

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.12.017

清水池观察级水下机器人巡检装置设计与实践

袁 曲¹, 周 冬¹, 胡 彪¹, 王海龙¹, 祝 灵¹, 童 力¹,
孙 倜², 王凌云²

(1. 武汉市自来水有限公司 制水部, 湖北 武汉 430034; 2. 华中科技大学 电气与电子
工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 针对清水池巡检作业中存在需要停产、作业环境差、劳动强度大和成本高等问题,提出了清水池水下机器人巡检的技术方案。在对清水池水下巡检作业进行功能需求、性能需求分析的基础上,给出了装置的具体设计方案,并集成了一套清水池观察级水下机器人巡检装置。在4座清水池进行了水下视频检查、水样采集、泥砂沉积测量和杂物拾取等实验验证,结果表明该技术方案经济、可行,装置实现了清水池不停产水下巡检作业的目标。

关键词: 清水池; 观察级水下机器人; 巡检装置; 巡检作业

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)12-0105-05

Design and Implementation of the Observation-level Underwater Robot Inspection Device in Clean Water Tank

YUAN Qu¹, ZHOU Dong¹, HU Biao¹, WANG Hai-long¹, ZHU Ling¹, TONG Li¹,
SUN Ti², WANG Ling-yun²

(1. Water Production Department, Wuhan Water Supply Co. Ltd., Wuhan 430034, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and
Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In view of the problems of production suspension, poor working environment, high labor intensity and high cost in the inspection operation of clean water tank, the technical scheme of underwater robot inspection is proposed. Based on the analysis of functional requirements and performance requirements of the underwater inspection operation of clean water tank, the specific design scheme of the device is provided, and a set of observation-level underwater robot inspection device of clean water tank is integrated. The underwater video inspection, water sample collection, sediment measurement and debris picking were tested in four clean water tanks for verification. The results show that the technical scheme is economical and feasible, and the device achieves the goal of unsuspended underwater inspection operation of clean water tank.

Key words: clean water tank; observation-level underwater robot; inspection device; inspection operation

基金项目: 武汉市自来水公司项目(2021-GX-ZX-ZG-48)

通信作者: 王凌云 E-mail: wangly@hust.edu.cn

清水池是给水系统的重要组成部分,是为贮存净化后的清水,调控制水量与供水量之间的差额,并为满足消毒接触时间而设置的调蓄构筑物,其基本封闭的结构型式和长时间不间断运行的特点导致池内状况很难通过常规仪表或其他手段获取。清水池运行过程中因结构缺陷而渗水的现象^[1]时有发生,影响了给水系统的正常运行。清水池经过长时间的运行,池底均存在不同程度的泥砂沉积现象,也存在金属部件的锈蚀现象,甚至会出现微生物滋生现象^[2],影响了给水系统的水质和安全。由于缺乏有效的巡检手段,《城镇供水厂运行、维护及安全技术规程》(CJJ 58—2009)第4.13条只规定清水池必须定期排空清洗,清水池检查作业只能随着清洗作业进行。清水池维护作业包括多道工序,过程复杂、危险,而且持续时间长、劳动强度大、成本高,使得国内大多数清水池的维护状况不甚理想^[3]。近年来,水下机器人和管道机器人逐渐应用在给水排水行业的检测和清淤等作业中,取得了宝贵的经验^[4-5]。由于给水系统中清水池运行工艺和内部结构的特殊性及其水下环境的复杂性等原因,国内未见文献报道有水下机器人用于清水池内部巡检的技术方案和装置。因此,开发、设计清水池水下机器人巡检装置,将改变缺乏清水池内不停产巡检手段的现状,为提高供水系统的安全性提供技术和设备保障,并能显著降低清水池的巡检成本。

