

陈昱霖, 张欣. 基于遗传算法优化的污水厂雨天平稳运行对策[J]. 净水技术, 2026, 45(1): 142-149.

CHEN Y L, ZHANG X. Optimization of stable operation solution in rainy days for WWTPs based on genetic algorithm [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(1): 142-149.

## 基于遗传算法优化的污水厂雨天平稳运行对策

陈昱霖, 张欣\*

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

**摘要** 【目的】 大型城市的排水设施运行模式趋于复杂,对于多节点入流污水厂,传统人工调度模式很难满足动态管理需求,需要研究智慧调度方式,保障排水设施的平稳运行。【方法】 本文以上海某大型排水系统为例,通过分析末端收集历史数据,结合运行水位预设污水处理厂处理能力,根据实时来水数据动态调节末端各节点提升设施开泵情况,通过遗传算法对控制方程进行参数寻优,在所有世代中选出最高得分个体作为最终参数组合,确定雨天进厂流量策略。【结果】 采用该优化策略后使污水厂处理水量更加平稳,尽可能缓解短时间水泵频繁启闭的问题,同时通过设置相应的预警条件,使得蓄水池在安全条件下得到充分利用。基于蓄水池水位的负反馈控制方程策略可在确保雨天排水安全的前提下,最大程度保障污水厂雨天平稳运行。【结论】 本文提出的算法可为多入流节点或组团式布置污水厂提供运行调度策略,保障排水系统末端设施效能最大化的同时,实现节能降耗、稳定运行的目标,具有一定的工程应用价值。

关键词 污水厂 平稳运行对策 遗传算法 雨天运行 多节点

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)01-0142-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.01.017

## Optimization of Stable Operation Solution in Rainy Days for WWTPs Based on Genetic Algorithm

CHEN Yulin, ZHANG Xin\*

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract** [Objective] The operation mode of drainage facilities in large cities tends to be complex. For multi-node inflow wastewater treatment plants (WWTPs), the traditional manual scheduling mode is difficult to meet the dynamic management needs. It is necessary to study intelligent scheduling methods to ensure the stability of operation of drainage facilities. [Methods] This paper took a large drainage system in Shanghai as an example. By analyzing historical data collected at the end of the system and setting the treatment capacity of the WWTP based on the operating water level, the pumping situation of the lifting facilities at each node at the end of the system was dynamically adjusted according to real-time incoming water data. The genetic algorithm was used to optimize the control process parameters, and the highest scoring individual among all generations was selected as the final parameter combination to determine the flow rate strategy for entering the WWTP on rainy days. After adopting this optimization strategy, the treated water volume of the WWTP became more stable, and the problem of frequent opening and closing of the water pump in a short period of time was alleviated as much as possible. At the same time, by setting corresponding warning conditions, the reservoir was fully utilized under safe conditions. The negative feedback control equation strategy based on reservoir water level could maximize the stability of operation of WWTPs in rainy days while ensuring the safety of drainage in rainy days. [Conclusion] The algorithm proposed in this paper can provide operational scheduling strategies for WWTPs with multiple inflow nodes or clustered arrangements, ensuring maximum efficiency of end facilities in the drainage system while achieving the goals of energy conservation, consumption reduction,

[收稿日期] 2023-11-19

[基金项目] 上海市“科技创新行动计划”项目(23DZ1203504); 上海城投科技创新项目(CTKY-ZDXM-2022-003)

[作者简介] 陈昱霖(1989—), 男, 高级工程师, 主要从事给排水设计等工作, E-mail: chenyulin@smedi.com。

[通信作者] 张欣(1969—), 男, 正高级工程师, 主要从事给排水设计咨询和相关科研工作, E-mail: zhangxin@smedi.com。

and stable operation. It has certain engineering application value.

**Keywords** wastewater treatment plant (WWTP) stable operation solution genetic algorithm operation in rainy days multi-node

污水处理厂是城市污水治理的重要一环,随着城市规模增大,组团式大型污水厂建设案例在全国各地越来越普遍。对于服务范围内包括合流制系统或排水管网复杂的区域,末端污水厂存在旱雨天水量波动大的情况。在雨天工况下,污水厂进水量与降雨强度存在较强的正相关性<sup>[1]</sup>。降雨量的不确定性使得雨天情况下对末端来水难以估计,并且雨天水量的负荷将远超于旱天工况<sup>[2]</sup>。另外,雨天的额外水量可能使得污水厂进水水质发生变化,Wilén等<sup>[3]</sup>研究发现:降雨会改变污水厂进水水质,影响污水厂工艺的处理效果。因此,合理的蓄水池调蓄可以有效减轻雨天污水处理厂的负荷,保障污水处理的稳定性和效率。但在实际问题中,绝大多数地区并不具备排水模型,即便在实时获得降雨强度信息的前提下,也难以估算降雨工况下的来水流量曲线。污水厂在雨季和旱季的最大处理能力是相同的,若采用粗放的管理模式运行,极易造成污水厂超负荷运行,发生溢流,造成严重的水环境污染<sup>[4-5]</sup>。因此,需设计一套成熟稳定的运行方案,在污水应排尽排的基础上保障供水平稳性,实现污水厂的平稳高效运行。

