

伊犁河扬水工程中空气罐水锤防护的设计与优化

翁湛¹, 尹晓芷², 胡建永²

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江杭州 310020; 2. 浙江水利水电学院水利与环境工程学院, 浙江杭州 310018)

摘要 长距离输水工程水锤问题日益突出, 水锤防护难度大。针对伊犁河扬水工程存在的水锤问题, 根据瞬变流基本理论, 建立了空气罐的水力分析模型, 并结合工程实例对空气罐的水锤防护方案进行了分析优化。研究表明, 通过理论设塔方法可以方便地得到空气罐的初设方案, 结合水力过渡过程分析对初设方案进一步优化, 可以在不影响水锤防护效果的情况下, 显著减小空气罐的体型尺寸。

关键词 抽水断电; 水锤防护; 空气罐; 输水工程

中图分类号 S274.2; TV134+.1; TV672+.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)21-382-03

Design and Optimization of Air Chamber for Water Hammer Protection in Yili River Water Supply Project

WENG Zhan¹, YIN Xiao-zhi², HU Jian-yong² (1. Zhejiang Institute of Hydraulic and Estuary, Hangzhou, Zhejiang 310020; 2. Institute of Hydraulic and Environmental Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou, Zhejiang 310018)

Abstract Water hammer is growing serious for long-distance water supply project, so water hammer protection is more and more difficult. Aiming at Yili River water supply project, hydraulic analysis model is built based on theory of hydraulic transients, and case study is made for analysis and optimization of air chamber. Study indicates preliminary design of air chamber can be realized easily by method of theoretical analysis, and optimized through hydraulic transients analysis of accidental pump-stop, so more efficient design scheme of air chamber is obtained with less shape.

Key words Accidental pump-stop; Water hammer protection; Air chamber; Water supply project

长距离输水工程已经成为当前水资源优化配置的有效手段, 但其引水流量大、受水区域广、线路距离长, 正常运行调度和事故应急调度时, 需要对泵、闸、阀等进行一系列复杂操作, 并引起管道中压力和流量的剧烈波动, 导致水锤防护问题较为突出。由于输水管道较长, 除日常检修维护困难外, 事故响应速度也相对迟缓, 一旦管道发生破坏, 将产生严重后果, 轻则导致管线受损, 重则导致管道爆管、水泵机组损毁, 甚至全系统停水^[1-3]。因此, 输水管道一般需采取多重水锤防护措施, 以确保管道安全。同时, 为保证各种防护措施的有效及可靠性, 必要时还需进行多个防护措施的联合控制。

常规双向稳压塔水锤防护性能稳定, 但往往设置高度较高, 投资很大, 限制了其在输水工程中的应用, 而空气罐具有优良的水锤防护性能, 可以大大缩小调压室的体型, 受场地条件的限制较小, 在输水工程中应用具有一定的优势。因此, 基于有压瞬变流理论, 探讨空气罐的水力分析模型, 结合工程实例进行空气罐水锤防护方案的设计优化分析, 有利于空气罐的工程设计与推广应用, 对大型有压输水工程的水锤防护具有借鉴意义。

1 工程概况

新疆伊犁河南岸干渠察布查尔县扬水灌区东西长约 50 km, 南北宽约 9 km, 海拔高程 800 ~ 1 000 m。项目区地形较平坦, 南北向自然坡降 1/30 ~ 1/50, 东西向纵坡 1/2 000 ~ 1/4 000。灌区净灌面积 3.07 万 hm² (46 万亩)。整个灌区以较大的洪沟为界划分为面积不等、相对独立的 3 个小灌区, 单独设扬水站进行分级扬水, 扬水总高度约为 200 m。每个

小灌区设 4 级泵站, 共设 12 级泵站。设计扬程区间约在 52 ~ 57 m 之间, 单级泵站管线长度在 1 376 ~ 2 895 m 之间, 单级泵站设计流量在 1.57 ~ 7.32 m³/s 之间。

