

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.01.018

# 基于冗余空间估算的污水干管调度策略优化与验证

陈波<sup>1,2</sup>, 戴界红<sup>1,2</sup>, 陆文涛<sup>1,2</sup>, 张大臻<sup>3</sup>, 董欣<sup>3,4</sup>

(1. 常州市排水管理处, 江苏 常州 213017; 2. 常州市城市排水有限公司, 江苏 常州 213017; 3. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 4. 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

**摘要:** 厂网一体化实时调度是提升城市排水系统运行效能的重要手段。针对非汛期污水厂稳定进水的的需求,基于模型预测控制和水量平衡模型,提出了污水干管调度策略优化方法。利用高密度液位监测信息,通过空间线性内插推演管道冗余空间,使用模型预测控制对未来24 h的泵站提升流量进行优化,以充分利用干管内的冗余空间,实现污水厂进水流量昼夜调峰。在常州市江边污水厂及其上游干管泵站对该方法进行现场测试,实现了连续79 h的污水厂稳定进水,其间系统末端污水厂一、二期和三、四期的进水流量波动分别可控制在均值的 $\pm 3\%$ 、 $\pm 9\%$ 以内,日最低进水流量较优化前提升了7.6%(950 m<sup>3</sup>/h),表明该方法具有可操作性和有效性。

**关键词:** 排水系统; 污水干管; 模型预测控制; 现场测试

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)01-0123-05

## Optimization and Field Test of Scheduling Strategy for Sewage Mains Based on Pipe Redundancy Estimation

CHEN Bo<sup>1,2</sup>, DAI Jie-hong<sup>1,2</sup>, LU Wen-tao<sup>1,2</sup>, ZHANG Da-zhen<sup>3</sup>, DONG Xin<sup>3,4</sup>

(1. Changzhou Drainage Administration, Changzhou 213017, China; 2. Changzhou Drainage Co. Ltd., Changzhou 213017, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The integrated real-time scheduling of wastewater treatment plant (WWTP) and sewer network is a crucial approach to enhance the operational efficiency of urban drainage system. Based on model predictive control and water balance model, an optimization approach for the scheduling strategy of sewage mains was established to fulfill the demand of stable inflow of WWTP in the dry season. By utilizing high-density water level monitoring information, the pipeline redundant space was derived through spatial linear interpolation, and the flow rate of the pumping station in the next 24 hours was optimized by employing model predictive control, thereby making full use of the redundant space in the sewage mains and achieving the day and night peak regulation of the inflow of the WWTP. The method was tested in the field at Jiangbian WWTP and its upstream main pipe pumping station in Changzhou City, achieving a stable inflow of the WWTP for 79 consecutive hours. The fluctuations of inflow in the

phase I, II, and III, IV Projects of the WWTP could be controlled within  $\pm 3\%$  and  $\pm 9\%$  of the mean value respectively, and the daily minimum inflow increased by 7.6% (950 m<sup>3</sup>/h) compared to that before optimization. The results demonstrate that the method is feasible and effective.

**Key words:** drainage system; sewage main; model predictive control; field test

城市排水系统的运行效能直接关系到城市的正常运转,并显著影响城市水环境质量。实时控制是提升排水系统运行效能的有效手段<sup>[1-2]</sup>。模型预测控制是一种可靠的系统实时控制方法<sup>[3-6]</sup>,相比基于规则的调度,其能够考虑调度策略对系统全局的影响。目前该方法落地应用的难点主要在于基于复杂机理模型预测的调度需在此过程中进行系统仿真,计算时间长、可操作性较差<sup>[7-8]</sup>。鉴于此,笔者基于模型预测控制方法框架,使用简化的水箱模型<sup>[9-11]</sup>对系统进行建模,利用高密度的系统运行状态监测和对管道内水量的推演,支撑调度策略优化。最终,利用污水干管自身的容积进行昼夜调峰,在管网安全运行的前提下,实现了非汛期污水厂稳定进水的目标。

## 1 调度策略优化方法的建立

本研究建立的系统调度策略优化方法包括管道冗余空间推演和调度策略优化两个模块。管道冗余空间推演模块根据管道结构和液位监测信息,推演各管道单元内的冗余空间,作为调度策略优化的初始条件;调度策略优化模块接收前一模块的输出,结合上游来水量预测,最终以逐小时流量的形式输出未来一段时间内的泵站调度策略。方法框架如图1所示。

