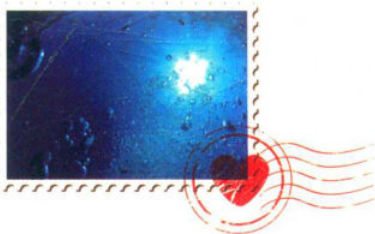


海洋声学与信息感知丛书

# 水下声源定位理论与技术

杨坤德 段睿 李辉 马远良 著



 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

海洋声学与信息感知丛书

# 水下声源定位理论与技术

杨坤德 段 睿 李 辉 马远良 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了水下声源定位理论与技术。全书共 10 章, 包括绪论、基本知识介绍、浅海窄带声源定位方法、浅海宽带声源定位方法、基于深海近海面阵列的声源定位方法、深海可靠声路径下基于单阵元的声源定位方法、深海可靠声路径下基于双阵元的声源定位方法、深海可靠声路径下基于垂直线阵列的声源定位方法、深海可靠声路径下的干涉条纹特征及其应用、阵列流形失配条件下的水平线阵列测向方法。本书融入了作者团队 10 余年来在水下声源定位方面的理论与技术科研成果, 纳入了作者团队在国内外重要期刊上发表的 40 余篇论文, 同时也参考了少量国内外相关的研究工作文献。

本书对水下声源定位问题叙述详尽, 理论、方法与技术的分析力求系统、深入, 阐述深入浅出, 便于自学。本书可供水声工程、海洋工程、水中兵器、海洋监测、海洋开发等领域的科研工作者、教学人员、研究生和本科生参考。

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

水下声源定位理论与技术 / 杨坤德等著. —北京: 电子工业出版社, 2019.12

(海洋声学与信息感知丛书)

ISBN 978-7-121-36472-3

I. ①水… II. ①杨… III. ①水下声源—定位 IV. ①TB561

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 089461 号

责任编辑: 郭穗娟

印 刷: 天津千鹤文化传播有限公司

装 订: 天津千鹤文化传播有限公司

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: 787×1 092 1/16 印张: 20.75

字数: 531 千字

版 次: 2019 年 12 月第 1 版

印 次: 2019 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 98.00 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, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: (010)88254502, [guosj@phei.com.cn](mailto:guosj@phei.com.cn)。

# 前 言

随着我国建设海洋强国步伐的加快,对水下声源定位理论与技术的需求日益旺盛。水下声源定位在海洋科学研究、海洋环境监测、水下目标探测与侦察、水下通信与对抗、导航制导等领域具有十分重要的科学研究价值,也具有特别重要的实际应用意义。本书是一本系统阐述水下声源定位理论与技术的专著,涉及海洋工程、水声工程、电子与信息工程、电子对抗等技术领域。本书是根据作者团队 10 余年来在水下声源定位理论与技术的科研成果总结提炼写成的,纳入了作者团队在国内外重要期刊上发表的基础研究论文。此外,书中也少量涉及国内外同行近年来取得的研究进展。

水下声波传播的海洋环境主要包括海面、海底及中间的水体层。海底声学参数的未知和不确性、水体环境参数的时空变化特性,导致水下声波的传播规律与特性十分复杂。如何在复杂的水下环境中对感兴趣的声源实施准确的定位,具有相当的难度,这也成为国内外科技工作者长期以来的研究热点。融入水声传播模型的水下声源定位理论与技术,尽力使之具有环境变化的宽容性,成为国内外研究者们长期执着而方兴未艾的方向,涌现出了大量的理论方法与实验验证结果。针对浅海和深海不同的海洋环境,面向不同的应用需求和不同的水下传感器阵列,所需要的水下声源定位理论与技术不同,其稳健性、快速性等处理的方法也有所区别。作者团队在长期的水下声源定位研究中,针对不同的环境条件和应用场景,开展了由浅海到深海环境的理论研究和实验验证,取得了一些研究成果。本书以一部专著的形式,系统地介绍作者团队在水下声源定位理论与技术的成果,希望同行参考借鉴并共同推动更加深入而系统的研究及应用。

全书共 10 章,主要内容如下:

第 1 章概述了水下声源定位研究的背景、意义、历史和现状。

第 2 章介绍了声场传播模型、全球水声环境主要参数分布、典型声传播模式、水下信号定位方法等基本知识。

第 3 章阐述了浅海窄带声源定位方法,涉及水平线阵列声场定位原理、匹配场定位性能分析、时反聚焦定位性能分析、匹配场定位的虚拟时反实现方法。

第 4 章阐述了浅海宽带声源定位方法,包括基于自相关函数的定位方法、基于多途到达结构的近距离声源定位方法、基于简正波模态消频散变换的定位方法、基于集合卡尔曼滤波的声源跟踪方法。

