

# 第四讲 探潜先锋——拖曳线列阵声纳\*

余华兵<sup>†</sup> 孙长瑜 李启虎

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

**摘要** 文章介绍了在反潜战中发挥重要作用的拖曳线列阵声纳的工作原理、结构特点、系统组成,同时回顾了拖曳线列阵声纳从第一次世界大战时 Hayes H C 博士的概念到 2000 年 John R. Potter 等人的细线阵所经历的长达 80 年的发展过程,最后预计,应用光纤、新声源,采用多线阵结构能进行三维定位的主被动模块化拖曳线列阵声纳是未来的发展方向。

**关键词** 拖曳线列阵,声纳,探潜,反潜战

## Towed line array sonar spearheads submarine detection

YU Hua-Bing<sup>†</sup> SUN Chang-Yu LI Qi-Hu

(Institute of acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Towed line array sonar (TLAS) has been playing an important role in anti-submarine warfare. The principle, characteristics and configurations of TLAS are briefly introduced. The history of TLAS from the inspiration of H. C. during World War I to the 'thin array' of J. R. Potter in 2000 is reviewed, and it is predicted that future TLAS will be composed of passive and active modulated multiple arrays with fiber-optic hydrophones and new acoustic sources, and will be capable of locating targets in 3-dimensions.

**Keywords** towed line array, sonar, submarine detection, anti-submarine warfare

### 1 前言

声波是人类迄今已知的唯一能在海水中远距离传输的能量形式,其他能量辐射形式,如光波和电磁波都不能在海水中远距离传输<sup>[1]</sup>。因此,人们一直利用声波对水下或者水面的固定或运动目标进行导航、定位、跟踪和识别,具有这种功能的设备称为声纳或水声设备。

拖曳线列阵声纳拖曳距舰船尾部一定距离的声接收系统(通常称为线列阵),通过接收航行目标自身辐射的噪声或者通过接收目标反射回来的主动信号的回波,来检测目标的有无并估计目标有关参数。

该声纳可以分为两类,即被动式和主被动联合式。被动式拖曳线列阵声纳仅通过接收到的目标辐射噪声来进行探测,具有较好的隐蔽性,它可以由水面舰艇,也可以由潜艇拖曳,而主被动联合式拖曳线列阵声纳既可以利用被动接收到的目标辐射噪声进

行探测,又可以通过主动发射信号经目标反射后的回波信号来进行检测,是探测辐射噪声日益降低的潜艇的重要手段,通常由水面舰艇拖曳。

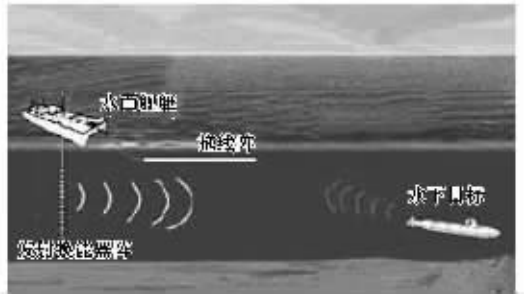


图1 拖曳线列阵声纳工作场景示意图<sup>[2]</sup>

被动式拖曳线列阵声纳通常由以下几个部分组成:

\* 中国科学院知识创新工程资助项目  
2005-11-14 收到初稿,2006-2-10 修回  
<sup>†</sup> 通讯联系人, Email yhb@ocean.ioa.ac.cn

(1) 线列阵 :用于接收目标的辐射噪声和目标回波 ,它由若干个拾取水下声学信号的水听器按照一定的间距布放 ,并采取隔振措施 ,配备用于水下姿态监视的传感器模块 ;

(2) 拖曳收放系统 :用于拖曳、布放和回收线列阵 ,包括拖缆和绞车 ;

(3) 深度、航向监视系统 :用于监视拖线阵在水下的深度、温度、航向等信息 ;

(4) 信号处理系统 :用于处理各种信息 ,实现对目标的检测及有关参数的估计 ;

