

气囊式空气罐水锤防护研究

蒋梦露, 张健, 罗浩, 黎东洲

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 根据气囊式空气罐的工作原理, 推导了水泵掉电情况下气囊式空气罐的涌浪周期及压力波动理论公式, 并与常规空气罐进行了对比, 分析了不同参数对气囊式空气罐水锤防护性能的影响, 给出了气囊式空气罐过渡过程数学模型。结合某长距离输水工程实例, 利用过渡过程数值仿真, 对气囊式空气罐与常规空气罐的水锤防护效果进行了对比。结果显示气囊式空气罐能够有效缓解长距离输水工程中的停泵水锤, 且其防护性能优于常规空气罐。

关键词: 长距离供水工程; 过渡过程; 水锤防护; 气囊式空气罐; 数学模型

中图分类号: TV 732.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0713-04

Research on water hammer protection of pneumatic tank

JIANG Meng lu, ZHANG Jian, LUO Hao, LI Dong zhou

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the working principle of pneumatic tank, the surge cycle and pressure fluctuation formulae of the pneumatic tank were deduced under the circumstance of power off pumping. Compared with the ordinary air tank, the effects of different parameters on the performance of water hammer protection for pneumatic tank were analyzed, and the mathematical model of the pneumatic tank in transition period was developed. Combined with the example of a long distance water supply project, the effects of water hammer protection between pneumatic tank and ordinary air tank were compared using the numerical simulation of transition period. The results showed that pneumatic tank can effectively eliminate pump stopping water hammer in the long distance water supply project and has better protective features than the ordinary air tank.

Key words: long distance water supply project; transition period; water hammer protection; pneumatic air tank; mathematical model

长距离输水工程距离长, 水力条件复杂。由于事故停泵, 管道中易发生停泵水锤现象^[14], 其产生的负压会使管线中某些部位的压力降至蒸汽压力以下, 产生水柱分离。当正压波反射回该处, 空穴中水汽凝结, 分离水柱撞击, 产生弥合水锤。水柱弥合压力将对输水管道产生破坏。空气罐作为一种常用的水锤防护措施能够有效的防护水锤压力^[59], 因此前人对常规空气罐做了大量研究, 如刘梅清^[10]利用特征线法并结合工程实例验证了空气罐在长距离水锤防护中的作用; 陆胜^[11]进行了简单管路的水击试验, 并建立数学模型, 将实测数据与计算结果进行对比, 证明了空气罐是一种有效的水锤防护措施; Stephenson D^[12]利用特征线法进行了空气罐体型优化; 廖永诚^[13]论述了空气罐消除水锤的基本原理, 并给出了空气罐容积的计算方法; 高松竹^[14]分析了空气罐体型和安装位置对空气罐水锤防护效果的影响; 黄玉毅^[15]对空气罐和空气阀的水锤防护效果进行比较, 验证了空气罐的水锤防护效果。但是, 常规空气罐中高压气体没有

与水体分隔开, 若防护设置不当, 空气罐内水体可能漏空, 从而使高压气体进入管道, 产生严重的后果。而气囊式空气罐内部有一个整体的气囊, 避免了空气罐内高压气体进入管道内, 保证输水系统的安全。因此, 气囊式空气罐具有常规空气罐不具备的优点。在以往的研究中关于气囊式空气罐的理论分析还不够充分, 本文基于特征线法建立气囊式空气罐的数学模型, 推导在水泵掉电情况下, 气囊式空气罐的涌浪周期及压力波动公式, 并结合实际算例将其与常规空气罐进行对比。

1 气囊式空气罐工作原理及数学模型的建立

1.1 工作原理

气囊式空气罐的工作原理见图1。

气囊式空气罐由钢制罐体和橡胶内胆组成, 通过法兰与管道连接, 是密闭的高压容器。它依靠气体的压缩和膨胀特性, 来反射水锤波, 抑制水位波动, 保证供水系统的安全稳定

收稿日期: 2015-02-01 修回日期: 2015-03-04 网络出版时间: 2015-07-24
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150724.0912.003.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(51379064)
作者简介: 蒋梦露(1991-), 女, 江苏句容人, 主要从事长距离、跨流域输配水系统的供水安全方面研究。E-mail: mengluyaya@126.com