第 5 章阐述了基于深海近海面阵列的声源定位方法,涉及基于海底反射信号多途到达结构的定位方法、基于几何关系近似的声源定位方法。

第 6 章在分析深海可靠声路径声场特性分析的基础上,介绍了深海可靠声路径下基于单阵元的声源定位方法,包括基于延时互相关函数的定位方法、基于直达波-海面反射波相

对时延与卡尔曼滤波的运动声源定位方法。

第7章介绍了深海可靠声路径下基于双阵元的声源定位方法，包括基于双阵元多途时延差和双水听器互相关函数的匹配定位方法。

第8章阐述了深海可靠声路径下基于垂直线阵列的声源定位方法，包括基于多途到达结构的定位方法、声场空频域联合定位方法。

第9章分析了深海可靠声路径下劳埃德镜中明暗波束形成的物理机理及其轨迹的计算方法，给出了可靠声路径声场干涉条纹的形成过程，最后阐述了基于干涉条纹的声源深度估计方法。

第10章介绍了基于稀疏性的被动合成孔径定位与子阵处理方法、海底水平线阵列测向误差分析及误差修正方法。

本书编写分工如下：杨坤德编写第1、3、7章，段睿编写第2、5、8、9章，李辉编写第4、6、10章，马远良对稿件进行了仔细修改。书中纳入了作者团队在国内外重要期刊上发表的学术论文，也涉及了作者团队所指导的多名研究生的少量成果，这些研究生包括张同伟、郭晓乐、雷志雄、杨秋龙、卢艳阳等。同时，本书所反映的研究结果，得到了多项国家级科研项目的支持，是在课题组长期科研工作基础上提炼而成的。在此期间，西北工业大学航海学院的相关老师为此做出了重要贡献，这些老师包括孙超、何正耀、雷波、段顺利等。在此，对国家与作者所在学校有关部门、有关老师和研究生深表感谢！

希望本书的出版对水下探测、水下侦察、水下对抗、水下通信、水中兵器、海洋科学、海洋工程、海洋监测、海洋开发等领域的科研工作者、教学人员、研究生和本科生有所帮助。

由于作者学识水平所限，书中难免存在不妥之处，恳请读者和相关专业同仁提出宝贵的意见和建议。

作者  
2019年9月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 研究历史和现状	3
1.2.1 海洋声学主要工作	3
1.2.2 声源被动定位方法	10
1.3 本书的结构	13
第 2 章 基本知识介绍	16
2.1 概述	16
2.2 声场传播模型	16
2.2.1 理想流体介质中的波动方程	16
2.2.2 射线模型	18
2.2.3 简正波模型	20
2.2.4 抛物方程模型	21
2.3 全球水声环境主要参数分布	23
2.3.1 数据集	23
2.3.2 海底地形	23
2.3.3 声速剖面分布	24
2.3.4 深海声道轴深度	28
2.3.5 表面波导厚度	29
2.3.6 临界深度分布	30
2.4 典型声传播模式分析	31
2.4.1 大陆坡及大陆架斜坡传播模式	31
2.4.2 海底反射模式	42
2.4.3 表面波导模式和泄漏模式	44
2.4.4 可靠声路径	47
2.4.5 海底反射与表面波导泄漏能量对比	50
2.5 水声信号定位方法	52
2.5.1 波达方位 (DOA) 估计方法	52
2.5.2 匹配场信号处理	55
2.5.3 基于稀疏性表示的 DOA 方法	58
本章小结	64

第3章 浅海窄带声源定位方法	65
3.1 概述	65
3.2 水平线阵列声场定位原理	66
3.2.1 线性匹配场定位原理及其评价指标	66
3.2.2 时反聚焦定位原理及其评价指标	68
3.3 匹配场定位性能分析	69
3.3.1 仿真条件	69
3.3.2 水平线阵列深度对匹配场定位性能的影响	70
3.3.3 海底水平线阵列的匹配场定位性能	75
3.4 时反聚焦定位性能分析	76
3.4.1 仿真条件	76
3.4.2 水平线阵列深度对时反聚焦性能的影响	76
3.4.3 海洋环境对水平线阵列时反聚焦性能的影响	78
3.5 匹配场定位的虚拟时反实现方法	80
3.5.1 虚拟时反实现方法	80
3.5.2 传统匹配场处理和虚拟时反实现方法比较	82
3.5.3 仿真数据分析	85
3.5.4 实验数据分析	88
本章小结	92
第4章 浅海宽带声源定位方法	94
4.1 概述	94
4.2 基于自相关函数的定位方法	95
4.2.1 多途信道模型及环境敏感性分析	95
4.2.2 本征声线特征参数的提取及其定位方法	98
4.2.3 自相关函数匹配的稳健目标定位方法	100
4.2.4 仿真分析	105
4.2.5 实验数据分析	109
4.3 基于多途到达结构的近距离声源定位方法	112
4.3.1 浅海多途到达结构特征	112
4.3.2 多途到达结构匹配的定位方法	113
4.3.3 仿真验证	115
4.4 基于简正波模态消频散变换的定位方法	116
4.4.1 浅海简正波模态频散特性	116
4.4.2 定位方法	117
4.4.3 海底参数与声源位置参数的同时求解	119
4.4.4 实验数据分析	123

