

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 07. 018

# 基于在线液位监测的排水管网异常状态诊断

成浩科, 文 钺, 张 烨, 张亚洁, 陈凤梅  
(长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062)

**摘 要:** 为了充分挖掘在线液位监测数据在排水管网运维中的作用,识别液位变化规律和诊断管网异常运行状态,通过对液位长期监测数据的分析及现场复核验证,在明确管网上下游液位相关关系的基础上,进一步分析了管道液位上涨/下降过程及不同淤积状态对上下游液面高程差变化规律的影响。结果表明,上下游液面高程差与下游管道液位存在联动关系,而由降雨过程中雨水混接所带来的液位变化会导致上下游液面高程差与下游液位的关系异于常规情况;在上游存在多条支管的情况下,支管与主管之间的上下游液面高程差波动程度比无支管情况下要大,支管的淤积会对自身以及其他支管与下游主管的液位变化带来不同的影响。通过合理布置监测点和掌握管道液位的变化规律可更加精确地判断实际管道发生的异常情况类型及位置。

**关键词:** 排水管网; 异常状态诊断; 在线液位监测; 液面高程差

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)07-0124-06

## Diagnosis of Abnormal State in Drainage Pipe Networks Based on Online Liquid Level Monitoring

CHENG Hao-ke, WEN Cheng, ZHANG Ye, ZHANG Ya-jie, CHEN Feng-mei  
(Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430062, China)

**Abstract:** Long-term liquid level monitoring analysis and on-site verification were carried out to fully explore the role of online liquid level monitoring data in drainage pipe network operation and maintenance, identify the variation pattern of liquid level and diagnose abnormal operation state. On the basis of clarifying the correlation between the upstream and downstream liquid levels in the pipe network, the influences of the liquid level rise or fall process and the different silting states of pipeline on the variation of the upstream and downstream liquid level difference were analyzed. There existed an interdependent relationship between the upstream and downstream liquid level difference in the pipeline and the downstream liquid level elevation. The fluctuation in liquid level caused by rainwater and sewage mixing during rainfall influenced the relationship between the upstream and downstream liquid level difference and the downstream liquid level elevation. In the case of multiple upstream branches, the fluctuation of the upstream and downstream liquid level difference between the branch and the main pipe was greater than that without branches. Additionally, the siltation within the branch pipe had varying impacts on the liquid level change of each branch and downstream main pipes. By reasonable arrangement

基金项目: 长江生态环保集团有限公司科研项目(YEEC-KCTD-202207)

通信作者: 张亚洁 E-mail: zhang\_yajie1@ctg.com.cn

of monitoring points and variation pattern of the pipe liquid levels, it was possible to determine the types and locations of abnormal situations within the actual pipelines more accurately.

**Key words:** drainage pipe network; abnormal state diagnosis; online liquid level monitoring; liquid level elevation difference

排水管网是现代化城市重要的基础保障设施,随着城市的不断发展,排水管网系统日益庞杂,采用传统的管理手段已经不能满足排水管网日常管理的需求。在线监测技术和设备的应用,能够实时收集排水管网运行信息,为排水管网问题诊断提供数据支撑<sup>[1-3]</sup>,从而指导排水管网运维单位有针对性地开展排查和维护工作,提升排水管网运维成效,减少运维成本。

流量、液位、水质是排水管网最常用的监测指标<sup>[4-5]</sup>,其中液位计因其成本低、运营维护简单、测量准确,在排水系统中得到了广泛应用。在采用液位数据诊断管道状态方面,国内已开展了一些研究,例如,赵丛丛等<sup>[1]</sup>利用液位监测数据对管道的淤积风险、漫溢风险进行分析;范鹏辉等<sup>[6]</sup>在室内试验的基础上,建立CNN-SVM诊断模型,探讨液位监测排水管网缺陷诊断的可行性和有效性;王剑锋等<sup>[7]</sup>利用液位数据的旱雨季差异、上下游相关性进行了溢流区域的风险等级划分;笔者在前期研究中<sup>[8]</sup>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位的相关关系,通过案例验证了液位监测在管道问题诊断、精准溯源方面的可行性。

