

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.007

高山景区大高差供水管线水锤防护优化研究

赵星明¹, 赵兴忠¹, 王振国², 赵 赛³

(1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东农业大学勘察设计研究院, 山东 泰安 271018; 3. 上海市工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘 要: 针对高山景区供水管线高差大、末端起伏大,失电停泵容易发生断流弥合性水锤的特点,研究了可行的水锤防护措施。首先在水泵出口处安装液控蝶阀,通过正交试验优化两阶段关闭时间和关闭度;同时在管线的高位处设置复合式空气阀,模拟水力瞬态过程,当入流和出流孔径分别为15 mm和5 mm时,水锤正压力降低了158.98 mH₂O(1 m水柱产生的压力约为9.8 kPa),管线最高点的最大负压为-57.0 kPa,空气体积降到了最小;合理布设复合空气阀的位置,仅保留3个空气阀的水锤防护效果最佳。经过严格的过程优化,使壁厚为4.5 mm的20[#]无缝钢管可以承受262 m高差的供水管线发生的水锤压力。

关键词: 高山景区; 大高差供水管线; 水锤防护; 两阶段关闭; 复合式空气阀

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0038-06

Water Hammer Protection of Water Supply Pipeline and Its Optimization in High Mountain Scenic Area with Large Height Difference

ZHAO Xing-ming¹, ZHAO Xing-zhong¹, WANG Zhen-guo², ZHAO Sai³

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 2. Shandong Agricultural University Survey and Design Institute, Taian 271018, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Water supply pipeline in high mountain scenic area has the characteristics of large height difference, great fluctuation at the ends and easy occurrence of cavities collapsing water hammer due to power loss and shutdown of pumps. To solve these problems, feasible protective measures of water hammer were explored. Hydraulic control butterfly valve was firstly installed at the outlet of the pump, and the closing time and the closing degree in two stages were optimized by orthogonal experiment. At the same time, a compound air valve was set at high position of the pipeline to simulate the instantaneous hydraulic process. When the inflow and outflow apertures were 15 mm and 5 mm respectively, the positive pressure of the water hammer was reduced by 158.98 mH₂O, the maximum negative pressure of the highest point of the pipeline was -57.0 kPa, and the air volume was minimized. The best protective effect was obtained by reasonably arranging the position of the compound air valve and only setting three air valves. After the optimization, 20[#] seamless steel pipe with a wall thickness of 4.5 mm could bear the water hammer pressure generated by the water supply pipeline with a height difference of 262 m.

Key words: high mountain scenic area; water supply pipeline with large height difference; water hammer protection; closing valve in two stages; compound air valve

山东省某高山景区的供水管线,供水高差达到 800 m 左右,需要分级供水。供水路线地势险峻、地

形复杂、施工与维护难度大,为保证供水安全,特别要求对供水管道可能发生的水锤过程进行分析和评估,并提出技术可行、经济合理的水锤防护措施^[1]。笔者选择了地形起伏变化较大的第二级供水管线进行水锤防护分析,按照《输送液体用无缝钢管》(GB/T 8163—2018)规范,选用20#热浸镀锌无缝钢管,管径为DN150,管线总长为1.54 km,采用地面架空与埋地的敷设方式。山脚下的泵房共布置水泵机组3台,2用1备,水泵型号为D85-45×6多级离心泵,配套电机功率为110 kW、轴功率为86.81 kW、转速为2 950 r/min。水泵从下游水池取水加压供到上游水池,下游水池水位高程为610 m、上游水池水位高程为872 m,水泵提升高度为262 m,中途最高点为878 m。管道沿线地势起伏较大,易发生断流弥合性水锤^[2],造成管道破裂、管道连接处漏水,给维护和检修造成困难,威胁景区供水安全。拟通过优化两阶段关闭蝶阀、空气阀等防护措施,模拟水锤防护效果,获得最优的水锤防护方案。

