

空气罐在高原山区复杂地形条件下 高扬程泵站水锤防护中的应用

李玲玲¹, 童保林¹, 刘志勇², 顾世祥^{1*}

(1.云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650051; 2.武汉大学, 武汉 430072)

摘要:【目的】探讨空气罐在高原山区复杂地形条件下高扬程泵站水锤防护中的应用效果。【方法】本文结合云南省某供水工程, 基于特征线法建立泵站系统计算模型, 进行了多种工况下水力过渡过程仿真计算, 对比分析了止回阀拒动无防护、止回阀与防水锤型空气阀联合防护、止回阀与设置在不同位置的空气罐联合防护等工况下水锤防护措施的效果, 探讨空气罐对高原山区复杂地形条件下高扬程泵站负水锤防护效果。【结果】在管线后段设置空气罐与水泵出口速闭止回阀联合防护, 可使事故停泵下水泵不倒转, 沿线无负压, 最高升压比 1.2 倍, 满足《泵站设计规范》要求。【结论】在高原山区复杂地形条件下高扬程泵站中将空气罐设置在负水锤源头或较上游位置, 可从根本上防护弥合水锤。

关键词: 高扬程泵站; 复杂地形; 空气罐; 弥合水锤; 负水锤防护措施

中图分类号: TV134

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022288

李玲玲, 童保林, 刘志勇, 等. 空气罐在高原山区复杂地形条件下高扬程泵站水锤防护中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(Supp.1): 56-61.

LI Lingling, TONG Baolin, LIU Zhiyong, et al. Application of Air Tank in Water Hammer Protection of High Head Pumping Station under Complex Terrain Condition in Plateau Mountainous Area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Supp.1): 56-61.

0 引言

【研究意义】供水工程中输水管道一般按地形走势铺设, 在水泵扬程主要克服地形落差的输水工程中, 因输水系统末端地势较高, 输水管道初始内水压力较小^[1]。云南省因其独特的地形条件, 高扬程泵站提水管线往往难以避免前陡后缓的驼峰敷设。在这种敷设条件下, 水泵因失电引起突然停泵的事故工况, 管道系统后段驼峰附近很容易出现水柱分离现象, 产生破坏性很强的断流空腔弥合水锤^[2]。因此, 在复杂地形条件下进行高扬程泵站水力过渡过程计算分析, 探索安全、经济、合理的水锤防护措施, 对工程的安全运行具有重要意义。【研究进展】为了防护弥合水锤压力, 可采取的措施包括: 增加泵组 GD²、设置防水锤

型空气阀、调压塔、空气罐以及两阶段关闭液压操作阀等。如李高会等^[3]提出高扬程超长距离供水工程中采用“空气罐+超压泄压阀”的防护方案可以有效缓解管道中的负压、降低管道中的正压。李琨等^[4]提出在长距离泵站水锤防护中通过液控蝶阀、空气阀及空气罐联合防护水锤具有较好防护效果。结合阿鲁沙供水工程实例。吴旭敏等^[5]研究了空气罐及空气阀联合水锤防护在长距离高扬程供水工程中的应用。可见, 针对不同工况, 水锤防护措施大相径庭。【切入点】对无防护措施下水泵事故停泵进行瞬态模拟分析, 发现高扬程泵站停泵正水锤并不严重, 负压和高压的主要源头来源于管线后段高凸节点产生的弥合水锤。故通过不同水锤防护措施的组合进行复杂地形条件下高扬程泵站后段负压弥合水锤防护措施探索。采用空气罐对负水锤的源头位置进行就地保护, 可有效减缓系统负压, 并同时降低正压。同时进一步探究了空气罐设置位置 and 不同参数的选定对水锤防护效果的影响。【拟解决的关键问题】结合工程实例, 研究复杂地形条件下高扬程供水工程的水锤防护问题, 通过 0 流速关闭止回阀和空气罐的联合防护, 解决事故停

收稿日期: 2022-05-20

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目(2021YFC300205-06); 云南省高层次人才及创新团队项目(2018HC024)

