

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.09.010

基于双阀调节的重力流管路水锤控制分析

王祺武¹, 李志鹏¹, 朱慈东¹, 李豪²

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙日丰机电科技有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 在距离较长的输水管路中, 单个阀门对水锤的控制效果会逐渐减弱。因此, 通过在管路中增设阀门, 将管路分解为两段进行管理, 利用水锤波在传播过程中的独立性和叠加性, 制造人工波源, 对管路中的水锤情况进行有效控制。以 MATLAB 软件为工具进行数值模拟计算, 对采用双阀协调方式和双阀动作方式控制水锤的影响因素进行研究。结果表明, 双阀协调操作有利于管路中水锤问题的改善; 结合单阀连续两阶段调节的优势, 将双阀也均进行连续两阶段的关闭, 发现对管路中水锤的最大压强和最小压强均起到了更好的控制作用。

关键词: 输水管路; 水锤; 阀门调节; 压力控制

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)09-0052-07

Water Hammer Control in Gravity Flow Pipeline Based on Double-valve Regulation

WANG Qi-wu¹, LI Zhi-peng¹, ZHU Ci-dong¹, LI Hao²

(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Changsha Rifeng Electrical and Mechanical Technology Co. Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: The control effect of a single valve on water hammer gradually decreases in the long distance water pipelines. Therefore, the pipeline was divided into two sections for management by adding a valve, and an artificial wave source was created to effectively control the water hammer condition in the pipeline by utilizing the independence and superposition of the water hammer wave in the propagation process. MATLAB software was used to carry out numerical simulation calculation, and influencing factors of adopting double-valve coordination mode and double-valve action mode were studied. The double-valve coordination operation was beneficial to the improvement of the water hammer problem in the pipeline. Combined with the advantages of continuous two-stage adjustment of a single valve, the double valves were also closed in two consecutive stages. It was found that the maximum pressure and minimum pressure of the water hammer in the pipeline were better controlled.

Key words: water pipeline; water hammer; valve regulation; pressure control

现代供水工程普遍具有管线较长、规模较大、投资较高等特点, 管路一旦出现事故, 不仅经济损失

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)
通信作者: 李志鹏 E-mail: 1379448@163.com

大,同时也会严重影响当地人民的生活,因此整个输水系统的安全是一个必须要考虑的问题。而在输水系统管道中由于阀门启闭或事故停泵,时常引起管道内压力波动剧烈交替变化的水锤现象,且在距离较长的输水工程中,水锤在管内传播所需的时间也增加,单个阀门对水锤进行控制时,效果可能会减弱,所以需要输水管道增设阀门,人为设置波源产生水锤,得到水锤波间的有利叠加,对整个输水管路中的水锤进行控制以保证管道安全。Karadžić等^[1]通过控制管路中的两个阀门同时或按顺序(延迟)关闭制造水锤,发现第2个阀门的关闭时间对管路中的水锤及水柱分离情况的影响更加严重。董茹等^[2]对带有支线管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于水锤防护有着重要作用。冯卫民等对于长距离输水系统中的水锤现象提出了多阀协调最优控制理论对水锤进行调控,并对在泵出口与管路中间设置、泵出口与管路末端设置双阀方案下的水锤控制效果进行了分析,同时提出带泵输水系统的最优阀调节方案与水锤控制方法^[3-4]。因此,基于水锤波的传播特性,通过在管道中增设阀门,采用合适的双阀调节方式,对整个输水管路中的水锤进行控制以保证管道安全。

笔者利用 MATLAB 软件,首先对单阀控制效果和双阀控制效果进行比较,在得知双阀控制效果优于单阀后,对双阀调节下的水锤控制效果做进一步分析,并提出控制水锤效果更好的方式,旨在为实际工程中阀门控制方案的选择提供参考,也可为进一步研究分析三阀调节控制效果及多阀调节控制效果提供依据。

1 工程概述

某供水工程输水管路长 $L = 3\,000\text{ m}$,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 $a = 1\,000\text{ m/s}$,管道总分段数 $N = 30$,重力加速度 $g = 9.8\text{ m/s}^2$,管道末端设置调节阀,全开时,阀门阻力系数根号值倒数和阀门面积的乘积为 $0.657\,2$ 。