4.5 基于集合卡尔曼滤波的声源跟踪方法	127
4.5.1 集合卡尔曼滤波简介	127
4.5.2 运动声源跟踪定位方法	127
4.5.3 仿真分析	131
4.5.4 实验数据分析	140
本章小结	144
<b>第5章 基于深海近海面阵列的声源定位方法</b>	<b>146</b>
5.1 概述	146
5.2 基于海底反射信号多途到达结构的定位方法	146
5.2.1 深海多途到达结构特征	147
5.2.2 联合定位方法(SE方法)的应用	148
5.2.3 实验数据处理	149
5.3 基于几何关系近似的声源定位方法	157
5.3.1 多途时延的几何关系模型	157
5.3.2 定位方法介绍	159
5.3.3 实验数据处理	161
本章小结	163
<b>第6章 深海可靠声路径下基于单阵元的声源定位方法</b>	<b>164</b>
6.1 概述	164
6.2 可靠声路径的声场特性分析	165
6.2.1 无影区特性	165
6.2.2 声传播特性分析	167
6.3 基于延时互相关函数的定位方法	171
6.3.1 基于射线理论的声场互相关特性分析	171
6.3.2 运动声源测速和定深方法	172
6.3.3 声场互相关仿真和应用分析	175
6.3.4 实验数据处理	182
6.3.5 方法应用限制和误差分析	186
6.4 基于直达波-海面反射波时延的运动声源定位方法研究	187
6.4.1 扩展卡尔曼滤波理论介绍	187
6.4.2 声源速度位置估计方法及仿真分析	188
6.4.3 实验数据处理	195
本章小结	198

<b>第 7 章 深海可靠声路径下基于双阵元的声源定位方法</b> .....	199
7.1 概述 .....	199
7.2 基于多途时延差的双阵元深海匹配定位方法 .....	199
7.2.1 匹配定位方法原理 .....	199
7.2.2 定位方法仿真结果和误差分析 .....	200
7.2.3 实验数据验证 .....	203
7.3 双水听器互相关函数匹配定位方法 .....	204
7.3.1 基于互相关函数匹配的被动定位方法 .....	204
7.3.2 定位方法的模糊平面及性能分析 .....	208
7.3.3 互相关函数的稀疏重构方法 .....	219
7.3.4 实验数据处理 .....	220
本章小结 .....	225
<b>第 8 章 深海可靠声路径下基于垂直线阵列的声源定位方法</b> .....	226
8.1 引言 .....	226
8.2 基于多途到达结构的定位方法研究 .....	226
8.2.1 加权子空间拟合匹配定位方法 (WSF-MF) 的应用 .....	226
8.2.2 WSF-MF 方法的定位精度及稳健性分析 .....	227
8.3 声场空频域联合的定位方法研究 .....	235
8.3.1 联合定位方法及算例 .....	235
8.3.2 联合定位方法性能分析 .....	241
8.3.3 联合定位方法应用于水面和水下声源分类 .....	244
8.3.4 实验数据处理 .....	249
本章小结 .....	252
<b>第 9 章 深海可靠声路径下的干涉条纹特征及其应用</b> .....	254
9.1 概述 .....	254
9.2 劳埃德镜的简正波分析 .....	255
9.2.1 等声速波导环境 .....	255
9.2.2 深海环境 .....	260
9.3 干涉条纹分析 .....	263
9.3.1 中等距离内的 3 种干涉条纹 .....	263
9.3.2 干涉条纹轨迹的计算方法 .....	267
9.4 深度估计中的应用 .....	268
9.4.1 MIS 方法 .....	268
9.4.2 MFS 方法 .....	270



9.4.3 MIS 方法和 MFS 方法的性能分析	273
9.5 海上实验数据验证	274
9.5.1 采用 MIS 方法估计气枪声源深度	276
9.5.2 采用 MFS 方法估计爆炸声源深度	277
本章小结	277
<b>第 10 章 阵列流形失配条件下的水平线阵列测向方法</b>	<b>279</b>
10.1 概述	279
10.2 基于稀疏性的被动合成孔径定位与子阵处理方法	279
10.2.1 运动直线阵列被动合成孔径 (PSA) 定位原理介绍	279
10.2.2 子阵位移误差对 PSA 方法的影响	282
10.2.3 含有子阵位移误差时的直线阵列稀疏贝叶斯 DOA 估计方法	284
10.2.4 基于稀疏贝叶斯的直线阵列 PSA	293
10.3 海底水平线阵列测向误差分析及误差修正方法研究	297
10.3.1 测向误差的物理成因	297
10.3.2 测向误差随声源距离和声源方向变化规律研究	302
10.3.3 测向误差修正方法	309
本章小结	311
参考文献	313

