

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.13.002

# 基于浓度梯度算法控制的自动寻污船应用于暗管排查

杨帆<sup>1</sup>, 杨喆<sup>1</sup>, 胡林涛<sup>2</sup>, 郭子瑜<sup>3</sup>, 汪达<sup>1</sup>, 宋爽<sup>1</sup>,  
马军<sup>4</sup>

(1. 浙江工业大学环境学院 浙江省工业污染微生物控制技术重点实验室, 浙江 杭州 310032; 2. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310032; 3. 浙江工业大学 设计与建筑学院, 浙江 杭州 310032; 4. 哈尔滨工业大学环境学院 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 针对我国水域潜在的暗管偷排漏排水问题,设计了一款自动寻污水质监测船。船体搭载监测模块、采样模块、自动寻污方向控制模块、自动避障模块以及动力系统,可实时获取电导率、pH、氨氮、总磷等水质监测数据。行船方向控制基于自行编写的浓度梯度算法,可在指定水域范围内自动搜寻偷排暗管等水质指标异常区域并记录监测数据,与定位坐标一并传输储存至云平台。船体搭载的采样模块可自动采集异常水样用于进一步分析,为暗管排查固定证据。小船的自动寻污方向控制、区域巡航及自动采样等功能在多处湿地河道内完成测试验证。与现有水质监测船相比,其具有自动寻污、全天巡查、安全机动、节能降耗等优势,可有效排查污水偷排漏排水问题。

**关键词:** 水质监测; 无人船; 浓度梯度算法; 自动寻污; 偷排

**中图分类号:** TU992 **文件标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)13-0008-07

## Application of Automatic Sewage-seeking Ship Controlled by Concentration Gradient Algorithm in Concealed Pipe Inspection

YANG Fan<sup>1</sup>, YANG Zhe<sup>1</sup>, HU Lin-tao<sup>2</sup>, GUO Zi-yu<sup>3</sup>, WANG Da<sup>1</sup>, SONG Shuang<sup>1</sup>,  
MA Jun<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Microbial Technology for Industrial Pollution Control of Zhejiang Province, College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 3. School of Design and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 4. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** Aiming at the potential illegal discharge or sewer leak, a water quality monitoring ship was designed which can automatically seek wastewater discharge. The automatic sewage-seeking ship is equipped with monitoring module, sampling module, automatic sewage-seeking direction control module, automatic obstacle avoidance remote control module and electric drive system, and can obtain real-time water quality monitoring data such as conductivity, pH, ammonia nitrogen, and total phosphorus. The

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22076168、52000158); 浙江省自然科学基金青年基金资助项目(LQ21E080011)  
通信作者: 汪达 E-mail: wangda@zjut.edu.cn

movement of the ship is controlled based on a self-developed concentration gradient algorithm, which can automatically search the exception water quality point within a designated area such as concealed pipe then record and store the monitoring data to the cloud platform together with the positioning coordinates. Furthermore, the equipped sampling module can automatically collect water sample for further analysis and fix evidences for concealed pipe searching. The functions of the boat's automatic contamination direction control, regional cruise and automatic sampling have been tested and verified in many wetland rivers. Compared with the existing water quality monitoring ships, it has the advantages of automatic pollution search, all-day inspection, safe maneuvering, energy saving and low consumption, etc., and is effective at preventing illegal discharge or sewer leak.

**Key words:** water quality monitoring; unmanned ship; concentration gradient algorithm; automatically contamination searching; illegal discharge

水环境监测是水环境安全保护的基础工作,更是水环境生态管理的“顶梁柱”<sup>[1]</sup>。对于水环境生态治理来说,水质监测数据是客观评价环境质量状况、反映污染治理成效、实施环境管理与决策的基本依据<sup>[2]</sup>。

