

文章编号:1672-9331(2020)02-0075-09

# 基于阀门关闭策略的重力流管路水锤控制分析

李志鹏<sup>1</sup>, 王祺武<sup>1</sup>, 朱慈东<sup>1</sup>, 董成彪<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 湖南省特大口径电站阀门工程技术研究中心, 湖南 长沙 410007)

**摘 要:** 在输水管路中一旦出现水锤问题, 不仅严重影响输水工程安全, 还会制约输水工程的进一步发展。重力流作为高效节能的输水方式, 有必要对其阀门关闭方式进行研究, 改善水锤问题以提高安全性。以 MATLAB 为工具进行数值模拟计算, 先对阀门两阶段调节分析, 发现先快关后慢关的阀门关闭方式对水锤的控制效果优于先慢关后快关方式; 再对阀门两阶段关闭方式中的快关时间和快关关闭量影响因素进行研究, 发现采用“4 s 快关 65%, 16 s 慢关 35%”连续两阶段关闭方式能够有效控制水锤, 而且阀门的关闭量是影响管路中水锤压强的主要因素; 进一步分解阀门的快关和慢关关闭过程, 增加动作次数, 采用“1 s 快关 35%, 3 s 快关 30%, 12 s 慢关 25%, 4 s 慢关 10%”, 水锤最大压强得到抑制, 同时阀门完全关闭后的压强波动情况也得到改善。将在两阶段间加入时间间隔的关闭方式与连续两阶段的关闭方式进行对比, 发现前者对水锤问题也能发挥良好的控制效果。因此, 在设备无法满足多次连续动作时, 采用在两阶段间加入时间间隔的关闭方式也能有效的控制管路水锤。

**关键词:** 输水管路; 水锤; 阀门调节; 单阀调节; 压力控制

**中图分类号:** TK72

**文献标识码:** A

## Water hammer control analysis of gravity flow pipeline based on valve closing strategy

LI Zhi-peng<sup>1</sup>, WANG Qi-wu<sup>1</sup>, ZHU Ci-dong<sup>1</sup>, DONG Cheng-biao<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Hunan Province Extra Large Caliber Power Station Valve Engineering Research Center, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Water hammer occurring in water pipeline not only seriously threatens the safety of water transfer project, but also restricts further development of water transfer project. However, as an efficient and energy-saving method of water delivery, it is necessary to study valve closing mode of gravity flow to solve the water hammer problem. After numerical calculating with MATLAB, and analyzing two-stage adjustment of the valve, it is concluded that the mode of first closing fast and then closing slow has better control effect on water hammer than that of first closing slow and then closing fast. The influencing factors of fast closing time and fast closing amount in two-stage valve closing mode were studied. It is found that water hammer can be effectively controlled by adopting the continuous two-stage closing mode of “4 s fast closing 65%, 16 s slow closing 35%”, and the closing

**收稿日期:** 2019-11-14

**基金项目:** 湖南省重点研发项目(2017KG2182); 湖南省研究生科研创新项目(CX20190690)

**通讯作者:** 李志鹏(1962—), 男, 云南丘北人, 长沙理工大学教授, 主要从事流体动力工程多相流动理论与应用方面的研究。E-mail: 1379448@163.com

amount of the valve is main factor affecting the surge pressure in the pipeline. After closing process is further decomposed, increasing the number of action, adopting "1 s fast closing 35%, 3 s fast closing 30%, 12 s slow closing 25%, 4 s slow closing 10%", the maximum pressure of water hammer is suppressed, and the pressure fluctuation is also improved after the valve is closed completely. It is found that the closing mode of adding a time interval between the two stages can also exert good control effect on water hammer after compared it with the continuous two-stage closing mode. Therefore, when the equipments cannot meet multiple continuous actions, the closing mode of adding a time interval between two stages can also control the water hammer in the pipeline effectively.

**Key words:** water pipeline; water hammer; valve adjustment; single valve adjustment; pressure control

在输水工程中,阀门的动作是引发水锤出现的主要原因。输水管道中发生水锤时,会对管道安全造成严重威胁,引发输水事故<sup>[1,2]</sup>。利用水锤的波动特性,通过调节阀门动作方式和规律,使水锤在产生和传播过程中产生适宜的相互作用,从而达到控制水锤的目的。Lohrasbi 等<sup>[3]</sup>指出阀门的关闭或开启时间影响着管路中的水锤压力波动;黄毅等<sup>[4]</sup>对末端关阀水锤进行模拟分析,认为采用两阶段关阀措施能够很好地控制关阀水锤压力;常臣贵<sup>[5]</sup>采用阀门调节技术对城市给水管网系统的调度优化进行研究,认为采用阀门调节技术能够对管网中的节点压力进行调节和控制;王焰康等<sup>[6]</sup>对管路的两阶段阀门关闭方式进行了研究改进,改进后的两阶段阀门关闭方式能够有效降低关阀的水锤压力;周广钰等<sup>[7]</sup>在重力流输水工程中,采用两阶段关阀方式,配合空气阀防护措施,既缩短了关阀时间,又降低了管路中的最大压力,还消除了负压;于景洋等<sup>[8]</sup>对输水管线中阀门操作时间进行了研究,总结出了两次操作时间的间隔规律;陈明等<sup>[9]</sup>建立了最佳阀门关闭模型,得到了多种情形下最优化的关闭规律;康迎宾等<sup>[10]</sup>在长距离有压输水管道水锤防护研究中,发现关闭阀门的时间越长,引起的最大水锤压力越小。并且改进阀门关闭方式,采用先快后慢两阶段关闭,能够达到降低管道中最大水锤压力的效果;黄源等<sup>[11]</sup>对输水管网系统中阀门多阶段线性关闭的水锤模型进行了优化,发现采用多阶段线性关闭的方式能够有效缩短关阀时间,并能够对水锤压力的波动进行抑制;董茹等<sup>[12]</sup>对带有支线路的重力流输水工程的关阀水锤进行研究,发现主线

