

水產部海洋水產研究所

水產叢書

第20号

魚群定位的物理基礎 和試驗研究

蘇聯專家E.B. 石什科娃講稿

251

1961. 12.

譯 者 的 話

苏联全苏海洋渔业与海洋学研究所工程师B.B.石什科娃同志为渔业方面的水声学专家，1960年4月应聘来我所短期指导工作。在我所工作期间，就水声学在渔业上的利用问题系统地做了多次报告，给我们以很大的帮助。

石什科娃同志根据苏联的试验研究成果，并参考最新的国外资料，在理论和应用两方面阐述颇为详尽。报告的内容，除了详细地探讨了与鱼群探测有关的水声学问题以外，还涉及收听鱼声以及鱼对船只噪声的反映的研究成果，这些都是极其宝贵的资料。在我国应用水声仪器的鱼群探测工作日益发展的今天，这些资料将起很大的指导作用。为了在我国的研究上和渔业实践上能得到广泛的利用，特将译出的讲稿整理出版，供各有关方面参考。

此书由唐之吉同志翻译，由李豹德、陈锦通、陈毓楨、翁维源、宋福华、顾嗣明等同志校订，特别是陈毓楨同志在随同专家工作中对译稿提出了不少意见。限于翻译水平和业务水平，译文中难免有缺点以至错误，希望读者多加指正。

319-3-18

121#

水产部海洋水产研究所

目 次

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.....	9
三、魚体的声学特性.....	18
四、上層魚类和底層魚类的反射本領.....	39
五、蟹类的反射本領.....	56
六、魚体的超声反射的損失.....	61
七、海中和水——魚媒質中声波随距离而衰減的現象.....	69
八、深水散射層.....	85
九、海中的混响及其对魚群定位条件的影响.....	90
十、魚群定位器有效距离的計算.....	97
十一、魚群定位器的回声訊号的分类.....	112
十二、魚对探察船的噪声的反应.....	118
十三、辨識魚群种类組成的可能性.....	124

一、声波在海中的傳播速度及其与 水文条件的关系

水是具有一定容積弹性的一种媒質。因此，正象在其他液体和气体、特别是在空气中一样，声波在水中也是可以傳播的。声以一定速度从一个層到另一个層的稠密和稀疏状态的傳播过程叫做声波，該項速度称作声速。声波在某一媒質（例如，水）中傳播时进行运动，从一个点傳到另一个点，但整个媒質本身是不动的。如果把由振动物体构成的声源放入水中，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，于是就产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。声綫乃是与波陣面相垂直的綫。

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。質点在声波中的振动速度与声波本身的运动速度是两种完全不同的概念，因此不能將它們混淆起来。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，在这种情况下就产生球面波。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。

从声学的观点看来，液体与气体的主要区别如下。液体媒質（如水）比气体（如空气）具有大得多的密度，因此，可壓縮的程度要小許多倍。甚至在压力很大的情况下，也很

难看出水的体积的变化。但是，通过精密的测定已经查明，不但是液体，甚至固体（如金属）也能够受到压缩。甚至在声压这样小的压力下，纵然程度很小，它们也是要受到压缩的。正是由于液体和固体可被压缩，所以声波才能在其中传播。

波在液体媒质中的传播速度，取决于这一媒质的特性——弹性和密度，其关系可表现为下式：

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

式中：E——容積弹性模数，或媒质的压缩系数的倒数；

ρ ——媒质的密度；

k——液体的压缩系数，即压力发生1个大气压的变化时液体容积的相对变化。

。水的压缩系数 $k = 4 \times 7 \times 10^{-11}$ （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 $C = 1440$ 米/秒，即约为空气中的速度的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1420到1520米/秒之間。

