

深海长期驻留自主水下机器人系统研究现状与发展趋势

徐会希^{1,2,3}, 吕凤天^{1,2,3}, 石 凯^{1,2,3}, 朱宝彤^{1,2,3}, 陈 仲^{1,2,3}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169; 3. 辽宁省水下机器人重点实验室, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 深海环境的长周期监测已成为人类分析和认识海洋生态系统和海洋环境变换过程的必要手段, 而深海长期驻留自主水下机器人 (LRAUV) 系统则是实现深海环境长周期监测的有效装备, 成为近年来深海领域的研究热点。本文通过梳理、总结前人的研究, 首先对 LRAUV 系统的含义及其工作模式进行了介绍; 对 LRAUV 系统的典型应用领域进行了分析与展望; 然后, 对国内外 LRAUV 系统进行了综述, 包括其配置、功能与技术参数等内容, 并总结了其发展趋势; 最后对 LRAUV 系统长期生存、基站支撑、AUV 自主对接、能源补充及数据传输、探测作业等关键技术的研究现状、难点问题及未来发展方向进行了综述与分析。

关键词: 环境监测; 自主水下机器人 (AUV); 长期驻留; 自主对接; 自主探测

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2023)-06-0720-17

Research Status and Development Trends of Deep-sea Long-term Resident Autonomous Underwater Vehicle Systems

XU Huixi^{1,2,3}, LÜ Fengtian^{1,2,3}, SHI Kai^{1,2,3}, ZHU Baotong^{1,2,3}, CHEN Zhong^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;

3. Key Laboratory of Marine Robotics, Liaoning Province, Shenyang 110169, China)

Abstract: Long-term monitoring of the deep-sea environment becomes a necessary means for human to analyze and understand the marine ecosystem and the transformation process of the marine environment. The deep-sea long-term resident autonomous underwater vehicle (LRAUV) system is an effective equipment to realize long-term monitoring of the deep-sea environment, and becomes a research hot-spot in the deep-sea field in recent years. After combing and summarizing previous studies, the meaning and working mode of the LRAUV system are introduced in this paper. And the application fields of the LRAUV systems are analyzed and prospected. Then, the LRAUV systems at home and abroad are reviewed, including their configuration, functions and technical parameters, and their development trends are summarized. Finally, the research status, difficulties and future development directions of key technologies of the LRAUV system including long-term survival, docking station supporting, AUV autonomous docking, energy supplement and data transmission, and detection operations, are summarized and analyzed.

Keywords: environment monitoring; AUV (autonomous underwater vehicle); long-term residency; autonomous docking; autonomous exploration

1 引言 (Introduction)

海洋蕴藏着丰富的生物资源、矿物资源和海洋能源^[1], 是人类未来的资源宝库。深海海底区域也孕育着地球上关键的生态系统^[2], 是人类知之甚少且亟需探索的海底区域。习近平总书记指出“深海蕴藏着地球上远未认知和开发的宝藏, 必须在深海进入、深海探测、深海开发方面掌握关键技术”。以我国的西太平洋多金属结核矿区为例, 该区域

内就有众多需要探究的科学问题: 海底地质成因分析、固体矿产资源评估、海洋生物极端环境适应性分析、极端事件对海底环境影响分析等, 而这些科学问题的研究亟需长周期、具有时间和空间连续性的探测数据作为支撑。

自主水下机器人 (AUV) 作为一种常用的深海探测工具, 能够搭载各种传感器进行海洋探测, 在军事、民用以及科学研究中发挥着越来越重要的作用。然而, AUV 携带的能源有限, 工作时间严

重受限, AUV 在完成一次科学任务后, 需要浮出水面与母船或水面支持平台对接进行能源补充、数据交换和维护保障, 消耗了大量的时间, 打断了作业连续性。为了延长深海监测的时间, 深海长期驻留 AUV (LRAUV) 系统应运而生。LRAUV 系统利用水下对接技术, 可实现 AUV 与海底基站等水下平台的连接, 进而实现能源补充、数据交换和维护保障, 延伸和扩展了海底基站的探测范围, 增加了 AUV 水下作业时间, 是对深海环境进行大范围、长时间连续探测作业的有效方式, 能为海洋科学研究提供连续性的长周期探测数据。因此, 可与水下平台进行对接并能够长期驻留的 LRAUV 系统成为 AUV 技术发展中一支重要力量, 得到了世界各国的高度重视并在快速发展。

LRAUV 系统能够在没有支撑船只的情况下部署数月甚至数年^[2-4], 将提高海洋环境时间和空间变化的检测能力。此外, LRAUV 系统能够取代人工船只和遥控水下机器人 (ROV), 采用远程交互的方式维护海底基础设施, 大大节省了维护费用。

LRAUV 系统是一项极其复杂的系统工程, 一般包括 AUV 和海底基站。LRAUV 系统需要增强 AUV 单体的自主能力, 涵盖整个 AUV 活动周期。无人值守出坞探测和回坞、自主任务规划、现场充电、健康监测等技术, 是 AUV 的重大发展方向, 这些能力是 LRAUV 系统能够在部署地长时间驻留的基础保障。

2 LRAUV 系统的含义及其工作模式 (Meaning and working mode of LRAUV system)

LRAUV 系统主要包括 AUV 和海底基站两大部分^[2-3]。海底基站或者被固定在海底, 或者能在小范围内进行移动, 可为 AUV 提供驻地, 对 AUV 进行充电, 接收 AUV 的探测和状态数据, 对 AUV 实施任务层面的控制, 必要时实施一定的人工干预。AUV 主要用来探测海底基站周围的海床、水体等海洋环境, 为深海科学问题研究提供数据; 在完成探测后, AUV 需要自主对接进入海底基站中, 在基站中驻留。因此, 利用 LRAUV 系统可以在深海海底实现重点关注区域的长期监测和调查, 获取长时间的、连续的探测数据。

LRAUV 系统的工作模式如图 1 所示。AUV 通常采用无值守休眠静默方式驻留在海底基站中, 在准备开展探测任务时: (1) 首先进行任务规划和分配, 将探测任务分为多个任务序列来执行。(2) 然

后对 AUV 进行唤醒、状态检查、下达探测指令, AUV 开始离开海底基站, 行驶至探测目标区域, 展开科学探测。(3) 在探测完成后, AUV 返回基站, 通过自主对接技术, 进入海底基站中, 进行数据交互与能源补充; 在完成数据交互后仅进行充电的期间, AUV 进入休眠模式。(4) 在完成充电后, 重复第 (2)(3) 步, 开展下一个任务序列的探测, 直至完成所有任务。

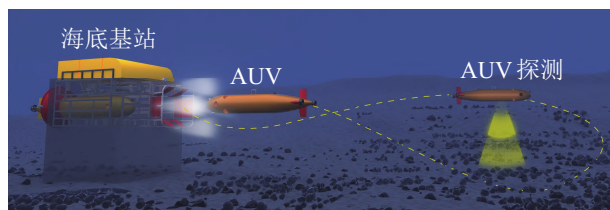


图 1 LRAUV 系统工作模式

Fig.1 Working mode of the long-term resident AUV system

3 LRAUV 系统典型应用领域 (Typical application fields of the LRAUV system)

利用 LRAUV 系统搭配海底基站构建的海底探测系统, 是人类征服海洋空间, 开展深海长期探测的大系统。利用自主对接技术, LRAUV 系统扩展了基站的探测范围, 在军事、海洋工程以及科学研究领域均具有广泛的应用前景。

3.1 军事领域

LRAUV 在军事领域的应用主要体现在水下预置武器研发方面。水下预置武器^[5-6]是深海作战的一项主要内容, 可将无人机、AUV、导弹及鱼雷等作战装备预先放置于海底, 并长时间潜伏, 具备一定的移动能力以及较高水平的自主决策能力。其行为^[5-6]主要包括侦察、监视、探测、通信、指挥、攻防打击等。近年来, 随着深海技术的发展, 水下预置武器研究越来越受到各国的重视。

水下预置武器可以分为大、中、小、微型系统^[6]。大型系统主要由深海基地、无人潜水器以及海底观测网等组成, 具备集中打击、综合补给和战场综合保障等功能; 中型系统主要为搭载小型无人潜航器、无人水面艇、无人飞行器或鱼/水雷武器的无人水下母艇或发射装置, 主要担负指挥通信、专项侦察和打击任务; 小型系统主要为小型基站, 具备完成常态化侦察、探测和其他作战辅助性任务的能力; 微型系统或平台则包括各类探测装置、传感器、中继节点等。

水下预置武器可以利用 LRAUV 系统实现水下长期驻留的侦察、监视、探测这 3 种行为。通过扩充 LRAUV 系统中的 AUV 数量, 可以使其具备通

信、巡查、武器维护、区域侦察等能力,成为小型预置武器系统的主体组成部分。同时,该系统也可以成为大型与中型预置武器系统重要组成部分,承担其中的感知探测、立体监测以及长期自持保障的任务。

3.2 海洋工程领域

在海洋工程领域,LRAUV 系统当前的主要应用场景为海底油气管道检查、维护和维修(inspection, maintenance, repair, IMR)等。最初的 LRAUV 系统是以降低海底管道维护费用为目标而设计的,如 Sabertooth AUV 以及 FlatFlish AUV 等,LRAUV 系统可以减小海底管道维护对船只、ROV 以及人工操作的依赖程度,大幅度降低时间和经济成本。

随着海底油田产业的发展,未来油田开发将位于深水和超深水区域,IMR 操作难度极大^[7-8]。LRAUV 系统可在降低油田监测成本方面发挥重要作用^[3,9]。对于大型油田,例如由多达 100 口井组成的挪威 Troll 油田^[7],IMR 工作量巨大,油田上集成 LRAUV 系统的应用前景十分诱人。例如,大型油田通常配备大量需要定期检查和维护的流线、脐管和立管,使用 LRAUV 系统可大大降低人工和时间成本。在油田 IMR 领域,LRAUV 系统的应用工况还包括:

(1) 要求更高检查量的高腐蚀性环境,例如巴西近海的盐前油田;

(2) 要求快速响应的操作,例如频繁开关阀门等。

3.3 科学研究领域

当前 AUV 的常规探测模式为依托母船的走航探测,可以为深海科学问题研究提供静态、短期的探测数据。随着海洋科学技术的发展,为了更加清晰地认识海洋生态系统,科研人员对海底环境的研究从表面现象逐渐往深层次的成因机理转变,如采矿行为对环境的动态影响及极端事件对海底环境影响等科学问题的研究。此类科学研究需要动态连续性的深海探测数据的支撑,但 AUV 常规探测已无法满足需求,而 LRAUV 系统是解决上述需求的可靠方案。具体应用主要包括以下几方面。

