

# 机器人在管道提升式深海采矿系统中智能化的挑战与发展趋势

沈义俊<sup>1,2</sup>, 张炜峰<sup>1,2</sup>, 周健一<sup>1,2</sup>, 全嘉鑫<sup>1,2</sup>, 李文庆<sup>1,2</sup>, 刘悦凡<sup>1,2</sup>,  
张瑞永<sup>1,2</sup>, 李萌<sup>1,2</sup>

1. 海南大学南海海洋资源利用国家重点实验室, 海口 570228

2. 海南大学海洋科学与工程学院, 海口 570228

**摘要** 近年来对深海矿物资源的开采需求逐步增大,为了解决传统的管道提升式采矿系统的缺陷,提出将智能化机器人引入来实现高效、精准的矿物采集和结构物的健康监测。但由于深海环境复杂,与陆地上机器人相比,水下机器人的设计需要考虑海洋带来的阻力、噪声等多方面的影响。从水动力学、水下定位和水下视觉3个方面介绍了管道提升式深海采矿系统中采矿机器人的发展与技术难点,概述了机器人管道检测技术。探讨了深海资源开采水下机器人的技术发展方向。

**关键词** 深海采矿机器人;管道检测机器人;水下动力学;水下定位;水下视觉

地球表面的矿物资源日益稀缺,深海中蕴藏的宝贵矿产资源的开发利用变得尤为重要。中国南海海域中的海砂矿、油气资源与大洋锰结核都具有极大的价值。目前管道提升式采矿系统是最具商用价值的系统,包括水面工作母船、管道运输系统和深海采矿车3个部分,采矿车在作业区收集矿物后通过管道提升装置输送到水面工作母船<sup>[1]</sup>。但是由于传统深海采矿车的操作受限和对水下环境的依赖,其采矿效率往往较低,且由于深海环境对信号传输的限制,数据传输受限于水下通信技术,无

法实时获取采矿过程中的关键信息,从而无法精确定位和采集目标矿物资源,影响采矿效率和作业稳定<sup>[2]</sup>。此外,常规的采矿过程会带来物理损害,不仅包含对管道系统的磨损,同时也对海底环境造成破坏,影响周围生态系统的平衡。因此,引入智能化机器人技术来提升深海采矿系统生产的稳定性和安全性,是未来深海采矿领域的重要发展方向。

智能机器人可以在进行精准作业的同时对周围环境进行观测,通过算法制定出最优方案,减少对海洋生态的影响<sup>[3]</sup>。智能机器人携带声呐设备和

收稿日期:2023-09-28;修回日期:2023-10-31

作者简介:沈义俊,教授,研究方向为海洋能源开发及深海工程,电子信箱:sheny2000@hainanu.edu.cn

引用格式:沈义俊,张炜峰,周健一,等.机器人在管道提升式深海采矿系统中智能化的挑战与发展趋势[J].科技导报,2024,42(12):92-106;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.09.01377

光信号采集系统,可以通过获取的数据对海底矿场和周围环境进行数字重建,并通过目标检测、姿态识别等技术精确地定位并开采矿物资源,从而最大限度地提高采矿效率。此外,智能化机器人可以在强化学习和优化自身算法的基础上,逐步解决面临的问题<sup>[4]</sup>。

然而,在引入智能化机器人技术的过程中,仍然面临着一系列问题。首先,机器人的结构设计和材料选择是需要考虑的一个关键技术。为了承受深海的恶劣条件,包括高压、暗流等,材料选择、耐压性、运动自由度、关节设计和压力平衡都是机器人设计中考虑的重要因素。其次,机器人的自身定位和目标定位也是值得研究的另一个重要方面。由于海底光传输效应和由杂质引起的噪声等因素影响,机器人的视觉算法需要进一步强化,以适应复杂的水下环境。同时,使用二维图像和三维深度数据的融合定位技术是进一步优化精准采矿技术的关键,但是在该领域中仍然存在许多待解决的难题。此外,海底管道、线缆等海洋结构物健康监测技术也亟待提高。

## 1 深海采矿机器人的结构需求

深海矿产资源开采技术的研究从20世纪50年代末对多金属结核开采技术的研究开始至今相继出现过多种技术原型和样机。目前,国内外的深海采矿设备主要用于深海海底富钴结壳、多金属硫化物、多金属结核等矿物的开发<sup>[5]</sup>。

### 1.1 深海采矿机器人与陆地机器人的区别

深海采矿机器人和陆地机器人作为不同应用场景下的机器人,它们的设计结构存在差异<sup>[6]</sup>。首先,深海采矿机器人需要考虑水下深海环境中的高压、低温等因素,需要采用高压水密封技术,使其具备防水性能。其次,在水下深海环境中,机器人需要具备一定的浮力以保持机器人的平衡和稳定,因此需要设计出较为扁平的机身形态,同时采用流线型的机身设计,减小水流阻力,提升机器人的稳定性和效率。此外,深海环境中能量补给资源有限,机器人在适应这种环境时需要具备高能效和低能

耗的特点,从而实现有效的资源利用。而在陆地上的机器人则不需要考虑上述因素,研制者可以更灵活地选择不同材料和工艺适应不同远程操作环境,设计出更加符合任务特点的机器人结构。同时,为了提升机器人的导航精度和执行效率,陆地机器人通常采用GPS(global positioning system)导航系统,并且在种类和形态上都具有更高的可定制性和适应性。综上所述,深海采矿机器人和陆地机器人在结构上的设计存在很大的差异,这是不同的应用环境导致的,研究者必须根据应用环境的特点,采用适当的结构设计与方法,以兼顾效率、精度、稳定性、安全性等多方面的考虑<sup>[7]</sup>。

### 1.2 机器人水动力设计理论

水下环境十分复杂,水下机器人会受到暗流、缆索扰动、波浪等多种影响,而在下潜深度足够大的情况下,可忽略波浪对机器人的位姿影响。因此对于海底采矿机器人而言,首先要分析其受到的静水力、水流作用力、水动力、缆索影响力以及自身的运动推力。

而在分析水下机器人的受力之前,需要先定义其运动坐标系。与一般的空间三维坐标系类似,一般将纵荡运动方向定义为 $x$ 轴,横荡运动方向定义为 $y$ 轴,垂荡运动方向定义为 $z$ 轴,如表1<sup>[8]</sup>所示。

表1 SNAME(1950)海洋船舶运动概念定义

自由度 序号	运动名称	作用力 和力矩	线速度 和角速度	位置 和姿态
1	纵荡	$X$	$u$	$x$
2	横荡	$Y$	$v$	$y$
3	垂荡	$Z$	$w$	$z$
4	横摇	$K$	$p$	$\phi$
5	纵摇	$M$	$q$	$\theta$
6	艏摇	$N$	$r$	$\psi$

首先要分析的是静水力。静水力是机器人在静水中所受到的力,即只有重力和浮力。在设计机器人过程中,一般会让重力略小于浮力,这是为了让机器人在水下航行出现事故时可以靠着自身浮力自然上浮。当机器人浮于水面后,水上平台进行回收和修理便十分方便。一般情况下,遥控潜水器(remote-operated vehicle, ROV)的静水力为

$$g = \begin{bmatrix} R^{-1}(mg_0 - B) \\ mS(r_g^b)R^{-1}g_0 - S(r_b^b)R^{-1}B \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $g_0$  为重力加速度,  $r_b^b$  为机器人的浮心位置,  $B$  为机器人在水中所受到的浮力。

