

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.15.012

双水源长距离供水工程停泵水锤防护研究

陈楠¹, 王泽民², 朗华伟², 王沁怡¹, 陈胜¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 唐山市曹妃甸供水有限责任公司,
河北 唐山 063200)

摘要: 在长距离供水工程中发生的停泵水锤是威胁工程安全的重要因素,对于多泵站供水工程,存在不同泵站停泵问题,给防护措施的设计带来了困难。基于有压瞬变流基本理论,结合实际工程模拟了不同泵站停泵过渡过程,提出在干线上设置调流阀,当泵站掉电时通过阀门联动将管道系统隔离为多个封闭系统进行防护的方法,并验证了该水锤防护方法的效果。结果表明,通过采用合理的中部调流阀关闭策略将供水管道隔离为独立的封闭系统,一方面可以降低水锤防护措施规模,另一方面也可以降低单个泵站掉电对系统整体的影响。

关键词: 长距离供水系统; 水锤防护; 调流阀; 单向塔; 空气罐

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)15-0083-08

Water Hammer Protection during Pump Shutdown in Long-distance Dual-source Water Supply Projects

CHEN Nan¹, WANG Ze-min², LANG Hua-wei², WANG Qin-yi¹, CHEN Sheng¹

(1. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Tangshan Caofeidian Water Supply Co. Ltd., Tangshan 063200, China)

Abstract: Water hammer resulting from pump shutdown in long-distance water supply projects poses a significant threat to project safety. In multi-pumping station systems, the occurrence of pump stoppages across different stations introduces additional complexity in the design and implementation of effective protective measures. Based on the fundamental principles of pressurized transient flow and in conjunction with practical engineering applications, the transition processes of various pumping stations during pump shutdown were simulated. A method involving the installation of a flow regulating valve along the main pipeline was proposed. In the event of a power failure at the pumping station, the pipeline system could be divided into multiple isolated closed systems through coordinated valve operations, thereby providing effective protection. The efficacy of this water hammer mitigation approach was subsequently validated. Isolating the water supply pipeline into an independent closed system through a properly designed closure strategy for the middle regulating valve reduced the scale of water hammer protection measures. Furthermore, the impact of power failure at a single pumping station on the overall system could also be effectively minimized.

Key words: long-distance water supply system; water hammer protection; flow regulating valve; one-way surge tank; air tank

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52379087)

通信作者: 陈胜 E-mail: chensheng@hhu.edu.cn

对于多泵站长距离供水工程,由于多个水源地进水口水位不同,多个泵站机组水泵扬程存在差异,同时多支线向主管供水后即形成有压多分支管汇流,其水力瞬变过程对主干管道的水锤防护势必会产生一定的影响^[1]。若发生水泵掉电事故,水泵后产生的降压波在扰乱供水系统正常运行的同时,也会损害沿线的水力元件,甚至有压管道会因为液柱分离、弥合产生的巨大压力而破裂,或因管道内部水体汽化而被压瘪。阀门的不合理操作或者水锤防护措施设置不当均会引发弥合水锤,打破供水系统多泵站之间的平衡,引发一系列的连锁反应,造成严重供水事故^[2]。因此,为了保证供水系统安全和供水效率,应设立水锤防护措施以及制定合理的阀门操作策略。

目前,主要的水锤防护措施有空气罐、单向塔、空气阀、调压室、超压泄压阀、两阶段式关阀以及各种联合方案^[3-5]。单向调压塔偏向于安装在输水管道的局部高点,针对管道内产生的降压波进行防护,但无法防护升压波;空气罐具有安装管理方便、对场地没有严格要求等优点,同时对升、降压波都具有较好的防护效果,在国内外得到广泛应用^[6]。石林等^[7]针对前陡后缓的实际工程,说明了空气罐联合出口溢流池可产生较好的防护效果;仇为鑫等^[1]针对分布式供水泵群同时掉电工况,提出了单向塔和空气阀的联合防护方案;杨春霞等^[8]发现,合理设置末端阀门的关闭时间可进一步优化空气罐和单向塔的尺寸和防护效果。上述研究为水泵掉电防护提供了思路,但对于一些多泵站系统,全线停水往往会产生一些不必要的损失,难以满足实际工程中供水保证率的需求。

对于单一泵站供水的长距离供水工程,当泵站发生水泵掉电事故后,可通过关闭管道始末阀门来控制水流状态,使其整体形成封闭系统进而通过防护措施避免水锤破坏。而对于多泵站供水工程,某一泵站掉电后其余泵站仍可能具有继续工作的条件,若可将掉电泵站安全地隔离出供水系统,则既有利于降低水锤防护投资,又可以保证其他泵站继续工作。笔者结合实际工程情况,在管道沿线设置调流阀,需要时通过合理的阀门关闭策略将管道隔离成不同的封闭系统,将掉电泵站进行隔离,可有效削弱掉电泵站产生的瞬时降压波对其他泵站的影响,减小水锤防护措施的规模,同时其他泵站仍