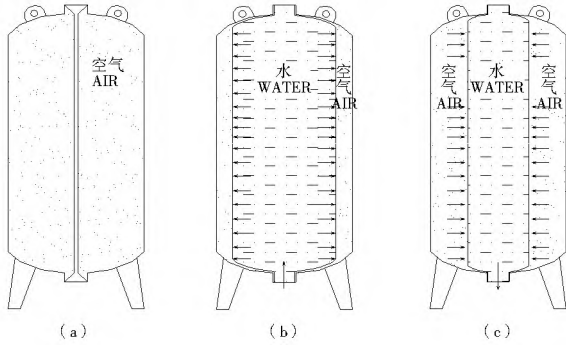


图 1 气囊式空气罐工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the working principle of pneumatic tank

运行。初期,空气罐与橡胶内胆间,根据计算结果预充入一定压缩的气体(空气或氮气),橡胶内胆被压缩(图 1(a));水泵启动时,空气罐底部压力增加,水进入橡胶内胆,内胆膨胀,压缩气体,气体压力变大(图 1(b));事故停泵时,泵后压力降低,管道中产生负压,压缩空气压迫橡胶内胆,内胆里的水补充进入管道,以防止负压的产生(图 1(c)),同时由于阻抗孔的作用,抑制罐内水位波动,进一步控制管道内水锤压力。

从空气罐构造上可以看出,气囊式空气罐中气囊中水体截面积大小改变,但高度不变,水体的防护效果在运行中不会减弱,底部的压力变化只来自气室压力的降低,而常规空气罐底部压力变化由气室压力的降低和水位的降低共作用,因此气囊式空气罐底部压力变化较小,具有较常规空气罐更优的水锤防护效果。

1.2 理论推导及特征参数分析

在含有气囊式空气罐的泵站输水系统(见图 2)中,气囊式空气罐中水体被约束在一个竖直的气囊内,只能横向膨胀

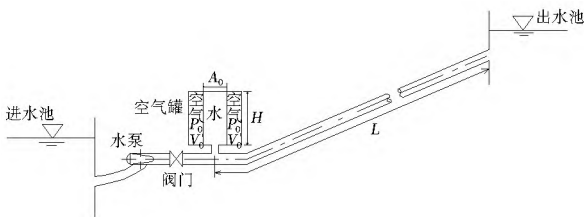


图 2 带气囊式空气罐的泵站输水系统布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of pumping station water conveyance system with pneumatic tank

收缩。理论上由于水体自身存在重力,气囊在变化的过程中,其上下截面略有差别,下部截面比上部略大。在建模过程中,假设上下截面相差很小,气囊体型简化为圆柱形,同时假设罐内气体为理想气体,变化过程中符合多变指数关系。不考虑水体和罐体的弹性。当水泵抽水断电时,泵后阀门快速关闭以防止倒流,此时气囊式空气罐的基本方程如下。

动力方程

$$Z_0 + p/\gamma - \alpha |v|v - \beta |v|v - H_0 = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

连续方程

$$fv = H_{st} \frac{dA}{dt} + Q_i \quad (2)$$

气体状态方程

$$p(F - A_a)^m = p[F - (A_s + A)]^m = p_0(F - A_0)^m \quad (3)$$

式中: H_0 为泵站出水池水位(m); A_a 为空气罐内气囊截面积(m^2); L 为空气罐后输水管线长度(m); H_{st} 为空气罐罐体高度(m); Z_0 为空气罐顶部高程(m); A_0 为空气罐初始状态气囊截面积(m^2); A 为气囊截面积变化量(m^2),大于空气罐稳定后气囊截面积为正; A_s 为稳定运行时气囊截面积(m^2); p_a, p 分别为当地大气压力与气室绝对压力(N/m^2); m 为理想气体多方指数,等温变化时取 1.0,绝热变化时取 1.4; γ 为水体容重(N/m^3); Q_i 为水泵出口流量(m^3/s); v 为引水道流速(m/s); α 为空气罐后输水管线水头损失系数; β 为空气罐阻抗水头系数; f, F 分别为引水道与空气罐截面积(m^2)。

