

海洋声学原理

J. W. 凯鲁泽 著



科学出版社

海洋声学原理

J. W. 凯鲁泽 著

杨禎先 董学明 译

杭汝衡 校

科学出版社

1983

内 容 简 介

本书作为“海洋声学”的基础教材,叙述了水下声学所涉及的基本研究方面。第一章是导言,首先突出的重点是海洋中声传播理论(包括声衰减理论),所以在第六、七两章中对波动理论、射线方法、海水介质特性以及界面的影响等问题,着重于数理基础的详细阐述。再连同第八章混响(包括散射),第九章噪声的一些比较简练然而却是基本的内容,从而概括了水声物理平均场研究的主要方面。第二、三、四共三章以较多篇幅介绍了声源、声发射系统及声接收系统。加之第五章声纳方程及第十章信号检测理论原理的内容,就总括了水下声学研究及应用的三个主要方面,较完整地给予读者有关此领域的基础知识。

本书适合于从事海洋学、水声学的研究、测量人员以及海洋仪器的设计和生产方面的科技人员阅读。对高等院校有关专业教学有较大的参考价值。

J. W. Caruthers

FUNDAMENTALS OF MARINE ACOUSTICS

Elsevier Scientific Publishing Company, 1977

海 洋 声 学 原 理

J. W. 凯鲁泽 著

杨祯先 董学明 译

杭汝衡 校

责任编辑 杨玉梅

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1983 年 2 月第一次印刷 印张: 5 1/4

印数: 0001—1,700 字数: 115,000

统一书号: 13031·2180

本社书号: 2983·13—17

定价: 0.85 元

译 者 的 话

近年来,在海洋科学的领域内,流行着一个新的名词——“海洋声学”(Marine Acoustics, Ocean Acoustics),或者有人称“声(学)海洋学”(Acoustic Oceanograph)。这意味着一门新兴学科已经展现出来了。这个学科既有别于传统的“海洋学”(Oceanography),又不同于周知的水声学(Underwater Acoustics; Underwater Sound)。

海洋学是一门分支学科繁多的、既古老而又年轻的学科。水声学本来是海洋物理的一个分支。但是,到目前为止,声波还是唯一能在深海中作远距离传输的能量形式;特别是由于军事用途上的需要,水声物理基础研究;应用声波作为水下通信、数据传输、目标检测和定位、识别、导航及控制工具的研究得到了迅速的发展,形成了一门独特的技术科学——水声学。

虽然从一开始,水声理论工作十分重视海洋环境因素的影响,并正确地选用了若干典型海洋环境要素作为声场描写中的参数。但从事应用研究和工程技术的科学工作者,往往并未意识到这些问题的重要意义。另一方面,从事海洋学研究、调查的科学工作者,一般说来对水下声学物理现象也比较生疏。实际上,许多著名海洋学家和水声科学家早已指出:海洋学许多分支学科研究同水声学密切相关,海洋环境因素对水下声场有重要的影响。另一方面水声学研究积累的成果知识,特别是高度发展的水下声纳技术,能为海洋学研究提供极为有效的方法和工具。这样,在七十年代初期“海洋声学”就瓜熟蒂落地诞生了。现代科学的发展,各学科相互渗透,通过综合,

在学科边缘交界的沃土中，定能结出丰硕的科研成果。上述就是一个鲜明的例子。由于应用声学方法作为观测海洋现象手段，例如：“声发”中性浮标的使用，对海洋的时-空大、中尺度的海洋现象观测，有了巨大的进展。

在这样的背景下，美国的研究发展比较快，为适应研究工作的要求，国家科学基金海洋资助计划委托得克萨斯(州)农工大学(A & M)海洋系于1971年6月28日至7月；1973年6月25日至29日举办“海洋声学”讲座。由政府机构、工业界和大学人员参加。讲座目的在于向在各领域从事科技工作人员介绍“海洋声学”领域内的科学和技术知识以及其发展。本书内容作为基础知识教材讲授。连同其后的高级专门论题报告，使得来自各领域的参加者获得应用“海洋声学”方法解决各自科学领域问题的知识。

