

海底掩埋物的目标强度和回声信混比

万 琳 范 军 汤渭霖

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 振动、冲击、噪声国家重点实验室 上海 200030)

2004 年 9 月 23 日收到

2005 年 1 月 10 日定稿

摘要 基于两种流体介质中声散射的修正的 Kirchhoff 近似, 导出计算掩埋物回声的近似公式。应用回声计算的板块元方法和底质的地声模型, 能够计算任意形状刚性掩埋物的回声特性。海底沉积层的影响主要反映在声波在底质中传播的衰减。界面的作用主要表现在声波经过两次折射或透射产生的损失。计算结果表明, 用常规方式探测掩埋物时回声信混比总是很小, 探测是十分困难的。

PACS 数: 43.30

The target strength and echo-to-reverberation ratio of a buried target in sediment

WAN Lin FAN Jun TANG Weilin

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, State Key Laboratory of Vibration,
Shock & Noise, Shanghai Jiao Tong University Shanghai 200030)

Received Sept. 23, 2004

Revised Jan. 10, 2005

Abstract An approximate formula is derived to calculate the echo from a buried target in the sediment by the modified Kirchhoff approximation of the scattering in two liquid mediums. The echo characteristics of buried rigid targets with arbitrary shapes can be calculated by means of the planar element method and geoacoustic model of the sediment. The effects of sediment are mainly the loss of the sound propagation in the sediment and the effects of the interface are the loss generated by refraction and transmission when the wave through the interface two times. The calculation results show the echo-to-reverberation ratio of a buried target is always very low so that the detection by conventional methods is quite difficult.

引言

海底沉积层中的掩埋物, 无论是军用的水雷、还是民用的管路、沉船等, 探测的方法主要是各种声学方法。包括常规阵和参量阵的脉冲回声和成象, 合成孔径声呐成象等。总的说来, 掩埋物的探测是一项极其困难的任务, 主要因为一是声波在海底沉积物中衰减大, 二是声波经历从水体到沉积层和从沉积层到水体的两次透射, 增加了损失。因此, 在严重的海底混响背景下回声的信混比低。长期以来, 人们一直在致力于寻求掩埋物回声的计算方法。理论上, 已经研究过掩埋物是弹性球和球壳的情况, 并做过相

应的实验^[1,2]。数值计算方面, 曾尝试用 T 矩阵方法计算掩埋物的回声^[3]。但是就作者所知没有一种方法能够比较简单地估计任意形状的掩埋物的回声。

物理声学方法 (Kirchhoff 近似) 虽然不是一种精确的回声计算方法, 但是因为其简单实用而得到广泛的应用。本文的目的是将这种方法推广用于掩埋物的回声计算。在此之前已经将这一方法推广到沉底目标的情况, 成功地处理了沉底目标的回波结构和回波信混比问题^[4,5]。在对海底作出一些假定后, 可以将自由空间中的 Kirchhoff 近似推广到掩埋情况, 由此导出一种计算掩埋物回声的近似公式。利用这个公式, 结合底质的地声模型和回声计算的板块元方法能够计算任意形状凸光滑表面掩埋物的回声特性。

1 掩埋体回声的 Kirchhoff 公式和 Kirchhoff 近似

1.1 掩埋体回声的 Kirchhoff 公式

假设两层流体介质由无限大平面界面分开。散射体掩埋在下层流体介质中, 声波从上层流体介质入射, 接收也在上层介质中。在推导回声的 Kirchhoff 积分公式时取上、下两个封闭面 Ω_+ 和 Ω_- 。 Ω_+ 由上介质中无限贴近于界面的 S_{12}^+ 平面和半径无限大的上半球面构成, 内部包含有源点 r 和和场点 R 。 Ω_- 由下介质中无限贴近于界面的 S_{12}^- 平面和半径无限大的下半球面构成, 内部包含有散射表面 S , 但是不存在源点。所有表面取外法线, 见图 1 所示。

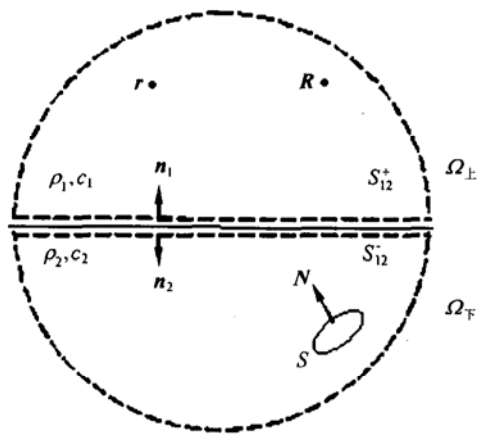


图 1 掩埋目标示意图

定义上介质中的格林函数 $G_1(r, R)$, 声场势函数可以表示为:

