

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.004

源—网—厂—河排水系统多目标实时优化控制方法与实践

韩冠宇¹, 王殿常², 王浩正¹, 邱依婷¹, 黄荣¹, 初翔宇¹,
栗俊涛¹, 王秋懿¹, 冯宇¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 长江经济带生态环境
国家工程研究中心, 北京 100038)

摘要: 由于极端天气和城市化进程的影响,传统的排水系统运行模式在解决城市内涝、合流制溢流等问题时面临严峻挑战。随着人们对水环境和水安全的日益关注,在安全、生态、效益等方面对城市排水系统运行提出了更高要求。城市排水系统多目标实时优化控制通过对控制仿真模型、多目标管理体系、优化算法等技术的研究,可实现设计优化方案、构建优化系统、制定与分析优化策略等功能,为源—网—厂—河一体化运行提供技术支持。介绍了城市排水系统中多目标实时优化控制的具体方法及其在某市的应用效果,并提出实时控制技术应用中面临的新挑战。

关键词: 城市排水系统; 实时控制; 多目标控制; 控制仿真模型; 优化算法

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0021-09

Method and Practice of Multi-objective and Real-time Optimal Control in Urban Drainage System

HAN Guan-yu¹, WANG Dian-chang², WANG Hao-zheng¹, QIU Yi-ting¹,
HUANG Rong,¹ CHU Xiang-yu¹, LI Jun-tao¹, WANG Qiu-yi¹, FENG Yu¹

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074,
China; 2. Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center, Beijing 100038, China)

Abstract: Due to the influence of extreme weather and urbanization process, the traditional operation mode of urban drainage system (UDS) is encountering severe challenges in addressing urban flooding and combined sewer overflow issues. As greater emphasis is placed on water environment and water safety, elevated standards are being set for the operation of UDS with a focus on safety, ecology, and overall benefits. By delving into control-oriented model, multi-objective management system, optimization algorithm and other technologies, it becomes possible to design optimization schemes, establish optimization systems, and determine and analyze optimization strategies for the multi-objective and real-time optimal control in USD. This approach can offer technical support for the integrated operation of UDS including wastewater source, wastewater pipeline network, wastewater treatment plant, and river. This paper introduces the specific method of multi-objective real-time optimization control in UDS, and its application effect in a certain city. The new challenges faced in the application of real-time control (RTC) technology are proposed.

Key words: urban drainage system (UDS); real-time control (RTC); multiple objectives

通信作者: 王殿常 E-mail: wang_dianchang@ctg.com.cn

control; control-oriented model; optimal algorithm

不断加快的城市化进程以及频繁出现的极端天气,给城市排水系统(Urban drainage system, UDS)造成了日益严重的运行压力。传统的排水系统运行调控模式已经不足以应对城市内涝和合流制溢流(CSO)问题,亟需建立更加动态、全局、优化的运行机制。实时控制(Real-time control, RTC)技术在排水系统运行过程中,通过在线监测雨量、液位、流量、水质等重要过程变量,根据监测数据与在线模型对控制策略进行动态调整,并通过阀门、水泵等控制设备对城市排水系统各设施的运行进行实时干预^[1],是一种有效提升城市排水系统可靠性、弹性和可持续性的新兴技术。

实时控制在应用于工程实践前应在模型层面达到高精度、高效率的控制效果。因此,对实时控制技术的研究主要聚焦于模型概化技术和优化控制技术。以线性水库、积分-延迟和马斯京根法^[2-3]等为代表的模型概化方式,能够将排水系统的复杂设施以高度简化的形式呈现^[4],大幅提升模型计算速度,以满足实时控制技术的时间需求。例如,中国市政工程华北设计研究总院有限公司开发的城市水系统控制仿真模型(Simuwater),将机理模型与概化模型耦合,以局部精细化、局部概念化的模拟形式,在保证模型可靠性的基础上提高运算效率,为实时控制技术的实施提供保障。

在模型建立可靠的基础上,优化控制技术是将优化算法运用于城市排水系统的研究,需要充分考虑城市排水系统中源-网-厂-河的边界条件,并结合系统内各设施的转输、收集和处理的**最大能力,制定满足全系统或局部设施控制目标的最优策略,是实时控制技术在城市排水系统中应用的新挑战。

1 实时优化控制实施过程

城市排水系统多目标实时优化控制应在控制仿真模型建立的基础上实施。通过分析系统各设施的匹配性^[5]与现状问题,梳理系统边界条件和限制条件,评估系统的优化潜力,制定合理的实时控制目标;通过选取合适的优化算法,建立目标函数等,构建完整、可行的优化系统;在实时运行/模拟过程中,提取优化系统所需数据,完成实时多控制目标下的策略制定,并将策略返回至运行/模拟系统

