

研制海底浅地层剖面仪的某些声学问题*

中国科学院海洋研究所剖面仪研制组**

近十年来,探测海底几十米至几百米松散沉积层分层结构的“海底浅地层剖面仪”已逐步发展定型,并广泛用于海底工程施工和海洋地质研究方面。这种浅地层剖面仪主要采用以下几种声源装置:电致伸缩器件、磁致伸缩器件、电磁脉冲声源、电火花放电器以及气枪。

浅层剖面仪实际上是一种以地层为探测目标的主动声纳,本文给出了有关的声纳方程式,它将有助于这类仪器的工程设计和性能预报。

从探层声纳方程式出发,采用电磁脉冲声源^[1]研制了浅层剖面仪,获得了穿透地层几十米的较高分辨率的记录。对此,本文也作了简单的介绍。

一、探层声纳方程

浅层剖面仪利用回声测深的原理,接收波阻抗不同的地层界面所反射的声脉冲讯号,并在记录纸上相应地描绘出海底地层的剖面图来。

如图 1 所示,若要探测的是地层 m 与 n 的界面,可列出下列声纳方程:

$$S + DI_s - TL + DI_h - N = DT \quad (1)$$

其中: S ——离声源 1 米处的发射声源级(分贝);

DI_s ——发射指向性指数(分贝);

TL ——传播损失(分贝);

DI_h ——接收指向性指数(分贝);

N ——水听器处的噪声级(分贝);

DT ——水听器输出端的检测阈(分贝)。

传播损失 TL 项包括三部分:(1) 球面扩展损失;(2) 地层内的衰减(吸收,散射等)损失;(3) 地层界面上的反射损失和透射损失。可列出下列方程:

$$TL = DL + 2 \sum_{i=1}^m \alpha_i d_i + \sum_{i=1}^{m-1} PL_{ij} + RL_{mn} + \sum_{j=2}^m PL_{ji} \quad (2)$$

其中: DL ——球面扩展损失(分贝);

α_i ——地层 i 的衰减损失(分贝/米);