计算机模拟仿真技术不断发展,为预测模拟雨天水量,协调联动污水排放各环节设施提供了有力支持<sup>[6-7]</sup>。本文通过构建上海市Z片区内各污水厂和调蓄池的联动模型,对雨天污水厂运行策略进行优化设计,在排水安全的基础上充分利用蓄水池调蓄功能维护末端污水厂进水稳定性。

## 1 研究对象

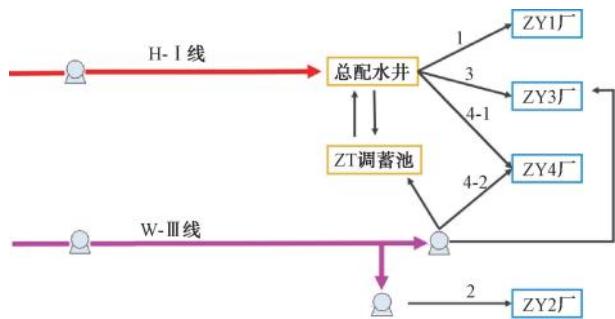
本文以上海市Z片区排水区域作为研究对象。Z区域服务面积为335 km<sup>2</sup>,其片区内由多座污水厂和多条干线构成。2厂指系统末端Z1、Z2、Z3和Z4污水厂以及1座污水削峰调蓄池ZT。干线包括H-I、W-III。H-I、W-III在末端均通过提升泵房将污水输送至污水厂进行调配处理,各条干线及污水厂设计规模如表1所示。

如图1所示,Z片区末端为厂群布置,各污水厂连接关系复杂,且处理水量大,如配水策略不合理将导致配水不均、设施功能无法发挥等问题。另外,由于Z片区多为合流制排水系统,不同工况干线水量

表1 Z片区污水设施

Tab. 1 Main Facilities of Network District Z

名称	功能	能力
Z1	污水处理	110 万 m <sup>3</sup> /d
Z2		30 万 m <sup>3</sup> /d
Z3		80 万 m <sup>3</sup> /d
Z4		120 万 m <sup>3</sup> /d
ZT	污水调蓄	50 万 m <sup>3</sup>
H-I	污水转输	45 m <sup>3</sup> /s
W-III	污水转输	20.85 m <sup>3</sup> /s



注:图中1、3、4-1、4-2、2均为厂群编号。

图1 片区末端水量分配

Fig. 1 Water Distribution at the Network End

波动大,虽然设置了削峰调蓄池,传统人工调度方式很难找到最佳运行工况。

针对多节点复杂入流的末端厂群体系,在雨天第一要务往往是发挥设施最大功能,尽量减少溢流发生;同时兼顾各厂区配水均匀以及处理水量稳定,拟利用计算机仿真技术进行水量预测、污水厂水量分配及调蓄池运行调度方案分析,寻找优化方案。

## 2 技术路线

本文拟从排水安全和水量平衡的角度出发,减少污水处理厂雨天工况下的水量波动,实现末端的平稳运行。处理水量可划分为根据雨天来水量的预估处理量、基于蓄水池当前水位的负反馈调节水量两部分(图2)。

预处理量部分由于排水量波动大,不可预测性强的问题,采用一维线性的简单卡尔曼滤波,在消除一定波动的基础上对来水曲线进行实时拟合。预处理水量与实际水量的差异部分需要利用蓄水池调节。考虑到蓄水池偏离安全水位越大,调节水量越多,设计调节函数,通过对系统行为产生反作用,使

得蓄水池水位稳定地趋于健康水位<sup>[8]</sup>。

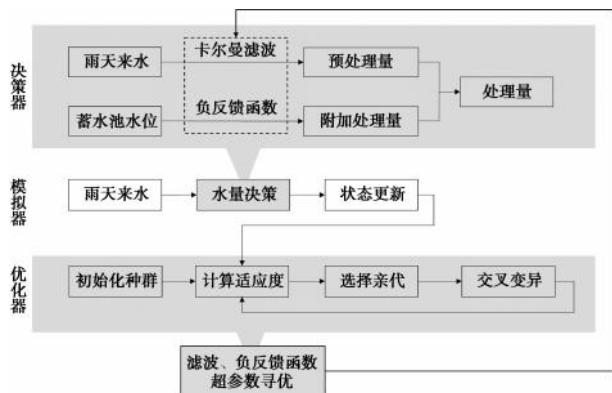


图 2 技术路线

Fig. 2 Technical Routes

## 2.1 雨天处理水量预处理

雨天处理水量分为 2 个部分:基于雨天来水量计算污水厂运行的预处理量和根据蓄水池水量计算处理量的修正值,具体如式(1)。

$$Q_t = Q_{kt} + d_{Qt} \quad (1)$$

其中:  $Q_t$  —— 时刻  $t$  的排水处理总量,  $\text{m}^3$ ;