3.3.1 采矿前后环境变化监测

我国近年来十分重视海洋矿产资源的探测与采集。根据《联合国海洋法公约》^[10],采矿等探测行为要尽量减小对海洋环境的有害影响。受限于海洋环境监测手段,目前关于采矿对深中层海洋生态系统的影响的研究还不够深入。为了方便地研究采矿作业对海洋环境的影响程度,需要使用 LRAUV

系统对采矿前后的海洋环境进行监测。

面向深海金属矿产资源开采,LRAUV 系统可长期监测矿产区域,利用其探测数据可评估深海矿区环境基线,构建环境监测评估的计量标准化体系。例如,利用 LRAUV 系统在海底对采矿行为进行长期监测,监测采矿引起的羽状流及其再沉积对海底环境与生态系统的影响,持续数月监测采矿前、采矿中以及采矿后的环境数据,为科研人员提供采矿引起的环境变化数据,以便于评估采矿活动对海洋环境的影响,建立并验证深海采矿羽状流模型及再沉积对海洋影响的预测模型。

3.3.2 火山监测

全球大洋中脊(mid-ocean ridge, MOR)系统的火山作用和热液循环是整个地质历史上地幔与海洋相互作用的主要机制。海底火山系统通常远离陆地,由于它们被海水覆盖,MOR 的火山爆发很少能被检测到。由于火山喷发,羽流会在海平面以下达到中性浮力,因此,它们对海洋生态系统的影响是未知的^[2,11]。

用水面船来探测和评估火山喷发难以奏效。由于部署延迟,往往在调查人员到达之前,火山喷发就已经到了后期或者已经结束。LRAUV 系统可在岸上远程操作,并可在航行中执行重新部署的使命任务,能够实时监测火山爆发完整的演变过程^[2,11]。

3.3.3 极地冰下探测

极地环境中的科学任务对于理解地球上物理、生物和化学过程是至关重要的。AUV 具备较强的自主探测能力,灵活性高,已成为极地探测的重要工具^[12]。然而,极地温度、冰层带来的物理限制、海底的可达性、移动的海冰和冰原以及与之相关的复杂冰下声学等因素,使得 AUV 的回收以及与母船通信等操作极具挑战性^[7]。因此,利用 LRAUV 系统降低海面活动以及作业风险是未来极地探测的发展趋势。LRAUV 系统搭载相关探测传感器可以为以下科学问题研究提供探测数据^[2]:

1) 冰下环境生命成长机理与局限性的研究。

2) 生命的代表和直接指标主要内容及其变化过程研究。

3) 冰的物理几何学及其演化过程研究。

4) 极地海洋与全球海洋相互作用机制以及极地海洋与冰的相互作用机制研究。

5) 大气与冰的相互作用机制研究。

3.3.4 其他感兴趣目标区域的持续环境监测

感兴趣目标区域通常是指能源资源、生物资

源、台风通过前后环境变化等区域,为了更好地对上述区域进行分析研究,未来需要 LRAUV 系统能够长期反馈探测信息,监测环境变化过程^[7]。具体应用场景包括以下几个方面:

1) 开展深海海底微地形地貌、磁异常和浅层剖面的高精度连续探测,重构局部地形地貌的 3 维高分辨率模型,刻画深海海底地质构造特征,探讨深海海底地质成因机制。

2) 开展底栖生物群落特征监测,探查海底大生物物种、多样性特征及其空间分布规律,探讨上层海洋与深海之间的大生物物种交换及其高压极端环境适应机制。

3) 开展深海海底区域水体温度、盐参数、颗粒物浓度、环境噪声等理化参数探测,探讨台风或者地震事件对海底环境的影响^[13]。

4) 开展大陆边缘动态生态系统监测,分析生物栖息地变化情况,预测海啸等灾难性事件^[2]。

5) 开展甲烷渗漏的空间和时间连续变化监测^[2],研究甲烷渗漏的轨迹和渗漏量的变化,总结分析其变化规律,进而探索它们对水体和动物的影响。

4 典型的 LRAUV 系统及其设计趋势 (Typical LRAUV systems and their design trends)

当前,国内外面向深海长期驻留任务研发或开展测试的 LRAUV 主要包括 Sabertooth AUV、FlatFish AUV、Freedom AUV、Tri-TON 2 (TT2) AUV、Imotus hovering AUV (IHAUV) 以及深渊 AUV,下面对这几款 LRAUV 系统进行综述性的介绍。

4.1 Sabertooth AUV

面向海底设备的检查、维护和修理,英国 Saab Seaeye 公司开发了一种悬停混合 AUV/ROV 系统 Sabertooth AUV^[13-14]。Sabertooth 可以在自主模式、操作员协助模式和手动模式下进行工作。Sabertooth AUV 及其海底基站如图 2 和图 3 所示^[14]。



图 2 Sabertooth AUV

Fig.2 Sabertooth AUV

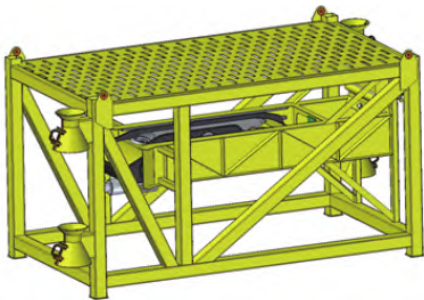


图 3 Sabertooth AUV 海底基站

Fig.3 The docking station of Sabertooth AUV

Sabertooth AUV 主要包括以下系统^[14], 电池系统、控制系统、多普勒测速仪 (DVL) / 惯性测量单元 (IMU) 导航系统、避障系统、车载视频/声呐记录系统、SM7 推进器、相机、LED 灯、工具和载荷接口、无线充电装置、电磁通信天线。其中,无线充电装置最高充电功率为 5 kW; 电磁通信传输速率最高可达 10 Mb/s, Sabertooth AUV 技术参数如表 1 所示^[14]。

表 1 Sabertooth AUV 技术参数

Tab.1 The technical parameters of Sabertooth AUV

名称	数值
最大下潜深度	3000 m
尺寸	3.4 m×0.65 m×1.2 m
质量	500 kg
最大航速	5 kn
电池电量	18 kW·h
水下驻留时长	不少于 6 个月
探测范围	20~50 km

Sabertooth AUV 在设计时要求在水下驻留时长不少于 6 个月。2013 年 10 月,在挪威近海组织了 Sabertooth AUV 试验,测试了系统探测能力,主要包括底栖生物群落调查、水抽样调查、油气泄漏检测和定位、视觉检查等,试验中执行了 100 多次任务,相当于大约 200 h 和 350 km 的探测工作。

4.2 FlatFish AUV

FlatFish AUV^[15] 是由德国和巴西共同开发的 LRAUV,主要用来检查海底石油和天然气的基础设施。FlatFish 是一种小型 AUV (图 4),具备建立水下设施的高分辨率 3D 地形模型的能力^[16]。FlatFish AUV 载荷主要包含多波束声呐、立体成像系统以及激光扫描系统,技术参数如表 2 所示。

在设计之初,FlatFish AUV 要求具备悬停功能,可长期部署在海底。FlatFish AUV 利用扩展卡尔曼滤波器将惯性导航系统、DVL 和车辆运动模型融合

成一个航迹推算系统，在距离海底基站 1 km 的范围内，利用超短基线定位系统进行 FlatFish AUV 声学对接导引。



图 4 FlatFish AUV
Fig.4 FlatFish AUV

表 2 FlatFish AUV 技术参数
Tab.2 The technical parameters of FlatFish AUV

名称	数值
最大下潜深度	300 m
尺寸	2.2 m×1.05 m×0.5 m
质量	275 kg
电池电量	5.8 kW·h

在管道检查与跟踪方面，FlatFish AUV 拥有先进的声光管道和电缆跟踪器，可以锁定连接当前检测目标和其余部分的管道，使用前视成像声呐进行管道的末端与当前导航目标之间的过渡段导航。在 3 维重建方面，水下设施结构重建主要是离线完成的，但其覆盖探测是在线完成的，可利用在线检测部分功能进行 AUV 定位。



图 5 Freedom AUV
Fig.5 Freedom AUV

表 3 Freedom AUV 技术参数
Tab.3 The technical parameters of Freedom AUV

名称	数值
最大下潜深度	4000 m
尺寸	4.5 m×1.2 m×0.8 m
质量	2200 kg
最大航速	6 kn
探测范围	120 km

4.3 Freedom AUV

针对海底管道检测需求，美国 Oceaneering 公司于 2017 年开展 Freedom AUV 研发^[17-18]。Freedom AUV 如图 5 所示，既能够作为 AUV 独立工作，也能够以 ROV 模式进行工作，配备了水下海底基站。Freedom AUV 主要配备了 3 维激光扫描仪、相机、多波束声呐、水听器，其技术参数如表 3 所示。

Freedom AUV 能够识别管道特征，可在距离海床 2 m 位置跟踪管道，具备障碍物检测、自主避让和环境感知等功能。Freedom AUV 还可以应用于深水现场检查 and 资产分析、远程海底测绘、海洋栖息地评估和水下干预活动等方面。

2020 年 9 月，Oceaneering 成功地将 Freedom AUV 与挪威 Equinor 公司和 Blue Logic 公司的水下对接站进行了对接。

4.4 Tri-TON 2 AUV (TT2 AUV)

2013 年，日本东京大学研发了悬停型 TT2 AUV^[19]，总体布置和技术参数分别如图 6 和表 4 所示。TT2 AUV 有 2 个垂直推进器，3 个水平推进器，其中 2 个沿载体轴向布置，1 个沿载体侧向布置。该 AUV 配备了 DVL、三轴光纤陀螺、声学定位通信装置以及前视摄像机。TT2 AUV 配有 3 个对接销，用来与海底基站的电磁铁销孔连接，还配备了无线充电设备，实现 AUV 能源补充。