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 332 号。

** 参加这项工作的有: 道克敏、马秉琨、庄杰枣、唐宝珏、阎伯增、金翔龙、朱宏庆、季祥荣、郭晓林。本文由道克敏执笔。

参加这项工作的还有国家计委地质局高德扬、朱伟霖、丁志火。

张叔英给予这项工作以有益的帮助。

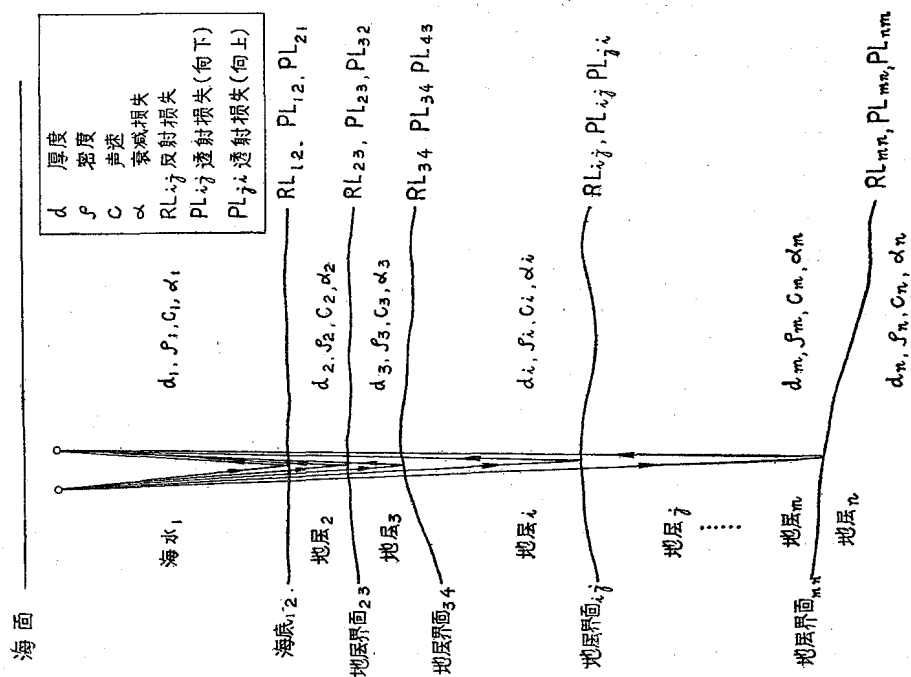


图1 海底地层剖面测量原理

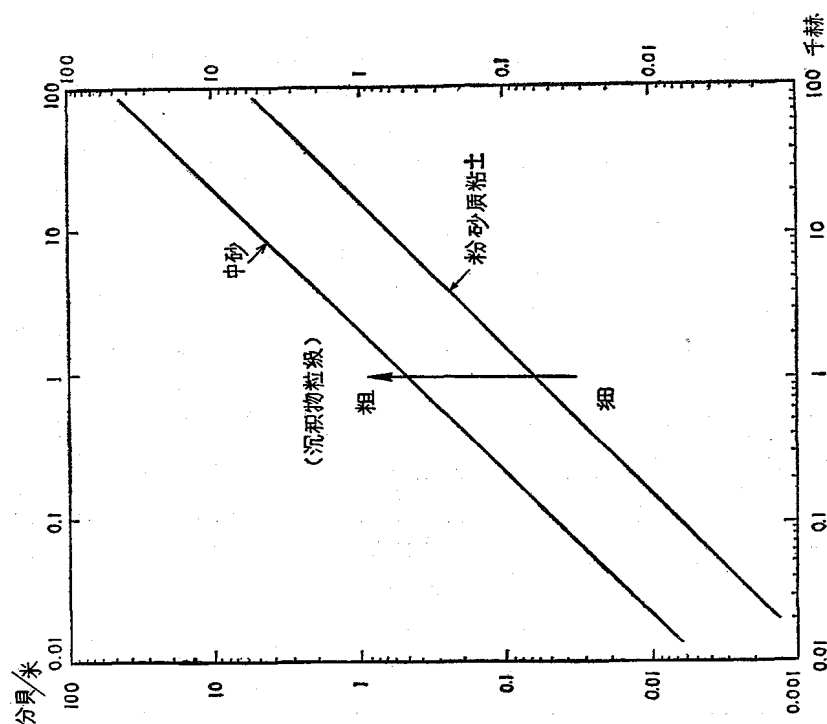


图2 沉积物的衰减损失

表 1 在垂直入射时沉积物的反射损失 RL_{ij} 与透射损失 PL_{ij} 、 PL_{ji}

层 j / 层 i	海 水 ($\rho C = 1.57$)	粉砂质粘土 (2.16)	粘土质粉砂 (2.20)	砂质粉砂 (2.42)	砂-粉砂-粘土 (2.50)	粉砂质砂 (3.07)	极 细 砂 (3.27)	细 砂 (3.45)
粉砂质粘土 ($\rho C = 2.16$)	16.1 $\frac{1.50}{-1.27}$					说明：例如砂质粉砂与细砂的地层界面， $RL_{ij} = 15$ 分贝， $PL_{ji} = 1.72$ 分贝， $PL_{ij} = -1.44$ 分贝。 其中： $RL_{ij} = -20 \lg \left \frac{\rho_j C_j - \rho_i C_i}{\rho_j C_j + \rho_i C_i} \right $ $PL_{ij} = -20 \lg \frac{2\rho_j C_j}{\rho_j C_j + \rho_i C_i}$ $PL_{ji} = -20 \lg \frac{2\rho_i C_i}{\rho_j C_j + \rho_i C_i}$		
粘土质粉砂 (2.20)	15.2 $\frac{1.59}{-1.34}$	40 $\frac{0.08}{-0.08}$						
砂质粉砂 (2.42)	13.5 $\frac{2.08}{-1.68}$	25 $\frac{0.54}{-0.51}$	27 $\frac{0.44}{-0.42}$					
砂-粉砂-粘土 (2.50)	12.1 $\frac{2.25}{-1.79}$	23 $\frac{0.62}{-0.50}$	24 $\frac{0.54}{-0.51}$	36 $\frac{0.14}{-0.14}$				
粉砂质砂 (3.07)	9.9 $\frac{3.39}{-2.43}$	15 $\frac{1.62}{-1.44}$	16 $\frac{1.52}{-1.36}$	18.4 $\frac{1.10}{-0.98}$	20 $\frac{1.02}{-0.83}$			
极 细 砂 (3.27)	9.1 $\frac{3.56}{-2.62}$	14 $\frac{1.94}{-1.60}$	14 $\frac{1.82}{-1.58}$	16.5 $\frac{1.42}{-1.21}$	18 $\frac{1.20}{-1.14}$	30 $\frac{0.26}{-0.26}$		
细 砂 (3.45)	8.6 $\frac{4.08}{-2.76}$	13 $\frac{2.26}{-1.80}$	13.4 $\frac{2.16}{-1.73}$	15 $\frac{1.72}{-1.44}$	16 $\frac{1.52}{-1.29}$	25 $\frac{0.54}{-0.51}$	31.4 $\frac{0.26}{-0.17}$	
中粗砂 (3.73)	7.8 $\frac{4.55}{-2.97}$	11 $\frac{2.74}{-2.10}$	11.6 $\frac{2.62}{-2.01}$	11.4 $\frac{2.04}{-1.73}$	14 $\frac{1.94}{-1.60}$	20 $\frac{0.92}{-0.83}$	23.6 $\frac{0.54}{-0.51}$	28 $\frac{0.36}{-0.34}$