$Q_{kt}$  ——  $t$  时刻基于卡尔曼滤波估计的预

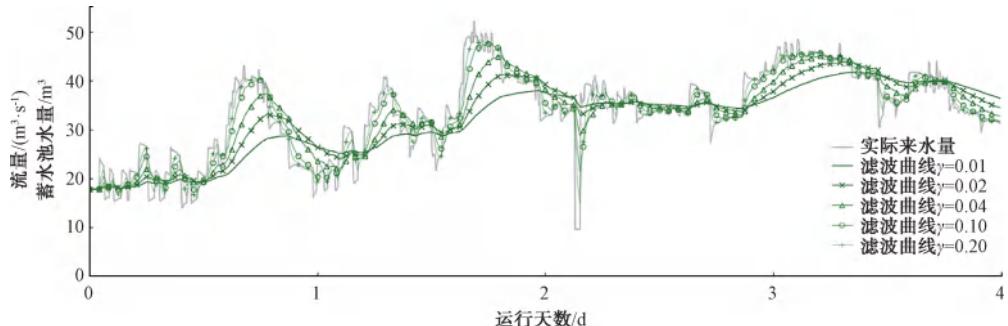


图 3 雨水量卡尔曼滤波处理结果

Fig. 3 Kalman Filtering Processing Results of Rainwater Runoff

## 2.2 蓄水池运行模式

若当前运行水量不严格等于来水量时,需要蓄水池对该部分水量进行调节,本文设计该部分水量由以下 2 个部分组成。

1) 通过附加一部分处理量使其在一段时间后回归安全水位,该部分体现为关于蓄水池水量  $R$  的一次线性函数[式(3)]。

$$Q_1 = a(R - R_{pre})^b \quad (3)$$

其中:  $Q_1$  —— 处理量,  $\text{m}^3$ ;

$a$  —— 低次项权重系数, 取值为 0.0~1.0;

处理量,  $\text{m}^3$ ;

$d_{Qt}$  ——  $t$  时刻的负反馈修正值。

在稳定性控制方面,卡尔曼滤波是一种有效的方法<sup>[9]</sup>。本文仅具备来水量的时序数据,因而,采用一维线性的卡尔曼滤波方法对来水数据做平滑处理,该滤波过程认为观测数据的不确定性与准确性随时间保持恒定,且认为预测对象在前后时刻的状态变化不存在严格的函数表达,但呈现一定的相关性,具体如式(2)。

$$Q_{kt} = (1 - \gamma) \times Q_{k(t-1)} + \gamma Q_{obs} \quad (2)$$

其中:  $Q_{k(t-1)}$  —— 上一时刻流量平滑值估计,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$Q_{obs}$  —— 流量观测值,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\gamma$  —— 数据吸收系数。

这一过程既是水量的预测过程,也是波动曲线的平滑过程。污水厂处理量依据平滑后的来水情况作出相应调节。由图 3 可知,吸收系数选取越大,滤波曲线越接近真实情况,反之则越平滑。因此,需要选取一个合适的  $\gamma$ ,使得估计水量平稳的同时尽可能接近真实水量情况。

$b$  —— 低次项指数系数, 取值为 0.8~1.2;

$R$  —— 当前蓄水池水量,  $\text{m}^3$ ;

$R_{pre}$  —— 设定蓄水池的回归水量, 可以认为是全运行时期的蓄水池水量均值, 可选用 30%~60% 的蓄水池容积上限。

2) 由于水位偏离安全水位越大时,其超出容积的风险也越大,需要给予更大的约束阻力,该部分体现为关于蓄水池水量  $R$  的高次函数的附加量  $Q_2$ 。

$$Q_2 = c \cdot \text{sign}(R - R_{pre}) \cdot \text{abs}(R - R_{pre})^d \quad (4)$$

其中:  $c$  —— 高次项权重系数, 取值为 0.0~1.0;