然而现有的水质监测手段仍存在部分漏洞,让不法分子有机可乘<sup>[3]</sup>。2017年环境保护部向媒体通报:各地自2017年7月执行《环境保护法》配套办法以来,已查处偷排漏排污水案件多达20 631起。仅2016年,浙江省通报第五批环境违法典型案件,在新公布的11起典型案件中,水污染案件数量最多,共9起<sup>[4]</sup>。其中,有3家企业因重金属废水超标排放受到严惩,5名涉案人员被刑拘,例如海宁某铜装饰工程有限公司表面处理车间的清洗废水经雨水管直排外环境,废水总铜超标3倍以上<sup>[5]</sup>。从历年查处的偷排污水案件看,偷排企业往往设有污水排放暗管,位置隐蔽,环境监察人员一般很难用肉眼发现,检查难度极大。且不法企业多选择在雨天、深夜等人工不易巡查的时间段进行偷排,作案时间极不固定<sup>[6-7]</sup>。此外,偷排者警惕性极高,安装监控或采取专人盯梢躲避检查人员的方式屡见不鲜,反侦察能力极强。仅靠定点监测和人工巡查满足目前的监管需求仍有较大难度,遏制污水偷排漏排仍需有效手段<sup>[8-9]</sup>。

相较于传统人工巡查,基于无人船的移动监测在应用方面具有诸多优势,例如更低的操作门槛,更低的运维成本,更广泛的应用领域,更稳定的运行工况,更高的安全性与精确性等,因此具有广阔的市场前景。无人船可替代采样员至指定水域采

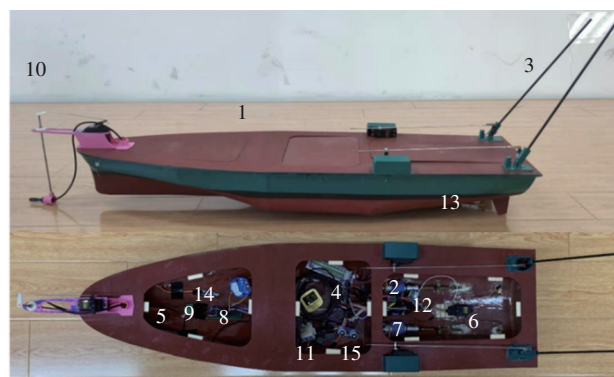
集水样,具有实时在线监测、定位精确等优势,是未来水环境移动监测的最优选择之一。然而现有无人船水质监测方案存在以下问题:①部分无人监测船仍采用人工遥控发送航行和采样指令,需要人员跟随且通信距离短,多点采集水样时遥控操作繁琐,工作量较大,不能实现智能化多点采样;②无人监测船巡航采样需要提前设置采样路径,操作人员在路径规划和采样点选择方面必须具有较强的专业性,且无法准确预测水质异常区域;③开放水域的水体环境复杂,传统无人监测船在其中航行时易被水草缠绕或遭遇暗礁搁浅,无法靠近岸线浅滩完成监测采样工作。由此可知,上述监测方式对于较隐蔽的暗管和水质异常区域均不具备自动搜寻定位能力。

为此,设计并建造了一艘自动巡航无人驾驶船(下称自动寻污船),它搭载水质参数监测装置并配套远程服务监控平台,以船为载体实现智能化移动监测,满足水污染监测需求。在动力、控制、监测模块配合协作下,自动寻污船运用浓度梯度算法,对非法排污暗管进行精准定位,并自动采集污染源附近水样,可极大提升排查工作的效率和准确性,解决了传统污染源排查的系列难点问题,为专项行动提供精确的污染源数据参考,为执法提供有力证据支撑<sup>[10]</sup>。

## 1 材料和方法

### 1.1 船体设计

自动寻污船由玻纤船体、监测采样模块、自动寻污方向控制模块、自动避障远控模块以及电驱动力设备组成,船体成品见图1。



1.船体 2.直流电机 3.简易龙门吊 4.主机 5.接线 6.舵机 7.电子调速器 8.信号转换器 9.水质监测器 10.一体化监测探头 11.信号接收器 12. GPS 13.螺旋桨 14.红外传感器 15.超声波测距模块

图1 自动寻污船的侧视和俯视图

Fig.1 Side view and top view of the finished automatic sewage-seeking ship

由图1可知,船体由船壳、龙骨和甲板组成。船壳由玻璃钢翻模制作手法打造一体成型,可承受10 kg以上载重。船首甲板搭载一体式倾旋探头,可对船体不同方向水源进行快速检测。探头支架采用3D打印技术制作,保证整体强度以及安装精确度。探头伸出船首15 cm,可防止水浪对探头数据进行干扰。船尾甲板安装有龙门吊式结构用于采集水样,整体开合角度达90°,可防止取样装置在航行过程中接触水源。

