

小型水库的水下清淤机器人设计及仿真

姚玉南, 王韵琦, 韩承宇

(武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 武汉 202502)

摘要: [目的]为解决大型清淤设备无法用于小型水库清淤作业, 导致小型水库淤积情况严重无法正常发挥水库功能的问题, 设计了一种用于小型水库的水下清淤机器人。[方法]基于模块化设计的方法, 对清淤机器人及配套装置进行设计并进行建模, 基于模型对机器人进行运动学仿真及水动力学仿真, 根据仿真结果对结构进行优化设计。[结果]确定了清淤机器人的工作流程及清淤绞刀的转速和转向并分析确定所设计清淤机构的可靠性。[结论]仿真结果表明: 机器人设计合理, 可以完成小型水库的清淤功能。

关键词: 小型水库清淤; 水下机器人; 仿真分析

中图分类号: TK513.5 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2025.09.17

Design and Simulation of Underwater Dredging Robot for Small Reservoirs

YAO Yunan, WANG Yunqi, HAN Chengyu

(School of Ship Sea and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 202502, China)

Abstract: [Purpose] To solve the problem of large dredging equipment being unable to operate in small reservoirs, resulting in serious siltation and malfunction, an underwater dredging robot for small reservoirs has been designed. [Method] Based on a modular design, the dredging robot and its supporting equipment are designed and modeled. Kinematic and hydrodynamic simulations are conducted on the robot based on the model. The structure is optimized according to the simulation results. [Result] The workflow of the dredging robot and the speed and direction of the dredging cutter are determined, and the reliability of the designed dredging mechanism is analyzed and determined. [Conclusion] The simulation results indicate that the robot design is reasonable and can fulfil the dredging function of small reservoirs.

Key words: desilting of small reservoirs; underwater robot; simulation analysis

0 引言

水库作为水利工程中重要的水利枢纽, 由于回水区的存在, 不可避免地造成水库内大量的泥沙淤积, 尤其大坝和库尾部分淤积情况最为严重^[1]。我国水库平均年淤损率为2.3%, 是世界上大型水库平均年淤损率的2~4倍, 水库淤积问题严重程度高居世界之首^[2]。根据《2020年全国水利发展统计公报》显示, 我国目前建造的小型水库数量较多, 位置分散在全国各地, 已建成小型水库93 703座, 总库容为717亿 m³, 在防洪、灌溉、供水、发电、通航和

养殖等方面发挥着重要作用。一旦小型水库发生泥沙淤积, 水库的有效库容将会减少, 防洪、灌溉及发电等综合效益降低, 影响当地经济发展的同时, 也会对人民生命财产安全构成威胁, 造成严重损失。

目前对于淤泥淤积问题有2种解决方法: 人工清淤和湿式机械清淤。人工清淤方法存在清淤难度大、清淤效率低、清淤工作量大和容易造成二次污染等缺点, 淤泥发酵形成的沼气在人工清淤作业过程中可能引起的施工安全问题也不容忽视^[3]; 湿式机械清淤在目前河道清淤以及海上疏浚工程中主要采用

收稿日期: 2024-10-14; 修回日期: 2025-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(52071240)

作者简介: 姚玉南(1974—), 男, 博士、副教授。研究方向: 船舶与海洋工程、交通运输工程等领域装备系统可靠性、运行维护与保障智能化理论及应用。E-mail: ynyao@whut.edu.cn

挖泥船^[4]，该船也可用于大型水库清淤，但部分小型水库位于偏远且交通不便的区域，现有各类挖泥船船体尺寸大，不便于运输，小型水库深度不满足该类型船舶吃水深度，现有清淤方法并不适用于小型水库清淤工程。

随着水下机器人技术快速发展，近年来国内外对于可代替人工和挖泥船进行清淤的机器人展开大量研究。程煜^[5]针对水下涵洞内路面存在障碍物阻碍设备工作的问题，实现通过视觉定位引导清淤机器人自行清障；王子卓^[6]针对管道清淤过程中存在沼气等易燃易爆气体的问题，设计气压驱动的管道清淤机器人，并对排污管道流场特性及大颗粒淤泥泵送特性进行分析，根据研究结果进行清淤泵的选型；LU等^[7]针对管道清淤过程中管道管径变化的问题，设计变径管道清淤机器人；罗继曼等^[8]对于管道机器人在旋转条件下的稳定性展开研究，得到管道清淤系统添加柔性缓冲元件后可极大减小冲击力和系统振动的结论；邵可鑫等^[9]基于深度神经网络方法提出一种用于绞龙与硬物碰撞问题的可靠性分析方法；陈保平等^[10]探究机器人在箱涵清淤中替代传统人工清淤作业的应用，该方式不仅能提高箱涵清淤效率，也可以保障操作人员的安全；杨旭^[11]设计清淤机器人导航定位和控制系统，并开展陆地和 underwater 试验验证该系统的可靠性和有效性；康向南^[12]针对矿用水舱中工作环境受限、工况条件恶劣和工作状态超负载运行等问题，通过液压自主越障功能配合负载敏感技术的应用，提高清淤机器人的运动稳定性和可靠性；SHADEMANI等^[13]设计一种三轮楼梯挖泥机器人用于清理灌溉渠中的淤泥；王李俊等^[14]使用计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）方法，对不同参数下绞吸式清淤机器人绞刀正刀与反刀切削工况进行了数值模拟；WANG等^[15]针对人工河道、湖泊和鱼塘中没有合适工具的水下淤泥清理问题，研制一种模仿乌龟腿结构和运动，能适应复杂水下环境的四足清淤机器人；

