

某短距离大高差山区村落供水改造工程设计与研究

刘升升^{1,2}, 吕 谋^{1,*}

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛动车小镇投资集团有限公司, 青岛 266109)

摘要: 山区乡村供水工程是基础性、长远性、普惠性民生工程。针对位于山地且高程落差大的典型乡村供水工程展开研究, 依托实际山地 A 村落供水项目, 探索短距离大高差山村供水技术, 根据项目现有规模开展管网的水力计算和供水工况分析, 进而通过 Hammer 软件进行水锤模拟得出水锤防护措施。结合供水泵站设计建立 A 村短距离高扬程的最佳供水方案, 采用山地村落短距离大高差供水的工程管理模式, 为山地开发与水资源利用工作提供重要依据。

关键词: 山区供水; 供水设计方案; 短距离大高差; 水锤分析和防护

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)02-0155-08

Design and research of water supply reconstruction project for mountain villages of short distance and large height difference

LIU Shengsheng^{1,2}, LÜ Mou^{1,*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. Qingdao Bullet Train Town Investment Group Co. Ltd., Qingdao 266109, China)

Abstract: Water supply for mountain villages is a basic, long-term and inclusive livelihood project. This paper studies the typical rural water supply projects located in mountainous areas with large height difference. Relying on the actual water supply project of mountain Village A, this study explores the water supply technology for mountain villages with short distance and large height difference. Hydraulic calculation of pipe network and water supply condition analysis are carried out according to the existing scale of the project, and then the water hammer simulation is carried out through Hammer software to obtain the water hammer protection measures. After considering the design of the pumping station, the best water supply solution for the short distance and large height difference in Village A is obtained. The management mode of water supply project for mountain villages with short distance and large height difference is adopted, which provides important basis for mountain development and water resources utilization.

Key words: mountain water supply; water supply design scheme; short distance and large height difference; water hammer analysis and protection

收稿日期: 2022-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778307)

作者简介: 刘升升(1988-), 男, 山东青岛人。硕士, 研究方向为给排水系统分析与优化。E-mail: 385589544@qq.com。

* 通信作者: 吕 谋(1965-), 男, 山东青岛人。博士, 教授, 博导, 主要从事给排水系统分析与优化等方面的研究。
E-mail: qdlvmou@yeah.net。

山村供水工程建设中普遍存在着规模偏小,供水保证率较低,水体环境污染日益严重,施工管护较难等问题^[1],严重影响了农业工程经济效益的发展^[2]。目前,国内在长距离高扬程输水方案方面已经有了成熟的理论和实际应用^[3],但是对短距离高扬程输水方案的研究尚不多见。与长距离高扬程输水管道相比^[4-5],短距离高扬程输水管道具有事故发生快、管道内压力变化幅度大等特点^[6]。本文将着力研究高差较大山村给水工程中供水难的问题,并提供具体解决方案,以保证短距离高扬程山村供水安全,为全国落差较大的山村供水方案提供建议^[7]。

A村位于山东省青岛市崂山区南部,距离市中心约30 km。它坐落在崂山山脉的南麓,面朝大海,是一个以渔业和农业为主的小村庄。地势高程差距接近238 m,经过研究并设计的山村分区加压供水模式不但能够缓解A村所遇到的地下水饮用量不平衡、生活用水不安全等问题,而且一定程度上改变了A村人民生活吃水难、生产用水难的问题。更为关键的是在高差较大的山村区域通过优化农村水资源合理配置^[8],进一步发挥农村现有供水工程的供给能力,并根据受水区需求、地形地貌、饮用水特点等因素,通过科学合理设计泵站建筑、输水管线和高位水池,有效保障了山村饮水安全,提升了乡村供水品质,提高了农村边远地区民众的喝水要求,从而带动了农村地方社会经济发展,促进了中国农村复兴战略逐步落到实处。

