

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2021.0083

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. FAN J W, GUAN G H, ZHU Z L. Hydraulic response and accidental emergency dispatch of the long inverted siphon in north Hubei under accident conditions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 795-804. (in Chinese)

# 鄂北调水工程长倒虹吸事故水力响应及应急调度

樊甲伟,管光华,朱哲立

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072)

**摘要:**以鄂北水资源配置工程中的孟楼-七方倒虹吸(全长约 72 km)为研究对象,建立事故工况的一维非恒定流数值计算模型,仿真分析事故工况下长倒虹吸的水力响应过程。结果表明:事故工况下闸门同步异速调度相较于异步同速调度更利于倒虹吸安全;同步异速调度规则下,延缓倒虹吸进口以及上游闸门开始关闭时间、延长进口以及上游闸门关闭时长,或快速关闭倒虹吸出口以及下游闸门,都会抑制倒虹吸内部压力水体释放过程,增大压力超限风险;针对鄂北水资源配置工程,建议倒虹吸进口及上游闸门至少不晚于出口及下游闸门开始关闭后的 30 min 开始动作,倒虹吸出口及下游闸门关闭时长不宜短于 30 min,倒虹吸进口及上游闸门关闭时长不宜超过 30 min,并最终提出一组可供参考的节制闸应急调度组合。主要结论对于鄂北水资源配置工程的应急调度具有一定参考价值,也对类似含有大型倒虹吸工程的运行调度有一定的借鉴意义。

**关键词:**鄂北地区水资源配置工程;倒虹吸;水力响应;应急调度

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



孟楼-七方倒虹吸长约 72 km,设计流量 38 m<sup>3</sup>/s,属于超长管道、大管径的有压输水系统,其安全运行直接关系到整个工程的正常与平稳运行。在突发事故条件下,倒虹吸内可能产生水锤、局部负压等复杂的急变流态,应急反应不及时或调度措施不合理都可能导致严重的事故破坏及断水影响。因此,研究长距离输水倒虹吸事故工况水力响应及应急调度意义重大。

目前国内大部分学者的研究主要集中在对事故工况下渠道的水力响应规律以及沿线节制闸、退水闸等应急调度规则的探索上。段文刚等<sup>[1]</sup>对大型调水工程的突发事故进行分类归纳,并提出节制闸的调度规则。聂艳华等<sup>[2-4]</sup>研究了节制闸控制规则对南水北调工程应急调度的影响,分析闸门关闭速度

对水位壅高和退水量的影响,并对应急调度中节制闸预警水位的设置进行探讨,提出选取加大水位作为闸前预警水位可提高应急调度的安全经济性,同时也研究分析了应急调度目标水位对退水量和水位壅高的影响,并推荐设计水位+0.3 m 的闸前目标水位方案。崔巍等<sup>[5-6]</sup>对明渠调水工程事故段上游闸门群的应急调度做了研究,提出上游闸门群的调度规则和一种混合式“闸前常水位+等体积”运行方式。史哲等<sup>[7]</sup>建立南水北调典型渠段的变态模型,并通过数值模拟验证实验结果,分析节制闸控制下宽浅渠道内的非恒定流水力特性。万蕙等<sup>[8]</sup>研究闸门故障扰动事故的应急调度,提出小影响故障的许可应急时间为 60 min。张成等<sup>[9]</sup>研究了具有多个交叉建筑物的长距离渠段的事故工况水力响应特

收稿日期:2020-10-18 修回日期:2021-01-15 网络出版时间:2021-03-10

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210309.1546.002.html

基金项目:国家自然科学基金(51979202;51439906;51009108);国家重点研发计划(2016YFC0401810)

作者简介:樊甲伟(1996—),男,宁夏固原人,主要从事灌排自动化研究。E-mail:fanjiawei@whu.edu.cn

通信作者:管光华(1979—),男,江苏阜宁人,副教授,硕士生导师,主要从事灌排自动化及量水理论研究。E-mail:GGH@whu.edu.cn

性,分析退水闸和节制闸的调度对水位波动和水位壅高的影响。房彦梅等<sup>[10]</sup>研究了突发水污染事故的应急控制策略,通过模拟分析不同策略下的退水量、水质以及稳定时间。树锦等<sup>[11]</sup>分析研究了事故渠段节制闸在不同紧急关闭时间和闸前控制水位下的总干渠水力响应特征,并提出闸门控制策略。赵然杭等<sup>[12]</sup>对南水北调东线山东段的突发事故风险进行了评估。韩黎明<sup>[13]</sup>对南水北调中线工程供水安全影响的严重程度进行分级,提出了应急响应流程和应急调度策略。这些研究都是针对明渠的突发事故的,对于事故工况下长倒虹吸的水力响应特性和应急调度研究却少之又少。

本文在前人研究成果的基础上,以鄂北水资源配置工程中孟楼-七方倒虹吸(约 72 km)为研究对象,运用输水渠道系统运行仿真与控制软件(SCCS Version1.0)<sup>[14]</sup>,对长倒虹吸在事故工况下的水力响应特性进行仿真模拟,分析比较不同的闸门调度方案下的水力响应特性并提出闸门调度策略,通过应急调度以确保长倒虹吸在事故工况下的安全,避免严重的事故破坏以及断水影响。

## 1 数学模型

采用普莱斯曼窄缝法将明渠无压流和管道有压流的控制方程进行统一。整个数学模型以一维非恒定流的 Saint-Venant 方程组作为基本方程,采用 Preissmann 四点差分隐格式进行求解。

由于明渠非恒定流的基本方程和有压非恒定流的基本方程两者十分相似,1964 年 Cunge 等<sup>[15]</sup>提出了可以在管道顶端假想存在一条极窄的缝隙,将两组公式统一化。缝隙宽度为

$$W_{sl} = \frac{gA}{a^2} \quad (1)$$

式中: $a$  为压力波波速,  $m/s$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $A$  为过水断面面积,  $m^2$ ;  $W_{sl}$  为水面宽度,  $m$ ;

当管道内计算断面的水头高于管顶时,窄缝法内的水位就可以表征该断面的水头,而相应的重力波在窄缝内的传播速度与该水头下的水击波速相同。以矩形断面管道为例,水面宽度与管道内水位关系见图 1、2。图中  $W_{ch}$  为无压流水面宽度;  $W_{sl}$  为有压流水面宽度;  $H_{ch}$  为设计断面高度。