灌区各级泵站间均有分水无空流段, 且灌区各灌溉区间流量要求变幅较大。为满足灌溉流量调节的要求各泵站设置的水泵大小和台数均不同, 各泵站的每根上水管线都并联有不同型号的多台水泵。其中第一级泵站工程左管安装 4 台卧式双吸离心泵 (2 台大泵和 1 台中泵工作, 1 台小泵备用), 大泵单机流量 1.66 m³/s, 转速 730 r/min, 配套电机功率 1 400 kW; 中泵单机流量 0.55 m³/s, 转速 1 450 r/min; 小泵单机流量 0.2 m³/s, 转速 1 450 r/min, 配套电机功率 220 kW, 扬程 56.64 m。输水管线采用 PCCP 管单管供水, 直径为 1.6 m, 长度约 3.0 km。该文主要针对第一级泵站工程的空气罐水锤防护进行分析。

2 水锤分析基本方程

描述任意管道中的水流运动状态的基本方程如下。

$$\frac{Q}{A} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q}{A} \sin \beta = 0 \quad (1)$$

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

式中: H 为测压管水头, m; Q 为流量, m³/s; D 为管道直径, m; A 为管道面积, m²; t 为时间变量, s; a 为水锤波速, m/s; g 为重力加速度; x 为沿管轴线的距离, m; f 为摩擦系数, β 为管轴线与水平面的夹角。

式(1)、(2)可简化为标准的双曲型偏微分方程, 从而可利用特征线法将其转化成同解的管道水锤计算特征相容方程。

对于长度 L 的管道 A-B, 其两端点 A、B 边界在 t 时刻的瞬态水头 $H_A(t)$ 、 $H_B(t)$ 和瞬态流量 $Q_A(t)$ 、 $Q_B(t)$ 可建立如下特征相容方程:

基金项目 国家自然科学基金资助项目(51379064)。

作者简介 翁湛(1982-), 男, 浙江衢州人, 工程师, 从事水利水电工程设计与研究。

收稿日期 2015-06-03

$$C^-: H_A(t) = C_M + R_M Q_A(t) \quad (3)$$

$$C^+: H_B(t) = C_p - R_p Q_B(t) \quad (4)$$

式中: $C_M = H_B(t - k\Delta t) - (a/gA)Q_B(t - k\Delta t)$;

$$R_M = a/gA + R|Q_B(t - k\Delta t)|;$$

$$C_p = H_A(t - k\Delta t) - (a/gA)Q_A(t - k\Delta t);$$

$$R_p = a/gA + R|Q_A(t - k\Delta t)|$$

其中: Δt 为计算时间步长; ΔL 为特征线网格管段长度, $\Delta L = a\Delta t$ (库朗条件); N 为特征线网格管段数, $N = L/\Delta L$; R 为水头损失系数, $R = \Delta h/Q^2$; 其他符号意义同前。

水力过渡过程计算一般从初始稳定动行状态开始, 即取初始 $t=0$, 因此当式中 $(t - k\Delta t) < 0$ 时, 则令 $(t - k\Delta t) = 0$, 即取为初始值。式(3)、(4)均只有 2 个未知数, 将其分别与 A、B 节点的边界条件联列计算, 即可求得 A、B 节点的瞬态参数。

3 空气罐水力分析模型

目前, 空气罐的水力计算模型主要基于以下的基本假设^[4-5]: ①空气罐内的气体满足理想气体状态方程; ②气体的惯性和罐壁的摩擦可以忽略不计, 任何瞬间气室内的压力处处相等; ③不考虑气体与边界之间的热量交换, 气体的膨胀或压缩过程服从准静态的多变过程; ④气体的溶解损失和渗漏损失可以忽略不计。在此基础上, 得到空气罐水力计算模型的控制方程。

