

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2012.01.018

## 设有复式空气阀的管道充、放水过程

郑源<sup>1</sup>, 薛超<sup>2</sup>, 周大庆<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098)

**摘要:**为了研究长距离有压管道充水和放水过程中管内气体压力的变化情况,并保证其运行中的安全,针对长距离有压管道的特点,对其充水和放水过程,采取了对整个管道进行分段处理、依次充水和放水的策略。对于分段后的每一段管道,建立了圆形管道内水体体积与水深关系的数学模型。按照小流量充水的原则,运用理想气体状态方程,结合复合式空气阀的进气和排气性质,在空气阀和泄水管布置情况已知的前提下,根据不同的充水流量和放水流量,计算各管段气体压力的变化情况。整个数值计算过程采用自编 Fortran 程序计算求解。计算结果表明:充水和放水的流量越大,对应管段的气体压力越大和越小,管道越危险;在不影响管道安全性的前提下,为了使管道尽快充满和放空,应采取较大的充水流量( $16 \text{ m}^3/\text{s}$ )和放水流量(泄水阀全开)。

**关键词:**有压管道;复合式空气阀;充水过程;放水过程;理想气体状态方程

中图分类号: S277.9; TV134 文献标志码: A 文章编号: 1674-8530(2012)01-0091-06

## Water filling and emptying process of pipeline with combined air valve

Zheng Yuan<sup>1</sup>, Xue Chao<sup>2</sup>, Zhou Daqing<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** In order to research the air pressure changes in water filling and emptying process of a long distance pressured-pipeline, sectional treatment and ordinal water filling and water emptying were adopted according to the characteristics of the pressured-pipeline. For each segment of the circular pipe, a mathematical model which involved the relationship between the water volume and water depth was established. On the basis of the definite positions of air valves and drain pipes as well as with the principle of small flow filling, the ideal equation concerning with the characteristics of air valve were calculated by Fortran programmed code for the various flow rates of both water filling and water emptying. The results show that the greater flow rate of the water filling and water emptying, the higher and lower the corresponding air pressure, and the higher risk of the pipe. The greater flow rate of water filling and water emptying should be accepted on the premise that the pipe is safe. The final filling flow rate is  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ , and the drain valves are full opening during water emptying process.

**Key words:** pressured-pipeline; combined air valve; water filling process; water emptying process; ideal gas equation of state

收稿日期: 2010-08-17

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAB04A03)

作者简介: 郑源(1964—),男,山东日照人,教授,博士生导师(zhengyuan@hhu.edu.cn),主要从事水利水电工程、流体机械研究。  
薛超(1985—),男,吉林长春人,硕士研究生(eshen320@126.com),主要从事水利水电工程、流体机械研究。

水是生命之源,水资源是人类赖以生存和社会发展的不可替代的资源。近十几年来,水资源的供需矛盾已经严重地制约着世界各地经济的发展和社会的进步。跨流域长距离输(调)水工程是解决水资源供需矛盾的一项行之有效的工程措施。因此,世界各地已建了和在建着许多跨流域调水工程,例如美国加利福尼亚的北水南调工程、巴基斯坦的西水东调工程<sup>[1]</sup>,国内的东深供水工程<sup>[2]</sup>、正在建设中的南水北调工程<sup>[3]</sup>以及大伙房水库输水工程<sup>[4]</sup>等。

有压输水方式在提高输水规模和保证水质方面有着无可比拟的优势,但其水力控制引起的非恒定流非常复杂<sup>[5]</sup>,特别是频繁检修时进行的充放水操作中,复杂的水力过渡现象还未被人们所认知。Wylie等<sup>[6]</sup>研究了瞬变流的发生、发展机制,对于复杂管道系统里的非定常流动,采用基本的偏微分方程进行分析,并给出可以减少由于瞬变流对工程所造成危害的方法和措施,为后来学者进行相关研究奠定了理论基础。杨敏等<sup>[7]</sup>基于明渠非恒定流的运动方程和连续方程,采用Preissmann四点隐式差分格式,结合虚拟流量法,对有压管道充水过程进行了数值仿真模拟。但是目前尚未有相关文献指明管道放水时的流量如何控制。管道的充水和放水过程中,充、放水流量的大小直接影响充放水的安全性。充水流量过大,会导致排气不畅,容易引起气爆型水锤破坏等事故<sup>[8]</sup>;放水流量过大,会导致管道局部出现较大真空,继而发生管道凹陷等破坏。