$d$ ——高次项指数系数,取值为1.2~2.2。控制方程表示如式(5)。

$$d_{Q_t} = (Q_1 + Q_2) \quad (5)$$

对于末端提升设施,如果仅配备了非变频泵组的情况,则无法用泵组满足任意连续的数值,在该情况下,本文设计了一个简单可行的运行方案以及对应的遗传算法适应度计算策略来应对这种需要量化处理的情况。

水泵开启数量计算如式(6)。

$$n = \text{round}\left(\frac{Q_t}{Q_{\text{pump}}}\right) \quad (6)$$

其中: $Q_{\text{pump}}$ ——设定的单泵流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ , 取值为2.93  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

为避免 $n$ 的数值在2个整数之间频繁跳动,本文设置规定:新时刻 $n$ 的修改需要满足如式(7)的条件。

$$\left(\frac{Q_t}{Q_{\text{pump}}}\right) - \text{round}\left(\frac{Q_{t-1}}{Q_{\text{pump}}}\right) > g \quad (7)$$

其中: $g$ ——设定常数,一般可设为1。

该条件表示仅当前时刻的水泵数量的计算值与实际运行值相差过大时,才允许进行工况调整。

### 2.3 基于遗传算法对控制方程及平滑系数的率定

本文选用遗传算法进行参数寻优。遗传算法是当前应用十分广泛的寻优手段,它从生成代表问题潜在解集的种群开始,该种群由一定数目的基因编码的一定数目的相异个体组成<sup>[10]</sup>。根据问题域中个体的适应度大小挑选个体,并借助于自然遗传学的遗传算子进行组合交叉和变异,产生出代表新的解集的种群。这个过程将导致种群像自然进化一样,后生代种群比前代种群更加适应于环境,末代种群中的最优个体经过解码,可以作为问题的近似最优解<sup>[11]</sup>。

#### 1) 目标函数

本文目标函数是让污水厂水量波动尽可能小,设置reward1函数求解波动值并对函数归一化,如式(8)。

$$\text{reward1} = -\frac{\text{abs}(Q_t - Q_{t-1})}{\bar{Q}} \quad (8)$$

其中: $\bar{Q}$ ——前一年全年污水厂处理流量均值,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

为保障蓄水池使用安全性,需尽可能让蓄水池水位远离危险水量,本文蓄水池容量为50万  $\text{m}^3$ ,取

危险水量上下界为40万、10万  $\text{m}^3$ ,需设置罚函数reward2,并对函数进行归一化,如式(9)。

$$\text{reward2} = \begin{cases} \max\left(\frac{\text{abs}(R_t - 25) - 15}{50}, 0\right), & 0 \leq R_t \leq 50 \\ -10000, & R_t \geq 50 \end{cases} \quad (9)$$

其中: $R_t$ ——蓄水池水量,  $\text{m}^3$ ;

25——蓄水池总水量的平均值,  $\text{m}^3$ 。

最终目标函数reward为reward1与reward2之和,如式(10)。

$$\text{reward} = \text{reward1} - \frac{\text{abs}(Q_t - Q_{t-1})}{\bar{Q}} - \begin{cases} \max\left(\frac{\text{abs}(R_t - 25) - 15}{2}, 0\right), & 0 \leq R_t \leq 50 \\ -10000, & R_t > 50 \end{cases} \quad (10)$$

#### 2) 优化变量

污水厂处理水量包括根据雨天来水量的预估处理量和基于蓄水池当前水位的负反馈调节水量两部分组成。预估处理量中存在不确定参数 $\gamma$ ,负反馈调节水量有大量不确定参数: $a, b, c, d, e, R_{\text{pre}}$ 。以上优化变量取值均为连续值,且编码应选用低阶、短长度的编码方案,故针对以上变量采用实数编码,最终的优化变量约束条件,如式(11)。

$$\begin{cases} 0 \leq \gamma \leq 1 \\ 0 \leq a \leq 1 \\ 0.8 \leq b \leq 1.2 \\ 0 \leq c \leq 1 \\ 1.2 \leq d \leq 2.2 \\ 10 \leq R_{\text{pre}} \leq 40 \end{cases} \quad (11)$$

### 3 运行结果

在Python中搭建雨天污水厂处理水量的数字模型,对于实时接收的流量数据采用类卡尔曼滤波平滑处理,根据控制方程和判断公式决定水泵开启数量,并最终得到运行记录。模型搭建完毕后,对控制方程利用遗传算法进行参数寻优,对式(11)中所有超参数按照取值范围

归一化后,采用实数编码合并至一条向量中,以表示一个个体,种群数量设为100,交叉率设为0.7,变异率设为0.01。模拟数据选用当地2020年1月—7月的真实来水数据,并且系统无法得知未来的任何数据。实际情况下往往出现降雨停止一段时间后,又继续降雨的情况,并且初期雨水从流经管网至末端同样需要一段时间,因此,需要对雨天工况做简单的判断设定,本文设定为降雨开始至降雨停止后的6 h视为雨天工况。若降雨停止后的6 h内重新开始降雨,则继续计时,直至降雨停止且此后6 h内无降雨,则雨天工况结束。

