

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.11.007

高落差重力流异性管道输水管网关阀规律研究

张绮萱^{1,2}, 李琳^{1,2}, 李刚³

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆伊犁州水利电力勘测设计研究院有限公司, 新疆 伊犁 835100)

摘要: 应用 Bentley Hammer 软件对高落差重力流异性输水管网 QT 工程的关阀规律开展研究。通过计算和对比多组不同线性关阀时长及两阶段关阀下主管、支管的水力过渡过程, 得出较优的关阀操作规律, 即主管执行 40 s-90%-160 s 关阀, 间隔 1.0 倍主管水锤波相长($T_{\text{主管}}$)后支管执行 30 s-80%-70 s 关阀。结果表明, 对于含支管的输水系统, 两段式关阀时, 在支管与主管的关阀时间间隔为 $(0.5 \sim 1.5)T_{\text{主管}}$ 条件下可有效降低输水系统水锤压力; 线性关阀时, 在节制阀关阀总时长与水锤波相长之比 $k < 10$ 条件下, 延长线性关阀总时长可有效降低管道最大水锤压力和压力波动时长。但 $k > 30$ 时该方法失效, 且该结论适用于阀门特性曲线不同的球阀和蝶阀。关阀总时长相同的两段式关阀的经济性优于线性关阀, 主管、支管间隔关阀的经济性优于无间隔关阀。

关键词: 高落差重力流; 异性管道; 线性关阀; 两段式关阀; 间隔关阀

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)11-0050-09

Valve Closing Rules of High-drop Gravity-flow Heterogeneous Water Pipeline Network

ZHANG Qixuan^{1,2}, LI Lin^{1,2}, LI Gang³

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Yili State Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute Co. Ltd., Yili 835100, China)

Abstract: The Bentley Hammer software was applied to investigate the valve closing rules for the QT project, a high-drop gravity-flow heterogeneous water pipeline network. By calculating and comparing the hydraulic transient processes of the main pipe and branch pipes under multiple sets of different linear valve closing durations and two-stage valve closing operations, the optimal valve closing rule was obtained as follows: the main pipe performed a 40 s-90%-160 s valve closing, and after an interval of 1.0 time the water hammer wave phase length of the main pipe ($T_{\text{主管}}$), the branch pipes performed a 30 s-80%-70 s valve closing. The results showed that for water transmission systems with branch pipes, during two-stage valve closing, when the time interval between the valve closing of the branch pipes and that of the main pipe was 0.5-1.5 times $T_{\text{主管}}$, the water hammer pressure in the system could be effectively reduced. During linear valve closing, when the ratio k of the total valve closing duration of the regulating valve to

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项课题(2022A02003-4-2)

通信作者: 李琳 E-mail: lilin_xjau@163.com

the water hammer wave phase length was less than 10, prolonging the total linear valve closing duration could effectively reduce the maximum water hammer pressure and the duration of pressure fluctuation. However, when $k > 30$, this method became ineffective. This conclusion applied to both ball valves and butterfly valves with different valve characteristic curves. Two-stage valve closing with the same total valve closing duration was more economical than linear valve closing, and staggered valve closing between the main pipe and branch pipe was more economical than simultaneous valve closing.

Keywords: high-drop gravity-flow; heterogeneous water pipeline; linear valve closing; two-stage valve closing; interval valve closing

我国水资源在时间和空间上分布不均,重力流输水工程因其运行成本低、输水方式可靠的优点成为跨流域管道输水的常用方式^[1],但管线末端富余水头较大,末端节制阀突然关闭会导致管内压力突变明显^[2]。通过建立合理关阀规律能有效减小关阀操作不当导致的水锤危害,同时也是降低管道关阀水锤压力和管道水锤防护投资的重要途径。谢杰等^[3]发现,在关阀总时间相同的情况下,末端阀采用线性关闭方式能更好地抑制关阀正水锤,而不宜采用先快后慢的两阶段关阀方式;张健等^[4]修正了间接水锤公式,该公式可为两段式关阀规律设计提供理论依据;王焰康等^[5]认为,一味增加线性关阀时长以降低输水系统水锤压力会大大增加阀门的制造难度,他提出一种能防止二次关阀事故发生的改进两段折线关阀方案;徐燕等^[6]认为,含支管输水系统关阀时应尽量增加关阀时长,避免主管和支管同时关阀。

目前的研究主要分析了线性关阀和分段式关阀的优点,对两段式关阀方式进行了理论研究,为有支管输水系统提出运行建议,但并未明确两种关阀方式的适用范围以及主管、支管同时关阀时的建议关阀间隔,且之前研究主要针对单一管径的输水系统,有关主管管径渐变的异性管道^[7]上同时布置并联支管的管网系统关阀规律研究较少。笔者基于数值模拟的方法,以高落差重力流异性输水管网工程为例,探讨了复杂管网内的水力过渡过程,提出了较优关阀操作规律,明确了两种关阀方式的适用范围,旨在为其他异性管网工程关阀操作提供参考依据。

