

输水系统水泵失电工况出口阀关闭规律的优选

黄时锋,周文萍,程佳秋

(上海金山海川给水有限公司,上海 201504)

摘要:为优选水泵失电工况下出口阀门的关闭规律,基于一维特征线方法,建立输水系统水力过渡过程仿真计算的数学模型,给出了水泵出口阀采用两段折线关闭规律时转折点开度和时间的选取方法,以“水泵失电,出口阀拒动”工况下水泵发生倒流的时间作为第1阶段关闭时间的参考值,通过其他控制工况进行校核计算,并结合工程实例进行验证分析。计算结果表明,所采用数学计算模型准确、合理,选定的阀门关闭规律能够有效预防输水系统水击破坏事故的发生。

关键词:水泵;失电工况;出口阀;关闭规律;水击;输水系统

中图分类号:TV675

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2014)03-0056-05

Optimization research on closure law of outlet valve under power failure condition in water conveyance system//
HUANG Shifeng, ZHOU Wenping, CHENG Jiaqiu (Shanghai Jinshan Haichuan Water Supply Company, Shanghai 201504, China)

Abstract: Based on the 1-D characteristics method, a mathematical model for simulating hydraulic transient process in water conveyance system was established to optimize the closure law of outlet valves under power failure condition. The two-segment linear closure law of outlet valves was proposed in this paper, and the method for determining the transition point's opening and its corresponding time was presented. Under the power failure condition, the time when the reversed flow occurs can be regarded as the closure time of the transition point, it is also verified by other control operating conditions. The simulation results of an engineering instance show that the mathematical model of this paper is accurate and reasonable, and the water hammer accidents can be effectively prevented employing the proposed valve closure law.

Key words: pump; power failure condition; outlet valve; closure law; water hammer; water conveyance system

输水管道系统中水泵失电工况下的水击现象可能导致严重的系统危害,如水体倒流引起水泵反转,当反转转速超过额定转速时,可能发生水泵破坏事故;若水击波动产生的系统负压超过水柱分离水压控制值,可能产生“水柱分离-弥合水击”现象,从而导致系统破坏事故的发生^[1]。水泵出口处的出口阀(缓闭蝶阀)作为系统中的主动性截流元件,在水泵失电时能够防止泵组产生过大的反转转速,达到保护泵组的目的,但其动作也将引起系统的水击波动,并影响水泵失电工况下系统的相关水力瞬态参数。因此,针对不同的输水系统特点采用合理的水力过渡过程仿真计算方法,对水泵出口阀的关闭规律进行优化研究,是防止系统产生水击危害的重要手段^[2-3]。关于水泵出口阀关闭规律的优选及水击防护,国内已有相关的研究:程洪霞等^[4]基于多元线性回归分析原理,研究了蝶阀关闭角度和阻力系数函数关系及过流面积比和阻力系数的关系函数,

使水力过渡过程数值模拟在蝶阀关闭规律优化的应用中更为精确;蒋劲等^[5]引入遗传算法,以开度和时间为变量,以系统最高内水压力为适应函数,验证蝶阀两阶段关闭对系统过渡过程压力的控制作用,以达到优化的目的;向华球等^[6]应用相似原理进行蝶阀流阻试验,计算并绘制了流阻系数曲线;马丽琼等^[7]通过对管道中的蝶阀进行流场数值模拟,研究不同开度和不同流速下的阻力系数,总结出阻力系数与蝶阀开度及流速的函数关系等。以上研究仅针对水泵出口阀过流特性、单一约束条件下的关闭规律等问题,而出口阀关闭规律的优选需要考虑的约束条件较多,是多目标优化问题。本文基于已有研究成果,针对已建输水管道系统,研究出口阀关闭规律对水力过渡过程参数的影响,并提出出口阀关闭规律的优选方法。对于水力过渡过程瞬态参数的控制,除需考虑管道系统沿线最大内水压力应小于管路设计工作压力的1.5倍这一控制条件外,还应考

