

水下噪声原理

〔美〕D·罗斯 著

海洋出版社

水下噪声原理

[美] D.罗斯 著

《水下噪声原理》翻译组 译

关定华 校

海洋出版社

1983年·北京

内 容 简 介

水下噪声是影响声呐工作性能的一个重要因素，在海洋研究和声学探测以及船舶工程中，早已深受国内外科学家的重视。本书系统地论述了水下噪声的产生原理，内容包括噪声的基本原理和液体中声波的基本概念以及各种产生水下噪声的机理。

本书适应大专院校师生、科研人员、工程技术人员及从事科学组织工作人员参阅。

MECHANICS OF UNDER WATER NOISE

水下噪声原理

[美] D. 罗斯 著

《水下噪声原理》翻译组 译

关定华 校

海洋出版社出版

(北京复兴门海贸大楼)

建国门外印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1983年1月第1版

1983年1月第1次印刷

开本：787×1092 1/32

印张：16 1/8

字数：300,000

印数：1—1,200

统一书号：13193·0084

定价：3.20元

中译本前言

水下噪声的研究近年来发展很快,它对海洋研究、水下声探测和船舶工程都有重要的意义。水下噪声牵涉问题范围很广,与流体力学、空气动力学、热力学、机械学、振动学、水声学、海洋物理学都有密切关系。多年来不同学科的科学从不同角度用不同方法对水下噪声进行了广泛的研究,发表了大量论文。有关的文献散在不同领域的杂志里。但目前除本书之外,还没有类似的专著。要了解这方面的进展就不得不去翻阅大量的文献。Donald Ross 从事水下噪声研究和教学工作多年,他写的这本专著可供与水下噪声有关的工作者以及大专院校师生参考。

本书共分十章。前五章介绍声波、声辐射、结构振动等方面的基本原理,后五章介绍与船舶机械、螺旋桨、空化、流动有关的噪声的产生机理,也介绍了一些降低噪声的措施。本书概括了大量文献资料。从内容的广度和深度看来,原著是一本值得阅读的水下噪声参考书。为适应各方面的需要,我们将其翻译出版。

但本书仍存在一些问题和缺点。由于引用文献庞杂、来源不同,作者虽做了很大努力,但在符号和论述方法上仍不能完全统一,有些图表、公式和论述也存在错误和问题,在中译本中我们已尽可能加以改正,在个别地方加了脚注。有些专门问题介绍得过于简单,有兴趣的读者可以阅读引用的文献。

主要参加翻译的有中国科学院声学研究所的陈跃明、于永源、颜保缺、赵克勇和上海交通大学的江可宗、柳康宁、朱月锐、姚肇康、汤福坤、吴君明、高卫国等同志。

由于水平所限，译文中难免仍有错误和不妥之处，望读者指正。

关定华

1982年

前 言

我和我的许多水声界同事一样，在进入水声领域时，并未受过这一专业的任何正规教育，而只具备物理学和工程学的基础知识。教课是学习一门学科的好方法，因此我曾经尽可能多地参与各种正式教学和专业性会议。在过去的十六年中，除了教产业部门资助的商业性课程以外，我一直在麻省理工学院、天主教大学、美国大学和加州大学圣地亚哥分校从事组织和教授研究生的水声学课程。

目前，虽然已有不少有关水声学各个领域的书籍，但还没有一本深入地论述水下噪声的书。当时海军研究署声学分部主任马维·拉斯克 (Marvin Lask) 意识到这点，并且了解我对水声学的这一方面有特别的兴趣，他建议我写一本有关这一专题的书，作为该领域工作人员的自学课本和参考书。

这本书是我三十年来研究和教学工作的总结。按照与海军研究署签订的合同，写完本书花了三年多时间。

我的做法是强调噪声产生、通过结构传递以及向海洋辐射等基本机理的物理解释。尽管这些现象中的相当一部分很复杂，但大多数还是可以用一些既强调主要机理又有十分重要的实际应用的直接方法来解释的。

本书的章节是根据基本的声源机理来安排的。在讨论有关的基本现象之后，再说明各种实际情况。因此，在第四章中，紧接在与振荡气泡产生噪声有关的飞溅噪声之后讨论风成海洋环境噪声。同样，把第八章中的舰船产生的环境噪声

放在舰船噪声的主要来源——螺旋桨空化噪声源之后。隔振和结构阻尼的工程问题包括在论述结构振动的第五章中。而经常涉及到由湍流引起的板激励以及随之而产生辐射的流噪声，则在研究由板弯曲振动而产生辐射的第六章中加以讨论。我试图阐述这一领域的全部内容，同时也特别注重我个人最为熟悉的那些课题。