和干线阀门的合理关闭时间对水锤防护有着重要作用;封金磊<sup>[13]</sup>通过具体算例,得到阀门不同关闭方式时的最大水击压强,并根据最大水击压强最小的原则选择最佳的关闭方式。

延长阀门关闭时间是减小水锤危害的有效途径<sup>[14]</sup>,但是管道最大水锤压力随关阀时间增加而降低的敏感度会下降,且在某些情况下需要阀门快速关闭。因此,为了维护整个供水管路的安全,需要对阀门关闭方式进行研究,选择合适的阀门关闭策略。

## 1 概述

### 1.1 关阀水锤计算模型

对于管道中的瞬变流,弹性理论分析下水锤基本微分方程由运动方程和连续方程构成:

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

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \left( \frac{\partial H}{\partial x} + \sin \alpha \right) + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

式中:  $H$  为水头, m;  $x$  为位置坐标;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $V$  为流体流速,  $\text{m/s}$ ;  $t$  为暂态历时, s;  $f$  为管道摩阻系数;  $D$  为管道管径, mm;  $\alpha$  为管道与水平面之间的夹角,  $(^\circ)$ ;  $a$  为水锤波波速,  $\text{m/s}$ 。

水锤运动方程和连续方程构成了一组准线性双曲偏微分方程,可将其改写为:

$$\begin{cases} L_1 = g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{2D} V|V| = 0; \\ L_2 = V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \sin \alpha = 0. \end{cases} \quad (3)$$

由于特征线法能够较好地利用计算机程序进行运算,是目前求解准线性双曲偏微分方程组最为常用的一种方法。本研究采用此方法来求解关阀水锤方程组。

## 1.2 工程参数

某供水工程输水管路长  $L=1\,200\text{ m}$ ,上游水库恒定水位  $H_R=60\text{ m}$ ,摩阻系数  $f=0.02$ ,管径  $D=900\text{ mm}$ ,波速  $a=1\,000\text{ m/s}$ ,管道分段数  $N=12$ ,重力加速度  $g=9.8\text{ m/s}^2$ ,管道末端设置调节阀。管路布置如图 1 所示。以 DN900 环喷式流量调节阀为例,对管路末端阀门调节对水锤的控制效果进行研究。阀门全开时阀门阻力系数根号值倒数和阀门面积的乘积  $C_d A_g=0.657\,2$ 。阀门主要参数如图 2 所示<sup>[15]</sup>。

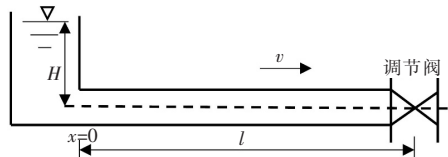
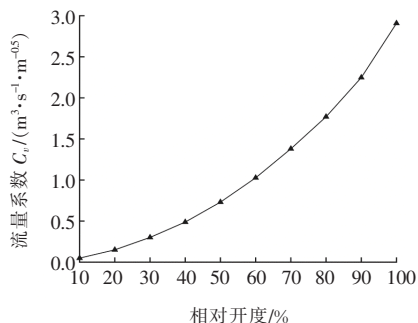
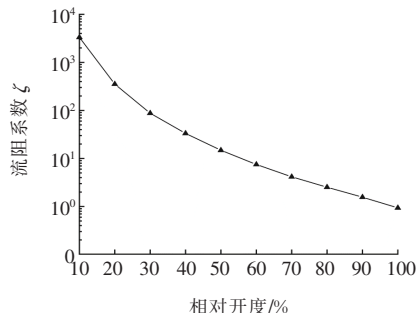


图 1 管路布置示意图

Fig. 1 Pipe layout diagram



(a) 流量系数与相对开度之间的关系



(b) 流阻系数与相对开度之间的关系

图 2 DN900 环喷式流量调节阀流量系数及流阻系数与相对开度之间的关系

Fig. 2 The relationship between flow coefficient, flow resistance coefficient and relative opening of DN900 cyclic type regulating valve

## 2 阀门两阶段关闭方式

### 2.1 两阶段关阀方式水锤控制效果研究

两阶段关闭是将线性关闭分解为两个阶段,并分别对应不同的线性关闭方式。采用等步长离散方式,将时间域或阀门开度域离散化,采用阀门先快速关闭后缓慢关闭和先缓慢关闭后快速关闭两种方式对水锤进行计算,分析这两种关闭方式对水锤的控制效果。