虑沿线最小内压力不能超过水柱分离的压力控制值,以及离心泵的反转转速不应超过额定转速的1.2倍等控制条件。以某水厂二期原水输水系统为例,针对各种水泵失电状况,通过对不同出口阀关闭规律下的水力过渡过程进行计算分析,研究水泵出口阀的关闭规律对相关控制条件的影响,实现关闭规律的优选,并验证本文研究结论。

1 水力过渡过程仿真计算

本文采用精度较高的一维特征线法进行输水系统的水力过渡过程水力瞬态参数的求解;采用一维刚性水力模型求解水泵、阀门等系统边界元件的水力瞬态参数^[8]。

管道特征相容方程(包括正特征线方程 C^+ 与负特征线方程 C^-)分别为

$$C^+:\quad H_{Pi}=C_P-B_PQ_{Pi}\quad (1)$$

$$C^-:\quad H_{Pi}=C_M+B_MQ_{Pi}\quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{其中}\quad C_P&=H_{i-1}+BQ_{i-1} \\ C_M&=H_{i+1}-BQ_{i+1} \\ B_P&=B+R\mid Q_{i-1}\mid \\ B_M&=B+R\mid Q_{i+1}\mid \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B&=\frac{a}{gA} \\ R&=\frac{f\Delta x}{2gDA^2} \end{aligned}$$

式中: H_{Pi} 为节点 i 处的压力; H_{i-1} 、 H_{i+1} 分别为节点 $i-1$ 和 $i+1$ 处的压力; Q_{Pi} 为节点 i 处的流量; Q_{i-1} 、 Q_{i+1} 分别为节点 $i-1$ 和 $i+1$ 处的流量; a 为水击波速; g 为重力加速度; A 为管道截面面积; f 为管道沿程摩擦阻力系数; Δx 为管段长度; D 为管道直径。

在一般情况下,通过阀门的流量为

$$Q_p=C_dA_G\sqrt{2g\Delta H_p}\quad (3)$$

式中: ΔH_p 为阀门的水头损失; C_d 为阀门过流系数; A_G 为阀门过流面积。

在阀门孔口全开条件下,定常流时的阀门流量可以描述为

$$Q_r=C_{d,r}A_{G,r}\sqrt{2g\Delta H_r}\quad (4)$$

式中:下标 r 表示阀门全开工况; ΔH_r 为阀门全开时的水头损失。

定义无量纲阀门流量系数 $\tau=\frac{C_dA_G}{C_{d,r}A_{G,r}}$,当阀门关闭时, $\tau=0$;当阀门全开时, $\tau=1$ 。不同阀门的水力特性有很大的差别,一般来说, τ 是阀门开度 θ 的非线性函数,通常以离散数据或曲线表示。

定义 $q=\frac{Q_p}{Q_r}$,由式(3)(4)可得

$$q=\tau\sqrt{\frac{\Delta H_p}{\Delta H_r}}\quad (5)$$

考虑到瞬变过程中液体的流动方向可能发生变化,为了使分析具有普遍性,式(5)可改写为

$$\Delta H_p=\frac{\Delta H_r}{\tau^2}\mid q\mid q=\frac{\Delta H_r}{(Q_r\tau)^2}\mid Q_p\mid Q_p\quad (6)$$

考虑到水泵在瞬态过程中的进出口压力差与过流量、转速、轴力矩有关,主要由水泵特性曲线决定,因此水泵过流方程可以描述为

$$H_{Pu}=f(q_{Pu},n_{Pu},m_{Pu})\quad (7)$$

式中: H_{Pu} 为水泵扬程,即水泵出口压力水头(下游管道首节点压力 H_{Pi})与进口压力水头(上游管道末节点 H_{PN})之差; q_{Pu} 、 n_{Pu} 、 m_{Pu} 分别为流量、转速和轴力矩的无量纲量; f 为水泵扬程函数,由水泵边界水头平衡方程及水泵转动力矩平衡方程得到。

