

# 水声学原理

主编 刘伯胜 雷家煜



哈尔滨工程大学出版社



# 水声学原理

刘伯胜 雷家煜 编

哈尔滨工程大学出版社

## 内 容 简 介

本书共八章,介绍了海水介质的声学特性;海水中的声传播理论;常见声速分布下的声传播规律;声波在声呐目标上的反射和散射;海水中的混响;水下噪声(包括海洋环境噪声,舰船辐射噪声,舰船自噪声)和海水中的声传播起伏。第一章声学基础是为未学习声学基础课程的读者安排的,有关声呐方程的内容,安排在绪论中介绍。

本书适用于高等学校水声工程专业的本科生、硕士研究生,也可供从事水声工程的科技人员阅读参考。

## 水声学原理

主编 刘伯胜 雷家煜

责任编辑 困廷生

\*

哈尔滨工程大学出版社出版发行  
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼  
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001  
新华书店经销  
肇东粮食印刷厂印刷

\*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 16.75 字数 395 千字

1993年12月第1版 2002年9月第3次印刷

印数:3001~5000册

ISBN 7-81007-245-5

O·16 定价:18.00元

## 前 言

本书是根据 1986 年 6 月全国高等院校船舶类专业教材规划会所拟定的出版计划,为适应我国目前水声工程专业本科生教学的需要而编写、出版的。

“水声学原理”是水声工程专业的专业基础课。多年来,有关院校在该课程的教学,或者采用专著或者采用译著作为教材使用。这些著作中,虽然不乏名著和权威著作,但用作本科教学的教材时,则或者显得过于偏重理论,缺乏工科特色;或者有丰富的图表曲线和实验数据,但理论分析不够,不宜用作本科教学的教材。为此,有关院校的师生热切盼望出版“水声学原理”统编教材,以满足本科教学的需要。

根据 1986 年 9 月中国船舶工业总公司教材编审室水声电子工程教材会议所确定的内容,本书在内容选择上,重点是使同学获得水声工程设计、声纳设备正确使用所必需的水声学基本知识,着重于物理概念,基本分析方法和技能,实验数据、曲线图表的正确使用等内容的叙述。限于篇幅,本书将不做过于严密的数学推导。根据上述指导思想,本书共设八章,除第一章外,其余各章涉及的均为水声学的基本内容,重点说明声信号在海水介质中传播时遵循的基本规律、出现的基本现象、形成机理以及它们对声纳设备工作的影响。第一章声学基础是考虑到部分院校不开设声学基础课程,同学们缺乏这方面的知识,学习本课程会发生困难而设置的。另外,有关声纳方程的内容,安排在绪论部分。声纳方程是本书的主干线,对其中的每个参数都设章进行专门讨论(检测阈及有关换能器的内容除外)。

本书由哈尔滨船舶工程学院水声研究所刘伯胜和东南大学无线电系水声教研室雷家煜合作编写,其中绪论、第五章、第六章和第七章由刘伯胜编写;第一章、第二章、第三章、第四章和第八章由雷家煜编写。全书由刘伯胜完稿。

本书由山东海洋大学海洋物理系包青华副教授主审,并由哈尔滨工程大学水声研究所所长杨士莪教授最后审定。编者向他们表示衷心感谢!

编者深感水平有限,教学经验也不足,书中难免有不当和错误之处,恳请使用本书的兄弟院校师生和广大读者批评、指正。

编 者

1989 年

# 目 录

绪 论	1
§0-1 水声学发展简史	1
§0-2 水声学的研究对象	3
§0-3 水声学的应用	4
§0-4 本书的内容安排	4
§0-5 声纳及其工作方式	5
§0-6 声纳参数	6
§0-7 声纳方程	9
§0-8 组合声纳参数	11
§0-9 声纳方程的应用及其限制	11
本章参考文献	13
第一章 声学基础	14
§1-1 概 述	14
§1-2 理想流体介质中的小振幅波	16
§1-3 声波的辐射和接收	40
本章参考文献	58
第二章 海洋的声学特性	59
§2-1 海水中的声速	59
§2-2 海水中的声吸收	68
§2-3 海 底	72
§2-4 海 面	79
§2-5 海洋内部的不均匀性	84
本章参考文献	86
第三章 海洋中的声传播理论	87
§3-1 波动方程和定解条件	87
§3-2 波动声学基础	92
§3-3 射线声学基础	101
§3-4 分层介质中的射线声学	109
本章参考文献	119
第四章 典型传播条件下的声场	120
§4-1 邻近海面的水下点源声场	120
§4-2 表面声道	124