随温度、盐度和静压力而有变化的声速，可用下列經驗（根据試驗）公式求出，这个公式对实际计算来说，是有足够的精確度的。

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

式中：C——水中的声速（米/秒）；

t——水温（°C）；

S——盐度（‰）（每1升水中含盐的克数）；

h ——深度(米)。

从以上公式可得出結論，水中的声速随温度、盐度和静压力的增加而增大。

表1指出，在不同温度值条件下，温度每上升一度时声速增加多少。

根据最初温度的大小温度每上升一最时声速的增加情况

表1

最初温度 °C	5	10	15	20
增加值 ΔC (米/秒)	3.8	3.5	3.1	2.7

静压力提高1个大气压即水深增加10米时，声速就增加0.175米/秒。水深增加150米所引起的声速的增加，与温度提高1°时大致相同。

盐度的变动主要是在靠近陆地起着重要作用，因为那里有大量淡水从江河流入海中。盐度每有1%的变化，根据公式，声速的变化为1.14米/秒。

圖1指出了声速与温度和盐度的关系。

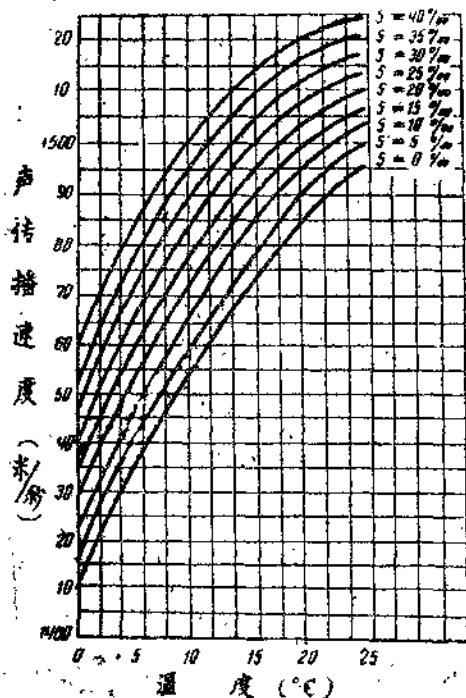
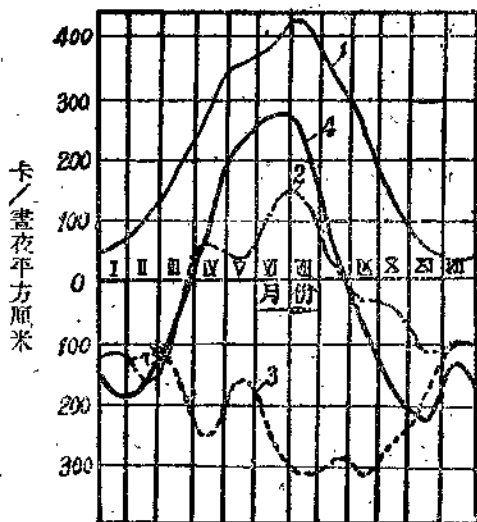


圖1 声速与水温 and 鹽度的关系。S——鹽度(‰)。

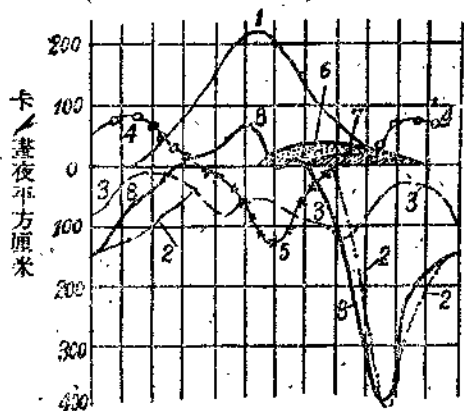
在各个季节温度按深度的垂直分布取决于該海区的热平衡。每一个海中都有其十分固定的热平衡。

圖2和3用圖解表現出黑海和北冰洋的热平衡。在这些圖解中，橫坐标上画出一年的各个月份，縱坐标表現出一昼夜中各該海面每一平方厘米吸收或放散的(橫坐标以上或以下)热量。



