

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.10.006

城市智慧排水系统的构建方法及路径

王浩正¹, 杨卫国², 毛光君¹, 韩冠宇¹, 邱依婷¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 烟台市城市排水服务中心, 山东 烟台 264001)

摘要: 随着日益频繁的极端降雨事件给城市排水系统带来的突发性风险,持续提升的水环境质量需求以及国家碳达峰、碳中和的战略要求,传统的粗放型管理方式已不能满足日益复杂的排水系统运行要求。以水文和水力学的原理和模型为基础,结合现代大数据分析方法,提炼从评估、判断到预测的排水数据治理体系,并形成城市排水信息学方法论,是构建具有洞察力的城市排水智慧化系统的基础理论和重要路径。介绍了城市排水智慧化路径及其模型体系搭建方法,以期智慧排水构建及应用提供参考。

关键词: 排水系统; 智慧排水系统; 数据治理; 洞察力; 排水信息学; 路径

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)10-0036-09

Method and Path of Constructing Intelligent Drainage System

WANG Hao-zheng¹, YANG Wei-guo², MAO Guang-jun¹, HAN Guan-yu¹, QIU Yi-ting¹

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. Yantai Urban Drainage Service Center, Yantai 264001, China)

Abstract: The increasingly frequent extreme rainfall events have brought sudden risks to the urban drainage system. The traditional extensive management mode can not meet the complex operation requirements of the drainage system with the continuously increasing demand for water environment quality and the national strategic requirements of carbon emission peak and carbon neutrality. Based on the principles and models of hydrology and hydraulics, combined with advanced big data analysis methods, the drainage data governance system is refined to encompass evaluation, judgment, and prediction. The formed methodology of urban drainage informatics is the basic theory and an important path for establishing an insightful urban drainage intelligent system. The intelligent path of municipal drainage and the construction method are introduced, aiming to provide reference for the construction and application of intelligent drainage.

Key words: drainage system; intelligent drainage system; data governance; insight; drainage informatics; route

随着城市化的快速发展和极端降雨事件的频发,排水系统面临日益严峻的挑战,出现了越来越多的城市内涝、污水管网溢流(SSO)和合流制管网溢流(CSO)等问题。为解决此类问题,国内近几年不断推进内涝防治、海绵城市、黑臭水体治理、污水

系统提质增效、生活污水处理设施补短板等工作,城市排水系统化治理和运行得到重视,很多城市形成了源-网-厂-河一体化运行的工程体系。

在一体化的背景下,工业4.0带来的各类技术发展推动了水行业迈进工业4.0阶段,源-网-厂-

河体系的智慧化管理和运行成为水务智慧化管理的重要方向。德国水工业协会 Water 4.0 报告指出,实现水工业 4.0 的关键技术是水务数字物理系统(WCPS)。WCPS 将通信(Communication)、计算(Computation)及控制(Control)等“3C”技术有机融合,建立一个智能网络,将水用户(即农业、工业和家庭)与水基础设施可持续管理相联系,使得整个水系统沿着整体效率及价值提升的方向运行。

水工业 4.0 的目标是实现排水系统各要素间的协同运行。但是,排水系统各要素间逻辑关系复杂、数据处理分析专业性强,实现智慧化管理和运行的关键是通过评估(Hindsight)、判断(Insight)、预测(Foresight)3个层面不断提高对过程规律的洞察力(Sight)。评估主要基于传统的数据可视化和统计方法,利用历史或当前数据对历史状态或过程进行后评估;判断是利用历史和当前数据对目前状态进行实时判断,借助数据快速分析、诊断技术进行当前状态的实时诊断和报警;而预测是利用历史和当前的数据对系统未来状态及趋势进行提前判断。从评估、判断到预测,每一个环节都需要专业的理论支持和充分、可靠的数据及算法支撑。

1 原理和方法

现代城市排水已经形成源-网-厂-河一体化的体系,其系统性分析需要以城市水文学、水力学、流体力学、环境水力学以及大数据相关原理和方法作为基础。

城市水文学^[1]研究囊括了城市化水文效应以及城市化伴生的水环境与水生生态效应、城市水文过程机理解析和过程模拟等内容,通过降雨观测、水文序列分析以及水文模型等一系列研究方法,揭示城市化对城市水文过程和自然生态环境的影响特征和机理。对于降雨形成的地表漫流,在进入排水管道之前的水文过程包括不同土地利用类型的产流特征、洼蓄存水、下渗等。常用的产流过程原理包括径流系数法、单位线法、SCS-CN方法、非线性/线性水库法及概率分布模型法等。

水力学的任务是研究液体(主要是水)的平衡和机械运动的规律及其实际应用^[2],在城市排水领域主要研究检查井、地下管网、天然和人工明渠、涵洞、蓄水池和出水口等城市排水管网系统内的水流过程,并通过遵循质量和能量守恒关系的圣维南方

程组(SVE)描述自由表面水体流动,求解管道中的流速和水深。此外,通过流体力学计算可有效评估大流量时泥沙冲击对管道和水体的影响。在水质层面,环境水力学^[3]重点进行射流特性的理论和实验研究、管道及河道中的污染物质迁移和扩散研究、水质模型研究、河流中的重金属吸附及释放机理研究等。

