

水声物理与水声工程  
技术交流会  
论 文 集

中国科学院声学研究所图书馆藏

1999年11月

水声物理与水声工程技术交流会  
论 文 集

中国科学院声学研究所图书馆藏

# 水声物理与水声工程技术交流会

## 论文目录

- 1 海洋噪声研究进展.....关定华
- 2 多层有源材料厚度振动换能器的设计.....曹承伟 ✓
- 3 方位分割式声波水泥胶结测井仪 (SBT) .....罗善政
- △4 低频宽带合成孔径声纳实验研究新进展.....李军 丛卫华 ✓ ✓
- 5 模糊控制理论在机动目标信息融合及自适应跳跃中的应用  
.....何瑾瑜 孟桥 陆信人
- 6 中长线阵线谱相干特性分析.....王茂法 张国栋 王广恩 ✓
- 7 用全局动力学模型进行水声信号检测/分类研究.....薛文虎 张明敏
- 8 目标方位的声压、振速联合估计.....冯海泓 惠俊英 ✓
- 9 对声纳设备可靠性水平评估的探讨.....傅宇青 ✓
- 10 5000W 低频宽带发射机.....田力 ✓
- 11 在过渡区楔形海域目标定向的修正研究.....姜冠亭
- 12 用 TMS320C40 构成通用加固型阵列信号处理单元.....崔永生 ✓
- 13 水中弹性管状目标声散射场的频谱特性.....李迎春 王仁乾 ✓
- 14 低频纵向换能器减小尺寸的一种措施.....俞宏沛 唐义政 林家旺 ✓
- 15 潜艇反射特性的数值预报.....徐海亭 赵洪 谭红波 刘彩芬 ✓
- 16 电补偿法校准系统的研究.....陈毅 袁文俊 沈建新 ✓
- 17 声传播损失预报模型与实验研究.....范敏毅 陈东 纪峻岭
- 18 被动测距声纳的一种抗干扰被动跟踪系统.....李训诤 史秋亮

- 19 一种新的抗多径干扰的非线性阵处理方法  
 .....丛卫华 惠俊英 刘孟庵 ✓
- 20 宽带波达方向估计新方法研究.....梁国龙 徐海东
- 21 多阵综合定位与识别的统一体系结构.....杜栓平 赵航芳 宫先仪 ✓
- 22 中国航空声纳发展史.....肖国有 谢朝矩
- 23 船舶螺旋桨噪声预报研究.....朱锡清 孙红星 何凌 ✓
- 24 均匀圆阵的两维角估计.....赵航芳 李然威 宫先仪 ✓
- 25 高性能通用接收机设计.....姜亚浩 黄文华 ✓
- 26 湍流边界层起伏压力谱和 PVDF 水听器响应的实验研究  
 .....葛辉良
- 27 目标反射场的近场声全息研究方法.....暴雪梅
- 28 换能器校准多路径信号建模技术的基本原理和计算机模拟  
 .....赵涵
- 29 声相关海流剖面 (ACCP) 测量的流速估值方法.....郭纪捷 荀俊姑
- 30 利用 ADCP 技术监测波向.....张道平 梁捷
- 31 水听器类型对水声材料插入损失测量的影响  
 .....李水 沈奇慧 顾昌灵

32. 基阵对多途信号的处理增益分析.....郭社锋 ✓

# 海洋噪声研究进展

安定华

中国科学院声学研究所

海洋噪声是水下探测、通信，特别是海底固定接收系统的一种重要干扰。海洋噪声谱级已由 Knudsen 在 1948 年和 Wenz 在 1962 年给出，目前为人们通用。

近年来人们对噪声源机理进行了深入的理论研究，实验室模拟实验和海上观测，有了不少进展。在噪声能流的测量方面，发现了一些有趣的现象。提出了利于噪声进行海洋环境观测的不少新方法。

## 1. 破碎浪噪声

目前已知道，破碎浪是海洋噪声的主要来源。随风速增加，浪高也增加，由于非线性效应，浪高到一定程度，就会变尖、翻转，形成白头浪，激起水花，在水下形成气泡群，气泡群不断振动，辐射出噪声。实验证明，破碎浪辐射出的噪声能量，与波浪能消耗在破碎上的能量成正比，这个比例为  $10^8$ 。破碎浪产生的噪声谱有一峰值频率  $f_p$ ，在峰值的上、下频率，噪声谱级随  $f^{-1}$  下降，在  $f_p$  以下的频率上，按不同的方式下降(Kennedy 1993)。图 1 中显示 Kennedy 大量海上测量数据，经过海面平衡范围波浪破碎消耗能量归一化(Phillips 1985)的结果。图中我们加上了一个“中间”频谱形式

