

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.14.026

大东湖核心区污水深隧智慧调度与管理系统设计

杨杏勃, 李胡爽, 江 涛, 张功嗣, 鲁尔超, 谈泽龙
(中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘 要: 大东湖核心区污水传输深隧是国内首次以满管压力流运行方式建成的污水传输系统,尚无实际运行调度经验可借鉴,因此该项目在合理统筹上下游调度技术层面遇到较大挑战。针对大东湖污水深隧的管理与调度中面临的重、难点问题,结合在线监测、物联网、水力模型等技术,联合设计开发智慧调度与管理系统,辅助深隧管理人员实时掌握深隧运行状态,管理深隧巡检与设备维护等日常工作,并基于水力与淤积模型做出调度决策。该系统的设计与开发着眼于符合深隧运行的实际管理需求,重点解决大东湖深隧运营期内合理调度与淤积风险管控问题,最大限度地降低深隧运行风险,同时统筹规划上下游调度需求。

关键词: 污水深隧; 智慧系统; 在线监测; 模型; 调度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)14-0151-06

Design of Smart Dispatch and Management System for Sewage Deep Tunnel in Core District of Great East Lake

YANG Xing-bo, LI Hu-shuang, JIANG Tao, ZHANG Gong-si, LU Er-chao,
TAN Ze-long

(China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: The deep tunnel in core district of Great East Lake is the first sewage conveyance system operated with full pipe pressure flow in China. Since there is no other implemented domestic project for reference, the project has encountered many technical challenges in reasonable coordination of upstream and downstream scheduling. Aiming at the key challenges, combining on-line monitoring, Internet of Things, hydraulic model and other technologies, the smart dispatch and management system is jointly designed and developed to assist the deep tunnel managers to master the operation status in real time, to manage the daily inspection work and equipment maintenance, and to make scheduling decisions based on the hydraulic and sedimentation model. The design and development of the system focus on fulfilling the practical management requirements during the operational stage, targeting on solving the reasonable scheduling issue and sedimentation risk control in the operation period, migrating the operational risks of the deep tunnel, and meeting the upstream and downstream dispatch requirements.

Key words: sewage deep tunnel; smart system; on-line monitoring; model; dispatch

为改善武汉市水环境生态状况,统筹解决区域 污水处理、内涝控制和初雨控制等问题,武汉市提出

四厂合并和深隧传输的污水方案,采用深隧传输现有污水处理厂污水^[1]。然而深隧在国内建设尚属起步阶段,目前仅上海^[2]、广州^[3]、成都^[4]开展了深隧建设。武汉大东湖深隧作为全污水的压力流深隧在国内尚属首次尝试,缺乏运行调度经验,智慧水务系统在污水深隧中应用设计尚无先例,因此提出污水深隧智慧调度与管理系统^[5],优化深隧的运行调度与管理方式。

1 系统设计难点与需求

1.1 大东湖污水深隧运行风险分析

从大东湖深隧的实际运行需求出发,分析深隧运行的核心风险如下:

① 被动进水与出水风险

大东湖污水深隧作为污水转输的中间转输环节,一定程度上为被动入流出流,需同时保障上游管网无冒溢、下游污水厂稳定运行,因此,传统的人工调度管理方式缺乏对深隧内污水的水量与流速等关键技术点的控制能力,如运行不当易造成上游污水冒溢、下游污水厂前溢流等问题。

② 进水水量波动风险

深隧上游汇水片区地表污水系统处于合流制与分流制并存的排水体制下,在雨季时峰值流量将造成污水隧道超负荷运行并影响污水厂进水水质;而旱季夜间污水流量较低,难以满足深隧设计运行条件。因此,深隧运行如基于人工调度,将面临入流量大幅波动的问题,使深隧处于较大的风险中。

③ 深隧运行淤积风险

深隧目前尚无备用管线,一旦投入运行无法停水清淤,因此大东湖深隧可采用的清淤方式以调水冲淤为主、水下机器人为辅,人工调度管理无法对淤

积风险进行有效的监控与预测,也难以实施有针对性的调水冲淤。

1.2 智慧深隧系统设计需求

为应对大东湖深隧的调度与淤积风险问题,设计建立智慧深隧调度与管理系统,其核心功能总结如下:

