

文章编号:1672-9331(2020)04-0085-07

基于自力控制阀的水锤控制

李志鹏^{1,3},张程钊^{1,3},任羽皓¹,彭 枫¹,严 杰²

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院,湖南 长沙 410114;2. 英诺威阀业有限公司,安徽 铜陵 244000;
3. 湖南省特大口径电站阀门工程技术研究中心,湖南 长沙 410007)

摘 要: 针对泵站压力输水管路系统的停泵水锤,自力控制阀可有效削弱停泵水锤造成的管道升压,但却不能消除管道中的负压。以一实际工程为例,使用 HAMMER 软件的数值模拟方法对自力控制阀水锤防护方案进行比较分析,探讨将管道中的负压保持在安全范围内的方法。模拟中以自力控制阀为基础,联合空气阀和单向调压塔对水锤设备进行防护,使管道内水锤的正、负压都符合规范。模拟结果表明:自力控制阀加空气阀可取代单向调压塔在管路系统中的作用,该水锤防护方案可保证管路系统的安全,降低在停泵水锤防护上的资金投入。

关键词: 停泵水锤;自力控制阀;空气阀;单向调压塔;数值模拟;联合防护;压力控制

中图分类号: TK72

文献标志码: A

Water hammer control based on self-operated control valve

LI Zhi-peng^{1,3},ZHANG Cheng-chao^{1,3},REN Yu-hao¹,PENG Feng¹,YAN Jie²

(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Innovation Valve Co., Ltd., Tongling 244000, China; 3. Hunan Province Extra Large Caliber Power
Station Valve Engineering Research Center, Changsha 410007, China)

Abstract: For the pump-stopping water hammer of the pressure pipeline system of the pump station, the self-operated control valve can effectively weaken the pressure rise of the pipeline caused by the pump-stopping water hammer, but cannot eliminate the negative pressure in the pipeline. In order to make the negative pressure of the pipeline reach the standard, a real project was taken as an example to compare and analyze the water hammer protection schemes of self-operated control valve by using the numerical simulation method of HAMMER software. In the simulation, the self-operated control valve was the basis, and the air valve and the one-way surge tank were combined to protective the water hammer equipments, which made the positive pressure and negative pressure of the water hammer in the pipeline to reach the standard. The simulation results show that self-operated control valve plus air valve can replace the function of one-way surge tank in the pipeline system, the water hammer protection scheme can ensure the safety of the pipeline system, reduce the capital investment in the protection of pump-stopping water hammer.

Key words: pump-stopping water hammer; self-operated control valve; air valve; one-way surge tank; numerical simulation; joint protection; pressure control

收稿日期:2020-01-08

基金项目:湖南省重点研发项目(2017KG2182)

通讯作者:李志鹏(1962—),男,云南丘北人,长沙理工大学教授,主要从事流体动力工程多相流动理论方面的研究。

E-mail:1379448@163.com

自力控制阀与水泵关联后能够进行先启动水泵后开启阀门和先关闭阀门后关停水泵的控制,这样就可以隔离水泵与管道,在水泵启动、停止的过程中对水泵和管道起到更好的保护作用。

停泵水锤会造成管道压力上升和水泵倒转,对泵房机组和管道的安全有着巨大的威胁^[1]。朱蒙生等^[2]用数值模拟方法对管网直联泵站停泵水锤问题进行了研究,对管网简化、边界条件设定、终端泄流节点模拟元件处理等若干重要问题进行了分析,并给出了部分计算结果。熊水应等^[3]研究了长距离输水管道中的断流弥合水锤,对水柱分离现象进行了分析总结,提出了断流弥合水锤在防护中需要重点考虑的问题。张健等^[4]研究了长距离输水工程中关阀水锤的特性,对长距离输水工程中的线路充填现象进行了分析。杨祖强等^[5]基于改进的多目标遗传算法对含气水锤的防护进行了分析研究,开辟了水锤防护新的研究方向。

