

海底底质声学性质原位测量技术研究

郭常升¹, 窦玉坛^{1,2}, 谷明峰^{1,2}

(1. 中国科学院 海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:系统介绍了海底底质声学性质原位测量技术,提出了新的原位测量方法,并根据这一测量方法,初步设计制作了相应的海底原位测量仪器。利用初步制作的测量仪器在实验室内对砂质沉积物进行了模拟测量试验,仪器测量得到的沉积物声速与直接透射法测量获得的声速基本一致。在宁波近海海域进行了海上实际测量试验,获得了该测量区域海底底质的声速,验证了此测量技术的可行性,为进一步研发先进的海底原位测量仪器奠定了基础。

关键词:海底底质;原位测量;声速;声衰减

中图分类号: TB565.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2007)08-0006-05

海底浅层底质的声学特性与水下通讯、潜艇和水雷探测等声学研究密切相关,对海洋环境声场研究有重要意义。研究海底底质的声学特性首先需要发展海底底质声学参数测量技术,国外在 20 世纪中期就已经开始了这方面的研究^[1,2]。声信号在海底底质中传播的声速可以用 Hamilton 给出的经验关系^[3,4]或者 Biot-Stoll 物理模型^[1,2,5]来粗略估算,但是为了得到精确的海底底质的声学参数,研究者经过试验发展了很多测量技术,大致可以分为两类^[6]:海上取样实验室内测量分析和海上原位测量。取样测量是一种间接的方法,技术简单,但是由于在采样和运输过程中不可避免地会使样品产生扰动,使样品(尤其是稀软的海底表层沉积物以及某些含气沉积物)的原始状态发生变化,而且,取样测量受样品长度的限制,测量频率被限制在 20 kHz 以上的高频段,难以研究低频声信号在底质中的传播特性。在取样测量方面,中国科学院南海海洋研究所的卢博等^[6-8]做了较多的研究工作,通过取样分析测量,对中国南海某区域海底的沉积物声学物理参数进行了专门研究。海上原位测量是把仪器下放到海底进行直接测量的方法,由于海底环境复杂,这种方法要求的测量技术较高。国外已经开发出几种原位测量技术,在国内,陶春辉等^[9,10]仿制了国外的一种声学长矛,除此之外还没有其它的原位测量技术。通过最近两年的研究,作者开发出一种新的海底底质声学性质原位测量技术。

1 现有主要原位测量技术分析

1.1 国外测量技术

美国海军实验室研制了沉积物声学特性原位测量系统^[11-13]。最早有 38 和 58 Hz 两种频率,由 4 个固定的激发接收两用换能器组成,工作时 1 个(或 2 个)作为声源,另外 3 个(2 个)作为接收器。经过改进,将系统的测量频率扩展到 25 ~ 100 kHz,步长 5 kHz。通过 40 ~ 110 cm 的传播距离测量沉积层以下 0 ~ 50 cm 沉积物压缩波的波速和衰减。

20 世纪 90 年代初,夏威夷大学地球物理学与行星学研究所研制了一种原位测量设备——声学长矛^[14,15]。声学长矛是一种原位测量海底近表面几米沉积层范围内声速和声衰减剖面的仪器,其最上部是宽频带的声源发射器,其下是一个插入海底沉积层的线性的接收器阵列,包括 7 个间距 0.4 m 检波器,有 10 个独立的信号记录道,可以原位记录全波形的声波信号,通过计算可以得到浅层沉积中的声传播速度和声衰减。测量前先在水中测量校正,然后将长矛自由降落插入沉积层中,不同的检波器得到不同的

收稿日期:2007-01-08;修回日期:2007-05-20

基金项目:国家 863 计划项目(2006AA09Z116)

作者简介:郭常升(1964-),男,山东青岛人,研究员,博士,研究方向为海洋地质声学,电话:0532-82898529 E-mail: guochine@ms.qdio.ac.cn