$$|\bar{N}|^2 = 1.3 \times 10^{-7} \frac{2.5\xi^{1.5}}{1+1.5\xi^{2.5}}$$

和  $\pm 3$  分贝的曲线(虚线)，其中  $\xi = f/f_p$ ， $f_p = 520$  赫。从平均峰值来看，其能量为海浪破碎能量的  $0.6 \times 10^{-8}$ ，与 Loewin 与 Melville(1991)的实验数据惊人地接近。波浪过程的所谓平衡范围，也就是当风吹过海面时先产生小尺度的波浪，当风继续增强时，盛行波的波长，继续增加。在给定风速下谱峰以下的短波成份强度不再增加，但频谱变宽，能量增加，后来短波成份的谱密度达到平衡，这反映动力过程达到平衡，即从风输入的能量，转化为波与波的相互作用，并在波浪的破碎中消耗。

实验结果表明，海面波浪噪声是由于波浪破碎时卷入的气泡产生的。声能的谱峰  $f_p$  与波浪破碎的特征长度成反比(或与“白头”区的面积平方根成反比)，与波浪破碎时消耗的能量成反比。

## 2. 气泡噪声

经过仔细观察，发现破碎浪、雨滴等发出的噪声都是由气泡振动产生的。水面附近的气泡的谐振频率与其半径的关系是  $f = 3.25 \times 10^{-6} / a$ ， $a$  为气泡半径，微米。气泡产生的噪声与气泡总量和半径分布有关。实验室实验(Medwin et al 1990)测出了破碎浪气泡的半径分布。Loewin 等人(1991)利用测得的气泡分布计算出噪声频谱与实测谱和 Knudsen 谱比较在 1 千赫到 20 千赫范围，符合很好。

1 千赫以下的噪声目前认为是气泡云总体振荡的结果。假定气泡云半径为 50 厘米，孔隙度为 1%，实测结果和假定几个气泡半径分布  $f(a) = a^{-4.3}$ ， $a^{-5}$  的计算结果符合较好(见图 2)。

### 3. 雨噪声

雨噪声的特点,是在15千赫附近有一个宽带的谱峰(图3),其强度与雨量有关。经过实验室观察雨噪声是由雨滴敲击海面和水滴将空气带入水中形成气泡,气泡以偶极子方式振动辐射出噪声,雨滴噪声中气泡振动的噪声占主要地位。(Pumphrey et al 1990)

### 4. 低频噪声

经过仔细观测,人们发现在0.3赫附近噪声有谱峰,约在120dB到160dB左右,当频率升高时大约以-20~-23dB/倍频程下降,在5-10赫范围有一个噪声最小的频段。

理论分析证明,这个谱峰是由波浪的非线性相互作用,Longuet-Higgises(1950)提出,如两个波波长相同,传播方向相反时会产生驻波,这时波压力与单个波传播时不同,不是随深度指数衰减,而是不随深度变化,由于非线性相互作用产生一个二倍频的压力,Brekhovskikh(1966)研究了连续谱波浪的驻波的问题,发现由于波浪相互作用产生的噪声谱随频率降低而升高,在低频有一峰值,其频率为海面波高谱频率峰值的一半,理论与实验符合很好,稍有不符合之处可以同海浪方向扩展来解释(见图4)。

### 5. 噪声能流的测量

使用声压和振速(加速度)传感器可以直接测到声能流,使用这种方法观察到许多有趣的现象(Shchurov 1998)

- (1) 噪声场有各向同性部分与各向异性部分,在风速为1-2米/秒时,95%的噪声场为各向同性,但当风速达到10米/秒时就有50-60%的场是各向异性的。
- (2) 噪声能流方向为:6-20赫噪声能流由海面向海底与海面成30-45°;50-200赫噪声能流为水平方向与波浪方向一致。
- (3) 幅度相等方向相反的噪声能流会互相抵消。
- (4) 使用能流接收系统。当平均时间增加时均匀各向同性噪声干扰按 $1/\sqrt{BT}$ 降低。

### 6. 噪声的应用

海洋中噪声目前用于海面风、雨量、浅海海底特性等方面的测量,最近提出“阳光方法”(Buckingham 1993)即利用噪声在物体上散射对物体进行探测,是一个有趣的方向。

