# doi: 10.11720/wtyht.2024.0144

第48卷第6期

2024年12月

巩奕轩,姜凯,高敬语,等.海底光泵磁力仪研制[J].物探与化探,2024,48(6):1498-1506.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0144 Gong Y X, Jiang K, Gao J Y, et al. Development of submarine optically pumped magnetometer[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2024,48 (6):1498-1506.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0144

# 海底光泵磁力仪研制

# 巩奕轩1,姜凯1,高敬语2,朱万华2,陈凯1

(1.中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,北京 100083;2.中国科学院 空天信息创新研 究院,北京 100094)

**摘要:**自主水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)搭载磁力仪开展水下目标磁异常探测,可进行长时间、大范围连续采样,具有隐蔽、高效、实用性高、应用范围广泛、机动性强、续航能力强的优势。为提升其测量精度,需要用海底同步观测的磁场数据作为参考,以抵消磁场环境噪声。为此,开发海底光泵磁力仪,为 AUV 磁异常探测数据处理提供参考。海底光泵磁力仪由磁场测量单元和水声释放单元组成,具备海底磁总场高精度自容采集、海底水声释放回收能力。磁场测量单元由光泵探头、电子学单元、计数器、电池包、尼龙承压舱等组成;水声释放单元由水声换能器、水声通讯板、电腐蚀脱钩器、水泥块、浮力块、框架等组成。重点解决了小型化、自容采集、水声通讯等技术难题。2022年于青岛近海海域开展磁异常探测试验,测试结果验证了海底光泵磁力仪的海底磁场自容采集、释放回收功能,为水下目标探测提供了有效参考数据。

关键词:水下目标磁异常探测;光泵磁力仪;海底磁场观测;水声释放

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2024)06-1498-09

# 0 引言

水下目标探测技术一直是世界各国的热点研究 方向,随着先进消声技术的不断进步,传统声纳探测 手段遇到瓶颈<sup>[1]</sup>。非声探测技术提供了水下目标 探测的新思路,现有的非声探测技术,如磁异常探 测、激光探测、合成孔径雷达探测、电场探测和尾迹 探测等正在加速研究,其中磁异常探测是比较成熟 的非声探测方法之一<sup>[2]</sup>。水下目标大量使用铁磁 材料,在地磁场或外加磁场的作用下会发生磁化,造 成磁场异常现象<sup>[3]</sup>。磁探测可以通过检测由水下 目标导致的磁场异常,精准锁定、跟踪水下目标,具 有良好的探测效果<sup>[2]</sup>,在沉船、水雷、海底电缆和潜 艇探测中得到了广泛应用<sup>[4]</sup>。

20世纪 50年代末期,世界上第一台真正意义 上的自主水下航行器系统平台"SPURV"在美国华 盛顿大学问世,主要用于水文调查。美国伍兹霍尔

海洋研究所研制的"REMUS"系列 AUV,主要用于 水雷侦查以及海底资源勘查[5-6]。美国海军研究生 院和金枪鱼机器人技术公司合作开发的"Bluefin" 系列 AUV 是现阶段技术较为成熟的 AUV 系统平 台,已装备于美国海军,最大潜水深度达到4500m, 搭载了侧扫声呐、合成孔径声呐、多波束声呐等多种 探测传感器,为水下环境的感知理解和智能决策提 供原始数据支撑[7],在水雷探测、海洋环境情报收 集和海底探测领域均有成功应用。挪威 Kongsberg 公司和挪威国防研究机构合作研制的"HUGIN"系 列 AUV, 广泛应用于海上石油设备和海底电缆管线 检测,以及海洋科学调查<sup>[8]</sup>。英国南安普敦国家中 心设计了"Autosub"系列 AUV 并成功执行了 200 余 次的海洋科学调查任务<sup>[9]</sup>。日本东京大学在"Rone"AUV平台的基础上研制的"r2D4"AUV 搭载了 多种传感器,在3D海底地形构造观察、热液喷口区 域的科学考察等作业任务中扮演重要角色<sup>[10]</sup>。

