

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220883

阀门调节对水锤压力的控制效果对比研究

郭子琪¹, 弓学敏^{1,2}, 谢英柏¹

(1. 华北电力大学动力工程系, 河北 保定 071003; 2. 华电电力设计研究院有限公司, 河北 保定 071003)

摘要: 水锤作为输水工程中常见的安全性问题, 往往由阀门非正常操作引起, 因此有必要对比分析不同阀门调节方式下的水锤问题。通过 CFD 技术和动网格技术模拟了不同的单、双阀调节方式, 分析了管道内不同位置处的水锤压力波动情况。结果表明, 单阀调节时, 先快后慢的关阀方式在一定的快关关闭量范围内对水锤有抑制作用, 快关关闭量过大, 即会起到恶化水锤的效果, 快关量为 60% 时可对水锤压力进行有效控制, 而快关量为 80% 时则会恶化水锤; 双阀调节时, 综合考虑两阀之前和两阀之间压力可发现同时采用“前 0.25 s 关 60%, 后 0.25 s 关 40%”方式可避免过高压力及负压的出现。研究结果可为实际工程中阀门快速关断过程设计和操作方案提供参考。

关键词: 关阀水锤; 阀门调节; 压力控制; CFD 技术

中图分类号: TV672; TU991.39

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0095-04

1 引言

水锤是从一种稳态到另一种稳态的过渡流现象^[1], 在输水工程中十分常见且危害大。但水锤不能被彻底消除, 只能进行有效控制, 水锤控制分为主动法和被动法两大类。阀门调节是一种主动控制方法^[2,3], 其中延长关阀时间最为常见, 对水锤有一定的抑制作用。但面对突发状况需快速关阀以最大程度抑制水锤的操作尚需进一步研究。王祺武等^[4]通过特征线法研究了双阀调节方式, 发现双阀有利于水锤控制, 且双阀均采用先快后慢方式控制效果更好; BAZARGAN-LARI M R 等^[5]利用多目标优化模型和贝叶斯网络(BNs)得到了最优的阀门实时关闭曲线; 李志鹏等^[6]利用 Matlab 研究两阶段关阀方式, 发现先快后慢方式的控制效果优于先慢后快方式, 同时提出非连续两阶段关阀方式可适用于某些特殊情况; 王祺武等^[7]以实际工程为例, 研究了不同阀门调节方式对水锤的控制效果, 发现单阀、双阀、三阀调节均可对水锤进行有效控制。目前, 此类研究多采用特征线法, 同时在研究双阀调节时忽略了两阀之间的压力变化。鉴此, 本文建立了三维模型, 综合

考虑管道各处压力变化, 对比不同阀门调节方式下的水锤控制效果, 旨在为实际工程中阀门快速关断过程提供更优的设计和操作方案。

2 数学模型与计算模型

2.1 流体力学控制方程

流体力学控制方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_\tau) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

式中, ρ 为流体的密度; t 为时间; u_i 为流体速度在三个坐标轴上的分量; μ 为流体的粘性系数; p 为修正压力; μ_τ 为湍流粘性系数。

2.2 湍流模型

水锤现象属于典型的湍流问题。因此, 采用标准 κ - ϵ 湍流模型即引入湍动能 κ 和湍流耗散率 ϵ 的输运方程, 表达式为:

$$\frac{\partial (\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (3)$$

收稿日期: 2022-04-30, 修回日期: 2022-06-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018MS105)

作者简介: 郭子琪(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为管道水力瞬变特性, E-mail: ziqiguo@ncepu.edu.cn

通讯作者: 谢英柏(1971-), 男, 副教授, 研究方向为输水管网等, E-mail: 220192214084@ncepu.edu.cn

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (4)$$

式中, σ_κ 、 σ_ε 分别为 κ 、 ε 的湍流普朗特数, $\sigma_\kappa = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$; G_κ 为速度梯度导致的湍流动能; G_b 为浮力导致的紊流动能; Y_M 为波动膨胀对总耗散率的贡献; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{3\varepsilon} = 0$ 或 1.0 。

