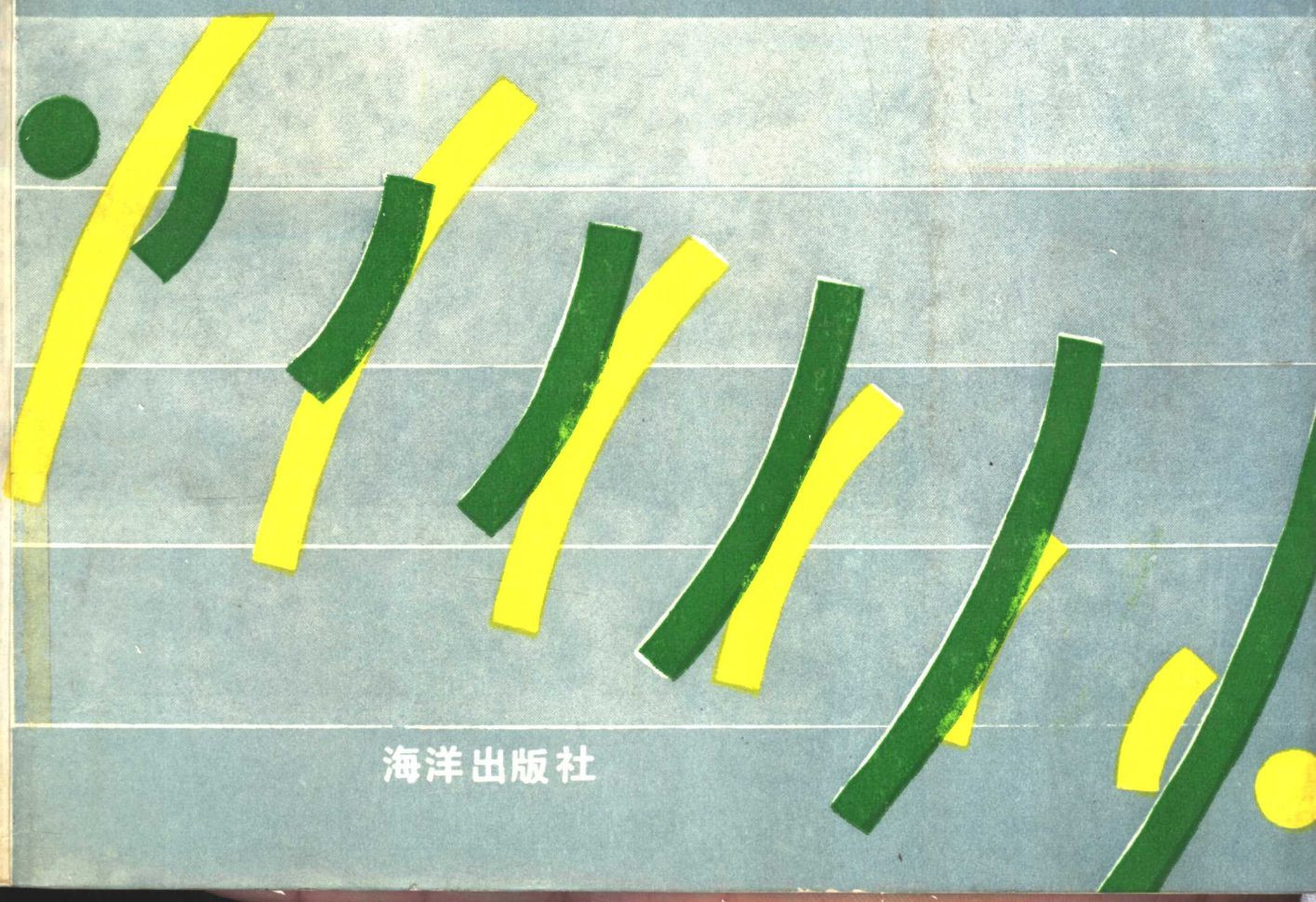


水声系统分析

[美] W.S.伯迪克 著

海洋出版社



水声系统分析

〔美〕W.S.伯迪克 著

方良嗣 阎福旺 等译

方良嗣 李启虎 阎福旺 校

海洋出版社

1992年 北京

内 容 提 要

本书以足够的深度介绍了水声原理、声信号产生及声信号处理,使有可能分析和最佳确定水声系统的性能。

全书共分十四章。首先研究声波的产生和传播及在海面和海底边界上产生的复杂效应,进而复习傅里叶方法、相关技术及随机过程,还研究了海洋环境噪声、声波束形成、目标特性及用统计假设方法计算系统检测性能和估计目标参量的理论,最后有选择地介绍了几个总的系统性能分析的例子。为适于学习、每章后还有独具特色的习题。

本书可供水声系统分析人员、海军军官参考,也可作为水声专业大学高年级学生或研究生的教材。

(京)新登字087号

责任编辑:陈泽卿

Underwater Acoustic System Analysis

水 声 系 统 分 析

〔美〕W.S.伯迪克 著

方良嗣 阎福旺 等译

方良嗣 李启虎 阎福旺 校

海洋出版社出版(北京复兴门外大街1号)

新华书店北京发行所发行 北京西三旗印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 18 字数: 400千字

1992年1月第一版

1992年1月第一次印刷

印数: 1~500

ISBN 7-5027-2129-0/P·176

定价: 13.00元

译 者 序

水声学是一门综合性的科学技术,在现代国防建设和国民经济建设中有着广泛的应用。它虽是在第二次世界大战期间发展起来的,但至今已涉及到较广的范围。发展到现在我们可以认为它包括水声物理、水声工程、水声标准和声呐战斗使用等四个方面。随着水声应用的不断提高,水声技术也在不断革新。由于系统工程发展的需要,所以在水声应用中十分强调系统的技术性能。水声设备的使用部门渴求优良的水声系统,从而要求水声设备的设计者有较强的系统设计能力。为了适应水声应用发展的需要,我们翻译了《水声系统分析》这本书,以供参考。