#### 参考文献

- [1] Brekhovskikh L. M. 1966. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2, 582-587
- [2] Buckingham M. J. 1993. *Journal of Computational Acoustic*, 1, 117-140
- [3] Kennedy R. M. 1993. *J. Acoust. Soc. Am.*, 94, 2443
- [4] Loewin M. R. and Melville W. K. 1991. *J. Acoust. Soc. Am.*, 90, 2075-2080
- [5] Longuet-Higgins 1950. *Philos. Trans. Roy. Soc. London Ser. A*, 243, 1-35
- [6] Medwin H. and Beaky M. M. 1989. *J. Acoust. Soc. Am.*, 88, 408-412
- [7] Philips O. M. 1985. *J. Fluid Mech.*, 156, 505-531
- [8] Pumphrey H. C. & Crum, L. A. 1990. *J. Acoust. Soc. Am.*, 87, 142-148
- [9] Shchurov V. 1998. *Proc. 16<sup>th</sup> ICA and 135<sup>th</sup> ASA meeting*, 989-990, Seattle, USA

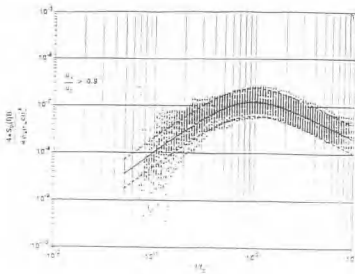


图1 破碎浪噪声谱

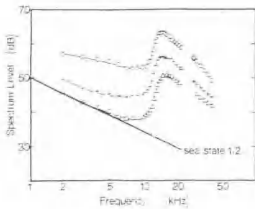


图3 雨噪声  
 $\Delta$  为 0.5 毫米/小时  
 + 为 0.8 毫米/小时  
 ○ 为 1.3 毫米/小时

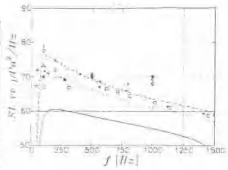


图2 气泡云噪声谱  
 分布为  $f(a) = a^{-n}$ , 实线为  $n=1.85$   
 点线为  $n=4.3$ , 划线为  $n=5$

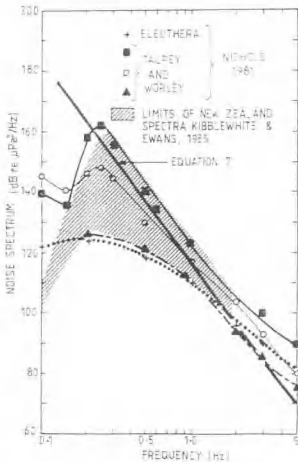


图4 海浪非线性低频噪声

# 多层有源材料厚度换能器的设计

721厂 曹承伟

## 一、问题的提出

具有多层无源匹配层的单层陶瓷厚度换能器的设计已有比较成熟的技术，文献[1]介绍的方法是工程上常用的设计方法。

然而，为了解决某些低电容量、高阻抗的高频换能器与长电缆严重失配的问题，需采用多层有源材料在声学上串联、电学上并联的换能器，以使发射换能器电阻与电缆电阻匹配，增加输出功率；或使接收换能器电容量尽可能多地超过电缆电容量，减小电缆分布电容对接收信号的衰减。

多层有源材料换能器制做时，由于在有源材料之间存在无源的粘结层等，当高频时这些无源层的影响不可忽略时，不简单地直接采用[1]中的方法。本文在文献[1]的基础上，推导多层压电陶瓷厚度换能器设计计算公式，并用实际换能器进行实验验证。

## 二、设计思路及设计方法

不失一般性，本文以双层压电陶瓷厚度换能器为例，如图1所示，双层陶瓷用粘结层联结，激励电源如图1所示联结，形成电学上并联、声学上串联的结构。无源多层匹配层可按文献[1]计算，其综合效应应用图1匹配层表示。

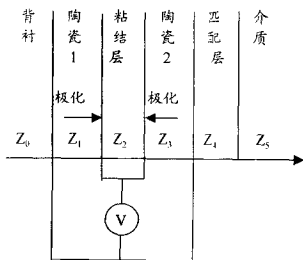


图 1

参数。

具体设计方法如下：

第一步：陶瓷1看作有源层，陶瓷2看作无源层，用 $[N_2]$ 、 $[N_3]$ 、 $[N_4]$ 分别表示粘

首先考虑陶瓷层1单独受电压 $V$ 激励，陶瓷2看作无源层，把它及粘结层看作“匹配层”，则用文献[1]中方法可计算陶瓷1激励下各层材料的界面振速。然后考虑陶瓷2单独受电压 $V$ 激励，陶瓷1无源，它与粘结层看作“背衬层”，再用文献[1]中方法计算在陶瓷2激励下各层材料的界面振速。将上述二步计算得到的各层界面振速相加，可得到陶瓷1、2同时激励时其界面振速，由此可计算双层陶瓷换能器厚度振动时的电声



