

# 双套筒式 PVDF 聚合物薄膜水听器

李东林 蒋楠祥

(哈尔滨船舶工程学院)

1990年5月28日收到

本文提出一种采用 PVDF 聚合物薄膜压电材料的双套筒式水听器结构,并通过静态分析方法给出了水听器的低频电声灵敏度公式。理论优化值及该结构式水听器的一例实测结果均表明,这种结构具有乐观的应用前景。

## 一、引言

人们对高分子聚合物压电性能的研究工作早在四十年代就已开始进行。七十年代初,高分子压电聚合物在日本制成压电薄膜,自此,人们开始了将其用于水听器制做的种种尝试。PVDF 薄膜,即聚偏二氟乙烯薄膜是这类高分子压电聚合物中被人们广泛采用的一种。

由于重量轻、特性阻抗与水很接近,机械柔顺性好、易于制成各种形状等诸多优点,使得 PVDF 压电薄膜很适合于用于水听器领域。采用这种压电材料制成真正适用的、可服役的水听器及基阵则是七十年代末期的事情,这也还只限于国外(主要是美国)。我国在这方面的的工作始于八十年代,目前已有采用这种新型压电材料制做水听器的国内专利。

由于 PVDF 压电薄膜比较软,一般的设计思想都是采用一个背衬结构来增大其机械强度。PVDF 薄膜贴在背衬上,这样,水听器的形状便完全由背衬结构确定下来。因而水听器的机械性能主要是由背衬决定的。当水听器工作时,入射声压引起背衬形变,也就引起聚合物薄膜产生应变,则在薄膜两极间产生一与应变成正比的电压。为使应变尽可能地大,一般将薄膜不与背衬粘接的一面保持空气负载。

可以说,在材料参数相同的情况下,这种水听器的性能是否优越只取决于结构的设计。本

应用声学

文介绍一种具有端盖板的双套筒圆柱形自由溢流式 PVDF 压电薄膜水听器,从静态理论出发给出其电声灵敏度公式,并将灵敏度的理论值与实验值进行了比较。

## 二、水听器的结构

双套筒式 PVDF 压电薄膜水听器的剖面结构如图 1 所示,内外两个有机玻璃套筒形成水听器的背衬结构。将 PVDF 压电薄膜分别粘贴在外套筒的内侧壁及内套筒的外侧壁上。

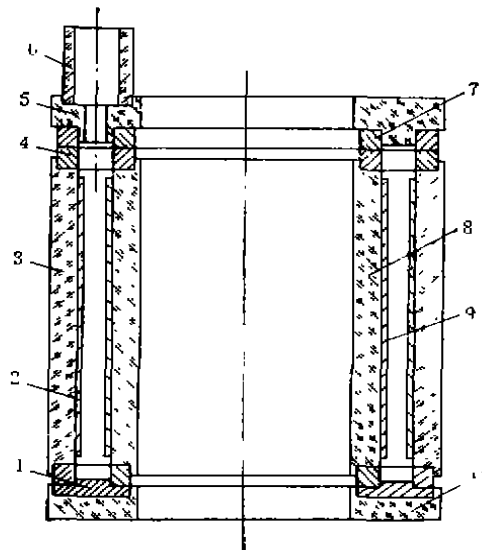


图 1 双套筒式 PVDF 压电薄膜水听器的结构剖面图  
1,4,7 为电极铜环; 2,9 为压电薄膜; 3,8 为有机玻璃外、内套筒; 5,10 为上、下盖板; 6 为引出电缆封口

薄膜沿厚度方向极化,其机械延伸方向沿圆周方向。采用环片状盖板使水听器中间形成自由溢流腔,且在内外套筒间采用电学串联,这不仅可增大水听器的声压接收面积;进而提高接收灵敏度,而且也有益于纵、横两个方向上的抗加速度响应。上下盖板与内外套筒间密封形成的空气腔,使得 PVDF 压电薄膜不与声压接触的一面保持空气负载。为了引线的方便,采用了图中所示的环状电极形式。

