

# 工程水声原理

国防工业出版社

## 内 容 提 要

本书系美海军军械研究室 R. J. 烏立克(Urick)所编写。由 McGraw-Hill 图书公司1967年出版。

书中从声纳方程出发，分章简要地叙述了方程中各参数的物理现象与实验数据。最后，再回到声纳方程，用物理规律在设计上的使用为例，作了总结。

本书适合从事水声专业的工程设计、技术人员和科研人员阅读，以及中等以上学校作为教学参考。

Principles of Underwater Sound for Engineers

R. J. 烏立克 著

McGraw-Hill 图书公司

1967年

\*

工程水声原理

洪申 译

\*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 111/8 250千字

1972年12月第一版 1972年12月第一次印刷

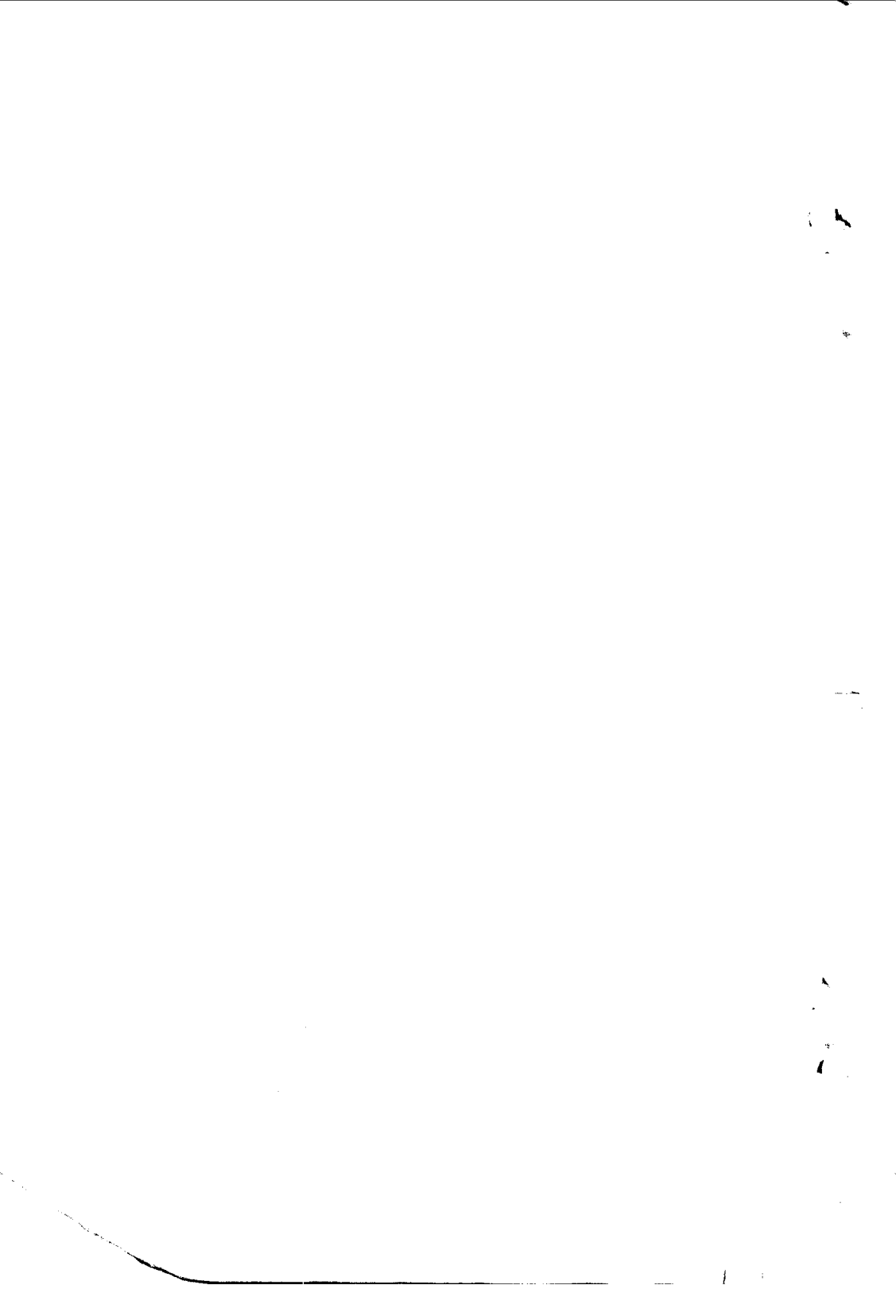
统一书号：15034·1277 定价：1.10元

## 毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。



## 译者序

为了配合当前我国社会主义革命和社会主义建设的大好形势和适应广大工人、工程技术和科研人员在“抓革命，促生产，促工作，促战备”中对水声书籍的需要，我们遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，翻译出版了“工程水声原理”这本书，供大家参考。