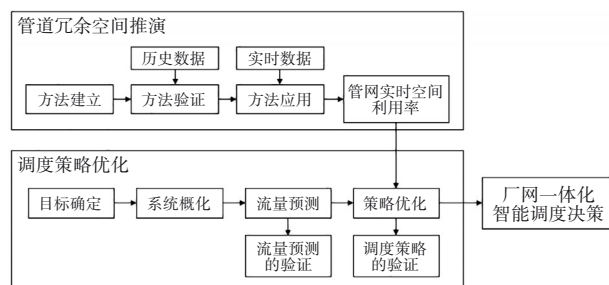


图1 污水干管调度策略优化方法框架

Fig.1 Framework of scheduling strategy optimization for sewage mains

### 1.1 管道冗余空间的推演

首先,通过资料搜集和现场勘误,准确掌握管网系统的结构信息,包括管道长度、管径、起终点管

底标高、是否为有压管等,作为管道冗余空间推演的重要依据。其次,时间高频率、空间高密度的液位感知是管道冗余空间推演的必要条件。

以泵站和液位监测检查井为界,将干管划分为子单元。鉴于污水干管流量较大、流态稳定的特点,对子单元内未知液位的检查井节点,采用空间线性内插的方法进行液位推测,如式(1)所示。一般情况下,上、下游液位由液位监测仪提供;当子单元上游为泵站时,令 $h_1$ 等于泵后第1根重力管的起始端管顶标高。最后,根据子单元内每段管道的首尾液位和管道结构参数,利用几何公式即可得到管道内的水量和冗余空间。

$$h_x = \frac{l_{x2}}{l_{x1} + l_{x2}} h_1 + \frac{l_{x1}}{l_{x1} + l_{x2}} h_2 \quad (1)$$

式中: $h_x$ 为待推测节点的绝对液位,m; $h_1$ 、 $h_2$ 分别为待推测节点上、下游的绝对液位,m; $l_{x1}$ 、 $l_{x2}$ 分别为待推测节点到上、下游液位监测点的管长,m。

### 1.2 调度策略的优化

以水量平衡为基础建立简化的系统模型。以可调控的泵站为界,将管道划分为若干单元(调度策略优化的“单元”一般包括若干个管道冗余空间推演的“子单元”)。每个单元内的水量变化等于其上游泵站的输入减去下游泵站或污水厂的输出:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + \sum_{p \in P_{in,i}} Q_{p,t+1} \Delta t - \sum_{p \in P_{out,i}} Q_{p,t+1} \Delta t \quad (2)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为第 $t$ 、 $t+1$ 小时第 $i$ 个管道单元中的水量,m<sup>3</sup>; $Q_{p,t+1}$ 为第 $t+1$ 小时泵站 $p$ 的流量,m<sup>3</sup>/h; $\Delta t$ 为调度策略的决策步长,取1h; $P_{in,i}$ 、 $P_{out,i}$ 分别为输入和输出第 $i$ 个管道单元的泵站编号集合。

简化系统模型建立后,进行调度策略的优化,其实质是求解如下数学优化问题。决策变量为未来24h内每小时污水厂的进水流量和每座泵站的提升流量。目标函数为最小化污水厂进水流量的逐小时波动[见式(3)]。约束条件包括:①泵站流量受到各台泵的设计规模约束,只能取若干分立的值,根据实际情况确定;②水量平衡[见式(2)];③

管道单元内水量应不小于0且不大于管道容积[见式(4)];④上游边界泵站的提升量受到上游来水的约束,即截至第1~ $T$ 小时之间的任意时刻 $t'$ ,上游边界泵站的累积转输量不得大于累积上游来水量加上初始时刻边界外的既存水量[见式(5)],也不得小于累积上游来水量减去边界外的蓄水空间[见式(6)]。

$$\min F = \sum_{t=1}^{T-1} |Q_{w,t+1} - Q_{w,t}| \quad (3)$$

式中: $F$ 为目标函数; $Q_{w,t}$ 为未来第 $t$ 小时污水厂的进水流量, $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $T$ 为调度的时间步长数,取24。

$$0 \leq V_{i,t} \leq V_{\max,i} \quad (4)$$

式中: $V_{\max,i}$ 为第 $i$ 个管道单元的容积, $\text{m}^3$ 。

$$\sum_{t=1}^{t'} Q_{1,t} \Delta t \leq \sum_{t=1}^{t'} Q_{\text{in},t} \Delta t + W_0 \quad (5)$$

$$\sum_{t=1}^{t'} Q_{1,t} \Delta t \geq \sum_{t=1}^{t'} Q_{\text{in},t} \Delta t - S_0 \quad (6)$$

