

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.02.018

面向排水系统实际运行场景的控制策略优化方法

许光明¹, 戴俊龙², 曲亚纯¹, 谢丽霞³, 刘雨桐⁴, 王境怡⁴

(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. 艾默生科技资源<西安>有限公司, 陕西 西安 710076; 4. 清苏智慧水务科技<苏州>有限

责任公司, 江苏 苏州 215163)

摘 要: 排水系统实时控制能够有效改善系统性能,但是该领域大部分研究是基于模型仿真而非实际工厂应用。提出了面向排水系统实际运行场景的控制策略整体框架,并在此框架基础上给出了控制系统升级流程。选取常州江边污水厂一、二级主要泵站片区作为案例研究区域,开展了控制策略现状分析、优化设计、建模和策略决策、控制系统改造、现场测试调试等工作。结果表明,采用该控制方法能够实现排水系统实时在线控制并满足实际运行的需求。

关键词: 排水系统; 运行场景; 实时控制; 优化控制; 现场测试

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)02-0100-09

Control Optimization Methods for Drainage System Real-time Control in Actual Scenario

XU Guang-ming¹, DAI Jun-long², QU Ya-chun¹, XIE Li-xia³, LIU Yu-tong⁴,
WANG Jing-yi⁴

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

Abstract: Real-time control of drainage system can effectively improve system performance, but most of the research in this field is based on model simulation rather than practical plant application. In this study, an overall framework of control strategy oriented to the real-time operation scenario of drainage system is proposed, and the control system upgrading process is also applicated based on this framework. We selected the multiple pumping stations of Changzhou Jiangbian wastewater treatment plant as the case area, and carried out the control strategy analysis, optimization design, modeling and strategy decision, control system modification, field test and debugging. The result shows that this control method can achieve the drainage system real-time control in actual scenario.

Key words: drainage system; actual scenario; real-time control; control optimization; on-site tuning

排水系统实时控制(RTC)是一个全世界广泛研究的课题^[1]。经过合理设计的控制策略能够显著减少排水系统内涝风险、减少污水冒溢、提升排水系统韧性等^[2]。但是,国内外大部分的控制策略研究都

是基于模型^[3],鲜有基于排水系统实际运行场景,主要原因在于实际排水系统需要一套覆盖全工况、稳定可靠、性价比高的控制策略,并且需要现场软硬件的支撑,包括监测仪表、控制系统和受控设备的改

造。实际上,基于模型的控制策略研究只是第一步,后续还需要继续推进控制策略在实际运行场景下的调试测试,才能够得到具有应用价值的控制策略。

介绍了如何面向排水系统实际运行场景进行策略优化并最终实施的一套方法,并基于平原河网地区典型多级泵站提升系统进行方法应用和案例示范。

1 模型及系统

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、全世界应用最广泛的排水过程模型之一。SWMM基于一维圣维南方程和质量守恒等方程,提供包括排水户排污水、降雨、地表径流、管道雨污水输送、关键设施操作、污水处理等过程的水动力水质动态变化结果。SWMM自带RTC Rule模块,允许用户编辑控制规则,实现依据状态变量(相当于实际监测变量)的条件调整控制变量(泵/闸的启停/开度等)的取值。在SWMM的计算引擎中,微分方程每一次迭代计算时,都要扫描控制规则,判断规则的状态条件是否满足要求,如果满足要求,则控制变量获得规则赋予的新的取值,如果不满足则控制变量保持原值。

1.2 OVATION控制系统

OVATION是美国艾默生公司推出的、在全世界范围得到广泛应用的控制系统。OVATION控制系统以其分布式的功能设计、简化的软硬件配置、冗余配置的设计理念、直观丰富的诊断技术、简便易用的组态工具,以及灵活的扩展能力等优势,得到了包括电力、新能源、水/水处理、钢铁等各个行业用户的高度认可。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。控制逻辑使用虚拟控制器实现和真实控制器完全一样的算法模块和控制效果,由此可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,包括但不限于PID、DMC、MPC、模糊控制、神经网络等,能够方便地支撑用户定义监测变量和控制变量之间复杂的控制逻辑。

1.3 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,采用机理模型与概化模型耦合的模拟形式以及高精度的线性化、非线性化模拟方法,主要应用于汇水区、LID、城市雨污水管道、水体、泵站、调蓄池等水循环系统的连续动态仿真模拟,可实现源-网-厂-河联合模拟,可模拟降雨径流、面源冲刷、管网水力传输、污染物降解等,可设置控制规则,通过识别排水系统节点或链接状态变量,动态调整水泵、堰等控制设施启闭。Simuwater的实时控制功能可根据所选状态参数、优化变量设定的限制条件和目标方程,利用先进成熟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,实现设施级和系统级的优化调度控制目标。

2 方法

2.1 控制策略优化流程

排水系统实际运行工况条件下,可以按照以下流程对控制策略进行优化:

① 补充必要在线监测仪表,对系统动态过程开展监测。

在排水系统的关键节点,包括泵站、截流井、重要汇水点、易涝点等,布设排水管道在线液位计、在线流量计、在线水质仪表。如果涉及雨季控制,则应部署一定密度的雨量计。

② 提炼评价指标和控制目标。

从系统运行管理的角度,提出实时控制主要保障的目标,以及会对控制策略的选择造成影响的指标。区分目标和指标是因为控制问题往往是一个多目标问题,但是控制策略的设计往往只能从少量目标出发,考虑过多彼此可能矛盾的目标难以推进策略设计工作。控制目标包括:污水旱季不冒溢、减少雨季内涝、减少溢流污染等。评价指标包括:建设改造成本、仪控设备失效风险等^[4]。

③ 进行在线监测数据分析,挖掘以往控制策略不足。

基于监测数据,估算上述控制目标和评价指标,分析以往控制策略的表现。

④ 提出新的控制思路。

设计新的控制逻辑及全局优化策略。

⑤ 评估全局优化控制策略。

根据提出的控制目标和评价指标,评价所有的候选策略,并选择最终应用的策略(全局优化策略)。如果策略较为复杂,可以构建机理模型对策略进行模拟评估^[5]。

⑥ 调整实际监控系统,构建新控制策略的测试条件。

监测仪表、PLC、上位机监控软件都应根据优化控制策略的要求进行(临时)改造。

⑦ 开展全局优化控制策略的现场调试和测试。

在实际环境中应用优化控制策略,结合控制逻辑在线运行,获得真实的在线监测数据,基于实际数据调整策略及逻辑参数并验证策略效果。

⑧ 启用优化控制策略。

将旧控制系统切换至新控制系统,并长期维护和使用新系统。

2.2 控制策略整体框架

排水系统是一个运行工况较多的系统,包括旱季低水位运行、汛期安全运行、雨后快速排空等各类运行工况。每一种工况下都有不同的控制目标以及与之匹配的控制逻辑,从而构成一整套完整的控制策略。

整体控制策略框架如图1所示。

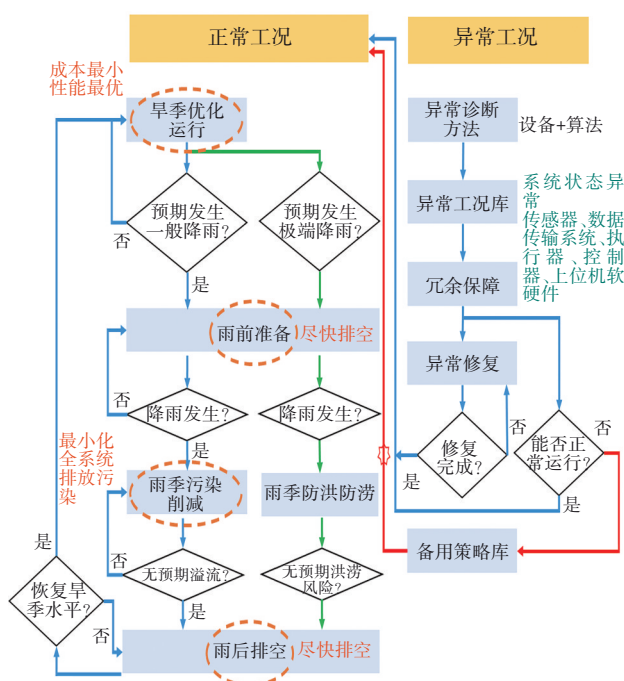


图1 整体控制策略框架

Fig.1 Overall control strategy framework

在每个工况下,都需要针对其相应的控制目标建立对应的全局优化算法,该算法给出了当前目标下各设备的最优设定值和与之匹配的控制逻辑以增强系统的鲁棒性,避免由于输入增益过大而导致输出震荡。

2.3 控制系统升级流程

应用优化控制策略往往需要对控制系统进行升级,内容包括在线监测仪表添置和改造、PLC的修改或更新、上位机系统的修改或更新。本研究提出一种成本最小化的升级流程。首先,评估所提出的优化控制策略所需的详细的输入点、输出点、控制逻辑。然后,分析现有的监控系统,主要是上位机组态软件、PLC的控制器和I/O点配置、现有自控工程服务商能否满足需求。如果可以满足需求,则在原监控系统上增加新的优化控制逻辑,并实现与原控制模式的手动切换。如果只是控制器性能或I/O点配置无法满足,则改造控制器或I/O点即可。如果现状控制系统无法支撑如此复杂的控制逻辑组态,则需要更换组态软件(和控制器)。

