由爆炸声源及传播损失反演海底声学参数

赵 梅，胡长青
(中国科学院声学研究所东海研究站，上海 200032)

摘要：以 2001 年东中国海(ECS)一次浅海声学试验(ASIAEX)获得的爆炸声源的声信号和声传播损失，进行海底声学参数反演。对宽带爆炸声源(WBS)进行研究，由爆炸声源的声信号提取出海底反射波与直达波，从而得到海底垂直反射系数，结合 Hamilton 的经验公式反演出海底等效声速和密度。反演所得结果与海底取样结果相近。由传播损失反演海底声衰减，选取适当的代价函数，调整声衰减，使得代价函数最小，从而反演出海底声衰减。运用反演得到的海底参数计算的传播损失值与试验结果符合较好。

关键词：爆炸声源；垂直反射系数；传播损失；代价函数；海底声学参数
中图分类号：TB566 **文献识别码**：A **文章编号**：1000-3630(2009)-02-0104-05
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2009.02.002

Sea-bed acoustic parameters inversion by explosive sources and transmission loss

ZHAO Mei, HU Chang-qing
(*Shanghai Acoustic Laboratory*, *Institute of Acoustics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 200032, *China*)

Abstract: The explosive source signals and the transmission loss are used to estimate sea-bed acoustic parameters from the 2001 Asian Seas International Acoustics Experiment (ASIAEX) conducted in the East China Sea (ECS).The analysis of the wide-band explosive sources(WBS) has been made in this paper. From the reflection wave from sea-bottom and the direct wave derived from the bomb signals, the vertical reflection coefficient is obtained. Combined with Hamilton's empirical equations,the equivalent sound velocities and densities of the sea-bed are inverted,and the results are similar to the datas from cores. Sediment attenuation is inverted from the transmission loss. The cost function needs to be chosen properly, because it was varied with the sediment attenuation. When the value of the cost function reaches the minimum, the estimated attenuation is inverted. The transmission loss calculated from the inversion results is in agreement with the experimental values.

Key words: explosive source; vertical reflection coefficient; transmission loss; cost function; sea-bed acoustic parameters

1 引 言

海底声学参数如海底的密度、声速和声衰减等是利用声学研究海底的重要指标，与海底物理特性有着密切的关系。对海底直接取样，价格昂贵、速度慢，且只能提供离散点的信息，而通过大范围的声学回波反演海底声学参数，可以消除海底直接取样所面临的大部分问题，故海底声学参数反演近年来获得了人们极大的关注，成为一重点热点课题[1-4]。

本文主要采用对爆炸声源进行分析来反演海底密度和声速。爆炸声源声信号经过海底反射后含有丰富的海底信息。反射信号的幅度反映了海底的反射系数，而海底的声速和密度与海底的反射系数密切相关[5]。本文通过对爆炸声源的时域信号图进行分析，提取出海底垂直反射系数，进而反演出海底声学参数(海底密度和声速)。声衰减系数通过声传播损失来反演。

海底声学参数反演需要选取适当的海洋环境模型，本文采用的是无限大液态海底模型[6]，见图 1。

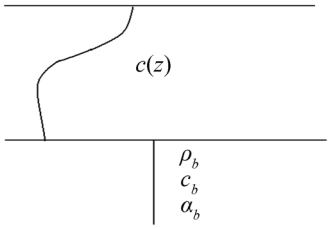

图 1 地声反演所用的海底模型
Fig.1 Sea-bottom model used in geoacoustic inversion

2 浅海试验描述

2001 年 5 月 27 日至 6 月 10 日，中美两国水声学

收稿日期：2008-12-18；**修回日期**：2009-02-16
作者简介：赵梅(1984-)，女，江苏泰兴人，硕士研究生，研究方向为海洋声学。
通讯作者：赵梅，E-mail: zhaomei20022002@hotmail.com。

家在东中国海域进行了一次浅海声学试验(ASIAEX)。中方试验采用双船作业，试验二号船为发射船，试验三号船为接收船。美方的船为 Melville 号。接收船即试验二号船在图 2 中的 M 点抛锚，船下挂垂直 32 元水听器阵和一个无前放的水听器用来接收声信号。32 元水听器阵上 16 阵元间隔 2m，下 16 阵元间隔 4m，覆盖了从 4.6m 到 90.5m 深的大范围水域。无前放水听器位于水下 51.25m，用来接收直达声。水听器信号由 32 通道录音机记录，第 15 通道接无前放水听器。单通道采样频率为 6000Hz。发射船沿图 2 中的圆圈和直线航行，航行过程中投 50m 深度爆炸的 38g TNT 炸药的信号弹，并记录投弹时刻发射船与接收船之间的距离，同时测量海深。M 点附近海深为 104.5m。试验海区的声速分布图如图 3 所示。