因为本书编写的目的与宗旨明确，特别适合从事海洋学及其他领域工作，对“海洋声学”感兴趣而又对水声学接触较少的科技人员参阅。为此本书被编入海洋学丛书之内。把这本书介绍到我国，引起有关方面科技工作者注意。对促进我国“海洋声学”的发展，会发挥一定的积极作用。

译者力求把工作做得更好些，但限于水平，漏误之处在所难免，热切希望读者对不妥之处，提出批评和指正。

序

本书主要介绍给读者关于声音在海洋中的传播问题。该书是为从事水声工程技术领域中的研究生、高年级大学生编写的。同时,对水声工程的实际工作人员(工程师和科研人员)也颇为适合。本书内容,主要是根据作者几年来对得克萨斯州农工大学海洋系(the Department of Oceanography of Texas A & M University)毕业班讲课内容和在该校举办的两届夏季短期专题讲座内容编写的。《海洋声学原理》一书出版,是在美国商业部所属国家海洋大气管理局的海洋研究基金资助计划的赞助下完成的。为适应海洋研究基金资助计划的宗旨,故本书内容主要基于民用和侧重海洋环境因素的研究。该书原为得克萨斯州农工大学海洋研究基金资助计划的授课讲义。其后,在美国和国外几所大学作为教材被采用了。

本书的编写和出版,曾得到得克萨斯州农工大学及美国海洋研究基金资助计划的支持。在此特表示感谢。同时也对编写该书协助收集资料的同学们表示感谢。巴尔巴拉、韦伯夫人和杜姆尼克、苏马先生为该书的出版绘制了大量图表,也向他们表示感谢。

J. W. 凯普泽

目 录

第一章 导言	1
1.1. 海洋中的声音	2
1.2. 声场特性	3
1.3. 对数单位	11
1.4. 谱的概念	12
讨论题	14
第二章 电声及化学换能	16
2.1. 电声换能器	16
压电特性	17
铁电特性	18
机电系统	19
辐射能	22
等效电路理论概述	23
功率转换与阻抗匹配	26
发射效率	27
品质因数	28
机电耦合系数	29
接收灵敏度	30
2.2. 爆炸声源	32
讨论题	36
第三章 水听器、发射器及其校准	38
3.1. 换能器响应	38
3.2. 校准方法	39
比较法	39
互易法	39

3.3. 特殊校准方法	44
宽带噪声校准方法	44
近场校准方法	45
3.4. 波束图和指向性	46
指向性图	46
接收换能器指向性指数	50
发射换能器指向性指数	52
3.5. 水听器特性	54
3.6. 发射器特性	55
空化	56
讨论题	57
第四章 换能器阵列及其控制	59
乘积定理	60
电子扫描	60
束控	62
阵增益	63
讨论题	64
第五章 声纳方程及其参数	65
5.1. 声纳方程的几种形式	66
5.2. 声纳参数及其几种组合	68
讨论题	69
第六章 声传播理论	71
6.1. 波动理论	72
应用于一维波动方程的分离变量法	73
格林函数法	77
赫姆霍兹积分公式	79
程函方程	80
费马原理	81
斯涅尔定律	82
6.2. 反射	84

强度	88
在平面边界处反射的分析	89
掠射角低于临界角即全反射情况时,边界下面介质中声 场的解	92
空气-水的界面反射	94
海底反射	95
反射声线与直达声线间的相干作用:劳埃德镜像效应...	96
6.3. 浅海声传播理论	99
6.4. 扩展与衰减	100
扩展	100
衰减	101
讨论题	103
第七章 海洋中的声传播	104
7.1. 海洋中声速分布图	104
7.2. 声道效应	107
混合层声道	107
深海声道	108
浅海传播	111
7.3. 声音在海中的衰减	117
第八章 混响	119
8.1. 体积混响理论	119
8.2. 界面混响理论	123
兰伯特定律	127
8.3. 海上观测到的混响	128
体积混响	128
海面混响	129
海底混响	130
第九章 噪声	132
第十章 声纳信号处理	135
10.1. 检测理论	135