李岳等^[16]提出一种基于并联机构的履带式管道清淤机器人，采用折展调姿行走装置以减小机器人体积，采用基于3-US并联机构的工作装置以增大机器人的工作空间；王杰等^[17]研发一种适用于渠道淤积和倒虹吸淤塞等不同类型的友好型智能水下清淤成套技术及装备，为该设备安装了氮气气囊自升装置来实现设备掉入泥坑后的脱困自救。

分析上述各类研究可知，近几年各国研究人员对于水下挖泥机器人结构、控制和功能等多个方面开展研究，但现有研究多而不精，大部分方案停留在概念阶段，实际效果无法验证。基于以上分析，本文拟设计一种小型尺寸、便于运输和可实现安全高效清淤作业的绞刀式水下清淤机器人，可解决小型水库淤积影响正常功能的问题，推动水下清淤作业模式向自动化和智能化的方向发展。

1 水下清淤机器人本体结构设计

为解决小型水库淤积难以清除的问题，根据水下机器人概念设计水下清淤机器人，对该清淤机器人进行指标及参数的确定，见表1。

表1 水下清淤机器人主要设计指标及参数表

Tab. 1 Main Design Indicators and Parameters of Underwater Dredging Robot

序号	设计指标	设计参数
1	一次性可清理区域面积/m ²	≥100
2	清淤效率/(m ³ /h)	≥30
3	最大吸入颗粒直径/mm	≥10
4	机器人自重/kg	≤180
5	管道输送流量/(m ³ /h)	≥25
6	动力来源	电力

采用模块化设计的方法，分模块对清淤机器人进行设计，设计了泵送模块、移动模块和清淤模块等3个主要工作模块。水下清淤机器人结构见图1。

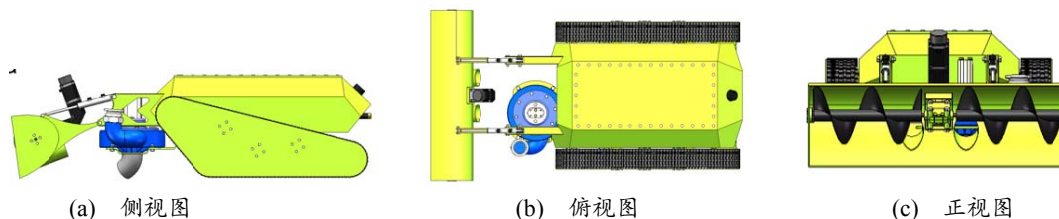


图1 清淤机器人整体结构图

Fig. 1 Overall Structure of Dredging Robot

1.1 泵送模块设计

泵送模块的主要作用是将与水混合后的泥浆通过管道运输到储存位置。本设计使用1台小型渣浆泵和2台大型渣浆泵组成多级泵组用于泵送泥浆，小型

渣浆泵和大型渣浆泵见图2。其中，小型渣浆泵由清淤机器人搭载，通过机器人上所设计泵支架固定小型渣浆泵，小型渣浆泵主要用于制造清淤罩内部管道真空度从而使淤泥和水能够进入清淤罩中进行混

合,2台大型渣浆泵由清淤机器人配套装置中的工作船舶携带且2台泵串联安装,该安装方法可以提供较大扬程从而保证将混合后的泥浆由水底泵吸至工作船舶储存舱中,最终设计得到的多级泵组性能数据见表2。

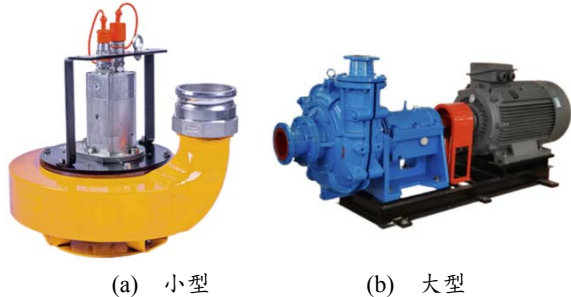


图2 小型渣浆泵和大型渣浆泵

Fig. 2 Small Slurry Pump and Large Slurry Pump

表2 多级泵组性能指标及参数表

Tab. 2 Performance Indicators and Parameters of

Multi-Stage Pump Group

性能指标	性能参数
流量/(m ³ /h)	40
扬程/m	150
可泵吸颗粒尺寸/mm	80

1.2 移动模块设计

移动模块采用履带式,其优势在于支撑面积大且接地比压小,适合于泥泞场地作业;下陷度小,滚动阻力小,可以适应水底表面复杂情况,可以跨越机器人在水底遇到的碎石、树枝、垃圾残骸等障碍。根据不同场景选择不同的履带形状以达到更加适应地形的目的,在水库清淤的场景中存在建筑以及各类水底障碍物,本设计选择钝角三角形履带,钝角角度为130°,相同履带尺寸下,采用该形状履带相比其他不同形状履带具有更强的爬坡能力,能够适应水坝等建筑的坡度。在履带外侧及履带驱动电机位置加装挡泥板见图3。挡泥板作用为保护履带及驱动部分,防止杂质影响履带底盘的正常工作。

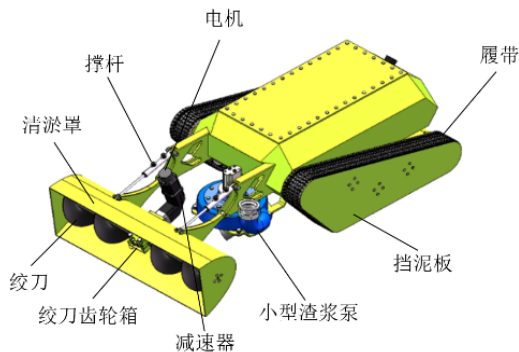


图3 水下清淤机器人结构组成图

Fig. 3 Structural Composition of Underwater Dredging Robot

1.3 清淤模块设计

图3中清淤模块由绞刀、绞刀驱动装置、传动机构、清淤罩等4个部分组成。淤泥被铲入清淤罩中,绞刀电机转动时通过减速器与绞刀齿轮箱相连,带动绞刀旋转。其中减速器用于降低转速并提高扭矩;绞刀在清淤罩内旋转将大型泥块切割成可通过运输管道的小型淤泥碎块,同时将淤泥与水分搅拌混合成易于运输的泥浆;清淤罩为泥水搅拌混合提供场所,同时可以防止淤泥扩散造成污染。

