

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.21.010

# 负扬程大流量调水工程的水锤防护效果分析

黄 伟, 祖子豪, 李火坤, 黄 鑫, 陈祥即  
(南昌大学 工程建设学院, 江西 南昌 330031)

**摘 要:** 对于长距离、负扬程、大流量调水工程来说,事故停泵水锤是影响管道安全运行的主要威胁之一,所以选取合理的防护方案尤为重要。结合实际工程,利用特征线法和正交试验法,对空气阀与空气阀调压室新型联合防护方案开展停泵水锤数值模拟,同时分析不同空气阀口径、进排气流量系数和空气阀调压室短管尺寸对水力控制效果的影响。结果表明,空气阀对于消除负压、抑制正压存在一个合适的口径,并不是越大或者越小就越好;空气阀与空气阀调压室联合防护能够将负压控制在 $-2\text{ m}$ 内,比单一空气阀的防护效果更好,是一种十分经济且水锤防护效果较好的方案;相比于其他几种因素,空气阀调压室的短管高度对水锤防护效果的影响最大,所以选择合理的短管尺寸对于水锤防护至关重要。

**关键词:** 负扬程; 停泵水锤; 空气阀; 空气阀调压室; 水锤防护

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)21-0059-08

## Evaluation of Protective Performance of Water Hammer in Water Diversion Project with Negative Head and Large Flow Rate

HUANG Wei, ZU Zi-hao, LI Huo-kun, HUANG Xin, CHEN Xiang-ji  
(School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** In long-distance water diversion projects characterized by negative head and large flow rate, the occurrence of water hammer-induced accidents poses a significant threat to the safe operation of pipelines. Therefore, selecting an appropriate protective scheme is of paramount importance. In conjunction with the actual project, the novel combined scheme of air valves and air-valve surge tank (AVST) for pump stop water hammer protection was numerically simulated using the characteristic line method and orthogonal test approach. Additionally, the impact of varying air valve diameters, inflow and outflow coefficients, as well as the size of standpipe in the AVST on the hydraulic control performance was analyzed. The air valve had an appropriate diameter to effectively mitigate negative pressure and control positive pressure. It is important to note that a larger or smaller size does not necessarily yield better performance. The combined protection system comprising both air valve and AVST effectively maintained negative pressure below  $-2\text{ m}$ , demonstrating superior performance compared to a standalone air valve. This approach represents a highly economical and efficient solution for mitigating water hammer. In comparison to other factors, the height of standpipe in the AVST exerted a significant influence on the effectiveness of water hammer protection. Therefore, selecting an appropriate standpipe size was crucial

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3209404); 江西省自然科学基金资助项目(20232BAB204093)

通信作者: 李火坤 E-mail: lihuokun@ncu.edu.cn

for mitigating water hammer.

**Key words:** negative head; pump-stopping water hammer; air valve; air-valve surge tank; water hammer protection

在长距离泵站调水系统中,由于突发性抽水断电事故的发生,导致泵后压力急剧下降,降压波向下游管道传播时,当管道内水的压力降低到汽化压力以下后会发生液柱分离现象,引起的水锤压力会对输水管道造成严重破坏,因此需要采取防护措施控制管内负压<sup>[1-3]</sup>。空气阀作为能有效消除负压、抑制液柱分离的设备,具有造价低、结构简单和安装方便等优势,在调水工程中被广泛使用<sup>[4]</sup>。对此,国内外学者开展了大量的相关研究。Huang等<sup>[5]</sup>研究了不同空气阀布置方案对水锤防护的影响,发现空气阀布置数量及位置对防护效果的影响较大。张健等<sup>[6]</sup>进行了空气阀布置的理论分析,提出在不同工况条件下设置空气阀应满足的相关公式与准则。Bianchi等<sup>[7]</sup>基于空气阀进排气过程的理论基础,提出了一个充水排气过程中空气阀尺寸选择的理论公式,通过数值模拟并结合试验验证了公式的可靠性。徐放等<sup>[8]</sup>分析了空气阀口径对水锤防护的影响,提出空气阀存在一个与管道直径和流速相关的最优口径。李小周等<sup>[9]</sup>针对不同型式的空气阀进行数值模拟分析,发现选择合理型式的空气阀能够降低负压,防止液柱分离。郭永鑫等<sup>[10]</sup>指出空气阀动态特性参数对空气阀的水力瞬变控制效果有直接影响。褚志超等<sup>[11]</sup>和李小周等<sup>[12]</sup>证明空气阀的进气流量系数对控制负压效果影响较大,排气流量系数则对二次瞬变压力有影响。杨开林<sup>[13]</sup>提出了一种能提高空气阀调压效果的装置——空气阀调压室,并将其引入实际工程中,不仅取得了良好的水锤防护效果,并且大大减少了工程投资。

