

渠道清淤机器人的作业性能与场景适配研究

宗华超

中国南水北调集团中线有限公司天津分公司 天津 300112

摘要: 渠道清淤机器人对水利工程意义重大。本文先分析其作业性能,涵盖机械结构、动力能源、感知控制及清淤效率。接着对渠道清淤场景分类,研究机器人与场景适配性,从机械结构、动力能源、感知控制、作业效率等方面展开。最后提出提升适配性策略,包括模块化设计、智能感知决策优化等,为渠道清淤机器人发展提供参考。

关键词: 渠道清淤机器人; 作业性能; 场景分类; 适配性; 提升策略

引言: 渠道淤积影响水利工程运行,传统清淤方式存在诸多局限。渠道清淤机器人作为新兴技术,能有效解决这些问题。其作业性能受多种因素影响,不同渠道场景特征各异,对机器人适配性要求高。研究渠道清淤机器人作业性能与场景适配,有助于提高清淤效率与质量,保障水利工程安全稳定,推动相关技术发展与应用。

1 渠道清淤机器人的作业性能分析

1.1 机械结构性能

移动机构设计直接决定机器人在复杂渠道环境中的通行能力。履带式设计凭借接触面积大的优势,在泥泞松软地面能有效分散重量,每平方厘米的接触面积可分散约500克的重量,减少下陷风险,适合多数淤积严重的渠道场景;轮式结构转向灵活,在硬质渠底或轻度淤积区域作业效率更高,其转向半径可控制在1-2米;仿生式移动机构则借鉴两栖生物运动特性,可适应水陆交替的复杂工况,提升环境适应性^[1]。清淤执行机构需匹配不同淤积类型,挖掘式机构针对块状淤泥或夹杂碎石的淤积效果显著,通过刚性铲斗实现高效剥离,铲斗容量可达5-10升;吸污式机构依靠高压真空系统,对流动性强的稀软淤泥吸附能力突出,真空吸附压力可达80-120千帕,能降低作业扬尘与二次污染;破碎式机构配备高强度齿爪,可对板结坚硬的淤堵物进行预处理,齿爪硬度可达HRC50-60,为后续清淤提供便利。结构强度与耐久性依赖优质材料与优化设计,采用高强度合金钢材制作关键部件,能抵御渠道内尖锐杂物的碰撞磨损,关键部件可承受1000-1500牛的冲击力,密封结构强化处理可防止淤泥渗入内部组件,延长设备使用寿命。

1.2 动力与能源性能

动力系统类型需结合作业需求选择。电动系统运行噪音低、排放清洁,适合城市内河及生态敏感区域的清淤作业,运行噪音可控制在60-70分贝;液压系统输出功率大,能为重型执行机构提供稳定动力,在高强度清淤

场景中表现可靠,输出功率可达10-20千瓦;混合动力系统整合两者优势,可根据负载变化自动切换动力模式,兼顾环保与作业强度需求。能源供应方式影响作业范围与灵活性,有线供电能提供持续能源,但受电缆长度限制,一般电缆长度为50-100米;电池供电摆脱线缆束缚,作业范围更广,却需考虑充电周期,单次充电续航时间可达3-5小时;无线充电技术通过非接触式能量传输,实现机器人自主补能,进一步提升作业连续性,无线充电效率可达80-90焦耳/秒。能源效率通过动力系统优化与能耗管理技术提升,合理匹配负载与动力输出,减少能源浪费,续航能力则结合电池容量与节能设计,满足长时间作业需求,电池容量可达50-100安时。

1.3 感知与控制性能

环境感知技术构建全方位作业视野,视觉系统通过高清摄像头捕捉渠底图像,识别障碍物与淤积分布,摄像头分辨率可达1080P-4K;声呐技术可穿透浑浊水体,探测水下地形与隐蔽障碍,探测距离可达10-20米;激光雷达能精准测量距离,为导航提供精确数据,测量精度可达1-5厘米。淤泥特性识别通过传感器采集数据,分析硬度、湿度及颗粒组成等参数,为执行机构调整作业模式提供依据,例如针对坚硬淤泥加大破碎力度,针对稀软淤泥增强吸附功率。自主导航与路径规划能力依托环境感知数据,结合算法规划最优作业路径,避开障碍并覆盖全部作业区域,路径规划误差可控制在10-20厘米。远程操控系统实现操作人员对机器人的实时控制,应对复杂突发情况;自动化水平通过程序预设与智能决策提升,减少人工干预,提高作业效率。

1.4 清淤作业效率

单位时间清淤量是核心指标,受执行机构类型、动力输出及淤泥特性影响,通过结构优化与动力匹配提升,例如增大铲斗容量或提高吸附流速。清淤深度与范围由机械结构与移动能力决定,可伸缩式执行机构能延