阀门设置如图1所示。在一输水管路末端装有阀门A,末端阀门A与上游水池之间的管路中设置一个中间阀门B。中间阀门B关闭时,产生向上游水库传播的升压水锤波,并在到达上游水库后发生反射变为降压波向下游传播,同时产生向下游传播

的降压波。末端阀门A关闭时,产生向上游水库传播的升压水锤波,并在到达上游水库后发生反射变为降压波传向下游。由于中间阀门B将整个管路分为两段,阀门B到上游水池的距离较A小,由B产生的升压水锤波能更快到达上游水池发生反射,与A产生的升压波在B与上游水库之间的管道内相遇叠加,从而对上游水库与B之间的管路中的压力进行控制。因此,可以对末端阀门A与中间阀门B的关闭进行协调控制,达到改善水锤情况的效果。

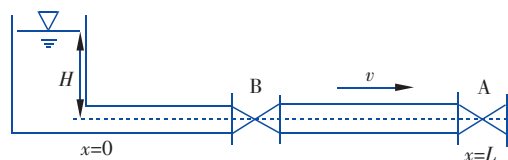


图1 双阀设置示意

Fig.1 Schematic diagram of double-valve setting

阀门均以DN900环喷式流量调节阀为例,对各个不同工况下的水锤结果进行模拟计算,对管路中的水锤控制效果进行研究。由于双阀调节系统在管路中间安装了一个阀门,末端阀门和中间阀门共同动作,管道中的水锤波情况更加复杂,管线最大水锤压强发生的位置也可能出现变化,因此在分析系统的压强变化时,还应该对中间阀门处的压强变化进行分析。

2 双阀调节效果

为了对比分析单阀调节和双阀调节对水锤的控制效果,采用末端单阀调节时关闭方式为按时间线性40 s关闭,而采用双阀调节时中间阀门安装在管路中间位置,令 x 为中间阀门到上游水锤的距离,则中间阀门处位置为 $x = 0.5L = 1\,500\text{ m}$,双阀均采用按时间线性关闭的方式,关闭时间为40 s,两个阀门同时关闭。计算结果如图2~4所示。

从图2、3可以看出,采用双阀调节时,末端阀门处和中间阀门处的最大压强都出现了明显下降,而末端单阀调节时,末端阀门处和中间阀门处都出现了负压过大而引起的水柱分离,由此可知采用双阀调节时,不仅最大压强降低,而且不再有负压出现。图3中显示,中间阀门后的压强先降低再升高,最终趋于稳定,这是由于中间阀门开始关闭时,通过阀门的水流流量降低,产生降压水锤波,过一段时间后,末端阀门产生的升压水锤波到达,开始对该处的水锤压强产生影响。从图4可以看出,与末端单阀调节相比,双阀调节能够对整个管线中的压强情况进

行改善,最大压强均低于末端单阀调节,最小压强也均未出现负压,中间阀门最大压强为 110.87 m 水柱 (1 m 水柱产生的压强约为 9.8 kPa,下同),较线性关闭最大压强 (156.11 m 水柱)降低了 45.24 m 水柱,末端阀门最大压强为 85.90 m 水柱,较线性关闭最大压强 (209.89 m 水柱)降低了 123.99 m 水柱,管线中最大压强出现位置也由管线末端转移至中间阀门处。