排水系统智慧化管理工作的开展离不开水文、气象、内涝、排水管网监测数据的支撑,上述监测信息受仪表安装环境、仪器故障或信号传输异常等因素影响可能导致数据缺失、错误和偏差,因此首先需要进行数据验证和过滤。随后,为实现信息提取,深度挖掘数据背后的规律,通过统计分析、机器学习、深度学习等技术可评估历史事件、判断目前状态,预测未来风险。统计分析主要有数据特征分析、关联分析、假设检验与统计推断等,机器学习是由机器(计算机)根据输入的样本数据对模型进行认识训练,利用经过训练的模型对系统状态进行辨识和预测。结合监测数据对排水系统各环节中的运行状态进行智能诊断/行为预测是智慧水务重要的研究内容。深度学习^[4]主要指层数较多、神经元较多的神经网络模型。近几年,随着技术的发展和算力的提高,对卷积神经网络(CNN)和循环神经网络(RNN)的研究逐渐广泛,该方法可很好地解决多变量、非线性问题,但其对样本的量级和质量要求较高。

模型是对排水系统评估、分析和预测的重要方法,可分为面向过程的模型和面向控制的模型两类。面向过程的模型以机理模型为主,利用数学方程式描述输入量和输出量之间的主要物理过程,需要较长的模拟运算时间。面向控制的模型指通过模拟可操控设施对排水系统的影响,进而辅助管理决策的模型,分为线性SVE模型、数据驱动模型和概念模型等^[5]。其中,数据驱动模型通过对监测数据的分析,可预测城市排水系统在不同工况下的水流动态情况。概念性模型通过对排水管网、河道等进行概念化模拟,并对概念化后的设施参数根据实时监测数据进行调整,以实现准确模拟城市排水系统状态和用于模型预测控制的功能。当前,城市排水系统模型的应用难点和研发热点主要有两个:①排水系统结构越来越复杂,构建厂-网-河模型时则要求将城市排水系统作为一个整体进行紧密耦合

模拟和评估;②排水系统面临的问题越来越复杂,将机理模型、概念性模型、数据驱动模型混合应用的模式则是未来趋势^[6]。混合应用模型在保证可靠性的前提下,可大幅提高运算速度,实现高效、全局、多目标的排水系统优化控制,也是水文模型领域第四代范式^[7]关注的热点。国外的 Simba^[7]可在其平台上结合 SWMM 模块和概念化模拟模块,实现城市排水系统的混合模拟;国内的水系统控制仿真模型(Simuwater)软件实现了源-网-厂-河的耦合模型、机理模型、概念性模型以及数据驱动模型的混合应用^[8]。

优化主要用于模型支持排水系统实现多目标的最优控制,应用优化算法可使排水设施发挥最佳的运行潜力。离散微分动态规划的应用最早,也被视为确定性优化调度最早的解决算法,然而该算法容易陷入“维数灾”困境,因此无法在大型复杂系统中应用。元启发式算法以仿自然体算法为主,易于寻找到全局最优解,在城市排水系统应用时具有全局搜索能力较强、计算复杂度较低等优势,其中又以遗传算法应用最为广泛。

2 排水智慧化路径

综合考虑城市排水系统各种设施的工艺特性、整体运行逻辑、当前和未来的状态以及潜在风险问题等要素,构建涵盖评估-判断-预测三个环节的数据治理体系是实现城市排水系统智慧化的路径。

通常,收集数据后,智慧化路径包括两个步骤:首先对收集的数据进行滤波与预处理,去除各类无效数据并进行合理修正,然后在此基础上,构建一系列数据治理工具。排水系统数据治理工具涉及3个环节,依据常见需求可分为9项内容,具体如下:在评估环节,采用数据统计方法和机理模型,构建管道性能评估、入流入渗评估、内涝风险评估及排水系统匹配性评估方法体系;在判断环节,采用数据快速分析、诊断等技术,构建管网运行状态实时判断、水体水质时空变化实时判断方法体系;在预测环节,基于虚拟现实、深度学习、优化算法等人工智能技术,构建管网资产状态预测、洪涝灾害预测及实时控制预测方法体系。最后实现数据结构化、信息提取、分析结果的可视化展现。排水系统智慧化实现路径见图1。

