

长距离泵输水系统事故停泵水锤数值模拟研究

董丽丽¹, 冯民权¹, 吕岁菊^{1,2}

(1. 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 北方民族大学 数值研究所, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为了确定输水系统事故停泵水锤的合理防护措施, 根据辛安泵站长距离高扬程的工程特点, 建立水锤数学模型。通过模拟计算, 确定了两阶段阀门的最优关闭规律, 并将水泵出口设置两阶段关闭蝶阀、无关闭阀、蝶阀和空气阀联合防护3种不同条件下停泵水锤水力瞬态过程计算结果进行对比分析。结果表明: 所建立的数学模型合理, 蝶阀和空气阀联合防护措施效果明显, 为管道和泵站的设计提供依据。

关键词: 长距离输水系统; 停泵水锤; 数值模拟

中图分类号: TU991.39

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)05-0112-04

Numerical simulation of water hammer of accident stopped pump in water transmission system of long distance pump

DONG Lili¹, FENG Minquan¹, LÜ Suiju^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Numerical Research Institute, Beifang University of Nationalities, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to determine reasonable protection measures for the water hammer of accident stopped pumping of water transmission system, according to the engineering characteristics of long-distance and high-lift in pumping station of Xin'an, the paper established water hammer mathematical model of accident stopped pump. It determined the optimal close rule of two stage valve through calculation, and analyzed the calculation results of stopped pumping water hammer hydraulic transient process were under three different conditions of two stage closing butterfly valve, no shutoff valve and the protection of butterfly valve combined with air valve setted in the outlet of pump. The results showed that the established mathematical model is reasonable and the effect of protection measures of butterfly valve combined with air valve is obvious, which provide the basis for the design of pipeline and pumping station.

Key words: long distance water transmission system; water hammer of stopped pump; numerical simulation

随着我国国民经济的发展, 液体管道输送越来越多, 保证管道输送的安全是首要任务, 因此水锤安全分析越来越被人们所认识和重视, 对水锤进行分析以及确定合理经济的措施是重要任务, 数值模拟管道水力过渡过程是一种既经济又安全的重要方法之一。国内外已有水电站、核电站、水泵站、输油管道系统中水力过渡过程的理论和计算方法以及实例的专著出版。Bourdarias^[1]等提出对可变形管的瞬变流动进行模拟的一维二阶隐式有限体积法, 此模型应用到符合工业规范的一个刚性管的水锤情况; Zhao M 等^[2]通过阐述、应用和分析一、二阶显式戈杜诺夫型有限体积法研究水锤问题; Bianchi 等^[3]根据管道允许的最大水锤压力和管道设定的最大水流

速度, 分别得出了计算空气阀孔径的两种实用公式。万五一等^[4]对流量系数的变化对水击压力的影响进行了深入研究; 胡建永等^[5-6]考虑到理想气体与实际气体的差别, 采用实际气体的范德瓦耳方程代替传统空气阀数学模型中的理想气体状态方程, 建立了新的空气阀边界条件; 郑源等^[7]对有压管道含气水锤防护进行了试验研究和数值计算, 指出安装空气阀可明显减轻管道中的正压冲击、降低负压; 刘梅清等^[8]研究了空气阀作为水锤防护手段的适用条件, 对于多峰局部凸起的管线布置, 事故停泵后将出现多处水柱分离, 空气阀防护效果不甚理想; 朱满林等^[9]首次提出了空气阀组防护压力管道水锤的概念。本文以辛安泵站为研究对象建立

收稿日期: 2013-06-20; 修回日期: 2013-06-30

基金项目: 山西水利科研基金项目(2012-7)

作者简介: 董丽丽(1988-), 女, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 研究方向: 水环境模拟与污染控制研究。

通讯作者: 冯民权(1964-), 男, 山西永济人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 水环境模拟与污染控制研究。

数学模型并进行计算机模拟;并根据工程的长距离高扬程地形复杂的情况,采取空气阀、两阶段关闭液控蝶阀联合防护措施。通过计算机数值模拟优化蝶阀关闭程序,对蝶阀加空气阀的联合防护措施进行模拟,提出供水系统经济合理的运行制度。

1 水锤计算的数学模型

1.1 基本方程

水锤基本微分方程由运动方程和连续方程组成,是研究水力过渡过程的基础。

水流运动方程和连续性方程如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v f v | v |}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + v \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为水的压力; a 为水锤波传播速度; g 为重力加速度; D 为管道直径; v 为水流流速; f 为摩擦损失系数; x 为计算断面在管道中的位置; t 为计算时刻; θ 为管路与水平面的夹角。