① 水量模拟预测

开展深隧上下游一体化监测,实时监测预处理站的入流流速、流量,竖井水位,深隧流量等关键参数,结合水力模型可对下游的水量变化进行模拟预测^[6],辅助管理人员提前准备应急预案。

② 淤积风险管理

在智慧平台设计中,着重考虑对深隧淤积情况进行监测,并结合模型对淤积风险进行合理模拟预测,对当前淤积高风险管段发布报警。此外,可对淤积风险进行时间演进模拟,从而对未来管道的淤积风险进行判断。

③ 调度决策辅助

基于在线水力模型与优化算法,建立不同场景下的调度模式,根据用户需求选择不同的计算逻辑,根据用户调度目标给出优化调度方案,并基于水力模型给出该调度方案的水力过程线,辅助调度人员进行决策。

2 智慧深隧系统设计

2.1 监测监控布点设计

基于项目红线范围,监测监控布点以深隧预处理站为边界,覆盖大东湖深隧项目范围内的主隧、支隧、预处理站,根据建设范围设计深隧监测内容(见表1),主要监测深隧进水与出水水量、沿途各竖井液位、深隧进水水质、深隧沿途淤积厚度等。

表 1 智慧深隧管理相关监测内容

Tab. 1 Monitoring content of smart dispatch and management system

项目	安装点位	数量/台	监测目标
电磁流量计	4 座预处理站出流	4	监控各个预处理站实时处理量,并作为深隧水力模型进水的边界条件
超声波流量计(互相关法)	考虑安装条件,安装至 3#、4#、6#、7#竖井上游或下游	4	监控深隧运行的实时流量,并作为深隧水力模型的率定节点
淤泥界面仪	满管状态下,采用超声波流量计(互相关法)可同时监测到稳定的淤泥界面,从而换算出淤积厚度	4	监控深隧运行中的实时淤积情况,并作为深隧淤积模型的率定节点,用于评估深隧淤积风险
在线悬浮物(SS)仪	4 座预处理站进水	3	监控各预处理站的效果,以及各站进入深隧的水质,SS 是影响淤积的主要指标,作为淤积风险模拟的重要因素
压力式液位计	1#、3#、4#、6#、7#、10#竖井	12	监控深隧沿程竖井的实时液位变化,作为深隧调度的限制边界条件

监测数据由远程终端单元(RTU)负责采集,并

通过 4G 无线网络传输到公网。

2.2 深隧模型构建

深隧水力模型是水量预测、淤积风险模拟预测与调度方案模拟的基础,该项目采用 SWMM(暴雨洪水管理模型)搭建基础水力模型。因项目范围不涉及上游管网与地块,故不采用模型的水文模块,仅采用水力模型与水质模型,其中水质模型中仅建立 SS 对流扩散模型,为淤积风险模拟做好前期基础。

① 水力模型

大东湖深隧管道内水动力状态符合一维圣维南方程的假设,可以使用一维管网水力模型进行模拟,根据深隧管线的节点坐标、高程、坡度等信息搭建 SWMM 模型,模型管道总长 19.2 km。其中,以二郎庙预处理站、落步咀预处理站为模型入流边界,以末端泵站为出流边界。管道曼宁系数设定为 0.014,时间步长设定为 5 s。

② 水质模型

水质模型主要建立 SS 的对流扩散模型,其中,与一般污染物模型不同,在 SS 对流扩散模型中不考虑 SS 的衰减,原因在于深隧中 SS 的衰减主要由 SS 颗粒沉降造成,这部分通过淤积模拟进行计算。

③ 淤积模型

淤积模型将淤积过程分为沉积与冲刷两个过程,其沉积过程可按式计算:

$$M_s(t) = M_{\max} \left(v \times \frac{t - t_0}{h} \right) \quad (1)$$

式中: $M_s(t)$ 为沉积物在时间 t 时的沉积质量, kg; t 为沉积时间, s; M_{\max} 为沉积物的最大沉积量, kg; v 为淤积速度, m/s; h 为水深, m; t_0 为沉积物体积为 0 的时刻。

