

雷毓灵, 崔巍, 王磊, 等. 南水北调中线京石段闸门间歇关闭水力响应特性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 427-435. LEI Y L, CUI W, WANG L, et al. Hydraulic response of synchronous and intermittent closing of gates on Beijing-Shijiazhuang section in the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 427-435. (in Chinese)

# 南水北调中线京石段闸门间歇关闭水力响应特性

雷毓灵, 崔巍, 王磊, 丁志楠, 穆祥鹏, 陈文学

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

**摘要:**为减小闸门关闭引发的水位壅高,以南水北调中线工程京石段磁河闸至沙河北闸之间的渠池为研究对象,构建一维明渠非恒定渐变流仿真模型,比较分次间歇关闭与一次连续关闭,以及不同闸门间歇方案对闸前壅水峰值、水力振荡稳定时间的影响。研究表明:分次间歇关闭可带来更低的闸前壅水水位和更短的水力振荡稳定时间;设置 1 次间歇相较于多次间歇可减小闸前壅水峰值,将间歇开始时刻设置在上游降水波即将传播至闸前的时刻、设置间歇时长略小于关闸总时间的 1/2 均可有效降低闸前壅水峰值,缩短稳定时间。闸门分次间歇关闭水力响应特性与水波运动规律紧密关联,合理设置间歇有助于在应急调控阶段减少事故造成的影响。

**关键词:**明渠水力学;南水北调中线工程;闸门分次间歇关闭;水力振荡;应急调度

**中图分类号:**TV133.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0044

南水北调中线工程起自丹江口水库, 终至北京团城湖, 调水距离长且沿途尚无在线调节水库, 沿线水情复杂多变<sup>[1]</sup>。中线工程主要采用明渠自流的方式进行输水<sup>[2]</sup>, 沿线共有 61 座节制闸将干渠间隔成 60 个渠池<sup>[3]</sup>, 是典型的明渠输水闸控系统<sup>[4-5]</sup>。因自然灾害、事故灾难等导致的突发事件不可避免, 给工程的安全运行带来挑战, 需要选择合适的闸门群调控方式以减少事故造成的影响<sup>[6-8]</sup>。采取同步调节的调控方式, 渠道运行方式由闸前常水位运行转变为等体积运行, 渠道水流状态迅速改变, 水力过渡时间短, 对应急调控尤为有效<sup>[9-11]</sup>。渠池两端闸门同步关闭时, 渠池两端将同时产生相向传播的壅水波与降水波, 引发水力振荡<sup>[10-12]</sup>, 渠池下游闸前存在漫溢风险<sup>[13]</sup>, 威胁工程的运行安全。对闸门关闭引发的水力响应进行研究能够为工程的实际运行提供有力的技术指导, 具有重要现实意义。

众多学者围绕该方向, 通过构建一维水动力模型、物理模型进行了深入研究。史哲等<sup>[14]</sup>通过建立南水北调中线物理模型进行水工实验, 结合数值计算分析了闸门关闭引发的水力响应特性; 张成等<sup>[15]</sup>模拟分析了非正常工况下南水北调中线典型渠段

水力响应特征与退水闸的退水作用; 聂艳华等<sup>[16]</sup>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; 朱德军<sup>[17]</sup>分析了闸门关闭所引发的扰动, 揭示了闸门启闭速度对闸后水位降落过程的影响; 崔巍等<sup>[18]</sup>分析了南水北调中线干渠闸门同步关闭所引发的水力响应特性。不过, 相关研究均停留在闸门一次连续关闭水力响应特性方面。郭英<sup>[19]</sup>、刘孟凯等<sup>[20]</sup>、郑和震<sup>[21]</sup>、齐佳硕等<sup>[22]</sup>分别研究了不同应急工况下闸门关闭引发的水力响应特性。

有压管输水相关研究<sup>[23]</sup>表明, 相较于一次连续关闭阀门, 分次间歇关闭阀门可大大减小瞬态压力。明渠闸控研究<sup>[18]</sup>显示, 闸前壅水峰值与闸门关闭幅度呈正比例关系, 采用分次间歇小步幅的关闸方式有助于降低闸前壅水水位, 有效避免闸前壅水超出安全水位。在南水北调中线工程实际调度演练中, 闸门并非以最快的速度一次连续关闭, 而是在 30~60 min, 间歇 1~3 次逐渐关闭<sup>[24]</sup>。不过, 这些操作往往缺乏明确定量的理论指导, 操作人员通常依据自身经验与直觉决定何时开始间歇、间歇次数、间歇时长。受水流变化和其他因素的影响, 仅凭经

收稿日期: 2023-12-27 修回日期: 2024-04-25 网络出版时间: 2024-05-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240523.1604.006>

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: 雷毓灵(1999—), 男(畚族), 江西九江人, 主要从事输水工程应急调度研究。E-mail: rocklei2919@outlook.com