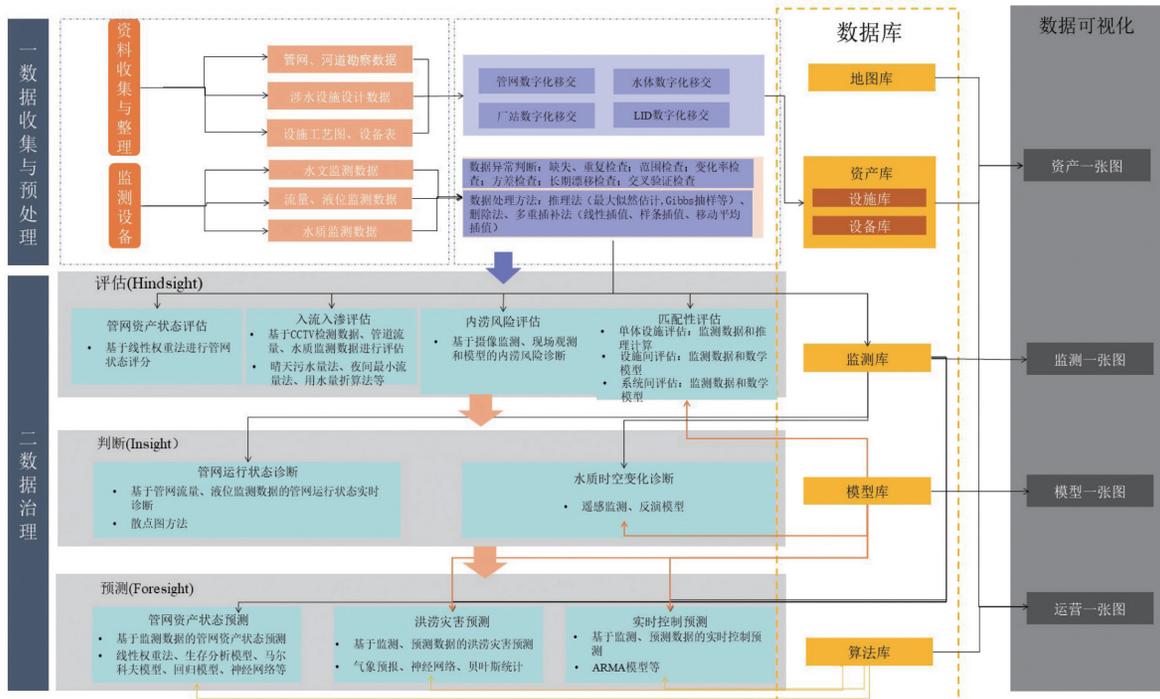


图1 构建具有评估、判断、预测能力的排水系统智慧化路径

Fig.1 Intelligent path of building an urban drainage system with ability of evaluation, judgment and prediction

2.1 数据滤波与预处理

数据滤波和预处理是构建智慧化路径的第一步,常见的在线监测数据和基础地理信息数据都需

要进行数据质量审核和预处理。

排水在线监测由于受安装环境、信号传输和外部入流特征影响,其数据通常存在缺失、重复、异常

等问题,需要进行修复。常用的数据异常判断方法包括^[9]:①缺失、重复检查,即某一时间段内有缺失或重复的监测数据;②范围检查,即设定监测值的合理上限与下限,超出阈值范围的数据通过人工辅助判断;③变化率检查,即相邻两点之间的差值或百分偏差,过程变量的变化率是信号可靠性的一个重要指标;④方差检查,当传感器发生故障以致数据锁定在某一固定值时,可通过计算一定时间间隔内的监测数据方差来进行判断;⑤长期漂移检查,即对数据的长期变化趋势进行检查,长期漂移可能是仪器所致也可能是实际状况;⑥交叉验证,即利用多个测量参数如液位、流量之间的可能关系进行判断。异常数据的处理主要有推理法(最大似然估计、Gibbs 抽样等)、删除法、多重插补法(线性插值、样条插值、移动平均插值)等。需要对异常数值的重要性、不确定性以及对其他参数的影响进行分析,根据不同参数特征理性处理异常数据。

此外,基础地理信息属于相对静态的数据,在短时间内不会发生经常性的变化,包括管网、河道、厂(站)等空间和属性数据,但由于普查中的疏忽和测绘难度等原因,其数据不规范问题较为突出,影响数据分析和建模工作的开展。例如,对常见的排水管网数据进行多种拓扑检查,以构建完整的拓扑关系,是实现有效评估-判断-预测的前提。另外,排水系统的源-网-厂-河各要素之间也存在复杂的联动关系,需要构建系统级的标准数据库进行统一管理。

2.2 评估

评估是对排水系统过去的状态进行分析并给出评价,是进行提质增效、黑臭水体治理、排水防涝补短板、厂网一体化运行等工作的重要前期内容。常见的评估包括管道性能评估、入流入渗评估、内涝风险评估及排水系统匹配性评估。

2.2.1 管道性能评估

管道性能评估方法^[10]一般是利用管道内部检测的缺陷、外部环境特征、所处场地性质来评估管道的结构性能,根据流量、压力等指标评估管道的水力性能,最后结合以上因素评估管道的整体性能,并将管道划分成不同等级,以便确定管道维护或修复的优先次序^[11-12]。也有研究通过分析影响管道状态的物理、环境等因素,如管材、管龄、管径、管长、管深、土壤类型、街道类别、垫层状态等,建立管道结构和运行状况评估模型^[13],帮助管理者确定关

键管道、确定管道检测的优先顺序和修复需求。

2.2.2 入流入渗评估

入流入渗是导致污水处理厂进水污染物浓度低、管网运行水位高、污水处理效率降低等问题的重要原因^[14]。降雨导致的入流入渗量(RDII),指降雨带来的城市污水管网或雨污合流制管道内的雨水,包括入流和入渗两部分。基于水量平衡原理,分析过程通常为:①对旱天典型流量进行分析,识别污水排放规律,了解管道负荷和运行状况;②根据雨天实测流量,计算雨天入流入渗量;③分析降雨量和入流入渗量的关系,结合现场调查,分析入流入渗原因。

