

DOI: 10.13715/j.issn.2096-644X.20250605.0001

引用格式:王杰文,陈妙谋,胡海云,等.水下液压机械手技术进展[J].湘潭大学学报(自然科学版),2026,48(2):99-116.

Citation: WANG Jiewen, CHEN Miaomou, HU Haiyun, et al. Advancements in underwater hydraulic manipulator technology [J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2026,48(2): 99-116.

水下液压机械手技术进展*

王杰文¹, 陈妙谋¹, 胡海云¹, 韩超¹, 曾亚骏¹, 熊佳弘², 尹硕辉²

(1. 中海油深圳海洋工程技术有限公司, 广东 深圳 518052;

2. 湘潭大学 机械工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要:【目的】为了梳理水下液压机械手的技术发展现状, 针对其在结构设计、建模方法、驱动方式、控制策略及工程应用等方面的研究进展开展全面综述. 【方法】采用文献归纳与对比分析的方法, 首先对水下液压机械手的结构设计特点, 包括自由度配置、材料选择及构型设计进行总结; 其次阐述其运动学与动力学建模方法; 然后分析液压驱动与电动驱动的特点及应用情况; 并对控制系统从基础控制方法到高级智能控制技术的发展脉络进行梳理; 进一步通过国内外代表性企业及产品的对比分析, 总结当前技术现状; 最后基于现有研究, 识别技术挑战并展望未来发展方向. 【结果】调研分析表明, 水下液压机械手在结构设计方面已形成多种构型与材料组合, 建模方法日趋精确, 驱动系统中液压驱动仍占主导, 但电动驱动逐步兴起, 控制技术正从传统控制向智能控制演进; 智能化水平的提升有助于改善复杂环境下的作业性能. 【结论】该综述系统总结了水下液压机械手的关键技术与产品现状, 明确了当前面临感知受限、动态扰动及智能化不足等挑战; 该领域未来应向人机共融、自主智能化、数字孪生应用及集群化作业等方向持续发展, 为相关研究与工程实践提供有价值的参考.

关键词: 水下液压机械手; 结构设计; 运动分析; 控制系统; 技术进展

中图分类号: O631

文献标志码: A

文章编号: 2096-644X(2026)02-0099-18

Advancements in underwater hydraulic manipulator technology

WANG Jiewen¹, CHEN Miaomou¹, HU Haiyun¹, HAN Chao¹, ZENG Yajun¹, XIONG Jiahong², YIN Shuohui²

(1. COOEC Subsea Technology Co., Ltd., Shenzhen 518052, China;

2. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: 【Objective】 In order to summarize the current technological development status of underwater hydraulic manipulators, this review comprehensively covers research progress in aspects such as structural design, modeling methods, driving methods, control strategies, and engineering applications. 【Method】 A method of literature induction and comparative analysis is proposed. Firstly, the structural design characteristics of underwater hydraulic manipulators, including the configuration of degrees of freedom, material selection, and configuration design, are summarized; secondly, their kinematic and dynamic modeling methods are explained; then, the characteristics and applications of hydraulic and electric drives are analyzed; the development of control systems from basic control methods to advanced intelligent control technologies is outlined; furthermore, by comparing representative domestic and international companies and products, the current technological status is summarized; finally, based on existing research, technical

* 收稿日期: 2025-06-05

基金项目: 湖南省自然科学基金(2021JJ30649)

通信作者: 陈妙谋(1965-), 男, 湖南常德人, 博士/深圳市 A 类人才/中海油国家特聘海洋工程专家. Email: chen.miaomou@qq.com

challenges are identified, and future development directions are projected. 【Results】 Investigation and analysis show that multiple configurations and material combinations have been formed in structural design, modeling methods are becoming increasingly accurate, hydraulic drives still dominate in driving systems while electric drives are gradually emerging, and control technologies are evolving from traditional control to intelligent control; the improvement in intelligence level helps to enhance operational performance in complex environments. 【Conclusion】 This review systematically summarizes the key technologies and product status of underwater hydraulic manipulators, clarifies the current challenges such as limited perception, dynamic disturbances, and insufficient intelligence; the field should continue to develop toward human-machine integration, autonomous intelligence, digital twin applications, and clustered operations in the future, providing valuable reference for related research and engineering practice.

Key words: underwater hydraulic manipulator; structural design; motion analysis; control system; technological development

0 引言

水下液压机械手是现代海洋工程和水下作业中不可或缺的基本工具, 它们以水下机器人为载体, 能够在人类难以或无法直接介入的复杂、危险水下环境中执行各种任务^[1]. 这些任务包括深海油气资源的勘探与开发、海底基础设施的建设与维护, 以及核设施的退役、深海科学研究以及水下救援等多个领域, 如图 1 所示. 随着人类对海洋资源的日益重视和水下作业需求的不断增长, 对高性能、高可靠性的水下机械手的需求也随之增加. 然而, 水下环境的严苛性, 如高压、低温、腐蚀以及有限的可见度, 给水下机械手的设计和操作带来了巨大的挑战^[2].

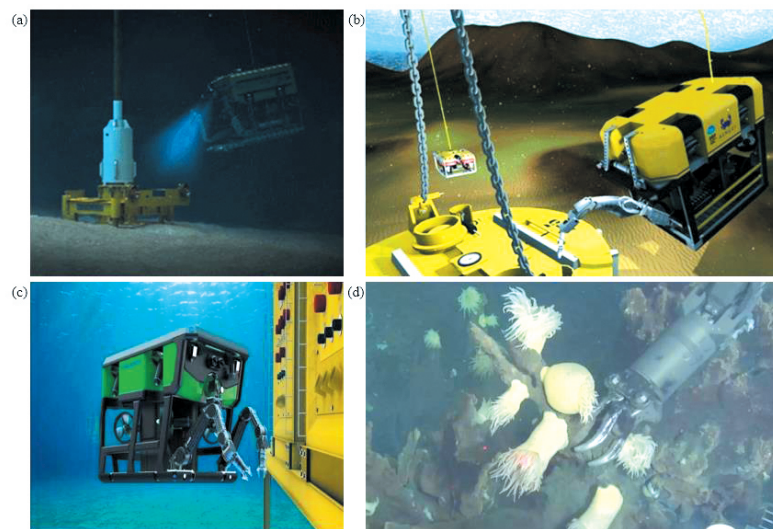


图 1 (a) 油气勘探开发; (b) 海底基础设施的建设; (c) 海底基础设施维护; (d) 海底科学研究

Fig. 1 (a) Oil and gas exploration and development; (b) the construction of submarine infrastructure; (c) maintenance of submarine infrastructure; (d) Scientific research on the seabed

水下作业特别是深水作业对机械手的可靠性、操作精度和环境适应性提出了严格要求. 液压驱动因其功率密度高、耐压耐用性好等优势, 成为水下机械手的主要驱动方式^[3]. 相比于电驱动机械手, 液压机械手能够提供更大的力和力矩, 更持久的可靠性和更适合水下重型的作业

环境。然而,水下环境的极端特性给液压机械手的设计、制造和应用带来了严峻挑战^[4-5]。深海高压(每下降10 m增加约0.1 MPa压力)对结构的耐压强度和密封可靠性提出了极高要求^[6-7];海水的强腐蚀性要求采用特殊耐腐蚀材料或防护涂层^[2];水体的浑浊和光线衰减导致视觉感知受限,增加了目标识别和精确定位的难度^[4];复杂多变的水动力(如海流、波浪、载体运动引起的扰动)以及机械手运动与载体之间的强耦合效应,使得精确建模和稳定控制异常困难^[1,4,8];水下无线通信带宽受限也给远程实时控制和数据传输带来挑战。此外,许多水下作业任务具有非结构化和不确定性的特点,要求机械手具备更高的灵活性、适应性和一定的自主决策能力^[9]。

面对日益增长的应用需求和严苛的环境挑战,水下液压机械手技术正朝着更高性能(更大的负载/自重比、更高的精度和灵活性)、更高可靠性、更强环境适应性和更智能化的方向发展。本综述旨在全面梳理近年来水下液压机械手在结构设计创新、运动学与动力学建模分析、驱动技术演进、先进控制策略以及国内外产业发展等方面的研究现状与进展,深入分析当前面临的关键技术瓶颈,并对未来的发展趋势进行展望,以为相关领域的研究人员和工程技术人员提供有价值的参考。

