

水声释放器声指令发射换能器

梁希庭 柳天明 张昌国

(中国科学院声学研究所)

1981年8月18日收到

水声释放器是用来重现水下目标位置和回收水下遥测仪器的装置。它包括指令发射机、声指令发射换能器、浮标接收系统、释放机构等。工作时,按照船上控制设备通过换能器向水下发出声指令,促使释放机构动作,自动释放定位浮标或使记录仪器罐浮出水面。在海洋开发,科学研究等方面都有广泛的应用。

作为与释放器相配套的指令声源,其电声性能直接关系着系统的效能。常由于指令发射换能器的指向性尖锐或阻抗高、灵敏度低或频带窄等问题,严重影响着使用效果或整个系统的协调。

结合使用情况,于1979年设计并提供出 FQ 20 等类型的指令发射换能器。它们在结构和性能上,与同样用途的国际产品相比,均有自己的特色。它具有高效率、宽频带、低阻抗、较高的发射及接收灵敏度、无指向性、小型等特点。已由有关单位引用于水下声学引爆系统、应答装置、水声实验等其它场合。

一、方案概述

1. 确定换能器基本指标

考虑指令编码填充频率为 18 千赫、20 千赫、22 千赫、24 千赫的情况,设想用一个换能器解决。

由于搜索区间为水下全向,作用距离要求又不太远,故利用换能器无指向辐照的办法。这既能实行自由吊放,又避免了一套旋转机构的设置。

按照预计的最大遥控范围及释放系统最小启动声压级,并参考了传播衰减来估计声源级。

指令发射机在工作电压为 300 伏(有效值)时,约有 300 瓦额定电功率输出。为使电声系统有良好的阻抗匹配并与声源级有相应的声功率输出,确定关于等效电阻、电声效率及电压发射灵敏度的指标,见(表 1)。

2. 选择切向极化圆管类型

对切向极化圆管、径向极化圆管、圆球、复合棒四种类型进行了比较(表 2)。

表中, $d_{33}(d_{31})$ 、 $s_{33}^E(s_{11}^E, s_{12}^E)$ 、 σ 、 ρ_3 分别为压电材料的压电常数、顺性系数、泊松比及密度、

$D_0(D_{me})$ 、 H 、 T 、 δ 分别为压电元件的外直径(平均直径)、高度、壁厚及极距, r 、 η_{ma} 、 s 分别为换能器的集中因子、机声效率及辐射面积。

表 1 预定指标

技术性能		指标(频带内)
频带 (KHz)		18~24
电压发射灵敏度 (db)		≥ 46
声源级 (db)		≥ 95
等效电阻 (Ω)		200~400
电声效率(%)		≥ 70
指向性	水平	无或弱
	垂直	$\geq \pm 90^\circ$ (垂线为基轴)
最大使用水深(M)		200

可见,切向极化与径向极化圆管除有共同点外,前者具有特别显著的高机电转换系数。这对降低阻抗,提高灵敏度皆有重要意义。

复合棒型式的机电转换系数也比较高,但由于它属于半波系统、实体结构和较小的辐射面积,因而与一般壳体结构相比,功率/重量、频率、频带等指标显得差些。特别是对所要求的指向性指标是难以满足的。

表 2 四种类型比较

特 性 式		类 型	切向极化圆管	径向极化圆管	圆 球	复 合 棒
机电转换系数 (ϕ)			$\frac{2\pi d_{33}HT}{s_{33}^E \delta}$	$\frac{2\pi d_{31}H}{s_{11}^E}$	$\frac{4\pi d_{31}D_{me}}{s_{11}^E(1-6)}$	$\frac{\pi d_{33}D_0^2}{4s_{33}^E \delta}$
频率常数 ($f_R D_{me}$) KHZ-mm			$\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\rho_3 s_{33}^E}}$	$\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\rho_3 s_{11}^E}}$	$\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2}{\rho_3 (s_{11}^E + s_{12}^E)}}$	$H \times f_R$
			950	1050	1600	2100
指向性	水平		无	无	无	无
	垂直		可调	可调	基本无	有
发射电压灵敏度 (s_V)			$\sqrt{\frac{\gamma}{4\pi s}} \cdot \phi \eta_{ma}$			

