 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9303

Design and Practice of Intelligent Monitoring System for Water Supply and Drainage Pipeline Network under the Background of Smart Water Management

Yujuan Zhang[1] Kangkang Li[1*] Chengfeng Shi[2]

1. Dongying Garden Investment Development Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257091, China
2. Dongying Yihai Construction Engineering Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

As the core component of underground lifeline engineering, the precise perception of the operation status of urban water supply and drainage pipeline network has long been limited by the timeliness defects and spatial coverage blind spots of traditional manual inspection mode. The deep integration of IoT sensing technology and artificial intelligence algorithms provides a technological pathway to overcome the aforementioned challenges. The online collection of parameters such as pressure, flow rate, and water quality has transformed the pipeline network from a black box state to an observable object, and the machine learning anomaly detection algorithm has enabled the system to actively identify potential risks. The research mainly focuses on the architecture design, key technology implementation and engineering application verification of the intelligent monitoring system, trying to answer the core issues such as how to maximize the monitoring coverage efficiency under cost constraints, how to balance the computing power distribution of edge computing and cloud analysis, and how to improve the accuracy of leak location under complex network topology conditions.

Keywords

Smart Water Management; Water supply and drainage pipeline network; Intelligent monitoring; Leakage location; Edge computing; Deep learning

智慧水务背景下给排水管网智能化监测系统设计与实践

张玉娟[1] 李康康[1*] 石成峰[2]

1. 东营园林投资发展有限公司，中国·山东 东营 257091
2. 东营宜海建设工程有限公司，中国·山东 东营 257000

摘 要

城市给排水管网作为地下生命线工程的核心组成，其运行状态的精准感知长期受制于传统人工巡检模式的时效性缺陷与空间覆盖盲区。物联网传感技术同人工智能算法的深度整合，给摆脱上述困境赋予了技术途径。压力、流量、水质等各方面的参数在线采集使管网由黑箱状态变为可观测的对象，而机器学习的异常检测算法又使系统具有了主动识别潜在风险的能力。研究主要针对智能化监测系统的体系架构设计、关键技术实现和工程应用验证，试图回答在成本限制下怎样最大化监测覆盖效能、怎样平衡边缘计算和云端分析的算力分配、怎样提高复杂管网拓扑条件下漏损定位的精度等核心问题。

关键词

智慧水务；给排水管网；智能化监测；漏损定位；边缘计算；深度学习

1 引言

本文以 HY-2024 智慧水务试点工程为载体，创建起一个把多源异构传感器、边缘计算网关、云端智能分析平台融合在一起的管网智能化监测系统。系统在试点区域覆盖管网总长度为 287.6 公里的范围内布置了压力、流量、水质等各类传感终端共 1842 个监测点位，实现了管网运行参数的秒级采集和分钟级异常响应。基于深度残差网络和时序卷积融合的漏损定位算法，在实际工况下准确率达到 92.37%，比传统的负压波法高了 18.64 个百分点。系统上线运行 278 天之后，试点区域管网漏损率由原来的 14.82% 降低到 9.17%，单次漏损事件的平均响应时间由原来的 47.3 小时缩短到 6.8 小时。研究结果表明，此智能化监测系统对提高管网运维效率、降低产销差有着明显的工程应用价值。

【作者简介】张玉娟（1983–），女，中国山东淄博人，本科，工程师，从事给水排水施工研究。

【通讯作者】李康康（1986–），男，中国山东东营人，本科，工程师，从事给水排水施工研究。

2 系统总体架构与技术原理

2.1 智慧水务背景下给排水管网监测需求分析

HY-2024 工程前期调研发现试点区域管网运行存在结构性问题，产销差率一直超过国家控制标准，暗漏占总泄漏的 73.4%，传统听漏仪夜间有效巡检长度不足管网总长度的 8%。排水管网遇到合流制管段混接溯源的技术难题，水质监测要求包含常规指标和重金属快速筛查，压力流量参数要秒级采样，水质参数可以放宽到分钟级 [1]。

2.2 智能化监测系统总体架构设计

系统架构按照端、边、云三层协同的模式来设计，感知层中布置的监测点按照功能可以分为压力、流量、水质、液位四类，布点的密度按照水力模型敏感性分析的结果进行优化配置。边缘计算网关完成本地的数据清洗、特征提取，上传到云端的只有原始采集量的 12.3%，边缘侧部署轻量级的异常检测模型可以实现毫秒级的本地预警，云端平台主要负责深度学习模型的训练和多源数据的关联分析。

2.3 核心传感与数据传输技术选型

压力传感器为硅压阻式，精度等级为 0.1% FS，IP68 防护等级保证井下潮湿环境长时间稳定运行；流量监测采用电磁流量计和超声波流量计相结合的方式。数据传输层使用的是 NB-IoT 和 LoRa 混合组网的方式，应用层使用 MQTT 轻量级消息队列，数据帧格式在经过深度优化之后可以支持传感终端达到 5 年的设计寿命 [2]。