笔者以长江中下游W市排水管网为例,通过长期监测数据分析及现场复核验证,探讨管道发生异常运行状态时,管道液位监测数据的变化规律,为进一步发挥在线监测设备作用、诊断复杂现场情况下排水管网运行状态提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 区域概况

研究区域位于长江中下游W市某污水系统片区,采用分流制排水体制,服务面积约36 km<sup>2</sup>,污水厂设计处理能力为9×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,共有污水管网101 km,污水提升泵站5座,其中一级泵站1座、二级泵站3座、三级泵站1座。

### 1.2 监测点布置

使用20台液位监测设备(编号:WS1~WS20)通过轮检的形式对5个泵站片区开展了为期一年的监

测,监测时间为2022年12月1日—2023年12月16日。每个泵站片区的监测点布设原则为:根据泵站纳污范围内排水管网的拓扑关系,梳理筛选出系统内的主要污水管道,从泵站逐步向上游梳理管道连接关系,在关键节点安装液位监测设备,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点数量和位置。设备监测精度为0.1 cm。监测点数据在线率达到98%,液位传感器故障在24 h内解决。

## 2 液位监测结果与讨论

### 2.1 排水管道上下游液位联动关系特征

排水管道的上下游连通管段之间存在显著的联动关系,根据这一特性可以利用液位数据来诊断管道的异常状态,但前提是需要掌握片区内管道正常运行状态的液位变化规律,将这一规律作为对照,就可以在管道液位发生异常变化时及时进行预警。王剑锋等<sup>[7]</sup>在对昆明市排水管网液位检测时发现上下游主管的液位相关性可达到0.867~0.873;笔者在前期研究中<sup>[8]</sup>选择上下游液面高程差与下游液位之间的相关关系作为分析对象,发现在具有连通性的上下游污水管道中,上下游液面高程差与下游液位之间的相关关系分为两个阶段,在下游液位较低时,上下游液面高程差随着下游液位的升高而线性减小,同时存在一个拐点液位,当下游液位达到拐点液位值后进一步升高时,上下游液面高程差不再发生显著变化,即王剑锋等人研究中相关性较高的阶段。

选择具有上下游关系的WS1和WS2两个点位(WS1为下游,WS2为上游,位置见图1)的液位数据进行分析,采样时间为2022年11月28日—12月15日,图2为两个点位的液面高程差与WS1液位之间的相关关系。可以看出,其相关关系与前期研究结果<sup>[8]</sup>一致:变化过程中存在拐点液位,且在达到拐点液位后,管道进入满管运行状态,上下游液面高程差随主管液位的变化不再发生明显变化,对于该段管道监测点位而言,拐点液位在2.1 m左右。

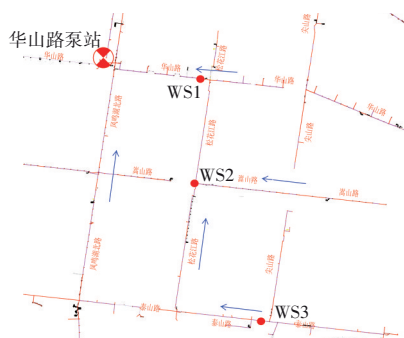


图1 液位监测点WS1、WS2和WS3的位置

Fig.1 Location of liquid level monitoring points WS1, WS2 and WS3

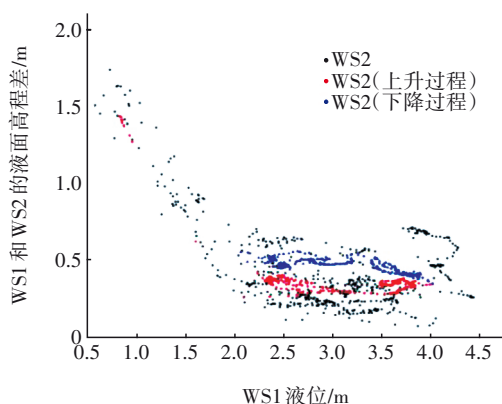


图2 WS1和WS2的液面高程差与WS1液位的相关关系

Fig.2 Correlation between liquid level elevation difference of WS1 and WS2 and liquid level of WS1