10.2. 检测概率和虚警概率	140
10.3. 检测阈	142
10.4. 窄带处理	143
讨论题	144
参考文献	145
选题解答	146
中英术语对照表	155

第一章 导 言

声学是一门工程科学。它是研究能量以振动波的形式在一种介质中产生、传播和接收的科学。这样的能之所以有价值在于它包含着某种形式的信息。这样,对包含于此能量中信息内容的研究,就是声学的一个部分。

在海洋声学历史的记载中,达·芬奇曾于1490年写过这样一段话:“如果使船停航,把一根长管的一端插入水中,而另一端贴紧耳朵,则能听到远处的航船。”这是水下被动式声纳设备的雏型。从这一发现开始,海洋工程声学又走过它漫长的道路。

水声学的实际应用是从本世纪初开始的。当时把潜水钟作为危险航区的信标,作为浅水航区航行的辅助设备;使用测深仪来测深;同时,用回波测距声纳(当时称之“声测位器”)进行对潜艇、冰山的探测和定位。

当前,深度测量仅用测深仪即可;而对潜艇的检测主要是用声纳设备来完成的。回声测距系统既可用于探测和定位,在某种程度上还可用来分辨鱼群;进行海上石油勘探主要使用海底浅层回声探测设备;被动式监听和通讯设备以及水声信标、定位系统都有不少用途。诸如声成像、全息摄影以及水声电视遥测这类先进的设备,即使我们还没有用上,国外已开始在海上使用。

事实上,关于水声学的在民用方面已经使用得如此广泛,以至于必须要加强管理¹⁾。

1) *Present and Future Civil Uses of Underwater Sound*, National Academy of Sciences (Washington, D. C., 1970).

1.1. 海洋中的声音

声传输的基本概念是十分简单的。声是在介质中传播的机械扰动。与这一机械扰动相关联的是由于质点运动引起压力和密度的变化。这就是使介质产生形变的力同质点运动之间的基本关系。适用于小振幅波的最简单的模型是由运动方程、连续性方程以及物态方程求得的偏微分方程,亦即下面的公式,通称为波动方程:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1)$$

其中 $p = p(x_1, x_2, x_3, t)$ 为逾量压力, $c = c(x_1, x_2, x_3)$ 为声速, ∇^2 为拉普拉斯算子¹⁾。自然,一个具体的问题必须包括边界条件在内²⁾。

想对海洋中声音有最根本的认识,则必须对声场特性有个基本的了解。声场最简单的描述是以正弦平面波构成的一维波动方程的解,表式如下:

$$p(x, t) = p_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi f t + \phi\right) \quad (1.2)$$

其中 p_0 为压力扰动的振幅, λ 为波长, f 为频率, ϕ 为相移, T 为周期 $\left(T = \frac{1}{f}\right)$, 正弦函数的辐角称为相位。相速 c 可用 $f\lambda$ 表示,亦即是 $c = f\lambda$ 。

