

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.02.017

# 排水管道不停运的数字化服务成套技术实现和示范

覃新元, 雷宗辉, 陈俊, 张隆曦  
(东莞市水务集团管网有限公司, 广东 东莞 523000)

**摘要:** 近年来,东莞市地下排水管网因存在无法停运作业、管线不明、雨污混接等情况,导致普通市政工程及市面上CCTV机器人无法检测管网情况。因此,特开展雨污水管道带水作业状态下的数字化服务,采用水下仿生学、水下探测思路,克服了设备在水下的位姿调整、定深潜航等难点。新研发了多种适应满水、带压、高流速情况下的智能化设备,解决了带水检测与评估、管道走向定位、水质传感器动态数据获取等数字化服务成套技术问题,并建立了示范镇的管网运维平台,涵盖基础数据的入库和动态数据的获取、分析、预警、调度等功能,极大地改善了工作效率,提高了快速响应和现场处置能力。

**关键词:** 数字化服务; 智能化设备; 定深潜航; 动态数据获取; 管网运维

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)02-0094-06

## Complete Set of Digital Service Technology and Demonstration for Continuous Operation of Drainage Pipelines

QIN Xin-yuan, LEI Zong-hui, CHEN Jun, ZHANG Long-xi  
(Dongguan Water Group Piping Network Co. Ltd., Dongguan 523000, China)

**Abstract:** In recent years, the underground drainage pipe network in Dongguan cannot be detected by ordinary municipal engineering and CCTV robot on the market to stop operation, due to the unknown pipelines, as well as mixed storm and sewage. Therefore, the digital service of stormwater and sewage pipeline without shutdown is specially carried out, and the ideas of underwater bionics and detection are adopted to overcome the difficulties such as underwater pose adjustment and fixed depth diving of equipment. A variety of intelligent equipment suitable for full water, pressure and high flow rate have been newly developed, which solves the complete set of digital service technical problems such as water detection and evaluation, pipeline trend positioning, dynamic data acquisition of water quality sensor. The pipe network operation and maintenance platform of the demonstration town was set up, which covers the basic data warehousing, dynamic data acquisition, analysis, early warning, dispatching, etc. It greatly improves the work efficiency, rapid response and on-site disposal capabilities.

**Key words:** digital service; intelligent equipment; fixed depth diving; dynamic data acquisition; pipe network operation and maintenance

### 1 管网不停运状态下的智能化检测设备

市政雨污水管网,特别是污水管网是城市的重要基础设施,承担着收集城市污水并汇运至污水处理厂的功能,一旦发生结构性病害,会导致路面塌

陷、影响污水处理厂的经济效益等不良后果。若要不影响管道日常收送水及满水状态,则需进行不停运状态下的检测。通过智能化机器人对管道进行检测并评估管道缺陷(功能性、结构性缺陷,特殊结构

及附属物),以及水质、水量、淤堵等情况就显得格外重要<sup>[1]</sup>。智能化设备可进入管道内部进行空间定位、地面标绘,形成精准的GPS或GIS信息,进一步完善管网信息数据<sup>[2]</sup>,弄清检查井位置缺失、管道走向不明等情况,形成管道的真实、客观、精准数据。

结合光谱分析的水质传感器能够进行快速鉴别与污染源溯源:快速移动实现对沉井或管道内部接入的支管性质的鉴别,在最小150 mm直径的支管中巡检水质,确定是否为非法接入及污染源管道,结合空间定位技术,实现隐蔽污染源溯源,追踪污染源主体。

### 1.1 满水状态下的仿生“龟”

由于管道内为满水状态,待检管道基本都在水面以下,需要机器人具备潜水定深功能<sup>[3-4]</sup>,因此仿生“龟”(见图1)前后各配置两个上下推进器,并配置水压传感器反馈当前机器人所处的深度,形成闭环系统。左右各一个推进器,完成左转、右转、前进的功能,并可在逆水流情况下形成稳定的悬浮、定深功能。