国外文献中对降雨导致的入流入渗评估内容较多。在我国管网目前的运行状态下,除雨天外,旱天的非法入流问题(如河水倒灌、山水混接等)也比较常见,需要进行更详细的现场调查和采用更多的评估方法,找到问题所在。这些方法包括晴天污水量法、夜间最小流量法、用水量折算法、污染物负荷法、三角分析法及特征因子法等。其中,夜间最小流量法适用于监测点位在监测期内旱天日累积流量波动性较大,且数值具有明显波峰与波谷的情况。特征因子法^[15]选取污水管道各部分来水中浓度差异较大、易于分析的保守物质作为水质特征因子,基于化学质量平衡理论,计算入流入渗的各部分水量,准确率较高。此方法降低了对流量监测的要求,并且不对管网运行造成干扰,显著降低CCTV检测的工作量,提高了检测效率。

2.2.3 内涝风险评估

采用监测数据和模型相结合的方法进行内涝风险评估。模型应具有降雨产汇流、管道汇流、二维地表漫流等模拟功能,需充分考虑评估区域下垫面、地形地貌、排水管渠。基于模型计算结果,可进行管网充满度、最大流量、积水时间及退水时间的分析。结合实际观测的易涝点积水数据,提取重点关注区域范围,建立城市暴雨内涝风险空间分布的直观表达,实现城市内涝风险等级评估。同时,分析不同积水点的积水原因,并提出改造建议。

2.2.4 排水系统匹配性评估

城市排水系统通常由管网、泵站、调蓄/净化设施、污水处理厂以及接纳水体等要素组成,这些设施之间相互连通,联动运行,共同实现城市内涝防治和污水处理达标排放。通过源-网-厂-河排水系

统匹配性评估,可辅助进行工程改造方案和联调联控方案设计,在减少不必要工程投资的同时最大程度发挥各设施的调蓄、协同和处理能力。

匹配性评估^[16]包括单体设施、设施间及系统三个层次。单体设施匹配性评估主要采用监测和推理计算等方法,对厂、池、站、网等设施是否满足现状及规划设计要求进行评估;设施间的匹配性评估以排水分区为单位,评估排水分区内各排水设施间的匹配性,包括泵站、调蓄池、污水厂与自身服务范围内的上下游管网的匹配性,并针对性地提出改造方案和优化调度方案,通常需要排水系统模型及不同工况下的设施监测数据;排水系统匹配性评估主要包括厂-池-站-网整体是否满足规划目标的能力评估和排水系统与受纳水体水质之间的匹配性评估,需要采用实测和模型相结合等手段。

2.3 判断

判断是指利用历史数据和当前数据,借助快速的数据分析及诊断技术,对目前状态进行实时判断。实时状态诊断主要包括管网的运行状态诊断及水体水质时空变化诊断。

2.3.1 管网运行状态诊断

基于排水管道的实时监测数据,绘制散点图,

以有效识别水流状态,如溢流、过载等情况。构成散点图的要素包括曼宁曲线、等流量线以及弗洛德曲线^[17]。通过散点图分析管网运行状态的方法依赖于管道流量数据的真实性和可靠性,对监测数据可靠性及稳定性有较高的要求,需要合理选择监测点,并对数据进行合理的滤波和数据分析预处理。

2.3.2 水体水质时空变化诊断

传统的水环境监测通常采用人工采样或者建设监测站的形式,存在成本较高、周期较长、难以全面反映水体水质总体连续性分布特征及状况的缺点。近些年来,除了新型快速在线水质监测仪表及水质快速感知、监测手段被开发应用外,遥感技术(Remote Sensing, RS)作为一种新型的环境快速监测技术,可用于水质反演监测方向,能够全面动态地从遥感影像信息中获取水质信息,可用于快速诊断水体水质状态。在精准提取水体范围的前提下,对叶绿素 a^[18]、总磷^[19]和总氮^[20]三种水质参数进行遥感反演,通过反演模型(见图 2)制定水体水质营养状况分布图,分析三种水质参数的空间分布特点和扩散迁移趋势,可为水体水质时空变化规律的研究提供一种合理可行的技术路线。