设定阀门总关闭时间为  $20\text{ s}$ ,并将  $20\text{ s}$  等分为两段,然后对不同关闭方案中的阀门处压强进行计算,并与  $20\text{ s}$  线性关闭方式对比分析水锤的控制情况。先慢关后快关阀门关闭方式,以  $10\%$  为步长减小第一阶段关闭量;先快关后慢关阀门关闭方式,以  $10\%$  为步长增大第一阶段关闭量,得到以下几种计算方案。阀门处压强如图 3,4 所示。

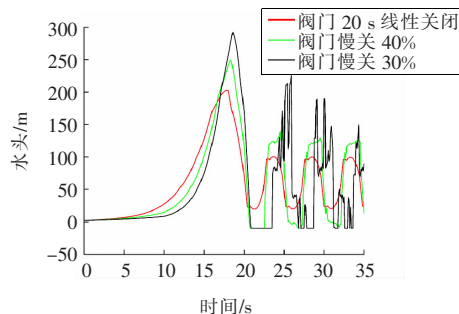


图 3 第一阶段关闭量减小时阀门处压强

Fig. 3 The valve pressure when reducing closing amount in the first stage

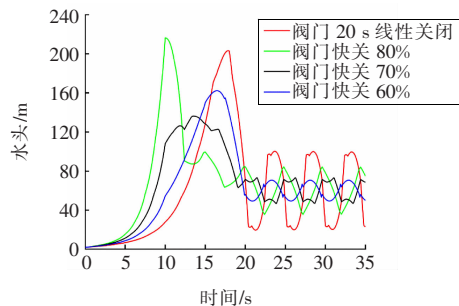


图 4 第一阶段关闭量增加时阀门处压强

Fig. 4 The valve pressure when increasing closing amount in the first stage

方案一:10 s 慢关 50%,10 s 快关 50%(线性关闭);

方案二:10 s 慢关 40%,10 s 快关 60%;

方案三:10 s 慢关 30%,10 s 快关 70%;

方案四:10 s 快关 60%,10 s 慢关 40%;

方案五:10 s 快关 70%,10 s 慢关 30%;

方案六:10 s 快关 80%,10 s 慢关 20%。

由图 3 可以看出,随着第一阶段关闭量的减小,最大压强快速增加,压强振荡的情况也更强烈,这是因为阀门快速关闭引起的水锤导致。同时看出,当第一阶段慢关 30%、40%时,最低压力出现了部分直线段,这是由于出现了水柱分离的现象,弥合水锤引起的最大压强已经超过 20 s 线性关闭时的最大压强,会给管道造成严重损坏。从图 4 可以看出,当快关 60%和 70%时,阀门关闭引起的水锤最大压强相较于 20 s 线性关闭引起的水锤最大压强都有所降低,最小压强也得到提升,对水锤起到了良好的控制作用。但当快关 80%时,水锤最大压强超过了 20 s 线性关闭引起的最大压强,并且最大压强出现的时间大幅度提前,情况更加恶化。

综上可以看出,采取先慢关后快关的两阶段关闭方式并不合理。采用先快关后慢关两阶段关闭方式时,一定范围内增加快关关闭量,能够对关闭水锤引起的升压起到良好的控制作用,但快关关闭量不宜过大,需合理选择。

## 2.2 先快后慢两阶段关阀方式水锤控制效果影响因素研究

在连续两阶段关闭方式中将快关慢关时间等分设定时,合适的快关关闭量能够取得良好的水锤控制效果。为得到更加合适的两阶段关闭方式,现对采用“先快关后慢关”两阶段阀门关闭方式的快关时间和快关关闭量进行研究。

### 1) 快关时间的影响。

设定阀门关闭总时间为 20 s,固定快关关闭量为 50%。快关时间从 10 s 开始,对以下几种不同快关时间搭配方案进行计算,结果如图 5 所示。

方案一:10 s 快关 50%,10 s 慢关 50%(线性关闭);

方案二:8 s 快关 50%,12 s 慢关 50%;

方案三:6 s 快关 50%,14 s 慢关 50%;

方案四:4 s 快关 50%,16 s 慢关 50%;

方案五:2 s 快关 50%,18 s 慢关 50%。

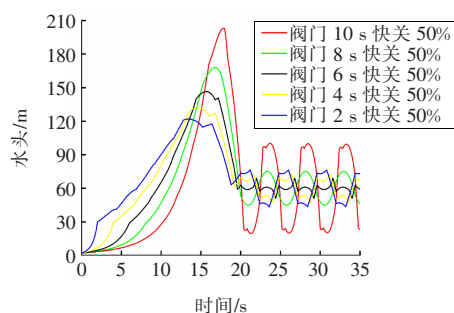


图 5 不同快关时间阀门处压强

Fig. 5 The valve pressure at different fast closing time

从图 5 可以看出,快关关闭量一定时,随着快关时间的减少,水锤引起的最大压强降低,最大压强水头出现的时间提前,没有负压出现。同时发现,随着快关时间的减少,相邻两个工况间的最大压强差值也在不断减小,这表示对水锤的控制效果在减弱。在很短的时间内进行阀门操作,会提高对相关设备的要求,4 s 快关 50%的水锤最大压强较 10 s 快关情况下已有较大幅度减小,表现出了良好的控制作用。因此,快关时间宜选用 4 s。