然而,上述研究大多针对于正扬程调水工程的防护,而负扬程工程(上游水位高于下游,地形扬程为负)则与之不同,当发生事故停泵时,管道内的负压更大,对于控制管道负压的要求更高。因此,笔者结合实际负扬程、大流量工程,对空气阀与空气阀调压室新型联合防护方案开展停泵水锤数值模拟,同时分析不同空气阀口径、进排气流量系数和空气阀调压室短管尺寸对水力控制效果的影响。

## 1 数学模型

### 1.1 管道水击方程

特征线方法是当前常用的求解管道水力瞬变的数值计算方法,采用特征线方法可得到管道相容性方程<sup>[14]</sup>,见式(1)和式(2)。

$$C^+: H_{Pi} = C_1 - B_1 Q_{Pi} \quad (1)$$

$$C^-: H_{Pi} = C_2 + B_2 Q_{Pi} \quad (2)$$

式中: $H_{Pi}$ 、 $Q_{Pi}$ 分别为 $t$ 时刻管道内 $i$ 断面 $P$ 点的未知水头(m)和流量( $m^3/s$ ); $C_1$ 、 $C_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 为 $t - \Delta t$ 时刻的已知量。

### 1.2 空气阀

空气阀模型如图1所示。

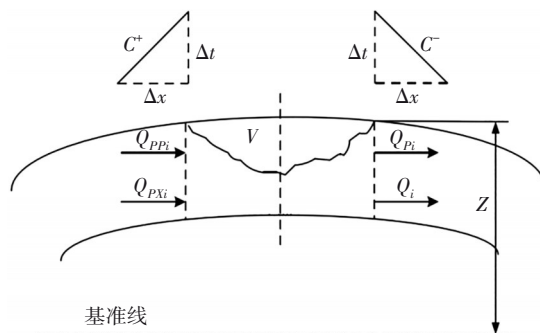


图1 空气阀模型示意

Fig.1 Schematic diagram of air valve boundary condition model

流过空气阀的空气量取决于管外大气的绝对压力 $p_a$ 、绝对温度 $T_a$ ,以及管内的绝对温度 $T$ 和绝对压力 $p$ ,分为4种情况<sup>[15]</sup>。

#### ① 空气以亚声速流入

$$\dot{M}_a = C_{in} A_{in} \sqrt{7 p_a \rho_a (p_r^{1.4286} - p_r^{1.714})} \quad (3)$$

$$0.53 < p_r < 1$$

式中: $\dot{M}_a$ 为空气质量流量,kg/s; $C_{in}$ 为空气进入阀门时的流量系数; $A_{in}$ 为进气时阀的流通面积, $m^2$ ; $\rho_a = p_a / (RT_a)$ , $\rho_a$ 为大气密度( $kg/m^3$ ), $p_a$ 为管外大气的绝对压力(Pa), $T_a$ 为绝对温度(K), $R$ 为气体常数; $p_r = p / p_a$ , $p$ 为管内绝对压力(Pa)。

#### ② 空气以临界速度流入

$$\dot{M}_a = C_{in} A_{in} \frac{0.686}{\sqrt{RT_a}} p_a \quad p_r \leq 0.53 \quad (4)$$

③ 空气以亚声速流出

$$\dot{M}_a = -C_{out} A_{out} p_a p_r \sqrt{\frac{7}{RT} p_r^{-1.4286} - p_r^{-1.714}} \quad 1 < p_r < 1/0.53 \quad (5)$$

式中:  $C_{out}$  为排气时阀的流量系数;  $A_{out}$  为排气时阀的流通面积,  $m^2$ 。

④ 空气以临界速度流出

$$\dot{M}_a = -C_{out} A_{out} \frac{0.686 p_a p_r}{\sqrt{RT}} \quad p_r \geq 1/0.53 \quad (6)$$

当水头降到管线高度以下时,打开空气阀让空气流入,在空气被排出之前,气体满足恒定内温的完善气体方程,见式(7)。

$$pV = M_a RT \quad (7)$$

式中:  $V$  为管内空气体积,  $m^3$ ;  $M_a$  为空气质量,  $kg$ 。

在  $t$  时刻,式(7)近似为式(8)。

$$p \left[ V_0 + 0.5 \Delta t (Q_i - Q_{pxi} - Q_{ppi} + Q_{pi}) \right] = \left[ M_{a0} + 0.5 \Delta t (\dot{M}_{a0} + \dot{M}_a) \right] RT \quad (8)$$

式中:  $V_0$  为时刻  $t_0$  的气穴体积,  $m^3$ ;  $Q_i$  为  $t_0$  时刻流出  $i$  断面的流量,  $m^3/s$ ;  $Q_{pxi}$  和  $Q_{ppi}$  分别为  $t_0$  和  $t$  时刻流入  $i$  断面的流量,  $m^3/s$ ;  $M_{a0}$  为  $t_0$  时刻的空气质量,  $kg$ ;  $\dot{M}_{a0}$  为空穴在  $t_0$  时刻  $i$  断面的空气流量,  $kg/s$ ;  $T$  为管内的绝对温度,  $K$ ;  $\Delta t = t - t_0$  为计算时间步长,  $s$ 。

