

水產部黃海水產研究所

水產叢書

第17号

水声仪器的魚群探測

В.Г.阿若查, Е.В.石什科娃 著
黃海水產研究所譯

1961年6月

序 言

水中定位——借助水声仪器向水中發射声振动，再接收从水下障碍物反射回来的回声訊号，用以測定水下物体的位置——广泛地用以測定海洋深度，發現海岸、船隻，以及確定魚群所在地点（魚群定位）。魚群定位是魚群偵察的一个手段，它只是水声仪器使用的一个方面。与水声仪器的其他用途比較，有着許多的共同原理和定律，但也有不少差異。差異之所以存在，首先是由于魚群定位中的探測对象是魚，它作为反射体，与固体的水下目标——船隻、海底相比，具有完全不同的声学特性。因此，对探魚仪器的結構就提出了。与航海用回声測深仪或水下观测用水中定位器不同的技術要求。

直到最近为止，在魚群探測上所采用的水声仪器，主要是回声探測器，原是为其他目的設計的。只是在最近十年，苏联以及外国才开始專門地設計制造了探魚器和水平、垂直兩用的探魚用魚群定位器。魚群定位器除了能記錄从船上到障碍物的距离以外，还應該提供垂直以及水平方向魚群范围的概念，有时还能提供魚群密度的概念。

目前魚群定位作为一个方法正用于以下各方面：

漁撈偵察，偵察船用以發現魚群，研究魚的分布，观察大小魚群的移动，調度捕撈船隻；

在捕撈条件下，漁船用以發現魚群并隨之捕撈所發現的魚群；

用以研究魚的行动，即魚的分布、垂直、水平以及昼夜

和季节性移动洄游；大小魚群的结构、长度和密度变化；魚类对外界影响及其他因子的反应，以及研究魚在漁具作用区域中的行动。

本書第一編和第二編是E·B·石什科娃編写的，第三編是B·Г·阿热查編写的。

目 次

第一編 魚群定位的物理基礎.....	1
一、声波在海中的傳播速度及其与水文条件的关系.....	1
二、声波在海中的反射与散射.....	3
三、魚体的声学特性.....	6
四、海中和水——魚媒質中超声随距离而衰减的現象.....	10
五、海中的混响及其对魚群定位条件的影响.....	15
六、魚群定位器有效距离的計算.....	19
七、魚群定位器回声訊号的分类.....	34
第二編 水声仪器.....	37
一、苏联水声仪器.....	37
探魚器.....	37
探魚导航兩用HЭЛ—5P型探魚器.....	38
“鱸魚”型探魚器.....	44
“海豚——1”型探魚器.....	47
水中定位器.....	50
“蝸子——1”型魚群定位器.....	54
二、国外水声仪器.....	60
探魚器.....	60
E L A K厂帶自动記錄器和簡單靜象管的探魚器.....	60
H A G—240型探魚器.....	61
M S—29型探魚器.....	64
水中定位器.....	65
“Lodax”水中定位器.....	65
H A G—400型水中定位器.....	69
其他国外水中定位器簡介.....	71

第三編 探魚器和水中共定位器在魚群探測中的利用...72

一、探魚器在船上的运用.....72

探魚器在船上的利用方式.....72

深度的讀取.....75

二、非魚类目标的回声記錄.....82

回声記錄上的海底映象.....82

多次回声和記錄筆第二次回轉中的回声.....83

不同底質的回声記錄.....86

船体搖擺对回声記錄的影响.....88

自动記錄器和电子指示器可以录出的干扰.....90

✓ 溫躍層的回声記錄.....95

三、魚群的回声記錄.....97

魚群的大小.....97

在上部水層記錄魚群时的重复反射.....105

魚群的密度.....107

四、利用探魚器的魚群探測.....108

利用探魚器探測魚群簡介.....108

✓ 底層魚拖网捕撈中探魚器的利用.....111

✓ 上層魚捕撈中探魚器的利用.....118

探魚器映象与所得漁獲量不相符合的場合.....131

关于探魚器使用的几点意見.....132

五、水中定位器在大西洋鯡魚秋冬集群的探測

和中層拖网捕撈中的利用.....136

用水声仪器探測鯡魚捕撈魚群.....137

發現魚群后的引导和水層中瞄准拖网的保証.....142

六、水中定位器探測間距的計算.....145

七、利用水中定位器測定魚群运动速度和方向.....146

附录 1 НЭЛ—4 和 НЭЛ—5 Р型探魚器备用

另件年需要量.....148

附录 2 某些种經濟魚类回声記錄例.....148

推荐文献.....159

第一編 魚群定位的物理基礎

一、声波在海中的傳播速度及其与水文条件的关系

水是具有一定容積彈性的一種媒質。因此，正象在其他液体和气体、特別是在空气中一样，声波在水中也是可以傳播的。如果把由振动物体構成的声源放入水中，在与振动面直接接触的水中，將發生压力的变化。媒質状态的变化循序地从一个質点傳到另一質点，于是就產生从声源开始的声波傳播过程。声波是一种縱波，因为在声波傳播时，質点是在傳播的方向上、即沿着声綫方向振动的。

