

深海外波导区声场与海底反射损失

朱柏贤 蒋继萍 王维佳

(中国科学院东海研究站)

一、引言

过去20多年中,国内外在浅海声波传播领域进行过许多研究工作^[1-2],在感兴趣的频率范围内对典型传播条件下的声场衰减规律取得了大量的理论和实验研究结果,同时还获得了有关浅海海底声学特性的一些信息。海底声学特性不仅对浅海声传播具有显著的影响,而且有时在分析深海声场中也是不可缺少的^[3,4]。

研究深海声道传播时,根据海水声速垂直分布的特殊规律性,定义声速剖面上两处相同大小的最大声速所对应的深度为声道的上边界和下边界。当声源和接收器都位于声道上、下边界以内时(内波导区),声源辐射的大部分能量被限制在波导内,因而,就形成通常的波导传播。但是,当声源或接收器,或两者都位于声道上、下边界所包含的深度以外时(外波导区),波导传播所对应的全折射声线不再存在,而只存在经由边界反射而到达观察点的反射声线。显然,沿这类路径到达接收点的声信号强度与海底的声学特性密切相关。由于深海环境的特殊性,研究深海海底声学特性一般要比研究浅海海底声学特性困难和复杂。本文通过对深海声道外波导区声场的研究,给出一种获取深海海底反射损失的声学方法。

二、理论计算

图1是实验海区测得的典型深海声速剖面,其中虚线AB标出了声道的上、下边界。为了研究外波导区声场,令声源和接收器分别位于线段AB所包含深度以外的 $P(z_p, 0)$ 和 $Q(z_q, r)$ 点,这时可测量到外波导区声场。外波导区声场主要由两类传播路径组成,一类是衍射路径,另一类是经由界面一次或多次反射的反射路径。声源处以角度 α_k 向上出射的声线在海面附近发生反转,该声线的外侧是几何影区。在Q点除了接收到沿路径PSDQ传播的衍射声之外,还接收到沿路径PBQ到达影区的一次反射声。显然,反射声强度与海底声学特性有密切的关系。假如对于观察点接收到的声信号,在实验上能够分离和识别上述两类主要传播路径,则通过计算和分析可以获得实验海区的海底反射损失。

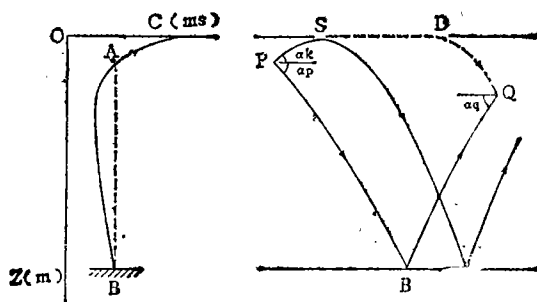


图1 深海声速剖面

设海水介质由 N 层组成,在深度 $z_i (i=0, 1, 2 \dots N)$ 处声速为 C_i ,并且 $z_0=0, z_N=H, H$ 为

深海。根据分层介质中声波传播的射线理论^[1], 计算可得声线由深度 z_{i-1} 到 z_i 的传播时间和通过的水平距离分别为

$$t_i = \frac{z_i - z_{i-1}}{2(C_i - C_{i-1})} \left(\ln \frac{1 + \sin \alpha_{i-1}}{1 - \sin \alpha_{i-1}} - \ln \frac{1 + \sin \alpha_i}{1 - \sin \alpha_i} \right) \quad (1)$$

$$r_i = (z_i - z_{i-1}) \cot \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} \quad (2)$$

设声源 P 和接收器 Q 所对应的深度序号分别为 p 和 q , 则声信号沿反射路径 PBQ 到达接收点的传播时间和通过的水平距离分别为

$$t_B = \sum_{i=p+1}^N t_i + \sum_{i=q+1}^N t_i \quad (3)$$

$$r = \sum_{i=p+1}^N r_i + \sum_{i=q+1}^N r_i \quad (4)$$

其中 t_i 和 r_i 分别由公式 (1) 和 (2) 给出, 而声线在深度 z_i 处的掠角 α_i 满足关系式

$$\frac{C_i}{\cos \alpha_i} = \frac{C_p}{\cos \alpha_p} \quad i = m, m+1, \dots, N \quad (5)$$

式中常数 $m = \min\{p, q\}$, α_p 为声线在源处的出射角。

声信号沿衍射路径 $PSDQ$ 到达接收点的传播时间为

$$t_D = \sum_{i=1}^p t_i + \sum_{j=1}^q t_j + \frac{r - r_m}{C_0} \quad (6)$$

其中

$$r_m = \sum_{i=1}^p r_i + \sum_{j=1}^q r_j \quad (7)$$

此处 t_i 和 r_i 也由公式 (3) 和 (4) 确定, 但这时掠角 α_i 满足关系式

$$\frac{C_i}{\cos \alpha_i} = C_0, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

