

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250695

单向调压塔与支线动态关阀联合防护对长距离输水系统水锤压力的影响研究

王腾跃¹, 王超^{2,3}, 张小莹^{2,3}, 刘甲春⁴

(1. 德州黄河河务局齐河黄河河务局, 山东 德州 251100; 2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 4. 宁波大学土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对长距离输水工程末段水锤防护难度大、压力极值动态调控复杂等问题, 采用瞬变流计算的特征线法探究停泵过程中不同支线阀门的动态关闭对管线压力调控的影响特性。研究表明, 在长距离供水工程管道末段水锤防护中, 设置多个单向调压塔联合进行阶梯式防护方案能够取得较好的防护效果; 采用干线一支线阀门分阶段关闭策略时, 加速一支线阀门关闭可优化防护效果; 减小单向调压塔面积可降低塔内最终水位, 实现压力极值动态调控且不影响最小压力。研究揭示了多塔联合防护与支线关阀协同消波的机制, 提出了兼顾工程安全与经济效益的水锤防护优化方案, 为复杂地形下长距离输水工程设计提供了理论依据。

关键词: 水锤防护; 单向调压塔; 关阀规律; 供水工程; 停泵水锤

中图分类号: TV672⁺.2; TV732⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0147-05

Study on Influence of Combined Protection of One-way Surge Tank and Branch Dynamic Valve Closing on Water Hammer Pressure of Long-distance Water Conveyance System

WANG Teng-yue¹, WANG Chao^{2,3}, ZHANG Xiao-ying^{2,3}, LIU Jia-chun⁴

(1. Yellow River Qihe Bureau, YRDB, Dezhou 251100, China; 2. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China; 4. School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In response to the challenges of significant water hammer protection difficulty at the terminal section of long-distance water conveyance projects and the complexity of dynamic regulation for pressure extremes, The characteristic line method for transient flow calculation was used to investigate the impact characteristics of dynamic closure of different branch line valves on pipeline pressure control during pump shutdown. Research demonstrates that in terminal water hammer protection for long-distance water supply pipelines, implementing a multi-unit one-way surge tank system with coordinated stepwise protection achieves good protective effect. When adopting a phased closure strategy for main-line-branch line valves, accelerating the closure of one branch valve can enhance protective performance. Reducing the cross-sectional area of one-way surge tanks can reduce the final water level of the towers, enabling dynamic regulation of pressure extremes without affecting the minimum pressure. The study elucidates the collaborative wave-dissipation mechanism between multi-tank joint protection and branch valve closure coordination. An optimal water hammer protection solution is proposed that balances engineering safety and economic benefit. These findings provide theoretical basis for designing long-distance water conveyance systems in complex terrains.

Key words: water hammer protection; one-way surge tank; valve closing law; water supply project; pump-stopping water hammer

收稿日期: 2025-04-16, **修回日期:** 2025-05-12, **接受日期:** 2025-05-20

基金项目: 新疆维吾尔自治区教育厅高校基本科研业务费建设类项目(XJEDU2024J046); 天山英才培养计划青年托举人才项目(2023TSYCQNTJ0014)

