



现代物理学丛书

汪德昭 著
尚尔昌

水 声 学

科学出版社

现代物理学丛书

水 声 学

汪德昭 尚尔昌 著

JY1137/16

科学出版社

1981

内 容 简 介

本书着重从声场分析的观点,系统地论述近代水声学的基础理论,并反映我国水声学研究的某些进展和成果。全书共分十二章。第一章简述水声场的信息结构,建立声呐方程;第二章简述作为水声信道的海洋介质的某些特性;第三章讨论水声场的基本概念及理论方法,并较详细地讨论简正波与射线之间的变换问题;第四、五章对典型声场作理论分析,在浅海声场的分析中,使用边界反射损失的“三参数”模型,用“过渡距离”的分析方法讨论平均场强结构,并用简正波理论分析深海声场中的“反转点会聚区”;第六章讨论海洋中的背景场,介绍由传播算子构成噪声场时空相关函数的理论,并讨论浅海远程混响问题;第七、八、九章讨论目标源的特性,信号场的散射与起伏,声场数值预报与信道匹配问题;第十、十一章讨论水声信号处理问题,着重介绍声场的最佳时空处理问题,并对近代水声探测系统作了简介;第十二章讨论水声换能器中的一些重要问题,包括结构体特别是弯张换能器的振动分析、声阵及测量技术等问题。

本书可供从事水声、海洋物理及地球物理的科研与教学工作者及研究生参考。

现代物理学丛书

水 声 学

汪德昭 尚尔昌 著

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

1981年4月第一版 开本: 850×1168 1/32

1981年4月第一次印刷 印张: 23 1/2

印数: 精1—1,670 插页: 精2
平1—1,580 字数: 619,000

统一书号: 13031·1553

本社书号: 2133·13—3

定价: 布脊精装 4.85 元
平 装 4.30 元

序 言

水声学是近代声学的一个重要分支，也是一个非常活跃的分支。众所周知，在海水介质中以声波的传播性能为最佳；而无线电波和光波在海水中传播时都要受到严重的衰减，因此不能有效地传递信息。早在1918年，P. Langevin 就利用石英的压电性能，用钢板夹住石英制成的换能器，产生了超声频声波，在海水中进行远程目标的探测，由此发明了声呐，并且证明了声波是海水中载荷信息的有效形式。以后的实验证明，在大洋中，通过由声速垂直分布所形成的自然波导——声道，能够收听到在几千公里远处几公斤炸药所产生的爆炸声信号。

然而，作为声信息传输通道(水声信道)的海水介质及其边界条件，具有十分复杂和多变的特性，这就使得声波在海水中传播的规律相应地也十分复杂和多变。但掌握和了解水下声场的这种复杂多变的规律性，并作出合乎要求的预报，对水下探测和通讯系统的设计、制造、操纵和使用，以及增进人类对海洋环境的认识，海洋资源的开发，又是必不可少的。

正是由于这些迫切要求，推动了近代水声学的迅速发展。随着人们对于水声场观测的时间尺度与空间尺度的不断加大，对于原来可以视为确定性环境因素的某些过程，必须改变为“动态调制”过程而纳入水声场的预报模型之中。这一方面增添了水声场信息处理的新的研究内容，另一方面又推动了水声学海洋学的相互渗透，于是一个新的交叉学科——“声学海洋学”诞生了。但经典海洋学的观测方法和手段局限于孤立点的时间过程的采样，这对于要按照时间-空间“立体”过程的全貌来了解海洋运动过程的要求，几乎是不可能的。声波场作为探测海洋介质的“积分探头”的概念——在大面积长时间范围内连续监测海洋运动过程的

可能性,为打开这一困难局面提供了新的前景。近年来,许多知名的声学家和海洋学家,例如,Л. М. Бреховских, W. H. Munk 等,都积极地参与了这一新兴领域内的研究活动。

