

# 水下声自导武器目标识别技术综述

刘朝晖<sup>1,2</sup> 马国强<sup>1,3</sup>

(1 西北工业大学航海学院 西安 710072; 2 海军航空工程学院青岛分院 青岛 266041)

(3 海军 91388 部队 420 所 湛江 524022)

**摘要** 现代鱼雷高新技术发展的一个方向是水下目标识别技术。本文在调查国内外声自导鱼雷关于目标识别技术研究成果的基础上,较详细地介绍了该技术的研究和应用现状,并展望了今后的发展方向。

**关键词** 鱼雷 目标识别 水声对抗

## 1 引言

水下声自导武器的主要战斗使命就是打击敌方的潜艇和水面舰艇。随着水声电子对抗技术的发展,自导系统的工作环境更加恶劣。在现代海战中,目标舰潜艇为了对付鱼雷的袭击,多采用施放宽带噪声干扰器、回波重放式诱饵、气幕弹等各种类型的声诱饵干扰自导系统工作,这就要求鱼雷自导系统应尽可能综合各种信息,进行多方面的分析,从而抗击假目标干扰、正确地对真实目标进行识别跟踪攻击。

鱼雷自导系统的工作方式有主动和被动两种,依据其不同的工作制式,我们可以将自导系统对水下目标的识别分为被动方式下的目标识别和主动方式下的目标识别两种。

## 2 被动方式下的目标识别

系统以被动方式工作时,接收到的信号是水下目标的辐射噪声,对目标辐射噪声的时频特征进行分类识别,是被动方式下水声目标分类识别的基本途径。从不同角度对水下目标噪声原始信号进行分析和研究,得出了几种常用的特征提取方法。

### 2.1 目标辐射噪声的时域波形结构提取特征

舰船目标原始噪声信号的时域波形结构中含有丰富的目标类别信息。信号的波形结构特征可以从其过零点分布、峰间幅值分布、波长差分布和波列面积分布等方面描述。其主要特点是所需分析时间短、实时性好、方法简易,有明显的分类识别效果。

### 2.2 从目标辐射噪声的频谱结构来识别目标

航行中的舰船产生的辐射噪声主要有三

大类:由主机、辅机、空调设备等产生的机械噪声;由螺旋桨转动导致的空化、旋转声及“唱音”构成的螺旋桨噪声;由水流辐射、附件共振等产生的水动力噪声。舰船辐射噪声的平均功率谱是由连续分布的宽带噪声谱和离散频率上的窄带分量-线谱构成。宽带连续谱分量主要是由螺旋桨噪声和机械噪声两部分构成;而线谱主要集中在 1000Hz 以下的低频段,主要是由往复运动的机械噪声、螺旋桨唱音、水动力引起的壳体共振和叶片共振噪声构成。由主、辅机噪声表现出的线谱成份一般分布在 100~1000Hz 的范围内,而更高频率的线谱往往被连续谱所淹没。这种具有低频线谱和较宽范围连续谱的辐射噪声谱与目标施放的宽带噪声干扰器所产生的宽带谱有着明显的区别。常用的谱估计方法有以下几种。

#### 2.2.1 经典谱估计

这是基于傅立叶分析的谱估计方法(如周期图法和自相关法)。它的特点是技术成熟、方法简单,且谱信息中包含明确的物理概念,在水下目标识别中应用的比较广泛,但频率分辨率低、方差性能不太好。

#### 2.2.2 现代谱分析

这是通过计算模型参数建立模型得到信号的谱,其参数模型主要有 AR 模型、MR 模型以及 ARMA 模型等。其思想是:进行谱估计时,对观测的有限数据不作任何确定性假设,在对这些数据如何产生具有一定先验知识的基础上,采用外推或预测的方法,从已知的有限个点推求无限个点。这样它就克服了非参数化谱估计法中假设除已知数据外其他数据全为零的不合理性,从而提高了谱分辨率,改善了信

噪比, 特别对于在小样本的情况下优势就更明显。正是由于这些优点, 它已成为现代信号处理中最流行的方法。主要估计方法有 ARMA 谱估计、最大似然法、熵谱估计和特征分解法。

