

周吉祥, 刘慧敏, 陆凯, 等. 深海 ARV 在海洋资源调查中的应用及展望[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(2): 93-102.

ZHOU Jixiang, LIU Huimin, LU Kai, et al. Application and prospect of deep-sea ARV in mineral resource investigation[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(2): 93-102.

# 深海 ARV 在海洋资源调查中的应用及展望

周吉祥, 刘慧敏\*, 陆凯, 单瑞, 杨源

(中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237)

**摘要:** 深海自主/遥控式水下机器人 (ARV) 作为新兴的复合型水下机器人, 融合了自主式水下机器人的灵活性和遥控式水下机器人的人机交互性等优势, 开启了自主与遥控混合作业的新模式。深海 ARV 可切换为 AUV 自主航行模式, 独立采集周边区域近海底地形地貌、地质结构以及环境参数等数据, 也能下潜至目标区域后切换为 ROV 遥控模式进行局部观察和采样操作, 其探测作业一体化技术代表了具备复杂使命执行力的第三代深海水下机器人的发展方向。通过分析国内外深海混合型水下机器人的发展现状, 结合 ARV 在中国深海矿产资源调查中的主要应用案例和取得的成果, 以 6000 米级“问海一号”ARV 系统的研发为例, 给出其关键技术集成以及面对的技术挑战, 并对未来深海 ARV 的应用场景、功能集成和发展方向提出了一些设想和建议。

**关键词:** 自主/遥控式水下机器人 (ARV); AUV 自主航行; ROV 遥控; 深海矿产资源调查; “问海一号”ARV 系统

中图分类号: P715; P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.005

## 0 引言

深海矿区蕴藏着极为丰富的战略金属、能源和生物资源, 而资源调查、勘探是深海资源开采前的重要基础性工程。深海潜航器作为掌控深海矿产资源调查主导权的重要装备, 是拓展深海调查能力、提升综合作业能力的重要手段<sup>[1-3]</sup>。深海潜航器主要分为无人水下机器人和载人潜水器 2 大类, 而无人水下机器人又可细分为遥控式水下机器人 (Remotely Operated Vehicle, ROV)、自主式水下机器人 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV)、水下滑翔机、水下拖曳系统等<sup>[4-9]</sup>。其中, ROV 通过脐带缆

传输信号和动力, 可以实现小范围水下精细定点局部观察和采样作业, 如采集生物和海底沉积物样品、布放小型海底观测站等, 同时亦受脐带缆的制约, 作业范围和航行灵活性受限<sup>[10]</sup>。AUV 自带能源 (电池), 在确定水下航行路径后可按照自主程序完成大面积的搜索和调查活动作业, 但其数据传输、自动化控制和导航都面临较多挑战<sup>[11]</sup>。深海自主/遥控式水下机器人 (Autonomous and Remotely-operated Vehicle, ARV) 融合了最新的 ROV 和 AUV 技术, 既能通过细微光纤进行信息交互并实现遥控作业, 又可以切断光纤进行大面积水下探测或执行混合任务, 其自主/遥控混合模式和探测作业一体化技术代表了可执行更复杂使命的第三代深海水下机器人的发展方向<sup>[12-13]</sup>。深海 ARV 可同时搭载光学、声学、水文调查传感器以及重力/磁力仪等, 能为深海多金属结核、热液硫化物、冷泉和深海生物资源的调查等提供技术支撑<sup>[14-15]</sup>。作为新型的复合型水下机器人, ARV 可以通过机械手和高清摄像机实现深海目标区域的可视化作业, 其在深海资源调查中具有重要的科研和应用价值, 也是当前国际水下机器人的研究热点<sup>[16]</sup>。

收稿日期: 2023-01-06

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (42174021); 山东省自然科学基金青年基金 (ZR2023QD081); 青岛市自然科学基金 (23-2-1-65-zyyd-jch, 23-2-1-217-zyyd-jch); 中国地质调查局项目 (DD20230643)

第一作者: 周吉祥 (1992-), 男, 工程师, 主要从事基于 ROV 的声光集成探测技术方面的研究工作。E-mail: zhou\_jixiang@126.com

\* 通讯作者: 刘慧敏 (1991-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事深海探测技术及海底地形地貌方面的研究工作。E-mail: liuhuimin@mail.cgs.gov.cn

美国、日本、法国、瑞典等发达国家近年来一直致力于复合型水下机器人的研发工作<sup>[17-18]</sup>。其中,比较有代表性的产品有美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)的“Nereus(海神)”号 ARV(图 1a),又称为混合式 HROV,其最大工作水深为 11 000 m,并通过 ROV 模式对马里亚纳海沟进行了全海深资源调查<sup>[19]</sup>。此外,伍兹霍尔海洋研究所在“海神”号的基础上,还研制了用于极地科考和探测的“Nereid-UI” HROV,其最大工作水深为 2 000 m,可以搭载多种生物、化学传感器对极地冰层以下区域进行调查和取样。美国 Oceaneering 公司联合 Boeing 公司和 Fugro 公司共同开发了新型的混合式水下机器人“Taser”,可以根据应用环境选择传统 AUV 模式、短缆或长缆混合作业模式。日本海洋科学与技术中心(JAMSTEC)研发的混合式水下机器人 MR-X1(图 1b),可完成自主、有缆遥控和声学遥控 3 种混合作业模式,极限下潜深度为 4 200 m,适用于近海底的资源调查和设备检测。法国海洋研究所研发的“Ariane(阿丽亚娜)”号混合式 ROV(图 1c),极限下潜深度为 2 500 m,可以利用高清摄像机、照相机和机械手完成水下调查和取样工作。“阿丽亚娜”号 HROV 可通过光纤与母船连接,进行 ROV 作业,或通过声通执行 AUV 模式。法国 Cybernetix 公司也研发了类似的混合式水下机器人“Swimmer”,可利用 AUV 携带 ROV 与生产系统对接,并用 ROV 执行水下作业。瑞典 SAAB 公司研发的“Seaeye Sabertooth”混合水下机器人,可切换至 AUV 模式在水下航行超过 10 nmi,接近目标基站后可通

