

国家自然科学基金课题 (10574038) 及河海大学常州校区资助项目



水声通信

基本原理与应用

◎ 朱昌平 韩庆邦 李 建 张秀平 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



策划编辑：董亚峰
责任编辑：裴杰
封面设计：喻晓



本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书。

ISBN 978-7-121-08003-6



9 787121 080036 >

定价：28.00 元

国家自然科学基金课题(10574038)及河海大学常州校区资助项目

水声通信基本原理与应用

朱昌平 韩庆邦 李 建 张秀平 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍关于水声通信的一些基本知识和基础理论及应用。全书分为6章，前2章与后4章分别在声学 and 通信两方面各有侧重。本书围绕指导实际应用研究开展原理分析，内容简明扼要，实用性强。本书可以供有关从事水声通信研究的高校师生及科研院所的工程技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

水声通信基本原理与应用 / 朱昌平等编著. —北京：电子工业出版社，
2009.3

ISBN 978-7-121-08003-6

I. 水… II. 朱… III. 水声通信 IV. E96

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第199779号

责任编辑：裴 杰

印 刷：北京天宇星印刷厂

装 订：涿州市桃园装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本：850×1168 1/32 印张：10.5 字数：280千字

印 次：2009年3月第1次印刷

印 数：2000册 定价：28.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

前 言

当今世界已经进入了飞速发展的信息时代，通信是这一进程中发展最迅速、进步最快的行业。通信的应用可以分为海、陆、空三个大的部分。现在，陆地和空中包括的两个最积极、最活跃和发展最快的分支——Internet 和移动通信网已日臻完善，而海洋中无线通信技术的发展却刚刚崭露头角。随着人类对海洋的探索、开发和利用程度不断加深，无论是军用还是民用领域，都对海洋环境下的信息交流有了巨大的需求。

随着现代电子技术和信息科学的飞速发展，水声通信技术取得了长足的进步。其作为一门综合学科，数字信号处理、移动通信、软件无线电技术上所取得的成果都可以借鉴，飞速发展的大规模集成电路技术和数字信号处理技术也应用到了水声通信当中。由于海洋信道的复杂性，水声通信技术成为当代最复杂的技术之一，水声通信也成为当前研究的一个热门领域。

为顺应这一发展形势，针对当前有关这方面专著比较少的状况，组织编写了《水声通信基本原理与应用》一书。

本书主要介绍关于水声通信的一些基本知识和基础理论及应用。全书分为6章，第1章介绍声学的基本知识；第2章讲述声波在海洋中传播的基本特性；第3章讨论水声信道的特性；第4、第5章分别介绍水声通信的编码及调制技术；第6章介绍水声通信系统及其目前发展现状。本书可以供有关从事水声通信研究的高校师生及科研院所的工程技术人员参考。

本书在原理分析的基础上以指导实际应用研究为目的，因此只将水声通信领域多年来的研究成果进行了简明扼要的介绍，有关更复杂的理论和技术讨论，有兴趣的读者可参阅书后参考文献或者其他更专业的书籍。

本书在编写过程中得到河海大学通信系教师齐本胜、霍冠英、单鸣雷等的鼎力帮助；研究生路龙惠、殷冬梅、王瑞华、段红恩，以及部分本科生参与了资料搜集及部分章节编写和排版工作，在此一并表示感谢。

在本书编写过程中，参阅并引用了许多同仁宝贵的研究成果，多数列在了参考文献中，有的可能因作者的疏忽而被遗漏了，在此本书作者向所有为本书编写提供参阅的参考文献作者们，一并致以衷心的感谢！没有您们公开发表的成果，就不可能有本书的出版。

由于作者水平所限，书中错误难免，敬请广大专家和读者批评指正。

朱昌平

目 录

第 1 章 水声学基础	1
1.1 声学基本知识	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 声波的分类	2
1.1.3 声波的基本物理量	3
1.1.4 理想流体中的声波波动方程	6
1.2 声纳方程	11
1.2.1 声纳系统的工作原理及声纳方程概述	11
1.2.2 声纳方程的建立	12
1.2.3 声纳参数	20
1.2.4 修正声纳方程	21
1.3 声波的发射与接收	24
1.3.1 声波的发射	24
1.3.2 声波的接收	46
参考文献	54
第 2 章 声在海水中传播的特性	57
2.1 声在海中传播损失的概念	57
2.1.1 扩展损耗	59
2.1.2 吸收损耗	61
2.2 海洋的基本声学特性	66
2.2.1 海洋中的声速分布	66
2.2.2 海洋表面的风浪	70
2.2.3 海底底质及其一般性质	71
2.2.4 海洋中的自然波——内波	73
2.3 海洋介质中声波的散射	76