冲刷再悬浮过程计算公式如下:

$$M_w(t) = k(v) \times M_s(t) \quad (2)$$

式中: $M_w(t)$ 为沉积物在时间 t 时被冲刷的质量, kg; $k(v)$ 为冲刷系数, 由与流速 v 有关的曲线决定, 该曲线后期将根据实际监测数据进行校正。

最终沉积物体积的计算公式为:

$$V(t) = \frac{M_s(t) - M_w(t)}{\rho} \quad (3)$$

式中: $V(t)$ 为沉积物在时间 t 时的沉积体积, m^3 ; ρ 为沉积物密度, kg/m^3 , 通过水下机器人采集泥样检测得到。

2.3 智慧深隧系统功能设计

智慧深隧系统基于水力与淤积模型构建三大核

心功能模块,其中,运行状态监控与预测模块作为系统的“眼睛”,重点实现实时监测数据的查询与分析,基于水力模型实现短时深隧运行状态预测;淤积风险管理模块基于淤积风险算法提供深隧当前的淤积风险;深隧调度模块则作为系统的“大脑”,辅助深隧调度方案制定。

① 运行状态监控与预测

该模块实时接入大东湖深隧工程中关联的预处理站运行工况数据,生产数据采集系统采集到的实时生产运行数据在三维工艺组态画面上动态展现,能够对实时数据的超标和设备故障进行报警展示,超限数据自动标注。实时监测的流量、液位等水力、水质数据,则结合 GIS(地理信息系统)进行滚动展示。

基于在线水力模型,以二郎庙、落步咀、武东预处理站进入深隧的实时水量与历史流量数据为输入边界条件,系统每 15 min 计算未来 24 h 内沿线节点流量过程线与各竖井液位过程线,并结合 GIS 进行图像化展示,由此实现水量模拟预测。

② 淤积风险管理

该模块主要基于淤积模型,根据 SS 浓度、流速与模拟得到的淤积厚度三个指标,及其淤积风险权重(见表 2)进行模拟与评估。

表 2 淤积风险权重

Tab. 2 Weight of sedimentation risk

项目		淤积厚度 h_s/cm	流速 $v/$ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	SS 浓度 $c_{ss}/$ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
权重系数		α_1	α_2	α_3
风险等级 (低到高)	1	$< h_{s1}$	$> v_1$	$< c_{ss1}$
	2	$h_{s1} \sim h_{s2}$	$v_1 \sim v_2$	$c_{ss1} \sim c_{ss2}$
	3	$h_{s2} \sim h_{s3}$	$v_2 \sim v_3$	$c_{ss2} \sim c_{ss3}$
	4	$h_{s3} \sim h_{s4}$	$v_3 \sim v_4$	$c_{ss3} \sim c_{ss4}$
	5	$> h_{s4}$	$< v_4$	$> c_{ss4}$

淤积厚度、流速、SS 对应的权重系数:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \quad (4)$$

最终风险等级按下式计算:

$$R = \alpha_1 \times R_h + \alpha_2 \times R_v + \alpha_3 \times R_{ss} \quad (5)$$