本书着重于从声场分析的观点,系统地论述近代水声学研究所涉及的基本内容,书中还部分地反映了我国水声学研究的某些进展和成果;但是全面地详尽地反映我国水声的科研成果,将留给今后陆续出版的一些专题论著。鉴于国外已经出版了一些水声学著作,本书各章节的内容与深度并不是很均衡的,有些内容甚至完全没有提到,例如非线性水声学。全书共分十二章。第一章简述水声场的信息结构,并建立声呐方程。第二章简述作为水声信道的海洋介质的某些基本特性。第三章讨论水声场的基本概念及处理声场问题的理论方法,包括简正波方法与射线方法,并较详细地讨论了简正波表示与射线表示之间的变换关系问题。第四、五章讨论分层介质中典型声场的理论分析问题。在浅海声场的分析中,我们使用了边界反射损失的“三参数”模型,并用“过渡距离”分析方法给出平均场强结构的简单明了的物理图象;在深海声场的理论分析中,我们用简正波理论着重讨论了“反转点会聚区”问题。第六章讨论了海洋中的背景场,介绍了由传播算子构成分层介质中噪声场的时空相关函数的理论,并根据角度谱加权的概念,讨论了浅海远程混响问题,应该指出,浅海远程混响的理论研究还处于探索阶段,特别是小掠角的海底散射特性还知道得很少。第七章讨论目标源的特性,包括主动探测系统中的简单目标的反射问题,以及被动探测系统中的舰船辐射噪声的特性。第八章讨论信号场的散射与起伏问题,包括湍流,内波及粗糙表面的散射与起伏,介绍了 Татарский 的谱方法以及 Басс 微扰理论方法。第九章讨论海洋声场的数值预报以及信道匹配的某些问题。第十章讨论水声信号处理问题,着重讨论声场的最佳时空处理问题,并介绍自适应波束形成技术,水声信道中信号参量估计问题以及自动检测器问题。第十一章对近代水声探测系统作了简介。为了有效地达到探测和通讯的目的,必须能够有效地控制声波的辐射和信号接收,这就

需要对水声换能器进行深入的理论 and 实验研究。最后，第十二章讨论了水声换能器中的一些重要问题，包括结构体的振动分析，特别介绍了弯张换能器的振动分析，声阵的辐射及相互作用问题，以及测量校准问题。

要在有限的篇幅内全面地论述现代水声学的研究内容，当然是十分困难的。本书以水声场的物理分析为基本重点，力图通过这些分析，使读者深入了解在近代水声学研究中把经典场方法与统计方法综合考虑的必要性，以及综合考虑信道影响与信号处理方法的必要性。本书可以作为从事水声学、海洋物理以及地球物理科研与教学工作的科技人员、研究生的参考书。

本书第十、十一章是请侯自强同志执笔的；第十二章是请徐其昌同志执笔的。

著者深切感谢中国科学院方毅院长的关怀、鼓励和支持；并衷心感谢魏荣爵、杜连耀及杨士莪教授等审阅本书初稿，并提供宝贵意见；对中国科学院声学研究所同事们所提供的许多有益的意见和建议以及为本书绘制大量曲线图表的刘士风同志，也一并在此志谢。

限于我们的水平，书中挂一漏万，错误不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

著 者

1980年6月于北京

目 录

第一章 信号、信道及声呐方程	1
§ 1.1 水声学的信息空间	1
§ 1.2 声呐信号及系统的分辨能力	4
§ 1.3 水声信道对信号的影响	7
§ 1.4 声呐方程	16
第二章 作为水声信道的海洋介质	20
§ 2.1 海洋中的声速及声吸收	20
2.1.1 海水中声速的基本公式	20
2.1.2 海水中的声吸收衰减	21
2.1.3 典型声速剖面	27
§ 2.2 海底及其声学特性	32
2.2.1 海底沉积层的概况	32
2.2.2 沉积物的取样分析	34
2.2.3 海底地貌	36
2.2.4 海底反射性能	41
§ 2.3 海面及其声学特性	46
2.3.1 表面波浪的概况	46
2.3.2 海浪谱	49
2.3.3 波高, 风速与海况	51
§ 2.4 海洋中的内波	55
§ 2.5 海洋中的局部非均匀体	60
2.5.1 温度“微”结构水团	60
2.5.2 生物散射体及深水散射层(DSL)	61
第三章 水声场的基本概念与理论方法	69
§ 3.1 波动方程与定解条件	69
§ 3.2 分层介质中点源声场的积分表示	74

