

CENTURY

21

高等学校教材

兵器科学与技术

鱼雷

自导信号与信息处理

★ 李志舜 编著

西北工业大学出版社

鱼雷自导信号与信息处理

李志舜 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是在讲义《鱼雷自导系统》和多年来研究生教学讲稿的基础上编写的,书中主要围绕鱼雷自导技术的信号波形、信道(含目标)和接收机三个主要因素进行阐述。全书共分8章。第1章讲述了鱼雷自导的基本原理和鱼雷自导系统的基本结构;第2章和第3章讲述了鱼雷自导信道和目标;第4章讲述了鱼雷自导信号分析;第5章至第8章讲述了自导接收机的相关问题。

本书可作为“兵器科学与技术”学科的研究生教材,略去书中理论偏深的内容,也可作为本科生教材,还可供相关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

鱼雷自导信号与信息处理/李志舜编著. —西安:西北工业大学出版社,2004.3

ISBN 7-5612-1722-6

I. 鱼… II. 李… III. 鱼雷自导-研究生-教材 IV. TJ63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 125987 号

出版发行: 西北工业大学出版社

通信地址: 西安市友谊西路 127 号 邮编:710072 电话:029-88493844

网 址: www.nwpup.com

印刷者: 陕西东江印务有限责任公司

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

印 张: 16.25

字 数: 349 千字

版 次: 2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 1~2 000 册

定 价: 22.00 元

前 言

自导鱼雷是一种能自动搜索捕获目标,并以某种导引方式跟踪目标,当命中目标时自动爆炸从而毁伤目标的水下武器。现代鱼雷又称为水下导弹,是海军潜艇、水面舰艇和飞机用于反潜攻舰的主要武器,特别地,是潜艇的克星。第二次世界大战以后,随着科学技术的发展,根据现代战争的需要,潜艇技术和水面舰艇技术得到了飞速的发展。作为反潜攻舰的主要武器,鱼雷技术得到了相应的发展,其发展方向是高航速、远航程、大航深、具有目标识别和对抗能力、精确导引和高的爆破威力等。鱼雷自导是现代鱼雷的重要组成部分,鱼雷技术的发展,特别是现代科学技术如微电子技术、计算机技术和信号处理技术等的发展,促进了鱼雷自导技术的进步和发展。

实际上,鱼雷自导是装载在鱼雷上的一部小型声纳,就其基本职能而言与声纳和雷达一样都是要探测、测量和识别目标,因此,声纳和雷达采用的信号分析理论、信号检测理论和参数估计理论,甚至一些基本的信号处理技术和方法,对鱼雷自导也适用。然而,鱼雷自导与声纳的工作载体不同,与雷达的工作介质不同,也就是说鱼雷自导与声纳和雷达的工作环境有所差异,因而又有其特点和难点。书中内容力图反映鱼雷自导技术的特点及其最新发展。

本书是“兵器科学与技术”学科的研究生教材(略去书中理论偏深的内容,也可作为本科生教材),是在讲义《鱼雷自导系统》和多年来研究生教学讲稿的基础上编写的,主要围绕鱼雷自导技术的信号波形、信道(含目标)和接收机三个主要因素进行阐述。全书共分8章。第1章是绪论,主要讲述鱼雷自导技术的过去、现在和未来,鱼雷自导的基本原理和鱼雷自导系统的基本结构等。第2章和第3章讲述鱼雷自导信道和目标。第4章讲述鱼雷自导信号分析,包括信号表示、信号采样、运动点目标的信号模型、信号波形的模糊度函数及其对系统性能的影响、波形选择和设计等。第5章至第8章讲述自导接收机的相关问题,包括目标定向、信号检测、参数估计和目标识别等。

本书是我国第一部公开出版的有关鱼雷自导技术的研究生教材,书中侧重于对基本理论、基本概念、基本方法和工程实现等问题的阐述,收入了编者及所在科研团队近年来的部分研究成果。其主要特点如下:

(1) 综述了鱼雷自导技术的现状和发展趋势,指出了鱼雷自导技术正向着宽带和低频方向发展,并提出了相应的关键技术,可为进一步研究鱼雷自导技术提供参考。

(2) 详细讨论了鱼雷自导波形分析的相关问题,提出了鱼雷自导波形设计和选择的方法,

指出自导波形的设计和选择是以系统对目标信息的要求和干扰背景为依据的,其与信道情况、目标运动规律和鱼雷跟踪目标的不同阶段和主要任务有关,在不同条件下,自导波形的设计是不同的。对不同波形,应采用相应的最佳信号处理器。

(3) 论述了宽带阵列信号处理的相关问题,包括宽带恒定束宽波束形成器和波束域高分辨方位估计等问题。

(4) 论述了频率压缩复本相关器的基本原理和实现方法,这种处理器可同时实现信号检测和目标径向速度与距离的估计。

(5) 论述了自适应滤波器在混响、检测信号中的应用,指出在深海采用推广的自适应相干累积器,在浅海采用自适应混响抵消器加推广的自适应相干累积器,并给出了外场实验结果。