作者简介: 李玲玲(1981-), 女, 高级工程师, 主要从事灌溉排水理论技术研究工作。E-mail: 56624664@qq.com

通信作者: 顾世祥(1972-), 男, 教授级高工, 博士, 主要从事农业节水灌溉理论技术研究工作。E-mail: gushxang@qq.com

泵下后段弥合水锤负压和水泵倒转问题。

1 工程概况

供水工程设计流量 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，共设两级提水，其中二级泵站提水扬程 470.8 m ，设置 4 台工作泵，单泵设计流量 $0.375 \text{ m}^3/\text{s}$ 。泵组主要参数见表 1。水泵进口为单管单机布置，出口压力钢管为 1 管 4 机布置方式。出水总管总长约 2148 m ，管径 1.0 m 。本工程提水系统的特点为地势陡峭的高扬程提水泵站，泵站设计扬程高达 470.8 m ，泵站提水管管材选择各项性能较为稳定的 Q355C 钢管。提水主管通过壁厚计算，起始管壁厚度为 24 mm ，末端管壁厚度 10 mm 。系统计算平均波速约 1028 m/s 。

表 1 泵组主要参数

Table 1 Main parameters of pump group

序号	项目	内容
1	水泵形式	中开多级卧式离心泵
2	设计流量/ $(\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	0.375
3	设计扬程/m	470.8
4	额定转速/ (r min^{-1})	1480
5	设计点效率/%	84.0
6	配套电机功率/kW	2450
7	泵组转动惯量/ (N m^2)	975
8	水泵安装高程/m	742.49

2 水锤防护措施探究

2.1 无防护措施下瞬态模拟分析

为分析本工程停泵水锤的特点，对无防护措施水泵出口阀门拒动的情况下进行事故停泵工况模拟分析。进水池处于最高水位，出水池处于最低水位，4 台泵同时运行，末端不限流的工况为该泵站在事故停泵下的最不利工况。此时，提水管道的流量为 $1.523 \text{ m}^3/\text{s}$ ，在某一时刻，水泵同时掉电。计算结果见图 1—图 3。

由图 1—图 3 可知，断电停泵后，管线后段约 1450 m 后节点均被拉低到 -8.7 m 的当地汽化压力，这是因为事故停泵后停泵水锤以降压波开始，在其作用下管线稳态压力较低的下游管段多处水柱分离严重，发生了弥合水锤，管线最大升压达 867.4 m ，水泵发生严重倒转，约在停泵后 7.7 s 时转速达 -2250 r/m ，达到水泵额定转速的 1.55 倍。而停泵正水锤并不算很严重，峰值约 $752.5/470=1.6$ 倍。可见，该系统停泵水锤防护的重点应立足于首相降压波谷底值的抬升及水泵倒转转速的防护。故下一步将主要针对管线后段负压防护进行探索。

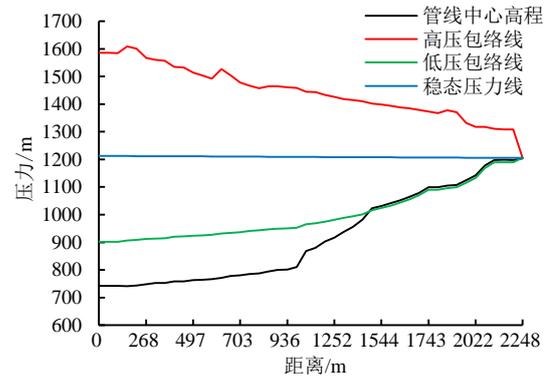


图 1 事故停泵无防护下管道压力包络线

Fig.1 Pressure envelope of unprotected pipeline under accident shutdown

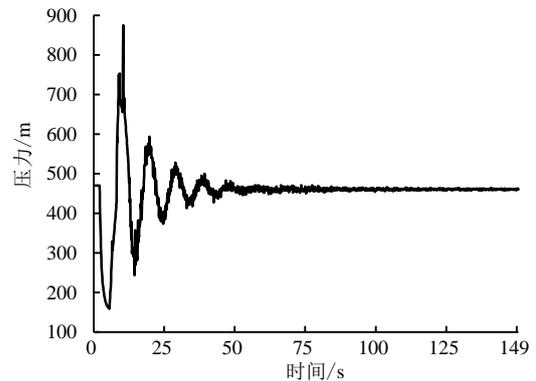


图 2 事故停泵无防护下提水管线起点压力变化曲线

Fig.2 Change curve of starting point pressure of water extraction pipeline without protection under accident shutdown

