

# 深水油气平台水下结构运维机器人技术进展

姜哲<sup>1,2</sup>, 赵宇<sup>1</sup>, 黄建虾<sup>3</sup>, 王芳<sup>1</sup>, 陈祎<sup>3</sup>, 罗传坤<sup>1</sup>, 罗高生<sup>1\*</sup>

1. 上海海洋大学, 工程学院上海深渊科学工程技术研究中心, 上海 201306
2. 上海交大海洋水下工程科学研究院有限公司, 上海 200231
3. 中海油能源发展装备技术有限公司, 天津 415599

**摘要** “深海一号”半潜式生产储油平台的投入使用标志着中国深水油气田开发能力和深水海洋工程装备建造水平实现了走进深水的重大跨越。总结了近10年海洋工程领域新型的水下结构运维专用机器人, 综述了清洗、检测和维修等水下运维机器人技术国内外发展现状, 分析了新型机器人所特有的共性关键技术问题, 探讨了基于路径规划与自主导航的水下自主作业技术、基于数字孪生与人工智能技术的水下运维作业模拟与应急预案评估、多传感器融合的水下作业技术等水下运维机器人智能化技术发展趋势。

**关键词** 深水油气平台; 水下运维机器人; 智能化

目前, 中国用于海上油气田开发的平台类型主要包括导管架平台、半潜式平台、浮式生产储卸油装置(FPSO)等。除了平台主体结构本身, 每个平台又包含锚链和桩基、立管、水下生产系统等结构设施。截至2021年, 国内已建成导管架平台284座、FPSO18艘、半潜式生产和钻井平台16座。正在服役的平台中约29%已接近设计年限或延期服

役, 这类平台结构腐蚀和累计损伤情况更为严重。受制于现有技术和成本等问题, 水下设施运维作业通常要3~5年1次, 老平台的设备完整性不能完全掌握的情况下, 存在很大安全隐患。

平台在海上长期作业过程中, 包括藻类、贻贝以及海洋软体类生物等海生物会大量吸附在平台及系泊缆钢结构表面, 附着海生物会加剧海洋环境

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2024-04-12

基金项目: 上海市产业协同创新(科技)项目(XTCX-KJ-2023-2-15); 上海市科委创新行动计划项目(20dz1206500); 中海油能源发展装备技术有限公司数字化重点攻关项目

作者简介: 姜哲, 研究员, 研究方向为潜水器总体设计、水动力学等, 电子信箱: zjiang@shou.edu.cn; 罗高生(通信作者), 讲师, 研究方向为全海深液压机机械手及其非线性控制系统、爬壁清洗与检测机器人等, 电子信箱: gsluo@shou.edu.cn

引用格式: 姜哲, 赵宇, 黄建虾, 等. 深水油气平台水下结构运维机器人技术进展[J]. 科技导报, 2024, 42(13): 6-15;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.09.01367

对钢结构的腐蚀,增大平台自重,减弱平台负载能力,会影响水下设备的性能和寿命。因此,需要定期清理钢结构表面海生物。另外,根据作业区安全保障要求以及船级社强制要求,平台水上和下水结构还要定期进行检测,包括外观检查、厚度测量、电位检测以及无损探伤等工作<sup>[1]</sup>。当出现结构损伤时,需要进行必要的水下修复工作。因此,海洋油气平台水下运维作业主要包括海生物清洗、结构检查与结构维修等。

总体来说,随着作业水深增加,深水油气平台的水下运维作业呈现“三复杂”和“三高”的特点:“三复杂”即结构型式与类型复杂(导管架、半潜平台、船体、阳极块、斜支撑等)、作业环境复杂(风浪流、浑浊水域、内波流等)、现场施工条件复杂(新老平台条件不同、水下渔网等障碍物);“三高”即水深要求高、安全可靠要求高、智能化程度要求高。

基于此,目前国内几乎所有的浅水平台海生物清洗、检测和维修作业都由潜水员完成。然而,潜水作业具有明显的高风险、低效率、长耗时等问题。特别是随着水深增加,潜水作业的挑战和风险急剧增加。因此,采用机器人代替人力开展运维作业是一直以来努力的方向。目前,深水平平台及系泊系统的清洗与检测作业一般采用作业级无人遥控潜水器(ROV)。作业级ROV因具有水下安装、检修、清理、监测、救援等多种功能,在目前的海洋资源开发

中发挥了非常重要的作用。作业级ROV动力为150~200 HP,质量在1 t以上。国外Oceanering(国际海洋工程)公司、SAAB(萨博)公司等均已开发出具有市场价值的成熟产品,国内在作业级ROV领域起步较晚,同时面临的技术挑战也更高。目前,海洋油气领域所使用的作业级ROV主要是进口设备。对于常规的运维作业,作业级ROV尚未广泛使用,主要原因一方面操作费用高,现有作业级ROV主要为进口产品,设备本身成本较高,且ROV作业一般需要动用动力定位船舶,日费很高<sup>[2]</sup>;另一方面是操作难度高,由于其体积巨大,难以进入平台内部,此外,还存在着脐带缆缠绕以及设备碰撞风险。

