

崔巍, 王磊, 穆祥鹏, 等. 南水北调中线干渠闸门同步关闭水力响应特性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 1013-1020.
CUI W, WANG L, MU X P, et al. Hydraulic response of synchronous closing of main canal gate on Middle Route of South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 1013-1020. (in Chinese)

南水北调中线干渠闸门同步关闭水力响应特性

崔巍, 王磊, 穆祥鹏, 陈文学, 刘哲, 雷毓灵

(流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 中国水利水电科学研究院水力学所, 北京 100038)

摘要: 构建南水北调中线干渠局部一维非恒定渐变流模型, 以“刁河闸—湍河闸”渠池为例, 测试闸门调控方式和渠道运行条件对闸前壅水峰值水位、达到峰值水位所用时间、水力振荡频率、水力振荡幅度等水力响应特性的影响。研究表明: 水力振荡上升过程快, 下降过程慢, 波幅随时间呈对数函数衰减; 闸前壅水峰值水位随闸门关闭速度、闸门关闭幅度、输水流量、运行水位、渠道糙率的减小而近似线性地减小; 达到峰值水位所用时间对输水流量、运行水位和糙率变化不敏感, 随闸门关闭幅度和输水流量的增加而近似线性减小; 水力振荡频率对闸门关闭所用时间、闸门关闭幅度、输水流量和糙率变化不敏感; 水力振荡幅度对运行水位、糙率变化不敏感, 随输水流量的增大而快速衰减。

关键词: 水力学; 南水北调中线工程; 闸门同步关闭; 非恒定渐变流仿真; 水力振荡

中图分类号: TV133.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0097

南水北调中线干渠长 1 432 km, 输水能力按加大流量设计, 渠首 420 m³/s, 渠尾 60 m³/s, 靠重力自流输水。渠道由 61 座节制闸分隔为 60 个渠池, 主要采用闸前常水位运行方式。工程沿线布置 97 个分水口, 多数位于节制闸的闸前^[1]。闸门群的调控目标是维持闸前水位的稳定, 保障安全、高效、适时和适量供水^[2-3]。闸门群的调控方式有顺序调节、同步调节和选择性调节, 其中同步调节能够同时改变整个渠道的水位与流量, 水力过渡时间短, 尤其适用于突发事件等大范围调度工况^[4-7]。闸门同步关闭时, 渠池两端分别产生壅水波和降水波, 在渠池内往复运动, 引发水位流量持续振荡^[8-9]。受此影响, 渠池下游端闸前易出现壅水漫溢风险^[10-11], 闸门反馈控制过程易受干扰而性能下降^[12-13]。

有关闸门调控的水力响应特性已开展研究: 史哲等^[14]建立南水北调中线典型渠段的水工试验模型, 分析了闸门关闭引发的水力响应特性; 高学平等^[15]、赵鸣雁等^[16]分别仿真研究了南水北调东线干渠和某试验渠道闸门调节幅度及速度对水位流量

的影响; 樊甲伟等^[17]仿真研究了鄂北调水工程事故工况下闸门关闭速度同倒虹吸内部压力水体释放的响应关系; 聂艳华等^[18]研究了南水北调中线干渠事故工况下闸门关闭速度同闸前壅水峰值及退水量的响应关系。崔巍等^[19]仿真研究了南水北调中线京石段闸门和分水口同步启闭引发的渠道沿程水位流量变化。Biswas 等^[20]、Horvath^[21]和 Zhu 等^[22]从水力振荡模拟、特性辨识及应对算法设计等角度开展了大量相关研究工作。不过, 已有研究在认识闸门调控方式和运行条件对水力响应特性的影响方面(如闸前壅水达到峰值的时间、水力振荡的波形和频率变化等)许多工作有待深入开展。

南水北调中线干渠具有距离长(单渠池平均长度 20 km)、底坡缓(平均 1 : 25 000)和断面宽浅(平均边坡 1 : 2.5)等特点。本文构建南水北调中线干渠局部渠段的一维非恒定渐变流仿真模型, 选取“刁河闸—湍河闸”之间的渠池, 分析闸门同步关闭引发的水力响应特性, 从闸门关闭所用时间、闸门关闭幅度、运行水位、输水流量和渠道糙率等方面,

收稿日期: 2023-04-12 修回日期: 2023-08-22 网络出版时间: 2023-09-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230926.0907.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200905); 国家自然科学基金项目(U20A20316)

作者简介: 崔巍(1979—), 男, 河南焦作人, 正高级工程师, 博士, 主要从事明渠水力学与河流生态修复研究。E-mail: joylife@126.com

分析其变化对水力响应特性的影响。研究成果对支撑同类型大型明渠工程运行管理和闸门控制算法设计等工作具有良好的参考价值。

1 数值仿真模型

文献 [14] 研究表明, 基于圣维南方程组 [式 (1)] 建立的一维非恒定渐变流模型, 可有效仿真闸门同步关闭引发的水力响应特性, 与水工模型试验结果相近。本研究建立南水北调中线干渠上游 4 个渠段(陶岔闸—淇河闸, 参数见表 1)的仿真模型, 采用 Preissmann 四点隐式差分格式离散圣维南方程组, 采用双扫描法求解^[23-24]。仿真模型上游边界为陶岔

