

智慧水务视角下城镇排水管道系统 规划勘测设计

刘硕雅

天津水务集团华淼规划勘测设计研究院有限公司，天津 300000

摘要：在全球气候变化与城市化进程加速背景下，传统城镇排水系统面临内涝频发、管网老化、运维低效等多重挑战。智慧水务作为新型基础设施建设的核心领域，通过物联网、大数据、人工智能等技术的深度集成，为排水系统全流程管理提供了革新路径。本文聚焦排水管道系统的规划、勘测与设计环节，构建智慧化技术应用框架，旨在推动排水系统从被动运维向主动调控的范式转变。

关键词：智慧水务；城镇排水管道系统；规划；勘测；设计

一、智慧水务的概念

智慧水务是水务管理领域在第四次工业革命浪潮中形成的系统性变革范式。其本质是通过新一代信息技术的渗透融合，重构水循环系统的管理模式，实现从“经验决策”向“数据决策”、从“人工干预”向“自主响应”、从“分割治理”向“协同共治”的范式跃迁。相较于传统水务以人工巡检与静态模型为主的运行方式，智慧水务更强调三个维度的突破：

（1）对象维度：将物理实体（管道、泵站等）与虚拟模型（数字孪生体）深度融合，形成“感知-认知-预知”的完整映射链；

（2）时间维度：突破传统水务的“瞬时快照式”管理，实现对水系统全生命周期（规划-建设-运维-报废）的动态追踪；

（3）空间维度：整合地上地下、流域区域的多尺度空间数据，构建“城市细胞单元-管网子系统-流域大系统”的立体管控架构。

其核心目标在于通过技术赋能，提升水系统的韧性、效率与可持续性，最终服务于城市安全、生态平衡与人居环境改善的多元需求。

二、智慧水务视角下城镇排水管道系统规划

（一）规划原则转型

传统城镇排水系统在规划之时，往往会较多地依靠历史方面的经验以及静态的设计标准。凭借确定性的假设来应对处于不确定状态的环境，如此一来，就很难去适应由气候变化以及城市不断扩张所引发的那种动态性的风险。智慧水务视角下，规划原则要达成三重方面的转变：一是从以往那种“静态蓝图”模式转变成为“动态适应性规划”的模式，把实时气象数据、土壤湿度传感所获取的信息以及人口迁移预测模型嵌入其中，进而构建起一个能够进行动态调整的规划框架；二是从“工程导向”转向“系统韧性优先”，就是说在保证排水能力达标的基础之上，着重去强化管网针对极端降雨、地质沉降等多种复合干扰所具备的自适应能力；三是从“独立设计”转向“多系统耦合”，也就是要把排水管网的规划和城市交通、能源、生态等基础设施的数字化模型在空间上进行叠加，并且让它们在功能方面实现协同^[1]。

（二）多尺度建模方法

城镇排水系统有着相当复杂的特性，其复杂性就体现在空间跨度呈现出多层次的状况，

并且时间演化还带有多阶段的特征。智慧水务技术借助构建多尺度耦合模型的方式,达成了从宏观层面的流域水文循环一直到微观层面的管道流态的全过程解析的效果。在宏观层面上,把高分辨率的遥感影像以及城市土地利用变化的数据整合到一起,运用分布式水文模型去模拟在不同开发强度之下的地表径流所具有的时空分布规律,进而识别出易涝风险区和生态敏感区二者之间存在的空间耦合关系。中观层面主要着重于对管网拓扑结构展开动态的优化操作,通过运用图论算法来分析现有管网的冗余程度以及瓶颈节点的情况,再结合人口密度热力图和地面硬化率的数据,从而生成一份能够兼顾现状改造以及远期扩展这两方面需求的管网布局方案。微观层面则是把关注点放在管道内部物质传输以及结构性能的精细化模拟这件事上,可以通过计算流体力学方法去细致刻画悬浮物沉积过程给过流断面带来的那种渐进式的影响,又或者利用材料腐蚀动力学模型去预测不同管材在酸碱环境下其服役寿命的衰减曲线具体情况^[2]。

（三）管网优化策略

在智慧水务框架下,排水管网优化不再局限于管径与坡度的水力参数匹配,而是扩展为涵盖经济成本、环境效益、社会公平等多维目标的综合寻优过程。其最为关键的核心要点就在于构建起具备自学习能力的优化算法框架,要把管网建设所产生的成本、运维过程中的能耗、碳排放的强度等一系列能够量化的指标转化为目标函数空间当中的多维曲面,接着凭借智能优化算法在解空间里面快速地去逼近帕累托最优前沿。例如,雨污分流改造规划需要同时去权衡分流管网新建所需要花费的成本、合流制溢流污染削减能够带来的效益以及施工期间交通受到干扰所产生的社会成本等多方面情况,并且要通过约束条件动态松弛技术去妥善处理不同利益主体之间存在的那些冲突性诉求^[3]。