本文仿真算法中的圣维南方程组表达为

$$\begin{cases} g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g(S - S_0) = 0 \\ v \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{A}{W} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x$  为沿水流方向距离,  $m$ ;  $v$  为控制体沿水流方向的速度,  $m/s$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $S$  为水力坡度;  $S_0$  为底坡;  $H$  在无压流状态下为水深大小,在有压流状态下为压力水头大小,  $m$ ;  $W$  在无压流状态下为水面宽度,在有压流状态下为窄缝宽度,  $m$ 。

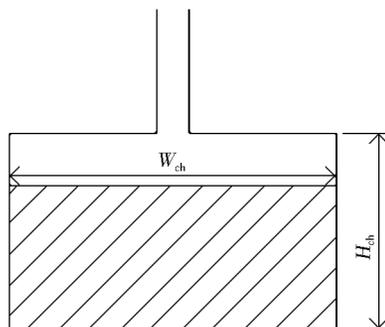


图 1 无压流状态管道内水体

Fig. 1 Water body in pipeline under free-surface flow

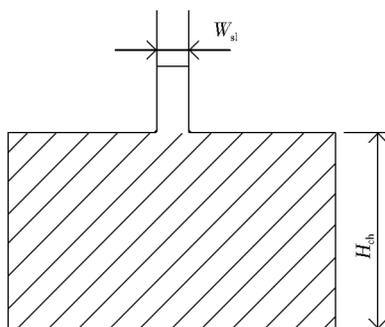


图 2 有压流状态管道内水体

Fig. 2 Water body in pipeline under pressure flow

## 2 仿真建模

### 2.1 工程概化

鄂北干渠孟楼-七方倒虹吸总长 72 149 m,设计流量  $38 m^3/s$ ,由 3 根直径 3.8 m 的 PCCP 管组成。以鄂北取水竖井节制闸为起点,以下游七方检修闸为终点进行仿真建模,为简化仿真模型,共划分为 4 个渠池,其中 3 号渠池为长倒虹吸段,其他渠池的仿真主要是为长倒虹吸的仿真提供仿真边界。模型共 5 个闸门,依次从上游到下游进行了编号。渠池划分与闸门编号见图 3,建模参数见表 1,沿线分水口参数见表 2。

### 2.2 边界条件概化

操控节制闸的关闭速率或过闸流量变化过程,是事故工况应急调度十分重要的举措之一。在模型仿真过程中,节制闸边界条件的选取对仿真结果的影响较大。鄂北取水竖井节制闸、长倒虹吸进口检修闸、七方检修闸均采用闸门自由出流公式<sup>[16]</sup>进行计算,公式为

$$Q = \mu_0 e B \sqrt{2gH_0} \quad (3)$$

式中:  $e$  为闸门开度,  $m$ ;  $B$  为闸门宽度,  $m$ ;  $H_0$  为闸

前水头,  $m$ ;  $\mu_0$  为闸孔自由出流的流量系数,  $\mu_0 = 0.60 \sim 0.18 \times e/H_0$ ;

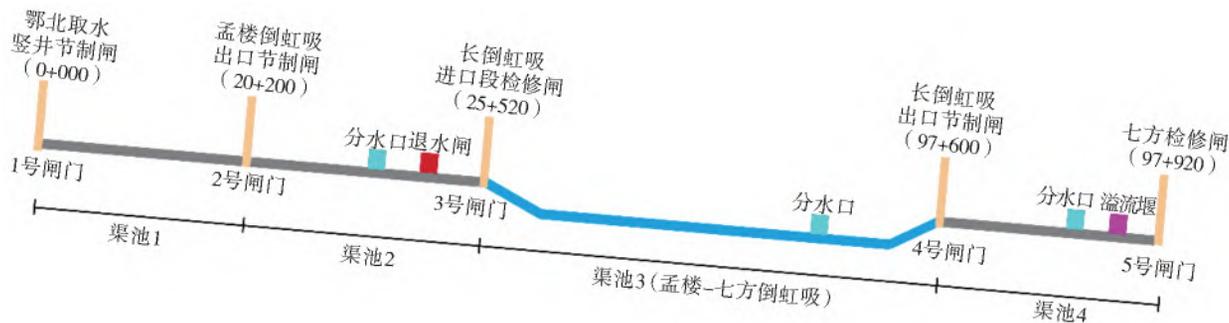


图3 渠池划分与闸门编号

Fig. 3 Channel pool division and gate number

表1 渠池建模参数

Tab. 1 Modeling parameter of the canal system

渠池编号	起点桩号	终点桩号	渠底起点高程/m	渠底终点高程/m	闸门宽度/m	闸门最大开度/m	渠道设计流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	下游目标水深/m	总长度/m
1	0+000	20+200	142.20	140.30	7.4	4.9	38	4.06	20 200
2	20+200	25+520	140.20	138.99	15.0	4.8	38	4.42	5 320
3	25+520	97+600	138.89	123.90	11.4	3.8	38	4.52	72 149
4	97+600	97+920	123.90	123.88	8.0	4.8	38	4.46	320

表2 沿线分水口情况

Tab. 2 Water diversion along the line

编号	名称	干渠建筑物	桩号	流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
1	滕庄水库分水口	明渠	25+200	0.2
2	夹河套分水闸	倒虹吸	80+600	1.6
3	官沟分水闸	明渠	97+700	1.5
4	七方镇分水闸	明渠	97+700	1.0

对于长距离倒虹吸, 闸门调控下的出口边界设置对倒虹吸管内水力响应过程有显著影响<sup>[17]</sup>, Henry公式难以反映快速关闸引发的水击震荡, 但能得到更大的水击强度, 更加适于制定应急调度计划<sup>[17]</sup>。因此, 倒虹吸出口选择 Henry公式<sup>[18]</sup>作为边界条件, 孟楼-七方倒虹吸出口节制闸属于闸孔淹没出流, 过闸流量计算公式为

$$C_d = 0.611 \left( \frac{h_0 - e}{h_0 + 15e} \right)^{0.072} (h_0 - h_2)^{0.7} \cdot$$

$$\left\{ 0.32 \left[ 0.81 h_2 \left( \frac{h_2}{e} \right)^{0.72} - h_0 \right]^{0.7} + (h_0 - h_2)^{0.7} \right\}^{-1} \quad (4)$$

$$Q = 0.864eB \sqrt{gh_0} \left( \frac{h_0 - e}{h_0 + 15e} \right)^{0.072} (h_0 - h_2)^{0.7} \cdot$$

$$\left\{ 0.32 \left[ 0.81 h_2 \left( \frac{h_2}{e} \right)^{0.72} - h_0 \right]^{0.7} + (h_0 - h_2)^{0.7} \right\}^{-1} \quad (5)$$

