

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.13.008

重力流关阀极限水锤特征及阀门关闭规律研究

李朋宇, 俞晓东, 王开朗, 陈楠, 王皓臻
(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 长距离重力流输水工程关阀水锤是威胁管道系统安全的重要因素之一。首先分析了重力流关阀的极限水锤特征,将重力流末端关阀产生的极限水锤特征分为两个阶段,第一阶段为静水头值的恢复段,此段管线压力呈上升趋势,上升速率受关阀速率控制;第二阶段为水锤压力的波动段,当管线压力恢复到静水头值后,水锤波特征逐渐明显,压力最大值受到该段关阀速率控制。进一步推导了极限水锤压力最大值的理论计算公式,并结合水锤特征解释了长距离重力流输水工程最大关阀水锤压力取决于第二阶段关阀规律。再以某实际长距离重力流输水工程为例,模拟末端关阀过渡过程,分析不同关阀规律下系统的水锤压力,验证了重力流关阀水锤特征和理论计算公式,并在此基础上提出了分阶段关阀速率和折点开度的选择方法。

关键词: 重力流; 极限水锤; 关阀规律; 压力

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)13-0049-06

Limiting Water Hammer Characteristics of Gravity Flow Valve Closing and Corresponding Valve Closing Law

LI Peng-yu, YU Xiao-dong, WANG Kai-lang, CHEN Nan, WANG Hao-zhen
(College of Water Resources and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The closing of valves causing water hammer is a critical threat to the safety of long-distance gravity flow water transmission projects in pipeline systems. The limiting water hammer characteristics of the gravity flow valve closing were initially analyzed, and the resulting characteristics could be divided into two stages. The first stage involved the recovery of static water head value, during which the pipeline pressure showed a rising trend that was controlled by the valve closing rate. The second stage involved the fluctuation section of water hammer pressure. As the pipeline pressure returned to the static water head value, the water hammer wave became gradually more apparent, and the maximum pressure was controlled by the valve closing rate in this section. The theoretical formula for the maximum limit of water hammer pressure was further derived. It was explained that the maximum water hammer pressure depended on the second stage valve closing law of long-distance gravity flow water transmission projects, in combination with the characteristics of water hammer. Using an actual long-distance gravity flow water transmission project as a case study, this paper simulated the transition process of end valve closing, analyzed the water hammer pressure of the system under different valve closing laws, and verified

基金项目: 河海大学优秀研究生学位论文培育项目

通信作者: 俞晓东 E-mail: yuxiaodong_851@hhu.edu.cn

the water hammer characteristics and theoretical calculation formula of gravity flow valve closing. Based on this rationale, a method for selecting the rate of valve closing and the opening of the break point was proposed.

Key words: gravity flow; limiting water hammer; valve closing law; pressure

随着我国社会经济的不断发展,工业、农业及城市用水量持续增加,水资源供求矛盾愈加严重,长距离输水工程可解决水资源时空分布不均和城市供水不足等问题,为社会发展提供基础保障。相比于泵站加压输水,重力流输水方式能最大限度地利用水的势能,并具有水量损失小、运行管理方便、不需要外界提供动力等特点。然而,重力流输水工程一般地形落差大,输水时要同时考虑地形坡降和水力坡降,阀门的不合理启闭或错误操作可导致重力流管线中的压力急剧变化,当水锤压力超过管道承压标准时,极易发生爆管,直接影响供水管网的安全运行。因此,确定合理的水锤防护措施和阀门调节方式,避免管线系统变换工况产生水锤破坏事故,对供水工程的安全运行具有重要意义。

重力流输水工程中常见的设备有调流调压阀、蝶阀、空气阀、超压泄压阀、调压塔等^[1]。对于部分长距离重力流输水工程,往往只需利用合理的关阀方式便可实现较好的水锤防护效果。采用简单的线性关阀,在一定的水锤压力控制标准下,关阀时间往往较长,不能快速隔断水流,有时需要采用两阶段关阀方案以减少关阀时间。两段折线关阀方案一般为先快后慢^[2]。王祺武等^[3]基于MATLAB模拟计算两阶段关阀方式,发现先快后慢比先慢后快的关阀方式对水锤的控制效果更优。黄毅等^[4]对末端关阀引起的水锤情况,采用先快后慢两阶段关阀措施,发现对关阀水锤压力能够发挥很好的控制作用,有效保证管线安全。王焰康等^[5]提出改进的两段折线关阀方案不仅能够缩短系统反应时间,也能有效减小水锤压力。针对两阶段关阀速率及折点开度的选择,袁林等^[6]通过试算以消除管道负压来确定第一段关阀速率及折点开度,正压满足防护标准来确定第二段关阀速率。

