

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.02.016

山区长距离高落差村镇供水的水锤防护措施

樊波¹, 沈荣¹, 白立黎¹, 余竞²

(1. 昆明市建筑设计研究院股份有限公司, 云南 昆明 650228; 2. 昆明通用水务自来水有限公司, 云南 昆明 650032)

摘要: 村镇供水工程时常需在长距离高落差的条件下敷设管道进行输配水,在实际工程中长距离高落差的管道在无水锤防护措施的情况下,很容易发生水锤事故,对泵站和管道产生极大破坏,特别是在云南广大偏远山区,交通不便,检修困难,水锤事故发生将对整个供水系统的安全运行造成严重影响。以云南某工程实例为研究对象,采用国际上较成熟的水锤软件建立水力计算模型,对不同工况下的管线进行水锤模拟计算,找出可能发生水锤的最不利位置,采取合理的防护措施,保障管道、泵房等供水系统的平稳安全运行,防止事故发生。

关键词: 村镇供水; 高落差; 长距离; 水锤模拟与防护

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)02-0101-06

Water Hammer Protection Measures for Water Supply in Long-distance Villages and Towns with High Drop in Mountainous Area

FAN Bo¹, SHEN Rong¹, BAI Lili¹, YU Jing²

(1. Kunming Institute of Architectural Design Co. Ltd., Kunming 650228, China; 2. Kunming CGE Water Supply Co. Ltd., Kunming 650032, China)

Abstract: In the water supply projects in villages and towns, it is often necessary to lay pipe in places with high drop and long-distance for water transmission and distribution. In the actual projects, water hammer accidents are easy to occur in the pipe with long-distance and high drop without water hammer protection measures, which will cause great damage to pump stations and pipes, especially in the vast remote mountainous areas of Yunnan Province, where transportation is inconvenient and maintenance is difficult. Water hammer accident will have a great impact on the safety of the whole water supply system. This paper takes an engineering example as the research object, adopts the internationally mature water hammer software to establish a hydraulic calculation model, conducts water hammer simulation calculation for pipelines under different working conditions, finds out the most unfavorable position where water hammer may occur, and takes reasonable protective measures to ensure the stable and safe operation of water supply systems including pipes and pump houses, so as to prevent accidents.

Keywords: water supply for villages and towns; high drop; long-distance; water hammer simulation and protection

基金项目: 云南省科技厅重点研发计划项目(202203AC100004)

通信作者: 沈荣 E-mail: 331317664@qq.com

村镇供水设施的建设与完善,对改善民生、吸引企业入驻、推动村镇经济的发展、促进村镇生态环境的改善具有重要意义。但是,因水源分布与村镇位置的不均衡,利用长距离管道进行输配水的情况非常普遍,特别是云南的偏远山区,往往从水源点取水后,供水管道需要翻山越岭才能到达净水厂和村镇居民用水点。当输配水管道发生事故时,供水可能突然中断且修复周期长,带来的社会影响巨大。根据《村镇供水工程技术规范》(GB/T 43824—2024),向高地输水可能产生水锤危害的泵站,设计中应进行事故停泵水锤计算。当事故停泵瞬态特性不符合《泵站设计标准》(GB 50265—2022)时,应采取防护措施。根据《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》(CECS 193:2005)^[1],中等口径和大口径输水管道的水锤分析和防护设计,应经专门的分析计算后,确定水锤防护措施。

根据上述规范、规程的要求可知,供水系统中管道的水锤分析和防护设计十分必要^[2-4],特别是中等口径和大口径输水管道^[5],输水量大,停泵水锤对管道破坏的影响范围广。以云南某工程实例作为研究对象,具体计算与分析水锤的防护设计。

