

海洋开发与水声技术

秦 臻



海洋出版社

海洋开发与水声技术

秦 臻

海洋出版社

1984年·北京

内 容 提 要

本书从水声技术的基础知识出发,系统地介绍了各种水声设备在海洋开发中的应用,同时对其工作原理、应用方法及用途给予扼要的介绍。全书分为六章,第一章水声技术基础;第二章海洋环境参数的测量;第三章海底地形、地貌及地质勘探;第四章声学导航和定位;第五章水下遥测海洋生物;第六章水声技术在海底石油开采中的应用。

本书适合从事水下工程、石油开采、捕捞、导航等海洋科技人员阅读参考。

海洋开发与水声技术

秦 臻

海 洋 出 版 社 出 版 (北京市复兴门外大街)
新华书店北京发行所发行 山西新华印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 13 1/8 字数: 300千字

1984年8月第一版 1984年8月第一次印刷

印数: 2 500

统一书号: 13193·0287 定价: 2.00元

序 言

人类赖以生存的地球，百分之七十以上的表面被海水淹没，那些未被淹没的地球陆地部分，只不过是海洋中的“岛屿”。如果能把地球削平，填满海底，那么光滑的地球将全部淹没在一片汪洋大海之中，整个地球表面的水深均达数千米之多。所以，有人产生把“地球”改名为“水球”的想法也并非毫无依据。既然海洋如此深广，如此浩瀚，生活在被海洋包围着的“岛屿”上的人类，就必然同海洋发生着极其密切的关系。自古以来，尽管人们从渔盐之利、航海运输等方面注意到海洋的利用，但人们对海洋的认识毕竟是有限的。几千年来，浩瀚的海洋差不多安然无恙地将其潜在的奥妙隐藏在一片蓝色的海水之中。

从另一方面看，随着人类社会工业化水平的日益提高，必然伴随着资源消费的急剧增长。六十年代以来，能源危机给资本主义社会经济带来的巨大冲击足以证明，单单依靠陆地上现存的而且正在逐渐耗尽的那些资源，要维持人类未来生存显然是极为困难的。因此，人类必须冲破地球陆地的束缚，到广阔的宇宙和浩瀚的海洋去寻求资源开发的途径。

与宇宙相比，海洋几乎就在人类身旁，可是人类对海洋开发的进程却又明显地落后于宇宙开发，其原因就在于层层海水阻隔了人类认识海洋的视野。不过，我们应该看到，即使是宇宙开发取得了诸如登月那样的惊人成就，但要从其它

地球上取回所需资源那毕竟是极为艰难的，也是一件为期相当遥远的事情。据此，从比较现实的意义上分析，把注意力转向资源富饶的海洋，确是具有时代特征的必然趋势。

近二十年来，随着科学技术的高度发展，人们对海洋的认识才逐步得到深化，海洋因其战略上的重要地位和经济上的无穷潜力而越来越被人们所重视。目前，就世界范围而言，海底开发的矿产种类已经很多，其中经济价值最高的是石油。据初步估计，海底石油的总藏量约有2000亿吨以上，占地球陆地石油储藏量的30—50%。

开发大洋洋底的锰核资源也是现今人们研究的重要课题。大洋洋底表面分布着大量锰核，其储量约有15000亿吨。锰核含有锰、铜、镍、钴等多种金属，经济价值仅次于石油，列居第二位。

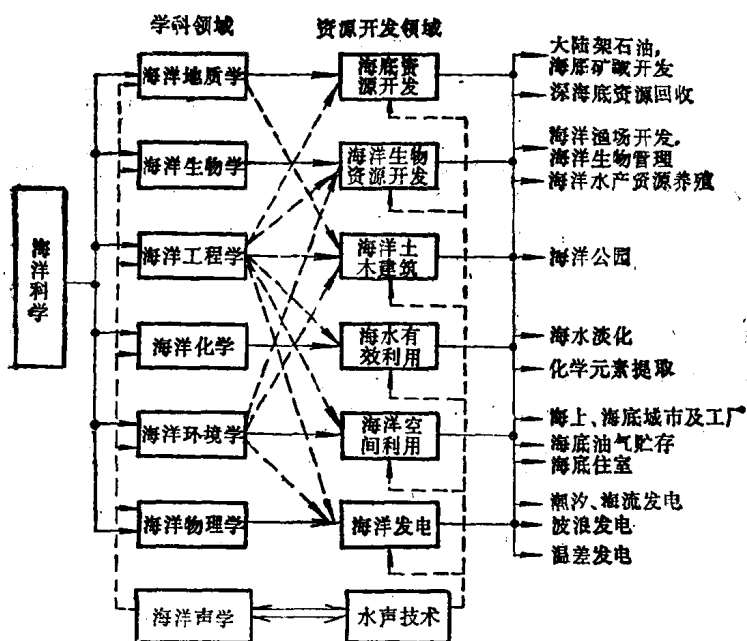
海洋除了蕴藏着丰富的矿藏资源外，它那丰富的生物资源也是人们所共知的。海洋中的大量鱼虾贝藻都可供人们食用。广阔的海洋每年能够为人类提供近30亿吨的食物资源，然而迄今人们每年所获得的数量还不到1亿吨，可见其潜力之大。

