

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 11. 009

调流阀在倒虹吸管线中的位置对水锤的影响

刘有亮¹, 李 鹏¹, 胡斌超¹, 卢默金², 陶承军¹, 白万军¹,
李朝阳¹, 范 征¹, 廖敏泉¹

(1. 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 中南大学
能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 长距离高落差倒虹吸管线具有V字型特点,调流阀在管线的不同位置会对管线系统压力和工程投资产生影响。以甘肃某长距离高落差的倒虹吸为例,在管线选取5个调流阀位置,借助HAMMER软件分别进行开关阀水锤模拟分析。结果表明,调流阀设置在位置2~5,管线压力基本都满足规范要求。在输水管径较小及末端出水池具有调节能力时将调流阀设置在倒虹吸管线前段可以显著降低阀后管线承压等级,减少工程投资。调流阀设置在最低点及管线后段对水锤升压影响均很小,管线最低点水锤防护设备不宜设置过多。

关键词: 倒虹吸; 调流阀; 最高压力; 最低压力; 水锤

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)11-0065-05

Impact of Regulating Valve's Position on Water Hammer in Inverted Siphon Pipeline

LIU You-liang¹, LI Peng¹, HU Bin-chao¹, LU Mo-jin², TAO Cheng-jun¹,
BAI Wan-jun¹, LI Zhao-yang¹, FAN Zheng¹, LIAO Min-quan¹

(1. Gansu Water Resources and Hydroelectric Investigation & Design Institute Co. Ltd., Lanzhou 730000, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Given that the long-distance and high-drop inverted siphon pipeline exhibits V-shaped characteristics, the placement of regulating valves at various positions along the pipeline can significantly influence both the pressure distribution within the pipeline system and the overall project investment. Five regulating valve positions were strategically selected along a long-distance and high-drop inverted siphon project in Gansu Province, and a comprehensive water hammer simulation analysis was conducted for the on-off valve operation using HAMMER software. When the regulating valve was set within the range of positions 2 to 5, the pipeline pressure generally complied with the specification requirements. When the pipe diameter was relatively small and the terminal outlet pool possessed regulating capacity, positioning the regulating valve in the front section of the inverted siphon pipeline could effectively decrease the pressure level of the pipeline downstream of the valve, thereby reducing overall project costs. The regulating valve located at the lowest point and rear section of the pipeline had minimal impact on the pressure surge caused by water hammer. Therefore, the installation of water hammer protection equipment at the lowest point of the pipeline should be carefully evaluated to avoid over-protection.

Key words: inverted siphon; regulating valve; maximum pressure; minimum pressure; water hammer

重力流输水管线多数都是从高处自流至低处,在管线末端设置调流阀进行调压控流,同时在整个输水管线系统参与水锤防护。李建宇等^[1]分析了57.6 km的长距离重力流末端阀门关闭水锤,发现末端关阀危害较大,通过合理布置空气阀、超压泄压阀等水锤防护设备可将水锤危害降至管道承受范围。杨瑞虎等^[2]研究了给水管道末端关阀水锤,提出末端关阀水锤对工程危害极大,可采取多种水锤防护设备预防末端关阀水锤。谢杰等^[3]考察了长距离重力流工程调节阀启闭产生的正负水锤,提出采用在线阀和末端阀组合可控制负压和正压,减少工程投资。王俊等^[4]探讨了长距离输水工程线路、管径、末端阀门关阀时间等对水锤的影响,发现延长关阀时间等保护措施可以使管线运行更安全。黄毅等^[5]研究了长距离输水工程末端关阀方式对水锤的影响,得出两阶段关阀是管线末端关阀的最佳选择。郭伟奇等^[6]分析了长距离重力流输水系统水锤防护措施,认为通过优化关阀规律和设置超压泄压阀能使工程安全运行。以上研究都是在管线末端设置调流阀进行分析。长距离高落差倒虹吸也属于重力流的一种,管线呈V字型,调流阀存在设置在管线前端、底部和末端的可能,其对整个管线系统水锤压力及工程投资的影响需做进一步分析。