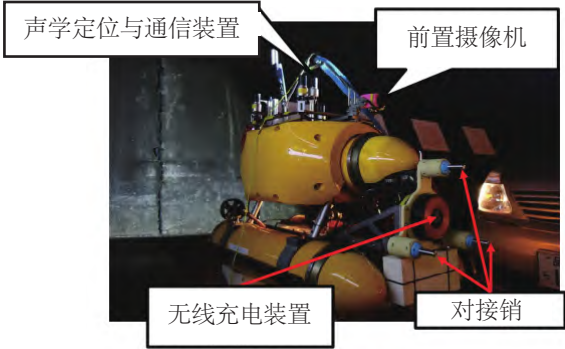


图 6 TT2 AUV
Fig.6 TT2 AUV

表 4 TT2 AUV 技术参数
Tab.4 The technical parameters of TT2 AUV

名称	数值
最大下潜深度	2000 m
尺寸	1.40 m×0.76 m×1.45 m
质量	280 kg
续航能力	10 h

TT2 AUV 海底基站如图 7 所示，该海底基站在顶部装有声学定位通信装置，用于 TT2 AUV 对

接导引定位和通信; 该海底基站前方安装了视觉对接导引灯, AUV 利用前视摄像机进行近距离对接导引。海底基站有 3 个带有电磁铁的销孔, 连接 AUV 的对接销具备厘米级的对接位置偏差容忍能力。此外, 该海底基站还配有 1 个无线充电装置(发射机)。

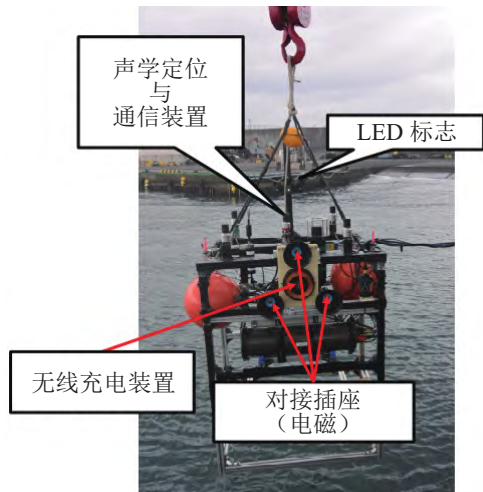


图 7 Tri-TON 2 (TT2) AUV 海底基站
Fig.7 The docking station of Tri-TON 2 (TT2) AUV

2018 年, TT2 AUV 在日本平津贺渔港进行了海上试验, 成功与海底基站对接, 并进行充电, 通过实验验证了系统的基本性能。此次海上试验 TT2 AUV 驻留在水下 3 天^[19]。

4.5 Imotus hovering AUV (IHAUV)

2018 年, 加拿大 Cellula 机器人公司开发了一种长驻悬停自主水下机器人 IHAUV^[20], 主要应用于海床到水面的垂直剖面观测。IHAUV 及其海底基站如图 8 所示, 技术参数见表 5。IHAUV 布置了 8 个矢量电动推进器, 具备 6 自由度运动能力。海底基站配备了蓝光调制解调器和感应充电装置, 用于传输数据和给 IHAUV 电池充电。

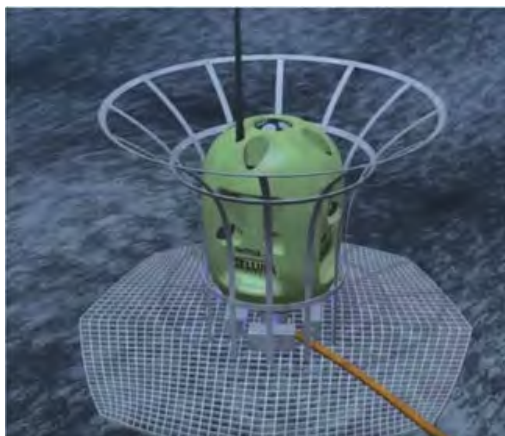


图 8 IHAUV
Fig.8 IHAUV

表 5 IHAUV 技术参数
Tab.5 The technical parameters of IHAUV

名称	数值
最大下潜深度	500 m (可选 3000 m)
尺寸	Φ1.1 m×0.9 m
质量	92 kg
电池电量	4 kW·h
探测范围	10 km (1.5 kn 航速)
续航能力	10 h

IHAUV 导航传感器主要包括压力深度传感器、DVL 和光纤陀螺, 用于观测的传感器主要包括摄像头、温盐深仪以及声学多普勒海流剖面仪, 可进行感兴趣区域环境持续监测。

4.6 深渊 AUV

海斗深渊(简称深渊)是指海洋中深度大于 6000 m 的海沟区域, 是一种非常独特的海洋极端环境。在中国科学院战略先导专项支持下, 我国展开了以深渊 AUV 为代表的深渊探测装备技术研发, 发展长期连续的深渊探测能力。深渊 AUV 及海底基站如图 9 和图 10 所示, 主要技术指标见表 6。



图 9 深渊 AUV
Fig.9 Abyss AUV



图 10 深渊 AUV 海底基站
Fig.10 The docking station of Abyss AUV

表 6 深渊 AUV 技术参数
Tab.6 The technical parameters of Abyss AUV

名称	数值
最大下潜深度	11 000 m
尺寸	3.45 m×1.21 m×1.00 m
质量	1355 kg
最大航速	2.5 kn
驻留时间	6 个月
续航能力	航速 2 kn 下 10 h

深渊 AUV 是一种可长期驻留、多次自主对接、获取深渊海底精细地形的 LRAUV。其艏部水平布置 2 个推进器来提供向前航行时的推进力。艏部上下布置 2 个垂直稳定翼，使 AUV 具备稳定直线航行能力。艏部布置 2 个垂直槽道推进器，艏部布置 1 个垂直槽道推进器，可提供垂向力。艏部和艉部各布置 1 个水平槽道推进器，可配合 2 个艉部推进器，完成侧移和原地回转运动。

深渊 AUV 的导航系统主要由 IMU、DVL、高度计、通信定位一体机信标、摄像头组成。其中通信定位一体机信标与摄像头主要用于 AUV 对接引导。该 AUV 所搭载的主要载荷为万米级进底多波束测量系统与温盐深仪等。

2022 年 12 月，深渊 AUV 开展了海上对接试验，验证了其自主探测技术和自主对接技术。未来将会进一步进行海底驻留测试，并将其集成于海底基站，用于深海资源长期监测。

4.7 LRAUV 系统的设计趋势

上文综述的国内外 6 款 LRAUV 中，Sabertooth AUV、FlatFish AUV 以及 Freedom AUV 主要是面向海洋工程领域研发的，可以用来进行油电、天然气等海底管道的 IMR 工作；TT2 AUV、IHAUV 以及深渊 AUV 主要是面向科学研究领域研发的，主要用来进行海洋环境监测与海底资源探测。但是这几款 LRAUV 系统大都处于开发与试验阶段，相关资料中均未介绍其具体的应用情况。随着技术的不断发展，LRAUV 系统将逐渐实现在深海环境的实际应用。

这几款 AUV 最长可驻留 6 个月，最大可下潜 11 000 m，且它们均具备自主对接、能源补充与数据交互功能。为了将 LRAUV 系统应用于军事领域中的预置武器研发，以及科学研究领域中的火山监测、环境变化监测等方面，必须进一步提升 LRAUV 系统的水下驻留时长指标（在海底驻留一年以上）。鉴于海底环境的高压与强腐蚀等特性，

LRAUV 系统在可靠性、健康检测等方面将会面临严峻的考验。

当前国内外已公开的 LRAUV 系统均由 1 台 AUV 和 1 个海底基站组成，其目的主要是进行长期的海底监测，并执行固定的探测任务。为了满足未来深海科学研究的需求，探测数据类型将越来越多样化，LRAUV 系统需要同时具备声学、光学、水体等多种探测功能。这些功能难以集成于一台 AUV 上，需要 LRAUV 系统拥有多台功能互补的 AUV。未来 LRAUV 系统将逐渐发展为由多个 AUV 与海底基站组成的深海长期驻留监测系统。

5 LRAUV 系统的关键技术及其发展趋势
(Key technologies and their development trends of LRAUV system)

LRAUV 系统需要在海底探测水下环境，并长期驻留在海底。下面对 LRAUV 系统的主要关键技术进行介绍与分析。

5.1 LRAUV 系统长期生存技术

5.1.1 可靠性技术

现阶段 LRAUV 系统的设计理念有了明显的进步，但技术还不够成熟。在高压、能见度差的复杂海洋环境下，深海长期驻留需要考虑各设备和部件的长久使用可靠性问题，若其出现故障且无法及时诊断并处理，将会导致 LRAUV 系统处于危险工作状态，甚至导致系统失效，无法完成使命和任务，严重情况下可能会产生灾难性的后果^[21-22]。因此，可靠性是开发 LRAUV 系统的核心工程技术问题，LRAUV 系统可靠性是其能够保证长时间驻留后依然正常工作的前提条件^[3]。

AUV 除常规的控制、导航、能源、推进等部分外，通常需增加额外的导引控制单元，用于图像处理等高计算量工作和自主对接等高自主性操作。海底基站由任务规划单元、锁紧唤醒设备、导引设备控制单元、数据存储计算机、视频处理与照明控制单元、无线充电及数据传输装置、通信定位基阵等组成。LRAUV 系统水下作业过程中，AUV 和海底基站通过通信定位一体机进行定位和通信，通过无线数据传输与充电装置进行数据传输、能量补给和唤醒控制。这部分功能在两者之间是耦合的，因此，在进行可靠性设计时，可将这部分功能所涉及的设备分别从 AUV 和海底基站中分离出来。

在进行 LRAUV 系统的可靠性设计时，需要将 LRAUV 可靠性需求转化为明确的可靠性设计指标，对总体可靠性指标进行分解，形成 LRAUV 系统各

组件和结构的可靠性指标, 并在此基础上, 开展 LRAUV 系统器件级、部件级、装置级和系统级的可靠性设计以及可靠性试验。可靠性设计可采用模块化设计、冗余设计、降额使用等方法。

迄今为止, AUV 系统的可靠性研究主要面向单次探测的典型应用模式, 而针对长期驻留、多次探测应用模式的研究较少。

5.1.2 健康监测技术

自主性和安全性是 LRAUV 系统的重要特征。LRAUV 系统长期驻留于海底工作, 面临着高压与强腐蚀等复杂的环境。此外, LRAUV 系统的软件面临长期运行的考验, 若软件系统出现故障, 同样会带来不可预知的风险。在海洋探测历史上, 有很多因各种故障导致 AUV 失事的案例, 如英国的 Autosub2 AUV^[23] 以及美国 Nereus AUV^[24] 等。健康监测技术能够自主检查水下机器人状态是否正常, 判断设备的使用寿命, 降低水下机器人系统因故障而造成机器人丢失等风险。