作者简介: 王腾跃(1994-), 男, 工程师, 研究方向为泵站水力学, E-mail: wangtengyueYRQB@163.com

通讯作者: 张小莹(1992-), 女, 副教授, 研究方向为泵站水力学及管道瞬变流, E-mail: 543485711@qq.com

1 引言

在长距离供水工程中,管线长度往往长达数十千米甚至数百千米,管线沿程水头损失较大,末段管道内水压力较小,该段管道的停泵水锤防护难度较大^[1-2]。对于停泵水锤的研究,王腾跃等^[3]针对管线末端含虹吸断流结构的特殊输水工程,采用真空破坏阀与单向调压塔联合防护控制末端管线压力;张醒等^[4]揭示了配置不同类型阀门输水系统停泵特性间的差异。目前对于停泵水锤的研究多聚焦于不同防护设备的管线压力调控效能^[5-6]、多设备联合防护与关阀规律^[7]、水锤防护设备结构参数优化^[8]等方面,忽略了停泵水锤压力波的传播特性,尤其在多支管输水工程中较少考虑波的叠加效应对管线压力调控的影响。鉴此,本文以某长距离输水工程为例,基于瞬变流特征线法建立数学模型,提出多单向调压塔联合防护方案与分水厂支线关阀规律优化方法,分析不同关阀速率对干线末段压力极值的影响,揭示支线阀门时空协同控制的消波机制,结合多塔差异化参数设计探讨塔体面积对压力极值的动态调控作用。研究结果可为复杂地形下长距离输水工程的水锤防护设计提供理论依据,能在保障管道安全的同时降低工程成本与资源消耗,具备重要工程应用价值。

2 数学模型

2.1 水锤方程

在有压输水管道中,非恒定流过渡过程基本方程为:

$$\frac{Q}{A} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{Q}{A} \sin \beta = 0 \quad (1)$$

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q}{A^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2DA^2} = 0 \quad (2)$$

式中, Q 为管道流量, m^3/s ; A 为管道断面面积, m^2 ; H 为测压管水头, m ; x 为沿管轴线的距离, m ; t 为时间变量, s ; a 为水锤波波速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; β 为管轴线与水平面的夹角; f 为摩阻系数; D 为管道直径, m 。

2.2 单向调压塔数学模型

单向调压塔的数学模型见图 1,该水力节点 P 的前后边界编号为 1、2,则该节点控制方程中的流量连续性方程为:

$$Q_{P2} = Q_{st} + Q_{P1} \quad (3)$$

水头平衡方程为:

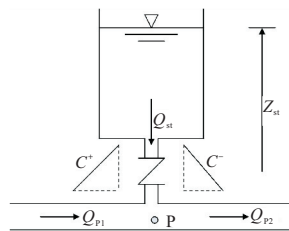


图 1 单向调压塔数学模型

Fig. 1 Mathematical model of one-way surge tank

$$H_P = Z_{st} - R_k Q_{st} |Q_{st}| \quad (4)$$

流量与水头关系为:

$$\frac{-dZ_{st}}{dt} = \frac{Q_{st}}{A_{st}} \quad (5)$$

压力管道相容性方程为:

$$H_P = C_{P1} - B_{P1} Q_{P1} \quad (6)$$

$$H_P = C_{M2} - B_{M2} Q_{P2} \quad (7)$$

式中, Q_{P1} 、 Q_{P2} 分别为水力节点 P 前后边界 1、2 的瞬态流量; Q_{st} 为流进、出稳压塔阻抗孔的流量,流出时 Q_{st} 为正; Z_{st} 、 A_{st} 分别为稳压塔水位和截面积; R_k 为阻抗水头损失系数; H_P 为管道边界的瞬态水头; C_{P1} 、 B_{P1} 、 C_{M2} 、 B_{M2} 均为 $t-\Delta t$ 时刻的已知条件, C_{P1} 、 B_{P1} 由 POST 前一节点在 $t-\Delta t$ 时的压力和流量求得; C_{M2} 、 B_{M2} 由 POST 后一节点 $t-\Delta t$ 时刻的压力和流量求得。

3 案例分析

某引调水工程管线长 61.92 km,从上游水库引水至泵站前池,前池设计水位 31.96 m,经加压泵站加压至分水口(桩号 K54+247.06),输水设计总流量 $10.8 \text{ m}^3/\text{s}$,管径 DN2 600 mm,管材为钢管,水锤波速取 $1\,000 \text{ m/s}$ 。分水口分往 3 个水厂,干线 A 水厂设计流量 $5.4 \text{ m}^3/\text{s}$,管径 DN2 000 mm,设计水位 42.42 m;一支线(B 水厂)设计流量 $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$,管径 DN1 600 mm,设计水位 41.56 m;二支线(C 水厂)设计流量 $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$,管径 DN1 200 mm,设计水位 16.71 m。泵站安装 4 台设计扬程 81.88 m、单泵设计流量 $2.70 \text{ m}^3/\text{s}$ 的变频泵。依据《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》(CECS193-2022)^[9],管道最大压力不超过最高工作压力 1.5 倍,负压不低于 -2 m ,算例采用 Fortran90 自编程计算管网水锤压力。输水系统管道平面布置见图 2,主管道中心高程线及测压管水头线见图 3。

