

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 05. 007

基于遗传算法的重力流输水管道关阀方案优化

马熠阳^{1,2}, 李红艳^{1,2}, 崔建国^{1,2}, 张峰^{1,2}, 史文韬^{1,2}, 王有理³

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600; 2. 山西省市政工程研究生教育创新中心, 山西 晋中 030600; 3. 山西山安碧泉海绵城市科技有限公司, 山西 太原 030032)

摘要: 为防止长距离重力流输水管道水锤发生,减少水锤危害,以山西省某市长距离重力流输水工程(输水管道长度为18.492 km,水位高差为84 m)为例,建立了水力瞬态计算模型,基于该模型采用遗传算法开发了关阀曲线及气阀布置方案的优化程序。分别对一~四阶段关阀曲线及气阀布置方案进行了优化计算,并对不同关阀方案下程序运行效率和水锤防护效果进行了对比分析。结果表明,多阶段关阀方案明显优于一阶段关阀方案;多阶段方案中,三阶段关阀方案的遗传算法优化成功率更高,对水锤的防护效果更好,气阀布置的数量明显减少。

关键词: 长距离输水; 重力流; 水锤防护; 遗传算法; 关阀方案

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)05-0043-07

Optimization of Valve-closing Scheme in Gravity Flow Pipeline Based on Genetic Algorithm

MA Yi-yang^{1,2}, LI Hong-yan^{1,2}, CUI Jian-guo^{1,2}, ZHANG Feng^{1,2}, SHI Wen-tao^{1,2}, WANG You-li³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China; 2. Innovation Center for Postgraduate Education in Municipal Engineering of Shanxi Province, Jinzhong 030600, China; 3. Shanxi Shan'an Biquan Sponge City Technology Co. Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: This paper established a hydraulic transient calculation model to develop the optimization program of valve-closing curve and air valve layout scheme by using genetic algorithm in a long-distance gravity flow water delivery project in a city of Shanxi Province, so as to prevent the occurrence of water hammer and reduce its harm. The length of water pipeline was 18.492 km, and the height difference of water level was 84 m. The one-stage, two-stage, three-stage and four-stage valve-closing curve and the air valve layout scheme were optimized respectively, and the program efficiency and water hammer prevention performance under different valve-closing schemes were compared. The multi-stage valve-closing scheme was obviously better than the one-stage valve-closing scheme. Among the multi-stage valve-closing schemes, the genetic algorithm optimization success rate of

基金项目: 山西省科技成果转化引导专项(201904D131065); 山西省重点研发计划(社会发展领域)项目(201803D31046)

通信作者: 李红艳 E-mail: lhy3162@126.com

the three-stage valve-closing scheme was higher, demonstrated better water hammer prevention performance, and significantly reduced the number of air valve.

Key words: long-distance water delivery; gravity flow; water hammer protection; genetic algorithm; valve-closing scheme

长距离重力流输水工程是解决我国部分地区淡水资源空间分布不均问题的有效手段,然而不合理的末端阀门关闭方案则是导致出现水锤、危害供水系统安全的重要原因之一。国内外专家对关阀水锤防护方案进行了大量研究,赵晓磊^[1]对北方某供水工程重力流部分进行了两阶段关阀措施与超压泄压阀的联用研究,保证了管道的安全运行。石硕等^[2]通过在管线上布置阀门并控制末端阀门关阀时间,消除了管线负压工况。在水锤防护设备各项参数优化方面,针对高山景区供水管线,赵星明等^[3]通过正交实验法确定了水泵出口处蝶阀两阶段关阀时间和关阀度。Moghaddas等^[4]提出了一种选择管道参数与水锤防护设备的优化模型,采用遗传算法对模型进行优化后可解决停泵水锤问题。Yazdi等^[5]将神经网络与进化算法(EA)、差分进化算法(DE)相结合,求解出输水管道中水锤控制装置的最优尺寸和位置。Skulovich等^[6]采用拟牛顿算法和遗传算法分析了配水管网关阀水锤问题,并对关阀曲线进行了优化。

