



*Modeling and Application of
Underwater Acoustic Environmental Effect*

海洋水声环境效应 建模与应用

笮良龙 著



科学出版社

前 言

声波在海水中良好的传播性能使其成为人们进行海洋研究的主要信息载体,也使得水声技术在军事上具有特别重要的意义,在人类开发和利用海洋中起着无可替代的重要作用。先进的水声技术是国家强大的象征,是国家发展海上军事和海洋经济的重要支柱。两次世界大战的爆发大大促进了水声技术的发展,人们认识了声波在水中的传播机理,逐步建立起水声学研究的理论体系,并发展成为一门独立的新兴交叉学科,在这一过程中,水声环境效应研究受到重视,并不断发展成为相对独立的研究方向,在水声技术和军事应用研究领域占有重要地位。

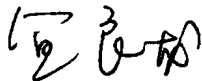
声波在水下环境中所表现出的普遍、异常变化特征和规律及其影响即水声环境效应。水声环境效应主要研究水声信息传输的信道环境以及信息传输过程中所形成的物理场,以实现水声装备与环境的最佳匹配,使水声装备的性能得到最大限度的发挥。水声信息主要包括目标噪声和回声特征;传输的信道环境主要包括海水温度、盐度、密度和声速,以及海表和海底声学特性;传输过程中所形成的物理场主要包括水声目标信息在信道中的传播损失、混响、噪声等特性。水声环境对水声装备的影响主要研究水声环境效应仿真、评估与决策技术。实验基础上的建模与仿真是水声环境效应研究的基本方法。水声环境效应研究是水声物理、海洋学、信息处理技术和军事技术的交叉,它涉及水声物理前沿、水声探测及水声信号处理理论的前沿、数字化海洋战场可视化技术前沿,是多种学科的综合,多种技术的集成。学科与技术的综合集成,既是推动装备技术跨越式发展的原动力,也是军事理论和技术创新的原动力。可以确信,水声环境效应研究在未来的发展中仍将从其他学科和专业中获取营养和支持,同时,水声环境效应研究的发展也必将给相关学科和专业注入新的活力。

本书主要介绍水声环境效应研究的基础理论、基本方法和应用。全书共分8章,第1章是绪论,介绍了水声环境效应研究的对象、历史和方法,水声环境基本参数及水声环境效应研究的重要意义;第2章介绍了水声传播建模理论及其高性能并行仿真、海洋噪声场和浅海混响建模,为后续章节的理论分析奠定了模型基础;第3章介绍了宽带水声信道波形预报问题,对螺旋桨空化噪声波形仿真问题进行了较为系统而全面的分析研究,开发了宽带传播模型及并行算法;第4章主要研究了水声环境对声传播的影响,为定量地研究海洋环境要素对声纳探测效能的影响打下了良好的基础;第5章分析和研究了水声环境效应的不确定性,其目的是为了掌握不确定性规律,并进一步抑制不确定性,从而捕捉不确定性;第6~7章介绍了水声环境效应评估模型,以及在此基础上建立的信号级水声环境效应仿真系统;第8章介绍了水声环境效应技术在辅助决策方面的应用。

本书根据作者近年的科研工作写成,是长期科研积累的结果,其中包含了张林、范培勤、谢骏、杨廷武、过武宏、吴长柱、唐帅、刘贝等多位研究生的工作,在此表示感谢。在本书的写作过程中,参阅并引用了许多同仁宝贵的研究成果,在此一并致谢。

本书是关于水声环境效应建模与应用的一部专著,书中内容丰富,叙述力求精简,将理论与应用紧密结合,便于读者理解本书的基本观点,希望能对广大读者的工作和学习有所裨益。

限于作者水平和经验,书中不足和疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。



2011 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水声环境效应研究	1
1.1.1 研究对象	1
1.1.2 研究历史	2
1.1.3 研究方法	8
1.2 水声环境基本参数	8
1.2.1 海水中的声速和垂直结构	9
1.2.2 海水的声吸收	11
1.2.3 声传播的界面特性	12
1.2.4 海洋内部的非均匀性	13
1.2.5 不确定性和非线性特性	15
1.3 水声环境效应研究的重要意义	16
参考文献	17
第 2 章 海洋声场建模与仿真	18
2.1 海洋声场基本理论	18
2.1.1 射线理论	18
2.1.2 简正波理论	19
2.1.3 多途扩展模型	20
2.1.4 快速场模型	20
2.1.5 抛物方程模型	20
2.2 射线-简正波方法	21
2.2.1 简正波本征方程	21
2.2.2 简正波本征函数	23
2.3 射线-简正波-抛物方程方法	24
2.3.1 基本理论	24
2.3.2 高性能并行仿真	29
2.4 海洋中噪声场	36
2.4.1 噪声源和谐级	36
2.4.2 噪声场的指向性	40
2.4.3 环境噪声建模	40