通信作者: 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

验操作可能无法保证良好的水位控制效果,甚至存在漫顶风险。因此,有必要对闸门分次间歇关闭方式进行深入研究。

本文选取南水北调中线工程京石段 5 个渠段作为仿真对象,构建一维非恒定流水动力模型,分析闸门采用分次间歇关闭策略所引发的水力响应特性,研究闸门间歇开始时刻、间歇次数、间歇时长对水力响应特性的影响,为工程调度运行提供技术支撑。

## 1 研究方法

### 1.1 数学模型

对于长距离输水工程,渠道长度远大于输水断面的宽度及深度,水动力仿真可概化为一维问题<sup>[25]</sup>。研究<sup>[14]</sup>表明,基于圣维南方程建立的一维非恒定渐变流模型能够有效地模拟明渠闸前水位的波动变化,模拟结果与物理模型实验所得结果一致。圣维南方程组包括连续性方程和动量方程<sup>[26]</sup>。

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

式中:  $A$  为过水断面面积,  $m^2$ ;  $Z$  为水位,  $m$ ;  $Q$  为流量,  $m^3/s$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $x$  为断面的空间坐标,  $m$ ;  $t$  为时间坐标,  $s$ ;  $q$  为旁侧入流,  $m^2/s$ ;  $\alpha$  为动量校正系数;  $n$  为糙率系数;  $R$  为水力半径,  $m$ 。

建立南水北调中线工程京石段古运河节制闸—唐河节制闸 5 个渠段的仿真模型,见图 1,仿真渠道参数见表 1,仿真模型上游边界取古运河节制闸过闸流量,下游边界取唐河节制闸过闸流量,并对渠段内小规模分水口进行归并简化处理。采用稳定性好、计算精度高、收敛速度快的 Preissmann 四点带权隐式差分格式对圣维南方程组进行离散,采用追赶法求解。离散网格以流程  $s$  为横坐标,时间  $t$  为纵坐标,设置自适应距离步长  $\Delta s$ ,时间步长为 1 min,在自变量平面上构建矩形网格。

表 1 仿真渠段参数

Tab. 1 Parameters of simulation canal pools

渠段	长度/m	底宽/m	糙率	边坡	底坡	分水流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	下游端过闸流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	下游端闸前水位/m
古运河闸—滹沱河闸	9 737	10.0~22.2	0.015	2.5~3.0	1/25 000	0	170	75.86
滹沱河闸—磁河闸	22 053	20.0~23.5	0.015	2.0~3.0	1/25 000	5	165	74.13
磁河闸—沙河北闸	15 177	20.0~21.5	0.015	2.5~3.0	1/25 000	2	163	73.26
沙河闸—漠道沟闸	19 553	16.5~22.0	0.015	0.0~3.0	1/25 000	22	141	71.49
漠道沟闸—唐河闸	9 233	15.0~16.5	0.015	2.5~3.0	1/25 000	0	141	71.00

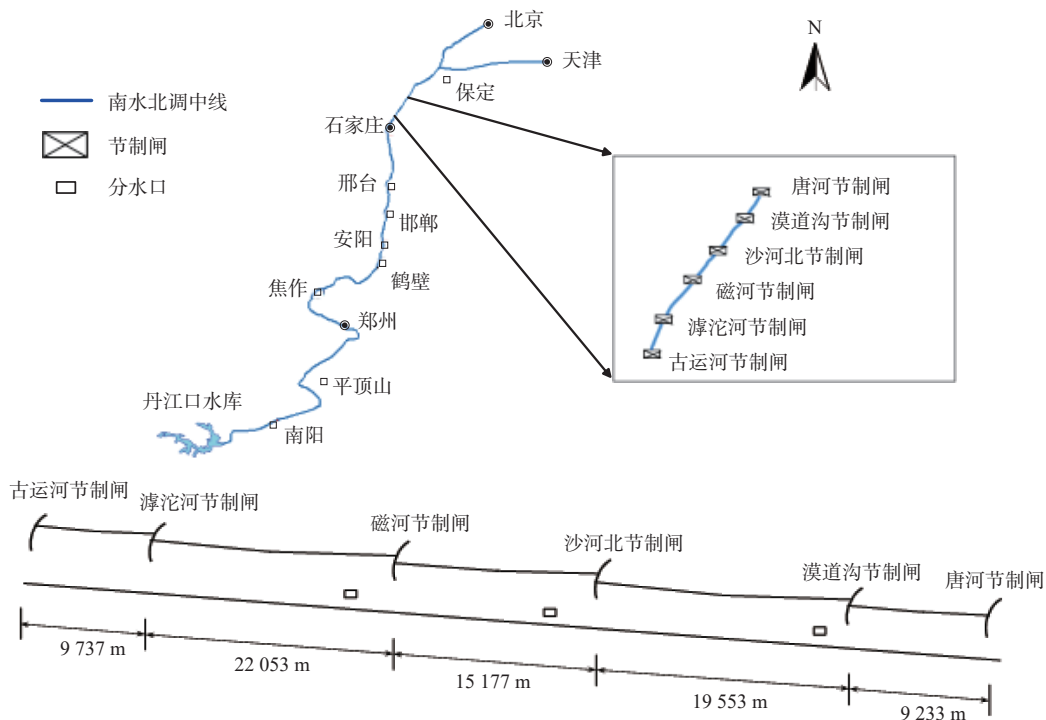


图 1 仿真渠段

Fig. 1 Schematic diagram simulation canal pools

为验证模型计算精度,基于京石段 2022 年 5 月水情数据,采用多目标遗传算法(NSGA-II)对模型参数进行率定,部分仿真结果见图 2。水位计算误差在 0.10 m 以内,对于水深 5~7 m 的大型输水渠道,精度能够满足工程研究需求。

