

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.10.018

基于排水管网在线液位监测的管网运行状态诊断

成浩科^{1,2}, 张亚洁¹, 张浩^{1,3}, 黄荣敏^{1,3}

(1. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062; 2. 中国长江三峡集团有限公司,
湖北 武汉 430000; 3. 芜湖市三峡智慧水管家有限责任公司, 安徽 芜湖 241114)

摘要: 排水管网在线液位监测是最经济、可靠的在线监测预警手段。通过在长江中下游W市某污水系统片区建立在线液位监测系统,构建了排水管道正常运行状态下的上下游液面高程差与下游液面高程的相关关系,在此基础上,建立了基于排水管道液位监测的管道运行状态诊断分析方法,通过实际案例对管道堵塞、淤积缺陷进行了识别和精准定位。最后结合实践从管道基础信息、设备安装点位、设备运营三个方面对提高排水管网在线液位监测分析的准确性提出建议,为排水系统的高效运维提供经验。

关键词: 排水管网; 在线监测; 液位监测; 预警; 管网诊断

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)10-0107-07

Drainage Network Operation Status Diagnosis Based on Online Liquid Level Monitoring

CHENG Hao-ke^{1,2}, ZHANG Ya-jie¹, ZHANG Hao^{1,3}, HUANG Rong-min^{1,3}

(1. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430062, China; 2. China Three Gorges Co., Wuhan 430000, China; 3. Wuhu Three Gorges Smart Water Housekeeper Co. Ltd., Wuhu 241114, China)

Abstract: Online liquid level monitoring of drainage network is the most economical and reliable online monitoring and early warning means. Through the establishment of an online liquid level monitoring system in a sewage system area of W City in the middle and lower reaches of the Yangtze River, the correlation between the upstream and downstream liquid level elevation difference and the downstream liquid level elevation under normal operation of the drainage pipeline is constructed. On this basis, the drainage network operation status diagnosis and analysis method based on liquid level monitoring is established, and the blockage and siltation of pipeline are identified and accurately positioned through actual cases. Finally, based on practice, suggestions are put forward to improve the accuracy of online level monitoring and analysis of drainage pipe network from three aspects: pipeline basic information, equipment installation site, and equipment operation to provide experience for efficient operation and maintenance of drainage system.

Key words: drainage network; online monitoring; liquid level monitoring; early warning; network diagnosis

基金项目: 长江生态环保集团有限公司科技创新团队资助项目(YEEC-KCTD-202207)

通信作者: 黄荣敏 E-mail: huang_rongmin@ctg.com.cn

排水管网是城市最基础的保障设施,具有隐蔽性强、管线关系复杂的特点,因此开展全面的排查是掌握排水管网运行情况最有效的手段,然而管网排查的难度大、成本高,且难以及时全面地掌握排水管网的运行状态。随着排水管网尤其是污水管网在线监测技术的发展,监测的精度和可靠性越来越高,对排水管网的在线监测能够帮助运维单位及时掌握排水管网的运行状态,在管网水量、水质数据出现异常时能快速进行应急处置,同时结合监测数据挖掘和模型分析,能进一步地对管网系统的运行状态进行评估^[1-3]。

排水管道的监测指标通常分为水量和水质两个方面,其中流量是水量监测的主要指标,可以对排水管网的入流渗入情况进行定量分析。液位通常作为水量监测的辅助性指标,可提供定性分析^[4],目前排水管道流量监测的主要产品为超声波流量计,然而排水管网流量测量仍面临大量困难^[5],包括:污水管道的大埋深带来的施工安装风险;管道底部污泥带来的运维难度和测量误差;满管/非满管运行、污水管道存在杂物导致的测量误差;流量计对安装位置的要求较高以及设备成本高等因素使得液位监测仍是目前国内众多排水管网智慧管理平台大量选用的监测手段。通过管网液位监测分析,也可以对管网的运行状态进行评估,如王剑锋等^[6]通过对管网液位在线监测数据进行分析,探讨了液位数据在预警预报、旱天液位规律、雨天液位响应以及上下游联动等方面的应用模式;李志涛等^[7]基于液位在线监测实现了积水监测、多级预警、内涝分析和堵管分析等功能。