近年来水声系统分析的理论已逐步臻于完善,这一领域中的大部分有关论文多半散见于国外一些期刊杂志之中,或汇集于某些专著中,而W.S.伯迪克写的《水声系统分析》一书,比较系统地论述了水声系统分析的理论和技术,取材新颖,也有足够深度,更能集中反映近年来发展起来的系统分析方法。

书中不仅从理论上阐明水声系统分析的对象和方法,并举出了用于主、被动系统检测预报和参量估计的例子。书中列出大量参考文献,每章后都附有习题,这就为加深理解和运用书中提出的理论和方法提供了方便。

本书翻译中,方良嗣译了第一章、第七章、第九章、第十一章,阎福旺译了第二章、第四章、第十三章,李秀峰译了第三章,吴慧侠译了第五章,凌青译了第六章,朱明洪译了第八章,汲长利译了第十章,徐韬译了第十二章,何敏译了第十四章。阎福旺完成了全书的初校;方良嗣和李启虎完成了全书的最后校定。

在本书的出版过程中曾得到海洋出版社刘莉蕾同志的大力支持,在此示谢。

由于水平有限,加上译校时间较短,书中错误和不足之处在所难免,热忱希望读者批评指正。

译 者

一九八九年十月

英文版前言

本书的目的是以足够的深度介绍了水声学、声信号产生及声信号处理的基本知识,以便读者能够分析水声系统的性能并使之最优化。尽管主要打算用于系统分析人员,但介绍的题材一般也适用于高年级或研究生学习声学系统或系统分析技术。

水声系统的研究对象包括声学通讯、水面或水下目标的检测及定位、测深仪及用于地震研究的海底层剖面图。尽管每种应用各有其特殊的问题,但基本的物理现象是相同的,所以需要的系统分析技能是类似的。

水声系统分析需要了解海洋中压缩声波的产生和传播,及其在海面和海底边界上产生的复杂效应。这些内容包括在第一章历史评论之后的第二章至第五章中。

第六章至第九章是复习傅里叶方法、相关技术和随机过程。熟悉信号和噪声分析的读者仅需粗略地浏览这些章节,目的是熟悉用于本书其余章节中的符号。

海洋环境噪声源及其特性研究包括在第十章中,特别注意环境噪声场的指向性及对噪声空间相关函数的影响。

第十一章用空间滤波方法来研究声波束形成,这种方法可改善存在于空间分布环境噪声中的空间聚集信号的检测。使用第十章中的结果,讨论了均匀和非均匀噪声场中对空间滤波器性能的影响。

对被动系统而言,检测水中目标取决于目标的辐射声能;而对主动系统而言,要检测目标的声反射特性。第十二章介绍了对于主动和被动检测系统来说都很重要的目标特性。在这一章还讨论了有碍于主动系统接收目标回波的被称作混响的干扰信号。

在第十三章中,为使用统计假设检验的方法计算系统检测性能和估计目标参量奠定了基础。最后,在第十四章中用以前各章阐述的许多原理有选择地介绍了几个总的系统性能分析的例子。这些例子包括用于主动、被动系统的检测预报和参量估计。

这本书所用的资料是多年来在Rockwell International公司海上系统分部的奥都涅蒂克为公司开设的课题中汇集起来的。我非常感谢洛克维尔同事们许多有益的建议以及在准备手稿时对我的直接帮助,也感谢洛克维尔的管理部门对出版计划的支持。

W. S. 伯迪克

目 录

前 言

第一章 历史背景

1.0 早期阶段	(1)
1.1 第一次世界大战前的技术	(1)
1.2 第一次世界大战中的声学技术	(2)
1.3 两次世界大战之间的声学发展	(3)
1.4 第二次世界大战和大战以后	(5)
1.5 结论	(6)

第二章 均匀介质中的声波

2.0 引言	(11)
2.1 平面波传输中的电模拟	(11)
2.2 均匀介质中的声平面波	(12)
2.3 均匀介质中的声球面波	(18)
2.4 脉动球声源	(22)
2.5 单位, 参考标准和分贝表示法	(26)
2.6 举例: 脉动球声源	(29)

第三章 声换能器

3.0 引言	(39)
3.1 简单棒的纵向振动	(39)
3.2 水听器工作原理	(40)
3.3 发射器工作原理	(42)

第四章 反射、透射和折射

4.0 引言	(61)
4.1 垂直入射	(61)
4.2 斜入射	(65)
4.3 两层边界问题	(68)
4.4 射线声学: 等声速梯度的折射	(71)

第五章 海洋中的声传播

5.0 引言	(78)
5.1 海洋中的声速变化	(78)
5.2 海洋表面的声损失	(80)
5.3 海底的反射损失	(82)
5.4 海洋中的声吸收	(84)
5.5 表面层声特性	(86)
5.6 深海声道	(92)

