

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.20.006

数据模型在排水系统管道模拟中的应用

韩冠宇¹, 蒋礼兵², 邵红艳³, 隋圣义³, 邱依婷¹, 初翔宇¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 镇江市给排水管理处, 江苏 镇江 212001; 3. 烟台市城市排水服务中心, 山东 烟台 264000)

摘要: 排水系统模拟技术是通过计算机模拟全面反映城镇排水系统运行状态的重要手段。随着排水系统智能控制技术的持续应用,排水系统模型在智能控制系统中的在线应用也日益得到重视。在排水系统模型中,管道模拟占据核心地位,其模拟可靠性和时效性直接影响模型的总体性能。为了克服传统机理模型中管道模拟参数繁多、运行速度慢、复杂性高、难应用于控制器的优化调节等问题,从实现模型的在线高效实时应用角度出发,研究了滑动平均算法、线性拟合法、传递函数法等多种侧重于数据化模拟的方法在管道模拟中的应用可行性与可靠性,并根据实际案例比较了不同数据模型方法在多变管网条件下的模拟表现。

关键词: 排水管网模型; 数据模型; 可靠性分析; 拟合效率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)20-0040-06

Application of Data-based Model in Pipeline Simulation of Urban Drainage System

HAN Guan-yu¹, JIANG Li-bing², SHAO Hong-yan³, SUI Sheng-yi³, QIU Yi-ting¹,
CHU Xiang-yu¹

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. Zhenjiang Water Supply and Drainage Development, Zhenjiang 212001, China; 3. Yantai Urban Drainage Service Center, Yantai 264000, China)

Abstract: Modeling technology of urban drainage system (UDS) is an important means to comprehensively reflect the operation state of UDS. With the development of intelligent control technology of UDS, the on-line application of drainage system model has been paid more attention. In the drainage system model, pipeline simulation occupies the core position, and the reliability and timeliness of its simulation directly affect the overall performance of the model. In order to overcome the modeling problems caused by complicated parameters and slow running speed, high complexity and difficulty in applying to the optimal regulation of the controller in the classical mechanism model, several efficient data-based modeling techniques, such as moving average algorithm, linear fitting method and transfer function method, are introduced, and their feasibility and reliability are described from the perspective of realizing the on-line and efficient real-time application of the model. Finally, their simulation performance

基金项目: 2023年度江苏省建设系统科技项目(2023ZD010); 2023年度“金山英才”高层次领军人才培养计划(第六期“169工程”)科研项目

通信作者: 韩冠宇 E-mail: hanguanyu9301@126.com

comparison under the changing conditions of pipe network is given with practical cases.

Key words: drainage system model; data-based model; reliability analysis; fitting efficiency

快速的城市化进程以及气候变化增加了极端降雨事件发生的频率和幅度,城市雨污水系统的负荷加重,加大了内涝和合流制管网溢流(Combined Sewer Overflow, CSO)的风险^[1],城市排水系统运行状态的预测模拟成为防范未来风险的重要举措。20世纪60年代美国环保局(USEPA)推出SWMM模型,自此以描述排水系统物理过程为计算核心的排水系统模型(物理模型)得到了广泛应用^[2]。物理模型能够提供精细化的排水系统过程模拟,可为系统建设方案评估、系统运行效能评价等工作提供详尽的分析数据。

然而,物理模型工具普遍采用详尽的物理公式描述管道的水力传输过程,存在计算求解运行时间长、计算负担重等问题。同时,管道的物理模型所需参数多,异参同效效应也会导致模型的率定过程复杂且难以自动化完成^[3]。而排水系统的未来管控技术以实时控制技术为代表,需要排水系统模型在控制系统中起到在线模拟和辅助优化调节的作用,为决策系统提供实时性强、可靠性高的模拟预测结果,并能根据实测数据快速调整模型参数,实现自动率定。