要牢记的是海洋中声传输的基本作用是传送某种形式的信息。再也没有其他物理现象能适应这种作用的要求。在同空间里使用的各种电磁波遥测系统(无线电、雷达、人的眼睛

1) (x_1, x_2, x_3) 系空间坐标,即直角坐标 (x, y, z) 。

2) 第六章里指出声传播理论更完善的论述。这里列出的所有公式也在第六章中展开。

等)相比较时,考虑影响和限制声传输的若干基本特点是有价值的。

水中声速与空间电磁波的传播速度相比要小得多。(电磁波速度为水中声波的 2×10^5 倍。)故使得扫描速率大大地降低。

声波高频分量衰减很大(使用频率一般低于 15 千赫。)因此,数据传输率很低。

波长比较长(因为 $\lambda = c/f$, 大于 0.1 米),因此空间分辨率也很低。

水中声速梯度要比空气中声速梯度大得多,致使声波发生强烈的折射(射线的曲率半径量级为 10 海里)。定向信息的可靠性甚差。

海洋中的背景噪声以及混响都比较大,且占较宽频带,再加上换能器只能是低 Q 情况下使用(见下一章),因此,使信号检测受到严重的限制。

海水无法承受高于*一确定的最小压力值,因而进入海水中的总能量受发射器尺寸大小的限制,并且还同发射器放置的深度有关。

自然,整个水声学的研究和发展都与上述的各问题有关。在本书中将强调水声学的基本作用在于传送信息这一简单事实。上述各个问题会相继出现的。

1.2. 声 场 特 性

业已指出声场可由压力变化 $p(x, y, z, t)$ 描述,并指出,在某些简单的场合,该压力变化可由正弦平面波表示:

* 此处似有误,原文 below 应为 beyond.——译者注

$$p(x, t) = p_0 \sin(kx - \omega t + \phi)$$

其中定义角波数 $k(k = 2\pi/\lambda)$, 角频率 $\omega(\omega = 2\pi f)$, 并得声速 $c = \omega/k$.

通常一维平面波可由下列函数形式描述:

$$p(x, t) = f(kx - \omega t) \quad (1.3)$$

前述的平面波可以由相当数目的正弦平面波的求和 (或积分) 来构成。例如, 一个平面波可以是

$$p(x, t) = \sum_{i=1}^n p_i \sin(k_i x - \omega_i t + \phi_i) \quad (1.4)$$

其中, n 可为任何数, p_i 为分量波振幅, 它具备角频率 ω_i , 波数 k_i , 相移 ϕ_i 。每个分量波速为 $c_i = \omega_i/k_i$ 。假如各分量的速度都相同的话, 称该介质是非色散介质, 否则就是色散介质。从实用目的来看, 对声波而言海水一般可看作非色散介质。

在许多应用的场合, 声场的平均强度比起声压更为有用, 且容易测定。强度是由通过垂直于声波传播方向的单位面积的能流速率来量度的, 亦即

$$\text{强度} = \text{功率} / \text{面积}$$

倘若声波不是平面波或者存在多个波辐射的情况下, 情况更复杂, 就不在此讨论了。

符号 I 以及“强度”一般指“平均强度”而言, 可由下式计算:

$$I = K \overline{p u} \quad (1.5)$$

其中 K 为一常数并取决于单位量纲的选择。 “ u ” 为质点速度,

-
- 1) 用 $\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}$ 代换 kx 即得到三维正弦波。此处 $\mathbf{K}$ 是具有矢长为 $2\pi/\lambda$, 取向和传播方向一致的波矢量 (或称传播矢量)。此处 $\mathbf{r}$ 则是所讨论的问题在任意原点的位矢量。但通常可找到一坐标系统, 其中任意平面波以一维形式表示。

横号是在时间区间 τ 内的时间平均。

一个量 $x(t)$ 的时间平均值 $\bar{X}(t, \tau)$:

$$\bar{X}(t, \tau) = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} X(t') dt' \quad (1.6)$$

应该注意 $\overline{pu} \neq \bar{p}\bar{u}$, 因为 p 和 u 相互并非独立的。这在下面将看到。

这里同样用到在推导波动方程时所用过的运动方程, 如牛顿定律所指出:

$$\text{grad } p = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1.7)$$

其中 u 为质点速度, ρ 为平衡密度。对平面波来说, 取梯度, 完成积分即可得到

$$p = \rho c u \quad (1.8)$$

将之代入方程 1.5, 对任一平面波可得:

$$I(t, \tau) = K \frac{\bar{p}^2(t, \tau)}{\rho c}$$

在水声学中公认以达因/厘米²表示压力(微巴, μbar)²⁾, 以克/厘米³表密度, 声速由厘米/秒(用于本公式时); 强度便是瓦/厘米²。这样, K 为 10^{-7} (瓦/厘米²)/(尔格/秒·厘米²), 强度由下列实用公式求得:

$$I = \frac{\bar{p}^2}{\rho c} \cdot 10^{-7} \quad (1.9)$$

在水中, ρc 的乘积约为 154,000 克/秒·厘米²,

- 1) 设信号 $X(t)$ 为平稳, 并且 τ 足够大时, 可得

$$\bar{X}(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau X(t') dt' \quad (1.6a)$$

