

# 新型换能器的发展概况及 应用前景\*

周福洪 郑士杰 姚青山  
(哈尔滨船舶工程学院)  
1989年10月16日收到

本文系统地介绍了九种新型换能器的工作机理及应用前景

## 一、引言

近年来,由于新材料及高技术取得迅速发展,促使人们研制多种新型换能器,以满足新技术的需要。新型换能器的机理取决于新材料的工作特性,本文将介绍每种新型换能器的工作机理及其重要应用领域。

## 二、铁磁流体换能器<sup>[1-3]</sup>

铁磁流体换能器是一种新型低频、宽带辐射器,它具有10Hz—25.0kHz的八个倍频程带宽。这种换能器的工作物质是由胶状的有机溶剂载有铁氧体悬浮粒子所构成,悬浮微粒的直径约20—200 Å,依据热力学及电动力学理论,可导出铁磁流体中的应力张量为

$$\begin{aligned} \vec{T}_m = & \left\{ \left[ \frac{\partial(\nu F_0)}{\partial \nu} \right]_T \right. \\ & \left. - \int_0^H \left[ \frac{\partial(\nu B)}{\partial \nu} \right]_{H,T} dH \right\} \vec{I} \\ & + \vec{B} \vec{H} \end{aligned} \quad (1)$$

这里  $\nu$  是比容,  $F_0 = F_0(\rho, T, H)|_{H=0}$  为外加磁场  $H$  为零时的单位体积自由能,  $\rho$  为密度的变化部分,  $T$  为绝对温度,  $B$  为磁感应强度,  $\vec{I}$  为单位张量,括号中的第一项代表压力

应用声学

的负值,即  $-p(\rho, T) = \frac{\partial(\nu F_0)}{\partial \nu} \Big|_{T=\text{常数}}$ 。当  $\vec{B}$  与  $\vec{H}$  共线时,  $B = \mu_0(H + M)$ , 其中  $\mu_0$  为真空的磁导率,  $M$  为磁化强度。又令  $\vec{T}_m = \vec{T}'_m + p\vec{I}$ , 则有

$$\begin{aligned} \vec{T}'_m = & - \left\{ p(\rho, T) \right. \\ & + \int_0^H \mu_0 \left[ \frac{\partial(\nu M)}{\partial \nu} \right]_{H,T} dH \\ & \left. + \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \right\} \vec{I} + \vec{B} \vec{H} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{而 } \vec{T}_m = & - \left\{ \int_0^H \mu_0 \left[ \frac{\partial(\nu M)}{\partial \nu} \right]_{H,T} dH \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \right\} \vec{I} + \vec{B} \vec{H} \end{aligned} \quad (3)$$

利用高斯定理,可得铁磁流体中的体积力密度  $\vec{f}$ , 令

$$\vec{f} = \nabla \cdot \vec{T}_m \quad (4)$$

$$a = \mu_0 \int_0^H \left[ \frac{\partial(M\nu)}{\partial \nu} \right]_{H,T} dH + \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \quad (5)$$

考虑到  $\nabla \cdot (a\vec{I}) = \nabla a$ , 将(3)式代入(4)式得

$$\vec{f} = -\nabla \left\{ \mu_0 \int_0^H \left[ \frac{\partial(M\nu)}{\partial\nu} \right]_{H,T} dH \right\} + \mu_0 M \nabla H \quad (6)$$

上式中第一项为铁磁流体中的磁致伸缩力, 它比镍的小一个量级, 可忽略不计。第二项称开尔温 (Kelvin) 力密度, 它是激励铁磁流体振动的实际作用力。当铁磁流体放在恒定磁场中, 使  $M$  具有最大值, 同时使它受到大的交流磁场梯度的作用, 利用铁磁流体液柱的多模振动, 它可得到 8 个倍频程的低频发射带宽, 由于铁流体密度为  $1.2 \times 10^3 - 1.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 声速为  $1.6 \times 10^3 - 1.8 \times 10^3 \text{ m/sec.}$ , 它的特性阻抗为  $1.75 \times 10^6 - 2.2 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ sec.}$ , 故这种换能器能和海水介质的特性阻抗相匹配, 因此, 在水声对抗中, 它可用做模拟舰艇所发出噪声的假目标声源。如加上均衡器, 可制作出水下芭蕾用的高保真度放音器。用在拖曳阵上, 可制成模拟舰艇线谱干扰器。