1 工程实例及水力坡度计算分析

1.1 工程概况

云南某村镇居民饮用水兼产业园区供水项目,工业与生活用水规模 3 万 m³/d(含管道漏损及水厂自用水量),输水管线采用单线设计,全长 7 915 m,全部采用球墨铸铁管,管径 DN600,粗糙系数为 0.013。水源为金沙江水系横江干流上段的一级支流,设置取水坝取水,取水坝下游 100 m 处设置 1#泵站,泵站高程为 1 840.63 m;净水厂调节池进水口的高程为 2 154.32 m,高程差为 313.69 m。村镇和一期产业园区平均高程为 2 061.95 m,二期工业用地平均高程为 2 111.85 m,均采用重力供水。该工程采用分级供水形式,在取水坝下游 100 m 处设置一次加压提升泵站(1#泵站);在管线敷设沿线中途海拔 1 989.29 m 处设置二次加压提升泵站(2#泵站);取水经过两次提升后进入净水厂调节池,1#和 2#泵站的高差为 148.66 m,2#泵站至净水厂调节池进水口的高差为 165.03 m。1#和 2#泵站均选用 2 台多级卧式双吸离心泵,1 用 1 备,单泵额定流量 1 250 m³/h,额定扬程 175 m,额定转速 1 450 r/min,水泵效

率 85%,电机功率 900 kW。

1.2 管道纵断面及水力坡度计算分析

首先,根据《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》(CECS 193:2005)和《室外给水设计标准》(GB 50013—2018),该项目管道总水头损失采用海曾-威廉公式进行计算,计算结果见表 1。

表 1 输水管道水力计算结果

Tab.1 Hydraulic calculation results of water transmission pipeline

管径	DN600
流速/(m/s)	1.168
管道设计秒流量/(L/s)	347.2
1#~2#泵站总水头损失/m	14.98
2#泵站至净水厂总水头损失/m	8.52

其次,根据工程中各个节点高程、平面距离等参数,为方便在水锤软件中进行建模计算,以输水系统纵断面图为基础,对工程管道数据按实际工况进行简化,绘制水力坡度计算图。

1.3 静压管道水力坡度计算分析

为简化计算,1#泵站、2#泵站输水量均按 1 250 m³/h 计,水泵扬程均为 170 m,管道流速 1.168 m/s,海曾-威廉系数取 100,沿程损失为 3.154 m/km。1#~2#泵站管道末端剩余水头约 4.44 m,2#泵站至净水厂处管道末端剩余水头约 4.97 m,2#泵站至各段管道水力计算结果如图 1 所示。

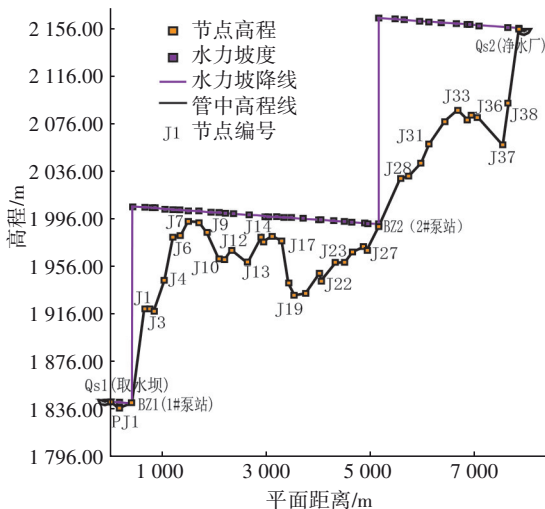


图 1 1#~2#泵站、2#泵站至净水厂管道工作水头计算

Fig.1 Calculation of the working water head of No.1 pump station to No.2 pump station and the pipeline from No.2 pump station to the water treatment plant

由图1可以看出,管道存在多个明显的高位点,遇到停泵时容易发生断流空腔形成弥合水锤。

2 多种防护方案的水锤计算与对比分析

2.1 管道无防护措施

在额定流量 $1\,250\text{ m}^3/\text{h}$ 的输水情况下进行停泵水锤分析,1#、2#泵站的出水管上均安装蝶式止回阀,在突然断电时水泵停转。根据软件模拟显示,停泵约5 s时管道内的水流发生逆转,止回阀快速关闭保护水泵。水泵突然停电时停泵水锤的模拟分析计算结果如图2、3所示。

