

海外跨境长距离输水工程的水锤防护分析

郝新宇¹, 余仁志², 厉帅¹, 怀肖清¹

(1. 浙江省城乡规划设计研究院, 浙江 杭州 310030; 2. 中地海外水务有限公司, 浙江 杭州 310051)

摘要: 长距离输水工程中水锤的影响,关系到整个输送系统运行的稳定性和安全性。埃塞俄比亚至吉布提跨境供水工程管道输送距离总长超过 200 km,输送流态包括泵送压力流和有压重力流。通过建立数学模型,对这两种流态下事故停泵、关闭、小流量运行等不同工况下进行水锤模拟分析,根据计算结果提出防水锤空气罐体积、空气阀位置、关闭时间要求、阀门组合形式等水锤防护措施,为输水系统的安全可靠运行提供了保障。

关键词: 长距离输水; 压力流; 重力流; 水锤防护; 水力分析

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)09-0057-05

Analysis of Water Hammer Protection in Overseas and Cross-border Long Distance Water Transfer Project

HAO Xin-yu¹, YU Ren-zhi², LI Shuai¹, HUAI Xiao-qing¹

(1. Zhejiang Urban & Rural Planning Design Institute, Hangzhou 310030, China; 2. CGCOC Water, Hangzhou 310051, China)

Abstract: The protection of water hammer in long distance water transfer project is related to the stability and safety of the whole transmission system operation. The total length of transboundary water supply pipeline from Ethiopia to Djibouti is more than 200 km which transfers water in forms of pumping pressure flow or pressure gravity flow. Through the mathematical model, water hammer was simulated and analyzed under different working conditions including pump-stop, valve closing and small flow in the two flow states above respectively. According to the results, measures about the volume of air vessel, position of air valve, temporal requirement of closing valve and the valve combination were proposed to prevent the water hammer, providing security and reliability guarantee for the operation of water conveying.

Key words: long distance water transfer; pressure flow; gravity flow; water hammer protection; hydraulic analysis

1 工程概况

1.1 工程背景

埃塞俄比亚至吉布提跨境供水项目是为解决吉布提境内淡水资源紧缺而自 2012 年开始筹划的民生保障项目。该项目是由中国、埃塞俄比亚及吉布提三国政府共同合作推进的东非区域内互联互通项目,由中国进出口银行出资提供优惠贷款,中资公司负责实施,项目建成后可为吉布提 5 个主要城镇提

供 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的优质饮用水,直接受益约 75 万人,占吉布提全国人口的 85%。

1.2 工程内容

本项目的供水规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,供水范围是吉布提国家的 Djibouti 市和 Alisabieh、Arta、Dikhil 三个镇;工程主要内容包括在埃塞俄比亚地面标高为 680 m 的 Shinile 地区 Kulen Vally 区域的水源地打 28 口深井取水,收集汇总之后相继通过 Kulen 泵

站和 Adigala 泵站提升约 300 m 后,输送至标高为 976 m 的 Anthill 高位水池,后经全程重力流管道输送至本工程管线的终点即地面标高为 175 m 的 PK20 水池,重力落差达到 801 m,中间设置 1#水池、2#水池、3#水池、4#断压水池和 Dikhil 支线供水水池,每座水池之间高差约为 150 ~ 200 m,管线中最低点的最大静压约为 280 m (2 800 kPa)。从 Kulen 泵站至 PK20 水池的输送管线总长约为 210 km。输水系统概况如图 1 所示。



图 1 长距离输水系统概况

Fig. 1 Layout of long distance water transfer system

1.3 设计难点

项目建设地点位于东非,属于经济不发达地区,落后的基础设施建设和科技发展水平为本项目的安全稳定运行带来了很大的困难。跨越两个国家的长距离输水系统全线工作压力超过 1.5 MPa,而当地的供电系统不稳定和运行管理水平低下很可能给供水系统造成较大的水锤危害^[1]。因此,设计具备有效的水锤防护功能,而且管理方便、运行可靠的输水系统是本工程最大的难点。

2 研究目的

本项目从水源地至吉布提终端水池,输送主干管总长超过 200 km,输水管道内水流状态包括泵送压力流和有压重力流^[2-4]。通过对管道两种流态在事故停泵、关阀、小流量运行等不同工况下的水锤分析计算,提出有效的水锤防护和控制措施,为输送系统的安全稳定运行提供保障,也为今后同类工程的设计和运行提供借鉴。