管道内  $H_p$  和  $p$  之间的关系见式(9)。

$$H_p = Z + \frac{p - p_a}{\gamma} \quad (9)$$

式中:  $\gamma$  为水的容重,  $N/m^3$ ;  $Z$  为空气阀高程,  $m$ 。

将式(1)、式(2)和式(9)代入式(8)可得式(10)。

$$p \left\{ V_0 + \frac{\Delta t}{2} \left[ Q_i - Q_{pxi} - \frac{C_1 + C_2}{B} + \frac{2}{B} \left( Z + \frac{p - p_a}{\gamma} \right) \right] \right\} = \left[ M_{a0} + \frac{\Delta t}{2} (\dot{M}_{a0} + \dot{M}_a) \right] RT \quad (10)$$

式中仅有管道内绝对压力  $p$  为  $t$  时刻的未知量,其余参数均为  $t - \Delta t$  时刻的已知量或常量。

### 1.3 空气阀调压室

空气阀调压室模型如图2所示。空气阀调压室是一种空气阀和短管组合的水锤控制措施,通过在

输水干管顶端人为设置一定体积的短管,并将短管顶部封闭,然后在其顶部设置空气阀,以提高空气阀的调压效果<sup>[13]</sup>。工程正常运行时,短管内充满水。当水锤管道中产生负压时,短管内的水流首先流出补充输水主管,同时外界空气通过顶端的空气阀进入管内破坏真空;当管内压力增大时,主管内水流流入短管调压室,水流压缩空气使其缓慢从空气阀排出。由于有气垫缓冲作用,所以理论上对于弥合性水锤正压的防护效果较好<sup>[16]</sup>。为了使得工程正常运行时通过空气阀调压室的水头损失较小,并降低水锤发生时短管调压室内的水位波幅,可以将短管与输水主管采用阻抗式进行连接。

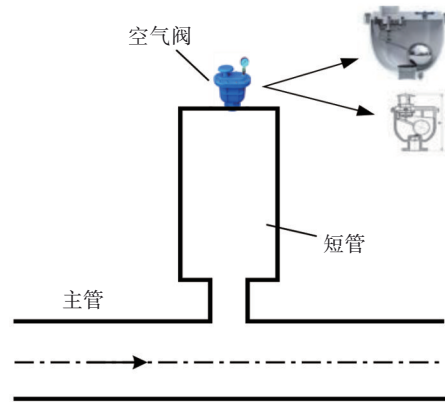


图2 空气阀调压室模型示意

Fig.2 Schematic diagram of air-valve surge tank model

## 2 实例分析

### 2.1 工程概况

工程实例为某长距离、负扬程有压输水工程,输水管道全长约为80 km,采用2根直径为4 m的PCCP管和直径为3.8 m的有压隧洞输水形式。工程总布置分为两段,第一段为泵站进水池到中间调节池,该段为长约57 km的PCCP管;第二段为调节池到出水池,该段采取长约21 km的低压暗涵输水,管线布置如图3所示。

为了加大输水流量,工程采用泵站加压输水方式,取水泵站安装8台大型离心泵机组,每根输水管道对应4台机组(3用1备),水泵出口处设置液控缓闭止回蝶阀,泵站进水池设计水位为60.33 m,调节池设计水位为56.40 m,出水池设计水位为49.00 m。水泵机组参数如下:设计扬程  $H=59.5$  m,设计流量  $Q=10.6$   $m^3/s$ ,额定转速  $N=375$   $r/min$ ,额定功率  $P=6\ 860$   $kW$ ,转动惯量  $J=15\ 000$   $kg \cdot m^2$ 。工程稳态运行时的管线沿程水压如图4所示。