中,完成控制时间步长内的实时优化控制,并将优化后的系统表现与原始规则下的系统运行表现对比,分析优化方式的可靠性。多目标实时优化控制实施技术路线见图1。

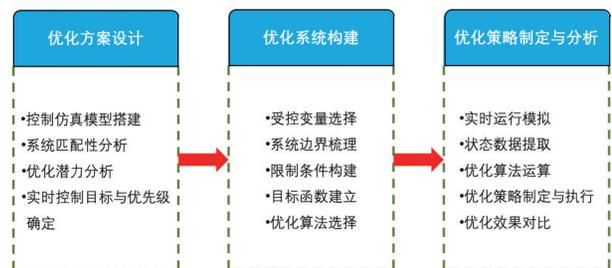


图1 多目标实时优化控制实施技术路线

Fig.1 Implementation scheme of multi-objective real-time optimal control technology

2 优化方案设计

2.1 控制仿真模型搭建与匹配性分析

排水系统实时优化控制技术的应用高度依赖模型,因此模型的模拟精度、运算速度、控制I/O等因素影响其在实时优化中的表现。传统的基于机理的模型,如SWMM模拟精度高,行业接受度较好,但因其对圣维南方程组的求解过程复杂,在运算速度上不具备优势,不适合在大尺度流域的实时控制中应用。

适用于实时优化控制的模型应具备以下条件:

- ① 模型系统中应包含泵站、闸门、堰等实际可控设施^[1];
- ② 对排水系统各要素的建模应有必要的概化,可使用不同的概念模型建模以确保模拟速度^[6];
- ③ 对于运行状态恶劣、管网自身问题较多的系统局部,可采用机理模型建模以确保模拟精度;
- ④ 应具备实时数据传递功能,若采用多模型耦合建模,应确保双向数据可实时动态传递;
- ⑤ 应支持优化算法运用,确保实时控制措施为全局或局部最优。

此类控制仿真模型可在运算速度和模拟精度上实现平衡,为实时优化提供数据支持和时间窗口。国内外常见的控制仿真软件包括Simba、C-soft,以及Simuwater等。

在控制仿真模型建立的基础上,对已建系统开展匹配性评估,预先分析源-网-厂-河的单体设施

匹配性、设施间的匹配性和系统的匹配性,从而分析系统是否具有实时优化控制的空间。由于匹配性较低的设施或子系统往往是系统自身瓶颈,若无改建方案将极大地制约实时控制的优化能力。而匹配性较高的设施或子系统在系统运行中往往没有发挥其最大能力,可作为实时控制的重点优化利用对象。

2.2 优化潜力分析

将匹配性分析结果与排水系统的边界条件、限制条件相结合,综合考虑源-网-厂-河中各设施的可控性,从而分析排水系统的优化潜力。源-网-厂-河城市排水系统常见的优化条件见图2。

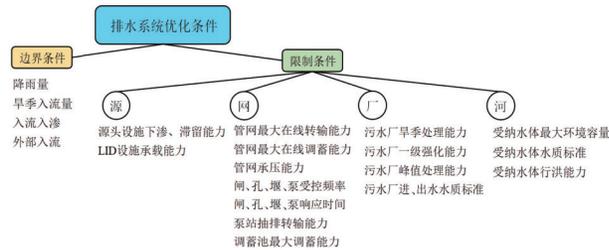


图 2 源-网-厂-河城市排水系统常见优化条件

Fig.2 Common optimization conditions of the UDS including wastewater source, wastewater pipeline network, wastewater treatment plant, and river

优化潜力分析不仅是对现有设施及系统运行的控制潜能进行分析,也需要提出基础性改造方案。基础改造的核心目的是提高控制区域的匹配性,最大程度地挖掘和释放系统潜力。常见的改造方案包括控制区域的连通管设计、执行机构(如泵站、闸阀等)的远程自动控制改造等。

2.3 实时控制目标与优先级制定

实时控制所包含的优化目标众多,其中合流制溢流控制和内涝控制通常为国内外城市排水系统的核心目标。常见的优化控制目标及内容如表1所示。

事实上,在多目标优化控制过程中,各个控制目标之间可能存在矛盾。例如,封闭全部合流制溢流排口尽管可以消除合流制溢流,但是会造成极端的节点内涝;又如不加限制地将雨污水转输至污水处理厂,虽然极大地提升了污水厂的处理能力,但会造成严重的厂前溢流。因此,仅设置某几项控制目标并要求全部实现最优是不合理的,需将多个控制目标结合使用,并为其分配优先级(权重)才能构

成合理的实时控制目标体系。

表 1 源-网-厂-河城市排水系统常见优化控制目标

Tab.1 Common optimization objectives of the UDS including wastewater source, wastewater pipeline network, wastewater treatment plant, and river