在每一瞬間振动傳播到一定的面，这个面称为波面（волновая поверхность），或称波陣面（фронт волны）。位于某一波陣面上的媒質的質点进行着同一的（同相的）运动。如果波从某一点在自由均匀媒質中开始傳播，波陣面就成为球面，在这种情况下就產生球面波。在距声振动發生点很远的地方，波陣面可以被認為是一个平面，波就是平面波。

在液体媒質中声波傳播速度取决于这种媒質的特性——弹性和密度，可以表現为下式：

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{k\rho}}$$

式中：E——容積彈性模数，或媒質压縮系数的倒数；

ρ ——媒質的密度；

k——液体的压縮系数，即压力發生1个大气压的变化时液体容積的相对变化。

对水来说, $k = 1.7 \times 10^{-11}$ (CGS单位制)。

温度为 8°C 时水的密度 $\rho = 0.998$ 。

根据上述公式, 声在水中的速度为 $C = 1,440$ 米/秒, 即约为在空气中的4.5倍。

此数不是一个严格的常数, 而要取决于下列因子: 温度、盐类含量、气体含量和静压力。从实践中已知, 声波在海中的传播速度变动在1,420到1,520米/秒之间。

随温度、盐度和静压力而有变化的声速, 可用下列经验(根据试验)公式求出, 这个公式对实际计算来说, 有着足够的精确度:

$$C = 1410 + 4.21t - 0.037t^2 + 1.14S + 0.0175h$$

式中: C ——水中的声速(米/秒);

t ——水温($^{\circ}\text{C}$);

S ——盐度(‰)(每1升水中含盐的克数);

h ——深度(米)。

从以上公式可得出结论, 水中的声速随温度、盐度和静压力的增加而增大。

图1指出了声速与温度和盐度的关系。

夏季, 通常随着深度的增大, 水温先缓慢地、然后相当迅速地逐渐下降。在某种深度中可能形成“温跃层”。随着温度的不均匀的变化, 水的密度也随着深度的增大先缓慢地、以后相当迅速地逐渐增大。这样一来, 温跃层的特点是, 与上部水层比较, 不仅温度有很大的变化, 水的密度也有很大的变化。

声线从一个水层传到声的传播速度与前者不同的另一水层时要发生曲折。这时就在海中出现声线的折射现象。

对鱼群定位来说, 温跃层起着消极作用, 因为在入射角

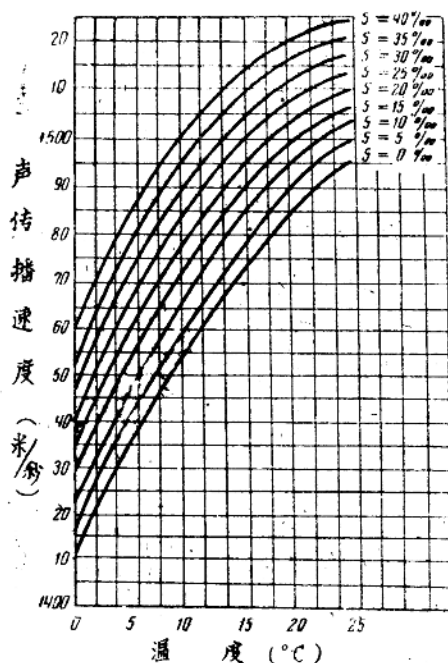


圖1 声速与水温 and 鹽度的关系。S——鹽度(‰)

很小时声綫要大大弯曲，以致声波很少通过温躍層。

在不同的海中温躍層有着不同的厚度——从数米到数十米或更多。

二、声波在海中的反射与散射

声波在水中傳播时，發生水的質点压缩和稀疏現象。这样一来，对水的平均压力而言，声波就產生变动逾量压力，

它称为声压，用绝对单位——巴^①来测定。水的质点在有声波从其中通过时以一定速度接近均衡状态地振动，这种速度称为质点振动速度（акустическая скорость）。

