

智慧水务背景下的给水管网漏损智能诊断与调控

廖红艳

华章（江西）技术有限公司 江西宜春 331299

摘要：本文围绕智慧水务背景下的给水管网漏损问题，研究并构建了一套智能诊断与调控系统。文章首先阐述了以多源感知数据为基础的漏损智能诊断技术，通过数据驱动方法实现漏损的精准识别与定位，并设计了系统的功能架构。其次，深入分析了漏损与管网水力状态的关联性，提出了基于实时诊断信息的管网压力智能调控方法及联动机制。最后，从系统总体架构、核心模块协同和关键技术支撑三个方面，阐述了系统的集成与实现路径。研究表明，该系统能有效实现从“被动抢修”到“主动防控”的管理模式转变，对降低管网漏损率、保障供水安全、提升运营效率具有重要的实践价值。

关键词：智慧水务；给水管网；漏损控制；智能诊断

引言

给水管网是城市的“生命线”，但其漏损问题长期以来困扰着供水行业，不仅造成宝贵水资源的巨大浪费，也带来了供水安全隐患和巨大的经济损失。传统依赖人工巡检和经验判断的漏损控制模式，存在响应滞后、定位不准、效率低下等弊端，已难以适应现代化城市水务管理的需求。随着智慧水务理念的深入发展和物联网、大数据、人工智能等技术的广泛应用，为管网漏损管理提供了革命性的技术手段。

一、给水管网漏损智能诊断技术

（一）漏损智能诊断的数据基础

智慧水务背景下，给水管网漏损智能诊断的数据基础源于多源感知数据实时采集与融合，包括压力、流量、水质、声学数据等，构成管网运行数字化表征。压力数据反映节点压力变化，助判泄漏；流量数据监测管段流量，找异常损失；水质数据变化指渗漏或污染风险；声学数据能定位漏损点。各数据关联紧密，如压力波动伴流量变化，声学信号确认漏损。多源数据融合分析可提升诊断准确性。

（二）基于数据驱动的漏损识别与定位方法

基于数据驱动的方法利用人工智能算法，从监测数据提取漏损特征。识别阶段，系统分析压力、流量异常模式，机器学习算法预警；定位阶段，通过相关性分析和区域定位算法缩小范围，提高精度。该方法可早期识别预警，减少人工排查。

（三）智能诊断系统的功能架构

智能诊断系统由数据接入与预处理、异常检测、漏

损评估与定位模块构成闭环。数据接入与预处理模块采集并处理多源传感器数据；异常检测模块基于处理后数据监测管网，识别异常；漏损评估与定位模块评估漏损程度，确定位置。模块数据流向清晰，实现全流程自动化，模块化设计提升灵活性与扩展性，满足不同管网诊断需求^[1]。

二、基于诊断结果的给水管网动态调控策略

（一）漏损与管网水力状态的关联性分析

管网漏损与系统水力状态关联紧密。漏损会影响压力分布与流量分配，改变水力平衡。漏损点使局部压力下降，上游流量增加、下游减少，这些水力参数变化是漏损识别依据。此外，漏损会加剧压力波动、增加水锤概率，恶化管网运行甚至引发爆管。研究表明，管网压力影响漏损速率，压力越高，漏损流量与爆管风险越大。优化管网压力是控制漏损、降低爆管风险的有效手段，工程实践已广泛验证其价值。

（二）管网压力的智能调控方法

在保障用户用水需求下，基于实时监测与漏损诊断信息对管网压力精细化调控，是漏损控制的核心。智能调控方法采集压力、流量等数据，结合漏损信息，利用智能算法确定最优压力设定点，实现分区、分时管理。分区管理根据管网结构与用户需求划分区域，制定差异化调控策略；分时管理依据用水量时间规律，高峰提压、低谷降压。智能算法综合多因素优化压力设定点，平衡漏损控制与供水保障，既能源头减少漏损，又能降低能耗、提高效率，具经济效益与社会效益。

（三）调控策略与诊断信息的联动机制

智能诊断系统的漏损信息是动态调控策略的关键输

入，二者联动是管网智能化管理的保障。当诊断到新漏损或漏损加剧，诊断系统将信息传至调控系统，调控系统据此调整压力设定点或阀门状态，降低漏损。如某区域严重漏损，调控系统可降低该区域压力、调整相邻区域压力分布。“诊断-调控-再诊断”闭环机制实现漏损实时响应与动态控制，防止漏损扩大。调控结果反馈给诊断系统形成优化循环，该联动机制提高漏损控制效率与精度，增强系统自适应能力，为给水管网管理提供技术支撑^[2]。