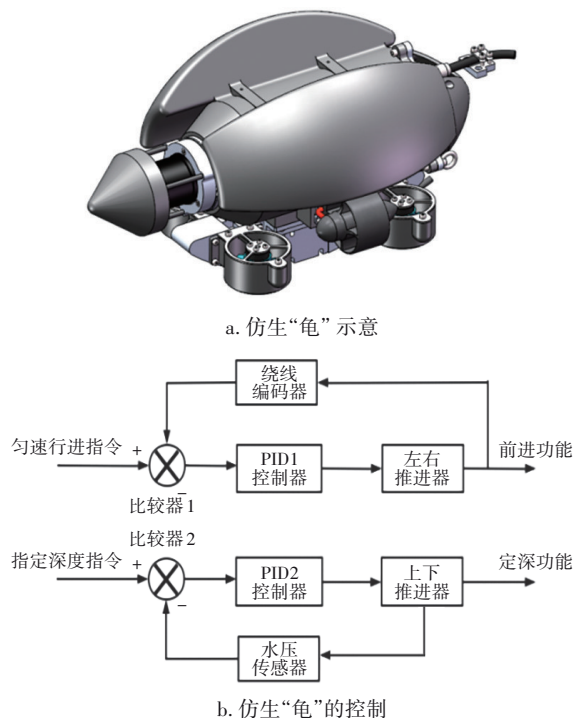


图1 仿生“龟”及其控制流程

Fig.1 Schematic diagram of bionic “turtle” and control process

仿生“龟”可实时获取满水管道的声呐数据,根据声呐采集的断面图和时间轴,形成三维管道图。

### 1.2 非满水状态下的螺旋侦察机器人

螺旋侦察机器人能在非满水环境下的管道、暗渠、河道中控制行进,实时获取有水管道的地上、水中、水底的视频图像及声呐图像。螺旋机器人配备有云台摄像头,也可以携带声呐设备以及多种传感器融合技术(MSI),可用于排水条件不理想的城市雨污水管道检测,解决非满水环境下,市面上的管道机器人(CCTV)无法进行管道检测的难题。许多老旧的城市雨污水管道,因为初始的设计规划缺陷,导致不能或无法轻易地排空管道内的水、进行常规的CCTV检测。本设备的研发,能够有效地解决上述问题,提升城市地下管道的检测和维护工作品质。

螺旋侦察机器人示意及水上、水下采集成果如图2所示。

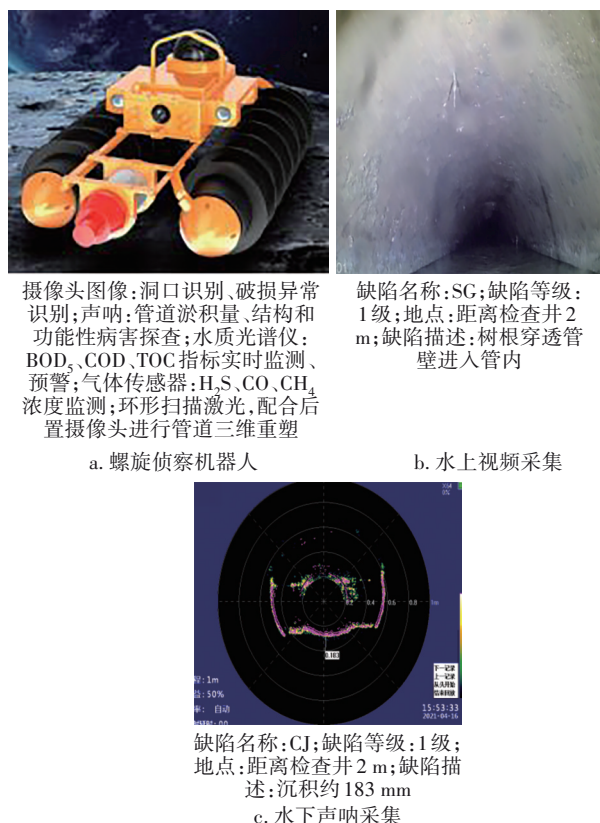


图2 螺旋侦察机器人及水上、水下采集成果

Fig.2 Spiral reconnaissance robot and acquisition results on water and underwater

### 1.3 全环境下的履带式侦察机器人

侦察机器人可以提供各种管道类的爬行巡检,钢管、铜管、PVC管、波纹管等各类管材均可,管道内部无水、半满水、全水均适用,雨水、污水均可。

机器人本体可以携带各类附件设备,包括声呐、摄像头等,能够在长距离和大直径范围内工作。这种侦察机器人可以携带高清晰度的平移变焦相机、检索工具、激光测量和轮廓系统、声呐和其他无损检测(NDT)传感器、机械波等各类辅材。