整体而言,相对于排水管网液位监测设备的大量使用,在相关液位数据挖掘和分析方面,国内外的研究仍较少。本研究基于长江中下游W市排水系统在线液位监测实践,探讨了液位监测数据在管网运行状态诊断方面的应用和意义,并对提高排水管网在线液位监测的准确性提出建议。

1 研究方法

1.1 区域概况

研究区域位于长江下游W市某污水系统片区,采用分流制排水体制,污水处理能力为 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,服务面积约 36 km^2 ;共有污水管网 101 km ,污水泵站5座,其中一级泵站1座,二级泵站3座,三级泵站

1座。选择其中1座二级泵站的收水片区进行监测分析,该收水范围内共有污水管网约 21 km ,泵站日均提升污水约 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1.2 监测点布置

根据泵站纳污范围内排水管网的拓扑关系,筛选出系统内主要污水管道,从泵站逐步向上游梳理管道连接关系、安装液位监测设备,结合研究目标、安装条件、管网拓扑关系、现场人工辅助检测等因素,通过多次调整选择合适的监测数量和点位,最终确认安装液位监测设备19台(编号:WS-1~WS-19),设备监测精度为 0.1 cm 。液位监测点位分布如图1所示。监测时间为2022年11月1日—2023年1月31日。



图1 研究区域的液位监测点位

Fig.1 Location of liquid level monitoring points in the research area

2 液位监测结果及讨论

2.1 管道冒溢预警预报

管道液位监测最直接的作用是对管道冒溢进行预警,在管网GIS数据中包含监测点位的地面高程、井深、井底高程数据,结合现场排水特征、运营管理经验及数据的不断积累,可分别设置预警、报警、溢流线,为管道的运行管理提供依据。WS-1号井的液位监测情况见图2。

由图2可以看出,井深为 1.2 m ,在11月17日、20日、22日、26日分别出现多次液位上升甚至达到报警线的情况,通过运营管理系统及时向现场运维人员反馈并派发工单,采取加大下游泵站排水、现场围挡、导排等措施,保证了现场安全,避免对周围居民出行带来影响。这种基于分钟级的液位测量和预警预报机制,可以使现场运维管理人员及时了

解管网的运行状态和存在问题,及时采取有效的处理措施,通过“发现问题-执行反馈-分析总结-巩固提升”4个步骤不断提升管网运维的质量和精细化水平,减少冒溢事故的发生,降低管网运行风险。

值得注意的是,在该点位11月20日、22日、26日的液位监测数据出现了大于井深的情况,这是因为本次使用压力式液位计,当井内液位达到距离井口30~50 cm时,设备透气塞被水淹没,导致液位测量数据偏大,这就需要在液位降低之后及时对设备进行维护,确保后续监测数据的准确性。同时大部分设备会在液位回落之后数据恢复正常并进行传输,设备也按照污水管监测要求做好防腐等措施,但是污水长期淹没主机仍会对设备造成损害,并导致运维工作量增加,因此可以根据管道液位上下游变化存在联动性的特点,在易冒溢点位的上下游选择合适位置布设监测设备,既可以保障监测设备的长期有效运行,又可以保证预测的准确性。在这种情况下,液位报警值应该如何设置就与管道上下游液位的联动密切相关。

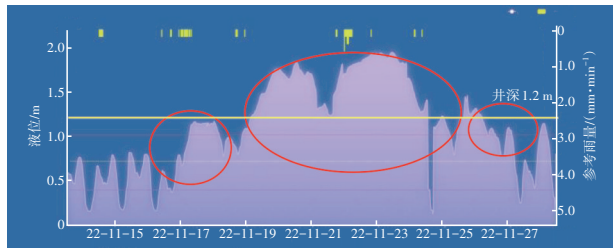


图2 WS-1号井液位监测数据

Fig.2 Liquid level monitoring data of WS-1

2.2 排水管道上下游液位联动关系特征

选择WS-2、WS-3、WS-4、WS-5四个点位监测(见图3),监测时间为2022年11月28日—12月25日,其中WS-2为靠近二级提升泵站的井位,可用该井的液位代表泵站的液位,其余3个监测点位分别位于3条不同方向的主管上游,距离WS-2分别为470、610、1 210 m。通过对4个点位的液位监测数据进行分析,探讨排水管道上下游的液位变化联动关系特征。