1 工程算例

1.1 工程概况

图1为QT高落差自流输水工程管线布置情况。

工程由上游水库、管道、蝶型节制阀、末端减压池、分水支管等组成。

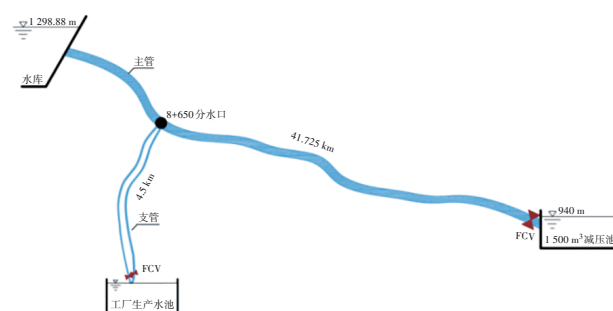


图1 管线布置示意

Fig.1 Schematic of pipelines layout

输水管线全长为41.725 km,干管设计流量为0.92 m³/s,管线进水高程为1273.65 m,经过DN630、DN820、DN920三段管径渐变输水管道至末端减压池,管线最大承压为2.0 MPa,减压池设计水位为940 m。工程规划在8+650桩号处设置分水口,并铺设支管供水(桩号8+650处与工厂直线距离最短,且支管管线不横跨河流和耕地等),两根DN185支管并联布置且运行可满足工厂总需水量(0.15 m³/s),单根支管额定供水量为75 L/s,支管供水管线全长为4.5 km。

1.2 管道相长

QT工程中并联支管为单一直径的简单管道,可直接根据式(1)进行相长计算。主管为管径渐变的异性输水管道,计算管径渐变的异性管道水锤波传播相长时可根据管径将管道分段,根据式(2)分段计算不同管段水击相长,再将各段相长求和得到异性管道输水系统管道水击相长。

$$T_r = \frac{2L}{c} \quad (1)$$

$$T_r' = \sum_{i=1}^n \frac{2L_i}{c_i} \quad (2)$$

式中: T_r 和 T'_r 均为管道水锤波传播相长; L 为管道长度; c 为管道水锤波的波速; n 为异性管道按管径分段的段数。

本研究中, 支管管长 $L=4.5$ km, $c=932.7$ m/s; 主管 $n=3$, $L_1=6.75$ km, $L_2=11.60$ km, $L_3=23.38$ km, $c_1=995.6$ m/s, $c_2=922.3$ m/s, $c_3=889.7$ m/s, 计算得 $T_{r\text{主管}}=91.27$ s, $T_{r\text{支管}}=9.65$ s。

1.3 计算工况

设置了3种阀门操作工况, 见表1。工况1为主管节制阀关闭, 支管节制阀全开, 以探究QT复杂管网输水系统异性主管关阀规律, 避免支管关阀产生的水锤压力波在主管内叠加对主管关阀规律计算结果造成影响; 同理, 工况2为避免异性主管关阀影响两根并联支管全关关阀规律的计算结果, 设置了主管节制阀全开, 支管节制阀全关工况; 工况3对输水系统最危险运行工况(主、支管同时关阀)下主、支管分别执行由工况1和2计算所得的较优关阀规律时管内压力进行计算。分别模拟主管、支管在3种不同工况下执行不同关阀规律时管道水力过渡过程, 模拟计算至水锤波传播结束形成新的恒定流状态时结束。

表1 计算工况

Tab.1 Calculated working condition

项目	主、支管线性关阀总时长/s	关阀操作
工况1	100、300、800、1 000、 1 500、2 000、3 000、4 000	线性关阀、两段式关阀
工况2	20、50、90、100、200、 300、400、500、600	线性关阀、两段式关阀
工况3	100、200	两段式关阀

2 数学模型及边界条件

水锤基本微分方程组由运动方程(3)和连续性方程(4)组成。

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{f}{D} \frac{v|v|}{2g} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \sin \alpha \right) + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

式中: H 为测压管水头; x 为管道沿管轴线的距离; v 为流速; t 为时间; f 为摩阻系数; D 为输水管道直径; g 为重力加速度; α 为管轴线与水平面的夹角; a 为水锤波的波速。

采用特征线法转化为两组常微分方程组。相容性方程(5)和(6)在对应满足特征线方程(7)和(8)时成立。

$$C^+: \frac{1}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2gD} + \frac{v}{a} \sin \alpha = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = v + a \quad (6)$$

$$C^-: -\frac{1}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2gD} - \frac{v}{a} \sin \alpha = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dx}{dt} = v - a \quad (8)$$

在实际输水管道中水锤波的波速远大于输水管道中水流的流速, 因此一般会忽略相容性方程中的 $\frac{v}{a} \sin \alpha$ 项和特征线方程中的 v 项^[8], 具体见式(9)~(12)。

$$C^+: \frac{1}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2gD} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{dx}{dt} = a \quad (10)$$

$$C^-: -\frac{1}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2gD} = 0 \quad (11)$$

