



国防特色教材·船舶与海洋工程

水声学原理

SHUISHENGXUE YUANLI

(第二版)

刘伯胜 雷家煜 主编

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社



国防特色教材·船舶与海洋工程

水声学原理

(第二版)

刘伯胜 雷家煜 主编

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书全面介绍了海洋中的声传播现象、规律及机理。全书共8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。本书第1章介绍了声呐方程,它是本书的主干线,方程中的每一项(除检测阈和换能器指向性)都在后续章节中进行了讨论。

本书适用于高等学校水声工程专业的本科生、研究生教学使用,也可供水声工程专业和相关专业的科技人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

水声学原理/刘伯胜,雷家煜主编—2版.—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009.8

ISBN 978-7-81133-604-7

I.水… II.①刘…②雷… III.水声学原理
IV.O·16

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第003633号

水声学原理

主编 刘伯胜 雷家煜

责任编辑 薛力

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街124号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

肇东粮食印刷厂 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:20.25 字数:416千字

1993年12月第1版 2010年3月第2版 2010年3月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-81133-604-7 定价:50.00元

修订说明

根据国防科技工业局“十一五”教材规划的安排,编者对本书进行了修订,旨在使其更好服务于水声工程专业本科生、硕士研究生的培养。本书于1993年出版,至今已使用了15年,根据使用过程中师生的反映,再考虑到近年来科学技术的飞速发展,编者深感对原书进行修订的必要性。本书的修订,得到原国防科工委有关部门的批准,也征得了原主编之一雷家煜先生的同意。

本次修订对原书作了必要的改动,主要体现于以下六个方面:

1. 力求反映近年来水声科技取得的长足进步,修订中增加与之相适应的内容;
2. 每章增加了习题,希望能有助读者对于书中内容的理解;
3. 规范了参考文献的应用,这里需要说明,部分文献中物理量的单位不是标准计量单位,但是考虑到读者阅读方便,修订中未作改动,仍沿用原单位;
4. 改正了原书中的笔误、乃至错误;
5. 为帮助读者理解书中内容,书中列举了若干例子,例中参数为随意设定,不具实际参考意义;
6. 限于篇幅,本次修订删除了原第1章“声学基础”,读者如有需要,可阅读“声学”专著。

西北工业大学航海学院孙进才教授,哈尔滨工程大学水声工程学院孙辉教授审阅了本书修订稿,提出了有益的意见和建议。本次修订中,得到薛睿硕士和时洁、宋海岩、张之猛博士的大力帮助。还有,在以往的教学工作中,师生们也提出了若干有益的意见。哈尔滨工程大学研究生院培养处和哈尔滨工程大学出版社的有关人员,为本书的出版做了大量工作。在此,修订者一并向他们表示衷心地感谢!

“水声学原理”涉及海洋中声传播的方方面面,内容十分丰富。限于水平,修订者深感在知识的广度和深度方面均存在不足,书中不当和错误之处仍在所难免,敬请使用本书的广大师生和读者批评、指正。

编者
2009年6月

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、硕士研究生的教学需要而编写的。

“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过程中,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 月原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、声呐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 8 章,除第 1 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呐设备工作的影响。有关声呐方程的内容,安排在第 1 章,它是本书的主干线,对其中的每个参数都设章进行了专门讨论(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 1 章、第 5 章、第 6 章和第 7 章由刘伯胜编写;第 2 章、第 3 章、第 4 章和第 8 章由雷家煜编写。全书由刘伯胜统稿。

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,敬请使用本书的兄弟院校师生和广大读者批评、指正。

编 者

1993 年 12 月

目 录

绪论	1
第 1 章 声呐方程	3
1.1 声呐及其工作方式	3
1.2 声呐参数	4
1.3 声呐方程	10
1.4 组合声呐参数	11
1.5 声呐方程的应用及注意事项	12
1.6 声源辐射功率增大的限制	15
1.7 矢量水听器及其信号处理基础	17
本章习题	21
本章参考文献	22
第 2 章 海洋的声学特性	23
2.1 海水中的声速	23
2.2 海水中的声吸收	30
2.3 海底及其声学特性	36
2.4 声波在介质层上的反射	44
2.5 声波在流-固界面上的反射	47
2.6 海面及其声学特性	51
2.7 海洋内部的不均匀性	55
本章习题	57
本章参考文献	58
第 3 章 海洋中的声传播理论	60
3.1 波动方程和定解条件	60
3.2 波动声学基础	66
3.3 射线声学基础	76
3.4 分层介质中的射线声学	86