式中: R 为最终风险等级; R_h 为基于淤积厚度的风险等级; R_v 为基于流速的风险等级; R_{ss} 为基于 SS 浓度的风险等级。

系统基于在线模型每 15 min 进行一次淤积风险的模拟计算,将计算得到的各管段风险等级渲染不同颜色,以绿色代表低风险,以红色代表高风险,

结合 GIS 进行直观展示,使管理人员能够实时掌握各管段的淤积风险,并及时制定冲淤方案。

③ 调度管理

调度管理模块基于深隧实际运行中的调度需求,按照使用场景,共设置以下3种调度方案模拟逻辑:常规调度方案、应急调度方案、淤积冲刷调度方案。

其调度逻辑如图1所示。

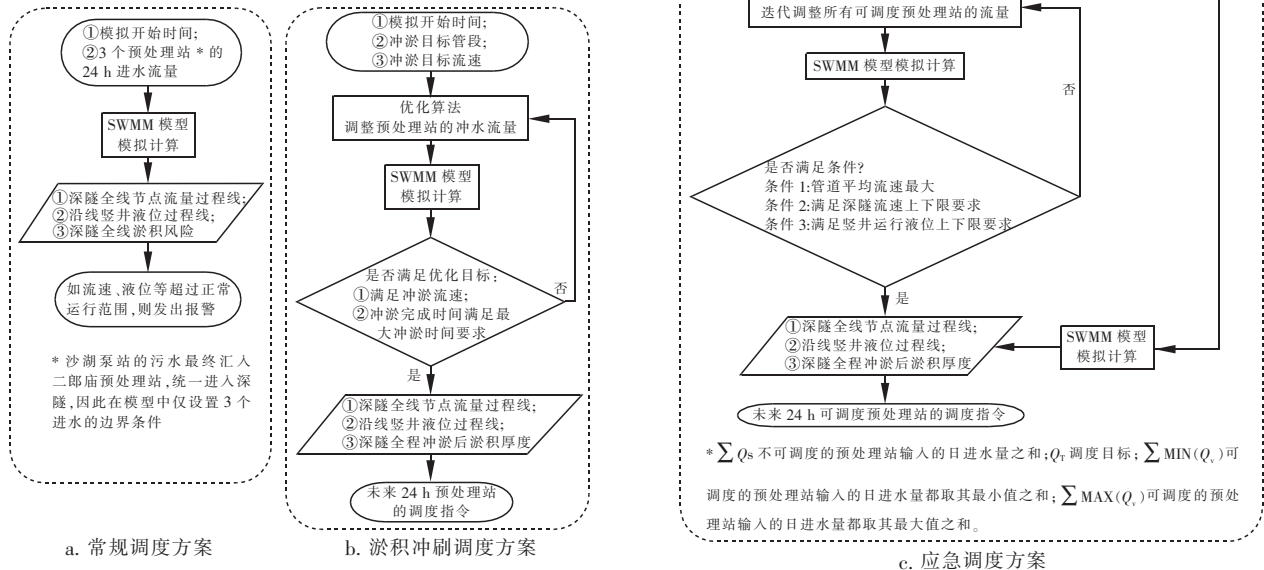


图1 三种调度模式的调度逻辑

Fig. 1 Logic chart of three scheduling modes

a. 常规调度方案

该模式应用于日常调度,为管理人员提供“调度模拟实验室”,模拟不同进水方案对下游各竖井与末端污水厂带来的影响,从而调整与优化日常调度方案。

b. 应急调度方案

该模式主要应用于下游污水处理厂工艺线检修、上游预处理站泵站检修等特殊情景,在预处理站输水量或深隧总输水量发生大幅变化的情况下,基于优化算法与模型验证,为管理人员提供满足限制条件的最优调度方案。

c. 淤积冲刷调度方案

该模式应用于深隧淤积风险较高时,针对特定高风险管段提高流速实现淤积冲刷的情景,系统基于优化算法与模型验证,为管理人员提供满足冲淤条件的最优调度方案。

除以上3个核心功能模块外,系统也整合了设备与巡检管理、数据管理、监控视频管理、权限管理

等基础功能,满足深隧运行的所有日常管理需求,整体实现深隧运营工作的一体化管理目标。

3 运行场景模拟效果

根据系统实际运行中可能面临的各类应急情况,选取3种应急调度场景进行系统模拟测试:下游污水厂部分停水检修;上游部分区域夜间水量过小;上游降雨造成部分区域管网存在冒溢风险。

① 下游污水厂部分停水检修

下游污水厂处理能力为 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,当部分处理线停水检修时,污水厂处理能力将大幅下降,在保证深隧满足设计运行条件下,上游预处理站进水需相应调整。在该情景下,设定系统调度目标调整为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,4座预处理站均保持可调度状态,系统计算得到的调度方案见图2(a)。