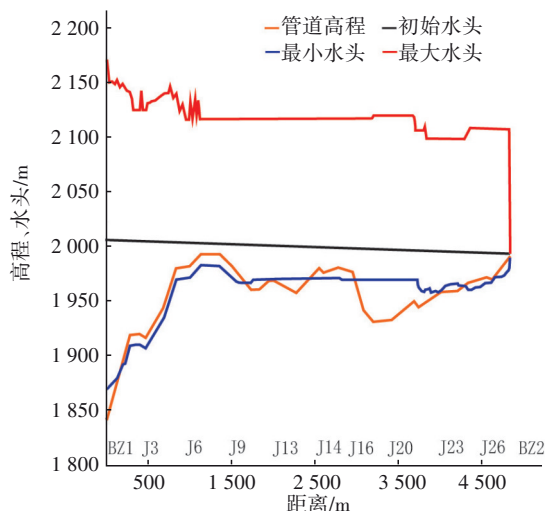


图2 1#~2#泵站管道无防护措施时停泵水锤计算

Fig.2 Calculation of water hammer caused by pump shutdown when no protective measures are taken for pipelines from No.1 pump station to No.2 pump station

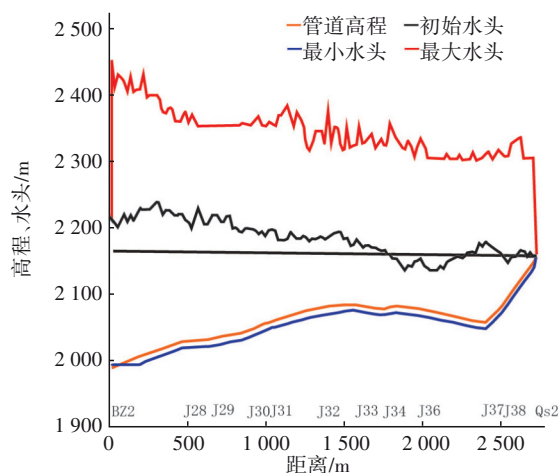


图3 2#泵站至净水厂处管道无防护措施时停泵水锤计算

Fig.3 Calculation of water hammer caused by pump shutdown when no protective measures are taken for pipeline from No.2 pump station to the water treatment plant

由图2、3可以看出,断电停泵时均为水泵出口产生最大的水锤,1#泵站管道压力水头上升至 $2\,170.0\text{ m}$,2#泵站管道压力水头上升至 $2\,455.0\text{ m}$ 。1#泵站处管道高程为 $1\,840.63\text{ m}$,水锤发生时管道承受的瞬态最大压力为 3.294 MPa ,大于管道所承受的工作压力 2.500 MPa ,导致管道破坏。2#泵站处的管道高程为 $1\,989.29\text{ m}$,水锤发生时管道承受的压力为 4.657 MPa ,大于管道所承受的工作压力 2.500 MPa ,更容易导致管道破坏。由图2、3明显看出,管道负压主要分布在 PMP1~J10 段、J14~J17 段、J24~J26 段、Res2~Res3 段,软件模拟分析中其数据显示最大负压为 -98 kPa ,并在3个高点处(J7、J32和J33)出现蒸汽容积,其值分别约为 $6\,250$ 、 185 和 145 L ,说明水柱被拉断出现相应容积的空腔,进一步将产生断流弥合水锤。基于上述情况分析,断电停泵需要采取水锤防护措施,以保证各级水泵及各段输水管线安全工作。

