

城镇老旧给排水管网漏损监测与修复技术优化研究

蒋志鹏

广汽丰田汽车有限公司 广东广州 511400

摘要：本文围绕城镇老旧给排水管网漏损问题，系统研究漏损监测与修复技术的优化路径。通过分析老旧管网漏损的成因与特征，探讨现有监测技术的局限性，从传感技术、数据处理、智能诊断等维度提出监测体系的优化方案；同时，结合管网结构特性与修复需求，对传统修复工艺与新型非开挖技术进行对比分析，从材料选择、施工工艺、成本控制等方面构建修复技术的综合优化模型。研究旨在提升漏损监测的精准性与时效性，降低修复工程的资源消耗与环境影响，为城镇给排水管网的高效运维与可持续发展提供技术支撑。

关键词：城镇给排水管网；老旧管网；漏损监测

引言

随着城镇化进程的快速推进，城镇给排水管网作为基础设施的重要组成部分，其安全稳定运行直接关系到居民生活质量、生态环境可持续性 & 城市整体功能的发挥。然而，部分城镇现存的给排水管网因建设年代久远、材质老化、施工标准偏低等因素，普遍存在管道腐蚀、破裂、接口渗漏等问题，导致漏损现象频发。管网漏损不仅造成水资源的严重浪费，增加供水成本与污水处理负荷，还可能引发地面沉降、道路塌陷等安全隐患，对城市运行安全构成威胁。当前，传统的漏损监测方法多依赖人工巡检与经验判断，存在效率低、精度差、响应滞后等不足；修复技术则面临工艺选择单一、施工周期长、对交通与环境干扰大等挑战。因此，针对城镇老旧给排水管网的漏损问题，开展监测技术的智能化升级与修复方案的系统性优化研究，具有重要的理论价值与现实意义。

一、老旧管网漏损成因及监测技术分析

（一）管网漏损的主要成因与特征

城镇老旧给排水管网漏损成因具复合性与系统性，是材料老化、环境侵蚀、荷载变化与水力冲击等多重因素长期耦合结果。首先，材料性能退化是内在根本原因。早期常用灰口铸铁管、石棉水泥管等，材质脆性大、抗拉强度低、易腐蚀，随服役年限增长，力学性能衰减，管壁变薄、韧性降低，易脆性断裂。其次，外部环境 & 荷载动态变化是主要诱因。土壤不均匀沉降、交通荷载振动、周边施工活动等，会使管道产生额外应力，导致接口松动、管体开裂折断。再者，管网运行工况不稳定

加剧漏损。水锤效应的瞬时超压冲击老化管壁 & 薄弱接口，易引发爆管。这些漏损特征为多点散发、隐蔽性强 & 发展性。初期多为微小渗漏或暗漏，难察觉，长期会造成次生灾害，最终演变为明漏或爆管，演化具非线性特征。

（二）传统漏损监测技术的局限性

传统漏损监测技术应对老旧管网复杂漏损问题时，存在被动响应、精度不足 & 效率低下的局限性。被动检漏法如人工听音、观察地面渗水等，是事后补救，无法早期预警，导致水资源大量流失。音听检漏法虽提升定位能力，但依赖操作人员经验，易受环境等因素干扰，定位误差大，对微小渗漏基本无效。区域装表法能宏观评估漏损率，但无法精确定位漏损点，后续排查工作量大、成本高。此外，传统方法缺乏数据连续性与系统性，无法动态评估管网健康状态，难以支撑预测性维护决策，是“亡羊补牢”式低效循环^[1]。

（三）现代智能化监测技术的应用

现代智能化监测技术的应用，为解决老旧管网漏损问题提供了从被动响应到主动预警、从粗放定位到精准识别的技术路径。其核心在于利用物联网、大数据分析 & 先进传感技术，构建一个覆盖全管网、实时感知、智能分析的监测体系。基于分布式光纤传感（DAS/DTS）技术，通过沿管道敷设的光纤对管道沿线的振动 & 温度变化进行连续监测，能够捕捉到漏损产生时特有的声波 & 温度场异常信号，实现对长距离管线的实时、不间断监控，有效弥补了传统点式监测的覆盖盲区。智能声学监测网络通过在管网关键节点部署高灵敏度听音传感器，结合噪声过滤 & 模式识别算法，能够自动识别并定

位漏损声源，大幅提升了微小漏损的发现效率和定位精度。此外，基于压力和流量监测的瞬变流分析法，通过分析管网水力模型中的压力波动数据，可以反演推算漏损点的位置与规模。更为关键的是，这些智能化技术采集的海量数据被整合至统一的管网数字孪生平台，通过机器学习算法对数据进行深度挖掘，能够建立漏损预测模型，识别出管网中的高风险管段，从而实现从“故障后维修”向“预测性维护”的根本性转变，为管网修复决策提供了科学、精准的数据支撑^[2]。