三、智能诊断与调控系统的集成与实现

(一) 系统总体架构设计

智能诊断与调控系统的总体架构需与智慧水务平台深度兼容，确保数据互通与功能协同，其层次化结构遵循“感知-传输-数据-应用”的逻辑，分为感知执行层、网络传输层、数据平台层和应用服务层，各层通过标准化接口衔接，形成完整的技术链路。感知执行层是系统的数据入口与执行终端，核心组成包括管网压力传感器（量程0–1.6MPa，精度 $\pm 0.2\%$ FS，采样频率1次/分钟）、电磁流量计（量程0–500m³/h，精度 $\pm 0.5\%$ ，支持双向流测量）、智能远传水表（支持NB-IoT通信，数据上传间隔15分钟）及电动调节阀门（响应时间 ≤ 3 秒，开度控制精度 $\pm 1\%$ ），主要功能是实时采集管网压力、流量、瞬时用水量等运行数据，并执行调控模块下发的阀门开度调整、水源切换等指令。网络传输层承担数据中继功能，采用“边缘网关+混合通信网络”架构：终端感知设备通过NB-IoT/LoRa（传输距离1–10km，功耗 $\leq 10\mu\text{A}$ ，适合大规模部署）将数据传输至边缘网关，网关完成数据预处理（如异常值剔除、格式转换）后，通过光纤骨干网（带宽1000Mbps以上，时延 $\leq 10\text{ms}$ ）或4G/5G工业级通信模块，将数据上传至数据平台层，同时接收应用服务层下发的调控指令并转发至执行设备。数据平台层是系统的数据中枢，需与智慧水务平台的数据库兼容，核心组成包括时序数据库（如InfluxDB，存储5年以上实时传感数据）、关系数据库（如MySQL，存储管网基础数据：管径、管材、拓扑关系、历史漏损记录）及数据融合引擎，主要功能是完成数据清洗（去除冗余数据、修复缺失值）、数据关联（将传感数据与管网拓扑绑定）、数据标准化（统一数据格式与单位），为上层应用提供高质量数据支撑。应用服务层是系统的功能输出端，包含漏损智能诊断、动态调控、效果评估、报表生成等子模块，且可与智慧水务平台的水质监测、水量调度、应急指挥模块联动，实现从漏损识别到调控优

化的全流程管理。

以深圳水务集团2021年上线的“给水管网漏损智能诊断与调控系统”为例，该系统架构完全兼容深圳智慧水务平台，感知执行层部署1.2万台压力传感器（覆盖全市85%的市政管网）与3.5万台智能远传水表，网络传输层采用中国移动NB-IoT网络（数据传输成功率达99.3%）与华为光纤传输系统，数据平台层基于华为云时序数据库构建，应用服务层实现与平台水质监测模块的实时数据交互。公开数据显示，该架构使系统数据采集覆盖率从传统的30%提升至85%，漏损诊断数据响应时间控制在5分钟以内，为后续漏损识别与调控提供了稳定的架构支撑^[3]。

(二) 系统核心功能模块的协同

智能诊断模块与动态调控模块的协同，依托“数据流转-诊断触发-调控执行-效果反馈”的闭环机制实现，确保系统运行的连贯性与高效性。数据流转环节：感知执行层采集的管网压力、流量数据，经网络传输层预处理后，同步写入数据平台层的时序数据库；数据平台层通过数据接口，将实时数据（如某管段15分钟内的压力波动曲线、流量异常值）与管网基础数据（该管段管径、管材、历史漏损频次）打包，按每3分钟一次的频率推送至智能诊断模块。诊断触发环节：智能诊断模块接收数据后，先通过异常检测算法（如基于LSTM的压力预测模型）对比实际压力与预测压力的偏差，若偏差超过预设阈值（如市政管网压力偏差 $\geq 0.05\text{MPa}$ ），再结合管网拓扑关系与水力模型，定位漏损位置（精度 ≤ 50 米）并计算漏损量；若漏损量 $\geq 5\text{m}^3/\text{h}$ （判定为中大型漏损），诊断模块自动生成“漏损诊断报告”（含位置、漏损量、影响范围），并通过系统内部API接口推送至动态调控模块，同时触发调控指令生成流程。调控执行环节：动态调控模块接收诊断报告后，调用内置的管网水力优化模型（基于EPANET二次开发），输入漏损位置、当前管网压力分布、水源供水能力等参数，计算最优调控方案——如针对漏损管段上游的电动阀门，生成“开度从80%调整至60%”的指令，或切换备用水源以保障周边用户供水；调控指令经数据平台层校验（确认阀门编号、管段匹配性）后，通过网络传输层下发至感知执行层的对应电动阀门，阀门执行后实时反馈“执行状态”（如“开度已调整至60%，执行成功”）至调控模块。效果反馈环节：调控执行后，感知执行层持续采集漏损管段及周边的压力、流量数据，经传输层上传至数据平台层，再同步至智能诊断模块；诊断模块重新分析

数据, 验证漏损量是否下降(如漏损量从8m³/h降至2m³/h以下为合格), 若合格则标记“漏损调控有效”, 并将结果写入历史数据库; 若漏损量未达标, 诊断模块重新优化漏损定位模型(如调整压力偏差阈值), 调控模块则基于新的诊断结果重新计算调控方案, 直至漏损得到有效控制。

