

城市供水工程管网漏损控制技术研究

张焱焱

天津市自来水集团有限公司第一营销分公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8692

[摘要] 城市供水工程管网漏损不仅造成水资源浪费，还影响供水稳定性与服务质量，是城市水务管理的核心难题。本文以“多技术融合优化管网漏损控制体系”为主论点，围绕管网漏损的成因机制，系统研究感知监测、精准定位、管网改造及智慧调度等关键技术。通过整合技术优势、优化应用流程，构建适配城市管网复杂工况的漏损控制模式，为提升管网运行效率、降低漏损率提供技术支撑与实践路径，助力城市供水系统的可持续发展。

[关键词] 城市供水管网；漏损控制；技术融合；智慧监测；管网优化

Research on Leakage Control Technology of Urban Water Supply Engineering Pipeline Network

Zhang Yanyao

Tianjin Municipal Waterworks Group Co., Ltd. First Marketing Branch

[Abstract] The leakage of urban water supply engineering pipeline network not only causes water resource waste, but also affects the stability of water supply and service quality, which is the core problem of urban water management. This article focuses on the main argument of "multi technology integration and optimization of pipeline leakage control system", and systematically studies key technologies such as perception monitoring, precise positioning, pipeline renovation, and intelligent scheduling around the causes and mechanisms of pipeline leakage. By integrating technological advantages and optimizing application processes, a leakage control mode suitable for complex working conditions of urban pipeline networks is constructed, providing technical support and practical paths for improving pipeline operation efficiency and reducing leakage rates, and helping the sustainable development of urban water supply systems.

[Key words] urban water supply network; Leakage control; Technology integration; Smart monitoring; Pipeline optimization

引言：

城市供水管网是保障居民生活与城市运转的“生命线”，而漏损问题长期制约着供水系统的高效运行，既加剧资源紧张局面，也增加水务运营成本。如何通过技术创新破解管网漏损难题，已成为城市可持续发展进程中亟待回应的重要课题。基于“多技术融合优化管网漏损控制体系”的核心思路，本文聚焦漏损控制的技术瓶颈，衔接前期对漏损成因与技术需求的分析，后续将深入探讨各类控制技术的协同应用逻辑，为构建高效、精准的漏损治理方案奠定基础，以期在城市供水安全保障提供新的技术视角。

一、城市供水管网漏损成因与技术需求分析

城市供水管网漏损由管网自身属性、运行环境、管理模式

等多维度因素叠加导致，其成因具有复杂性与关联性特征。从管网本体来看，管材选择与施工质量直接影响漏损发生率，传统刚性管材抗沉降能力弱，接口密封性能易受地质变形影响失效；管网运行年限过长会引发管材腐蚀、老化，形成隐蔽性漏点。管网运行压力调控不当也是重要成因，压力波动导致管道内壁承受交替应力，加速裂纹扩展，超压运行时管道薄弱部位易发生破裂，而压力不足则可能导致负压吸入空气，引发管道内壁腐蚀^[1]。

外部环境因素对管网漏损的诱发作用不可忽视。地质条件变化会导致管道基础沉降、位移，使管道产生拉伸、扭曲变形，接口处出现缝隙；地下施工活动若缺乏精准的管网位置勘察，易造成机械性破坏，直接引发管道破损漏损。水文气象条件影

响管道周围土壤湿度与密实度，冻融循环会导致管道材料性能劣化，土壤不均匀冻胀与融沉对管道产生周期性荷载，诱发漏点形成。

管网管理层面的短板进一步加剧漏损问题。管网基础数据不完善，缺乏统一的信息管理平台，导致漏点定位滞后；巡检维护机制不健全，未能实现全周期、全覆盖的管网监测，隐蔽性漏损难以及时发现；漏损检测技术应用不系统，单一检测方法难以适配复杂管网工况，导致漏点识别准确率低。

针对上述成因，管网漏损控制形成明确的技术需求。在管网建设阶段，需要具备抗腐蚀、抗沉降、密封性能优良的新型管材与接口技术，以及适配复杂地质条件的管道铺设工艺。运行调控方面，需构建精准的压力调控技术体系，实现管网压力的动态优化。漏损检测领域，需要开发高精度、高效率的综合检测技术，结合多源数据融合分析，提升隐蔽性漏点识别能力。管理层面，亟需建立智能化的管网信息管理与调度平台，整合监测、检测、维护等全流程数据，实现漏损控制的精细化管理。

二、漏损控制核心技术体系构建

漏损控制核心技术体系以多技术融合为逻辑主线，涵盖漏损检测、压力调控、管网建设、智能管理四大关键模块，各模块协同联动形成全流程漏损治理能力，打破传统单一技术治理的局限，实现从源头防控、过程监测到精准调控的全链条技术覆盖。