目标类型	控制目标	控制内容
水量目标	系统合流制溢流	系统内所有合流制溢流排口累计合流制溢流量
	重点排口合流制溢流	重点合流制排口累计合流制溢流量
	系统内涝量	系统所有节点累计内涝量
	重点区域内涝量	重点区域节点累计内涝量
	指定位置溢流量	为不可避免的溢流选择合适的溢流位置
水质目标	系统污染物排放量	系统排入自然水体中的污染物累积量
	重点排口污染物排放量	重点位置污染物累积排放量和瞬时排放量
	污水厂尾水污染物排放量	污水厂尾水污染物累积排放量和瞬时排放量
设施运行目标	设施最大能力运行	设施的实际使用情况与设计最大值的差距
	设施工况稳定	规定时间内泵站设施运行功率变化/闸门、孔口等设施启闭幅度和频率
	均匀填充	受控设施充满度差异(方差或标准差)
	上、下游优先填充	上、下游受控设施充满度差异(方差或标准差)
成本目标	运行成本	受控运行下,系统各设施的运行成本
	维修成本	受控运行下,系统设施故障等维修成本
	质量成本	为保障系统的运行、排放等行为满足规定要求或因不合规引起损失等而产生的质量成本

3 优化系统构建

3.1 受控变量选择与条件函数构建

在明确源-网-厂-河系统的边界条件、限制条件及优化目标后,需选择与优化目标相关的受控设施。城市排水系统的受控设施通常包括:泵站、智能分流井、调蓄池、可调闸坝等,相应的受控变量可选择水泵启用数量、变频泵功率、分流井分流流量、调蓄池进出水量、闸坝高度等。

条件函数包含边界条件函数和限制条件函数两种,通常是将系统的边界条件和限制条件转化为数学函数的形式,是整个系统在进行优化控制计算时必须满足的条件和遵守的前提。

从结构上看,边界条件函数通常为守恒等式,以系统动态水量平衡为例,形式如下:

$$\sum Q_d + \sum Q_{ind} + \sum Q_{rf} + \sum Q_{ill} + \sum Q_{net} = \sum Q_{tr} + \sum Q_{st} + \sum Q_f + \sum Q_{ov} \quad (1)$$

式中: Q_d 、 Q_{ind} 、 Q_{rf} 、 Q_{ill} 、 Q_{net} 、 Q_{tr} 、 Q_{st} 、 Q_f 、 Q_{ov} 分别为动态的生活污水量、工业污水量、降雨径流量、外水入侵量、净转输量、处理量、调蓄量、内涝量和溢流量。

限制条件函数通常为不等式,以调蓄池排空泵为例,其单位时间内的排空量不得超过下游管网动态可用容积,并且排空泵的实际功率也不得超过额定功率,表达形式如下:

$$Q_p \cdot t_{step} \leq V_{down,avai} \quad (2)$$

$$Q_p \leq Q_{rated} \quad (3)$$

式中: Q_p 、 Q_{rated} 、 t_{step} 、 $V_{down,avai}$ 分别为实际流量、额定流量、时间步长和下游管网可用容积。

3.2 目标函数构建

目标函数是将表1所列的源-网-厂-河系统控制目标转化为可求解的函数形式,求解目标函数的过程通常是求解最值问题的过程。从结构上看,目标函数包含目标表达式和权重,形式如下:

$$\text{Objective}(X) = \sum_{i=1}^m [w_i \times ob_i(X)] \quad (4)$$

式中: X 为受控变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的集合,其中 n 为受控变量个数; $ob_i(X)$ 为第 i 个优化目标; w_i 为第 i 个控制目标的权重; m 为系统的优化目标个数。

如果控制目标涉及不可忽略的水量传播延时,该目标 $ob_i(X)$ 应改写成包含时间 t 的表述 $ob_i[X(t)]$,以描述历史状态对目标值的影响。

在实际应用中,由于不同的控制目标 $ob_i(X)$ 具有不同的量纲和数量级,仅仅依靠权重来区分系统控制目标不能确保优化控制系统制定的控制策略满足预设的优先级要求。例如,由于目标1“系统CSO水量(通常以 10^4 m^3 为单位)”的数量级过大,即便调整权重,也会使目标2“多座调蓄池均匀填充(无量纲,数值小于1)”无法在优化系统中得到足够的表达。因此,需要对式(1)中的优化目标 $ob_i(X)$ 进行归一化处理,得到 $\text{norm_ob}_i(X)$,具体如下:

$$\text{norm_ob}_i(X) = [\text{ob}_i(X) - \min \text{ob}_i(X)] / [\max \text{ob}_i(X) - \min \text{ob}_i(X)] \quad (5)$$

$$\text{Objective}(X) = \sum_{i=1}^m [w_i \times \text{norm_ob}_i(X)] \quad (6)$$

对目标函数进行归一化后,再合理地给每个目标设置相应的权重。通常情况下,每个目标项的权重设定值介于0和1之间,目标权重值总和为1。

3.3 优化算法选择

优化算法相比穷举法、随机法通常是一类更高效的算法,它通过不同的计算方式更快速找到能够达到或接近目标函数的一系列参数集合。因此,优化算法的选择将决定系统的优化速度。在排水系统的实时优化中,按照算法的功能可划分为两类:一类是以遗传算法(GA)和种群动力法(PD)等为代表的纯优化类方法;另一类是以混合逻辑动态法(MLD)和线性二次求解法(LQR)为代表的兼具模拟与优化的方法。