1 水下液压机械手结构与功能

水下液压机械手的自由度配置直接影响其操作能力和适用范围。目前,水下作业机械手的自由度配置已从最简单的1-2自由度发展到复杂的7个^[10-11]或更多自由度^[12]。单自由度和两自由度机械手主要用于简单的抓取操作任务,功能受限。三自由度水下机械手具有刚度大、可到达工作空间内任何位置的特点,适用于需要较高工作精度的场合^[13]。六自由度机械手在不考虑机器人本体自由度的情况下,能够实现末端执行器的任意位置和姿态,广泛应用于精细操作任务^[7]。7个及以上自由度的冗余机械手可以增加动作灵巧性,提高环境适应能力,但同时也给运动规划和控制带来了更大的挑战^[10,14]。

为满足不同深度和作业要求,水下液压机械手的功能配置也有所差异。对于浅水作业(通常深度在300 m以内),机械手设计相对简单,主要考虑操作灵活性和成本因素。而中等深度(300~1 000 m)的机械手则需要考虑更复杂的密封和压力补偿问题^[15]。深海作业(1 000 m以上)的液压机械手面临极端的环境挑战,需要特殊的材料和设计来确保其可靠性和耐久性,如TechnipFMC的TITAN 4机械手(如图5(a)所示)采用轻量、高强度、耐腐蚀的钛合金,其标准工作深度可达4 000 m,甚至可扩展至7 000 m。为了提高系统的可靠性、减小尺寸并简化电缆连接,将控制阀组、电子设备等集成到机械手本体内部成为重要的发展趋势^[1]。例如,Schilling(现属于TechnipFMC)TITAN 4将所有下行臂电子设备置于前臂内^[3]。国内浙江凯富博科的“土星机械手”采用钛合金结构和创新的内置(镂空)油道技术(如图6(b)所示),避免了传统外置液压管路的风险,实现了结构紧凑和轻量化^[16]。此外,拓扑优化等先进设计方法也被应用于臂体结构设计,以在保证强度的前提下最大限度地减轻重量^[17-18]。

水下液压机械手的功能配置则需考虑其应用场景和任务需求。例如,用于海洋科学考察的机械手通常配备精细的末端执行器,以便于采集脆弱的生物样本,如图2所示;而用于海洋工程的机械手则需要更大的夹持力和操作能力,以满足水下结构安装和维护的需求^[19]。此外,一些专用机械手还配备特殊的工具和传感器,以实现特定的水下任务,如水下清洗等^[20-21]。



图 2 (a) 海洋采集用软夹; (b) 搜救打捞用特殊回收钳

Fig. 2 (a) Soft clips for ocean collection; (b) Special recovery pliers for search and rescue salvage

2 水下液压机械手运动分析

2.1 运动学建模方法

水下液压机械手的运动学分析是进行控制和模拟的基础, 主要包括正向运动学和逆向运动学. 正向运动学描述给定关节变量下末端执行器的位置和姿态, 而逆向运动学则是求解实现特定末端位置和姿态所需的关节变量^[22]. 目前, 常用的运动学建模方法主要有 Denavit-Hartenberg (D-H) 矩阵法、改进的 D-H 矩阵法以及旋量理论等. D-H 矩阵法是一种经典的机构运动学建模方法, 它通过建立一系列局部坐标系, 并利用 4 个参数 (连杆长度、连杆扭角、关节偏移和关节角) 描述相邻坐标系之间的转换关系^[23], 如图 3 所示. 这种方法直观且易于实现, 因此在水下机械手的运动学分析中得到广泛应用. 然而, 标准的 D-H 矩阵法在处理某些特殊构型 (如平行轴) 时存在奇异性问题. 为此, 将旋量理论和基于指数积 (POE) 的公式用于运动学建模^[24-25], 可以避免建立局部坐标系的复杂性和奇异性.

为了提高实际控制精度, 运动学参数标定是必不可少的环节^[26], 通常采用激光跟踪仪等测量设备获取末端位姿数据, 结合最小二乘法等优化算法对理论 D-H 参数进行校准. 对于冗余机械手 (自由度大于完成任务所需的最小自由度), 其运动学求解通常采用最小范数解法、加权伪逆法、梯度投影法和任务优先级法等方法^[27]. 这些方法可以利用冗余自由度实现次要目标 (如避障、优化能耗等), 同时保证主要任务的完成. 在水下环境中, 这种冗余性尤为重要, 可以提高系统的可靠性和任务执行的灵活性^[28].

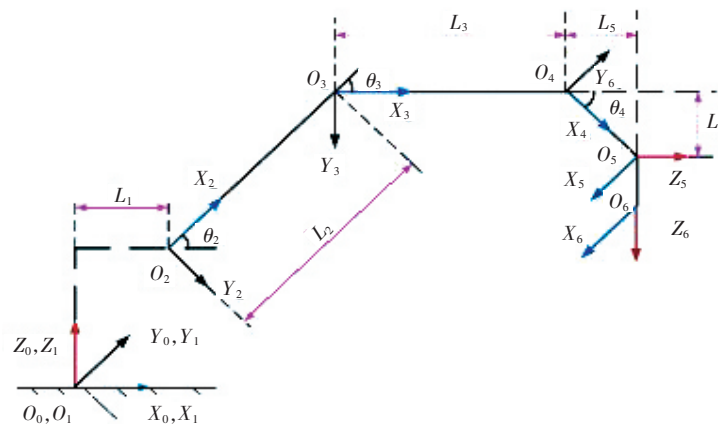


图 3 D-H 矩阵法机械手运动学建模

Fig. 3 Modeling of manipulator operation by D-H matrix method

2.2 动力学建模与水动力影响

水下液压机械手的动力学建模比空气中的机械手更为复杂, 因为需要考虑浮力、水阻力、附加质量以及其他水动力效应^[29]。目前, 水下机械手动力学建模主要采用牛顿-欧拉法、拉格朗日法和凯恩法。牛顿-欧拉法是基于力和力矩平衡原理, 采用递推方式建立系统模型, 该方法计算效率高, 表达直观^[30]。拉格朗日法基于能量原理, 通过分析系统的动能和势能, 建立拉格朗日方程, 虽然计算过程较为烦琐, 但系统性强, 适用于复杂系统的分析^[31]。而凯恩法结合了前两者的优点, 建模效率高, 适合复杂系统, 特别是在考虑外部环境力的情况下^[32]。

水下环境对机械手动力学的影响主要体现在浮力、水阻力和附加质量 3 个方面。浮力会减轻机械手的有效重量, 影响其动态特性和控制难度^[33]。水阻力会阻碍机械手的运动, 增加能耗, 并且随着速度增加而显著增大^[34]。附加质量效应是指水体随着物体加速而加速所产生的惯性力, 它可以显著改变系统的动态响应^[35]。此外, 还有波浪、洋流等外部干扰因素, 进一步增加了水下机械手动力学建模和控制的复杂性。为了获取准确的水动力参数, 研究人员采用了理论分析、数值模拟和实验测量等多种方法。Leabourne 等^[36]通过理论分析与实验测量相结合的方法, 研究了水下机械手的水动力学参数, 发现相应水阻力系数并非定常的, 而是与关节角度等因素有关。Zhang 等^[35]和 Kolodziejczyk^[37]基于计算流体动力学 (CFD) 动网格技术, 通过仿真计算获得了水下机械手的水动力学系数, 为建立更精确的动力学模型提供基础。Wang 等^[38]采用 CFD 仿真方法, 得到了六自由度机械臂在不同角速度和角加速度下的瞬态水动力载荷。仿真数据的对比分析表明, 节点的形状和节点之间的相对运动决定了瞬态水动力系数。Yusof 等^[39]基于 CFD 耦合模型, 分析机械手在不同位置和布置下的压力分布。结果显示, 在流体流动和速度作用下, 机械手、夹持器尖端和模型底部会产生高压。因此, 在设计和控制水下机械手时, 须考虑流体动力的影响。