## 2 管网数字化的数据采集

管网数字化不仅靠管内CCTV的采集,还需进行管道固有属性的测绘和动态数据的获取。固有属性包括:GPS信息、权属信息、管道直径、标高等。动态数据包括:不同位置沉积物的厚度(作为清淤造价依据)、气体的成分(涉及安全问题)、水质(电导率、COD、TOC、pH、NH<sub>3</sub>等)、水体的属性(流量、流速、液位高度等)、管道走向等。

### 2.1 沉积物的测量

雨污水管道,包括暗渠、箱涵等存在着长期没有运行、固体淤积物较多等问题,在运行前需要检测是否淤积物过多、淤积物容量、高度、总体积等,才能落实具体的清淤工作,保证管道的流通。机器人本体携带测量杆,其与机器人端通过旋转编码器链接,另一端随着沉积物的高度上下摆动。管道沉积物测量方法如图3所示。

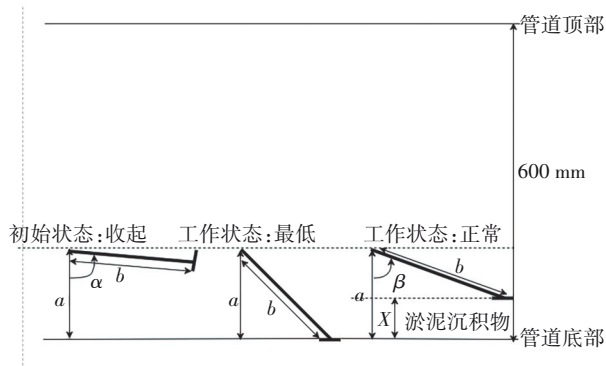


图3 管道沉积物的测量方法示意

Fig.3 Schematic diagram of measurement method of pipeline sediment

角度的获取:来源于编码器的一圈500线。已知: $a$ 为机器人测量单元与管道底部距离; $b$ 为测量杆长度; $\angle\alpha$ 为测量杆收起状态与垂直方向夹角,可以测量获取; $\angle\beta$ 为有淤泥沉积物的测量杆与垂直方向夹角,可以通过编码器正向旋转后经过简单计算得到; $X$ 为淤泥的厚度, $X=a-b\times\cos\beta$ , $\angle\beta=\angle\alpha-\frac{n}{500}\times 360^\circ$ , $n$ 为正向旋转的脉冲数,淤泥高度决定着 $n$ 进行增减变化。其中: $a$ 、 $b$ 、 $\angle\alpha$ 三个量是机器人自身参

数,需要配置进去。当编码器往下旋转一个脉冲时,可以达到精度为3mm的测淤厚度。

### 2.2 气体环境检测

排水管道内成分复杂、废水性质差异大,可能存在蛋白质、碳水化合物、油脂、有机酸等有机化合物。污水中的有机物在下水道、化粪池等特殊环境中受微生物作用的影响而分解,最终产物是CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、CO、H<sub>2</sub>S。气体传感器模组可实时监测管道中有毒有害气体的浓度,当管道内气体含量超过预定的警戒值时会通过灯光及报警的形式提醒工作人员,因此该气体传感器模组的设置能避免因管道内有毒有害、易燃易爆气体对人身及管道设施造成危害。

### 2.3 水体环境检测

水质检测原理:绝大多数有机化合物都会吸收紫外光,紫外吸收光谱曲线的形状能间接反映水体中有机污染物COD、TOC、BOD<sub>5</sub>等指标参数值的浓度大小。采用最新第三代光源技术及全新探测系统,使得产品集成度更高、体积更小,更小的体积将带来更高的稳定性、更低的功耗、更快速的响应等诸多优点。

水体环境检测技术路线见图4。

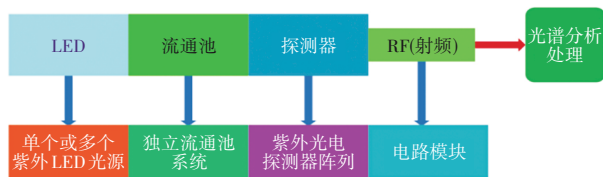


图4 水体环境检测技术路线

Fig.4 Technical route of water environment detection

### 2.4 管道病害分析

激光图像提取在提取激光线径的过程中,为降低算法的复杂度,需要进行图像的处理,提取光条图像。常见的图像提取算法有差影法、边缘检测法、阈值分割法、区域分割法等。差影法算法步骤:①从已经滤波的图像序列中提取一帧无激光线的背景图像,记为G;②提取图像序列中相邻的包含激光线的两帧图像,分别记为I1和I2;③将包含激光线的两帧图像取平均,即 $I=(I1+I2)/2$ ;④根据差影法,将I与G相减,获取激光光条图像 $S=I-G$ 。此算法需要环形激光配合频闪,达到有无激光线差异图像的效果。