### 三、超导换能器<sup>[4-6]</sup>

自 1986 年以来, 在世界范围内出现了“高温超导”热, 超导技术获得很快发展。85 年 12 月瑞士苏黎世 IBM 实验室 J, G, Bedorg 和 K. A. Müller 等人发现 La-Ba-CuO 系列超导体, 其转变温度为 35K。87 年休斯顿大学朱经武发现在  $T_c = 92\text{K}$  的零电阻高温超导材料, 它们的化学组成为 Y-Ba-Cu-O 及  $\text{Bi}_2(\text{Sr}, \text{Ca})_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 。后者在 105K 时呈超导状态, 并出现梅斯纳 (Meissner) 效应。87 年 12 月美国洛克希德公司发现了  $T_c = 230\text{K}$  的超导体。早在六十年代, 美国海军研究所利用铌化钛的超导材料研制出大功率的水声换能器, 这种换能器的功率密度为  $2.2\text{KW/kg/kHz}$  左右, 而通常的压电陶瓷换能器平均功率密度为  $20\text{W/kg/kHz}$ , 因此, 超导换能器的功率密度要比常规的压电换能器高出百倍, 可惜这种超导体的  $T_c = 4.2\text{K}$  (液氮温度), 使气态氮液化到液态耗费很大电能, 现在有了高温超导材料, 特别

是利用  $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  系列的高温超导材料, 其中 R 为 Y (钇)、Sc (钪)、Nb (铌)、Sm (钐) 等稀有金属, 它们  $T_c$  皆相当高。我国有丰富稀有金属资源。利用上述材料制作高温超导材料换能器是有希望的。并且运用低频大功率换能器组成基阵, 可制造出超远作用距离声呐。在医学方面, 超导材料把电能转换成强大的磁场能, 这种强大的磁场先把人体的原子排列成行, 然后经过电磁波的振荡将排成的行列打乱, 然后让人体的原子恢复到它们先前的状态时, 他们就发出辐射线, 产生人体软组织的具体影像, 即核磁共振造影。现在使用的核磁共振造影机体积很大 ( $2\text{m} \times 2.7\text{m} \times 3.1\text{m}$ )。需十万美元来制造保持液氮冷却庞大隔热装置, 利用高温超导材料把电能转换成强磁场能, 体积和费用可以小得多, 它能制成轻便型核磁共振造影机, 对肿瘤诊断有不可估量的价值。

### 四、脉冲激光声源<sup>[7-9]</sup>

依据苏联 L.M. Lyamashev 及美国 D.A. Hutchins 等人的研究, 利用激光向水中辐射, 它能使水中产生声脉冲。其产生机理有以下几种: (1) 热膨胀; (2) 爆炸式飞腾; (3) 表面蒸发; (4) 介质破裂。在低功率密度的激光向水中发射时, 水温低于蒸发阈, 热膨胀 (或称为热弹振荡) 是主要的。依据 Heritier 和 Lai 等人的研究, 设在液体中有半径为  $R$  的圆柱区域被激光照射, 脉冲持续时间为  $\tau_p$ , 水的吸收系数为  $\alpha$ , 由于激光激励形成声脉冲, 声脉冲穿越圆柱源的时间为  $\tau_s = R/C$ ,  $C$  为声速, 如果声检测器离开圆柱中心距离为  $r$ , 那么在检测器收到的热弹声压  $p(r, t)$  可用速度势  $\phi$  来表示

$$p(r, t) = K_s \frac{d\phi}{dt} = KK_s \tau_c^{-\frac{3}{2}} \frac{d\phi_0(\xi)}{d\xi} \quad (7)$$

$$\text{这里 } KK_s = \frac{\alpha\beta E}{2\pi \sqrt{2} c_p} \sqrt{\frac{c}{r}} \quad (8)$$

其中  $\beta$  是体积膨胀系数,  $E$  为入射激光能量,

$c_p$  为热容, 而

$$\tau_e = [\tau_p^2 + \tau_s^2]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$\frac{d\phi_0(\xi)}{d\xi}$  将由声脉冲形状确定, 它由下式表示:

$$\begin{aligned} \phi_0(\xi) = & |\xi|^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{\sqrt{2}}{\pi} K_{\frac{1}{2}} \left( \frac{\xi^2}{4} \right) \right. \\ & \left. + 2\theta_{(\xi)} I_{\frac{1}{2}} \left( \frac{\xi^2}{4} \right) \right] \\ & \times \exp \left( -\frac{\xi^2}{4} \right) \left( \frac{\pi}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10) \end{aligned}$$