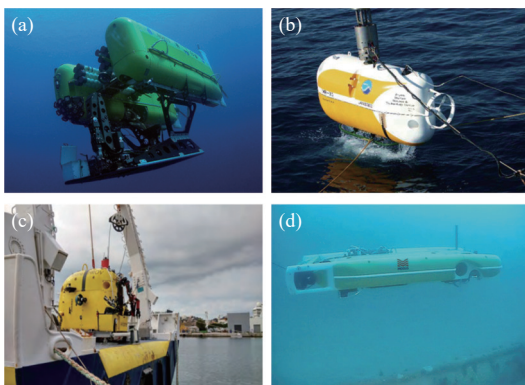


图 1 美国 WHOI “海神”号 ARV (a)、日本 JAMSTEC “MR-X1”号 ARV (b)、法国“阿丽亚娜”号 HROV (c) 以及瑞典 SAAB 研制的“Seaeye Sabertooth” HROV (d)

Fig.1 The “Nereus” ARV of WHOI (a), “MR-X1” ARV by JAMSTEC (b), “Ariane” HROV developed by IFREMER (c) and “Seaeye Sabertooth” HROV developed by SAAB (d)

过辅助操控模式或手动操控完成对接并充电和数据传输。

近年来,深海自主/遥控式水下机器人逐渐引起了国内科研单位的重视和投入,相关技术和产品得到了快速的发展,并在极地冰下调查、深渊调查等复杂海域得到了广泛的应用。中国科学院沈阳自动化研究所于 2008 年成功研发了“北极”号 ARV<sup>[20]</sup>(图 2a),并圆满完成了第 3 次和第 4 次北极科考调查。上海彩虹鱼海洋科技有限公司研发的万米级全海深 ARV 验证平台,其海试的成功标志着中国除载人舱以外的各项关键技术攻关均有了显著突破。在中国科学院先导专项的支持下,沈阳自动化研究所成功研制了“海斗”号 ARV<sup>[21]</sup>(图 2c),并于 2016 年 7 月在马里亚纳海沟成功完成 10 767 m 下潜深度,使中国成为继日本、美国之后第 3 个拥有研制万米级无人潜水器能力的国家;紧接着研发成功了首台作业型全海深自主遥控潜水器“海斗一号”,并成功完成了首次万米海试与试验性应用任务,最大下潜深度 10 907 m,刷新中国潜水器最大下潜深度纪录,为 11 000 m 载人潜水器的研制提供了技术支持。

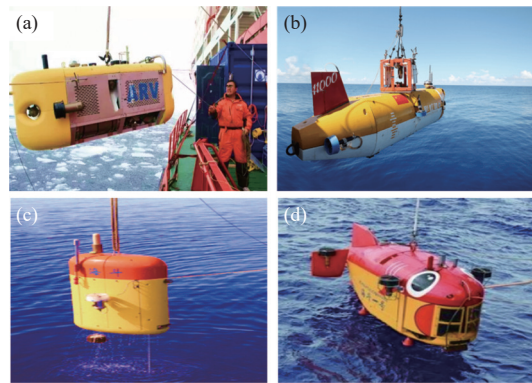


图 2 沈阳自动化研究所的“北极”号 ARV (a)、上海彩虹鱼公司的“彩虹鱼”ARV (b)、沈阳自动化研究所的“海斗”号 (c) 以及“海斗一号”ARV (d)

Fig.2 “Beiji” ARV developed by Shenyang Institute of Automation (a), “Rainbow Fish” ARV (b) by Shanghai Rainbow Fish Company, and “Haidou” (c) and “Haidou 1” ARV (d) by Shenyang Institute of Automation

在“海斗一号”ARV 设计的基础上,中国地质调查局青岛海洋地质研究所根据海洋调查作业需求,联合中国科学院沈阳自动化研究所共同研发了“问海 1 号”6 000 米级 ARV 系统(图 3)。主要应用于 6 000 m 以浅水下目标区域的海洋基础地质调查、海洋油气和天然气水合物资源勘查以及海底固体矿产资源调查,可实现近海底精细地球物理调查、



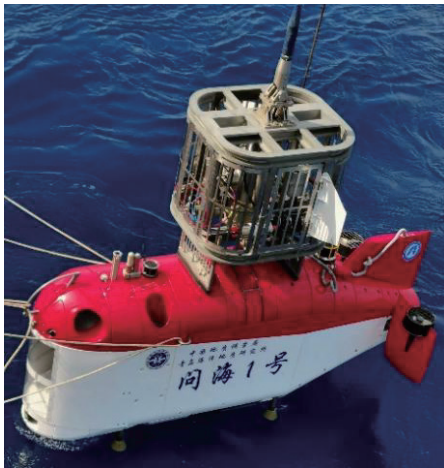


图 3 “问海 1 号” 6000 米级 ARV 系统

Fig.3 The "Wenhai 1" 6000-m ARV system

近距离实时光学探测和取样作业<sup>[22-23]</sup>。“问海 1 号”是面向 6 000 m 深海综合科考需求研制的探测作业一体化高技术海洋装备,采用自主与遥控混合作业的新模式,融合自主水下机器人的自主能力且兼具

遥控水下机器人的人机实时交互优势,大大提升了水下机器人探测作业的综合效率。

## 1 深海 ARV 的系统组成和关键技术

深海 ARV 系统兼具自主航行与远程遥控能力,可执行 AUV 的作业模式(图 4a),开展自主航行探测,依靠其搭载的超短基线定位系统(Ultra-Short Baseline, USBL)<sup>[19]</sup>、惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)、多普勒计程仪(Doppler Velocity Log, DVL)等核心导航和声学调查设备,获取关键区域内高精度测深侧扫及浅地层剖面探测数据;或在有缆遥控模式下(图 4b),利用光纤微缆实时遥控,探测海底精细地形地貌、浅部地层结构、海底表面目标物,并对特定目标物进行取样;还能在自主/遥控混合模式下执行自主探测任务,通过光纤微缆实时传输现场作业信息,操控者可随时切换自主航行及实时远程遥控,高效灵活地完成作业任务<sup>[22]</sup>。