水声学是在二次世界大战期间发展起来的综合性尖端技术科学。它包括物理与工程两个方面。水声物理是水声工程应用的理论根据；同时，水声技术的不断革新又促进了物理的进展。如此往复，二者有着相互依存、相互促进的关系。众所周知，各种声纳设备是水面舰艇、潜艇以及水下防御系统的耳目，起着“水中雷达”的作用。它不仅是反潜和水下作战的重要设备，在民用方面，也是捕鱼、导航、开发和研究海洋的有效工具。

本书作者是美海军军械研究室的物理研究人员，为了配合美国海军发展声纳工程的需要，多年来从事水声物理的实验研究。本书初步总结了过去美国在水声方面的实验研究，介绍了水声物理的基本原理和它在工程上的应用。作者试图使本书起到联结物理与工程之间的桥梁作用。因此，它对工程设计人员了解物理，物理研究人员了解工程使用，都有一定帮助。书中提供了较多的实验曲线和数据表，可作为一般性参考。本书系一实用性质的书籍，从物理角度来看，它的理论叙述是不够严格的。

“一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。”我们应当遵照毛主席

的教导，对本书的内容批判地吸收，去其糟粕，吸收其精华。特别对于他们的数据，应注意到当时当地的海洋环境条件和技术条件，以确定其有无参考意义。我们要破除迷信，解放思想，自力更生，发奋图强，“打破洋框框，走自己发展工业道路”，为使我国水声事业赶超世界先进水平而努力奋斗。

本书在第一章内叙述了水声学在资本主义世界的发展过程，其中为几个公司的产品进行了宣传，并且夸大了一些科学家的个人作用，对此我们作了适当的删改。

对书中许多错误的地方，我们作了必要的改正。因为一些声学名词尚不统一，在书末参照原书中的索引，附上了一个英汉名词对照。由于我们水平所限，译文中可能还有错误之处，希望读者批判地使用，对我们提出宝贵的意见。

译 者

一九七一年十月

# 目 录

第一章 声纳 .....	5
1.1 历史的回顾 .....	9
1.2 水声的应用 .....	15
1.3 基本概念和单位 .....	19
第二章 声纳方程 .....	23
2.1 基本考虑 .....	24
2.2 主动和被动方程 .....	24
2.3 声纳参数各种组合的名称 .....	28
2.4 回声级、噪声级和混响级与距离的关系 .....	29
2.5 声纳方程的瞬态形式 .....	30
2.6 摘要与举例 .....	33
第三章 换能器阵的特性：指向性指数 .....	35
3.1 换能器响应 .....	37
3.2 校准方法 .....	38
3.3 互易校准 .....	44
3.4 声束图案 .....	45
3.5 乘积定理 .....	51
3.6 束控和超指向性 .....	52
3.7 接收指向性指数 .....	54
3.8 阵增益 .....	57
3.9 乘积阵 .....	62
第四章 水下声的产生：发射器的声源级 .....	68
4.1 声源级与辐射声功率的关系 .....	70
4.2 限制声纳功率的因素 .....	72
4.3 用爆炸作为水下声源 .....	78
第五章 海洋中的声传播：传播损失 I .....	91

5.1	引言	91
5.2	扩展定律	92
5.3	海洋中的声吸收	94
5.4	海洋中的声速	102
5.5	海洋中的声速结构	108
5.6	传播理论和射线轨迹	113
5.7	海面	118
5.8	海底	123
第六章	海洋中的声波传播: 传播损失 I	132
6.1	混合层声道	132
6.2	深海声道	142
6.3	浅海声道	152
6.4	声传播起伏	160
6.5	深海的声线轨迹及其损失: 总结	164
第七章	海洋的噪声背景: 自然噪声级	171
7.1	深海中的自然噪声源	171
7.2	深海噪声谱	176
7.3	浅海自然噪声	178
7.4	自然噪声的变化性	180
7.5	自然噪声的间歇源	181
7.6	深度影响	185
7.7	振幅分布	187
7.8	冰下水噪声	188
7.9	深海自然噪声的指向性	189
7.10	自然噪声的空间相关	192
7.11	摘要	194
第八章	海洋中的散射: 混响级	197
8.1	混响的种类	197
8.2	散射强度	198
8.3	等效平面波的混响级	199
8.4	体积混响理论	200
8.5	界面混响理论	204