结层、陶瓷2和匹配层的传输矩阵<sup>(1)</sup>，则图1可简化为图2所示， $Z^{(1)}_{前}$ 可由

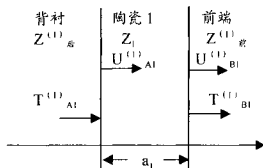


图2

$[N_1][N_2][N_3]$ 级联并计及介质  $Z_3$  得到,  $Z^{(1)}_{后}=Z_0$ , 于是图2可用如下方程组表示:

$$\begin{Bmatrix} T^{(1)}_{A1} \\ T^{(1)}_{BI} \\ V \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -n_1 & n_2 & -n_3 \\ -n_2 & n_1 & -n_2 \\ n_3 & -n_3 & n_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U^{(1)}_{A1} \\ U^{(1)}_{BI} \\ I^{(1)}_1 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $n_1=Z_0/Zh(\gamma^D a_1)$ ,  $n_2=Z_0/Sh(\gamma^D a_1)$ ,  $n_3=h_{33}/(j\omega)$ ,  $n_4=n_1/A$ ,

$n_5=1/(j\omega C_0)$ ,  $\gamma^D=\alpha+j\omega/v^D$ .

$v^D$ —压电陶瓷恒电位移条件下声速(无源陶瓷声速为  $v^S$ )

上标(1)表示陶瓷1单独激励时的参数, 下文上标(2)类推。

发射时: 因  $T^{(1)}_{A1}=Z^{(1)}_{后}U^{(1)}_{A1}$ ,  $T^{(1)}_{BI}=-Z^{(1)}_{前}U^{(1)}_{BI}$  (2)

将(2)代入(1)式, 得

$$\begin{cases} U^{(1)}_{A1}=I^{(1)}_1 n_4 (n_2 - n_1 - Z^{(1)}_{前}) / ((Z^{(1)}_{后} + n_1)(Z^{(1)}_{前} + n_1) - n_2^2) \\ U^{(1)}_{BI} = -I^{(1)}_1 n_4 (n_2 - n_1 - Z^{(1)}_{后}) / ((Z^{(1)}_{后} + n_1)(Z^{(1)}_{前} + n_1) - n_2^2) \\ V = n_1 (U^{(1)}_{A1} - U^{(1)}_{BI}) + n_3 I^{(1)}_1 \end{cases} \quad (3)$$

由(3)式解得电阻抗和电流分别为:

$$Z^{(1)}_{前} = V / I^{(1)}_1 = n_1 (U^{(1)}_{A1} - U^{(1)}_{BI}) + n_3 \quad (4)$$

$$I^{(1)}_1 = V / Z^{(1)}_{前} \quad (5)$$

将(4)、(5)代入(3)中前二式, 可得  $U^{(1)}_{A1}$  和  $U^{(1)}_{BI}$ , 再由文献[1]中公式可计算各层表面振速。其中最关键的是陶瓷2前后表面振速  $U^{(1)}_{A3}$  和  $U^{(1)}_{B3}$  及匹配层前表面振速  $U^{(1)}_{B4}$ 。

第二步, 陶瓷2看作有源层, 陶瓷1看作无源层。用前一步的方法可得到陶瓷2、陶瓷1前后表面振速  $U^{(2)}_{A3}$ ,  $U^{(2)}_{B3}$ ,  $U^{(2)}_{A1}$ ,  $U^{(2)}_{B1}$  及匹配层前表面振速

$U^{(2)}_{B4}$ 。

第三步, 当陶瓷1、2受电压  $V$  同时激励时, 由迭加原理, 得到陶瓷1、2前后表面振速为:

$$U_i = U^{(1)}_{i1} + U^{(2)}_{i1} \quad (6)$$

式中:  $x=A, B; i=1, 2$

将(6)代入(3)式中的第3式(此时无上标), 可得  $I_1, I_2$ , 于是双层换能器的

电导纳为:

$$Y_a = (I_1 + I_2) / V \quad (7)$$

反映该换能器发射特性的传输函数为  $(U^{(1)}_{R1} + U^{(2)}_{B4}) / V$ 。

### 三、实验验证及结果

将厚度为 0.2mm 的两片 PZT—5 陶瓷按图 1 所示, 用环氧粘合, 粘结层厚  $5\mu\text{m}$ , 制成具有二层匹配层的换能器。前端向水中辐射, 后端为吸收背衬。按上节公式计算换能器电导纳曲线与实测结果基本吻合。