四个点位液面高程之间的相关关系见图4。由于每个井位的井底标高不同,因此选用井内水体的黄海液位高程值作为标准,纵坐标为WS-3、WS-4、WS-5与WS-2的液面高程差,横坐标为WS-2的液面高程值,可以看到在污水管网中,同一主管上不

同支管上下游点位的液面高程差随主管液位高程的变化规律呈现高度一致,在WS-2液位较低时,3个支管点位与WS-2的液面高程差随着WS-2液位的增大呈线性减小,当WS-2液位高程上升至约3.5 m时,变化曲线出现拐点,随着WS-2液位的进一步增大,上下游的液面高程差不再发生大的变化。出现这种情况的原因是:①当WS-2液位较低时,此时管道为非满管阶段,WS-2的液位受到华山路泵站调控和上游来水的影响,WS-2、WS-3、WS-4的液位主要受到上游来水的影响,且在管道畅通的情况下,上游管道可以低水位运行,来水会立即排入下游管道,因此当WS-2液位上升时,对上游管道的液位不会产生明显的影响,呈现线性减少的相关关系;②当WS-2的液面高程继续上升达到上游监测点位所在井的井底标高时,对应图4中拐点液面高程,管道进入满管运行的状态,此时可将污水管道看作有压流管,局部水头损失可忽略不计,管道上下游的液位差即等于沿程水头损失,其计算见下式:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

式中: h_f 为沿程水头损失; λ 为沿程阻力系数; l 为管道长度; d 为管道直径; v 为平均流速; g 为重力加速度。

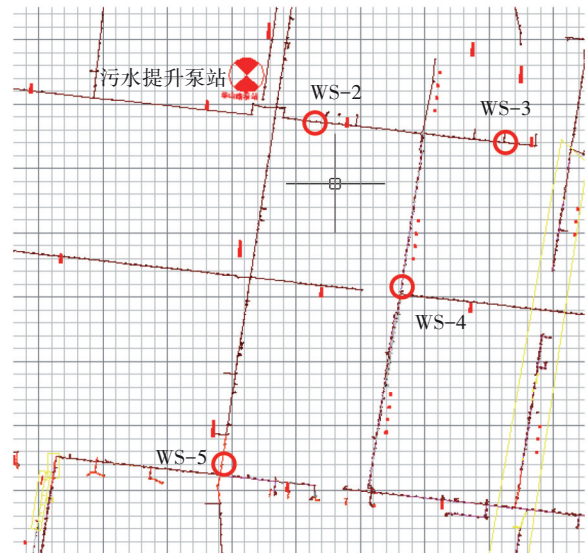


图3 污水提升泵站上游4个液位监测点分布

Fig.3 Liquid level monitoring points of WS-2, WS-3, WS-4 and WS-5

因此,当处于满管情况时,管道流量与泵站出口流量相关,为常量,沿程阻力系数、管道长度、管

道直径等参数也均为常数,则沿程水头损失不发生变化,上下游的液面高程差也相应地不发生变化。

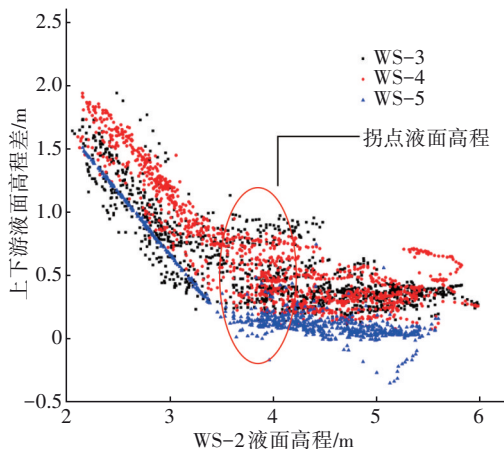


图4 监测点WS-3、WS-4、WS-5液面高程差与WS-2液面高程的关系

Fig.4 Relationship between liquid level elevation differences of monitoring points WS-3, WS-4 and WS-5 and the liquid level elevation of WS-2