文中根据工程实际情况,给定若干种充、放水流量的方案,再根据实际管内气体压力大小和充、放水时间长短的综合情况,最终确定充水和放水流量的大小。

## 1 复合式空气阀的特性

空气阀在长距离输水管道中起着相当重要的防护作用,它可以有效地控制输水系统中产生的负压。通过在管路中合理布置空气阀,既可以排出管路中的有害气团,又能在管路出现负压时及时补气,消除液柱分离现象,避免事故的发生。在长距离输水管道中,空气阀沿管道纵向的设置数量和布置方式应根据沿线地形合理确定<sup>[9]</sup>。一般人为地每隔一定距离布置成一个高点,在驼峰处布置空气阀,不仅在充水时有利于空气排出,在放水时也利于空气的及时补

充,而且还可以防止管道的气蚀和振动,从而确保管道输水安全。

以色列艾瑞(ARI)流体控制设备公司生产的D-060 NS SD2 DN200 mm复合式空气阀为例,其特性曲线见图1,图中 $Q'$ 为流量, $m^3/h$ ;  $\Delta p$ 为压差,0.1 MPa。

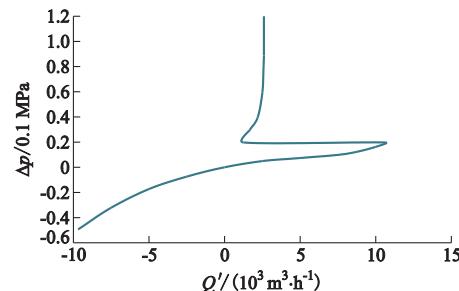


图1 空气阀排气量与压差的关系曲线

Fig. 1 Curves between displacement and pressure difference of air valve

根据空气阀的特性曲线,利用最小二乘法拟合得到式(1)的曲线方程:

$$\begin{cases} y = 13.66x^3 + 17.161x^2 + 10.596x + 0.0003, & x \leq 0, \\ y = -260.4x^3 + 51.99x^2 + 14.899x - 0.019, & 0 < x < 0.2, \\ y = 1.0554x^3 - 2.9649x^2 + 2.7168x - 0.088, & x \geq 0.2, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x$ 为相对压差, $x = \frac{p - p_0}{p_0}$ ;  $p$ 为管内的实际气体压力,Pa;  $p_0$ 为大气压力,Pa;  $y$ 为进排气量, $m^3/s$ 。

空气阀靠水流压缩管内空气,管道内外空气产生一个压力差,进而使球阀自动启闭。ARI复合式空气阀具有高低压微量和大量两种排气功能,大排量组合式进排气阀的结构保证在管道正常运行时及时进、排气。高压微量自动排气是在管道有压状态下自动排放内部积聚的空气,保证管道的正常运行;低压大量自动排气是既能在空管道充水时排放管道内的空气,又能在管道排空或出现负压时自动开启,向管道内进气以消除负压。值得一提的是,ARI复合式空气阀在任何工况下,只要系统内出现负压,不论是因为管道排空还是爆管事故引起的,均可瞬间完全开启,开启压力几乎为0,全速进气,及时消除负压,保护系统。

文中主要研究的是管道的充、放水过程,管道压

力较低,主要为低压工况下大量排气和进气.

输水管道内气体的压缩过程可以认为是空气动力学中的等温过程.在时间步长极小的情况下,可以忽略空气阀的进排气量,认为管道内的气体满足理想气体的状态方程.

## 2 充水模型

### 2.1 数学模型的建立

在充水过程中,水流按一定的流量不断地流进管道内,要想知道某一时刻管道每一断面水体的水深,必须先建立圆形管道内水体体积与水深的关系函数.圆形管道内水体面积  $dA$  与该断面水深  $H$  的关系见图 2.

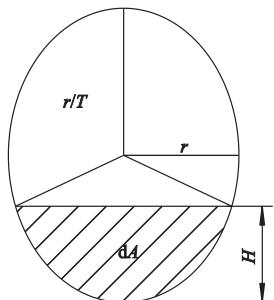


图 2 圆形管道计算断面图

Fig. 2 Computation section of pipeline

由图 2 可知

$$dA = \frac{\pi r^2}{2T} + (HT - r) \sqrt{H\left(\frac{2r}{T} - H\right)} - \frac{r^2}{T} \arcsin\left(1 - \frac{HT}{r}\right), \quad (2)$$

式中: $r$  为管道半径; $T = \cos(\arctan \sigma)$ ,  $\sigma$  为管道的坡度,大小为  $\tan \theta$ ,  $\theta$  为管道的倾角.

