

# 水下机器人在渠道清淤中的实践应用

王 超

中国南水北调集团中线有限公司天津分公司 天津 300380

**摘 要：**水下机器人在渠道清淤中应用前景广阔。本文介绍常见水下机器人类型与关键技术，分析渠道清淤需求、目标、要求及作业环境挑战。阐述水下机器人具体应用方式，包括作业流程、不同类型应用策略及与其他技术结合。探讨应用中技术、应用、成本与维护层面问题及解决思路，为水下机器人在渠道清淤领域应用提供参考。

**关键词：**水下机器人；渠道；清淤应用；技术问题；解决思路

引言：渠道在灌溉、排水、防洪等方面作用关键，但易淤积影响功能。传统清淤方式存在效率低、成本高、对渠道结构破坏大等问题。水下机器人作为新兴技术，凭借灵活、精准、高效等优势，为渠道清淤带来新契机。研究在渠道清淤中的应用，对提升清淤效率、保障渠道功能具有重要意义。

## 1 水下机器人类型与关键技术

### 1.1 常见水下机器人类型

有缆遥控水下机器人，简称ROV，是水下作业领域较为常见的一类。这类机器人基本构造包含主体框架、推进装置、脐带缆以及操控终端等部分，通常采用履带式设计以适应不同地形。工作原理是通过脐带缆从水面控制台获取动力，同时将水下采集到的各类数据实时回传至控制台<sup>[1]</sup>。操作时，操作人员借助控制终端，利用脐带缆传输的信号对机器人进行精准操控。这种操作方式的特点在于，动力和信号传输稳定，能保障机器人在水下持续作业，并且操作人员可依据实时回传的信息，及时调整机器人动作，完成各项任务，不过作业范围受脐带缆长度限制。自主水下机器人，即AUV，拥有自主导航与决策能力。其自主导航与决策系统架构复杂，集成了多种传感器和智能算法，可依据预设任务规划路径，自主开展水下作业。优势是无需人工实时干预，能节省人力成本，提高作业效率。但受当前技术水平制约，在面对复杂多变的水下环境时，自主决策的准确性和及时性还有待提升。混合式水下机器人融合了具备手动遥控控制与理论上自主导航和决策的特性。这种特性使其能够灵活应对多种复杂清淤场景，在不同水流、水质和地形条件下，都能有效开展清淤工作。

### 1.2 水下机器人关键技术

动力与推进技术是水下机器人灵活移动的关键。实际水下机器人推进用橡胶履带，靠液压驱动如坦克，能稳定行进；理论螺旋桨推进靠旋转产推力，结构简单效

率高；喷水推进利用水反作用力，灵活性佳。设计实际推进系统时，要充分考虑渠道清淤需求，确保机器人能在狭窄空间移动。实际水下机器人不具备理论导航与定位技术，定位靠机器人身上的旗杆辅助；理论上惯性导航靠自身惯性元件测量参数定位，声学导航利用声波特性，视觉导航通过摄像头采集图像。定位精度和可靠性影响清淤作业准确性和效率。传感器技术为清淤作业提供准确信息。视觉传感器采集水下图像，声学传感器探测环境与物体距离，压力传感器测水深。这些传感器数据采集处理能力强，能转化数据辅助机器人清淤。实际应用中，需根据场景和需求合理选型配置传感器。机械臂与作业工具技术是完成清淤作业的重要手段。实际应用机器人机械臂前有绞盘与格栅，格栅阻隔大实物，绞盘绞碎小实物，且主要用大功率淤泥泵抽取渠道淤泥，因渠道为衬砌板结构无根系植物。理论上机械臂结构设计注重强度和灵活性，运动控制精准，能够实现复杂动作。理论上多样化作业工具需根据淤积物性质和清淤要求适配选择，以高效完成清淤。

## 2 渠道清淤需求分析

### 2.1 渠道特征与分类

材质差异直接决定渠道清淤方案选择。混凝土衬砌板结构的渠道，表面坚硬平整，淤积物多附着紧密，清淤需注重设备对渠壁的保护，避免刮损结构<sup>[2]</sup>。形状与尺寸影响清淤操作难度。渠道为倒梯形，边坡角度不同，设备需适配倾斜作业面；渠道宽度较大，大型设备可进入，但需考虑设备体型和作业半径限制；深度方面需考虑设备续航与信号传输稳定性，尺寸参数直接关联设备选型。使用功能明确清淤重点方向。灌溉渠道清淤需保障水质洁净，避免污染物残留影响作物生长；排水渠道以疏通排水路径为核心，优先清理易造成堵塞的杂物堆积；防洪渠道注重快速恢复过流能力，清淤需兼顾效率与渠道结构安全，功能差异决定清淤优先级与作业

