

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0166

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. ZHAO M Y, KONG L Z, ZHENG Y X, et al. Analysis of the influence of gate closure time on the height of the water level before the control gate in a multi-channel system[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 157-163, 170. (in Chinese)

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

赵鸣雁¹, 孔令仲², 郑艳侠³, 雷晓辉⁴, 权锦⁴

1. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038; 2. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058;
3. 北京市南水北调工程建设管理中心, 北京 100097; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 针对采用应急同步关闸措施导致的水位雍高问题, 分析了多闸门同步关闸情况下不同关闸时间对水位雍高的影响。通过建立一维水力学模拟模型, 进行了大量的关闸工况计算, 研究了上、下游节制闸分别关闸动作对闸前水位的影响过程, 结果表明, 下游节制闸的关闸过程中产生的水位涨幅速率远大于关闭完成后的水位涨幅速率。并以此为依据设置了不同的下游关闸时间, 分析上、下游节制闸同步动作情况下关闸时间对闸前最大雍高产生时间与雍高高度的影响, 结果表明最大雍高出现在上游水波传递到下游的时间或者滞后一小段时间, 且下游关闸时间是影响水位雍高的主导因素。通过对多渠池联调下其他渠池的闸门调控对研究渠池的水位影响分析, 得出了同步关闸情况下渠池雍水基本只受本渠池上、下游闸门动作的影响的结论, 从而为多闸联调情况下闸前水位优化提供了参考。

关键词: 串联渠池; 同步关闸; 雍水; 关闸时间

中图分类号: TV 66 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of the influence of gate closure time on the height of the water level before the control gate in a multi-channel system

ZHAO Mingyan¹, KONG Lingzhong², ZHENG Yanxia³, LEI Xiaohui⁴, QUAN Jin⁴

(1. Construction and Administration Bureau of South to North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058;

3. Beijing Department of South to North Diversion, Beijing 100097, China;

4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In view of the problem of water level rising caused by emergency synchronous closure of control gates, this paper analyzes the influence of different closure time on the water level under the condition of synchronous closure of multiple gates. We established a one dimensional hydraulic simulation model, conducted plenty of calculations on closure conditions, and studied the influence of the closure of upstream and downstream control gates on the water level before the gate. The results showed that the water level rise rate during the closure process of the downstream control gate was much greater than that after the completion of the closure. On this basis, we set different downstream gate closure time, and analyzed the influence of the closure time on the height and happening time of the maximum water level during the synchronous closure of upstream and downstream control gates. The results showed that the maximum water level

收稿日期: 2018-06-15 修回日期: 2018-10-14 网络出版时间: 2018-11-02
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181101.1547.002.html>
基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108001)

Fund: Major Projects of Water Pollution Control and Management Technology(2017ZX07108001)

作者简介: 赵鸣雁(1971-), 女, 山东德州人, 高级工程师, 博士, 主要从事水资源调度管理方面研究。E-mail: zhaomingyan@nsbd.cn

通讯作者: 孔令仲(1992-), 男, 湖北仙桃人, 博士, 主要从事渠道自动化控制方面研究。E-mail: lkong@126.com

appeared during the transmission of the upstream water wave to the downstream section or a short time after that, and the downstream gate closure time was the dominant factor affecting the water level. After analyzing the influence of gate operation in other pools on the water level of the study pool in a multi channel system, we concluded that the water level of a pool is basically affected by the operation of the upstream and downstream gates of the pool alone under the condition of synchronous closure. This paper can provide a reference for the optimization of the water level before the gate under synchronous closure.

Key words: multi channel system; synchronous closure; water level rise; gate closure time

为了解决水资源分布不均的问题,国内外已建或在建有许多的大型调水工程,比如南水北调工程、美国的加州调水工程、法国的普罗旺斯工程。这些输水工程大部分输水段都是采用明渠输水,并采用明渠两端的节制闸进行输水调控^[1-2]。正常运行过程中,明渠的运行工况较为稳定,一般其分水流量较小,引起的渠道流量或者水位变化很小。因此其节制闸控制目标较为简单,达到输水目标流量并且保证水位尽可能稳定在目标水位即可^[3]。目前针对渠道运行控制方法主要为蓄量补偿算法或者预测控制算法^[4-5]。这些算法都是假设渠池的流量变化需求提前知道的情况下进行的闸门控制策略计算^[6-7]。但是,当工程遇到可能发生的应急事件,比如气候、洪水、地震、滑坡、建筑物损害、人为失误和交通事故,就需要进行突然的输水流量调控^[8]。最为严重工况就是在发生下游段突发水污染事件的时候,整个上游段渠池都需要进行大幅度的流量减小^[9]。而闸门的关闭势必会在渠池下游产生雍水,如果渠池下游雍水过高则可能导致漫溢。而漫溢会导致渠池水体淹没节制闸机房,造成液压油污染或者其他类型的污染。漫溢在渠池的调控过程中一般是不允许发生的^[10]。因此,在应急调控过程中,除了考虑渠池的稳定问题,还需要考虑关闸导致的节制闸水位雍高,节制闸的调控较为困难^[11]。