正交实验、遗传算法和神经网络等方法在水锤防护设备具体参数的优化过程中得到了普遍应用,但是在关阀曲线优化问题上应用较少。针对长距离输水工程关阀曲线优化问题,目前普遍采取的设计方法有两种:经验法和算法优化法。结合经验的枚举或正交实验法计算次数有限、代表性差,不易得到全局最优方案;而基于智能优化算法的设计方法对多阶段关阀方案选取最佳阶段数的研究尚属空白。

笔者针对上述问题,编写了基于特征线法的水力瞬态计算模型,采用遗传算法分别对多阶段关阀曲线与气阀联用的水锤防护方案进行优化计算。首次寻找到一套在保证效果良好的情况下,通过选取关阀曲线最佳阶段数减少遗传算法目标函数维度、缩小搜索空间、降低优化复杂度、提高计算成功率的优化方法,并得到了优化后关阀曲线的总体特征与规律,旨在为长距离重力流输水管道水锤防护

方案的确定提供参考。

1 水锤计算的基本原理

1.1 水锤计算的特征线法

水锤计算的基本微分方程包括连续性方程和运动方程,分别见式(1)和式(2)。

$$\bar{v} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \bar{v} \sin \theta = 0 \quad (1)$$

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\lambda \bar{v} |\bar{v}|}{2D} = 0 \quad (2)$$

式中: $H=Z+P/(\rho g)$,其中 Z 为管道轴线高程(m), P 为压力(Pa), ρ 为液体密度(kg/m^3), g 为重力加速度(m/s^2); x 为管道沿轴线方向的长度,m; a 为管道中水锤的波速,m/s; t 为瞬变时间,s; θ 为管道轴线与水平面的夹角,°; \bar{v} 为管道中流体的平均流速,m/s; λ 为沿程阻力系数; D 为管道内径,m。

通过特征线法对基本微分方程进行变换和简化,可以得到易于编入MATLAB的相容性方程组,具体见式(3)、(4)。

$$C^+: H_i = C_P - BQ_i \quad (3)$$

$$C^-: H_i = C_M + BQ_i \quad (4)$$

由此可得:

$$H_i = \frac{C_P + C_M}{2} \quad (5)$$

$$Q_i = \frac{C_P - C_M}{2B} \quad (6)$$

式中: B 、 C_P 、 C_M 为计算系数,见式(7)~(9)。

$$B = \frac{a}{gA} \quad (7)$$

$$C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_{i-1} |Q_{i-1}| \quad (8)$$

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_{i+1} |Q_{i+1}| \quad (9)$$

式中: A 为管道横截面积, m^2 ; f 为阻力系数; Δx 为管路的距离步长,m; H_i 为此时刻第 i 节点的水头,m; Q_i 为此时刻第 i 节点的流量, m^3/s ; H_{i-1} 、 H_{i+1} 分别为上一时刻第 $i-1$ 和第 $i+1$ 节点的水头,m; Q_{i-1} 、 Q_{i+1} 分别为上一时刻第 $i-1$ 和 $i+1$ 节点的流量, m^3/s 。

1.2 基本边界条件

当水池面积远大于管道面积时,暂态过程中的水量变化对水池水位的影响可以忽略不计。若上、下游水池的水位分别为 H_{R1} 和 $H_{R(N+1)}$,则管道起点和终点的节点水头分别为 $H_1=H_{R1}$ 和 $H_{N+1}=H_{R(N+1)}$ 。为满足设计流量的要求,在管道终点安装流量控制阀,稳态运行时管道的流量维持 Q_0 不变。

关阀操作会导致管路局部压力降低,进而有可能产生断流弥合水锤,提前在这些位置布置气阀可以有效防止断流弥合水锤现象的发生。当节点压强小于大气压时,气阀进气,水柱断流,节点均维持在当地压强不变。当气囊长度开始缩短时,关闭气阀,根据理想气体状态方程,气囊被压缩。