### 2.2.3 高阶谱估计

由于高阶谱具有抑制未知谱特征中的高斯噪声的特点, 并能保持信号相位特征的优点, 近些年已引起水声界广泛重视, 被用来作为分析非高斯信号的主要工具。

### 2.2.4 Lofar 谱图分析

信号的 Lofar 谱图是从时、频两个角度对信号进行描述的方式。该方法是目前被动声纳信号处理的经典方法之一。通过对连续的采样数据作短时傅立叶变换而构成信号频谱变化的时间历程图, 可反映信号的非平稳特性。

### 2.2.5 基于 DEMON 谱的特征提取

由于一般情况下, 直接从声纳音频信号不能得到舰船辐射噪声中的慢节奏信息。我们可用一组带通滤波器时域上排列覆盖所感兴趣的频段, 把通过带通的信号做检波(解调), 低通滤波后再求低频信号的谱, 该谱就称解调制(DEMON)谱。对调制谱进行分析可以提取出一些螺旋桨的特征, 如调制谱中线谱基频的频率位置反映螺旋桨的转速, 每组线谱的根数对应于螺旋桨的叶片数等。

## 2.3 目标辐射信号的时频特征提取

时频分析是指在时间-频率域而不是仅在时域或频域上对信号进行分析, 这是一种对任何信号都适用的分析方法。主要方法有小波变换、短时傅立叶变换、Winger-Ville 分布和 Gabor 展开。特别是小波变换具有良好的时频定位技术, 通过它提取的特征可以更好地反映目标的时域和频域特征, 不同尺度小波系数的重构又反映小波变换的变焦特性, 同时实现了对信号的滤波处理, 能有效滤除噪声和干扰。经小波变换处理后的信号再提取它的物理特征如基频, 将更容易和准确。人们已经开始利用小波的多尺度分解提取舰船辐射噪声的特征, 运用离散二进制小波变换提取水下回波的多尺度边缘特征, 并讨论了小波变换在水声工程中的宽带相关处理技术。作为一种全新的技术,

它迅速在水下目标噪声信号处理中被应用。

## 3 主动方式下的目标识别

现代目标分析技术, 包括目标冲激响应识别技术、过零分析技术、目标尺度分析技术、目标亮点分析技术、目标姿态分析技术等。下面列举的方法代表了现今鱼雷目标识别基本处理方法。

### 3.1 基于距离、方位、频率门的简单识别方法

在鱼雷自导系统发现目标的情况下, 在相邻的几个周期内目标的距离、方位及频率信息都不会急剧地突变, 而是按自导系统已获取参数的规律缓慢地变化, 这样由声回波本周期估计的距离、方位及频率参量可预测下一周期的距离、方位及频率参量。一旦在其它的距离、方位及频率参量出现信号, 自导系统都予以承认和处理, 这是传统的鱼雷自导系统抗干扰的基本思想, 也称目标信息一致性检验。这种一次性检验法不能识别声诱饵, 极易跟踪的声诱饵而丢失真正目标。工程上其近似判别准则为:

$$\hat{R}_{n-1} + V_r \frac{\hat{R}_{n-1}}{C} - \Delta R \leq \hat{R}_n \leq \hat{R}_{n-1} + V_r \frac{\hat{R}_{n-1}}{C} + \Delta R \quad (1)$$

$$\hat{\theta}_{n-1} - \Delta\theta \leq \hat{\theta}_n \leq \hat{\theta}_{n-1} + \Delta\theta \quad (2)$$

$$\hat{f}_{n-1} - \Delta f \leq \hat{f}_n \leq \hat{f}_{n-1} + \Delta f \quad (3)$$

其中下标  $n$  代表第  $n$  个声周期,  $\hat{R}$ 、 $\hat{\theta}$ 、 $\hat{f}$  分别表示距离、方位及频率的估计值。 $V_r$  是鱼雷和目标间的相对速度。 $\Delta R$ 、 $\Delta\theta$ 、 $\Delta f$  表示允许的估计误差范围。