为防止停泵水锤的流体倒流对水泵及管道造成破坏,通常会在水泵出口安装止回阀,自力控制阀也属于止回阀的一种。除了止回阀,水锤防护设备还有排气阀、调压塔等。Izquierdo 等^[6]、Jung 等^[7]、Dhandayudhdhapani^[8]及 Kim^[9]分别运用不同算法对水锤防护设备的设计参数进行了优化。Leila 等^[10]通过水锤理论的半解析公式对空气阀的效果进行了研究,提出了摩擦因素对空气阀防护效果的影响。Moghaddas 等^[11]通过自适应遗传算法研究了空气罐与空气阀联合水锤防护的最优方案。胡建永等^[12]通过计算,认为计算模型可以准确地模拟空气阀在水力过渡过程中的进排气特性,空气阀进排气系数等设计参数对空气阀的水锤防护效果有显著影响。空气阀可以防止由于管道产生负压而导致的水柱分离和水汽溃灭的危险,但如果空气阀布置不合理可能会加剧断流弥合水锤对管道的破坏^[13]。与其他防护设备相比,空气阀的结构简单,成本低,安装便捷,不受地形因素影响^[14]。而单向调压塔在水锤防护方面效果较好,但其建设受地形限制,体积大,成本较高,且在冬天还存在需要保温等问题,不利于维护管理^[15]。近年来,我国多位专家学者在水锤防护设备的研究上取得了很大的进展,发表了许多相关

论文。研究的主要内容可分为两方面:一方面使用不同方法对空气阀^[16-17]、调压塔^[18-20]、超压泄压阀^[21-22]、空气罐^[23-24]等水锤防护设备进行优化改进;另一方面体现在对泵送管路系统的水锤联合防护方案的优化上。

综上所述,使用多种水锤防护设备对高扬程泵站管路系统中的水锤进行联合防护是目前广泛使用的方式。本研究以自力控制阀为基础,提出几种水锤设备联合防护方案。以一实际工程为例,使用 HAMMER 软件对自力控制阀水锤防护方案进行比较分析,最终确定基于自力控制阀的最优水锤防护方案。

1 自力控制阀数学模型

由于在模拟计算中无法建立精确的模型,目前对自力控制阀数学模型的研究尚少。本研究使用与之相似的两阶段关闭蝶阀模型作为自力控制阀的数学模型^[25]。

设流体流经阀门的水头损失为 ΔH ,其大小与阀门的角度 θ (θ 为 0 时阀门全开)和过流面积 A_v 等参数有关。 ΔH 的计算公式为:

$$\Delta H = C_v Q_n^2 v |v| \quad (1)$$

$$C_v = \frac{\zeta}{2g A_v^2} \quad (2)$$

式中: C_v 为阀门流量系数; Q_n 为水泵的额定流量, m^3/s ; $v = Q/Q_n$ 为水泵的相对流量, m^3/s ; ζ 为阀门流阻系数; A_v 为实际过流面积, m^2 。

可用分段函数表示自力控制阀在任意时刻 t 的关阀角度 θ :

$$\begin{cases} \theta = t \frac{\varphi_1}{t_1}, t \leq t_1, \text{快关阶段} \\ \theta = \varphi_1 + \frac{\varphi_2}{t_2}(t - t_1), t_1 < t < t_2, \text{慢关阶段} \\ |\theta = \varphi_1 + \varphi_2 = 90^\circ, t \geq t_2, \text{完全关闭} \end{cases} \quad (3)$$

求出 θ 即可确定 C_v 的值,以便使用计算机进行计算。当 $t > t_1 + t_2$ 时,自力控制阀处于完全关闭状态或相对流量为 0。自力控制阀在没有完全关闭前的水头平衡方程为:

$$F_1 = (C_P - C_M) - 2B_v Q_n + H_n (\beta^2 + v^2)(A_0 + A_1 x) - C_v Q_n^2 v |v| = 0 \quad (4)$$