我国于 20 世纪 90 年代开始研制 AUV 系统平

收稿日期: 2024-04-01; 修回日期: 2024-10-14

**基金项目**:国家高技术研究发展计划项目(2022YFC2807900、2016YFC0303100);国家自然科学基金项目(42174081) 第一作者:巩奕轩(1998-),女,博士研究生,主要从事地球物理仪器开发及应用工作。Email:gyxcugb@163.com

通讯作者:陈凯(1984-),男,副教授,博士生导师,主要从事海洋电磁仪器开发及应用工作。Email:ck@cugb.edu.cn

台,经过30年的潜心研究,先后研发出一系列的 AUV 装备产品,并取得了在大深度、长航程等技术 指标上的突破,有力地支撑了海洋环境监测、海底资 源探测以及海洋安全防卫等领域的发展。以中国科 学院沈阳自动化研究所、哈尔滨工程大学、中船重工 710研究所等为代表的科研院校是我国具有代表性 的较早开展 AUV 系统研究的单位。在项目的支撑 下研发了一系列的 AUV 平台,最大下潜深度达到 11 000 m,为海洋生物学、海洋地质等学科提供了丰 富的海洋环境数据,强有力地促进了这些学科的发 展。具有代表性的如"潜龙"系列潜水器。"潜龙一 号"AUV 是我国第一台实用化的深海 AUV.下潜深 度达到 6 000 m,自 2013 年起多次承担多金属结核 区域的探测任务,是我国海洋科考调查船配套的成 熟装备。"潜龙二号"AUV 在"潜龙一号"AUV 的基 础上进行了优化,具有非回转体立扁水动力外形,其 目的在于使 AUV 适应西南印度洋热液区复杂地形 作业的需要。

AUV 机动性强,具有可进行长时间、大范围连续采样的特点<sup>[11]</sup>。海底 AUV 因主要在海底作业, 技术上需要满足 3 个方面的要求:一是具有适应海 底驻留的本体结构,二是具备较强的机敏性,三是需 要解决海底复杂环境下的水声通信导航问题。此 外,由于海底 AUV 需要实现海底驻留,需要为海底 AUV 提供一个可供充电和数据回传的水下基站,进 而需要解决水下接驳关键技术。还有一个指标对提 升 AUV 的性能尤为重要,就是 AUV 的搭载能力。 由于 AUV 是用于海洋观测、探测的移动平台,能够 搭载的传感器载荷的体积与重量,是决定 AUV 实用 性的重要指标<sup>[12]</sup>。

为提高海洋数据采集的质量和预测海洋环境特 征的能力,AUV水下作业需要海底基站作为参考来 评估磁场环境噪声。现有的高精度磁力仪主要包括 磁通门磁力仪(fluxgate magnetometer)、超导量子干 涉仪(superconducting quantum interference device, SQUID)、质子旋进磁力仪(proton precession magnetometer, PPM)、光泵磁力仪(optically pumped magnetometer, OPM)等<sup>[13-15]</sup>。目前使用的海底基站主 要是 Overhauser 磁力仪,它是一种基于动态核极化 效应测量总磁场的标量磁力仪。GSM-19 Overhauser 磁力仪灵敏度小于 0.015 nT,绝对精度优于0.1 nT, 带宽为 15~30 kHz,梯度容限优于 10 000 nT/m<sup>[16]</sup>, 功耗较低且没有死区问题,但采样率较低。Cs-3 高 精度铯光泵磁力仪灵敏度小于 0.000 6 nT,绝对精 度优于 2.5 nT,带宽只受磁力仪所采用的处理器限 制,梯度容限优于 40 000 nT/m<sup>[17]</sup>,功耗较高且死区 无法消除,采样率较高。Overhauser 磁力仪与铯光 泵磁力仪相比的局限性表现在灵敏度低、带宽窄,适 用的频率范围有限、采样率低、梯度容忍度小等方 面<sup>[18]</sup>。综合对比灵敏度、精度、带宽、能耗、成本等 技术指标,选择光泵磁力仪作为 AUV 载荷。为提升 AUV 水下作业的测量精度,需要海底同步观测的磁 场数据作为参考,以抵消磁场环境噪声。为此,开发 海底光泵磁力仪,获取地磁环境背景噪声,为 AUV 磁异探测数据处理提供参考。所研制的海底光泵磁 力仪由磁场测量单元和水声释放单元两部分组成, 具备海底磁总场高精度自容采集能力,并具备海底 水声释放回收能力。重点解决了小型化、自容采集、 水声通讯等技术难题。

