

长距离有压输水工程泵站水锤的数值分析

韩凯,丁法龙,茅泽育

(清华大学水利水电工程系,北京 100084)

摘要:综合考虑了长距离有压输水系统中的泵、泵后阀门、空气阀、调压井、异性串联管、下游水库等各种内、外边界条件,采用特征-差分方法,针对实际工程的泵站水锤问题,通过数值方法对事故停泵后重新启泵的时间间隔、输水系统管线糙率等要素进行了敏感性分析。结果表明,合理的启泵时间间隔有助于改善有压输水系统及其部件在水力过渡过程中的水动力特性,并缩减调压井尺寸及相应工程造价;管线糙率对水头损失和水锤波衰减存在影响,对全系统在水力过渡过程中的水动力特性影响较小。

关键词:有压流;输水工程;水锤;特征-差分方法;敏感性分析

中图分类号:TV134.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)02-0069-07

Numerical analysis of water hammer in a long-distance pressurized water transfer project//HAN Kai, DING Falong, MAO Zeyu(*Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Taking various internal and external boundary conditions of pumps, valves, air valves, surge tanks, heterogeneous series of pipes and the downstream reservoir into consideration for a long-distance pressurized water transfer system, water hammer induced by pump failure in engineering construction was discussed based on the characteristic difference method. Sensitivity analysis of the time interval of pump restarting after pump failure and the roughness of the pipeline was carried out by numerical method. The results show that the reasonable time interval between pump failure and pump restarting can improve the hydrodynamic characteristics of the pressurized water transfer system as well as its components in the hydraulic transition process, which can reduce the size of the surge tank and the engineering cost. The roughness affects head loss and water hammer attenuation but has little influence on the hydrodynamic characteristics of the whole system in the hydraulic transition process.

Key words: pressure flow; water transfer project; water hammer; characteristic difference method; sensitivity analysis

为了解决地区水资源分布不均与部分城市水量供求紧张的问题,长距离供水工程的论证与建设得到了社会的普遍关注。水锤是一种有压输水工程中不可避免的水力过渡现象,在管线系统中引起剧烈的压力波动,产生结构振动和噪声,威胁工程的安全稳定运行,甚至导致水质下降和危及人民群众的生命财产安全^[14]。学者们通过数值方法、模型试验、原型观测等方式对水锤现象开展了大量的研究^[4-8]。由于长距离有压输水工程的部件及涉及的物理现象多而复杂,系统中不同的内边界条件相互之间又存在影响,而且水力过渡过程中的液柱分离现象具有较大的动态性,因此与水锤相关的研究一直受到人们的重视^[9]。随着计算机技术的发展,越来越多的

数值方法得以应用到水锤计算,常见的数值方法有特征线法(MOC)、有限差分法(FDM)、有限体积法(FVM)、有限元法(FEM)。为了提高数值计算的精度,结合各类数值方法,多种新型的数值格式被提出^[9-13]。其中MOC方法由于具有计算方便有效、便于计算机编程、在考虑水头损失影响的复杂管道系统中适用性好等优点,在工程领域得到了更为广泛的应用^[14-16]。

双吸离心泵站适用于流量大、管线长的输水工程,为了避免发生严重的泵站水锤,需要对其进行较为准确的水锤计算与分析。泵站水锤的水动力学特性对边界条件极敏感,不同工程的水锤特性可能存在较大差异,因此对长距离有压输水工程,尤其是在

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0402504)
作者简介:韩凯(1994—),男,硕士研究生,主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail:hk17@mails.tsinghua.edu.cn
通信作者:茅泽育(1962—),男,教授,博士,主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail:maozeyu@tsinghua.edu.cn

事故停泵时,针对个别重要影响因素进行敏感性分析和研究,了解水力过渡过程中水锤的动力学特性,对有压输水系统的安全稳定运行十分重要^[17]。综合考虑多种内外边界条件,从有压输水工程的全系统角度出发,用数值方法开展的停泵水锤研究目前很少,尤其是对工程管线长度超过 50 km 的超长距离有压输水工程,国内外在相关领域的工程建设经验还很缺乏^[18-19]。

本文以四平干线为例,综合考虑了长距离有压输水系统中的多种边界条件,以特征-差分方法为基础建立了长距离有压输水工程泵站水锤问题的数值模型,对事故停泵后重新启泵的时间间隔、输水系统管线糙率等要素进行了敏感性分析,并根据计算结果提出了相应建议,以期为相关的研究和今后的工程建设提供参考和借鉴。

1 数值模型

水锤现象可用一维非恒定有压管流的连续性方程和运动方程描述^[5]:

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

式中: h 为测压管水头; v 为断面平均流速; x 为管道轴线上的坐标,指向下游为正; θ 为管轴线上水流方向与水平线的夹角,当高度沿 x 轴正方向增加时为正; a 为水锤波速; t 为时间; D 为管道直径; λ 为 Darcy-Weisbach 沿程阻力系数; g 为重力加速度。

用特征-差分方法求解水锤基本方程^[7],忽略特征线方程中的水流流速 v ,这样就将 $x-t$ 平面划分成了如图 1 所示的矩形网格,两条斜率为 $\pm a$ 的网格对角线即为特征线。在式(1)中,令 $dx/dt = \pm a$,则特征方程可以写成以下形式^[18]:

$$\begin{cases} C^+ : h_{i,n+1} = C_P - Bq_{i,n+1} \\ C^- : h_{i,n+1} = C_M + Bq_{i,n+1} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} C_P &= h_{i-1,n} + Bq_{i-1,n} - Rq_{i-1,n} |q_{i-1,n}| \\ C_M &= h_{i+1,n} - Bq_{i+1,n} + Rq_{i+1,n} |q_{i+1,n}| \\ B &= \frac{a}{gA} \\ R &= \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \end{aligned}$$

式中: $h_{i,n+1}$ 、 $q_{i,n+1}$ 分别为在 $t+\Delta t$ 时刻节点 i 处的水头和流量; $h_{i\pm 1,n}$ 、 $q_{i\pm 1,n}$ 分别为在 t 时刻节点 $i\pm 1$ 处的水头和流量; Δx 、 Δt 分别为空间步长和时间步长; A 为输水管道的截面积; f 为管线的摩擦系数。

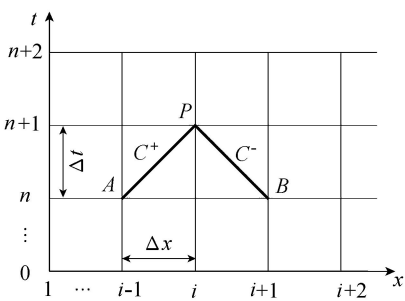
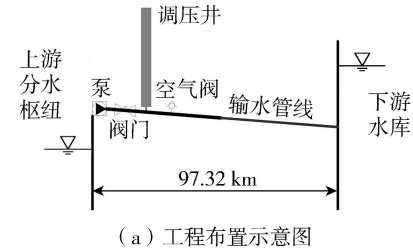


图1 特征-差分网格

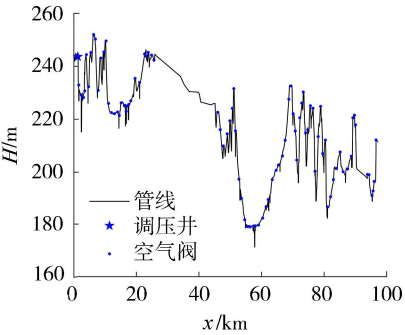
2 输水工程概况与模型构建

2.1 输水工程概况

四平干线为吉林省中部城市引松供水工程中的一条干线,取水口位于总干线末端的冯家岭分水枢纽,终点为下三台水库,两者之间为大黑山主脉。输水线路总长 97.32 km,有多个分水口、检修阀、空气阀、泄水阀、调压井、通风竖井等,沿线管道坡度变化由于地势原因也非常复杂。工程布置情况与管线高程 H 沿程变化情况如图 2 所示。可见,影响该输水工程供水设计和运行可靠性的因素众多,任意一处构筑物遭到破坏都将影响输水系统的正常运行。



(a) 工程布置示意图



(b) 四平干线沿程管线高程及特征构筑物分布

图2 四平干线工程概况

泵站设计流量为 $8.8 \text{ m}^3/\text{s}$,相应泵站出口压力线高程为 256.78 m,管线末端处的中心线高程为 211.58 m。根据设计资料,隧洞、预应力钢筒混凝土管(PCCP)、钢管(SP)设计糙率分别为 0.014 0、0.011 5、0.012 0,由于工程资料存在不可避免的误差,且工程长期运行后必然会出现管壁损耗引起管道糙率增加,因此分别再选取 4 组糙率组合,针对这 5 组糙率组合进行了恒定流计算。糙率组合的取值

