

拖曳式线列阵声纳研究丛书

《1》



中国科学院声学研究所

INSTITUTE OF ACOUSTICS • ACADEMIA SINICA

1989 · 北京

献词

汪德昭

(中科院学部委员, 中国声学学会名誉理事长, 中科院声学所名誉所长)

众所周知, 在海水介质中以声波的传播性能为最佳, 而无线电波和光波在海水中传播时都要受到严重的衰减, 因此不能有效地传递信息。早在七十二年前, P. Langevin 就利用石英的压电性能, 用钢板夹住石英制成“三明治”式的换能器, 产生了超声频或声频的声波在海水中进行远程目标的探测, 由此发明了声呐。它成为第一次世界大战时在海中横行霸道的德国潜艇的克星。以上的历史事实, 说明了声呐技术和指导声呐技术的水声学, 是由于国防的需要——反潜战 (ASW) 的需要而发展起来的。

半个多世纪过去了, 时代在变化, 科技在飞跃, 水声新技术也在不断发展, 它不仅仅满足于国防建设的需要, 而开发海洋, 探测海洋, 实现人类对海洋环境的认识对海洋资源的利用, 实现人类向海洋进军的宏伟目标, 也是离不开水声新技术的。开发海洋的重要课题之一, 就是寻找海底石油。目前广泛使用的寻找方法为人工地震勘探。为了接收各种地震回波, 就需要一种高分辨力, 高效能的关键性装备——于是拖曳线列阵接收系统就诞生了。它既然能接收地震回波, 当然也能接收潜艇低频噪声; 国防部门就把它移植过去, 成为线列阵声呐。因此线列阵声呐是由民用发展成为军用的。

1975 年 7 月, 中国科学院声学研究所应有关单位的咨询, 为我国海岸水下预警体系提出了适合我国国情的五种警戒系统, 即 001 至 005 系统。其中 005 即为战术型拖曳式线列阵声呐, 并委托科学院东海研究站负责研究工作。1978 年声学所又提出了 005 的改进方案, 这个方案在理论上及某些信号处理机关键设备方面, 进行了深入的分析和说明。由于种种原因, 此课题虽没有能够及时地、全面地开展研究工作, 但有关专家在水声物理和水声工程方面, 已作了足够的准备, 因为专家们已经认识到 005 在反潜战中占有重要的位置。这种看法和美国国防部报告中所说的不谋而合。报告说“三十年来, 水面舰艇反潜战中最重要的发展是战术拖曳线列阵声呐的问世”。1984 年年底, 经过专家的建议, 有关部门决定开展这项研究工作。

战术拖曳式线列阵声呐是一种新型声呐。为了提高作用距离, 并且能探测出几百赫以下的潜艇噪声中的线状谱成份, 要求这种被动式声呐工作在几十赫的低频范围内。在低频状态下, 为了保证有足够尖锐的方向性, 要求基阵很长, 甚至长达几百米, 上千米, (美国埃多和古德公司在 1976 年开始研制的 AN/SSQ-19, 水听器阵长 240 米, 拖缆长 1680 米) 这就大大超过了舰艇本身的长度。发展成为拖曳式线列阵声呐。它的优点, 除了采用很长的长度以获取空间增益外, 因为为较远地离开本舰, 受舰艇噪声影响也较小。一条良好的拖曳阵, 阵元上收到的噪声仅比海洋噪声约高 10 分贝左右。另外, 拖曳深度可变, 便于克服跃层的障碍。

拖曳式线列阵声呐的出现, 受到美国、苏联、英国、加拿大、巴西、日本、西班牙、法国等国家的重视。如前所述, 关于线列阵声呐, 我国水声专家在水声物理和水声技术方

面也有良好的理论基础和雄厚的技术力量。对于总体设计，低频水听器的研制，多通道数据采集系统，信号处理机的核心设备，拖缆绞车系统的控制，定深，自适应减噪等方面，将把我国的独创性工作和国际上先进技术结合起来，如同过去的噪声测距声呐，浅地层剖面仪等设备一样，做到后来居上。以水声专家李启虎同志为首的研究组编写出版的“拖曳式线列阵声纳研究丛书”，对声呐技术的推动，对国际研究情况的了解，将起到很好的作用。该丛书第一册将翻译国外资料，以后将陆续报导自己的工作。丛书不仅对于从事水声，海洋物理及地球物理的科研与教学工作者及研究生是很好的参考书，对于海上石油地球物理勘探工作者，也是必要的读物。

1989.8

前 言

关定华

(中科院声学所所长, 中国声学学会理事长)

海洋是资源的宝库, 也是人类活动的重要场所。海洋调查研究, 海上运输, 海洋资源开发, 水下工程建设及海上战争都需要有高效的水下观察手段, 光波和无线电波在海水中吸收很厉害, 观察距离很短。只有声波在海水中能传播很远的距离。因此声波就成为水下观察、通讯、定位、制导等最有效的手段。随着海洋开发的发展和海上战争的需要水声技术和各种声呐近年来有长足的进展。