2 模型及求解方法

采用MATLAB编制水锤计算模型和遗传算法优化程序。遗传算法常用于解决单因素或多因素条件下的最优解,相比于传统的枚举法、梯度下降法等最优化算法,其具有收敛速度快、更容易避免局部最优解的优势。

2.1 决策变量

决策变量是遗传算法中的自变量,本研究将遗传算法的决策变量定义为不同的关阀程序。对不同关阀变量的描述如图1所示。以图1(b)为例,在该多阶段关阀方案中, t_c 为总关阀时间,因此选取拐点横坐标 $t_1 \sim t_3$ 、纵坐标 $y_1 \sim y_3$ 共6个决策变量。

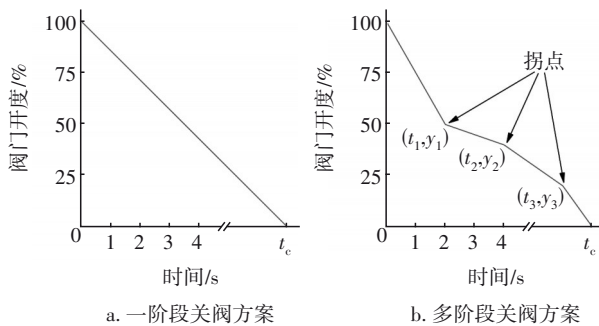


图1 对不同关阀方案变量的描述

Fig.1 Description of variables for different valve-closing schemes

2.2 目标函数

为了既能满足水锤防护要求,又尽量降低管内压力波动,将目标函数设置为:

$$F = \text{Fitness} + PF_1 + PF_2 \quad (10)$$

式中: Fitness 为适应度; PF_1 、 PF_2 分别为最大水锤升压约束函数和最小水锤降压约束函数,当所有

节点的水头均在允许范围内时,约束函数 PF_1 、 PF_2 均为0。

通过设置合适的惩罚系数,遗传算法可以在演化过程中规避不满足约束条件的方案,其中:

$$\text{Fitness} = \sum_{i=1}^{N+1} [H_{\max}(i) - H_{\min}(i)] \quad (11)$$

$$PF_1 = M_1 \cdot \sum_{i=1}^N \max[0, H_{\max}(i) - H_{a,\max}(i)] \quad (12)$$

$$PF_2 = M_2 \cdot \sum_{i=1}^N \max[0, H_{a,\min}(i) - H_{\min}(i)] \quad (13)$$

式中: i 为节点编号, $i=1, 2, 3, \dots, N+1$; $H_{a,\max}(i)$ 、 $H_{a,\min}(i)$ 分别为管线各节点可以承受的最大和最小水头, m ; M_1 、 M_2 分别为对应约束条件的惩罚系数; $H_{\max}(i)$ 、 $H_{\min}(i)$ 分别为管线各节点模拟过程中出现的最大和最小水头, m 。

2.3 求解方法

选取合适的种群规模将显著影响遗传算法运行效率。经前期预实验,最终选定遗传算法的种群规模为50,选择优秀个体方式为轮盘赌选择法,交叉方式为算术交叉,变异方式为非统一变异函数,演化代数50代。

3 工程案例

3.1 工程概况

以山西省某市引黄入晋长距离重力流输水工程为例,水厂供水规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,双管并联输水,单管正常输水量为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,输水管全长为18 492 m,上游水库水位为1 126 m,进水口高程为1 114.5 m,下游水池水位为1 042 m,出水口高程为1 037 m。管道采用粗糙系数为0.018的钢筋混凝土管,壁厚为60 mm,水锤波速为1 111.21 m/s,管道的总平面图与纵剖面图如图2所示。

