

基于多目标优化的城市雨水系统控制策略研究

东阳^{1,2},李谐然²,姜巍²

[1.上海市市政工程设计科学研究所有限公司,上海市 200092;2.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:随着社会经济的发展,城市水系统精细化管理水平地提高对排水系统的运行控制提出了更高要求。传统的排水系统运行管理常基于单一性能目标和操作经验确定系统控制策略,而对排水系统的复杂性和多功能性考虑不足。集成随机采样、排水水力模型和非支配遗传算法,构建了多目标下的雨水系统控制策略优化求解算法,以上海市某排水分区为案例开展实证研究,研究成果为城市雨水系统的精细化运行管理提供科学决策方法参考。

关键词:雨水系统;多目标优化;水力模型;控制策略

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)09-0141-04

0 引言

近年来,国家和地方的发展规划与战略都对安全、韧性、智慧的城市基础设施建设提出更高的要求,如何建设布局合理、安全可靠、环境良好、管理有效、智慧韧性的城市现代化排水体系成为亟待解决的问题^[1-2]。

城市排水系统的运行性能需要匹配近年来不断提高的精细化管理水平,而排水系统的运行控制策略则直接影响系统功能作用地发挥。排水系统的复杂性和多重功能性决定了其运行控制策略的确定应是复杂系统的多目标优化问题,而现有排水系统实际运行控制的方案往往基于单一性能目标和操作经验确定,缺少系统性分析,使得排水系统日常运行管理的科学决策支撑能力不足^[3-4],同时其应对气象、社会经济等不确定性因素的韧性水平有待提升。

在此背景下,现有的排水系统运行管理模式已不能满足新形势下的要求。国内外学者对排水系统运行优化进行了一系列研究,主要采用常规优化、智能优化、计算机模型/软件辅助优化等方法^[5-9]。其

中计算机模型/软件辅助方法有效结合数学优化算法和计算机模型软件,具有结果直观、适用性强的特点,减少不必要计算过程的同时也规范化了系统寻优路径^[10-11]。

本研究综合考虑排水系统的环境、能耗和运行等多目标,建立了以水力模型、随机采样和非支配遗传算法为核心的雨水系统控制策略优化方法,并以上海市某排水分区为案例开展实证研究。

1 研究区域概况

研究区域为上海市某排水分区,面积为1.35 km²。如图1所示,该排水分区排水体制为雨污分流制,雨水管网总长8.97 km,有1座包含截流设施的雨水泵站,现状排水能力为1 a一遇。



图1 研究区域雨水管网分布图

泵站装有雨水轴流泵3台,单机流量2.30 m³/s,总排水能力6.9 m³/s。泵站的开泵水位(Ad)为2.95 m,

收稿日期: 2024-06-28

基金项目: 上海市青年科技启明星计划课题(21QB1404600);

2022年度上海城投科技创新计划项目(CTKY-ZDZX-2022-008)

作者简介: 东阳(1986—),女,博士,高级工程师,从事城市水系统分析、智慧排水等研究工作。

通信作者: 李谐然(1992—),女,硕士,工程师,从事智慧排水研究工作。电子信箱: lixieran@smedi.com

停泵水位(Ad)为-1.5 m。

2 技术路线

本研究以雨水系统水力模型为核心,基于多目标优化方法开展雨水泵站控制策略研究,总体技术路线如图 2 所示。

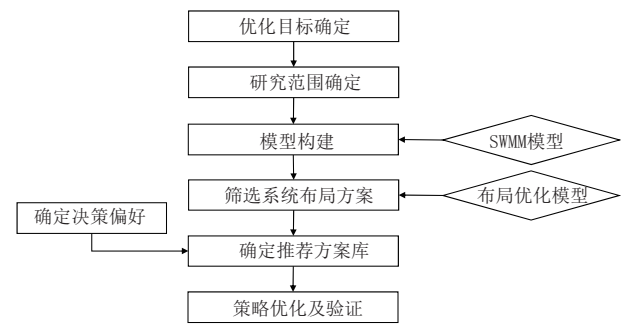


图 2 总体技术路线图

3 雨水系统模型构建

3.1 水力模型构建

基于研究区域已收集的现状管网数据,开展空间拓扑及管网属性数据的检查及修正,将修正后的管网数据作为水力模型构建的基础数据,导入 SWMM 模型。研究区域共包含雨水管网 749 段,雨水井节点 729 个,如图 3 所示。