d_i ——地层 i 的厚度(米);

PL_{ij} ——由地层 j 向地层 i 穿透的界面透射损失(分贝), 穿透方向向下;

RL_{mn} ——地层 m 与地层 n 的界面反射损失(分贝);

PL_{ji} ——由地层 j 向地层 i 穿透的界面透射损失(分贝), 穿透方向向上。

海底松散沉积物的衰减损失值 α 与频率的一次方成正比: $\alpha = Af$, 系数 A 与沉积物的类型很有关系(图 2)^[3]。

垂直入射时的反射损失值 RL_{mn} 和透射损失值 PL_{ij} 、 PL_{ji} , 我们可利用 E. L. Hamilton 测得的阻抗值^[2]进一步算得, 列出表 1。

由表 1 可见, 除砂质海底外, 反射损失值至少为 11 分贝, 而透射损失值 $PL_{ii} + PL_{ji}$ 最多为 0.6 分贝。因此, 在地层层次较少的情况下, 对于几千赫的工作频率, 透射损失比起反射损失和衰减损失要小得多, 可以略而不计, 方程(2)化为:

$$TL = DL + 2 \sum_{i=1}^m \alpha_i d_i + RL_{mn} \quad (3)$$

从而使问题简便多了。

二、仪器的声学设计

浅层剖面仪的设计指标: 工作水深 50 米; 地层探测深度 30—50 米; 地层分辨率 0.5—1 米; 换能器固定在舷侧使用。

决定采用现有的电磁脉冲声源^[1]作为发射部件。

工作频率的选择: 作为传播衰减 TL 中的主要项——地层的衰减损失 α , 据图 2 要求选择尽可能低的频率, 最好低于 10 KHZ。但因水听器固定在舷侧, 为了降低主要干扰避开船舶噪声的强大低频干扰, 又要求选择尽可能高的频率, 以高于 1 KHZ 为宜。考虑到 0.5—1 米的分辨率(图 3), 最后将工作主频集中在 3 KHZ 左右。