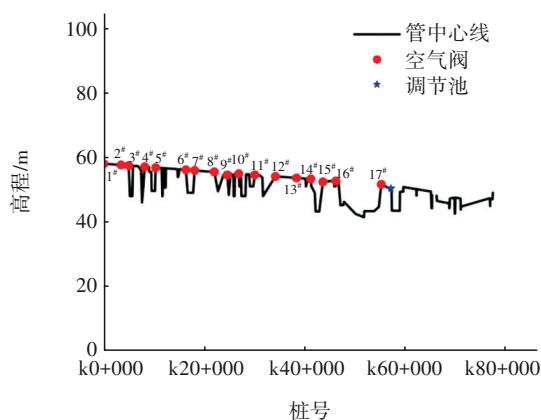


图3 输水管线布置示意

Fig.3 Distribution diagram of pipeline

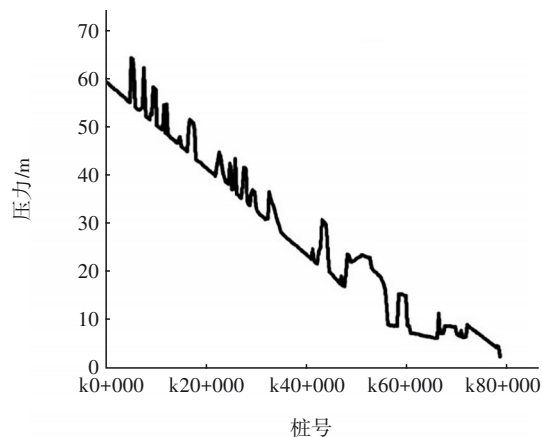


图4 稳定运行时管道压力

Fig.4 Pipeline pressure during steady operation

## 2.2 无防护措施下的停泵水锤分析

针对控制性工况三台工作水泵同时事故断电, 泵后蝶阀拒动的无防护工况开展数值模拟, 得到的管道沿程压力包络线结果如图5所示。

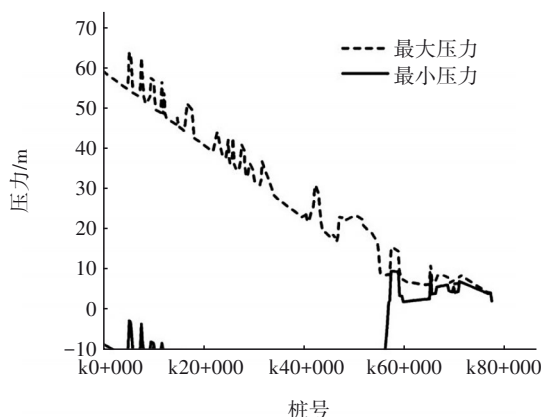


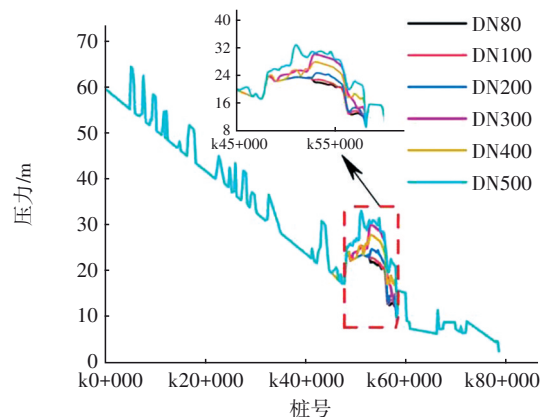
图5 事故停泵工况下的管线沿程压力包络线

Fig.5 Pressure envelop along the pipeline under the condition of accidental pump stop

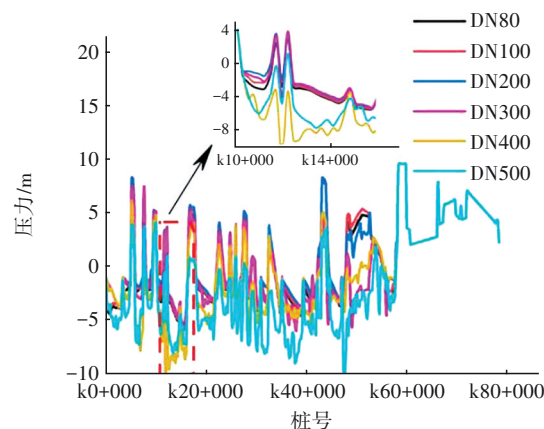
事故停泵后的沿程最大压力为63 m,最小压力为-10 m(汽化),水泵最小转速为47 r/min,水泵出口最小压力为-8 m。可以发现,由于下游水位低于上游,停泵后管内不发生倒流,故水泵不会发生倒转;水泵出口到调节池之间很长范围的管道最小压力均在饱和蒸汽压力以下,发生液柱分离现象,从而可能导致管道、阀门、机组等设施被严重破坏,所以需要考虑采取防护措施,消除管道内的负压。

## 2.3 不同空气阀口径对水锤防护效果的影响

为了消除负压,通过模拟分析,在水泵出口到调节池之间的管线高点处布置了17个空气阀(布置位置见图3)。空气阀类型采用注气微排阀,进排气口径比为4:1,流量系数取0.7,这样使得空气阀的排气能力小于进气能力,既能保证发生停泵水锤时快速抵消负压,同时又避免了空气阀因排气过快而导致的弥合水锤。不同空气阀口径下对应的沿程最大和最小压力包络线如图6所示。



a. 沿程最大压力



b. 沿程最小压力

图6 不同口径空气阀对应的沿程最大和最小压力

Fig.6 Maximum and minimum pressures along the pipeline with different air valve diameters



空气阀最大口径按照实际工程取值方法,即取主管管径的1/8(DN500),并且对比分析了口径分别为DN80、DN100、DN200、DN300和DN400时的防护效果。从图6(a)可以看出,在桩号k40+000至调节池之间,最大压力会随着空气阀口径的增大而增加, DN80的空气阀在桩号k48+227处的最大压力为23.68 m, DN500的空气阀在桩号为k51+076处的最大压力为32.91 m。这是因为口径更大的空气阀排气速率更快,导致冲击水锤更大。而对于管道负压的消除而言,空气阀口径并不是越大或越小就越好,而是存在一个适当的口径<sup>[8,17]</sup>,如图6(b)所示。对比分析后发现,相比于其他口径的空气阀, DN200控制负压的效果较好,沿程最小压力为-5.49 m。综合来看,对于本工程空气阀口径取DN200时的防护效果较好。