2.5	混响模型	43
2.5.1	混响的基本概念	43
2.5.2	浅海混响模型	44
2.6	本章小结	49
	参考文献	49
第3章	宽带水声信道波形预报	52
3.1	宽带传播模型	52
3.1.1	频域宽带传播模型	53
3.1.2	时域宽带传播模型	60
3.2	波形预报并行算法	65
3.2.1	频域近似展开	65
3.2.2	频域近似展开的计算精度分析	65
3.2.3	宽带模型频域近似展开的计算速度分析	72
3.2.4	频域宽带模型并行算法设计	74
3.3	水中目标辐射噪声波形仿真	80
3.3.1	低频线谱波形仿真	80
3.3.2	连续谱波形仿真	83
3.3.3	包络谱波形仿真	88
3.4	本章小结	91
	参考文献	91
第4章	水声环境对声传播的影响	94
4.1	声速垂直结构对声传播的影响	94
4.1.1	负声速梯度	94
4.1.2	正声速梯度	95
4.1.3	均匀声速梯度	95
4.2	水平非均匀介质对声传播的影响	96
4.2.1	海洋锋	96
4.2.2	中尺度涡旋	98
4.2.3	内波	101
4.3	海底地形对声传播的影响	102
4.3.1	大陆架地形对声传播的影响	102
4.3.2	大陆坡地形对声传播的影响	104
4.3.3	岛礁区地形对声传播影响	106
4.4	深海会聚区声传播	107
4.4.1	会聚区特征预报模型	107

4.4.2 会聚区预报结果分析	109
4.5 本章小结	110
参考文献	110
第5章 水声环境效应的不确定性	111
5.1 水声环境效应不确定性的产生原因	111
5.1.1 客观世界固有的不确定性	111
5.1.2 人为引起的不确定性	113
5.2 水声环境不确定性传播	114
5.3 随机声纳方程与声纳检测概率	116
5.3.1 随机声纳方程	116
5.3.2 声纳检测概率的均值和均方差的估计	116
5.3.3 随机声纳方程的仿真与分析	117
5.4 声纳作用距离的随机性	120
5.5 捕捉水声环境效应的不确定性	123
5.5.1 基于MC方法捕捉不确定性	123
5.5.2 基于MCMC方法捕捉不确定性	131
5.5.3 基于海洋-声学耦合模式捕捉海洋环境不确定性	135
5.6 本章小结	139
参考文献	140
第6章 水声探测系统环境效应评估模型	142
6.1 指标体系构建	142
6.2 声纳探测效能计算模型	143
6.2.1 目标深度已知	143
6.2.2 目标深度未知	147
6.2.3 深海中声纳探测效能计算模型	150
6.3 声纳探测效能计算模型的并行算法	151
6.3.1 并行计算简介	151
6.3.2 声纳探测效能计算时间分析	154
6.3.3 并行算法实现	156
6.3.4 并行算法性能分析	157
6.3.5 计算结果	158
6.4 指标的规范化	160
6.5 指标权重计算	161
6.5.1 三级指标权重	162
6.5.2 二级指标权重	162

6.6 效能评估计算	163
6.7 仿真分析	164
6.7.1 作战设定	164
6.7.2 探测效能仿真结果	165
6.8 本章小结	167
参考文献	168
第7章 信号级水声环境效应仿真系统	170
7.1 信号级被动声纳仿真系统	170
7.1.1 声纳系统仿真概述	170
7.1.2 信号级被动声纳仿真系统的基本原理	174
7.2 信号级被动声纳仿真系统设计与实现	175
7.2.1 波束形成技术	175
7.2.2 系统功能与体系结构设计	179
7.3 声纳探测效能综合评估系统	183
7.3.1 系统设计	184
7.3.2 系统实现	185
7.4 本章小结	191
参考文献	191
第8章 水声环境效应应用	193
8.1 基于不确定性水声环境效应的规划理论	193
8.1.1 不确定规划的数学模型	193
8.1.2 基于不确定性水声环境效应的机会约束规划决策模型	195
8.2 基于水声环境信息的视觉数据融合决策技术	200
8.2.1 基于视觉信息的“人过马路”的序贯决策理论	201
8.2.2 交互式水声环境信息四维虚拟决策空间	224
8.2.3 基于CT方式的人机一体化视觉数据决策模型	234
8.3 本章小结	241
参考文献	242
图版	244

第1章 绪 论

海洋是资源的宝库、运输的大动脉、影响地球天气的决定性因素,同时也是国家安全的重要屏障。海洋覆盖了地球表面 70% 以上的面积,蕴藏着丰富的生物和矿产资源。海洋资源的探测与开发,日益受到世界各国的重视。潜艇的出现、战略核潜艇作为威慑力量的发展,更增加了海水介质中信息传递的重要性。然而人们对海洋环境的认识却十分有限,这主要是因为人们用来在大气环境中进行信息探测和通讯的主要载体——无线电波在海水中传播时会发生严重的衰减,因而不能有效传播信息的缘故。相对来说,声波在海水中的传播性能较好,因而声波成为人们进行海洋研究的主要信息载体。两次世界大战的爆发大大促进了水声学的发展,人们认识了声波在水中的传播机理,逐步建立起水声学研究的理论体系,使其成为人们认识和了解海洋,进而开发和利用海洋的又一有效途径,并发展成为一门独立的新兴交叉学科。在这一过程中,水声环境效应研究受到重视,并不断发展成为相对独立的研究方向,在水声学和军事应用研究领域占有重要地位。

1.1 水声环境效应研究

1.1.1 研究对象

由于海洋对光波与电磁波基本上是“不透明”的,声波是目前唯一能够在海水介质中进行远距离传播的有效信息载体,因此人们创造了各种不同的水声设备,用来进行水下探测、识别、导航、定位、通讯和遥感、遥控。声波在民用方面可进行导航、鱼群探测、研究海底地形底质及进行海底探矿等;在军事方面,主要用在潜艇、鱼雷声纳等方面。声纳作为水下“耳目”,是舰艇尤其是潜艇必不可少的一种水下探测设备。声纳在水下的军事应用强烈地受到海洋水声环境的影响。作为声波传播信道的海洋水声环境是极其复杂的时变、空变的随机信道,信号在信道中传输产生的多途效应,会致使其相位和能量发生变化,进而改变水声传感器的接收信号,并最终影响声纳装备的探测效能。