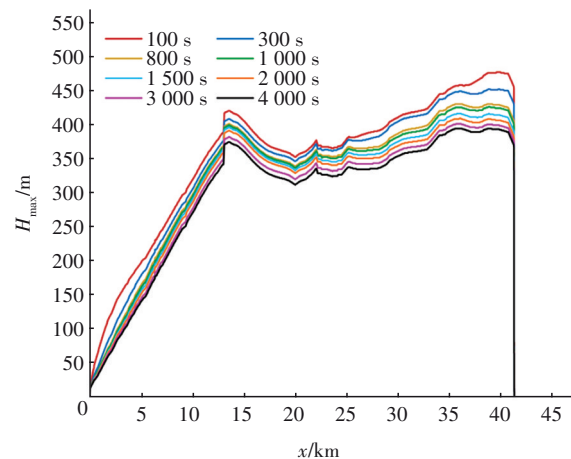
$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (12)$$

关阀模拟计算采用 Bentley Hammer 水锤模拟计算软件来求解一维管道非恒定流数学模型, 瞬时摩擦力计算为非恒稳态法。管道管材海森-威廉系数设定为 140。

3 水力调节方案

3.1 线性关阀规律

线性关阀即管道末端阀门在一定时间内匀速全关, 分别计算工况1和工况2下执行不同线性关阀规律时主管、支管管道最大压力包络线及管道末端阀前节点处(J-149、J-180)压力随时间波动曲线, 计算结果如图2所示。



a. 主管压力包络线

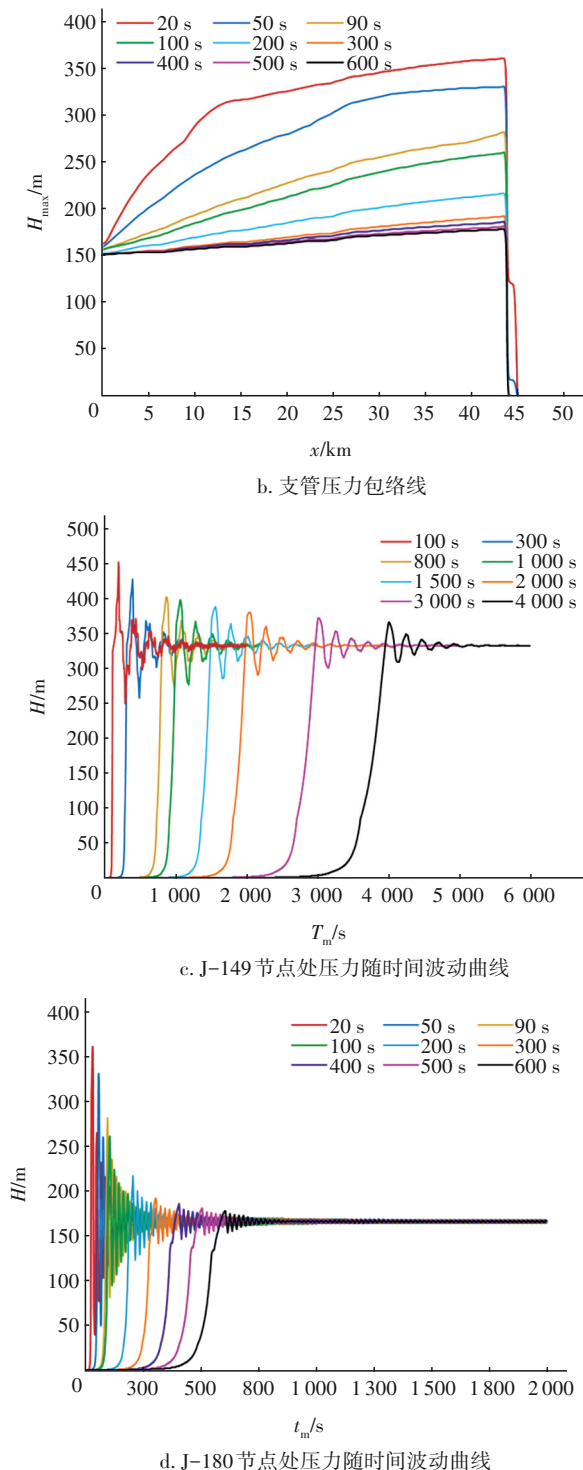


图2 不同线性关阀时长下主管和支管的管道压力特性曲线

Fig.2 Pressure characteristic curves of main pipe and branch pipes under same linear value closing duration

由图2(a)可知,主管末端节制阀按工况1执行不同线性关阀规律时,主管内压力变化趋势相同,主管内水锤压力自末端节制阀41+657处产生,在

40+000附近达到最大值,在向上游0+000传播过程中由于能量损失,压力包络线沿程下降,在12+350桩号处(该点高程最低)受最大工作压力和水锤压力的叠加,压力再次达到峰值。主管末端阀门100 s线性全关时主管内关阀水锤压力最大,随着线性关阀总时长的增加,主管内最大水锤压力逐渐下降但幅度越来越小。同理,由图2(b)可知,支管末端节制阀按工况2执行不同线性关阀规律时支管内压力变化趋势相同,随支管末端线性关阀时间延长,支管内压力逐渐下降,但减幅逐渐减小。

