

宽带水听器的相位及其离散度的计算关系式

林向真 明代都 刘怀芳 高秀珍

(中国科学院声学研究所)

1983年1月17号收到

本文探讨了从压电换能器机电等效电路出发,注意到声端负载及电端接口的影响,推导出以共振频率、介电损耗、低频电容等压电型水听器常用特性参数为参量的水听器相位计算关系式,从而提供了对相位一致性有要求的压电水听器设计依据及电声参数的选取范围,尤其是对一些由于条件限制,使不宜实测的水听器阵的相位及其离散度,得到一个定量的估计,在工程设计上有一定的实用性。

一、引言

在水声工程中,对声阵中水听器不断提出相位一致性的要求,而机加工精度、材料本身电声性能及装配工艺的差异都会导致水听器的相位离散。在进行水听器设计时,如何计算相位值及相位离散程度?哪些参数是影响相位的关键因素?能否对给定的工作频带及相位的一致程度选择最合理的水听器参数?这是设计有相位要求的水听器时必须考虑的问题。

另一方面,高精度的相位测量需要严格的测试条件及周围环境要求,对于大型的水听器阵,由于结构形状及体积尺寸的限制,使高精度的相位测量难以实现。

基于以上两个原因,我们从压电换能器机电等效电路出发,并注意了声端负载及电端接口电路的影响,推导出了以水听器常用特性参数为参量的相位及其离散度的计算关系式。在推导过程中作了必要的简化,得到了以共振频率、介电损耗、低频电容等压电型水听器主要电声特性有关的计算关系式。从而提供了有相位要求的压电水听器设计依据及电声参数的选取范围。

应用声学

二、相位及其离散度的计算关系式的推导

首先画出包括前置放大器输入阻及水中辐射阻在内的机电类比等效电路,见图1。由于考

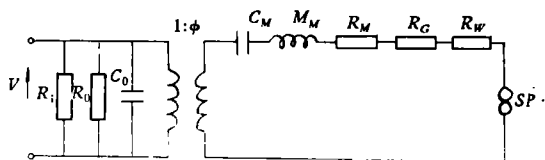


图1 水听器等效电路

虑到前置放大器的输入抗及水中辐射抗比水听器本身固有的抗小得多,所以在等效电路中省略了它们。

图中 R_i 是前置放大器输入阻; R_0 是水听器介电损耗; R_M 是压电材料机械阻; R_G 是装配和水密带来的附加机械阻; R_W 是水中声阻; c_0 是水听器静态电容; c_M 是水听器力顺; M_M 是水听器力质量; ϕ 是力系数; S 是接收面积; p 是输入声压。这些参量有下列关系: $R_0 = 1/(\omega c_0 \tan \delta)$; $\omega_r = 1/\sqrt{c_M M_M}$; $R_W = B p c_s$ 。这里 $\tan \delta$ 是压电材料的介电损耗; ω_r 是共振圆频率; $p c$ 是水特性阻抗; B 是水听器形状、尺寸及工

• 25 •

作频率的函数。

为分析方便^[1], 简化电路, 见图 2。

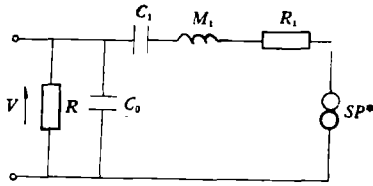


图 2 简化后电路

图中

$$c_1 = c_M \phi^2;$$

$$M_1 = M_M / \phi^2;$$

$$R_1 = (R_M + R_G + R_w) / \phi^2;$$

$$R = R_0 R_i / (R_0 + R_i);$$

$$p^* = p \phi.$$

水听器低频电容为 $c_w = c_0 + c_1$; 有效机电耦合系数为 $k^2 = c_1 / c_w$ 此外, 并作如下假设: $\text{tg} \delta \ll 1$; $B \ll 1$; $\omega^2 / \omega_r^2 \ll 1$ 。

于是, 从力端看进去的总阻抗 z 为:

$$z = R_1 + j\omega M_1 - j/(\omega c_1) + R/(1 + j\omega c_0 R) \quad (1)$$

总电流 I 为

$$I = sp^* / z \quad (2)$$

输出电压 V 为

$$V = IR / (1 + j\omega c_0 R) \quad (3)$$

输出电压和输入声压之比 V/P 为:

$$\begin{aligned} V/P &= SR / [\phi z (1 + j\omega c_0 R)] \\ &= SR / \{ \phi [(R_1 + R - \omega^2 c_0 M_1 R + R c_0 / c_1) + j(\omega M_1 - 1/\omega c_1 + \omega c_0 R R_1)] \} \quad (4) \end{aligned}$$