为了在尽可能保证模拟精度的基础上,显著提升排水系统的模拟效率,可采用基于数据的模拟方式,形成以数据变化为核心、物理公式为辅助的排水管网数学模型。采用在数学和其他工程领域广泛应用的滑动平均模型、多元线性拟合法、传递函数法等经典算法作为管道模拟的替代算法,分析各方法的基本原理及在管道模拟中的应用方式。在此基础上,以南方某沿江城市的管网模型作为基准,分析验证各方法的可行性与可靠性。

1 数据模型的应用意义

区别于传统的离线模拟方式,模型的在线应用是排水系统智能预测优化控制的核心环节。模型实时接收监测数据,并以此为初始状态进行一定时间窗口内的系统运行状态模拟预测,预测数据将用于优化控制系统或者预警预报系统。在此过程中,模型的输入数据和输出数据都与监视控制系统实时动态连接,模型模拟结果需要快速返回至决策中

心。因此,模型的模拟效率和模拟可靠性对在线控制系统的运行表现具有决定性作用。

采用数据模型的方式,可以大幅简化计算难度,提升计算效率,满足实时控制系统对模拟预测的时效要求,同时降低对现场硬件设备的计算性能要求,降低模型的复杂性,为控制器提供前反馈,辅助其参数的调节。

经典的机理模型在线使用时,除面对计算效率的问题外,还存在由于异参同效效应及物理参数众多带来的率定复杂的问题,其参数调整既涉及模拟结果的准确性,又涉及现实物理参数的合理性,难以在实时运行中实现较为准确的动态率定。

基于数据分析或数据拟合的模型参数较少,本质上不涉及(或较少涉及)客观的物理规律,因此其最终算法公式及各项参数不具备(或极少具备)客观的物理意义。在模型的动态率定方面,数据模型只需重点关注其模拟结果与观测数据(机理模拟数据)的一致性程度,以实现快速的参数调整。

2 管道模拟中的典型数据模型方法

2.1 滑动平均模型

滑动平均法(Moving Average, MA)是利用若干周期历史数据预测未来周期内数据变化的典型方法^[4]。滑动平均法的基本思想是:根据时间序列资料,逐项推移,依次计算包含一定项数的序时平均值,以反映未来趋势。

针对排水管道模拟,当管道出流量时间序列的数值受周期性变动和随机波动的影响,起伏较大,不易明显演算出管道输出量的发展趋势时,使用滑动平均法可以消除这些因素的影响,并显示出流量变化方向与趋势(即趋势线),然后依据趋势线分析预测出流量的长期数值序列。管道出流量预测值(Y)计算如下:

$$Y = \sum_{i=1}^p x_{t-i}/p \quad (1)$$

式中: p 为采样周期; x_{t-i} 为 $t-i$ 时刻的观测值。

式(1)中 p 值将显著影响滑动平均模型对时间序列的预测精度,当 p 值过大时,代表下一时刻的预测值 x_t 与较远时间点的历史观测值关联更强;当 p

值过小时,代表预测值 x_t 与较远的历史观测值关联度低。因此, p 值的选取受到流量传播时间的影响:管道越长、管径越短, p 的取值会相应增长。显然,上述滑动平均公式难以平衡不同时序的历史观测值与预测值之间的关系,因此需要采用加权滑动平均法,通过引入不同的权重 a_i 以更为准确地拟合观测时序值与预测时刻值的关系,具体公式如下:

$$Y = \sum_{i=1}^p a_i x_{t-i} \quad (2)$$

其中, $\sum_{i=1}^p a_i = 1$ 。

以某段管道组合终点出流量(见图1)为例,利用SWMM模型模拟数据作为观测数据,采用滑动平均法作为数据模型算法,利用观测数据进行出流量预测。对于该管段,采用平均系数进行计算时,采样周期为10时拟合结果优于采用周期为20时的拟合结果;同时,在采样周期固定为10时,采用加权平均的模拟结果优于平均系数的模拟结果。