漏损检测技术模块以精准识别漏点为目标，整合声学检测、光纤传感、压力波监测等技术手段，构建多维度检测网络。声学检测技术通过部署便携式或固定式声学传感器，捕捉管道漏损时水流冲击管壁产生的振动声波，结合自适应滤波、小波变换等信号处理算法，剔除环境噪声干扰，提取漏损特征信号，实现漏点定位；光纤传感技术基于光纤光栅的应力应变感知特性，将传感光纤直接铺设于管道外壁或预埋在管道周围土壤中，实时捕捉管道变形、位移及漏损引发的土壤湿度、温度变化，通过光信号波长偏移量分析实现漏损监测；压力波监测技术在管网关键节点布设高精度压力传感器，捕捉漏损瞬间产生的压力突变信号，结合管网水力模型与波速传播理论，反演漏点位置与漏损强度^[2]。多技术融合通过数据互补，弥补单一检测方法在复杂管网工况下的适配缺陷，提升漏点识别的准确率与响应速度。

压力调控技术模块聚焦管网运行压力优化，采用动态压力调控与分区计量相结合的技术路径。动态压力调控技术以管网水力仿真模型为基础，通过实时采集用水负荷数据，利用PID控制算法动态调整泵站变频设备运行参数，实现供水压力的精准匹配；针对管网末端压力不足或局部超压问题，结合分区调压阀组实现区域压力差异化调控，避免超压运行引发的管道破

裂与渗漏。分区计量技术通过划分独立供水区域，在区域边界安装电磁流量计量设备，实时采集进出水流量数据，结合水量平衡分析实现区域漏损量化评估，为压力调控提供精准的数据支撑，两者协同构建“按需供水”的压力调控模式，在保障供水压力达标的同时，最大限度降低压力相关漏损。

管网建设技术模块围绕源头防控，集成新型管材应用、精准铺设与接口密封技术。新型管材技术优先选用高分子复合材料、防腐合金等优质材质，通过材料改性提升管道抗腐蚀、抗沉降与抗老化性能，延长管道使用寿命；精准铺设技术以地质勘察数据与三维管网建模为依据，优化管道路由设计，避开地质不稳定区域，采用水平定向钻、顶管等非开挖施工工艺，减少施工对周边土壤与管道的扰动；接口密封技术采用柔性密封材料与承插式、焊接式等结构设计，增强接口抗变形能力与密封性能，降低因接口失效导致的渗漏风险，从管网建设源头提升系统抗漏损能力。

智能管理技术模块以数据驱动为核心，构建管网信息管理平台与智慧调度系统。管网信息管理平台采用分布式数据库架构，整合管网基础资产数据、实时监测数据、维护记录等多源信息，实现管网资产数字化建档与动态更新；智慧调度系统基于实时监测数据与水力模型仿真结果，运用机器学习算法动态优化供水调度方案，同步联动漏损检测与压力调控模块，将漏点信息转化为调控指令，形成“监测 - 分析 - 决策 - 执行”的闭环管理。

三、多技术融合漏损控制模式实践

多技术融合漏损控制模式以全流程闭环管理为核心架构，整合漏损检测、压力调控、管网建设、智能管理四大模块技术，通过数据互通与协同调度实现漏损精准防控。该模式以智能管理平台为中枢，联动前端感知监测设备、中端调控执行系统与后端维护作业体系，构建“监测 - 分析 - 决策 - 执行 - 反馈”的完整链路，打破传统漏损控制中技术碎片化、流程割裂化的局限，形成全周期、全维度的治理体系。

模式实施遵循标准化流程，首要环节为管网数字化建模，依托三维地理信息系统与管网资产数据，整合管材材质、管径规格、接口类型、敷设年限等基础属性，以及管网拓扑结构、节点压力、流量分布等运行参数，构建高精度数字化孪生模型。模型通过实时数据校准实现动态更新，为技术融合提供统一的数据底座与仿真分析载体，支撑后续各环节的精准决策。

数字化建模完成后开展全域感知部署，按照管网重要性等级与漏损风险分布，在主干管、分支管节点、关键接口及易损段布设声学传感器、压力传感器、电磁流量计量设备及分布式光纤传感网络^[3]。声学传感器捕捉管道漏损产生的低频振动信号，压力传感器实时采集节点压力数据，流量计量设备记录管

段瞬时流量与累计流量，光纤传感网络实现管道变形与温度变化的连续监测，多类型设备协同实现漏损信号与运行数据的全方位、无死角采集。

数据采集后通过边缘计算节点进行预处理，采用信号滤波、异常值剔除、特征参数提取等算法，过滤环境干扰与冗余信息，提取漏损特征频率、压力突变幅度、流量偏差等关键参数，再通过 5G 或工业以太网传输至智能管理平台进行融合分析。平台搭载水力仿真模型与机器学习算法，对多源数据进行深度挖掘，通过特征匹配识别漏损信号，结合数字化模型反演漏点精确位置与漏损量级；同时实时评估管网水力工况，分析压力分布合理性与流量供需匹配度，生成个性化压力调控方案与分级维护作业计划。