2.2 1#~2#泵站管道设防护措施

① 设空气阀保护时停泵水锤的计算与分析

1#~2#泵站管道设空气阀保护时停泵水锤模拟计算结果:在1#~2#泵站管道最高点处设置空气阀进行保护,空气阀的进气管直径为 120 mm ,出气管直径为 6 mm 。断电停泵时阀前管网压力波形有明显变化,但水泵出水管段压力水头上升至 $2\,155.0\text{ m}$,较未设置任何保护措施情况下的管道最大压力水头 $2\,170.0\text{ m}$ 小 15.0 m ,超过管道所承受的工作压力。而阀后的管道压力明显降低,对管道起到显著保护作用。管道负压分布变化也较为明显,集中出现在 PMP1~AV1 段,最大负压为 -98 kPa ,超过规范允许最大值且管道承受的正压和负压均出现在 PMP1~AV1 段,容易造成该管段的破坏。

② 设多功能水泵控制阀+空气阀保护时停泵水锤计算与分析

1#~2#泵站管道设多功能水泵控制阀+空气阀保护时的停泵水锤计算:在1#~2#泵站管道最高点处设置空气阀进行保护,并在1#泵站处设置多功能水泵控制阀进行双重保护,空气阀的进气、出气管直径规格不变。模拟计算结果显示,1#水泵出水管至管道最高点位置段的管段压力水头只是微小波动,瞬时最大压力水头为 $2\,140.0\text{ m}$,比未设置任何保护措施情况下管道承受瞬时最大压力水头 $2\,170.0\text{ m}$ 小 30.0 m ,变化也不大,但仍超过管道所承受的工

作压力。空气阀前至2#泵站段的管道水锤最大水头与仅设置空气阀时相同。在PMP1~AV1段,虽然局部管道的负压减小,但最大负压仍为-98 kPa,超过规范允许最大值。

③ 设缓闭止回阀+空气阀保护时停泵水锤计算与分析

1#~2#泵站管道设缓闭止回阀+空气阀保护时停泵水锤计算:在1#~2#泵站管道最高点处设置空气阀进行保护,并在管网J4点处设置单点缓闭止回阀进行双重保护,空气阀设置在管网凸起段最高位置J7点处不变,空气阀的进气、出气管直径规格不变。模拟结果显示,1#水泵出水管段至设置缓闭止回阀J4(CV-1)点的管道最大压力值下降变化较为明显,缓闭止回阀J4(CV-1)点至最高点J7(AV-1)点的管道最大压力值下降变化较小。水泵出水口至空气阀处管道最大压力值逐渐降低,过缓闭止回阀后管道最大压力水头陡然上升,再减小至与管道水力坡降线相同。该措施中管道最大压力水头约为2 140.0 m,管道最大压力值线与第②种工况明显不同,管道负压出现的情况基本与第①种情况相同。

在上述保护措施的基础上,再在管道J6(CV-2)点处设置一个缓闭止回阀进行多重保护。模拟计算结果显示:1#水泵出水管段至设置缓闭止回阀J4(CV-1)点的管道最大压力值下降变化较为明显,缓闭止回阀J4(CV-1)点至最高点J7(AV-1)点的管道最大压力值下降变化更加明显。水泵出水口至空气阀处管道最大压力值由高逐渐降低,经过多次缓闭止回阀后管道最大压力水头控制在2 030.0 m内,管道最大压力值线与第②种和设置单点缓闭止回阀的工况显著不同,设置多点缓闭止回阀的模拟计算结果显示更为合理。因仅在管道最高处设施空气阀进行保护,1#泵站至AV-1段的管道负压仍为-98 kPa,超过规范允许最大值。

④ 设多功能水泵控制阀+缓闭止回阀+空气阀保护时停泵水锤计算与分析

1#~2#泵站管道设多功能水泵控制阀+缓闭止回阀+空气阀保护时停泵水锤计算:在1#~2#泵站管道最高点处设置空气阀进行保护,并在1#泵站处设置多功能水泵控制阀、在邻近管道最高点处设置缓闭止回阀进行三重保护,多功能水泵控制阀、缓闭止回阀、空气阀规格与前面工况相同。