另外,这种升级也不是一蹴而就的,可能需要经过模拟评估、现场测试、现场应用等阶段。控制系统的升级可以逐个阶段完善(见图2)。

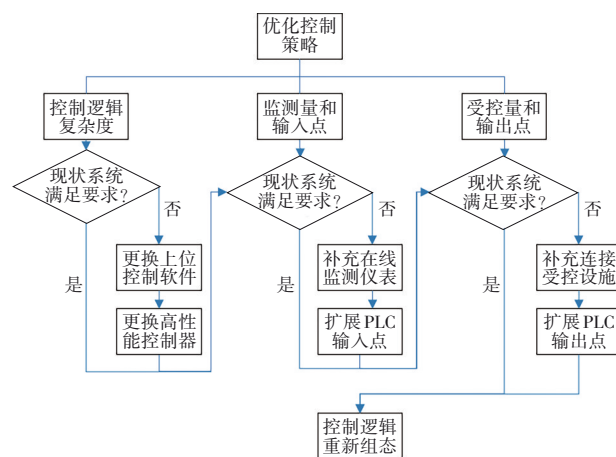


图2 控制系统逐步升级流程

Fig.2 Control system gradual upgrading process

以只需要更换组态软件为例(原组态软件无法支撑所提出的优化控制策略),模拟评估阶段只需要采购一套上位机,实现优化控制逻辑组态,通过OPC通信的方式与机理模型连接,将模型视作真实系统进行模拟评估。现场测试阶段可将控制系统与本地PLC控制器的输入、输出点进行读写,将原有监控系统并联且实现手动切换。现场应用阶段

为了避免两套控制系统带来的不稳定性,应用新控制系统取代旧监控系统。

3 结果分析

3.1 案例系统与现状分析

选取由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)所组成的排水系统作为案例研究区域。基于历史监测数据,分析案例区域控制效果发现:在降雨过程中,上下游泵站水量积累与液位变化过程不平衡。以2019年5月25日—27日液位对比情况为例(见图3),在时段a内,王家塘泵站的液位显著下降,而下游汤家桥泵站、江边污水厂的液位显著上升;在时段b内,汤家桥泵站的液位显著下降,而王家塘泵站、江边污水厂的液位明显上升。可见原有控制策略利用开环控制,对于排水系统强耦合、大时滞、非线性和不确定性等问题没有很好地解决,难以应对复杂的降雨条件。

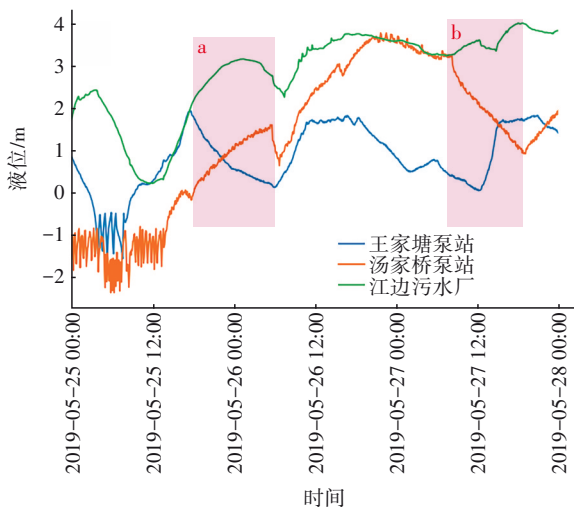


图3 案例区以往控制策略表现分析

Fig.3 Performance analysis of previous control strategies in case area

3.2 策略设计与建模评估

采用全工况控制策略框架。针对不同的季节条件以及当前每个泵站的液位情况、污水厂的接收能力,以及在不同季节下不同的控制目标,制定相对应的控制策略。

① 在旱季条件下,需要实现的控制目标是低水位运行且尽可能降低泵站启停频次及综合能耗,故采用基于全局优化的PID反馈控制。该策略在每个控制周期估计每个排水片区的充满度,计算整个

片区的最优充满度并推断每个片区的控制最优液位设定值,此设定值与实际液位经过PID控制器运算后得到泵站流量设定值,依据流量设定值通过智能分配控制器,结合模型预测来水量及泵站前池液位增速,综合计算并调整泵站启泵台数以及变频泵的速率,以此实现最小化泵站启停次数及液位稳定控制的双重控制目标。此外,根据旱季节能控制的思想,在以上控制策略基础上,根据管网及泵站前池的高程分析适当加入液位死区,即若某一泵站超出了低水位,则不进行泵的启停,直到被控液位达到高液位时进行启泵。核心控制逻辑如图4所示。

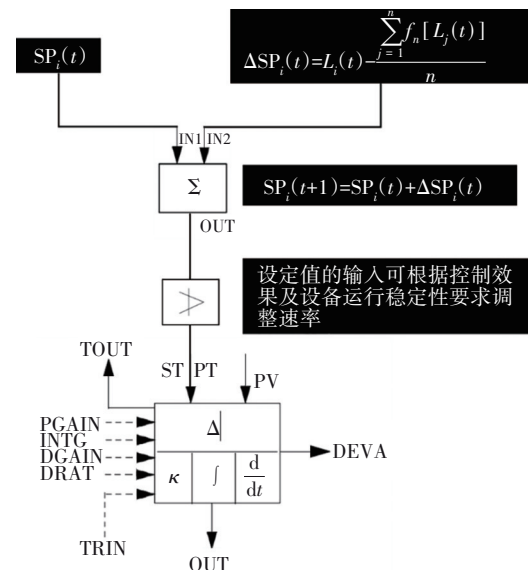


图4 旱季基于全局优化的PID反馈控制

Fig.4 PID feedback control based on global optimization in dry season

$SP_i(t)$ 为目标泵站在 t 时刻的目标液位设定值; $\Delta SP_i(t)$ 为 t 时刻全局优化算法的单步长计算结果,输出为目标泵站的区域可调蓄空间与全局可调蓄