管道病害分析效果如图5所示。



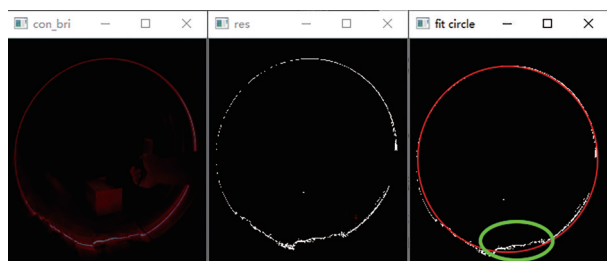


图5 管道病害分析效果

Fig.5 Analysis effect of pipeline diseases

## 2.5 管线走向、埋深

在空间定位技术方面,采用机械波传感器的方式,发射一定波段(512 Hz、8 K)的机械波,该传感器携带在机器人设备上,地面工程师手持接收设备,可以准确地接收到机械波产生的球形波,并通过四步法,即找到峰值信号、确定线的方向、穿过空图像圆、确定深度,就可以非常准确地测绘出管道走向、埋深等数据。

操作示意如图6所示。

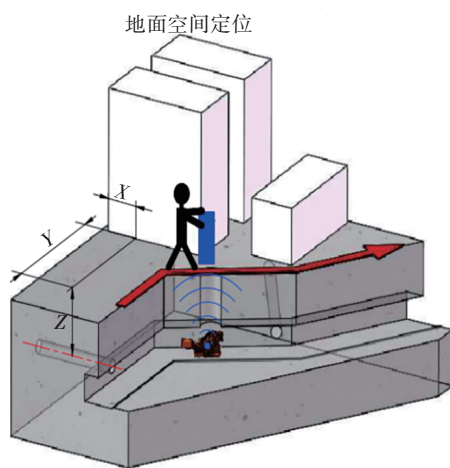


图6 机械波操作示意

Fig.6 Schematic diagram of mechanical wave operation

## 3 管网运维的实现

### 3.1 动态档案中心

系统提供了GIS化的管网数字档案功能,可在地图上以各种条件检索搜索和呈现管道、管井、传感器、泵站等业务对象信息。本模块主要功能有:GIS功能,显示各种业务图层,具备地理空间关系(包含、被包含、相交等)检索各种业务对象,以及地图漫游、测距、测面积、拾取坐标、视觉飞行等功能;属性查询,根据各种业务对象属性,查询管道、管井、传感器、工厂、重点POI等业务对象信息;施工历史查询,以管网施工单类型(例如勘察单、巡检单、

清障单等)、施工时间、工作人员、验收情况等为条件,查询各种业务对象信息,并在地图上显示;故障历史查询,以故障类型(例如破损、错位、沉降、预计、环境指数超标等)、发生时间、故障解决情况、负责人、故障描述关键字等)为条件,查询各种业务对象信息,并在地图上展示;业务对象详情展示,在地图上选择某个业务对象后(例如某个管井),展示其当前属性、图片、视频、三维模型、历史属性、详情信息,以及历史施工信息、历史障碍信息。

### 3.2 工程中心

工程中心是对管网实体及其历史施工信息、异常、历史异常进行查询、浏览、统计分析,可以据此了解管道全生命周期的状态,也可以对远程机器人进行实时控制,操作机器人的前进、后退、越障等功能,包括机器人携带的传感器采集数据上传,并能获取机器人的状态和历史采集数据等,达到远程操控的目的。

### 3.3 任务中心

本系统在管道机器人巡检过程中,将机器人在地图上管道内的动态位置、虚拟成像区、直播视频进行视觉同步。在管道巡检过程中,机器人不断通过搭载的各种传感器发送行进距离、“点云”、环境参数值到本系统云端服务器,云端服务器根据这些数据进行GIS坐标绑定、虚拟成像数据处理、环境异常数据生成等计算,最终推送至终端浏览器进行图形化展现。