可保证一定的供水效率。因此,针对单一泵站掉电工况,结合管网布置设定合理的阀门关闭策略,确定经济有效的水锤防护措施,对于多泵站联合供水管网的高效运行与安全稳定具有重要意义。

1 工程概况

某长距离供水工程全长40 km,沿线接入两座泵站,一泵站为主要供水泵站,设置4台卧式离心泵(三用一备),设计扬程为35 m,额定转速为990 r/min;第二水源泵站为补充供水泵站,设置4台卧式离心泵(三用一备),设计扬程为30 m,额定转速为987 r/min。日常使用情况下由一泵站与二泵站共同向管道末端输水,二泵站接入管线前安装一处调流阀,供水系统如图1所示。

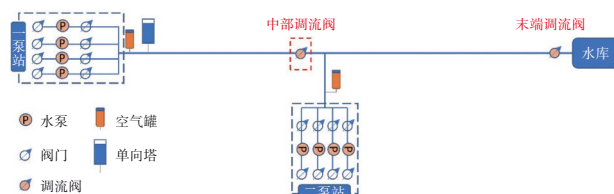


图1 供水系统示意

Fig.1 Schematic diagram of water supply system

设计输水管道采用单条压力管道输水,管材采用DN1 600球墨钢管,粗糙度系数为0.012,设计压力为0.5 MPa。供水系统自两泵站前池取水加压至下游水库,下游水库水位为10 m,一泵站进水前池最低运行水位为25 m,二泵站进水前池最低运行水位为7.5 m;管道末端设计运行总流量为2.7 m³/s,其中一泵站总体供水流量为2.1 m³/s,二泵站总体供水流量为0.6 m³/s;两座泵站每台水泵的出水侧管道上皆装设一个多功能水泵控制阀,压力管道中心线及恒定流运行下的测压管水头线见图2。可知,二泵站在管线21.2 km处汇入主管,接入主管线节点的高程为10.1 m,汇入点后的主管流量由2.1 m³/s变为2.7 m³/s。在设计流量工况下,一泵站至二泵站之间的管路损失约为18.5 m,二泵站至管道末端之间的管路损失约为27.1 m,二泵站接入管线前调流阀在设计流量下保证阀门全开,过阀损失为0.07 m。整个管线呈现先陡后缓的特点,管道中心线最高点高度为37.61 m,位置十分接近一泵站出口,一旦发生水泵掉电事故,泵后的瞬时降压会使局部高点形成空腔,导致水柱分离,甚至产生断流弥合水锤。若不设置恰当的水锤防护措施,水锤压

力则会威胁到水泵、阀门和管道的安全运行。

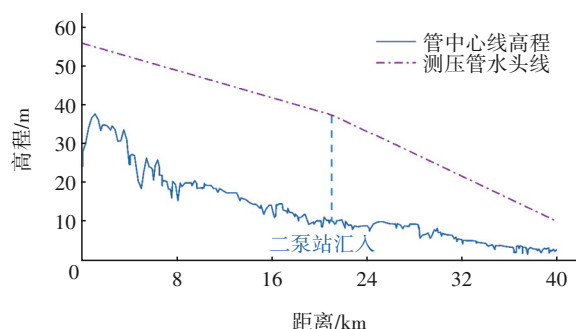


图2 供水系统管道纵剖示意

Fig.2 Schematic diagram of pipeline profile in water supply system

2 过渡过程计算模型

2.1 有压管道水锤数学模型

水锤计算可采用特征线法,将运动方程和连续性方程[见式(1)、(2)]组成的标准双曲型偏微分方程转化成具有相同解的水锤计算特征相容方程。

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2DA^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

式中: H 为测压管水头,m; Q 为管道内流量, m^3/s ; D 为管道的直径,m; A 为管道面积, m^2 ; t 为时间变量,s; a 为水锤波速,m/s; g 为当地的重力加速度, m/s^2 ; x 为沿管轴线的距离,m; f 为摩擦系数。

2.2 空气罐数学模型

空气罐多放置在泵后,用于防护因停泵产生的压力骤降,从而避免管道中的压力降至汽化压力^[8]。空气罐如图3所示。

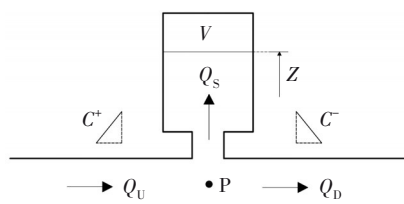


图3 空气罐示意

Fig.3 Schematic diagram of of air tank

在图3中, Z 为空气罐内水位,m; V 为空气罐内气体体积, m^3 ; Q_s 为进出空气罐的流量,流入为正, m^3/s ; Q_u 、 Q_d 分别为管道边界流经空气罐节点前、后的瞬态流量, m^3/s ; C^+ 、 C^- 为特征线。