J-149节点处压力波动时长记为 T_m ,J-180节点处压力波动时长记为 t_m 。由图2(c)、(d)可知,延长主管、支管末端节制阀线性关阀总时长,J-149、J-180节点处压力波动峰值和波动时长随之减小,但主管/支管线性关阀总时长增加至一定程度时,节点处压力波动时长 T_m/t_m 与 T/t 呈正相关。当 $T < 1\,000$ s时,J-149节点处 T_m 随 T 的增加逐渐减小;当 T 为1 000 s时, T_m 较 T 为100 s时缩短了7.35%;当 T 分别为1 200、4 000 s时, T_m 较 T 为1 000 s时分别增加了16.67%、66.67%。说明延长 T 可以减缓末端节制阀全关后压力波动频率,但 $T > 1\,000$ s时,关阀过程缓慢,升压过程较长,导致管内压力波动总时长(T_m)增加。同理,当 T 为100 s时, t_m 较 T 为10 s时缩短了5.37%;当 T 分别为200、600 s时, t_m 较 T 为100 s时分别增加了16.29%、52.74%。

基于模拟结果,给出了最大关阀水锤压力减幅 γ 和节点处压力波动时长 T_m/t_m 随 k (主管/支管节制阀线性关阀总时长 T/t 与水锤波相长 T_r 之比)的变化情况,如图3所示。

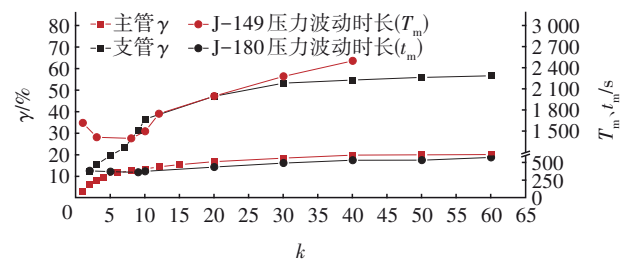


图3 主管/支管的 γ 和 T_m/t_m 随 k 的变化

Fig.3 Variation curves of γ and T_m/t_m of main and branch pipes with k

k 与 γ 分别按式(13)、(14)计算。

$$k = \frac{T(t)}{T_r} \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{H_i - h_a}{H_i} \quad (14)$$

式中: H_i 为关阀时长为 10 s 时的最大水锤压力; h_a 为不同线性关阀时长下管道最大水锤压力。

从图 3 可以看出, 当 $0 < k \leq 10$ 时, γ 随 k 的增加呈线性增大, 如 $k=6$ 、主管线性关阀总时长由 100 s 延长至 600 s 时, γ 由 3.04% 增加至 11.54%, 增加了 8.50 个百分点; 当 $k > 10$ 时, γ 增长速率明显减缓, 如 k 由 10 增加至 15 时, 主管线性关阀总时长同样增加 500 s (由 1 000 s 增至 1 500 s), γ 仅增加 2.03 个百分点, 仅为 $k < 10$ 时的 25%。支管变化与主管相似, 当 $k < 10$ 时, 支管线性关阀时长由 20 s 延长至 70 s, γ 增加了 10.89 个百分点, 当 $k \geq 10$ 时支管线性关阀总时长由 100 s 延长至 150 s, γ 增加了 5.33 个百分点, 仅为 $k < 10$ 时增加幅度的 50%; 当 $k > 30$ 后, 主管、支管内 γ 随 k 的增加呈水平直线变化, 表明继续通过延长线性关阀时间以降低管道最大水锤压力方法已无效。随着 k 增大 (即延长主管、支管末端节制阀线性关阀总时长), J-149、J-180 节点处 T_m/t_m 先减小后增大。当 $0 < k \leq 10$ 时, J-149、J-180 节点处 T_m/t_m 随 k 增大而减小; 当 $k > 10$ 时, J-149、J-180 节点处 T_m/t_m 随 k 增大而极速增长。

通过上述分析可知, 一定程度上增加阀门线性关闭时长 (即增大 k 值) 可以有效减小输水系统最大水锤压力, 缩短管道压力波动时长, 但当线性关阀总时长大于 10 倍管道水锤波传播相长 ($k > 10$) 后, 继续增加线性关阀总时长不仅降低了最大水锤压力, 同时还增加了管道压力波动时长, 容易导致水力部件的结构疲劳破坏。

根据《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》(CECS 193—2005) 的规定, 管道允许承压不应超过最大工作压力的 1.3~1.5 倍, 主管、支管最大工作压力分别为 281、164 m, 按照最大校核标准 1.5 倍计算主管最大压力不超过 421.5 m, 支管最大压力不超过 246 m。通过上述计算可知, 主管、支管分别执行线性关阀总时长小于 10 倍对应管道水锤波传播相长时, 管内最大压力均大于规范允许的最大压力标准。因此, QT 工程不宜采用线性关阀规律, 应进一步探究两段式关阀规律在 QT 工程中的适用性。