有掩埋物时:

$$\phi_1 = \phi_i + \phi_s + \phi_S, \quad (1)$$

$$4\pi\phi_1(R) = 4\pi\phi_i(R) + \iint_{S_{12}^+} \left[\phi_1(R^+) \frac{\partial G_1(r, R^+)}{\partial n_1} - G_1(r, R^+) \frac{\partial \phi_1(R^+)}{\partial n_1} \right] dS, \quad (2)$$

其中, ϕ_i 是直达声场, ϕ_s 是界面 S_{12}^+ 的散射场, ϕ_S 是目标散射场, $R^+ \in S_{12}^+$ 。

无掩埋物时:

$$\phi_1^0 = \phi_i + \phi_s, \quad (3)$$

$$4\pi\phi_1^0(R) = 4\pi\phi_i(R) + \iint_{S_{12}^+} \left[\phi_1^0(R^+) \frac{\partial G_1(r, R^+)}{\partial n_1} - G_1(r, R^+) \frac{\partial \phi_1^0(R^+)}{\partial n_1} \right] dS, \quad (4)$$

(2) 式减 (4) 式得到:

$$4\pi\phi_S(R) = \iint_{S_{12}^+} \left[\phi_S \frac{\partial G_1(r, R^+)}{\partial n_1} - G_1(r, R^+) \frac{\partial \phi_S}{\partial n_1} \right] dS. \quad (5)$$

定义下介质中的格林函数 $G_2(r, R)$, 源点 R 在下介质, 场点 r 在上介质。下介质中的声场可以表示为:

有掩埋物时:

$$\phi_2 = \phi_{in} + \phi_S, \quad (6)$$

0 =

$$\iint_{S_{12}^-} \left[\phi_2(R^-) \frac{\partial G_2(r, R^-)}{\partial n_2} - G_2(r, R^-) \frac{\partial \phi_2(R^-)}{\partial n_2} \right] dS + \iint_S \left[\phi_2(R_S) \frac{\partial G_2(r, R_S)}{\partial N} - G_2(r, R_S) \frac{\partial \phi_2(R_S)}{\partial N} \right] dS \quad (7)$$

其中, ϕ_{in} 是入射声场, ϕ_S 是掩埋物散射声场, $R^- \in S_{12}^-$, $R_S \in S$, N 是下介质中掩埋物表面 S 的外法线向量。

无掩埋物时:

$$\phi_2^0 = \phi_{in}, \quad (8)$$

$$0 = \iint_{S_{12}^-} \left[\phi_{in} \frac{\partial G_2(r, R^-)}{\partial n_2} - G_2(r, R^-) \frac{\partial \phi_{in}}{\partial n_2} \right] dS. \quad (9)$$

(7) 式减 (9) 式得到:

$$0 = \iint_{S_{12}^-} \left[\phi_S \frac{\partial G_2(r, R^-)}{\partial n_2} - G_2(r, R^-) \frac{\partial \phi_S}{\partial n_2} \right] dS + \iint_S \left[\phi_S \frac{\partial G_2(r, R_S)}{\partial N} - G_2(r, R_S) \frac{\partial \phi_S}{\partial N} \right] dS. \quad (10)$$

根据界面上声场连续的条件:

$$\begin{aligned} \phi_1(R^+) &= m\phi_2(R^-), \\ G_1(r, R^+) &= mG_2(r, R^-), \quad m = \frac{\rho_2}{\rho_1} \\ \frac{\partial \phi_1(R^+)}{\partial n_1} &= -\frac{\partial \phi_1(R^-)}{\partial n_2}, \\ \frac{\partial G_1(r, R^+)}{\partial n_1} &= -\frac{\partial G_2(r, R^-)}{\partial n_2}. \end{aligned} \quad (11)$$

并结合 (10) 式可证:

$$\begin{aligned} &\iint_{S_{12}^+} \left[\phi_S \frac{\partial G_1(r, R^+)}{\partial n_1} - G_1(r, R^+) \frac{\partial \phi_S}{\partial n_1} \right] dS = \\ &-m \iint_{S_{12}^-} \left[\phi_S \frac{\partial G_2(r, R^-)}{\partial n_2} - G_2(r, R^-) \frac{\partial \phi_S}{\partial n_2} \right] dS = \\ &m \iint_S \left[\phi_S \frac{\partial G_2(r, R_S)}{\partial N} - G_2(r, R_S) \frac{\partial \phi_S}{\partial N} \right] dS, \end{aligned}$$