1 稳态计算与失电停泵水锤分析

1.1 稳态计算

供水管纵剖面如图1所示^[3-4]。

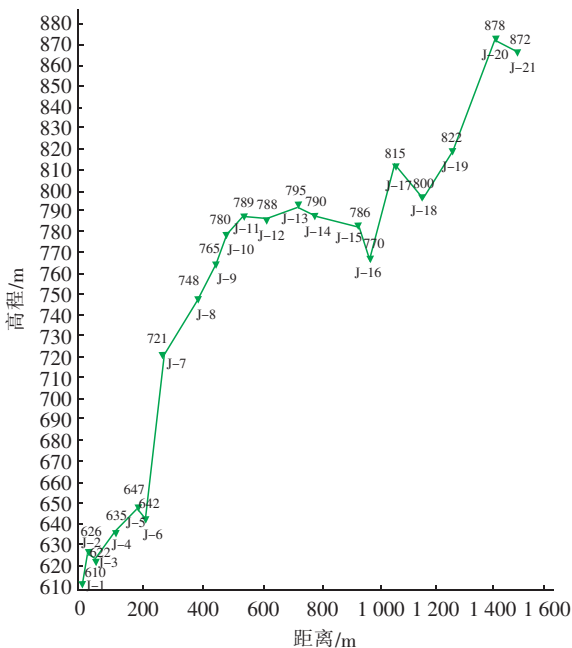


图1 供水管线纵剖面

Fig.1 Longitudinal section diagram of water supply pipeline

本工程的水锤分析采用 Bentley HAMMER 软件,在水锤分析之前需先进行稳态计算,得到供水管线在正常工作状态下的水力参数,然后才能进行水

锤模拟^[2]。设水泵按照最大输送能力扬水,采用海曾-威廉公式稳态计算结果如下:供水系统的流量为77.6 m³/h,管道流速为1.22 m/s,在J-20节点附近出现了负压,水泵出水近处的J-1节点压力为2 721.8 kPa,水头为888.11 mH₂O(1 m水柱产生的压力约为9.8 kPa,下同)。

1.2 失电停泵水锤分析

水泵按水锤无防护措施进行常规设计,就是在出口管道上安装普通止回阀,遇到失电停泵时止回阀会瞬间关闭,阻挡水倒流,以保护水泵机组^[5]。不过,普通止回阀的快速关闭,会产生极限水锤使管道压力剧增,产生的破坏力是最严重的^[6]。使用特征线法对失电停泵水锤的水力瞬态进行分析计算,模拟管道内的水锤现象^[7],结果如图2所示。

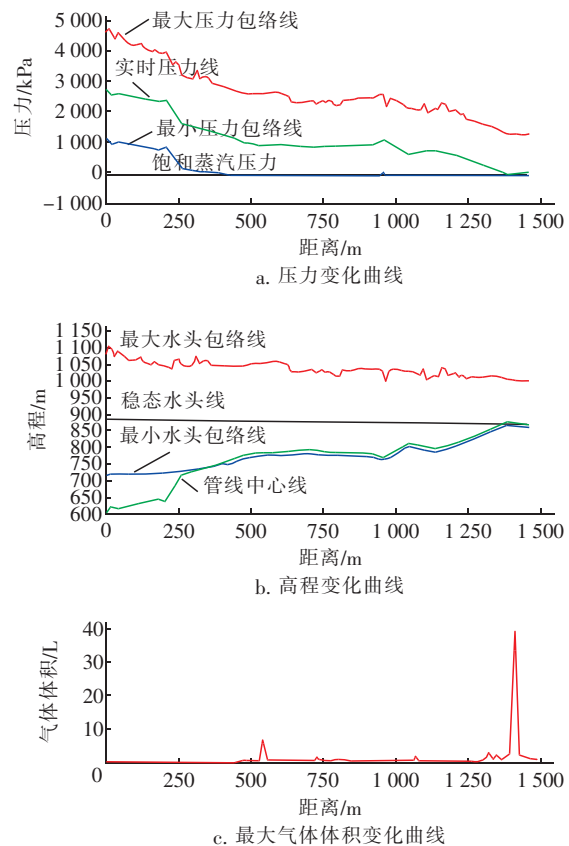


图2 无防护停泵水锤压力和最大气体体积变化曲线

Fig.2 Changing curve of unprotected pump water hammer pressure and maximum gas volume