声波在水下环境中所表现出的普遍、异常变化特征和规律及其影响即水声环境效应。水声环境效应主要研究水声信息传输的信道环境以及信息传输过程中所形成的物理场,以实现水声装备与环境的最佳匹配,使水声装备的性能得到最大限度的发挥。水声信息主要包括目标噪声和回声特征;传输的信道环境主要包括海水温度、盐度、密度和声速,以及海表和海底声学特性;传输过程中所形成的物理场主要包括水声目标信息在信道中的传播损失、混响、噪声等特性。虽然声波在海水中具有较好的传播性能,但是作为水声信息传输通道的海水介质及其边界的复杂多变特性,使声信号在海洋信道中的传递存在着强烈的畸变和涨落,海水中的声场分布也非常复杂。海洋中的跃层、海

洋锋、内波、中尺度涡、海底特性等对声传播都会造成强烈影响。为了更好地掌握声信号在海洋信道中传播的规律,以便采取有效措施改善和提高水声设备性能,人们对水声目标及环境特性信息的获取、分析、建模及其机理进行了广泛的研究。

复杂的海洋水声环境将强烈地影响水声装备效能的发挥。水声环境对水声装备的影响主要研究水声环境效应仿真、评估与决策技术。水声环境效应仿真主要是建立信号级水声环境效应仿真系统,研究水声环境及其不确定性对声传播、探测器材和武器系统的影响。信号级仿真从信号传播和信号处理角度仿真水声传感器在探测过程中,由于环境、目标特性和目标态势的变化所引起的信号在传播和处理过程中能量和相位的起伏,满足复杂水声环境对水声装备探测效能影响仿真需求。水声环境效应评估采用基于模型和准则的评估算法,定量描述水声装备在一定水声环境中探测性能的发挥情况,构建水声探测系统效能评估的指标体系和评估系统,对水声探测系统的环境适应能力进行综合评价,为辅助决策提供依据。水声环境效应决策技术针对水声环境的不确定性和非线性,在水声环境效应不确定性规划理论基础上,研究基于水声环境信息的视觉数据融合决策技术,提高水声环境的感知速度和感知能力。

水声环境效应研究是水声物理、海洋学、信息处理技术和军事技术的交叉,它涉及水声物理前沿、水声探测及水声信号处理理论前沿、数字化海洋战场可视化技术前沿,是多种学科的综合、多种技术的集成。学科与技术的综合集成,既是推动装备技术跨越式发展的原动力,也是军事理论和技术创新的原动力。可以确信,水声环境效应研究在未来的发展中仍将从其他学科和专业中获取营养和支持,同时,水声环境效应研究的发展也必将给相关学科和专业注入新的活力。

1.1.2 研究历史^[1]

随着海洋的开发和利用,特别是军事需求的推动,水声技术得以快速发展和广泛应用。水声技术的起源可追溯到几百年之前,早在 1490 年,人们就注意到声在水中的传播。意大利的达·芬奇写道“如果使船停航,将长管的一端插入水中,而将管的开口放在耳旁,则能听到远处的航船。”这可能是人类利用声波探测水下目标的最早记载。1687 年,英国科学家艾萨克·牛顿在他的《自然科学的数学原理》一书中首次描述了声传播的数学原理。

早在 17 世纪中叶人们就测量了空气中的声速,然而直到 1826 年,瑞士物理学家丹尼尔·克莱顿和法国数学家查尔斯·斯特姆才合作测量出水中的声速。如图 1.1 所示,他们通过测定日内瓦湖中闪光和水下响钟之间的时间间隔,测得 1.8℃ 水中的声速值为 1435m/s,此值与现代测量值之间仅相差 3m/s。以上观察和测量说明,声波是水中良好的传输媒质,其水中速度是空气中速度的 5 倍之多。

1877 和 1878 年,英国科学家瑞利男爵三世约翰·威廉·斯特拉特出版了他的两卷开创性著作——《理论声学》,这被认为是现代声学研究开始的标志。1904 年瑞利因氦元素的成功分离而获得诺贝尔物理学奖,他在声学和光学领域的重大发现大大促进了声波在液体中传播理论的发展。他首次描述了声波的数学方程,这是所有声学理论

工作的基础;他首次描述了大气中微小离子对阳光的散射,这一原理同样适用于水中的声波。

直到1902年,沿美洲沿海航行的船舶依然通过固定在灯塔上的水下导航钟实现暗礁的预警。1912年,英国四万吨级邮轮“泰坦尼克号”与水下冰山相撞沉没,1500余人遇难。这次海难促使人们开发更多的主动设备来预警静止的水下冰山和其他导航威胁。事件发生后不久,英国物理学家理查森提出了空气中的回声测距方法并获得专利,一个月后提出了水下回声定位方案,即由船舶