声波在海中的吸收随频率升高而增大, 为了增加作用距离, 近年来声呐使用的频率愈来愈低。使用低频声波时为了保持高的分辨能力, 需要用尺寸很大的基阵。基阵尺寸的增加对于海底固定式设备已是很大的困难, 对于船用设备就更加困难了。因为舰船的尺寸限制了基阵的尺寸。但近年来在基阵尺寸和运载平台尺寸之间的关系上有一个突破, 这就是拖曳线列阵。拖曳线列阵最早用于海洋地质勘探。为了保证有足够的分辨能力, 需要使用大的基阵。为此, 人们提出新的方案, 使用拖曳线列阵, 把接收水听器装在中性浮力电缆中, 拖在船后, 长达若干公里, 远远超出舰船的尺寸。这种技术在地质勘探中取得很好的效果, 与线列阵配合, 发展了数据处理技术, 使用很大的高速计算机和复杂的程序来处理数据, 拖曳阵的结构, 稳定等技术也有不少进展。

后来, 人们发现拖曳线列阵对于探测舰船噪声也有很强的能力, 军用拖曳线列阵很快发展起来。这是军用和民用水声技术互相影响, 互相渗透的很好例子。拖曳线列阵在拖曳过程中产生噪声, 运动过程中不能保持完全的直线。探测舰船噪声使用频率远高于海洋地质勘探, 数据必需实时处理, 因此要开展物理研究, 发展新的数据处理技术, 结构上也要有很大改进, 这些都是高难度的技术问题。由于这一系列的关键技术问题, 到现在为止能掌握拖曳线列阵声呐的国家还不多, 是一种先进的技术。

我国在海洋地质勘探方面拖曳线列阵早已使用, 有关拖曳线列阵的理论, 实验和信号处理技术也有不少工作。为了促进拖曳线列阵技术的发展, 出版“拖曳线列阵声纳研究丛书”, 介绍国内外有关进展及研究成果是很及时很必要的。相信丛书的出版对于促进技术交流, 提高我国这方面技术的发展, 一定会带来很大的好处。

1989.8

71.5754
140
3

拖曳式线列阵声纳研究丛书

目 录



献词
前言

汪德昭 (i)
关定华 (iii)

国外现役声呐拖曳式线列阵介绍:

- | | |
|-------------------------------|----------|
| 1. 美国 AN/SQR-19 拖曳式线列阵介绍 | 李启虎 (1) |
| 2. 英国 comtass I 型拖曳式线列阵声呐系统介绍 | 李启虎 (8) |
| 3. 法车朗巴若拖曳式线列阵声呐 | 徐俊华 (20) |

综述:

- | | |
|----------------------|--------------|
| 1. 第五代数字式声呐信号处理 | 侯自强等 (41) |
| 2. 目标强度和回声结构 | 徐俊华 (51) |
| 3. 高吞吐能力的声呐处理器 | 朱 桢 陈 庚 (63) |
| 4. 谱分析: 经典与高分力频谱估计综述 | 张春华 (71) |
| 5. 时间延时估计 | 王劲林 (92) |
| 6. 自适应阵处理综述 | 王晓蕾 (109) |

波束成形及信号处理技术

- | | |
|--------------------------------|-----------|
| 1. 畸变拖曳阵的波束成形 | 李启虎 (121) |
| 2. 存在大的估计误差时利用互相关法进行时延估计 | 张 艳 (125) |
| 3. 高分辨力的空间处理方法在浅海固定基阵实数据处理中的应用 | 李启虎 (138) |
| 4. 利用小稀疏阵的自适应频率域波束形成和谱分析 | 欧 侠 (142) |
| 5. 普通阵列对空间近距离宽频带相干源的分辨力 | 张 艳 (155) |
| 6. 线性接收阵对单个单色平面波的方位估计 | 路 斌 (162) |
| 7. 使用大型拖曳阵进行方位估计 | 刘秋实 (171) |
| 8. 一种有效的道尔夫-切比雪夫波束成形方法 | 李云岗 (183) |
| 9. 用两种模式识别法对浅海水下声信号源进行自动分类的实验 | 魏学环 (188) |
| 10. 分析与模拟辐射到水中的船舶螺旋桨噪声的信号处理技术 | 魏学环 (195) |
| 11. 判断船舶噪声的专家系统 | 魏 薇 (201) |
| 12. 存在多途传输时的时延估计 | 罗翔飞 (215) |
| 13. 距离与方位确定: 最大似然和MUSIC技术 | 李淑秋 (223) |
| 14. 用于旁瓣消除的阵列滤波器 | 张春华 (234) |
| 15. 时间延迟误差对线列阵波束形成的影响 | 王青玲 (247) |
| 16. 水声信道时、空及频率稳定性测量 | 陈 庚 (262) |
| 17. 利用未知位置的源来校准阵形——最大似然近似 | 解宝兴 (273) |