§ 4-3 深海声道·····	138
§ 4-4 深海负梯度和深海负跃层·····	146
§ 4-5 均匀浅海声场·····	148
§ 4-6 浅海表面声道·····	155
本章参考文献·····	158
<b>第五章 声波在目标上的反射和散射</b> ·····	159
§ 5-1 目标强度·····	159
§ 5-2 常见声纳目标的目标强度的一般特征·····	160
§ 5-3 目标强度的实验测量和常见声纳目标的目标强度·····	163
§ 5-4 目标回波·····	168
§ 5-5 刚性球体的散射声场·····	170
§ 5-6 声波在弹性物体上的散射·····	174
§ 5-7 壳体目标上的回波信号·····	179
§ 5-8 用赫姆霍茨积分方法求解散射声场·····	183
本章参考文献·····	185
<b>第六章 海洋中的混响</b> ·····	187
§ 6-1 海洋混响基本概念·····	187
§ 6-2 体积混响·····	190
§ 6-3 海水中气泡的声学特性·····	196
§ 6-4 海面混响·····	199
§ 6-5 海底混响·····	203
§ 6-6 混响的统计特性·····	207
§ 6-7 混响的预报·····	210
本章参考文献·····	211
<b>第七章 水下噪声</b> ·····	213
§ 7-1 噪声的基本概念·····	213
§ 7-2 海洋环境噪声·····	216
§ 7-3 舰船和鱼雷的辐射噪声·····	224
§ 7-4 舰船、潜艇和鱼雷的自噪声·····	232
§ 7-5 舰船噪声控制简介·····	236
本章参考文献·····	238
<b>第八章 声传播起伏</b> ·····	240
§ 8-1 海水介质随机不均匀性引起的声传播起伏·····	240
§ 8-2 随机界面上的声散射和声传播起伏·····	251
§ 8-3 内波和声传播起伏简介·····	255
§ 8-4 声传播起伏对声纳测量精度的影响·····	258
本章参考文献·····	261

# 绪 论

众所周知，在人们迄今所熟知的各种能量形式中，在水中以声波的传播性能为最好。在混浊、含盐的海水中，无论是光波还是无线电波，它们的传播衰减都非常大，因而在海水中的传播距离十分有限，远不能满足人类海洋活动如水下目标探测、通讯、导航等方面的需要。相比之下，声波在水中的传播性能就好得多，例如，利用深海声道效应，人们甚至远在五千公里以外，也清晰地收到了几磅 TNT 炸药爆炸时所辐射的声信号。正是由于上述原因，使得水声技术在人类的海洋活动中得到了广泛的应用，而且随着人类对海洋的需求的日益增加，水声技术的应用也必将更加广泛。

## § 0-1 水声学发展简史

虽然水声学的迅速发展开始于第二次世界大战初期，但其起源却可追溯到几百年之前。早在 1490 年，意大利的达·芬奇就在他的摘记中写道：“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。”这可能是人类利用水声探测水下目标的最早记载。当然，和现代声纳相比，这种最原始的“声纳”的性能是十分落后的，但是，达·芬奇所描述的这种方法，直到第一次世界大战时还广为采用。

1827 年，瑞士物理学家 D. Colladon 和法国数学家 C. Sturm 合作，在日内瓦湖测量了水中的声速，这是水声的第一次定量测量，他们通过测定闪光和水下钟响之间的时间间隔，测得水中声速值为 1435 米/秒。此值与现代测量值十分接近。

水声的一个重要进展是焦耳在 1840 年发现了磁致伸缩效应和皮埃尔·居里在 1880 年发现了压电效应。以上发现，对水声技术的发展具有十分重要的意义。在此基础上，后人制成和发展了水声压电换能器和磁致伸缩换能器，实现了水中电能和声能之间的转换。目前，虽然出现了一些新型的换能器，如薄膜换能器、磁流体换能器、稀钍换能器和光纤换能器等，但压电换能器和磁致伸缩换能器仍广泛应用于几乎所有的水声设备中。

1912 年，英国四万吨级邮轮“泰坦尼克号”和冰山相撞，1500 余人遇难。这次海难事件告诉人们：海上航船必须安装导航、定位设备。事件发生后不久，英国人 L. F. Richardson 提出了水下回声定位方案，即由船舶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回波，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。

人类历史表明，需要是发明、创造的强大动力，水声技术的发展也不例外，正是由于反潜的迫切需要，促进了水声技术的迅速发展。1914 年爆发了第一次世界大战，它促进了军用声纳的发展。战争后期，德国人展开了“无限制潜艇战”，利用 U 型潜艇击沉了

协约国大量的舰船，使其造成了重大的损失，迫使协约国投入大量的人力、物力研究对策，其中一个主要研究方向就是如何有效地发现水下潜艇。在这方面，法国著名爱国科学家郎之万和俄国电气工程师 Constantin Chilowsky 的工作是卓有成效的。他们在 1916 年接收到了海底回波和 200 米外的一块装甲板的回波。1917 年，郎之万改进了他们的设备，应用了石英-钢的夹心换能器和刚刚问世的真空管放大器，首次将电子学应用于水声技术，并取得了成功。1918 年，他收到了来自潜艇的回波，探测距离可达 1500 米。郎之万的工作具有重要的意义，他首次实现了利用回声探测水下目标！更重要的是，他的成功表明，只有在水声换能器问世和放大微弱电信号的电子技术发展基础上，水声技术的迅速发展和广泛应用才成为可能。近代声纳技术的发展，也雄辩地证明了这点。

