

[引用格式] 刘腾蛟, 王丹, 刘金国. 潜艇非声探测技术综述 [J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(4): 521-526.

潜艇非声探测技术综述

刘腾蛟¹, 王丹¹, 刘金国^{2*}

(1. 沈阳建筑大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳, 110168; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳, 110016)

摘 要: 传统声学探潜技术由于作战环境的复杂化已逐渐受限, 与此同时, 非声探潜技术的重要性日益展现。文章分别介绍了磁异探潜技术、激光探潜技术、尾流探潜技术、电场探潜技术以及红外探潜等其他非声探潜技术, 详细描述了各种非声探潜技术的优势及其局限性, 并对非声探潜技术的发展趋势进行了展望, 旨在为研究非声探潜技术提供有益参考。

关键词: 潜艇; 非声探测; 磁异探测; 激光探测; 合成孔径雷达; 尾流探测

中图分类号: TJ630.34; U674

文献标识码: R

文章编号: 2096-3920(2023)04-0521-06

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2023-0054

Review of Non-Acoustic Detection Technologies of Submarines

LIU Tengjiao¹, WANG Dan¹, LIU Jinguo^{2*}

(1. Faculty of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Liaoning 110168, China; 2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Liaoning 110016, China)

Abstract: Due to the complexity of the combat environment, the traditional acoustic detection technologies of submarines are gradually limited, and the importance of non-acoustic detection technologies of submarines is increasingly shown. This article respectively introduced the magnetic anomaly detection technology, laser detection technology, wake detection technology, electric field detection technology, and other non-acoustic detection technologies of submarines, described the advantages and limitations of these technologies, and predicted their development trend, so as to provide a reference for the development of detection technologies of submarines.

Keywords: submarine; non-acoustic detection; magnetic anomaly detection; laser detection; synthetic aperture radar; wake detection

0 引言

潜艇作为不可或缺的海上作战力量, 是公认的战略武器, 具有隐蔽性强、生存能力强、攻击能力强等特点, 战略地位十分重要。随着消声隐身技术(如消声瓦)以及减振降噪技术的发展, 潜艇的辐射噪声急剧降低, 自噪声也越来越接近于海洋的背景噪声(据报道, 美国海军潜艇的自噪声仅为

90 dB 左右), 传统声呐探潜手段已不能满足日益复杂的近海作战形式。为提高反潜概率, 亟需寻找新的探潜方法。

非声探潜技术近年来受到各国的极大关注。美国海军在《2000—2035 年美国海军技术》报告中指出, 非声探潜是水声探测的必要辅助手段, 发展非声探潜技术意义重大^[1-3]。

文中通过梳理和对比目前各种非声探潜技术

收稿日期: 2023-05-12; 修回日期: 2023-07-13.

作者简介: 刘腾蛟(2000-), 男, 在读硕士, 主要研究方向为非声探潜、航空反潜.

* 通信作者简介: 刘金国(1978-), 男, 博导, 研究员, 主要研究方向为空间机器人与空间智能装备、公共安全机器人与无人平台、仿生可变形与可重构机器人.

的优势和局限性,分析其发展趋势并进行展望,以期对探潜技术的发展提供借鉴。

1 非声探潜技术概述

非声探潜技术大致可分为探测潜艇非声物理场的直接探潜技术、探测尾迹的间接探潜技术以及其他探潜技术^[4-5]。直接探潜主要包括磁异探潜和激光探潜等,间接探潜主要包括利用合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)进行尾流探潜和电场探潜等,其他探潜技术主要包括红外探潜、重力梯度探潜、核辐射探潜以及废气探潜等。

1.1 磁异探潜技术

磁异探潜技术是当今提高反潜效率最可靠的辅助非声探潜手段,也是现代反潜飞机等普遍使用的技术^[6]。潜艇通常由大量具有剩磁或高磁导性的磁性材料(如合金钢等)制成,当铁磁性的物质处于地磁场时,潜艇内部的铁磁材料会形成可逆的磁化过程,即感应磁性^[7],对地磁场产生扰动,引起畸变,磁异探潜技术通过捕捉这种异常信号来进行探测以得到目标位置等信息。