### 3.4 订单中心

订单中心是管网运维人员的工作界面。本系统将管网运营日常工作的方方面面(勘察、巡检、清障、养护、环境异常解决、基础信息维护等)通过流程化的订单系统全部管理起来。涉及的流程覆盖面广:订单类型主要有管网勘察订单、管道巡检订单、管网清障订单、环境异常解决单、信息维护单、项目工程单、项目竞标单等;涉及的环节覆盖面广:流程环节主要有施工计划制定、施工作业、指派部门、指派人员、评价验收、项目汇总、工程结算等;向导式界面录入信息:通过向导式界面分步骤录入施工信息。

## 4 重点镇街示范

### 4.1 东城街道管道走向示范

东城街道W1检查井收集多处污水并汇入,但

是W1往下游管道走向,管内状态不明,因此需要排查,在W1检查井放置智能化设备,携带声呐和机械波空间定位技术,并进行走向定位和地面标绘及测深。W1往下游整体描述如下:第一段6 m左右,为直径1 000 mm圆管,其上部变形,底部有少量淤积。第二段26 m左右,存在疑似高100 cm、宽65~72 cm的暗渠(小箱涵)代替管道排水功能。第三段28 m左右,距W1检查井32~60 m,为直径600~700 mm圆管,因为挤压而变形严重。

东城街道的管道示意图7。

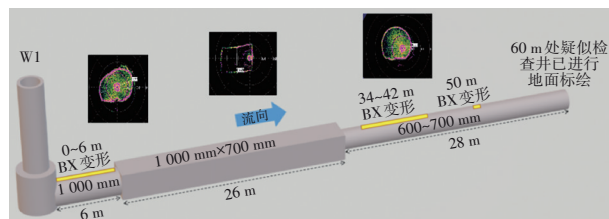


图7 东城街道管道示意

Fig.7 Schematic diagram of Dongcheng Street pipeline

空间定位与地面标绘步骤情况如下:智能化机器人在管道内部采集声呐数据和发射机械波,采集设备在地面上实时定位,并绘制走向图;当发现异常时,定位设备定位到管道异常起点,操作人员做好标绘,当异常结束时,做好标绘,并做好埋深(标高)的测定,将开挖点位和造价依据提供给施工队伍使用。

