

徐健, 鲍任兵, 雷培树, 等. 城镇水务行业机器人技术的应用现状与发展[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 38-44.

XU J, BAO R B, LEI P S, et al. Application status and development of robot technology in urban water industries[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 38-44.

## 城镇水务行业机器人技术的应用现状与发展

徐健\*, 鲍任兵, 雷培树, 邹磊, 万年红

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010)

**摘要** 【目的】 文章旨在探讨城镇水务行业中机器人技术的应用现状与发展前景,通过系统性分类与分析,研究机器人在降低人力成本和劳动强度方面的应用效果,并总结其关键技术,同时辨析当前应用面临的挑战及未来发展趋势,为城镇水务行业的智能化发展提供参考。【方法】 文章将城镇水务行业中的机器人按照功能分为采样及水质监测类机器人、管道检测类机器人、巡检类机器人和维护类机器人四大类,分别对其特点和应用场景进行简要介绍。同时,从运动及动力、图像及语音、通信及控制、感知、操作、综合决策等方面对机器人的关键技术进行总结,并分析当前机器人应用面临的适应性、可靠性、稳定性、维护保养及使用成本等问题。【结果】 研究发现,各类机器人在城镇水务行业中具有显著的应用价值,能够有效完成重复性、危险性高的工作,降低人力成本和减轻劳动强度。然而,目前机器人在适应性、可靠性和稳定性方面仍存在不足,需要频繁维护保养,且使用成本较高。未来,机器人技术将朝着可靠性和耐用性更好、功能更加集成、智能化程度更高、注重绿色低碳发展的方向发展。【结论】 城镇水务行业机器人技术的应用前景广阔,但需要进一步优化和改进。未来应加强技术研发,提高机器人的适应性、可靠性和稳定性,降低使用成本,以更好地满足城镇水务行业的需求,推动行业的智能化和可持续发展。

**关键词** 机器人 城镇水务行业 水质监测 管道检测 巡检与维护 绿色低碳

**中图分类号:** TU991;TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)08-0038-07

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.005

## Application Status and Development of Robot Technology in Urban Water Industries

XU Jian\*, BAO Renbing, LEI Peishu, ZOU Lei, WAN Nianhong

(Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

**Abstract** [Objective] This paper aims to explore the current application status and future development prospects of robot technology in the urban water industry. Through systematic classification and analysis, the study examines the application effects of robots in reducing labor costs and labor intensity, summarizes the key technologies of robots, and identifies the challenges faced in current applications and future development trends. This research provides a reference for the intelligent development of the urban water industry. [Methods] Robots in the urban water industry are categorized into four major types based on their functions: sampling and water quality monitoring robots, pipeline inspection robots, patrol robots, and maintenance robots. The characteristics and application scenarios of each type of robot are briefly introduced. Additionally, the key technologies of robots are summarized from aspects such as motion and power, image and voice, communication and control, perception, operation, and comprehensive decision-making. The paper also analyzes the issues faced in current robot applications, including adaptability, reliability, stability, maintenance, and high usage costs. [Results] The study finds that various types of robots have significant application value in the urban water industry, effectively accomplishing repetitive and high-risk tasks while reducing labor costs and labor intensity. However, current robots still have deficiencies in adaptability, reliability, and stability, requiring frequent maintenance and incurring high usage costs. Future robot technology is expected to develop in the direction of better reliability and durability, more integrated functions, higher intelligence, and a focus on green and low-carbon development. [Conclusion] The application prospects of robot technology in the urban water industry

[收稿日期] 2024-05-27

[基金项目] 湖北省建设科技计划项目

[通信作者] 徐健(1993—),男,工程师,主要从事水处理科研及设计等工作,E-mail:584127062@qq.com。

are broad, but further optimization and improvement are needed. Future efforts should focus on strengthening technological research and development to enhance the adaptability, reliability, and stability of robots, and to reduce usage costs. This will better meet the needs of the urban water industry and promote its intelligent and sustainable development.