通过对液位进行长期监测即可获取该片区液位变化的普遍规律,作为描述正常运行状态下的污水管网液位变化规律,将这一规律作为对照值(不仅包括上下游液位差与下游液面高程的变化趋势,也应包括由历史监测数据所生成的包络线),在后续管网运行过程中,通过在线监测设备获取的液位监测数据,如其形成的坐标点位于包络线外,则假定现场管网尤其是两个监测点之间的管段发生异常情况,需配合现场运营单位排查,对异常情况进行查证,如无异常情况发生,则将该部分数据纳入正常变化规律,如此重复即可获得更为准确的管道液位变化规律数据,为管网运行状态诊断提供依据。在以往关于管网液位的研究中,多将旱天液位作为背景值,通过对比降雨时的液位变化情况来判断雨污混流、入流入渗重点区域,笔者更进一步地将雨污混流、入流入渗纳入管网液位变化规律对照值范围,得到管网常规运行状态下的液位情况,从而将异常的液位变化作为管网状态变化的依据。

2.3 管道运行状况判断实例

在排水管道正常运行中,上下游液位存在明显的联动关系,上下游液面高程差与下游液面高程关系曲线以拐点液位高程为界限,可以分为两个阶段:第一阶段为线性减少阶段,随着下游液面高程的增加,上下游液面高程差随之线性减少;第二阶

段,随着下游液面高程的增加,上下游液面高程差无明显的变化,上下游液位呈现协同变化的规律。管道缺陷的发生会使得这种变化规律发生偏离。根据这一现象,分析管道液位监测数据进而对管道情况进行判断,从而更精准地对管道进行检测和修复,达到降本增效的效果。

① 在凤鸣湖北路(衡山路-泰山路)设置液位监测点2处(见图5),分别位于WS-2及WS-6两井,此两处井均为凤鸣湖北路主干管上污水井,流向华山路泵站,WS-6为上游,WS-2为下游,两点之间相距约480 m,同时还收集了嵩山路两侧的污水。两处点位信息:WS-2的地面标高、井底标高分别为8.233、3.353 m,WS-6的地面标高、井底标高分别为10.283、4.050 m。

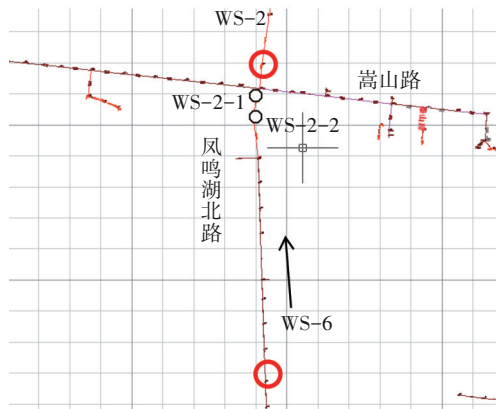
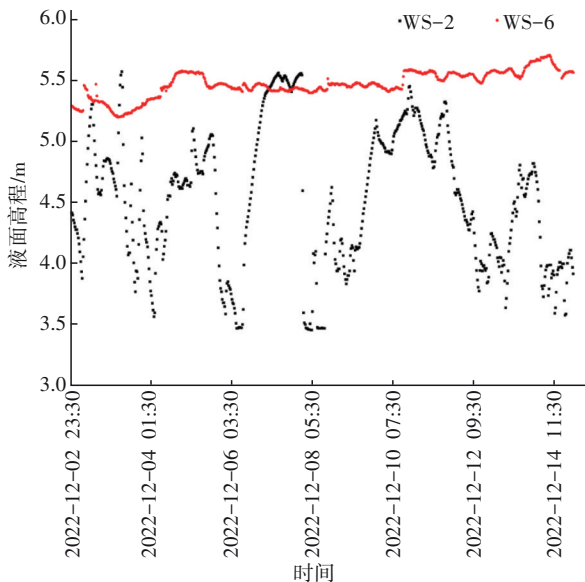