# 1 总体设计

综合稳定可靠性、测量精度、功耗、灵敏度、成本 等因素,海底光泵磁力仪由磁场测量与水声释放两 部分组成。其中,磁场测量功能主要由光泵探头、电 子学单元、计数器和电池舱等实现。光泵探头用于 实现工作原子在待测外磁场中的光泵浦作用和磁共 振作用,将对赛曼子能级间隔跃迁频率的测量转换 为对投射光信号的探测;电子学单元的作用是检测 光信号的幅值、相位和频率信息,然后通过反馈回路 控制射频磁场的变化频率使之稳定在共振点;计数 器对驱动电路输出的信号进行测频、计数、存储:电 池舱为光泵磁力仪提供电能。水声释放功能主要由 换能器、水声通讯板和电腐蚀脱钩器等实现。换能 器将水声信号与电信号相互转换:电腐蚀脱钩器区 别于机械声学释放器,借助电化学原理将熔断实现 脱钩释放;水声通讯板完成换能器对海底仪器的命 令解析与编码大功率发送。

海底光泵磁力仪硬件原理如图 1 所示,硬件包 括电子舱、电池舱、换能器和电腐蚀脱钩器等。电子 舱内置光泵探头、电子学单元、计数器、水声通讯板 等。电池舱为光泵计数器和水声通讯板提供电能。

图 2 为海底光泵磁力仪电子舱内部结构,包括 光泵探头、电子学单元、计数电路、水声通讯板等。 为减小电子学单元对探头的电磁干扰,光泵探头拟 垂直安装于框架的顶部,远离电子学单元。

2 结构设计

结合水下作业环境和光泵磁力仪工作特征,从



Fig.1 Hardware schematic of submarine optical pump magnetometer



图 2 海底光泵磁力仪电子舱内结构示意 Fig.2 Schematic diagram of the structure inside the electronic

chamber of the submarine optical pump magnetometer

释放回收、浮力、压力舱和水声通讯4个方面开展结 构设计。在释放回收方面,设计了电腐蚀脱钩器和 水泥块。当水声通讯板收到"电腐蚀开"命令时,使 能内置恒流源,电腐蚀脱钩器的腐蚀片在恒流源电 解作用下逐渐熔断,实现电腐蚀释放机制。水泥块 为仪器下沉时提供水下重量,同时防止仪器在海底 作业时受底流冲击而发生位移;在浮力设计方面,浮 力块为仪器上浮时提供浮力,其采用标准预制件,尺 寸为 D200 mm×L300 mm, 单块提供 5 kg 浮力, 设计 使用6块浮力块,提供30kg浮力;在压力舱设计方 面,电子舱为尼龙压力舱,为内置的光泵探头、电子 学单元、计数电路、水声通讯板模块提供水密耐压工 作环境。电子舱内置光泵探头,为保证磁洁净度和 磁场观测带宽,采用尼龙材料加工耐压舱,耐压深度 100 m,外尺寸 D158 mm×L1320 mm,水下重量约为 5 kg。尼龙材料相比金属材质具有无磁干扰、磁场 稳定性好、耐腐蚀、低密度、高强度的优势,性价比 高。电池舱为铝合金舱,为内置的两个电池组模块 提供水密耐压工作环境。内尺寸为 D135 mm×L500 mm,外尺寸为 D163 mm×L585 mm,水下重量约为 15 kg。压力舱均通过 1.5 MPa 保压 2 h 测试,未发 生形变和渗漏;在水声通讯方面,通过船载甲板单元 向位于海底的仪器发送声学命令,仪器执行电腐蚀 后脱开水泥块上浮。水声通讯板与外置的换能器配 合,实现水声测距、电腐蚀开关。水声通讯实现与甲 板遥控端的水声命令解析、状态信息回传、电腐蚀装 置触发等。通过水声通讯模块可以查询仪器的状态 信息,包括电压、温度、距离、噪声能量、信号能量、电 腐蚀状态等参数。