1 需求分析

1.1 现状和问题

武汉市自来水公司制水部管理清水池40余座,每年用于清水池定期检查的直接费用预算为40万元。清水池内的检查方式全部采用停产,人工进入检查,包括设施、池底积泥和结构缺陷等状况的检查、记录和分析。目前存在的主要问题有4个:①清水池内为有毒的密闭空间,人员进入需配备防毒、防潮、通信、照明等用具,存在较大的安全隐患;②清水池停产后对管网调度和管网压力指标有较大的影响,会造成区域性停水或降压而影响社会生活;③每次清水池内人工巡检需要配备6~8名作业人员;④清水池内巡检记录为照片,数量多,整理工作量大,且经常缺失。

在数字化转型的大趋势下,多个行业将巡检作为数字化转型的重点内容之一,巡检作业模式将逐

渐由人工监督向电子监督转变、由定性考核向定量考核转变、由重点抽查向全面检查转变、由被动防范向主动预防转变^[6]。为配合落实公司数字化转型整体策略,并解决清水池定期检查作业中存在的问题,制水部立项进行了清水池观察级水下机器人巡检装置的开发、设计和实践工作。

1.2 功能需求

通过调研清水池内的结构、障碍、水流等情况和清水池巡检项目,以及参考相关的巡检规范和其他行业的机器人巡检产品,得出巡检的主要需求如下:①航行——巡检装置航行至池内任意位置并以任意姿态悬停;②视频巡检——对池内水流、泥砂、结构、设施、杂物等进行视频和照片拍摄;③水样采集——指定位置、指定深度采集水样;④泥砂沉积测量——指定位置测量池底泥砂沉积厚度;⑤其他——单自由度简单作业,如拾取杂物、携带工具等。

1.3 性能需求

依据巡检装置的工作环境需要,以及上述确定的功能需求,并结合目前水下航行器的技术性能指标和经济性,确定巡检装置性能需求(见表1)。

表1 巡检装置性能需求

Tab.1 Performance requirements of the inspection device

项目	性能需求
潜水深度/m	不小于10
航行速度/(m·s ⁻¹)	不小于1
航行距离/m	不小于100
航行控制	前后/左右/上下/指向/俯仰/翻滚6个自由度
深度控制	定深悬停
视频和照片分辨率	照片不小于1 920×1 080@30 Hz, 视频为4K@30 Hz
照明光通量/lm	不小于3 500
水样采集容积/mL	不小于100
泥砂沉积厚度测量/mm	不小于250
单动作机械臂行程/mm	不小于100
机械臂作用力/N	不小于80

1.4 设计约束

在对多座清水池进行现场踏勘,并在实验室搭建小型水池进行实验后,确定了如下设计约束条件:①外形尺寸——最大边不超过800 mm,便于从检查井进入清水池;②质量——不超过10 kg,便于1~2人携带和操作;③电源——电池供电,单次充电的工作时间不少于1 h,便于完成一座清水池的全部

巡检。

其他如线缆强度、电池容量、网络连接、数据存储空间等不再赘述。如不考虑成本,可采用供电模块直接供电,则不需要考虑运行时间和充电时间。

2 方案设计与实现

水下航行器(UV-Underwater Vehicle)分为有人和无人2类。无人水下航行器也称水下机器人(Underwater Robot),分为遥控型(Remote Operate Vehicle, ROV)和自主型(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)。ROV根据航行方式分为拖曳式、移动式 and 浮游式3类,根据尺寸和质量分为轻量级、中量级和重量级,轻量级多用于水下观测,重量级多用于水下作业。近年来,国内的技术进步逐渐突破国外的垄断,使得水下机器人成本大幅降低,并在海岸警卫、海事、海关、核电、水利、水电、海洋石油、渔业、海上救助、管线探测等多种水下环境广泛使用^[7]。

水下航行是实现清水池水下机器人巡检的关键,也是影响巡检装置成本的最主要因素。依据确定的需求和多次实验的实际情况,确定了采用1~2名作业人员操控基于长控制线缆观察级浮游式水下机器人携带定制的专用工具完成巡检任务的总体技术方案,并集成了一套清水池观察级水下机器人巡检装置。巡检装置组成如图1所示。