二、漏损修复技术优化策略

(一) 现有修复技术的比较与适用性分析

对现有漏损修复技术进行比较与适用性分析，是制定科学修复策略的基础。现有技术体系主要分为开挖修复与非开挖修复两大类，二者在技术原理、适用条件、经济成本与社会影响上存在显著差异。开挖修复作为传统方法，其技术成熟度最高，能够彻底更换损坏管段，从根本上解决材质老化问题，适用于管道结构性严重损坏、基础沉降严重或需进行管网扩容改造的工况。然而，其局限性同样突出：施工周期长，对地面交通、商业活动及居民生活造成长时间、大面积的干扰；土方开挖与回填工程量大，产生的建筑垃圾与扬尘、噪声等环境问题显著；在城市建成区，尤其是地下管线密集区域，施工安全风险高且协调难度大。与之相对，非开挖修复技术通过利用原有管道路径，在地面极小干预条件下完成管道内衬或局部修复，最大限度地减少了对社会与环境的影响。该技术适用于管道材质尚有一定承载能力、主要功能为恢复结构完整性与水密性的工况，但对管道变形量、错口量有严格要求，且修复后的管道过流断面通常会有所减小。因此，技术选择并非优劣之争，而是基于对管道现状评估、地质条件、交通状况、环境保护要求及全生命周期成本进行综合权衡后的决策过程，其核心价值在于实现技术可行性与社会经济成本之间的最优平衡^[3]。

(二) 非开挖修复技术的优化方向

非开挖修复技术的优化方向，旨在突破现有技术瓶颈，提升其适用范围、施工效率与长期服役性能。首要的优化方向是提升内衬材料的综合性能。当前主流的CIPP（原位固化法）材料，需在耐化学腐蚀性、抗弯折强度与长期环刚度之间寻求更优的平衡点，以适应更复杂的地质与荷载条件。同时，研发低温或常温固化树脂，能够降低固化过程对环境温度的依赖，拓展其在冬季或低温地区的应用。其次，施工工艺的精准化与智能

化是关键优化路径。通过引入CCTV（管道闭路电视）检测系统与三维激光扫描技术，可在施工前对管道内部状况进行高精度建模，为内衬材料的设计与施工参数的设定提供精确数据支持。在施工过程中，利用传感器实时监控固化温度、压力与材料膨胀状态，实现对修复过程的闭环控制，确保内衬层与原管壁的紧密贴合与均匀固化。此外，针对不同类型的缺陷，发展模块化、复合式的修复技术是另一重要方向。例如，将局部点状修复技术（如不锈钢发泡筒）与整体内衬修复技术相结合，针对管道中存在的少量严重缺陷进行预处理，再进行整体内衬，既能保证修复质量，又能避免因局部问题而采取全线修复带来的成本浪费，实现修复策略的精细化与经济性。

(三) 修复材料与工艺的协同优化

修复材料与工艺的协同优化，是确保修复工程质量的内在要求，其核心在于实现材料性能与施工过程的最佳匹配。脱离了工艺特性，材料的优越性能无法充分发挥；而缺乏高性能材料的支撑，工艺的先进性也无从体现。协同优化的基础在于建立材料-工艺-性能的关联模型。例如，对于CIPP工艺，树脂的粘度、凝胶时间与固化温度曲线必须与软衬膜的浸渍工艺、翻转或牵引速度以及加热方式（如热水、蒸汽或紫外线）精确匹配。树脂粘度过高会导致浸渍不均，过低则可能在输送过程中流失；凝胶时间过短易造成软衬膜在管内未完全展开，过长则影响施工效率。因此，需要通过实验与模拟，确定特定工况下的最佳材料配方与工艺参数组合。在喷涂法修复中，聚合反应速度与喷涂速率、提管速度的协同控制，直接决定了内衬层的厚度均匀性与结构强度。协同优化的更高层次，是发展智能响应型材料与自适应工艺。例如，研发能够根据管道内部温度与湿度变化自动调节固化速度的树脂材料，并配合能够实时反馈环境参数并自动调整施工参数的智能设备。这种深度的协同，将修复工程从依赖经验的操作，转变为基于数据与模型的精确控制，从而最大限度地保证修复后的管网系统达到设计使用寿命，实现全生命周期内的功能可靠性与安全性^[4]。

