

\*现代水声技术专刊\*

## 水下未爆弹无人电磁探测装备研究现状与展望

蒋泽坤<sup>1,2</sup>, 高俊奇<sup>1,2</sup>, 沈莹<sup>1,2,3</sup>, 王雪雯<sup>1</sup>, 盛湛峰<sup>1</sup>, 张鹏飞<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 海洋信息获取与安全工业和信息化部重点实验室 (哈尔滨工程大学), 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:**为解决水下未爆弹在部署或遗弃多年后随时可能爆炸或泄漏,造成致命危险,急需清理的迫切需求,本文探讨了水下未爆弹无人化电磁探测系统研制中的关键技术。被动磁探测方法探测范围大,适合广域的快速搜探,但缺乏非铁磁目标的探测能力及对小目标的识别能力;主动磁探测方法具有目标识别能力,但探测范围小,探测速度慢。现阶段针对水下小目标的无人化搜探仍受到平台磁干扰、避障、续航及数据智能化实时处理能力等多方面制约。未来研究可聚焦于研制高灵敏度、低噪声的磁探测载荷,结合深度学习与多源信息融合方法,推动水下未爆弹“探测-定位-识别-处置”的闭环无人化作业流程。

**关键词:**水下未爆弹;无人潜载系统;磁异常探测;航磁补偿;主动磁探测;无人装备;掩埋目标;目标识别

**DOI:**10.11990/jheu.202504001

**网络出版地址:**https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20260115.1317.004

**中图分类号:**P631.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7043(2026)04-0914-15

## Research status and prospects of underwater unexploded ordnance detection using unmanned electromagnetic systems

JIANG Zekun<sup>1,2</sup>, GAO Junqi<sup>1,2</sup>, SHEN Ying<sup>1,2,3</sup>, WANG Xuwen<sup>1</sup>, SHENG Zhanfeng<sup>1</sup>, ZHANG Pengfei<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology; Harbin 150001, China; 3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** To address the urgent need to clear underwater unexploded ordnance (UXO), which may detonate or leak after years of deployment or abandonment and thus pose fatal hazards, this paper investigates key technologies for the development of unmanned electromagnetic detection systems for underwater UXO. Passive magnetic detection offers a wide detection range and is suitable for rapid, large-area searches; however, it lacks sensitivity to non-ferromagnetic targets and has limited capability for identifying small objects. In contrast, active magnetic detection enables target discrimination but suffers from a short detection range and low survey speed. Currently, unmanned detection of small underwater targets remains constrained by platform-induced magnetic interference, obstacle avoidance and endurance limitations, and insufficient real-time intelligent data processing capabilities. Future research should focus on developing high-sensitivity, low-noise magnetic detection payloads and integrating deep learning with multi-source data fusion to establish an unmanned, closed-loop workflow for underwater UXO clearance, encompassing detection, localization, identification, and disposal.

**Keywords:** underwater unexploded ordnance; unmanned underwater vehicle system; magnetic anomaly detection; aeromagnetic compensation; active magnetic detection; unmanned equipment; buried target; target recognition

收稿日期:2025-04-01.

网络出版日期:2026-01-15.

基金项目:青年项目(006170130620);青年科学家培育基金项目(79000014/003);电波环境特性及模化技术重点实验室基金项目(JCKY2024210C61424030202);中央高校基本科研业务费项目(3072025YY0501).

作者简介:蒋泽坤,男,博士研究生;

沈莹,女,教授,博士生导师.

通信作者:沈莹,E-mail: shenying@hrbeu.edu.cn.

未爆弹(unexploded ordnance, UXO)包括地雷、手雷、迫击炮弹、航空炸弹、鱼雷等,因各种原因未能按预定方式爆炸而仍存在于地表或地下。在边境和军事训练场地,清理这些危险区域的任务既紧迫又成本高昂。根据《关于军地共同加强部队训练

场未爆弹药安全风险防控的意见》,大型训练基地负责处理历史遗留的未爆弹药及部队撤离后发现的零星未爆弹药,需利用部队轮换、演训休整等机会,每年至少对落弹区及其周边进行一次全面搜排。

常用的水下目标探测技术根据原理可以分为磁法探测<sup>[1]</sup>、电法探测<sup>[2]</sup>、声学探测<sup>[3]</sup>、光学探测<sup>[4]</sup>4类。磁法探测具备可穿透多种物质(水、空气、气泡、植被和泥沙等)进行探测的特性,适合对海底金属目标开展探测、定位、识别。磁法探测根据探测方式可以分为主动磁探测与被动磁探测,2种方法均可以有效探测掩埋的目标,但具有不同的探测距离、覆盖率和分类能力。电法探测采用激发极化效应,通过对目标物施加外部电流,产生异常场电位,但浅海环境下海水-海底分界面与空气-海水分界面对电流的吸收较大,降低电场能量,探测距离相对较短<sup>[5]</sup>。声学探测由于其在水下远距离传播的特性,一直以来被广泛应用。海底声学环境复杂,声学探测受海洋环境噪声影响极大,虚警率高,对于海底底质的穿透能力弱。合成孔径声呐在损失分辨率的前提下,仅能穿透2 m以内的底质<sup>[6]</sup>。对于礁石区的探测,侧扫声呐成像难以分辨未爆弹与海底礁石。光学成像要求水下环境可见度高,在海底环境下尤为困难。载体平台近底探测会卷起大量的泥沙,使光学探测方法完全失效。

未爆弹的搜索工作极具危险性,尤其是水下未爆弹的清理。传统水下未爆弹搜索作业需要潜水员手持金属探测器在水下缓慢搜索,这无疑是大海捞针,且危险性极高。得益于无人技术的发展,采用无人潜航器搭载主被动磁探测载荷实现未爆弹的搜索已成为近年来的研究重点。这种技术具有安全性高、探测效率高、操作灵活的优点。

对于传感器载体平台的选择,拖曳式或自主式水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)平台对于深度超过约5 m的水域最佳,而水面船和无人平台则最适合甚浅水水域的未爆弹探测<sup>[7]</sup>。遥控式水下航行器(remotely operated vehicle, ROV)操作更为灵活,但受限于脐带缆长度。基于不同作业深度的ROV平台,磁探测载荷对于几十厘米至几千米深度水域均能实现有效探测。磁探测载荷搭载于深海潜航器可以实现万米深度海域的探测。

虽然水下动平台磁探测具有可实现近海底测量、探测精度高、平台可操作性强等特点,但受到海浪、涌浪等影响,水下动平台难以获得航磁系统一样的高平稳度。磁异常数据质量受机体动平台磁干扰影响严重,对磁噪声补偿技术提出了更高的要求。对于主动磁探测技术,高电导率的海水介质对高频

电磁场具备更强的衰减作用、空气-海水-海底3层介质对电磁场的反射吸收作用是水下未爆弹探测的研究重点。

国外对我国实行了海洋磁探测技术垄断。近年来,由于国外设备价格不断升高,例如TELEDYNE MARINE公司的TSS440定位仪单台价格可达230万元人民币,工程作业成本较高。随着贸易战的逐渐升级,国内很多企业,潜载磁探测装备同样被严格禁售,对我国海洋事业发展造成了极大的影响。

本文从被动磁探测技术和主动磁探测技术两个方面综述了水下未爆弹无人搜索的关键问题,分析了代表性文献,梳理了技术发展脉络,并展望未来发展方向,为本领域的前沿技术研究提供支持。

## 1 被动磁探测技术

被动磁探测方法也称磁异常探测方法(magnetic anomaly detection, MAD),是目前比较成熟的探测方法之一。地球磁场会对高磁导率物体产生磁化作用,被磁化的金属附体附近会产生磁场畸变。当运动的传感器经过磁异常区域,或者运动的铁磁目标经过传感器时,传感器会检测到这种磁异常现象。磁异常探测方法具有跨介质探测稳定、不受制于环境介质(如水、空气、沙石、泥土)干扰、不受水文气象条件限制的多种优势。因此在工业、军事等领域磁异常探测一直为研究的热点,尤其在未爆弹探测、水下沉船搜索、水雷排爆、潜艇搜寻等方面受到广泛的关注<sup>[8-9]</sup>。然而被动磁探测方法除了提供与物体大小相关的磁矩测量外,通常缺乏分类能力,而且无法对非铁磁性目标进行探测。但被动探测方法相对于主动探测方法具有更大的距离检测范围,可达5 m,更适合于大规模的搜探任务<sup>[7]</sup>。

拖曳系统探测是成本最低的探测方法。为减小航行器对磁探测设备的干扰,通常使用低铁磁性的玻璃钢船只拖曳磁力仪,实现海域的搜索。加拿大Marine Magnetics公司的SeaSPY磁力仪系统探测范围18 000~120 000 nT,采样率4 Hz,测量精度0.01 nT,常用于地球物理调查与海底管线、光/电缆调查<sup>[10]</sup>,但是拖曳系统只能在海底以上相对较高的高度运行。

### 1.1 潜载被动磁探测系统

AUV/ROV搭载磁传感器系统是未来水下无人磁探测的发展趋势,其优势体现在传感系统的定位精度高、受振动噪声影响小、载体作业灵活、具备抵近探测能力。

#### 1.1.1 基于AUV的潜载磁探测系统

AUV的概念最早可以追溯到20世纪50年代,科研人员开始研究如何使用无人控制的水下设备进行海洋勘探和军事应用。2006年6月份美国海军利

用“蓝鳍”AUV携带实时跟踪梯度计(real-time tracking gradiometer, RTG)系统对掩埋水雷进行了探测定位实验,其基本传感单元是一个三轴磁通门传感器,测量局部磁场的3个正交分量。RTG包含3组主传感三轴传感器,呈三角形排列,间距为0.165 m,用于构建6个张量梯度分量,其中5个分量独立<sup>[11]</sup>。Brian等<sup>[12]</sup>将光泵磁力仪与磁阻传感器安装在水下滑翔机的尾部,完成了水池验证。水池干扰复杂,并没有获得理想的实验数据,但是水下滑翔机的低成本及以周为单位的长续航为水下磁场集群化搜探提供了可能。Marc等<sup>[13]</sup>将3个磁通门组成的梯度计安装在具有悬停能力的AUV前方2 m处,以减少载体干扰。该系统本底噪声约2 nT,较之前有了显著改善。经过测试,该系统在距离海底1.8 m的高度,探测到了0.1 Am<sup>2</sup>的磁偶极子目标;在1 m的高度,完成了对海底表层81 mm炮弹等效物体的探测。