式中:  $Q$  为仿真时刻闸门过闸流量,  $m^3/s$ ;  $C_d$  为过闸流量系数;  $e$  为仿真时刻闸门开度,  $m$ ;  $B$  为闸门宽

度,  $m$ ;  $h_0$  为闸前水位,  $m$ ;  $h_2$  为闸后水位,  $m$ 。

### 3 应急调度逻辑及工况设置

#### 3.1 应急调度逻辑

事故工况是指输水系统在运行过程中发生突发的结构破坏、设备故障、水质污染以及社会公共事件, 这对保障输配水工程安全运行带来巨大挑战, 事故调度就显得尤为重要了。事故调度往往以保障工程本身安全、防止次生灾害的发生为第一目标, 同时兼顾经济性, 避免大量的弃水。控制策略反映了应急管理的调控目标与重点, 决定着闸门控制规则的设计。本研究中, 主要考虑保证孟楼-七方倒虹吸管压力不超过设计限值, 维持水力过渡期的持续供水。具体控制策略如下。

策略1, 提前进行闸门调度, 保证倒虹吸自身安全。事故工况下, 随着闸门的关闭, 倒虹吸压力如得不到及时的释放会导致倒虹吸沿线水头在短时间维持在较高水平, 对倒虹吸安全造成隐患, 面临压力超限甚至爆管风险, 因此应及时对倒虹吸进出口闸门进行适当调节, 使之尽快释放压力水体。

策略2, 维持分水口的正常分水。向分水口供水是调水工程的主要任务, 突发事件发生后, 上下游渠池具有一定的流量和蓄量存量, 具备向分水口继续供水的条件, 因此原有分水口的取水计划可维持不变。

在通常情况下,应急调度往往需要对节制闸、退水闸以及溢流堰进行联合调度,以实现应急调度目标,调度逻辑见图 4。立足于总结节制闸调度对长倒虹吸水力响应影响以及制定应急调度规则,因此未考虑与溢流堰和退水闸的联合调度。应急事故下的节制闸调度通常分为同步同速、同步异速、异步同速和异步异速等 4 种闸门调度方式<sup>[19-20]</sup>;同步同速是指闸门同步开始关闭且关闸速度相同;同步异速是指所有闸门同步开始关闭,但关闸速度不同;异步同速是指闸门开始关闭时间不同步,但关闸速度相同;异步异速是指开始关闭时间和关闸速度都不同。

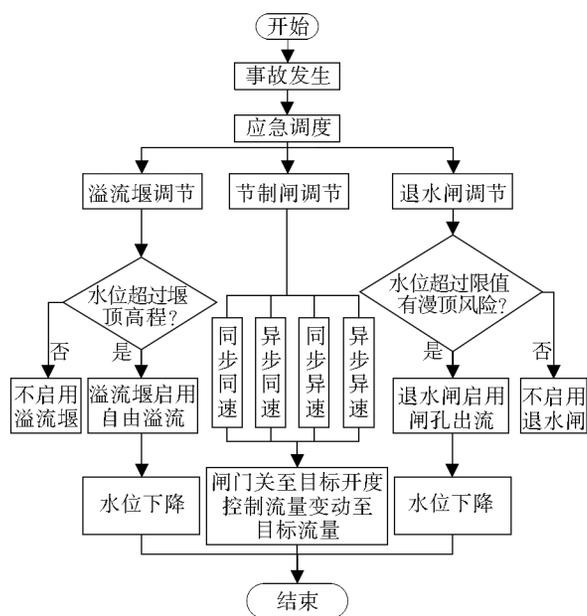


图 4 应急调度控制逻辑

Fig. 4 Schematic diagram of emergency dispatch control logic

根据工程经验,同步同速会导致倒虹吸进气,因此不考虑该种调度方式。异步异速闸门组合过多,不利于实际操作。因此,主要研究同步异速和异步同速规则下的水力响应特性,为长倒虹吸在事故工况下的闸门调度提供参考。

本模型共有 4 个渠池、5 个节制闸,事故工况下各闸门调度的组合情况较多且对长倒虹吸应急响应影响较大。为减少仿真数量,方便总结调度规则,各仿真基于以下 3 点:

(1) 为避免长倒虹吸进气,当下游发生事故时,应尽量遵循先关闭长倒虹吸出口闸门、后关闭倒虹吸进口闸门的原则;

(2) 根据工程实际情况,闸门最短关闭时长为 15 min;

(3) 孟楼-七方倒虹吸出口节制闸(4 号闸门)及七方检修闸(5 号闸门)距离较近(320 m),根据仿真经验 4、5 号闸门操作顺序对结果影响不大,故假定

二者同步同速关闭。

### 3.2 仿真工况设置

为简化仿真过程,以七方检修闸下游发生事故为例,对长倒虹吸的水力响应特性进行研究。假定仿真开始 1 h 后,七方检修闸(5 号闸门)下游发生事故,各个闸门从下游向上游依次关至目标开度。仿真总时长设置为 96 h,时间步长为 1 min。流量过程和各个闸门的目标开度见表 3。

表 3 下游事故工况流量过程与闸门目标开度

Tab. 3 Downstream accident condition flow process and gate target opening table

闸门编号	初始流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	初始开度 $e_1/m$	目标流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	目标开度/ m
1	38.0	5.04	11.3	1.50
2	38.0	3.92	11.3	1.17
3	37.8	3.82	11.1	1.12
4	36.2	3.80	9.5	0.95
5	33.7	3.84	7.0	0.71

#### 3.2.1 异步同速调度工况

在异步同速方案下,4、5 号闸门先同时开始关闭,然后 3、2、1 号闸门依次以同一时间间隔开始关闭(设为  $T_1$ ),所有闸门的关闭时长相同(设为  $T_2$ )。

采用控制变量法,控制关闸时间间隔( $T_1$ )一定,设置不同的闸门关闭时长( $T_2$ ),见表 4 中的 2、3、4 工况,来研究异步同速调度方案下不同关闭时长对倒虹吸水力响应的影响;同理控制闸门关闭时长( $T_2$ )一定,设置不同的关闸时间间隔( $T_1$ ),如表 4 中的 1、3、5 工况所示,据此总结不同关闸时间间隔对长倒虹吸的水力响应过程的影响。设计的异步同速工况汇总见表 4,闸门关闭过程见图 5。