然而,以上研究都是基于数值模拟并通过试算来确定阀门的关闭规律,对于长距离重力流输水工程的关阀极限水锤特征以及关阀规律缺乏理论分析。笔者在以往研究的基础上,首先分析了管线末

端阀门关闭产生的极限水锤特征,推导了极限水锤最大值的理论计算公式,解释了长距离重力流输水工程最大关阀水锤压力取决于第二阶段关阀规律的原因。再以某实际重力流长距离输水工程为研究对象,进行关阀过渡过程的数值模拟,比较不同关阀规律下的水锤压力计算结果,进一步验证重力流关阀水锤特征,并提出一种两阶段中关阀速率和折点开度的选择方法,旨在为长距离重力流输水工程的关阀策略制定提供依据。

1 关阀极限水锤理论分析

1.1 关阀极限水锤压力特征分析

图1为长距离重力流输水系统。对于以一定流量稳定运行的长距离输水管道系统,由于摩擦的存在,造成管道系统测压管水头逐渐降低,控制一段直线关阀速率使系统压力满足管道承压标准,其中线性缓慢关阀产生的阀前极限水锤压力过程线如图2所示。

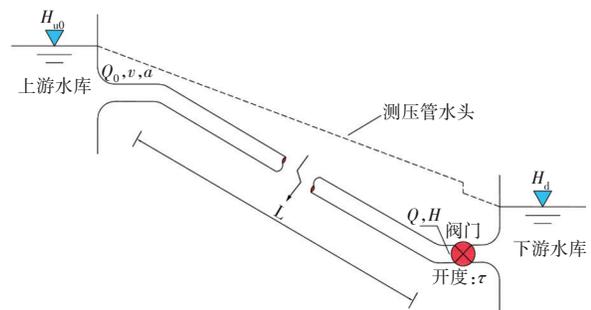


图1 重力流输水系统示意

Fig.1 Schematic diagram of gravity flow water transmission system

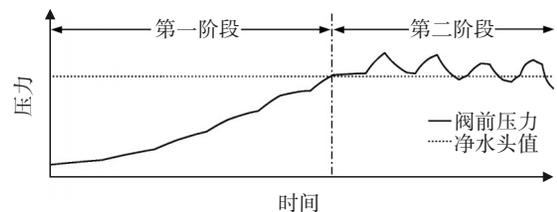


图2 阀前压力变化过程线

Fig.2 Process line of pressure change in front of valve

在阀门关闭过程中,阀门处持续产生水锤波并

不断向上游传递,管道流量逐渐减小,摩阻效应逐渐减弱。在关阀前期流量较大时,阀门的流量系数变化较小,阀门处因关阀产生局部水头损失的增加量小于因摩阻逐渐消失产生测压管水头的增加量,关阀水锤与之叠加使得阀前压力不断上升,首先要恢复由于摩阻造成的测压管水头的降低值,即恢复到静水头值。静水头值为阀门关闭后首端水库水位与该点高程的差值,此段称为关阀水锤的第一个阶段(静水头值的恢复段),压力变化包括阀门持续关闭产生的升压波、经水库反射的降压波、阀门异号反射的升压波组成的水锤压力及传播过程中管道水头损失的恢复值;阀前压力到达静水头值后,管道流量较小,阀门处局部水头损失的增加量大于测压管水头的增加量,关阀产生的水锤现象更为明显,阀前压力在静水头值附近产生波动,此段称为关阀水锤的第二个阶段(水锤压力的波动段)。当阀门完全关闭后,水锤波继续在管道中传播并逐渐衰减,最后阀前压力稳定在静水头值。

第一阶段阀前压力在到达静水头值之前整体呈上升趋势,上升速率与关阀速率有关,关阀速率越慢,压力上升速率越慢,一般情况下,此阶段并不

$$\begin{cases} C^+: H_{pi} = H_{i-1} + (algA)Q_{i-1} - (algA)Q_{pi} - (f\Delta x/2gDA^2)Q_i | Q_{i-1} | \\ C^-: H_{pi} = H_{i+1} - (algA)Q_{i+1} + (algA)Q_{pi} + (f\Delta x/2gDA^2)Q_i | Q_{i+1} | \end{cases} \quad (3)$$