#### (1) 有变频泵组的结果方案

由图4可知,经过60代后算法基本收敛。从中

选取最优个体,截取7月降雨集中的7 d作为结果示意图,将其排水曲线和传统排水曲线和未优化前的排水曲线作对比,如图5~图7所示。

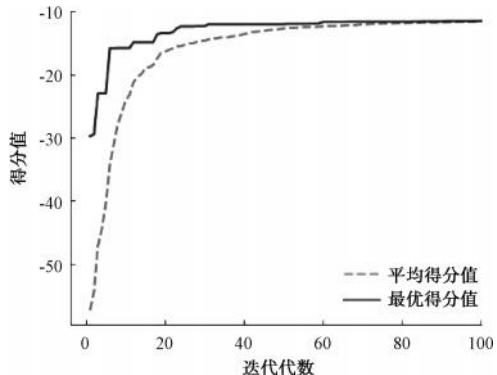


图4 遗传算法迭代轨迹

Fig. 4 Genetic Algorithm Iteration Trajectory

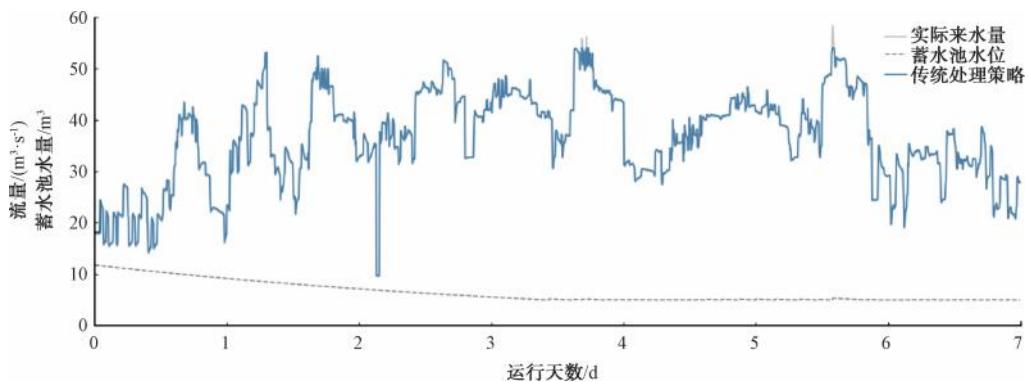


图5 传统方式排水曲线

Fig. 5 Traditional Drainage Curve

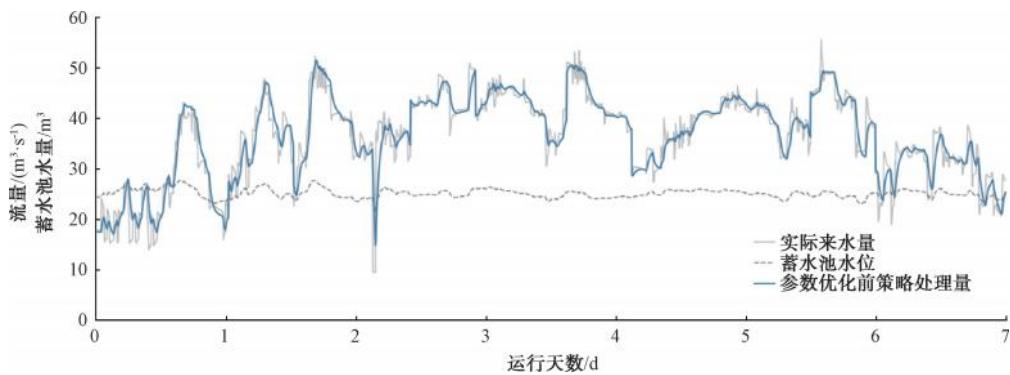


图6 优化前策略排水曲线

Fig. 6 Solution Drainage Curve before Optimization

由图5可知,传统方式的排水曲线遵循应排尽排原则,排水曲线随进水曲线的波动而波动,呈现大波动的特点,不利于下游污水处理厂的处理。由图6可知,该方法下的运行策略在这7 d的雨天工况数

据下运行良好,但排水曲线略有不同。未进行参数优化前,随机设定参数 $\gamma$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $R_{pre}$ 分别为0.1、0.5、1.0、0.5、2.0、25.0。该参数设置的策略处理水量曲线波动较大,蓄水池利用率较差。经过参数寻