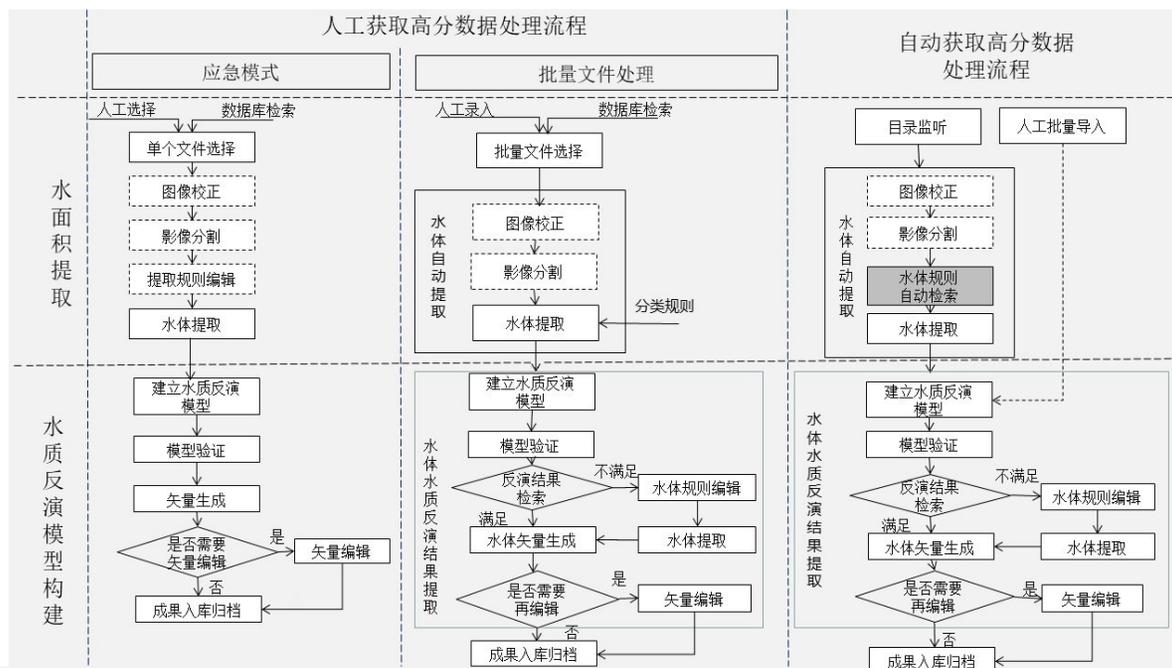


图 2 水体水质反演模型构建

Fig.2 Construction of water quality inversion model

2.4 预测

未来状态预测需要利用历史数据和当前数据,

借助虚拟现实和深度学习等人工智能工具来实现。预测主要包括三种:管网资产状态预测、洪涝灾害

预测及实时控制预测。

2.4.1 管网资产状态预测

排水管网因结构和功能性欠缺导致的服务故障、公共卫生及环境污染等问题日益突出,为了制定排水管网长期的运维策略,减少管网突发事故及其带来的损失,需要对排水管网资产的未来状态进行可靠的预测。可根据管道当前状态、管道属性信息、所处环境信息等预测管道未来的状态或剩余寿命。管网状态预测常用方法^[21-24]如表1所示。

表1 管网状态预测常用方法

Tab.1 Common methods of pipeline network state prediction

方法	说明	局限性	举例
线性权重法	确定不同属性的权重,加权计算故障概率	需结合经验和理论分析,主观性较大	
生存分析模型	预测管道在某一时刻的故障概率以及生存概率	需要良好的管龄数据	Cox比例风险模型、Weibull分布、Herz分布
马尔科夫模型	通过过渡矩阵,预测管网未来的状态等级	需要多次检测数据	马尔科夫链模型、半马尔科夫链模型
回归模型	分析不同参数对管道状态的影响程度,建立模型计算管道状态等级或管道处于某种状态等级的概率	需要大量可靠数据	线性回归、非线性回归、逻辑回归
神经网络	模仿人类学习的方式,生成状态等级的概率	需要大量可靠数据,且计算量较大	

2.4.2 洪涝灾害预测

洪涝预测系统的作用是收集、处理和分析各种类型的数据,对即将发生的洪水事件进行预测。一个完整的洪涝预测系统通常由以下几部分组成:①降雨监测系统,包括遥感(雷达、卫星)、雨量计和水位计;②区域和全球天气预报模型,能够提供24~48 h的短时气象预报;③水文模型和/或水力学模型,可在较大的时间范围内模拟汇水区的响应。

近年来,许多技术被用于提供不同空间范围、时间分析和预报范围的降雨预报。这些技术主要基于数值天气预报、天气雷达和卫星估计以及它们的集成应用。短时降水预报基于外推技术,使用雷达和卫星观测来捕获降水场的时空动态,并预测一组离散的降雨对象的运动^[25]。耦合方法、人工神经网络和贝叶斯统计技术也已被应用于短时降水预报^[26]。雷达预报的预见期相对较短,通常为1~6 h,

而集合预报,如区域集合数值天气预报,其预见期可延长至1~5 d。更长的预见期能够有效地提高洪涝灾害预测的效率。

水文和水力模型支持将气象预报(如降雨、气温、风速、湿度等)转换为径流预测。实时应用水文模型需要对其进行连续更新,以便在预测程序的每个时间步长下约束各种不确定性源(即输入误差、参数和结构不确定性),通常涉及:①输入变量(如气象和水文预报);②建模系统的状态变量(如水深、饱和及非饱和区域的范围、调蓄池和其他防洪结构的水位等);③模型参数或结构(使用更新的数据对模型进行重新率定)。

预测洪涝是否发生的方法有流量比较法和降雨比较法。最简单的流量比较法是将预测的径流量与洪水阈值进行比较,降雨比较法将降雨预测与给定区域内产生洪水的降雨量进行比较,美国国家气象服务河流预报中心全面使用的山洪指导是其代表之一。