代入 (5) 式得到散射场满足的 Kirchhoff 积分方程:

$$4\pi\phi_S(R) = m \iint_S \left[\phi_S \frac{\partial G_2(r, R_S)}{\partial N} - G_2(r, R_S) \frac{\partial \phi_S}{\partial N} \right] dS. \quad (12)$$

形式上与自由空间中的 Kirchhoff 积分方程相似, 积分号前面的 m 是由于上、下介质密度不同引起的。需

要注意的是这里的 $G_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}_s)$ 是下介质中的源点 $\mathbf{R}_s$ 到上介质中的场点 $\mathbf{r}$ 的 Green 函数。

1.2 掩埋体回声的 Kirchhoff 近似

直接解算 (12) 式的积分方程工作量很大, 不适合于工程计算。下面在此基础上导出回声计算的 Kirchhoff 近似公式。假设:

(a) 密度 ρ_1 的水介质无损耗, 声速 c_1 和波数 k_1 是实数。密度 ρ_2 的海底沉积层是有损耗的液态介质, 其中只存在有衰减的纵波, 声速 $\tilde{c}_2 = c_2(1 - i\eta)$ 和波数 $\tilde{k}_2 = k_2(1 + i\eta)$ 是复数。

(b) 沉积层是均匀的半无限介质, 下面不存在其他的界面。

(c) 入射声波的掠射角超过临界角, 下介质中传播正常波。

(d) 声波频率不十分低 ($k_1 a > 5, k_2 a > 5$, a 是掩埋体的特征尺度), 物理声学方法适用。

设无限远单频平面波以入射角 θ_1 从水体入射到海底界面, 按照假设 a、b 和 c, 海底介质中产生折射角为 θ_2 的折射或透射波。透射系数可以根据两种介质的声阻抗求得。现在海底介质的阻抗是复数, 且随频率变化。透射波经过掩埋物散射后再从下介质透射回水体。对于收—发合置情况只关心从原方向返回的声波。

如果不考虑界面的影响, 在下介质中物体的散射如同自由空间中一样, 因此物理声学方法或 Kirchhoff 近似仍适用。根据物理声学的基本假设, 只有处在亮区的那部分表面对回波有贡献。值得注意的是, 由于声线的折射物体在沉积层中的亮区和在水中时有所不同, 亮点的位置也有所不同。

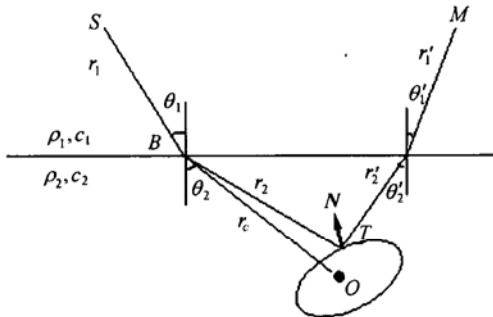


图 2 掩埋目标回声计算示意图

由于界面的存在, 从物体上散射的波可能在界面和物体之间发生多次反射和散射。但是, 绝大多数情况下多次反射的声波不能沿原方向返回。当掩埋体是凸光滑表面时只有当反射声线和界面垂直时才可能返回入射方向。但这种情况很少发生。此外, 由于沉积层中波的衰减严重, 多次反射波衰减很快。综合这两个因素, 可以忽略界面引起的多次反射声的贡献。

回声主要由下介质中表面亮区产生, 这部分回声可以用 Kirchhoff 近似计算。

首先推导上介质中的源点在下介质中产生的格林函数 G_1 , 物理上它就是上介质的点源入射到下介质中的声场。如图 2 所示, 假设从源点 S 出发并在分界面上按几何光学定律折射的射线到达下介质中的点 T , 这根射线就是 SBT。

由折射定律得到入射角 θ_1 和折射角 θ_2 的关系:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2} = n, \quad c_2 \cos \theta_1 d\theta_1 = c_1 \cos \theta_2 d\theta_2,$$

其中 n 是折射率, 在分析声线的折射时可以忽略声速 $\tilde{c}_2$ 的虚部的影响。在几何光学近似下, T 点的相位由射线的声程确定为 $\tilde{k}_2 r_2 + k_1 r_1$ 。 T 点波的振幅由射线管内能流守恒的条件确定。文献 6 已经导出球面波入射到下介质中的折射波声势:

$$G_1(\mathbf{r}_1, \mathbf{R}_s) = \phi_i(\mathbf{R}_s) = \frac{2\sqrt{\sin \theta_1}}{(m \cos \theta_1 + n \cos \theta_2) \Delta^{1/2}} e^{ik_1 r_1} e^{i\tilde{k}_2 r_2}, \quad (13)$$

$$\Delta = (r_1 \sin \theta_1 + r_2 \sin \theta_2) \left(\frac{r_1}{\cos^2 \theta_1} + \frac{r_2}{n \cos^2 \theta_2} \right). \quad (14)$$