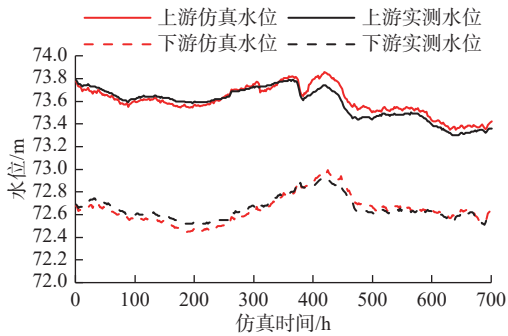


图 2 模型仿真水位与实测水位对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured water levels

## 1.2 工况设置

设定仿真开始第 60 min 时,参与调控的节制闸同步关闭,关闸总历时 60 min,以磁河闸至沙河北闸之间的渠段作为研究渠段。见图 3,采用间歇开始时刻  $T_{\text{beg}}$ 、单次间歇次数  $M$  和单次间歇时长  $T_0$  表征不同的分次间歇工况。初始设定闸门分次间歇试验工况:在第 84 min、102 min 时刻分别间歇 12 min,即间歇开始时刻  $T_{\text{beg}}$  为 84 min,间歇次数  $M$  为 2,单次间歇时长为 12 min,总间歇时长  $T$  为 24 min。在初始试验工况的基础上,改变闸门分次间歇关闭方式,得到其他试验工况,见表 2,受篇幅所限,表中省略了部分工况,间歇开始时刻类别  $T_{\text{beg}}$  递增 2 min,间歇时长类别  $T$  递增 2 min。作为对照,设置一次连续关闸试验工况,使闸门在 60 min 内匀速关闭。闸门关闭后,水位波动振幅小于 5 cm 即视为水位稳定。各工况仿真时长 10 h,比较各分次间歇关闸工况下的闸前壅水峰值削减率[式(2)]与水力振荡稳定时间。

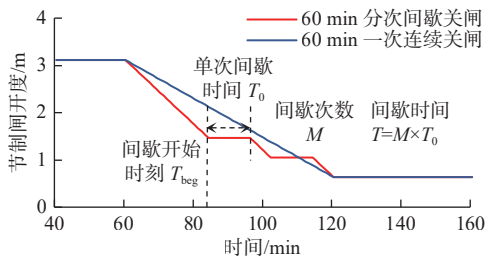


图 3 闸门开度随时间变化曲线

Fig. 3 Gate opening curve over time

闸前壅水峰值削减率计算公式为

$$\eta = \frac{H_{\max,1} - H_{\max,n}}{H_{\max,1}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\eta$  为壅水峰值削减率,%;  $H_{\max,1}$  为一次连续关闸壅水峰值, m;  $H_{\max,n}$  为分次间歇关闸壅水峰值, m。

表 2 磁河闸—沙河北闸渠池闸门同步分次间歇关闭仿真工况

Tab. 2 Simulation conditions for synchronous closure of Cihe gate-Shahebei gate channel pool gates

工况数量	划分依据	工况编号	间歇开始时刻 $T_{\text{beg}}$ /min	间歇次数 $M$	总间歇时长 $T$ /min
2	是否间歇	1	84	2	24
		2	-	-	-
		3	70		
		4	72		
15	间歇开始时刻	:	:	1	20
		:	:		
		16	96		
		17	98		
		18		1	
3	间歇次数	19	86	2	24
		20		3	
		21			8
12	间歇时长	22			10
		:	12	1	:
		:			:
		31			28
		32			30

## 2 分次间歇关闸水力响应特性

图 4 为 2 种关闸方案下磁河闸—沙河北闸渠段两端水位变化仿真结果,表明:

(1)分次间歇关闸引发多组壅水波、降水波,在渠池内往复运动引发水力振荡,见图 5。壅水波、降水波的组数均为闸门间歇次数加 1。壅水波带动沿程水位升高,降水波使沿程水位降低。壅水波、降水波在来回传递的过程中能量沿程耗散,水位波动幅度逐渐减小直至稳定。

(2)闸前水位在间歇期内的变化特点由降水波与壅水波的叠加关系决定。为便于分析,采用重力波公式  $T = L/(\sqrt{gh} \pm V)$  (式中:  $L$  为渠池长;  $h$  为水深;  $V$  为流速) 计算波的传播时间,磁河闸关闭引发的降水波需约 32 min 首次传播至下游闸前,反射后再次传播至下游闸前需约 107 min; 而沙河北闸关闭引发的壅水波经反射传播至下游闸前需约 75 min。