近年来,国内AUV磁探测载荷取得快速发展,沈莹等<sup>[14]</sup>使用AUV搭载磁探测载荷应用于浅海未爆弹的搜探。在浅滩未爆弹测作业中,使用磁力仪对10 000 m<sup>2</sup>核心区进行全覆盖、高效率探测,并绘制扫描海域总体观测图,确定未爆弹的坐标位置,目标探测准确率达到100%,证明了磁异常探测在浅海未爆弹探测中的准确性与可靠性。Wang等<sup>[15]</sup>搭建了一套由2个光泵和1个磁通门组成的探测系统,在陆地上进行了水下磁探测系统的样机测试,采用3个不同的运动方向实现对铁磁性目标磁矩及位置信息的估计,为未来水下平台搭载提供基础。

使用AUV搭载磁探测装备的优势是其具有强大的自主性,没有海缆的限制,搜探效率高,图1展示了AUV搭载磁探测载荷的探测流程。缺点在于其无法与操作者实时交互,载体操控性有限,存在受到渔礁石等杂物干预失控的风险,避障能力不足,不适用于浅海多礁石的环境作业。AUV磁探测系统缺乏实时处理能力,无法对数据实时读取,仅能在作业完成后一次性将数据拷贝,在一些强干扰环境往往会浪费大量的作业时间。AUV是一种“能量有限”潜航器,需要携带大重量的电池,增加了载体负担,续航有限,难以连续作业。

### 1.1.2 基于ROV的潜载磁探测系统

早在1960年,美国研制成功了世界上第一台ROV,与载人潜器配合,在西班牙外海找到了一颗失落在海底的氢弹,引起了极大的轰动,从此ROV技术开始引起人们的重视。TELEDYNE MARINE的TSS350海缆定位仪采用被动探测方法,针对通电目标或强铁磁性目标执行探测与定位作业。但其易受环境磁场影响,且缺乏对非铁磁性目标的检测能力<sup>[16]</sup>。德国SENSYS公司使用磁通门传感器开发了

一款ROV磁探测装备MX3D UW,可以装载5阵元以上的磁传感器阵列,其采用的24位高精度采集系统,单通道采样率可达6 kHz<sup>[17]</sup>。

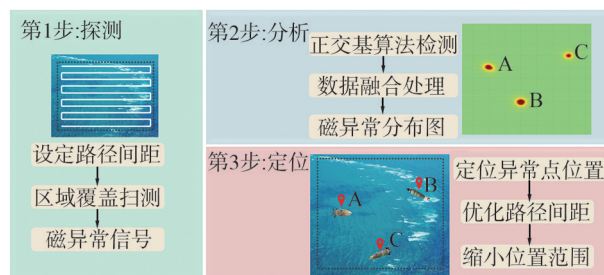


图1 未爆弹探测流程<sup>[14]</sup>

Fig. 1 Unexploded ordnance detection process<sup>[14]</sup>

青岛海月辉科技有限公司<sup>[18]</sup>开发了一台基于ROV作业平台的水下磁梯度探测仪,如图2所示。探测仪由2个光泵磁力仪和1个磁通门传感器组成,采用磁补偿算法大大减小了航行器姿态变化引起的信号噪声,对直径57 mm双联舰炮弹探测距离可达4 m,具备甚浅水域未爆弹探测能力。Sha等<sup>[19]</sup>针对ROV无刷电机磁场对被动磁探测数据干扰的问题,提出了由电机转速建模与小波降噪结合的两步噪声抑制方法,提高了目标定位精度。

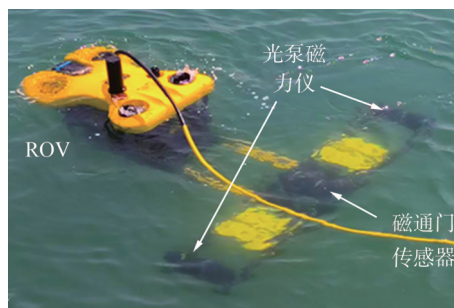


图2 基于ROV的磁梯度探测系统<sup>[18]</sup>

Fig. 2 ROV-based magnetic gradient detection system<sup>[18]</sup>

使用ROV搭载磁探测装备的优势是其具有良好的人机交互能力,具有较强的操控性。ROV是一种“能量无限”潜航器,无需携带电池,具有更强的带载能力,即便受到渔网等干扰物干预,也不存在潜航器遗失的风险。此外,ROV作为一种可悬停的潜航器,其速度、航向均可以很灵活地控制,避障能力远超AUV平台,可以在距离海底更近的礁石区或者浅海进行作业。最重要的是,ROV可以通过脐带缆实时获取探测数据,而非AUV自容式的数据获取方式,提升了作业效率。然而,脐带缆长度的限制同样制约着ROV磁探测方法的作业能力,需要母船配合作业,探测区域随着母船空间位置的改变进行调整,带来了更高的作业成本。

虽然经过多年的发展,潜载被动探测系统已经在

实际的工程作业中得到了广泛的应用,潜载被动探测系统探测能力如表 1 所示。但同样也存在很多不足,包括水下载体平台部署和回收的复杂性、在海床附近航行时的障碍物干扰。为减小自噪声,水下载体平台

的结构设计应尽可能选用非铁磁性材料。此外,为实现针对水下小目标的精准、高效探测,运动平台姿态干扰抑制算法、针对磁异常小目标的目标检测算法、目标定位算法,仍是亟待研究的焦点问题。

表 1 潜载被动探测系统探测能力  
Table 1 Detection capability of submarine passive detection systems

| 研究单位                    | 产品名称                                   | 搭载平台        | 产地  | 探测能力                                       |
|-------------------------|----------------------------------------|-------------|-----|--------------------------------------------|
| 青岛海月辉科技有限公司             | FRU200-24 <sup>[18]</sup>              | ROV         | 中国  | 直径 57 mm 双联舰炮弹,探测距离 4 m                    |
| Teledyne Marine         | TSS350 <sup>[16]</sup>                 | ROV         | 美国  | 电流 30 mA,频率 25 Hz 的电缆,探测距离 4 m             |
| SENSYS                  | MX3D UW <sup>[17]</sup>                | ROV         | 德国  | 未知                                         |
| GEOMAR Helmholtz Centre | Girona 500 AUV “Luise” <sup>[13]</sup> | AUV         | 德国  | 0.1 Am <sup>2</sup> 的磁偶极子目标,探测距离 1.8 m     |
| Marine Magnetics        | SeaSPY <sup>[10]</sup>                 | 拖曳式/ROV/AUV | 加拿大 | 水泥训练弹,探测距离 4 m                             |
| Geometrics              | G-882 <sup>[13]</sup>                  | 拖曳式         | 美国  | 0.45 kg 重铁块,探测距离 3 m,20 mm 直径铁壳,探测距离 1.8 m |

1.2 动平台姿态干扰抑制

使用 AUV 与 ROV 等移动平台搭载被动磁探测载荷不可避免地要受到载体姿态干扰,影响磁传感器对未爆弹的探测。因此,为了提升这种水下动平台磁探测系统的可靠性和探测能力,需要对磁传感器的测量数据进行补偿。

动平台姿态干扰补偿方面的研究起源于航空磁探测领域,应用于预警机、大型无人机搭载的磁传感器阵列。近年来,对于水下载体的磁补偿研究逐渐受到重视,但尚不成熟。在进行动平台探测时,传感器系统不可避免地受到载体自噪声及转向干扰的影响。早期的航磁补偿采用线圈等硬件抵消载体磁场的硬件补偿技术<sup>[20]</sup>。随着软硬件技术的不断发展,自 20 世纪 60 年代加拿大研制出 AN/ASA-65(9)型半自动补偿器,航磁补偿朝着“软补偿”的方向发展<sup>[21]</sup>。Leliak 等<sup>[22]</sup>在 Tolles-Lawson(T-L)模型基础上,建立通用补偿模型,该模型包含 18 项系数线性回归方程。由于变量的相关性,Bickel 等<sup>[23]</sup>提出了基于小信号近似的补偿系数求解方法,通过保留一阶项部分来保留固定磁场和感应磁场,忽略高阶项部分去除涡流磁场来求解模型。Noriega 等<sup>[24]</sup>提出了自适应补偿算法,通过递归的方法对每组新的测量值进行补偿。

在水下动平台姿态补偿方面,“蓝鳍”AUV 携带 RTG 系统,利用 4 个三轴传感器测量到的磁场分量驱动三轴降压线圈构建反馈系统,使主传感器周围的磁场无效,从而放宽了对传感器动态范围和线性度的要求<sup>[11]</sup>。Adrien 等<sup>[25]</sup>针对水下拖曳平台磁化导致搭载的磁传感器产生仪器测量误差的问题,提出了磁传感器不依赖于水下动平台的姿态传感器(俯仰、航偏和横滚)的标量校准方法。该方法利用磁传感器采集地球磁场的标量强度,减小固有的仪器测量误差以及水下动平台的磁化效应导致的信号