如图 3 所示,由充水的先后顺序和管道的坡度可知,管道内水体体积与水深的关系函数是一个分段函数,即

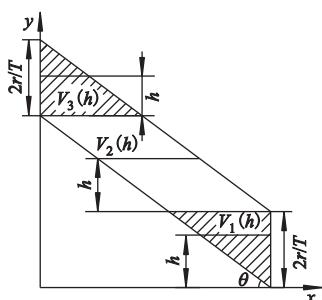


图 3 圆形管道纵向断面图

Fig. 3 Longitudinal section of a pipeline

$$V(h) = \begin{cases} V_1(h) = \frac{\pi r^2 h}{2\sigma T} + \frac{T}{3\sigma} \left( \frac{2rh}{T} - h^2 \right)^{\frac{3}{2}} - \frac{r^3}{\sigma T^2} \times \\ \left[ \frac{\pi}{2} - \left( 1 - \frac{hT}{r} \right) \arcsin \left( 1 - \frac{hT}{r} \right) - \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{hT}{r} \right)^2} \right], & 0 \leq h \leq \frac{2r}{T}, \\ V_2(h) = \frac{\pi r^2 h}{\sin(\arctan \sigma)}, & 0 \leq h, \\ V_3(h) = V_1\left(\frac{2r}{T}\right) - V_1\left(\frac{2r}{T} - h\right), & 0 \leq h \leq \frac{2r}{T}, \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_1(h)$ ,  $V_2(h)$ ,  $V_3(h)$  分别为图 3 中对应管段内水体体积与水深的关系函数; $h$  为某一水面状态下对应的相应管段内的最大断面水深.

### 2.2 充水流量的确定

采用小流量充水原则.采用较小的流量对即将投入运行的管道充水是一项重要的原则和主要手段,不仅可以避免管路水击,而且也是减小进、排气设施规模的重要条件之一.文献[10]指出:“如果管道以等于满管流速 0.3 m/s 或者更小的速度充水,将不会发生由水击造成的管道破坏”,并强调“为了尽量减少管内剩余气体和避免发生水击,任何情况下充水速度不应超过 0.6 m/s”.流速越小,充水时间越长;流速越大,充水时间越短.但如果流速过高,又会发生空蚀破坏等一系列问题<sup>[11]</sup>.

由所结合的工程实际情况知,隧洞段满管平均流速为 0.3 m/s 所对应的流量为 8.482 m<sup>3</sup>/s.但考虑到为了能充分利用管道的承载能力,并尽快将管道充满,文中列举了隧洞段充水流量分别为 8.482, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 m<sup>3</sup>/s 等 9 种工况.

### 2.3 求解过程

数值计算过程均采用自编 Fortran 程序求解.

假定上游库水位在整个充水过程中保持不变,即闸孔全水头保持不变,取水端闸门处的流量不变,设时间步长为  $\Delta t$ ,整个充水数值计算过程如图 4 所示,图中  $i$  为循环次数, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $m$  为管内气体质量,kg; $\Delta m$  为气体质量变化量,kg; $\rho$  为管内气体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $V$  为管内气体体积,m<sup>3</sup>;  $\Delta V$  为气体体积变化量,m<sup>3</sup>;  $p$  为管内气体压强,Pa; $y_i = f(x_i)$  代表式(1);  $R$  为摩尔气体常数, $R = 8.31451 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ ;  $T$  为体系温度, $T = 288.15 \text{ K}$ ;  $M$  为气体平均摩尔质量, $M = 29 \text{ g/mol}$ ;  $V_w$  为管内水体积,m<sup>3</sup>;  $V_0$  为

管道的容积,  $m^3$ .

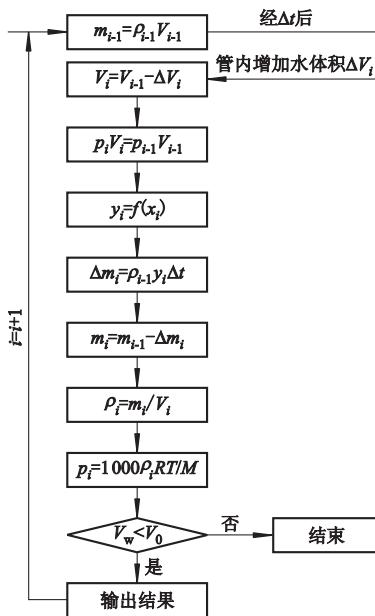


图4 充水求解过程方框图

Fig. 4 Block diagram of solution process in water-filling

初始时刻,即  $i = 1$  时刻,取水端闸门没有打开,管道内只有空气。管道内的气体通过空气阀与大气相通,即管道内的气体压强为大气压强,密度与管道外的气体相同。