目前,针对渠池下游的突发的大流量变化下的闸门调控方法研究较少。国外学者主要是研究了在渠池上游来水突然减小下的应急调控方法,由于上游调控产生的涨水波需要一定的时间才能到达下游渠池,结果表明可以通过闸门异步调整来减小水位雍高^[12-13]。部分学者考虑了利用在线水库的库容来进行突发水量变化情况下的闸门调控^[14],但是并不是所有的渠池都具有在线调节水库。中国学者则针对南水北调中线工程的突发水污染事件,研究了大型明渠的应急调控方法^[15-16],并得出应急渠段的上游适合采用同步关闸措施,并且结合退水闸的使用来保证工程的安全的结论。虽然通过退水闸的使用可以减小渠道雍水,但是退水闸的开启及其不经

济,会退掉大量的可饮用水。国内已有研究表明在节制闸的开度调节过程中可以通过延长关闸时间来减小水位变幅速率^[17]。如果在节制闸的关闭过程中,考虑节制闸的关闭时间对节制闸的闸前雍水高度的影响,则可以通过合适的关闸时间选择来尽可能的降低闸前雍水高度。因此,本文通过研究节制闸关闸时间对闸前雍水的影响,分析在应急情况下的闸门关闸时间选择。

1 建模方法

(1) 渠系建模方程。

对于输水明渠而言,其渠道多为长窄类型^[18],因此,可以采用一维水力学模型来进行较精确模拟。一维方程为圣维南方程组^[19]:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{2A^2} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} + g(S_f - S_0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 和 t 为空间和时间坐标; A 为过流面积; Q 为流量; h 为水深; S_0 为渠道底坡; g 为重力加速度; q 为单位长度渠道上的侧向出流量; S_f 为摩擦坡度,定义为

$$S_f = Q|Q|/K^2 \quad (2)$$

其中 K 为流量模数。

(2) 节制闸建模方程。

节制闸处流量水位关系过闸流量方程描述。一般情况下输水明渠的节制闸过闸流量可以假设可以用与上游水深有关的方程描述,方程为:

$$Q = C_d l b \sqrt{2gh_1} \quad (3)$$

式中: Q 为流量; l 为闸门开度; b 为闸门宽度; h_1 为上游水深; C_d 为过闸流量系数,根据闸门开度、闸门过流形式等而定,其取值可参考 Henry 公式^[20]。

在节制闸开度已知的情况下,整个模型是具有定解的。在模型计算中,假设节制闸的开度是根据关闸时间线性减小的。

对于明渠水流,一般最下游节制闸水位不至于过低以至于影响闸门过闸能力,基本为明渠缓流,不存在急缓流交替。因此模型的数值解可采用 Pre

issman 隐式差分格式求解^[21]。

2 研究情景设置

闸门关闭过程对水位的影响主要在于流量改变后形成的水波。其中,下游闸门关闭过程中会形成涨水波,而上游闸门关闭过程会形成降水波。由于上游的降水波到达下游节制闸存在着时间上的滞后。因此,下游节制闸闸前水位在上游降水波传递过来的过程中会先上升后下降从而产生雍水现象。为分析上、下游关闸时间对下游水位的影响,首先构造了一个简单两渠池串联渠道,通过设置两个渠池的上、下游闸门的关闭时间,来分析关闸时间对渠池下游水位的影响。这里,设置的两个渠池的渠池长度均为 15 km,每个渠池的最下游水深均为 3.1 m;

初始的工况为最上游进口流量为 40 m³/s,中间分水口流量均为 0,最下游的出流也为 40 m³/s。此工况下计算得到的水波的传递速度约为 4.7 m/s,水波在每个渠池中的从上游传播到下游以及从下游传播到上游的时间分别约为 50 min 和 70 min,因此可考虑设置关闸时间为 10~90 min 来进行分析。研究渠段的具体结构和具体参数见图 1 和表 1。

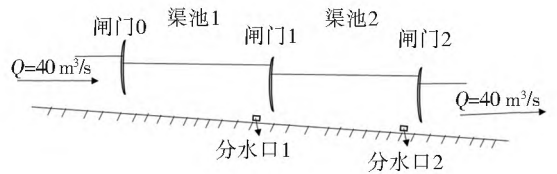


图 1 研究渠系设置

Fig. 1 Schematic diagram of the studied canal system

表 1 研究渠系基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the studied canal system

| 渠池长度 L/km | 渠池底坡 i | 糙率 n | 边坡系数 m | 底宽 d/m | 下游控制水深 h/m | 流量 / ($m^3 \cdot s^{-1}$) |
|-------------|----------|--------|----------|----------|--------------|-----------------------------|
| 15 | 0.0001 | 0.015 | 3 | 13.5 | 3.1 | 40 |