由于潜艇的磁异常与自身材质有关,而因材质磁化产生的附加磁场可通过某些先进手段降至非常微弱,因此在反潜等军事领域中,一般采用弱磁测量传感器(低强度磁场传感器)进行探测。磁异探潜可分为航空磁探、水面磁探和水中磁探 3 种方式,如图 1 所示。航空磁探主要是将磁探仪搭载在反潜飞机上,有固定式和拖曳式 2 种方式^[8]。代表性磁探仪有美国的 AN/ASQ-81 型、AN/ASQ-208 型和最新的 AN/ASQ-233 型磁探仪,加拿大的 AN/ASQ-501 型、AN/ASQ-504 型和最新的 AN/ASQ-508 型磁探仪,国内研制的磁探仪系统已列装于“高新 6 号”反潜巡逻机。其中,AN/ASQ-81

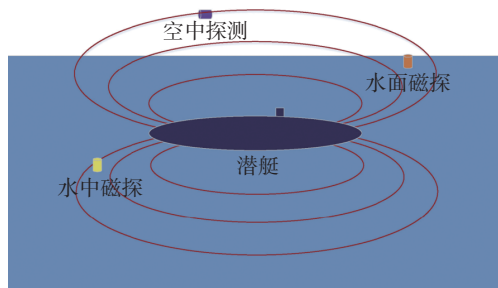


图 1 3 种磁异探测方式

Fig. 1 Three types of magnetic anomaly detection

型磁探仪性能指标如表 1 所示。常见的海面磁探仪有美国的 G882 型,国内的 GB-5A 型、GB-6 型和 GB-6A 型等。水中磁探主要利用水下航行器搭载磁探仪来实现,通常使用磁通门传感器,例如美国 WoodsHole 海洋研究所研发的搭载三轴磁通门传感器的 ABE(autonomous benthic explorer)水下机器人,可用于水下探测。布置基站也属于水中磁探的一种,例如有国内学者提出栅栏式水下磁性防御网和分布式水下磁性防御网的布置概念^[9]。

表 1 AN/ASQ-81 型磁探仪性能指标

Table 1 Performance index of AN/ASQ-81 magnetometer

探测目标	最大作用距离/m		定位误差/m
	深海	浅海	
常规潜艇	—	290	≤200
核潜艇	450	350	≤300

磁异探测技术具有定位精度高、执行能力强、受水文条件影响较小等优点,但由于潜艇磁场磁性微弱,且空间衰减快,因此需要磁探仪具有更高的灵敏度和精度。

1.2 激光探潜技术

激光探测主要以蓝绿激光作为照明源,运用光电传感器进行水下探测、成像和识别等^[10-11]。其工作原理是:从某种平台上发射出蓝绿激光,经空气-海水界面折射后进入到海水中,再通过水中目标和海水物质反射回大气中,蓝绿激光探测器接收到反射回的光信号并通过计算机进行处理,从而得到水下目标信息。例如:美海军使用的卡曼公司研制的“魔灯”机载激光探雷系统,该系统可在 100~500 m 高度巡航,发射单脉冲能量为 500 mJ 的窄脉冲,重复频率 40 Hz,探测深度达 30 m,该系统投入使用 4 天时间内发现的水雷数量达到之前 7 个月的 12%;俄罗斯在“熊 F-IV”型轰炸机头部安装“紫水晶”系统,用来搜索水雷和潜艇,该系统的激光发射装置沿飞机飞行方向 45°范围内扫描,能覆盖大约 300 m 的扇形搜索区域,需要飞机巡航高度约 100 m,并且保持 200 kn 的速度匀速飞行,转弯时必须关闭变速器^[5]。国外其他典型激光水下探测系统如表 2 所示。