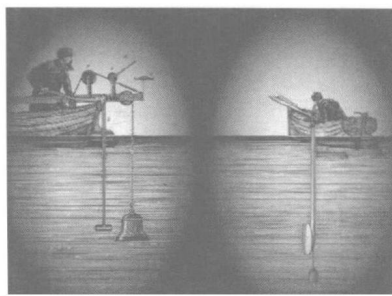


图 1.1 1826 年水声的第一次定量测量

通过水下声发生器向水中发射声波,接收从暗礁、冰山等目标反射回来的声波,来实现探测目标的目的。这是水声史上第一个回声定位方案,遗憾的是他本人未能实现这一方案。1914年,美国工程师雷金纳德·奥布里·费逊登制作了第一个回声定位仪并在美国申请专利,该设备能够探测到 2n mile 外的冰山,但不能精确测定其方向。

第一次世界大战期间,法国科学家郎之万将压电晶体和真空管放大器应用于水声技术,首次实现利用回声探测水下目标,形成了现代声纳的雏形。协约国开发了更多精密的回声设备,但却无法应对德国的 U 型潜艇威胁,原因是这些设备不能对运动目标进行定位和跟踪。战后不久,德国科学家利特特希望通过声学方法扫除德国港口的水雷,提出了海水中声波的折射理论,他认为,同光在两种介质间的折射类似,声波在遇到海水温度、盐度和压力的微小变化时也将产生折射现象,因此海流及其季节变化将影响声传播,遗憾的是,他的观点在 60 年后才被广泛认识。

第一次世界大战后至第二次世界大战之前,美国海军工程实验局仍致力于开发更精密的回声定位设备。因此,第二次世界大战爆发前夕,美国海军舰船都装备了声学测深仪和改进的回声测距仪即声纳。声纳设备能够接收几千米外潜艇螺旋桨的噪声或从潜艇外壳反射的回声。然而,这种声纳设备的可靠性令人难以琢磨。1937 年夏季,塞姆斯号美国军舰的军官们在古巴海湾训练时发现,声纳的探测性能在下午将急剧下降,有时甚至收不到回声,这就是著名的“午后效应”。美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)和麻省理工研究所(MIT)为此开发了海水温度深度测量仪(BT),用于测量海水的温深剖面。这一设备可广泛应用于海洋基础研究,如海水温度和深度对海洋生物的影响,海流的结构尤其是沿大型洋流边界的海洋涡旋结构。而科学家用 BT 测量了海水的温深剖面后发现,午后表层海水由于阳光照射温度高于底层海水温度,声纳信号在经过性质不同的冷暖水层时将发生折射,由声速高的区域向声速低的区域弯曲,这种弯曲导致了“声影区”的出现,“声影区”内的声纳信号微弱,因此难以发现目标,如图 1.2 所示。美国海军迅速意识到“声影区”和 BT 设备对潜艇作战的重要意义,在潜艇上装备了 BT 设备。第二次世界大战期间,BT 设备成为美国海军潜艇和反潜舰船的标准设备,得到广泛应用。伍兹霍尔海洋研究所负责海军官兵对 BT 设备操作使用的培训,海军官兵则将日常作战训练时测量的 BT 历史数据传至伍兹霍尔海洋研究所进行再分析。

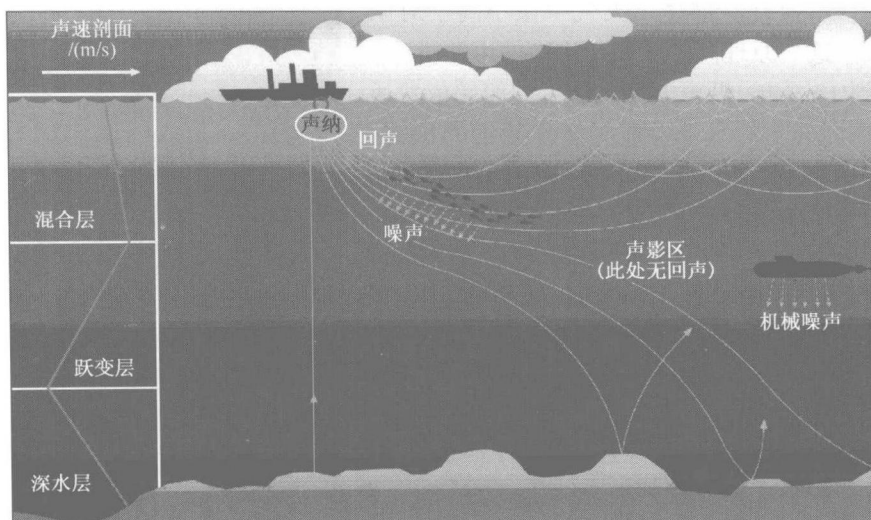


图 1.2 “午后效应”的物理解释

1946 年,美国海军研究局(ONR)成立,后来成为海洋声学研究的主要支持者。科学家们对影响声信号传播的条件进行了研究,发现海水的声吸收是蒸馏水的 30 倍,而且低频声波由于吸收和散射较小传播得更远。对海水温度、盐度、压力对声速影响的进一步研究表明,通常声速在海水表层受温度影响更大,在海水下层受压力影响更大。海水表层受日照影响,其温度和厚度随季节变化,在中纬度海区,海表受风浪搅拌作用形成等温层。等温层以下是一个过渡层,称之为温跃层,在这一层呈现温度和声速随深度下降的趋势。在海水底层,温度低且稳定,声速由于压力作用随深度增加。1943 年,哥伦比亚大学的莫里斯·尤因等在一次试验中发现,在巴哈马群岛的 11b^①TNT 炸药的爆炸声能够在 3200km 外的非洲西海岸轻易探测到,据此他们发现了 SOFAR 声道的存在。俄罗斯声学家布列霍夫斯基赫在日本海的试验同样发现了这一现象的存在,将其称为深海声道,如图 1.3 所示。美国海军迅速意识到低频声和深海声道的军事价值,在高度保密的情况下于 20 世纪 50 年代启动了代号“Jezebel”的一项计划,也就是后来的“声学监视系统(SOSUS)”。该系统在海底布放大量水听器,通过电缆与岸上的处理中心相连。通过布置在北美和西印海岸的声学监视系统,美国海军不仅可以探测北半球大部分潜艇,而且可以识别其推进器类型(是核动力还是常规动力),甚至可以识别其种类。