波至数据,结合校正得到的数据可以计算出声速,求取声衰减系数。

1992年,南安普顿海洋研究中心和 Geotec 公司合作研制了沉积物声学物理特性测量仪。这是一种可以测量海底沉积物多种声学属性的测量平台,包括纵波速度和声衰减、横波速度、渗透性、流体速度以及海洋学的其它属性参数(温度、盐度和压力)。针对粗颗粒和细颗粒的沉积物,包括 1~10 kHz 和 10~100 kHz 高低两个频段的纵波声源,可适应于水深 6 000 m 以内的海底测量。

1.2 国内测量技术

在国内,由于测试仪器设备的缺乏和昂贵的海上试验费用,利用声学原位测试技术进行海底沉积物声学特性的研究相对较少^[10]。国家海洋局第二海洋研究所的陶春辉等^[10]将美国的声学长矛进行了改进,开发出了多频海底声学原位测试系统,用来测量海底界面以下数米沉积物的纵波声速剖面,利用垂直插入沉积物的水听器阵列接收的声波时间差和振幅差来得到海底沉积物的声速和声衰减的垂直剖面。除此之外,国内还没有其它海底表层介质声学性质原位测量技术。对于海洋环境声场研究,海底表层介质的声速和声衰减是不可缺少的参数,仅靠海底沉积物取样测量分析,已经远不能满足现代海洋研究的需求。

2 新原位测量技术原理

2.1 测量原理

通过详细的相关资料的查阅,分析研究了国外已有的海底介质声学性质原位测量技术,作者提出了新的原位测量方法。这种新方法基于一点发射,两点以上接收,测量原理如图 1 所示。假设发射换能器 T 到第一个接收换能器 R1 的距离用 L 表示;两个接收换能器之间的距离用 l 表示,海底浅层沉积物的平均纵波声速用 v 表示。当发射换能器 T 在 t_0 时刻发射一个一定频率的声波信号后,该信号在海底浅层沉积物中经过路径 A 到达接收换能器 R1,所用时间设为 t_1 ,信号能量为 e_1 ,这样同一个信号经过路径 A、B 到达接收换能器 R2 时,所用时间设为 t_2 ,信号能量为 e_2 。由此有:

$$t_1 = L/v \quad (1)$$

$$t_2 = (L + l)/v \quad (2)$$

这样可以计算出两个接收换能器接收到同一个声波的时差 t 为:

$$t = t_2 - t_1 = l/v \quad (3)$$

同时,可计算得到声波在沉积物中传播距离为 l 时的衰减系数 r 为:

$$r = (e_1 - e_2)/e_1 \quad (4)$$

按照上面的测量方法, t 是原位测量仪器所测到的时差, l 是仪器预先设计的已知参数,这样可以得到海底浅层沉积物的平均纵波速度 v 和声衰减系数 r 。

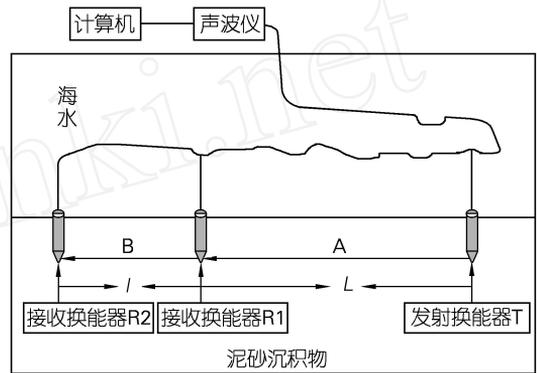


图 1 室内模拟测量系统

Fig. 1 Test system in the laboratory

2.2 测量仪器构造

从上面的描述可以看出,提出的测量方法所依据的测量原理非常简单,但是由于海底的环境比较复杂,如何实现这种方式的测量是一个比较复杂的技术问题,需要从测量环境、沉积物声学特性以及硬件的复杂程度等方面深入分析研究,设计出合理可行的技术方案。通过前期的实验室内模拟沉积物测量实验分析,认识了沉积物的一些声学特性,例如,松软沉积物对 10 kHz 频率以上的声波衰减非常严重,发射接收距离大于 50 cm 时,测量穿过沉积物的声信号就比较困难,这一点对于设计仪器的发射接收换能器间距非常重要,这也是为什么国外的原位测量仪器发射接收间距一般不超过 1 m 的原因。对于松软的沉积物,设计的测量仪器的发射接收间距最好不要超过 50 cm,此外接收换能器要有较高的灵敏度,因为穿过沉积物的声信号都被严重衰减,变的很弱。根据沉积物的声学特性以及上面提出的测量方法,并通过多次的模拟测量试验,作者设计出了测量系统的海底部分仪器,如图 2 所示,整体测量系统构成如图 3 所示。