联立式(1)~(7)即可求得任意时刻 t 时的输水管道系统中各水力瞬态参数。

2 出口阀开启开度和转折点时间的选取

水泵失电工况下,出口阀关闭通常采用一段直线关闭和两段折线关闭两种闸门关闭方式,前者是在总关闭时间 T_s 内将出口阀由全开状态关闭至全关状态(图1(a));后者指从水泵失电时刻起,在第1阶段内($t<t_m$),出口阀由全开状态($\alpha=1$, $\theta=90^\circ$)匀速关闭至转折点开度(α_m , θ_m),然后在第2阶段内($t_m<t<T_s$),出口阀由转折点开度匀速关闭至全关状态($\alpha=0$, $\theta=0^\circ$)(图1(b))。

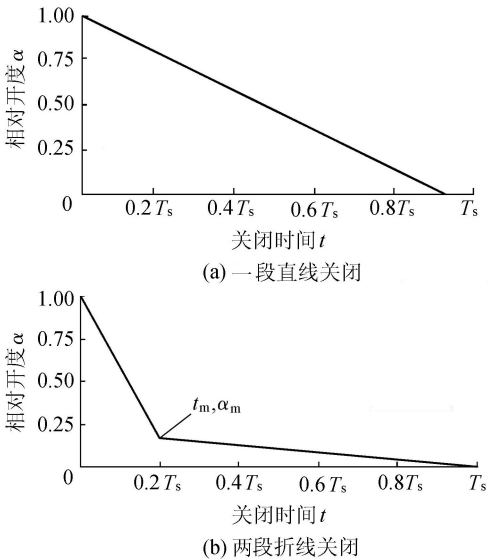


图1 水泵出口阀关闭规律示意图

一般来说,水泵控制阀关闭规律为预先整定的,且只能设定为1种,该关闭规律不仅要尽可能减小泵组正常停机时的水击波动幅值,还需要校核水泵机组在失电情况下系统最大、最小内水压力等参数

满足设计要求。

由于不同阀门开度下的过流特性相差较大,在总关闭时间一定的情况下,采用一段直线关闭的方式在阀门较大开度下流量截断效果较差,而在阀门较小开度下会造成过流量变化较快,从而造成较大的水击压力,因此,一般不采用一段直线关闭的方式。

对于两段折线关闭方式,阀门关闭转折点开度一般需要计算确定。当阀门关闭转折点开度 θ_m 较小时,在水泵失电工况下,第1阶段折线关闭时间过长和过短均是不利的,输水系统最大、最小内水压力等计算参数难以控制;当 θ_m 较大时,由于慢关段时间相对较长,泵组停机过程中容易发生较大的反转。结合目前输水泵站中常见液控阀门的过流特性^[6-7],水泵出口阀关闭规律中转折点开度一般选择为 $15^\circ \sim 20^\circ$,经多个工程的计算验证,推荐采用 15° 的转折点开度。

水泵失电工况下出口阀第1阶段关闭时间的选取原则是:既要避免因阀门过快关闭引起阀门进口处过大的水击压力及阀门出口处过小的瞬态负压,又要避免因阀门过慢关闭导致水泵反转速超过额定转速。一般来说,水泵失去动力后,合理的出口阀第1阶段关闭动作对水泵过流量变化的影响不会太大,因此,在进行仿真分析时通常将“水泵失电、出口阀拒动”工况下的水泵瞬态参数(如水泵发生倒流时间)作为阀门第1阶段的关闭时间 t_m 的参考值。这是由于水泵发生倒流时刻前后,水泵出口阀第1阶段关闭动作结束,而第2阶段关闭过程中阀门小开度区域对过流系数的影响非常大,此时较小的阀门过流量将不会产生过大的系统水击压力,即阀门在静水状态下的关闭比在动水状态下的关闭所产生的水击波动小。

水泵正常停机工况一般不作为阀门关闭规律选定的控制工况。对于阀门采用两段折线关闭方式,该工况可作为校核工况进行计算验证,最大内水压力与倒流量以不超过控制值为准;在工程布置形式较特殊或泵组要求较高情况下,可考虑采用“先关