第一次世界大战后，水声在实际中的应用持续地发展着，1925 年研制出了用于船舶导航的水声设备——回声测深仪。磁致伸缩换能器应用于水声设备，解决了回声定位中所需的大功率声辐射问题，也克服了石英的昂贵成本和不易加工的困难。电子学的发展，使微弱电信号的放大、处理和显示都具备了良好的技术基础，促进了声纳性能的日趋完善。1955 年，美国开始成批生产声纳设备，并装备了潜艇。在第二次世界大战中，交战双方被击沉的潜艇中，有 60% 是由水声设备发现的。声纳设备成了舰艇不可缺少的观通设备，尤其在反潜战中，它的作用更为重要。

这里需特别指出，从科学的角度来看，在两次大战之间取得的最大成就，是人们对海水中声传播机理的认识更加深化了。起初，人们对海中声传播规律了解甚少，感到探测距离随季节和一天的“早、中、晚”变化莫测，众所周知的“下午效应”就是这方面的一个例子。但是，随着水声物理研究的逐步深入和水声设备的大量应用，人们丰富和深化了关于水声传播规律的认识，如：海水中的声速分布及其对声传播的影响，用射线理论分析海洋中的传播规律，海水中的声波衰减规律和吸收机理，海底、海面的声学特性及对声传播的影响，对舰艇噪声、混响，海洋环境噪声等水声干扰特性的了解，舰船等目标的反射本领研究等。所有这些工作，为水声设备合理选择参数提供了依据，其本身也形成了一门独立的学科。

二次大战的爆发，进一步推动了水声技术的发展，交战双方投入了大量的人力、物力，从事水声各领域内的研究工作，并取得了很多成果，如各种主、被动声纳纷纷问世；水声制导鱼雷、现代音响水雷和扫描声纳等都是战争时期的产物；另外，对各种声纳目标的目标强度、各类舰艇的辐射噪声级、海洋中的混响等取得了初步的认识。

二次大战后，电子技术和信息科学得到了突飞猛进的发展，水声技术也因此得到迅速的发展，形成了以低频、大功率、大基阵和综合信号处理为特征的新一代声纳。现代水声设备的有效作用距离，与二次大战时期相比，提高了数倍，当采用海底反射声或声道效应时，其作用距离则提高了一个数量级，这无疑是深海声道研究、低频大基阵声辐射研究及先进电子技术的应用的综合成果。近年来，脉冲数字技术和计算机的引入、近代信号检测、处理理论与大基阵的声学技术相结合的最佳时空增益处理机理的进展，信号处理的自适应技术和大规模集成电路的应用，又酝酿着更新一代水声设备的诞生。

水声技术在二次大战后的又一个重要发展是它在民用方面的应用日益广泛，除了回声测深的传统应用外，海洋开发、捕鱼、海底地质测绘、导航、水下机器人研制等方面

也都有了水声设备的应用。随着人们的注意力逐渐转向海洋，水声在民用方面的应用必将越来越广泛。

新中国成立以来，随着国民经济的发展，我国的水声事业从无到有、从小到大，取得了很大的发展。目前，水声科研、生产、教育体系已经形成，建立了一支具有一定水平和一定规模的水声科技队伍，取得了大量科研成果，制造了具有较先进水平的各类声纳设备。但是，与世界先进水平相比，还有相当的差距，需要我们努力赶超，这是我国水声工作者肩负的光荣而艰巨的历史使命。

## § 0-2 水声学的研究对象

作为近代声学的一个重要分支，水声学是二次大战期间发展起来的综合性尖端技术科学。它又是一门工程科学，主要研究携有某种信息的声波在水中的产生、传播和接收，因而，它包含了水声工程和水声物理两个部分。它们相辅相成。水声物理是水声工程应用的理论依据，为工程设计提供合适的参数；同时，水声技术的不断发展和广泛应用，又对水声物理提出新的内容和要求，并为水声物理的研究提供新的手段，促进了水声物理的发展。

水声物理从水声场的物理特性分析出发，主要研究海水介质及其边界（海底、海面）的声学特性和声波在海水介质中传播时所遵循的规律，及其对水声设备工作的影响。虽然声波在海水中有很好的传播性能，但是作为声信息传输通道（水声信道）的海水介质及其边界（海底、海面）具有复杂和多变的特性，因而声波在这种信道中的传播现象也是复杂和多变的，而这些恰好就是水声物理的研究内容。通过实验和理论研究，发现和总结水声场所遵循的规律及相应的机理，并为水声设备的设计提供合理的参数。