2 水下清淤机器人工作设计及清淤能力确定

为清淤机器人设计配套设备形成整套系统共同完成清淤作业,本文所设计的清淤系统除清淤机器人本身外,还包括清淤工作船、淤泥输送管道、传输线缆,整套清淤系统可以完成水库中淤泥的清理、储存及转移工作。

2.1 水下清淤机器人工作流程设计

水下清淤机器人主要工作流程:1)由工作船将绞刀式水下清淤机器人及其配套设备运输至指定区域水面,通过工作船上吊放装置将机器人吊放下水,吊至水底后清淤机器人脱离吊放装置,并通过履带底盘进行移动修正吊放带来的位置误差;2)当机器人到达预先设定的清淤方案所指定的工作位置后,通过履带底盘调整清淤机器人铲斗朝向使清淤机器人铲斗口正对需要清淤区域所处方位,等待工作船上操作人员通过工作船控制柜下达“开始清淤”命令;3)收到“开始清淤”命令后,气动推杆向前伸出推动铲斗下移,使其部分埋入淤泥中,同时绞刀电机以设定转速带动绞刀转动,将淤泥与水2种介质在绞刀周围基本搅匀达到“起动时刻”;4)达到“起动时刻”后,清淤机器人及工作船所携带的多级淤泥泵投入工作,多级淤泥泵达到相应转速后建立较大真空度从而将泥水混合物由铲斗中抽吸至工作船淤泥舱中进行储存,20 s后多级淤泥泵工作情况达到稳定;5)清淤机器人通过履带底盘以0.1 m/s速度按照预设路径推进,直至清淤机器人走完全部路线,完成路线后清淤机器人向上方工作船控制柜发送“清淤结束”信号,得到工作船控制柜下达的“完成清淤”命令后多级淤泥泵及绞刀停止工作,清淤机器人移动至工作船下方等待吊放装置将全部作业设施收回。

2.2 水下清淤机器人清淤能力验证

清淤机器人在前行过程中将淤泥铲入机器人前端的清淤罩中,通过清淤罩内部绞刀将水分和淤泥充分混合得到泥浆,再通过多级泵组将泥浆抽吸到工作船上进行后续处理。由于多级泵组所采用的渣浆泵流量及扬程远高于机器人的设计指标所要求的数据,故整套清淤系统的清淤效率主要取决于机器

人清淤模块的效率。清淤机器人饱和清淤能力计算公式为

$$C = 3600 S_k v_s \varphi_m \quad (1)$$

式中： C 为清淤效率； S_k 为开口面积； v_s 为机器人推进速度； φ_m 为进入开口处物质中淤泥的体积分数，取值为0.3~0.4。

若清淤机器人以0.1 m/s的速度推进，由式（1）可得此时的饱和清淤效率为48.96 m³/h。对比设计指标中的清淤效率数值可知，所设计清淤机器人清淤效率满足设计指标要求。

本文设计的清淤效率≥30 m³/h，最大吸入颗粒直径≥10 mm，机器人自身质量≤180 kg及管道输送流量≥25 m³/h，均参考了文献[6]在《管道清淤机器人的研制及其搅拌输送特性研究》中的研究成果；

$$H = \sin \theta_0 \frac{\sqrt{L_0^4 - L_1^4 + L_2^4 + 2L_1^2 L_0^2 - 2L_2^2 L_0^2 - 2L_1^2 L_2^2}}{2L_1 L_0} + \cos \theta_0 \frac{L_2^2 + L_0^2 - L_1^2}{2L_1 L_0} + h_0 \quad (2)$$

式中： H 为清淤装置活动高度； θ_0 为 AB 和 AC 在起动时刻的夹角； L_0 为推杆长度； L_1 为 BC 的长度； L_2 为 AD 的长度。

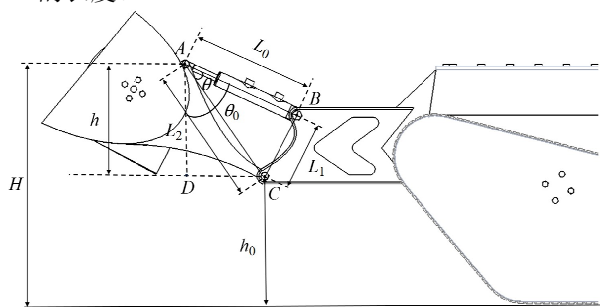


图4 清淤机器人推杆长度和清淤装置活动高度

Fig. 4 Length of the Push Rod of the Dredging Robot and the Activity Height of the Dredging Device

对于本清淤机器人， $L_2=0.4$ m， $L_1=0.2$ m， $h_0=0.3$ m， $\theta_0=62.1^\circ$ ，式（2）可简化为

$$H = \frac{47(L_0^2 + 0.12) + 44\sqrt{L_0^4 - 0.2L_0^2 + 0.01}}{40L_0} + 0.3 \quad (3)$$