闸前的丹江口水库水位, 下游边界为淇河闸的过闸流量。干渠沿线的输水结构, 如节制闸、倒虹吸、分水口和退水闸等, 按内部边界处理。

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为空间坐标, m; t 为时间坐标, s; A 为过水断面面积, m^2 ; Q 为流量, m^3/s ; q 为单位长度渠道上的侧向入流量, m^2/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; Z 为水位, m; n 为糙率系数; R 为水力半径, m。

表 1 仿真渠段参数

Tab. 1 Parameters of simulation canal pools

| 范围 | 长度/km | 底宽/m | 边坡 | 设计糙率 n | 底坡 | 加大流量/($m^3 \cdot s^{-1}$) | 加大水深/m |
|----------|-------|-----------|-----------|----------|----------|-----------------------------|--------|
| 陶岔闸—刁河闸 | 14.6 | 10.5~13.5 | 3.00~3.50 | 0.015 | 1/25 000 | 420 | 8.8 |
| 刁河闸—湍河闸 | 21.8 | 15.0~26.0 | 2.00~2.75 | 0.015 | 1/25 000 | 420 | 8.7 |
| 湍河闸—严陵河闸 | 12.3 | 15.5~23.0 | 2.00~3.25 | 0.015 | 1/25 000 | 420 | 8.2 |
| 严陵河闸—淇河闸 | 25.9 | 15.5~22.0 | 2.00~3.25 | 0.015 | 1/25 000 | 410 | 8.2 |

闸门过流公式采用 Ferro^[25] 和 Shahrokhnia 等^[26] 提出的基于量纲分析的公式, 表示为

$$K/e = i(H_E/e)^j \quad (2)$$

$$K = (q_g^2/g)^{1/3} \quad (3)$$

$$H_E = H_0 - H_d \quad (4)$$

式中: i, j 为待定系数, 基于实测数据做了率定^[27]; q_g 为过闸单宽流量, m^2/s ; H_0 为含流速水头的闸前水头, m; H_d 为闸后水深, m; e 为闸门开度, m。式 (2) 可化为常用形式式 (5)。

$$Q = B \sqrt{g \left[ei \left(\frac{H_0 - H_d}{e} \right)^j \right]^3} \quad (5)$$

式中: B 为闸门宽度, m。

基于南水北调中线工程 2022 年 6 月下旬的监测数据, 采用基于遗传算法的多参数率定方法^[28], 对仿真模型的糙率和过闸流量系数进行率定。模型仿真部分结果见图 1 和图 2, 模型精度能够满足本文研究需求。

研究刁河闸与湍河闸同步关闭引发的水力响应特性。设定初始运行工况: 输水流量 $Q=280 m^3/s$, 运行水位 $Z=145.65 m$ (即设计水位), 闸门关闭所用时间 $\Delta T_g=10 min$, 闸门关闭引起的流量减小幅度 $\Delta Q=280 m^3/s$, 渠道糙率 $n=0.015$, 见图 3。在初始运行工况的基础上, 变化闸门调控方式和运行条件,

得到其他研究工况, 见表 2。各组工况的仿真时间步长 5 min, 仿真时长 720 min, 在第 60 min 刁河闸和湍河闸同步线性关闭, 其他渠池的节制闸保持不动。

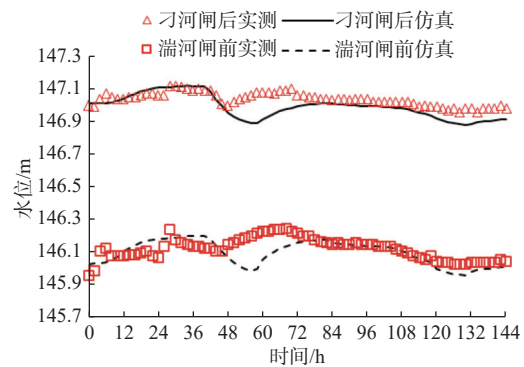


图 1 模型仿真水位值与实测水位值对比

Fig. 1 Comparison of simulated and measured water levels

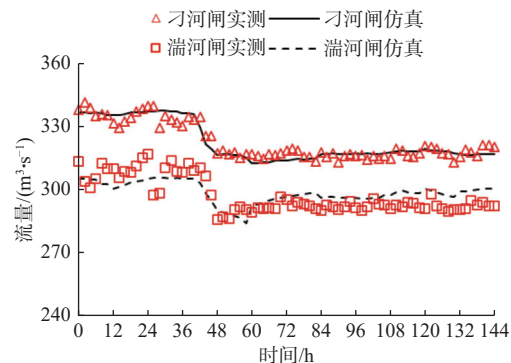


图 2 模型仿真流量值与实测流量值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured flow rates

