

# 一种核电厂取水口水下清淤巡检机器人 控制系统的设计

菅佳乐<sup>1</sup>, 张文杰<sup>1</sup>, 简垠帆<sup>2</sup>, 韩王畴<sup>3</sup>, 曾美琳<sup>4</sup>

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100044; 2. 上海景奕智能控制技术有限公司, 上海 210000;  
3. 海南核电有限公司, 海南 海口 572733; 4. 江西工业贸易职业技术学院, 江西 南昌 330038)

**摘要:** 由于核电厂取水口具有水域环境复杂且淤泥较多等特征, 因此清淤工作必须高度重视, 为此设计一款清淤巡检机器人控制系统, 系统运行时可利用避碰声纳、姿态、深度以及压力等传感器对运动数据进行获取, 同时还会通过 LED 灯、摄像头、浑浊度传感器、温湿度传感器对环境数据进行获取, 并且传输至核心处理器。核心处理器处理数据在解析和处理数据后, 在调整运动姿态以及控制机械臂清淤的同时, 通过压缩算法将环境、运动数据压缩, 然后向终端控制中心传输。控制中心成功接收数据之后, 能够根据需要, 向清淤巡检机器人发送指令以调节其工作状态。系统经验证可知, 系统能够精准获取环境数据并高效调控水下机器人工作状态, 对于环境监测和运动调控要求都能够很好地满足。

**关键词:** 清淤; 巡检机器人; 控制系统; 精确感知

中图分类号: TN06

文章编号: 1000-0682(2025)02-0009-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.02.002

## Design of control system for underwater dredging inspection robot for water intake of nuclear power plant

JIAN Jiale<sup>1</sup>, ZHANG Wenjie<sup>1</sup>, JIAN Yinfa<sup>2</sup>, HAN Wangchou<sup>3</sup>, ZENG Meilin<sup>4</sup>

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2. Shanghai Jingyi Intelligent Control Technology Co., Ltd., Shanghai 210000, China; 3. Hainan Nuclear Power Co., Ltd., Hainan Haikou 572733, China; 4. Jiangxi Vocational and Technical College of Industry and Trade, Jiangxi Nanchang 330038, China)

**Abstract:** Due to the complex water environment and high amount of silt at the water intake of nuclear power plants, dredging work must be highly valued. Therefore, a dredging inspection robot control system is designed, which can use collision avoidance sonar, attitude, depth, and pressure sensors to obtain motion data during operation. At the same time, environmental data is also obtained through LED lights, cameras, turbidity sensors, temperature and humidity sensors, and transmitted to the core processor. After parsing and processing the data, the core processor adjusts the motion posture and controls the robotic arm to clear silt. At the same time, it compresses the environment and motion data through compression algorithms and transmits it to the terminal control center. After successfully receiving data, the control center can send instructions to the dredging inspection robot as needed to adjust its working status. The system has been verified to be able to accurately obtain environmental data and efficiently regulate the working status of underwater robots, meeting the requirements for environmental monitoring and motion control very well.

**Keywords:** dredging; inspection robot; control system; precise sensing

收稿日期: 2024-07-31

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ2202718)

第一作者: 菅佳乐 (1992—), 女, 汉族, 内蒙古鄂尔多斯市人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为核电水工。

通信作者: 曾美琳 (1984—), 女, 汉族, 江西信丰人, 硕士, 讲师、高级工程师, 主要研究方向为机器学习与图像处理技术。

## 0 引言

核电厂取水口水下清淤是核电厂重要工作之一,一方面保证高效取水,避免淤泥过多导致难以取水,确保核电厂冷却系统可以安全稳定运行,另一方面也能够对淤泥堵塞导致的安全事故有效防范,为核电厂安全稳定的运行提供保障。尽管当前已有的水下清淤巡检机器人在清淤巡检方面可实现自动化操作,效率相对较高,使人工操作风险得到很好控制,不过仍然存在性价比偏低和算法繁琐等缺陷。所以该文研发了一款 STM32 + DSP 双核架构的核电厂取水口水下清淤巡检机器人控制系统,该系统包括电源模块、电机驱动模块、无线通信模块、环境和运动情况感知等模块,软件技术引入全新的运动姿态调控算法,使水下清淤巡检机器人系统能够进一步优化和完善。