若要令 ROV 机器人在静水中保持正浮状态, 只需要对 ROV 机器人的重心和浮心进行调整, 使得重心和浮心的连线与运动坐标系的  $z$  轴平行。

当确定好机器人在静水中的受力情况后, 便要开始考虑水流作用力对机器人的影响。水流作用力即水流作用机器人身上受到的力, 是最为复杂且难以预测的一种力。在复杂水下环境中, 可能有多股水流以不同的速度, 从不同的角度冲击到机器人身上, 影响机器人的水下运动。因此, 在实际作业中, 一般将水流作用力当作扰动项来处理。但是在设计阶段的仿真模拟中, 一般假定机器人所在领域当前的水流速度和方向基本不变来进行简化模拟。挪威科技大学 Fossen<sup>[9]</sup> 将海流作用的影响加入到水动力模型中, 得到的机器人动力学模型为

$$M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu + g + M_A\nu_r + C_A(\nu_r)\nu_r + D(\nu_r)\nu_r = \tau_{wind} + \tau_{wave} + \tau \quad (2)$$

当假定机器人所遭遇的水流为定常无旋流后, 水流则具有定常线速度  $\nu_c^n$ 。

$$\nu_c^n = [u_c, \nu_c, w_c, 0, 0, 0]^T \quad (3)$$

此时, 水流在整个运动坐标系中的速度表述为

$$\nu_c^b = R^{-1}\nu_c^n \quad (4)$$

则, 此时的水流的加速度为

$$\dot{\nu}_c^b = -S(\nu_2)\nu_c^b \quad (5)$$

并且 ROV 机器人的惯性矩阵与科氏力矩阵关系为

$$M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu = M_{RB}\dot{\nu}_r + C_{RB}(\nu_r)\nu_r \quad (6)$$

在水流作用力确定后, 便要继续考虑水动力。水动力与机器人的设计结构、运动特性及流体特性有关。可以将其简单分为 2 类, 一类与加速度有关, 另一类与速度有关。前者与加速度有关的被称为惯性类水动力, 后者与速度有关的水动力被称为黏性类水动力。惯性类水动力可以视为机器人的附加质量矩阵和加速度的乘积。

附加质量是 ROV 机器人在水下工作运动时, 推动装置推动机器人的力不仅仅为机器人做功, 同时也对机器人周围的海水做功。所以机器人真正在海水中运动时, 其动力不是简单的  $F=ma$ 。而应该是  $F=(m_{\text{机器人}}+m_{\text{海水}})a$ , 增加的这部分质量  $m_{\text{海水}}$  便是附加质量。

而机器人的运动一般以定速直航, 定点悬停与姿态调整为主。根据 Fossen<sup>[9]</sup> 提出的黏性类水动力可以划分为上述所说附加质量带来的水动科氏力、向心力、线性阻尼和非线性阻尼, 最后得到的水动力公式为

$$F_{hd} = M_A\nu' + C_A(\nu) + [D + D_n(\nu)]\nu \quad (7)$$

式中,  $M_A\nu'$  为惯性类水动力, 其余为黏性类水动力。

在水动力确定之后, 由于本文介绍的海底采矿机器人为 ROV 带缆机器人, 因此还要考虑缆索影响力。缆索影响力则是 ROV 机器人身上的缆索对机身所产生的影响力。在模拟仿真中, 一般采用有限元思想或者集中质量法<sup>[10-11]</sup> 来处理。这 2 种方法算出的结果优点是确保了计算精度, 缺点是无论是有限元还是集中质量法的计算量都特别巨大, 且整个仿真过程也十分复杂。因此, Huo 等<sup>[12]</sup> 在收集归纳了大量脐带缆作用力的计算结果后, 找到了一种简化的方法, 提出了一种全新的脐带缆作用力模型。在这个模型中, 缆索影响力与速度的平方成正比, 方向与相对速度相反, 表现为阻碍 ROV 的运动。基于这个模型, ROV 机器人在运动中受到的作用力为和力矩矢量为

$$F_{\text{cable}} = [f_{\text{cable}}, S(r_c^b)f_{\text{cable}}] \quad (8)$$

$$f_{\text{cable}} = [-K_x u_r | u_r |, -K_y \nu_r | \nu_r |, -K_z w_r | w_r |] \quad (9)$$

式中,  $r_c^b$  为脐带缆与 ROV 连接点在运动坐标系下的位置;  $f_{\text{cable}}$  为脐带缆在运动坐标系中对 ROV 的作用力。

### 1.3 深海采矿机器人结构设计

对于多金属结核采矿机器人的结构形式设计, 需要考虑多个因素。由于多金属结核位于海底深处, 机器人需要具备足够的深度适应能力。多金属结核具有高硬度和高韧性的特点, 因此机器人需要具备相应的抗磨损和抗冲击能力<sup>[13-14]</sup>。考虑到多

金属结核可能含有有害物质,机器人还需要具备一定的安全性能,以避免对人体和环境造成危害。机器人的设计应该符合人机工程学原则,以提高工人的使用体验和工作效率。到目前为止,国际上已先后设计和试验了多种结核采矿机器人的集矿方式与行走方式,集矿方式包括了水力式、机械式和复合式3种,行走方式包括了拖曳式和自行式2种,其中自行式又包括阿基米德螺旋式、螺旋桨推进式和履带自行式<sup>[15]</sup>。

1978年,美国海洋管理公司研制了一种采用水力式集矿的拖曳式采矿机器人,该机器人由一个大号的水下车辆拖曳着,集矿设备安装在车辆的下部。使用液压装置收集海底矿物,同时可通过电缆进行它们的通信,该机器人在东太平洋赤道海域进行了海试并成功采集多金属结核<sup>[16]</sup>。20世纪70年代开展的海上试验表明,拖曳式行走方式存在开采轨迹行走,避障及操控难度大等缺点,自行式深海采矿机器人已为大势所趋。1976年,美国海洋矿业公司研制的阿基米德螺旋式采矿机器人(图1)在太平洋夏威夷以南进行了海下试验并成功在深海采集到结核<sup>[17]</sup>。

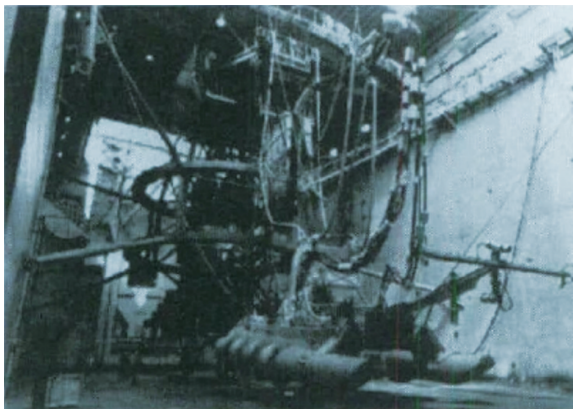


图1 阿基米德螺旋式采矿机器人

进入20世纪80年代,各国开始研究履带自行式采矿机器人,德国是世界上最早开展深海多金属结核资源研究和开发活动的国家之一。自20世纪70年代起,德国就开始在太平洋马里亚纳海沟开展深海采矿试验。德国政府和科学机构在该地区的广阔海域内进行了多次探测,利用自主开发的深

海钻探、海底取样、地震勘探等技术获取了大量数据。其深海采矿技术研究也处于国际领先水平。在“八五”时期,中国开始了对深海矿产资源的研究和开发,其中就包括对采矿机器人的研制。第1代用于多金属结核开采的履带自行式采矿机器人,是在综合引进国外研究的基础上,由中国自主设计和研制而成的。该机器人采用了水力机械复合式集矿技术,可以实现对于矿物颗粒和胶结物的有效分离和回收。在“九五”时期,中国深入研究了第1代采矿机器人的成果,进一步改进和升级了该机器人,并且与法国 Cebynetic 公司合作,研发出了第2代采矿机器人(图2)<sup>[18]</sup>。第2代采矿机器人不仅具备第1代机器人的所有功能,而且有了诸多创新,例如,采用磁约束推进、钻杆钻孔、全平面工作等,该机器人在后续的实验中取得成功<sup>[17]</sup>。目前,中国的深海采矿机器人不仅可以进行深海勘探和矿产资源的开采,还可以进行多个环节的海洋科学研究,例如,物种样本采集、水样采集、天然气体采样、海底地球物理、海底地质等方面的研究。