冷战结束后,美国海军允许民方科学家利用 SOSUS 进行基础研究。来自太平洋海洋环境实验室的克里斯多佛·福克斯及其团队是 SOSUS 的早期使用者。1991 年,从事地质热排放研究的福克斯及其团队利用 SOSUS 发现了水下火山爆发的位置。来

① 11b(磅)=0.453592kg。

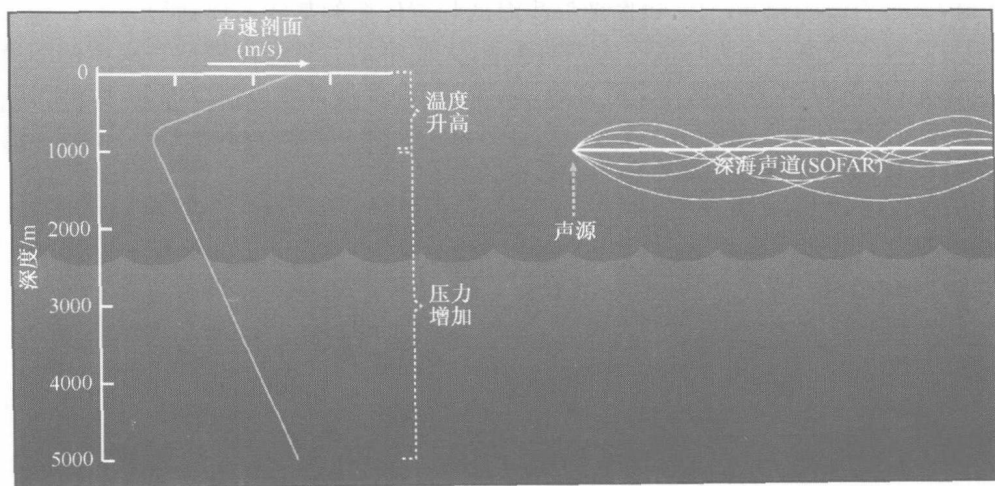
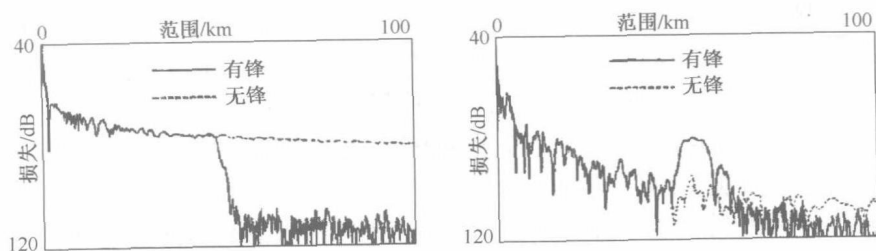


图 1.3 深海声道(SOFAR)声传播

自科内尔大学的生物声学家克里斯多佛·克拉克利用 SOSUS 进行海洋鲸类的研究,通过布放在西印海域的水听器,他能够听到 1100n mile 外鲸的声音。SOSUS 还被用来进行地球天气和气候的研究,通过全球范围的海洋温度测量,科学家能够更好地认识海气热转换。1996 年,启动了一项名为“海洋气候声学测温”(ATOC)的计划,用于研究太平洋温度的变化及其对海洋气候的影响。

得益于大量观测设备的开发,海洋动力学特性的研究有了新的发展。对水声来说,重要的中尺度海洋特征包括海洋锋、涡旋和内波。对于海洋中尺度现象的研究从 20 世纪 70 年代开始有了很大的进步,尤其是卫星遥感资料的使用和数值模拟技术的发展,极大地促进了海洋中尺度特征的研究。1976 年,Cheney 和 Winfrey 总结了海洋锋的分类和分布,给出了海洋锋的水声学定义:海洋中声传播模式和传播损失显著改变的突变面。1994 年,Robins 和 Harrison 研究了海洋锋对声传播的影响,由于锋的存在对声传播产生了强烈影响^[2],如图 1.4 所示。1973 年,Vastano 和 Owens 利用射线模型研究了涡旋对声传播的影响^[3],如图 1.5 所示。由于涡旋的存在使声场的主要特性产生了明显改变,会聚区发生偏移,并且可探测范围减小。1991 年,Zhou 等研究了水下声

图 1.4 海洋锋对声传播的影响(100Hz)^[2]

波和内部重力波的相互作用,试图解释浅海低频声传播的某些不规则行为^[4]。为了适时预报高度可变海洋动力环境下的声纳性能,人们将动力学海洋模型与水声传播模型结合起来,进行海洋-声学耦合建模。海洋-声学耦合预报系统包括三部分,即海洋预报部分、耦合部分和声传播部分。1989年,Botseaw等将PE声传播模型和HOOM海洋模型结合起来证明了海洋-声学耦合建模的可行性。