以及由恒定流计算得到的下游边界条件如表 1 所示。

本文主要讨论泵站机组同时事故断电后,再次启机的时间间隔和管道糙率组合对输水系统沿程压力线、压力极值、调压井水位波动、泵站机组和泵后阀门受到的水动力荷载的影响。将模型设计为关闭所有分水口,泵站所有机组断电,泵后液压阀门按照设定程序进行启闭操作,经过不同时间间隔 t_g 后所有机组和阀门再次启机运行。各设计工况的停泵时刻、再次启机的时间间隔、启泵时间等情况见表 1。其中,通过工况 K1 ~ K5 数值计算结果的对比可以分析事故停泵后再次启泵的时间间隔 t_g 对停泵过程水力特性的影响;通过工况 K6、K7、K8、K9、K1 数值计算结果的对比可以分析不同糙率组合对停泵过程水力特性的影响。

2.2 模型构建

数值模型共设有 3 个泵,3 个泵后阀门,1 个调压井,636 个管段,93 处空气阀。计算总时长取 1 000 s,水力过渡发生前输水系统以有压恒定流状态运行。数值计算过程中关于无因次量、管长、管径、面积、压强、流量、流速、密度等主要变量的相对容许误差取 0.001;时间步长取 0.004 s;上游边界条件以泵站出口的压力高程线计;下游水位取水库的正常蓄水位 213.60 m。水体的各项物性参数取值如下:密度为 998.23 kg/m³,动力黏度为 0.001 Pa·s,温度为 10℃,体积模量为 2.2 GPa,蒸汽压强为-0.1 MPa。

2.2.1 泵

泵站机组采用卧式单级双吸离心泵(三用一备),泵站机组的基本参数如下:额定水头 $h_n=15$ m,额定流量 $Q_n=2.95$ m³/s,额定转速 $N_n=425$ r/min,额定功率 $P_n=560$ kW,转动惯量 $J=185$ kg·m²,额定效率 $\eta_n=89.2\%$ 。根据这些基本参数通过计算比转速得到泵站机组的无因次全特性曲线 W_H 、 W_B ^[19],结果如图 3 所示。

2.2.2 调压井

四平调压井位于桩号 1+286 m 处,直径 12 m,高度 45.51 m,与之相连的管线为内径为 4.0 m 的压力

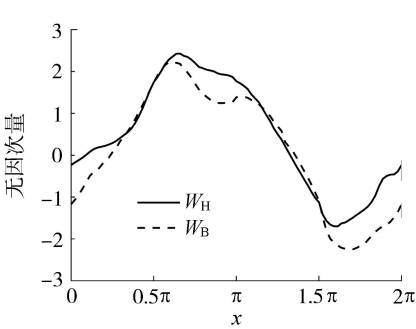


图 3 泵的无因次全特性曲线

隧洞,隧洞糙率取 0.014,调压井的计算模型如图 4 所示。

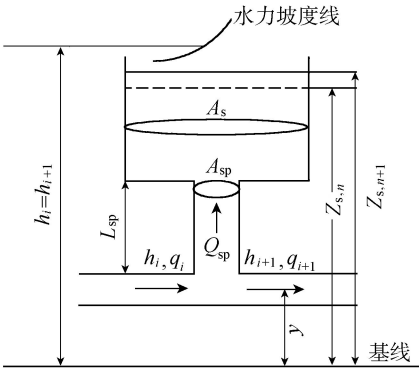


图 4 调压井计算模型

调压井内水流连续性方程可用式(3)表示,立管的容积与整个输水系统相比,可视为一个集中质量点,若忽略节点 i 和节点 $i+1$ 之间的水头损失,则管内流体的运动方程可用式(4)表示^[2]。

$$q_{i,n+1} = q_{i+1,n+1} + Q_{sp,n+1} \tag{3}$$

$$\frac{L_{sp}}{gA_{sp}} \frac{dQ_{sp}}{dt} = h_{i,n+1} - \frac{f_1 L_{sp}}{2gA_{sp}^2 D_{sp}} Q_{sp,n} |Q_{sp,n}| - Z_{s,n+1} \tag{4}$$

式中: A_{sp} 、 D_{sp} 、 L_{sp} 分别为立管的横截面积、直径、竖向长度; Q_{sp} 是经立管流入调压井的流量; f_1 为立管的摩阻系数; Z_s 为调压井水位; $\frac{f_1}{2gA_{sp}^2 D_{sp}} Q_{sp,n} |Q_{sp,n}|$ 为摩擦力项。对单一时间步长, Q_{sp} 与 Z_s 的关系如下:

$$Z_{s,n+1} = Z_{s,n} + \frac{\Delta t}{2A_s} (Q_{sp,n+1} + Q_{sp,n}) \tag{5}$$

表 1 计算工况

工况	停泵时刻/s	t_g /s	启泵时刻/s	糙率组合	隧洞糙率	PCCP 糙率	SP 糙率	h_w /m	h_d /m
K1	60	60	120	F3	0.0140	0.0115	0.0120	41.96	6.48
K2	60	90	150	F3	0.0140	0.0115	0.0120	41.96	6.48
K3	60	120	180	F3	0.0140	0.0115	0.0120	41.96	6.48
K4	60	150	210	F3	0.0140	0.0115	0.0120	41.96	6.48
K5	60	180	240	F3	0.0140	0.0115	0.0120	41.96	6.48
K6	60	60	120	F1	0.0150	0.0125	0.0130	48.31	0
K7	60	60	120	F2	0.0145	0.0120	0.0125	45.02	3.36
K8	60	60	120	F4	0.0135	0.0110	0.0115	38.90	9.48
K9	60	60	120	F5	0.0130	0.0105	0.0110	36.15	12.23

注: h_w 为沿程水头损失; h_d 为管线下游段的压力水头值。

式中: A_s 是调压井的横截面积。

2.2.3 异性串联管

管径变化、糙率变化、约束条件变化或有其他特性变化的输水管道称为异性管道,长距离输水管线的异性管道多为单管串联,称为异性串联管^[6]。图5描述了异性串联管在单管内部以及不同管段之间的边界条件,对于有压输水工程中产生的水锤,正向波波速 $v+a>0$,逆向波波速 $v-a<0$ 。在连接处两侧,设压力相等、流量连续,则

$$h_i = h_j \quad q_i = q_j \quad (6)$$

联立式(2)和式(6)可直接解得

$$q_i = q_j = \frac{C_p - C_m}{B_i + B_j} \quad (7)$$

将 q 结果代入式(2)后,即可得出 h 。

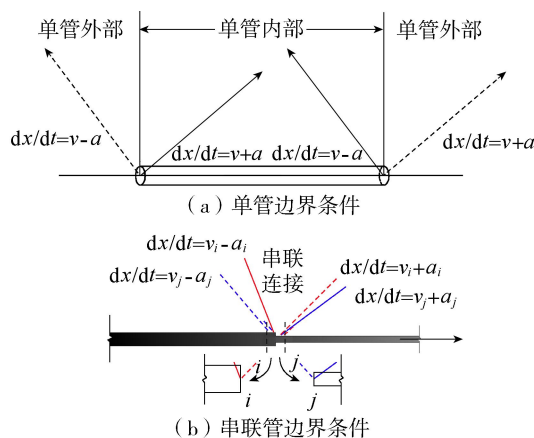


图5 异性串联管的边界条件

四平干线输水管线共计 636 个管段,单管长度从 2~3.6 km 不等,管径从 2.0~4.0 m 变化。由于管线资料复杂,水锤波速又是一个较难精确确定的物理量,为使计算成本得到有效控制,需对 PCCP、SP 和圆形压力隧洞中的水锤波速进行简化计算^[20]。结合工程实际资料,PCCP、SP、隧洞中水锤波速取值依次为 950 m/s、1000 m/s 和 1230 m/s。将不满足库朗条件的短管设为压力瞬间通过管道,相应管段内流体的动量方程为

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{A}{\rho L_1} (p_1 - p_2) - \frac{2f}{AD} Q |Q| - Ag \sin \theta \quad (8)$$

式中: Q 、 L_1 分别为短管流量、长度; ρ 为流体的密度; p_1 、 p_2 分别为管道入口和出口的压力。

当时间步长取 0.004 s 时,模型中 636 个管段中仅有 5 段短管,共 10.89 m,仅占管线总长的万分之一,对计算结果的影响可以忽略不计。

2.2.4 空气阀

空气阀的求解采用直接求解法^[8],分别将以亚声速流入和以临界速度流出空气阀的描述空气质量流量的方程式离散,并经一系列分段方程近似后,得

到关于空气阀中气体压力的一元二次方程,然后通过判断解的存在区域并通过求解相应一元二次方程得到下一时刻的空气阀内的气体压力。

工程沿线共设置直径为 0.3 m 的空气阀 90 处,每台机组后各设 1 处空气阀,真空负压允许值为 -3.0 m,气体排放系数取 0.6。

2.2.5 泵后阀门

为了有效控制输水水量和防止可能发生的水泵倒转,在泵后设置了液压缓闭蝶阀,进口管径 1.4 m,出口管径 1.2 m,对应于阀门有效截面积 A_f 的流量系数 C_D 与阀门开度 τ ($\tau = A_f/A_0$,其中 A_0 为阀门全开时的过流面积)的关系如图 6 所示。通过阀门的流量 q_v 可以表示为

$$q_v = C_D A \sqrt{2g\Delta h} \quad (9)$$

式中: Δh 为阀门两端的水头差。

结合式(2),阀门端节点的水头可用下式计算:

$$\begin{cases} h_{vl,n+1} = C_p - Bq_v \\ h_{vr,n+1} = C_m + Bq_v \end{cases} \quad (10)$$