**Keywords** robot urban water industries water quality monitoring pipeline inspection inspection and maintenance green and low-carbon

在城镇水务行业中,供排水系统的运行都需要大量的人力去维护。为了提高工作效率,替代人工完成一些重复性、危险性高的工作,降低人力成本和减轻劳动强度,在城镇水务行业中出现了各种各样的机器人。机器人按照其功能来划分可以大致分为四大类:采样及水质监测类机器人、管道检测类机器人、巡检类机器人、维护类机器人。

采样及水质监测类机器人可以替代或者协助人工完成水质采样及监测工作,可以弥补人工采样测定、机械采样测定、固定位置传感器监测等几种水样采集及检测方式的缺点。管道检测类机器人则是用于各种供排水管道的检测,可避免人工监测时因产生硫化氢、一氧化碳而中毒,以及人工对小口径管道检测困难的情况。巡检类机器人被设计成代替人工进行各种巡检作业,比如管廊、厂站的巡检,实现降低事故率,故障及时反馈,达到减少人员成本投入,实现智能化、精细化管理的目标。维护类的机器人主要分为水面清洁机器人和清淤类的机器人。水面清洁机器人用于河流湖泊的水面垃圾清洁。清淤类的机器人主要用于管道以及河湖的淤泥的清理。

本文系统地梳理了目前城镇水务行业中出现的机器人,并对机器人的关键技术进行总结,辨析了目前城镇水务行业中机器人技术的应用所面临的挑战,对未来机器人技术的发展趋势进行预测,方便城镇水务行业从业者系统地了解机器人技术的发展与应用现状。

## 1 城镇水务行业机器人的类型

### 1.1 水质采样及监测类机器人

目前,在城镇水务行业水质检测通常采用人工采样测定、机械采样测定、固定位置传感器这3种方式,但这些采样方式具有危险性高、防护要求高、效率较低以及测样点固定、设备难以维护等缺点<sup>[1]</sup>。为了弥补以上3种水样采集及检测方式的缺点,各种采样及水质检测机器人应运而生,采样及水质监测类机器人分为水上采样监测采样机器人和下水采样监测机器人。

#### 1.1.1 水上采样监测机器人

水上采样机器人的外形多为船状,它上面还配备水质采样系统和水质监测系统,可完成常规或应急水质定时、定点、定量的自动采样任务。一般此类产品采样速度可达2 L/min以上,可对温度、pH、溶解氧(量程为0~20 mg/L)、COD(量程为0.15~500.00 mg/L)、氨氮(量程为0.50~1 000.00 mg/L)、浊度(量程为0~1 000 NTU)等水质指标进行在线监测,能代替人工对河流、湖泊、水库、近海等水域进行水体环境监测以及水质采样。部分产品船体内部搭载了先进的电子罗盘和全球定位系统(GPS),星基增强系统(SBAS)定位精度可达平面50 cm、垂直85 cm,能够实现自主导航,智能规划巡航路线。通过安装超声波避障传感器和高清摄像头,还可以实现自动避障、视频监控、拍照取证的功能。当船形机器人搭载了无线数传、图传通信模块时,可实现检测数据的实时传输与备份管理,确保数据的准确性与可靠性<sup>[2]</sup>。还有部分高级产品,具备失联和低电量自动返航等智能功能和配套的智慧控制平台,大幅提升其在水域环境中的操作易用性、安全性、稳定性。

#### 1.1.2 水下采样监测机器人

目前水下采样监测机器人多采用开架式,一般其防水等级需达到IP68等级,可用于海洋以及河流湖泊的监测采样。其由水下系统以及陆上控制系统组成,其耐压深度一般可达300~500 m。其中,水下系统包含操推系统、水样及泥样采集系统、定位及导航系统、监测系统、图像处理及传输系统。陆上控制系统可通过缆线或无线的方式进行通信。其中,操推系统通过安装多个水平或者垂直螺旋桨式推进器来实现机器人在水下的进退、升降、横移、横滚、转向等动作。水样及泥样采集系统通过在机器人本体内部设置储水罐和电磁阀实现,储水罐在使用前可使用真空泵抽成真空状态,当机器人行驶至目标采样点时,可通过打开储水罐的电磁阀让水样进入储水罐。部分产品还