(5) 显示控制系统 :用于将信号处理系统处理的结果进行显示 ,与其他系统进行信息交换 ,并将控制命令下发给有关系统 ;

(6) 数据记录系统 :将各种数据进行存储。

主被动联合式拖曳线列阵声纳则还有发射换能器基阵、相应的拖曳收放系统及发射机。

图 1 是拖曳线列阵声纳工作场景的示意图 ,其中在船尾拖曳的即是拖曳线列阵声纳的线列阵 ,而在船底吊放的则是发射换能器阵 ,其余设备均在甲板上或者舱室中。

拖曳式线列阵声纳区别于安装在舰艇外壳上的舰壳声纳的优点在于 (1) 拖曳线列阵声纳将接收声波的拖线阵远离工作母船 ,显著减小了拖曳平台噪声的影响 ,能显著提高接收信噪比 ,达到提高声纳检测能力的目的 (2) 拖曳线列阵声纳中的拖线阵规模不受舰船尺寸的限制 ,可以安装较之舰壳声纳更多的水听器 ,充分利用了海洋中信号和噪声不同的统计特性 ,有效地提高声纳的检测性能 (3) 可以利用在海洋中传播损失较小而且是水面和水下目标辐射噪声中重要成分的低频信号进行检测。

由于以上优点 ,拖曳线列阵声纳出现后受到广泛关注 ,经过多年的发展 ,已经成为各国海军对日益安静的潜艇进行有效检测的重要装备<sup>[3]</sup> ,不妨称其为探潜先锋。

## 2 拖曳线列阵声纳工作原理

众所周知 ,人的两只耳朵具有定向功能 ,当要判断一个声源的方向时 ,总是把头转向声源的方向 ,使得声源正好处于两只耳朵连线的垂直平分线方向上 ,声音能够同时到达两只耳朵 ,这实际上是一种简单的定向原理——最大声压定向法<sup>[4]</sup>。拖曳线列阵声纳就是利用类似的原理来进行工作的 ,它充分利用噪声和信号的不同统计特性 ,将多个水听器在同

一时刻收到的不同信号 ,经过与方位相关的时间补偿处理 ,再通过能量积累 ,得到输出能量最大的方向就是目标到达的方向。

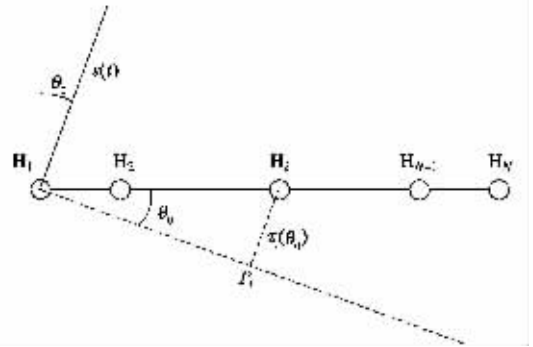


图 2 等间隔线列阵水听器之间时延差计算 ( $H_1, H_2, \dots, H_i, \dots, H_{N-1}, H_N$  为间距固定的  $N$  个水听器)

如图 2 所示 ,拖曳线列阵声纳的线列阵中的声学模块由  $N$  个水听器组成 ,以平面上的某一点为参考点 ,设入射信号为  $s(t)$  ,经过海洋传播 ,到达第  $i$  个水听器的信号为  $s(t + \tau_i(\theta_0))$  ,这里  $\theta_0$  为信号的入射角。如果将这一路信号延时  $\tau_i(\theta_0)$  (此延时和信号入射方向有对应关系 ,通过此延时能给出信号的入射方向) ,那么对所有  $N$  路信号都会变成  $s(t)$  ,将这  $N$  路信号相加便得到  $Ns(t)$  ,再平方积分得到  $N^2 \sigma_s^2$  (这里  $\sigma_s^2$  为信号功率) ,如果改变信号入射的方向 ,那么第  $i$  个水听器的信号经延时  $\tau_i(\theta)$  就变成  $s[t + \tau_i(\theta) - \tau_i(\theta_0)]$  ,系统输出能量最大 ,即

$$D(\theta) = E \left[ \left( \sum_{i=1}^N s(t + \tau_i(\theta) - \tau_i(\theta_0)) \right)^2 \right]$$