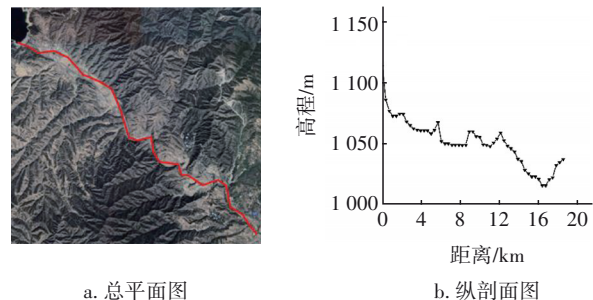


图2 供水管线的总平面图与纵剖面图

Fig.2 General plan and longitudinal section of water supply pipeline

管道总分段数为52,管道末端设置流量调节阀。为满足经济流速的要求,根据《给水工程》(第3版),将管径设置为DN600,稳态时管道流速为1.02 m/s,水力坡降为0.209 2%,分别以管道中心线以上200 m和以下2 m作为允许最大和最小水头线。从保证长距离输水工程安全运行的角度考虑,对关阀水锤的防护方案进行了优化。

3.2 多阶段关阀方案的调节效果

对于长距离重力流输水工程,较短的关阀时间将会导致管道内瞬时压力激增,进而影响系统安全,较长的关阀时间则与工程实际情况不相符。为对比不同关阀方案对水锤的防护效果,分别以一阶段、两阶段、三阶段和四阶段关阀方案对管线的水力过渡过程进行模拟。保持总关阀时间恒定(35 s),总模拟时长为1 000 s,关阀曲线的决策变量体现为各拐点的位置。关阀方案见表1。关阀曲线的决策变量体现为各拐点的位置,模拟结果表明,一阶段关阀方案在第35个节点处会调用气阀,其余方案无需调用气阀;一~四阶段关阀方案中,超出水头限制的节点数分别为4、3、1、1。相比于一阶段的关阀方案,多阶段关阀方案可以明显降低超出水头限制节点的数目,减少调用气阀的数目,对水锤效应防护有明显作用。

表1 关阀方案

Tab.1 Valve-closing schemes

关阀方案		关阀曲线拐点位置				
		关阀开始	拐点一	拐点二	拐点三	关阀结束
一阶段关阀	历时/s	0	—	—	—	35
	开度/%	100	—	—	—	0
两阶段关阀	历时/s	0	10	—	—	35
	开度/%	100	60	—	—	0
三阶段关阀	历时/s	0	10	25	—	35
	开度/%	100	50	35	—	0
四阶段关阀	历时/s	0	10	20	30	35
	开度/%	100	50	35	20	0

3.3 基于遗传算法的关阀方案优化

虽然多阶段关阀方案对于水锤效应的防护有显著作用,但仍然有部分节点水头超出最大、最小水力包络线的范围。为进一步探究阀门动作特性对水锤防护效果的影响,分别对两阶段、三阶段和四阶段关阀方案使用遗传算法进行优化,并重复

100次。其中开始关阀时刻设置为0 s,阀门完全关闭时刻设置为35 s,分析0~1 000 s之间的水力瞬态变化情况,基于3种关阀方案的优化程序最优解如表2所示。模拟结果表明,在两阶段关阀方案的最优解中,第35个节点会调用气阀,超出水头限制的节点数为1;其他关阀方案的最优解均无需调用气阀、无超出水头限制的节点。每种方案的成功率、平均适应度、平均超出水头限制节点数和平均调用气阀数见表3。可知,三阶段关阀方案运行成功率最高(高达64%),平均超出水头限制节点数最少,平均调用气阀数也最少。

表2 基于3种关阀方案的优化程序最优解

Tab.2 Best solution of optimization program based on three kinds of valve-closing schemes

关阀方案		最优关阀曲线拐点位置				
		关阀开始	拐点一	拐点二	拐点三	关阀结束
两阶段关阀	历时/s	0	4.18	—	—	35
	开度/%	100	83.85	—	—	0
三阶段关阀	历时/s	0	4.64	29.41	—	35
	开度/%	100	59.13	47.26	—	0
四阶段关阀	历时/s	0	5.13	15.18	30.33	35
	开度/%	100	46.43	45.41	41.97	0

