

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.20.018

基于模型的复杂排水系统控制逻辑模拟仿真

陈俊¹, 戴俊龙², 古燕霞¹, 刘雨桐³, 谢丽霞⁴, 王境怡³

(1. 常州市排水管理处, 江苏 常州 213017; 2. 艾默生过程控制有限公司, 上海 201206;

3. 清苏智慧水务科技<苏州>有限责任公司, 江苏 苏州 215163; 4. 艾默生科技资源<西安>有限公司, 陕西 西安 710076)

摘要: 排水系统是一个错综复杂的广域分布系统,具有强耦合、大时滞、非线性和多扰动等特性,为实现系统实时控制运行,对其直接进行在线优化控制和过程参数调试,易导致调试周期较长、安全风险较大等问题。为保证实时控制逻辑的合理性和准确性,运用机理模型对系统进行出厂前的实时控制系统逻辑测试,为排水系统的优化控制提供重要的数学试验环境。将城市水系统控制仿真模型Simuwater中的功能模块与全世界范围内广泛应用的OVATION控制系统和排水系统模拟软件SWMM进行有机结合,可实现真实生产环境的排水系统控制逻辑在数学模型环境下的模拟和测试。运用该模拟环境,针对常州王家塘-惠家塘排水系统开展案例研究,构建案例区SWMM模型,在OVATION虚拟控制器中编制多级泵站优化调度闭环控制逻辑,将机理模型常规的规则控制更替为标准控制系统的闭环控制逻辑,并应用先进控制策略进行全过程多工况仿真。通过真实控制系统与机理模型耦合模拟,使案例的系统性能显著提高,可为基于模型的排水系统控制逻辑仿真提供参考,同时为真实的排水系统自动化控制提供现实依据。

关键词: 排水系统; 机理模型; 过程控制仿真

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)20-0102-07

Model-based Simulation of Complex Drainage System Control Logic

CHEN Jun¹, DAI Jun-long², GU Yan-xia¹, LIU Yu-tong³, XIE Li-xia⁴,
WANG Jing-yi³

(1. Changzhou Drainage Administration, Changzhou 213017, China; 2. Emerson Process Management Co. Ltd., Shanghai 201206, China; 3. Tsingsu Smart Water Technology <Suzhou> Co. Ltd., Suzhou 215163, China; 4. Emerson Xi'an Engineering Center, Xi'an 710076, China)

Abstract: The drainage system is an intricate huge system with strong coupling, great time delay, nonlinearity and uncertain characteristics. In order to realize the real-time control of the system, it is optimally controlled online and the process parameters are adjusted, which can easily lead to long commissioning cycle and high safety risk. To guarantee the rationality and accuracy of real-time control logic, the first principal model is used to test the control logic of the system before delivery, and provide an important mathematical experiment environment for the optimal control of drainage system. Through the function module of Simuwater, an urban water system control simulation model, in combination with the widely used OVATION control system and the drainage system simulation software SWMM, the simulation and testing of the drainage system control logic in the real production environment under the mathematical model environment is realized. The simulated environment was used to carry out a case study of

Changzhou Wangjiatang-Huijiatang drainage system, set up the SWMM model of the case area, develop the closed-loop control logic of multistage pumping station optimized dispatching in OVATION virtual controller, and replace the conventional regular control of mechanism model with the closed-loop control logic of standard control system. The advanced control algorithm is used to simulate the whole process of multi-condition. Through the coupling simulation of the real control system and the mechanism model, the system performance of the case is significantly improved, which can provide a reference for the model-based control logic simulation of the drainage system, and provide a realistic basis for the real automatic control of the drainage system.

