發收兩用換能器的發收靈敏度，在各自共振頻率附近亦都較高，而且平直。這些換能器大致都滿足要求。

## 參考文獻

- [1] Hueber and Bold: *Sonics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1955, p. 146.
- [2] T. Nimura, Y. Watanabe: *Sound Radiation from the Zonal Radiators*, Science Repts. Tôhoku Univ., B 5, 155 (1953).
- [3] 福島：有限長の円筒音源，日本音響学会研究発表講演会講演要旨 p. 1 (昭 24~10)。
- [4] R. A. Langevin: *The Electro-Acoustic Sensitivity of Cylindrical Ceramic Tubes*, J.A.S.A., 26, No. 3, 421 (1954).
- [5] 森：超音波加工における機械の負荷の測定，日本音響学会誌 11-4, 238 (1955).

(盛榮堂譯自日本《日本音響学会誌》1961年  
第 17 卷第 4 期第 293~302 頁，吳繩武校)