- 1——由太陽進入的热量；
- 2——海与大气的热交换；
- 3——蒸發中的热消耗；
- 4——結果曲綫。

圖2 黑海的热平衡。



- 1——由太陽進入的热量；
- 2——海与太陽的热交换；
- 3——蒸發中的热消耗；
- 4——冰塊形成中的热；
- 5——冰融化中的热；
- 6和7——鄂畢和叶尼塞河的热；
- 8——結果曲綫。

圖3 北冰洋的热平衡

下列兩表可說明黑海和北冰洋的熱平衡。

黑海的周年熱平衡

表 2

進 入 熱 量		支 出 熱 量	
來 源	熱 量 (卡/立方厘米)	引起熱平衡 的 物 理 現 象	熱 量 (卡/立方厘米)
太陽和天空	82,000	蒸 發	71,000
與大氣之間 的 熱 交 換	11,000	逆向熱交換及輻射	22,000
合 計	93,000	合 計	93,000

北冰洋的周年熱平衡

表 3

進 入 熱 量		支 出 熱 量	
來 源	熱 量 (卡/平方厘米)	引起熱平衡 的 物 理 現 象	熱 量 (卡/平方厘米)
太陽和天空	33,700	與大氣之間 的 熱 交 換	48,000
大西洋水体	38,000	蒸 發	27,800
冰 的 形 成	11,200	冰 的 融 化	11,200
河 水	4,100		
合 計	87,000	合 計	87,000

太陽能直接進入海中很淺，表層的最上面數十厘米的水層吸收全部能量的一半。由於通過熱傳導的傳熱過程進行緩慢，溫暖季節中在海況平穩的情況下就形成上層與下層的温度差。

海中上部各水層的水温趨向一致的現象，是水体在風力影響下進行混合時發生的。

夏季中，通常隨着深度的增大，水温先緩慢地逐漸下降，然後它的變化變得相當迅速（圖4a）。在某種深度中可能形成“溫躍層”（圖4b， T 點）。隨着温度的不均勻的變化，水

的密度也随着水深的增大先缓慢地、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，而且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折射现象。

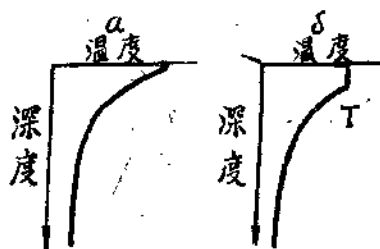


图 4

对鱼群定位来说，温跃层起着消极作用；因为声线与温跃层表面构成很小的角度时声线要大大弯曲，以致声波很少通过温跃层。

在不同的海中温跃层有着不同的厚度——从数米到数十米或更多。

在秋冬季表层海水逐渐变冷。因此就由于对流^①而发生水体的混合，形成了恒温层或称等温层，这个层有时占有很大的水深。如果海的深处的较暖的水比表层水具有更高的盐度，等温层的厚度就不大。这时将不发生对流，因为下层的水较重。

长时间持续的大风会引起海水的涡动混合，因此，直到很大的深度为止温度趋于一致。

海面的水温昼夜变化要小得多，不过达到几度。

^①对流——热在流动媒质中的移动。

盐度比温度变化程度较小。海中不同深度上的盐度变化和分布，是淡水的流入和对流混合与涡动混合过程所引起的。在上述因子的影响下，海中就发生随时间和海区而不同的温度和盐度的垂直分布。

知道了所有这些数值，就能够确定声速的垂直分布，而归根结底，声速的垂直分布决定着声在海中传播的特性。图5以图解方式说明海中不同深度上声速分布的各种情况：

(a) 表层或整个深度为不变声速，这种情况发生于浅海；

(b) 随深度增大而降低的声速负梯度，这种情况冬季发生于海中最下层水体的温度高于上层的地点；

(c) 声速在上层为负梯度，到下层变为正梯度，这是冬季中最常见的深海所特有的情况，这时在变冷的表层的下面有较暖的水层，再往下温度就降低了；

(d) 整个深度为正梯度，即随深度的增大温度均匀地下降，这种情况发生于春季海面刚刚开始变暖时；

(e) 上层（等温层）为不变声速，在此以下具有正梯度，即温度随水深而降低；这种情况是夏季所特有的；

(f) 上层声速不变，在此以下有一负梯度层；这种情况发生于冬季很大一部分表层已经变冷，在此以下温度随水深而增大时。

声速 (C)