文献 6 指出, (13) 式在声源和目标到分界面的距离比波长充分大时成立。将上、下介质的特性互换, 可以推出下介质中的源点 $\mathbf{R}_s$ 到上介质中的场点 $\mathbf{r}'_1$ 的 Green 函数 $G_2(\mathbf{r}'_1, \mathbf{R}_s)$:

$$G_2(\mathbf{r}'_1, \mathbf{R}_s) = \frac{2\sqrt{\sin \theta'_2}}{\left(\frac{1}{m} \cos \theta'_2 + \frac{1}{n} \cos \theta'_1 \right) \Delta'^{1/2}} e^{ik_1 r'_1} e^{i\tilde{k}_2 r'_2}, \quad (15)$$

$$\Delta' = (r'_1 \sin \theta'_1 + r'_2 \sin \theta'_2) \left(\frac{r'_1}{\cos^2 \theta'_1} + \frac{nr'_2}{\cos^2 \theta'_2} \right), \quad (16)$$

所有带撇的量见图 2。

(2) 水下掩埋体目标强度计算公式

假设掩埋在下介质中的目标表面刚硬, 所以 (12) 式中:

$$\phi_s(\mathbf{R}_s) = \phi_i(\mathbf{R}_s), \quad \frac{\partial(\phi_s + \phi_i)}{\partial N} = 0. \quad (17)$$

将 (13) 和 (15) 式代入 (12) 式, 在对法向量 N 求导时作出一些近似并经过一系列繁琐的计算, 对于收—发合置情况得到:

$$\phi_s(\mathbf{r}) = \frac{m}{2\pi} \int_S \left[\phi_i(\mathbf{R}_s) \frac{\partial G_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}_s)}{\partial N} \right] dS \quad (18)$$

后最终得到散射声势:

$$\phi_s(\mathbf{r}) = -\frac{mT_1(\theta_1)T_2(\theta_2)}{2n\pi} \left(\frac{i\tilde{k}_2 \cos \theta_1}{r_1^2 \cos \theta_2} \right) e^{2ik_1 r_1} \int_S e^{2i\tilde{k}_2 r_c} e^{2i\tilde{k}_2 \Delta r_2} \cos \alpha dS, \quad (19)$$

其中 $T_1(\theta_1)$ 是入射角为 θ_1 的平面波向下介质的透射系数^[6]:

$$T_1(\theta_1) = \frac{2m \cos \theta_1}{(m \cos \theta_1 + n \cos \theta_2)}, \quad (20)$$

$T_2(\theta_2)$ 是下介质中入射角为 θ_2 的平面波向上介质的透射系数:

$$T_2(\theta_2) = \frac{2 \frac{1}{m} \cos \theta_2}{\left(\frac{1}{m} \cos \theta_2 + \frac{1}{n} \cos \theta_1 \right)}, \quad (21)$$

$$\cos \alpha = \frac{\partial r_2}{\partial N}, \quad r_2 = r_c + \Delta r_2, \quad (22)$$

r_c 是从界面上 B 点到目标参考点 O 的距离, 是入射和反射声波在下介质中的平均传播距离, 见图 2 所示。 Δr_2 是目标表面点相对于参考点的距离增量。

声呐技术中传统的目标强度 TS 定义在离目标等效声中心 1 m 处的回声强度与入射到目标的声强度之比的 10 倍对数值。对于掩埋目标, 声中心 1 m 处可能在海底中。按此定义的目标强度不能直接用于声呐方程, 因为声波经历界面的两次透射而且还在底质中传播一段距离, 这段距离虽然不长但衰减却很大。这些因素必须另外计算。为了便于声呐应用, 以界面上入射点和目标回声到达点 B 为参考点, 将掩埋目标的目标强度定义为离该点 1 m 处的回声强度与入射到该点的声强度之比的 10 倍对数值:

$$TS = 10 \lg \frac{I_s^{(T)} \Big|_{1 \text{ m}}}{I_i^{(T)}}, \quad (23)$$

这样定义的目标强度可以直接用于声呐方程, 而且可以与海底混响比较以计算信混比。由 (19) 式取 $I_i^{(T)} = (e^{ik_1 r_1}/r_1)^2$ 得到:

$$TS \approx 10 \lg \left(\left| \frac{m T_1 T_2 \cos \theta_1}{n \cos \theta_2} \right|^2 e^{-2\eta k_2 r_c} \left| \frac{\tilde{k}_2}{2\pi} \int_S e^{2i\tilde{k}_2 \Delta r_2 \cos \alpha} dS \right|^2 \right), \quad (24)$$