水声学中的许多工作是保密的，这部分当然无法提及了。书中所讨论的大多数论题是我广泛参阅过的各种公开刊物发表的文章内容。

除了声学以外，我还引用流体力学、空气动力学、热力学、电气工程、机械工程、船舶工程以及造船学等学科的资料。由于涉及范围很广，因而选择合适的符号来表示出现在各种公式中的总数达450个以上的不同参量是相当困难的。尽管我谨慎地避免混淆，但对于熟悉其它领域而不太熟悉声学的读者仍然会感到不方便。在这种情况下，使用附录A中的符号和缩写词表将会有所帮助。

本书较之我平日的著作更为流畅易读，应完全归功于南希·爱·罗斯 (Nacy I. Ross) 所作的编审工作。

D. 罗斯

1976年7月于加利福尼亚州圣地亚哥

目 录

第一章 引言	1
1.1 噪声：不需要的声音	1
1.2 分贝和声级	6
1.3 频谱的意义	13
1.4 被动声呐方程	14
1.5 某些数学问题	16
参考文献.....	25
第二章 液体中的声波	27
2.1 波的描述	27
2.2 流体中声波动方程	32
2.3 平面声波	42
2.4 球面波	45
2.5 介质界面上的透射	51
2.6 大振幅效应	57
参考文献.....	59
第三章 声辐射原理	61
3.1 噪声源的一般特性	61
3.2 声发生的普遍方程	64
3.3 一般球面声源	68
3.4 流体动力声源	69
3.5 运动声源	74
参考文献.....	76
第四章 脉动体声源（单极子）的辐射	78

4.1	均匀脉动球源	78
4.2	单极子辐射	83
4.3	液体中的气泡发声	84
4.4	飞溅声	93
4.5	两个相等的单极子辐射	97
4.6	近表面声源	104
4.7	线列阵	109
4.8	刚性活塞辐射	119
4.9	船体开孔辐射	128
4.10	任意物体辐射	130
4.11	船体辐射	134
	参考文献	137
第五章	结构振动	145
5.1	结构声	145
5.2	固体中的波动	146
5.3	梁的弯曲方程	151
5.4	弯曲波速度	158
5.5	弯曲共振	166
5.6	变截面梁	176
5.7	非共振结构的受迫振动	182
5.8	共振结构的受迫振动	189
5.9	结构振动的衰减	192
5.10	流体负载	202
5.11	船体的弯曲共振	205
	参考文献	207
第六章	板弯曲振动的辐射	215

6.1	板的弯曲振动	215
6.2	流体负载	221
6.3	点激励的无限板	229
6.4	有限板辐射	235
6.5	通过结构的传递	244
6.6	边界层流噪声	250
	参考文献	267
第七章	空化	277
7.1	引言	277
7.2	液体的抗张强度	279
7.3	单气泡的生长和崩溃	282
7.4	单气泡空化噪声	296
7.5	宽带空化噪声	304
7.6	空化的其它效应	305
7.7	流体动力产生的空化	307
7.8	水翼空化	318
7.9	水力空化	330
7.10	水下爆炸	333
	参考文献	337
第八章	螺旋桨空化噪声	349
8.1	螺旋桨空化类型	349
8.2	叶面空化噪声	351
8.3	均匀来流中的螺旋桨	358
8.4	尾流中工作的螺旋桨	365
8.5	潜艇螺旋桨空化	372
8.6	水面舰船的辐射噪声	375

8.7 舰船产生的环境噪声	386
参考文献	394
第九章 脉动力声源 (偶极子) 的辐射	398
9.1 偶极子声源	398
9.2 螺旋桨叶片的单频声	404
9.3 旋涡散发声	413
9.4 风扇和鼓风机噪声	432
9.5 螺旋桨唱音	436
9.6 流激励的空腔共振	440
参考文献	442
第十章 机械噪声源	454
10.1 机械不平衡	454
10.2 电磁力脉动	457
10.3 碰撞声	459
10.4 往复机的活塞拍击噪声	463
10.5 轴承噪声	481
参考文献	483
附录 A 符号表	487
附录 B 分贝运算	502