## 1 总体设计方案

系统由六大模块构成,STM32MP1 微处理器和 ADSP-21479KBCZ-2A 是系统核心控件,前者主要用于处理控制信号,后者用于发送、接收和压缩视频信号。系统运行过程中,微处理器 STM32MP1 通过环境感知模块将 LED 灯开启,利用高清 CCD 摄像头对视频信号进行获取,PH 值、浑浊度和温湿度传感器对环境信号进行获取,此外,碰撞声纳、压力、深度和运动姿态等数据是通过运动状态感知模块获取的。最后向控制中心发送信号,ADSP-21479KBCZ-2A 芯片以运动数据为依据完成运动模型分析,再通过六维度运动控制算法对机器人运动进行调控,驱动机械臂完成淤泥清理。与此同时,H.264 视频数据压缩协议算法会对获取到的运动状态和环境信息进行压缩,并完成向数字编码的转化,接下来由无线通信模块向控制中心传输,控制中心成功接收数据之后,能够向清淤巡检机器人发送指令以调节其工作状态。系统利用锂电池来提供电能,该系统工作原理框图如图 1 所示。

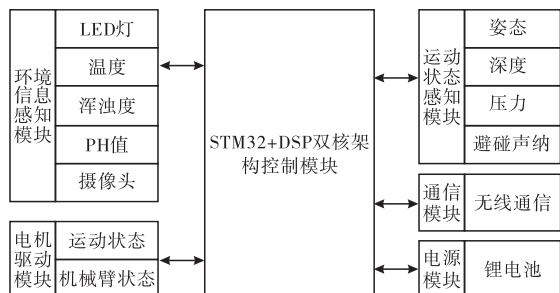


图1 系统工作原理框图

## 2 核心硬件设计

系统核心硬件主要包括电源、无线通信、电机驱动、运动状态感知、环境信息感知以及控制模块这六个部分,电源的功能是供电,无线通信负责通信,电机驱动模块负责驱动电机工作,运动状态和环境信息感知负责获取运动状态和环境信息数据,控制模块负责控制清淤巡检机器人。

### 2.1 主控模块

系统核心控件选用的是由意法半导体公司研发的 32 位 ARM 微处理器芯片,型号为 STM32MP1,具有工作电压小、功耗低、支持异构处理和 Linux 系统的优势,并且集成度很高。在医疗器械、自动化工业以及机械控制等多个领域都已经广泛运用。而视频压缩则是 ADSP-21479KBCZ-2A 数字处理芯片利用 H.264 视频数据压缩协议算法对运动状态和环境信息进行压缩,从而实现并完成向数字编码的转化。由于其内部 VICP 视频编码协议处理单元有独立工作的特点,且数量为两个,所以可提升编码效率,对于多路高清和标清图像的处理水平方面是比较高的。而且,其内部的 2 个 DDR2(64M × 16bits)、SPI 串行 FLASH(32K × 8bits)以及 NAND 的 FLASH(128M × 8bits)使数据压缩在面临大量数据时也能够稳定高效地完成。

### 2.2 环境信息感知模块

环境信息感知模块的主要功能是感知并获取工作环境数据,例如视频信号主要分为对视频信号的采集和压缩,采集模块的构成部分包括以太网、Hi3516 芯片和图像传感器等。Hi3516 芯片的主要特点是处理速度很快且功耗极小,并且处理 Sensor 的图像支持自动白平衡、曝光以及降噪等处理,为图像质量提供良好的保证,该芯片的作用是调控其他模块,储存空间是由 e.MMC 负责,运行空间由 LPDDR4 负责,图像信号则是由图像传感器获取后进行处理得到数字信号,这样才能通过 USB3.0 通信协议进行传输,向芯片 ADSP-21479KBCZ-2A 传输后并完成压缩操作,最后利用无线通信模块向后台控制中心传输。视频信号采集与处理原理如图 2 所示。