考虑到上述问题,近10年来工业界一直在尝试研发新型的更具经济优势的水下运维专用机器人,并已取得了一定进展。

## 1 水下清洗机器人技术现状

水下清洗机器人是一种先进的技术设备,专门设计用于在水下环境中进行清洗任务。水下清洗机器人在清洗作业中常采用的技术有清洗刷清洗、水射流清洗、超声波清洗、激光清洗等<sup>[3]</sup>。其中以清洗刷、高压水射流和空化水射流技术较为常见,如图1所示。

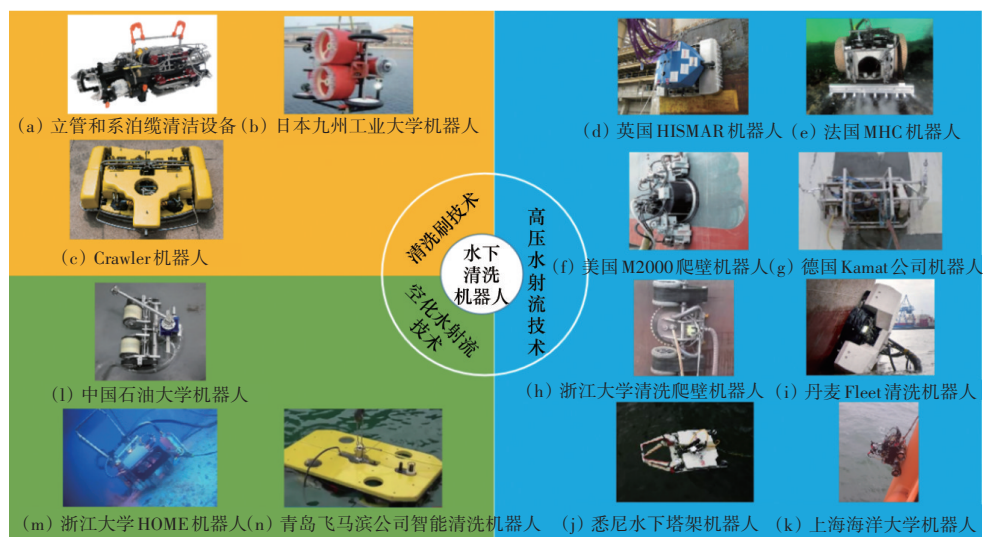


图1 水下清洗机器人

### 1.1 水下清洗刷机器人

清洗刷技术是用旋转刷通过在物体表面施加摩擦力来去除形成的物质的清洗技术。但在清洗过程中可能会对原始表面或底层油漆造成损害。刷头清洗也不能对清洁废物进行回收,其中可能含有油漆残留物。因此有毒物质在清洁过程中被释放到环境中。此外,还需要根据表面的形状、堆积材料的类型和磨损情况来更换刷头。使用到清洗刷技术的机器人有由美国 Oceaneering 公司研制的立管和系泊缆清洁设备,如图 1(a)所示。其需由无人自治潜水器(AUV)拖曳提供驱动力在结构物上进行清洗作业<sup>[4]</sup>。哈尔滨工程大学孟庆鑫等设计了一款水下清洗机器人,它采用永磁吸附和履带移动,通过清洗刷完成船体表面清洗作业<sup>[5]</sup>。日本九州工业大学设计了一款水下清刷机器人,如图 1(b)所示。安装有 2 组清洗刷可进行清洗作业,并且携带有水下摄像机,用于拍摄清刷后的船体表面,通过图像分析清刷效果。通过叶轮旋转产生的负压使机器人吸附在船体表面,在船体表面使用 4 个橡胶轮行走。这个机器人可以有效清除锈斑、锈皮等海洋污损物,但对于贝类、藤壶等附着物的清除效果不好<sup>[6]</sup>。TecHull Clean (TecHullClean Pte. Ltd.)公司设计的 Crawler 机器人,如图 1(c)所示。基于清洗刷的清洗方式,其独特的液压悬挂系统确保尼龙刷在船体和涂层系统上以适当的压力旋转。因此,它可以有效地去除船体垂直侧面和平底的所有海洋污垢,而不会损坏船舶昂贵的防污涂层。它可由潜水员或 ROV 对其进行拖曳移动<sup>[7]</sup>。

### 1.2 高压水射流清洗机器人

水射流技术的有效性取决于清洗表面、水的压力、喷射角度和与清洁表面的距离。如英国纽卡斯尔大学 2008 年研发了一种清除船体附着物的自动清洗机器人 HISMAR,如图 1(d)所示。其具有自主式航位推算和清理物回收功能,自动化程度较高<sup>[8]</sup>。法国 Cybernetix 公司于 2015 年发布了 MHC (Magnetic Hull Crawler)特种水下机器人,如图 1(e)所示。机器人依靠底部强磁铁实现吸附,两侧轮子实现行走,清理机构为高压喷冲装置,最大工作深度为 50 m,最大移动速度 0.3 m/s。MHC 主要应用于