3.1 基于单向调压塔的水锤防护

根据单向调压塔布置理论与试算结果,决定在管线 K0+082.12、K2+770.70、K36+499.37 三处设置单向调压塔对管线进行水锤防护。单向

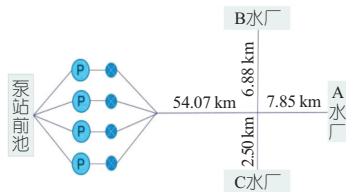


图 2 输水系统平面布置图

Fig. 2 Layout of the water delivery system

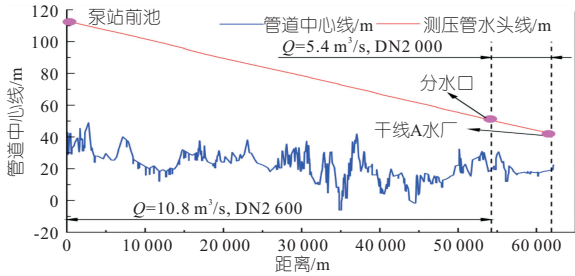


图 3 主管道中心高程线及测压管水头线

Fig. 3 Elevation and piezometric head line of pipeline

调压塔体型参数见表 1,单向调压塔防护计算结果见图 4。

表 1 单向调压塔体型参数表

Tab. 1 Shape parameters of one-way surge tank

编号	位置	塔顶高程/m	横截面积/m ²
# 1	K0+082.12	48.78	40
# 2	K2+770.70	65.93	275
# 3	K36+499.37	51.45	20

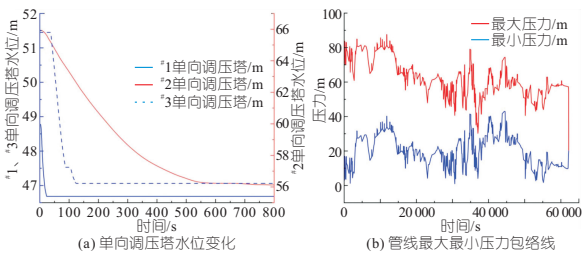


图 4 单向调压塔防护下计算结果

Fig. 4 Calculation results under one-way surge tank

由图 4(a)可知, # 1 塔(K0+082.12)因距离泵站最近,受降压波影响最快,约 0.08 s 后触发动作,其横截面积(40 m²)较小,补水速率高,塔内水位在 23.8 s 内耗尽,短期内缓解了水泵后局部低压; # 2 塔(K2+770.70)位于较高处(高程 65.93 m)且横截面积达 275 m²,显著增大,动作稍晚,但庞大容积使其持续调节长距离管道压力波动,607 s 才完成补水,抑制了地形高差引发的压力震荡; # 3 塔(K36+499.37)因距离最远,降压波抵达时间长,其横截面积(20 m²)较小,处于中等高程 51.45 m,在 125 s 内完成补水,主要应对末段管段压力突变。图 4(b)沿线管道压力变化曲线显示全线最大压力始终低于 100 m,负压改善 77%,且压力极值随距离呈阶梯式衰减,印

证了联合防护协同效应。由图 4(b)可知,在 3 个单向调压塔防护下,管道全线最大最小压力满足水锤防护控制标准《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》(CECS193-2005)^[9]要求。该多塔联合防护体系通过参数优化实现压力梯度控制,系统性化解了复杂地形长输水管水锤风险。

3.2 支线末端阀门关闭规律对水锤防护效果的影响

在供水工程突发掉电事故中,水泵后降压波与关阀水锤波的时空耦合作用显著影响管道压力极值,二者相遇时会互相消减以减小水压力波动幅度,故可利用关阀水锤波消减水泵后降压波实现水锤防护。