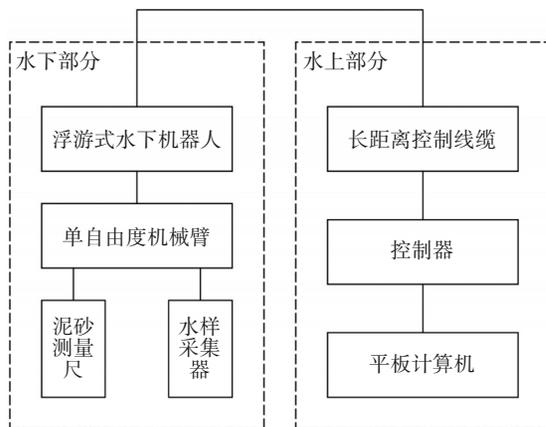


图1 巡检装置组成

Fig.1 Block diagram of inspection device

- ① 平板计算机:水下实时视频显示;
- ② 控制器:控制6个自由度航行和姿态,控制视频和照片拍摄,控制机械臂动作;
- ③ 长距离控制线缆:含卷线盘和200 m零浮力线缆,用于约束机器人、传递视频和控制信号;

④ 水下机器人:浮游式遥控水下航行器,为巡检装置母机,内置照明灯和摄像头;

⑤ 单自由度机械臂:携带巡检工具;

⑥ 泥砂测量尺:由清水池底泥测量针和支座构成,定制设计制作;

⑦ 水样采集器:由医用注射器和连接件构成,定制设计制作。

各部件的连接关系:①平板计算机与控制器之间为WIFI连接,传递视频数据;②控制器与长距离控制线缆之间为线缆连接,传递视频数据和控制信号;③长距离控制线缆和浮游式水下机器人之间为水下线缆连接,传递视频数据和控制信号;④浮游式水下机器人与单自由度机械臂之间为刚性机械连接,并可传递控制信号;⑤单自由度机械臂与泥砂测量尺之间为柔性绳索连接,只起约束作用;⑥单自由度机械臂与水样采集器之间为刚性机械连接,可传递动作行程至医用注射器。

集成的巡检装置主要技术参数:①观察级浮游式ROV的外形尺寸500 mm×400 mm×160 mm;②下潜深度50 m;③6个推进器、6个航行自由度;④静水航速为1.5 m/s;⑤照明光源为4 000 lm的补光LED灯;⑥摄像机拍摄分辨率为4K@30Hz;⑦数据卡容量为64 GB;⑧150 Wh容量充电电池;⑨装置质量为6 kg;⑩带载能力为5 kg;⑪长距离控制线缆为手动卷线盘和200 m长的零浮力线缆;⑫单动作作业机械臂为悬浮式铝合金材质,夹持力100 N,最大动作行程125 mm;⑬泥砂测量尺为定制不锈钢三角支架带刺针,刺针色环刻度分辨率5 mm;⑭水样采集器为150 mL医用注射器,动作行程120 mm,实现100 mL水样采集。

图2为清水池观察级水下机器人。



图2 水下机器人和机械臂

Fig.2 Photo of the underwater robot and robotic arm

图3为定制设计的2种泥砂测量尺模型,图4为定制设计的水样采集器和机械臂组合模型。

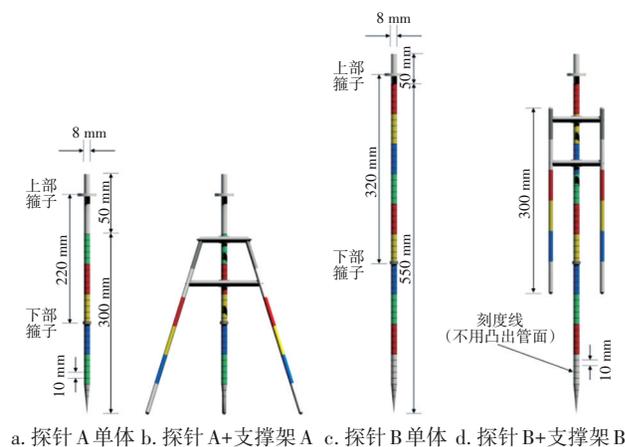


图3 泥砂测量尺的设计模型

Fig.3 Design model of sediment measurement rule



图4 水样采集器和机械臂组合的设计模型(3种行程)