平面结构清洗<sup>[9]</sup>。美国航空航天局联合加州理工学院共同研制了一种用于船舶清洗的 M2000 爬壁机器人,如图 1(f)所示。该机器人安装有高压水射流装置,能够承受较大的负载,但整机质量高达 216 kg,制造和维护成本高<sup>[10]</sup>;后续又开发出了改进型的 M3500 机器人,采用永磁与真空混合吸附方式,优化了附壁能力与质量比,清洗速度更快,效率更高<sup>[11]</sup>。德国 Kamat 公司研制了一款船舶清洗爬壁机器人,如图 1(g)所示。该机器人采用履带式移动,除锈速度可达 40 m<sup>2</sup>/h<sup>[12]</sup>。浙江大学宋伟等研发了一款清洗爬壁机器人,如图 1(h)所示。该机器人能够搭载 200 Mpa 超高压射流设备,并能够同步回收废水<sup>[13]</sup>。丹麦公司 Fleet Cleaner 研制的 Fleet 清洗机器人,如图 1(i)所示。其使用高压水射流进行清洁,采用磁性附着系统,机器人能够牢固地附着在船上。利用声呐定位,具有在零能见度下进行清洁的能力,利用导航系统可完成自动驾驶<sup>[14]</sup>。由悉尼科技大学机器人研究所与新南威尔士州道路和海事服务局合作开发的自主水下塔架机器人,如图 1(j)所示。该机器人提供了一种创新和实用的解决方案,可在维护浅水区水下结构期间确保工人的安全,其中包括在危险的水流中工作和高压水射流清洁。主要特点包括:(1)多模态传感,定位和重建水下结构的三维地图;(2)广泛的环境和操作意识-自主导航结构,规划水射流轨迹以清洁表面,并收集清洁表面的图像数据以进行检查<sup>[15]</sup>。2021 年上海海洋大学研发的海洋平台清污与检测机器人在半潜式生活平台、某 FPSO 和渤海导管架平台上完成了实船试验,如图 1(k)所示。该机器人可在 600~2000 mm 不同直径的钢质导管表面实现稳定吸附,适用于高压水喷冲和空化喷冲,从而开展清洗和检测作业<sup>[16]</sup>。此外,还有 Flow 公司研制的 Hydro-Cat 机器人<sup>[17]</sup>和德国 Hammelmann 公司设计的 SPIDERJET 和 DOCKBOY 机器人<sup>[18]</sup>也采用了该类清洗技术。

### 1.3 空化水射流清洗机器人

空化水射流技术是通过在喷嘴中加压的水在高速流动过程中产生空化现象,形成微小气泡破裂的冲击力,以高速水流的动能实现对目标物的切割

和清洗。空化水射流的主要优势是高效、环保、无污染和精度高。

应用到空化水射流清洗技术的机器人有,中国石油大学研制的爬壁机器人,通过携带空化水射流设备对船体表面进行清洗<sup>[19]</sup>,如图1(i)所示。2017年,浙江大学HOME机器人在东海成功完成海试,如图1(m)所示,使用专用机器人对导管架平台钢结构进行清洗在国内尚属首次。该款机器人采用永磁吸附模块,利用空化水射流与视觉导航控制等技术,能够在水下100 m内进行海生物自动化清洗<sup>[20]</sup>。青岛飞马滨智能科技有限公司研制的智能清洗机器人,如图1(n)所示。机器人在底部搭载双空化射流装置,最大清洗速度为2800 m<sup>3</sup>/h,清洗效果好,不伤船漆;由于机器人采用水平推进器提供推力,机器人的清洗姿态受海流影响较大<sup>[21]</sup>。

## 2 水下检测机器人技术现状

### 2.1 海洋平台结构检测技术概述

根据作业区安全保障要求以及船级社强制要求,平台水上和水下结构要定期进行检测,主要包括外观检查、厚度测量、电位检测、构件充水探测以及焊缝检测等内容。

水下检测的技术手段一般包括视觉检测、机械测量、超声波检测、磁粉探伤技术、交流场检测等<sup>[22]</sup>。其中,视觉检测主要是通过水下光学设备(水下摄像、激光等)对待测物进行直接检查,其对作业区域水质的要求较高;超声波检测技术是一种利用超声波传播和回波信号分析的非破坏性检测方法。将高频声波传播到被测对象内部,通过测量声波的回波信号,可以获取目标物体的结构、尺寸、缺陷等信息,具有高灵敏度、高分辨率、实时性等优点,并且不会对被测对象造成损伤。磁粉探伤技术主要应用于水下平台外观检查中,如对构件或节点有怀疑,或平台定期检查有要求时,应对平台构件或节点进行水下磁粉探伤,以检查构件或节点的表面或近表面缺陷。水下磁粉探伤主要采用荧光磁粉。交流场检测是一种交流电场检测技术(ACFM),主要用于水上结构或水下结构裂纹检测,具有对工件表

面的处理要求低、对水下探头的操作人员的专业技能要求少等优点。

### 2.2 海洋平台新型检测机器人

随着海上作业在深水区的不断推进,由潜水员进行水下检测变得不现实。从20世纪80年代开始,可携带多个检测传感器的作业型遥控潜水器开始逐渐承担深水结构物的检测任务,如图2所示。作业级ROV上一般要搭载1~2个高自由度(DOF)、大抓力的液压机械手,以增加运维作业的能力,例如,Shilling Robotics提出了许多型号的机械手,如TITAN、ATLAS、CONAN和ORIAN等。这些机械手遵循同构主从式遥操作机制的原理工作,其中操作员可控制主机械手,该主机械手是真实副机械手的复制品。机械手由钛等材料制成,可以轻松承受重复、恶劣、潮湿和高压的水下环境。