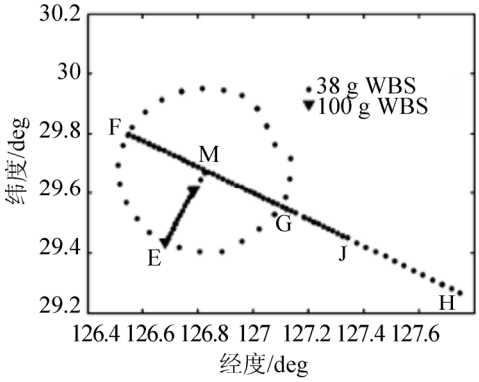

图 2　试验海区及发射船航行过程中宽带爆炸声源投放点

Fig.2　Experimental sea area and the deployment of wide-band explo sive source droppped from Shi Yan 2 during the navigation.

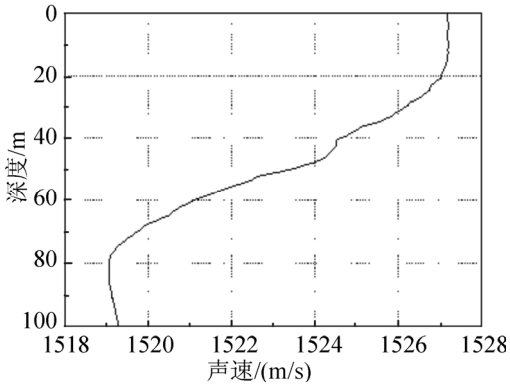

图 3　声速剖面

Fig.3　Sound speed profile

3　由爆炸声源反演海底密度和声速

3.1　爆炸声源特性

爆炸声源，在很宽的发射频谱中功率较大，发射脉冲持续时间短，且实际上是无指向性的。使用爆炸声源，可以通过一次试验获得宽频带的声场信息，此外，爆炸声源不需要通过电缆与船体相连接，可以扩大测量的距离范围。声源爆炸时，形成压力波。压力波是由非常短暂的冲击波(直达波)、爆炸所形成的水下气泡惯性振动所引起的脉动(气泡脉动)以及海底、海面反射波组成的[5]。本文采用的爆炸声源信号是由重量为 38g、爆炸深度为 50m 的 TNT 信号弹爆炸所产生的。图 4 为距离爆炸声源 14.7m，深度为 51.25m 的无前放水听器接收到的该爆炸声源的时域信号图。

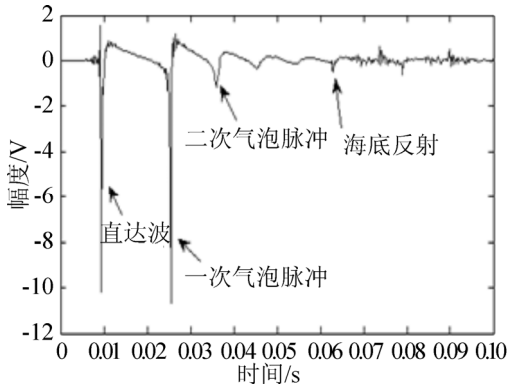

图 4　爆炸声源时域信号图

Fig.4　Time series of bomb source signals

3.2　反演基本原理和理论

反射信号的幅度可以反映海底反射系数。通常用 $V_{有效}$来描述海底的反射特性，称之为反射系数的模，或简称反射系数。本文采用的是无限大液态海底模型，故可以不用考虑横波。考虑到海底不平整性对于海底反射的影响，反演时采用低频段 100Hz~200Hz，海底界面近似为平面。两种液态介质分界面上的反射系数为瑞利反射系数[5]：

$$V_{有效}=\frac{m\sin\theta-\sqrt{n^2-\cos^2\theta}}{m\sin\theta+\sqrt{n^2-\cos^2\theta}} \tag{1}$$

其中，$m=\rho_b/\rho_w$ 表示介质密度比，$n=c_w/c_b$ 表示介质的折射率，θ 为掠射角。

当接收水听器距离爆炸声源较近时，声波经过海底反射可以近似认为是垂直反射。平面波海底垂直反射系数满足：

$$\frac{1+V_\perp}{1-V_\perp}=\frac{\rho_b c_b}{\rho_w c_w} \tag{2}$$

$\rho_w c_w$ 为靠近海底处海水的声阻抗，由平面波的垂直反射系数 $V_\perp$ 可以得到无限大液态海底的等效声阻抗 $\rho_b c_b$ [5]。