2.1 单一渠池中节制闸动作对渠池下游水位的影响分析计算工况

为了分析单一渠池中,上、下游节制闸分别关闭作用下的闸前水位变化过程,这里选取了渠池 1 作为研究对象。为分析上游节制闸关闸对下游水位的影响,假设节制闸 0 的流量从 40 m³/s 变为 0 m³/s,而其他节制闸的开度保持不变;为了分析下游节制闸关闸对下游水位的影响,假设节制闸 1 的流量从 40 m³/s 变为 0 m³/s,而其他节制闸的开度保持不变。此外,为分析关闸时间不同导致的水位变动差异,设置了 10 min、30 min 两种关闸时间,即节制闸 0 或节制闸 1 的流量分别在 10 min 和 30 min 内线性从 40 m³/s 变为 0 m³/s。此外,设置初始的变化开始时间均为 10 min。计算工况见表 2。

表 2 单一节制闸作用下的水位变化计算工况

Tab. 2 Conditions for calculation of water level change under the closure action of a single control gate

| 工况 | 节制闸 | | |
|-----------------|------------|------------|-------|
| | 节制闸 0 | 节制闸 1 | 节制闸 2 |
| 工况 ¹ | 关闭, 10 min | 开度不变 | 开度不变 |
| 工况 ² | 关闭, 30 min | 开度不变 | 开度不变 |
| 工况 ³ | 开度不变 | 关闭, 10 min | 开度不变 |
| 工况 ⁴ | 开度不变 | 关闭, 30min | 开度不变 |

2.2 单一渠池中上、下游节制闸同时动作对渠池下游雍水的影响分析计算工况

而在上、下游节制闸同时关闭的过程中,由于

上游涨水波到达下游节制闸前的滞后性,会导致闸前水位的雍高。为分析在单一渠池中,上、下游节制闸共同作用下的渠池下游闸前水位雍高过程,这里选取了渠池 1 作为研究对象。假设节制闸 0 以及节制闸 1 同时开始关闸,而节制闸 2 的开度保持不变,分析节制闸 1 的闸前水位雍高过程。为分析节制闸关闸时间对闸前水位雍高的影响,同样需要设置两个不同的关闸时间。而由于上游水波传播时间到达下游的时间具有滞后性,这里计算滞后时间大约为 50 min。因此,节制闸 1 设置了 70 min 关闸,以分析下游节制闸关闸时间大于水波传播时间情况下的水位雍高过程。设置计算工况见表 3。

2.3 串联渠池其他渠池节制闸动作对渠池 1 下游水位的影响分析计算工况

而在串联渠池中,一般多个渠池处于联动状态,这个时候就需要考虑多渠池节制闸关闸对闸前水位的影响。对于某一渠池而言,其下游闸前水位除了受渠池上、下游节制闸影响,也受到上游渠池的节制闸和下游渠池的节制闸动作影响。以渠池 1 中的节制闸 1 的闸前水位为研究对象,其即受到节制闸 0 上游的节制闸的关闸动作的影响,也受到节制闸 2 以及节制闸 2 下游的关闸动作的影响。但是由于节制闸 0 上游的节制闸动作产生的水波到达节制闸 1 处需要传播两倍的渠池长度,其影响滞后时间很长,而且在传播过去时节制闸 0 的降水波已经与节

表 3 单一渠池内上、下游节制闸关闭时间对水位雍高的影响分析计算工况

Tab. 3 Conditions for calculation of water level change affected by dosure time of upstream and downstream control gates in a single pool

| 工况 | 时间 | |
|-----------------|----------------|----------------|
| | 节制闸 1 关闭时间/min | 节制闸 0 关闭时间/min |
| 工况 ¹ | | 10 |
| 工况 ^o | | 20 |
| 工况 [»] | 10 | 30 |
| 工况 ^¼ | | 40 |
| 工况 ^½ | | 10 |
| 工况 ^¾ | | 20 |
| 工况 [¿] | 30 | 30 |
| 工况 ^À | | 40 |
| 工况 ^Á | | 30 |
| 工况 ^Â | | 40 |
| 工况 ^Ã | 70 | 50 |
| 工况 ^Ä | | 70 |

制闸 1 产生的涨水波相遇, 因此其对最大水位雍高几乎没有影响。所以这里就只考虑节制闸 2 的关闭对渠池 1 中节制闸 1 的闸前水位影响。

首先分析闸门 2 采取关闭动作, 而渠池 1 中的节制闸 0 和节制闸 1 开度保持不变工况下, 闸门 2 关闭对节制闸 1 的闸前水位的影响。设置工况见表 4。

表 4 其他渠池的节制闸关闭对本渠池的闸前水位影响计算工况

Tab. 4 Conditions for calculation of water level change under the closure action of gates in other pools

| 工况 | 节制闸 | | |
|-----------------|-------|-------|------------|
| | 节制闸 0 | 节制闸 1 | 节制闸 2 |
| 工况 ¹ | 开度不变 | 开度不变 | 关闭, 10 min |
| 工况 ^o | 开度不变 | 开度不变 | 关闭, 30 min |