但值得注意的是,理论上当管道处于满管状态,即可看作压力流时,管道上下游的液面高程差应保持一致性的变化,但对于实际运行的排水管道,因受到沿线排水户排水、外水入侵、管道自身状况的影响,上下游液面高程差仍会发生一定程度的波动,如WS2与WS1两个点位的液面高程差的25%、50%、75%分位值分别为0.27、0.35、0.45 m。进一步选择2022年12月8日—13日一个管道液位上涨—下降周期中的数据进行分析,如图2所示,可以看出管道上下游液面高程差的变化规律在下游管道液位上涨和下降过程中存在明显的区别。当下游管道液位处于上升周期时,液面高程差与WS1液位的关系曲线向下偏离;当下游管道液位处于下降周期时,液面高程差与WS1液位的关系曲线向上偏离。本研究进一步对该现象的成因进行分析,探讨管道液位的变化过程对上下游液面高程差与下游液位相关关系的影响,进一步揭示排水管道中液位的变化规律。

## 2.2 管道液位上涨/下降过程对液面高程差的影响

2.1节的分析表明,管道中液位的上涨和下降过程会对拐点液位后的上下游液面高程差与下游液位之间的相关关系产生影响。选择WS1、WS2及WS3(为上下游关系,其中WS1为下游、WS2为中游、WS3为上游)在2023年2月1日—28日的液位监测数据进行分析,在该时间段WS1有3次完整的液位涨落过程,其中第1次由降雨引起,另外两次在非降雨状态下由泵站调控造成,据此可以研究不同因素导致的液位涨落是否会对管道液位变化规律造成影响。

首先分别对比了WS2与WS1的液面高程差与WS1液位的相关关系、WS3与WS1的液面高程差与WS1液位的相关关系在3次上涨—下降过程中的变化规律,结果见图3,其中上涨1、下降1为降雨前后的时间段,上涨2、下降2、上涨3、下降3则为未发生降雨的情况。

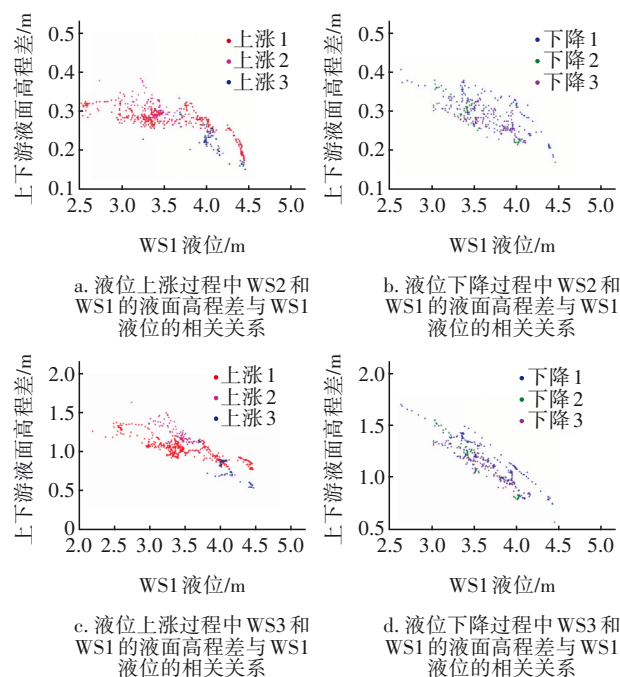
图3 液位涨落过程中上下游液面高程差与下游液位的相  
关关系

Fig.3 Correlation between elevation difference of upstream and downstream liquid levels and the downstream liquid level during different liquid level fluctuation processes