1 华东地区A村供水工程现状及改造可行性分析

1.1 A村供水工程现状概况

1) A村村落地势较高,距离集中供水管网较远,村户分散且村落内部供水设施普遍不完善,疏于管理。

2) 村落居民用水大多利用山上泉水及打深井等措施,村户现有供水设施未能充分利用。提取的地下水未经处理、消毒直接供村民饮用,水质安全难以保证。

3) 取水点旱季时难以保证供水。

4) 水处理设施大部分为膜处理设施,水源矿物质较多,滤芯堵塞严重,维护成本较高。

5) 目前村落水处理设施无专业工作人员管理,处理后的水难以保证达到饮用水标准,且设备易损坏。

1.2 A村供水工程改造可行性分析

1.2.1 项目地需水量和水质分析

项目地市政供水管线为西边市政管网(DN300),水量丰富,供水能够满足整个项目区的日常生活需水要求。供水的水质符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求。

1.2.2 项目地输水线路布设遵循的基本准则

A村输水线路布设遵循的基本准则主要有以下5点:①输水线路布设一般要求线路最短,交叉工程量最小,起伏差最小,施工便捷,土石方工作量最小;②尽量避免通过主要路面、村庄屯、山谷、水沟、山坡及其他建筑;③尽量减少拆除,尽量少侵占良田、果园,尽量少破坏自然环境;④尽可能避让恶劣地质构造处,尽可能沿现状或规划路线敷设;⑤考虑管线工程的建设要求、运营条件、管护要求、机电设备容量等方面的综合影响,以节省能源^[9]。

2 A村供水改造工程项目规模确定与设计计算

2.1 项目规模确定

2.1.1 项目地理特征及建设范围

A村落目前有2个高位水池。1号高位水池容积 50 m^3 ,地面高程266.5 m;2号高位水池容积 50 m^3 ,地面高程353.2 m。市政起点距离2号高位水池1370 m,高差151.2 m。2号高位水池距离1号高位水池1600 m,高差86.7 m。供水从配水干管接入到高位水池,然后从高位水池接入村落入户(已实施)。现有DN300给水市政主管道,管道地面标高115.3 m。如图1所示。

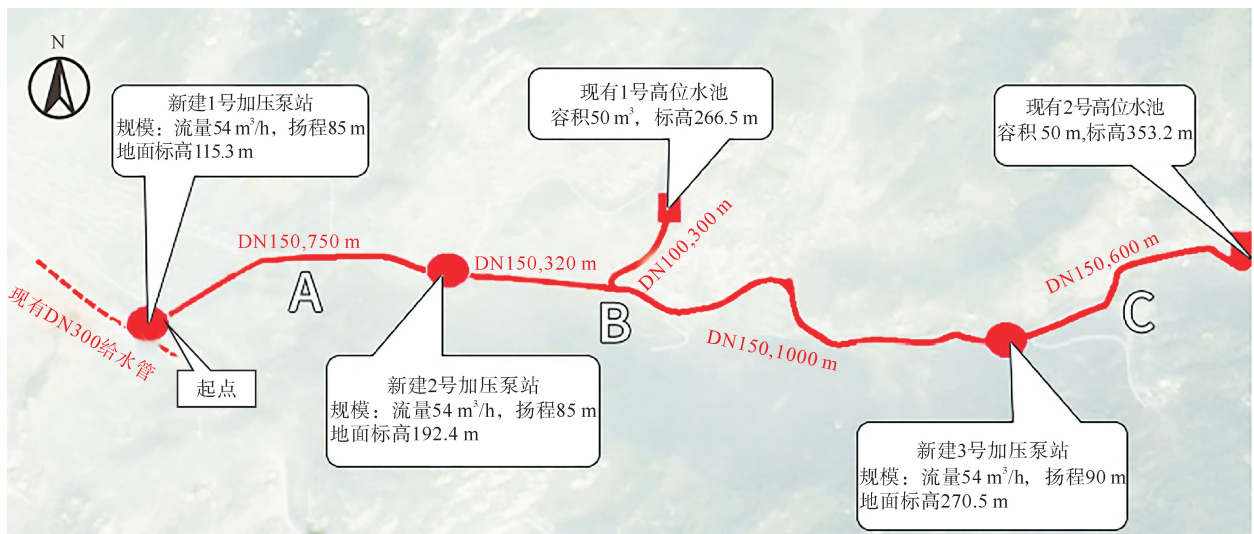


图 1 供水方案

A 村现有水源主要取自地下水,提升至 2 座 50 m^3 高位水池后向居民供水。2 座高位水池高程分别为 353.2、266.5 m。在高位水池边已建设水处理设施,但未启用。