表 4 下游事故工况异步同速闸门组合

Tab. 4 Asynchronous and same speed gate combination in downstream accident conditions

调度方式	工况序号	闸门关闭间隔 时间/min	闸门关闭 时长/min
异步同速	1	15	30
	2		15
	3	30	30
	4		45
	5	45	30

#### 3.2.2 同步异速调度工况

由于应当遵循长倒虹吸出口闸门先关闭、入口闸门后关闭的调度原则,故同步异速并非严格意义上的所有闸门同步启闭,而是长倒虹吸出口闸门(4 号闸)以及七方检修闸(5 号闸)首先同步关闭,

在一定的时间间隔(设为  $\Delta T$ )之后,长倒虹吸进口检修闸(3号闸)、孟楼倒虹吸出口节制闸(2号闸)、鄂北取水竖井节制闸(1号闸)等闸门再同步关闭。其中长倒虹吸出口闸门以及七方检修闸关

闸时长一致(4、5号闸门关闭时长设为  $T_3$ ),长倒虹吸进口检修闸、孟楼倒虹吸出口节制闸、鄂北取水竖井节制闸等闸门关闭时长一致(1、2、3号闸门关闭时长设为  $T_4$ )。

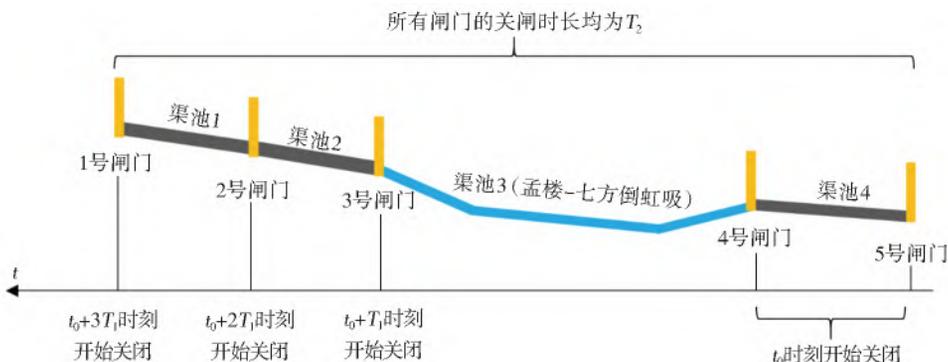


图5 异步同速闸门调度

Fig. 5 Schematic diagram of asynchronous and same speed gate scheduling

保持4、5号闸门关闭时长( $T_3$ )以及1、2、3号闸门关闭时长( $T_4$ )一致,设置不同的长倒虹吸进出口闸门开始关闭时间间隔( $\Delta T$ ),见表5中工况1、4、7,以探究同步异速调度工况下不同时间间隔对长倒虹吸水力响应的影响;保持长倒虹吸进出口闸门开始关闭时间间隔( $\Delta T$ )以及1、2、3号闸门关闭时长( $T_4$ )一致,设置不同的4、5号闸门关闭时长( $T_3$ ),见表5中工况2、4、6,以探究同步异速调度工况下不同下游闸门关闭时长对长倒虹吸水力响应过程的影响;保持长倒虹吸进出口闸门开始关闭时间间隔( $\Delta T$ )以及4、5号闸门关闭时长( $T_3$ )一致,设置不同的1、2、3号闸门关闭时长( $T_4$ ),见表5中工况3、4、5,以探究同步异速调度工况下不同上游闸门关闭时长对长倒虹吸水力响

应过程的影响。仿真闸门组合工况见表5,闸门关闭过程见图6

表5 下游事故工况同步异速闸门组合

Tab. 5 Synchronous all-speed gate combination for downstream accident conditions

工况编号	3、4号闸门关闭时间间隔/ min	4、5号闸门关闭时长/ min	1、2、3号闸门关闭时长/ min
1	15	30	30
2		15	30
3			15
4	30	30	30
5			45
6		45	30
7	45	30	30

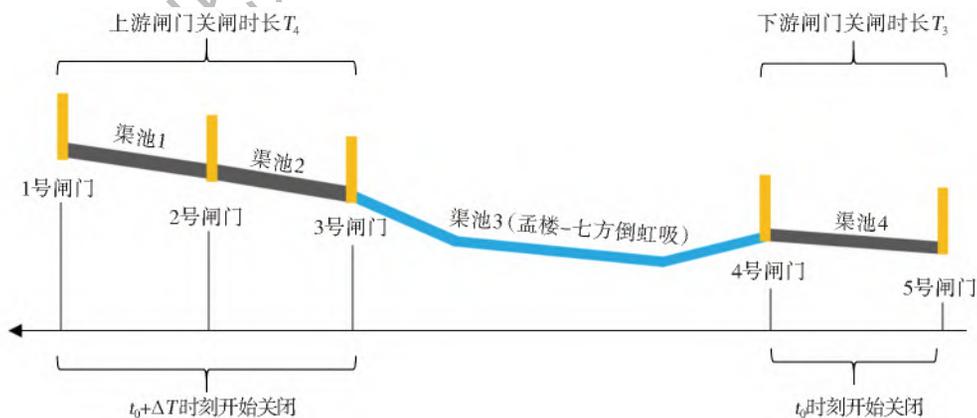


图6 同步异速闸门调度

Fig. 6 Schematic diagram of synchronous all-speed gate dispatch

## 4 仿真结果分析

通过对仿真结果的分析,白河桥大转弯段(桩号:75+062)断面处最容易发生压力超限,将其选作仿真分析的控制断面,以下简称控制断面。通过

该断面的压力水头变化过程来分析长倒虹吸事故工况下的水力响应特性。

### 4.1 异步同速调度

(1) 关闭时间一定,探究不同的关闭时间间隔对倒虹吸沿线压力的影响。

图 7 是在关闸时长同为 30 min, 关闸时间间隔分别为 15、30、45 min 工况下的孟楼-七方倒虹吸沿程压力水头线图。可以看到, 长倒虹吸在闸门关闭后, 压力水头迅速攀升至峰值, 并在较短时间内完成了压力释放, 符合压力管道的水力特性。结合图 7、8 可知, 随着时间间隔( $T_1$ )的增大, 倒虹吸沿线的压力水头明显增大, 且当时间间隔超过 15 min 时, 压力水头峰值超过了设计压力水头。