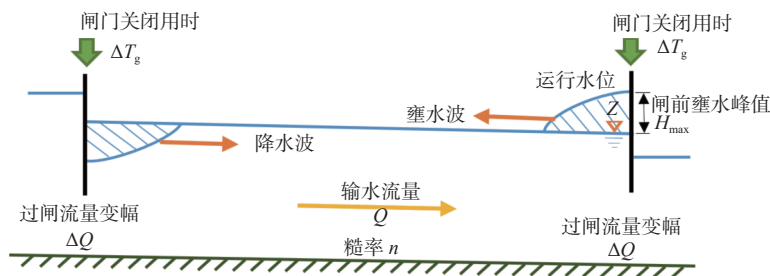


图3 闸门同步关闭引发的水力响应

Fig. 3 Hydraulic response initiated by gates closure simultaneously

表2 刁河闸—湍河闸渠池闸门同步关闭仿真工况

Tab. 2 Simulation conditions for synchronous closure of Diaohu sluice-Tuanhe sluice channel pool gates

| 类别 | 工况数量 | 划分依据 | 输水流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$) | 运行水位/ m | 渠道糙率 | 闸门关闭所用 时间/min | 闸门关闭引起的流量 减小幅度/($m^3 \cdot s^{-1}$) |
|------------|------|-------------------|---------------------------------|--|---|--------------------------------|--|
| 闸门调控 方式 | 8组 | 闸门关闭 所用时间 | 280 | 145.65 | 0.015 | 10、20、50、70、90、 110、130、150 | 280 |
| | 5组 | 闸门关闭引起 的流量减小幅度 | 280 | 145.65 | 0.015 | 10 | 60、120、180、 240、280 |
| | 5组 | 运行水位 | 280 | 145.55、145.65、145.85、 146.00、146.27 | 0.015 | 10 | 280 |
| 渠道运行 条件 | 5组 | 输水流量 | 70、100、170、 220、280 | 145.65 | 0.015 | 10 | 280 |
| | 6组 | 渠道糙率 | 280 | 145.65 | 0.015、0.016、0.017、 0.018、0.019、0.020 | 10 | 280 |

2 水力响应特性分析

初始运行工况下, 仿真渠池两端的水位变化见图4, 各波峰波谷的峰值水位变化见图5, 其他运行

工况下的结果见后文。仿真结果中, H_{max} 为闸前壅水峰值水位, T 为达到峰值水位所用时间, M 为水力振荡振幅, ω 为水力振荡频率即单位时间内闸前出现水力振荡的次数。

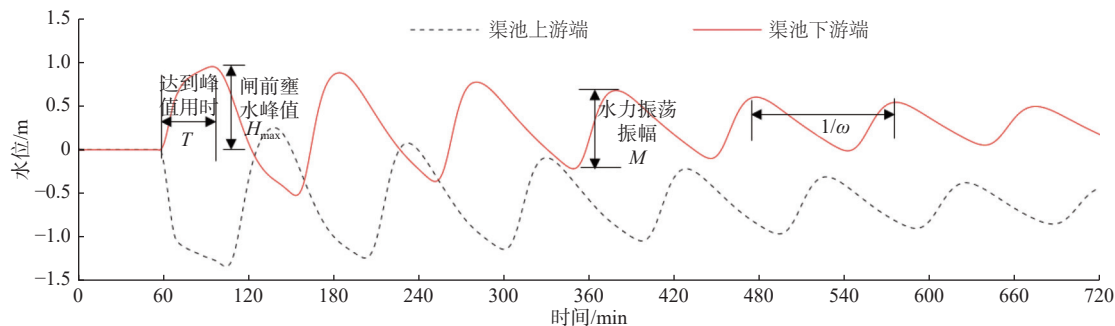


图4 仿真渠池两端的水位变化

Fig. 4 Variation of water levels at both sides of the simulation channel pool

分析表明: ①渠池两端闸门同步关闭后, 分别引发降水波和壅水波, 在渠池内往复运动, 沿程水位流量持续振荡, 最大振幅出现在渠池两端, 水位波动幅度随时间近似呈对数函数衰减。②渠池两端分别出现水位波峰波谷的进程基本同步, 但达到峰值的时刻有所差异。例如, 上游端首个波谷达到峰值的时刻稍晚于下游端首个波峰达到峰值的时刻,

而随后上游端出现首个波峰峰值的时刻稍早于下游端出现首个波谷峰值的时刻。上述差异随振荡的持续而逐渐不明显。③无论是壅水波还是降水波, 上升阶段时水面曲线陡, 变化用时短; 下降阶段时水面曲线缓, 变化用时长; 相邻波峰波谷的时间间隔并不相等。上述差异随振荡的持续而逐渐不明显。

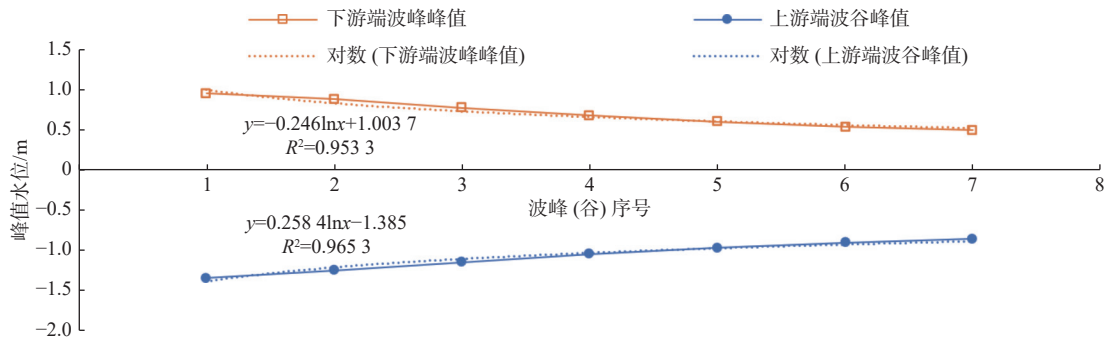


图 5 渠池两端波峰波谷的峰值水位变化

Fig. 5 Variations of peaks of waves at both sides of a channel pool

上述规律源于壅水波与降水波之间以及水波顺行与逆行时水力响应特性的差异,并叠加了能量的沿程耗散。壅水波带动沿程水位流量升高,降水波带动沿程水位流量减小;水波顺行时速度快,约为 $L/(C+v)$ (L 为渠池长, C 为波速, v 为流速),水波逆行时速度慢,约为 $L/(C-v)$ 。