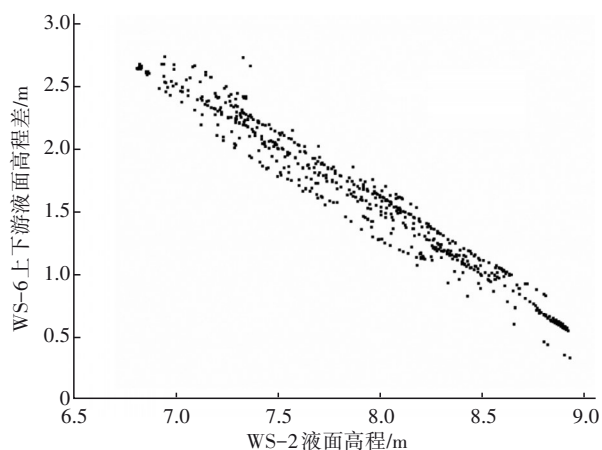
图5 WS-2、WS-6监测点位布置

Fig.5 Positions of WS-2 and WS-6

监测点WS-6与WS-2的液位相关关系见图6。



a. WS-6和WS-2的液面高程



b. 监测点WS-6上下游液面高程差与WS-2液面高程关系

图6 监测点WS-6与WS-2液位相关关系

Fig.6 Liquid level elevation relationship of monitoring points WS-6 and WS-2

由图6可看出,两个点位在2022年12月2日—14日期间液位数据无明显的相关关系,进一步对监测点WS-6上下游液面高程差与WS-2液面高程进行分析可知,WS-6与WS-2的液面高程差和WS-2的液面高程之间呈单调递减的变化,这与上节分析得到的管道上下游液面高程差与下游液面高程的相关关系不一致,在排除设备问题之后,通过现场排查发现在井WS-2-1~WS-2-2之间有一处管道四级障碍物(见图7),该缺陷的存在使得上游持续高液位运行,阻断了管道之间的连通关系,需实施管道整治以保证该段管道的正常运行。



图7 WS-2-1~WS-2-2管道CCTV检测结果

Fig.7 CCTV inspection of sewage pipe between WS-2-1 and WS-2-2

② WS-7、WS-8监测点位的布置如图8所示。WS-7为下游点,WS-8为上游点,两井间距约450 m,以WS-4与WS-2的相关关系为背景图(WS-4与WS-2井的距离为610 m,考虑到图中横坐标为监测点位处的液面高程,WS-2的井底标高为1.54 m,

