DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20251123

基于情景分析与水动力模型的分洪区洪水模拟及防洪工程效果评估

赵艳湄[1],徐 美[2],李小娟[1],郝晓丽[2],高 强[3]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048;2. 中国水利水电科学研究院,北京 100038;
3. 北京市水文总站,北京 100089)

摘要:蓄滞洪区作为防洪"底牌",区内防洪工程是否能够达到预期效果,对分洪区整体防洪能力的准确评估至关重要。研究采用情景分析法,基于一、二维耦合的水动力模型,通过模拟小清河分洪区内的洪水演进过程来分析并评估防洪工程效果。结果表明,针对不同洪水重现期,对防洪工程修建前后进行洪水模拟,通过对比洪水在河道与地表的不同演进结果,能精细化分析防洪工程效果,有效评估和掌握分洪区整体防洪能力;北京市小清河分洪区正在实施的其中三项防洪工程均能达到预期防洪效果,其中,工程A能有效保护大石河左岸的防洪安全;工程B能利于大宁水库分泄洪水尽快通过分洪区内铁路涵洞;工程C保障了分洪时小清河下泄流量不大于500 m^3/s,满足控泄要求。研究提出的方法能定量化分析防洪工程防洪效果,对指导蓄滞洪区防洪工程规划与建设以及蓄滞洪区安全评估具有重要意义。

关键词:情景分析;洪水模拟;防洪工程;水动力模型

中图分类号:TV873 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2026)01-0237-05

Flood Simulation of Flood-diversion Areas and Effect Evaluation of Flood Control Project Based on Scenario Analysis and Hydrodynamic Model

ZHAO Yan-mei[1], XU Mei[2], LI Xiao-juan[1], HAO Xiao-li[2], GAO Qiang[3]

(1. College of Resource Evironment and Tourism, The Capital Normal University, Beijing 100048, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
3. Beijing Hydrological Station, Beijing 100089, China)

Abstract: As a "last resort" for flood control, the effectiveness of flood control projects in flood detention area is crucial for accurately assessing the overall flood control capacity of the area. Based on a one- and two-dimensional coupled hydrodynamic model and scenario analysis method, the effectiveness of flood control projects was evaluated by simulating the flood evolution process in the Xiaoqing River flood-diversion area. The results show that by simulating floods for different recurrence periods before and after the construction of flood control projects and comparing the different evolution results of floods in watercourse and on the surface, the effectiveness of flood control projects can be analyzed in detail, and the overall flood control capacity of the flood diversion area can be effectively evaluated; Three of the flood control projects currently being implemented in the Xiaoqing River flood diversion area in Beijing can achieve the expected flood control effects. Specifically, Project A can effectively protect the flood control safety of the left bank of the Dashijiang River; Project B can facilitate the rapid passage of released flood from the Danning Reservoir through the railway culvert in the flood diversion area; Project C ensures that the discharge of the Xiaoqing River during flood diversion does not exceed 500 m^3/s, meeting the requirements of flood control. The proposed method can quantitatively analyze the effect of flood control projects and is of great significance for guiding the planning and construction of flood control projects in flood detention areas and the safety assessment of these areas.

Key words: scenario analysis; flood simulation; flood control project ;hydrodynamic model