### 2) 快关关闭量的影响。

固定快关时间为 4 s,阀门关闭总时间为 20 s,快关关闭量从 50%开始,对以下几种不同快关关闭量搭配方案进行计算,结果如图 6 所示。

方案一:4 s 快关 50%,16 s 慢关 50%;

方案二:4 s 快关 60%,16 s 慢关 40%;

方案三:4 s 快关 70%,16 s 慢关 30%;

方案四:4 s 快关 80%,16 s 慢关 20%。

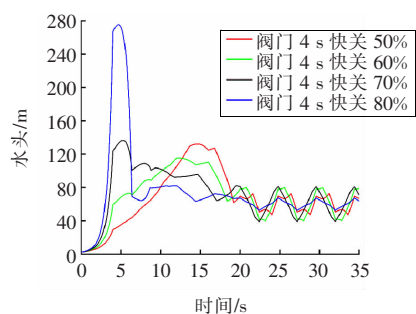


图 6 不同快关关闭量阀门处压强

Fig. 6 The valve pressure with different fast closing amount

从图 6 可以看出,当快关时间一定时,随着快关关闭量的增加,最大水锤压强呈现先减小后增加的情况。说明在保持快关时间恒定时,阀门快

关关闭量也有一定的限制范围,不可随意增大。为了对水锤情况进一步研究,针对快关关闭量,计算步长设置为 5%,对以下两种方案进行计算,结果如图 7,8 所示。

方案一:4 s 快关 55%,16 s 慢关 45%;

方案二:4 s 快关 65%,16 s 慢关 35%。

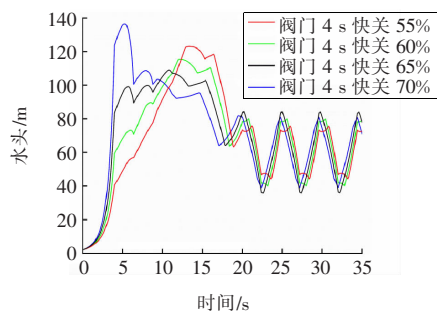


图 7 改善快关关闭量时阀门处压强

Fig. 7 The valve pressure when improving fast closing amount

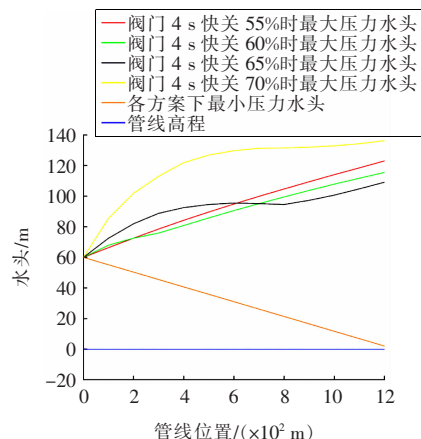
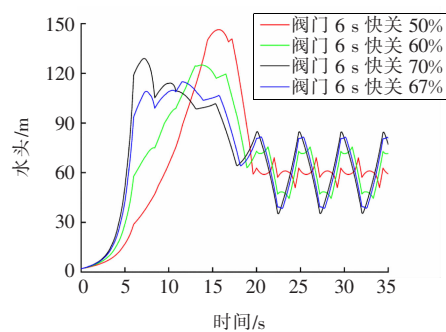


图 8 改善快关关闭量时管线压强情况

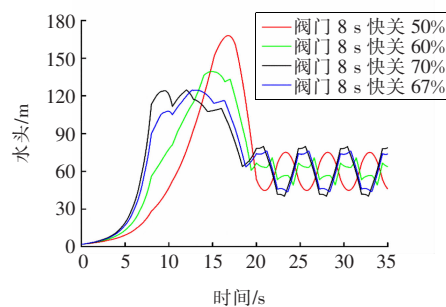
Fig. 8 The pipeline pressure when improving fast closing amount

从图 7 可以看出,当快关关闭量为 65%时,水锤产生的最大压强最小,两阶段关阀方式对水锤的控制效果明显。结合图 6 和图 8 可以看出,当快关关闭量为 70%时,水锤最大压强超过了 20 s 线性关闭时最大压强,且全管线最大压强升高明显。图 7 显示,适宜关闭量为 65%,位于 60%与 70%之间。因此在缩小范围时,还应当在能有效控制水锤压强情况至最大水锤压强出现增大情况之间进行方案设置。

为了对快关时间与快关关闭量的相互关系进行研究,按照快关时间为 4 s 时的方法对快关 6 s 及快关 8 s 的不同快关关闭量情况进行计算。计算结果如图 9 所示。



(a) 快关时间为 6 s 不同快关关闭量阀门处压强



(b) 快关时间为 8 s 不同快关关闭量阀门处压强

图 9 快关时间为 6,8 s 时不同快关关闭量阀门处压强

Fig. 9 The valve pressure with different fast closing amount at fast closing time 6, 8 s