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究意义

海洋声学的基本任务是研究声波在海洋环境下的基本传播规律、海洋环境对声波传播的影响及基于以上基础研究的应用研究。海洋对声波是透明的，对电磁波则不然。因此，勘测海底、探测鱼群、船舶和潜艇之间的通信，以及使用主动和被动声呐发现舰船等无不强调声学方法的应用。由于海洋军事的需求，水声学于第二次世界大战初期开始迅速发展，包含的子领域有海洋声测量学（温度、盐度、海流等）、地质声学（海底地貌和底质特性等）、生物声学（海洋生物探测、识别和跟踪等）、海洋声学（声传播特性，目标探测、识别和定位等），以及海洋结构声学和水动力声学等。在研究海洋声学问题时，一般需要明确研究的对象是浅海还是深海。虽然深、浅海的波动方程相同，但由于垂直尺度、边界条件、声速剖面、介质不均性等因素的显著差异，导致深、浅海的声传播特性差别较大，所适用的目标探测、识别和定位方法也不同。深、浅海声学条件的差别主要有以下4点：

（1）垂直尺度。浅海一般认为是从海岸至大陆架坡折或至大陆架陡坡 500m 深度的海域。深海海域的海深一般在 1000m 以上，存在典型的温跃层（极地区域除外）。考虑几十赫兹至几百赫兹的声频率，浅海海深一般相当于几个至几十个声波波长。此时，声场的射线模型不适用，一般使用简正波模型解释声传播特性。而在深海海域，一般使用射线模型解释观测到的多途信号到达结构。此外，由于深海垂直尺度较大，可以观测到 4 种声传播模式：表面波导、深海声道、可靠声路径和海底反射。浅海环境有时也存在表面波导，但由于海底反射信号的影响，很难观测到表面波导声传播特性。

（2）边界条件。由于海底分层现象的存在及海底的不平整性，海底边界比海面边界更复杂，建模更困难。在平整海面条件下，海面边界是简单的压力释放边界，但在风浪较大时，粗糙海面的声散射也须在建模中予以考虑。在浅海环境中，须考虑声传播与边界（海面和海底）的相互作用。例如，浅海环境下的声速剖面多呈现向下折射的特性，海底边界几乎是无法避免的。在深海环境中，有些声传播可以避免与边界或其中一个边界相互作用，处理起来较为简单。例如，在深海声道中的声传播过程，靠近声道轴的低阶模态与边界均不发生相互作用，其传播特性比较简单。类似的声传播还有表面波导传播和可靠声路径传播等。

（3）三维声场效应。在浅海环境中，沿海流锋面、非线性内波、大陆架斜坡、大陆架坡折海域等会产生明显的三维声场效应，如水平折射效应。在深海环境中，海山、海岛、锋面和涡旋等会引起三维声场效应，但这些因素出现的海域相对于整个深海海域，比例较小。因此，深海声传播的研究更倾向于二维声场。

(4) 混响与衰减。在浅海中, 由于海深较浅, 声波与边界频繁接触, 混响和衰减相对于深海更加明显。

从 20 世纪 80 年代至今, 海洋声学的理论和实验研究偏重于浅海。浅海实验包括中国学者在 80 年代末组织的黄海实验、1992 年的巴伦支海极地锋面实验、1995 年的 SWARM 实验、1996—1997 年的大陆架坡折 PRIMER 实验、2000—2001 年的 ASIAEX 实验, 以及 2006 年的 SW06 实验等。浅海声学迅速发展, 一是因为浅海声传播的复杂性, 二是因为地缘因素。大陆架延伸海域一般为浅海, 所以浅海声学的研究是国家防御战略的需求。深海声学的理论和实验研究相对偏少, 典型的实验有 1986—1992 年的太平洋回声(Pacific Echo) 实验、1987 年的 TAGET 87 实验、2004 年的 LOAPEX 实验和 2009—2011 年的菲律宾海(PhilSea 09 和 PhilSea 10) 实验。随着深海声学设备的逐渐成熟及各个国家走向深远海的战略需求, 深海声学的研究逐渐成为国际研究的热点, 尤其是菲律宾海实验中全深度阵列的使用可以更深入研究以下课题:

- (1) 锋面、涡旋、内潮对声场的影响。
- (2) 利用数据同化方法预测海洋声场环境的可靠性。
- (3) 海洋微结构对声场的影响。
- (4) 全深度的噪声特性, 包括其时变特性。
- (5) 全深度声场传播特性, 包括到达结构等。

国内水声学术界长期以来重点在第一岛链以内开展工作, 研究的环境主要是大陆架浅海环境, 对深海环境特性、水声传播特征和声呐性能评估的研究缺乏长期、系统和广泛的积累, 在这些方面还有十分广阔的研究空间。