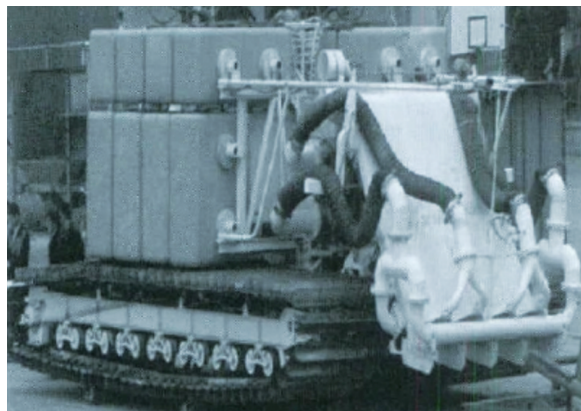


图2 中国研制的多金属结核采矿机器人

富钴结壳是一种富含钴和其他稀土元素的矿物质,具有很高的经济价值。对于富钴结壳采矿机器人的结构形式设计,主要考虑的因素是富钴结壳的物理特性和采矿要求。机器人的设计需要满足能够适应富钴结壳所在的深海环境和高压条件;能够有效采集和运输富钴结壳样品;具备自主导航和避障功能,以保证安全操作和生产效率。同时,在设计过程中还需要注意机器人的耐用性和可靠性,

以确保其在长期运行中保持高效工作状态。1995年,美国在国际“海洋工程及其环境”会议上提出了钻结壳采矿机器人设计方案和相关技术问题(图3),该机器人配有8条三角形行走履带,以适应复杂地形多变的要求,采用水力-机械复合式采掘头,装备有6个带截齿切割头的机械臂,具备采剥、集矿、大块破碎分选等功能<sup>[19]</sup>。

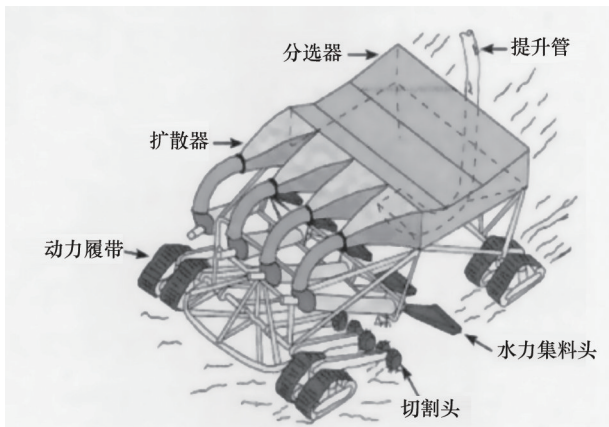


图3 美国提出的海底钻结壳采矿机器人

中国在“十一五”期间对深海矿产勘探和开发进行了大量的研究和实践,特别是在钻结壳破碎采集和行走技术方面,取得了一定的进展。就钻结壳破碎采集而言,中国研制了具有自主知识产权的“领航者”系列海洋开采装备。这些装备包括海底柔性钻探挖掘机、多功能海底抓斗、海底大功率磨粉机、多功能海底破岩机和水下扩散式冲洗器等<sup>[20]</sup>。

对于多金属硫化物采矿机器人的结构形式设计,主要考虑因素包括多金属硫化物的特点和采矿要求。多金属硫化物是一种富含铜、锌、铅等多种金属的矿物质,具有非常高的经济价值<sup>[21]</sup>。2006年,澳大利亚 Nautilus 矿业公司进行了首次海底多金属硫化物原位切割采集试验<sup>[22]</sup>。试验的主要目的是探测和测试该公司矿产资源勘探和开采技术的可行性。该公司使用一种叫作“海底原位切割器”的设备(图4)<sup>[22]</sup>,它可以在海底采集和处理多金属硫化物矿。这种设备由一辆四轮驱动车和一台电子控制单元组成,在控制下可以在海底进行货物收集,使用研磨器将多金属硫化物从海底切下,并

将其收集到容器中。这项试验是深海采矿历史上的一个重要里程碑,证明了虽然深海环境复杂,但仍然可以通过现代技术在那里开采珍贵的资源。

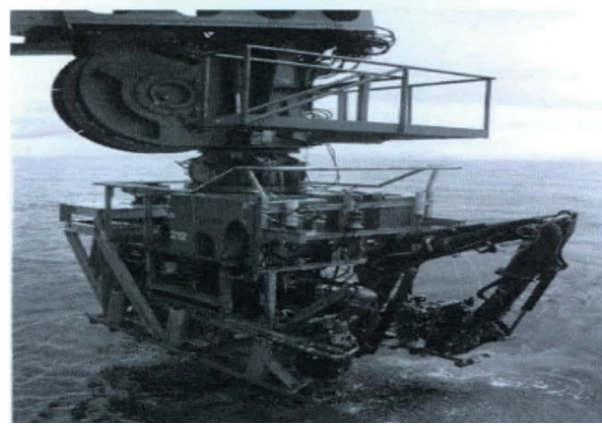


图4 Nautilus公司研制的多金属硫化物采集机器人

随着技术的不断发展,现代多金属硫化物采矿机器人已经实现了自主控制和智能决策,并且具备了更高的效率和安全性<sup>[23]</sup>。除此之外,和传统的采矿机器人一样,仿生机器人在深海采矿中有着重要的作用。它们可以通过模仿生物的形态和行为特征来执行特定的任务,如自主导航、避障、抓取和采集矿物等。与传统机器人相比,仿生机器人更加灵活,适应性更强,可以在复杂的环境中完成各种任务,从而提高了深海采矿的效率和安全性。此外,仿生机器人还可以模拟鱼类、海豚等海洋生物的行为,从而更好地了解深海环境和矿物分布规律,为深海采矿提供更准确的数据支持。

然而,当前国内外深海采矿机器人的机械结构普遍存在着强度不足、稳定性差等问题,导致其在深海环境下容易出现故障或损坏<sup>[24]</sup>。另外,深海采矿机器人的动力系统也需要得到更好的保障和支持,以保证其长期稳定运行。因此,针对这些主要问题,需要通过技术创新和结构创新等手段加以解决,以提高深海采矿机器人的可靠性和安全性。

#### 1.4 深海采矿机器人的材料选择

深海采矿机器人是在极端的深海环境下工作的高科技设备,其材料选择和性能对于其技术水平和采矿效率的影响至关重要。深海采矿机器人需

要经受住深海环境的压力、盐蚀、腐蚀等多重考验。因此,材料的选择与性能的测试、验证直接关系到机器人的稳定性、安全性和使用寿命。机器人的设计中,需综合考虑材料的力学特性、耐腐蚀性、重量轻等多方面因素。只有在材料选择和耐压性能测试等多个环节都进行科学的研究和实验验证,才能保证深海采矿机器人的稳定运行和持久使用<sup>[25]</sup>。

深海采矿机器人所需材料的选择需要考虑其在深海环境下的使用条件和要求。一般来说,深海采矿机器人需要使用高强度、耐腐蚀、耐低温的材料,以应对深海环境下的极端条件。常用的深海采矿机器人材料包括碳纤维、玻璃纤维和铝镁合金等。这些材料都具有高强度、轻量化、耐腐蚀等优点,可以满足深海采矿机器人在不同环境下的使用需求。同时,这些材料还具有较好的绝缘性、隔热性和耐腐蚀性,可以有效地减少深海采矿机器人在工作过程中所受到的外界干扰和损害。目前,柔性材料和柔性驱动技术的出现,使得采用柔性驱动成为水下机器人领域的一个重要研究方向。柔性材料可以使得水下机器人更具适应性和稳定性,同时可以提高水下机器人的机械灵活性和自适应性,从而使其更加智能和自主。如西湖大学 2000 m 级仿生潜器采用高内聚低耦合子系统设计,实现全系统模块化封装,构建基于深度进化算法框架的智能控制与自导航系统,实现刚-柔仿生推进机构与多项“卡脖子”子系统开发<sup>[26]</sup>。该仿生设计具有高灵活性、弱驱动、低噪声、长航时、低成本等特点,面对深水低温、高压等极端环境,无任何原型参照,实现 100% 自主研发与国产化。