§ 3.3	一维波动方程的可解情况	77
§ 3.4	W. K. B. 近似	81
3.4.1	基本思想及解的形式	82
3.4.2	W. K. B. 解的物理图象	83
3.4.3	W. K. B. 解的适用判据	85
3.4.4	W. K. B. 解在“反转点”附近的解析延拓	87
3.4.5	W. K. B. 近似下的平面波反射问题	89
§ 3.5	二阶反转点及“射线分裂”	93
§ 3.6	分层介质中点源声场的谱表示	96
§ 3.7	简正波场与旁侧波场	99
§ 3.8	射线-简正波(Ray-Mode)近似理论	105
§ 3.9	射线声学理论	111
3.9.1	射线声学的基本方程	111
3.9.2	分层介质中的射线方程	114
3.9.3	分层介质中的声线图	118
3.9.4	广义射线	120
§ 3.10	简正波表示与射线表示之间的关系	135
3.10.1	简正波生成函数与广义射线生成函数之间的傅氏变换关系	136
3.10.2	简正波与经典射线之间的局部转换关系	142
3.10.3	射线向简正波场的转化	147
3.10.4	关于转化条件的讨论	151
§ 3.11	指向性声源在分层介质中的声场	154
3.11.1	平面辐射器在自由空间的指向函数	154
3.11.2	分层介质中指向性声源的简正波理论	155
§ 3.12	介质水平变化的问题	162
第四章	浅海典型声场分析	170
§ 4.1	平滑平均场强及海底反射损失模型	170
4.1.1	浅海中的平滑平均场强	170
4.1.2	“三参数”界面反射损失模型	175
§ 4.2	浅海均匀层声场的分析	182
4.2.1	浅海均匀层声场的简正波表示	183

4.2.2	Pekeris 问题	185
4.2.3	平均场强结构	195
4.2.4	海底反射参数对平均场强结构的控制	202
4.2.5	平均场强结构的频率依赖关系	207
4.2.6	任意反射损失时的场强分析	208
§ 4.3	浅海均匀层中脉冲的传播	210
4.3.1	脉冲峰值衰减与能量衰减的关系	210
4.3.2	脉冲多途拖散与相关损失	218
§ 4.4	浅海负梯度声场分析	222
4.4.1	平滑平均场强的分析	223
4.4.2	“角功率谱”表示的平均场强	236
4.4.3	负梯度浅海中脉冲的多途拖散	238
§ 4.5	浅海负跃层声场分析	244
§ 4.6	浅海表面声道平均声场的分析	255
第五章	深海典型声场分析	262
§ 5.1	深海混合层声道	262
5.1.1	射线分析	263
5.1.2	波动理论分析	265
5.1.3	混合层中的平滑平均场强	272
5.1.4	混合层中 TL 的经验公式	274
§ 5.2	深海 SOFAR 会聚带声场	275
5.2.1	SOFAR 信号波形	277
5.2.2	会聚带声场的射线分析	278
5.2.3	会聚带声场的波动解	286
第六章	海洋中的混响与噪声	298
§ 6.1	海洋中的混响	298
6.1.1	近程混响的射线理论	298
6.1.2	作为一次散射场的混响	302
6.1.3	浅海均匀层远程混响	310
6.1.4	浅海负跃层远程混响	314
6.1.5	混响强度与脉宽的关系	321
6.1.6	混响的统计特性	323

6.1.7	散射强度数据	329
§ 6.2	海洋环境噪声	331
6.2.1	谱级	331
6.2.2	噪声场的“构成”理论	335
6.2.3	噪声场的指向性	338
6.2.4	波导中的噪声场及匹配滤波	346
第七章	目标反射及舰船辐射噪声	351
§ 7.1	目标反射问题	351
7.1.1	刚性小球的瑞利散射	352
7.1.2	几何镜反射及“象脉冲”理论	355
7.1.3	弹性体散射的一般概况	357
7.1.4	惠更斯积分与费涅尔带方法	362
7.1.5	液球散射的波动解	368
7.1.6	海洋生物的散射问题	372
7.1.7	目标强度的一些实验数据	375
§ 7.2	舰船辐射噪声特性	376
7.2.1	辐射噪声源的一般特性	376
7.2.2	舰船辐射噪声信号的描写	378
第八章	信号场的散射与起伏	387
§ 8.1	由海水介质随机不均匀性引起的声场起伏	389
§ 8.2	粗糙随机表面引起的声场起伏	397
§ 8.3	内波引起的声场起伏	401
§ 8.4	浅海信道中信号场的横向相关	412
§ 8.5	矩方法	417
§ 8.6	散射引起的平均场(有规分量)的衰降	425
8.6.1	Eckart 理论	426
8.6.2	微扰理论(Bacc 方法)	430
8.6.3	内波对平均场的衰降	436
第九章	数值声场预报与信道匹配问题	445
§ 9.1	海洋声场的数值预报	445
9.1.1	射线场数值解算	448
9.1.2	简正波场数值解算	450