Key words: drainage system; principle model; process control simulation

1 系统背景

排水系统是重要的城市基础设施,承担了收纳、转输、净化污水和收集、传输、排放雨水等任务。随着信息技术、人工智能技术、自动化技术的不断发展,排水系统的智慧化建设也在全国各地陆续展开,转输泵站、截流井、调蓄池等排水设施将逐步实现无人值守、联合调度控制。由于排水系统是一个典型的多变量、非线性、随机性、大滞后、强耦合系统,因此很难在没有控制模型的前提下对其进行全面地优化控制^[1]。通过良好率定的排水系统机理模型能够提供过程控制操作及全系统水量水质过程的关系,因而被国内外学者广泛地用于制定排水系统调度策略的研究^[2]。

但是,现有的机理模型软件仅提供简单的控制逻辑编辑功能,难以直接将所定制的策略平移应用到现实控制环境中^[3]。将Simuwater模型中的功能模块与全世界范围内广泛应用的OVATION控制系统和排水系统模拟软件SWMM有机结合,可以实现真实生产环境的排水系统控制逻辑在数学模型环境下的模拟和测试。

1.1 暴雨径流模型

暴雨径流管理模型(SWMM)是一款由美国环保署开发的、被全世界广泛应用的排水过程模型^[4]。SWMM基于一维圣维南、质量守恒等方程,提供雨/污水管、自然排放系统的水动力水质动态变化结果仿真,包括排水户污水排放、降雨、地表径流、管道雨/污水输送、污水处理等过程。

1.2 Simuwater模型

城市水系统控制仿真模型(Simuwater)是中国市政工程华北设计研究总院有限公司智慧水务分公司自主开发的分布式水文、水力、水质模型软件。

Simuwater的实时控制功能可根据所选状态参数和优化变量而设定相应的限制条件和目标方程。同时,利用先进成熟的系统级优化算法,计算出每个时间步长内目标方程达到最大或最小值时可控优化变量的值,从而制定系统内所有可控设施的最佳运行策略,实现设备级和系统级的优化调度控制目标。

1.3 OVATION控制系统

OVATION控制系统由美国艾默生公司推出且在全世界范围得到广泛应用。采用OVATION的控制逻辑组态功能,能够定义输入点、输出点、控制逻辑、人机界面^[5]。控制逻辑可使用虚拟控制器^[6]实现与真实控制器一致的算法模块和控制效果,以节省对原有控制系统的改造工作量。OVATION虚拟控制器自带多种控制算法模块,包括PID、DMC、MPC、模糊控制、神经网络等,能有力支撑用户定义监测变量和控制变量间复杂的控制逻辑。

2 模拟环境构建

通过Simuwater-MC功能模块链接SWMM模型和OVATION控制系统,构建多级排水泵站控制逻辑的模拟测试环境,并通过Simuwater-EO实现全局优化计算。

2.1 Simuwater-MC模型链接模块

Simuwater-MC是Simuwater的子功能模块,通过基于SWMM模型软件的二次开发,实现Simuwater与SWMM模型软件的链接,可对排水系统中发生的污水输送等水力过程进行动态模拟,也可对降雨条件下的地表产汇流、雨水至污水管网的水量转输状况等进行模拟。SWMM模型中提供了对排水泵站、闸门、调蓄池、分流井等排水系统构筑物的模拟功能,但在设施的控制策略设计方面有较大的局限

性,通常只能实现局部的反馈控制,不能有效地实现多系统协调控制、全局优化控制等控制策略仿真。

Simuwater-MC 可将 SWMM 作为观测模型与 OVATION 进行链接,本质上需要在每一次 SWMM 迭代计算时,将 SWMM 中的过程状态量通信至 OVATION,在 OVATION 中实现对应的逻辑运行,将计算得到的控制指令再发送至 SWMM,从而改变模型中对应设施的输出状态并执行下一次迭代计算。该软件具有以下特点:

① 可以对现有的 SWMM 模型进行快速转译调用,模型可以与 OVATION 形成交互式的调用,并可在任意控制步长上暂停模型的计算过程;

② 在计算暂停的状态下,可以读取 SWMM 模型中的状态变量值,包括泵站的液位、流量、启闭状态及相关管网节点、被控设施的过程状态;

③ 在计算暂停的状态下,可以修改模型中可控设备的设定值,例如泵的启闭状态、泵的转输流量大小、闸门的开度等;

