

基于实时监测数据的城市排水管网运行状态诊断与预警

卢林¹ 吴雪^{2*} 李皓君¹

1 云南省设计院集团有限公司

2 云南开放大学

DOI:10.32629/bd.v9i8.4623

[摘要] 极端降雨天气越来越频繁,城市建成区也在不断往外扩。过去那种靠人工巡检、定期排查的老办法,反应慢、隐患看不全、风险也预判不准,已经跟不上现代城市排水安全管控的要求了。本文利用管网实时监测的时序数据,研究城市排水管网的运行状态诊断和预警问题。先建一套科学的评价指标,再分析典型故障的数据特征,最后搭起智能诊断和时序预警模型,把管网运行状态判准、把风险提前看出来。目标是解决传统运维方式预判能力差、故障发现晚的问题,提升城市排水管网的安全管控水平,为城市防汛排涝和地下管网智慧化管理提供理论和技术的支撑。

[关键词] 实时监测数据; 城市排水管网; 运行状态诊断; 预警

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A

Diagnosis and Early Warning of Urban Drainage Network Operating Conditions Based on Real-Time Monitoring Data

Lin Lu¹ Xue Wu^{2*} Haojun Li¹

1 Yunnan Design Institute Group Co., Ltd.

2 Yunnan Open University

[Abstract] Extreme rainfall events are becoming increasingly frequent, while the built-up areas of cities continue to expand. Traditional methods based on manual inspections and periodic investigations are characterized by slow response, incomplete identification of potential hazards, and inaccurate risk prediction, making them inadequate for modern urban drainage safety management. This paper investigates the diagnosis and early warning of urban drainage network operating conditions using time-series data from real-time network monitoring. A scientific evaluation index system is first established, followed by an analysis of data characteristics associated with typical faults. Intelligent diagnosis and time-series early warning models are then developed to accurately assess network operating conditions and identify potential risks in advance. The study aims to address the poor predictive capability and delayed fault detection of traditional operation and maintenance methods, improve the safety management of urban drainage networks, and provide theoretical and technical support for urban flood prevention and drainage as well as intelligent management of underground pipeline networks.

[Key words] real-time monitoring data; urban drainage network; operating condition diagnosis; early warning

引言

物联网在线监测技术越来越成熟,液位、流量、流速这些实时监测设备在排水管网监测中用得也越来越广,攒下了海量连续的时序运行数据。这些数据能真实反映管网的水力运行状态,也给数据驱动的智能诊断和风险预警提供了一条新路子。利用实时监测数据,把管网运行规律挖出来,把异常工况的特征识别出来,再搭起一套科学的状态诊断和预警体系——这已经成为当前城市排水智慧化管理的一个重要方向。

1 城市排水管网运行状态诊断研究

1.1 管网运行状态评价指标体系构建

(1) 结合城市排水管网常见运行问题,从四个运行状态维度来筛选核心指标。针对管网稳态运行状态,主要选那些能反映管道正常输水能力的基础参数,用来判断管网日常输水稳不稳定、通不通畅。针对管网过载运行状态,聚焦雨水高峰期、大水量工况下的运行参数,找出管网输水能力不足、负荷超限的问题。针对管网淤积状态,选能体现管道通水断面变化、水流流速异常的

参数,依靠数据特征来识别管道泥沙堆积、杂物淤积这些隐性病害。针对积水风险状态,侧重筛选能反映管网排水滞后、管网顶托、排水能力不足的参数,预判路面积水、管道溢流等风险^[1]。这几个维度的指标互相补充,基本能覆盖管网的各种运行工况。(2)为了避免人工主观判断带来的偏差,需要用规范化的计算方法给各项评价指标确定权重。根据指标对管网运行风险的影响程度来分配权重比例,突出核心指标的作用,弱化次要指标的干扰。权重算完之后,再结合城市排水设计规范和管网运行阈值标准,对整体运行状态做等级划分。根据指标综合评分结果,把管网运行状态分成四个档次:正常稳定、轻微隐患、一般风险、严重故障。等级划清楚了,就能精准区分管网运行的好与坏,为后续的故障诊断、风险预警和管网运维整治提供一个标准化的判定依据。