阀、后停机”的停机方式。

对于常规输水系统,水泵出口阀关闭规律的优选主要考虑不同工况下系统最大内水压力、最小内水压力、水泵反转速、吸水池涌波水位满足设计要求。采用上述分析的出口阀关闭选取方式能够满足水泵出口阀关闭规律优选的基本要求,结论具有较强的通用性。对于起伏较大的管道,水泵失电工况下在凸起管段处容易产生较大的负压^[9],需进行系统水击压力的校核计算。此外,在吸水池设计时,应考虑在选定的出口阀关闭规律下,水泵失电时吸水池涌波水位不超过吸水池的顶高程。

3 实例分析

以某水厂二期原水输水管道系统为例,优选水泵出口阀关闭规律。该原水系统由取水泵站和输水管道组成,取水泵站设计能力为 $20 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,配置2台大泵和2台小泵(其中1台大泵作为备用)。设计参数分别为:大泵转速为 740 r/min ,小泵转速为 960 r/min ;设计扬程为 30 m ;大泵流量为 $1.681 \text{ m}^3/\text{s}$,小泵流量为 $0.806 \text{ m}^3/\text{s}$ 。水泵出口配置缓闭蝶阀,输水管全长为 8000 m ,材质为钢管,内径为 1400 mm ,壁厚为 15 mm ,出口管中心高程为 1.6 m ,沿线驼峰点(定义为节点2)管中心安装高程为 2.7 m 。管道系统计算简图如图2所示,图中1~79表示79段管道的编号,(1)~(80)表示80个计算节点的编号,输水管道沿线布置了20个排气阀、8个排水阀、12座管桥、1座倒虹管。

为了进行水泵出口阀关闭规律的比选计算,选定表1中的10种工况及出口阀关闭规律,初始稳定工况取两种:①工况 A-01~A-10:吸水井最低水位 -0.5 m ;稳压配水井水位 $H_d = 7.3 \text{ m}$;水泵扬程 $H_0 = 30.912 \text{ m}$;大泵流量为 $1.612 \text{ m}^3/\text{s}$;小泵流量为 $0.77 \text{ m}^3/\text{s}$ 。②工况 B-01~B-10:吸水井最高水位 3.5 m ;稳压配水井水位 $H_d = 7.3 \text{ m}$;水泵扬程 $H_0 = 29.669 \text{ m}$;大泵流量为 $1.705 \text{ m}^3/\text{s}$;小泵流量为 $0.815 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

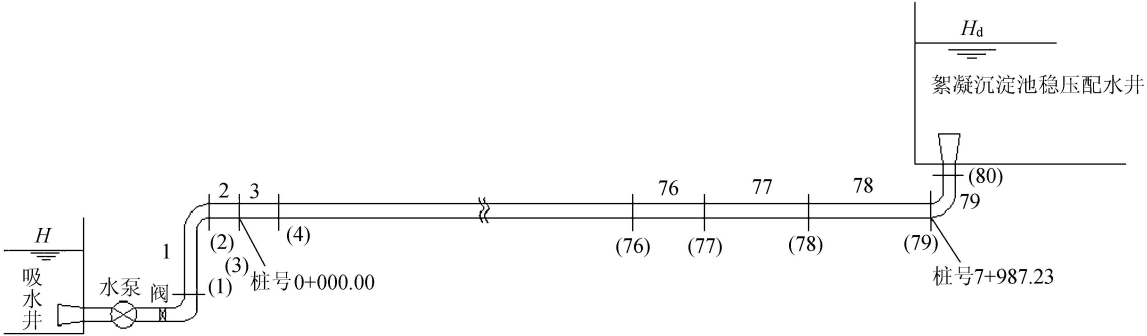


图2 管道系统计算简图

表 1 水泵出口阀关闭规律优选的计算工况

工况编号	水泵出口阀 关闭规律	参 数		
		T_s/s	t_m/s	α_m
A-01、B-01	拒动			
A-02、B-02	一段直线	150		
A-03、B-03	两段折线	100	5	0.167
A-04、B-04	两段折线	100	10	0.167
A-05、B-05	两段折线	100	15	0.167
A-06、B-06	两段折线	100	20	0.167
A-07、B-07	两段折线	100	25	0.167
A-08、B-08	两段折线	60	20	0.167
A-09、B-09	两段折线	80	20	0.167
A-10、B-10	两段折线	120	20	0.167