水声工程包括水下声系统和水声技术两个方面。水下声系统指的是水声换能器及基阵，它类似无线电设备中的天线，用来实现水下声能与电能之间的转换。水下声系统的研究内容主要为换能器材料、结构、制作及其辐射、接收特性等。广义的水声技术是泛指声波在水中完成某种职能的有关技术问题。狭义的水声技术可理解为水声信号处理、显示技术，它主要研究声信号在水中传播时的特性和背景干扰（噪声和混响）的统计特性，并在此基础上设计出最佳时、空处理方案，从而实现强背景干扰下的信号检测。另外，在检测出目标的基础上，对目标的参数，诸如方位、距离、运动速度等量中的某些量作出估计，这就是所谓参数估计问题。对被检测目标的某些属性，如性质、形状、运动要素等作出判别，就是所谓目标识别问题。参数估计和目标识别，也是信号处理所要讨论的内容。限于篇幅，有关水下声系统和水声技术方面的内容，请读者阅读有关专著，本书将不作讨论。

## § 0-3 水声学的应用

人类社会的发展历史表明,任何一门科学的诞生和发展,总是基于社会的需要和经济、技术的发达程度,水声学也不例外。首先是由于军事上的需要,才引起了人们对水中声学的重视,促进了水声学的发展。自然,水声学的任何新成果,也毫例外地首先应用于军事部门。目前,声纳作为水下“耳目”,是舰艇特别是潜艇必不可少的一种观通设备。声纳设备在军事上的应用是多种多样的。例如反潜、通讯、导航、定位、鱼雷制导、水雷引爆等都是声纳的具体应用。

随着科学技术的发展和人们对海洋资源需求量的日益增加,海洋开发愈来愈受到关注,这就促进了声纳技术在民用方面的发展并逐步形成了与军用声纳并列的独立体系。声纳在民用方面的用途也是多种多样的,如用于渔业的渔探仪,用于导航的多卜勒导航声纳,测量海底结构的地貌仪以及声波测井等。可以预见,随着海洋开发事业的日益发展,水声技术所起的作用将越来越重要,它的应用也将更加广泛。

我国属于海洋国家,海域辽阔,海岸线长达 18 000 余公里,海洋资源丰富。随着我国社会主义现代化建设的不断发展,水声在国防和海洋资源开发中将起重要作用。

## § 0-4 本书的内容安排

本书以声纳方程为干线来介绍水声学的基本原理,对它的每个参数都从水声物理的角度设专章展开讨论。

声纳方程是水声工程设计、应用的基本依据,这部分内容在绪论中进行讨论。

本书共八章。第一章声学基础基本知识,简单介绍了以后各章涉及的声学基础知识,它是为未学习过声学基础课程的读者安排的。

第二章讨论海水介质及其边界的声学特性,其内容为海水中的声速度、海水中的吸收,以及作为界面的海底、海面的声学特性。有关海洋环境噪声,将在第七章中加以讨论。

第三章海水中的声传播理论,对射线理论的基本内容、适用条件作了比较详细的讨论,同时对简正波理论也作了简要的介绍,并比较了两种理论的优缺点。

第四章典型水文条件下的声传播,主要内容是应用射线理论处理了几种常见水文条件下的声传播问题,给出了相应的传播损失。

第五章声波在声纳目标上的反射和散射,讨论了目标强度概念,并以简单几何形状目标为例介绍了散射声场的计算方法,最后给出了常见声纳目标的目标强度值及一般特性。

第六章海洋中的混响,首先讨论了混响的基本概念,然后根据机理的不同,讨论体积混响、海面混响和海底混响的特性及相应的等效平面波混响级,最后简单讨论混响的

统计特性和混响的预报。

第七章海洋噪声，介绍了海洋环境噪声、舰船辐射噪声、舰船自噪声的噪声源及其特性，给出了相应的噪声级，同时也介绍了噪声的统计特性及降噪问题。

第八章声传播起伏，讨论了声传播起伏现象，机理、统计特性及对声纳设备工作的影响。

## § 0-5 声纳及其工作方式

“声纳”一词是 Sonar 的音译，它是英语 Sound Navigation and Ranging 的略语。目前，声纳一词具有了更广泛的涵义。凡是利用水下声信息进行探测、识别、定位、导航和通讯的系统，都广义地称之为声纳系统。