提高峰值声压: 按照理论分析^[1], 除尽可能减小发射器中线圈与铝板之间的耦合距

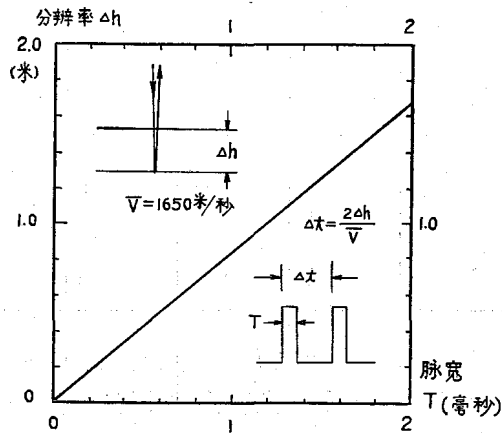


图 3 地层分辨率 Δh 与脉宽 T 的关系

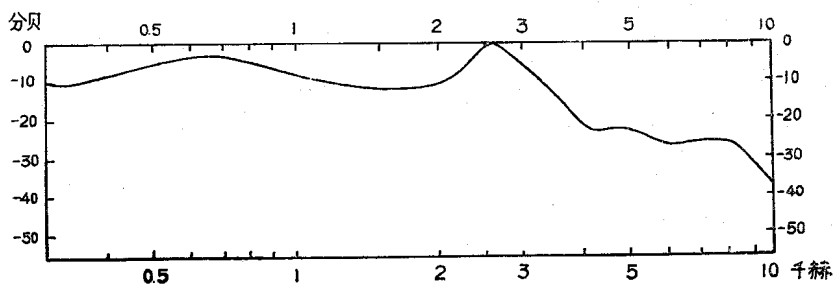


图4 电磁脉冲声发射器能谱

离外,为提高 3KHZ 左右的峰值声压,还作到: (1) 使线圈电感值 L_0 与储能电容 C 相配合,电谐振在 1.5KHZ,即工作主频的一半处; (2) 发射铝板的边长至少取 0.5 米左右,即至少相当于工作主频的波长。实测能谱(图 4)的主频与理论估计略有偏差。在离声源一米处的峰值声压约 10^6 巴。

压低噪声干扰: 为压制螺旋桨的干扰,水听器组成一六基元半波长(3KHZ)等间距不加权线列阵。图 5 为其指向性图,但实测表明“组阵”压制螺旋桨干扰约 10 分贝。在工作时,水听器阵收到的噪声级约 10 分贝。关于放大器的带宽要统一考虑讯号和噪声谱,实际上在 3KHZ 工作主频,1/3 倍频程比 1/1 倍频程的讯噪比约提高 6 分贝。

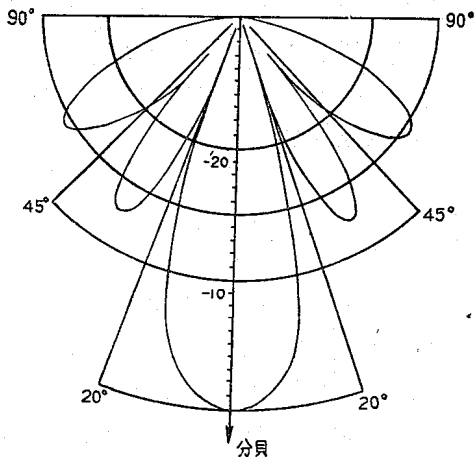


图5 六元等间距(半波长)线列阵指向性图

发射功率的选择: 已有的 1,000 焦耳装置^[1]是否足以在水深 50 米的情况下穿透 30—50 米地层呢? 对方程 (1)、(3) 代入以下参数: $S = 120$ 分贝, $DI_s = 11$ 分贝, $DI_h - N = 6$ 分贝, $DT = 6$ 分贝, $DL = 46$ 分贝, 结果还有 70 多分贝的余量用于穿透地层。由图 2、表 1 可以估计,只要砂层的总厚度不是太厚,是可以获得 30—50 米的地层记录的。

三、测量结果

图 6 是采用三种不同频率在同一测线的剖面记录,其中 30KHZ 与 50KHZ 只穿透 10 多米含水量很高的软泥层,而 3KHZ 则不但穿透这层软泥,还进一步穿透约 25 米的硬质粘土层,直达海底以下约 40 米的基岩面。很明显: 地层的衰减损失随频率的降低而减小,地层相当于低通滤波器。

图 7、图 8、图 9 是不同海区的探测记录,采用的工作频率都是 3 KHZ。记录表明: (1) 波阻抗小,衰减损失小的泥质地层容易穿透;波阻抗大,衰减损失大的砂质地层难穿透。(2) 波阻抗差别大,反射损失小的界面,例如沉积层与基岩、泥层与砂层的界面反射讯号强;波阻抗差别小、反射损失大的界面反射讯号弱。