由图2(a)、(b)可知,在无防护措施下发生失电停泵水锤,节点J-1的最大水头为1 093.28 mH₂O,在管道内产生的最大压力为4 729.9 kPa(约为4.73 MPa),是稳态运行的1.74倍。对于DN150

(外径为 159 mm) 的 20# 热浸镀锌无缝钢管来说, 若采用最小壁厚为 4.5 mm, 经计算只承受 2 900.9 kPa 的压力, 因此水锤对管道施加的压力明显超出了其承受能力。从节点 J-7 开始, 下游管道在水锤发生过程中都出现了负压, 最大负压值出现在节点 J-9~J-21 之间, 达到了 -97.9 kPa, 多处水柱被拉断, 出现了气体空腔, 而在节点 J-20 的气体体积最大, 为 35.5 L, 产生了断流空腔再弥合水锤, 如图 2(c) 所示。失电停泵产生的水锤对管道的损害最大, 可作为用其他防护措施削弱水锤的一个参照。

2 液控蝶阀水锤防护

通过对失电停泵水锤的模拟分析可知, 水泵出水口蝶阀的流阻系数随其关闭过程而呈指数递增, 水头损失急剧增大, 使水泵进入制动工况造成管道出现逆流, 其逆流流速也不断变大, 与下游反射逆行波的水击压强叠加, 水锤压力升高。研究表明, 蝶阀需缓慢关闭, 并执行两阶段关闭程序, 才能较好地控制阀后压力升值^[8]。

液控蝶阀兼顾止回阀和截止阀的功能, 能够预先设定开关程序。水泵启动前液控蝶阀应处于关闭状态, 等运行稳定后, 在 15~60 s 时间内先慢后快地打开阀门。若是遇到失电或正常停泵, 液控蝶阀则执行快关、慢关两阶段动作, 即先快速关闭至某一角度, 再缓慢关闭, 以控制水锤压力升高。KD741X-6Q 型液控蝶阀的快关时间为 1.5~15 s, 关阀角度为 $70^\circ \pm 10^\circ$, 慢关时间为 2.5~60 s, 其关阀角度为 $20^\circ \pm 10^\circ$, 最小流阻系数为 0.1。不同的液控蝶阀产品其设计参数有出入, 可根据水锤模拟结果选择合适的液控蝶阀^[9]。

使用液控蝶阀削弱水锤的关键是优化两阶段关闭时间和关阀度, 可通过优化试验确定关阀程序^[10]。本试验按照正交表 $L_{16}(4^3)$ 进行水锤模拟, 3 个影响因素 (A、B、C) 分别是第 1 阶段关阀时间、第 2 阶段关阀时间和第 1 阶段关阀度, 每个因素设定 4 个水平 (因素 A 的 4 个水平分别是 1.5、4.5、7.5、10.5 s; 因素 B 的 4 个水平分别是 10、25、40、55 s; 因素 C 的 4 个水平分别是 80%、70%、60%、50%), 以节点 J-1 的最大水头作为评价指标, 结果见表 1。

表 1 数据显示, 因素 B 的极差 R_B 远大于 R_A 和 R_C , 说明第 2 阶段慢关时间对水锤压力的影响程度最高。 \bar{k}_1 、 \bar{k}_2 、 \bar{k}_3 、 \bar{k}_4 表示 3 个因素 4 个水平下节点

J-1 最大水头的平均值, 因素 A: 水平 4 即 10.5 s 关阀时间的 \bar{k}_4 最小, 比 \bar{k}_1 小 46.61 m, 但加长第 1 阶段的关阀时间, 也就是延长了水泵逆转的时间, 容易损害水泵。因素 B: 水平 1 即 10 s 关阀时间的 \bar{k}_1 最大, 而 25、40 和 55 s 这 3 个水平的 \bar{k} 值相差不大, 说明第 2 阶段的关阀时间太短会对 J-1 节点最大水头产生较大影响。因素 C: 水平 4 即 50% 关阀度的 \bar{k} 值最低, 较小的关阀度会加剧水流逆向流动, 能削弱水锤压力, 不过若关阀度太小会增加水泵逆转速。