其中  $\xi = \left( t - \frac{r}{c} \right) / \tau_e$ ,  $K_{\frac{1}{2}}$  及  $I_{\frac{1}{2}}$  是虚宗量

贝塞尔函数,  $\theta$  为单位阶跃函数。

当激光功率增加时, 引起蒸发, 热弹效应仍然存在, 再增加激光功率将导致爆炸式飞腾, 进而产生高频振荡。当更强大功率密度的激光照射到水面时, 水介质破裂将会发生, 介质破裂是最有效地形成声辐射的机制, 虽然在理论上尚未探讨其声辐射的严谨关系式, 但实验上已获得相当好的效果。用一个  $Q$  突变技术的红宝石激光器向水中辐射一个 30ns 的光脉冲, 它能激起一个接近于  $5 \times 10^4$  KPa 峰值声压的脉冲声源。D.A. Hutchins 曾利用这种声脉冲代替海洋勘探中的蒸气炮声源, 它的优点是可利用改变激光脉冲波形的方法来控制声脉冲的频谱。

## 五、新型稀土元素磁致伸缩合金换能器<sup>[10]</sup>

最有发展前途的稀土元素铁合金磁致伸缩材料有铁化铽 ( $TbFe_2$ ), 铁化铽钨 ( $Tb_{0.15}Ho_{0.85}Fe_2$ ) 及铁化铽镨 ( $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 、 $Tb_{0.7}Dy_{0.25}Fe_2$  或  $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_2$ )。在室温条件下, 稀土元素铁合金的饱和磁致伸缩应力常数比镍大 50—60 倍, 在较大交变磁场下(极化场为 2000Oe), 其应变与交变磁场仍成线性关系。其极化场可用永久磁钢产生。TbFe<sub>2</sub> 在 1000Oe 大小的交变磁场激励下, 磁致伸缩应力比普通压电陶瓷的压电应力大 12.5 倍, 即大 22dB, 特别对于三元合金, 其机电耦合系数大于镍的, 且具有较高的

应用声学

电阻系数, 因此可做成大功率磁致伸缩换能器。通常的镍金属常做成薄片以减少涡流损耗, 稀土金属合金难以做成薄片, 但可做成整体的自由溢流式圆环形换能器, 它可在任何深度的水下正常工作。

## 六、宽带的多个基元的压电换能器<sup>[11]</sup>

在一般情况下, 压电陶瓷换能器的辐射声压的频率特性主要取决于压电材料的机械品质因素  $Q_m$  值, 它取决于机械安装引起的损耗和辐射阻抗的作用。采用多个基元组合式换能器, 每个基元装配后的谐振频率稍有差别, 可得到较低的有效  $Q$  值, 亦既较宽的带宽, 如果有一个  $m$  个基元的这种换能器, 其总的电路增益和总相移在一定条件下可表示成如下形式:

$$\begin{aligned} G_i(f) = & \left| \frac{\dot{E}_o(f)}{\dot{E}_i(f)} \right| \\ = & \left\{ \left[ \sum_{n=1}^m \frac{1}{1 + Q^2 \left( \frac{f}{f(n)} - \frac{f(n)}{f} \right)^2} \right]^2 \right. \\ & \left. + \left[ \sum_{n=1}^m \frac{Q \left( \frac{f}{f(n)} - \frac{f(n)}{f} \right)}{1 + Q^2 \left( \frac{f}{f(n)} - \frac{f(n)}{f} \right)^2} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11) \end{aligned}$$

$$\beta_i(f) = \tan^{-1} \left\{ \sum_{n=1}^m Q \left[ \frac{f(n)}{f} - \frac{f}{f(n)} \right] \right\} \quad (12)$$

$G_i(f)$  和  $\beta_i(f)$  分别表示总增益及总相移,  $f(n)$  为第  $n$  个元的谐振频率,  $\dot{E}_o(f)$  为复数输出电压,  $\dot{E}_i(f)$  是复数输入电压,  $Q$  为电品质因素。如果以三基元组合的换能器为例, 谐振频率居中间值的基元相位与另两个相反, 其  $|\dot{E}_o/\dot{E}_i|$  及  $\beta_i(f)$  频率响应如图 1 所示