经计算,当吸水井在最高水位运行时,大泵与小泵均不出现水流倒流现象。对于吸水井最低水位工况,水泵出口阀关闭规律比选计算结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,在水泵失电的过渡过程中,各控制参数值基本能满足设计要求,且 2 号节点为该输水系统的最小内压力主要控制点。在水泵失电、出口阀拒动工况下,水泵过流量及转速变化过程曲线如图 3 所示。根据计算结果,大泵、小泵发生倒流的时间分别约为 15.2 s、19.0 s,因此初步选定出口阀两段折线关闭规律的转折点时间 $t_m=20$ s,转折点开度选定为 $\theta_m=15^\circ$ 。对于一段直线关闭的规律,考虑到阀门在小开度区域不能过快关闭,选定总关闭时间 $T_s=150$ s 作为计算比选方案。对于两段折线关闭规律,另外分别选择第 1 阶段关闭时间 $t_m=5$ s、10 s、15 s、25 s 进行比选验证;第 2 阶段关闭时间按 3 ~ 7

表 2 吸水池最低水位工况水泵出口阀关闭规律比选计算结果

水泵 类型	工况编号	$H_{进}/m$	$H_{出}/m$	$Q_{总min}/$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	t_Q/s	T_{RQ}/s	$n_{min}/$ ($r \cdot min^{-1}$)	t_n/s	H_{Fmin}/m	t_H/s
大泵	A-01	3.20 ~ 2.10	33.05 ~ 0.43	-0.58	38.26	15.20	-335.03	39.38	-4.6	2.7
	A-02	3.20 ~ 2.10	33.05 ~ 0.43	-0.58	38.32	15.20	-376.86	41.51	-4.6	2.7
	A-03	3.20 ~ 2.16	33.04 ~ 0.95	-0.29	25.96	11.79	-162.75	34.65	-8.1	5.0
	A-04	4.93 ~ 0.15	33.05 ~ 0.22	-0.30	28.86	14.92	-168.78	36.48	-4.6	2.7
	A-05	4.93 ~ 0.24	33.04 ~ 0.25	-0.31	28.38	14.96	-171.14	36.25	-4.7	2.7
	A-06	4.93 ~ 0.15	33.04 ~ 0.23	-0.32	29.09	15.08	-177.25	35.66	-4.7	2.7
	A-07	4.93 ~ 0.24	33.04 ~ 0.25	-0.32	27.91	15.08	-181.11	35.18	-4.7	2.7
	A-08	4.59 ~ 0.25	33.04 ~ 0.26	-0.30	26.26	15.08	-160.16	33.59	-4.7	2.7
	A-09	4.93 ~ 0.24	33.04 ~ 0.25	-0.32	28.62	15.08	-181.83	36.31	-4.7	2.7
	A-10	4.93 ~ 0.24	33.04 ~ 0.25	-0.32	28.62	15.08	-181.83	36.31	-4.7	2.7
小泵	A-01	2.68 ~ 2.10	33.05 ~ 0.43	-0.28	32.88	18.98	-377.13	41.57	-4.6	2.7
	A-02	2.70 ~ 2.10	33.05 ~ 0.44	-0.28	32.98	18.98	-376.83	41.51	-4.6	2.7
	A-03	2.69 ~ 2.11	33.05 ~ 0.43	-0.22	28.56	14.96	-290.98	39.44	-8.1	5.0
	A-04	4.60 ~ 0.22	33.05 ~ 0.32	-0.23	31.28	18.68	-296.96	42.58	-4.6	2.7
	A-05	4.66 ~ 0.15	33.05 ~ 0.22	-0.23	31.87	18.10	-298.90	42.58	-4.7	2.7
	A-06	4.60 ~ 0.25	33.05 ~ 0.33	-0.23	31.40	18.51	-303.62	42.16	-4.7	2.7
	A-07	4.68 ~ 0.15	33.05 ~ 0.23	-0.23	30.57	18.63	-306.38	41.93	-4.7	2.7
	A-08	4.68 ~ 0.14	33.05 ~ 0.29	-0.22	29.27	18.51	-264.56	37.49	-4.7	2.7
	A-09	4.66 ~ 0.15	33.05 ~ 0.21	-0.23	31.28	18.51	-308.61	42.34	-4.7	2.7
	A-10	4.66 ~ 0.15	33.05 ~ 0.21	-0.23	31.28	18.51	-308.61	42.34	-4.7	2.7

