

Study on risk assessment and optimization of underground pipe network leakage in old campus

Qingxiang Zheng

Qufu Normal University, Zoucheng, Shandong, 273165, China

Abstract

With urbanization and aging campus infrastructure, leakage issues in underground pipeline systems have become increasingly prominent, severely impacting campus operations and safety management. This study systematically examines structural characteristics and degradation mechanisms of aging campus pipelines, identifies key risk factors for leaks, and develops a multi-parameter coupled leakage risk assessment model. Through field investigations and empirical data, risk zoning and classification are implemented for typical campus pipelines. The research proposes optimized technical solutions including trenchless pipeline repair, intelligent monitoring, and precision renovation, with engineering case studies validating the feasibility and cost-effectiveness of these approaches. Results demonstrate that a multidimensional, full-process risk assessment and optimization system significantly enhances operational safety and service life of aging pipeline networks, providing theoretical foundations and technical support for campus underground infrastructure upgrades.

Keywords

aging campus; underground pipeline network; leakage risk assessment; trenchless repair; intelligent detection; renovation technology

老旧校园地下管网泄漏风险评估及优化改造技术研究

郑庆祥

曲阜师范大学, 中国 · 山东 邹城 273165

摘 要

随着城市化进程推进和校园建设年限增长, 老旧校园地下管网系统的泄漏问题日益突出, 严重影响校园正常运行与安全管理。本文系统梳理老旧校园地下管网的结构特征与常见劣化机制, 分析泄漏风险的主要影响因素, 构建基于多参数耦合的泄漏风险评估模型。结合现场调查与实际数据, 对典型校园地下管网进行风险分区与等级划分。针对现有问题, 提出管网非开挖修复、智能检测与精细化改造等优化技术路径, 并通过工程案例验证技术方案的适用性和经济性。研究结果显示, 多维度、全过程的风险评估与优化改造体系能够显著提升老旧管网系统的运行安全性和使用寿命, 为校园地下基础设施改造提供理论依据和技术支撑。

关键词

老旧校园; 地下管网; 泄漏风险评估; 非开挖修复; 智能检测; 改造技术

1 引言

在我国城市化和高等教育扩张的背景下, 大批建成于 20 世纪的校园基础设施面临老化、功能退化和运维压力加剧等挑战。地下管网作为校园供水、排水、供热和电气等多类系统的“生命线”, 其安全运行直接关系到校园师生活动的顺利开展和后勤管理的高效保障。长期运行过程中, 由于材料老化、接口变形、外力损伤和地质变化等多种因素叠加, 老旧地下管网极易发生渗漏、破裂和功能障碍, 带来水资源浪费、地面塌陷、环境污染及安全隐患。

传统管网维护手段多依赖人工巡检与“事后抢修”,

难以及时、精准发现隐蔽泄漏, 导致维修滞后、治理成本高昂, 甚至引发局部大面积失水和运行中断。随着智能检测技术和非开挖修复技术的发展, 地下管网运维理念逐步从“被动应急”向“主动预防”和“系统优化”转变。科学、系统地开展老旧校园地下管网泄漏风险评估与技术改造, 成为提升基础设施健康水平和管理现代化的核心课题。

本文围绕老旧校园地下管网系统, 分析其泄漏风险成因与演化机理, 构建多参数风险评估模型, 提出基于智能检测和非开挖修复的系统改造技术路线。通过典型案例验证研究方法的适用性和经济性, 为我国校园地下基础设施改造与管理提供可行性理论和技术支撑。

【作者简介】郑庆祥 (1973-), 男, 中国山东邹城人, 本科, 工程师, 从事建筑工程研究。

2 老旧校园地下管网泄漏风险成因与系统特征

2.1 管网结构老化与功能退化的影响

老旧校园地下管网多建于数十年前，管道所用材料随服役年限的增长出现力学性能衰减、耐腐蚀性下降等问题。长期高压输水和反复水力冲刷下，管壁逐渐变薄，局部出现点蚀、穿孔甚至断裂。部分管段因基础沉降、地质变形等因素导致接口错位和密封失效，形成隐蔽的渗漏通道。近年来，随着校园用水高峰期流量负荷增加，部分管道常处于超负荷运行状态，材料疲劳损伤和功能退化愈发严重。结构老化与功能衰减的交互作用，使管网泄漏隐患不断积累，为突发性大规模泄漏事件的发生埋下隐患。这种“慢病式”演化导致的管网失效，是校园基础设施维护和风险管控的难点与重点。

2.2 环境变化与外部扰动的致灾作用

校园地下管网埋设环境复杂，受地质条件、气候变化和人为活动等多重因素影响。市政道路施工、周边新建建筑基础施工及大规模景观绿化等工程，会对管道本体产生直接扰动或改变原有土体应力状态，诱发管道局部变形和裂隙扩展，显著提升泄漏风险。同时，地下水位的周期性波动、土壤胀缩和地面沉降等地质过程，易导致管网埋深和管道受力状况动态变化，增加泄漏点出现的不确定性。极端气候，特别是冬季严寒与地面冻胀效应，会加快老化管道的劣化速度，出现季节性渗漏高发的现象。上述环境与外部扰动的综合影响，极大增加了老旧管网的运维难度和泄漏灾害的不确定性。