2.3 计算模型

以文献[8]中的试验系统为原型建立单、双阀模型, 见图 1。管道全长 25 m, 直径为 0.12 m, 阀门选用球阀, 其半径为 0.09 m; 左侧为压力入口 (0.4 MPa), 右侧为压力出口 (0 MPa); 阀-1 安装在距离出口 0.5 m 的位置, 阀-2 安装在阀-1 前 5 m 的位置; P_1 、 P_2 为模拟计算过程中设置的监测点, P_1 设置在阀-1 上游 10 m 处, P_2 设置在两阀中点处。

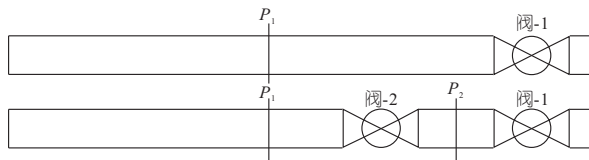


图 1 单、双阀模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single and double valve models

3 数值模拟与分析

3.1 模型验证

(1) 网格无关性验证。网格数量随轴向网格间距的变化而变化, 网格划分情况见表 1。模拟过程中, 参数设置及阀门调节方式选择文献[8]中提供的参数及相应的关阀规律。

表 1 网格划分

Tab. 1 Meshing partition

轴向网格 间距/mm	网格数量 /个	轴向网格 间距/mm	网格数量 /个
11	526 308	14	250 999
12	410 054	15	207 469
13	317 353		

图 2 为监测点 P_1 在不同网格数量下的压力曲线及波峰、波谷线。由图 2(a) 可看出, 水锤压力的波动有很强的规律性, 在不同网格数量下水锤压力的波动周期及频率近乎相等, 且波峰、波谷及压力峰值出现的时刻保持一致。由图 2(b) 可看出, 不同网格数目下的波峰、波谷及压力峰值的相对误差较小, 以压力峰值为例, 其相邻网格数量间模拟结果的误差范围在 1.09%~2.23% 内, 小于工程误差 (5%), 因此可认为在 11~15 mm 区

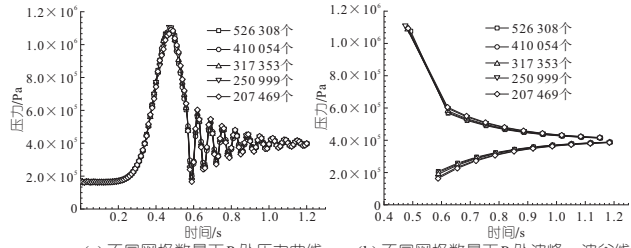


图 2 不同网格数量下 P_1 处压力曲线及波峰、波谷线

Fig. 2 Pressure curve, peaks and trough lines at P_1 under different grid numbers

间范围内的网格尺寸对水锤压力的影响很小, 可满足网格无关性的要求。

(2) 准确性验证。最大水锤压力是实际工程的重点关注对象, 因此以文献[8]中的最大压力值作为验证值来进行准确性验证, 结果见图 3。由图 3 可看出, 五种网格所计算的模拟值与文献值[8]十分接近, 其中, 使用轴向网格间距为 12、15 mm 的网格的计算误差分别为 0.08%、0.56%, 均小于 1%, 说明本文所建模型准确、可行。