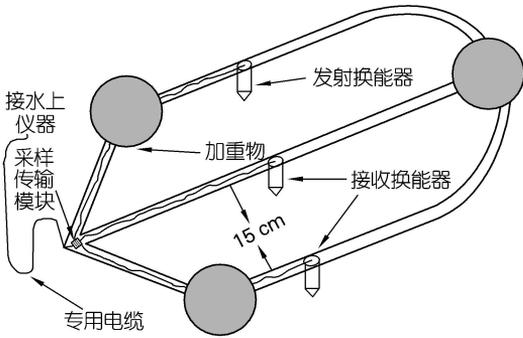


图2 海底部分测量仪器

Fig. 2 The seabed part of in situ acoustic apparatus

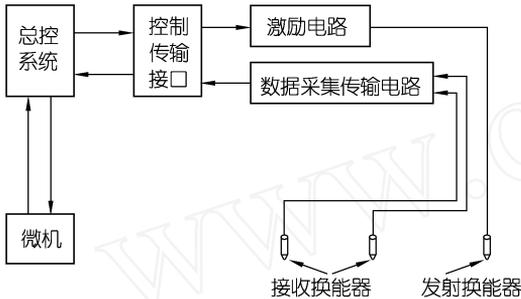


图3 原位测量系统构成示意图

Fig. 3 Sketch map of in situ acoustic apparatus

测量系统的关键部分是海底部分,这部分应有合理的仪器形状,以便适应海底测量,使声波探头容易插入表层沉积物中,并且保证沿仪器外壳传播的波以及沿其它路径传播的波晚于穿过沉积物的直达波到达接收探头。海底部分仪器包括采样传输模块、换能器部分以及一些相关的辅助设备(重力平衡设备、接收辅助系统)。换能器部分由一个发射换能器和两个接收换能器组成,三个换能器探头直径在2~3 cm之间且位于一条直线上,两个接收换能器之间的距离为15 cm。声波发射探头采用宽频圆柱状探头,频率范围在10~40 kHz之间。这样水下系统部分在重力平衡设备的帮助下,探头插入海底沉积物中,在与沉积物良好耦合后,由水上仪器控制发射声波信号,即可实时随船原位测量海底浅层(20 cm之内)沉积物的声学性质,包括沉积物纵波声速和声衰减等声学参数,可以实施站点式测量,也可以实施拖动式测量。

3 测量试验

3.1 室内模拟测量试验

完成测量仪器的制造之后,需要对测量仪器进

行测量检验。根据预定的研究方案,首先利用仪器在室内进行模拟测量试验,验证仪器是否能够正确测出沉积物的声速和声衰减系数。模拟试验是在一个长2 m、宽0.7 m、高1 m的大水槽中进行的,水槽底部足够厚的泥砂沉积物,然后加入海水,让沉积物充分自然沉淀(静止15 d以上),然后把测量系统的海底部分放入到水槽中进行测量分析,重复多次记录,计算声速和声衰减系数。模拟试验中记录的其中一组波形如图4所示。