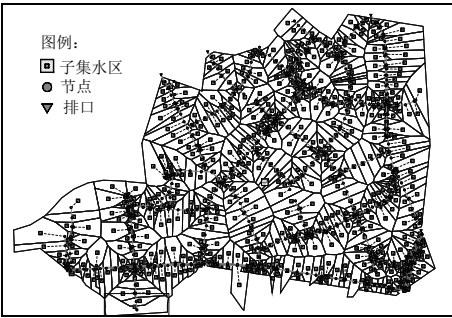


图 3 研究区域雨水系统模型概化图

依据泰森多边形法对研究区域子集水区进行初步自动划分,并结合区域土地利用、道路、水系等空间分布情况进行细化和调整,共划分出 728 个子集水区。子集水区下垫面概化为屋面、道路、水系、绿地、小区铺装、其他等 6 种类型。以子集水区为基本单元进行地表产汇流计算参数的设置。管道水动力则基于动力波法进行计算。

3.2 参数率定与验证

- 模型率定验证的基本流程如下。
- (1)参考设计规范或经验值进行初始参数值的设定；
 - (2)选取典型场次降雨 I,利用泵站前池水位数据,率定水文、水力关键参数；

- (3)计算率定场次降雨模拟结果的纳什系数,当纳什系数大于 0.5 时,认为结果精度符合标准,否则需要调整模型参数；
- (4)选取典型场次降雨 II,利用泵站前池水位数据,验证水文、水力关键参数；
- (5)计算率定场次降雨模拟结果的纳什系数,当纳什系数大于 0.5 时,认为结果精度符合标准,否则需要调整模型参数。

本研究分别采用 2022 年 6 月 5 日及 2022 年 6 月 29 日两场降雨进行水力模型参数的率定和验证,图 4 的模拟结果显示,两场降雨模拟结果的纳什系数均大于 0.5,已建模型可用于支撑雨水系统控制策略的优化研究。

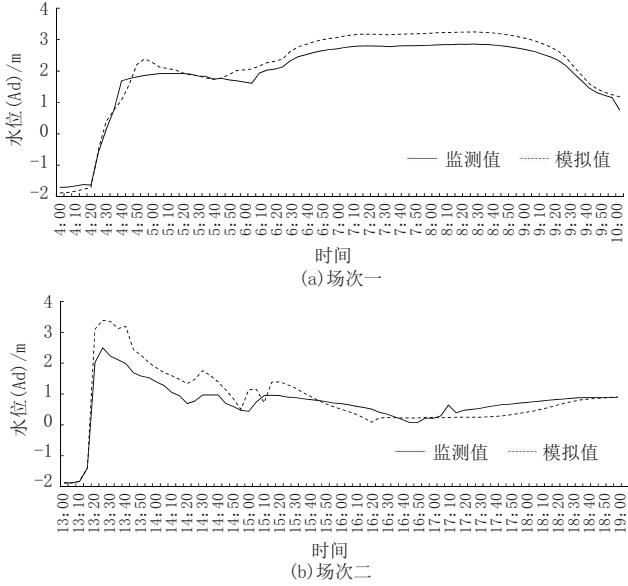


图 4 模型率定验证结果图

4 控制策略优化方案制定

4.1 优化目标及内容

本研究以多目标优化为核心,在考虑管网空间拓扑关系、设计水位、控制启闭合理性等约束条件下,通过大规模采样、优化计算、统计比选的方式筛选雨水泵站的控制策略优化方案。

4.1.1 优化目标

优化目标可分解为环境目标、能耗目标与运行目标。其中环境目标用管网节点总溢流量表征,能耗目标用泵机总运行时长表征,运行目标用泵机启闭频繁度表征。为了满足研究区域泵站防洪排涝的管理需求目标,优先保障环境目标最小化,在此前提下,尽可能进一步降低能耗目标及运行目标。