对平面波来说，声压 P 与质点振动速度 V 之间有着下列的重要比例关系：

$$\frac{P}{V} = \rho C$$

式中： ρ ——水的密度；

C ——水中的声速。

从外观来看，上式很象说明电流 I 与电压 V 和导体电阻 R 的关系的欧姆定律 $\frac{V}{I} = R$ 。

这种相似自然是形式上的，因为声波从水中通过与电流从导体中通过相比，乃是不同的物理特性。但是，在现代声学中，为了使不同课题的解决简单化，往往利用这种相似。在这种情况下，电压 V 起着声压 P 的作用，电流 I 起着质点振动速度 V 的作用，欧姆电阻 R 起着波阻抗（声阻抗） ρC 的作用。

当媒质保持均匀时，声波可以毫无阻碍地传播下去。譬如说，如果声遇到具有不同波阻抗的媒质，均匀性就被破坏。当来到具有不同波阻抗的两种媒质的界面时，声波一部分被反射回去，一部分进入第二种媒质（被吸收）。

如果声波来到两种不同媒质的界面，一部分声能就从界面上反射仍留在第一种媒质之内；另一部分声能进入第二种

①巴——1平方厘米所受的1达因的压力。达因——作用于1克物质使其产生1厘米/秒²的加速度的力。

媒質中，但它并不沿着原来的方向傳播。根据下列定律發生声的折射：

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

式中： φ_1 和 φ_2 、 C_1 和 C_2 各为两种媒質中的入射角和声速。

声的折射定律，象上面已經提到的，可据以闡明海中出現的折射現象，这种現象就是声綫从一个水層进入傳播速度与前者不同的另一水層时的曲折（弯曲）。

任一媒質的反射本领都可用反射系数來說明，反射系数就是反射声波与入射声波的質点振动速度（或声压）的振幅比：

$$\beta = \frac{V_{\text{反射}}}{V_{\text{入射}}} = \frac{P_{\text{反射}}}{P_{\text{入射}}}$$

在声波正常（垂直）入射的情况下，反射系数决定于下列比值：

$$\beta = \frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2}$$

式中： $\rho_1 C_1$ ——第一种媒質的波阻抗；

$\rho_2 C_2$ ——第二种媒質的波阻抗。

对空气來說，波阻抗（ $\rho C_{\text{空气}}$ ）为43。水的波阻抗（ $\rho C_{\text{水}}$ ）为 1.5×10^5 。

声波从空气中入射到水面时，声几乎完全被反射。声綫从水中入射到水——空气的界面时，也可看到同样現象。

声波落到魚体时，發生波的散射，因此一部分能量形成回声訊号又复返回，其强度与距离值的四次幂成反比。回声

訊号的强度与魚群的长度和密度，以及与魚的反射本领有着正相关关系。

三、魚体的声学特性

到目前为止，用于探测魚群的水中定位器和探魚器，大多数都是为了其他目的制出的，因此对物体（魚）的反射本领那样的重要因子都未予考虑。在已提出創造能有效而經濟地工作的魚群定位器和探魚器的任务的今天，重要的是要全面地研究魚体的超声反射。

对魚体的声学特性的研究，目前尚未达到能詳尽解答对魚群定位具有重大意义的一系列問題的程度。这类問題首先是魚体中的声速、波阻抗、輸入声阻抗①的測定，而归根結底，就是魚体反射系数与声音頻率②的关系。

如果我們看一看目前用于魚群探测的探魚器的工作頻率，就可以看到頻率范围是很廣的。从表1可看出，大多数探魚器的工作頻率是12到80千赫。水中定位器的工作頻率大

①輸入声阻抗（Входной акустический импеданс）是引起对某一声綫（这里指水柱）形成負荷的研究样品（如魚）發生振动的交变压力所遇到的声阻抗（声阻加声抗或表观阻抗）；輸入声阻抗决定于样品表面压力与正常表面質点速度之比。但是，測定輸入声阻抗的方法相当复雜。下面将要指出，通过对某一頻率范围的輸入声阻抗变化規律的認識，可以確定研究材料（这里指无限長魚物質）中的声傳播速度、材料的波阻抗和反射本领。

②振动頻率 f （1秒鐘的振动数）决定于声速 C 与波長 λ 之比。就水來說， $f = \frac{C}{\lambda} = \frac{1500 \text{ 米/秒}}{\lambda \text{ 米}}$ 。頻率的單位为赫（1赫为1秒鐘振动1次）。