按声纳的工作方式来区分，它通常又分为主动工作系统和被动工作系统，习惯上称为主动声纳和被动声纳。图 0-1 是主动声纳的信息流程示意图。主动声纳工作时，发射

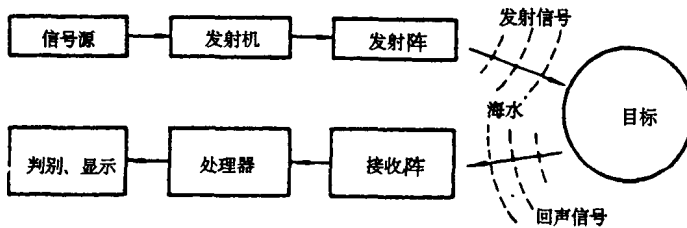


图 0-1 主动声纳信息流程示意图

系统向海水介质中发射带有一定信息的声信号，称为发射信号，此信号在海水中传播时如遇到障碍物，如潜艇、水雷、鱼雷、冰山、暗礁（通常称为声纳目标）等，就会产生“回声”信号。“回声”信号遵循传播规律在海水中传播，其中在某一特定方向上的“回声”信号传播到接收器处，并由接收换能器将其转换为相应的电信号，此电信号经处理器处理后传送到判别器，它依据预先确定的原则作出有无目标的判决，并在作出确认有目标的判决后，指示出目标的距离、方位、运动速度及其某些物理属性，最后显示器显示判决结果。这就是主动式声纳的完整信息流程。

图 0-2 是被动声纳信息流程示意图。与主动声纳不同，它没有专门的发射系统，图 0-2 中的声源部分系指被探测目标，如鱼雷、潜艇等航行中所辐射的噪声（所以，也有将被动声纳系统称为噪声声纳站的），被动声纳就是通过接收目标的这种辐射噪声，来实现水下目标探测，确定目标状态和性质等目的。由此不难看出，主、被动声纳在信息流程上的差异，“主动”、“被动”也由此而得名。至于被动声纳的接收阵、时空处理和判决、显示，就本质而言，它和主动声纳是相同的，这里不再详述。

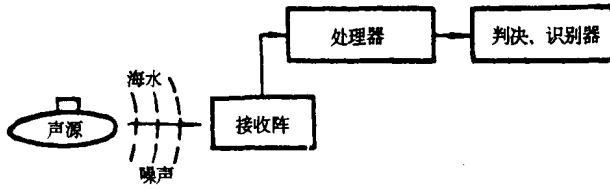


图 0-2 被动声纳信息流程示意图

## § 0-6 声纳参数

由上节可知，虽然主、被动声纳的工作方式有所不同，但它们工作时的信息流程却是相同的，都由三个基本环节组成，这就是声信号赖以传播的海水介质、被探测目标和声纳设备本身。可以想见，这些基本环节的状态、特性和性能，将直接影响声纳信息的传送、处理和判决，也即影响声纳设备的工作质量。进一步的分析表明，上述三个基本环节中的每一个，又都包含了若干个影响声纳设备工作的因素，工程上将这些因素称为声纳参数。下面，我们首先给出各个声纳参数的定义，并简要说明其物理意义，然后再在下节将它们组合成声纳方程。

### 声源级 SL

声原级 SL 用来描述主动声纳所发射的声信号的强弱，它定义为

$$SL = 10 \lg \frac{I}{I_0} \Big|_{r=1} \quad (0-1)$$

式中， $I$  是发射器（发射换能器或发射换能器阵）声轴方向上离声源声中心 1m 处的声强， $I_0$  是参考声强。在水声学中，通常将均方根声压为 1 微帕（写为  $1\mu\text{Pa}$ ）的平面波的声强取作参考声强  $I_0$ ，它约等于  $0.67 \times 10^{-22} \text{W}/\text{cm}^2$ 。以下如无特别说明，参考声强均指此值。

为了有效地提高主动声纳的作用距离，它的发射器总是做成具有一定的发射指向性，使它所发射的声能主要集中于空间某一方向（通常就是目标所在的方向），其余方向上则仅有很少量的发射声能，图 0-3 形象地表示了这种发射指向性特性。利用这种发射指向特性，就可得到较强的回声信号，从而提高接收信号的信噪比。对于一部声纳设备来说，只要接收器输出端输出信号的信噪比达到预定的值，该设备就能正常工作，所以不难想见，由于发射器具有发射指向性，使辐射声能主要集中在某一有限的空间内，提高了辐射信号的强度。相应地回声信号强度也得到了提高，从而增加了设备的作用距离。发射器的上述特性通常用发射指向性指数  $DI_T$  来描述，它定义为：设有两个

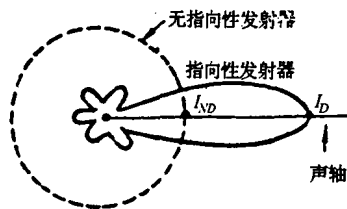


图 0-3 发射指向性图案

发射相同声功率的发射器，一个具有发射指向性，另一个无发射指向性，又设在它们各自的辐射声场的远场测量声强，测量距离相同，测得无指向性发射器辐射声强度为  $I_{ND}$ ，在指向性发射器声轴上测得的声强度为  $I_D$ ，见图 0-3，则指向性发射器的发射指向性指数  $DI_T$  为

$$DI_T = 10 \lg \frac{I_D}{I_{ND}} \quad (0-2)$$

由式 (0-2) 可见，发射指向性指数  $DI_T$  实际上就是在相同的距离上，指向性发射器声轴上的声级高出无指向性发射器辐射声场声级的分贝数。 $DI_T$  值愈大，就表示了声能在声轴方向集中的程度愈高，就愈有利于增加设备的作用距离。所以，近代主动声纳的发射器，都在造价、工程实施等允许的条件下，尽可能地提高发射指向性指数。