式中: $h_{vl,n+1}$ 、 $h_{vr,n+1}$ 分别为阀门端节点左、右两端在 $t+\Delta t$ 时刻的压力水头。

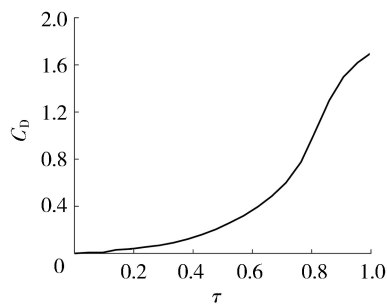


图6 泵后阀门的 C_D - τ 关系曲线

GB 50265—2010《泵站设计规范》规定,扬程高、管道长的大中型泵站,事故停泵可能导致机组长时间超速反转或造成水锤压力过大,推荐在水泵出口安装两阶段关闭的液压缓闭阀门。根据水锤基本理论和系统实际情况,在数值模拟分析的基础上优化,本文最终选用的阀门启闭规则如下:①两阶段折线关闭,第一阶段为快关,即在 5 s 内关闭 30% 的开度,剩余 70% 的开度则在 55 s 内慢关;②60 s 内匀速开启。

3 结果与讨论

3.1 模型计算结果

图 7 为数值计算得到的工况 K1 的压力线高程。由图 7 可知,最低压力线高程位于管线高程之上,设计的联合水锤防护措施可以有效应对停泵引起的负压;压力水头最大值出现在里程 $x=57.684$ km 处,即管线高程最低点,这是因为在该处除了存在位能和压能的转化之外,管线坡度剧烈变化引起的液柱分

离与断流弥合水锤进一步增大了该区域的压力极值;事故停泵之后,泵后产生较大的水锤降压波并沿输水管线向下游传播,在空气阀和管线摩阻的作用下,水锤波沿程不断衰减;沿程最低压力出现在泵后1 km 管线范围内。

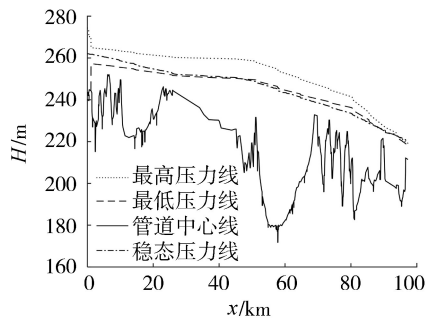


图7 工况 K1 下沿程压力线高程

工况 K2 ~ K9 的压力线趋势与工况 K1 一致,为了表征其在数值上的差异,令不同水平位置最低压力线的水头平均值为 $\bar{h}_{\min}$,不同水平位置最高压力线的水头平均值为 $\bar{h}_{\max}$,得到各工况下的瞬时压力水头极值和压力水头平均值如图 8 所示。可见,从工况 K1 ~ K5,随着停泵后启泵的时间间隔增大,瞬时最大水头 $h_{\max}$ 和最大水头平均值 $\bar{h}_{\max}$ 有所降低,但幅度不大,瞬时最小水头 $h_{\min}$ 出现在 $x=0.629$ km 处,均为 -4.40 m, $\bar{h}_{\min}$ 呈现明显的递减趋势;从工况 K6、K7、K1、K8、K9,随着管线材料的糙率减小,水头的瞬时值和平均值均为先降后升,而 $\bar{h}_{\max}$ 和 $\bar{h}_{\min}$ 的差值很小,且该差值随着糙率减小进一步变小。

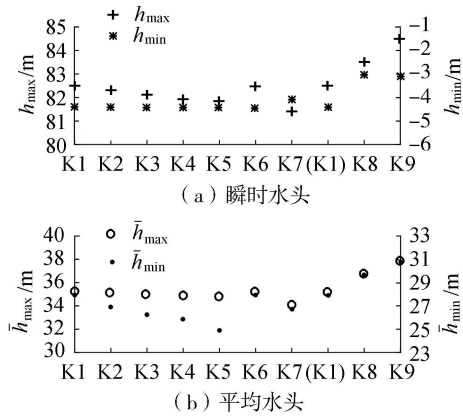


图8 各工况条件下水锤压力对比

图 9 为 K1 ~ K9 工况下调压井水位、泵出口相对流量(实时流量与额定流量之比, Q_b/Q_n)、泵出口水动力荷载、泵后阀门出口水动力荷载的变化情况。停泵 ($t=60$ s) 首先引起水锤降压波,造成桩号 1+286 m 处的调压井水位在停泵后随即降低,启泵后经过一段时间又逐渐恢复到稳定水位。相应地,泵出口的流量变化主要取决于泵的运行状态,阀门完全关闭 ($t=120$ s) 之前虽然出现短暂的倒流现象,