监测采样模块包括一体化监测探头、水质检测器和采样龙门吊装置<sup>[11]</sup>。水质监测器以Cortex-M4作为主芯片,可实时监测NH<sub>3</sub>-N、pH、COD、BOD、TOC、TDS、TP共7种水质指标数据,各指标监测量程和精度见表1。此外,小船也可以通过更换不同水质监测探头实现监测其他水质指标(如DO)或提高某些监测指标监测精度的功能。

表1 一体化监测探头监测参数量程与精度

Tab.1 Parameter range and accuracy of the integrated monitoring probe mg·L<sup>-1</sup>

项目	NH <sub>3</sub> -N	COD	BOD	TOC	TDS	TP
量程	0.1 ~ 129	0 ~ 800	0 ~ 500	0 ~ 500	0 ~ 500	0 ~ 20
精度	0.001	1	0.1	0.01	0.1	0.01

自动寻污方向控制模块包含STM32芯片、390有刷电机、480A直流调速器、MG955、SG-5010舵机。STM32芯片通过实时传输数据搭建输出为两路PWM波的自寻污染源算法模型,调整占空比用以分别控制直流电机和舵机,实现船体自动前进与

转向,实现自动寻污<sup>[12]</sup>。

在自动寻污过程中,STM32芯片对每一步前进步长测得的水质指标进行实时分析,通过对比相邻的水质检测数据控制舵机,调整船体的前进方向,同时修正检测步长。检测步长的初始范围一般设置为河道宽度的1/10左右,最小步长一般取初始步长的1/4 ~ 1/2,当满足最小步长条件时即可确定局部污染物浓度最高点,并记录发送监测数据和定位坐标。

自动避障远控模块包括WH-LTE-7S1 4G模块、GPS北斗双定位模块、红外光电反射传感器和HC-SR04超声波测距模块。舵机与舵通过拉杆连接,螺旋桨与电机采取轴连接,轴套填充密封油防止水由轴套进入船舱。红外光电反射传感器通过在单片机上输出高电平与单片机配合作业,实现船体智能避障。单片机与4G模块实现通信后,移动终端方可通过4G模块发送指令使单片机作业。由4G模块调控飞控板可将自控模式切换至遥控模式,一旦自控芯片故障则可通过遥控器进行人工控制回收船体。

根据以上方案设计完成的自动寻污船,可实现自动寻污、自动避障、自动采样、双控切换功能,其具体的控制原理见图2。

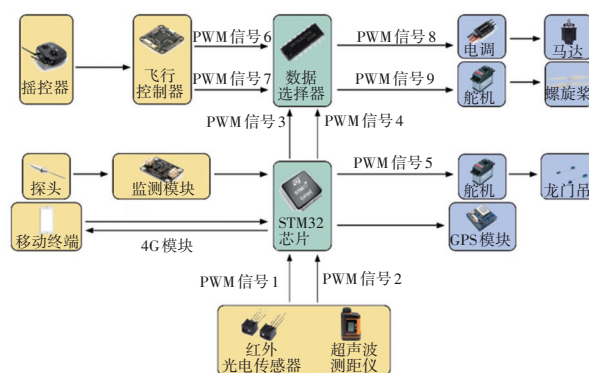


图2 自动寻污控制原理

Fig.2 Schematic diagram of the automatic sewage-seeking control system

## 1.2 系统开发

船体系统的开发从模块化设计角度出发,将船体系统分为监测采样、自动寻污方向控制、自动避障远控三个模块。由主芯片统一控制以实现系统一体化运行,并通过模块间数据信息共享以提升互操作性,真正使寻污船系统智能化,对应的技术路线