若不考虑管道摩阻及阻抗损失,得出下方方程:

$$Z_0 + p/\gamma - H_0 = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

当泵站输水系统稳定运行时,上述方程满足以下条件:

$$p_0/\gamma + Z_0 = H_0 + p_a \quad (5)$$

$$p_0(F - A_0)^m = C \quad (6)$$

$$fv_0 = Q_i = Q_0 \quad (7)$$

式中: v_0 为稳定运行时引水道流速(m/s); Q_0 为稳定运行时引水道流量(m^3/s)。

将式(6)泰勒展开得

$$p = \frac{p_s(F - A_0)^m}{[F - (A_0 + A)]^m} \approx p_0(1 + \frac{mA}{F - A_0}) \quad (8)$$

式中: p_s 为稳定运行时气室绝对压力。

将式(8)、式(2)代入式(4)并化简得

$$\frac{d^2A}{dt^2} + \sigma^2 A = 0 \quad (9)$$

其中: $\sigma^2 = \frac{gf}{LH_s}\sigma, \sigma = m \frac{p_0}{\gamma(F - A_0)}$

式(9)为简谐振动方程,代入初始条件后可得出下列运行参数:

涌浪周期估算

$$T_{\text{气囊}} = 2\pi \sqrt{\frac{LH_{st}}{gf}} / \sqrt{\sigma} \quad (10)$$

水体截面变化幅值估算

$$\Delta A_{\text{气囊}}^* = v_0 \sqrt{\frac{Lf}{gH_{st}}} / \sqrt{\sigma} \quad (11)$$

空气罐底部压力变化幅值估算

$$\Delta H_{\text{气囊}}^* = v_0 \sqrt{\frac{Lf}{gH_s}} / \sqrt{\sigma} \quad (12)$$

同理,可求得在无摩阻情况下常规空气罐的特性参数如下:

涌浪周期估算

$$T_{\text{常规}} = 2\pi \sqrt{\frac{LF}{gf}} / \sqrt{1 + m \frac{p_0}{\gamma l_0}} \quad (13)$$

涌浪幅值估算

$$\Delta Z_{\text{常规}}^* = v_0 \sqrt{\frac{Lf}{gF}} / \sqrt{1 + m \frac{p_0}{\gamma l_0}} \quad (14)$$

空气罐底部压力变化幅值估算:

$$\Delta H_{\text{常规}}^* = v_0 \sqrt{\frac{Lf}{gF}} / \sqrt{1 + m \frac{p_0}{\gamma l_0}} \quad (15)$$

式中: l_0 为常规空气罐气室高度(m); $\Delta Z_{\text{常规}}^*$ 为常规空气罐中水位变化幅值(m);化简式(10)和式(13)可得

$$T_{\text{气囊}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{gf}} \times \sqrt{\frac{\gamma H_{st}(F - A_0)}{mp_0}} \quad (16)$$

$$T_{\text{常规}} = 2\pi \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{gf}} \times \sqrt{\frac{\gamma Fl_0}{\gamma l_0 + mp_0}} \quad (17)$$

式中： $H_s(F - A_0)$ 和 Fl_0 分别为气囊式空气罐和常规空气罐内气体体积，对于安装高程和气室体积相同的两种空气罐，常规空气罐的初始压力较大， $H_s(F - A_0) = Fl_0$ 且 $mp_{0\text{气囊}} = \gamma l_0 + mp_{0\text{常规}}$ ，因此气囊式空气罐的涌浪周期大于常规空气罐。化简式(12)和式(15)可得

$$\Delta H_{\text{气囊}}^* = v_0 \frac{\sqrt{Lf}}{\sqrt{g}} \times \sqrt{\frac{mp_0}{\gamma H_s(F - A_0)}} \quad (18)$$

$$\Delta H_{\text{常规}}^* = v_0 \frac{\sqrt{Lf}}{\sqrt{g}} \times \sqrt{\frac{\gamma l_0 + mp_0}{\gamma Fl_0}} \quad (19)$$