激光探潜系统的探测光源大多采用重复率较低、脉冲宽度窄且单脉冲能量大的蓝绿激光,波长

表 2 典型激光水下探测系统
Table 2 Typical laser underwater detection system

探测系统	国别	飞行高度 /m	探测深度 /m
Sparta水下激光成像系统	美国	—	<50
SM2000水下激光成像系统	美国	—	45
“鹰眼”水下激光海洋探测系统	瑞典	—	70
LADSMK II水深测量系统	澳大利亚	500	0~70

以 532 nm 为主, 最大探测距离可达 200 m。例如美国先进防御研究项目机构开发的激光雷达系统利用 510 nm 的蓝绿激光进行探测, 最大探测距离为 200 m^[12-13]。

激光探测具有定位较准、探测方向性好、透过性和准直度高、成像和测距效果理想等优点, 并且激光的高亮度能够有效滤除大多数噪声, 提高图像对比度和探测信噪比。但由于海水水体对光的衰减严重, 使得激光经过水体的多次散射后难以找到其原始方向信息。

1.3 SAR 探潜技术

SAR 属于小尺度检波器, 可搭载在飞机、卫星和其他航天器上, 通过发送并接收微波的方式进行探测, 具有定位精度高、探测范围广、发现目标快、能在恶劣环境和黑夜中工作等优点。潜艇航行时会产生航迹尾流, 从而改变海面粗糙度, SAR 可通过捕捉由于海水内波和湍流引起的海面变化, 发现、跟踪并定位潜艇^[14-16]。据报道, 美国“长曲棍球”SAR 侦察卫星能对最深至水下 45 m 航行的潜艇实施侦察; 美国已经能够在近海小风速海况下找出潜航中的潜艇尾迹, 正在研究任何海况下的星载 SAR 探潜新方法^[17]。SAR 能够探测的潜艇尾流主要包括航迹尾流、气泡尾流、热尾流、生物尾流和磁尾流等。

1) 航迹尾流。潜艇在水下航行时, 会产生内波、湍流和开尔文尾迹(潜艇航行方向后方呈“V”字型的尾流, 见图 2)等, 这些现象与海表面波和海面地形等因素交互作用, 使得海表面波的局部分布不均, 扩散在海面上, 形成较大面积的尾迹波纹, 即航迹尾流。据资料显示, 3~4 级海况下, 潜艇水动力尾流可维持 1~1.5 h, 且延伸范围可达 15~25 km, 持续时间长, 范围广, 可通过 SAR 检测并成像。

2) 气泡尾流。潜艇在水下航行时, 推进器(螺

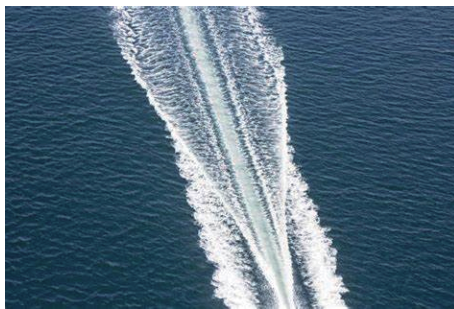


图 2 开尔文尾迹

Fig. 2 Kelvin wake

旋桨)转动使其尾部的海水产生很多气泡, 形成气泡幕带, 即气泡尾流。潜艇气泡尾流持续时间长、分布范围广, 可通过气泡尾流的光学散射特性来探测潜艇。

3) 生物尾流。海洋中的生物种类繁多, 潜艇在水中航行时会干扰到海洋中的生物场, 在海水中产生一条长达数千米生物尾流。同时, 由于高温污水排放会使海水不同层的海洋浮游生物死亡, 形成特有迹象。生物尾流光学效应能维持数小时, 从理论上来说易于检测。

4) 磁尾流。潜艇在航行过程中, 螺旋桨转动使周围海水产生电流, 从而产生极低频电场, 耦合出低频磁场。Madurasinghe^[18-19]对下潜物体航迹引起的海水运动感应电磁场的表达式进行了理论推导, 并对其进行了仿真实验, 结果表明: 在下潜物体航迹 10 km 范围内, 可以形成 10^{-3} nT 以上的磁场, 证明磁尾流具有较好的探测前景。