注: $H_{进}$ 和 $H_{出}$ 分别为水泵进、出口节点处的内水压力; $Q_{总min}$ 、 n_{min} 分别为水泵最小总供水流量和最小转速; T_{RQ} 为水泵开始发生倒流的时间; H_{Fmin} 为输水系统 2 号节点出现的最小内水压力; t_Q 、 t_n 、 t_H 分别为 $Q_{总min}$ 、 n_{min} 、 H_{Fmin} 的出现时间。

倍的 t_m 取值进行水力过渡过程计算验证。

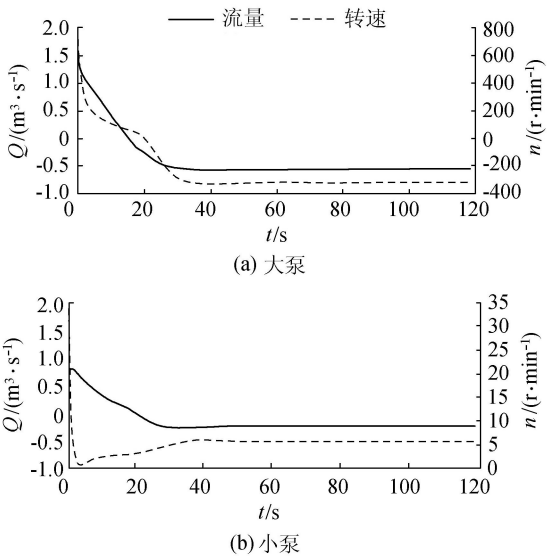


图 3 工况 A-01 水泵转速和供水流量变化过程曲线

从以上计算结果可以看出:①该输水系统在水泵出口阀正常关闭工况下,水泵失电后的反转转速均小于其额定转速,不会发生水泵飞逸破坏事故;但考虑到出口阀采用一段直线关闭规律时,水泵反转转速相对较大,因此采用两段折线关闭规律。②水泵出口阀采用两段折线关闭规律时,出现倒流的时间与出口阀拒动工况比较接近,因此,本文出口阀第 1 阶段关闭时间选取 20 s 是合理的;当出口阀关闭转折点开度 θ_m 选取 15° 时,水泵的反转、系统最大与最小内水压力能够得到有效的控制,说明本文取

值是合理的。③从两段折线关闭规律中第2阶段关闭时间的比选结果看,水泵的反转转速计算值相差均不大,考虑到水泵正常停机及事故停机时应尽可能避免小开度阀门关闭过程中的水力激振现象,选取总关闭时间 T_s 为100 s。④该输水系统最终选取的水泵失电工况下出口阀关闭规律为:第1阶段关闭时间 $t_m=20$ s,转折点开度 $\theta_m=15^\circ$,总关闭时间 $T_s=100$ s。该工况下水泵进口压力、出口压力、转速、供水流量的变化过程曲线如图4和图5所示,表明水泵失电工况下各瞬态参数均能满足设计要求,且水泵出口阀关闭规律比选结果与本文提出的结论完全一致。