8.6	目标强度和散射强度 .....	206
8.7	一层体积散射体所产生的界面混响 .....	207
8.8	短脉冲的混响级 .....	208
8.9	水中的气泡 .....	209
8.10	体积混响 .....	214
8.11	海面混响 .....	219
8.12	海面散射的理论和起因 .....	223
8.13	海底混响 .....	227
8.14	冰下混响 .....	235
8.15	混响的特征 .....	236
8.16	混响的预报 .....	238
第九章 声纳目标的反射与散射: 目标强度 .....		243
9.1	回声是反向散射贡献之和 .....	245
9.2	几何镜反射 .....	246
9.3	小球的目标强度 .....	249
9.4	简单形状物体的目标强度 .....	253
9.5	目标强度的测量方法 .....	253
9.6	潜艇的目标强度 .....	258
9.7	水面舰艇的目标强度 .....	262
9.8	水雷的目标强度 .....	263
9.9	鱼雷的目标强度 .....	263
9.10	鱼的目标强度 .....	264
9.11	回声形成过程 .....	265
9.12	回声特征 .....	268
9.13	数值的总结 .....	270
第十章 舰船、潜艇和鱼雷的辐射噪声: 辐射噪声级 .....		272
10.1	声源级和噪声谱 .....	272
10.2	测量方法 .....	273
10.3	辐射噪声源 .....	275
10.4	辐射噪声源概要 .....	283
10.5	总的辐射声功率 .....	284
10.6	辐射噪声级 .....	286

第十一章	舰船、潜艇和鱼雷的自噪声：自噪声级 .....	293
11.1	自噪声的测量和转换 .....	295
11.2	自噪声的声源和路径 .....	296
11.3	流噪声 .....	299
11.4	导流罩 .....	304
11.5	自噪声级 .....	307
第十二章	噪声和混响背景上的信号检测：检测阈 .....	311
12.1	检测阈的定义 .....	312
12.2	阈的概念 .....	313
12.3	检测的输入信噪比 .....	316
12.4	估计检测阈 .....	320
12.5	持续时间和带宽效应 .....	321
12.6	计算举例 .....	322
12.7	摘要 .....	323
12.8	听觉检测 .....	324
第十三章	声纳系统的设计和预报 .....	332
13.1	声纳设计 .....	332
13.2	声纳预报 .....	333
13.3	最佳声纳频率 .....	334
13.4	声纳方程的应用 .....	337
	英汉名词对照 .....	344

# 第一章 声 纳

在人们所熟知的各种辐射形式中，以声波在海水中的传播为最佳。在混浊和含盐的海水中，无论光波或无线电波的衰减都远较声波的衰减为大。

由于声波相对地说来容易传播，因此在利用和开发海洋事业中，人们广泛地利用水声。水声的应用构成了声纳的工程科学，而以这种或那种形式利用水声的系统就叫做声纳系统。

若声音是有目的地从系统中的发射器产生的，则称这些声纳系统、设备或部件是主动的。发射器产生声音后，经过海水传递到目标，然后以声纳回波形式返回到水听器上，将声能再转换成电能，水听器输出的电信号经放大和各种处理，最后馈至控制或显示系统，从而完成了声纳的使命。因此，主动声纳是用来对目标进行回声定位的。

被动或听测声纳则是利用目标辐射出来的声音（通常就目标本身来说并不希望如此）。此时在海水中仅有单程传播，而系统的核心部件是用来听测目标声音的水听器。通讯、遥测和控制等应用则采用声纳系统的综合形式，这种声纳系统在声学通讯通道的两端都有发射器和水听器。

## 1.1 历史的回顾

虽然声纳的“新时代”可以说是开始于第二次世界大战初期，然而它的起源却是很早的。最早提到声音不仅存在于空气之中，也存在于海水之中的文献是芬奇的一本摘记。芬奇是一个工程师，在1490年，也就是哥伦布发现美洲大陆的前二年，他写道：“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”<sup>(1)</sup>。虽然这种被动声纳的雏型具有极其简单的特点，但是它毕竟不能提供方位指示，并且由于空气和水的声学特性不匹配，因此也是不灵敏的。然而这种在海水和听测者耳朵之间用了一根长管的听音方法一直到第一次世界大战还广为采用。那时，在另一只耳朵和海水中另一点之间又加了一根长管，这样就能测得方向，而目标的方位也能确定了。