深海采矿机器人需要在深海环境下承受高压、低温等极端条件,因此其所需材料的耐压性能非常重要。针对深海采矿机器人的耐压性能,需要考虑以下几个方面的要求:首先,耐压强度需要足够高,以保证机器人在深海环境下能够承受高压和低温的影响;其次,耐压时间也需要足够长,以保证机器人可以在深海环境中持续工作;最后,耐压变形方面则需要考虑机器人在深海环境下可能会受到波浪、水压等因素的影响。

目前,深海采矿机器人在材料选择上还存在一

些瓶颈。由于深海环境的极端条件(如高压、低温等),对机器人材料的耐蚀性、耐腐蚀性、耐低温性等要求较高,深海采矿机器人需要具有非常高的抗压能力才能在深海环境下工作,目前使用特殊钢材、钛合金或复合材料来制造深海采矿机器人在一些环境下仍无法达到预期目标。深海环境中的高盐度和高压又会对深海采矿机器人的金属部件产生腐蚀作用,导致机器人性能下降或损坏。为了解决这个问题,需要有抗腐蚀性能更好的材料,并对材料进行特殊的防腐蚀处理。加之深海环境温度非常低,机器人需要具有良好的温度稳定性才能够在极端温度条件下正常工作。对于机器人的结构和材料,需要具有一定的绝热性和导热性,既能够维持机器人部件内的稳定温度,又能在机器人部件之间迅速传递热量。目前可用的解决方法包括使用高温超导体材料,提供散热以保持温度稳定,使用具有高稳定性的电子元器件,以及选择低温下仍具有良好性能的润滑剂来实现润滑作用。此外,深海采矿机器人还需要具备轻量化等特点,以减轻机器人的重量和提高其机动性能。针对这些技术瓶颈,需要进行材料研发和创新,并加强对海洋环境和生物的研究,以寻找更为适合的材料应用方案。

## 2 采矿机器人水下定位技术

空间定位作为深海采矿机器人技术领域的重要组成部分,具有广泛的应用前景,同时也面临挑战。优秀的定位技术不仅可以支持深海采矿机器人精准采矿,还可以应用于矿场勘探、路径规划和蜂群协作等领域。但深海环境的复杂性和传感器受限等因素为定位技术带来了挑战。传统的 GPS 定位在深海环境中并不适用,因为水能够阻挡卫星信号的传播,从而影响定位的准确性<sup>[27]</sup>。在定位技术的研究中,不同的定位技术和方法被广泛应用。基于声学的定位技术,如长基线、短基线和超短基线定位,利用声波的传播特性来测量机器人与参考点之间的距离或相对位置<sup>[28]</sup>。此外,引入深度数据的视觉技术也被用于水下机器人的定位。近年来,多传感器融合和机器学习等方法的发展为提高水

下机器人定位的精度和鲁棒性提供了新的途径。本节将水下机器人定位分为自身定位和目标定位2个方面来介绍主要的定位技术、方法和应用,并探讨当前的研究进展和挑战。

### 2.1 自身定位

深海采矿设备常采用声呐技术进行,通过测量声波信号传播的时间和相位差,可以确定设备和水上舰船的位置<sup>[29]</sup>。在采矿机器人进行导航定位之前,需要在海底、舰船底部或机器人上安装声学传感器阵列,用于接收和分析声波信号。

常见的声学导航系统包括长基线(LBL)、短基

线(SBL)和超短基线(USBL),它们分别适用于不同的应用场景和精度要求(图5)<sup>[30]</sup>。2005年李守军等<sup>[31]</sup>对这3种声学定位系统进行了概述。其中LBL定位系统主要包含2部分:一是水下机器人上所配置的应答器;二是海底布设的发射收发器,称为基站,通过最小化CRB(cramer rao bound)或最大化FIM(fisher information matrix)提供最佳几何形状,组成几百到几千米之间的基线,机器人位于基阵之内,通过测量机器人应答器和收发器之间传播的声波信号,并记录声波到达各个传感器的时间差或者入射角度差,来确定机器人的坐标<sup>[32]</sup>。

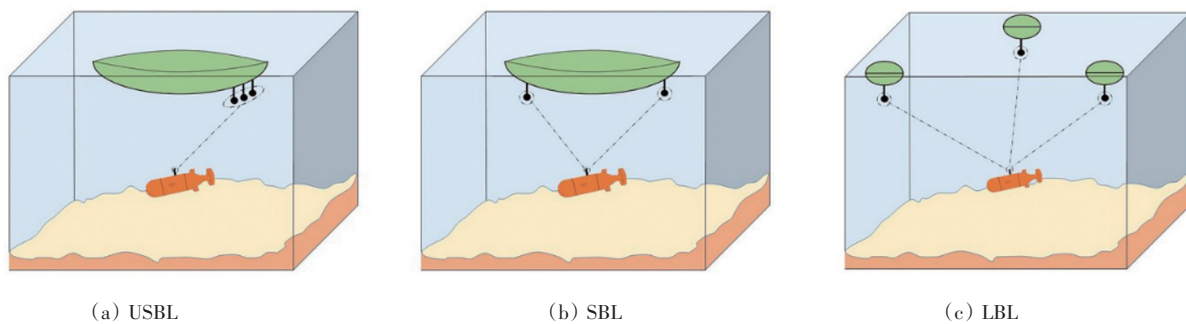


图5 声学导航

SBL定位系统是由3个或3个以上基阵布设在机器人底部,原理与长基线类似,不同的点是通过测量声波在应答器和接收器之间传播的时间或时间差来确定斜率,系统根据基阵相对机器人坐标系的固定关系,结合从传感器获得的观测值来确定机器人的位置。

USBL定位系统是由3个或3个以上基阵布设在船底,它的基线长度更短,通常在几厘米至几米的范围内,利用声波入射角与各个接收器之间的相位差测量机器人的位置。超短基线定位系统尺寸小,部署和配置非常简单和快速(表2)<sup>[33]</sup>。

尽管声呐定位技术在深海采矿机器人自身定

位中有许多优势,但也需要考虑其局限性。前期的布设较为复杂,需要在海底部署多个发射器,增加了初始部署的工程难度和成本,对于较深海域需要依赖海底组网和基站。此外,声呐定位技术对于机器人的运动和姿态变化也敏感,需要进行姿态校准和运动补偿。

声学定位在采矿机器人中存在的主要问题是采矿机器人通常工作在水下几千米深的海底,声波的传输会受到海底各种因素的干扰,如投放基站自身的不稳定性和海底各种生物的扰动都是定位不准确的主要原因,为了解决单定位系统定位不一定准确的问题,目前常采用的技术是多定位系统联合

表2 水声定位分类

类型	基线长度/m	特点	优点	缺点	适用对象
LBL	100~6000	阵列分布广	定位精度高,范围广	设备复杂,操作繁琐	大范围、高精度定位
SBL	1~100	基元布放于载体	快速部署,精度较高	受船体运动或噪声影响	靠近母船的作业机器人
USBL	<1	集成声学单元	体积小,安装方便	定位精度低、范围小	小型潜航器

定位,利用多个传感器获取不同类型的数据,如水声传感器、惯性测量单元(IMU)、视觉传感器、磁场传感器等。通过对不同传感器数据进行融合和融合算法处理,可以提高定位的准确性和稳定性。