本次建设范围包括在道路沿线敷设给水管和附属消防设施,以及建设 3 座提升泵站配套进水池。

2.1.2 工程布置

村落目前拥有 2 个高位水池。由于地势高低差较大,考虑分设多个增压泵站和高位储水池,以满足不同用水范围对水量和水压的需求。

市政供水系统的起点与 1 号高位水池距离较短、高差较大,因此考虑建设 2 座加压泵站,分别为新建的 1 号加压泵站和 2 号加压泵站。同样地,2 号高位水池与 1 号高位水池距离较短、高差也较大,因此也需要设置 1 座加压泵站,即 3 号加压泵站。新建加压泵站布置见图 1。

2.2 用水量确定

2.2.1 用水人口确定

1) 村民用水人口确定。根据《村镇供水工程技术规范》(SL 310—2019)中第四章第 4.1.2 条要求,设计年限内的用水人口 P :

$$P = P_0(1 + \gamma)^n + P_1 \quad (1)$$

式中: P 为工程设计期限内的总用水人口; P_0 为工程设计时供水区域内的现状生活人口,根据现实情况取 $P_0 = 353$ 人; γ 为工程项目设计年限内总人口的天然增长率,取 $\gamma = 2\%$; n 为工程设计期限,取 $n = 20$ a; P_1 为工程设计期限内天然机械增长总人口,取 $P_1 = 0$ 人。

由式(1)计算得设计用水人口 $P = 367$ 人。

2) 农家宴用水人口确定。农家宴用水人口可以按照饭店餐馆面积为单位($1 \text{ m}^2/\text{人}$)进行测算。餐馆合理建筑面积估算:①可按图纸资料算得,若数据不全,可按 80%的餐馆建筑面积估计;②根据《建筑给水排水设计统一技术措施:2021》规定的饭店客户数量,中餐酒楼餐馆可按 $0.85 \sim 1.3 \text{ m}^2/\text{人}$ 测算。由于 A 村以农家宴为主要特点,并且分散布局,因此估计农家宴餐馆的有效面积约为 400 m^2 ,故农家宴用水人口约为 400 人。

2.2.2 生活用水量确定

1) A 村村民生活用水量。A 村村民属于城镇居民,城镇居民的日常饮用水主要受城镇居民人口规模、家庭生活中的饮用水需求、城市中供水普及率等因素的影响^[10-11]。城镇居民生活用水定额可根据《室外给水设计标准》(GB 50013—2018)中第四章第 4.0.3 条的相关规定确定(表 1)。

表1 最高日城镇居民生活用水定额

城市类型	L/(人·d)						
	超大城市	特大城市	I型大城市	II型大城市	中等城市	I型小城市	II型小城市
一区	180~320	160~300	140~280	130~260	120~240	110~220	100~200
二区	110~190	100~180	90~170	80~160	70~150	60~140	50~130
三区	—	—	—	80~150	70~140	60~130	50~120

因为A村所属的城市人口规模在1000万人左右,城市类别按照超大城市考虑,又因为A村所属的城市在二区范围内,所以按照标准及城镇居民实际使用量,设定村民生活用水定额为160 L/(人·d),则A村村民的生活用水量 Q_1 (时变化系数取1.5):

$$Q_1 = \text{人数} \times \text{村民用水定额} \times \text{时变化系数} = 367 \times 160 \times 1.5 / 1000 = 88.1 \text{ m}^3/\text{d}$$

2) A村农家宴游客生活用水量。根据《村镇供水工程技术规范》(SL 310—2019)中表4.1.2选取最高日居民生活用水定额40 L/(人·d),则农家宴的设计用水量 Q_2 (时变化系数取1.2):

$$Q_2 = \text{人数} \times \text{村民用水定额} \times \text{时变化系数} = 400 \times 40 \times 1.2 / 1000 = 19.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

