

# 空气中超声波测距系统技术 参数的设计和预报

顾 峰

(上海超声波仪器厂)

本文采用工程水声原理对空气中超声波测距系统的参数选择提供估算方法, 从而对系统性能作出数值预报和论证。

## 一、回声测距方程

由于空气中超声波吸收十分严重, 实际使用条件下的混响时间甚短, 所以按照工程水声原理采用噪声背景条件下的回声测距方程<sup>[1]</sup>有:

$$SL - 2TL + TS = NL - DI + DT$$

式中SL——声源级, TL——传播损失, TS——目标强度, NL——噪声级, DI——接收指向性指数, DT——检测阈。

下面将导出超声波在空气中传播时各个参数的表达式。

### 1. 声源级

$$\text{按定义有: } SL = 10\lg \frac{I_1}{I_0}$$

式中 $I_1$ ——在声轴上距声源1米处的声源强度。 $I_0$ ——参考声强度, 即均方根声压为 $2 \times 10^{-4}$ 达因/厘米<sup>2</sup>的平面波强度。

对于平面波, 距声源 $r$ 处声强度 $I_r$ 与均方根声压 $p_r$ 的关系为:

$$I_r = \frac{p_r^2}{\rho c} \times 10^{-7} \text{瓦/厘米}^2$$

这里 $p_r$ ——声压(达因/厘米<sup>2</sup>),  $\rho$ ——介质密度(克/厘米<sup>3</sup>),  $c$ ——声速(厘米/秒)。对于空气有:  $\rho = 1.29 \times 10^{-3}$ 克/厘米<sup>3</sup>,  $c = 34300$ 厘米/秒(相当于温度为20℃), 代入上式得:

$$\begin{aligned} I_r &= \frac{p_r^2}{1.29 \times 10^{-3} \times 34300} \times 10^{-7} \\ &= 2.26 \times 10^{-9} p_r^2 \text{瓦/厘米}^2 \\ &= 2.26 \times 10^{-5} p_r^2 \text{瓦/米}^2 \end{aligned}$$

对于一个无指向性辐射器, 此声强度对应于辐射器所辐射的声功率为:  $P_r = 4\pi r^2 I_r = 4\pi \times 2.26 \times 10^{-5} p_r^2 r^2 = 28.4 \times 10^{-5} p_r^2 r^2$ 瓦。

令 $r = 1$ 米, 则得距声源1米处的声功率为:

$$P_1 = 28.4 \times 10^{-5} p_1^2 \text{瓦。}$$

这里 $p_1$ ——距声源1米处的均方根声压。以分贝表示并注意到声源级的表达式有:

$$\begin{aligned} 10\lg P_1 &= 10\lg(28.4 \times 10^{-5}) + SL + 20\lg p_0 \text{ 这 \\ 里 } p_0 &\text{——参考声压, 对于空气有 } p_0 = 2 \times \\ &10^{-4} \text{达因/厘米}^2, \text{故得: } SL = -10\lg(28.4 \times \\ &10^{-5}) - 20\lg(2 \times 10^{-4}) + 10\lg P_1 \\ &= 109.5 + 10\lg P_1, \end{aligned}$$

对于有指向性的辐射器, 其指向性指数为 $DI_{发}$ , 此时

$$\text{有: } SL = 109.5 + 10\lg P_1 + DI_{发},$$

因为:  $DI_{发} = 10\lg \gamma_{发}$

式中 $\gamma_{发}$ ——辐射器的聚集系数。因此有:

$$SL = 109.5 + 10\lg P_1 + 10\lg \gamma_{发}。$$

辐射器的聚集系数决定于辐射器的工作频率和辐射面的几何尺寸。

### 2. 传播损失

$$\text{按定义有: } TL = 10\lg \frac{I_1}{I_r}$$

式中 $I_1$ ——距声源1米处的声强度,  $I_r$ ——距声源 $r$ 处的声强度。

传播损失是由于扩展和吸收所引起的损失之和。扩展损失表示当信号从声源向外扩展时有规则减弱的几何效应。吸收损失包括吸收和散射等效应。

### a. 扩展损失

在自由声场中，对球面扩展的情况，当不考虑介质损失时可认为穿过所有球面的功率是相等的，即有：

$$P = 4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2$$

令  $r_1 = 1$  米，则有：

$$TL_1 = 10 \lg \frac{I_1}{I_2} = 10 \lg r^2 = 20 \lg r$$

### b. 吸收损失

当平面波在吸收介质中传播时，在它传播的每一个单元小距离上都有一部分声强度损失掉。设在某一距离  $r$  上的声强度为  $I_r$ ，传过小距离增量  $dr$  时声强度损失  $dI$  由下式给出：