圆球与切向极化圆管，二者在有关特性方面大致相近。然而，圆球难以实现牢靠的装配；并由于装配孔的存在、壳体不圆度、非均匀厚度等实际问题的影响，使其并不真正具有无指向性和平坦的频率响应。对于切向极化圆管，若选择适当的高度，便能得到以直径方向为长轴的椭圆状垂直指向性图案和良好的频率响应。

此外，切向极化圆管的各种机电性能，可以通过对直径、高度、壁厚、电极距离等多维途径进行调节，为良好的综合性能的设计提供了方便。因此，切向极化圆管（实际上是拼合结构）是较适宜的类型。

3. 实行套筒—玻璃钢复合预应力结构

作为发射用途，圆管切向极化在壁厚极距比较大的情况下，不宜采用表面电极方式，因为此时极化的有效性很差。分割电极的拼合结构能较多方面地发挥切向极化的特点。然而，圆周方向极低的抗拉强度，却是这种拼合体的要害。其中，银层是最薄弱的环节。它在 PZT-8 陶瓷上的附着强度只有 100 公斤/厘米²左右。这是静拉。在动态条件下则还将下降几倍。由于电极和胶层的分割，使管壁结构在连续性方面也产生了问题。所以，对拼合体施加偏压应力，以进行增强和一体化是不可缺少的。

加偏压预应力，实质上是移动应力循环的起始，从而并扩展其动态范围，使其主要位于陶瓷材料的受压区域。因此，其动态范围就直接受到材料压—压疲劳极限的限制。根据 800 公斤/厘米²的极限数据，预压应力不能超过 400

公斤/厘米²。在共振时，陶瓷管内最大的动态切应力为

$$T = d_{33} Y_{33}^E E Q_M,$$

它分别与压电常数、相氏模量、电场强度、品质因数成正比。按工作场强 3000 伏/厘米（峰值）计算，最大动态应力约为 150 公斤/厘米²。这应当是偏压应力起码要达到的数值。

一般来讲，用玻璃纤维蘸环氧胶的扎紧办法加力均匀、缓和并电气绝缘。然而经验表明，绕层过厚对小器件的性能影响很大；绕层薄了箍紧力量又达不到要求。若用热压金属套筒的办法，则薄壁套筒即能施加较大的力。实验表明，这样做还能起到使振动分布均匀化的作用。但绝缘困难，膨胀系数较大，其施力突然又不易控制，容易损伤拼合体的结构。若二种方法结合起来，用前者来稳定结构并兼做内衬，用后者来加强结构并兼做防水外壳，这种热压金属套筒—玻璃钢衬里的复合预应力措施，对增强结构，稳定性能，改善耦合将更为有效。

4. 关于共振频率的选定

电压发射灵敏度的频率特性为^[1]

$$\frac{s_V}{s_{VR}} = \frac{\alpha_0}{\alpha_{OR}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-Q^2)^2 + \frac{Q^2}{Q_M^2}}} \cdot \left(\frac{f}{f_R}\right)^2,$$

式中 f_R 、 s_{VR} 、 α_{OR} 分别为径向共振频率及共振下的电压发射灵敏度、绕射系数，而 $Q = f/f_R$ 。

当 $f < f_R$ 时，

$$s_V \doteq \frac{s_{VR}}{\alpha_{OR}} \cdot \left(\frac{f}{f_R}\right)^2,$$

即 s_V 随 f^2 变化。

当 $f > f_R$ 时，

$$s_V = \frac{s_{VR}}{\alpha_{OR}} \cdot \alpha_0 = \frac{s_{VR}}{\alpha_{OR}} \cdot \left(\frac{f}{f_R}\right)^{-1/2}$$