图2 视频信号采集与处理原理图

### 2.3 运动状态感知模块

运动状态感知模块的作用是感知运行或静止下的运动状态,并向数字处理器 ADSP-21479KBCZ-2A 进行传输,模块中主要包括水深压力传感器 MS5837-30BA 和姿态传感器 MPU6050 等。其中,MPU6050 姿态传感器选用的是六轴姿态传感器,能够对  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴的角度参数和加速度参数进行感测,经过数据汇总和处理后,能够获取到姿态角。

### 2.4 无线通信模块

无线通信模块选择 YED-C724 核心板,这是银尔达公司在 Air724 模块的基础上进行优化的产品,具有体积小、功耗低、支持实时采集和二次开发等特点,并且经过实测该产品可以在  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  到  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度范围内正常运行。YED-C724 核心板实物图如图 3 所示。

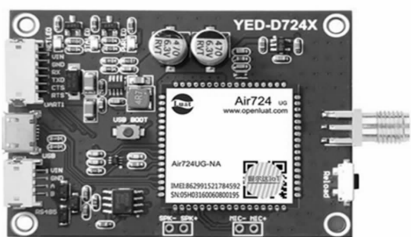


图 3 YED-C724 核心板实物图

### 2.5 电机驱动模块

伺服电机驱动机器人工作,在伺服电机控制下机器人进行机械臂操作和做出其他相应动作。对于水下机器人驱动和控制是通过开环和闭环两种控制方法来共同实现的,水下清淤巡检机器人动作可通过开环控制上位机进行操控,姿态传感器可实现闭环控制并将机器人姿态等信息进行反馈,进而调解机器人位置。机器人共有 4 个机械臂,在腕关节、肘关节和肩关节运动与之协调配合下可确保所有位置都能够触达,这样机械手就可以实现对目标物的接触。末端执行器具有夹持功能,可以实现对目标物的夹持操作。

### 2.6 电源模块

电源模块选择 12 V 锂电池,电路稳压是通过 LM2596 稳压模块来实现的,该模块能够借助 LM2596 芯片将电压稳定在 5 V 大小,可以为系统正常供电。该模块可以对 3 A 电流负载正常驱使,同时线性度较好,且有负载调解功能;支持输出 12 V、5 V 和 3.3 V 大小的电压,并且可以对输出电压类型进行调整;具有应用难度小和较高集成度的优势,

内部还配置了固定频率振荡器。在开关频率大小是 15 kHz 的情况下,该模块可以正常工作,所以相对于频率很小的开关稳压器来说,只需选择极小尺寸的滤波器即可,这样机器人内部空间就能够更大程度的压缩,并且在电量极低的情况下可控制机器人从水下漂浮起来。电源模块在绝缘处理之后可以与 12 V 充电器直接相连,也可以连接太阳能板以完成充电,所以与当前市面上常用的水下清淤机器人相比,该文研发的机器人的续航时间的优势更为显著。

## 3 核心软件设计

### 3.1 主程序流程图

主程序开始运行以后,首先需要声明任务调度表并获取任务地址和任务数量,将默认参数进行加载,然后系统开始进行初始化操作,初始化操作包括系统内部所有模块和参数,接下来程序会检验设备是否正常,若设备不正常则程序运行直接结束,如果正常则进入循环调度中,按照顺序对任务进行执行。在执行过程中最开始程序会对当下的环境信息和运动信息进行采集,并向后台控制中心传输,控制中心以运行模式为依据完成初始化操作,若运行模式为自动则需要初始化电机、姿态和设备位置等,若运行模式为手动,则需要对机械臂电机和推进器电机进行控制,并对遥控指令进行接收,这样就可以实时操控水下清淤机器人。系统初始化子程序流程图如图 4 所示。