图2 Oceanering作业级ROV

相较作业级遥控机器人,各类新型机器人由于其载体质量较轻,同时不搭载机械手或仅搭载轻量级的电动机械手,因此其作业能力较为单一。在前文所述各类检测作业中,水下摄像检测、超声波检测以及厚度测量等所采用的传感器设备相对质量较小,搭载难度较低,很多清洗爬壁机器人也兼具水下结构检测功能,如法国Cybermetix公司MHC机器人、上海海洋大学研发的清污机器人等。Eddyfi公司研发了一款专用ACFM作业的爬壁机器人MaggTM,如图3所示,该机器人利用磁吸附履带沿钢结构壁面行走,设备质量仅10.9 kg,具有水下观察、超声波无损检测以及ACFM等多重功能,其利用磁吸附力,保障了焊缝检测作业的稳定性要求<sup>[23]</sup>。国内某公司在传统ROV基础上,采用负压吸附与轮式技术,研发了一种新型的结构检测机器人,可有效搭载多套腐蚀缺陷检测、超声检测(UT)



图3 MaggTM爬壁检测机器人

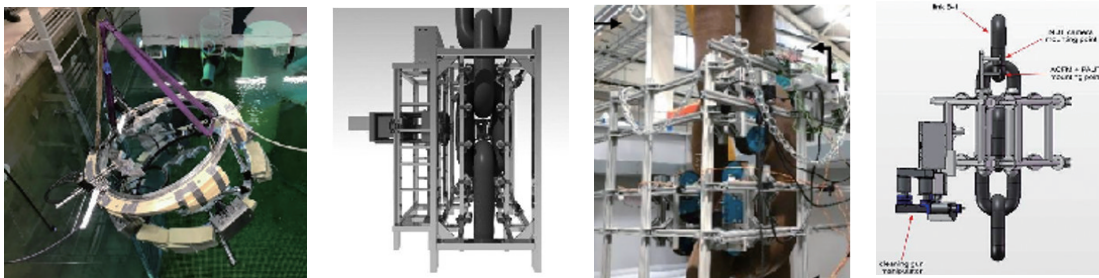
和ACFM等检测设备,并成功应用于“深海一号”半潜式生产平台。

### 2.3 海洋平台系泊链检测机器人

深水浮式海洋平台系泊系统主要由锚链、聚酯缆等组成<sup>[24]</sup>。由于系泊系统长期处在海水中,不但要承受风浪及洋流外力作用,还要受到海水带来的微生物腐蚀和电化学腐蚀。特别是锚链的链与链间相互作用,会导致在连接位置很容易产生疲劳磨损,最终造成锚链失效,以至于影响海洋平台的安全性和可靠性<sup>[25]</sup>。因此,需要定期对锚链进行检测维护。

Tanaka等<sup>[26]</sup>设计的系泊链检测设备配备了夹持装置用于在检测过程中夹持系泊链,其由4个连接臂组成,用于对系泊链进行夹持,以在对系泊链进行图像测量时保持稳定。在处于图像测量模式时可自动对系泊链外形轮廓进行测量。Weiss等<sup>[27]</sup>设计的用于系泊链检测的ICARE爬链机器人可以在FPSO永久安装的采油船等浮式生产设施的系泊链上进行作业。其检测方式是通过测试程序对链条进行图像检测,检测链条是否有裂纹和腐蚀。机器人利用2个爪子在系泊链上交替移动的方式攀

爬移动。整个系统在水中有轻微的浮力。在检测系泊链前,其可利用搭载的高压喷水设备对系泊链构件进行清洁以确保测量的准确性。此外,还有由Innovate UK公司资助研发的一款轻量化的水下检测机器人RIMCAW,如图4(a)所示。该项目旨在设计一个能在系泊链上移动的检测机器人,其结构设计基于一个标准的Stewart平台,包括6个棱柱执行机构,并部署超声波无损检测技术来扫描系泊链,从而检测系泊链上存在的结构缺陷<sup>[28]</sup>。Innovate UK公司还研发了一款名为Moorinspect的水下检测机器人,如图4(b)所示。其长度接近1.5 m,能够携带70 kg以上的检测设备。机器人框架被拆分成2部分,当被放置在系泊链上时,两者通过机械门闩进行连接,并可以根据系泊链的尺寸进行调整。其通过安装的一个长程超声波检测探针项圈实现对锚链状态的检测<sup>[29]</sup>。伦敦南岸大学开发了一种质量轻、快速、易于展开的,同时适用于水面以上和水面以下的锚链攀爬机器人并可应对锚链间由海流作用导致的错位情况,如图4(c)所示。其采用相控阵超声检测技术,获得离散检测能力对锚链进行检测,并采用全矩阵捕获(FMC)数据采集技术来提高无损检测(NDT)图像的质量<sup>[30]</sup>。西班牙等国家联合开发出了一款用于近海石油平台的系泊链自主检测机器人,如图4(d)所示。该机器人采用绞车控制并利用重力沿链运动,部署时必须利用单独的绞车系统将其移动到链条上,利用相控阵超声波对锚链进行检测。除此之外,该机器人可实现图像检测和ACFM检测<sup>[31]</sup>。