沙河北节制闸闸前水位及闸门开度随时间变化

过程见图 6,从图中可以看出,第 1 次间歇期间水位缓慢上涨后回落,第 2 次间歇期间水位直接迅速回落。分析其原因:第 1 次间歇期间,虽然闸门不再对水体产生驱动作用,但闸前水位在运动惯性作用下仍缓慢上涨,至 92 min 时,上游降水波前缘到达下游节制闸并开始反向传播,水位由上涨转向回落;

第 2 次间歇期间,降水波大部已到下游闸前并转向上游传递,且第 2 次闸门操作时间较短,对水体的约束能量较小,故闸前水位迅速回落。显然,在闸门关闭过程中,应充分利用上游降水波的作用,通过合理设置间歇方案,降低闸前壅水。

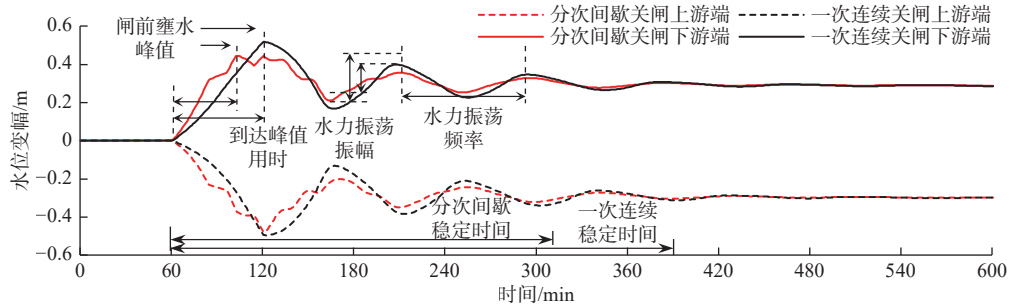


图 4 2 种关闸方案下磁河闸—沙河北闸渠段两端水位变化仿真结果

Fig. 4 Variation of water levels at both sides of the simulation pool under two different gate closure schemes

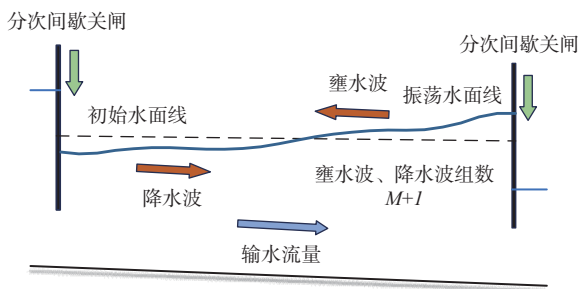


图 5 分次间歇关闸水力响应

Fig. 5 Schematic diagram of hydraulic response of intermittent closing of sluice gates

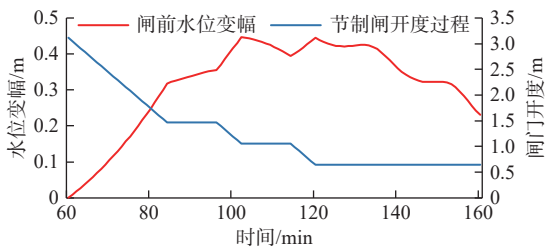


图 6 沙河北节制闸闸前水位及闸门开度随时间变化过程

Fig. 6 Water level and gate opening curve over time at front of the Shahebei gate

(3)分次间歇关闸方案下,初始时刻水位上涨速率更高,闸前壅水峰值出现的时间更早。分析原因,相同关闸总历时下,分次间歇关闸工况闸门关闭速率更快,闸门运动对水体的约束作用更加显著,闸前壅水速率更大<sup>[17]</sup>。在间歇时刻,闸门关闭对水体的约束消失,且上游闸门关闭产生的降水波传播至下游闸前,正负波相消而形成水位变化拐点,闸前壅水峰值提前出现,其他波段峰值出现时间无明显

变化。

(4)分次间歇关闸方案下,各波段水力振荡振幅更小,总的水位稳定时间大幅减小。间歇打断了闸前壅水的连续过程,分散了壅水波的能量。多组壅水波、降水波同时在渠池内来回传递,相互叠加、相互抵消,使水力振荡振幅更快地削减。分次间歇关闸与一次连续关闸所引发的水力振荡频率没有明显变化。

### 3 分次间歇关闸方式对水力响应特性的影响

分次间歇关闸相比于一次连续关闸,可实现更小的闸前壅水水位和更短的水力过渡时间,以下从间歇开始时刻、间歇次数和间歇时长 3 个方面具体分析其对闸前壅水水位和水力过渡时间的影响,探讨合理的分次间歇关闸方式。统计不同工况下的闸前壅水峰值、稳定时间、壅水削减率,见表 3。

