

# 海底声学原位测试声速提取技术研究

李红星<sup>1,2,3</sup>, 陶春辉<sup>1,2</sup>, 刘 财<sup>1,2</sup>, 邓显明<sup>1,2</sup>, 周建平<sup>1,2</sup>,  
张金辉<sup>1,2</sup>, 顾春华<sup>1,2</sup>, 何拥华<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 2. 国家海洋局 海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012;  
3. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

**摘 要:**海底沉积物的声学声速特性是沉积物声学中的一个重要的研究方向。正确提取声学原位测量的声速对海底沉积物声学反演至关重要。分析了海底声学原位测试系统的输出子波特性,提出了基于子波提取的互相关双向极值声速提取法。在声速提取过程中,发现某些通道实测声波到达时会出现超出正常范围的异常。分析后认为异常通道的到达波相位出现 $180^\circ$ 反至现象。通过互相关数值的负极小值提取的声波到达时对互相关正极大值所获得的到达时曲线进行校正后提取声速,得到了正确的结果,说明了本方法的正确性。

**关键词:**海底声学原位测试系统;声速提取;互相关双向极值法;换能器源;海底沉积物声学特征

**中图分类号:**P744.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1671-6647(2007)04-0474-06

海底沉积物的声学特性(最重要的是声速)是沉积物声学中的一个重要的研究内容。目前直接测量海底沉积物的声学特性方法可以分为原位测量与取样测量两种<sup>[1]</sup>。在这 2 类测量方法中取样测量具有仪器设备简单、操作容易等特点,而原位测量则具有较高的精确性和可靠性的特点。原位测量的结果包容了周边环境的所有因素所引起的效应,同时,还可避免在沉积物取样和样品运输过程中对样品的扰动而导致的测量误差,而这种误差很难预估。对于稀软的深海浅表层沉积物或者浅海的砂质沉积物,没有扰动的取样几乎是不可能的。对某些含气沉积物,其所含的气体在取样后“逃逸”更使样品测量的结果与实际的特性大不相同。

由于原位测试技术不是通过取样直接对沉积物的声速等参数进行测量,所以其后续的处理、反演技术对获取准确可靠的海底沉积物声学特征是十分重要的<sup>[2-4]</sup>。

海底声学原位测试系统的基本原理:通过一个声波发射换能器发射声波,一系列等间隔排列的水听器接收,声波通过被测介质传播,通过各个水听器的接收时间和水听器的间距就可以确定被测介质的声速度<sup>[5]</sup>。水听器之间的距离在设计海底声学原位测试系统时可以事先设定为固定值,而各水听器接收到声波到达时差就需要一定的后处理才可以获得。由于水中的声波波速是已知的,本文采用沉积物中声波到达时与水中声波到达时之比来求取沉积物中声波波速,称之为对比法<sup>[3,6]</sup>。

前人的原位测试声速提取软件需要人为判断各通道声波的初至位置,这样难以做到精确提取初至位置。本文从海底声学原位测试系统的脉冲响应以及介质的脉冲响应角度分析了海底声学原位测试系统的输出子波特性。基于更合理的子波提取,利用互相关技术<sup>[7,8]</sup>进行声速提取。在声速提取过程中,发现某些通道实测声波到达时会出现超出正常范围的异常。分别利用互相关数值的负极小值和正极大值提取声波到达时对其进行分析,认为异常通道的到达波相位出现 $180^\circ$ 反至现象。通过互相关数值的负极小值提取的声波到达时对互相关正极大值所获得的到达时曲线进行校正后提取声速,得到了正确的结果。

收稿日期:2006-11-13

资助项目:国家高技术研究发展计划——海底物理原位测试系统(2002AA615130、2005AA615040);国家自然科学基金资助项目——天山兴安岭和锡霍特褶皱系地壳精细结构及其动力学意义(40574042);国家海洋局青年基金资助项目——基于小波分析的浅剖资料精细后处理技术研究(903-01)

作者简介:李红星(1981-),男,山西翼城人,博士,主要从事海洋地震底及声学探测与观测系统研究。

(高 峻 编辑)

### 1 海底声学原位测试系统输出子波特性分析

理想情况下,加在换能器输入终端上的电压波形  $V(t)$  会产生与  $V(t)$  形态一致的脉冲输出  $S_b(t)$ ,实际情况并非如此。由于系统响应和介质的加入,换能器是个有限的通带宽度,其影响就相当于一个转换因子  $H(j\omega)$ 。这样在频率域,输入脉冲  $S_m(j\omega)$  和输出脉冲  $S_b(j\omega)$  之间的关系可以写为  $S_b(j\omega) = H(j\omega)S_m(j\omega)$ 。