经数学推导,可得出水锤特征方程:

正特征线方程: $H_p = C_p - BQ_p \quad (2)$

负特征线方程: $H_p = C_M + BQ_p \quad (3)$

式(2)、(3) 为水锤常微分方程。

其中: $C_p = H_A + BQ_A - RQ_A | Q_A |$, $C_M = H_B - BQ_B - RQ_B | Q_B |$, $B = \frac{a}{gA}$, $R = \frac{f \Delta x}{2gDA^2}$

式中: H_p 、 Q_p 分别为计算断面 i 在 t 时刻的水头和流量; H_A 、 Q_A 分别为断面 $i - 1$ 在 $t - \Delta t$ 时刻的水头和流量; H_B 、 Q_B 分别为断面 $i + 1$ 在 $t - \Delta t$ 时刻的水头和流量; D 、 A 、 f 分别为管道直径、过水断面面积和摩擦阻系数; a 为水锤波速; Δx 为水锤分析管道分段长度; g 为重力加速度。

1.2 空气阀边界条件

在水锤数值分析中,空气阀的边界条件主要反映在通过阀流入流出管道的空气流动特性。空气通过进排气阀时的质量流量与管外大气的绝对压力 P_0 、绝对温度 T_0 及管内的绝对压力 P 和温度 T 有关。根据相关假设和边界条件,经数学推导可得到空气阀的差分方程为^[10]:

$$\begin{aligned} P \left\{ V_0 + 0.5 \Delta t [Q_i - Q_{pxi} - \frac{C_m + C_p}{B} + \right. \\ \left. \frac{2}{B} (\frac{P}{\gamma} + Z - H_a)] \right\} \\ = [M_0 + 0.5 \Delta t (M_0 + M)] RT \end{aligned} \quad (4)$$

式中: Δt 为计算时间步长; C_M 、 C_P 为水锤相容性特

征线方程中的计算常数; B 为管道特性常数; z 为空气阀的安装高度; H_a 为气压计压头。 V_0 为时刻 t_0 空穴体积; Q_i 为时刻 t_0 流出断面 i 的流量; Q_{pxi} 为时刻 t_0 流入断面 i 的流量; M_0 为时刻 t_0 空穴中空气的流量; M 为时刻 t 流入或流出空穴的质量流量; RT 为气体常数和绝对温度的乘积。

式(4) 中 P 是未知量, M 又是 P 的函数,由气体流入流出管道的质量流量关系,可以建立如下的表达式:

$$\begin{cases} \dot{M} = A_2 P'^2 + A_1 P' + A_0 & 0.428 \leq P' \leq 1.0 \\ \dot{M} = C_i \omega_i 0.686 P_0 / \sqrt{RT_0} & P' < 0.528 \\ \dot{M} = D_2 P'^2 + D_1 P' + D_0 & 1.0 < P' \leq 1.894 \\ \dot{M} = -0.686 C_0 \omega_0 P_0 P' / \sqrt{RT} & P' > 1.894 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P' = (P/P_0)$ 为无量纲压力; C_i 、 C_0 分别为空气流入和流出空气阀时的流量系数; ω_i 、 ω_0 分别为空气阀的开启面积, m^2 ; ρ 为大气密度, $\rho = P_0/RT$; R 为气体常数; P 为管内绝对压力。

2 工程概况

该供水工程采用水泵加压输水方式,泵站相对高程见图 1。泵站流量 $5 \text{ m}^3/\text{s}$,出水池水位 755 m ,取水水位 639 m 。泵站压力出水管道采用单管布置, PCCP 管材,管径 2 m ,管道全长 $5\,370 \text{ m}$ 。最大设计扬程为 127 m 。泵站布置 6 台机组(4 台大机组,2 台小机组),泵站平面布置图见图 2,大、小机组单机设计流量分别为 1 、 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