在实际应用中, 水下机械手的动力学模型还需要考虑机械手与水下载体之间的耦合作用。机械手的运动会产生反作用力和力矩, 影响载体的姿态和位置, 特别是当机械手质量占整个系统比例较大时, 这种影响更为显著^[40]。因此, 完整的水下机械手系统动力学模型应该包含机械手与载体的耦合动力学, 以便更准确地预测系统行为和设计控制策略^[41]。

3 水下液压机械手驱动与密封

3.1 驱动方式

水下机械手的驱动方式主要有电驱动、液压驱动和混合式驱动。相比液压系统, 电动机机械手通常结构简单、控制精度高、具有更高的能源效率和更小的环境污染风险^[42]。然而, 电动驱动在水下应用中也面临许多挑战。首先是水密性问题, 电气系统需要完全密封以防海水渗入, 这增加了设计和制造的复杂性。其次, 电动系统在深水高压环境下需要特殊的压力补偿设计, 以防止壳体坍塌或变形。此外, 电动机机械手的输出力和扭矩通常较小, 限制了其在需要大负载的水下作业中的应用^[45], 通常用于小型水下机器人 (ROV)。

液压驱动是水下机械手最主要的驱动方式, 其在水下环境中具有诸多优势。首先, 液压系统的功率密度高, 能够在相对紧凑的空间内提供较大的输出力和扭矩, 这对于需要大负载能力的水下作业至关重要^[44]。其次, 液压系统具有良好的过载能力和散热特性, 能够在高负载条件下长时间工作而不会过热^[45]。此外, 液压系统对环境干扰 (如温度、湿度、辐射等) 的敏感性较低, 适合在恶劣的水下环境中工作。液压驱动的水下机械手通常采用双作用液压缸或液压马达作为执行元件, 通过控制阀组调节液压油的流向和流量, 实现对机械手关节的精确控

制^[27]. 现代水下液压机械手系统通常包括液压泵站、蓄能器、控制阀组、执行器和压力补偿器等组件^[46]. 为了适应深水环境, 液压系统需要特殊的设计, 如压力补偿器用于平衡内外压力差, 防止海水渗入系统; 而密封件则需要能够在高压条件下保持良好的密封性能^[47]. 如 Schilling Robotics 的 TITAN 4 和 ATLAS 系列机械手采用了先进的液压技术, 如闭环位置控制和伺服控制阀, 实现了高精度的操作控制^[48]. Kraft^[49] 的 Predator 和 Raptor 系列则在液压系统设计上注重主从控制和力反馈功能, 提供了更直观的操作体验. 这些商业化产品的成功, 证明了液压驱动在水下机械手领域的适用性和可靠性.

尽管液压驱动具有诸多优势, 但也面临一些挑战. 液压系统的泄漏风险是一个重点关注问题, 尤其是在深水高压环境下, 泄漏不仅会导致系统性能下降, 还可能造成严重的环境污染^[2]. 为了避免液压油泄漏污染问题, 一些学者采用新型湿电磁驱动水液压高速开关阀 (WHSV), 以替代传统的油液压阀, 并结合多目标优化方法, 提高了密封性^[50-51]. 此外, 液压系统的响应速度和控制精度也普遍低于电驱动系统, 这在需要高精度操作的任务中可能成为限制因素^[52]. 液压系统的体积和重量也相对较大, 对整个水下平台的负载能力提出了更高要求. 此外, 混合驱动方式 (结合液压和电动技术的优点) 也逐渐受到关注, 如电动机驱动液压泵的方案, 既保留了液压系统的大力输出能力, 又具备了电动系统的控制精度^[53]. 电驱动、液压驱动和混合驱动系统特性对比如下表 1 所示.

表 1 电驱动、液压驱动和混合驱动系统特性对比

Tab. 1 Comparison of characteristics of electric, hydraulic, and hybrid drive systems

特性	电驱动系统	液压驱动系统	混合驱动系统
结构复杂性	灵活布局, 高扭矩常需齿轮箱, 增加复杂性	灵活布局, 无需齿轮箱, 但需油箱、阀块、管路、密封件	结合两者组件, 整体复杂性增加, 但可简化机械传动
控制精度	高精度, 快速调整	精度良好	精度较高、响应更快
响应速度	快速响应, 伺服电机快速启停	相对较慢, 受流体动力学和阀门响应时间影响	闭环控制下响应更快
能耗 (效率)	通常更节能, 空闲时电机可停; 高效率可达 97%	通常效率较低, 泵持续运行; 高能量回收潜力	节能
功率密度	较低	高	结合液压高功率与电动效率
输出力/扭矩	较低, 高力需大电机	小体积可产生巨大力	可达全液压系统力, 适用于重型应用
密封性要求	无流体, 无泄漏风险	高要求, 需精密密封防泄漏, 动态密封易磨损	减少液压油量, 降低泄漏风险
散热性	能量损失以热量散失	摩擦和流体阻力产生热量, 油箱散热	运行温度较低, 延长油液和机器寿命
环境敏感性	风险低, 无液压油, 安静, 可与可再生能源协同	存在泄漏风险, 液压油有毒, 噪声大, 对温度敏感	更环保, 减少排放和能耗, 降低泄漏风险

3.2 密封技术

密封技术是水下液压机械手的另一个关键技术, 它直接影响系统的可靠性和寿命. 水下环境高压和腐蚀性对液压机械手的密封件提出了严峻挑战^[47]. 常用的密封方式包括动态密封 (如 O 型圈、唇形密封、机械密封等) 和静态密封^[54]. 为了适应深水环境, 密封系统通常采用

压力补偿设计 (如图 4 所示弹簧压力补偿密封), 保持内外压力平衡, 减轻密封件的压力负担^[55].

近年来, 磁流体密封和液体金属密封等新型密封技术在水下机械手中得到了应用. 磁流体密封利用磁性流体在磁场作用下形成密封障壁, 具有无摩擦、长寿命和零泄漏等优点^[56]. 液体金属密封利用液态金属的流动性和不可压缩性, 在高压下仍能保持良好的密封效果. 这些新技术为提高水下液压机械手的可靠性和作业深度提供了新的解决方案. 如 Schilling Robotics 的 TITAN 4 机械手采用了上述先进的密封技术, 如磁性耦合和压力补偿设计, 确保在深水环境中的可靠运行^[48].

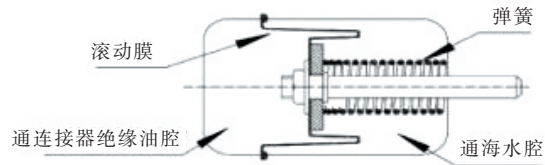


图 4 弹簧压力补偿密封^[57]

Fig. 4 Spring pressure compensation seal^[57]

4 水下液压机械手控制系统

4.1 控制方式

水下液压机械手的控制系统经历了从最初的基本速率控制到更复杂的带有反馈机制的位置控制演变^[58]. 早期的控制方式主要是开环控制, 依靠操作员通过目视观察调整机械手的位置, 控制精度和重复性较低^[36]. 随着技术的发展, 闭环控制系统得到广泛应用, 位置和力的传感器反馈使得机械手能够实现更精确的操作^[25, 29]. 位置控制通常利用模拟分解器或数字编码器等传感器提供位置反馈, 实现闭环控制, 提高系统的精确性和稳定性. 商业化的机械手通常采用关节速率或位置控制, 操作员通过主控制器进行操作.

为了提高控制稳定性, 水下液压机械手控制系统发展为多层控制架构, 包括低层驱动控制、中层运动控制和高层任务规划^[60]. 低层控制负责执行器的直接控制, 如液压阀的开关和流量调节; 中层控制实现关节或笛卡尔空间的轨迹跟踪; 高层控制则负责任务规划和协调. 这种分层架构使系统能够有效地处理复杂任务, 同时保持良好的响应性和可靠性.