3 闸门调控方式对水力响应特性的影响

3.1 闸门关闭所用时间

在初始运行工况的基础上,采用不同的关闭闸门用时 ΔT_g , 仿真闸前壅水水位的变化见图 6。统计闸前壅水峰值水位 H_{max} 和达到峰值水位所用时间 T , 见图 7。

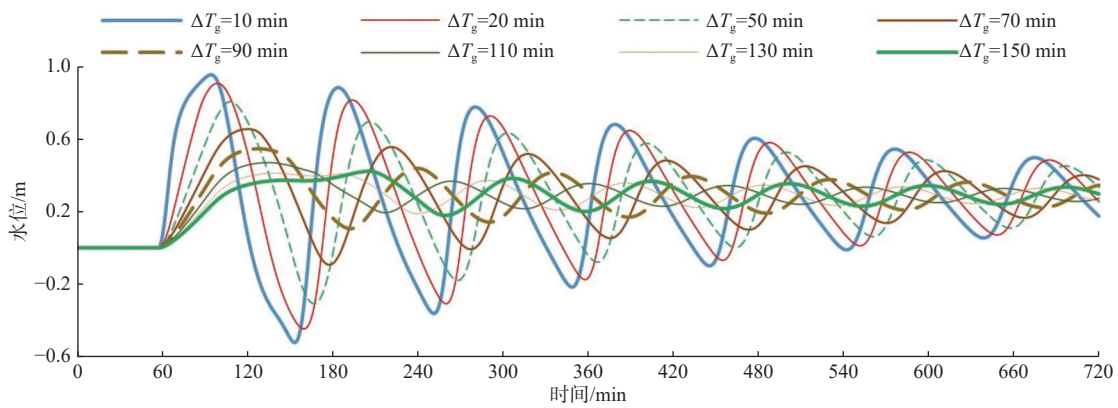


图 6 不同闸门关闭用时对应的闸前壅水水位变化

Fig. 6 Upstream water levels with various gate closure duration

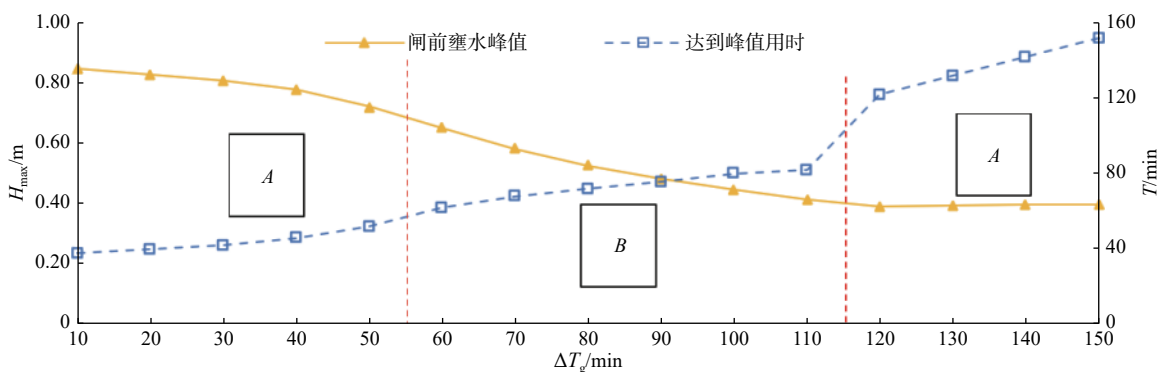


图 7 不同闸门关闭用时对应的闸前壅水峰值水位和达到峰值水位所用时间

Fig. 7 Upstream peak water levels and time spent with various gate closure duration

分析表明:①随着 ΔT_g 的增加, H_{max} 近似线性减小,按其变化速率可分为 A、B 区(图 7),分界点近似对应上游降水波到达闸前的时刻。在 A 区,闸前

水力响应主要由闸门自身的运动特性决定,变化较缓;在 B 区,叠加了降水波的影响后,变化明显加快。② T 随着 ΔT_g 近似线性增加,在分界点附近增速加

快。③水力振荡频率 ω 对 ΔT_g 变化不敏感, 振幅 M 对 ΔT_g 的变化敏感, 二者反向变化。

3.2 闸门关闭引起的流量变化

在初始运行工况的基础上, 采用不同的闸门关闭幅度引起的流量减小幅度 ΔQ , 仿真闸前壅水水位的变化见图 8。统计闸前壅水峰值水位 H_{\max} 和达到峰值水位所用时间 T , 见图 9。