① MLD

MLD是研究连续系统和离散系统之间相互作用的方法。由瑞士科学家提出的MLD建模和控制理论框架可以解决复杂过程的建模、仿真和优化问题。在排水过程研究方面,利用二进制变量和线性不等式的MLD模拟方法对源-网-厂-河系统的降雨径流、水量传输、水量守恒、内涝溢流等众多过程建立描述系统^[7]。采用目标线性化的方式,利用混合线性整型规划(MLP)法可以高效求解MLD排水模型的运行状态以及多周期预测优化问题,是目前排水系统过程模拟优化的重要研究方法。

② LQR

LQR通过求解由状态变量和控制变量构成的目标函数,可得到状态线性反馈的最优控制规则。在LQR系统的设计过程中,需要构建连续的时间-状态-空间数学表达式,用来表示受控系统在控制动作下的状态^[8]。在实际应用中,多变量的LQR方法已经被证明可以作为RTC系统的有效控制方式。Marinaki等^[9]在阐述线性二次控制算法的基础上,研究了其在削减CSO和均匀分配水量方面的应用。

③ PD

PD可以改善雨污水分布不均导致的局部内涝或溢流情况。通过模仿生物种群间的进化过程,种群动力控制器可以很好地分配流量,使系统达到动态平衡的过程。Ramírez-Llanos等^[10]对多调蓄池系统的研究表明,种群动力学控制在调蓄池进水过程中可以根据各调蓄池的剩余蓄水能力,分配流入调

蓄池的流量,结合PID控制法可调节各调蓄池的水位达到动态平衡;在调蓄池排空时,也可根据下游管网最大能力,分配各调蓄池的出流量^[1]。

④ GA

GA模拟种群在自然界的遗传和变异方式,在排水系统实时控制领域使用较为广泛。丹麦哥本哈根排水系统对Lynetten片区和Avedøre片区实施全局实时控制系统升级改造时,采用遗传算法对复杂的目标函数求解,从而为系统各受控位置计算设定值。Rauch等^[11]采用模型预测控制法与遗传算法相结合的实时控制方法,分析了系统CSO控制与受纳水体溶解氧(DO)含量提升之间的关系,发现不同控制目标下最优控制方案的差异性,为多目标的联合控制提出新的思考方向。

优化算法的选择并不是越复杂越好,针对不同排水系统的实际情况,选择合适的优化算法,最高效地达到控制目标,是实时优化控制的核心。同时应注意,优化算法和目标函数等本质上是以数学方式对现实过程的归纳和表达,即使构建了较为合理的控制目标,选择了适用的优化算法,也不能保证制定的优化策略完全符合现实运行逻辑。因此需要设计人员在边界条件、限制条件及目标函数的梳理表达上尽可能贴近客观事实。

4 优化策略制定与分析

数据的提取和传输是优化控制成功实施的关键。对于离线模拟系统,需提取优化所需的模型数据;对于在线控制系统,监测设备需将重点位置的状态数据传输至优化系统。合理地选择模拟(优化)时间步长是在模拟精度和运算、优化速度上实现平衡。优化系统的时间步长一般选取5 min,预测周期为30~60 min,这就要求单步长优化时间不超过90 s,以便留出足够的时间窗口完成调度指令传递、指令执行等过程^[12]。

如需实现排水系统的多周期预测控制,可选取控制步长(或模拟步长)的整数 N 倍作为预测周期,同时受控变量优化值数量相应扩大至 $N \cdot n$ 个。根据未来 N 周期内的系统预测状态,利用算法同时计算 $N \cdot n$ 个变量值,在执行时只执行当前一个步长的 n 个变量值,即考虑未来 N 个时间周期系统状态的前提下,为当前时段制定优化运行方案。这样的方式尽管大幅增加了模拟和优化的计算时长,但所制定

的方案具有全时段(多周期)最优性。实时控制系统模拟、优化时间轴见图3。

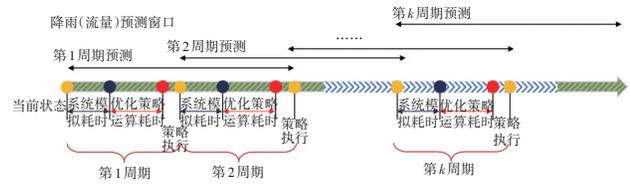


图3 实时控制系统模拟、优化时间轴

Fig.3 Timeline of simulation and optimization in RTC system

优化策略分析应从系统整体与重点位置的表现出发,与优化前方案进行对比,同时应分析优化方案对优化目标的实际实现情况,通过研究优化方案的不足,及时完善限制条件,优化多目标权重分配,提升优化系统的表现。