2.3.1	混响的形成及其分类	77
2.3.2	体积混响级 RL_v	79
2.3.3	海面混响级 RL_s	80
2.3.4	海底混响的计算和海底混响级 RLB	81
2.4	水声噪声	81
2.4.1	噪声的基本概念和频谱分析	82
2.4.2	海洋自然噪声	86
2.4.3	船舰自噪声	88
	参考文献	89
第 3 章	水声信道特性	91
3.1	信道基础	91
3.1.1	调制信道模型	92
3.1.2	编码信道模型	95
3.2	水声信道特点	97
3.2.1	有限通信带宽	97
3.2.2	多途径效应	99
3.2.3	海洋环境噪声	101
3.2.4	时变、空变、随机性	103
3.2.5	多普勒效应	105
3.3	水声信道模型	106
3.3.1	水声信道的衰落特性	107
3.3.2	水声信道的几种模型	115
	参考文献	120
第 4 章	水声信道编码技术	123
4.1	信道编码	124
4.1.1	信道编码定理及基本概念	125
4.1.2	各种编码技术简介	128
4.2	信源编码	156
4.2.1	无失真信源编码 (统计匹配编码)	156



4.2.2	相关信源编码	159
4.2.3	限失真信源编码	162
4.3	水声信道的编码技术	165
	参考文献	174
第 5 章	水声信号的调制解调	176
5.1	非相干通信	178
5.1.1	FSK 方式简介	178
5.1.2	适合水声信道的 FSK 信号的设计	181
5.2	相干通信	185
5.2.1	水声通信中的相干通信方式	185
5.2.2	MC-PSK 调制与解调技术	191
5.3	频分复用	195
5.3.1	OFDM 技术的特点	196
5.3.2	正交频分复用 (OFDM) 原理	197
5.3.3	最佳工作频率	199
5.4	扩频技术	200
5.4.1	扩频技术基础知识	200
5.4.2	水声通信中常用的扩频技术	203
5.5	水声信号接收技术	210
5.5.1	均衡技术	210
5.5.2	空间分集与智能天线技术	219
5.5.3	时间反转技术	221
5.6	水声通信仿真设计	228
	参考文献	243
第 6 章	水声通信系统	251
6.1	水声通信技术的发展简史	252
6.2	国内外水声通信的发展现状	254
6.2.1	国内水声通信的现状	254
6.2.2	国外水声通信的现状	255

6.3 水声通信系统基本组成	257
6.3.1 模拟水声通信系统	257
6.3.2 数字水声通信系统	258
6.3.3 数字水声通信系统设计	261
6.4 水声通信网络	274
6.4.1 水声通信网络概述	274
6.4.2 水下自组织网络的研究	293
6.4.3 自治水下机器人的发展	298
6.4.4 水下声学传感器网络	310
6.4.5 水声网络设计	311
参考文献	320

第 1 章 水声学基础

1.1 声学基本知识

1.1.1 基本概念

声波是物体的振动状态在介质中传播的一种物理现象。当声源发生振动后，周围的介质质点就随之振动而产生位移，导致介质空间产生介质的疏密，就形成了声波传播。传播振动的介质可以是空气，也可以是液体或固体。当振动经空气介质传入人耳，使人耳的鼓膜振动时，便有声音的感觉，属于可听声范围。

声波的产生必须具有两个条件：一是声源，二是弹性介质。发声体的振动状态激发起周围介质的扰动，该扰动由远及近，形成声波在介质中的传播，因此，必须借助于介质本身的弹性和惯性，振动状态才能得到传播。声波不能在真空中传播，只能在弹性介质中传播。可以认为弹性介质是由无数质点和小弹簧组成的连续介质，质点代表介质的惯性，小弹簧代表介质的弹性。当介质受扰动时，质点离开平衡位置向前移动，压缩小弹簧，且推动相邻质点向前。小弹簧在推动质点向前的同时，有弹性反力作用于质点，使它恢复到原来的平衡位置，当质点回到平衡位置时，依赖质点的惯性，使其反冲超过原来的平衡位置，又压缩了另一侧的弹簧及其相邻质点。另一侧的弹簧也将产生弹性反力，使质点又回到平衡位置，且继续超过平衡位置向前冲。由于介质的弹性和惯性，使得被扰动的质点在其平衡位置附近来回振动。同样，随着时间推移，推动了临近的其