#### 3.1 间歇开始时刻的影响

在间歇时长不变(均取 20 min)的前提下,通过改变间歇开始时刻  $T_{beg}$ ,典型工况的仿真闸前水位、闸门开度过程见图 7。结果表明:

(1)闸前壅水峰值随着间歇开始时刻的推移先减小后增大,即闸前壅水削减率先增大后减小。设置 1 次间歇,将引发 2 组壅水波、降水波,设置合理间歇开始时刻能够合理分配 2 组波的能量,降低闸前壅水峰值。间歇过早开始,间歇时长内降水波尚未到达闸前,水位无法在降水波作用下回落。例如工况 5 ( $T_{beg}=76$  min)间歇时间内水位在以固定速率

持续上涨。待闸门完全关闭后水体自流惯性叠加反射壅水波,达到闸前壅水峰值,并未达到削峰效果。闸门关闭引发的壅水速度远大于降水波的降水速度,即使间歇稍晚开始能使水位回落更多,但

间歇前的关闸已造成了较高壅水,见图8。间歇也不宜过晚开始,例如工况16( $T_{beg}=98\text{ min}$ ),间歇内水位回落5.22 cm,水位回落值最大,但98 min水位已高达52.51 cm。

表3 不同工况闸前壅水峰值、壅水峰值削减率、稳定时间

Tab. 3 Upstream peak water levels, reduction rate of peak and stability time with various operating conditions

工况	闸前壅水峰值/cm	壅水峰值削减率/%	稳定时间/h	工况	闸前壅水峰值/cm	壅水峰值削减率/%	稳定时间/h
一次连续关闭	52.00	-	5.50	$M=1$	43.80	15.76	4.27
$T_{beg}=70\text{ min}$	55.55	-6.93	5.80	$M=2$	46.38	10.65	4.08
$T_{beg}=72\text{ min}$	55.03	-5.91	5.78	$M=3$	47.64	7.81	4.05
$T_{beg}=74\text{ min}$	54.34	-4.59	5.77	$T=8\text{ min}$	49.74	4.34	5.55
$T_{beg}=76\text{ min}$	53.43	-2.84	5.75	$T=10\text{ min}$	49.30	5.20	5.55
$T_{beg}=78\text{ min}$	52.27	-0.61	5.72	$T=12\text{ min}$	48.74	6.27	5.53
$T_{beg}=80\text{ min}$	50.85	2.13	5.68	$T=14\text{ min}$	48.04	7.61	5.48
$T_{beg}=82\text{ min}$	49.13	5.44	5.58	$T=16\text{ min}$	47.15	9.32	4.37
$T_{beg}=84\text{ min}$	47.05	9.44	4.38	$T=18\text{ min}$	46.34	10.89	4.37
$T_{beg}=86\text{ min}$	45.56	12.38	4.35	$T=20\text{ min}$	45.56	12.38	4.35
$T_{beg}=88\text{ min}$	46.16	11.15	4.32	$T=22\text{ min}$	44.73	13.99	4.33
$T_{beg}=90\text{ min}$	46.77	9.99	4.20	$T=24\text{ min}$	43.80	15.76	4.27
$T_{beg}=92\text{ min}$	47.30	8.96	4.08	$T=26\text{ min}$	42.76	17.77	4.07
$T_{beg}=94\text{ min}$	47.83	7.94	4.02	$T=28\text{ min}$	45.40	12.69	2.53
$T_{beg}=96\text{ min}$	49.74	4.26	3.98	$T=30\text{ min}$	49.32	5.16	3.53
$T_{beg}=98\text{ min}$	52.94	-1.89	3.97				

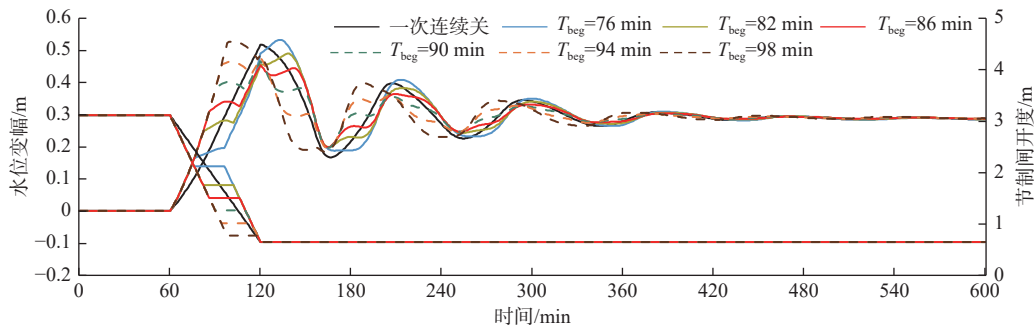


图7 不同间歇开始时刻对应的闸前水位变幅及闸门开度过程

Fig. 7 Upstream water levels and gate opening curve with various intermittent start times