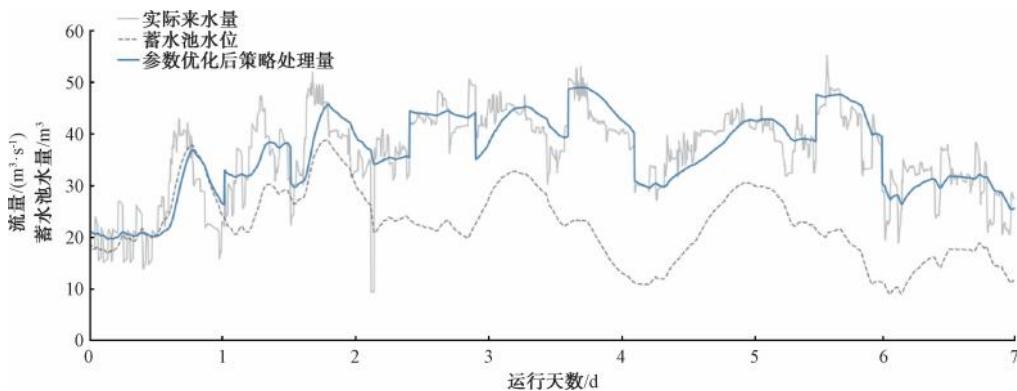


图 7 优化后策略排水曲线

Fig. 7 Solution Drainage Curve after Optimization

优后,最优个体的参数  $\gamma$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $R_{pre}$  分别为 0.007、0.014、1.304、0.081、1.696、21.900。策略的平均得分能力从 -57.33 提升至 -11.60, 结果的最优个体在测试数据下得分为 -11.51, 该参数设置下的策略处理水量变化如图 7 所示, 其处理量表现更加平稳, 即使对应于波动较大的雨天排水量也能保持相对的稳定。

#### (2) 没有变频泵组的结果方案

由图 8 可知, 经过 60 代后算法基本收敛。从中选取最优个体, 截取 7 月降雨集中的 7 d 作为结果示意。将其排水曲线和传统排水曲线和未优化前的排水曲线作对比, 如图 8~图 11 所示。

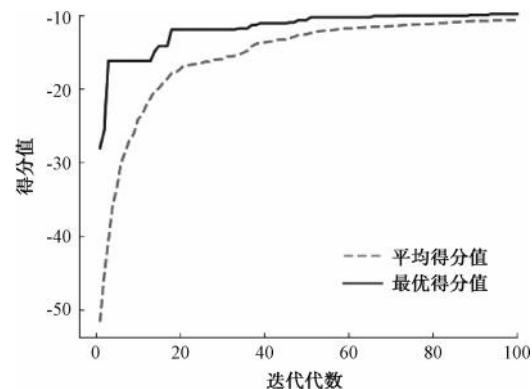


图 8 遗传算法迭代轨迹

Fig. 8 Genetic Algorithm Iteration Trajectory

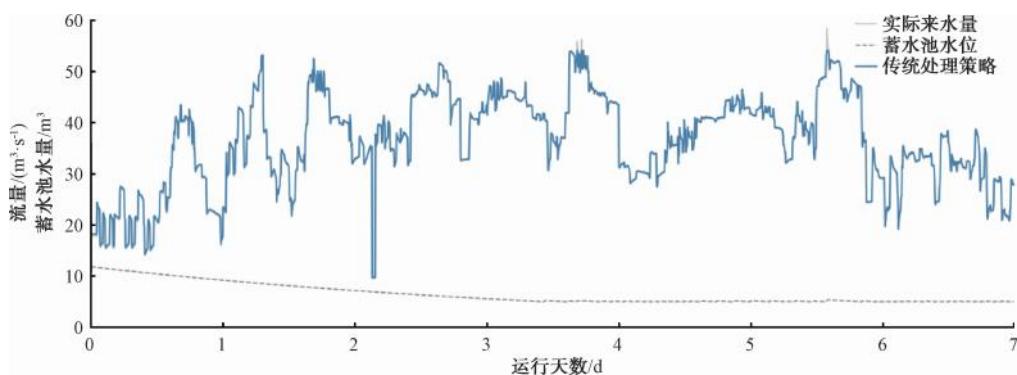


图 9 传统方案排水曲线

Fig. 9 Traditional Drainage Curve

由图 9 可知, 在没有变频泵组的情况下, 传统方案的应排尽排模式的水量波动更加明显, 通过一定策略来降低波动十分必要。图 10 为未进行参数优化前, 随机设定参数  $\gamma$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $R_{pre}$  分别为 0.1、0.5、1.0、0.5、2.0、25.0 得到的排水曲线。此策略下处理量能够在 7 d 的雨天工况下相对稳定且保证蓄水池水位保持在安全位置, 但蓄水池利用率相对