2.3 运维管理与监测手段的局限性

老旧校园地下管网长期依赖人工巡检和定期试压等传统管理手段。受限于人员配置和技术条件，许多隐蔽性较强的早期泄漏难以及时发现，导致小规模渗漏演变为严重失水事故。现有运维体系自动化、信息化水平低，缺乏对管网运行状态的实时监控和早期预警能力，管理过程中对高风险管段和节点的识别依赖经验判断，资源投入难以精准匹配风险分布。此外，运维数据采集不连续、管理档案不完整，导致风险分级与科学决策困难，维修工作存在“被动响应、头痛医头”的弊端。这些管理和技术短板成为影响老旧校园地下管网安全高效运行与科学改造的瓶颈问题。

3 老旧校园地下管网泄漏风险评估模型构建

3.1 多参数耦合的风险评估理论基础

地下管网泄漏风险具有成因复杂、影响因素多样、致灾过程隐蔽等特点。传统风险评价方法往往侧重单一参数或经验判断，难以准确反映老旧校园地下管网的多源致灾机理。多参数耦合风险评估理论强调将管材类型、服役年限、埋设深度、接口状况、运行压力、周边环境以及历史维修等多维度数据进行集成，采用层次分析法、灰色关联分析与模

糊综合评价等方法，构建覆盖结构、环境、运行与管理全链条的风险评估模型。模型通过对各影响参数赋予科学权重并实现归一化处理，使得不同管段泄漏风险能够实现定量分级和空间分布辨识。

3.2 现场数据采集与风险分区方法

在风险评估实施过程中，全面、精准的数据采集是模型有效运行的前提。以典型老旧校园为对象，采用结构检测、非开挖摄像、漏水监听、地质雷达扫描等多种现代技术手段，系统获取管道的几何尺寸、埋深、裂损类型与分布、周边环境扰动、历史渗漏等核心参数。通过 GIS 空间叠加分析，将各类风险参数映射至校园空间布局，实现参数的地理化集成。结合风险评估模型，对不同管段进行风险等级划分，明确高危、次高危和一般风险区的空间位置与分布特征。这一分区方法为校园地下管网的改造工程制定差异化、分层次的技术决策提供了科学依据和数据支撑。

3.3 模型验证与典型案例剖析

为验证多参数耦合风险评估模型的科学性与实用性，选取校园内历史泄漏高发区作为重点对象，结合实际泄漏案例与长期监测数据开展回归检验。模型输出的高风险区与实际泄漏事件空间分布高度吻合，识别率和分级精度明显优于传统方法。模型应用过程中，能够根据实时采集和管网运行变化，动态修正各参数权重，提高风险评估的灵活性与适应性。以此为基础，结合典型案例剖析，进一步分析模型分区结果与实际治理成效的关联性，有效指导了管网改造技术路径与资源优化配置，为老旧校园地下管网系统的高质量治理和科学升级提供了坚实决策基础。

4 老旧校园地下管网智能检测与非开挖修复技术

4.1 智能检测技术体系的构建

针对老旧校园地下管网隐蔽性强、结构复杂、缺乏完整原始资料等问题，单一的人工巡检与传统监测手段已难以胜任全生命周期健康管理需求。为此，构建以多元智能检测手段为核心的技术体系成为地下管网风险治理的关键。当前，声波检测能够实现对管道壁裂纹、孔洞等缺陷的无损识别，地质雷达对地下管道埋深、变形及周围环境异常具有高灵敏度，漏水监听设备可精准定位微小渗漏点，而内窥镜机器人则适合于管道内部的全方位可视化巡检。通过多种手段协同，显著提升了泄漏隐患识别的全面性和准确性。数据采集后，借助大数据平台与人工智能算法，可对历史运行数据和实时检测数据进行深度挖掘，建立泄漏异常识别和趋势预测模型，支持早期泄漏定位与风险预警。信息化管理平台将空间数据、运行状态与故障历史一体化管理，赋能管网系统的在线监测、自动报警和智能运维，为校园管网改造与全生命周期风险治理提供坚实的数据基础和决策支撑。

4.2 非开挖修复与局部加固技术

面对老旧管网埋设深、地表扰动大、空间环境受限等特点,大面积开挖修复不仅成本高昂,而且对校园环境、教学秩序影响极大。非开挖修复技术为地下管网高效、低扰动改造提供了理想解决方案。内衬法可通过新型管材在原有管道内部形成新的密封层,阻断渗漏通道;原位固化修复(CIPP)技术适用于结构性破损管段的整体加固与耐久性提升;局部树脂加固和喷涂衬里针对小范围损伤,实现快速修复和强化防护;管道拉管(pipe bursting)可替换严重损坏管段,极大提升整体承载力。这些非开挖技术具备施工周期短、对地表环境影响小、经济性突出的优势,适应老旧校园复杂管网的升级改造需求。其应用不仅有效提升了管网的耐久性和运行安全,也为全校日常运行和基础设施现代化升级提供了重要技术支撑。