从上图可以看出, 它可得到稍低于 6 的有效  $Q$  值, 以此类推, 利用多个谐振频率稍有不同的基元可得到宽带压电换能器。

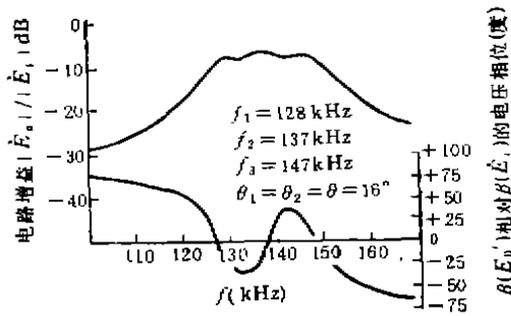


图1 三基元组合换能器的  $G_r(f)$  和  $\beta_r(f)$  频响图

### 七、光纤水听器<sup>[12-14]</sup>

光纤水听器是一种新型水下检测器。单模干涉型水听器具有良好的接收灵敏度，约为 -160dB (相对 1V/ $\mu$ Pa 参考值)，适合于声检测用途的干涉型水听器有三种结构类型：Mach-Zehnder 型，Fabry-Perot 型和圆环谐振型。它们各有优缺点。Mach-Zehnder 型能工作在相干性稍差的光源的情况，它可用增长光纤的办法提高灵敏度，但它需要一根对声波敏感度不高的参考光纤和两个光纤耦合器，它能导致水听器结构复杂；Fabry-Perot 型省去了一个耦合器及一根参考光纤，它仅用一根单模光纤，在光纤的两个端面上镀上一层半反射的介质膜，这样，光纤自身就构成了一个 (F-P) 的共振腔。外界声振动会改变腔内光程差，从而在激光载体上形成相位调制，但是，它对激光二极管的高反向反射将导致光源的不稳定性，并且要求光源有很好的相干性；单腔环形谐振型所产生的反向反射很低，如果利用相干性很好的非常稳定的激光源，如单模氦氖激光器作光源，这种类型水听器将产生高灵敏度而又平

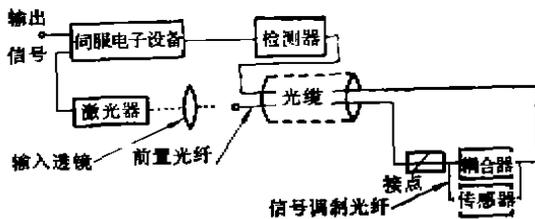


图2 环形谐振光纤水听器示意图

坦的接收响应特性，从 50Hz 到 5000Hz 具有 -160dB (re 1V/ $\mu$ Pa) 的灵敏度平坦接收响应曲线。这种类型水听器结构如图 2 所示

### 八、PVDF 及 [P(VDF-TrPE)] 的水听器和传感器<sup>[15-17]</sup>

压电高聚物——PVDF (聚偏氯乙烯)及其改进型 [P(VDF-TrPE)] (偏氯乙烯及三氟乙烯共聚物) 都是一种半结晶薄膜，它们具有卓越的接收声波特性。

PVDF 是由 1,1-二氟乙烯自由基聚合而成，其中晶体成份占 50%，其晶型有四种异构体，即  $\alpha, \beta, \gamma$ ，极性  $\alpha$  或极性  $\delta, \alpha$  相由熔体结晶而成，它是非极性单胞， $\beta$  相是产生压电性的相，在所有温度下均能形成，具有垂直于链方向的强偶极矩 ( $7.0 \times 10^{-30}$ cm 大小)。  $\gamma$  相由溶液结晶而成，受机械应力作用发生应变时它可转变为  $\beta$  相， $\delta$  相是  $\alpha$  相经强电场处理后所产生的极性  $\alpha$  态。PVDF 必须经极化处理才能得到压电特性，其办法是将薄膜浸入油中，加热到 100℃，然后加 80MV/m 的强电场处理，并加应力使偶极矩按一定方位取向。经极化处理并经双轴取向的 25 $\mu$ m 压电薄膜的特性如表 1 所示：