### 3.2 目标冲激响应识别方法

目标反射过程可以看成是一个线性时不变网络, 其特性可用传输函数表征。当发射宽带信号时, 通过测量目标反射回波, 则可得到目标的反射传输函数, 并从中提取一些特征做为目标识别的特征参量, 从而构成目标识别器来识别目标。在主动高频声纳工作的情况下, 目标的脉冲响应可近似为如下的模型:

$$h(\tau) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=-N}^N f_{mn} \delta^{(n)}(\tau - \tau_m) \quad (4)$$

$M$ 、 $N$  表示阶数,  $f_{mn}$  表示对应阶数的强度, 适当地选择参数  $M$ 、 $N$ 、 $f_{mn}$  就可以精确地综合出各种目标的  $h(\tau)$  函数, 通过对真实目标回波进行拟合, 便可估计出参量 ( $M$ ,  $N$ ,  $f_{mn}$ ), 这就是目标特征量。不同种类的目标对应着不同的特征量 ( $M$ ,  $N$ ,  $f_{mn}$ ), 这样通过分类器便可较好地识别目标。这种识别方法要求发射波形的频带宽, 一般而言多采用 LFM 发射信号形式。在实际应用中受到多方面的限制, 如声传播多途效应。在海洋中声传播受声线弯曲、海底、海面反射的影响, 因而由以上方法估计出的参量 ( $M$ ,  $N$ ,  $f_{mn}$ ) 也受多途径的影响, 从而使目标特征量模糊, 不易识别目标; 在主动高频声纳工作的体制下, 目标的特征量与目标舷角有关, 因此其特征量随舷角变化而出现很大的变异性, 不利于目标识别; 在人工对抗日益发展的情况下, 易受欺骗。先进的点诱饵可对其回波时域结构进行精确的模拟, 即诱饵可实现传输函数  $h(\tau)$  的模拟, 从而使自导系统对诱饵误判为目标, 导致鱼雷攻击失效; 模型参量的解算量大, 需快速算法及更高速的数据处理芯片, 同时对  $M$ 、 $N$  的阶数判定需多次计算, 因此运算量相对较大。

由于以上原因, 限制了这种方法在实际鱼雷自导系统进行目标识别的应用, 目前这种方法在实验室对简单形体判别研究较多, 在实际自导系统中应用尚有距离。

### 3.3 瞬时频率分析目标识别方法

在高频主动声纳的工作体制下, 对单频脉冲 (CW) 入射信号, 体目标在近距离时目标回波的瞬时频率分布呈现一定的扩展, 而不仅仅是一个恒定的值。从理论上讲, 可以将瞬时频率分布做为目标特征量, 进行目标识别。一般而言, 瞬时频率分布有多种方法, 应用较多的方法为 Vigner-ville 分析法及时间域快速瞬时频率分析法。

#### 3.3.1 Wigner-Ville (WVD) 分析法的目标识别

主动声纳体目标的回波  $e(t)$  的 WVD 时频率分布一般用下面的公式估计:

$$W_e(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e(t + \frac{\tau}{2}) e^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

其离散形式  $W_e(t, \omega)$  为:

$$W_e(t, \omega) = \frac{1}{T} \sum_{n,m} W_e(n, m) \delta(t - \frac{nT}{2}) \delta(\omega - \frac{m\pi}{NT}) \quad (6)$$

其中

$$W_e(n, m) = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) x^*(n-k) e^{-j\frac{\pi T}{N}(2k-n)}$$

这里  $n$  对应离散时间序列,  $m$  对应离散的频率序列,  $W_e(t, \omega)$  表征了在时刻  $t$  和频率  $\omega$  时信号的强度, 由此对目标回波分析可得到如图 1 所示的三维分布, 其中峰点  $P_1, P_2, \dots, P_N$  表示了在时刻  $t_1, t_2, \dots, t_N$  最大能量处所对应的频率成份  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$ 。仅考虑  $(\omega, t)$  平面, 则得到图 2 所示的时-频关系。

