

# 典型浅海地声模型下的反射波特性初步研究

杨 挺

(同济大学海洋地质与地球物理系 上海·200092)

本文给出了一种典型浅海地声模型下,波动方程有限差分正演的计算方法,并详细分析了沉积层的顶层速度、厚度、速度梯度、密度梯度,以及震源特性等参数变化时反射波受其影响的一般规律;而且对于航道底部的浮泥层作了重点研究,从而得到了浮泥层的容重变化率及其厚度对反射波的影响规律,以及浮泥厚度与反射波特征谱之间的关系。这对于解决长江口航道的安全行船深度这一实际问题是很有意义的。

## Preliminary study on reflection characteristics of a typical geo-acoustic modeling of shallow water

YANG Ting

(Tongji University, Shanghai · 200092)

Forward modeling, which simulates the signals reflected from seabed, is an effective approach in underwater geo-acoustic detection research. This paper presents a wave-equation-based, finite-difference modeling algorithm, which is concerned with a typical geo-acoustic modeling of shallow water, and analyses, in detail, the pattern followed by variation of reflection with the coefficient of sediment such as upper velocity, thickness, speed gradient, density gradient and the nature of source. Additionally, more attention has been paid to a practical modeling waterway and we obtained the law of the dependence of reflected wave on the thickness and density gradient of the floating mud in waterway, and relationship between the thickness of floating mud and the feature spectrum of reflection. All this will be the bases of the following research concerning with determining the navigable depth of a waterway.

### 1 引言

现代水下地声探测技术经历了从定形到定性的发展过程,现在已进入了一个全新的阶段,即利用海底反射波的特征对沉积物的地声参数进行定量的预测<sup>[1]</sup>。这就要求我们必须了解海底参数变化对于反射波的影响规律,才能充分利用反射波的信息来确定海底参数。

浅海环境中有一种典型的地声模型<sup>[2]</sup>,如图1所示,即在海水和均匀硬质基底之间有一层厚度有限的不均匀的沉积层,它的密度和声速等地声参数均随深度连续变化。了解这一沉积层特性有很大的意义,地声领域的许多学者对它都作过研究<sup>[3,4]</sup>,但他们都是在理论上通过对平面波反射系数和反射损失的分析来研究介质参数对反射的影响,这样只能描述较窄频带的信号与海底的相互作用,而实际震

源产生的常常是宽频信号,而且,反射系数和反射损失在实际中都不能直接测得。因而,直接模拟海底反射信号是进行这种研究的有效方法。对于不同的理论地声模型进行正演模拟,可以得到反射波随介质参数变化的规律。通过实测信号与模拟信号的比较,我们也能分辨出那些无法预料的复杂因素对反射波的影响,从而为实际资料解释以及反演海底结构和参数提供理论依据。

上述模型在实际浅海环境中广泛存在,长江口航道就是其中的一种,在航道的基底之上沉积着一层浮泥,这一浮泥层的厚度和容重对于航道的行船安全性至关重要,如果能通过海底反射波特性来确定浮泥层的容重和厚度,那将是具有很大经济效益的。为了进行这一课题的研究,中科院东海研究站张叔英教授等人在实验室里对长江口和杭州湾航道内

\* 收稿日期: 96-12-27

的浮泥进行了声速和声衰减等参数的测定<sup>[5]</sup>, 结合上海航道勘察设计院提供的资料<sup>[6-7]</sup>, 我们发现, 浮泥层的密度近似线性增大, 而声速的变化则不明显。所以可以认为航道中的浮泥层是典型模型的特殊情况, 即其声速保持不变, 而密度线性增大。

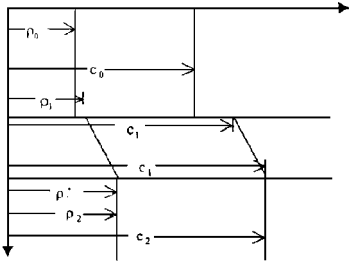


图1 典型地声模型

本文给出了图1所示典型模型下, 波动方程有限差分正演的计算方法, 并详细分析了模型中各参数变化对于反射波影响的一般规律。而且对于航道内的浮泥层做了重点研究, 从而得到了浮泥层的容重变化率及其厚度对反射波的影响规律。这对于确定浮泥层的厚度和容重以及最终解决航道的安全行船深度问题是有一定意义的。