收稿日期:2025-06-23,**修回日期**:2025-09-05,**接受日期**:2025-09-12

作者简介:赵艳湄(2001-),女,硕士研究生,研究方向为城市洪涝模型模拟,E-mail:2230902169@cnu.edu.cn

通讯作者:李小娟(1965-),女,教授、博导,研究方向为资源环境遥感与GIS,E-mail:lixiaojuan@cnu.edu.cn

中国知网 https://www.cnki.net

1 引言

蓄滞洪区通过滞纳超标准洪水、削减洪峰，保障下游地区安全，是防御大洪水的“底牌”。国外较早开始建设蓄滞洪区，如日本建设的渡良赖滞洪区，其区域内不进行生产活动，形成了湿地型分洪区；美国在密西西比河下游设置了少人或无人的滞洪区和行洪区，汛期用于行泄洪水，平日仅用作集约化种植[1]，此类分洪区在泄洪时均能正常启用。我国建设蓄滞洪区时，经济欠发达，分洪作用经济发展矛盾不显著，但随着经济快速发展，蓄滞洪区的决策与启用难度变大，洪水来临时，不仅要保护蓄滞洪区下游对象，还要考虑降低蓄滞洪区内部分洪时的损失。因此，如何合理建设并有效使用蓄滞洪区，使其不仅能起到防洪作用，又能实现资源的合理利用，是当前我国蓄滞洪区建设管理与运用的核心问题[2-3]。目前，已提出各类评价指标对蓄滞洪区能否安全启用进行评价，此类评价仅从区内工程建设情况、经济情况等指标对蓄滞洪区进行分级，大大限制了蓄滞洪区的安全启用[4]。如邹佳宇等[5]运用 MIKE21 研究单退圩和蓄滞洪区联合分洪运用，为鄱阳湖分蓄洪工作提供参考；杨炳辉等[6]以长江洪水为研究对象，建立一二维耦合水动力模型，对洞庭湖区的水位和超额洪量进行计算；练迪等[7]通过 MIKE11 水动力模型，分别对蓄滞洪区的围内蓄滞水量河道蓄滞水量进行模拟研究。但现阶段针对蓄滞洪区内的具体防洪工程的模拟研究较少，而防洪工程是否建设完善决定了蓄滞洪区能否正常启用，因此分析其防洪效益并进行合理评价至关重要。本文以小清河分洪区为例，采用情景分析方法，基于水动力模型，模拟典型情景下分洪区可能的洪水淹没，分析防洪工程的防洪效益，助力小清河分洪区实现高标准建设管理与运用。

2 研究对象

小清河分洪区横跨北京与河北，地面高程 26～50 m，河道纵坡度约 1/1 500～1/2 000，在北京市面积约为 232 km^2。当卢沟桥上游来水超过 2 500 m^3/s 时，启用永定河滞洪水库进行滞洪。大宁水库下泄具体情况见表 1。

现拟在分洪区内修建三项主动防洪工程。一是分洪区良乡“卫星城”安全区南围堤（工程 A），用于保证安全区不进水；二是黄良铁路桥涵改造工程（工程 B），用于使永定河洪水顺利通过桥涵；三是小清河干流分洪工程（工程 C），主要任务是在设计标准情况下，将进入小清河的永定河分洪洪水引入位于左岸的分洪区域，使小清河流量控制在 500 m^3/s，保障分洪区分洪、蓄洪、退洪调度运用安全。研究区概况图见图 1。

表 1 大宁水库下泄情况

Tab. 1 The discharge of the Daning Reservoir

重现期/a	分洪/($m^3 \cdot s^{-1}$)	下泄水量/$10^4 m^3$
100	214	308
200	3 130	3 770

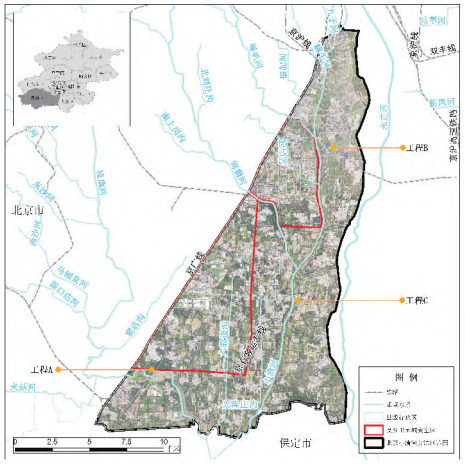

图 1 研究区概况图

Fig. 1 Study area

3 研究方法

3.1 一、二维水动力模型

3.1.1 模型构建

河道一维水动力模型构建时，主要考虑分洪区内小清河、大石河等 7 条主要河流。河道内洪水演算过程属于明渠非恒定流模拟范畴，通过圣维南方程组进行描述，采用显格式的有限差分法的一维水动力模型进行求解，该方法能很好地处理干床问题[8]。

二维地表建模时，采用边长 5～10 m 的不规则网格进行剖分，详细刻画道路、铁路、桥涵等区域的微地形阻水、导水作用[9-10]，共剖分约 86×10^4 个网格。通过 DEM、遥感影像、土地利用对网格进行赋值，如高程、地类、初始下渗、稳定下渗等参数，使用数据具体情况见表 2。二维地表水动力模型采用有限体积法求解连续性方程，通过有限差分法求解动量方程[11]。