流量连续方程如下:

$$Q_u = Q_s + Q_d \quad (3)$$

水位与流量关系方程如下:

$$dZ/dt = Q_s/A_s \quad (4)$$

水头平衡方程如下:

$$H_p = Z + \frac{(P_a - P_0)}{\gamma} + kQ_s|Q_s| \quad (5)$$

气体多变过程方程如下:

$$P_a V^n = C \quad (6)$$

管道压力特征线相容方程如下:

$$\begin{cases} H_{Pi} = C_{P1} - B_{P1}Q_{Pi} \\ H_{Pi} = C_{M2} + B_{M2}Q_{Pi} \end{cases} \quad (7)$$

式中: A_s 为空气罐断面面积, m^2 ; H_p 为空气罐与主管连接处压力,m; P_0 为大气压,Pa; P_a 为空气罐内绝对气体压力,m; γ 为水的重度, N/m^3 ; k 为水力损失系数; n 为气体状态方程指数,一般取1.0~1.4; C 为与罐内气体初始状态有关的常数; H_{Pi} 为管道边界的瞬态水头,m; Q_{Pi} 为瞬态流量, m^3/s ; C_{P1} 、 B_{P1} 、 C_{M2} 、 B_{M2} 均为时刻 $t-\Delta t$ 的已知量。

2.3 单向调压塔的数学模型

单向调压塔多放在管道局部高点,当单向塔底部压力高于该处管道压力时单向阀开启。其流量连续方程、水头平衡方程、流量与水位关系等与空气罐相同,在此不再赘述,单向调压塔如图4所示。

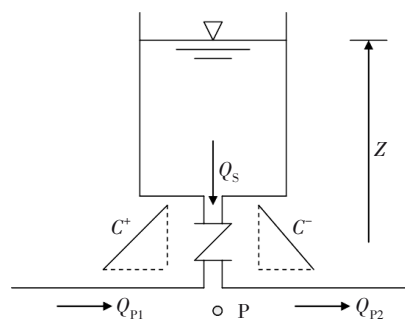


图4 单向调压塔示意

Fig.4 Schematic diagram of one-way surge tank

2.4 调流阀的节点方程

阀门的过流方程见式(8)。

$$Q_p = C_d A_G \sqrt{2g\Delta H_p} = \tau(C_r A_r) \sqrt{2g\Delta H_p} \quad (8)$$

式中: Q_p 为阀门流量, m^3/s ; C_d 为阀门流量系数; A_G 为阀门开启面积, m^2 ; τ 为阀门相对开度; C_r 为阀门全开时的流量系数; A_r 为阀门全开时的面积, m^2 ; ΔH_p 为过阀水头损失,m。

3 停泵水锤模拟及防护

3.1 泵后无防护停泵水锤计算

本工程最危险工况为两座泵站按设计流量运行时,两座泵站的6台水泵同时事故掉电,泵后阀门拒动。无防护掉电管道沿线压力变化模拟计算结果如图5所示。可以看出,水泵掉电后,管道沿线各点的最大压力为该点恒定流状态下的最大内水压力,双泵站掉电时管线负压情况十分严重,水泵后最小压力迅速下降至汽化压力以下,管道中最小负压为 -29.26 m (低于 -10 m 的压力值仅表征此处的负压严重程度,实际管道中此时水体已发生汽化)。在无防护事故掉电工况下,管道沿线出现不同程度的液柱分离现象,因此针对本工程开展水锤防护研究是十分必要的。

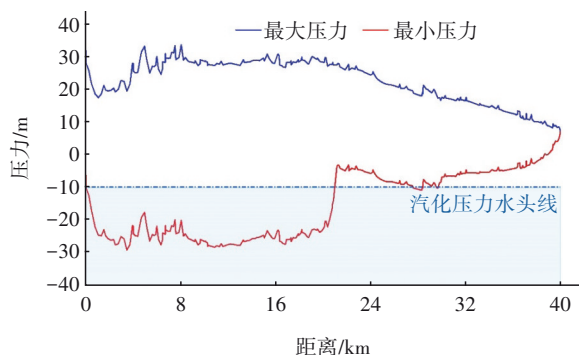


图5 双泵站无防护掉电下内水压力包络线

Fig.5 Pressure envelope lines of double pumping station power failure without protection