他质点，使得它们也都在自己的平衡位置附近来回振动。所以，声波是振动状态在弹性介质中的传播，并非是介质质点本身的传播。

1.1.2 声波的分类

声波按其频率的高低，波阵面的几何形状以及质点的振动情况可有不同的分类。

1. 按频率分

可听声——可听声是频率在人耳听觉高低极限间的声波，一般在 $20\sim 20\,000\text{ Hz}$ 之间。

次声——次声是频率低于人耳听觉低限的声波，一般在 20 Hz 以下。

超声——超声是频率超过人耳听觉高限的声波，一般在 $20\,000\text{ Hz}$ 以上。

现代声学研究的范围已经扩展到 $10^{-4}\sim 10^{14}\text{ Hz}$ 。

2. 按波阵面的几何形状分

平面声波——平面声波是波阵面为平行平面的声波。

球面声波——球面声波是波阵面为同心球面的声波。

柱面声波——柱面声波是波阵面为同轴柱面的声波。

3. 按质点振动情况分

纵波（也称压缩波）——纵波是介质中质点振动方向与波的传播方向一致的波。如空气和海水等流体中传播的声波。

横波——横波是介质中质点的振动位移方向与波的传播方向互相垂直的波。如弦绳的振动波。

介质的纵波及横波波速由介质材料特性所决定，所以波速是表征介质特性的重要参数。

1.1.3 声波的基本物理量

为了描述声振动，在连续介质中，通常要定义一些连续函数，它们分别是声压、位移、振速、密度和压缩量等。

1. 声压

若介质未受外力扰动时的静压强为 P_0 ，它等于平衡状态下垂直于任意截面的压强。在受到扰动时，若压强改变为 P ，声压 p 定义为介质压强的变化量，即：

$$p = P - P_0 \quad (1-1)$$

所以， p 为声扰动引起的相对于静压强的改变量。不同时刻、不同位置的压强 P 不同，因而，声压 p 是时间和坐标的函数， $p = p(x, y, z, t)$ 。

存在声波的空间称为声场。声场中某瞬时的声压称为瞬时声压，一定时间间隔内的最大瞬时声压称为峰值声压，当声压随时间按简谐规律变化时，峰值声压的大小即为声压的振幅。瞬时声压在一定时间间隔内的均方根值称为有效声压 p_t 。

$$p_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2 dt} \quad (1-2)$$

式中， T 为所取的时间间隔，对于周期振动，它可以是一个周期或者比周期大得多的时间间隔。按简谐规律振动的声波，由上式可得有效声压 p_t 和声压振幅 p_c 的关系， $p_t = p_c / \sqrt{2}$ 。一般电子仪表测得的就是有效声压，因而，习惯上声压就是指有效声压。声压是压强改变量，可正可负，介质压缩时， $p > 0$ ，介质膨胀时， $p < 0$ 。

有效声压的大小能代表声波的强弱。在 CGS 单位制中，声压单位是 dyn/cm^2 ，称微巴 (μbar)；在 MKSA 单位制中，声压单位 N/m^2 ，称帕 (Pa)； $1\mu\text{bar} = 0.1 \text{ Pa}$ 。微风吹动树叶时的声压约为

0.001 μbar ；房间内大声讲话时的声压约为 1 μbar ；在距离船舶 100 m 处收到的船舶航行噪声声压约为 10~100 μbar 。

2. 位移、振速和声速

在声波作用下，介质质点围绕其平衡位置往返振动。质点位移是指介质质点离开其平衡位置的距离，沿坐标轴正向的位移为正，沿坐标轴负向的位移为负，因而，质点位移随坐标和时间改变。同样，质点振速也有正有负，也随坐标和时间改变。位移和振速分别用 ξ 和 u 来表示，且 $u=d\xi/dt$ 。

在没有声扰动时，若介质静态流速 U_0 不等于零，在声波作用下流速为 U ，则介质质点振速 $u=U-U_0$ 。位移的单位是 m 或 cm，振速的单位是 m/s 或 cm/s。

而声速是指声波传播的速度，一般声波传播速度 c 要远远大于质点振动的速度 u 。

3. 密度和压缩量

若 ρ_0 代表没有声扰动时处于静态状态是的介质密度， ρ 代表有声扰动时的介质密度，其改变量为 $\rho_1=\rho-\rho_0$ ，通常声学中也常用密度改变量 ρ_1 来描述运动状态。介质密度的相对变化量 s 称为压缩，即 $s=(\rho-\rho_0)/\rho_0=\rho_1/\rho_0$

ρ_1 和 s 都是坐标和时间的函数。

在描述声场时，通常采用的是各物理量的空间分布函数，即 p ， u ， ρ_1 等是空间坐标点的函数，而并不是其介质质点的函数。当质点流经其空间点时，就取该空间点的函数值。