将此式表示成:

$$TS = TS_0 + \Delta_1 + \Delta_2, \quad (25)$$

其中:

$$TS_0 = 10 \lg \left| \frac{\tilde{k}_2}{2\pi} \int_S e^{2i\tilde{k}_2 \Delta r_2 \cos \alpha} dS \right|^2 \approx 10 \lg \left| \frac{k_2}{2\pi} \int_S e^{2ik_2 \Delta r_2 \cos \alpha} dS \right|^2 \quad (26)$$

是下介质中的目标强度, 就像发射-接收都处在无限大的下介质中,

$$\Delta_1 = 10 \lg \left| \frac{m T_1 T_2 \cos \theta_1}{n \cos \theta_2} \right|^2 \quad (27)$$

是声波经过两次折射或透射引起的目标强度变化,

$$\Delta_2 = 10 \lg |e^{-2\eta k_2 r_c}|^2 = -2 \times 8.68 \times \eta k_2 r_c \quad (28)$$

是声波在下介质中双程传播衰减导致的目标强度降低。

2 海底沉积层基本声学特性^[7]

(28) 式中的 η 可以从地声模型和测量的经验公式得到。Hamilton 总结的沉积层中纵波的衰减系数是:

$$\alpha = K f^\gamma \quad (\text{dB/m}) \quad (29)$$

其中, f 是频率, 以 kHz 计。 K, γ 是经验常数, $\gamma \approx 1$, K 与孔隙度有关, 当孔隙率在 35% ~ 60% 时 $K \approx 0.5$ 。 1 kHz 频率声波的衰减大约为 0.3 ~ 0.5 dB/m。 复波数 $\tilde{k}_2 = k_2(1 + i\eta)$ 中的 η 和 α 的联系是:

$$\eta = \frac{\alpha c_2}{2\pi f \times 8.68} = \frac{K c_2}{2\pi \times 8.68} \quad (30)$$

因为 α 中的频率以 kHz 计, 所以最后一式中的 c_2 要以 km/s 计。例如, 当 $K \approx 0.5$, $c_2 = 1700$ m/s 时 $\eta = 0.0156$, 其值远小于 1。将 (30) 式代入 (28) 式得到:

$$\Delta_2 = -2K f r_c, \quad (31)$$

其中 f 以 kHz 计, r_c 以 m 计。

3 水下掩埋目标的目标强度和回波信混比算例

3.1 球形目标

设半径为 0.266 m 的刚性球形目标掩埋入海底。取淤泥海底声速 1623 m/s, 密度 1.767 g/cm³, 海底吸收系数 $K = 0.673$ 。为了适应水声的习惯, 下面的结果中用入射角的余角-掠射角表示。

(a) 掠射角的影响: 设掩埋深度 (球心到界面距离) 0.566 m。图 3 给出当探测频率为 5 kHz, 15 kHz 和 30 kHz 时目标强度随掠射角的变化, 并将他们与该球形目标在自由空间的目标强度对比。由图可见, 频率越高目标强度比自由空间的值减小越多, 因为频率越高声波在底质中的衰减越大。在相同频率, 目标

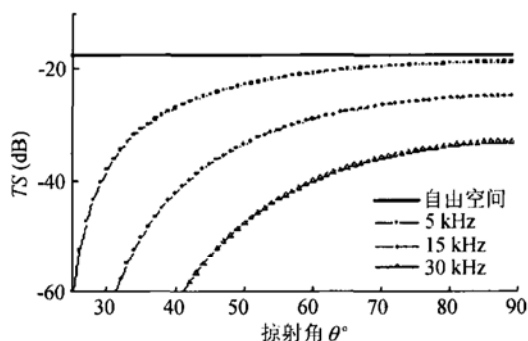


图 3 球形掩埋目标 TS 随掠射角的变化球半径 0.266 m, 掩埋深度 0.566 m。

强度随掠射角的增加而增加, 因为随着掠射角的增加, 声波透射到淤泥介质中的能量增加, 同时声波在淤泥介质中的声程减小, 衰减减弱。

(b) 掩埋深度的影响: 固定探测的掠射角 30° 。图 4 给出探测频率为 10 kHz, 15 kHz 和 20 kHz 时目标强度随掩埋深度的变化。由图可见, 在各个频率目标强度都随掩埋深度的增加而近似线性减小。不过频率越高减小的斜率越大。因为随着掩埋深度的增加, 声波在淤泥介质中的声程近似线性增加。从数值上看, 对于 10 kHz 频率掩埋深度达到 1 m 时目标强度已降低 20 dB。