（四）韧性提升路径

排水系统的韧性具体表现为在遇到干扰事件的时候,有能力维持自身的核心功能,而且还能够快速恢复过来,进而实现适应性的进化。智慧水务技术通过打造出“风险识别-脆弱性诊断-适应能力建设”闭环式提升路径,把韧性理念充分融入到规划阶段当中。需要建立起一个关于暴雨强度、管网荷载以及地表漫溢的级联风险传播模型,对在不同重现期降雨情景之下,管网出现超载的概率以及内涝的影响范围进行量化处理。在此基础之上,规划策略不能局限于传统的被动防御,可采用“源头削减-过程缓释-末端调蓄”的主动适应框架:在源头,借助智慧海绵城市系统来让降雨实现就地消纳以及滞蓄;在输送的过程当中,去设计那种带有压力自适应调节功能的智能检查井以及可逆流管道,以此来缓解局部出现超负荷的工况;在末端环节,把数字高程模型和实时水位监测数据结合起来,对调蓄池容积和空间布局的动态匹配方案加以优化^[4]。

三、智慧水务视角下城镇排水管道系统勘测

（一）传统勘测的局限性

传统排水管道的勘测手段,向来是受到技术条件以及作业模式的限制的,这样的限制状况对管网信息化建设的进程起到了很强的制约作用。一方面,人工进行巡检,再加上单一物探技术,像闭路电视检测、声呐探测等,这样的组合模式在效率方面存在着十分明显的瓶颈问题,很难去满足大规模管网普查在时空方面的诸多需求,并且对于那些较为隐蔽的缺陷,比如微小裂缝、管周空洞等,其识别的精度也是不够的。另一方面,勘测所得到的数据呈现出离散化的特点,这就使得信息整合困难,地下管线与地表构筑物的空间关联性被割裂,进而形成了所谓的“数据孤岛”现象。更为重要的是,传统勘测所取得的成果,大多是以二

维图纸以及纸质报告的形式来进行存档的,这里面缺乏一种能够动态更新的机制,所以没办法去适应像管网老化、土壤侵蚀等这些持续演变过程的跟踪方面的需求。这种呈现出静态且碎片化特点的勘测模式,已然变成了制约排水系统朝着智慧化方向转型的一大因素^[5]。

（二）新型勘测技术集成

智慧水务所推动的勘测技术革新,其本质就在于借助多源感知设备展开协同组网,并让智能算法深度参与其中,进而构建起“空-天-地-地下”这种一体化的全息勘测体系。在空中,无人机装载着多光谱传感器以及激光雷达,能够较为迅速地获取诸如地表高程、植被覆盖状况、硬化率等宏观层面的环境参数,并且将其与倾斜摄影技术相结合,以此生成具备厘米级精度的三维实景模型,从而给管网路径规划给出相应的地形基准。在地面,移动勘测平台把探地雷达、电磁感应仪等诸多设备集成到一起,运用多频段电磁波联合反演技术,达成对地下管线的非开挖式的精确定位以及埋深测量工作,同时还能够对管周土体密度存在异常的区域加以识别。管道内部检测则是依靠具备高机动性的机器人集群,这些机器人配备了高清摄像头、激光扫描仪以及机械臂装置,在无需截断水流的条件下,完成对管壁腐蚀情况的量化评估、沉积物厚度的测量以及局部修复相关作业。

（三）多源数据融合

勘测数据所具有的多维异构这一特性,促使着要去建立起统一的数据治理框架,以此来处理时空基准不相匹配、语义描述无法达成一致、精度层级存有差异等一系列融合方面的难题。空间维度上,借助点云配准算法,让无人机航测数据、地下管线探测所取得的成果以及既有的 BIM 模型实现坐标系统的统一以及几何方面的对齐,进而构建起涵盖地上地下全要素的数字底板。时间维度上,运用滑动窗口机

制,针对周期性检测的数据,比如年度 CCTV 录像,还有实时监测的数据,像是光纤应变时序等,展开动态关联操作,以此来揭示管网性能出现退化情况的时空演化规律。面对多传感器数据存在的冗余以及冲突这样的问题,引入证据理论(也就是 D-S 理论)和模糊逻辑算法,针对同一目标属性,例如管道渗漏概率,对其多源观测所得到的结果进行置信度加权融合处理,从而生成具备高可靠性的综合诊断结论。

（四）勘测成果数字化

智慧水务的勘测成果已发展为数字化资产,包含丰富的语义信息。核心在于建立一个自描述的管网特征数据库,包括静态和动态参数。数据库设计应基于“对象-关系”模型,定义实体的空间关联逻辑。数据标准化需要统一的元数据规范和编码体系,以实现数据的无缝集成和互操作性。将勘测数据集成到数字孪生平台,可创建与物理管网同步更新的虚拟模型,用于管网改造和应急抢险的仿真。