将一维河道水动力模型和二维地表水动力模型耦合，依据分洪区的空间结构及模型的物理机制进行模拟计算。模型耦合采用时间追赶法进行

中国知网 https://www.cnki.net

表 2　数据来源

Tab. 2　The origin of the data

序号	数据	精度	年份	来源
1	河道断面		2018～2022	房山区水务局
2	遥感影像图	0.5 m	2023	北京市测绘院
3	DEM	5 m	2022	北京市测绘院
4	土地利用数据	0.1 m	2023	北京市测绘院

数据交换,模型互为边界条件,基于“耦合节点水位相同”的假定,计算水流在两个模型之间的演进过程,一、二维水动力模型计算时间步长分别为 1、100 s[12-13]。模型概化图见图 2。

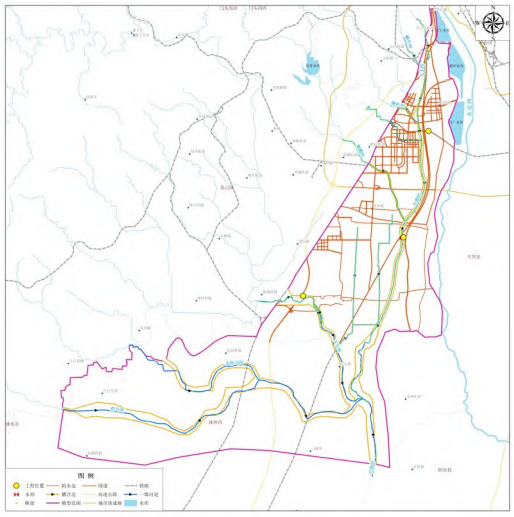

图 2　模型概化图

Fig. 2　Generalization model picture

模型在汇入研究区内主要河道上游断面设置流量过程作为上边界,在主要流出河道即白沟河下游断面设置水位过程作为下边界。

3.1.2　模型率定与验证

小清河分洪区位于大清河流域,研究参考大清河流域内洪水分析资料中的糙率参数赋值,结合分洪区下垫面类型,确定网格的糙率、下渗等基础产汇流参数(表 3)。

表 3　地表产流系数与糙率率定值

Tab. 3　Surface runoff coefficient and roughness rate

地类	初损量/mm	初始下渗率/(mm·h^{-1})	稳定下渗率/(mm·h^{-1})	糙率
建筑	5.00	5.00	3.00	0.070
草地	10.00	30.00	20.00	0.065
灌木	10.00	30.00	20.00	0.065
林地	10.00	30.00	20.00	0.065
道路	5.00	0.00	0.00	0.035
裸地	10.00	30.00	20.00	0.040
硬化地表	5.00	10.00	5.00	0.035

选取大清河流域“23·7”洪水对河道一维水动力模型进行率定,河道糙率取值 0.025。取流域内水文资料条件较好的漫水河站,对 10 场洪水过程进行模拟,其中 8 场洪水的洪水洪峰模拟误差均在 10%以内。漫水河站“23·7”场次洪水模拟流量过程与实测流量过程对比显示,该场洪水实测洪峰流量为 5 300 m^3/s,模拟洪峰流量为 4 790.67 m^3/s,洪峰相对误差 9.4%,小于 10%;实际峰现时间为 12:00,模拟结果峰现时间为 13:00,峰现时间晚 1 h,模拟效果良好。

选择 3 个关键断面最高水位与实测最高水位进行比较,绝对误差均小于 20 cm,满足模型验证要求。故可将率定的大清河流域糙率用于小清河分洪区一、二维精细化水动力模型进行模拟计算。

3.2　情景设置

研究考虑洪源遭遇情况并结合防洪工程建设情况,根据洪水量级与工程工况的多种组合,设置典型洪水情景。小清河分洪区可能洪水来源包括本流域暴雨洪水及永定河分洪,对本地流域洪水进行模拟,设置小清河本地 50、100 年一遇两个方案;其次,由于永定河发生 100、200 年一遇洪水时需向小清河分洪区进行分洪,设置现状工况下小清河 50 年叠加永定河 100 年和小清河 100 年叠加永定河 200 年两个方案。为分析防洪工程防洪效果,设置三项工程建成并启用分洪区的 2 个方案,具体情况见表 4。

表 4　洪水模拟方案情况

Tab. 4　Flood evolution scheme combination

方案	工程建设与否	永定河是否分洪	洪水来源与重现期/a	
			永定河	小清河
1	否	否		50
2	否	否		100
3	否	是	100	50
4	否	是	200	100
5	是	是	100	50
6	是	是	200	100