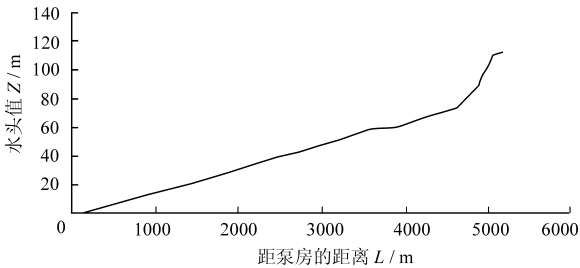


图 1 管线的相对高程图

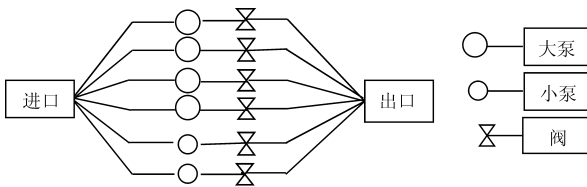


图 2 泵站平面布置图

3 模拟计算结果与分析

3.1 泵出口阀门拒动作工况

根据辛安泵站可能出现的运行情况,对故障停

泵时泵出口阀门拒动作情况的水锤进行模拟计算,计算主要参数列入表 1 中。

图 3 绘出了泵系统最不利运行工况下的管道压力包络线。

表 1 泵出口阀门拒动作情况计算结果表						m, s, m ³ , %	
运行 情况	阀后水 锤压力	开始倒 流时间	开始倒 转时间	最大倒转 转速比值	总倒泄 水量	额定 扬程	最大水锤压力与 额定扬程的比值
3 大	166.397	6.14	15.44	-1.28	-488.83	138	120.58
4 大	168.885	10.80	16.16	-1.29	-648.52	138	122.38
4 大	162.555	10.68	16.59	-1.27	-809.79	138	117.79
2 小		0.31	2.56	-1.28		136	119.53
2 大	164.644	7.46	14.47	-1.27	-494.19	138	119.31
2 小		0.31	2.19	-1.26		136	121.06

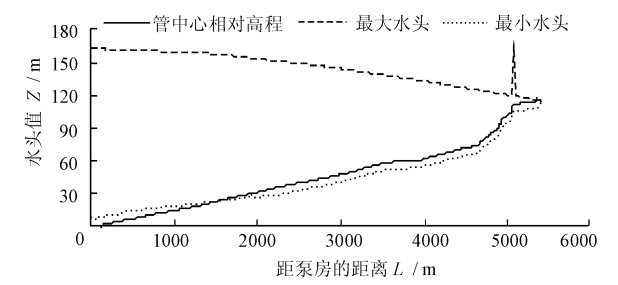


图 3 泵站阀门拒动作情况压力包络线

由表 1 和图 3 可以看出,出现事故停泵机组倒转、倒流情况。最大倒转转速均超过额定转速的 1.2 倍,超过了《泵站设计规范》要求的“水泵倒转转速不得超过额定转速的 1.2 倍”的要求。泵出口断面最大压力为 162.56 m,为额定压力的 1.1 倍,满足《泵站设计规范》要求的“水泵最大压力不得超过额定压力的 1.3~1.5 倍”的要求。距离泵房 5 060 m 处出现水柱断裂现象,该断面最大水锤压力达 165.39 m。沿管线多处出现负压,因此,需要采取相应的防护措施。

3.2 泵出口蝶阀优化关闭工况

在选择阀门关闭程序时,以两阶段关闭,快关角度和时间,慢关角度和时间来控制管道的压力和水泵机组的倒转转速,计算的最优关闭程序结果见表 2,最不利工况下的水锤计算结果见表 3,图 4 绘出了此情况下管道各断面压力变化过程线。

表 2 泵站阀门最优操作程序 (°), s				
水泵机组	快关角度	快关角度	快关时间	慢关时间
大机组	70	20	8	40
小机组	70	20	8	50

表 3 泵出口阀门按规定程序关闭情况计算结果表							
m, s, m ³ , %							
运行 情况	阀后水 锤压力	开始 倒流 时间	开始 倒转 时间	最大倒 转转速 比值	总倒 泄水量	额定 扬程	最大水锤 压力与额定 扬程的比值
4 大	164.586	10.71	17.74	-0.68	-73.09	138	119.27
2 小		0.31	2.59	-0.86		136	121.02

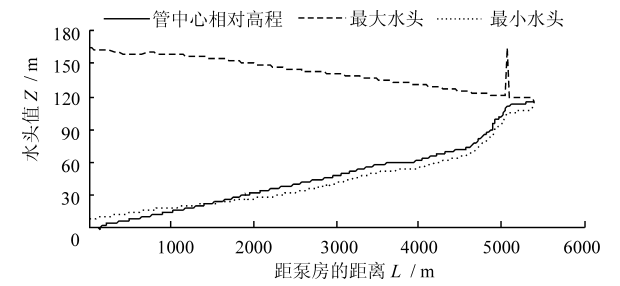


图 4 泵站出口阀门按规定程序关闭情况压力包络线

在可能出现的运行工况下,事故停泵机组最大倒转转速均未超过额定转速的 1.2 倍,阀后最大压力均也未超过水泵额定扬程的 1.5 倍。由此可见,采用两阶段关闭蝶阀对防治事故停泵机组倒转效果较明显。