海洋的化学物质资源也极其丰富。人们已经发现海水中含有80多种化学元素。由于海洋容积如此之大，即使含量极微，其总藏量比陆地还多得多。比如海水每升含有0.003毫克铀，全部海水中的储量就有40亿吨，这个数字比陆地储量要多几千倍。可见，从海洋提取化学物质的前景，也是极为广阔的。

此外，海洋还是一个潜在的动力资源，潮汐、波浪、海流、温差等动力的利用，都会给人类带来极大的好处。

我国属于海洋国家，海域辽阔，海岸线有18000多公里。海洋资源的开发和利用必将在社会主义四个现代化的建设中起着重要的作用。

我们知道，海洋开发是涉及范围很广，综合性很强的一门工程学科。借以海洋开发的对象是海水包围着的特殊空间，这就决定了海洋开发中的每一工程活动，几乎都可能与水声技术有着密切的联系。我们把这些联系归纳于下图。



在这里我们还需简要地回顾一下水声技术发展的历史。早在第一次世界大战时期，隐蔽的德国潜艇所造成的巨大威胁，就吸引着人们对水中声波的重视。直到1918年声源方面取

得的进展，以及利用回声探测设备接收到潜艇目标回波的事实，又进一步增强了人们应用水声技术为军事服务的信心。随后，由于电子技术的飞速发展，基础研究的不断深入，到第二次世界大战前后水声技术就已得到极为广泛的应用。那时几乎所有的军用舰只都装备了水声观测设备，并且在海战中发挥了十分重要的作用。正因为这样，在世界范围内从事研制军用声呐的国家都毫不例外地把它们的最新技术列为严格保密的范围。半个多世纪以来，除了作为助航、探鱼用的测深仪和鱼探仪外，水声技术的每一项进展几乎都限制在军事应用上。这一局面一直持续到六十年代才逐渐有所改观。值得注意的是，随着海洋开发事业的迅猛发展，声呐技术正在以惊人的速度向民用方面转移，加上民用声呐自身的发展，从而使其逐步形成与军用声呐完全并列的独立体系。

事实上，海洋学和声学都是古老的学科，但是两者结合所构成的近代海洋声学和声学海洋学却有其崭新的内容。近十年来，鉴于声学对海洋研究的渗透，及其所产生的推动作用，致使科学家们直言不讳地称海洋为“声学的海洋”。这不仅因为以研究海洋中声波传播规律为对象的水声学，及其工程应用都与海水介质、海洋界面和海底地质构造等海洋特征有关，而且，实践证明，海洋开发工程的发展都必须借助各种水声探测手段。对海洋地质构造的判断和分类又往往依赖于它们所呈现的声学特征。然而，尽管声学和海洋学之间的关系如此密切，但从事水声工程人员在水声技术在海洋开发上的应用，却缺乏系统的了解；而海洋工作者也因专业范围的限制，对水声技术的应用难以做到得心应手。

本书希望对这方面存在的不足有所弥补，并以主要的篇

幅阐述水声技术在海洋开发工程中的广泛应用及其工作原理。笔者认为，水声技术在推动海洋开发方面所起的重要作用是无庸置疑的，但是就整个海洋开发的进程来看，它毕竟还是一门发展中的工程领域，要在有限篇幅内把水声技术的全面应用予以系统的论述，显然又是十分困难的。加上笔者水平有限，书中错误之处在所难免，因此热忱地希望读者提出批评指正。