### 3 放水模型

#### 3.1 数学模型的建立

放水可以近似认为是充水的逆过程。但从严格意义上讲,并非如此。这主要取决于管道的具体布置形式,如果整个管段为同一坡度的直管段,则放水和充水过程互逆;若同时存在正、逆坡管段,则另当别论。因此,放水过程中,由水体体积与水深函数关系所建立的放水数学模型并非和充水过程在严格意义上相等。考虑到所结合的工程的实际情况,这里取放水过程中放水数学模型水深关系函数和充水过程一样。

#### 3.2 放水流量的确定

由于目前尚未有相关文献指明管道放水时的流量如何被控制,所以根据工程实际情况,给定若干种放水流量的方案,再根据实际管内气体压力大小和排水时间长短的综合情况,最终确定排水流量的大小。其中隧洞段列举的放水流量分别为 6, 7, 8, 9, 10, 11  $m^3/s$  和泄水阀全开(流量非恒定)等 7 种工况。

#### 3.3 求解过程

假定泄水管的排水流量在整个排水过程中保持不变,整个放水数值计算过程如图 5 所示。

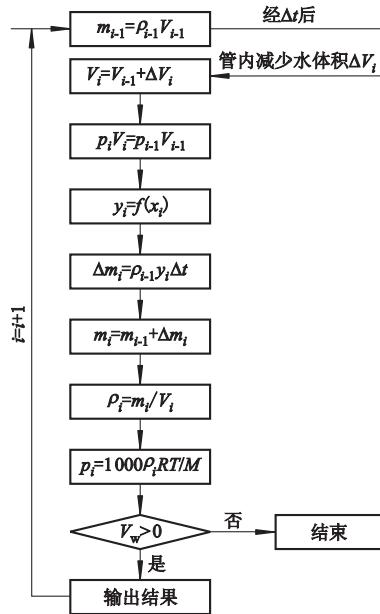


图5 放水求解过程方框图

Fig. 5 Block diagram of solution process in water-emptying

初始时刻,即  $i = 1$  的时刻,泄水管阀门没有打开,管道内全部是水。管道内的气体压强近似为大气压强,密度与管道外的气体相同。

### 4 模型应用

我国东北某输水工程采用管道和隧洞形式,全程有压,是目前国内管道输水距离最长、输水量最大、供水方式最复杂的工程。由于管线比较长(200 多 km),如果采用整段的充放水方式,不但不符合工程的实际要求,而且会给计算程序的编制、计算结果的合理性带来很大的影响,因此需要分段充水和放水,分段后每段长度为 15 ~ 30 km。考虑到篇幅,仅以其中的隧洞段作为研究对象,在不同的充水流量和放水流量下,计算和分析输水隧洞内气体参数的变化情况。管道部分分段情况及节点高程如图 6 所示,图中  $H$  为高程,  $m$ ; PCCP 为预应力钢筒混凝土管段;tunnel 为隧洞段;图中所示的是管道的纵断面图,其中隧洞的横断面形式是直径为 6 m 的圆形,在桩号为 K6 + 520 处的隧洞顶部并排布置 8 个 DN200 复合式空气阀。

结合前面分析给定的充水流量,得到不同流量下各个管段内气体体积、压力和时间的对应关系。限

于篇幅,只列举其中较具有代表性的隧洞段,见图7和8,图中 $t$ 为时间, min;  $V$ 为管内气体体积,  $\text{m}^3$ ;  $p$ 为管内气体压力, Pa;  $q$ 为充水流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