第一章 引 言

1.1 噪声：不需要的声音

当人们使用噪声这一名词时，往往指的是喷气式飞机从头上掠过时发出的声音，卡车在附近公路上驶过产生的隆隆声，或者邻居小孩的吵闹声。这些声音是令人讨厌的，它给人们带来烦恼，干扰人们的谈话或睡眠，甚至妨碍人们的思考。噪声是一种不需要的声音，它干扰系统的正常功能。噪声的严重性和必需加以控制的程度，与其说是取决于噪声级，不如说是取决于噪声对其它功能的干扰量。

水下噪声

水下噪声是限制海军装备性能的水下声音。尤其潜艇特别容易受到它的限制，因为潜艇的辐射噪声会把自己的存在暴露给敌人。另一方面，潜艇还要靠声信号来通讯，还要用声呐来探测敌人，而这些功能都受到噪声的限制。

在实现指定功能方面，潜艇并不是受到噪声严重限制的唯一的海军装备。水面舰船辐射的噪声也会把自己的存在暴露给敌方的潜艇，而且它和潜艇一样，声呐自噪声也会限制探测目标的能力。有时，水面舰船辐射的噪声还干扰其它舰船声呐的性能。受自噪声限制的另一种海军装备是被动式制导鱼雷，它是利用水面舰船或潜艇的辐射噪声来进行目标定位的。最后，像浮标这样安静的系统，它的性能也要受到海洋噪声的控制。

目前，大多数海军界人士都已认识到，噪声在海军作战中起着决定性的作用。他们在降低噪声和研究利用噪声方面进行了大量的工作。由于军事上的需要，当然大部分工作是保密的。但是，与噪声有关的现象都是物理学和力学的课题，在不泄露专门军事系统秘密的情况下，仍可以进行一般性的讨论。

噪声是不可避免的

根据热力学第二定律，任何有用的机械过程都必然会产生热。如果不产生热，那么人们就有可能制造永动机了。同时，任何作功的机械过程也必然会产生某些振动，从而至少会产生少量的噪声，这虽然不是众所周知的，但同样是事实。所以，噪声是机械作功的不可避免的副产品。伴随任何稳定作功的力，必然会产生微弱的不稳定或振动，而这种振动能传递到机器表面，并通过表面辐射声波。同样，当一个物体通过流体运动时，就会产生湍流。这种湍流运动不仅最终衰变为热，而且也会辐射少量的声波。只有在真空中才能实现作功而不发声。这使声学家们很容易想到修改众所周知的热力学第二定律，把声和热并列为机械过程中必然产生的副产品。

从不同机器辐射到空气中的声功率，小到1微瓦（小型风扇），大到几千瓦（飞机），甚至高达1兆瓦（大型火箭）。但是，水中的声音却要低得多。一艘低航速的现代化潜艇，它辐射的声功率约为10毫瓦；而水面舰船辐射的声功率一般为5—100瓦。如果考虑到水面舰船和潜艇航行用的机械功率通常高达数千马力的话，则不难算出，只有很少一部分机械功率转换成水下声音。

尽管舰船、潜艇和鱼雷辐射到水中的声功率较低，但不能认为这种水下噪声是毫无意义的。仅能辐射 1 瓦声功率的声源，也可在很远的地方被现代化的被动式声呐检测到，而同样功率的声源，在空气中只能传过几个街区。其差别的原因是，在水中很小的声功率就能有较大的声压。而声呐检测系统接收的正好是声压而不是声功率密度（声强）。换句话说，决定水声设备检测能力的是声压级而不是声功率级

声转换效率

在分析噪声机理中，声转换效率是一个有用的概念，它定义为辐射声功率与声源的机械功率之比，即

$$\eta_{\text{声}} \equiv \frac{\text{声功率}}{\text{机械功率}} = \frac{W_{\text{声}}}{W_{\text{机械}}} \quad (1.1)$$

这一比值的最大用途是用来区分噪声源，因为不同的发声机理具有不同的声转换效率。

水下的声转换效率比在空气中的要低得多，水下声源的声转换效率通常低到 10^{-8} ，而在空气中的转换效率经常高达 10^{-4} 至 10^{-2} 。两种介质的这种差别是由它们的相对可压缩性造成的，水的可压缩性比空气要小得多，正是由于介质有可压缩性才会传播声音，同样的机械功率在空气中产生的声功率比在水中要来得大。

