

49-54 自导作用距离影响因素的分析

蒋兴舟 陈 喜 TJ 630.34

(海军兵器工程系)

摘 要

本文以声纳方程为核心,探讨诸参数对鱼雷自导作用距离的影响,着重分析 SL, GL, DT 以及鱼雷自噪声 NL 与自导作用距离的关系,并且提出了降低鱼雷自噪声的几种途径。

关键词: 鱼雷自导; 自导作用距离; 声纳方程

1 引 言

绝大部分自导鱼雷是利用水声场进行工作的,而水声学所特有的许多现象和效应对自导作用距离产生各种定量的影响。我们常常有条理地将这些效应组合在几个称为声参数的量中,通过自导作用距离方程即声纳方程把这些参数联系起来。该方程是将介质(信道)、目标和鱼雷的作用联结在一起的关系式。

主动自导方程为:

$$SL - 2TL + TS = NL - GL + DT_n \text{ (噪声掩蔽时)}$$

$$SL - 2TL + TS = RL - GL + DT_n \text{ (混响掩蔽时)}$$

被动自导方程为:

$$SL - TL = NL - GL + DT$$

式中: $TL = 20 \lg r + \beta r \times 10^{-3}$ (球面扩展、直线传播情况)。

从以上各式可以求得不同情况下的自导作用距离。

可见,影响自导作用距离的参数较多,可分成三类:

(1) 由鱼雷决定的参数

发射机声源级: SL (对于主动自导)

接收机信号处理增益: GL

检测阈: DT

自噪声级: NL

(2) 由介质确定的参数

传播损失: TL

本文 1991 年 6 月 23 日收到。

混响级:RL(对于主动自导)

(3)由目标确定的参数

目标强度:TS(对于主动自导)

目标声源级:SL(对于被动自导)

下面分类分析各参数的影响。

2 由鱼雷决定的参数的影响

2.1 发射机声源级 SL

$$SL = 171.5 + 10\lg P_e + 10\lg E + DI_r$$

式中: P_e 为发射电功率;

E 为电声转换效率;

DI_r 为发射指向指数。

为了达到主动式自导的最大作用距离,总希望产生最大的声功率,但是这是有限制的,除电技术方面的原因之外,还有两个方面因素限制了声功率的增大。一是声功率过大,会产生空化现象,即声场所产生的负压超过空化阈时,就会产生空化气泡。空化气泡云的吸收与散射,引起声功率损失,发射指向性变差,以及发射器工作所必需的声阻抗降低。二是互作用效应,由于空间的限制,由紧密排列的共振发射阵元构成的阵存在着近场效应。当通电工作时,可发现各个发射阵元的运动速度是不均匀的,互作用效应会减少发射阵的功率输出和破坏它的指向性图。

2.2 接收机处理增益 GL

鱼雷接收机的处理增益 GL 由两部分组成:一部分为空间处理增益 GS,当阵元间的距离 d 等于或大于 $\lambda/2$ 时,干扰噪声的空间相关性很小,而信号的相关性较大,故经波束形成器空间处理后的声压中的信噪比提高;另一部分为时间处理增益,利用噪声的时间相关性很弱,而信号的时间相关性较强的特点,采用时间处理器来提高信噪比。时间处理器可分为相干处理器和非相干处理器两大类。不同的空间处理器和时间处理器有不同的处理增益。接收机信号处理系统的性能对自导作用距离有较大的影响。

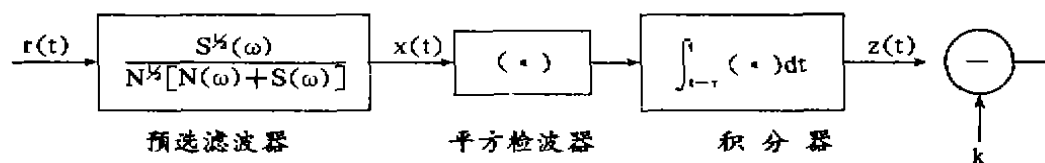
对于被动自导装置,其空间处理器还可分为两大类型:一类是线性阵,它是将各路水听器输出相加形成波束的;另一类为限幅阵,它是将各路水听器的输出限幅放大后再相加形成波束的。限幅阵对于信号动态范围很大的自导装置是很适用的,但经过限幅阵后,其处理增益约降低 $4/\pi^2$ 倍。

在线性阵中,也可将阵分成两部分,各自形成波束(分裂波束),分裂相关器的重要优点是当不存在信号时,只要两路信号不相关,积分器输出为 0(即无信号时的波束均衡较好),但是其处理增益要降低一半。

在高斯噪声中检测高斯信号的最佳时间处理器为对数的似然比接收系统,其对数似然比为

$$\varphi(r) = \sum_{n=1}^{TW} T |r(n)|^2 \left[\frac{1}{N(W_s)} - \frac{1}{N(W_s) + S(W_s)} \right]$$

其结构如下图所示:



可见此接收系统为一带有预选滤波器的平方检波积分系统。

在限带白谱的情况下,预选滤波器的传输函数则变成 1,此时的最佳检测系统便是一个平均功率检测器。图中的平方检波器常用线性检波器代替,这主要是从线路实现简单考虑的,但其处理增益要下降 0.57dB。

线性检波积分器系统的时间处理增益为:

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{out} = \frac{1}{2(\pi - 2)} \left(\frac{S}{N} \right)_{in}^2 \quad \text{小输入信噪比情况}$$

目前某些鱼雷的被动自导装置都采用多波束,为限幅阵线性检波系统,其处理增益为:

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{out} = \frac{1}{\pi - 2} \cdot \frac{4}{\pi^2} TW(M-1)^2 \left(\frac{S}{N} \right)_{in}^2$$

式中:T—等效积分时间;

W—等效噪声谱宽;

M—换能器阵元数。

由于全部阵元参与波束形成,又采用了线性检波积分系统,其处理增益比较大。

主动自导的最佳时间处理器有匹配滤波器、维纳滤波器、卡曼滤波器等,而最实用的为匹配滤波器。匹配滤波器的冲击响应函数 $h_m(t)$ 应满足:

$$\int_0^T h_m(\tau) \cdot R_m(t - \tau) d\tau = S(t_0 - t) \quad (0 < t < T)$$

式中: $R_m(t-\tau)$ 为噪声 $n(t)$ 的相关函数;

$S(t_0-t)$ 为信号。

对于白噪声背景的情况,匹配滤波器 $h_m(t)$ 为 $S(t)$ 的平移镜像,即:

$$h_m(t) = \frac{2}{N_0} S(t_0 - t)$$

输出信噪比:

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{out} = \frac{2E}{N_0} = 2WT \left(\frac{S}{N} \right)_{in}$$

式中 E 为信号的能量, $N_0/2$ 为白噪声的功率谱,故其时间处理增益

$$GL = 10 \lg(2WT)$$

匹配滤波器可用互相关器、横向滤波器、时间压缩器等来实现。为提高时间处理增益,必需选择好发射信号波形和电路,以便其 WT 真正得到提高。

匹配滤波器为相干处理器,实现较困难,故往往采用非相干处理,即用正交机来实现最佳接收(它放弃了相位信息的利用)。正交机也是平均似然比接收机。为同时检测与估计参数,则

用广义似然比接收机,比较实用的是时间压缩—差频相关接收机,其处理增益为:

$$GL = 10\lg(2W_s T)$$

式中 T 为回波持续时间; W_s 为噪声带宽; $2W_s T$ 为独立样点数。样点数愈多,则信息愈多,系统性能愈好,处理增益愈高。

2.3 检测阈 DT

我们讨论的自导装置都是采用奈曼—皮尔逊准则设计的,即在一定的虚警概率下,使检测概率达到最大。因此,检测阈 DT 与两个概率有关,也与接收机的形式有关,也就是 DT 由自导装置的 ROC 工作特性曲线和虚警概率、检测概率决定。

2.4 自噪声级 NL

这是一个由鱼雷总体决定的指标(当然它也和鱼雷辐射噪声的传播途径有关),它对自导作用距离的影响甚大。过去的大型鱼雷,其自噪声与速度的 2.4 次方成正比。

其主要来源是螺旋桨噪声、动水压噪声和机械噪声。它们通过水介质的散射,反射到雷头换能器基阵处,从而形成自噪声。

只有在总体设计时就考虑降低噪声,才能使鱼雷自噪声有明显的改进,从而可使自导作用距离有较大的提高。

现在常用的鱼雷自噪声级经验公式为:

$$NL = 96V_t - 33\lg f - 23.5\lg H + 0.15\text{dB}/(1\mu\text{Pa}/1\text{Hz})$$

目前降低鱼雷自噪声主要应从以下几方面考虑:

(1) 减小螺旋桨噪声,从现在的鱼雷看,当速度不超过 40 节时,螺旋桨噪声是主要的干扰源,例如鱼雷航速在 24 节时,92% 的噪声由螺旋桨推进器所产生,故应设计低噪音螺旋桨。现代,采用低转速 5~7 叶螺距螺旋桨是减小螺旋桨噪声的有力措施。

(2) 减小动水压噪声,这部分噪声也是重要的干扰噪声部分,尤其在鱼雷高速航行时,其比例就更为突出。

在设计自导鱼雷时,应设计更好的流线型,尽量减少鱼雷壳体上的孔,必要的孔上最好加上盖子,以保持壳体的光滑与线型。换能器外的硫化层应有适当的延长,雷顶要保持流线形,对平面阵应加导流罩。表面粗糙度和不连续性是水动力噪声产生的重要原因,故要求表面光滑和连续。据国外资料报导,应尽量使表面粗糙度 ζ 不超过以下尺寸:

$$\zeta < 6 \times 10^{-2}/V_t$$

式中: V_t 为雷速(节)。

(3) 采用泵喷式动力系统或其它形式的动力系统,以减小由推进系统产生的噪声。

(4) 减小机械振动与摩擦噪声。

(5) 切断螺旋桨噪声传到雷头接收器基阵的路径。在雷尾加装遮声板,加装气幕屏蔽环,都是为了切断尾部噪声传向雷头。

(6) 在雷体上加涂高分子涂层,如水溶性高分子涂料。

3 由介质确定的参数的影响

3.1 传播损失 TL

传播损失是由扩展和衰减引起的。对于球面波直线传播,传播损失 TL 可表达为

$$TL = 10\lg r + \beta r \times 10^{-3}$$

第一项为几何扩展引起的损失(几何衰减),第二项为衰减损失(物理衰减),衰减损失包括吸收、散射、声能泄漏出声道的效应。影响衰减系数 β 的因素主要是温度和深度,其数量关系为:

$$\beta = (0.01249 - 0.60535 \times 10^{-3}t + 0.14767 \times 10^{-4}t^2 - 0.15352 \times 10^{-6}t^3)(1 - 1.764 \times 10^{-5}d)f^2$$

式中: t 为温度($^{\circ}\text{C}$), d 为深度(米), f 为频率(KHz)。

对于存在温度梯度(或声速梯度)的海区,声线是弯曲的。此时的作用距离受海区的影响而不同于直线传播的情况。特别在负梯度时,作用距离大大减小,因此对自导作用距离的考核在鱼雷规范中提出的规定为 -1×10^{-4} 以下的负梯度。

3.2 混响级 RL 的影响

在海洋中对发射信号有三种混响:体积混响——介质体积不均匀性引起的反向散射;海底混响——海底反向散射;海面混响——表面反向散射。在浅海区,主动自导的混响主要是界面(海面和海底)混响。在深海区,深航鱼雷主动自导的混响干扰主要是体积混响,而浅航鱼雷主动自导的混响干扰主要是海面混响。

由于混响会降低主动自导作用距离,因此选择好的设计是很重要的。目前,许多鱼雷采用混响陷波器、双向调频脉冲等措施,都收到了较好的效果。

4 由目标确定的参数的影响

对于主动自导鱼雷而言,主要是目标强度 TS。目标强度决定于舰船的形状、材料、尺寸,并且和弦角 φ 有关

$$TS = 20\lg G - 10\lg U$$

$$U = \{0.251635\varphi^2 - 0.18555\varphi + 0.365\sin[3(\varphi + 0.17453)] + 0.015\varphi^2\sin(9\varphi/2)\}$$

$$G = Kabc/(a^2\sin^2\theta\cos^2\varphi + b^2\sin^2\theta\sin^2\varphi + c^2\cos^2\theta)$$

式中: a 、 b 、 c 为目标的长、宽、吃水; K 为反射系数,对于钢材料的舰船, $K=0.94$ 。

现代的高分子涂料可大大减小目标强度,例如代号为“簇卫”或“集束卫士”(clusterguard)的涂料可使 MK46 和 MK48 的主动自导装置的作用距离缩短三分之一。苏联潜艇上用的消声瓦,也使主动自导作用距离大大降低。

为考核主动自导作用距离,必须对目标强度作出统一规定,鱼雷规范规定了鱼雷的 dB 值。

对被动自导而言,目标声源级 SL 对作用距离的影响极大。对各种目标都作一些测量后得到的经验公式,在战术评定时,就是利用它们进行计算的。为考核被动自导鱼雷作用距离,我国鱼雷规范对目标声源级作出了统一的规定。

5 结 论

影响自导作用距离的因素较多,但可归结为三类参数:目标参数、介质参数、鱼雷参数。

目标参数 TS 和 SL 已根据自导学组的建议在鱼雷规范中作了具体的规定。

介质参数中的 TL 由海区决定,而对于负梯度的问题,在规范中对考核条件作了相应的规定。

对于混响问题,必须在设计主动自导装置时增加抗混响电路,以使在混响掩蔽下的作用距离得到提高。

从鱼雷参数的影响看,一是要从总体的角度大力降低自噪声,二是设计高性能的自导装置,特别是加强信号处理方面的研究,并使其真正实现工程化。

参 考 文 献

- 1 蒋兴舟. 鱼雷自导技术概论. 海军工程学院, 1984
- 2 马幼常. 鱼雷自导系统. 海军工程学院, 1987
- 3 林建域. 水声信号检测与参数估计, 海军电子工程学院, 1984
- 4 侯自强, 李贵斌. 声纳信号处理. 海洋出版社, 1986
- 5 尤里克 R J. 水声原理. 哈尔滨船舶工程学院, 1990

Parameter Analysis for Influence Range of Homing Device

Jiang Xinzhou Chen Xi

Abstract

The paper considers sonar equation as a core of the question, researching parameter's influence on seeking range. It specially analyses the relevance between seeking range and SL, GL, NL, and provides some ways to reduce self noise of torpedo.

Key words: Torpedo homing; Action range; Sonar equation