LRAUV 系统的健康监测技术的难点主要体现在人工参与困难、深海环境长期(数月至数年)影响系统健康、缺乏船只的辅助与维护等。LRAUV 系统的健康监测主要内容有: (1) 在 LRAUV 执行任务前, 进行系统状态检测及 AUV 与基站的故障诊断与维护。(2) 在 LRAUV 执行任务过程中, 随时监控 AUV 及基站状态, 判定是否存在关键系统故障、LRAUV 系统是否能够执行任务。例如检测通信定位一体机与视觉导引对接系统是否发生故障, 以判断 AUV 能否完成对接。若出现故障无法完成对接, 则需要 AUV 采取坐底措施或浮出水面。(3) 在 LRAUV 系统执行探测任务后, 进行系统检查, 确定各零部件及功能单元是否能够正常工作, 以判断是否开展下一个探测任务, 并制定维护策略。LRAUV 系统健康检测主要对探测感知系统、运动执行机构、控制系统、能源系统以及通信系统进行健康监测。

(1) 探测感知系统可以看作是 LRAUV 的眼睛与耳朵。为了能够有效完成规划的探测任务, LRAUV 系统必须保证感知系统可靠工作。LRAUV 携带的传感器有 DVL、深度计、多波束测量系统、声学通信定位一体机、相机、3 维激光扫描仪等。

(2) 运动执行机构是 LRAUV 系统实现各种运动及动作的系统, 是保证 LRAUV 系统可以按照指令执行航行、对接、定位、锁紧等动作的基础结构。若某一执行机构发生故障, 则无法完成特定任务。

(3) 能源系统检测与诊断主要针对 LRAUV 电池

的状态、温度、各电池模块的通信以及耐压壳水密性等问题。

(4) 通信系统检测主要针对 LRAUV 是否能正常通信, 对通信数据可靠与否进行判断。

健康监测技术是包含信号处理、数理统计、可靠性以及人工智能等多学科的综合性技术。在故障诊断方面, 常见方法包括基于模型的方法、基于规则的方法以及基于数据驱动的方法^[25]。其中, 由于 AUV 海洋应用数据积累不足, 无法满足学习算法训练需求, 因此基于数据驱动的方法应用较少。但基于数据驱动的方法具备学习功能, 能够帮助 LRAUV 系统逐渐完善结构及软硬件的故障诊断, 并且有实现系统的健康监测与管理的发展潜力。

5.1.3 其他长期生存技术

为了保证 LRAUV 系统能够在水下驻留期间无碍正常工作, 还需要研究自主休眠静默与唤醒、结构防腐蚀、生物防附着、免维护高效推进、远程通信等技术。

LRAUV 系统在深海环境长期驻留期间, 为节约能源, 需要采用全系统断电的方式实现 AUV 无值守休眠静默。在休眠期间, 通过海底基站定期对电池充电实现 AUV 电池保护, 保证电池寿命。在实验站下达探测任务后, 需要唤醒 AUV 执行探测任务, 研究唤醒信号触发及重唤醒技术, 实现 AUV 可靠唤醒。

LRAUV 系统在深海环境中会受到海水的腐蚀^[3], 需要对 LRAUV 系统出现的腐蚀问题分类。从 LRAUV 系统结构材料选取到工艺设计整个过程中, 考虑 LRAUV 系统部件的防腐蚀问题, 保证深海驻留期间 LRAUV 系统结构无损坏。

LRAUV 系统在海底长期驻留期间, 海底基站以及 AUV 可能会产生海底生物以及泥沙附着等问题^[26]。附着物会妨碍 AUV 识别海底基站, 导致对接失败, 无法回到海底基站。因此, 在 LRAUV 系统研制过程中, 需要研究生物防附着技术。

为了使 LRAUV 系统在长期驻留期间能够正常执行探测任务, 其 AUV 推进系统要具有较强的稳定性。鉴于 LRAUV 系统采用无人回路反馈的工作模式, 需要研究免维护的推进技术。

LRAUV 系统需要多个通信链路来实现相互之间的数据、指令的传输。一方面, 当 AUV 距离海底基站较近时, 利用低带宽声波信标, 通过海底网络, 可以在几公里的范围内接收新任务信息。另一方面, 利用基站实现 LRAUV 系统与岸基中心的通信, 以便于人类介入到 LRAUV 系统探测工作中,

完成一些 LRAUV 系统难以自主实现的任务规划。同时,人的介入还可以选择 LRAUV 系统下一步探测任务,提高 LRAUV 系统工作的可靠性。

5.2 基站支撑技术

海底基站的供电是 LRAUV 系统长期运行的关键问题,其供电方式可以分为 4 种:(1)利用水面舰艇/船进行供电^[27]。此方式适合短期作业或者试验测试。(2)基站携带大容量电池^[28]。此种方式可以使 LRAUV 系统灵活布置在任何目标区域,但电池占用了基站的大量空间。(3)借助锚系浮标系统^[29]。利用太阳能、风能或海洋波浪能发电,此种方式可以节约基站空间,但系统隐蔽性差。(4)利用海底观测网/实验站进行供电^[30]。海底观测网利用海底光电缆将一系列仪器和陆地相连接,能够解决 LRAUV 系统供电问题。但此方式限制了 LRAUV 工作区域,只能在海底观测网范围内部署与工作。

在数据传输方面,海底基站可以与海底观测网连接,向岸基中心传输数据。但是,当 LRAUV 系统应用于特定的深海区域时,与岸基中心的通信变得困难,此时可以考虑利用光缆锚系浮标实现基站与岸基中心之间的通信,还可利用垂直剖面 AUV/滑翔机将基站信息远程传输至岸基中心^[31]。如图 11 所示,将基站的数据传输给垂直剖面 AUV/滑翔机;垂直剖面 AUV/滑翔机浮出水面,利用卫星与岸基中心远程通信传输数据;完成数据传输后,垂直剖面 AUV/滑翔机下潜并与基站对接,驻留在基站内。

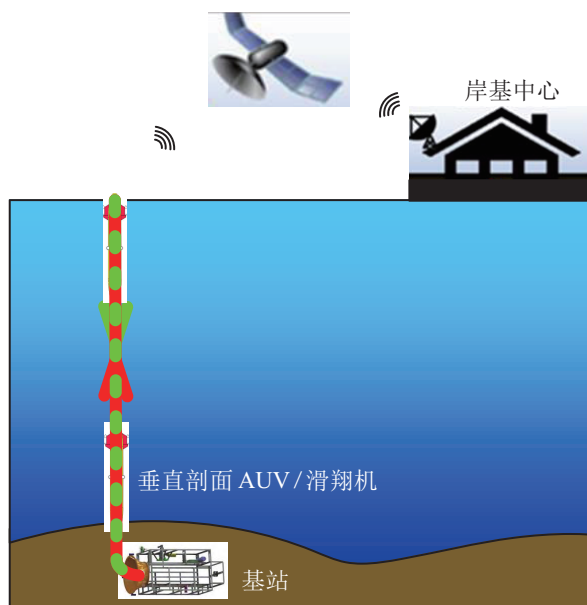


图 11 垂直剖面 AUV/滑翔机数据传输工作示意图

Fig.11 Schematic diagram of the vertical section AUV/glider data transmission

在基站维修养护方面,可以利用 ROV 或 AUV 进行定期维修与养护,对附着物进行清理,进行简单的零件更换、维修等操作。若基站出现关键功能部件损坏或关键系统失效等问题,将需要利用艇/船将基站回收。在艇/船上由专业工作人员进行维修养护,或者是运输至陆地,在陆地上进行养护。然后重新部署至海底。

基站回收可以采用类似于 AUV 回收的方式:抛掉上浮压铁,无动力上浮至水面,将自身的位置信息发送到母船;母船航行至其预计上浮点的 1 km 范围内,工作人员利用小艇及吊装设备进行回收。此外,海底基站的设计可以安装铠装光缆装置,连接锚系浮标系统。在回收海底基站时,母船航行至其布置区域。通过船上专用设备,将铠装光缆连到船上布置的绞车上,利用绞车将铠装光缆逐渐收紧,进而将其回收至甲板。

在基站研发及部署过程中,模块化技术也是一项至关重要的内容。通过模块化技术,将任务载荷与基本平台相分离,根据实际需求进行模块化更换,减小了维护与升级成本。在 LRAUV 系统部署过程中,通过模块化搭载、收放、对接与操纵 LRAUV,能够提高作业效能与安全性。模块化搭载还可以用于采样的样品、各类待布放或回收的通用/专用仪器设备等有效载荷的入舱、存储与转运。

5.3 AUV 自主对接技术

当 LRAUV 系统中的 AUV 完成探测任务后,需要回到海底基站内进行能源补充与数据交互。AUV 与海底基站的自主对接是实现上述任务的前提。美国在 AUV 自主对接技术方面处于领先地位,典型的 AUV 系统如 Odyssey-IIB^[32-34]、REMUS^[35-36]、Bluefin^[37-38]、Morpheus^[39-40]等,均进行了大量的水下对接试验。此外,韩国^[41-43]、西班牙^[44]、日本^[45-48]、法国^[49-51]、德国^[52]等国家也都开展了水下自主对接的试验研究。近年来,国内的中国科学院沈阳自动化研究所^[53-55]、浙江大学^[56-60]、哈尔滨工程大学^[61-65]、中国船舶重工集团公司第七一五研究所^[66]等单位在 AUV 自主对接方面开展了一系列工作。目前已经完成了静态/动态对接、接触/非接触能源数据交换的湖上或浅海试验。其中,中国科学院沈阳自动化研究所的深渊 AUV 于 2022 年 12 月开展了 3 次深海对接试验,均取得成功。

AUV 对接可分为导引式对接、落座式对接和捕获式对接。导引式对接中,海底基站大都采用喇叭口形的设计,可实现 AUV 单向对接,如图 12(a)、

(b)^[44] 和 (c)^[62] 所示; 落座式海底基站如图 12(d)^[40] 所示, 可实现全方位对接; 捕获式对接可分为 AUV 捕获海底基站和海底基站捕获 AUV 两种形式, 如图 12(e)^[33] 和图 12(f)^[50] 所示。自主对接需要研究深海环境下 AUV 进入海底基站的导引方法, 海流干扰、浑浊水体或声干扰会使对接过程变得复杂。