然而,水下多系统联合定位是一个复杂的问题,不仅仅要解决多传感器融合的问题,还要解决水下环境对定位的影响,目前面临着许多挑战。

1) 数据融合复杂性。将不同传感器和定位系统的数据进行融合和协调是一个复杂的问题,需要合理的融合算法和数据处理技术。

2) 系统互操作性。不同定位系统可能来自不同厂商或开发团队,需要确保它们之间的互操作性和兼容性,以实现有效的数据交流和融合。

3) 环境适应性。不同水下环境可能对多系统联合定位的性能产生影响,需要针对不同环境做相应的参数调整和优化。

4) 实时性和计算复杂性。实现实时的多系统联合定位需要高效的计算能力和算法优化,以确保定位结果及时准确地反馈给水下机器人控制系统。

## 2.2 目标定位

水下目标定位方法主要是深度相机拍摄水下环境图像,结合设备参数和场景信息,从图像中提取出特征信息通过神经网络进行训练后对目标检测、姿态识别等算法进行优化,推导出目标的位置和姿态<sup>[34]</sup>。相比其他定位方法,视觉定位不需要额外的传感器或标志物,可以在无干扰的情况下进行非接触式定位;由于计算机视觉技术的快速发展,视觉定位可以实现实时的目标检测和机器人的姿态估计。但是对于深海采矿领域,基于光学的视觉定位技术遇到很多挑战。首先在水下环境中,光线严重衰减<sup>[35]</sup>,给试图获取水下目标区域信息的二维成像传感器带来很大挑战(图6)<sup>[36]</sup>。

深海采矿机器人的目标定位遇到的问题主要表现为视觉信息的颜色失真、对比度降低及细节(特别是边缘信息)的丧失。因此,人们迫切需要开发强大的图像增强技术。为了解决这些具有挑战性的问题,已经提出了多种水下图像增强(UIE)方法<sup>[37]</sup>。在研究初期,有人利用硬件设备进行优化<sup>[38]</sup>,例如,利用多幅图像或偏振成像来提高水下

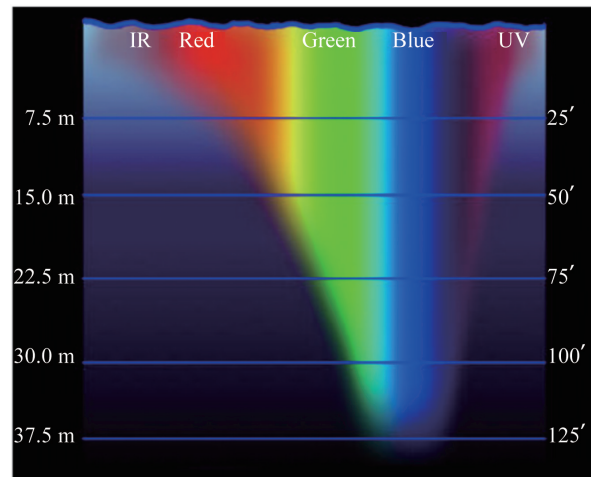


图6 海水中自然光衰减示意

图像的可见性。然而,由于这些复杂设备的限制,捕捉图像序列是一项困难的任务。相较之下,近年来基于增强的方法<sup>[39]</sup>对于提高水下图像的对比度和亮度效果显著,例如,基于分段颜色校正和双先验优化对比度增强的水下图像增强方法等<sup>[40]</sup>,但容易引入过度增强和过度饱和问题。另外,基于学习的方法面临高质量训练图像匮乏的挑战。近年来,研究者使用人工光源并采用生成对抗网络(GANs)来实现水下图像增强。例如,UMGAN模型采用非配对的图像-图像转换方法来提高水下图像的质量。同时,还探索了使用预训练的变换器模型和卷积神经网络(CNN)进行水下图像增强<sup>[41]</sup>。

在二维图像处理技术发展的同时,为了更精确地实现对机器人周围环境的探测和目标检测等功能,同时结合多波束声呐数据和激光点云数据的优点<sup>[42-43]</sup>,可以通过配准、补全的方式来对深度数据进行优化。

对于三维点云数据,通常从安装在ROV或自治式潜水器(autonomous underwater vehicle, AUV)上的激光雷达设备获得,代表了连续三维表面的离散数据版本<sup>[44]</sup>。处理这种数据涉及压缩、去噪、登记和缩放等任务,对优化其传输、存储和质量至关重要。三维点云数据压缩的最新趋势涉及使用深度学习驱动的几何技术<sup>[45]</sup>。例如,Huang等<sup>[46]</sup>提出了一个分层结构的自动编码器模型来压缩三维点云的原始数据。这个模型采用一个编码器来压缩

原始数据,并使用稀疏编码进一步压缩。然后,解码器遵循反向程序对数据进行解压,生成不同分辨率的模型<sup>[47]</sup>。Li等<sup>[48]</sup>在2021年提出了一种用于三



维点云处理的深度神经网络,该网络利用有效的特征聚合方法,强调三维深度数据的通用性和相关性(图7)<sup>[49]</sup>。

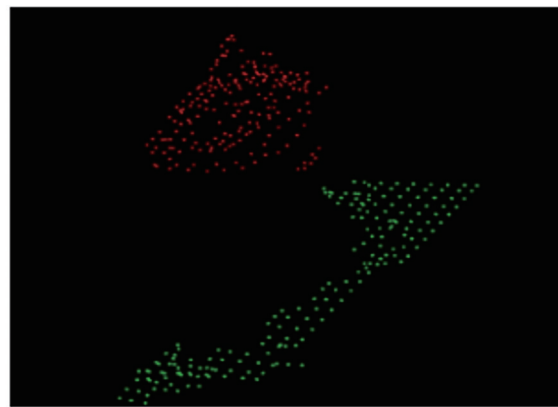


图7 水下三维点云数据

为解决三维深度数据缺乏颜色等特征信息的问题,目前的技术常采用深度学习网络提取点云的结构特征信息,将二维水下图像和三维深度数据进行跨模态配准<sup>[50]</sup>,更好地实现了采矿机器人的自主驾驶、避障和定位等功能,还为海底矿场三维重建、路径规划、数字孪生领域打好了基础。

然而,二维水下图像和三维深度数据之间进行跨模态配准是一个复杂的问题,目前还面临着许多挑战。

首先是数据类型不同。二维水下图像是由相机捕获的表面影像,而三维深度数据是通过声呐或激光雷达等传感器获得的点云或深度图。这2种数据类型的表达方式和分布特性不同,因此,很难直接进行匹配。

其次,信息丢失也是一个重点问题。从三维深度数据到二维图像的投影过程中,通常会丢失一部分信息。例如,多个不同的三维结构可能投影到相同的二维图像上,这种信息丢失会导致配准的不确定性增加。

噪声和遮挡更是一个关键难点。水下图像和深度数据可能受到水质、光照和目标物体遮挡等因素的影响,导致数据中存在噪声和缺失,这给配准过程带来了挑战。

此外,数据稀疏性问题的水下环境中也是常常

遇到的问题,获取完整和密集的三维深度数据可能是困难的,因此在进行配准、补全等操作时需要解决此类数据密度不一致问题。

### 3 管道检测机器人的技术与发展

管道提升式采矿系统中的管道将机器人采集的矿物资源从海底运输到母船关键基础设施中进行加工、储存等操作。然而,这些管道在长期使用和海洋环境作用下会出现各种问题,如腐蚀、裂纹、破损和泄漏等,可能导致安全事故、资源浪费和环境污染<sup>[47]</sup>。管道的检测和维护是确保其安全性和可靠性的关键环节。传统的管道检测方法包括挖掘管道和人工巡检等,存在检测效率低、操作困难、数据获取不全面等问题,面对水下等恶劣环境,检测变得更加困难。为了解决这些问题,将管道结构健康监测技术与机器人技术结合的管道检测机器人应运而生。