在停泵的整个过程中,稳态下的水头平衡方程仍然成立,即:

$$H_Z + H - H_f = H_N. \quad (5)$$

式中: H_Z 为水泵入口端压力水头, m; H 为水泵工作扬程, m; H_f 为阀门水头损失, m; H_N 为水泵出口端压力水头, m。其中 $H_f = \frac{H_0 v |v|}{\tau^2}$, H_0 为阀门完全开启时的水头损失。

联立式(5)和水泵入口前端管道的相容性方程,可得水泵在停泵时的水头平衡方程:

$$C_{P_1} - C_{M_2} - (B_1 Q_{P_1, NS} - B_2 Q_{P_2, 1}) + H_n (\beta^2 + v^2) (A_0 + A_1 x) - \frac{H_0 v |v|}{\tau^2} = 0. \quad (6)$$

由动量定理可得:作用在水泵机组转子上的合力矩与转子转速的变化率成正比,即:

$$M = -\frac{G_D^2}{4g} \frac{dw}{dt}. \quad (7)$$

式中: G_D^2 为水泵的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; g 为重力加速度, m/s^2 ; M 为作用在水泵机组上的合力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; w 为水泵旋转角速度, rad/s 。

水泵转速变化方程可由下式得到:

$$(\beta^2 + v^2) (B_0 + B_1 x) + m_0 - \frac{G_D^2}{60g} \frac{N_n}{M_n} \frac{\pi}{\Delta\tau} (\beta_0 - \beta) = 0. \quad (8)$$

式中: $\beta = N/N_n$; $v = Q/Q_n$; $\beta_0 = M/M_n$; τ 为阀门的相对开度。

联立式(4)与式(8)即可计算出 β 和 v , 然后联立式(1)至式(4)即能求解出流体流经阀门的水头损失。

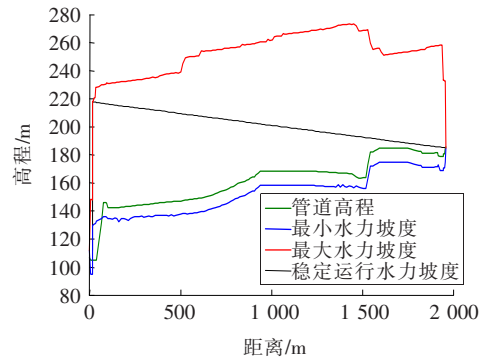
2 案例分析

某泵站输水工程,管线全长约 2 408 m,输水管道长约 1 918 m,输水管道为 DN300 无缝钢管。泵房内装有两台立式长轴深井水泵,两台水泵并联运行,水泵额定扬程为 120 m,额定流量为 200 m^3/h ,额定转速为 1 485 r/min ,电机配套功率为 630 kW。

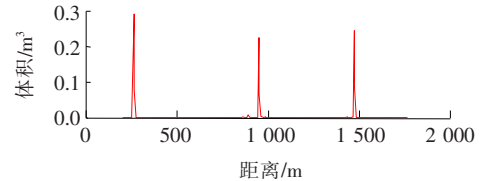
2.1 无水锤防护停泵模拟

设水泵稳定运行 3 s 后突然断电停止工作,这时进行停泵水锤模拟,总模拟时间 300 s,结果见

图 1~3。在无水锤防护措施的情况下,突然断电停泵,管道中后部升压较大,大部分管道的最低压力超过负压下限达到 -10 m,水体汽化,在 3 个管道尖点出现蒸汽空腔,发生水柱分离弥合水锤,严重危害管道安全。水泵在稳定运行 3 s 后断电,流量和转速迅速下降,在 7 s 左右流量为 0,水流方向发生改变,水泵在 11.5 s 左右开始反转,反转转速最大达到 1 338 r/min ,这将对水泵造成损害。综上所述,在无水锤防护措施的情况下突然停泵,管道内会产生破坏性的水锤升压和诱发断流空腔再弥合水锤发生的水锤负压。因此,需要采取一定的防护措施来保证输水管道的安全运行。



