



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.01.022

罗浩, 张健, 蒋梦露, 等. 长距离高落差重力流供水工程的关阀水锤[J]. 2016, 14(1): 131-135.

LUO Hao, ZHANG Jian, JIANG Meng lu, et al. Water hammer in the long distance and high drop water supply project of gravity flow[J]. 2016, 14(1): 131-135. (in Chinese)

长距离高落差重力流供水工程的关阀水锤

罗浩, 张健, 蒋梦露, 俞晓东, 黎东洲

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 对长距离高落差重力流供水工程中阀门动作规律进行了研究, 分析了关阀的水锤特性, 运用特征线法推导了在已知阀门关闭规律时管道首相水锤压力的解析公式以及在已知管道控制压力时阀门最快直线关闭规律的解析公式, 并结合数值计算对公式的正确性进行检验。结果表明: 推导出的首相水锤压力解析公式和水锤直线关阀规律解析公式计算均与数值计算结果吻合较好, 精度较高, 可为高落差重力流供水工程的管道设计及运行调度提供参考。

关键词: 重力流; 高落差输水; 流阻系数; 首相水锤; 关阀规律; 特征线法

中图分类号: TV134 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0131-05

Water hammer in the long distance and high drop water supply project of gravity flow

LUO Hao, ZHANG Jian, JIANG Meng lu, YU Xiaodong, LI Dongzhou

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

Abstract: Water hammer of first phase usually occurs in the long distance and high head water supply system. Thus, once the downstream valve is urgently closed in case of an accident in a project, a rational closure rule is needed to ensure the safety of the water supply system. Based on the long distance and high fall gravity flow water supply project, the formula of water hammer at the end of first phase and the formula for linear valve closure were proposed based on the method of characteristic (MOC) when valve closure law or water hammer pressure were known. The two formulas had been tested by numerical calculation. It was observed that the results of both formulas fit the results of numerical calculation very well. Taken together, we believe that the conclusion of this paper could provide a reference for pipeline design, operation and dispatching of long distance and high drop gravity flow water supply project.

Key words: gravity flow; high fall water conveyance system; coefficient of flow resistance; first phase water hammer; valve closure law; MOC

长距离供水工程是解决水资源时空分布不均的有效方式, 工程运行中发生的水锤将严重威胁输水系统的安全^[1-2]。在我国中西部地区, 地势上下起伏较大, 使得长距离供水工程上下游落差较大, 阀前水头较高, 由水力学知识可知, 此种供水工程在遇到紧急情况需关闭末端阀门时管道内可能出现首相水锤

现象。在长距离重力流供水工程中, 管道的安全运行十分重要。国内很多学者对有关重力流的关阀规律及其引起的管道压力进行了研究^[3-13]。Wylie^[14]详细阐述了阀调节的基本概念并建立了简单和复杂管道系统的阀调节方法; 封金磊^[15]对减小关阀水锤的阀调节措施进行了优化; 陈明等^[16]对管道耦合水击的

收稿日期: 2015-03-20 修回日期: 2015-11-12 网络出版时间: 2016-02-27
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1647.016.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51379064)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51379064)

作者简介: 罗浩(1990), 男, 河北邢台人, 主要从事长距离、跨流域输配水系统的供水安全方面的研究。E-mail: 807674266@qq.com

通讯作者: 张健(1970), 男, 江苏南京人, 教授, 博士, 主要从事长距离、跨流域输配水系统的供水安全方面的研究。E-mail: zhang@hhu.edu.cn

最优阀调节问题进行了研究;冯卫民^[17]对泵系统最优阀调节策略及水锤控制方法进行了分析;王林锁、索丽生等^[18]研究了有关水力-机组过渡过程中阀调节应用问题;张健等^[19]对含摩阻的长距离供水工程中关阀引起的直接水锤和极限水锤进行了理论分析,并均推导了相应水锤的理论计算公式。论文针对长距离高落差重力流输水系统,首次从理论上分析阀门关闭规律与首相水锤压力两者之间的定量关系,并根据管道承压能力反求出合理的阀调节措施,对高落差重力流输水系统阀门关闭规律具有指导意义。

1 含摩阻输水系统首相水锤

1.1 第一相末阀前水锤压力

图 1 中, L 为管道长度, a 为水锤波速。将管道动量方程与连续性方程^[14]沿正向特征线 AP 积分得:

$$H_P - H_A + \frac{a}{gS}(Q_P - Q_A) + \frac{f}{2gDS^2} \int_A^P |Q| Q dx = 0 \quad (1)$$