如图 3,海底光泵磁力仪主要由框架、浮力块、 水泥块、电腐蚀脱钩器、电池舱、电子舱、换能器等组 成。电池舱位于框架的底部,水平放置。



图 3 海底光泵磁力仪海上投放 Fig.3 Deployment diagram of submarine optical pump magnetometer at sea

海底光泵磁力仪主要技术参数:
1)通道:单通道,总场;
2)最大工作水深:100 m;
3)水下连续工作时间:不少于7天;
4)量程:20~120 μT;
5)本底噪声水平:优于1.0 pT/rt(Hz)@1 Hz;
6)采样率:640 Hz/160 Hz/40 Hz;
7)存储空间:32 GB;
8)功耗:28 W;
9)体积:0.7 m×0.7 m×1 m;
10)质量:120 kg。

3 光泵磁力仪

为了实现海底磁总场高精度自容采集,综合对

6期

比各项技术指标,选用高精度的光泵磁力仪来进行 磁场测量。光泵磁力仪是以原子能级的塞曼效应为 基础,利用光泵作用和光磁共振实现磁场测量的一 种高精度、高灵敏度的磁力仪<sup>[19-22]</sup>。当原子处在外 磁场 B 时,若外磁场方向与原子磁矩方向成一个夹 角,原子磁矩受到转矩的作用会发生进动,即拉莫尔 进动。进动的角频率与外磁场成正比<sup>[23]</sup>,即:ω = γB,其中:γ称为旋磁比。光泵磁力仪主要由光泵 探头、电子学单元、计数电路等组成,用来测量地磁 场、目标磁场和载体干扰场,输出拉莫尔频率信号, 经过信号分离、滤波和整形后由 FPGA 计数获得测 量磁场强度。

#### 3.1 光泵探头

光泵磁力仪工作时,磁传感探头处于待测磁场, 探头中的铯吸收气室含有铯原子团,泵浦激光照射 铯原子使之发生光泵浦作用,最终各粒子的塞曼子 能级处于偏极化分布。探头中的射频线圈给铯吸收 气室提供一个均匀的射频磁场,适当频率的射频磁 场使偏极化的铯原子发生磁共振作用,各粒子会逐 步去极化,当偏极化与去极化过程达到动态平衡时, 发生光磁共振效应。泵浦激光透过铯吸收气室后, 以射频信号频率形式发生变化,并由光电探测器接 收后转换为电信号。

#### 3.2 电子学单元

电子学单元的任务就是检测磁传感探头输出的 光电探测信号,即拉莫尔频率信号的幅值、相位和频 率信息,然后通过反馈控制回路再驱动射频线圈,使 射频信号频率最后锁定在磁共振点,共振频率与外 磁场强度成线性关系,测量此频率即可计算得到外 磁场强度。

#### 3.3 计数电路

电子学单元的拉莫尔频率信号通过变压器耦合 到电源线输出,频率为50~350 kHz,幅值约为300 mVpp。首先对拉莫尔频率进行信号分离,将拉莫尔 信号从电源线分离;其次对拉莫尔信号进行低通滤 波,滤除带外噪声;最后通过超高速迟滞比较器输出 低抖动的数字逻辑信号。计数电路框如图4所示。

系统设计采用高性能 FPGA 实现频率测量、逻 辑和时序控制等相关任务。具体实现功能如下:测 量光泵磁力仪输出的拉莫尔频率磁场;控制任何与 时间相关任务的调度和执行,包括时钟同步等;采集 电压、电流、温度等系统状态参数;数据收集与数据 缓冲;与 CPU 的指令交互和数据传输等。

光泵磁场测量值是以系统时钟源为参考计算的。因此,系统基准源的绝对精度决定了磁场测量的准确性。为实现高准确度的磁场测量,设计如图5所示电路,利用 GPS 秒脉冲的长稳特性与恒温晶振的短稳特性,通过实时计数并反馈调节恒温晶振, 使其输出高准确度的时钟频率。