1.2 管网典型故障状态特征分析

(1)管网淤积在排水系统里算是比较隐蔽的慢性病,不会一下子造成剧烈的工况波动,潜伏性很强,泥沙和杂物在管道里长时间堆积,会挤占过水断面,改变水流输送的条件。在常规降雨和日常排水情况下,淤积管道里的水流速度会长期比正常水平低,水体流动动力不足。同样进水条件下,管内的液位会持续偏高,排水效率整体往下降。时序监测数据会表现出变化平缓、衰减慢的特点,排水回落的时间明显拉长。这类数据变化相对平缓,常规监测手段不容易察觉到。但时间一长,管网输水能力会持续降低,运行隐患也会一步步加重。(2)管道堵塞跟淤积不一样,工况变化更剧烈,属于突发性故障。管道局部堵了杂物之后,过水断面突然缩小,上游的水流过不去,管内液位会快速抬升^[2]。对应的监测数据会出现短时间内液位大幅上涨、流速骤降的异常变化,上下游的水文数据呈现明显的断层特征。堵塞越来越严重,排水能力完全扛不住的时候,就会引发溢流。(3)管网超负荷运行多出现在强降雨集中的时段,属于外部水量冲击引起的工况异常,短时间大量雨水涌进管网,超出了管道设计的输水负荷,打破了管网稳态运行的平衡。超负荷工况下,管网的整体流量和流速快速攀升,并且长时间维持在高位,管内液位持续处于高阈值区间。受下游排水顶托的影响,水体排出去的速度慢了不少,管网整体处在高负荷承压状态,这个状态虽然不算管道结构性损坏,但会大大增加淤积、堵塞和溢流问题的概率。它是判断城市内涝风险、评估管网承载能力的一个重要数据依据。

1.3 基于监测数据的管网状态诊断模型

(1)模型构建主要依据管网各类故障的数据特征规律,围绕稳态运行、淤积堵塞、超负荷和溢流风险这四类运行状态来建立识别逻辑。整体思路是跳出传统经验公式那种单一判定模式,采用数据驱动的建模方式,把清洗降噪后的液位、流速、流量时序数据作为模型输入特征。再结合前面梳理的不同故障状态的数据变化规律,挖出数据背后隐藏的管网运行特征关联。通过特征筛选和维度优化,剔除冗余的干扰信息,只保留辨识度更高的核心特征参数。(2)为了保证模型的识别精度和运行稳定性,需要做系统化的模型训练和参数迭代优化。先把整理好的数据集

按合理比例分成训练样本和验证样本,保证数据分布均匀,既要覆盖常态工况,也要有各类故障工况,避免只用单一类型数据导致模型拟合出偏差。模型训练过程中,持续迭代调整内部超参数,优化模型的特征提取能力和收敛速度^[3]。同时引入正则化优化方法,有效规避过拟合和欠拟合问题,提升模型的泛化能力。(3)模型训练和参数优化完成之后,就可以用成熟的模型对管网整体运行状态做智能化识别判定。模型能自主提取实时监测数据中的时序变化特征,精准区分正常运行状态和各种异常故障状态,完成自动化的分类诊断。再结合预设的运行等级标准,对管网当前运行质量进行综合评定,量化隐患有多严重。通过对诊断结果的整体分析,可以清楚掌握区域管网的运行短板,摸清各类故障的发生规律。

2 城市排水管网运行预警模型构建

2.1 预警分级标准确定

2.1.1 量化阈值作为判定依据

管网风险预警分级不再靠人工经验拍脑袋,而是用量化的运行阈值做核心判定依据。阈值设定要综合考虑城市排水工程设计规范、管道固有的输水能力,以及长期监测积累下来的工况数据。研究以流量、流速、液位这些核心监测指标为基础,结合管网稳态运行区间、负荷临界区间和故障超限区间,划分不同状态对应的数值范围。把管网正常输水、轻微异常、负荷超标、严重超限这几档参数边界理清楚,确立各指标对应的风险阈值范围。同时兼顾降雨时序变化、管网水力传导特性这些间接影响因素,对单一指标阈值的局限性做一些修正。让分级依据完全贴合管网水力运行机理,保证每一个风险判定都有数据和理论支撑,提高预警分级的科学性和客观性。

2.1.2 四个预警等级划分

结合量化阈值标准和管网运行风险程度,把排水管网预警等级分成四个档次:正常状态、关注状态、预警状态、紧急状态。(1)正常状态:管网处于标准的稳态运行区间,各项监测指标都在合理范围内,水流输送平稳,不存在淤积、积水或超载等运行隐患,管网整体运行安全稳定。(2)关注状态:属于轻微异常工况。各项监测指标小幅偏离标准区间,但还没到故障临界条件。管网输水能力略有下降,存在轻微淤积或水流滞缓的情况,短期内不会产生内涝风险,需要持续监测工况变化趋势。(3)预警状态:管网运行出现明显异常,核心指标接近或达到负荷临界阈值。管网输水压力明显加大,排水效率大幅降低,局部区域有积水和堵塞隐患,具备一定的内涝风险,需要提前启动预备运维管控措施。(4)紧急状态:属于高危故障工况。监测指标全面突破安全阈值,管网处于超负荷运行状态。管道溢流、路面积水这些问题极易发生,城市内涝风险很高,需要立即启动应急处置方案,快速开展排水调度和管网疏通工作。

2.2 时序预警模型搭建

(1)模型构建首先要做输入特征筛选和数据集样本搭建,这是保证模型预测效果的基础。结合管网运行的时序变化特点,选那些能反映管网工况动态变化的核心参数作为输入特征,包