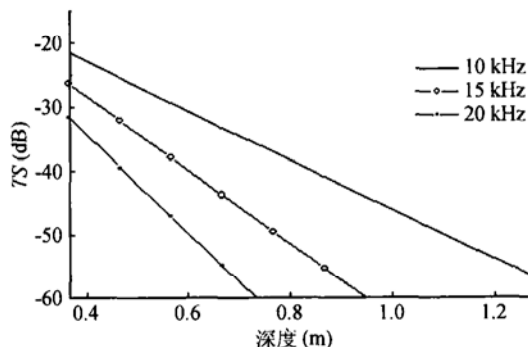


图 4 球形掩埋目标 TS 随掩埋深度的变化
半径 0.266 m, 掠射角 30°

3.2 球-圆柱组合目标

球柱形目标由半球和圆柱合成, 球半径 0.266 m, 柱半径 0.266 m, 柱长 1.599 m。假设它平行掩埋在海底中, 见图 5。掩埋深度定义为目标上沿与界面的距离。淤泥海底参数同上, 另取损耗较小的黏泥海底以资比较。黏泥海底声速 1546 m/s, 密度 1.469 g/cm^3 , 海底吸收系数 $K = 0.095$ 。计算结果如下:

(a) 掠射角的影响: 设底质为淤泥, 掩埋深度 0.5 m, 探测的方位角 60° , 探测频率为 5 kHz, 15 kHz 和 30 kHz。图 6 给出目标强度随掠射角的变化。基本规律与球形目标类似, 整体趋势上目标强度随掠射角的增加而增加。但因为球柱形目标的回波比较复杂, 目标强度随掠射角有起伏变化。

(b) 掩埋深度的影响: 设底质为淤泥, 探测的掠射角 45° , 方位角 30° , 探测频率为 5 kHz, 15 kHz, 30 kHz 和 50 kHz。图 7 给出目标强度随掩埋深度的变化。其变化规律与球形目标相同。目标强度随掩埋深度的增加而近似线性减小, 频率越高减小的速率越大。

(c) 沉积层的影响: 设目标掩埋深度 1 m, 探测频率 30 kHz, 探测的掠射角 45° 。图 8 给出两种底质中目标强度随方位角的变化, 并将他们与自由空间中的值比较。由图看出底质的影响很大。在相同方位

角时, 掩埋入黏泥的目标强度只比自由空间的值小 5 dB 左右, 而掩埋入淤泥的目标强度比自由空间的值小达 50 dB 左右。这是因为声波在黏泥介质中的吸收较小在淤泥介质中的吸收很大。

(d) 球柱形目标的回波信混比: 假定声纳频率为 10 kHz, 脉冲宽度为 8 ms, 换能器波束宽度为 7° , 换能器置放在离淤泥海底上 50 m 处。海底反向散射强度在掠射角为 30° 附近近似取 $-27 \text{ dB}^{[8]}$ 。将目标埋入淤泥海底 0.3 m, 探测的掠射角为 30° 。



