

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.22.013

长距离大管径跨海供水管道水锤防护设计

寇殿良¹, 刘存莉², 王学攀³

(1. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029; 2. 广西交科集团有限公司, 广西 南宁 530007; 3. 博纳斯威阀门股份有限公司, 天津 300350)

摘要: 目前针对长距离跨海供水项目水锤防护的研究较少,由于跨海段管道设置水锤防护措施较难,因此水锤防护主要集中在陆地段管道,实施范围有限,水锤防护难度较大。某沿海企业用水量为 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,通过提升泵站从水库向企业供水,采用 $D1\ 600\text{ mm}$ 钢管单管敷设,管线全长约 36.5 km ,其中约 24.8 km 埋设在海底。借助Bentley Hammer软件,针对长距离“凹”字状跨海管道布置模型,分析了该模型的特点,并在停泵水锤工况下分析了水锤波的传递,进行了两阶段关阀水锤防护、设置单向调压塔和空气阀等水锤联合防护研究。针对“凹”字状管道模型跨海段后的陆地段管道负压大、水头线低等特点,提出加深该段管道埋深、放缓管道坡度的措施,并进行了经济技术比选。

关键词: 水锤; 供水工程; Bentley Hammer 软件

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)22-0084-05

Design of Water Hammer Protection for Long Distance and Large Diameter Cross-sea Water Supply Pipeline

KOU Dian-liang¹, LIU Cun-li², WANG Xue-pan³

(1. Guangxi Communications Design Group Co. Ltd., Nanning 530029, China; 2. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co. Ltd., Nanning 530007, China; 3. BENS Valve Stock Co. Ltd., Tianjin 300350, China)

Abstract: There are hitherto few studies on water hammer protection for long distance cross-sea water supply projects. Because it is difficult to install water hammer protection measures in cross-sea pipelines, the protection measures are mainly installed in the pipelines on land with limited implementation area, which also increases the difficulty to carry out water hammer protection. The water consumption of a coastal enterprise is $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$. The water is supplied to the enterprise from a reservoir through a lifting pump station. The pipeline is laid by single $D1\ 600\text{ mm}$ steel pipe with a total length of about 36.5 km , of which approximately 24.8 km is buried on the seabed. The characteristics of the layout of the “concave” long distance cross-sea pipeline were analyzed via Bentley Hammer software, as well as the water hammer wave transmission under the water hammer condition caused by the pump stop, and the effects of combined measures such as two-stage valve closing, setting of one-way surge tower and air valve on the protection of water hammer were investigated. In response to the characteristics of high negative pressure and low water head line in the land section of the “concave” shaped pipeline

model after crossing the sea, measures were proposed to deepen the burial depth of the pipeline in this section and slow down the slope of the pipeline, and economic and technological comparisons were conducted.

Key words: water hammer; water supply project; Bentley Hammer software

长距离供水项目由于距离长、地形起伏大等因素,管道系统中瞬态水力过渡过程比较复杂,极易在管道系统多个位置发生水锤现象,而水锤又是造成爆管事故的重要因素。目前,长距离供水管道在陆地敷设时水锤防护研究的案例比较多,而长距离跨海供水管道水锤防护研究案例较少。由于在海底设置排气阀、调压塔等水锤防护措施非常困难,因此跨海管道的水锤防护设施只能在陆地段上设置,这就要求水锤防护措施的设置更精准、针对性更强,因此难度更大。

笔者利用 Bentley Hammer 软件并结合工程案例对跨海供水管道进行水锤防护模拟研究,提出此类项目的水锤综合防护方案。Bentley Hammer 软件是一款常用的水锤模拟分析计算软件,该软件采用特征线法对管道内的各种瞬态水力工况进行模拟分析,精确度较高。

1 项目概况

某沿海企业用水量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,通过提升泵站从水库向企业供水,水库常水位标高约 15 m,企业蓄水池水位标高 25 m,泵站设置 3 台水泵(2 用 1 备),单泵流量 1 200 L/s,扬程 450 kPa,采用 D1 600 mm 钢管单管敷设。管线全长约 36.5 km,其中约 24.8 km 埋设在海底,管道标高最低 -7 m,海平面标高约 5 m。