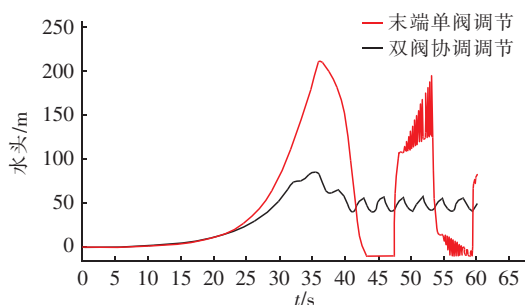


图2 末端阀门处压强变化

Fig. 2 Change of pressure at the end valve

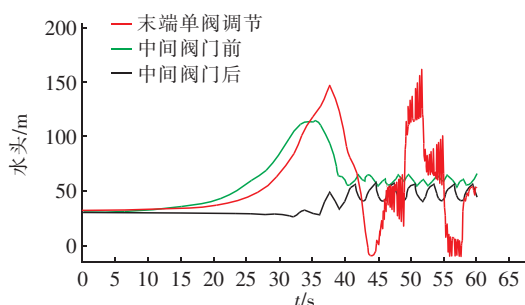


图3 中间阀门处压强变化

Fig. 3 Change of pressure at the intermediate valve

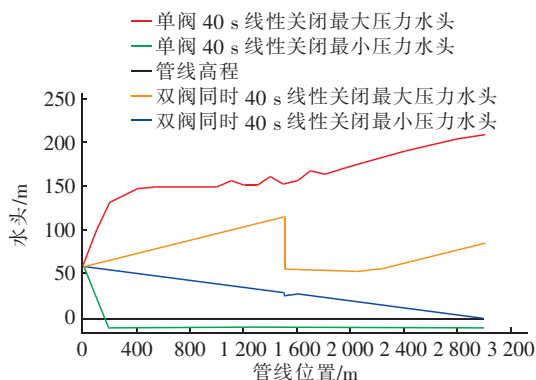


图4 输水管线最大与最小压强曲线

Fig. 4 Maximum and minimum pressure curves of the water pipeline

3 阀门动作特性对控制效果的影响

综上所述,在管路中间加入一个调节阀,与末端

阀门协同动作,能够对管路中的水锤起到有效的控制作用。为了深入探究双阀调节对管路中水锤的控制规律,对双阀调节动作特性的影响进行了研究。

3.1 阀门关闭次序及时间

当中间阀门的位置固定时,中间阀门与末端阀门由于关闭方案不同可能对管线中各处的水锤情况造成很大影响。若中间阀门关闭过快,则阀门剩余开度较小,容易引起中间阀门上游侧的管段内压力快速升高,中间阀门下游侧的管段内则容易出现压力迅速降低的现象。中间阀门关闭过慢,则容易引起相反的结果。因此,合理设置中间阀门与末端阀门的协调联动,才能更好地对输水管内的水锤进行控制。

现将中间阀门固定在管路中间位置,调整末端阀门与中间阀门的关闭次序及时间,探究阀门关闭次序及时间对双阀调节在水锤控制过程中的影响。由于末端阀门到上游水池距离为 $L = 3\ 000\text{ m}$,水锤波速 $a = 1\ 000\text{ m/s}$,则当末端阀门关闭时产生的水锤经过 3 s 时间到达上游水池发生反射并继续向下游传播,而水锤波由末端阀门传播至中间阀门的时间为 1.5 s。两个阀门关闭间隔时间与阀门关闭时间的总和为阀门总动作时间,总动作时间为 40 s。

首先关闭末端阀门,间隔一定时间后再关闭中间阀门,阀门采用随时间线性关闭的方式。对间隔时间 $\Delta t = 0、1.5、3、4.5、6\text{ s}$ 这几个节点进行计算,结果见图 5~7。从图 5 和图 7 皆可以看出,随着间隔时间 Δt 的增加,末端阀门处最大压强增加幅度明显, $\Delta t = 6\text{ s}$ 与 $\Delta t = 0\text{ s}$ 时最大压强差超过 30 m 水柱。从图 6 可以看出,阀门前、后的压强都随着两个阀门间隔时间的增加出现了上升趋势,并且从图 6(a)可知,当末端阀门处产生的升压波到达中间阀门处再开始关闭中间阀门时,中间阀门关闭产生的降压波虽然在某一段时间内对压强波动产生了影响,但是对于压强升高的趋势控制效果并不理想。从图 6(b)、(c)、(d)可知,由于随着间隔时间的增加且中间阀门开始动作之前,管路中仅有末端阀门引起的水锤波在互相影响,当中间阀门开始动作时,管道中多处位置压强已经上升,此时即使产生向下游传播的降压波,能够降低的压强幅度也是有限的。

接着采取中间阀门先关闭,间隔一定时间后关闭末端阀门的方式。对间隔时间 $\Delta t = 0、1.5、3、4.5、6\text{ s}$ 这几个关键节点进行计算。模拟结果表明,