3.2 多泵站掉电全线停水联合防护

该工程采用在两座泵站的水泵出口处安装空气罐,在管线最高点放置单向调压塔并结合末端调流阀关闭的水锤联合防护方案。现针对两泵站同时掉电工况进行防护,为了防止水泵最大倒转转速超过额定转速的1.2倍,同时进一步减小空气罐的体积,各泵后阀拟采取 $1/10\text{ s}$ 的一段式关闭策略。一泵站后设置 120 m^3 空气罐,连接管直径为 0.8 m ,罐内水深为 3 m ,罐体高度为 6 m ;二泵站后设置 60 m^3 空气罐,连接管直径为 0.8 m ,罐内水深为 2.5 m ,罐体高度为 5 m ;单向塔设置在管线最高点,距管线起点 1.05 km 处,塔内水深为 11 m ,塔径为 8 m ,连接管直径为 0.8 m 。管道末端调流阀采取 100 s 快关至 50% 与 800 s 慢关至 0 的先快后慢两段式关阀方案,管道承压标准为 50 m ,具体计算结果如图6所示。可知,在管道前段,经过空气罐和单向塔的水

源补充,管道沿线的最小压力为 1.33 m ,出现在管线最高点单向塔底部,由于后续主管线持续变缓,管道内最小压力经提升后逐渐下降;结合布置在管线中部二泵站后的空气罐,可保证管道全线内水压力均保持在 1 m 以上,管道内不再发生断流空腔弥合水锤现象;管道沿线的最大压力为 48.31 m ,管线的最大压力随管线整体呈向上发展的趋势,最大压力点在末端管道最低处,管道整体最大内水压力不超过 50 m ,满足系统防护要求。可见在两座泵站后布置空气罐,配合管线最高处的单向塔对泵站掉电产生的负水锤具有较好的防护效果。上述是针对两座泵站同时掉电的工况进行防护,但实际工程中,两泵站相距较远,且分属不同的供电系统,可能发生单独掉电工况,因此有必要针对泵站单独掉电展开分析。

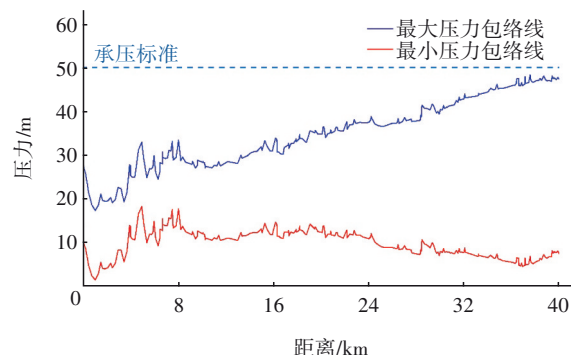


图6 空气罐与单向塔联合防护内水压力包络线

Fig.6 Pressure envelope lines of air tank and one-way surge tank joint protection

3.3 单泵站掉电隔离式联合防护

3.3.1 隔离式水锤防护效果分析

多泵站系统中某一水源泵站掉电后,其他泵站仍可能有保持供水的条件,可采取隔离式停水的方式来保证其他泵站的正常供水,避免输水系统全线停水。对于多泵站系统,若采用全线停水的方案,一旦主泵站掉电,其他泵站则需要逐渐停泵断水,往往可能因此加剧水锤负压波对管道的破坏,并使整个供水系统陷入瘫痪。本工程中一泵站为主要加压泵站,一泵站掉电后可对整个供水系统产生严重影响;而二泵站流量相对较小,即使发生掉电事故,泵站出口处已设置空气罐,同时一泵站仍可继续补充水源,不会对系统产生较大影响。二泵站掉电后,泵后阀门采取 10 s 完全关闭的方案,防护效果如图7所示。可知,二泵站掉电后,得益于空气罐和

一泵站的流量补充,管道沿线不出现负压,各点最大压力不会对管道产生严重影响,只需关闭泵后阀门,避免倒流使水泵发生严重反转即可满足防护要求,防护压力较小,因此主要针对一泵站掉电展开后续工作。