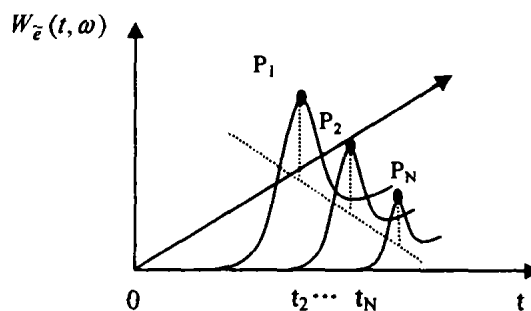


图 1 目标回波时频-幅度分布示意图

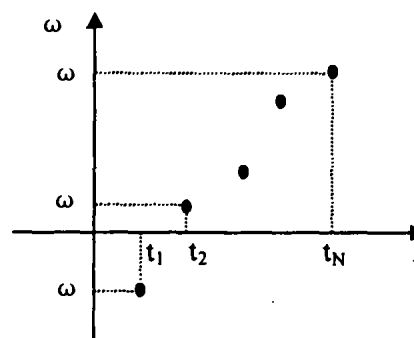


图 2 目标回波的时-频分布示意

对图 2 中的数据采用直线回归拟合, 则得到直线方程

$$\omega(t) = \alpha t + \beta \quad (7)$$

其中  $\alpha$  ( $\alpha \geq 0$ ) 表示了目标的特性。一般当  $\alpha$

$\approx 0$  时, 则表明目标为应答诱饵, 当  $\alpha \gg 0$  时, 则表明为真实目标概率很大。这样识别方法极易受较为精确的应答诱饵的欺骗。在现代电子技术高速发展的现今, 模拟这种时频分布效应的点应答诱饵是能够研制出的, 其次特征量  $\alpha$  的门限的制定也与多种因素相关。

### 3.3.2 时间域快速瞬时频率分析法目标识别

WVD 方法提取目标回波的时-频分布特征, 其运算量较为庞大。而直接从时间域着手

$$\beta(k) = \frac{8[e(k-1)e(k-4) - e(k-2)e(k-3)]}{4[e(k-1) - e(k-3)]^2 + [2e(k-2) - e(k-4) - e(k)]^2} \quad (9)$$

同样对估计序列  $[k, \hat{f}(k)]$  进行线性回归得到:

$$\hat{f}(t) = \hat{\alpha}t + \hat{\beta} \quad (10)$$

则根据特征量  $\alpha$ , 判别目标真伪。这种方法对瞬时频率的估计要简单、快速。但同样存在 3.3.1 中所述的限制。总之, 时频分析目标识别技术还有一些问题急需解决。如对发射信号形式的要求, 短时间隔段的分割及体目标造成的目标回波重叠而引起的频率估计方差增大等问题, 都有待深入研究。

### 3.4 目标亮点分析识别方法

该方法原理是: 一般认为近场目标反射回波主要由 2~6 个不同方位的目标空间反射点形成, 其强度要远强于背景反射, 在自导系统中配置几个密集多波束来观察不同方位的亮点分布区, 则据此可判断是真伪目标。这种方法要求事先对亮

分析目标回波的时频特征简单、快速, 一种较为简单的方法如: 对中心频率为  $f_0$  的窄带回波  $e(t)$ , 以  $f_s = 4f_0$  采样, 则  $e(t)$  的瞬时频率  $f(k)$  可根据相邻的五个采样值计算。

$$\hat{f}(k) = f_0 + \Delta\hat{f}(k) \quad (8)$$

式中

$$\Delta\hat{f}(k) = \frac{2}{\pi} f_0 \beta(k)$$

点的分布规律有较为详细的先验知识。

### 3.5 目标空间姿态分析识别方法

这是由 Woon Hyun Cho 等人提出的一种识别方法, 其主要应用于分裂波束左右通道鉴向的鱼雷自导系统中。一般认为中近距离潜艇目标的反射回波由多个亮点反射构成, 目标空间姿态分析主要通过估计空间反射亮点位置特征进行目标识别。

首先将目标回波在时域上分割成  $N$  段, 对每段回波进行距离、方位估计 (方位估计一般采用左右通道鉴相), 得出在每个时间段的位置坐标  $(x_i, y_i, z_i)$ , 进一步得到各时间段坐标的均值:

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad m_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad m_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (11)$$

则坐标位置的协方差矩阵为

$$M_c = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \sum (x_i - m_x)^2 & \sum (x_i - m_x)(y_i - m_y) & \sum (x_i - m_x)(z_i - m_z) \\ \sum (y_i - m_y)(x_i - m_x) & \sum (y_i - m_y)^2 & \sum (y_i - m_y)(z_i - m_z) \\ \sum (z_i - m_z)(x_i - m_x) & \sum (z_i - m_z)(y_i - m_y) & \sum (z_i - m_z)^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