然而, 在深海、远海的海洋声学方面, 我国目前的研究基础还不够充分, 尤其是在海洋声学理论(如深海声传播物理机理和目标检测与定位方法等)、深远海水声综合考察(如深远海声传播及海洋物理现象同步观测、深远海海洋环境噪声和海洋声层析等)、水声装备的深远海对抗技术等方面, 缺乏长期和深入系统的研究。由于深海与浅海声传播特性的差异性, 基于浅海环境的声呐系统若直接应用于深海, 则声呐性能将大幅度降低, 甚至失效。此外, 潜艇降噪和吸波技术得到了巨大的发展, 安静型潜艇在低速航行时, 100Hz 处的线谱声源级已经降低至 115 dB, 在 1kHz 处的线谱声源级为 95dB, 并且先进潜艇较强的线谱成分也已经几乎不复存在。因此, 在研究近浅海的同时, 加强深远海的研究, 提出适用的声源定位方法符合我国国防建设的需求。

水下声源定位分为主动和被动两种工作方式。被动工作方式具有隐蔽性高的优点, 是各类水下声源定位的重要手段。水声信号处理发展历程可以分为两个阶段<sup>[1]</sup>。第一阶段为传统水声信号处理方法, 假设声波为平面波、声场各向同性, 在此基础上发展了丰富的阵列信号处理方法, 并且使用匹配滤波技术提高处理增益。然而, 在实际海洋环境中, 由于海水的非均匀性, 以及海面和海底边界的影响, 实际声场明显偏离平面波假设, 传统定位方法难以对水下目标实现精确定位。第二阶段是将水声物理纳入水声信号处理体系中, 人们逐渐重视海洋波导环境的复杂性对水声信号处理的影响。这一阶段海洋声学和水声传播



理论成为研究热点。传统水声信号处理和水声物理场相结合的新的信号处理方法层出不穷,匹配场处理 (Matched Field Processing, MFP) 是第二阶段最具代表性的处理方法<sup>[2,3]</sup>。与传统水声信号处理方法相比,这些新的信号处理方法结合了海洋波导特性,因而获得了更好的定位效果。历史上,通过水声装备探测能力的多次重大突破,人们开始认识到水声传播特性的重大作用:基于深海汇聚区的探测模式已经成为声呐探测远距离目标的最重要方式;若声呐深度较浅,近距离的目标探测范围仅有 2~3km,而变深拖曳声呐的使用可以扩大探测范围;海底反射声波的研究促进了声呐海底反射模式的发展,在一定条件下可以探测几千米至二三十千米的目标。目前,水声传播特性的研究热点包括表征声场相干性/干涉性不变特征的参量(如波导不变量)、稳定的海洋信道(如深海可靠声路径)、深海信号多途到达时延及到达角等。今后,基于水声传播特性的定位技术将是推动水声装备进一步创新发展的重要因素。只有那些能够与海洋环境良好匹配的新型声呐才有可能达到最优的技术性能。从这个角度来说,声呐技术取得跨越式发展的重要途径之一,在于水声传播特性研究。基于上述分析,本书主要介绍各种环境适应性强的水下声源定位方法。

## 1.2 研究历史和现状

### 1.2.1 海洋声学主要工作

无论深海和浅海,海洋声学领域研究人员都十分关注声起伏、环境噪声、底质反演和三维声传播建模等方面,但深海海洋声学在这些方面有其显著特点:

(1) 深海声起伏。深海的锋面、涡旋、内波等均可引起声起伏。由于线性内波在深海频发,其统计规律可由 Garrett-Munk 谱<sup>[4]</sup>表示,因此针对线性内波引起的声起伏统计规律的研究一直是热点。代表性的工作为 Dozier 和 Tappert<sup>[5,6]</sup>提出的基于模态耦合方程的模态幅度统计量传递方程方法,之后 Creamer<sup>[7]</sup>扩展了该方法。Colosi 等<sup>[8-10]</sup>在 Creamer 工作的基础上使用了一种高效的内波模型,简化了传递方程的计算,得到内波条件下,模态幅度高阶统计量随距离的变化规律。Virovlyanskii 等<sup>[11,12]</sup>考虑在高频近似条件下,模态耦合方程的简单解析解,得到了模态幅度统计量的近似解析解。在深海条件下,一般满足高频近似条件。因此, Virovlyanskii 等的方法在深海条件下比较实用。

(2) 深海环境噪声。当频率小于 300Hz 时,绝大多数海域的环境噪声主要来源于航船,中高频环境噪声则来源于风雨噪声。因此,随着航船数量和吨位的不断增加,低频海洋环境噪声也不断增加。深海环境噪声实验测量结果的报告从 20 世纪中叶开始就连续不断<sup>[13-19]</sup>,结果表明,在 1980 年之前,低频噪声级增长速度约为 0.55dB/年,而在这之后,噪声级增长速度降低至 0.2dB/年。深海环境噪声的垂直方向性也是实验测量的重要内容<sup>[20-26]</sup>,结果表明,噪声主要集中在水平方向,但在中频范围内 0° 方向上可能会出现凹槽。