模拟计算分析结果显示,1#水泵出水管至管道最高点位置的管段压力水头值变化大幅减小,由最初的2 170.0 m降至约2 030.0 m,管道压力水头减小140.0 m。水锤发生时管道承受的水头为1.893 7 MPa,远小于管道所承受的工作压力2.500 MPa,最大程度地保护了管道系统和泵站不被正压破坏,使整个供水系统安全得到保障。

通过前面的工况分析可知,在管路上设置空气阀和缓闭止回阀不仅可以减小管道受到的正压,还可以有效消除管道负压,再通过软件模拟计算,在多重缓闭止回阀+多重空气阀的保护下,管道所受正压基本消除,管道负压也基本消除,如图4所示。

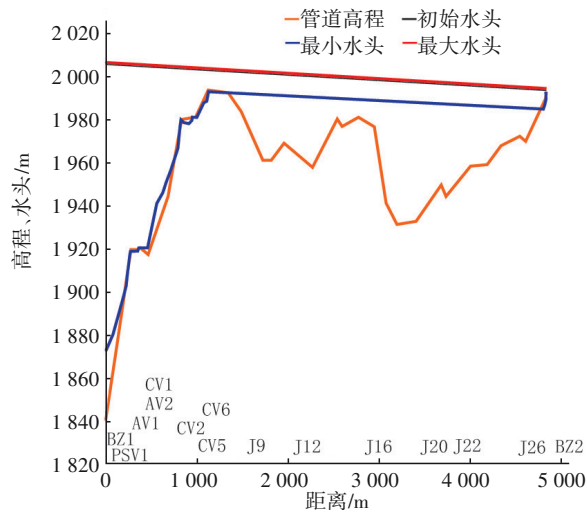


图4 1#~2#泵站管道设多功能水泵控制阀+多重缓闭止回阀+多重空气阀保护时停泵水锤计算

Fig.4 Calculation of pump-stop water hammer in case of setting multi-functional pump control valve + multiple slow-closing check valve + multiple air valve for the pipeline from No.1 pump station to No.2 pump station

2.3 2#泵站至净水厂管道设防护措施

① 2#泵站至净水厂管道设液压气动罐保护时停泵水锤计算与分析

2#泵站至净水厂管道设液压气动罐保护时停泵水锤计算,在2#泵站至净水厂管道最高点处设置液压气动罐对管网进行保护,液压气动罐水箱容积20 m³。断电停泵时液压气动罐后管道正压呈现从高到低的变化,罐后管道压力减小较大,均对管道起到明显保护作用。在该工况下,罐后管道负压基本消除。

结合上述工况,将液压气动罐调至中部管段最

高突起段位置并增大水箱容积至 100 m^3 , 停泵水锤计算结果显示, 水箱容积增大4倍后, 液压气动罐前后的停泵时, 管道最大压力水头明显减小, 但罐前的减小变化十分微弱, 而罐后管道最大压力水头变化较大。通过两种模拟工况计算结果比较可以看出, 设置液压气动罐保护时, 随液压气动罐水箱容积不断增大, 停泵时管道最大压力水头不断减小, 且减小的管道压力水头值不成正比, 而管道在液压罐位置至水泵段正压升高的同时, 也出现负压(达到 -98 kPa), 容易造成该管段破坏。

② 2#泵站至净水厂管道设泵后多功能水泵控制阀+液压气动罐保护时停泵水锤计算与分析

2#泵站至净水厂管道设泵后多功能水泵控制阀+液压气动罐保护时停泵水锤计算(水箱容积 20 m^3), 在泵站及管网设置多功能水泵控制阀和液压气动罐保护时, 管道压力水头值减小的变化较为显著, 管道最大压力水头由未设置任何保护措施情况下的 $2\,455.0 \text{ m}$ 降至 $2\,220.0 \text{ m}$, 减小 235.0 m 。2#泵站处管道高程为 $1\,989.29 \text{ m}$, 水锤发生时管道承受的最大压力值为 2.307 MPa , 在所选管材工作压力 2.500 MPa 范围内。但是 J28-1~J32 段的管道负压仍然较大, 最大达到 -98 kPa , 不满足规范要求。