这里  $\sum = \sum_{i=1}^N$ 。对协方差矩阵  $M_c$  进行特

征分解, 则得到本征值  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  ( $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ ) 和本征向量  $\vec{V}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ ,  $i=1, 2, 3$ 。

则反射点的空间线性度可用  $r$  ( $1 \geq r \geq 0$ ) 表示:

$$r = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + (\lambda_2 - \lambda_3)^2 + (\lambda_3 - \lambda_1)^2}{2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)^2} \quad (13)$$

当  $r \rightarrow 1$  时, 表明目标反射点的位置分布是

线性统计关系: 当  $\gamma \rightarrow 0$  时, 目标位置分布在空间是球形。由得到的三个本征向量  $\bar{V}_i$  则可进一步估计目标的姿态, 即以本征向量中表示水平坐标的元素  $(x_i, z_i)$ ,  $i=1, 2, 3$ , 作为数据得到线性回归方程:

$$x(z) = \alpha z + \beta \quad (14)$$

则目标识别的特征量为  $\gamma$  及  $\alpha$ , 当  $\gamma \rightarrow 1$  同时  $\alpha \gg 0$  时, 则识别为真实目标。

这种识别方法的优点是抗噪声干扰能力较强, 一般的点源干扰器不能欺骗它。另外, 该方法利用了目标的空间信息, 但是也同时存在一些限制因素: 矩阵  $M_c$  的分解有可能存在奇异, 而使特征值和特征向量很难获取; 矩阵  $M_c$  的估计需要同时进行距离估计及方位估计, 而使其估计误差增大; 目标识别距离较近。这种目标识别方法虽然受到一些限制, 但因其抗干扰方面的优势而仍有进一步研究的必要。

### 3.6 梅林变换方法

由于梅林变换具有比例不变性, 只有它可以消除因舷角变化所引起的目标回波的剧烈变化, 从而提取目标的不变特征。该方法最早在光学图象处理中获得应用, 后由 Zwick 等人在雷达舰船目标识别中加以修改并应用。理论分析、计算机仿真和实验结果表明, 基于梅林变换的方法可以有效地提取目标的不变特征, 是一种很有前途的特征提取方法。该方法的缺点是随着发射脉冲宽度的加大, 理论模型与梅林变换的条件之间有一定的误差, 该误差随脉冲宽度的加大而变大, 最终影响特征提取及目标分类的结果。但是若发射脉冲宽度过窄, 发射信号能量减小, 这会减小自导作用距离。如何消除该方法中脉宽对算法的影响, 是需要解决的问题。

### 3.7 宽带方法

对海豚等海洋生物的研究发现, 海豚所发射的信号为宽带线性调频信号。因此, 许多学者致力于研究宽带信号, 即声纳发射宽带信号。著名的方法是美国学者提出的按目标脉冲响应函数来分类的窄带滤波器组法及 AR 模型反射系数法。做法是设  $S(f)$  为发射信号的傅氏变换,

$R(f)$  为目标回波的傅氏变换, 则目标传递函数为  $H(f)=R(f)/S(f)$ 。然后用一组窄带滤波器去过滤目标的响应函数, 把滤波器的输出构成目标特征向量, 然后进行目标分类。另一种方法是用 AR 模型来逼近目标的脉冲响应函数, 用 AR 模型的反射系数来作为目标的特征。但是这两种方法所获得的目标特征参数特别依赖目标的舷角。为了消除舷角对特征参数的影响, Chestnut 等人提出一种基于 K-L (Karhunen-Loeve) 展开技术的最小特征向量法。K-L 展开是常用的特征抽取技术, 它消除了各特征元之间的相关性。但当舷角变化时, 其特征协方差矩阵的大特征值对应的特征向量变化较为剧烈, 而小的特征值对应的特征向量则相对变化较小。寻求的是当目标舷角变化时所保持相对稳定的特征量, 显然 K-L 展开中的小特征值及其特征向量能满足这一要求。可用小特征矢量来组合目标的不变特征。理论分析、仿真试验和实测数据均表明, 该方法有明显的缺点, 即特征的方差矩阵对应的小特征值易受噪声的影响, 因而其目标不变特征也易受噪声的影响, 对 SNR(信噪比)较为敏感。如何消除或减少噪声对它的影响是需要解决的问题。