### 三、套筒壳体内部的应力与应变

鉴于水听器的结构形状,采用柱坐标系统比较方便。为了照顾压电方程的习惯做法,我们取坐标变量为  $x_1$  ( $\theta$  方向)、 $x_2$  ( $z$  方向)、 $x_3$  ( $r$  方向)。由于轴对称性,问题的解将与  $x_1$  无关。

就低频的情况而言,可按静态问题处理<sup>[1]</sup>。即通过引入应力函数  $\phi$  来解出静应力分布。应力函数  $\phi$  满足四阶偏微分方程

$$\nabla^2 \nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

其中

$$\nabla^2 = \partial^2 / \partial x_3^2 + \frac{1}{x_3} \cdot \partial / \partial x_3 + \partial^2 / \partial x_2^2$$

应力分量与应力函数的关系由下式给出

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu \cdot \partial / \partial x_2 & -\frac{1}{x_3} \cdot \partial / \partial x_3 \cdot \partial / \partial x_2 \\ (2-\nu) \cdot \partial / \partial x_2 & -\partial^3 / \partial x_3^3 \\ \nu \cdot \partial / \partial x_2 & -\partial^2 / \partial x_3^2 \cdot \partial / \partial x_2 \\ (1-\nu) \cdot \partial / \partial x_3 & -\partial^2 / \partial x_2^2 \cdot \partial / \partial x_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \nabla^2 \phi \\ \phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $\nu$  为壳体的泊松比。

(1) 式的解为

$$\phi = x_2(A \ln x_3 + Bx_3^2 + C) + Dx_3^3 \quad (3)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $D$  为待定常数。将(3)代入(2)得

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/x_3 & 4\nu - 2 & 6\nu \\ 0 & 8 - 4\nu & 6\nu - 6 \\ 1/x_3 & 4\nu - 2 & 6\nu \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ D \end{bmatrix} \quad (4)$$

若用角标  $i$  表示内壳体的量;角标  $o$  表示外壳体的量, $a$  表示壳体的量, $a$  表示壳体的内半径; $b$  表示壳体的外半径, $l$  表示壳体高度, $p_0$  代表入射声压,则边界条件可以写成

$$\begin{aligned} \text{内壳体: 在 } x_3 = a_i \text{ 处,} \\ T_3 = -p_0 (0 \leq x_2 \leq l) \\ \text{在 } x_3 = b_i \text{ 处,} \\ T_3 = 0 (0 \leq x_2 \leq l) \\ \text{在 } x_2 = 0, l \text{ 处,} \\ T_2 = -p_0 \cdot \frac{b_i^2 - a_i^2}{(b_i^2 - a_i^2) + (b_i^2 - a_i^2)} \\ (a_i \leq x_3 \leq b_i) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{外壳体: 在 } x_3 = a_o \text{ 处,} \\ T_3 = 0 (0 \leq x_2 \leq l) \\ \text{在 } x_3 = b_o \text{ 处,} \\ T_3 = -p_0 (0 \leq x_2 \leq l) \\ \text{在 } x_2 = 0, l \text{ 处,} \\ T_2 = -p_0 \cdot \frac{b_o^2 - a_o^2}{(b_o^2 - a_o^2) + (b_o^2 - a_o^2)} \\ (a_o \leq x_3 \leq b_o) \end{aligned} \quad (6)$$

利用边界条件(5)、(6)及表达式(4),我们得到此时内外壳体的应力分布满足

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}^i = p_0 \begin{bmatrix} (b_i^2/x_3^2 + 1)A_1 \\ -A_2 \\ (-b_i^2/x_3^2 + 1)A_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}^o = p_0 \begin{bmatrix} (a_o^2/x_3^2 + 1)B_1 \\ -A_2 \\ (-a_o^2/x_3^2 + 1)B_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 &= a_i^2/(b_i^2 - a_i^2), \\ A_2 &= (b_o^2 - a_i^2)/[(b_o^2 - a_o^2) \\ &\quad + (b_i^2 - a_i^2)], \\ B_1 &= b_o^2/(a_o^2 - b_o^2) \end{aligned}$$