2.4.3 实时控制预测

排水系统的实时控制(Real Time Control, RTC)广义上可定义为在降雨和旱流工况下,基于特定规则动态调整设施、设备的运行,从而达到操作或运行目标,如管网溢流控制、调蓄空间使用和存储效率及处理能力提升等。厂-网-河联合控制可通过在线监测数据、模拟预测或过程控制规则,为各控制单元和模块、控制机构(如闸阀、孔口、堰门、处理单元设施及设备)提供输出指令,为管网-调蓄池-泵站-污水厂的各个组成单元存储及处理工艺输出最优运行控制规则或指令。

降雨-流量预测是实时控制系统执行的关键环节之一。准确的预测数据和较长的预测窗口为实时控制提供了可靠的数据支持和充足的运行时间,是成功实施实时控制的保障。常见的降雨预测可以通过降雨雷达预测或数学模型预测实现。不同的项目对降雨预测的精度要求不同,在使用中可根据实际能够获取的数据条件和要求选择预测方法。在获取降雨预测数据之后,利用模型模拟可以获得各汇水区的径流量、各重要管段和节点的入流量、管网的溢流量以及内涝程度,包括污水厂进水流量、浓度的峰值及出现时间,这些重要的流量预测数据将会传递至实时控制系统的计算中心,为优化控制提供数据支持。

3 智慧排水系统构建

针对我国排水系统的现状、系统运行效率提升及资产管理需求,亟需以城市排水系统运行相关原理和方法为基础,以“3C”(即通信、计算、控制)为技术手段,以构建具有“3S”(即评估-判断-预测)能力的方法为路径,建设排水智慧系统。排水智慧系统搭建包括数据中台建设、模型体系搭建及智慧化系统应用三个层面。

3.1 数据中台建设

数据中台一方面集成全部关键数据,同时,提炼并集成评估、判断及预测三个环节涉及的专业数据分析方法,提供数据治理服务。数据中台主要包括数据标准化、数据治理及数据可视化三部分。通过数据标准化工具,对排水系统的各类资产数据、监测数据、运营数据等进行标准化配置,实现数字化移交。数据治理涵盖评估、判断及预测三个环节的数据分析和统计方法,充分挖掘数据价值,实现洞察力的提升。可视化的难点在于对专业的理解,

以及设计合适的二、三维图表,直观表现数据特征与关联关系。

3.2 模型体系搭建

城市排水系统模型主要有两类:一个是面向城市排水过程的机理模型,可辅助项目规划设计阶段的防洪排涝、水环境治理等方案的制定,校核方案的可行性与可达性;同时可为智慧水务管理中的水安全预警、设施调度、水环境溯源等提供多尺度、全方位的决策支持服务。另一个是面向控制的仿真模型,可实现源-网-厂-河要素概念性、快速模拟,并具有工程运行优化功能。

3.3 智慧化系统应用

智慧排水应用系统包括数据管理、业务应用及平台监控三部分,通过上位平台监控功能,可实现视频展示、设施运行工况监视及设备的三维展示。此外,除获取调度指令、实现设备远控外,系统还需要支持报警管理、运维管理、资产管理等智慧化应用。智慧排水应用系统架构如图3所示。