可通过设置多个储水罐来实现机器人一次下水, 多点采样。监测系统通过水温、pH、浊度传感器可对水质进行监测。通过搭载舱外的摄像头和辅助照明模块还可以实现水下视频的实时传输。

## 1.2 管道检测类机器人

传统的管道检测方式, 需要人工通过排水管道检查井对管道进行检测维护<sup>[3]</sup>。但由于排水管道常埋于地下, 结构复杂, 且污水管道内常聚集大量黑臭污泥和硫化氢、一氧化碳等有毒气体, 部分管道管径较小, 使得人工检测管道难以进行<sup>[4]</sup>。针对供水管道市面上也出现一些压力管道检测机器人, 其可以实现不停水内窥检测, 可以精确检测并定位漏损、沉积以及管道破损。这些管道检测类机器人的出现, 使得管道检测类的工作更加的高效、安全<sup>[5]</sup>。

根据管道机器人的运动方式, 可以将其分成主动运动方式和被动运动方式。其中主动运动方式, 指的是机器人本身搭载了动力源, 其在管道中的运动可控。主动运动方式还可细分为轮式、履带式、无轮式, 通过搭载其他的设备和传感器, 还可以进行检测和维修作业<sup>[6]</sup>。

轮式管道机器人可分为车型式和支撑轮式。车型式管道机器人的车轮与马达直接相连, 外形构型类似汽车, 可在管道底部行走, 具备结构简单、运动灵活的特点。由于其行驶过程中, 主要靠自身重力提供抓地力, 因此不适用于坡度较大的管道, 容易出现车轮打滑或者上坡困难的现象。轮式管道机器人

主要适用于管径在 DN400 以上的管道。支撑轮式管道机器人的车轮通常采用 120° 对称分布的行走结构, 其车轮紧贴管道内壁, 可获得较大的摩擦力, 可在较大坡度的管道中行走。部分产品具备变径结构, 具备较好的管道变径适应性。

履带式管道机器人采用履带进行移动, 与管壁的接触面积大, 摩擦力大, 具有较好的通过能力。但由于其履带式驱动机构较为复杂, 使得机器人的尺寸一般较大, 一般适用于管径在 DN1000 以上的管道。

无轮式管道机器人又可分为螺旋式、仿生蠕动式、蛇形式。螺旋式管道机器人采用螺旋式的推进器, 可漂浮在水面上, 适合淤积及较高水位的管径在 DN600 以上的管道或者箱涵<sup>[7]</sup>。仿生蠕动式管道机器人能像蚯蚓一样通过前后支撑部分径向伸缩运动, 其驱动力大, 结构简单, 但其行动较为缓慢。蛇形式管道机器人有许多关节, 可以像蛇一样前行, 灵活度较高, 可以通过复杂的环境, 但由于其自由度较高, 操控性较差。

被动运动方式管道机器人主要为漂浮式管道机器人, 其本身无驱动装置, 只需随着管内流体流动, 压力管道检测机器人多采用此种运动方式。一般这种机器人采用高分子有机材料制成, 具备强度高、能耗低及轻量化的特点, 但其运动模式有限, 操控性一般。各类管道检测机器人外形特点及其适用性总结如表 1 所示。

表 1 各类管道检测机器人外形特点及其适用性  
Tab. 1 Appearance Properties and Applicability of Various Pipelines Inspection Robots

类别	外形特点		适用性	
主动运动式	轮式	车型式	外形构型类似汽车, 车轮与马达直接连接	
		支撑轮式	车轮紧贴管道内壁, 车轮对称分布	
	履带式	采用履带进行移动	具有较好的通过能力, 一般适用于管径在 DN1000 以上的管道	
	无轮式	螺旋驱动式	采用螺旋式的推进器移动	适合淤积及较高水位的管径在 DN600 以上的管道或者箱涵
		仿生蠕动式	能像蚯蚓一样通过前后支撑部分径向伸缩运动	驱动力大, 结构简单, 但其行动较为缓慢
	蛇形式	具有许多关节, 可以像蛇一样前行	灵活度较高, 可以通过复杂的环境, 操控性较差	
被动运动式	漂浮式	无驱动装置, 随着管内流体流动	具备高强度、轻量化、能耗低的特点, 操控性一般	

