长江口和杭州湾浮泥声参数测量*,**

凌鸿烈　孙耀秋　(中国科学院东海研究站　上海 · 200032)
杨　挺　(同济大学　上海 · 200092)

本文报导了用 4 种频率(100kHz、150kHz、500kHz 和 1500kHz)的超声波,对长江口和杭州湾的水底浮泥在不同重度下测得的声速和重度之间、声衰减与重度之间以及在一定重度下频率与声衰减之间的变化关系曲线。实验结果表明:在相同条件下,杭州湾浮泥的声衰减比长江口浮泥的声衰减大一点(约 10%)。在重度 10.0～16.0kN/m³ 之间,声衰减与重度成线性关系,声衰减与频率约成一次方关系;声速随重度的增加变化不大(约±2%),在低频率(100kHz 和 150kHz)上出现一个明显的极小值,例如,长江口浮泥重度 14.5kN/m³ 时,声速最小,约为 1460m/s,杭州湾浮泥重度 13.5kN/m³ 时,声速最小,约为 1440m/s。

关键词:浮泥,声参数测量

Measurements of acoustic parameters of fluid-mud in Changjiang Estuary and Hangzhou Gulf

LING Honglie　SUN Yaoqiu　(Shanghai Acoustics Lab., Academia Sinica, China · 200032)
YANG　Ting　(Tongji University, China · 200092)

The acoustic attenuation coefficients and velocities of fluid-mud collected from Changjiang Estuary and Hangzhou Gulf respectively have been measured with ultrasonic waves of 4 frequencies (100, 150, 500 and 1500kHz) in a water tank. The results show that the linear variations of acoustic attenuation coefficients with bulk densities of fluid-mud in the range of 10.0～16.0kN/m³ for a certain frequency and with frequencies for a certain bulk density are confirmed, that the attenuation coefficient of fluid-mud in Hangzhou Gulf is a little more (about 10%) than that in Changjiang Estuary for a certain bulk density at the same frequency, and that the variation of acoustic velocities with bulk densities in the range of 10.0～16.0kN/m³ is slight (about ± 2%) and a minimun of velocity can be clearly found at 100kHz and 150kHz frequencies, e.g. 1460m/s vs14.5kN/m³ in Changjiang Estuary and 1440m/s vs13.5kN/m³ in Hangzhou Gulf.

Key words: fluid-mud, measurements of acoustic parameters.

1　前　言

江河水底的浮泥探测是国内外航道部门十分重视的一项具有重大经济效益的研究课题。从现代的航道来看,重度 13.0 以下的水底浮泥层是允许船舶通航的,但是通常用高频回声测深仪测得的水深是重度比 13.0 小得多(如 10.5)的浮泥深度。按规定,当测得的水深小于预定 的通航水深时,就需要在航道上进行挖泥疏浚,而实际上很可能这是不需要的。近年来,航道部门采用高低频同时工作的双频测深仪,探测水底地形,希望由此可确定水底浮泥层的深度,但效果并不理想。双频测深仪的主要功能,是由高频探测决定水底深度,而低频探测用于对水底底质进行粗略识别(如硬底或软底等)。由高低频测得的水深差,不可能确定由重度 13.0 所界定的浮泥层。因此,国内航道部门多年来一直期望研制一种能够以重度 13.0 浮泥层界定水底的回声测深仪,也就

*　上海市自然科学基金(96ZA14045)和国济大学海洋地质开放实验室基金项目
**　收稿日期:97-4-1

是希望该测深仪具有估测水底浮泥层重度值的功能。目前比较现实而有效地预报航道水深的方法是在航道内除了用通常的回声测深仪沿航道测量水深以外,还在航道的一些典型位置用接触式浮泥重度仪测定水底浮泥层中的重度-深度剖面,由此确定重度为 13.0 浮泥层所界定的水底深度。交通部上海航道勘察设计研究院已经使用 γ 射线浮泥密度测量仪进行这类工作,取得了成功的经验。由于 γ 射线浮泥密度测量仪使用很不方便,尤其是对人体会有伤害,希望予以取代。本项工作就是为研制新一代超声浮泥重度计所做的基础性研究工作。结果表明:合适地选择工作频率后,通过声衰减测量可以比较精确地在相应范围内估测浮泥(或其他悬浮质)的重度,并且具有良好的重复性和稳定性。