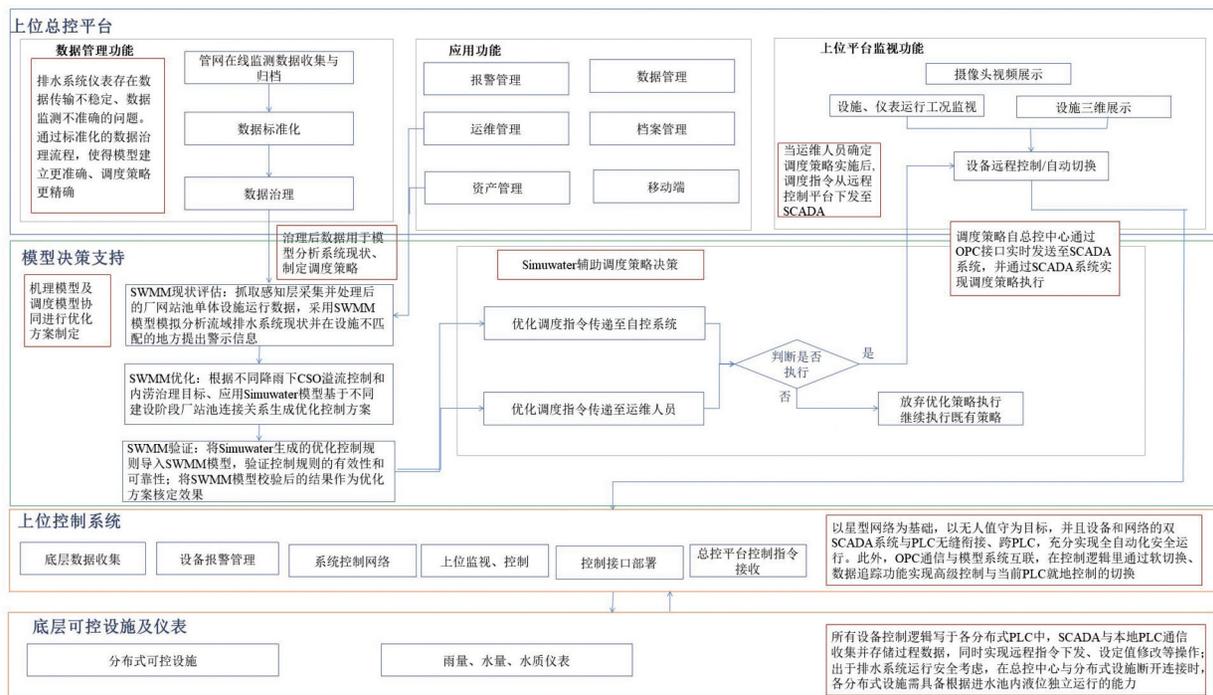


图3 智慧排水应用系统架构

Fig.3 Architecture of intelligent drainage application system

4 问题和展望

4.1 发展瓶颈

针对我国城市排水系统信息化现状,在建设层面,系统建设分散,缺少顶层规划和标准化的产品和服务;在数据治理层面,数据收集不完整、不及

时、不准确,缺少数据治理意识和能力,大数据流于口号和信息化技术的堆砌,缺少实际应用场景;在数据可视化层面,各种驾驶舱局限于数据展示和图表的堆砌,缺乏有效信息及有意义的一张图展示;在理论基础层面,缺少水科学及计算技术等各专业

理论基础的有效融合和体系梳理。以上因素均制约着城市排水智慧化的发展和数据的应用。

4.2 未来展望

① 智慧系统搭建是逐步迭代和完善的过程。智慧系统搭建的基础是数据的收集、过滤和预处理等数字化工作,中台建设是关键,需提供数据标准化、数据治理和可视化的功能。此外,结合数据反馈和业务场景,应不断进行数据分析方法的经验概化;在模型层面,需要进一步探索控制模型在源-网-厂-河一体化运行中的应用;在应用层面,应实现对排水系统运行效果的全面监管、整体评估,并提供优化分析能力,实现设施的可监、可控、可调。通信、计算、控制等“3C”技术的快速发展,使数据的分析、计算和优化取得突破性的进展,为智慧系统搭建提供了技术保障。

② 智慧化工作的推进需要组建智慧运营团队。由于数据治理和分析的专业性较强,需要组建智慧运营服务团队,提供专业的数据治理与分析服务。建议由系统的承建方和业主共同组成团队的人员和专业技术人员深入评估、判断和预测三个环节,配合数据中台,洞察城市排水系统的运营规律,并将洞察力转化为生产力,有效推动城市排水系统智慧化运营的发展进程。

③ 城市排水信息学理论体系应作为智慧水务的基本知识体系进行总结,并结合技术发展和管理实践不断拓展。智慧水务的发展需要以城市水文学、水力学、计算流体力学、环境力学以及大数据相关理论为基础,城市排水系统机理以及水信息的获取、建模与分析和实现技术等可统筹为城市排水信息学。随着传感、通信、模型及优化技术的快速发展,城市排水信息学也应结合实际智慧水务管理工作进一步拓展其理论体系。

参考文献:

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4):594-605.
ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, *et al.* Development and challenge of urban hydrology under changing environment: I. urban hydrological effect [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4):594-605 (in Chinese).
- [2] 吴持恭. 水力学[M]. 北京:高等教育出版社,2016.
WU Chigong. *Hydraulics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2016(in Chinese).
- [3] 刘炜. 环境水力学进展[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1999.
LIU Wei. *Advances in Environmental Hydraulics* [M]. Wuhan: Wuhan University of Water Resources and Electric Power Press, 1999(in Chinese).
- [4] 刘媛媛,李磊,韩刚,等. 数据挖掘技术在城市防汛中的应用[J]. 中国防汛抗旱,2020,30(5):45-49,57.
LIU Yuanyuan, LI Lei, HAN Gang, *et al.* Application of data mining technology in urban flood prevention [J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(5):45-49,57(in Chinese).
- [5] 王浩正,冯宇,孙文超,等. 城市排水系统模型综述[J]. 中国给水排水,2021,37(22):1-10.
WANG Haozheng, FENG Yu, SUN Wenchao, *et al.* Review of urban drainage system models [J]. *China Water & Wasterwater*, 2021, 37(22):1-10(in Chinese).
- [6] SCHUTZE M, LANGE M, PABST M, *et al.* Astlingen-a benchmark for real time control (RTC) [J]. *Water Science & Technology*, 2018, 2017(2): 552-560.
- [7] PETERS-LIDARD C D, CLARK M, SAMANIGEO L, *et al.* Scaling, similarity, and the fourth paradigm for hydrology [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21:3701-3713.
- [8] WANG H Z, HAN G Y, ZHANG L, *et al.* Integrated and control-oriented simulation tool for optimizing urban drainage system operation [J]. *Water*, 2022, 14:25.
- [9] 盛政,刘旭军,王浩正,等. 城市污水管道入流渗入监测技术研究与应用进展[J]. 环境工程,2013,31(2):17-21.
SHENG Zheng, LIU Xujun, WANG Haozheng, *et al.* Study on field monitoring technology for urban drainage network system management [J]. *Environmental Engineering*, 2013, 31(2):17-21(in Chinese).
- [10] 王浩正,蔡然,骆春会,等. 排水管网资产管理技术和工具研究进展[J]. 中国给水排水,2021, 37(2):18-24.
WANG Haozheng, CAI Ran, LUO Chunhui, *et al.* Research progress on asset management technology and tools of drainage network [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(2):18-24(in Chinese).
- [11] TAGHEROUIT W B, BENNIS S, BENGASSEM J. A fuzzy expert system for prioritizing rehabilitation of sewer networks [J]. *Computer-aided Civil & Infrastructure*

