

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221430

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

吴 震

(北京禹冰水利勘测规划设计有限公司, 北京 100048)

摘要: 针对长距离低扬程输水工程中单个空气阀的水锤控制距离较短无法有效抑制管内真空等问题,提出了空气阀调压室与空气阀联合防护的新型水锤控制方案,并以某长距离低扬程输水工程为例,对单纯采用空气阀防护以及空气阀调压室与空气阀的联合防护方案开展了水力过渡过程数值模拟与对比分析。结果表明,单纯采用空气阀防护时主管内发生了液柱分离,且因排气过快引发了较大的冲击水锤;而采用空气阀调压室与空气阀联合防护方案不仅能够有效抑制主管内的真空,还可有效缓解排气时引发的冲击水锤,是一种经济且有效的水锤防护措施,可为其他长距离低扬程输水工程的水锤防护提供借鉴。

关键词: 低扬程; 水锤防护; 空气阀; 空气阀调压室; 液柱分离

中图分类号: TV134.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0123-04

1 工程概况

某长距离低扬程加压泵站位于河南省鹿邑县,其输水工程采用东、西线双管布置,输水管线长约 29.88 km,泵站装设 6 台(4 用 2 备)卧式单级双吸离心泵,每根输水管线对应 3 台水泵机组(2 用 1 备)。水泵的额定扬程为 31.0 m,额定流量为 5.942 m³/s,额定转速 425 r/min,水泵出口处设置 DN 1600 mm 液控缓闭止回蝶阀,水泵机组参数见表 1。泵站设计提水流量 22.9 m³/s,采用 2 根管径为 DN3000 的 PCCP 管输水,管壁厚 30 mm,设计糙率 0.012。东、西线管道对称布置,且管长差别不大,其中东线输水管线的布置情况见图 1。泵站进、出水池设计水位分别为 39.45、45.50 m,设计净扬程 6.05 m。输水管线沿线原设计共布置有 86 个空气阀井,每个空气阀井内设 2 个 DN300 的复合式空气阀。由于工程输水线路长、流量大,当发生事故停泵,将诱发较大的正、负水锤,若防护不当,可能造成爆管等事故,因而

表 1 水泵机组设计参数

Tab. 1 Design parameters of water pump unit

参数	设计扬程/m	设计流量/(m ³ ·s ⁻¹)	设计转速/(r·min ⁻¹)	额定效率/%	额定功率/kW	必需汽蚀余量/m	转动惯量/(kg·m ²)
取值	31.0	5.942	425.0	90.0	2 240	5.1	1 806

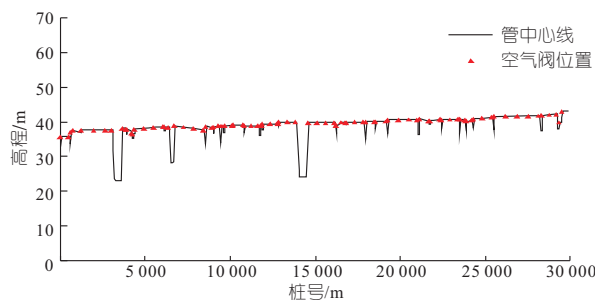


图 1 输水管线布置图

Fig. 1 Layout of water pipeline

有必要针对事故停泵等极端工况开展水锤防护方案的设计。空气阀是调水工程中常用的负水锤防护设施^[1,2]。HUANG S F 等^[3]对比分析了不同空气阀布置方案的水锤防护效果,指出空气阀数量及布置位置不合理,均会极大降低其防护效果;张健等^[4]推导了空气阀布设位置、间距和数量与管道纵断之间的关系,提出了空气阀的设置准则,为空气阀的优化布置提供了参考。对于长距离低扬程输水工程而言,单纯采用空气阀防护往往无法有效控制管道中的负压,此时可考虑空气阀与空气罐或调压塔等进行联合防护^[5,6]。然而,空气罐和调压塔造价昂贵,当扬程较低,输水管线长且布置平缓时所需空气罐和调压塔的体积较大。为此,杨开林^[7]提出了一种能够提高空气阀防护效果的装置——空气阀调压室,仅需在空气阀位置处加装一截短管,在有效调节管道内真空压力