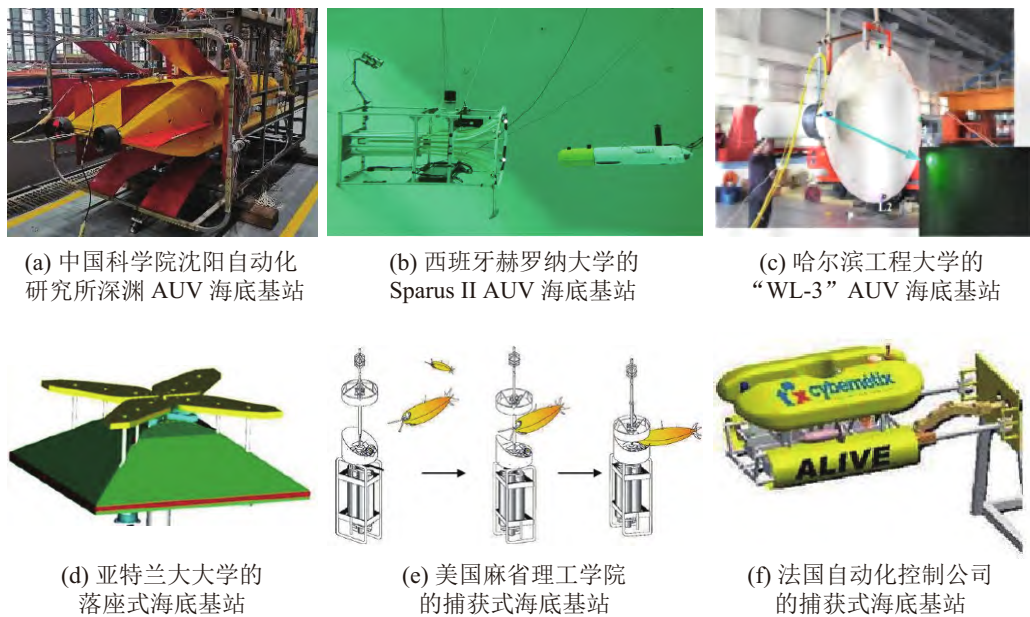


图 12 典型海底基站

Fig.12 Typical docking stations

对接导引技术是 AUV 水下对接的关键技术。AUV 完成探测作业后, 通过声学定位引导 AUV 到达能够观察到导引灯的距离范围; 此后, AUV 利用视觉导引技术, 控制 AUV 实施对接。

AUV 声学导引技术^[67-70]的基础是 AUV 相对声学信标的位置信息, 该位置信息可通过超短基线定位方法产生。视觉导引^[62-64,71-81]通常利用相机采集导引图像, 从图像中提取出导引特征, 计算 AUV 相对于海底基站的位姿。

导引式海底基站的对接装置设计简单, AUV 不需要改造, 容易锁紧, 是应用最广泛的一种对接方式。为了减小 LRAUV 系统整机体积和重量, 对接装置应尽可能地少占用海底基站的空间。这就需要对接装置的入口尺寸较小, 对接空间余量小, 因此, AUV 在对接过程中, 水流干扰将会变成无法忽视的因素: 其可能导致 AUV 偏离规划轨迹, 对接失败; 严重情况下可能发生 AUV 与海底基站的碰撞, 产生损坏。为此, 水下对接还需要研究高精度对接导引和抗干扰对接控制技术, 以提高 AUV 对接可靠性和准确性。

5.4 能源补充与数据交换技术

AUV 充电包括无线充电与接触式充电^[66,82]两种方式, 如图 13 所示。接触式湿插拔作业难度高、漏电隐患大、连接器在多次循环使用后可能退化

和失效; 而无线充电技术^[38,83-100]能避免上述问题, 更适合深海环境长期使用。

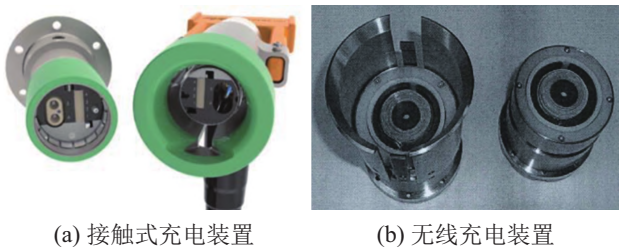


图 13 水下充电装置

Fig.13 Underwater charging devices

最早将无线充电技术应用到水下对接领域的是 Odyssey IIB AUV 水下对接系统, 其充电效率达到 79%^[34,89-90]。日本川崎重工 Marine-bird 水下对接系统^[91]采用日本东北大学和日本 NEC 公司设计的水下无线充电系统为 AUV 充电, 充电功率为 1 kW, 充电效率最高可达 90%^[91-93]。美国 Bluefin 水下对接系统可以实现 AUV 的水下无线充电^[37], 系统具有 8 个功率为 250 W 的无线充电模块。近几年我国在此领域也发展较快。浙江大学针对 AUV 水下对接充电技术进行了深入研究^[59,83,94-95], 于 2017 年成功实现“海豚二号” AUV 与水下基站的自主对接, 完成了水下无线充电^[59], 充电最高功率为 681 W。中国科学院电工研究所^[97-100]提出了大容量无线充

电方法,研制了智能无线充电装置,并于 2020 年成功通过 3000 m 海试。

在数据交互方面,目前在水下自主对接系统中大多采用无线网通信^[101]或水声通信^[102],但是速率较低,不支持大量数据的实时可靠通信。光通信能实现高速、实时的近距离高带宽水下无线通信,具有抗干扰能力强、能耗低等优势,典型产品有 Hydromea、Sonardyne 等,数据传输速率几十 Mbps 左右。2020 年日本岛津制造所的光学无线通信设备 MC100^[103],通信速率可以达到 95 Mbps 以上,但价格昂贵。

无线电能传输与通信技术正处于快速发展时期,随着 AUV 对续航里程需求的增大,未来需要进一步在无线充电功率密度、系统效率、可靠性、无线通信速率等方面进行大力提升,降低对系统对接精度的要求,推进该项技术的实用化进程。

5.5 LRAUV 系统探测作业技术

5.5.1 自主探测作业技术

要实现 LRAUV 的水下长期自主探测作业,需要在任务规划、环境感知、自主导航定位等 3 个方面具备高度的自主能力:

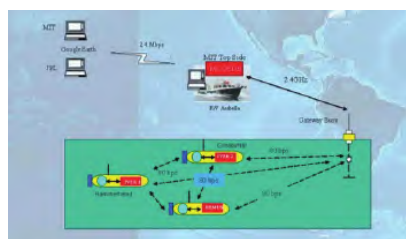
(1) 自主任务规划技术。LRAUV 系统需要在某一区域反复执行不同科学目标的探测任务。人工干预其自主作业过程存在较大的时间和成本开销,因此,需要 LRAUV 系统能够自主决策如何执行探测任务^[2],综合考虑 AUV 能源、环境安全性等多种关键性约束,决定如何对任务集合进行分配,进行多潜次、多任务序列的自主探测,实现潜次任务调度策略和任务时间效能的优化。当前关于 AUV 的研究中,还未发现有关内容的研究,这是个亟待解决的问题。在任务规划中,首先要解决探测环境地图构建的问题;然后根据探测环境以及潜水器的能力,利用人工智能技术综合划分探测任务为多个任务序列;最后针对每个任务序列,制定相应的探测任务航行路线以及探测目标数据的获取策略,由 LRAUV 系统逐个执行各任务。

(2) 智能环境感知技术。在开展任务探测过程中,AUV 需要根据实际感知环境,来进行探测路径的实时规划与该任务序列的探测路线调整,以确保 AUV 能够精确和高效地完成探测任务^[2-3]。为了实现该目标,需要研究地形地貌数据自动高精度归位技术和声呐点云数据特征识别技术,使得 AUV 具备生成包含地形地貌的地图和识别典型特征的能力。在此基础上,研究 AUV 自主规划技术,根据 AUV 状态和环境信息对探测使命进行在线调整^[104],提高 AUV 探测的安全性和效率。

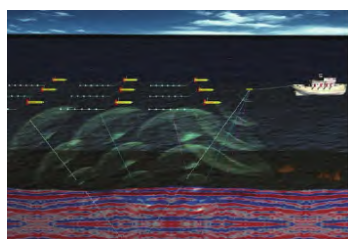
(3) 自主导航定位技术。LRAUV 系统需要执行诸多不同类型的任务,不可避免地需要在复杂海底地形工况下近底航行,此时可以通过重复的特征制图和海底跟踪来提高导航精度^[2-3]。随着水下视觉 SLAM(同步定位与地图创建)技术的发展,AUV 水下高精度定位已具备一定的实现能力。在 AUV 探测过程中,避障也是需要重点关注的问题。目前,基于多波束声呐的避障系统在 2 维和 3 维模式下得到了明显改进。除声呐外,立体/3D 视觉图像和 3D 激光扫描可以用来识别和躲避障碍物^[3],在几分钟内以毫米级的局部精度创建水下物体的 3D 模型。AUV 搭载这些传感器是水下现场导航、检查和干预的基础,在 AUV 研制过程中,需要综合考虑避障需求与探测需求,来选择合适的搭载载荷。

5.5.2 协同探测作业技术

在协同探测方面,LRAUV 系统需要开展以基站为中心的多 AUV 协同探测研究,包括海底基站与 AUV 的异构协同与多 AUV 之间的任务协同。已阅读文献中,未见到相关研究。目前协同探测研究大都以水面船/无人艇为中心,美国与欧盟均展开了大量的相关研究,如海洋观测站计划(OOI)^[105]、观测系统仿真试验(OSSE)^[106]以及可扩展移动水声组网技术(Wi MUST)^[107]等项目。其中,OSSE 项目研发了海洋数据采集系统,如图 14(a)所示,该系统由多 AUV 和水面移动平台组成。Wi MUST 研发了一套水声组网系统,该系



(a) OSSE 项目多 AUV 协同探测试验



(b) Wi MUST 项目多 AUV 协同探测



(c) 可协同组网作业的“探索 100” AUV

图 14 典型多 AUV 协同探测

Fig.14 Typical multi AUVs cooperative exploration

统由多 AUV/USV 组成, 可用于海底地形测绘及海洋搜救等任务, 如图 14(b) 所示。我国西北工业大学、哈尔滨工程大学、中国科学院沈阳自动化研究所、中国海洋大学以及上海交通大学等机构均在多 AUV 协同探测领域展开了研究, 中国科学院沈阳自动化所研制了多台可协同组网的“探索 100” AUV, 如图 14(c) 所示, 经过多次湖、海试验, 已成功完成水下协同编队、目标搜探与追踪、以及海上声源定位等任务。