干扰,但只适用于总场测量,而不适用于磁矢量。吴涛等<sup>[26]</sup>公布了一种具有磁力仪延伸杆的水下机器人及磁力仪磁干扰的海上校正方法。磁力仪固定在延伸杆上,延伸杆固定在水下机器人本体的尾部,延伸杆减小了水下机器人的磁干扰,由 10<sup>4</sup> nT 的磁干扰减小到 10<sup>3</sup> nT 以内。其提出的磁校正方法,即基于水平旋转磁数据的磁校正公式参数拟合法,使 10<sup>3</sup> nT 的磁干扰减小到 60 nT 以内。Oehler 等<sup>[27]</sup>证明了将三轴矢量磁传感器直接嵌入到 AUV 本体里而非在 AUV 体外延伸几米的距离,同样可以通过磁系数补偿的方式降低航行器的感应场和永久场的静态磁噪声,达到对小于 10 nT 的弱磁异常探测的目的。

智能磁补偿技术方面,Peter 等<sup>[28]</sup>引入人工神经网络技术,构建了磁干扰非线性映射模型,提高了补偿模型的参数估计精度。Nerrise 等<sup>[29]</sup>引入一种基于 T-L 模型并使用液体时常网络去除动平台的磁干扰信号的物理方法。结果表明,磁干扰补偿误差降低了 64%,优于传统模型。Xu 等<sup>[30]</sup>提出了干扰模型引导的磁补偿的神经网络,利用模型驱动和数据驱动的优势,结合干扰模型嵌入损失函数,实现了协同效应。结果表明,即使在数据有限且噪声较大的情况下也能消除干扰,而不会显著降低精度。

目前的水下磁补偿算法多应用于地质磁场的测量,磁传感器测量地磁总场时存在 9 项误差,通过参数补偿,噪声可低至 10 nT 航磁补偿算法如表 2 所示。通常情况下,海底地壳上部具有相当大的磁化强度,10 nT 的精度足以对海底进行磁化强度分析<sup>[25]</sup>。然而,这种限制在未爆弹等小目标及磁信号弱且磁场分布不明确区域仍然存在很大的问题。目前针对小目标探测平台的磁补偿方法较少,仍有着很大的研究空间。

表 2 航磁补偿算法对比  
Table 2 Comparison of aeromagnetic compensation algorithms

| 算法                               | 优势                                                    | 需要改进的问题                                |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 线性 T-L 模型驱动方法 <sup>[22-31]</sup> | 将磁干扰场分解为固有磁场、感应磁场和涡流磁场,并分别进行补偿求解。                     | 无法解决线性 T-L 模型中无法描述的非线性磁干扰问题。           |
| 基于机器学习的数据驱动方法 <sup>[28-29]</sup> | 将 T-L 模型中的方向余弦矩阵作为神经网络输入,通过大量数据减小补偿的标准差,提升补偿改善比,      | 数据驱动方法对可用数据的质量和数量具有高度依赖性,对低信噪比数据鲁棒性较差。 |
| 干扰模型引导的磁补偿神经网络方法 <sup>[32]</sup> | 增加了非线性干扰的训练项。同时由 T-L 物理模型和训练数据驱动。在有限数据和噪声环境下具有更强的鲁棒性。 | 需要建立具体的非线性干扰模型。通过在损失函数中加入典型的非线性干扰来改进。  |

1.3 目标检测算法

基于信号特征检测方法的基本思路是基于磁性目标的正演模型,构建关键检测量用于判断目标是否存在。其中,最典型的算法是基于正交基函数(orthogonal basis functions, OBF)的匹配滤波算法。OBF 检测算法将磁偶极子正演模型分解为 3 个正交的基函数,磁异常信号可以表示为 3 个线性独立且单位正交的基函数的组合,获知磁性目标的时间特征量后,采用滑动窗的方式对时域磁观测序列进行逐段滤波以获得对应时间段内的能量值<sup>[32]</sup>。

OBF 算法在白噪声条件下可以达到最优检测的目的,然而实际应用中噪声功率谱往往呈现 1/f 分布<sup>[33-34]</sup>,故需要对信号进行白化预处理<sup>[35]</sup>。例如,林春生等<sup>[36]</sup>提出了构建 FIR 滤波器设计使得噪声近似高斯化,同时保留磁异常信号的有用信息。Wang 等<sup>[37]</sup>提出了二维正交基函数(2-D-OBF),将对模拟未爆弹探测的磁异常图转换为能量图。该方法在 10 nT 的数据噪声水平下,定位精度和虚警率分别为 0.34 m 和 1.9%,优于一维 OBF 方法。

以 OBF 算法为代表的信号特征检测方法发展成熟,但需要目标与传感器相对速度及最近路径等先验信息,制约了其在非配合目标检测下的应用。基于噪声统计特性的检测方法的核心是根据噪声的统计特性来进行检测<sup>[38]</sup>。Sheinker 等<sup>[39]</sup>以高阶过零

特征构建了高阶交叉谱检测算法(high-order zero-crossing detector, HOC)。需要注意的是,噪声特征检测方法同样是高斯白噪声背景下的检测算法,在非高斯白噪声背景下,其检测性能不可避免地下降。以上方法均可用于未爆弹磁异常指纹曲线的解析和目标检测的实现。

得益于机器学习技术的突破,推动了磁异常检测算法的发展,Claire 等<sup>[40]</sup>采用了一种无监督机器学习方法,在无人机采集的磁测数据中选择用于 UXO 探测的反演子区域,实测结果表明,其正确检测到了所有未爆弹目标,并将反演子区域总数减少了 75%。

磁异常信号衰减很快,能量集中于至低频频段,存在着与低频地磁背景噪声混叠的问题,常规的检测算法中多是以高斯白噪声为理论基础提出。在实际应用条件下的检测效果不佳,为此诸多研究采取了相应的预处理方法,如对观测序列采取白化处理或信号分解降低低频噪声干扰。但目前的预处理方式对目标频率分布特征的认知较为模糊,对背景噪声的空间特性探讨较少,使得预处理无法有效对噪声进行抑制或造成有效信息的丢失。对于动平台搭载的磁传感系统,如何从目标、噪声的特征出发构建适应性更强的预处理算法,是抑制噪声提高检测能力的关键。目标检测算法对比如表 3 所示。

表 3 目标检测算法对比  
Table 3 Comparison of target detection algorithms

| 算法                            | 优势                                           | 需要改进的问题                                                                  |
|-------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| OBF 算法 <sup>[41]</sup>        | 在信号背景为高斯白噪声时能够获得最佳的检测性能。                     | 检测性能高度依赖于所选基函数是否准确匹配真实目标。对于非理想偶极子(如延展体、多个邻近目标)或复杂磁化情况,性能会下降,可能出现漏检或定位偏差。 |
| 基于噪声统计特性的检测算法 <sup>[42]</sup> | 熵准则不要求模型与数据之间具有很强的匹配关系,对模型失配和噪声特性变化具有更强的鲁棒性。 | 需要大量熵计算,计算量较大。不合适的优化算法,容易导致陷入局部极小值,导致漏报。                                 |
| 机器学习检测算法 <sup>[37]</sup>      | 通过训练具有大数据集的神经网络框架,可以同时实现目标检测和噪声检测。           | 需要大量的数据构建数据集。对硬件要求较高,目前难以应用于小型嵌入式系统。                                     |

1.4 目标定位算法

运动平台由于具有高机动性的优点,使其可以

通过抵近目标区域,开展往复扫测,进而通过载体过顶时间或者磁图信息获得目标位置<sup>[14-43]</sup>,其算法对

比如表4所示。

实际探测中为了对地磁梯度、环境时变干扰进行抑制,多数研究倾向于使用梯度或者张量系统开展定位研究。由于水下试验复杂,研究进展较慢,目前多以机载磁传感器对空气介质或土壤掩埋目标定位的研究为主。Wynn等<sup>[44]</sup>利用超导磁力仪阵列进行目标定位的研究,采用磁张量分

量的关系给出了静态目标位置的解析公式。Davis等<sup>[45]</sup>提出了基于希尔伯特变换的欧拉反卷积未爆弹定位方法,对噪声背景下的数据集进行了测试,并验证了方法的有效性。Birsan等<sup>[46]</sup>基于磁偶极子模型提出了线性独立函数的方式对水平向梯度场信息进行处理,估计目标物位置参数的方法。

表4 目标定位算法对比  
Table 4 Comparison of target localization algorithms

| 算法                            | 优势                                                     | 需要改进的问题                                               |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 磁偶极子模型定位方法 <sup>[44-46]</sup> | 定位精度高,不仅可以反演目标的位置,还可以反演出目标的磁矩矢量。非线性反演计算速度慢。            | 需要满足目标尺寸小,距离远的条件才可以看作为磁偶极子。对背景场变化和邻近干扰源非常敏感,需要很高的信噪比。 |
| 欧拉反褶积 <sup>[47-49]</sup>      | 对目标的先验知识要求较少,不受磁化方向的影响。使用张量数据,对背景场干扰不敏感。求解线性方程组,计算速度快。 | 定位精度往往低于磁偶极子模型定位方法。无法求解目标的磁矩及方向。存在多解性,需要进一步对解集进行判决。   |

尹刚等<sup>[47]</sup>提出了基于自适应模糊均值聚类的自动检测类未爆弹目标的方法,该磁异常反演方法可应用于估计多个未爆弹的初始位置。郑小平等<sup>[48]</sup>针对动平台数据质量较差,提出了一种采用多分辨率线性回归算法配合改进欧拉定位方法,提高了未爆弹定位精度。在4 m×4 m的区域,传感器阵列高度0.25 m,对直径5 cm铁球实测定位误差小于0.15 m。

