

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.13.020

基于马斯京根方法的概念模型在排水系统中的应用

王浩正, 邱依婷, 韩冠宇, 王秋懿, 冯宇, 张磊
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 为了提高雨季城市排水系统的弹性和韧性, 削减合流制管网溢流和城市内涝, 应用实时控制技术是一种智能化的解决方案。实时控制技术的有效实施对城市排水系统模型的运行时间和计算能力提出了要求。为了克服传统物理模型建模复杂、参数繁多、运行速度慢等问题, 根据实际案例应用构建了一种基于马斯京根方法的概念模型, 分析了其物理原理和参数特征, 描述了概念化的具体过程。通过模型参数优化和整体可靠性分析证实了马斯京根模型对排水系统良好的模拟效果, 并将其应用于控制策略优化。

关键词: 马斯京根模型; 排水系统; 参数率定; 可靠性分析; 实时控制

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)13-0113-08

Construction and Application of Conceptual Model Based on Muskingum Method in Urban Drainage System

WANG Hao-zheng, QIU Yi-ting, HAN Guan-yu, WANG Qiu-yi, FENG Yu, ZHANG Lei

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: To improve the flexibility and resilience of the urban drainage system in wet weather and reduce combined sewer overflow and urban flooding, the application of real time control (RTC) is an intelligent solution. The effective implementation of RTC technology puts forward requirements on the running time and computing power of the urban drainage system model. In order to overcome the problems of complex modeling, too many parameters, and slow running speed of traditional physical models, a conceptual model based on Muskingum method was built for an actual application, analyzing its physical principles and parameter characteristics and describing the conceptualization process. Through the optimization of model parameters and overall reliability analysis, the good simulation effect of the Muskingum model on urban drainage system was confirmed and it could be applied to control strategy optimization.

Key words: Muskingum model; drainage system; parameter calibration; reliability analysis; real time control

随着快速的城市化进程以及气候变化引起的极端降雨事件频率和幅度的增加, 城市雨污水系统的

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目(2019-K_174); 中国建设科技集团科技创新基金资助项目(Z2019J02); 中国市政工程华北设计研究总院科研课题(ZHY-2020-44-ZHSW)

通信作者: 王浩正 E-mail: haozheng_bnu@hotmail.com

负荷加重,从而增加了内涝和合流制管网溢流(CSO)的风险^[1]。对城市排水系统进行模型模拟是防范未来风险的重要措施,实时控制(RTC)技术也是提升城市排水系统运行性能的可行方式^[2]。然而,现在使用的大多数数学建模工具都试图尽可能的全面和细致,导致运行时间长、计算负担大。而实时应用所需的模型,通常在几秒钟或几分钟内就要预测未来几小时的水力状态。另外,由于计算时间长,传统的物理模型用于工况发展、设计优化以及风险分析时也受到阻碍^[3]。为了减少模型的计算时间,一种方法是通过优化计算资源的使用来增强计算性能,例如并行计算^[4-5],但该方法需要保证足够的计算资源;另一种方法是建立概念模型以降低计算成本。考虑到水力学的复杂性和成本问题且要将实时控制有效地应用于城市排水系统,构建适当的概念模型是一种可替代的方案。

1 概念模型的原理及方法

1.1 概念模型的原理

传统的水力模型如EPA-SWMM模型,通过求解复杂的圣维南水力方程,被广泛地应用于大规模管网系统建模。而概念模型是基于概化整个管网,尤其是水力细节,并且出于建模目的考虑,需要同时保持整个管网的主要特征^[6]。因此,其物理系统由高度简化的“概念”表示,例如通过简单的调蓄池系统表示管道流动的物理原理或用单个工艺的具体处理来替代全局。

这类模型通常关注主导过程,只对有直接和重大影响的过程进行定量描述,而其他过程通常可以忽略。一些研究只关注系统的物理和水力特性,对流量校准、调蓄池建模、系统划分和汇水区拓扑结构进行深入研究^[7-8]。而另一些研究的重点是水质,更关注污染物浓度的变化过程^[6]。

由于概念模型依赖于更简单和更少的关系,其总体复杂性降低,同时显著减少了计算时间。但是概化程度的选择是在准确性、误差裕度和计算时间三者之间的权衡。因此,应基于模拟过程的类型和模拟的目的来定义概念模型的细致程度、可接受的误差裕度和计算时间^[9-12]。