从图 9 可以看出,当快关时间为 6,8 s,阀门快关 67%时水锤控制效果最佳。由此看出,在不同快关时间条件下,适宜的阀门快关关闭量均在 65%附近。对比时间变化量,快关关闭量的变化更小,说明了快关关闭量对水锤的影响更加明显。

### 3 阀门多阶段关闭方式

#### 3.1 连续多阶段关阀方式

连续两阶段关闭方案中的水锤情况较 20 s 线性关闭有明显改善,但理想的关阀曲线应该为光滑曲线。为此,通过增加阀门动作次数,对多阶段关阀方式进行研究。在 4 s 快关 65%,16 s 慢关 35%阀门关闭方式的基础上,分别对快关及慢关阶段进行分解。首先将慢关阶段分解为两个阶段,快关阶段保持不变,对以下方案进行计算。计算结果如图 10 所示。

方案一:6 s 慢关 20%,10 s 慢关 15%;

方案二:6 s 慢关 15%,10 s 慢关 20%;

方案三:10 s 慢关 20%,6 s 慢关 15%;

方案四:10 s 慢关 15%,6 s 慢关 20%。



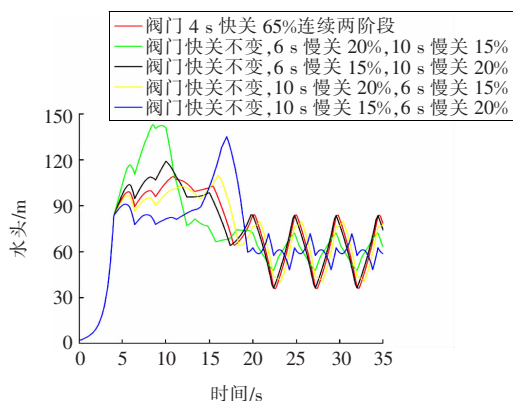


图 10 快关阶段保持不变时阀门处压强

Fig. 10 The valve pressure when fast closing stage remaining unchanged

从图 10 可以看出,将慢关阶段分解为两阶段后,6 s 期间阀门关闭量越大,引起的水锤最大压强也越大。对 10 s 关闭 15% 搭配 6 s 关闭 20% 的方案,在阀门完全关闭前一段时间,水锤压强出现急剧升高,这是由于后期关闭速度相较于前期关闭过快,引起压力激增;对 10 s 关闭 20% 搭配 6 s 关闭 15% 的情况,水锤最大压强出现的时间后移,最大压强值也有少量降低,由此推测慢关第一阶段关闭速度低于第二阶段慢关速度,可以对水锤起到一定的调控作用。因此,为探究慢关阶段分解对水锤压力的控制效果,设置慢关第一阶段 12 s 关闭 25%,第二阶段 4 s 关闭 10%。计算结果如图 11,12 所示。

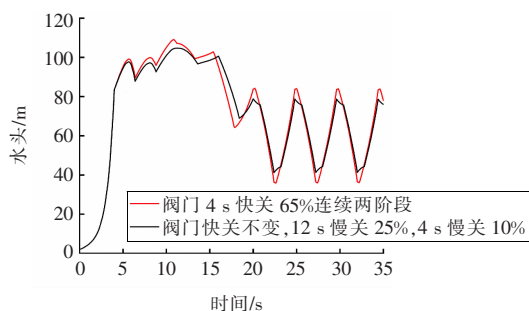


图 11 调整慢关阶段分解时间搭配后阀门处压强情况

Fig. 11 The valve pressure after adjusting the decomposition time at slow closing stage

从图 11,12 可以看出,慢关第一阶段关闭速度略低于第二阶段时,最大水锤压强较连续两阶段关闭进一步降低,说明有降低最大水锤压强的效果。因此,通过分解慢关阶段,发现当慢关第二阶段阀门关闭速度高于第一阶段阀门关闭速度

时,能较好地改善水锤问题。

保持慢关阶段规律不变,将快关阶段分解成以下情况进行计算,结果如图 13,14 所示。

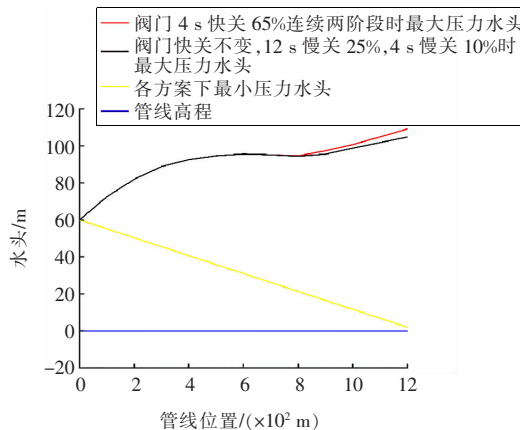


图 12 调整慢关阶段分解时间搭配后管线压强情况

Fig. 12 The pipeline pressure after adjusting the decomposition time at slow closing stage

