DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260720

智慧城市精细运维下雨污混接溯源与整治研究

樊　波[1],孙建海[2],陈宝光[3],周　凌[4]
(1.浙江数智交院科技股份有限公司,浙江 杭州 310000; 2.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092;
3.杭州嘉澍市政工程设计有限公司,浙江 杭州 310000; 4.浙江省城乡规划设计研究院有限公司,浙江 杭州 310000)

摘　要: 在高质量发展和建设韧性城市政策背景下,市政排水系统雨污混接问题需要系统性治理。梳理了智慧城市精细化运维的内涵,分析比较了专业上应用较多的水量平衡、化学质量平衡、物流探测与内窥、示踪剂与烟雾测试、物联网与边缘计算等雨污混接溯源方式及其适用范围,进而提出了从源头到管网再到末端的全方位雨污混接整治方案,并特别强调了数智化手段运维管控。最后,结合工程案例进行了分析。研究发现,在工程中采用感知、诊断、整治、评估的全周期精细化运维方式,能够有效地解决雨污混接的难题,持续改善城市水环境及增强排水韧性。建议设计院深度融合传统设计与信息技术,全过程提供技术支撑。

关键词: 智慧城市;精细化运维;雨污混接;溯源技术;管网整治
中图分类号: TU992　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0255-06

Research on Source Tracing and Remediation of Rainwater and Sewage Mixed Connections in Refined Operation and Maintenance of Smart Cities

FAN Bo[1], SUN Jianhai[2], CHEN Baoguang[3], ZHOU Ling[4]
(1. Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Hangzhou Jiashu Municipal Engineering Design Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 4. Zhejiang Urban and Rural Planning Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Against the policy backdrop of high-quality development and resilient city construction, the systematic governance is required to tackle the rainwater and sewage mixed connections in municipal drainage systems. The connotation of refined operation and maintenance of smart cities is sorted out, and the source tracing methods of rainwater and sewage mixed connection, such as water balance, chemical mass balance, logistics detection and endoscopy, tracer and smoke testing, Internet of Things and edge computing, which are widely used in the professional field, and their applicable scopes are analyzed and compared. Furthermore, a comprehensive rainwater and sewage mixed connection rectification scheme from the source to the pipeline network and then to the end is proposed, and the particular emphasis is on the operation and maintenance control through digital and intelligent means. Finally, the analysis is conducted with the engineering cases. The research result shows that implementing a full-cycle refined operation and maintenance model encompassing sensing, diagnosis, remediation and evaluation can effectively resolve the difficulty of rainwater and sewage mixed connections, continuously improve the urban water environments, and enhance the drainage resilience. It is suggested that design institutes should deeply integrate traditional design with information technology, and provide full-process technical support.

Keywords: smart city; refined operation and maintenance; rainwater and sewage mixed connection; source tracing technology; pipeline network remediation

0　引　言

2025 年 4 月 28 日,中央政治局会议提出“加强水网、新型电网、算力网、新一代通信网、城市地下管网、物流网等规划建设”,宣告“六网”建设正式纳入国家顶层部署,为“十五五”期间工程建设确立具体路径。当前,城市治理正从传统的粗放式管理逐步转型为智慧化、精细化的运维,智慧城市建设已成为高质量发展的核心内涵。城市“六网”建设需要坚持科技创新、数字赋能,推动传统设计与信息技术的深度结合,持续提升城市韧性,保障城市的安全。