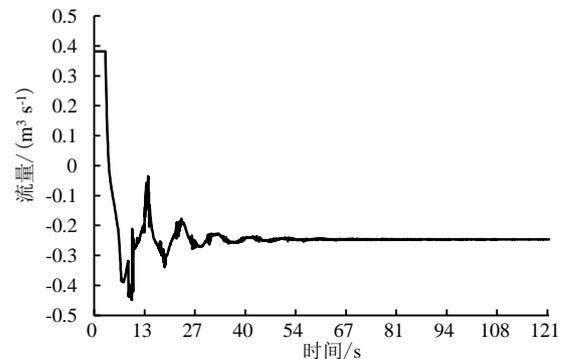


图 3 事故停泵无防护下水泵流量变化曲线

Fig.3 Flow variation curve of unprotected pump under accident shutdown

2.2 设置注汽微排阀及调整泵后止回阀关闭规律（情景 1）

根据无防护下事故停泵水锤特点，在管线 1450 m 之后局部凸点处共设置约 8 台 DN150-3.2 注汽微排阀（平均间隔 $800/8=100 \text{ m}$ ，略微偏多；但若考虑爆管负水锤防护工况，则确实需要适当加大密度^[6]），注汽微排阀特点是高速进气、不高速排气、微量排气^[7-8]。当水柱分离产生空腔结构时，该排气阀高速进气抑制水柱分离；断流弥合发生时，微排阀停止高速进气并形

成气囊减小水柱弥合的对冲加速度,抑制水锤压力升高,再进行低速排气,使残留空气缓慢排出,从而起到防止断流弥合水锤产生的作用^[9],延时 0.2 s 进行负压防护。管线在事故停泵后 0 流速时间约 0.95 s,通

过对泵后止回阀第一阶段经过 3、2 s 分别关闭至 30%、10%、5%开度,第二阶段关闭 30 s 和全关以及随水流速闭至 10%、5%、3%,第二段关闭 30 s 和全关,共 12 个情景进行计算得出结果见表 2。

表 2 止回阀不同关闭规律计算结果

Table 2 Calculation results of different closing laws of check valve

情景	止回阀关闭规律	阀后压力值/m	最低压力值/m	水泵转速/(r min ⁻¹)	历时 120 s 管线最高点压力震荡值/m
1.1	3 s 关至 30%+30 s	751.56	汽化	-2 100	50
1.2	3 s 关至 10%+30 s	766.42	汽化	-1 900	75
1.3	3 s 关至 5%+30 s	871.9	汽化	-680	85
1.4	3 s 全关	988.2	汽化	无倒转	280
1.5	2 s 关至 30%+30 s	749.46	汽化	-2 050	25
1.6	2 s 关至 10%+30 s	765.51	汽化	-1 870	80
1.7	2 s 关至 5%+30 s	853.9	汽化	-570	115
1.8	2 s 全关	868.1	汽化	无倒转	260
1.9	随水流速闭关至 10%+30 s	836	汽化	-710	205
1.10	随水流速闭关至 5%+30 s	825.3	汽化	无倒转	180
1.11	随水流速闭关至 3%+30 s	824.5	汽化	无倒转	210
1.12	随水流速闭	811.9	汽化	无倒转	220

由表 2 可知,不管如何调整止回阀关闭规律,仅在提水管线后段设置注汽微排阀防护下,管线瞬态负压弥合水锤无法消除,仔细观察发现止回阀处的正水击峰值高达 750~1 000 m 乃是下游注汽微排阀节点弥合水锤传递所致,下游高凸节点产生瞬态负压,并且产生弥合水锤,是管系负压和高压的主要源头。因为瞬态负压历时很短,降压波一闪而过,空气阀吸气量很小;虽沿线密布防水锤型空气阀,对负水锤而言,仅具有就地、就近的后保护功能,其防护距离很短,且依赖于其吸气动作对瞬态负压的响应灵敏度、以及临时瞬间封锁气囊使其充当弹性阻尼的能力。至此确定注汽微排阀对管段后段弥合水锤无能为力。从表 2 可知,仅在注汽微排阀的保护下,随着水泵出口止回阀第一阶段关闭开度越小,阀后压力值越高,管线压力震荡值越高,水泵倒转转速越低;若控制水泵倒转转速在规范规定范围内,阀门第一阶段关闭开度需在 5%以内,或第一阶段为随水流速闭,而随水流速闭规律下,第一阶段留的开度越小,阀后升压压力越低,管线震荡值越高。