### 1.3 巡检类机器人

巡检类的机器人按其构造形式可分为轮式巡检机器人和挂轨式巡检机器人。轮式巡检机器人主要可应用于地上式的污水处理厂、给水厂以及泵站。挂轨式巡检机器人主要应用于地下式的厂站、综合管廊<sup>[8]</sup>。

#### 1.3.1 轮式巡检机器人

轮式巡检机器人多配备大行程的升降杆和高清双目云台。机身搭载的热成像仪和可见光高清双目云台可以对机组设备的拍照、红外测温、移动视频监控等,实现 30 倍的光学变焦,及 1 920×1 080 像素以上的视频分辨率。大行程的升降杆可以使机器人对不同高度的巡检目标灵活地进行监测。地上巡检机器人的系统一般由自主导航系统、无线通讯系统、运维管理系统、客户端等部分组成。自主导航系统可以使得机器人按照既定的巡检路线进行巡检,重复定位误差可小于 1 cm,续航时间可达 8 h。搭载避障雷达等传感器的机器人还能自动侦测行进路线上的障碍物,实现自动避障的功能。搭载气体传感器、温湿度传感器还可实现对周边环境的氧气、硫化氢、氨气、一氧化碳等多种气体和温、湿度进行监测。搭载声纹传感器的机器人可以对周边异常声音进行监测,还可实现前后台双向语音对讲,协助运维检修。搭载人工智能(AI)图像识别系统的机器人不仅能够对各类仪表、阀组、开关的状态读数进行识别还能对设备的外观缺陷进行监测,并通过无线通讯系统实时向控制中心传输巡检数据,如若发现异常可以及时向运维管理系统和客户端推送故障信息,以便技术人员及时处理。

#### 1.3.2 挂轨式巡检机器人

挂轨式巡检机器人多应用于加药间、泵房、综合管廊和地下式污水处理厂<sup>[9]</sup>。其主要构成为巡检机器人本体、机器人轨道、充电站、无线通信系统、智能综合管理平台系统。巡检机器人采用悬挂轨道安装方式,通过搭载红外摄像机、可见光高清摄像机、激光雷达、气体传感器可以实现水平 360°,垂直 90°全方位的设备监测、环境监测、自动停障、远程控制以及智能识别等功能。机器人轨道采用高强度合金材料制作,需要设施在建造时预埋安装。目前应用于污水处理厂的巡检机器人除了能代替人工完成常规项目的巡检,市面上出现了可以用于监测地下式生物池的曝气情况的巡检机器人。生物池是污水处

理中影响最终出水水质的核心单体,其溶解氧的控制也是影响生物池运行状况的非常重要的参数。传统的方式是通过巡检人员通过肉眼判断生物池中的气泡翻滚情况,大致判断曝气状况和是否出现曝气器损坏。但当生物池采用地下式后,生物池上设置混凝土盖板,使得巡检人员难以观察生物池内的情况。在生物池采用这种巡检机器人,需在生物池盖板的内侧预埋导轨。机器人通过预留的洞口沿着导轨,通过搭载的高清摄像头和照明设备,巡检机器人可以逐个廊道的检查曝气的状况,通过智能综合管理平台可对曝气状态进行识别分析,并自动形成报表。