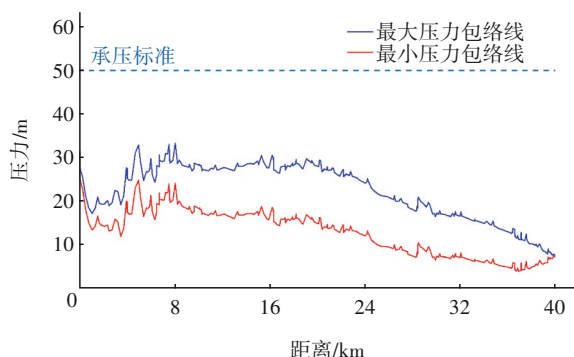


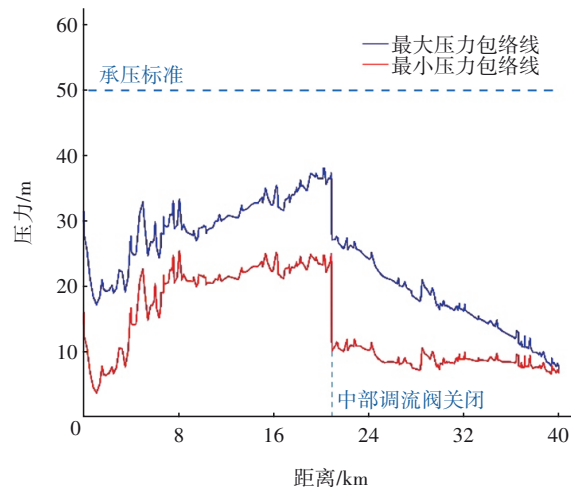
图7 二泵站掉电联合防护内水压力包络线

Fig.7 Pressure envelope lines of the second pumping station power failure combined protection

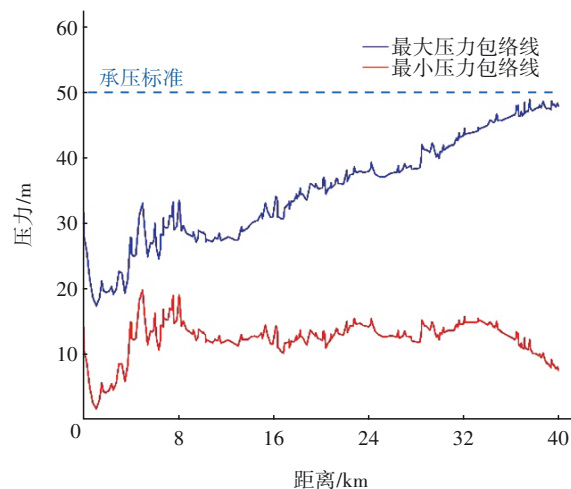
由于一泵站在本系统中起主要加压作用,其一旦掉电,传统上往往结合水锤防护措施采取全线停水的形式进行防护。现提出,在管道中部二泵站汇入主管处上游端安装调流阀(见图1),当一泵站掉电时,联合关闭中部调流阀,将一泵站及管道中前段隔离出整个供水系统,以保证二泵站正常通过中后段管道进行补水,将传统的全线停水防护转化为隔离式区块化停水防护。

现针对一泵站掉电分别采取隔离式防护和全线停水防护进行模拟计算。隔离式防护方案的中部调流阀关闭方案与全线停水的末端阀关闭方案均采用100 s快关至50%与800 s慢关至0的两段式阀门关闭策略。在全线停水方案中,二泵站在二泵站掉电后30 s内停水断电并关闭泵后阀门,其他各防护措施与前述一致,计算结果如图8所示。可知,对于起主要加压作用的一泵站掉电情况,采取隔离式防护后,管道系统整体的防护效果明显好于采取全线停水方案进行防护。由图8(a)可知,最大压力为38.12 m,位于中部调流阀前,较采取全线停水方案的最大内水压力减小了21.8%,距离承压标准50 m仍有较多的安全裕度。由于调流阀的分隔作用,水锤降压波未对后中后段管道造成太大影响,中后段的内水压力从调流阀后开始呈现明显的下降趋势,二泵站可继续向下游供给水源,保证系统具有一定的工作效率。由图8(b)可知,受末端阀关闭引起正

水锤的影响,沿线各点的最大压力持续增加,最大压力为48.73 m,出现在管道末端最低点处,同时二泵站也需停水断电;隔离式防护方案管道沿线最小压力为3.7 m,处于管线的最高点处,相比全线停水方案的最小压力1.5 m增加了2.2 m的安全水头。



a. 隔离式防护



b. 全线停水防护

图8 一泵站掉电联合防护内水压力包络线

Fig.8 Pressure envelope lines of the first pumping station power failure combined protection

两种方案的最小水锤压力都位于管道的最高点,设置在此处的单向调压塔内水深变化见图9。可知,一泵站掉电后,调压塔内水深迅速下降,采用隔离式停水防护方案的单向塔最低水深为3.7 m,采用全线停水方案的单向塔最低水深为1.5 m,两者水位相差2.2 m。在隔离式停水方案中,通过关闭中部调流阀和保证二泵站的持续补水有利于缓解单向塔对下游端的补水压力,可见单向塔的主要