水声的第一次定量测量大约是在 1827 年进行的。那时，瑞士的物理学家 Daniel Colladon 和法国数学家 Charles Sturm 合作，在瑞士日内瓦湖测声速。他们通过测定闪光和水下钟响之间的时间间隔将声速测到一个惊人的精度。

其后，在十九世纪，一批物理学家，由于大家都对“换能”现象感兴趣，他们在水声事业中被间接地联系在一起了。所谓“换能”就是电声之间的相互转换<sup>(2)</sup>。人们公认雅克和皮埃尔·居里在 1880 年发现了压电效应。压电效应是某些晶体的特性，当压缩某种晶体时，则在某一对晶面上会出现电荷。在此以前，也有一些其它的物理学家在这个课题上作过一些试验。库仑预言过，加压可能会产生电，而伦琴曾著文叙述在应力作用下不同晶面上将出现电荷。磁致伸缩是相应于压电效应的另一种换能过程，也就是磁场会使某些物质发生形变。约在 1840 年就发现：当线圈中电流变化时，或线圈中的电流受马蹄形磁铁扰动时就会发生响声，这是最早的磁致伸缩演示实验。1840 年焦耳定量测定了磁致伸缩引起的长度的变化，因此一般就认为他是磁致伸缩现象的发现者了。

这些研究工作以及在 1840 年到 1850 年间进行的一些其它的研究，奠定了发明电话的基础。电话的发明使贝耳获得一个长期独占的专利。在电子管发明以前，在十九世纪，作为声纳的基石的另一个发明，要算碳粒微音器了。碳粒微音器是最早，但也是最灵敏的水听器。

二十世纪初，出现了水声的第一个实际应用。这就是船舶沿

海导航用的潜水钟。在灯塔船上安装潜水钟和雾号，测定出钟声和同时由雾号发出的号声之间的时间差，船舶就能测定它与灯塔船间的距离。但这种方法始终没有被广泛采用，后来就被无线电导航，特别是无线电测向方法代替了。

第一次世界大战前另一个成就是第一个水下目标回声定位方案。1912年客轮“巨人”号和冰山相撞后，L. F. Richardson 建议用空气声进行回声定位<sup>(2)</sup>。一个月以后又提出了与其相仿的水声回声定位方案。他的想法有些独到之处，即采用了频率为数千赫的指向性发射器和一个选频接收机。由于进行回声定位的船舶的运动产生多普勒效应，因此接收机要相对发射频率偏调，以补偿多普勒频移。遗憾的是，Richardson 并未实现他的建议。与此同时，在美国 R. A. Fessenden 设计和制造了一种新型动圈换能器，这种动圈换能器既能用作水下发信又能用来回声定位。这样到1914年就能探到2哩外的冰山。Fessenden 的振荡器工作在500赫到1000赫附近，据称装在第一次世界大战时的美国潜艇上<sup>(8)</sup>，这样使潜艇在下潜状态能相互发信。直到现在这种换能器还在研究工作中当作强正弦声信号源用。

1914年第一次世界大战爆发，它促使了一系列军用声纳的发展。在法国，年青的俄国电气工程师 Constantin Chilowsky 和著名的物理学家郎之万合作，他们利用电容（静电）发射器和一只放在凹曲面焦点的碳粒微音器进行实验，尽管由于发射器采用了高电压而有着漏电和击穿的缺点，但到了1916年他们都收到了海底回波，以及200米外的一块装甲板的回波。其后在1917年郎之万转向研究压电效应，并用石英-钢的夹心换能器来代替电容发射器。他同时还利用了一种刚研制成的真空管放大器，恐怕这可以算电子学第一次在水声中的应用了。到1918年，第一次收到了潜艇的回波，有时甚至可远至1500米。在英国，一个由 R. W. Boyle 领导的小组也在研究石英发射器。“asdic”这个名字也就产生了，这是指当时高度保密的实验<sup>①</sup>。水声回声定位尚未