多数是这个范围内的低频部分

表 1

水 声 仪 器 名 称	频率(千赫)	出品国
EDO厂的航海用回声测深器	12	美 國
Kelvin-Hughes厂的探鱼器	14.25	英 國
ELAK厂水中定位器“Lodar”	20	德 國
НЭЛ-5P型探鱼器	21.3	苏 联
SKAM厂探鱼器	29—53	法 國
ELAK厂探鱼器	30	德 國
探鱼器“Fishfinder”	30	英 國
Simrad厂水中定位器	30	挪 威
СКОРПИОН-1(蝎子—1)型水平、垂直兩用魚群定位器	30.2和79.5	苏 联
Bendix厂探鱼器	50	美 國
浅水探鱼器(水深20米用)	50—70	日 本

产生这样一个问题：对魚群定位来说最适宜的频率应该多少？低频的声音在水中被吸收较少，因此，选用低频可以得到较大的探测距离。但是，为此目的，需要尺寸很大的换能器。频率的上限受到上述声波吸收的限制，为了克服吸收问题，需要很大的辐射功率。但是，选用高频则用尺寸较小的换能器比较容易获得较集中的能量，因为换能器的指向角①与波长有着下列的比例关系：

$$\sin \frac{\theta}{2} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad \text{——直径 } D \text{ 的圆形振动面换能器}$$

①在探鱼器和水中定位器（包括魚群定位器）中，换能器的超声辐射不是均等地指向一切方向，而是集中于所要求的方向的某一立体角内，因此有效距离就增大了。进行辐射范围内的角称为指向角（Угол направленности）。

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{\lambda}{h} \quad \text{—— 寬为 } h \text{ 的方形振動面換能器}$$

在發射時如果能集中（指向角較小），則可以提高水聲裝置的靈敏度。在淺水區作業時，特別重要的是超聲射線的指向角要尽可能小；否則海底混響會嚴重地影響水中定位器的工作。驟然看來，對魚群的水中定位似乎需要採用極為集中的能量，即需要選用較高的頻率，因為魚不象船隻和海底那樣是一種堅實的反射目標，因而反射較小。但是，這個結論中，只有前一部分指出必須使能量極為集中，以便提高探魚裝置的靈敏度一點是正確的，然而並不限於採用高頻率，利用工作效率較高的接收——發射換能器也能達到這個目的。談到工作頻率的選擇，就需要考慮一切起作用的因子，特別是要確定魚的反射本領是否與頻率有關係，以及究竟有什麼關係。

國外研究魚體反射本領的著作中，我們知道有科森和里查遜(D.H.Cushing and I.D.Richardson)的著作〔59〕。他們除了在實物條件下的研究以外，在其實驗中是有一定條件性的（塑料模型魚、模仿氣鰻的橡皮氣球、固定在網上的福爾馬林浸過的死魚）；因此未得出能說明魚的真正聲學特性的資料。

為了測定魚體的聲學特性——魚體中的聲傳播速度 C 、它的波阻抗 ρC 、魚的超聲反射係數，我們利用了蘇聯科學院聲學研究所設計的測定裝置——“脈沖測定管”^①，在其中研究了從活魚切下的均一樣品。進行實驗的結果〔49〕查明，魚體中的聲傳播速度 (C_p) 接近於水中的聲速，為 1,600

① “脈沖測定管”已由 H.C. Арсба 描述過(1)。

米/秒。由于魚的密度也接近于水的密度，魚的波阻抗是一接近于水的波阻抗的数值，即 $\rho_p C_p = 1.63 \cdot 10^5$ 。

无限长均匀魚物質①的超声反射系数可用下式算出：

$$\beta_{\infty} = \frac{\rho_B C_B - \rho_p C_p}{\rho_B C_B + \rho_p C_p}$$

式中： β_{∞} ——无限长均匀魚物質的超声反射系数；

ρ_B ——水的密度；

C_B ——水中的声速；

ρ_p ——魚的密度；

C_p ——魚体中的声速。

反射系数公式一般具有更复杂的形式，其中包括說明声波在所研究的媒質中傳播时的損失的損失系数。

在这种个别情况下（在魚体中），損失系数是微不足道的。

由于魚的波阻抗接近于水的波阻抗，理想的无限长魚物質的超声反射系数为0.044或4.4%。

自然，如果声学研究的对象是活魚，我們会得到新的、更完整的資料。水声探魚仪器的使用經驗証明，游动于水中的活魚較之切下的密度均一的样品，應該有更大的超声反射。活魚由于其机体中有气体（在气鰾、腸等等中）而反射会較大。在实际中不可以不考慮，魚群中的魚会引起声波的散射，这归根結底会引起超声的多次反射和合成訊号的强度的提高。

①无限長均匀魚物質（Однородная рыбная масса бесконечной протяженности）这一概念，乃是一理想概念，是假定有一种无限媒質，其中的密度和声的傳播速度与在均一魚样的試驗中相同。