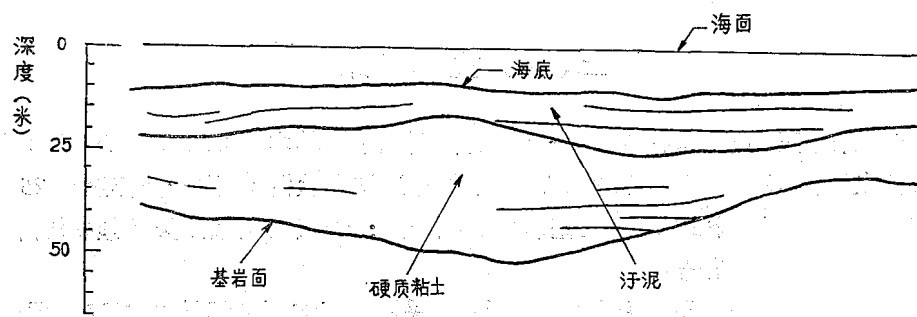
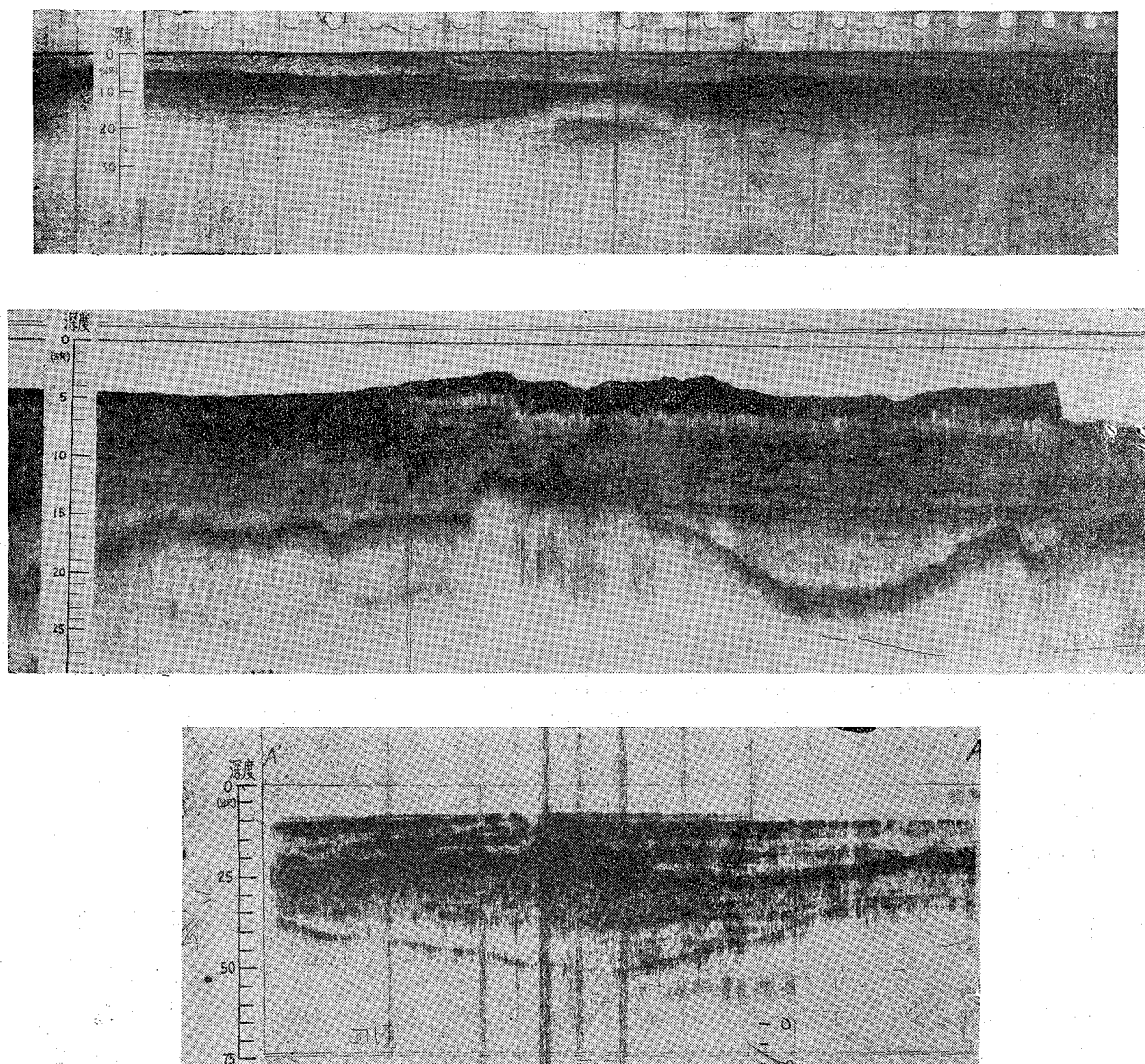