随着末端阀门与中间阀门动作间隔时间的增加,末端阀门处压强出现明显的降低,这是由于末端阀门动作时间越晚,接受来自中间阀门产生的降压波越多,末端阀门关闭产生的升压波对此处压强的影响已经不够明显。此外,中间阀门先关闭时,中间阀门前的压强出现升高的情况,随着间隔时间的增加,压强升高幅度增大,这是由于不仅中间阀门关闭引起了压强升高,同时向下游传递的降压波遇到末端阀门发生反射,变成向上游传播的升压波。同时还可以看到,中间阀门后的压强由于阀门关闭而减小,随着间隔时间增加,压强减幅越大,当 $\Delta t = 6$ s时,中间阀门后的最小压强已经接近零,即接近负压,而负压是输水管路中需要注意的问题,因此采用中间阀门先关闭的方法调控时,末端阀门开始关闭的间隔时间不宜过长。

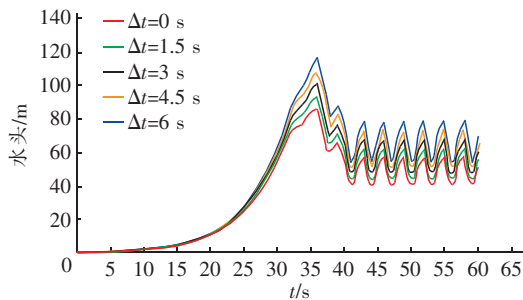
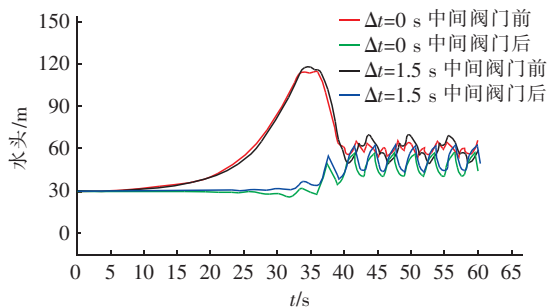
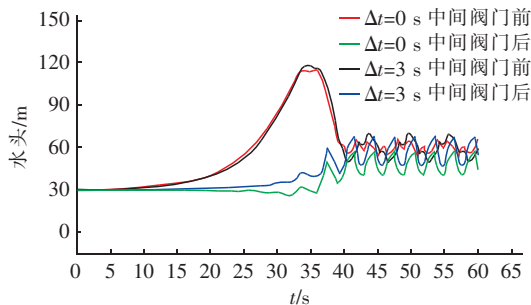


图5 末端阀门先关闭时各工况下的末端阀门压强情况

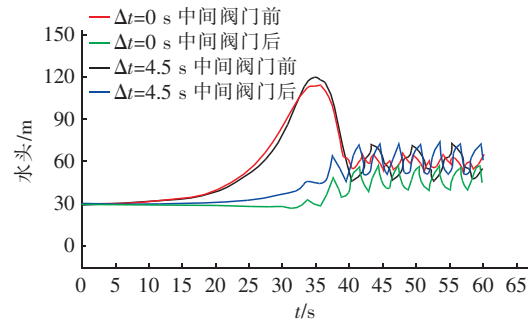
Fig. 5 Pressure of the end valve in each case with the end valve closed first