根据研究区域雨水系统规划目标,模拟降雨输入条件选取《上海市短历时暴雨强度公式修编与设

计雨型研究》成果中 5 a 一遇重现期下 120 min 短历时暴雨雨型,采用芝加哥设计雨型作为短历时设计雨型,雨型雨峰位置系数 $r=0.405$,120 min 总降雨量为 76.4 mm,过程线如图 5 所示。

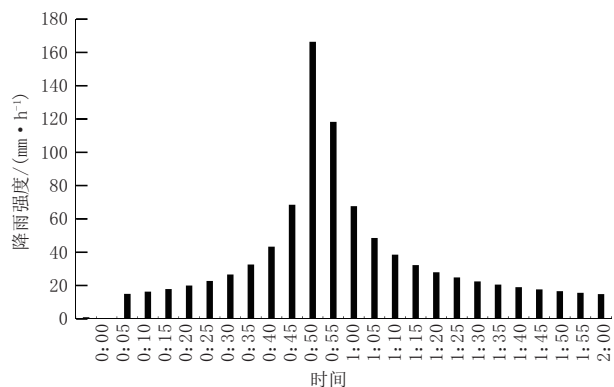


图 5 5 a 一遇降雨过程线

4.1.2 优化内容

控制策略优化的内容通常依据泵站技术管理规程的相关标准选取^[12],一般主要包括:

- (1)机组的开机台数、顺序及其运行工况的调节;
- (2)泵站与其他相关工程的联合调度;
- (3)泵站运行与供排水计划的调配;
- (4)在满足供排水计划前提下,通过站内运行机组运行调度和工况调节,改善进出水池流态,减少水力冲刷和水力损失。

本次控制策略的优化研究根据研究区域运行调度的实际情况,选取泵机开机台数及启泵水位工况作为核心优化内容。

4.1.3 约束条件

- (1)水位约束条件
- 设 #1 泵机启泵水位为 h_1 ,#2 泵机启泵水位为 h_2 ,泵机 #3 启泵水位为 h_3 ;为了实现优化后的泵站排水能力不小于优化前,启泵水位应小于或等于现状启泵水位(设为 $H_{\max}$),同时应大于现状停泵水位(设为 $H_{\min}$),水位约束条件表达式如下:

$$H_{\min} < h_1 < h_2 < h_3 \leq H_{\max}$$

- (2)泵机启闭约束条件

泵机频繁启停会造成水泵机组的加速磨损,增加故障率,减少其使用寿命。泵机启闭次数参考《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)^[13] 集水池设计条文说明设置,满足单台泵开停次数不宜大于 6 次/h 的要求。

4.2 优化方案思路

本研究集成随机采样、SWMM 水力模型及非支配遗传算法(NSGA-II),构建了多目标、多约束下的

求解算法,优化方案思路如图 6 所示。通过大规模随机采样,调用 SWMM 水力模型批量生成模拟工况,并以管网节点溢流量、启泵次数及泵机运行总时长作为目标函数,采用 NSGA-II 算法迭代计算,最终获取帕累托最优的方案解集。