2 测量系统简介

水底浮泥的声速和声衰减测量系统如图 1 所示。根据实验室的现有条件,利用尺寸为 43.5×35.0×20.0cm^3 的塑料箱作为测量水槽。水槽两端上面装有一条导轨,导轨上有一只发射换能器 T 和接收水听器 H_1 或 H_2,并伸入到水中 10cm 处。T,H_1 和 H_2 在一条直线上,T 和 H_1 及 H_1 和 H_2 的间距 r_1 和 r_2 都为 15cm。经实验证实 H_1 的存在会对 H_2 接收声信号产生"遮蔽效应"(降低达 6dB),因此在测量声衰减时采用一只接收水听器,相继放在距离 r_1 和 r_1+r_2 上接收声信号。显然采用这种测量方法,水听器的接收灵敏度可以是未知的。

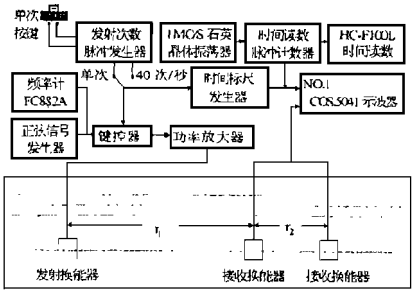


图 1 浮泥声速和声衰减测量方块图

在测量之前(在可能的条件下,水槽要抽真空,排除气泡影响)需将水槽内浮泥搅拌均匀,同时要注意别让气泡过多进入水中,造成介质声速下降,声衰减增大。当浮泥搅拌均匀后,等 1～2 分钟让气泡外溢,同时进行浮泥采样。每次都以 50ml 烧杯采样,经过滤、烘干和称重,即可求出这种状态下的含沙量和体积百分比,与此同时要测出清水和浑水中的温度。通常在水槽的不同部位作两次采样,然后作相应处理,其结果进行平均,这样可提高测量精度。

在测量过程中,由脉冲发生器按每秒 40 次的重复率(或单次),输出脉冲宽度为 30μs 或 100μs(可调)的脉冲去控制频率分别为 100kHz,150kHz,500kHz 和 1500kHz 的正弦信号,再经过 2W 功率放大以后,激励发射换能器 T,从而在浮泥中发射声脉冲信号。在发射声脉冲信号的同时,时间标尺发生器(由单稳态电路组成)输出标尺脉冲,开启时标计数门,使重复频率为 1M Hz 的时标脉冲通过,并由时间读数器计时。水听器 H_1 或 H_2 的接收信号分别输入到双线示波器的一个输入端。时间标尺发生器输出的标尺脉冲输入到示波器的另一端,调节标尺脉冲的宽度,使其后沿对准接收信号 1 或 2,则从时间读数器上就能读出相应的传播时间 t_1 或 t_2(可精确到 1μs),以测定传播介质(浮泥)的声速。从接收信号 1 和 2 的幅度差就能测定浮泥的声衰减。

3 声参数测量原理

3.1 声速 c 的测量

如上所述,相继调节时间标尺发生器输出的标尺脉冲(50～740μs 连续可调)的后沿,分别对准在 r_1 和 r_1+r_2 位置上水听器接收到的声信号 1 和 2 的前沿,则由时间标尺脉冲宽度键控的 1MC/s 石英晶体振荡器输出的时标脉冲进行计数,就能读出相应的传播时间 t_1 和 t_2,测得传播介质的声速为

$$c_0 = \frac{r_2}{t_2 - t_1} \text{ 或 } c_0 = \frac{r_1}{t_1}; c_0 = \frac{r_1 + r_2}{t_2} \qquad (1)$$

为了检查测量系统工作是否正常,可以先在存有清水的水槽内测出声速进行鉴别。

3.2 声衰减 β 的测量

悬浮液的声衰减由声散射和粘滞两个因素所引起的。当声波波长比浮泥粒径大很多时,可以近似地认为浮泥的粒子是球形的,而且浮泥的体积浓度小于 10%(即含沙量约 300kg/m^3),可以忽略粒子间的相互作用,称稀悬浮液。当悬浮浓度大于 10%,粒子间的相互作用不能忽略,此时要产生第二次散射波和粘滞波,再产生高阶相互作用波,这个过程继续下去,最终到达稳态[1]。