3 研究内容

3.1 水锤分析软件

本工程的水锤分析采用 PIPE2000 流体力学工程计算软件包系统。该软件几乎包含了所有可能在建立水锤模型过程中出现的设备及附件的数字化模块,这些设备与附件的相关参数均具有完整的取值数据库,以供精确的计算。

3.2 水力计算方法

3.2.1 管道计算

本工程中输水管道主管材为球墨铸铁管,设计计算采用海曾-威廉公式:

$$i = \frac{10.67q^{1.852}}{C_h^{1.852} d_j^{4.87}} \quad (1)$$

式中: i 为单位管道长度的水头损失(水力坡降),m (10 kPa); q 为设计流量, m^3/s ; C_h 为海曾-威廉系数; d_j 为管道内径,m。

对于水泥砂浆内衬的球墨铸铁管,海曾-威廉系数 C_h 的取值,规范的范围为 120 ~ 130。设计中泵送压力管采用 $C_h = 125$,重力压力管采用 $C_h = 120$,局部损失按沿程损失的 5% ~ 15% 估算。

3.2.2 恒定流过程分析计算

恒定流过程分析中,与常规设计计算不同,管段沿程水头损失采用海曾-威廉公式简化计算法,系统中不计入局部损失,管道的光滑系数 C_h 建议取较大值,本工程中取值为 130,主要考虑以下因素:

① 在水锤分析中为了考虑极端最不利工况,一般管道的摩阻取较小值,此时水锤传播的阻尼比较小,断流之后水流往返也较为容易,水柱的弥合作用也相对明显,能体现较为不利的水锤现象。

② 在大口径输水管道或新建长距离输水管道的水锤计算中,由于水体流动的特点, C_h 一般取较大值,这样的计算结果与实际运行情况较为吻合。

3.2.3 水锤计算方法

水锤波通常是指管内水压的快速变化,与管道流量的变化直接相关,并以声速(计入水的可压缩性和管壁的弹性)在管道内传播。当到达管路系统的相关水力边界时,水锤波一部分继续向前传播,一部分则被反射,此类水力边界主要有管道的连接节点、水泵、阀门、管线盲端以及水锤防护装置等。

波特性法是以瞬态管流源于管道系统水力扰动所产生的压力波的发生和传播这一物理概念为理论基础,通过追踪水锤波的发生、传播、反射和干射,来

计算各节点不同时间段的瞬态压力值。该方法在大型管网系统水力分析方面具有优势。

3.3 水锤模型分析

本输水系统根据水力流动特性可分为加压输水系统和有压重力流输水系统。其中,加压输水系统由 Kulen 泵站和 Adigala 泵站串联加压组成,系统末端为 Anthill 高位水池;有压重力流系统自 Anthill 高位水池流经 1[#]水池、2[#]水池、3[#]水池和 4[#]断压水池至 PK20 终端水池。本研究以 Adigala 泵站—Anthill 水池和 1[#]—2[#]水池两端输水管道为例分别介绍加压输水系统和有压重力流输水系统的水锤分析过程。

3.3.1 加压输水系统

Adigala 泵站的设计规模为 $10.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水泵设计扬程为 180 m (1 800 kPa),根据项目所在地的实际应用情况以及当地的管理水平,水锤防护措施采用空气罐+防水锤型空气阀形式;后续管道长度为 4.6 km,管径为 DN1 000。