常数 $M = \max\{q, p\}$, C_0 是海面声速, r 是声源和接收器之间的水平距离。声信号沿上述两类路径传播的时间差为

$$\Delta t = t_B - t_D \quad (9)$$

对于给定的声源和接收器空间位置, 由公式 (4), (5) 以及 (7), (8) 分别可求得沿上述两类不同路径传播的声线掠角, 再由公式 (3), (6) 和 (9) 就可计算出它们的传播时间差。当实验室信号处理时, 若能在时间域上分离不同的传播路径, 则根据 $\Delta t - r$ 的依赖关系, 可以对传播路径作出判断。

为了获得海底声学参数, 现在计算沿路径 PBQ 到达接收点的反射信号强度。设距离 R_0 处的信号强度为 $I(R_0)$, 海底反射系数的模为 $|V(\alpha_B)|$, 则反射信号的强度为

$$I_B = \frac{R_0^2 I(R_0) |V(\alpha_B)|^2}{r} \times \frac{\cos \alpha_p}{\sin \alpha_q \left| \frac{\partial r}{\partial \alpha_p} \right|} \quad (10)$$

上式中 α_p , α_q 和 α_B 分别为声线在声源, 接收器和海底处的掠角。掠角 α_i 与水平距离 r 的关系由公式 (2), (4) 和 (5) 确定。

公式(4)对 α_p 求导, 注意到公式(2)和(5), 不难求得 $\frac{\partial r}{\partial \alpha_p}$ 。把 $\frac{\partial r}{\partial \alpha_p}$ 代入公式(10), 最后得到反射信号的强度为

$$I_B = \frac{|V(\alpha_B)|^2 R_0^2 I(R_0) \cos^2 \alpha_p}{r \sin \alpha_p \sin \alpha_q} \times \left\{ \sum_{i=p+1}^N \frac{z_i - z_{i-1}}{2} \csc^2 \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} (\cot \alpha_i + \cot \alpha_{i-1}) + \sum_{i=q+1}^N \frac{z_i - z_{i-1}}{2} \csc^2 \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} (\cot \alpha_i + \cot \alpha_{i-1}) \right\}^{-1} \quad (11)$$

定义海底反射损失 $BL = -10 \log |V(\alpha_B)|^2$, 则由(11)式可得

$$BL = 10 \log I(R_0) - 10 \log I_B - 10 \log \frac{r^2 \sin \alpha_p \sin \alpha_q}{R_0^2 \cos^2 \alpha_p} - 10 \log \left\{ \sum_{i=p+1}^N \frac{z_i - z_{i-1}}{2r} \csc^2 \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} (\cot \alpha_i + \cot \alpha_{i-1}) + \sum_{i=q+1}^N \frac{z_i - z_{i-1}}{2r} \csc^2 \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} (\cot \alpha_i + \cot \alpha_{i-1}) \right\} \quad (12)$$

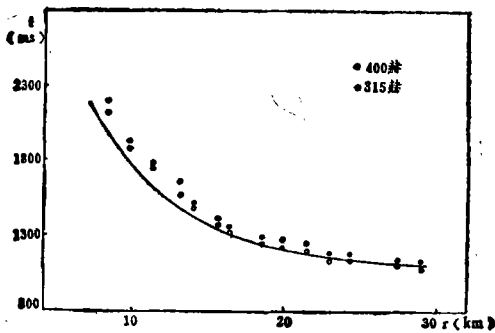


图2 $\Delta t-r$ 依赖关系

公式(12)右边第一项是距离 R_0 处的声源级, 第二项为沿路径 PBQ 到达接收点 Q 的信号级, 最后两项相应于介质非均匀性引起的附加损失。由此可见, 若我们在实验上获得沿路径 PBQ 到达接收点的反射信号级 I_B 和距离 R_0 处的声源级 $I(R_0)$, 则利用公式(12)可求得海底反射损失。