最后必须指出，本书编写过程中得到有关同志的支持和帮助，特别是承蒙北京大学李贵斌同志对初稿的全面审阅，在此表示深切的谢意。

目 录

第一章 水声技术基础	(1)
1.1 波动方程的建立及其简正波解.....	(3)
1.2 波动方程的射线理论解.....	(13)
1.3 海水中声波传播速度.....	(24)
1.4 海底地层中声波传播速度.....	(27)
1.5 声波的反射和折射.....	(30)
1.6 海水介质传播损失.....	(33)
1.7 海底沉积层中声波的吸收衰减.....	(43)
1.8 声波的散射和混响.....	(45)
1.9 海洋环境噪声.....	(47)
1.10 水声设备简介.....	(50)
1.11 换能器材料及其工作参数.....	(57)
1.12 换能器基阵的束控.....	(73)
1.13 多波束形成原理.....	(82)
1.14 声呐信号及其处理.....	(95)
1.15 声呐方程.....	(102)
第二章 海洋环境参数测量	(106)
2.1 波浪测量.....	(103)
2.1.1 定点浪高仪.....	(110)
2.1.2 船用浪高仪.....	(112)
2.2 海流测量.....	(116)

2.2.1	多卜勒海流计	(117)
2.2.2	时差法海流计	(122)
2.2.3	海流剖面仪	(126)
2.2.4	中性浮标测量深海流	(130)
2.2.5	洋中动力学试验(MODE)——声学探头	(134)
2.3	内波测量	(140)
2.4	海水声速测量	(142)
2.4.1	间接声速测量	(144)
2.4.2	直接声速测量	(149)
2.5	声发装置	(158)
2.6	声遥控自动释放机构及水文参数遥测	(160)
2.7	海洋石油污染的声学监测	(169)
第三章	海底地形、地貌及地质勘探	(173)
3.1	海底地形测绘	(175)
3.1.1	精密测深仪	(176)
3.1.2	升沉补偿测深仪	(183)
3.1.3	拖曳式测深仪	(185)
3.1.4	多波束测深仪	(191)
3.1.5	旁视声呐	(193)
3.1.6	合成孔径旁视声呐	(204)
3.2	海底沉积地层剖面测量	(209)
3.2.1	次海底剖面仪	(209)
3.2.2	非线性声源次海底剖面仪	(211)
3.3	海底地质勘探	(214)
3.3.1	地震波反射勘探	(216)
3.3.2	地震波折射勘探	(227)

3.3.3 地震勘探用人工震源	(232)
第四章 声学导航和定位	(247)
4.1 推算导航	(248)
4.1.1 多卜勒导航声呐	(249)
4.1.2 时差法计程仪	(260)
4.1.3 相关法计程仪	(263)
4.1.4 巨轮靠岸防撞系统	(267)
4.2 海底地形导航	(269)
4.3 短基线水声导航和定位系统	(269)
4.3.1 “方位-方位”测量系统	(270)
4.3.2 “方位-距离”测量系统	(273)
4.3.3 “距离-距离”测量系统	(277)
4.4 长基线水声导航和定位系统	(278)
4.5 深潜器水下导航和定位	(288)
4.5.1 通讯声呐	(290)
4.5.2 测深和潜深声呐	(291)
4.5.3 避碰声呐	(292)
4.5.4 深潜器水下精确导航	(294)
4.5.5 同步声信标水下导航	(295)
4.6 船用综合导航系统	(298)
第五章 水下遥测——海洋生物	(313)
5.1 探鱼仪	(317)
5.1.1 垂直探鱼仪	(317)
5.1.2 水平探鱼仪	(326)
5.2 鱼量计	(334)
5.2.1 回波计数式鱼量计	(334)

5.2.2 回波积分式鱼量计	(337)
5.3 浮游生物资源水下遥测	(341)
5.4 海洋鱼类生态遥测	(346)
5.5 网位仪	(350)
5.6 声学牧鱼	(352)
第六章 水声技术在海底石油开采中的应用	(355)
6.1 声学动态定位系统	(357)
6.2 井口重入设备	(370)
6.2.1 短基线和超短基线井口重入系统	(371)
6.2.2 声呐重入系统	(373)
6.2.3 重入声呐的井口目标——角反射体	(376)
6.3 声波测井仪	(383)
6.4 沉物探测声呐	(387)
6.5 超声石油流量计	(395)
6.6 钻井平台水下缺陷无损检测 ——声发射技术	(401)