4.2 控制策略

水下液压机械手的控制策略多样, 根据任务需求和系统特性选择合适的控制方法至关重要. 常见的控制策略包括比例积分微分 (PID) 控制、自适应控制、滑模控制、神经网络和模糊控制等^[1]. PID 控制因其结构简单、实施方便而被广泛应用于水下液压机械手的控制中. 通过调整比例、积分和微分参数, 可以实现良好的跟踪性能和扰动抑制^[61]. 然而, 由于水下环境的不确定性和系统的非线性特性, 传统 PID 控制在某些情况下可能难以满足高精度控制要求.

自适应控制能够根据系统参数的变化和外部环境的扰动自动调整控制参数, 适应性强, 特别适合水下复杂环境^[62]. 滑模控制具有对参数变化和外部干扰的鲁棒性, 特别适合水下机械手的控制^[63]. Wang 等^[64]采用了连续非奇异快速终端滑模控制方法, 对水下机械手系统进行轨迹跟踪控制, 取得了良好的效果. 模糊控制和神经网络控制能够处理系统的不确定性和非线性, 不需要精确的数学模型^[65]. Duan 等^[66]使用神经网络控制算法控制水下机械手系统, 显著提高了系统对未知环境的适应能力. 模型预测控制通过预测系统未来行为优化当前控制输入, 能够处理多变量约束问题, 近年来在水下机械手控制中得到了应用^[67]. 此外, 一些研究人员将多种控制方法进行融合, 如鲁棒自适应控制、自适应反演终端滑模控制、自适应模糊 PID 控制^[68]等, 以获得更好的控制性能. 如 Zhou 等^[62]采用反步法简化模型以处理高阶效应, 利

用鲁棒控制器应对水下外部干扰和液压动态模型误差,并引入参数自适应方法来解决模型参数的不确定性,从而有效实现水下多自由度液压机械手的精确运动控制.尽管随着人工智能如强化学习、物理信息机器学习模型在机器人控制领域得到了发展,然而人工智能方法需要训练数据作为支撑,水下液压机械臂受水下环境影响大,使用人工智能控制方法,其稳定性需要进一步分析,目前主要用于水下液压机械臂控制研发^[69].

4.3 力/位置混合控制

在水下接触作业时,如采样、焊接和搬运等任务中,不仅需要控制机械手末端执行器的精确位置,还需要考虑与环境的交互力.力/位置混合控制策略针对这一需求而设计,在位置控制的同时,有效调节与环境的接触力^[70].Khatib^[70]提出的运动与力统一控制方法是一种经典的力/位置混合控制策略,它将操作空间分解为力控制子空间和位置控制子空间,分别施加不同的控制策略.Lapierre等^[71]以力控制为基础,保持机械手在自由或受约束的空间内稳定,通过安装在机械手基座和本体之间的力传感器来估计机械手所产生的力/力矩,借助外力控制回路来校正平台的位置误差.

Antonelli等^[72]提出了一种水下车辆-操纵器系统(UVMS)外力控制方案,考虑了本体在运动过程中机械手可能出现的触点失稳问题,采用了动态补偿的自适应运动控制方案.Cui等^[73]结合阻抗和混合控制,提出一种统一的力控制方案,该模型将阻抗控制与模糊切换方式的力/位置控制相结合,实现了水下自主控制.对于力传感器不可用的情况,Barbalata等^[74]提出了确保控制律能够处理与环境近似的接触力的方法.Heshmati-Alamdari等^[75]提出的力/位置跟踪控制方法能够保证响应速度,减少最大稳态误差以及跟踪误差.

为了实现水下机械手在未知环境下对目标物进行抓取,张建军等^[76]提出了自适应阻抗控制方法,并结合自适应PID控制来调节期望位置,实现了跟踪目标位置的同时保证了力的要求.段晋军等^[77]针对双臂协调搬运中同时存在外部干扰和内力约束,提出了一种基于变阻抗模型的内外力/位置混合控制策略,对力约束子空间中的内力约束采用变阻抗模型进行力跟踪,对位置子空间中的外部干扰采用阻抗模型进行轨迹跟踪.这些研究成果极大地提高了水下液压机械手在复杂环境中的操作能力和适应性.

4.4 智能控制与自主操作视觉伺服控制与人机交互

视觉伺服控制是实现水下液压机械手自主控制的关键技术.通过视觉系统获取环境信息,引导机械手执行精确操作,减少对人工直接控制的依赖^[78].基于视觉引导,手眼协同控制可以实现水下目标的跟踪和自主操作,大大提高工作效率和安全性^[79].针对视觉传感器参数、机械手运动学和特征位置信息等的不确定性,Li等^[80]提出了一种水下机器人手眼相机系统的无标定视觉伺服方案,采用机器学习方法自适应地学习系统参数,从而实现高精度控制.Geng等^[81]提出了一种基于单目视觉的定位算法,实现了水下机械手的自主定位,并在水池中进行试验,验证了该算法的有效性.通过机器视觉的单目和双目技术,能够辅助完成悬停、特征点提取、水下定位和水下抓取等工作任务^[82].

在人机交互方面,水下液压机械手控制系统需要提供直观易用的操作界面,减轻操作员的工作负担.Kraft TeleRobotics的KMC 770控制系统提供了多种标准功能,以增强系统性能和操作的便捷性,如单按钮索引、动力对准、关节锁定、关节缩放和比例控制夹爪力等^[83].这些功能显著提高了操作员的工作效率,特别是在复杂任务中.近年来,虚拟现实和数字孪生技术在水下机械手人机交互中的应用也取得了显著进展.通过实时的运动仿真、视觉辅助及计算机重建,操作员可以在虚拟环境中预演和规划操作,提高作业成功率^[84].此外,力反馈技术

的应用也日益广泛, 使操作员能够“感觉”到机械手与环境之间的相互作用力, 从而提高任务执行的效率, 尤其是在复杂或精细的操作中。

5 国内外水下液压机械技术对比

5.1 国际领先企业与产品分析

水下液压机械手技术长期由少数几家欧美公司主导, 其中最具代表性的是 Schilling Robotics (现属于 TechnipFMC) 和 Kraft TeleRobotics. 这些公司经过数十年的发展, 已经形成了成熟的产品线和完善的技术支持体系^[2], 典型产品如图 5 所示。

Schilling Robotics 成立于 1985 年, 1986 年交付了第一台机械手, 并在 1988 年占据了水下机械手市场的领先地位^[3]. 目前, Schilling 已经交付超过 3 000 套机械手系统, 其产品几乎部署在全球所有工作级水下机器人和其他潜水器 (包括研究和勘探潜艇) 上, 已成为行业标准. Schilling Robotics 的机械手系列包括 TITAN、ATLAS、CONAN 和 ORION 等, 覆盖了不同应用场景和性能需求^[2].

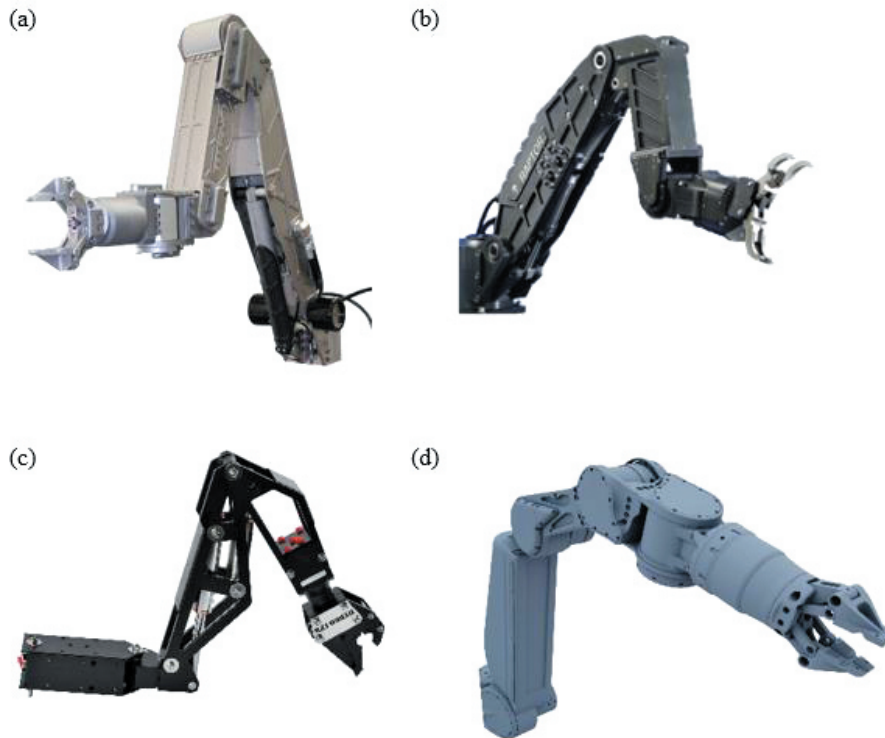


图 5 国际典型液压机械手: (a) Schilling TITAN 4 系列; (b) Raptor; (c) Hydro-Lek; (d) Saab Seaeeye