三、监测与修复技术协同优化路径

(一) 精准监测引导下的修复决策

精准监测引导修复决策需依托技术手段实现漏损信息量化，为修复优先级排序提供依据，某市水务集团对辖区内120公里老旧给排水管网（建成年限20年以上，管材以灰口铸铁管、混凝土管为主）的优化项目。该项

目采用“物联网传感器+声波检测”组合监测模式，在管网关键节点布设280个物联网压力传感器（每500米1个），实时采集管道压力波动数据，同时使用声波泄漏检测仪每周开展1次全线巡检，监测数据通过5G传输至管网管理平台，经算法分析后实现漏点定位误差 ≤ 1 米，监测覆盖率达95%。修复决策环节依据监测得出的漏损量分级制定方案：漏损量 $> 5\text{m}^3/\text{h}$ 的高风险漏点（共锁定32处）优先启动修复，漏损量 $2\text{--}5\text{m}^3/\text{h}$ 的中风险漏点（45处）纳入1个月内修复计划，漏损量 $< 2\text{m}^3/\text{h}$ 的低风险漏点（28处）纳入季度维护清单，避免传统“盲目开挖、全面修复”导致的资源浪费，确保修复资源集中于高影响漏点。

（二）基于管网全生命周期的修复策略

基于全生命周期的修复策略需结合管网管龄、腐蚀程度、使用环境制定差异化技术方案，延续上述某市水务集团项目案例。项目团队先通过管道内窥检测（CCTV检测）评估管网状态：对管龄25年以上、内壁腐蚀度 $> 60\%$ 的30公里管网，采用非开挖紫外光固化修复技术，该技术修复后管道内壁光滑度提升40%，预计使用寿命达30年，单次修复成本800元/米；对管龄20–25年、仅局部出现腐蚀穿孔的55公里管网，采用局部气囊膨胀修复技术，针对漏点位置定制修复气囊，修复后使用寿命15年，成本降至300元/米；对管龄20年以内、漏损点分散但整体结构完好的35公里管网，采用管道内衬修复技术，通过插入柔性内衬改善管道密封性，使用寿命20年，成本500元/米。同时结合城市未来5年道路改造规划，优先修复市政主干道下方的18公里管网，避免后期道路施工时重复开挖，延长管网全生命周期内的使用稳定性，减少二次改造投入。

（三）技术协同优化的综合效益

技术协同优化的综合效益体现在漏损控制、成本节约、社会效益三方面，仍以上述某市水务集团项目为例。项目实施后，辖区老旧给排水管网漏损率从修复前的18.5%降至9.2%，年均减少漏损水量约120万立方米，相当于3个小型水库的总蓄水量，缓解了当地水资源紧张问题；经济成本方面，精准监测使无效巡检次数从每月15次降至3次，运维人工成本年均节约120万元，非开挖修复技术避免路面开挖120处，减少路面修复额外成本60万元/年，同时降低因开挖导致的交通拥

堵时长（每月从120小时降至40小时）；社会效益上，管网漏损减少后，居民用水压力稳定性提升，水压不足投诉量从每月28起降至5起，道路开挖减少也降低了市民出行不便，项目满意度调查显示，89%的沿线居民对修复效果表示认可，实现水资源、经济、社会层面的综合效益提升^[5]。

结语

城镇老旧给排水管网的漏损问题是一个复杂的系统性难题，其成因涉及管材老化、外部环境变化及运行工况波动等多方面因素。传统监测技术由于被动响应和精度不足，难以满足当前对漏损早期预警和精准定位的需求。而现代智能化监测技术通过物联网、大数据分析和先进传感手段，实现了从被动到主动、从粗放到精准的技术跨越，为漏损治理提供了科学依据。在修复环节，开挖与非开挖技术各有适用场景，需基于管道现状和外部条件综合权衡。非开挖修复技术在减少社会干扰和环境影响方面优势显著，但其材料性能和施工工艺仍有优化空间。通过监测与修复技术的协同优化，不仅能够有效降低漏损率，还能实现经济成本和社会效益的多重提升，为城市供水系统的可持续发展提供了重要支撑。未来，随着智能材料和自适应工艺的发展，管网漏损治理将向更高效、更精准的方向迈进。

参考文献

- [1] 赵桓, 吕谋, 岳宏宇, 等. 基于群体智能优化算法的供水管网漏损定位研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 4.
- [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] 顾丽韵, 陆勇, 何晓燕. 基于声学在线漏损监测技术的园区智慧水务系统研究与实践[J]. 绿色建筑与智能建筑, 2023.
- [4] 杨丹. 城镇供水管网漏损现状分析及漏损控制技术的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(2): 9. DOI: 10.12677/AEP.2022.122029.
- [5] 冯伟. 给排水管网漏损控制与水资源保护策略研究[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(10): 166–168.