伸作业深度,灵活的移动系统则扩大作业覆盖范围,适应不同规格渠道需求。作业连续性与稳定性依赖能源供应、设备可靠性及故障预警系统,稳定的能源输出、耐用的机械结构以及及时的故障提示,能减少停机时间,确保作业持续高效进行,提升整体清淤效果。

2 渠道清淤场景分类与特征分析

2.1 按渠道类型分类

农田灌溉渠道多呈现小型化特征,分支网络密集交错,穿梭于田间地头。这类渠道的淤泥成分十分复杂,除泥沙沉积外,还混杂着作物秸秆、根系以及农药残留等物质,清淤过程中需兼顾作业精细度与环保要求,避免对周边农田生态造成扰动^[2]。小型农田灌溉渠道宽度一般在0.3-1米,深度在0.5-1.5米。城市排水渠道承担着雨水疏导与污水排放功能,管径尺寸随功能区域变化明显,从狭窄小巷的小型管道到主干道下方的大型沟渠差异显著,小型排水管道直径可达0.2-0.5米,大型排水沟渠宽度可达2-5米。渠道内部常存在建筑垃圾、废弃杂物等障碍物,部分区域水质污染严重,淤泥中含有大量有害微生物,对清淤设备的耐腐蚀性和污染物隔离能力提出更高标准。河流湖泊支流渠道连接主体水域与周边区域,水流速度普遍较快,长期携带的泥沙易在平缓段大量沉积,水流速度一般在0.5-2米/秒。开放的环境使得渠道受气候影响明显,汛期水流冲击会改变淤泥分布状态,增加清淤作业的不确定性。

2.2 按环境条件分类

水下清淤场景中,设备完全浸没于水体,持续承受水压作用,深度越大压力越强,对设备密封性能考验严苛,水下10米处水压可达100千帕。水体浑浊导致能见度极低,常规视觉观测难以奏效,需依赖特殊感知技术完成作业。半水下清淤场景常见于水位不稳定的渠道,设备部分暴露于空气,部分浸泡在水中,泥水混合的环境易造成设备部件磨损和锈蚀。水位随降水、排水等因素频繁波动,要求设备具备灵活的适应性,能快速调整作业参数应对环境变化,水位波动幅度可达0.3-1米。干式清淤场景多出现于渠道检修、停水期间,渠道内无水或仅存少量积水,淤泥长期暴露后逐渐干燥板结,颗粒间结合紧密。作业过程中稍受扰动就会产生大量扬尘,不仅影响操作人员健康,还会对周边环境造成污染,因此防尘措施至关重要。

2.3 按淤泥特性分类

软质淤泥含水量高,流动性强,呈糊状或浆状,易附着在设备表面,清理难度较大。这类淤泥密度较低,吸附能力突出,作业时需用针对性收集方式避免二

次扩散。硬质淤泥因长期脱水或混入杂质,粘性大增,挖掘阻力远高于普通淤泥,直接清理易导致设备负载过大,必须经过破碎处理降低硬度后,才能进行后续清淤作业。混合淤泥成分最为复杂,除泥沙外,还包含石块、金属碎片、塑料袋等各类杂物,部分尖锐杂物可能划伤设备,大型石块则会阻碍作业进程,要求清淤设备具备分拣、破碎等多重功能,应对复杂工况。

3 渠道清淤机器人与场景的适配性研究

3.1 机械结构与场景的适配

移动机构需根据渠道地形调整设计。平底渠道中轮式结构可凭借高速特性提升作业效率,斜坡环境下履带式通过增强抓地力防止打滑,弯道区域则依赖灵活转向系统减少作业盲区。清淤执行机构需与淤泥硬度精准匹配,软质淤泥适合吸污式机构快速吸附,硬质淤泥需破碎式机构预处理,混合淤泥则需挖掘与破碎组合机构协同作业^[3]。结构尺寸需与渠道管径严格契合,小型管道需紧凑机身设计避免卡滞,大型渠道可采用模块化结构拓展作业范围,确保设备在不同规格渠道内灵活运作。

3.2 动力与能源与场景的适配

动力系统需适应环境特性。水下场景优先选择密封性能优异的液压系统,避免水体渗入导致故障;干式场景可采用电动系统降低能耗与噪音。能源供应方式直接关联作业效能,长时间连续作业适合有线供电保障续航,大范围移动作业则依赖高容量电池摆脱束缚,偏远区域可搭配太阳能辅助供电延长时长。能源效率需匹配场景能耗,高强度作业时提升动力输出,低负载阶段自动进入节能模式,实现能耗与作业需求的动态平衡。

3.3 感知与控制与场景的适配

感知技术需突破环境限制,水下能见度低的场景可组合声呐与激光雷达,通过多源数据融合识别障碍;杂物密集区域强化图像识别算法,精准区分淤泥与杂物。导航系统针对复杂渠道布局优化算法,分支密集区域采用分区规划策略,长距离渠道结合定位技术确保路径精准。控制策略需应对动态环境变化,水位波动时实时调整作业高度,水流冲击下增强机身稳定性控制,维持作业参数稳定。