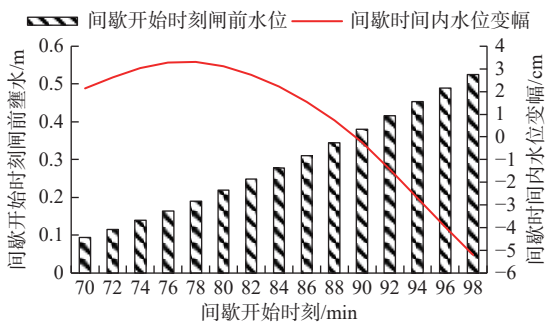


图8 不同间歇开始时刻闸前水位与降水效果变化

Fig. 8 Water level and precipitation effect with various intermittent start times

建议将间歇设置在降水波即将到达下游闸前的时刻,水位在间歇时长内回落的同时,兼顾了间歇前的较低壅水,减小了第二段闸门关闭引发的壅水上漲速率,且阻止了反射壅水波的叠加,闸前壅水峰值最大可降低8 cm,壅水削减率最高可达12.3%。

(2)水力振荡稳定时间随间歇时刻推移呈减小趋势。水力振荡稳定时间主要由闸前壅水峰值、闸前壅水峰值出现时间、水力振荡频率决定。观察图7发现,在不同间歇开始时刻工况下水力振荡频

率基本没有明显变化,而闸前壅水峰值先减小后增大,当间歇开始时刻大于 86 min 时,闸前壅水峰值出现时间提前了 20 min。受闸前壅水峰值及其出现时间的影响,水力振荡稳定时间逐步缩短,当间歇开始时刻大于 92 min 时,水力振荡稳定时间缩短幅度逐渐减小。比较一次连续关闸,将间歇设置在降

水波即将到达下游闸前之后,可缩短水力振荡稳定时间,最高可缩短 1.53 h。

### 3.2 间歇次数的影响

在间歇开始时刻相同(均取降水波即将传播至渠池下游端闸前的时刻)的前提下,通过改变闸门间歇次数  $M$ ,仿真闸前水位、闸门开度过程见图 9。

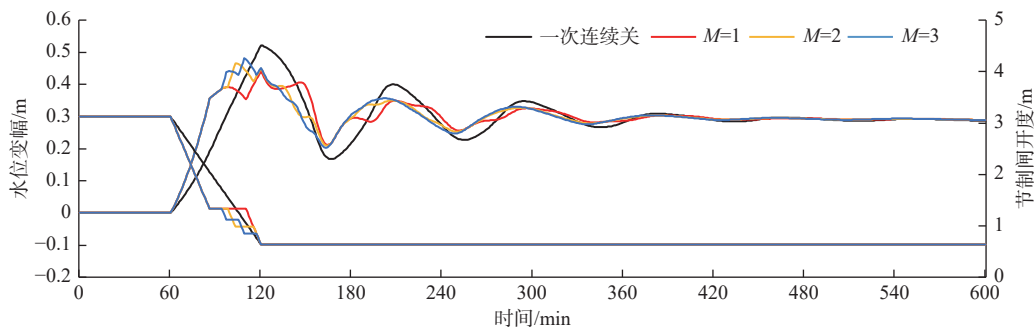


图 9 不同间歇次数对应的闸前水位变幅及闸门开度过程

Fig. 9 Upstream water levels and gate opening curve with various intermittent frequency

由图 9 可以看出以下结果:

(1)随着间歇次数的增加,闸前壅水峰值增大,壅水削减率减小。分析显示,闸门关闭引发的壅水速度远大于间歇时长内的水位的回落速度,将间歇时长间隔成多份小段间歇,小段间歇内水位回落值小于前期小幅闸门运动引发的壅水。例如工况 19( $M=2$ ),一段 5 min 的闸门运动将间歇时长间隔成两段,关闸 5 min 引发了 7.5 cm 的壅水,而第 2 次间歇 12 min 水位只回落了 5.6 cm,整体削峰效果不佳。因此多次分散设置间歇的削峰效果不如集中设置 1 次间歇。建议将间歇集中设置在降水波即将到达下游闸前的时刻,使水位在降水波前缘的作用下回落更多,待降水波大部到达下游闸前后,减缓

闸前壅水速率,降低了闸前壅水峰值。

(2)水力振荡稳定时间随着间歇次数的增加而减小。随着间歇次数的增加,闸前壅水峰值增加,水力振荡频率、振幅基本相同,但闸前壅水峰值出现的时间略有提前;且随着间歇次数的增加,渠池内来回传递的壅水波、降水波组数也有所增加,多组波来回传递,相互叠加、抵消使能量快速耗散,故闸前水位所需稳定时间略有减小。

### 3.3 间歇时长的影响

在间歇开始时刻和间歇次数相同(均为降水波即将传播至下游闸前时设置 1 次间歇)的前提下,通过改变间歇时长  $T$ ,典型工况仿真闸前水位、闸门开度过程见图 10。