(a) 无水锤防护高程模拟



(b) 无水锤防护体积模拟

图 1 无水锤防护模拟结果

Fig. 1 Simulation results without water hammer protection

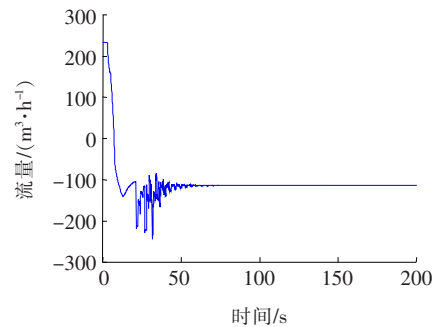


图 2 无水锤防护管道流量变化

Fig. 2 Change of pipeline flow without water hammer protection

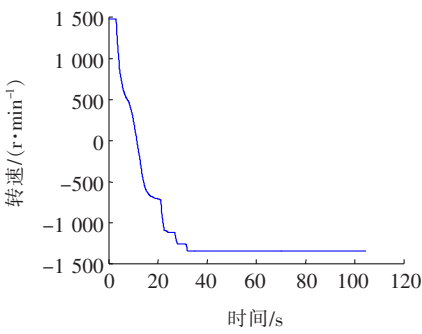


图 3 无水锤防护水泵转速变化

Fig. 3 Change of pump speed without water hammer protection

2.2 普通止回阀水锤防护模拟

普通止回阀+空气阀水锤防护模拟结果见图 4。根据无水锤防护模拟结果,在容易出现水柱分离的三个管道节点 J-15,J-59,J-72 处设置空气阀,其进气口直径为 40 mm,排气口直径为 8 mm。使用普通止回阀和空气阀后,管道升压依然很大,最大压力水头为 273.47 m,最大水锤压力为 1 648.7 kPa,超过了水泵正常工作压力的 1.3 倍,不符合规范要求。普通止回阀不具有慢关功能,在水泵断电后迅速关闭,虽然可以防止水泵倒转,但由于关阀速度过快,水锤压力上升严重,会对阀门及管道造成破坏。管道中虽然设置了空气阀,但只提升了安装空气阀的一小段管道的压力,绝大部分管道仍处于负压状态。因此,普通止回阀+空气阀无法对泵送管路系统的停泵水锤进行有效保护。

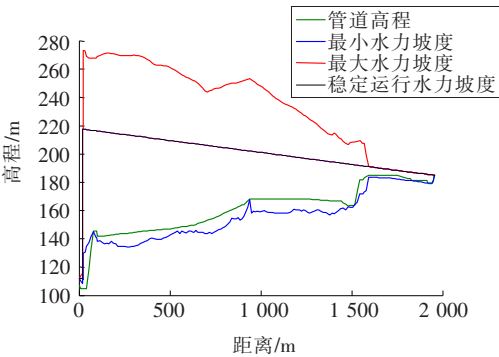


图 4 普通止回阀+空气阀水锤防护模拟

Fig. 4 Simulation of water hammer protection with common check valve plus air valve

在 J-59 节点处设置一个单向调压塔,其初始水位为 2 m,直径为 1 m,补水管直径为 200 mm;在 J-15,J-72 节点处设置空气阀,其进气口直径为

40 mm,排气口直径为 8 mm。由图 5 普通止回阀+空气阀+单向调压塔水锤防护模拟可知,在加入单向调压塔后,管道升压明显下降,最大压力水头为 248.59 m,管道最大水锤压力为 1 405.3 kPa,满足规范要求。管道负压也明显提升,最低压力水头为-6.7 m,不会发生汽化使水柱拉断。由于使用普通止回阀,水泵也没有发生倒转。因此,使用普通止回阀+空气阀+单向调压塔可以有效地对泵送管路系统的停泵水锤进行防护。