$$\frac{dI}{I} = -n dr$$

式中  $n$ ——比例系数。若在  $r_2$  和  $r_1$  之间积分得：

$$I_2 = I_1 e^{-n(r_2 - r_1)}$$

取对数则有：  $10 \lg \frac{I_2}{I_1} = -10n(r_2 - r_1) \lg e$

令  $\alpha = 10n \lg e$ ，则有：

$$10 \lg \frac{I_2}{I_1} = -\alpha(r_2 - r_1)$$

令  $r_2 - r_1 = r$ ，并注意到定义式  $TL = 10 \lg \frac{I_1}{I_2}$ ，

则有：

$$TL_2 = \alpha r$$

这里  $\alpha$  称作强度吸收系数。

在实际条件下，球面扩散和吸收是同时存在的。因此，总的传播损失应为扩展损失和吸收损失之和，即有：

$$TL = TL_1 + TL_2 = 20 \lg r + \alpha r$$

这里  $r$  的单位为米， $\alpha$  的单位为 dB/米。

在回声测距的情况下，双程传播损失应表示为：

$$2TL = 40 \lg r + 2\alpha r$$

吸收系数一般用实验方法测定。有一些前人的实验数据也可供参考选用<sup>[2,3]</sup>。必须指出，用声强度定义的吸收系数比用振幅定义的吸收系数大一倍<sup>[3]</sup>。

理论上吸收系数与频率的平方成正比例而变化。在气体中存在微粒时吸收将剧烈地增加<sup>[3]</sup>。

### 3. 目标强度 TS

$$\text{按定义有： } TS = 10 \lg \frac{I_r}{I_i} \Big|_{r=1}$$

式中  $I_r$ ——距目标1米处由目标反射回来的声强度， $I_i$ ——距目标1米处入射的声强度。

一般地讲，回声是反向散射贡献的总和。但对曲率半径大于波长的目标，回声基本上由镜面反射产生。各种不同形状的物体具有不同的目标强度。对于无界平面，在垂直入射时的目标强度为<sup>[1]</sup>：

$$TS = 10 \lg \frac{r^2}{4} = 20 \lg \frac{r}{2}$$

式中  $r$ ——声源离反射目标的距离。

在非垂直入射的情况下，由于接收指向性的影响，目标强度将会有明显地减小，其值可通过对接收器指向性因子进行计算来获得<sup>[4]</sup>。

### 4. 噪声级 NL

$$\text{按定义有： } NL = 10 \lg \frac{I_N}{I_0}$$

式中  $I_N$ ——在接收器处的噪声强度。 $I_0$ ——参考声强度。

噪声级一般应在使用现场环境下用实验方法测量求得。

### 5. 接收指向性指数 DI

$$\text{按定义有 } DI = 10 \lg \frac{P_{No}}{P_N}$$

式中  $P_{No}$ ——由等效无指向性接收器输出的噪声功率。

$P_N$ ——由实际接收器输出的噪声功率。

由于辐射器和接收器在作发射和接收时

的指向性是互易的，因此在实际应用中可将DI表为：

$$DI = 10 \lg \gamma_{收}$$

式中  $\gamma_{收}$  —— 接收器在作为辐射器使用时的集聚系数。

### 6. 检测阈DT

按定义有：
$$DT = 10 \lg \frac{P_s}{P_N}$$

式中  $P_s$  —— 刚好完成特定职能时的接收器输出的信号功率。 $P_N$  —— 接收器输出的噪声功率。

一般地检测阈可根据系统的特定要求来设定。

## 二、辐射器和接收器几何尺寸的估算

对于设定的工作频率和指向角，活塞式辐射器其辐射面的几何尺寸是确定的。对于圆形辐射器其指向性因子为<sup>[2]</sup>：

$$G_D = \frac{2J_1(Z)}{Z}$$

这里  $J_1(Z)$  为第一类贝塞尔函数。宗数  $Z = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \frac{\alpha}{2}$ 。令  $G_D = 0.707$ ，由数学手册查

得宗数  $Z = 1.62$ ，因此有：

$$\sin \frac{\alpha}{2} = 0.52 \frac{\lambda}{D} \text{ 或 } D = \frac{0.52\lambda}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

式中  $D$  —— 辐射器的辐射面直径， $\lambda$  —— 波长， $\alpha$  —— 辐射器指向角。

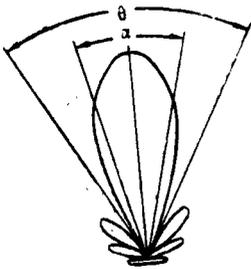


图1 辐射器指向性示图

对于矩形辐射器，其指向性因子为：

$$G_1 = \text{Sin} Z / Z$$

式中  $Z = \frac{\pi l}{\lambda} \text{Sin} \frac{\alpha}{2}$ 。令  $G_1 = 0.707$ ，由数学手册查得  $Z = 1.39$ ，因此得：

$$\text{Sin} \frac{\alpha}{2} = 0.44 \frac{\lambda}{l} \text{ 或 } l = \frac{0.44\lambda}{\text{Sin} \frac{\alpha}{2}}$$

式中  $l$  —— 辐射器的辐射面边长。

与此同时，辐射器的波束宽度或称波束最大开角  $\theta$  也是确定的。对于圆形辐射器，取  $G_D = 0$ ，由数学手册查得  $Z = 3.83$ ，故有：

$$\text{Sin} \frac{\theta}{2} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