1.2 概念模型的方法

概念模型通过对城市排水系统中主要设施的概念化模拟,并对概念化后的设施参数根据监测数据进行调整,以达到能够准确地模拟城市排水系统状

态和用于模型预测控制的功能。根据概念化的方式不同,概念模型主要包括:虚拟水箱模型(Virtual-tank based)、纳什模型(Nash)、积分器-延迟模型(Integrator-delay)和马斯京根模型(Muskingum)。

虚拟水箱模型是通过对网络中元素分组并用互连的虚拟存储库替换它们。所有收集元素中的存储量代表相应虚拟水箱中包含的水量^[13]。

纳什模型通常是非线性模型,它将排水管道概化为多个串联的层叠瀑布式的水箱,每个水箱的输出是下一个水箱的输入^[14]。

积分器-延迟模型考虑延迟条件和回水作用,将管道、河道的出流量通过管道下游出流和上游入流的一阶关系表示^[15]。

马斯京根模型将管道、河道或汇水区出流量,通过一种管道蓄水体积与管道流入和流出量之间的假设线性关系描述。在上述几种概念模型中,马斯京根模型是一种广泛应用于模拟和控制的模型,其方法简单且在预测方面具有适用性,因此被用于设计MPC控制器,但其有效性取决于参数的估计。

2 马斯京根模型

2.1 物理原理

天然河道里的洪水波是随时间和空间变化的不稳定流,可用连续方程和动力方程(即圣维南方程组)来描述。洪水波经过河段时,河槽蓄水量可分为两部分:平行于河底直线下方的为柱蓄,直线与水面之间的槽蓄量为楔蓄,如图1所示。

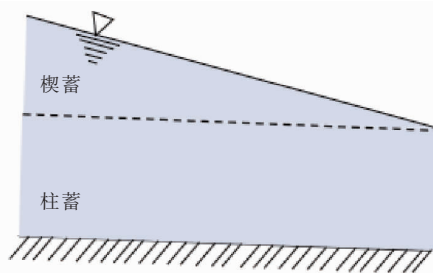


图1 柱蓄和楔蓄

Fig. 1 Prismatic storage and wedge storage

马斯京根流量演算法描述了河流的动力学并能够解决洪水运动的非线性变化过程。它用槽蓄方程近似代替动力方程,水量平衡方程代替连续方程,通过联解两个方程来演算流量,见式(1)、(2)^[16]。

$$V = \frac{V_i + V_{i-1}}{2} = K \cdot Q_{E,i} + K \cdot X \cdot (Q_{I,i} - Q_{E,i}) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta t} = Q_{I,i} - Q_{E,i} \quad (2)$$

式中: V 为槽蓄量, m^3 ; Q_I 为入流, m^3/s ; Q_E 为出流, m^3/s ; Δt 为演算时间, s ; K 、 X 为马斯京根参数。通过式(1)、(2)可得到式(3):

$$Q_{E,i} = C_X \cdot Q_{I,i} + C_Y \cdot V_{i-1} \quad (3)$$

式中: C_X 、 C_Y 是 K 、 X 和 Δt 的函数。因此,按传统的方法,只要确定参数 K 、 X 及 Δt ,则推出 C_X 、 C_Y ,从而得到 Q_E 。上述方程是对单一子河段的计算,对于多子河段而言,马斯京根法还具有另一重要参数 N ,即子河段数。

马斯京根模型中的管道采用马斯京根流量演算法模拟。其中, Q_I 为管道入流, Q_E 为管道出流, V 为管道的存储体积, Δt 为模拟时间步长, K 、 X 和 N 为马斯京根参数。

马斯京根模型中汇水区的产流采用径流系数法,如式(4)所示。径流传输采用马斯京根流量演算法,即默认汇水区的出流由一根虚拟管道收集并输送。

$$R_i = I_i^* \times A \times \varphi \quad (4)$$

式中: R 为径流量, m^3/s ; I^* 为净雨强度,即降雨强度扣除入渗和蒸发强度后的差值, m/s ; A 为汇水区面积, m^2 ; φ 为径流系数,取值范围为 $0 \sim 1$ 。

马斯京根模型中的调蓄池采用水量平衡方程模拟。通过建立泵站流量与调蓄池蓄水液位的关系,可通过泵站模拟调蓄池的出流,如式(5)所示。

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta L \times A}{\Delta t} = \frac{(L_i - L_{i-1}) \times A}{\Delta t} = Q_{I,i} - q_i \quad (5)$$