需要指出的是, 在下面的正演算法中, 没有考虑波传播过程中的衰减效应, 这是因为我们的研究是针对航道内的浮泥层, 其厚度只有1米左右, 因而波传播的距离非常有限, 当震源频率不高时(如: 5kHz左右), 衰减的能量很小, 按在实验中所测得的衰减常数计算, 这时, 衰减的能量在两个分贝以内, 因而忽略衰减效应是合理的。

## 2 正演算法

因为介质参数随深度的连续变化, 我们选用如下形式的波动方程来描述波的传播:

$$\rho(z) \frac{\partial^2 P(z, t)}{\partial z^2} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(z) \frac{\partial P(z, t)}{\partial z} \right] = 0 \quad (1)$$

$P$  为声压,  $\lambda(z)$ 、 $\rho(z)$  分别是随深度变化的体积压缩模量和密度, 传播速度  $c(z)$  由  $\lambda(z)/\rho(z)$  来确定。

正演问题可以表示为在边界条件  $\lambda(z) \hat{q}(z, t)/\partial z|_{z=0} = -g(t)$ ,  $p(z, t) = 0, t \in (0, T)$  和初值条件  $p(z, 0) = 0$ ,  $\hat{q}(z, t)/\partial t|_{t=0} = 0, z \in (0, Z)$  以及如图1所示的地声模型下, 求解方程(1)。其中,  $g(t)$  为震源,  $T$ 、 $Z$  分别为最大时间和深度。

在沉积层中, 因为速度和密度线性变化, 故令

$$\rho(z) = \rho_1 (1 + b_1 * z), \quad c = c_1 (1 + b_2 * z)$$

其中,  $b_1$ 、 $b_2$  分别为密度和速度梯度, 并由  $c(z)$  和  $\rho$

( $z$ ) 来确定  $\lambda(z)$ 。

我们选用 Lax-Wendroff 格式的有限差分法来计算波场<sup>[8]</sup>。令

$$u(z, t) = \frac{\partial v(z, t)}{\partial z}, \quad v(z, t) = \rho(z) \frac{\partial p(z, t)}{\partial z}$$

则方程(1)可写为:

$$\begin{cases} \partial u / \partial t = \partial [v / \rho(z)] / \partial z \\ \partial v / \partial t = \partial [\lambda(z) u] / \partial z \end{cases} \quad (2)$$

对  $u(z, t)$ 、 $v(z, t)$  进行泰勒展开, 并利用(2)式, 得:

$$\begin{aligned} u_j^{n+1} &= u_j^n + \frac{\tau}{2h} \left[ \frac{v_{j+1}^n}{\rho(j+1)} - \frac{v_{j-1}^n}{\rho(j-1)} \right] \\ &+ \frac{\tau^2}{2h^2} \left\{ \frac{\lambda(j+1)}{\rho(j+1)} u_{j+1}^n - \left[ \frac{\lambda(j)}{\rho(j+1)} + \frac{\lambda(j)}{\rho(j)} \right] u_j^n \right. \\ &\left. + \frac{\lambda(j-1)}{\rho(j-1)} u_{j-1}^n \right\} \\ v_j^{n+1} &= v_j^n + \frac{\tau}{2h} [\lambda(j+1) u_{j+1}^n - \lambda(j-1) u_{j-1}^n] \\ &+ \frac{\tau^2}{2h^2} \left\{ \frac{\lambda(j+1)}{\rho(j+1)} v_{j+1}^n - \left[ \frac{\lambda(j+1)}{\rho(j)} + \frac{\lambda(j)}{\rho(j)} \right] v_j^n \right. \\ &\left. + \frac{\lambda(j)}{\rho(j-1)} v_{j-1}^n \right\} \end{aligned}$$