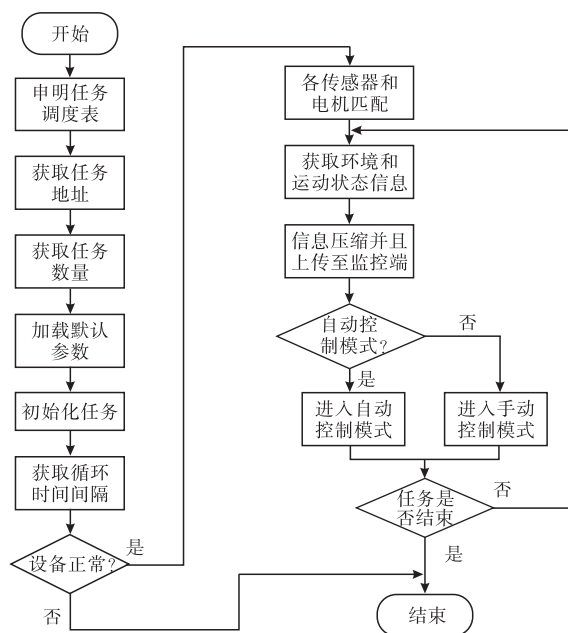


图 4 系统初始化子程序图

### 3.2 环境信息及运动状态感知子程序

运动状态和环境信息感知程序的功能是对水下清淤机器人的运动姿态和所处环境信息进行获取,环境信息主要包括 PH 值、温度和湿度等。该文以采集并压缩视频信号为例对子程序运行过程进行介绍,首先连接 CCD 高清摄像机,启动摄像功能,系统判断是否设置摄像文件的存储路径,如果并不存在则按照路径新建文件夹,然后对 ClientRecordStart() 函数调用,这样摄像就开启了;采集时长提前设置,到达预定时间后调用 ClientRecordStop() 函数使摄像终止。视频采集子程序流程图如 5 所示。

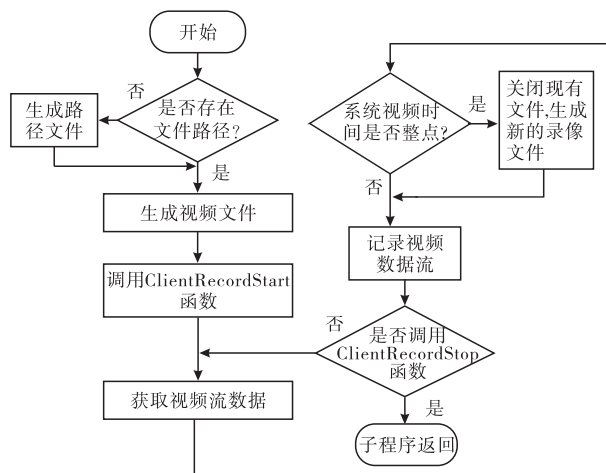


图 5 视频采集子程序流程图

视频压缩采用 H. 264 压缩编码标准,在适配度和压缩率方面效果更好,所以在各领域中应用也更加广泛,在如今繁多的压缩编码标准中占有重要地位,所以该文研发的系统也选用此标准,视频压缩子程序流程如图 6 所示。

