

# 刚硬背衬PVDF微型环高频水听器

袁 易 全

(南京工学院)

本文通过研制适用于水声、超声的刚硬背衬PVDF微型环高频水听器,给出了它的灵敏度、指向性以及频率响应等经验设计公式。对研制品的测量表明:计算与实测是一致的。并得到在100—500kHz频率范围内接收响应均匀的PVDF微型环高频水听器。

## 一、前 言

水声、超声检测技术以及声压标准计量设备等方面,迫切需要一种水平无指向性的高频段具有平坦频响的水听器。长期来,由PZT压电陶瓷精心研制的优质高频微型环水听器,无论在接收灵敏度数值上还是在灵敏度高频频段平坦区的宽度上皆已远不能满足传感技术的迅速发展的实际需要。国内这类水听器(PZT-MH型)的典型灵敏度仅 $-226\text{ dB} \pm 3\text{ dB}$  ( $0\text{ dB} = 1\text{ V}/\mu\text{Pa}$ ),它的平坦区工作频段最宽为200kHz至400kHz。

本文作者研制一种由PVDF压电薄膜、DMOS集成电阻抗变换以及针管支撑的组合式微型环高频水听器。命名为“PVDF-ST-1=L型”。初次研制,它的性能就比PZT环优良。研制表明:PVDF环替代传统的PZT环有如下优点:(1)前者比后者结构简单、造价更低廉。PVDF的 $g$ 常数高,它与水具有相近的声阻抗率<sup>[1]</sup>;(2)前者比后者柔韧、重量轻、易于加工和装配,性能稳定,一致性好,几乎无横向波耦合,振动模式单纯。经DMOS集成电阻抗转换器就近联用,其实际接收电压灵敏度将更高<sup>[5]</sup>;(3)前者比后者体积可以制作得更微小,故易于实现100kHz至500

kHz(甚至1MHz)的高频自由场声压接收灵敏度平坦频响。

一般地说,由于PVDF质地柔顺,通常它总是贴附在刚硬背衬基底之上使用<sup>[6]</sup>,以获得器件稳定形状。本文亦不例外。但是,一端固定另一端自由的单层PVDF卷绕微型环,显然与内壁、上下端皆自由的PZT环结构不同。作者从工程实用观点出发,参照文献[2],研究了PVDF环结构的自身特点,初步获得了适用于PVDF微型环高频水听器的经验设计公式。这些公式,经过研制器件的实际设计、装配和性能测试。现已证明有足够的精确性,计算结果与实测结果十分相符。

本文研制的PVDF-ST-1=L型水听器获得了100kHz至500kHz(灵敏度 $-224\text{ dB} \pm 3\text{ dB}$ )的高频频段平坦接收灵敏度响应的特性。

图1为具有刚硬背衬的PVDF微型环水听器探头剖面图和外形图。图中,1防水层,2金属电屏蔽电极,3PVDF电压薄膜,4有机胶粘层,5不锈钢针管柱基底,6电缆线。图1下为水听器的外形。图中:1 PVDF探头,2 不锈钢针管(柱长度150mm,  $\phi = 1.6\text{ mm}$ ),3 DMOS集成电阻抗变换器(具备10dB的电压增益)。

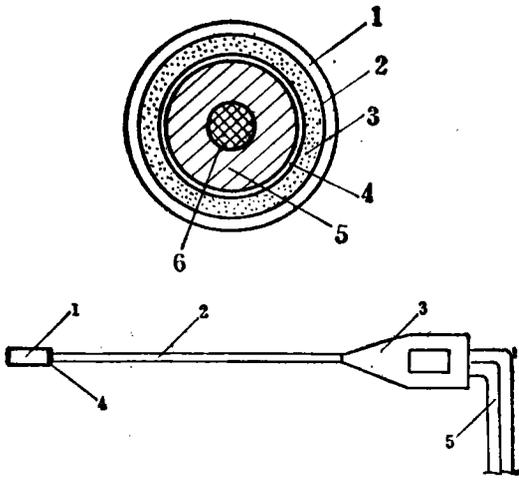


图1 PVDF 微型环探头剖面结构

## 二、设计方法

### 1. PVDF 圆环指向性与衍射常数

置于圆形无限长刚性声障棒之间的圆环振子，理论上，在与轴垂直的水平面内没有指向性；在轴平面内的垂直指向性由福岛<sup>[4]</sup>等推导获得，它为

$$R_0(\theta) = \left( \frac{p}{p_0} \right)_\theta = \left[ J_0(k_o R \cos \theta) - J_1(k_o R \cos \theta) \right] \times \frac{H_0^{(2)}(k_o R \cos \theta)}{H_1^{(2)}(k_o R \cos \theta)} \times \frac{\sin(k_o L \sin \theta)}{k_o L \sin \theta} \quad (1)$$