收稿日期: 2022-07-13, 修回日期: 2022-09-15

作者简介: 吴震(1976-),男,高级工程师,研究方向为水工水力学, E-mail: wuzhen7607@163.com

的同时,降低了水锤控制措施的投资。当前关于空气阀调压室的防护性能研究较少。为此,本文以某长距离低扬程输水工程为例,对单纯空气阀防护及空气阀调压室与空气阀联合防护等方案开展水力过渡过程数值模拟与对比分析,验证了联合防护方案的有效性。

2 数学模型

所谓空气阀调压室,是在输水主管上安装一截密封的短管,并在短管顶部设置空气阀形成的组合体^[7],空气阀类型一般可选用复合式空气阀。因此,空气阀调压室的边界条件模型与空气阀的数学模型一致,配套的短管一般长度很短,可简化为刚性管近似处理。

空气阀进排气的动态过程是一个复杂的气液两相瞬变过程^[8],目前最常采用的空气阀模型^[9],将空气流入和流出空气阀的质量流量进行分类:空气以亚声速流入:

$$\dot{m} = C_{in} A_{in} \sqrt{2p\rho \left(\frac{r}{r-1}\right) \left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{2/r} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{r-1}{r}}\right]} \quad 0.53p_0 < p < p_0 \quad (1)$$

空气以临界速度流入:

$$\dot{m} = C_{in} A_{in} \sqrt{2p\rho \left(\frac{2}{r+1}\right)^{\frac{r+1}{r-1}}} \quad p < 0.53p_0 \quad (2)$$

空气以亚声速流出:

$$\dot{m} = -C_{out} A_{out} \sqrt{2p\rho \left(\frac{r}{r-1}\right) \left[\left(\frac{p_0}{p}\right)^{2/r} - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{r-1}{r}}\right]} \quad p_0 < p < \frac{p_0}{0.53} \quad (3)$$

空气以临界速度流出:

$$\dot{m} = -C_{out} A_{out} \sqrt{2p\rho \left(\frac{2}{r+1}\right)^{\frac{r+1}{r-1}}} \quad \frac{p_0}{0.53} < p \quad (4)$$

式中, \dot{m} 为空气的质量流量; C_{in} 、 C_{out} 分别为空气阀进气孔和排气孔的流量系数; A_{in} 、 A_{out} 分别为空气阀进气孔和排气孔的流通面积; p 、 p_0 分别为管道内绝对压力和外界大气的绝对压力; ρ 为空气密度; r 为多变指数,假设空气进出空气阀是等熵的,则 r 取为1.4。

通过空气阀进入主管内的空气在排出前,假设为恒定内温的完善气体,根据差分近似得:

$$p [\nabla_0 + 0.5\Delta t(Q_{e0} - Q_{r0} - Q_r + Q_c)] = [m_0 + 0.5\Delta t(\dot{m}_0 + \dot{m})] RT \quad (5)$$

式中, ∇_0 为时刻 t_0 的初始空穴体积; Δt 为时间步

长; Q_{e0} 、 Q_{r0} 分别为时刻 t_0 流出和流入空气阀断面处的流量; Q_c 、 Q_r 分别为时刻 t 流出和流入空气阀断面处的流量; m_0 为时刻 t_0 空穴中空气的质量; \dot{m}_0 为时刻 t_0 流入或流出的空气质量流量; R 为气体常数,一般可取 $287.1 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为管道内的绝对温度。

结合弹性管道的相容性方程,式(5)可转化为下式^[9]:

$$p \{ \nabla_0 + 0.5\Delta t [Q_{e0} - Q_{r0} - (C_P + C_M)/B + 2(p/\gamma + Z - H_a)/B] \} = [m_0 + 0.5\Delta t(\dot{m}_0 + \dot{m})] RT \quad (6)$$