3.2 两段式关阀规律

通过线性关阀规律研究发现, 主管线性关阀总

时长 T 为 [100, 300] s, 支管线性关阀总时长 t 为 [50, 100] s 时, 降低最大水锤压力效果明显。张健等^[4]认为, 两段式折线关阀方式可极大地减小关阀时间, 因此主管、支管分别以 [100, 300] s 和 [50, 100] s 时间区间作为两段式关阀总时长计算范围, 进一步探究适用于 QT 工程的两段式关阀规律。

3.2.1 主管两段式关阀

两段式关阀优先确定“快关段”关阀时间 T_1/t_1 及关阀角度 $P\%$ 的最优取值范围, 控制管线负压情况, 再确定慢关时间 T_2/t_2 , 形成最优关阀曲线的大致走向, 随后在已经确定的合理范围内继续寻优, 直至得到最优两段式关阀曲线。主管两段式关阀规律研究共进行 45 组模拟计算, 分别计算了不同关阀总时长下 50%~90% 开度的主管最大压力包络线和主管末端节制阀前 (J-149) 压力随时间的变化情况, 部分计算结果见表 2。当主管末端节制阀执行 100、200、300 s 线性关阀规律时, 主管内最大压力分别为 479、464 和 454 m, 主管末端阀前 (J-149) 处最大压力值分别为 458、444、433 m。由表 2 可知, 当关阀总时长相同时, 两段式关阀操作下主管内最大压力和主管末端阀前压力 (J-149) 均小于线性关阀操作, 当 T 分别为 100、200、300 s 时, 两段式关阀主管内最大压力较线性关阀最大减幅分别为 4.38%、11.21% 和 9.69%; J-149 节点处最大压力较线性关阀最大减幅分别为 4.37%、12.84% 和 11.09%。且分段关阀时 J-149 节点处压力波动时长均小于相同关阀总时长的线性关阀, 证明 T 相同时, 采用两段式关阀操作可以有效减小管内最大压力和管道末端阀前压力, 缩短管道压力波动时长。

分别比较第 1、2 组和第 5、6 组的计算结果可以发现, 当 T_1 和 T_2 相同、快关角度为 90% 时, 主管最大压力、阀前最大压力均小于快关角度为 60% 和 85% 的。说明当快关时间 (T_1) 与慢关时间 (T_2) 一致时, 快关角度 $P\%$ 越大则管内最大压力和管道末端阀前压力越小。

管道设计规范要求管线沿程负压不得超过 -2 m, 结合管内正压情况, 40 s-90%-160 s、10 s-85%-290 s 和 100 s-90%-200 s 关阀操作均能满足管线负压要求且降低最大正压力, 其中 40 s-90%-160 s 关阀操作总时长较短, 系统水力调节较快, 因此建议 QT 工程主管末端阀门调节采用 40 s-90%-160 s 关阀规律。

表 2 不同关阀操作下主管压力计算结果

Tab.2 Calculation results of main pipe pressure with different valve closing rules

关阀总时长/s	组号	关阀方案 $T_1-P\%-T_2$	管内最大压力/m	最大负压水锤/m	负压范围/m	阀前压力(J-149)/m	阀前压力波动时长/s
100	1	20 s-60%-80 s	485	-4	68	462	1 303
	2	20 s-90%-80 s	458	0	0	438	1 072
	3	30 s-80%-70 s	476	-1	68	454	1 252
	4	40 s-90%-60 s	466	0	0	446	1 464
200	5	10 s-85%-190 s	422	0	0	397	1 263
	6	10 s-90%-190 s	412	-7	34	387	1 231
	7	30 s-85%-170 s	425	0	0	401	1 313
	8	40 s-90%-160 s	417	-1	34	391	1 338
	9	80 s-90%-120 s	424	0	0	400	1 414
300	10	10 s-85%-290 s	411	0	0	386	1 602
	11	70 s-80%-230 s	424	0	0	400	1 604
	12	100 s-90%-200 s	410	0	0	385	1 701

3.2.2 支管两段式关阀

支管两段式关阀规律研究共进行 45 组模拟计算,分别计算了 50、80、100 s 时末端节制阀 50%~90% 开度支管最大压力包络线和支管末端节制阀前(J-180)压力随时间的变化情况,部分计算结果见表 3。支管执行 50、80、100 s 线性关阀规律时,支管内最大压力均在支管末端阀前(J-180 节点)处形成,支管内最大正压力为 332、301、262 m,支管末端

阀前 116 m 范围管线均为负压,最大负压力分别为 -10、-9、-7 m。对比表 3 中分段式关阀计算结果可以发现,分段式关阀管道内正、负压力均小于线性关阀操作,从第 1、2 组和第 3、4 组以及第 7、8 组的计算结果可以看出, t_1 、 t_2 相同时,增大快关角度 $P\%$ 可以减小支管内正压力,相比主管计算结果,增大 $P\%$ 降低管内正压力在较小管径管道中的作用更加明显。

表 3 不同关阀操作下支管压力计算结果

Tab.3 Calculation results of branch pipe pressure with different valve closing rules