9.1.3	抛物(P-E)近似方法	454
§ 9.2	浅海信道中点源场的匹配	462
§ 9.3	传播波形的数值预报	465
§ 9.4	垂直线阵过滤简正波抗近场点源干扰的潜在 能力	468
第十章	水声信号处理	478
§ 10.1	水声信号处理概况	478
10.1.1	水声信号处理的任务	478
10.1.2	水声信号处理技术的发展	479
§ 10.2	信号、随机过程及线性系统	480
10.2.1	窄带确定性信号	480
10.2.2	随机信号	482
10.2.3	信号的离散表示	489
10.2.4	线性系统	490
10.2.5	假设检验	493
§ 10.3	在高斯噪声背景中检测信号(单通道情况)	496
10.3.1	检测已知信号	496
10.3.2	形式已知、参数未知的信号	501
§ 10.4	在混响背景中检测确定性信号	503
10.4.1	混响散射函数	503
10.4.2	普通匹配滤波器在混响背景中的性能	504
10.4.3	抗混响干扰最佳接收机	508
§ 10.5	水听器阵信号处理	509
10.5.1	宽带能量检测器——普通标准基阵处理器	510
10.5.2	数字多波束阵信号处理	512
10.5.3	分波束互相关处理	514
10.5.4	被动式窄带处理器——线谱检测器	517
§ 10.6	声场的最佳时空处理	519
10.6.1	概述	519
10.6.2	声场的时空采样	519
10.6.3	声场的贝叶斯时空处理	523
10.6.4	基于最佳波形估计的最佳时空处理	527

10.6.5	时空因子分析	534
10.6.6	最佳时空处理器与普通标准基阵处理器的性能 比较	536
10.6.7	在畸变信道中检测信号	543
10.6.8	自适应波束形成器	547
§ 10.7	信号参量估计	566
10.7.1	几种最佳准则和克拉默-罗界限	567
10.7.2	方位角估计	571
10.7.3	距离估计——到达时间估计	575
10.7.4	频率估计——目标径向速度估计	576
10.7.5	在畸变信道中估计信号参量	577
§ 10.8	自动检测器	579
10.8.1	“或”门减数据率和多次发射历程图显示	579
10.8.2	自动检测器概述	581
10.8.3	似然比检测器及简化检测器	582
10.8.4	减数据率, 恒虚警处理	585
第十一章	水声探测系统简介	589
§ 11.1	概述	589
§ 11.2	被动式声呐	590
11.2.1	噪声测向声呐	591
11.2.2	噪声测距声呐	594
11.2.3	拖曳线列阵声呐	595
§ 11.3	主动式声呐	596
11.3.1	主动式声呐的工作体制	597
11.3.2	主动式声呐系统概况	599
11.3.3	典型声呐介绍	603
11.3.4	探雷声呐——连续发射调频声呐	606
§ 11.4	航空反潜声呐	607
11.4.1	直升飞机吊放声呐	608
11.4.2	声呐浮标	608
§ 11.5	水声电子对抗设备	609
11.5.1	侦察声呐	609