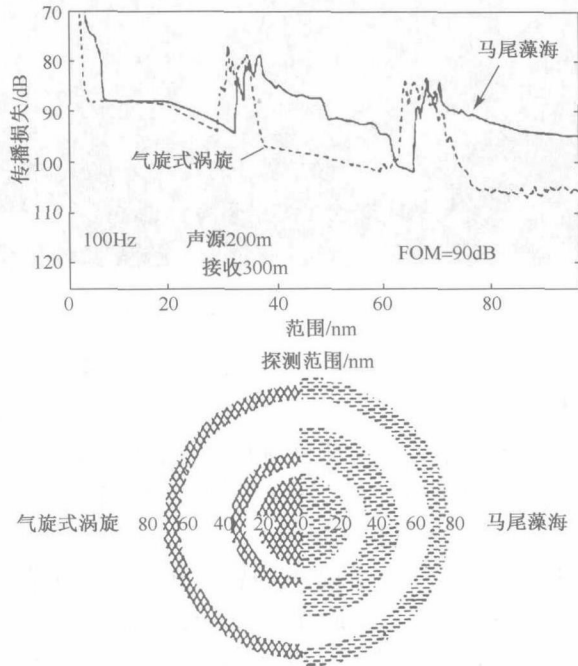


图 1.5 涡旋对声传播的影响^[3]

自 20 世纪 90 年代开始,海洋环境效应技术研究逐渐得到重视。在环境特性研究领域,1991 年美国国防部 21 项关键技术中,新增加了一项被认为对武器系统长期质量优势有很大贡献的“武器系统环境技术”。1992 年的 11 项关键技术计划中改称为“环境效应技术”,其基本内容包括大气、海洋、地面和空间环境的探测、表征、预测、建模及其对武器系统的影响。1994 年的 19 项关键技术计划中,又更名为“作战空间环境”,它涉及的子领域有海洋要素测量、海洋遥感、海洋物理、信息、仿真及其军事应用技术。海洋环境不确定性的研究是近年来一项重要研究内容,进入 21 世纪,美国海军研究局(ONR)海洋、大气与空间部发起了国防研究首创计划(DRI),该计划涉及多个学科,包括海洋建模、物理海洋学、海洋声学、数据同化、信号处理等,其目的是研究海洋环境信息中不确定性的捕捉、计算与表征。

美国海军研究局(ONR)在对环境不确定性进行深入研究的同时,开展了有针对性的海洋声学试验。图 1.6 所示为 2001 年分别在中国南海和东海海区进行的亚洲海国

际声学试验(ASIAEX)。对于东海海域,Abbot 等研究了水声传播的不确定性估计、传播损失的不确定性及对声纳性能的影响,重点是从传播的角度考虑环境的不确定性对声纳作用距离的影响,图 1.7 所示为对试验海区中经多个方向测得的传播损失及不确定性的统计^[5]。对于南海海域,Duda 等考虑了陆架断层的传播损失及其水平一致估计,同时对陆架断层区传播损失的波动进行统计,并对有关数据、结论、仿真进行比较,研究了点对点系统中传播的随机性,图 1.8 所示为试验海区的传播损失及不确定性的统计^[6]。

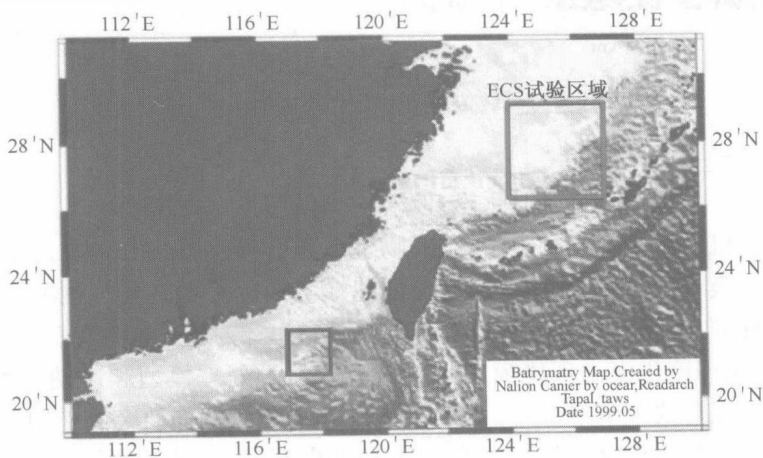


图 1.6 亚洲海国际声学试验(ASIAEX)区域^[5]