将粘结层及陶瓷厚度设为 0, 其计算结果与单层陶瓷换能器的实测结果同样基本吻合。用此验证文中的计算方法是正确的。本文的计算方法不难推广到更多层有源材料发射换能器的设计。用这一思路也不难推导多层有源材料接收换能器的设计, 并且可以研究自发自收多层换能器的传输损失。

#### 参考文献

- [1] S.J.H. Van Kervel and J.M. Thijssen. Ultrasonics Vol.21(1983) 134-140

# 方位分割式声波水泥胶结测井仪 (SBT)

罗善政

(第七一五研究所 贵阳 311400)

## 1 引言

声波水泥胶结测井仪广泛用于油田下套管注水泥的井中, 检查固井质量。在这种井中, 声波从发射器到接收器有四种可能的途径: 沿套管、沿水泥环、通过地层、通过泥浆。同时测量并分析沿不同途径传播信号的波形和幅度, 可判断套管与水泥环 (第一界面) 胶结情况、水泥环与地层 (第二界面) 胶结情况及串槽的情况。

通常的声波水泥胶结测井仪 (CBL) 采用同管形发射和接收换能器, 属无定向测量, 测井响应是井周  $360^\circ$  平均结果, 不能反映井眼径向水泥胶结不均匀的能力。CBL 仪器在工作时要求在井眼内良好居中。CBL 仪器要求在自由套管中刻度, 且自由套管的尺寸与日的层套管尺寸相同, 但在油气层附近往往无自由套管可供刻度而影响 CBL 测量精度。

方位分割式声波水泥胶结测井仪 (SBT) 克服了 CBL 仪器上述致命的弱点和诸多其它不足, 各油田迫切希望国内尽快开发出这种新型声波测井仪, 以免除对国外的依赖。

## 2 SBT 测井阵

如图 1 所示, SBT 利用六个推靠臂将六个换能器极板紧贴到套管内臂。每个极板上, 一端装有  $1/4$  波长, 100KHz 主频, 受控激励的发射器 Tx, Tx 由二元发射换能器组成; 极板另一端装有一个接收换能器, 如图 2 所示。

SBT 下井时收臂, 上提测量时张臂。参看图 3。1、3 和 5 号极板发射器在上, 接收器在下端, 而 2、4 和 6 号极板则相反, 发射器在下, 接收器在上端。奇数号极板和偶数号极板在高度上错开 0.25ft (7.62cm)。

相邻四个极板构成螺旋形双发双收补偿声衰减率测量,  $T_1 \rightarrow R_2 \leftrightarrow R_5 \leftarrow T_4$  构成第一个  $60^\circ$  扇区测量,  $T_2 \rightarrow R_1 \leftrightarrow R_4 \leftarrow T_3$  构成第二个  $60^\circ$  扇区测量, 依此类推, 六个极板就构成六次循环补偿测量, 复盖了套管四周  $360^\circ$  范围。

## 3 发射束控

在声波测井中, 声波是以滑行波形式传播的, 如图 4 所示。极板上的发射器 Tx 由二元换能器组成, 其激励时间是受控制的。离接收器 R 远的单元 Te 先被激励, 近的单元 Td 延迟激励。延迟时间  $t=d/V_p$ , d 为间距,  $V_p$  为套管纵波 (P 波) 速度。Te 先发射的声波,

满足 P 波临界角的声能进入套管并沿套管滑行（侧面波），当从 A 点滑行到 B 点时， $T_4$  延迟发射，以 P 波临界角入射的声波刚好进入 B 点。这两个滑行 P 波同相位迭加后继续滑行，在滑行中又以相同的临界角不断地向井筒中辐射，使得接收器 R 收到的首波幅度增大，提高了信噪比。