式中: $\forall t'=1, \dots, T$ ;  $Q_{\text{in},t}$ 为第 $t$ 小时的上游来水量, $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $Q_{1,t}$ 为上游边界泵站(设其编号为1)第 $t$ 小时的流量, $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $S_0$ 为上游边界外的蓄水空间, $\text{m}^3$ ;  $W_0$ 为初始时刻边界外的既存水量, $\text{m}^3$ 。

求解该优化问题所需的输入包括:各座泵站的提升能力;系统各管道单元的容积;初始时刻各管道单元内的水量,由管道冗余空间推演模块得到;预测未来24 h内的上游来水总量及其波动,以及可能存在的其他输入系统边界内的不受控流量,可由该区域的历史数据分析得到。使用遗传算法求解该优化问题,求解过程中,将约束式(4)~(6)转化为惩罚项加入适应度函数中。

## 2 案例区域概况

以常州市江边污水厂及其配套干管为研究对象,该厂分为一、二期和三、四期分别运行,可调控的泵站为3座一级泵站和2座二级泵站,各泵站之间的转输关系见图2。

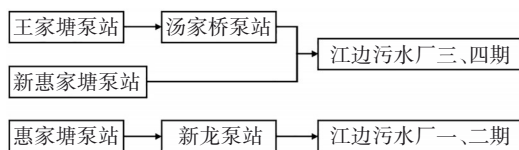


图2 研究区域内泵站之间的转输关系

Fig.2 Topological relationship between pump stations in study area

可控系统范围内的干管总长约为34.5 km,包含15个液位监测点(其中8个位于管网检查井,其余位于泵站集水井和污水厂格栅前)。管道总容积约为 $3.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,非汛期的空间利用率平均约为60%,因而有利用干管冗余空间进行调蓄的能力。系统的调度目标是减小污水厂进水流量的昼夜波动,同时使一、二期的进水量达到计划的保底水量即 $19.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (约为 $8210 \text{ m}^3/\text{h}$ )。

## 3 结果与讨论

### 3.1 优化策略及其模拟效果

以2023年11月29日(00:00—24:00)为模拟调度的时间范围。以29日00:00的管道冗余空间为初始条件,依据前3 d(26日—28日)的上游来水量预测29日的来水量,运行调度策略优化算法,得到5座可控泵站逐小时的指定流量,如图3所示。

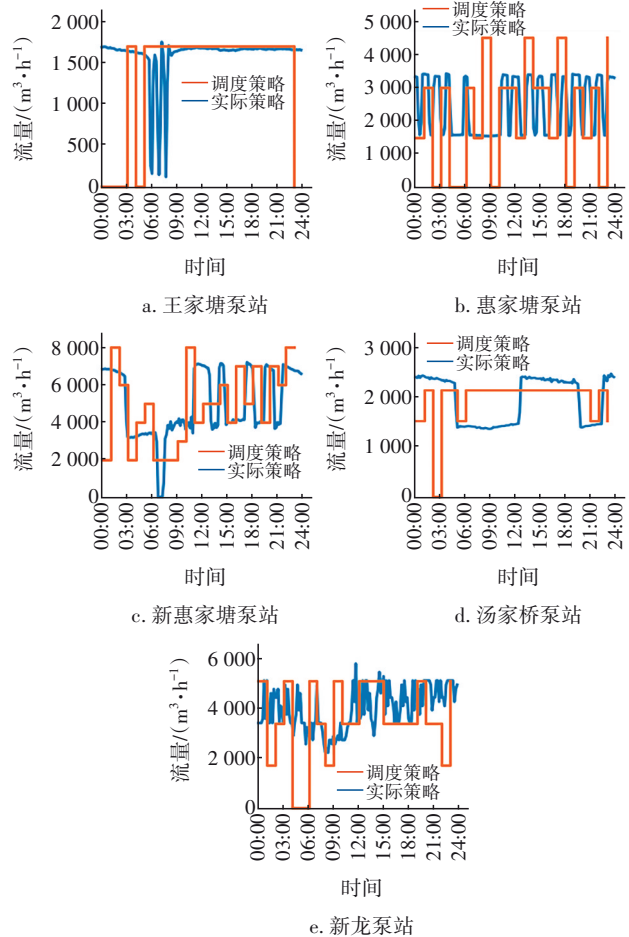
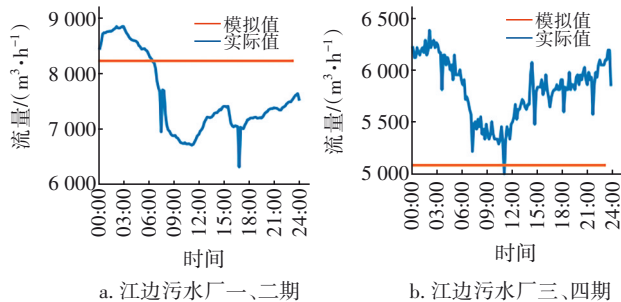