见图3。

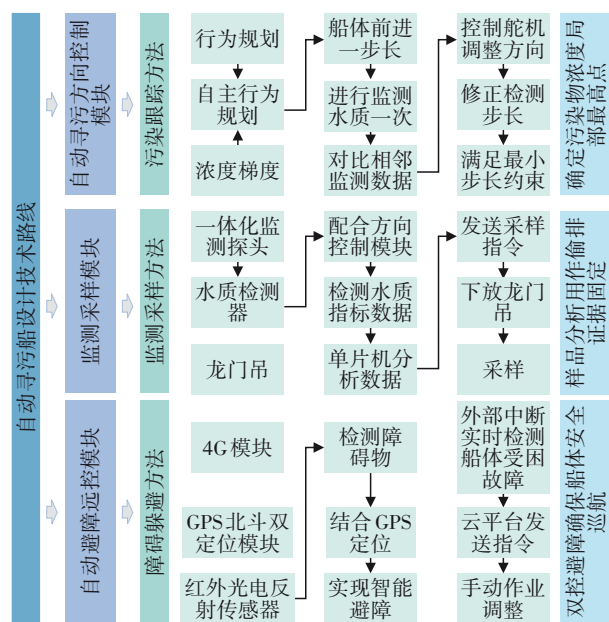


图3 自动寻污船系统功能开发流程

Fig.3 Flow chart of function development system of automatic sewage-seeking ship

### 1.3 一体化监测器调试方法

一体化监测器的实时监测项目包括pH、COD、BOD、NH<sub>3</sub>-N、TOC、TDS和TP。选取相同水质的水样先后在一体化监测器和实验室中进行监测,对监测结果进行对比。实验室水质分析项目中,氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定,总磷采用钼酸铵分光光度法测定,pH采用赛多利斯PB-10 pH计测定,TDS采用雷磁DDS-307A TDS计测定。

### 1.4 自动避障系统有效性验证方法

为检验自动寻污船能否及时发现巡航路径上的障碍物并改变行进路线,在封闭水域中进行测试。首先在移动端为自动寻污船设置一条指定行进航线,航线中包含若干个障碍物,若小船能识别障碍物并适当改变行进路线,最终到达指定地点,则视为成功实现自动避障。

### 1.5 实际水域巡航功能测试方法

于2022年3月6日在杭州市西湖区西溪湿地区块河道中完成了自动寻污船最终的实际水域巡航功能测试。船体下水前已使用GPS模块配合单片机规划完成巡航区域。将寻污船放入水中后启动,执行巡航作业,巡航过程中对区域内水体完成水质监测和对应定位坐标发送。

### 1.6 实际水域自动寻污算法功能测试方法

于2022年3月10日在湖州市德清县余英溪中完成了实际水域自动寻污算法功能的测试。余英溪水质常年稳定在《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅱ类,河道沿岸1 km处设有小型污水处理厂1座,处理厂排水管口埋设于余英溪河道中心,出水水质为准Ⅳ类。将自动寻污船放入余英溪中作业,根据浓度梯度算法监测余英溪水质指标变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 一体化监测器调试结果

于2021年7月25日在封闭水体中开展一体化监测器调试。将自动寻污船开启后放入水中使其自动航行,船头一体化监测器在水中随机监测若干个点的TDS、pH、氮和磷数据,BLE模块将实时监测数据和定位传给移动端。在自动寻污船全部监测完毕之后,通过人工方法对所有自动水质监测点位进行取样,带回实验室完成分析,并将所得数据与自动寻污船的在线监测数据进行比对。在10个点的监测分析中,无人船的TDS监测值分别为135、146、174、103、184、145、117、153、144、128 μS/cm,人工测定值分别为130、142、178、100、180、142、122、157、148、123 μS/cm,相对误差在2.30%~4.27%之间;无人船的pH监测值分别为9.0、8.3、8.9、9.3、8.4、8.8、9.0、8.1、9.2、8.7,人工测定值分别为9.3、8.6、8.7、9.0、8.8、8.6、9.1、8.2、9.0、8.8,相对误差在1.1%~4.8%之间;无人船的氨氮监测值分别为0.401、0.372、0.447、0.523、0.309、0.324、0.561、0.373、0.494、0.425 mg/L,人工测定值分别为0.414、0.384、0.427、0.545、0.291、0.326、0.536、0.356、0.513、0.439 mg/L,相对误差在3.29%~4.86%之间;无人船的TP监测值分别为0.09、0.09、0.09、0.10、0.09、0.11、0.10、0.10、0.09、0.09 mg/L,人工测定值分别为0.10、0.09、0.08、0.10、0.09、0.10、0.11、0.10、0.09、0.10 mg/L,相对误差在0~11%之间。由此可知,自动寻污船搭载TDS模块的监测数据与实验室分析测试的数据质控比对结果一致性较好,由于探头精度限制,除总磷外其余水质指标的相对误差均在6%以内,表明自动寻污船搭载的pH、氨氮和TDS监测模块的监测数据准确度较高。