1 工程项目概况

工程项目位于甘肃,其利用某水库引水,新建输水主管道1条,线路总长约为39 km,设计引水流量约为0.73 m³/s,输水管径为800~1 100 mm,管线首段和末端均为水池,上游水池水位为2 822.70 m,下游水池水位为2 725.25 m。设计管线流量时,阀门开度约为0.6,阀门几乎不进行调节,仅在小流量运行时进行调节。由于输水线路较长,管线最低处静压值较高,流量调节过程及开关阀都会引起明显的水锤效应^[7]。

2 水锤分析

选取5个调流阀位置进行研究,如图1所示。位置1的高程高于末端水池水位,其余调流阀位置高程均低于末端水池水位。位置2和位置4基本在一个高程,位置3位于管线最低部,位置5紧邻末端

出水池。以上5个位置的调流阀参数见表1(口径均为400 mm,全行程开/关阀时间均为500 s)。

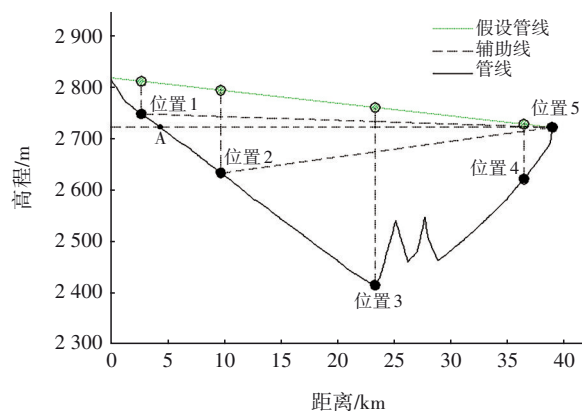


图1 调流阀位置示意

Fig.1 Schematic diagram of regulating valve's position

表1 调流阀参数

Tab.1 Parameters of regulating valve

调流阀位置	桩号	管中心高程/m	数量/台	压力等级/MPa	阀前静压/m	阀前动压/m
位置1	K2+800	2 750.20	2	1.0	72.6	≥65.5
位置2	K9+800	2 634.20	2	4.0	188.5	≥163.8
位置3	K23+390	2 414.30	2	6.4	408.4	≥347.0
位置4	K36+228	2 616.40	2	4.0	206.3	≥110.4
位置5	K39+236	2 722.50	2	1.6	100.2	≥2.8

2.1 位置1工况分析

将调流阀设置在位置1,分析设计流量工况时关阀和开阀情况。结果表明,位置1的最大和最小压力分别为75、-10 m,压力升高比(最大压力与静压之比)为1.03;最低点K23+390处最大和最小压力分别为345、311 m,压力升高比为0.84。调流阀设置在位置1时,整条管线系统最大压力没有明显波动,调流阀前压力升高也不明显,阀后最高压力线基本与正常运行时水力坡度线重合。但是关阀后,阀后局部管线出现了负压,其原因是阀后管线呈迅速向下趋势,水流惯性造成阀后局部管线被拉断。从图1可以看出,阀门完全关闭后,位置1至A点这段管线为空管,其中A点位置桩号为K4+466,管中心高程为2 722.50 m。在HAMMER软件中,当阀后管线存在空管时无法模拟开阀过程。在进行有压输水管线设计过程中,停水时整个管线系统应

保持满管带压,而将调流阀设置在位置1时,调流阀关闭后局部管线为空管,不利于管线下次开启运行,开启运行将会产生较为明显的压力波动。经过上述分析,不推荐将调流阀设置在位置1(调流阀安装位置高程高于末端出水池水位)。