收稿日期: 2026-06-30
作者简介: 樊波(1981—),男,工学学士,高级工程师,从事轨道交通及市政给排水设计工作。

城市雨污水管网在整个城市地下管网系统中举足轻重。在城市化加速的进程中，管网规模迅速扩大，同时也带来大量问题。历史建设标准偏低、管理粗放、投资重地上轻地下、管网老化等因素，导致城市雨污管道混接、错接、渗漏等问题日益凸显。业界较多学者对雨污混接提出深刻见解和技术方案。雨水管网混接，雨天溢流排放是造成水体黑臭的重要因素[1]。水环境问题的改善需要彻底解决雨污混接难题。陈黄隽，李一平等[2]对分流制系统雨污混接溢流污染特征进行研究，分析溢流污水水质变化和颗粒物粒径分布情况，探讨降雨强度、降雨历时、前期干旱时间等对溢流污水颗粒物粒径分布的影响。徐祖信等[3]提出了基于管网节点水质特征因子监测的低成本的雨水混接来源诊断技术方法。魏源源等[4]结合团标编制过程，提出了混接预判、混接区域调查，以及混接点（源）探查、判定、治理的技术路径。王捷、张朔、舒海涛等[5-14]结合上海、厦门、资阳、南京等城市工程实践，对雨污混接综合治理给出分析和对策。

为助力城市水生态环境的提升及智慧城市的建设，笔者尝试在智慧城市精细化运维背景下，研究更加科学有效的雨污混接解决方案。

1　智慧城市精细化运维概念

智慧城市精细化运维是将物联网感知、数据融合处理、智能算法分析等数字化技术与城市基础设施运维深度融合，形成具有智能化特征的管理机制。在市政排水行业中，在管网等处设置智能监测设备，持续采集管网流量、液位、水质等实时信息，上传数据至智慧运维平台进行计算，对管网健康程度自动研判，从而及时发现雨污混接，管道渗漏、破损、淤积等隐性问题，并智能化溯源混接点位，匹配相应的整改修复方案，全程动态跟踪，并对效果实施评价。

2　雨污混接溯源体系研究

雨污混接隐蔽、动态、分散的突出特征是制约城市排水提质增效的技术瓶颈。《城镇排水管道混接调查及治理技术规程》（T/CECS 758—2020）规定的溯源调查法是从排水口沿排水管网向上游追溯，按照排水口—总管—干管—支管顺序调查混接点，查找混接源，其核心任务是高效查清混接点位、方向及水量来源。

2.1　水量平衡溯源

通过分析管网流量、液位的变化来推断异常混接是最基础、应用最广的筛查手段。

在疑似混接区域的上、下游关键节点安装流量计，对比晴天与雨天的流量过程线。若晴天雨水管内存在持续且明显的生活污水流量特定，则判定有污水混入；若雨天污水管内流量异常增大且超过收水范围合理水量，则判定有雨水混入。

根据管网的实际走向核算上下游水量，当发现某一管段下游水量偏离上游收水规律时，即可判断该管段有混接或渗漏嫌疑。此方法多用于分区闭水试验或封闭式小区的水平衡测试。

通过分析液位变化来判断混接类型是常用技术手段。在检查井内安装液位传感器，当污水混入雨水管时，液位往往升高；当雨水混入污水管时，雨天液位会快速上涨，容易引发管道溢流。结合降雨数据，即可建立雨量-液位的响应分析模型，从而快速定位混接的高敏感区域。

2.2　化学质量平衡溯源

基于水质特征因子实现多源混接精确定量诊断的方法，适用于在复杂混接的水体中分辨生活污水、工业废水、地下水等不同来源的情况[2-3]。

首先，需要寻找能够表征某一类污染源的特异性水质指标。对于生活污水，常以总氮、氨氮、阴离子表面活性剂（LAS）、人工甜味剂（安赛蜜）等作为特征因子；对于工业废水，视行业选择特定重金属（如氟化物、铜等）或特定有机物作为特征因子；对于地下水，多采用硬度、硝酸盐、氯离子等作为特征因子[2-3]。

其次，需要建立混接水流的物料衡算方程。对于某一混合水样，其中任一特征因子的浓度等于各混接源贡献的加权和。通过监测管网节点多个特征因子的浓度，结合各纯源特征因子的背景浓度数据库，可求解出各混接源的水量占比[3]。