即 s_V 随 $f^{-1/2}$ 变化。

所以，为了使 s_V 在使用频段之内获得均衡，应把径向共振频率设计在偏向下限的一边，即

$$f_R = f_1^{0.8} \cdot f_2^{0.2} \cdot k_f$$

f_1 、 f_2 分别为下限及上限频率，修正系数 k_f 一般取值 1.05。在 18 千赫到 24 千赫频段内，共振频率定为 20 千赫为宜。

二、尺寸设计

共振频率是一项重要的技术指标，也是设计过程中的一个基本参数。辐射阻抗和频率之间存在着相互制约的关系。加偏压应力后拼合环共振频率的升高，实属对胶层隔离作用的一种补偿现象。而预应力结构附层对频率的影响问题，可表达为具有等效质量和顺性的串联系统与内层拼合环系统以节相联的关系，在薄附层的情况下，又简化成修正的形式，即用设计控制频率指标 f'_0 代替频率指标 f_0 。

$$f'_0 = f_0 \frac{1}{\sqrt{\frac{1 + \frac{t}{T} \times \frac{\bar{Y}}{\bar{Y}_{33}^E}}}{1 + \frac{t}{T} \times \frac{\rho}{\rho_3}}}}$$

式中 \bar{Y}_{33}^E 、 ρ_3 、 T 及 \bar{Y} 、 ρ 、 t ，分别为拼合环和附层的等效杨氏模量、密度及厚度。而

$$\rho = \frac{t_1 \rho_1 + t_2 \rho_2}{t}; \bar{Y} = \frac{t_1 \bar{Y}_1 + t_2 \bar{Y}_2}{t}$$

其中 t_1 、 ρ_1 、 \bar{Y}_1 及 t_2 、 ρ_2 、 \bar{Y}_2 分别为应力筒及绕层的厚度及其材质的密度和杨氏模量。

由上述观点出发，拟定的设计程序是：以共振频率为中心，按其参考直径及设计规范计算有关尺寸；由预应力值给出附层厚度，再与拼合环厚度求比，修改频率指标为设控频率指标；引入辐射阻抗对频率进行衡算，调整直径

使频率逐步逼近。

在设计规范方面，考虑 PZT-8 材料及拼合结构的力学限制较大，限定 Q_M 为 3 左右；为了去耦并强化径向振动，高度直径比应取 $H/D_0 \leq 1$ ；当波长、直径、高度三者之比 $\lambda_w:D_0:H$ 为 1:0.7:0.6 时，在频带内均可获得近椭球状的指向特性；为了提高机电转换性能并兼顾功率因数，厚度极距比 t/δ 取 1.5—2.0 为宜；考虑材料极化性能沿极面尽可能地均匀，梯形截面压电陶瓷条宽窄极距比 $\delta_{max}/\delta_{min}$ 应不大于 1.25。

以 FQ 20 为例，尺寸设计结果如 (表 3) 所示。

表 3 尺寸设计结果

压电瓷件部分		外套部分	
项目	尺寸 (mm)	项目	尺寸 (mm)
拼合管外径	D_0 49.9	应力筒外径	d_0 52.5
拼合管厚度	T 5.0	应力筒高度	h 48
拼合管高度	H 40	应力筒厚度	t_1 0.5
拼条厚度	δ_{max} 3.5	内衬厚度	t_2 0.9
	δ_{min} 2.87		
拼条断面夹角 7.2°		预计偏压应力 150~200 Kg/cm ²	