空间平均值的差; $L_j(nt) = \frac{\sum_{j=1}^n f_n[L_j(nt)]}{n}$ 为目标函数,

此处 $L_j(nt)$ 为目标区域的可调蓄空间, $\frac{\sum_{j=1}^n f_n[L_j(nt)]}{n}$ 为 n 个子系统的平均可调蓄空间。

② 在雨季条件下,需要实现的控制目标是各个泵站平均分配水量并且不产生冒溢,以此控制目标为条件,在PID反馈控制策略的基础上增加模糊算法及模型预测前馈增益,可在液位激增的前提

下,提高系统的响应速度,避免冒溢发生。该策略在旱季策略的基础上,将模型实时计算的排水系统上游汇流节点的模型预测流量作为控制器前馈增益。由于排水系统存在大时滞特性,且每个泵站进水量的实时测量往往不准确,这样一定程度上也对控制的准确性造成了影响,故提出了每个泵站上游汇流节点流量的软测量技术,并将这部分水量结合水量变化速率、泵站液位、泵站液位变化速率进行综合计算,作为液位控制的前馈量。当上游来水量增加时,下游提前增加排水量,从而更快速地实现目标液位的控制,在此基础上利用模糊PID控制器,并针对不同的上游汇流节点的模型预测流量及泵站液位变化情况建立隶属度分区。当上游汇流节点的模型预测流量或泵站液位激增时,快速调节PID参数及前馈增益以提高系统响应速度,避免冒溢现象的发生。最终通过前反馈模糊PID控制器(见图5)计算出每个泵站的流量设定值,再依据此流量设定值以及实际流量实现泵的启停和变频泵的变频控制。

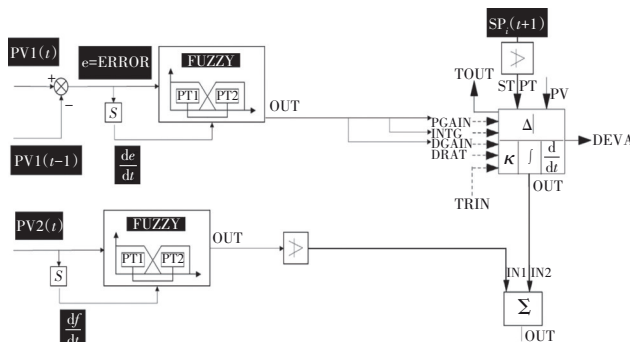


图5 雨季模糊PID前反馈控制

Fig.5 Fuzzy PID forward feedback control in rainy season

全局优化目标液位计算基本思路见图6。

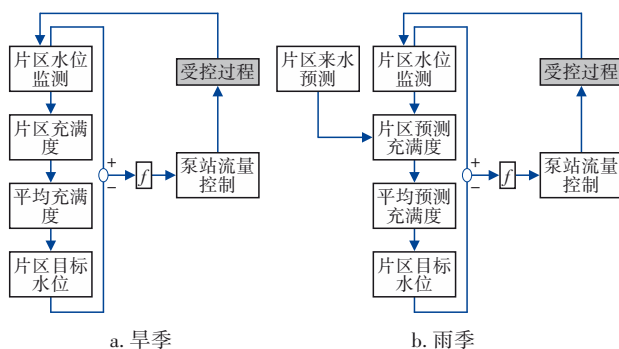


图6 旱季和雨季全局优化目标液位计算基本思路

Fig.6 Basic idea of global optimization target level calculation in dry and rainy season

其中 $SP_i(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻的全局优化设定值, $PV1(t)$ 为 t 时刻目标泵站测量液位, $PV1(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻目标泵站的液位实际设定值, $\frac{de}{dt}$ 为液位差的变化速率。 $PV2(t)$ 为 t 时刻上游汇流节点的模型预测流量值, $\frac{df}{dt}$ 为该流量的变化速率。

③ 构建排水系统机理模型,模拟上下游水量传递过程。

根据常州市排水系统的实际情况,构建包含污水管网、雨水管网、合流管网、泵站、SWMM 等的模型。在模型构建完成后,结合历史降雨数据和排水系统监测数据,对系统模型的可靠性进行模拟验证,通过对比结果不断调整模型参数,使之能够准确可靠地反映系统运行状态。

模型重点关注受控泵站前池的入流量与上游管网节点出流量变化。模型通过率定和验证达到旱季污水总量模拟误差不超过 3%,旱季污水动态模拟纳什效率系数达到 0.57,雨季动态模拟纳什效率系数达到 0.35。

④ 识别上下游流量响应关系,形成模型预测响应函数。

根据模型模拟短周期的排水系统运行状态,记录受控泵站前池的入流量与上游管网节点出流量的时间序列;通过数学算法归纳出上下游流量的响应关系并进行数学验证;通过增加偏置项修订比例项,进一步完善响应关系的可靠性与准确性,形成可信度较高的泵站入流量模拟预测响应函数。