5) 热尾流。由于热尾流与红外探测技术都属于探测潜艇的热效应, 将在下文红外探潜技术中一并描写。

1.4 电场探潜技术

潜艇结构中的不同金属在海水中呈现不同的电极电位, 使潜艇在海水中易被腐蚀, 通常会采用阴极保护措施来防止金属阳极被腐蚀, 这会使潜艇周围海水产生电流, 在潜艇壳体和推进器间产生回路, 螺旋桨运转使轴系接触电阻发生周期性变化, 进而使防腐电流也发生周期性变化, 时变电流产生的电磁波由壳体向外传播形成极低频(extremely low frequency, ELF)电场^[20]。潜艇航行时主轴和推进器持续转动, 故 ELF 电场的产生是不可避免的。

ELF 电磁波具有低频、衰减小、受海况和天气条件等因素影响较小等优点, 因此利用 ELF 电磁

波探潜具有一定的可行性,但目前由于技术受限,该技术的探测距离仅在 1 km 左右^[21]。

1.5 其他非声探潜技术

除上述几种主要非声探潜技术外,还可采用红外探潜、重力梯度探潜、核辐射探潜和废气探潜等其他非声探潜技术。

1) 红外探潜技术。红外探测主要利用红外探测仪,其工作原理是将入射的辐射信号转换成电信号输出^[22]。当潜艇在水下航行时,会造成水流扰动,同时由于潜艇排出废气、冷却核动力装置、与水体摩擦等行为,都会使特定水层的水温发生异常变化(升高或降低),从而使潜艇的航路上出现 1 条水温变化的尾流(即 1.3 节中的热尾流)。例如 1 台功率 190 kW 反应堆的核潜艇每秒可释放约 4.5×10^7 cal 的热能,使得潜艇周围海面温度上升^[23]。这些热辐射可被红外探测仪探测并转换为电信号进行输出,进而分析目标的活动轨迹等。美国在 20 世纪 90 年代就已经利用红外卫星探测潜艇,能够在太空中探测到 25 m 深度下海域 0.006 °C 的微小温度变化,也证明了使用高灵敏度的红外探测仪探测潜艇的热尾流完全可行。红外探潜技术不仅能探测潜艇热尾流,还可对潜艇进行直接探测(潜艇在水面时,太阳光照射潜艇表面金属产生红外辐射,进而被红外探测仪探测到)。红外探测仪工作较为隐蔽,不易被发现,无论日夜均可使用,但恶劣天气(如雨雪、大雾)对其影响较大,且红外探潜技术仅能检测到附近是否有潜艇,无法确定潜艇的具体位置。

2) 重力梯度探潜技术。地球重力场可以用来描述地球内部和表层的密度分布,以及物质的运动状态。重力梯度是地球重力场在全空间的变化率,相对于重力场而言,重力梯度对于地下物质的分布和地形状况等更加敏感,由于地球对表面物体具有吸引力,潜艇在水下也会产生重力梯度,尤其是垂直重力梯度。垂直重力梯度是重力位在铅垂方向的 2 阶导数,表示重力场强度在垂直方向上的变化率,它在反映局部异常时显得更为灵敏,在地球物理勘探中起着重要的作用^[24-25]。潜艇垂直重力梯度主要包括潜艇外壳质量产生的重力梯度和潜艇引起的海水亏损产生的重力梯度两部分。重力梯度探潜的工作原理就是通

过对这两部分垂直重力梯度的计算值与重力梯度仪的实测值进行比对,从而实现探潜。重力梯度仪主要分为基于扭矩的重力梯度仪、基于差分加速度计的重力梯度仪以及绝对重力梯度测量仪等几种^[26]。

3) 核辐射探潜技术。核潜艇反应堆在工作过程中,其周边环境会发生核辐射,同时伴随着某些放射性排出物,核辐射线与海水中的离子发生作用,形成可见的蓝色光,可利用光学仪器探测到,也可通过探测污染情况来确认是否存在核潜艇。