(a) RIMCAW水下检测机器人 (b) Moorinspect水下检测机器人 (c) 锚链攀爬机器人 (d) 系泊链自主检测机器人

图4 系泊链检测机器人

### 3 水下维修机器人技术现状

与水下清洗与检测作业相比,水下维修作业由于所针对的结构受损状态、施工作业条件和节点位置等因素,对维修作业任务的要求是不断变化的,因此,水下维修机器人也具有很大的差异性。通常来说,水下维修作业一般包括钢结构除锈、涂覆层保护与喷漆以及局部焊接作业等。

Fraunhofer IOSB(弗劳恩霍夫光电、系统技术及图像处理研究所)等研究所联合研制了一种低成本水下维护机器人——Crawfish,如图5所示。该机器人可以自主作业,如自动清洁、修理海上结构物,可在水下涂抹防腐涂层,为水下结构提供防腐蚀保护。在检测技术上同样使用了超声波技术,该机器人可以对水下结构裂缝进行无损检测作业。为了实现精确定位,其导航使用光学位置跟踪系统,并借助Fraunhofer IOSB开发的立体相机和创新的图像增强算法,对处理对象进行三维捕捉。德国人工智能研究中心(DFKI)开发的一种新型双臂自主水下维护AUV<sup>[32]</sup>,如图6所示。它能够进行自主和远程操作作业,在AUV的侧面安装有2个集成的机械手,可以操作水下物体,用于水下结构的维护和维修。基于特殊机身结构的设计和人工智能控制技术,机器人可以在潜水过程中改变重心和浮力,并以稳定的方式保持任何方向。除了完全自主运行外,AUV还可以

通过连接的光纤电缆以混合模式运行,允许操作员在水下结构作业的关键时刻进行干预和远程控制。除了机械手之外,该机器人还配备了许多用于环境感知的传感器,例如,声呐传感器、相机、激光扫描仪和磁力计。为有效处理大量传感器数据,研究人员开发了一种特殊的架构概念,可以直接在机器人上对数据流进行分散分析<sup>[33]</sup>。Weiss等设计了OCTOPUS履带机器人,如图7所示。OCTOPUS配备有永磁铁,能够沿着80%的船体表面爬行,由于模块化的设计方式,其可在干船坞中通过高压水爆破清洁船体,并在船体上进行喷漆作业。OCTOPUS速度最高可达0.3 m/s。该机器人的优点之一是可以将使用过的水进行系统回收。为了能够对船体钢板损坏的地方进行定位,OCTOPUS可配备无损检测超声波传感器,使其能够测量船体厚度<sup>[27]</sup>。美国SARCOS公司研发的水下移动操纵机器人如图8所示。该机器人被设计用于在复杂且通常危险的环境中操作,并具有类似人类的操作能力。其具备灵活高效的电动机械手,可在300 m工作深度,一次工作数小时<sup>[34]</sup>。挪威Eelume公司设计的蛇形机器人,如图9所示。可用于海底检查、维护和维修。机器人自身拥有推进器和机械臂,其细长灵活的身体可以远距离行驶,并在传统水下航行器无法进入的密闭空间中进行作业。利用机身上的推进器和关节结构,机器人可以在水中做出任何姿势<sup>[35]</sup>。



图5 Crawfish水下维护机器人



图6 新型双臂自主水下维护AUV



图7 OCTOPUS履带机器人

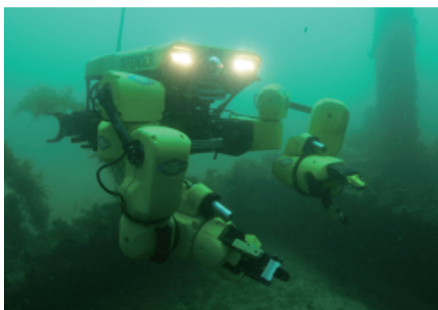


图8 水下移动操纵机器人



图9 蛇形机器人

Oceanearing 公司设计了一款无人海底管道修复的解决方案,如图 10 所示。AUV 被部署对管道进行巡检任务,并将所收集的数据进行整理,使得巡检可以有针对性地进行。对故障位置进行标记并采集图像。操作 AUV 使用疏浚工具将管道上方的泥土进行疏浚作业并利用 AUV 搭载拆卸防护层的工具使用高压水去除混凝土配重层、熔结环氧树脂、煤焦油环氧树脂和其他常见于海底管道保护层,以确保直接接触到管道的基材。使用检测设备

对去掉保护层后的管道进行水下检测,管道内部和外部的异常特征进行识别和记录。利用作业船将抬升机构部署到海床,使管道抓钩降至管道位置。在 AUV 的辅助下,将机构对齐管道以确保修复连接的正确配合。进而对管道的圆度和直线度进行评估。并将损坏的部分切割和回收,并使用双夹紧固密封连接器部署新的管段。连接器通过液压方式移动到现有管道上。最后,将新的管段从导向器中释放。修复后的管道被放置回海床<sup>[36]</sup>。