5.7 会聚区传播	(92)
5.8 可靠的声路径	(93)
5.9 声在海洋中的起伏	(94)
第六章 傅里叶方法	(96)
6.0 引言	(96)
6.1 函数展开	(96)
6.2 周期函数: 复傅里叶级数	(97)
6.3 时间有限波形: 傅里叶积分变换	(101)
6.4 标准基本函数	(103)
6.5 线性系统的时域响应	(108)
6.6 傅里叶分析的基本运算	(111)
6.7 重复算子和抽样函数	(115)
6.8 变换规则和变换对: 小结	(118)
6.9 信号的复数表示: 包络函数	(123)
第七章 离散傅里叶方法	(127)
7.0 引言	(127)
7.1 连续函数的离散表示法	(127)
7.2 离散傅里叶变换	(129)
7.3 离散函数的基本运算	(130)
7.4 快速傅里叶变换	(133)
第八章 相关和相关函数	(136)
8.0 引言	(136)
8.1 矢量的相关	(136)
8.2 时间波形的相关	(138)
8.3 归一化的相关和相关函数	(139)
8.4 分辨力和信号模糊度函数	(143)
第九章 随机过程	(156)
9.0 引言	(156)
9.1 概率的定义	(156)
9.2 离散随机变量	(158)
9.3 连续随机变量	(159)
9.4 矩	(161)
9.5 密度函数举例	(163)
9.6 随机过程	(166)
9.7 随机变量的函数	(168)
9.8 随机过程的相关函数	(178)
9.9 例: 多途传输通道	(183)
第十章 海洋环境噪声	(188)
10.0 引言	(188)

10.1 环境噪声源.....	(188)
10.2 环境噪声的相关特性.....	(191)
10.3 空间相关函数在系统噪声计算中的应用.....	(202)
第十一章 空间滤波:波束形成	(205)
11.0 引言.....	(205)
11.1 一维空间滤波器.....	(207)
11.2 离散空间阵.....	(211)
11.3 阵的束控:非均匀加权.....	(213)
11.4 波束定向.....	(214)
11.5 离散线列阵的广义阵增益.....	(217)
11.6 阵增益用于系统性能分析.....	(221)
11.7 目标角度估计.....	(222)
11.8 多维空间滤波器.....	(226)
第十二章 目标的声特性	(231)
12.0 引言.....	(231)
12.1 水面舰艇和潜艇的噪声量级.....	(231)
12.2 用于主动系统的目标强度.....	(234)
12.3 混响.....	(236)
第十三章 用于性能分析的统计基础	(243)
13.0 引言.....	(243)
13.1 假设检验.....	(243)
13.2 接收机工作特性.....	(255)
13.3 信号的参量估计.....	(256)
第十四章 系统性能分析举例	(264)
14.0 引言.....	(264)
14.1 被动窄带检测.....	(264)
14.2 被动宽带检测.....	(266)
14.3 被动宽带角度跟踪.....	(270)
14.4 被动多途测距.....	(274)
14.5 主动系统检测性能.....	(277)

第一章 历史背景

1.0 早期阶段

大多数近代技术都能够在几个世纪以前追溯出与其有关的各种基本发现，以及科学家们在各个不同领域的成就。这些科学先驱者之所以受尊敬，是因为他们常常能在几个初看起来无关的技术领域里作出重要贡献。

没有几个人能在其全部活动和思想过程中与达·芬奇 (da Vinci) 相匹敌。他既是科学家又是工程师，参与了许多当时已有的和后来的技术应用的开发。对于水声系统的工作者来说，最感兴趣的是他摘记中有关声学的记载。在十五世纪末叶，他写到：

“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，则能听到远处航船的声音。”

这项引人注目的发现包含了现代被动声呐系统的全部主要器件。它指出了航行的船，无论是用帆还是用桨，所产生声音在水中能传播到相当远的距离。它描述了一种接收装置，这里是充满空气的长管，将水中的声音转变为空气中的声音，耦合到耳—脑组合，结果是收听到并识别出远处的船只。摘记中甚至还指出这样的事实，若减少混在远处航船声音中的自噪声（如使探测船本身停航），则将获得较好的效果。

从达·芬奇时代到现在，进步主要表现在接收设备复杂化了（费用高了），以及对影响声在水中传播的因素加深了理解。

从笔记的下面一段叙述中可看出，达·芬奇已认识到声传播具有有限的速度。

“在耳朵听到打雷的轰隆声之前，可以看到其闪光……”。

1635年法国自然科学家Pierre Gassendi用这种思想来测声速。他测出从看见手枪的火光到听到声音之间的时间，估出声速为1569英尺/秒，虽然这与约为1100英尺/秒的真实值不很接近，但这是最早几次定量测定声学参数中的一次。约在同一时代，另一法国人 Marin Mersenne用测回声的方法来测声速，其精度值高于10%。

1687年Isaac Newton爵士发表了《自然科学的数学原理》(Mathematical Principles of Natural Philosophy)，其中第一次对声学理论进行数学描述。他将声在流体中的传播与当时可测量的物理量如密度和弹性等联系起来，并从理论上导出了空气中的声速正比于大气压力与空气密度之比的平方根。实际上这样得出的值太小，后来由拉普拉斯进行了修正，他将比热引入此表达式。牛顿除了上述在声学理论上开拓性的工作外，他发明的微积分学在对描述波动现象的数学表达式进行推导和求解上，当然是极为重要的。

18和19世纪中，声学的许多理论工作都是有关乐器所产生的声的音调和音质的研究。在此领域中著名的研究人员有达朗贝尔、拉格朗日、丹尼尔·伯努利和欧拉。实际上声的谐波分析是在解出了研究热学的几个问题后开始的。傅里叶用有限三角级数（现在已用它命名）来表示更为复杂的函数，这出现在他的论文“热分析理论”（1822）之中。1843年，德国物理学家Georg Simon Ohm研究出复杂的声可以分解为一系列单音，并在数学上

表示为傅里叶级数。这不仅对于研究声信号而且对其他类型信号都是一件重要的大事。

瑞士物理学家Daniel Colladon与法国数学家Charles Francois Sturm在1927年测量了水中声速。他们在日内瓦湖用闪光和水下钟声比较得出在水温为8℃时声速为4707英尺/秒。这个量值与今天在淡水中测得的声速极为接近。