表3 基于3种关阀方案的优化程序性能评价

Tab.3 Performance evaluation of optimization program based on three kinds of valve-closing schemes

关阀方案	成功率/%	平均适应度	平均超出水头限制节点数	平均调用气阀数
两阶段	0	5 418.161 6	2.70	0.58
三阶段	64	5 639.419 3	0.36	0.30
四阶段	39	5 740.862 3	1.22	0.59

从表3还可以发现,两阶段关阀方案平均适应度略好于三阶段,但是由于其成功率为0,在供水安全方面得不到保证。与两阶段关阀方案相比,三阶段关阀方案优化以后的平均适应度略高,但是对应的最大、最小水力包络线的变化保证了水锤防护系统的安全。与四阶段关阀方案相比,虽然三阶段关阀方案最优解的适应度略高,但是在平均适应度、计算成功率和平均调用气阀数量方面均有优势。因此,基于三阶段关阀方案的遗传算法优化程序具有较好的求解能力,可以更好地降低供水系统中输

水管道的建设成本。

3.4 数据分析

基于两阶段关阀方案的遗传算法优化结果如图3所示。在两阶段关阀方案的情况下,优化后的关阀曲线普遍呈现“先快关,后慢关”的趋势。但关阀曲线的变化对水力包络线的影响效果有限。针对该长距离重力流输水工程案例,两阶段关阀方案对水锤消除的效果不明显。

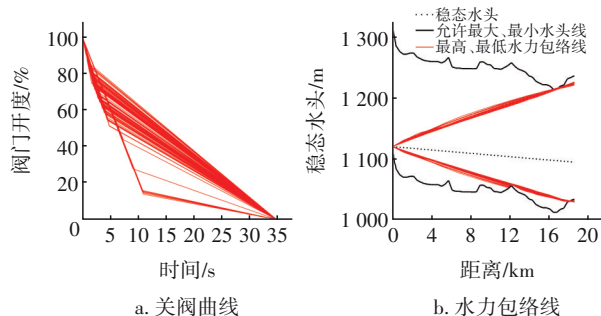


图3 基于两阶段关阀方案的遗传算法优化结果

Fig.3 Genetic algorithm optimization results based on two-stage valve-closing scheme

使用K-Means算法对成功优化后的三阶段关阀方案进行聚类分析,聚类结果及其对应的水力包络线如图4所示。

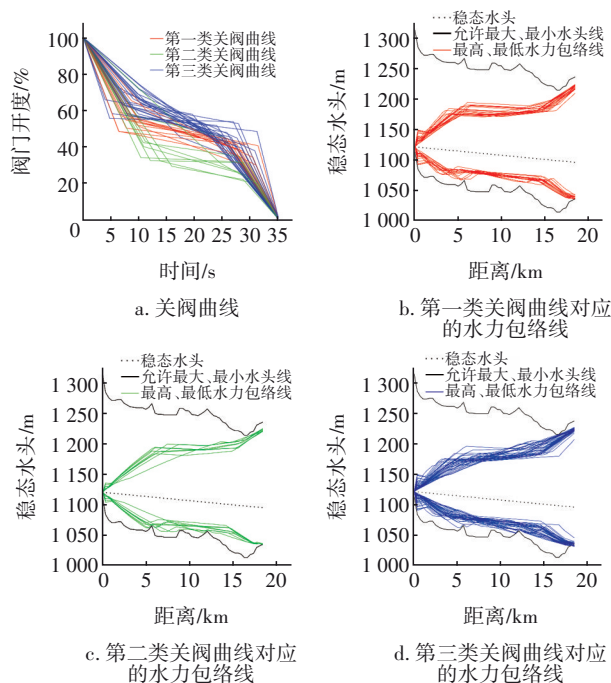


图4 基于三阶段关阀方案的遗传算法优化结果

Fig.4 Genetic algorithm optimization results based on three-stage valve-closing scheme