2.2 位置2工况分析

将调流阀设置在位置2,分析设计流量工况时关闭和开阀情况。经计算,位置2关闭/开阀的最大压力为197/189 m,最小压力为167/167 m,压力升高比为1.05/1.0;最低点K23+390处最大压力为345/346 m,最小压力为295/313 m,压力升高比为0.84/0.84。调流阀设置在位置2时,开阀和关阀后整个管线系统最大压力、最小压力均满足规范要求。调流阀后管线的压力升高不明显,管线最低点最大压力为345 m,小于该点静压值408.4 m,由于阀门关闭后将阀门上游管线静压阻断,在调流阀可靠的情况下,将调流阀设置在位置2可以降低阀后管材承压等级,从而减少管材经济成本。

然而,将调流阀设置在位置2时要注意调流阀关闭的时间,虽然位置2的高程比末端出水池高程低,但通过分析不同关闭时间发现,一旦关闭时间过快,阀后管线依然会被拉断。当调流阀关闭时间小于150 s时,关阀后管线拉断就开始发生了,虽然阀前和阀后最大压力值均满足规范要求,但关阀后整条管线系统最大压力振荡较为明显,见图2。

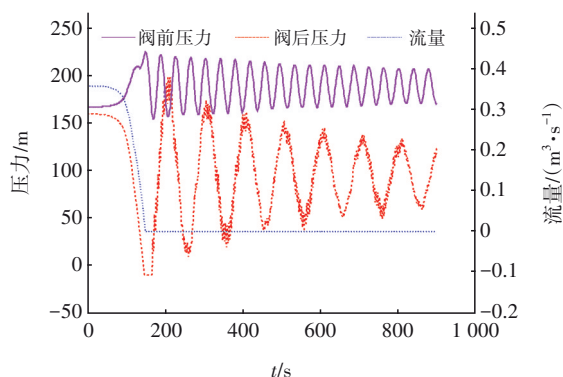


图2 压力和流量变化曲线

Fig.2 Variation curves of pressure and flow rate

负压发生从第145秒开始,也就是阀门即将完全关闭时负压开始发生,持续时间将近22 s,对管线安全运行有影响。从图2还可以发现,由于阀后产生负压造成阀后压力振荡幅度较阀前明显。

将调流阀设置在位置2,由于调流阀下游管线

较长,阀门关闭后下游管道水流会因惯性继续流动,流入末端出水池后再流入管道,一段时间内会往复振荡。关阀后进入末端水库流量的变化如图3所示。可以发现,300 s关阀后流入末端水库的流量振荡较为明显。综上所述,将调流阀设置在位置2,可以减少阀门和管线的经济成本。需要注意的是,应尽量延长开关阀时间,以防关阀后管线被拉断,且末端出水池应具有一定的调节能力。

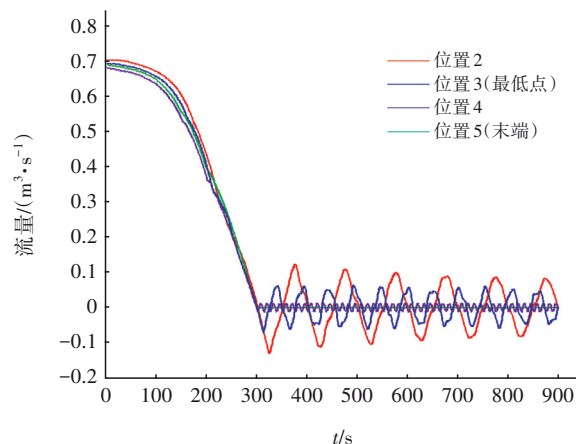


图3 关阀后进入末端水库流量的变化

Fig.3 Change in flow rate of entering the end reservoir after closing the valve

2.3 位置3工况分析

将调流阀设置在位置3,分析设计流量工况时关闭和开阀情况。经计算,位置3(最低点)关闭/开阀的最大压力为434/407 m,最小压力为298/313 m,压力升高比为1.06/1.0。调流阀设置在位置3时,开阀和关阀后整个管线系统最大和最小压力均满足规范要求。管线最低位置的最大压力为434 m,压力升高不明显。从图3发现,调流阀设置在位置3(最低位置)相比位置2流入和流出末端水库的流量振荡弱一点,但还应考虑末端水库具有一定的调节能力。综上所述,将调流阀设置在位置3后调流阀及调流阀配套附属设备的压力等级均较高,设备成本明显增加,且末端水库应具有调节能力。