最后，采用蒙特卡罗法对水质做模拟解析。由于实际管网中同一类型混接源在不同点位存在浓度差异，且测量存在误差，确定性方法求出的解可能不闭合。引入蒙特卡罗理论，根据各混接源浓度的概率分布进行大量随机模拟，可给出各混接源贡献量的置信区间，使定量解析的误差控制在10%以内[4,13]。这一方法已在上海等地区排水系统混接诊断中成功应用。

2.3　物理探测与内窥溯源

当通过水量和水质手段将混接区域的探查范围缩小至若干管段后，需要借助物理探测手段进行“最后一米”的管道内确认与定位。

CCTV 检测：机器人进入管道内部，直接拍摄管道的连接、破裂、错口及私接入口状况，可精确定位混接点管道位置和缺陷类型。

QV 检测：将潜望镜和补光设备从检查井管口伸入管道采集图像。该方法适用于快速核查，效率较高，但视野范围有限，精度不足。

声呐探测：对于满水或高水位管道场景，声呐技术可穿透水体成像，排查管壁结构和淤积情况，识别暗接的支管。

雷达监测：地面无损检测，用于定位地下不明走向的未知管线和渗漏空洞，可追踪雨污混接支管的走向。

2.4　示踪剂与烟雾测试溯源

对于源头立管错接和埋地暗管混接，示踪法提供了一种直观辨认的方法。

烟雾测试：在雨水或污水管道系统内释放无毒烟雾，观察烟雾是否从另一系统的排水口（如屋顶通气管、雨水箅子、污水井）逸出，以此来判断管道立管是否错接。

染料示踪：将荧光染料投入可疑排水户的用水点，在下游雨、污水检查井中分别采样，使用荧光光谱仪检测是否出现示踪剂，可确定明确的混接路线。

2.5　物联网与智能算法诊断溯源

通过物联网监测设备收集各类数据，将其接入智慧大模型平台，进行分析解读，再通过大模型智能算法，科学系统地溯源。

在线监测预警：在区域排口、管网关键分叉节点等位置，部署 COD、氨氮、电导率等多参数的水质在线监测装备，自动对比实时和正常数据，当水质的特征值偏离正常范围时，即刻发出报警信号。

机器学习识别异常：利用长期积累的水质、水量监测数据训练大模型，区分正常排水与雨污混接之间数据差异；通过聚类、孤立森林等算法，精准识别流量、水质的微小波动，筛查疑似混接管段；将结果数据再反馈给大模型，使之不断学习进化。

GIS 结合水力模型反演：整合管网 GIS 管线信息与现场的实时监测数据，搭建多级的水力计算模型。当监测点发现异常以后，模型可反向推演上游可疑的范围，再结合遗传算法等，不断优化、缩小排查的范围，一步步接近实际混接点位。

3　精细化运维下雨污混接整治策略

精细化运维可有效解决当前城市雨污混接、管道渗漏、雨天溢流污染等问题。结合城区、商业街区及市政管网的实际工况，雨污混接整治可从源头整治、管网修复、数智化运维管控等 3 个维度落地实施，形成可持续整治策略体系。

3.1　源头整治

依托溯源技术，精准识别各类混接源头，分类整治。针对老旧小区较多的建筑立管雨污混接问题，重点开展分户断接改造；对居民私改厨卫排水、阳台雨改污等违规立管进行专项整改，按规范重设独立管线，严禁污水进入雨水管；针对沿街商铺、各类工商企业等排水户，实行一户一档管控，对私接乱排、偷排污水的排水设施，从技术和管理上全面管控，理顺排水接驳关系，落实排水许可备案制度。