三、装配及工艺

换能器 (图 1) 由压电振子、应力外套、封盖所组成。压电振子是由 50 件 PZT-8 陶瓷条拼合起来的切向极化圆管。全部电极并联，从外

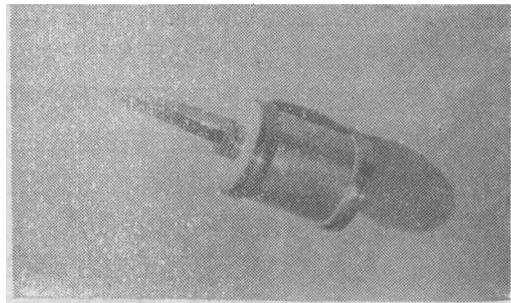


图 1 换能器外形

侧面引出并在二端胶封 (图 2)。用旋动加劲和环氧胶热固化的方法，获得均力拼合的效果。

从而保证了元件具有单一的强径向共振峰和很高的有效机电耦合系数。K_e 约 0.6，这几乎达到了压电材料本身 (K₃₃) 的水平。

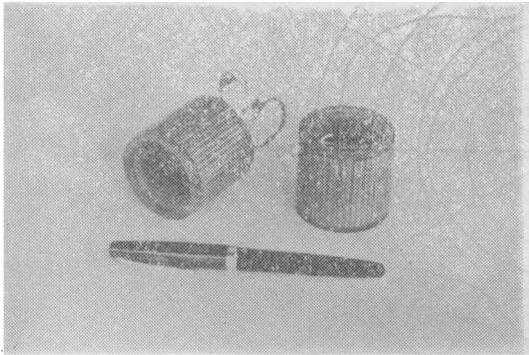


图2 拼合振子

铜制应力外套，是在温升 200℃ 的条件下，通过热压与振子复合起来的。其间用固化性耦合剂。玻璃钢衬里，是用拉紧的玻璃纱浸胶缠绕的工艺实现的。其中胶合剂的粘度调配需要适当。因为这直接关系到绕层含胶过量或缺的问题。由于实行了厚缠多削的办法，获得了致密程度高，蓄压力较大的玻璃钢薄附层。因此，才能把铜套的厚度设计的很薄，从而大大减小了附层对透声的影响。

需要说明的是，在复合结构中偏压应力的产生，除了缠绕固紧力、机械压力、冷缩力之外，还有化学固化力也是不可忽视的。因此，应力大小的控制是不容易的。根据电容法的标定，在振子的切向施加了约 170 公斤/厘米² 的压应力。从加速度检测及全息图象(图 3)中看

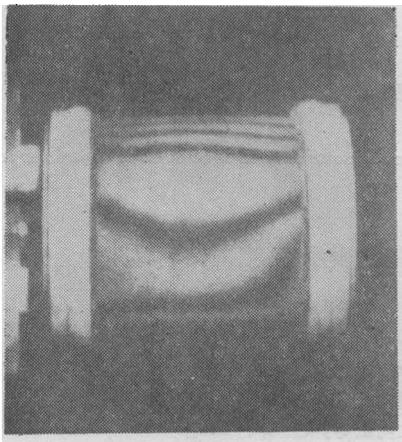


图3 全息图象

应用声学

到，复合振子外表面的振幅分布是比较均匀的。

封盖是在圆管端头做密封用途。它是依靠中心螺杆拉紧而压缩二端的橡皮垫来达到的。橡皮垫同时起着相当程度的隔振作用。空气腔和端头覆盖的巨氨酯硬质泡沫塑料片，均起声屏蔽的作用，是进行指向性、灵敏度等性能设计的需要。

四、性能测量结果及运用情况

对制品 FQ 20-1、FQ 20-2 的测量结果如表 4 及图 4、5、6 所示。其性能指标完全达到了设计要求。

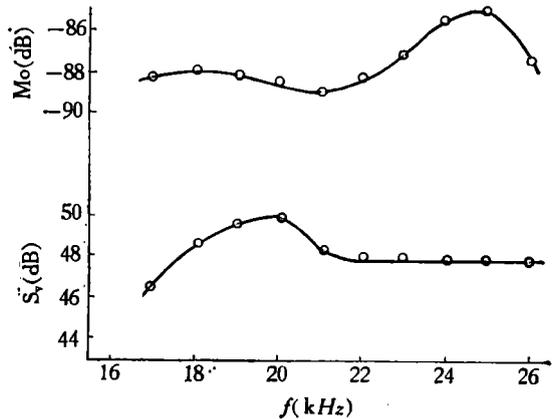


图4 发射电压灵敏度 S_v 、接收电压灵敏度 M_0 响应 (FQ 20-1)