以干线管道内水压力为对象,同时关闭干线 A 水厂阀与支线 B 水厂阀,待两阀完全关闭后开始关闭二支线 C 水厂阀门,旨在缩短主线关阀时间、通过 C 水厂泄压缓解干线水压力,并通过改变支线 B 水厂末端阀门关闭规律制定 3 种关阀方案,对干线管道末段压力极值点的压力变化过程展开探讨,“1/450 s”是指阀门开度从全开度 1 到全关开度 0 用时 450 s 匀速直线关闭,各方案各水厂阀门关闭规律见表 2,计算结果见图 5、6。

表 2 水厂调流阀关闭规律统计表

Tab. 2 Statistics table of the closing law of regulating valve in water plant

阀门位置	初始开度	动作时刻/s	关闭规律
A 水厂	1	15	1/450 s 一段直线关闭
B 水厂方案 1	1	15	1/200 s 一段直线关闭
B 水厂方案 2	1	15	1/150 s 一段直线关闭
B 水厂方案 3	1	15	1/100 s 一段直线关闭
C 水厂	0.723	450	1/600 s 一段直线关闭

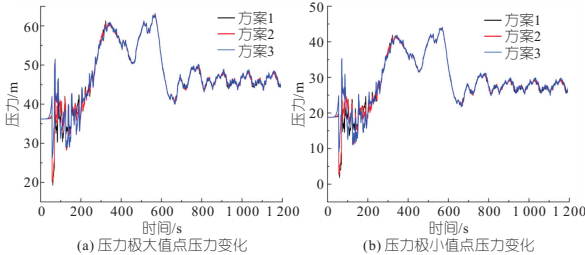


图 5 管线压力极值点压力变化

Fig. 5 The variation of pressure at the extreme points of stress

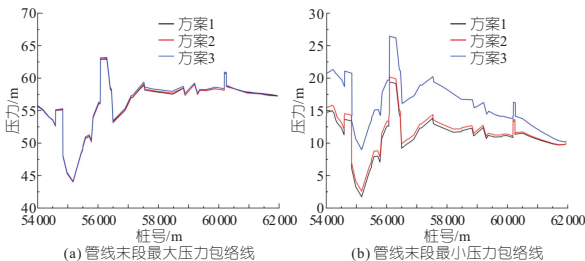


图 6 管线末端压力包络线

Fig. 6 The pressure envelope of the end pipeline

由图 5、6 及表 2 可知,该管线末段压力极大值出现在桩号 K56+290 处,大小受 A 水厂、C 水厂阀门的关阀规律影响,A 水厂以 1/450 s 速率在 15 s 启动关阀,产生的正向水锤波于 350 s 传播至该点形成首个波峰,C 水厂在 450 s 时以 1/600 s 速率关阀,于 570 s 抵达形成次波峰,两波峰幅值差异源于关阀速率差异导致的流速梯度变化,当两波峰峰值大小满足管道水锤防护压力要求且相近时为相继关阀最优方案;B 水厂阀门关阀过程在 A、C 水厂阀门完成关阀动作之前,其关阀规律对压力极大值的波峰大小影响甚微,水锤波能量被系统提前耗散,图 6(a)中 3 种方案的最大压力包络线重合。该管线末段压力极小值出现在桩号 K55+172 处,3 种方案的压力极小值点压力分别为 1.82、2.68、8.98 m,此处压力极小值由水泵后降压波所致,内水压降与水泵扬程、地形条件等因素相关,与关阀导致的水锤波无关,改变 B 水厂关阀规律时,该点因降压波导致的压降大小恒定。