根据式（3）可计算得到，本水下清淤机器人撑杆伸缩长度在0~0.35 m可将清淤模块伸入地下执行清淤工作。

3.2 清淤机构运动仿真分析

清淤机构主要工作流程：清淤开始时，清淤罩推杆推动清淤机构部分没入淤泥中，清淤机器人在履带底盘带动下向前移动；清淤罩随机器人移动将水分和淤泥由清淤罩开口处铲入清淤罩内部，进入内部的水分和淤泥在绞刀转动下被均匀混合为泥浆；小型渣浆泵将混合均匀后的泥浆由排泥口吸入后续管道中。

导出运动仿真动画，见图5。仿真结果中机构位

研究成果表明：绞刀的转速和绞吸参数经过优化，能够在保证清淤效果的同时，达到较高的清淤效率；通过优化绞刀的设计和泵送模块的吸力，机器人能够处理较大颗粒的泥沙，避免堵塞；轻量化的设计能够保证机器人在水下的移动性和稳定性，同时便于运输和部署；通过多级泵组的优化设计，能够保证泥浆的高效输送，避免管道堵塞和效率下降。

3 清淤机构数学分析与运动仿真分析

3.1 清淤机构数学分析

图4为清淤机器人推杆长度和清淤装置活动高度分析，其中： A 、 B 、 C 为3个铰链中心点； D 为过 A 的铅垂线和过 C 与地面的平行线交点。计算公式为

移平滑无明显冲击，表明所设计机构运行平稳。插件数据生成的锥齿轮相互啮合，能够实现传动要求。



图5 运动仿真动画截图

Fig. 5 Screenshot of Motion Simulation Animation

根据运动仿真动画截图，在3.5 s时本水下清淤机器人的清淤罩已经进入地面以下，表明撑杆长度在0~0.35 m可将清淤机构埋进地下正常工作，能够实现清淤要求。

通过MATLAB绘制了清淤机构位移随时间变化的曲线，见图6。

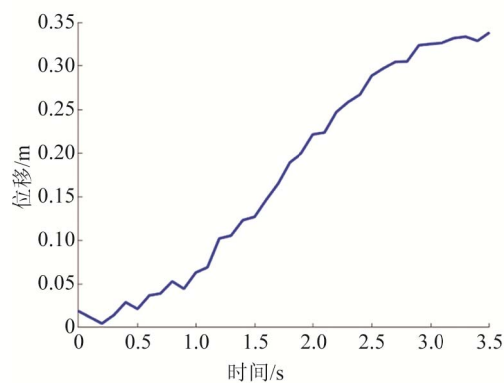


图6 清淤机器人位移随时间变化曲线

Fig. 6 Time Dependent Displacement Curve of Dredging Robot

从图6可知：位移曲线呈现平滑的S形变化，初始阶段清淤罩缓慢加速，稳定阶段以恒定速度下移，结束阶段逐渐减速至停止。曲线的斜率变化连续，且没有明显的跳跃或尖峰，表明机构运动过程中位移平滑且无明显冲击。此外，通过分析曲线的2阶导数（加速度），进一步验证了机构运动过程中没有剧烈的冲击，表明所设计的清淤机构运行平稳，能够满足清淤作业的要求。

4 水下清淤机器人搅拌流场仿真

水下清淤机器人通过绞刀将淤泥与水分搅拌混合，防止输送管道堵塞，便于泥浆运输。为保证工作过程中绞刀的可靠性，通过数值仿真方法得到绞刀周围流场情况并分析。所设计仿真的主要内容：清淤绞刀在水和淤泥介质交界面以一定转速转动，得到绞刀周围流场物理性质的瞬态结果变化情况，分析仿真结果从而优化清淤机器人的设计。仿真所使用介质的相关物理性质参数见表3。

表3 仿真所使用介质参数表

Tab. 3 Parameters of Media Used in Simulation

介质名称	密度/(kg/m ³)	黏度/(Pa·s)	黏粒含量/%
水	998.2	0.001 003	—
淤泥	1 350.0~ 1 650.0	0.01~0.02	7~15

4.1 清淤机构模型简化

由于所设计清淤机构较为复杂，首先需要对绞刀清淤机构模型进行简化，去掉对于仿真影响较小的部分，并通过Solidworks软件建立简化后三维模型，见图7。简化模型中去除了清淤机构复杂的驱动及传动设计，仅保留螺旋形绞刀并将其置于计算区域中。计算区域被从中间分为2部分，位于上方的部分介质为水，位于下方的部分介质为淤泥；绞刀位于泥水交界面处，沿径线方向被分为2部分，并分别浸没在2种介质中，见图8。

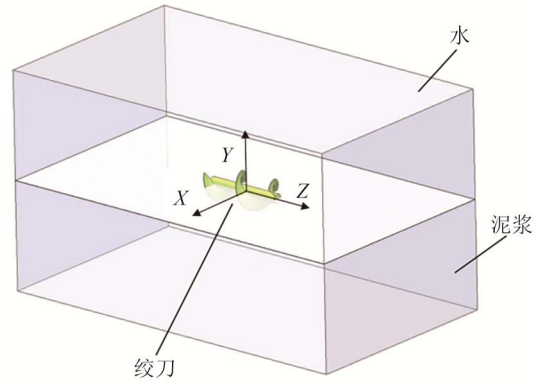


图7 简化模型示意图

Fig. 7 Simplified Model Diagram

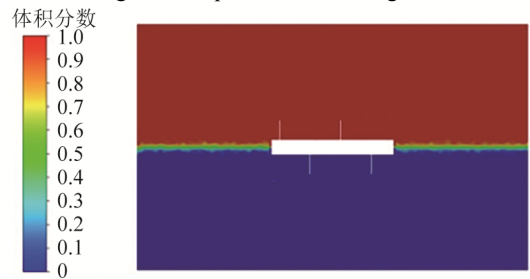


图8 水泥交界面剖面图

Fig. 8 Sectional Diagram of Cement Interface

4.2 仿真结果

4.2.1 仿真结果分析

通过仿真计算得到绞刀以30 r/min、60 r/min和90 r/min旋转工况仿真结果，并对结果进行后处理及分析。为便于对结果进行分析，建立三维直角坐标系，坐标系原点在计算域长方体几何中心位置。设置绞刀转速为90 r/min，在0.05 s、0.50 s、1.00 s、1.50 s、2.00 s、4.00 s、6.00 s、8.00 s和10.00 s的流场中淤泥介质的体积分数（Phase 2 Volume Fraction）情况见图9和图10。图9为过坐标系原点的YZ剖面图，图10为过坐标系原点的XY剖面图。