② 上游部分区域夜间水量过小

当上游区域夜间污水流量降低,将造成该区域预处理站泵前液位过低,则该区域预处理站进水泵站需暂时关闭,通过调整其他预处理站提升水量来

弥补该区域水量缺失,以保障下游污水厂进水稳定。在该情景下,设定 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 作为全天调度目标,设定沙湖预处理站不可调度,且进水量设定为 0,系统计算得到的调度方案见图 2(b)。沙湖预处理站汇水面积为 16.9 km^2 ,而其他 3 个预处理站汇水面积为 113.45 km^2 ,上游管网保留充足的调蓄容积,实际可分担沙湖预处理站短时缺失的水量。

③ 上游降雨造成部分区域管网存在冒溢风险

当上游区域降雨带来合流制污水激增,将造成该区域预处理站泵前液位过高,使上游管网水位过高,带来污水冒溢的风险,因此需要该预处理站提升进水流量,并保持适当时间直至水位降低,为满足污水厂处理能力要求,其他预处理站进水量应相应调整。在该情景下,考虑到深隧全程及污水厂前均无溢流条件,雨季如深隧转输污水量超过 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,污水厂无法容纳超量污水且无溢流通道,因此设定系统调度目标为 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设定二郎庙预处理站不可调度,且进水量设定为 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,系统计算得到的调度方案见图 2(c)。



图 2 应急调度方案模拟结果

Fig. 2 Simulation results of emergency scheduling scheme
应急调度方案模拟结果见表 3。

表 3 应急调度方案模拟结果

Tab. 3 Simulation results of schedule of emergency control

模拟情景	下游污水厂部分 停水检修		上游部分区域 夜间水量过小		上游降雨造成部分区域 管网存在冒溢风险		设计水量上限	
	总水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	小时流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	总水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	小时流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	总水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	小时流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	总水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	小时流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
沙湖提升泵站	2.18	0.25	0	0	0	0	8.64	1.0
二郎庙预处理站	21.25	2.46	60	6.94	60	6.94	84.67	9.8
落步咀预处理站	16.41	1.90	17.5	2.03	15	1.74	49.25	5.7
武东预处理站	2.34	0.27	2.5	0.29	5	0.58	20.74	2.4

调度方案结果主要分为 3 部分:调度水量分配、24 h 调度流量指令、24 h 模拟过程线。其中调度水量分配可查看系统为各预处理站分配的全天调度总水量;24 h 调度流量指令可查看对各个预处理站未来 24 h 内,每小时输水流量的建议调度方案,该小时流量作为调度指令可发送给预处理站管理人员,由管理人员调控 PLC(可编程逻辑控制器),调整变频泵达到该目标流量;24 h 模拟过程线可模拟在执行该调度指令后深隧节点的水位与流量变化。以“下游污水厂部分停水检修”情景为例,当下游北湖污水厂全体调度水量缩减至 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 后,系统将缩减的水量按各预处理站处理能力进行分配。从表 3 可以看到,沙湖服务人口最少,仅为 33.29 万人,其承担的水量也最少,为 $2.18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,相应

的泵站调度方案的小时流量也最低,为 $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$;而二郎庙服务人口最多,为 81.79 万人,其提升泵站设计能力最高为 $9.8 \text{ m}^3/\text{s}$,因此其承担的转输水量最多为 $21.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。24 h 模拟过程线以下游 6#井的流量与液位为例,其流量在经历 30 min 的进水后由 $6.58 \text{ m}^3/\text{s}$ 上升至 $7.08 \text{ m}^3/\text{s}$,并保持在 $7.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 直至 24 h 模拟结束,液位同样由 30.03 m 上升至 30.65 m 并保持不变,24 h 模拟结束后系统默认所有泵站停止运行,深隧流量逐渐降为 0,深隧液位逐渐回落并保持不变。从模拟结果来看,各预处理站水量均不超过预处理站设计上下限,且分配水量与各预处理站处理能力相匹配;调度方案的进水小时流量 24 h 保持稳定,且不超过设计流量上限,该稳定进水方式与深隧实际运行要求一致;由于 24 h