此外，我們知道，栖息深度很大的單个活魚，如果探魚器在發射時能量極為集中而在接收時有較高的靈敏度，則在記錄器上是可以把牠錄出的。圖2是縛有鉛錘的一尾活鱈魚的映象。這尾鱈魚被放入180米的深度，在停船中用“蝸子—1”型魚群定位器垂直系統的記錄器錄出的。這就證明，甚至一尾魚也可以有顯著的超聲反射。

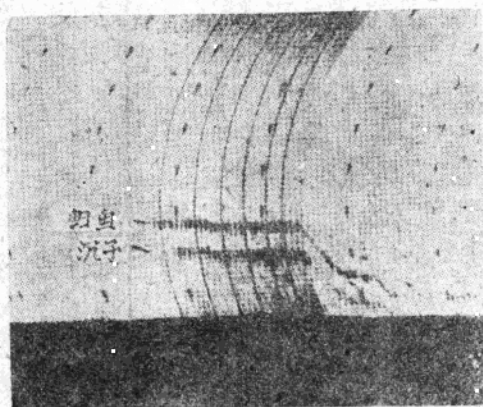


圖2 水深170—180米处一尾活鱈魚的映象，用“蝸子——1”型魚群定位器垂直系統錄出。

在研究魚的反射特性的同時，測定引起超聲脈沖在魚群中衰減的吸收系數，是有很大的實際意義的。

四、海中和水—魚媒質中超聲隨距離而衰減的現象

聲波的強度隨着遠離聲源由於以下兩個原因而逐漸減弱：由於聲能的分布面隨距離而逐漸增大（幾何衰減）和由於在媒質中的損失。

无限均匀媒質中声强度的减弱可用下式表示：

$$I = \frac{Pa_r}{4\pi r^2} 10^{-0.1\delta r}$$

式中：Pa——發射器的声功率；

r ——發射器的集中系数；①

r ——与声源的距离；

δ ——單位距离的空間衰减系数（分貝）。②

在实际的海洋条件下，海面和海底的反射影响到声波的傳播。声从有波浪的海面上的反射具有不穩定性。在含有大量气泡的表層，發生特別强烈的声吸收。入射到海底上的声波的能量，一部分进入海底，一部分被反射回来；反射程度取决于底質的特性、入射角和振動頻率。

声波衰减的原因之一是水媒質的粘性所引起的损失和水媒質的导热性，但是，导热性的影响較小，因为对声頻特別是在超声頻來說，状态变化的过程进行得如此迅速，以致放出的热来不及傳入周圍的媒質中。

除了媒質的粘性所引起的损失以外，还有分子內部运动过程所引起的损失。这时由于被声波刺激的分子各組成部分的振動和旋轉运动以致能量被吸收（轉化为热）。

①集中系数 r 表示：用指向發射器时，較之用无指向發射器时，在声場中的某一点上產生同样声强度所需的功率要少几倍。

$$r = \frac{4\pi S}{\lambda^2}$$

式中：S——輻射面面積。

②分貝是声值和电值的相对測定的量度。例如，一个声的强度为 I ，另一个声的强度为 I_0 时，就認為第一个声比第二个声高 K 分貝，

$$\text{这里 } K = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

如水中含有固体物或气泡，則声能就被多吸收一部分①。因为固体質点的密度大于水的密度，所以它們振动的速度小于周圍水質点的振动速度。这样一来，在媒質的界面上就產生速度的梯度而發生粘滯摩擦。

在大洋中，粘性所引起的声的空間衰减系数可用下式計算〔64〕：

$$\delta = 0.036 \sqrt{f^3} \text{ 分貝/公里}$$

表面水層中大量存在的气泡，大大地增加了声波在上部水層傳播中的吸收。在垂直輻射的探魚器工作过程中，这种吸收将小于水平輻射的水中定位器，因为后者的声綫是具有很大长度的表面水層輻射的。

在魚类集群的地点通常有許多极为微小的气泡，因为魚吸入氧氣，分解出二氧化碳，从其靜水力器官（鰾）中排出气体。

表面水層中的超声空間衰减系数很高，而且变化范围很大，但在深水中这个系数小而且不变。

从探测魚群用的水声裝置的实际应用中我們知道，探魚器發出的超声脉冲在穿过濃密的魚群以后，与同样的脉冲不穿过魚群一直到达海底比較，前者要大大减弱。圖3为栖息深度15到30米、长120米的鯷魚群的映象。在此映象上清楚地看出，通过水媒質到达海底的超声脉冲，与从魚群下方的海底反射回来只能微微“透过”魚群的脉冲相比，得到了更强大的反射。

①这种吸收Ю. М. Сухаревский曾計算过〔31〕。