协同探测的主要研究内容如图 15 所示, 相比于传统的以水面船为中心的协同探测, LRAUV 系统长期驻留于深海海底, 在协同探测技术上要求更高的自主性, 整个协同任务无人参与。因此, 基站除了具备任务分配能力以外, 还要具备任务发起与规划能力。考虑到 LRAUV 系统的特殊性, 需要针对多 AUV 进出海底基站的协同调度进行研究。在导航定位方面, 以基站为中心的协同探测通信难度远高于以水面船为中心的协同探测。以水面船为中心的协同探测可以根据需要来驱使水面船进行移动, 多 AUV 可通过与水面船之间的通信来实现相互通信。然而 LRAUV 系统的基站在海底无法大范围移动, 多 AUV 会有大量距离基站较远的工作需求, 这就要求多 AUV 要具备更强的自身导航定位与互定位能力。同时, 由于 AUV 与基站距离较远, 多 AUV 之间的通信更依赖于 AUV 自身, 难以利用基站来实现相互通信, 以基站为中心的协同探测通信的可靠性有待进一步加强。同时, 为了满足探测需求, 针对通信问题, 还需研究弱通信条件下多 AUV 迟滞系统的稳定控制。

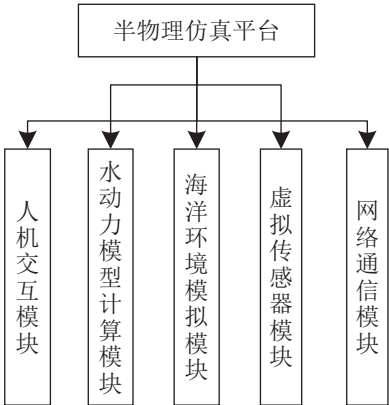


图 15 协同探测主要研究内容

Fig.15 Main research contents of cooperative exploration

5.6 LRAUV 系统仿真技术

仿真可以为 LRAUV 系统提供 3D 海底模型、AUV 水动力模型、对接模型等, 可为系统设计提供

准确的模拟环境。半物理仿真系统还可集成测试系统硬件设备, 提供有关 LRAUV 系统和部件的局限性和耐久性的信息, 从而改善系统可靠性设计。

半物理仿真平台主要负责完成 LRAUV 系统的预先测试和仿真, 是验证自动驾驶计算机的全部软硬件必不可少的设备。半物理仿真平台主要是实现系统使命演示与验证、系统应急故障处理测试与验证、系统航行控制参数调试与验证、对接任务过程中潜水器位置的实时仿真等功能, 半物理仿真平台组成如图 16 所示。自动驾驶单元上运行控制与导航软件, 实现路径及使命规划和航行控制; 虚拟环境仿真计算机软件模拟除自动驾驶单元以外的外部设备并根据水动力模型计算 AUV 运动状态; 图形显示计算机软件仿真海底地形地貌和 AUV 航行与对接信息。

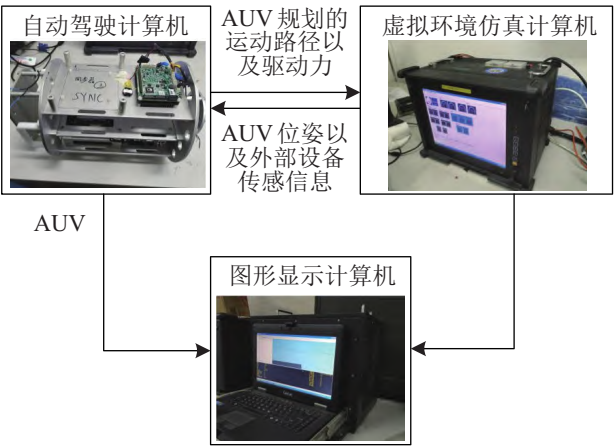


图 16 半物理仿真平台示意图

Fig.16 Schematic diagram of the semi-physical simulation platform

LRAUV 系统执行的探测任务包括大范围的粗略探测与小范围的精细探测, 大范围探测可以帮助 LRAUV 系统选择感兴趣区域, 以便开展小范围精细探测。在当前仿真技术研究中, 缺乏针对上述运动及探测场景的仿真。未来需要研究大范围粗略探测和小范围精细探测的运动仿真技术, 进一步提升半物理仿真平台的能力, 更好地辅助 LRAUV 系统研发工作。在 LRAUV 进行精细探测时, 通常会采用高精度的光学环境感知技术, 所采用的传感器主要包括激光传感器及相机等。因此, 也需要开展光学传感器的高仿真度建模技术的研究。

6 结论 (Conclusion)

相比于传统深海探测 AUV 的单航次探测策略, LRAUV 系统能够对深海环境开展持续监测, 了解深海环境的变化过程, 为海底地质成因分析、固体

矿产资源评估、海洋生物极端环境适应性分析、极端事件对海底环境影响分析等科学问题的研究提供长时间、连续性的探测数据。本文对 LRAUV 系统当前的研究现状和未来发展进行了综述与分析,简要介绍了 LRAUV 系统的含义,分析了其工作模式,对 LRAUV 系统的应用领域进行了分析与展望,在军事领域主要应用为水下预置武器,在海洋工程领域主要应用为海底石油和天然气产业中的管道检测与维护,在科学研究领域主要应用为深海矿区采矿前后环境变化监测、海底火山活动监测及其喷发前后对环境影响的探测、极地冰下探测以及其他感兴趣目标区域的持续环境监测,例如大陆边缘动态生态系统监测以及台风、地震等事件对海洋环境的影响。

综述了目前国内外的 6 款 LRAUV 系统,包括 Sabertooth AUV、FlatFish AUV、Freedom AUV、TT2 AUV、IHAUV 以及深渊 AUV,介绍了它们的功能、主要参数以及试验应用情况,在此基础上,针对上述场景应用需求以及 LRAUV 研究现状,对 LRAUV 关键技术的研究现状进行了综述,关键技术存在的重点及未来发展方向如下:

1) 长期生存技术。(1) 系统可靠性是 LRAUV 系统实现长期驻留的必要条件。当前 LRAUV 系统可靠性研究较少,未来需要根据 LRAUV 驻留时长和探测任务来分析其可靠性指标,开展 LRAUV 器件级、部件级、装置级和系统级的可靠性设计以及可靠性试验。(2) LRAUV 系统的健康监测是一项亟需研究的技术,是保障其长时间深海驻留依然能够有效工作的关键技术。目前 LRAUV 领域缺乏相关研究,且以往水下机器人的研究主要围绕故障诊断技术开展,尚未形成健康监测系统。基于数据驱动的方法具备学习功能,未来将会成为重点研究方向:通过不断地学习,该方法能够逐步实现 LRAUV 系统的健康监测,提高 LRAUV 系统的安全性和智能性。(3) 目前的 LRAUV 系统设计驻留时长为半年,未来需要研究能够驻留更长时间的 LRAUV 系统。(4) 除了上述关键技术,其他有待进一步研究的技术主要包括 AUV 自主休眠静默与唤醒技术、生物防附着技术、结构防腐蚀技术、免维护高效推进技术、远程通信技术等。

2) 基站支撑技术。当前海底基站的理想部署方式是在海底观测网/海底基站的节点上部署,借助海底观测网进行岸基供电与岸基通信。未来,为了实现 LRAUV 系统在深海区域应用,需要研究 LRAUV 系统单独供电及其与岸基通信方法。在维

修保养方面,可以利用 ROV 等机器人进行简单的维修操作;对于复杂维修问题,需要将其回收至船上,进行人工维修。此外,模块化搭载也是基站运行和部署的未来发展趋势。

3) 自主对接技术。其相关研究较多,技术成熟度较高。未来主要研究高精度抗干扰对接技术,并将自主对接逐渐向深海应用推进。

4) 能源补充及数据传输技术。(1) 在能源补充方面,未来主要发展方向为无线充电技术。随着 LRAUV 系统中 AUV 对续航里程需求的增大,需要进一步在无线充电功率密度、系统效率、可靠性等方面进行大力提升。(2) 在数据传输方面,需要进一步研究高速率、高鲁棒性的数据传输技术,提高系统对传输装置的错位容忍能力。

5) 探测作业技术。(1) 在自主探测方面,未来的主要发展方向为探测任务的自主规划、智能环境感知和 AUV 探测过程中的探测路线实时规划与调整。此外,导航定位与避障技术主要发展方向为声光联合高精度 SLAM 导航及避障技术,以提高 AUV 定位精度与避障可靠性。(2) 在协同探测方面,多 AUV 通信、任务分配、协同探测路径规划、协同导航以及协同编队控制方面的研究仍显不足,多 AUV 系统需要从加强通信可靠性、提高感知精度、增强操作能力、提高数据处理速度和系统稳定性等方面进行改进。

6) 仿真技术。仿真技术可以辅助科研人员开发和验证测试 LRAUV 系统。为了满足 LRAUV 系统仿真需求,需要进一步研究深海驻留环境模拟、大范围粗略探测和小范围精细探测的运动仿真、光学传感器模拟等技术,为 LRAUV 系统设计提供指导。

总之,LRAUV 系统距离常规应用,还有很多亟待突破的关键技术和难题要解决。LRAUV 系统相关领域研究依然存在着很大的发展空间。

参考文献 (References)

- [1] 蒋新松,封锡盛,王棣棠.水下机器人[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2000.
Jiang X S, Feng X S, Wang D T. Unmanned underwater vehicles[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2000.
- [2] Manalang D, Delaney J, Marburg A, et al. Resident AUV workshop 2018: Applications and a path forward[C]//IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium. Piscataway, USA: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/AUV.2018.8729720.
- [3] Newell T. Technical building blocks for a resident subsea vehicle[C]//Offshore Technology Conference. Richardson, USA: OnePetro, 2018. DOI: 10.4043/28856-MS.