图 5 球柱形目标掩埋入海底

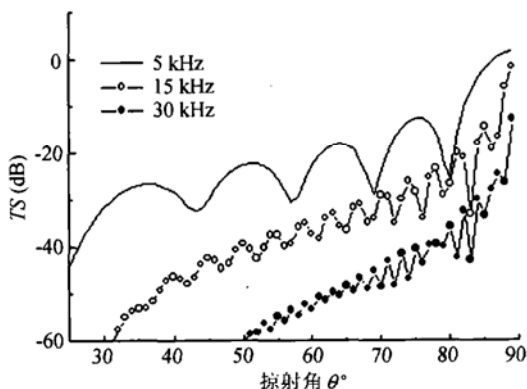


图 6 球柱形目标掩埋在淤泥层中的 TS 随掠射角的变化

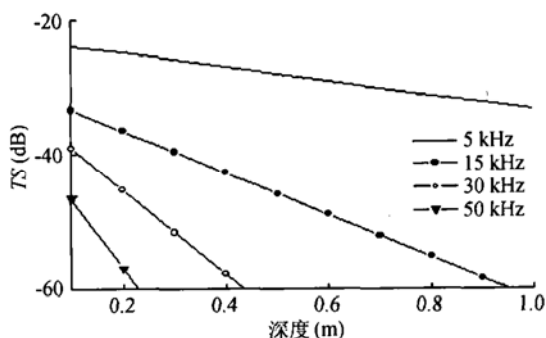


图 7 球柱形目标在淤泥层中的 TS 随掩埋深度的变化

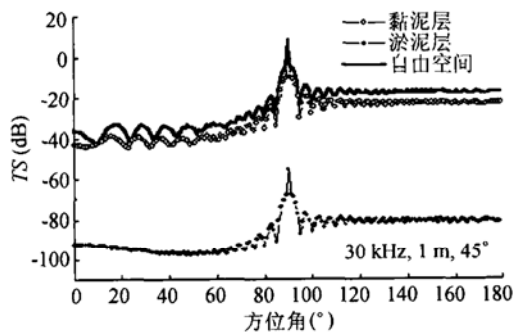


图 8 球柱形目标在自由空间、黏泥层和黏泥层中的 TS 随方位角的变化

根据 Urick 的“水声原理”^[8] 回波信混比是:

$$EL - RL = TS - (S_B + 10 \log A)$$

其中, A 是混响面积, S_B 是海底反向散射强度。图 9 给出回波信混比随探测方位角的变化。从图中可见, 只有在方位角 90° 和 270° 附近很小的范围, 信混比接近于 0 dB; 在方位角从 90° 到 270° 的绝大部分角度内信混比在 -20 dB 左右, 因为这一侧有半球面的回波; 当方位角处在 $0^\circ \pm 90^\circ$ 角度内信混比很小, 一般小于 -25 dB, 只有在 $0^\circ \pm 15^\circ$ 范围内, 信混比大于 -25 dB, 因为有圆柱的平端面起作用。

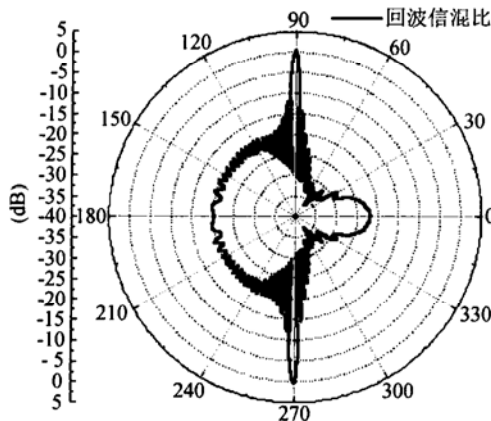


图 9 球柱形目标在淤泥层中的回波信混比随方位角的变化

4 小结

提出了一种计算海底沉积层中的掩埋物回声目标特性的近似方法, 此方法基于两层液态介质的 Kirchhoff 近似。结合底质的地声模型和回声计算的板块元方法能够计算任意形状凸光滑表面刚性掩埋物的回声特性。

近似计算公式的分析表明, 海底沉积层的影响主要反映在声波在底质中传播的衰减, 衰减因子随

频率的升高成正比增加, 因此频率高时沉积层内的衰减很大。界面的作用主要表现在声波经过两次折射或透射产生的损失。

数值计算的例子说明, 对于常规的探测方式掩埋物的回声信混比总是很小的, 采用低频、窄波束和大掠射角工作方式有利于掩埋物的探测。

参 考 文 献

- 1 Kristensson G, Strom S. Scattering from buried inhomogeneities—a general three-dimensional formalism. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1978; **64**(3): 917—936
- 2 Lim R, Lopes J L, Hackman R H, Todoroff D G. Scattering by objects buried in underwater sediments: Theory and experiment. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993; **93**(4): 1762—1783
- 3 Sammelmann G S, Hackman R H. Acoustic scattering in a range independent shallow water waveguide with a penetrable bottom, *Proc. Oceans'89*, 1989: 1162—1167
- 4 汤渭霖. 用物理声学方法计算界面附近目标的回波. *声学学报*, 1999; **24**(1): 1—5
- 5 万琳, 范军, 汤渭霖. 沉底水雷目标强度与回声信混比. *声学学报*, 2003; **28**(5): 429—433
- 6 布列霍夫斯基赫著, 杨训仁译. 分层介质中的波 (第二版). 北京: 科学出版社, 1985
- 7 汪德昭, 尚尔昌. 水声学. 北京: 科学出版社, 1980
- 8 尤立克 R J 著, 洪申译. 水声原理. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990

附录: 水下掩埋体目标强度计算公式

首先要求出 $\partial\phi_s/\partial N$ 和 $\partial G_2/\partial N$. 由于源点距离界面很远 (即 $r_1/r_2 \gg 1$), 近似认为 r_1 随目标的法向没有变化即 $\partial r_1/\partial N = 0$, 得到:

$$\frac{\partial\phi_s}{\partial N} = -\frac{\partial\phi_i}{\partial N} \approx \frac{\partial\phi_i}{\partial r_2} \frac{\partial r_2}{\partial N} = \frac{\partial\phi_i}{\partial r_2} \cos\alpha_1,$$