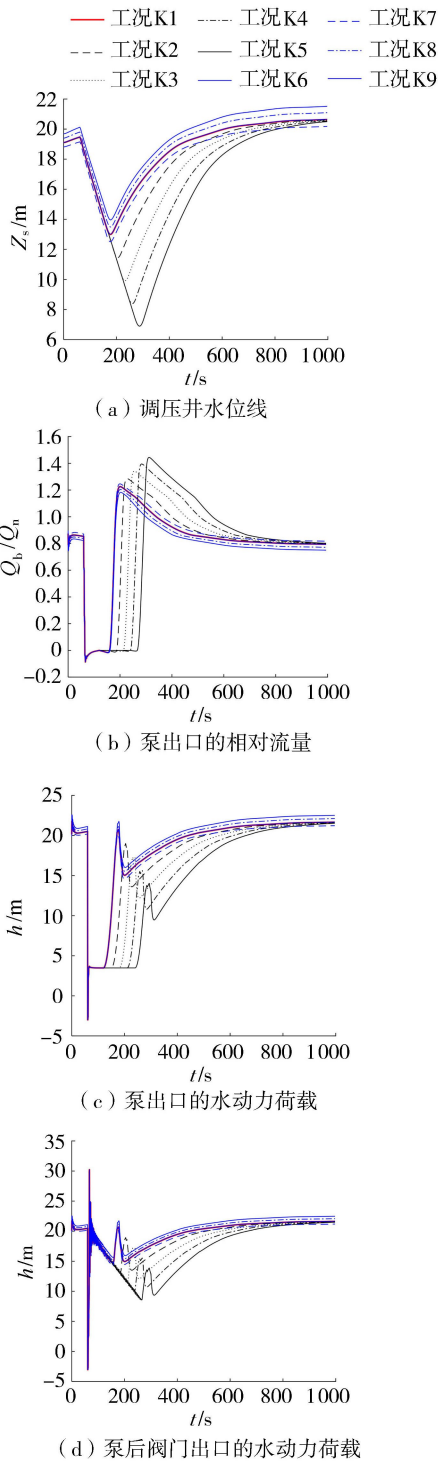


图9 不同工况数值计算结果对比

但由于关阀程序设置合理,倒流量较小,符合 GB 50265—2010《泵站设计规范》要求。泵出口的水压由于停泵骤减至 4 m 的瞬时负压,并快速回升至 3.5 m 的压力水头,启泵引起该处的水压迅速升高而后又降低了 5 m 的水头,即产生了启泵水锤。相比于泵出口,泵后阀门承受的水动力荷载更为不利,瞬时最大正压力水头达到 30 m,最大压力水头差接近 35 m,存在剧烈波动;在摩阻作用下,这种波动又快速衰减,形成阻尼振荡。

3.2 分析讨论

模型计算结果表明四平干线输水系统沿线构筑物布置和阀门启闭规则设计合理,能够保证四平泵站机组以及沿程管线和构筑物在发生事故停泵后能够安全、迅速地完 成水力过渡过程,保证了输供水系统事故时能够及时响应。但启泵的时间间隔 t_g 和管线糙率这两个要素对最终的计算结果仍有着不同程度的影响。

四平长距离有压输水工程的水锤波传播周期 T ($T=2L/a$, 其中 L 为管线总长度) 接近 200 s, 工况设计的启泵时间间隔 t_g 设计在 120 ~ 240 s 之间。由图 9 可知, 启泵时间间隔 t_g 对输水系统的水锤防护存在重要影响: ①停泵引起减压顺波, 在经下游水库反射传回增压逆波之前, 上游端调压井的水位将逐渐下降, 而启泵过程可以产生增压顺波, 使调压井水位提前回升, 因此设计较小的 t_g 有助于减小长距离有压输水工程的调压井尺寸及相应工程造价; ② t_g 越小, 启泵水锤引起的泵出口瞬时流量越大, 对应的瞬时荷载越大; ③ t_g 越小, 泵后阀门承受的压力波动越剧烈, 对机组的安全稳定运行也就越不利。