其中

$$B = a/(gA)$$

式中, C_P 、 C_M 为 $t - \Delta t$ 时刻管道内 i 断面的已知量; a 为水击波速; g 为重力加速度; A 为管道横截面积; γ 为水的重度; Z 为空气阀安装高程; H_a 为当地大气压的绝对压力水头。

3 水锤防护方案对比

3.1 单纯空气阀防护(原方案)

本工程原设计的水锤防护方案为沿输水管线布置86个空气阀井,每个空气阀井内设2个DN300的复合式空气阀,其布设位置见图1。利用数学模型,对进、出水池设计水位下单根输水管线上2台水泵正常运行突然同时发生事故断电,泵后蝶阀拒动工况开展水力过渡过程数值模拟,模拟结果见图2。由图2可看出,在单纯采用空气阀防护的原水锤控制方案下,水泵的最大反转转速为水泵额定转速的0.44倍,最大倒流流量为额定

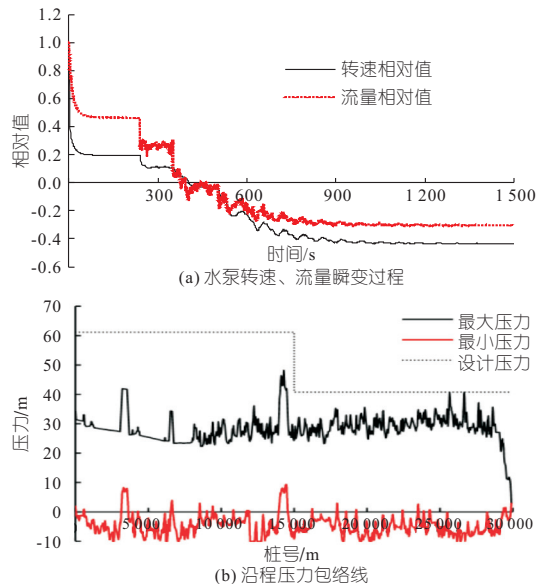


图2 空气阀防护的模拟结果

Fig. 2 Simulation results of air valve protection

流量的 0.30 倍;管路沿线最大水压为 48.21 m,在桩号 14+293;桩号 10+000 下游管道设置的空气阀因排气速度过快产生了冲击水锤,使下游管道内最大正压较大,有两处管段共约 70 m 长管段的最大水压接近管道的设计承压值;绝大多数的管段均存在负压,且多个管段的最小水压均低于 -10 m。这表明长距离且管线布置平缓的加压泵站输水工程空气阀的水锤控制距离有限。该工况下管线中发生了汽化现象,导致液柱分离,不满足水锤防护要求,有必要对管路系统的现有防护措施进行优化。

3.2 空气阀调压室与空气阀联合防护

鉴于此工程扬程较低(净扬程仅为 6.05 m),管线布置平缓,每个空气阀仅能控制较短距离的水压变化^[7],因此,经过大量试算,确定在管道沿程负压较大的 6 个位置处设置空气阀调压室来替换掉原位置处的空气阀,每个空气阀调压室顶部设置一对 DN 50 的复合式空气阀,其特征参数见表 2。并将 5 处空气阀口径由原来的 DN 300 调整为 DN 50,将 4 处空气阀口径由原来的 DN 300 调整为 DN 100,其设置位置见表 3。

表 2 空气阀调压室特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of air-valve surge tank

序号	桩号 /m	调压室底部高程/m	直径 /m	高度 /m	空气阀孔径/mm
1	0+065.00	35.76	3	3	DN 50
2	2+043.31	37.60	3	3	DN 50
3	3+564.16	38.18	3	2	DN 50
4	6+173.37	38.57	3	2	DN 50
5	14+647.47	39.79	3	3	DN 50
6	21+152.98	40.89	3	3	DN 50