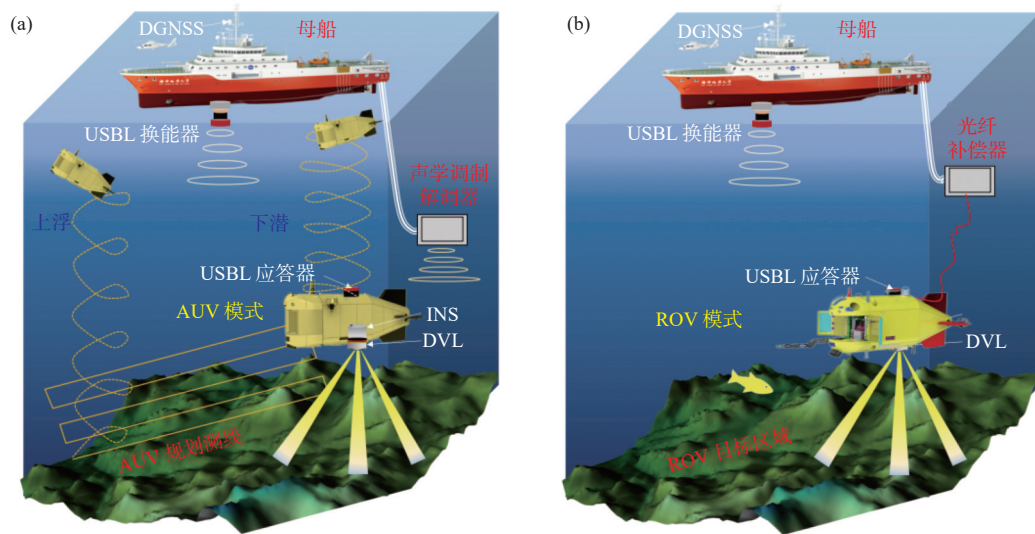


图 4 ARV 执行 AUV 作业模式 (a) 和 ROV 作业模式 (b)

Fig.4 The ARV operates in AUV mode (a) and ROV mode (b)

### 1.1 ARV 系统组成

深海 ARV 系统一般由水面支持系统、缆控系统和 ARV 潜器本体等组成(图 5)。以 6000 米级“问海 1 号”ARV 为例,下面简单介绍深海 ARV 的核心系统组成。

#### 1.1.1 水面支持系统

水面支持系统通过母船和作业团队对深海 ARV 的正常作业、释放和维护提供支持 and 保障,主要包括综合显控系统、甲板释放回收系统以及维护保障系统等(图 6a、b、c)。

综合显控系统主要通过多屏显示器对深海 ARV 的状态信息、导航信息、姿态信息和视频图像等进行实时显示和处理,并通过甲板遥控设备对水下设备进行遥控和下达作业指令。甲板释放回收系统主要依靠母船的 A 型架、绞车、光电复合缆及其他辅助设备对 ARV 进行释放和回收。维护保障系统主要对 ARV、水下调查设备和光电复合缆等常用设备进行日常维护、检修和测试等。

#### 1.1.2 缆控系统

缆控系统主要通过水下声学通讯中继器连接母船与水下潜器。ARV 的通讯中继器上端通过光

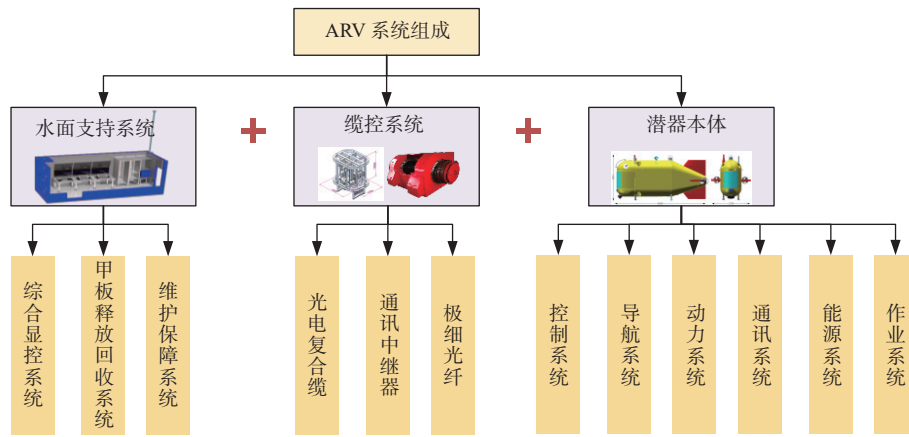


图5 ARV系统组成示意图

Fig.5 Schematic diagram of ARV system structure

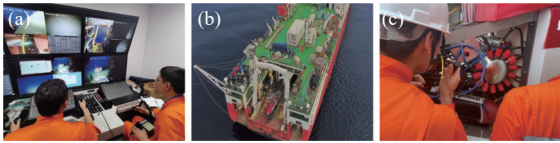


图6 水面综合显控系统 (a)、甲板释放回收系统 (b) 以及维护保障系统 (c)

Fig.6 The ARV integrated display and control system (a), release and recovery system onboard (b) and maintenance and supporting system (c)

电复合缆与水面综合显控系统相连。在 ROV 模式时, 通讯中继器的下端通过极细光纤与深海 ARV 相连, 完成水面和水下信息的快速传输。而在 AUV 模式时, 通讯中继器切断光纤, 利用水下声学通讯装置与 ARV 进行信息交互。

### 1.1.3 潜器本体

深海 ARV 的潜器本体除自身的机械结构外, 按照功能一般划分为: 控制系统、导航系统、动力系统、通讯系统、能源系统、可视化作业系统以及搭载的多种声学探测传感器(图7)。

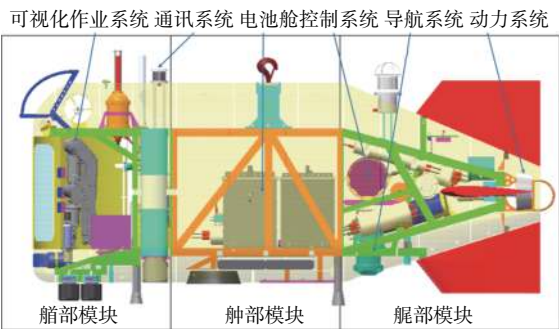


图7 ARV水下本体系统组成

Fig.7 Modules and components and of the ARV system

#### (1) 控制系统

控制系统可自主执行使命或接收水面控制命令, 与推进单元连接完成控制回路, 与探测系统连

接完成探测传感器的控制<sup>[24-27]</sup>。通过计算机结合航行控制单元、信息采集处理单元以及深度、姿态和水密监控系统实现对 ARV 的操控, 可以保障 ARV 定向、定深、定高的完成巡线作业, 也可以切换手操模式控制水下可视化作业系统进行遥控作业。