式中: H 为测压管水头(m); Q 为管道流量(m^3/s); S 为管道截面积(m^2); D 为管道直径(m); f 为 Darcy-Weisbach 系数;下标 P 表示阀门处的现时参数,下标 A 表示空间上距离阀门上游 L 处时间上超前 L/a 时刻的参数。

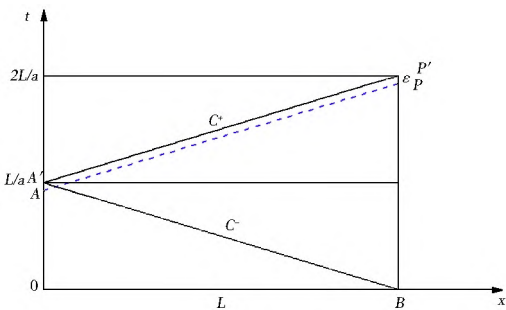


图 1 长管道特征线

Fig. 1 Schematic diagram of MOC in long pipeline

在水锤波传递过程中水库边界 A 点的压力几乎不发生变化,即任意时刻 $H_A = H_{U0}$,而水锤波未至水库端时 $Q_A = Q_{U0}$,式(1)转化为:

$$H_P = H_{U0} + \frac{a}{gS}(Q_{U0} - Q_P) - \frac{f}{2gDS^2} \int_A^P |Q| Q dx \quad (2)$$

式(2)中 H_{U0} 、 Q_{U0} 为上游端部节点的初始水头与流量,将上式二阶近似得:

$$H_P = H_{U0} + \frac{a}{gS}Q_{U0} - Q_P \left[\frac{a}{gS} + \frac{fL|Q_{U0}|}{2gDS^2} \right] \quad (3)$$

式中: H_P 为第一相末阀前测压管水头; H_{U0} 为上库初始水头,即上库水头; Q_0 为管道内初始流量; Q_P 为首相末阀门过流量,其它符号意义同前。

1.2 阀门过流特性

常见的阀门有针阀和蝶阀等,严格意义上说,每个阀门都有与之对应的流阻系数曲线。通常阀门在安装前,其流阻系数曲线已知,从而阀门前后压差、过流量与开度等参数之间的关系已确定。假定某一阀门其流阻系数与相对开度符合以下函数关系式,即

$$\alpha = g(\tau) \quad (4)$$

式中: α 为流阻系数; τ 为阀门的相对开度,对直线关闭时间 T_s ,任意时刻 t 阀门相对开度, $\tau = \tau_0 \left[1 - \frac{t}{T_s} \right]$, τ_0 为阀门初始相对开度。

由水力学可知:阀门前后压力差 ΔH 等于阀门损失系数 ξ 与阀门过流量 Q^2 的乘积,其中 ξ 为 $\frac{\alpha}{2gA^2}$ 。由式(4)可知在阀门面积 A 确定情况下, ξ 是阀门相对开度的一元函数。即

$$\xi = \frac{g(\tau)}{2gA^2} = f(\tau) \quad (5)$$

通常管道末端阀门与下游水库距离很近,两者之间水头损失很小,可近似认为阀后测压管水头与水库水位相等,则:

$$\Delta H = H_P - H_{D0} = f(\tau)Q^2 \quad (6)$$

式中:管道末端是水库时, H_{D0} 为水库水位;当其直接接入大气时, H_{D0} 为管道末端高程; τ 为首相末阀门相对开度; $f(\tau)$ 为首相末阀门损失系数,其它符号意义同前。

在已知阀门关闭规律及其初始相对开度 τ_0 下,可根据阀门开度依时间变化规律计算出首相末阀门相对开度 τ ,进而根据阀门流阻系数曲线,差分出对应的流阻系数值 α ,最后根据公式(5)求出首相末阀门损失系数 $f(\tau)$ 。

综上所述,联合式(3)及式(6)可得:

$$H_P = H_{U0} + \frac{a}{gS}Q_{U0} - \sqrt{\frac{H_P - H_{D0}}{f(\tau)}} \left[\frac{a}{gS} + \frac{fL|Q_{U0}|}{2gDS^2} \right] \quad (7)$$