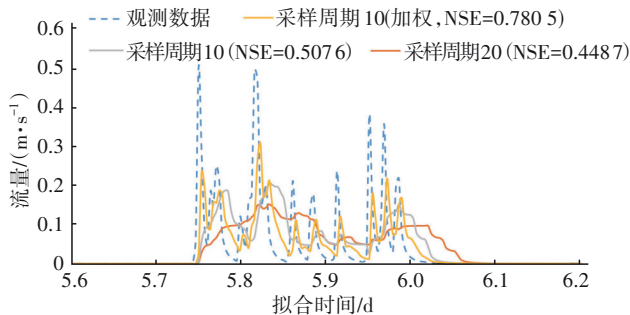


图1 滑动平均法管道出流模拟数据示例

Fig.1 Example of pipeline outflow simulation by moving average method

2.2 多元线性回归分析

回归分析(Regression Analysis, RA)是一种统计学上经典的数据分析方法,目的在于了解两个或多个变量对观测变量的影响,并构建回归方程对变量间的关系进行描述^[5]。回归分析方法可分为线性/非线性回归、一元/多元回归等,在排水管道的数据模拟中,由于目标出流节点的上游可能存在多个入流节点,在流量模拟的范围内可选择多元线性回归分析(Multiple Linear Regression, MLP),拟合的核心为最小二乘法原理。

在排水系统的管道模拟中,与(加权)滑动平均模型相比,多元线性回归更加关注管道入流数据(X)与出流数据(Y)的数学关系[见式(3)],特别是

对多路上游来水的管线,或者上游连接关系复杂的管线,采用多元线性回归的方法尤其适用。管道出流与上游历史入流关系见表1。

$$Y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{i,j} X_{i,t-j} \quad (3)$$

式中: n 为上游输入点数量; m 为回溯周期,与滑动平均法类似,回溯周期取值与管路系统自身特性相关,理论上,回溯周期越长,拟合结果一致性越好,但是模型的计算量也会同步提升。

表1 管道出流与上游历史入流关系示例

Tab.1 Example of relationship between pipeline outflow and inflow

$Y:Q_{out,t}$	$X:Q_{in,1}$	$X:Q_{in,2}$	$X:Q_{in,3}$	$X:Q_{in,4}$	.....	$X:Q_{in,n}$
$X:t-1$ 时刻	$Q_{in,1,t-1}$	$Q_{in,2,t-1}$	$Q_{in,3,t-1}$	$Q_{in,4,t-1}$	.....	$Q_{in,n,t-1}$
$X:t-2$ 时刻	$Q_{in,1,t-2}$	$Q_{in,2,t-2}$	$Q_{in,3,t-2}$	$Q_{in,4,t-2}$	.....	$Q_{in,n,t-2}$
$X:t-3$ 时刻	$Q_{in,1,t-3}$	$Q_{in,2,t-3}$	$Q_{in,3,t-3}$	$Q_{in,4,t-3}$	.....	$Q_{in,n,t-3}$
.....
$X:t-m$ 时刻	$Q_{in,1,t-m}$	$Q_{in,2,t-m}$	$Q_{in,3,t-m}$	$Q_{in,4,t-m}$	.....	$Q_{in,n,t-m}$

以某管道系统为例,该系统中3路独立支流交汇,采用多元线性回归分析方法,根据3个入流点的流量及出流SWMM观测数据进行拟合。当回溯周期为25时,管道系统的观测出流数据与拟合结果的对比见图2。

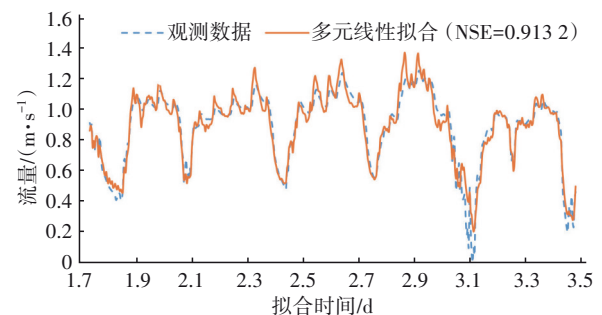


图2 多元线性拟合法管道出流模拟数据示例

Fig.2 Example of pipeline outflow simulation by multiple linear regression method