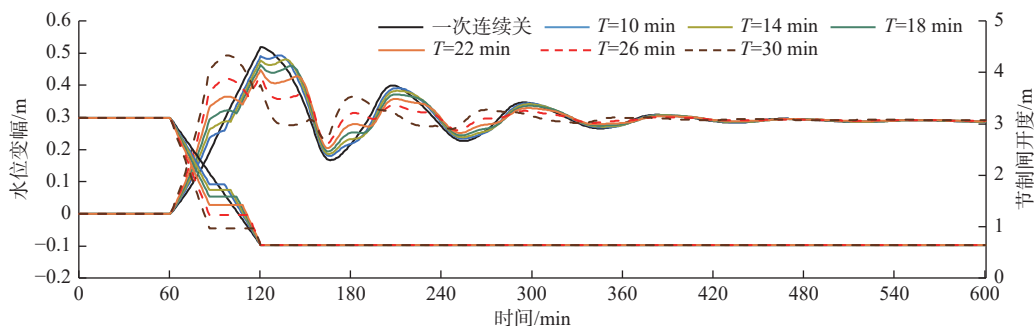


图 10 不同间歇时长对应的闸前水位变幅及闸门开度过程

Fig. 10 Upstream water levels and gate opening curve with various intermittent duration

由图 10 可以看出,闸前壅水峰值与水力振荡稳定时间均随间歇时长的增加先减小后增大。原因是在关闸总时间一定的前提下,间歇时长与关闸时

长此消彼长。延长间歇时长,有利于提供更多的时间给水位自然回落,但也意味着剩余的关闸时间短,闸门需要以更大的速率关闭,对应的壅水峰值

更高。在上述两个作用的博弈下: 间歇时长过短, 关闸引发的壅水速率小, 但间歇时间内降水效果差; 间歇时长过长, 间歇时间内降水效果好但关闸引发的壅水速率大, 间歇前闸前壅水迅速达到较高水平; 当间歇时长略小于关闸总时间的 1/2 时, 在保证降水波作用时间的同时, 兼顾了壅水速率较小, 闸前壅水峰值削减率最大可达 17.77%, 反之效果不佳。

#### 4 结论

搭建了南水北调中线京石段一维非恒定渐变流模型, 以磁河节制闸和沙河北节制闸同步关闭为例, 仿真研究了不同分次间歇关闸方式下的水力响应特性, 得出以下结论:

关闸总时间相同的条件下, 相比一次连续关闸, 分次间歇关闸可减小闸前壅水峰值、水力振荡振幅, 延缓退水闸开启时间、减少渠池弃水; 闸前水位稳定所需的时间大幅缩短, 使渠池快速恢复稳定。提高了应急状态下闸门对水位的控制能力。

间歇开始时刻的合理设置对于降低峰值水位至关重要。选择不适当的分次间歇开始时刻可能导致比一次连续关闸更高的闸前壅水。在降水波即将传播至下游闸前时设置间歇, 既降低了闸前壅水峰值, 又大幅缩短了水力振荡所需稳定时间。

间歇次数对闸前水位的控制效果产生明显影响。设置 1 次间歇虽略微延长了闸前水位稳定所需的时间, 但集中设置间歇可充分利用降水波使得闸前壅水削减率达到最大, 同时避免了繁琐的启闭闸门操作。

间歇时长的长短直接影响了降水波的作用时间, 同时也决定了闸门的关闭速度。间歇时长略小于关闸总时间的 1/2 时, 通过调整间歇时长可以分别得到较高的闸前壅水削减率与较短的稳定时间, 即使不能同时兼顾, 但综合效果均比一次连续关闸好。

闸门分次间歇关闭水力响应特性与水波运动规律紧密关联, 主要受渠池长度、水深、流速等影响。基于磁河闸—沙河北闸渠段得出的结论对中线工程其他渠段具有一定的适用性。下一步, 可探讨差异化的多个渠段联合调控时如何制定闸门群分次间歇关闸方式。

#### 参考文献:

[1] 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.

- [2] ZHANG Z, LEI X, TIAN Y, et al. Optimized scheduling of cascade pumping stations in open-channel water transfer systems based on station skipping[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2019, 145(7): 05019011. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001080.
- [3] 叶舟, 周旦娜, 陈芳. 基于网络流模型利用台风雨资源的舟山岛地下水库调度研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(2): 18-30. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.02.002.
- [4] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 南水北调中线工程渠道敏感性研究[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(6): 109-114.
- [5] 金思凡, 初京刚, 李昱, 等. 南水北调中线京石段冬季调度策略[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(2): 365-377. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0039.
- [6] 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.
- [7] 张保航, 张召, 雷晓辉, 等. 基于水动力耦合的明渠调水工程节制闸安全调控[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 821-832. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0080.
- [8] 孔令仲. 大型明渠输水工程常态控制与应急调控算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2019.002165.
- [9] KONG L, LEI X, WANG M, 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.
- [10] 苏圣致, 杨春霞, 饶天华, 等. 不同开度下某闸门流激振动数值模拟研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(9): 148-155. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.09.013.
- [11] 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.
- [12] 李月强, 马芳平, 薛萍, 等. 明渠输水流量不平衡量感知及水位超限预警方法研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(1): 73-82. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.01.008.
- [13] 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雍高影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 157-163, 170. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0166.