关阀总时长/s	组号	关阀方案 $t_1-P\%-t_2$	管内最大压力/m	最大负压水锤/m	负压范围/m	阀前压力(J-180)/m	阀前压力波动时长/s
50	1	10 s-50%-40 s	300	-8	116	298	1 303
	2	10 s-80%-40 s	209	-6	116	208	1 072
	3	20 s-70%-30 s	256	-7	116	254	1 252
	4	20 s-80%-30 s	218	-5	116	216	1 464
80	5	10 s-80%-70 s	181	-6	116	180	1 263
	6	20 s-80%-60 s	185	-4	116	185	1 231
	7	30 s-80%-50 s	196	-4	116	195	1 313
	8	30 s-90%-50 s	185	-9	116	177	1 338
100	9	20 s-70%-80 s	209	-5	116	208	1 602
	10	20 s-80%-80 s	179	-4	116	178	1 604
	11	30 s-80%-70 s	181	-4	116	180	1 701
	12	40 s-80%-60 s	185	-4	116	185	1 734

支管采用两段式关阀规律时支管负压值较线性关阀减小,支管内负压情况严重,应优先降低管内负压值,即 20 s-80%-60 s、30 s-80%-50 s、20 s-80%-80 s、30 s-80%-70 s 和 40 s-80%-60 s 操作方式下支管内负压值较小,其中 30 s-80%-70 s 关阀操作下支管正压力最小,因此 QT 工程支管关阀操

作建议采用 30 s-80%-70 s,支管末端阀前 116 m 沿线 -4 m 负压可通过安装进气阀或双动式空气阀等进行防护。

通过上述对主管、支管两段式关阀计算发现,当分段关阀总时长、快关时长、慢关时长一致时,适当增大快关角度 $P\%$ 亦可同时减小管内负压,但快

关角度 $P\%$ 过大时会导致管内负压增大,对于不同管径管道,其快关角度 $P\%$ 的界限值不同,需要结合工程实际计算确定。

通过分析主、支管两段式关阀规律计算结果发现,当两段式关阀总时长、快关时长、慢关时长一致时,输水系统管道正压力随快关角度增大而减小,且管径越小管道正压力减小幅值越大,最大减幅为39.77%。

3.2.3 关阀间隔分析

间隔关阀操作采用先关闭主管末端节制阀,再关闭支管末端节制阀,计算主管、支管在不同时间间隔(t_g)下分别执行由工况1、2计算所得较优两段式关阀规律时主管内最大压力包络线,并利用式(15)、(16)、(17)分别计算 n 取不同值时的时间间隔 t_g ,以及不同 t_g 下主管和支管最大压力较同时关阀时管道最大压力的减幅 X 、 Y 。

$$t_g = nT_{r\text{主管}} \quad (15)$$

$$X = \frac{H - H'}{H} \times 100\% \quad (16)$$

$$Y = \frac{h - h'}{h} \times 100\% \quad (17)$$

式中: X 、 Y 分别为不同关阀间隔时长下主管、支管内最大压力较同时关阀时压力的减幅; H 、 h 分别为同时关阀时主管、支管内最大压力; H' 、 h' 分别为不同 t_g 下主管、支管内最大压力。

不同关阀间隔下主管、支管压力计算结果见表4。可知,随着 t_g 逐渐增加,主管、支管内最大压力逐渐减小。当 t_g 为 $1.5T_{r\text{主管}}$ 和 $2.0T_{r\text{主管}}$ 时,主管内最大压力相同;当 t_g 为 $2.0T_{r\text{主管}}$ 时,支管压力大于 t_g 为

1. $5T_{r\text{主管}}$ 时支管内最大压力。

表4 不同关阀间隔下主管、支管压力计算结果

Tab.4 Calculation results of main and branch pipes pressure at different valve closing intervals

项目	n	$t_g(nT_{r\text{主管}})/s$	H'/m	$X/\%$	h'/m	$Y/\%$
无间隔关阀	0	0	493	0	368	0
间隔关阀	0.5	50	489	0.81	357	2.99
	1.0	100	470	4.67	305	17.12
	1.5	150	466	5.48	274	25.54
	2.0	200	466	5.48	280	23.91

以上结果表明,间隔关阀可有效降低主管、支管内最大压力,但随着间隔时间延长,降低管内最大压力的作用逐渐减弱。当 $t_g > 1.5T_{r\text{主管}}$ 时,通过延长主管、支管关阀间隔时间来降低主管内最大压力的方式失效,支管内压力反而增大,说明主管、支管间隔 $(0.5 \sim 1.5)T_{r\text{主管}}$ 关阀,降低输水系统最大压力效果较好。QT工程支管自主管全关后间隔 $1.0T_{r\text{主管}}$ 关阀,降低主管最大水压力效果较好且整个关阀过程时间较短,阀门水力调节工作效率较高。

综上所述,QT工程主管执行40 s-90%-160 s关阀操作,支管间隔 $1.0T_{r\text{主管}}$ 时长执行30 s-80%-70 s关阀操作,可进一步通过优化关阀操作减小最危险事故工况下(主管、支管同时关阀)输水系统的最大压力。