图 1 是换能器源的等价电路图<sup>[4]</sup>。 $M$  代表了输入终端和输出终端的电路和机械耦合程度,  $R_0$  和  $C_0$  分别代表了输入终端的电路损耗和固定电容。 $L_m, C_m$  和  $R_m$  的串联代表了换能器输出终端的机械响应。 $L_x$  和  $R_x$  代表了介质加入的影响<sup>[4]</sup>。

假设输入终端输入信号为 6 周期, 70 kHz 的正弦波(图 2a), 则经过系统和某介质响应后, 其输出终端最终输出波形会变为图 2b 所示。

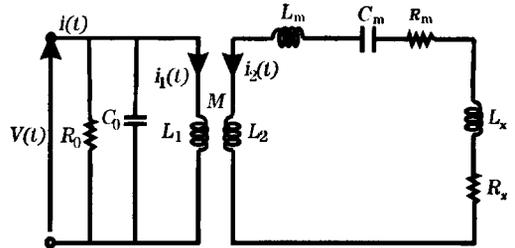
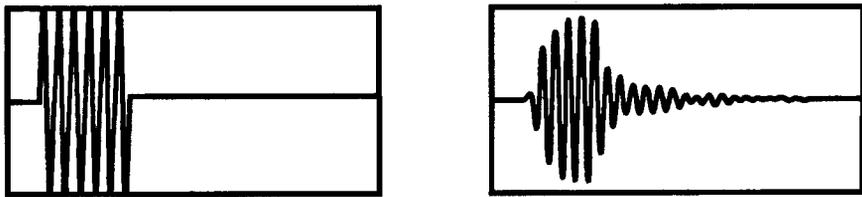


图 1 海底声学原位测试系统换能器源等价电路图 (引自文献[4])

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of source transducer of in-situ marine sediment geoacoustic measuring system (Adapted from reference[4])



(a) 输入信号波形 (b) 输出信号波形  
图 2 换能器输入终端输入信号与输出终端输出信号波形对比示意图

Fig. 2 Comparison between the input and output signal waveforms of transducer

总体上  $H(j\omega)$  包括 2 部分: 海底原位测试系统的系统响应  $H_x(j\omega)$  和介质响应  $H_m(j\omega)$ 。系统响应对于特定的系统是固定的, 而介质的响应是随测量介质的变化而变化的, 在不同的介质中实际的输出子波是不同的, 所以在速度提取的互相关运算中, 本文采用在沉积物实测资料中提取质量较好的子波, 这样互相关运算的结果更为精确, 有利于提高声速提取精度。

### 2 利用互相关技术提取声波到达时曲线

本次数据采集采用的原位测试系统为国家海洋局第二海洋研究所自主研发的多频海底声学原位测试系统(图 3)。系统测量深度可达 2.88 m; 测量项目为沉积物的声速和声衰减; 测量频率: 8, 10, 12 和 15 kHz 可选; 发射正弦波数: 4, 5, 6, 7 和 8 可选; 工作水深: 300 m。水听器阵列的间隔为 25 cm<sup>[8]</sup>。

图 4 为子波频率为 8 kHz, 4 波数, 周期为 4 个周期的海底沉积物声学原位测试的原始数据图。



图 3 多频海底声学原位测试系统(引自文献[8])

Fig. 3 Multi-frequency in-situ marine sediment geoaoustic measuring system(Adopted from reference[8])