发射器的声源级反应了发射器辐射声功率的大小，它们之间有着简单的函数关系。设 在无吸收的介质中有一个辐射声功率为  $P_s$  (W) 的点声源，根据声学基础知识可知，距此声源声中心单位距离处的声强度为

$$I|_{r=1} = P_s/4\pi \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (0-3)$$

将式 (0-3) 代入式 (0-1)，并注意到  $I_0 = \frac{10^{-22}}{1.5} \text{ (W/cm}^2\text{)}$ ，则可得到

$$SL = 10 \lg P_s + 170.77 \quad (0-4)$$

上式给出了无指向性声源辐射声功率与声源级 SL 之间的关系。对于一个发射声功率为  $P_s$  (W)、指向性指数为  $DI_T$  的指向性发射器，根据指向性指数的定义及式 (0-4)，可得其声源级为

$$SL = 10 \lg P_s + 170.77 + DI_T \quad (0-5)$$

由式 (0-5) 可见，只要知道发射器的辐射声功率和发射指向性指数，就能方便地得到该发射器的声源级。目前，船用声纳的辐射声功率范围为几百瓦到几十千瓦，发射指向性指数为 10~30dB，所以其声源级范围约为 210dB 到 240dB。

### 传播损失 TL

海水介质是一种不均匀的非理想介质，由于介质本身的吸收、声传播过程中波阵面的扩展及海水中各种不均匀性的散射等原因，声波在传播过程中，声传播方向上的声强度将会逐渐减弱，传播损失 TL 定量地描述了声波传播一定距离后声强度的衰减变化，它定义为

$$TL = 10 \lg \frac{I_1}{I_r} \quad (0-6)$$

式中， $I_1$  是离声源声中心 1m 处的声强度； $I_r$  是距声源  $r$  处的声强度。式 (0-6) 定义的传播损失 TL 值总为正值。

### 目标强度 TS

对于主动声纳而言，它是利用目标回波来实现检测的。由声学基础知识可知，目标回波的特性除和声波本身的特性如频率、波阵面形状等因素有关外，还与目标的特性如几何形状、组成材料等有关，也就是说，即使是在同样的入射波照射下，不同目标的回波也将是不一样的。这一现象反应了目标反射本领的差异。水声技术中，通常用目标强度 TS 定量描述目标反射本领的大小，它定义为

$$TS = 10 \lg \left. \frac{I_r}{I_i} \right|_{r=1} \quad (0-7)$$

式中,  $I_i$  是目标处入射声波的强度;  $I_r|_{r=1}$  是在入射声波相反的方向上、离目标声中心 1m 处的回波强度。

### 海洋环境噪声级 NL

海水介质中, 存在着大量的、各种各样的噪声源, 它们各自发出的声波构成了海洋环境噪声。这种环境噪声, 对声纳设备的工作无疑是一种干扰。环境噪声级 NL 就是用来度量环境噪声强弱的一个量, 它定义为

$$NL = 10 \lg \frac{I_N}{I_0} \quad (0-8)$$

式中,  $I_N$  是测量带宽内 (或 1Hz 频带内) 的噪声强度;  $I_0$  是参考声强。

### 等效平面波混响级 RL

对于主动声纳来说, 除了环境噪声是背景干扰外, 混响也是一种背景干扰。关于海水混响的研究指出, 混响不同于环境噪声, 它不是平稳的, 也不是各向同性的。为了定量描述混响干扰的强弱, 我们引入声纳参数等效平面波混响级 NL。设有强度为  $I$  的平面波轴向入射到水听器上, 水听器输出某一电压值; 如将此水听器移置于混响场中, 使它的声轴指向目标, 在混响声的作用下, 水听器也输出一个电压。如果这两种情况下水听器的输出相等, 那么, 就用该平面波的声级来度量混响场的强弱, 称为等效平面波混响级。

### 接收指向性指数 DI

接收换能器的接收指向性指数的定义是

$$DI = 10 \lg \left( \frac{\text{无指向性水听器产生的噪声功率}}{\text{指向性水听器产生的噪声功率}} \right)$$

设有两个水听器, 一个无指向性, 另一个有指向性, 且指向性水听器的轴向灵敏度等于无指向性水听器的灵敏度, 设为单位值。现将它们置于单位立体角内的噪声功率为  $I_i$  的各向同性噪声场中, 此时无指向性水听器产生的均方电压是

$$R_N = m \int_{4\pi} I_i d\Omega = 4\pi m I_i \quad (0-9)$$

式中,  $m$  是比例常数;  $d\Omega$  是元立体角。在同一噪声场中, 指向性水听器产生的均方电压是

$$R_D = m \int_{4\pi} I_i b(\theta, \varphi) d\Omega = m I_i \int_{4\pi} b(\theta, \varphi) d\Omega \quad (0-10)$$