标准。

## 2.2 清淤目标与要求

清淤需全面清除渠道内各类淤积物。泥沙沉积会缩小过流断面,杂物漂浮易引发堵塞,由于渠道无根系植物,无需考虑水生植物根系缠绕破坏渠壁的情况,但需重点关注其他可能影响渠道功能的淤积因素,这些均为重点清除对象。清淤深度与宽度需依据渠道原始设计参数确定,既要保证清除全部淤积层,又不能超出渠体结构承载范围。例如,渠道原始设计深度为2米,清淤深度应控制在1.8-2米之间;渠道宽度为3米,清淤宽度应不小于2.8米。渠道采用倒梯形全衬砌板结构,渠底亦为衬砌板材质,清淤作业需在保持渠道结构稳定的前提下进行,既要实现有效清淤,又无需担忧因挖掘过深或过宽引发渠体损坏,可彻底规避过度清淤导致的渠道边坡坍塌、结构损坏等安全隐患。清淤核心目标是恢复渠道原有性能,确保过流能力达标,水流速度均匀,满足灌溉、排水或防洪的实际使用需求,过流能力恢复后应达到设计值的90%以上。

## 2.3 清淤作业环境挑战

水流因素对水下机器人作业干扰显著。渠道实际流量约为 $30\text{m}^3/\text{s}$ ,结合倒梯形衬砌渠道断面特性及曼宁公式推算,在此流量条件下,流速超过1.5米每秒会导致设备定位偏移,偏移量可达15厘米;流速低于0.3米每秒则可能使悬浮泥沙再次沉积,沉积速度为每小时2厘米;水流方向突变还会增加设备动力消耗。此外,作业中还须综合考虑各类环境因素的共同影响,确保设备安全稳定运行。水下能见度是突出问题,浑浊水质中悬浮颗粒浓度超过100毫克每升时,会干扰声呐、红外等探测设备的信号传输,导致机器人难以精准识别淤积物和障碍物位置。渠道内复杂地形方面,因渠道为倒梯形混凝土衬砌板结构,结合实际工程案例数据,凸起结构高度超过20厘米就可能阻碍设备行进,凹陷区域深度超过15厘米易形成淤积盲区,直径超过10厘米的石块还可能碰撞损坏机器人作业部件,这些都对清淤设备的适应性提出极高要求。

## 3 水下机器人在渠道清淤中的具体应用方式

### 3.1 作业流程规划

前期准备阶段需全面掌握渠道基础信息。通过无人船勘察与人工测量结合,精准获取渠道尺寸数据、材质特性以及淤积物分布范围和厚度,为后续作业提供数据支撑<sup>[3]</sup>。水下机器人需完成全面设备检查与调试,重点测试动力系统、通信模块及机械臂灵活性,确保各部件性能稳定符合作业标准。清淤作业实施需遵循科学步骤

推进。机器人入水点选择应避开障碍物密集区域,初始定位通过卫星与水下声学定位技术结合实现精准固定,无需加装水面旗杆辅助定位。机械臂前端焊接内置绞龙与格栅结构,格栅可阻隔大型杂物,绞龙则能绞碎淤积物,实现不同类型淤积物的高效处理。淤积物收集可搭配30kw渣浆泵同步作业,少量零散淤积物通过人工辅助装袋运输,实现清淤过程闭环。后期处理工作保障作业质量与设备安全。机器人回收后立即进行表面清洁与内部检查,重点排查推进器是否存在缠绕、机械臂是否有结构损伤。渠道清理效果通过水位观测与流速测试初步评估,记录未达标的区域为补充作业提供明确方向。

### 3.2 不同类型水下机器人的应用策略

ROV凭借实时操控特性在复杂场景中优势明显,操作人员通过控制台接收数据实现精准控制,可高效处理闸前淤积物堵塞等突发问题,在2025年9月1日-29日作业周期内,配合脱水单元累计完成776.9立方米清淤量,生成泥饼26.7吨。AUV的自主巡航能力使其成为大面积勘察主力,可预设航线对长距离渠道进行淤积分布探测,为ROV精准作业提供数据支撑,但受现场水流及淤积物分布影响,自主作业时提前规划避障路径。混合式水下机器人整合两类设备优势,勘察阶段启用自主巡航模式高效覆盖全域,发现闸前等复杂淤积区域则切换至实时操控模式精准处理,结合自有人员操作优势,实现了清淤项目自主实施,提升了维护质效与队伍能力素质。在实际工程部署中,需根据渠道淤积的具体特征、作业环境与任务优先级,灵活选用或组合不同类型的机器人,以形成最优的技术方案。