## 4 目标识别技术的发展

鱼雷武器在多种干扰环境下工作, 要求自导系统应尽可能的综合各种信息, 进行多方面的分析, 从而确定目标是否真正存在并对抗诱饵。可见水下目标识别是一个综合性很强的技术, 单一的对抗技术可能仅仅识别或对抗一种或几种假目标, 而不可能对抗多种类型的假目标。水下声自导武器目标识别技术作为精确制导的核心技术必然朝着数字化的方向发展, 计算机运算速度和存储量的进一步提高, 可存储更多的目标信息供鱼雷使用。快速信号处理芯片的发展和应用将解决信号处理的实时问题, 使许多识别目标的自适应算法和非线性算法在鱼雷上的实际应用成为可能。

鱼雷的数字化和智能化可以在较短的时间内对工作环境进行适应, 并建立自适应门限。同时对目标信息可以从时域、频域、空域同时

得到精细的处理,不但有效地提高自导作用距离,而且能更有效地对目标进行识别与分类。

鱼雷可以提取目标的多种特征,建立综合判据。多种识别手段的综合使用可弥补单一识别手段的不足,提高识别可靠性。

近场目标识别技术的意义在于形成最佳攻击末弹道和命中目标要害部位。因此,这种识别不是判别目标的真伪问题,而是测量目标的空间姿态。此外卡尔曼滤波、旁视阵技术、目标水下成像等技术也将进一步发展和应用。

#### 参考文献

- [1]相敬林,王海燕.目标噪声的谱分析处理与线谱声引信.现代引信,1993(3)
- [2]陈春玉.目标识别技术的现状和发展.声学技术,1999(4)
- [3]嵇绍岭,丛丰裕,贾鹏等.水下目标信号的Lofar谱图特征的主分量分析研究.数据采集与处理,2003(6)
- [4]蔡悦斌.水下目标辐射噪声的特征提取与分类研究[D].上海:上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室,1998
- [5]吴国清.周期性局部平稳过程双重谱图分析和测量[J].声学学报,1980(5)
- [6]林良骥.提取回声信号特征的过零点方法[J].水声通讯,1983,(3)
- [7]林良骥.波形峰间峰值的分布特性及其用于回声信号的识别[J].水声通讯,1983,(3)
- [8]朱埏.主动声纳检测与信息原理.北京:海洋出版社,1990
- [9]杨福生.随机信号分析.北京:清华大学出版社,1990
- [10]Woon Hyun Cho. Target state estimation via eigendata analysis of signal covariance matrix. UDT'95.
- [11]J W Pitton, K Wang, B H Juang. Timw-frequency Analysis and Auditory Modeling for Automatic Recognition of Speech, Proc of the IEEE, 1996, 84(9): 1190~1215
- [12]黄海宁,李志舜.基于宽带信号的目标识别技术[J].水中兵器,1996:(4)
- [13]张群飞,谢一清,黄建国.目标尺度估计[J].水中兵器,1996:(4)
- [14]汤子跃,杨明,陈喜等.基于相位起伏谱分析的目标尺度识别原理[J].鱼雷技术,1999:(1)
- [15]张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,1994

### 特殊的俄罗斯新型舰用吊放声纳-“灶神星-k”(B E C T A - K)

俄罗斯“海洋仪器公司”生产的“灶神星-k”新型舰用吊放声纳,适用于中小型水面舰艇。该声纳由发射阵和支臂展开式接收阵构成,能以主动方式探潜和自动跟踪,并对目标进行定位。此外,该声纳还具有鱼雷报警和跟踪、低频水声通信、目标识别与分类以及被动测距等功能。阵的吊放深度为400m,发射(单频、调频和复合信号)频率为2.5kHz,声源级为200dB/ $\mu$ Pa,干端和湿端重180kg。与欧美国家相比,该型声纳有其独特之处。声纳的湿端如右图所示。

(栾波 编译)