该管道的水力坡度线见图 1。

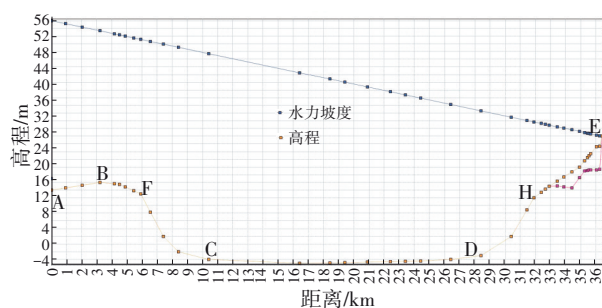


图1 稳态下水力坡度线

Fig.1 Hydraulic gradient in steady state

2 水锤防护措施

常用水锤防护措施主要有空气阀、单向调压

塔、空气罐、水击预防阀及通过两阶段关阀操作(水泵后安装的液控缓闭止回阀)和在水泵安装惯性飞轮等。空气阀是水锤防护措施中最常见的一种,可有效削减局部负压,其快速进气缓慢排气,可避免水柱快速弥合而产生水锤,主要布置在管道起伏的高点处;单向调压塔是削减负压时用得比较多的防护措施,主要设置在管道中容易产生水柱分离的峰点、膝部折点、鱼背点等位置;空气罐和双向调压塔的原理类似,大多布置在泵站附近,对削减管道内的正负压都有很好的效果;水击预防阀通常安装在管道旁支管处,当管道发生水锤,产生的压力超过该阀门设置的安全压力时,该阀开阀泄水,释放管道中的压力;惯性飞轮的安装,是通过增大水泵转动惯量的方式削减水锤的影响,但是需要增大电机功率,后续运营成本较高^[1]。

3 模型分析

利用 Bentley Hammer 软件对该供水管道突然断电停泵水锤工况进行分析,其压力包络图见图 2。

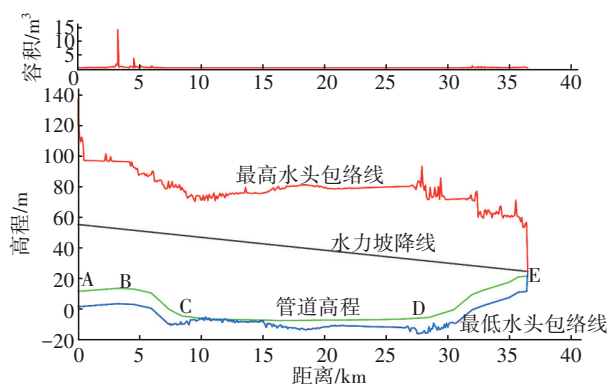


图2 停泵水锤压力包络图(无防护)

Fig.2 Pressure envelope of stop pump water hammer (no protection)

由图 2 可见,突然断电后,管道内压力降低、液柱拉伸,降压顺波从水泵向下游(企业蓄水池)传播,约在第 36 秒时到达 30.7 km 处(跨海后的陆地段),并降低到水的汽化压力,部分液柱开始汽化。此时一部分降压顺波反射,以增压逆波向上游传递,另一部分降压顺波传递到企业蓄水池,以增压

逆波向上游传播,并在31~33 km区域产生断流弥合水锤,断流弥合水锤产生的高压波最终向上游泵房传播^[2]。首相水锤波约在72 s时传递到水泵出口处的阀门处,末相水锤波在约143 s传递到水泵出口处的阀门处。第257秒时,水泵出口水流发生倒流,第259秒时水泵开始反转。

整体来看,整个管道受降压波影响,基本全线处于负压状态,大部分管道的负压达到水的汽化压力;管道陆上部分多处产生空腔,最高达14 m³,并产生断流弥合水锤,最大正压124.87 m水柱(1 m水柱 \approx 9.8 kPa,下同),超过规范“管道中瞬时最高工作压力不应大于工作压力的1.3~1.5倍”的标准。