- [4] Song Z Y, Marburg A, Manalang D. Resident subsea robotic systems: A review[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2020, 54(5): 21-31.
- [5] 陈锋, 杨清轩, 周泓伯, 等. 国外深海作战概念发展及启示[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(4): 186-189.
Chen F, Yang Q X, Zhou H B, et al. Research on development and enlightenment of foreign deep sea operations concepts[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(4): 186-189.
- [6] 姚芳华. 基于水下预置系统的深远海水下作战体系[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2020, 3(1): 82-86.
Yao F H. Research on deep-sea underwater combat system based on underwater preset system[J]. *Digital Ocean & Underwater Warfare*, 2020, 3(1): 82-86.
- [7] Furuholmen M, Hanssen A, Carter R, et al. Resident autonomous underwater vehicle systems – A review of drivers, applications, and integration options for the subsea oil and gas market[C]//Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. Richardson, USA: OnePetro, 2013.
- [8] Geng W B, Lü X Z, Wang L, et al. Development of underwater vehicle's application in offshore oil and study on the key problems of anti-disturbance control[C]//Journal of Physics: Conference Series, International Conference on Computer, Communication, Control, Automation and Robotics. Bristol, UK: IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1976/1/012054.
- [9] McLeod D, Jacobson J R. The role of autonomous underwater vehicles in deepwater life of field integrity management[C]//Offshore Technology Conference. Richardson, USA: OnePetro, 2011. DOI: 10.4043/22438-MS.
- [10] 联合国海洋法公约[EB/OL]. [2022-10-01]. <https://www.un.org/zh/documents/treaty/UNCLOS-1982>.
United Nations Convention on the Law of the Sea[EB/OL]. [2022-10-01]. <https://www.un.org/zh/documents/treaty/UNCLOS-1982>.
- [11] Manalang D, Delaney J R. Axial seamount-restless, wired and occupied: A conceptual overview of resident AUV operations and technologies[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761305.
- [12] 程晓, 范双双, 郑雷, 等. 极地环境探测关键技术[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(7): 921-931.
Cheng X, Fan S S, Zheng L, et al. Critical technologies for detection of polar environment[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(7): 921-931.
- [13] Lopez J L, Grandi S. Fully autonomous marine seismic acquisition systems for reservoir monitoring[C]//International Congress of the Brazilian Geophysical Society & Expogef. Sociedade Brasileira de Geofísica, 2019. DOI: 10.22564/16cis bgf2019.337.
- [14] Johansson B, Siesjö J, Furuholmen M. Seaeye Sabertooth, a hybrid AUV/ROV offshore system[C]//SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition. Richardson, USA: OnePetro, 2011. DOI: 10.2118/146121-MS.
- [15] Albiez J, Joyeux S, Gaudig C, et al. FlatFish – A compact subsea-resident inspection AUV[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2015. DOI: 10.23919/OCEANS.2015.7404442.
- [16] Albiez J, Cesar D, Gaudig C, et al. Repeated close-distance visual inspections with an AUV[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761099.
- [17] Bogue R. Robots in the offshore oil and gas industries: A review of recent developments[J]. *Industrial Robot*, 2019, 47(1): 1-6.
- [18] Oceaneering. Freedom autonomous vehicle[EB/OL]. (2022-08-21) [2022-10-21]. <https://www.oceaneering.com/rov-services/next-generation-subsea-vehicles/freedom/>.
- [19] Matsuda T, Maki T, Masuda K, et al. Resident autonomous underwater vehicle: Underwater system for prolonged and continuous monitoring based at a seafloor station[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, 120. DOI: 10.1016/j.robot.2019.07.001.
- [20] Nichols J, Leslie D, Soyulu S, et al. Imotus: An autonomous underwater resident vehicle for vertical profiling[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604684.
- [21] 周海亮. 水下滑翔机浮力驱动系统的可靠性研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
Zhou H L. The reliability of underwater glider buoyancy-driven system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [22] 朱大奇, 刘乾, 胡震. 无人水下机器人可靠性控制技术[J]. *中国造船*, 2009, 50(2): 183-192.
Zhu D Q, Liu Q, Hu Z. Reliability control technology of unmanned underwater vehicles[J]. *Shipbuilding of China*, 2009, 50(2): 183-192.
- [23] Xiang X B, Niu Z M, Lapierre L, et al. Hybrid underwater robotic vehicles: The state-of-the-art and future trends[J]. *Hkic Transactions*, 2015, 22(2): 103-116.
- [24] Nunnally C C, Friedman J R, Drazen J C. In situ respiration measurements of megafauna in the Kermadec Trench[J]. *Deep Sea Research, Part I: Oceanographic Research Papers*, 2016, 118: 30-36.
- [25] 黄琰, 李岩, 俞建成, 等. AUV 智能化现状与发展趋势[J]. *机器人*, 2020, 42(2): 215-231.
Huang Y, Li Y, Yu J C, et al. State-of-the-art and development trends of AUV intelligence[J]. *Robot*, 2020, 42(2): 215-231.
- [26] Li J H. Study on the UUV operation via conventional submarine's torpedo tube[J]. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 2014, 17(1): 33-40.
- [27] 郑荣, 辛传龙, 汤钟, 等. 无人水面艇自主部署自主水下机器人平台技术综述[J]. *兵工学报*, 2020, 41(8): 1675-1687.
Zheng R, Xin C L, Tang Z, et al. Review on the platform technology of autonomous deployment of AUV by USV[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(8): 1675-1687.
- [28] Wang T L, Zhao Q C, Yang C J. Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 224. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108744.
- [29] Frye D E, Kemp J, Paul W, et al. Mooring developments for autonomous ocean-sampling networks[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 477-486.
- [30] Ishibashi S, Tanaka K, Ota Y, et al. The underwater recharge docking system for an autonomous underwater robot applying visual information[C]//IEEE Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 127-130.
- [31] Lin M W, Yang C J. Ocean observation technologies: A review[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33. DOI: 10.1186/s10033-020-00449-z.

- [32] Wirtz M, Hildebrandt M, Gaudig C. Design and test of a robust docking system for hovering AUVs[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2012. DOI: 10.1109/OCEANS.2012.6404975.
- [33] Singh H, Bellingham J G, Hover F, et al. Docking for an autonomous ocean sampling network[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 498-514.
- [34] Bellingham J G. Autonomous underwater vehicle docking[M]//Springer Handbook of Ocean Engineering. Berlin, Germany: Springer, 2016: 387-406.
- [35] Stokey R, Allen B, Austin T, et al. Enabling technologies for REMUS docking: An integral component of an autonomous ocean-sampling network[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 487-497.
- [36] Rauch C G, Purcell M J, Austin T, et al. Ship of opportunity launch and recovery system for REMUS 600 AUV's [C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2008. DOI: 10.1109/OCEANS.2008.5151832.
- [37] McEwen R S, Hobson B W, McBride L, et al. Docking control system for a 54-cm-diameter (21-in) AUV[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33(4): 550-562.
- [38] Hobson B W, McEwen R S, Erickson J, et al. The development and ocean testing of an AUV docking station for a 21" AUV[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2007. DOI: 10.1109/OCEANS.2007.4449318.
- [39] Sarda E, Dhanak M. Concept for a USV-based autonomous launch and recovery system[C]//Launch and Recovery. Baltimore, USA: Curran Red Hook, 2014.
- [40] Lambiotte J C, Coulson R, Smith S M, et al. Results from mechanical docking tests of a Morpheus class AUV with a dock designed for an OEX class AUV[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2002: 260-265.
- [41] Park J Y, Jun B H, Lee P M, et al. Docking problem and guidance laws considering drift for an underactuated AUV [C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2011. DOI: 10.1109/Oceans-Spain.2011.6003574.
- [42] Kang H, Cho G R, Kim M G, et al. Mission management technique for multi-sensor-based AUV docking[J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2022, 36(3): 181-193.
- [43] Pyo J, Cho H, Joe H, et al. Development of hovering type AUV "Cyclops" and its performance evaluation using image mosaicing[J]. Ocean Engineering, 2015, 109: 517-530.
- [44] Palomeras N, Vallicrosa G, Mallios A, et al. AUV homing and docking for remote operations[J]. Ocean Engineering, 2018, 154: 106-120.
- [45] Fukasawa T, Noguchi T, Kawasaki T, et al. "Marine Bird", a new experimental AUV with underwater docking and recharging system[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2003: 2195-2200.
- [46] Hsu H Y, Toda Y, Watanabe K, et al. Visibility improvement in relation to turbidity and distance, and application to docking [J]. Artificial Life and Robotics, 2020, 25: 453-465.
- [47] Sato Y, Maki T, Masuda K, et al. Autonomous docking of hovering type AUV to seafloor charging station based on acoustic and visual sensing[C]//IEEE Underwater Technology. Piscataway, USA: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/UT.2017.7890282.
- [48] Sato Y, Maki T, Matsuda T, et al. Detailed 3D seafloor imaging of Kagoshima Bay by AUV Tri-TON2[C]//IEEE Underwater Technology. Piscataway, USA: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/UT.2015.7108314.
- [49] Deltheil C, Didier L, Hospital E, et al. Simulating an optical guidance system for the recovery of an unmanned underwater vehicle[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(4): 568-574.
- [50] Brignone L, Perrier M, Viala C. A fully autonomous docking strategy for Intervention AUVs[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2007. DOI: 10.1109/OCEANS.2007.4302290.
- [51] Evans J, Redmond P, Plakas C, et al. Autonomous docking for Intervention-AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2003: 2201-2210.
- [52] Hildebrandt M, Gaudig C, Christensen L, et al. Two years of experiments with the AUV dagon – A versatile vehicle for high precision visual mapping and algorithm evaluation[C]//IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium. Piscataway, USA: IEEE, 2012. DOI: 10.1109/AUV.2012.6380722.
- [53] Wu L H, Li Y P, Su S J, et al. Hydrodynamic analysis of AUV underwater docking with a cone-shaped dock under ocean currents[J]. Ocean Engineering, 2014, 85: 110-126.
- [54] 郑荣, 吕厚权, 于闯, 等. AUV 与自主移动坞站对接的技术研究及系统设计实现[J]. 机器人, 2019, 41(6): 713-721.
- Zheng R, Lü H Q, Yu C, et al. Technical research, system design and implementation of docking between AUV and autonomous mobile dock station[J]. Robot, 2019, 41(6): 713-721.
- [55] 燕奎臣, 吴利红. AUV 水下对接关键技术研究[J]. 机器人, 2007, 29(3): 267-273.
- Yan K C, Wu L H. A survey on the key technologies for underwater AUV docking[J]. Robot, 2007, 29(3): 267-273.
- [56] Tang J Z, Yu Y F, Nie Y. An autonomous underwater vehicle docking system based on optical guidance[J]. Ocean Engineering, 2015, 104: 639-648.
- [57] Lin R, Zhao Y C, Li D J, et al. Underwater electromagnetic guidance based on the magnetic dipole model applied in AUV terminal docking[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(7). DOI: 10.3390/jmse10070995.
- [58] Li D J, Chen Y H, Shi J G, et al. Autonomous underwater vehicle docking system for cabled ocean observatory network[J]. Ocean Engineering, 2015, 109: 127-134.
- [59] Zhang T, Li D J, Yang C J. Study on impact process of AUV underwater docking with a cone-shaped dock[J]. Ocean Engineering, 2017, 130: 176-187.
- [60] Lin R, Li D J, Zhang T, et al. A non-contact docking system for charging and recovering autonomous underwater vehicle [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2019, 24: 902-916.
- [61] 李晔, 何佳雨, 姜言清, 等. AUV 归航和坐落式对接的半物理仿真[J]. 机器人, 2017, 39(1): 119-128.
- Li Y, He J Y, Jiang Y Q, et al. Semi-physical simulation of AUV homing and docking processes[J]. Robot, 2017, 39(1): 119-128.
- [62] Li Y, Jiang Y Q, Cao J, et al. AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras[J]. Ocean Engineering, 2015, 110(Part A): 163-173.