动态载体平台可以通过抵近观测的方法获得目标所处的区域,但后续的排爆挖掘中要精确的位置坐标。如何确保观测信息能够准确映射在实际地理位置上是动平台磁探测系统设计的关键。磁探测系统扫测所关注的区域并绘制磁图,即可获取目标的大致位置信息<sup>[50]</sup>,但在测线稀疏、存在较大环境干扰的情况下并不能保证定位的精确度。因此,在已有信息基础上进一步研究高精度目标定位算法对未爆弹的挖掘、排爆指引具有重要的意义。

## 2 主动电磁探测技术

被动探测方法的激发场是地磁场,可以看作是均匀场,异常形态不受激发源的影响。在理论计算中,只需求解空间变量的拉普拉斯方程,场只是空间的函数,异常解释相对简单。

主动磁探测多采用人工偶极源,其激发强度较小,探测距离一般相对较近,工作效率稍低。该技术研究了电磁场的空间分布及电磁异常的频率特性,从而反演解释金属目标的电性与磁性。其对空间域和频率域的波动方程分别求解,相较于被动探测方法多了一个变量,增加了数据信息的丰富度,提高了目标分类能力。

主动磁探测技术的核心是电磁感应定律,其测量结果既取决于介质的电导率、磁导率,又取决于人工激发的交变电磁场源。如图3(a)所示,当发射线圈施加给定的变化的电流,将在线圈周围产生与变化电流同步变化的磁场,称为一次场。若周围存在高电导率的物体,该物体将被一次场激发,产生涡旋状的感应电流,称为涡流。涡流又在周围空间产生变化的磁场,称为二次场。当该物体是磁性体时,磁性体被磁化,增强了一次场,即在周围空间产生与一次场同步变化的二次场。通过测量二次场的空间分布和时间变化规律,即可了解物体的形状与导电性、导磁性,达到对该物体探测、分类、识别的目的<sup>[51]</sup>。

根据信号激励与处理方式的不同,主动磁探测分为采用低频电磁场检测的频率域电磁探测方法(frequency-domain electromagnetic methods, FEM)和将一次场信号激励时间与二次场信号采集时间分离的时间域电磁探测方法(transient electromagnetic methods, TEM)。主动探测方法的探测距离较短(1—3 m),因此只能用于较小区域的探测,但可以提供出色的识别、定位能力<sup>[7]</sup>。表5列举了国内外机构所研制的不同类型的水下主动磁探测装备。

### 2.1 频率域电磁探测方法

#### 2.1.1 探测原理

导电物体受到一次场激发形成涡流,相位相对于一次场落后90°,涡流产生感生磁场将反作用于涡流,形成互感电流,相位相对一次场落后180°。实际情况感生电流是涡流与互感电流相互往返作用的结果,即二次场由2部分组成:1)由所有感生电流叠加形成的与一次场相位相差90°的二次场虚部;2)由所

有互感电流叠加形成的与一次场相位相反的二次场实部。

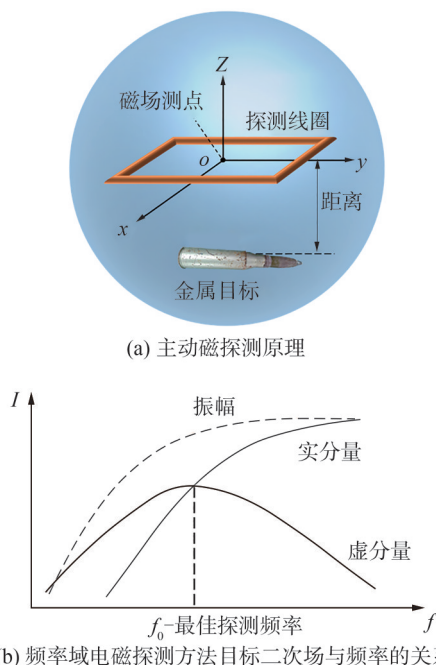


图3 主动磁探测原理及频率域电磁探测方法中目标二次场频率响应规律

Fig. 3 Principles of active electromagnetic detection and frequency response of target secondary field in frequency-domain electromagnetic method

表5 水下主动磁探测装备及应用领域  
Table 5 Underwater active magnetic detection equipments and application areas

| 产品名称                                  | 使用方式    | 探测能力                       |
|---------------------------------------|---------|----------------------------|
| VLBV-EM System <sup>[52]</sup>        | 频域电磁感应式 | 质量 28 kg 的银棒, 探测距离 2 m 以上  |
| Artemis Active System <sup>[53]</sup> | 频域电磁感应式 | 某海底电缆, 探测距离 5 m            |
| TSS440 <sup>[54]</sup>                | 时域电磁感应式 | 直径 15 cm 的铠装电缆, 探测距离 1.8 m |
| TSS660E <sup>[54]</sup>               | 时域电磁感应式 | 直径 15 cm 的铠装电缆, 探测距离 1.5 m |
| SubTEM ROV <sup>[55]</sup>            | 时域电磁感应式 | 直径 10 cm 的管道, 探测距离 0.86 m  |
| Flex-EM 3D EM Array <sup>[56]</sup>   | 时域电磁感应式 | 直径 6 cm 的未爆弹, 探测距离 45 cm   |
| MT-98 <sup>[57]</sup>                 | 电极化感应式  | 直径 12 mm 的海底电缆, 探测距离 1.7 m |

如图 3(b)所示,在激发频率很低时,二次场的虚部大于实部;随频率增加,虚部按一次方线性增加,实部按二次方增加;当频率继续增加时,由于实部与激发一次场反向,使虚部增加减缓,实部也响应减缓;当二次场虚部等于实部时,虚部达到极大值,此时为该导电物体的最佳频率;当频率继续增加时,二次场虚部逐渐减小,而实部缓慢增加,最后二次场虚部逐渐变为零,实部达到饱和,等于一次场<sup>[58]</sup>。

## 2.1.2 潜载频域电磁探测系统

频率域磁法在探测过程中,磁场持续激励,信号较强,相较于时域磁法更有利于在电磁噪声复杂的环境下提升探测效果<sup>[59]</sup>。美国赫罗纳大学开发了一种搭载于 ROV 与 AUV 的水下频率域探测系统 VLBV-EM System,采用多频数字阵列(multi-frequency digital array, MFDA)技术,系统由单个发射机和 3 个单轴(Z 向)差分接收机构成。这种多静态配置提供了对散射磁场在频域及空域上的分布测量。该系统目前同时发射 4 个频率,但可以在 0.4~70 kHz 发射和接收 8 个频率<sup>[52]</sup>。SMD 公司的 Artemis Active System 是一种主被动复合的电磁探测系统,主动模式下激发 3 kHz 的交变磁场,目标物在磁场的激励下产生感应磁场,其可以实现对 5 m 距离下海缆的探测、定位<sup>[53]</sup>。蒋泽坤等<sup>[60]</sup>结合海水中电磁场的衰减规律与水下目标的电磁响应规律,推导了针对水下小目标的频率域电磁探测方法的最优探测频段。基于串联谐振的单频点发射电路设计,研制了一套具有远距离探测能力的潜载电磁探测系统,如图 4 所示。该系统在海水介质中对直径 14 cm,长度 38 cm 的半掩埋铝管探测距离可达 1.5 m 以上。



图4 潜载频率域电磁探测系统  
Fig. 4 Submarine frequency-domain electromagnetic detection system

频率域电磁探测方法的硬件设计较为成熟,通过设计串联谐振电路可以提高发射线圈的辐射效率,激发更强的目标响应,但由于同时进行一次场与二次场的检测,会提升辐射噪声。通过合理的接收机设计可以降低一次场对接收信号的干扰<sup>[51]</sup>,如通过不同的收发空间布置或采用补偿线圈抵消接收端感知到的一次场。

## 2.1.3 频率域目标检测与识别方法

识别未爆弹是掩埋目标探测的核心,检测到疑似信号时,需要区分探测到的目标是未爆弹还是其他干扰物,对于未爆弹的挖掘、排除、引爆尤为重要。在以往的未爆物探测实践中,多达 95% 的疑似异常点为非未爆弹的虚警点,高达 70% 的清理费用被用于挖掘本可留在地底下的金属物体。无法区分未爆炸弹药与干扰物,以及由此产生的清理成本被美国

国防部称为“最紧迫的环境问题之一”。

Bell等<sup>[61]</sup>介绍了从靶场回收的各种惰性军械、军械碎片和废金属碎片的多轴电磁干扰响应进行综合测量的结果。使用最小二乘法获取极化张量的特征值,在只有几种不同类型军械的地点,如果能获得几个频率响应系数,并用该地点的材料进行训练,即可区分未爆弹和大部分杂波干扰。Norton等<sup>[62]</sup>将作为目标响应特征的磁极化张量的归一化特征值,作为方位不变的频谱特征,该特征值可以随深度归一化。对深度进行归一化处理后,使用L2准则作为拟合度量,比较未知物体得出的特征值与库特征值,实现对目标的分类,但缺点是需要从各个方向观测目标,这在实际应用中较难实现。Huang等<sup>[62]</sup>利用球体模型对孤立目标的宽带电磁感应数据进行反演,以确定其导电率、磁导率、半径和深度。通过该技术获得的几何参数非常接近真实值,无噪声数据的电参数正确率在百分之几以内。Hu等<sup>[63]</sup>采用盲源分离(blind source separation, BSS)理论,使用独立分量分析实现了多目标的特征分离,随后使用贝叶斯分类器跟踪分离过程,该方法有效实现了多个间隔较近目标的分类。Throckmorton等<sup>[64]</sup>采用独立分量分析(independent component analysis, ICA)技术从模拟电磁感应传感器数据获得的混合测量数据中恢复未观察到的物体特征,然后利用恢复的特征进行未爆炸弹药/杂波的判别,该算法在有限区域内增加干扰物的数量并不会降低性能。Fernandez等<sup>[65]</sup>使用Geophex公司的GEM-3D+手持式金属探测仪,基于接收三维矢量数据进行目标的定位和积分/平均处理,使用点偶极子模型和广义标准化激励方法对合成和测量数据进行建模,并提供鲁棒可靠的未爆弹分类能力。Tantum等<sup>[66]</sup>通过稀疏贝叶斯相关向量机方法(relevance vector machine, RVM),使用弛豫频率估计离散谱(discrete spectrum of relaxation frequencies, DSRF)的参数化基函数数目及对测量信号的相对贡献,构建DSRF信号模型,随后利用基函数参数作为特征对目标进行分类。该方法解决了传统DSRF方法需要获取模型顺序、求解器和正则化参数等初始条件的困难。Bijamov等<sup>[67]</sup>采用分层聚类方法,并结合高斯混合概率建模。该方法证实了机器学习技术可以实现高质量的未爆弹自动识别。