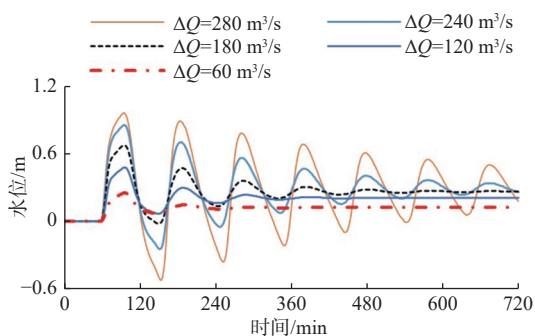


图 8 闸门关闭引起的不同流量变化对应的闸前壅水水位
Fig. 8 Upstream water levels with various gate closure

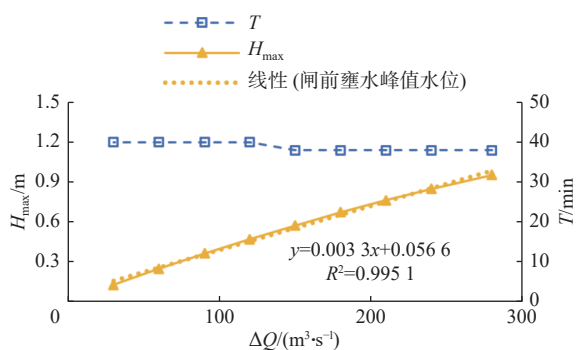


图 9 闸门关闭引起的不同流量变化对应的闸前壅水峰值水位和到达峰值水位所用时间
Fig. 9 Upstream peak water levels and time spent correspond to different waterflow changes caused by gate closure

分析表明: ① H_{\max} 与 ΔQ 呈正比例变化关系。为避免大的 ΔQ 导致闸前壅水超出安全水位, 可采取多次小幅度关闭的方式。② T 对 ΔQ 不敏感。 ΔQ 分别为 $280 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 对应 T 仅相差 2 min , 差异与约 40 min 的 T 相比, 可近似忽略。③水力振荡频率 ω 对 ΔQ 变化不敏感, 振幅 M 对 ΔQ 的变化敏感, 二者同向变化。图 9 中各曲线的波峰波谷出现时间基本一致, 这是因为这些时间主要由波速决定, 南水北调中线干渠在闸前常水位运行方式下, 各流量下的波速差异不大。

4 渠道运行条件对水力响应特性的影响

4.1 运行水位

渠道的运行水位会随季节和调控需求变化。在

初始运行工况的基础上, 采用不同的闸前水位, 即设计水位 -0.1 m 、设计水位、设计水位 $+0.2 \text{ m}$ 、设计水位 $+0.35 \text{ m}$ 、设计水位 $+0.62 \text{ m}$ (加大水位), 仿真闸前壅水的水位变化过程见图 10。统计闸前壅水峰值水位 H_{\max} 和达到峰值水位所用时间 T , 见图 11。

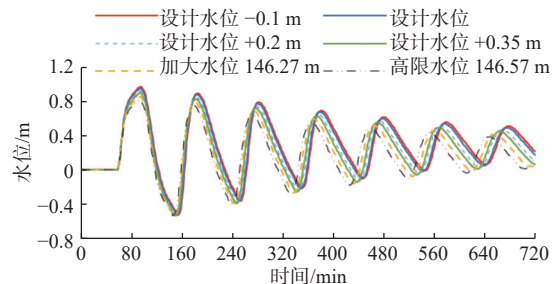


图 10 不同运行水位对应的闸前壅水水位变化过程
Fig. 10 Upstream water levels with various operating levels

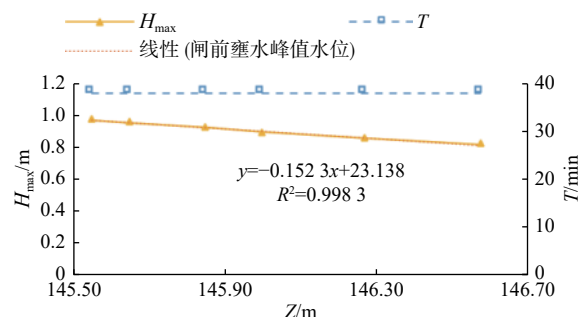


图 11 不同运行水位对应的闸前壅水峰值水位和达到峰值水位所用时间
Fig. 11 Upstream peak and time spent with various operating levels

分析表明: ①闸前壅水峰值 H_{\max} 与运行水位 Z 呈反比例变化关系, 但变幅不大。例如, 加大水位 (146.27 m) 较设计水位 (145.65 m) 高出 0.62 m , 对应 H_{\max} 仅降低 0.10 m 。综合来看, 高的运行水位下更易出现漫溢危险。②随着运行水位 Z 升高, 达到峰值水位所用时间 T 和水力振荡振幅 M 无明显变化, 频率 ω 略有增加。③在估算 H_{\max} 时, 可兼顾安全性、精确性和易用性, 将整个运行水位区间简化为几档, 按就高不就低的原则就近选定 Z 。