图3 优化后调度策略与实际策略的对比

Fig.3 Comparison between optimized and status-quo scheduling strategies

模拟结果表明,在这一调度策略下,理论上可

将污水厂的总进水流量稳定控制在当日的均值,其中江边污水厂一、二期进水流量可以达到 $8\,210\text{ m}^3/\text{h}$ ,三、四期进水流量可以达到 $5\,076\text{ m}^3/\text{h}$ (见图4)。

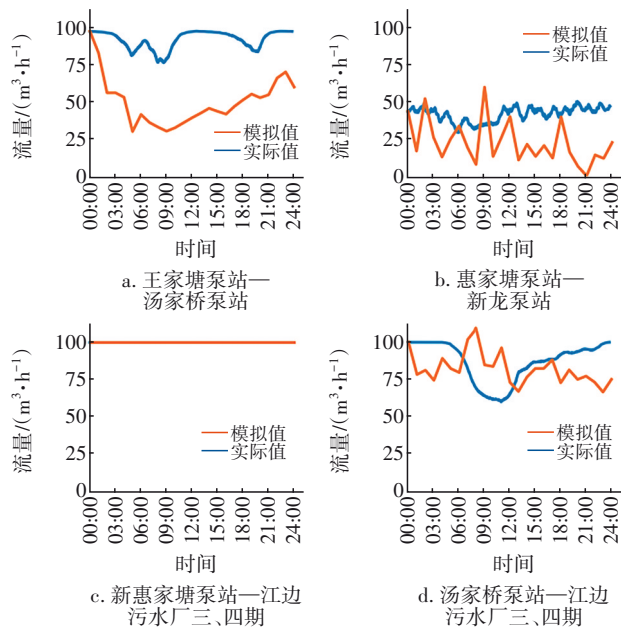


a. 江边污水厂一、二期 b. 江边污水厂三、四期

图4 污水厂进水流量优化模拟值与实际值

Fig.4 Optimized simulation values and actual values of inflow of WWTP

11月29日系统实际执行的是既定的基于液位的运行策略,考察优化策略与其区别,发现两者的差异主要体现在00:00—06:00之间,除新惠家塘泵站外,其余泵站优化策略所要求的流量和既定策略相比更低(见图3),说明这段时间优化策略将上游来水尽可能延缓转输,并要求污水厂首先消纳管道内储存的水量(见图5),从而在原本出现流量谷值的06:00—12:00之间能够维持原有流量(见图4)。同时,由于系统内存在不受控来水,在应用优化策略的过程中,汤家桥泵站—江边污水厂三、四期、新龙泵站—江边污水厂一、二期之间的管道单元出现了水量大于容积的违反模型约束的情况[见图5(d)和(e)],这表明该方法所给出的优化策略在现场应用时需要视情况进行一定修正。