Yu等<sup>[68]</sup>提出了一种基于基准时间戳(fiducial timestamp, FIDTS)技术的频域电磁检测分布式相位测量方法,并对其误差进行了分析。其采用FPGA作为控制核心,无需改变硬件即可实现奈奎斯特带宽内任意频率相位的提取,通过实验证实了相位比幅度具有更高的灵敏度与精确度。Qin等<sup>[69]</sup>将OBF方法引申到主动磁探测中,提出了一种涡流磁场正交

基检测方法(eddy current magnetic field-orthonormal basis function, ECMF-OBF),可以有效表征主动磁探测中磁性目标的二次场信息,显著提高信噪比,在不同环境中均验证了该方法的性能。Khan等<sup>[70]</sup>将磁光谱与探地雷达结合,使用多传感器数据融合处理的方法进行金属和非金属目标物的分类。其在6个领域中提取了66个特征训练人工智能模型,增强了在复杂土壤环境中系统分类能力的鲁棒性<sup>[71]</sup>。对于水下目标探测,由于海水对高频电磁波的强衰减,探地雷达无法使用。与上述方法相似,使用磁法与声呐数据融合提高水下目标识别能力是另一重要的研究方向。

为了实现对目标的识别能力,往往需要对系统采用多频设计,主要分为2种设计方法:1)对不同工作频率选用不同配谐电容和不同发射线圈。该方法在单一载体上布置多个线圈增大了重量,提高了动平台的负担,不适合过多频率和任选频率的工作方式;2)采用单一的发射线圈,不配置谐振。且为减小电感量,发射线圈匝数较少,通过增加发射线圈面积及发射电流大小提高发射磁矩。该方法增加了系统功耗,降低了能量利用效率,便于同时激发更多的频率,提高了对目标的识别能力。可见,频率域探测系统对于兼顾小型化便于动平台搭载、对目标探测能力及对目标识别能力是十分困难的,有待进一步的研究。

## 2.2 时间域电磁探测方法

### 2.2.1 探测原理

时间域磁探测方法是一种利用探测目标与所处环境介质电阻率差异为基础进行探测的电磁方法。通常有电性源和磁性源2种发射源,电性源瞬变电磁法是以有限长接地导线为场源,在距场源中心一定距离处同时观测电、磁场参数的一种电磁探测方法;磁性源瞬变电磁法(即回线源瞬变电磁法)是在发射线圈中通以一定波形的电流,接收设备接收目标反馈的视电阻率信息<sup>[72]</sup>。其分支海洋瞬变电磁法因其电磁噪声低、电磁耦合强和效率高等特点被广泛关注<sup>[73]</sup>。

时间域电磁探测方法与频率域电磁探测方法物理本质相同,都来自电磁感应原理。不同的是频率域电磁探测方法激发的是连续正弦波电流,并在全时段测量,难以克服一次场的影响。时间域电磁探测方法激发的是脉冲电流,在发射机电流关断后,通过二次磁场随时间的衰减特性,检测目标物的有无以及材质、大小等物理特性。图5为时间域电磁探测的原理示意图,其探测能力受一次场激励电流的强度与关断时间的影响,对同一发射线圈,一次场激励电流越大,关断时间越短,探测能力越强。时间域

电磁探测接收端受一次场的影响较小,但是抗外界电磁干扰的能力较弱,该方法的一个特别的优势是能够很大程度上减少重度矿化土壤中包含的矿物干扰。

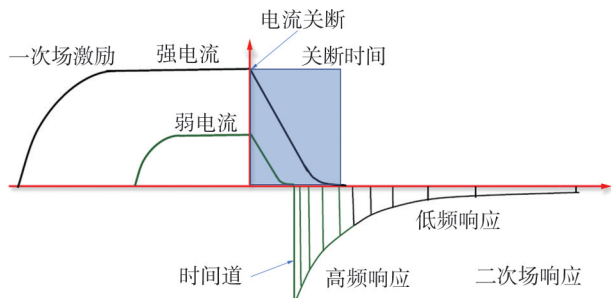


图5 时间域电磁探测方法原理示意

Fig. 5 Schematic principle of time-domain electromagnetic detection method

### 2.2.2 潜载时间域电磁探测系统

20世纪30年代,时间域电磁探测系统最早应用于地质勘探。美国Teledyne公司设计的TSS系列水下电磁探测系统已成为ROV平台搭载的行业标准。TSS440采用时域电磁感应探测方法,如图6所示,可以配合TSS350使用,抗干扰能力与定位能力得到了提升<sup>[74]</sup>,主要用于深海水下目标物的探测、定位工作。在应用过程中,系统会测量、显示和记录目标相对于ROV的位置,还有它的表面在海床中掩埋的深度。由于定位反演参数依赖于水深、盐度和均匀性,因此TSS440在使用时需要进行精确的校准<sup>[54]</sup>,其在1.5 m以内的探测距离对直径大于等于10 cm的目标具有很好的定位能力。Boskalis Hirdes公司开发了一种商用多分量TEM传感器(SubTEM ROV)。该传感器具有针对海洋环境的未爆炸弹药特定反演能力,其相对于TSS440尺寸更大,具有更多接收机以获得更高的检测范围及实现更高的空间分辨率。Seaview Systems公司<sup>[55]</sup>构建了具有足够稳定性、机动性和牵引力,但成本低廉的集成平台传感系统Flex-EM 3D EM Array。该系统在海浪和潮间带环境中成功探测埋在海底45 cm以下,直径在60~155 mm未爆弹。Tobias等<sup>[56]</sup>发表了TSS440与SubTEM-ROV在同一靶场的探测结果,SubTEM-ROV探测到了一些TSS440未发现的小尺寸异常目标,具有更强的探测能力及分辨率。

TSS系列的最新版本是TSS 660E,专为小型ROV设计,优先考虑尺寸和有效负载重量,将海底电子设备整合到一个更小的吊舱中,显著减少了系统的安装占地面积和有效负载。国外其他公司的水下磁探测产品相较于TSS系列占有市场份额较小,但相较于国内仍然处于领先地位。俄罗斯MT-98型AUV主动电磁探测阵列由4对电极组合的3对发

射-接收天线对构成,利用电势估计目标的存在概率,实现对目标的探测与定位<sup>[57]</sup>。

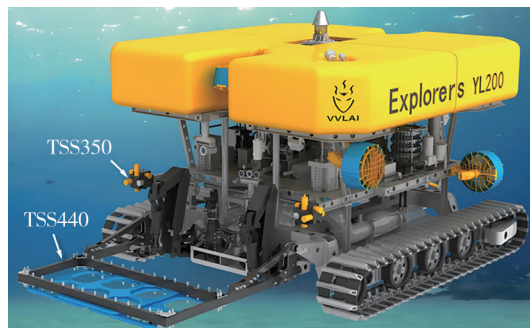


图6 大型水下时间域电磁探测系统TSS440

Fig. 6 Large underwater time-domain electromagnetic detection system TSS440

国内对于时域电磁探测系统的研究起步较晚,且多用于地质勘探应用,设备较为庞大。周逢道等<sup>[75]</sup>针对海洋瞬变电磁探测的发射系统、瞬变电磁技术用于海底浅部目标探测的基础理论及发射关键技术进行了相关研究<sup>[76]</sup>。樊伟等<sup>[77]</sup>通过对比国内外的多种电磁法发射机的发展现状和趋势,使用FPGA实现瞬变电磁法的发射端样机。王昊丰等<sup>[78]</sup>基于便携式瞬变电磁探测系统,对有限导体瞬变电磁时域特性以及响应反演等方面做了详细研究。王雪雯等<sup>[79]</sup>将时间通道提取策略直接嵌入到FPGA逻辑中,实现实时选通和基于帧的信号压缩,从而抑制硬件干扰,减少冗余数据,解决了传统TEM系统的关键限制,包括有限的实时信号处理能力和过多的存储需求。

时间域电磁探测系统由于激发的一次场多为极低频电磁场,故对海水具有更强的穿透性,且更适合于铁磁性目标的探测。然而时间域电磁法要求发射线圈和发射电流比较大,仪器设备一般比较笨重。且时域电磁探测方法需要在一次场信号完全关断后进行二次场信号的采集,导致对于超短早道的二次场观测实现困难,使得其对高电导率、近距离、浅层的金属目标探测能力较弱。目前对于时域电磁探测系统的研究关键在于通过发射电路的设计降低一次场的关断时间,并通过发射波形设计,提高目标电磁响应,通过时域信号衰减特征实现目标的分类、识别。

### 2.2.3 时间域目标检测与识别方法

时间域电磁法依赖于一次场关断后二次场的衰减规律,所以需要目标进行更加精确的建模。Song等<sup>[80]</sup>采用环境场建模为空气、海洋和沉积物组成的分层介质,研究了埋藏在海洋沉积物中的导电和磁性球体的电磁散射。通过数字正弦变换计算对阶跃波形的相应瞬态散射响应。数值结果表明,在