#### (2) 导航系统

水下定位和导航信息是保证深海 ARV 安全布放、回收和有效完成任务的关键, 也为 ARV 多场景动态测量、采集和传递信息提供了必不可少的空间位置参考。ARV 的导航系统主要包括长量程超短基线声学定位信标<sup>[28]</sup>、惯性导航定位系统、声学多普勒计程仪、高度计、压力计、避碰声呐以及相关的辅助设备。

#### (3) 动力系统

水下 ARV 的动力系统主要执行推进控制命令, 完成水下机器人的精确运动控制, 通过搭载的电池组动力能源, 由尾部舵板上的 2 个主推进器提供推力, 由艏部垂直和测向各 2 个槽道推进器保持潜器的平衡、升沉和转向。

#### (4) 作业系统

作业系统又分为可视化作业系统和声学探测系统, 主要包括: 水下高清摄像机、机械手、取样工具、声学探测传感器以及根据任务需求搭载的下潜/上浮抛载装置。深海 ARV 为了节省能源, 通常利用下潜抛载实现负浮力的螺旋下潜, 到达指定深度后释放下潜抛载, 此时 ARV 为零浮力状态进行作业, 完成作业任务后, 通过抛弃上浮抛载实现正浮力的螺旋上浮。

除上述系统外, ARV 还搭载了包括光端机、声学通讯系统等相应的通信装置, 以及根据不同任务搭载的多种深海调查设备。

## 1.2 深海 ARV 搭载的资源调查设备

深海 ARV 切换至自主模式时, 可结合搭载的声学设备、光学设备以及重力/磁力仪实现对近海底的地质调查、海洋油气和天然气水合物资源的勘查, 以及对地形地貌、浅部地层结构和海底表面目标物的自主探测。同时, 可以利用光纤微缆的信息实时传输能力, 通过实时遥控的方式, 实现探测海底精细地形地貌、浅部地层结构、海底表面目标物, 并对特定目标物进行取样。在自主/遥控混合模式下, 通过光纤微缆实时传输探测信息, 操控者可以随时切换至实时远程遥控模式, 利用搭载的高清摄像系统或其功能机械手, 对感兴趣的点位或目标物进行在线精细高清探测或取样作业, 提升水下机器人探测作业的综合效率。

### 1.2.1 声学探测传感器

水下机器人通过测深侧扫声纳和浅地层剖面仪, 可以在近底航行时获得海底地形地貌等地质数据, 用于目标搜索、科学研究和资源评价。

#### (1) 浅地层剖面仪

浅地层剖面仪 (Sub-bottom Profiler) 可以通过激发声波探测浅底地层的剖面结构, 在地层分辨率和地层穿透深度方面有较高的性能, 并可以任意选择扫频信号组合, 现场实时地设计调整工作参量, 利用浅地层剖面仪记录的反射声波信息能够测量和解释油气储层的基岩深度和厚度。

#### (2) 测深侧扫声纳

高分辨率声纳是获取海底微地形地貌的设备, 能利用多个接收阵测得海底回波的到达角度, 并根据此角度和回波传播时间来获得声纳探测点的水深值, 其作用距离较远, 具有分辨率高、声纳阵小、能耗小等优点。声纳的类型多种多样, 当前深海潜器主要搭载侧扫声纳和多波束测深声纳对海底进行探测。多波束测深声纳工作时, 其换能器向潜器行进的垂直方向发射多个不同波数, 并接收发射波的强度和往返时间, 从而计算出深度信息, 后期可用来绘制出海底地形图。侧扫声纳仅向海底发射单个声脉冲信号, 并记录回波强度, 其对目标的尺寸和深度信息不能准确估计, 但探测范围更广。因此, 深海 ARV 通过将测深与侧扫声纳结合起来可以更好地探测海底地形地貌信息。

### 1.2.2 光学探测传感器

深海 ARV 平台搭载的水下光学探测系统舷外

设备主要包括各类专用超清水下摄像机、高光谱相机、拉曼光谱仪、三维激光扫面仪、水下灯和云台等。由于水对光的吸收、散射以及漫反射等因素影响, 光在水中的传播随距离增加呈指数形式衰减, 另外, 光的散射作用使水下物体影像的对比度下降, 水下图像容易变得模糊。为获得清晰的摄像效果, 深海 ARV 携带的水下灯的照明系统性能将越来越高。

#### (1) 超清水下摄像机

为满足海洋水下科考的需求, 近些年逐渐采用拥有超大电荷耦合传感器的超清水下摄像机。超清水下摄像机具有灵敏度高、抗强光、畸变小、体积小、寿命长、抗震动等优点, 可以实现 4K 超清和静态拍照等不同模式切换, 静态拍照能达到 2 000 万像素, 部分产品内部具有色彩校正功能。

#### (2) 高光谱相机

高光谱相机是一种是基于反射或辐射特性的光谱成像设备, 通过将光谱技术和成像技术结合在一起, 可获取目标的空间信息和光谱信息<sup>[29]</sup>。高光谱图像数据可用于区分海底矿产的种类、组分、品位等特征, 为海底矿产资源的原位探测提供高精度光谱特征数据, 实现海底金属矿产资源的小范围精细识别与定位。

#### (3) 激光拉曼光谱仪

激光拉曼光谱测量仪是基于拉曼散射机制而研发的深海光学探测设备, 具有非侵入、非破坏、无需样品前处理、快速检测等一系列优势, 非常适宜于深海热液高温喷口流体中气体组分的测量<sup>[30]</sup>。根据深海不同环境下的测量需要, 可以安装和更换不同的测量探针, 对沉积物孔隙水、冷泉流体、天然气水合物、热液流体进行探测。

#### (4) 激光扫描仪

激光扫描系统一般由激光剖面静物照相机和激光光源等组成, 可以获得海底的高清激光剖面数据, 得到厘米级别的微地形剖面数据, 从而可以有效识别和分析海底的沉积物、生物聚集区、冷泉喷口等典型目标<sup>[31]</sup>。