#### 4 60° 扇区补偿声衰减率测量及计算

参见图 3、5 和 6。在第一个子周期，首先由 1 号极板上的  $T_1$  发射，两个邻近极板上的  $R_2$ 、 $R_3$  接收，P 波首波幅度分别为  $A_{12}$  和  $A_{13}$ ，声衰减率为：

$$A_1 = \frac{20}{d} \text{Log} \frac{A_{13}}{A_{12}} \quad (1)$$

式中  $d=6''$  ( $R_2$ 、 $R_3$  之间的间距)。

然后，由 4 号极板底部的  $T_4$  发射，仍由  $R_2$ 、 $R_3$  接收，P 波首波幅度为  $A_{42}$ 、 $A_{43}$ ，声衰减率为：

$$A_2 = \frac{20}{d} \text{Log} \frac{A_{42}}{A_{43}} \quad (2)$$

为消除井眼几何形状对测量的影响，对  $A_1$  和  $A_2$  进行平均，得到第一扇区 ( $T_1, R_2, R_3, T_4$  构成) 60° 范围内的声衰减率：

$$\text{ATC}_1 = \frac{10}{d} \text{Log} \frac{A_{13} \cdot A_{42}}{A_{43} \cdot A_{12}} \quad (3)$$

其它扇区的声衰减率 ATC 测量和计算依此类推。那个扇区的衰减率越高，说明该扇区内套管外水泥胶结越好，反之则差。

因而可计算平均声衰减率 ATAV 和最小声衰减率 ATMN：

$$\text{ATAV} = \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 \text{ATC}_n \quad (4)$$

$$\text{ATMN} = \min \{ \text{ATC}_n \} \quad (n=1, 2, \dots, 6) \quad (5)$$

ATAV 与 ATMN 的差值反映水泥胶结在圆周方向的不均匀性。如果在某一段连续出现明显差异，则表明有水泥沟槽存在。



图1 SBT测井阵

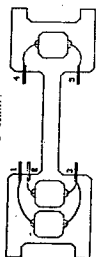


图2 换能器极板

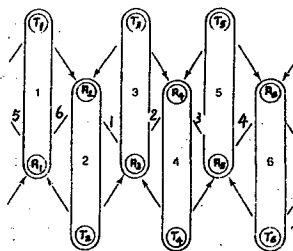


图3 SBT测井阵展开

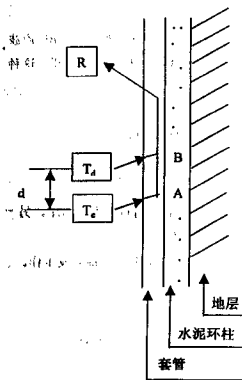


图4 发射束控及滑行波传播



图5 补偿衰减测量

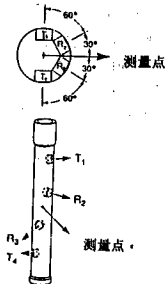


图6 60°扇区构成示意图

## 5 测井效果分析

5.1 SBT 具有对用户友好的水泥成像图, 便于直观、快速评价胶结质量。

地面系统记录和绘制 6 个扇区的衰减曲线, 方向曲线 (指示第一扇区中点对于仪器低线的方向) 和变衰减图。变衰减图是将实测的衰减率分成 5 个灰度等级, 从最黑 (胶结质量最佳) 到白色 (无水泥胶结), 以井眼低侧为母线将套管外水泥胶结状况图形展开, 得到水泥成像图。上述图形及曲线便于直观、快速评价圆周方向和深度方向水泥胶结的程度。

5.2 SBT 刻度简单、灵活、精度高, 只需在测井前将套管和水泥参数输入计算机即可。

5.3 不存在偏心问题。

SBT 的 6 个推靠臂, 每臂推靠力为 50lb, 测井时使换能器极板紧贴套管内管, 可在 4.0" ~ 15.5" 套管中可靠工作, 并在井斜角高达 45° 的斜井中取得合格资料。

5.4 SBT 能准确探测水泥沟槽。

水泥成像图和 ATAV~ATMN 的差异能显示 15° 以上的水泥沟槽和空隙, 独具特色。

5.5 SBT 的极极紧贴套管内壁, 测井不受气侵、井眼内流体类型、套管椭圆度及高速地层的影响。

## 6 结语

如何正确、全面、直观和快速评价水泥胶结质量是石油勘中的一个难题。用 SBT 声波成像测井仪, 很好地解决了这个难题。本文仅简要介绍了它的基本工作原理。要开发这种仪器必须解决下列复杂技术问题。

井下声场研究:

高温高压 (175°C, 140MPa) 严酷环境条件下动密封推靠机械设计;

高数据率电缆遥传 (200KBPS, 7Km 以上) 系统研制;

地面车载图象处理系统设计。

我国在这方面的研究起步晚, 与国外差距大, 尚有许多空白, 可说是无人问津。另一方面又不得不花巨额外汇向国外购买或直接雇用外国测井车来华服务。

SBT 是一种创新的高新技术, 能给油气勘探带来高效益, 值得我们尽早完成开发工作。

### 参考文献

1 E.L. Bigelow, A new and innovative technology for cement evaluation. SPE 20585

2 Western Atlas Wireline Services, 1424XA Segmented Bond Tool Manual.

# 低频宽带合成孔径声纳实验研究新进展

李军 丛卫华 霍国正 郑一鸣 易杏甫等

(第七一五研究所)