综上所述可以得出A村总的设计用水量 Q :

$$Q = Q_1 + Q_2 = 107.3 \text{ m}^3/\text{d}$$

2.2.3 消防用水量

依据《消防给水及消火栓系统技术规范》(GB 50974—2014)第三章中第3.3.2条规定,消防用水量取15 L/s。

2.3 供水管线水力计算

2.3.1 设计流量

该工程输水主管和室外消防管道合用,经过计算,室外消防设计流量为54 m³/h,生活用水设计流量为4.5 m³/h。

2.3.2 管径确定

管径根据计算获得,并且根据《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019)中第三章第3.7.13条要求确定。

2.2.3 管道水力计算

1) 计算方法。沿程损失按照《村镇供水工程技术规范》(SL 310—2019)中第七章第7.3.7条要求的公式进行计算。本设计局部水头损失按照整个体系中的管道沿程损失的10%计算。

2) 计算结果。西侧目前市政管网为DN300(标高为115.3 m),通过水力计算消防水管径采用DN150,市政供水管径采用DN65,因为消防用水管道和市政用水管道合用,取最大值,所以管道管径为DN150,计算结果如表2所示。

表2 管道水力计算结果

水力计算项目内容	供水管道水力计算结果		
	供水管段A	供水管段B	供水管段C
区间长度/m	750	1320	600
流量/(m ³ ·h ⁻¹)	54	54	54
公称外径/mm	DN150	DN150	DN150
流速/(m ³ ·h ⁻¹)	0.78	0.78	0.78
局部水头损失/m	0.016	0.029	0.013
总水头损失/m	0.074	0.074	0.074

2.4 泵站设计

2.4.1 水泵扬程确定

水泵扬程计算如表3所示。

根据表3得出A村供水方案:市政DN300给水管通过多级加压后供水至高位水池,同时考虑沿线设置消火栓。

采用消防水泵和高位水池联动方式,2座高位水池容量均为50 m³,考虑10 min的消防水量(9 m³),满足消防要求^[12]。

表3 加压泵站水力计算

水力参数	1号泵站		2号泵站		3号泵站	
	消防	生活用水	消防	生活用水	消防	生活用水
输出流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	54	4.5	54	4.5	54	4.5
输水管径/mm	DN150	DN150	DN150	DN150	DN150	DN150
海曾威廉系数	150	150	150	150	150	150
管线长度/km	750	750	1320	1320	600	600
局部水头损失/%	10	10	10	10	10	10
供水高差/m	78.5	78.5	75.7	75.7	83.7	83.7
水泵总扬程/m	81.5	78.4	82.7	79.7	88.2	84.6

2.4.2 计算结果

新建1号加压泵站。为满足市政消防水量,泵站直接从市政管网取水,设计规模为消防用水 $54 \text{ m}^3/\text{h}$ 、生活用水 $4.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。配套泵设置:生活水泵2台(变频,一用一备),设计流量 $4.5 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程85 m;消防泵2台(一用一备),设计流量 $54 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程85 m。

新建2号加压泵站。此泵站为中途增压泵站,采取无负压供水方式,以充分利用2号泵站前段的供应水的压力,设计规模为消防用水 $54 \text{ m}^3/\text{h}$ 、生活用水 $4.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。配套泵设置:生活水泵2台(变频,一用一备),设计流量 $4.5 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程85 m;消防泵2台(一用一备),设计流量 $54 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程85 m。

新建3号加压泵站。此泵站也为中途增压泵站,也采用无负压供水方式,以充分利用3号泵站前段的供应水的压力,设计规模为消防用水 $54 \text{ m}^3/\text{h}$ 、生活用水 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。配套泵的设置:生活水泵2台(变频,一用一备),设计流量 $2 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程90 m;消防泵2台(一用一备),设计流量 $54 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程90 m。

3 改造后的供水工况分析与水锤防护建议

多级加压增压的输水管线上因意外停泵的时候^[13],会在沿程上产生由水锤所引发的瞬时高压、水柱扩散、汽化等恶劣情况,有可能会产生爆管等危害安全工作的状况,所以得进行水锤防护^[14]。