式中: V 为调蓄池的蓄水体积, m^3 ; L 为调蓄池的蓄水液位, m ; A 为调蓄池底面积, m^2 ; Q_I 为调蓄池入流, m^3/s ; q 为调蓄池出流,即泵站流量, m^3/s 。

2.2 参数特征

马斯京根流量演算法的关键参数分别是 K 、 X 和 N 。其中, K 为蓄量常数,它表示恒定流时单个子河段的平均流动时间。 X 为流量比重因子,代表入流和出流对槽蓄影响的相对比重。它用于表示水面曲线的形状,反映了楔蓄的影响,同时也可反映河段的调蓄能力。 N 为子段数,通常为 1 ,当河道过长时 $N > 1$ 。

K 和 X 的数值选择通常受到一定限制, K 值一般大于演算时间 Δt , C_X 、 C_Y 必须大于 0 ,使入流和槽蓄量能够正向影响出流。通常,对 X 的取值要求在

$0 \sim 0.5$ 之间。采用马斯京根法模拟管道时, K 通常反映单一管段的传输延时, X 反映管段的削峰作用, N 表示管道的子段数。

3 模型构建和参数率定

3.1 案例介绍

某市一纳污片区的实际纳污范围约为 900 hm^2 ,采用合流制排水体制。有 4 路来水进入污水处理厂后排入受纳水体。根据其排水情况和地理信息,将该片区划分为甲、乙、丙、丁 4 个子区域。

为了更好地控制合流制溢流污染负荷,甲区和乙丙区分别建立了调蓄池 SUA ($15\,000 \text{ m}^3$) 和 SUB ($15\,000 \text{ m}^3$)。旱季污水和雨季未超过排水管道排放能力的合流污水通过管网直接输送至污水处理厂,而超过管网或污水处理厂处理能力的合流污水分别进入调蓄池 SUA 和 SUB 后再排入污水处理厂。丁区汇水进入调蓄池 SUC ($5\,500 \text{ m}^3$) 后再通过泵站排入污水处理厂。通过调蓄池的调蓄作用,可以将降雨初期的高浓度合流污水进行收集,对进厂水质、水量进行调节以保障现有污水处理厂的运行安全。具体区域划分和调蓄设施分布如图 2 所示。

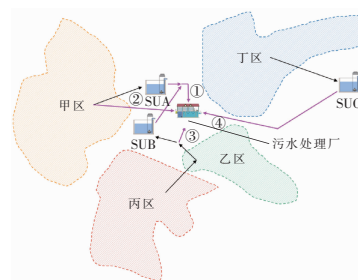


图2 某市一纳污片区的子区域划分和设施分布

Fig. 2 Sub-area division and facility distribution of a pollution receiving area

基于上述案例的 SWMM 简化模型中汇水区合计 105 个,管道合计 162 个,合流制溢流口合计 6 个。其中,甲区包含汇水区 33 个,管道 36 个;乙区包含汇水区 37 个,管道 20 个;丙区包含汇水区 20 个,管道 21 个;丁区包含汇水区 15 个,管道 85 个。旱天甲区、乙区、丙区和丁区的污水排放量分别为 2×10^4 、 1.7×10^4 、 2×10^4 、 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (0.231 、 0.202 、 0.231 、 $0.347 \text{ m}^3/\text{s}$),其中丙区出水汇入乙区。雨天甲区直排污水处理厂合流管道的最大能力为 $0.462 \text{ m}^3/\text{s}$,超出水量进入调蓄池 SUA;乙丙区直排污水处理厂合流管道的最大能力为 $0.462 \text{ m}^3/\text{s}$,

超出水量进入调蓄池 SUB;丁区合流污水直排污水处理厂,污水处理厂最大处理能力为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。降雨结束后,污水处理厂能力富余,调蓄池 SUA 和 SUB 在 24 h 内排空。

3.2 模型构建

马斯京根概念模型的构建流程如图 3 所示,具体包括:①确定纳污片区的区域划分和关键要素(如污水处理厂、调蓄池、排放口等);②确定片区的所有或主要入流,在数据缺失的情况下只确定主干管;③建立这些入流之间的相互连接关系,指出重要的联系节点;④明确重要的水力结构(如泵、堰、孔口、闸门等);⑤概化汇水区和管网;⑥概化调蓄池、泵站等;⑦根据概化模块和必要节点来设计整个系统。

