

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.21.008

基于模型预测控制的污水系统多泵站优化调度

林永钢¹, 吴龙跃², 郑越³, 余铭铨¹, 沈大利³, 敖誉旗³,
李秀娟³, 杨彦飞¹, 周永潮³

(1. 中国电建集团环境工程有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 中电建路桥集团有限公司,
北京 100000; 3. 浙江大学建筑工程学院 市政工程研究所, 浙江 杭州 310000)

摘要: 城市污水泵站的日常优化调度对降低其能耗和管理成本具有重要的现实意义。利用模型预测控制(MPC)方法,基于分布式模型和多目标优化算法,并以污水泵站系统的能耗成本和管理成本最低为目标,提出了一种城市污水系统多泵站全局优化调度技术。采用响应面法构建预测泵站泵池液位模型,基于自适应聚类的高维多目标进化算法(ACEA)保证全局调度的速度与精度,对调度前后泵站的能耗与操作复杂度进行对比,为运维人员提供科学合理的调度策略。以W市某片区为例,针对旱天日常运行工况应用全局优化调度方法以获得可靠的调度方案。结果表明,若按优化后调度方案运行,能耗较历史方案低3%~24%,平均低约13%;复杂度要比历史方案低5%~52%,平均低约34%,说明优化方法能显著降低污水泵站运行能耗和方案的复杂性,有助于降低运行管理成本。此外,调度方案的能耗与操作复杂度间存在一定的对抗关系,说明决策者需根据能耗与运维成本的实际需求合理选择方案。

关键词: 污水泵站调度; 节能优化; 模型预测控制; 分布式模型; 多目标优化算法

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0049-06

Optimal Scheduling Technology for Multiple Pumping Stations in Sewage Systems Based on MPC

LIN Yong-gang¹, WU Long-yue², ZHENG Yue³, YU Ming-quan¹, SHEN Da-li³,
AO Yu-qi³, LI Xiu-juan³, YANG Yan-fei¹, ZHOU Yong-chao³

(1. PowerChina Environmental Engineering Co. Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. PowerChina Road Bridge Group Co. Ltd., Beijing 100000, China; 3. Municipal Engineering Research Institute, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: The global optimal scheduling of urban sewage pumping stations is of great practical significance to reduce their energy consumption and management cost. This study utilized a model predictive control (MPC) method, based on a distributed model and a multi-objective optimization algorithm, to minimize the energy consumption and management cost of sewage pumping station systems. A global optimal scheduling technique for multiple pumping stations in urban sewage system was proposed. The response surface method was used to establish a model for predicting the pump level in pumping stations, and an adaptive clustering based evolutionary algorithm for multi-objective optimization

(ACEA) was applied to guarantee the speed and accuracy of global scheduling. A comparison was made between the energy consumption and operational complexity of the pumping station before and after scheduling, which could provide scientific and reasonable scheduling strategies for operation and maintenance personnel. Taking a certain area of W city as an example, a global optimization scheduling method was applied to obtain a reliable scheduling plan for daily operating conditions in dry weather. The results showed that if the optimized scheduling scheme was operated, the energy consumption was 3%–24% lower than that of the historical schemes, about 13% on average, and the operational complexity was 5%–52% lower, about 34% on average. This indicates that the optimized method can significantly reduce the energy consumption, the complexity of the scheme and the operation and management costs. There is a certain antagonistic relationship between the energy consumption and operational complexity of the scheduling plan, indicating that decision-makers need to choose the plan reasonably based on the actual needs of energy consumption and O&M costs.

Key words: sewage pumping station scheduling; energy-saving optimization; model predictive control (MPC); distributed model; multi-objective evolutionary algorithm

排水管网系统是城市的关键基础设施^[1-2],其中泵站是其不可或缺的单元^[3]。为了防止出现溢流现象,目前实际运行时通常采用预留一部分水位的做法,故水泵大部分时间在高扬程、低水位的工况下运行,造成了大量的电能浪费,并且泵机机组的组合往往也不是最佳的。