式(18)和式(19)中， $H_s(F - A_0)$ 和 Fl_0 分别为气囊式空气罐和常规空气罐内气体体积，对于安装高程和气室体积相同的两种空气罐，常规空气罐的初始压力较大， $H_s(F - A_0) = Fl_0$ 且 $p_{0\text{气囊}} < \gamma l_0 + mp_{0\text{常规}}$ ，因此气囊式空气罐的底部压力变化幅值小于常规空气罐，即气囊式空气罐底部最低压力略高于常规空气罐，可见气囊式空气罐防护停泵水锤的效果理论上略优于常规空气罐。值得注意的是，上述公式是基于无摩擦系统得出的，仅用于定性分析两种空气罐运行参数的变化趋势，得出的运行参数只用作优劣性对比，并不反映实际输水系统中参数变化。

2 算例分析

某长距离输水系统，泵房共设置 3 台水泵机组，两用一备设置，每台功率 220 W，设计流量 0.65 m³/s，扬程 20 m，安装高程 28.10 m。泵站进水池设计水位 18.13 m。通过长约 44 km 的 DN1200 输水管道送至末端水厂，水锤波速约 1000 m/s。选取设计工况进行恒定流水力计算，管线布置和沿线的测压管水头线见图 3。若输水系统发生抽水断电事故，泵后管道将产生严重压降，根据特征线法数值计算得出管道沿线最小压力包络线见图 4，由图 4 可以看出，在无防护措施的情况下，沿线大部分管道已出现低于 -10 m 的压力，水体早已汽化，其数值具有理论意义。一旦泵站机组发生抽水断电事故，泵后将产生很大的水锤降压，若无水锤防护措施，

管道沿线将出现无法承受的负压。

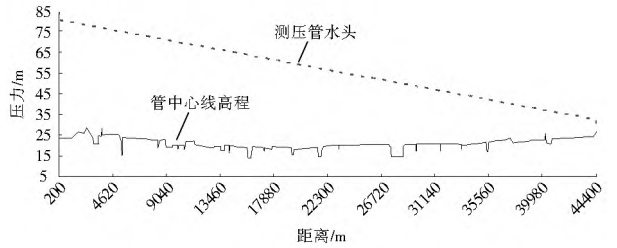


图 3 泵站至末端水厂管道高程及测压管水头线

Fig. 3 Elevation and piezometric head of the pipeline between the pump station and the end of water plant

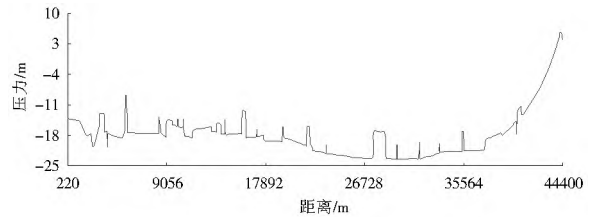


图 4 抽水断电无防护措施最小压力包络线

Fig. 4 Minimum pressure envelope for power off pumping without protective measures

泵站发生抽水断电事故时，为了充分发挥空气罐的水锤调节能力，空气罐应当尽量地靠近水泵布置，一般安装在逆止阀之后的水泵出口压力管道中。本节根据常规空气罐和气囊式空气罐的运行机理、运行条件及其相连管线的布置情况，通过多次论证和大量试算，对比两种空气罐的防护效果。分别对两种空气罐做如下对比：确定能够满足防护要求的气囊式空气罐的体型，并与相同体型的常规空气罐防护性能进行对比；确定能够满足防护要求的气囊式空气罐的体型，并与能够取得相近防护效果的常规空气罐体型进行比较；在算例对比中，为控制其他变量对结果产生影响，保持系统其他参数相同，并忽略阻抗孔损失。两种空气罐的参数见表 1、表 2，其中常规空气罐 a 与气囊式空气罐总体积及初始气体体积相同，用于水锤防护效果比较；常规空气罐 b 与气囊式空气罐防护效果接近，用于体型比较。

表 1 常规空气罐体型参数

Tab. 1 Shape parameters of ordinary air tank

参数名称	常规空气罐体型参数				初始气体绝对压力 / m	空气罐总容积 / m ³
	水深 / m	气室高度 / m	总截面积 / m ²	底部安装高程 / m		
常规空气罐 a	4.0	1.0	100.0	23.5	62.8	500.0
常规空气罐 b	4.8	2.0	100.0	23.5	62.8	680.0