- [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: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2007.06.007.
- [15] 张成, 贺莉, 傅旭东, 等. 南水北调中线总干渠水力响应特征[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(9): 1350-1352. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2010.09.014.
- [16] 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: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.2011.04.024.
- [17] 朱德军. 南水北调中线明渠段事故污染特性模拟方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [18] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0097.
- [19] 郭英. 引汉济渭南干渠明渠非恒定流的水力响应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [20] 刘孟凯, 莫庸, 杨佳, 等. 暴雨条件下的长距离渠系水力响应特性研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 151-157. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.20180023.
- [21] 郑和震. 南水北调中线干渠突发水污染扩散预测与应急调度[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [22] 齐佳硕, 崔娅茹, 王双银, 等. 北疆供水工程应急闸控下的水力响应分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2021, 19(1): 250-256. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2021.01.041.
- [23] YUCE M, OMER A. Hydraulic transients in pipelines due to various valve closure schemes[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(9): 1110. DOI: 10.1007/s42452-019-1146-4.
- [24] 唐涛, 张锐, 杨明哲, 等. 南水北调中线防污应急演练方案浅析[J]. *中国水利*, 2018(18): 21-24, 28. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2018.18.008.
- [25] LITRICO X, FROMION V. Simplified modeling of irrigation canals for controller design[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2004, 130(5): 373-383. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:5(373).
- [26] MU J, ZHANG X. Real-time flood forecasting method with 1-D unsteady flow model[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(2): 150-154. DOI: 10.1016/S1001-6058(07)60041-9.

## Hydraulic response of synchronous and intermittent closing of gates on Beijing-Shijiazhuang section in the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project

LEI Yuling, CUI Wei, WANG Lei, DING Zhinan, MU Xiangpeng, CHEN Wenxue

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

**Abstract:** The Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project was structured with interconnected canal pools, divided by regulating gates. During emergency situations, the synchronous operation approach was commonly adopted to shift the channel's operation from a normal water level regime to an equal-volume operation by simultaneously closing gates. This swift change in channel flow dynamics due to the abrupt hydraulic transition proved highly effective in emergency management. However, research efforts at that time focused solely on continuous gate closures, neglecting the study of hydraulic response characteristics stemming from sequential intermittent gate closures in small steps. Exploring these responses was anticipated to provide guidance for emergency gate closure strategies to effectively prevent water levels from surpassing safety thresholds.

Building on the synchronization principle, the study targeted the canal pools between the Cihe gate and the Shahebei gate within the Beijing-Shijiazhuang section of the Middle Route Project. Employing the Saint-Venant equations, a one-dimensional simulation model was constructed to simulate non-uniform transient flow in open channels. This model compared the hydraulic response characteristics between sequential intermittent gate closures and continuous closures, and it simulated various hydraulic responses under different intermittent closure patterns. The analysis aimed to assess the impacts of different closure initiation times, the frequency of closures, and the duration of closures on the peak water levels upstream of the gates and the duration of hydraulic oscillations.

Simulation outcomes demonstrated that, with an equal total closure time, sequential intermittent gate closures



considerably reduced peak water levels and hydraulic oscillation amplitudes compared to continuous closures. These closures substantially shortened the time required for stability, allowing the canal pools to rapidly regain stability. Peak water levels upstream of the gates initially declined and then increased as the closure initiation time was adjusted. Conversely, the stability duration of hydraulic oscillations decreased as the closure initiation time was altered. Initiating intermittent closures as precipitation waves approached downstream gates facilitated a reduction in water levels during the closure period, slowing the buildup of water resulting from gate closure. This action effectively minimized peak water levels upstream while significantly reducing the required duration for stability. The increased frequency of intermittent closures led to higher peak water levels upstream and reduced the rate of water level reduction. Yet, it notably reduced the duration of hydraulic oscillations. Despite slightly prolonging the stability time needed for upstream water levels, concentrating closures maximized the utilization of precipitation waves, achieving the most substantial reduction in upstream water levels. Both peak water levels and the duration of hydraulic oscillations initially decreased and then increased with longer closure durations. Closure duration directly influenced the duration of action for precipitation waves and gate closure speed. Optimal closure duration, slightly less than half of the total closure time, resulted in the highest reduction rates of peak water levels and shorter stability times.

The hydraulic response characteristics of sequential intermittent gate closures were closely associated with water wave dynamics, primarily influenced by canal pool dimensions, depth, and flow velocity. Setting a single intermittent closure as precipitation waves approached downstream gates, with a duration slightly less than half of the total closure time, maximized water reduction and shortened stability time. These findings, derived from the Cihe gate to Shahebei gate canal segment, were deemed broadly applicable to other segments within the Middle Route Project.

**Key words:** open-channel hydraulics; Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project; intermittent gate closure; hydraulic oscillation; emergency scheduling