3.1 稳态工况分析

管径:沿线主管径为DN150,至1号水池的管径为DN100。

流量:稳态工况流量通过计算得出,1号水泵、2号水泵的流量为 8.79 L/s ;3号水泵的流量为 4.53 L/s 。

3.2 停泵工况水锤分析

供水管网水锤分析是指对管网系统中水流产生的压力冲击和振动进行分析和计算的过程。水锤是由于管道系统中水流突然停止或改变流向等原因而产生的一种压力波动现象,如果不加控制,会给管道系统带来严重的危害。水锤分析是管道系统设计和运营中非常重要的一环,能够帮助工程师了解管道系统的水动力特性,预测和避免管道系统中可能发生的水锤问题,确保供水系统的正常运行和使用。

供水加压泵站的参数设置会对管网水锤产生影响,加压泵数量以及泵的工作状态是关键因素。根据加压泵数量以及泵的开启、关闭工作状态,可分为5种工况:①1号泵站停泵,其他泵正常工作;②2号泵站停泵,其他泵正常工作;③3号泵站停泵,其他泵正常工作;④1号、2号泵站同时停泵,其他泵正常工作;⑤1—3号泵站同时停泵。通过对5种停泵水锤工况进行模拟分析,找出停泵工况下水锤最大值,进而分析此时管材是否超出使用压力范围。

工况1:1号泵站停泵,其他泵正常工作时管网总水头压力曲线如图2所示。由图2(a)可以看出1号泵站停泵时压差变化幅度大,由图2(b)可以看出最大压力值为 106.30 m ,2号泵站和3号泵站运行平稳,且1号、2号、3号泵最小压力值没有超出最低压力值范围。

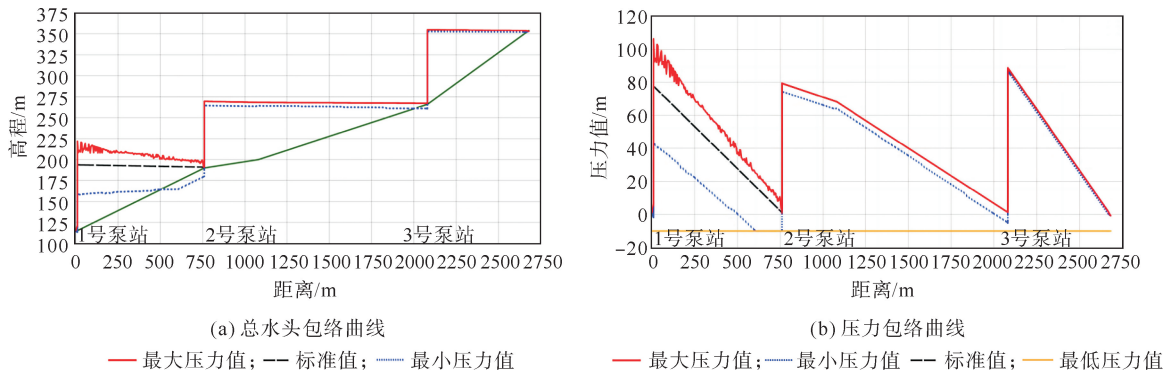


图 2 工况 1 管网总水头压力曲线

工况 2: 2 号泵站停泵, 其他泵正常工作时管网总水头压力曲线如图 3 所示。由图 3(a)可以看出 2 号泵站停泵时压差变化幅度大, 由图 3(b)可以看出最大压力值为 107.7 m, 1 号泵站和 3 号泵站运行平稳。