4) 废气探潜技术。潜艇在水面或通气管状态航行时,其内燃机产生的一氧化碳气体可在低空滞留 3 h 左右,因此可通过探测废气实现探潜。如美国反潜飞机装备的 AN/ASR-3 型废气探测仪、英国反潜飞机装备的“阿夫多利库斯”MK3 型废气探测仪等,均可实现废气探测,且效果较好。

各种探潜技术对比分析表如表 3 所示。

2 发展趋势与展望

1) 磁异探潜定位精度高、执行能力强、受水文条件影响较低,但也存在诸多局限性,由潜艇磁化产生的附加磁场信号很弱,且衰减迅速,这就要求磁探仪的精度和灵敏度等很高,还要抓好“关键期”。目前,有很多学者基于德拜效应产生的磁场来进行探测,德拜效应磁场(潜艇航行时会使海水中正负离子的质心分离产生极化电流,形成的特殊磁场被称为德拜效应磁场)^[27]由潜艇运动产生,与潜艇的材质无关,因此不论潜艇采取何种低磁材料和消磁手段,理论上都可利用基于德拜效应磁场研制的磁探仪实现大范围微弱信号的搜索,将对水下作战产生重大影响。磁异探测技术未来的发展应聚焦于更高灵敏度、更低功耗、更小体积的磁通门传感器^[28],小型化、低成本化的光泵磁力仪,小型化、低成本化及高温化的超导量子磁力仪,以及提高质子磁力仪等原子磁力仪的动态响应特性及高精度矢量测量技术等研究方向。另外值得关注的是,对无人探测系统的航磁测量技术进行深入的研究,有利于拓展反潜作战模式,将该技术与载人探潜平台相结合,将会取得更好的效果。

2) 由于激光探测时水体对光的衰减幅度大,使得告警信号动态范围很大,因此在激光探测技

表 3 各种探潜技术对比分析
Table 3 Comparative analysis of various submarine detection technologies

探潜技术	优势	劣势
磁异探潜	① 定位精度较高 ② 执行能力强 ③ 受水文条件影响较低	① 磁场信号较弱 ② 磁场衰减迅速
激光探潜	① 探测方向性好 ② 定位较准确 ③ 透过性和准直度高 ④ 成像和测距效果较理想	水体对光的衰减较为严重, 经多次散射后, 很难找到激光原始信息
SAR探潜	① 定位精度高 ② 探测范围广 ③ 发现目标快 ④ 能在恶劣环境和黑夜中工作	SAR工作频段是微波频段, 微波很难穿透海水, 因此探测范围受限
电场探潜	① 极低频电磁波频率低、衰减小 ② 受海况和天气条件等影响较小	探测范围有限
红外探潜	① 隐蔽性高 ② 日夜均可使用	恶劣天气对其影响较大
重力梯度探潜	① 隐蔽性高 ② 对外界环境的敏感度小	尚处于理论阶段, 技术突破性难度较大
废气探潜	隐蔽性高	受风力等气象条件影响较大
核辐射探潜	① 核潜艇不可避免存在核辐射 ② 受气象和海况条件影响较小	技术尚未成熟

术方面需重点研究如何让信号处理电路具有压缩动态信号范围的能力, 并建立更多完整的潜艇模型和数据库, 运用更为先进的二极管抽运固体激光器进行探测。

3) 潜艇航行时产生的尾流持续时间长、扩散范围广, 易于探测。但探测尾流所用的 SAR 工作频段为微波频段, 微波很难穿透海水, 因此利用 SAR 直接探测水下极为困难, 探测范围受限, 加之近海海况极为复杂多变, 潜艇航行时产生的航迹尾流会受海况的影响, 也为尾流探潜增加了难度。因此, 要继续研究性能高、成本低、体积小的小型化星载 SAR, 还应进一步研究如何提高 SAR 的精度, 进而提高分辨率, 得到更为准确清晰的图像; 此外, 图像处理的深度学习也将是 SAR 技术重要的研究方向。