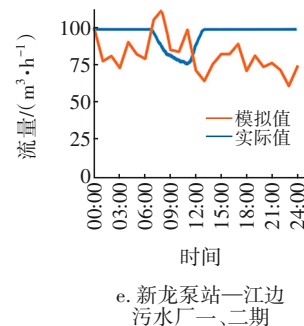


a. 王家塘泵站—汤家桥泵站

b. 惠家塘泵站—新龙泵站

c. 新惠家塘泵站—江边污水厂三、四期

d. 汤家桥泵站—江边污水厂三、四期



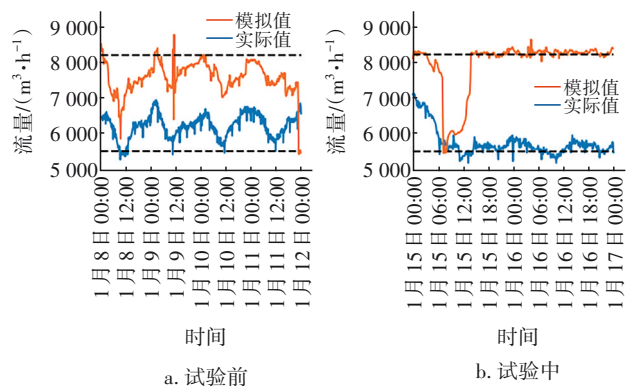
e. 新龙泵站—江边污水厂一、二期

图5 管道单元的空间利用率优化模拟值与实际值

Fig.5 Optimized simulation values and actual values of pipe usage

### 3.2 现场验证

2024年1月15日—18日,在江边污水厂片区开展现场试验,进一步验证该调度方法的可操作性。1月15日14:00起,污水厂和5座受控泵站开始执行调度策略优化模型输出的策略。同时,试验过程中,根据各泵站的高、低警戒液位,对优化策略可能导致的风险进行预警和修正,预计半小时内达到高警戒液位,则在优化策略的基础上增加流量,预计达到低警戒液位则降低流量。在这种控制规则下,系统实现了连续79 h污水厂进水流量稳定,直至1月18日21:00现场试验由于降雨终止。稳定流量运行期间,除1月17日14:00前后因设备测试导致的流量突增外,江边污水厂一、二期和三、四期的进水流量波动分别可控制在均值的 $\pm 3\%$ 和 $\pm 9\%$ 以内,日最低进水流量较试验前提高了 $7.6\%$ ( $950\text{ m}^3/\text{h}$ ),如图6所示,满足了非汛期稳定进水的要求。



a. 试验前

b. 试验中

图6 污水厂进水流量的实际控制效果

Fig.6 Actual control effect of inflow of WWTP

### 4 结论

针对复杂机理模型在排水系统实时控制中策略优化时间长、实际应用难的问题,提出了基于简化机理模型的污水干管调度策略优化方法,使用空



间线性内插法估算管道内水量和冗余空间,采用遗传算法对未来24 h内逐小时的泵站流量进行优化,利用污水干管内的调蓄空间,实现非汛期污水厂进水量稳定的目标。在常州市江边污水厂片区开展了为期4 d的现场试验,其间以优化策略为主,结合现场液位观测对策略进行实时修正,实现了连续79 h的污水厂稳定进水,初步验证了该方法的可行性和有效性。

#### 参考文献:

- [1] BEENKEN T, ERBE V, MESSMER A, *et al.* Real time control (RTC) of urban drainage systems—a discussion of the additional efforts compared to conventionally operated systems [J]. *Urban Water Journal*, 2013, 10(5): 293–299.
- [2] KROLL S, WEEMAES M, VAN IMPE J, *et al.* A methodology for the design of RTC strategies for combined sewer networks [J]. *Water*, 2018, 10(11): 1675.
- [3] LUND N S V, FALK A K V, BORUP M, *et al.* Model predictive control of urban drainage systems: a review and perspective towards smart real-time water management [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018, 48(3): 279–339.
- [4] CHEN Y, WANG C, HUANG H C, *et al.* Real-time model predictive control of urban drainage system in coastal areas [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 628: 130570.
- [5] ABOU RJEILY Y, ABBAS O, SADEK M, *et al.* Model predictive control for optimising the operation of urban drainage systems [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 558–565.
- [6] SVENSEN J L, SUN C C, CEMBRANO G, *et al.* Model predictive control of urban drainage systems considering uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2023, 31(6): 2968–2975.
- [7] GARCÍA L, BARREIRO-GOMEZ J, ESCOBAR E, *et al.* Modeling and real-time control of urban drainage systems: a review [J]. *Advanced Water Resources*, 2015, 85: 120–132.
- [8] SADLER J M, GOODALL J L, BEHL M, *et al.* Leveraging open source software and parallel computing for model predictive control of urban drainage systems using EPA-SWMM5 [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 120: 104484.
- [9] 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).
- [10] RAZAVI S, TOLSON B A, BURN D H. Review of surrogate modeling in water resources [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(7): 7401.
- [11] SAAGI R, FLORES-ALSINA X, FU G, *et al.* Catchment & sewer network simulation model to benchmark control strategies within urban wastewater systems [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 78: 16–30.

作者简介:陈波(1978–),男,江苏常州人,大学本科,正高级工程师,研究方向为排水系统综合调度及运行策略。

E-mail:chenbo0913@126.com

收稿日期:2024-06-05

修回日期:2024-07-08

(编辑:刘贵春)

综合运用自然恢复和人工修复,  
持之以恒推进生态建设