按照拐点位置的不同,关阀曲线共分为三类,

均表现为“前期快关,中期慢关,后期快关”的特征。由图4可以看出,第一、三类关阀曲线的拐点一出现在阀门启动以后4~12 s,第二类关阀曲线出现在10~16 s;第一、第二类关阀曲线的拐点二均出现在阀门启动以后24~32 s,第三类关阀曲线的拐点二出现在阀门启动以后19~31 s。第一类关阀曲线的慢关阶段阀门开度为25%~65%,第二类关阀曲线为20%~45%,第三类关阀曲线为35%~75%。三类关阀曲线对应的水力包络线均不超过允许最大、最小水头线。工程实践过程中,可以根据关阀曲线拐点的分布范围筛选关阀方案,避免水锤现象对管路的危害。

对成功优化以后的四阶段关阀方案进行了聚类分析,聚类结果及其对应的水力包络线如图5所示。

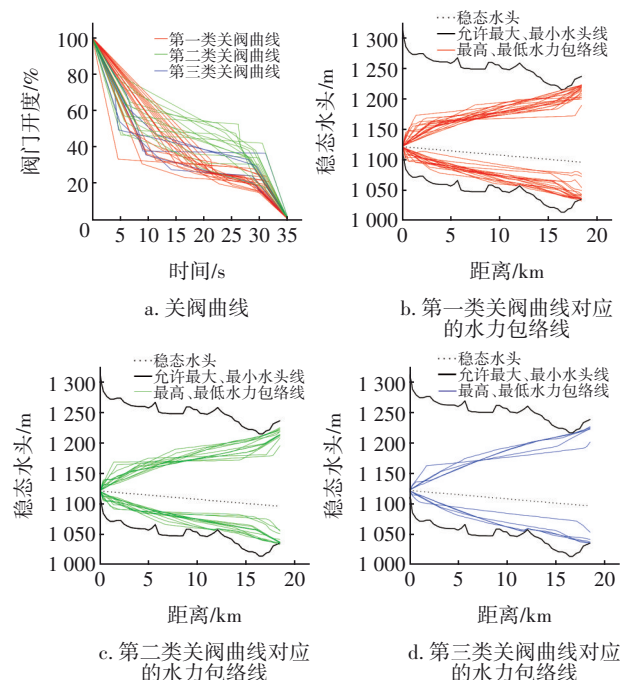


图5 基于四阶段关阀方案的遗传算法优化结果

Fig.5 Genetic algorithm optimization results based on four-stage valve-closing scheme

按照拐点位置的不同,关阀曲线也分为三类,但是其与三阶段关阀方案的优化结果并不相同,四阶段关阀曲线呈现“快关,快关,慢关,快关”“快关,慢关,慢关,快关”或“快关,慢关,快关,快关”的特征。由于四阶段关阀曲线的优化成功案例中,存在相邻阶段斜率变化不大的现象,因此可以将其近似看作三阶段关阀方案。由图5可以看出,第一类关

阀曲线的拐点一出现在阀门启动以后4~21 s,第二、三类关阀曲线出现在5~9 s;第一、二、三类关阀曲线的拐点二均出现在阀门启动以后26~31 s。第一类关阀曲线的慢关阶段阀门开度为20%~50%,第二类关阀曲线为25%~75%,第三类关阀曲线为25%~65%。与三阶段关阀方案相比较,经过优化以后的四阶段关阀方案的关阀过程更为复杂,水力包络线并没有显著优势,因此工程实践过程中不考虑四阶段关阀方案。

结合图3和图4可知,在各阶段阀门关闭速度没有约束的情况下,两阶段与三阶段关阀方案的优化结果并不相似,且无论如何优化两阶段关阀方案,均不能实现对关阀水锤的有效防护。说明理论最佳关阀曲线形态与两阶段关阀曲线差别较大,与三阶段关阀曲线差别较小。