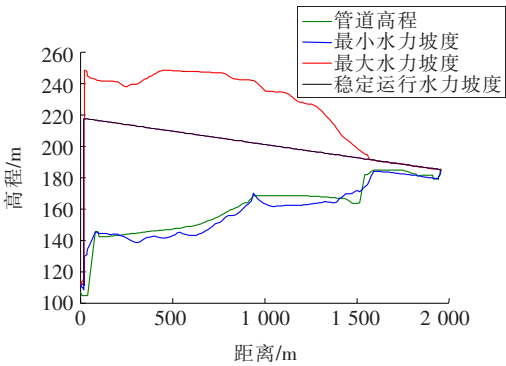


图 5 普通止回阀+空气阀+单向调压塔水锤防护模拟

Fig. 5 Simulation of water hammer protection with common check valve plus air valve plus one-way surge tank

2.3 自力控制阀水锤防护模拟

自力控制阀的主阀上安装有电磁头和限位开关。在水泵开启时,电磁头通电,主阀阀门慢慢开启;在水泵关闭时,电磁头断电,主阀关闭,在主阀阀门快要关闭时,限位开关动作使水泵关闭。这就实现了先启动水泵后开启阀门和先关闭阀门后关停水泵的控制顺序。自力控制阀能够实现在开泵时缓开,在停泵时速闭、缓闭,拥有两阶段关闭过程,可以对水锤进行有效防护。模拟前需先确定自力控制阀的快关时间。根据无水锤防护模拟结果可知,在停泵后 7.2 s 左右流量降为 0,因此选定 7 s 为快关时间。在确定快关时间之后进行慢关时间的模拟选优,总关阀时间的确定需要满足水泵倒转条件,即离心泵最高反转速度不应超过额定转速的 1.2 倍。通过模拟发现,在慢关时间为 60 s 时,最高反转速度满足规范要求。

2.3.1 自力控制阀+空气阀水锤防护

在确定了最佳关阀控制方案后,根据无水锤防护模拟结果,在容易出现水柱分离的三个管道

节点 J-15,J-59,J-72 处设置空气阀,其进气口直径为 40 mm,排气口直径为 8 mm,模拟结果见图 6。由图 6 可以看出:在使用自力控制阀+空气阀水锤防护方案之后,管道内只有一小段管道出现了升压,说明该方案对降低管道升压效果显著。同时该方案可以有效提升负压,大部分管道的最低水头都在管道高程之上,水泵最大反转转速为 1 072 r/min,符合规范标准。因此,自力控制阀+空气阀水锤防护方案可以对断电停泵水锤进行有效防护。

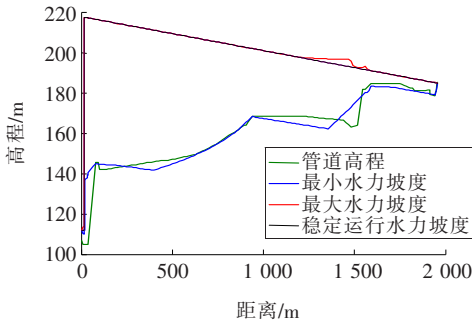


图 6 自力控制阀+空气阀水锤防护模拟

Fig. 6 Simulation of water hammer protection with self-operated control valve plus air valve

2.3.2 自力控制阀+单向调压塔水锤防护

在 J-59 节点处设置一个单向调压塔,其初始水位为 5 m,直径为 1 m,补水管径为 200 mm,模拟结果见图 7。由图 7 可以看出,自力控制阀+单向调压塔水锤防护方案能够有效降低管道升压,使管道压力保持在管道承压范围之内,但依然存在较长的负压管段,且部分管段最小压力低于负压下限-8 m。因此,还需增加单向调压塔的数量或增设空气阀来应对管道负压。