作用是后续补水,而不是防护第一波瞬时降压。

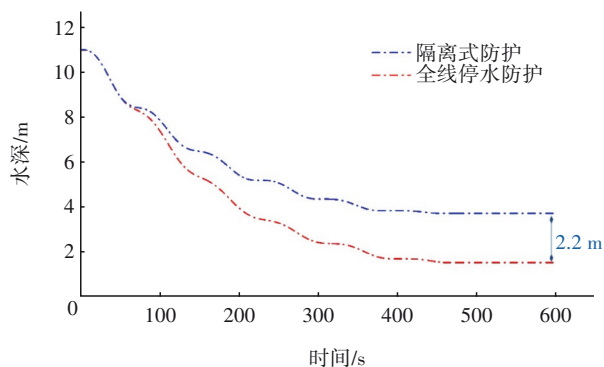


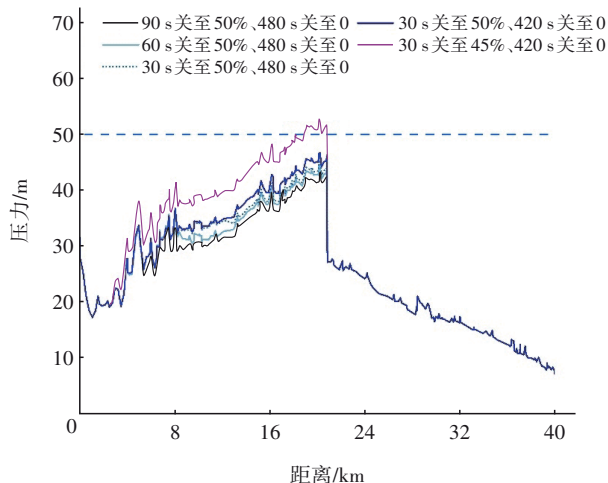
图9 单向塔水深变化过程线

Fig.9 Change process line of water level in one-way surge tank

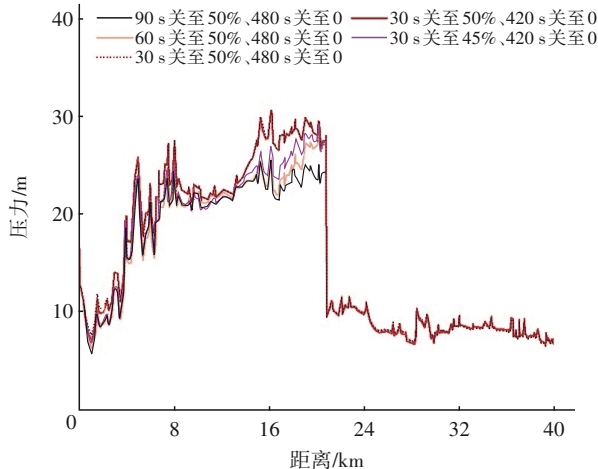
3.3.2 阀门关闭规律对防护效果的影响

根据上述分析,隔离式停水防护可极大提高水锤防护措施的效果,但计算结果皆基于中部调流阀采用全线停水方案下末端阀门的关闭规律。而两者由于地理布置的差异,各自关闭时对水锤防护的效果自然不同,沿用原关阀方案发现管道压力距离承压标准有较多冗余,仍有一定的承压空间,减少关阀时间有利于减小水锤防护措施的范围,因此有必要针对中部调流阀的关闭规律展开研究。为了与全线停水方案进行对比,中部阀门仍沿用先快后慢的关阀方式,在降压波传至阀前时先将阀门快关至小开度,产生升压波并向上游传播,既有利于避免节点的内水压力降至负压,也有利于防止设置在高点的单向塔出现漏空现象。但若折点开度过小或关阀速度过快,则有可能导致管道升压过大,超过管道的承压标准乃至出现爆管事故,因此需合理选择关阀方案,计算结果如图10所示。可以看出,随着中部调流阀的关闭,前半段管道沿线最大压力整体逐渐增加,最大值皆处于调流阀前一局部相对低点处,而中部调流阀后的管线内水压力基本不受影响。当折点开度相同时,沿线水锤压力极大值与极小值皆随着第一段关阀时间的减小而逐渐增加;在开度与第一段快关时间相同时,沿线水锤压力极大值与第二段慢关段时间成反比;当第一段快关时间为30 s时,若折点开度设定为45%,水锤压力极大值则会超出管道的承压标准。由于现阶段尚未有成系统的理论介绍两段式折线关闭规律和水锤压力极值之间的关系,经计算可知,采用30 s快关至50%、420 s慢关至0的关阀方案,沿线极大值为