从图3可以看出,在液位上涨过程中,由降雨或泵站导致的液位上涨对管道上下游之间的液面高程差均无明显影响;而在液位下降过程中,发生降



雨后的液面高程差要高于未发生降雨的情况。管道中液位的下降过程是由于泵站排水,使得下游排水量大于上游来水量,当降雨后,下游泵站开始排水,由于片区内的雨污分流不彻底,仍有雨水持续通过小区混接口进入污水管道,使得在降雨后的液位下降过程中,在同等的下游液位情况下,上游液位要高于不发生降雨的情况。

进一步对比3次液位涨落过程中上下游液面高程差与下游液位之间的相关关系,见图4和图5。可以看出,在未降雨的情况下,液位上涨及下降过程中,上下游液面高程差与下游液位之间的相关关系基本一致,表明由于下游壅水带来的管道内液位涨落变化规律与管道液位处于上涨还是下降过程无关。但在降雨的情况下,因降雨导致的液位上涨及其之后的液位下降过程所带来的上下游液面高程差与下游液位之间的规律存在区别,液位下降过程中的上下游液面高程差要高于液位上涨过程。通过2.1节的分析可知,在液位上涨过程中,是否有降雨带来的雨水进入并不会对上下游液面高程差与下游液位的相关关系带来显著影响,而当液位开始下降时,由于降雨之后雨水的持续进入,上游液位降低得更慢,上下游液面高程差会高于未降雨的情况,通过这一现象就可以判断污水管道系统在降雨时是否有雨水的混接进入。

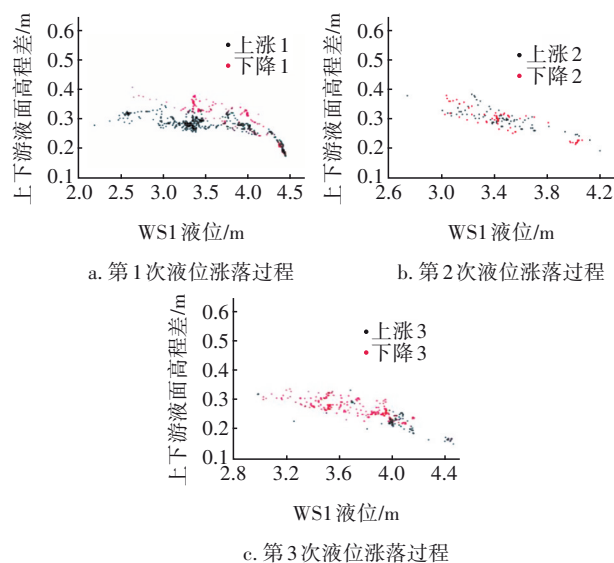


图4 液位涨落过程中WS2和WS1的液面高程差与WS1液位的相关关系

Fig.4 Correlation between liquid level elevation difference of WS2 and WS1 and liquid level of WS1 during different liquid level fluctuation processes

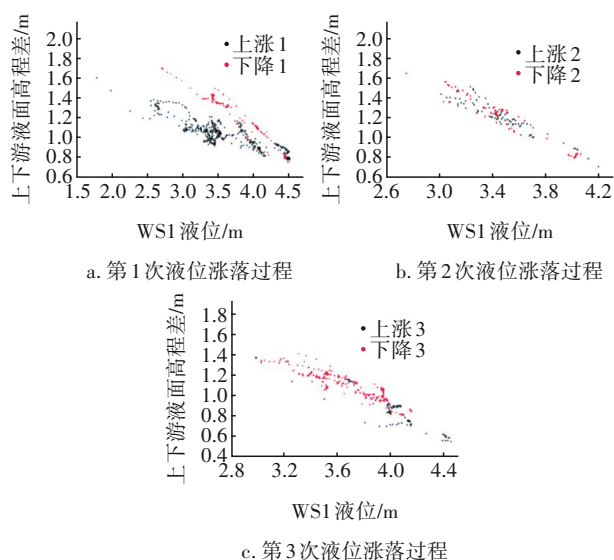


图5 液位涨落过程中WS3和WS1的液面高程差与WS1液位的相关关系

Fig.5 Correlation between liquid level elevation difference of WS3 and WS1 and liquid level of WS1 during different liquid level fluctuation processes