2.4 位置4工况分析

将调流阀设置在位置4,分析设计流量工况时关闭和开阀情况。结果表明,最低点K23+390处关闭/开阀的最大压力为432/407 m,最小压力为351/377 m,压力升高比为1.06/1.0;位置4最大压力为241/206 m,最小压力为110/129 m,压力升高比为1.17/1.0。从计算结果可以看出,调流阀设置在位

置4时,开阀和关阀后整个管线系统最大和最小压力均满足设计规范要求。压力包络线如图4所示。可知,关阀最低压力线与关阀起始压坡线基本重合,开阀最高压力线与开阀起始压坡线完全重合,最大压力和最小压力在关阀和开阀过程中均没有压力波动,整条管线系统水力过渡过程很稳定。管线最低处最高压力为432 m,压力升高幅度较小。从图3可以发现,调流阀设置在位置4时,关阀后流入末端水库的流量曲线振荡很小。经过上述分析发现,将调流阀设置在位置4整个管线系统的最高和最低压力在合理范围内,但管线经济成本比位置2方案高。

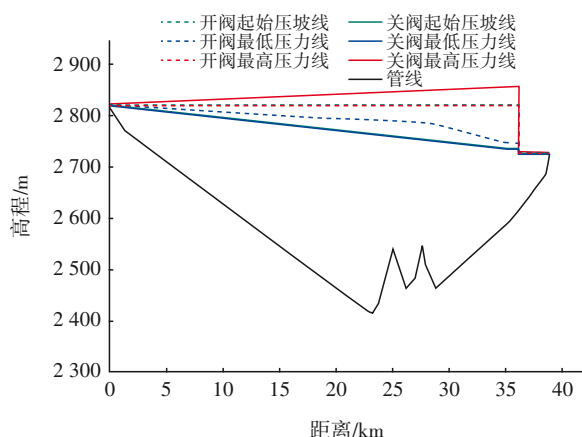


图4 压力包络线示意

Fig.4 Schematic diagram of pressure envelope

2.5 位置5工况分析

将调流阀设置在位置5,分析设计流量工况时关阀和开阀情况。经计算,最低点K23+390处关阀/开阀的最大压力为433/407 m,最小压力为350/350 m,压力升高比为1.06/1.0;位置4最大压力为256/218 m,最小压力为132/131 m,压力升高比为1.24/1.05,位置5(末端)最大压力为140/101 m,最小压力为13/13 m,压力升高比为1.4/1.0。可以看出,将调流阀设置在位置5时,开阀和关阀后整个管线系统最大和最小压力均满足设计规范要求,但最大压力升高比相对其他位置方案均偏高。压力包络线如图5所示。可知,关阀最低压力线与关阀起始压坡线完全重合,开阀最高压力线与开阀起始压坡线完全重合,最大压力和最小压力在关阀和开阀过程中均没有压力波动,整条管线系统水力过渡过程很稳定。管线最低处最高压力为433 m,压力升高幅度很小。

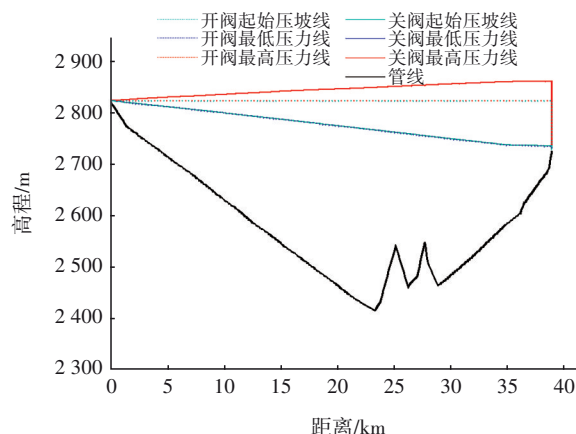


图5 压力包络线示意

Fig.5 Schematic diagram of pressure envelope

从图3可知,调流阀设置在位置5时,关阀后流入末端水库的流量基本为零。综上所述,将调流阀设置在位置5对末端出水池水位没有影响,该位置相比位置4方案管线压力整体略偏高,但也在合理范围内。开关阀时间应适当延长^[8],必要时采取分段折线开关阀^[9-10]。末端水池水位较低时需要复核调流阀的安装高程,气蚀条件不满足时降低调流阀安装高程或提高末端出水池水位。