3.2　管网整治

针对历史遗留的雨污错接、乱接问题，应结合管网 GIS 数据逐段复核梳理，系统性恢复雨污分流体系。除人为混接外，管道老化破损、淤积堵塞、渗漏等结构性、功能性缺陷引发的隐性混排，是以往管网整治中容易疏忽的地方。现在通过 CCTV 内窥、QV 潜望、声呐雷达等更加精准的诊断技术，可全面排查管网缺陷点位，实施精确的差异化修复。对管道淤积、沉积物堵塞等功能性问题，需要常态化清淤，消除管道堵塞物，防止雨天翻涌污染，同时保障排水通畅。对管道（暗涵）破损、错位、渗漏等结构性缺陷，根据缺陷等级选取适合的非开挖修复、局部开挖更换、微顶管等方案，修复排水系统。对雨天溢流污染严重的片区，需要结合监测数据，增设相应的截污、调蓄设施，有效削减污染负荷，弥补管网分流不足的短板。

3.3　数智化运维管控

数智化的主动运维管控手段是雨污混接问题得以整治的重要保障，主要包括以下内容：

（1）管网、排口运行等运管所需的数据，通过在设定区域内布设水质、流量、液位等监测设备，全天候采集，形成数据库。

（2）雨污混接异常，主要通过平台的智慧大模型计算识别，并给出整改方案，做到隐患早发现、早处置。

（3）重视数字化管网数据更新的管理，动态实时

更新混接整改信息，形成统一电子档案，再将整改过程及前后数据对比，提供给大模型进一步学习。

（4）落实网格化长效管控模式，明确物业、运维企业、街道等部门的管理边界，相关信息及责任部门在智慧平台上共享、公开。

4　工程实践

4.1　项目概况

东湖街道2021年“污水零直排”创建生活小区项目，位于杭州市临平区东湖街道东港花苑。项目建设性质为“雨污水管网分流综合整改”，建设内容包括区域内雨污废水管网及附属设施改造提升、建筑立面管道改造提升、住宅阳台水改造提升、沿街商铺污水管道改造，以及小区道路、绿化的恢复等。

“污水零直排”是浙江省“五水共治”的核心内容之一。截至2024年4月，东湖街道累计建成“污水零直排”小区43个，获评全省首批“污水零直排”星级街道。

该项目概算总投资1 932.65万元，工程费用1 698.56万元。其技术指标中，污水工程869元/m，雨水工程792元/m。项目建设周期具有鲜明的“短平快”特点，最大限度减少了对民生的影响。辖区治水办于2021年12月下旬完成对东湖街道的验收工作，总施工周期控制在300 d内。

4.2　排水现状排查

与属地街道及物业调查房屋功能改变情况（洗衣机放阳台、群租、阳台厨卫装修管线接入等）以及与小区相接的市政雨污水管道的运行情况（雨污水管道水位、排出口等）；核对设计区域内管线缺陷点位及等级，屋面檐沟，雨污立管位置以及建筑外立面（阳台装修）情况，保笼雨篷等设施位置，建筑一层南北院子内部装修及外部道路、绿地情况；复核雨污水管及检查井错接、混接等情况，原雨污管道坡度问题，截流井、泵井、连通管等设施位置及运行情况等。CCTV检测结果示例见表1。

表1　管道缺陷检测示例表

WS048-WS049	HDPE	225	16.2	管道缺陷图像
缺陷名称	变形/BX			
等级	4			
距离/m	3.88			
时钟表示	0012			
管道变形			建议：开挖修复	
YS101-YS100	HDPE	300	14.39	管道缺陷图像
缺陷名称	破裂/PL			
等级	4			
距离/m	11.42			
时钟表示	0912			
管道破裂			建议：开挖修复	

4.3　排水现状分析

根据现场排查，东港花苑共有居民居住楼42幢，总户数2 406户约7 300人。小区现状污水共有6个系统，2个流入西侧星河路市政污水管网，2个流入南侧北沙西路市政污水管网，2个流入东侧月荷路；现状雨水共有12个系统，其中11个流入内部叶家桥港，1个流入南侧北沙西路市政雨水井。根据检测资料，小区内存在22处雨污混接现象，周边共有16家餐饮店、6家汽车店、2家理发店、1家宠物店，隔油池等预处理措施不明，存在多处大管接小管的问题（见图1至图4）。