第一章 水声技术基础

象宇宙空间一样，人们也可借助诸如电磁波、光波、声波等能量形式在海洋空间传递信息。然而，各种能量形式在海水介质中的传输能力，与空气介质相比却有天壤之别，以致有些能量形式尽管在宇宙空间被有效利用，一到水下就很难施展其威力了。

对电磁波而言，海水介质是一种导电介质，因此向海洋空间辐射的电磁波会被海水介质本身所屏蔽，它的极大部分能量以涡流损耗形式被介质吸收。其结果使电磁波在海水中的传播受到严重限制。为了对各种能量形式在海水介质中的传输能力作出定量比较，我们首先引入本章第1.6节将要阐述的吸收系数这一概念。所谓吸收系数是指某种能量形式在海水介质中传播时，由于介质的吸收，单位距离能量衰减的程度。吸收系数的常用单位是分贝/千米或分贝/米。

图1.1a列举的是海水介质中电磁波吸收系数的实测曲线。至于光波，本质上属于频率更高的电磁波，它在海水介质中因吸收而损失的能量更为严重(见图1.1a)。但对可见光而言，波长在0.47—0.58微米范围内存在着吸收损失最小的“窗口”，这个波长范围内的光波尽管有着很高的穿透海水的^{能力}（在海水中传播1米，穿过的能量约有60%），但它受海水混浊度的影响很大。由于在混浊海水中传播能力的急剧下降，使它的应用范围也受到限制。

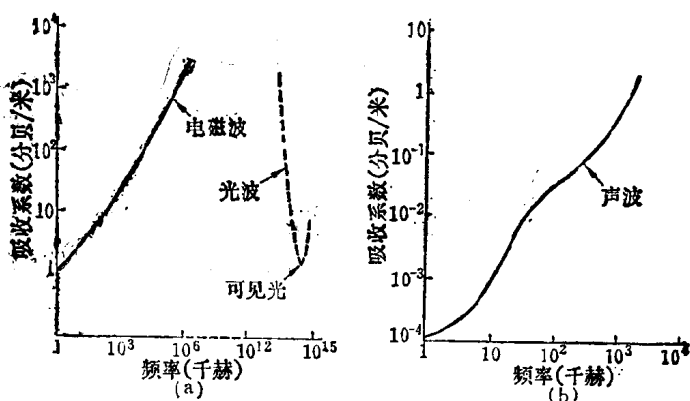


图1.1 海水中电磁波、光波与声波的吸收系数

由图 1.1 可以看出，电磁波吸收系数随着频率升高而升高，其经验公式可表示为

$$\beta = 1.3 \times 10^3 f^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

式中 β ——电磁波吸收系数（分贝/千米）

f ——电磁波频率（千赫）。

声波在海水介质中传播时，虽然也存在着吸收损失，但与电磁波相比要小得多，这可由图 1.1b 的声波吸收系数曲线得以证实。声波吸收系数与海水介质本身的温度、盐度、压力以及所用仪器的工作频率等参量有关，而以频率的影响最为严重。在海洋开发中，声呐设备常用的频段约在 20—100 千赫范围内，与实验曲线逼近的吸收系数表达式为

$$\beta = 0.036 f^{\frac{3}{2}} \text{ 分贝/千米} \quad (1.2)$$

式中 f ——声波频率（千赫）。

为了便于作出对比，我们把电磁波和声波在海水介质中的传播速度和吸收系数的典型值列举于表1.1。

表 1.1 电磁波和声波在海水介质中的传播特性对比

能量形式	传播速度 (米/秒)	吸收系数 (分贝/千米)	$f = 20$ 千赫时的吸收 系数 (分贝/千米)
电 磁 波	3×10^8	$1.3 \times 10^3 f^{\frac{1}{2}}$	5.81×10^3
声 波	1.5×10^3	$0.036 f^{\frac{3}{2}}$	3.2
电磁波与声波比	2×10^5		1.8×10^3