$u_j^n$ 、 $v_j^n$ , 分别为波传播过程中波场  $u(x, t)$ 、 $v(x, t)$  在  $x = j, t = n$  时的值,  $\lambda(j)$ 、 $\rho(j)$  为  $x = j$  时的  $\lambda, \rho$  值。

据 Alford et al<sup>[9]</sup> 对于二阶精度的有限差分算法, 若在中心频率对应的波长范围内有 10 或 10 个以上的网格, 能得到精确的结果; 在均匀介质中, 一维波动方程是具有解析解的, 应用以上算法模拟波在均匀介质中的传播, 所得结果与解析解拟合得很好。说明只要网格取得合适, 以上算法是精确的。

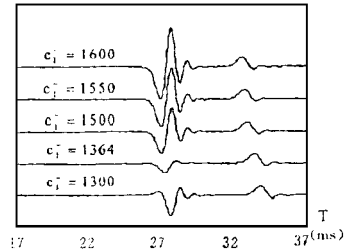


图2  $c_1$  对反射波的影响

## 3 反射波的影响因素及其分析

运用以上算法, 对图1所示的模型进行正演计算的结果, 如图2、3所示, 形成两个反射波, 从旅行时间上看, 它们分别对应沉积层的底层和顶层界面。沉积层各参数的变化对反射波的影响很大, 下面就逐一进行分析。

### 3.1 沉积层顶层速度 $c_1$ 的影响

图2中沉积层的密度和速度均线性变化,  $c_0 =$

1500m/s,  $\rho_0 = 1.0\text{g/cm}^3$ ,  $\rho_1 = 1.1\text{g/cm}^3$ ,  $c_1^+ = c_2$ ,  $\rho_1^- = \rho_2$ ,  $h_2 = 5\text{m}$ , 由于沉积环境和沉积物性质的不同, 沉积层的顶层速度  $c_1^-$  会大于或小于海水速度  $c_0$ 。图 2 显示了这一因素对于反射波的影响规律。可见沉积层顶层速度对反射的影响主要表现在对第 1 个反射波的振幅上, 而对于第 2 个反射波, 除了旅行时以外, 没有其他影响。而且第 1 个反射波的振幅大小并不仅仅是顶层界面间的反射波。这一点可以从  $c_1^- = 1364\text{m/s}$  时的反射波中看出, 这时  $\Delta P_0$  (顶层界面间的波阻抗差) 为零, 但依然存在一反射波, 它与第 2 个反射波波形基本相同但极性相反。当  $c_1^-$  为其它值,  $\Delta P_0$  不为零时, 第 1 个反射波正是这一波形与  $\Delta P_0$  所产生的反射波相互叠加的结果。在后面的讨论将会看到, 第 1 与第 2 个反射波极性相反的波形和第 2 个反射波一样, 是由速度或密度的梯度所决定的, 它们的振幅随着梯度的增大而增大。因此, 我们可以得到  $c_1^-$  对反射波的影响规律: 顶层速度的变化只引起第 1 个反射波的变化, 对第 2 个反射波没有影响。且第 1 个反射波是由顶层界面反射波和由速度或密度梯度所决定的反射波叠加的结果。

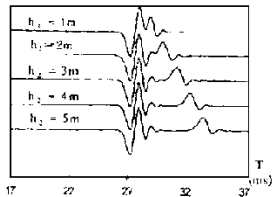


图 3 沉积层的厚度对反射的影响

对于航道内的淤泥层这一特殊情况,  $c_1^-$  的变化对反射的影响与上述规律几乎一样, 只是因为没有了速度变化, 反射波的幅度会小一点; 而且两个反射波的旅行时间间隔是不变化的。