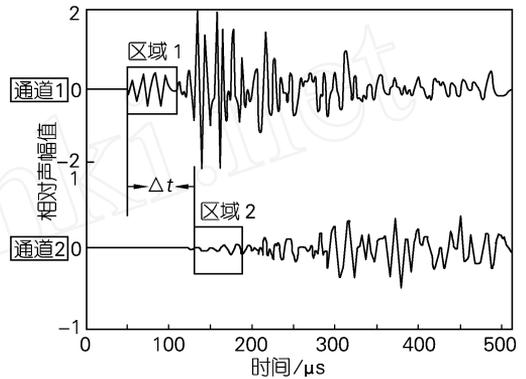


图4 室内试验记录的其中一组波形

Fig. 4 A group wave from trains of laboratory testing

从图4记录的波形中,可以清楚地看到首先到达的穿过细砂沉积物的直达波(区域1和区域2)随后到达的是其它路径传播的波,由于声波从声源发出穿过沉积物直接到达接收探头1和探头2经过的路径最短,最先到达接收探头,在时间域内与其它波容易分开,到达时间容易识别。根据记录的穿过模拟沉积物的直达波初至时差,可以较容易地计算获得沉积物的声速,对于模拟试验中的砂质沉积物,仪器多次重复测量获得的声速是1661 m/s,利用透射法测量得到的声速是1682 m/s,两种方法的测量值相差21 m/s,这一差值可以认为是人为操作造成的误差,属于正常的测量误差。多次重复测量得到的声速值基本一致,试验验证测量系统能够正确地测量出沉积物的声速。通过计算两个接收探头记录的初至波能量,可以得到声波在两个探头间的衰减系数为0.95,直观上来看波的衰减还是很严重的,根据记录波形中首波的可分离程度,可以确定系统测量得到的衰减系数是正确的。其实这也符合海底沉积物的声学特性,具有较大的声衰减和较低的纵波速度(速度值一

一般在 1 400 ~ 1 800 m/s 内)。

3.2 海上实测试验

在实验室内进行了多次的试验后,于 2006 年 4 月中旬在宁波近海进行了首次海试。整个测量系统在海上工作比较稳定,在海试过程中取得了较好的数据。

在海试现场对所测得的数据进行了初步筛选,当场进行了声速的测量计算,主要测量参数为:主频 30 kHz,采样间隔为 0.6 μs,采样长度为 1 024 点。在海试测量期间,作者选择了两个区域进行了站点式测量,在此分别称为 A 区和 B 区。通过多次测量,获得了 A 区和 B 区海底表层沉积物的声速平均值,表 1 列出了 A 区和 B 区每次测量的声速值以及它们的声速值。

表 1 海上试验测得的声速值

Tab. 1 Acoustic velocity by ocean test

A 区		B 区	
仪器记录号	声速 (m/s)	仪器记录号	声速 (m/s)
DS1972/ DS1982	1 520	DS2072/ DS2082	1 551
DS1992/ DS2002	1 515	DS2092/ DS2102	1 548
DS2012/ DS2022	1 509	DS2112/ DS2122	1 535
DS2032/ DS2042	1 509	DS2132/ DS2142	1 540
DS2052/ DS2062	1 512	DS2152/ DS2162	1 529
平均值	1 513	平均值	1 540.6

A 区和 B 区的位置相距较远(近百公里),故两区的海底沉积物有所不同。从表 1 的海底沉积物声速测量值也可以看出,A 区的海底沉积物声速值较低,B 区的海底沉积物声速值较高,这符合测量海域 A 区和 B 区的海底环境情况,因为从仪器的下放过程,可以直接观察到 A 区海底水流较慢,B 区海底水流较快,受海底水流的影响,A 区的海底沉积物颗粒较细,B 区的沉积物颗粒相对较粗,反映在声速值上就是 B 区的沉积物声速值会比 A 区的沉积物声速值高。

由于没有本海区海底沉积物取样测量值进行比较,所以无法验证测量系统在本次实测海域中获得的沉积物声速值的精确度,从记录波形分析,是基本正确的,图 5 为一组现场测量的波形。此外,由于记录波列中干扰信号较强,无法十分准确地计算沉积物的声衰减系数,只能粗略计算,比如图 5 中声衰减系数为 0.97。

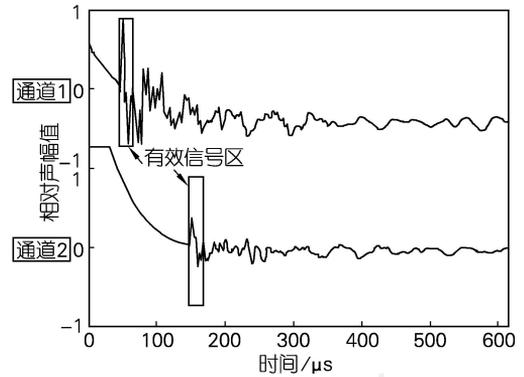


图 5 海上现场测量得到的一组波形(DS2132/ DS2142)