本书由海军工程大学蒋兴舟教授审阅,西北工业大学田琬逸教授对全书进行了审校,李海英博士对全书文稿进行了整理和计算机录入,并提出了许多有益的建议;同时,本书在编写中还得到了很多同行和领导的关心、支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。书中引用了参考文献中的部分内容,特向文献作者表示谢意。此外,还要特别感谢编者所在科研团队的同事们,以及给予关心、支持并提出许多宝贵意见的崔景元、李辉、王夏林、梁红等各位领导和老师。

书后附有参考文献目录,便于读者对有关问题进行深入研究。由于编者水平有限,书中不妥和错误之处,敬请读者予以批评指正。

编 者

2003 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
第 1 节 自导鱼雷及鱼雷自导系统综述	1
第 2 节 鱼雷自导的信息空间	14
第 3 节 鱼雷声自导工作原理	14
第 4 节 鱼雷自导系统的基本结构	22
习题与思考题	25
第 2 章 鱼雷自导信道	26
第 1 节 概述	26
第 2 节 海水的声吸收	26
第 3 节 海水中的声速	27
第 4 节 海洋中的声传播理论	29
第 5 节 界面对声传播的影响	52
第 6 节 声传播的多径效应	55
第 7 节 声传播起伏	56
第 8 节 随机时变信道的系统函数	57
第 9 节 随机信道的平均特性	59
第 10 节 随机信道的二阶统计特性	61
第 11 节 信道的衰落效应和相干函数	63
第 12 节 信道的散射函数	67
第 13 节 随机时空变信道	70
第 14 节 时变信道的抽头延迟线模型	71
第 15 节 海洋混响的统计特性	73
习题与思考题	75

第3章 鱼雷自导目标特性	77
第1节 目标强度	77
第2节 目标回波形成机理	78
第3节 目标系统函数	80
第4节 目标回波的衰落和模糊	81
第5节 目标模型	83
第6节 目标回波特征	87
第7节 舰艇辐射噪声特性	88
习题与思考题	90
第4章 鱼雷自导信号分析	92
第1节 概述	92
第2节 鱼雷自导实信号表示	92
第3节 信号空间	95
第4节 信号的矢量表示	101
第5节 信号的复数表示	108
第6节 信号采样	112
第7节 波形参数	125
第8节 点目标回波的数学模型	129
第9节 模糊度函数	131
第10节 常用鱼雷自导信号波形	139
第11节 鱼雷自导信号波形选择	157
习题与思考题	162
第5章 鱼雷自导目标定向	164
第1节 概述	164
第2节 基本的信号和噪声模型	164
第3节 换能器基阵特性	169
第4节 时域波束形成器的实现	172
第5节 频域波束形成器	176
第6节 宽带波束形成器	179
第7节 分裂波束目标定向	182
第8节 空间谱估计	186
习题与思考题	200

第 6 章 鱼雷自导信号检测	202
第 1 节 匹配滤波器	202
第 2 节 鱼雷自导信号最佳检测	204
第 3 节 常用鱼雷自导信号检测方法	209
习题与思考题	226
第 7 章 目标参量估计	227
第 1 节 目标参量估计	227
第 2 节 估计量的性质	227
第 3 节 最大似然估计	228
第 4 节 距离估计	230
第 5 节 速度估计	232
第 6 节 距离和速度联合估计	233
习题与思考题	237
第 8 章 目标识别与反对抗技术	239
第 1 节 引言	239
第 2 节 反鱼雷技术简述	240
第 3 节 目标识别的基本原理	241
第 4 节 鱼雷反对抗技术	242
习题与思考题	245
参考文献	246

第 1 章 绪 论

第 1 节 自导鱼雷及鱼雷自导系统综述

一、自导鱼雷的发展

自导鱼雷是一种能自动搜索捕获目标,并以某种导引方式跟踪目标,当命中目标时自动爆炸从而毁伤目标的水下武器。1868 年世界上第一条潜水航行的鱼雷问世,距今已有 100 多年的历史了,那是由在奥匈帝国工作的英国工程师 Robert Whitehead 发明的。

约在 20 世纪 30 年代,各国开始研制自导鱼雷。1943 年 9 月德国首先在海战中使用自导鱼雷,击沉三艘英国的水面舰船。第二次世界大战期间,盟军共发射了 340 条 MK24 鱼雷,其中 204 条击中敌潜艇目标,击沉 37 艘,击伤 18 艘;发射 MK27—0 鱼雷 106 条,其中 33 条击中目标,击沉 24 艘,击伤 9 艘;发射 14 条 MK28 鱼雷,其中 4 条击中目标。第二次世界大战末期,美国研制成功 MK32 主动声自导鱼雷,德国研制成功“Geier”主动声自导鱼雷和“云雀”(Lerchel)线导鱼雷^[1]。