通过上述对模型的分析,首先要削减管道内的负压,同时避免水柱快速弥合产生断流弥合水锤。可设置水泵出口处的液控缓闭止回阀的两阶段关阀程序和峰值及管道产生气穴空腔处设置空气阀,尽量通过低成本的方式消除水锤,如果防护效果不佳,再设置空气罐或调压塔,从而保证停泵水锤工况下管道内正负压满足规范要求。

4 水锤防护措施

在软件中设置水锤计算分析边界条件如下:供水管采用钢管,壁厚14 mm,波速1 021.95 m/s,水泵和电机的转动惯量40 kg·m²,终点的蓄水池简化为水库模型。

4.1 确定关阀时间

在水泵出口处设置液控缓闭止回阀,采用两阶段关阀的方式削减水锤,关阀时应避免产生直接水锤。当第一个水锤波还未到或刚到阀门处时,如果这时阀门已经关闭,则会产生直接水锤,直接水锤的危害很大;如果第一个水锤波传递到阀门处时,阀门还未关闭,这时反射过来的降压水锤波遇到与阀门继续关闭所产生的增压水锤波,将抵消一部分能量,称为间接水锤,间接水锤是确定关阀时间时要考虑的重要因素^[3-4]。

从上述模型分析可知:失电后降压波传递到企业蓄水池(第一阶段),以增压波方式反射到阀门(第二阶段),此时阀门开始动作,产生增压波传递到企业蓄水池(第三阶段),然后以降压波反射回阀门(第四阶段),最后以降压波传递到企业蓄水池(同第一阶段),至此四个阶段完成了一个水锤周期。为了避免发生直接水锤,应保证第四阶段降压

波传递到阀门时,此时阀门还在动作,因此总关阀时间应大于143 s。经模拟分析,采用两阶段关阀的最佳关阀程序为:失电后56 s内关闭阀门的95%,160 s全部关完,此时水泵并未发生反转。

4.2 设置空气阀

全线共设置19个空气阀,压力包络图见图3。可见,从整体上来看,管道的最大正压由124.87 m水柱降低至43.5 m水柱,最大正压满足规范要求;管道跨海部分CD段负压大部分已经消除,但管道跨海前ABC段、跨海后DE段的负压仍很低。对该模型进一步分析,断电后的降压波传递到DE段时,管道内水的压力降低到水的汽化压力,DE段管道内产生空腔,发生断流弥合水锤,降压波向上游传播,导致ABC段出现较大负压。经上述分析,断电后的降压波是跨海段前后出现较大负压的主要原因。可通过在ABC段设置单向调压塔的方式削减ABC段负压,并尽量抬高DE段的负压线,同时在DE段设置单向调压塔或加密布置空气阀来削减DE段负压。

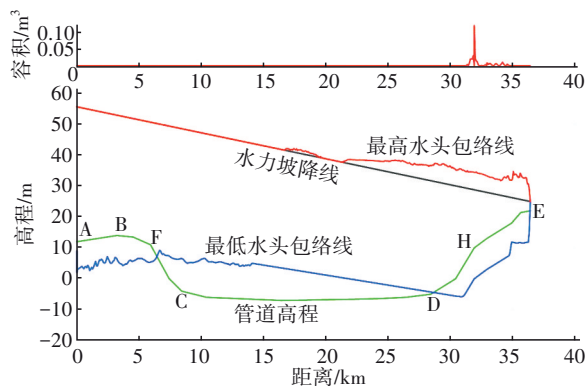


图3 停泵水锤压力包络图(空气阀防护)

Fig.3 Pressure envelope of stop pump water hammer (air valve protection)

4.3 设置单向调压塔

① 方案一:单向调压塔+空气阀

在跨海前ABC段的峰点(B点)和靠海端F点(膝部折点)设置2座单向调压塔。在跨海后DE段靠海端H点(膝部折点)设置1座单向调压塔,然后根据其调压范围向下游依次布置,DE段共设置10座单向调压塔,设置参数见表1,停泵水锤压力包络图见图4。ABC段由于在峰点和靠海端F点设置了单向调压塔,负压极大地缓解,靠海端H点设置的单向调压塔将DE靠海管段的压力提高了10 m左