## 1 引言

合成孔径声纳(SAS)是在合成孔径雷达技术的基础上发展起来的。早期的SAS技术多是由合成孔径雷达技术直接借用来的,使用窄带系统;研究工作虽在持续进行,但较少有投入实用的报导。近年来,SAS技术多是使用宽带系统,已走出实验室,进入海上试验阶段,处于原理样机阶段[1],尚未进入实用阶段。

常规声纳获得高方位分辨力的方法是升高工作频率或加长声阵的物理孔径,但是频率的升高会降低声纳作用距离,加长声阵的物理孔径会使水下设备过于庞大;而SAS可利用低频、小孔径物理声阵在远距离处(大于500m)取得高方位分辨力(1~10cm)。SAS的一个突出的优点是恒等分辨力,即在任何斜距上的分辨力都相等,而旁扫声纳的方位分辨力随着斜距的增加,分辨力降低。合成孔径声纳由于这些独特的优点而广受关注。利用宽带技术可提高斜距分辨力和具有较低的旁瓣的优点(相对于窄带而言),另外能较好地综合利用目标特性的频率响应。SAS技术有广阔的应用前景,可用于拖曳声纳、舷侧阵声纳、拖线阵声纳、以及舰壳声纳和拖线阵声纳组成的双基地合成孔径声纳等等。在军事上可用于综合探测水雷、探测掩雷尤其是探测沉底雷和掩埋雷。探测掩埋雷的物理机理是低频信号对海底有穿透能力,利用SAS技术提高信混比和分辨力。SAS在海洋开发和民用方面也有广泛的应用。

SAS的基本原理是通过声阵匀速直线运动,将沿航迹方向的回波数据相干累加,形成较大的虚拟孔径,提高方位分辨力。合成孔径声纳的物理基础是要求声场的空间相关半径和相干时间须大于合成孔径长度和进行孔径合成所需的时间,大量实验证明声场的相干性足够好,允许孔径合成。

去年5月,声学所与我所联合做了合成孔径声纳原理试验,这是国内首次合成孔径声纳湖上试验。声阵在轨道上运动,对悬浮在水中的点目标进行了成像分辨力试验,取得了优于30cm分辨力的试验结果[2]。今年5月,我所独立进行了一次合成孔径声纳动态拖曳试验,对合成孔径声纳的关键技术(相位误差补偿、空间降采样率等)进行了系统的试验研究,并对湖底的两个煤气瓶进行了合成孔径成像试验。这次试验是国内首次动态拖曳试验,接近于将来正式使用的合成孔径声纳。合成孔径声纳技术正在进一步的研究中,离原理样机的目标越来越近。

## 2. SAS动态拖曳试验

试验方法简介:电瓶车拖动浮筏,浮筏下装有导流罩,导流罩内装有声阵,操舵尽量使电瓶车保持直线运动,以旁视声纳工作方式探测目标。电瓶车上装有收发电子设备,并用计算机采集回波数据和运动姿态数据。将采集的数据做合成孔径处理,研究合成孔径关键技术。

运动姿态数据由TCM传感器测得,数据如图1。这次试验中声阵的纵摆和横摆较小,小于 $1^\circ$ ,而航向误差稍大( $\pm 2^\circ$ )。这是一次有运动误差下的合成孔径动态拖曳试验,已经接近原理样机试验。

距离压缩图如图 2, 仅经过拷贝相关处理, 此图相当于线性调频旁视声纳的结果, 只是方位分辨力较差。在斜距 10m 和斜距 15m 左右分别有一个目标, 位于体积混响中, 分别是  $\phi 41\text{cm}$  铜球和灭火器的回波, 可以看出目标的抛物线轨迹。发射脉宽 7.2ms, 理论上未经距离压缩前距离分辨力为 5.4m, 经距离压缩处理后距离分辨力为 0.1m, 实验结果目标的抛物线轨迹在斜距方向的分辨力是比较高的, 与理论分辨力相近。在斜距方向上  $\phi 41\text{cm}$  铜球在抛物线轨迹后面仍有回波, 这是由共振现象引起的。煤气瓶 (两个) 放在湖底, 被湖底混响掩盖, 在图 2 中很难看出。说明拷贝相关处理抗湖底混响能力较差。