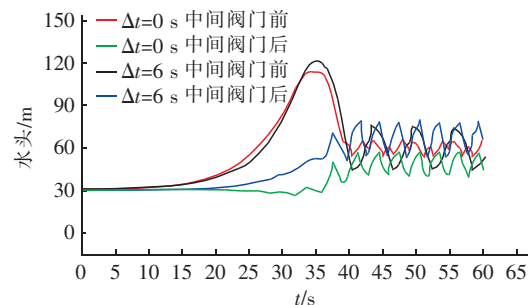
a. $\Delta t = 1.5$ s 中间阀门处压强情况



b. $\Delta t = 3$ s 中间阀门处压强情况



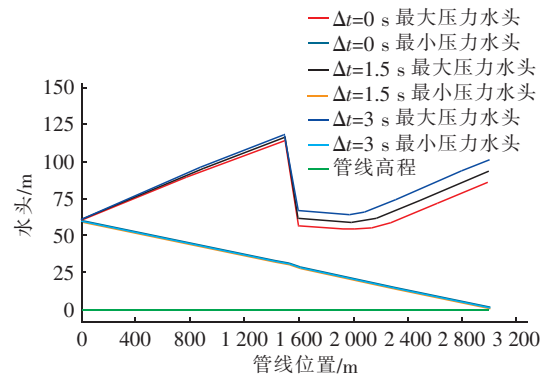
c. $\Delta t = 4.5$ s 中间阀门处压强情况



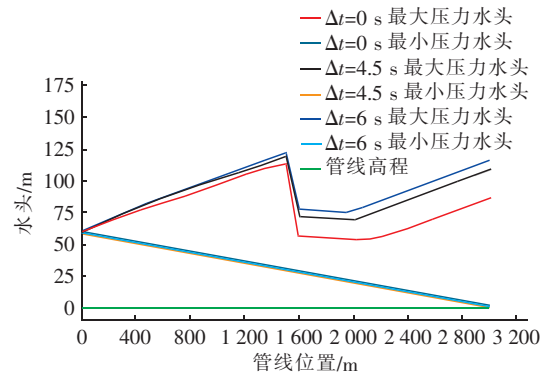
d. $\Delta t = 6$ s 中间阀门处压强情况

图6 末端阀门先关闭时各工况下中间阀门处压强情况

Fig. 6 Pressure of the intermediate valve in each case with the end valve closed first



a. $\Delta t = 1.5, 3$ s 时输水管线压强情况



b. $\Delta t = 4.5, 6$ s 时输水管线压强情况

图7 末端阀门先关闭时各工况下输水管线压强情况

Fig. 7 Pressure of the water pipeline in each case with the end valve closed first

3.2 阀门控制的关闭方式

采用末端单阀控制时,连续两阶段关闭阀门的方式能有效控制管路中水锤压强^[5],而且采用先快关后慢关的连续两阶段阀门关闭方式对水锤也有更好的控制作用^[6]。因此,将连续两阶段阀门关闭的方法引入双阀协调控制,先对末端阀门进行连续两阶段关闭,搭配中间阀门线性关闭的方式,双阀同时动作,总动作时间为40 s,对以下方案进行计算:①末端阀门8 s快关50%;②末端阀门8 s快关55%;③末端阀门8 s快关65%;④末端阀门8 s快关75%。结果见图8~11。

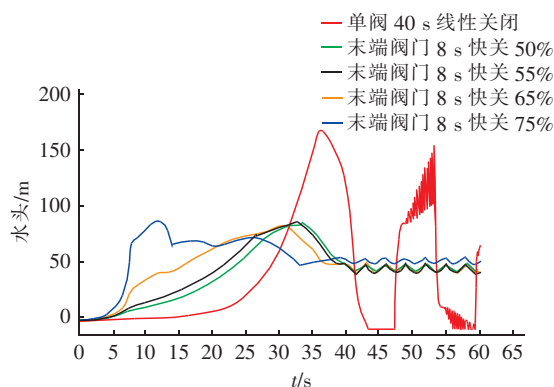


图8 末端阀门处压强情况

Fig. 8 Pressure at the end valve

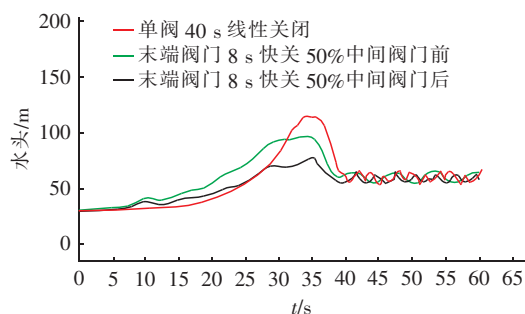
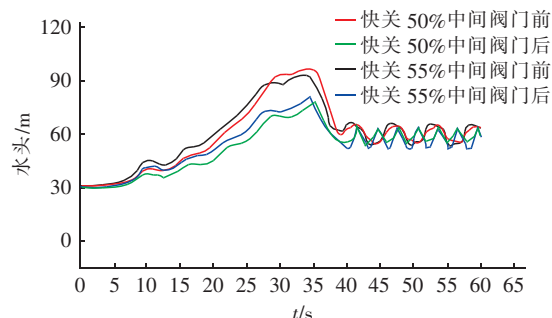