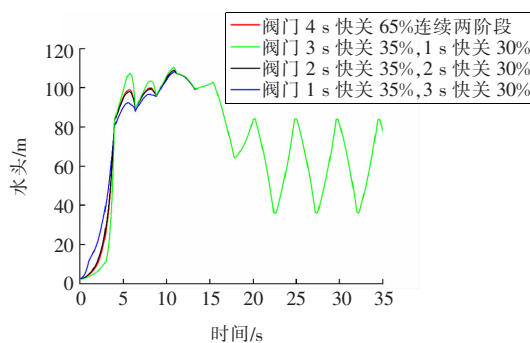


图 13 快关阶段分解后阀门处压强情况

Fig. 13 The valve pressure after decomposing fast closing stage

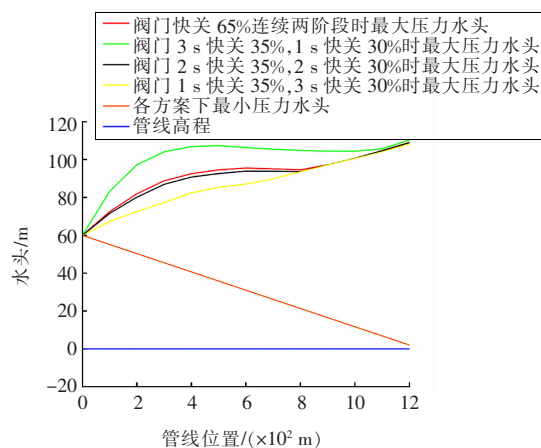


图 14 快关阶段分解后管线压强情况

Fig. 14 The pipeline pressure after decomposing fast closing stage

方案一:3 s 快关 35%,1 s 快关 30%;

方案二:2 s 快关 35%,2 s 快关 30%;

方案三:1 s 快关 35%,3 s 快关 30%。

由图 13,14 可以看出,快关第一阶段阀门关闭越慢,水锤最大压强升高越明显。而快关第一阶段阀门关闭较快时,水锤压强增长趋势减弱,最大压强值降低,慢关阶段压强情况基本保持一致。

通过分析三阶段阀门关闭方式计算结果发现,将阀门关闭方式合理分段能够对水锤压力起到良好的控制作用。因此,结合三阶段关阀方式中的关闭过程分解方法,将两阶段关阀方式中的快关和慢关阶段均进行分解,变为四阶段关闭方式。将快关阶段分解为 1 s 快关 35%,3 s 快关 30%,慢关阶段分解为 12 s 慢关 25%,4 s 慢关 10%,并对该方案进行计算,结果如图 15,16 所示。

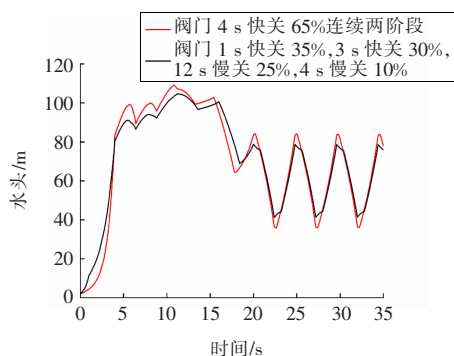


图 15 四阶段关闭阀门处压强情况

Fig. 15 The valve pressure with four-stage closing

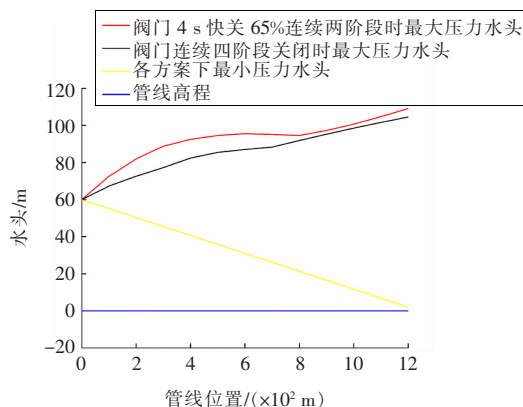


图 16 四阶段关闭管线压强情况

Fig. 16 The pipeline pressure with four-stage closing

从图 15,16 可以看出,采用分解快关阶段和分解慢关阶段相结合的方式,全管线水锤最大压强得到抑制,与两阶段中 4 s 快关 65%的方案相比,能够有效控制水锤压强,同时阀门完全关闭后

的压强波动也得到改善。

### 3.2 非连续多阶段关阀方式

采用连续多阶段关闭方式时,能有效控制水锤压强,但是有些设备不能达到频繁动作的要求,可靠性得不到保证。因此,提出在两阶段阀门关闭方式的基础上,两次阀门关闭动作之间加入时间间隔,时间间隔内阀门开度不变,让水锤波在相互作用和管路的沿程损失作用下得到一定缓解。对两阶段阀门关闭方式中两次阀门的动作时间间隔进行研究,分析其水锤控制效果。

设定快关阶段 4 s 快关 65%的规律不变,在两阶段间加入时间间隔,保持阀门开度不变,改变慢关阶段时间,阀门关闭总时间为 20 s。阀门关闭总时间为两阶段关闭时间与间隔时间的总和。对以下方案进行计算,结果如图 17 所示。

方案一:4 s 快关 65%,阀门稳定间隔时间 2 s;

方案二:4 s 快关 65%,阀门稳定间隔时间 4 s;

方案三:4 s 快关 65%,阀门稳定间隔时间 6 s;