3 结论

① 长距离高落差倒虹吸管线调流阀设置位置高程低于末端出水池水位高程一定裕量后,水力过渡过程结果基本都合理可行,可视工程特点择优选取。

② 通常调流阀设置在自流管线或倒虹吸末端,将调流阀设置在倒虹吸管线前段(位置2)既能满足压力要求,又可降低调流阀后管线承压等级,从而减少工程投资。在输水管径较小、末端出水池具有调节能力时该方案(位置2)最佳,应作为首选。

③ 调流阀设置在倒虹吸管线最低点及管线后段时,最低位置水锤升压较小,水锤防护设备可适当减少。

④ 调流阀设置在末端(位置5)为较常规的设计思路,关阀引起的水锤升压在几种方案中最高,调流阀开关时间要求也较长。

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] 杨瑞虎,王彤,尚渝钧,等. 供水管网气液两相流关闭水锤[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(6): 596-602.
- YANG Ruihu, WANG Tong, SHANG Yujun, *et al.* Water hammer of gas-liquid two-phase flow shutoff valve in pipe network [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(6): 596-602 (in Chinese).
- [3] 谢杰,黄伟,李火坤,等. 长距离重力输水系统的联合阀组水力控制研究[J]. *给水排水*, 2023, 49(4): 104-112.
- XIE Jie, HUANG Wei, LI Huokun, *et al.* Study on hydraulic control of combined valve group in long-distance gravity flow water delivery system[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(4): 104-112 (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 Jun, MA Ping'an, CUI Hongjun, *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] 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] 郭伟奇,吴建华,李娜,等. 长距离重力输水系统水锤防护措施研究[J]. *中国农村水利水电*, 2018(11): 124-126, 130.
- GUO Weiqi, WU Jianhua, LI Na, *et al.* Research on water hammer protection measures for long-distance gravity flow water delivery systems [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(11): 124-126, 130 (in Chinese).
- [7] 王祺武,李志鹏,朱慈东,等. 重力输水管路阀门调节与水锤控制分析[J]. *流体机械*, 2020, 48(6): 38-43, 50.
- WANG Qiwu, LI Zhipeng, ZHU Cidong, *et al.* Analysis on valve regulation and water hammer control of gravity flow pipeline[J]. *Fluid Machinery*, 2020, 48(6): 38-43, 50(in Chinese).
- [8] 张雷,李明,佟继有,等. 长距离重力输水管道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).
- [9] 王政平,贾东远,马追. 长距离重力输水工程关阀方案优化研究[J]. *人民黄河*, 2021, 43(4): 142-146.
- WANG Zhengping, JIA Dongyuan, MA Zhui. Optimization of valve closing scheme for long-distance gravity flow water delivery project [J]. *Yellow River*, 2021, 43(4): 142-146(in Chinese).
- [10] 赵斌,胡斌超,刘有亮,等. 长距离泵站水锤分析及管线布置对水锤的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2024, 42(11): 1112-1119.
- ZHAO Bin, HU Binchao, LIU Youliang, *et al.* Analysis of water hammer phenomena in long-distance pumping stations and impact of pipeline configuration on its occurrence [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2024, 42(11): 1112-1119 (in Chinese).

作者简介:刘有亮(1985-),男,甘肃兰州人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水利和水电工程水力过渡过程、抽水蓄能电站水力机械设计。

E-mail:94536900@qq.com

收稿日期:2024-11-22

修回日期:2025-02-05

(编辑:任莹莹)