四、智慧水务视角下城镇排水管道系统设计

（一）模块化设计理念

传统排水管道设计多采用“一次性定制”模式,其结果就是施工周期会比较长,而且维护方面的兼容性也很差,很难去适应城市不断动态发展所产生的各种需求。智慧水务所驱动的模块化设计理念着重强调,要凭借标准化、预制化以及可扩展性来对设计范式予以重构。它的核心要点在于把排水系统拆解成一个个带有标准接口的功能单元,就像是管段、检查井、调蓄模块这些。依靠参数化建模工具来生成能够被复用的组件库,以此来支持快速进行组合以及和不同场景相适配。这种设计模式一方面能够让施工周期得以缩短,另一方面也为后期开展智能化升级预先留出了物理接口,比如说在对管段进行预制的时候嵌入传感器槽道以及通信线缆通道,从而使得管网具备了能

够扩展“即插即用”这种感知能力的空间。

（二）智能设备集成

排水管网若要实现智慧化运行，需要依靠感知、控制以及执行设备所采用的多层级嵌入设计。在设计之时，得对智能设备的空间布局以及功能耦合关系展开系统性的规划。比如，要在关键水力节点，像是管径突变之处、汇流点下游这些地方，去布设能够获取多参数的传感阵列，以便可以实时捕捉到流速、压力、浊度等等这类状态变量。在像泵站前池、调蓄池入口这样的控制枢纽位置，要集成那种具备边缘计算能力的智能闸门，让其能够支持依据本地水位预测所制定的自适应启闭策略。而在容易出现淤积情况的管段，则要设计出自清洁装置，借助水力动能来驱动旋转刷或者气脉冲发生器，进而达成对沉积物进行原位清除的目的。

（三）水力模型耦合

传统的设计往往依靠稳态水力计算来明确管径以及坡度，可这样做很难对管网在实际运行时的动态响应特性予以反映。智慧水务方面需要把高精度水力仿真模型充分融入到设计流程当中，从而搭建起一个从“参数输入-模型迭代-结果验证”的闭环优化机制。通过耦合一维管网模型与二维地表漫流模型，可同步模拟管道满流、检查井溢流与地面内涝的交互过程，精准识别设计方案的薄弱环节。在对模型参数进行校准时，得引入实时监测所得到的数据以及历史运行记录，借助贝叶斯更新算法来动态地对曼宁系数、局部损失系数等一系列关键参数做出修正，以便让模型预测的结果

能够最大限度地贴近真实系统的行为表现。

（四）可持续设计导向

在碳中和目标约束下，排水系统设计需突破单一功能导向，转向环境-经济-社会多维可持续性协同优化。环境维度，要借助生命周期评价（LCA）工具来对诸如混凝土、HDPE、玻璃钢等不同材料的碳足迹以及生态毒性加以量化，进而从中挑选出环境负荷较低的管材以及施工工艺。经济维度，运用净现值分析法对初期建设成本和后期运维费用所产生的综合效益展开评估，要优先选用那些具备长期成本优势的智能化设计方案，比如自感知管网的故障率降低后所带来的收益这类情况。社会维度，在设计的过程当中需要把公众参与机制融入进去，通过虚拟现实（VR）所呈现的可视化界面将设计方案对交通、噪声、景观等方面的影响展示出来，并且利用社会感知大数据来对管道路由的选择进行优化。

结语

智慧水务显著改变了城镇排水管道系统的规划、勘测和设计。规划阶段通过转变原则、多尺度建模和管网优化，提升了排水系统的适应性和韧性。勘测中整合新技术和多源数据，克服了传统局限，为精准评估和动态管理提供了坚实数据基础。设计中采用模块化、智能设备集成和水力模型耦合等理念，提高了建设与运维效率，促进了可持续发展。尽管智慧水务在排水系统中的应用还在发展中，未来需加强技术创新和环节协同，提升系统性能和智能化水平。

参考文献

- [1] 叶元柳. 市政排水管道设计及管道修复策略研究[J]. 建筑·建材·装饰, 2023 (7): 175-177.
- [2] 席旭军. 小城镇市政排水系统专项规划的探讨[J]. 净水技术, 2014 (z1): 25-29.
- [3] 王亮, 李文涛, 张海飞等. 智慧水务在市政排水系统效能提升中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2023 (3): 269-272.
- [4] 刘静伟, 张云. 小城镇排水专项规划分析-以咸宁市某科技新城排水专项规划为例[J]. 住宅与

房地产. 2018, (12). 224-225.

[5] 高将, 张宝军, 周慧芳. 截流式合流制排水系统对城市水体污染状况研究分析[J]. 江苏水利, 2017, 33(4): 1-5

作者简介: 刘硕雅 (1984. 8-), 女, 中级工程师, 学历大学本科, 研究方向工程管理