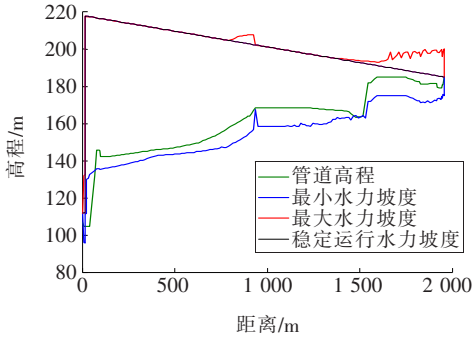


图 7 自力控制阀+单向调压塔水锤防护模拟

Fig. 7 Simulation of water hammer protection with self-operated control valve plus one-way surge tank

2.3.3 自力控制阀+空气阀+单向调压塔水锤防护

由于增加单向调压塔需要投入大量资金,而增加空气阀更加经济。因此,选择增加空气阀来提升管道负压。在 J-59 节点处设置一个单向调压塔,其初始水位为 5 m,直径为 1 m,补水管直径为 200 mm;在 J-15,J-72 节点处设置空气阀,其进气口直径为 40 mm,排气口直径为 8 mm,模拟结果见图 8。由图 8 可以看出,泵送管路系统在采用自力控制阀+空气阀+单向调压塔水锤防护方案后,突然断电停泵没有产生管道升压。该方案可以有效降低停泵水锤造成的管道升压。由于空气阀的加入,大部分管道的最低水头包络线处于管道高程之上,只有一小段管道产生了负压,但均高于负压下限-8 m,最低为-2.59 m,故该水锤防护方案能够有效提升管道负压。水泵最大反转转速为 1 109 r/min,符合规范要求。因此,自力控制阀+空气阀+单向调压塔水锤防护方案在发生停泵水锤时,可以有效地对泵及管道进行防护。

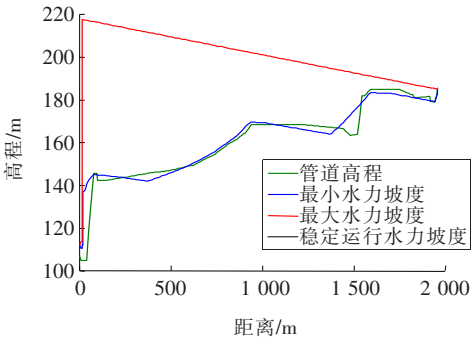


图 8 自力控制阀+空气阀+单向调压塔水锤防护模拟

Fig. 8 Simulation of water hammer protection with self-operated control valve plus air valve plus one-way surge tank

表 1 为水锤防护方案模拟结果对比。从表 1 可以看出,自力控制阀+空气阀、自力控制阀+单向调压塔、自力控制阀+空气阀+单向调压塔水锤防护方案都可以对泵送管路系统的停泵水锤进行有效防护。其中,自力控制阀+空气阀水锤防护方案水泵最大反转转速最小。在选择水锤防护方案时通常需要考虑成本问题。与建造自力控制阀和空气阀相比,建造单向调压塔不仅受地形影响大,且成本较高。综上所述,选择自力控制阀+空气阀水锤防护方案,泵送管路系统在不采用单

向调压塔的情况下,也可以保证管路系统的安全,且更经济。

表 1 水锤防护方案模拟结果对比

水锤防护方案	最大压	最大水	水泵最大	
	力水	锤压	反转转速/	反转比
	头/m	力/kPa	($r \cdot \min^{-1}$)	
自力控制阀+ 空气阀	217.60	1 101.9	1 072	0.722
自力控制阀+ 单向调压塔	217.60	1 101.9	1 090	0.734
自力控制阀+空气 阀+单向调压塔	217.60	1 101.9	1 109	0.747