3.3　模型边界

小清河流域各支流缺少实测流量资料,因此采用综合分析、合理选用的原则,移植邻近地区有关公式及参数,采用 1975 年北京市市政设计院编制的推理公式“简化式”推求各河流不同重现期设计洪水过程,刺猬河考虑崇青水库下泄,如图 3 所示。大宁水库下泄过程按调度方案进行,如图 4。

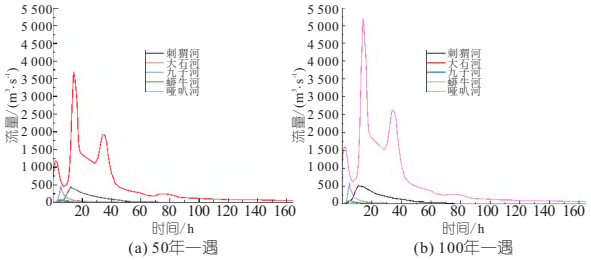

图 3　小清河 50、100 年一遇洪水过程

Fig. 3　Xiaoqing River 50 a, 100 a flood process

中国知网　https://www.cnki.net

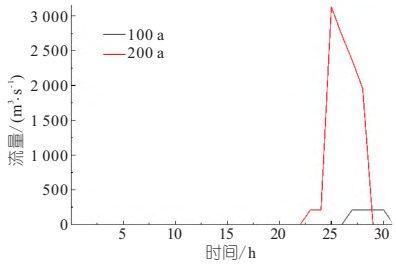

图 4 大宁水库下泄过程

Fig. 4 The process of discharging Daning Reservoir

4 结果与分析

4.1 模拟淹没结果分析

对模拟结果工程 C 处下游断面流量、总淹没面积、淹没面积占比、最大淹没水深、平均淹没水深进行统计，见表 5。

表 5 模拟结果统计

Tab. 5 Statistics of simulation result

方案	工程 C 处下游断面流量 /($m^3 \cdot s^{-1}$)	总淹没面积 /km^2	淹没面积占比 /%	最大淹没水深 /m	平均淹没水深 /m
1	443.68	24.21	9.87	10.02	1.33
2	541.02	33.88	13.81	11.20	1.46
3	413.81	43.57	17.76	10.29	1.23
4	613.98	130.70	53.28	12.25	1.36
5	500.00	42.14	17.17	10.34	1.09
6	500.00	82.51	33.64	12.03	1.20

方案 1、2 为分洪区遭遇本地 50、100 年一遇洪水且三项工程未建情景。50 年一遇洪水时，分洪区内刺猬河、哑叭河两侧出现淹没；100 年一遇洪水时，淹没范围增大至 33.88 km^2，由于分洪口门工程 C 未实施，此处断面洪峰为 541.02 m^3/s，超过小清河限泄流量。最大淹没水深见图 5(a)、(b)。

方案 3、4 分别为分洪区遭遇永定河 100 年及 200 年一遇分洪叠加本地洪水且三项工程未建情景。模拟结果显示，地表淹没面积分别为 43.57、130.72 km^2，平均淹没水深分别为 1.23、1.36 m。方案 3 中，淹没主要出现在小清河上游两岸，基本不影响两处安全区，满足该分洪区防洪标准；而方案 4 中，分洪区内出现较大范围淹没，洪水淹没面积剧增，达 130.72 km^2，超过分洪区面积的一半，最大淹没水深为 12.25 m，安全区亦不同程度受淹，最大淹没水深见图 5(c)、(d)。

方案 5、6 与方案 3、4 洪水重现期相同但工况不同，为三项防洪工程建设后情景。模拟结果显示，地表淹没面积分别为 42.14、82.51 km^2，平均淹没水深分别为 1.09、1.20 m，与方案 3、4 结果相比，淹没范围与水深均减少，方案 6 与方案 4 相比，洪水对安全区影响也显著减小。最大淹没水深见图 5(e)、(f)。