管线糙率因在工程建设中受到施工条件的限制, 实际值与设计值之间存在不可避免的偏差, 对比图 8 和图 9 中工况 K6、K7、K1、K8、K9 可以发现, 管线糙率对长距离有压输水工程及其停泵水锤的影响包括: ①糙率直接影响沿程水头损失和输水效率, 尤其对于长距离输水工程, 糙率对工程的影响更加显著; ②糙率越小, $\bar{h}_{\min}$ 和 $\bar{h}_{\max}$ 的差值越小, 当糙率组合为 F2 时, 输水系统应对泵站水锤时的防护效果最佳, 这是稳态压力线与摩阻作用下的水锤波相互叠加的结果; ③在长距离输水工程泵站操作引起的水力过渡过程中, 管线糙率影响阀门后管线水锤波的衰减, 但对全系统的水动力特性影响较小。

根据以上计算结果与分析讨论, 对长距离有压输水工程的规划与设计提出以下建议: ①工程涉及的部件众多, 多种边界条件之间存在相互影响, 个别设计条件的变化可能会对全系统产生重大的影响, 因此每项设计都应根据实际工程资料, 综合考虑各种边界条件, 对水力瞬变特性开展研究, 为水锤防护提供参考; ②在泵站水锤中, 事故停泵后的启泵时间间隔对水力过渡过程具有重要影响, 须保证泵站机组连同泵后阀门在事故断电或甩负荷后按照设计程序运行, 避免机组直接承受水力过渡引起的压力振荡, 防止机组出现倒转工况, 减少水量和水能损失; ③虽然管线糙率对全系统的水动力特性影响较小, 但摩阻引起的水能损失十分可观, 在工程建设过程中仍应把好工程质量关, 控制管线糙率在设计范围

内, 此外, 除了对工程沿线构筑物进行定期的检查和维护, 还需对可能出现的管道磨蚀、低等水生生物附着等不利情况进行监测与防治。

4 结 论

a. 增加停泵后的启泵时间间隔有利于减小有压输水系统及其部件承受的水动力荷载, 而对于长距离有压输水系统而言, 较小的启泵时间间隔有助于减小调压井尺寸及相应工程造价, 因此应为输水系统的停泵水锤设计合理的启泵时间间隔。

b. 长距离有压输水系统中, 管线糙率影响阀门后管线水锤波的衰减, 而对全系统的水动力特性影响较小, 但因其对水头损失和水能利用效率的重要作用, 在工程建设中仍应给予足够的重视。

参考文献:

- [1] TRIKI A. Water-hammer control in pressurized-pipe flow using an in-line polymeric short-section [J]. Acta Mechanica, 2016, 227(3): 777-793.
- [2] RIASI A, TAZRAEI P. Numerical analysis of the hydraulic transient response in the presence of surge tanks and relief valves [J]. Renewable Energy, 2017, 107: 138-146.
- [3] 周建旭, 邵卫红, 黄笑同, 等. 设置并联调压室的长引水式水电站稳定性分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2014, 42(2): 159-164. (ZHOU Jianxu, SHAO Weihong, HUANG Xiaotong, et al. Stability analysis of long-distance water diversion-type hydropower station with parallel surge chambers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(2): 159-164. (in Chinese))
- [4] KARA B, NEMDILI A. SimHydraulics approach to water hammer problems with the development of new formulas for static pressure diameter coefficient [J]. Forschung Im Ingenieurwesen-Engineering Research, 2018, 82(2): 107-118.
- [5] 万五一, 李玉柱, 王建军. 保水堰的交替水流数值模拟初探 [J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(1): 20-22. (WAN Wuyi, LI Yuzhu, WANG Jianjun. Numerical simulation of alternate flow in overflow weirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(1): 20-22. (in Chinese))
- [6] WAN W Y, HUANG W R. Water hammer simulation of a series pipe system using the MacCormack time marching scheme [J]. Acta Mechanica, 2018, 229(7): 3143-3160.
- [7] WYLIE E B, STREETER V L, SUO L. Fluid transients in systems [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [8] 王玲, 王福军, 黄靖, 等. 安装有空气阀的输水管路系统空管充水过程瞬态分析 [J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1240-1249. (WANG Ling, WANG Fujun,