### 1.4 维护类机器人

#### 1.4.1 清洁类机器人

常见的河流湖泊的水面垃圾主要有人类生活废弃物、意外事故漂浮物、地表植物覆盖层以及环境变化滋生的植物等。这些水面垃圾不仅影响美观,而且会导致水体的堵塞、使得水质恶化出现臭味。目前针对水面垃圾仍然采用人工打捞的方式。这种方式的效率低,清洁范围有限,且存在人员溺水的风险。针对水面垃圾,市面上出现了各式水面清洁机器人。水面清洁机器人的结构形式可以分为单船体式、双船体式、仿生式。双船体式水面清洁机器人在水面上行驶的平稳性好,不易晃动,部分产品可以抵抗三级风浪,船体中部形成的通道更方便垃圾的收集。单船体式结构更加灵活,可以收集双船体结构机器人无法收集的岸边垃圾,但是单次收集垃圾的容量较小,比较适合小型水域的清理,其垃圾承载量一般为 50 kg 左右。

水面清洁机器人的垃圾收集方式有带传送式、叶轮造流式、翻斗式和流体旋涡式<sup>[7]</sup>。带传送式外形类似履带,传送带转动时,垃圾会被其上的耙齿附着而被打捞入船体内;叶轮造流式则是通过叶轮转动搅起的水流将垃圾导入到船体上的垃圾翻斗中;翻斗式通过铲斗打捞水面的垃圾入垃圾收集装置中;流体旋涡式通过垃圾收集桶收集垃圾,并通过潜水泵将桶内的水排出,通过过滤网分离垃圾和水。

#### 1.4.2 清淤类机器人

清淤类机器人可分为主要用于江河湖泊的水下清淤机器人和主要用于管道清淤的管道清淤机器人<sup>[10]</sup>。水面垃圾的沉降,蓝藻、水葫芦等植物的死亡,以及淤泥中的有机物分解大量消耗水中氧气致

使鱼类大量死亡,又导致淤泥进一步地堆积。因此,在各种河流湖泊及人工水池中经常遇到水下清淤难题。水下清淤机器人按构造可以分为轮式行走式、履带行走式和加装水力推进式等。轮式行走和履带行走区别在于一个以行走轮为支撑,另一个使用橡胶材质的履带作为支撑,都可以在水底的淤泥层行走。由于在淤泥中行走的阻力较大,而且容易陷入淤泥中,部分产品会在这2种形式上加装推进器,以便提高清淤效率。此类机器人可在水深为15~30 m的水下工作,泥浆流量可达80 m<sup>3</sup>/h以上,能够自主规划清淤路线,自动完成清淤工作,其配备的多种传感器和智能控制系统,能够实时感知和反馈水下环境,实现智能化控制和操作。

## 2 城镇水务行业机器人的关键技术及挑战

### 2.1 关键技术

如图1所示,城镇水务行业机器人的关键技术可以大致分为六大类,分别是运动及动力类、图像及语音类、通信及控制类、感知类、操作类、集成类。运动及动力类技术是大部分具备运动功能机器人需具备的技术,其中机器人行走技术是针对不同的使用环境,需设计不同的行动方式,如管道机器人在坡度较小且管径较大的管道中行走时可采用轮式的运动方式,当管道坡度较大则需采用履带式或者支撑轮式。机器人供能技术则是采用各种方式为机器人提供动力,目前常采用蓄电池或电缆的方式向机器人供能。蓄电池供能的方式的优点是行动较为灵活不受线缆的束缚,缺点是续航时间短;采用电缆的方式的优点则是机器人的工作时间可较长,但缺点是其运动半径受电缆长度的影响。采用自主导航与定位的机器人则既可以通过遥控的方式运动,也可以自主规划路线移动。

机器人在管道、湖泊水下工作时,照明环境差、金属管道对信号有隔绝、杂物污渍多,传输清晰稳定的视频画面并非易事。因此,需要图像处理技术通过图像滤波技术和相关算法去除干扰,并通过高清视频传送技术利用数字信号实时传输高清视频。部分采用了AI图像识别技术的机器人,如在厂站中使用的巡检类机器人可通过该技术识别障碍物,识别各种设备仪器及其状态和读数。搭载了AI语音技术的机器人,能够识别操作者的声纹,操作者无需使用遥控器或者在电脑前操作机器人,仅需采用“对