#### 3.1 管道检测技术

管道检测机器人通常携带一些传感器设备用于数据收集,为后续的分析 and 决策提供数据支持。根据传感器类型的不同,最常见的检测技术大致可分为视觉检测、漏磁检测、超声波检测和涡流检测<sup>[51]</sup>。传统情况下,经验丰富的工程师通常采用肉

眼观看的方式检查管道是否有缺陷,但现在,机器人可以通过视觉传感器获取油气管道及其周围环境的图像和视频数据,之后结合图形处理、计算机视觉、机器学习等方法对获取的图像数据进行处理,以判断管道是否存在缺陷。Zhao等<sup>[52]</sup>提出了一种基于YOLOv3的水下管道溢油点检测方法,并针对图像模糊、失真等问题,对图像进行高斯滤波、亮度增强等预处理提高了图像质量,实验结果表明,该方法准确率高、漏检率低,提高了检测效率。然而,视觉传感器仅适用于检测管道表面的缺陷,并且由于水下复杂的环境,使用图像传感器获得的图像通常是模糊的,很大程度上影响了检测的准确率,这需要进一步改善图像处理的方法或使用更加有效的算法解决。

漏磁检测是一种无损检测技术。漏磁检测的原理是在管道表面产生一个磁场,并通过磁传感器测量沿管道表面漏出的磁场强度变化。当管道表面存在缺陷时,如腐蚀、裂纹或变形,这些缺陷会导致磁场的变化,从而被磁敏传感器探测到。漏磁检测具有非破坏性、快速以及敏感性高等优点。Pasha等<sup>[53]</sup>提出了一种基于漏磁检测技术的低成本管道无损检测机器人。然而,磁力检测也有一些限制,如只能检测到管道表面的缺陷,对于非磁性材料无效等。漏磁检测技术对被检测的材料很敏感,针对这一点,Jin等<sup>[54]</sup>发现超声波检测则没有这种缺陷,预测更准确。超声波检测是一种常用的非破坏性检测技术,通过利用超声波的传播特性来评估材料或结构的完整性和内部缺陷。超声波检测的基本原理是利用超声波在材料内部传播时受到缺陷或界面的反射、散射和衍射,从而产生不同的回波信号。这些回波信号可以被接收器捕获并用于分析,用于确定缺陷的位置、形状、尺寸和类型。涡流检测在某些方面类似漏磁检测,它基于涡流感应原理,通过在材料表面引入交变电流产生涡流,进而检测材料中的缺陷或变化。但是由于其对磁导率变化非常敏感,所以无法检测平行于表面的缺陷<sup>[55]</sup>。

### 3.2 管道检测机器人

随着计算机技术、机器人控制技术和无损检测

技术的进步,管道检测机器人得到迅速发展,目前,对于陆地上的管道检测机器人,按照运动结构可以分为轮式、履带式、PIG(智能检测机器人)、螺杆驱动式、尺蠖式、腿式、蛇形。由于水下环境的复杂性、水流的影响以及地形的不规则性等,给轮式机器人的移动和稳定性带来困难,只能在潜水或受限制的水下环境中进行移动和检测,相比于轮式机器人,履带式机器人在不规则、泥泞的地形上更具有稳定性和通过性,然而水流、浪涌和水下植被等因素对履带式机器人仍然是一种挑战。针对水下管道检测任务,更常见和适用的机器人是ROV、AUV和水下PIG,相比于陆地上常见的管道检测机器人,它们具有更好的水下操作能力和适应性。

PIG是一种在管道内部移动的设备,用于检测管道的内部状况。它们可以通过管道中的流体或气体推动,携带传感器等设备,检测管道内部的腐蚀、缺陷等问题。尽管PIG机器人的设计和开发具有很大的创新性,但是仍然存在一些无法解决的问题,例如:由于采用流体的压力作为驱动源,PIG机器人的运动需要管道具有足够大压力;无法在变形的管道、弯头内运动(图8)<sup>[56]</sup>;对于深海环境,PIG机器人的回收困难等。

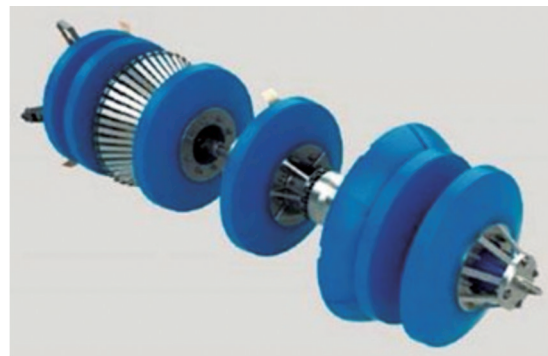


图8 具有推进驱动和漏磁传感器的PIG机器人

ROV是一种遥控操作的水下机器人,通常由水面操作员通过电缆进行远程控制。它们可以用于水下管道检测,配备相机、传感器和工具,能够进行视觉检查、测量、缺陷检测和维修等任务。Konratiev等<sup>[57]</sup>提出了使用ROV技术来评估水下输气系统的稳定性,评估方法为基于使用差动磁力计的

磁测法和目视监测法。但是由于ROV需要水面控制平台进行控制操作,所以具有很高的使用成本。为了降低水面控制平台带来的高额成本,Liljebäck等<sup>[58]</sup>提出了海底驻留的概念和Eelume机器人,Eelume可以进行管道的日常检查和维护,并于2016年完成了深达150 m的海上实验,如图9所示。



图9 Eelume 机器人

AUV是一种自主操作的水下机器人,能够独立完成任务,不需要实时遥控。它们通常配备导航系统、成像设备、传感器和控制系统,可以执行水下管道的检测、测量、地形勘测等任务。Jawhar等<sup>[59]</sup>提出了使用AUV从传感器节点收集数据,用于监测水下管道,并提出使用AUV进行数据收集具有相当大的优势,包括传感器节点放置的灵活性,可观的节能和减少干扰,隐藏的终端问题和碰撞问题。Gothi等<sup>[60]</sup>提出一种水下机器人,该机器人模型可以帮助估计海洋中的石油泄漏量,还可用于通过提供该位置的精确坐标来定位海洋深处管道中的泄漏。与ROV相比,AUV没有脐带电缆,需要更高精度的传感器、更高的智能水平,能源也是制约AUV发展的一个关键因素。

### 3.3 水下管道检测机器人未来发展趋势

尽管管道检测机器人的技术已经取得了显著的进展,但仍存在一些局限性,例如,传感器的检测精度、环境适应性等;深海和远程地区的管道检测机器人的环境适应、能源供应和续航问题等。随着大数据和机器学习技术的发展,未来的机器人能够处理和分析大规模的数据,这将有助于实时监测和异常检测,提高检测的准确性和效率。同时智能算法和人工智能技术的发展将为机器人赋予更高的

认知和决策能力。为了获取更全面的信息和提高检测准确性,未来的机器人可能采用多种传感器的融合技术、多机器人协作和通信技术。为了应对深海和远程地区的管道检测需求,未来的机器人将注重提高能源效率和续航能力,同时将可能采用柔性、可变性和自适应的设计,以适应多样化的管道结构和工作条件。

## 4 水下机器人未来技术与使用场景展望

目前,仿生学已经开始影响水下机器人的结构设计,但目前皆是以观测型水下机器人为主。在未来,仿生学结构设计完全有可能进一步影响诸如深海采矿机器人一类的作业型水下机器人。与传统水下机器人相比,采用仿生学设计的机器人可以通过模仿水下生物的结构、运动方式和行为特征,来实现机器人运动的高速性和灵活性。但与此同时,仿生学结构也更依赖材料学的突破,柔性材料的进步能直接促使仿生学水下机器人拥有更加完善的生物特征,来达成节能性、稳定性、机动性等方面的提升。