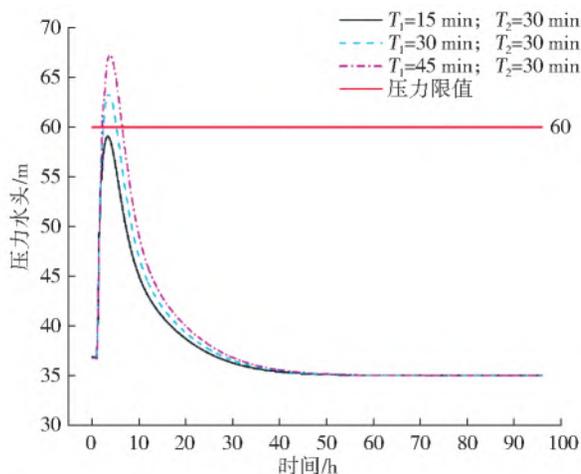


图 7 不同时间间隔的异步同速调度下控制断面的压力水头过程线

Fig. 7 The pressure head process line of the control section under different time interval asynchronous and same speed scheduling

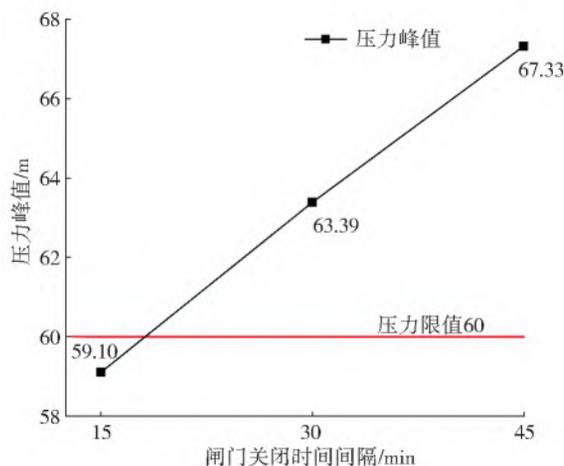


图 8 不同时间间隔的异步同速调度下的控制断面的压力水头峰值

Fig. 8 The peak value of pressure head of the control section under different time interval asynchronous and same speed scheduling

这是由于同步异速调度规则下, 倒虹吸上游闸门越晚关闭, 进入倒虹吸管内的压力水体越多, 容易引发压力超限的情况, 建议异步同速调度时闸门时间间隔不超过 15 min。

(2) 关闸时间间隔一定, 探究不同关闸速度对倒虹吸沿线压力的影响。

分析图 9, 时间间隔保持一致( $T_1=30$  min), 所有闸门的关闸时长分别为 15、30、45 min。闸门动作后, 长倒虹吸管压力水头都迅速攀升并在较短时间内完成压力释放, 压力变化过程基本一致且压力极差仅为 0.48 m。可见同一时间间隔下, 不同的关闸速率对长倒虹吸的水力响应过程影响不明显。

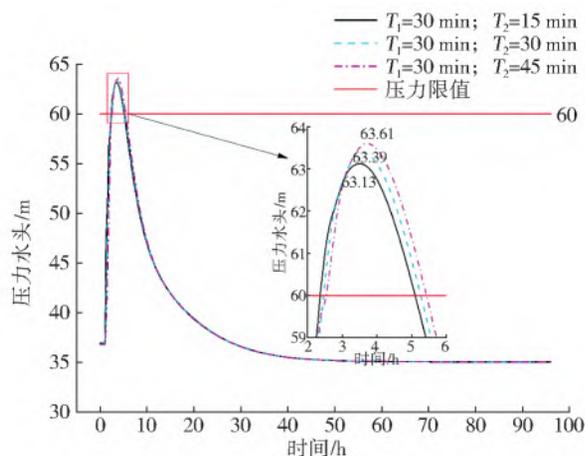


图 9 不同闸门关闭速度的异步同速调度下控制断面的压力水头过程线

Fig. 9 Process line of pressure head of control section under asynchronous and same speed scheduling with different gate closing speeds

## 4.2 同步异速调度

(1) 保持长倒虹吸进出口闸门关闭时长都为 30 min, 选取不同的进出口闸门关闭的时间间隔, 探究同步异速条件下不同的时间间隔对长倒虹吸的影响。结合图 10、11, 可以看到在各闸门的关闸时长一致时, 增大长倒虹吸进、出口闸门关闭时间间隔会显著增大控制断面压力水头峰值。

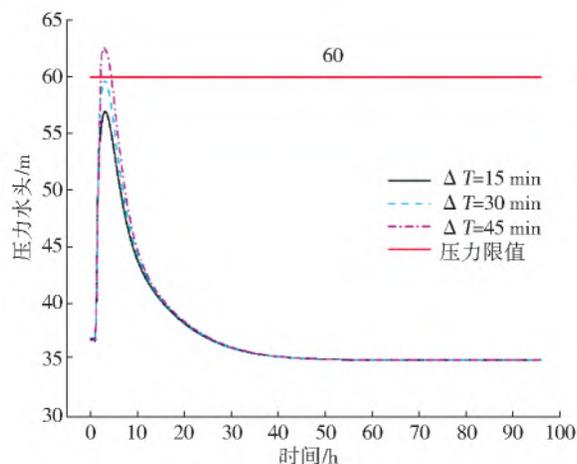


图 10 不同时间间隔下同步异速调度的控制断面压力水头过程线

Fig. 10 The pressure head process line of the control section of the synchronous all-speed dispatch at different time intervals

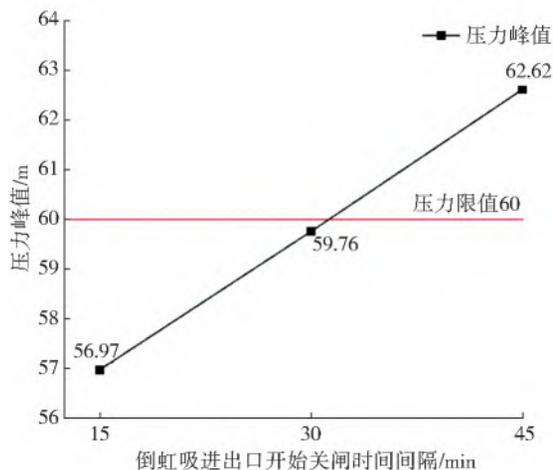


图 11 不同时间间隔下同步异速调度的控制断面压力水头峰值

Fig. 11 The peak value of the control section pressure head of the synchronous all-speed dispatch at different time interval