Fig. 5 Typical International Hydraulic Manipulator: (a) Schilling TITAN 4; (b) Raptor; (c) Hydro-Lek; (d) Saab Seaeeye

Kraft TeleRobotics 成立于 1984 年, 是力反馈主从控制技术的先驱和领导者^[4], 其产品在深海、核能、航空航天、电力和军事等领域有广泛应用. Kraft 的 Predator Raptor 和 Grips 系列机械手以其独特的力反馈主从控制系统而著称. 其中 Predator 系列以其强大的负载能力 (可达 226 kg)、超长的臂展 (超过 2 m) 和坚固耐用的重型结构著称. 该系列机械手通常用于需要较大力量和工作范围的深海及陆地危险环境作业. 其集成的控制阀设计简化了系统布局, 提高了可靠性^[5].

TechnipFMC 的 TITAN 4 机械手被广泛认为是行业内领先的伺服液压遥操作机械手系统, 自 1987 年以来一直是高灵活性水下机械手的行业标准^[75]. 它在超重型工作级水下机器人上得到广泛应用, 并因其在各种苛刻的深海应用中表现出的卓越性能而备受赞誉. TITAN 4 主要采用钛合金制造, 以实现结构强度、轻量化和优异的耐腐蚀性; 采用闭环位置控制, 确保操作的精确性; 配备六自由度的复制主操作手, 提供舒适直观的操作体验^[86].

其他还有 Hydro-Lek (现被 Saipem 收购)^[5]、Saab Seaeye (提供 eM1-7 等电动机械手^[5])、Oceanering^[4] 等公司也在水下机械手市场占有一席之地.

这些国际领先企业的产品具有以下共同特点: (1) 高可靠性设计, 能够在极端水下环境中长期稳定工作; (2) 模块化结构, 便于维护和升级; (3) 全面的技术支持体系, 包括培训、现场服务和备件供应; (4) 持续的技术创新, 不断提高产品性能和扩展应用范围.

5.2 国内水下液压机械手发展现状

相比于国际领先企业, 我国在水下液压机械手领域的研究起步较晚, 但近年来通过持续投入和技术积累, 已经取得了显著进步. 目前, 国内水下液压机械手的研发和应用主要集中在科研院所和部分专业企业^[8-9], 典型产品如图 6 所示.

中国科学院沈阳自动化研究所研发了一款六自由度七功能主从伺服液压机械手, 设计水深 7 000 m, 最大伸长范围 1.9 m, 全臂展最大持重达 65 kg^[87]. 该机械手采用液压塑料管道传输液压, 存在机械手粗大、水下响应慢、塑料管道易疲劳断裂等局限性. 杭州宇控机电工程有限公司也研发了基于液压塑料管道的六自由度七功能液压机械手, 同样存在类似的技术局限^[88].

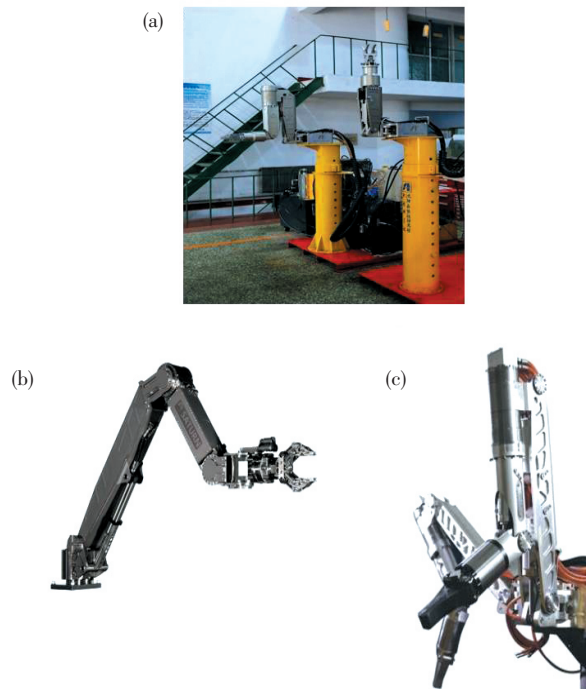


图 6 国内典型液压机械手: (a) 沈阳自动化研究所; (b) 浙江凯富博科; (c) 杭州宇控

Fig. 6 Typical Domestic Hydraulic Manipulator: (a) Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences; (b) CathayBot; (c) Hangzhou Yukong

浙江凯富博科科技有限公司 2020 年开始研发水下液压机械手. 通过使用拥有自主知识产

权的钛合金运动结构内置（镂空）油道和伺服控制系统，克服了基于塑料管道的水下液压机械手的局限。现阶段，该公司联合中海油深圳海洋工程技术有限公司已经研发出国内唯一的、可以对标 TechnipFMC TITAN 4 的“土星机械手”^[89]，采用钛合金结构和结构内置油道，土星机械手所有技术指标不低于 TITAN 4，某些指标甚至超过 TITAN 4，如重量更轻、肩部和腕部偏转角度更大、夹爪夹持力更强，并具备关节力反馈和运动学解算以及夹爪力位双控功能；此外，包括线路板和芯片的所有零部件和控制软件都实现了 100% 国产化。

总体而言，近期国内水下液压机械手技术取得了显著进步，总体技术指标达到国际先进水平，局部技术领先世界。但在应用特别是市场占有率上与国际领先公司还存在较大差距。国内外主要水下 7 功能液压机械手技术参数对比如表 2 所示。主要差距体现在实际海试和工程应用案例较少，缺乏长期运行验证^[90]。

表 2 国内外主要水下 7 功能液压机械手技术参数对比

Tab. 2 Comparison of technical parameters of major underwater 7-function hydraulic manipulators at home and abroad

功能特性	TechnipFMC/ Schilling TITAN 4	Kraft Predator	Kraft Raptor	浙江凯富博科 土星	沈自所/杭州宇 控（早期型号）
功能数量 (DOF+功能)	7 (6+1)	7 (6+1)	7 (6+1)	7 (6+1)	7 (6+1)
控制类型	主从控制， 位置控制	主从控制， -力反馈	主从控制， -力反馈	主从控制， -力反馈	主从控制
最大臂展/mm	1 922	>1 981	1 626	1 920	~1 900
全伸展提升能力/kg	122	91	91	125	65
最大提升能力/kg	454	227	227	455	未提及
额定工作深度/m	4 000 (可扩展至7 000)	3 000 (可扩展至6 500)	3 000 (可扩展至6 500)	7 000	7 000
空气中重量/kg	100	59	59	60	未提及（通常较重）
水中重量/kg	78	41	41	41	未提及
主要材料	钛合金	未明确提及 (坚固耐用)	未明确提及 (坚固耐用)	钛合金	未明确提及 (早期可能铝 合金/不锈钢)
液压管路	内置油道	未明确提及	未明确提及	内置油道	外部塑料软管
力反馈	无	有	有	有	无
夹爪力位双控	无	无（比例力控制）	无（比例力控制）	有	无
关键优势	行业标准， 高负载， 可靠性高	力反馈精准， 操作感知好	力反馈，紧凑	对标 TITAN 4， 轻量化，大转角， 力反馈	国内早期突破， 科考应用
主要挑战/局限	成本高， 无力反馈	提升能力相对 TITAN 4 较低	臂展相对较小	产业化初期	响应慢，软管易损， 性能局限

5.3 技术差距分析与发展机遇

通过对国内外水下液压机械手技术的对比分析，可以识别出当前存在的主要差距和潜在的发展机遇。在技术层面，主要差距包括以下几个方面：

首先，材料技术和制造工艺方面，国际领先企业已经成熟掌握钛合金精密加工和液压油路

内嵌式设计技术, 而国内在这方面刚刚实现突破. 其次, 在核心部件方面, 高性能伺服阀、液压密封件等关键部件也是刚刚实现国产化, 这些部件直接影响机械手的性能和可靠性. 第三, 在系统集成和控制技术方面, 虽然已经完成国产化, 但国内在多传感器融合、自适应控制、人机交互等方面与国际先进水平还存在差距. 最后, 实际海上作业经验的差距也不容忽视, 国际领先企业拥有数十年的产品应用经验和丰富的故障处理知识库, 而国内在这方面积累不足.