右,作用十分明显。DE段由于管道的坡度大且处在水力坡度线下游,受管道标高和水力坡降线水头的影响,单向调压塔的调节高度设置非常有限^[5],导致其缓解负压的范围有限,因此布置得较密集。

表1 单向调压塔设置

Tab.1 Installation of one-way surge tower m

桩号	直径	高度	桩号	直径	高度
K3+215	5	37.9	K34+418	5	10.6
K5+915	5	38.5	K35+261	5	6.9
K31+915	5	18.6	K35+450	5	5.7
K32+915	5	14.8	K35+547	5	5.2
K33+434	5	13.4	K35+648	5	4.6
K33+885	5	11.0	K36+040	5	2.3

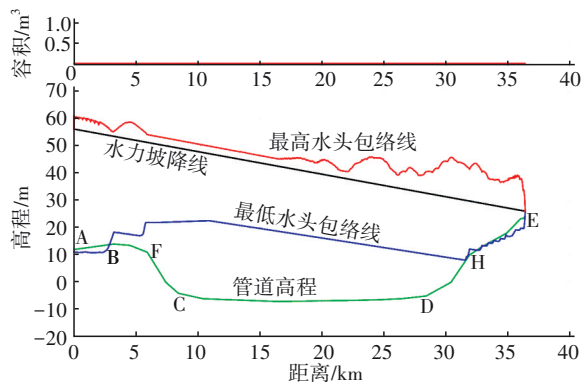


图4 停泵水锤压力包络图(单向调压塔防护)

Fig.4 Pressure envelope of stop pump water hammer (one-way surge tower protection)

多达12座单向调压塔的设置,虽然解决了水锤的问题,可是调压塔的数量偏多,造价高、用地大,后续维护工作量大。特别是DE段单向调压塔布置密度较大,长约5 km的管段上布置了10座,并不是最理想的防护方案。

② 方案二:增加管道埋深+单向调压塔+空气阀

采取增加DE段管段埋深的方式削减DE段的负压,即通过降低DE段管段标高,减少最低压力包

络线和管道之间的高差,从而达到削减负压的目的。最理想的是把管道埋设在最低压力包络线以下,发生水锤时,管道中的水流仍处于正压工作范围。可是这样会使管道埋深过大,DE段有长约3 km的管道埋深整体增加9 m多,施工难度大,工程量增加较多,对后续维护管理也不利。折中方案是设置单向调压塔和空气阀,同时再适当地增加管道埋深,负压满足规范要求即可。很明显折中方案在造价和后续运维上更合适。

加大DE段管道的埋深后(见图1),HE段粉红色线部分最大埋深增加约6 m,平均埋深增加约3.4 m,在DE段靠海端H点和终点端E点设置2座单向调压塔,停泵水锤压力包络图见图5。该方案下的最低压力控制在-4 m水柱以内,正负压都满足规范要求。

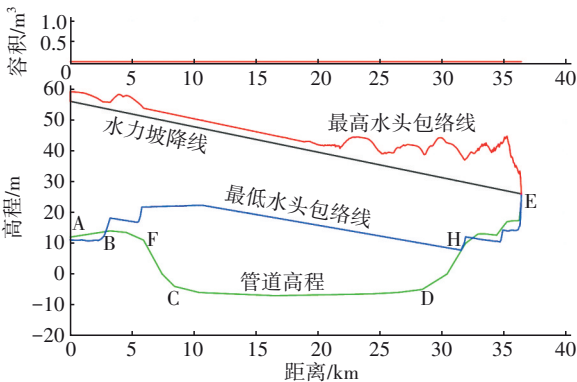


图5 停泵水锤压力包络图(增加管道埋深)

Fig.5 Pressure envelope of stop pump water hammer (increase the burial depth of pipelines)