## 2.2 避障系统有效性验证

自动寻污船避障系统的验证实验于2021年8月10日在校内封闭水域中开展。将自动寻污船置于水面,并在距离船头3 m处通过投放NaCl人为制造一个较高浓度的污染源,船和污染点之前人为放置漂浮障碍物一个。当启动小船并开启自动寻污功能后,小船朝着较高浓度的污染点行驶,期间小船可成功绕过障碍物并最终到达高浓度点。重复以上步骤若干次,在算法和模块间的动作指令下,自动寻污船可重新规划路径避开障碍物,并继续朝高浓度方向前进,最终到达污染物浓度中心处(如图4所示)。

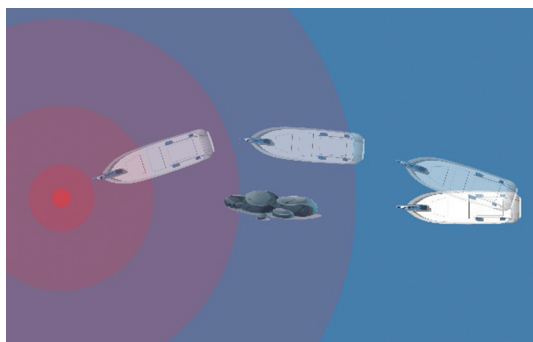
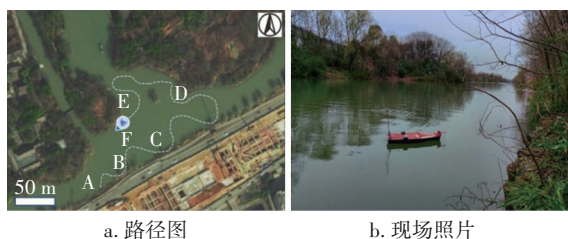


图4 小船避障功能示意

Fig.4 Schematic diagram of the obstacle avoidance function

## 2.3 实际水体巡航测试结果

自动寻污船在西溪湿地河道的巡航测试结果如图5所示。自动寻污船在西溪湿地周家村入口处河道规划范围内完成巡航,巡航过程中巡航功能执行良好,基本覆盖了规划的巡航区域,且自动寻污船避障功能执行良好,船体未与水体中障碍以及河岸发生碰撞。



a. 路径图 b. 现场照片

图5 实际水体巡航功能测试

Fig.5 Route map and site photo of the cruise function test in actual water body

在图5(a)中所示的A~E五个坐标点处完成水质指标的在线监测记录和数据传输,对应的在线监

测水质指标见表2。自动寻污船一体化监测探头给出的TP、pH、TDS、BOD、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TOC共7项水质指标的测定值均较为稳定,说明西溪湿地水域的水质较为均一稳定。通过实地观测可知,此片水域中并无雨污水管或其他污染源存在,因此水质监测结果与现场情况较为吻合。为进一步验证自动寻污船一体化探头在实际水体中测定指标的准确性,通过人工采样方式采集靠近自动监测C点附近河岸边1 m处的水样并送至实验室进行分析,测得TP、pH和TDS分别为0.08 mg/L、7.2和204  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , TP和pH与在线监测值接近,而TDS指标的升高可能与岸边人工采集水样时引起的天然有机物搅动有关。自动寻污船在此片水域中并未发现水质异常区域,当顺利完成巡航任务后自动返回指定位置,巡航功能测试成功。

表2 西溪湿地巡航在线监测数据

Tab.2 Cruise online monitoring data of Xixi wetland

点位	TP/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	pH	TDS/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	BOD/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	COD/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{NH}_3\text{-N}/$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	TOC/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
A	0.06	7.1	158	2.7	6	0.165	3.63
B	0.08	7.2	140	2.4	8	0.215	3.75
C	0.06	7.3	140	2.2	8	0.173	4.51
D	0.07	7.2	143	2.3	6	0.189	4.32
E	0.08	7.2	142	2.5	7	0.174	3.98