加压输水系统水锤的产生原因主要为泵站断电,水泵突然停机,此工况条件下后续管线在无任何保护下的瞬变流水锤特性分析见图 1 和图 2。

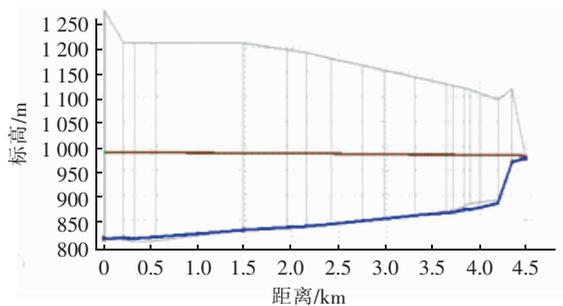


图 1 系统的高低压包络线

Fig. 1 Envelope of max/min pressures

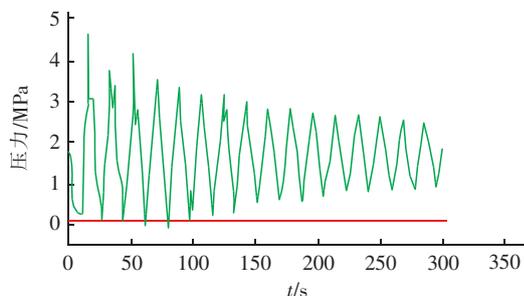


图 2 泵站处压力波动过程曲线

Fig. 2 Pressure fluctuation curve in pump station

从图 1 和图 2 可以看出,由于该段管线较短,在泵站位置的管道内会出现高密度强烈振动的水锤

波,同时,最大的水锤压力波动也主要出现在泵站位置,水锤波产生的压力可达 4.5 MPa,局部管段出现负压。因此,水锤防护以泵站处管段为主。

实际设计中,在泵站内设置 40 m^3 的空气罐,要求罐内气体体积为 25 m^3 ,连接管径为 DN500,罐体与管中心高差不小于 2 m,泵站管道出口和末端管道高点各设置 1 台 DN150 防水锤型空气阀,其他高点设置 DN150 复合型空气阀。此时的瞬变流水锤特性曲线见图 3 和图 4。可以看出,采取水锤防护措施后,水锤产生的压力波动明显变小,最高压力仅为 2.5 MPa,压力振动频率也更加平缓,管道内负压消失,对管线起到了较好的保护作用。

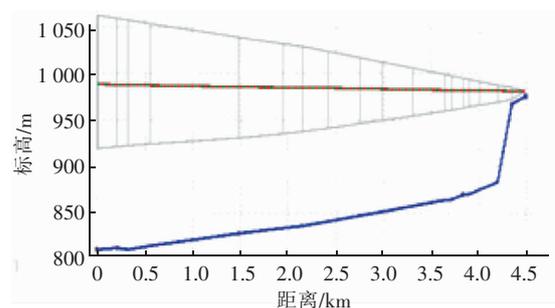


图 3 采取水锤防护措施后系统高低压包络线

Fig. 3 Envelope of max/min pressures after taking water hammer protection measures

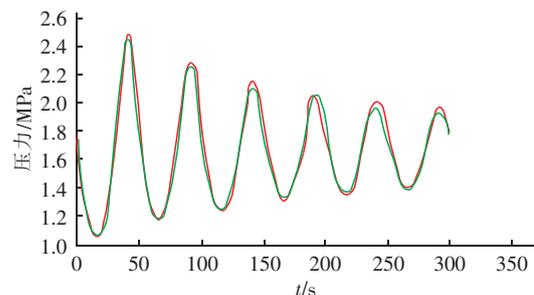


图 4 采取水锤防护措施后泵站处压力波动过程曲线

Fig. 4 Pressure fluctuation curve in pump station after taking water hammer protection measures

以上表明,加压输水系统的水锤主要来自瞬变流,防水锤空气罐的应用可以在水锤产生后对管道和水泵系统起到有效的保护作用,在埃塞俄比亚采用空气罐作为泵站水锤防护措施非常普遍,当地实际运行的空气罐在安装调试后,一般能够在不补充气压的情况下正常运行 3~5 年,维护工作量很少。

3.3.2 有压重力流输水系统

1[#]—2[#]水池输水管道设计流量为 10.2×10^4

m^3/d ,总管道长度为 21.0 km,设计管径为 DN1 000 + DN800,管道末端在 2[#]水池进水处设置流量调节阀,以控制 2[#]水池进水流量。设计流量工况下的水压线见图 5。

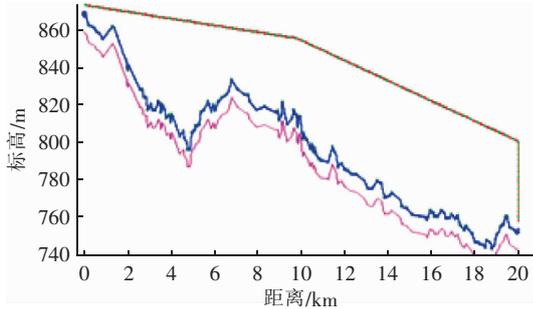


图 5 水压线

Fig. 5 Hydraulic pressure line

有压重力输水系统的水锤主要来自末端阀门关闭时产生的关阀水锤。若采用单一 DN800 阀门,在设计流量下有效开启度大约为 30%,较快关阀动作时间设置为 90 s,则管道关阀瞬变流分析结果见图 6~8。由于本段管线较长,所以末端调节阀在正常关闭时,可能会造成比较强的压力波动,主要表现为阀前压力升高约 1.9 MPa,产生关阀水锤,应做好防护措施。