对已知条件,令 $\lambda = \frac{a}{gS} + \frac{fL|Q_{U0}|}{2gDS^2}$, $\eta = \lambda \sqrt{f(\tau)}$,

$\phi = H_{U0} - H_{D0} + \frac{a}{gS}Q_0$;对待求解项 H_P ,令 $x =$

$\sqrt{H_P - H_{D0}}$,则上式可转化为:

$$x^2 + \eta x - \phi = 0 \quad (8)$$

解得: $x = \frac{-\eta \pm \sqrt{\eta^2 + 4\phi}}{2}$,在关阀过程中, $H_P > H_{D0}$,

因此 $x > 0$,即 $x = \frac{-\eta + \sqrt{\eta^2 + 4\phi}}{2}$

最后,可得高落差供水工程阀前压力计算公式:

$$H_l = H_p - H_z = x^2 + H_{D0} - H_z \quad (9)$$

式中: H_l 为首相末阀前压力; $x = \frac{-\eta \pm \sqrt{\eta^2 + 4\phi}}{2}$, 其

中 $\lambda = \frac{a}{gS} + \frac{fL|Q_0|}{2gDS^2}$, $\eta = N \sqrt{f(\tau_1)}$, $\phi = H_{U0} -$

$H_{D0} + \frac{a}{gS}Q_0$; 管道末端是水库时, H_{D0} 为水库水位;

当其直接伸入大气时, H_{D0} 为管道末端高程; H_z 为阀门处高程, 其它符号意义同前。

2 高落差输水系统阀调节规律

在长距离供水工程的过渡过程中, 阀门动作规律是重点关注对象。阀门关闭过快, 造成水锤压力较大, 易引发爆管事故; 其关闭过慢, 不利于水力调度及水力切换。因此, 合理的阀门关闭规律是十分重要的。本节推导阀门直线动作时, 阀前压力不超过管道控制压力下的关闭规律。

由式(7)可得:

$$H_l + H_z = H_{U0} + \frac{a}{gS}Q_0 - \sqrt{\frac{H_l + H_z - H_{D0}}{f(\tau_1)} \left(\frac{a}{gS} + \frac{fL|Q_0|}{2gDS^2} \right)} \quad (10)$$

上式中: H_l 为阀前管道控制压力, $H_p = H_l + H_z$, 在此, H_l 和 H_p 均为已知量, 其它符号意义同前。

令 $\phi = \left(\frac{NY}{\Gamma} \right)^2$, 其中 $\Gamma = H_{U0} + \frac{a}{gS}Q_0 - H_l - H_z$,

$Y = \sqrt{H_l + H_z - H_{D0}}$, 代入上式可得首相末阀门相对开度所对应的阀门损失系数: $f(\tau_1) = \phi$; 联立公式

$f(\tau_1) = \frac{\alpha}{2gA^2}$, 求得阀门损失系数 ϕ 对应的流阻系数

值 α_1 , 进而结合阀门流阻系数曲线图差分出对应阀门相对开度 τ_1 。

当阀门开度依直线变化时, 设 T_1 为管道首相时间, T 为阀门关闭规律, 当阀门以一段直线动作时, 则其首相末相对开度为: $\tau_1 = \tau_0 \left(1 - \frac{T_1}{T_s} \right) =$

$$\tau_0 \left(1 - \frac{2L}{a\tau_0 T} \right)$$

最后, 求出不超过阀前管道控制压力 H_l 下阀门的一段直线关闭规律:

$$T \geq \frac{2L}{a(\tau_0 - \tau_1)} \quad (11)$$

式中: L 为管道长度; a 水锤波速; τ_0 阀门初始开度; T 为阀门一段直线关闭规律; $\tau_1 = f^{-1}(\phi)$, 具体应用

时可根据式(5), 得出阀门损失系数对应的首相末流阻系数值 α_1 , 进而结合阀门流阻系数曲线图差分出首相末阀门相对开度 τ_1 。

3 算例分析

某供水工程管道水平距离 20 km, 坡度 0.005, 糙率 0.012, 直径 1.2 m。上游水库水位为 103 m, 下游端为一蓄水池, 水位 3 m, 管道输水流量为 1.2 m³/s。管道波速 1 000 m/s, 管中心线高程及测压管水头线详见图 2。