(3) 深海海底底质反演。深海声传播与海底底质有关,对于声传播损失等的估计需要

可靠的海底底质参数。描述声波与海底相互作用的传统方法是采用海底反射损失 (Rayleigh Reflection) 这个参数。该参数定义为随频率和入射角变化的反射和入射声能的比值, 用 dB 表示。这种方法由于假设了海底为类似镜面反射 (或半空间), 即只存在一条海底反射声线, 因此在描述声波与海底作用时非常简单。但实际海底并非半空间, 而是分层结构, 甚至是水平变化的, 这种复杂性对低频传播的影响非常明显, 因而海底底质的分层结构反演一直是研究的重点<sup>[27-36]</sup>。研究主要集中在海底分层模型的建立及利用海底反射损失反演分层结构的声学参数, 这些方法在深海和浅海同样适用<sup>[37-41]</sup>。

(4) 深海三维声传播建模。由于深海中存在内波<sup>[42-45]</sup>、锋面、涡旋等海洋中尺度现象<sup>[46-50]</sup>, 以及海底存在海沟海山等不平整地形<sup>[51-53]</sup>, 二维声传播模型计算结果误差较大, 需要使用三维声传播模型。例如 Stephen 等<sup>[54]</sup>研究了 500~2000km 的远距离声传播, 发现由于二维传播平面外海山的存在, 声波可以通过海山绕射-海面反射的路径传播至接收器, 是典型的三维声传播效应。

除了上述 4 种深海、浅海共同的研究热点, 深海海洋声学最大的特点是其独有的海洋分层现象及其产生的 5 种声传播模式, 这些声传播模式与声呐的工作原理密切相关。以下内容将分析声传播模式及其在声呐中的利用, 指出在现有声呐系统中尚未利用或未完全开发的声传播模式。

图 1-1 为低纬度地区 (南、北纬度  $30^\circ$  之间的区域) 一个典型深海声速剖面下声传播路径示意。由于海洋表面的风力作用, 热量、淡水交换 (强迫场) 等作用在紧邻海面之下会形成性质几乎相同的水体, 称为混合层。混合层中温度几乎不变, 但由于压力的原因, 声速随深度增加而增加, 形成梯度约为  $0.017\text{m/s}$  的表面声道。混合层的下一层称为温跃层, 在这一区域, 水温随着深度的增加而急剧降低, 因而具有负的声速梯度。低纬度区域的温跃层梯度的绝对值较大, 即声速变化剧烈。温跃层和海底之间称为深海等温层, 声速以约  $0.017\text{m/s}$  的梯度呈线性增加。在温跃层和深海等温层之间存在一个声速最小值, 对应的深度称为深海声道轴。在含有声道轴的剖面中, 把声道轴下面的某个深度定义为临界深度。在该深度上, 声速等于近海面的声速最大值, 通常为表面声道底部的声速值。临界深度也称为表面声道深度的共轭深度。临界深度至海底的水体厚度称为深度余量。声线由表面波导底部出射, 出射角度为  $0^\circ \sim 5^\circ$ , 传播路径如图 1-1 所示。在深海声道轴以上, 声速梯度为负, 射线向下折射; 在深海声道轴以下, 声速梯度为正, 射线向上折射。此时, 若声线出射角度足够小或深度余量足够大, 则射线将在与海底接触前反转, 传播至近海面附近形成汇聚区, 传播损失较小。折射声线不能直达的区域称为声影区, 但海底反射声线可以到达该区域, 如图 1-1 中的红色虚线所示。