对于该管道系统,在回溯周期为25时,模拟结果与观测结果高度一致,纳什系数达到0.913 2。同时,利用程序对回溯周期与纳什系数的关系进行了分析,结果见图3。

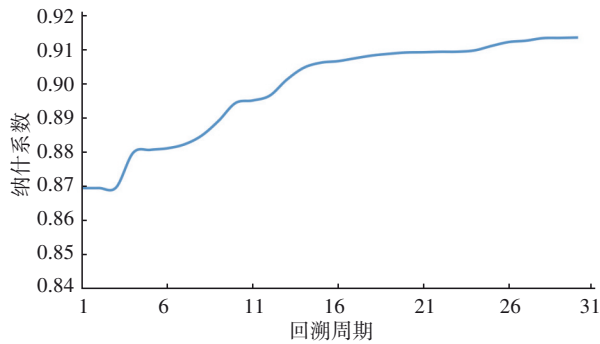


图3 不同回溯周期下多元线性拟合法的模拟效果示例

Fig.3 Example of simulation effect of MLP method under different backtracking period

由图3可以看出,回溯周期对拟合效果具有正影响,对于该管道系统,当回溯周期超过25时,拟合效果基本稳定,纳什系数提升不明显。

2.3 传递函数法

传递函数(Transfer Function, TF)是指零初始条件下线性系统响应值(即输出量)的拉普拉斯变换(或 z 变换)与激励值(即输入量)的拉普拉斯变换之比^[6]。记作 $G(s)=Y(s)/U(s)$,其中 $Y(s)$ 、 $U(s)$ 分别为输出量和输入量的拉普拉斯变换。传递函数是描述线性系统动态特性的基本数学工具之一。根据自控系统理论,当系统保持不变时,传递函数由系统的本质特性确定,与输入量无关;在确定系统的传递函数后,可以通过输入量计算输出量,或者根据需要的输出量确定输入量。

采用传递函数的理论进行数据模拟拟合,在系统本质特性不变的假设下(线性时不变),可以对管道系统进行阶跃响应实验,即设定阶跃形式的管道入流,利用管道出流变化反推传递函数,可快速直观地确定管道出流与入流变化的延时。图4为某管段的阶跃流量输入和终点流量输出关系。

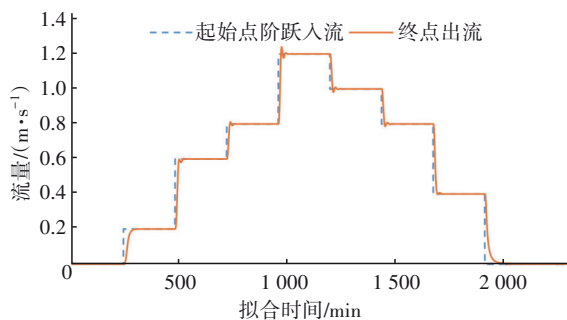


图4 管道阶跃响应入流与出流关系示例

Fig.4 Example of step response of pipeline outflow to inflow

图4示例反解传递函数如下:

$$Y(s) = U(s) \cdot \exp(-5s) \cdot \frac{0.1537s + 0.01916}{s^2 + 0.2593s + 0.01917} \quad (4)$$

3 数据模型的验证应用

上述多种数据模型方法在单管或简单管道组合中的模拟结果均较为理想,但是对于实际项目的复杂管线系统,数据模型能否实现对传统机理模型的可靠替代,需要进一步的分析验证。

3.1 短距离单一入流管线

某输水管线长440 m,坡度约0.7%(见图5),分别采用多元线性拟合、加权滑动平均等方法对出流量观测数据进行拟合,并将各种方法的最优拟合参数对不同时段的SWMM观测数据进行验证,结果如图6所示。