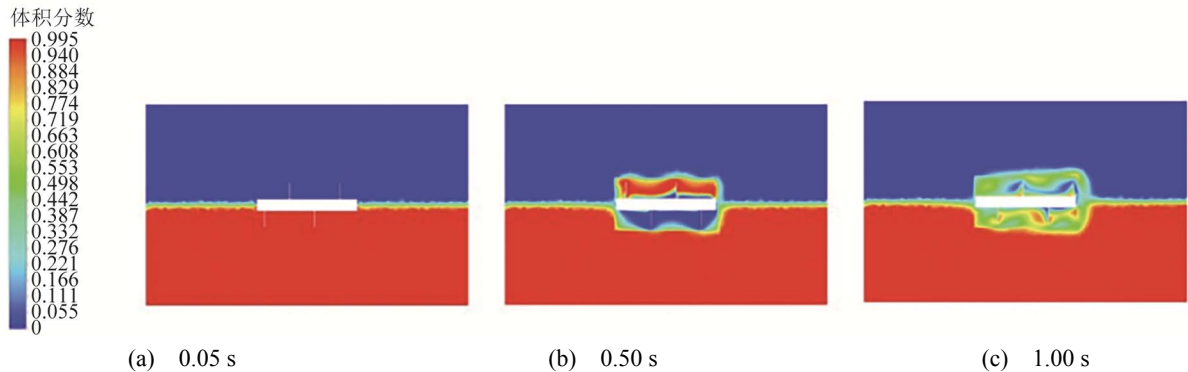


图9 绞刀流场 YZ 剖面不同时刻图

Fig. 9 YZ Profile Diagrams of the Cutter Flow Field at Different Times

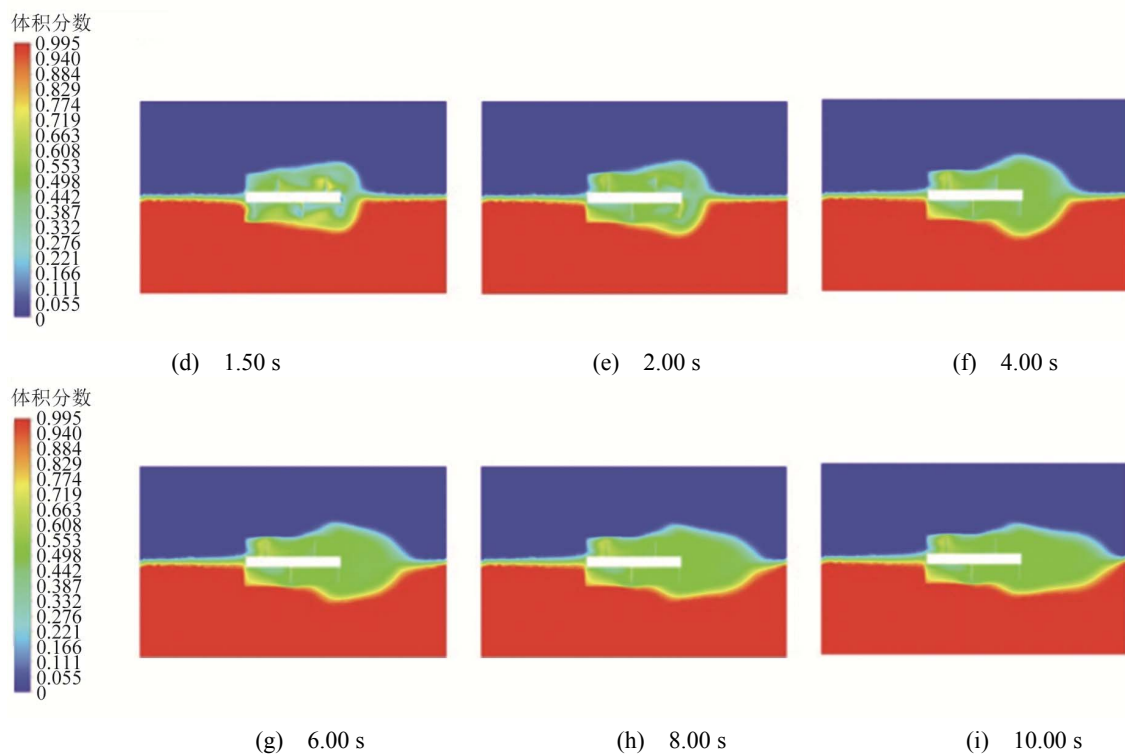


图9 绞刀流场 YZ 剖面不同时刻图 (续)

Fig. 9 YZ Profile Diagrams of the Cutter Flow Field at Different Times (Continued)