图6 工作频率对地层剖面测量的影响

上—50KHZ 中—30KHZ 下—3KHZ

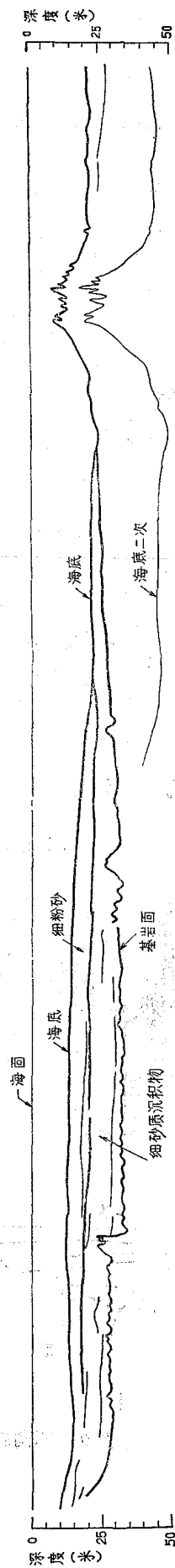
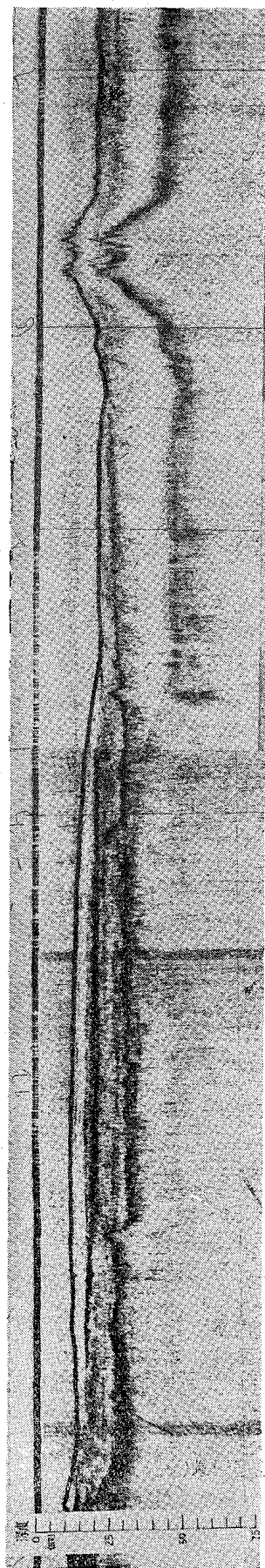


图7 不同底质的地层记录(例1)

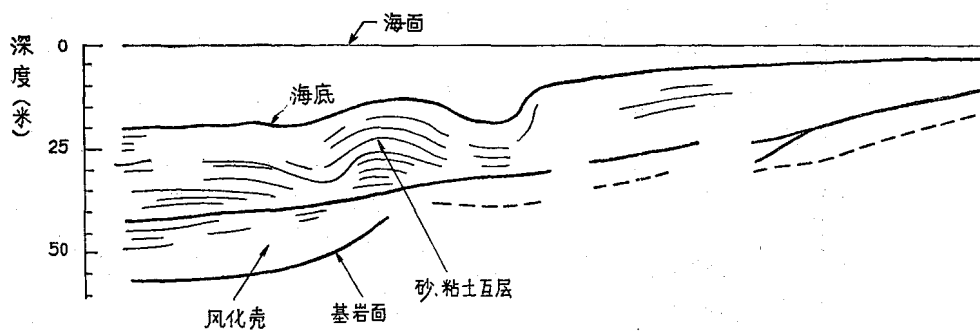
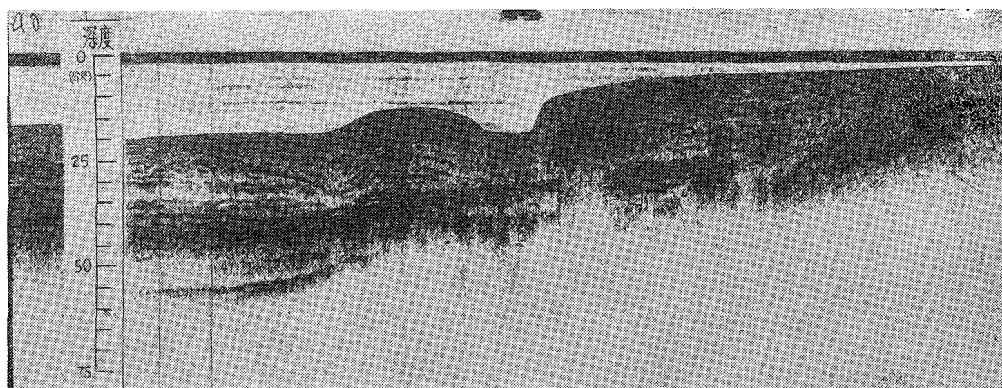