2.3 设置空气罐(情景 2)

工程实践中,为了防护弥合性水锤压力,常采用空气罐,其通常安装在位于负水锤的源头位置或较上游位置,把低谷抬起来,从根本上防护弥合水锤。当断电停泵事故发生时,在空气罐内初始压力的作用下,罐体里的高压水喷向管线下游,以补水方式抬高停泵水锤所产生的降压,由此从源头上抑制负压及其可能的水柱拉断造成的弥合水锤。当从管线下游返回升压

水锤时,空气罐内的压缩气体被进一步压缩,从而平抑升压水锤峰值。它是防止升压和降压水锤的主动性防护设备。

2.3.1 空气罐数学模型

假设处于密闭压力空气罐内的空气满足理想气体状态方程,由于瞬变过程非常迅速,空气膨胀或压缩过程接近于绝热情况,这对容积不大的气罐是符合实际情况的,如图 4 所示。

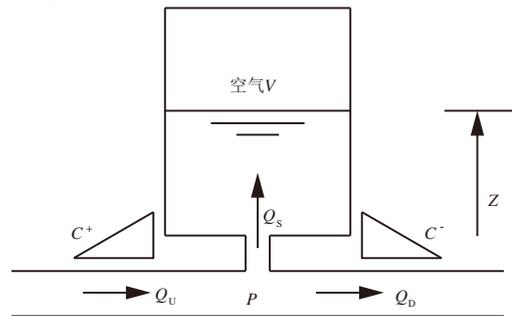


图 4 空气罐原理示意图

Fig.4 Principle diagram of air tank

其主要方程有:

$$H_A \cdot V^n = C, \quad (1)$$

$$H_A = H_P - k Q_S |Q_S| - Z + H_B, \quad (2)$$

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{1}{A_C} \cdot Q_S, \quad (3)$$

$$Q_S = Q_U - Q_D, \quad (4)$$

$$C^+ : H_P = C_P - B_P \cdot Q_U, \quad (5)$$

$$C^- : H_P = C_M + B_M \cdot Q_D, \quad (6)$$

式中: H_A 为空气罐内气体绝对压力 (m); H_B 为当地大气压力 (m), 与当地高程有关; V 为空气罐内气体

体积 (m^3); n 为气体状态方程指数, 取 1.2; C 为与空气罐内气体初始状态有关的常数; H_p 为空气罐与管路连接节点处的压力 (m), 相对压力; Q_s 为流入空气罐的流量 (m^3/s); k 为空气罐与管路连接节点处的水力损失系数值, 根据 Q_s 的符号流入流出时应取不同的数值; Z 为空气罐内水位 (m); A_c 为空气罐断面积 (m^2); Q_U 为空气罐上游侧节点的流量 (m^3/s); Q_D 为空气罐下游侧节点的流量 (m^3/s); 其他符号意义同前。式 (1) 一式 (6) 用来求解压力空气罐节点的压头和流量, 并可求出空气罐内气体体积、压力和水位变化过程。

2.3.2 情景 2.1

通过分析系统瞬态水锤特点及空气罐工作原理, 在管线下游 12#镇墩(离泵站约 1 500 m)处设置 10 m^3 空气罐。

根据表 2 对泵后止回阀关闭规律计算结果, 泵后设置随水流速闭止回阀, 发现在上述防护情景下, 泵

后止回阀后正水击峰值降低到 560 m 以下; 瞬态负压集中在末端高凸节点上, 最低在 -6~-2 m。水泵出口节点压力波动幅值在 120 s 时约为 28 m。

情景 2.2: 在情景 2.1 基础上把 12#镇墩处的 10 m^3 空气罐后移到 7#镇墩 (离泵站约 1 800 m) 处, 止回阀 0 流速时间基本无变化, 从图 6 可见管线末端负压稍微改善, 但高压相较放在 12#镇墩处偏高, 达到 607 m, 水泵出口节点压力波动幅值在 120 s 时约为 7 m。