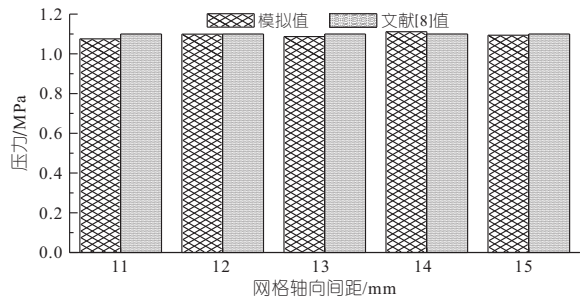


图 3 准确性验证

Fig. 3 Accuracy verification

综合考虑计算结果准确性和计算机模拟时间, 最终选择了轴向网格间距为 12 mm、网格数量为 410 054 个的网格划分形式。

3.2 单阀调节

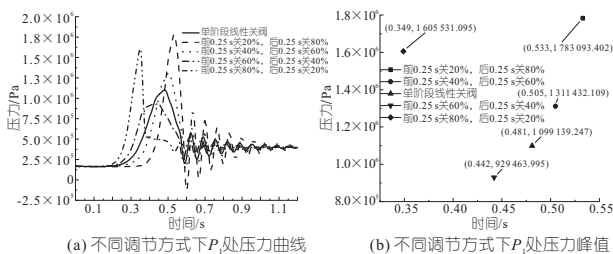
为分析单个阀门动作对水锤压力的控制效果, 从不同的阀门调节方式入手, 一般可分为单阶段线性关阀、单阶段非线性关阀、先慢后快两阶段关阀和先快后慢两阶段关阀。由于突发状态的快速关阀时间较短, 因此所有关阀过程可近似为线性关阀, 故不再考虑非线性关阀。阀门调节方式见表 2。

表 2 阀门调节方式

Tab. 2 Valve adjustment mode

单阀调节方式	阀门开度变化
单阶段线性关阀	前 0.25 s 关 50%, 后 0.25 s 关 50%
先慢后快两阶段关阀	前 0.25 s 关 20%, 后 0.25 s 关 80%
	前 0.25 s 关 40%, 后 0.25 s 关 60%
先快后慢两阶段关阀	前 0.25 s 关 60%, 后 0.25 s 关 40%
	前 0.25 s 关 80%, 后 0.25 s 关 20%

图 4 为不同调节方式下 P_1 处压力曲线及压

图 4 不同调节方式下 P_1 处压力曲线及压力峰值Fig. 4 Pressure curve and pressure peak at P_1 under different adjustment methods

力峰值。由图 4 可看出,对先慢后快关阀方式,随第一阶段关闭量的增加, P_1 处最大水锤压力快速减小,且峰值出现时间提前。当第一阶段关闭量为 40% 时的最大压力值为 1.78 MPa,较关闭量为 20% 时降低了 0.47 MPa,且压力峰值的出现时间也由第一阶段关闭量为 20% 时的 0.533 s 提前至 0.505 s;对先快后慢关阀方式,随第一阶段关闭量的增加, P_1 处最大水锤压力值增加,峰值出现时间也继续提前。当第一阶段关闭量由 60% 增至 80% 时,最大水锤压力值由 0.93 MPa 增至 1.61 MPa,变化量为 0.68 MPa,且压力峰值的出现时间也由 0.442 s 提前至 0.349 s。这是由于快关关闭量太大导致压力变化过快,即使与反射回来的降压波相互作用,也不会对压力变化有太大的影响。

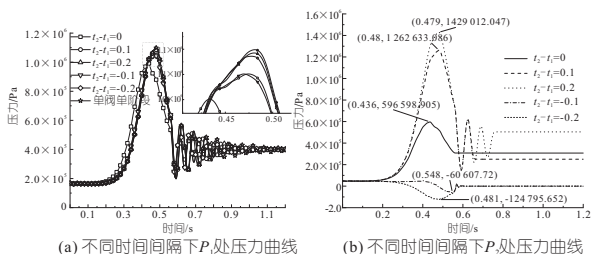
通过对比五种阀门调节方式,可发现相同时间内,第一阶段关闭量越大,则监测点压力开始变化的时间越早,阀门完全关闭后的压力振幅也越小;其中,“前 0.25 s 关 60%,后 0.25 s 关 40%”的调节方式对水锤压力的控制效果最好。

3.3 双阀调节

为研究双阀调节对水锤的控制效果,在单阀模型的基础上增加一个同规格型号的阀门构成双阀模型。由于人为地将管道分为两段,因此在双阀模拟计算中设置 P_1 、 P_2 两个监测点。

首先,以两阀门均为线性关阀为例研究阀门的关闭次序及间隔时间对水锤压力的影响,其中阀-1、阀-2 开始关闭时间分别用 t_1 、 t_2 表示,时间间隔用 Δt 表示。