4.2 输水流量

渠道输水流量 Q 会随供需变化调整。在初始运行工况的基础上, 采用不同的 Q , 仿真闸前壅水的水位变化过程见图 12。统计闸前壅水峰值水位 H_{\max} 和达到峰值水位所用时间 T , 见图 13。

分析表明: ①闸前壅水峰值 H_{\max} 与输水流量 Q 呈正比例变化关系, 但变幅不大, Q 增大 $30 \text{ m}^3/\text{s}$, H_{\max} 增大仅约 0.01 m ; ②时间 T 和频率 ω 均对输水流量 Q 变化不敏感; ③振幅 M 对流量 Q 变化较为敏感, Q 越大, M 值越小, 衰减得越快; ④估算闸前

壅水峰值 H_{\max} 时,可兼顾安全性、精确性和易用性,将流量 Q 区间简化为几档,按就高不就低的原则就近选定 Q 。

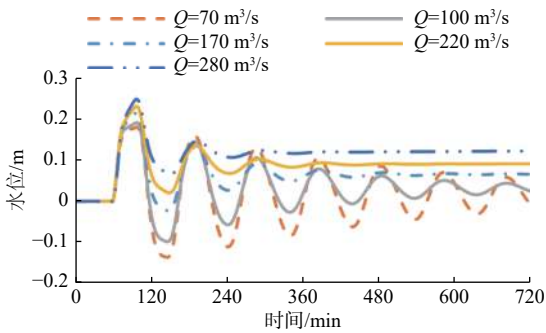


图 12 不同输水流量对应的闸前壅水水位变化过程
Fig. 12 Upstream water levels with various flowrates

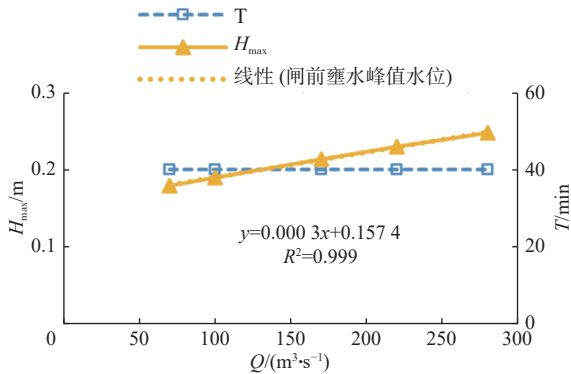


图 13 不同输水流量对应的闸前壅水峰值水位和达到峰值水位所用时间
Fig. 13 Upstream peak and time spent with various flowrates

4.3 渠道糙率

渠道糙率 n 会随着工程老化和运行环境变差而增长。在初始运行工况的基础上,采用不同的 n , 仿真闸前壅水的水位变化过程见图 14。统计闸前壅水峰值水位 H_{\max} 和达到峰值水位所用时间 T , 见图 15。

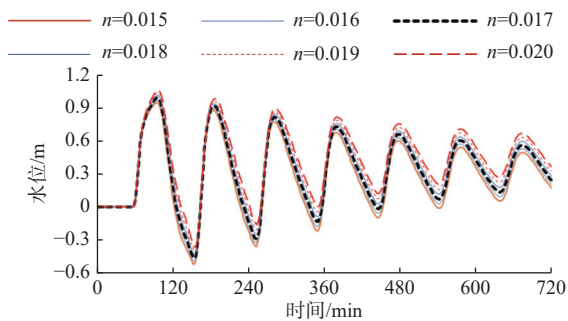


图 14 不同糙率对应的闸前壅水水位变化过程
Fig. 14 Upstream water levels with various roughness

分析表明:①闸前壅水峰值 H_{\max} 与糙率 n 呈正比例变化关系,但变幅不大,糙率 n 增加 0.001, H_{\max}

增大约 0.02 m;② T 、 ω 均对糙率 n 变化不敏感;③随着 n 变大,振幅 M 的衰减有所加快,振幅的差异逐渐趋于明显。

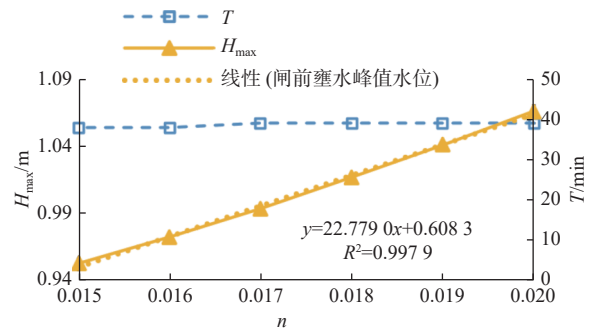


图 15 不同糙率对应的闸前壅水峰值水位和达到峰值水位所用时间
Fig. 15 Upstream peak and time spent with various roughness

5 结论

构建了南水北调中线干渠局部渠段的一维非恒定渐变流模型,以刁河闸和湍河闸同步关闭为例,仿真研究了闸门同步关闭条件下的水力响应特性,主要结论如下:

闸门同步关闭引发壅水波和降水波,二者之间以及它们顺行逆行时的运动特性差异,叠加能量沿程耗散,决定了水力响应特性。水力振荡上升过程快,下降过程慢,波幅随时间近似呈对数函数衰减,相邻波峰波谷的时间间隔逐渐趋于一致。