情景 2.3: 在情景 2.2 基础上在泵后出水母管上再设置 10 m^3 空气罐发现: 管线末端负压有所改善, 但止回阀后在停泵初期压力不稳定, 水泵出口节点压力波动幅值在 120 s 时约为 70 m, 且收敛速度较慢。

情景 2.4: 在情景 2.3 的基础上将 10 m^3 空气罐移到 12#镇墩处发现瞬态负压消除正水击峰值降低到 540 m, 管线最小压力 0.6 m, 水泵无倒转, 水泵出口节点压力震荡幅值较小且收敛较快。

以上情景结果详见图 5、图 6。

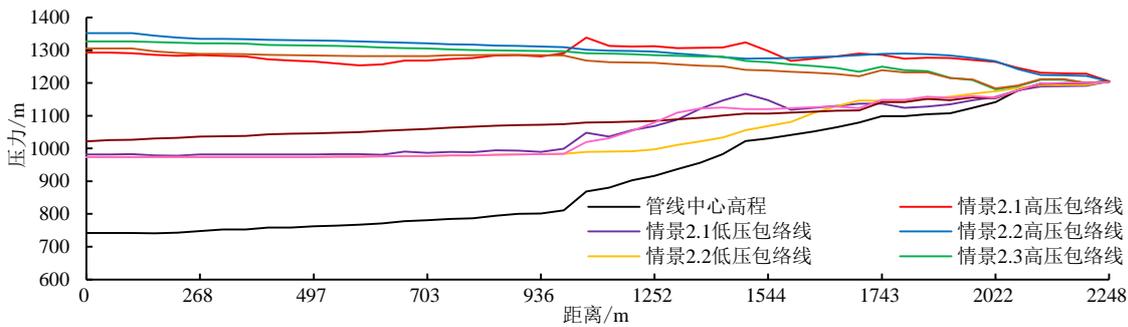


图 5 管线高低压包络线

Fig.5 High and low pressure envelope of pipeline

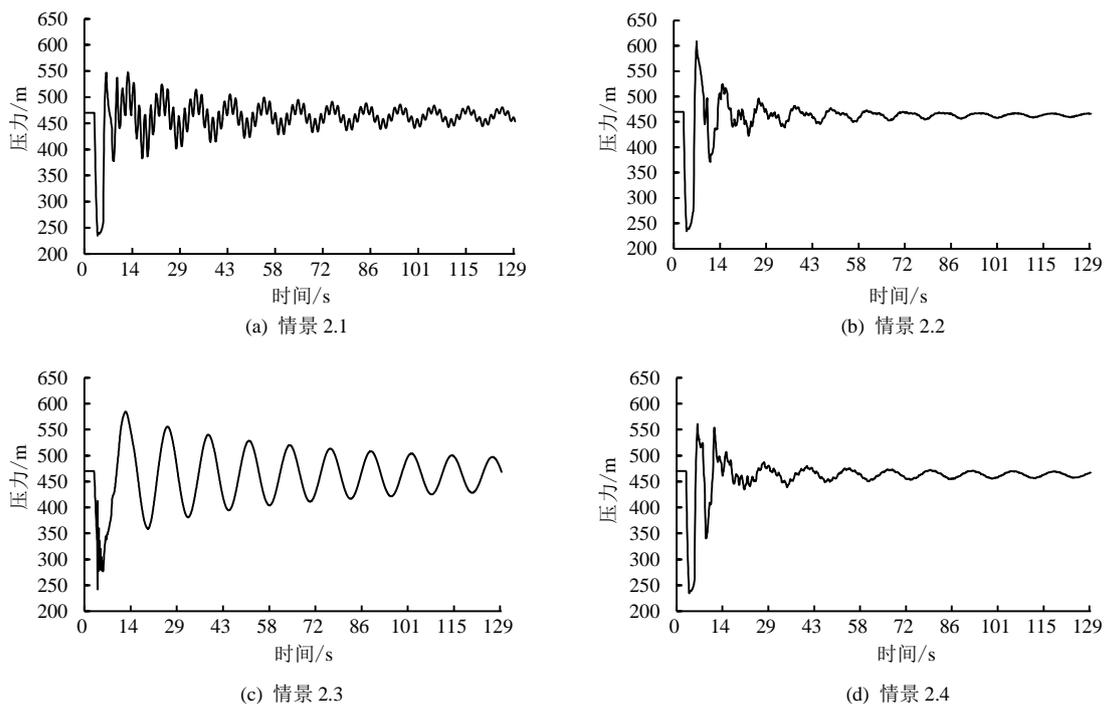


图 6 水泵出口节点压力变化

Fig.6 Pressure change of pump outlet node

3 水锤防护措施探索

按照上述探索路径,初步确定了该系统的水锤防护情景为:在12#和7#镇墩处分别设置1台 10 m^3 空气囊罐。在此基础上,对水泵出口止回阀关闭规律进行试算发现,哪怕第一阶段随水流快关到剩余3%开度,水泵倒转转速都接近额定转速的1.2倍,而采用0流速关闭止回阀,在确保水泵不倒转的同时还可消除止回阀本身的关阀水锤,使之不给停泵水锤添加额外扰动。故在泵后设置0流速止回阀的前提下对2个空气囊罐的容积、初充压力、进、出水阻抗值等关键参数进行了试算。计算结果见表4—表6。

表3 不同空气罐体积计算结果

Table 3 Calculation results of different volume air tanks

气罐容积/ m^3	高压值/m	低压值/m
10	564.83	1.33
8	555.4	0.96
6	541.31	0.32