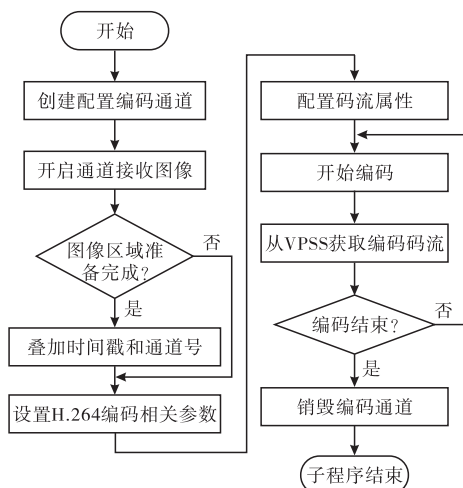


图 6 视频压缩子程序流程图

如图 6 所示,该子程序运行后首先要创建配置编码通道,开启通道后对图像进行接收,还需要对编

码流比特率和编码格式等进行配置,完成编码以后还应当对编码通道进行销毁,此时子程序结束运行。

### 3.3 无线通信子程序

近距离无线射频通信的载波频率可选甚低频通信或者远大于水声通信,前者频率不超过 30 kHz,后者低于 50 kHz。如果工作频率高于 500 kHz,再运用多载波调制技术,或者正交幅度调制技术后,就可以实现高速传输高于 100 kbit/s 的数据。图 7 所示为发送子程序流程图,图 8 为接收子程序流程图,由于水下射频通信速率很高,因此水下高速无线双工通信就能够实现,远程控制信号经后台控制中心向水下清淤巡检机器人发送,机器人成功接收信号以后开始工作,对水下环境数据进行采集并向后台控制中心发送。

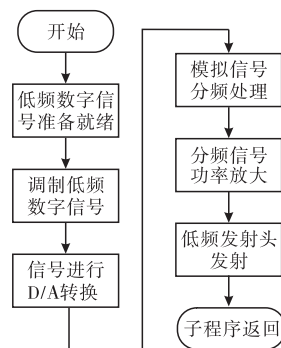


图 7 发送子程序

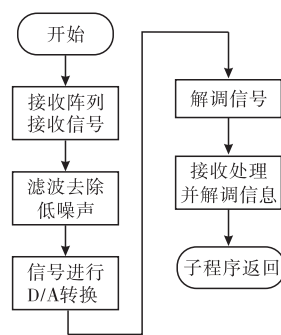


图 8 接收子程序流程图

### 3.4 电机驱动子程序

电机驱动子程序的作用是驱动机械臂进行清淤,并驱动机器人按照指令运动,该文以运动状态为例进行介绍。在水下工作的机器人受到很多因素的影响,例如机器人本身的推进力、水体阻力、浮力、重力以及外界干扰等多种因素,其受力模型较为复杂,这里对受力模型进行简化,再对机器人水下运动控制进行探究,以 SNAME 造船与轮机工程学会以及 ITTC 国际水池会议的坐标系为基准完成动坐标系  $O-X'Y'Z'$  与静坐标系  $E-XYZ$  的建立,水下机器人



运动分析坐标系示意图如图 9 所示。

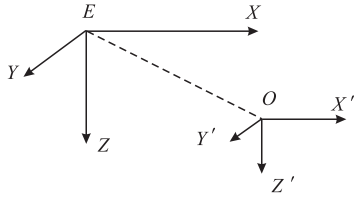


图 9 水下机器人运动分析坐标系

如图 9 所示,横向、纵向和垂直向位移依次用  $x, y, z$  来代表,这三个方向对应的移动速度依次用  $u, v, w$  来代表,横倾、纵倾、偏航角速度依次用  $p, q, r$  来代表,横滚、俯仰和航向角依次用  $\varphi, \theta, \psi$  来表示。

利用下面三个公式可以完成动坐标系和静坐标系的速度矢量转化,如下所示:

$$\dot{\eta} = J(\eta) V \quad (1)$$

$$\eta = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi] \quad (2)$$

$$V = [u \ v \ w \ p \ q \ r] \quad (3)$$

式中:  $J(\eta)$  为坐标转换矩阵,其计算式如下:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta) & 0 \\ 0 & J_2(\eta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用以上两种坐标系能够将六维度水下清淤巡检机器人所有运动方式进行描述,还能够对围绕自身三个坐标轴旋转运动进行分解,利用以下公式可以描述对应的动力学模型:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (5)$$