Fig.4 Design model of water sample collector and robotic arm combination(3 location)

3 实验验证

3.1 作业过程分解

该巡检装置可实现清水池不停产水下检查和处置的4种基本作业过程:

① 视频检查

将充满电的水下机器人携至清水池检查口,连接长距离控制线缆,线缆另一端连接控制器;下放母机至清水池内;通过控制器的航行控制手柄控制母机按预先安排的巡检计划路径航行,按需要通过控制器的拍摄控制按键进行视频和照片拍摄,直至完成作业任务。

② 水样采集

将充满电的水下机器人携至清水池检查口,连接长距离控制线缆,线缆另一端连接控制器,单动作业机械臂通过紧固件安装至水下机器人,水样采集器通过紧固件安装至机械臂的动作部位;通过控制器的航行控制手柄控制母机航行至指定位置和深度并保持,再通过控制器的动作控制按键进行水样采集;携带水样返回,取出水样再进行下一次

水样采集。

③ 泥砂测量

将充满电的水下机器人携至清水池检查口,连接长距离控制线缆,线缆另一端连接控制器,单动作业机械臂握紧泥砂测量尺;通过控制器的航行控制手柄控制水下机器人航行至指定位置,通过控制器的动作控制按键放置测量尺于池底,通过航行和动作控制按键的组合操作将测量尺的针形活动标尺刺入泥砂沉积层直至池底;拍摄照片,读取泥砂沉积厚度;至下一个位置再重复测量过程。

④ 杂物拾取

将充满电的水下机器人携至清水池检查口,连接长距离控制线缆,线缆另一端连接控制器,单动作业机械臂通过紧固件安装至水下机器人;通过控制器的航行控制手柄控制水下机器人航行至指定位置,通过控制器的动作控制按键操控单动作业臂拾取杂物或完成其他简单动作。

3.2 现场巡检

2021年7月10日和2021年11月10日,利用该装置对1座清水池进行了4次巡检作业。清水池尺寸为52 830 mm×32 200 mm×5 200 mm,有效容积7 500 m³,内部6道导流墙将水流分为7道,设有直径1 000 mm的圆形检修孔3个,其中2个可以进入。清水池于2017年投入运行,运行后没有进行过停产检查。

作业情况:单次充电最长航行时间40 min,最远航行直线距离40 m,对角迂回航行距离110 m,最大带载质量2 kg;在充满电的情况下对该清水池的1/2进行了视频巡检;经过1 h的充电后,在充满电的情况下对该清水池的另1/2进行了视频巡检;还在充满电的情况下实现了3次定深度水样采集、2次泥砂沉积测量和2次杂物拾取作业。

存在的问题:在初始规划的顺清水池流道直角迂回的航行路线情况下,当水下线缆超过115 m时,受池内水流阻力和线缆与结构柱之间的摩擦力影响,水下机器人的航行和姿态控制遇到了困难。在重新规划对角迂回的航行轨迹后,才完成了全池的检查作业。

为进一步验证巡检装置的效果,2021年11月还对另外3座水厂清水池进行了8次视频巡检和数十次水样采集、泥砂测量和杂物拾取作业,均达到了预期目的。

在清水池水下作业过程中,当巡检装置接近池底且底部沉积有较多泥砂时,推进器的水流会扬起底部泥砂。目测最大的泥砂扬起范围均小于 1 m,即体积为 1 m³,约占清水池容积的万分之一,不会对出厂水质产生可以测量的影响。同时,监控数据表明,巡检装置作业时段水厂水质数据均无异常。