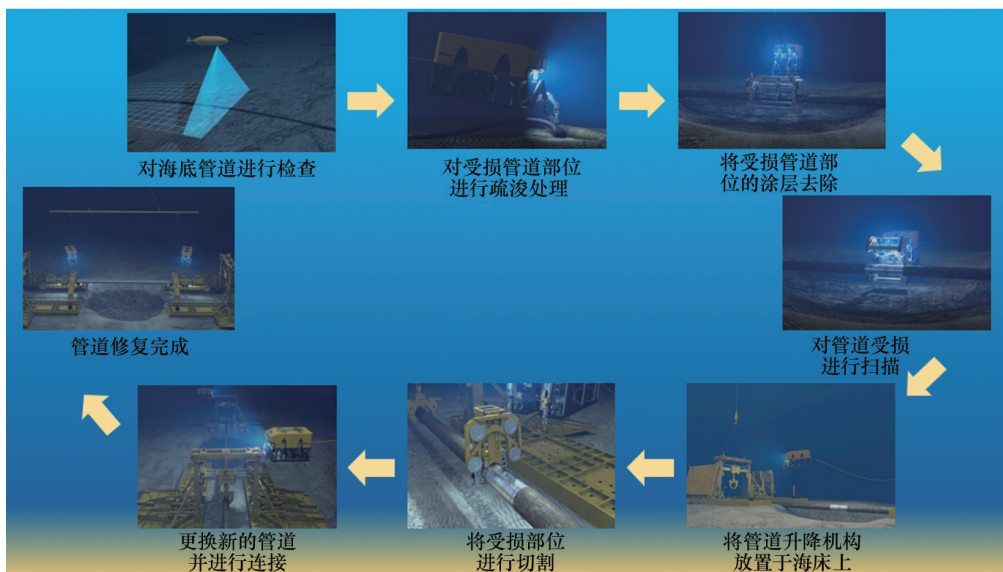


图 10 海底管道修复过程

Kongsberg Ferrotech 公司设计了一款水下管道修复产品。该产品利用了水下 3D 打印技术,如图 11 所示。通过操作 Nautilus 机器人对有缺陷的管道部分进行安置、排空、检查和修复。机器人通过起重机械被降到受损的管道部分上。该机器使用清管检测技术以减少对海床的开挖。通过针对性的检查对损坏区域的精确定位。机器人可以利用其

水下 3D 打印技术在现场修复被确认的损坏部位。这一技术减少了水下管道修复所需的时间、资金和资源,提高了检查和修复的成本效益<sup>[37]</sup>。

#### 4 适应于水下运维作业的机器人关键技术分析

相比传统作业级 ROV,前文所介绍的新型运维水下机器人由于运动方式、动力能力和设备重量等级等方面都存在较大差异,研发中产生了一些新的关键技术问题。

1) 运维作业影响下的机器人稳定性控制技术。在进行喷冲清洗和维修等作业时,会产生巨大的反作用力,对作业平台的稳定性控制提出更高的要求。



图 11 水下 3D 打印修复技术

2) 水下吸附技术。爬壁机器人是新型机器人中的一种主要形式,吸附技术是爬壁机器人的关键技术之一,壁面吸附能力强弱将直接影响到后续作业,所以吸附技术的优劣已成为评价爬壁机器人性能

的指标之一,吸附方式特点对比如表1<sup>[38]</sup>所示。

3) 水下移动技术。目前新型特种机器人主要采用了轮式、履带式 and 步行足式等移动方式,各自的优缺点对比如表2所示。

表1 爬壁机器人吸附方式特点对比

吸附方法	优点	缺点
磁力吸附	永磁体 维持吸附力不需要外加能量,安全性好	运行时磁体与壁面分离需要施加很大的剥离力
	电磁体 很容易实现磁体与壁面离合,易实现快速移动	维持吸附力需要电能且电磁铁本身的质量也大
负压吸附	单吸盘 允许一定程度的泄漏面积,允许壁面有凸起	吸盘无冗余性,一旦泄漏量超过界限,本体将丧失移动性能
	多吸盘 吸盘尺寸小,易实现轻量化,冗余性好	对壁面要求较高,当壁面有凹凸或裂缝时会有泄漏
推力吸附	不存在泄漏问题,对壁面的材料适应性强	产生推力的装置噪声大、体积大,容易出现故障

表2 新型特种机器人移动方式对比

移动方式	优点	缺点
轮式	移动快,容易转弯	贴合面积小,维持吸附困难
履带式	附着面积大,吸力强	体积大,灵活性差
步行足式	活动灵活,适应能力强	行走不易控制

4) 适用于多种海域条件下的环境适应性技术。目前,国内的油气平台主要分布在渤海、东海和南海,水深跨度从十几米到1500 m,水域和环境条件差异巨大,这对运维作业机器人提出了很高要求。其中,渤海区域及部分东海区域水质相对浑浊,要求机器人搭载声学定位设备辅助进行作业;南海区域面临深水作业对结构耐压与密封、远程控制等方面的要求,以及南海特殊的内波流对机器人稳定性的要求。

## 5 智能化技术发展趋势

海洋油气平台运维作业是长期的、复杂的过程,不仅对水下机器人自身提出了很高要求,同时,也给操作人员带来了巨大挑战,特别是面临复杂环境条件和大面积、高效率作业要求,如何通过智能化技术手段,降低操作人员工作强度和难度,是水下运维机器人发展的必然趋势。