3.3 较优关阀规律经济计算

按照相同防护等级要求估算了不同关阀规律下工程需要投入的水锤防护设备投资情况,结果见表5。

表5 不同关阀规律下管道水锤防护成本计算结果

Tab.5 Economic calculation results of water hammer protection of pipeline with different valve closing rules

序号	关阀规律	主管最大水锤压力/m	支管最大水锤压力/m	水锤防护总投资/万元	投资减幅/%
1	主管、支管10 s快关	528	412	8 385.41	
2	主管200 s线性关阀、支管100 s线性关阀	512	400	8 135.52	2.98
3	主管40 s-90%-160 s两段式关阀、同时支管30 s-80%-70 s两段式关阀	493	357	7 582.55	9.57
4	主管40 s-90%-160 s两段式关阀、间隔100 s支管30 s-80%-70 s两段式关阀	470	305	6 913.50	17.55

在主管、支管同时快关时,管道水锤防护设备投资金额共8 385.41万元,采用前述优化关阀规律,管道水锤防护投资小于10 s快速线性关阀,这说明对输水系统的关阀方式进行优化有利于减少管

道后期安全运行投资;对比2、3组可以发现,关阀总时长相同时,分段式关阀水锤防护投资减幅大于线性关阀;对比3、4组可以发现,输水系统执行相同关阀规律时,主管、支管末端节制阀间隔关阀输水系

统水锤防护投资减幅大于无间隔关阀操作。综上所述可知,QT工程主管、支管间隔两段式关阀规律经济性较好。

4 验证计算

长距离有压输水工程中常用球阀(旋塞阀)、蝶阀作为末端节制阀,而针阀主要应用于管径<300 mm、公称压力 $\leq$ PN320的输水管道,闸阀直径>600 mm时会导致阀杆过高、阀体自身质量较大,会大幅增加阀井的井深(宽),导致工程经济性较差,因此一般不用于长距离高压输水工程。为了验证本研究所得结论对球阀的适用性,将QT工程末端蝶阀节制阀替换为球阀进行相同线性关阀规律计算。同时,为验证本研究结论的工程适用性,引入DQ工程进行计算。

4.1 不同阀门特性曲线验证计算

图4为球阀条件下QT工程主管、支管内最大关阀水锤压力减幅 γ 与J-149、J-180典型节点压力波动时长 T_m/t_m 随 k 的变化曲线。可知,当 $0 < k \leq 10$ 时,主管、支管的 γ 随 k 增加的增长速率最快,如 $k=10$ 时,主管、支管的 γ 分别为8.30%和16.36%;当 k 增至20时,主管、支管的 γ 分别为11.74%和22.86%,二者增幅均小于 $0 < k \leq 10$ 时的50%。同时,当 $0 < k \leq 10$ 时,J-149、J-180节点处 T_m/t_m 随 k 增大而减小,最大减幅分别为50.42%和12.78%,但当 $k > 10$ 时J-149、J-180节点处 T_m/t_m 随 k 增大而极速增长,最大增幅分别为39.73%和29.19%($k=60$ 时)。

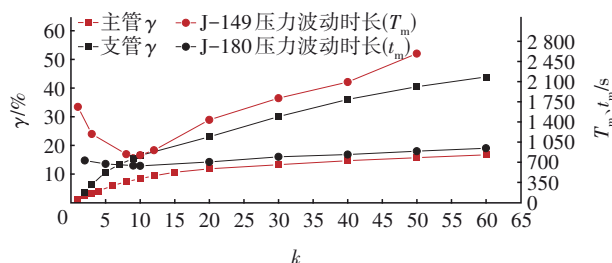


图4 球阀条件下主管与支管的 γ 和 T_m/t_m 随 k 的变化曲线

Fig.4 Variation curves of γ and T_m/t_m of main and branch pipes with k under ball valve

通过上述分析可知,上述所得有关线性关阀的相关结论不仅适用于蝶阀末端节制阀,对于阀门特性曲线不同的球阀也具有一定的适用性。

4.2 工程适用性验证计算

DQ工程输水段全程为10.2 km,管线最大落差为14.32 m,主管道选用管径为3 000 mm的钢管,末

端节制阀为蝶阀,管道设计流量为12 m³/s,于管线桩号7+550处预留分水接口,通过1 200 mm管径支管向3 km外受水地分水3 m³/s,主管、支管管材一致。分别计算主管、支管线性关阀时输水系统的最大压力包络线,通过式(1)计算可知,DQ工程主管相长 $T_{r,主管}=27.19$ s,支管相长 $T_{r,支管}=7.59$ s。

分别计算 $k=5、10、11$ 时主管和支管最大压力包络线以及不同取值下管内最大压力较直接水击压力的减幅,结果见表6。

表6 DQ工程主管、支管线性关阀管内压力计算结果

Tab.6 Calculation results of pressure in linear closing valve of main and branch pipes of DQ project