再利用各向同性体的应力与应变之关系,不难得到内外壳体的应变分布为

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}^i = (p_0/Y) \begin{bmatrix} (1+\nu)b_1^2 A_1/x_1^2 + (1-\nu)A_1 + \nu A_2 \\ -2\nu A_1 - A_2 \\ -(1+\nu)b_1^2 A_1/x_1^2 + (1-\nu)A_1 + \nu A_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}^o = (p_0/Y) \begin{bmatrix} (1+\nu)a_0^2 B_1/x_3^2 + (1-\nu)B_1 + \nu A_2 \\ -2\nu B_1 - A_2 \\ -(1+\nu)a_0^2 B_1/x_3^2 + (1-\nu)B_1 + \nu A_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,  $Y$  为壳体的杨氏模量。

#### 四、PVDF 薄膜内的应力与应变

当将 PVDF 薄膜贴在筒壁上后, 外部入射声压  $p_0$  作用于筒壁时, 薄膜亦将产生内部的应力及应变分布。我们将在以下几点假设下给出薄膜的应力应变分布函数<sup>[2]</sup>。

1. 设壳体与 PVDF 薄膜在粘接面上应变连续。

2. 设薄膜很薄, 以致于可认为应变沿薄膜厚度方向上为常数。

3. 设薄膜在弹性性能上是各向同性的。

于是, 由假设 1. 及 2. 知内外壳体上的薄膜的应变分别为(即令(9)式中的  $x_3 = b_1$ , (10)式中的  $x_3 = a_0$ ):

$$\begin{bmatrix} S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{bmatrix}^p = (p_0/Y) \begin{bmatrix} 2A_1 + \nu A_2 \\ -2\nu A_1 - A_2 \\ -2\nu A_1 + \nu A_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} S_1^o \\ S_2^o \\ S_3^o \end{bmatrix}^p = (p_0/Y) \begin{bmatrix} 2B_1 + \nu A_2 \\ -2\nu B_1 - A_2 \\ -2\nu B_1 + \nu A_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中角标  $p$  代表薄膜。再由假设 3. 可知, 在开路条件下, 即  $D_3 = 0$  时, 薄膜中的应力为

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}^p = \frac{Y^D}{(1+\sigma^D)(1-2\sigma^D)}$$

应用声学

$$\times \begin{bmatrix} 1-\sigma^D & \sigma^D & \sigma^D \\ \sigma^D & 1-\sigma^D & \sigma^D \\ \sigma^D & \sigma^D & 1-\sigma^D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}^p \quad (13)$$

式中  $Y^D = 1/S_{11}^D$ ,  $\sigma^D = -S_{12}^D/S_{11}^D$  分别为薄膜的杨氏模量及泊松比。

将(11)、(12)式代入(13)式中, 得到内外壳体上 PVDF 薄膜中的应力分别为

$$\begin{bmatrix} T_1^i \\ T_2^i \\ T_3^i \end{bmatrix}^p = \frac{Y^D p_0}{Y(1+\sigma^D)(1-2\sigma^D)} \times \begin{bmatrix} [2-(4\nu+2)\sigma^D]A_1 + (\nu-\sigma^D)A_2 \\ 2(\sigma^D-\nu)A_1 + [\sigma^D(2\nu+1)-1]A_2 \\ 2(\sigma^D-\nu)A_1 + (\nu-\sigma^D)A_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} T_1^o \\ T_2^o \\ T_3^o \end{bmatrix}^p = \frac{Y^D p_0}{Y(1+\sigma^D)(1-2\sigma^D)} \times \begin{bmatrix} [2-(4\nu+2)\sigma^D]B_1 + (\nu-\sigma^D)A_2 \\ 2(\sigma^D-\nu)B_1 + [\sigma^D(2\nu+1)-1]A_2 \\ 2(\sigma^D-\nu)B_1 + (\nu-\sigma^D)A_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

#### 五、自由场开路电压接收灵敏度

开路时, 即  $D_3 = 0$  时, PVDF 内之  $E_3$  为

$$E_3 = -[g_{31} \ g_{32} \ g_{33}] \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}^p = -g_{31}T_1^p - g_{32}T_2^p - g_{33}T_3^p$$