式中: $H_{i\pm 1}$ 、 $Q_{i\pm 1}$ 分别为第 $i\pm 1$ 个断面在 $t-\Delta t$ 时刻的水头和流量; Δt 为时间步长; A 为过流面积; Δx 为管道分段长度。

简化阀门过流特性^[7-8],则阀门过流方程为:

$$Q = \tau(t)Q_0\sqrt{H/\sqrt{H_{u0} - \alpha Q_0^2}} \quad (4)$$

式中: Q 为阀前流量, m^3/s ; H 为阀前水头, m ; $\tau(t)$ 为关阀规律,对于关阀时间为 T_s 的直线规律, $\tau(t)=1-t/T_s$; Q_0 为管道初始恒定流流量, m^3/s ; H_{u0} 为上游水位, m ; α 为管道损失系数。

对于长距离输水工程,设计流量下末端阀门的初始开度较大,为避免过大水锤,关阀时间往往较长,一般发生极限水锤,且最大水锤压力发生在接近关阀结束时刻,长距离输水工程关阀极限水锤求解过程如图3所示。在产生最大水锤压力时管道中的流量已经很小,近似忽略此时系统中的摩阻,在产生最大水锤压力前一相时刻,通过阀门向管道首段引入负特征线,可得:

产生压力极值。第二阶段阀前压力在恢复到静水头值之后开始出现波动,管道系统的水锤波动特征逐渐显现,并产生压力最大值,压力最大值与该阶段关阀速率有关,关阀速率越慢,系统最大压力值越小,但随着关阀速率的继续放缓,管线最大压力值下降的效果会减弱,最终趋于稳定。以上是对长距离重力流输水系统关阀水锤特征的分析,本研究将进一步从理论上证明最大关阀压力仅与第二阶段压力恢复到静水头值后的关阀速率有关。

1.2 关阀极限水锤理论公式

描述任意管道中的水流运动状态的基本方程为:

$$g\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g}\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

式中: H 为测压管水头, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; x 为位置坐标, m ; v 为流速, m/s ; t 为时间变量, s ; f 为摩擦系数; D 为管径, m ; a 为水锤波速, m/s 。

式(1)、(2)可简化为标准的双曲型偏微分方程,利用特征线法将其转化成同解的管道水锤计算特征相容方程。

$$H_{u0} = H_{D1} + \frac{a}{gA} [Q_u - \tau(t_1)Q_0\sqrt{H_{D1}/\sqrt{H_{u0} - \alpha Q_0^2}}] \quad (5)$$

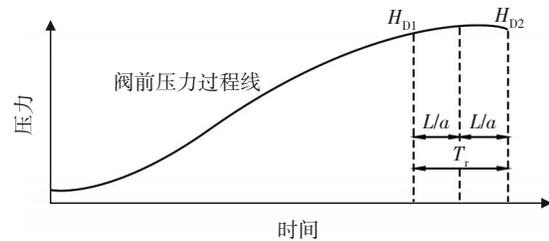


图3 关阀水锤求解示意

Fig.3 Schematic diagram of valve closing water hammer solution

再通过管道首段向末端阀门引入正特征线,两个过程相差一个相长,则:

$$H_{D2} = H_{u0} - \frac{a}{gA} [Q_u - \tau(t_2)Q_0\sqrt{H_{D2}/\sqrt{H_{u0} - \alpha Q_0^2}}] \quad (6)$$

$$\begin{cases} \tau(t_1) = 1 - t/T_s \\ \tau(t_2) = 1 - (t + 2L/a)/T_s \end{cases} \quad (7)$$

式中： Q_u 为此相关阀过程中前半相时刻管道首段的流量； H_{D1} 、 H_{D2} 分别为此相关阀过程中起始时刻和相末时刻的阀前压力，根据长距离输水系统关阀水锤过程线，可近似认为二者相等，即 $H_{D1} = H_{D2} = H_D$ 。

令 $\psi = LQ_u/gAT_s\sqrt{H_{u0} - \alpha Q_u^2}$ ，代入公式并联立式(5)~(7)，消去流量 Q_u ，可得：

$$H_D = H_{u0} + \frac{\psi}{2} (\psi + \sqrt{\psi^2 + 4H_{u0}}) \quad (8)$$

式(8)为长距离重力输水系统关阀产生极限水锤压力最大值的近似计算公式。可见，关阀产生的最大水锤压力与关阀时间相关。结合上述关阀水锤特征可知，因最大水锤压力只发生在第二阶段，关阀时间 T_s 既可取为一段直线关阀的时间，也可看作分阶段关阀中第二阶段的时间，那么在分阶段折线关阀中，如果在阀前压力恢复到静水头前采用较快速率关阀，提高第一阶段压力上升速率，缩短压力上升时间，到达静水头后降低关阀速率，保证压力最大值不超过管道承压标准，可大大缩短关阀时间，提高关阀效率。为此，对某长距离重力输水工程进行过渡过程模拟，以验证上述理论分析。