式中  $k_o$  是水中的波数， $\theta$  是声入射方向和与圆管的轴相垂直的平面间夹角。当声波垂直于轴入射时，即  $\theta = 0$  时，即为衍射常数

$$\alpha_o = J_0(k_o R) - J_1(k_o R) \frac{H_0^{(2)}(k_o R)}{H_1^{(2)}(k_o R)} \quad (2)$$

式中  $R$  为圆环平均半径。

式中当  $|k_o R| = 1$  时， $\alpha_o$  比低频时的值约低 0.7 (即 3dB)， $k_o R = 3$  时，约比低频时的值低 0.45 (即 7dB)。在更高频率时， $\alpha_o$  随频率

的平方根成反比下降 (约每倍频程 - 3dB)。

### 2. PVDF 圆环水听器理论接收灵敏度

倘图 1 结构的 PVDF 微型环满足  $h \ll R$ ， $L \cong 2R$  ( $L$  环高、 $h$  环总壁厚、 $2R$  为环平均直径)，且暂勿考虑透声层、胶粘层以及刚硬背衬基底对环振子产生的影响。则按文献[2]，PVDF 环的理想接收灵敏度为

$$M'_0 = \left| \frac{E_0}{p_0} \right| = \left| \frac{p}{p_0} \cdot \frac{F'}{p} \cdot \frac{F'}{F'} \cdot \frac{\tau}{F'} \cdot \frac{E_0}{\tau} \right| \quad (3)$$

式中： $\frac{p}{p_0} = \alpha_o$  (即衍射常数)， $\frac{F'}{p} \cong 2\pi R$

(即圆环的表侧面积)；

$\frac{F'}{F'} = \frac{1}{\sqrt{(1-Q^2)^2 + Q^2/Q_m^2}}$  (即机械阻抗)，

$F'$  为力  $F$  中使元件变形的有效分量部份， $Q_m$  为环径向谐振时的机械  $Q$  值， $Q = f/f_R$ ， $f_R$  为环径向谐振频率， $\frac{\tau}{F'} = \frac{1}{2\pi L h}$  (即为半径

方向和圆周方向力的转换比)， $\tau$  为  $F'$  产生的单位截面切应力， $h = t_1 + t_2 + t_3$ ， $t_1$ 、 $t_2$  及  $t_3$  分别为透声层、PVDF 及胶粘层的厚度； $\frac{E_0}{\tau} = g_h \cdot h$  ( $g_h$  即为 PVDF 的静水电

常数)， $g_h = g_{33} + g_{31}$ ， $g_{31}$ 、 $g_{33}$  分别为横向压电常数和纵向压电常数， $g_{31} = -258 \times 10^{-3} V \cdot m/N$ ， $g_{33} = 158 \times 10^{-3} V \cdot m/N$ ，故  $g_h = -100 \times 10^{-3} V \cdot m/N$ 。

经以上分析，故式(3)可简化为(分贝)

$$M'_0 = 20 \log [\alpha_o g_h \cdot R / \sqrt{(1-Q^2)^2 + Q^2/Q_m^2}] \quad (4)$$

低频时， $\alpha_o = 1$ ， $Q \rightarrow 0$ ，它的灵敏度为

$$M'_{00} = 20 \log (g_h \cdot R) \quad (5)$$

再考虑透声层、胶粘层以及刚硬背衬等影响，故理论计算接收灵敏度为

$$M_{\text{理}} = M'_0 \cdot G \cdot k \quad (6)$$

式中  $G$  为总的修正系数， $k$  为 DMOS 集成电阻变换器的电压增益 (即 10dB)。

### 三、修正系数G的分析

G 系数主要包括以下四项:

#### 1. 胶粘层的电学影响( $k_B$ )

所谓胶粘层的电学影响是指胶粘层的结构电容  $C_B$  带来的影响。

$$C_B = \epsilon_B \frac{\epsilon_0 A}{t_1} \quad (7)$$

式中  $\epsilon_B$ 、 $\epsilon_0$  分别为胶粘层、空气介质的介电常数;  $A$  为环表侧面积,  $t_1$  为胶粘厚度。

由于胶粘层不厚,  $C_B$  值很大。在高频交流电讯号下它对地端的电阻值很小, 产生旁路作用。故大大降低了水听器的实际接收电压灵敏度。其下降值可如图 2 的等效图加以计算,

$$k_B = \frac{V_G}{V_{out}} = \frac{C_0}{C_0 + C_B + C_{gs}} \quad (8)$$

式中  $C_0$ 、 $C_{gs}$  分别为 PVDF 的静态电容及 DMOS 管栅源之间电容 (本研制品  $C_{gs}$  约 40 PF)。

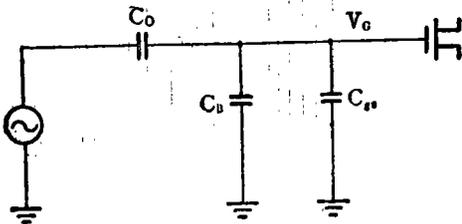


图 2 PVDF 圆环胶粘层电学影响等效图

#### 2. 透声层与胶粘层的力学影响( $k_t$ )

所谓力学影响是指胶层、透声层皆属于振子的非激活成份, 这部份的比例增加会降低有效机电耦合系数。从而降低接收电压灵敏度。倘材料中的应力是按透声层、PVDF 及胶粘层的各自厚度成比例分配, 则接收灵敏度的减少为

$$k_t = \frac{\text{PVDF 厚度}}{\text{壁总厚度}} = \frac{t_2}{h} = \frac{t_2}{t_1 + t_2 + t_3} \quad (9)$$

#### 3. 刚硬背衬带来的影响( $k_p$ )

首先假定不锈钢细针管基底是刚性体。PVDF 贴附后, 环内侧就为固定端、环外侧未加固定为自由端, 这一端固定另一端自由振动的边界条件, 必将抑制环的振动。当简谐外力驱动后, 圆环仅沿径向一个自由度振动时, 环的各部分沿径向作同相位的振动; 位移振幅(或形变)沿环厚向是不均匀的(假定按线性分布的规律), 环内侧为零, 环外侧为最大。由环径向转化为周向的形变(或位移)亦是如此。显然环平均半径处为外侧最大振幅的 1/2 倍。倘将刚硬背衬 PVDF 微型环的平均半径处的形变(或位移)作为环的等效集中参数, 并进行类似于 PZT 环一样的应力、运动方程等分析推导、求解, 就不难知道:

(1) 刚硬背衬 PVDF 环与两端自由 PZT 环的径向谐振频率公式相同

$$\omega_R = \sqrt{Y/\rho}/R = C/R; f_R = \frac{C}{2\pi R} \quad (10)$$

式中  $\rho$  为 PVDF 密度;  $Y$  为弹性模量;  $C$  为 PVDF 声速。

(2) 刚硬背衬 PVDF 环的机械品质因数 ( $Q_m$ ) 是两端自由 PZT 环机械品质因数 ( $Q_M$ ) 的 1/2 倍。

$$Q_m = \frac{\omega_R \cdot m}{R_s} = \frac{1}{2} Q_M \quad (11)$$

式中  $R_s$  为振子辐射阻<sup>[2]</sup>;  $m$  为 PVDF 环等效质量。

(3) 刚硬背衬 PVDF 环外侧振幅与两端自由 PZT 环的振幅取同一参考值, 则前者的平均半径处的振幅将是参考值的一半, 故  $k_p = 1/2 (-6\text{dB})$ 。

#### 4. 有限长 PVDF 圆管 ( $L > 2R$ ) 空间增益( $k_s$ )

由于 PVDF 质地柔韧, 弹性模量比不锈钢管材料小 20 多倍, 故它产生的横向切应变甚微。故有限长 PVDF 圆管水听器可看作若干只 PVDF 短圆环 ( $l = 2R$ ) 的连续组合基阵。