而在传统水下机器人的结构设计方面,未来深海采矿机器人将更加注重结构的稳定性和机动性。除了多支臂设计外,机器人结构还将采用模块化设计,使机器人更容易进行维护和升级。机器人将采用更多先进的组件和装置,如通信装置、导航系统等,以提高机器人的安全性和有效性。此外,深海采矿机器人的结构还将通过3D打印、机器人装配或其他技术的快速制造,来扩大制造和更新的范围。机器人的材料也将成为未来深海采矿机器人的重点研究方向之一。材料的选择应考虑其能够承受深海高压、高盐度、低温和强性能极端性所需的强度、硬度和耐蚀性等要求。未来深海采矿机器人将不仅仅使用金属材料,还会借助新的材料,如碳纤维和高强度陶瓷等先进材料,使用纳米材料制造,以提高机器人的性能。总之,未来深海采矿机器人的结构和材料的发展将逐渐走向高精度、高效能、高安全性。新的结构和材料将使机器人更加先

进、多功能,并赋予其超强的耐用性,增强尺寸、定位及其他关键方面的性能。这将使深海采矿机器人更加适应深海矿产勘探、资源开发和环保等多方面的需求。

在信号传输方面,目前的水下机器人信号通信基本以ROV脐带缆为主要媒介。为了使机器人适应更复杂的作业环境,并实现更高的自由度,人们开始进行水下基站的研究工作。与ROV机器人带缆不同,水下信号基站通过带缆连接水上平台,在基站通信范围内与机器人实现无线数据传输,甚至可以为水下机器人进行无线充电。陆上信号基站的建设技术已经较为成熟,但是建立水下基站却面临重重困难。无论是在水下直接使用机器人进行信号基站的搭建,还是在水上搭建好后再放置于水下都有许多技术问题亟待解决。

在自身定位技术方面,水下机器人需要处理各种复杂的环境和任务,因此将继续采用多传感器融合技术。通过结合激光雷达、声呐、视觉传感器等多种传感器,水下机器人可以更准确地感知自身的位置和姿态,提高定位的鲁棒性和精度。但水下传感器融合未来仍然需要克服传感器异质性、传感器不完备性、传感器数据的时间同步、融合算法复杂性、数据关联、算法鲁棒性等诸多问题。深度学习技术也将在水下机器人的自身定位中得到更广泛的应用。通过对大量传感器数据进行学习,水下机器人可以更好地理解复杂的水下环境,并实时自适应地调整定位算法,从而提高在不同条件下的定位性能。而未来在水下数据需求与标注、水下环境复杂性和计算成本、训练模型的泛化能力、水下机器人的自适应能力、模型可解释性、数据噪声与不确定性几个方面是需要研究的重点。与此同时,惯性导航和同时定位与地图构建(SLAM)技术在水下机器人的定位中将继续发挥重要作用。惯性导航可以提供高精度的位置和姿态信息,而SLAM技术可以在未知环境中构建地图并实现自主定位。

在目标定位技术方面,未来水下机器人的目标定位将倾向于采用多模态感知技术,如声呐、光学和磁力等。不同传感器之间的融合将使得机器人可以更全面地感知目标,并提高在复杂水下环境中

的目标检测和跟踪能力。随着计算能力的提升和算法的不断进步,水下机器人将能够更好地进行高级图像处理和目标识别。这将使机器人能够自动检测和识别目标,如海底生物、沉船和水下设施等,从而更有效地执行任务。多个水下机器人之间的协作也将成为未来目标定位的重要趋势。通过共享信息和协调行动,多个机器人可以共同定位目标,增加目标定位的准确性和覆盖范围。

总的来说,未来水下机器人无论是自身定位还是目标定位都需要先进的传感器技术,提供更多样化、更全面的感知信息。水下环境复杂多变,不同类型的传感器可以获取不同信息,传感器的技术发展是未来水下机器人定位发展的必要条件。

#### 参考文献(References)

- [1] 沈义俊, 陈敏芳, 杜燕连, 等. 深海矿物资源开发系统关键力学问题及技术挑战[J]. 力学与实践, 2022, 44(5): 1005-1020.
- [2] Skålvik A M, Saetre C, Frøysa K E, et al. Challenges, limitations, and measurement strategies to ensure data quality in deep-sea sensors[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1152236.
- [3] Sartore C, Campos R, Quintana J, et al. Control and perception framework for deep sea mining exploration[C]// *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 6348-6353.
- [4] Sun K, Cui W C, Chen C. Review of underwater sensing technologies and applications[J]. *Sensors*, 2021, 21(23): 7849.
- [5] Liu C H, Guo J J, Tian Y, et al. Development and field tests of a deep-sea laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) system for solid sample analysis in seawater[J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7341.
- [6] Leng D X, Shao S, Xie Y C, et al. A brief review of recent progress on deep sea mining vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 228: 108565.
- [7] Ben-Ari M, Mondada F. *Elements of Robotics*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [8] 薛乃耀. 作业型水下机器人运动控制系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [9] Fossen T I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and*

- motion control[M]. New York: Wiley, 2011.
- [10] Eidsvik O A, Schjøllberg I. Time domain modeling of ro umbilical using beam equations[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(23): 452-457.
- [11] 习刚, 杨兴满, 陈卫东. ROV 同步航行水下缆索运动仿真[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(5): 24-27.
- [12] Huo X X, Ge T, Wang X Y. Horizontal path-following control for deep-sea work-class ROVs based on a fuzzy logic system[J]. Ships and Offshore Structures, 2018, 13(6): 637-648.
- [13] 郑男. 基于深度特征的海底矿物图像分割算法研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2019.
- [14] Zhou H Y, Jiao P C, Lin Y. Emerging deep-sea smart composites: Advent, performance, and future trends[J]. Materials, 2022, 15(18): 6469.
- [15] 戴瑜. 履带式集矿机海底行走的单刚体建模研究与仿真分析[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [16] 阳宁, 陈光国. 深海矿产资源开采技术的现状综述[J]. 矿山机械, 2010, 38(10): 4-9.
- [17] Welling C G. An advanced design deep sea mining system[C]//Proceedings of All Days. OTC, 1981.
- [18] Liu S J, Yang N, Han Q J. Research and development of deep sea mining technology in China[C]//Proceedings of ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2010: 163-169.
- [19] Halkyard J. Technology for mining cobalt rich manganese crusts from seamounts[C]//Proceedings of OCEANS '85 - Ocean Engineering and the Environment. Piscataway, NJ: IEEE, 1985: 352-374.
- [20] 夏毅敏. 深海钴结壳螺旋切削采集过程仿真和螺旋采集头工作参数优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [21] Skarpelis N, Argyraki A. Geology and origin of supergene ore at the lavrion Pb-Ag-Zn deposit, Attica, Greece[J]. Resource Geology, 2009, 59(1): 1-14.
- [22] Crowhurst P, Lowe J. Exploration and resource drilling of seafloor massive sulfide (SMS) deposits in the Bismarck Sea, Papua New Guinea[C]//Proceedings of OCEANS'11 MTS/IEEE KONA. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1-6.
- [23] Vladimirs R, Konstantins S. Smarthub for supervising system for resource exploration and pollution control in deep-water and coastal areas based on ICT technologies [J]. Marine Economics and Management, 2023, 6(1): 23-34.
- [24] Yang G Z, Bellingham J, Dupont P E, et al. The grand challenges of Science Robotics[J]. Science Robotics, 2018, 3(14): eaar7650.
- [25] Teague J, Allen M J, Scott T B. The potential of low-cost ROV for use in deep-sea mineral, ore prospecting and monitoring[J]. Ocean Engineering, 2018, 147: 333-339.
- [26] Parra Rubio A, Fan D X, Jenett B, et al. Modular morphing lattices for large-scale underwater continuum robotic structures[J]. Soft Robotics, 2023, 10(4): 724-736.
- [27] Nain M, Goyal N. Localization techniques in underwater wireless sensor network[C]//Proceedings of International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 747-751.
- [28] Sun D J, Zheng C E, Cui H Y, et al. Developing status and some cutting-edge issues of underwater sensor network localization technology[J]. Scientia Sinica Informationis, 2018, 48(9): 1121-1136.
- [29] Qiao G, Babar Z, Ma L, et al. MIMO-OFDM underwater acoustic communication systems: A review[J]. Physical Communication, 2017, 23: 56-64.
- [30] Sahoo A, Dwivedy S K, Robi P S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2019, 181: 145-160.
- [31] 李守军, 包更生, 吴水根. 水声定位技术的发展现状与展望[J]. 海洋技术, 2005(1): 130-135.
- [32] 石桂欣, 鄢社锋, 吴永清. 一种基于纯方位的虚拟长基线定位算法[C]//中国声学学会 2017 年全国声学学术会议论文集. 北京: 中国声学学会, 2017: 389-390.
- [33] 张涛, 夏茂栋, 张佳宇, 等. 水下导航定位技术综述[J]. 全球定位系统, 2022, 47(4): 1-16.
- [34] 邸凯昌, 万文辉, 赵红颖, 等. 视觉 SLAM 技术的进展与应用[J]. 测绘学报, 2018, 47(6): 770-779.
- [35] Dong L L, Zhang W D, Xu W H. Underwater image enhancement via integrated RGB and LAB color models[J]. Signal Processing: Image Communication, 2022, 104: 116684.
- [36] Cherian A K, Poovammal E, Philip N S, et al. Deep learning based filtering algorithm for noise removal in underwater images[J]. Water, 2021, 13(19): 2742.
- [37] Fu X Y, Cao X Y. Underwater image enhancement with global-local networks and compressed-histogram equalization[J]. Signal Processing: Image Communication, 2020, 86: 115892.
- [38] Han P L, Liu F, Yang K, et al. Active underwater de-scattering and image recovery[J]. Applied Optics, 2017, 56(23): 6631-6638.