3.5 分层介质中的声线图绘制	94
3.6 声场反演及其应用	100
本章习题	101
本章参考文献	102
第 4 章 典型传播条件下的声传播	103
4.1 邻近海面的水下点源声场	103
4.2 表面声道中的声传播	110
4.3 深海声道中的声传播	127
4.4 深海负梯度和负跃层声传播	135
4.5 均匀浅海声传播	140
4.6 浅海表面声道中的声传播	148
本章习题	151
本章参考文献	152
第 5 章 声波在目标上的反射和散射	154
5.1 声呐目标的目标强度	154
5.2 常见声呐目标 TS 值的一般特征	156
5.3 TS 值的实验测量和常见目标 TS 值	163
5.4 目标回声信号	169
5.5 刚性球体的散射声场	174
5.6 声波在弹性物体上的散射	179
5.7 壳体目标上的回声信号	186
5.8 赫姆霍茨积分方法求解散射声场	190
5.9 声散射逆问题简介	194
本章习题	198
本章参考文献	198
第 6 章 海洋中的混响	200
6.1 海洋混响基本概念	200
6.2 体积混响	204
6.3 海水中气泡的声学特性	210
6.4 海面混响	215
6.5 海底混响	220
6.6 混响的统计特性	224

6.7 混响的预报	231
本章习题	233
本章参考文献	234
第 7 章 水下噪声	235
7.1 描述噪声的几个基本物理量	235
7.2 海洋环境噪声	239
7.3 航船噪声理论模型	249
7.4 风成噪声理论模型	254
7.5 舰船和鱼雷的辐射噪声	263
7.6 舰船、潜艇和鱼雷的自噪声	274
7.7 舰船噪声控制简介	280
本章习题	282
本章参考文献	283
第 8 章 声传播起伏	285
8.1 海水介质温度随机不均匀性和声传播起伏	285
8.2 介质随机不均匀的声散射引起的声传播起伏	288
8.3 随机界面上的声散射和声传播起伏	299
8.4 内波和声传播起伏简介	304
8.5 声传播起伏对声呐测量精度的影响	307
本章习题	313
本章参考文献	313

绪 论

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,主要研究携有某种特定信息的声波在水中的产生、传播和接收。水声物理和水声工程是水声的两个研究领域,它们相辅相成,互相促进。水声物理是水声工程应用的理论基础,为工程设计提供理论依据;同时,水声工程技术的不断发展和广泛应用,又对水声物理不断提出新的内容和要求,并为水声物理的研究提供新的手段,从而促进水声物理的发展。

水声学的研究对象

水声学的研究对象包含了海水介质声学特性、声波在海水介质中的传播特性和水声目标声学特性研究三个方面。前者主要研究海水介质及其边界(海底、海面)的声学特性,如海水介质中的声传播速度,海水中的声吸收,海洋环境噪声和海洋混响,海底、海面上声波的反射和散射特性等;声传播特性研究主要讨论声波在海水介质中传播的机理、现象和规律,及其对水声设备工作的影响等内容;目标特性研究是指目标的声反(散)射特性和辐射特性等内容的研究。由以上内容可以看出,水声学作为近代声学的一个重要分支,有其自身的理论体系和研究内容,是一门独立的学科。但它又与水声工程有着紧密的联系,是水声工程的理论基础,为工程设计提供指导原则、方案和合理的设计参数;反过来,水声工程的实践又为水声学的研究不断提出新的研究课题和研究手段,从而促进了水声学的完善和发展。

水声学是一门理论性很强的学科,建立理论模型和进行仿真研究是水声学的基本研究方法。但水声学又是一门实验性很强的学科,它的建立和发展,离不开大量深入细致的实验研究。开展水声科学考察,进行有特定目的的各种海上试验,采集水中声场信息和海洋环境数据,各种理论模型的实验验证,都是通过实验测量来完成的,因此它也成为水声学的基本研究方法。

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、技术的发展程度,水声学也不例外,开始是由于军事上的需要,才引起了人们对水声学的重视,促进了水声学的发展。自然,水声学的任何新成果,也毫无例外地首先应用于军事部门。目前,声呐作为水下“耳目”,是舰艇,特别是潜艇必不可少的一种观通设备。声呐设备在军事上的应用是多种多样的,反潜、通信、导航、定位、鱼雷制导、水雷引爆等都是声呐的实际应用。