图9 中间阀门处压强情况

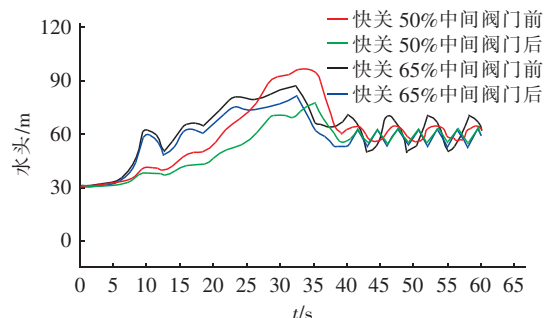
Fig. 9 Pressure at the intermediate valve

从图8可以看出,中间阀门线性关闭而末端阀门采用先快关后慢关连续两阶段关闭时,末端阀门处最大压强较单纯线性关闭出现了明显降低,同时最低压强也不再出现负压,更没有汽化的情况出现,说明管路中水锤情况得到显著改善。从图10可以看出,在各方案中,采用8 s快关75%的方式,水锤最大压强的出现时间较其他方案明显提前,采用8 s快关65%的方案时,较其他方案最大压强控制情况最佳。由于采用双阀协调控制,管路中压力情况应该同时考虑两个阀门位置,结合图11也可以看出,

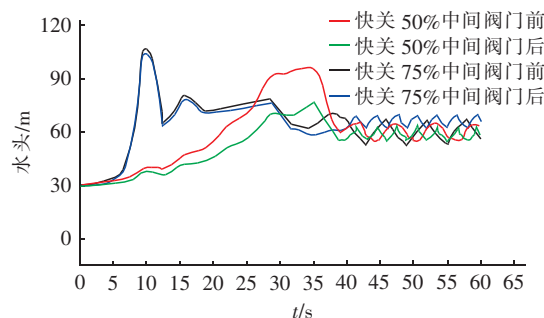
当采用8 s快关65%的方案时,中间阀门前的最大压强控制效果最佳,同时阀门后的压强也得到提升,并且阀门前后间的压强差也较小,更有利于阀门的安全。



a. 快关55%中间阀门处压强情况



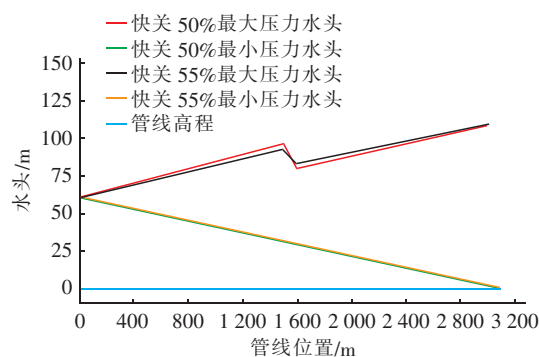
b. 快关65%中间阀门处压强情况



c. 快关75%中间阀门处压强情况

图10 末端阀门两阶段关闭中间阀门处压强情况

Fig. 10 Pressure of the intermediate valve with the end valve closed in two stages