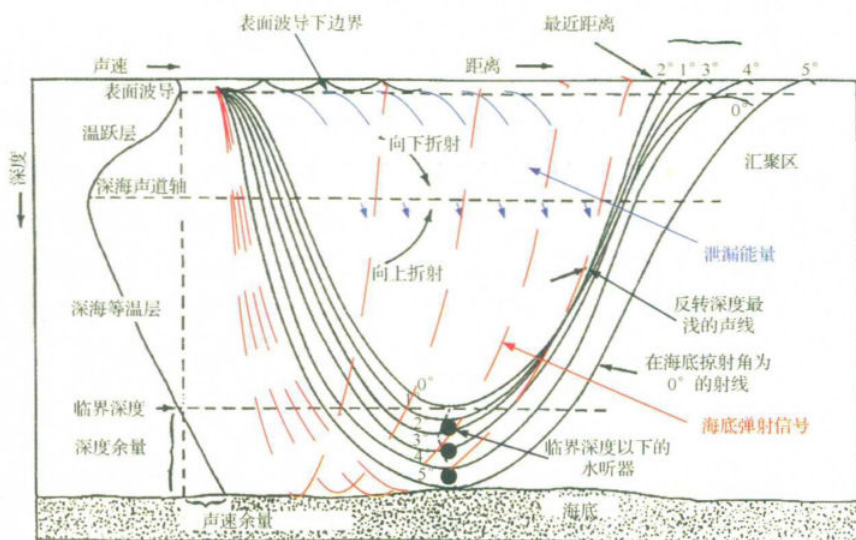


图 1-1 低纬度地区典型深海声速剖面下声传播路径示意

声呐在深海中工作时，需根据不同的海洋环境和目的，利用不同的声传播模式探测目标：

(1) 表面波导模式。表面波导可实现水声的远距离传播，但其存在强烈的时空变异性，是不稳定的信道<sup>[55]</sup>。当声呐系统在近海面工作时，其性能将受本地表面波导特性的影响。因此，表面波导特性及声传播受到了广泛关注<sup>[56-58]</sup>。Baker<sup>[59]</sup>和Schulkin<sup>[60]</sup>基于实验数据给出了表面波导中近距离声传播损失的经验公式；通过改变表面波导的特征参数（梯度、深度、表面声速等），Porter<sup>[56]</sup>研究了表面波导的海洋和声学特性。但关于表面波导，仍有很多声传播的细节未被分析和利用，例如，声呐在表面波导中主动发射和被动接收时的最优深度，以及表面波导中声波的波达角。本书第2章和第3章将就这些问题展开研究。

(2) 汇聚区模式。汇聚区是深海海洋中的一种远程声传播现象。从海面附近声源发出的声波在深海中折射并发生反转，从几十千米外传播至海面，形成环带状高声强区域，即汇聚区。第一个汇聚区的宽度为4km左右，随着距离增加，汇聚区宽度逐渐增加。汇聚区内的传播损失显著低于球面扩展损失，适用于水声通信、目标探测等，因此汇聚区强度、距离等特征随海洋水声环境参数的变化<sup>[61-67]</sup>，以及汇聚区内信号相关性、信号到达结构、声传播等<sup>[68-72]</sup>受到了广泛关注。声呐系统探测的汇聚区模式基于汇聚区声传播损失小的特点，可以探测汇聚区内的水下目标。但由于汇聚区是周期性的出现，这种模式虽然探测距离远，但是探测盲区大，并且存在汇聚区模糊现象（无法区分是第几汇聚区的目标）。由于汇聚区模式已广泛应用于深海声呐系统，对其特性的认识比较全面，本节不再研究该传播模式。

(3) 海底反射模式。汇聚区之间直达波的传播损失显著高于球面扩展损失，称为几何声影区。由于表面波导、内波、锋面、粗糙海面等环境因素，一部分声能通过散射和绕射效应可进入声影区<sup>[73-77]</sup>，提高声影区能量。但声影区的传播损失仍然较高，并且在近海面

处，声影区的范围远远大于汇聚区，导致声呐在深海中的探测存在盲区。这促使了海底反射声呐的出现，该声呐将声能打向海底，传播至声影区，从而探测声影区中的目标<sup>[78]</sup>。这种模式的优点是可以通过控制声波的出射角，探测几何影区任意位置的目标。海底特性对海底反射信号的影响已经被广泛研究，海底越“软”，海底反射损失越大，海底反射信号的能量越弱。但声呐海底反射模式的探测距离不仅与海底特性有关，也与海深有密切关系，将在第2章中讨论该问题。此外，海底反射声能量和表面波导泄漏能量均能“照亮”盲区，但两者传播损失的对比分析并没有得到关注。本书也将在第2章详细对比两种声传播模式，给出各自的适用条件。

舰载反潜声呐 AN/SQS-53（外壳见图 1-2）被用来探测、分类和追踪水下目标，有主动和被动两种工作方式。以主动声呐方式工作时，工作频率为 3.5kHz，可利用上述 3 种声传播模式工作，但利用表面波导模式时，由于海面混响和近海面噪声的干扰，有效探测距离约为 18km。AN/SQR-19 TACTAS 是舰载拖曳被动低频声呐，最大拖曳深度可以达到 365m，阵列孔径为 242m。由于其覆盖频率较宽，可以充分利用低频信号，并且本舰噪声干扰较小，因而该声呐拖曳在较深的深度时可以探测多个汇聚区内的目标。AN/SQR-501 CANTASS 也是舰载拖曳被动低频声呐，其低频覆盖范围从 50Hz 到 5kHz，处理带宽可以为 220Hz，为远距离（超过第二汇聚区）被动定位提供保障。AN/BQQ-5E 声呐的潜艇拖曳阵也是为了利用低频声传播的优势，实现远距离目标探测。