如果考虑信号中混有噪声  $n_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) , $n_i(t)$  之间相互独立 ,且它们的均值为 0 ,这时系统输出能量  $D(\theta)$  最大 ,

$$D(\theta) = E \left[ \sum_{i=1}^N s(t + \tau_i(\theta) - \tau_i(\theta_0)) + \sum_{i=1}^N n_i(t - \tau_i(\theta_0))^2 \right]$$

当  $\theta = \theta_0$  时 ,该值为  $N^2 \sigma_s^2 + N \sigma_n^2$  (这里  $\sigma_n^2$  为噪声功率) ,由此可知 ,信号增强了  $N^2$  倍 ,而噪声仅增强了  $N$  倍 ,因此带来的信噪比增益为

$$G_s = 10 \log \left( \frac{N^2 \sigma_s^2}{N \sigma_n^2} \right) = 10 \log N$$

由此可知 ,一个由  $N$  个水听器组成的拖曳线列阵声纳 ,如果满足各基元所接收的噪声相互独立的条件 ,那么它的增益就是  $10 \log N$  , $N$  越大 ,增益就越高。

根据海洋环境噪声的统计特性 ,当水听器间距为波长的一半时 ,各个水听器接收到的海洋环境噪声基本相互独立 ,因此在拖曳线列阵声纳中 ,水听器

正是按照这个间距来布放的,水听器的数目如果越多,那么获得的增益就越大,对目标的探测能力就越强,这也正是拖曳线列阵声纳孔径(拖线阵长度)越来越大的原因。

### 3 拖曳线列阵声纳发展历史

拖曳线列阵声纳的历史可以追溯到第一次世界大战,它的发展先后经历了三个阶段,即试验阶段、接受阶段和发展阶段<sup>[5]</sup>。

在第一次世界大战期间,美国人 Hayes H C 博士提出一种拖曳/舷侧线列阵声纳结构,如图 3 所示。在美国海军 Jouett 号军舰的舷侧前部安装两条 12 元线列阵,同时在其尾部拖曳两条 12 元线列阵,这套系统的探测距离大约为 1.8km,应对当时潜艇攻击已经足够。

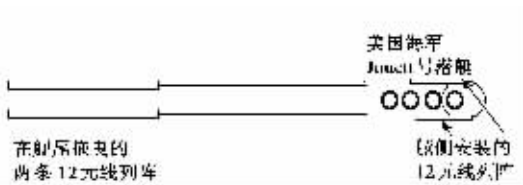


图3 Hayes博士提出的拖曳/舷侧线列阵声纳示意图

战后拖曳线列阵声纳的研究一度停滞,直到1940年,丹麦的 Holm C 为美国海军研制了同时在商船后面拖曳的双线阵声纳,该声纳具有鱼雷报警功能。在20世纪50年代后期,美国海军研究办公室的 Lasky M 又继续了 Hayes 博士的工作,先后进行了一系列相关的试验,其中包括小外径且与电缆类似的拖线阵声纳及安装在柔性橡胶套管中的三基元线列阵声纳。

在20世纪60年代早期,美国海军的潜艇的艇长们遇到一个问题:由于其他设备的阻挡,在舰尾部有声盲区。为了消除这个声盲区,贝尔电话实验室(Bell Telephone Laboratory, BTL)和 Chesapeake 仪器公司(Chesapeake Instrument Corporation, CIC)分别提出了不同的方案。BTL 提出在导弹发射管中存储并在潜艇下方拖曳的拖曳线列阵声纳,而 CIC 则采用在舰桥上进行拖曳的方式。试验证明,前者对目标的探测距离超过了 36km,而后者对同一目标的探测距离也达到了 9km。随后 CIC 利用自研的线列阵,并从海军借到 AN/AQA-2 声纳及有关处理设备,检测到了 100 多公里外的潜艇目标,取得了巨大成功。