1014134

18. 线阵波形成中水听器补偿的线性预测	魏学环 (281)
19. 阵形未知时拖曳线列阵的波束形成	徐俊华 (290)
20. 描述船噪声的统计方法和专家系统法的比较	魏学环 (296)
21. 后置波束形成干扰抵消器的带宽效应	蔡惠智 (301)
22. 畸变阵处理	蔡惠智 (306)
23. 具有自适应比特分配的差分脉码调制	周桂琴 (312)
24. 拖曳阵对浅海声场的响应的研究	陈耀明 张春华 (324)
25. 拖曳阵对舰船噪声的响应: 近场传播问题	朱厚卿 (342)
26. 浅海拖曳阵的指向性响应	陈耀明 (350)

设备、器件:

1. 全数字化自动增益控制	赵国英 陈玉凤 (365)
2. 跟踪卡尔曼滤波器的并行实现	杜利民 (371)
3. 基于 TMS320C25 的增强 32KBPS ADPCM 代码转换器	孙长瑜 (379)
4. 用 TMS320C30 实现 FFT	孙 增 (386)
5. 浮点 DSP Nubus 板使 MacII 成为实时工作站	李之岗 (394)

展望:

1. 甚高速集成电路 (VHSIC) 技术在数字信号处理中的应用	朱 桢 (397)
2. 甚高性能的集成电路 (VHPIC)	朱 桢 (404)
3. 信号处理应用中的光纤系统	朱 桢 (414)
4. Systolic 阵在自适应波束成形中应用	刘秋实 (419)
5. DSP 应用决定了浮点处理的发展	李云岗 (434)
6. 用神经网络方位估计方法	杜利民 (446)
7. 英国的微处理器: 一个他新的课题	路 斌 (454)
8. Acorn 处理器: 一种新的 RISC 结构	路 斌 (459)

后记

李启虎 (462)

美国 AN / SQR-19 拖曳式线列阵介绍

(李启虎, 根据 L.Gerken 著 "ASW versus Submarine
Technology Battle" 中有关材料编译)

与大多数声纳的发展史不同, 拖曳式线列阵声纳一开始是在民用部门发展起来的。自从五十年代英国在北海地区附近海域发现海底油田以来, 寻找海底石油成了海洋开发中的重要课题, 其中最为紧迫的问题是要有一种高分辨力, 高效率的海底地质剖面仪。地震勘探是达到这一目的的有效方法。当时, 美国的西方石油公司, 物探公司, 英国的 plessey 公司, 挪威的 Simera 公司先后使用拖曳式线列阵来接收地震回波, 当然其使用的频率是非常低的, 一般在 120HZ 以下。

在实际使用中, 发现这种拖曳式水听器阵具有远程听测潜艇低频辐射噪声的能力, 所以美国海军首先在六十年代开始致力于把它移植到军舰上的研究。

由于声纳所使用的频率范围远比地震勘探的高, 同时两者对信号处理的方法要求也有极大的差别, 再加上拖曳阵本身的定深, 噪声等问题, 使拖曳式线列阵声纳的研制遇到不少困难。一直到 1975 年 6 月份, 才有一种用于警戒的远程拖曳线列阵声纳研制出来。其型号为 AN / SQR-14。这种声纳不是装在战斗舰艇上的, 而是装在一种专用警戒船上的。

与此同时, 美国又开始研制装于水面舰艇与潜艇的战术拖曳式声纳, 简称 TACTAS(TACTical Towed Array Sonar)。

第一部 TATCAS 是由 EDO 公司制造的 AN / SQR-18, 它是附加于变深声纳 AN / SQS-35(V)拖鱼之后的, 由 32 个隔震水听器组成的 100 米长的线列阵, 这只是一种过渡形式, 后来 EDO 公司使用了 Gould 公司的技术, 变成了没有拖鱼的长拖缆 TATCAS。

Gould 公司开发 TATCAS 的工作始于 1976 年, 到 1982 年把第一部 AN / SQR-19 拖曳式线列阵声纳安装于 DD-980 导弹驱逐舰上, 自 83 年开始, 所有 Spruance 级导弹驱逐舰上几乎都装备了这种声纳。

同时, Gould 公司还研制核潜艇上用的拖曳式线列阵声纳 AN / BQR-25, 简称 STASS(Submarine Towed Array Sonar System), 装备于攻击型核潜艇 SSN594, 598, 637。这种线阵的拖缆长 1000 英尺, 直径 1 英寸, 接收阵长 300 英尺, 直径 2 英寸。