上述方法适用于具有明确优化控制目标的城市排水系统优化运行控制,在离线优化分析层面具备普遍适用性;在实时控制层面,对于具备较完善的监测系统和一定可靠性的降雨预测数据的实际项目,该方法形成的优化策略能够充分实现预设目标且具备较高的可执行性。

5 排水系统实时优化控制案例

5.1 案例介绍

某市污水厂服务片区面积约900 hm²,为合流制排水系统,包含1座污水处理厂、3座主要调蓄池、4个重点分流井和合流制溢流排口,主要设施的分布情况见图4。

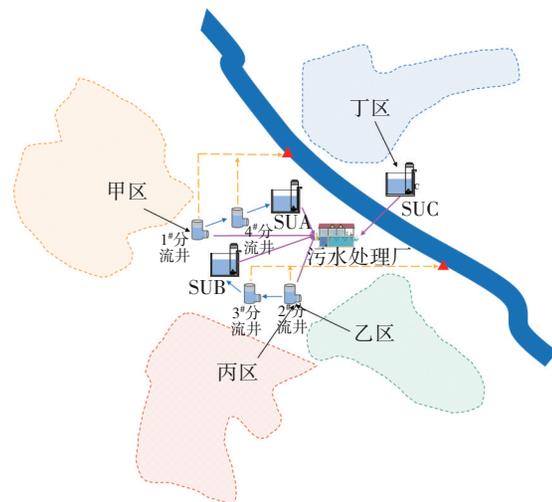


图4 某市排水系统主要设施分布

Fig.4 Distribution of main UDS facilities of the certain city

为了控制合流制溢流,在甲区、乙丙区和丁区分别建立了调蓄池 SUA(15 000 m³)、SUB(15 000 m³)和 SUC(5 500 m³)。在原始设计的运行规则下,旱季污水和雨季未超过管道排放能力的合流污水通过管网直接输送至污水厂。甲、乙、丙区超过管网或污水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。丁区汇水通过一体化泵站进入调蓄池 SUC 后排入污水厂。

根据该片区排水系统的拓扑结构和基础数据,利用 Simuwater 构建上述系统基于概念模型与机理模型耦合的混合模型(见图 5),并与 SWMM 模型进行模拟耗时对比,结果见表 2。

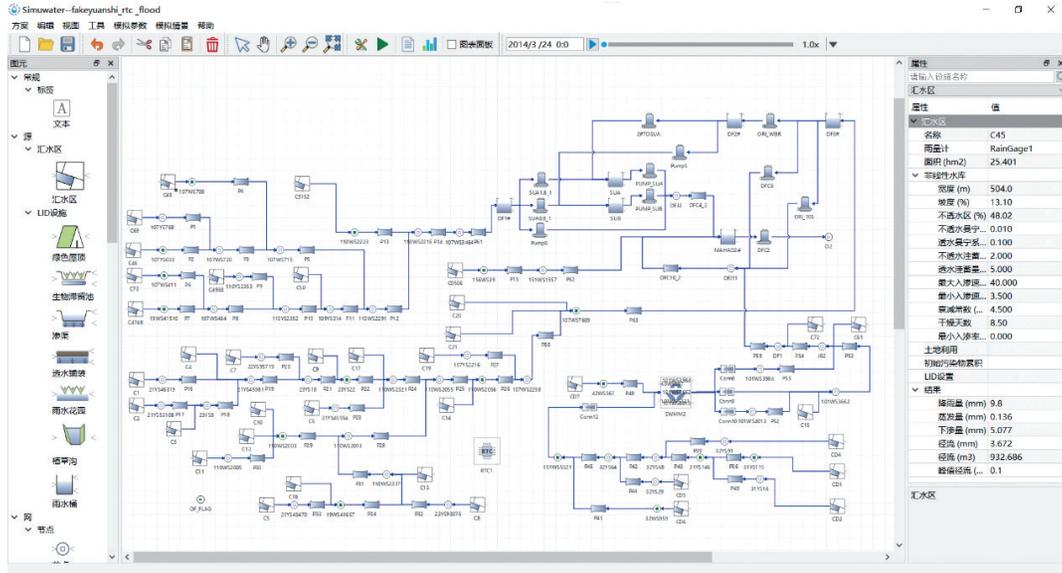


图 5 某市排水系统 Simuwater 模型界面

Fig.5 Simuwater model diagram of the UDS

表 2 Simuwater 模型与 SWMM 模型模拟耗时对比

Tab.2 Time consuming comparison between Simuwater model and SWMM model of the UDS

项目	季度模拟 (18 场降雨)		半年模拟 (25 场降雨)		年度模拟 (41 场降雨)	
	Simuwater	SWMM	Simuwater	SWMM	Simuwater	SWMM
耗时	3 min 1 s	5 min 2 s	5 min 17 s	10 min 21 s	13 min 14 s	17 min 32 s