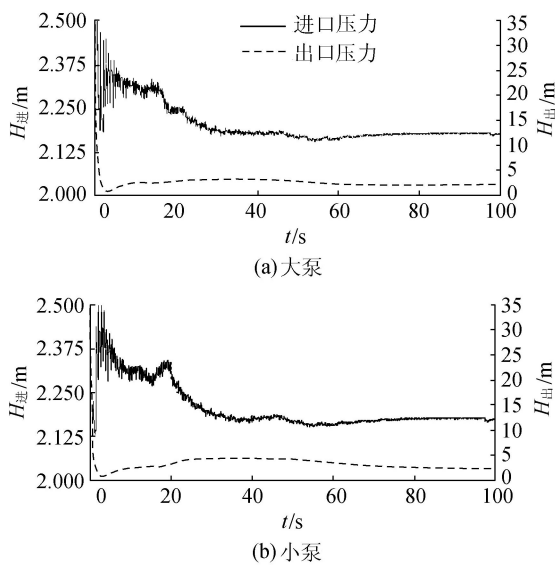


图4 工况 A-06 水泵进、出口节点处
内水压力变化过程曲线

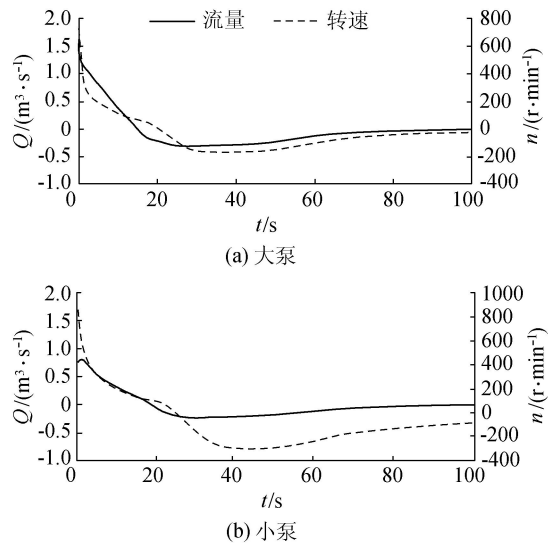


图5 工况 A-06 水泵转速与供水流量变化过程曲线

4 结 语

针对含水泵的输水管道系统,采用一维特征线法对水泵失电工况下出口阀关闭规律优选进行仿真

分析,提出采用两段折线关闭规律时转折点开度和时间的选取方法,探讨了第2阶段关闭时间的选取原则,并以某水厂输水管道系统作为算例进行水泵出口阀关闭规律的优选计算验证。计算结果表明:本文采用的数学计算模型准确、合理,提出的出口阀关闭规律选择方法正确,能够精确地对失电工况下的系统水力过渡过程进行仿真计算,所提出的水泵出口阀关闭规律选择方法能有效预防水击等破坏事故的发生。

参考文献:

- [1] 郑源,刘德有. 供水管道系统水力过渡过程研究计算[J]. 水泵技术,2000(5):8-11. (ZHENG Yuan, LIU Deyou. Research on the hydraulic transition process of water supply piping system[J]. Pump Technology, 2000(5):8-11. (in Chinese))
- [2] 刘景,陈正鸣,王丰,等. 用于水力特性分析的管网建模系统设计[J]. 计算机工程与设计,2006,27(15):2782-2784. (LIU Jing, CHEN Zhengming, WANG Feng, et al. Design of pipe net modeling system used in water power characteristics analysis[J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27(15):2782-2784. (in Chinese))
- [3] 刘奕朗,高学平,蒋琳琳. 压力输水系统中缓闭式液控蝶阀关闭规律研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(6):107-110. (LIU Yilang, GAO Xueping, JIANG Linlin. Research on the closure law of hydraulic control slow closing butterfly valve in pressure flow water diversion system[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(6):107-110. (in Chinese))
- [4] 程洪霞,吴建华. 基于多元线性回归分析的蝶阀关闭规律函数关系研究[J]. 山西水利科技,2010(3):1-10. (CHENG Hongxia, WU Jianhua. The study of the function relationship among the butterfly valve closure rule with multiple linear regression analysis[J]. Shanxi Hydropower, 2010(3):1-10. (in Chinese))
- [5] 蒋劲,姚志崇,符向前,等. 遗传算法在泵系统液控蝶阀关闭序列优化中的应用[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(1):74-76. (JIANG Jin, YAO Zhichong, FU Xiangqian, et al. Application of genetic algorithm to the optimization of closing butterfly valve by liquid control in a pumping station system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science, 2006, 34(1):74-76. (in Chinese))
- [6] 向华球,李纪臣,彭剑辉. 液控蝶阀流阻系数的研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,1987,14(3):98-109. (XIANG Huaqiu, LI Jichen, PENG Jianhui. Study of local resistance coefficient of liquid controlled butterfly valve[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 1987, 14(3):98-109. (in Chinese))