第一,基于路径规划与自主导航的水下自主作业技术。为了降低人员操作比率,针对大平面结构、直立柱等规则结构,设计基于声光+惯性传感器的实时姿态数据融合算法,优化机器人执行清洗与检测任务的行进轨迹,基于自主导航技术,实现大面积区域的自动运维作业。

第二,基于数字孪生与人工智能技术的水下运维作业模拟与应急预案评估。包括重型ROV、爬壁机器人等带缆机器人在海上作业时,都存在着脐带缆缠绕风险,如何通过方案设计、路径优化、作业模拟和人员操作等手段,最大限度地降低脐带缆缠绕风险以及一旦缠绕后的自主救援能力是十分关键的技术挑战。一方面,可以通过对水下场景的三维建模,进行水下运维作业的演练,通过大量的仿真和实测,基于深度学习方法,为作业人员提供推荐的作业优化路径,甚至模拟紧急情况下的预案;另一方面,在作业过程中,可通过数字孪生技术,实时开展水下场景重构,根据机器人运行状态、水流

变化等,为下一步操作提供指引。

第三,多传感器融合的水下作业技术。考虑到不同水域环境的特点,采用基于声光磁等多种定位与探测手段技术,通过不同信息的数据融合,起到综合决策的作用。

综上所述,水下运维技术在解决水下设备维护和操作方面发挥着重要作用。尽管存在一些问题和挑战,但随着技术的不断进步,自主操作、先进材料、远程操作和通信技术的改进以及环境监测和预测维护等技术的发展,水下运维技术将朝着无人化、智能化以及信息数字化方向不断发展。

### 参考文献(References)

- [1] 陈大江, 施佳, 包玉银. 在役海上固定平台结构预评估在定期检验中的应用[J]. 机电设备, 2018, 35(4): 45-49.
- [2] 刘浩, 祝杨, 余森, 等. 水下机器人 ROV 在复杂海域海底节点收放中的应用[J]. 物探装备, 2019, 29(2): 76-79.
- [3] Song C H, Cui W C. Review of underwater ship hull cleaning technologies[J]. Journal of Marine Science and Application, 2020, 19(3): 415-429.
- [4] Oceaneering. Intervention tooling search[EB/OL]. [2023-06-06]. <https://www.oceaneering.com/intervention-tooling-search/>.
- [5] 肖宏远. 船体表面水下清刷机器人研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [6] Nagaya K, Yoshino T, Katayama M, et al. Wireless piping inspection vehicle using magnetic adsorption force[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(3): 472-479.
- [7] TecHullClean. Cleaning units crawler[EB/OL]. [2023-06-03]. <https://techullclean.com/crawler/>.
- [8] Narewski M. Hismar-underwater hull inspection and cleaning system as a tool for ship propulsion system performance increase[J]. Journal of Polish CIMAC, 2009, 4(2): 227-232.
- [9] 周正权, 郭冀江, 陈祎, 等. 一种用于导管架平台结构清洗与检测的新型水下机器人总体设计初探[J]. 清洗世界, 2019, 35(12): 25-29, 35.
- [10] Bar-Cohen Y, Bao X, Marzwell N. Ultrasonic paint loosening and real-time thickness gauging system for enhancement of water jet paint stripping[R]. California: NASA Tech Briefs, 2001.
- [11] 衣正尧, 弓永军, 王祖温, 等. 用于搭载船舶除锈清洗器的大型爬壁机器人[J]. 机器人, 2010, 32(4): 560-567.
- [12] Bar-Cohen Y, Joffe B. Magnetically attached multifunction maintenance rover[R]. California: NASA Tech Briefs, 2005.
- [13] 宋伟, 姜红建, 王滔, 等. 爬壁机器人磁吸附组件优化设计与试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(10): 1837-1844.
- [14] Fleet Cleaner. Fleet cleaner robot[EB/OL]. [2023-06-06]. <https://www.fleetcleaner.com/technology/#FCROBOT>.
- [15] University of Technology Sydney. Underwater pylon inspection[EB/OL]. [2023-06-05]. <https://www.uts.edu.au/research/robotics-institute/industry-showcases/overview/robotics-infrastructure/underwater-pylon-inspection>.
- [16] Jiang Z, Sun T, Luo G S, et al. A preliminary study on the development of a novel marine growth cleaning robot for jacket platforms[C]//Proceedings of ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Glasgow: ASME, 2019.
- [17] Flow International Corporation. Hydro-cattM industrial cleaning system[EB/OL]. (2009-10-20) [2023-06-07]. <http://www.flowcorp.com/waterjet-products>.
- [18] Hammelmann. Water jet technology[EB/OL]. [2023-07-13]. <http://www.hammelmann.cn/cn/products/water-jet-technology/>.
- [19] 周维. 基于轮式清洗爬壁机器人的空化射流仿真及实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [20] 哈姆海生物清洗机器人平湖油气田海试成功[EB/OL]. (2017-09-11) [2023-07-02]. <http://me.zju.edu.cn/mecn/2017/0911/c6200a637699/page.htm>.
- [21] 飞马滨(青岛)智能科技有限公司. 船舶清洗检测水下智能清洗检测[EB/OL]. [2023-07-11]. [https://www.iuvt.com.cn/?list\\_21](https://www.iuvt.com.cn/?list_21).
- [22] Cartz L. "Quality Control and NDT" in nondestructive testing[M]. Almere: ASM International, 1995.
- [23] Remote visual inspection and ACFM for crack assessment[EB/OL]. (2021-08-01) [2023-07-11]. [https://www.eddyfi.com/doc/ProductsDownloadables/Magg-Crawler\\_R-VI-with-ACFM-kit\\_202108-01-01](https://www.eddyfi.com/doc/ProductsDownloadables/Magg-Crawler_R-VI-with-ACFM-kit_202108-01-01).
- [24] 霍发力, 蒋文馨, 朱晨阳. 浮式风机浅海区域系泊系统定位特性研究[J]. 中国造船, 2022, 63(6): 174-187.
- [25] 李莎航. 系缆全生命周期内极限破断和疲劳伤特性及影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [26] Tanaka T, Yoshie M. Field test of a practical test model of maintenance examination system for mooring facilities