⑤ 融入控制仿真模型,形成模拟-预测-控制体系。

依靠 Simuwater 的快速模拟运算能力,利用获得的泵站入流量模拟预测响应函数构建案例区全局优化仿真模型,最终通过优化算法,根据目标函数实时计算各泵站的全局优化液位设定值。在线运行过程中分析控制系统动态性能——超调量、稳态误差、延迟时间、峰值时间等,由此来调整在线模型过程参数。

3.3 难点分析

以上策略中对上游来水量的计算和各个泵站液位设定值的分配是本研究的重难点之一。根据上游泵站的出水量、支流扰动、重力流、污水黏稠度、管道曼宁系数、距离、坡降及流行时间,通过在

线实时模型计算得到每个泵站预期的进水量。根据充满度函数以及片区的溢流风险系数,通过在线实时模型计算得到每个泵站的液位设定值。每个泵站的预期进水量及液位设定值通过 OPC 通信的方式传给 OVATION 控制系统,并用于实现雨季的液位精确、快速控制。

以上旱雨季不同的控制策略在实际模拟仿真的过程中也发现了一些问题,故在以上控制策略的基础上,增加了以下控制策略:

① 当液位在不同位置时,由于存储空间的不同,液位会出现不同程度的不稳定。对于此问题,提出了根据液位的不同,利用不同的过程控制参数,以实现液位的稳定控制。在评估控制策略时,利用 Simuwater 和控制系统通信实现策略的仿真和验证,建立了不同液位下的控制参数模糊规则,并经过反复的验证和调整,最终实现在真实系统中的应用;

② 当所有泵站液位和污水处理厂前池液位均处于高液位时,计算出一个稳定工况,使得每个泵站都达到自身的最大出水能力,保证泵站不冒溢;

③ 由于现场对每个泵站均有出水量的约束,故对控制系统计算出的流量设定值和限制出水量进行比较取小,保证系统的安全性;

④ 为了保证泵站的安全性(泵站不能完全排空),当泵站液位处于低液位设定时,出于保护目的停止所有泵;

⑤ 由于系统为时滞非最小相位系统,且存在一些难以避免的模型失配问题,为使系统稳定可控,需要在调节过程中对前馈步长环节进行自适应调整, $u(k)$ 为前馈作用对系统状态的控制影响。

$$u(k) = u(k-1) + K_u w_i(k) \Delta e(k) \quad (1)$$

式中: K_u 为自适应控制的增益系数,直接影响被控系统的响应值,一般情况下, K_u 值过大将使系统的超调量增大,太小则使系统过渡时间加长,可以先确定一个初始 K_u 值,在调参阶段不断修正; $\Delta e(k)$ 为期望值与实际输出值的偏差; $w_i(k)$ 为 $\Delta e(k)$ 的加权系数,系统通过加权系数的调整来实现自适应、自学习功能。

3.4 现场测试

根据控制系统升级流程,案例区域原先采用

INTOUCH 上位机软件,难以实现优化控制逻辑。此次选用艾默生过程控制的 OVATION 控制系统,其所属的虚拟控制器及其强大的算法库降低了原控制系统的改造成本及硬件成本,且可以实现和真实控制器完全一样的控制功能。在现场测试阶段,将所涉及的 I/O 点与 OVATION 进行通信,在 OVATION 虚拟控制器中进行优化控制逻辑的组态,并在旧控制系统中增加手动控制的点位。在手动控制时利用原有控制系统的控制策略,新控制系统跟踪旧控制系统的控制;当切换到自动控制时,旧控制系统接收新控制系统的控制指令,从而实现新旧控制系统控制策略的无扰切换。另外,当通信异常时,新控制系统自动切换到手动控制,保证泵站的正常控制。

案例区域系统连接关系如图7所示。

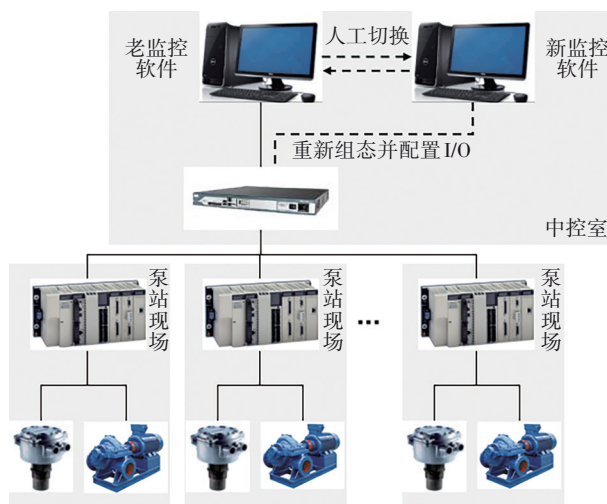


图7 案例区域控制系统连接关系示意

Fig.7 Schematic diagram of connection relationship of case area control system

在经过通信测试、逻辑测试和智能控制算法调试后,于2021年12月1日09:00—12月9日08:00期间进行智能控制系统的连续运行测试。连续运行时间共191 h,未发生降雨。