在此背景下,对城市污水泵站系统旱天工况下的日常运行进行科学、合理的优化调度显得尤为重要^[4-5]。国内外许多学者对此进行了相关研究,袁刚^[6]建立了一个基于模型预测控制(MPC)方法的城市排水泵站系统节能模型,通过一个受控的自回归滑动平均模型预测排水泵站水位,并采用滚动优化的策略使泵站达到最佳的节能状态。朱红林^[7]提出一种基于多面体不变集的鲁棒预测控制器对泵站水位进行仿真分析和节能优化控制,保证能耗较低的同时,降低了算法的求解复杂度。侯淑芳^[8]基于混杂优化策略对城市污水泵站进行优化布置,以使用更少的水泵达到节能优化效果。Fecarotta等^[9]基于混合整数优化模型,将水泵的重要参数(流量、扬程、功率、效率)联系起来,使模型能找到泵送能量最小化的调度方案。Horváth等^[10]提出了一种基于泵曲线和混合整数优化的凸模型,可用于变速和调速泵,降低泵站的能耗。

但是目前的研究大多未考虑污水泵站系统的全局性以及调度操作复杂性问题,因此以W市某片区的排水系统为研究对象,提出了一种基于分布式

模型与自适应聚类的高维多目标进化算法(ACEA)的泵站优化调度技术,利用响应面法构建预测泵池液位模型,并在此基础上以排水泵站系统日常调度能耗和管理成本最低为目标进行优化调度,保证了多目标优化调度的全局最优和运算速度。通过对调度前后多个泵站的能耗和操作复杂度进行比较,可向泵站运维操作人员提供同时降低泵站运行能耗和管理成本的调度策略,为实施城市排水泵站智能调度提供科学方法。

1 模型与方法

1.1 泵站泵池液位预测方法

泵站*i*的泵池液位的预测值可表示为:

$$y_{i,n} = y_{i,0} + \sum_{t=0}^{n-1} \Delta_{i,t} \quad (1)$$

式中: $y_{i,n}$ 表示对第*i*个泵站泵池在未来*n*个时间步长后的液位预测值; $y_{i,0}$ 表示该泵池的当前液位; $\Delta_{i,t}$ 表示该泵池在*t*~*t*+1这一个时间步长内的液位变化预测值。其中, $\Delta_{i,t}$ 可表示为:

$$\Delta_{i,t} = f(Q_{i,j}, R_{i,j}, P_{i,j}, D_{i,j}) \quad (2)$$

式中: $Q_{i,j}$ 表示过去*j*个时间步长泵站*i*的瞬时流量; $R_{i,j}$ 表示过去*j*个时间步长泵站所在区域的降雨; $P_{i,j}$ 表示过去*j*个时间步长各泵的运行状况; $D_{i,j}$ 表示过去*j*个时间步长泵站前端排水系统各测点的液位; f 是利用响应面法建立的 $\Delta_{i,t}$ 与 $Q_{i,j}$ 、 $R_{i,j}$ 、 $P_{i,j}$ 、 $D_{i,j}$ 之间的函数关系。利用该响应面函数的反函数,可通过设定在未来*t*时刻的液位目标,获得一系列泵

站调度方案的解集。

1.2 泵站运行约束条件

在泵站运行过程中,应满足库容约束和流量约束。

库容约束:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + T \cdot \bar{Q}_{i,t} < V_{\max,i} \quad (3)$$

式中: $V_{i,t}$ 表示与第 i 个泵站相连的排水管网在 t 时段初的生活污水体积; $V_{i,t+1}$ 则表示此时段末的污水体积; $\bar{Q}_{i,t}$ 表示在此时间段的平均入流流量; T 表示该时间段的时长; $V_{\max,i}$ 表示与该泵站相连的排水管网在不造成漫溢情况下的最大库容。由于排水系统管网相关信息缺失,以管网液位监测点的液位约束代替库容约束:

$$D_{i,t+1} = f(Q_{i,t,j}, P_{i,t,j}, D_{i,t,j}) \quad (4)$$

式中: $D_{i,t+1}$ 表示第 i 个液位监测点在 t 时段末的液位; $Q_{i,t,j}$ 表示第 i 个液位监测点在 t 时段初及过去 j 个时间步长的流量; $P_{i,t,j}$ 表示在该监测点区域的 t 时段初及过去 j 个时间步长的泵站运行状况; $D_{i,t,j}$ 表示第 i 个液位监测点在 t 时段初及过去 j 个时间步长的液位; f 是利用响应面法建立的 $D_{i,t+1}$ 与 $Q_{i,t,j}$ 、 $P_{i,t,j}$ 、 $D_{i,t,j}$ 之间的映射关系。

流量约束:

$$Q_{\min,i} < Q_{i,t} < Q_{\max,i} \quad (5)$$

式中: $Q_{i,t}$ 表示第 i 个泵站在 t 时刻的流量; $Q_{\max,i}$ 表示该泵站允许的最大流量; $Q_{\min,i}$ 表示该泵站允许的最小流量(可为0或负值)。