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,这就促进了声呐技术在民用方面的发展,并逐步形成了与军用声呐并列的独立体系。声呐在民用方面的用途也是多种多样的,如用于渔业的鱼探仪,用于导航的多普勒导航声呐,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。

第1章 声呐方程

声呐系统的工作,一般由三个基本环节组成,声源(声信号发射系统或被探测目标)、海水信道和接收设备,它们决定了声呐设备性能的优劣。这三个环节中的每一个,又需要用若干参数定量描述其特性,这些参数称为声呐参数。根据声呐系统的信号流程,将声呐参数有机组合起来,就得到声呐方程。声呐方程从能量角度综合了声呐参数对声呐性能的影响,它是声呐设计和声呐合理使用的依据,在水声工程中有十分重要的应用。

1.1 声呐及其工作方式

“声呐”一词是 Sonar 的音译,它是英文 Sound Navigation and Ranging 的略语。目前,声呐一词具有了更广泛的含义,凡是利用水下声信息进行探测、识别、定位、导航和通信的系统,都广义地称之为声呐系统。按声呐的工作方式来区分,它通常又分为主动工作系统和被动工作系统,习惯上称为主动声呐和被动声呐。

图 1.1 是主动声呐的信息流程示意图。主动声呐工作时,发射系统向海水中发射带有特定信息的声信号,称为发射信号,此信号在海水中传播时遇到障碍物,如潜艇、水雷、鱼雷、冰山、暗礁(它们通常被称为声呐目标)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”信号传播到接收水听器(阵)处,并由它将声信号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、运动参数及其某些物理属性,最后显示器显示判决结果。这就是主动式声呐的完整信息流程。

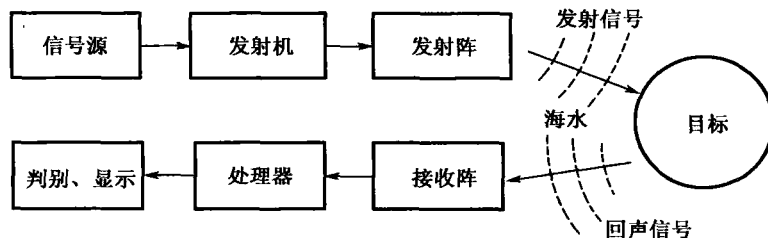


图 1.1 主动声呐信息流程示意图

图 1.2 是被动声呐的信息流程示意图。被动声呐没有专门的声源发射系统。图 1.2 中的

声源部分是指被探测目标,如鱼雷、潜艇等运动目标在航行中所辐射的噪声(所以,也有将被动声纳系统称为噪音声纳站的),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、时空处理等步骤,就本质而言,它和主动声纳是基本相同的,这里不再详述。

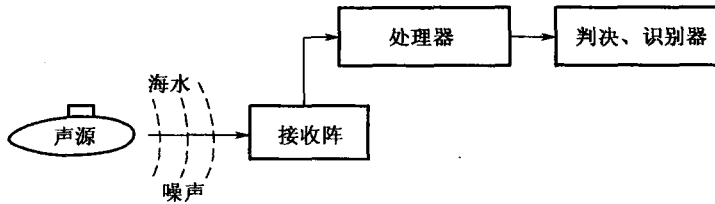


图 1.2 被动声纳信息流程示意图

1.2 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,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播、处理和判决,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。下面将首先给出各个声纳参数的定义,并简要说明其物理意义,然后在下节将它们组合成声纳方程。

1.2.1 主动声纳的声源级 SL

1. 声源级的定义

声源级用来描述主动声纳所发射的声信号的强弱,它定义为

$$SL = 10 \lg \frac{I}{I_0} \Big|_{r=1} \quad (1.1)$$

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 1 m 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 $0.67 \times 10^{-22} \text{ W/cm}^2$ 。以下如无特别说明,参考声强均指此值。

所谓声源的声学中心,通常理解为有限尺寸的发射器,其辐射声场的远场总是以球面波形式传播的,因此从远场来观察时,这一球面波好象是由发射器上或其附近的某点发出的,这一点便称为发射器的等效声学中心。对于对称性良好(球形、柱形)的发射器,其等效声学中心常与对称中心相一致,如活塞式发射器,活塞面中心可看作为等效声学中心。一般情况下,特别是发射器尺寸大于波长,或发射器几何形状比较复杂时,其等效声学中心需通过专门的测量才能确定。