4. 阻抗

声阻抗定义为：声压和有效面积上的体积速度的比值即：

$$Z = \frac{P}{U} \quad (1-3)$$

式中， U 为体积速度， $U=uS$ ，单位为牛·秒/米⁵



但由于体积速度的物理意义不明显，所以引入声压和质点速度的比值：

$$z_s = \frac{p}{u} \quad (1-4)$$

为阻抗率。阻抗率可以为复数，单位为 1 瑞利 = 1 牛·秒/米³。平面波前进的声阻抗率 $z_s = \rho c$ ，也称介质的声学特性阻抗。

5. 声功率和声强

声功率是指单位时间内声波辐射出的平均声能量流，单位为瓦特。声强是指垂直于波阵面上单位面积上的功率，也称平均声能流密度，单位为瓦特/米²。

6. 声压级、声强级和声功率级

在研究声压及声强问题时，由于声振动的能量范围非常广，如人通常讲话的声功率只有 10⁻⁵ 瓦，而火箭噪声声功率可达 10⁹ 瓦，相差十几个数量级，因此有必要引入声压级和声强级。

声压级以符号 SPL 表示，定义为待测声压有效值 p_e 和参考声压 p_{ref} 比值的常用对数并乘以 20，即：

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{p_e}{p_{ref}} \quad (\text{dB}) \quad (1-5)$$

在空气中 p_{ref} 一般取 2×10^{-5} 帕，在流体中根据具体情况而定。

声强级的符号为 SIL，定义为待测声强 I 和参考声强 I_{ref} 比值的常用对数再乘以 10，即：

$$SIL = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}} \quad (\text{dB}) \quad (1-6)$$

空气中的参考声强可取 10⁻¹² 瓦/米²。

声功率级 (PWL) 定义为：声源辐射声功率和参考声功率比

值的常用对数再乘以 10。相对前面两个量而言，声功率级应用场合较少。

1.1.4 理想流体中的声波波动方程

为了定量研究声波在介质中的传播规律，必须首先建立描述介质运动状态的物理量，即压强、振速和密度之间的关系，由此推导出声波波动方程，由波动方程及边界条件就可得到声场。

考虑理想介质流体情况，即波在介质中传播时没有粘滞损耗。在小振幅情况下，声压远小于静压强，即 $p \ll P_0$ ；质点位移远远小于波长，即 $\xi \ll \lambda$ ，质点的振速远远小于波传播速度即 $|\mathbf{u}| \ll c$ ，且介质处于宏观静止状态。流体中各个点的压强 $p(x, y, z, t)$ 及振速 $\mathbf{u}(x, y, z, t)$ 为位置及时间的函数。从基本的物理概念和定律出发可建立如下 3 个方程。

1. 运动方程（牛顿第二定律应用）

由牛顿第二定律， $\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{u}}{dt}$ ， m 为质点质量， \mathbf{u} 为振速。

(1-7)

在声场中取一小体积元，空间尺寸为 Δx ， Δy ， Δz ，如图 1-1。设流体静态密度为 ρ_0 。先分析 x 方向上受力情况，假定该方向截面积为 S 。则前后两面间的合力为：

$$F_1 - F_2 = -\Delta p \cdot S = -\frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (1-8)$$

式中，负号是由于 P 的方向引起的。

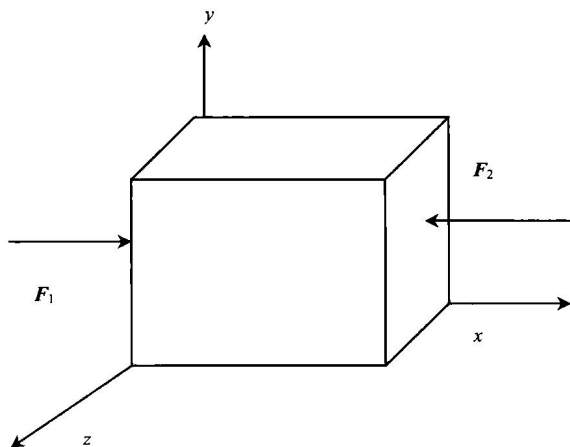


图 1-1 声场中的体积元

由于该体积元的质量元为 $\rho\Delta x\Delta y\Delta z$ ，在 x 方向产生的加速度满足牛顿第二定律，得：

$$-\Delta p \cdot S = \rho S \Delta x \frac{\partial u_x}{\partial t} \quad (1-9)$$

考虑到 $\Delta x \rightarrow 0$ 及 $\rho \approx \rho_0$ （小振幅时，密度变化不大）则：

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial u_x}{\partial t} \quad (1-10)$$

同理可以得到类似的关于 y, z 方向的方程，对三维情况则可表示为梯度关系

$$\nabla p = -\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \quad (1-11)$$

该式给出了 p, \mathbf{u} 之间的关系。