5.2 优化方案设计

结合控制仿真模型与实地调研情况发现,在小雨(14.4 mm)条件下,调蓄池 SUA 的利用率约为 50%,而调蓄池 SUB 的利用率达到 100%,且发生了池前排口溢流;在大雨(28.5 mm)条件下,调蓄池 SUA 与 SUB 的利用率均达到 100%,但 SUA 在降雨结束后迅速排空,而 SUB 仍在持续出现池前溢流。因此,调蓄池 SUA 蓄水能力与甲区产流情况相匹配,调蓄池 SUB 蓄水能力与乙、丙两区产流情况的匹配性较差。丁区汇水区面积相对较小,调蓄池 SUC 有足够的蓄水能力,且丁区与污水处理厂距离较远,需通过截污干管长距离传输后进入污水厂,因此应将丁区出水作为系统的边界条件之一。此

外,污水厂在降雨期间仍存在剩余处理能力,1#、2#、3#、4#分流井及相关泵站为系统可控区域的重点设施,且匹配性良好。

综合考虑系统边界条件、限制条件(见表 3)和匹配性情况,该系统具备较大的优化控制潜力。

表 3 某市排水系统优化方案边界条件及限制条件

Tab.3 Boundary and constrain conditions of optimization plans of the UDS in the certain city

边界条件	限制条件
降雨分别为 14.4、28.5 mm	污水厂最大处理能力为 1.390 m ³ /s
甲区产流 Q_{in_1}	SUA、SUB 最大排空能力均为 0.521 m ³ /s
乙区产流 Q_{in_2}	1#、2#分流井直排污水厂能力均为 0.462 m ³ /s
丙区产流 Q_{in_3}	1#、2#分流井向调蓄池排水的能力分别为 4.176、4.617 m ³ /s
丁区产流 Q_{in_4}	SUA、SUB 最大调蓄量均为 15 000 m ³

另外,选择 CSO 削减为核心控制目标,污水厂处理能力、调蓄池均匀填充和排空泵站工况稳定作为次级控制目标进行实时优化控制设计。

5.3 优化系统构建

本案例中的排水系统包括诸多边界条件和限

制条件,涉及多个智能分流井和排空泵站的流量分配,同时控制目标中包含均匀填充等非线性化控制目标,因此宜选用遗传算法作为调度策略的优化计算方法。根据对该排水系统的分析,选取5个受控设施的9个流量作为受控变量,并构建受控区域相应的边界条件和限制条件函数,如表4所示。

表 4 某市排水系统受控区域受控变量及条件函数

Tab.4 Condition functions and controlled variables of the controlled area of the UDS in the certain city

受控设施	受控流量		边界条件函数	限制条件函数
1# 分流井	直排污水厂	x_1	$x_1+x_2+x_3 = Q_{in_1}$	$0 \leq x_1 \leq 0.462$ $0 \leq x_2 \leq 4.176$
	排向SUA	x_2		
	排向溢流口	x_3		
2# 分流井	直排污水厂	x_4	$x_4+x_5+x_6 = Q_{in_2}+Q_{in_3}$	$0 \leq x_4 \leq 0.462$ $0 \leq x_5 \leq 4.617$
	排向SUB	x_5		
	排向溢流口	x_6		
SUA 调蓄池	排空至污水处理厂	x_7		$0 \leq x_7 \leq 0.521$ $0 \leq (x_2 - x_7) \cdot \Delta t + V_{SUA} \leq 15\ 000$
SUB 调蓄池	排空至污水处理厂	x_8		$0 \leq x_8 \leq 0.521$ $0 \leq (x_5 - x_8) \cdot \Delta t + V_{SUB} \leq 15\ 000$
污水厂	污水厂处理水量	x_9		$0 \leq x_9 \leq 1.39$

为了进一步探索不同的控制目标以及权重体系对系统整体表现的影响,选取不同的控制目标权重并依次构建目标函数,形成不同的优化方案,目标权重分配如表5所示。

表 5 某市排水系统受控区域目标函数及权重分配

Tab.5 Objective functions and distribution of weighting values of the controlled area of the UDS in the certain city

项目	CSO 削减权重 w_1	污水厂利用率权重 w_2	调蓄池均匀填充权重 w_3	排空泵站工况稳定权重 w_4
优化方案 1	1	0	0	0
优化方案 2	1/2	1/2	0	0
优化方案 3	5/11	5/11	1/11	0
优化方案 4	1/3	1/3	1/3	0
优化方案 5	5/16	5/16	5/16	1/16
优化方案 6	1/4	1/4	1/4	1/4