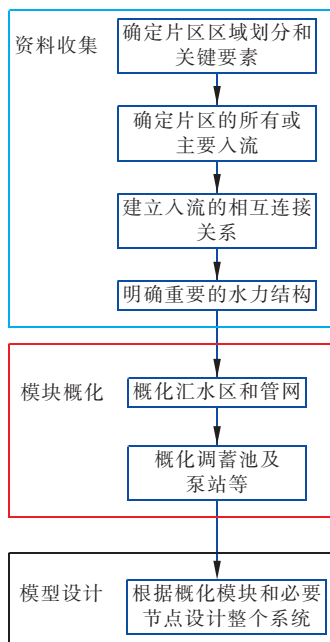


图3 马斯京根概念模型的构建流程

Fig.3 Construction process of Muskingum conceptual model

基于以上案例的马斯京根概念模型包含的主要模块有:汇水区、管道、调蓄池(含泵站)、污水处理厂等。其中,汇水区和管道的流量传输过程遵循马斯京根方法,因此马斯京根参数率定主要围绕汇水区和管道进行。

由于片区中包含诸多汇水区和错综复杂的管网,为了减轻计算负担,构建马斯京根模型的关键是对汇水区和管网进行合理的概化,要在提高计算速度的同时保证一定的准确性。具体的概化方式由片区的实际汇水排水情况和模拟目的决定,通常具有一定灵活性。由于该片区已划分为4个子区域,因

此需对各个子区域的汇水区和管网分别进行概化。

对于汇水区的概化,通常遵循以下几个原则:①调蓄池、溢流堰等可控设施需作为独立元件存在;②概化后的汇水区面积不宜过大;③多个子汇水区合并时需要考虑其实际空间位置和降雨分布,不宜相距过远;④多个子汇水区合并需依据管网的连接和走向,同时要明确旱季入流的情况。由于子汇水区合并过程中会有部分管道被纳入汇水区模块,因此汇水区和管网的概化是相互关联的。管网概化的原则是关注重要节点和重要管段,如保留具有调蓄能力的大型箱涵,而将流量小的分支进行概化。丙区部分管网和子汇水区概化的过程及结果(基于SWMM已有模型)如图4所示(虚框为概化区域,数字为管道或子汇水区名)。马斯京根模型概化汇水区的命名为其最终出水管道或原子汇水区名;管道命名的形式为:进水节点-出水管道(基于SWMM的命名)。

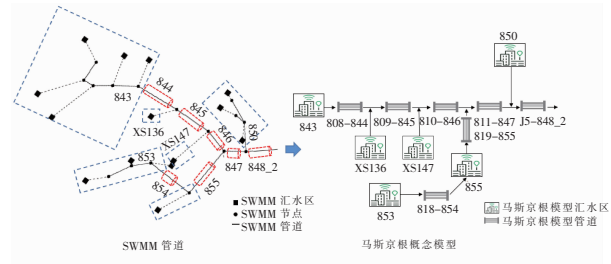


图4 丙区部分管网和子汇水区的概化

Fig.4 Generalization of part of pipes and subcatchments in sub-area C

根据上述概化原则,该片区的4个子区域的概化结果如表1所示。甲区概化为5个汇水区,3个主要管道;乙区概化为5个汇水区,3个主要管道;丙区概化为8个汇水区,7个主要管道;丁区概化为2个汇水区,1个主要管道。

表1 纳污片区4个子区域(甲、乙、丙、丁)的概化结果

Tab.1 Generalization results of 4 sub-areas (A, B, C and D) in the pollution receiving area

子区域	概化汇水区	主要管道
甲区	931、L23、L28、J55、L8	J65-L6、J57-L107、J55-L35
乙区	86、838、950、85、C18	803-839、J1-951_1、J23-C19
丙区	843、XS136、XS147、853、855、850、L29、C1_2	808-844、809-845、810-846、818-854、819-855、811-847、J5-848_2
丁区	GC335、S23	J14-GC5_2

马斯京根模型中的调蓄池、污水处理厂、泵站也以概化模块的形式表示,输入参数为实际参数。上述案例涉及 3 座调蓄池(SUA、SUB 和 SUC)、1 座污水处理厂(WWTP)和 3 个排空泵站。各设施模拟参数:调蓄池 SUA、SUB 和 SUC 的底面积分别为 1 500、1 800、1 000 m²,深度分别为 10、8.3、5.5 m;SUA、SUB 和 SUC 排空泵站的最大流量依次为 0.521、0.521、0.415 m³/s;WWTP 处理能力为 1.39 m³/s。