1877年出版了Reyleigh爵士的著作《声学原理》(Theory of Sound)。这本不朽的巨著严谨地论述了声的产生、传播和接收,同时还论述了固体、液体和气体的弹性形状,建立了声学理论的基础至今还适用。

1.1 第一次世界大战前的技术

除了第一次世界大战中有些例外,水声系统的发展在很大程度上取决于电气、电子元件和技术的发展。水声信号产生后,要把声信号转换成更为方便的电信号就得需要一些器件。声学系统中所需的放大、传输等信号处理技术广泛地利用了电子通信系统中的元件和分析方法。

声信号产生中特别有用的是电磁场中确实有机力存在。很早就知道了磁场有力施加于铁磁物质。1819年, Hans Christian Oersted揭示了带电导线周围存在磁场,在1831年Michael Faraday揭示了当电流流经线圈时,附近的导线中有感应电流。1840年James Joule测量了磁性物质在磁场中的尺寸变化,对磁致伸缩效应作了定量分析。1880年Pierre Curie及其兄弟发现了压电效应,即某些晶体形变后在其表面会产生电荷。相反这些晶体在电场中则会经受机械形变。磁致伸缩和压电效应以及由电磁铁施力于铁电枢构成了大多数水声换能器设计的基础。

1912年, Fessenden研制了第一个大功率水下声源。这个称为费森登振荡器的器件由电驱动,工作于单频,其工作原理与电动扬声器一样。它能工作在500至1000赫范围内,既可作水声接收器也能作为发射器。由于受“坦泰尼克”号于1912年沉没的驱使,1914年Fessenden将其设备用于对2英里处的冰山进行“回声测距”^{*}。由于它简单可靠,所以费森登振荡器作为水下正弦信号源一直到不久以前还在应用。

Fessenden还是潜艇信号公司的顾问,该公司研制了第一台商业用水声信号设备。在小船上装了水下鸣钟和水上雾号。钟和雾号同时发声就可以使周围船只测出各自到小船的距离。其方法是测出空气声和水下声到达的时间差。虽然由于无线电导航的出现这种方法没有得到广泛应用,该公司后来原封不动地成为雷声公司的潜艇信号分部。

19世纪中通信电话和电报系统的发展提供了元件和系统分析方法的储备,这最终有助于水声系统的开发。莫尔斯(Morse)电报于1844年交付使用,这给信号远距离传送提供了极有价值的经验。Thomas Alva Edison及他人发明了多路传输信号方法以降低成本。

1866年, G·Bell获准了关于电话的一项专利。尽管另外有人提出了基本想法, G·Bell第一个做出了一种实际仪器将语言声变为电信号,然后在接收端又转变成语言。G·Bell的发射器和接收器是相同的,都是在电磁铁形成的场中有一金属膜。声波撞击薄膜使它引起

^{*} “坦泰尼克”号沉没后5天, L. F. 理查逊申报了关于水下回声测距装置的英国专利。然而Fessenden看来是将概念转为实践的先驱。

振动, 因而使电磁铁线圈中的电流变化。在接收端, 此电流变化引起磁场变化。又导致薄膜振动, 因而恢复原来的声音。

电话技术促使人们对信号和网络分析概念加深理解。电路分析开始于Georg Ohm的工作, 它阐明了在简单阻抗元件(如电阻器)情况下电流和相关联的电压之间的关系。Gustav Kirchhoff 的著名定律发展了欧姆的工作, 此定律阐明了在更复杂的电气网络中电压和电流分布的关系。

1907年, Lee De Forest发明了真空三极管可以使弱信号得到放大, 因而使水声系统不再必须依赖于尽管是相当灵敏的人耳了。

1.2 第一次世界大战中的声学技术*

第一次世界大战中声学技术最初并非用于水下以抗击潜艇威胁, 而是用于空中以抗击敌轰炸机和齐伯林(Zeppelins)飞艇。在战争初期, 英国和法国在用辐射声信号对敌机检测和定位方面取得不少进展。这些信号或者是用号角及空气管直接由操作者耳朵接收到, 或者用电的方法, 即用碳晶话筒及电话接收器系统接收。这种技术对我们目前的课题也是重要的, 因为当时潜艇用饥饿来威胁盟军屈服的时候, 就是直接采用了水下环境。

瑞利爵士通过其早期工作并作为顾问, 对英国声学的成就作出了巨大的贡献。在19世纪, 通常认为我们用双耳的能力以确定声音的方向是由于当声音不是从正前方或正后方来到时, 两只耳朵接收到的声音强度有差别的结果。声强之所以有差别是推测为由于头盖骨的声屏蔽效应。瑞利意识到这不能解释我们有能力接收并判别低频声的方向, 因为这时波长大于我们头盖骨尺寸。例如频率为100赫, 空气中声波长约为10英尺, 因此头盖骨不会有足够的声屏蔽。瑞利的结论是, 除了强度差别以外, 耳-脑组合还对两耳收到的信号的相位差或时间差敏感。若由于耳朵分离引起相位差可以算出方向, 则增大原始传感器间距离就将明显地改善其灵敏度。这个观察结果导致了发明确定方位的双耳收听设备。

典型的飞机监听设备包括一双大的声号角, 各用一个管子和听诊器耳塞连到操作员的耳朵上。旋转这对号角直到两只耳朵听到的声音一样, 操作员就定出了方位。

早在研制飞机发动机时就注意到, 发动机产生一系列可预知的单音分量。主要的单音分量在80至130赫范围内。于是设计了覆盖这个频率范围的调谐和可调滤波器, 这样抑制了其他频率的干扰声信号, 从而改善了它的性能。对于非电的收听系统, 这些滤波器由赫姆霍茨(Helmholtz)谐振器构成。