注：空气罐参数均为泵站正常运行时参数。

表 2 气囊式空气罐体型参数

Tab. 2 Shape parameters of pneumatic tank

参数名称	气囊式空气罐体型参数				初始气体绝对压力 / m	空气罐总容积 / m ³
	气囊截面积 / m ²	罐体高度 / m	总截面积 / m ²	底部安装高程 / m		
参数值	80.0	5.0	100.0	23.5	61.8	500.0

注：空气罐参数均为泵站正常运行时参数。

根据表 1 和表 2 提供的三种空气罐的参数采用特征线法对系统停泵水锤进行计算，在停泵事故发生后，为防止空气罐高压导致水体迅速倒流，应当快速关闭泵后阀门。计算过程中，初步采用 30 s 一段直线规律关闭泵后阀门，计算结

果见表 3、图 5 和图 6。

计算结果表明，该系统若无水锤防护措施将出现管道无法承受的负压，常规空气罐与气囊式空气罐均能有效防护该长距离输水系统中的水锤压力。由表 3、图 5 和图 6 可知，常

表 3 空气罐底部最小压力统计

Tab. 3 Minimum pressure at the bottom of air tank

参数名称	空气罐总容积/ m^3	罐底最小压力/ m
常规空气罐 a	500.0	2.30
常规空气罐 b	680.0	3.93
气囊式空气罐	500.0	4.40

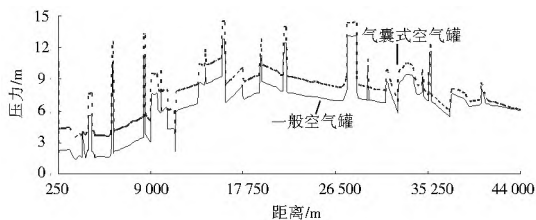


图 5 两种空气罐防护方案管道沿线管中心线最小压力包络线

Fig. 5 Minimum pressure envelope along the pipeline centerline of the two kinds of air tank protection scheme

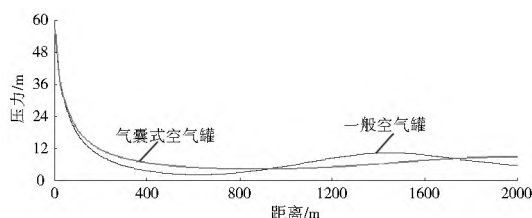


图 6 两种空气罐防护方案罐底压力变化过程

Fig. 6 Variation process of the tank bottom pressure with the two kinds of air tank protection scheme

常规空气罐 a 与气囊式空气罐安装高程、罐体总容积、罐体截面积、罐体高度和初始水气比均形同，气囊式空气罐罐底压力下降幅度较小，管道沿线最小压力包络线较常规空气罐高，即气囊式空气罐对该系统的水锤防护效果优于同体型的常规空气罐，且气囊式空气罐的涌浪周期大于常规空气罐，与 1.2 节的理论分析结果相同。常规空气罐 b 与气囊式空气罐水锤防护效果接近，常规空气罐底部最小压力略低于气囊式空气罐，且其体型大于气囊式空气罐，即在取得相同防护效果的情况下，气囊式空气罐的体型要比常规空气罐体型小，能够节省工程造价。

3 结语

在长距离输水系统中，气囊式空气罐能够有效防护事故停泵引起的断流弥合水锤。本文推导了水泵掉电情况下，气囊式空气罐的涌浪周期及压力波动理论公式。经过与常规空气罐的对比得知，具有相同安装高程和体型的两种空气罐，气囊式空气罐的涌浪周期大于常规空气罐，罐底部压力变化幅值小于常规空气罐，气囊式空气罐能够取得更优的防护效果。也就是说，在取得相同防护效果的情况下，气囊式空气罐的体型要比常规空气罐体型小，能够节省工程造价。但在数学模型的建立过程中，本文假设上下截面积相差很小，气囊体型简化为圆柱形，可能与实际情况略有偏差，有待进一步研究。由于本文仅进行了理论分析工作，初步得到的是根据数值计算验证出的结论，对于在实际工程上的应用效果还有待进一步根据实验数据进行验证。综上所述，本文的研究成果将有助于气囊式空气罐的实际工程应用，同时也为

气囊式空气罐的进一步研究提供参考。

参考文献(References):