话”这种更为自然的交互方式对机器人下达指令。

机器人在工作时需要操作者向其发送指令,机器人采集到的各种数据也需实时传输至操作者的终端,这就涉及通信及控制类的技术。机器人的无线控制技术是指通过蓝牙信号、移动信号等方式创建局域网,建立终端设备与机器人的联系,使得操作者可以控制其运动及操作。当各种水下采样机器人、清洁类的机器人在水下作业时,其通信需要克服带宽的限制、多普勒效应的干扰以及信号衰减等困难,此时需要采用水下通信技术为机器人提供可靠、稳定的水下通信系统。目前智慧化程度较高的厂站都会配备针对整个厂区的数据采集与监视控制(SCADA)控制系统平台,机器人可以采用综合平台联动技术接入厂区的平台并与其他设备进行联动,实现数据的联动展示、系统联动智能分析、报警智能处理等。

机器人感知类的技术常与其他技术联动使用,如机器人的自动避障技术在探测到障碍物后与机器人的行走技术联动实现自动避障,高温预警技术和环境气体监测技术联动则可对设备的异常高温、有毒气体扩散等事件通过综合联动技术向厂站的综合平台发送报警信息。

机器人操作类的技术与机器人功能性特点相关,采样及水质监测机器人则是通过水质监测技术和自动采样技术代替人工完成水样的采集和监测,清洁类机器人通过多种方式收集垃圾。

机器人的系统集成技术将多种技术集成在一个机器上,使得机器人可通过感知周边环境,进行自主决策,并执行相关动作,高度技术集成的机器人将更加智能化、小型化、多功能化。

### 2.2 面临的挑战

机器人技术在实际应用中仍然面临不少的挑战,首先是适应性问题,水处理设施的工作环境复杂多变,如外部环境、温度、湿度、水质等因素的变化都可能影响机器人的正常运行。比如管道检测类机器人往往设计成适应某种坡度或管径的管道,但在实际的地下管网中,坡度、管径、连接方式往往是复杂多变的。因此,如何设计出适应各种环境的机器人是一个重要的挑战。其次,目前市面上的机器人的可靠性和准确性依然有所欠缺,比如部分机器人图像识别不够准确,出现识别错误或者不识别的现象;部分水质监测机器人的水质监测数据与人工化验数