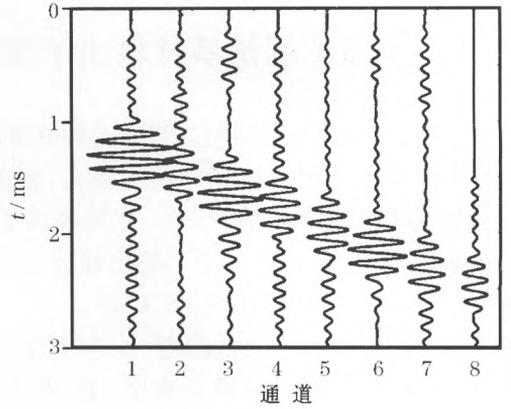


图 4 海底沉积物的声波原始资料

Fig. 4 Raw data measured by in-situ marine sediment geoaoustic measuring system

图 5 为在原始纪录中提取的形态较好的子波。图 6 为各通道原始纪录与子波进行互相关运算后的记录图。

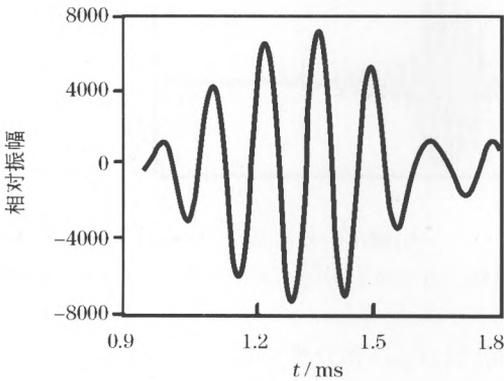


图 5 提取的子波

Fig. 5 Wavelet picked-up from the raw data

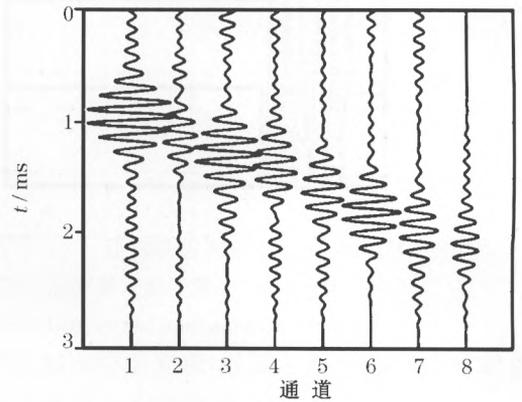


图 6 各通道原始纪录与子波做互相关后的记录图

Fig. 6 Records after making a cross-correlation between raw data and wavelets for different channels

图 7 是通过搜索互相关正极大值取得的声波初至时曲线。

由于声波原位测试系统的各通道换能器之间的间隔仅仅是 0.25 m,所以各通道之间沉积物性质变化一般应该是很小的,各通道之间的声波到达时曲线应该近似为一条直线(实质是曲线)。而图 7 中通道 5 的到达时明显偏离了其他通道到达时所拟合的声波到达曲线。应该对其原因进行分析,以便提取正确的声速曲线。

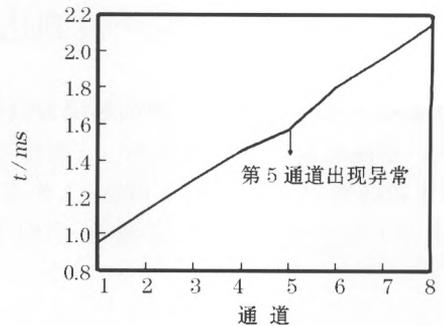


图 7 互相关正极大值提取的声波初至时曲线

Fig. 7 Sound wave arrival time curve obtained by finding the positive maxima of cross-correlation values

### 3 异常通道的声波到达分析

首先,分别利用互相关记录的极大值与负极小值提取声波到达时,进行对比分析。图 8 为分别利用互相关记录极大值和负极小值提取的声波到达时曲线对比图。

从图 8 可见,利用互相关负极小值提取的声波到达时曲线在第 5 通道的时值基本上位于用互相关极大值提取的各通道声波到达时(第 5 通道以外各通道)所拟合的声波到达时近似直线上。分析图 9 可知,当某通道到达声波出现 180°相位反至时,在提取其声波到达时时,利用互相关极大值才能够得到正确的到达时,而利用互相关极大值获取的声波到达时就会发生错误。因此基本可以断定,原始数据的第 5 通道声波在到达时出现了 180°相位反至现象。

因此,只需要用利用互相关负极小值提取的声波到达时曲线第 5 通道的时值校正利用互相关极大值提取第 5 通道的声波到达时值,就可以得到正确的声波到达时曲线。校正后的声波到达时曲线见图 10。

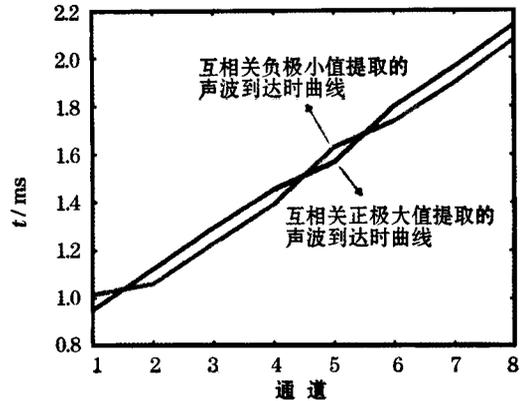


图 8 分别利用互相关记录极大值和负极小值提取的声波到达时曲线对比图

Fig. 8 Comparison between the sound wave arrival time curves obtained respectively by finding the positive maxima and negative minima of the cross-correlation values