电极两端的开路电压为

$$e_0 = \int_0^{h_p} E_3 dx_3 = h_p(-g_{31}T_1^p - g_{32}T_2^p - g_{33}T_3^p)$$

式中  $h_p$  为薄膜厚度。自由场开路电压接收灵敏度为

$$M_0 = e_0/p_0 = \frac{h_p}{p_0} \times (-g_{31}T_1^p - g_{32}T_2^p - g_{33}T_3^p) \quad (16)$$

将(14)、(15)式代入(16)中即得

$$M_0^i = -\frac{Y^D h_p}{Y(1+\sigma^D)(1-2\sigma^D)}$$

$$\begin{aligned} & \times \left\{ [2 - (4\nu + 2)\sigma^D]g_{31} + 2(\sigma^D - \nu)g_{32} \right. \\ & \left. + 2(\sigma^D - \nu)g_{33} \right\} \frac{a_i^2}{b_i^2 - a_i^2} \\ & + \{ [\sigma^D(2\nu + 1) - 1]g_{32} + (\nu - \sigma^D) \\ & \times (g_{31} + g_{33}) \} \times \frac{b_0^2 - a_i^2}{(b_0^2 - a_0^2) + (b_i^2 - a_i^2)} \} \\ & (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_0^o = & -\frac{Y^D h_p}{Y(1 + \sigma^D)(1 - 2\sigma^D)} \\ & \times \left\{ [2 - (4\nu + 2)\sigma^D]g_{31} + 2(\sigma^D - \nu)g_{32} \right. \\ & \left. + 2(\sigma^D - \nu)g_{33} \right\} \frac{b_0^2}{a_0^2 - b_0^2} \\ & + \{ [\sigma^D(2\nu + 1) - 1]g_{32} + (\nu - \sigma^D) \\ & \times (g_{31} + g_{33}) \} \times \frac{b_0^2 - a_i^2}{(b_0^2 - a_0^2) + (b_i^2 - a_i^2)} \} \\ & (18) \end{aligned}$$

串联时,总的灵敏度为

$$M_0^{total} = M_0^i + M_0^o \quad (19)$$

## 六、一例套筒式水听器的计算及实测结果

实际水听器的结构如图1所示,其几何尺寸如下

$$a_i = 9.5 \times 10^{-3} \text{m}, \quad b_i = 12.0 \times 10^{-3} \text{m};$$

$$a_0 = 15.0 \times 10^{-3} \text{m}, \quad b_0 = 17.5 \times 10^{-3} \text{m};$$

$$l = 40.0 \times 10^{-3} \text{m}.$$

PVDF 的有关参数如下<sup>[3]</sup>

$$\nu = 0.4, \quad Y = 3.5 \times 10^9 \text{N/m}^2.$$

可算得

$$M_0^i = 0.488 h_p$$

$$M_0^o = 1.202 h_p$$

则

$$M_0^{total} = 1.69 h_p$$

我们选用的 PVDF 薄膜厚度为  $h_p = 6.0 \times 10^{-5} \text{m}$ , 则

$$\begin{aligned} M_0^{total} &= 1.69 \times 6.0 \times 10^{-5} \\ &= 101.4 \times 10^{-6} \text{V/Pa} \end{aligned}$$