### 3.2 沉积层厚度的影响

不同的海区由于沉积环境的不同, 其海底沉积层的厚度是不一样的。这一因素对于反射波的影响见图 3。图中沉积层的密度和速度均线性变化,  $c_0 = 1500\text{m/s}$ ,  $\rho_0 = 1.0\text{g/cm}^3$ ,  $\rho_1 = 1.1\text{g/cm}^3$ ,  $c_1^+ = c_2$ ,  $\rho_1^- = \rho_2$ ,  $c_1^- = 1450\text{m/s}$

可见, 两个反射波的旅行时间随着深度的减小而减小; 而两个反射波的波形都没有受到深度变化的影响, 这再一次说明, 第 1 个反射是由顶层界面波阻抗差和速度、密度梯度决定, 而与深度及底层速度密度等因素无关。

为了进一步研究厚度对反射的影响, 我们对反射波进行了特征谱分析。设入射信号为  $X(t)$ , 其频谱为  $X(\omega)$ , 反射信号为  $Y(t)$ , 频谱为  $Y(\omega)$ , 则反射波的特征谱为  $Y(\omega)/X(\omega)$ 。显然, 特征谱是由介质的性质决定的, 而与震源特征无关。如果震源或其谱函数是已知的话, 可以利用它来研究介质的性质。

我们研究了沉积层厚度、顶层速度、速度和密度梯度等参数变化时的特征谱的变化规律, 发现沉积层厚度与其对应反射波特征谱存在着较明显的关系。图 4 给出了不同深度沉积层的反射波的特征谱, 从中可以看出, 在一定的深度范围内, 特征谱的极值点个数与沉积层的厚度存在着明显的对应关系。这一结论可以确定沉积层的厚度的一个特征。

在航道中, 浮泥层厚度对反射的上述影响规律依然存在, 即两个反射波波形不受影响, 变化的只是它们的旅行时间间隔; 其特征谱的极值点个数与厚度也存在上述对应关系。

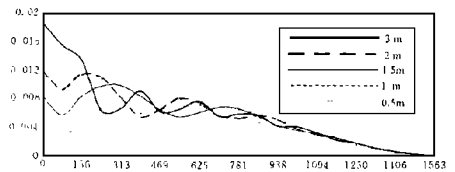


图 4 不同厚度沉积层反射波的特征谱

### 3.3 密度和速度梯度的影响

若沉积层的速度为常数, 密度线性变化, 这种情况在实际海底比较常见, 前面已经指出, 航道内的淤泥层正是属于这种情况。密度梯度不同时, 正演结果见图 5。图中沉积层的密度线性变化,  $b_1$  为其每米变化率, 速度不变  $c_0 = 1500\text{m/s}$ ,  $\rho_0 = 1.0\text{g/cm}^3$ ,  $\rho_1 = 1.1\text{g/cm}^3$ ,  $c_1^+ = c_2$ ,  $\rho_1^- = \rho_2$ ,  $h_2 = 5\text{m}$ , 最明显的特征是第 2 个反射波的振幅与梯度的大小有着密切关系; 结合图 2、3, 我们可以看到, 当梯度不变时, 尽管沉积层的顶层速度和厚度不同, 第 2 个反射波的波形也完全一样。因此, 可以得到结论, 第 2 个反射波仅与梯度这一因素有关, 它的幅度随着梯度的增大而增大。同时, 第 1 个反射波的振幅大小也受到梯度的影响, 这是因为第 1 个反射波中包含有一个由梯度决定的反射波的缘故。

若沉积层的密度是常数, 速度线性变化, 我们发现, 速度梯度不同时, 模拟的反射波的变化规律与图 5 几乎一样。所以, 速度梯度也与密度梯度一样, 决定着第 2 个反射波的振幅大小。而且我们可以看到, 决