- [1] 蒋劲, 赵红芳, 李继珊. 泵系统管线局部凸起水锤防护措施的研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31(5): 65-67. (JIAN G Jin, ZHAO Hong fang, LI Ji shan. Water hammer protection for pipe with local salience in pump system[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech: Nature Science Edition, 2003, 31(5): 65-67. (in Chinese))
- [2] 郑源, 屈波, 张健, 等. 有压输水管道系统含气水锤防护研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2005, 20(4): 436-441. (ZHENG Yuan, QU-Bo, ZHANG Jian, et al. Research on water hammer protection with gas in pressurized hydraulic pipeline system[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(4): 436-441. (in Chinese))
- [3] E B Wylie, V L Streeter. Fluid Transients[M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1983.
- [4] 刘德有, 索丽生. 变特性长管道内水流冲击气团的刚性数学模型[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2005(1): 44-49. (LIU-De you, SUO Li sheng. Rigid model of transient analysis for multiple characteristic long pipelines with trapped air mass[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005(1): 44-49. (in Chinese))
- [5] 龚娟, 张健, 俞晓东. 高扬程输水系统空气罐阻抗孔尺寸优化[J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 166-169. (GONG Juan, ZHANG Jian, YU Xiao dong. Optimization of impedance orifice of air vessel in high lift water supply system[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5): 166-169. (in Chinese))
- [6] 兰刚, 蒋劲, 李东东, 等. 空气罐在长距离输水管线水锤防护中的应用[J]. 水电站机电技术, 2013, 36(4): 42-44. (LAN-Gang, JIANG-Jin, LI Dong-dong, et al. Application on water hammer of long distance water pipelines by Air Vessel[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2013, 36(4): 42-44. (in Chinese))
- [7] 梁兴, 刘梅清, 张进国, 等. 空气罐对输水管道水锤的预防研究[J]. 排灌机械, 2009, 23(6): 16-18. (LIANG Xing, LIU Mei qing, ZHANG Jin guo, et al. Protection study on water hammer of pipelines by air vessel[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 23(6): 16-18. (in Chinese))
- [8] 王文蓉, 叶亚玲, 鞠小明. 压力空气罐对火电厂补给水系统瞬态负压的防护研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2003, 35(1): 27-30. (WANG Wen rong, YE Ya ling, JU Xiao ming. Protection study avoiding transient negative pressure by air vessel of thermal power station pumping system[J]. Journal of Sichuan university: Engineering Science Edition, 2003, 35(1): 27-30. (in Chinese))
- [9] 于永海, 王金星, 秦晓峰. 空气罐水锤防护的并联泵系统水力振动分析[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(11): 958-963. (YU Yong-hai, WANG Jin-xing, QIN-Xiao-feng. Hydraulic vibration analysis of parallel pump system with air surge tank for water hammer protection[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(11): 958-963. (in Chinese))
- [10] 刘梅清, 刘光临, 刘时芳. 空气罐对长距离输水管道水锤的预防效用[J]. 中国给水排水, 2000, 16(12): 36-38. (LIU Mei qing, LIU Guang lin, LIU Shi fang. Protection study on water hammer of long distance water pipelines by air vessel[J]. China Water & Wastewater, 2000, 16(12): 36-38. (in Chinese))

(下转第 725 页)