a. 快关55%时输水管线压强情况

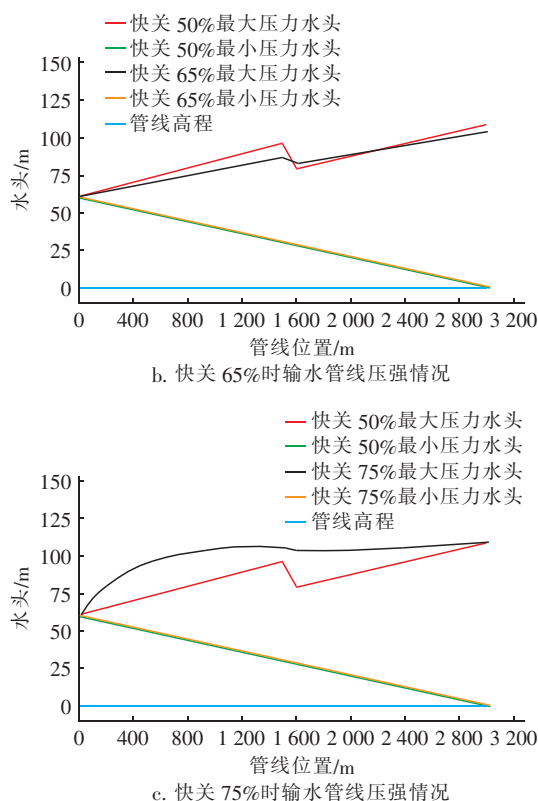


图 11 末端阀门两阶段关闭各工况下输水管线压强情况

Fig. 11 Pressure of the water pipeline with the end valve closed in two stages

在双阀协调控制时,采用末端阀门连续两阶段关闭的方式能使管路中水锤情况得到改善,接着在充分利用末端阀门连续两阶段关闭方式的基础上,中间阀门也采用连续两阶段关闭的方式,对管路中水锤控制情况进行研究。通过对几种双阀均连续两阶段关闭的方案(①中间阀门快关 65%、末端阀门快关 65%;②中间阀门快关 65%、末端阀门快关 60%;③中间阀门快关 60%、末端阀门快关 65%)进行计算,阀门总关闭时间为 40 s,快关阶段时间为 8 s,双阀同时关闭。计算结果如图 12~14 所示。

从图 12、14 可以看出,当双阀均采用先快后慢两阶段连续关闭方案时,末端阀门处压强情况得到改善,最大压强较仅末端阀门两阶段关闭明显降低,并且压强降低情况与中间阀门与末端阀门快关量的搭配有着重要联系,当中间阀门快关量大于末端阀门快关量时末端阀门处最大压强最低,当中间阀门快关量小于末端阀门快关量时末端阀门处最大压强最高,当两阀门快关量相同时压强情况居中。这主要是因为,当中间阀门快关量较大时,中间阀门产生

的向下游传播的降压波越大,对于末端阀门处的升压抑制更好。从图 13 中间阀门处压强情况可以看出,当双阀快关量一致时,多个高压极值较为接近,由此对管路的高压冲击次数也就更多,采用双阀不同快关开度搭配时,中间阀门前最大压强情况较为接近,但是多个高压极值不再接近,因此对管路的高压冲击减少,更有利于管路的安全。

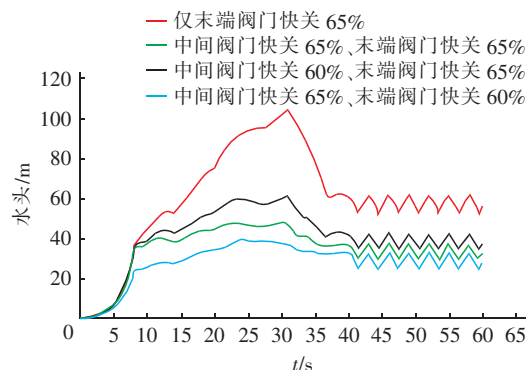
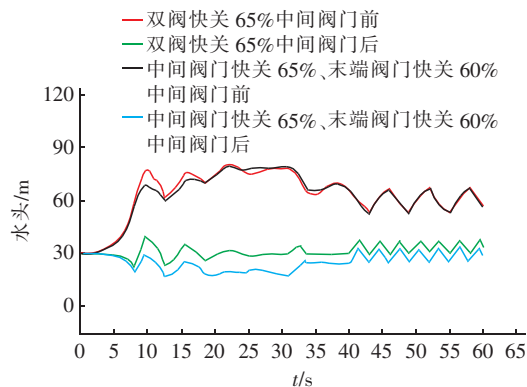
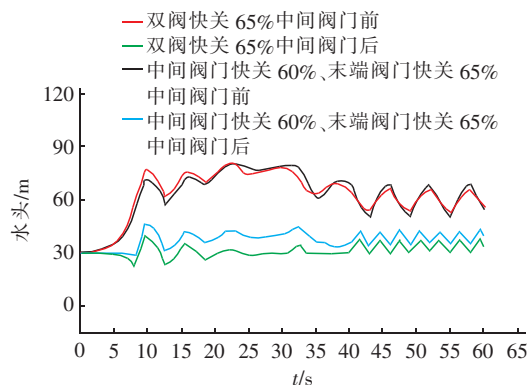