4.3 工程实践与技术应用成效

在某典型高校老旧管网系统中,采用“智能检测+非开挖修复”集成技术,分阶段对供水、排水及热力等多类地下管网进行系统性治理。工程实践过程中,通过声波、雷达、内窥镜等多手段协同检测,实现了泄漏隐患的全覆盖和精准定位,大幅提升了早期异常发现率。结合风险分区与优先治理原则,对高危和损伤严重区段优先实施非开挖修复,缩短了维修周期,有效减少了对师生活动和校园秩序的干扰。项目实施后,管网修复效率提升30%以上,系统运行寿命平均延长15~20年,年均维修费用和事故发生率分别下降40%和60%以上。该集成方案不仅提升了老旧管网的可靠性、智能化和经济效益,也为高校基础设施健康管理与绿色可持续发展树立了典型示范,对全国同类工程具有重要的技术推广和应用价值。

5 地下管网改造优化与全生命周期管理策略

5.1 差异化改造与分级治理路径

针对老旧校园地下管网泄漏风险的空间分布和危害等级,实施差异化改造与分级治理是提升系统整体安全性与改造效益的关键。基于多参数风险评估结果,高危区优先采用管材更换、全段结构加固和非开挖修复等高强度综合治理措施,同时部署智能监测与实时预警系统,实现对重点隐患管段的动态掌控。次高危区聚焦于接口密封、局部管道修复以及环境整治,通过精准干预和资源合理配置,提高其局部抗风险能力和运行稳定性。一般风险区则以周期性维护、常规巡检为主,动态跟踪系统健康状态,确保管网全域处于可控运行状态。三类风险区的差异化治理实现了技术、资金和管理资源的科学分配,兼顾改造成效与成本控制,为校园供排水系统的长期稳定和安全运行奠定坚实基础。

5.2 全生命周期数字化管理平台建设

随着信息技术的发展,建设基于BIM和GIS一体化的地下管网数字化管理平台已成为现代校园基础设施管理的重要方向。平台集成管网结构参数、运行数据、历史检测和维修记录,形成系统化、可视化的全生命周期管理体系。通过风险预警、资源调度、自动化巡检和故障追溯等功能,极大提升了管理的科学性、响应速度和智能化水平。平台还能够对历史数据进行智能分析,实现管网健康状态的实时评价、潜在风险的动态识别和预警,支持精准决策和管理优化。

5.3 可持续发展与管理机制创新

实现老旧校园地下管网改造的可持续发展,需要技术创新与管理体制改革的双轮驱动。在技术路径上,积极推广绿色节能管材和智能调度系统,降低能耗和环境负担,提升系统运行的环境友好性和资源利用效率。管理机制上,注重风险评估、在线监测、应急响应与日常养护的全链条完善,形成校内多部门协同、社会资本参与的长效管理格局。通过政策激励与机制创新,吸引多元主体共同参与改造与运营,推动地下管网治理由“重建轻管”向“管建并重”“智能协同”“可持续运营”转型。上述措施将进一步保障校园地下管网的安全稳定与高效运行,为高校基础设施的绿色转型和智慧校园建设奠定坚实基础。

6 结语

老旧校园地下管网的泄漏风险评估与优化改造是提升校园基础设施安全与现代化水平的关键。多参数耦合风险模型和智能检测、非开挖修复等技术的集成应用,极大提升了隐患识别与治理效率。差异化改造、全生命周期管理和可持续发展战略,为校园管网系统的安全稳定运行和健康升级提供了系统性解决路径。未来,伴随数字化与智能化手段的不断创新,老旧校园地下管网改造必将走向更高水平,为高校绿色、智慧和安全校园建设提供有力支撑。

参考文献

- [1] 夏松林,陈慧,王德美,等.基于BIM的校园地下管网运维管理平台开发[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2021,34(04):499-504.
- [2] 黄陈,周雪峰.BIM技术在高校地下管网运维管理中的应用研究[J].常州信息职业技术学院学报,2018,17(04):27-29.
- [3] 郭兴根,刘帅,赵威.市政地下管网运维大数据预处理技术的研究与应用[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(28):211-213.
- [4] 王志明.南山“百校焕新”让老校园蝶变迎新[N].深圳特区报,2024-09-02(A01).
- [5] 黄振兴,武勇,范砚婷,等.老旧校园绿地集水区优化对雨水排放与LID设施功能的影响——以石家庄铁道大学为例[J].中国园林,2024,40(06):84-90.