由公式 (13) 和 (14) 得到:

$$\frac{\partial\phi_i}{\partial N} = \frac{2\sqrt{\sin\theta_1} \left[i\tilde{k}_2\Delta - \frac{1}{2} \left(\frac{2\sin\theta_2}{n\cos^2\theta_2} r_2 + \frac{\sin\theta_2}{\cos^2\theta_1} r_1 + \frac{\sin\theta_1}{n\cos^2\theta_2} r_1 \right) \right]}{(m\cos\theta_1 + n\cos\theta_2)(\Delta)^{3/2}} e^{ik_1 r_1} e^{i\tilde{k}_2 r_2} \cos\alpha_1, \quad (F1)$$

类似地由公式 (15) 和 (16) 得到:

$$\frac{\partial G_2}{\partial N} = \frac{2\sqrt{\sin\theta'_2} \left[i\tilde{k}_2\Delta' - \frac{1}{2} \left(\frac{2\sin\theta'_2}{\cos^2\theta'_2} r'_2 + \frac{n\sin\theta'_2}{\cos^2\theta'_1} r'_1 + \frac{\sin\theta'_1}{\cos^2\theta'_2} r'_1 \right) \right]}{\left(\frac{1}{m} \cos\theta'_2 + \frac{1}{n} \cos\theta'_1 \right) (\Delta')^{3/2}} e^{ik_1 r'_1} e^{i\tilde{k}_2 r'_2} \cos\alpha_2. \quad (F2)$$

考虑收-发合置的情况, 取 $\theta_1 = \theta'_1$; $\theta_2 = \theta'_2$; $r_1 = r'_1$; $r_2 = r'_2$; $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$; $\Delta' = n\Delta$, 可以证明:

$$\phi_s \frac{\partial G_2}{\partial N} = -G_2 \frac{\partial\phi_s}{\partial N} = \frac{4\sqrt{\sin\theta_1 \sin\theta_2} \left[i\tilde{k}_2\Delta - \frac{1}{2} \left(\frac{2\sin\theta_2}{n\cos^2\theta_2} r_2 + \frac{\sin\theta_2}{\cos^2\theta_1} r_1 + \frac{\sin\theta_1}{n\cos^2\theta_2} r_1 \right) \right]}{\left(2\cos\theta_1 \cos\theta_2 + \frac{n}{m} \cos^2\theta_2 + \frac{m}{n} \cos^2\theta_1 \right) \Delta^2 n^{1/2}} e^{2ik_1 r_1 + 2i\tilde{k}_2 r_2} \cos\alpha. \quad (F3)$$

因此对于收-发合置情况得到正文 (18) 式。取近似 $r_1/r_2 \gg 1$, 有 $\Delta \approx r_1^2 \sin \theta_1 / \cos^2 \theta_1$, 于是:

$$\phi_s \frac{\partial G_2}{\partial N} \approx \frac{4\sqrt{\sin \theta_1 \sin \theta_2} \left[\frac{\tilde{k}_2 \cos^2 \theta_1}{r_1^2 \sin \theta_1} - \frac{1}{2r_1^3} \left(\frac{\cos^2 \theta_1 \sin \theta_2}{\sin^2 \theta_1} + \frac{\cos^4 \theta_1}{n \sin \theta_1 \cos^2 \theta_2} \right) \right]}{\left(2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{n}{m} \cos^2 \theta_2 + \frac{m}{n} \cos^2 \theta_1 \right) n^{1/2}} e^{2ik_1 r_1 + 2i\tilde{k}_2 r_2 \cos \alpha}. \quad (\text{F4})$$

利用 (20) 和 (21) 式表示的两个透射系数及 $n = \sin \theta_1 / \sin \theta_2$, 得到:

$$\phi_s \frac{\partial G_2}{\partial N} \approx \frac{T_1 T_2 \left[\frac{\tilde{k}_2 \cos \theta_1}{r_1^2 \cos \theta_2} - \frac{1}{2r_1^3} \left(\frac{\cos \theta_1}{n \cos \theta_2} + \frac{\cos^3 \theta_1}{\cos^3 \theta_2} \right) \right]}{n} e^{2ik_1 r_1 + 2i\tilde{k}_2 r_2 \cos \alpha}. \quad (\text{F5})$$

再进一步近似, 取 $|\tilde{k}_2| r_1 \gg 1$ 最终得到正文 (19) 式的散射声势。