表 3 调整后的复合式空气阀设置参数

Tab. 3 Adjusted parameters of air-valve

序号	桩号/m	原设计口径/mm	调整后口径/mm
1	0+536.22	DN 300	DN 50
2	0+649.17	DN 300	DN 50
3	0+765.18	DN 300	DN 50
4	1+252.17	DN 300	DN 50
5	2+696.37	DN 300	DN 50
6	3+185.92	DN 300	DN 100
7	6+406.08	DN 300	DN 100
8	13+886.85	DN 300	DN 100
9	29+556.33	DN 300	DN 100

分析优化方案下的水锤控制效果,当采取表 2、3 的空气阀调压室和空气阀联合防护时,同样地,对进、出水池设计水位下单根输水管线上 2 台水泵正常运行突然同时发生事故断电,泵后蝶阀拒动工况开展水力过渡过程数值模拟,模拟结果见图 3,原方案与优化防护方案的水锤特性参数极值对比见表 4。由图 3、表 4 可看出,在空气阀调压室与空气阀的联合防护方案下,水泵的最大反转转速为水泵额定转速的 0.48 倍,最大倒流流量为额定流量的 0.34 倍;管路沿线最大水压为 42.10 m,位于桩号为 3+220;当管路中产生负压时,空气阀调压室内的水体流出补充主管道,同时空气通过其顶部空气阀快速进入,破坏管内真空,使得管路沿线的负压均得到有效缓解,整个管段最小水压提升至 -3.11 m,满足工程设计要求;待水柱弥合时,主管内的压力水流流入空气阀调压室,同时通过其顶部空气阀缓慢排气,使得桩号 10+000 下游约 20 km 管道的冲击水锤也得到了极大缓解,较原单纯空气阀防护方案的最大水压

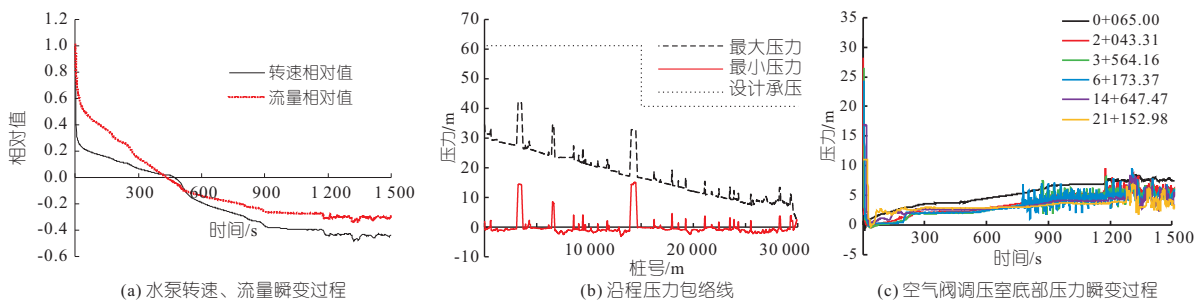


图 3 空气阀调压室与空气阀联合防护的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of combined air-valve surge tank and air valve protection

表 4 两种防护方案下的过渡过程极值对比

Tab. 4 Comparison of extreme values of transition process under two protection schemes

防护方案	水泵最大倒转	水泵出口	沿线最大	沿线最小
	转速相对值	最大水压/m	水压/m	水压/m
空气阀防护	0.44	35.79	48.21	-10.00 (汽化)
空气阀调压室+空气阀	0.48	34.45	42.10	-3.11

减小了 10 ~ 30 m 水头,可显著降低管道投资。这表明空气阀调压室不仅能够有效降低主管内负压,还能够避免空气阀排气过程中产生较大的冲击水锤,代价仅是增加了 6 处直径 3 m,高度 2~3 m 的短管,是一种十分经济且防护效果较好的水锤防护措施。