不同背景下计算的分散响应在后期具有接近相同的衰减。赵越等<sup>[81]</sup>针对掩埋的海洋沉积物中导电目标的电磁散射,使用矢量有限元技术计算水平电偶极子下三维背景和散射场的解,以此来实施三维水下UXO建模,并且设计了环路源配置拖曳装置,进行受控水下实验与仿真模型进行比较,介绍了TEM方法探测水下掩埋未爆弹的能力。Shubitidze等<sup>[82]</sup>通过分析、数值和实验研究结果表明,导电环境会在时域早期与频域高频段扭曲一次场和二次场。并且,随着目标和传感器之间距离的增加,目标的电磁干扰信号失真时间延后,失真频率降低。随后,其提出了圆柱坐标系下无条件时域有限差分(crank nicolson finite-difference time-domain, CN-FDTD)方法,与传统时域有限差分方法相比,在显示出良好的一致性的同时,实现更高的时间步长,并使用该方法研究了水-沉积物区域的模型电场和磁场分布,以加强水下未爆炸弹药目标的探测和分类能力<sup>[83]</sup>。Shubitidze等<sup>[84-85]</sup>利用无条件稳定的CN-FDTD方法在时域内解决了低频EMI问题,证明了该方法不仅对大时间步长是无条件稳定的,而且对非均匀时间步长也是无条件稳定。研究表明,均匀导电介质和空气-水-沉积物3层介质都会产生电磁响应,这些响应随导电率和目标与观测点之间的距离而变化。背景信号与电导性、铁磁性和非铁磁性圆柱体的响应之间的比较表明,背景信号在早期高于目标的响应。随着目标和观测点之间的距离增加,这些高背景信号移动到较晚的时间通道。Zhang等<sup>[86]</sup>拟合典型UXO和干扰目标的特征响应,将并比较自由空间中的UXO,分析了目标类型、测量距离和埋藏姿态对目标识别的影响。

近年来,机器学习技术的发展为目标分类、识别带来了突破,在获取了目标时域电磁响应规律后,建立数据库,达到对实测数据进行分类的目的。段世宏等<sup>[87]</sup>对球体模型和近似正演模型进行了分类敏感性分析。通过对比8种算法在基于材料分类和基于形状分类中的精度,发现拟合算法的结果对噪声水平非常敏感,神经网络算法的分类性能优于其他算法。

时间域电磁探测方法对目标的识别能力较弱,其识别机制主要依赖目标时域响应的时域衰减规律;该方法对信噪比要求较高,检测时通常需将探测系统固定于空间某一位置,在目标周边逐点采集数据,且目标信号需经过数十次以上的叠加平均处理,因此耗时显著,这使其在快速探测的应用场景中往往面临较大局限。如何提高时间域电磁探测系统的作业效率是未来研究的重点问题。

### 3 应用与发展展望

针对水下未爆弹对航行安全、海洋环境以及近岸设施造成的严重威胁,科研人员进行了大量水下无人探测技术的研究。由于传统声呐探测技术受限于复杂多变的海底环境,近年来水下无人电磁探测技术成为未爆弹搜探最有力的手段。目前水下未爆弹探测的主要难点在于:

1)远距离探测能力。海洋作为电磁场的良导体,导致了目标信号3次方以上的高衰减率,使得检测信噪比较低,目标探测距离较短。被动磁探测方法只能通过提高接收端传感器的灵敏度、降低平台噪声/传感器本底噪声干扰的方式提高探测能力。采用主动探测方法还可以提高一次场的发生功率,提高了目标的二次场响应,进而提高信噪比。

2)探测作业效率。平稳高效的潜航器平台是水下无人磁探测技术作业效率的关键。由于水下磁探测距离的限制,潜航器往往需要近底航行,杂乱的礁石将带来航行的危险性。开发具有自主避障航行的控制算法,提升水下未爆弹搜探的作业效率,并保证设备安全运行。

3)目标识别能力。为了克服陆上或水下对金属目标的识别开发了一个UXO特征数据库。科研人员不仅必须系统地记录给定传感器发现的每种危险目标的特征、传感器设置的详细信息以及发现它的环境,还必须记录误报特征的等效细节。通过人工智能的方法,进行给定信号的快速辨别,收集训练集,以便与实测信号进行比较。

水下未爆弹探测的未来发展趋势:

1)研制高灵敏度、低噪声、小尺寸的磁传感器。目前在水下磁探测领域广泛使用质子磁力仪、光泵磁力仪、磁通门传感器、磁阻传感器。但质子磁力仪与光泵磁力仪的测量带宽很窄,且光泵磁力仪存在测量盲区;磁通门传感器与磁阻传感器的噪声相对较高。超导量子干涉磁力仪(superconducting quantum interference magnetometer, SQUID)具备高灵敏度、低噪声、宽频带的特点,是目前的重要研究方向,但其尺寸大,且冷却要求高制约了其应用。小尺寸高温超导量子干涉磁力仪的研究及应用将是未来的必然发展趋势。

2)AUV水下探测集群。虽然针对水下未爆弹的探测,磁学方法具备很多得天独厚的优势,但是其探测范围较小,搜探效率低,不适合快速大面积的探测。采用智能编组的AUV集群搭载磁探测载荷可以快速覆盖广阔的搜探区域,减小测线间距,大幅提升对深埋或微弱目标的探测能力。

3)深度学习驱动的目标检测与分类方法。以往

的水下未爆弹清理作业中,假目标的清理耗费了庞大的成本。得益于人工智能技术的发展,利用深度学习或物理信息神经网络直接从数据快速反演目标的尺寸、大小、姿态、埋深、类型等信息成为目前研究的重点方向。

4)多源数据深度融合。开发更先进的多源数据融合算法,深度融合磁、电、声、光等多物理场数据,充分利用其互补信息,比如声学的水下远距离探测及定位能力,光学对目标形状的刻画,电学对目标物电导率的反演能力。利用数据融合算法,提升对于水下未爆弹探测的置信度和目标属性的反演精度,实现对目标的高精度探测、定位、识别。

通过广泛分析现阶段国内外研究现状可知,水下未爆弹无人电磁探测技术对于潜航器的操控、动平台的噪声干扰补偿、目标信号的识别都依赖于经验丰富的作业人员、信号处理人员,尚未实现真正的无人化,增加了设备的使用难度。开发服务于未爆弹搜探的潜航器自主航行控制算法、数据融合算法、水下磁干扰补偿器、目标识别器,真正实现针对水下未爆弹的潜航器自主无人搜探,并最终实现从广域搜索到精确定位、目标识别乃至自主处置的自动化闭环作业。

## 4 结论

1)水下未爆弹无人电磁探测技术已初步具备水下未爆弹搜探能力,但仍存在诸多不足。被动磁探测效率高,但无法探测非铁磁目标,且对小型金属目标识别能力有限;主动电磁探测可提供更丰富的目标识别信息,但在海水强衰减与动平台工况约束下难以兼顾远距离、小型化与高效率作业。

2)水下动平台磁干扰与姿态噪声补偿研究不足、浅海近底航行的自主避障与续航保障的工程难点制约对水下未爆弹的高效检测。

3)水下未爆弹种类复杂多样,面向目标识别的特征库样本获取困难,导致对目标识别能力不足,在假目标排除上浪费大量的时间与成本。

未来的研究应面向工程化应用,重点推进高灵敏度低噪声小型传感器与载荷研制,结合深度学习与多源数据融合(磁/声/光/电)提升探测置信度与识别精度,构造丰富的样本数据库,并与自主航行控制算法协同,实现“探测-定位-识别-处置”的闭环无人化作业流程。随着科技的进步和研究的深入,水下未爆弹无人电磁探测技术将不断发展,为国家水下安全做出更大的贡献。

## 参考文献:

[1] 程锦房, 张伽伟, 姜润翔, 等. 水下电磁探测技术的发

展现状[J]. 数字海洋与水下攻防, 2019, 2(4): 45-49.

CHENG Jinfang, ZHANG Jiawei, JIANG Runxiang, et al. Development status of underwater electromagnetic detection technology[J]. Digital ocean & underwater warfare, 2019, 2(4): 45-49.

[2] 徐天洋. 基于多电极的水下主动电场探测系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.

XU Tianyang. Research on underwater active electric field detection system based on multi-electrode [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.

[3] 黄海宁, 李宇. 水声目标探测技术研究现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 264-271.

HUANG Haining, LI Yu. Underwater acoustic detection: current status and future trends [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 264-271.

[4] 刘锴滔, 柳稼航. 海底主动光学探测影像亮度校正与色彩恢复[J]. 中国光学, 2022, 15(4): 689.

LIU Rongtao, LIU Jiahang. Brightness correction and color restoration of seabed image obtained by active optical detection[J]. Chinese journal of optics, 2022, 15(4): 689.

[5] SCHULTZ G, SHUBIDITZE F, MILLER J, et al. Active source electromagnetic methods for marine munitions [J]. Detection and sensing of mines, explosive objects, and obscured targets XVI, 2011, 8017: 80170U.

[6] 刘梦婷, 于盛齐, 谢志敏, 等. 海底掩埋目标声探测与识别关键技术进展[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(5): 910-921.

LIU Mengting, YU Shengqi, XIE Zhimin, et al. Progress on key technologies for acoustic detection and identification of submarine-buried targets[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(5): 910-921.

[7] RICHARDSON M D, TULEY M T. SERDP/ESTCP munitions response program: a summary of progress and a way forward for underwater remediation of unexploded ordnance (UXO)[C]//OCEANS 2022, Hampton Roads. Piscataway, NJ, 2022: 1-6.

[8] 闫伟. 基于UUV的水下目标非声探测技术研究综述[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(12): 10-13, 43.

YAN Yi. The overview study of non-acoustic detection technology base on UUV application in searching target underwater [J]. Ship science and technology, 2017, 39(12): 10-13, 43.

[9] 万成彪. 磁异信号检测理论与方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.

WAN Chengbiao. Investigations on the theory and method of magnetic anomaly detection [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.