首先介绍在强混响背景下的单基地 SAS 试验情况。煤气瓶 (两个) 放在湖底, 对煤气瓶方位压缩图如图 3, 上图仅经过合成孔径处理, 下图是对上图开窗显示一个局部。相对而言, 此图比图 2 的信混比提高很多, 说明合成孔径技术更利于探测湖底目标。此图未经过运动补偿, 仍取得较好的结果, 说明低频阵对运动误差有一定的宽容性。下右图是经过运动补偿的结果, 信混比更高。左右两图都很容易判断目标在何处, 位于斜距 25m、方位 27m 左右, 并能大致描绘出两个煤气瓶的轮廓及尺寸 (0.4m $\times$ 0.8m), 与实际使用的工业用煤气瓶的尺寸相当。合成孔径处理抗混响能力的物理机理是: 1) 小物理孔径声阵 (24cm) 发射, 波束较宽 ( $36^\circ$ ), 在斜距 30m 处可有约 20m 的虚拟孔径, 通过合成孔径处理形成很窄的波束 ( $<0.5^\circ$ ), 通过宽波束发射、很窄的波束接收的方法来抗混响, 2) 与目标散射特性有关, 由于目标强度在某些角度上较强, 而在另一些角度就很弱, 通过宽波束发射, 在较大的范围内探测目标, 总能在某个角度上探测到较强的回波, 这样一来能较多地利用回波信息来描绘目标轮廓。

然后介绍多阵元方案试验情况。多阵元方案通常是用来解决空间采样率的问题, 提高拖曳速度或勘测速率。本次试验主要用来抗混响。抗混响的方法简而言之就是多阵元方案的 SAS 比单基地的 SAS 增加了子阵处理, 然后作 SAS 处理, 因此增加了子阵增益。试验结果如图 4, 上左图是经过 SAS 处理, 但未经过运动补偿处理, 以下三图分别是对小球、灭火器、煤气瓶三个目标开窗显示, 与上左图相比增加了内插处理和斜距校正处理。内插处理可提高象数点, 图象较为柔和。斜距校正处理分为幅度校正和几何校正, 这里仅作幅度校正, 它可消除混响的扩展传播衰减, 在斜距维平滑图象, 顺便指出图 2 和图 4 的上左图都未经过斜距校正处理。小球、灭火器的信混比最高, 能清晰成象, 小球的图象拖尾是由共振现象引起的。灭火器的图象也较为清晰, 比图 3 (单阵元 SAS 方案) 中未经运动补偿处理的信混比要高一些, 说明多阵元方案能更好地抗混响。

用三维图来说明合成孔径处理前后的信混比改善的情况, 图 5 是合成孔径处理前的结果, 图 6 是合成孔径处理后的结果, 对比两图信混比改善率大于 6dB。

### 3. 结论

通过合成孔径声纳动态拖曳试验的目标成象试验, 得出主要结论如下: 1) 很低的信混比下 (尤其是对沉底目标) 能提取较为清晰的目标图象, 2) 对运动误差 (航向误差 $\pm 2^\circ$ ) 有一定的宽容性, 3) 运动补偿能更清晰地描绘目标轮廓, 4) 多阵元方案能更好地抗混响。

试验是 SAS 课题组共同努力的结果, 在此向参加这次试验的人员表示感谢。



参考文献

- [1] Jacques Chatillon, etc, "SAMI: A Low Frequency Prototype for Mapping and Imaging of the Seabed by Means of Synthetic Aperture", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 24, 1999(1).  
 [2] 李军、丛卫华等, "宽带合成声纳实验研究", 水雷战与舰船防护, 1999 (3)。

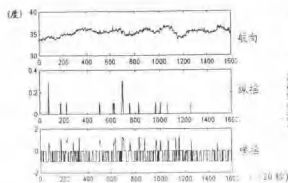


图 1 动态拖曳姿态数据

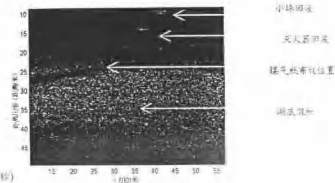


图 2 距离压缩图(旁视声纳视图)

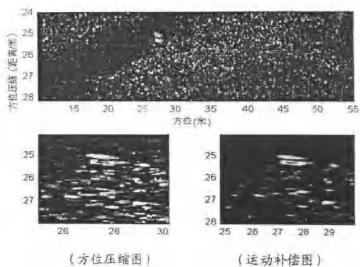


图 3 两个煤气瓶的方位压缩和运动补偿图(合成孔径声纳视图)