FPGA 程序主要包括时钟控制模块、拉莫尔频 率测量模块、数字协议解析模块、恒温晶振校准模 块、数据同步模块,如图 6 所示。时钟控制模块为 FPGA 各模块提供基准时钟源。拉莫尔频率测量模 块完成双通道的频率测量。数字协议解析模块完成 温度、电压、电流监控等数字协议解析。恒温晶振校 准模块通过计算秒脉冲和系统时钟偏差,控制 DAC 输出反馈电压,进而调节晶振输出频率。数据同步 模块用于同步光泵测频数据等参数,同时把同步后 数据按帧进行缓存。



### 4 水声释放模块

传统的声学释放器以 iXblue 公司的 Oceano 2500 Universal 型号为例,其空气中质量为 30 kg,水 中质量为 22 kg,尺寸为 D143 mm×L849 mm<sup>[24]</sup>。针 对海底磁测应用场景,传统声学释放器在体积、重 量、成本方面存在局限性。海底光泵磁力仪创新采 用水声通讯模块方案<sup>[25]</sup>,水声释放模块由水面和水 下两个部分组成。水面部分由甲板控制单元、用户 终端和换能器组成,水下部分由换能器、水声通讯 板、电腐蚀脱钩器、电池组成。水面和水下两部分的 组合实现了声学测距和电腐蚀开关功能。换能器用 于声电信号相互转换,其尺寸为 D106 mm×H76 mm,水下质量为1.5 kg。水声通讯板完成换能器对 海底仪器的命令解析与大功率编码发送,其尺寸为 D68 mm×H50 mm,水下质量为 0.5 kg。水声释放模 块工作示意如图7所示,甲板控制单元借助 Wifi 与 用户终端进行通讯,用户终端运行 APP 程序,即可 发送查询、电腐蚀开关命令。水下端的水声通讯板 通过换能器采集来自甲板单元发送的信号,并对其 进行解析。在接收到"查询"命令后,发送应答信 号,水面甲板控制单元解算状态信息(包括电池电 压、温度、斜距)。在接收到"电腐蚀开"命令后,使 能恒流源,电流向外输出约为0.7 A,腐蚀片约30 s 后熔断,杠杆抬起,钢丝绳松开,仪器脱离水泥块上 浮。基于水声通讯控制软件,可以选择仪器的序列 号,改变增益、信号传输幅度和响应幅度,并控制电 腐蚀的开关状态。查询状态返回设备状态屏幕,查 看电压、温度、距离、噪声能量、信号能量和电腐蚀开 关状态等参数。电腐蚀脱钩器与传统的声学释放器 相比,在水中重量减少为原来的23%,体积压缩为



Fig.7 Schematic diagram of hydroacoustic release operation

#### 5 测试

#### 5.1 磁力仪测试

为了评估铯光泵磁力仪 CAS-18 与国外同类产品的性能,选择磁场均匀的野外空旷地带作为试验 探测地点。同点布置加拿大 Scintrex 公司的高精度 铯光泵磁力仪 Cs-3 和本文所选用的铯光泵磁力仪 CAS-18,进行仪器一致性对比测试,测试现场如图 8 所示。



图 8 光泵磁力仪测试现场 Fig.8 Optical pump magnetometer test site

光泵磁力仪接收到的外部磁场信号是相关的, 但自身噪声是不相关的,通过相关处理算法即可得 到磁力仪噪声。在试验条件下,利用光泵磁力仪对 地磁场进行约 100 s 的静态测量,并计算其功率谱 密度,Cs-3 和 CAS-18 测试结果如图 9 所示。Cs-3-1、Cs-3-2, CAS-18-1、CAS-18-2 为各磁力仪自功率 谱,Cs-3噪声和 CAS-18噪声为经相关处理后的磁力仪自身噪声水平。由图 9 可知,在 1 Hz 处 Cs-3 的噪声水平约为 0.6 pT/rt(Hz),与其数据手册基本相符;CAS-18噪声水平约为 0.3 pT/rt(Hz),指标优于 Cs-3。所以选用铯光泵磁力仪 CAS-18 进行磁场测量。