尽管存在上述差距, 国内水下液压机械手发展也有多方面的机遇. 首先, 国家对海洋经济和深海装备的战略重视为行业提供了良好的政策环境和资金支持. 其次, 国内制造业整体水平的提升为水下机械手的工程化和产业化奠定了坚实基础. 再次, 信息技术和人工智能的快速发展为水下机械手的智能化提供了新的技术路径. 最后, 与国际领先企业相比, 国内企业在成本控制和本地化服务方面具有一定优势, 有利于开拓国内外市场.

6 水下液压机械技术挑战与展望

6.1 当前技术挑战

尽管水下液压机械手技术取得了显著进展, 但在实际应用中仍面临多方面的技术挑战. 首先, 深水环境的高压、低温和腐蚀性对机械手的材料、密封和控制系统提出了极高要求. 随着水下作业向更深水域扩展, 机械手需要承受更大的环境压力, 同时保持高可靠性和性能稳定性. 如何研发适用于全海深环境的机械手材料和结构, 仍是当前面临的重大挑战^[91].

其次, 高精度控制与力反馈技术仍有提升空间. 水下环境的复杂性和不确定性给机械手的精确控制带来了挑战. 特别是在需要精细操作的任务中, 如何实现高精度位置控制和精确的力反馈, 是提高水下作业效率和安全性^[92]的关键.

此外, 水下机械手的智能化和自主性水平尚不高. 目前水下机械手仍主要依靠人工远程操控, 在复杂环境中的自主决策和执行能力有限^[93]. 如何提高机械手的环境感知、任务规划和自主执行能力, 减少对人工操控的依赖, 是未来发展的重要方向.

最后, 系统集成和标准化也是一个重要挑战. 水下液压机械手需要与多种平台和设备协同工作, 接口兼容性和系统集成难度较大. 此外, 行业标准的缺乏也限制了技术的通用性和互换性, 增加了开发和维护成本^[94].

6.2 未来发展趋势

面对上述挑战, 水下液压机械手技术的未来发展将呈现出多方面的趋势. 第一, 智能化和自主操作能力将成为重要发展方向. 随着人工智能、机器学习和计算机视觉技术的进步, 水下液压机械手将逐步实现更高级别的自主操作, 减少人工干预, 提高作业效率和安全性. 基于深度学习的环境感知、任务规划和动作控制将使机械手能够适应更复杂的环境和任务需求^[95].

第二, 材料和制造技术的创新将推动机械手向轻量化、高强度和高可靠性方向发展. 新型复合材料、特种合金以及先进的 3D 打印技术将使机械手结构更加优化, 减轻重量, 提高强度和耐用性^[96-97]. 同时, 微纳制造技术的应用将促进更小型、更精密的液压组件发展, 提高系统的集成度和性能.

第三, 混合驱动将成为未来研究热点. 结合液压和电动技术的混合驱动方案可以综合两者的优势, 实现更高效、更精确的控制^[98]. 如机械手靠近基座、负责主要承重和移动的关节 (如肩关节、肘关节) 采用液压驱动, 而靠近末端、负责精细姿态调整和抓取的腕关节 (俯仰、偏航、旋转) 和手爪采用电力驱动.

第四, 数字孪生和远程操作技术将进一步发展. 基于高保真仿真和实时数据交互的数字孪

生技术,可以实现水下机械手的虚拟调试、训练和运行监控,减少现场试错成本,提高操作安全性。同时,高带宽低延迟的水下通信技术的进步,将使远程操作更加流畅和直观,扩展机械手的应用范围^[1]。

第五,模块化和可重构设计将成为未来设计理念的重要趋势。通过标准化接口和灵活组合,模块化机械手可以根据不同任务需求快速重新配置,提高系统的适应性和经济性。可重构机械手能够在作业过程中调整其结构和功能,以应对变化的环境和任务条件。

7 总结

水下液压机械手作为海洋工程和水下作业的关键设备,在过去几十年中经历了显著的技术发展。本文对水下液压机械手的结构设计、运动分析、驱动方式、控制系统等方面进行了全面综述,分析了国内外技术现状和差距,探讨了未来发展趋势和应用前景。

1) 在结构设计方面,水下液压机械手已从简单的抓取工具发展为具有多自由度、高精度和强大操作能力的复杂系统。液压驱动技术仍然是水下机械手的主要驱动方式,但电动驱动在某些应用场景中展现出优势,混合驱动方案也逐渐受到关注。控制系统从简单的速率控制发展到复杂的智能控制,力反馈和人机交互技术显著提高了操作的直观性和效率。

2) 国际领先企业如 Schilling Robotics 和 Kraft TeleRobotics 凭借多年的技术积累和丰富的工程经验,在全球市场占据主导地位。国内水下液压机械手技术起步较晚,但近年来取得了显著进步,液压机械手已经可以对标国际先进水平,并 100% 实现了国产化。但在工程应用经验方面,特别是市场占有率仍然存在较大差距。

3) 面向未来,水下液压机械手技术将朝着智能化、轻量化、高可靠性和多功能化方向发展。水下液压机械手的应用领域也将从传统的海洋油气工程扩展到海洋可再生能源、深海科学研究、核设施退役等多个领域。

4) 随着全球对海洋资源开发利用的日益深入,以及海洋环境保护意识的增强,水下液压机械手技术将面临更多机遇和挑战。通过技术创新、产学研合作和国际交流,我国水下液压机械手技术有望实现跨越式发展,为海洋强国战略和海洋经济可持续发展做出重要贡献。

参 考 文 献

- [1] 常宗瑜,张扬,郑方圆,等. 水下机器人-机械手系统研究进展:结构、建模与控制[J]. 机械工程学报,2020,56(19):53-69.
- [2] 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.
- [3] SIVEV S, COLEMAN J, OMERDI E, et al. Underwater manipulators: A review[J]. Ocean Engineering, 2018, 163: 431-450.
- [4] 徐明浩,司马灿,朱忠,等. 水下机器人自主操作——机遇、进展与挑战[J]. 船舶,2024,35(6):60-80.
- [5] 李硕,吴园涛,李琛,等. 水下机器人应用及展望[J]. 中国科学院院刊,2022,37(7):910-920.
- [6] 邱中梁,汤国伟. 7000米深海液压系统设计研究[J]. 液压与气动,2006(8):6-8.
- [7] 潘平. 适用于深海的电动缸设计[J]. 舰船科学技术,2021,43(13):109-113.
- [8] 高阳,张晓晖,高玉儿,等. 基于神经网络和模糊补偿的水下机械臂控制[J]. 计算机工程与应用,2022,58(15):317-323.
- [9] 李硕,刘健,徐会希,等. 我国深海自主水下机器人的研究现状[J]. 中国科学:信息科学,2018,48(9):1152-1164.
- [10] YANG X, WU D, GAO H, et al. Position control of water hydraulic high-speed on-off valves-controlled