图5 海中随水深而不同的声速分布的各种情况。

二、声波在海中的反射与散射

声波在水中傳播时，發生水的質点变密和变稀現象。这样一来，对水的平均压力來說，声波就产生附加的压力变化，它称为声压(звуковое или акустическое давление)，用絕對單位——巴^①来測定。水的質点在有声波从其中通过时以一定速度在平衡位置附近振动，这种速度称为質点振动速度(акустическая скорость)。

对平面波來說，声压 P 与質点振动速度 v 之間有着下列的重要比例关系：

$$\frac{P}{v} = \rho c \quad P = \rho c v$$

式中： ρ ——水的密度；

c ——水中的声速。

从外觀来看，上式很象說明电流 I 与电压 V 和导体电阻 R 的关系的欧姆定律 $\frac{V}{I} = R$ 。^{電和聲类似}

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，在現代声学中，为了使不同課題的解决簡單化，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 起着質点振动速度 v 的作用，欧姆电阻 R 起着波阻抗(声阻抗) ρc 的作用。——声阻抗的公式是 $Z = \rho c$ 。

①巴——1 平方厘米所受的 1 达因的压力。达因——作用于 1 克物質使其產生 1 厘米/秒² 的加速度的力。

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

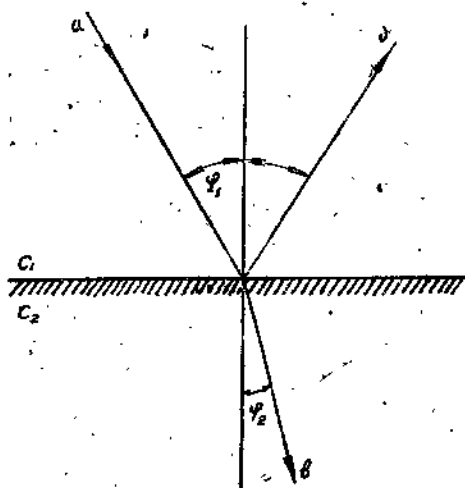


圖6 声綫的入射、反射和折射。

圖6 表明存在着两种不同媒質时声綫——入射声綫、反射声綫和折射声綫的行程。如果声波朝着“a”的方向入射到两种媒質的界面上，那么，一部分声能从界面上反射，仍留在第一种媒質之內，而向“a”的方向傳播；另一部分声能进入第二种媒質中，朝着“b”的方向傳播，此方向不同于原来的方向“a”，于是發生声的折射。

折射是根据下列定律进行的：

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

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，如上节所述，可据以阐明海中出现的折射现象，这种现象就是声线从一个水层进入传播速度与前者不同的另一水层时的曲折（弯曲）。

下面分析声波反射中所发生的现象的本质，并阐明某些数量关系。任一媒質的反射本领都可用反射系数来说明，反射系数就是反射声波与入射声波的质点振动速度（或声压）的振幅比：

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

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。

对空气来说，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，几乎完全被反射。声线从水中入射到水的界面——空气时，也可看到同样现象。

除了有关声压（或质点振动速度）的反射系数的概念之外，还存在着有关声能的反射系数的概念，声能的反射系数就是反射声能与入射声能之比。为了把这两个概念联系起来，下面我们考察几个比例关系。在1秒钟之间从与声波运动方向保持正常关系（相垂直）的1平方厘米的面上通过的能量，称为声强度。如果在某一瞬间某一点上存在着声压P，而质点振动速度等于V，则瞬间的声强度值I，等于：