#### 5.2 整机陆地测试

在磁干扰较低的野外环境下进行陆地试验测 试,可以测得稳定的数据来校验仪器精度。试验场 地位于青岛市黄岛区一处磁场分布均匀且磁干扰小 的区域。测量时,把一台海底光泵磁力仪放置在试 验场地内进行短期地磁场测量,试验人员持已知磁 异模块多次经过海底光泵磁力仪。陆地试验的磁场 测试数据如图 10 所示,其中的两处局部放大图是已 知磁异模块经过仪器时所产生的磁异常信号波形。 仪器采样率为 160 Hz,在 1 061 s 时,出现第一次已 知磁异常信号,持续时间约 5 s,峰峰值约为 3 537 nT。在 2 444 s 时,出现第二次已知磁异常信号,持 续时间约 4 s,峰峰值约为 1 990 nT。



图 10 海瓜儿永磁力区阳地树瓜珀木

Fig.10 Land-based test results of the submarine optical pump magnetometer

#### · 1504 ·

# 5.3 海上测试

为了评估海底光泵磁力仪的性能,于 2022 年 10月在青岛近海海域开展了磁异探测试验,实现海 底磁总场高精度自容采集、存储,为水下目标探测提 供原始数据支撑。一共进行了 5 次海上投放测试, 回收率 100%,电腐蚀脱钩器的释放功能得到验证。 测试地点是青岛市团岛湾近海试验站,海况 2 级,水 深 50 m。海试设备为 1 台海底光泵磁力仪,配套设 施包括配套作业船、近海测试船。借助水声通讯板、换能器和电腐蚀脱钩器装置,5次投放全部回收成功,数据完整,水下作业时间约200h,未发现异常。海底光泵磁力仪在海底连续测量约6h,采样率为160Hz。截取部分时段所观测地磁总场时间序列见图11,持续长度10000s,总场约为51760nT,峰峰值约为84.1nT,其中包含大地电磁噪声、运动海水感应电磁噪声以及近岸人文工业干扰等环境噪声。





对海底光泵磁力仪所观测的地磁总场数据进行 功率谱密度分析,结果见图 12。整体呈现 1/f 特征, 低频段从 10 Hz~20 mHz,随着频率增大,功率谱密 度逐渐减小;在 50 Hz 频段附近,海底环境噪声影响 较大;在 1 Hz 附近,地磁总场数据中开始出现浪涌。 成功获取了地磁环境背景噪声,为 AUV 磁异探测数 据处理提供参考。



图 12 海底地磁环境背景场功率谱密度



由磁力仪测试结果可知, 铯光泵磁力仪 CAS-18 更适用于高精度磁力测量和需要低噪声环境的应用 场景。由陆地测试和海上测试结果可知, 海底光泵 磁力仪在海底与陆地的磁场强度具有一致性。而且 海底光泵磁力仪的稳定性和可靠性很强, 受到磁干 扰后产生的磁异常信号持续时间较短, 不会对测量 磁场强度产生较大的影响。在海上测试获取的海底 环境背景场噪声可以作为参考来抵消磁场环境噪声,提高 AUV 磁异探测数据的测量精度。

## 6 结论

本文研制的海底光泵磁力仪,主要解决了小型 化、自容采集、水声通讯等技术难题。海底光泵磁力 仪由磁场测量单元、水声释放单元两部分组成,具备 海底磁总场高精度自容采集能力,并具备海底水声 释放回收能力。海底采集站具有大数据量高速存 储、低功耗、接收信号频率范围大、本底噪声低、可满 足微弱信号探测等优势。在青岛近海海域开展磁异 探测试验,采样率为 160 Hz 时,成功获取海底环境 背景场噪声,为 AUV 磁异常探测数据的处理提供参 考,以抵消磁场环境噪声。验证了海底光泵磁力仪 的海底磁场自容采集、释放回收功能,为水下目标探 测提供参考数据。同时证明了海底光泵磁力仪具有 较好的稳定性和较高的可靠性,具有良好的应用前 景。

## 参考文献(References):

[1] 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 H N, Li Y.Underwater acoustic detection: Current status and future trends[J].Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3):264-271.