3.4 清淤作业效率与场景需求的匹配

机器人清淤能力需与渠道淤积量适配,重度淤积区域选用大负载设备,轻度淤积则采用小型高效机型。作业模式需契合场景特点,城市排水渠道需连续作业减少交通影响,农田灌溉渠道可采用间歇作业适配农时。大型渠道中多机器人协同作业可提升效率,通过分工负责挖掘、运输、清理等环节,结合协同控制避免作业重

叠,实现清淤效能最大化。

4 提升渠道清淤机器人场景适配性的策略

4.1 模块化设计

模块化设计为机器人适配多元场景提供基础支撑。清淤执行模块采用可快速更换结构,面对软质淤泥装配吸污模块实现高效吸附,遭遇硬质淤泥则切换破碎模块进行预处理,接触混合淤泥时启用挖掘-破碎复合模块完成协同作业^[4]。移动机构设计成可调节形式,通过伸缩履带适应宽窄不同的渠道管径,伸缩履带可调节范围为0.3-1.5米;更换轮履组件匹配平底与斜坡地形,调整车身高度应对高低起伏的作业环境,车身高度可调节范围为0.5-2米。标准化接口贯穿各功能模块,统一的连接规格让功能扩展更便捷,新增检测或分拣功能无需重构主体结构,同时简化维护流程,损坏部件可直接拆卸更换,缩短设备停机时间。

4.2 智能感知与决策优化

智能感知与决策优化强化机器人环境适应能力。多传感器融合技术整合视觉、声呐与激光雷达数据,通过互补消除单一传感器的感知盲区,在浑浊水下或杂物密集区域仍能精准捕捉环境信息。基于机器学习算法构建淤泥特性识别模型,利用海量样本数据训练模型精准判断淤泥硬度、含水量等参数,自动调整执行机构转速、压力等作业参数,无需人工干预即可匹配当前淤积状态。动态路径规划算法实时接收环境反馈,遭遇突发障碍时快速重新规划路径,水位变化或水流改向时及时调整作业轨迹,确保在动态场景中保持作业连贯性。

4.3 能源管理优化

能源管理优化为机器人持续作业提供保障。高效动力系统采用低损耗传动部件与节能电机,在输出同等功率时降低能耗,液压系统引入负载敏感技术,根据作业需求动态调节油液流量。智能能源分配策略通过监测各部件运行状态,将能源优先供给清淤执行机构与导航系统等关键部件,非作业时段自动关闭冗余功能进入待机模式。无线充电技术通过电磁感应实现非接触式补能,

机器人可自主停靠充电站点完成能源补给,快速换电系统则采用标准化电池舱设计,更换满电电池仅需数分钟,大幅延长设备连续作业时间。

4.4 人机协同与远程操控

人机协同与远程操控提升复杂场景作业可靠性。远程监控与干预系统通过实时传输视频与数据,让操作人员清晰掌握设备运行状态,发现故障或突发情况时可立即介入控制,避免危险扩大。人机协作模式明确双方分工,机器人承担重复性强的基础清淤工作,人工则聚焦处理机器人难以应对的复杂任务,比如清理大型顽固性障碍或处理突发污染事件^[5]。虚拟现实或增强现实技术优化操控体验,虚拟现实构建沉浸式作业场景,操作人员仿佛亲临现场进行控制,增强现实则将设备参数与环境数据叠加在实时画面上,让操作指令下达更精准直观,降低操控难度,操作指令下达误差可控制在1-3厘米。

结束语

渠道清淤机器人的作业性能与场景适配研究至关重要。通过深入剖析作业性能,全面分类场景特征,明确适配要点,并针对性提出提升策略,能有效增强机器人在不同场景下的作业能力。这不仅有助于解决当前渠道清淤难题,还能推动相关技术进步,为渠道维护与管理提供更优质、高效的解决方案,保障水资源的合理利用与渠道系统的稳定运行。

参考文献

- [1]刘帅,关雪丹.泵站清淤机器人清淤工艺的研究[J].电力设备管理,2021(06):157-158.
- [2]姚玉南,王韵琦,韩承宇.小型水库的水下清淤机器人设计及仿真[J].船舶工程,2025,47(9):165-173.
- [3]李新,徐军.污水管道清淤机器人行走路径自动感知方法研究[J].通化师范学院学报,2024,45(8):1-8.
- [4]杨伟,马惠民,宋朝英,等.矿用淤泥自适应水仓清淤机器人研究与应用[J].中国煤炭,2024,50(3):91-96.
- [5]罗继曼,郭松涛,刘思远.管道机器人清淤装置振动稳定性研究[J].机械设计与制造,2022,371(1):242-246.