- cylinder of water hydraulic manipulator[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2025, 442: 114235.
- [11] DECLAN S, ALLAHYAR M. A Non-Singular terminal sliding mode control approach for a 7 Degree-of-Freedom hydraulic manipulator[C]//*IEEE 18th International Conference on Control & Automation*, 2024, 276-281.
- [12] ANTONELLI G. *Underwater Robots*[M]. 4th ed. Cham: Springer, 2018.
- [13] 安江波, 张铭钧, 孙昌将. 水下机械手控制系统研究[J]. *机械设计与制造*, 2009(5): 185-187.
- [14] MARANI G, CHOI S K, YUH J. Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(1): 15-23.
- [15] HUANG H, ZHOU Z X, LI J Y, et al. Investigation on the mechanical design and manipulation hydrodynamics for a small sized, single body and streamlined I-AUV[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 186: 106106.
- [16] 凯富博科. Saturn 土星液压机械臂[EB/OL]. [2020]. <https://www.cathaybot.com/product/11>.
- [17] ZHONG J, JIANG W J, ZHANG Q Z, et al. Design and Simulation of a Seven-Degree-of-Freedom Hydraulic Robot Arm[J]. *Actuators*, 2023, 12(9): 362.
- [18] LQING T Q T, FANG L F L, SONG L S L, et al. Multi-objective optimization of high-speed on-off valve based on surrogate model for water hydraulic manipulators[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 173: 0920-3796.
- [19] TANG C, WANG Y, WANG S, et al. Floating autonomous manipulation of the underwater biomimetic vehicle-manipulator system; Methodology and verification [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(6): 4861-4870.
- [20] FERNÁNDEZ J J, PRATS M, SANZ P J, et al. Grasping for the seabed: Developing a new underwater robot arm for shallow-water intervention[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2013, 20(4): 121-130.
- [21] SIMETTI E, CASALINO G. Whole body control of a dual arm underwater vehicle manipulator system[J]. *Annual Reviews in Control*, 2015, 40: 191-200.
- [22] ENG M J, DAI J B, ZHOU W B, et al. Kinematics analysis and trajectory planning of 6-DOF hydraulic robotic arm in driving side pile[J]. *Machines*, 2024, 12(3): 191.
- [23] WANG Q, YU T, ZHANG Q, et al. Kinematics modeling and analysis of deep-sea hydraulic manipulator [C]//*13th International Symposium on Computational Intelligence and Design*. IEEE, 2020: 253-258.
- [24] MERAT F. Introduction to robotics; Mechanics and control [J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(2): 166-166.
- [25] ALESSANDRO P, DANIELE L, LORENZO D M C D V, et al. Modelling and control of manipulators for inspection and maintenance in challenging environments; A literature review[J]. *Annual Reviews in Control*, 2024, 57: 100949.
- [26] PHUNG A. Online, In-Situ Calibration of Underwater Hydraulic Manipulators Using a Wrist-Mounted Camera[J]. 2020. amyphung.github.io
- [27] 郭莹. 水下自主作业系统协调控制技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [28] 王尧尧. 自治水下运载器—机械手系统协调控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [29] FOSSEN T I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [30] TARN T J, SHOULTS G A, YANG S P. A dynamic model of an underwater vehicle with a robotic manipulator using Kane's method[J]. *Autonomous robots*, 1996, 3: 269-283.
- [31] 李德军, 何春荣, 赵桥生. HOV 水下机械手运动学和动力学建模研究[J]. *天津理工大学学报*, 2019, 35(4): 58-64.

- [32] ZHANG W, XU H, DING X. Design and dynamic analysis of an underwater manipulator [C]// Proceedings of the 2015 Chinese Intelligent Automation Conference: Intelligent Technology and Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2015: 388-398.
- [33] 肖治琥, 徐国华. 流干扰下的水下机械手动力学建模分析[J]. 中国机械工程, 2011, 22(21): 2521-2526.
- [34] 高涵, 张明路, 张小俊, 等. 水下机械手动力学模型及力矩影响研究[J]. 机械设计与制造, 2017(3): 68-71.
- [35] ZHANG M, LIU X, TIAN Y. Modeling analysis and simulation of viscous hydrodynamic model of single-DOF manipulator[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(8): 261.
- [36] LEABOURNE K N, ROCK S M. Model development of an underwater manipulator for coordinated arm-vehicle control [C]// IEEE Oceanic Engineering Society. OCEANS'98. Conference Proceedings (Cat. No. 98CH36259). IEEE, 1998, 2: 941-946.
- [37] KOLODZIEJCZYK W. The method of determination of transient hydrodynamic coefficients for a single DOF underwater manipulator[J]. Ocean Engineering, 2018, 153: 122-131.
- [38] WANG X, LIU Y, XUE G, et al. Transient hydrodynamics coefficients analysis of a six-degree-of-freedom underwater manipulator[J]. Ocean Engineering, 2024, 312(P2): 119156.
- [39] YUSOF A A, NOR M K M, SHAMSUDIN S A, et al. Kinematic and Computational Fluid Dynamics Analysis of an Underwater Manipulator Arm in Streamline and Blunt Body Arrangement[J]. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2018, 47(1): 69-88.
- [40] DE WIT C C, DIAZ E O, PERRIER M. Robust nonlinear control of an underwater vehicle/manipulator system with composite dynamics [C]// Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146). IEEE, 1998, 1: 452-457.
- [41] OLGUIN-DIAZ E, ARECHA VALETA G, JARQUIN G, et al. A passivity-based model-free force-motion control of underwater vehicle-manipulator systems [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(6): 1469-1484.
- [42] YANG C, WANG Y, YAO F. Driving performance of underwater long-arm hydraulic manipulator system for small autonomous underwater vehicle and its positioning accuracy [J]. International journal of advanced robotic systems, 2017, 14(6).
- [43] RIBAS ROMAGÓS D, RIDAO RODRÍGUEZ P, TURETTA A, et al. I-AUV Mechatronics Integration for the TRIDENT FP7 Project [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(5): 2583-2592.
- [44] YAO J, WANG C. Model reference adaptive control for a hydraulic underwater manipulator [J]. Journal of Vibration and Control, 2012, 18(6): 893-902.
- [45] TAIRA Y, SAGARA S, OYA M. Model-based motion control for underwater vehicle-manipulator systems with one of the three types of servo subsystems [J]. Artificial life and robotics, 2020, 25: 133-148.
- [46] 魏延辉. UVMS 系统控制技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2016.
- [47] ZHANG Q, CHEN J, HUO L, et al. 7000M pressure experiment of a deep-sea hydraulic manipulator system [C]// International Conference on Intelligent Robotics and Applications, 2014, 1-5.
- [48] Technip FMC. Schilling Robotics TITAN 4 Manipulator [EB/OL]. [2023-10-11]. <https://www.technipfmc.com>.
- [49] Kraft TeleRobotics. Predator Remotely Operated Force Feedback Manipulator Arm System [EB/OL]. [2024-11-05]. <http://krafttelerobotics.com/products/predator.htm>.
- [50] LIAO Y, ZHAO W, FENG J, et al. Optimization of the control performance of a novel 3/2 water proportional directional valve with a special position following servo mechanism [J]. IEEE/ASME Trans. Mechatron, 2024, 29: 3391-3400.
- [51] MENG L, WU D, GAO H, et al. Multi-objective optimization of a wet electromagnet-driven water