检测飞机的声号角有4英尺长, 相距7英尺。这个距离等于80赫的半波长。因此, 当目标与最大响应方向成直角时, 两号角中频率为80赫的信号正好抵消。除了在方位平面上有两个分离的号角外, 还有两个分离的号角在垂直面上, 由此定出目标的仰角。

这种四个号角结成的设备很大, 为避免必须使它机械转动, 发明了一种装置使操作员可以调节接到耳朵上管子的有效长度。这样为使到达双耳的声音相等可以调节声有效路径的长度。这种声路径“补偿器”经过校准, 就可以直接在控制器上读出目标方位。

1915年, 由于德国潜艇攻击商船, 加强了开发探测潜航潜艇的手段。在考虑声学手段

* Marvin Lasky在JASA[7]上有一篇关于水声技术从一次大战到1950年发展历史的文章, 论文还附有参考书目, 这对于对水声技术发展历史感兴趣的读者是很有用的。

的同时，还考虑了光学的、热学的、磁性的和电磁的手段。结论是：实际解决问题的方法是声敏感器件。

英国海军部研究与开发局的A.B.Wood及其助手们在大不列颠进行了水声系统的研究工作。在美国新伦敦实验站（现在是海军水下系统中心）Harvey Hayes成了被动声呐阵方面的先驱者。

美国的SC器件是一种早期成功的被动检测和定位系统。图1.1中给出了其示意图，这种器件是达·芬奇收听管的直接产物，但不是把一根管子置于水中，而是用两根管子带有相距大约5英尺的灵敏的球状物。两个球通过空气管最后到听诊器型式的耳机。这种器件使操作员具有双耳能力，这对中心频率在500赫左右的频段特别有效。这种SC装置在水面舰和潜艇上使用都很成功。

SC听测器件的自然延伸就是图1.2中所示的MB管。这种器件在一个可旋转管子的两边各有六个橡皮球。每边的六个球与声学“阻抗匹配”的管状导管相连接，并与SC器件一样，被连接到听诊器型耳机的一端。确定方向也是用人工方法，使整个结构旋转以使双耳中声音同时到达。与SC器件相比较，MB管改善了灵敏度且具有更好的角分辨率。

可旋转双耳听测器件配置在船壳之外，通常只能在低航速时使用。为避免这个问题，MV管可由壳体上的平镶阵构成。在各个球通道中由各种声学长度“补偿器”线来完成旋转。其阵每边六个基元互相耦合，经适当的定向补偿后，进到每只耳朵。补偿器上有一方位度盘，使操作器能有指示目标方向的读数。MV管的长度在18至40英尺之间*。典型的装置用两个MV器件，舰舷两边各装一个。这样由舰壳造成声屏蔽而解决了通常单根线阵所具有的左一右向的不确定性。MV管是在第一次世界大战中所用的最复杂的非电听测设备，据报道可在20节航速情况下跟踪2000码远的潜艇。

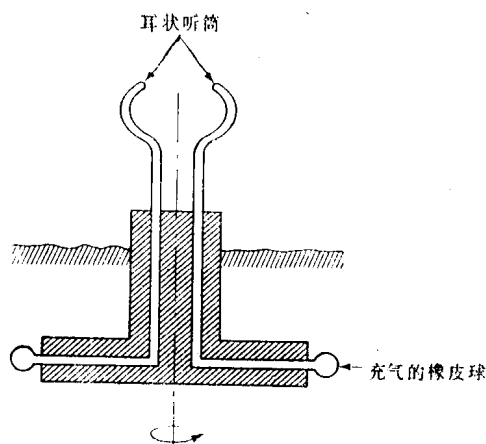


图1.1 SC双空气管听测器件

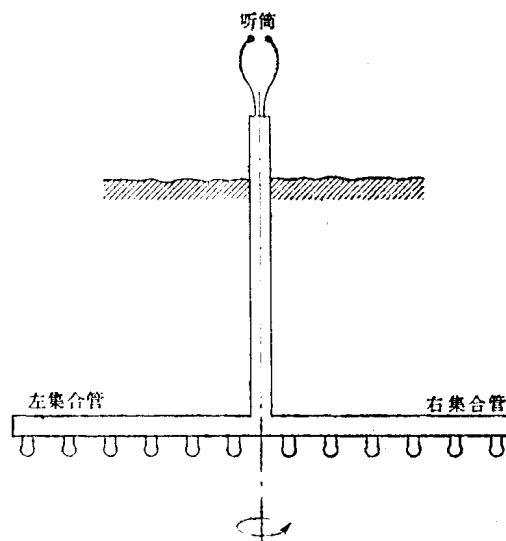


图1.2 MB管人工旋转空气管阵

*本书所采用的单位与我国法定计量单位稍有差别，而翻译出版时，考虑到其他原因，不宜统一到我国法定计量单位上来，故仍沿用原来单位，望见谅。——编者

第一次世界大战期间已充分了解到声学传感器载体运动的自噪声对听测器件性能造成有害的影响。这导致发展一系列拖曳水听器装置，企图使传感器尽可能远离自噪声场。最成功的拖曳系统是1918年研制的U-3管。12个等间距水听器（炭精按钮送话器）装在40英尺长的可伸缩的橡皮管内。两端密封，管内充满淡水使总体在海水中是浮力平衡的系统。这样的水听器线阵称为“鳗鱼”。U-3管系统由两条“鳗鱼”组成，拖在舰后约300至500英尺处，且两水平阵间隔大约12英尺。电信号用多芯电缆传到舰上，并用电补偿器补偿从不同角度到达的信号。在信号迭加之前补偿器将电时延引入到各个水听器通道。象上述空气管阵那样，阵分成两半，从各个一半来的六个水听器信号混合在一起加到操作员的左、右耳机里。与前述一样，操作员转动补偿器使声音相同就确定了目标方位。要拖两条水平分开的鳗的目的是解决左-右不确定性。从两条“鳗鱼”中每一个的一组六个水听器接入一补偿器，补偿器被调整到使两个信号的相位相同。这就给出了单独相对于不同基线方向上的方位量度，从而消除了不确定性。这种系统的几何图形示于图1.3。此例中由右舷“鳗鱼”测到的 α 角可以在第一或第二象限。同时用左舷和右舷鳗的前半段，测得 β 角可以在第一或第四象限。利用 α 和 β 可鉴别目标方位在第一象限。