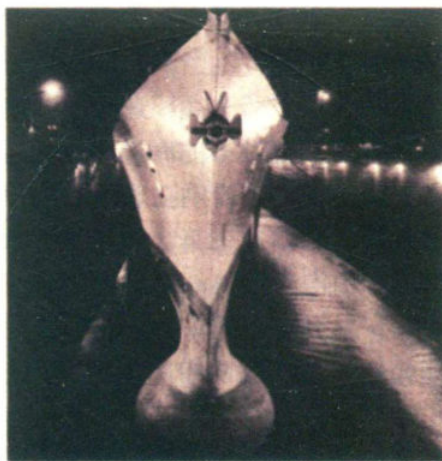


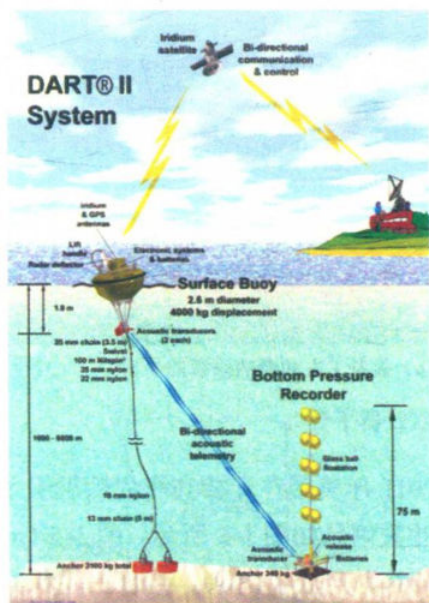
图 1-2 AN/SQS-26 声呐的弓形外壳（该外壳与 AN/SQS-53 声呐外壳相似）

除了上述三种传播模式，深海环境中还存在两种典型的声传播模式，其特点并未被广泛研究，也未见有声呐系统基于这两种声传播模式的工作模式。这两种声传播模式如下：

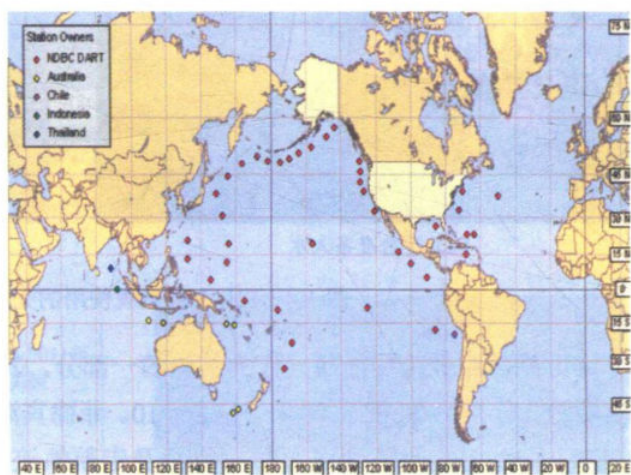
（1）表面波导泄漏模式。如图 1-1 的中蓝色点画线，当声能在表面波导中传播时，会有一部分能量从表面声道中泄漏，从而照亮“影区”。在低频条件下，能量泄漏强烈。当潜艇位于表面波导以下并探测水面舰艇时，由于表面声道能量的泄漏，有可能在“影区内”接收到水面舰艇的辐射噪声。同时，根据互易性原理，潜艇的辐射声能会通过绕射进入表

面声道而被水面舰艇发现。当表面声道不存在时,这两种可能的探测方式是无法实现的。因而,表面波导声能量泄漏为声呐探测提供一种新的模式,具有重要的研究意义。Labianca<sup>[79]</sup>和 Murphy<sup>[80]</sup>分别利用简正波理论和射线理论刻画了表面波导中的声能量泄漏现象,Porter<sup>[81]</sup>从仿真和实验数据分析两个方面说明了声能量泄漏的重要性。

(2) 可靠声路径传播模式。如图 1-1 所示,黑色实圆点所示的水听器布放在临界深度以下,目标与水听器之间存在的直达波传播路径被称为可靠声路径。可靠声路径是深海声传播的重要声道之一,声速起伏和界面散射对其声传播影响较小,并且该声道下的噪声级较低。为深入认识可靠声路径的物理特性,本书在第 6~9 章中对其声特性进行了详细的讨论。可靠声路径被广泛关注始于美国建立的深海海啸灾害监测系统(Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis, DART)。该系统将监测仪布置在近海底位置,接收近距离海啸波产生的声波,为美国国家海洋和大气管理局提供了远程监测海啸的方法。2004 年 12 月 26 日发生的印度洋海啸(造成超过 30 万人死亡)促使 DART 系统升级为 DART II 系统,系统组成如图 1-3 (a) 所示。当海底声压传感器(Bottom Pressure Recorder)接收到超过阈值的尖峰信号时,海底声压传感器通过声学调制解调器向浮标发送报告,然后浮标通过卫星通信系统将报告发送至海啸预警中心。该中心将结合其他信息对该报告进行评估。DART II 系统在 2008 年 3 月完成,其节点的分布位置如图 1-3 (b) 所示。



(a) DART II 系统的组成  
(摘自文献[82]的图 1)



(b) DART II 节点的分布位置  
(摘自文献[82]的图 2)

图 1-3 DART II 系统介绍

从 DART II 系统中认识到可靠声路径低传播损失、低噪声级的特点,美国国防部先进研究项目局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)启动了分布式潜艇猎捕系统(Distributed Agile Submarine Hunting, DASH)。安静型潜艇对海上平台造成了极大