这是由于进出口时间间隔的增大会导致更多压力水体进入倒虹吸管,从而致使压力峰值持续攀升,对倒虹吸安全不利。建议在同步异速的调度规则下,长倒虹吸进、出口闸门关闭时间间隔不超过 30 min。

(2) 倒虹吸进出口关闭时间间隔一定( $\Delta T = 30$  min),不同闸门关闭速度对倒虹吸沿线压力的影响。

① 固定倒虹吸进口及上游闸门的关闭时间  $T_4$ , 变动倒虹吸出口和下游闸门的关闭时间  $T_3$ , 探究倒虹吸沿程压力水头变化规律。分析图 12、13, 可知倒虹吸出口关闭时长对倒虹吸沿线水头影响显著, 关闭时长越短, 水力响应更加剧烈, 更容易超限。这是因为缩短了关闭时间, 不利于倒虹吸内部压力水体的释放。因此, 适当延长倒虹吸出口及下游闸门的关闭时间对倒虹吸安全有利, 建议关闭时长不短于 30 min。

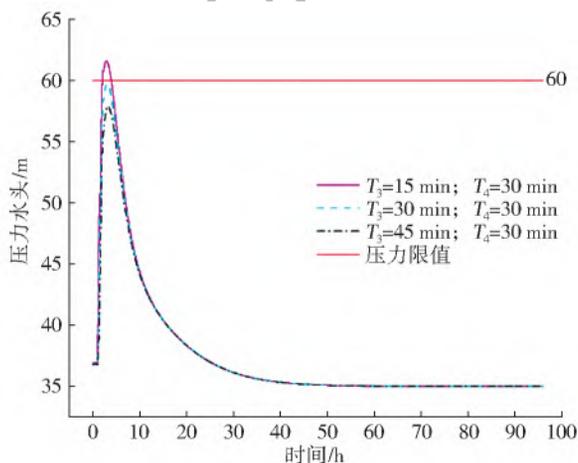


图 12 不同倒虹吸出口及下游闸门关闭速度时控制断面压力水头过程线

Fig. 12 The pressure head process line of the control section at different inverted siphon outlets and downstream gate closing speeds

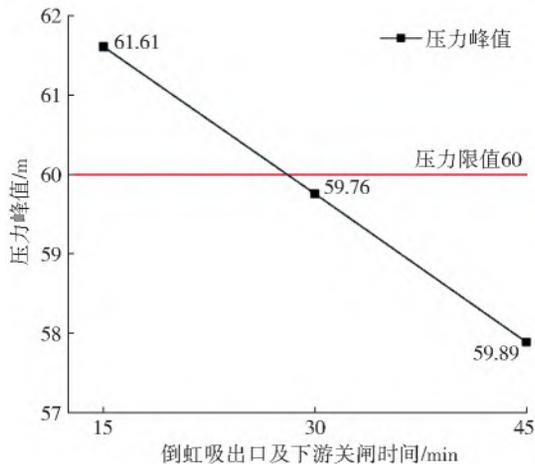


图 13 不同倒虹吸出口及下游闸门关闭速度时控制断面压力水头峰值

Fig. 13 The peak value of the pressure of the control section at different inverted siphon outlets and downstream gate closing speeds

② 固定倒虹吸出口和下游闸门的关闭时间  $T_3$ , 变动倒虹吸进口及上游闸门的关闭时长  $T_4$ , 探究倒虹吸沿线压力水头的变化。从图 14、15 可以看到, 在固定  $T_3$ 、增大  $T_4$  时, 倒虹吸沿线水力响应过程也更剧烈, 当进口及上游闸门关闭时长超过 30 min 时, 控制断面的压力峰值超过了设计限值。显然延长进口和上游闸门关闭时间会使得更多压力水体进入倒虹吸管段, 对事故工况下倒虹吸安全不利, 建议同步异速工况下倒虹吸进口及上游段闸门关闭时长不超过 30 min。

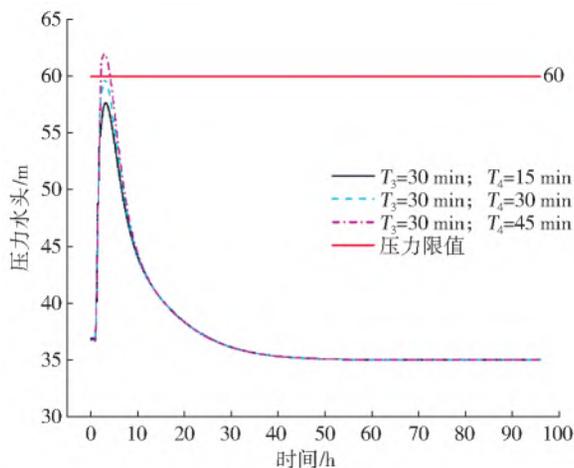


图 14 不同倒虹吸进口及上游闸门关闭速度时控制断面压力水头过程线

Fig. 14 The pressure head process line of the control section at different inverted siphon inlet and upstream gate closing speeds

### 4.3 两种调度方式的比较

结合图 16 以及各闸门组合情况下的仿真结果分析, 可以发现同步异速调度具有更大的优越性。以保障长倒虹吸安全为出发点, 给出一组推荐闸门组合, 见表 6。

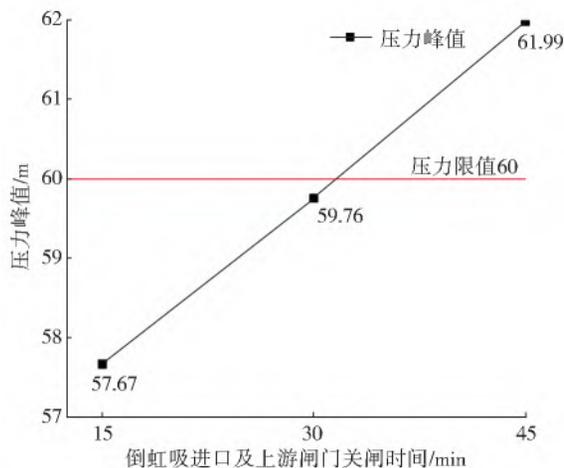


图 15 不同倒虹吸进口及上游闸门关闭速度时控制断面压力水头峰值

Fig. 15 The peak value of the pressure head of the control section at different inverted siphon inlets and upstream gate closing speeds