针对该案例全局优化算法的目标函数为:各泵站的液位超过临界液位的总时长最小,即:

$$f(x) = \sum_i \left[w_i \int_0^T \varepsilon [h_i(t) - H_{c,i}] dt \right] \quad (2)$$

式中: $h_i(t)$ 为 t 时刻泵站 i 的液位; $H_{c,i}$ 为泵站 i 的临界液位值; ε 为阶跃函数; w_i 为泵站 i 的权重,根据泵站的重要性确定其取值; T 为统计时段的总

时长。

各厂站液位和流量变化如图8所示。

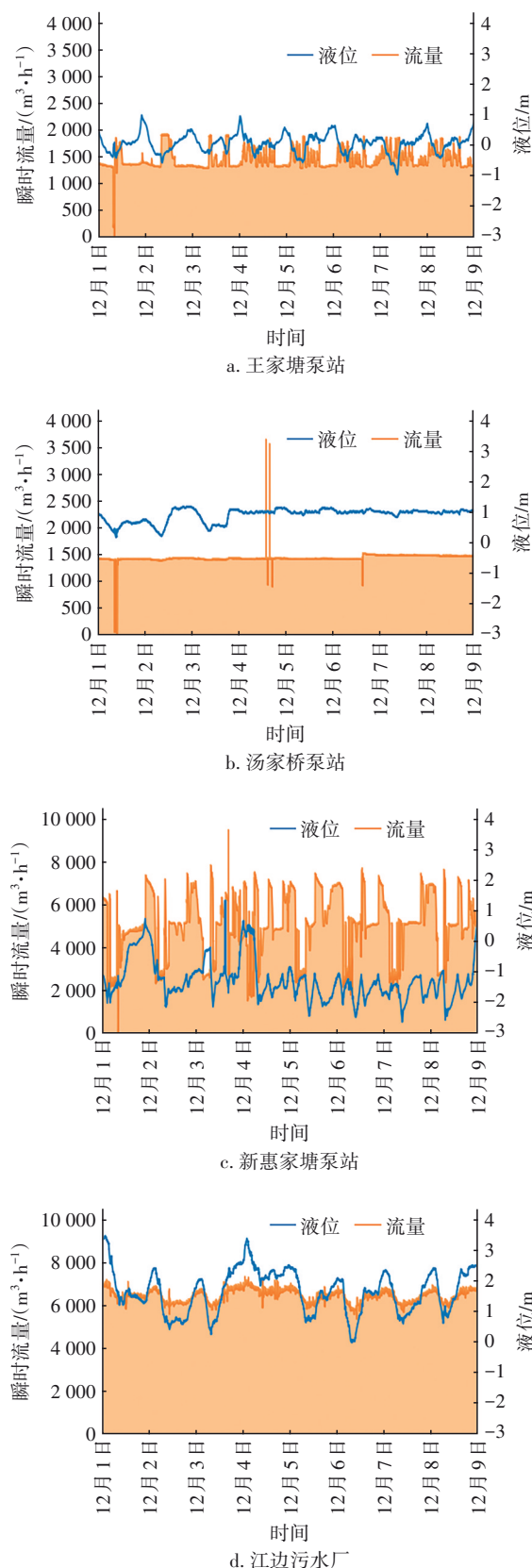


图8 各厂站液位和流量变化

Fig.8 Change of liquid level and flow of the WWTP and pump stations

连续运行期间,王家塘泵站的液位整体较稳定,大部分时间为 $-0.5 \sim 0.5$ m(青标)。

王家塘泵站的流量调节依据主要是下游汤家桥泵站的液位。当汤家桥泵站液位超过1 m(青标)的临界目标时,王家塘泵站将会减小流量到变频泵最低流量,直至汤家桥泵站液位下降。通过王家塘泵站的流量调节,可以将汤家桥泵站的液位始终维持在1 m左右,从而实现王家塘泵站和汤家桥泵站的液位平衡,同时也保证了两个泵站的低水位运行。

大部分情况下,新惠家塘泵站的液位在 $-2.5 \sim -0.5$ m范围内变动(时间占比约82%)。

导致新惠家塘泵站液位上升的原因主要是下游江边污水厂的液位偏高(超过限流液位2.5 m),为了平衡污水厂的液位,触发新惠家塘泵站限流,导致新惠家塘泵站流量减小、液位上升。

老惠家塘泵站的液位大部分在 $-0.5 \sim 0.7$ m范围内变动(时间占比为83%)。老惠家塘泵站液位上升的原因主要有两个:一方面,上游黄河路泵站来水量较大,根据旱季的开泵台数限制,老惠家塘

泵站的开泵台数保持在 2~3 台,其流量范围为 2 960~4 000 m³/h,该流量和黄河路泵站来水量相当(其平均值为 2 940 m³/h,最大值为 3 990 m³/h);另一方面,老惠家塘泵站自流片区有约 400 m³/h 的入流量,当黄河路泵站来水保持在高流量时,老惠家塘泵站的输送能力不足(在开泵台数限制为 3 台的情况下),因此液位上升。

