

排水管网全要素调查与外水入侵快速检测技术体系研究

李昊洋 刘畅 史路肖 李朝辉 刘雪飞

中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

摘要: 伴随着我国城镇化进程的持续推进, 城镇排水管网作为重要的市政基础设施, 其健康程度直接关系城市水环境安全、防洪排涝能力与民生保障质量。我国大量城镇老旧排水管网建成年代久远、建设标准偏低、运维养护滞后, 普遍存在管道结构性与功能性缺陷突出、外水入侵严重、基础信息缺失等问题, 已成为制约城镇水环境治理与高质量发展发展的关键瓶颈。针对当前老旧排水管网排查工作中存在的基础信息调查体系不健全、外水入侵溯源效率低、检测方法适配性不足等痛点, 本文基于现行规范与工程实践经验, 系统构建了涵盖空间拓扑、结构属性、外部环境、运行现状四大维度的排水管网物理信息全要素调查体系, 明确了各维度的调查内容与技术方法; 厘清了7类典型外水入侵的来源与水质特征, 建立了“普查-复核-精测”三级快速检测技术体系, 实现了外水入侵异常点位的低成本快速锁定与精准溯源。研究成果可为城镇老旧排水管网的排查检测、健康评估与更新改造提供可复制的技术流程与实践参考。

关键词: 排水管网; 管网排查; 外水入侵; 快速检测

Research on Full-Element Investigation of Drainage Pipe Network and Rapid Detection Technology System for External Water Intrusion

Li Haoyang, Liu Chang, Shi Luxiao, Li Zhaohui, Liu Xuefei

MCC Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., China Beijing 100176

Abstract: With the continuous advancement of urbanization in China, urban drainage networks, as important municipal infrastructure, directly affect urban water environment safety, flood control and drainage capacity, and the quality of livelihood protection. A large number of old urban drainage networks in China were built long ago, with low construction standards and delayed operation and maintenance, generally exhibiting prominent structural and functional defects, serious external water intrusion, and lack of basic information. These issues have become key bottlenecks restricting urban water environment management and high-quality development. Addressing the current pain points in inspecting old drainage networks, such as incomplete basic information survey systems, low efficiency in tracing external water intrusion, and insufficient adaptability of detection methods, this paper systematically constructs a full-element physical information survey system for drainage networks based on current standards and engineering practice experience. The system covers four dimensions: spatial topology, structural attributes, external environment, and operational status, specifying the survey content and technical methods for each dimension. It clarifies the sources and water quality characteristics of seven types of typical external water intrusions and establishes a "general survey - review - precise measurement" three-level rapid detection technical system, achieving low-cost rapid identification and accurate tracing of abnormal external water intrusion points. The research results can provide replicable technical procedures and practical references for the inspection, health assessment, and renewal of old urban drainage networks.

Keywords: Drainage network; Network inspection; External water intrusion; Rapid detection

0 引言

排水管网是城镇基础设施体系的核心组成部分, 承担着雨水收集输送、污水收集转输的核心功能, 是保障城市水系统健康循环、防范城市内涝风险、保护水生态环境的重要载体。

据统计, 我国城镇排水管网大多建设于上世纪中后期^[1], 大量老旧排水管网受建成年代久远、原建设标准偏

低、长期运维养护不到位等因素影响, 已进入病害高发的“老龄化”阶段, 普遍存在过流能力不足、结构性破损、淤积堵塞、外水入侵等突出问题, 由此引发的城市内涝、水体黑臭、污水处理厂进水浓度偏低等问题频发, 其带来的公共安全风险与生态环境风险已不容忽视^[2]。