表 1 两阶段关阀正交模拟结果和极差分析

Tab. 1 Results and range analysis of two-stage closed valve by orthogonal experiments

序号	因素 A	因素 B	因素 C	最大水头/m
1	1	1	1	1 158.19
2	1	2	2	1 001.46
3	1	3	3	1 016.99
4	1	4	4	997.24
5	2	1	2	1 124.50
6	2	2	1	997.34
7	2	3	4	997.05
8	2	4	3	1 001.28
9	3	1	3	1 075.18
10	3	2	4	996.85
11	3	3	1	996.88
12	3	4	2	996.94
13	4	1	4	996.89
14	4	2	3	996.87
15	4	3	2	996.85
16	4	4	1	996.83
\bar{k}_1	1 043.470	1 088.690	1 037.310	
\bar{k}_2	1 030.043	998.130	1 029.938	
\bar{k}_3	1 016.463	1 001.943	1 022.580	
\bar{k}_4	996.860	998.073	997.008	
R	46.610	90.617	40.302	

通过因素交互作用分析得出, 若第 1 阶段的快开阀时间大于 4.5 s, 第 2 阶段的慢开阀时间超过 25 s, 正交模拟的 J-1 节点的最大高程都在 996 mH₂O 左右, 在这个开阀时间范围内, 第 1 阶段的关阀度设定为 50%~70%, 模拟结果较好。防护方案 $A_2B_4C_3$ 虽然不是最佳的结果, 但它在第 1 阶段是 4.5 s 关阀 60%, 对水泵的逆转保护是最好的。通过对液控蝶阀水锤的正交优化模拟, 并考虑对水泵逆转的保护 (不推荐含 C_4 的方案), 得到的优化防护方案为 $A_2B_4C_3$ 、 $A_2B_2C_1$ 、 $A_3B_4C_2$ 、 $A_4B_2C_3$ 、 $A_4B_3C_2$, 可较大地

降低供水管线的水锤压力并保护水泵。

图3为 $A_2B_4C_3$ 防护方案的模拟结果。节点J-1的最大压力为3 829.5 kPa,比无防护措施的4 729.9 kPa下降900.4 kPa。节点J-1最大水头为1 001.28 mH₂O,比无防护措施产生的1 093.28 mH₂O下降了92.00 mH₂O,减压效果明显。整个供水管道压力波动较平稳,但负压没有完全消除,最高节点J-20的气体体积还增加到119.1 L。

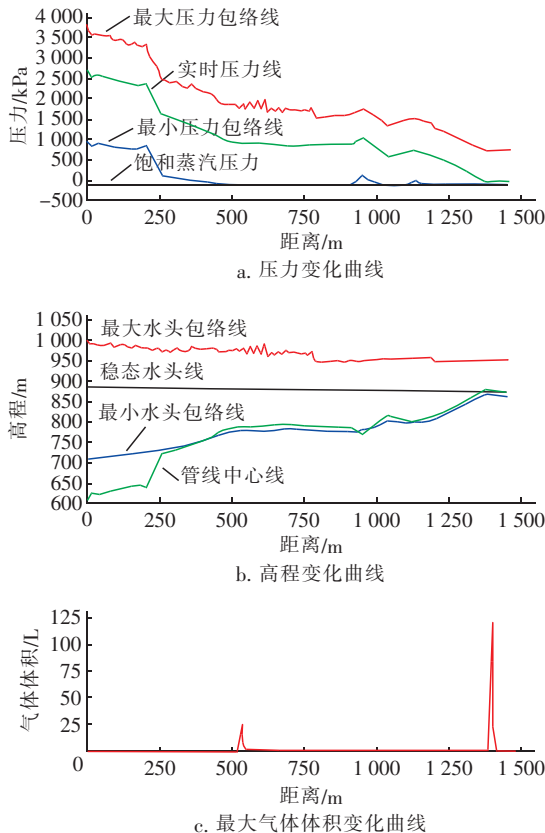


图3 液控蝶阀水锤防护压力和最大气体体积变化曲线
Fig.3 Changing curve of water hammer protection pressure and maximum gas volume by hydraulic control butterfly valve