### 3.3 与其他清淤技术的结合

与高压水射流技术结合可提升清淤效果。高压喷头工作压力设定为30兆帕,将密实淤积物冲击松散,水下机器人机械臂同步跟进清理,避免泥沙二次沉积;机械臂上焊接搭载3-4kw吸水泵,可实时冲洗机械臂格栅内部及绞龙结构,有效防止淤泥堵塞管道,若出现喷头堵塞情况,可采用吸水泵反向冲洗疏通,或通过机械臂上下摆动破除板结淤积。与30kw渣浆泵协同作业优化流程,机器人通过搅动或抓取动作使淤积物处于悬浮状态,渣浆泵随即启动负压系统将其抽送至预处理单元,经筛分后进入离心机脱水,该模式大幅缩短淤积物收集运输时间,提升整体作业效率<sup>[4]</sup>。通过这种多技术融合的作业体系,不仅扩展了单一设备的作业能力边界,也构建起“探测-疏松-清理-输运-脱水”的完整清淤闭环,为复杂工况下的高效、低扰动清淤提供了系统化解决方案。

### 4 水下机器人在渠道清淤应用中的问题与解决思路

#### 4.1 技术层面问题

导航定位精度不足是水下机器人在渠道清淤中面临的重要技术难题。水流波动、泥沙干扰等因素干扰导航定位系统,导致传感器测量数据误差,影响机器人精准定位。作业过程中曾出现线缆绞入履带、绞龙卡簧脱落等设备故障,及预处理单元电机停机、进料泵故障等问题,直接影响清淤作业连续性。为解决这一问题,可采用多传感器融合技术,将声呐、惯性导航等数据综合分析,利用各传感器优势互补,提高定位精度;同时建立常态化巡检机制,作业前重点检查易损部件,避免故障发生。机械臂作业灵活性有限同样制约清淤效果,受结构限制,面对狭窄空间或特殊淤积物时操作难度大。可优化机械臂设计,增加关节自由度,或采用柔性驱动,提升柔韧性和灵活性,更好完成清淤任务。能源供应问题不容忽视,水下作业能耗大,现有能源存储续航有限,难以满足长时间连续作业。可研发高效能源存储装置,提高能量密度,或探索无线充电技术,保障作业持续性。

#### 4.2 应用层面问题

对复杂环境适应能力弱是应用中的突出问题,遇特殊地形或恶劣水流时,机器人易作业受阻甚至损坏。本项目曾因淤泥管路淤积固化导致堵塞,后续通过缩短管路、作业后清水冲洗解决该问题。加强机器人环境感知能力是关键,安装多类型传感器,实时获取环境信息,开发适应不同环境的作业模式,使机器人自动调整作业策略。与其他设备协同作业困难也影响清淤效率,项目成立专项作业组,明确岗位职责,通过每日班前活动统一标准,实现各设备单元无缝衔接。建立统一通信协议和数据交换标准,实现设备间信息共享,确保协同工作。操作人员培训难度大,水下机器人操作涉及多学科知识,培训周期长。项目采用“边干边学”模式,依托自有人员实战练兵,借助主题党日活动填补人员缺口,保障作业推进。开发简便操作界面和培训模拟系统,降低操作难度,缩短培训周期。

#### 4.3 成本与维护问题

设备购置成本高限制水下机器人推广应用,技术研发成本高致设备昂贵,给中水利单位带来初期投入压力<sup>[5]</sup>。本项目发挥自有人员设备优势,自主采购材料,实现清淤项目自主实施,大幅降低外协成本。推动技术规模化生产,降低单位成本,探索设备租赁、分时共享模式,帮助用户控制成本。维护保养复杂也是不容忽视的问题,水下环境恶劣,设备易腐蚀损坏,维护要求高,增加长期隐性成本。针对作业中出现的液压设备漏电、泥浆泵故障等问题,建立完善的维护保养体系,制定详细的设备巡检与维修计划,对故障部件及时联系厂家返厂检修;同时采用模块化、易拆装的设备设计,简化现场维护流程,降低对专业人员的依赖。借助远程诊断技术实现预知性维护,从而构建起全生命周期的成本优化方案。

#### 结束语

水下机器人在渠道清淤中展现出显著优势,能提高清淤效率与质量,减少对渠道结构的破坏。不过,应用中存在技术、应用、成本与维护等多方面问题。通过采取多传感器融合、优化机械臂设计、建立统一通信协议等措施,可有效解决问题。应持续推动技术发展,降低成本,促进水下机器人在渠道清淤中的广泛应用。

#### 参考文献

- [1]夏清华,王同.水下机器人在水利工程汛前检查中的应用研究[J].中国防汛抗旱,2022,32(09):83-86.
- [2]金殿喜.水下机器人技术在水利工程检测中的应用分析[J].建筑工程技术与设计,2021,(24):1524-1524.
- [3]黄泽光.水下机器人技术在水利工程检测中的应用[J].水上安全,2023,(07):13-15.
- [4]肖俊,曹温博,郑鸿志.水下机器人在北京雨洪工程水下检测中的应用[J].水利建设与管理,2022,42(09):18-23.
- [5]傅柯.水下机器人在城市输水渠道工程中的检测应用[J].吉林水利,2023(7):58-61.