$$I_s = P V \textcircled{1}$$

声压的有效值(平均值)为振幅的 $\sqrt{2}$ 分之一, 即

$$P_s = \frac{P}{\sqrt{2}}, \quad (11.12.5)$$

质点振动速度的有效值为振幅的 $\sqrt{2}$ 分之一, 即

$$V_s = \frac{V}{\sqrt{2}},$$

因此, 声强度的有效值为:

$$I = \frac{1}{2} P V.$$

从已知的比例式

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

可以得出:

$$P = \rho c V$$

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

把 P 和 V 的值代入声强度的式中, 得出:

$$I = \frac{1}{2} \rho c V^2$$

$$I = \frac{1}{2} \rho c \frac{P^2}{\rho c}$$

由此得出结论, 声强度(能量流密度)与质点振动速度的振幅的平方, 或者说, 与声压的平方成正比。从而, 声能

①这个比例表现声能流(Поток энергии)的密度。声能流这一概念是H. A. Умов(1846—1915)使用的。

的反射系数等于声压（质点振动速度）的反射系数的平方，即：

$$\frac{I_{\text{反射}}}{I_{\text{入射}}} = \frac{P_{\text{反射}}^2}{P_{\text{入射}}^2} = \frac{V_{\text{反射}}^2}{V_{\text{入射}}^2} = \beta^2$$

入射、反射和折射声波的能量比的分析表明，入射声波的功率等于反射的声波和折射的（被吸收的）声波的功率之和。

$$I_{\text{入射}} = I_{\text{反射}} + I_{\text{折射}}$$

由此得出声吸收系数（ α ）的概念，它是被吸收的声能与入射声能之比：

$$\alpha = \frac{I_{\text{吸收}}}{I_{\text{入射}}} = \frac{I_{\text{入射}} - I_{\text{反射}}}{I_{\text{入射}}} = 1 - \beta^2$$

因此， $\alpha = 1 - \beta^2$ 。

表4中列出平面波的波阻抗，以及不同的两种媒质的反射系数 β 和吸收系数 α （在声线正常入射的情况下）。

表4

媒质名称	$\rho_1 C_1$ 克/平方厘米秒	$\rho_2 C_2$ 克/平方厘米秒	反射系数 β	吸收系数 $\alpha = 1 - \beta^2$
水—空气	1.5×10^5	41	1	0.001
水—铜	"	3.9×10^8	0.93	0.13
水—木(云杉)	"	5.6×10^4	0.46	0.79
水—冰	"	1.8×10^4	0.79	0.37
水—橡皮	"	5×10^3	0.74	0.45
水—花岗石	"	11×10^5	0.76	0.42
水—砂	"	3.2×10^5	0.36	0.87

在水中定位，特别是在鱼群定位中，我们比较常接触的不是无限大的面，而是长度不大的对象。当声波入射到物体

时，就發生波的散射，結果一部分能量返回成为回声訊号。为了弄清楚所發生的現象，下面我們分析几个数学上的比例关系①。

我們以 P_1 表示物体附近的入射声波的声压，而以 I_1 表示声强度，再来考察接收点的声压 P_2 和声强度 I_2 的情况（圖 7）。

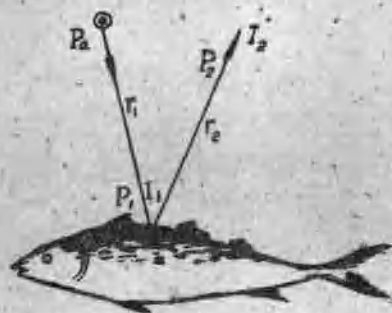


圖 7

在考察声波的散射时，可以設想，散射体，例如魚，本身乃是这些声波的二次發射体，它作为發射体，具有該物体固有的某种声功率 P_2 和指向性。

入射声波的声强度为：

$$I_1 = \frac{P_a r_1}{4 \pi r_1^2} \dots \dots \dots (1)$$

式中： P_a ——發射器的声功率；

r_1 ——从發射器到魚的距离；

γ_1 ——發射器的集中系数。

①下列所推出的公式引自В.Н.Тюлин的著作。是应用于魚的。