④ 在完成上述设置后可继续执行 SWMM 模型计算,直到下一控制步长。

在 Simuwater-MC 的仿真运算开始前,需要设置控制步长与模拟倍速。其中,控制步长指 SWMM 模型和 OVATION 之间完成一次完整控制通信的周期(包括监测量读取、执行逻辑计算、操作指令下发),本研究中的控制步长设定为现实时间 1 s;模拟倍速指 SWMM 模型内的仿真速度相对于现实时间的倍率,本研究中的模拟倍速为 60 倍。模拟步长为在设定的控制步长内模型所仿真的步长,其计算值通过控制步长和模拟倍速相乘算得。通过以上计算,可得本研究模拟步长为 60 s,即模型每完成 60 s 的水力计算步长都会暂停并等待通信,通信完成后继续等待直到 1 s 结束,再继续执行计算(本研究所应用的模拟步长与模型执行水力计算的迭代步长 routing step 非同一概念,但模拟步长应为 routing step 的整数倍)。

通过代码实现方法如下:

① 通过 Simuwater-MC 调用 SWMM 的动态链接库,在每一次模拟步长(即模型内时间 60 s)的计算完成,并达到一个控制步长(现实时间 1 s)后,暂停并执行与 OVATION 的数据通信;

② 通过 Simuwater-MC 读取到的 SWMM 在本

次计算周期中的部分过程状态数据存入通信点表中(预设的通信点表作为 OVATION 的输入量);

③ 通过 Simuwater-MC 提供 OPC Client,与 OVATION 的 OPC Server 通信,实现上述状态数据写入 OVATION;

④ 执行 OVATION 控制逻辑运算,得到控制指令;

⑤ 通过 OPC Client 和 OPC Server 得到计算出的控制指令,并利用 Simuwater-MC 将其写入 SWMM 作为下一计算步长中被控设施输出状态的取值;

⑥ 等待该控制步长(现实时间 1 s)结束后,继续执行下一周期的计算;

⑦ 执行①~⑥直至程序结束(达到设定的模拟结束时间,或手动终止)。

基于 Simuwater-MC 的系统链接示意图 1。

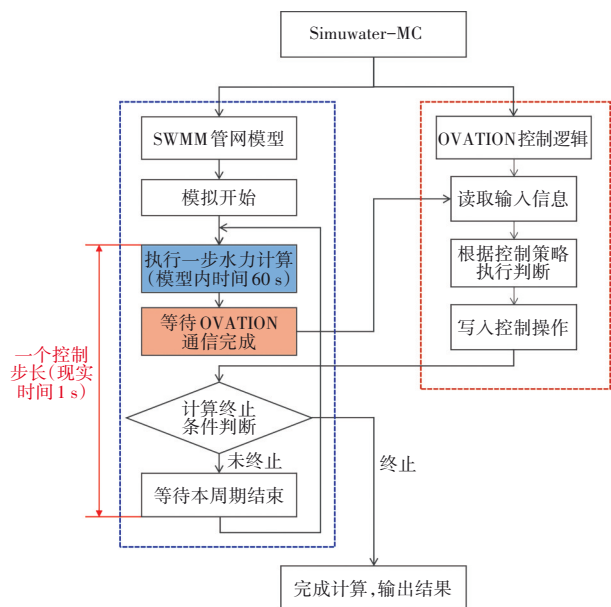


图1 基于 Simuwater-MC 的系统链接概念图

Fig.1 Communication framework between SWMM and OVATION base on Simuwater-MC

上面提到的计算模型的暂停是本研究的难点之一,具体分析如下:

① 由于 OVATION 的控制逻辑是按照一定的执行周期连续运算,故在每个执行周期中 OVATION 都会读取模型的过程状态量作为过程控制的状态反馈量,然后与设定值同时输入控制算法模块中进行逻辑运算。若模型不暂停,则控制系统的计算和模型必定会产生一定时间的脱节(举例来说,液位、流量等由模型产生的过程控制反馈量可能是数个