2 实例分析

2.1 工程概况

某长距离重力输水工程输水管线纵断面如图4所示。

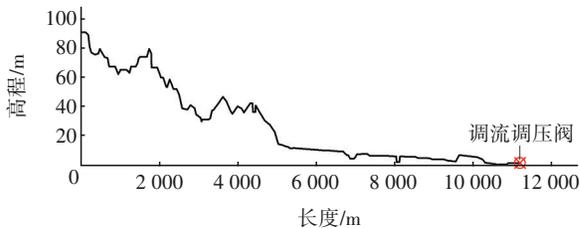


图4 输水管线纵断面

Fig.4 Profile of water transmission pipeline

输水管线采用PE管(DN1 400)，水锤波速为1 000 m/s，管道糙率为0.01，单线总长度约为11.2 km，远期最大输水量为5.01 m³/s，流速约为3.25 m/s，上游水库水位为100 m，下游水位为35 m，输水工程末端装有调流调压阀，标高为1.15 m，静水头值约为100 m(1 m水头产生的压力约为9.8 kPa)，该

重力输水工程流量、流速、落差均较大，管线最大高差约为90 m，采用远期最大输水量运行时，末端调流阀全开，阀前水头约为48.76 m，沿程和局部水头损失共约为65 m。参照《室外给水设计标准》，阀前管道承压标准取1.3~1.5倍静水压力，考虑PE管材的温度折减，此输水工程管道承压标准取为115 m，此工程关闭末端阀门时，通过计算 $\rho\tau_0 > 1$ ，将发生极限水锤。

2.2 一段直线关阀规律

以远期最大输水量5.01 m³/s恒定流工况的计算结果作为初始条件，通过数值模拟试算选取出一段直线关阀时间为60、90、120、540、600、660、720 s，7种情况下末端阀门产生的最大水锤压力见表1。

表1 一段直线关阀不同方案计算结果

Tab.1 Calculation results of different schemes of one-stage linear valve closing

方案	关阀时间/s	式(8)计算结果/m	阀前最大压力/m	管线最大压力/m	承压标准/m
a	60		260.90	260.96	115
b	90		206.02	206.05	115
c	120		168.59	168.62	115
d	540	110.37	113.95	114.52	115
e	600	109.29	112.16	112.75	115
f	660	108.41	110.77	111.45	115
g	720	107.68	110.00	110.70	115

从表1可以看出，当关阀时间为60、90、120 s时，管线压力值不满足控制标准。当采用斜率为1/600 s⁻¹一段直线关阀时，管线最大压力为112.75 m，输水系统各管段的内水压力均能满足设定的承压标准且有一定富余，能够较好地保证系统安全，达到最快速度关闭系统的目的，且关阀时间越长，式(8)计算值越接近阀前最大压力数值计算结果。关阀方案d、e、f、g的阀前压力见图5。

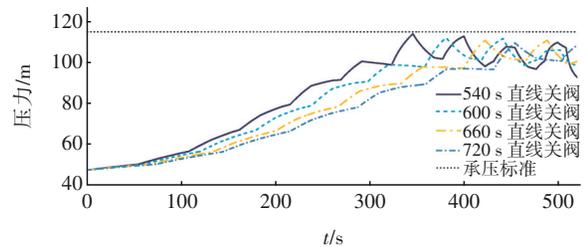


图5 方案d、e、f、g的阀前压力变化过程线

Fig.5 Process line of pressure change in front of valve in schemes d, e, f and g

2.3 两段折线关闭规律

采用两段折线关闭方式优化重力流长距离输水工程关闭产生的水锤压力,以分析的水锤压力特征为基础,关闭方案以组合不同的快关段关闭速率 K_1 、折点开度 τ_z 和慢关段关闭速率 K_2 ,选取快关段关闭速率 K_1 分别为 $1/60$ 、 $1/90$ 、 $1/120$ s^{-1} ,选取慢关段关闭速率 K_2 与满足管道承压标准的一段直线关闭速率一致,即 $1/600$ s^{-1} ,折点开度选择方法为:以一段直线关闭速率产生的水锤压力上升到静水头值附近时的开度 τ_0 为基准,例如一段直线关闭中方案a、b、c的阀前压力见图6,以速率为 $1/60$ s^{-1} 的一段直线关闭阀门时,当阀前压力上升到静水头值100 m左右时,找到此刻阀门的开度为0.59,将0.59作为折点开度。