结合图4和图5可以看出,在各阶段阀门关闭速度没有约束的情况下,四阶段关阀方案有向三阶段关阀方案拟合的趋势,依然符合“前期快关,中期慢关,后期快关”的特征,同时两类方案在拐点位置、水力包络线的走势上大体相同。由于遗传算法追求绝对最优解的算力成本过高,令关阀曲线在与最优解适应度差距足够小的次优解上收敛是较为合理的选择。因此,考虑到遗传算法的随机性,两类方案优化结果虽然不完全相同,但是无本质的区别。考虑到四阶段关阀方案的决策变量($t_1, t_2, t_3, y_1, y_2, y_3$)相较于三阶段关阀方案(t_1, t_2, y_1, y_2)的维度更多,搜索空间急剧扩大,搜索难度增加,方案优化成功率降低,宜基于三阶段关阀方案进行关阀曲线的优化。

4 工程应用效果

随着管径的增大,长距离重力输水工程的建设成本逐渐增加。以山西省某市引黄入晋长距离重力输水工程为例,与未优化相比,经过优化以后的水锤防护方案可以缩小输水管管径,工程建设综合费用降低了22.52%。建设成本主要由管道采购费、垫层施工费和管道铺设费组成,该输水工程优化前后的管径、各部分工程量和综合费用如表4所示。

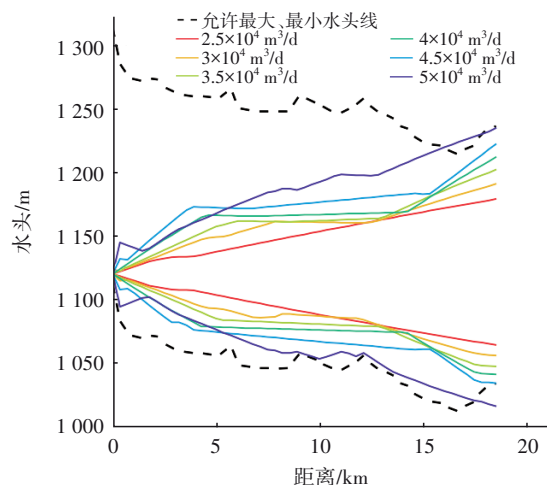
将提出的三阶段关阀优化方案应用于实际输水工程以后,在维持现有实际工程设计、不进行扩容改造及保证水锤防护效果的情况下,通过对关阀

曲线进行优化,可以将单管极限输水量由 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,不同输水量下关阀水锤的水力包络线结果如图6所示,具体关阀方案如表5所示。

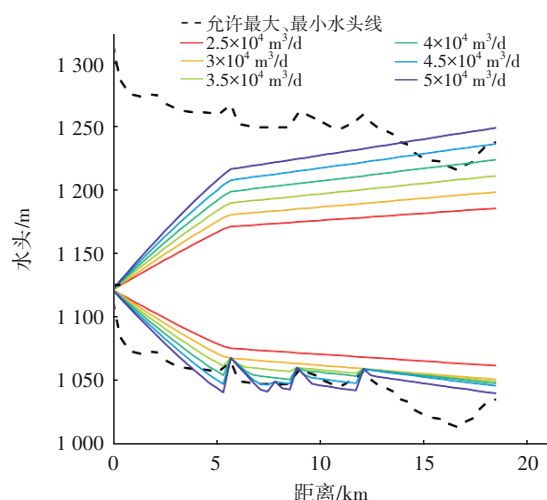
表4 优化前后的工程建设成本

Tab.4 Construction cost of project before and after optimization

方案	管径/mm	项目名称	常规工程量	综合单价	综合费用/万元
优化前	800	管道采购	18 492.0 m	168.300 元/m	8 675.94
		垫层施工	557 348.9 m ³	148.499 元/m ³	
		管道铺设	18 492.0 m	47.667 元/m	
优化后	600	管道采购	18 492.0 m	148.500 元/m	6 721.84
		垫层施工	42 9939.0 m ³	148.499 元/m ³	
		管道铺设	18 492.0 m	33.899 元/m	



a. 优化后三阶段关阀方案的水力包络线



b. 优化前两阶段关阀方案的水力包络线

图6 不同供水量下关阀水锤的水力包络线

Fig.6 Hydraulic envelope of valve-closing water hammer under different water supply amounts