2.4 串联渠池闸门都关闭其他渠池节制闸动作对渠池 1 下游雍水的影响分析计算工况

此外, 还需要考虑其他渠池关闭对本渠池中的水位雍高过程的影响。由于节制闸 2 的关闭对节制闸 1 的闸前水位的影响时间的滞后性较大, 如果节制闸 1 的关闭时间很短, 下游水波传播上来时节制闸 1 已经关闭, 其对节制闸 1 的闸前水位影响几乎可忽略。因此这里选择较长的节制闸 1 关闭时间。此外还设置了对照组: 节制闸 0 和节制闸 1 关闭, 而节制闸 2 的开度保持不变。以分析在节制闸同步关闭过程中, 其他渠池的节制闸关闭对本渠池的闸前水位的影响。具体工况设置见表 5。

采用第 2 部分的建模思路建立水力学模拟模型, 按照各工况设定的节制闸运行工况, 进行非恒定流模拟, 分析各工况中节制闸 1 的闸前水位变化过程。假设初始时刻渠池处于恒定流运行工况, 所有的关闭都是从 10 min 开始。

表 5 其他渠池的节制闸关闭对本渠池的闸前雍水影响计算工况

Tab. 5 Conditions for calculation of water level change under the closure action of gates in other pools and the studied pool

| 工况 | 时间 | | |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 节制闸 0 关闭时间/min | 节制闸 1 关闭时间/min | 节制闸 2 关闭时间/min |
| 工况 ¹ | 30 | 70 | 10 |
| 工况 ^o | 30 | 70 | 闸门不动 |
| 工况 [»] | 30 | 90 | 10 |
| 工况 ^¼ | 30 | 90 | 闸门不动 |

3 结果分析

3.1 单一渠池中节制闸动作对渠池下游水位的影响

首先分析上、下游关闭对渠池下游水位的影响。设置节制闸 0 关闭时间分别为 10 min 和 30 min, 其节制闸 0 的过闸流量变化过程与节制闸 1 的闸前水位变化过程见图 2。设置节制闸 1 关闭时间分别为 10 min 和 30 min, 其节制闸 1 的过闸流量变化过程与节制闸 1 的闸前水位变化过程见图 3。

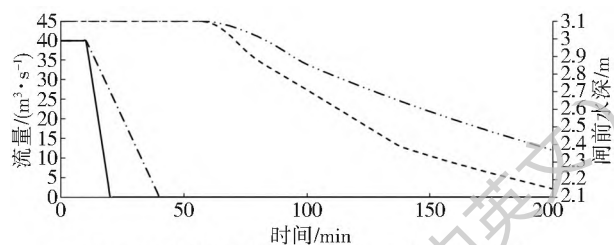


图 2 节制闸 0 关闭情况下过闸流量与渠池下游水位变化过程
Fig. 2 The gate flow and the downstream water level change process when gate 0 is closed

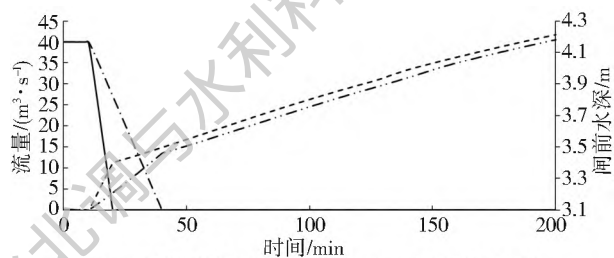


图 3 节制闸 1 关闭情况下过闸流量与渠池下游水位变化过程
Fig. 3 The gate flow and the downstream water level change process when gate 1 is closed

在图2中,节制闸0在10 min开始关闭,而下游节制闸前水位则在56 min分钟才开始变动,说明中间间隔着46 min左右的滞后时间。这说明上游关闸产生的降水波需要一段时间才能到达下游闸前。一般渠池上游扰动传递到下游的时间为水波的传递时间^[22]。对于上游扰动,水波传播时间计算公式为 $t = \frac{L}{c+v}$,水波波速也用 $c = \sqrt{gh}$ 近似估计。在本文设置工况中,渠池上、下游的水波波速计算结果分别为4.1 m/s和4.6 m/s,上、下游水流流速分别为0.8 m/s和0.5 m/s,上游水波传播到下游时间计算为47~50 min。这也说明模型的计算结果较为准确。

而且对比10 min和30 min关闸时间下的闸前水位变化过程可以看出,其产生的水位下降大致是两阶段的线性变化:(1)第1阶段和第2阶段水位都是线性降低,且第1阶段的水位降速略大于第2阶段;(2)第2阶段不同关闸时间带来的降速基本接近,水位降幅的差别是在第1阶段产生的。

从图3可以看出,本地节制闸关闭后的一段时间内闸前水位大致分为两阶段上升:(1)第1阶段和第2阶段水位都是线性降低,且第1阶段的水位降速略大于第2阶段;(2)关闸结束后的第2阶段的水位涨速也是相同的。其中,关闸完成之后水位线性增加且增速基本保持一致,符合现阶段在渠道集中控制中常用的积分时滞模型^[23-24]的相关结论,也说明了本文模型模拟结果的准确。