3.3 结果分析

① 清水池观察级水下机器人巡检装置能在 1~2 名作业人员的操作下,用时约 4 h 对 1 座 7 500 m³的清水池进行较全面的不停产视频检查,再用时约 8 h 对视频数据整理、分析、归档,并形成清水池内部结构缺陷、泥砂沉积、金属锈蚀等的分析报告。

② 清水池观察级水下机器人巡检装置能针对结构缺陷、金属锈蚀、泥砂沉积、水样采集、杂物遗留等问题进行仔细检查和简单处置作业,为清水池在不停产情况下处置池内具体问题提供了一种技术手段。

③ 清水池观察级水下机器人巡检装置在水下作业期间对出厂水质无明显影响。

④ 经测算,对 40 座清水池进行停产检查直接费用约 40 万元,而水下机器人巡检装置不停产检查直接费用约 10 万元,直接成本降低约 75%。

4 结论

① 清水池观察级水下机器人巡检能够完成清水池不停产情况下的水下检查、采样和测量等作业,是一种值得推广的具有社会效益和经济效益的清水池运维作业方式。

② 后期可在取得足够清水池运行中水下视频资料的基础上,开发、设计更多功能的作业工具,并解决清水池水下航行距离和航行控制等问题。

参考文献:

- [1] 石清林,蒋红光. 泵站清水池上浮事故的原因分析与加固处理[J]. 中国给水排水, 2022, 38(14): 106-111.
SHI Qinglin, JIANG Hongguang. Cause analysis and reinforcement of the floating accident in a clear water tank in pumping station[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(14):106-111(in Chinese).
- [2] 袁雅姝,杨佳蓉,张黎,等. 高通量测序研究清水池底泥微生物群落多样性[J]. 中国给水排水, 2021, 37

(21):94-99.

YUAN Yashu, YANG Jiarong, ZHANG Li, *et al.* Study on microbial community diversity in sediment of clean water tank by high-throughput sequencing [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (21) : 94-99 (in Chinese).

- [3] 韩梅,许光,张瀚中,等. 水厂清水池菌群结构特征及安全调控策略[J]. 给水排水, 2020, 46(1):9-13.
HAN Mei, XU Guang, ZHANG Hanzhong, *et al.* Microbial community structure characteristic and safety control strategies of clean water tank in the water treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(1):9-13(in Chinese).
- [4] 齐国辅,沈小华,封汇川,等. 污水收集系统过河管检测技术、案例及分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10):141-146.
QI Guofu, SHEN Xiaohua, FENG Huichuan, *et al.* Detection technology, case and analysis of river crossing pipe in sewage collection system [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(10):141-146(in Chinese).
- [5] 邵琦. 一种能源自给式自来水管管道清理机器人的结构设计及仿真分析[D]. 长春:吉林农业大学, 2017:2-6.
SHAO Qi. Mechanism Design and Simulation Analysis of a Power Self-support Pipeline Cleaning Robot [D]. Changchun: Jilin Agriculture University, 2017: 2-6 (in Chinese).
- [6] 冯坤. 变电站巡检机器人系统设计与实现[D]. 成都:西南交通大学, 2018:2-5.
FENG Kun. Design and Implementation of a Substation Inspection Robot [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018:2-5(in Chinese).
- [7] 李真. 水下管线自动跟踪式 ROV 的设计及研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018:6-10.
LI Zhen. Design and Research of Automatic Tracking ROV for Underwater Pipeline [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018:6-10(in Chinese).

作者简介:袁曲(1975-),女,重庆人,大学本科,高级工程师,主要研究方向为净水厂水质及工艺管理。

E-mail:wangly@hust.edu.cn

收稿日期:2022-10-20

修回日期:2022-10-28

(编辑:衣春敏)