增加闸门关闭所用时间(慢关闸门)和减小闸门关闭幅度,均可近似线性地降低闸前壅水峰值水位和水力振荡振幅,降幅随闸门关闭时间呈分区分布函数。水力振荡频率对慢关闸门和减小闸门关闭幅度均不敏感。

随着运行水位的升高,闸前壅水峰值水位线性减小,达到峰值水位所用时间和水力振荡振幅均无明显变化,水力振荡频率略有增加。仿真案例中,对于 0.62 m 的运行水位升幅,闸前壅水峰值水位仅降低 0.1 m。

随着输水流量的增大,闸前壅水峰值水位线性升高,达到峰值水位所用时间和水力振荡频率均无明显变化,振幅明显变小,衰减变快。仿真案例中,对应 30 m³/s 的流量增幅,闸前壅水峰值水位仅升高约 0.01 m。

随着糙率变大,闸前壅水峰值水位线性升高,达到峰值水位所用时间、水力振荡频率和振幅均无明显变化。仿真案例中,对应 0.001 的糙率增幅,闸前壅水峰值水位仅升高约 0.02 m。估算闸前壅水峰值

水位时,可忽略糙率取值偏差。

本研究表明,采用分次小步幅的关闸方式有助于降低闸前壅水水位。下一步,可探讨调节次数和步幅的选择问题。此外,本研究可支撑闸前壅水峰值水位的预测研究,未来通过预估壅水高度可在线修正闸门的调控方式。

参考文献:

- [1] NIU X Q. The first stage of the Middle-Line South-to-North Water Transfer Project[J]. *Engineering*, 2022, 16(9): 21-28. DOI: [10.1016/j.eng.2022.07.001](https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.07.001).
- [2] 王浩,雷晓辉,尚毅梓.南水北调中线工程智能调控与应急调度关键技术[J].*南水北调与水利科技*, 2017, 15(2): 1-8. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.001](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.001).
- [3] 南水北调中线干线工程建设管理局.南水北调中线干线工程输水调度暂行规定(试行)[R].南水北调中线干线工程建设管理局, 2018.
- [4] 南水北调中线工程建设管理局总调中心.输水调度应急手册[R].北京:南水北调中线工程建设管理局, 2017.
- [5] KONG L Z, LEI X H, WANG M N, et al. A regulation algorithm for automatic control of canal systems under emergency conditions[J]. *Irrigation and Drainage*, 2019, 68(4): 646-656. DOI: [10.1002/ird.2353](https://doi.org/10.1002/ird.2353).
- [6] 崔巍,刘哲,穆祥鹏,等.南水北调中线总干渠藻类的生态调度[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 79-86. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0009](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0009).
- [7] ZHU Z L, GUAN G H, MAO Z H, et al. Application of model predictive control for large-scale inverted siphon in water distribution system in the case of emergency operation[J]. *Water*, 2020, 12: 2733. DOI: [10.3390/w12102733](https://doi.org/10.3390/w12102733).
- [8] CUI W, MU X P, CHEN W X, et al. Emergency control scheme for upstream pools of long-distance canals[J]. *Irrigation and Drainage*, 2019, 68(2): 218-226. DOI: [10.1002/ird.2297](https://doi.org/10.1002/ird.2297).
- [9] 李占松,周琼.渠道上下游闸门同时关闭壅水高度计算公式[J].*人民黄河*, 2009, 31(12): 89-90. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2009.12.043](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2009.12.043).
- [10] 方神光,吴保生.南水北调中线输水渠道中节制闸影响研究[J].*水利水电技术*, 2008, 39(2): 32-35, 39.
- [11] 张成,傅旭东,王光谦.南水北调中线工程总干渠非正常工况下的水力响应分析[J].*南水北调与水利科技*, 2007, 5(6): 8-12, 20. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2007.06.004](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2007.06.004).
- [12] VAN OVERLOOP P J, MILTENBURG I J, BOMBOIS X, et al. Identification of resonance waves in open water channels[J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(8): 863-872. DOI: [10.1016/j.coneng-prac.2010.03.010](https://doi.org/10.1016/j.coneng-prac.2010.03.010).
- [13] CLEMMENS A J, LITRICO X, VAN OVERLOOP P J, et al. Estimating canal pool resonance with auto tune variation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2012, 138(1): 9-15. DOI: [10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000384](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000384).
- [14] 史哲,马吉明,郑双凌.节制闸控制下宽浅渠道内的非恒定流[J].*南水北调与水利科技*, 2007, 5(6): 21-24. DOI: [10.3969/j.issn.1672-1683.2007.06.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-1683.2007.06.006).
- [15] 高学平,张岩,孙博闻,等.节制闸对分水口处渠道水力响应的影响及敏感性研究[J].*水力发电学报*, 2018, 37(2): 79-87. DOI: [10.11660/slfdx.20180208](https://doi.org/10.11660/slfdx.20180208).
- [16] 赵鸣雁,孔令仲,郑艳侠,等.串联渠池闸门同步关闭情况下关闸时间对闸前水位壅高影响[J].*南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 157-163, 170. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0166](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0166).
- [17] 樊甲伟,管光华,朱哲立.鄂北调水工程长倒虹吸事故水力响应及应急调度[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 795-804. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0083](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0083).
- [18] 聂艳华,黄国兵,何建国.节制闸控制规则对南水北调工程应急调度的影响[J].*水电与新能源*, 2011(4): 62-65. DOI: [10.3969/j.issn.1671-3354.2011.04.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-3354.2011.04.020).
- [19] 崔巍,陈文学,穆祥鹏,等.长输水渠道前馈控制时间研究[J].*水利学报*, 2009, 40(11): 1345-1350. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.2009.11.018](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.2009.11.018).
- [20] BISWAS T R, DEY S, SEN D. Modeling positive surge propagation in open channels using the Serre-Green-Naghdi equations[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2021, 97: 803-820. DOI: [10.1016/j.apm.2021.04.028](https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.04.028).
- [21] HORVATH K. Model predictive control of resonance sensitive irrigation canals [D]. Barcelona: Technical University of Catalonia Barcelona Tech, 2013.
- [22] ZHU Z L, GUAN G H, TIAN X, et al. The Integrator Dual-Delay model for advanced controller design of the open canal irrigation systems with multiple offtakes[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 205: 107616. DOI: [10.1016/j.compag.2023.107616](https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107616).
- [23] 李炜,徐孝平.水力学[M].武汉:武汉水利电力大学出版社, 2002.
- [24] CUI W, CHEN W X, MU X P, et al. Canal controller for the largest water transfer project in China[J]. *Irrigation and Drainage*, 2014, 63: 501-511. DOI: [10.1002/ird.1817](https://doi.org/10.1002/ird.1817).
- [25] FERRO V. Simultaneous flow over and under a gate[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2000, 126(3): 190-193. DOI: [10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000384](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000384).