方案四:4 s 快关 65%,阀门稳定间隔时间 8 s。

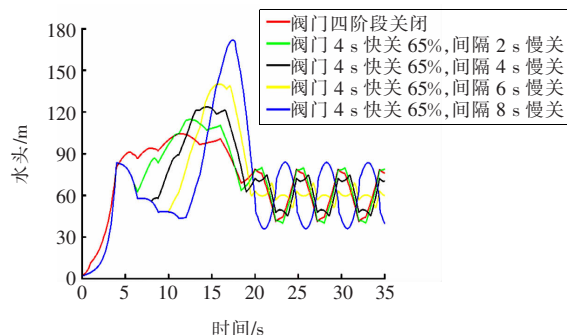


图 17 快关规律恒定慢关时间变化阀门处压强

Fig. 17 The valve pressure with constant fast-closing rule and varying slow-closing time

由图 17 可以看出,阀门关闭到一定开度并保持稳定时,水锤压强出现减小现象,时间间隔过后,阀门继续关闭,水锤压强重新开始上升。随时间间隔的增长,间隔时间内产生的水锤压强降低也更明显,但是后期产生的压强升高也更加严重。这是由于时间间隔的延长使得慢关时间减少,慢关阶段阀门关闭速度不断加快,水锤压强的降低对于后期水锤压强的升高难以发挥有效的控制作用。

保持慢关阶段 16 s 慢关 35%的规律不变,加入时间间隔,对快关时间进行调整,阀门关闭总时

间为 20 s,对以下方案进行计算,结果如图 18,19 所示。

方案一:3 s 快关 65%,阀门稳定间隔时间 1 s;

方案二:2 s 快关 65%,阀门稳定间隔时间 2 s;

方案三:1 s 快关 65%,阀门稳定间隔时间 3 s。

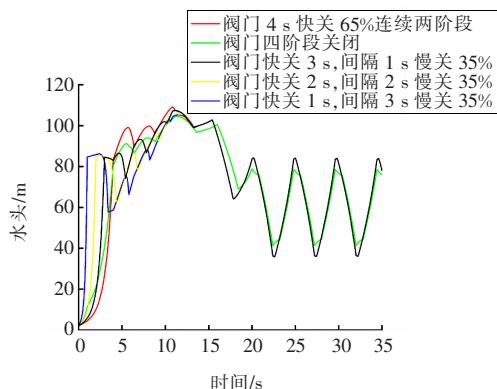


图 18 慢关规律恒定快关时间变化阀门处压强

Fig. 18 The valve pressure with constant slow-closing rule and changing fast-closing time

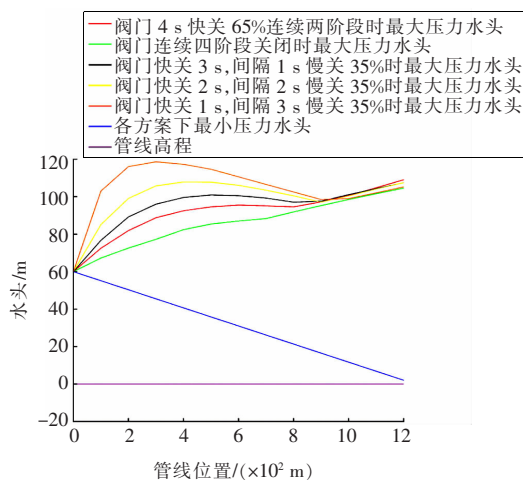


图 19 慢关规律恒定快关时间变化管线压强情况

Fig. 19 The pipeline pressure with constant slow-closing rule and changing fast-closing time

由图 18 可以看出,当慢关规律保持恒定不变时,对快关时间进行调节,水锤最大压强低于连续两阶段关闭方式的压强值,较阀门四阶段关闭方式的最大压强值差别不大。多种计算情况下的最大压强值后面的波动基本重合,说明慢关阶段的时间和关闭量对于最大压强值后的压强波动有重要的影响。同时结合图 19 可以看出,随着快关时间的减少,快关阶段的压强增加更加快速,管路中压强增加也较大,由于间隔时间随着快关时间的

减小而增加,压强下降情况也更加显著。管路中对应的最大压强值最小,但是最大压强值的减小幅度有限,且管路中压强会有一定的升高。在实际操作中,快关时间不宜过短,快关速度不宜过快,并保持一定的间隔时间,有利于管路中水锤问题的改善。

## 4 结论

本研究以 DN900 环喷式流量调节阀为例,针对管径 900 mm,长度 1 200 m 输水管路中的末端阀门,利用 MATLAB 进行数值模拟,计算并分析了各个动作方案引起的水锤情况,得到以下结论:

1) 在 20 s 相同关阀时间内,将线性关闭改为两阶段关闭,采用先慢关后快关的关闭方式时,慢关 40%和慢关 30%时的最大压强较线性关闭时的最大压强有较大增长,且最低压强达到饱和水蒸气压强(-10 m),恶化了管路中的水锤情况。当采用先快关后慢关的关闭方式,选用合理的时间、阀门关闭量的搭配,即 4 s 快关 65%、16 s 慢关 35%时,能够使管路中水锤压强得到有效控制。