美国潜用拖曳式线列阵的拖曳方式有两种(见图 1), 一种是固定式的, 如 SSN688 攻击型核潜艇上安装的, 拖缆长 1000 英尺, 声学模块长 240 英尺, 直径 3.25 英寸, 这种拖曳式线列阵在潜艇出港前安装好, 当潜艇在海上游弋时, 无法回收, 只有在到港后才能拆卸下来。另一种具有回收装置, SSN637 级潜艇上装的就是这一种, 从图上可以看出, 拖放机构不是艇壳的外露部分而是从艇尾经过一个导缆槽, 放在潜艇里边。这种传动机构叫作 TADOG(Towed Array Deep Operating Gear)。它的详细结构见图 2。

它由水平稳定出口, 存贮轮, 牵引器, 滑轮等构成。TADOG 机构虽然可以使拖曳式线列阵在海上回收或施放, 但由于增加了潜艇的辅助设备, 且操作也不甚方便, 还要在

潜艇中专门留下空间给拖缆上的残存水使用。所以还有待进一步改进。

STASS 的拖曳部分结构如图 3 所示, 尾部有一个 VIM(隔振模块), 首部有两个 VIM。然后有一个 ASM(阵形稳定模块)中间有 4 个水听器模块。

水面舰艇上用的 TACTAS 系统据信是目前作用距离最远的一种声纳, 目前导弹驱逐舰上装的是为 Gould 公司生产的 AN/SQR-19 拖曳式线列阵声纳。它的阵形稳定控制机构及水面上的信号处理系统是非常先进的。

图 4.给出了 AN/SQR-19 基阵子系统的结构。基中 HDTM 表示航向, 温度, 深度模块。

VTD 表示遥测驱动模块, VIM——低频水听器模块 MFM——中频水听器模块, HFM——高频水听器模块, 拖缆长 1600 米, 直径 1.07 英寸, 基阵长 150 米, 直径 3.25 英寸, 空气中重量 770kg, 由 8 个模块构成, 每块长 12 米, 每一模块由 48 个等间隔的水听器构成, 整个基阵有 384 个水听器。

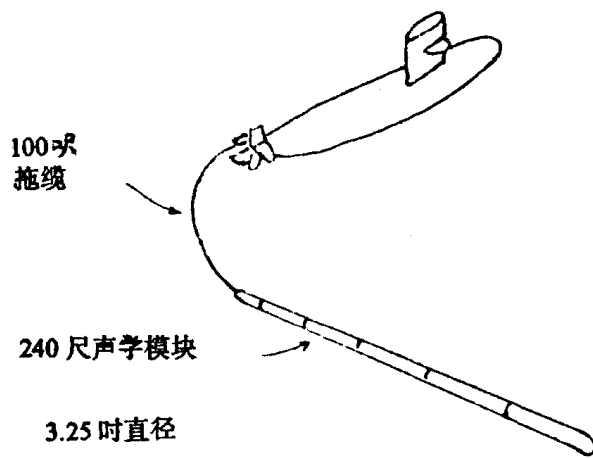
AN/SQR-19 的系统配量见图 5.信号处理部分的核心设备是 IBM 公司生产的 AN/UYK-20

信号处理机, 终端控制占有 4 个显示屏幕, 由两名声纳员操作。

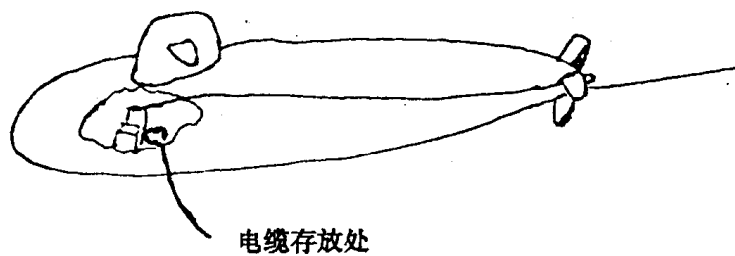
AN/SQR-19 上第一次使用自适应噪声抵消技术(见图 6)它利用一种 PIC(Postbeam Interference Canceller)方式, 以便最大限度地抵消干扰, 提高检测性能。

目前正在致力于改善 TACTAS 的性能, 一种称之为 HSTAS (High Speed Array System)的系统正在加紧研制之中, 它利用高级电子技术和噪声抵消系统以便扩大检测与识别能力。

AN/SQR-19 的价格是每台 950 万美元。



(a) 688 级 SSN 用的固定点系统



(b) 637 级 SSN 传动机构
(TADOG—Towed Array Deep Operating Gear)

