网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20211022.1815.001.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：孙宁, 马沙沙. 自主飞行声呐浮标关键技术及作战样式分析 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(6): 109–115.
SUN N, MA S S. Key technologies and combat pattern analysis of autonomous flight sonobuoy[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(6): 109–115.

自主飞行声呐浮标关键技术及作战样式分析

扫码阅读全文

孙宁*, 马沙沙
江苏自动化研究所, 江苏 连云港 222061

摘 要：自主飞行声呐浮标是一种能够在管内发射并具备自主飞行能力的声呐浮标，其使传统声呐浮标摆脱了对造价高昂的空中投送平台的依赖，可适装于各类中小型水面舰艇、无人艇平台，并满足对水下战场态势远距离快速感知的作战需求。介绍无人机管内发射技术和声呐浮标技术的发展现状，提出自主飞行声呐浮标的设计思路，总结自主飞行声呐浮标集群作战的关键技术，包括集群控制、集群智能决策、组网探测等，分析自主飞行声呐浮标集群在广域协同探测、多源信息保障、辅助作战效能评估等方面的作战样式，结果可为自主飞行声呐浮标集群的论证、设计、应用提供借鉴。

关键词：自主飞行声呐浮标；无人集群作战；作战样式；智能化
中图分类号：U666.7; E925.4 **文献标志码：**A **DOI：**10.19693/j.issn.1673-3185.02096

Key technologies and combat pattern analysis of autonomous flight sonobuoy

SUN Ning, *MA Shasha*
Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang 222061, China

Abstract: Launched from a sonobuoy tube and capable of autonomous flight, the autonomous sonobuoy frees the traditional sonobuoy from dependence on costly aerial delivery platforms. It can be installed on various small and medium-sized surface ships and unmanned vehicles to support the operational needs of long-distance and rapid situation awareness regarding underwater battlefields. By introducing the development of in-tube launch and sonobuoy technology, this paper proposes the design method of the autonomous sonobuoy and summarizes the key technologies of autonomous sonobuoy cluster operations, including cluster control, intelligent decision-making, network detection and so on. Furthermore, the combat patterns of autonomous sonobuoy clusters in wide-area cooperative detection, multi-source information support and evaluation assistance of combat effectiveness are analyzed. The results can provide references for the demand analysis, design and application of autonomous sonobuoy clusters.

Key words: autonomous flight sonobuoy; unmanned swarm operation; combat pattern; intelligence

0 引 言

在现代潜艇减振降噪、消声瓦、消磁等技术不断发展和完善的情况下，探测潜艇变得越来越困难。而航空布设声呐浮标具有投送速度快、覆盖范围广、搜潜效率高、不易被水下潜艇发现和攻击等优点，是当前最有效的反潜探测手段之一，因此，配备反潜直升机和航空布设声呐浮标成为现代水面舰艇拓展对潜探测范围和强化反潜战能力的有效途径。然而，作为声呐浮标重要投送平台的反潜直升机，其对载舰空间及相关维护保障能力的要求非常高，中小型水面舰艇因不具备搭载反潜直升机实施中、远程声呐浮标布放的能力，使得常规声呐浮标的应用受到限制，而无人艇等新型作战平台尤其如此。

作战单元数量是比作战单元能力更重要的决定战争胜负的因素[1]，故在未来的对水下作战中，将功能高度集成、造价高昂的多任务武器系统分解为若干低成本的小规模作战平台，可以有效提升作战行动的效费比。与此同时，借助快速发展的无人机小型化技术，特别是管内发射无人机技术，声呐浮标有机会摆脱来自昂贵的航空平台的

收稿日期：2020–08–29 **修回日期：**2021–01–14 **网络首发时间：**2021–10–25 11:48
作者简介：孙宁，男，1982 年生，硕士，高级工程师
马沙沙，女，1987 年生，硕士，高级工程师
***通信作者：**孙宁

downloaded from www.ship-research.com

制约，而以更加独立、灵活和智能化的方式来完成中、远程布放作业。所谓管内发射并可自主飞行的声呐浮标，其融合了现有的水下探测技术与小型化无人机技术，具有低耗高效的特点，具备了智能组网、集群控制、广域覆盖的优势。相比于传统的航空平台搭载以及部署投放声呐浮标的模式，自主飞行的声呐浮标有着更为广泛的水面平台适装性以及更高的环境适应性，尤其适合在各类水面作战平台上批量搭载和使用。而且，在未来对水下作战中，自主飞行声呐浮标可以支持水面舰艇以较低的成本快速执行广域水下探测任务，应用前景广阔。