WS-7的井底标高为3.95 m,为体现对比的合理性,分析时将WS-2的横坐标适当偏移),绘制WS-8与WS-7的液面高程相关关系,见图9。

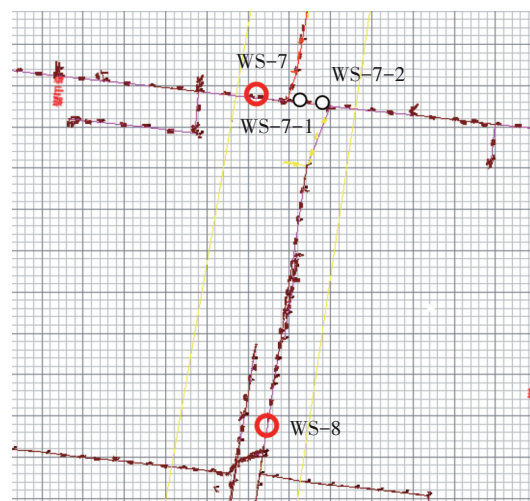


图8 WS-7、WS-8监测点位布置

Fig.8 Layout of WS-7 and WS-8 monitoring point

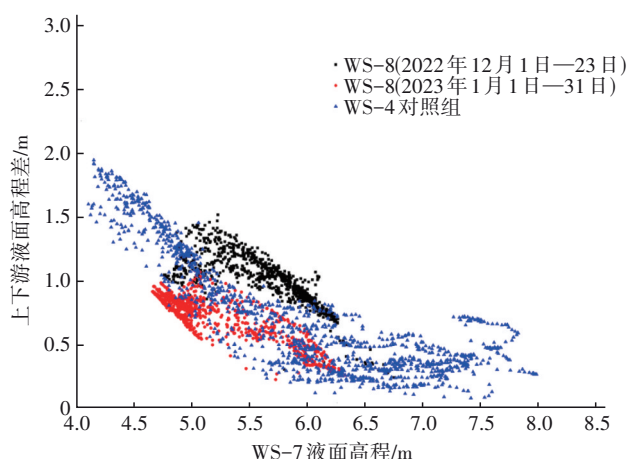


图9 监测点WS-8上下游液面高程差与WS-7液面高程的关系

Fig.9 Relationship between liquid level elevation differences of monitoring points WS-8 and liquid level elevation of WS-7

由图9可以看出,2022年12月1日—23日WS-8井与WS-7井之间的液面高程差为0.23~1.5 m,与WS-4~WS-2井相比,其分布曲线偏高,而实际上其管道间距比WS-4~WS-2井的更小,理论上其液面高程差也更小,因此判断此段管道中可能存在淤积或者堵塞情况,导致上游液位较高,但不影响管道的过水能力。基于此判断,对两井之间的管道进行全面排查,在WS-7-1~WS-7-2井之间发现存在一处封堵墙(见图10),对管道过水能力产生影响,

导致上游液面高程相对正常情况偏高,在对该处缺陷进行处理之后,WS-8与WS-7井之间的液面高程差减少至0.3~1.33 m,曲线回落至正常范围内。故通过建立管道正常运行情况下,上下游液面高程差与下游液面高程之间的相关关系曲线,以此为背景图,即可通过监测管道液面来判断管道的运行状态,以更小的成本及时判断管道缺陷发生区域。



图10 管道封堵墙CCTV检测视频

Fig.10 CCTV inspection of sewage pipe with a blocking wall

2.4 提高排水管网液位监测分析准确性的建议

通过管道液位监测数据对管道运行状态进行分析的基础是准确、可靠的GIS数据及在线液位监测数据,结合本次研究,对提高排水管网液位监测分析准确性的建议如下:

① 准确、可靠的管网GIS数据,包括管道连接关系、井底标高、井深等数据是进行监测布点方案设计及数据分析的基础,在基础资料掌握较差的区域,可通过前期的整体监测首先掌握整体信息,在逐步探明管道GIS信息的情况下,不断调整监测点位,确定最终的监测方案。

② 针对压力式的液位监测设备,其选点应尽量避免以下情况:a. 上游管道与井室之间有较大落差,上游来水会对压力传感器造成冲击,影响液位测量值;b. 井室长期运行在水位较高的状态,井室水位对设备透气塞的淹没和堵塞会导致液位测量偏大、运维量大大增加。

③ 运营人员需每天对已建立相关关系的点位进行数据分析,如当日规律偏离原规律,首先检查设备情况,若设备无问题,则需对现场情况进行排查,若有异常,则将该现象纳入案例库,若无异常,则将该段相关关系纳入统计范围。

3 结论

基于排水系统在线液位监测实践,构建了排水管道正常运行状态下的上下游液面高程差与下游液面高程的相关关系,在此基础上,建立了基于排水管道液位监测的管道运行状态诊断分析方法,通过实际案例对管道堵塞、淤积缺陷进行了识别和精准定位,进一步验证了排水管道液位在线监测在管道问题诊断、精准溯源方面的潜力和优势,最后结合实践,从管道基础信息、设备安装点位、设备运营三个方面对提高排水管网在线液位监测分析的准确性提出了建议。