图 1. 潜艇上用的拖曳式阵的两种拖曳方式

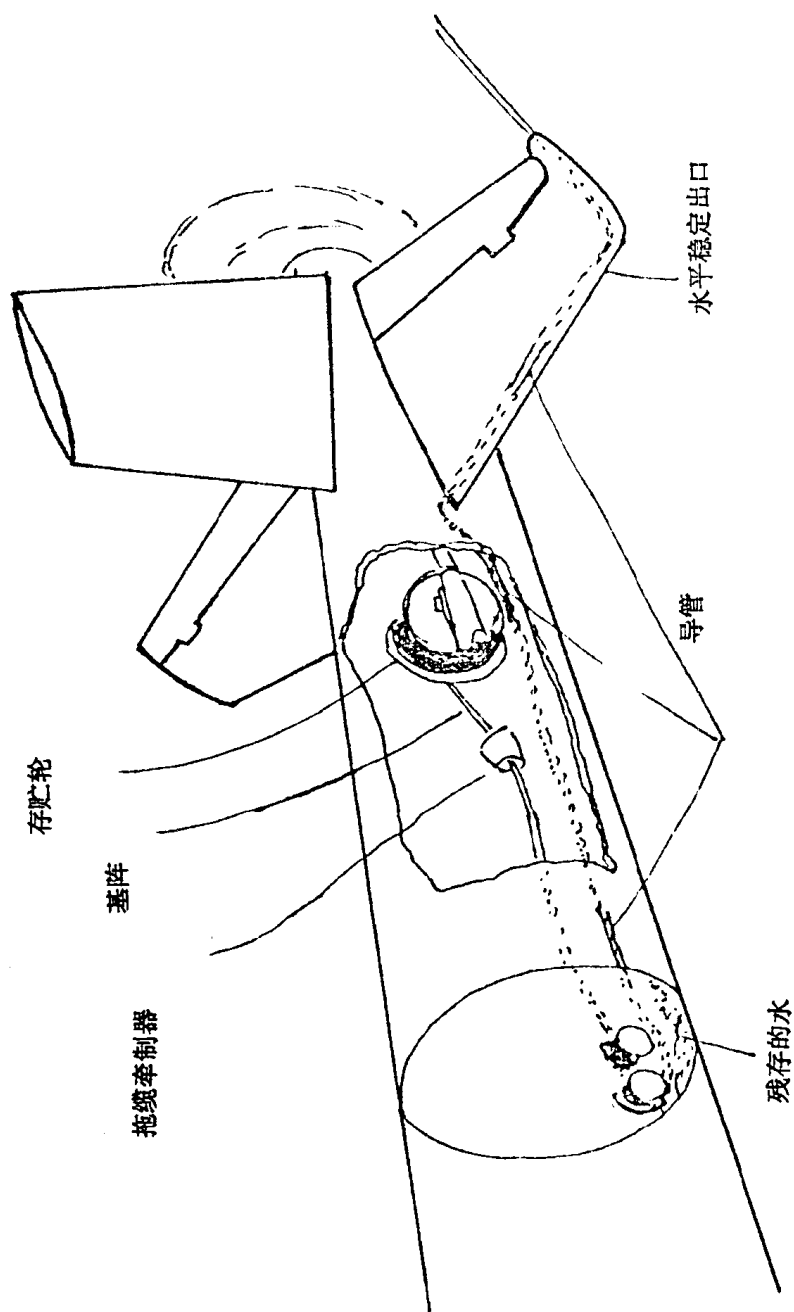


图 2. TADOG 的细部结构

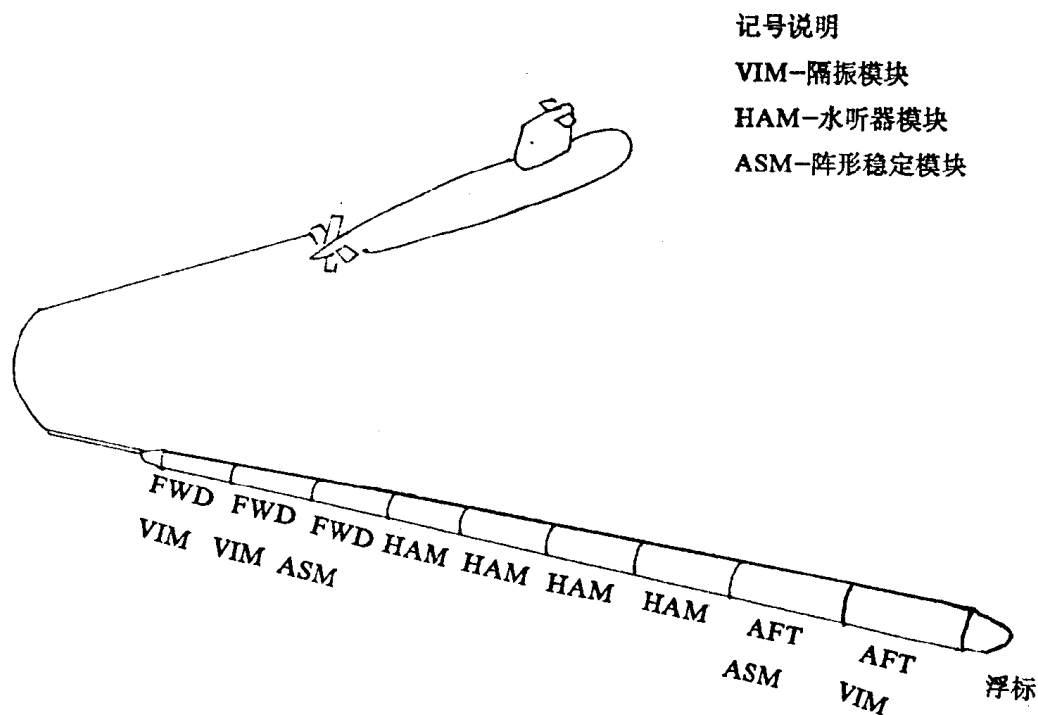


图 3. STASS 拖曳式线列阵

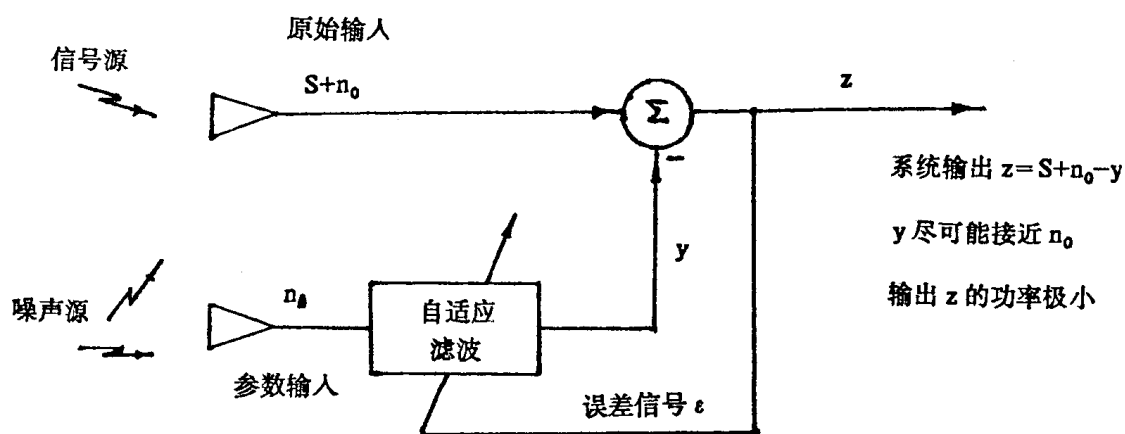


图 6.SQR-18 上使用的噪声抵消系统示意图

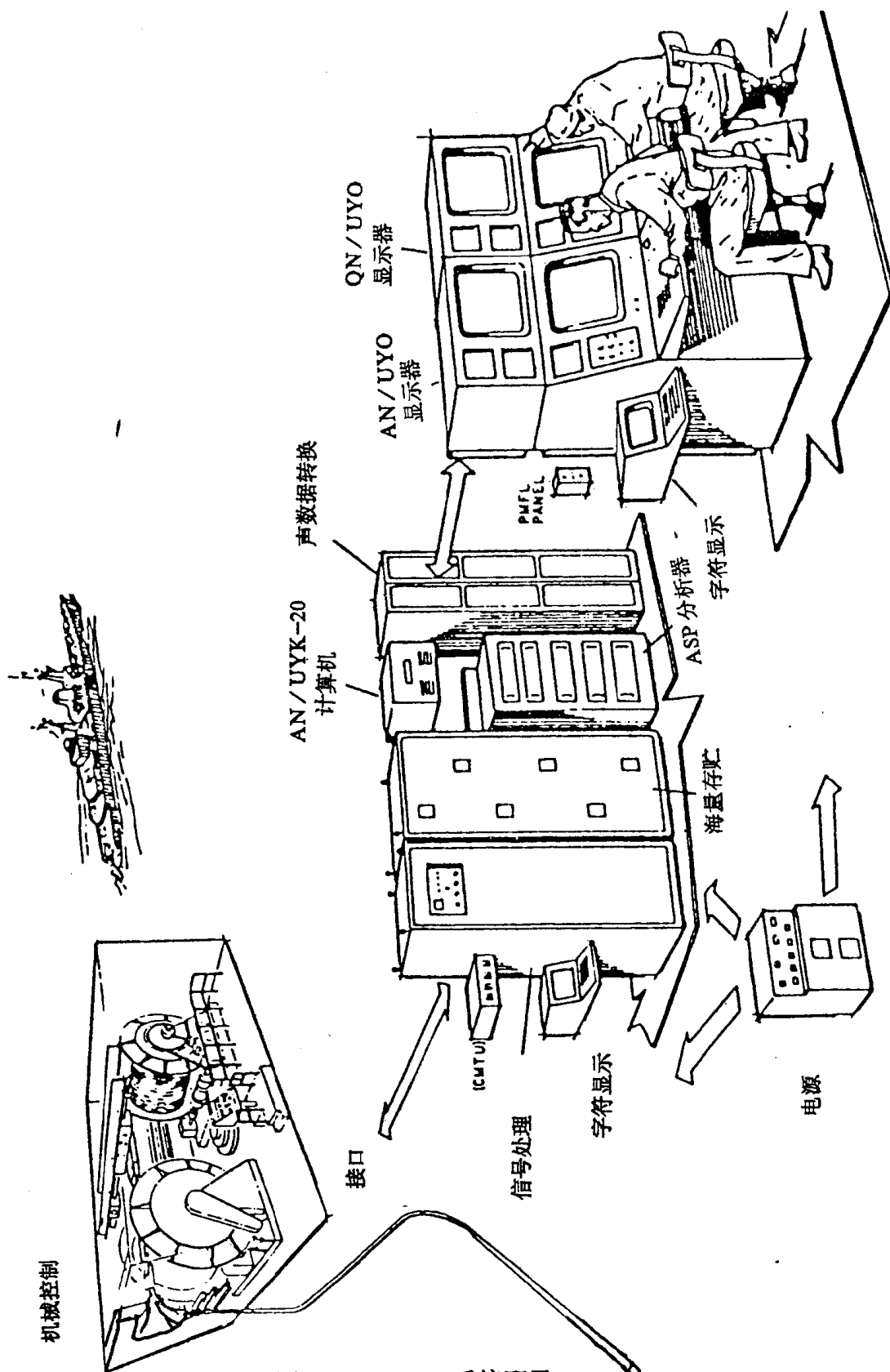


图 5. SQR-19 系统配置

英国 COMTASS 1 型拖曳式线列阵声呐系统介绍

(李启虎根据英国 Plessey 公司产品说明书编译)

一、引言

Comtass 是英文 Compact Towed Array Sonar System 的缩写, 表示紧凑的拖曳阵声呐系统。由英国 Plessey Marine 与 Ameco Hydrospace 公司合作生产, 其中机械传动部分由 Strachan 与 Henshaw 公司提供。

1.1 概述