(下转第64页)

Yanfeng. Formula for direct calculation of contracted depth of parabolic-shaped canal [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(2): 175-177. (in Chinese))

[7] 文辉, 李凤玲. 抛物线形断面渠道收缩水深的解析解[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(9): 32-33. (WEN Hui, LI Fengling. Analytical solution of water depth in parabolic-shaped channel with contracted section [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(9): 32-33. (in Chinese))

[8] 冷畅俭, 王正中. 三次抛物线形渠道断面收缩水深的计算公式[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(4): 29-31. (LENG Changjian, WANG Zhengzhong. Formula for calculation contracted water depth of cubic parabola cross section [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(4): 29-31. (in Chinese))

[9] 谢成玉, 滕凯. 三次抛物线形渠道断面收缩水深的简化计算公式[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 136-138. (XIE Chengyu, TENG Kai. Simplified equation of contracted water depth in a channel having a cubical paraboloid section [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 136-138. (in Chinese))

[10] 赵延凤, 王正中, 刘计良. 抛物线类渠道断面收缩水深的计算通式[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 126-131. (ZHAO Yanfeng, WANG Zhengzhong, LIU Jiliang. Explicit equation for calculation of contracted flow depths in channels of parabolic cross-section [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 126-131. (in Chinese))

[11] 刘刚, 滕凯. 梯形断面均匀流水深的近似计算公式[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1): 41-44. (LIU Gang, TENG Kai. Approximate calculation formula uniform flow depth of trapezoidal cross-section [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(1): 41-44. (in Chinese))

[12] 谢成玉, 滕凯. 抛物线形断面渠道均匀流水深的近似计算公式[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 94-95. (XIE Chengyu, TENG Kai. Approximate formula of uniform flow depth for parabolic cross-section channel [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 94-95. (in Chinese))

[13] 滕凯. 消力池深的简化计算法[J]. 人民长江, 2012, 43(15): 77-79. (TENG Kai. Simplified calculation method of depth of stilling basin [J]. Yangtze River, 2012, 43(15): 77-79. (in Chinese))

[14] 滕凯, 周辉. 弧底梯形明渠正常水深的简化计算法[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2012, 24(5): 85-88. (TENG Kai, ZHOU Hui. A method of simplifying calculations for the normal water depth of open trapezoidal channel with arc bottom [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2012, 24(5): 85-88. (in Chinese))

[15] 滕凯. 标准门洞形过水断面临界水深的简化算法[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(5): 1-3. (TENG Kai. Simple computation of critical water depth of standard door-shaped waterway tunnel [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and hydroelectric Power, 2012, 33(5): 1-3. (in Chinese))

[16] 张志昌. 水力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.

[17] 王慧文. 偏最小二乘回归法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

[18] 阎凤文. 测量数据处理方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1988.

(收稿日期: 2013-05-03 编辑: 骆超)

(上接第 60 页)

[7] 马丽琼, 刘华, 伍超, 等. 蝴蝶阀阻力系数的数值模拟及分析[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2010, 36(5): 827-831. (MA Liqiong, LIU Hua, WU Chao, et al. Numerical simulation and analysis of valve resistance coefficient [J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science, 2010, 36(5): 827-831. (in Chinese))

[8] 杨开林. 控制输水管道瞬态液柱分离的空气阀调压室[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 805-811. (YANG Kailin. Air-valve surge tank for controlling liquid column separation in water supply projects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7): 805-811. (in Chinese))

[9] 杨玉思, 徐艳艳, 姜巨智. 长距离高扬程多起伏输水管道水锤防护的研究[J]. 给水排水, 2009, 35(4): 108-111. (YANG Yusi, XU Yanyan, XIAN Juzhi. Research on water hammer prevention in high-lift, hilly and long distance water transmission pipeline [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(4): 108-111. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-05-06 编辑: 骆超)