### 1.2.3 可视化作业取样系统

该系统包括七功能主从伺服电动机械手(主手、水面控制盒、水下控制器和从手)、采样工具、光学观测系统等。光学观测系统一般由光学观测单元和云台系统组成, 而光学观测单元主要部件为高清摄像机、主灯、标清摄像机、标清小灯等, 云台系统包含电动云台, 照明灯和激光尺等。在云台上安装



光学观测单元可以随着云台的转动进行不同方向的观测,协助机械手完成不同方向的作业。

#### 1.2.4 地球物理探测传感器

##### (1) 水下重力仪

目前广泛采用的海洋重力测量技术为船载重力测量技术,而相较于船测重力数据,深海水下机器人可搭载小型化水下重力仪,通过贴近海底探测海底重力信号中的高频信息<sup>[32]</sup>。由于其测得的信号强度较强,水下重力仪适用于海底地壳表层的研究。

##### (2) 水下磁力仪

相较于船测拖曳式磁力数据,近海底水下磁法勘探是获取埋藏于海底地层信息更有效的手段。能够改变磁力场的物质都是铁磁物质构成的,因此,磁力仪能够勘测出任何会使磁力场发生改变的物体。水下磁力仪可以测量和分析某一地区的磁场变化,在海底热液硫化物调查中起到非常关键的作用。

### 1.3 深海 ARV 关键技术

不同于传统的 AUV 和 ROV 水下机器人,深海 ARV 作业具有超远距离、混合控制及轻型作业的特点,其整体系统的设计需要特别考虑声学/光纤通讯,主动导航/被动跟踪,自主模式/远程遥控作业等因素。除传统的耐压抗腐蚀材料、长距离动力传输技术、远程数据传输及航行控制等关键技术外,深水 ARV 还需额外关注微细光纤微缆传输技术、高密度电池技术以及自主/遥控混合控制等技术。

#### 1.3.1 微细光纤缆传输技术

深海 ARV 主要应用的微细光纤缆传输系统由微细光纤缆线团、大功率光端机及光纤剪切机构组成。“问海 1 号”ARV 系统标配 2 个 30 km 无轴内放线式微细光纤缆线团,分别安装于潜器与压坠器,单个线团输功率衰减约 12 dB,破断力 80~120 N。目前 ARV 潜器理论最大通讯距离可达 80 km。通过 ARV 的通讯中继器管理近海面端光纤,提升了 ARV 光纤连续通信的稳定性,同时搭载其他声学设备,可实现与 ARV 的信息传输和定位。

#### 1.3.2 高密度电池技术

由于 ARV 相较于 AUV 具备一定的作业能力,作业时的平均能耗也相对较高,因此,为提升 ARV 潜器的作业能力,需要开发耐低温、耐高压的高能量密度的能源电池组。目前应用较为普遍的是磷酸铁锂电池与锂离子电池,前者具有良好的热稳定

性与化学稳定性,安全性较高;后者则具有良好的能量密度及放电速率,但安全性不及前者。“问海 1 号”ARV 系统采用湿舱耐高压稳定性高的磷酸铁锂电池组,磷酸铁锂控制/动力电池组由 1 组控制电池组、1 组动力电池组及专用充电机等组成,控制电池和动力电池独立封装,充分提高安全性,优化能耗,减小推进干扰,分别为潜水器控制系统及动力系统提供 DC48V 及 DC110V 电源。电池组总容量 24 kWh,自主航行模式下可支撑潜器航行 30 h 以上。

#### 1.3.3 自主遥控混合控制技术

航行控制系统是 ARV 的重要组成部分,用于海底精细遥控作业、预编程自主路径规划、系统故障检测及应急处理,实现复杂海底地形条件下的稳定航行及传感器控制,是保证潜器安全运行的监控中心。航行控制舱是控制系统核心,主要完成对载体所有设备开关的直接或间接控制,所有设备的直接或间接通信,所有控制指令的发布。在航行控制舱内包含电源转换、电源分配、ARM 核心板、避碰计算机、ARM 控制辅助板、交换机、光端机等电路板。控制程序模块分为 4 层,每层实现相对独立的逻辑功能:①人机交互层主要完成操作员指令下达及潜水器状态反馈;②使命层则实现依据使命任务生成行为指令,对系统发生的各种故障进行处理;③行为层负责实现潜器的航向、航速、深度、高度等控制算法;④执行层负责实现本系统所安装设备/传感器输入数据的读取解析和对它们的操控等。未来随着 AI 技术的发展,ARV 系统的智能化程度将不断提升,其在应对复杂海底环境及特殊工作任务的工作能力也将进一步提升。

## 2 深海 ARV 在地质资源调查中的主要应用

“问海 1 号”ARV 兼顾区域航行与局部精细作业的能力,并且搭载高度集成的浅剖、测深侧扫声学探测系统、光学探测系统、轻质化的灵巧七功能电动机械手以及可扩展空间与接口,最大作业深度为 6 000 m,能覆盖全球海洋面积 98.8% 的海域。

### 2.1 深海 ARV 作业流程

如图 8 所示,ARV 到达工作区域后,首先进行工作区域环境调查,包括全水深温盐深(CTD)及海底地形地貌探测,CTD 数据主要用于核算 ARV 潜器浮力,地形地貌数据用于 ARV 航路规划。准备

阶段时, 将压坠器置于潜器顶部, 期间注意人员止荡, 防止压坠器摇摆角度过大。完成准备工作后 ARV 作业转入下潜阶段, 入水后继续释放光电复合缆。期间光纤压坠器与潜器同步下潜至目标区域, 到达指定深度后, 释放器脱钩, 潜器和压坠器依靠重力分离, 压坠器悬停于分离位置, 潜器依靠重力

继续下潜, 下潜到近底时, 抛掉下潜压铁, 转入悬停阶段, 等待作业指令。ARV 在自主模式下作业任务结束或出现故障后, 潜器将自动执行抛载上浮程序, 在有缆遥控模式下可手动执行抛载上浮程序。潜器下潜任务结束后, 切断光纤, 抛掉上浮压载, 开始上浮阶段, 压坠器独立回收。