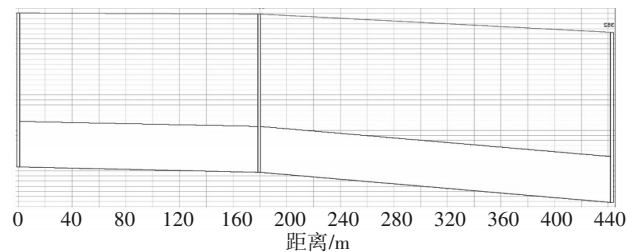


图5 短距离管道示例

Fig.5 Example of a short-distance pipe

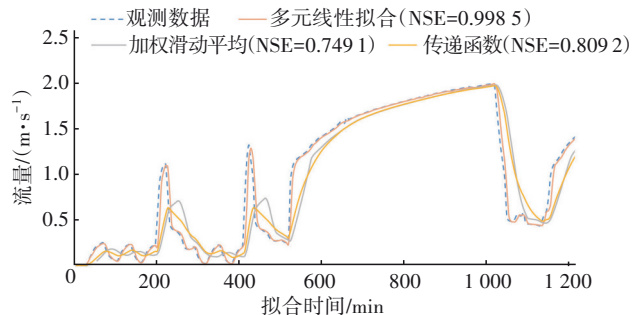


图6 短距离单一入流管线出流拟合验证示例

Fig.6 Example of validation of outflow fit for a short-distance pipe with single inlet

由图6可知,三种方法均能较准确地模拟出流趋势变化,并在峰值量模拟方面表现较好。其中,多元线性拟合法的拟合程度最高,纳什系数达到0.9985;加权滑动平均法存在一定的峰(谷)值滞后及削减现象,但能模拟流量变化趋势,纳什系数达到0.7491;传递函数法的模拟效果较好,在流量变化趋势上与观测数据相符,但峰(谷)值拟合存在一定偏差,纳什系数为0.8092。

3.2 长距离单一入流管线

某长距离输水管线入流为上游蓄水池排空泵,出流点位下游泵站前池,管线全长1 600 m,管线存在一定程度的逆坡与断头情况(见图7)。分别采用多元线性拟合、加权滑动平均等方法对出流量观测数据进行拟合,并将各种方法的最优拟合参数对不同时段的SWMM观测数据进行验证,结果如图8所示。

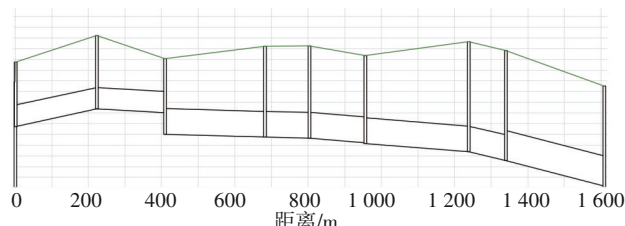


图7 长距离管道示例

Fig.7 Example of a long-distance pipe

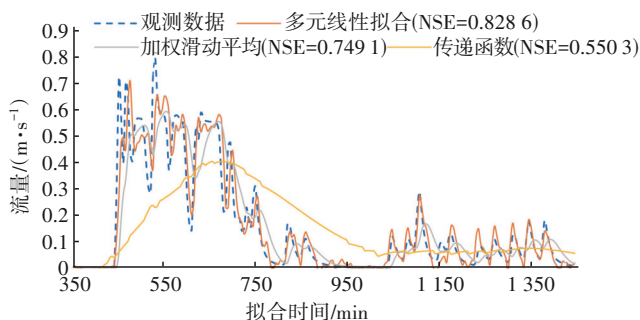


图8 长距离单一入流管线出流拟合验证示例

Fig.8 Example of validation of outflow fit for a long-distance pipe with single inlet