相比于泵站,B 水厂阀门距压力极小值点更近,其关阀水锤先于水泵后降压波到达该点。由图 5(b)可知,加快 B 水厂关阀速率后,压力极小值点内水压力从 40 s 左右逐渐上升,机组事故停电 55 s 左右时,水泵后降压波才传至该处。这符合水锤波叠加原理,B 水厂关阀波早到与降压波形成非对称性干涉,削弱了降压波负面效应。相比于方案 1,方案 2、3 降压波传至压力极小值点时,该点初始内水压力更高,压降不变,压力极小值更大。因此,在保证 B 水厂支线管道承压能力前提下,加快 B 水厂关阀速率有利于消减水泵后降压波、增大干线末段管道压力最小值、提高管线水锤防护效果,且不影响压力最大值。实践表明,通过支线阀门时空协同控制,可在不改变主干线承压等级前提下,将系统最低压力从危险阈值提升至安全区间,对长距离输水工程水锤防护设计有重要参考价值。

3.3 单向调压塔面积对水锤防护效果的影响

单向调压塔的初始设定水位保证了管线最小压力的防护效果,而其最终水位对管线压力的影响值得探究。通过改变该管线中体积最大、补水时间最长的 #2 单向调压塔面积,制定了 3 种方案,对干线末段管道压力极值点的压力变化过程进行了讨论。各方案下 #2 单向调压塔体型参数及结果统计见表 3,管线压力计算结果见图 7、8。

由图 7(a)、图 8(a)可知,因塔内初始设定水位未变,减小 #2 单向调压塔面积时,管线末段最

表 3 各方案下 #2 单向调压塔体型参数
及管线末段压力极大值统计表

Tab. 3 Statistics of body parameters and maximum pressure at the end of pipeline for #2 under various schemes

方案	横截面积/m ²	塔内最低水位/m	压力极大值/m
4	275	56.15	63.14
5	220	53.87	60.41
6	180	51.40	57.42

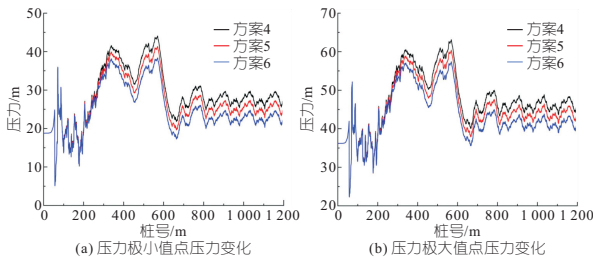


图 7 压力极值点压力变化
Fig. 7 Variation of pressure at the extreme points of stress

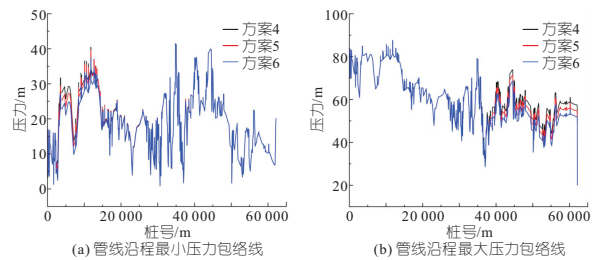


图 8 管线沿程压力包络线
Fig. 8 Pressure envelope of the pipe line

小压力不变,说明管线最小压力与单向调压塔初始设定水位相关,与面积无关;由图 7(b)、图 8(b)可知,减小 #2 单向调压塔面积,3 种方案下管线末段压力极大值点压力分别降至 63.14、60.41、57.42 m,因管道内水压力极大值受关阀规律和单向调压塔水位影响,减小面积会使塔内水位下降更快、更低,导致塔底管道水压力变小,传递至管线压力极大值点的压力波也更小,该点最大压力随之减小。因此,在保证单向调压塔塔底高程满足施工设计要求的前提下,减小单向调压塔面积,既能降低塔内最终水位、减小管线管道压力最大值、提高管线水锤防护效果,又不影响管线管道压力最小值,还能节约土地资源。

4 结论

a. 在长距离、地形起伏大的供水工程管线上,差异化布置多个单向调压塔的高程和截面积,能分段吸收降压波能量、延长防护时长,较未防护工况负压改善 77%。多塔阶梯式联合防护是经济有效的水锤防护方式,可系统性化解复杂地形长输水管的水锤风险。

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, 增大干线末端管道的压力最小值, 而不影响干线末端管道的压力最大值, 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 Standard 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))
- [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 rain-storm 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))

(上接第 241 页)