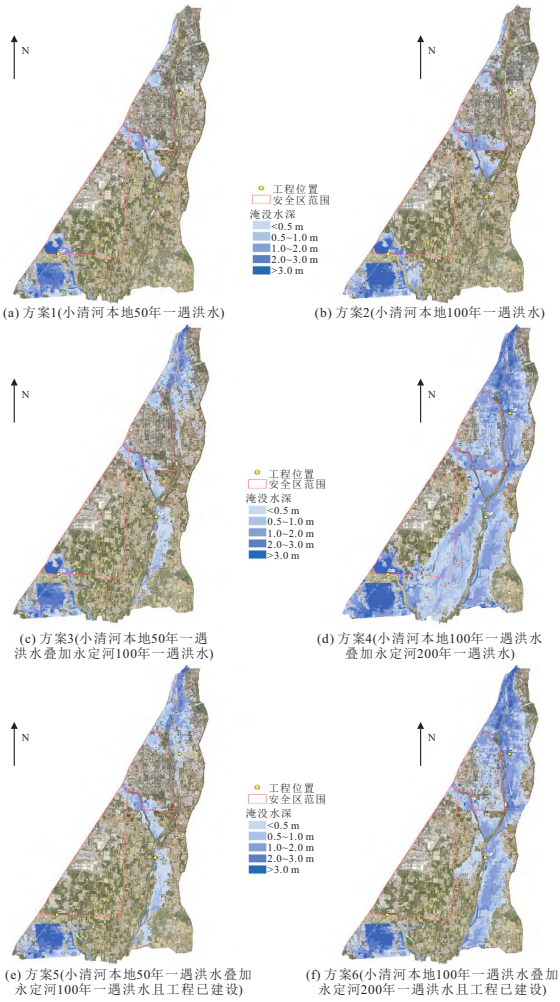

图 5 方案 1～6 最大淹没水深图

Fig. 5 The maximum inundation depth map of scheme 1-6

4.2 工程防洪效果分析

方案 1～4 为三项防洪工程修建前情景，无论分洪区同时遭遇永定河分洪叠加本地洪水，或只遭遇本地洪水，大石河左堤均出现洪水漫溢，且淹没程度随洪水重现期增大而增大。

方案 5、6 为三项工程修建后情景，分别与方案 3、4 进行比较。结果表明，三项工程实施后，整体淹没情况均有所减轻，且方案 6 与方案 4 相比，减淹程度非常显著。主要原因是分洪口门工程 C 建成后，主动将河道洪水引进小清河左岸，减小了河道洪水对小清河右岸的淹没风险，其次是南围堤工程 A 的修建，保护了良乡卫星城安全区南部和大石河左堤重要设施。此外，方案 3、4 中，工程 C 下游断面流量分别为 413.81、613.98 m^3/s；工程 C 建成后，即方案 5、6 中，工程 C 下游断面流量控制在 500 m^3/s，符合小清河限泄要求。

对于铁路桥涵改造工程 B，建成前即方案 3、4 结果显示，黄良铁路桥雍水深度分别为 2.39、2.42 m，建成后即方案 5、6 结果显示，黄良铁路

中国知网 https://www.cnki.net

桥雍水深度分别为 1.92、1.97 m,说明工程 B 建成后铁路桥阻水减轻;此外,对比方案 4、6,即永定河发生 200 年一遇洪水时,黄良铁路桥平均淹没历时分别为 30、29 h,也表明桥涵过水能力有所提升,有利于永定河分泄洪水快速通过黄良铁路桥涵。

5　结论

a. 研究通过构建小清河分洪区一、二维水动力模型,利用情景分析法,针对分洪区遇不同来源及不同重现期洪水时三项防洪工程建设前后的洪水演进过程进行了精细化模拟,通过多情景模拟结果对比,分析防洪工程对洪水演进造成的影响,从而评估工程的防洪效果。

b. 评估结果显示,工程 A 保护了良乡卫星城安全区南面的安全,工程 B 的改造使得洪水能够快速通过,工程 C 的修建使小清河流量得以控制,符合控泄要求,保障了下游河道行洪能力,缓解了分洪区下游白沟河、兰沟洼等河流的防洪压力。总体来说,三项防洪工程建设后,可降低小清河分洪区受淹程度,提升分洪区安全水平与运用能力,有利于小清河分洪区的安全启用,防洪工程可达到预期防洪效果。但现状条件下,刺猬河、哑叭河等河流需加强治理,安全区内也需要采取一定改造措施,以免永定河大宁水库向小清河分洪区分洪时,威胁区内居民生命财产安全,各部门应加快工程建设,尽快实现蓄滞洪区高标准建设。

c. 研究结果表明,利用情景分析方法和数值模拟方法对防洪工程可能造成的洪水影响进行模拟与对比分析,可实现有效地、量化地评估其防洪效果,有助于提升蓄滞洪区的防洪工程规划建设水平,准确评估其安全应用标准。