针对排水管网病害排查与检测技术, 国内外学者已开展了大量研究: 谷俊鹏等^[3]系统分析了排水管网运维效能

的提升路径,明确了管网基础信息排查与缺陷检测的核心作用;DI等^[4]基于智能模型开展了排水管道淤积的水力特性研究,为管道检测提供了理论支撑;杜预等^[5]对比了国内外主流排水管道状况评估系统的差异,为评估体系的本土化应用提供了参考。但现有研究仍存在明显不足:大多聚焦于单一检测技术的优化与应用,缺乏体系化的管网物理信息全要素调查规范;针对外水入侵的快速检测方法多为单一指标检测,未形成分级适配、低成本、高效率的全流程排查体系;对国内外管网健康评估体系的工程化应用场景分析不足,难以直接指导一线排查与改造实践。

基于此,本文针对城镇老旧排水管网排查检测的核心痛点,系统构建了排水管网物理信息全要素调查体系,明确了各维度的调查内容、资料清单与技术方法;梳理了典型外水入侵类型的水质特征,建立了三级快速检测方法体系,最终形成一套具有通用性、可复制性的排水管网智慧排查与快速检测工作流程,为城镇老旧排水管网的更新改造、健康运维提供技术支撑与实践参考。

1 管网物理信息调查

管网物理信息是描述排水管网系统实体设施的空间几何特征、材料构造、工程属性等固有静态特征的核心数据集,是开展管网健康评估、缺陷修复、更新改造的基础前提。本次管网物理信息调查体系涵盖空间位置与拓扑关系、管道结构属性、外部环境特征、运行历史与现状等四个核心维度,形成全要素、可落地的调查规范与技术流程。

1.1 空间位置与拓扑关系调查

空间位置与拓扑关系是构建管网数字孪生模型、厘清管网水力逻辑的核心基础。调查目标是还原管网的空间坐标、竖向高程与节点连接关系,解决管网基础数据缺失、拓扑关系错乱的问题。

1.1.1 调查内容

进行管网空间位置与拓扑关系调查,需要收集的基础资料如下:

- (1) 平面坐标:管段的起点、终点、转折点的精确平面坐标;
- (2) 埋深与高程:管内底高程、井内底高程、地面高程、埋设深度等;
- (3) 几何参数:管道内径、管段的实际长度、敷设坡度等;
- (4) 水力流向:管段内水流的深度和流向;
- (5) 拓扑关系:检查井、雨水口、排放口、泵站等节点的位置、编号,以及管段与管段、管段与节点之间的连

接关系。

1.1.2 调查技术与方法

(1) 现有资料调阅。优先从建设单位、档案馆、市政排水管理部门、管网运维单位调取权威基础资料,包括管网设计图纸、竣工资料、市政管网GIS数据库等,完成基础数据的初步归集与校核。

(2) 现场精准测绘。采用RTK、全站仪等高精度测量设备,完成检查井井盖中心、雨水口中心等地面控制点的平面坐标与高程测量;地下管线探查采用开井实测方式,通过激光测距仪、高精度卷尺等设备测量井深、管底至井口的垂直距离以及液面至井口的垂直距离,反算井内底、管内底高程和水深;针对非开挖、难实测管段,融合探地雷达、惯性定位仪等物探技术,同步搭载CCTV管道检测机器人,在缺陷检测的同时精准记录管道三维空间轨迹,为后续修复设计提供高精度空间数据支撑。

(3) 实际流向判定。通过目测、漂浮物测试(乒乓球、示踪浮片等)、烟雾测试或相邻检查井管底高程差校核等方法,确定管段内实际水流流向,修正图纸资料与实际运行不符的拓扑错误。

1.2 管网结构属性调查

管道结构属性是评估管道结构安全、剩余使用寿命、缺陷严重程度的核心依据。调查目标是全面掌握管道的材质、规格、接口形式、结构完整性等关键参数。

1.2.1 调查内容

进行管道结构属性调查,需要收集的基础资料如下:

- (1) 管径与壁厚:管道外径、公称直径及壁厚,用于评估管道腐蚀剩余厚度与结构承载能力;
- (2) 管材类型:明确管道材质,如混凝土管、铸铁管、陶土管、HDPE管、PVC管等;
- (3) 接口形式:如承插式、平接口、焊接、法兰连接等;
- (4) 附属设施:与管道配套的检查井、跌水井、溢流堰等附属构筑物的结构参数与完好状况。