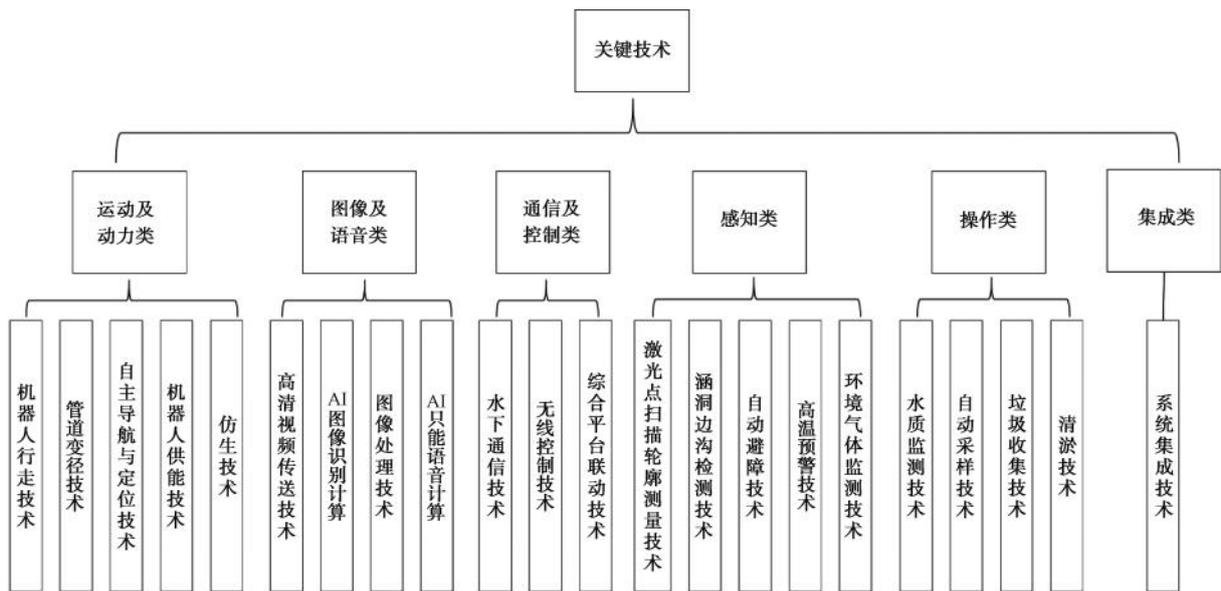


图 1 城镇水务行业机器人的关键技术

Fig. 1 Key Technologies of Robots in Urban Water Industries

据仍然会存在一定的偏差,需经常性进行校准;还有部分机器人在地下的工作环境中出现信号丢失、无法控制的现象。再者,机器人的维护保养也是限制其发展的重要原因,当机器人长期运行在潮湿、腐蚀的环境中,对机器人的耐久性和抗腐蚀性提出了很高要求,一些机器人往往在出厂时拥有较好的性能,但在使用一段时间后,则会出现各种各样的故障,影响正常的生产工作。最后,机器人的成本效益则是限制其应用最重要的原因,尽管在城镇水务行业中机器人技术能够提高效率和质量,但其高昂的初始投资和运维成本可能会让一些企业望而却步。城镇水务行业中的机器人往往针对专业场景研发,其受众有限,无法通过大规模的销量来摊平初期的研发和制造成本。因此,如何在保证机器人性能的同时降低其成本也是一个需要解决的问题。

### 3 未来的发展趋势

纵观机器人技术目前在城镇水务行业的发展和应用,未来的机器人技术发展方向和技术进步点主要有以下几点。

(1)可靠性和耐用性将更好。考虑到水处理环境的复杂性,未来的水处理机器人将解决目前机器人遇到的各种问题,将更加注重提高设备的可靠性和耐用性,以减少维护和更换的成本,切实提高工作效率和质量,使得企业和个人更愿意使用机器人代替人工。借助 5 G 和物联网技术,未来的水处理机

器人可以实现更加稳定的远程控制和实时监控,这将极大地提高水处理的效率和安全性。

(2)多功能的集成。未来的水处理机器人将更加模块化和多功能化,可以集成多种传感器和执行装置,例如将水质监测和水面清洁的功能集成,从而实现一机多用,提高机器人的利用率。

(3)智能化的程度越来越高。随着人工智能和深度学习的发展,机器人的自主导航和感知能力将进一步增强。这意味着机器人可以更好地理解和适应复杂的水处理环境,提高操作效率和准确性。随着大数据和云计算技术的发展,未来的水处理机器人还将能够收集和分析大量的水质数据,从而提供更精准的水质管理和预测服务。

(4)绿色能源将成为使用趋势。为了减少对环境的影响,未来的水处理机器人将更加注重使用绿色可再生能源供电,例如太阳能、风能等,以实现可持续发展。

### 4 结束语

机器人技术被广泛应用于城镇水务行业的各个环节,但由于现阶段的机器人技术尚未成熟、可靠性和稳定性较差、使用成本过高等诸多原因,使得城镇水务行业中机器人技术未能大规模地代替人工。未来的水处理机器人将更加智能化、模块化、绿色化,并且能够更好地适应复杂的环境,降低运营成本。同时更加注重环保和可持续发展,使得机器人能真