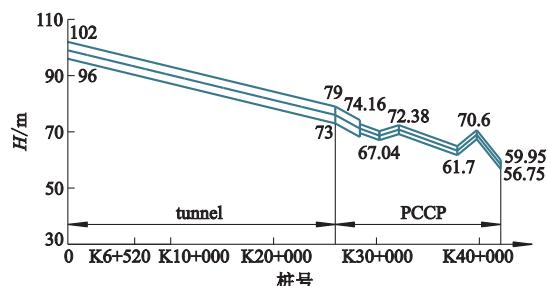


图 6 部分管线分段情况

Fig. 6 Segmentation of partial pipelines

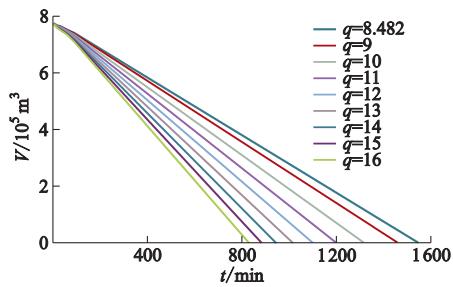


图 7 隧洞内气体体积随时间变化曲线

Fig. 7 Curves between air volume and time difference in tunnel

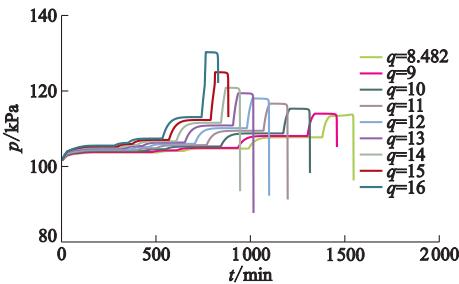


图 8 隧洞内气体压力随时间变化曲线

Fig. 8 Curves between air pressure and time difference in tunnel

由图7可知,隧洞内的气体体积随时间的变化基本上属于线性变化规律,这主要是与空气阀的排气特性有关。由图8可知,按照小流量充水原则,在不同的充水流量下,隧洞段内气体压力在整体上不很大,满足设计要求;充水流量越大,管道内气体压力越大,充水时间越短,考虑到为了能充分利用管道的承载能力,并尽快将管道充满,采用 $16 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量进行充水。图8中压力变化较大(曲线较陡)区域,主要是因为空气阀的布置情况与水位的上涨状态处于临界的位置,即 $t_0$ 时刻,空气阀位于水面以上,空气阀保持进、排气功能;到了下一时刻 $t_1$ ,空气

阀被水面淹没,失去进、排气功能,导致管道排气能力骤然下降,致使管内气体压力突增。

同样,由前面分析给定的不同放水流量,得到隧洞段内气体压力与时间、水体积与时间的对应关系,见图9和10,图中 $V_w$ 为管内水体积,  $10^5 \text{ m}^3$ ;  $Q$ 为放水流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

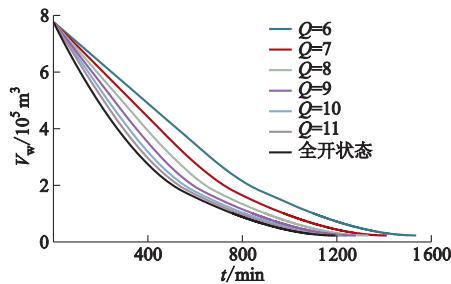


图 9 隧洞内水体积随时间变化曲线

Fig. 9 Curves between water volume and time difference in tunnel

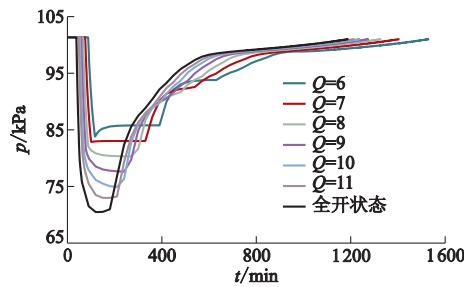


图 10 隧洞内气体压力随时间变化曲线

Fig. 10 Curves between air pressure and time difference in tunnel

由图9,10可知,在不同的放水流量下,管道内各特征量随时间变化的趋势是一致的。图10中压力陡降区域主要是因为在放水初始阶段,水位(水头)相对较高,泄水管的排水流量较大,而此时空气阀没有来得及进气或者进气量远不及由于水的流失而需要其补充的量,导致管内出现较大真空。图10中压力陡增区域主要是因为泄水管的布置情况与水位的下落状态处于临界的位置,即 $t_0$ 时刻,泄水管管底位于水面以下,泄水管保持排水功能;到了下一时刻 $t_1$ ,泄水管管底位于水面以上,失去排水功能,导致管道整体排水能力骤然下降,而空气阀的进气并未受到影响,致使管内气体压力突增。从图10还可知,随着放水流量的增大,管道内气体压力达到最小值所用的时间越短,放水所用的时间也越短,但是能达到的最小压力值也越小,即真空度越大,越不安全。泄水阀全开时,流量最大,放水时间最短,但是放水时产生的真空度也是最大。考虑到能尽快放空管道

中的水,为接下来的检修和再次供水做好准备,加之产生的最低压力不是很低,以及保持最低压力的时间亦不是很长,因此,隧洞段放水时泄水管阀门可以全开,对应的放空时间是19~20 h.