图 5 为不同时间间隔下 P_1 、 P_2 处压力曲线。由图 5(a) 可看出,当两阀同时关闭时其压力峰值最小,且随间隔时间的增长其压力峰值越接近单阀线性关闭时的压力峰值;相同时间间隔下,阀-2 先关时的压力峰值略小于阀-1 先关时的压力峰值,这是由于阀-2 较阀-1 距管道进口的距离较短,当关阀速度相同时,阀-2 关阀所导致的水锤波周期更短,在相同时间内其振荡衰减次数更多,

图 5 不同时间间隔下 P_1 、 P_2 处压力曲线Fig. 5 Pressure curve at P_1 and P_2 under different time intervals

从而使压力峰值略小于阀-1 先关时的压力峰值。

由图 5(b) 可看出,两阀同时关和阀-1 先关时 P_2 处产生正压,阀-2 先关时则产生负压,这是由于在阀-1 还未动作前,阀-2 的关闭产生降压波向阀-2 下游传播,导致两阀间的压力呈下降趋势,且阀-1 开始关闭时间较阀-2 越晚,产生的负压值越大;阀-1 先关时则会产生相反的效果。

综合考虑 P_1 、 P_2 两点处的压力波动情况,当两阀同时关闭时对管道内压力的控制效果最好,此时 P_1 、 P_2 处的压力峰值分别约为 1.0、0.6 MPa,且在整个阀门调节过程中未出现负压。

此外,在保证阀-1 采用最优两阶段关阀方式的基础上,阀-2 也采用两阶段关阀方式,且两阀同时关闭,研究阀-2 的两阶段关阀方式对管路水锤压力的控制效果。具体方案为:①方案 1。阀-1:前 0.25 s 关 60%,后 0.25 s 关 40%;阀-2:前 0.25 s 关 20%,后 0.25 s 关 80%。②方案 2。阀-1:前 0.25 s 关 60%,后 0.25 s 关 40%;阀-2:前 0.25 s 关 40%,后 0.25 s 关 60%。③方案 3。阀-1:前 0.25 s 关 60%,后 0.25 s 关 40%;阀-2:前 0.25 s 关 60%,后 0.25 s 关 40%。④方案 4。阀-1:前 0.25 s 关 60%,后 0.25 s 关 40%;阀-2:前 0.25 s 关 80%,后 0.25 s 关 20%。

图 6 为不同方案下 P_1 、 P_2 处压力曲线及 P_1 处压力峰值。由图 6(a)、(c) 可看出,当阀-1 保持“前 0.25 s 关 60%,后 0.25 s 关 40%”关阀方式不变,阀-2 的第一阶段关闭量增加时其 P_1 处的压力峰值随之增加,且出现时间提前。对比单阀单阶段线性关闭时的水锤压力 1.1 MPa,采用方案 1~3 时的压力峰值更小,分别下降了约 0.16、0.16、0.12 MPa。由图 6(b) 可看出,阀-2 第一阶段关闭量增大时两阀间的压力值减小,且出现时间提前。这是由于在相同时间内关闭量越大,其关阀速度越快,阀-2 后产生的降压波也就越强,当降压波弱于阀-1 生成的升压波时两阀间呈正压,且正压值随两波的强弱差距增大而增大;相反,当降压波强于升压波时两阀间呈负压,且负压