表5 不同供水量下具体关阀方案
Tab.5 Valve-closing scheme under different water supply amounts

关阀方案	关阀曲线拐点位置	单管供水量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)					
		2.5	3	3.5	4	4.5	5
优化后三阶段关阀	拐点一	历时/s	26.77	49.92	51.53	51.35	60.02
		开度/%	23.61	41.75	47.44	49.34	47.47
	拐点二	历时/s	29.80	25.34	24.17	25.69	26.41
		开度/%	23.47	41.75	47.46	49.34	47.47
优化前两阶段关阀	拐点一	历时/s	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
		开度/%	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00

5 结论

① 在山西省某市引黄入晋长距离重力输水实际工程中,为有效防止爆管现象和断流弥合效应的发生,宜基于三阶段关阀曲线针对水锤防护问题进行优化。关阀曲线的解不唯一,但均表现为“前期快关,中期慢关,后期快关”的特征,将该优化方案应用于实际工程后,在保证水锤防护效果的前提下,可降低工程建设成本、提高输水能力。

② 与三阶段关阀方案相比,四阶段关阀方案也能实现水锤防护效果,但在优化成功率、调用气阀数量上没有明显优势,从保证系统运行过程及程序计算简单的角度考虑,优选三阶段关阀方案。

③ 基于遗传算法优化重力流输水管道关阀方案的筛选方法在寻找关阀曲线及其最佳阶段数方面具有普遍性,针对不同的地形特征,均可使用该方法确定最佳关阀阶段数及最佳关阀曲线形态。

参考文献:

[1] 赵晓磊. 基于供水工程中重力流的水锤联合防护措施研究[J]. 黑龙江水利科技, 2020,48(2):10-13.
ZHAO Xiaolei. Research on combined protection measures of water hammer based on gravity flow in water

supply engineering[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020, 48(2): 10-13(in Chinese).

[2] 石硕, 苏思. 重力流输水管道水锤防护分析及优化设计[J]. 给水排水, 2018,44(S2):256-258.
SHI Shuo, SU Si. Analysis on water hammer protection for the gravity flow water conveyance pipeline to optimize the design[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(S2): 256-258(in Chinese).

[3] 赵星明, 赵兴忠, 王振国, 等. 高山景区大高差供水管线水锤防护优化研究[J]. 中国给水排水, 2020,36(13):38-43.
ZHAO Xingming, ZHAO Xingzhong, WANG Zhenguo, et al. Water hammer protection of water supply pipeline and its optimization in high mountain scenic area with large height difference[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 38-43(in Chinese).

[4] MOGHADDAS S M J, SAMANI H M V, HAGHIGHI A. Transient protection optimization of pipelines using air-chamber and air-inlet valves [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017,21(5):1991-1997.

[5] YAZDI J, HOKMABADI A, JALILIGHAZIZADEH M R. Optimal size and placement of water hammer protective devices in water conveyance pipelines [J]. Water Resources Management, 2019,33(2):569-590.

[6] SKULOVICH O, PERELMAN L, OSTFELD A. Modeling and optimizing hydraulic transients in water distribution systems [J]. Procedia Engineering, 2014, 70:1558-1565.

作者简介:马熠阳(1997-),男,河南濮阳人,硕士研究生,主要从事长距离输水管道水锤防护工程研究。

E-mail:1376612618@qq.com

收稿日期:2021-05-27

修回日期:2021-07-06

(编辑:任莹莹)