3 结 论

1) 与普通止回阀相比,自力控制阀在降低管道升压方面的效果较好。当采用普通止回阀+空气阀水锤防护方案时,最大压力水头为 273.47 m,最大水锤压力为 1 648.7 kPa,超过了水泵正常工作压力的 1.3 倍,不符合规范要求;当采用自力控制阀+空气阀水锤防护方案后,只有一小段管道出现了升压,最大压力水头为 217.60 m,最大水锤压力为 1 101.9 kPa,符合规范要求。此时,不使用单向调压塔也可以对停泵水锤进行有效防护。

2) 自力控制阀+空气阀+单向调压塔与自力控制阀+空气阀的水锤防护方案都可以对泵送管路系统的停泵水锤进行有效防护。与上述两种方案相比,自力控制阀+单向调压塔的水锤防护方案在管道负压控制方面效果较差,部分管道最小压力低于负压下限-8 m,管路系统存在安全隐患,而上述两种方案最低水头分别为 -4.69 m 和 -2.59 m,均高于负压下限 -8 m。由于建设单向调压塔的成本较高,综合考虑后,选用自力控制阀+空气阀的水锤防护方案作为最终方案。

〔参考文献〕

[1] 张荣上. 基于 Bentley Hammer 的停泵水锤分析[J]. 陕西水利,2019(5):17-19.
ZHANG Rong-shang. Water hammer analysis of pump stopping based on Bentley Hammer [J].

Shaanxi Water Resources,2019(5):17-19.
[2] 朱蒙生,史守峡,何钟怡,等. 管网直联泵站水锤的数值模拟[J]. 给水排水,2002,28(1):25-28.
ZHU Meng-sheng, SHI Shou-xia, HE Zhong-yi, et al. Numerical simulation of water hammer in directly connected pumping stations [J]. Water and Wastewater Engineering,2002,28(1):25-28.
[3] 熊水应,关兴旺,金锥. 多处水柱分离与断流弥合水锤综合防护问题及设计实例[J]. 给水排水,2003,29(7):1-5.
XIONG Shui-ying, GUAN Xing-wang, JIN Zhui. Comprehensive protection of water hammer by separating and breaking water column in multiple places and design examples [J]. Water and Wastewater Engineering,2003,29(7):1-5.
[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 Jian, YU Xiao-dong, ZHU Yong-zhong. Valve-closing water hammer and line filling in long-distance water supply project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(2):183-189.
[5] 杨祖强,罗希,王文文. 基于改进型多目标遗传算法的含气水锤防护方案优化研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):200-204.
YANG Zu-qiang, LUO Xi, WANG Wen-wen. Research on optimization of water hammer protection scheme with gas based on improved multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2014,25(1):200-204.
[6] Izquierdo J, López P A, López G, et al. Encapsulation of air vessel design in a neural network[J]. Applied Mathematical Modelling,2006,30:395-405.
[7] Jung B S, Karney B W. Hydraulic optimization of transient protection devices using GA and PSO approaches[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2006,132(1):44-52.
[8] Dhandayudhdhapani R. Design aids for air vessels for transient protection of large pipe networks—a framework based on parameterization of knowledge-base derived from optimized network models[D]. Kentucky:Kentucky University,2007.
[9] Kim S H. Design of surge tank for water supply systems using the impulse response method with the GA algorithm[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2010,4(2):629-636.
[10] Leila R, Bryan K. Water column separation and cavity collapse for pipelines protected with air vacuum valves;