表1 高聚物压电薄膜特性

名称	数值	单位
相对介电常数 $\epsilon/\epsilon_0$	10-13	无量纲
声速 C	2.1-2.3	$10^3$ m/sec
密度 $\rho$	1.78	$10^3$ kg/m <sup>3</sup>
压电常数 $d_{11}$	20	$10^{-12}$ C/N
压电常数 $d_t$	-12.7	$10^{-12}$ C/N
压电常数 $g_{31}$	-63	$10^{-3}$ Vm/N
特性阻抗 $\rho C$	3.8-4.1	$10^6$ kg/sec.m <sup>3</sup>

从表中看出 PVDF 具有低密度、低特性阻抗和高  $g_{31}$  的特性，因此它可制成良好的水听器。马可尼公司曾利用 PVDF 制造了  $6 \times 25 \mu$ m 的叠层水听器，并利用这种结构的 100 个水听器做成了 360° 全向扫描声呐(警戒声呐)，其方

位分辨率为  $1.1^\circ$ ，距离分辨率为  $0.1\text{m}$ 。PVDF 也是制做超声传感器的理想材料，其工作频率范围为  $0.5\text{Hz}-20\text{MHz}$ ，人们还把经过极化处理的 PVDF 薄膜粘在硅片上，使其形成 MOSFET 放大器阵列，并用它们制成具有 34 个基元的线列阵，它的带宽为  $6\text{MHz}$ ，已被用于动态范围为  $70\text{dB}$  的医疗摄像仪中的超声收发阵列。

### 九、复合材料换能器<sup>[18-21]</sup>

复合材料是指将压电陶瓷和高聚物按一定的连通方式、一定的体积或重量比例和一定的空间几何分布复合制成的压电材料，通过人们用恰当的连通方式连接，已研制出多种复合压

电材料，它们具有许多优越的性能：它有比 PZT 材料高出一到二个数量级的  $g_h$  值；有低的特性阻抗，能与水和生物组织良好地匹配；其质量轻和柔软易弯曲的机械特性决定了它适于做成特定几何形状的换能器；其机械品质因素  $Q_m$  低，故可实现宽带声检测；它有高的  $K_t/K_p$  比值，能适用于制做超声检测中使用的厚度模辐射换能器。在表 2 中，我们列出了几种有代表性的压电复合材料的特性参数。为了便于比较，也将 PZT-5 及  $\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_5$  的有关参数一并列入表中。

在复合材料中，由两个组成部分构成的复合材料可以有多种连通性。人们经常把第一个数字代表压电相的连通维数，第二个数字代表

表 2 几种复合材料及 PZT 等材料的参数

材料类型	$\rho 10^3 \text{kg/m}^3$	$\epsilon_{33}/\epsilon_0$	$d_{31} 10^{-12} \text{C/N}$	$g_{31} 10^{-3} \text{Vm/N}$	$d_{32} 10^{-12} \text{C/N}$	$g_{32} 10^{-3} \text{Vm/N}$	$d_h g_h 10^{-12} \text{m/N}$
PZT-5	7.8	1800	374	25	32	2	64
$\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_5$	6.0	225	85	42.5	67.6	34	2300
1-3PZT/环氧	1.37	100-300		97	59.7	69	4100
3-3PZT/硅橡胶	3.3	40	95	280	35.6	30	2800
3-1PZT/环氧		410	275	76			3500
3-2PZT/环氧		360	290	90			17600