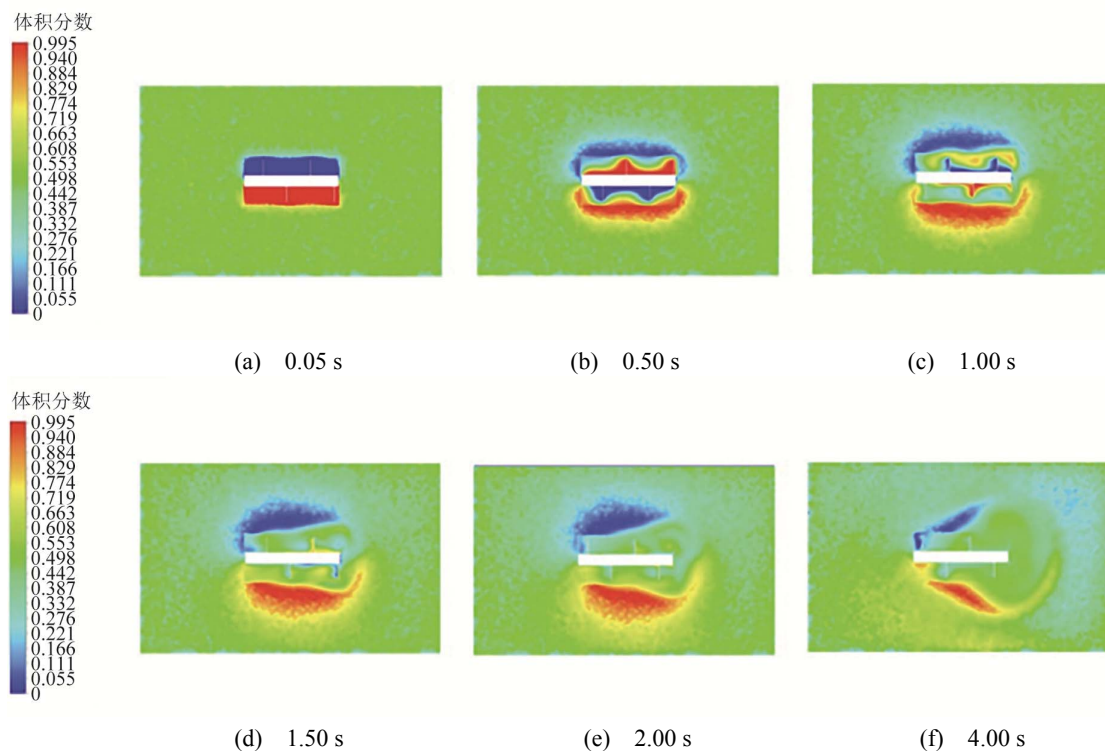


图10 绞刀流场 XY 剖面不同时刻图

Fig. 10 XY Profile Diagrams of the Cutter Flow Field at Different Times

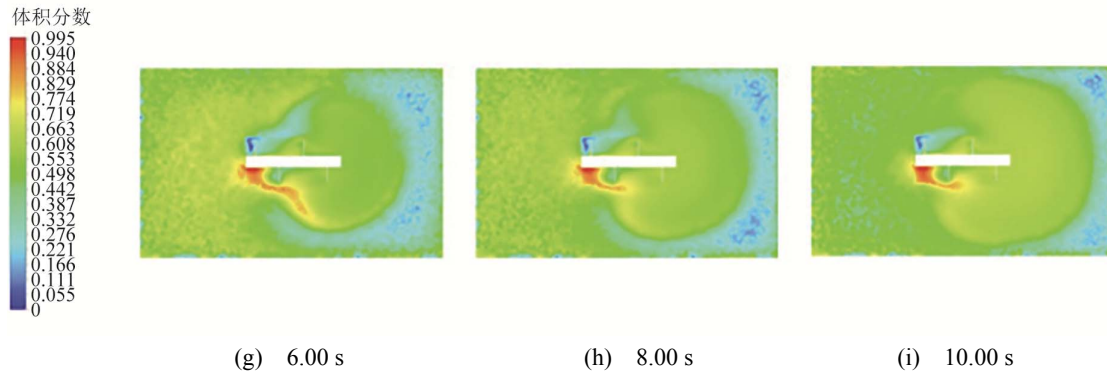
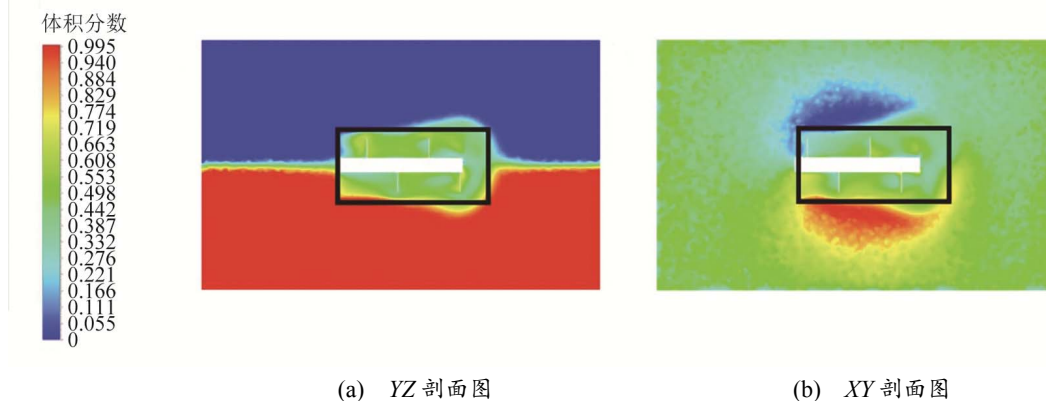


图 10 绞刀流场 XY 剖面不同时刻图 (续)

Fig. 10 XY Profile Diagrams of the Cutter Flow Field at Different Times (Continued)

当绞刀转速为90 r/min时，见图11。在绞刀转动下淤泥和水分逐渐混合，在2.00 s时绞刀周围区域淤泥介质的体积分数约为50%，即在2.00 s时刻绞刀已将周围区域2种介质搅拌混合至均匀状态。由于所设计绞刀为螺旋状，在转动过程中绞刀会将水和淤