[10] 年永吉. SeaSPY磁力仪在南海海底光缆检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(5): 566-573.

NIAN Yongji. Application of SeaSPY marine magnetometer to cable detection in South China Sea [J]. Chinese journal of engineering geophysics, 2010, 7(5): 566-573.

[11] SULZBERGER G, BONO J, MANLEY R J, et al. Hunting sea mines with UUV-based magnetic and electro-optic

- sensors[C]//OCEANS 2009. Piscataway, NJ, 2010: 1-5.
- [12] PAGE B R, LAMBERT R, MAHMOUDIAN N, et al. Compact quantum magnetometer system on an agile underwater glider[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1092.
- [13] SEIDEL M, FREY T, GREINERT J. Underwater UXO detection using magnetometry on hovering AUVs[J]. *Journal of field robotics*, 2023, 40(4): 848-861.
- [14] 沈莹, 杨晓宝, 王嘉增, 等. 浅海未爆弹磁异常探测和定位技术[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2023, 6(5): 534-541.
- SHEN Ying, YANG Xiaobao, WANG Jiazeng, et al. Magnetic anomaly detection and localization technology of unexploded ordnance in shallow water[J]. *Digital ocean and underwater warfare*, 2023, 6(5): 534-541.
- [15] WANG Zhen, LIU Shengwei, GUO Yanguo, et al. Joint use of scalar and vector magnetometers for underwater magnetic target localization[J]. *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 2023, 20: 7505305.
- [16] PENG Lei. Design and implementation of ROV submarine cable inspection decision support system[J]. *IOP conference series: earth and environmental science*, 2021, 809(1): 012003.
- [17] KAMPMEIER M, GREINERT J, BECK A, et al. Mine monitoring in the German Baltic Sea 2020; Dumped munition monitoring[J]. *ALKOR - Reports*, 2021, 4:7-11.
- [18] TSINGTAO H T. Underwater intelligent magnetic detection system of FRU200-24 [EB/OL]. Accessed: May 2025. Available: <https://www.qd-hyh-tech.com>.
- [19] SHA Zitong, HU Shan, YANG Shaojian, et al. Interference cancellation and wavelet denoising for magnetometers in electric work-class ROVs[J]. *IEEE sensors journal*, 2023, 23(22): 27438-27449.
- [20] 刘首善, 唐林牧, 许庆丰, 等. 航磁补偿技术及补偿质量的评价方法[J]. *海军航空工程学院学报*, 2016, 31(6): 641-647.
- LIU Shoushan, TANG Linmu, XU Qingfeng, et al. Investigation of aeromagnetic compensation technology and performance assessment method[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2016, 31(6): 641-647.
- [21] 孟庆奎, 周德文, 高维, 等. 国内外航磁补偿技术历史与展望[J]. *物探与化探*, 2017, 41(4): 694-699.
- MENG Qingkui, ZHOU Dewen, GAO Wei, et al. History and prospects of aeromagnetic compensation technologies used in China and abroad[J]. *Geophysical and geochemical exploration*, 2017, 41(4): 694-699.
- [22] LELIAK P. Identification and evaluation of magnetic-field sources of magnetic airborne detector equipped aircraft[J]. *IRE transactions on aerospace and navigational electronics*, 1961, ANE-8(3): 95-105.
- [23] BICKEL S H. Small signal compensation of magnetic fields resulting from aircraft maneuvers[J]. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 1979, AES-15(4): 518-525.
- [24] NORIEGA G. Performance measures in aeromagnetic compensation[J]. *The leading edge*, 2011, 30(10): 1122-1127.
- [25] BRONNER A, MUNSCHY M, SAUTER D, et al. Deep-tow 3C magnetic measurement: Solutions for calibration and interpretation[J]. *Geophysics*, 2013, 78(3): J15-J23.
- [26] WU Tao, TAO Chunhui, ZHANG Jinhui, et al. Correction of tri-axial magnetometer interference caused by an autonomous underwater vehicle near-bottom platform[J]. *Ocean engineering*, 2018, 160: 68-77.
- [27] OEHLER J F, SCHIFANO V, MARQUIS G, et al. Processing of unmanned underwater vehicle vector magnetometer data[J]. *Geophysical prospecting*, 2024, 72(8): 2902-2918.
- [28] WILLIAMS P M. Aeromagnetic compensation using neural networks[J]. *Neural computing & applications*, 1993, 1(3): 207-214.
- [29] NERRISE F, SOSANYA A S, NEARY P. Physics-informed calibration of aeromagnetic compensation in magnetic navigation systems using liquid time-constant networks[C]//37th annual conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), New Orleans, 2024: 2401.09631.
- [30] XU Yujing, LIU Zhongyan, ZHANG Qi, et al. Interference model guided neural network for aeromagnetic compensation[J]. *IEEE sensors journal*, 2024, 24(8): 12266-12275.
- [31] PRAGA-ALEJO R J, TORRES-TREVIO L M, PIA-MONARREZ M R. Optimal determination of k constant of ridge regression using a simple genetic algorithm[C]//2008 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA' 08). Cuernavaca, Morelos, Mexico, 2008: 39-44.
- [32] GINZBURG B, FRUMKIS L, KAPLAN B Z. Processing of magnetic scalar gradiometer signals using orthonormalized functions[J]. *Sensors and actuators A: physical*, 2002, 102(1/2): 67-75.
- [33] SHEINKER A, SHKALIM A, SALOMONSKI N, et al. Processing of a scalar magnetometer signal contaminated by  $\alpha$  noise[J]. *Sensors and actuators A: Physical*, 2007, 138(1): 105-111.
- [34] 陈敏, 潘仲明. 磁异常信号自适应检测算法[J]. *传感技术学报*, 2014, 27(7): 916-921.
- CHEN Min, PAN Zhongming. Adaptive detecting algorithm for magnetic anomaly signal[J]. *Chinese journal of sensors and actuators*, 2014, 27(7): 916-921.
- [35] WANG Jiazeng, JIANG Zekun, GAO Junqi, et al. Frequency characteristics analysis for magnetic anomaly detection[J]. *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 2022, 19: 8007505.
- [36] 张坚, 林春生, 邓鹏, 等. 非高斯背景噪声下的微弱磁异常信号检测算法[J]. *海军工程大学学报*, 2011, 23(4): 22-26.

- ZHANG Jian, LIN Chunsheng, DENG Peng, et al. Detection of weak magnetic anomaly signal in non-Gaussian noise background[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2011, 23(4): 22-26.
- [37] WANG Tao, LI Jutao, LIU Naizheng, et al. A new data processing method for magnetic anomaly detection and localization based on 2-D orthonormal basis functions[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2023, 61: 5912011.
- [38] 徐磊, 张志强, 林朋飞, 等. 磁异常检测方法研究现状及发展趋势[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2022, 5(1): 66-72.
- XU Lei, ZHANG Zhiqiang, LIN Pengfei, et al. Research status and development trend of detection method for magnetic anomaly[J]. *Digital ocean and underwater warfare*, 2022, 5(1): 66-72.
- [39] SHEINKER A, GINZBURG B, SALOMONSKI N, et al. Magnetic anomaly detection using high-order crossing method[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2011, 50(4): 1095-1103.
- [40] MCGINNITY C, KOLSTER M E, DØSSING A. Towards automated target picking in scalar magnetic unexploded ordnance surveys: an unsupervised machine learning approach for defining inversion priors[J]. *Remote sensing*, 2024, 16(3): 507.
- [41] ROIGNANT T, LE JOSSE N, BOUDRAA A, et al. Magnetic anomaly detection using noise-optimized orthonormalized functions on dual magnetometric sensor signals [C]//2024 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO). Piscataway, NJ, 2024: 2382-2386.
- [42] SHEINKER A, SALOMONSKI N, GINZBURG B, et al. Magnetic anomaly detection using entropy filter[J]. *Measurement science and technology*, 2008, 19(4): 045205.
- [43] MUNSCHY M, BOULANGER D, ULRICH P, et al. Magnetic mapping for the detection and characterization of UXO: Use of multi-sensor fluxgate 3-axis magnetometers and methods of interpretation[J]. *Journal of applied geophysics*, 2007, 61(3/4): 168-183.
- [44] WYNN W, FRAHM C, CARROLL P, et al. Advanced superconducting gradiometer/Magnetometer arrays and a novel signal processing technique[J]. *IEEE transactions on magnetics*, 1975, 11(2): 701-707.
- [45] DAVIS K, LI Yaoguo, NABIGHIAN M. Automatic detection of UXO magnetic anomalies using extended euler deconvolution[J]. *Geophysics*, 2010, 75(3): G13-G20.
- [46] BIRSAN M. Inversion of magnetic dipole parameters using a scalar field gradiometer[J]. *IEEE sensors journal*, 2021, 21(6): 7434-7438.
- [47] YIN Gang, ZHANG Yingtang, FAN Hongbo, et al. Automatic detection of multiple UXO-like targets using magnetic anomaly inversion and self-adaptive fuzzy C-means clustering[J]. *Exploration geophysics*, 2017, 48(1): 67-75.
- [48] ZHENG Xiaoping, TIAN Yichen, WANG Bin. A magnetic gradient tensor based method for UXO detection on movable platform[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2023, 61: 5905709.
- [49] 金煌煌. 基于磁异常探测的水下目标定位与反演技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
- JIN Huanghuang. Underwater target localization and inversion technology based on magnetic anomaly detection[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.
- [50] 刘荣林. 海洋磁力仪在某近岸海域未爆弹探测中的应用[J]. *海洋测绘*, 2021, 41(4): 48-52.
- LIU Ronglin. Application of marine magnetometer in detection of unexploded bombs in a coastal area[J]. *Hydrographic surveying and charting*, 2021, 41(4): 48-52.
- [51] JIANG Zekun, GAO Junqi, WANG Jiazeng, et al. A novel orthogonal electromagnetic sensing method for metal detection[J]. *IEEE sensors journal*, 2023, 23(17): 19205-19210.
- [52] SCHULTZ G, KERANEN J, GLEASON A, et al. Littoral seafloor sensing and characterization using marine electromagnetics, optical imagery, and remotely and autonomously operated platforms [C]//OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington. Piscataway, NJ, 2016: 1-7.
- [53] BANCROFT J. Advances in underwater robotic inspection [C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi, United Arab Emirates. SPE, 2024: D031S115R003.
- [54] ZHANG Jialei, XIANG Xianbo, LI Weijia. Advances in marine intelligent electromagnetic detection system, technology, and applications: a review[J]. *IEEE sensors journal*, 2023, 23(5): 4312-4326.
- [55] SCHULTZ G, KERANEN J, BASSANI C, et al. Littoral applications of advanced 3D marine electromagnetics from remotely and autonomously operated platforms: Infrastructure and hazard detection and characterization [C]//OCEANS 2017-Aberdeen. Piscataway, NJ, 2017: 1-7.
- [56] KULGEMEYER T, SCHWARTZ M, BILLINGS SD. Test of a submarine transient electromagnetic sensor for UXO classification by remotely operated vehicles (SubTEM-ROV)[C]//UACE2019-Conference Proceedings. Hersonisos, Crete, Greece. 2019: 437-442.
- [57] KUKARSKI A K, PAVIN A M. Using of electromagnetic searcher for inspection of metallic cable by means of AUV [C]//OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean. Piscataway, NJ, 2008: 1-5.
- [58] 王卫平. 频率域航空电磁法及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- WANG Weiping. Frequency domain airborne electromagnetic method and its application[M]. Beijing: Geoscience Press, 2011.
- [59] 张嘉霖. 拖曳式频率域电磁法收录系统关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- ZHANG Jialin. Research on key technologies of the recording system in towed frequency-domain electromagnetic sys-