式中:用  $C(v)$  为机器人科氏力和离心力矩阵;  $M$  为机器人惯性矩阵和水动力力矩(也可以称之为静力矩阵);  $g(\eta)$  为机器人浮力和重力矩阵;  $D(v)$  为机器人流体阻尼矩阵。

以上述的方程组和分析为依据,对动力学模型进行优化,同时简化计算方法,考虑到水下清淤巡检机器人运动是六维度的,所以假设重心和动坐标系原点是重合的,这样则有  $Y_g = Z_g = 0$ ,利用公式(5)能够简化计算,旋转方程和平动方程就都能够得到,具体如下面公式:

$$\begin{cases} (m + m_u)(\dot{u} - vr + wq) = X \\ (m + m_v)(\dot{v} - wr + uq) = Y \\ (m + m_w)(\dot{w} - uq + vp) = Z \\ I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr = K \\ I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp = M \\ I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq = N \end{cases} \quad (6)$$

针对水下清淤巡检机器人在运行过程中的动力学方程进行计算和探究,将其运动参数  $u, v, w, p, q,$

$r$  求解出来,然后利用公式(1)(2)(3)将静坐标系中运动规律、偏转量和位移量等计算出来。为了更好地满足需求,选用四维度螺旋推进器,水下机器人螺旋推进器布局方式及受力情况如图 10 所示。

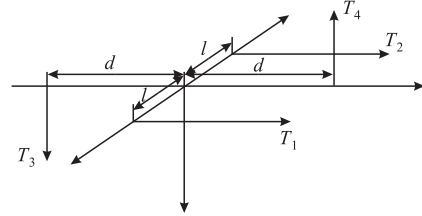


图 10 水下机器人螺旋推进器布局方式及受力

## 4 系统测试

如图 11 所示为船用水下监测机器人的实物图,该系统设计完成后在长、宽和深分别为 5 m、3 m 和 1.5 m 的长方体水池中对系统进行测试。对机器人的定深运动、旋转运动和直线运动进行测试,对机器人的运动情况进行观察和监测,如图 12 所示。



图 11 巡检清淤机器人实物图



图 12 实验用四屏控制箱实物图

如图 13 所示为清淤巡检机器人在水下按照直线、转向、直线的顺序运动时的偏航角变化曲线图。在 50 秒之前机器人的航向角稳定在  $90^\circ$ ,51 秒开始到 101 秒时,连续转向  $360^\circ$ ,从 101 秒开始到 151 秒结束转向加速,这样航向角由  $0^\circ$  提高到  $90^\circ$ ,从 151 秒开始到 201 秒转向角稳定在  $90^\circ$ ,船用水下监测机器人在整个运动过程中对于控制中心发出的指令都能够正确稳定地执行。

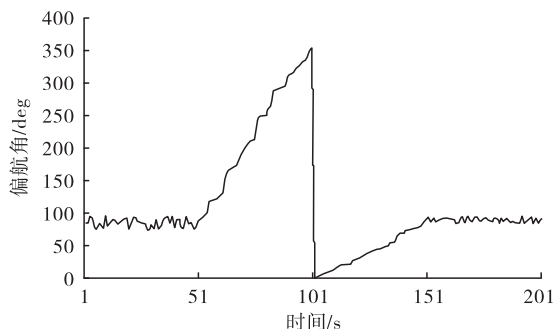


图 13 偏航角曲线

如图 14 所示为清淤巡检机器人从水面附近到 80 cm 深度运动时的水深控制曲线变化图,深度值由上位机设置,并将传感器数据反馈以完成曲线图的绘制。根据该曲线图能够发现最开始的时候在 0 值附近小幅度波动,在机器人刚刚要被水面淹没时,水面波动对测量水压会有一定干扰,因此会出现深度波动;上位机将深度设置数据反馈后,深度值会急速提高,此时机器人潜入水下速度也加快,当到达深度 80 cm 后潜入速度就会降低,并在此时会出现很小的超调量,最终在 80 cm 深度趋于稳定。深度控制会受到水面波动的影响,而机器人在接近水面后必然要进行潜入水下的运动,这也就不可避免地造成测量水压受到干扰。