周期之前的模型过程状态量),这样就会造成控制精度的下降,也就失去了利用模型仿真模拟测试逻辑回路的意义;

② 由于城市雨洪系统单次工况的时间跨度较长,所以在进行模型仿真的过程中,通常为了提高实际的优化效果及控制逻辑的验证效率而对模型进行加速,在不同模拟倍速和控制步长下,模型都需要暂停。

2.2 Simuwater-EO 全局优化模块

Simuwater-EO 是 Simuwater 软件因 SWMM 和 OVATION 在全局优化计算方面的局限性而开发的优化计算扩展包。该扩展包可在基础模型上针对不同的控制目标进行全局优化算法计算,并通过 Simuwater-MC 实现与 OVATION 控制系统的通信。其计算结果可与现有的控制算法模块进行链接,使得控制算法设计的灵活性和实用性大大增强。

采用 Simuwater-EO 进行管网系统控制策略模拟的基本过程如下:①收集资料,在 SWMM 软件中搭建排水管网模型;②设计控制策略,通过 OVATION 搭建控制逻辑;③通过 Simuwater-MC 调用 SWMM 管网模型的过程状态量或快速模拟结果;④应用 Simuwater-MC 进行全局优化计算;⑤通过 Simuwater-MC 将计算完的优化设定值匹配至 OVATION 对应的控制逻辑中;⑥在 SWMM 中使用复杂控制策略进行模拟测试。

系统集成的计算流程如图2所示。

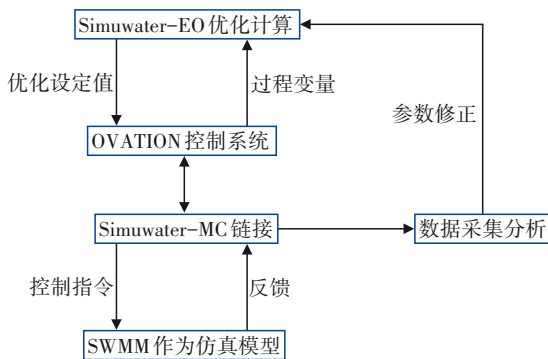


图2 系统模拟仿真计算流程

Fig.2 System simulation process

3 模拟研究

在构建起整套模拟环境后,应用配有权重的排水系统均匀填充(Average Filled)控制策略开展研究。均匀填充控制策略是一种广泛应用于城市排

水系统的控制策略^[7-10],基于对目标区域中相邻汇水区的充满度计算、预估、对比、排水设施的调度操作,实现目标区域可调蓄容积的平均分配。理论上充分利用目标区域管网可调蓄容积,即可以最大化分散来水压力,提高系统稳定性及雨季抗溢流、内涝风险的能力。但在现场部署之前策略的可行性及控制逻辑的安全性、稳定性需要优先通过模拟环境下的测试验证。由于利用 SWMM 自带的 Rule Control 功能模块难以搭建这种策略,所以利用本研究构建的模拟环境进行仿真测试。

3.1 研究对象

选取常州市江边污水处理厂及上游主要二级泵站(汤家桥泵站、新龙泵站、王家塘泵站、新惠家塘泵站、老惠家塘泵站)所构成的排水系统作为目标控制区域,并在此基础上增加戴家塘泵站、中港泵站、多棱泵站、大坝头泵站等13座上游三级泵站作为建模区域。厂站的拓扑连接关系见图3。研究区域排水系统为典型的树状结构,适合作为均匀填充策略应用效果研究的对象。