#### 2.4 空气阀加空气阀调压室的联合防护效果

尽管口径为DN200时空气阀的防护效果较好,但是安装的17个空气阀并不能把沿程负压控制在设计要求的-2 m内,所以在负压较大的地方将其中的7个空气阀替换成空气阀调压室,如图7所示,即将1<sup>#</sup>节点、5<sup>#</sup>节点、7<sup>#</sup>节点、9<sup>#</sup>节点、11<sup>#</sup>节点、12<sup>#</sup>节点和15<sup>#</sup>节点处的空气阀换成空气阀调压室。采用空气阀加空气阀调压室进行联合防护,其中空气阀调压室参数如下:顶部空气阀口径为DN200,短管直径为4 m、高为5 m。

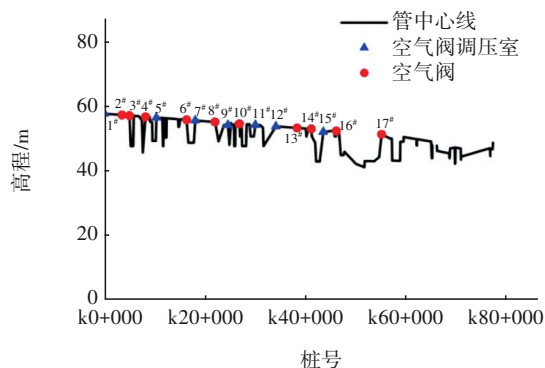


图7 空气阀及空气阀调压室布置示意

Fig.7 Distribution diagram of air valves and air-valve surge tanks

对该防护情况下三台工作水泵同时进行事故断电,并对泵后蝶阀拒动工况开展数值模拟,得到的管道沿程压力包络线如图8所示。可以看出,采用空气阀加空气阀调压室进行联合防护后,管路沿线最大压力为64.00 m,小于管道设计最大工作压

力80.00 m,最小压力提升至-1.90 m,满足负压控制要求;泵后最小压力提升至1.29 m,水泵最小转速为20 r/min,同样不会倒转,满足设计要求。这说明引入空气阀调压室能够有效控制住管道内的负压,并且相比于空气罐、调压塔等防护措施,空气阀调压室具有体积更小、安装方便,以及后期运行成本更低等优势。所以对于负扬程、大流量工程来说,空气阀联合空气阀调压室是一种十分经济且水锤防护效果较好的防护方案。

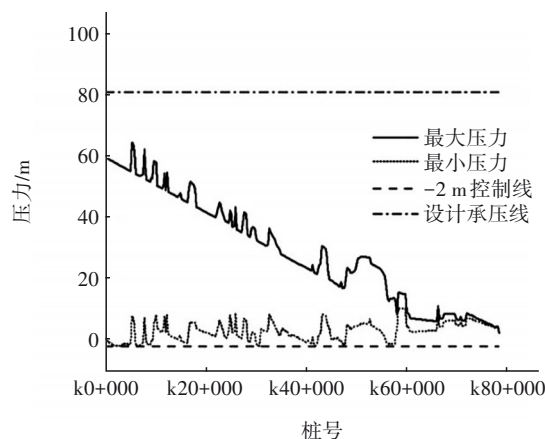
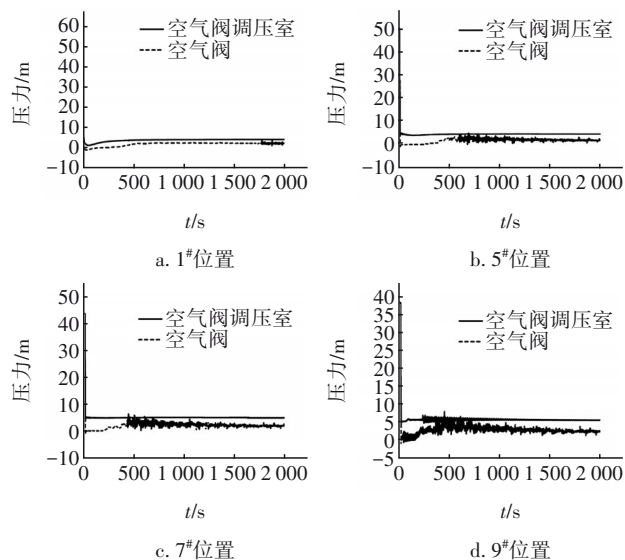


图8 联合防护下管道沿程压力包络线

Fig.8 Pressure envelop curve along the pipeline under the condition of joint protection

图9为7处空气阀与空气阀调压室的压力特性。可以看出,空气阀调压室不仅能够提高空气阀的负压控制效果,而且其压力波动比空气阀更小,说明空气阀调压室与空气阀相比更能有效避免因排气过快而导致的二次水锤压力。