如图8所示,上述三种方法中,多元线性拟合在流量波动趋势和流量峰值方面重合度较高,能够较为准确地描述“入流-出流”关系,纳什系数达到0.8286;加权滑动平均法本质上是描述“历史出流-出流”关系,在对峰(谷)值的拟合预测上存在滞后和削峰(谷)的情况,影响流量拟合的一致性,纳什系数为0.7491;传递函数在应对出流量剧烈变化方面表现不理想,在流量剧烈变化趋势和峰值上均不能与观测数据相吻合,表明其在大幅振荡的流量系统中的适用性较低。

3.3 多入流管线

某区域排水管线总长2 300 m,共计3处入流点,管道相继汇合后经较长距离管段出流,管段坡度0.2%~0.6%(见图9)。分别采用多元线性拟合、加权滑动平均等方法对出流SWMM观测数据进行拟合,并将各种方法的最优拟合参数对不同时段的

观测数据进行验证,结果如图10所示。

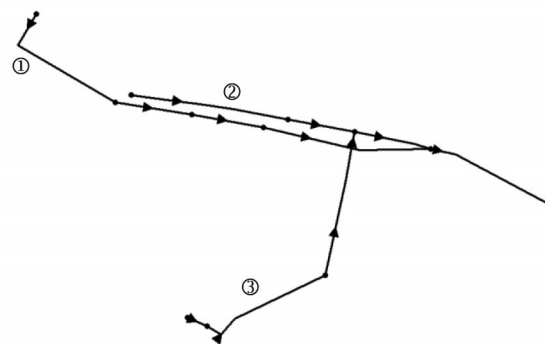


图9 多入流管线示例

Fig.9 Example of a pipe with multiple inlets

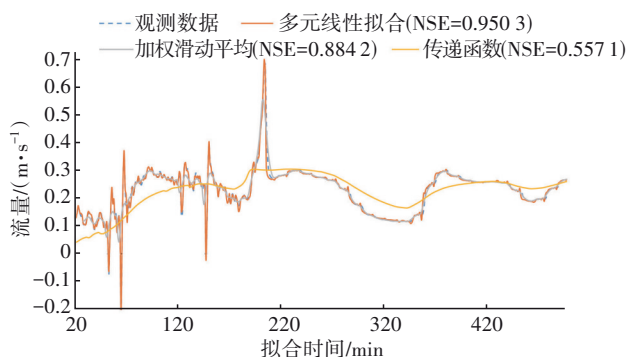


图10 多入流管线出流拟合验证示例

Fig.10 Example of validation of outflow fit for a pipe with multiple inlets

由图10可知,多元线性拟合的拟合程度最高,纳什系数达到0.9503,表明其对多入流的管道系统仍可较好地进行出流模拟,甚至在一定程度上对倒流等较不利的水力过程也有较好的适用性;加权滑动平均法仍存在一定的峰(谷)值滞后及削减现象,但在该示例中流量波动相对平缓,其模拟结果在趋势上与观测数据拟合度同样较高,纳什系数达到0.8842;传递函数的方法对该管道模拟效果有所提升,在流量变化趋势上与观测数据相符,但峰(谷)值拟合仍不理想,纳什系数为0.5571。

3.4 区域复杂末端

某区域末端设有合流制泵站一座,上游分区1 000 hm²的污水和未分流雨水以重力自流和泵站转输的形式输入该泵站,管道合计1 700余根。上游来水主要流经6处重要节点通向末端泵站,需利用重要节点的过流流量模拟推算泵站入流量。分别采用多元线性拟合、加权滑动平均等方法对末端泵站的入流量观测数据进行拟合,并将各种方法的