- tem[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [60] JIANG Zekun, GAO Junqi, SHEN Ying, et al. Optimal frequency design of marine electromagnetic detection system for small underwater targets[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2025, 63: 4212109.
- [61] BELL T H, BARROW B J, MILLER J T. Subsurface discrimination using electromagnetic induction sensors[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2001, 39(6): 1286-1293.
- [62] NORTON S J, WON I J. Identification of buried unexploded ordnance from broadband electromagnetic induction data[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2001, 39(10): 2253-2261.
- [63] HU Wei, TANTUM S L, COLLINS L M. EMI-based classification of multiple closely spaced subsurface objects *via* independent component analysis[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2004, 42(11): 2544-2554.
- [64] THROCKMORTON C S, TANTUM S L, TAN Yingyi, et al. Independent component analysis for UXO detection in highly cluttered environments[J]. Journal of applied geophysics, 2007, 61(3/4): 304-317.
- [65] FERNÁNDEZ J P, BARROWES B, O'NEILL K, et al. A vector handheld frequency-domain sensor for UXO identification[J]. Detection and sensing of mines, explosive objects, and obscured targets XIV, 2009, 7303: 73030W.
- [66] TANTUM S L, SCOTT W R, MORTON K D, et al. Target classification and identification using sparse model representations of frequency-domain electromagnetic induction sensor data[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2013, 51(5): 2689-2706.
- [67] BIJAMOV A, FERNÁNDEZ J P, BARROWES B E, et al. Camp butner live-site UXO classification using hierarchical clustering and Gaussian mixture modeling[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2014, 52(8): 5218-5229.
- [68] YU Shengbao, ZHANG Jialin, WEI Yiming, et al. A distributed phase measurement method of frequency-domain electromagnetic detection[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2021, 70: 3000711.
- [69] QIN Yijie, LI Keyan, ZHANG Wenting, et al. Active magnetic detection using eddy current magnetic field orthonormal basis function[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2022, 71: 6003711.
- [70] BALASURIYA A, URA T. Multi-sensor fusion for autonomous underwater cable tracking [C]//Oceans '99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings. Piscataway, NJ, 2002: 209-215.
- [71] KHAN M U, AHMAD K M, KHAN W R, et al. Multi-sensor fusion for remote sensing of metallic and non-metallic object classification in complex soil environments and at different depths[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2024, 62: 1001113.
- [72] 王兴春, 智庆全, 张杰, 等. 瞬变电磁法在雄安新区地下水调查中的应用[J]. 地球科学, 2023, 48(11): 4243-4255.
- WANG Xingchun, ZHI Qingquan, ZHANG Jie, et al. Application of transient electromagnetic method in investigation of underground water in Xiongan New Area[J]. Earth science, 2023, 48(11): 4243-4255.
- [73] 赵越, 孙怀凤, 刘佳, 等. 浅海磁性源瞬变电磁探测技术及其应用研究[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(6): 2768-2777.
- ZHAO Yue, SUN Huaifeng, LIU Jia, et al. Technology of shallow sea magnetic sources TEM detection and its application[J]. Progress in geophysics, 2023, 38(6): 2768-2777.
- [74] CHO G R, LEE M J, KANG H, et al. Evaluation of underwater cable burying ROV through sea trial at East Sea [J]. IFAC-papersonline, 2020, 53(2): 9658-9663.
- [75] 周逢道, 韩思雨, 綦振伟, 等. 基于FPGA+DSP的浅地表频域电磁探测数字处理系统[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(10): 94-101.
- ZHOU Fengdao, HAN Siyu, QI ZhenWei, et al. Digital processing system for shallow surface frequency-domain electromagnetic detection based on FPGA+DSP[J]. Journal of Hunan University (natural science edition), 2016, 43(10): 94-101.
- [76] JIANG Zhihai, LIU Shucui, MALEKIAN R. Analysis of a whole-space transient electromagnetic field in 2.5-dimensional FDTD geoelectric modeling [J]. IEEE access, 2017, 5: 18707-18714.
- [77] 樊伟. 基于FPGA的电磁发射机的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- FAN Wei. Development of electromagnetic transmitter based on FPGA[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [78] 王昊丰. 便携式瞬变电磁未爆弹探测系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- WANG Haofeng. Research on portable transient electromagnetic system for unexploded ordnance detection [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [79] WANG X, GAO J, JIANG Z, et al. Compact transient electromagnetic system for detecting nonferromagnetic metal targets on underwater mobile platforms [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2026, 75: 1-11.
- [80] SONG Linping, BILLINGS S D, PASION L R, et al. Transient electromagnetic scattering of a metallic object buried in underwater sediments [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2016, 54(2): 1091-1102.
- [81] ZHAO Yue, XU Feng, LIU Jia. Transient electromagnetic detection of unexploded ordnance buried in underwater sediments[C]//Oceans 2018 MTS/IEEE Charleston. Piscataway, NJ, 2019: 1-5.
- [82] NEILL K, SHUBITIDZE F, BARROWES B E, et al. Accounting for the influence of salt water in the physics required for processing underwater UXO EMI signals [C]//Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and

- Obscured Targets XXIII. Orlando, 2018: 25.
- [83] SHUBITIDZE T, BARROWES B E, CHAPMAN E, et al. The crank-Nicolson FDTD method in cylindrical coordinates and its application to underwater UXO detection and classification problems [C]//2018 XXIIIrd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPEd). Piscataway, NJ, 2018: 1-4.
- [84] SHUBITIDZE F, BARROWES B E, SHAMATAVA I. EMI sensing for underwater metallic targets detection and classification [C]//Oceans 2019-Marseille. Piscataway, NJ, 2019: 1-10.
- [85] SHUBITIDZE F, BARROWES B E, O'NEILL K. Investigating time domain EMI signals diffusion in a conducting environment for UXO detection and classification [C]//Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXIV. Orlando, 2019: 32.
- [86] ZHANG Luxing, GAO Huotao, DU Jun, et al. Detecting the transient electromagnetic characteristic response of unexploded ordnance buried in the seafloor [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2024, 62: 2004116.
- [87] DUAN Shihong, LI Yue, WAN Yadong, et al. Sensitivity analysis and classification algorithms comparison for underground target detection [J]. IEEE access, 2019, 7: 116227-116246.

### 本文引用格式:

蒋泽坤,高俊奇,沈莹,等.水下未爆弹无人电磁探测装备研究现状与展望[J].哈尔滨工程大学学报,2026,47(4):914-928.

JIANG Zekun, GAO Junqi, SHEN Ying, et al. Research status and prospects of underwater unexploded ordnance detection using unmanned electromagnetic systems [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2026, 47(4): 914-928.

(上接第 769 页)

- [27] NGAN K N, LEONG K S, SINGH H. Adaptive cosine transform coding of images in perceptual domain [J]. IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing, 1989, 37(11): 1743-1750.
- [28] NILL N. A visual model weighted cosine transform for image compression and quality assessment [J]. IEEE transactions on communications, 1985, 33(6): 551-557.
- [29] RAJESH R, DARAK S J, JAIN A, et al. Hardware-software co-design of statistical and deep-learning frameworks for wideband sensing on zynq system on chip [J]. IEEE transactions on very large scale integration (VLSI) systems, 2023, 31(1): 79-89.
- [30] SHI Gang, WANG Xianglong, OUYANG Yichen, et al. A spatio-temporal video denoising co-processor with adaptive codec [J]. IEEE Transactions on circuits and systems I: Regular papers, 2023, 70(11): 4223-4234.

### 本文引用格式:

刘祖延,周天,陈宝伟,等.基于帧内压缩的三维图像声呐自适应压缩方法[J].哈尔滨工程大学学报,2026,47(4):760-769,928.

LIU Zuyan, ZHOU Tian, CHEN Baowei, et al. An adaptive compression method for 3D image sonar based on intra-frame compression [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2026, 47(4): 760-769, 928.