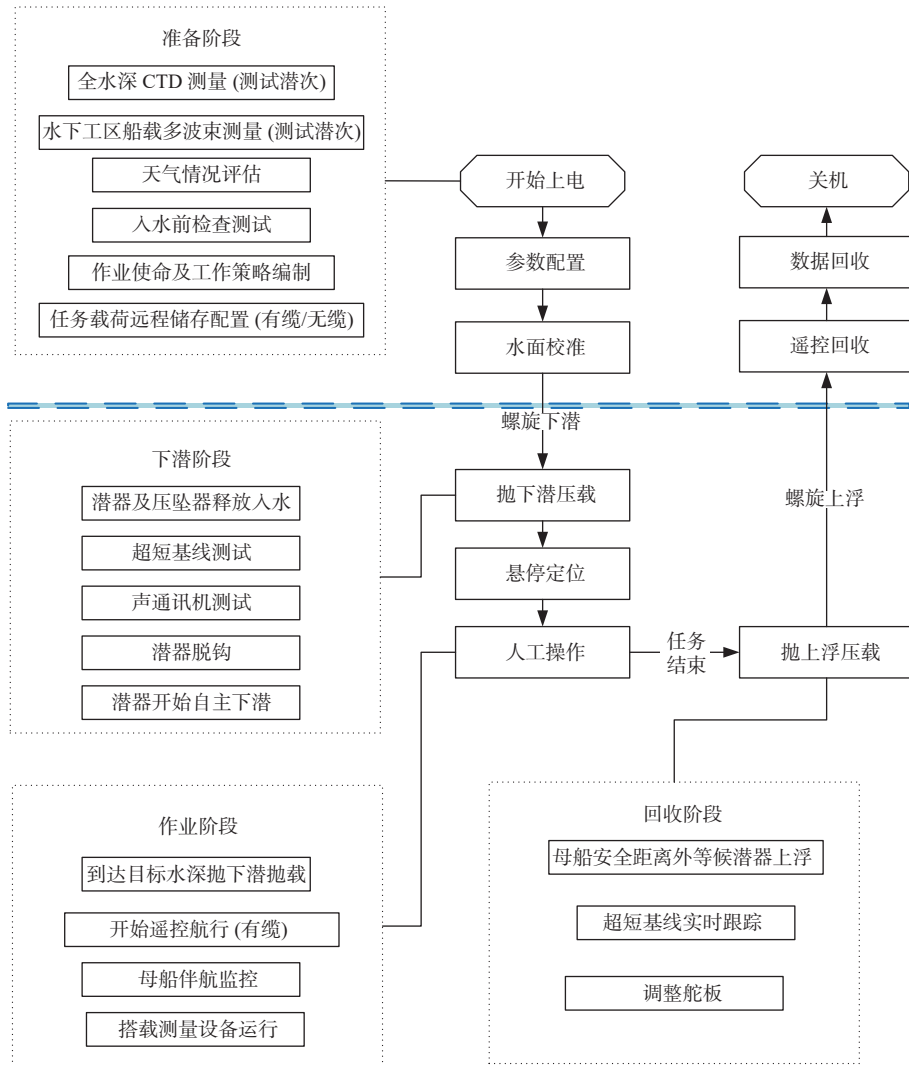


图 8 深海 ARV 遥控作业流程

Fig.8 Flow chart of remote control operation of deep sea ARV

### 2.2 可视化作业

深海 ARV 的定点作业与负载拓展能力相对传统的重载 ROV 较弱, 但其水面支持系统集成度高, 对不同作业支持母船的适配性较好。可视化作业分系统是 ARV 的重要组成部分, 用于完成采样、布放作业等任务。

深海 ARV 潜器坐底作业时, 舱门开启后机械手伸出作业, 照明主要由左舱门的门挂照明灯、航

行照明灯及云台照明灯提供, 云台照明灯可跟随云台调整角度, 以上照明可以覆盖机械手作业范围。机械手作业时, 其高清摄像主要由云台相机完成, 高清摄像可跟随云台多角度拍摄机械手作业, 可实时直播并回传到操作中心, 航行摄像及标清相机作为辅助摄像, 为机械手提供多个视角, 方便样品采集及回收落位。云台上激光尺可提供水下参照物的尺度。如图 9 所示, 当 ARV 处于有缆遥控模式下, 基于水面实时遥控航行, 能够根据调查需求采

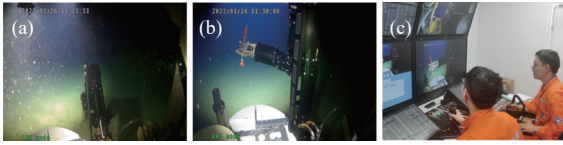


图9 ARV 分别采集表层沉积物柱状样 (a)、海洋生物样品 (b) 以及实时高清视频数据传输 (c)

Fig.9 Surface sediment coring (a), marine life sampling (b), and real-time high-definition video transmission (c) by the ARV

集表层沉积物柱状样及海洋生物样品。

### 2.3 近海底声学重磁同步探测

“问海1号”ARV的艏部采用舱门式工作状态切换方法,其在巡航探测状态下,通过关闭左右两扇舱门,保障载体整体的流线型,满足低阻巡航探测的要求。“问海1号”ARV可实现6000m以深的定向、定深、定高航行,最大实测航速3节,经济航速1.2节,具备良好的水下轨迹跟踪能力。

当ARV到达测线区域时,通过母船搭载的超短基线定位系统获得其自身的准确位置,ARV依靠声学通信和细微光纤进行通讯和数据传输,并按航行指令去往上线点。“问海1号”ARV搭载的浅地层剖面仪和测深侧扫声呐采用Edgetech公司专门为潜器设计开发的2205系列,具有体积小、功耗低、集成度高、模块化配置的优点,其声学换能器在ARV上的分布如图10所示。其侧扫工作频率为230/540kHz,测深工作频率230kHz;浅地层剖面仪的工作频带2~16kHz,穿透能力6~80m,分辨率6~10cm。