声衰减 β 的测量需要先在清水中(即 $\beta=0$)测得水听器在 r_1 和 r_1+r_2 两个位置上的输出幅度比 R_0,然后再在含一定浮泥的浑水中测出 r_1 和 r_1+r_2 两个位置上的输出幅度比 R_1,从而求出浮泥在该浓度下声衰减系数 β,即

$$\beta = 20\log(R_1/R_0)/r_2 \quad (2)$$

这种测量方法的优点在于测量结果与发射声场及水听器灵敏度无关[2]。

在超声浮泥重度计实际测量时，插入浮泥的声传感器仅由一只发射换能器和一只接收水听器组成，因此，根据在 r_1 处水听器 H_1 分别在清水和不同浮泥重度的浑水中测得的接收声信号幅度分别为 A_0 和 A_1，直接计算声衰减系数 β 为

$$\beta = 20\log(A_0/A_1)/r_1 \quad (3)$$

这种方法的缺点是因声发射换能器的辐射阻抗在清水里和不同重度浮泥的浑水中有变化，使辐射声功率改变，从而影响声衰减的测量精度，但实际测量结果表明：在浮泥重度小于 16.0 情况下，按(2)和(3)式计算得到的 β 值相差不大，从中说明发射换能器在不同重度下，辐射阻抗变化不大。从测量不同浮泥重度下发射换能器导纳表明：随着浮泥重度的增加，发射换能器的辐射阻略有增加，电容基本保持不变，带宽增加，(如重度为 15.7，共振频率处辐射阻增加 8%，带宽增加 13.8%) 见表 1。

表 1　500kHz 换能器在共振点不同重度下导纳、带宽和机械品质因素(长江口泥样)

测量项目 \ 含沙量 (kg/m³) \ 编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	0 (清水)	66	92	130	140	234	312	400	460	476	546	600	846
重量 (kN/m³)	10.00	10.42	10.58	10.82	10.89	11.48	11.97	12.53	12.91	13.01	13.46	13.80	15.35
电导(等效阻Ω)	2.01 (497.5)	1.99 (502.5)	1.98 (505.1)	1.97 (507.6)	1.96 (510.2)	1.95 (512.8)	1.94 (515.5)	1.93 (518.1)	1.91 (523.6)	1.90 (526.3)	1.89 (529.1)	1.87 (534.8)	1.86 (537.6)
电纳 (pf)	888	890	890	886	888	888	890	888	894	888	888	873	886
带宽 (kHz)	45.150	45.403	46.537	47.049	47.225	47.457	47.955	48.462	49.306	49.528	49.860	50.928	51.363
品质因素 (Q_M)	10.61	10.55	10.30	10.19	10.15	10.10	9.99	9.89	9.72	9.67	9.61	9.41	9.33

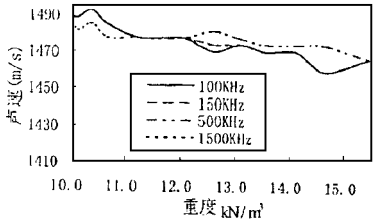


图 2(a)　长江口地区水底浮泥声速与重度的关系

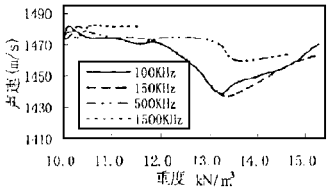


图 2(b)　杭州湾地区水底浮泥声速与重度的关系

4　测量结果分析

(1) 长江口和杭州湾浮泥与一般的悬浮液具有相似的地声特性。在一定的重度范围内，声速随重度变化不明显，见图 2。在重度小于 16.0 的浑浊液内，声速比清水中小，与 A. B. Wood 声速理论曲线吻合[3]。

(2) 在不同的工作频率下，声衰减与重度呈线性关系，由图 3 可见，在相同重度下，杭州湾水底浮泥的声衰减比长江口浮泥声衰减大些，这说明浮泥的声衰减与区域有关，也即与浮泥本身的成分、粒径分布、粘滞性等因素有关[4]。图中直线是采用最小二乘法计算的拟合直线，以反映声衰减和重度的线性关系，为研制超声重度计提供了很好的实验依据。为了减少偶然误差，对含沙量、声传播时间和脉冲幅度等参数测量都采用多次平均值(根据上海航道勘定设计研究院分析结果：长江口浮泥属亚粘土，平均粒径 D_{50}= 0.043mm；杭州湾浮泥属亚砂土，平均粒径 D_{50} = 0.0126mm)。