三、实验结果和讨论

深海爆炸声传播实验采用两艘船进行, 投弹船在选定的距离上投放深水信号弹, 接

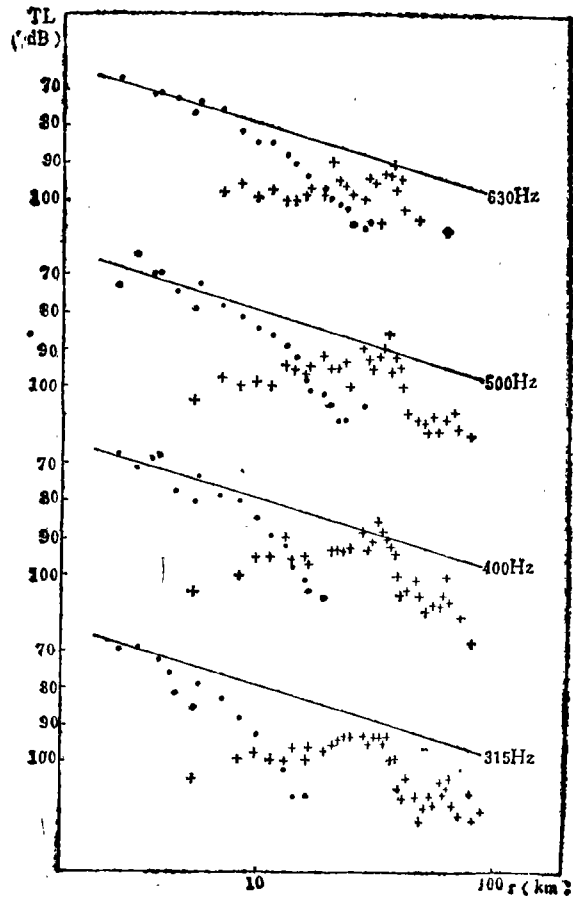


图3 声强—距离依赖关系

收船用录音机记录宽频带爆炸声信号。两船分别测量了海水的垂直温度分布和海深,实验海区的平均海深约为3600米,平均声速剖面为图1所示的典型深海水下声道,声道轴约在1000米深处,0—190米为外波导区,190—3600米为内波导区。在实验期间,投弹船还应用自返式重力采泥管取得海底表层的沉积物样品*。为了测得外波导区声场,实验取声源和接收器的深度均为50米。

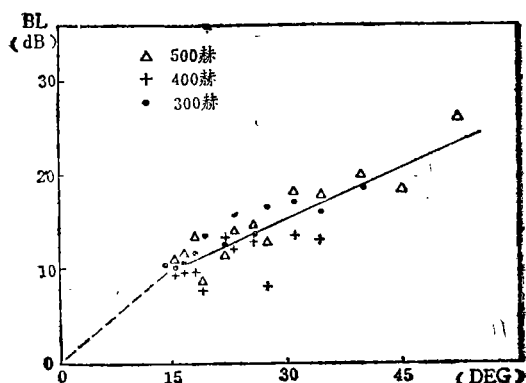


图4 海底反射损失随掠角的变化

沿路径PBQ。它们间的时间差 Δt 随水平距离 r 的增加而减小。图2给出了 $(\Delta t, r)$ 的实验值,圆点是315赫信号,圆圈是400赫信号。图中曲线是根据实测的声速剖面利用公式(3)~(9)计算得到的。从图可以看出,实验结果与理论计算是比较符合的。因此,我们可以确认这两类传播路径。量取各个距离上这两类信号的振幅,得到如图3所示不同频率声强随距离的依赖关系。图中圆点表示沿路径PSDQ到达接收点的信号,十字号表示沿路径PBQ到达接收点的信号。由图可知,第一个海底反射会聚区出现在约30公里的距离上,我们感兴趣的场区是临界声线之外,第一个海底反射会聚区以内的区域。原则上,根据实验所得这两路信号的强度比,可以估算海底反射损失。但是,由于理论计算模型与实际状况间的差异,特别是海面状况对沿路径PSDQ传播信号的影响,应用这种方法估计的海底反射损失离散很大。因此,我们采用前面理论计算时已经提到的方法,由实验确定距离 R_0 上的声源强度 $I(R_0)$,然后利用公式(3),(4)和(12)进行计算,最后可求得海底反射损失随掠角的依赖关系,所得结果画在图4中。由图可知,当声线在海底的掠角 α 从15度变化到45度时,图示三种频率的海底反射损失从10分贝变化到20分贝。对现场采集沉积物样品所作的物理分析表明,厚约1.3米的表层沉积物,其平均孔隙度约为77%,这时,声波垂直反射损失为16分贝。由此可见,直接测量沉积物物理参数估算的海底反射损失值落在声学方法所得值的变化范围之内。

以上通过对外波导区声场的分析和研究,获得实验海区的海底反射损失。虽然,所得结果带有一定的区域性质,但是,本文所应用的理论分析和实验方法,对于研究和测量深海海底声学特性具有一定的通用性。

参 考 文 献

- [1] 汪德昭, 尚尔昌, 水声学, 科学出版社, 1981, 170—255。
- [2] CLAY C. S. MEDWIN, H. ACOUSTICAL OCEANOGRAPHY, John Wiley & Sons, Inc.,

1977, 288—318.

- [3] 张仁和等, 负梯度深海中的反转点会聚区, 声学学报, 3(1981), 198—200。
- [4] 朱柏贤, 深海沉积物声速对信号时一频特性的影响, 海洋学报, 5(1983), 553—560。

• 这项实验由海洋仪器研究所进行。