灵敏度级

$$M_0 = -199.88 \text{dB} (0 \text{dB} = 1 \text{V}/\mu\text{Pa})$$

实测时,采用的是低频振动液柱系统,如图2所示。测得的自由场开路电压灵敏度曲线与计算所得的灵敏度曲线均绘于图3中。

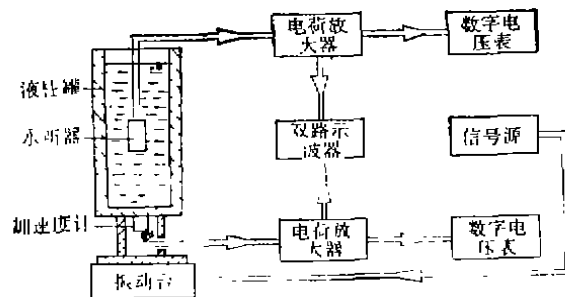


图2 振动液柱低频测量系统

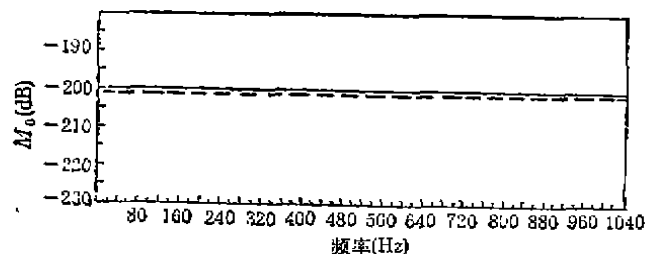


图3 水听器灵敏度级的理论计算值与实测值

——计算值；----实测值；0dB = 1V/μPa。

## 七、讨 论

1. 由(17)、(18)式知,当背衬及 PVDF 参数确定之后,水听器的接收灵敏度完全取决于

双套筒的内外径之比  $a_i/b_i$  与  $a_0/b_0$ 。设  $a_i/b_i = a_1$ ,  $a_0/b_0 = a_2$ , 得如图4所示的曲线(此时取  $h_p = 6.0 \times 10^{-5} \text{m}$ )。

2. 造成图3中两条曲线之间差别的主要原因,很可能是 PVDF 的标定参数与实际情况有

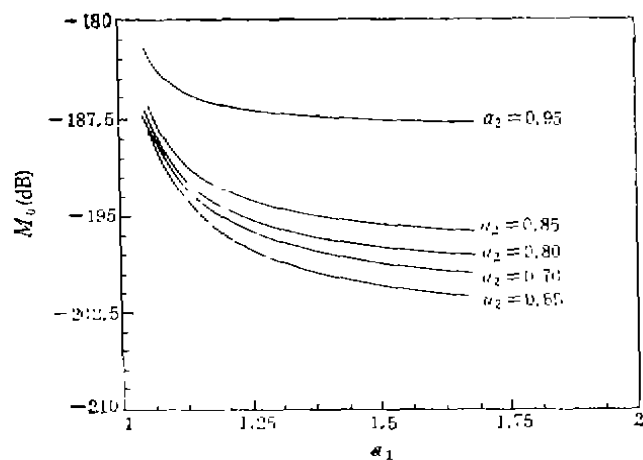


图4 水听器灵敏度级  $M_0$  与  $a_1$ 、 $a_2$  之关系

些出入，因为这种材料的参数测量本身就不是一件容易的事情。

### 感 谢

王文芝同志精心地为本文绘制了插图，作者在此深表谢意。

### 参 考 文 献

- [1] Langevin R. A., *J. Acoust. Soc. Am.*, **26**(1954), 421—427.
- [2] Donald Ricketts, *J. Acoust. Soc. Am.*, **68**(1980), 1025—1029.
- [3] Donald Ricketts, 现代科技译丛, **63**(1988), 53—61.

## 活塞式换能器聚焦超声场的级数描述\*

程 晖 杜 功 焕

(南京大学声学研究所)

1990年10月8日收到

本文采用一种级数表达的方法，来解析地研究由圆片活塞式换能器产生的聚焦超声场。考虑一个带声凹透镜的圆片活塞式换能器，将其活塞面上的振速沿径向分布分解成为一系列高斯函数的叠加，而其每一项高斯函数所对应的声场分布都能用解析式表达，经过叠加则就可求得圆片活塞式换能器的聚焦超声场的声压分布。与用通常的数值积分直接计算结果比较表明，二者的误差甚小，而利用高斯声场叠加进行处理的解析方法显然具有简捷、物理图像明晰的优点。

### 一、引 言

对于带有球状声凹透镜的圆片活塞式超声换能器及其所产生的聚焦声场特性的研究，由于其广泛的应用，一直受到人们普遍的重视。

应用声学

在流体中，由换能器产生的声场可以由波动方程描述。对活塞式振速分布的超声换能器所产生的声场，在抛物线近似下，即当满足  $ka \gg 1$  条件下，这里  $k$  代表声波波数， $a$  为换能器半

\* 国家自然科学基金项目