图 12 双阀两阶段关闭时末端阀门处压强情况

Fig. 12 Pressure of the end valve with the two valves closed in two stages



a. 方案②中间阀门处压强情况



b. 方案③中间阀门处压强情况

图 13 双阀两阶段关闭中间阀门处压强情况

Fig. 13 Pressure of the intermediate valve with the two valves closed in two stages

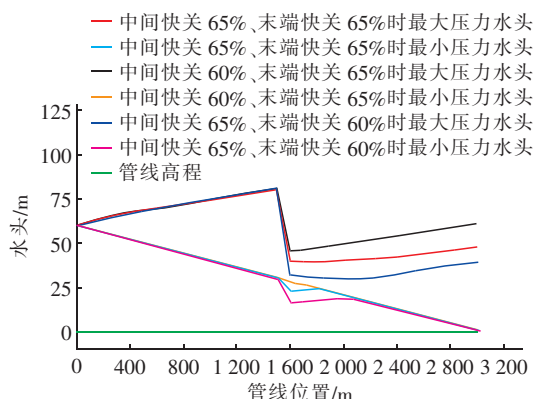


图14 双阀两阶段关闭各方案下水管压强情况

Fig. 14 Pressure of the water pipeline with the two valves closed in two stages

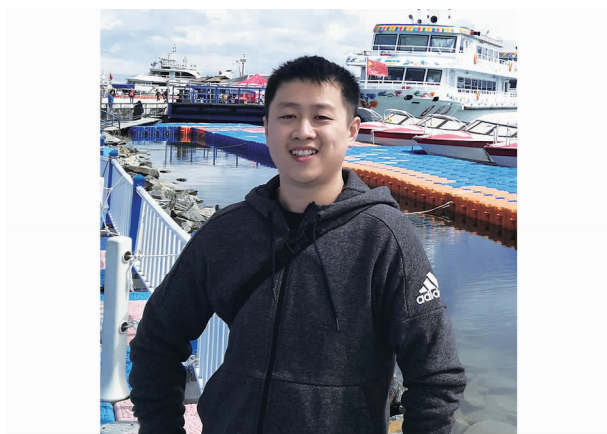
4 结论

① 与管道末端单阀调节相比,在输水管路中间增设阀门不仅最大压强降低,而且不再有负压出现,对控制管线中的水锤压强发挥了重要作用;同时,管线中最大水锤压强的出现位置也可能会发生改变。

② 当中间阀门位置固定在管线长度1/2处时,进行中间阀门和末端阀门各自优先关闭和不同间隔时间下的方案分析,发现采用双阀同时关闭的方式能够很好地对管线中的水锤压强情况进行控制;同时对阀门关闭方式进行改进,双阀均采用先快后慢连续两阶段关闭方案,并且搭配不同快关量,能够取得更好的控制效果。

参考文献:

- [1] Karadžić U, Janković M, Strunjaš F, et al. Water hammer and column separation induced by simultaneous and delayed closure of two valves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 64(9): 525–535.
- [2] 董茹, 杨玉思, 葛光环, 等. 关阀程序对分支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 Yusi, Ge Guanghuan, et al. Effect of valve closure on rise in pressure in gravity water transmission pipeline with branches[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(11): 50–54 (in Chinese).
- [3] 冯卫民, 郑欣欣. 瞬态多阀调节流体过渡过程最优控制的研究[J]. 武汉大学学报:工学版, 2003, 36(2): 130–132, 136.
Feng Weimin, Zheng Xinxin. Research on optimal control of transient multiple valves regulation for fluid transient[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(2): 130–132, 136 (in Chinese).
- [4] 冯卫民. 泵系统最优阀调节策略及水锤控制方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
Feng Weimin. Research on the Optimization Strategy of Pumping System Valve-stroking and Water-hammer Protecting [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004 (in Chinese).
- [5] 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 (in Chinese).
- [6] 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 Yingbin, Zhang Xuelin, Xu Yangyang. Study on valve closing law of long-distance pressurized water pipeline [J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2016(3): 68–69 (in Chinese).



作者简介: 王祺武(1996–), 男, 湖南益阳人, 硕士研究生, 主要从事流体机械及工程研究。

E-mail: 704732654@qq.com

收稿日期: 2019-09-24