Fig. 5 A group wave from trains of ocean test (DS2132/ DS2142)

4 讨论

作者通过分析国内外已有的海底底质声学性质原位测量技术,提出了全新的海底底质声学性质原位测量方法,据此制作了相应的测量系统。通过多次室内测量试验以及宁波近海的海试测量,证明提出的原位测量技术是可行的。这一技术与国内外同类技术相比,具有操作简便、测量速度快的优点,可以根据需要进行点式测量。但通过海试也发现了测量系统存在的问题,这一技术还不成熟,需要进行多次海试,根据海试结果进行不断改进,进一步完善该技术。

通过海试后的分析研究,作者认为测量系统应在以下几个方面改进:(1) 水下部分仪器的重力平衡系统。受海底水流的影响,仪器可能会不正确地放置海底,使探头不能较好地插入沉积物中,要求这部分要有合适的重量及重量的合理分布。(2) 提高发射换能器的能量和接收换能器的灵敏度,这样可以有效提高信噪比。(3) 改变换能器之间的距离,通过多次海试,寻找更为合理的换能器分离间距。

参考文献:

- [1] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. low frequency range [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28: 168-178.
- [2] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. higher frequency range [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28: 179-191.

- [3] Hamilton E L. Prediction of in situ acoustic and elastic properties of marine sediments [J]. **Geophysics**, 1971, 36: 266-284.
- [4] Hamilton E L. Sound attenuation as a function of depth in the sea floor [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1976, 59: 528-535.
- [5] Stoll R D. Marine sediment acoustics [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1985, 77: 1 789-1 799.
- [6] 卢博,李敢先,孙东怀. 中国东南近海海底沉积物声学物理性质及其相关关系[J]. 热带海洋学报,2006,25(2): 12-17.
- [7] 卢博,李敢先,黄韶健. 南海北部大陆架海底沉积物物理性质研究[J]. 海洋工程,2004,22(3): 48-55.
- [8] 卢博,梁元博. 南海某海区海底沉积物物理、声学 and 弹性性质[J]. 海洋科学,1995,23(3): 42-45.
- [9] 陶春辉,金肖兵,金翔龙. 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): 46-49.
- [10] 陶春辉,王东,金翔龙. 海底沉积物声学特性和原位测试技术[M]. 北京:海洋出版社,2006. 11-25.
- [11] 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.
- [12] Griffin S R, Grosz F B. In situ sediment geoacoustic measurement system [J]. **Sea Technology**, 1996, 37 (4): 19-22.
- [13] 陶春辉,Baffi S,Wilkens R H. Biot 反演在夏威夷钙质沉积物原位测量声速和衰减中的应用[J]. 海洋学报,2005,29(3): 80-83.
- [14] Fu S S, Wilkens R H. Acoustic lance: New in situ seafloor velocity profiles [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1999, 99 (1): 234-242.
- [15] Gorgas T J, Wilkens R H, Fu S S, *et al.* In situ acoustic and laboratory ultrasonic sound speed and attenuation measured in heterogeneous soft seabed sediments: Eel River shelf, California [J]. **Marine Geology**, 2002, 182: 103-119.

Development of in situ marine sediment acoustic measurement technique

GUO Chang-sheng¹, DOU Yu-tan^{1,2}, GU Ming-feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received Jan. 8, 2007

Key words: marine sediment; in situ measurement; acoustic velocity; acoustic attenuation

Abstract: In this paper, we systematically introduce the measuring principle of in situ marine sediment acoustic measurement technique, and present a new in situ measuring method. According to this measuring method, we assemble an in situ marine sediment acoustic measurement system. At first, we have a test on different sediments such as arenilla sediment in the laboratory, the acoustic velocity obtained by in situ test accords well with the acoustic velocity acquired by transmission method. Then we run an ocean test in Ningbo offshore in April 2006, and acquire acoustic velocity of the measuring area, which verifies the feasibility of in situ marine sediment acoustic measurement technique, and lays a foundation for advanced development of in situ marine sediment acoustic property apparatus.

(本文编辑:刘珊珊)