定反射波特性的介质的波阻抗,即速度和密度的乘积,因为这两次正演中波阻抗的变化规律相同,所以它们的反射波的特征才是相同的。

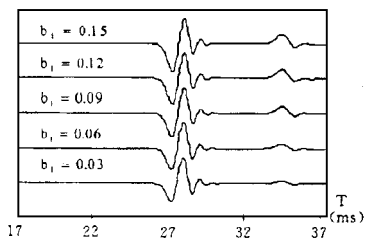


图5 密度梯度对反射的影响

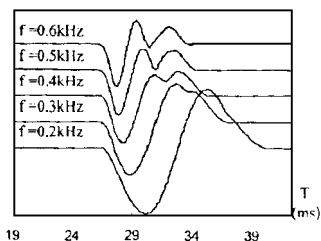


图6 主频很低时的反射波

### 3.4 震源频率的影响

计算中我们所用的震源是最小相位的雷克子波。正演结果显示,震源频率在一定范围内变化时,不考虑衰减的话,反射波的波形及相对幅度大小是基本相同的,这时对于各个频率,上述各参数变化时,反射波受其影响的规律也是基本相同的。然而,如果震源频率很低,以至其主频对应的波长大于沉积层厚度的大约4倍时,我们发现,第1个反射波将与第2个反射波叠合成一个波形,如图6所示,图中沉积层的密度和速度均线性变化,  $c_0 = 1500\text{m/s}$ ,  $\rho_0 = 1.0\text{g/cm}^3$ ,  $\rho_1 = 1.1\text{g/cm}^3$ ,  $c_1 = c_2$ ,  $\rho_1 = \rho_2$ ,  $c_1 = 1450\text{m/s}$ , 这时,因为无法分辨两个反射波,也就无法确定沉积层的底界面。因而,用作震源的子波的频率不能太低,尤其是当沉积层的厚度较小时。

## 4 结论

综合以上分析,图1所示的典型模型中各参数对反射波的影响规律可以总结如下:

(1) 正演模拟的结果是形成两个反射波,它们的旅行时间分别对应于沉积的顶、底界面;

(2) 第1个反射波的特性由沉积层顶层两侧的波阻抗差及速度、密度梯度共同决定,它与沉积层厚度、底层速度和密度无关;

(3) 沉积层的速度或密度梯度是影响第2个反射波特性的敏感的且唯一的因素,第2个反射波的振幅随梯度的增大而增大;

(4) 反射波特征谱的极值点的个数与沉积层厚度存在对应关系;

(5) 当入射子波波长大于沉积层厚度的大约4倍时,只形成1个反射波形,无法确定底层界面;

(6) 因行船安全深度的决定因素是浮泥层的厚度和密度梯度,这对于反射波的影响分别表现在第1、2个反射波的时间间隔和第2个反射波的幅度上,可以通过它们来反演浮泥层的厚度和密度梯度,从而确定安全行船深度。还有,反射波特征谱的极值点个数也是反映浮泥层厚度的一个标志。

本项研究得到了同济大学海洋地质开放实验室和上海市自然科学基金的资助,作者在此表示感谢,并且还要向给予作者指导和帮助的马在田教授、张叔英教授以及凌鸿烈和孙耀秋两位老师表示衷心的感谢!

### 参考文献

- 1 Williamson, A. et al. ROXANN-Remote data acquisition and classification of seabed surface material types from echo sounder signal return. 1994 International Conference on Underwater Acoustics, 73 ~ 75
- 2 Hamilton, E. L. 海底的地声模型. 水声译丛, 1979; (1): 29 ~ 52
- 3 Ainslie, M. A. Reflection and transmission coefficients for a layered fluid sediment overlying a uniform solid. J. Acoust. Soc. Am 1996; 99(2): 893 ~ 902
- 4 Robins, A. J. Reflection of a plane wave from a fluid layer with continuously varying density and sound speed. J. Acoust. Soc. Am., 1991; 89: 1686 ~ 1696
- 5 张叔英等. 长江口浮泥地声特性研究总结报告. 1996
- 6 曹更新. 高浓度 $\gamma$ 射线测沙仪的研制及其在长江口航道疏浚中的应用. 1980
- 7 袁金林. 杭州湾东西试挖槽浮泥勘察技术报告
- 8 陆金浦, 关治. 偏微分方程数值解法. 清华大学出版社, 1987
- 9 Alford, R. M. and Kelly, K. R. Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation. Geophysics. 1979; 39(6): 834 ~ 842