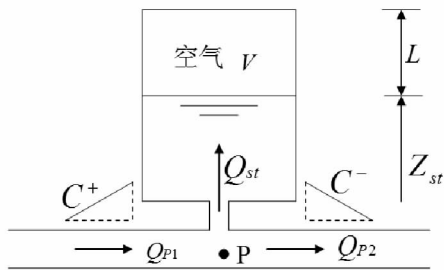


图1 空气罐水力计算模型示意图

$$H_A V^n = C \quad (5)$$

$$H_A = H_p - kQ_{st}|Q_{st}| - Z_{st} + H_B \quad (6)$$

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{1}{A_C} \cdot Q_s \quad (7)$$

$$Q_{st} = Q_{p1} - Q_{p2} \quad (8)$$

$$C^+: H_p = C_p - B_p Q_{p1} \quad (9)$$

$$C^-: H_p = C_M + B_M Q_{p2} \quad (10)$$

式中: H_A 为空气罐内气体绝对压力; H_B 为当地大气压力, 与当地高程有关; V 为空气罐内气体体积; n 为气体状态方程指数, $1 < n < 1.4$, 设计计算中常采用平均值 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, 相对压力; Q_{st} 为流入空气罐的流量; 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; A_C 为空气罐断面积; Q_{p1} 为空气罐上游侧节点的流量; Q_{p2} 为空气罐下游侧节点的流量; 其他符号意义同前。方程(5)至(10)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。

4 空气罐水锤防护方案

根据空气罐的水锤防护机理, 结合相关工程的实践经验, 当采用空气罐作为工程的水锤防护措施时, 通常以水泵抽水断电的事故工况作为空气罐方案设计的控制工况。根据水锤波的传播特性和管线的布置特点, 制定出空气罐的初设方案, 并需要借助瞬变流分析理论, 对初设方案进行优化。

4.1 计算工况的选择 第一级泵站工程输水管线采用PCCP管单管供水, 直径为 1.6 m, 长度约 3.0 km。前池为供水起点, 正常水位 823.02 m; 出水池作为供水终点, 正常水位 871.84 m, 总供水量为 3.87 m³/s。以第一级泵站水泵断电作为控制工况进行计算分析, 由于为单管供水, 因此水泵抽水断电后将没有补给水源为该输水管线供水, 如不采取稳压措施, 该输水管线可能发生负压破坏。

4.2 空气罐初设方案的确定

4.2.1 泵后不设空气罐的计算。 由于第一级泵站及其输水系统全长约 3.0 km, 水锤波速约 750 m/s, 在不设置空气罐的无调压措施情况下系统发生水锤时, 水锤波的相长约 8 s, 意味着当水泵抽水断电时, 8 s 内流量变化所产生的泵后压力降低, 将按照直接水锤公式变化, 由此产生较大的水锤压力, 直接水锤公式如下:

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta v \quad (11)$$

式中: Δv 为输水管线 8 s 之内的流速变化。

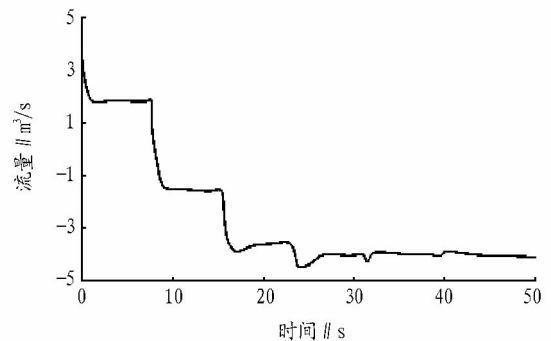


图2 不设空气罐泵站抽水断电输水管道流量变化过程

由图1可知, 在泵后不设空气罐的无调压措施情况下, 泵站抽水断电时, 泵后输水管道 3 s 内的流量由 3.87 m³/s 变化到 2.37 m³/s, 由此导致输水干管流速由 1.93 m/s 下降至 1.18 m/s, 下降约 0.75 m/s, 按照式(11), 可能导致压力下降约 563.1 kPa。