对比图4和图5发现,WS3在降雨时液位上涨和下降曲线的偏离程度要高于WS2,这可能由两方面原因造成:一是WS3与WS1的距离更远,WS3液位变化对WS1的影响要滞后于WS2对WS1的影响;二是调查发现,该片区在降雨时液位上涨主要是由于WS3上游某小区雨污混接整治不彻底,导致雨水进入污水管道,表明与雨水混入位置的距离远近会影响降雨时管道上下游液位的关系,这为通过液位监测判断雨水混入位置提供了新思路。

通过长期监测识别正常运行状态下的污水管网液位变化规律,并将这一规律作为标准对照,在后续管网运行过程中,当液位数据不符合常规规律时,可判断对应管段发生了异常情况。

### 2.3 管道淤积及清淤带来的管道液位变化规律

选择2023年9月1日—12月12日,WS4、WS5、WS6三个污水井(位置见图6)的液位在线监测数据,其中WS4为下游主管,WS5和WS6分别为汇流到WS4的两个支管井,将监测数据分为4个时段进行分析,第1时段为9月1日—30日(管道淤积),第2时段为10月28日—11月2日(不完全清淤,运营单位对WS5—WS7段进行了清淤,但WS7—WS8段未进行完全的清淤),第3时段为11月3日—14日(管道再次淤积),第4时段为11月26日—12月12日(管道完全清淤)。



游管道液位处于上升周期时,上下游液面高程差与下游液位的关系曲线与无雨水混入的情况无明显差异;当下游管道液位处于下降周期时,上下游液面高程差与下游液位的关系曲线相对于正常状态会向上偏移。由于泵站调控导致的液位上涨/下降过程则不存在这一现象。

② 在上游存在多条支管的情况下,支管与主管之间的上下游液面高程差波动程度会比无支管的情况要大,某一支管的淤积程度不同会对自身及其他支管与下游主管液位的关系产生影响。

通过持续收集管道液位数据并加以分析,可在不对管道进行导排的情况下,对管道的不同运行状态进行系统科学的判断,为管道养护及修复提供决策支持,降低排查与决策成本。

#### 参考文献:

- [1] 赵丛丛,赵云飞,任紫嫣. 水务物联监测技术在排水管网问题诊断中的应用[J]. 环境工程, 2023, 41(11): 34-38, 45.
- ZHAO Congcong, ZHAO Yunfei, REN Ziyang. Application of water IOT monitoring technology in problem diagnosis of drainage network [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(11): 34-38, 45 (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] TAN P Y, ZHOU Y C, ZHANG Y P, *et al.* Assessment and pathway determination for rainfall-derived inflow and infiltration in sanitary systems: a case study [J]. Urban Water Journal, 2019, 16(8): 600-607.
- [4] 罗坤,孙凌凯,马方凯,等. 基于水质水量监测的污水管网评估诊断与定量分析[J]. 中国给水排水, 2024, 40(13): 109-114.
- LUO Kun, SUN Lingkai, MA Fangkai, *et al.* Evaluation, diagnosis and quantitative analysis of sewage pipe network based on water quality and quantity monitoring [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(13): 109-114 (in Chinese).
- [5] 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).
- [6] 范鹏辉,姜涛,牛超群,等. 基于液位监测及CNN-SVM的排水管网缺陷诊断[J]. 中国给水排水, 2023, 39(23): 30-39.
- FAN Penghui, JIANG Tao, NIU Chaoqun, *et al.* Fault diagnosis method of drainage network based on liquid level monitoring data and CNN-SVM [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(23): 30-39 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] 成浩科,张亚洁,张浩,等. 基于排水管网在线液位监测的管网运行状态诊断[J]. 中国给水排水, 2024, 40(10): 107-113.
- CHENG Haoke, ZHANG Yajie, ZHANG Hao, *et al.* Drainage network operation status diagnosis based on online liquid level monitoring [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(10): 107-113 (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:2024-07-09

修回日期:2024-07-29

(编辑:刘贵春)