则输出电压和输入声压的相位差 φ 为:

$$\begin{aligned} \varphi &= \text{tg}^{-1} [(1/\omega c_1 - \omega M_1 - \omega c_0 R R_1) / (R_1 + R - \omega^2 c_0 R M_1 + c_0 R / c_1)] \\ &= \text{tg}^{-1} \frac{1 + \omega c_0 \text{tg} \delta - \omega^2 M_1 c_1 - \omega^2 c_0 c_1 R_i R_1 - \omega^3 M_1 c_1 c_0 \text{tg} \delta}{\omega R_i c_w + \omega c_1 R_1 + \omega^2 c_0 c_1 R_1 \text{tg} \delta - \omega^3 c_0 c_1 M_1 R_i} \quad (5) \end{aligned}$$

设 Q_1 为空气中水听器的机械 Q 值, Q_2 为水中机械 Q 值, 则 $Q_1 = 1/[c_M(R_M + R_G)\omega_r]$;

$$Q_2 = 1/[c_M(R_M + R_G + R_w/B)\omega_r];$$

$$1/Q_2 = 1/Q_1 + \omega_r c_M R_w / B.$$

并 $\omega_r = 1/\sqrt{M_1 c_1}$ 。再假定 $R_i \gg R_1$; $Q_2 > 1$; φ 角很小, $\varphi \cong \text{tg} \varphi$ 。则(5)进一步简化成:

$$\begin{aligned} \varphi &\cong 1/(\omega c_w R_i) + (1 - k^2) \text{tg} \delta \\ &\quad - (1 - k^2)(1/Q_1 + B/Q_2) \omega / \omega_r \quad (6) \end{aligned}$$

为分析方便起见, 上式改写成:

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3, \\ \varphi_1 = (1 - k^2) \text{tg} \delta, \\ \varphi_2 = 1/(\omega c_w R_i), \\ \varphi_3 = -(1 - k^2)(1/Q_1 + B/Q_2) \omega / \omega_r, \end{cases} \quad (7)$$

(7) 式就是我们求得的水听器相位关系式。将(7)式微分, 即可得到由于参数离散而产生的相位离散的关系。

$$\begin{aligned} \Delta \varphi &= |\Delta \varphi_1| + |\Delta \varphi_2| + |\Delta \varphi_3| \\ |\Delta \varphi_1| &= (1 - k^2) \Delta(\text{tg} \delta) + \text{tg} \delta \Delta(k^2) \\ |\Delta \varphi_2| &= \Delta c_w / (\omega c_w^2 R_i) \\ &\quad + \Delta R_i / (\omega c_w R_i^2) \\ |\Delta \varphi_3| &= (1/Q_1 + B/Q_2) \omega \Delta(k^2) / \omega_r \\ &\quad + (1 - k^2)(1/Q_1 + B/Q_2) \omega \Delta \omega_r / \omega_r^2 \\ &\quad + (1 - k^2) \omega \Delta Q_1 / (\omega_r Q_1^2) \\ &\quad + (1 - k^2) \omega B \Delta Q_2 / (\omega_r Q_2^2) \end{aligned} \quad (8)$$

(8) 式给出了相位离散度的关系式。

三、相位及相位离散度关系式的分析

(7)~(8) 式给出了我们所需的计算关系式。现选取一组水听器的常用电声参数及可能的离散范围代入(7)、(8)式中, 定量地观察 φ 和 $\Delta \varphi$ 的变化情况。

假设: $f_r = 50 \text{ kHz} \pm 5\%$; $k = 0.4 \pm 10\%$; $Q_1 = 30 \pm 50\%$; $Q_2 = 6 \pm 20\%$; $c_w = 3 \times 10^{-9} \text{ F} \pm 5\%$; $R_i = 10^6 \Omega \pm 5\%$; $\text{tg} \delta = 2 \times 10^{-2} \pm 10\%$; $B \cong 0.1$ 。