6期

[2] 陈允锋,刘伟.非声探潜新技术浅析[J].光纤与电缆及其应用 技术,2016(6):29-32,36.

Chen Y F, Liu W.Brief analysis of new non-acoustic submarine detecting technologies[J].Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2016(6):29-32,36.

- [3] Fagnard J F, Vanderheyden B, Pardo E, et al. Magnetic shielding of various geometries of bulk semi-closed superconducting cylinders subjected to axial and transverse fields[J]. Superconductor Science and Technology, 2019, 32(7):074007.
- [4] 王芙蓉.水下金属目标探测方法研究[D].太原:中北大学, 2024.

Wang F R. Research on (detection method of) underwater metal target[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.

- [5] Sharp K M, White R H. More tools in the toolbox: The naval oceanographic office's Remote Environmental Monitoring UnitS (RE-MUS) 6000 AUV[C]//Oceans, IEEE, 2008.
- [6] Adams A A, Charles P T, Veitch S P, et al.REMUS100 AUV with an integrated microfluidic system for explosives detection[J].Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2013, 405(15):5171-5178.
- [7] Bondaryk J E. Bluefin autonomous underwater vehicles: Programs, systems, and acoustic issues[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 115(5s): 2615.
- [8] Marthiniussen R, Vestgard K, Klepaker R A, et al. HUGIN-AUV concept and operational experiences to date [C]//Oceans' 04 MTTS/IEEE Techno-Ocean'04,2004.
- [9] McPhail S, Furlong M, Huvenne V, et al. Autosub6000: Its first deepwater trials and science mission [J]. Underwater Technology, 2009,28(3):91-98.
- [10] Ura T, Obara T, Nagahashi K, et al. Introduction to an AUV" r2D4" and its kuroshima knoll survey mission [C]//Oceans' 04 MTS/ IEEE Techno-Ocean'04, 2004.
- [11] Fisher A W, Nidzieko N J, Scully M E, et al. Turbulent mixing in a far-field plume during the transition to upwelling conditions: Microstructure observations from an AUV[J].Geophysical Research Letters, 2018, 45(18): 9765-9773.
- [12] 周晶,司玉林,林渊,等.海底 AUV 关键技术综述[J].海洋学报,2023,45(10):1-12.
   Zhou J,Si Y L,Lin Y, et al. A review of subsea AUV technology
   [J].Haiyang Xuebao,2023,45(10):1-12.
- [13] 李浩.航空激光氮光泵磁传感器光机系统设计及抗振动性能研究[D].长春:中国科学院大学,2022.
  Li H.Research on opto-mechanical system design and anti-vibration performance of aviation laser pumped <sup>4</sup>He magnetic sensor[D].
  Changchun:University of Chinese Academy of Sciences,2022.
- [14] 陈大勇,史彦超,崔敬忠,等.矢量原子磁力仪中旋转磁场产生装置的研制[J].光学精密工程,2022,30(7):780-792.
  Chen DY,Shi Y C, Cui J Z, et al.Development of rotating magnetic field device for vector atomic magnetometers[J].Optics and Precision Engineering,2022,30(7):780-792.

- [15] 吴德伟, 苗强, 何思璇, 等. 量子传感的导航应用研究现状与展望[J].空军工程大学学报: 自然科学版, 2021, 22(6):67-76.
  Wu D W, Miao Q, He S X, et al. A study of existing status and prospects for quantum sensor in navigation[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2021, 22(6):67-76.
- [16] GSM-19-Overhauser.pdf[Z/OL].[2024-05-29].https://www. gemsys.ca/pdf/GSM-19-Overhauser.pdf.
- [17] CS-3-Brochure-762711\_3.pdf [Z/OL]. [2024-05-31].https://6c3ae8. a2cdn1. secureserver. net/wp - content/uploads/ 2017/03/CS-3-Brochure-762711\_3.pdf.
- [18] 裴彦良,梁瑞才,刘晨光,等.海洋磁力仪的原理与技术指标对 比分析[J].海洋科学,2005,29(12):4-8.
  Pei Y L,Liang R C,Liu C G, et al.Principle of marine magnetometer and specification comparative analysis [J]. Marine Sciences, 2005,29(12):4-8.
- [19] 张振宇,程德福,王君.氦光泵磁测技术研究[D].长春:吉林大学,2012.
   Zhang Z Y,Cheng D F, Wang J.Research on optically pumped he-

lium magnetic measurement technology[D].Changchun;Jilin University,2012.