- [4] 王均星,陈晓勇,尹浩,等. 湖南镇水电站水工模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(5): 103-108. (WANG Junxing, CHEN Xiaoyong, YING Hao, et al. Study on the hydraulic model tests of Hunanzhen hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric engineering, 2008, 27(5): 103-108. (in Chinese))
- [5] 范杰,王长德,管光华,等. 渠道非恒定流水力学响应研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 55-60. (FAN Jie, WANG Changde, GUAN Guanghua, et al. Study on the hydraulic reaction of unsteady flows in open channel[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 55-60. (in Chinese))
- [6] 邱春,刁明军,徐兰兰. 溢流堰表孔弧形闸门开启过程水力特性3维数值模拟[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(3): 19-25. (QIU Chun, DIAO Mingjun, XU Lanlan. 3D Numerical simulation of hydraulic characteristics during the opening process of radial gate for overflow weir[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(3): 19-25. (in Chinese))
- [7] 刁明军,杨永全,王玉荣,等. 挑流消能水气二相流数值模拟[J]. 水利学报, 2003(9): 77-82. (DIAO Mingjun, YANG Yongquan, WANG Yurong, et al. Numerical simulation of water Air two phase jet flow from flip bucket to plunge pool[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(9): 77-82. (in Chinese))
- [8] 王念慎. 采用宽尾墩加消力池水工布置的水力特性试验研究[J]. 水利学报, 1986(9): 15-23. (WANG Nianshen. A laboratory study on hydraulic characteristics of flaring gate piers and stilling pool in combined application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986(9): 15-23. (in Chinese))
- [9] 刘永川. 宽尾墩消能工在安康水电站应用中的水力学问题[J]. 水利水电技术, 1987, 18(9): 11-15. (LIU Yongchuan. Hydraulics studying & applying on flaring gate piers of ankang hydropower[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1987, 18(9): 11-15. (in Chinese))
- [10] 倪汉根. 宽尾墩消力池的简化计算方法[J]. 水利学报, 1998(6): 19-24. (NI Hange. A simplified hydraulic calculation method for flaring gate pier stilling basin[J]. Journal of Hydraulic engineering, 1998(6): 19-24. (in Chinese))
- [11] 李中枢,潘艳华. 宽尾墩联合消能工体型选择及水力特性的研究[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 82-87. (LI Zhongshu, PAN Yanhua. Hydraulics of stilling basin with flaring gate piers[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 82-87. (in Chinese))
- [12] 张挺,伍超,莫政宇,等. X型和Y型宽尾墩水力特性对比研究[J]. 水利学报, 2007, 38(9): 1207-1213. (ZHANG Ting, WU Chao, MO Zhengyu, et al. Comparison on hydraulic characteristics of X-shape and Y-shape flaring gate piers[J]. Journal of Hydraulic engineering, 2007, 38(9): 1207-1213. (in Chinese))
- [13] 周喜德,殷彤,雷云华,等. 低Fr数宽尾墩消力池流场3维数值模拟[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(6): 17-24. (ZHOU Xide, YIN Tong, LEI Yunhua, et al. 3D numerical simulation of turbulent flow with lower Fr number in stilling basin with flaring gate pier[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(6): 17-24. (in Chinese))
- [14] 胡静,邓军. 宽尾墩对跌坎底流消能影响的试验研究[J]. 水力发电, 2010, 36(3): 93-96. (HU Jing, DENG Jun. Experimental investigation about the effect of flaring gate pier on falling still bottom flow dissipator[J]. Water Power, 2010, 36(3): 93-96. (in Chinese))
- [15] 尹进步,梁宗祥. 与宽尾墩联合使用的消力池底板压强特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 103-108. (YIN Jibu, LIANG Zongxiang. Experimental study on the bottom pressure of a stilling basin combined with flaring gate piers[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(4): 103-108. (in Chinese))

(上接第716页)

- [11] 路胜. 空气罐控制管道水击实验研究[J]. 油气储运, 1994, 13(2): 19-22. (LU Sheng. Experimental study on water hammer of pipelines by air vessel[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1994, 13(2): 19-22. (in Chinese))
- [12] Stephenson D. Simple Guide for Air Vessels for Water Hammer Protection of Pumping Lines[J]. Journal of Hydraulic Engineering(ASCE), 2002, 128(8): 792-797.
- [13] 廖永诚. 一种防止水锤的有效装置——空气罐[J]. 水利水电技术, 1984(3): 49-53. (LIAO Yongcheng. An effective equipment to prevent water hammer—the air tank[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 1984(3): 49-53. (in Chinese))
- [14] 高松竹,蒲家宁,许萍,等. 空气罐控制输液管道水击研究[J]. 管道技术与设备, 2004(4): 17-19. (GAO Songzhu, PU Jianing, XU Ping, Study on controlling water hammer of pipelines by air tank[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2004(4): 17-19. (in Chinese))
- [15] 黄玉毅,李建刚,符向前,等. 长距离输水工程停泵水锤的空气罐与气阀防护比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(8): 186-192. (HUANG Yuyi, LI Jiangan, FU Xiangqian, et al. Research on the comparison of air vessel and air valve on pump stopping water hammer protection of long distance pipeline[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(8): 186-192. (in Chinese))