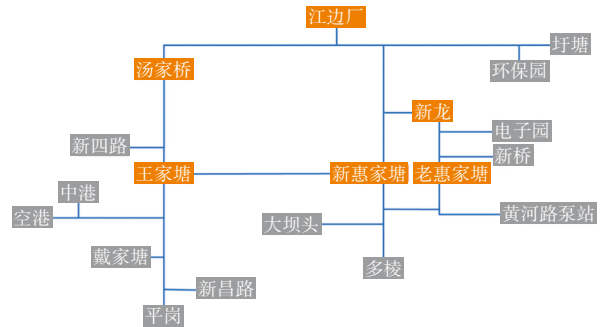


图3 案例区厂泵站拓扑连接方式

Fig.3 Topological connection diagram of pump station

3.2 建模和参数率定

基于 SWMM 对案例区域进行建模,建模步骤包括:①整理并清洗管网和排水户数据;②基于数据编写 SWMM 的 INP 文件,构架管网骨架模型;③拟合并输入排水户的排水量和曲线,以及研究范围内泵站就地 PLC 的控制规则;④开展现场监测,收集、率定、验证实时数据;⑤依次进行旱天污水总量率定、旱天污水动态过程率定、雨天雨污水动态过程率定;⑥依次进行上述情景的验证工作。

案例区 SWMM 模型如图4所示。

研究范围内 SWMM 模型包含18座泵站、1座污水处理厂,旱季污水总量的验证误差<5%,旱季污水动态校正的纳什效率系数达到0.85,雨季雨污水动

态校正的纳什效率系数达到0.8。

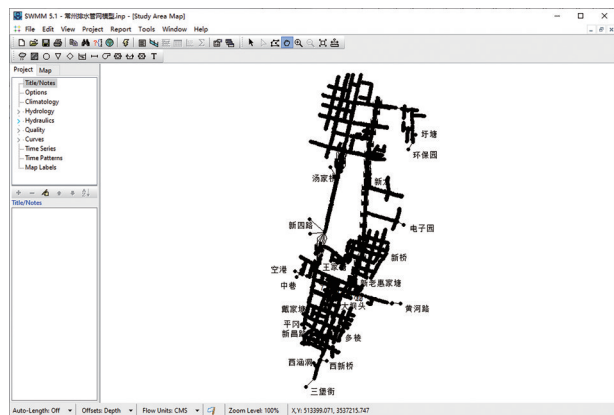


图4 案例区SWMM模型

Fig.4 Case study area SWMM model

3.3 Simuwater-EO 优化设定值计算

应用均匀填充的控制策略(见图5),每个步长均需计算与受控泵站直连的所有上游一级管网的综合充满度。该计算过程首先需要建立一个充满度函数,该函数描述了目标管网限制点液位和充满度的数学关系。该函数是通过SWMM模拟结果得到的不同泵站前池液位条件下的区域管网充满度,并在此基础上结合片区内低洼点、易涝点综合计算所得出的。

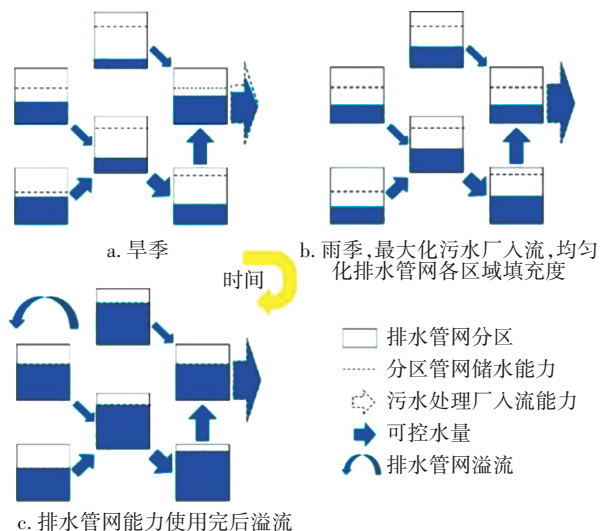


图5 均匀填充控制策略原理示意

Fig.5 Schematic diagram of equal filling optimization control strategy

之后针对各片区的充满度计算出各泵站对应的均匀填充液位设定值。Simuwater-EO 计算过程如下:

① 通过当前实际液位计算每个排水片区充

满意度:

$$\text{fild}_i = f_i(H_i) \quad (1)$$

式中: fld_i 为片区 i 的充满度; H_i 为片区 i 的代表液位(一般为泵前液位); $f_i()$ 为将片区 i 的代表液位转化为片区 i 的充满度的函数。