而对比图2和图3可以看出,下游节制闸在关闸过程中(关闸第1阶段)引起的水位变动更为强烈,水位变化速率远大于下游节制闸关闸完成后的变化速率以及上游节制闸关闸引起的下游渠池水位变化速率。而上游节制闸关闸引起的渠池下游水位下降速率略大于或者等于下游节制闸关闸完成后引起的水位上升速率。

3.2 单一渠池中上、下游节制闸同时动作对渠池下游雍水的影响

假设下游节制闸的关闸时间分别为10 min、30 min和70 min。分析在不同的下游关闸时间情况下,上游节制闸不同的关闸时间导致的渠池下游闸前水位变化情况。其结果见图4。

从图4中可以看出,在上、下游节制闸的共同作用下,渠池下游水位出现波动,而闸前的水位雍高大致出现在第一个波峰处;水位最大雍高出现的时间大约在60~80 min之间,也就是上游水波传播到下游节制闸1滞后一段时间。即最大雍高主要是由于上、下游水波的传递时间的差值造成的。

同时,对比相同上游时间,下游不同关闸时间的情况可以看出,延长下游关闸时间20 min带来的水位降幅约为0.06 m;相比之下,在下游相同时间,缩短上游关闸使劲20 min带来的水位降幅约为0.02 m,这也说明下游关闸时间是影响下游雍水高度的主要因素。

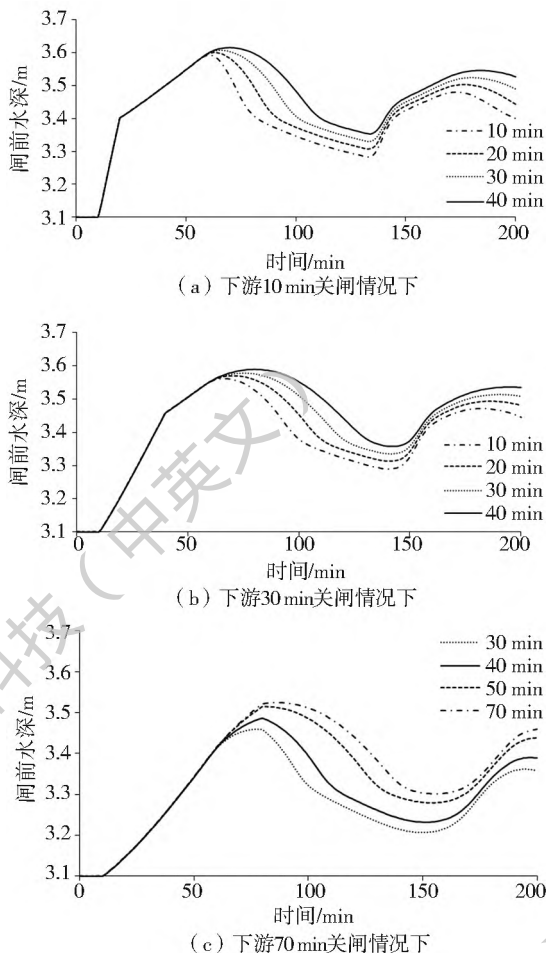


图4 下游10、30、70 min关闸情况下引起的下游水位变化过程
Fig. 4 The downstream water level change process due to the different closure time of the upstream gate when the downstream gate is closed in 10, 30, and 70 min

3.3 串联渠池其他渠池节制闸动作对渠池1下游水位的影响

假设节制闸0和1开度不变,而节制闸2关闭,其关闸时间分别为10 min、30 min。分析节制闸2的关闭对渠池1的下游水位(节制闸1的闸前水位)的影响。

从图5中可以看出,节制闸2在10 min开始关闭,而节制闸1闸前水位则在78 min分钟才开始变动,说明中间间隔着68 min左右的滞后时间。这是因此下游关闸产生的涨水波需要一段时间才能到达上游节制闸,其传播时间即为渠池除以水波的速率。

计算水波传播时间 $t = \frac{L}{c-v} \approx 70$ min。而在对比10

min 和 30 min 对闸 1 的闸前水深的影 响可以看出, 节制闸 2 的关闭也会造成节制闸 1 的闸前水位升高, 但是 关闸时间几乎不会影响到水位的变化速率。

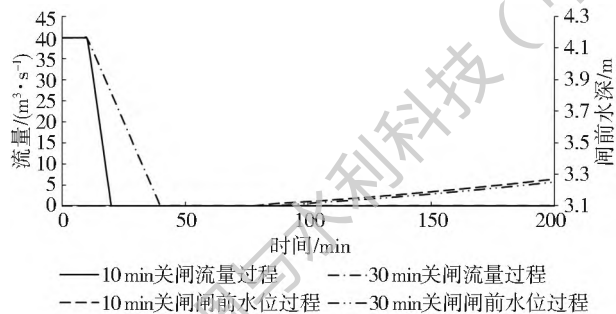


图 5 节制闸 2 在 10 min、30 min 关闸情况下的流量过程以及渠池 1 下游水位变化过程

Fig. 5 The downstream water level change process of pool 1 when gate 2 is closed in 10 and 30 min