其中,  $b(\theta, \varphi)$  是归一化的声束图案函数,  $\theta, \varphi$  是空间方位角。根据指向性指数的定义, 由式 (0-9) 和 (0-10) 可得

$$DI = 10 \lg \frac{R_N}{R_D} = 10 \lg \left( \frac{4\pi}{\int_{4\pi} b(\theta, \varphi) d\Omega} \right) \quad (0-11)$$

由此可见, 指向性水听器的指向性指数, 其实就是在各向同性噪声场中, 无指向性水听器输出的均方电压和具有同样轴向灵敏度的指向性水听器输出的均方电压的比值, 并用分贝表示。

顺便指出, 只有对各向同性噪声场中的平面波信号, 参数 DI 才有意义, 对于具有其它方向特性的信号和噪声场, 需用参数阵增益来表示指向性接收器的上述特性。有关阵增益概念的详细讨论, 请参阅有关水声换能器基阵方面的书籍。

换能器阵的接收指向性指数, 原则上需通过积分式 (0-11) 得到, 但对于一些几何形状较简单的换能器阵, 可用阵的尺寸来表示它的 DI 值, 表 0-1 列出了四种阵的作为阵尺寸函数的 DI 表达式。

表 0-1 简单几何形状换能器的指向性 [0. 1]

型 式	声束图案函数	DI = 10 lg
长度为 $L \gg \lambda$ 的连续线阵	$\left[ \frac{\sin(\pi L/\lambda) \sin\theta}{(\pi L/\lambda) \sin\theta} \right]^2$	$\frac{2L}{\lambda}$
无限障板上直径为 $D \gg \lambda$ 的活塞	$\left[ \frac{2J_1[(\pi D/\lambda) \sin\theta]}{(\pi D/\lambda) \sin\theta} \right]^2$	$\left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$
间距为 $d$ 的 $n$ 个等间隔单元构成的线阵	$\left[ \frac{\sin(n\pi d \sin\theta/\lambda)}{n \sin[\pi d/\lambda \sin\theta]} \right]^2$	$\frac{n}{1 + \frac{2}{n} \sum_{\rho=1}^{n-1} \frac{(n-\rho) \sin(2\rho\pi d/\lambda)}{2\rho\pi d/\lambda}}$
双单元阵, 间距为 $d, n=2$	$\left[ \frac{\sin(2\pi d \sin\theta/\lambda)}{2 \sin[\pi d/\lambda \sin\theta]} \right]^2$	$\frac{2}{1 + \left[ \frac{\sin(2\pi d/\lambda)}{2\pi d/\lambda} \right]}$

### 检测阈 DT

声纳设备的接收器工作在噪声环境中, 既接收声纳信号, 也接收背景噪声, 相应地, 其输出也由这两部分组成。因此这两部分比值的大小将直接影响设备的工作质量, 即如果接收带宽内的信号功率 (或均方电压) 与 1Hz 带宽内 (或工作带宽内) 的噪声功率 (或均方电压) 的比值较高, 则设备就能正常工作, 它作的“判决”也是可信的; 反之, 上述的信噪比值比较低时, 设备就不能正常工作, 它作出的“判决”也就不可信。在水声技术中, 习惯上将设备刚好能正常工作所需的处理器输入端的信噪比值 (用分贝表示) 称作检测阈, 它定义为

$$DT = 10 \lg \frac{\text{刚好完成某种职能时的信号功率}}{\text{水听器输出端上的噪声功率}}$$

由检测阈定义可知, 对于完成同样职能的声纳来说, 检测阈值较低的设备, 其处理能力较强, 其性能也较好。

## § 0-7 声纳方程

以上介绍的声纳参数, 从能量的角度定量描述了海水介质、声纳目标和声纳设备所具有的特性和效应, 如果我们从声纳信息流程出发, 按照某种原则将它们组合在一起, 那么, 我们就得到了一个将介质、目标和设备的作用综合在一起的关系式。它综合考虑了水声所特有的各种现象和效应对声纳设备的设计和应用所产生的影响。这个关系式就是所谓的声纳方程, 它在声纳设计和声纳性能预报中是十分有用的。

### 基本考虑

大家知道，声纳总是工作在背景干扰的环境中，工作时，既接收到有用的声纳信号，同时也接收到背景干扰信号。如果接收信号级与背景干扰级之差刚好等于设备的检测阈，即

$$\text{信号级} - \text{背景干扰级} = \text{检测阈} \quad (0-12)$$

(背景干扰级的含义是：并非全部背景干扰都对设备的工作起干扰作用，只有设备工作带宽内的那部分背景噪声才起干扰作用)，根据检测阈的定义可知，此时设备刚好能完成预定的职能。反之，若(0-12)式的左端小于右端时，设备就不能正常工作。所以通常将(0-12)式作为组成声纳方程的基本原则。