北京自来水集团2020年应用该协同机制后, 公开数据显示: 智能诊断模块与动态调控模块的数据交互延迟控制在2分钟以内, 漏损诊断结果触发调控指令的响应时间缩短至15分钟, 调控后漏损修复验证周期从传统的24小时压缩至4小时; 系统运行1年内, 中大型漏损的平均修复时间从3天缩短至1天, 漏损量较上年下降18%, 充分体现了模块协同对系统效率的提升作用^[4]。

(三) 系统实现的关键技术支撑

智能诊断与调控系统的稳定运行, 依赖物联网传感、通信网络、大数据处理、云计算、人工智能等关键技术的综合应用, 各技术在系统中承担特定功能, 共同保障系统的稳定性、实时性与智能化。物联网传感技术是数据采集的基础, 需采用高精度、低功耗的传感设备: 管网压力传感器需具备抗腐蚀(适应地下潮湿环境)、抗干扰(抵御电磁信号影响)特性, 如深圳水务集团采用的航天科工CGY-1000型压力传感器, 其测量精度达 $\pm 0.1\%FS$, 年故障率 $\leq 2\%$; 智能远传水表需支持数据本地存储(断电后保留7天数据), 避免数据丢失, 确保感知数据的完整性与准确性。可靠的通信网络技术是数据传输的保障, 需结合场景选择通信方式: 终端感知设备采用NB-IoT(覆盖范围广、功耗低), 适合分散部署的水表、压力传感器; 骨干传输采用光纤通信(带宽高、时延低), 保障海量数据的高速传输; 边缘网关需具备断点续传功能, 如上海城投水务2020年部署的华为AR550边缘网关, 在网络中断后可存储24小时数据, 网络恢复后自动补传, 数据传输可靠性达99.5%以上。大数据存储与处理技术支撑数据中枢运行, 采用分布式数据湖(如Hadoop)存储海量历史数据(包括5年以上的管网运行数据、10万+条漏损记录), 时序数据库(如InfluxDB)存储实时传感数据(支持每秒10万条数据写入); 数据处理采用Spark框架, 实现数据清洗(去除1%以下的异常值)、数据关联(将压力数据与管段ID绑定)、特征提取(提取压力波动方差、流量突变值等漏损特征), 处理延迟控制在1秒以内, 为诊断与调控提供及时的数据支持。云计算平台提供弹性计算资源, 采用混合云架构: 私有云部署管网水力模型、管网拓扑图等敏

感数据, 确保数据安全; 公有云(如阿里云、华为云)提供弹性计算节点, 支持AI模型训练与大规模数据计算, 如北京自来水集团的系统基于阿里云混合云, 将漏损诊断模型的训练时间从传统的48小时缩短至12小时, 系统并发处理能力提升至每秒5000次请求。人工智能算法是系统智能化的核心, 漏损诊断采用LSTM神经网络(预测管网压力, 识别漏损导致的压力偏差)与图神经网络(结合管网拓扑定位漏损点), 如上海城投水务2020年采用的LSTM诊断模型, 漏损识别准确率达92%, 较传统水力分析法提升25%; 动态调控采用遗传算法(优化阀门开度组合, 最小化漏损量)与强化学习(适应管网负载变化, 动态调整调控策略), 该算法使调控方案的生成时间从30分钟缩短至5分钟, 且调控后管网压力波动幅度减少30%, 进一步降低漏损风险^[5]。

结语

构建基于智慧水务的给水管网漏损智能诊断与调控系统, 是解决当前供水行业漏损难题、实现精细化管理的必然选择。该系统通过融合多源感知数据、人工智能算法与动态调控策略, 成功打通了从“数据感知”到“智能诊断”再到“精准调控”的技术闭环, 实现了对管网漏损问题的前瞻性预警和主动性干预。其核心价值不仅在于显著降低了漏损率、节约了水资源, 更在于通过数据驱动优化了整个管网的运行状态, 提升了系统的安全韧性与运营效率。未来, 随着相关技术的持续迭代与成本的不断优化, 该系统将在更广范围内推广应用, 为构建智慧、绿色、安全的城市水循环体系奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 李立.智慧水务背景下的供水管网漏损控制研究进展[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2021 (6): 1.
- [2] 岳宏宇.基于群体智能优化算法的供水管网压力监测点优化布置与爆管预警定位研究[D].青岛理工大学, 2021.
- [3] 王欣, 徐雪婧.智慧水务理念下管网漏损的研究进展[J].清洗世界, 2022 (004): 038.
- [4] 徐强、张佳欣、王莹、谢涛、强志民.智慧水务背景下的供水管网漏损控制研究进展[J].环境科学学报, 2020, 40 (12): 6.DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0458.
- [5] 徐强, 张佳欣, 王莹, 等.智慧水务背景下的供水管网漏损控制研究进展[J].环境科学学报, 2020 (012): 040.