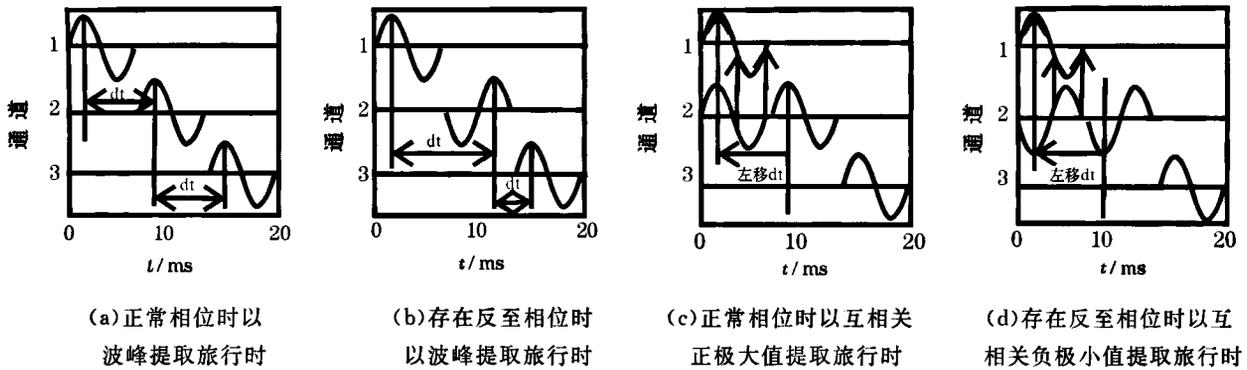


图 9 相位反至分析图

Fig. 9 Analytical diagram for phase reversal

### 4 速度提取

由于声波在水中的波速是已知的(约为 1 500 m/s),本文在计算沉积物波速时采用对比法求取,其计算公式为  $V_s = \frac{t_w}{t_s} \times V_w$ , 式中,  $V_s$  为沉积物中波速,  $V_w$  为水中波速,  $t_w$  为水中声波到达时,  $t_s$  为沉积物中声波到达时。用上述同样方法提取水中声波到达时,结果见图 11。

利用图 10、图 11 以及计算公式就可得到沉积物中的声波波速曲线(图 12)。声速分别为第  $i$  通道距离换能器声波脉冲发射中心沉积物的平均声速,  $i=1, 2, 3, \dots, 8$ 。