- understanding the essential wave processes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016(9):1-13.
- [11] Moghaddas S M, Samani H M, Haghighi A. Transient protection optimization of pipelines using air-chamber and air-inlet valves[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2017, 21(5):1 991-1 997.
- [12] 胡建永, 张健, 索丽生. 长距离输水工程中空气阀的进排气特性研究[J]. 水力学报, 2007(S1):340-345.
HU Jian-yong, ZHANG Jian, SUO Li-sheng. Study on air inlet and exhaust characteristics of air valve in long distance water delivery project[J]. Journal of Water Conservancy, 2007(S1):340-345.
- [13] 张志军. 长距离供水管道水锤分析优化与应用研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.
ZHANG Zhi-jun. Study on optimization analysis and application of water hammer simulation in long distance water transmission pipeline[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [14] 柯颢, 胡云进, 万五一. 空气阀防护水锤的研究进展[J]. 人民黄河, 2010, 32(12):229-232.
KE Xie, HU Yun-jin, WAN Wu-yi. Research progress on water hammer protection by air valve[J]. Yellow River, 2010, 32(12):229-232.
- [15] 唐迪, 张鑫, 王婷婷, 等. 高扬程水泵小起伏长输水管线水锤防护方案优选案例分析[J]. 珠江水运, 2017(8):71-72.
TANG Di, ZHANG Xin, WANG Ting-ting, et al. A case study of water hammer protection scheme for high-lift pumps with small fluctuations and long delivery pipelines[J]. Pearl River Water Transport, 2017(8):71-72.
- [16] 郑兴兴, 张健, 何喻, 等. 空气阀的水锤防护性能及其在联合防护中的应用[J]. 水电能源科学, 2014, 32(2):167-170.
ZHENG Xing-xing, ZHANG Jian, HE Yu, et al. Water hammer protection performance of air valve and its application in combined protection[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(2):167-170.
- [17] 李小周, 朱满林, 解建仓, 等. 不同型式空气阀的水锤防护效果研究[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(3):316-321.
LI Xiao-zhou, ZHU Man-lin, XIE Jian-cang, et al. Study on water hammer protection effect of different types of air valves[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(3):316-321.
- [18] 葛光环, 寇坤, 张军. 断流弥合水锤最优防护措施的比较与分析[J]. 中国给水排水, 2015, 31(1):52-60.
GE Guang-huan, KOU Kun, ZHANG Jun. Comparison and analysis of optimal protective measures for water hammer caused by cut-off and closure[J]. China Water and Wastewater, 2015, 31(1):52-60.
- [19] 饶雪峰, 刘海涛, 苏雷. 长距离压力输水管道水锤防护设计[J]. 给水排水, 2013, 39(2):123-126.
RAO Xue-feng, LIU Hai-tao, SU Lei. Protection design of water hammer in long distance pressure water delivery pipeline[J]. Water and Wastewater Engineering, 2013, 39(2):123-126.
- [20] Wan W Y, Zhang B. Investigation of water hammer protection in water supply pipeline systems using an intelligent self-controlled surge tank[J]. Energies, 2018, 11(6):1-16.
- [21] 张聆瑜. 泄压阀的选型分析和应用[J]. 石油化工安全环保技术, 2012, 28(6):40-42.
ZHANG Ling-yu. Selection analysis and application of relief valve[J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2012, 28(6):40-42.
- [22] 高学平, 蒋琳琳, 刘奕朗, 等. 长距离重力流输水管路水锤压力数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6):6-9.
GAO Xue-ping, JIANG Lin-lin, LIU Yi-lang, et al. Numerical simulation of surge pressure for long-distance gravity flow pipeline[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science and Technology, 2012, 10(6):6-9.
- [23] 王娜. 泵站压力管道的水锤研究[J]. 水利规划与设计, 2016(1):85-88.
WANG Na. Study on water hammer in pressure pipeline of pumping station[J]. Water Resources Planning and Design, 2016(1):85-88.
- [24] 邓安利, 蒋劲, 兰刚. 长距离输水工程停泵水锤的空气罐防护特性[J]. 武汉大学学报:工学版, 2015, 48(3):402-406.
DENG An-li, JIANG Jin, LAN Gang. Protective characteristics of air tank for water hammer caused by pump stopping in long distance water delivery project[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(3):402-406.
- [25] 汪建平. 伴有水柱分离的长距离平坦管路停泵水锤综合防护研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
WANG Jian-ping. Study on pump failure water hammer with water column separation in long-distance flat pipeline[D]. Xi'an: Changan University, 2017.