## 5 结 论

按照小流量充水的原则充水,管道内气体压力变化不是很大,亦不会发生水击造成管道破坏,若考虑能充分利用管道承载能力,并缩短充水时间,可适当增加充水流量. 充水流量越大,管道内气体压力越大,充水时间越短;放水流量越大,管道内气体压力到达最小值所用的时间越短,放水所用的时间也越短,但是能达到的最小压力值也越小,即真空度越大,越不安全. 因此,在实际充、放水过程中,为了保证管道安全,合理地选择充、放水流量是十分必要的. 计算结果可为长距离输水管道充水和放水过程的安全评估提供科学依据.

在长距离有压管道充、放水过程的研究中,以下问题值得进一步深入研究:充、放水过程中,管道进、排气过程因与外界大气相通,难以严格满足气体状态方程的条件.

## 参考文献(References)

- [ 1 ] 蒋国富.国外跨流域调水经验对我国南水北调中线工程的启示[J].世界地理研究,2006,15(4):35~40.  
Jiang Guofu. Enlightenment of trans-boundary region water diversion in foreign countries to the South-to-North Water Diversion Project in the middle line[J]. World Regional Studies,2006,15(4):35~40. (in Chinese)
- [ 2 ] 广东水利厅.东深供水工程支撑香港繁荣发展 推进粤港紧密合作[J].中国水利,2009(18):140~141.  
Water Resources Department of Guangdong Province. Dongshen water supply project—Support the development of Hongkong and promote the cooperation between Guangdong and Hongkong [ J ]. China Water Resources,2009(18):140~141. (in Chinese)
- [ 3 ] 马骏,郑垂勇.南水北调工程价值链管理研究[J].水利经济,2006,24(5):1~3.  
Ma Jun, Zheng Chuiyong. Researches on value chain management of South-to-North Water Transfer Project in China [ J ]. Journal of Economics of Water Resources,
- [ 4 ] 2006,24(5):1~3. (in Chinese)  
许晓辉,张晓梅,魏长勇,等.大伙房水库输水工程水资源优化配置模型的分析与研究[J].安徽农业科学,2006,34(11):2618~2620.  
Xu Xiaohui, Zhang Xiaomei, Wei Changyong, et al. The analysis and studies on optimal allocation of water resources model of water distribution project of Dahuofang reservoir[ J ]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006,34(11):2618~2620. (in Chinese)
- [ 5 ] Zhao M, Ghidaoui M S, Kolyshkin A A. Perturbation dynamics in unsteady pipe flows[ J ]. Journal of Fluid Mechanics,2007,570:129~154.
- [ 6 ] Wylie E B, Streeter V L. Fluid Transients [ M ]. New York: McGraw-Hill,1978.
- [ 7 ] 杨敏,李强,李琳,等.有压管道充水过程数值模拟[J].水利学报,2007,38(2):171~175.  
Yang Min, Li Qiang, Li Lin, et al. Numerical simulation of water-filling process in pressure conduit [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(2):171~175. (in Chinese)
- [ 8 ] 刘志勇,刘梅清.空气阀水锤防护特性的主要影响参数分析及优化[J].农业机械学报,2009,40(6):85~89.  
Liu Zhiyong, Liu Meiqing. Analysis and optimization of main influencing parameters for water-hammer prevention characteristic of air valves [ J ]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40 (6):85~89. (in Chinese)
- [ 9 ] 胡建永,方杰,张健,等.空气阀在长距离输水系统中的水锤防止作用[J].人民长江,2008,39(1):63~65.  
Hu Jianyong, Fang Jie, Zhang Jian, et al. The protection efficiency of water hammer by air valve in long-distance conveyance system[ J ]. Yangtze River,2008,39(1):63~65. (in Chinese)
- [ 10 ] AWWA. Concrete Pressure Pipe [ M ]. USA: AWWA, 1995.
- [ 11 ] 袁丹青,陈向阳,白滨,等.水力机械空化空蚀问题的研究进展[J].排灌机械,2009,27(4):269~272.  
Yuan Danqing, Chen Xiangyang, Bai Bin, et al. Research progress of cavitation and erosion in hydraulic machinery [ J ]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27 (4): 269~272. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)