3 空气阀与液控蝶阀联合水锤防护

缓闭蝶阀的防护措施降低了水锤正压力,但是J-10~J-21大多数节点的最小压力仍降到了饱和蒸汽压-10.1 mH₂O(-98.9 kPa),引起水柱分离再弥合性水锤。水柱分离再弥合性水锤与失电停泵水锤和关阀水锤的机理是有区别的,在水泵处设置停泵水锤防护设备的效果甚微,通常应在管线凸起位置安装空气阀,当管道内压力低于饱和蒸汽压时吸入空气,而当压力高于饱和蒸汽压时则排出空气,通过进排气平衡管道压力^[11]。该工程采用可以进

排气的复合式空气阀,当管道出现负压发生水柱分离时,大口径的进气孔自动快速吸气,抑制气穴继续增大,减缓水柱分离速度,而当发生断流弥合性水锤时,小口径的排气孔缓慢排气,可以降低水柱弥合时的速度,从而减小升压^[12]。

由图3(b)可知,从节点J-9开始出现负压,为-41.9 kPa,J-10就达到了饱和蒸汽压-97.9 kPa。对空气阀安装位置的确定,是先在J-10上设置一个复合式空气阀,然后在空气阀与液控蝶阀联合作用下进行数值模拟计算,并对空气阀的进气口径和出气口径再进行优化,使J-10及附近节点的负压达到理想值。复合式空气阀一般要达到快进慢出的效果,进气速度快,则进气口径较大,一般情况下,进气口径宜取主管直径的1/8~1/5,在此取入流孔径分别为32、20、15 mm,流出孔径分别为5、10、15 mm进行试验,发现J-10的最小压力与流出孔径无关,入流孔径为32 mm时,最小压力达到最低(-1.1 kPa)。J-9的最小压力为55.9 kPa,J-11的仍为-97.9 kPa。然后在J-11节点上安装空气阀,设置获取的最佳参数即入流孔径为32 mm、流出孔径为5 mm,再次找出最大负压节点,依此类推,在最小压力为-97.9 kPa的节点上安装空气阀。

整个模拟优化过程花费大量时间,第1次模拟试验,在J-10、J-11、J-12、J-13、J-17和J-20节点上安装复合式空气阀,分别设置所有复合式空气阀入流孔径为32、20、15 mm,而流出孔径定为5 mm,模拟结果如表2所示。

表2 空气阀入流孔径模拟结果

Tab.2 Simulation results of air valve inlet aperture

入流孔径/mm	J-1 最大压力/kPa	J-20 最小压力/kPa	J-20 空气体积/L
32	3 445.5	-56.9	4 789.8
20	3 404.8	-49.1	4 036.0
15	3 364.3	-49.1	3 422.4

从模拟结果看,当入流孔径为15 mm、流出孔径为5 mm时,J-1最大压力、J-20最小压力和空气体积达到了最小值,即3 364.3 kPa、-49.1 kPa、3 422.4 L。J-20的空气体积太大,引发断流弥合性水锤,削减管道负压的效果不理想。在第2次试验中,经分析认为,J-10、J-12、J-13不在管道凸起部位,这3个节点上的空气阀起作用的可能不大,然后依次删除这3个节点的空气阀进行模拟试验,