由表 1.1 可知，电磁波虽然能以 2×10^5 倍于声波的传播速度，在海水介质中快速传递信息，但它的吸收损失要比声波高得多。

在一般情况下，利用实测数据引出的结论比简单的推理更能令人信服。笔者在本章开头所花的笔墨也无非是为了向读者引出一个结论：在海水介质中传播的各种能量形式，只有声波吸收损失最小，因此它能够传播到较远的距离。正因为这样，水声技术不仅在反潜作战中享有重要的地位，而且随着海洋开发事业的蓬勃发展，它在民用方面所展现出来的前景也是十分广阔的。

为了便于本书内容的展开，我们将在本章侧重介绍声波在海洋中的一些传播特点。学习这些基本知识对于进一步掌握水声技术在海洋开发工程上的应用原理是颇为有益的。

1.1 波动方程的建立及其简正波解

弹性介质中传播的任何机械扰动都会使介质产生压缩或

膨胀。如果这种扰动是一种规则的正弦变化，那么介质质点就一会儿受压缩，一会儿又膨胀。这种周而复始的质点运动，使声波载有的机械能在介质中传播出去。弹性介质中声波的波动现象，可以用线性二阶偏微分方程（波动方程）来描述。为了使读者对波动方程的物理意义有一个基本了解，在求解这一方程之前，先对它的建立作出简要推导。

以图 1.2 为例，在压力为 P_0 的常压介质中有一个点声源 θ 。假设在某一瞬间点源受激励后产生向外扩张的机械扰动， θ 处的介质压力随即从常压 P_0 上升到 $P_0 + \Delta P_0$ ，压力增量 ΔP_0 引起的加速度使介质质点运动到 R_1 。与此同时，在 R_1 处产生一个新的压力增量 ΔP_1 ，这一压力增量又使

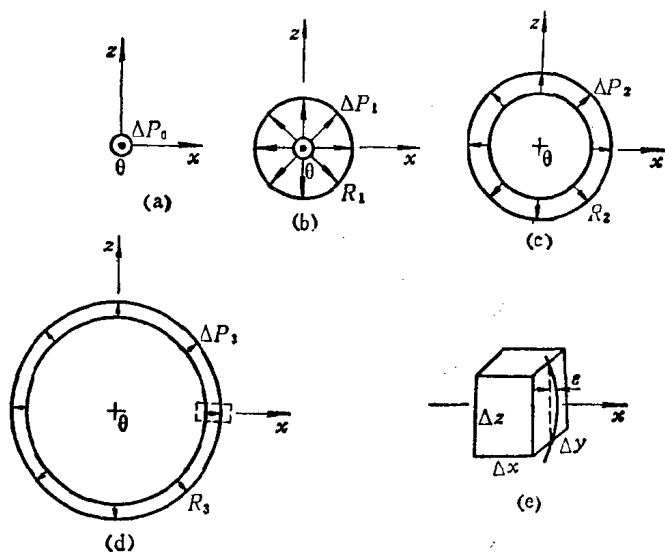


图1.2 声波的传播过程

R_1 处的质点加速运动到 R_2 ……。依此类推，质点的运动使声波所载有的机械能不断地从点源处向外传播出去。

随着声波传播过程的球面扩展，到一定距离后它的波阵面曲率已很小，图1.2 e 中的 ε 将趋近于 0。如果我们取图 1.2 e 加以分析，则可知压力增量具有线性下降的趋势。因此，在 x 方向上引起的压力变化应为

$$-\left(\frac{\partial \Delta P}{\partial x}\right) \Delta x \quad (1.3)$$

式中 ∂ 为偏微分符号。

上述的压力变化，使 $\Delta y - \Delta z$ 波阵面上受到的作用力变为

$$F = -\left(\frac{\partial \Delta P}{\partial x} \Delta x\right) \Delta y \Delta z \quad (1.4)$$

令介质密度为 ρ_A ，所讨论的图1.2 e 小立方体的总质量应为

$$m = \rho_A \Delta x \Delta y \Delta z \quad (1.5)$$

若质点沿 x 方向的振速分量为 v ，则它的加速度为

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1.6)$$

基于牛顿第二定律 $F = ma$ ，将(1.4)、(1.5)和(1.6)式代入后得到

$$-\left(\frac{\partial \Delta P}{\partial x} \Delta x\right) \Delta y \Delta z = \rho_A \frac{\partial v}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (1.7)$$

经化简后

$$-\frac{\partial \Delta P}{\partial x} = \rho_A \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1.8)$$

同时，声源受激励后在介质中产生的机械扰动会引起质量流