1.2.2 调查技术与方法

(1) 开井验视:通过检查井直接观察检查井及井口附近暴露的管段,初步判定管道材质、接口类型与表观结构状况,完成大范围初步筛查。

(2) 内窥成像检测:

- 1) QV管道潜望镜:适用于井室周边管段的快速初步检测,可快速判定管径、管材与明显结构性缺陷,效率高、成本低;
- 2) CCTV管道机器人检测:通过搭载高清摄像

头与激光测距模块的检测机器人,可精准测量管道内径,通过管道内壁成像特征分辨管材类型、接口形式与接口完好性,同步识别管道裂缝、腐蚀、变形、淤积等结构性与功能性缺陷,完成管道结构状况的全面评估。

(3) 无损检测技术:

1) 超声波测厚仪:对于金属管道,可从管道内部或暴露点位精准测量管道剩余壁厚,评估腐蚀劣化程度。

2) 三维激光扫描:通过激光扫描生成管道内部高精度三维模型,精准量化管道变形量、腐蚀坑深度等缺陷参数,为结构安全评估提供精细化数据。

1.3 外部环境信息调查

外部环境是影响管道结构劣化速度、缺陷发展趋势的关键外部因素。调查目标是明确管道周边的荷载、地质、周边管线等环境条件,评估管道运行的外部风险。

1.3.1 调查内容

进行外部环境信息调查,需要收集的基础资料如下:

(1) 道路荷载:管道上方道路等级、设计荷载、日常车流量、重载车辆通行情况,评估地面荷载对管道结构的影响;

(2) 地质条件:管道敷设区域的土壤类型、土壤腐蚀性、地下水位埋深与变化规律,预判地基沉降、砂土液化、土壤腐蚀等风险;

(3) 邻近管线:周边燃气、电力、通信、给水等其他地下管线的平面位置、竖向高程、与调查管道的净距。

1.3.2 调查技术与方法

(1) 资料查阅。从交通管理部门获取道路等级与荷载数据,从地质勘察单位获取项目区域工程地质勘察报告,从城建档案馆调取区域综合管线竣工图,完成外部环境基础数据的归集。

(2) 现场勘查。现场记录管道上方道路类型,排查路面重车碾压痕迹、检查井周边地面裂缝与沉降迹象;采用探地雷达、三维激光扫描等技术排查管道周边土体空洞、疏松等风险;针对地下水位影响显著的区域,可在检查井内布设自记水位计,长期监测地下水位与管道内水位的联动变化规律。

1.4 运行历史与现状调查

运行历史与现状是预判管道缺陷高发区域、评估管道长期运行稳定性的重要依据。调查目标是厘清管道全生命周期的建设、运维、病害历史,锁定管网高风险管段。

1.4.1 调查内容

进行管道运行历史与现状调查,需要收集的基础资料

如下:

(1) 管道建设信息:管道准确敷设年份、原设计标准、施工单位等建设基础信息;

(2) 运维历史记录:管道历次清淤、检测、维修、改造的档案资料,包括历史 CCTV 检测报告、维修改造竣工资料等;

(3) 当前运行状况:管道历史溢流、堵塞、路面塌陷、污水冒溢、内涝等病害事件的发生时间、位置与处置记录,明确问题高发区域。

1.4.2 调查技术与方法

(1) 档案管理。系统归集排水运维单位、市政管理部门资产管理系统、运维管理系统中的全生命周期历史档案,完成管道运行历史数据的系统化整理。

(2) 走访调研。向长期负责该区域管网运维的工作人员开展走访调研,掌握管网的历史改造情况、病害高发区域与常见运行问题,弥补档案资料的缺失。

(3) 快速内窥筛查。在全面检测前,针对历史问题高发区域开展 QV 或 CCTV 快速内窥检测,核实管道当前内部结构与运行状况,锁定高风险管段。

2 外水入侵快速排查

排水管网多数设于地下,具有强隐蔽性、长距离、全生命周期服役的特征,管道结构性缺陷、接口破损、雨污混接等问题难以及时发现,由此引发的地下水入侵、河水倒灌、雨污混流等外水入侵问题十分突出^[3-4]。外水入侵不仅会导致污水直排引发水体黑臭,还会造成污水处理厂进水有机物浓度偏低、运行负荷波动大、处理成本大幅上升等问题,严重影响污水系统的运行效能^[6]。