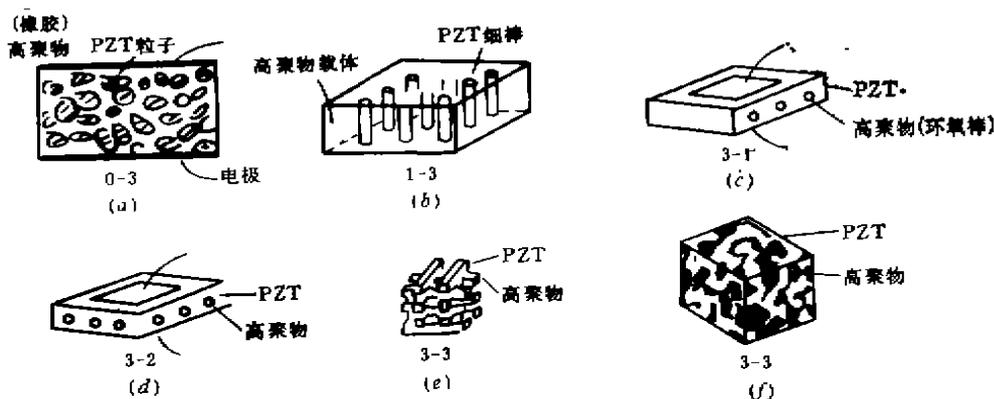


图 3 几种典型复合材料的结构示意图

聚合物维数，图 3 画出了它们其中的几种典型情况。

从图 3 中可以看出，3-1 压电复合材料是在 PZT 陶瓷片上打细孔，并在孔内填入高聚物

物。由于在垂直于压电陶瓷的极化方向上引入了一维的环氧棒，从而降低了这种材料的  $g_{31}$  及  $g_{32}$  结果使  $g_h = 70 \times 10^{-3} \text{Vm/N}$ ，它比 PZT-5 的  $g_h (2 \times 10^{-3} \text{Vm/N})$  大 35 倍，因此适宜

做深水水听器。1-3型压电复合材料可用来制做柔软且易于弯曲的医疗诊断用超声换能器。例如：一个用聚胺酯为载体所做成的1-3型复合材料换能器，聚胺酯圆片直径19mm，厚度0.6mm，片中细棒为PZT，它的直径为0.45mm，相距周期为0.9mm和0.75mm，PZT体积百分数为20%—30%，测得其密度为 $\rho = 2.29 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，相对介电常数238， $d_{33} = 320 \text{ Pc/N}$ ，以空气为背衬材料，其谐振频率为2.5MHz。当以10V电压激励换能器振动向人体腹部发射，经

肝脏反射，与人体特性阻抗相匹配的接收器能获得2.4mV的反射信号。这种材料做成的换能器，用加热的方法可使其变成聚焦型换能器。

## 十、无定形体合金制成的磁致伸缩水听器<sup>[22]</sup>

无定形体的磁致伸缩合金是含铁量高的材料，它有很高的机电耦合系数，约为0.9，它的接收灵敏度比镍大50倍，比PZT大4.5倍，且价

表3 无定形体合金的组成及特性

材料特性	符号及单位	组 成		
		$\text{Fe}_{11}\text{Bi}_{11}\text{Si}_4\text{C}_2$	$\text{Fe}_{80}\text{BO}_{20}$	$\text{Fe}_{40}\text{P}_{15}\text{C}_1\text{B}_1$
饱和磁通密度	$B_s(\text{Tesla})$	1.50	1.60	1.48
剩磁 饱和磁通密度	$\frac{B_r}{B_s}$	0.8—0.9	0.51	0.4
矫顽场	$H_c(\text{A/m})$	<4	15	
居里点	$T_c(\text{K})$	693	647	565
饱和磁致伸缩常数	$\lambda_s(10^{-6})$	30	31	29
密 度	$\rho(\text{kg/m}^3)$	7100	7400	7700
杨氏模量	$E(10^9\text{Pa})$	150	172	138
电阻率	$\rho_r(10^{-9}\Omega\cdot\text{m})$	130	130	

格较低，适合于做水听器，它们的组成和特性如表3所示。利用它做成加筋薄壳圆柱形水听器，可获得廉价格的拖曳线列阵。

## 十一、结 束 语

在上面我们对九种新型换能器作了介绍，应该强调指出的是，铁磁流体换能器具有优良的低频宽带声发射特性，是很有应用前途的新型低频宽带声源，在水声对抗中能有效模拟舰艇噪声；光纤水听器加上光信息处理技术孕育着一代新型声呐的产生（光声呐）；PVDF及复合材料换能器将会在水声、超声特别是医疗超声领域中有广阔应用前景。

## 参 考 文 献

[1] Pieter. S. Dubbelday *IEEE. Transaction on Magnetics* MAG16-2(1980), 372—374.