较差, 排水曲线中存在短期的频繁小波动而导致水泵启闭频繁。经过参数寻优后, 最优个体的参数  $\gamma$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $R_{pre}$  分别为 0.010、0.024、1.161、0.148、1.442、22.100, 策略的平均得分能力从 -51.72 提升至 -10.64, 结果的最优个体在测试数据下得分为 -9.80。该策略的排水水量如图 11 所示, 可知它的处理水量相较优化前表现更加平稳, 尽可能缓解

了短时间水泵频繁启闭的问题,同时通过设置相应的

预警条件使得蓄水池在安全条件下得到充分利用。

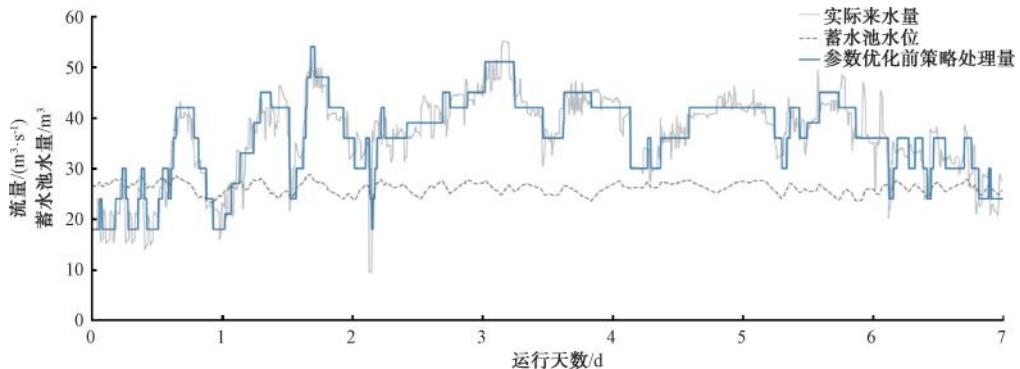


图 10 优化前策略排水曲线

Fig. 10 Solution Drainage Curve before Optimization

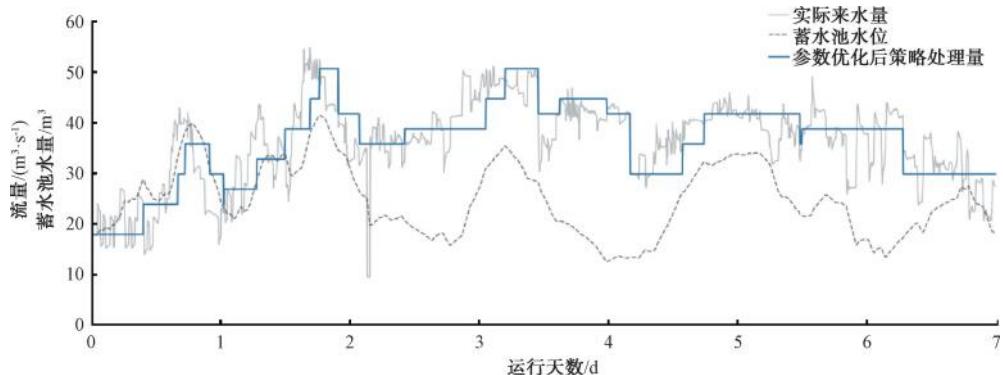


图 11 优化后策略排水曲线

Fig. 11 Solution Drainage Curve after Optimization

## 4 结论

(1) 对于实时观测结果进行类卡尔曼滤波的平滑处理能够一定程度应对雨天来水水量的波动情况。

(2) 本文设计的雨天修正水量控制方程能够实现充分利用蓄水池水位并保障蓄水池水位不超出预警线,实现安全运营。

(3) 本文提出了一种基于蓄水池水位的负反馈控制方程策略。同时,针对变频泵和非变频泵的排水情况做了区分,分别设计相应的策略代码。对两种排水情况均通过遗传算法对控制方程进行参数寻优,在所有世代中选出最高得分个体作为最终参数组合,通过测试发现最优参数组合下的排水策略能够在实际的运行模拟中大量缓解水量波动,同时保持蓄水池水位处于安全水位。