调度流量指令保持稳定,由此带来深隧流量与竖井液位也保持相对稳定。但缺乏对上游汇水片区实际来水量的考虑,实际运行期间可能会受上游片区来水量的影响而无法满足稳定流量进水的要求,因此待后期获取上游管网与下垫面数据后,对系统模型进行进一步扩充,可对上游片区来水水量进行模拟预测,进一步调整调度指令,使其更贴近实际运行的水量波动。

综上,在系统发生检修、暴雨等应急情景下,能够提供未来24 h的调度方案,该种调度模式能够适应可预见的系统变化,可根据全天进水量需求来指导小时流量的调整,由于在应急调度场景模拟中,污水厂检修、上游夜间水量和降雨数据是由用户根据可能发生的紧急情况假设性的输入,而非接入在线实测数据,因此调度情景模拟中模型只是离线模型,无法根据实时监测数据来调整调度方案,该功能有待未来进一步完善。

4 结论

① 受限于深隧安装条件的特殊性,仅在4处竖井上游或下游安装流量计,能够为深隧水力模型的校准提供数据支撑,以地面预处理站的出水流量监测与水质监测为辅助,为深隧水力模型提供实时在线的模型边界条件,以支撑在线模型的运行与水力条件的模拟计算。

② 大东湖深隧的智慧调度与管理系统充分结合后期运维的需求,针对深隧面临的风险开发运行状态监控与预测、淤积风险管理与调度管理三个功能模块并集成整合,提供了深隧调度与淤积风险预警问题的辅助管理手段。

③ 基于系统应急调度情景模拟结果可以看到,系统能够根据用户需求提供符合系统边界条件的调度方案,然而受限于项目边界,缺乏上游汇水区的管网数据与监测数据,无法基于水文模型对上游汇水区的来水量进行实时模拟预测,有待未来通过扩展上游管网模型进一步完善系统功能。

参考文献:

[1] 杜立刚,邹惠君,饶世雄,等. 武汉市大东湖核心区污水深隧传输系统工程设计[J]. 中国给水排水,2020,

36(2):74-78.

DU Ligang, ZOU Huijun, RAO Shixiong, *et al.* Design of Dadonghu core area wastewater deep tunnel transmission system project in Wuhan [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(2): 74-78 (in Chinese).

[2] 王晓鹏. 苏州河深隧调蓄工程综合设施的集约化布置方案[J]. 净水技术, 2019, 38(12): 41-45.

WANG Xiaopeng. Solutions of integrated layout for comprehensive facilities in deep tunnel storage project under Suzhou creek [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(12): 41-45 (in Chinese).

[3] 王广华,李文涛,陈贻龙,等. 广州市东濠涌深层排水隧道工程前期研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(22): 7-13.

WANG Guanghua, LI Wentao, CHEN Yilong, *et al.* Preliminary study on deep tunnel drainage engineering at Donghao creek in Guangzhou [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 7-13 (in Chinese).

[4] 夏霖. 城市深隧排水系统防涝控污效果模拟[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2019.

XIA Lin. Simulating of the Effect of Urban Deep Tunnel Drainage System in Waterlogging and Pollution Control [D]. Beijing: China Institute of Water Resource and Hydropower Research, 2019 (in Chinese).

[5] 何文凯. 基于武汉大东湖核心区污水传输系统的城市排水深隧项目总体规划探讨[J]. 智能城市, 2019, 5(24): 114-115.

HE Wenkai. Discussion on overall planning of urban drainage deep tunnel project based on sewage transmission system in the core area of Dadong Lake in Wuhan [J]. Intelligent City, 2019, 5(24): 114-115 (in Chinese).

[6] 时珍宝. 浅析上海市智慧排水信息化系统规划与建设[J]. 净水技术, 2020, 39(增刊): 235-238.

SHI Zhenbao. Brief analysis of the planning and construction of intelligent drainage information system in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(S1): 235-238 (in Chinese).

作者简介:杨杏勃(1987-),男,河北保定人,大学本科,工程师,从事给水排水设计工作。

E-mail: 371516202@qq.com

收稿日期:2020-11-25

修回日期:2021-01-12

(编辑:衣春敏)