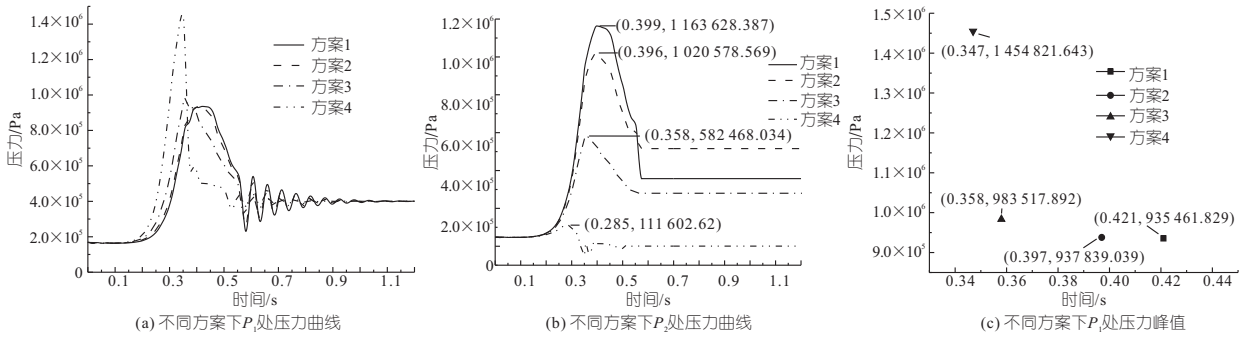


图 6 不同方案下 P_1 、 P_2 处压力曲线及 P_1 处压力峰值

Fig. 6 Pressure curve at P_1 , P_2 and pressure peak at P_1 under different schemes

值随两波的强弱差距增大而增大。

综合 P_1 、 P_2 处的压力波动情况,认为方案 3 即双阀同时采用“前 0.25 s 关 60%,后 0.25 s 关 40%” 关阀方式时能够对管道压力进行有效控制, 不仅可降低最大水锤压力,同时可避免出现负压。

4 结论

a. 单阀调节时,随第一阶段关闭量的增加,最大水锤压力先减小后增大,当第一阶段关闭量为 60%时,水锤压力达到最小值。

b. 双阀调节方式的确定应综合考虑两阀之前和两阀之间的压力变化。本文中仅考虑了两阀之前压力时方案 1 为最优方案;同时考虑两处压力时方案 3 为最优方案。

c. 双阀调节时,阀门关闭次序对两阀间的压力变化有很大影响。

参考文献:

[1] 邹亮,胡光忠,文华斌,等.基于 CFD 动网格技术的蝶阀关闭特性研究[J].水电能源科学,2017,35

(10):168-170,164.

[2] 刘渊铭.基于液压管路阀门关闭规律的水锤抑制方法研究[D].成都:电子科技大学,2021.
 [3] 宋生奎,宫敬,于达.利用阀调节控制管道加油系统的水击压力[J].油气储运,2007,26(3):39-43.
 [4] 王祺武,李志鹏,朱慈东,等.基于双阀调节的重力流管路水锤控制分析[J].中国给水排水,2020,36(9):52-58.
 [5] BAZARGAN-LARI M R, KERACHIAN R, AF-SHAR H, et al. Developing an optimal valve closing rule curve for real-time pressure control in pipes [J]. Journal of mechanical science and technology, 2013, 27(1):215-225.
 [6] 李志鹏,王祺武,朱慈东,等.基于阀门关闭策略的重力流管路水锤控制分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(2):75-83.
 [7] 王祺武,李志鹏,朱慈东,等.重力流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.
 [8] 赵钰,钱利勤,涂忆柳,等.多重阀门关闭降低高压管道水击压力的机理和实验研究[J].科学技术与工程,2017,17(35):312-317.

Comparative Study on Control Effect of Valve Adjustment on Water Hammer Pressure

GUO Zi-qi¹, GONG Xue-min^{1,2}, XIE Ying-bai¹

(1. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
 2. Huadian Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Baoding 071003, China)

Abstract: As a common safety problem in water diversion engineering, water hammer is often caused by abnormal operation of valves. So, it is necessary to conduct a comparative analysis of water hammer problems under different valve adjustment methods. The CFD technology and dynamic mesh technology were used to simulate different single and double valve adjustment modes, and analyze the fluctuation of water hammer pressure at different locations in the pipeline. The results show that when the single valve is adjusted, the first fast and then slow closing valve mode has an inhibitory effect on the water hammer within a certain range of fast shutdown; The fast closing amount is too large, which will play a worsening effect of water hammer; When the fast shutdown amount is 60%, the water hammer pressure can be effectively controlled, and the water hammer will deteriorate when the fast shutdown amount is 80%; When adjusting the double valve, considering the pressure before and between the two valves, it can be found that the “first 0.25 s off 60%, the last 0.25 s off 40%” method can avoid the occurrence of excessive pressure and negative pressure. The research result provides a design and operation scheme for the rapid shut-off process of the valve in practical engineering.

Key words: shut-off valve water hammer; valve regulation; pressure control; CFD technology