由图 2 知, 输水系统管道高程沿线下降很快, 阀前管道内水压力已增至 86.49 m, 而其后蓄水池水位仅为 3 m, 故阀门需消减的水头很大, 使得其初始开度较低落差时值要小。由水力学可知, 在以上条件下, 当关闭管道末端阀门时输水系统很容易出现首相水锤现象。

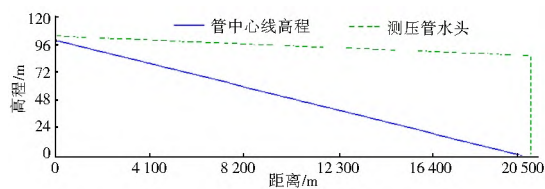


图 2 输水系统管中心线高程及测压管水头线

Fig. 2 The elevation of pipe center line and piezometric head line of the water conveyance system

此供水工程采用某阀门的流阻系数曲线见图 3。为方便读数, 纵坐标采用以 10 为基底对数表示。

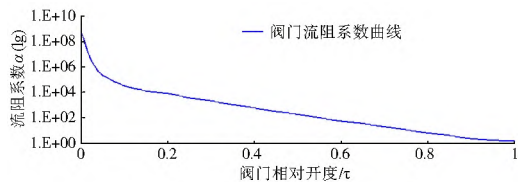


图 3 输水系统末端阀门流阻系数曲线

Fig. 3 Flow resistance coefficient graph of downstream valve for the water conveyance system

对于水平距离 20 km, 坡度 0.005, 直径 1.2 m 的供水管道, 在输水流量 1.2 m³/s 情况下, 不同关阀规律下阀前压力的公式(9) 计算值与数值计算值两者结果对比见表 1。

表 1 不同关阀规律下阀前压力计算结果对比

Tab. 1 Comparisons of pressures in front of valve under different closure rules

直线关阀规律	首相水锤特征			
	阀前最大压力数值计算/m	阀前最大压力公式(9)/m	误差 (%)	最大压力发生时刻/s
300 s	137.9	138.9	0.73	40.0
350 s	131.4	131.9	0.38	41.4
400 s	125.4	126.0	0.48	40.0

由表 1 及图 4、图 5 可知: 阀前最大压力基本发生在首相末时刻 ($2L/a = 40.0$ s), 时间误差很小, 且关阀时间 $T_z > 2L/a$, 表明此供水工程关阀产生首

相水锤;对于不同的关闭规律,采用公式(9)计算的结果与采用数值计算得出的结果吻合很好,可见公式具有较高精度。

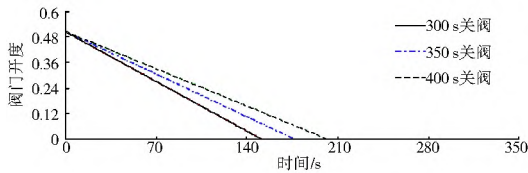


图 4 不同关闭规律下阀门相对开度变化过程线

Fig. 4 The changing process lines of valve relative opening degree under different valve closure rules

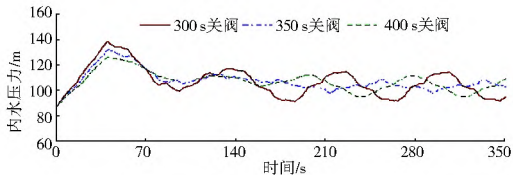


图 5 不同关闭规律下阀前压力变化过程线

Fig. 5 The process lines of pressure changing in front of valve under different valve closure rules

根据相关规程^[20],水锤防护措施设计应保证输水管道最大水锤压力不超过 1.3~1.5 倍最大工作压力。该供水工程阀前最大工作压力约 100 m,为此特选取 130 m、140 m 和 150 m 三种水锤控制压力值,并用公式(11)计算不超过相应压力下阀门最快的一段直线关闭规律 T 。为检验计算结果的合理性,再运用数值计算求出各直线关闭规律下相应的阀前水锤压力,并与选取的三种水锤压力控制值作比较,以此验证公式(11)的合理与否。相应计算结果见表 2。

由表 2 及图 6、图 7 可知:阀前最大压力基本发生在首相末时刻($2L/a=40.0$ s),时间误差很小,且关闭时间 $T_c > 2L/a$,表明相应关闭产生首相水锤;对三种不同阀前水锤压力控制值,其相应的数值计算结果与之吻合很好,可见公式具有较高精度。

表 2 不同阀前控制压力计算结果对比 (阀前静水压力约 100 m)