Plessey 公司是英国为皇家海军提供电子设备的主要公司之一。服务于海军已有 20 年的历史。它的姐妹公司 Ameco Hydrospace 主要从事于各种水面舰艇与潜艇用的声呐基阵的研制。这两个公司参加世界范围的竞争。Plessey-Ameco 拖曳阵声呐具有下列性能:

- * 提供整机, 无须到其他厂商处找配件
- * 完备的后勤支持
- * 低背景噪声
- * 低功耗
- * 安装, 维修简便
- * 空气致冷的电子模块
- * 多功能的操纵台
- * 成熟的最现代技术
- * 简易的插入测试仪表
- * 价格便宜
- * 高可靠性
- * 高性能

1.2 拖曳式声呐

远程拖曳式被动声呐是二次大战以来。反潜战方面取得的最重要成就之一。它的基阵由高灵敏度的水听器组成线阵。由水面舰艇或潜艇拖曳, 本舰噪声的影响相对来说比较小。由于基阵长, 易于利用目标的低频成份进行远距离检测。

1.3 Comtass 1.

拖曳式线列阵已在世界范围内获得海军越来越多的应用。

Comtass 1 的设计出发点是研制一种相对来说比较小的, 便宜的, 易于在小型, 中型舰艇上安装的拖曳式声呐, 但是其性能又要和大型的专用反潜舰艇上安装的声呐相近。

Comtass 1 的基阵及电子装备都是可以扩展的, 用户可以选购其他部件予以延伸, 它

在船上的基本配置见图 1。拖曳部分的结构见图 2。

Comtass1 的轻型绞车及存缆系统甚至可以由非熟练工人稍加培养就能操作。系统可简单归纳为

- * 32 米长的声基阵
- * 三个频段的接收系统

它的基本特征如下:

- * 低噪声:基阵的流体噪声和来自其他方面的干扰被隔到最小。
- * 高性能:大的声学基阵具有几组水听器, 提供高的指向性指数, 从而增加检测能力。
- * 稳固的结构:塑料及其他高强度结构特征模块的物理性能, 声学模块和电子设备的联结简单可靠。
- * 信号处理:数字信号处理技术改善了跟踪和识别性能, 特别是多路混合的处理技术大大减少了整机的尺寸。
- * 集成度:Comtass1 是全系统的反潜声纳系统。
- * 高可靠性:低 MTTR 及高 MTBF
- * 维修:具有故障自检程序
- * 极少模块:利用电子设计技术已使所需模块减到最少
- * 安装简便
- * 功耗低
- * 潜在的扩展能力:无须换部件就可使选购的模块加在已有部件上, 使功能得到扩展。

1.4 系统配置

本系统由基阵, 拖缆, 传动系统, 信号处理部分及控制台构成 (见图 3)