括管道液位、水流流速、实时流量等核心监测数据。同时把时序变化特征也纳进来,比如数据变化速率、时段波动幅度、工况持续状态这些隐性特征,让模型的识别维度更丰富^[4]。基于长期连续监测的时序数据完成样本集构建,按时间序列整合不同天气、不同时段的管网运行数据,覆盖稳态运行、轻微异常、过载承压、故障高危等各种工况场景。对原始样本做统一规整和平衡处理,避免数据样本不均衡导致模型偏向,保证样本数据能全面覆盖管网的各种运行状态。(2)结合排水管网数据时序性强、动态波动明显的特点,有针对性地设计适配时序预测的预警模型结构。模型整体结构贴合时序数据的分析逻辑,分成四个核心部分:特征输入层、特征提取层、状态判别层、结果输出层。特征输入层负责接收整理后的多维时序数据,做好数据标准化适配处理。特征提取层专门挖掘时序数据的前后关联规律,捕捉管网工况的渐变趋势和突变异常特征,精准提取不同风险等级对应的隐性数据规律。状态判别层结合前面设定的预警分级标准,完成运行风险等级的智能判定。结果输出层最终输出管网实时运行风险等级和风险预判趋势,实现从数据监测到风险预警的全流程智能化分析。(3)模型搭建完成之后,还需要通过标准化的训练和验证流程来优化模型性能。把构建好的样本数据集按合理比例分成训练集和验证集,用训练集数据做模型迭代学习,持续调整模型内部参数,优化特征提取和风险判定能力。训练过程中动态校正模型偏差,避免过拟合和欠拟合问题,提升模型的泛化能力和稳定性。训练结束后,用验证集数据对模型预测效果做全方位检测,对比模型预警结果和实际管网运行状态的匹配程度。通过多项评价指标综合评估模型的精准度、灵敏度和稳定性,选出最优的模型参数组合,确保模型能精准捕捉管网风险演变趋势,满足实际工程预警应用的需求。

2.3 管网风险预警结果与分析

(1)短时积水和管道溢流,多半是短时强降雨引发的,属于变化快、影响直观的突发风险。这种工况下,监测数据会在短时间内出现明显的起伏,对模型的响应速度和识别灵敏度要求比较高。从模型输出的预警信息来看,系统能紧跟水量变化节奏,捕捉参数异动,在管网负荷接近临界区间时及时发出对应等级的提示。(2)模型能够根据液位、流量等数据的上升趋势预判工况走向,在险情形成之前就把风险提示发出来。整体预警响应节奏跟管网水力变化过程是合拍的,不同风险梯度的划分结果也和现场工况保持一致。快速有效的预警输出,能帮管理方提前调

配排水资源,做好区域管控。并且也能看出,数据波动越剧烈的工况,模型的识别特征越清晰,整体预警表现也越稳定。(3)管网淤积属于发展慢的隐性问题,相关监测数据不会剧烈波动,变化趋势是长期、渐进的,这也是风险预警里的一个难点。时序预警模型依托连续的历史数据做趋势研判,能够捕捉到常规排查很难发现的细微参数变化。(4)模型通过对比不同时段的流速、液位变化规律,识别过水断面缩减带来的运行异常,逐步判断管道内部淤积到了什么程度。针对这类缓慢演变的隐患,模型不会只盯着某一个时刻的数据做判定,而是结合长周期时序走势综合评估风险等级。从整体分析结果来看,模型能持续跟踪淤积问题的发展态势,按预设标准推送对应的预警信息。

3 结语

总之,把管网各类典型故障的运行特征理清楚,建立一套贴合实际工况的综合评价指标和预警分级标准,再完成状态诊断模型和时序预警模型的搭建、训练与性能验证。然后分别针对短时突发的积水溢流风险和长期淤积隐患做了预警效果分析,就这样形成了一套完整的管网状态识别与风险预判体系。

[项目编号]

2026J0839,名称:绿色低碳转型背景下基于SWMM模型的市政排水管网智慧评估研究,云南省教育厅科学研究基金项目。

[参考文献]

- [1]黄冕眉.基于多源数据融合与深度学习模型的排水管网故障诊断技术研究进展与展望[J].市政技术,2026,44(4):281-286.
- [2]刘军,王乾坤,王冲.水利工程供排水管网实时监测与异常预警机制分析[J].水上安全,2026,(2):142-144.
- [3]孔令彦,鲍鹏,谢文瑄,等.融合物联感知数据的城镇排水管网动态知识图谱构建研究[J].工程勘察,2026,54(3):117-122.
- [4]赵森鑫,张涛,倪臣,等.城市排水建筑一体化设计中的水环境承载能力分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2026,(4):001-004.

作者简介:

卢林(1989—),男,汉族,云南人,研究生,高级工程师,研究方向:市政给排水及水环境综合治理项目的策划与设计。

*通讯作者:

吴雪(1988—),女,汉族,辽宁人,研究生,副教授,研究方向:市政工程领域的教学与科研工作。