46.67 m,极小值为6.56 m,在满足防护要求的前提下进一步缩小了关阀时间。



a. 最大压力包络线



b. 最小压力包络线

图10 各关阀规律下管线压力包络线

Fig.10 Pressure envelope lines under different valve closing rules

3.3.3 单向调压塔对防护效果的影响

中部调流阀的关闭规律可直接影响水锤防护措施关键参数的选取,因此有必要针对新的阀门关闭方案重新量化水锤防护措施的尺寸。其中两处布置在泵后的空气罐用于消除管路中的瞬时负水锤,其原尺寸制定时主要以第一波降压作为设计标准的主要参考。相较而言,设置在高点的单向塔关键尺寸将受到中部调流阀关闭规律的直接影响。在全线停水方案中,单向塔的高度和塔底直径受限于防护管道较长,在防止掉电产生的负压波导致所在高点压力骤降产生空腔的同时,仍需要较多的补水量来避免管道高点及下游管道出现液柱分离,因

而单向塔内相当一部分体积主要用于补水。通过关闭中部调流阀,可缩减原本需单向塔进行补水的管段长度,从而在原来的基础上对单向塔的塔高和截面积进行优化。基于中部调流阀关闭方案中,单向塔高及塔底直径对水锤防护效果的影响展开研究,计算结果如图11所示。

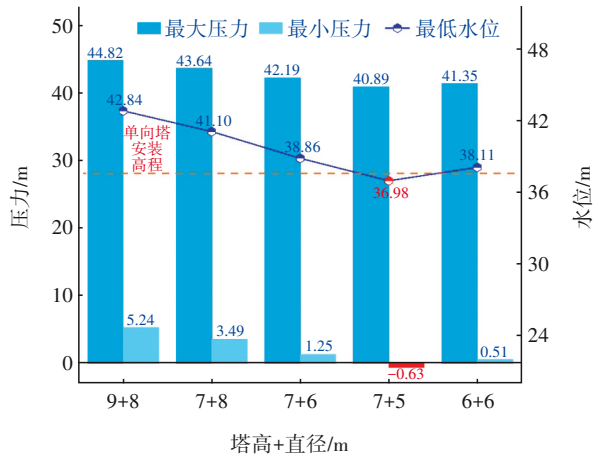


图11 各方案下单向塔的防护效果

Fig.11 Protective effect of one-way surge tank in each scheme

由图11可知,单向塔内最低水位、管道沿线最大和最小压力皆随着塔高和塔底直径的减小逐步降低。该系统最小压力出现在单向塔所在高点,塔内初始水位越低,稳定后的最终水位也相应减小,而最小压力与单向塔的最低水位成正比;若单向塔的初始水位较高,则掉电后单向塔的补水流量也会相应增加,单向塔补水与关阀产生的两股升压波相互叠加引起管道升压,因此管道的最大压力随着单向塔初始水位的升高而增加。当采用塔高为7 m、塔底直径为5 m的方案时,单向塔出现漏空现象,该处出现负压;而采用塔高为6 m、塔底直径为6 m的方案时,防护效果能满足要求,但沿线最小压力仅为0.51 m。为了提高系统的安全裕度,该系统采用塔高为7 m、塔底直径为6 m的较优方案。

3.4 多泵站掉电隔离式联合防护

为了保证二泵站在二泵站掉电时能够继续运行,提出在二泵站接入管道前设置调流阀将管线进行隔离,并在二泵站掉电工况中优化了单向调压塔的规模和关阀方案。为了保证双泵站掉电时经优化的防护方案能够保证工程的安全,基于优化后的防护方案对双泵站掉电工况展开研究。在维持两

座泵站后的空气罐体积不变,中部调流阀与末端调流阀均采用30 s快关至50%、420 s慢关至0的关阀方案,高点处采取塔高为7 m、塔底直径为6 m的单向调压塔进行防护的条件下,防护效果如图12所示。可知,管线最大压力为44.71 m,出现在中部调流阀前,最小压力为0.74 m,仍出现在最高点处,单向塔不出现漏空,满足防护需求。同时相比全线停水方案关阀时间减少了225 s,单向调压塔减少了354.8 m³的补水体积。

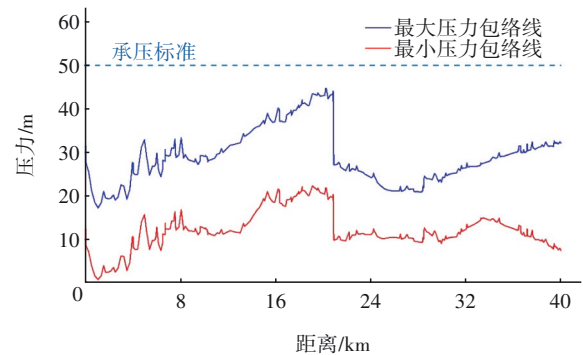


图12 双泵站掉电联合防护内水压力包络线

Fig.12 Pressure envelope lines of double pumping station power failure combined protection

当水泵掉电时应按照标准关闭泵后阀门,同时为了充分利用多泵站系统的灵活补水能力,针对出现不同掉电情况可采取相关的调流阀联控策略。本工程的调流阀调控流程如图13所示。需要说明的是,所提出的针对多泵站长距离输水工程停泵水锤防护方法,涉及调流阀的正常动作,因而在日常维护中,需重点保障调流阀的性能。