(4) 本文提出的算法可为多入流节点或组团式布置污水厂提供运行调度策略,保障排水系统末端设施效能最大化的同时,实现节能降耗、稳定运行的

目标,具有一定的工程应用价值。

## 参考文献

- [ 1 ] MCMAHAN E K. Impacts of rainfall events on wastewater treatment processes [ D ]. Florida: University of South Florida, 2006.
- [ 2 ] 李岩,袁弘宇,于佳乔,等. 遗传算法在优化问题中的应用综述 [ J ]. 山东工业技术, 2019(12): 242-243, 180.  
LI Y, YUAN H Y, YU J Q, et al. Overview of the application of genetic algorithm in optimization problems [ J ]. Shandong Industrial Technology, 2019(12): 242-243, 180.
- [ 3 ] WILÉN B M, LUMLEY D, MATTSSON A, et al. Rain events and their effect on effluent quality studied at a full scale activated sludge treatment plant [ J ]. Water Science & Technology, 2006, 54(10): 201-208.
- [ 4 ] 陈鑫,蒋晨灿. 基于监测数据的城市河道溢流污染计算方法 [ J ]. 环境工程, 2024, 42(4): 273-278.  
CHEN X, JIANG C C. A method for analysis and calculation of river overflow pollution based on monitoring data [ J ]. Environmental Engineering, 2024, 42(4): 273-278.

[ 5 ] 戴勇华. 基于数据驱动的竹园片区排水系统一体化运行策略 [J]. 净水技术, 2024, 43(9): 105-112, 150.  
DAI Y H. Integrated operation strategy of drainage system in Zhuyuan area based on data-driven [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(9): 105-112, 150.

[ 6 ] 廖青桃, 谭琼, 时珍宝, 等. 城市污水处理厂网联动平稳输送运行优化研究 [J]. 给水排水, 2016, 42(12): 20-24.  
LIAO Q T, TAN Q, SHI Z B, et al. Research on the optimization of smooth transportation operation of urban sewage treatment plant network linkage [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(12): 20-24.

[ 7 ] 高雨妃, 周立典, 张雪, 等. 基于遗传算法的二次供水低位水箱调度方案优化 [J]. 净水技术, 2022, 41(4): 121-125.  
GAO Y F, ZHOU L D, ZHANG X, et al. Optimization of scheduling solution for low-level water tank in secondary water supply system based on genetic algorithm [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(4): 121-125.

[ 8 ] 陈伟. 基于负反馈的负载均衡算法实现 [J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2013, 25(1): 41-45.

[ 9 ] CHEN W. Realization of the load balancing algorithm based on negative feedback [J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology), 2013, 25(1): 41-45.

[ 10 ] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用 [J]. 软件导刊, 2009, 8(11): 32-34.  
PENG D C. Basic principle and application of Kalman filter [J]. Software Guide, 2009, 8(11): 32-34.

[ 11 ] 李敏强, 寇纪淞, 林丹, 等. 遗传算法的基本理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
LI M Q, KOU J S, LIN D, et al. The basic theory and application of genetic algorithm [M]. Beijing: Science Press, 2002.

[ 12 ] 赵宜鹏, 孟磊, 彭承靖. 遗传算法原理与发展方向综述 [J]. 黑龙江科技信息, 2010(13): 79-80.  
ZHAO Y P, MENG L, PENG C J. A review of the principles and development directions of genetic algorithms [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010(13): 79-80.

(上接第 132 页)

[ 13 ] SONG Y L, MAHDY A, HOU Z, et al. Air supplement as a stimulation approach for the in situ desulfurization and methanization enhancement of anaerobic digestion of chicken manure [J]. Energy Fuels, 2020, 34(10): 12606-12615.

[ 14 ] LEI Y Q, SUN D Z, DANG Y, et al. Metagenomic analysis reveals that activated carbon aids anaerobic digestion of raw incineration leachate by promoting direct interspecies electron transfer [J]. Water Research, 2019, 161: 570-580. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.038.

[ 15 ] 杨振虎, 吴明, 王凯晴, 等. 高钙造纸废水中添加 FeO 提高厌氧颗粒污泥产甲烷能力的研究 [J]. 中国造纸, 2024, 43(1): 161-170.  
YANG Z H, WU M, WANG K Q, et al. Improving methanogenic activity of anaerobic granular sludge by adding FeO to high calcium-containing papermaking wastewater [J]. China Papermaking, 2024, 43(1): 161-170.

[ 16 ] 方楠. 钙铁离子对垃圾渗滤液厌氧生物处理效果及微生物的影响 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2022.

[ 17 ] FANG N. Effects of calcium and iron ions on anaerobic biological treatment of landfill leachate and microorganism [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2022.

[ 18 ] XIE Z F, WANG Z W, WANG Q Y, et al. An anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for landfill leachate treatment: Performance and microbial community identification [J]. Bioresource Technology, 2014, 161: 29-39. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.03.014.

[ 19 ] YEPEZ-CERON O D, MCCARTHY P, PATTERSON P, et al. The role of calcium in anaerobic treatment: The good, the bad and the ugly [J]. Water Research X, 2025, 28: 100381. DOI: 10.1016/j.wroa.2025.100381.