- and additional installation of chain grasping frame in the vehicle[C]//Proceedings of IEEE International Underwater Technology Symposium (UT). Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1-8.
- [27] Weiss P, Andritsos F, Schom F, et al. Innovative Robotic Solutions for the Survey and Certification of Ships and Mobile Offshore Units[C]//COMPIT2004. Siguenza: COMPIT, 2004, 1-8.
- [28] International Institute of Marine Surveying. New innovation for inspecting mooring chains above and below water successfully trialled[EB/OL]. (2021-07-19) [2023-06-10]. <https://www.iims.org.uk/new-innovation-inspecting-mooring-chains-water-successfully-trialled>.
- [29] Ruiz A G, Sattar T P, Sanz M C, et al. Inspection of floating platform mooring chains with a climbing robot [M]//Proceedings of Mobile Service Robotics Hackensack: World Scientific, 2014: 251-258.
- [30] Dissanayake M. Development of a chain climbing robot and an automated ultrasound inspection system for mooring chain integrity assessment[D]. London, UK: London South Bank University, 2018.
- [31] Autonomous robotic system for the inspection of mooring chains that tether offshore oil gas structures to the ocean floor[EB/OL]. [2023-07-11]. <https://cordis.europa.eu/project/id/18236>.
- [32] Innovations report. Autonomous underwater maintenance [EB/OL]. (2022-01-25) [2023-05-31]. <https://www.innovations-report.com/information-technology/autonomous-underwater-maintenance>.
- [33] Fraunhofer. Underwater maintenance via robot[EB/OL]. [2023-06-09]. <https://www.smart-ocean.fraunhofer.de/en/projects/underwater-maintenance-via-robot.html>.
- [34] SARCOS. Underwater mobile manipulation[EB/OL]. [2023-06-10]. <https://www.sarcos.com/products/guardian-sea-class-robot>.
- [35] Eelume. The Eelume concept and value proposition[EB/OL]. [2023-06-11]. <https://eelume.com/#system-and-product>.
- [36] Oceaneering. Pipeline repair[EB/OL]. [2023-06-02]. <https://www.oceaneering.com/pipeline-repair/>.
- [37] AZO Materials. Introducing an underwater 3D printer for seabed-level repairs[EB/OL]. (2021-06-21) [2023-06-01]. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=20515>.
- [38] 王丽慧. 水下船体表面清刷机器人及相关技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.

## Development and trends of underwater robots for inspection, maintenance and repair for offshore oil and gas platforms: A review

JIANG Zhe<sup>1,2</sup>, ZHAO Yu<sup>1</sup>, HUANG Jianxia<sup>3</sup>, WANG Fang<sup>1</sup>, CHEN Yi<sup>3</sup>, LUO Chuankun<sup>1</sup>, LUO Gaosheng<sup>1\*</sup>

1. Shanghai Engineering Research Center of Hadal Science and Technology, College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China
2. Shanghai Jiao Tong University Underwater Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200231, China
3. CNOOC EnerTech Equipment Technology Co., Ltd., Tianjin 415599, China

**Abstract** The deployment of semi-submersible production and storage oil platform "Deepsea No.1" signifies a significant leap in China's ability to develop deep-water oil and gas fields and to construct deep-water ocean engineering equipment. However, due to prolonged offshore operations, deep-water oil and gas platforms face environmental challenges such as corrosion from seawater, marine organism attachment, wind and wave flow. As a result, the development of underwater operation and maintenance of deep-water platform structures, including cleaning, inspection, and repair, has become a key factor for ensuring long-term safe operation. Currently, shallow-water platforms mainly rely on divers for operations. With increasing water depths, the use of underwater robots for inspection, maintenance and repair (IMR) has become an inevitable trend. Nevertheless, traditional remotely operated vehicles (ROVs) are expensive and difficult to operate because of their sizes. This paper mainly summarizes novel underwater IMR robots for marine engineering applications developed in the past decade, reviews domestic and international status of underwater maintenance robots, and discusses some typical case studies. Finally, common key technical issues of new robots and the trend for intelligent technology development in underwater maintenance robots are addressed.

**Keywords** deepwater oil and gas platform; underwater robots for inspection; intelligent technology ●



(责任编辑 王微)