泥2种介质混合后的泥浆推向箭头所指方向，绞刀对泥浆推动作用的方向可以用右手螺旋定则确定：若右手4指弯曲方向为旋转方向，则大拇指方向即为泥浆被推动方向。



(a) YZ 剖面图

(b) XY 剖面图

图 11 2.00 s 时刻绞刀流场剖面图

Fig. 11 Flow Field Profile of the Cutter at 2.00 s Time

4.2.2 绞刀转速和转向的确定

将淤泥与水2种介质在绞刀周围基本搅匀的时刻称为“起动时刻”，即在绞刀开始转动后达到“起动时刻”时清淤机器人履带底盘起动并以一定速度前进。此时清淤罩内存有的淤泥与水分已充分混合并被吸入输送管道中，且清淤机器人前进将未混合的淤泥铲入清淤罩内，“起动时刻”之后清淤罩内淤泥与泥浆输送情况达到平衡状态，清淤机器人进入清淤工作状态。

为确定起动时刻及绞刀转速，对仿真结果进行分析，仿真结果中YZ剖面图对于2种介质的混合情况展示较为清晰，故对YZ剖面仿真结果图及动画进行分析，得到不同转速下起动时刻数据见表4。

当转速为30 r/min时，起动时刻为5.7 s，混合效果较慢，清淤效率较低；当转速为60 r/min时，起动时刻为4.0 s，混合效果较好，清淤效率适中；当转

速为90 r/min时，起动时刻为2.0 s，混合效果最好，但转速过高可能导致功率消耗过大，且容易造成绞刀磨损或损坏。

表 4 不同转速下起动时刻表

Tab. 4 Starting Time at Different Speeds

转速/(r/min)	起动时刻/s
30	5.7
60	4.0
90	2.0

综合考虑混合效果、功率消耗和设备磨损，选择60 r/min作为清淤机器人的工作转速，此时起动时刻为4.0 s，能够在保证清淤效率的同时，降低设备磨损和功率消耗。

4.2.3 吸入口位置的确定

根据右手螺旋定则，设计左右两侧绞刀转向及

输送管道吸入口位置示意图见图12。左右两侧绞刀采用对转的旋转方向，吸入口设置在两绞刀中心靠近下侧的位置，通过两绞刀的对转可以将混合后的泥浆推动到吸入口位置吸入泥浆输送管道内。

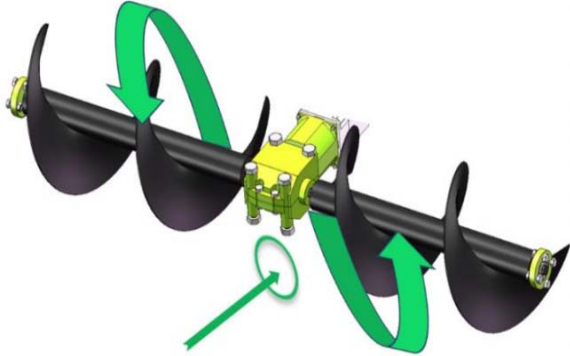


图 12 两侧绞刀转向及吸入口位置示意图

Fig. 12 Schematic Diagram of the Turning Direction of the Two Side Cutters and the Position of the Suction Port

4.3 设计结果验证

确定清淤机构两侧绞刀旋转方向、转速和吸入口位置后，采用相同仿真设置对所设计内容效果进行验证，通过设置2个旋转域反向等速旋转获得两侧绞刀反转时流场结果，设置2个旋转域转速均为60 r/min得到最终仿真结果见图13。

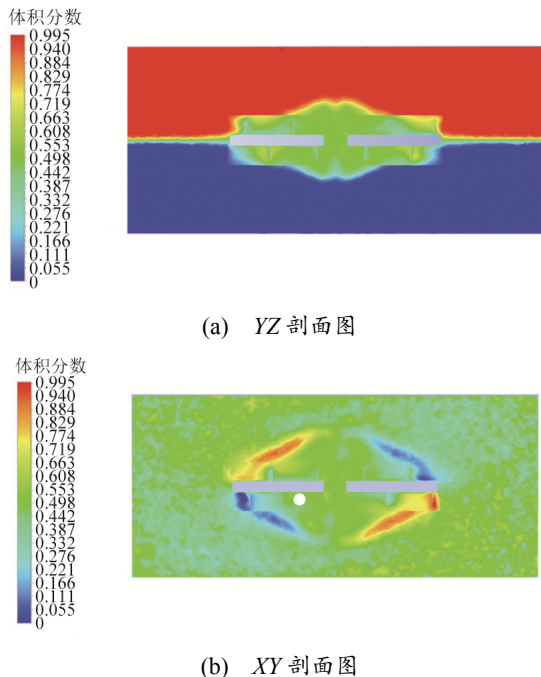


图 13 4.0 s 时刻验证模型绞刀流场剖面图

Fig. 13 Verification of the Flow Field Profile of the Model Cutter at 4.0 s Time

由图13可知：当绞刀转动达到“启动时刻”，即绞刀开始转动4.0 s时，设计中设置的输送管道吸入口附近淤泥和水2种介质混合效果良好，且混合后的泥浆被推动到输送管道吸入口位置附近，结果表明清淤机构设计合理。

5 结论

本文针对大型清淤疏浚船舶因交通不便、吃水不足等原因无法用于小型水库清淤工程的问题，调研了现有水下机器人的国内外研究现状，采用模块化设计方法设计了体型较小、便于运输和自动化程度较高的绞刀式水下清淤机器人，采用模块化设计方法设计了符合设计指标的清淤模块、移动模块和泵送模块，并设计了清淤机器人的工作流程；完成了清淤机构的运动仿真，验证了所设计清淤机构的可靠性；对于清淤机构模型进行简化后进行搅拌流场仿真，根据仿真所得绞刀周围流场结果进一步验证了设计的合理性，并确定了绞刀转速和转向。