图1　小区位置图



图2　沿街商铺分布照片



图3　排水井混接照片



图4　垃圾点污水照片

该片区居住区排水系统主要存在以下问题：

（1）现状雨、污管网陈旧。现状排水管网系统存在管道破损、接口不密实、渗水严重等问题。

（2）住宅的阳台功能改变，污水私接入雨水系统。传统阳台设计考虑洗拖功能不足，较多的住户会私自更改，将洗手池或洗衣机、鱼缸等改在阳台上，甚至直接改为厨房，导致生活污水从源头流入雨水系统，造成雨污合流、混流。目前住宅小区这种现象比较严重。

（3）住宅小区的建筑雨污水立管老化破损，错接乱排。个别老旧的小区立管品质较差，破损、折断，雨水立管直接排至地面或者污水立管自行修复后随意就近接入雨水井。

（4）管道及雨水口、检查井、化粪池等附属构筑物堵塞现象严重。部分管道老化、腐蚀、破损、坍陷形成堵点；施工质量低，管道坡度偏小或倒坡；部分管径偏小，雨污水管道过流能力低；较多的井室内沉积物不能按时清理。

（5）商铺餐饮污水乱接现象严重。部分临街商铺、餐饮店等废水无末端处理装置，未经处理便直排小区内部雨污水管网。

（6）部分小区内部雨污水管网存在大量管道倒坡现象，且存在部分管道没有出路，游离在主管网以外的情况。

4.4　混接整改方案设计

根据对居住区先行排查的数据，计算各居住区雨污水量，核算相应管径、坡度；再对各居住区内部雨污管网进行相应整改，并对建筑单体进行雨污分流改造。

4.4.1　排水系统改造

对东港花苑现状雨污水管网局部修复，对雨污混接及小区内 3、4 级管道进行改造设计。对 3、4 级破损管道及倒坡严重的原管位进行翻建，其中：污水管道 D200 管 4 585 m，D300 管 724 m；雨水管道 D200 管 96 m，D300 管 2 147 m，D400 管 163 m，D500 管 35 m。所有检查井均新增防坠网，修复破损井体。新建雨污水系统采用新型管材，并保证水力坡降，杜绝雨污合流。

4.4.2　居住区建筑单体合流立管改造

（1）合流立管改造

改造原合流系统，原建筑合流管从雨水斗下方截断，改作污水管，增加伸顶通气帽、检查口；屋面雨水从截断处单独接出，增设雨水立管，排入附近雨水井或雨水口。

（2）雨水立管入地改造

改造混接入化粪池及污水井的雨水立管，在地面以下截断雨水立管，就近排入附近雨水井或雨水口。

（3）雨水立管散排改入地

改造散排地面的雨水立管，将此类雨水立管改造入地，确保接入井内。

4.4.3　排水管网维护方案

根据建设单位提供的相关资料，对建设地点环境概况、城市雨污水排放量进行分析，勘测、物探复核排水管网，查清排水管的布局、走向、位置、管径（断面尺寸）、淤积量、雨水口、检查井盖的破损情况等，针对性提出清疏方案、修复措施及运行养护意见，保证排水管网正常运行（见表 2）。

表2　排水管网存在问题及整改方案汇总表

序号	问题类型	工程措施
1	管道淤积堵塞	清淤疏浚
2	管道破损	套管或衬管
3	管道塌陷、错口	按规划原管位恢复
4	管道倒坡、下沉、破损严重、堵塞无法清通	重新水力计算，调整管径坡度，新建管道
5	树根或其他障碍物	清除或原位换管
6	错接乱排	按雨污分流原则改建

5　结论与建议

城市地下管网雨污混接问题是困扰水环境提升的重难点。智慧城市精细化运维体系为雨污混接治理提供了先进的技术路径与管理模式，摆脱了以往依靠人工逐段排查、凭经验整治、静态台账管理的局限。结合文章的梳理研究及项目案例可以看出：