考虑到空气阀调压室的高度对水锤防护效果

的影响,本文还分别模拟了采用高度 1、5 m 的空气阀调压室的水锤防护效果,其沿程水压包络线对比结果见图 4。由图 4 可看出,减小空气阀调压室的高度至 1 m 将使管线局部出现较大的负压,在桩号 13+796 处最小负压达到了一 9.59 m,不满足水锤防护要求;而将高度增加至 5 m 后,该处管线的负压则降低至 -1.19 m,最大正压二者则相差不大。相比下增加空气阀调压室高度可有效减小管道负压,但考虑到增加空气阀调压室高度后不仅加大了防护设施的投资,同时还给调压室结构的稳定性带来不利影响,施工亦不便。因此,推荐采用表 2 优化方案中空气阀调压室的布置方式。

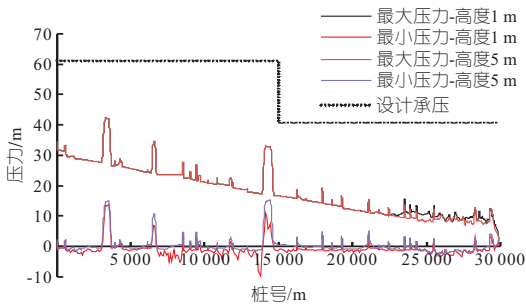


图 4 不同空气阀调压室高度的沿程水压包络线

Fig. 4 Envelope of pressure along the pipeline under air-valve surge tanks at different heights

4 结论

a. 对于长距离低扬程输水工程而言,空气阀的平压控制距离有限,常无法有效控制管内真空,且可能因负压较大造成排气过快引发较大的冲击水锤。

b. 采取空气阀调压室与空气阀联合的新型防护方案不仅能够有效降低主管内负压,还能够

避免空气阀排气过快引发的冲击水锤,是一种经济、有效的水锤防护措施。空气阀调压室的高度、直径及配套的空气阀参数等是影响其防护性能的关键参数,其最终选取可通过敏感性分析或正交试验优选出这些参数的最佳组合。

参考文献:

- [1] 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): 167-170,63.
- [2] 杨春霞,耿魏强,严杰,等. 不同开度防水锤空气阀的进排气特性数值模拟[J]. 水电能源科学, 2022, 40(8): 181-185.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 齐敦哲,郝建志,吴福臣,等. 长管道工程中空气阀与单向调压塔水锤防护比较与优化[J]. 中国农村水利水电, 2012(12): 134-136.
- [6] 刘梅清,孙兰凤,周龙才,等. 长管道泵系统中空气阀的水锤防护特性模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(5): 23-27.
- [7] 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.
- [8] 郭永鑫,张骏,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.
- [9] WYLIE E B, STREETER V L. Fluid Transient in Systems [M]. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1993.

Research on Combined Water Hammer Protection of Air-valve Surge Tank and Air Valve in Low-lift and Long Distance Water Delivery Project

WU Zhen

(Beijing Yubing Hydraulic Survey Planning Design Co., Ltd., Beijing 100048, China)

Abstract: In view of the short water hammer control distance of a single air valve in long-distance and low lift water delivery projects, which can not effectively suppress the vacuum in the pipe, a new water hammer control scheme of combined protection of air-valve surge tank and air valve was proposed. Taking a practical project as an example, a comparative analysis of the hydraulic transient process was carried out for the air valve protection and the combined protection scheme of air-valve surge tank and air valve. The results show that the water column separation occurs in the main pipe when the air valve is used for protection, and a large impact water hammer is caused by the rapid exhaust. The combined protection scheme of air-valve surge tank and air valve can not only effectively suppress the vacuum in the main pipe, but also effectively alleviate the impact water hammer caused by exhaust. It is an economic and effective water hammer protection scheme, and can provide a reference for the water hammer protection of other long-distance and low-lift water delivery projects.

Key words: low lift; water hammer protection; air valve; air-valve surge tank; water column separation