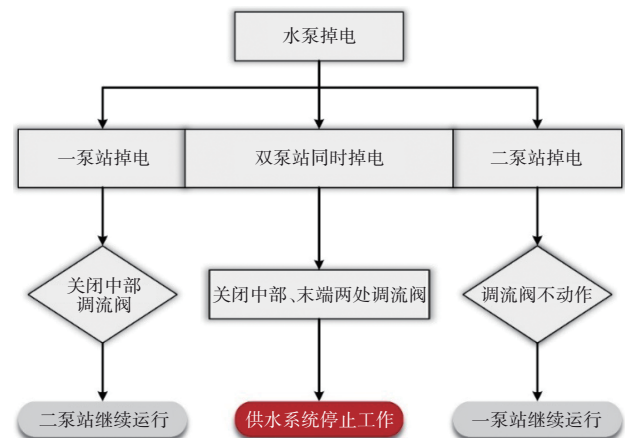


图13 多泵站系统水锤防护阀门调控流程

Fig.13 Flow chart of water hammer protection valve control in multi-pumping station system

4 结论

① 基于水锤防护措施,当单泵站掉电时,通过隔离式防护既可有效提高水锤防护效果,又可保证其他泵站的正常运行;当双泵站皆掉电时,通过联合中部和末端两处调流阀与空气罐、单向调压塔进行防护,可进一步改善系统的防护效果。

② 中部调流阀的关闭方式将直接影响隔离式防护效果,结合先快后慢的两段式阀门关闭方法能有效减少整体关阀时间,在降低管道整体压力的基础上,可进一步提升管线局部高点的防护力度。中部调流阀采用30 s快关至50%、420 s慢关至0的关阀方案,相比全线停水方案关阀时间减少了225 s,在缩短关阀时间的同时,管道中最大压力也有所减小。

③ 对于先陡后缓的管线布置,采用隔离式水防护可有效降低高点处单向调压塔的规模,避免因防护管道较长导致单向塔因补水需求而增加过多防护体积。在满足防护需求的基础上,相比全线停水方案减少了单向调压塔354.8 m³的补水体积。

参考文献:

- [1] 仇为鑫,潘益斌,张健. 分布式供水泵群水锤防护计算研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(3): 101-112.
QIU Weixin, PAN Yibin, ZHANG Jian. Protection against water hammers for distributed pump group in water supply system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(3): 101-112(in Chinese).
- [2] ZHAO W L, YU X D, TANG R L, *et al.* Negative pressure protection of water supply systems with multi-undulating terrain by one-way surge tanks [J]. AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 2023, 72 (9/12): 2138-2151.
- [3] 雷春元,杨瑞虎,王伟,等. 傍河多井水源系统水锤模拟及防护研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(13): 51-58.
LEI Chunyuan, YANG Ruihu, WANG Wei, *et al.* Simulation of water hammer in riverside multi-well water source system and protection [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(13): 51-58(in Chinese).
- [4] 李建宇,魏举旺. 长距离重力流输水管线末端关阀水锤分析及防护[J]. 中国给水排水, 2022, 38(7): 51-55.
LI Jianyu, WEI Juwang. Analysis of valve closing water hammer at the end of long-distance gravity flow water transmission pipeline and protection [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(7): 51-55(in Chinese).
- [5] 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.
WANG Qiwu, LI Zhipeng, ZHU Cidong, *et al.* Water hammer control in gravity flow pipeline based on double-valve regulation [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(9): 52-58(in Chinese).
- [6] 邓安利,蒋劲,兰刚,等. 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 Anli, JIANG Jin, LAN Gang, *et al.* Research on protective properties of air vessel for pump-stopping water hammer protection of long distance pipelines [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(3): 402-406(in Chinese).
- [7] 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.
SHI Lin, ZHANG Jian, NI Weixiang, *et al.* Water hammer protection of long-distance water supply projects with special terrain conditions [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38 (5) : 81-88 (in Chinese).
- [8] 杨春霞,李倩,于洋,等. 空气罐参数对多驼峰输水系统水锤防护的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2023 (5): 166-171.
YANG Chunxia, LI Qian, YU Yang, *et al.* The influence of air vessel parameters on water hammer protection in multi-hump water distribution systems [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023 (5) : 166-171 (in Chinese).

作者简介:陈楠(1998-),男,海南海口人,博士研究生,主要研究方向为长距离、跨流域泵站输配水系统的供水安全。

E-mail: chennan902@163.com

收稿日期: 2024-03-11

修回日期: 2024-07-18

(编辑:任莹莹)