11.5.2	声呐干扰器	610
11.5.3	假目标	610
§ 11.6	水声防潜警戒系统	610
11.6.1	固定式声呐监视系统	611
11.6.2	拖曳线列阵远程监视声呐	611
11.6.3	综合水声反潜探测系统	611
§ 11.7	水声探测设备在国民经济中的应用	612
11.7.1	测深仪	612
11.7.2	鱼群探测仪	613
11.7.3	地貌仪——侧扫声呐	613
11.7.4	地层剖面仪	614
11.7.5	多普勒导航声呐	614
第十二章	水声换能器	615
§ 12.1	结构体的振动分析	616
12.1.1	弯张换能器圆拱壳体的振动特性	616
12.1.2	有限元法及其对压电弯曲棒的计算	623
12.1.3	用能量法推导有限长压电薄圆管的等效电路	635
§ 12.2	结构体的声辐射以及声阵中的相互作用	638
12.2.1	用边界配值法解声辐射问题	638
12.2.2	声辐射的积分公式及其近似解法	641
12.2.3	有限元法解声辐射问题	645
12.2.4	阵中的相互作用效应	649
12.2.5	弯曲圆板换能器阵的互阻抗	660
§ 12.3	阵的方向性	661
12.3.1	计算阵方向性的一般方法	662
12.3.2	在频带内的方向性	668
12.3.3	圆柱阵, 球阵和宽带恒定束宽阵	671
12.3.4	阵元性能的不一致性对阵方向性的影响	679
§ 12.4	声源, 水听器和声基阵	683
12.4.1	概述	683
12.4.2	声源, 水听器和阵	690
§ 12.5	测量技术	704

12.5.1	耦合腔中互易参量的理论计算和灵敏度的修正	705
12.5.2	脉冲频谱法换能器低频校准	708
12.5.3	脉冲平衡比较法精确测定水听器的相位	710
12.5.4	压电材料机电性能的测量	715
附录 I	海水吸收系数 α 数值表	720
附录 II	符号表	729

第一章 信号、信道及声呐方程

水声学是一门新兴学科,主要研究声波在水下的辐射、传播与接收,用以解决与水下目标探测和信息传输过程有关的各种声学问题。

声波是目前在海洋中唯一能够远距离传播的能量辐射形式。因此,作为信息载体的声波,在海洋中所形成的声场的时空结构,就成为近代水声学的基本研究内容,而提取海洋中声场信息的结构是我们用来进行水下探测、识别、通讯及环境监测等的手段,例如,远距离目标探测,海洋资源开发,鱼群探测及海洋动力过程(内波,环流,…)的遥测等。不言而喻,这些对于国民经济、国防建设和科学研究等方面都具有重要意义。

海洋中的声场信息结构,一方面既与发射-接收系统本身的信息结构有关,另一方面又与海洋信道的影响有关;海洋信道在线性声学范围内相当于对发射信号进行线性变换(线性网络)。

为使读者对第二章到第十二章所论述的每个专门问题有一个整体概念,并了解每个局部的专门问题在整个声场信息结构的形成和提取过程中所处的地位,本章包括下列内容: § 1.1 引入由信噪比(S/N), $\Delta\tau$, $\Delta\theta$, $\Delta\Omega$ (分别代表信号是否存在,目标的距离、方位、速度)所构成的水声学的信息空间; § 1.2 简要讨论信号本身的分辨能力; § 1.3 概述水声信道带来的信息损失影响[包括(S/N)的衰减, $\Delta\tau$, $\Delta\Omega$, $\Delta\theta$ 的扩展];最后, § 1.4 给出综合反映信号(系统)的性能、信道影响及探测要求的相互关系的表式——声呐方程。