如图11所示,“问海1号”ARV可在艏部搭载

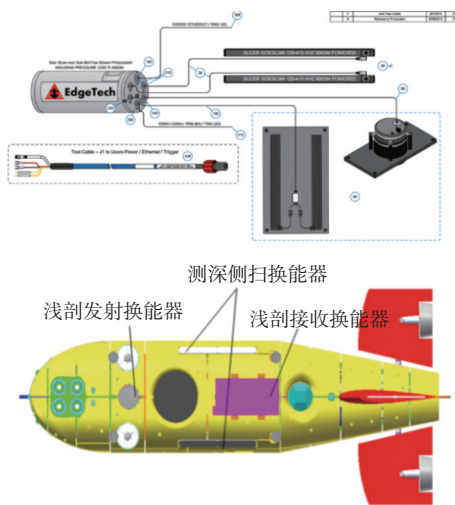


图10 Edgetech公司2205声学换能器分布示意图

Fig.10 Elevation view of the Edgetech 2205 acoustic transducer

单独封装小型化重力仪。重力仪的耐压舱采用顶部半球形、底部平端盖设计,通过固定支架与潜器框架固定连接。磁力仪电子舱安装在ARV内部,使用安装支架与潜器框架固定连接。磁力仪探头支架通过法兰与潜器尾部预留机械接口连接,两部磁力仪探头分别架设在支架中段与末端。ARV进行水下重磁数据采集时,采用定高或定深模式按照规划测线实现近海底的高精度重磁测量。

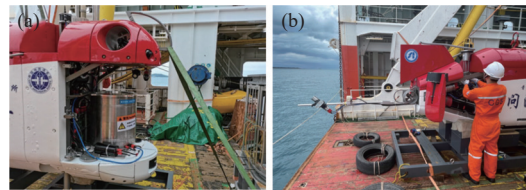


图11 ARV 搭载的小型化重力仪 (a) 和磁力仪 (b)

Fig.11 The small-sized gravimeter (a) and magnetometer (b) onboard ARV

在2022年3月22日—4月26日,“问海1号”ARV累计进行17个潜次任务,包括9个水下声学重磁同步测量作业航次,完成试验水下测线12条,共计190km。ARV单潜次最大连续航行时间超过21h,最大航程45km,光纤微缆模式下最大航行距离为21km。整个任务期间,“问海一号”ARV的控制系统、导航定位系统、能源推进系统等工作状态正常,潜器获得了近海底高精度的声学 and 重磁探测数据。基于无人潜水器平台的重磁、地形地貌及浅部地层结构同步测量(图12),是中国在海洋地质调查方法上的一次重要创新与突破。而深海ARV

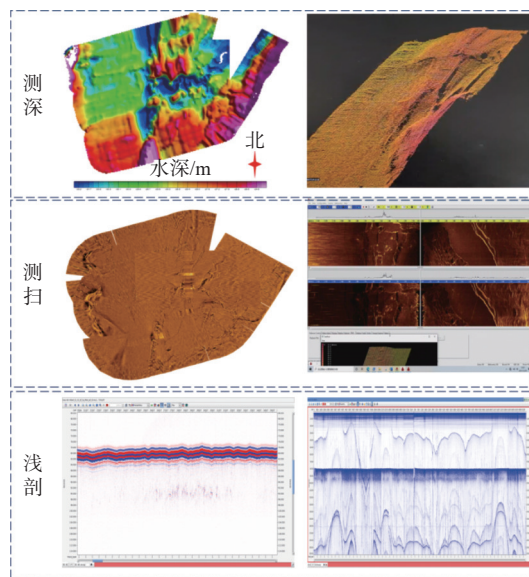


图12 “问海1号”ARV 实测测深、侧扫和浅剖声呐图像

Fig.12 Images of echo-sounding, sonar side-scanning, and subsurface profiling acquired by "Wenhai 1" ARV



能够有效支撑水下重磁测量系统稳定运行,实现对地球重力场磁场等信息的精细化测量,为海洋资源勘探和水下多物理场匹配导航研究提供有力的装备及技术方法支撑,具有重要的工程应用意义。

### 3 结论与展望

随着“问海一号”ARV系统的成功入列,完成了国内首次基于无人潜水器平台的近海底重、磁、地形同步测量,极大地提升了中国深远海近底精细地质调查与作业能力。通过集成研发的水下多传感器搭载平台,能够有效支撑水下重磁测量系统稳定运行,实现对地球重力场磁场等信息的精细化测量。未来针对ARV技术发展的需求,应重点开展潜水器总体适配性、微细光纤收发系统、机械手作业系统以及基于工作母船布放回收的技术攻关和能力提升,从而能够有效的开展深海科学应用,实现同多种潜水器的联合作业,提升ARV的技术先进性和实用化水平。目前,深海ARV的一系列设备多处于研发和试验阶段,其未来的发展依赖于水下能源技术、通讯技术、人工智能控制技术、一体化协同技术等。随着深海矿产资源的调查与开发战略需求的深入拓展,深海ARV在资源调查领域中将发挥越来越关键的作用。

(1)深海调查领域作业范围继续拓展,网格更加精细。深海ARV作为一种新型的水下机器人,未来将主要应用于超深水、极地、海沟、等极端海洋环境下的水下探测。随着深海ARV的耐压深度、能源系统、导航系统及避障系统不断的完善,其深海调查的作用范围将更加广泛。借助于极细光纤,可以灵活操纵ARV进行精细网格作业,获得更多高密度的近海底测量数据。

(2)设计更加智能化、网络化、自主化。从目前发展趋势来看,深海ARV的功能越来越趋向于智能化、网络化和自主化。结合最新的人工智能图像识别技术,深海ARV更加具有智能和自主作业能力,通过网络化的水声通讯和光纤微缆,将能够自主化的在复杂深海环境航行,具备在复杂环境中安全生存、精确探测和作业的能力。

(3)执行任务复杂度增大,专业型ARV不断改进和提升。未来的ARV可根据任务需求拓展搭载其他化学/物理参数传感器,如激光拉曼、温度梯度探针、甲烷传感器、二氧化碳传感器等,以及相应的小型手持工具,例如:机械手勾爪支持T型把手工

具抓握,可根据调查需求自行设计配置如切割机、取样铲、抄网等小型手持工具。

(4)无人化装备协同作业。近年来国内许多家高校和科研院所积极开展基于无人探测设备的组网技术研究,但目前尚未进入实践应用阶段,作业过程中仍需母船伴航支持,无人化及智能化程度较低。未来随着水声通讯、Mesh组网、卫星通讯等多种通讯手段的海上通讯终端技术的成熟,以及可适配于水面及水下载体的无人船或作业支持母船的无人化回收释放系统研发成功,深海ARV和无人船有望实现无人化的远程高效率协调作业。