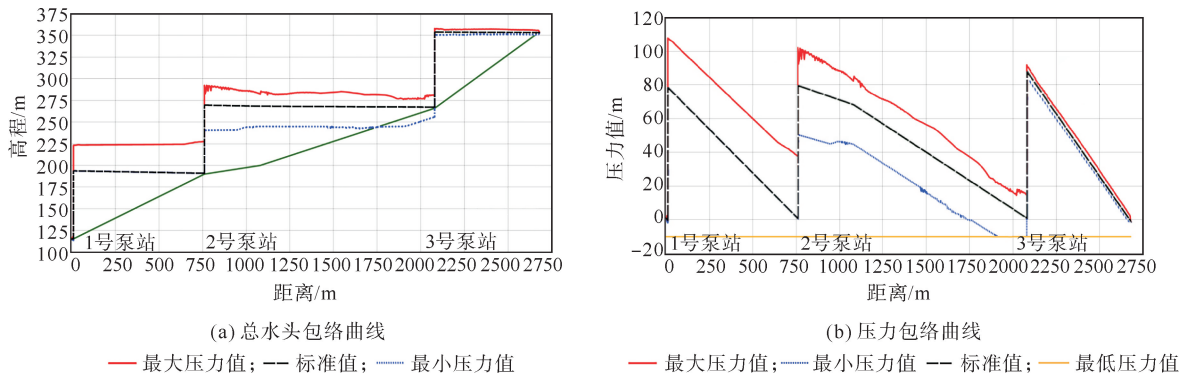


图 3 工况 2 管网总水头压力曲线

工况 3: 3 号泵站停泵, 其他泵正常工作时管网总水头压力曲线如图 4 所示。由图 4(a)可以看出 3 号泵站停泵时压差变化幅度大, 由图 4(b)可以看出最大压力值为 100.76 m, 1 号泵站和 2 号泵站运行平稳。

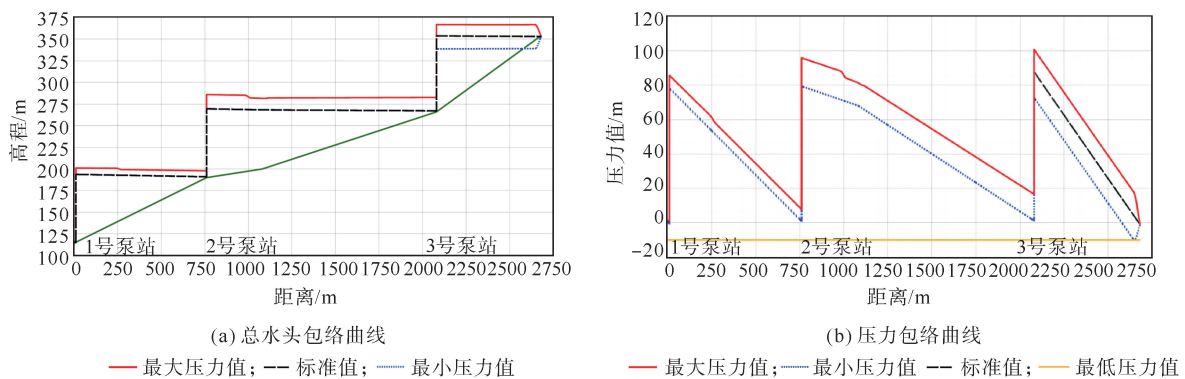


图 4 工况 3 管网总水头压力曲线

工况 4: 1 号、2 号泵站同时停泵, 其他泵正常工作时管网总水头压力曲线如图 5 所示。由图 5(a)中可以看出 1 号泵站和 2 号泵站停泵时压差变化幅度大, 3 号泵站运行平稳, 由图 5(b)可以看出 1 号泵站最大压力值为 111.22 m。