外水入侵排查的核心目标是精准识别外水类型、快速锁定入侵异常点位、实现入侵来源高效溯源。本文基于不同外水类型的水质与水量特征,构建“普查-复核-精测”的三级快速检测体系,形成适配不同排查场景、低成本、高效率的外水入侵全流程排查方法。

2.1 典型外水入侵类型及特征识别

不同来源的外水具有显著差异化的水质、水量与时间变化特征,是外水类型识别与溯源的核心依据。本文梳理了城镇生活污水管网 5 类常见外水入侵类型的来源与核心特征,详见表 1。

2.2 外水入侵分级快速检测体系

基于不同外水类型的特征差异,结合排查工作的不同阶段目标,构建三级快速检测体系,实现大范围快速锁定异常点位、中范围精准判定外水类型、小范围精准量化入

表1 典型外水入侵类型、来源及核心特征

外水类型	来源	外水特征	混入后特征	核心检测指标
地下水入侵	地下水位高于管道内底高程时,在静水压力下,通过管道及检查井缺陷处渗入。	水温全年稳定;矿化度高;几乎无有机污染物;无病原微生物;铁锰含量可能偏高。	电导率、总硬度同步升高;夜间最小流量异常升高;水量随地下水位变化呈现规律性波动。	总硬度;电导率;氨氮;水温。
景观水倒灌	景观水通过管网末端出水口淹没倒灌、管道破损侧渗、违规直排等进入管网。	常含余氯、除藻剂;氮磷含量显著高于地下水;可检出藻类;透明度低;水质随季节波动大。	水量随景观水位波动;总磷升高幅度远大于COD;可能检出铜离子;水质指标与景观水体同步变化。	总磷;铜离子;COD。
自然水体倒灌	自然水通过管网末端出水口淹没倒灌、截流并倒灌进入管网。	受流域本底影响大;SS中等;氮磷低于生活污水;咸潮倒灌时氯离子、电导率呈数量级升高;无余氯。	水量随河道水位/潮汐周期同步波动;电导率与自然水体高度一致;COD、氨氮呈中等程度稀释;悬浮物及藻类含量高。	氯离子;电导率;COD。
雨污混接	雨水管道错接入污水管网。	初期雨水SS极高,携带路面沉积物、油污;后期雨水水质干净;电导率极低;污染物浓度随降雨历时呈指数衰减。	晴天水量无明显异常,雨天流量激增;水质指标被大幅稀释,COD、氨氮等污染物浓度骤降;电导率骤降;雨停后数小时内水质指标恢复。	电导率;SS;氨氮。
自来水管道的漏损	供水管网破损,自来水渗入排水管道。	水质极干净;含稳定余氯;有机物、氨氮几乎为零;电导率低且稳定。	电导率、COD、氨氮极低;可检出余氯;水量全天稳定无明显波动,不受降雨、地下水位变化影响。	余氯;电导率;COD。
施工降水	建筑基坑降水、井点降水、盾构施工排水等施工降水违规直接接入污水管网。	水质接近地下水,但SS显著偏高;可能含施工添加剂;pH偏碱性。	阶段性、临时性存在,与工程建设周期高度相关;悬浮物含量波动大;可能检出高浓度钙离子、硫酸根。	总硬度;SS;pH。
工业偷排	工业企业违规排放的生产废水通过私接管道、偷排口进入污水管网。	水质差异极大,取决于行业类型;常含重金属、有毒有机物等特征污染物;pH、COD可能较极端。	水质突发异常波动,与生产周期同步;特征污染物浓度急剧升高或出现管网中不应存在的特征污染物。	pH;COD;特征污染物。