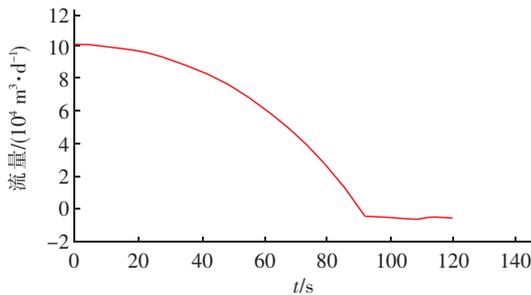


图 6 系统的流量变化过程曲线

Fig. 6 Flow fluctuation curve

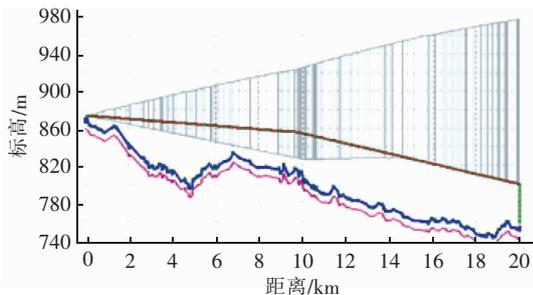


图 7 系统的高低压力包络线

Fig. 7 Envelope of max/min pressures

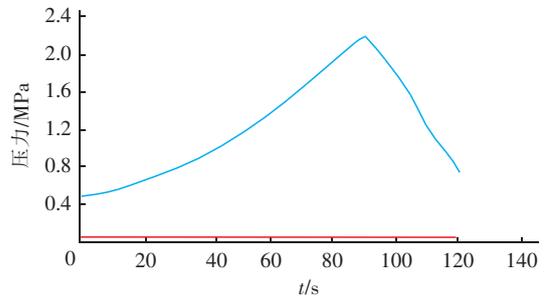


图 8 末端阀前压力波动过程曲线

Fig. 8 Pressure fluctuation curve of valve

设计中采用 DN800 主阀和 DN350 副阀并联联动控制,主阀关闭会使阀前压力自然升高,当阀前压力升高至副阀开启设定值时,副阀缓慢开启,主阀继续关闭,主阀全关之后,再行关闭副阀,两阀梯度关闭过程延长了系统的关闭时间,本段建议关闭时间不小于 360 s,从而使得系统的流量变化与时间呈线性关系,以消除压力波动的产生。此工况下关阀瞬变流分析结果见图 9~11。可以看出,采用主副控制阀门并联形式延长关闭时间后,系统关阀瞬变流产生的阀前压力仅升高 0.8 MPa,基本可以消除关阀水锤的影响。