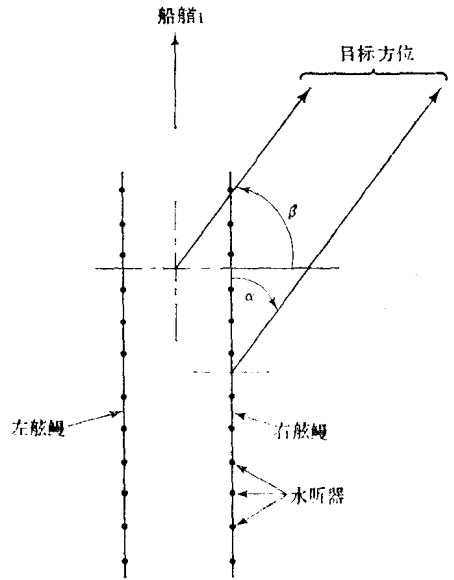


图1.3用两条鳗消除方位不确定性

为了改善信噪比，U-3管系统装备了两个电气高通滤波器，其一具有450赫截止频率，另一滤波器的截止频率为900赫。较高频率的滤波器可以在较高拖速时用来补偿增大的低频流噪声。

U-3系统与壳装的MV系统联合使用很有效。从拖曳系统与壳装系统取得目标方位，并已知两系统的间距，便可用三角方法计算出目标的大致距离。给操作员提供一种简单的算法图，将两个系统所得到的方位送入就可以读出目标距离。

SC、MV及U-3等被动系统在检测水下潜艇中已取得了相当的成功。然而，要以一定的精度定位，以发射武器仍有困难，这就导致开发主动回声测距系统。

已提到过的法国物理学家 Langevin 经过多年工作，1917年发展了用主动系统检测潜艇。他用工作在38千赫的无线电发射装置去驱动压电换能器。换能器大到足以在水中产生窄的能量波束，因而能确定到目标的距离和方位。以 Langevin 的工作成果，英国开始发展主动回声测距设备。然而，在任何主动装置能付诸实用之前，战争就结束了。

1.3 两次世界大战之间的声学发展

由于第一次世界大战结束，水下声系统的发展步伐显然慢下来了。1923年，在美国海军研究所建立了声学分部，其第一任主任为Harvey Hayes，到1927年，这个室的全部人员只有H. Hayes和其他四个人了。

在战争的末尾,双方都在降低潜艇辐射声信号强度方面花了很大力气。这种努力的成就以及Langevin实验的成功都导致美国和英国在战后大部分致力于开发主动声呐。除了不依赖于目标的辐射噪声之外,主动声呐能迅速对目标定位。

这一时期的主动声呐,其频率范围主要在10至30千赫。这个频率范围在大部分舰艇自噪声之上,而且能用中等尺寸的传感器产生窄的声能波束。英国开发的换能器用了与Langevin相同的压电器件,而美国用磁致伸缩器件产生超声脉冲。在其他方面英国和美国的系统在原理上很类似于Langevin的早先的回声定位系统。当然迅速发展的真空管技术,由已形成的无线电工业的刺激,大大改善了系统电子部分的可靠性和性能。

凡尔赛条约限制德国只有一支小的海军力量,不能有潜艇和飞机。这些条款约束了他们把声呐的作用视为防御而不是进攻性的。结果是他们在战后致力于开发被动听测器而不是主动系统。为了保持这种防御姿态,他们首先仔细地研究了潜艇本身的各种噪声源,包括螺旋桨、机械噪声和首波噪声,并把这些信息用于设计新的舰艇。被动声呐传感器基元的设计和位置都仔细地与舰船设计相协调,以取得可能最佳的性能。由H. Hayes开发的电气旋转保角阵得到了应用并改进,从而为他们的主力舰生产了卓越的保角被动阵。这种称为GHG的系统装在德国巡洋舰“欧根王子”(Prinz Eugen)号上,根据德国报道,在广泛的鱼雷攻击中,它能使舰艇保存下来。

GHG保角阵为椭圆形,装在首部。在“欧根王子”号上,它每边有60个水听器。用宽带抽头电气延时线接到一个机械装置来完成波束形成,从形状上看这个机械装置实际上是水听器阵的小的复制品。一组可旋转的刷子连接到延时线,在每个水听器通道中加进适当的补偿延时,以在一定方向上形成接收波束。第二次世界大战开始后,美国声呐专家们仔细地研究了该系统的设计,并对以后的被动保角系统的设计有巨大的影响。

对于象声在海洋中传播这样的物理过程加深理解始于30年代。海军研究所在超声频上测量了海水对声的吸收,开发了一个研究领域,目前仍在整个感兴趣的频率范围上积极进行定量的测量和对吸收现象的解释。

海洋作为声传播介质的似乎不可预见的特征,随着1937年Aethelstan Spilhaus发明了温深仪而开始变得可理解了。这种器件可迅速而方便地测出温度相对于深度的曲线,由此可算出声速—深度剖面。由此得知,只要很小的温度梯度便会使声折射,从而使传播特性大受影响。