至此拖曳线列阵声纳已经完成从概念到声纳的试验过程,从1968年开始,拖曳线列阵声纳开始为大家接受,并逐渐扩大了应用的范围,成为水面舰艇和潜艇的重要装备。

1968年,美国海军水声实验室(U. S. Naval Underwater Sound Laboratory, USNUSL)提出过渡型拖曳线列阵警戒系统 AN/SQR-14 的战技指标。CIC 经过大约 14 个月的努力,于 1970 年交付使用。在地中海投入使用后,该声纳工作非常出色。1972 年, CIG 获得了五台 AN/SQR-14 的改进型 AN/SQR-15 的订货。

同时在潜用拖线阵声纳方面, Hughes 飞机公司(Huges Aircraft Company, HAC)于 20 世纪 60 年代中期获得了一份合同,在快速攻击潜艇上进行了拖曳线列阵声纳的适装性试验。在 20 世纪 60 年代晚期,由于前苏联安静型潜艇的出现,美国海军海上系统司令部决定在所有的攻击型潜艇上装备拖曳线列阵声纳。

在随后的 20 余年的时间里,拖曳线列阵声纳得到了全面的发展。

1975 年, CIC 被 Gould 公司收购,但 CIC 拖曳线列阵声纳研发队伍仍然在拖曳线列阵领域继续工作多年,在 20 世纪 80 年代,在减小拖线阵拖曳自噪声方面取得了巨大的进展,并研制出自噪声更小的 TB-16 拖曳线列阵声纳。

1984 年, Bendix 公司开发出一种用于潜艇警戒的细长缆拖曳线列阵声纳 TB-23,其后于 1990 年, Gould/Martin Marietta 公司研制出比 TB-23 更长的 TB-29 型拖曳线列阵声纳。

到 20 世纪 90 年代,拖曳线列阵声纳有各种不同长度的配置,覆盖了宽广的频率范围。拖线阵的直径由 40-80mm 减小至 8mm<sup>[6]</sup>。

20 世纪 70 年代到 80 年代的拖曳线列阵声纳有一个很大的弱点,就是它们的动态范围有限,受到当时电子技术的制约,当时的声纳只能依赖 8bit 电子器件,最高只有 48dB 的幅度动态范围。在 20 世纪 90 年代, 24bit 电子器件出现使得幅度动态范围最高可以达到 140dB。

在此阶段的另一个重大的事件是光纤在拖曳线列阵声纳中的应用,在此之前只能采用多路双绞导线来进行数据传输,拖缆的外径最大只能接受大约 50 路信号的传输。后来出现了数字化同轴缆传输技术,将线列阵中水听器的信号在水下进行数字化并打包后通过同轴电缆传送到处理设备。但是更高的

动态范围和更多的水听器数目使得同轴电缆也不能满足大量数据传输的需要. 在 20 世纪 90 年代, Litton 工业公司和 CSC 进行了光纤水听器和光纤阵的研制和测试.

同时 Tohomson Marconni 和 Serel 开发出固体填充的拖线阵, 避免了用油填充的拖线阵面临的破损泄漏和污染. 最终, APL 实验室使用双缆拖曳线列阵声纳解决了拖曳线列阵声纳的左右舷模糊(单缆拖曳线列阵声纳无法判断目标在舰船的左侧还是右侧)问题.

多功能拖曳线列阵(MFTA)也在此期间出现, 由于高动态范围的 AD 芯片的出现, 使得拖曳线列阵声纳既能接收主动信号, 也能接收被动噪声, 既能接收高频信号, 也能接收低频信号.

纵观整个发展历程, 在过去的 80 余年中, 拖曳线列阵声纳家族经历从 2 倍波长(对应 1kHz 声波波长)到超过 1000 倍波长的历程. 动态范围从 60dB 增加到 120dB. 水面舰拖曳线列阵声纳解决了海军的问题, 在护卫舰航速下能够进行警戒, 并对潜艇进行战术低频探测.

