

[引用格式] 张翔鸢, 董小龙. 水声对抗 UUV 关键性能与作战运用研究 [J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(6): 821-826.

水声对抗 UUV 关键性能与作战运用研究

张翔鸢, 董小龙*

(中国人民解放军军事科学院 战争研究院, 北京, 100091)

摘要: 水声对抗装备能够对声自导武器实施软杀伤, 提高舰艇在海战中的生存能力。气幕弹、噪声发生器和声诱饵等现有水声对抗装备在智能化、机动性、自持力和灵活性等方面存在不足, 难以满足未来海战需求。文章以分布式海上作战为背景, 提出在无人水下航行器(UUV)基础上集成水声对抗技术, 发展水声对抗 UUV, 改进水声对抗模式, 通过集群战术提高水声对抗效能。从未来海上作战需求角度, 阐述了智能组合对抗性能的重要性, 同时分析了目标高效识别、任务自主规划、持久高效机动、多域平台投送等关键性能。在剖析分布式海上作战基本特征和力量运用特点的基础上, 研究了水声对抗 UUV 在水下侦察、破除雷障、反声自导武器以及反无人舰艇集群等方面的典型运用。

关键词: 无人水下航行器; 水声对抗; 分布式海上作战; 关键性能

中图分类号: TJ630.1; U666.7

文献标识码: R

文章编号: 2096-3920(2023)06-0821-06

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2022-0092

Study on Key Performance and Operational Applications of Underwater Acoustic Countermeasure UUV

ZHANG Xiangyuan, DONG Xiaolong*

(Institute of War, PLA Academy of Military Science, Beijing 100091, China)

Abstract: Underwater acoustic countermeasure equipment can carry out soft killing against acoustic homing weapons and improve the survivability of naval ships in naval warfare. The existing underwater acoustic countermeasure equipment, such as air curtain shell, noise generator, and acoustic decoy, has shortcomings in intelligence, maneuvering, self-holding power, and flexibility, which makes it difficult to meet the needs of future naval warfare. Based on distributed maritime operations, this paper proposed to integrate underwater acoustic countermeasure technologies on the basis of unmanned undersea vehicles (UUVs), develop underwater acoustic countermeasure UUVs, improve underwater acoustic countermeasure mode, and enhance the effectiveness of underwater acoustic countermeasures through swarm tactics. From the perspective of future maritime warfare requirements, the significance of intelligent combined countermeasures and the key performance such as efficient target identification, independent mission planning, durable and efficient maneuvering, and multi-domain platform delivery were analyzed. According to the analysis of the basic characteristics of distributed maritime warfare and the characteristics of force application, the typical applications of underwater acoustic countermeasure UUV in underwater reconnaissance, lightning barrier breaking, anti-acoustic homing weapons, and anti-unmanned ship swarm were studied.

Keywords: unmanned undersea vehicle; underwater acoustic countermeasure; distributed maritime operations; key performances

收稿日期: 2022-12-12; 修回日期: 2023-01-18.

作者简介: 张翔鸢(1985-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为联合作战与水下攻防.

* 通信作者简介: 董小龙(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为联合战术.

OPEN ACCESS

0 引言

在海战中,鱼雷、水雷和深水炸弹等水下武器给舰艇生存带来巨大威胁。据统计,二战中共有 19 艘航空母舰和 45 艘巡洋舰被鱼雷击沉,7 艘航空母舰、13 艘巡洋舰和 360 艘潜艇被深水炸弹击沉,12 艘航空母舰和 23 艘巡洋舰被鱼雷和炸弹联合击沉,2 700 余艘其他类型舰船被水雷摧毁或炸伤^[1-3]。战后,水下武器普遍采用了声自导技术,可对舰艇进行自动搜索、跟踪和攻击,进一步提高了打击精度和毁伤效能。为了降低声自导武器对舰艇的威胁,美、英等国海军采用了水声对抗装备。随着声自导武器和探测声呐智能化水平和综合性能的提高,水声对抗装备的对抗效能不断被削弱^[4-8],难以满足未来海战需求。综合运用水下无人自主技术和水声对抗技术发展水声对抗无人水下航行器(unmanned undersea vehicle, UUV),对提升水声对抗智能化水平,增强舰艇生存能力具有重要意义。

1 水声对抗装备发展现状

根据内在机理不同,现有水声对抗装备主要包括气幕弹、噪声发生器和声诱饵等。

气幕弹通过在水中产生大量微小气泡,形成气幕,屏蔽来袭声自导武器的主动寻的信号和己方舰艇的声辐射信号,从而起到保护己方舰艇不被探测和攻击的作用。气幕弹尺寸较小,成本较低,隐身性能良好^[9],但对抗效果不佳,甚至会起到引导声自导武器的作用^[10]。随着声自导武器智能化水平的提高,气幕弹更加容易被识别,不再作为水声对抗手段的重点发展对象。

噪声发生器通过产生覆盖来袭声自导武器工作频段的强噪声,将己方舰艇的水声辐射信号和来袭声自导武器的主动寻的信号淹没在强噪声环境下,从而使来袭声自导武器无法进行目标识别和攻击。根据声呐方程,只要强噪声使水声信号低于声呐探测阈值,即可对声自导武器实施有效压制。但在现实运用中,噪声发生器除了压制来袭声自导武器外,还可对己方舰艇声呐系统产生严重干扰。此外,现有噪声发生器不论基于宽带噪声压制干扰技术还是基于扫频压制干扰技术,均不具备智能化对抗能力。

声诱饵通过模拟己方舰艇水声辐射和反射特性,使来袭声自导武器误判、误跟和误击,从而达到欺骗目的。从世界范围来看,以美国为代表的海军强国较为重视发展声诱饵,主要类型包括拖曳式(如 AN-SLQ-25 系列)、悬浮式(如 ADC MK-2/3/4)和自航式(如 ADC MK5)。其中,ADC MK5 声诱饵既可发射强噪声对来袭声自导武器实施压制,又可模拟舰艇水声特性和运动特征对来袭声自导武器实施诱骗,并通过多诱饵协同对抗提高水下防御效能^[11-13]。法国 CANTOS 声诱饵为悬浮式,可在 360°范围内发射诱骗信号,使来袭声自导武器信号处理系统饱和^[14]。意大利 C303 和 C303/S 声诱饵分别为悬浮式和自航式,可实时模拟来袭声自导武器寻的信号,此外,C303/S 声诱饵还可模拟舰艇运动特征并实施多枚接力对抗^[15-16]。以色列 Scutter、Subscut 和 Torbuster 声诱饵均为悬浮式,其中 Scutter 和 Subscut 声诱饵主要通过水声诱骗对来袭声自导武器实施软杀伤,Torbuster 除了具备诱骗功能外,还集成了硬杀伤功能^[17-18]。多种类型的声诱饵组合使用,可使己方舰艇有效规避敌方声自导武器攻击^[19-20]。采用科学的编队协同算法、目标识别算法和遗传算法,可有效提高声诱饵的水声对抗效能^[21-23]。大口径声诱饵与小口径声诱饵协同使用,可有效延长对抗时间和距离,提高对抗成功率^[24]。综合运用强噪声压制和声诱饵诱骗,可有效提高对声呐检测环节的干扰效率^[25]。

然而,现有声诱饵依然存在一些缺陷,难以满足分布式海上作战需求。拖曳式声诱饵置于母舰艇后方,使母舰艇机动性能降低 50% 左右;无机动对抗能力,与声自导武器来袭方向偏差较大时,对抗效果不佳;离母舰艇较近,有暴露母舰艇位置的风险。悬浮式声诱饵寿命较短,消耗量大;发射方向虽可根据来袭声自导武器方位灵活调整,但落水距离较近,且只能在深度方向实施有限机动。自航式声诱饵虽然机动性能得到明显改善,但与主流声自导武器相比,航速和航程等关键性能指标均存在明显不足,且在掩护大型目标和集群目标时有较大难度。现有声诱饵均由母舰艇释放或发射,且在有限区域内实施对抗,难以形成跨域聚能非对称优势。

UUV 作为重要的水下新质力量,在全球范围

内受到广泛重视,被美国等海军强国视为海上力量倍增器。在 UUV 基础上集成水声对抗技术,发展水声对抗 UUV,通过智能化赋能改进水声对抗模式,通过集群战术提高对抗效能,可在一定程度上削弱敌方水下进攻优势,提高己方舰艇生存能力。

2 水声对抗 UUV 关键性能

参照美国海军作战概念,在未来海战中,分布式作战将成为主要作战形式,无人智能装备将成为重要作战力量,有人无人协同将成为主流作战方法。在此背景下,新型声自导武器将成为水下主战武器,在海战场发挥巨大作战效能。基于未来海战发展趋势、水下对抗需求和人工智能等新兴技术支撑,水声对抗 UUV 首先应具备智能组合对抗这一核心性能,同时还应具备目标高效识别、任务自主规划、持久高效机动以及多域平台布放等关键支撑性能。水声对抗 UUV 的核心性能和关键支撑性能深度融合、有机统一,共同满足未来海战场智能化水声对抗需求。

2.1 核心性能

水声对抗 UUV 的核心性能是智能组合对抗,即通过智能控制,灵活运用诱骗、压制和诱爆手段对抗声自导武器。智能组合对抗的基本实施路径如下:运用声纹仿真和深度学习技术,提高诱骗信号模拟己方舰艇声学特征的精准度;运用机电一体化水声控制技术生成定向压制信号,使来袭声自导武器探测系统失效;运用非接触引爆技术,引爆被诱骗或压制的来袭声自导武器,将其摧毁;运用智能控制技术,对水声对抗策略进行控制决策,对水声对抗效果进行实时反馈。

针对智能组合对抗的重要性,根据已有文献提供的数据^[26],声诱饵对抗声自导武器的效果如图 1 所示。随着声源级的增加,舰艇被攻击的概率呈

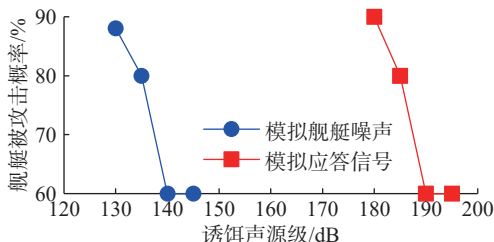


图 1 声诱饵对抗声自导武器效果图

Fig. 1 Rendering of acoustic decoy against acoustic homing weapon

现递减趋势,并最终稳定在 60% 左右。由此可见,即便有声诱饵保护,舰艇被声自导武器攻击的风险依然较大。

为了进一步降低舰艇被声自导武器攻击的概率,水声对抗 UUV 在借鉴声诱饵诱骗功能的基础上,集成了定向压制功能。假设声自导武器采用主动声自导模式,工作频率为 30 kHz,声源级 $SL=217$ dB,接收方向性指数 $DI=20$ dB,声呐检测阈 $DT=38.2$ dB,声自导作用距离为 1 187 m。该声自导武器突破水声对抗 UUV 诱骗梯队以后,与目标舰艇距离 $r_1=1\ 000$ m,与水声对抗 UUV 压制梯队距离 $r_2=500$ m,且水声对抗 UUV 压制梯队位于声自导武器和目标舰艇之间。水声对抗 UUV 声源级 $SL^*=186$ dB,频段覆盖声自导武器工作频率。水声对抗 UUV 压制梯队到声自导武器的声传播损失为

$$TL^* = 20\lg(r_2) + \gamma r_2 = 59\text{ dB} \quad (1)$$

式中, γ 为海水吸收系数。在 30 kHz 条件下, $\gamma \approx 0.01$ dB/m。

由水声对抗 UUV 产生的背景噪声为

$$NL = SL^* - TL^* = 127\text{ dB} \quad (2)$$

舰艇的目标强度 TS 一般为 12~40 dB,保守地,取 $TS=40$ dB。

声自导武器寻的信号至潜艇的单程传播损失为

$$TL = 20\lg(r_1) + \gamma r_1 = 70\text{ dB} \quad (3)$$

声自导武器接收到的有效声信号为

$$DT^* = SL - 2TL + TS - (NL - DI) = 10\text{ dB} < DT \quad (4)$$

式(4)表明,声自导武器接收的有效声信号小于其检测阈,导致其探测系统失效,无法探索到目标舰艇。由此可见,对声自导武器实施诱骗与压制组合对抗,可进一步提高舰艇安全性。声自导武器一般采用触炸与近炸结合的毁伤模式,故水声对抗 UUV 可通过模拟舰艇电磁、水声等物理信号,在成功实施诱骗或压制后,主动接近并诱炸声自导武器,以避免其发起二次攻击。

2.2 关键支撑性能

除需具备智能组合对抗这一核心性能外,水声对抗 UUV 要想更好地对声自导武器实施软杀伤,还需具备目标高效识别、任务自主规划、持久高效

机动和多域平台投放等关键支撑性能。

1) 目标高效识别

声自导武器尺寸远小于潜艇,不易被常规探潜设备发现,加之较高的智能化水平、先进的隐身技术和优良的机动性能,进一步增加了对声自导武器的探测难度。如何在水下环境中实时精确地识别声自导武器,是水下防御面临的首要难题。水声对抗 UUV 作为一种反制声自导武器的装备,可通过以下路径实现目标智能识别:运用深度学习技术,提高信号处理与特征提取的精度和效率,降低环境噪声影响,解决复杂环境下小目标识别困难、低信噪比条件下目标识别率低等水下目标识别难题;运用前视声呐、合成孔径声呐、多波束声呐、中低频被动声呐以及矢量声呐等先进声呐技术,扩展水下探测范围和维度,提高水下探测效率和精度;运用电磁、激光等非声探测手段,在水声探测完成初始扫描后,对目标进行精确测量,通过水声-非声协同探测,进一步改善水下探测效果。

2) 任务自主规划

未来海战中,无人智能装备将成为重要的侦攻防力量。水声对抗 UUV 作为一种无人智能装备,唯有优良的任务自主规划性能,方可适应水下复杂战场环境,灵活应对新型声自导武器带来的威胁。水声对抗 UUV 可通过以下路径提高任务自主规划性能:运用智能控制技术,实现作战功能敏捷切换,发现来袭目标前采用安静悬浮或低速巡航模式执行侦察任务,发现来袭目标后快速抵达最佳战位开展智能组合对抗;运用智能编组技术,使多枚水声对抗 UUV 自主组网,并与声呐阵列、海面力量、空天力量以及水下武器协同,形成体系对抗优势;运用动态效能评估与智能反馈技术,使水声对抗链路高效闭环,实时掌握对抗效果,及时调整对抗策略,最终使来袭目标彻底失效。

3) 持久高效机动

现有水声对抗装备,不论其具体形式和机理如何,均在离母舰艇较近的海域执行任务,很可能将新型声自导武器吸引过来,反而会增加母舰艇被攻击的风险。与现有水声对抗装备不同,水声对抗 UUV 可在距被保护目标相对较远的海域执行任务,为多 UUV 协同对抗、智能组合对抗赢得足够的缓冲空间和准备时间。水声对抗 UUV 可通

过以下路径实现持久高效机动,为在较大范围内遂行灵活对抗任务提供能源动力支撑:运用石墨烯电池、海水电池等先进能源技术,使水声对抗 UUV 在一次充满电的情况下具备较强的续航能力;运用海洋能发电和水下充电技术,为水声对抗 UUV 提供充足能源储备与可持续能源补给服务;运用双模推进技术,为水声对抗 UUV 提供高、低速连续可变速动力模式,并根据任务变化对能源及推进模式进行自主管理。

4) 多域平台布放

为满足未来海战跨域聚能需求,水声对抗 UUV 可由水下、海面、空中有人及无人作战平台布放,通过多域协同拓展对抗范围,提高对抗时效性,增强对抗效果。水声对抗 UUV 可通过以下路径实现多域平台布放:搭载于潜艇、超大型 UUV 和水下预置平台的水声对抗 UUV,可采用鱼雷管或弹射器发射;搭载于水面舰艇、无人水面艇(unmanned surface vessel, USV)和海上浮式平台的水声对抗 UUV,可采用鱼雷管、弹射器或火箭发射;搭载于多功能战斗机、歼击轰炸机、直升机和无人机等的水声对抗 UUV,可借助空中机动优势迅速抵达来袭声自导武器必经之路,采用超低空掠海投射,入水后实施对抗。

3 水声对抗 UUV 典型运用

根据分布式海上作战概念,未来海战场可能呈现如下特征:指挥中枢、有生兵力和大型平台后移至敌方远程打击范围以外,最大限度降低人员伤亡率和高价值装备战损率;无人力量前出至敌方近海乃至纵深区域,形成侦察和进攻前沿力量;有人/无人力量在大跨度时空范围内协同,有人力量通过广域分散部署与协同提高生存力和攻击力,并在前沿无人力量取得较大战果后实施快速推进和立体突击。

在分布式海上作战背景下,航空母舰、导弹巡洋舰、导弹驱逐舰和核潜艇等大型平台分散部署于远离敌方的区域,控制无人舰艇(UUV 和 USV)集群前出至敌方近海,执行监视侦察、布设水雷障碍、水下精确打击以及远程精确打击等任务。鉴于此,水声对抗 UUV 在分布式海上作战中的典型运用主要包括水下侦察、破除雷障、反声自导武器

以及反无人舰艇集群 4 个方面。为提高水声对抗效能, 文中借鉴无人机蜂群概念, 形成水声对抗 UUV 集群。

1) 水下侦察

水声对抗 UUV 集群可用于水下侦察, 水下目标搜索、跟踪和识别, 为水声对抗提供情报支撑。

与导弹预警不同, 舰艇针对声自导武器的预警距离较短, 一般只有几千米, 反制窗口通常只有几分钟。待舰艇声呐系统发现来袭声自导武器后再组织对抗, 往往难以构建即时聚优窗口。

为抓住最佳战机, 水声对抗 UUV 集群部署于敌方无人舰艇和武器可能部署的方向, 由近及远组成阵列, 向敌方前出, 采用静止悬浮或低速巡航模式开展水声侦察。一旦发现敌方无人舰艇和武器, 水声对抗 UUV 集群旋即开展智能组合对抗, 在其抵近己方舰艇之前将其杀伤或摧毁。此外, 水声对抗 UUV 集群还可深入敌方后方, 监视其大型平台、基地港口和战略通道, 为己方远程精确打击力量提供情报支援。

水声对抗 UUV 集群既可单独执行水下侦察任务, 还可与声呐阵列、预警机、侦察机和侦察卫星等协同, 以提高水下侦察的广域性、机动性和时效性。

2) 破除雷障

水声对抗 UUV 集群可用于反水雷作战, 对雷障进行探测、定位和摧毁, 破除雷障封锁, 确保己方舰艇编队安全通行。

从世界范围来看, 现役水雷主要包括沉底雷、漂雷、锚雷、自航水雷、自导水雷以及导弹水雷等。自导水雷融合了普通锚雷和声自导鱼雷的优点, 既可长期设伏、隐蔽待机, 又可长距离跟踪和精确打击, 是一种较为理想的水下武器; 但其成本较高, 难以像普通水雷一样数以万计地使用。在分布式海上作战中, 多种类型的水雷将协同运用, 以最大限度发挥雷障对海战场的立体封锁效能。

水声对抗 UUV 集群发现雷障后, 通过模拟舰艇水声信号、电磁信号和压力信号等, 诱导水雷进入战斗状态。对于沉底雷、漂雷和锚雷等常规水雷, 可运用水声、电磁和压力等信号将其诱爆。对于自航水雷, 在其自航过程中可实施主动拦截; 在其展开为锚雷后, 可运用对抗常规水雷的方式将

其诱爆。对于上浮水雷, 可诱导其向虚假目标进行攻击, 然后将其诱爆。对于自导水雷, 可诱导其向虚假目标发射声自导鱼雷, 然后运用下一小节对抗模式对声自导鱼雷实施杀伤。对于导弹水雷, 可主动接近并通过自爆将其摧毁。

为提高水声对抗 UUV 可重复使用率, 可在其后方加装拖曳假体, 其本体执行水声侦察任务, 拖曳假体执行诱爆水雷任务, 从而降低水声对抗 UUV 本体在水雷爆炸中损毁的概率。对于线式雷障, 可运用平面式水声对抗 UUV 集群予以扫除; 对于幕式雷障, 可运用垂面式水声对抗 UUV 集群予以扫除。

3) 反声自导武器

水声对抗 UUV 集群可用于反声自导武器, 对来袭声自导武器实施诱骗、压制和摧毁, 在舰艇编队防卫、海上护航以及驻泊防御等行动中保护己方安全。

水声对抗 UUV 集群发现来袭声自导武器以后, 以己方舰艇为参照原点, 由远及近组成诱骗梯队、压制梯队和阻击梯队 3 层防御屏障。行动时, 首先启用诱骗梯队, 将来袭声自导武器诱骗至远离己方舰艇的方向。若诱骗失败, 则启用压制梯队, 显著增强环境噪声, 使来袭声自导武器无法辨别己方舰艇方位。若压制失败, 则启用阻击梯队, 将来袭声自导武器诱骗至附近区域, 或主动接近来袭声自导武器, 待满足距离条件后将其诱爆。

4) 反无人舰艇集群

水声对抗 UUV 集群可通过与声自导武器集群协同, 摧毁敌方无人舰艇集群。

水声对抗 UUV 集群发现敌方无人舰艇集群后, 与多枚声自导武器组成水声对抗 UUV-声自导武器复合集群。水声对抗 UUV 集群为声自导武器提供掩护, 避免被敌方声呐探测、声诱饵诱骗以及反鱼雷鱼雷攻击。水声对抗 UUV 集群与多枚声自导武器的编组方法如下: 水声对抗 UUV 居于集群外围, 声自导武器居于集群内部, 由水声对抗 UUV 交替领航, 领航水声对抗 UUV 与其余水声对抗 UUV 以及声自导武器通过群内通信实现联通。当领航水声对抗 UUV 因诱爆反鱼雷鱼雷或受攻击而失效时, 其他水声对抗 UUV 递补领航位置。

水声对抗 UUV-声自导武器复合集群安全抵

近敌方无人舰艇集群以后,多枚声自导武器突然前出,对无人舰艇集群实施攻击。

4 结束语

文章剖析了现有水声对抗装备的现状与不足,提出了发展水声对抗 UUV 的必要性,以提升水声对抗智能化水平、增强舰艇生存能力;从未来海战需求出发,探讨了水声对抗 UUV 应具备的关键性能;以分布式海上作战为背景,研究了水声对抗 UUV 在水下侦察、破除雷障、反声自导武器和反无人舰艇集群等方面的典型运用。文章着眼于智能和集群技术的发展,以理技融合为指导,聚焦新型作战概念对水声对抗迭代升级的现实需求和典型运用,为未来水声对抗装备发展提供参考。

参考文献:

- [1] 石秀华, 王晓娟. 水中兵器概论(鱼雷分册)[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [2] 罗会彬, 贾跃, 袁志勇, 等. 深水炸弹技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [3] 韩鹏, 李玉才. 水中兵器概论(水雷分册)[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [4] 何心怡, 高贺, 陈菁, 等. 鱼雷真假目标识别技术现状与展望[J]. 鱼雷技术, 2016, 24(1): 23-27.
He Xinyi, Gao He, Chen Jing, et al. current situation and prospect on torpedo's true/false target identification technologies[J]. Torpedo Technology, 2016, 24(1): 23-27.
- [5] 何心怡, 卢军, 张思宇, 等. 国外鱼雷现状与启示[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3(2): 87-93.
- [6] 张方方, 李文哲, 董晓明, 等. 噪声干扰器作用下反潜鱼雷主动自导性能数值分析[J]. 水下无人系统学报, 2020, 28(1): 33-38.
Zhang Fangfang, Li Wenzhe, Dong Xiaoming, et al. numerical analysis on active acoustic homing performance of anti-submarine torpedo under the action of noise jammer[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2020, 28(1): 33-38.
- [7] 郭志强, 苏文国, 唐贵. 美国海军MK48重型鱼雷现状与技术发展[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(2): 129-134.
Guo Zhiqiang, Su Wenguo, Tang Gui. current situation and technological development of U. S. Navy's MK48 heavyweight torpedo[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(2): 129-134.
- [8] 唐波, 孟荻, 范文涛. 国外水声对抗器材发展现状与启示——潜用器材[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(1): 15-22.
Tang Bo, Meng Di, Fan Wentao. current situation and enlightenment of foreign underwater acoustic countermeasure equipment for submarine[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2022, 30(1): 15-22.
- [9] 李杰, 毛启明, 崔国平. 水下精确制导武器对抗技术发展现状与趋势[J]. 现代防御技术, 2018, 46(4): 73-78.
- [10] 施丹华, 胡必楠, 黄俊希. 水声对抗器材发展及其趋势分析[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(5): 174-180.
- [11] Anon. Acoustic device countermeasure ADC MK3 and MK4[J]. Jane's Defence Weekly, 2017, 8(10): 1-4.
- [12] Anon. Next generation countermeasure ADC MK5[J]. Jane's Defence Weekly, 2017, 3(30): 1-5.
- [13] Anon. CSA MK2 Mod0/Mod1[J]. Jane's Defence Weekly, 2017, 3(4): 1-4.
- [14] Anon. CANTO-V®/CANTO-S®Torpedo decoy rounds [J]. Jane's Defence Weekly, 2017, 4(4): 1-7.
- [15] Anon. C303[J]. Jane's Defence Weekly, 2009, 3(18): 1-3.
- [16] Anon. C303/S Torpedo Decoy[J]. Jane's Defence Weekly, 2017, 12(20): 1-5.
- [17] Anon. Torbuster[J]. Jane's Defence Weekly, 2017, 9(1): 1-5.
- [18] Anon. SubscutTM[J]. Jane's Defence Weekly, 2017, 9(27): 1-4.
- [19] 李峰, 单广超, 李晖. 潜艇水声对抗及其发展趋势[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(9): 150-152.
- [20] 崔贵平. 国外反鱼雷技术现状及发展趋势[J]. 鱼雷技术, 2012, 20(6): 472-473.
Cui Guiping. Current and future technology for anti-torpedo torpedo in the world[J]. Torpedo Technology, 2012, 20(6): 472-473.
- [21] 夏志军, 杜选民, 章新华, 等. 基于方位信息的编队多诱饵协同水声对抗方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 186-190.
Xia Zhijun, Du Xuanmin, Zhang Xinhua, et al. Cooperative underwater acoustic countermeasure method of ship formation using multi-decoy based on bearing information[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(9): 186-190.
- [22] 薛灵芝, 曾向阳, 杨爽. 基于生成对抗网络的水声目标识别算法[J]. 兵工学报, 2021, 42(11): 2444-2452.
Xue Lingzhi, Zeng Xiangyang, Yang Shuang. Underwater acoustic target recognition algorithm based on generative adversarial networks[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(11): 2444-2452.
- [23] 彭会斌. 基于遗传算法的潜艇组合使用声诱饵防御鱼雷技术研究[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(1): 52-55.
- [24] 周敏佳, 袁志勇. 大口径声诱饵在组合使用中的研究[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(4): 36-38.
- [25] 徐复, 郑丽莉. 灵巧噪声干扰在水声对抗中的应用研究[J]. 声学及电子工程, 2022(1): 30-33.
- [26] 孙仲阜. 水声对抗系统中声诱饵仿真研究[J]. 声学技术, 2003, 22(2): 113-116.

(责任编辑: 陈 曦)