3 智能化监测系统的关键技术实现

3.1 管网压力与流量实时监测技术实现

压力监测子系统数据采集周期为 10 秒，异常触发模式下可以自动切换到 1 秒级高频采样。采集终端内置的 MEMS 加速度计可以识别井盖开启、车辆碾压等物理扰动事件，防止由于机械振动造成压力信号失真而被误判成管网异常。原始压力数据经过卡尔曼滤波处理之后，消除了测量噪声的影响，系统建立了覆盖全监测区域的压力基线模型，用分位数回归的方法拟合压力的日周期波动规律，压力偏离基线幅度超过阈值就触发预警。流量监测的技术难点是大口径管道全管段流速剖面测量，主干管用多声道超声波流量计，流量数据和压力数据的时间戳同步精度控制在 100 毫秒以内，为水力瞬态分析打下数据基础。

3.2 水质多参数在线检测技术实现

供水管网水质检测的重点是余氯衰减以及微生物二次污染的预警。在线余氯分析仪采用恒电位电解法原理来监测管网末端余氯浓度，监测数据显示管网末端余氯浓度存在明显的空间异质性，系统据此建立了余氯衰减预测模型，把管龄、水温、管材类型等因素纳入多元回归分析框架中，可以提前几个小时预测出余氯浓度跌破限值的高风险区域 [3]。排水管网水质监测有成分复杂、腐蚀性强的双重难题，化学需氧量在线分析仪采用紫外吸收法、重铬酸钾消解法双校准方式，工业园区排口的重金属在线监测站可以同时检测出多种离子浓度，运行期间记录了多起超标排放事件。

3.3 管网漏损定位与预警算法设计

漏损定位算法的核心架构采用深度残差网络与时序卷积神经网络的级联融合设计。第一阶段的深度残差网络来提取多点位压力时间序列的空间相关特征，用预激活结构缓解梯度消失问题；第二阶段的时序卷积网络有指数级增长的感受野，将两阶段特征进行融合输出漏损点位的概率分布热力图，最小可定位单元对应 50 米的管段。模型训练时加入了对抗样本增强和迁移学习的方法，训练数据集中包括了历史漏损事件的真实样本和基于 EPANET 水力仿真模型产生的虚拟样本，在独立测试集上定位准确率为 92.37%，比传统负压波法提高 18.64%。

3.4 监测设备低功耗与远程维护技术

设备固件使用多级休眠唤醒方式，在非采样时间处理器进入深度睡眠状态，射频模块发射功率可以调节，平均发射功率比固定功率方案低很多。远程维护能力的形成缩减了现场运维的人力投入，系统具备固件空中升级的功能，升级包采用差分压缩算法生成，远程诊断模块可以提取电池电压、信号强度、传感器健康度等重要指标，采用阈值规则和趋势预测相结合的方式提前发现有故障的设备，防止因为设备失效造成监测盲区 [4]。

4 系统应用实践与效果验证

4.1 应用场景部署与系统集成实施

HY-2024 工程从试点到分区推进的 187 天里有序推进。第一阶段选择产销差率最大的 C03 分区作为试验田，该分区管网长度 28.3 公里，服务人口 4.7 万人，历史产销差率为 19.6%。试验田阶段布置压力监测点位 182 个、流量监测点位 36 个、水质监测点位 12 个，用密集监测来验证系统架构的合理性以及算法模型的有效性。第二阶段把监测范围扩大到全部 9 个分区计量区域，根据试验田阶段积累的经验对监测点位密度做了差异化调整，漏损高发区压力监测密度提高到每公里 8 个，运行平稳区降低到每公里 4 个来控制建设成本。

系统集成过程中既有 SCADA 系统、GIS 平台、营收系统数据打通成为主要的技术难题。SCADA 系统用 OPC UA 协议同智能监测平台进行实时的数据交换，采集频率由原来的 5 分钟提高到现在的 1 分钟，以满足新系统时间分辨率的要求。GIS 平台利用 REST API 接口对管网拓扑数据进行查询，支撑漏损定位算法的可视化输出。营收系统导出的用户水表抄检数据经过地址匹配、空间聚合之后得到区域用水量统计，再与流量计实测数据进行交叉校核，找出计量设备的系统偏差。集成测试阶段找到的 47 项接口缺陷经过两轮迭代修复全部关闭，系统于 2024 年 3 月正式切换到生产运行模式 [5]。

4.2 多源监测数据采集与处理流程

系统日均采集数据量达到 2.78GB，经过边缘预处理、云端清洗、特征存储三层处理管线后形成可以供分析调用的标准化数据资产。边缘网关完成的预处理任务有异常值剔除、数据插值、边缘特征提取，原始数据中有大约 4.2% 的采样点被当作异常点剔除，缺失的数据用三次样条插值的方法来填补。云端数据清洗环节还要进行跨设备的一致性校验，对同一管段相邻监测点位出现物理矛盾的数据（如下游压力持续高于上游）启动人工核查流程。特征存储层使用时序数据库和关系数据库混合架构，原始时序数据保留 90 天滚动窗口，聚合后的小时级、日级统计数据永久保存。