利用本地试验时所投的爆炸声信号的直达波和反射波的功率谱可以得到不同频率下的垂直反射系数，公式如下[7]：

$$V_\perp(f)=\left|\frac{P_1(f)}{P_0(f)}\right|\frac{r_1}{r_0} \tag{3}$$

或：$V_{\perp}^{2}=\dfrac{I_1}{I_0}\dfrac{r_1^2}{r_0^2}$ (4)

其中，$P_1(f)$为海底反射脉冲的傅里叶变换的幅度谱，$P_0(f)$为直达波的傅里叶变换的幅度谱，r_1和r_0分别为声波从声源出发经海底反射到达接收水听器的反射声程和直达声程，I_1和I_0分别为海底反射波和直达波的声能量。

Hamilton[8]大陆架海底沉积物声速(纵波)和密度的经验公式为：

$$c_b=2330.4-1257.0\rho_b+487.7\rho_b^2,\quad \sigma=33\text{m/s} \tag{5}$$

式中，σ为标准估计误差。已知靠近海底处海水的密度ρ_w和声速c_w，由公式(2)、(5)用迭代法可求得ρ_b和c_b。

3.3 爆炸声源反演结果及分析

采用无限大液态均匀海底模型，反演过程中使用三枚爆炸深度为 50m 的信号弹作为爆炸声源。声源爆炸后声波经过海底反射,示意图见图 5。由位于海深 51.25m 处的无前放水听器接收到的声信号，提取出直达声和海底反射声，图 6 给出了一枚爆炸声源声信号的示意图。分别对爆炸声源直达声和海底反射声进行傅里叶变换，根据公式(3)得到海底垂直反射系数$V_{\perp}$。图 7 为三枚信号弹 5Hz~1000Hz 频率范围内的海底垂直反射系数。已知靠近海底处海水的密度ρ_w=1.025g/cm^3，声速c_w=1519m/s，将垂直反射系数值代入公式(2)，计算出海底等效声阻抗，结合 Hamilton 给出的大陆架海底沉积物声速和密度的经验公式，即公式(5),可求得声源爆炸处的等效海底密度。取低频段 100Hz~200Hz，各个爆炸声源反演结果如表 1 所示，平均等效海底密度为 1.88g/cm^3，均方差为 0.015 g/cm^3，平均等效海底声速为 1692m/s，均方差为 11m/s。

M 点附近海区海底采样结果为平均颗粒粒径 3.47ϕ，其中，$\phi=-20\log_2 D$，D 为以 mm 为单位的颗粒直径[9]。表 2 为 Hamilton[8]总结的大陆架海洋环境中海底平均颗粒粒径与海底密度和声速间的关系。

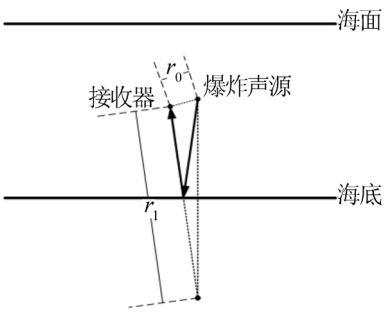

图 5 海底反射示意图

Fig.5 Schematic diagram of sound reflecion from sea-bottom

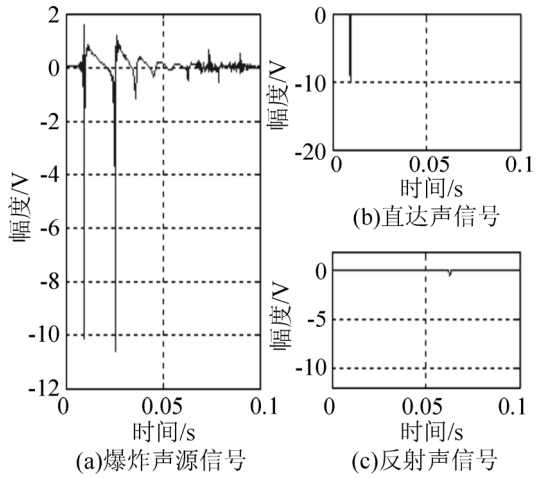

图 6 38g/50m 爆炸声源信号图及提取出的直达声和海底反射声信号图

Fig.6 Bomb source signals of 38g/50m, and the derived direct wave and the bottom reflection wave