- [63] 姜言清. AUV回收控制的关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
Jiang Y Q. Study on critical control issues for AUV docking applications[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [64] Sun Y S, Ran X R, Cao J, et al. Deep submergence rescue vehicle docking based on parameter adaptive control with acoustic and visual guidance[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, 17(2). DOI: 10.1177/1729881420919955.
- [65] Yan Z P, Jiang L, Zhao Y F, et al. A novel image matching algorithm application in vision guided AUV docking[J]. *Energy Procedia*, 2012, 17(Part B): 991-1000.
- [66] 程烨, 羊云石, 林捷, 等. 一种 AUV 水下接驳站的研究[J]. *舰船科学技术*, 2015, 37(11): 91-94.
Cheng Y, Yang Y S, Lin J, et al. A survey on underwater AUV docking station[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(11): 91-94.
- [67] Fu S B, Guan X W, Liu Z, et al. Adaptive unscented particle filter algorithm for acoustic positioning of AUV docking in shallow water[C]//*International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering*. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 93-98.
- [68] Gruzlikov A M. Short and ultra-short baseline navigation of the AUV for bringing it to the bottom docking device[C]//*29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 2022. DOI: 10.23919/ICINS51784.2022.9815380.
- [69] Dong L Y, Xu H L, Feng X S, et al. A research on the simultaneous localization method in the process of autonomous underwater vehicle homing with unknown varying measurement error[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(21). DOI: 10.3390/app9214614.
- [70] Fan S S, Liu C Z, Li B, et al. AUV docking based on USBL navigation and vision guidance[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 24: 673-685.
- [71] Park J Y, Jun B H, Lee P M, et al. Experiment on underwater docking of an autonomous underwater vehicle 'ISiMI' using optical terminal guidance[C]//*OCEANS*. Piscataway, USA: IEEE, 2007. DOI: 10.1109/OCEANSE.2007.4302370.
- [72] Lü F T, Xu H X, Shi K, et al. Estimation of positions and poses of autonomous underwater vehicle relative to docking station based on adaptive extraction of visual guidance features[J]. *Machines*, 2022, 10(7). DOI: 10.3390/machines10070571.
- [73] 吴利红, 许文海, 王利鹏. AUV 水下终端对接目标识别与定位技术[J]. *大连海事大学学报*, 2014, 40(2): 81-85.
Wu L H, Xu W H, Wang L P. Dock position and pose estimation algorithm for AUV underwater terminal docking[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2014, 40(2): 81-85.
- [74] Figueiredo A B, Matos A C. MViDO: A high performance monocular vision-based system for docking a hovering AUV[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(9). DOI: 10.3390/app10092991.
- [75] Hsu H Y, Toda Y, Yamashita K, et al. Stereo-vision-based AUV navigation system for resetting the inertial navigation system error[J]. *Artificial Life and Robotics*, 2022, 27: 165-178.
- [76] Lwin K N, Mukada N, Myint M, et al. Visual docking against bubble noise with 3-D perception using dual-eye cameras[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2020, 45(1): 247-270.
- [77] Zhang B, Zhong P, Yang F, et al. Fast underwater optical beacon finding and high accuracy visual ranging method based on deep learning[J]. *Sensors*, 2022, 22(20). DOI: 10.3390/s22207940.
- [78] Yan Z P, Gong P, Zhang W, et al. Autonomous underwater vehicle vision guided docking experiments based on L-shaped light array[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 72567-72576.
- [79] Zhong L J, Li D J, Lin M W, et al. A fast binocular localisation method for AUV docking[J]. *Sensors*, 2019, 19(7). DOI: 10.3390/s19071735.
- [80] Trslc P, Rossi M, Robinson L, et al. Vision based autonomous docking for work class ROVs[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 196. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106840.
- [81] Lin M W, Yang C J. AUV docking method in a confined reservoir with good visibility[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, 100: 349-361.
- [82] 杨咚. 水下无人航行器回收技术研究[J]. *科技广场*, 2013(5): 177-182.
Yang D. Research on recycling technology of unmanned underwater vehicle[J]. *Science Mosaic*, 2013(5): 177-182.
- [83] Lin M W, Li D J, Yang C J. Design of an ICPT system for battery charging applied to underwater docking systems[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 145: 373-381.
- [84] Sun P, Wu X S, Cai J, et al. Analysis of special technical problems of wireless charging at UUV docking stations and a new underwater electromagnetic coupler[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 719-728.
- [85] Kuipers J, Bruning H, Yntema D, et al. Self-capacitance and resistive losses of saline-water-filled inductors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(5): 2356-2361.
- [86] Hu Y L, Kang L, Zheng W, et al. Impedance matching control method for an underwater magnetic resonance-based wireless power transfer system with metamaterials[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2016, 30(15): 2003-2019.
- [87] Cheng Z Y, Lei Y, Song K, et al. Design and loss analysis of loosely coupled transformer for an underwater high-power inductive power transfer system[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(7): 1-10.
- [88] Teeneti C R, Truscott T T, Beal D N, et al. Review of wireless charging systems for autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2021, 46(1): 68-87.
- [89] Bradley A M, Feezor M D, Singh H, et al. Power systems for autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 526-538.
- [90] Feezor M D, Sorrell F Y, Blankinship P R. An interface system for autonomous undersea vehicles[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 522-525.
- [91] Kawasaki T, Fukasawa T, Noguchi T, et al. Development of AUV "Marine Bird" with underwater docking and recharging system[C]//*International Conference Physics and Control*. Piscataway, USA: IEEE, 2003: 166-170.
- [92] Kojiya T, Sato F, Matsuki H, et al. Construction of non-contacting power feeding system to underwater vehicle utilizing electro magnetic induction[C]//*OCEANS*. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 709-712.
- [93] Kojiya T, Sato F, Matsuki H, et al. Automatic power supply system to underwater vehicles utilizing non-contacting technology[C]//*OCEANS*. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 2341-2345.

- [94] Yang C J, Lin M W, Li D J. Improving steady and starting characteristics of wireless charging for an AUV docking system[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, 45(2): 430-441.
- [95] Lin M W, Lin R, Yang C J, et al. Docking to an underwater suspended charging station: Systematic design and experimental tests[J]. Ocean Engineering, 2022, 249. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110766.
- [96] Yang C J, Wang T L, Chen Y H. Design and analysis of an omnidirectional and positioning tolerant AUV charging platform [J]. IET Power Electronics, 2019, 12(8): 2108-2117.
- [97] Liu Z M, Wang L F, Guo Y J, et al. Eddy current loss analysis of wireless power transfer system for autonomous underwater vehicles[C]//IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer. Piscataway, USA: IEEE, 2020: 283-287.
- [98] Bo Q, Wang L F, Zhang Y W. Zero-voltage-switching angle of inductive power transfer system supplied by parallel multi-inverter[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2022, 50(3): 981-987.
- [99] Zhu Q W, Guo Y J, Wang L F, et al. Improving the misalignment tolerance of wireless charging system by optimizing the compensate capacitor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 4832-4836.
- [100] Guo Y J, Zhang Y W, Li S F, et al. Load parameter joint identification of wireless power transfer system based on the DC input current and phase-shift angle[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10542-10553.
- [101] Lloret J, Sendra S, Ardid M, et al. Underwater wireless sensor communications in the 2.4 GHz ISM frequency band[J]. Sensors, 2012, 12(4): 4237-4264.
- [102] Frye D, Ware J, Grund M, et al. An acoustically-linked deep-ocean observatory[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 969-974.
- [103] 日本岛津制造所. 日本最新型水下无线光通信设备 MC 100 正式商用[EB/OL]. (2020-02-27) [2022-09-13]. https://www.shimadzu.co.jp/news/press/z4yxg4_r4xf88jox.html. Shimadzu. MC100, the latest underwater wireless optical communication equipment in Japan, was officially commercialized [EB/OL]. (2020-03-12) [2022-09-13]. https://www.shimadzu.co.jp/news/press/z4yxg4_r4xf88jox.html.
- [104] 张禹, 徐红丽, 韦茵, 等. 基于数字海图的自主水下机器人路径规划研究[J]. 机器人, 2006, 28(3): 321-325. Zhang Y, Xu H L, Wei Y, et al. Path planning of AUV based on digital charts[J]. Robot, 2006, 28(3): 321-325.
- [105] Philip B T, Kelley D S, Solomon E A, et al. Monitoring methane emissions at Southern Hydrate Ridge using an OOI cabled array acoustic Doppler current profiler[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761469.
- [106] Balasuriya A, Petillo S, Schmidt H, et al. Behavior-based planning and prosecution architecture for autonomous underwater vehicles in ocean observatories[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2010. DOI: 10.1109/OCEANSSYD.2010.5603896.
- [107] Al-Khatib H, Antonelli G, Caffaz A, et al. Navigation, guidance and control of underwater vehicles within the widely scalable mobile underwater sonar technology project: An overview[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(2): 189-193.

作者简介:

徐会希 (1975 -), 男, 硕士, 研究员。研究领域: AUV 系统。

吕凤天 (1990 -), 男, 博士, 助理研究员。研究领域: AUV 对接导引, AUV 环境视觉感知。

石凯 (1981 -), 男, 博士, 研究员。研究领域: AUV 运动控制技术。

(上接第 719 页)

- [29] Braam J. In touch: Plant responses to mechanical stimuli[J]. New Phytologist, 2005, 165(2): 373-389.
- [30] Sachse R, Westermeier A, Mylo M, et al. Snapping mechanics of the Venus flytrap (*Dionaea muscipula*)[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(27): 16035-16042.
- [31] Wang Y W, Yan J, Li J, et al. The fabrication of gas-driven bionic soft flytrap blade and related feasibility tests[J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20: 628-644.

作者简介:

李健 (1985 -), 男, 博士, 教授。研究领域: 机器人技术, 增材制造。

黄美珍 (1997 -), 女, 硕士生。研究领域: 仿生软体机器人。

闫杰 (1996 -), 男, 博士生。研究领域: 仿生软体机器人, 复合材料。