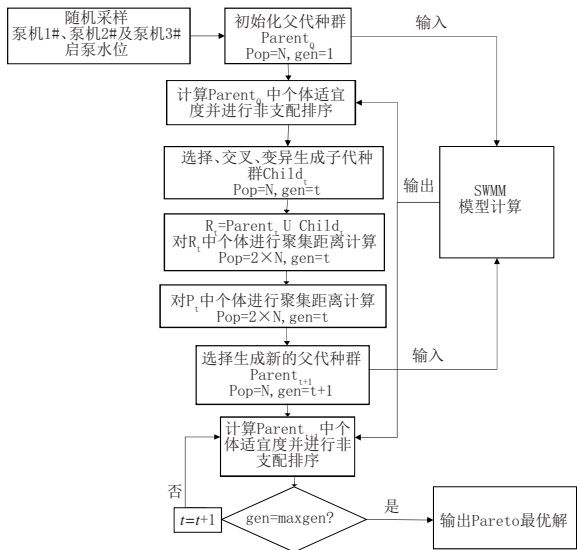


图 6 优化方案技术路线

4.3 优化方案制定

利用 Python 中的随机数生成命令,经过计算生成符合约束条件的启泵水位组,见表 1。

表 1 随机生成水位组合示例(部分) 单位:m

序号	1# 泵机水位	2# 泵机水位	3# 泵机水位
1	2.1	2.3	2.4
2	1.4	2.0	2.4
3	1.0	1.4	2.2
4	1.9	2.2	2.4
5	1.9	2.3	2.4
6	1.4	1.7	2.2
7	1.6	2.0	2.4
8	2.1	2.3	2.4
9	1.0	1.5	1.7
10	0.5	2.0	2.4
11	1.6	2.3	2.4
12	2.2	2.3	2.4

将生成的启泵水位组作为已建水力模型的泵站运行规则输入,不同泵机组合下的泵机状态及模拟泵前池水位变化模拟结果如图 7 所示。

5 优化方案结果

综合考虑样本容量合理性及运算速度,NSGA 种群数(N)取 30,迭代次数(maxgen)取 15,经过迭代

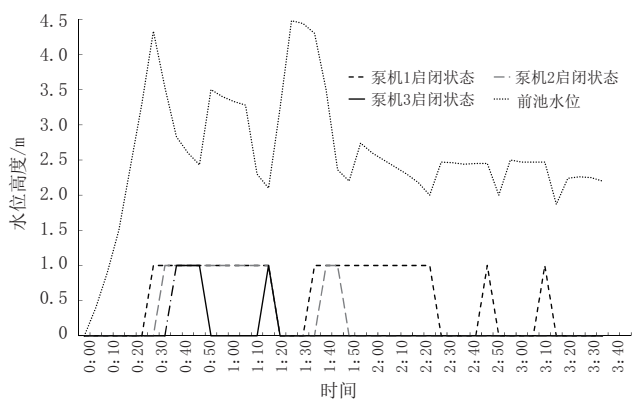


图7 随机启泵组合控制策略下水位变化
计算最终获取帕累托最优解集,如图8所示。

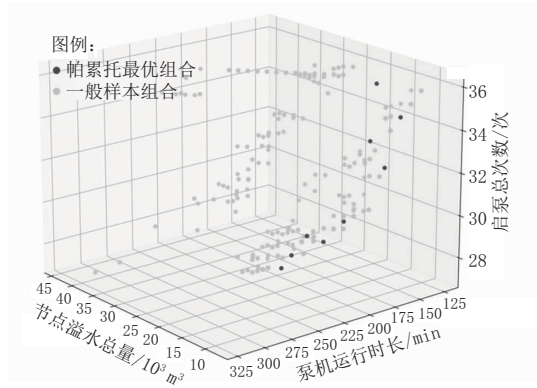


图8 帕累托最优组合选取示意图

经过15代优化迭代计算的泵机水位组合及对应的目标计算结果见表2。

由上述30种优化方案的模拟结果可见,相较于优化前,节点溢水量可以由优化前的 $36\,030\text{ m}^3$ 降至最低 $28\,332\text{ m}^3$,降幅为 $0.2\%\sim 21.4\%$ 。

考虑到最大程度提升系统排水能力的决策偏好,最终推荐方案选取以溢水总量最小化作为首要原则,兼顾启泵次数及运行时长最小化。最终推荐泵站运行水位组为:1#泵机启泵水位 $2.1\sim 2.2\text{ m}$,2#泵机启泵水位 $2.6\sim 2.7\text{ m}$,3#泵机启泵水位 $3.6\sim 3.7\text{ m}$ 。泵站依照该水位组合运行的情况下,4 h模拟时间内总启泵数为17次,3台泵机运行总时长为 245 min ,5 a一遇降雨工况下节点溢水总量约为 2.8万 m^3 ,相较于现行泵站运行方案降低约 21.4% 。

6 结论与建议

本文以上海市某排水分区为例,基于管网、泵站设计及普查资料构建了排水分区的雨水系统水力模型,综合考虑环境、能耗与运行三类目标,对雨水泵站的泵机运行控制策略进行了优化。优化方案模拟结果显示,排水分区的5 a一遇降雨工况下区域雨水节点的溢水总量能下降 21.4% ,且能耗及运行目标