在节制闸 0、节制闸 1、节制闸 2 分别采用 10 min 关闸而其他节制闸不操作工况下的水位过程, 见图 6。从图 6 中可以看出节制闸 0 和节制闸 1 关闭对渠池 1 的闸前水位影响较为强烈, 且后期导致的水位变化速率接近, 而节制闸 2 的关闭对渠池 1 的闸前水位影响极小, 且还存在着很大的滞后时间。因此, 需要分析在节制闸都同步采取关闸措施情况下的节制闸 2 对渠池 1 的闸前水位的影响。

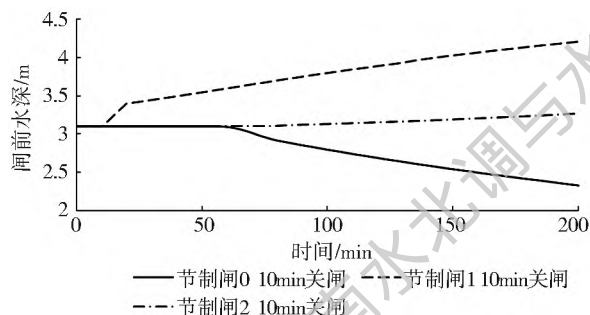


图 6 节制闸 0、1、2 分别在 10 min 关闭情况下渠池 1 下游的水位变化过程

Fig. 6 The downstream water level change process when gate 0, 1, or 2 is closed in 10 min

3.4 串联渠池闸门都关闭其他渠池节制闸动作对渠池 1 下游雍水的影响

从图 7 中可以看出, 在节制闸都采取关闸过程的时候, 下游节制闸 2 的关闭对渠池 1 的下游闸前水位没有任何影响。图 7(a) 中, 节制闸 1 在 70 min 内关闭, 由于节制闸 2 产生的水波到达节制闸 1 的时间为 76 min, 所以节制闸 2 关闸不会对闸 1 的闸前水位产生影响。而在图 7(b) 中, 尽管节制闸 1 的关闸时间为 90 min, 但是由于下游的水波传递到节制闸 1 时, 节制闸 1 的闸前水位雍高较大, 而节制闸 1 的闸前水位雍高较小, 且节制闸开度很小, 处于自

由闸孔出流状态, 计算方程假设下游水深对上游流量与水深没有影响^[25], 所以下游水波不会对节制闸 1 的闸前水位产生影响。也就说明, 在同步关闸时候, 除非是极端情况, 下游渠池的关闸几乎是不会对上游渠池的关闸产生的雍水有影响的。而由于上游渠池的关闸产生的水波到达下游存在很大的时间滞后, 几乎也不会对渠池的关闸雍水有影响。因此, 可以假设在多渠道串联渠系中, 同步关闸产生的最大雍水只与本渠池的上、下游的节制闸动作有关。

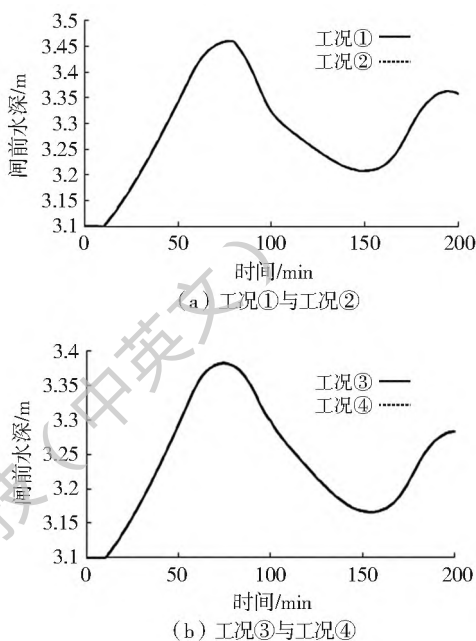


图 7 工况 1 与工况 2 及工况 3 与工况 4 下的渠池 1 下游水位变化对比

Fig. 7 The downstream water level change process of pool 1 under conditions 1 and 2 & conditions 3 and 4

4 结论

(1) 渠池上游节制闸关闭对下游水位的影响具有滞后性, 滞后时间为上游水波的传播时间。而且其导致的渠池下游水位是呈两阶段线性变化的, 关闸时间越快第 1 阶段的降速越快, 而第 2 阶段的降速在不同关闸时间下基本相同。由于第 1 阶段的降速差别导致最终的水位降幅差别。

(2) 渠池下游节制闸关闭对渠池下游水位的影响是瞬时的。而且其导致的渠池下游水位的也是两阶段线性变化的。第一阶段和关闸过程同步, 且第一阶段的涨速快于第二阶段的。第 2 阶段的涨速在不同关闸时间下基本相同。由于第 1 阶段的涨速差别导致最终的水位雍高幅度差别。