参考文献:

[1] 丁志雄,李娜,俞茜,等. 国家蓄滞洪区土地利用变化及国内外典型案例分析[J]. 中国防汛抗旱,2020,30(6):36-43.(DING Z X, LI N, YU Q, et al. Land use variations of national flood storage and detention areas and typical case analysis in domestic and abroad[J]. China flood & drought management, 2020, 30(6): 36-43.(in Chinese))

[2] 王艳艳,李娜,俞茜,等. 我国蓄滞洪区建设管理问题及措施研究[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(4):1-7.(WANG Y Y, LI N, YU Q, et al. Research on the issues and measures of construction and management of flood storage and detention areas in China[J]. China flood & drought management, 2022, 32(4): 1-7.(in Chinese))

[3] 陈福容. 某蓄滞洪区优化调度模型应用研究[J]. 水电能源科学,2021,39(8):103-106.(CHEN F R. Application research on optimal scheduling model of flood storage and detention area[J]. Water resources and power, 2021, 39(8): 103-106.(in Chinese))

[4] 李娜,王静,俞茜,等. 蓄滞洪区安全运用分析评价体系构建及应用[J]. 中国防汛抗旱,2024,34(12):46-54.(LI N, WANG J, YU Q, et al. Construction and application on safety operation analysis and evaluation system for flood storage and detention areas[J]. China flood & drought management, 2024, 34(12): 46-54.(in Chinese))

[5] 邹佳宇,温天福,顾平,等. 超标准洪水下鄱阳湖单退圩和蓄滞洪区联合分洪运用研究[J]. 水利水电科技进展,2025,45(2):54-62,68.(ZOU J Y, WEN T F, GU P, et al. Study on joint operation of semi-restoration polder and detention and retention area for flood diversion in Poyang Lake under extreme flood conditions[J]. Advances in science and technology of water resources, 2025, 45(2): 54-62, 68.(in Chinese))

[6] 杨炳辉,施勇,栾震宇,等. 洞庭湖区超标准洪水数值模拟研究[J]. 水利水运工程学报,2023(2):34-42.(YANG B H, SHI Y, LUAN Z Y, et al. Study on super-standard flood situation in Dongting Lake area[J]. Hydro-science and engineering, 2023(2): 34-42.(in Chinese))

[7] 刘艳,康爱卿,虞云飞,等. 北江流域“2022·6·22”暴雨洪水分析[J]. 水资源与水工程学报,2024,35(1):17-25.(LIU Y, KANG A Q, YU Y F, et al. Analysis of rainstorm “2022·6·22” in the Beijiang River Basin[J]. Journal of water resources and water engineering, 2024, 35(1): 17-25.(in Chinese))

[8] 徐美,孙杨,刘舒. 北京城市精细化洪涝模型初步构建与应用[J]. 中国防汛抗旱,2020,30(7):16-21.(XU M, SUN Y, LIU S. Preliminary building and application of Beijing urban flood models[J]. China flood & drought management, 2020, 30(7): 16-21.(in Chinese))

[9] 刘媛媛,刘业森,郑敬伟,等. BP 神经网络和数值模型相结合的城市内涝预测方法研究[J]. 水利学报,2022,53(3):284-295.(LIU Y Y, LIU Y S, ZHENG J W, et al. Intelligent rapid prediction method of urban flooding based on BP neural network and numerical simulation model[J]. Journal of hydraulic engineering, 2022, 53(3): 284-295.(in Chinese))

(下转第 151 页)

中国知网 https://www.cnki.net

b. 在保证支线管道承压能力的前提下,加快支线阀门的关阀速率,可通过水锤波与降压波的时空叠加效应削弱后者的负面作用,增大干线末段管道的压力最小值,而不影响干线末段管道的压力最大值,为多支线输水工程动态调控提供了理论依据。

c. 在保证单向调压塔塔底高程满足施工设计要求的前提下,减小单向调压塔截面积可降低塔内最终水位提高管线水锤防护效果,而不影响管线管道的压力最小值。该优化既减少土地资源占用,又通过调节压力传播特性动态控制极值,为复杂地形下的水锤防护提供了经济高效的解决方案。

参考文献:

[1] 刘欢. 压力流树状管网停泵及末端关阀水锤研究[D]. 西安:长安大学,2022.(LIU H. Study on the water hammer of the stopping pump and the end closing valve of the pressure flow tree pipe network[D]. Xi'an: Changan University, 2022.(in Chinese))

[2] 顾元皓,牧振伟,周镇,等. 基于 KY PIPE 的管道输水工程停泵水锤分析及防护方案研究[J]. 水电能源科学,2024,42(4):168-172.(GU Y H, MU Z W, ZHOU Z, et al. Analysis and protection scheme of pump stopping water hammer in water conveyance pipeline project based on KYPIPE[J]. Water resources and power, 2024, 42(4): 168-172.(in Chinese))

[3] 王腾跃,张健,倪尉翔. 管线末端含虹吸断流结构的输水工程水锤防护[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(2):358-364,377.(WANG T Y, ZHANG J, NI W X. Water hammer protection in water conveyance project with siphon breaking structure at end of pipeline[J]. South-to-north water transfers and water science & technology, 2021, 19(2): 358-364, 377.(in Chinese))

[4] 张醒,刘跃飞,姜劲. 阀门类型对离心泵输水系统停泵特性影响研究[J]. 中国农村水利水电,2023(9):115-121.(ZHANG X,LIU Y F,JIANG J. Research on shutdown characteristics of water delivery system with centrifugal pumps and different types of valves[J]. China rural water and hydropower, 2023(9):115-121.(in Chinese))

[5] 李源,吕谋,王永康,等. 基于水锤防护的多级增压泵站两阶段关阀策略优化研究[J]. 水电能源科学,2024,42(6):143-147.(LI Y, LV M, WANG Y K, et al. Research on optimization of two-stage valve shutoff strategy of multi-stage booster pump stations based on water hammer protection[J]. Water resources and power, 2024, 42(6): 143-147.(in Chinese))

[6] 赵立杨,冯梦雪,李昊,等. 气垫调压室联合单向塔的停泵水锤防护研究[J]. 水电能源科学,2023,41(5):81-84,47.(ZHAO L Y, FENG M X, LI H, et al. Research on pump failure water hammer protection of air cushion surge chamber and one-way surge tank[J]. Water resources and power, 2023, 41(5): 81-84, 47.(in Chinese))

[7] 李建刚,蒋劲,范征,等. 长距离输水管线压力波动预止阀开阀时间对突然停泵水锤低压的影响[J]. 水电能源科学,2014,32(10):155-158.(LI J G, JIANG J, FAN Z, et al. Influence of opening time of surge anticipation valve on negative pressure in long-distance water-supply pipelines with pumping accident[J]. Water resources and power, 2014, 32(10): 155-158.(in Chinese))

[8] 褚志超,吴建华,郭伟奇,等. 空气阀进排气流量系数对停泵水锤的敏感性研究[J]. 水电能源科学,2019,37(5):152-155.(CHU Z C, WU J H, GUO W Q, et al. Sensitivity study of inlet and exhaust flow coefficient of air valve for pump water hammer[J]. Water resources and power, 2019, 37(5): 152-155.(in Chinese))

[9] 中国工程建设标准化协会. 城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程:CECS193-2022[S]. 北京:中国计划出版社,2022.(China Engineering Construction Stand Ardiiation Association. Technical specification for long distance water transmission pipeline engineering of urban water supply: CECS 193-2005[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.(in Chinese))

(上接第 241 页)

[10] 郝晓丽. 城市暴雨洪涝多尺度模拟技术研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2022.(HAO XIAOLI. Multi-scale simulation study of urban rainstorm flooding[D]. Beijing:China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2022.(in Chinese))

[11] ZHANG H P, WU W M, HU C H, et al. A distributed hydrodynamic model for urban storm flood risk assessment[J]. Journal of hydrology, 2021, 600: 126513.

[12] PENG F, HAO X L, CHAI F X. A GPU-accelerated two-dimensional hydrodynamic model for unstructured grids[J]. Water, 2023, 15(7): 1300.

[13] 李德龙,黄萍,许小华,等. 柘林水库第二溢洪道行洪区洪水风险分析[J]. 水电能源科学,2020,38(12):62-65.(LI D L, HUANG P, XU X H, et al. Flood risk analysis of the second spillway of flood way district in Zhelin Reservoir[J]. Water resources and power, 2020, 38(12): 62-65.(in Chinese))

中国知网 https://www.cnki.net