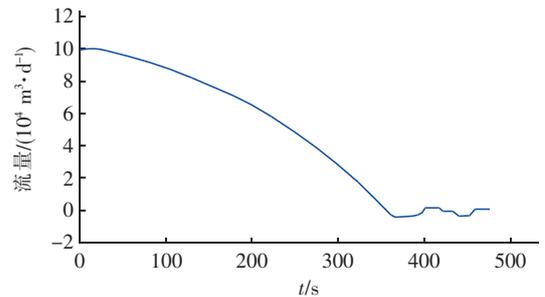


图 9 设置控制阀后系统的流量变化过程曲线

Fig. 9 Flow fluctuation curve after setting control valve

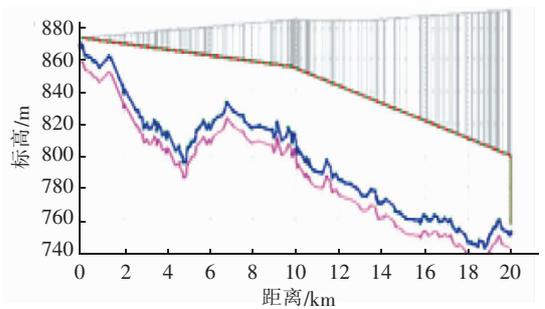


图 10 设置控制阀后系统的高低压力包络线

Fig. 10 Envelope of max/min pressures after setting control valve

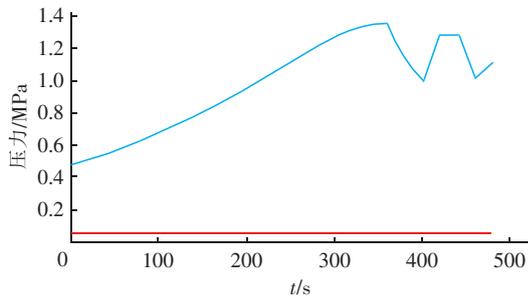


图 11 设置控制阀后末端阀前压力波动过程曲线

Fig. 11 Pressure fluctuation curve of valve after setting control valve

以上表明,末端阀门正常关闭时引起的阀前压力升高通过主副控制阀并联调节能够起到很好的消除水锤作用。末端阀门的控制量应具有 5 个内容:阀前压力、过阀流量、阀位控制、时间控制、阀后液位,其中,后 3 种为辅助控制,而流量控制是较直接的控制,需要与流量计配合使用。由于阀前压力与过阀流量一一对应,而且压力的检测方便又准确,因此,实际运行中控制人员多会采用阀前压力控制。

4 结论

4.1 加压输水系统的水锤防护

对于管线敷设形态良好的加压输水管道,水锤的发生机理并不复杂,主要体现在泵站出口处的压力波动,做好泵站的水锤全面防护,即可以保护系统安全可靠的运行。本工程两座泵站水锤防护设施采用以气囊式空气罐为主体水锤防护系统,并配以罐体处以及系统远端处的防水锤型空气阀协同工作。

4.2 有压重力输水系统的水锤防护

有压重力输水管道的水锤多为“关阀水锤”,在阀门关闭的瞬间,水锤即到来。为减少末端关阀水锤的影响,需要延长末端阀门的关闭总时长,有压重力输水的管线距离越长,所需关阀时间就越长。根据管线的实际情况,通过计算分析,提出理论关阀总时长的“临界时间”,采取大小阀门的组合,使组合关阀时间大于该“临界时间”。

4.3 长距离输水管线的安全防护

长距离输水管线的安全防护,需要一套完善的安全系统,其内容包括全过程监测、全过程控制、应急事故预案等。

全过程监测:供水系统的监测主要是流量与压力。流量监测主要设置在泵站、水池的进出水位置;压力测量相对比较容易,费用低廉,可以按需设置。

通过对压力的实时监测,能够及时判断管线系统可能存在的渗漏、爆管等运行异常状况。

全过程控制:加压输水系统的控制主要是水泵的切换与流量变频调节等。有压重力输水系统的控制主要体现在 3 方面,即:①限流,限制流量的大范围变化,让系统在合理的流量范围内波动;②调节,对压力进行调节,避免出现不利工况;③实施跟踪流量的压力调节,具备关断、隔离以及保护功能。

应急事故预案:实践中,应首先防止事故的发生,在最合理的工况下实现管线运行。一旦发生事故发生后,需采取的预案性措施主要包括事故定位程序、应急断水程序、事故抢修程序、恢复通水程序等。

工程建设之后的运行维护是系统安全稳定运行的重要保障。

参考文献:

- [1] 李建军,曹松. 长距离废水输送管线水锤及气阻问题解决方案[J]. 中国给水排水,2015,31(6):85-88.
- [2] 李停,李星,李江丽,等. 瞬变水力分析技术在输配水管道运行中的应用[J]. 中国给水排水,2015,31(11):5-9.
- [3] 王圃,许兰森,王颖. 高扬程多起伏输水管道水锤模拟及其防护[J]. 给水排水,2014,40(6):112-114.
- [4] 高小涛,马浩,马玉涛,等. 长距离大流量重力流输水管道设计实例[J]. 给水排水,2015,41(10):115-119.



作者简介:郝新宇(1974-),男,浙江杭州人,硕士,高级工程师,主要从事市政给排水规划设计工作。

E-mail:1131706@qq.com

收稿日期:2016-12-12