构建科学的管网监测系统是一个循序渐进的过程,首先,依靠在线监测设备的精确监测、更科学的监测点位设置,依据现场工况,结合不断完善的管网数据,才能够建立系统、科学的在线监测网络,精确掌握管网的运行情况。其次,液位监测具有准确、易操作、成本低的优势,能在一定程度上反映管道问题,但由于管道系统情况复杂,仅靠液位数据不一定能够及时有效地反映管段过流量的真实变化,配合在线流量监测技术,能够更好地实现管道问题的诊断,为管网养护及整治修复提供量化的支持。再次,随着数据的不断积累和监测设备的增加,人工分析的难度越来越大,建立基于大数据的智能分析算法,对于及时发现设备及管网异常,评估管网运行状态就更为重要。最后,关于污水管道中液位变化规律有一些新的发现,例如:泵站调控、降雨或排水户大量排水对管道液位变化过程的不同影响;管道/井室的部分淤积或者垃圾堆积,对管道液位差规律可能无显著影响,但是对管道液位的变化过程有轻微的影响(根据淤积情况,影响在小时级或分钟级),下一步会继续开展管道液位在线监测的数据分析,并结合管网现场的排查和检查,探索管道液位监测在管网状态分析诊断方向的前景,为开展厂站网一体化智慧运营提供依据。

参考文献:

- [1] ALMEIDA M C, BRITO R S. System diagnostics using flow data: quantifying sources and opportunities for performance improvement [C]//ASCE. Proceedings of Ninth International Conference on Urban Drainage (9ICUD). Portland: ASCE, 2022: 13.
- [2] 程雨涵,李梅,梁漫春,等. 基于在线监测数据诊断管

- 网异常排放[J]. 给水排水, 2020, 46(8): 132-135, 151.
- CHENG Yuhuan, LI Mei, LIANG Manchun, *et al.* Diagnose abnormal discharge of pipe network based on online monitoring data [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(8): 132-135, 151 (in Chinese).
- [3] 赵冬泉, 王浩正, 陈吉宁, 等. 监测技术在排水管网运行管理中的应用及分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(8): 11-14.
- ZHAO Dongquan, WANG Haozheng, CHEN Jining, *et al.* Application and analysis of monitoring technology in operation and management of urban drainage network [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(8): 11-14 (in Chinese).
- [4] 郭效琛, 李萌, 杜鹏飞, 等. 排水管网在线监测布点数量的确定[J]. 中国给水排水, 2022, 38(2): 122-131.
- GUO Xiaochen, LI Meng, DU Pengfei, *et al.* Quantification of on-line monitoring layout in urban drainage network [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(2): 122-131 (in Chinese).
- [5] 杜培楠. 超声波流量计计量误差分析及控制措施研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(22): 163-164, 167.
- DU Peinan. Measurement error analysis and control measures of ultrasonic flowmeter [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2021, 41(22): 163-164, 167 (in Chinese).
- [6] 王剑锋, 黄微, 姚远, 等. 昆明排水管网在线液位监测网络建设及数据应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(11): 131-136.
- WANG Jianfeng, HUANG Wei, YAO Yuan, *et al.* Construction and data application of online liquid level monitoring system in Kunming drainage network [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(11): 131-136 (in Chinese).
- [7] 李志涛, 张慧, 印小军. 城市排水管网液位在线监测系统设计与实现[J]. 四川水利, 2021, 42(6): 131-134.
- LI Zhitao, ZHANG Hui, YIN Xiaojun. Design and implementation of on-line liquid level monitoring system for urban drainage network [J]. *Sichuan Water Resources*, 2021, 42(6): 131-134 (in Chinese).

作者简介:成浩科(1987-),男,河南三门峡人,博士,高级工程师,主要研究方向为市政给排水。

E-mail:313512229@qq.com

收稿日期:2023-02-17

修回日期:2023-10-25

(编辑:衣春敏)

优化国土空间开发保护格局,
加强生态环境分区管控,
加快推进重要生态系统保护和修复重大工程