1.3 优化目标

① 泵站运行能耗最低

污水泵站运行能耗是其运行成本的重要组成部分,因此将泵站运行能耗最低作为优化调度的主要目标,该目标可描述为:

$$P = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n T \cdot P_{i,t} \quad (6)$$

式中: m 表示污水管网系统中泵的总数; n 表示调度的总时间步数; P 表示调度方案中不同时刻各泵的运行状况,是一个 $m \times n$ 的矩阵; T 表示时间步长; $P_{i,t}$ 表示第 i 个泵站在 t 时刻的运行状况。

② 泵站管理成本最低

过于复杂的污水泵站调度方案会带来较多的运行、维护等方面的管理成本,因此需要减少各泵的运行状态调整和启闭次数,对该目标的描述如式

(7)所示。

$$P = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n C_{i,t} \quad (7)$$

式中: $C_{i,t}$ 表示在 t 时刻是否需要对第 i 个泵进行运行状态调整。 $C_{i,t}$ 可表示为:

$$C_{i,t} = \begin{cases} 0 & P_{i,t} - P_{i,t-1} = 0 \\ 1 & P_{i,t} - P_{i,t-1} \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

1.4 优化算法

与早期的单目标最优化算法不同的是,多目标优化问题最终得到的结果往往是一组多个相互冲突的、目标之间相互权衡取舍后的结果集合,被称为非支配解集或者帕累托最优解集。目前常用的多目标进化算法有非支配排序遗传算法(NSGA)、多目标遗传算法(MOGA)、小生境帕累托遗传算法(NPGA)及非支配排序遗传算法2(NSGA-II)。但随着数据维度的上升,许多多目标进化算法的性能都会急剧下降。

本研究的泵站运行优化调度方案涉及两个优化目标,以及包括大量水泵运行状态在内的较高数据维度,运算复杂程度较大,为保证响应速度与精度,采用了基于自适应聚类的高维多目标进化算法(ACEA)进行求解。具体优化流程如图1所示。

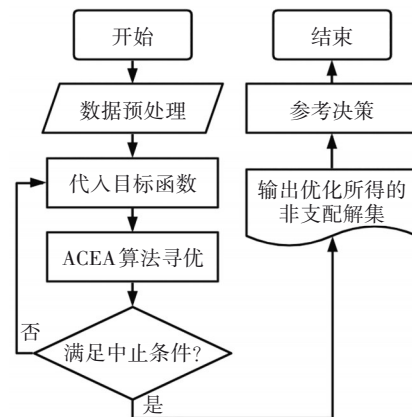


图1 采用ACEA求解优化调度方案流程

Fig.1 Flow chart for solving the optimal scheduling scheme using ACEA

2 研究区域与模型评估

2.1 研究区域概况

W市某片区排水系统的拓扑结构如图2所示,包含JA、OH和HTL三个污水泵站。管网水位测点均为2个,水泵分别为6、4、4台,共用一个雨量计。以2021年—2022年泵站运行数据集中的10 d数据

为训练集、5 d数据为测试集,进行泵站优化调度方案研究。

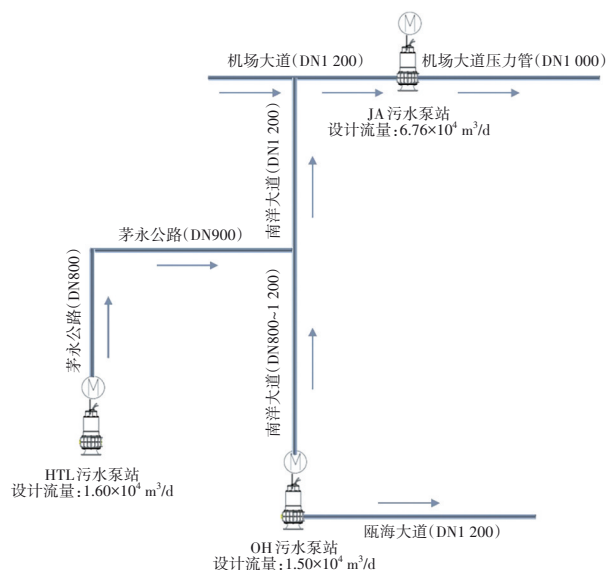


图2 研究区域污水泵站拓扑结构

Fig.2 Topology of sewage pumping stations in the study area

2.2 模型评估方法

采用最大误差(MAXE)、平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)这五个指标来评估所建立的泵站泵池液位预测模型的准确性。 R^2 值在0~1之间,越接近1则说明效果越好;其他四个指标越接近0则代表模型结果越好。