② 根据每个排水片区充满度计算所有排水片区的平均充满度:

$$\overline{\text{fld}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{fld}_i}{n} \quad (2)$$

式中: $\overline{\text{fld}}$ 为多个受控片区的平均充满度。

③ 根据平均充满度结合该片区的溢流风险系数反算得到各片区目标平衡液位:

$$H_i^* = A_i f_i^{-1}(\overline{\text{fld}}) \quad (3)$$

式中: H_i^* 为根据平均充满度反算出来的每个片区的目标平衡液位; A_j 为片区 j 的CSO敏感系数,即内涝及溢流风险指数。

④ 根据保护条件(如防止溢流、防止排空等)进行目标平衡液位的修正:

$$H_i^{**} = \min(H_i^*, H_{\max}) \text{ or } \max(H_i^*, H_{\min}) \quad (4)$$

式中: H_i^{**} 为经过最高最低水位修正后的目标平衡液位。

⑤ 根据当前液位和目标液位的差值、预测进水流量,根据前反馈控制逻辑进行泵站流量设定值的调整,并依据不同的液位及管底标高、旱天及雨天对控制策略进行调整,以满足旱天节能、雨天不冒溢的要求,利用预测所得进水流量实现对液位的提前控制:

$$Q_i = f[\text{PID}(H_i, H_i^{**}, K_P, K_I, K_D), Q_{in}] \quad (5)$$

式中: Q_i 为泵站流量设定值; Q_{in} 为泵站入流量预测值(在实际调度中, 根据泵站流量设定值及实际泵站出口流量直接调节泵站频率以及泵的启停); K_p 、 K_I 、 K_D 分别为对应PID算法的比例、积分、微分参数。

⑥ 根据流量设定值及泵的额定流量进行泵的启停控制,并利用比例、积分、微分控制(PID)算法,根据流量设定值和实际流量对变频泵的频率进行调节。

⑦ 根据泵站高高液位或低低液位对泵的启停进行超驰保护控制,防止泵站溢流或水泵空转所造成的环境、经济损失。

3.4 控制逻辑搭建

OVATION控制系统根据本研究计算所得优化设定值(由Simuwater-EO模块计算得出)进行逻辑运算,并将指令下发到执行机构。对于每个泵站的逻辑,主要分为以下部分:

①液位设定值选择。液位设定值由Simuwater-EO模块计算得到,也可由操作员在OVATION控制系统中手动设定,两者之间的切换可在系统画面上进行切入及退出。

②泵站流量设定值计算。应用增益调度PID(Gain scheduled-PID)控制器,根据不同的工况进行不同比例、积分、微分控制参数的选择,进而计算出流量设定值。

③启泵台数判断。由泵站流量设定值作为输入量来判断需要启用泵的台数,之后根据泵的健康状态、启用优先级、允许条件、泵组配对情况等,判断需要启动哪一台泵。注意开泵台数不超出泵站最大启泵台数。此外,部分泵站根据关联管网充满足度,需对启泵台数制定一些限定规则。

④变频泵频率控制。根据工频泵的总流量,以及其与流量设定值之间的差值,对变频泵的频率进行控制。本研究变频泵的频率调节范围为35~50 Hz。

⑤低液位保护停泵。在泵坑液位为低低值时保护逻辑动作,关停所有泵,为了防止液位波动及预测、监测误差,当泵站达到低低值后,延时10 s停止所有泵。

⑥高液位保护(强排)。对每个泵站设置强排液位,当泵站液位为高高时,优先保护泵站不冒溢,此时不考虑下游对该泵站的出流量限制,增加启泵台数,但总出流量不超出管网通流量上限。