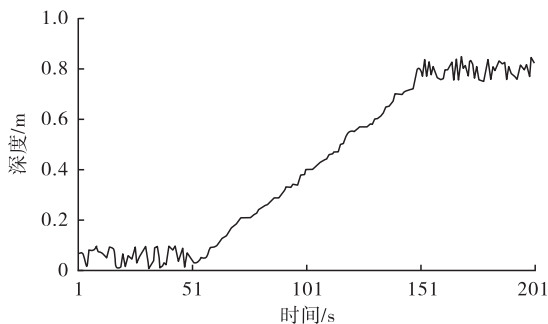


图 14 水深控制曲线

## 5 结论

该文研发了一款水下清淤巡检机器人的控制系统,系统设计完成后经过实际测试证明:该文研发的水下清淤巡检机器人能够在水下进行定深和姿态控制,运动控制性能也较为理想;水下画面经摄像头拍摄清晰且能够回传到后台控制中心。通过实验表面

实采用该系统的水下清淤巡检机器人具有稳定、可靠的控制性能,符合设计要求,在浅层水下环境能够正常工作,能够很好地完成清淤巡检任务。

### 参考文献:

- [1] 陈东军,吴家鸣,拜永征. 双控制方式下带缆水下机器人轨迹跟踪与水动力响应分析[J]. 船舶力学, 2024, 28(07): 967 - 980.
- [2] 陈真,朱嘉晟,陈潇潇,等. 水下捕捞机器人视觉系统发展趋势分析[J]. 造船技术, 2024, 52(03): 49 - 54 + 77.
- [3] 陈珏. 水下机器人检测显身手[N]. 中国水运报, 2024 - 06 - 28(005).
- [4] 刘长红,吴博淳,黄锦山,等. 基于曲柄摇杆机构的仿生海扁虫水下机器人[J]. 机械设计, 2024, 41(S1): 27 - 31.
- [5] 张鑫,孙凤刚,冯涛,等. 水下机器人检测技术在城市输水隧洞检测中的应用[J]. 北京水务, 2024(03): 73 - 77.
- [6] 袁曲,周冬,胡彪,等. 清水池观察级水下机器人巡检装置设计与实践[J]. 中国给水排水, 2024, 40(12): 105 - 109.
- [7] 乔路宽,刘爱民,王子君,等. 基于 FPGA 的水下机器人视觉检测系统[J]. 微处理机, 2024, 45(03): 47 - 51.
- [8] 俞伟豪,韩旭,唐纵,等. 水下机器人耐压舱的结构设计与分析[J]. 机电信息, 2024(11): 45 - 48.
- [9] 徐刚. 水下机器人在深竖井长引水隧洞水下检测中的应用[J]. 水利科技, 2024(02): 20 - 23.
- [10] 徐晨轩,朱承志,万青,等. 水下机器人在入海水道通榆河立交工程涵洞的探查应用[J]. 江苏水利, 2024(06): 61 - 65.
- [11] 刘鑫. 基于多电机协同控制的水下机器人轨迹跟踪系统研究[J]. 信息记录材料, 2024, 25(06): 61 - 63.
- [12] 林群锋,高秀晶,黄红武,等. 基于 SVD - SUKF 的水下机器人电池 SOC 估计[J]. 船舶工程, 2024, 46(05): 89 - 96.
- [13] 张瑞杰,李兆祥,吴振铭,等. 水下机器人视景仿真研究[J]. 机械设计, 2024, 41(05): 170 - 176.
- [14] 寇邗郡,李想. 基于视觉伺服的水下机器人导引技术[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(05): 215 - 221.
- [15] 耿成园,张亚念,罗贤虎,等. 浅谈海洋调查中的水下机器人避障技术[J]. 中国新技术新产品, 2024(07): 18 - 20.