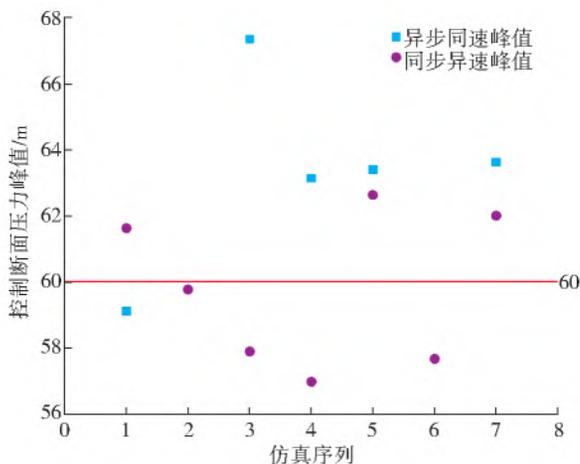


图 16 两种调度方式倒虹吸压力水头峰值散点图

Fig. 16 Scatter plot of the peak value of the inverted siphon pressure head for two scheduling modes

表 6 推荐闸门组合

Tab. 6 Recommended gate combination

调度类型	$\Delta T$ /min	$T_3$ /min	$T_4$ /min
同步异速	15	30	15

注:表中  $\Delta T$  为倒虹吸进出口闸门关闭时间间隔;  $T_3$  为长倒虹吸出口闸门、七方检修闸关闭时长;  $T_4$  为长倒虹吸进口闸门及上游闸门关闭时长。

## 5 结论

以孟楼-七方倒虹吸为研究对象,以七方检修闸(5号闸门)下游发生事故为例,对事故工况不同闸门组合下的长倒虹吸水力响应过程进行了仿真分析,该事故类型下推荐的闸门组合对其他类型的事故也有较好的适用性。同时鉴于节制闸在事故工况下相较于退水闸和溢流堰来说,对长倒虹吸的水力响应特性有着更加显著的影响,因此基于总结节制

闸的应急调度规则的目的,并未考虑节制闸与退水闸、溢流堰的联合调度。主要得到如下结论:

(1)事故应急调度时,由于压力波波速与重力波波速差距较大,调度时倒虹吸水力响应过程十分迅速,以鄂北水资源配置工程中的孟楼-七方倒虹吸为例,会在较短时间内攀升至压力峰值,随后压力水体会在较短时间内从出口闸门宣泄,使整个倒虹吸沿线压力最终稳定在安全水平。

(2)对比同步异速和异步同速调度方式,同步异速调度方式更有利于倒虹吸安全。

(3)同步异速调度规则下,延缓倒虹吸进口以及上游闸门开始关闭时间、延长进口以及上游闸门关闭时长,或快速关闭倒虹吸出口以及下游闸门,都会抑制倒虹吸内部压力水体释放过程,使压力峰值迅速攀升,增大压力超限风险。

(4)同步异速调度规则下,针对鄂北水资源配置工程,建议倒虹吸进口及上游闸门至少不晚于出口及下游闸门开始关闭后的 30 min 开始动作,倒虹吸出口及下游闸门关闭时长不宜短于 30 min,倒虹吸进口及上游闸门关闭时长不宜超过 30 min。给出一组可供参考的节制闸应急调度组合。

研究结论对长距离倒虹吸事故工况下的水力特性分析和闸门应急调度规则制定有一定参考价值,但当前只考虑了节制闸调度的情况,未进行退水闸与节制闸联合调度的探讨,在后续的研究中可做进一步探索。

## 参考文献(References):

[1] 段文刚,黄国兵,王才欢,等.大型调水工程突发事件及应急调度预案初探[C].北京:中国水利学会 2008 学术年会论文集(下册),2008:252-256 (DUAN W G, HUANG G B, WANG C H, et al. Preliminary study on emergencies and emergency dispatch plans of large-scale water transfer projects[C]. Beijing: Proceedings of the 2008 Annual Conference of China Hydraulic Engineering Society (Volume 2),2008:252-256. (in Chinese))

[2] 聂艳华,黄国兵,崔旭.南水北调中线应急调度节制闸预警水位研究[J].人民长江,2015(4):67-69. (NIE Y H, HUANG G B, CUI X. Research on the early warning water level of the emergency dispatch control gate in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Yangtze River, 2015 (4): 67-69. (in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.04.016.

[3] 聂艳华,黄国兵,崔旭,等.南水北调中线工程应急调度目标水位研究[J].南水北调与水利科技,2017,15(4):198-202. (NIE Y H, HUANG G B, CUI X, et al. Study on the target water level of emergency dispatch in the