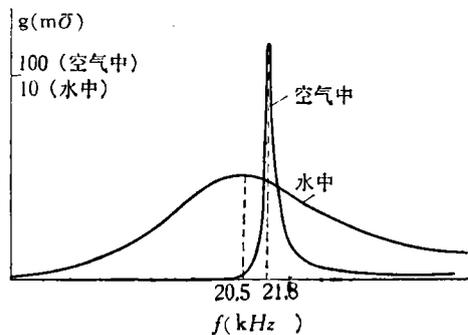


图5 电导响应 (FQ 20-1)

1979 年 10 月至 1980 年 11 月在新安江水库和链岛海区，多次对释放器系统进行功能实验。情况表明，阻抗匹配良好；被遥控的水下浮标的方位不受限制；一个声源能在 18—24 千赫或更

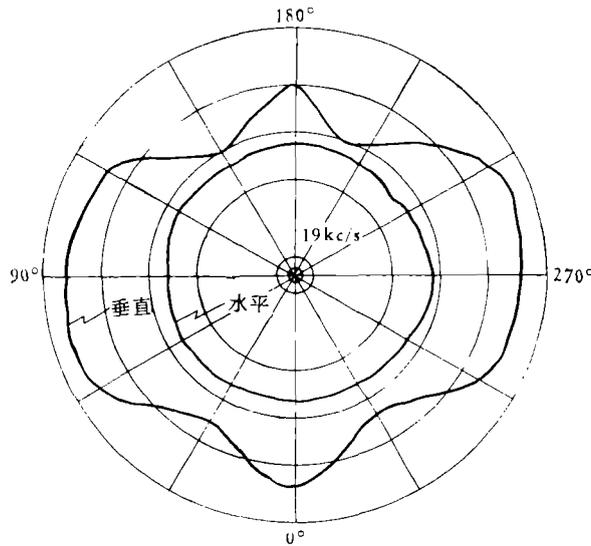


图 6 指向性图 (FQ 20-1)

表 4 主要性能指标

性能		指标	FQ 20-2
共振频率		$f_0(\text{kc/s})$	20.5
频 带		$\Delta f(\text{kc/s})$	17.5~24.5 ($Q_M 3.2$)
谐振发射灵敏度		$S_V(\text{db})$	49.8
谐振阻抗 (带电缆)	等效电阻	$R(Q)$	190
	电容	$C^T(\text{pF})$	35000
指向角 (20~24 kc/s)	水平	(度)	360($\pm 0.5 \text{ db}$)
	垂直	(度)	80~105 (3 db 开角)
集中系数		r	1.46(20 kc/s)
电声效率		$\eta_{ed}(\%)$	89
声功率		$P_A(\text{w})$	420(300 V_{rms})
陶瓷重量		$G(\text{Kg})$	0.2
水压实验		$P(\text{Kg/cm}^2)$	20

宽一些的频段内使用，达到了预期的目的。

结 束 语

声指令发射换能器的研制工作，是与本所释放器研制组及连云港无线电厂合作下进行的。机械加工，性能测量，元件处理等分别由声学所工厂、兄弟组配合完成。在玻璃钢工艺技术方面，得到北京 251 厂等单位的大力支持。

现在提供的制品，按正式产品要求还有待工艺上的改进定型。为了扩大应用范围，准备在收发兼用，深水使用，解决半空间无指向性等方面做进一步的工作。

参 考 文 献

- [1] 奥岛基良，日本音响学会志，4(昭和 36 年 12 月)，297。

(上接 33 页)

行，这里就不重复了。

此外还有 ΔE 值在降温过程中不规则变化的情况，这里不一一列举了。

本工作得到本所很多同志和中国科学院上海硅酸盐化学与工学研究所赵梅瑜同志的帮助

指导，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 许煜寰等编，铁电与压电材料，科学出版社，1978，185。
[2] 大内宏等，昭 42-9716。