3 结果与讨论

3.1 泵站泵池液位预测精度

图3~5为3个污水泵站泵池液位变化预测的精度分析结果。

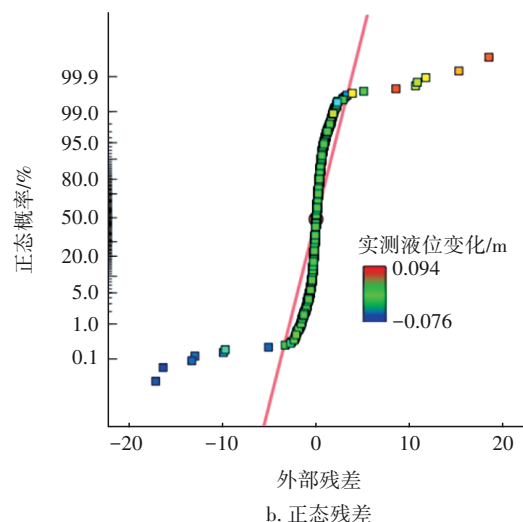
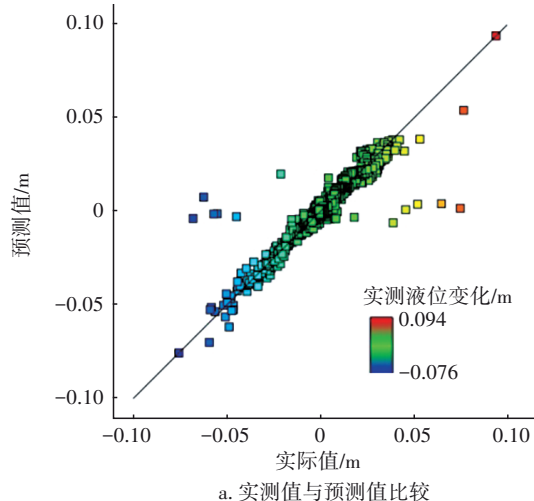


图3 OH污水泵站泵池液位预测结果精度分析

Fig.3 Accuracy of level prediction of OH pumping station

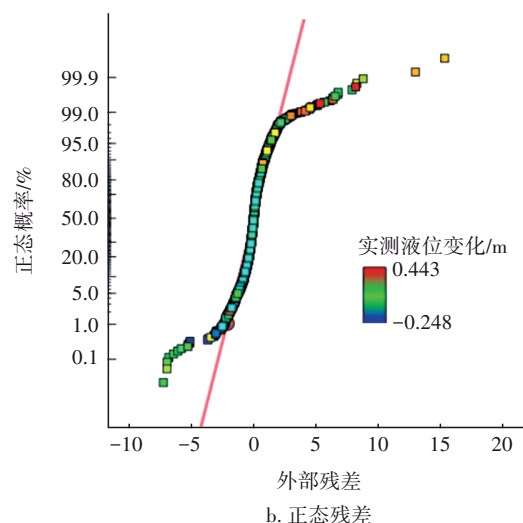
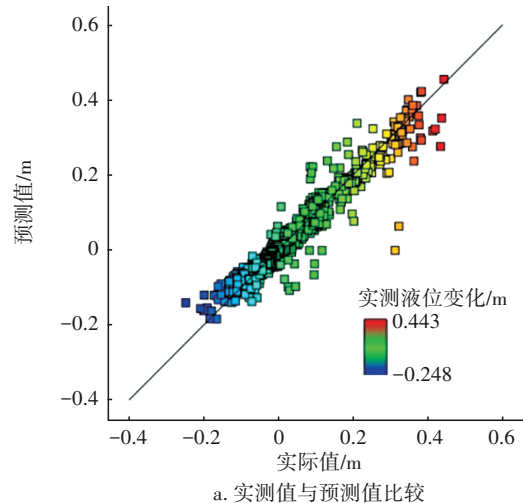