第二次世界大战开始时美国舰艇装备了温深仪(BT),这样可以估计声传播特性。潜艇有了这种能力后,在作战决策时就大大地增加了有用的信息。

改善对介质的了解对于正确地开发一种系统方法,以设计和分析水声系统是必要的。在两次大战的间隙期间,信息处理系统的奠基性研究工作是由以下这些人领导的,如贝尔电话实验室的Nyquist和Hartley。估计理论和假设检验方法开始在许多问题中应用,如在通信系统中鉴别混在不需要的噪声中的有用信号。在两次大战之间,除了开始对上述整个系统加深理解外,还有许多更重要的进展。

1.4 第二次世界大战和大战以后

在第二次世界大战中,美国参战后组成了以Vannevar Bush为领导的国家防务研究委

员会 (NDRC)。该组织负责对于从事战争认为是极端重要的开发和研究领域。这些努力的结果有: MIT放射实验室开发了雷达, 曼哈顿计划的原子弹, 以及由 NDRC第六分部组织的广泛的水声规划。水声研究由加州大学战争研究分部、圣地亚哥海军电子试验室以及伍兹霍尔海洋研究所进行。哥伦比亚大学、哈佛大学、MIT的实验室以及其他海军实验室和工业组织也大力协作, 做出了有价值的贡献。

这些小组工作的目的是改善水下声系统的设计和使用。由于这个短期的实用的目标, 实验大纲不总是解决在科学意义上的各种基础问题。所以几乎全部实验都是在那时对主动声呐系统有用的超声频段上进行的。然而, 参与这些研究的人员素质很好, 在对水声传播的基础理解方面有了许多进展。有幸的是在战争末期, 这些知识汇集起来并以总结报告的方式公开发行了, 书名为《海洋中的声物理学》(Physics of sound in the sea)。这些报告描述声在海水中传播, 混响, 声从潜艇、舰船上的反射以及尾流等的理论基础, 并有许多在形式上与目前的研究是一样的。在战争期间开发的测量仪器和技术为以后多年的海洋测量方案开创了一个新阶段, 它为由于战时方案的有限目标填补了空缺。

到战争末期, 影响海洋中声速的各种因素都已认识到并理解了其机理。声速的实验测量在全球进行, 并覆盖了各种季节、气候和水深。首先是利用射线声学研究声速剖面对传播途径的影响, 识别了不同途径的类型并给予命名, 这些名称现在尚 在应用。Woolard, Ewing和Worzel用爆炸弹研究深水中远距离低频声的传播, 证实了存在深海声道, 使得可在距离1000海里或更远处接收到声信号。

MIT放射实验室的雷达技术规划发展了元器件和电路技术以及各种信号处理技术, 这些都是发射、传播、接收和检测微波脉冲信号所必需的。在有噪声情况下雷达弱信号的处理问题基本上和声呐信号处理问题一样。在此规划中所完成的工作在战后也有许多资料汇编成值得注意的28卷文集, 称为麻省理工学院的《辐射实验室丛书》(Radiation Laboratory Series) 该书由 NDRC 资助出版。特别值得一提的是在噪声环境中处理信号的普遍课题, 这在丛书第二十四卷中叙述, 该卷为Lawson和Uhlenbeck 合著的《门限信号》(Threshold Signals)。此书是将信号与噪声的统计特性和谱特性进行统一处理的先导工作之一。它将实验方法和分析结合起来研究了输出信噪比和接收机滤波器特性间的关系式, 确认了一种近似最佳的滤波器。检测过程用基于输出波形 (有和无目标信号存在) 的统计特性的假设检验来描述。虽然所用特定的准则 (称为理想观察员准则) 以后被改变了, 这是在发展统计模型时走出的重要一步, 该模型描述了信号处理系统与一输出决策设备 (常常是一观察者) 结合在一起的性能。

独立于辐射实验室的工作, Norbert Wiener和S.O.Rice 在信号和噪声处理方面作出了重要贡献。1942年, N.Wiener写成了他的经典著作《平稳时间序列的外推、内插与平滑》(The Extrapolation, interpolation and Smoothing of stationary Time series), 原来是作为NDRC 报告发表的。他用估计理论严格地导出了能把需要的信号从噪声中分离出来的最佳滤波器的形式。S.O.Rice于1944—1945年在《贝尔系统技术杂志》上发表了文章“随机噪声的数学分析”。这篇文章广泛地涉及噪声的各种统计特性以及当噪声通过各种电路运算后对这些统计特性的影响。

大约从1945至1955年, 美国Shannon的工作, 以及英国 Gabor和Woodward的工作把信息论课题建立成成熟的学科。Gabor 和 Woodward 特别提出了深入的信号波形设计性能的

观点, 这影响到系统在目标分辨和目标距离及速度估值领域的的能力。

第二次世界大战结束时, 技术活动的步伐并未象第一次世界大战后那样放慢。冷战的压力加上战争期间科技显著进步的刺激, 使得各种活动全面发展。许多关键的组织如MIT的辐射实验室和战争研究所的加州大学分部, 以及许多其他组织解散了。这实际上把这种能力分布到全国, 最终形成了更大的技术基地。战后头十五年我们看到了开始迅速发展的固态技术、数字计算机系统、火箭技术, 远程精确制导系统, 以及将核技术应用于功率产生装置, 这种装置适于作舰艇主推进系统的动力。