Tab. 2 Comparison of calculation results under different control pressures in front of valve (The hydrostatic pressure of inlet valve is 100 meters)

控制压力 /m	首相水锤特征			
	直线关闭规律公式(11)/s	阀前最大压力数值计算/m	误差 (%)	最大压力发生时刻/s
130	363.9	129.7	0.23	41.5
140	292.1	139.0	0.71	40.0
150	242.2	148.7	0.87	40.9

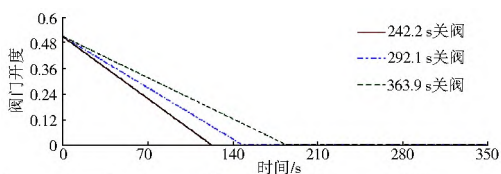


图 6 不同关闭规律下阀门相对开度变化过程线

Fig. 6 The changing process lines of valve relative opening degree under different valve closure rules

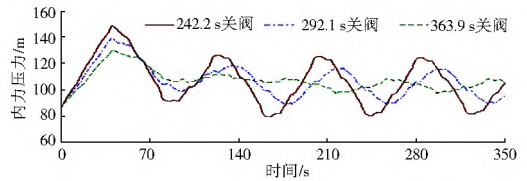


图 7 不同关闭规律下阀前压力变化过程线

Fig. 7 The changing process lines of pressure in front of valve under different valve closure rules

4 结论

在长距离高落差重力流供水工程中,阀前初始内水压力较大,如阀门操作不当导致阀前压力过大,会严重威胁输水系统的安全运行。论文根据特征线法推导了有摩阻管道首相水锤的阀前压力解析公式及其阀调节关闭规律;公式正确反映了阀前压力与其一段直线关闭规律两者之间的关系,且精度较高。文章推导的阀调节规律公式可为高落差重力流供水工程末端阀门操作提供理论指导,同时根据输水系统特性结合首相水锤公式计算得出阀调节过程中的最大压力可为管道承压能力的设计提供参考,以便于选择合适的输水管材。

参考文献 (References):

- [1] 刘春发. 国内外大型调水工程现状和启示[J]. 水科学与工程技 术, 2009(5): 77-78. (LIU Chun fa. Status and revelation in domestic and foreign large scale water diversion project[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2009(5): 77-78. (in Chinese))
- [2] 杨立信. 国外调水工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (YANG Li xin. Introduction of overseas water shift engineering [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 金锥, 姜乃昌, 汪兴华. 停泵水锤及其防护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. (JIN Zhui, JIANG Nai chang, WANG Xing hua. The water hammer of pump stopping and its protection[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993. (in Chinese))
- [4] 刘启钊, 胡明, 马吉明. 水电站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (LIU Qi zhao, HU Ming, MA Ji ming. Hydropower station [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2010. (in Chinese))
- [5] 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. (JIANG Jin, ZHAO Hong fang, LI Ji shan. Water hammer protection for pipe with local salience in pump system[J]. Journal of Hua zhong University of Science & Technology: Nature Science Edition, 2003, 31(5): 65-67. (in Chinese))
- [6] 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 system[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(4): 436-441. (in Chinese))
- [7] 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 mathematical model of gas impact in long pipe with variable characteristics[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005(1): 44-49. (in Chinese))