图4 HTL污水泵站泵池液位预测结果精度分析

Fig.4 Accuracy of level prediction of HTL pumping station

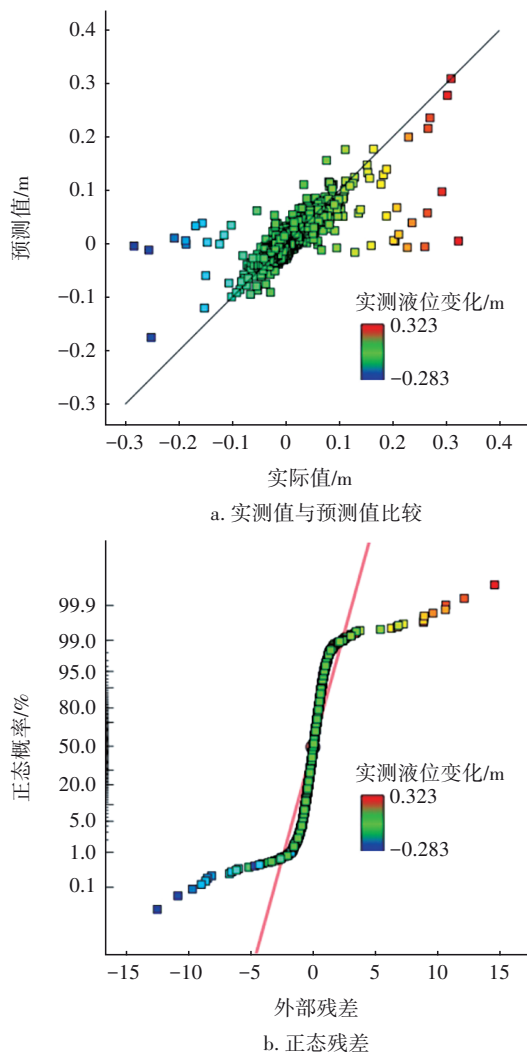


图5 JA污水泵站泵池液位预测结果精度分析

Fig.5 Accuracy of level prediction of JA pumping station

由图3(a)和图4(a)可知,响应面函数对OH和HTL污水泵站泵池液位变化的预测结果与实测值之间存在着良好的对应关系;图4(b)表明,HTL泵站绝大部分液位预测结果的残差分布接近一条直线,说明大部分液位预测结果的残差遵循正态分布;而OH泵站的残差分布接近“S”型,说明存在一定的不稳定性,误差的产生主要是由数据测量过程中的不稳定随机因素引起。整体而言,泵池液位的响应面预测函数仍能较好地反映泵站运行变量与泵池液位变化间的映射关系。

由图5可知,对于JA污水泵站,响应面函数的泵池液位变化预测结果与实测值之间对应关系较差;同时,液位预测结果的残差分布结果无法接近一条直线,说明大部分液位预测结果的残差没有遵

循正态分布,误差的产生主要是由建模不合理导致的系统误差引起,响应面函数不能较好地反映泵站运行变量与泵池液位变化间的映射关系。

为定量描述液位预测函数的精度,对预测结果的准确性指标进行了统计,结果见表1。一方面,三个泵站液位变化预测结果的MAXE、ME、MAE均较小,体现了利用响应面函数预测泵站液位变化的准确性;另一方面,JA污水泵站的 R^2 为0.575,说明响应面函数仅能解释该站泵池液位变化方差的57.5%,不能很好地反映泵站运行变量与泵池液位变化间的映射关系,而OH与HTL污水泵站的 R^2 则分别高达0.886和0.930,体现出响应面函数能很好地反映这两个泵站泵池液位变化,这与图3~5呈现的规律相符。

表1 泵站泵池液位变化预测结果准确性指标统计

Tab.1 Statistics of accuracy indicators of pump station water level prediction results

泵站	MAXE/m	ME/m	MAE/m	RMSE/m	R^2
JA	0.273	2.82×10^{-3}	1.11×10^{-2}	3.21×10^{-2}	0.575
OH	0.129	-5.26×10^{-4}	6.80×10^{-3}	1.51×10^{-2}	0.886
HTL	0.162	7.01×10^{-2}	5.54×10^{-3}	2.65×10^{-1}	0.930

由图2可知,JA污水泵站泵池存在机场大道和南洋大道两个方向干管的污水入流,研究所使用的数据集中缺失了机场大道方向污水的相关数据,使得响应面函数建模效果较差。若能进一步获取相关数据,可进一步提升JA污水泵站泵池液位预测模型的准确性。

3.2 调度结果分析

表2是按ACEA方法优化求得的5种方案,以及按历史调度方案进行泵站运行调度时各泵站的能耗以及调度复杂度。该片区泵站若按ACEA方法算得的调度方案运行,除方案3外,能耗均要比历史方案低,方案1、2、4、5的总体能耗要比历史方案低3%~24%,平均约13%,说明该优化调度方法能显著降低污水泵站运行能耗。另外,各优化调度方案的复杂度要比历史方案低5%~52%,平均约34%,说明该优化调度方法能显著降低调度方案的复杂度,有助于降低运行管理成本。