- hydraulic high-speed on/off valve for underwater manipulator in deep sea[J]. *Measurement*, 2025, 239:115443.
- [52] ISHITSUKA M, ISHII K. Control of an underwater manipulator mounted for an AUV considering dynamic manipulability[C]//International Congress Series. Elsevier, 2006, 1291: 269-272.
- [53] SOYLU S, BUCKHAM B J, PODHORODESKI R P. Redundancy resolution for underwater mobile manipulators[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(2): 325-343.
- [54] BOWEN A D, YOERGER D R, TAYLOR C, et al. The Nereus hybrid underwater robotic vehicle for global ocean science operations to 11,000 m depth[C]// Proceedings of OCEANS, 2008: 1-10.
- [55] SAKAGAMI N, SHIBATA M, KAWAMURA S, et al. An attitude control system for underwater vehicle-manipulator systems [C]//International Conference on Robotics and Automation. 2010: 1761-1767.
- [56] ISHITSUKA M, ISHII K. Development of an underwater manipulator mounted for an AUV[C]// Proceedings of OCEANS 2005. 2005: 1811-1816.
- [57] 孙晓军,曹宏涛,杨成博,等. 等压平衡及压力补偿密封技术在水下动密封连接器中的应用[J]. *机电元件*, 2023, 43(4):25-27,35.
- [58] TEIGLAND H, MøLLER M T, HASSANI V. Underwater manipulator control for single pilot ROV control[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, 55(31): 118-123.
- [59] ANTONELLI G, CACCAVALE F, CHIAVERINI S, et al. Tracking control for underwater vehicle-manipulator systems with velocity estimation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, 25(3): 399-413.
- [60] SIVČEV S, ROSSI M, COLEMAN J, et al. Collision detection for underwater ROV manipulator systems [J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1117.
- [61] YADAV S, KUMAR S, GOYAL M. Trajectory control and optimization of PID controller parameters for dual-arms with a single-link underwater robot manipulator [J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2024, 47(7): 830-840.
- [62] ZHOU S, SHEN C, XIA Y, et al. Adaptive robust control design for underwater multi-DoF hydraulic manipulator[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 248: 110822.
- [63] ZHOU S, CHEN Z, ZHU S. Sliding mode control for underwater multi-DOF hydraulic manipulator[C]// International Conference on Intelligent Autonomous Systems. Cham; Springer, 2022: 854-866.
- [64] WANG Y, CHEN B, WU H. Joint space tracking control of underwater vehicle-manipulator systems using continuous nonsingular fast terminal sliding mode[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2018, 232(4): 448-458.
- [65] JIN X, CHEN K, ZHAO Y, et al. Simulation of hydraulic transplanting robot control system based on fuzzy PID controller[J]. *Measurement*, 2020, 164: 108023.
- [66] DUAN R, WANG J, DU J, et al. Power-delay trade-off for heterogenous cloud enabled multi-UAV systems[C]//International Conference on Communications, 2019: 1-6.
- [67] VARGA B, MEIER S, SCHWAB S, et al. Model predictive control and trajectory optimization of large vehicle-manipulators[C]//International Conference on Mechatronics, 2019, 1: 60-66.
- [68] YANG X, WU D, WANG C, et al. Adaptive fuzzy PID control of high-speed on-off valve for position control system used in water hydraulic manipulators [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2024, 203:114437.
- [69] HONG R, NIE S, JI H, et al. Physics-informed machine learning for high-speed on/off valve performance degradation prediction in water hydraulic manipulator[J]. *Reliability Engineering & System Safety*. 2025, 261:111106.

- [70] KHATIB O. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation[J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2003, 3(1): 43-53.
- [71] LAPIERRE L, FRAISSE P, DAUCHEZ P. Position/force control of an underwater mobile manipulator [J]. *Journal of Robotic Systems*, 2003, 20(12): 707-722.
- [72] ANTONELLI G, SARKAR N, CHIAVERINI S. Explicit force control for underwater vehicle-manipulator systems[J]. *Robotica*, 2002, 20(3): 251-260.
- [73] CUI Y, SARKAR N. A unified force control approach to autonomous underwater manipulation[J]. *Robotica*, 2001, 19(3): 255-266.
- [74] BARBALATA C, DUNNIGAN M W, PETILLOT Y. Position/force operational space control for underwater manipulation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 100: 150-159.
- [75] HESHMATI-ALAMDARI S, BECHLIOLIS C P, KARRAS G C, et al. A robust interaction control approach for underwater vehicle manipulator systems[J]. *Annual Reviews in Control*, 2018, 46: 315-325.
- [76] 张建军, 刘卫东, 李乐, 等. 未知环境下水下机械手智能抓取的自适应阻抗控制[J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(3): 341-347.
- [77] 段晋军, 甘亚辉, 戴先中. 双臂协调搬运过程中基于变阻抗模型的位置/力混合控制[J]. *机器人*, 2019, 41(6): 795-802, 812.
- [78] 公丕亮, 张奇峰, 全伟才, 等. 基于双特征点视觉模型的水下机器人悬停定位研究与试验[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(增刊2): 36-41.
- [79] 郝颖明, 吴清潇, 周船, 等. 基于单目视觉的水下机器人悬停定位技术与实现[J]. *机器人*, 2006, 28(6): 656-661.
- [80] LI J, HUANG H, XU Y, et al. Uncalibrated visual servoing for underwater vehicle manipulator systems with an eye in hand configuration camera[J]. *Sensors*, 2019, 19(24): 5469.
- [81] GENG J, CHOU W, DONG M. Implementation of vision based 2-DOF underwater Manipulator[C]// *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2015, 31: 03016.
- [82] 肖治璇. 深水机械手动力学特性及自主作业研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [83] TELEROBICS K. Robotic science and technology[EB/OL]. [2023-06-01]. <http://krafttelerobotics.com/products/index.htm>.
- [84] SHIM H, JUN B H, LEE P M, et al. Workspace control system of underwater tele-operated manipulators on an ROV[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(11/12): 1036-1047.
- [85] TechnipFMC. TITAN 4-Manipulator Systems[EB/OL]. <https://www.technipfmc.com/en/what-we-do/subsea/robotics-solutions/manipulator-systems/titan-4/>.
- [86] TechnipFMC. Schilling Robotics TITAN™ 4 Manipulator [EB/OL]. [2023-05-11]. <https://www.technipfmc.com/media/pb4i4rfy/titan-4-manipulator.pdf>.
- [87] 姚卓, 张奇峰, 霍良青, 等. 深海液压机械手连杆参数优化研究[J]. *现代制造工程* 2021(8): 40-47.
- [88] 杭州宇控机电工程有限公司. MA710A 水下机械手[EB/OL]. [2021-07-06]. <http://www.hzykjd.com/product-show.asp?id=61>.
- [89] 凯富博科. 液压机器人系统[EB/OL]. [2024-05-01]. <https://www.cathaybot.com/product/11>.
- [90] 纪辉, 兰宇, 武子为, 等. 面向水下作业的水下液压机械手研究与展望[J]. *机械工程学报* 2023, 59(4): 283-294.
- [91] 王芳, 崔维成. 深海耐压结构研究现状和发展趋势[J]. *船舶工程*, 2021, 43(2): 21-27.
- [92] 王峰. 基于海水压力的水下液压系统关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [93] MORGAN E, CARLUCHO I, ARD W, et al. Autonomous underwater manipulation: Current trends in dynamics, control, planning, perception, and future directions[J]. *Current Robotics Reports*, 2022, 3(4): 187-198.

- [94] 董胜,廖振焜,于立伟,等. 海洋科考装备技术发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 33-41.
- [95] YAO Z, XU F, JIANG G P, et al. Data-driven control of hydraulic manipulators by reinforcement learning[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 29(4): 2673-2684.
- [96] NIE S, HUO L, JI H, et al. Bending deformation characteristics of high-pressure soft actuator driven by water-hydraulics for underwater manipulator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 344: 113736.
- [97] KORNIEJENKO K, GADEK S, DYNOWSKI P, et al. Additive Manufacturing in Underwater Applications[J]. Applied Sciences, 2024, 14(4): 1346.
- [98] 郑玉坤,孙如月,李凤鸣,等. 液压机机械臂集中式驱控系统研究与应用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(11): 3358-3371.

(责任编辑:夏金玉)



(上接第 98 页)

- [33] 周蒙,王盛,傅和青. mGO/Cu₂O 纳米复合材料改性 UV 固化丙烯酸酯压敏胶的研究[J]. 中国胶粘剂, 2021, 30(1): 1-6, 17.
- [34] AHMADI DA, GHASEMIRAD S. Designing of desired nanocomposite pressure-sensitive adhesives through tailoring the structural characteristics of polysilsesquioxane-acrylic core-shell nanoparticles[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021, 111: 102973.
- [35] 张雷,董其宝,张梅,等. 聚合诱导自组装制备聚合物纳米材料及其在水凝胶改性方面的应用研究[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2025, 47(1): 129-138.
- [36] YU Q, YANG W, WANG Q, et al. Functionalization of cellulose nanocrystals with γ -MPS and its effect on the adhesive behavior of acrylic pressure sensitive adhesives[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 217: 168-177.
- [37] VU M C, PARK G D, BAE Y H, et al. Pressure-sensitive adhesive composites with a hydrophobic form of graphene oxide for enhanced thermal conductivity[J]. Macromolecular Research, 2016, 24(12): 1070-1076.

(责任编辑:胡 丁)