- 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)
- [8] 高婧宇, 车威. 重力有压输水系统主线调节阀关闭水锤计算[J]. 阀门, 2012(1): 29-32. (GAO Jing yu, CHE Wei. Water hammer calculation on the main regular valve closed condition in gravity pressure conveyance system[J]. Valve, 2012(1): 29-32. (in Chinese))
- [9] 高学平, 蒋琳琳, 刘奕朗, 等. 长距离重力流输水管路水锤压力数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012(6): 69, 41. (GAO Xue ping, JIANG Lin lin, LIU Yi lang, et al. Numerical simulation of water hammer pressure in long distance water gravitational transportation pipeline[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012(6): 69, 41. (in Chinese))
- [10] 齐向南, 高小涛, 刘建红, 等. 长距离重力流输水管道充水调试关键问题探讨[J]. 给水排水, 2013(8): 114-116. (QI Xiang nan, GAO Xiao tao, LIU Jian hong, et al. Discussion of the key problems about water filled debugging in long distance gravitational water transportation pipeline [J]. Water and Wastewater Engineering, 2013(8): 114-116. (in Chinese))
- [11] 王超, 陈文立, 康学飞. 长距离重力输水工程中水锤防护措施的对比如研究[J]. 供水技术, 2013(3): 25-28. (WANG Chao, CHEN Wen li, KANG Xue fei. Comparison of measures for water hammer control in long distance gravity water transfer projects [J]. Water Technology, 2013(3): 25-28. (in Chinese))
- [12] 朱小双. 长距离大高差多级消能重力流输水系统水锤防护研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. (ZHU Xiao shuang. Research on the protection technology of water hammer in long distance, large elevation difference, multi-level energy dissipation and gravity flow water supply system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese))
- [13] 马兰兰. 长距离多支管重力流输水系统水锤防护研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. (MAN Lan lan. Study on the water hammer prevention of long-distance and multiple branches, with gravity flow, water supply system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese))
- [14] Wylie E B, Streeter V L, SUO Li sheng. Fluid transient in systems[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993: 6F-65.
- [15] 封金磊. 关于减小关阀水锤危害的阀调节的优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012. (FENG Jin lei. Optimization of valve adjustment for reducing the closing valve water hammer damage[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese))
- [16] 陈明, 李秉昕, 贾如玉, 等. 管道耦合水击的最优阀调节问题研究[J]. 流体机械, 2011(3): 3F-36. (CHEN Ming, LI Bing xin, JIA Cong yu, et al. Study on optimal valve stroking of coupling water hammer in the pipeline[J]. Fluid Machinery, 2011(3): 3F-36. (in Chinese))
- [17] 冯卫民. 泵系统最优阀调节策略及水锤控制方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (FENG Wei min. Research on the optimization strategy of pumping system valve stroking and water hammer protecting[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese))
- [18] 王林锁, 索丽生, 屈磊飞, 等. 水力机组过渡过程阀调节应用研究[J]. 水力发电学报, 2007(2): 143-146. (WANG Lin suo, SUO Li sheng, QU Lei fei, et al. Study on application of valve stroking in hydro turbine system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007(2): 143-146. (in Chinese))
- [19] 张健, 俞晓东, 朱永忠. 长距离供水工程的关阀水锤与线路充填[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 183-189. (ZHANG Jian, YU Xiao dong, ZHU Yong zhong. Study on water hammer and line packing in long distance water supply project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 183-189. (in Chinese))
- [20] CECS 193: 2005, 城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程[S]. (CECS 193: 2005, Technical specification for long distance water transmission pipeline engineering of urban water supply [S]. (in Chinese))

(下接第 148 页)

- [17] 闫芙蓉, 邓清海, 潘国营. 陕西省冯家山灌区三氮转化机理实验研究[J]. 西部探矿工程, 2003(12): 163-165. (YAN Fu rong, DENG Qing hai, PAN Guo ying. The experimental research of three nitrogen transformation mechanism in Fengjia mountain irrigation area in Shanxi province [J]. West-China Exploration Engineering, 2003(12): 163-165. (in Chinese))
- [18] 杜新强, 齐素文, 廖资生, 等. 人工补给对含水层水质的影响[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 2(37): 293-297. (DU Xin qiang, QI Su wen, LIAO Zi sheng, et al. Influence of artificial recharge on groundwater quality [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 2(37): 293-297. (in Chinese))
- [19] 王焰新, 郭华明, 阎世龙, 等. 浅层孔隙地下水系统环境演化及污染敏感性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (WANG Yan xin, GUO Hua ming, YAN Shi long, et al. Geochemical evolution of shallow groundwater systems and their vulnerability to contaminants[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [20] 曹振东, 危润初, 段启杉, 等. 犀牛洞地下水-岩作用反向模拟[J]. 人民黄河, 2012, 34(10): 74-76. (CAO Zhen dong, WEI Rui chu, DUAN Qi shan, et al. Inverse Geochemical simulation of Water Rock interaction of Xiniudong underground river of Xiniu Cave [J]. Yellow River, 2012, 34(10): 74-76. (in Chinese))
- [21] 朱中竹, 王维平, 蒋颖魁, 等. 屋面雨水回灌裂隙岩溶水水岩作用实验研究[J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 272-278. (ZHU Zhong zhu, WANG Wei pin, JIANG Ying kui, et al. Laboratory experiment on water rock interaction of the karst fracture water after recharged with roof rainwater [J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(3): 272-278. (in Chinese))