最后仅在J-11、J-17、J-20安装了3个空气阀,此时水锤防护效果达到预期,成为利用空气阀进行水锤防护的最佳方案,其模拟的包络线见图4。

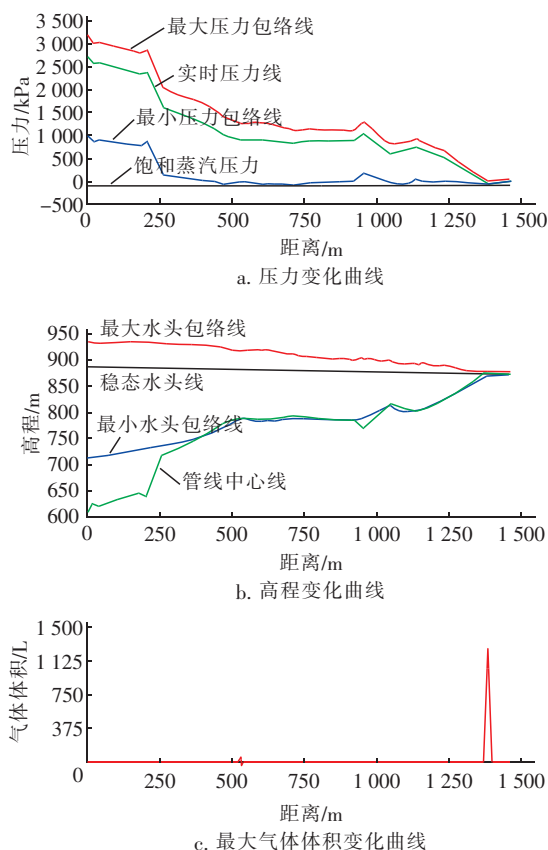


图4 复合空气阀与液控蝶阀水锤防护压力和最大气体体积变化曲线

Fig.4 Changing curve of water hammer protection pressure and maximum gas volume by compound air valve and hydraulic control butterfly valve

在液控蝶阀的基础上采用复合式空气阀的水锤防护措施,减小了管道中的负压,原来负压最严重的节点J-20,其负压降到了 -57.0 kPa,空气腔体积虽然有所增加,但是3个空气阀的空气腔体积为 $1\,253.1$ L,远小于6个空气阀的空气腔体积 $3\,422.4$ L,J-18~J-20的管道负压和液柱分离得到较好控制,管道压力平稳,抑制了水锤正压力的升高。节点J-1的最大压力为 $3\,174.0$ kPa,减少了 $1\,555.9$ kPa,最大水头为 934.30 mH₂O,也减少了 158.98 mH₂O,对管道正压力的削减效果明显。节点J-1的最大压力虽然比壁厚为 4.5 mm的 $20^{\#}$ 热浸镀锌无缝钢管的抗拉强度还稍高一点,但若把壁厚增加到 5 mm,管道的可承受压力为 $3\,223.3$ kPa,大于水

锤瞬时压力。

由图4(a)可知,J-6节点以后的管线最大水锤瞬时压力都小于 $2\,900.9$ kPa,故可使用壁厚为 4.5 mm的 $20^{\#}$ 无缝钢管,J-6节点以前的管线的壁厚推荐使用 5 mm,能够保证景区供水工程安全运行。

4 结论

① 高山景区供水线路的地形高差大,若水泵出水管仅安装普通止回阀,遇到失电停泵的事故,因产生的断流弥合性水锤在水泵出水口处的正压力增加到 $4\,729.9$ kPa,是稳态运行的 1.74 倍,已超出了管道的承受能力,增大了爆管几率。

② 采取液控蝶阀快关、慢关两阶段防护水锤措施,经过正交试验设计,优化了快关时间、慢关时间和关阀度执行参数,降低正压效果明显。考虑到尽量缩短水泵逆转时间,快关时间应短一些,关阀度取值大一点。慢关时间对水锤压力影响大,采用 55 s的慢关可取得最好效果,但若再延长慢关时间,对控制水锤的最大升压保持不变。现有的液控蝶阀参数可满足模拟的设计值。

③ 在液控蝶阀防护措施的基础上,在节点J-11、J-17、J-20安装复合式空气阀控制负压,大大缩小了管线的负压区,降低了最大负压值,因抑制了断流弥合性水锤,也降低了水锤正压。复合式空气阀的安装位置对控制水锤影响至关重要,需经过试验比对,对安装位置进行优化分析,该工程在管线上仅安装3个复合式空气阀,控制水锤的效果达到了理想状态。

④ 虽然高山景区的供水管道起伏和高差大,但经过严格的试验设计,仅采取液控蝶阀和复合式空气阀两个措施,就收到了很好的水锤防护效果,水锤压力低于 $20^{\#}$ 热浸镀锌无缝钢管的抗拉强度,满足了工程设计要求,也节省了工程投资,降低了运行维护费用。

参考文献:

- [1] Kim S H. Design of surge tank for water supply systems using the impulse response method with the GA algorithm [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(2): 629-636.
- [2] 宋芹,赵星明,艾典胜. 输水管道水锤分析与防护技术[J]. 山东农业大学学报:自然科学版, 2017, 48(1): 84-87.