在对付德国潜艇威胁方面作出贡献，第一次世界大战就结束了。

与此同时，芬奇的气管也被广泛用在被动听测中，并且改成了双管，这样就能利用观察者具有双耳定向感觉的这样一个特点。定名为 MV 的设备有一对线阵列，每一个线阵由 12 根空气管组成，这对阵列在船底安装在左右舷侧，它的转向是靠特殊的补偿器进行的。这种设备在对噪声目标进行定向时有惊人的精度，一个未经训练的观察者能对一个远处的目标定到  $\frac{1}{2}^\circ$  的精度。其时另一个成就是一种叫做“鳗”的系统<sup>(5)</sup>。“鳗”是一个由 12 个水听器组成的可弯曲的漂浮于水下的线阵，它能很方便地装到任何一种船上，也能在船尾拖曳使它远离嘈杂的船舶。在第一次世界大战中，大约总共有三千多条战舰装有不同型号的听测设备。如果二、三条舰同时交叉定向，则完全可以确定出被测潜艇的位置。

第一次世界大战以后，水声在实际中的应用持续地进展着。不久就研究出航行船舶的回声测深方法。1925 年就将设备定名为“测深仪”。在美国海军研究实验室寻求各种对舰艇进行回声定位的实用方法。磁致伸缩发射器解决了回声定位中的发射器需要产生足够功率的问题。同样用酒石酸钾钠的合成晶体代替压电换能器的主要压电材料——天然石英。在两次大战间隔期间，由于电子学的发展使水声有了很大的进展。电子学的发展使放大、处理，以及将声纳信息显示给观察者等有了实现的可能。

当不用助听设备时，超出人耳听觉的频率范围，叫做超声频。在听测和回声定位中采用超声频能使一个不太大的发射器和水听器有更好的指向性。在这段时间内，又有一系列小的但是很重要的声纳部件出现了。特别是英国研制的在回声定位声纳中用的距

● 按照 A. B. Wood 的见解<sup>[4]</sup>，“asdic”这个字原来是“Anti-Submarine Division—ics”的缩写，这是当时进行反潜工作的一个小组的名称，后缀和英语中物理学（physics），声学（acoustics）等字中的 ics 的意义是一样的。很多年后，英国人一般就认为这个字是指回声定位和回声定位声纳系统。

——原注

离记录器，它能使距离的记录保存下来。流线型的导流罩使装在运动船舶上的换能器能避免嘈杂的环境干扰，这种嘈杂的环境是由运动船舶的水流产生的。在1935年研制出了几种较为适用的声纳。随着第二次世界大战的迫近，1938年声纳开始在美国批量生产。在大战初期，大批美国舰艇上都装上了水声听测设备和回声定位设备。水面舰艇的标准回声定位声纳系统是QC型。操作者靠手轮作方位搜索，而用耳机或扬声器作回音监听。如果有回波，则距离由旋转着的指示灯的闪光或距离记录器来指示。潜艇则装有JP型听测装置，它包含一个可旋转的水平直线型水听器、一个放大器、一个可调带通滤波器和一付耳机。靠了这些初始的声纳装置，在反德国潜艇的大西洋战役中起了作用。

但是从科学的角度上来讲，在第一次世界大战和第二次世界大战之间最大成就要算是对海中声传播机理的认识了。在二十年代末和三十年代初，船用回声定位设备都有一种神秘的不可靠性，也就是说，在早晨往往能得到良好的回波，可是一到下午回波就变差或者甚至根本收不到了。直到后来才弄清楚回波一到下午就变弱的原因是海水介质的传播特性。只有靠了特殊的温度测量装置，才知道很小的温度梯度就会使声音向海底折射，而使目标处于影区。这是在此以前所未想到过的。E. B. Stephenson 称这种现象叫“下午效应”。为了测量海面下几百呎范围内的温度梯度，A. F. Spilhaus 首先研制成了温度深度仪，第二次世界大战初几乎每一条参与反潜工作的海军舰只都装有这种设备。在这个时期，人们对海水的声吸收也了解得比较透彻，并在20~30千赫这个感兴趣的频段内，将吸收系数测到相当高的精度。

在第一次世界大战和第二次世界大战时期，大西洋的两岸都热衷于水声事业。在美国，国防研究委员会组织了大批科学工作者在水声的各领域内开展研究工作<sup>●</sup>。现在美国的一些概念以及实