3.5 策略模拟分析

共设置3种策略,通过模型模拟不同策略下排水系统的表现。3种策略分别为:①液位启停控制,即现有的泵站自动控制模式;②均匀填充策略,即前述控制策略;③均匀填充+预排空策略,即在均匀填充策略的基础上,增加降雨前的管网预排空措施,其实现方式是通过控制逻辑,在降雨发生前将污水厂进水量控制模式切换到手动,并设置为进水流量最大值(研究范围所覆盖污水厂规模为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)。选取2020年5月14日00:00—5月17日00:00作为模拟时间段,其中14日17:00—21:00发生一次降雨过程,降雨量约25 mm。切入管网预排空的时间为

14日14:00。图6展示了不同策略下,各泵站及污水厂的液位模拟结果对比情况。

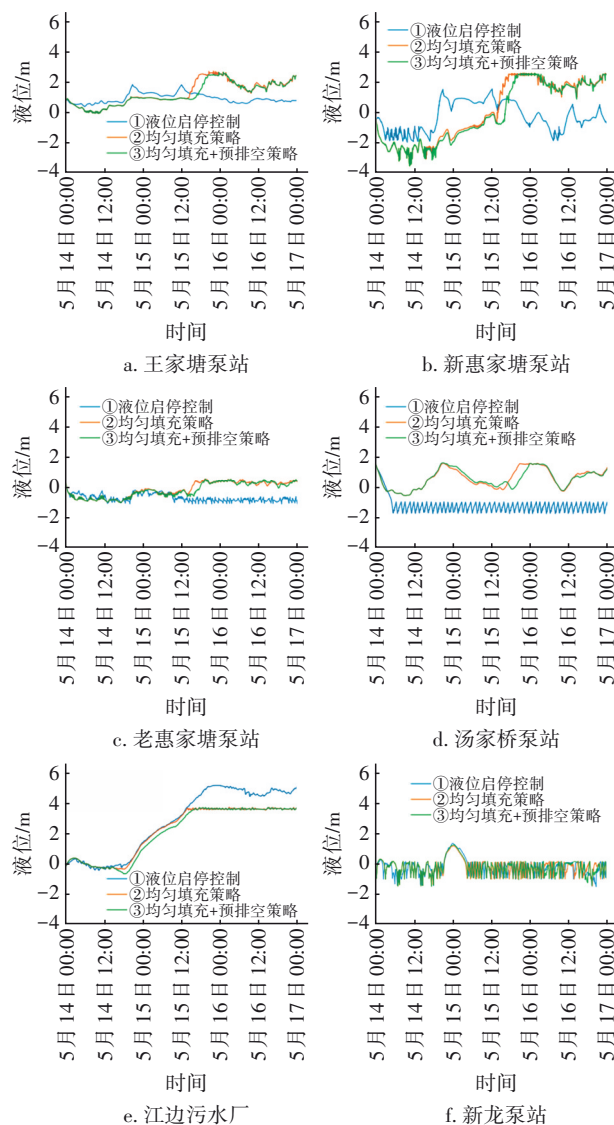


图6 不同控制策略下的泵站液位对比

Fig.6 Water level comparison of pump stations under varied control strategies

由图6可以看出,在14日18:00—22:00左右,策略①下,新惠家塘的液位有明显的迅速升高的过程;而对策略②和③采用均匀填充控制,可有效延缓液位上升过程并降低液位峰值。15日16:00之后,在策略①下,江边污水厂液位最高上升到5.1 m,并长时间处于4.0 m以上,易导致片区内涝风险升高;而策略②、③综合考虑了上下游的液位平衡,当下游污水厂的液位达到临界值(3.5 m)时,会限制上游泵站的排水量,以避免污水厂液位过高;但相应地,新惠家塘和王家塘的液位有一定上升。对

比策略②和策略③,在采用降雨前管网预排空措施后,可推迟污水厂达到高液位的时间约2 h,同时新惠家塘、王家塘泵站液位上升的时间也相应推迟。

图7展示了3种策略下,模拟期间的总体水量平衡情况。对比策略②和策略①,采用均匀填充控制后,可更高效地利用管网存储空间,从而削减内涝量约9 000 m³;应用策略②和策略③,在采取预排空措施后,污水厂提前增加进水量降低管网液位,可使内涝水量进一步削减约6 000 m³,达到15 000 m³。