4	608.7	汽化

表4 不同连接管径计算结果

Table 4 Calculation results of different connecting diameters

连接管径/m	高压值/m	低压值/m
600	596.5	汽化
500	541.31	0.32
400	527.06	-0.43
300	576.88	-4.32

表5 不同初充压力计算结果

Table 5 Calculation results of different initial charging pressures

初充压力/m	高压值/m	低压值/m
40/50	587.64	汽化
45/55	541.31	0.32
50/60	588.50	汽化

从表3—表5可知,在初充压力和连接管径不变的情况下,气罐容积的减小,低压值越小直到汽化,高压值先降低再提高;在气罐容积和初充压力不变的情况下,低压值在连接管径DN600时后段反而汽化,查看气罐容量变化曲线发现,气罐内气体最大体积已超过气罐容积。随着连接管径的减小,低压值也在不断恶化,分析原因,连接管径大时,补水量不够,连接管径小时,补水不够快。都影响了水锤防护效果。

最终确定参数见表6,12#镇墩处空气囊罐容积 4 m^3 ,初充压力55 m,7#镇墩处空气囊罐容积 6 m^3 ,初充压力45 m,进、水管径均采用DN500。系统水锤防护设备及防护后瞬态参数统计情况如表7所示。计算结果见图7、图8。防护效果满足《泵站设计规范》^[9]的要求。

表6 水锤防护情景参数

Table 6 Parameters of water hammer protection scheme

止回阀类型	0 流速关闭	
12#镇墩处空气罐	有效容积/ m^3	4
	初充压力/m	55
	进、水管径/mm	500
7#镇墩处空气罐	有效容积/ m^3	6
	初充压力/m	45
	进、水管径/mm	500