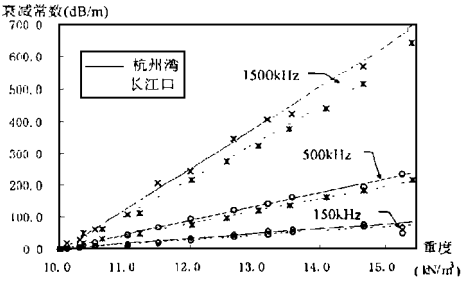


图 3　长江口和杭州湾水底浮泥声衰减与重度的关系

(3) 对于某一重度的浮泥,其声衰减与声波频率近似呈一次方关系,见图4。对于长江口和杭州湾的水底浮泥,在一定的重度范围内(10.0～16.0),声衰减可以分别用如下的经验公式近似得到。

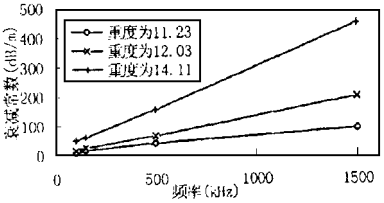


图4(a)　长江口海区水底浮泥声衰减与频率的关系

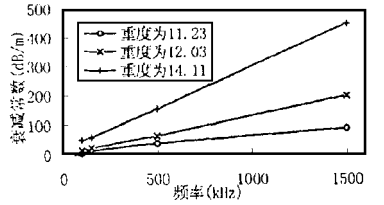


图4(b)　杭州湾海区水底浮泥声衰减与频率的关系

$$\text{长江口: } \beta_1 = 0.072\times(\rho - 10.0)\times f + \beta_0(f)$$
$$\text{杭州湾: } \beta_2 = 0.08\times(\rho - 10.0)\times f + \beta_0(f) \qquad (4)$$

式中: β_1、β_2 为声衰减系数(dB/m); β_0 是频率 f 时海水的声衰减[5]; ρ 为重度(kN/m^3); f 是声波频率(kHz)。

5　结　语

(1) 图2～4中给出的测量数据为多次测量的平均值,但是每一次浮泥搅和均匀后的实测值和平均值差别不大(小于±10%),这说明测量的重复性和稳定性能满足要求。

(2) 在不同区域应用超声衰减法估测水底浮泥重度,也需要通过采集泥样事先进行"标定"。但是由(4)式可知,对长江口和杭州湾的水底浮泥来说,两者的"标定"系数差别不大。

本项测量工作是在张叔英研究员指导和帮助下进行的,在此谨致谢意。

参考文献

1　钱祖文. 颗粒介质中声衰减的浓悬浮粒子理论及其应用. 物理学报, 1988; 37(1): 64～70

2　许能贵, 殷志贤. 浑水的声衰减. 应用声学, 1985; 4(2): 36～38

3　A. B. Wood. A Textbook of Sound. London: G. Bell & Sons, 1941: 361～362

4　E. L. Hamilton Compressional-wave attenuation in marine sediments. Geophysics, 1972; 37(4): 620～646

5　R. J. 乌立克. 工程水声原理

(上接第193页)

由图4所示结果可见,加入辅助频率1.06MHz参与辅照后,随着1.06MHz的声强增大,其合效应近似呈线性增长,最强时可达到28kHz单独作用时声化学产额的4倍左右! 同时合效应也明显地高于两单频单独辐照时的代数和,最高可达到两倍。对这一现象我们认为是两个方面的原因所致。一是合作用增强了样品的机械扰动,使更多的空气能从样品表面进入而使空化核增多,以致空化效应增强;二是1.06MHz加入后可使能参与空化的空化核增加。因为在双频超声作用下,在空化过程中各自空化泡内爆时,会产生许多新的空化核,这些空化核不仅贡献于该频率的自身再空化,同时也可能为另一频率的空化提供更多的空化核。从而使空化效应增强,即声化学产额提高。

参考文献

1　丁东. 声学技术, 1992; 11(3): 41～44

2　冯若, 李化茂. 声化学及应用. 安徽科技出版社, 1992; 1～5

3　赵逸云, 鲍慈光, 冯若等. 化学通报, 1994; 8: 26～29

4　ZHU Changping, FENG Ruo, HUANG Jinlan et al. Acoustics Issue. 南京大学学报, 1995; 31; 180～183

5　A. Weissler et al., Amer. Chem. Soc. J., 1950; 72: 1769～1775

6　冯若, 赵逸云, 陈兆华等. 声学技术, 1994; 13(2): 56～61