2. 发射器的发射指向性指数

为了有效地提高主动声呐的作用距离,发射换能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),其余方向上则仅有少量的发射声能,图1.3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,这对于后续的信号处理是非常有利的。对于一部声呐设备来说,只要接收器输出端输出信号的信噪比达到预定的“门限值”,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,对于同一“门限值”,就有可能提高设备的作用距离。发射器的上述“指向”特性,通常用发射指向性指数 DI_T 来描述,它定义为:设有两个发射相同声功率的发射器,一个具有发射指向性,另一个则无发射指向性,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方向上测得的声强度为 I_D ,如图1.3所示,则指向性发射器的发射指向性指数 DI_T 定义为

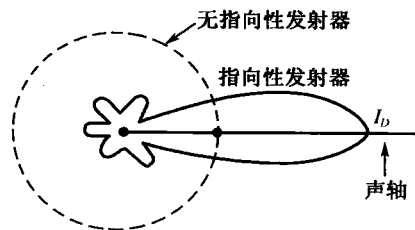


图1.3 发射指向性图案

$$DI_T = 10 \lg \frac{I_D}{I_{ND}} \quad (1.2)$$

由式(1.2)可见,发射指向性指数 DI_T 实际上就是在相同的距离上,指向性发射器声轴方向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,近代主动声呐的发射器,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。

3. 声源级与发射器辐射声功率

发射器的声源级反映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

$$I|_{r=1} = P_a/4\pi \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1.3)$$

将式(1.3)代入式(1.1),并注意到 $I_0 = 0.67 \times 10^{-22} \text{ (W/cm}^2\text{)}$,则可得到

$$SL = 10\lg P_a + 170.77 \quad (1.4)$$

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 $P_a \text{ (W)}$ 、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(1.4),可得其声源级为

$$SL = 10\lg P_a + 170.77 + DI_T \quad (1.5)$$

由式(1.5)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,船用声呐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 $10 \sim 30 \text{ dB}$,所以其声源级范围约为 210 dB 到 240 dB 。

为了增大主动声呐的作用距离,一个有效途径是提高声源级,使回声出现在混响背景上,而不是出现在噪声背景上。但是,增大主动声呐的辐射声功率,除遇到工程技术上的困难外,还将受到空化效应和互作用效应的限制,详见本章 1.6。

1.2.2 被动声呐的声源级 SL_1

由图 1.2 可知,被动声呐本身并不辐射声信号,它是接收被测目标的辐射噪声来实现目标检测的,因此目标的辐射噪声,就是被动声呐的声源。工程上,用声源级来描述目标辐射噪声的强弱,它被定义为接收水听器声轴方向上、离目标声学中心单位距离处测得的目标辐射噪声强度 I_N 和参考声强 I_0 之比的分贝数

$$SL_1 = 10\lg \frac{I_N}{I_0} \quad (1.6)$$

虽然 SL_1 也称为声源级,但它只适用于被动声呐。

关于声源级 SL_1 ,需要注意以下两点。首先,目标辐射噪声强度的测量应在目标的远场进行,并修正至目标声学中心 1 m 处。其次,式(1.6)中的 I_N 指的是接收设备工作带宽 Δf 内的噪声强度。如带宽 Δf 内的噪声强度是均匀的,则有

$$SL_2 = 10\lg \left(\frac{I_N}{I_0 \Delta f} \right) \quad (1.7)$$

式中, SL_2 称为辐射噪声谱级,它也是一个广为采用的物理量。

1.2.3 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,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

$$TL = 10\lg \frac{I_1}{I_r} \quad (1.8)$$

式中, I_1 是离声源等效声中心 1 m 处的声强度, I_r 是距声源 r 处的声强度。式(1.8)定义的传播损失 TL 值将总为正值。

1.2.4 目标强度 TS

对于主动声呐而言,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、波形等因素有关外,还与目标自身的特性,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。这一现象反映了目标反射本领的差异。水声技术中,用目标强度定量描述目标反射本领的大小,它定义为

$$TS = 10\lg \left. \frac{I_r}{I_i} \right|_{r=1} \quad (1.9)$$

式中, I_i 是目标处入射平面波的强度; $I_r|_{r=1}$ 是在入射声波相反方向上、离目标等效声中心 1 m 处的回声强度。

这里需要特别说明,工程上往往遇到 $TS > 0$ 的情况,这并不表示回声强度高于入射声强度,其原因仅是参考距离选用 1 m 所致。

目标强度是空间方位的函数。在空间的不同方位,目标的回波强度是不一样的,因而目标强度也是不一样的。本书约定,如无特别说明,则回波所指为入射方向相反方向上的回声,称为目标反向回波。

1.2.5 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,对声呐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

$$NL = 10\lg \frac{I_N}{I_0} \quad (1.10)$$

式中, I_0 是参考声强, I_N 是测量带宽内的噪声强度。如测量带宽为 1 Hz,则这样的 NL 称为环境噪声谱级,它是工程上的一个常用量。

海洋环境噪声是一个随机量,为了使用方便,工程上往往将其假定为是平稳的,各向同性的,并具有高斯型分布的函数。这仅是一种近似处理,实际的海洋环境噪声并不严格满足以上

假定。

1.2.6 等效平面波混响级 RL

对于主动声呐来说,除了环境噪声是背景干扰外,混响也是一种背景干扰。混响研究指出,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,引入参数“等效平面波混响级” RL 。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恰好相等,那么,就用该平面波的声强级来度量混响场的强弱,并定义等效平面波混响级 RL 为

$$RL = 10\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1.11)$$

式中, I 是平面波强度, I_0 是参考声强。

1.2.7 接收指向性指数 DI

与发射换能器(阵)总具有一定的发射指向性一样,接收换能器(阵)一般也有指向特性,称为接收指向性指数,定义为

$$DI = 10\lg \frac{\text{无指向性水听器产生的噪声功率}}{\text{指向性水听器产生的噪声功率}} \quad (1.12)$$

设有两个水听器,一个无指向性,另一个有指向性,且其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噪声功率是

$$R_N = m \int_{4\pi} I_i d\Omega = 4\pi m I_i \quad (1.13)$$

式中, m 是与水听器灵敏度有关的比例常数, $d\Omega$ 是元立体角。在同一噪声场中,指向性水听器产生的噪声功率是

$$R_D = m \int_{4\pi} I_i b(\theta, \varphi) d\Omega = m I_i \int_{4\pi} b(\theta, \varphi) d\Omega \quad (1.14)$$

其中, $b(\theta, \varphi)$ 是归一化的声束图案函数, θ, φ 是空间方位角。根据指向性指数的定义,由式(1.13)和(1.14)可得

$$DI = 10\lg \frac{R_N}{R_D} = 10\lg \left(\frac{4\pi}{\int_{4\pi} b(\theta, \varphi) d\Omega} \right) \quad (1.15)$$

由此可见,指向性水听器的指向性指数,其实就是在同一各向同性噪声场中,无指向性水

听器输出的噪声功率,和具有同样轴向灵敏度的指向性水听器输出的噪声功率的比值,并用分贝表示。

顺便指出,只有对各向同性噪声场中的完全相干信号,参数 DI 才有意义,对于具有其他方向特性的信号和噪声场,需用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专著。

接收水听器(阵)的接收指向性指数,原则上需通过积分式(1.15)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值。表 1.1 列出了四种简单形状基阵的 DI 表达式,给出了 DI 与基阵尺寸的函数关系。

表 1.1 简单几何形状换能器的指向性指数

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 $d, n=2$	$\left[\frac{\sin(2\pi d \sin\theta/\lambda)}{2 \sin[\pi d/\lambda \sin\theta]} \right]^2$	$\frac{2}{1 + \left[\frac{\sin(2\pi d/\lambda)}{2\pi d/\lambda} \right]}$

1.2.8 检测阈 DT

声呐设备的接收器工作在噪声环境中,既接收声呐信号,也接收背景噪声,相应地其输出也由这两部分组成。实践表明,这两部分比值的大小对设备的工作有重大影响,即如果接收带宽内的信号功率与工作带宽内(或 1 Hz 带宽内)的噪声功率的比值较高,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。工程上,将工作带宽内接收信号功率与工作带宽(或 1 Hz 带宽内)的噪声功率的比值(用分贝表示)称为接收信号信噪比,它被定义为

$$SNR = 10\lg \frac{\text{信号功率}}{\text{噪声功率}}$$

在水声技术中,习惯上将设备刚好能完成预定职能所需的处理器输入端的信噪比值称为检测阈,它定义为

$$DT = 10\lg \frac{\text{刚好完成某种职能的信号功率}}{\text{水听器输出端上的噪声功率}} \quad (1.16)$$

式(1.6 所示)即信号声级高出噪声声级的分贝数。