③ 2#泵站至净水厂管道设液压气动罐+多重缓闭止回阀时停泵水锤计算与分析

2#泵站至净水厂管道设液压气动罐+多重缓闭止回阀时停泵水锤计算见图5。由图5可知, 在泵站及管道上设置液压气动罐和多重缓闭止回阀保护时, 管道压力水头值减小的变化较为显著, 管道最大压力水头由未设置任何保护措施情况下的 $2\,455.0 \text{ m}$ 降至 $2\,165.0 \text{ m}$, 减小 290.0 m 。2#泵站处管道高程为 $1\,989.29 \text{ m}$, 水锤发生时管道承受的最大压力值为 1.757 MPa , 在所选管材工作压力 2.500 MPa 范围内, 即管道能承受断电停泵水锤的最高压力, 在该工况下管道负压基本消除, 有效保障了供水系统的安全运行。

实际水锤防护措施及方法多种多样, 组合形式也很多, 不再一一列举计算。通过以上不同工况、防护设备及方式组合的分析不难看出, 在不采用任何保护措施或单一设备保护的情况下, 断电停泵水锤对管道运行危害最大。防护设施设备的选择、设置形式、设置位置等均对水锤的减小或消除具有重要影响。

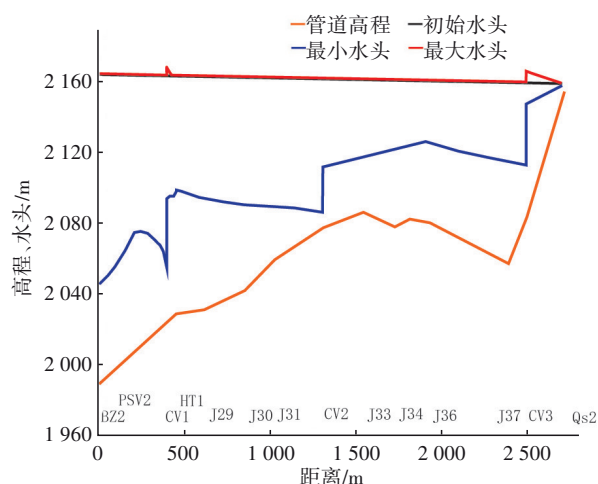


图5 2#泵站至净水厂管道设液压气动罐+多重缓闭止回阀时停泵水锤计算

Fig.5 Calculation of pump-stop water hammer in case of setting hydraulic pneumatic tank + multiple slow-closing check valves for the pipeline from No.2 pump station to the water treatment plant

3 防护技术与设备

常用水锤防护技术分为4类:注水(补水)型、注空气(缓冲)稳压型、泄水降压型和控制压力波动型。常用防护设备:①注水(补水)型设备有单向调压塔、气压罐;②注空气(缓冲)稳压型设备有普通空气阀、复合排气阀;③泄水降压型设备有水锤消除器、水击预防阀、超压泄压阀;④控制压力波动型设备有缓闭止回阀、零流速快闭止回阀、多功能水泵控制阀、压力波动预止阀等;⑤其他还有减压恒压阀、电动调流调压阀、液控蝶阀、管力阀,以及新型水锤防护设备,如恒速缓冲排气阀、喷孔控流阀、箱式双向调压塔。

采用不同防护类型设备的有效组合是降低水锤最大水头的科学方法,但也需要根据工程的实际情况,合理选择防护设备。该项目地处偏远山区,大部分管道沿山地林地敷设,没有现成的公路运输条件,需修建临时道路或采用人工搬运的方式,而且整个管道敷设沿线地势较陡,施工条件较差,因此,计算中虽然选用如2#泵站至净水厂中计算的液压气动罐,且防护效果也较好,但实际存在运输、选址、安装等困难因素,给施工和后期的维护管理带来很大不便,所以实际未选用。