由于理论分析忽略了断电水泵运行水泵之间的压力传递, 计算结果略大于理论分析值, 但计算结果的波形与理论分析基本一致。由于泵后产生了约 588.6 kPa 左右的压力下降, 该压力波的传播, 将导致泵站后的输水管路沿线出现较严重负压。沿线由于初始压力较低, 桩号 0+692、1+418、2+118 等处压力可能降低至水流汽化压力以下, 将导致管道破坏。

从图3、4 可看出, 1-1 泵站后无调压措施时, 1-1 泵站抽水断电时, 泵后沿线将产生远大于汽化压力的负压, 故需

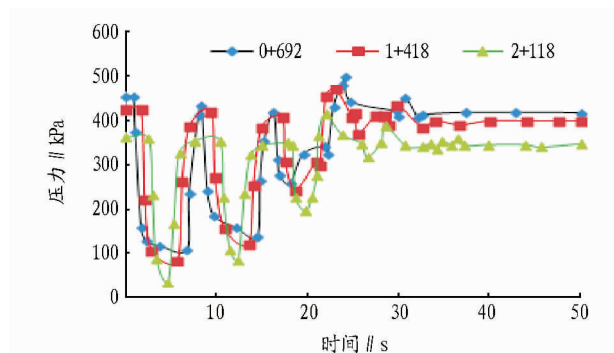


图3 不设空气罐泵站抽水断电泵后沿线压力变化过程

在 1-1 泵站后沿线设置平压措施,尤其在管道后面由于管中初始压力很低,水锤压力一旦通过时产生的压力降低将直接导致水流汽化。

4.2.2 泵后设置空气罐的计算。综合考虑地形条件、施工难度及工程造价等因素,在拟定空气罐的体型尺寸时,空气罐高度限制在 10 m 以内,面积设置在 25 m² 以内。选取了 2 个对比方案进行比选,初拟的空气罐体型尺寸方案如下。