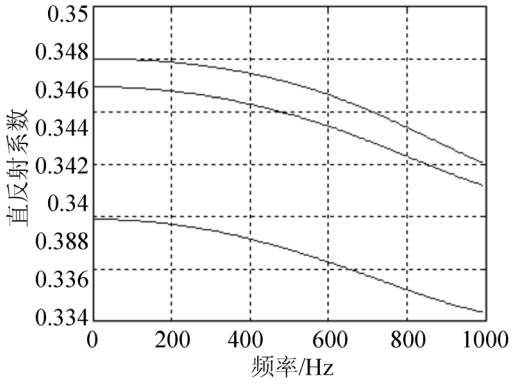

图 7 海底垂直反射系数

Fig.7 Vertical reflection coefficients of sea-bed

表 1 三枚爆炸声源 100Hz~200Hz 时的海底等效密度和声速的反演结果

Table 1 The equivalent sea-bottom density and sound velocity inverted from three explosive sources at 100Hz~200Hz

	ρ_b /(g/cm^3)	c_b /(m/s)
爆炸声源 1	1.89	1696
爆炸声源 2	1.86	1679
爆炸声源 3	1.90	1700

表 2 大陆架海洋环境：海底沉积物平均颗粒粒径、密度和声速

Table 2 Continental terrace environment: mean grain sizes,densities and sound velocities of sediment

沉积物类型	平均颗粒粒径/ϕ	密度/ (g/cm^3)		声速/ (m/s)	
		Av.	SE	Av.	SE
砂：粗	0.92	2.034	…	1836	…
细	2.61	1.962	0.017	1759	9
极细	3.34	1.878	0.017	1709	14
粉砂质砂	4.24	1.783	0.014	1658	7
砂质粉砂	4.88	1.769	0.018	1644	7
粉砂	5.40	1.740	0.027	1615	6
砂-粉砂-黏土	5.82	1.575	0.021	1582	7
黏土质粉砂	7.13	1.489	0.014	1546	3
粉砂质黏土	8.80	1.480	0.010	1517	2

由表 2 可以看出，根据采样结果，M 点附近海区海底沉积物应属于表中极细砂这一行范围内，本文反演结果与采样结果比较相近。

4　由传播损失反演海底衰减

4.1　理论部分

利用简正波理论[10]，在远场条件(k_0r>>1)下，声场可以表示为一系列离散简正波的级数合成(忽略时间因子 $e^{-i\omega t}$)：

$$p(r,z)\simeq \frac{i}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r}}e^{-i\pi/4}\sum_{m=1}^{\infty}\psi_m(z_s)\psi_m(z)\frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_{rm}}} \tag{6}$$

$$k_m=k_{rm}+i\beta_m \tag{7}$$

其中，ρ 为密度，ψ_m 为本征函数，k_m 为本征值，k_{rm} 为第 m 号简正波波数的水平分量，β_m 为简正波衰减系数。

传播损失的定义为：

$$TL(r,z)=-20\lg\frac{|p(r,z)|}{|p_0(r=1)|}\simeq -20\lg\left|\frac{1}{\rho(z_s)}\sqrt{\frac{2\pi}{r}}\sum_{m=1}^{\infty}\psi_m(z_s)\psi_m(z)\frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_{rm}}}\right| \tag{8}$$

其中，$p(r，z)$为声场中某一点的声压，$p_0(r=1)$为距离声源 1m 处的声压。

4.2　反演结果及分析

已估计得到海底密度和声速后，再根据传播损失反演海底衰减。

试验中，在 MG 航向上 20km 距离范围内， 在 11 个距离上进行了定点投弹试验，每个距离上投两枚信号弹。定义试验传播损失与数值模拟的传播损失之差为 $\Delta TL(r)=TL_{数值}(r)-TL_{试验}(r)$，$\overline{\Delta TL}$ 为不同距离上 $\Delta TL(r_i)$ 的平均值。定义代价函数为 $\Delta TL(r)$ 的标准偏差：

$$E(\alpha)=\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(\Delta TL(r_i)-\overline{\Delta TL}\right)^2\right]/(N-1)} \tag{9}$$

N 为试验数据点的个数。调节海底衰减 α 值，使得代价函数最小。此时的 α 值，即为反演出的估计值。

图 8 为频率 100Hz 时代价函数随海底衰减的变化曲线，声源深度为 50m，接收器深度为 90.5m。由图 8 可知，当海底衰减为 0.11 dB/λ 时代价函数最小。由此可知，当频率为 100Hz 时，海底声衰减估计值为 0.11 dB/λ。同样的方法，反演出频率 200Hz 时海底衰减为 0.13 dB/λ。图 9 给出了频率为 100Hz 和 200Hz 时，传播损失试验值和计算值的比较。试验值是经过 1/3 倍频程平均的结果。计算值是根据上面反演所得的海底密度、声速和衰减计算的经过 1/3 倍频程平均的传播损失曲线。从图 9 可以看出，理论值与试验值符合较好，个别试验点由于爆炸声源声源级的起伏而出现误差。