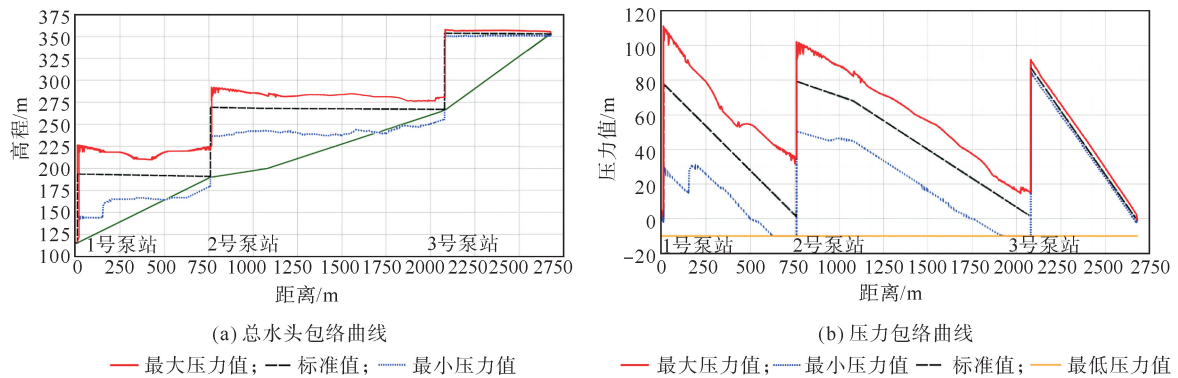


图 5 工况 4 管网总水头压力曲线

工况 5:1—3 号泵站同时停泵时管网总水头压力曲线如图 6 所示。由图 6(a)中可以看出,3 组泵站因为停泵,所以压差变化幅度大,由图 6(b)可以看出泵站最大压力值为 112.35 m,1 号泵站和 2 号泵站压力值比 3 号泵站压力值偏大。

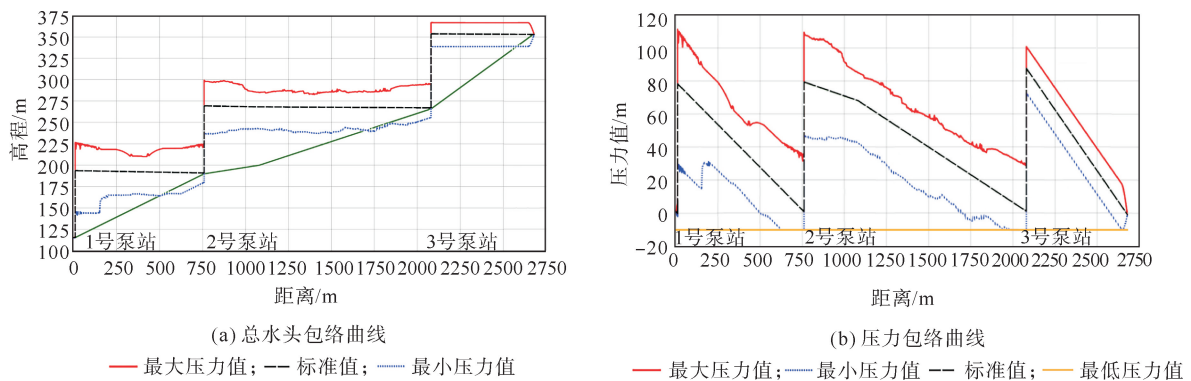


图 6 工况 5 管网总水头压力曲线

综上所述,本工程在不加防护的情况下,3 组泵停泵水锤压力最大值为 112.35 m,并且管道沿线正压、负压未超限,选用 1.6 MPa 级的 PE100 管材、附件及阀件满足要求。为安全起见,建议将水泵后的止回阀设置为缓闭式止回阀,可通过调节导管上出口球阀的开度改变主阀缓闭速度。加大球阀开度,主阀关闭快;减小球阀开度,主阀关闭慢。主阀关闭时间在 3~60 s 内可调。球阀也可以用针阀替代。

为了确保启动水泵不会导致负压问题,建议首先启动前一级泵,等待压力稳定后再启动后一级泵。这样做可以有效地防止水泵的空转,减少气蚀或气爆的风险。具体的启泵顺序为 1 号泵站—2 号泵站—3 号泵站。此外,2 号泵站和 3 号泵站可以使用吸水管端的压力开关进行控制,只有当吸水管端的压力大于 0.06 MPa 时,泵站才会自动启动。这种控制方式有助于确保水泵系统的稳定运行。

4 结束语

山村供水普遍存在短距离大落差特点,设计时首先考虑山村供水时与最近市政管线距离和山村村落高差,实地考察山村村落的项目规模,进而通过水力计算得出管道管径,而后进行泵站设计和选型,最后通过对山村供水管线工况和水锤分析得到山村村落供水的最优方案。通过 A 村设计实例可以得出:山地村镇应该根据自身的地形特点、用水需求等因素确定管线布置方案,从而解决山地村镇饮用水安全问题,改善投资环境,加快基础设施建设,促进地方社会经济的发展,进而提高村民幸福感、获得感。