### 主动声纳方程

根据主动声纳信息流程及等式(0-12)，我们可以方便地写出声纳方程。考虑一个收发合置的主动声纳，其辐射声源级为SL，并设接收阵的接收指向性指数为DI，由声源到目标的传播损失为TL，目标的目标强度为TS，时空处理器的检测阈为DT，背景干扰为环境噪声，在设备的工作带宽内，其声级为NL。由图0-4可知，由于声传播损失，声源级为SL的声信号到达目标时，其声级降为SL-TL；由于目标的目标强度是TS，由TS的定

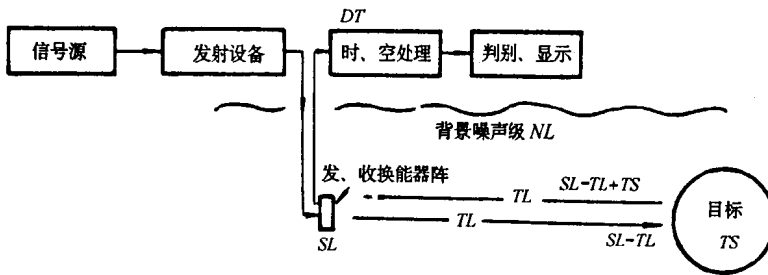


图0-4 主动声纳信号强度变化示意图

义可知，在返回方向上离目标声中心单位距离处在的声级为SL-TL+TS，此回声到达接收阵时的声级是SL-2TL+TS。SL-2TL+TS通常称为回声信号级。另一方面，背景噪声也作用于接收换能器，但它为接收阵接收指向性指数所抑制，起干扰作用的噪声级是NL-DI。这里我们指出，因为换能器的声轴总是指向目标的，所以，回声信号级不会被接收指向性指数压低。回声信号和噪声经换能器转换为电信号送至处理器，该信号的信噪比（以分贝表示）就是

$$(SL - 2TL + TS) - (NL - DI) \quad (0-13)$$

根据式(0-12)所示的原则，就可得到如下形式的主动声纳方程

$$SL - 2TL + TS - (NL - DI) = DT \quad (0-14)$$

我们称式(0-14)为主动声纳方程。

为了正确应用方程(0-14)，指出以下两点是有益的。其一，方程(0-14)适用于收发合置型声纳。对于收发换能器分开的声纳，声信号往返的传播损失一般是不相同的，所以，不能简单的用2TL来表示往返传播损失。其二，方程(1-14)适用于背景干扰为各

向同性的环境噪声情况。但是，对于主动声纳来说，混响也是它的背景干扰，而混响是非各向同性的，因而，当混响成为主要背景干扰时，就应使用等效平面波混响级 RL 替代各向同性背景干扰 NL-DI，方程 (0-14) 变为

$$SL - 2TL + TS - RL = DT \quad (0-15)$$

### 被动声纳方程

被动声纳的信息流程比主动声纳略为简单，主要表现为：首先噪声源发出的噪声不再需要往返程传播，而直接由噪声源传播至接收换能器（阵）；其次噪声源发出的噪声不经目标反射，所以，目标强度级 TS 不再出现；其三被动声纳的背景干扰一般总为环境噪声。考虑到以上的差异，基于被动声纳工作时的信息流程，我们可以得到被动声纳方程

$$SL - TL - (NL - DI) = DT \quad (0-16)$$

式中，SL 是噪声源辐射噪声的声源级，其余各参数的定义同主动声纳方程。

## § 0-8 组合声纳参数

在本节的声纳参数部分，我们定义了声纳参数，但在实际工作中，往往会遇到若干个声纳参数的组合项，这些组合量具有明确的物理意义，工作中使用起来颇感方便，例如，可以通过测量某几个组合声纳参数来检验设备的工作状态。水声学中，通常将几个声纳参数的组合量称为组合声纳参数，表0-2是常用组合声纳参数一览表。

表0-2 常用组合声纳参数一览表

名称	表达式	物理意义
回声信号级	$SL - 2TL + TS$	加到主动声纳接收换能器(阵)上的回声信号的声级
噪声掩蔽级	$NL - DI + DT$	工作在噪声干扰中的声纳设备正常工作所需的最低信号级
混响掩蔽级	$RL + DT$	工作在混响干扰中的声纳设备正常工作所需的最低信号级
回声余量	$SL - 2TL + TS - (NL - DI + DT)$	主动声纳回声级超过噪声掩蔽级的数量
优质因数	$SL - (NL - DI + DT)$	对于被动声纳,该量规定了最大允许传播损失;在主动声纳中,当 $TS=0$ 时,该量给定了最大允许双程传播损失
品质因数	$SL - (NL - DI)$	

## § 0-9 声纳方程的应用及其限制

经典的声纳方程是建立在声纳系统平均能量的基础上的，而且，某些参数散布在很大的范围内，因而，它的应用受到了一定的局限。尽管如此，经典的声纳方程以简洁、明