其空间增益(分贝)

$$k_d = 20 \log(L/2R) \quad (12)$$

综上所述,修正系数G为

$$G = k_B \cdot k_t \cdot k_p \cdot k_d \quad (13)$$

由此可见,理论计算接收电压灵敏度为

$$M_{理} = 20 \log \left( \frac{\alpha_0 \cdot g_h \cdot R \cdot G \cdot k}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + \Omega^2/Q_m^2}} \right) \quad (14)$$

低频时,  $\alpha_0=1, \Omega \rightarrow 0$ , 故

$$M_{理} = 20 \log(g_h \cdot R \cdot G \cdot k) \quad (15)$$

## 四、测试结果

表1列出了PVDF微型环水听器与PZT微型环水听器之间比较结果。这些典型设计实例有代表性。表中还列入了设计计算值。PVDF-ST-1-L型3\*、4\*是84年12月研制的; PVF-ST-1-L型12\*、14\*是85年3月研制的。以上四只水听器由国家计量总局成都计量测试研究院测定(前后经半年考察,取四次测试结果的平均值)。PZT-MH型水听器及其测试数据由无锡721厂提供。表1中的 $f_0$ 为 $k_0 R=1$ 运算出的频率值,  $f_0 = \frac{C_1}{2\pi R}$ ,  $C_1$ 为水的声速( $1.5 \times 10^3 \text{m/s}$ ),它对频响平坦区宽度有密切关系; PZT环 $Q_m \cong 16(t_2/R)^{12}$ ; PVDF环 $Q_m \cong 2.4 \times \frac{h}{2R}$ 。图3绘出

了PVDF环的两类典型频响曲线(包括理论值与实测值),一类为环高2.5mm( $\phi 2\text{mm}$ );另一类为环高12mm( $\phi 3\text{mm}$ ),显然短圆环、小直径的微型水听器平坦区宽得多。图3中PZT-MH型微型环水听器( $\phi 4\text{mm}, L=4\text{mm}$ ,壁厚0.3mm)的接收灵敏度频率响应曲线亦是相当不错的。但两者比较可知:(i) PVDF-ST-1-L型较PZT-MH型的灵敏度高;(ii)并且前者的高频平坦接收频响更宽,高端上限频率更高。图3中对同类PVDF-ST-1-L型水听器,其各种结构参数变化与特性曲线的关系趋向大致如下:环半径R越小,  $f_0$ 及 $f_R$ 值越高,则水听器高频段平坦频响越宽,平坦区高端频率上限越高;胶层 $t_1$ 越厚、透声层越薄,则水听器的灵敏度越高;环高L越长,虽水听器的低频灵敏度很高,但水听器的垂直指向性开角越小。