统计运行期间的液位情况,具体结果如图 9 所示。

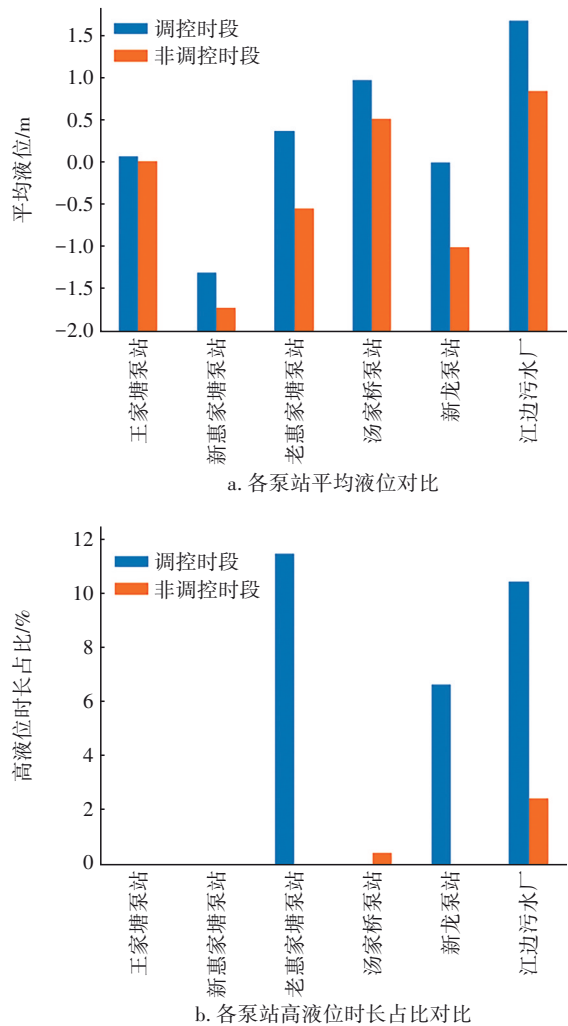


图 9 现场运行期间厂站液位变化对比
Fig.9 Comparison of liquid level changes between the WWTP and stations during field operation

调控时段内各泵站的平均液位相比非调控时段整体偏高,原因主要是在上游来水量较大的情况下,江边污水厂的液位偏高。在限流规则的影响下,上游泵站限制了其出流量,以避免污水厂前池液位过高。

现场运行期间各泵站的开泵次数对比如图 10 所示。

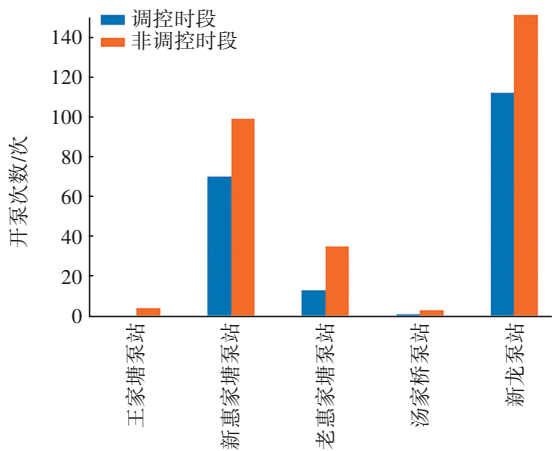
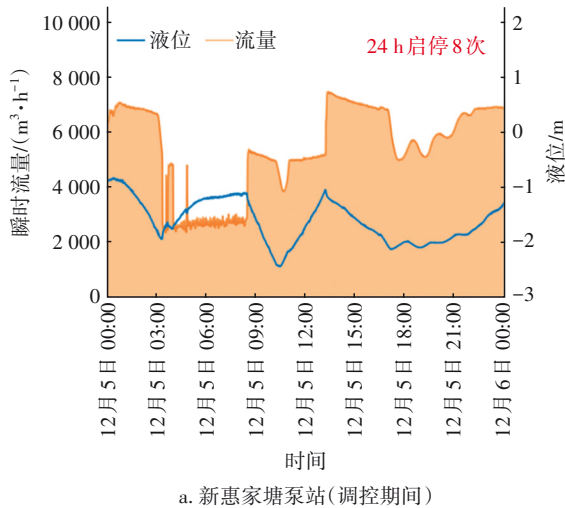


图 10 现场运行期间各泵站的开泵次数对比
Fig.10 Comparison of pump starting frequency of each pumping station during field operation

从开泵次数分析,调控期间各泵站在相同时长下的开泵次数均少于非调控时段。其中新惠家塘、老惠家塘泵站的启停泵次数明显减少,主要是因为采用变频调节流量代替了部分泵启停。新龙泵站没有变频泵,但启停泵次数也明显减少,主要是由于非调控时段内其启停泵液位过低,导致在低液位下的频繁启停。