潜用拖曳线列阵声纳始于 20 世纪 50 年代, CIC 在 USSAlacore 舰桥上安装的拖线阵揭开了潜用拖曳线列阵声纳应用的序幕, 其后, 为了解决潜艇声盲区的问题, BTL 和 CIC 均取得成功, 最终 BTL 完成了 AN/SQR-15 声纳的生产. 在 20 世纪 60 年代到 70 年代早期, HAC 开发了用于攻击型潜艇的 TUBA 和 TB-16 拖曳式线列阵声纳. 由于面对前苏联的安静型潜艇, 具有较小流噪声的 TB-23 拖曳线列阵声纳应运而生, 在此基础上, TB-29 使用更多的水听器, 具有更好的探测能力并装备使用.

## 4 未来发展趋势

在被动联合拖曳线列阵声纳中, 主动声源目前一般采用发射换能器基阵, 而在海上石油勘探中使用的气枪较之发射换能器基阵来讲虽然在信号形式的控制上, 目前还存在问题, 但由于其更小的体积, 能够激发更大声源级的信号, 因此一旦在气枪的信号控制问题上取得突破, 气枪有望称为拖曳线列阵声纳的一种新的声源.

另一方面, 光纤水听器自诞生以来, 备受关注,

由于其体积小, 便于多路复用, 并可以将多种传感器集成在一起, 使得拖曳线列阵外径显著减小且无需从甲板向水下供电, 适装性和可靠性得到明显改善, 因此基于光纤水听器的全光纤拖曳线列阵声纳是发展的重要方向之一.

如前所述, 拖曳线列阵声纳较之舰壳声纳的优点之一就是其孔径不受舰船尺寸的影响, 能够在水平方向形成尖锐的指向性来实现对目标水平方位的估计. 如果能使拖曳线列阵声纳在垂直方向上同样具有一定的指向性, 就能够对目标的垂直方位进行估计, 从而实现对目标的更加精确的三维定位. 因此, 同时具有水平和垂直指向性的拖曳线列阵声纳也是未来发展的重要方向之一.

在潜艇中安装拖曳线列阵声纳时, 由于存放、布放、回收等方面的问题, 目前尚未报道多缆拖曳线列阵声纳装备使用, 但由于它能够解决左右舷模糊问题, 并有可能提供目标的深度信息, 实现更准确的定位, 并对目标进行识别, 多缆拖曳线列阵声纳备受人们关注.

目前, 拖曳线列阵声纳的拖曳平台为水面舰艇及潜艇, 由于其显著的优点, 在其他拖曳平台上使用也具有重大的意义. 因此对拖曳线列阵声纳进行更细致的模块化设计, 使其能够根据拖曳平台的特点, 进行裁剪或者扩展, 将使拖曳线列阵声纳具有更广阔的应用天地.

## 参 考 文 献

- [1] 李启虎. 数字式声纳设计原理. 合肥安徽: 教育出版社, 2003. 1 [ Li Q H. Design principle of digital sonar. Hefei: Anhui education publisher, 2003. 1 (in Chinese) ]
- [2] Bruce Joffe. <http://www.mindfully.org/Technology/2005/SURTASS-LFA-Sonar4mar05.htm>.
- [3] Tyler G D. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1992, 13 (1): 145
- [4] 李启虎. 声纳信号处理引论. 北京: 海洋出版社, 2000. 162 [ Li Introduction of sonar signal processing. Beijing: Ocean publisher, 2000. 162 (in Chinese) ]
- [5] Lemon S G. IEEE J. ocean. engineer., 2004, 29(2): 365
- [6] Potter J R, Delory E, Constantin S et al The 'thinarray': a lightweight, ultra-thin(8 mm OD) towed array for use from small vessels of opportunity. In: Underwater technology 2000. Tokyo, Japan, June 2000