管道	k	线性关阀总时长/s	最大压力/m	减幅/%
主管	5	135	120	16.67
	10	270	54	66.67
	15	300	42	69.75
支管	5	40	72	13.89
	10	80	40	60.00
	15	90	37	63.00

由表6可知,当 k 由5增加至10时,主管内最大压力较直接水击压力减幅增加了50%,支管内减幅增加了46.11%;当 k 由10增加至15时,主管减幅仅增加3.08%,支管减幅仅增加3%。说明主管、支管线性关阀总时长分别按照各自管内水锤波传播相长的倍数增加,当增加的倍数 $k < 10$ 时,主管、支管的压力减幅明显大于增加倍数 $k > 10$ 的。说明管道线性关阀总时长大于节制阀安装管道的10倍水锤波传播相长时,通过延长线性关阀总时长降低管道水锤压力的方法作用有限,这一结论同样适用于管径单一的管网系统,具有一定的工程适用性。

5 结论

① 通过计算不同线性关阀规律下QT工程主管、支管最大压力包络线和末端阀前节点处压力波动变化曲线,判定线性关阀不适用于该工程。研究发现,管径渐变的输水系统(包括有支管布置的输水系统),当管道末端节制阀线性关阀总时长小于其所在管道的10倍水锤波相长($k < 10$)时,增加线性关阀总时长可有效减小管道压力,当 $k > 10$ 时增加线性关阀总时长以减小管内压力的作用减弱且增加

了管内压力波动时长(66.67%),当 $k>30$ 时该方法作用失效。经验证,该结论同样适用于阀门特性曲线不同的球阀和蝶阀及管径单一的输水管网。

② QT工程较优关阀规律为主管执行40 s-90%-160 s,支管间隔 $1.0T_{\text{主管}}$ 时长执行30 s-80%-70 s关阀规律,关阀总时长一致时,两段式关阀的经济性优于线性关阀。当两段式关阀总时长、快关时长、慢关时长一致时,输水系统管道正压力随快关角度增大而减小,且管径越小管道正压力减小幅值越大,最大减幅为39.77%。

③ 对于含支管的输水系统,其主管、支管间隔 $(0.5\sim 1.5)T_{\text{主管}}$ 关阀可有效减小输水系统水锤波叠加,降低输水系统最大压力值,主管压力最大减幅为5.48%,支管压力最大减幅为25.54%,且间隔关阀的经济性优于同时关阀,但当关阀间隔大于 $1.5T_{\text{主管}}$ 时,通过增加间隔关阀时长减小输水系统最大压力的方法失效。

参考文献:

- [1] 石喜,吕宏兴,朱德兰,等.枝状管网水力瞬变工况的试验与数值模拟[J].排灌机械工程学报,2013,31(5):406-412.
SHI X, LÜ H X, ZHU D L, et al. Experiment and numerical simulation of hydraulic transients in branched pipe network [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 406-412 (in Chinese).
- [2] 李妍,白绵绵,闫飞.高落差重力流输水管道开关阀水锤模拟分析[J].西北水电,2022(4):94-97.
LI Y, BAI M M, YAN F. Simulation analysis of water hammer from switching valves in high drop gravity flow water delivery pipelines [J]. Northwest Hydropower, 2022(4): 94-97(in Chinese).
- [3] 谢杰,黄伟,李火坤,等.长距离重力流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 J, HUANG W, LI H K, 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] 张健,俞晓东,朱永忠.长距离供水工程的关阀水锤与线路充填[J].水力发电学报,2010,29(2):183-189.
ZHANG J, YU X D, ZHU Y Z. Study on water-hammer and line packing in long-distance water-supply project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 183-189(in Chinese).
- [5] 王焰康,张健,何城.长距离重力流输水工程的关阀方案优化[J].人民黄河,2017,39(5):131-134,139.
WANG Y K, ZHANG J, HE C. Valve closing plan optimization of long-distance gravity flow water-supply project [J]. Yellow River, 2017, 39(5): 131-134, 139 (in Chinese).
- [6] 徐燕,李江.长距离重力流输水工程多支管运行方案水锤研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(6):129-133.
XU Y, LI J. Water hammer analysis of multi-branch pipes in long distance gravity flow [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(6): 129-133(in Chinese).
- [7] 韩凯,丁法龙,茅泽育.长距离有压输水工程泵站水锤的数值分析[J].水利水电科技进展,2020,40(2):69-75.
HAN K, DING F L, MAO Z Y. Numerical analysis of water hammer in a long-distance pressurized water transfer project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 69-75 (in Chinese).
- [8] 亚太建设科技信息研究院有限公司,株洲南方阀门股份有限公司.水锤防护技术发展报告[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.
Yatai Construction Science & Technology Consulting Institute Co. Ltd., Zhuzhou South Valve Co. Ltd.. Water Hammer Protection Technology Development Report [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021(in Chinese).

作者简介:张绮萱(1998—),女,河北张家口人,硕士,主要研究方向为长距离管道输水水力过渡过程。

E-mail:1430889741@qq.com

收稿日期:2025-01-24

修回日期:2025-03-22

(编辑:任莹莹)