3.3 泵出口蝶阀加排气阀联合工况

事故停泵阀门按预定的操作程序关闭在桩号 7 + 762.28,8 + 562.28,9 + 362.28,10 + 162.28,10 + 962.28,11 + 762.28 依次安装 6 个空气阀,示口径为 350 mm,进气流量系数为 0.65,排气流量系数为 0.975。最不利运行工况下计算结果列入表 4 中。此时沿线各空气阀的进气量变化过程如图 5 所示。此情况下管道各断面压力变化过程线由图 6 给出。

表4 泵出口蝶阀加排气阀联合防护情况计算结果表

		m, s, m ³ , %					
运行情况	阀后水锤压力	开始倒流时间	开始倒转时间	最大倒转转速比值	总倒泄水量	额定扬程	最大水锤压力与额定扬程的比值
4大	188.48	7.55	14.31	-0.83	-54.47	138	136.58
2小		0.71	12.31	-1.03		136	138.58

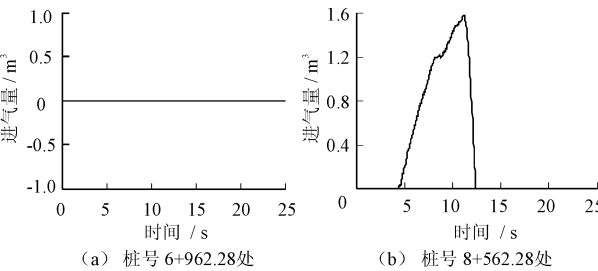


图5 沿线部分空气阀进气量变化过程图

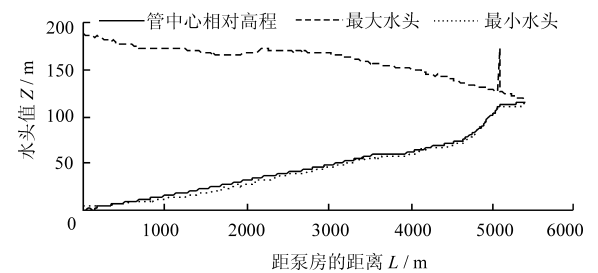


图6 泵口蝶阀加排气阀联合防护情况压力包络线

从模拟计算结果中看出,在蝶阀和排气阀的联合防护下,凸点处的水锤压力明显降低,有效降低了局部位置的负压;空气阀进气有效排出,说明该工程设置的空气阀位置、间距合理,空气阀有显著的防护作用。

4 结 语

(1) 根据辛安泵站工程长距离高扬程的特点,建立了复杂地形的水锤数值模拟模型,并进行了模拟计算。

(2) 根据泵站端的边界条件和运行工况,通过

反复模拟计算,确定了两阶段关闭蝶阀的最优关闭规律,其对水锤的消除效果较明显。

(3) 通过合理布置空气阀,可以有效地消除长距离输水系统中的负压现象,解决了辛安泵站工程的问题,具有实际的工程意义;同时可以得到,联合防护措施是消除水锤一种安全经济的方法,为同类工程提供了设计依据。

参考文献:

[1] Bourdarias C, Gerbi S. A conservative model for unsteady flows in deformable closed pipes and its implicit second order finite volume discretisation[J]. Journal of Computers and Fluids,2008,37(10):1225-1237.

[2] Zhao M, Ghidaoui M S. Godunov-type solutions for water hammer flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,130(4):341-348.

[3] Bianchi A, Mambretti S, Pianta P. Practical Formulas for the Dimensioning of Air Valves[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,133(10):1177-1180.

[4] 万五一,练继建,李玉柱. 阀门系统的过流特性及其对瞬变过程的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版),2005,45(5):1198-1201.

[5] 胡建永,张 健,索丽生.长距离输水工程中空气阀的进排气特性研究[J]. 水利学报,2007,38(S1):340-345.

[6] 胡建永,张 健,祁 舵.长距离输水系统中空气阀的运行特性研究[J]. 水力发电,2007,33(10):61-63.

[7] 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,2005,20(4):436-441.

[8] 刘梅清,孙兰凤,周龙才,等.长管道泵系统中空气阀的水锤防护特性模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2004,37(5):23-27.

[9] 朱满林,沈 冰,张言禾,等.长距离压力输水工程水锤防护研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2007,39(1):40-43.

[10] 杨开林. 电站与泵站中的水力瞬变及调节[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.