注: 标准形式的权重分配为各目标权重之和为1,实际构建可等比例放大各目标权重,不影响优化结果。

5.4 优化策略制定与分析

完成优化方案设计及优化系统构建后,选取 14.4 mm 和 28.5 mm 两场降雨作为研究案例,分别模拟和分析原始方案、优化方案 1~6 的系统运行过

程,结果如表 6、7 所示。

表 6 14.4 mm 降雨下原始方案及优化方案效果

Tab.6 Performance of different control plans during 14.4 mm rainfall event

项目	CSO 削减量/ m^3	CSO 削减比例/%	污水厂增加处理量/ m^3	污水厂处理量增加比例/%	污水厂溢流量/ m^3
原始方案					13 002
优化方案 1	12 407	56.49	-8 724	-0.05	<100
优化方案 2	19 014	86.56	19 005	0.10	<100
优化方案 3	19 011	86.55	19 001	0.10	<100
优化方案 4	19 000	86.50	18 990	0.10	<100
优化方案 5	18 672	85.01	18 663	0.10	<100
优化方案 6	9 632	43.85	8 955	0.05	<100

表 7 28.5 mm 降雨下原始方案及优化方案效果

Tab.7 Performance of different control plans during 28.5 mm rainfall event

项目	CSO 削减量/ m^3	CSO 削减比例/%	污水厂增加处理量/ m^3	污水厂处理量增加比例/%	污水厂溢流量/ m^3
原始方案					20 240
优化方案 1	3 424	2.02	-10 739	-1.92	<1 000
优化方案 2	16 100	9.48	16 988	3.03	<1 000
优化方案 3	16 092	9.48	16 980	3.03	<1 000
优化方案 4	16 065	9.46	16 953	3.02	<1 000
优化方案 5	7 126	14.40	7 391	1.32	<1 000
优化方案 6	7 712	4.55	8 427	1.51	<1 000

由表 6、7 可知,以系统溢流为单一控制目标(优化方案 1)的情况下,系统溢流削减量明显低于复合控制目标体系,并且污水厂处理水量不增反降,浪费了系统的处理能力。在同时考虑污水厂最大处理能力(优化方案 2~6)的情况下,系统溢流削减量和污水处理量增加明显,达到了预期的控制效果。以 28.5 mm 降雨为例,不同优化方案对调蓄池容积和排空泵流量的影响如图 6 所示。由图 6 可知,调蓄池均匀填充的目标权重变化(优化方案 3 和 4)均起到了平衡调蓄容积的作用,但对系统总体模拟的表现影响不大。而调蓄池排空泵稳定运行的目标权重变化(优化方案 5 和 6)却对泵站运行和系统表现具有明显影响,该权重增大在一定程度上提升了系统溢流量削减和污水厂处理量的增加,与优化方案 2~4 相比,由于考虑了泵站的平稳运行,对溢流削减和污水厂最大处理的贡献会相对减小。

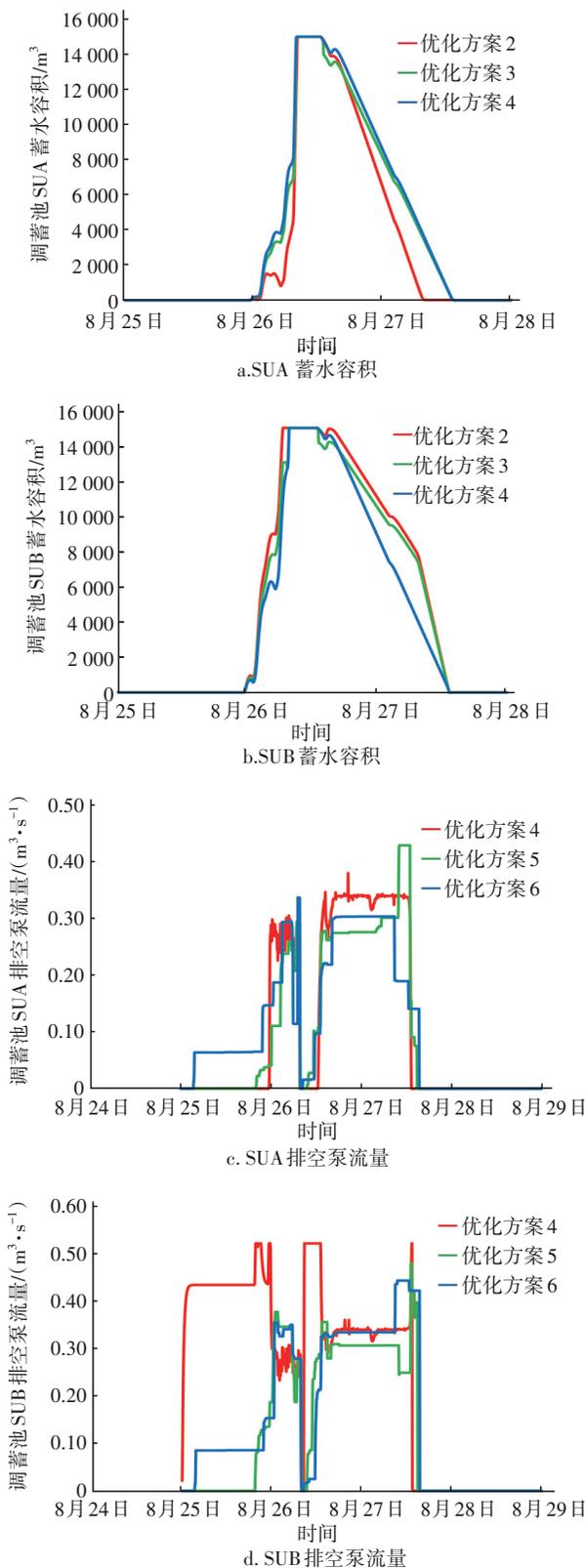


图6 28.5 mm降雨下不同优化方案对调蓄池的影响

Fig.6 Impacts of different optimization plans on storage tanks during 28.5 mm rainfall event