本文将提出自主飞行声呐浮标的总体设计思路和集群作战样式。首先，概述无人机管内发射技术和声呐浮标技术的发展现状，提出自主飞行声呐浮标的设计思路。然后，总结自主飞行声呐浮标集群作战的关键技术，进而分析自主飞行声呐浮标集群作战概念和典型作战样式。

1 技术发展现状

1.1 无人机管内发射技术

长久以来，小型化是无人机的发展目标之一，而管内发射无人机是无人机小型化发展过程中的重要成果，使得无人机能够通过多样化的空中和水面平台进行运输和部署。管内发射无人机的成本低廉、运输和部署方式灵活，可以根据需要执行各类任务，尤其是在敌对的高风险环境下可有效替代传统的更大、更昂贵的平台来开展战场监视、侦察等活动，从而避免了危及平台的安全，故有着广阔的应用前景。美国、意大利、以色列等国在管内发射无人机方面广泛开展了论证、开发和试验验证工作[2]，形成了如图 1 所示的一些代表性的产品[3]，其具体特点描述如下：

Coyote 无人机——由美国先进陶瓷公司开发，是最成功的声呐浮标管内发射无人机之一[4]。该无人机重约 5.44~6.35 kg，翼展约 1.47 m，可收纳在一个标准的 a 级声呐浮标筒中，最高速度 85 kn，巡航速度 60 kn，续航时间 90 min。

Cutlass 无人机——由美国 L-3 无人系统公司开发。该无人机采用通用声呐浮标管从空中或地面系统发射，地面站可实时控制无人机的导航系统[5]，机重约 5.44 kg，翼展约 1.4 m，最高速度 75 kn，巡航速度 55~60 kn，使用锂电池供电，续航时间可达 40~60 min。

Horus 无人机——由意大利 OTO Melara 公司开发。该无人机由手动弹射器或 120 mm 的发射管内发射后自主飞行（也可由地面控制飞行），机重约 2 kg，机长约 0.98 m，采用鸭翼布局，翼展 1.65 m，巡航航速 31 kn，冲刺速度 58 kn，续航时间 60 min。

(a) Coyote 无人机 (b) Cutlass 无人机

(c) Horus 无人机 (d) SkyLite 无人机

图 1 国外管内发射无人机产品[3]

Fig. 1 Foreign products of tube-launched UAV[3]

SkyLite A 无人机——由以色列 Rafael 公司开发。该无人机采用一对 X 型可折叠机翼及一对双尾翼设计，可从发射管发射，机重约 6.02 kg，翼展约 1.5 m，巡航速度 37~55 kn，续航时间 90 min。SkyLite 最新型号 SkyLite B 的飞行性能更强，续航能力更优[6]。

随着管内发射无人机技术的成熟，经改进设计后，很多小型无人机都具备了适应从声呐浮标管发射的能力，发展前景越来越广阔。

1.2 声呐浮标技术

声呐浮标是探测水下目标的浮标式水声遥感器材。自 1940 年代初诞生以来，经过长期的发展，声呐浮标给反潜战带来了深刻影响。图 2 所示为典型的声呐浮标。

声呐浮标外形呈圆柱形，顶部有可分离的旋叶和天线护罩，壳体内安装有可折叠的伞状天线、超高频无线电发射机、声信号放大器、声呐基阵、电池和浮标自沉装置等。声呐浮标功能各异，约有 20 种类型。其中，按工作方式可分为主动和被动式声呐浮标，按定向方式可分为定向和全向式声呐浮标，例如全向被动浮标、定向被动浮标、全向主动浮标、定向主动浮标、温度−深度浮标、扩展回声测距浮标、通信浮标等。

声呐浮标在长期发展过程中逐渐形成了标准化的 A，G，F 这 3 种类型尺寸[7]，具体如表 1 所示。

downloaded from www.ship-research.com

图 2　美军装备的声呐浮标

Fig. 2　U.S. military aviation sonobuoy

表 1　声呐浮标类型及其尺寸

Table 1　Types and size of sonobuoys

型号	直径/m	长度/m	最大重量/kg
A	0.124	0.914	17.69
G	0.124	0.419	8.16
F	0.124	0.123	5.44

不同类型的声呐浮标作用距离差异较大。例如, 主动式声呐浮标对大中型潜艇目标的作用距离一般约 1.5 n mile, 被动式声呐浮标对核潜艇目标的作用距离一般为 1~5 n mile, 而利用线谱检测可达 10 n mile。声呐浮标的最大工作深度达数百米, 可穿过跃变层进行探测。这些功能各异的声呐浮标在现代反潜战中发挥着重要作用。

声呐浮标经历了从被动到主动、从高频到低频、从全向到定向、从单阵元到多阵元、从单基地到多基地、从模拟到数字控制的发展过程[8]。例如, 最新型的第 4 代空投式主动接收声呐浮标采用多基地探测方式, 可充分发挥主、被动探测的优势, 通过收发分置降低主动探测的混响干扰、增大基阵孔径、优化波束形成等方式提高探测距离和定位精度, 使之具备了多目标实时跟踪能力。为了有效应对水下威胁, 未来声呐浮标还将朝着网络化和集群化应用的方向发展, 从而对平台的携载和快速部署能力都提出了更高要求。

1.3　小型无人机对水下探测

BAE 系统公司正在为美军研发一种从 P-8A “海神”海上反潜巡逻机上发射的小型无人机——无人瞄准航空系统(unmanned targeting air system, UTAS)[9]。该系统配备了类似 Coyote 无人机搭载的磁异常探测器(magnetic anomaly detector, MAD), 从 P-8A 反潜巡逻机上的发射管发射后, 通过检测地球磁场的微小变化来探测和定位潜艇目标。图 3 所示为 UTAS 作战示意图。

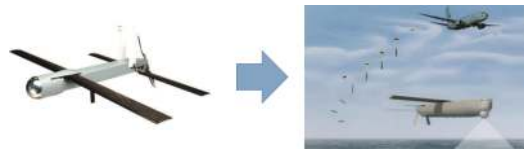

图 3　美军无人瞄准航空系统[9]

Fig. 3　U.S. military unmanned targeting air system[9]

UTAS 通过搭载磁异常探测器的无人机集群, 弥补了 P-8A 反潜巡逻机无法配备内置式磁探仪的不足, 并可为其配备的远程滑翔鱼雷(即“高空反潜战武器(HAAWC)”系统)提供目标数据。

运用管内发射无人机技术与磁异常探测器结合的发展思路对于开发自主飞行声呐浮标具有重要的借鉴意义。

2　自主飞行声呐浮标的关键技术

2.1　总体设计思路

自主飞行声呐浮标的设计目标是将无人机与传统声呐浮标进行集成设计, 使之可置入声呐浮标管内, 经由管内发射技术赋予声呐浮标自主飞行的能力。对于基于小型化无人机及声呐浮标成熟技术的自主飞行声呐浮标, 组件复用、机翼折叠以及展开机构是其关键设计要求。

在组件复用方面, 小型化无人机与声呐浮标有诸多组件的功能及结构类似, 故可通过复用设计来减少组件的数量。小型无人机系统的部件一般分为机体结构、航电、动力、起降等。其中, 机体结构由机身、机翼等组件组成; 航电系统由处理器、传感器、有效载荷、天线、电池等组件组成, 负责飞行控制; 动力系统由动力电池、螺旋桨、动力电机等组件组成, 负责提供飞行所需的动力; 起降系统由弹射绳、弹射架、降落伞等组件组成, 负责弹射起飞和伞降着陆。

声呐浮标一般由天线、控制器、电池、水听器、电缆和减振机构、减速机构、漂浮机构、筒体等组件组成[10]。

如图 4 所示, 在自主飞行声呐浮标中, 小型化无人机和声呐浮标的天线、处理器、电池、减速机构、折叠机翼等组件具备了复用条件, 通过对上述组件的复用设计可降低设备复杂度, 实现对自主飞行声呐浮标的体积及其成本的有效控制。

downloaded from www.ship-research.com

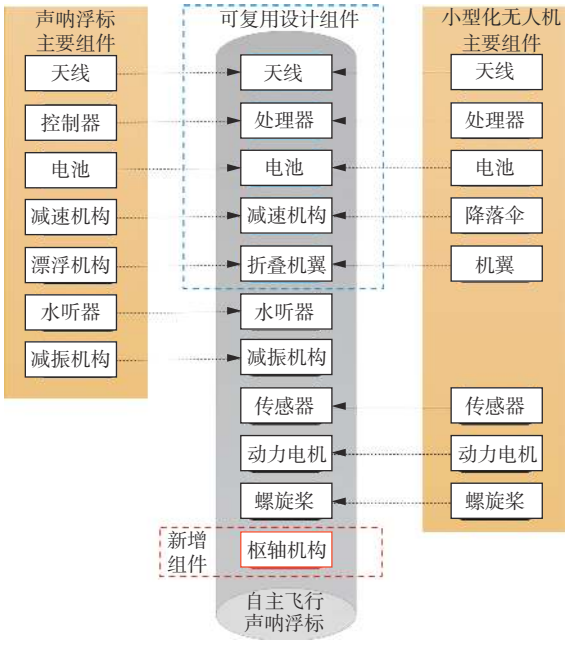

图 4 自主飞行声呐浮标的组件

Fig. 4 Components of autonomous flight sonobuoy

为了实现声呐浮标的管内发射，自主飞行声呐浮标采用枢轴机构和扭转弹簧等组件来实现机翼管内折叠和出管展开动作。枢轴机构在管内发射无人机技术方面应用较为成熟，是实现自主飞行声呐浮标管内发射的重要组件。

图 5 所示为典型的小型枢轴机构。机翼通过凸耳(左耳或右耳)穿过枢轴销，经滚珠轴承压入凸耳，并将结构载荷传递到机翼，在枢轴销的末端，安装的一对扭转弹簧围绕枢轴销缠绕和退绕，从而实现机翼的折叠和展开动作[3]。图 6 所示即为自主飞行声呐浮标的机翼在管内以折叠形态发射出管、枢轴机构和扭转弹簧完成机翼折叠、展开和锁定的过程。

综上所述，与依赖机载投放的传统声呐浮标相比，自主飞行声呐浮标实现了管内发射、自主飞行，摆脱了声呐浮标对昂贵的空中运载平台的高度依赖性，可在各类水面舰艇，尤其是在不具备直升机起降能力的中小型水面舰艇、无人艇上大量存储和独立投放，可充分发挥水面舰艇的装载优势，为作战中不间断投放大量声呐浮标的需求提供保障。

2.2 对水下作战的关键技术

相比水下作战面临的广阔作战区域，单个声呐浮标所能够执行的任务极为有限。因此，自主飞行声呐浮标的发展方向是构建智能化集群，并运用集群控制和群体智能技术来实现空中自行组织飞行和水下组网探测，充分发挥集群的灵活组网、快速部署、广域覆盖的优势，以最低代价完成高对抗环境下复杂的对水下作战任务。其中，集群控制、集群智能决策、水下组网探测等是自主飞行声呐浮标集群作战的关键技术。

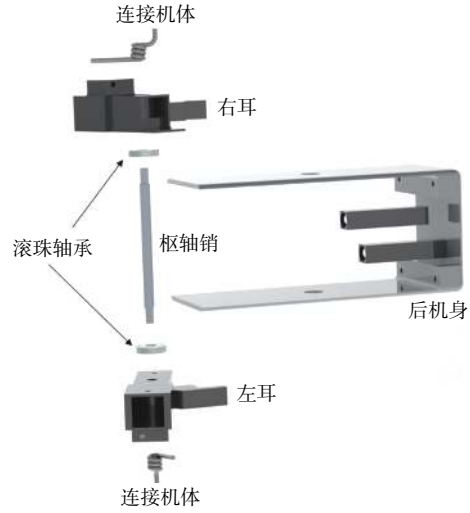

图 5 枢轴机构结构图[3]

Fig. 5 Illustration of pivot mechanism structure[3]

(a) 机翼展开、锁定和固定

(b) 机翼折叠出管

图 6 自主飞行声呐浮标的机翼折叠、展开和锁定过程[3]

Fig. 6 The process of wing folding, unfolding, and locking for autonomous flight sonobuoy[3]

2.2.1 集群控制

集群控制是指无人集群在执行任务过程中控制各任务节点，形成并保持一定的几何构型[11]，以适应平台性能、战场环境、战术任务等需求的技术。若要实现对任务海域的广域覆盖，由大量自主飞行声呐浮标组成的作战集群在空中飞行时必须支持空间、时间和通信拓扑的构型优化，通过收缩、扩张和旋转等方式切换队形。若任务节点增加、减少或任务目标改变，其可通过集群控制实现动态调整、规避和重构。

downloaded from www.ship-research.com

适用于集群控制的方法包括行为控制法、领航–跟随法、虚拟领航法等[12]。其中, 领航–跟随法[13] 是较为成熟的方法, 即在自主飞行声呐浮标集群中确立领航者, 其他飞行声呐浮标作为跟随者, 而跟随者计算与领航者之间的相对位置并跟随领航者运动, 进而实现有效的集群控制。领航–跟随法中领航者可能成为集群的弱点, 一旦领航者出现故障, 可能导致集群失控, 而交替领航策略是弥补该弱点的有效手段。

2.2.2　集群智能决策

自主飞行声呐浮标的集群智能决策是实现对水下作战优势的关键, 在激烈对抗的战场环境下其有助于提升系统整体生存能力, 当有可能损失部分作战节点时, 还可确保顺利完成作战任务。

集群智能决策涉及了环境感知、威胁判断、航迹规划、任务动态分配与调度等多方面[14], 其核心内容是按照最大益损比和任务均衡的原则实现多节点间任务的动态分配和冲突消解, 避免对单节点资源的利用产生冲突, 并在集群整体效率最优的情况下, 使完成任务的数量最大化或执行任务的时间最短, 从而发挥集群协同作战的优势。

集群智能决策实现任务动态分配的算法主要有蚁群算法[15]、粒子群算法、遗传算法、市场拍卖算法[16] 等, 在动态且不确定的外部环境下, 面对随时可能出现的任务目标、威胁和环境、节点损伤、集群规模变化等突发情况, 自主飞行声呐浮标集群可以通过设计和选择成熟的算法高效及合理地执行对水下作战任务, 从而实现最佳的作战效能。

2.2.3　水下组网探测

水下声信道具有长时延和窄带宽的显著特征, 受此影响水声数据传输速率较低, 而且还会受到诸如舰船及海洋生物活动、风、浪等环境噪声的影响, 信号衰减与传播损失较大, 导致数据丢失和通信误码的可能性大增。噪声、温度波动以及严重的多径衰减也会影响水下网络通信链路[17]。自主飞行声呐浮标集群将浮标获取的水下探测信息转换为无线电信号进行跨域通信, 运用数据传输、信息分发管理、合作处理决策支持技术, 可以确保浮标入水后各节点的信息经稳定的无线通信链路快速准确地交互, 解决了水下通信的速率低、稳定性差的问题。基于上述技术, 自主飞行声呐浮标集群可以实现广域范围的对水下组网探测, 在节点出现故障时可自我修复, 形成稳固的水下战场区域感知能力, 完成对水下作战信息的交互共享和集成融合。

2.2.4　水下探测数据回传

自主飞行声呐浮标具备无线数据收发和通信中继的功能。多个自主飞行声呐浮标组成的集群可协同使用。其中, 设置为探测节点的声呐浮标负责入水探测目标, 设置为通信中继节点的声呐浮标负责在探测区域上空持续飞行, 由无线电通信接收探测节点的水下探测数据, 再经中继通信将这些数据回传至水面舰艇。

3　自主飞行声呐浮标集群作战样式分析

自主飞行声呐浮标集群本质上是一种具备快速投送能力的智能化无人系统, 可以满足在敌方潜艇威胁区域以外远程构建舰艇水下传感器覆盖区域及感知目标, 并运用武器实施打击的作战需求。与传统上依赖昂贵的空中平台投放呐浮标相比, 自主飞行声呐浮标集群适合装备在各类中小型水面舰艇、无人艇上, 可支持分散存储和多任务部署的要求, 符合未来分布式对水下作战理念。

图 7 所示为自主飞行声呐浮标集群作战概念图。在此作战概念设想中, 自主飞行声呐浮标集群能够在复杂的水下环境下完成区域协同探测、多源信息保障、辅助作战效果评估等多样化的作战任务, 并且可提高己方的战场生存能力, 以及增强敌方的应对难度。

3.1　区域协同探测

水面舰艇在遂行反潜作战任务时, 通常需要在敌潜艇威胁区域以外远程发现、定位作战海域内的水下目标, 以提供对水下作战的信息保障。然而, 面对复杂的水下作战环境和广阔的反潜任务区域, 水面舰艇经常面临如下困难:

1) 受传感器探测距离的限制, 单纯依靠本舰的声呐设备无法对更远区域的水下目标保持感知能力。

2) 受海况、直升机航程、机动能力、载荷和出动时间间隔等因素的限制, 舰载直升机难以长时间不间断地留空作战。

3) 平台配备的反潜直升机数量有限, 难以支持同时应对多个方向的远程水下目标威胁。

自主飞行声呐浮标集群是解决上述问题的有效解决方案之一。在水面舰艇配备大量自主飞行声呐浮标的情况下, 水面舰艇可以轻松地突破本舰传感器感知范围的限制, 从而可以对水下目标进行远程探测。此外, 配备大量自主飞行声呐浮标后, 水面舰艇还可以有效解决舰载直升机数量

downloaded from www.sinp-research.com

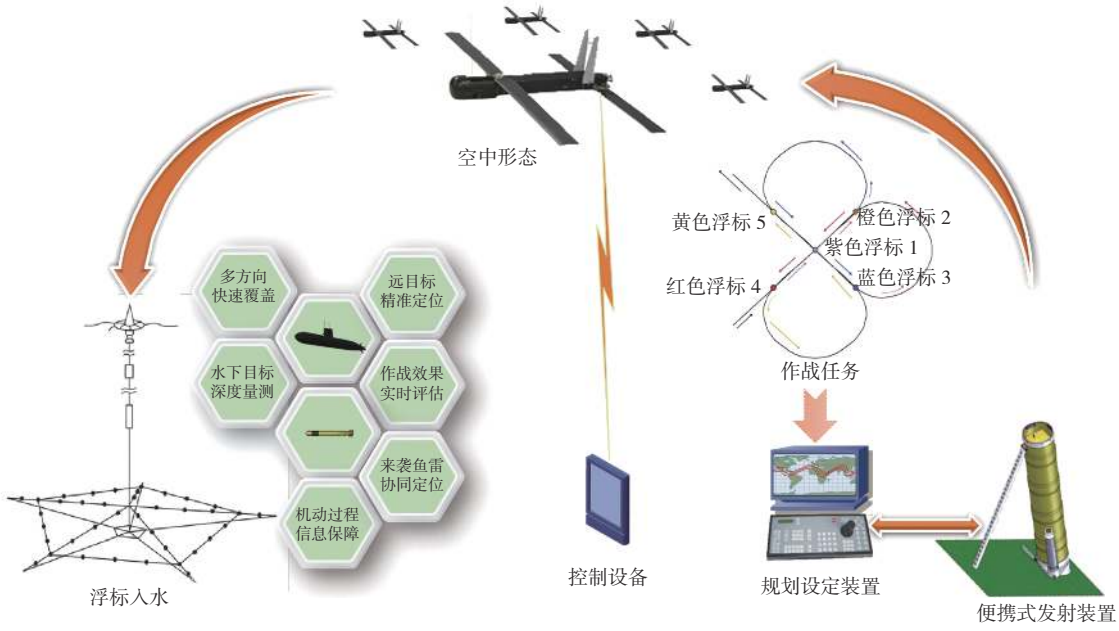

图 7 自主飞行声呐浮标集群作战概念图

Fig. 7 Concept of operations for autonomous flight sonobuoy cluster

少、留空时间短的问题，在不确定的战场环境下可以随时向多个作战区域快速投送声呐浮标，实现区域覆盖、协同探测，充分发挥浮标集群的数量优势，显著提升对远程作战区域水下目标的持续感知能力。

3.2 多源信息保障

对水下目标实施有效打击需依靠精确的目标信息保障能力的支持。水面舰艇使用本舰声呐设备探测远程水下目标时的误差较大且难以测定目标深度，直接影响了对此类目标的打击能力。而依靠快速投放、近距离观测的优势，自主飞行声呐浮标集群可以显著减少探测误差、提升精度，为舰艇提供更精确的水下目标信息。与此同时，垂直线列阵声呐浮标在不同深度布设多组水听器阵列进行垂直方向的多基地检测，还可以获取和估计目标深度。可见，准确的水下目标深度信息保障有助于显著提升水中兵器的打击效能。

在水下防御方面，水面舰艇开展机动规避是指挥员应对来袭鱼雷威胁的首选对抗手段之一，但是其实施机动规避过程会严重影响鱼雷报警声呐的探测效果，而且，指挥员还需要面临诸多选择的困境。例如，保持持续跟踪、精确拦截后机动规避或立即机动规避后择机拦截。对于上述情况，自主飞行声呐浮标可以解决指挥员面临的本舰机动与持续探测的矛盾，在机动过程中保持对目标的持续探测能力，既可以缓解指挥员面临的决策压力，又可以确保实时提供梯次拦截所需的保障信息。可见，能够提供多样化的目标信息保障能力的自主飞行声呐浮标集群将在未来的水下防御作战中发挥重要作用。

3.3 辅助作战效能评估

水面舰艇对水下作战过程需要实时的作战效果评估，并基于此结果来决定是否进行二次打击。然而，若缺少信息支撑，指挥员将难以对作战效果进行观测和检验，评估结果的可信度也会不高。但是，通过对自主飞行声呐浮标进行航路规划，充分发挥其快速部署、抵近探测的特性，同步追踪水中兵器的射后运行轨迹，在武器打击完成后近距离检测爆炸区域，则可以为作战效果提供独立的信息支持。

4 结 语

自主飞行声呐浮标的平台适装性强，可作为反潜直升机的替代产品装载在不具备反潜直升机搭载条件的大量中小型水面舰艇、无人舰艇上，遂行水下搜索、探测、效果评估等多样化作战任务，从而提升对水下战场的感知能力。

自主飞行声呐浮标可满足多样化的作战需求。例如，通过投放温深梯度测量浮标和环境噪声测量浮标，对反潜区域的水文环境信息进行测量，以及部署主动声源浮标进行扩展回声测距等。自主飞行声呐浮标在集群控制、智能决策、有人/无人协同等方面仍有许多问题需要解决，但机遇与挑战并存，自主飞行声呐浮标集群可适应未来海上作战需求，符合未来分布式对水下作战的发展趋势，在一定程度上可以改变对水下作战

downloaded from www.ship-research.com

的样式, 具有广阔的发展前景。本文的研究结果有助于解决水面舰艇对远程水下目探测、感知能力不足的问题。

参考文献:

[1] 黄吉传, 周德云. 无人机协同作战兰彻斯特方程设计与作战进程预测 [J]. 电光与控制, 2018, 25(12): 40–44.
HUANG J C, ZHOU D Y. Design of Lanchester equation and prediction of operational process for cooperative operation of UAVs[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(12): 40–44 (in Chinese).

[2] OTT J, BIEZAD D. Design of a tube-launched UAV[C]// AIAA 3rd “Unmanned Unlimited” Technical Conference, Workshop and Exhibit. Chicago, Illinois: AIAA, 2004: 1–5.

[3] BAWA G S. The design, development and testing of a tube launched UAV[D]. Sydney: The University of Sydney, 2016.

[4] 宋怡然, 申超, 李东兵. 美国分布式低成本无人机集群研究进展 [J]. 飞航导弹, 2016(8): 17–22.
SONG Y R, SHEN C, LI D B. Advance in the research of distributed low cost unmanned aerial vehicle cluster in USA[J]. Winged Missiles Journal, 2016(8): 17–22 (in Chinese).

[5] MORTIMER G. SEA CORP successfully launches ground-based compressed carriage UAV[EB/OL]. (2009-07-02)[2020-07-30]. https://www.suasnews.com/2009/07/sea-corp-successfully-launches-ground-based-compressed-carriage-uav/.

[6] GlobalMil. Rafael Skylite B UAV[EB/OL]. (2020-04-06)[2020-07-30]. http://www.globalmil.com/military/unmanned_system/israel/rafael/2020/0406/498.html.

[7] 王鲁军, 凌青, 袁延艺. 美国声纳装备及技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 128-128.
WANG L J, LING Q, YUAN Y Y. American sonar equipment and technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 128-128 (in Chinese).

[8] 鲜勇, 鲁宏捷, 李佳庆. 国外航空声呐浮标发展综述 [J]. 电光与控制, 2019, 26(8): 67–70.
XIAN Y, LU H J, LI J Q. A review on development of foreign aviation Sonobuoys[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(8): 67–70 (in Chinese).

[9] 王鹏, 程段方, 宋浩田, 等. 美国空射无人机项目综述 [C]// 中国航天电子技术研究院科学技术委员会 2020 年学术年会论文集. 北京: 中国航天电子技术研究院科学技术委员会, 2020: 555–563.
WANG P, CHENG D F, SONG H T, et al. Overview of the US air-launched UAV program[C]//2020 Annual Conference of Science and Technology Committee of China Academy of Aerospace Electronics Technology. Beijing: Science and Technology Committee of China Academy of Aerospace Electronics, 2020: 555–563 (in Chinese).

[10] 凌国民, 王泽民. 声呐浮标技术及其发展方向 [J]. 声学与电子工程, 2007(3): 1–5.
LING G M, WANG Z M. Sonobuoy technology and its development direction[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2007(3): 1–5 (in Chinese).

[11] 张伟, 王乃新, 魏世琳, 等. 水下无人潜航器集群发展现状及关键技术综述 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 289–297.
ZHANG W, WANG N X, WEI S L, et al. Overview of unmanned underwater vehicle swarm development status and key technologies[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(2): 289–297 (in Chinese).

[12] 沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
SHEN L C, NIU Y F, ZHU H Y. Theories and methods of autonomous cooperative control for multiple UAVs[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013 (in Chinese).

[13] 董文奇, 何锋. 大规模 UAV 编队信息交互拓扑的分级分布式生成 [J]. 航空学报, 2021, 42(3): 324380.
DONG W Q, HE F. Hierarchical and distributed generation of information interaction topology for large scale UAV formation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3): 324380 (in Chinese).

[14] 牛轶峰, 肖湘江, 柯冠岩. 无人机集群作战概念及关键技术分析 [J]. 国防科技, 2013, 34(5): 37–43.
NIU Y F, XIAO X J, KE G Y. Operation concept and key techniques of unmanned aerial vehicle swarms[J]. National Defense Science & Technology, 2013, 34(5): 37–43 (in Chinese).

[15] 刘瑞轩, 张永林. 基于改进蚁群算法的多自主式水下机器人任务分配 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 107–112.
LIU R X, ZHANG Y L. Task allocation of multiple autonomous underwater vehicles based on improved ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(6): 107–112 (in Chinese).

[16] 林晨. 面向无人机集群任务分配的分布式算法研究 [D]. 四川: 电子科技大学, 2019.
LIN C. Distributed algorithm research for multi-UAV task assignment problem[D]. Sichuan: University of Electronic Science and Technology of China, 2019 (in Chinese).

[17] YANG X. Underwater Acoustic Sensor Networks[M]. Boca Raton: Auerbach Publications, 2010.

downloaded from www.ship-research.com