(3) 在渠池中上、下游闸门都关闭的情况, 最大水位雍高出现在上游水波传播到下游的时间或者之后一小段时间。且最大水位雍高随着下游关闸时间

的延长以及上游关闸时间的缩短而逐渐降低,但是下游关闸时间是影响最大雍高的主要因素。

(4) 在多串联渠池同步关闸情况,其他渠池的闸门操作几乎不会对其他渠池的水位雍高产生影响。各个渠池的最大水位雍高主要受渠池上、下游水位关闸时间的影响。在各个渠池的允许水位雍高不同的情况下,可以利用关闸时间优化来尽可能使得多渠池的水位雍高满足要求。

参考文献(References):

- [1] 皮钧,熊雁晖.加利福尼亚调水工程对我国调水工程的启示[J].南水北调与水利科技,2004,2(4):50-52.(PI J, XIONG Y H. Enlightenment from California State Water Project to South North Water Diversion Project[J]. South North Water Transfers And Water Science & Technology, 2004, 2(4): 50-52. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2004.04.017.
- [2] 王长德,阮新建.南水北调中线总干渠控制运行设计[J].人民长江,1999,30(1):19-21.(WANG C D, RUAN X J. Design of automatic control operation for main canal of Middle Route S N Water Transfer Project[J]. Yangtze River, 1999, 30(1): 19-21. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.1999.01.007.
- [3] 崔巍,陈文学,姚雄,等.大型输水明渠运行控制模式研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(5):6-10.(CUI W, CHEN W X, YAO X, et al. Research on canal control of large scale water transfer project[J]. South North Water Transfers And Water Science & Technology, 2009, 7(5): 6-10. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.05.002.
- [4] BAUTISTA E, CLEMENS A J. Volume compensation method for routing irrigation canal demand changes[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(6): 494-503. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:6(494).
- [5] ALVAREZ I A, RIDAO M A, RAMIREZ D R, et al. Constrained predictive control of an irrigation canal[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(10): 841-854. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000619.
- [6] 姚雄,王长德,丁志良,等.渠系流量主动补偿运行控制研究[J].四川大学学报(工程科学版),2008,40(5):38-44.(YAO X, WANG C D, DING Z L, et al. Study on canal system operation based on discharge active compensation[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition) 2008, 40(5): 38-44. (in Chinese) DOI: 10.15961/j.jsuese.2008.05.018.
- [7] 尚毅梓,吴保生,李铁键,等.渠道分水扰动可预知算法设计与仿真[J].水科学进展,2011,22(2):242-248.(SHANG Y Z, WU B S, LI T J, et al. Design and simulation of a foreseeable algorithm for canals[J]. Advances in Water Science. 2011, 22(2): 242-248. (in Chinese) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2011.02.004.
- [8] SEWELL T, STEPHENS R E, DOMINEY-HOWES D, et al. Disaster declarations associated with bushfires, floods and storms in New South Wales, Australia between 2004 and 2014[J]. Scientific Reports, 2016, 6. DOI: 10.1038/srep36369.

- [9] CHENG W P, JIA Y. Identification of contaminant point source in surface waters based on backward location probability density function method[J]. Advances in Water Resources, 2010, 33(4): 397-410. DOI: 10.1016/j.advwatres.2010.01.004
- [10] 方神光,吴保生,赵刚.南水北调中线输水渠道的漫溢现象分析[J].水利水电科技进展,2007,27(4):11-14.(FANG S G, WU B S, ZHAO G. Analysis of overflowing phenomenon in water transfer channel of middle route of South to North Water Transfer Project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources. 2007, 27(4): 11-14. (in Chinese) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2007.04.003.
- [11] 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):F8.(WANG H, LEI X H, SHANG Y Z. Key technologies of intelligent control and emergency regulation for The Middle Route of South to North Water Diversion Project[J]. South North Water Transfers and Water Science & Technology. 2017, 15(2): F8. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nslrdqk.2017.02.001.
- [12] SOLER J, GÓMEZ M, RODELLAR J, et al. Application of the GoRoSo feedback algorithm to compute the gate trajectories for a quick canal closing in the case of an emergency[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2013, 139(12): 1028-1036. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000640.
- [13] 方神光,吴保生.南水北调中线干渠闸前变水位运行方式探讨[J].水动力学研究与进展,2007,22(5):633-639.(FANG S G, WU B S. Operation of allowing fluctuating of water level in the Middle Route of the South to North Water Transfer Channel[J]. Journal of Hydrodynamics. 2007, 22(5): 633-639. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-4874.2007.05.014
- [14] SOLER J, GAMAZO P, RODELLAR J, et al. Operation of an irrigation canal by means of the passive canal control[J]. Irrigation Science, 2015, 33(2): 95-106 DOI: https://doi.org/10.1007/s0027.
- [15] 房彦梅,张大伟,雷晓辉,等.南水北调中线干渠突发水污染事故应急控制策略[J].南水北调与水利科技,2014(2):133-136.(FANG Y M, ZHANG D W, LEI X H, et al. Emergency control strategy for sudden water pollution accident in the main channel of Middle Route of South to North Water Diversion Project[J]. South North Water Transfers and Water Science & Technology. 2014(2): 133-136. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nslrdqk.2014.02.031.
- [16] 王浩,郑和震,雷晓辉,等.南水北调中线干线水质安全应急调控与处置关键技术研究[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(2):F6.(WANG H, ZHENG H Z, LEI X H, et al. Study on key technologies of emergency regulation and treatment to ensure water quality safety of the main canal of Middle Routes of South to North Water Diversion Project[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(2): F6. (in Chinese) DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.02.001.