4) 潜艇在航行过程中总会伴随 ELF 电场的产生, 所以利用具有低频、衰减小、受海况和天气条件影响较小等优势 的 ELF 电磁波进行探测是完全可行的, 但目前探测范围仅为 1 km 左右, 因此, 后续应重点研究如何进一步扩大探测范围。

5) 红外探测技术主要依靠红外探测仪, 该技术应着重对红外探测仪趋于小型化、低成本化以及更高精度与准确度等方面的研究。

6) 重力梯度探潜技术是一种被动的无源探测

手段, 探测时不会向外界发射任何信号, 隐蔽性较高, 受外界环境等影响较低, 并且理论上只要重力探测仪的精度足够高, 便可以实现探潜目的。由于重力梯度仪在探测油田、地形地貌等方面的应用已较为成熟, 故为了实现探潜目的, 应该将重心放在提高重力梯度仪的精度和灵敏度方面; 另外, 重力梯度仪的小型化、高精度化也将成为重力梯度探潜的重要研究方向。

3 结束语

反潜探测装备在海军军事领域发挥着不可或缺的作用, 加快其技术创新、赶超先进水平显得更为迫切, 因此, 大力发展非声探潜技术十分必要, 文中介绍的各种非声探潜技术虽各具优势, 但都存在一定的局限性, 单一的探潜手段并不能满足探测需要, 需要对各种探潜技术进行更深入的研究, 将其相互结合, 扬长避短, 进行技术创新, 并基于体系化作战, 以提高探潜能力, 提升海上作战能力。

参考文献:

[1] 梅风华, 侯旺. 非声探潜技术在航空尾迹探测上的应用[J]. 电光与控制, 2017, 24(7): 62-65.
Mei Fenghua, Hou Wang. Application of non-acoustic submarine exploration technology in aviation wake detection[J]. Electro-Optics & Control, 2017, 24(7): 62-65.