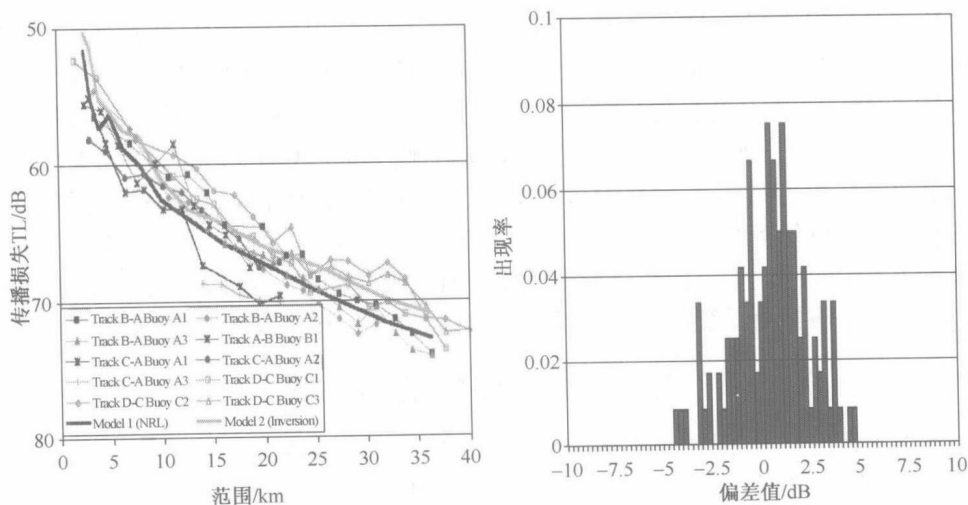
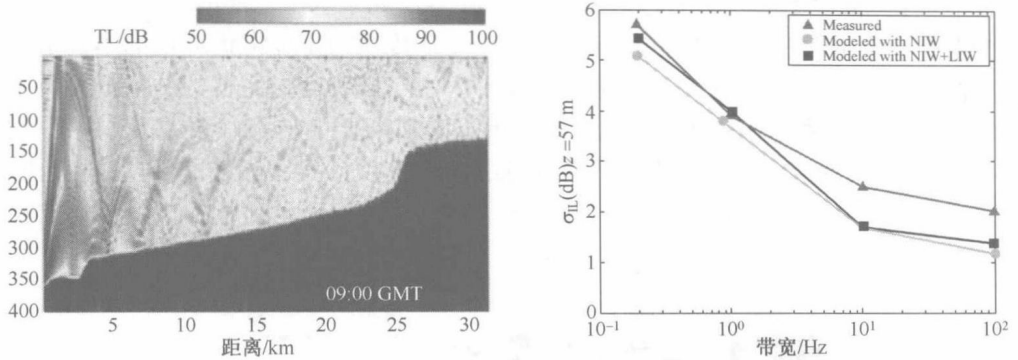


图 1.7 东海海域测得传播损失及不确定性统计^[5]

图 1.8 南海海域传播损失及由带宽产生的不确定性^[6]

1.1.3 研究方法

实验基础上的建模与仿真是水声环境效应研究的基本方法。

建模即有机地组织知识的方法,是对物理现象的高度概括和抽象。本书的建模包括海洋环境建模、海洋声场建模及声纳探测建模三部分。海洋环境建模主要是海底和海面边界条件的量化及海洋体积效应的经验算法;海洋声场建模由声传播、噪声和混响模型组成,声纳探测建模由环境模型、声场模型、信号处理模型和声纳方程组合而成。建模的应用主要有两个基本方向——研究与军事应用。面向研究的应用与实验室环境关联,精度更重要,而计算时间不是关键因素;面向军事的应用与军事任务关联,一般需要快速的反应,对精度的要求不是很高。本书的建模既考虑实验室研究的需要,具有一定的精度,又兼顾军事应用的需求,考虑反应的时效性。

仿真是运用模型的方法,支持军事应用的仿真可分为四个等级:工程级、交战级、任务级和战场级。工程级仿真也是信号级仿真,由环境模型、声场模型和声纳探测模型组成,用于预报和诊断系统性能;交战级仿真针对特定的交战目标,在特定空间和时间内的海洋环境条件下,执行工程级模型,用于战术评估和作战辅助决策;任务级仿真在任务想定被完全描述的情况下,集成多个交战任务,产生统计结果,用于任务有效性评估;战场级仿真集成任务级组件,产生兵力动态调节,用于评估兵力结构和战略,一般在联合作战演习中使用。本书的水声环境效应仿真主要定位于工程级和交战级仿真,用于预测和评估水声探测系统的性能,为战术行动提供评估和作战环境辅助决策。

1.2 水声环境基本参数

海洋及其边界(海面和海底)组成了复杂多变的水声传播媒质,由于受到各种自然条件、地理条件和随机因素的影响,致使它的物理特性有很大的复杂性和不稳定性,使得在其中传播的声信号产生了延迟、失真、损耗等变化。这些物理特性中的基本要素即水声环境基本参数,它大致包括海水中的声速及其垂直分布、声吸收、界面特性及海洋内部的不均匀性、不确定性和非线性特性。

1.2.1 海水中的声速和垂直结构

海水中的声速是研究声波在海水中传播的最基本物理量之一,它是海水中的温度、盐度和静压力(或深度)的函数,这也正是海水声速具有较明显的深度分布的基本原因。海水中的声速随温度、盐度和静压力的增大而增大,在温度、盐度和静压力(或深度)中,以温度的影响最为显著,压力的单位变化对声速影响最小,但在上千米的海洋中,压力的累积效果引起的声速改变的总量非常大,这也就是深海海水声速具有较明显的深度分布的基本原因。

对于大多数海洋区域而言,声速的垂直梯度约为水平梯度的 1000 倍。仅暖流和寒流交汇区域,水平梯度有时与垂直梯度相比拟。因此,在一级近似下,可以把海洋看作是一种平面分层介质,其声速特性仅随深度的变化而变化,而在水平面内保持不变。对于有内波、海洋涡旋及海洋锋等海洋特征影响的区域需要分别考虑。