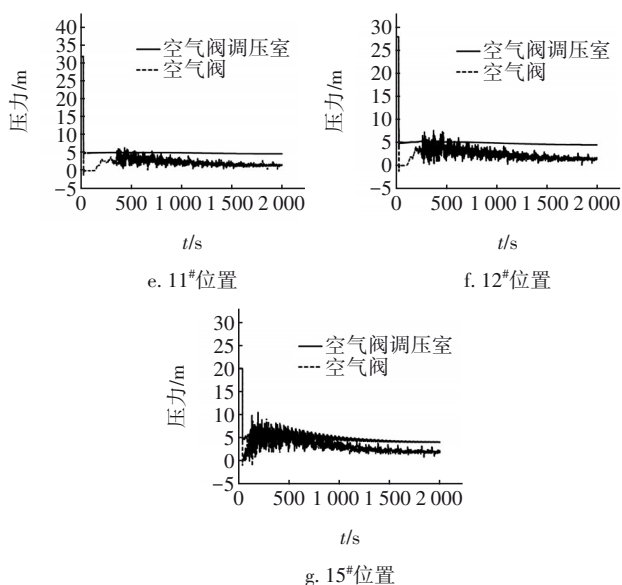


图9 7处空气阀与空气阀调压室的压力特性

Fig.9 Pressure characteristics of air valves and air-valve surge tanks in the seven positions

## 2.5 空气阀流量系数与调压室尺寸的影响

为了确定DN200空气阀进排气流量系数,以及空气阀调压室短管尺寸对停泵水锤防护效果的影响,需要针对空气阀进排气流量系数 $C_{in}$ 和 $C_{out}$ 、空气阀调压室的短管直径 $D$ 和短管高度 $L$ 等4个因素对管道沿程最大压力 $H_{max}$ 、最小压力 $H_{min}$ 、泵后压力和水泵转速的影响进行敏感性分析。采用正交试验法进行模拟分析<sup>[18]</sup>,各因素的水平值见表1。

表1 各因素水平值

Tab.1 Horizontal value of each factor

水平序号	$C_{in}$	$C_{out}$	$D/m$	$L/m$
1	0.50	0.10	1	2
2	0.65	0.25	2	3
3	0.80	0.40	3	4
4	0.95	0.55	4	5

按 $L_{16}(4^4)$ 正交表安排试验,模拟结果见表2。

表3 各水平值的极差结果

Tab.3 Range analysis for each level value

项目	$H_{min}/m$				泵后压力/m				水泵转速/( $r \cdot min^{-1}$ )			
	$C_{in}$	$C_{out}$	$D$	$L$	$C_{in}$	$C_{out}$	$D$	$L$	$C_{in}$	$C_{out}$	$D$	$L$
$K_1$	-2.92	-2.95	-3.36	-3.43	0.71	0.73	0.50	-0.05	36.24	36.23	36.35	49.98
$K_2$	-3.40	-3.17	-3.01	-3.57	0.64	0.64	0.68	0.38	36.32	36.32	36.25	42.53
$K_3$	-2.99	-3.06	-3.08	-3.11	0.65	0.63	0.73	0.91	36.24	36.25	36.23	32.01
$K_4$	-3.01	-3.14	-2.87	-2.22	0.65	0.65	0.74	1.40	36.27	36.26	36.24	20.55
$R$	0.48	0.22	0.49	1.35	0.07	0.10	0.24	1.45	0.08	0.09	0.12	29.43

此外,以表2中序号9、10和13的模拟结果为

可以看出,各因素对沿程最大压力没有影响,最大压力值均为64.46 m,所以为了便于综合分析且简化对比过程,以沿程最小压力为例,在 $C_{in}$ 的水平1( $C_{in}=0.50$ )下,对应指标的最小压力 $H_{min}$ 求和并取均值( $K_1$ ),可以得出 $K_1=(-3.48-3.32-3.02-1.85)/4=-2.92$  m。

表2 正交试验的模拟结果

Tab.2 Simulation results of orthogonal test

序号	$C_{in}$	$C_{out}$	$D/m$	$L/m$	$H_{max}/m$	$H_{min}/m$	泵后压力/m	水泵转速/( $r \cdot min^{-1}$ )
1	0.50	0.10	1	2	64.46	-3.48	-0.04	49.97
2	0.50	0.25	2	3	64.46	-3.32	0.40	42.53
3	0.50	0.40	3	4	64.46	-3.02	0.98	31.98
4	0.50	0.55	4	5	64.46	-1.85	1.50	20.46
5	0.65	0.10	2	4	64.46	-3.18	0.96	31.98
6	0.65	0.25	1	5	64.46	-3.01	1.18	20.80
7	0.65	0.40	4	2	64.46	-3.41	-0.05	49.98
8	0.65	0.55	3	3	64.46	-4.02	0.47	42.52
9	0.80	0.10	3	5	64.46	-1.89	1.50	20.45
10	0.80	0.25	4	4	64.46	-2.96	1.01	31.98
11	0.80	0.40	1	3	64.46	-3.68	0.15	42.55
12	0.80	0.55	2	2	64.46	-3.42	-0.07	49.98
13	0.95	0.10	4	3	64.46	-3.26	0.50	42.53
14	0.95	0.25	3	2	64.46	-3.40	-0.04	49.98
15	0.95	0.40	2	5	64.46	-2.12	1.43	20.49
16	0.95	0.55	1	4	64.46	-3.27	0.70	32.09