## 2.4 实际水域自动寻污算法功能测试

自动寻污船在余英溪完成了基于浓度梯度算法的自动寻污功能测试。如图6(a)所示,余英溪附近污水处理厂排水口位于大桥的下方,水流流向为自西向东。将自动寻污船由A点放入余英溪后启动自动寻污模式,小船由A点开始一边实时监测多种水质指标,一边根据浓度梯度算法对水质指标进行分析,实时规划航行方向。该段河道宽度约为50 m,且河面有明显可见的波纹,水流速度较快,而自动寻污船在其中能够平稳航行,证明小船在实际水体航行中具备一定的抗风浪能力。

自动寻污船在A~F点处完成水质指标的在线监测记录和数据传输,对应的在线监测水质指标见表3。自动寻污船在A点完成第一次水质指标的监测,此处的TP、pH等7项水质指标满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅱ类水水质标准。

当自动寻污船在A点完成第一次水质指标监测后,监测系统开始实时监测水体中7项水质指标的数值,通过浓度梯度算法控制航向,开始逐渐向水质指标升高的区域航行,依次经过B、C、D、E点,最终到达综合水质指标最高的F点处。小船行进的曲线航线主要基于浓度梯度算法的计算结果,从而导致航向不断改变。由于一体化水质监测探头可同时监测多个水质参数,且不同参数的变化趋势和变化数值不尽相同,因此浓度梯度算法需要对多水质指标变化的影响进行综合判断。在STM32处理器中,算法对各水质参数数值的变化存在一定的优先级,因此小船的行进方向会根据不同水质指标和对应数值的变化完成实时综合调整,但最终行进到余英溪中水质浓度较高的F点。以上结果表明,自动寻污船的自动寻污算法功能在实际水域中的测试结果良好。

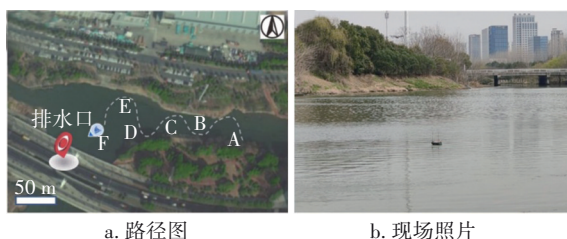


图6 实际水体多参数自动寻污功能测试

Fig.6 Route map and site photo of the automatic sewage-seeking function test rely on multi-parameter monitoring in actual water body

表3 余英溪自动寻污在线监测数据

Tab.3 Automatic sewage-seeking online monitoring data of Yuying River

点位	TP/ (mg· L <sup>-1</sup> )	pH	TDS/ (μS· cm <sup>-1</sup> )	BOD/ (mg· L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg· L <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> -N/ (mg· L <sup>-1</sup> )	TOC/ (mg· L <sup>-1</sup> )
A	0.06	7.4	158	2.2	10	0.105	3.31
B	0.05	7.2	167	2.5	13	0.135	3.52
C	0.06	7.5	163	3.2	17	0.224	3.51
D	0.07	7.4	179	2.5	19	0.173	4.72
E	0.06	7.5	224	2.7	19	0.347	5.48
F	0.12	7.4	265	5.3	25	0.403	6.35

### 3 结论

研发制作了一款自动寻污船,它由监测模块、采样模块、自动寻污方向控制模块、自动避障模块和动力系统构成。小船搭载的一体化监测探头可同时实时在线监测TP、pH、TDS、BOD、COD、NH<sub>3</sub>-N

和TOC共7项水质指标。在自行编写的浓度梯度算法运算控制下,自动寻污船可实现区域内自主规划巡航路径和改变寻污航向,可在全时段对水域内可能存在的水质异常区域或偷排暗管进行无人巡查。自动采样系统可采集污染水样用于证据固定或实验室进一步分析。该自动寻污船架构小巧,运行能耗低,投资及维护费用小,可有效解决暗管查找难度大和人工排查困难等难题,也可为专项行动提供精确的污染源数据参考,为监督执法提供有力证据支撑。