(下转第170页)

- (in Chinese)
- [20] 刘宇翼, 周国庆, 苏运河, 等. 聚苯乙烯泡沫塑料颗粒膨胀土混合料的胀缩特性试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(5): 90-95. (LIU Y Y, ZHOU G Q, SU Y H, et al. Experimental study of swell-shrinking characteristics of the mixture of EPS granules and expansive soil[J]. Industrial Construction, 2017, 47(5): 90-95. (in Chinese) DOI: 10.13204/j.gyjz201705018.
- [21] 蔡骁, 高洪梅, 赵晖, 等. 轨道交通荷载作用下 EPS 颗粒轻质混合土的动力特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 651-658. (CAI X, GAO H M, ZHAO H, et al. Dynamic characteristic of EPS composite light weight soil under railway loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(5): 651-658. (in Chinese) DOI: 10.13409/j.cnki.jdpm.2015.05.015.
- [22] 唐朝生, 施斌, 高玮. 聚丙烯纤维和水泥对粘性土强度的影响及机理研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(1): 108-113. (TANG C S, SHI B, GAO W. Effects of polypropylene fiber and cement additives on strength behavior of clay soil and the mechanisms[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(1): 108-113. (in Chinese))
- [23] 杜伟飞, 刘争宏, 沈云霞, 等. 聚丙烯纤维优化黄土改良土力学性能研究[J]. 工程勘察, 2014, (11): 12-16, 28. (DU W F, LIU Z H, SHEN Y X, et al. Study on optimization mechanical properties of improved loess with polypropylene fiber[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, (11): 12-16, 28. (in Chinese))
- [24] 何钰龙, 韩春鹏, 王绍全, 等. 冻融作用下聚丙烯纤维土力学性能试验研究[J]. 公路工程, 2015, 30(6): 84-87, 95. (HE Y L, HAN C P, WANG S Q, et al. Experimental study on mechanical properties of polypropylene fibers soil under the freezing and thawing[J]. Highway Engineering, 2015, 30(6): 84-87, 95. (in Chinese))
- [25] 邓友生, 吴鹏, 赵明华, 等. 基于最优含水率的聚丙烯纤维增强膨胀土强度研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 349-353, 360. (DENG Y S, WU P, ZHAO M H, et al. Strength of expansive soil reinforced by polypropylene fiber under optimal water content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 349-353, 360. (in Chinese) DOI: 10.16285/j.rsm.2017.02.006.

(上接第 163 页)

- [17] 吴辉明, 雷晓辉, 秦韬, 等. 南水北调中线渠系蓄量补偿运行控制方式[J]. 南水北调与水利科技, 2015(4): 788-792. (WU H M, LEI X H, QIN T, et al. Operation control of storage compensation of canal system in the Middle Route of South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(4): 788-792 (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.04.040.
- [18] TANG C, YI Y, YANG Z, et al. Water pollution risk simulation and prediction in the main canal of the South to North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 2111-2120. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.010.
- [19] 范杰, 王长德, 管光华, 等. 渠道非恒定流水力响应研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 55-60. (FAN J, WANG C D, GUAN G H, et al. Study on the hydraulic reaction of unsteady flows in open channel[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 55-60. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2006.01.009.
- [20] HENRY H R. Discussion of diffusion of submerged jets by Albertson M L, Dai Y B, Jensen R A, Rouse H[J]. Transaction of ASCE, 1950, 115: 687-694.
- [21] 田兆伟. 一维非恒定流数学模型参数若干问题研究[J]. 人民珠江, 2015, 36(3): 16-20. (TIAN Z W. Research on some parameters of one dimensional unsteady flow mathematical model parameters[J]. Pearl River, 2015, 36(3): 16-20. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2015.03.005.
- [22] 崔巍, 陈文学, 穆祥鹏, 等. 明渠运行前馈控制改进蓄量补偿算法研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 12-17. (CUI W, CHEN W X, MU X P, et al. Revised Volume compensation algorithm for feedforward control of canal[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 12-17. (in Chinese))
- [23] CLEMMENS A J, SCHUURMANS J. Modeling of irrigation and drainage canals for controller design[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1999, 125(6): 338-344. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1999)125:6(338).
- [24] CLEMMENS A J, TIAN X, OVERLOOP P J V, et al. Integrator delay zero model for design of upstream water-level controllers[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2017, 143(3): B4015001. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000997.
- [25] 毛潭, 李继栋, 史喆琼, 等. 平板闸孔自由出流流量系数的实验研究[J]. 实验科学与技术, 2015, 13(3): 6-9. (MAO T, LI J D, SHI Z Q, et al. Experimental research of flow coefficient for free outflow of the flat sluice[J]. Experiment Science and Technology, 2015, 13(3): 6-9. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-4550.2015.03.003.