计算各影响因素在不同水平值下对应的管道沿程最小压力、泵后压力和水泵转速等3个指标的极差值 $R$ ,结果列于表3。可以看出,管道沿程最小压力、泵后压力和水泵转速对空气阀调压室短管高度最为敏感,短管直径次之。对于影响沿程最小压力 $H_{min}$ 的因素按照敏感性排序为 $L>D>C_{in}>C_{out}$ ,影响泵后压力的因素按敏感性排序为 $L>D>C_{out}>C_{in}$ ,影响水泵转速的因素按敏感性排序为 $L>D>C_{out}>C_{in}$ 。

表3 各水平值的极差结果

Tab.3 Range analysis for each level value

项目	$H_{min}/m$				泵后压力/m				水泵转速/( $r \cdot min^{-1}$ )			
	$C_{in}$	$C_{out}$	$D$	$L$	$C_{in}$	$C_{out}$	$D$	$L$	$C_{in}$	$C_{out}$	$D$	$L$
$K_1$	-2.92	-2.95	-3.36	-3.43	0.71	0.73	0.50	-0.05	36.24	36.23	36.35	49.98
$K_2$	-3.40	-3.17	-3.01	-3.57	0.64	0.64	0.68	0.38	36.32	36.32	36.25	42.53
$K_3$	-2.99	-3.06	-3.08	-3.11	0.65	0.63	0.73	0.91	36.24	36.25	36.23	32.01
$K_4$	-3.01	-3.14	-2.87	-2.22	0.65	0.65	0.74	1.40	36.27	36.26	36.24	20.55
$R$	0.48	0.22	0.49	1.35	0.07	0.10	0.24	1.45	0.08	0.09	0.12	29.43

此外,以表2中序号9、10和13的模拟结果为

例,其对应的空气阀调压室体积分别为35.34(直径

为3 m、高为5 m)、50.27(直径为4 m、高为4 m)和37.70(直径为4 m、高为3 m)  $\text{m}^3$ ,而相应的管道沿程最小压力分别为-1.89、-2.96和-3.26 m。由此可见,空气阀调压室的短管采用“瘦高型”的负压防护效果要优于“矮胖型”,这是因为管道负压的防护效果取决于空气阀调压室短管向主管内补水的速率,而不是补水的体积。当发生事故停泵后,“瘦高型”空气阀调压室因高度较高、静压较大,向主管道内补水的速率更快,因而负压的防护效果更好。因此,当采用空气阀调压室进行防护时,应合理确定短管的直径和高度,以保证既能有效控制管内负压,又能降低空气阀调压室尺寸,从而节约投资。

### 3 结论

① 空气阀作为最常用的水锤防护方式之一,其口径对于防护效果影响很大,并不是选择空气阀口径越大或越小越好,而是存在一个合适的口径以达到理想的防护效果。

② 单一防护方案往往很难满足工程防护要求,本研究将7个位置处的空气阀替换成直径为4 m、高度为5 m的空气阀调压室进行联合防护。在事故断电、阀门拒动工况下,管道沿程最大压力为64.00 m,最小压力为-1.90 m,水泵最小转速为20 r/min(无倒转)。该方案不但能减少空气阀的安装数量,并且能将沿程管道内的负压控制在了-2 m以内,是一种十分经济且负压控制效果较好的水锤防护方案。

③ 改变DN200空气阀的进排气流量系数和空气阀调压室短管直径,对防护效果的影响较小,而空气阀调压室短管高度变化对水锤防护效果的影响最大。以沿程最小压力 $H_{\min}$ 为例, $C_{\text{in}}$ 、 $C_{\text{out}}$ 和短管直径 $D$ 对应的极差分别为0.48、0.22、0.49 m,都小于改变短管高度 $L$ 的极差1.35 m。因此,选择合适的短管尺寸对于空气阀调压室的水锤防护效果至关重要。