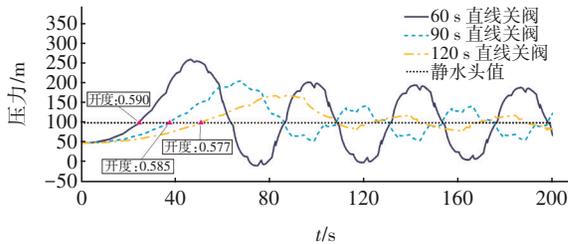


图6 方案a、b、c的阀前压力变化过程线

Fig.6 Process line of pressure change in front of valve in schemes a, b and c

为更好地说明阀前压力达到静水头之前所呈上升趋势与关闭时间无关,选取5种方案进行对比,各方案及压力极值统计见表2。

表2 两段折线关闭不同方案计算结果

Tab.2 Calculation results of different schemes of two-stage linear valve closing

折线关闭方案	快关速率 K_1/s^{-1}	折点开度 τ_z	慢关速率 K_2/s^{-1}	折点开度对应的阀前压力/m	阀前最大压力/m	关闭总时间/s
1	1/60	0.700	1/600	72.41	112.15	438.00
2	1/60	0.650	1/600	85.75	112.14	411.00
3	1/60	0.590	1/600	100.72	112.15	378.60
4	1/90	0.585	1/600	100.84	112.13	388.35
5	1/120	0.577	1/600	100.72	112.14	396.96

图7和图8分别为各方案阀前压力变化过程线。由图7和表2可知,采用两段折线关闭时,阀前压力首先经历第一阶段静水头值的恢复段,压力要上升到图7各方案中的A、B、C点,快关段关闭所产

生的阀前压力未到达静水头值,慢关段关闭时压力也要继续上升直至恢复到静水头值。至于图中压力在到达静水头值后先上升后下降部分是由于两阶段关闭速率不同、流量变化率不同、水锤波叠加所致,其中标红加粗处的压力降低部分是由于快关段关闭产生的升压波经上库反射回的降压波比慢关段关闭产生的升压波大得多,导致压力叠加后呈下降趋势。由此可见,在快关段关闭速率 K_1 相同的情况下,折点开度 τ_z 选在阀前压力到达静水头值的阀门开度 τ_0 时,可进一步缩短关闭时间,且不影响全过程的压力最大值。由图8和表2可知,当选择快关段关闭速率 K_1 不同、折点开度 τ_z 均选在阀前压力到达静水头值的阀门开度 τ_0 时,可看出快关段关闭速率越快,总时长越短,压力到达静水头之后的波形与600 s一段直线关闭的波形相同。

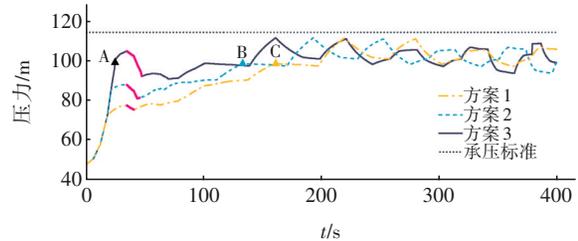


图7 方案1、2、3的阀前压力变化过程线

Fig.7 Process line of pressure change in front of valve in schemes 1, 2 and 3

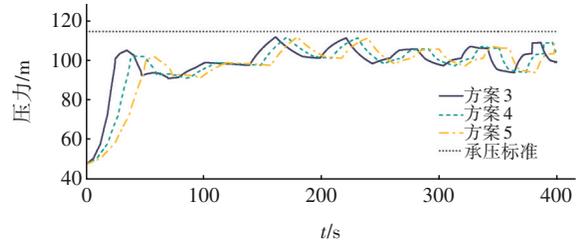


图8 方案3、4、5的阀前压力变化过程线

Fig.8 Process line of pressure change in front of valve in schemes 3, 4 and 5

采用上述两段折线关闭方案关闭阀门时,阀门动作时间最快为378.6 s,相较于一段直线关闭方案中阀门动作时间600 s有明显缩减,且水锤压力满足设定的承压标准,可以作为两阶段关闭方案。因此,采用两段折线关闭末端阀门的方案来优化管线水锤压力时,只要保证快关段关闭速率 K_1 与折点开度 τ_z 的组合所产生的阀前压力达到静水头值附近,快关段就不会影响全过程的压力最大值,并且能极大地提高关闭速率,压力最大值均发生在慢关段