[2] R. E. Rosensweig *Ferrohydrodynamics* 1985 103—111.  
 [3] Zou Fuhony, *Proceeding of the China-Japan Joint Conference on Ultrasonics*, (1987), 299—302.  
 [4] J. G. Bednorz and K. A. Müller, *E. Phys.* B64, (1986), 189.  
 [5] C. W. Chu, *Phy Rev. Letter.* 58, (1987), 405.  
 [6] M. A. Hermann and Z. Z. Sheng, *Nature*, March (1988) 10.  
 [7] L. M. Lyamahev, *Tenth International Congress On Acoustic* (1980), 30—41.  
 [8] D. A. Hutchins, *Proceedings of the Institute of Acoustics* 6, Pt3, (1984), 24.  
 [9] Yves, H. Berthelot, *J. Acous. Soc. Am.*, 78-3 (1985), 411.  
 [10] R. J. Bobber, *Underwater Acoustic and Signal Processing* 1980 95—97.  
 [11] R. L. Batey and R. H. Wallace *J. Acous. Soc. Am.* 61-6 (1977), 897.  
 [12] T. Yoshino et al, *IEEE J. Quantum Electronics* QE18 (1982), 1624.  
 [13] L. F. Stokes, *Optic Letter* 7, (1982), 288.  
 [14] P. Mouroulis, *Proc. Inst. Acoustics* 6-Pt 3 (1984),

- 31.
- [15] D. R. Bacon, IEEE Transaction on Sonics and Ultrasonics, SU-29 (1982), 18—25.
- [16] A. J. Lovinger, Science, 220—4602 (1983), 1115—1121.
- [17] H. R. Gallantree, The Marconi Review, First Quarter, (1982), 49—64.
- [18] T. R. Gururaja, et al, IEEE Trans. SU-32-4. (1985), 481.
- [19] T. R. Gururaja, et al, IEEE Trans. SU-32-4. (1985), 499.
- [20] 栾桂冬,应用声学7-4,(1988),37—41.
- [21] 奥岛基良,日本音響學會講演論文集 2-7-7 (昭和75年),717.
- [22] P. Walmsley, PROC. INST. Acoustics Pt3-6, (1984), 38—41.

\* 本文得到国家自然科学基金资助

## 听觉基础研究的若干问题展望(2)

方 至

(中国科学院心理研究所)

1990年6月8日收到

### 三、心理声学

当前心理声学研究的主要趋向是从以往纯音听觉的单因素研究转向具有频谱时间表征的复合声的多维研究。这个转变和生理声学的发展情况恰成有趣的对比。如上节所述,生理声学的近期进展是对 Helmholtz 为代表的传统耳蜗观念的突破。与此相反,心理声学的前进却不能不回到 Helmholtz 在其名著“乐音感觉:音乐理论的生理学基础”一书中提出的一个基本课题,即对音乐、言语这类复合声的知觉。自然,这并不是说心理声学应该径直去研究音乐和言语,去取代音乐声学 and 言语声学。在纯音心理声学和音乐声学、言语声学之间还有一大片被忽略了的领域,即具有复杂的频谱和时间模式的复合声。这类声音在物理结构上和音乐、言语有许多共性。它们不但都是复合声,而且都具有多声源和连续声流的性质。对这类声音的知觉,也和音乐及言语的知觉有着不少共性。它们都是多维的,而且加工过程都不限于听系统外周,还有听觉中枢的参与。因此,复合声心理声学的研究将一改以往心理声学和音乐、言语听觉脱节的现象,有希望真正成为理解两者的基础。

应用声学

下面将扼要介绍 50 年代以来对复合声某些主观属性的实验结果和三项可能产生影响的近期发展。

#### 1. 复合声的某些主观属性

(1) 分音 (*partials*) 的分辨限度 Helmholtz 曾研究过人耳将周期性声波分解为它的类正弦成分的能力,即欧姆听觉定律,但没有给出这种能力的限度。用包含有 12 个谐波的复合声的听觉实验表明,即使在最有利的条件下,人耳能分辨的谐波数不会超过前面的 5—7 个。这和临界带宽的概念是一致的。

(2) 合音 (*Combination Tone*) 当频率分别为  $f_1, f_2$  的两个纯音同时作用,主观上将产生一个频率相当于  $2f_1 - f_2$  的差音。Helmholtz 认为这是欧姆听觉定律的又一限度。以往,对原声  $f_1, f_2$  需要多强的感觉级才能引起差音听觉,几乎没有什么实验数据。Plomp 的实验说明,差音  $2f_1 - f_2$  的觉察阈主要决定于频差  $f_2 - f_1$ 。因此,它肯定和人耳的频率选择性有关,而且来源于内耳的非线性。

(3) 涩度 (*Roughness*) 和不协和度 (*Dissonance*)

调幅纯音产生拍 (*Beats*) 时,拍的变化将引起刺耳的粗涩感。当  $f_1, f_2$  两个纯音的频差逐渐增加,最初听到的拍象响度在作缓慢的起