数据质量监督系统贯穿于采集、处理的全过程。系统建立起了包含完整率、及时率、准确率这三个方面的数据质量评价指标，每天自动生成数据质量报告并推送给运维人员。2024 年第四季度压力监测数据完整率为 99.12%，流量监测数据完整率为 98.67%，水质监测数据由于设备维护周期较长，完整率相对较低，为 96.34%。及时率指标是指数据到达云端平台的延迟是否大于设定阈值，全系统平均及时率为 99.78%，未达标的主要是信号覆盖较差的少数深井点位。

4.3 管网运行状态智能诊断实践

智能诊断模块自系统上线以来的 278 天内一共处理了 1247 起预警事件，人工核实的真实异常事件为 863 起，预警准确率为 69.2%。漏损类预警占比最大，为 41.3%，其次是压力异常预警占比 28.7%，流量突变预警占比 18.4%。系统成功预警了 3 起重大漏损事件，漏损流量均大于每小时 50 立方米，如果用传统的依靠用户报修来发现的方式，预计延迟时间会超过 72 小时。典型案例中 A07 区域 DN400 管道爆管事件发生后 127 秒被系统捕获，定位偏差 83 米，运维团队在事件发生后 2.3 小时完成抢修恢复供水。

智能诊断误报主要是由于用水模式异常波动和设备故障混淆。大型商业用户的非规律用水行为会造成局部区域压力和流量的异常，系统一开始把这种情形错误地判断为漏损事件。后期版本中加入用户类型标签以及用水习惯特征库，针对商业用户周边监测点位动态调节预警阈值，误报率从原来的 38.6% 下降到现在 30.8%。降低误报率还要依靠更长的运行数据积累，来完善用水模式的知识图谱。

4.4 系统应用效果分析与优化建议

系统应用效果的量化评价主要用产销差率和漏损响应时间两个指标。上线前试点区域产销差率的基线值是 14.82%，上线运行 278 天之后该指标降低到 9.17%，降幅达到 5.65 个百分点，年化节水效益约为 156 万立方米，折合经济价值约 468 万元。漏损事件平均响应时间从传统模式下的 47.3 小时缩短到 6.8 小时，响应效率提高了约 7 倍。从投入产出比的角度来分析，系统建设总投资 1820 万，按照 10 年折旧计算年均成本 182 万，节水经济效益已经覆盖了运维成本，并且产生明显盈余。

后续的优化方向有三个方面，传感器的可靠性提高、算法精度的提高、业务场景的扩展。目前部分水质传感器在高浊度水体环境中的电极污染加重，需要寻找自清洁涂层和机械清洗相结合的维护方案。漏损定位算法对于小流量暗漏的检测能力还差，将采用多分辨率小波分解技术来提高微弱信号特征的提取。从业务场景上看，压力优化调控和泵站能效管理可以和监测系统联动，使用实时压力分布数据来调节变频泵组的运行参数，年节电率可达 8%~12%。

5 结语

智能监测系统在 HY2024 智慧水务试点工程中的实践表明，端、边、云协同架构在复杂的管网环境下是可行的，也是经济合理的。多源异构传感终端的大规模部署解决了管网状态感知的覆盖盲区问题，边缘计算和云端智能分析相互配合，实现了数据处理效率和分析深度的平衡。深度学习算法加入之后，漏损定位从以前的经验判断变为数据驱动、精准预测为主，为主动式管网运维模式的创建打下了技术基础。系统推广应用还存在着传感器长期稳定性、算法泛化能力、数据安全合规等现实问题。各个城市的管网拓扑结构、用水模式、运维能力各不相同，直接套用 HY-2024 工程的技术方案很难达到预期的效果，因地制宜的本地化适配将会成为规模化推广的重要环节。伴随着 5G 网络的深入覆盖和边缘智能芯片算力的不断提升，监测系统实时性、智能化水平将会得到新的提升，进而促使城市供水服务由安全保障型向优质服务型转变。

参考文献

[1] 王飞.城市集中供热管网的智能化监测与节能优化技术研究[J].张江科技评论,2025(1):46-48.

[2] 周倩倩,王琦,王志红,刘立凡,聂锦旭.智慧水务背景下城市给排水管网系统课程的改革和创新思路探讨[J].中文科技期刊数据库(文摘版)教育,2022(10):238-240.

[3] 张开明,杨永飞,司凡,帅嘉.智慧水务在滨海城市污水管网设计的应用[J].智能城市,2025,11(1):133-135.

[4] 盛庭杰.智慧水务在市政给排水工程中的应用探讨[J].中国地名,2025(6):0019-0021.

[5] 刘大双,刘小双.智能化技术在市政给排水工程的应用研究[J].微型计算机,2025(24):145-147.