通过数值计算画出 φ 及 $\Delta \varphi$ 对频率的曲线。见图 3、图 4。

从图中可看到, 从一确定的水听器特性参数组所画出的曲线, 可以找到对应的最佳工作频段。在此频段内, 相位值变化较缓慢, 且相位离散度最小。从我们设定的情况, 最佳工作频段为 1kHz 到 7kHz。在此频段内, 水听器相位

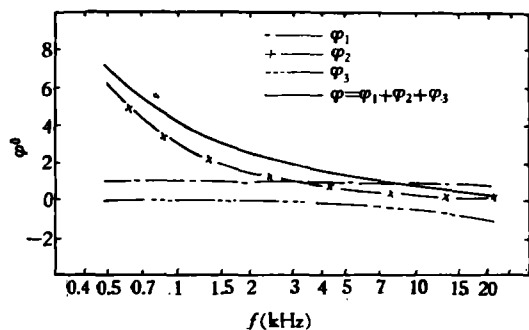


图3 相位与工作频率的曲线

变化 3° ; 离散度为 0.5° 。

四、讨 论

我们看一下 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 及 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 、 $\Delta\varphi_3$ 这二组分量的数值变化, 物理意义及选取方法。

φ_1 及 $\Delta\varphi_1$ 不随工作频率而改变, 在数值上起主要作用的是压电材料的介电损耗 $\text{tg}\delta$ 。如要减小此项数值, 可选用低耗材料, 如选用 PZT-8, 则 φ_1 及 $\Delta\varphi_1$ 可比 PZT-5 材料减小一个量级^[2]。

再看 φ_2 和 $\Delta\varphi_2$, 它们是随工作频率上升而减小的, 此项是由前置放大器输入阻和水听器低频电容组成的高通网络的相位影响。要减小此项值, 主要靠提高前置放大器的输入阻及增大水听器的低频电容。

第三项 φ_3 及 $\Delta\varphi_3$ 是随工作频率升高而增大的。此项数值主要决定于工作频率和水听器基频之比。减小此项的方向是设计带宽更宽的水听器。

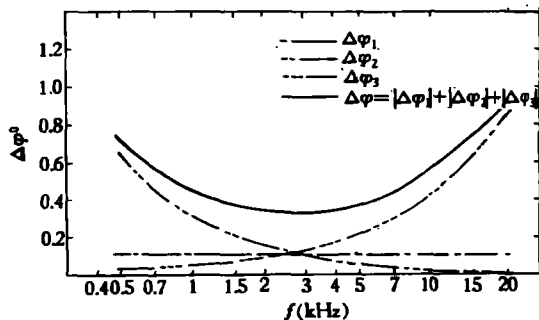


图4 相位离散与工作频率的曲线

我们推导关系式是基于水听器的基频等效电路, 如在基频以下有寄生振动就会使 φ_3 及 $\Delta\varphi_3$ 的值增大。这就要求水听器要合理设计, 在基频下接收灵敏度响应平坦, 无明显共振峰出现。至于比基频频率更高的高次模, 其影响是很小的。

五、结 论

我们推导的利用水听器常用特性参数表示的相位及其离散度的计算关系式, 使有相位要求的水听器设计及参数选择有了定量的依据, 尤其是对一些由于条件限制, 结构尺寸不适宜实测的水听器阵的相位及其离散度有一个定量的估算。这在实用上是很必要的。

参 考 文 献

- [1] R. H. 秋林, 水声学的理论基础, 科学出版社, 1959, 60—72.
- [2] H. Jaffe and D. A. BarLincourt "Piezoelectric Transducer Materials" Proc. IEEE 53, (1965), 1372.

(上接第12页)

- [2] R. Plomp, H. J. M. Steenken, *Acustica*, **38** (1973), 50.
- [3] H. Kuttuff, «Room Acoustics», Applied Science Pub. Ltd. London, 1973, 180.
- [4] 马大猷 王晓震, 建筑物理会议资料之二, 建筑声学选集, 1960, 66.

- [5] E. G. Richardson, E. Meyer, «Technical Aspects of Sound» III, 1962, 243.
- [6] Б.В. Фурдыев, 声学译丛之四, 建筑声学, 上海市物理学会声学工作委员会主编, 1962, 1.
- [7] H. D. Harwood, A. N. Burd, *Acustica*, **28** (1973), 330.