针对DE段的水锤防护,方案一和方案二对比见表2。方案一虽然工程费用小,但是额外征地费用较高,后续维护工作量大;方案二由于加大了管道埋深,工程费用较高,但征地少,后续维护管理工作量小。综合来看,方案二性价比更高。

表2 DE段水锤防护方案对比

Tab.2 Comparison of water hammer protection scheme for DE section

项目	防护效果	水锤防护设施	后续维护	征地	管道覆土
方案一	最大正压 56.09 m 水柱;最大负压 -3.92 m 水柱。压力满足规范要求	10座单向调压塔,共 93.1 m;12个空气阀	后续维护工作量大	多	沿现状地面地形敷设, 全线覆土 1.5 m 左右
方案二	最大正压 55.91 m 水柱;最大负压 -3.96 m 水柱。压力满足规范要求	2座单向调压塔,共 30.6 m;12个空气阀	后续维护工作量小	少	全线平均覆土 4.9 m,最大覆土约 7.5 m

综上,本项目停泵工况水锤防护措施主要为:采用泵后两阶段关阀(液控缓闭止回阀)的方式、在

峰点和膝部折点等位置布置4座单向调压塔、19个空气阀以及增加过海后的管道埋深。

5 结论

① 长距离跨海供水项目中,由于跨海段设置排气阀比较困难,因此海底管道的布置,应避免起伏,尽量布置成两端高、中间低的方式,方便排气;在靠海端的位置(膝部折点处)布置单向调压塔对缓解负压有很好的效果。

② 长距离跨海供水管道模型大多呈“凹”字形,跨海后的陆地段管道大多会沿现状地形地貌用一个较大的坡度埋设,即从海底到陆地地面在很短的距离内提升一个很大的高差。这样埋设管道造价最省,施工也最便捷,但管道距离水力坡降线过近,对水锤防护不利,因此该段管道的埋深可适当增加,降低最低压力包络线和管道的高差,有利于水锤防护。

③ 目前该项目水锤防护方案已经通过评审,正在加紧实施中,预计3年左右可投产运行。该方案的实施,可大大减少管道运营单位后续的运维工作量,降低运营成本,不仅可有效提高企业的供水安全,为企业生产的连续性提供可靠保障,同时对改善当地营商环境,实现经济可持续发展具有极大的促进作用。

参考文献:

- [1] 邬海军. 舟山大陆引水二期工程过渡过程计算及管线布置[J]. 浙江水利科技, 2013, 41(4): 67-69, 78.
- WU Haijun. Transient calculation and pipeline layout of the second phase of the Zhoushan continental water diversion project[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2013, 41(4): 67-69, 78(in Chinese).
- [2] 王彦祥, 颜炳魁, 田颖玲, 等. 长距离输水管线停泵水锤分析及防护[J]. 中国给水排水, 2019, 35(7):

57-61.

WANG Yanxiang, YAN Bingkui, TIAN Yingling, *et al.* Analysis and protection of water hammer for pump stopping in long distance water conveyance pipeline[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(7): 57-61(in Chinese).

- [3] 袁哲, 王丰, 周子旋, 等. 长距离跨海管道供水工程的水锤防护研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6): 114-117.

YUAN Zhe, WANG Feng, ZHOU Zixuan, *et al.* Research on protection of water hammer for long distance cross-sea pipeline water supply project[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(6): 114-117(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 its protection[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(7): 51-55(in Chinese).

- [5] 胡卫娟, 胡建永, 李柏庆. 长距离供水工程水锤联合防护研究[J]. 给水排水, 2022, 48(9): 107-111.

HU Weijuan, HU Jianyong, LI Baiqing. Analysis of water hammer joint protection for long-distance water supply project[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(9): 107-111(in Chinese).

作者简介:寇殿良(1982-),男,吉林安图人,硕士,教授级高级工程师,从事市政给排水设计研究工作。

E-mail: 26482129@qq.com

收稿日期: 2023-05-16

修回日期: 2023-06-06

(编辑:孔红春)

环境就是民生,青山就是美丽,蓝天也是幸福