在水声学领域, 战争期间开始的理论与实验工作仍继续着并扩展到整个声频和超声频范围。Kundsen、Wenz, Marsh, Urick及其他人确定了海洋中各种声源和环境噪声特性。Lieberman和Leonard等人提出了海洋中声吸收原因的附加见解, 并在低于100赫高于1兆赫的频率上, 用实验方法确定出吸收系数。在全世界许多不同的测站, 已获得了大量的声传播数据。通用计算机的增进可用性, 使它能分析这些数据并能发展一种传播条件下相对频率的统计图。计算机还可能解出按常规基础描述声传播的方程组, 这样, 理论与实验结果就很容易作比较了。这导致在系统分析和性能计算中用更精确和更完整的数学模型。

战后一项重要的发展是将数字技术引入到信号处理领域。首先应用到水声的数字多波束定向系统 (DIMUS)。这种系统对水听器信号进行强限幅, 随后是用数字移位寄存器以提供必要的延时作波束形成。引入快速变换技术和固态数字元件, 不仅使成本迅速下降而且功能增强, 结果在60年代末和70年代初设计了全数字化信号处理系统。

在战后年代, 战略核武器的存在逐渐改变了水声系统的作用和设计。第二次世界大战中的典型声呐对接近到护航队的潜艇定位以辅助护航队的防御, 而短距离主动系统可很好地完成这项任务。由于发展了有能力发射远程弹道导弹的核潜艇, 使形势发生了根本的变化。现在防卫的面积包括整个大陆, 而潜在的导弹发射区则覆盖整个海洋。现在不得不在远距离上对水下目标检测和分类。这又导致重新对被动系统感兴趣, 因为它不象回声测距系统那样会受到双程传播损失。

增加作用距离的要求就要用更低的频率, 以避免在超声波段上的高吸收损失。而用更低的频率则要求较大的声孔径, 以保持确定目标方位的能力。通常, 舰载装置趋于利用最大的舰载孔径或用长的拖曳线阵, 以获得所要求的作用距离。

已经进行了一些基本的实验, 如进行远距离低频传播的测量, 以及在低频上信号与噪声相关特性的测量。高速数字技术的进展推动了目标信号窄带音色分量的检测和处理。当然舰船设计师在设计潜艇时也考虑到所有这些进展, 因而努力降低潜艇辐射噪声, 更增加了检测的困难。在核潜艇产生的总能量中, 只有极少量作为声能辐射出来。

依据在纯随机的、良好形状的噪声背景中检测单个目标信号的经典问题, 在七十年代之前水声系统能非常接近理想性能。在这些条件下限制性能的因素有: 可用的空间孔径、时间孔径、频率孔径和介质特性。然而, 随着检测弱信号的灵敏度的改善, 对抗噪声场的简单模型已变得不大适用了。海洋中充满了象目标那样的噪声源, 有人为的也有生物形成的, 而增加灵敏度就使接收这些噪声源的数目增多, 而目标信号又必须与之相对抗。于是就有一个从许多目标接收到的信号的分类与分离的问题了。在这些条件下, 由现代多波束声呐系统产生的数据量非常大。这时, 关键技术问题变成用什么方法处理这些信息, 以消除无关的信息并只给操作员展示可资利用的信息量。

企图解决从大量数据中提取有用信息的问题导致用各种意图去实现目标自动检测与分类和自适应地控制系统参数, 以在特定环境中改善性能, 这些发展要利用不断增强的固态数字处理硬件的能力。对这个领域的进展至今尚未完结, 水声系统发展的研究继续作为一个重要的课题将是毫无疑义的。

1.5 结论

现代水声领域的工作者必须接受过去成就的影响。H. Hayes可以在家里对设计声阵进行现代式的讨论, 而且有可能提出某些有价值的见解。从达·芬奇宣布可以在水中听到舰船的声音到现在, 我们仍然为下列问题的答案而工作: 有多少? 在什么方向? 有多远和什么类型?

另一方面, 在一百多年就有的知识水平上加进了大量的信息和理解。现在我们懂得为什么和在什么情况下能在远距离上听到舰船的声音。我们可以表征介质和所用系统的特性, 以便可以对其性能作出预报, 至少在简单的情况下可以预报。最后, 限制性能的遗留问题已经清楚, 并正在研究获得进一步改善的可行方法。

参 考 文 献

1. MacCurdy, E. *The Notebooks of Leonardo da Vinci*. Garden City, N. Y.: Garden City Publishing Co., Inc., 1942, Chap. X.
2. "Sound," *The New Encyclopaedia Britannica*, Vol. 17. Chicago: Encyclopaedia Britannica, Inc., 1974, p. 19.
3. "Sound," *Funk and Wagnalls New Encyclopedia*, Vol. 22. New York: Funk & Wagnalls, Inc., 1975, p. 24.
4. Strutt, John W. (Lord Rayleigh), *Theory of Sound*, Vols. I and II, New York: Dover Publications, Inc., 1945.
5. Albers, V. M., *Underwater Acoustics Handbook-1*. University Park, Pa.: The Pennsylvania State University Press, 1965, Chap. 10.
6. Urick, R. J., *Principles of Underwater Sound for Engineers*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1967, Chap. 1.
7. Lasky, M., "Review of Undersea Acoustics to 1950," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 61, No. 2, p. 283, Feb. 1977.
8. Rayleigh, Lord, "On the Perception of the Direction of Sound," *Proc. R. Soc. A*, Vol. 83, pp. 61-64 (1909); or *Scientific Papers by Lord Rayleigh*, Vol. V. New York: Dover Publications, Inc., 1964, p. 522.
9. *Physics of Sound in the Sea*, Parts I-IV; originally issued as Division 6, Vol. 8, NDRC Summary Technical Reports; reprinted in 1969 by the Government Printing Office, Washington, D. C.
10. Wiener, N., "The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary