

[引用格式] 马亮, 郭力强, 张会, 等. 无人水下航行器鱼雷攻击智能决策需求与方法探讨 [J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(2): 323-328.

无人水下航行器鱼雷攻击智能决策需求与方法探讨

马 亮, 郭力强, 张 会, 杨 静, 刘 剑

(海军潜艇学院, 山东 青岛, 266199)

摘 要: 无人装备的自主技术是当前最具活力的前沿技术领域, 提高决策的智能化程度是无人水下航行器(UUV)发展的必然趋势。鱼雷攻击决策是攻击型 UUV 遂行攻击任务的重要环节, 也是形成自组织跨域协同、自主集群对抗等作战能力的基础和前提。从梳理作战运用特点和典型任务样式出发, 总结 UUV 与有人平台相比存在的优势和不足, 分析其不同于传统鱼雷攻击的决策内容, 阐述决策功能实现需要解决的关键问题, 并结合机器学习技术的发展现状, 提出适用于解决观测数据不确定性大、攻击决策实时性难保证和模型感知交互能力弱等方面问题的智能决策方法, 可为未来无人装备研制与智能决策领域的研究提供借鉴。

关键词: 无人水下航行器; 作战运用; 鱼雷攻击; 智能决策; 机器学习

中图分类号: U674.7; TJ630

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2023)02-0323-06

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.202201003

Demand and Method Discussions for Intelligent Decisions of Torpedo Attacking by Unmanned Undersea Vehicle

MA Liang, GUO Liqiang, ZHANG Hui, YANG Jing, LIU Jian

(Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

Abstract: The autonomous technology of unmanned equipment is currently the most dynamic frontier technology field. Therefore, improving the intelligence of decision-making is an inevitable trend in the development of future unmanned undersea vehicles (UUVs). Torpedo attack decision-making is a critical aspect of UUVs on operational missions and also the basis and prerequisite for the formation of self-organized cross-domain cooperation, autonomous swarm confrontation, and other operational capabilities. Beginning with a summary of the characteristics of their operational use and typical operational mission styles, the advantages and shortcomings of UUVs with manned platforms in operational applications were compared, and their decision-making content differed from that of traditional torpedo attacks was analyzed. The key problems that need to be solved to realize the decision-making function were expounded. Based on the development of machine learning technology, it is proposed that an intelligent decision-making method is suitable for solving the problems of large uncertainty of observation data, difficulty in guaranteeing real-time decision-making, and weak interaction ability of model perception. This study can provide a reference for future research in the field of unmanned equipment development and intelligent decision-making.

Keywords: unmanned undersea vehicle; operational application; torpedo attack; intelligent decision-making; machine learning

收稿日期: 2022-01-18; 修回日期: 2022-03-28.

基金项目: 国防科技创新特区项目(20-163-05-xxx).

作者简介: 马 亮(1973-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为水下发射理论与技术.

0 引言

随着装备技术和军事应用的高速发展,无人水下航行器(unmanned undersea vehicle, UUV)已经成为水下攻防作战体系中的重要组成部分,正在推动水下作战形态由以有人为主导向有人/无人相结合的方向发展。从作战概念看,无人系统集群作战、跨域协同作战^[1-2]等新型作战样式相继产生;从作战任务看,无人平台任务领域开始由保障向主战扩展;从作战主体看,无人平台逐步代替部分有人平台成为影响战争的重要力量^[3]。美国智库在 *The emerging era in undersea warfare*^[4] 研究报告中指出,未来水下作战样式将向潜艇/无人平台体系化方向发展,潜艇需要从类似于飞机的前沿战术平台逐步转变为类似于航母的协同平台。

无人装备的自主技术是当前最具活力的前沿技术领域,提高决策的智能化程度是 UUV 发展的必然趋势^[5-6]。鱼雷攻击决策是 UUV 遂行攻击任务的重要环节,也是无人装备形成自组织跨域协同、自主集群对抗等作战能力的前提和基础。作为武器化的无人平台, UUV 的鱼雷攻击决策需要依靠平台自主完成,对其行为建模与智能决策方法提出一系列新的挑战和需求。如果仍然沿用有人平台鱼雷攻击决策的方法,将不能充分发挥无人平台的作战潜能。因此,迫切需要根据 UUV 装备的作战运用特点和任务样式,着眼水下特殊的战场环境,研究能够满足其鱼雷攻击决策需求的智能决策方法。

1 作战运用特点及任务

现役的军用 UUV 以大型或超大型为主,如“海神”双模式 UUV、“曼塔”巨型 UUV、“虎鲸”超大型 UUV 等。该类航行器排水量一般不小于 5 t,自持能力超强,自主化程度高,能够灵活配置传感器和任务模块,具备载荷投送、情报搜集、反水雷、水声诱骗、警戒监视、反潜跟踪、保障支援和智能打击等先进作战能力^[7-8]。

与有人平台相比, UUV 可利用其作战范围广阔、运用方式灵活、隐蔽渗透能力强、生产成本相对较低以及使用风险小等特点^[9],在水下作战信息网络的支撑下,通过单独或集群运用、与水下有人平

台的一体化运用,实现对源头、近海和近岸等重要区域水下空间的有效控制。

1.1 源头海域打击

在有人平台难以到达的源头海域对出港潜艇实施打击。可将多个不同类型的 UUV 组成移动式水下无人集群^[10],按规划航路航渡至对方港口基地附近,由侦察型 UUV 编组前出进行态势侦察,掌握敌潜艇动向后,将目标信息反馈给指挥型 UUV 或岸基指挥中心。UUV 编组可通过水声通信或隐蔽浮起利用卫星通信,根据指挥型 UUV 或岸基指挥中心的指令,对目标实施自主多向攻击。

1.2 近海海域伏击

在潜艇活动密集的近海海域进行隐蔽待机或机动搜索,伺机突袭或引导其他兵力远程打击。在已知对方可能机动的重要航道附近,由母艇将多个 UUV 预先部署于航道上的指定阵位点蛰伏待机或机动搜索。UUV 可以在一定深度低速巡航,定期上浮进行定位、传输信息和接受指令,也可以按规划航路自主进行搜索探测。发现目标后,可听令自主攻击,也可以通过信息传输,引导母艇或其他水下兵力实施火力打击^[11]。

1.3 近岸海域警戒

在近岸海域与水下固定监听设备执行重要港口基地和航道周边海域的常态化警戒任务,增强近岸海域防御作战能力。敌高性能潜艇和 UUV 可能长期隐蔽部署于近岸海域,企图对出港舰艇实施探测搜索和跟踪。可采用多个 UUV 进行长航时的水下自主巡逻,与水下固定监听设备组成移动式探测网络,形成具有一定宽度和纵深的威胁拒止区域,打击或有效迟滞敌水下兵力,防范其对我实施的侦察和破坏行动,提高近岸海域水下反潜警戒效率。

2 鱼雷攻击决策内容变化

传统鱼雷攻击决策包括攻击方式、雷种和制导方式、射击阵位和占位方案等内容,涉及目标性质判断、战场态势感知、海区情报获取以及目标运动要素解算等必要前提^[12-13]。通过对 UUV 作战运用特点和反潜任务样式分析可知,相比于有人平台, UUV 在隐蔽性、灵活性以及作战风险方面具有明显优势,同时在探测能力、携带载荷数量和

指挥控制等方面存在差距,使得 UUV 鱼雷攻击决策的内容和相关环节产生了一些新的变化。

2.1 攻击方式

有人平台通常是依据战术紧迫程度,将鱼雷攻击分为正常攻击和紧急攻击 2 种情况。一般来讲,当判断目标距离比较近,对本平台威胁程度较高,则不得不缩短武器发射准备时间,以降低目标运动要素解算精度为代价,采用紧急攻击方式,并视情实施机动规避。相反,如果目标距离较远或不足以对本艇构成威胁时,采用正常攻击方式,以对目标类型、目标运动态势等必要条件进行准确的判断和观测,并占领有利发射阵位进行武器发射。

对 UUV 而言,由于其相对成本低、作战使用风险低,作战运用样式以阵地伏击和机动巡歼为主,在通常情况下目标威胁和战术紧迫程度不高,因此在攻击方式选择上应以正常攻击方式为主,为达到鱼雷攻击效果做好充分准备。

2.2 雷种和制导方式

对于携带多种型号鱼雷的有人平台而言,通常是依据目标性质和战场态势研判结果,综合分析平台所装载鱼雷的战技术性能、制导方式以及作战使用方式和条件等因素,对鱼雷雷种和制导方式进行选择。

UUV 体积较小,自身探测能力相对有限,目前的技术难以实现像有人平台那样操控线导鱼雷进行射击。因此,在执行对潜攻击任务中,应以性能高、能够实施主被动联合制导方式的声自导鱼雷作为主要雷种和制导方式的选择对象,并采取双雷齐射的方式提升鱼雷命中概率。

2.3 射击阵位

射击阵位选择是鱼雷攻击决策的关键所在。有人平台射击阵位的选择通常受以下 3 方面因素约束:一是本平台占位可行;二是在占领的阵位发射鱼雷命中概率尽可能高;三是占位过程中被发现概率尽可能低。在敌我态势和平台机动性能一定的条件下,鱼雷的射击可行域、等命中概率曲线以及目标威胁范围是选择射击阵位的重要指标。

由于 UUV 隐蔽渗透能力强、防御行动战术意义不明显,无需过多估计本平台被目标发现的问题,从而拥有更大的阵位决策空间,甚至可以跟踪目标实施抵近射击。在射击阵位选择上应以取得

最高鱼雷命中概率为准则,突出复杂对抗态势下的攻击效果的预估和射击方案的优化,以保证在指定射击阵位点鱼雷能够命中目标。

2.4 占位方案

对于优选出来的射击阵位,需要确定平台占领射击阵位所采取的速度、航向及时间。通常在本平台所能采用的速度范围内,按一定的间隔计算不同占位速度对应的占位航向及所需的占位时间,制成占位方案表^[13],或由指控系统计算提供某一指定机动速度。若各方案占位时间差别不大,原则上选择占位速度较低的方案以保证有人平台的隐蔽性。

占位机动是一个需要根据战场态势动态变化调整的过程。传统的占位方案计算方法是由指挥员在指控系统的辅助下,综合研判态势情况进行实时调整。在水下贫弱的通信环境下,UUV 无法依靠人机交互实现对占位方案的动态调整。因此,在占位方案制定上,需要着重考虑规划算法的动态适应能力。

3 决策实现关键问题

作为无人平台,UUV 在大多数情况会布放至未知的水下战场执行作战任务,这就要求 UUV 能够在复杂和不确定环境下,具备自主理解、适应环境以及高效可靠执行任务的能力。相比于空中和地面,海洋环境更为复杂多变,远海和深海海域的战略性和危险性并存,对无人装备的自主决策能力提出了更高的要求。因此,为保证 UUV 对潜鱼雷攻击决策功能的有效实现,还需着重解决以下关键问题。

3.1 复杂环境下的数据融合处理问题

态势感知是 UUV 必备能力,然而在未知复杂的水下战场,多源信息的观测和交互存在一定的噪声和误差。同时,水下通信具有长时延、低带宽和弱联通的特点,各指挥节点通信链路的传输效率低,导致平台所获得的信息在数据类型、数据结构、数据尺度和噪声水平等方面存在着显著差异。因此,在缺乏人工干预的情况下,如何从水声、图像和温度等多源异构复杂数据中提取特征,实现信息一致性表征和融合,为战场态势感知和后续目标运动要素解算等环节提供必要支持,是影响鱼

雷攻击决策能否实现的先决条件和头等难题。

3.2 不确定和对抗条件下的优化求解问题

UUV 对潜鱼雷攻击决策过程是一个典型的动态、多约束和非线性的复杂系统,受海区水文条件的不确定性、敌我博弈行为的对抗性和装备自身性能特点的影响。在这个复杂系统中,每个实体状态和要素的时序演变都会对优化结果产生影响,如目标的散布程度、对抗策略及鱼雷的战技性能等。在预估鱼雷命中概率时,如果仍然沿用传统的解析法和模拟法^[14],那么随着参数维度和搜索空间的增加,势必会出现求解耗时甚至解空间不收敛的情况,需要着重考虑求解算法的灵活性、高效性等方面的问题。

3.3 时敏任务下的快速高效决策问题

美国国防科学委员会(Defense Science Board, DSB)在 *Autonomy*^[15] 报告中指出:自主性的显著特征是在未知环境下,能够以“目标导向”的方式来优化自身行为和完成任务策略。自主性的核心是决策,追求先发制人的“速度”是关键^[16-17]。UUV 鱼雷攻击是一个隐蔽突然的任务行动,发射平台需要通过有限的观测信息,快速精准决策才能达到出奇制胜的目的。目前有人平台常用的决策方法,如模糊逻辑、范氏推理和贝叶斯网络等,其执行效率和可信度往往相互制约,难以满足 UUV 对潜突击任务对鱼雷攻击决策实时性的要求。

3.4 有限控制模式下的决策信任问题

UUV 常用的武器控制模式是半自主或自主模式。在半自主模式下,指挥员在控制回路中,可视情对武器发射过程进行干预,即“人在回路中”的控制方式。在自主工作模式下,武器发射都是由装备自主完成的,指挥员处于控制回路上,仅起到监控作用,即“人在回路上”的控制方式^[18]。无论是在半自主还是自主模式,与有人平台“人在回路”和“人在现场”的控制方式相比,对武器发射的控制能力非常有限。因此,在 UUV 鱼雷攻击决策问题上,将权限交由自主武器系统是一件非常严肃的事情,必须要确保自主决策结果的准确性和可信任性。

4 适用方法探讨

综上所述,为满足鱼雷攻击决策内容的变化和

解决影响决策功能实现的关键问题,亟需研究能够从战场态势变化中自主学习的智能决策方法。现有的鱼雷攻击决策大多依托作战仿真技术,通过规则方式建立各种实体的任务行为模型^[19],在仿真结果的基础上进行优化分析和决策。一方面,以优化目标函数为导向的仿真决策方法对战场时序数据和环境信息的完备性要求高,在未知复杂的海域中缺乏动态调整决策方案的自主能力。另一方面,这种纯粹的条件式判断方法表示实体行为的能力有限,而且随着战场态势复杂度的增加,运算工作量呈指数倍增长,很难描述实体兵力的复杂任务行为,导致模型的可移植性、拓展性和重用性方面存在不足。

机器学习为 UUV 鱼雷攻击决策问题的解决提供了新的思路。机器学习^[20]的基本思想是使机器能够通过学习数据获得经验,实现对未知事件的预测或得出结果,即模型具备相应的泛化能力。其中深度学习是以研究人工神经网络算法为核心的一种机器学习方法,通过多层网络结构及非线性变换,形成以发现数据分布式特征的高层表示;强化学习是一类特定的机器学习方法,通过最大化智能体获得的累计奖励值,以得到学习过程的最优策略;深度强化学习将深度学习与强化学习相结合,综合利用深度学习的特征自提取能力和强化学习的序贯决策能力,被认为是当前突破认知智能的代表性机器学习方法。目前,以数据驱动为代表的学习模式应用较为广泛。在无人机作战智能决策方面,韩统等^[21]和潘耀宗等^[22]将强化学习应用于空战机动决策,在与外界环境动态交互的过程中,采用试错的方式计算相对较优的空战机动决策序列,取得较好的效果。

针对观测数据不确定性大的问题,可利用深度学习特征自提取的能力,采用多通道卷积、长短时记忆网络以及注意力机制等数据压缩和预处理策略,实现多源异构数据的降维融合与一致性表征处理,为战术行为识别与分类提供支持。

针对攻击决策实时性难保证的问题,可以通过计算机仿真和少量弱标注试验数据迁移的方法,得到基于水下攻防态势下的海量样本数据,以数据学习和规则推演混合驱动的线下学习方法代替基于多实体有限状态机搜索^[23]的传统仿真决策方

法,以动态数据变化适应环境和任务变化,从而赋予模型高效决策和线上自学习的能力。

针对模型感知交互能力弱的问题,可以通过战术规则知识网络转化的方式,构建基于“感知—调整—决策—行动”循环的强化学习多智能体,实现与环境交互和对抗过程中智能体学习能力的增强,为态势规则库提供渐进式自更新策略,从而赋予UUV鱼雷攻击决策主动学习和自适应动态调整的能力。

5 结束语

鱼雷攻击智能决策对于水下新质力量作战能力的生成具有重要研究意义。当前,机器学习正处于“感知智能”向“认知智能”发展的阶段,虽然在数据挖掘、模式识别等领域问题的处理上已经相对成熟,但是在知识表达、逻辑推理等方面的SOTA(state of the art)性能尚且难以达到工程应用的水平。因此,UUV鱼雷攻击智能决策需要作战仿真技术、启发式优化算法和机器学习技术共同作用,通过充分发挥机器学习独有的多模态数据融合及泛化自适应能力,以解决上述关键问题,弥补传统仿真决策方法在动态性和灵活性方面的不足,共同服务于装备指控系统及软件的开发。下一步建议从战术态势识别、有效阵位决策和占位机动规划等具体问题出发,选择适用于智能决策的关键环节开展研究,并通过引入先验知识和任务行为仿真建模的方法,预先收缩求解空间,以提高智能学习模型的收敛效率,防止出现梯度消失或维度灾难等问题。

参考文献:

- [1] 司广宇,苗艳,李关防.水下立体攻防体系构成技术[J].指挥控制与仿真,2018,40(1):1-8.
Si Guangyu, Miao Yan, Li Guanfang. Underwater tridimensional attack-defense system technology[J]. Command Control & Simulation, 2018, 40(1): 1-8.
- [2] 谢伟,杨萌,龚俊斌.水下攻防对抗体系及其未来发展[J].中国工程科学,2019,21(6):71-79.
Xie Wei, Yang Meng, Gong Junbin. Underwater attack-defense confrontation system and its future development[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(6): 71-79.
- [3] 吴超,杜辉,何青海.水下“有人/无人”作战平台协同运用方式探讨[J].舰船科学技术,2020,42(9):153-156.
Wu Chao, Du Hui, He Qinghai. Discussion on the cooperative use mode of underwater manned/unmanned combat platform[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(9): 153-156.
- [4] Bryan Clark. The emerging era in undersea warfare [R/OL]. (2015-01-22)[2022-02-18]. [https://csbaonline.org/uploads/documents/CSBA6292_\(Undersea_Warfare_Reprint\)_web.pdf](https://csbaonline.org/uploads/documents/CSBA6292_(Undersea_Warfare_Reprint)_web.pdf).
- [5] 王雅琳,郭佳,刘都群.2018年水下无人系统发展综述[J].无人系统技术,2019,2(4):20-25.
Wang Yalin, Guo Jia, Liu Duqun. Summary of the development of unmanned undersea systems in 2018[J]. Unmanned Systems Technology, 2019, 2(4): 20-25.
- [6] 王雅琳,刘都群,杨依然.2019年水下无人系统发展综述[J].无人系统技术,2019,3(1):55-59.
Wang Yalin, Liu Duqun, Yang Yiran. Summary of the development of unmanned undersea systems in 2019 [J]. Unmanned Systems Technology, 2019, 3(1): 55-59.
- [7] 钟宏伟,李国良,宋华桦,等.国外大型无人水下航行器发展综述[J].水下无人系统学报,2018,26(4):273-282.
Zhong Hongwei, Li Guoliang, Song Huahua et al. Development of large displacement unmanned undersea vehicle in foreign countries: A review[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(4): 273-282.
- [8] 王强.大型无人水下潜行发展及军事用途[J].数字海洋与水下攻防,2019,2(4):33-39.
Wang Qiang. Development and military purpose of large displacement unmanned underwater vehicle[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2019, 2(4): 33-39.
- [9] 陈强.水下无人系统及其装备发展论证[M].北京:国防工业出版社,2018:41-43.
- [10] 邓鹏,李伟,王新华.水下无人平台“蜂群”作战体系研究[J].兵器装备工程学报,2018,39(8):8-10,47.
Deng Peng, Li Wei, Wang Xinhua. Research on battle system of “swarm” of underwater unmanned vehicle[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(8): 8-10, 47.
- [11] 张鑫明,韩明磊,余益锐,等.潜艇与UUV协同作战发展现状及关键技术[J].水下无人系统学报,2021,29(5):498-508.
Zhang Xinming, Han Minglei, Yu Yirui, et al. Development and key technologies of submarine-UUV cooperative operation[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(5): 498-508.
- [12] 张靖康,李本昌.尾流自导鱼雷攻击决策的需求与方法研究[J].指挥控制与仿真,2007,29(5):29-31.
Zhang Jingkan, Li Benchang. Requirement and method research for attacked decision-making of the wake-homing torpedoes[J]. Command Control & Simulation, 2007, 29(5): 29-31.
- [13] 李伟,邓正前,荣海洋.潜射线鱼雷作战使用攻击决策[J].火力与指挥控制,2011,36(10):1-4.
Li Wei, Deng Zhengqian, Rong Haiyang. Discussion on

- the battlefield usage of submarine-launched wire-guided torpedo based on attack decision[J]. *Fire Control & Command Control*, 2011, 36(10): 1-4.
- [14] 孟庆玉, 张静远, 王鹏, 等. 鱼雷作战效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 171-172, 184-187.
- [15] Defense Science Board. Autonomy[R]. US: Office of the Secretary of Defense, 2016.
- [16] 钱东, 赵江, 杨芸. 军用 UUV 发展方向与趋势(上)——美军用无人系统发展规划分析解读[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(1): 1-30.
Qian Dong, Zhao Jiang, Yang Yun. Development trend of military UUV(I): A review of U. S. military unmanned system development plan[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2017, 25(1): 1-30.
- [17] 钱东, 赵江, 杨芸. 军用 UUV 发展方向与趋势(下)——美军用无人系统发展规划分析解读[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(2): 107-150.
Qian Dong, Zhao Jiang, Yang Yun. Development trend of military UUV(II): A review of U. S. military unmanned system development plan[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2017, 25(2): 107-150.
- [18] 苏金涛. 水下无人作战系统武器控制研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(12): 118-121.
Sun Jintao. Research on weapon control of unmanned combat undersea system[J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(12): 118-121.
- [19] 吴金平. 潜艇作战建模与仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 138-158.
- [20] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [21] 韩统, 崔明朗, 张伟, 等. 多无人机协同空战机动决策[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(4): 117-123.
Han Tong, Cui Minglang, Zhang Wei, et al. Multi-UCAV cooperative air combat maneuvering decision[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(4): 117-123.
- [22] 潘耀宗, 张健, 杨海涛, 等. 战机自主作战机动双网络智能决策方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(11): 144-151.
Pan Yaozong, Zhang Jian, Yang Haitao, et al. Dual network intelligent decision method for fighter autonomous combat maneuver[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(11): 144-151.
- [23] 程健, 张会. 潜艇使用声抗器材防御鱼雷方案优化模型及模型求解策略[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(6): 48-51.
Cheng Jian, Zhang Hui. Optimal model and model solving strategy of submarine torpedo defence using acoustic countermeasure equipment[J]. *Command Control & Simulation*, 2019, 41(6): 48-51.

(责任编辑: 周林涛)

(上接第 322 页)

- [13] 李涛, 张灿, 张帅驰, 等. 基于兴趣度关联规则的海洋气象数据质控算法[J]. 现代电子技术, 2018, 41(22): 138-142.
Li Tao, Zhang Can, Zhang Shuaichi, et al. Marine meteorological data quality control algorithm based on interestingness association rule[J]. *Modern Electronics Technique*, 2018, 41(22): 138-142.
- [14] 陈子飞, 任强, 南峰, 等. 深海锚系潜标 ADCP 数据处理的质量控制研究[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(4): 54-61.
Chen Zifei, Ren Qiang, Nan Feng, et al. Research on the quality control of ADCP Data processing for deep-ocean subsurface mooring[J]. *Journal of Ocean technology*, 2021, 40(4): 54-61.
- [15] 国家海洋标准计量中心. GB/T 14914.6—2021 海洋观测规范第 6 部分: 数据处理与质量控制[S]. 北京: 国家标准化管理委员会, 2021.
- [16] Thomson J, Garton J B, Rajesh J, et al. Measurements of directional wave spectra and wind stress from a wave glider autonomous surface vehicle[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, 35(2): 347-362.
- [17] 王冠琳, 王岩峰, 官晟. 水下滑翔机数据管理[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(5): 514-520.
Wang Guanlin, Wang Yanfeng, Guan Sheng. Data management of underwater gliders: A review[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2019, 27(5): 514-520.
- [18] Wang B L, Gu X D, Ma L, et al. Temperature error correction based on BP neural network in meteorological wireless sensor network[J]. *International Journal of Sensor Networks*, 2017, 23(4): 117-132.
- [19] 侯颀. 气象数据质量控制与监控系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [20] 韩格格, 黄艳红, 姜娜娜, 等. 基于改进 Apriori 算法的气象数据质量控制研究[J]. 电子测试, 2021, 5: 63-64.
Han Gege, Huang Yanhong, Jiang Nana, et al. Research on quality control of meteorological data based on improved apriori algorithm[J]. *Electronic Test*, 2021, 5: 63-64.
- [21] 李超, 宁春林, 刘宝超, 等. 南海南部季风的自动气象站观测系统设计[J]. 海岸工程, 2016, 35(4): 42-50.
Li Chao, Ning Chunlin, Liu Baochao, et al. Design of automatic weather station observation system for monsoon in the southern South China Sea[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 35(4): 42-50.

(责任编辑: 杨力军)