第二次世界大战以后,随着水声学、信号处理、微电子学、计算机科学、控制及材料学等学科的发展和技术的进步,鱼雷技术也有了飞速的发展,尤其是现代信号处理技术及计算机技术的应用,使得鱼雷自导技术有了一个飞跃。

鉴于反潜战的需要,世界各国一直十分注重发展鱼雷武器。现代鱼雷的发展趋势是高航速、远航程、大航深、具有“会思考”能力及反对抗能力、精确导引和高的爆破威力等。目前,世界各鱼雷强国通常都装备轻型鱼雷、重型鱼雷和火箭助飞鱼雷^[2, 3]。一般地,轻型鱼雷口径为 300~400 mm,典型的为 324 mm,长度为 2 m 左右,用来装备水面舰艇和飞机,也用做火箭助飞鱼雷的弹头。轻型鱼雷主要用于反潜,为了解决装药量少和高爆破威力的矛盾,采用精确制导、垂直命中和定向爆破技术。最具代表性的轻型鱼雷有美国 MK50 鱼雷、英国鳐鱼(Sting Ray)鱼雷、法国海鳐鱼雷和意大利 A290 鱼雷等。重型鱼雷典型口径为 533 mm,长度为 6 m 左右,用来装备潜艇和水面舰艇,用以攻击潜艇和水面舰船。重型鱼雷通常为线导和主动声自导,也有的加装尾流自导。鱼雷发射后,首先线导系统工作,导引鱼雷跟踪目标,在鱼雷进入自导工作区域后,自导系统工作,一旦捕获目标,由自导系统导引鱼雷跟踪直至最后命中目标。

最具代表性的重型鱼雷有美国 MK48 ADCAP 鱼雷、英国旗鱼(Spearfish)鱼雷、法国 F17—2 鱼雷和意大利 A184 鱼雷等。火箭助飞鱼雷又称反潜导弹或反潜鱼雷导弹系统,鱼雷是导弹的末级或导弹的战斗部。火箭助飞鱼雷可由水面舰船发射,也可由潜艇发射,是舰艇的中程反潜武器,从类型上可分为弹道式和飞航式。最具代表性的火箭助飞鱼雷有舰用“垂直发射阿斯洛克”(VLA)、潜用“海长矛”(Sea Lance)、舰用“超依卡拉”(Super Ikara)和“米拉斯”(Milas)等。

俄罗斯也是世界鱼雷强国,其鱼雷品种较多,大体可与西方抗衡。此外,俄罗斯还发展了一种重型鱼雷,口径为 650 mm,长度为 10 m 左右,航速可达 50 kn,在此航速下,航程可达约 45 km。

二、现代鱼雷是高新科技的综合体

现代鱼雷是水下导弹,是海军潜艇、水面舰艇和飞机用于反潜攻舰的主要武器,特别地,是潜艇的克星。随着科学技术的发展,根据现代战争的需要,潜艇技术和水面舰艇技术得到了飞速的发展。作为反潜攻舰的主要武器,鱼雷技术也得到了相应的发展。现代鱼雷技术是以系统论、控制论、信息论、电学、声学、光学、流体力学、热物理工程学、电子技术和计算机技术为基础,以提高鱼雷武器战术技术性能为目标的一项多学科的综合性高技术,现代鱼雷是高新科技的综合体,这可从以下几个主要方面来说明。

1. 高航速、大航深和远航程

据报道,国外水面舰船和潜艇的航速超过了 35 kn,个别达到 40~42 kn;潜艇航深达到了 500~600 m,个别超过了 900 m。随着科学技术的发展,舰艇的航速还会有所提高。在这种情况下,鱼雷的航速和航深也应进一步提高,只有达到一定的指标,才能保证鱼雷命中目标的概率。由于水面舰船和潜艇远程探测和攻击能力的不断增强,为了提高实施鱼雷攻击舰艇的安全性,提高鱼雷捕获和命中目标的概率,因此,需要增大鱼雷的航程。

鱼雷航速和航程与鱼雷总体和动力系统参数有关,可用鱼雷航行质量指标来描述。对热动力鱼雷,其航行质量指标为

$$E_T V_T^2 = \frac{2m_f H}{9.8 C_x \Omega \rho} \eta \quad (1.1)$$

式中, E_T 为鱼雷航程; V_T 为鱼雷航速; m_f 为燃料的消耗量; H 为燃料的热值; C_x 为鱼雷的阻力系数; Ω 为浸湿面积; ρ 为海水密度; η 为动力推进系统效率,包括热机的效率、传动装置的效率和螺旋桨推进效率。可以看出,热动力鱼雷航速和航程与发动机及推进器的设计、燃料的选择和鱼雷的线型设计有关。对电力鱼雷,其航行质量指标为

$$E_T V_T^2 = \frac{2UC}{9.8 C_x \Omega \rho} \eta \quad (1.2)$$

式中, U 为推进电机的端电压; C 为电池组的容量;其他参数同式(1.1)。其中动力推进系统的效率包括推进电机的效率、传动装置的效率和螺旋桨推进效率。可以看出,电力鱼雷航速和

航程与推进电机及推进器的设计、电池的选择和鱼雷线型有关。

综上所述,为了提高鱼雷的航程和航速,应采用低阻的鱼雷线型;设计最佳的鱼雷流体动力布局,在保证鱼雷航行稳定性和机动性的前提下,提高鱼雷的快速性;采用降阻涂料,进一步降低鱼雷阻力;动力推进系统对增大鱼雷航程和提高航速至关重要。据报道,目前热动力鱼雷航速可达 $50\sim 70$ kn,电动力鱼雷航速可达 $40\sim 50$ kn,轻型鱼雷航程在 10 km以上,重型鱼雷航程可达 40 km。

当鱼雷在大深度航行时,主要面临两个问题,一是鱼雷的壳体强度和稳定性问题,一是热动力系统的背压问题,背压增加,会降低发动机的有效功率和增加燃料消耗。因此,为了增大鱼雷航深,应进行壳体优化设计,合理选择壳体材料,以保证在大深度情况下,鱼雷壳体的强度和稳定性。还应指出的是,当鱼雷在大深度工作时,会增加声学基阵阵元间的耦合,在基阵设计时应设法减小这种耦合。目前鱼雷航深可达 $500\sim 600$ m,最大达 $1\ 100$ m。

2. 先进的自导系统

现代鱼雷自导系统融水声学、现代信号处理和计算机技术于一体,使其获得了高的性能指标,这表现在以下几个方面。

(1) 相关检测技术、准相关检测技术、自适应信号检测技术和复杂信号波形在信号检测中应用等技术广泛应用于现代鱼雷自导系统中,使检测阈下降到 $-10\sim -20$ dB,甚至更低。

(2) 多种自导波形选择。自导波形是主动自导设计中的重要因素之一。鱼雷自导信号波形不仅决定了系统的信号处理方法,而且直接影响系统在分辨力、参数测量精度、抑制混响和反对抗能力等方面的性能。自导波形的设计与选择,与信道情况(如深海或浅海)、目标运动规律(如低速或高速)和鱼雷跟踪目标的不同阶段(如远程、中程或近程)及主要任务(如检测、估计或识别)有关,在不同条件下,自导波形的最佳设计是不同的。因此,在鱼雷攻击的全过程,将采用多种自导波形,以完成不同阶段的不同任务。

可编程数字信号发生器可以很方便地产生各种自导波形和实现波形之间的转换。目前常用的自导波形有单频矩形(或其他包络)脉冲信号(CW 波形)、线性调频矩形脉冲信号(LFM 波形)、双曲调频信号、伪随机信号和时间分集信号或频率分集信号等。

(3) 分裂阵相位法方位估计技术、密集波束内插方位估计技术、距离与速度联合估计技术和其他最佳估计技术在现代鱼雷自导系统中的应用,使在 $1\ 000$ m 距离上,方位估计均方误差小于 0.5° ,距离估计均方误差小于 10 m,径向速度估计误差不大于 0.5 kn。

(4) 新一代鱼雷自导系统均具有目标识别与反对抗能力,所采用的技术包括回波信号长度识别,回波信号上升与下降斜率识别,与发射信号结构的对比识别,导引脉冲的采用,尺度识别(体识别),径向速度、距离和方位门的设置和反对抗弹道的安排等。

(5) 集成电路、微处理器、高速数字信号处理器和计算机技术在现代鱼雷自导系统中的应用,使自导系统的可靠性、可维性、自检能力、扩展能力以及对各种现代信号处理算法的实现和运算能力大大地提高了,为鱼雷自导系统的智能化和“会思考”奠定了基础。

(6) 新一代的轻型鱼雷具有精确导引和垂直命中目标的能力,从而为其命中目标要害部

位和定向聚能爆破创造了条件。

3. 定向聚能爆破技术

轻型鱼雷体积小,重量轻,当由飞机携带或作为火箭助飞鱼雷弹头时,可对中远程敌潜艇目标进行攻击,同时轻型鱼雷机动性较好,易于实现最优精确控制和最佳导引。但由于受体积限制,轻型鱼雷装药量较少,一般为 40 kg 左右,最大 80 kg,难以对具有较好防护的现代潜艇构成威胁。因此,现代轻型鱼雷发展了定向聚能爆破技术,使其爆破威力较常规装药方法有大幅度提高。据报道,定向聚能爆破其射流前部速度可达 $7\,000\sim 8\,000\text{ m/s}$,温度高达 $4\,000\sim 5\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$,足以穿透防护精良的潜艇壳体。法国“海鳐”鱼雷其射流能穿透 40 mm 的耐压壳体。

4. 低噪声和隐形设计

鱼雷噪声有辐射噪声和自噪声之分。鱼雷辐射噪声是指在某一距离上测得的航行鱼雷的噪声;鱼雷自噪声是用安装在鱼雷上的水听器测得的航行鱼雷的噪声,对自导鱼雷,测鱼雷自噪声的水听器通常是自导声基阵的阵元。鱼雷辐射噪声级直接影响鱼雷攻击的隐蔽性和发射鱼雷本舰的安全,对线导鱼雷,还影响本舰对鱼雷的导引。鱼雷自噪声级是鱼雷自导系统的主要背景干扰,它对自导作用距离等性能指标产生影响。因此,现代鱼雷均采用低噪声和隐形设计技术,以提高鱼雷的战技性能和鱼雷攻击的隐蔽性。

鱼雷辐射噪声主要由机械噪声、推进系统(主要是螺旋桨)噪声和水动力噪声组成。机械噪声主要是动力系统产生的,推进系统噪声主要是螺旋桨空化噪声和螺旋桨线谱噪声,水动力噪声包括水流流过水听器及鱼雷外部结构时引起的不规则和起伏产生的噪声。

为了降低鱼雷辐射噪声,应进行低噪声头部壳体线型设计,保持头部壳体轮廓的连续性,保证壳体特别是头部壳体表面的光洁度,各大段连接采取隔振措施,低噪声动力系统设计及动力系统的隔振安装,避免因动力系统激振引起壳体的共振和低噪声螺旋桨设计等,此外,还可以采用减阻降噪涂层和采用非金属壳体材料等。

鱼雷自噪声的基本成因与辐射噪声是相同的,机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声是其三种主要噪声源。辐射噪声经绕射,通过壳体传播和海底、海面及海中的不均匀体反射或散射到达鱼雷自导基阵形成自噪声。因此,为了降低鱼雷自噪声,除采取措施降低鱼雷辐射噪声外,还可以采取以下措施:自导基阵阵元和基阵的指向性设计、换能器的减振安装、基阵的减振安装和基阵硫化层的向后延伸等。

5. 大型线导鱼雷

大型线导鱼雷上配备有线导系统,其与发射鱼雷本舰(制导站)的遥测和遥控系统组成线导鱼雷武器系统。由于制导站的声纳作用距离远,因而可在更远的距离上发射鱼雷,实施对目标攻击;由于武器系统参与工作,因而线导鱼雷具有较强的抗干扰性能;又由于线导鱼雷的末弹道为自导系统工作,所以线导鱼雷可实现精确制导。现代线导鱼雷制导系统的工作方式如图 1.1 所示。图中,目标监视通道 1 和 2 用于观测目标,测定鱼雷参数;鱼雷监视通道用于观测鱼雷,测定鱼雷参数;鱼雷将目标观测数据通过通信通道,传输给制导站;制导站通过操纵通道操纵鱼雷。

制导系统的工作原理:在远距离时,制导站根据目标监视通道1和鱼雷监视通道测得的目标和鱼雷数据,按照某种导引律操纵鱼雷跟踪目标,鱼雷通过目标监视通道2观测目标。鱼雷发现目标后,交由自导系统操纵,并将目标数据传给制导站,制导站起监视作用。当自导系统工作失误时(如导向诱饵),制导站予以纠正(凌驾权)。鱼雷断线时,自导系统自主工作。

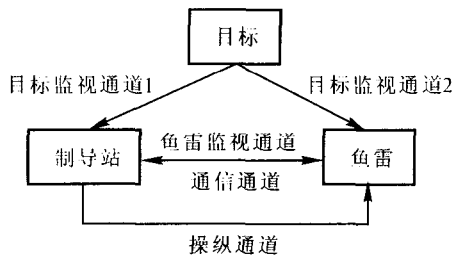


图 1.1 现代线导鱼雷制导系统工作方式

6. 尾流自导

水面舰船在航行中,其尾部将产生一条长长的尾流,鉴于舰船尾流的结构及其特性不易模拟,因而利用尾流场工作的自导系统具有很强的抗人工干扰能力。目前现役鱼雷的尾流自导多利用尾流场的声学特性,如尾流与海水声阻抗的差异、尾流与海面散射特性的差异等,尾流场的磁特性和热特性也是人们关注的问题。

7. 精确控制技术

鱼雷控制系统是确保鱼雷正常航行,完成作战使命的重要环节,它通常由敏感元件(测量鱼雷航深、航向和雷体运动参数如姿态角、角速度等)、信号综合、逻辑处理装置、功率放大电路或机构、执行舵机和参量预置机构组成。控制系统采用的技术和性能指标与全雷战技指标、总体布局、导引方式、使用环境、打击对象和动力情况等有关。控制系统的主要功能是对实航弹道中的主控量(鱼雷航深、航向、航行姿态角及角速度)实施自动控制,其控制精度和动态品质应满足要求,确保鱼雷航行的稳定性和机动性;准确实现鱼雷的程序弹道、搜索弹道、导引弹道和再搜索弹道。

现代舰艇技术的发展,使得目标的航速大、航深变化大,机动性和防护性能强,从而须远距离实施鱼雷攻击,这都对控制系统提出了更高的要求。现代鱼雷集自导、线导和控制于一个大系统中,这样,控制系统要综合处理大系统中的各参量,实现对鱼雷主控量(航向、航深、姿态角、角速度)的精确控制,准确实现各种战术弹道。因此,现代控制理论、现代计算机技术和现代敏感元件的应用,使得鱼雷精确控制技术得到了实现。

三、鱼雷自导系统的分类

利用目标辐射或反射的能量发现目标,测定其参量,并对鱼雷进行操纵的系统称为鱼雷自导系统。

通常用表征自导系统的状况和特征的方法对鱼雷自导系统进行分类,主要的分类方法如下。

(1) 按采用的物理场分类:任何自导系统均反应某种物理场的一定作用,这种物理场称为控制场。原则上讲,自导系统可用以进行工作的物理场有磁场、电场、水声场、热场和光场等,但评定利用这些场作为控制场的可能性时,系统作用距离和抗干扰性是最重要的标准。由于

声波较其他各种辐射形式在海水中的传播损失最小,因此,水声场作为自导系统的控制场最为有利。以水声场作为控制场的自导系统,称为声自导系统。现役的和在研的自导鱼雷绝大多数是声自导鱼雷。

由于尾流不易模拟,以尾流场作为控制场的自导系统(尾流自导)具有良好的抗干扰性能,因此,尾流自导系统常用以反舰。自导系统可以利用的尾流场的特性有声、磁、热和放射性等特性,目前尾流自导多利用尾流的声学特性,如尾流与海水在声阻抗上的差异和尾流与海面在声散射特性上的差异等。俄罗斯和美国均有尾流自导鱼雷。

(2) 按使用物理场的方法分类:鱼雷自导系统可分为主动自导系统、被动自导系统和主被动联合自导系统。利用自导系统发射并经目标反射回来的物理场导引鱼雷攻击目标的自导系统称为主动自导系统。利用目标本身产生的物理场导引鱼雷攻击目标的自导系统称为被动自导系统。既利用自导系统发射并经目标反射回来的物理场又利用目标辐射的物理场,并按一定程序工作,导引鱼雷攻击目标的自导系统称为主被动联合自导系统。

对声自导系统而言,被动自导系统的主要优点是:对高速目标,自导作用距离较远;当鱼雷辐射噪声很低时,具有良好的攻击隐蔽性;系统简单,易于实现。其主要缺点是:不能攻击静止和消声完善的目标;抗干扰性能差。主动自导系统的主要优点是:通过波形设计和回波分析,可具有较好的抗干扰性能;可攻击静止和消声完善的目标;可以通过波形设计与信号处理方法的结合,使系统具有良好的目标定位(即目标参数精确估计)性能,从而实现精确制导。其主要缺点是:攻击的隐蔽性差,系统复杂。主被动联合自导系统可发挥主动自导和被动自导两者的优点,但须恰当处理联合的工作模式。

(3) 按空间导向方法分类:在一个平面上,通常是水平面导引鱼雷攻击目标的自导系统称为单平面自导系统。在两个平面上,即水平面和垂直面导引鱼雷攻击目标的自导系统称为双平面自导系统。前者用于攻击水面舰船,后者主要用于反潜,也用于攻击水面舰船。

四、鱼雷自导的工作环境

实际上,鱼雷自导是装载在鱼雷上的一部小型声纳,就其基本职能而言,同声纳和雷达没有本质的差别,都是要探测和测量目标,因此,声纳和雷达采用的信号分析理论、信号检测理论和信号参数估计理论,甚至一些基本的信号处理技术和方法,对鱼雷自导也适用。然而,鱼雷自导与声纳的工作载体不同,与雷达的工作介质不同,也就是说鱼雷自导与声纳和雷达工作环境有所差异,因而又有其特点和难点。现对鱼雷声自导的工作环境做如下说明。

1. 复杂的水下信道

鱼雷自导是工作在海洋环境中的,其信道是海水介质。同雷达工作的空中信道相比,水下信道的低信息传输率、色散效应、界面(海底和海面)影响、声速剖面结构的影响、声传播起伏和多径传输等给鱼雷自导的工作造成困难。

众所周知,声波在海水中的传播速度较慢,仅约 $1\,500\text{ m/s}$,因此,鱼雷自导检测和测量目标的速度也较慢,如检测 2 km 的目标需要约 3 s 的时间,也就是说,在海洋中信息的传输率

低,这给连续检测、跟踪和识别目标带来困难。

传播损失包括空间扩展损失和海水吸收损失。海水吸收损失与频率有关,对较高频率和较远距离,吸收损失占较大比重。对窄带信号,海水吸收损失引起信号能量的衰减;对宽带信号,海水吸收损失可使信号波形产生畸变,即色散效应。

海面和海底对声传播产生很大的影响。海面反射和散射产生反射与散射损失;不平静的海面将产生反射起伏;较平静的海面会产生虚源干涉;海面受温度影响较大,当存在温度负梯度时,会形成影区。海底和海面有许多相似的影响,但其作用更复杂,其对声波的反射损失与海底物质类型、结构和声波入射角有关。

海水中的声速不是一个固定不变的量,它是取决于海水介质中许多特性的一个变量。它随着温度、季节、地理位置及时间而变化。实际测量表明,声速是温度、盐度和压力(深度)的函数,随温度、盐度和深度的增加而增大。“声速剖面”是指声速随深度的变化。深海声速剖面是分层的,由表面层、季度跃变层、主跃变层和等温层构成。浅海声速剖面不稳定、不规则,因而不易预测。声速剖面随季节、时间和纬度而变化。声速剖面对声传播影响很大,可产生声影区和声道,对有声速梯度的海水介质,声线不能直线传播。

海洋中的内波与湍流、温度微结构、生物群的运动、海面的波浪、鱼雷和目标的运动等因素都会引起声信号传播的起伏,它们是随机的、时变的,将影响自导检测与测量目标的稳定性。

声波在海面声道、深海声道和浅海传播时,会产生多路径传播,海底与海面反射、温度或盐度微结构的存在也会形成多路径传播。多路径传播是自导工作的有害因素,它产生信号起伏、信号畸变和去相关。

海洋信道的复杂性、随机性和时变性,使信号产生衰落和模糊,鱼雷自导就是工作在这样复杂的随机时空变信道中的。为了使自导能很好地工作,必须增加自导系统的复杂性,才能取得较为满意的结果。

2. 高速时变载体

鱼雷自导的载体是鱼雷。现代鱼雷航速高达 50 kn 以上,鱼雷在对目标进行搜索、跟踪和再搜索的过程中,往往在双平面进行高速机动,这样,载体本身是高速机动和时变的。高速机动的载体,将增加信号的随机时变性。

3. 严重的干扰背景

鱼雷自导的干扰背景主要是鱼雷自噪声和混响。由于鱼雷高速航行,将产生较强的鱼雷自噪声干扰。又由于随机时变信道的影响和鱼雷在双平面机动航行,鱼雷自噪声并非始终是平稳的和高斯分布的。鱼雷主动自导均以较强的声源级向海中辐射声波,从而产生较强的混响干扰。随机时空变信道的影响使混响也产生时间弥散、频率弥散、角度弥散和起伏。严重的干扰背景给鱼雷自导信号处理增加了难度。

4. 复杂的对抗和反对抗环境

鉴于鱼雷在海战中的重要作用,世界各国在重视发展鱼雷技术的同时,也十分重视发展反鱼雷技术,即目标对鱼雷攻击的对抗,或称目标对抗。海上试验和海战都证明,这些反鱼雷技

术能有效地扼制鱼雷攻击。针对反鱼雷技术的发展,现代鱼雷均采用了反对抗措施。目标对抗和鱼雷反对抗是在矛盾和斗争中发展的,随着现代科学技术的发展,人们正在把最新的科学技术发展成就引入到目标对抗技术和鱼雷反对抗技术中来。鱼雷自导就是工作在这样复杂的对抗和反对抗环境中的,并肩负着反对抗的重要使命。

反鱼雷技术大致可分如下几类。

(1) 舰艇的寂静设计和隐形设计。在潜艇设计和制造时,尽量降低辐射噪声级和其目标反射强度,例如采用低噪声螺旋桨,在舰艇表面覆以消声瓦或其他吸声防护涂层等,这样就减少了潜艇被探测的可能性和鱼雷攻击的威胁。

(2) 战术机动,按照最有利于避开鱼雷攻击的方式逃离。

(3) 软杀伤。施放各类人工干扰器材,即鱼雷诱饵,其模仿目标,诱骗自导鱼雷,破坏鱼雷攻击,使鱼雷攻击失效。鱼雷诱饵种类很多,主要是模拟目标信号类和模拟反射体类,它们可以是拖曳式、悬浮式和自航式。使用时一般将诱饵抛射在舰艇和来袭鱼雷之间,然后舰艇作机动规避或逃离。

模拟目标信号类诱饵主要有以下几种。

1) 宽带噪声:这是一种连续的宽带噪声,可以用电声转换的方法产生,也可以用机械的方法产生。它的特点是功率大、频带宽,可以模拟特定的噪声,例如某种水面舰艇的辐射噪声。这种干扰信号可以诱骗被动自导或使自导装置阻塞。

2) 随机脉冲:周期地产生脉冲信号,其周期、脉冲宽度、填充频率可根据需要设定。这种干扰信号可诱骗主动自导。

3) 扫频信号:这是一种周期地进行扫频的连续信号,合理地选择信号参量,例如扫频宽度和扫频周期,可以模拟被动信号和主动信号,从而诱骗被动自导和主动自导。

4) 应答机:它产生一个模拟目标回波的信号。当应答机收到鱼雷的发射信号时,即回一个信号,模拟目标回波。回波信号的参量可以是固定的,或者是接收信号的重发。后者是回波重发器,具有更强的欺骗性和干扰能力。

5) 利用拖曳线列阵模拟目标尺度:模拟反射体类诱饵有气幕弹,在海水中形成气泡团或气泡幕,其可模拟目标反射,同时具有声屏蔽作用;固定在水下航行器上的金属带,当航行器航行时,金属带展开,模拟运动目标;拖曳空气筏,可模拟具有尺度和结构的运动目标。

(4) 硬杀伤:就是摧毁来袭鱼雷。可采用深弹,反鱼雷鱼雷拦截,也可采用防雷网、电磁炮和高速旋涡等方法破坏鱼雷攻击。

针对反鱼雷技术,目前采用的较为简单易行的鱼雷反对抗技术有提高鱼雷自导的信号处理能力、设计逻辑门、目标尺度或体目标识别、波形设计、回波信号分析和反对抗跟踪弹道设计等,为了提高反对抗效果,通常是综合采用多种反对抗技术,而不是简单地采用某一种技术。

5. 无人干预,全自动工作

鱼雷自导无人的干预,全自动工作,即使是线导鱼雷,在末制导段也要求鱼雷自导系统自主工作。由于人具有知识和经验,可以提高设备检测与识别目标的能力,因而与雷达和声纳相

比,鱼雷自导具有较大难度。

6. 体积和重量

鱼雷的体积和重量受到严格的限制,这在一定程度上约束了自导性能的提高。

五、对自导系统的基本要求

1. 鱼雷自导系统的基本职能

鱼雷自导系统的任务是,在复杂的作战条件下,使鱼雷发现、跟踪和命中目标,从而将目标摧毁。其具有如下基本职能。

- (1) 检测目标,即搜索、发现和确认目标存在。
- (2) 测量目标,对目标参量如方位、距离和径向速度进行估计,即目标定位。
- (3) 识别目标,即提取目标特征,识别目标真伪,进而采取反对抗措施。
- (4) 导引鱼雷,按照某种导引律,操纵鱼雷跟踪并命中目标;攻击失效,按某种方式实施再搜索。

2. 对自导系统的基本要求

根据自导系统的基本职能,应对其提出如下基本要求。

(1) 自导作用距离:作用距离是指在一定的目标条件、信道条件和概率准则条件下,鱼雷自导系统恰好动作,即确认目标存在并开始操纵鱼雷导向目标的最大距离。通常期望鱼雷自导有较大作用距离,其可覆盖较大的目标散布,提高鱼雷发现与命中目标的概率。

作用距离是鱼雷的一项综合性指标,其与鱼雷和自导系统本身的参数、信道和目标的特性有关。鱼雷自噪声级和自导系统中许多技术参数的选择对自导作用距离影响很大,信道和目标特性对自导作用距离也有较大影响。

(2) 搜索扇面:搜索扇面是指自导系统搜索目标的最大角度范围。从战术上讲,期望有较大搜索扇面,以覆盖较大的目标散布,提高鱼雷发现与命中目标概率;从技术上讲,搜索扇面过大会降低自导系统的信号干扰比,并使抗干扰性能降低。在实际系统中可采用相控发射、多波束接收或用较窄扇面使鱼雷机动的办法来满足战术和技术对搜索扇面的要求。

目标距离小于自导系统作用距离,在搜索扇面内存在的不能操纵鱼雷的角度范围称为死角。

(3) 导引精度:导引精度指系统引导鱼雷命中目标的准确性,其用引导误差来表征,这是一项决定自导鱼雷使用效果的重要指标。

鱼雷在导引过程中所能达到的鱼雷与目标间的最小距离称为引导误差,或称为脱靶量。允许的引导误差与很多因素有关,如给定的命中概率、战斗装药的重量和特性、目标类型及其防护能力等,一般在几米之内,有的要求直接命中。

引导误差与下列基本因素有关:导引方法与鱼雷的机动性、目标运动规律、鱼雷控制系统的控制精度及动态品质和鱼雷自导系统本身的性能。可见,引导误差是鱼雷的一项综合性指标,在导引方法与鱼雷的机动性、目标运动规律和鱼雷控制系统的性能确定之后,其取决于鱼