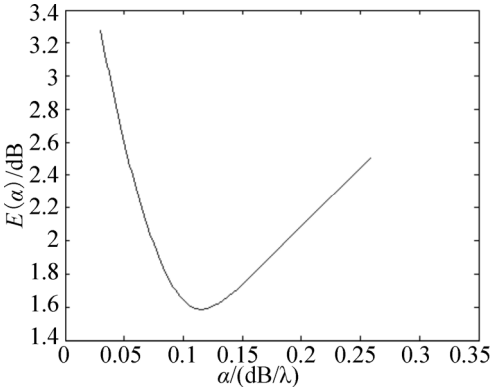

图 8　频率为 100Hz 时代价函数随海底衰减变化

Fig.8　Cost function versus sediment attenuation at 100Hz

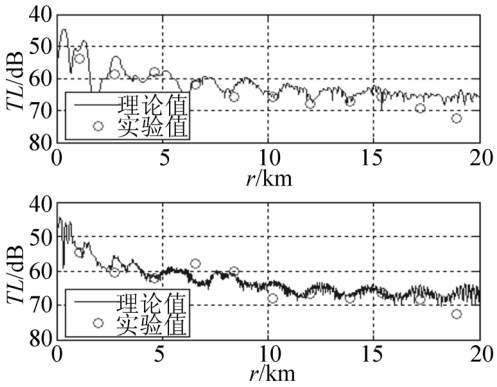

图 9　100Hz 和 200Hz 传播损失理论值和试验值的比较

Fig.9　Comparison between theoretical and measured values of transmission loss at 100Hz and 200Hz

5　总 结

本文通过 2001 年东中国海(ECS)一次浅海声学试验(ASIAEX)获得的爆炸声源的声信号和声传播损失，反演出了低频段(100Hz~200Hz)海底声学参数。反演时采用的地声模型为半无限大均匀液态海底模型。由近场爆炸声源的声信号图，提取出海底垂直反射系数，结合 Hamilton 的经验公式反演出海底等效密度和声速，由表 1 可以看出与试验船取样结果相近。由声传播损失反演出海底声衰减，利用反演值计算的传播损失，与试验值基本符合。但由于爆炸声源的源级起伏，使得个别值有所偏差。

参　考　文　献

[1] PENG Z. H, ZHOU J. X, Dahl P. H, et al. Sea-bed acoustic parameters from dispersion analysis and transmission loss in East China Sea[J]. IEEE J. Oceanic Eng., 2004, **29**(4): 1038-1045.

[2] LI Z. L., ZHANG R. H., YAN J, et al. Geoacoustic inversion by matched-field processing combined with vertical reflection coefficients and vertical correlation[J]. IEEE J. Oceanic Eng, 2004, **29**(4): 973-979.

[3] 李风华，张仁和. 由脉冲波形与传播损失反演海底声速与衰减系数[J]. 声学学报, 2000, **25**(4): 297-302.
LI Fenghua, ZHANG Renhe. Sea-bed velocitiy and attenuation invertion by the pulse shape and transmission loss[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2000, **25**(4): 297-302.

[4] GUO Y. G., LI F. H., LIU J. J. et al. Time-domain geoacoustic inversion based on normal incidence reflection from layered sediment[J]. CHIN. PHYS. LETT., 2006, **23**(9): 2483-2486.

[5] (苏)布列霍夫斯基. 海洋声学[M]. 科学出版社. 1983. 372-378
Brekhovskikh. L. Marine acoustics[M]. Science Press. 1983. 372-378.

[6] Chapman M. F.. What are we inverting for?[A]. M. I. Taroudakis and G. N. Makrakis, Eds. Inverse problems in underwater acoustics[C]. Springer New Tork, 2001.

[7] 商德江，张仁和. 新型宽带爆炸声源及海底参数反演[J]. 声学技术, 2003, **22**(z2): 158-160.
SHANG Dejiang, ZHANG Renhe. Geoacoustic inversion by using the new kind of broadband bomb signals[J], Technical Acoustics, 2003, **22**(z2): 158-160.

[8] Hamilton E. L, Bachman R.T. Sound velocity and related properties of marine sediments[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1982, **72**(6): 1891-1904.

[9] James H. Miller, Louis R. Bartek, Gopu R. Potty, et al. Sediments in the East China Sea[J]. IEEE J. Oceanic Eng., 2004, **29**(4): 940-951.

[10] Finn B. Jensen, William A. Kuperman, Michael B. Portor, et al. Schmidt.computational ocean acoustics[M]. American Institute of Physics, 1994.