从图 12 可以看出,随着平均深度的增加,沉积物声速总体呈增大趋势,与海底沉积物声速分布规律一致。

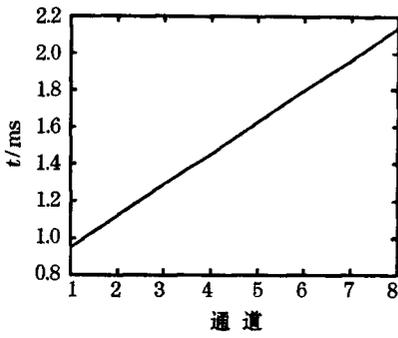


图 10 校正后的声波到达时曲线  
Fig. 10 Corrected sound wave arrival time curve

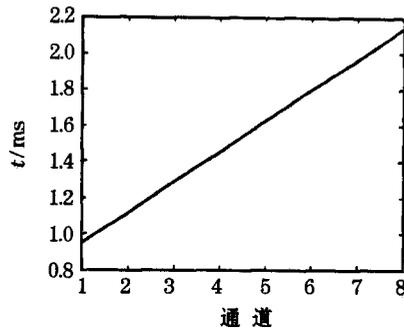


图 11 水中声波到达时曲线  
Fig. 11 Sound wave arrival time curve in water

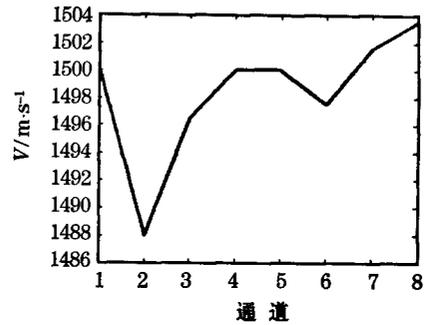


图 12 沉积物声速曲线  
Fig. 12 Sound speed curve in sediments

### 5 结 语

本文将上述方法称为互相关双向极值法声速提取技术。其实现过程如图 13 所示。

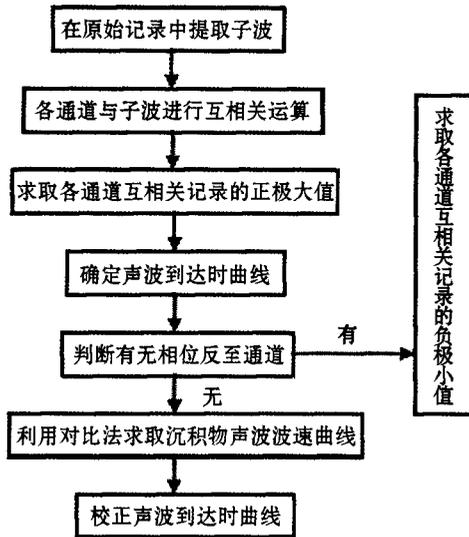


图 13 互相关双向极值法声速提取技术的框图

Fig. 13 Block diagram for sound speed picking-up technique by using cross-correlation two-way extreme value method

即,在原始资料里提取子波,同时利用互相关正极大值与负极大值提取声波到达时,可以克服由于各种原因造成的个别通道可能出现的声波初至相位反至现象,从而提取到正确的声速曲线。

### 参考文献 (References):

[1] ZHOU J P, LÜ W Z, TAO C H. Ultrasonic measurement of seabed sediment cores[J]. Journal of Oceanography of East China Sea, 2003, 21(4): 26-33. 周建平, 吕文正, 陶春辉. 海底柱状沉积物超声测量[J]. 东海海洋, 2003, 21(4): 26-33.

[2] FU S S, TAO C H, PRASAD M, et al. Acoustic properties of coral sands, Waikiki, Hawaii[J]. Acoust. Soc. Am., 2004, 115(5): 2013-2020.

[3] TAO C H, BAFFI S, WILKENS R H, et al. Biot inversion for in-situ sound speed and attenuation data, A case study in Hawaii, USA [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(3): 79-84. 陶春辉, BAFFI S, WILKENS R H, et al. Biot 反演在 Hawaii 钙质沉积物原位测量

- 声速与衰减中的应用[J]. 海洋学报, 2005, 27(3): 79-84.
- [4] TAO C H, JIN X L, XU F. The prospect of bottom material classification technology[J]. Journal of Oceanography of East China Sea, 2004, 22(3): 28-33. 陶春辉, 金翔龙, 许枫. 海底声学底质分类技术的研究现状与前景[J]. 东海海洋, 2004, 22(3): 28-33.
- [5] TAO C H, JIN X L, WILKENS R H, et al. Multi-frequency in-situ sediment geoacoustic lance[M]. Katlenburg-Lindau: European Geosciences Society, EGU, 2004.
- [6] TAO C H, JIN X B, JIN X L, et al. Development and test of multi-frequency in-situ marine sediment geoacoustic measuring system[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(2): 1-5. 陶春辉, 金肖兵, 金翔龙, 等. 多频海底声学原位测试系统研制和试用[J]. 海洋学报, 2006, 28(2): 1-5.
- [7] HE J D. Theory and technique of seismic exploration[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1986. 何焦登. 地震勘探原理和方法[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [8] BUCKINGHAM M J, RICHARDSON M D. On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(3): 429-453.

## Study on Sound Speed Picking-up Technique by Geoacoustically Measuring In-situ Marine Sediment

LI Hong-xing<sup>1,2,3</sup>, TAO Chun-hui<sup>1,2</sup>, LIU Cai<sup>1,2</sup>, DENG Xian-ming<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian-ping<sup>1,2</sup>  
ZHANG Jin-hui<sup>1,2</sup>, GU Chun-hua<sup>1,2</sup>, HE Yong-hua<sup>1,2</sup>

(1. Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China;

2. Key Lab of Submarine Geosciences, SOA, Hangzhou 310012, China;

3. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract:** The marine sediment acoustic characteristics are an important research direction in sediment acoustics, and the correct pick-up of in-situ marine sediment sound speed is of great importance to the marine sediment acoustics inversion. In this paper, the output wavelet characteristics of in-situ marine sediment geoacoustic measuring system are analyzed, and a cross-correlation two-way extreme value sound speed picking-up method based on wavelet pick-up is then proposed. In the sound speed pick-up process, it is shown that the anomalies of measured sound wave arrival times for some channels occurred, and it is concluded that the arrival sound wave phases for the abnormal channels are reversed. The sound wave arrival time curve obtained by finding the cross-correlation positive maxima is rectified by the sound wave arrival times obtained by finding the cross-correlation negative minima to pick-up the sound speed, and correct results are obtained, which indicates the correctness of this method.

**Key words:** in-situ marine sediment geoacoustic measuring system; sound speed pick-up; cross-correlation two-way extreme value method; source transducer; marine sediment acoustic characteristics

**Received:** November 13, 2006