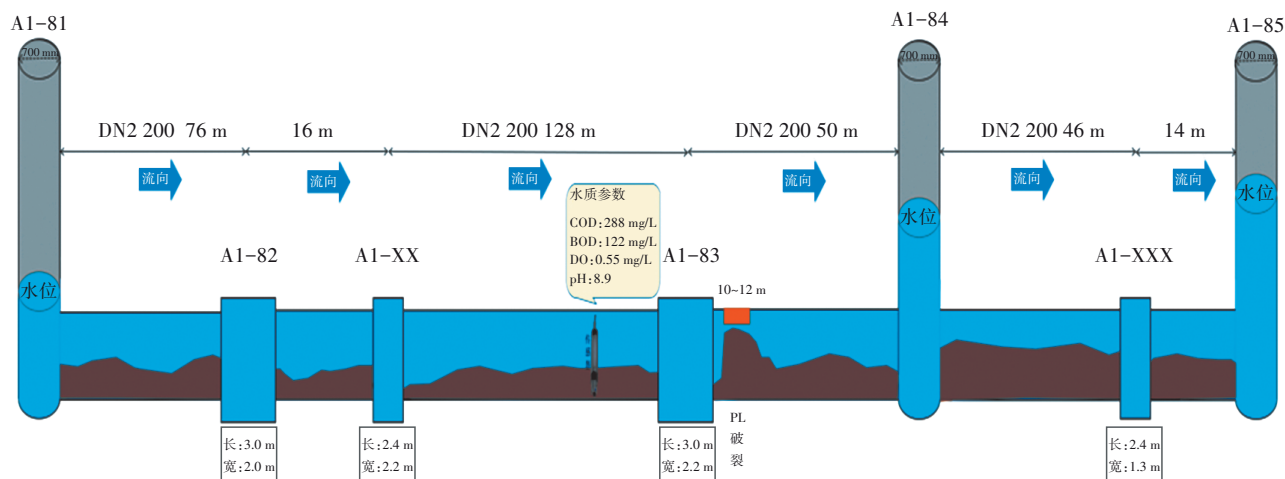


图9 常平镇管道示意

Fig.9 Pipeline diagram of Changping Town

由于管道建设久远,管道走向及埋设具体位置都是未知数,仅仅知道A1-81和A1-84检查井,因此整个A1-81~A1-85管道排查就有几大难点:①污水

发现暗渠的实施过程见图8。



图8 发现暗渠的实施过程

Fig.8 Implementation process of underground channel discovery

## 4.2 常平镇塌陷点排查示范

东莞市常平镇进污水处理厂前约60 m处的直径2 200 mm的玻璃钢夹砂管破损,由于埋深约11 m,破损后污水溢出带走管道上沿沙土和泥,导致承载力不够,引起塌陷。塌陷点正上方又是垃圾回填地,导致污水处理量从 $9.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 减少至 $6.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,直接影响了污水处理厂的经济效益和整个管线安全。由于这条管线埋深大、水流急,需要在破损处上下管线点、管线段整体排查,才能有针对性地治理解决。整个污水处理厂进水管线为:A1-81(河流边)、A1-82、A1-83、A1-84~A1-85(灌木林中),共计300 m左右,如图9所示。

量大,无法导排,暂不能停运,必须带水作业。②埋深大,需找出A1-82、A1-83检查井的位置。③A1-81~A1-85近300 m,需要智能化设备具备长距离排

查、高流速环境下的实施能力。

通过研发的仿生“龟”设备,携带声呐和机械波、水质传感器,在A1-81放置机器人完成定深潜航、自主巡航、前进越障功能,一直排查至塌陷点,机械波实时定位,确保管线的路径,通过声呐的判读获知管道内的病害以及A1-82、A1-83检查井的位置。

在排查过程中,意外发现其还有转接井室等特殊附属物。

经排查,此段管线因为过河,A1-82、A1-83均为暗井,管线存在两段转接井室,分别位于A1-82与A1-83之间的草坪中。A1-84~A1-85之间存在转接井室,位于树林中。

整段管线只有A1-83~A1-84存在管道破裂现象,其余管线有淤积等功能性病害,因此只需整治塌陷点处管线即可,大大节省了资金,加快了工作进度。

## 5 结论

通过此次示范项目建设,摸清了东莞市具有典型特点的在役污水重力管网、压力管网、污水管支管接入、水体污染指标、实际运行状况等,为后期的管道健康运行、污染源治理、排污口整治、水体指标的动态监测、塌陷道路的预防、内涝的治理等提供了科学依据。同时,完成了成果的数字化,建立了面向管道内部及配套管道指标监测的实时和动态的监控、预警、调度系统,能够及时发现污染物混排、偷排等行为,堵死非法排污通道。实践证明,通过系统建设实现管道的长效管控机制,是提升城市品质、改善城市环境、保障东莞市城市基础设施安全的重要且有效方式。

## 参考文献:

- [1] 周景,程建远,蒋羲,等. 管道电位探测技术用于城市暗涵排口溯源[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 142-145.  
ZHOU Jing, CHENG Jianyuan, JIANG Xi, *et al.* Application of pipeline potential detection technology in tracing the source of urban culvert outlet [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 142-145 (in Chinese).
- [2] 赵印,姜涛,陈兵. 智慧城市排水管网云服务系统设计与实现[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 99-103.  
ZHAO Yin, JIANG Tao, CHEN Bing. Design and implementation of cloud management system for smart city drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5): 99-103 (in Chinese).
- [3] 周超,曹志强,王硕,等. 仿生机器鱼俯仰与深度控制方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(9): 1215-1218.  
ZHOU Chao, CAO Zhiqiang, WANG Shuo, *et al.* Study on the pitching and depth control of biomimetic robot fish [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9): 1215-1218 (in Chinese).
- [4] WEI Q P, WANG S, DONG X, *et al.* Design and kinetic analysis of a biomimetic underwater vehicle with two undulating long-fins [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(8): 1330-1338.

作者简介:覃新元(1967-),男,湖南常德人,大学本科,高级工程师,执行董事,主要从事建筑工程管理和市政给排水技术管理工作。

E-mail: 764097898@qq.com

收稿日期: 2021-12-21

修回日期: 2022-01-04

(编辑:衣春敏)

全面推行河长制湖长制,维护河湖健康生命