可见,在智能调控状态下,通过变频泵的频率调节,以及启停泵液位的优化,可以有效降低泵启停频次。

现场运行期间典型泵站的液位与流量变化趋势见图 11。



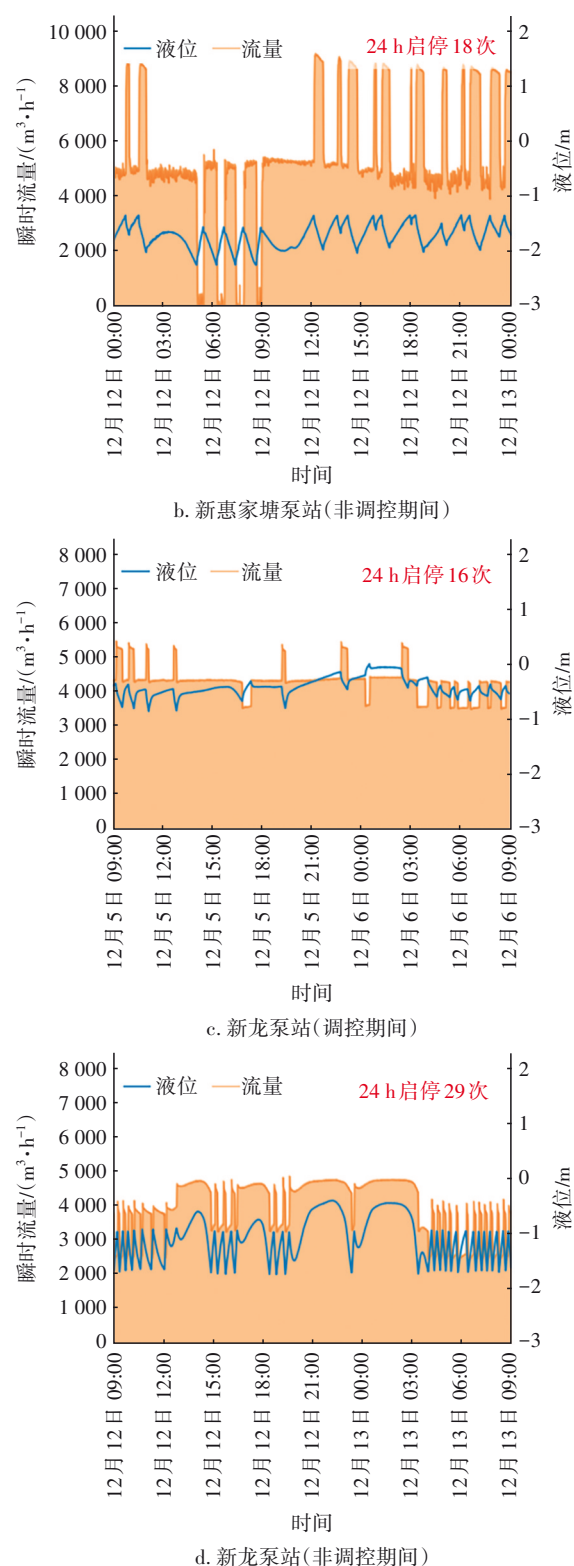


图11 现场运行期间典型站点的液位与流量变化趋势
Fig.11 Liquid level and flow trends of typical pumping stations during field operation

4 结论

针对实际污水系统运行场景,提出了控制策略优化流程、控制策略整体框架、控制系统升级流程。以常州江边污水厂一、二级主要泵站片区作为案例区域,开展了控制策略现状分析、优化设计、建模和策略决策、控制系统改造、现场测试、调试等工作。试运行结果显示,智能调控期间系统的冗余空间得到充分利用,各泵站运行情况稳定,并在启停泵频次等方面得到了明显优化。上述结果表明,该研究方法能够有效地处理排水系统实际运行条件下的控制策略优化问题。

参考文献:

- [1] SCHÜTZE M R, BUTLER D, BECK B M. Modelling, Simulation and Control of Urban Wastewater Systems [M]. USA:Springer, 2011.
- [2] DIRCKX G, SCHÜTZE M, KROLL S, *et al.* Cost-efficiency of RTC for CSO impact [J]. Urban Water Journal, 2011, 8(6):367-377.
- [3] BUTLER D, SCHÜTZE M. Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems [J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20(4):415-426.
- [4] SCHÜTZE M, CAMPISANO A, COLAS H, *et al.* Real time control of urban wastewater systems—where do we stand today? [J]. Journal of Hydrology, 2004, 299(3): 335-348.
- [5] 陈俊,戴俊龙,古燕霞,等. 基于模型的复杂排水系统控制逻辑模拟仿真[J]. 中国给水排水, 2022, 38(20): 102-108.
CHEN Jun, DAI Junlong, GU Yanxia, *et al.* Model-based simulation of complex drainage system control logic [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(20): 102-108 (in Chinese).

作者简介:许光明(1968—),男,江苏常州人,大学本科,研究员级高级工程师,处长,江苏省城镇供水排水协会副理事长,曾荣获华夏科技进步奖、太湖流域水污染防治先进个人称号,并拥有多项专利技术。

E-mail:cz5572700@sina.com

收稿日期:2022-01-09

修回日期:2022-01-28

(编辑:衣春敏)