对于矩形辐射器，取  $G_1 = 0$ ，得  $Z = \pi$ 。故有：

$$\text{Sin} \frac{\theta}{2} = \frac{\lambda}{l}$$

如果在辐射器背部及周围采用吸声材料封装，则辐射器可看作向全空间辐射的状态。对于活塞式辐射器，在这种状态下的波束集聚系数为：

$$\gamma = \frac{\pi \rho c s^2}{\lambda^2 r_s}$$

式中  $S$  —— 辐射器的辐射面积， $r_s$  —— 辐射阻抗。当  $\frac{D}{\lambda} > 2$  时<sup>[2]</sup>有  $r_s = \rho c S$ 。于是有

$$\gamma = \frac{\pi S}{\lambda^2}$$

由于空气中的声速较小，对超声频段而言波长都较短，上述条件一般均能满足。

对于向半空间辐射的状态，波束集聚系数应为向全空间辐射状态时的四倍。

如果辐射器的纵向几何尺寸与横向几何尺寸可以相比拟，则通常由于厚度与径向振动之间的耦合作用而产生特殊的振动模式。例如中间振幅最大，而四周振幅较小。这时所引起的直接后果是有效辐射面积的减小。从而引起实际指向角及最大张角比理论计算

值增大。而波束集聚系数则相应减小。

### 三、多普勒频偏的估算

在有些实际应用条件下，声源和目标是快速运动的。例如水翼艇自动驾驶系统中的超声波海浪高度传感器〔4〕。艇的航行速度高达30米/秒以上。由于声源和目标的快速相对运动而引起接收回波频率有十分明显的偏移，即多普勒频偏。下面将导出在回声测距情况下的多普勒频偏公式。

令声源运动速度为 $V_s$ ，目标运动速度为 $V_n$ ，声速为 $c$ ，声波频率为 $f_s$ 。

当声源静止而目标运动，即 $V_s = 0$ ， $V_n \neq 0$ 时，目标接收到的信号频率为：

$$f_{d1} = \frac{c + V_n}{c} f_s$$

在作相向运动时 $V_n$ 取正值，而在作背向运动时 $V_n$ 取负值。

当声源运动而目标静止，即 $V_s \neq 0$ ， $V_n = 0$ 时，目标接收到的信号频率为：

$$f_{d2} = \frac{c}{c - V_s} f_s$$

在作相向运动时 $V_s$ 取正值，而在作背向运动时 $V_s$ 取负值。

当声源和目标都运动，即 $V_s \neq 0$ ， $V_n \neq 0$ 时，我们可将频率为 $f_s$ 的运动声源视作频率为 $\frac{c}{c - V_s} f_s$ 的不动声源，于是目标接收到的信号频率为

$$f_{d3} = \frac{c + V_n}{c - V_s} f_s$$

如果我们将目标接收到的频率为 $f_{d3}$ 的信号视作声源，其运动速度为 $V_n$ ，则在辐射器点上接收到的目标回波频率为：

$$f_{d4} = \frac{c + V_s}{c - V_n} f_{d3} = \frac{c + V_s}{c - V_n} \cdot \frac{c + V_n}{c - V_s} f_s$$

于是得多普勒频偏 $\Delta f_d$ 为：

$$\Delta f_d = f_{d4} - f_s = \left( \frac{c + V_s}{c - V_n} \cdot \frac{c + V_n}{c - V_s} - 1 \right) f_s$$

$$= \frac{2V_s + V_n}{c - V_n - V_s + \frac{V_s V_n}{c}} f_s$$

通常 $V_s V_n / c$ 可以忽略不计，于是有

$$\Delta f_d \approx \frac{2(V_s + V_n)}{c} f_s \left( 1 - \frac{V_s + V_n}{c} \right)^{-1}$$

这里 $V_s$ 和 $V_n$ 在作相向运动时分别取正值，而在作背向运动时分别取负值。

由此可见，系统中的超声波接收器和接收放大器必须有足够的频带宽度，以保证所有回波信号都能被包含在整个接收系统的频带宽度之内。

### 四、结束语

依据声纳方程来解决超声波测距系统参数估算的步骤一般是先根据实际使用要求设定其中一些参数，如作用距离，辐射器指向角。而有的参数是待定的，如工作频率，可以从它们所必须遵循的条件来选定，从而对系统参数及性能作出预报和论证。

#### 参考文献

- 〔1〕 R. J. 乌立克著，洪申译，工程水声原理P. 27, 254
- 〔2〕 T. C. 金泽里等著，冯秉铨等译，声学基础P. 130, 167, 178
- 〔3〕 L. 别尔格曼著，曹大文等译，超声P. 255, 316, 319
- 〔4〕 田中哲郎著，贺玉生译，钛酸钡及其应用P. 169
- 〔5〕 顾峰，冯国俊，水翼艇超声波高度传感器技术论证