### 参考文献:

- [1] 吴季友,陈传忠,赵岑,等. 关于“十四五”生态环境监测支撑能力提升的思路与目标[J]. 中国环境监测, 2020, 36(6): 1-4.  
WU Jiyu, CHEN Chuansong, ZHAO Cen, et al. Thoughts and goals for improving the supporting capacity of ecological environment monitoring in the 14th Five-Year Plan[J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(6): 1-4 (in Chinese).
- [2] 郭效琛,李萌,史晓雨,等. 基于在线监测的排水管网事故预警技术研究与应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(19): 129-133.  
GUO Xiaochen, LI Meng, SHI Xiaoyu, et al. Research and application of warning technology for drainage network accidents based on on-line monitoring [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 129-133 (in Chinese).
- [3] 马良骥. 水环境监测存在的问题及对策[J]. 资源节约与环保, 2021 (9): 60-61.  
MA Liangji. Problems and countermeasures of water environmental monitoring [J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2021 (9): 60-61 (in Chinese).
- [4] 中华人民共和国生态环境部. 环境保护部通报2017年8月《环境保护法》配套办法执行情况[EB/OL]. (2017-09-30) [2022-02-28]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201710/t20171002422973.html>. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. The Ministry of Environmental Protection (MEP) reported the implementation of the supporting measures of the environmental protection law in August 2017 [EB/OL]. (2017-09-30) [2022-02-28]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201710/t20171002422973.html> (in Chinese).



- [5] 浙江省生态环境厅. 浙江通报第五批环境违法典型案例 [EB/OL]. (2016-05-21) [2022-02-28]. <http://zjnews.zjol.com.cn/system/2016/05/21/021159269.shtml>.  
Department of Ecological Environment of Zhejiang Province. Zhejiang circular fifth batch of typical cases of environmental violations [EB/OL]. (2016-05-21) [2022-02-28]. <http://zjnews.zjol.com.cn/system/2016/05/21/021159269.shtml> (in Chinese).
- [6] 步金慧. 工业企业环境污染管理及优化研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(8): 9-12.  
BU Jinhui. Management and optimization of industrial and waste pollution [J]. Environmental Science and Management, 2018, 43(8): 9-12 (in Chinese).
- [7] 张彦. 工业园区污水及废水排放监控管理的改进措施[J]. 中国给水排水, 2014, 30(16): 125-128.  
ZHANG Yan. Improvement of industrial park sewage and wastewater discharge monitoring management [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(16): 125-128 (in Chinese).
- [8] 罗华, 张太敏, 张志劬, 等. 一起农村居民集中式供水水源污染调查[J]. 中华预防医学杂志, 2012, 46(12): 1137-1138.  
LUO Hua, ZHANG Taimin, ZHANG Zhiqu, *et al.* An investigation of centralized water source pollution in rural area [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2012, 46(12): 1137-1138 (in Chinese).
- [9] 陆利杰, 李亚, 张亮, 等. 水环境问题导向下的海绵城市系统化案例探讨[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 43-47.  
LU Lijie, LI Ya, ZHANG Liang, *et al.* A case study on the systematic solution of sponge city oriented by water environment problems [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(8): 43-47 (in Chinese).
- [10] 赵同强, 韩超, 徐玉良, 等. 无人船技术应用于城市内河水质监测[J]. 中国给水排水, 2021, 37(7): 71-77.  
ZHAO Tongqiang, HAN Chao, XU Yuliang, *et al.* Application of unmanned surface vehicle in urban river water quality monitoring [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(7): 71-77 (in Chinese).
- [11] 陈青, 邱勇, 常杪, 等. 基于环境管理需求的COD在线监测技术改进建议[J]. 中国给水排水, 2015, 31(22): 27-32.  
CHEN Qing, QIU Yong, CHANG Miao, *et al.* COD online monitoring in China: demands, applications and usage suggestions [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(22): 27-32 (in Chinese).
- [12] 赵涛, 陶重桦, 冯佳佳, 等. 基于STM32单片机的自动喷灌机器人[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(9): 279-282.  
ZHAO Tao, TAO Zhonghua, FENG Jiajia, *et al.* Automatic spray robot based on STM32 microcontroller [J]. Computer Systems & Applications, 2017, 26(9): 279-282 (in Chinese).

作者简介: 杨帆(2000-), 男, 福建三明人, 本科生, 主要从事水污染控制、高级氧化等研究工作。

E-mail: 201906022322@zjut.edu.cn

收稿日期: 2022-04-02

修回日期: 2022-04-12

(编辑: 李德强)

像保护眼睛一样保护生态环境,  
像对待生命一样对待生态环境