- Engineering, 2011, 26(2):146-152.
- [12] SAEGROV S, SCHILLING W, CARE S. Computer Aided Rehabilitation of Sewer and Storm Water Networks [M]. London: IWA Publishing, 2006.
- [13] RUWANPURAL J, ARIARATNAM S T, ASHRAF E. Prediction models for sewer infrastructure utilizing rule-based simulation [J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2004, 21(3):169-185.
- [14] 郭泓利,李鑫玮,任钦毅. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2018, 44(6):12-15.
GUO Hongli, LI Xinwei, REN Qinyi. Analysis of influent water quality characteristics of typical urban sewage treatment plants in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44 (6) : 12-15 (in Chinese).
- [15] 徐祖信,汪玲玲,尹海龙,等. 基于特征因子的排水管网地下水入渗分析方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 593-599.
XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong, *et al.* Analysis method of groundwater infiltration in drainage network based on characteristic factor [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2016, 44 (4): 593-599(in Chinese).
- [16] 刘龙志,王浩正,黄荣,等. 流域治理视角下排水系统匹配性评估方法[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 24-30.
LIU Longzhi, WANG Haozheng, HUANG Rong, *et al.* Matching evaluation method of drainage system from the perspective of watershed governance [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6):24-30(in Chinese).
- [17] 杨玲霞,高珊珊,仇军,等. 明渠均匀流弗劳德数随水深变化的规律[J]. 水电能源科学, 2016, 34(11): 109-112.
YANG Lingxia, GAO Shanshan, QIU Jun, *et al.* Variation of Froude number with water depth in open channel uniform flow [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(11):109-112(in Chinese).
- [18] 史锐,张红,岳荣,等. 基于小波理论的干旱区内陆湖泊叶绿素 a 的 TM 影像遥感反演[J]. 生态学报, 2017, 37(3):1043-1053.
SHI Rui, ZHANG Hong, YUE Rong, *et al.* A wavelet theory based remote sensing inversion of chlorophyll a concentrations for inland lakes in arid areas using TM image data [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (3) : 1043-1053(in Chinese).
- [19] 徐良将,黄昌春,李云海,等. 基于高光谱遥感反射率的总氮总磷的反演[J]. 遥感技术与应用, 2014(4): 681-688.
XU Liangjiang, HUANG Changchun, LI Yunhai, *et al.* Deriving concentration of TN, TP based on hyper spectral reflectivity [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014(4):681-688(in Chinese).
- [20] 王丽艳. 基于MODIS遥感数据反演呼伦湖水体水质指标及其富营养化评价[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2014:20-44.
WANG Liyan. Determination the Water Quality and Evaluation of the Eutrophication of Hulun Lake with MODIS Data [D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2014:20-44(in Chinese).
- [21] DUCHESNE S, BEARDSSELL G, VILLENEUVE J P, *et al.* A survival analysis model for sewer pipe structural deterioration [J]. Computer-aided Civil & Infrastructure Engineering, 2013, 28(2):146-160.
- [22] JIN Y, MUKHERJEE A. Markov chain applications in modelling facility condition deterioration [J]. International Journal of Critical Infrastructures, 2014, 10(2):93-112.
- [23] WARD B, SELBY A, GEE S, *et al.* Assessing impacts of the private sewer transfer on UK utilities [J]. Infrastructure Asset Management, 2014, 1(2):23-33.
- [24] HO C I, LIN M D, LO S L. Use of a GIS-based hybrid artificial neural network to prioritize the order of pipe replacement in a water distribution network [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 166 (1/4): 177-189.
- [25] ALFIERI L, SALAMON P, PAPPENBERGER F, *et al.* Operational early warning systems for water-related hazards in Europe [J]. Environmental Science and Policy, 2012, 21:35-49.
- [26] HAPUARACHCHI H A P, WANG Q J, PAGANO T C. A review of advances in flash flood forecasting [J]. Hydrological Processes, 2011, 25(18):2771-2784.

作者简介:王浩正(1980-),男,河北涿州人,硕士,市政给水排水专业高级工程师,环境科学与工程专业副研究员,中国市政工程华北设计研究总院副总工,智慧水务分院院长,中国工程建设标准化协会智慧水务专业委员会秘书长,中国水协智慧水务专业委员会委员,从事智慧水务理论和实践研究工作。

收稿日期:2022-03-18

修回日期:2022-06-08

(编辑:丁彩娟)