综合上述结果,单一溢流削减目标的优化效果

明显劣于综合控制目标体系。以溢流控制目标为基准,增加污水厂处理量的目标可促进系统的溢流削减,表明二者为正相关控制目标;调蓄容积平衡的目标可促使水量平衡分配,尽管对溢流削减有一定的负面影响,但从长远角度看则有利于缓解系统压力,减小系统风险;设施稳定运行的目标显著影响溢流控制表现,为负相关控制目标,但对于真实泵站的运行管理有着切实意义。因此,应通过长期的研究和实践制定更合适的目标权重,不断修正优化方案以平衡各目标表现,最终实现最佳的多目标控制策略。

6 结语

排水系统的实时优化控制实施涉及现状分析、优化方案设计、优化系统构建和优化效果评估等一系列工作。对于具有复杂拓扑关系和大量受控设施的排水系统,模型的运算高效性、算法适用性、目标合理性对最终的系统表现具有决定性影响。同时,合理的多控制目标体系尤其是目标表达方式和权重分配对系统表现的影响也不可忽视。

大跨度的受控区域往往涉及不可忽略的水量传播延时和叠加(削峰)效应,实际调度上也存在管理层级多、指令不统一的情况。本案例的丁区距离受控核心区较远,且区域内调蓄设施能力有限,因此将其作为受控区域的边界条件,不纳入优化运行控制中。如需对其进行控制,应将全系统模型嵌入优化的适应度函数中,进行全局优化控制分析,这将对模型的快速、准确模拟提出更高的要求,机理与概念模型耦合的模拟方法将成为必由之路。

计算机制定的优化控制策略在实际执行时,需要结合设施实时工况,将策略转化为安全限度内可执行的最佳拟合指令,再下发到执行器,因此会面临更多复杂的问题,如受控过程振荡、自控设备反应不灵敏等。制定更丰富、合理的控制目标体系尽管能有效减弱这些问题的负面影响,但更理想的方式是通过一体化的软硬件设备实现数据的实时管理、优化策略的精确制定以及系统指令的精准执行。

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] BOLEA Y, PUIG V, GRAU A, *et al.* Discussion on muskingum versus integrator-delay models for control objectives [J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2014, 2014:197907.
- [3] GARCIA 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] SCHÜTZE M. Integrated Simulation and Optimum Control of the Urban Wastewater System [D]. UK: Imperial College London, 1998.
- [5] 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.* Evaluation methods of drainage system matching from the perspective of watershed management [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(6): 24-30 (in Chinese).
- [6] SHISHEGAR S, DUCHESNE S, PELLETIER G. Optimization methods applied to stormwater management problems: a review [J]. *Urban Water Journal*, 2018, 15(3/4): 276-286.
- [7] BIXBY R E. Solving real-world linear programs: a decade and more of progress [J]. *Operations Research*, 2002, 50(1):3-15.
- [8] STINSON M. Benefits of Sewerage System Real-time Control [M]. USA:EWRI, 2005.
- [9] MARINAKI M, PAPAGEORGIU M. Application of linear-quadratic regulators to sewer network control [C]// Technical University of Crete. Proceedings of Pumps, Electromechanical Devices and Systems Applied to Urban Water Management Conference. Valencia: Technical University of Crete, 2003:879-886.
- [10] RAMÍREZ-LLANOS E, QUIJANO N. A population dynamics approach for the water distribution problem [J]. *International Journal of Control*, 2010, 83(9): 1947-1964.
- [11] RAUCH W, HARREMOES P. Genetic algorithms in real time control applied to minimize transient pollution from urban wastewater systems [J]. *Water Research*, 1999, 33(5): 1265-1277.
- [12] CAMPISANO A, CABOT P J, MUSCHALLA D, *et al.* Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems [J]. *Urban Water Journal*, 2013, 10(5): 300-311.

作者简介:韩冠宇(1993-),男,辽宁沈阳人,硕士,工程师,从事城市排水系统实时控制技术研究及智慧水务系统设计工作。

E-mail:hanguanyu9301@126.com

收稿日期:2021-03-19

修回日期:2021-05-20

(编辑:丁彩娟)

全面推进水生态环境保护和修复
打造水清岸绿、河畅湖美的美丽家园