基阵由若干个声学与非声学模块构成, 它的长度是可以变的。

拖缆是铠装 1000 米缆绳, 本公司还可以提供长 1500 米的拖缆。

传动系统由一个绞车与自动卷绕机构及控制台构成, 绞车是液压式的, 由船上供电。但也可由电源-液压泵提供。(见图 5)

控制台有一个显示器与便于操作的键盘

二、各部件的说明

2.1 引言

Comtass1. 所有的线列阵适于装备 500 吨以上的水面舰船或潜艇, 绞车可以在船坞里或在离船坞后再安装, 一种挂钩设备也可直接将线阵挂在潜艇上, 电子信号处理部件安装于 19 英寸 (483 毫米) 的机柜中, 操作台有一台高分辨力的显示器。

2.2 基 阵

由四种类型模块构成, 允许拖曳速度为 15 节。

2. 2. 1 声学模块

由水听器构成，带有前放

2.2.2 隔震模块 (VIM)

使拖缆或绳尾的振动对声学模块的影响降到最低。

2.2.3 传感器模块

包括深度和温度传感器，其信息将在控制台上显示

2.2.4 绳尾

给基阵提供一个稳定的负载，以使基阵拉直，保证信号处理部分获得最大增益。

2. 3 拖缆和传动系统

2.3.1 拖缆

拖缆具有高强度铠装结构，即便拖曳速度到 30 节也不会发生危险。电气设备与它很好地匹配以免噪声经任何途径传到信号接收系统去。如果要扩展声阵，也无须换拖缆。

2.3.2 绞车和传动系统

绞车是轮型的，稳定可靠，便于操作，它由绞车内部的液压马达提供动力。该马达也可直接和船上的液压系统联结，如果船上没有这样的液压系统，那么用户可以使用电动 / 液压系统。绞车是便于运输的，可以放在 1 / 2ISO (2.5m / 2.5m / 5m) 舱室内。绞车可以在 5 级海况下工作。

2.4 信号处理与显示

Comtass1 完成以下功能：

- * 宽带监视
- * 音频监视
- * 跟踪

经过处理的数据以强度调制方式显示在操作台上。当系统有故障时，监控系统会通知操作员。系统的修复通过更换模块实现。

2.4.1 基阵接口

在数字化之前，声纳数据通过抗混淆滤波器，每一通道有一自动增益控制 (AGC) 电路，以保证系统的动态得到充分利用，每一通道的数据经串联混合后传输到波束成形器中，还有一个双向接口用于磁带录音机

2.4.2 波束成形

Comtass1 有一个能复盖 360° 的波束成形系统。该系统是可编程的，因而具有扩展的潜力。还有一个声速补偿器用于使空间误差极小化。基元的屏蔽因子可以产生 30dB 的付辨。最大响应角 (MRA) 由软件控制使波束指向角的扇面损失为常数。本系统也提供未加权波束成形以便提高指向性指数，所付的代价是增加付辨高度。

2.4.3 宽带监视

本系统有三个工作频段:400-800Hz, 800-1600Hz, 400-1600Hz。一共有 63 个波束对 (126 数据通道) 由波束成形系统产生。这些数据要经过外差和带通滤波到上述三个频段。通常情况下，监视系统工作于 400-1600Hz。波束数据经过互相关和积分得到增益，积分时间由操作员选定，分为 $1/2S$ ， $2S$ ， $8S$ ， $32S$ 四种。

另有 4 个跟踪器协助声纳员工作。

数据的显示方式是时间 (垂直) / 方位 (水平) 的强度调制，一个游标可以使声纳员求出精确的定向角。

2.4.4 显示与声纳员接口

Comtass1 有一个高分辨力的显示器。此外还有一个操作面板。声纳员可以通过它获得其它信息，操作手段有磨球，游标，数字 / 字母键。

等离子面板的触摸开关使声纳员不必按键就可完成选择。

2.4.5 系统的自检

在声纳工作时，系统不间断地完成自检，它能将需要更换的印刷电路板检查出来，以便及时更换它。

模拟或数字信号被注入系统，每一级处理的结果都与一个特殊处理块的数学模型相比较。比较的结果传送到中心处理器，如果发现有故障，就会在显示屏幕上出现警告信号。修复的办法就是更换有故障的模块。

2.5 性能

在拖曳高灵敏的声学模块时，本舰的噪声只有很小的影响，同时拖曳部份的结构允许扩展声学模块，以获得更大的增益。

基阵的结构允许高速拖曳而不发生危险。

2.6 硬拷贝记录器

有一个接口允许把数据记在记录器上，最长可走 40 小时。建议使用 EPCZZOS 型记录器。

EPCZZOS 电子图象记录器是一种 4000 点记录器。其中 3200 点用于数据记录。另有 800 点用于作标志及指示灰度

三、性能指标