（1）采用感知-诊断-整治-运维-评估的全过程精细化运维策略，能够很大程度地解决雨污混接难题，多地工程实践也验证此方案实操可行。

（2）采用在线监测、水质特征因子诊断等新式溯

源手段，可弥补传统排查的短板，对雨污混接点位进行定量、定位诊断，有效提升现场排查的效率与精确度。

（3）当下数智化技术发展迅速，但与工程项目设计、施工环节融合不足，各阶段工作脱节。例如：管线缺陷检测单独招标，后期运维参与少；设计院仅负责阶段性技术设计，项目缺少技术统筹主体。为此笔者建议，在后续项目中，设计院应将工作向前后环节延伸，将数字信息技术与传统排水设计深度融合，提供雨污混接整治全周期的成套技术方案。

目前，数字孪生、智慧大模型、AI智能体等信息技术正持续迭代完善。借助这些高新技术，城市排水系统运维将更加快速全面地转向主动预判式管理。精细化运维是必然的发展方向，雨污混接溯源与整治应以此为契机，持续深化研究相关理论，并通过技术实操验证，进而为建设一个运转有序、智慧、韧性的现代化城市提供坚实的专业支撑。

参考文献：

[1] 徐祖信，张辰，李怀正．我国城市河流黑臭问题分类与系统化治理实践[J]．给水排水，2018，44（10）：1-5.
[2] 陈黄隽，李一平，周玉璇，等．分流制系统雨水管网混接雨天溢流污染特征研究[J]．中国给水排水，2023，39（19）：116-124.
[3] 徐祖信，王诗婧，尹海龙，等．污水管网中雨水混接来源的高效诊断方法[J]．同济大学学报（自然科学版），2017，45（3）：384-390.
[4] 魏源源，张杰，唐建国．城镇排水管道混接调查及治理技术研究与要点解析[J]．给水排水，2022，48（8）：123-127.
[5] 王捷．某超大城市雨污混接综合治理现状分析及对策[J]．城市道桥与防洪，2024（7）：128-132.
[6] 张朔．厦门城市混合功能街区雨污混接改造实践[J]．中国给水排水，2024，40（24）：99-105.
[7] 舒海涛．上海嘉定区住宅小区雨污混接改造工程技术探讨[J]．城市道桥与防洪，2021（3）：97-99.
[8] 刘芳．小区雨污混接改造设计探讨[J]．城市道桥与防洪，2020（10）：102-104.
[9] 路金霞，柏杨巍，傲德姆，等．上海市黑臭水体整治思路、措施及典型案例分析[J]．环境工程学报，2019，13（3）：541-549.
[10] 胡晓健．分流制排水地区雨污混接调查评估及分流改造方案研究[J]．市政技术，2019，37（4）：199-211.
[11] 赵亮．基于在线监测诊断城市排水管网雨污混接和入流入渗问题研究[J]．给水排水，2024（增刊）：812-817；830.
[12] 崔诺，鲁梅，安瑞，等．资阳市老城区排水管网排查诊断难点问题与解决路径[J]．给水排水，2023（增刊）：337-343.
[13] 徐祖信，汪玲玲，尹海龙．基于水质特征因子和Monte Carlo理论的雨水管网混接诊断方法[J]．同济大学学报（自然科学版），2015，43（11）：1715-1721；1727.
[14] 程庆松．南京市江北新区雅居乐片区雨水管网混接排查及诊断对策研究[J]．中华建设，2022（3）：148-149.

《城市道桥与防洪》杂志
是您合作的伙伴，为您提供平台，携手共同发展！
欢迎新老读者订阅期刊　欢迎新老客户刊登广告
官方网址：http://www.csdqyfh.com　电话：021-55008850　联系邮箱：roadbridgeflood@163.com

广　告