中,且当慢关段关阀速率与一段直线关阀速率相同时所产生的阀前压力最大值几乎相同,与上述结论相吻合,进一步验证了末端关阀所产生的水锤特征。

3 结论

① 当关闭末端阀门产生极限水锤时,阀前压力变化过程分为两个阶段,第一阶段为静水头值的恢复段,压力整体呈上升趋势,上升趋势与关阀时间无关,上升速率与关阀时间有关,此段一般不产生压力极值,直到压力恢复到静水头值后,到达第二阶段为水锤压力的波动段,压力出现波动,管道系统的水锤特征逐渐呈现,并产生压力最大值,且关阀时间越长,管线最大压力值就越小,但随着关阀时间的继续增加,压力最大值减小的效果会减弱,最终趋于稳定。该特征解释了关阀水锤理论公式中最大关阀水锤压力取决于第二阶段关阀规律。

② 折线关阀中第一段关阀速率可选择较快速率关阀,以快关段中静水头值恢复时的开度作为折点开度,保证慢关段关阀时间与满足管道承压标准的一段直线关阀时间相同时,水锤压力最大值基本不发生改变,可大大缩短关阀时间,为两阶段关阀的两段关阀速率及折点开度的选取提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 李建宇,魏举旺.长距离重力流输水管线末端关阀水锤分析及防护[J].中国给水排水,2022,38(7):51-55.
LI Jianyu, WEI Juwang. Analysis of valve closing water hammer at the end of long-distance gravity flow water transmission pipeline and its protection [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(7): 51-55 (in Chinese).
- [2] 张雷,李明,佟继有,等.长距离重力流输水管线水锤计算及防护研究[J].水资源与水工程学报,2023,34(1):121-126.
ZHANG Lei, LI Ming, TONG Jiyu, et al. Calculation and prevention of water hammer for long distance gravity flow water conveyance pipelines [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(1): 121-126(in Chinese).
- [3] 王祺武,李志鹏,朱慈东,等.基于双阀调节的重力流管路水锤控制分析[J].中国给水排水,2020,36(9):

52-58.

WANG Qiwu, LI Zhipeng, ZHU Cidong, et al. Water hammer control in gravity flow pipeline based on double-valve regulation[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(9): 52-58(in Chinese).

- [4] 黄毅,陈锋.长距离输水工程末端关阀方式对水锤防护的影响[J].人民长江,2018,49(5):70-73.

HUANG Yi, CHEN Feng. Effect of terminal valve closing mode on water hammer protection in long-distance water conveyance project [J]. Yangtze River, 2018, 49(5): 70-73 (in Chinese).

- [5] 王焰康,张健,何城.长距离重力流输水工程的关阀方案优化[J].人民黄河,2017,39(5):131-134,139.

WANG Yankang, ZHANG Jian, HE Cheng. Valve closing plan optimization of long-distance gravity flow water-supply project [J]. Yellow River, 2017, 39(5): 131-134, 139 (in Chinese).

- [6] 袁林,李云龙,寇自洋.长距离重力流输水工程首末两端阀门关阀方案研究[J].水电能源科学,2022,40(6):118-121,109.

YUAN Lin, LI Yunlong, KOU Ziyang. Optimization of valve at both ends closing scheme for long-distance gravity flow water conveyance project [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(6): 118-121, 109 (in Chinese).

- [7] 万五一,练继建,李玉柱.阀门系统的过流特性及其对瞬变过程的影响[J].清华大学学报(自然科学版),2005,45(9):1198-1201.

WAN Wuyi, LIAN Jijian, LI Yuzhu. Influence of valve system discharge coefficient on hydraulic transients [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(9): 1198-1201(in Chinese).

- [8] 秦明海.阀门过流特性对水击影响的分析[J].水力电力机械,1997(5):9-13.

QIN Minghai. The analysis of valve overflowing property for the influence of water shock [J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 1997(5): 9-13 (in Chinese).

作者简介:李朋宇(2000-),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为长距离、跨流域泵站输配水系统的供水安全。

E-mail:438502627@qq.com

收稿日期:2023-10-03

修回日期:2023-10-19

(编辑:任莹莹)