- HUANG Jing, et al. Filling transient analysis in pipelines with air valves [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(10):1240-1249. (in Chinese))
 - [9] ZHOU L, WANG H, LIU D Y, et al. A second-order finite volume method for pipe flow with water column separation[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2017, 17:47-55.
 - [10] GHIDAoui M S, MING Z, MCINNIS D A, et al. A review of water hammer theory and practice[J]. Applied Mechanics Review, 2005, 58(1):49-76.
 - [11] 王念慎,史青玉,郑大琼. 准调压室在火电厂供水系统中的应用[J]. 水利水电科技进展,2005,25(增刊2):5-8. (WANG Nianshen, SI Qingyu, ZHENG Daqiong. Application of quasi-surge chamber to water supply system in heat-engine plant [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25 (Sup2):5-8. (in Chinese))
 - [12] 赵越,周领,刘德有,等. 基于有限体积法 Godunov 格式的水锤计算模型[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):76-81. (ZHAO Yue, ZHOU Ling, LIU Deyou, et al. Water hammer model based on finite volume method and Godunov-type scheme[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(1):76-81. (in Chinese))
 - [13] IVLJANIN B, STEVANOVIC V D, GAJIC A. Water hammer with non-equilibrium gas release [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2018, 165:229-240.
 - [14] GENG J, YUAN X L, LI D, et al. Simulation of cavitation induced by water hammer [J]. Journal of Hydrodynamics, 2017, 29(6):972-978.
 - [15] WANG X C, ZHANG J, YU X D, et al. Transient air-water flow patterns in the vent tube in hydropower tailrace system simulated by 1-D-3-D coupling method [J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, 30(4):715-721.
 - [16] TRIKI A. Further investigation on water-hammer control inline strategy in water-supply systems [J]. Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua, 2018, 67(1):30-43.
 - [17] WAN W Y, LI F Q. Sensitivity analysis of operational time differences for a pump-valve system on a water hammer response [J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME, 2016, 138(1):011303.
 - [18] WAN W Y, ZHANG B R. Investigation of water hammer protection in water supply pipeline systems using an intelligent self-controlled surge tank[J]. Energies, 2018, 11(6):1450.
 - [19] YANG Y S, LIU L, LI K. Analysis of full-featured pump curve to study the impact of large diameter, long distance and high-lift water pipeline [J]. Advances in Civil Engineering, 2011, 90:2954-2959.
 - [20] MOSLAND E N, LOHNE K D, YSTAD B, et al. Pressure wave velocity in fluid-filled pipes with and without deposits in the low-frequency range[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(10):04018064.
- (收稿日期:2019-01-15 编辑:雷燕)
-
- (上接第 41 页)
- [11] 刘佳佳,彭鹏. 基于 Kalman 滤波融合算法的某坝基水平位移分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010,31(3):110-114. (LIU Jiajia, PENG Peng. Analysis of dam foundation horizontal displacement based on Kalman filter fusion algorithm[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2010, 31(3):110-114. (in Chinese))
 - [12] 孙晓丹,欧进萍,侯纲领,等. 基于 Bayesian 估计的整体和局部信息融合的损伤识别[J]. 工程力学, 2012, 29(6):234-240. (SUN Xiaodan, OU Jinping, HOU Gangling, et al. Damage identification based on Bayesian fusion of global and local information [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6):234-240. (in Chinese))
 - [13] 李学军,李萍,褚福磊. 基于相关函数的多振动信号数据融合方法[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(2):179-183. (LI Xuejun, LI Ping, CHU Fulei. Data fusion of multi-sensor vibration signal using correlation function [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2009, 29(2):179-183. (in Chinese))
 - [14] 葛新成,罗大成,曹勇. 相关函数在数字信号处理中的应用[J]. 电光与控制, 2006, 13(6):78-80. (GE Xincheng, LUO Dacheng, CAO Yong. Application of correlation function in digital signal processing [J]. Electronics Optics and Control, 13(6):78-80. (in Chinese))
 - [15] 王济,胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
 - [16] GUPTA L, CHUNG B, SRINATH M D, et al. Multichannel fusion models for the parametric classification of differential brain activity [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2005, 52(11):1869-1881.
 - [17] 练继建,崔广涛,林继镛. 高拱坝泄洪振动的计算分析与验证[J]. 水利学报, 1999, 30(12):23-32. (LIAN Jijian, CUI Guangtao, LIN Jiyong. Analysis on flow-induced vibration of over flow high arch dam and its verification[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(12):23-32. (in Chinese))
 - [18] 寇立夯,金峰,迟福东,等. 国内外混凝土拱坝原型振动试验分析[J]. 水力发电学报,2007, 26(5):31-37. (KOU Lihang, JIN Feng, CHI Fudong, et al. Analysis of prototype dynamic test of concrete arch dams at home and abroad[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(5):31-37. (in Chinese))
- (收稿日期:2019-01-19 编辑:雷燕)