图8 不同底质的地层记录(例2)

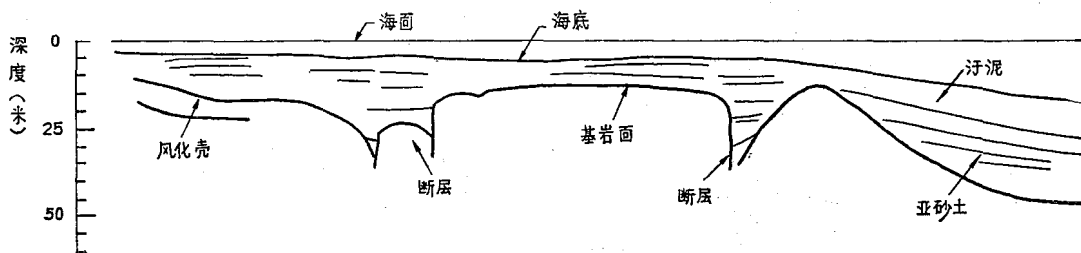
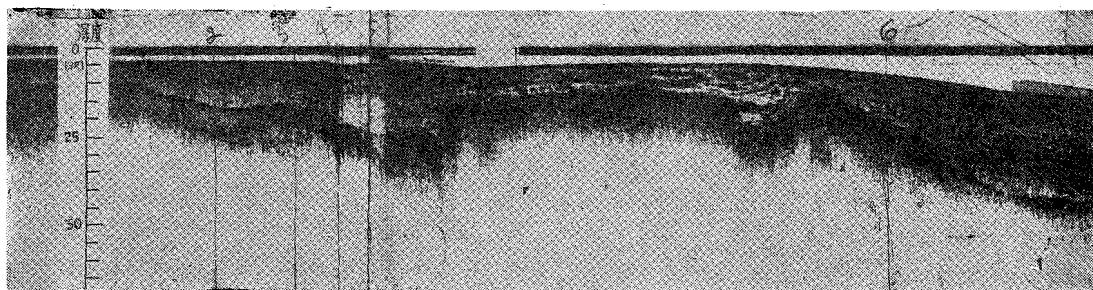


图9 不同底质的地层记录(例3)

四、结 语

本文列出了用于浅层剖面测量的声纳方程，介绍了在方程指导下研制仪器的某些声学考虑。采用电磁脉冲声源研制的仪器在航速七节的条件下获得了穿透松散沉积物几十米的较高分辨率的剖面记录。

探层声纳方程式对于地层剖面仪的研制、使用以及剖面记录的整理解释都是很有意义的。为了使这一方程式有效地用于地层探测，需要对各类地层的声学特性进行深入的了解。

参 考 文 献

- [1] 刘春奎、张叔英、凌鸿烈，1965。电磁脉冲声源系统的分析和测量。声学学报 3(1): 1—7。
- [2] Hamilton, E. L., 1970. Reflection coefficients and bottom losses at normal incidence computed from Pacific sediment properties. Geophy., 35(6):995—1004.
- [3] Hamilton, E. L., 1972. Compressional-wave attenuation in marine sediment properties. Geophy., 37(4):620—646.

SOME ACCOUSTIC PROBLEMS IN THE DEVELOPMENT OF THE SUB-BOTTOM PROFILING SYSTEM

PROFILING SYSTEM RESEARCH GROUP, INSTITUTE OF OCEANOLOGY, ACADEMIA SINICA

ABSTRACT

The sonar equation for sub-bottom profiling measurement was introduced. Following this equation, some accoustic considerations about testing of profiling system were given. The system provides a sub-bottom profiling record with a higher resolution by using a "boomer" as source. It penetrates the un-consolidated sediment up to a depth of tens of meters.