在典型的热带及温带深海环境下温度和声速的垂直剖面的对应关系如图 1.9 所示,其中左图为垂直温度剖面,右图为垂直声速剖面。由温度剖面可以看出,在海洋表面,由于受到海面的冷热交换和风浪的搅拌作用,在海表以下一定深度内海水温度基本不变,形成混合层,混合层的深度在不同的海域各不相同;对应到声速剖面上,由于温度不变,海水的声速主要受压力的影响,随深度的增大缓慢增大,形成一个声速梯度为正梯度的声学层,该层的最大深度称为声学层深度。在温度剖面上,在混合层下,随着深度的增加,海水温度急剧降低,形成温跃层,对应的声速剖面上,出现一个负梯度的声速层。随着海深的继续增大,到一定深度海水上下层的热量交换基本达到平衡,温度基本不变直至海底,形成深海等温层;同样在声速剖面上,声速主要受海水的静压力影响,以近似 $0.017/s$ 的正梯度随深度增大。温跃层和深海等温层的交接深度,对应到声速剖面上为一声速极小值,称为声道轴。临界深度是深海声道轴以下,海水声速值等于近表面海水声速最大值的深度,也就是声学层深度的声速值对应到深海等温层的共轭深度。临界深度以下到海底的深度距离称为深度余量。

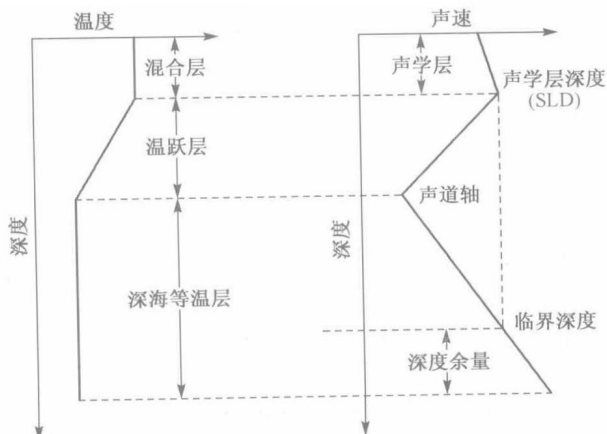


图 1.9 深海环境下温度和声速的垂直剖面的对应关系

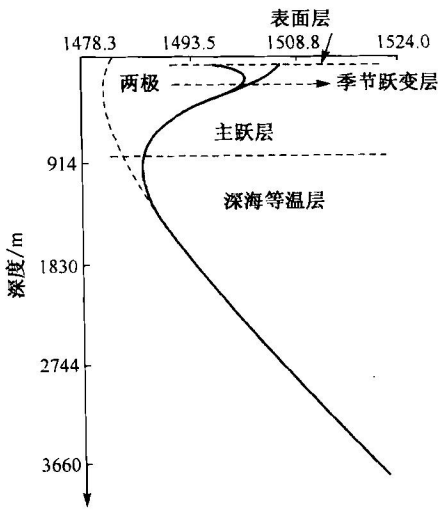


图 1.10 典型深海声速剖面

典型深海声速剖面可以分为几层,它们具有不同的特征和不同的出现可能性。如图1.10所示,紧贴在海表面下面是声学层(混合层),其中声速对热、冷和风的作用的日变化和地区变化是非常敏感的。声学层可能是含一层等温水的混合层,它由风吹过海面时的混合作用造成。此混合层对声波具有声道的作用,在长时间风平浪静的日照条件下,此混合层消失,而为温度随深度降低的水层所代替。表层之下为季节跃变层,季节跃变层的特征是负温度梯度或负声速梯度,此梯度随季节而异。在夏季和秋季,近表面海水是暖和的,季节跃变层强烈而界线分明;在冬季和春季,跃变层趋向于表面层,两者不易区分。在季节跃变层之下为主跃变层,它

有较大的负声速梯度且季节对它的影响微弱。声速极小值(声道轴)的具体深度与纬度有关,在我国南海海区声道轴位置大约在 1000~1100m,台湾以东海区声道轴位置大约在 900~1000m。如果在北极,声道轴位置将接近海表面附近。

在沿岸浅海及大陆架上,声速剖面受到较多因素的影响,比深海具有更大的变动性,具有比较明显的季节特征。在温带海域的冬季,浅海大多为等温层,形成均匀层声速剖面或弱的正梯度声速剖面;在夏季,则多为温度负梯度层,因而形成负梯度声速剖面。由冬季过渡到夏季,等温层逐渐变为负跃层,跃层深度逐渐增加。图 1.11 表示黄海海域历年平均声速垂直分布;图 1.12 表示东海海域历年平均声速垂直分布;图 1.13 表示南海海域(浅海)历年平均声速垂直分布。

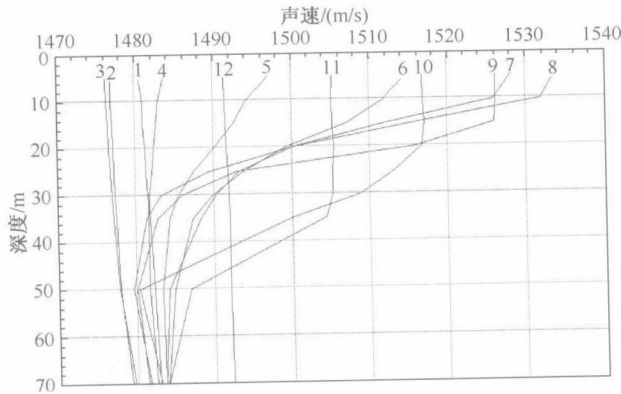


图 1.11 黄海年平均声速垂直分布

海洋中的声速分布是多变的,既有地域性变化,又有季节性变化,局部区域中声速