通过各种比较分析,对比经济合理性、施工便捷度、运维成本等,最后选择泵后多功能水泵控制

阀+缓闭止回阀+空气阀和液压气动罐+多重缓闭止回阀的组合形式,有效降低了水锤对供水泵站、管道等的影响,保障了管道、泵房等供水系统的平稳安全运行。防护设施具体布置如图6所示。

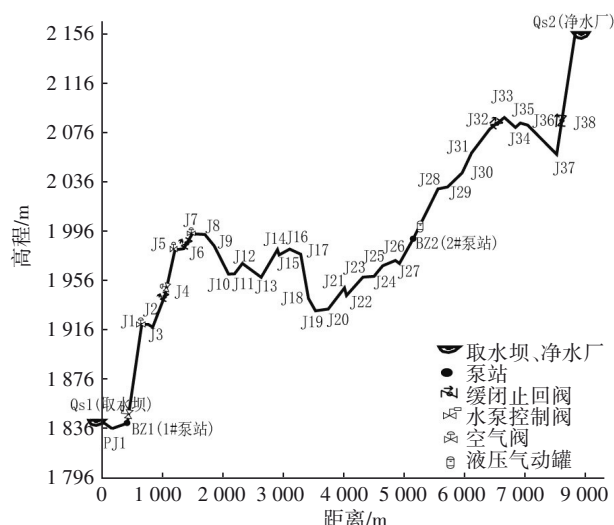


图6 防护设施布置

Fig.6 Schematic diagram of the layout of protective facilities

4 结语

长距离高落差输配水管网中,水锤对管道的危害显而易见,对水锤的计算和模拟分析十分重要,它关系到管材的合理选择、水锤防护措施的优化配置,以及供水管道的平稳运行,也是长久保障供水安全的重要因素之一。结合该工程的实际情况,最后在模拟计算的多种工况下,通过技术经济比较,考虑用地、施工、运维等成本,合理选择多功能水泵控制阀+缓闭止回阀+空气阀和液压气动罐+多重缓闭止回阀以及组合形式的水锤防护措施,是项目成功落地、运行的又一关键因素。

参考文献:

[1] 中国工程建设标准化协会. 城镇供水长距离输水管

(渠)道工程技术规程:CECS 193:2005[S]. 北京:中国计划出版社,2006.

China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Long Distance Water Transmission Pipeline Engineering of Urban Water Supply: CECS 193: 2005 [S]. Beijing: China Planning Press, 2006 (in Chinese).

[2] 金锥. 停泵水锤及其防护[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2004.

JIN Z. Shut Down Water Hammer and Its Protection [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004 (in Chinese).

[3] 王彤. 长距离输水管道水锤防护技术措施[D]. 西安:长安大学,2024.

WANG T. Technical Measures of Water Hammer Protection for Long Distance Water Pipeline [D]. Xi'an: Chang'an University, 2024 (in Chinese).

[4] 王俊,马平安,崔红军,等. 西安市某引水工程长距离重力输水管道设计[J]. 中国给水排水,2021,37(22): 84-88.

WANG J, MA P A, CUI H J, et al. Design of long-distance gravity conveyance pipeline for a water diversion project in Xi'an [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22): 84-88 (in Chinese).

[5] 寇殿良,刘存莉,王学攀. 长距离大管径跨海供水管道水锤防护设计[J]. 中国给水排水,2023,39(22): 84-88.

KOU D L, LIU C L, WANG X P. Design of water hammer protection for long distance and large diameter cross-sea water supply pipeline [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(22): 84-88 (in Chinese).

作者简介:樊波(1982—),男,云南昭通人,本科,高级工程师,从事给排水设计研究相关工作。

E-mail: 1229274790@qq.com

收稿日期:2024-10-23

修回日期:2025-01-25

(编辑:衣春敏)