压力调控方案通过泵站变频控制系统与分区调压阀组协同执行，根据管网时段用水负荷变化与漏损风险评估结果，动态调整泵站供水压力与分区调压阈值，实现管网压力的精细化、差异化调控，在保障末端供水压力达标的前提下，最大限度降低管道超压运行风险。维护作业计划通过智能管理平台推送至工作人员移动端设备，明确漏点位置、修复优先级、所需设备与材料，指导工作人员开展精准检修，采用非开挖修复技术或局部更换方式实现漏点快速修复。修复完成后，通过前端感知设备实时回传管段压力、流量数据，验证漏损治理效果，形成闭环反馈，平台根据反馈结果持续优化模型参数与技术应用策略。

技术协同机制是模式高效运行的关键。漏损检测技术与智能管理平台深度协同，检测设备采集的原始信号经平台算法解析后转化为精准漏损信息，平台根据漏损程度触发不同等级的响应机制；压力调控技术与流量计量数据实时联动，流量数据为压力调控提供动态依据，压力调控效果通过流量变化反向验证；管网建设技术与数字化建模紧密结合，在新管铺设与旧管改造中，基于模型仿真结果优化管道路由设计、管材选型与接口密封方案，从源头提升管网抗漏损能力。跨模块数据共享通过标准化接口实现，打破技术壁垒，使检测数据为调控提供依据，调控效果为维护提供参考，建设质量为运行提供保障，形成技术互补、协同发力的治理格局。

四、漏损控制技术应用效能验证

漏损控制技术应用效能验证需建立多维度指标体系，涵盖漏损控制效果、运行稳定性、技术适配性、经济可行性四大核心维度。漏损控制效果指标包括漏损率降幅、漏点识别准确率、漏点修复响应时间、隐蔽性漏损检出率；运行稳定性指标涉及管网压力波动幅度、供水压力达标率、设备运行故障率、系统连续运行时长；技术适配性指标包含不同管材适配度、复杂地质条件适应能力、不同管网规模应用兼容性、极端工况抗干扰

能力；经济可行性指标涵盖单位漏损治理成本、技术投入回收周期、运维成本降幅、水资源节约效益量化值。

效能验证采用现场实测与仿真模拟相结合的方法。现场实测通过在目标管网区域布设专用监测设备，持续采集技术应用前后的漏损相关数据，对比分析指标变化；同步记录设备运行参数、维护频次、成本投入等信息，形成实测数据库。仿真模拟依托管网数字化模型，复刻技术应用场景，输入不同工况参数，通过水力仿真与数值模拟，预测技术在各类场景下的效能表现，弥补现场实测在工况覆盖度上的局限性。两种方法数据相互印证，提升验证结果的可靠性。

漏损控制效果验证聚焦核心指标的量化分析。通过对比技术应用前后的漏损率数据，明确整体漏损控制成效；基于漏点定位记录与实际排查结果，核算漏点识别准确率，评估检测技术的精准性；统计漏点从发现到修复的全流程耗时，验证闭环管理的高效性；通过专项隐蔽漏损排查工作，量化隐蔽性漏损检出率的提升幅度，体现技术对复杂漏损类型的防控能力^[4]。

技术适配性与经济可行性验证为技术推广提供支撑。通过在不同管材、不同规模、不同地质条件的管网区域开展验证，分析技术在各类场景下的应用效果，明确技术适配范围；核算技术投入成本、运维成本与水资源节约效益，计算投入回收周期，评估技术的经济合理性；对比传统漏损控制方式与多技术融合模式的综合效能，凸显新型模式的应用优势。

结语：

通过对城市供水管网漏损成因、核心技术体系、融合模式实践及效能验证的系统研究，构建了多技术融合的漏损控制完整体系。该体系以智能管理为中枢，联动检测、调控、建设等技术模块，实现漏损治理从被动响应向主动预防转变。研究为破解管网漏损难题提供了技术支撑与实践路径，助力提升供水系统稳定性与可持续性。未来可进一步深化技术协同算法优化，拓展复杂工况适配能力，为城市水务精细化管理提供更坚实保障。

[参考文献]

- [1]曹银, 王莉.城市供水管网漏损问题及其控制策略探讨[C]//河海大学, 浙江省水利学会.2025(第九届)中国水资源高效利用与节水技术交流论文集.黄河建工集团有限公司; , 2025: 30-36.
- [2]程昶.城市供水管网漏损治理措施及成效分析[J].现代工程科技, 2025, 4(05): 117-120.
- [3]储娅, 戈佰沄, 李源.城区供水管网漏损控制新技术研究[J].中国设备工程, 2024, (24): 18-20.
- [4]朱敏.城市供水管网漏损检测技术与控制措施[J].城市建设理论研究(电子版), 2024, (02): 199-201.