最优拟合参数对不同时段SWMM观测数据进行验证,结果如图11所示。

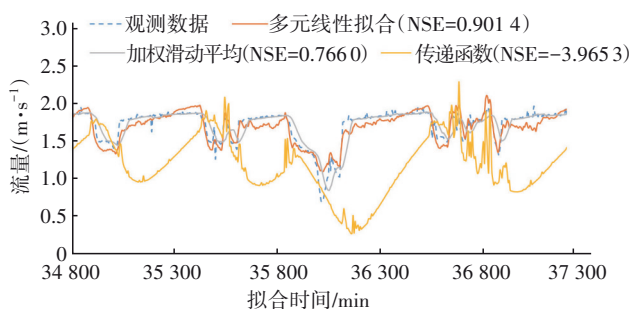


图11 某区域复杂末端管线出流拟合验证示例

Fig.11 Example of validation of outflow fit for a regional complicated terminal pipe

由图11可知,末端泵站入流量受上游雨、污水影响出现波动,由于管道过流能力和泵站及调蓄池的限制,泵站入流峰值基本稳定,总体呈现一定的周期性规律。经拟合验证,多元线性拟合法的拟合程度最高,纳什系数达到0.9014,但是其对峰(谷)值的拟合偏差相对明显;加权滑动平均法的模拟结果在趋势上与观测数据拟合度较高,纳什系数达到0.7660,除仍存在的变化滞后问题外,其对峰(谷)值的模拟更为准确;传递函数法的模拟效果不理想,在流量变化趋势和峰值上均不能与观测数据相吻合。

4 结论与展望

分析验证表明,基于数据的模拟方法可较好地代替复杂机理模拟方法。在流量变化较为激烈、汇流情况复杂的管道系统模拟中,多元线性拟合方法综合模拟可靠性最高,但是其需要的拟合参数相对较多;滑动平均法只需利用出流点的历史观测数据,即可推算下一时刻的流量,所需数据最少,模拟表现平稳,但是其存在流量变化模拟的滞后性;传递函数对结构相对简单、长度较短、流量变化相对平缓的管道系统具有一定的模拟准确性,但是对复杂的管道系统则缺乏模拟的可靠性。

基于数据的模拟方式本质上是对机理模型的近似替代。在离线应用方面,强调模拟的准确性并不需要考虑模拟时效性,因此机理模型有着模拟准确性的巨大优势;在在线应用方面,模拟的准确性需求相对降低,控制系统更加关注模型能否快速提供较为可靠的预测数据,模型能否起到辅助优化调节的作用,以及是否能根据现场监测数据的变化地

行动态率定,这为数据模型的使用提供了机遇。目前,一些排水系统模拟软件如Simuwater正逐步融合多种数据模型方法,并在相关工程中得到了应用。

除上述数据模拟方法外,近年来在排水系统中应用神经网络算法进行模拟预测的研究逐步升温。如果能获取大量的历史数据用于学习,神经网络有着巨大的应用潜力,有望提供更高效、更准确的预测数据。目前这种方式还处于研究阶段,尚未大量应用于工程实践。

参考文献:

- [1] 王浩正,刘智晓,刘龙志,等.流域治理视角下构建弹性城市排水系统实时控制策略[J].中国给水排水,2020,36(14):66-75.
WANG Haozheng, LIU Zhixiao, LIU Longzhi, et al. Real time control solutions for urban drainage system under watershed treatment [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 66-75 (in Chinese).
- [2] 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 & Wastewater, 2021, 37(22): 1-10 (in Chinese).
- [3] 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(1): 15.
- [4] LEE C C, GHARAIBEH N G. Automating the evaluation of urban roadside drainage systems using mobile lidar data [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2020, 82: 101502.
- [5] MOKHTAR A, ELBELTAGI A, GYASI-AGYEI Y, et al. Prediction of irrigation water quality indices based on machine learning and regression models [J]. Applied Water Science, 2022, 12: 76.
- [6] HERBST G. Transfer function analysis and implementation of active disturbance rejection control [J]. Control Theory and Technology, 2021, 19: 19-34.

作者简介:韩冠宇(1993-),男,辽宁沈阳人,硕士,工程师,主要从事排水系统实时控制与优化调度技术研究工作。

E-mail:hanguanyu9301@126.com

收稿日期:2023-08-09

修回日期:2023-09-23

(编辑:丁彩娟)