在实际应用中，清淤机器人可能会受到复杂水下环境的影响，如底部地形变化、障碍物、不同泥沙成分、水流和能见度等因素，这些因素可能影响机器人的移动、清淤效率和长期耐久性。尽管本文设计的机器人具有较强的适应性和自动化能力，但在极端地形、大颗粒泥沙或强水流等条件下，仍可能存在打滑、卡住、切割效率下降等问题。此外，长期水下作业可能导致腐蚀和磨损，影响机器人的使用寿命。未来研究需进一步优化设计，以提高机器人在复杂环境下的稳定性和耐久性。

参考文献：

- [1] 熊庭, 缪雪松, 范世东. 水库清淤研究进展[C]//2022中国水利学术大会论文集(第七分册). 2022.
XIONG T, MIAO X S, FAN S D. Progress in Reservoir Dredging Research [C]//2022 China Water Conservancy Academic Conference (Volume 7). 2022.
- [2] 韩其为, 杨小庆. 我国水库泥沙淤积研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(3): 169-178.
HAN Q W, YANG X Q. A Review of the Research Work of Reservoir Sedimentation in China[J]. Journal of China Institute of Water, 2003, 1(3): 169-178.
- [3] 宋政昌, 周成龙, 张述清, 等. 清淤机器人在暗涵疏浚工程中的应用[J]. 西北水电, 2020(增刊 1): 70-73.
SONG Z C, ZHOU C L, ZHANG S Q, et al. Application of Dredging Robot in Dredging Engineering of Concealed Culvert[J]. Northwest Hydropower, 2020(Suppl. 1): 70-73.

- [4] 连祎, 李杰, 贾海涛. 浅谈河道清淤及淤泥处理技术[C]//中国水利学会 2021 学术年会论文集第四分册. 2021.
LIAN W, LI J, JIA H T. Introduction to River Dredging and Silt Treatment Technology[C]//China Water Resources Society 2021 Academic Annual Conference. 2021.
- [5] 程煜. 水下涵洞清淤机器人结构及其视觉定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
CHENG Y. Research on the Structure and Visual Positioning Technology of Underwater Culvert Dredging Robot[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [6] 王子卓. 管道清淤机器人的研制及其搅拌输送特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
WANG Z Z. Development of Pipeline Desilting Robot and Research on its Stirring and Conveying Characteristics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [7] LU J Y, ZHU D. Design of City Sewer Dredging Robot with Variable Diameter[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1074: 012056.
- [8] 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(1): 242-246.
LUO J M, GUO S T, LIU S Y. Study on Vibration Stability of Pipeline Robot Dredging Device[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(1): 242-246.
- [9] 邵可鑫, 桑建兵, 田魏昌, 等. 基于深度神经网络水下清淤机器人绞龙的可靠性分析[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(11): 1894-1900.
SHAO K X, SANG J B, TIAN W C, et al. Reliability Analysis of Underwater Desilting Robot Winch Based on Deep Neural Network [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(11): 1894-1900.
- [10] 陈保平, 权博文. 机器人在箱涵清淤中的研究和应用[J]. 中国设备工程, 2023(8): 30-32.
CHEN B P, QUAN B W. Research and Application of Robot in Box Culvert Dredging[J]. China Equipment Engineering, 2023(8): 30-32.
- [11] 杨旭. 水下清淤机器人导航定位及控制系统的设计与实现[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.
YANG X. Design and Implementation of Navigation, Positioning and Control System for Underwater Desilting Robot[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2023.
- [12] 康向南. 矿用水仓清淤机器人液压越障自适应控制技术[J]. 当代化工研究, 2023(24): 171-173.
KANG X N. Adaptive Control Technology of Hydraulic Barrier Crossing for Mine Water Silting Robot[J]. Modern Chemical Research, 2023(24): 171-173.
- [13] SHADEMANI S, ZARAFSHAN P, KHASHEHCHI M, et al. Conceptual Design and Analysis of a Dredger Robot for Irrigation Canals[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2019, 46(6): 819-827.
- [14] 王李俊, 顾磊, 刘增辉, 等. 绞吸式清淤机器人不同绞吸参数下绞刀流场特性研究[J]. 水运工程, 2023(12): 171-177.
WANG L J, GU L, LIU Z H, et al. Flow Field Characteristics of Cutter Under Different Cutter Suction Parameters for Cutter Suction Dredging Robot[J]. Port & Waterway Engineering, 2023(12): 171-177.
- [15] WANG T, WANG Z, ZHANG B. Mechanism Design and Experiment of a Bionic Turtle Dredging Robot[J]. Machines, 2021, 9(5): 86.
- [16] 李岳, 邓云蛟, 敖然, 等. 可适径调整管道清淤机器人结构设计与运动分析[J]. 工程设计学报, 2023, 30(3): 353-361.
LI Y, DENG Y J, AO R, et al. Structural Design and Motion Analysis of a Dromed-Cleaning Robot with Suitable Diameter Adjustment [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023, 30(3): 353-361.
- [17] 王杰, 熊新宇, 贾军利, 等. 适用于渠道及倒虹吸的水下清淤设备设计与应用[J]. 人民长江, 2021, 52(增刊 1): 237-239.
WANG J, XIONG X Y, JIA J L, et al. Design and Application of Underwater Desilting Equipment for Channel and Inverted Siphon [J]. Yangtze River of the People, 2021, 52(Suppl. 1): 237-239.