- 0733-9437(2000)126:3(190).
- [26] SHAHROKHNIYA M A, JAVAN M. Dimensionless stage-discharge relationship in radial gates[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2006, 132(2): 180-184. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2006\)132:2\(180\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:2(180)).
- [27] 崔巍, 吴鑫, 陈文学, 等. 大型渠道弧形闸门过流公式测试比较[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(1): 141-146. DOI: [10.13522/j.cnki.gggs.2020677](https://doi.org/10.13522/j.cnki.gggs.2020677).
- [28] 严瑞昕, 岩应叫, 孔令仲, 等. 基于遗传算法的串联明渠多参数率定方法研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(4): 195-202. DOI: [10.12396/znsd.221182](https://doi.org/10.12396/znsd.221182).

Hydraulic response of synchronous closing of main canal gate on Middle Route of South-to-North Water Transfers Project

CUI Wei, WANG Lei, MU Xiangpeng, CHEN Wenxue, LIU Zhe, LEI Yuling

(*State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Department of Hydraulic, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: The main canal of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project is separated by gates into series channel pools. In case of emergencies and other situations, the synchronous operation technology of gates is often adopted to rapidly reduce the water flow in a large range. Rapid closing of the gates at both ends of the canal pool will cause continuous oscillation of the water level and flow in the canal pool, and affect the efficiency and effect of the gate feedback control. If the gate is not properly controlled, the water is easy to overflow. It is of great significance to deeply understand the hydraulic response characteristics of synchronous closing of gate and the influence law of related factors for guiding the control of gate scientifically and ensuring the operation safety of the project.

Based on Saint-Venant equation group, a one-dimensional unsteady gradually varied flow model for the main canal of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project was constructed. Taking the canal pool between Diaohe aqueduct gate and Tuanhe aqueduct gate as the research object, the hydraulic response of synchronous closing of the gate was simulated, and the hydraulic response characteristics such as peak water level, time spent to reach the peak water level, frequency and amplitude of hydraulic oscillation before the gate were analyzed. By changing the control mode of gate and the operating conditions of canal, the influences of gate closing duration, gate closing amplitude, operating water level, water delivery flow and canal roughness on hydraulic response characteristics were analyzed and summarized.

Simulation results showed that the rise process of hydraulic oscillation was fast, but the fall process was slow. The amplitude of the wave was approximately logarithmic function attenuation with time, and the time interval of the adjacent wave peaks and valleys gradually tended to be consistent. The peak height of backwater and amplitude of hydraulic oscillation in front of the gate can be reduced approximately linearly by slowly closing and decreasing closing amplitude. The decreasing amplitude was a zonal distribution function with gate closing time. With the increase of operating water level, the peak value of rising water in front of the gate decreased linearly. The time taken to reach the peak and the amplitude of hydraulic oscillation had no obvious change, but the oscillation frequency increased slightly. With the increase of the water flow, the peak value of backwater in front of the gate increased linearly. The time taken to reach the peak had no obvious change in the frequency of hydraulic oscillation, but the amplitude decreased obviously and the attenuation became faster. With the increase of roughness, the peak of backwater before the gate increased linearly, the time taken to reach the peak, and the frequency and amplitude of hydraulic oscillation had no obvious change.

The hydraulic response is determined by the difference of the movement characteristics between the increasing wave and the decreasing wave, as well as the difference while traveling downstream and upstream, and the energy dissipation along the travel. The amplitude of hydraulic oscillation is sensitive to the closing speed and closing amplitude of the gate. The value deviation of roughness can be ignored when estimating peak backwater before the gate.

Key words: hydraulics; the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project; synchronous gate-closing; unsteady gradually varied flow simulation; hydraulic oscillation