马斯京根模型通过建立基于 C 语言的优化控制中心模块对整个设计系统进行调控。优化控制中心需输入系统边界条件(如系统的水量平衡)和限制条件(如排空泵的实际出流不超过最大流量)、选择合理的实时控制目标(如系统溢流量最小)并建立目标函数以及选取合适的优化算法(如遗传算法)等。在模拟过程中,优化控制中心能提取实时模拟数据,计算多控制目标下的优化策略(如各排空泵站的出流优化值),并将策略返回至模拟系统中执行,从而实现系统的实时优化调控。

3.3 参数寻优率定

马斯京根模型是否可靠,其概化程度是否合理,需要进行汇水区和管道参数的率定。对于汇水区,降雨产生径流后发生传输,因此除马斯京根 3 个重要参数 K 、 X 、 N 外,还需对汇水区的径流系数 φ 进行率定。本研究使用基于 C 语言的自主开发工具,利用 SWMM 模型模拟数据(也可以使用当地的实际监

测数据)对汇水区和管道的马斯京根参数进行寻优率定。

为了评估率定的质量,计算以下 3 个指标:纳什效率系数(E)、符合度指数(d)和偏差(B)。其中,纳什效率系数一般用于验证水文模型模拟的好坏,其值接近 1 则表示模型质量良好,可信度高;符合度指数可以说明模拟值与观测值之间的符合程度,其值接近 1 则表示两者的分布趋势吻合,模型的模拟效果良好;同样地,偏差反映的是模型模拟值与观测值之间的误差,其值接近 1 则表示模型精确。

使用该自主开发工具率定汇水区参数时需输入概化汇水区的面积、早季入流、概化分支数、出水管道数、出水管道名称;率定管道参数时需输入进水节点和出水管道名称。根据该片区 2014 年 1 月—4 月的降雨数据,自主开发工具将一定取值范围内不同的 K 、 X 、 N 分别分配给各个汇水区和管道,计算汇水区产流、径流传输以及管道流量传输的情况(即模拟值),并与 SWMM 模型模拟的相应数据(即观测值)比对,不断优化以获得评估结果最佳的参数。在得到一组最优 K 、 X 、 N 、 φ 参数值后,利用 2014 年 5 月—12 月的降雨数据再次进行验证,得出最终的 E 、 d 和 B ,结果如表 2、3 所示。在马斯京根参数自动寻优的过程中,可以利用优化算法提升寻优效率,避免枚举运算的长耗时,本研究采用遗传算法计算不同 K 、 X 、 N 值对模拟值变化梯度的影响,快速逼近最佳参数解。

表 2 汇水区参数寻优率定结果

Tab.2 Parameter optimization and calibration results of subcatchments

项目	931	L23	L28	J55	L8	86	838	950	85	C18
K	900	600	600	300	900	600	1 500	1 500	900	1 200
X	0.15	0.1	0.2	0	0.15	0.05	0.1	0.1	0.15	0.1
N	2	2	2	3	2	3	1	1	2	2
φ	1	0.3	1	0.2	0.9	0.65	0.6	0.65	1	0.9
E	0.86	0.89	0.85	0.91	0.90	0.89	0.85	0.88	0.88	0.89
d	0.92	0.94	0.92	0.95	0.94	0.93	0.92	0.93	0.93	0.94
B	0.97	1.00	0.93	0.99	0.88	1.05	1.08	1.07	0.99	1.00
项目	843	XS136	XS147	853	855	850	L29	C1-2	GC335	S23
K	1 500	1 200	1 500	2 100	1 500	900	900	2 400	300	300
X	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.05	0.3	0
N	1	1	1	1	1	2	2	1	10	3
φ	0.6	0.55	0.6	0.6	1	0.6	1	0.6	0.6	0.5
E	0.85	0.88	0.89	0.85	0.74	0.88	0.88	0.84	0.88	0.88
d	0.92	0.93	0.94	0.92	0.88	0.93	0.93	0.92	0.94	0.93
B	1.08	0.99	1.02	1.02	0.78	1.01	0.95	1.03	0.98	0.99

表 3 管道参数寻优率定结果

Tab. 3 Parameter optimization and calibration results of pipes

项目	J65 - L6	J57 - L107	J55 - L35	808 - 844	809 - 845	810 - 846	803 - 839	J1 - 951_1	J23 - C19	818 - 854	819 - 855	811 - 847	J5 - 848_2	J14 - GC5_2
K	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
X	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0.2	0	0.15	0	0	0.05
N	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
E	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.90
d	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
B	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