2) 研究发现:6 s 快关再 14 s 慢关、8 s 快关再 12 s 慢关和 4 s 快关再 16 s 慢关,水锤最佳控制效果都出现在阀门快关 65%附近。因此,阀门的关闭量是影响管路中水锤压强的主要因素。在选用连续两阶段关闭方案时,可以根据需要先设定快关时间,再计算得到适宜的快关闭量;或者根据自身情况选定快关闭量,再计算适宜的时间搭配方案,以有效控制管路中的水锤压强。

3) 采用连续四阶段合理的方案搭配 1 s 关 35%、3 s 关 30%、12 s 关 25%、4 s 关 10%和非连续三阶段合理的方案搭配,都能够对管路中的水锤压强进行有效控制,相比较连续两阶段 4 s 关 65%,再 16 s 关 35%的关闭方式,能进一步解决管路中的水锤问题。同时,当设备不能满足连续多阶段关闭方式频繁动作的要求时,采用非连续多阶段关闭方式也能达到良好的水锤控制效果。

## 〔参考文献〕

- [1] 金锥,姜乃昌,汪兴华,等. 停泵水锤及其防护[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.  
JIN Zhui,JIANG Nai-chang,WANG Xing-hua,et al.



- Pump water hammer and its protection[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2004.
- [2] 王学芳,叶宏开. 工业管道中的水锤[M]. 北京:科学出版社,1995.
- WANG Xue-fang, YE Hong-kai. Water hammer in industrial pipes[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [3] Lohrasbi A R, Attarnejad R. Water hammer analysis by characteristic method[J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2008, 1(4): 287-294.
- [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 pipeline water diversion project[J]. Yangtze River, 2018, 49(5): 70-73.
- [5] 常臣贵. 基于阀门调节技术的城市给水管网系统优化调度研究[D]. 太原:太原理工大学, 2008.
- CHANG Chen-gui. Research on optimal dispatch of urban water supply network system based on valve regulation technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [6] 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.
- WANG Yan-kang, ZHANG Jian, HE Cheng. Optimization of valve closing scheme for long distance gravity flow water transfer project[J]. Yellow River, 2017, 39(5): 131-134.
- [7] 周广钰,吴辉明,雷晓辉,等. 长距离输水工程重力流水锤防护措施研究[J]. 人民珠江, 2016, 37(10): 49-54.
- ZHOU Guang-yu, WU Hui-ming, LEI Xiao-hui, et al. Research on protective measures of gravity flow water hammer in long distance water transfer project[J]. Pearl River, 2016, 37(10): 49-54.
- [8] 于景洋,吴晨光,边喜龙. 输水管线阀门操作水流稳定时间研究[J]. 硅谷, 2013, 5(2): 229.
- YU Jing-yang, WU Chen-guang, BIAN Xi-long. Study on water flow stabilization time of water pipeline valve operation[J]. Silicon Valley, 2013, 5(2): 229.
- [9] 陈明,李秉昕,贾从玉,等. 管道耦合水击的最优阀调节问题研究[J]. 流体机械, 2011, 39(3): 31-36.
- CHEN Ming, LI Bing-xi, JIA Cong-yu, et al. Research on optimal valve regulation problem of pipe coupled water hammer[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(3): 31-36.
- [10] 康迎宾,张学林,徐杨洋. 长距离有压输水管道阀门关闭规律研究[J]. 河南水利与南水北调, 2016(3): 68-69.
- KANG Ying-bin, ZHANG Xue-lin, XU Yang-yang. Study on valve closing law of long distance pressurized water pipeline[J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion, 2016(3): 68-69.
- [11] 黄源,赵明,张清周,等. 输配水管网系统中关阀水锤的优化控制研究[J]. 给水排水, 2017, 53(2): 123-127.
- HUANG Yuan, ZHAO Ming, ZHANG Qing-zhou, et al. Research on optimal control of water hammer in closed valve in transmission and distribution network system[J]. Water and Wastewater Engineering, 2017, 53(2): 123-127.
- [12] 董茹,杨玉思,葛光环,等. 关阀程序对分支线重力流输水系统水锤升压的影响[J]. 中国给水排水, 2016, 32(11): 50-54.
- DONG Ru, YANG Yu-si, GE Guang-huan, et al. Effect of valve closure on rise in pressure in gravity water transmission pipeline with branches[J]. China Water and Wastewater, 2016, 32(11): 50-54.
- [13] 封金磊. 关于减小关阀水锤危害的阀调节的优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
- FENG Jin-lei. Optimization of valve adjustment for reducing the closing-valve water hammer damage[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [14] 杨晓蕾,沈来新,俞锋,等. 重力流输水管道关阀水锤模拟研究[J]. 水利水电技术, 2017(5): 95-96.
- YANG Xiao-lei, SHEN Lai-xin, YU Feng, et al. Simulation study on water hammer of gravity flow water pipeline[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017(5): 95-96.
- [15] 李志鹏,朱慈东,吴兴. 环喷式流量调节阀的流动特性[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2019, 16(2): 78-85.
- LI Zhi-peng, ZHU Ci-dong, WU Xing. Flow characteristics of ring-jet valve[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2019, 16(2): 78-85.