#### 参考文献:

- [1] 封锡盛,李一平,徐会希,等.深海自主水下机器人发展及其在资源调查中的应用[J].中国有色金属学报,2021,31(10):2746-2756.
- [2] 吴有生,赵羿羽,郎舒妍,等.智能无人潜水器技术发展研究[J].中国工程科学,2020,22(6):26-31.
- [3] 李硕,唐元贵,黄琰,等.深海技术装备研制现状与展望[J].中国科学院院刊,2016,31(12):1316-1325.
- [4] 任玉刚,刘保华,丁忠军,等.载人潜水器发展现状及趋势[J].海洋技术学报,2018,37(2):114-122.
- [5] 徐伟哲,张庆勇.全海深潜水器的技术现状和发展综述[J].中国造船,2016,57(2):206-221.
- [6] 陈宗恒,田烈余,胡波,等.“海马”号ROV在天然气水合物勘查中的应用[J].海洋技术学报,2018,37(2):24-29.
- [7] 沈克,严允,晏红文.我国深海作业级ROV技术现状及发展展望[J].控制与信息技术,2020,3:1-7.
- [8] 李硕,刘健,徐会希,等.我国深海自主水下机器人的研究现状[J].中国科学:信息科学,2018,48(9):1152-1164.
- [9] 王振杰,刘慧敏,杨慧良,等.基于垂直约束的深海拖曳系统US-BL/DVL组合导航算法[J].中国惯性技术学报,2019,27(5):670-676.
- [10] YU C Y, XIANG X B, MAURELLI F, et al. Onboard system of hybrid underwater robotic vehicles: integrated software architecture and control algorithm[J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 106121.
- [11] WANG B, WU C, GE T. Self-repairing control system for a hybrid underwater vehicle[J]. Advanced Materials Research, 2014, 834/836: 1256-1262.
- [12] 徐鹏飞. 11 000米ARV总体设计与关键技术研究[D].北京:中国舰船研究院,2014.
- [13] 陆洋,唐元贵,王健,等.全海深ARV浮力配平计算方法[J].机器人,2021,43(1):74-80.
- [14] 杨新平.遥控自治水下机器人控制技术研究[D].北京:中国舰船研究院,2012.
- [15] XIANG X B, ZUO M J, LAPIERRE L, et al. Hybrid underwater robotic vehicles: the state-of-the-art and future trends[J]. Hkie Transactions, 2015, 22(2): 103-116.

- [16] 王磊, 刘涛, 杨申申, 等. 深海潜水器ARV关键技术[J]. *火力与指挥控制*, 2010, 35(11): 6-8.
- [17] 李一平, 李硕, 张艾群. 自主/遥控水下机器人研究现状[J]. *工程研究-跨学科视野中的工程*, 2016, 8(2): 217-222.
- [18] MOMMA H, WATANABE M, HASHIMOTO K, et al. Loss of the full ocean depth ROV Kaiko-part 1: ROV Kaiko-a review[C]//The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Yokosuka: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2004.
- [19] BOWEN A D, YOERGER D R, TAYLOR C, et al. The Nereus hybrid underwater robotic vehicle[J]. *Underwater Technology*, 2009, 28(3): 79-89.
- [20] 李硕, 曾俊宝, 王越超. 自主/遥控水下机器人北极冰下导航[J]. *机器人*, 2011, 33(4): 509-512.
- [21] 唐元贵, 王健, 陆洋, 等. “海斗号”全海深自主遥控水下机器人参数化设计方法与试验研究[J]. *机器人*, 2019, 41(6): 697-705.
- [22] 吴立新, 荆钊, 陈显尧, 等. 我国海洋科学发展现状与未来展望[J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 1-12.
- [23] 吴立新, 陈朝晖, 林霄沛, 等. “透明海洋”立体观测网构建[J]. *科学通报*, 2020, 65(25): 2654-2661.
- [24] LI J, JUN B, LEE P, et al. A Hierarchical real-time control architecture for a semi-autonomous underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(13): 1631-1641.
- [25] CUI W C, WANG F, PAN B B, et al. Issues to be solved in the design, manufacture and maintenance of full ocean depth manned cabin[J]. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2016, 11: 1-29.
- [26] SAHOO A, DWIVEDY S K, ROBI P S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 181: 145-160.
- [27] FERREIRA C Z, CARDOSO R, MEZA M, et al. Controlling tracking trajectory of a robotic vehicle for inspection of underwater structures[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 149(2): 373-382.
- [28] 孙大军, 郑翠娥, 张居成, 等. 水声定位导航技术的发展与展望[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(3): 331-338.
- [29] 郑冰, 孙骁禾, 粟京. 一种水下激光成像的新方法[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(1): 119-122.
- [30] 张鑫. 深海环境及深海沉积物拉曼光谱原位定量探测技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [31] 王冰, 宋永东, 杜增丰, 等. 水下激光扫描成像系统及其在冷泉研究中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(11): 60-65.
- [32] 潘国伟, 曹聚亮, 吴美平, 等. 水下重力测量技术进展[J]. *测绘通报*, 2019, 2: 1-5.

## Application and prospect of deep-sea ARV in mineral resource investigation

ZHOU Jixiang, LIU Huimin<sup>\*</sup>, LU Kai, SHAN Rui, YANG Yuan  
(Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** Deep-sea autonomous/remote-operated underwater vehicle (ARV) as an emerging hybrid underwater device, it combines the advantages of the flexibility of autonomous underwater vehicle (AUV) and the human-computer interaction of remotely operated vehicle (ROV), promoting a new model of hybrid autonomous and remote-controlled operations. The deep-sea ARV can be switched to AUV autonomous navigation mode to independently collect data of near-seabed topography, geological structure, and environmental parameters of the surrounding area. It can also be switched to ROV mode for local observation and sampling, depending on the target area of interest, showing future development direction of third-generation deep-sea underwater vehicles with complex mission execution capabilities. The development status of hybrid deep-sea ARV at home and abroad is reviewed. Aiming at deep-sea mineral resources investigation in China, the research and development of the 6 000-m Wenhai 1 ARV system is introduced, along with its key technology and technical challenges, and its main application cases and achievements. At last, some ideas and suggestions on future application scenarios, functional integration, and development directions for deep-sea ARV are presented.

**Key words:** autonomous/remote operated underwater vehicle; AUV autonomous navigation; ROV remote control; deep sea mineral resources survey; "Wenhai 1" ARV system