从表 2、3 可知,模型具有良好的汇水区和管道参数。若无法得到良好的参数结果,则应考虑概化方式是否存在问题。对于模拟效果不佳的汇水区或存在倒流等问题的管道,需手动调整参数,调整原则是使马斯京根模型与 SWMM 模型结果的趋势线尽量吻合、水量差异控制在一定范围、峰值尽量接近。

4 模型整体可靠性分析

马斯京根模型参数率定后,对模型进行整体的可靠性分析,分析的指标为各个重要节点的进、出水量。从全年降雨(2014 年)情况和两场重点降雨场次(11.7、18.5 mm)出发,对模拟片区 4 个子区域的总出水量、污水处理厂的进水量进行分析。污水处理厂进水量分两部分:甲区、乙丙区、丁区的直接排放量以及调蓄池 SUA、SUB 的排空量。由于调蓄池为受控设施,其进、出水量是实时控制的重点,受各种优化算法及控制目标的影响,因此在可靠性分析中考虑污水处理厂进水量时,只考虑子区域向污水处理厂的直接排放量。

4.1 全年数据分析

2014 年全年降雨条件下各个子区域的出水及直排污水处理厂的流量情况如图 5 所示。

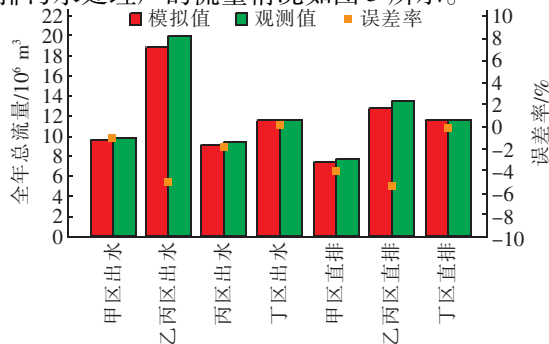


图 5 全年降雨条件下各子区域出水及直排污水处理厂总量

Fig. 5 Total amount of outflow and direct discharge to wastewater treatment plant of each sub-area

其中,直排污水处理厂总量包括甲区直排量、乙丙区直排量和丁区直排量。结果表明,率定后的马斯京根概念模型模拟值与 SWMM 模型观测值的误差范围在 0.03% ~ 5.5% 之间,该结果验证了参数率定的有效性。

4.2 重点场次数据分析

对 2014 年两场重点场次 11.7 mm 和 18.5 mm 的降雨分析结果如图 6 所示。

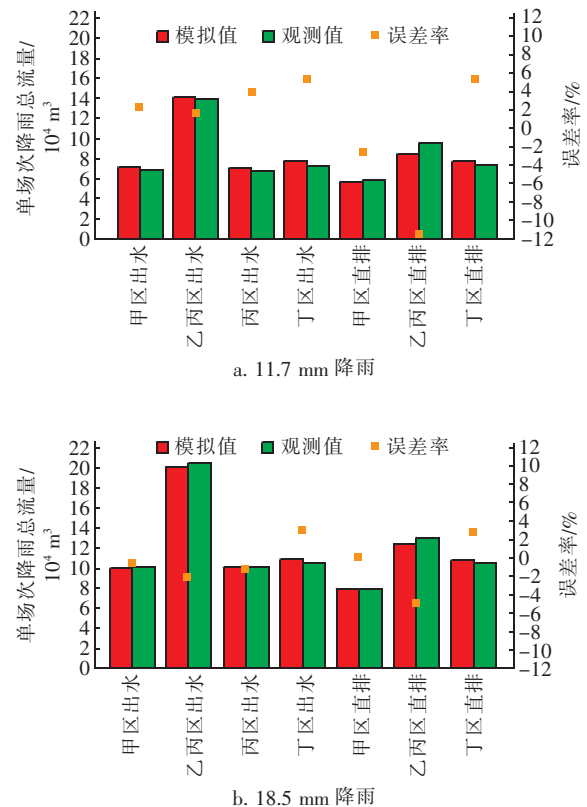


图 6 两场重点降雨场次下各子区域出水及直排污水处理厂总量

Fig. 6 Total amount of outflow and direct discharge to wastewater treatment plant of each sub-area in the two key rainfall events