由表2还可知,能耗较高的调度方案其操作复杂度普遍较低,而操作复杂度偏高的调度方案则能耗普遍相对较低。这说明调度方案的能耗与其操作的复杂程度存在一定的对抗关系,决策者可根据

能耗与运行管理成本的实际需求选取合适的优化调度方案。另外,综合考虑能耗与操作复杂程度,相比于历史方案,所得优化调度方案具有明显的性能优势。

表2 ACEA算法算得的典型非支配解及历史调度方案的优化目标统计

Tab.2 Typical non-dominated solutions calculated by ACEA algorithm and optimization objective statistics of historical scheduling schemes

调度方案	能耗/(总台时·d ⁻¹)				复杂度/(次·d ⁻¹)			
	HTL	OH	JA	合计	HTL	OH	JA	合计
方案1	15.1	26.2	8.8	50.0	10	5	2	17
方案2	15.6	17.7	7.2	40.5	21	4	1	26
方案3	21.9	25.0	11.0	57.8	9	3	1	13
方案4	19.1	24.3	8.5	51.8	9	4	2	16
方案5	16.3	20.7	6.8	43.8	15	3	1	19
历史方案	19.1	24.1	10.3	53.5	22	4	2	28

4 结论

① 构建了一种分布式泵站泵池液位预测模型,利用所建立响应面函数的反函数,设定未来时刻的泵池液位目标,并通过基于高维多目标进化算法的优化方法,在旱天工况下,以降低泵站运行能耗和操作复杂度为目标对泵站调度方案进行优化。

② 对于W市某片区排水系统,若泵站按ACEA算法所得调度方案运行,绝大部分方案的能耗低于历史方案3%~24%,平均约13%,说明优化调度方法能显著降低污水泵站运行能耗。此外,各优化调度方案的复杂度要比历史方案低5%~52%,平均低约34%,即优化调度方法能显著降低方案的复杂性,有助于降低运行管理成本。

③ 调度方案的能耗与其操作复杂程度间存在一定的对抗关系,决策者需根据能耗与运行管理成本的实际需求选择合适的优化调度方案。

参考文献:

- [1] NADIA S, ANNE K, MORTEN B, *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.
- [2] 刘智晓. 碳中和视角下城市可持续排水系统构建及评估指标体系[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(16):1-15.

- LIU Zhixiao. Establishment and evaluation index system of urban sustainable drainage system from the perspective of carbon neutrality [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(16):1-15(in Chinese).
- [3] JORGE C, ALMEIDA M, BRITO R S, *et al.* Water, energy, and emissions nexus: effect of inflows in urban drainage systems[J]. *Water*, 2022, 14(6):868-873.
- [4] HSU N, HUANG C, WEI C, *et al.* Intelligent real-time operation of a pumping station for an urban drainage system[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 489:85-97.
- [5] PIRI J, PIRZADEH B, KESHTEGAR B, *et al.* Reliability analysis of pumping station for sewage network using hybrid neural networks-genetic algorithm and method of moment [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 145:39-51.
- [6] 袁刚. 基于预测控制方法的城市排水系统建模与控制研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2011.
YUAN Gang. Research on Model Predictive Control of Urban Drainage System [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2011(in Chinese).
- [7] 朱红林. 城市排水系统预测控制算法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
ZHU Honglin. Research on Model Predictive Control of Urban Drainage System [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009(in Chinese).
- [8] 侯淑芳. 城市排水系统节能优化控制[D]. 上海:上海交通大学, 2016.
HOU Shufang. Energy Saving Optimal Control of Urban Drainage System [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016(in Chinese).
- [9] FECAROTTA O, CARRAVETTA A, MORANI M, *et al.* Optimal pump scheduling for urban drainage under variable flow conditions[J]. *Resources*, 2018, 7(4):73-77.
- [10] HORVÁTH K, ESCH B, VREEKEN D, *et al.* Convex modeling of pumps in order to optimize their energy use [J]. *Water Resource Research*, 2019, 55(3):2432-2445.

作者简介:林永钢(1984-),男,江西萍乡人,硕士,正高级工程师,主要研究方向为排水系统模拟和水环境综合治理。

E-mail:36747645@qq.com

收稿日期:2023-01-07

修回日期:2023-05-15

(编辑:李德强)