- [20] 李庆萌,张军海,曾宪金,等.地磁场对铯原子磁力仪共振谱线的影响[J].哈尔滨工程大学学报,2013,34(12):1617-1620.
  Li Q M,Zhang J H,Zeng X J, et al. Effect of the geomagnetic field on the resonance spectral lines of the Cs magnetometer[J].Journal of Harbin Engineering University,2013,34(12):1617-1620.
- [21] 周志坚,程德福,王君,等.氦光泵磁力仪中磁敏传感器的研制
  [J].传感技术学报,2009,22(9):1284-1288.
  Zhou Z J, Cheng D F, Wang J, et al. Development of magneto-dependent sensor in the optical pumped magnetometer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2009,22(9):1284-1288.
- [22] Alexandrov E B. Recent progress in optically pumped magnetometers[J].Physica Scripta, 2003, T105(1):27-30.
- [23] 王维东,李国祝,梁尚清,等.基于原子磁力仪的高精度电流传感器[J].仪表技术与传感器,2021(1):1-3,8.
   Wang W D,Li G Z,Liang S Q, et al. High accuracy current sensor based on atomic magnetometer[J].Instrument Technique and Sen-
- [24] 彭湛,邓明,赵建刚.电磁触发式声学释放器水下机的软硬件研发[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
   Peng Z, Deng M, Zhao J G. The Hardware and software realization of electromagnetic triggered acoustic releaser's underwater unit [D].Beijing:China University of Geosciences Beijing,2020.

sor, 2021(1):1-3,8.

[25] 罗贤虎,邓明,邱宁,等.MicrOBEM:小型海底电磁接收机[J]. 物探与化探,2022,46(3):544-549.

Luo X H, Deng M, Qiu N, et al.MicrOBEM: A micro-ocean-bottom electromagnetic receiver [J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3):544–549.

#### Development of a submarine optically pumped magnetometer

GONG Yi-Xuan<sup>1</sup>, JIANG Kai<sup>1</sup>, GAO Jing-Yu<sup>2</sup>, ZHU Wan-Hua<sup>2</sup>, CHEN Kai<sup>1</sup>

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: The Autonomous Underwater Vehicle (AUV) equipped with a magnetometer conducts underwater magnetic anomaly detection, enabling long-duration and large-scale continuous sampling. It offers advantages such as concealment, high efficiency, high practicality, wide application range, strong maneuverability, and robust endurance. To improve measurement accuracy, synchronous seabed magnetic field data is needed as a reference to counteract environmental magnetic noise. To address this, a submarine optically pumped magnetometer was developed to provide a reference for processing AUV magnetic anomaly detection data. The submarine optically pumped magnetometer consists of a magnetic field measurement unit and an acoustic release unit, capable of high-precision autonomous acquisition of the total magnetic field on the seabed, as well as underwater acoustic release and recovery. The magnetic field measurement unit includes an optical pumping probe, electronic unit, counter, battery pack, and nylon pressure chamber. The acoustic release unit includes an acoustic transducer, acoustic communication board, electro-corrosion decoupler, cement block, buoyancy block, and frame. This design addresses key technical challenges such as miniaturization, autonomous acquisition, and underwater acoustic communication. In 2022, a magnetic anomaly detection test was conducted in the offshore waters of Qingdao. The test results verified the autonomous seabed magnetic field acquisition and the release and recovery functions of the submarine optically pumped magnetometer, providing effective reference data for underwater target detection.

Key words: magnetic anomaly detection of underwater targets; optically pumped magnetometer; seafloor magnetic field observation; hydroacoustic release

(本文编辑:王萌)