在两场重点场次降雨中,马斯京根模型的模拟结果良好。其中,对于11.7 mm的降雨,马斯京根模型的模拟结果与SWMM模型的结果误差率在12%以内,除乙丙区直排外,其他节点进出水结果的误差率在6%以内;18.5 mm的降雨也出现相似的结果,乙丙区直排流量的误差率为5%,其余节点的误差则不超过4%。由于乙丙区为主要的汇水区域并涵盖大量的管网,其概化程度更高,因此马斯京根模型模拟管道传输过程与SWMM模拟时复杂的动力学过程相比,其最终结果的准确性相对较低,但误差水平依然处于可接受的范围。

为了进一步证明马斯京根模型的准确性,选择了上述18.5 mm的重点降雨场次,对各个子区域出水及直排污水处理厂流量的变化趋势进行分析。结果表明,马斯京根模型和SWMM模型的流量变化趋势吻合,马斯京根模型的峰值流量较SWMM模型相对偏低,但两者的总量数据相差较小,因此可以说明马斯京根模型对流量传输过程模拟的精确性。

5 模型应用

根据该纳污片区的汇水排水情况所构建的完整马斯京根概念模型如图7所示。在证实模型的可靠性后,对调蓄池、分流井等结构实施实时控制技术,通过在线调蓄和策略优化实现CSO的削减,减少内涝的发生。

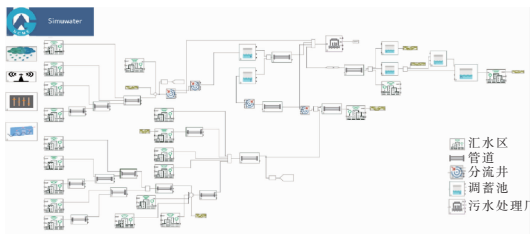
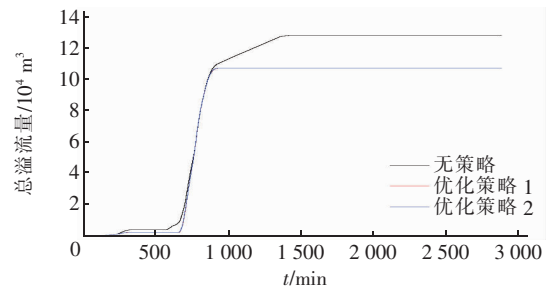


图7 某市一纳污片区的马斯京根概念模型

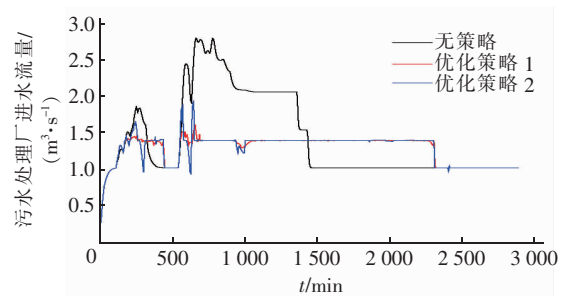
Fig.7 Muskingum conceptual model of a pollution receiving area

马斯京根模型的优化控制中心可根据不同的控制目标权重(溢流量最低、污水处理厂处理量最大、设施水量稳定等)实现不同降雨工况多个预测周期下的自动策略优化。该案例片区排水系统的边界条件为各个子区域的进、出水量平衡;限制条件主要涉及多个分流井和排空泵站的流量分配。由于控制目标中包含均匀填充等非线性控制目标,因此选用遗传算法作为优化策略的计算方法。

在某场选定的降雨(20.6 mm)中,将控制目标分别设定为总体溢流量最低(优化策略1)、总体溢流量最低及设施水量稳定(优化策略2),该模型在优化策略/无策略下的总溢流及污水处理厂进水流量情况如图8所示。对比无策略情况,优化策略1和2的总溢流削减率分别为16.4%和16.3%。其中,优化策略2在减少溢流的同时能保持污水处理厂进水稳定,成功实现了多目标的优化控制。



a. 总溢流量



b. 污水处理厂进水流量

图8 优化策略/无策略下的总溢流及污水处理厂进水流量变化对比

Fig.8 Variation of total overflow and inflow of wastewater treatment plant under optimized strategy or no strategy conditions