表7 水锤防护情景系统瞬态参数

Table 7 Transient parameters of water hammer protection scheme system

水泵倒转转速/ (r min^{-1})	管线最高压力/m	管线最低压力/m
0	533.15	0.21

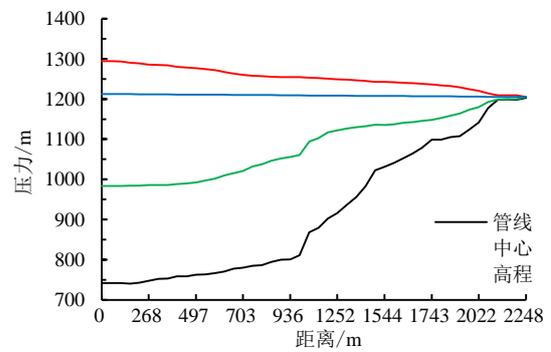


图7 管线高低压包络线

Fig.7 High and low pressure envelope of pipeline

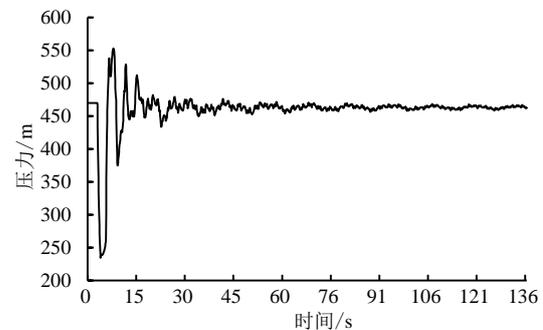


图8 水泵出口节点压力变化

Fig.8 Pressure change of pump outlet node

4 空气罐设置位置的比较

在不改变空气罐容积的情况下,将空气罐设置在泵站处,经反复试算不同连接管径和初充压力,仍无法对系统进行有效防护,为了提高后段负压的防护效果(但尽管消除了弥合水锤,仍有高达-7.6 m的负压),设定气罐的初充压力为250 m,高压达636.7 m,且水泵出口节点压力波动幅值在120 s时约为90 m,且收敛速度较慢。分析原因,防护停泵水锤的有效措施应该是,减缓流速的降低速度。空气罐设置在泵站处对抬升降压波能力有限,而应是就近就地抬升,从而

系统性的影响全管线系统的水锤防护。

5 结 论

1) 对于高扬程泵站，其出水母管及其附近可能不会出现负压，空气罐安装位置可以下移到稳态压力较低的中下游管段，通常安装在位于负水锤的源头位置或较上游位置，把低谷抬起来，从根本上防护弥合水锤；

2) 空气罐的容积与初充压力和补水阻抗值有对应关系，实际计算中应在基本确定其安装位置后对影响空气罐防护效果的几个因素进行反复试算，以求得到既安全又经济的防护措施。

参考文献：

[1] 石林, 张健, 倪尉翔, 等. 具有特殊地形条件的长距离供水工程水锤防护[J]. 水力发电学报, 2019, 38(5): 81-88.

- [2] 金锥, 姜乃昌, 汪兴华, 等. 停泵水锤及其防护[M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [3] 李高会, 邢吉舟, 张林, 等. 高扬程超长距离供水工程中的水锤防护研究[J]. 人民长江, 2021, 52(7): 210-215.
- [4] 李琨, 吴建华, 刘亚明, 等. 空气罐对泵站水锤的防护效果研究[J]. 人民长江, 2020, 51(2): 200-204.
- [5] 吴旭敏, 马子恒, 李高会, 等. 空气罐及空气阀联合水锤防护的应用[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(8): 93-98.
- [6] 陈旭云, 张健, 俞晓东, 等. 考虑爆管工况的长距离供水工程水锤防护研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(7): 145-148, 159.
- [7] 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.
- [8] 梁兴, 刘梅清, 张进国, 等. 空气罐对输水管道水锤的防护研究[J]. 排灌机械, 2005(6): 16-18.
- [9] 泵站设计规范. GB 50265—2010[S].

Application of Air Tank in Water Hammer Protection of High Head Pumping Station under Complex Terrain Condition in Plateau Mountainous Area

LI Lingling¹, TONG Baolin¹, LIU Zhiyong², GU Shixiang^{1*}

(1. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650051, China;

2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: 【Objective】 To explore the application effect of air tank in water hammer protection of high-lift pumping station under complex terrain conditions in plateau mountainous areas. 【Method】 Combined with a water supply project in Yunnan Province, the calculation model of the pumping station system was established based on the characteristic line method, and the simulation calculation of the hydraulic transition process under various working conditions was carried out. The effects of water hammer protection measures were compared and analyzed under the working conditions of no protection of check valve refusing to operate, joint protection of check valve and waterproof hammer air valve, and joint protection of check valve and air tank set at different positions. The protective effect of air tank on negative water hammer of high-lift pumping station under complex terrain conditions in plateau mountainous areas was discussed. 【Result】 The joint protection of air tank and pump outlet quick-closing check valve in the back section of the pipeline can prevent the pump from reversing under the accident shutdown, and there is no negative pressure along the line, and the maximum pressure rise ratio is 1.2 times, which meets the requirements of *Design Code for Pumping Station*. 【Conclusion】 Under the complex terrain conditions in plateau mountainous areas, the air tank in the high-lift pumping station is set at the source or upstream of the negative water hammer, which can fundamentally protect the water hammer.

Key words: high-lift pump station; complex terrain; air tank; water hammer of cavities collapsing; negative water hammer protection measures

责任编辑：白芳芳