表 1 空气罐的初拟参数

方案	高度//m	水气比	面积//m ²
方案 1	10	2:3	20
方案 2	7	3:4	25

表 2 2 种空气罐设置方案的计算结果

方案	最大气体压力 kPa	最小水深 m	泵后最大压力 kPa
方案 1	64.5	0.30	767.1
方案 2	70.4	0.18	811.3

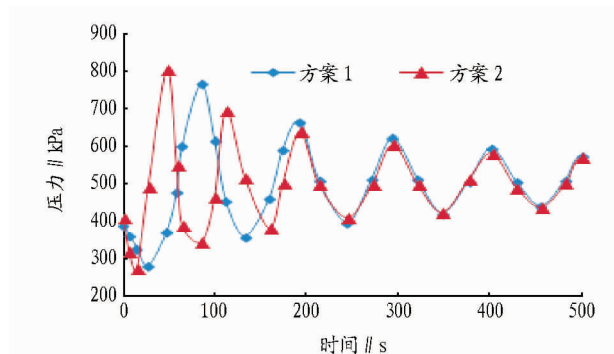


图 4 设置空气罐泵后典型位置管线内水压力变化过程

根据表 2 以及图 3、4 的计算结果可以看出,由于在泵出

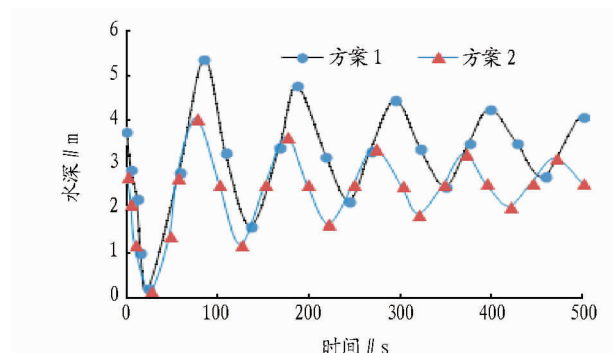


图 5 空气罐内水深变化过程

水管附近设置空气罐方案,泵后压力下降幅值与速度得以有效控制,水锤压力基本被空气罐隔断,管道内的压力不会降至负压,并存在一定余量。2 种空气罐的设置方案均可满足沿线无负压以及事故停泵过程中泵后压力允许上升值为水泵出口额定压力的 1.3~1.5 倍的规范要求,事故停泵过程中的最小水深分别为 0.3 和 0.18 m。在水锤防护效果相差不大的情况下,方案 1 的空气罐体积为 200 m³,方案 2 的空气罐体积为 175 m³,综合考虑方案 2 为推荐方案。

5 结论

通过对伊犁河扬水工程的空气罐防护方案进行理论和实例分析,可以得到如下结论:

- (1)空气罐具有良好的负压防护性能,空气罐水锤防护方案应通过理论分析和水力过渡过程数值计算来确定;
- (2)空气罐的体型设计与输水系统的具体布置和水泵特性密切相关,应进行多方案的优化比选;
- (3)空气罐的布置应尽量靠近泵站,则在有压输水系统发生抽水断电事故后,泵后阀门可以做到较快速关闭;
- (4)考虑到泵后阀门关闭需要一定的时间,必须具有合理的容积,以保证空气罐在整个过渡过程中不漏空,避免因漏空而导致管线出现负压。

参考文献

[1] WYLIE E B,STREETER V L,SUO L S. Fluid transient in systems[M]. New York:Prentice Hall,1993.
 [2] 胡建永,张健,陈胜. 串联加压输水工程事故停泵的应急调度[J]. 人民黄河,2013,35(8):74-76.
 [3] 刘梅清. 梯级调水系统瞬变流分析及优化调度研究[D]. 武汉:武汉大学,2004.
 [4] 邱锦春,杨文容,刘梅清,等. 梯级泵站水道系统过渡过程计算分析[J]. 中国农村水利水电,2003(5):61-63.
 [5] 胡建永. 长距离输水工程的水锤防护与运行调度研究[D]. 南京:河海大学,2008.

(上接第 343 页)

[9] 韦惠兰,杨彬如. 中国农村居民收入结构性变化研究——基于收入解构模型的分析[J]. 经济与管理研究,2013(7):23-28.
 [10] 钟叶喜,陆玉麟. 长三角经济圈县域经济差异研究[J]. 经济地理,2010,30(4):568-573.
 [11] 文琦,丁金梅,纳静涛. 宁夏农民人均纯收入时空演进格局分析[J]. 干旱区地理,2014,37(3):596-600.
 [12] 孙虎,刘彦随. 山东乡村居民收入地域差异及其形成机制研究[J]. 地域研究与开发,2011,30(2):69-72,77.
 [13] 夏永久,朱喜钢,储金龙. 安徽省区域经济格局时空演变研究[J]. 地域研究与开发,2012,31(4):41-46.

[14] 孟德友,陆玉麟. 基于基尼系数的河南县域经济差异产业分解[J]. 经济地理,2011,31(5):799-804.
 [15] 白彩全,张荣,宋伟轩,等. 基于 ESDA-GIS 的长三角县域农民人均纯收入格局时空演变[J]. 农业现代化研究,2014,35(3):308-312.
 [16] 赵文亮,王春涛,陈文峰,等. 基于县域单元的河南农民收入区域分异时空格局[J]. 地域研究与开发,2012,31(4):56-60.
 [17] 孟德友,陆玉麟. 基于县域单元的江苏省农民收入区域格局时空演变[J]. 经济地理,2012,32(11):105-112.
 [18] 甘荣俊,郑林,江为青,等. 鄱阳湖地区经济差异时空格局研究[J]. 江西农业大学学报:社会科学版,2008,7(4):86-89.
 [19] 曾光,张晓菊. 长三角地区农民收入差异的实证分析[J]. 华中农业大学学报,2007(5):64-69.