6 结论

① 基于实际案例构建了一种马斯京根概念模型来模拟管网的流量传输过程,并提出了构建的基础流程和概化的基本原则,旨在参与城市排水系统的综合实时控制。参数率定的结果和模型的整体可靠性分析证明该模型可以准确描述管网流体的运输,具备良好的模拟排水系统的性能,同时其在控制策略优化应用上也具有优越性。

② 马斯京根概念模型的成功构建为实施实时控制关键技术奠定了基础,由于其过程简单、结构单元少、运行时间短,有利于动态调整控制策略,对排水系统重点设施进行有效的实时干预,从而提高整个排水系统的运行效率。

③ 马斯京根概念模型相比 SWMM 机理模型能够极大地降低计算成本,由于其高度概化,在缺乏足够管网基础数据的实际情况中更具适用性,可由设计人员依据资料、经验或初步实地考察后建立,节约建模时间成本并降低建模复杂程度。

④ 在城市排水系统模型的选择上,概念模型与机理模型各具优势,取决于排水系统的类型、结构和模拟的目的、效果。马斯京根模型在应用中已显现其独特的优势,而未来的研究方向将致力于机理模型与概念模型的耦合,实现排水系统精度与效率的双重效益。

参考文献:

- [1] SEMADENI-DAVIES A, HERNEBRING C, SVENSSON G, *et al.* The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: combined sewer system[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 350: 100 – 113.
- [2] BORSANYI P, BENEDETTI L, DIRCKX G, *et al.* Modelling real-time control options on virtual sewer systems[J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2008, 7(1/6): 395 – 410.
- [3] HENONIN J, RUSSO B, MARK O, *et al.* Real-time urban flood forecasting and modelling—a state of the art[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2013, 15(3): 717 – 736.
- [4] LEANDRO J, CHEN A S, SCHUMANN A. A 2D parallel diffusive wave model for flood plain inundation with variable time step (P – DWave)[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 250 – 259.
- [5] NEAL J C, FEWTRELL T J, BATES P D, *et al.* A comparison of three parallelisation methods for 2D flood inundation models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25: 398 – 411.
- [6] GUO L, TIK S, LEDERGERBER J M, *et al.* Conceptualizing the sewage collection system for integrated sewer – WWTP modelling and optimization[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 710 – 716.
- [7] KROLL S, WAMBECQ T, WEEMAES M, *et al.* Semi-automated buildup and calibration of conceptual sewer models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 93: 344 – 355.
- [8] PIEPER L, LEDERGERBER J, COMEAU A, *et al.* An efficient and structured procedure to build the catchment and sewer models of integrated urban wastewater system models[C] // IWA. *Proceedings 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage (ICUD2017)*. London: IWA, 2017: 156 – 161.
- [9] BEVEN K. Facets of uncertainty: epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication[J]. *Journal of Hydrological Sciences*, 2016, 61(9): 1652 – 1665.
- [10] BLAZKOVA S, BEVEN K. A limits of acceptability approach to model evaluation and uncertainty estimation in flood frequency estimation by continuous simulation: Skalka catchment, Czech Republic[J]. *Water Resource Research*, 2009, 45: 1 – 12.
- [11] HAASNOOT M, VAN DEURSEN W P A, GUILLAUME J H A, *et al.* Fit for purpose? Building and evaluating a fast, integrated model for exploring water policy pathways[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 60: 99 – 120.
- [12] JAMALI B, LOWE R, BACH P M, *et al.* A rapid urban flood inundation and damage assessment model[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 1085 – 1098.
- [13] GELORMINO M S, RICKER N. Model-predictive control of a combined sewer system[J]. *International Journal of Control*, 1994, 59(3): 793 – 816.
- [14] REGNERI M, KLEPISZEWSKI K, SEIFFERT S, *et al.* Transport sewer model calibration by experimental generation of discrete discharges from individual CSO structures[C] // IEMS. *Proceedings of the 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software Managing Resources of a Limited Planet*. Leipzig: IEMS, 2012: 3109 – 3116.
- [15] BOLEA Y, PUIG V, GRAU A. Discussion on Muskingum versus integrator-delay models for control objectives[J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2014 (1/2): 1 – 11.
- [16] ROBERSON J A, CASSIDY J, CHAUDHRY M H. *Hydraulic Engineering*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1995.

作者简介:王浩正(1980 –),男,河北涿州人,硕士,高级工程师,研究方向为城市排水系统智慧化管理技术。

E-mail: 26802514@qq.com

收稿日期: 2021 – 01 – 10

修回日期: 2021 – 04 – 15

(编辑:李德强)