- Middle Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 198-202. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.032.
- [4] 聂艳华,黄国兵,何建国,等. 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. (NIE Y H, HUANG G B, HE J G, et al. The influence of control gate control rules on emergency dispatch of South-to-North Water Transfer Project[J]. Hydropower and New Energy, 2011(4): 62-65. (in Chinese))
- [5] CUI W, MU X, CHEN W, et al. Emergency control scheme for upstream pools of long-distance canals[J]. Irrigation & Drainage, 2019, 68(2): 218-226. DOI: 10.1002/ird.2297.
- [6] 崔巍,穆祥鹏,陈文学. 明渠调水工程事故段上游闸门群应急调控研究[J]. 水利水电技术, 2013, 48(11): 13-19. (CUI W, MU X P, CHEN W X. Study on emergency control of upstream gate group in accident section of open channel water transfer project[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2013, 48(11): 13-19. (in Chinese))
- [7] 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. (SHI Z, MA J M, ZHENG S L. Unsteady flow in a wide and shallow channel under the control of a throttle gate[J]. South-to-North Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology, 2007, 5(6): 21-24. (in Chinese))
- [8] 万蕙,黄会勇,闫弈博,等. 长距离渠道闸门故障扰动及小影响应急调度研究[J]. 人民长江, 2018, 49(13): 78-82. (WAN H, HUANG H Y, YAN Y B, et al. Long-distance channel gate fault disturbance and small-impact emergency dispatching research[J]. Yangtze River, 2018, 49(13): 78-82. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.13.014.
- [9] 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): 16-20, 28. (ZHANG C, FU X D, WANG G Q. Analysis of the hydraulic response of the main canal of the South-to-North Water Transfer Project under abnormal working conditions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Conservancy Science and Technology, 2007, 5(6): 16-20, 28. (in Chinese))
- [10] 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, 12(2): 133-136. (FANG Y M, ZHANG D W, LEI X H, et al. Emergency control strategy for sudden water pollution accidents in the main canal of the South-to-North Water Transfer Project[J]. Science and technology of south-to-north water diversion and water conservancy, 2014, 12(2): 133-136. (in Chinese))
- [11] 树锦,袁健. 大型输水渠道事故工况的水力响应及应急调度[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 161-165. (SHU J, YUAN J. Hydraulic response and emergency dispatch of large-scale water conveyance channel accident conditions[J]. South-to-North Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology (Chinese and English), 2012, 10(5): 161-165. (in Chinese))
- [12] 赵然杭,陈超,李莹芹,等. 南水北调东线工程山东段突发事故风险评估[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 180-186. (ZHAO R H, CHEN C, LI Y Q, et al. Risk assessment of accidents in shandong section of the East Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Science and technology of south-to-north water diversion and water conservancy, 2017, 15(4): 180-186. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.029.
- [13] 韩黎明. 长距离明渠突发事件应急调度策略设计及应用[J]. 国际沙棘研究与开发, 2018(11): 71-75. (HAN L M. Design and application of emergency dispatch strategy for emergencies in long-distance open channels[J]. International Seabuckthorn Research and Development, 2018(11): 71-75. (in Chinese)) DOI: 10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2018.11.17.
- [14] 王长德,管光华. 输水渠道系统运行仿真与控制软件[P]. 中国: 2011SR034392, 2011. (WANG C D, GUAN G H. Simulation and control software for water conveyance system operation[P]. China: 2011SR034392, 2011. (in Chinese))
- [15] CUNGE J A, WEGNER M. Intégration numérique des équations d'écoulement de barré de Saint-Venant par un schéma implicite de différences finies [J]. La Houille Blanche, 2010, 1(1): 33-39.
- [16] 李炜. 水力计算手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LI W. Handbook of hydraulic calculation [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese))
- [17] 朱哲立,管光华,毛中豪. 超长倒虹吸出口明满流仿真闸门动态边界设置方法[J/OL]. 南水北调与水利科技(中英文): 1-13[2021-02-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200805.1448.004.html>. (ZHU Z L, GUAN G H, MAO Z H. The dynamic boundary setting method of the super-long inverted siphon outlet open and full flow simulation gate[J/OL]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology : 1-13[2021-02-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200805.1448.004.html>. (in Chinese))
- [18] SWAMEE P K. Sluicgate discharge equations[J].

- Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1992, 118(1):56-60.
- [19] 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):161-167, 174(ZHAO M Y, KONG L Z, ZHENG Y X, et al. The effect of closing time on the water level in front of the gate under the condition that the gates in series canals are closed synchronously[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 161-167, 174. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsb-dqk. 2018. 0166.
- [20] 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. (ZHENG H Z. Prediction and emergency dispatch of sudden water pollution spread in the main canal of the South-to-North Water Transfer Project[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese))

## Hydraulic response and accidental emergency dispatch of the long inverted siphon in north Hubei under accident conditions

FAN Jiawei, GUAN Guanghua, ZHU Zheli

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The Menglou-Qifang inverted siphon is a pressurized water delivery system with ultra-long pipelines and large diameters. Its safe operation is directly related to the normal and stable operation of the entire project. Under sudden accident conditions, complex changes such as water hammers and partial negative pressure may occur, and untimely emergency response or unreasonable scheduling measures may lead to serious accidental damage and water interruption. Therefore, it is of great significance to study the hydraulic response and emergency dispatch of long-distance water conveyance inverted siphon.

Taking the Menglou-Qifang inverted siphon (72 km) in the North Hubei Water Resources Allocation Project as the research object, a one-dimensional unsteady flow numerical calculation model for accidental conditions was established. The water delivery channel system simulation and control software (SCCS Version 1.0) was used to simulate the hydraulic response characteristics of the long inverted siphon under accidental conditions. The hydraulic response characteristics of different gate dispatching schemes were analyzed and compared, and gate dispatching strategies were proposed accordingly.

The hydraulic response characteristics of the long inverted siphon are quite different under different dispatch gate modes. When the gate adopts the asynchronous same speed scheduling rule by keeping the closing time of each gate constant, increase the time interval at which the gate starts to close, and the pressure head of the inverted siphon will increase significantly. If the time interval increases to more than 15 minutes its peak value will exceed the limit. At the same time interval, different closing speeds have little effect on the hydraulic response process of the long inverted siphon, and the pressure range is only 0.49 m. When the gate adopts the synchronous all-speed dispatching rule, the closing time of the inverted siphon outlet has a significant impact on the water head along with the inverted siphon. The shorter the closing time, the more severe the hydraulic response and the easier it is to exceed the limit. When the closing time is less than 30 minutes, the pressure will exceed the limit. Extending the closing time of the inlet and upstream gates will cause more pressure water to enter the inverted siphon section, which is detrimental to the safety of the inverted siphon under accident conditions. When the closing time of the inlet and upstream gates exceeds 30 minutes, the pressure peak of the control section exceeds the design limit.

**Conclusions** (1) In the emergency dispatch of the accident, the hydraulic response process of the inverted siphon is very rapid due to the large gap between the pressure wave velocity and the gravity wave velocity. It will climb to the peak pressure in a short time, and the pressure water will be discharged from the outlet gate in a short time so that the pressure along the entire inverted siphon will eventually stabilize at a safe level. (2) Compared with the synchronous all-speed and asynchronous same-speed scheduling methods, the synchronous all-speed scheduling method is more conducive to the safety of the inverted siphon. (3) Under the synchronous allometric scheduling rules, delaying the inverted siphon inlet and upstream gate closing time, extending the inlet and upstream gate closing time, or quickly closing the inverted siphon outlet and the downstream gate will inhibit the internal pressure water release process of the inverted siphon and make the pressure peaks rise rapidly, increasing the risk of pressure overruns. (4) Under the synchronous all-speed dispatching rules, for the water resources allocation project in northern Hubei, it is recommended that the inverted siphon inlet and upstream gates start to operate no later than 30 minutes after the exit and downstream gates start to close, and the inverted siphon outlet and downstream gates are closed for a long time, it should not be shorter than 30 min, and the closing time of the inverted siphon inlet and the upstream gate should not exceed 30 min. This is a reference set of emergency dispatch combinations for control gates.

**Key words:** the water resources allocation project in northern Hubei; inverted siphon; hydraulic response; emergency dispatch