参考文献(References):

- [1] 李明德. 山区农村饮水安全精准扶贫难点与对策分析[J]. 建材与装饰, 2018(22): 282-283.
LI Mingde. Analysis on difficulties and countermeasures of targeted poverty alleviation through drinking water safety in rural areas in mountainous[J]. Construction Materials & Decoration, 2018(22): 282-283.
- [2] 白聪莉. 山区长距离输水管道工程的设计分析[J]. 市政技术 2020, 38(6): 228-233.
BAI Congli. Design and analysis of long distance water pipeline project in mountain area[J]. Municipal Engineering Technology, 2020, 38(6): 228-233.
- [3] 石文彬. 农村自来水供水水压不足问题及解决措施[J]. 湖南水利水电, 2019(5): 73-74.
SHI Wenbin. Insufficient water pressure and solution for rural tap water supply[J]. Hunan Hydro & Power, 2019(5): 73-74.
- [4] 杨玉思, 徐艳艳, 姜巨智. 长距离高扬程多起伏输水管道水锤防护的研究[J]. 给水排水, 2009, 45(4): 108-111.
YANG Yusi, XU Yanyan, XIAN Juzhi. Research on water hammer prevention in high-lift, hilly and long distance water transmission pipeline[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(4): 108-111.
- [5] 饶雪峰, 刘海涛, 苏雷, 等. 长距离压力输水管道水锤防护设计[J]. 给水排水, 2013, 49(2): 123-126.
RAO Xuefeng, LIU Haitao, SU Lei, et al. Water hammer protection design of long-distance pressure water transmission pipeline[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 49(2): 123-126.
- [6] 金锥, 姜乃昌, 汪兴华, 等. 停泵水锤及其防护[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
JIN Zhui, JIANG Naichang, WANG Xinghua, et al. Pump stop water hammer and its protection[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.
- [7] 李树平, 周巍巍, 侯玉栋, 等. 基于管段重要性的给水管网布局分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 433-436.
LI Shuping, ZHOU Weiwei, HOU Yudong, et al. Water distribution systems layout analysis based on link importance indicator[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2013, 41(3): 433-436.
- [8] 赵洪宾, 何文杰, 韩宏大, 等. 我国供水管网实现区域管理的思路[J]. 中国给水排水, 2001(9): 59-61.
ZHAO Hongbin, HE Wenjie, HAN Hongda, et al. Ideas for achieving regional management of water supply networks in China[J]. China Water & Wastewater, 2001(9): 59-61.
- [9] 张移. 山地城市供水管网可靠性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHANG Yi. Research on reliability technology of water supply network in the mountain city[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [10] 黄继军, 王红艳. 城市需水量预测需注意的几个问题[J]. 城市规划, 2004(5): 80-82.
HUANG Jijun, WANG Hongyan. Key problems in the prediction of city water demand[J]. City Planning Review, 2004(5): 80-82.
- [11] 李琳, 左其亭. 城市用水量预测方法及应用比较研究[J]. 水资源与水工程学报, 2005(3): 6-10.
LI Lin, ZUO Qiting. Comparative research on predicting method and application for city water consumption[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005(3): 6-10.
- [12] GB 50974—2014, 消防给水及消火栓系统技术规范[S].
GB 50974—2014, Technical code for fire protection water supply and hydrant systems[S].
- [13] 奕鸿儒. 泵站水锤分析和计算[M]. 修订本. 陕西: 陕西机械学院出版社, 1987.
YI Hongru. Analysis and calculation of water hammer in pump station[M]. Revised Version. Shaanxi: Shaanxi Institute of Machinery Press, 1987.
- [14] 徐放, 李志鹏, 邹顺利, 等. 高扬程泵站停泵水锤防护措施的比较与分析[J]. 给水排水, 2017, 53(12): 106-110.
XU Fang, LI Zhipeng, ZOU Shunli, et al. Comparison and analysis of water hammer protection measures for stopping pump in high lift pump station[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(12): 106-110.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)