§ 1.1 水声学的信息空间

从探测目标的角度来讲,中心问题是发现目标,并确定目标的

距离、方位、速度和目标类型等等。这就是通常所谓的目标信号的检测,目标信号的参量估计和目标信号的识别等问题。

目标的距离信息和速度信息分别由信号沿传播方向的延时 τ 和多普勒频移 Ω 提供,目标的方位角 θ 和深度信息依靠对声波波

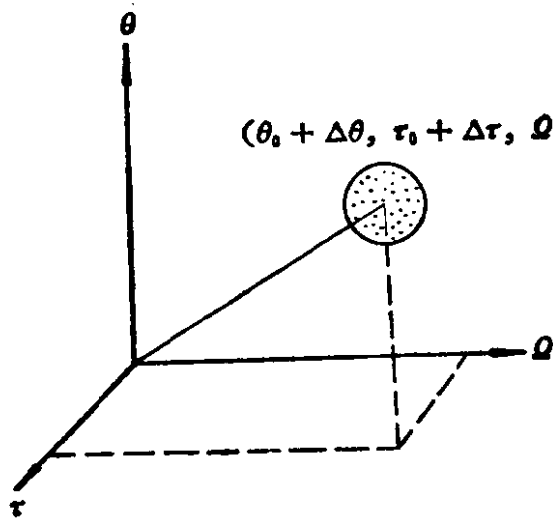


图 1.1.1

场的多点空间采样获取,而目标的识别(分类)则是通过对目标信号的“特征提取”,然后由“鉴别”运算来完成的.因此,水声学的信息空间 I 是由 $\tau, \Omega, \theta, c[j]$ 构成的多维空间,其中 $c[j]$ 是目标识别子空间(它的维数 j 由特征数决定).如果我们暂不考

虑目标的深度信息及识别分类问题,则水声信息空间可以看作是三维空间 $I(\tau, \Omega, \theta)$ (图 1.1.1).

若在探测之前对目标没有任何先验的信息,则初始信息量 I_0 对应于由 N 个等概事件所规定的不确定性,于是按信息量定义为

$$I_0 \sim k \ln\left(\frac{1}{N}\right), \quad (1.1.1)$$

其中 N 是信息空间 $I(\tau, \Omega, \theta)$ 在一定探测要求下的量化分隔总数; k 为常数.若经过探测获得了一个完全确定的目标,即空间中的一个点 $(\tau_i, \Omega_i, \theta_i)$, 它对应于概率为 1 的事件,因此,由不确定到完全确知所获信息量的增益为

$$\Delta I = I - I_0 = -k \ln\left(\frac{1}{N}\right) = k \ln(N). \quad (1.1.2)$$

由于探测系统本身的分辨能力以及信道的随机模糊干扰,实际探测过程只能取得对目标知识的部分改善,即只能知道目标是处在 $I(\tau, \Omega, \theta)$ 空间的某个有限范围内.此时,对目标的描述不能以确定点 $(\tau_i, \Omega_i, \theta_i)$ 来代表,而只能看作是一个有限体积的“雾

团”(见图 1.1.1).

这个“雾团”的范围愈大,对目标了解的不确定性就愈大,也就是模糊性比较大.简单地,可以用它所占有的等效量化分隔数 N_g 来代表“雾团”的体积:

$$N_g = (\Delta\tau, \Delta\Omega, \Delta\theta). \quad (1.1.3)$$

对应于 N_g 所获信息增益为

$$\begin{aligned} \Delta I &= -k \ln\left(\frac{1}{N_g}\right) - k \ln\left(\frac{1}{N}\right) \\ &= k \ln\left(\frac{N}{N_g}\right) = k \ln\left(\frac{N}{\Delta\tau, \Delta\Omega, \Delta\theta}\right), \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

即目标的模糊范围 $\Delta\tau, \Delta\Omega, \Delta\theta$ 愈小,信息增益就愈大.

以上讨论的是无背景干扰的情况;实际上,不论接收系统和信道总是存在加性背景干扰的.在有背景噪声干扰情况下,信号是否存在本身就具有一定的不确定性,其不确定性的程度可由信噪比(S/N)来描述.因此,在式(1.1.4)中还要引入(S/N)的影响,这里从略.

目标信息的模糊来源于两方面:一方面是探测系统本身固有的有限分辨能力,例如用以载荷信息的信号本身的模糊度;另一方面来源于信息传输通道(信道)的模糊效应,例如随机空变信道所产生的角模糊,随机时变信道产生的延时模糊等.而接收的信噪比(S/N),也同样受探测系统本身的信号功率和信道的能量耗损程度及加性干扰程度的约制,例如混响背景下的主动式声呐,其信噪比为

$$(S/N) = \{(SL - 2TL) + TS - RL\}, \quad (1.1.5)$$

其中 SL 为声源级,表示发射信号的强度大小; TL 为传播损失,代表信道的能量保持能力; TS 为目标反射强度; RL 为混响级代表信道的干扰程度.这些量是水声物理研究的部分基本内容,其定义将在后面给出.

经典的水声传播研究主要涉及能量传输因子.当然,对于有噪声背景干扰的情况,任何探测系统的工作总是需要有一定的