### 参考文献:

- [1] CAO Y P, DOU Y H, HUANG Y X, *et al.* Study on vibration characteristics of fracturing piping in pump-starting and pump-stopping water hammer[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2019, 19(4): 1093-1104.
- [2] 富友, 蒋劲, 李燕辉, 等. 改进双流体模型计算有液柱分离的管路水锤压力[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 58-65.
- FU You, JIANG Jin, LI Yanhui, *et al.* Calculation of pipe water hammer pressure with liquid column separation by improved two-fluid model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 58-65(in Chinese).
- [3] 张明, 郑双凌, 马吉明, 等. 简单管路中水击的类型偏误分析及解析计算[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(9): 986-992.
- ZHANG Ming, ZHENG Shuangling, MA Jiming, *et al.* Effect of errors in predicting the water hammer types and pressures in a simple pipeline[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2017, 57(9): 986-992 (in Chinese).
- [4] 徐放, 李志鹏, 王东福, 等. 水锤防护空气阀研究综述[J]. *流体机械*, 2018, 46(6): 33-38.
- XU Fang, LI Zhipeng, WANG Dongfu, *et al.* A review on air valve performance and water hammer protection [J]. *Fluid Machinery*, 2018, 46(6): 33-38 (in Chinese).
- [5] HUANG S F, WANG F, XU H, *et al.* Analysis on air valve placement in long-distance water conveyance pipeline system [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 610/613: 2513-2518.
- [6] 张健, 朱雪强, 曲兴辉, 等. 长距离供水工程空气阀设置理论分析[J]. *水利学报*, 2011, 42(9): 1025-1033.
- ZHANG Jian, ZHU Xueqiang, QU Xinghui, *et al.* Arrangement of air-valve for water hammer protection in long-distance pipelines [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(9): 1025-1033 (in Chinese).
- [7] BIANCHI A, MAMBRETTI S, PIANTA P. Practical formulas for the dimensioning of air valves [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(10): 1177-1180.
- [8] 徐放, 李志鹏, 王荣辉, 等. 空气阀口径对有压管道停泵水锤的防护研究[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(5): 52-55.
- XU Fang, LI Zhipeng, WANG Ronghui, *et al.* Influence of air valve diameter on protection of water hammer caused by pump-stop in pressurized pipelines [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(5): 52-55 (in Chinese).
- [9] 李小周, 朱满林, 陶灿. 空气阀型式对压力管道水锤防护的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(7): 599-605.

- LI Xiaozhou, ZHU Manlin, TAO Can. Impacts of type of air valve on water hammer protection in pressurized pipelines [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, 33 (7): 599-605 (in Chinese).
- [10] 郭永鑫, 张弢, 徐金鹏, 等. 空气阀气液两相动态特性研究综述[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16 (6): 148-156.
- GUO Yongxin, ZHANG Tao, XU Jinpeng, *et al.* A literature review on the dynamic behaviors of air valves during gas-liquid transients [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16 (6): 148-156 (in Chinese).
- [11] 褚志超, 吴建华, 郭伟奇, 等. 空气阀进排气流量系数对停泵水锤的敏感性研究[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(5): 152-155.
- CHU Zhichao, WU Jianhua, GUO Weiqi, *et al.* Sensitivity study of inlet and exhaust flow coefficient of air valve for pump water hammer [J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(5): 152-155 (in Chinese).
- [12] 李小周, 李帅毅, 费良军, 等. 进排气流量系数对传统空气阀控制瞬变效果的影响[J]. *流体机械*, 2022, 50(4): 58-64.
- LI Xiaozhou, LI Shuaiyi, FEI Liangjun, *et al.* Influence of intake and exhaust flow coefficient of traditional air valve on transient control effect [J]. *Fluid Machinery*, 2022, 50(4): 58-64 (in Chinese).
- [13] 杨开林. 控制输水管道瞬态液柱分离的空气阀调压室[J]. *水利学报*, 2011, 42(7): 805-811.
- YANG Kailin. Air-valve surge tank for controlling liquid column separation in water supply projects [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42 (7): 805-811 (in Chinese).
- [14] WYLIE E B, STREETER V L. *Fluid Transients in Systems* [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.
- [15] 杨开林. 电站与泵站中的水力瞬变及调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- YANG Kailin. *Hydraulic Transient and Regulation of Power Station and Pumping Station* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2000 (in Chinese).
- [16] 吴震. 某长距离低扬程输水工程空气阀调压室与空气阀的联合水锤防护研究[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(7): 123-126.
- WU Zhen. Research on combined water hammer protection of air-valve surge tank and air valve in low-lift and long distance water delivery project [J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41 (7): 123-126 (in Chinese).
- [17] 陆天友. 空气阀在多起伏输水管线中的应用[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(9): 52-54.
- LU Tianyou. Application of air valve to water delivery pipeline in rugged terrain [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(9): 52-54 (in Chinese).
- [18] 李火坤, 万子豪, 黄伟, 等. 中高水头水电站水轮机导叶关闭规律鲁棒性综合评价[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2023, 63(1): 125-133.
- LI Huokun, WAN Zihao, HUANG Wei, *et al.* Robust comprehensive evaluation of guide vane closure law in hydraulic turbines in moderately-high head hydropower plants [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2023, 63(1): 125-133 (in Chinese).

作者简介: 黄伟(1990-), 男, 江西高安人, 博士, 副教授, 主要研究方向为电站与泵站水力过渡过程。

E-mail: huangwei0214@ncu.edu.cn

收稿日期: 2024-05-06

修回日期: 2024-06-01

(编辑: 任莹莹)

珍惜地下水, 珍视隐藏的资源