就是说, 平均值同取样的时间原点无关。

- 2) 1968 年, 微帕 (10^{-6} 牛顿/米²) 变为美国的标准压力。然而, 微巴仍为普通的, 且将在本说明中使用。 10^{-5} 微巴 = 1 微帕。

$$I = \frac{\bar{p}^2}{154,000} \cdot 10^{-7} = 0.65 \cdot 10^{-12} \bar{p}^2$$

$$= 0.65 \cdot 10^{-12} p_{rms}^2 \quad (1.10)$$

均方根声压 p_{rms} 由 $p_{rms} = \sqrt{\bar{p}^2}$ 定义。

若扰动为一正弦平面波。那么均方压力是在周期 T 内取平均的值:

$$\bar{p}^2 = \frac{p_0^2}{T} \int_0^T \sin^2(kx - \omega t) dt,$$

或

$$\bar{p}^2 = \frac{p_0^2}{2T} \int_0^T [1 - \cos 2(kx - \omega t)] dt$$

在一周期内余弦项的平均值为零。因此, 正弦平面波的均方根声压为

$$\bar{p}^2 = p_0^2/2$$

$$p_{rms} = p_0/\sqrt{2} = 0.707 p_0 \quad (1.11)$$

正弦平面波的强度为

$$I_{pw} = 0.325 \cdot 10^{-12} p_0^2 \quad (1.12)$$

与电路作类比, 把量 ρc 称之为介质的声阻率。则对应关系如下:

$$V \longleftrightarrow F (=PA; \text{压力乘面积})$$

$$I \longleftrightarrow u$$

$$R \longleftrightarrow \rho c A$$

$$V = RI \longleftrightarrow F = (\rho c A)u; \quad p = \rho c u$$

ρc 是单位面积的声阻。总之, 声阻抗率为压力对速度的比值。

至此, 对于在弹性介质中的平面波来说, ρc 是纯阻性的。

1) 以微帕为单位测量压力, 方程 (1.10) 变为

$$I = 0.65 \cdot 10^{-12} p_{rms}^2 \quad (1.10a)$$

p_{rms} 系均方根声压。

$\cdot 10^{-22}$

纯阻性情况的重要之点就在于压力与速度是同相位的。我们很快就会明白，介质的非弹性或者不再是简单平面波传播形式的声场都能引起相对相移。这时，声阻变成为声抗，是一个复数。

在空气中声速为 34,400 厘米/秒，在海水中它大约为 150,000 厘米/秒；空气密度为 0.00129 克/厘米³，海水的密度为 1.02 克/厘米³；空气的声阻率为 42 声欧姆，海水的声阻率为 154,000 声欧姆。其比值为：

$$\frac{(\rho c)_w}{(\rho c)_a} = 3700$$

该比值也可写成：

$$\frac{(\rho c)_w}{(\rho c)_a} = \frac{u_a p_w}{u_w p_a} = \frac{p_w^2 I_a}{p_a^2 I_w}$$

对一定的压力扰动，质点的速度和位移在空气里要比海水里约大 4000 倍；对一定的质点速度而言，水中的压力要比空气中的压力大 4000 倍。

这意味着水听器或发射器的特性与传声器或扬声器的特性一定有着显著差别，也意味着空气与水的界面处对声的传播表现出很强的不连续性。因此，这个界面就是良好的声反射体。

在时间 τ 内由声源发射的平均功率（这里忽略固有的传播速度引起的时延）可由对包围着声源的整个表面 Σ 上的强度 $I(\tau)$ 进行积分而获得。

$$P(\tau) = \int_{\Sigma} I(\tau) ds \quad (1.13)$$

作为例子，我们考虑位于各向同性球坐标系原点上声源辐射的功率。在这个情况下，强度只是径向坐标的函数。流经任一半径为 r 的球面上的功率为