● 在大战末期，国防研究委员会中从事水声工作的部门将所得的研究结果综述成为二十二份报告，即所谓的国防研究委员会第六处技术综合报告。——原注

际应用都是在这个时候就开始酝酿起来的。例如水声制导鱼雷、现代音响水雷和扫描声纳都是战时的产物。发射器和水听器的快速校准法也开始被人们采用。并且对影响声纳性能的各种参数也有所了解，例如目标强度、各类船只在不同航速下和频率下的噪声输出，海洋中的混响、人耳对水下声音的识别等等，这都是第二次大战期间人们对这些因素的初步认识。

有一些成就是德国人做的。Alberich 发展了一种不反声的潜艇覆被材料。它是一层穿了孔的橡皮，这层橡皮贴在潜艇的外壳上，外面再贴上一层薄硬橡皮，使海水和空气孔隔开。这种表面覆被物只在有限深度和有限的频带内有效，并且在工作情况下，不能长期和艇外壳粘合在一起。另一项改进是用于水面舰艇上听测用的“平镶阵”。这种阵因德文 *grüppen-hort-gerät* 或“听测阵设备”而定名为 GHG。

根据 Batchelder 的说法<sup>[6]</sup>，“声纳”这个名字是仿照“雷达”一词而来的，是英语“声导航和回声定位”的缩写 (*sound navigation and ranging*)。

在第二次世界大战后，声纳在不断改进。在回声定位中采用大功率，低频率，并且加上了信号处理，而在此以前信号处理仅仅靠观察者来执行的。在被动声纳系统中同样也有趋势移向低频。在低频段，目标舰的输出噪声大而且海水吸收小。低频和大功率要求较大的阵列，这种阵列若按照老办法的话要求大量的换能器阵元<sup>●</sup>。现代，阵列都放到深海底，在那里具有安静的环境和良好的传播条件等优点。战后，在海上也不断地进行了测量和研究工作，使我们对许多水声参量有了数量上的概念，这些参量在工程上是很需要的。

水声在战后的一个重要发展是它在民用方面的推广，直到现在仍然如此。除了在回声测深方面的传统应用外，水声开始在声导航信标，深浅海底质测绘、探鱼以及遥测和控制等方面有所应

● 原文为水听器，应为换能器。——译注



用。随着人们对海洋的开发，水声在民用方面的应用还将不断地扩展。

## 1.2 水声的应用

水声应用的频段包括了一个其上限与下限差了五、六个十倍频程的频率范围。在其最低频端利用超低频的压敏水雷。运动船舶会使其附近的压力减小，这就引起压敏水雷的动作。这种压力减小的现象不是声学现象而是流体动力学效应（伯努利效应），因为超低频的存在并不要求一个弹性的介质，而且它也不向远处传播。由于水雷是靠了压力换能器触发的，因此看起来和声波没有什么两样。由航行的船舶产生的压力扰动通常含有低于一赫的频率分量。音响水雷对船舶真正辐射出来的声音敏感。当其通带内的声压超过一定大小时，就会爆炸。在扫雷时，靠扫雷艇后拖曳的大功率声源所发射的声音使这种音响水雷爆炸。作为水雷目标的船舶，在某些频率上发射出来的噪声最强，水雷和扫雷就工作在这些频率上。被动检测同样利用船舶或潜艇辐射出来的声音，在被动检测中，声音是由远处船上或置于海底的水听器阵列接收

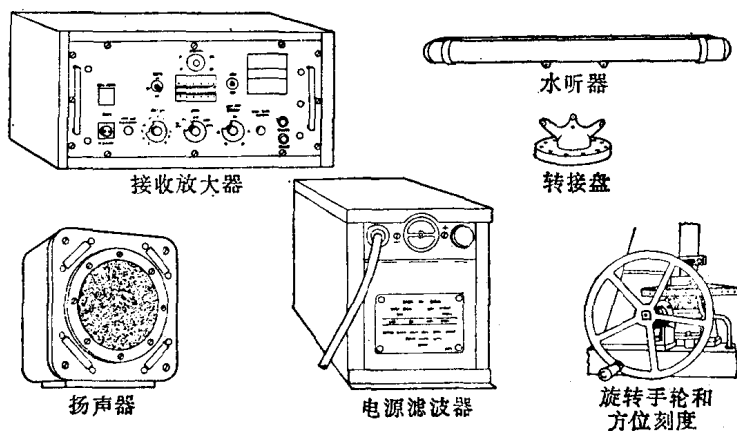


图1.1 潜艇用JP听测设备，第二次世界大战中美国潜艇一般都用这种设备<sup>(7)</sup>