量度可压缩性的相对重要程度的参数是马赫数 M ，它定义为相应的机械速度与声速之比：

$$M \equiv \frac{U}{C} \quad (1.2)$$

如果一个介质是完全不可压缩的，则其声速就是无限大，而马赫数总为零。因此，尽管水在许多场合可以看作是

不可压缩的，实际上它仍有微弱的可压缩性，而与它有关的马赫数尽管很低，但还是存在的。第三章关于声辐射机理将告诉我们，声转换效率通常可用马赫数的函数形式来表示：

$$\eta_{声} \sim M^n \quad (1.3)$$

其中指数 n 等于或大于 1。水下低的声转换效率与它的马赫数较低有关。

在处理许多噪声源问题时，有效的方法是把噪声的发生过程分为三部分：振动运动的产生、把振动传递到辐射面和声辐射进入介质。因此，声转换效率可以用三个过程的转换效率的乘积来表示：

$$\eta_{声} = \eta_{振动} \cdot \eta_{传递} \cdot \eta_{辐射} \quad (1.4)$$

最后一项，即辐射效率是由马赫数控制的，在水与空气中它的差别最大。其它两项通常与流体介质无关。显然，总的声转换率总是低于辐射效率的。

噪声控制

企图消除机械系统的一切噪声是不切实际的，也是不经济的，甚至是不必要的。噪声控制是一门技术，它首先考虑减噪的必要性，然后再按照经济和实用情况来把噪声级限制到可接受的程度。因此，对基本的噪声机理的理解，有助于成功地进行噪声控制。

(1.4) 式可以作为了解噪声控制原理的指导原则。要实现降低噪声有三种不同的途径：

1. 减少声源机械功率中转换成振动功率的那一部分，或选用额定机械功率比较低的机器；
2. 将声源与辐射面隔离，即降低振动传递效率；
3. 降低辐射面的辐射效率。

在这三种途径中的第二种，即把声源与辐射面隔离，通常是最容易做到的。降低声源的噪声往往需要改变机械系统的设计，而减少辐射效率可能需要采用大量的抗辐射被敷层。尽管减噪的问题本身并不是本书的宗旨，但本书叙述了有关噪声控制的许多问题，读者可对减噪方法有一些理解。

水下噪声的类型

水下噪声有许多不同的表现形式。在目前海军装备中遇到的各种基本噪声，还没有普遍采用的一致定义，而下述定义则是与美国标准协会的规定相一致的：

辐射噪声——辐射到水中的噪声，它可用被动式测听声呐在相当远的地方接收，并探测舰艇的存在。

环境噪声——当声呐平台或舰艇本身不存在时，声呐工作的介质中所具有的一切噪声。

平台噪声——在工作平台存在的情况下，安装在平台上的单个全向水听器所测出的噪声。从概念上讲，平台噪声应简单地归结于平台的存在所产生的噪声，而实际上，在测量平台噪声时总会包括海洋环境噪声的贡献。

声呐自噪声——与声呐平台及其水听器和前置放大器有关的噪声，通过声呐水听器阵测出。

声呐背景噪声——声呐基阵输出端的所有噪声，它限制着信号处理器的信号检测。声呐背景噪声包括介质的贡献，也包括平台噪声以及水听器，电缆和前置放大器所产生的任何噪声。（实际上，多数声呐自噪声测量都是背景噪声测量，因为一般情况下，客观环境不允许把这种测量与环境噪声测量分开，并且也没有估计介质贡献的实际方法）。

1.2 分贝和声级

声学测量几乎总是用分贝来表示，它是表示各种不同比值的对数单位。在声学中需要用对数来度量有以下两种原因：其一是在实际生活中声强的变化范围是由 10^{-9} 瓦/米²（勉强听懂的耳语声）到1千瓦/米²以上（在喷气机附近的声音）；其二是人耳对声刺激的响应接近于对数关系。因此，在声学测量中采用对数单位看来是合乎逻辑的。采用对数度量的并不是声学独有之点，这种方法在热力学中也很常见。声学中之所以会引起问题是由于参考量选取上的不一致。

分贝

早在20年代初期，关心网络功率传递性能的电讯工业工作人员就对分贝下了定义。他们发现，只要网络是线性的，输出功率就与输入功率保持一个恒定的比值。由于这一比值往往非常大，他们就用一个对数来表示，即

$$\text{传递比} = \lg \frac{W_2}{W_1} \quad (1.5)$$

它的单位是以电话的发明家贝尔的名字来命名的，简称为贝。为了避免用贝的分数，故采用它的十分之一作为单位，即分贝

$$\text{传递比} = 10 \lg \frac{W_2}{W_1} \quad (\text{分贝}) \quad (1.6)$$

在高阻抗网络普遍采用后，人们更关心的是电压比而不是功

1) 在数学上，以10为底的对数称为常用对数，用 \lg 表示，在此沿用，并与原文有异。 — 编辑