表2 泵机水位组合计算结果

序号	1# 泵机 水位 /m	2# 泵机 水位 /m	3# 泵机 水位 /m	节点溢 水量 / (10^3 m^3)	启泵 总次数 / 次	泵机运行 总时长 / min
1	2.74	4.15	4.17	35.963	8	140
2	2.74	4.12	4.19	35.334	9	145
3	3.11	4.18	4.19	35.248	20	125
4	2.74	4.04	4.19	34.707	10	150
5	2.74	4.00	4.19	34.084	11	155
6	2.68	3.98	4.19	33.546	13	165
7	2.75	3.73	4.19	32.697	9	170
8	2.75	3.63	4.20	32.365	9	175
9	2.71	3.33	4.16	31.104	8	190
10	2.73	3.07	4.13	30.871	11	190
11	2.74	2.95	4.13	30.693	10	195
12	2.74	2.95	4.17	30.693	10	195
13	2.74	2.96	4.14	30.693	10	195
14	1.80	3.05	4.07	30.377	10	240
15	1.80	3.06	4.19	30.377	10	240
16	2.73	3.07	3.97	30.267	12	195
17	1.81	2.74	4.14	30.171	10	245
18	2.73	2.95	4.05	30.090	11	200
19	2.69	2.82	4.06	30.063	12	205
20	2.68	2.82	4.06	30.063	12	205
21	2.74	2.79	3.89	29.914	14	205
22	1.80	2.76	3.87	29.539	11	250
23	2.64	2.82	3.88	29.430	13	210
24	1.80	2.73	3.85	28.920	12	255
25	2.57	2.87	3.77	28.825	15	220
26	2.13	2.67	3.70	28.335	17	245
27	2.12	2.64	3.64	28.335	17	245
28	2.07	2.77	3.64	28.333	17	250
29	2.01	2.56	3.62	28.332	17	255
30	1.95	2.61	3.70	28.332	17	260

都能控制在合理范围内。该研究成果可为区域的泵站运行管理提供决策支撑。

参考文献:

[1] 吴江涛.引领黄河流域发展的“韧性都市”——郑州市“31382”防洪防涝规划体系的实践与探索[J].城市道桥与防洪,2023(10):13–16,32.
[2] 庞一敏.韧性城市研究进展及对临港新片区水安全韧性提升的启示[J].城市道桥与防洪,2022(2):127–130.
[3] 刘澜,王峰,李杨秋,等.厦门机场路雨水泵站调蓄优化设计[J].给水排水,2009,35(5):50–52.
[4] 孙艳涛.下穿铁路立交桥排水泵站设计及安全防护[J].给水排水,2015,41(4):45–47.
[5] 葛学伟,邓卫东,于宁.新建下凹桥区雨水调蓄泵站的优化设计[J].中国给水排水,2023,39(14):91–95.
[6] AHMADIANFAR I, HEIDARI A A, HANDOMI A H, et al. RUN beyond the metaphor: an efficient optimization algorithm based on Runge Kutta method[J].Expert systems with applications,2021(181):

(下转第153页)

- (1)道路满足两个阶段(施工和运营)使用要求;
- (2)处于自然保护区,最小程度的减少挖填方,减少对植被的破坏;
- (3)考虑道路下方埋设原水管道的空间;
- (4)施工方便迅速。

图 13 所示为道路设计方案,施工阶段主要是满足泵房施工时大型设备的进出,需要的道路宽度约为 5 m;考虑尽可能减少挖填方量并结合管道敷设,道路标高结合原山体小道标高采用半挖半填方案;同时减少管道埋深,对管道采用混凝土包封;由于临近水体一侧坡度较陡,道路填方的挡土高度约 2 m,方便现场施工采用预制悬臂式挡土墙^[6]。

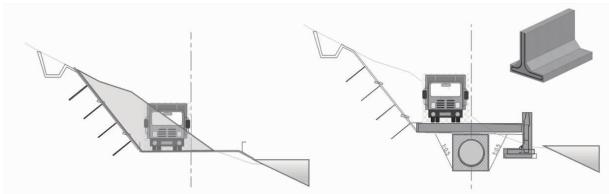


图 13 道路设计方案

结合以上方案的施工顺序为:

- (1)削坡护坡形成一阶段(施工阶段)临时道路,铺设简易水泥路面;
- (2)泵房施工完成后开挖临时道路铺设原水管道;
- (3)放置预制挡土墙并覆土铺设沥青路面。

5.2 桥梁设计

项目道路路由上有两处桥梁工程,连接水上泵房和陆上泵站的 30 m 联络桥,以及跨越一处 70 m 河道的桥梁,由于现场施工条件较为紧张且对进度要求高,采用预制空心板梁桥,选用最小标准跨度 10 m 构件,桩基采用水上施工的钻孔灌注桩,由于水上施工承台难度较大,采用墩接柱方案,如图 14 所示。

6 结 论

离岸式水库泵站受制于场地条件和环保要求,对结构设计提出了较高要求,本文以某取水项目为

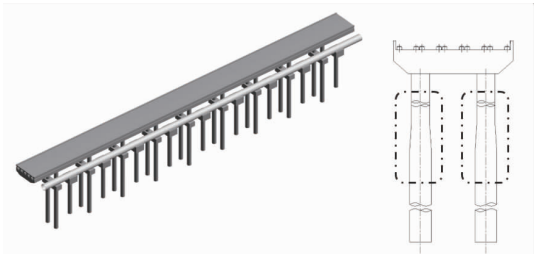


图 14 桥梁计方案

例,总结出以下要点:

- (1)泵房场地应根据场地不同的挖填方区域设计成高边坡和挡土墙形式,均质土体山坡可采用预应力锚索结合格构梁形式,土工格栅加筋式挡土墙可满足水库填方区域挡土要求。
- (2)水库泵房根据地形和自身荷载分布可采用桩基措施提高其抗倾覆和抗滑移稳定性。
- (3)水库泵房围堰在地质允许的条件下尽量采用钢板桩结合内支撑的形式,同时考虑预挖引孔措施,水上施工栈桥采用成品贝雷架,安装方便且经济性好。
- (4)泵站进场道路应同时考虑施工与运行阶段、管道敷设和地形条件三方面因素设计,桥梁应采用小跨度预制板梁结构。
- (5)水库泵站设计要特别考虑水上施工和环境保护的相应措施。

参考文献:

[1] 徐海宁,马龙飞.水库取水泵站结构设计和施工关键技术[J]. 特种结构,2022,39(5):63-68.

[2] 刘美,苏君博,师永健,巨志剑,周国强,齐桂满.板桥水库大型取水工程设计实例分析[J].给水排水,2022,58(1):69-75.

[3] 刘海奇.公路桥梁工程承台引孔钢板桩围堰施工技术要点分析[J].交通世界,2022,618(24):62-64.

[4] 凌汉清.桥梁水中深大基坑钢板桩围堰施工技术及应用[J].中国高新科技,2022,123(15):86-88.

[5] 蔡桂标.贝雷架钢便桥设计及关键施工技术[J].广东土木与建筑,2022,29(5):89-92.

[6] 陈建华.高陡边坡大口径塑料管道埋地施工方法介绍[J].给水排水,2010,46(6):98-99.

(上接第 144 页)

115079.1-115079.22.

[7] 张雷克,侯笑鹏,刘小莲,等.基于改进哈里斯鹰算法的梯级泵站优化调度[J].浙江大学学报(工学版),2023,57(12):2501-2512.

[8] 何彬浩,傅志敏,吴巍,等.基于改进遗传算法与动态规划的输水泵站日优化调度[J].水电能源科学,2023,41(2):128-132.

[9] 冯晓莉,王永兴,仇宝云.基于混合狼群算法参数优选的泵站群运行优化[J].农业工程学报,2020,36(3):30-36.

[10] 卫尤澜.城市雨水管道风险评估与雨水泵站优化运行研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.

[11] 时针宝,谭琼.基于水力模型的排水系统防涝应急调度预案制定[J].中国给水排水,2020,36(15):93-99.

[12] 王昊,张永祥,唐颖,等.雨水泵站水泵机组启停优化[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(8):98-103.

[13] GB 50014—2021,室外排水设计标准[S].