- Song Qin, Zhao Xingming, Ai Diansheng. The analysis and the protection technology of water hammer in water pipeline [J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2017, 48(1): 84 – 87 (in Chinese).
- [3] 赵星明, 王萱. 环状给水管网关联矩阵的建立[J]. 中国农村水利水电, 2012(11): 129 – 131, 135.
Zhao Xingming, Wang Xuan. Construction of incidence matrix in the annular water supply networks[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(11): 129 – 131, 135 (in Chinese).
- [4] 赵星明, 王萱. 基于扩展数据的给排水管网拓扑关系的构建[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2012, 43(4): 549 – 554.
Zhao Xingming, Wang Xuan. Construction of topological relationship for water supply and drainage network based on extended entity data [J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2012, 43(4): 549 – 554 (in Chinese).
- [5] 卢龙彬, 雷晓辉, 田雨, 等. 密云水库调蓄工程有压输水管道事故停泵过程水锤模拟分析[J]. 中国农村水利水电, 2017(5): 202 – 206.
Lu Longbin, Lei Xiaohui, Tian Yu, *et al.* A simulation of unexpected pump-stop water hammers of pressure conduits of the Miyun Reservoir storage project [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(5): 202 – 206 (in Chinese).
- [6] 吕岁菊, 冯民权, 李春光. 泵输水管线水锤数值模拟及其防护研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(9): 219 – 226.
Lü Suiju, Feng Minquan, Li Chunguang. Numerical simulation and protection of water hammer in pumping water supply system [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2014, 42(9): 219 – 226 (in Chinese).
- [7] 郝新宇, 余仁志, 厉帅, 等. 海外跨境长距离输水工程的水锤防护分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(9): 57 – 61.
Hao Xinyu, Yu Renzhi, Li Shuai, *et al.* Analysis of water hammer protection in overseas and cross-border long distance water transfer project [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(9): 57 – 61 (in Chinese).
- [8] 董丽丽, 冯民权, 吕岁菊. 长距离泵输水系统事故停泵水锤数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 112 – 115.
Dong Lili, Feng Minquan, Lü Suiju. Numerical simulation of water hammer of accident stopped pump in water transmission system of long distance pump [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(5): 112 – 115 (in Chinese).
- [9] 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, 43(2): 123 – 127.
Huang Yuan, Zhao Ming, Zhang Qingzhou, *et al.* Study on the optimal control of valve-induced water hammer in water conveying and distribution systems [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(2): 123 – 127 (in Chinese).
- [10] Algirdas K, Vaisnoras M, Valincius M. Modelling of valve induced water hammer phenomena in a district heating system [J]. Comput Fluids, 2014, 94: 30 – 36.
- [11] 葛光环, 寇坤, 张军, 等. 断流弥合水锤最优防护措施的比较与分析[J]. 中国给水排水, 2015, 31(1): 52 – 55, 60.
Ge Guanghuan, Kou Kun, Zhang Jun, *et al.* Comparative analysis on optimal protection measures of water hammer of cavities collapsing [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(1): 52 – 55, 60 (in Chinese).
- [12] 刘竹青, 毕慧丽, 王福军. 空气阀在有压输水管路中的水锤防护作用[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(4): 333 – 337.
Liu Zhuqing, Bi Huili, Wang Fujun. Effect of air valves on water hammer protection in pressure pipelines [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(4): 333 – 337 (in Chinese).



作者简介: 赵星明(1964 –), 男, 山东昌邑人, 大学本科, 副教授, 研究方向为给水管网设计与运行工况分析以及水处理技术。

E-mail: xmzhao@sda.u.edu.cn

收稿日期: 2019 – 12 – 12