正地代替人工完成各种复杂、危险、工作量大的工作,助力城镇水务行业迈向智能化、智慧化。

### 参考文献

- [ 1 ] 刘雅慧. 排水检测行业中水质检测的方法分析[J]. 山西化工, 2023, 43(12): 77-79.  
LIU Y H. Analysis of water quality testing methods in the drainage testing industry [J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(12): 77-79.
- [ 2 ] 覃建业, 喻浩, 何仁杰, 等. 基于无线通信的水下水质检测机器人系统设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(20): 30-34.  
QIN J Y, YU H, HE R J, et al. Design of underwater water quality detection robot system based on wireless communication [J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(20): 30-34.
- [ 3 ] 杨明霞. 城市排水管道检测机器人研究进展[J]. 广东建材, 2023, 39(8): 132-134.  
YANG M X. Research progress on urban drainage pipeline detection robots [J]. Guangdong Building Materials, 2023, 39(8): 132-134.
- [ 4 ] 朱贵兵, 李俊, 苏善昭. 管内检测机器人在城镇供水管网评估中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(12): 183-190.  
ZHU G B, LI J, SU S Z. The application of in pipe inspection robots in urban water supply network evaluation [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(12): 183-190.
- [ 5 ] 吴迪, 张云超, 崔苗苗, 等. 排水管道检测机器人研究进展[J]. 智能城市, 2023, 9(4): 19-22.  
WU D, ZHANG Y C, CUI M M, et al. Research progress on drainage pipeline inspection robots [J]. Intelligent City, 2023, 9(4): 19-22.
- [ 6 ] 闫宏伟, 李健, 刘翼, 等. 直轮驱动式自适应管道机器人通过性能研究[J]. 机械设计与制造, 2023(5): 300-304.  
YAN H W, LI J, LIU Y, et al. Research on the performance of a straight wheel driven adaptive pipeline robot [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2023(5): 300-304.
- [ 7 ] 刘瑾, 高增亮, 钱明星, 等. 水面垃圾清理设备的研究现状及发展趋势[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35(5): 82-84, 97.  
LIU J, GAO Z L, QIAN M X, etc. Development of surface waste disposal equipment [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2022, 35(5): 82-84, 97.
- [ 8 ] 朱俊卿, 魏海娟, 陈祺炜, 等. 封闭污水处理环境下无人巡检装置开发和试验[J]. 电气自动化, 2022, 44(5): 112-114, 118.  
ZHU J Q, WEI H J, CHEN Q W, et al. Development and testing of unmanned inspection devices in enclosed sewage treatment environments [J]. Electrical Automation, 2022, 44(5): 112-114, 118.
- [ 9 ] 刘尚珺. 无线巡检机器人在综合管廊的应用与研究[J]. 设备管理与维修, 2023(22): 26-28.  
LIU S J. Application and research of wireless inspection robots in comprehensive pipe galleries [J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(22): 26-28.
- [ 10 ] 石红梅, 侯伟. 管道检测机器人关键技术研究进展[J]. 机械制造, 2022, 60(7): 88-90.  
SHI H M, HOU W. Research progress of key technologies of pipeline detection robot [J]. Machinery, 2022, 60(7): 88-90.

(上接第 29 页)

- DUAN L, LI S L, XING F. Technical research progress of controlling reverse solute flux and membrane fouling in osmotic microbial fuel cell [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(3): 1150-1160.
- [ 48 ] 王昭云. 垃圾渗滤液对正渗透微生物燃料电池运行性能的研究[D]. 太原: 山西师范大学, 2019.  
WANG Z Y. Study on the performance of landfill leachate for osmosis microbial fuel cell [D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2019.
- [ 49 ] LIU Y, HAN M Z, LI F M, et al. Performance and mechanism of SMX removal by an electrolysis-integrated ecological floating bed at low temperatures: A new perspective of plant activity, iron plaque, and microbial functions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 463: 132802. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132802.
- [ 50 ] 张春秋, 易夏文, 王靖翔, 等. 连续流正渗透微生物燃料电池的运行性能研究[J]. 膜科学与技术, 2017, 37(6): 83-89.  
ZHANG C Q, YI X W, WANG J X, et al. Performance of a novel osmotic microbial fuel cell in a continuous operation [J]. Membrane Science and Technology, 2017, 37(6): 83-89.
- [ 51 ] JAIN A, ZOU S, HE Z. Chapter 2-Integration of membranes into bioelectrochemical systems for enhanced treatment performance [M]//BASILE A, COMITE A. Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes. Amsterdam: Elsevier, 2020: 35-51.