- [39] Li C, Guo C, Ren W, et al. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond[J]. *IEEE transactions on image processing*, 2019, 29: 4376–4389.
- [40] Zhang W D, Jin S L, Zhuang P X, et al. Underwater image enhancement via piecewise color correction and dual prior optimized contrast enhancement[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2023, 30: 229–233.
- [41] Raveendran S, Patil M D, Birajdar G K. Underwater image enhancement: A comprehensive review, recent trends, challenges and applications[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2021, 54(7): 5413–5467.
- [42] Kerstens R, Laurijssen D, Schouten G, et al. 3D point cloud data acquisition using a synchronized In-air imaging sonar sensor network[C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 5855–5861.
- [43] Kim B, Cho H, Joe H, et al. Optimal strategy for seabed 3D mapping of AUV based on imaging sonar[C]//*Proceedings of OCEANS–MTS/IEEE Kobe Techno–Oceans (OTO)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1–5.
- [44] Li S Y, Su D P, Yang F L, et al. Bathymetric LiDAR and multibeam echo-sounding data registration methodology employing a point cloud model[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 123: 103147.
- [45] Xu W X, Zhang F, Jiang T, et al. Feature curve-based registration for airborne LiDAR bathymetry point clouds [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 112: 102883.
- [46] Huang T X, Liu Y. 3D point cloud geometry compression on deep learning[C]//*Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia*. New York: ACM, 2019: 890–898.
- [47] Palomer A, Ridao P, Ribas D. Inspection of an underwater structure using point-cloud SLAM with an AUV and a laser scanner[J]. *Journal of Field Robotics*, 2019, 36(8): 1333–1344.
- [48] Li X, Xue F, Chen C, et al. Graph attention-based deep neural network for 3D point cloud processing[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 1–6.
- [49] Wang X X, Gao J, Feng L. Recognition and 3D pose estimation for underwater objects using deep convolutional neural network and point cloud registration[C]//*Proceedings of International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 1–6.
- [50] Afham M, Dissanayake I, Dissanayake D, et al. CrossPoint: Self-supervised cross-modal contrastive learning for 3D point cloud understanding[C]//*Proceedings of IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 9892–9902.
- [51] Ambati P, Raj K M, Joshuva A. A review on pipeline inspection robot[C]//*AIP Conference Proceedings*. Chennai: AIP Publishing, 2020, 2311: 60002.
- [52] Zhao X, Wang X, Du Z. Research on detection method for the leakage of underwater pipeline by YOLOv3[C]//*2020 IEEE international conference on mechatronics and automation (ICMA)*. Beijing: IEEE, 2020: 637–642.
- [53] Pasha M A, Khan T M. A pipeline inspection gauge based on low cost magnetic flux leakage sensing magnetometers for non-destructive testing of pipelines[C]//*Proceedings of International Conference on Emerging Technologies (ICET)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1–5.
- [54] Jin T, Que P W, Tao Z S. Development of magnetic flux leakage pipe inspection robot using hall sensors[C]//*Proceedings of Micro–Nanomechanics and Human Science, 2004 and The Fourth Symposium Micro–Nanomechanics for Information–Based Society*, 2004. Piscataway, NJ: IEEE, 2004: 325–329.
- [55] Safizadeh M, Hasanian M. Gas pipeline corrosion mapping using pulsed eddy current technique[J]. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 2011, 5(1): 11–18.
- [56] Mazreah A A, Alnaimi F B I, Sahari K S M. Novel design for PIG to eliminate the effect of hydraulic transients in oil and gas pipelines[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 156: 250–257.
- [57] Kondratiev S I, Dantsevich I M, Tarasenko A A. Pipeline monitoring technology in Nord Stream 2[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 872(1): 012021.
- [58] Liljeback P, Mills R. Eelume: A flexible and subsea resident IMR vehicle[C]//*Proceedings of OCEANS 2017–Aberdeen*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1–4.
- [59] Jawhar I, Mohamed N, Al-Jaroodi J, et al. An architecture for using autonomous underwater vehicles in wireless sensor networks for underwater pipeline monitoring [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(3): 1329–1340.
- [60] Gothi A, Patel P, Pandya M. *Underwater robotics[M]//ICT with Intelligent Applications*. Singapore: Springer Singapore, 2021: 445–453.

## Challenges and development trend of intelligent robot in pipe lifting deep sea mining system

SHEN Yijun<sup>1,2</sup>, ZHANG Weifeng<sup>1,2</sup>, ZHOU Jianyi<sup>1,2</sup>, QUAN Jiabin<sup>1,2</sup>, LI Wenqing<sup>1,2</sup>, LIU Yuefan<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Ruiyong<sup>1,2</sup>, LI Meng<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Marine Resources Utilization in South China Sea , Hainan University, Haikou 570228, China
2. School of Marine Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China

**Abstract** In recent years, the demand for deep-sea mineral resources has gradually increased. In order to solve the shortcomings of traditional pipe lifting mining system, intelligent robots are proposed to realize efficient and accurate mineral collection and health monitoring of the structure. However, due to the complexity of the deep-sea environment, compared with robots on land, the design of underwater robots needs to take into account the effects of resistance, noise, and other aspects brought by the ocean. This paper introduces the development and technical difficulties of mining robots in pipe-lifting deep-sea mining systems from three aspects: hydrodynamics, underwater localization, and underwater vision. Meanwhile, it provides an overview of robotic pipeline inspection technology. On this basis, this paper discusses the technological development direction of underwater robots for deep-sea resource mining.

**Keywords** deep-sea mining robot; pipeline inspection; underwater dynamics; underwater positioning; underwater vision ●



(责任编辑 王微)