表2 三级检测体系汇总表

检测分级	适用场景	检测方法与设备	技术优势	检测目标
一级检测	管网初步普查、入侵高风险区域全域筛查。	目测法:观察水位、流向、颜色、气味等;试纸法,含pH、氨氮、COD、总硬度等指标快速检测试纸。	操作无门槛、成本极低、无需电源与专用设备,单点位检测速度快、覆盖效率高。	快速识别水质异常波动点位,大幅缩小后续检测范围。
二级检测	异常点位复核、外水入侵类型精准判定、入侵来源初步溯源。	预制试剂法、便携式仪器检测,含COD、氨氮等指标预制试剂管、滴定试剂盒、便携式电导率仪/浊度仪等。	便携性强、现场可出结果,数据精度满足定性与半定量分析要求,适配性强。	精准判定外水入侵类型,锁定入侵来源,明确高风险核心管段。
三级检测	重点管段深度检测、入侵量精准计算、修复设计数据支撑。	实验室级便携式精密仪器,含便携式多参数电极分析仪、紫外分光光度计、电位滴定仪、便携式SS检测仪等。	检测精度接近实验室标准,可实现多参数同步精准检测,数据支撑性与权威性强。	精准量化外水入侵量,构建入侵溯源模型,为管网修复改造提供全套精准设计参数。

侵参数的全流程排查,兼顾检测效率、检测精度与排查成本,具体分级见表2。

通过三级检测体系的梯次搭配与组合应用,可针对不同排查目标与应用场景,实现外水入侵异常点位的快速锁定、类型精准判定与入侵量量化分析,在大幅降低排查成本的同时,显著提升排水管网外水入侵排查的工作效率与精准度。

3 结语

本文针对我国城镇老旧排水管网排查检测工作中的核心问题,基于现行规范与工程实践经验,系统开展了排水管网物理信息调查和外水入侵快速检测内容的研究,形成了一套具有通用性、可复制性的排水管网排查检测技术流程,主要研究结论如下:

(1) 构建了涵盖空间位置与拓扑关系、管道结构属性、外部环境特征、运行历史与现状等4个维度的排水管网物理信息全要素调查体系,明确了各维度的核心调查内容与配套技术方法,形成了标准化的调查资料清单,解决了当前管网排查中基础信息调查不系统、数据不完整的问题。

(2) 厘清了城镇污水管网7类典型外水入侵类型的来源与核心特征,构建了“普查-复核-精测”三级快速检测技术体系,明确了各等级检测的核心目标、适用场景与技术方法,实现了外水入侵异常点位的低成本快速锁定与精准溯源,兼顾了排查效率与检测精度。

本文研究成果可为城镇老旧排水管网的排查检测、健康评估与更新改造提供标准化的技术流程与实践参考。受研究条件限制,本文构建的技术体系尚未在大规模实际工

程中进行全流程验证, 后续将结合具体工程案例, 对调查体系与检测方法进行优化完善; 同时, 将进一步深化排水管网智慧化排查技术的研究, 提升管网排查检测的智能化水平与数据应用价值。

参考文献:

- [1] 张博. 城镇老旧排水管网更新改造的对策探讨[J]. 城市建设, 2025(17):86-88.
- [2] 菅秀钱. 城镇老旧给排水管网的改造与优化研究[J]. 城市周刊, 2024(8):21-23.
- [3] 谷俊鹏, 曹玉梅, 潘铁津. 城市排水管网运维效能提升策略研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(16):29-36.

[4] DID, LIT, FANGH, et al. ACFD-DEM investigation into hydraulic transport and retardation response characteristics of drainage pipeline siltation using intelligent model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 152:105964.

[5] 杜预, 郭帅, 潘刚等. 国内外排水管道状况评估系统对比分析研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20):9-15.

[6] 赵文涓. 合肥市王建沟片区排水管网入流入侵诊断和溯源解析研究[D]. 安徽建筑大学, 2023. DOI:10.27784/d.cnki.gahjz.2023.000307.