- [2] 宫继祥. 浅海非声探潜[J]. 现代舰船, 1996(11): 29-31.
Gong Jixiang. Non-acoustic diving in shallow sea[J]. Modern Ships, 1996(11): 29-31.
- [3] 成建波, 孙心毅. 航空磁异常探潜技术发展综述[J]. 声学与电子工程, 2018(3): 46-49.
Cheng Jianbo, Sun Xinyi. Review on the development of avionically anomalous submarine exploration technology [J]. Acoustics & Electronic Engineering, 2018(3): 46-49.
- [4] 艾艳辉, 赵志平. 非声探测技术面面观[J]. 水雷战与舰船防护, 2003(3): 43-46.
- [5] 崔国恒, 于德新. 非声探潜技术现状及其对抗措施[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(12): 10-13.
Cui Guoheng, Yu Dexin. Current situation of non-acoustic submarine exploration technology and countermeasures[J]. Fire Power & Command and Control, 2007, 32(12): 10-13.
- [6] 王翠珍, 唐金元. 现代航空搜潜技术[M]. 北京: 海潮出版社, 2003: 51-52.
- [7] 翁行泰, 曹梅芬, 吴文福, 等. 磁异探潜中潜艇的数学模型[J]. 上海交通大学学报, 1995(3): 27-32.
Weng Xingtai, Cao Meifen, Wu Wenfu, et al. Mathematical model of submarine in magnetic exploration[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1995(3): 27-32.
- [8] 孙明太. 航空反潜战术[M]. 北京: 军事科学出版社, 2003: 99-106.
- [9] 陈正想, 卢俊杰. 弱磁探测技术发展现状[J]. 水雷战与舰船防护, 2011, 19(4): 1-5.
- [10] Fletche R B, Antonelli L T. Experimental detection and reception performance for uplink underwater acoustic communication using a remote in-air acousto-optic sensor [J]. Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(1): 179-187.
- [11] 李哲, 邓甲昊, 周卫平. 水下激光探测技术及其进展[J]. 船舶电子工程, 2008, 48(12): 8-11.
Li Zhe, Deng Jiahao, Zhou Weiping. Underwater laser detection technology and its progress[J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 48(12): 8-11.
- [12] 方尔正, 桂晨阳, 王欢. 潜艇的非声学探测技术[J]. 国防科技工业, 2020(6): 66-68.
Fang Erzheng, Gui Chenyang, Wang Huan. Non-acoustic detection technology of submarine[J]. Science, Technology and Industry for National Defense, 2020(6): 66-68.
- [13] Stefansnick T. The nonacoustic detection of submarines [J]. Scientific American, 1998, 258(3): 41-47.
- [14] 张军, 张效慈, 赵峰, 等. 源于水动力学的潜艇尾迹非声探测技术研究之进展[J]. 船舶力学, 2003, 7(2): 121-128.
Zhang Jun, Zhang Xiaoci, Zhao Feng, et al. Research progress on non-acoustic detection technology of submarine wake derived from hydrodynamics[J]. Ship Mechanics, 2003, 7(2): 121-128.
- [15] Zhang Z J, Stern F. Free-surface wave-induced separation[J]. Journal of Fluids Engineering, 1996, 118(3): 546-554.
- [16] 彭亮, 王建勋, 邓海华, 等. 水下非声探测与隐身技术综述[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(5): 6-10.
Peng Liang, Wang Jianxun, Deng Haihua, et al. Review of underwater non-acoustic detection and stealth technology[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(5): 6-10.
- [17] 梁志城. 现代反潜武装[M]. 北京: 海潮出版社, 2003.
- [18] Madurasinghe D, Tuck E O. The induced electromagnetic fields associated with submerged moving bodies in an unstratified conducting fluid[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 19(6): 193-199.
- [19] Madurasinghe D. Induced electromagnetic fields associated with large ship wakes[J]. Wave Motion, 2014, 20(2): 283-292.
- [20] 林春生, 龚沈光. 舰船物理场[M]. 2版. 北京: 兵器工业出版社, 2007.
- [21] 龚沈光, 卢新成. 舰船电场特性初步分析[J]. 海军工程大学学报, 2008, 36(6): 54-57.
Gong Shengguang, Lu Xincheng. Preliminary analysis of electric field characteristics of ships[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 36(6): 54-57.
- [22] Roxburgh I S. Thermal infrared detection of submarines springs associated with the Plymouth Limestone[J]. Hydrological sciences journal, 1985, 30(2): 185-196.
- [23] Wren G G, May D. Detection of submerged vessels using remote sensing techniques[J]. Australian Defense Force, 1997, 127: 8-15.
- [24] 孙岚, 李厚朴, 边少峰, 等. 基于重力梯度的潜艇探测方法研究[J]. 海洋测绘, 2010, 30(2): 24-27.
Sun Lan, Li Houpu, Bian Shaofeng, et al. Research on submarine detection method based on gravity gradient[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(2): 24-27.
- [25] 张志强, 郑晗, 崔银峰. 航空重力垂直梯度探测潜艇方法研究[J]. 海洋测绘, 2019, 39(4): 6-9.
Zhang Zhiqiang, Zheng Han, Cui Yinfeng. Research on submarine detection method of aviation gravity vertical gradient[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39(4): 6-9.
- [26] 吴琼, 滕云田, 张兵, 等. 世界重力梯度仪的研究现状[J]. 物探与化探, 2013, 37(5): 761-767.
Wu Qiong, Teng Yuntian, Zhang Bing, et al. Research status of gravity gradiometer in the world[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(5): 761-767.
- [27] Oger G, Debye P. A method for the determination of the mass of electrolytic ions[J]. Journal of Chemical Physics, 1993, 1(1): 13-16.
- [28] Lei C, Sun X C, Zhou Y. Noise analysis and improvement of a micro-electro-mechanical-systems fluxgate sensor[J]. Measurement, 2018, 122: 1-5.

(责任编辑: 陈 曦)