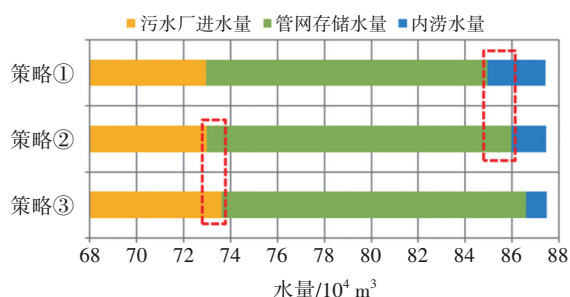


图7 不同控制策略下的水量平衡对比

Fig.7 Volume balance under varied control strategies

4 结论

① Simuwater-MC 将应用广泛的排水系统模型 SWMM 和高级控制系统 OVATION 相连接,实现了在 SWMM 每一个计算周期上执行 OVATION 过程控制逻辑。

② 基于常州王家塘-惠家塘案例,构建 SWMM 模型和 Simuwater-EO 均匀填充算法,并通过 OVATION 搭建驱动级的控制逻辑,最终实现了在模型场景下对不同的控制策略进行模拟测试。

③ 通过模拟分析发现,均匀填充控制策略能够有效提升被控区域管网冗余度,以此降低 CSO 及内涝的风险。

参考文献:

- [1] 黄森辰. 面向溢流污染削减的城市排水系统集成分层优化控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
HUANG Senchen. Research on Integrated Hierarchical Optimal Control of Urban Drainage System for Overflow Pollution Reduction [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018(in Chinese).
- [2] SCHÜTZE M, LANGE M, PABST M, *et al.* Astlingen—a benchmark for real time control (RTC) [J]. Water Science and Technology, 2017(2): 552–560.

- [3] GARCÍA L, BARREIRO-GOMEZ J, ESCOBAR E, *et al.* Modeling and real-time control of urban drainage systems: a review [J]. Advances in Water Resources, 2015, 85: 120–132.
- [4] ROSSMAN L, SIMON M. Storm Water Management Model User's Manual (Version 5.2) [M]. Washington D C: USEPA, 2022.
- [5] BRUNETTI G, ŠIM UNEK J, TURCO M, *et al.* On the use of surrogate-based modeling for the numerical analysis of low impact development techniques [J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 263–277.
- [6] ZHAN X S, CHEN S H, PAN F P, *et al.* A stimulated simulation system based on ovation virtual DCS [C]// ICMMTA. Proceedings of the 2015 3rd International Conference on Machinery, Materials and Information Technology Applications. Qingdao: Atlantis Press, 2015: 479–483.
- [7] 董欣, 陈吉宁, 曾思育. 城市排水系统集成模拟研究进展[J]. 给水排水, 2008, 34(11): 118–123.
DONG Xin, CHEN Jining, ZENG Siyu. The progress of urban drainage system integrated simulation research [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(11): 118–123(in Chinese).
- [8] GIORDANO A, SPEZZANO G, VINCI A, *et al.* A cyber-physical system for distributed real-time control of urban drainage networks in smart cities [C]//IEEE. Proceedings of International Conference on Internet and Distributed Computing Systems. Cham: Springer, 2014: 87–98.
- [9] CARBONE M, GAROFALO G, PIRO P. Decentralized real time control in combined sewer system by using smart objects [J]. Procedia Engineering, 2014, 89: 473–478.
- [10] CARBONE M, PRINCIPATO F, GAROFALO G, *et al.* Comparison of evapotranspiration computation by FAO-56 and Hargreaves methods [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2016, 142(8): 06016007.

作者简介: 陈俊(1973—), 男, 江苏扬中人, 硕士, 教授级高工, 总工程师, 主持和参与了多项城市雨水径流污染控制、排水管网综合整治科研项目。

E-mail: 13813553172@139.com

收稿日期: 2022-01-20

修回日期: 2022-05-16

(编辑: 衣春敏)