图4即为PVDF-ST-1-L型4\*水听器的

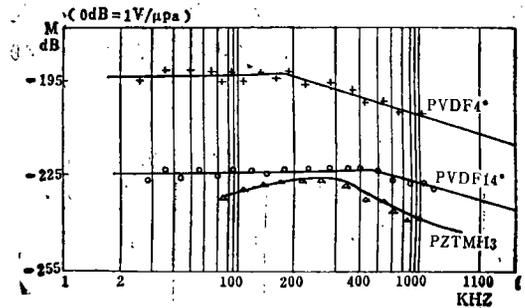


图3 PVDF两类微型环水听器频响比较

表1 PVDF与PZT微型环高频水听器实例及主要性能比较

型号	环高L (mm)	环直径2R (mm)	L/2R	胶层厚 $t_1$ ( $\mu\text{m}$ )	PVD F厚 $t_2$ ( $\mu\text{m}$ )	透水层厚 $t_3$ ( $\mu\text{m}$ )	$k_B$ (dB)	$k_t$ (dB)	$k_p$ (dB)	空间增益 $k_d$ (dB)	电压增益k (dB)	机械品质因数 $Q_m$	$f_0$ (kHz)	径向谐振频 $f_R$ (kHz)	总修正系数G (dB)	频响平坦区 (+3dB) (kHz)	平坦区灵敏度	
																	M理 (dB)	M实 (dB)
PVDF-ST-1-L2*	12	3	4	36	47	40	-9	-6	-6	+12	+10	<0.4	160	270	+1	100~300	-195	-197
PVDF-ST-1-L4*	12	3	4	36	47	60	-9	-8	-6	+12	+10	<0.4	160	270	-1	100~300	-197	-199
PVDF-ST-1-L12*	2.5	2	1.25	12	47	200	-14	-15	-6	+2	+10	<0.4	240	360	-23	100~500	-223	-224
PVDF-ST-1-L14*	2.5	2	1.25	12	47	120	-14	-10	-6	+2	+10	<0.4	240	360	-18	100~490	-218	-219
PZT-MH	4	4	1		300	1000						<2.0	200	340		200~400	-226	-226

垂直指向性图。图4中为200kHz工作频率时测定的值。3dB波束实测开角为23°。此实验在南京工学院消声水池中进行；指向性理论值，通过式(1)运算获得，3dB波束理论开角为25°。

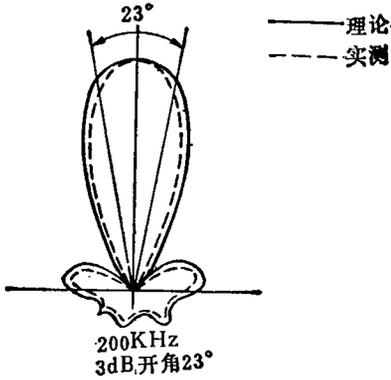


图4 PVDF-ST-I-L型4\*水听器垂直指向性图

## 五、结 论

(1) PVDF圆环水听器，因其PVDF实现声电转换时灵敏度高，DMOS集成阻抗转换的输出电阻低，并且靠针管支撑易于实施高频自由场声压的标定。故这种微型水听器既有高的灵敏度，又有水平无指向性的特点，

还有较宽的高频平坦接收自由场灵敏度频响等独特性能。

(2) PVDF-ST-1-L型微环水听器，环半径1mm，环高2.5mm，已获灵敏度 $-224\text{dB} \pm 3\text{dB}$ ，工作频段100—500kHz内响应平坦，优于PZT-MH型高频水听器。

(3) 本文研制表明：刚硬背衬PVDF微型环，若 $R$ 越小， $f_0$ 及 $f_R$ 将越高，高频频段平坦频响将越宽，越能向高频上限端延伸；同时，若环胶粘层越厚、透声层越薄以及环越高，则灵敏度将越高。但环过高会使水听器的垂直指向性变坏。

## 参 考 文 献

- [1] Gallantree H. R., Marconi Rev., 45(224)(1982)-49.
- [2] 奥岛基良: タバ丹筒きういた水中相互校正用补送受器。《日本音响学会志》第17卷第4号(昭和36年12月), 293~320.
- [3] Ricketts D.: Recent developments in the USA in the application of PVF<sub>2</sub> polymer in under-water transducers, Proc. Inst. Acoustics, Vol.6 PT3(1984), 46.
- [4] 袁易全、沈寿彭, 水下声成像PVDF-DMOS换能器, 应用声学, No 3(1985), 25.
- [5] 袁易全、郑文辉, PVDF多层结构换能器的方向特性, 南京工学院学报, No.1 (1985), 81.

## 生理声学专业委员会成立

上海市声学学会下属的生理声学专业委员会，1986年5月16日在本市科学会堂成立。到会约60人，多数为各医院耳鼻喉科医师及从事生理及心理声学、语言声学、艺术嗓音、生物医学工程等方面的科研人员。大会由梁之安同志(生理所)主持，陈玉琰主任(市第六人民医院)报告了筹备经过，并请声学学会及中华医学会的负责人王季卿、张本厚、吴学愚讲了话。邵殿华(生理所)、顾立德(文艺医院)、王政敏(眼耳鼻喉科医院)、胡正元(海军医学研究所)分别作了题为“听觉功能的客观测定”、“东西方歌声在声学上的某些区别”、“电子耳蜗”、“两个大气压高压氧下听觉诱发电位的变化”的学术报告。大会选举陈玉琰任主任委员，顾立德为秘书。并对今后的学术活动作了初步的安排。(安)