

排水管网泵群系统动态摩阻水锤仿真模拟

舒依娜¹, 刘兆峰¹, 夏修萍¹, 邓朝阳², 陆燕清², 田永薪², 胡垠盈², 周 领²

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211000; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对现有排水管网水锤计算大多基于恒定摩阻假定,忽略了动态摩阻对水锤压力衰减效应的问题,构建了动态摩阻水锤模型,采用特征线法进行求解,并设计水锤试验系统进行了验证,采用验证后的模型对实际复杂排水管网泵群系统进行了计算分析。结果表明:与传统的恒定摩阻水锤模型相比,动态摩阻水锤模型不仅能准确模拟第一峰值压力,而且可以精准仿真整个瞬变过程中水锤压力的波动峰值与周期;对于连续多个持续的水锤事件,忽略动态摩阻引起的累计计算误差不容忽视;设置空气阀可使最大水锤压力降低 22.7%,管线中最大负压可提升 73%。

关键词:排水管网;水力过渡过程;特征线法;动态摩阻;水锤防护

中图分类号:TV134 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)03-0032-08

Numerical simulation of water hammer with dynamic friction in pump group systems of drainage pipe networks// SHU Yina¹, LIU Zhaofeng¹, XIA Xiuping¹, DENG Zhaoyang², LU Yanqing², TIAN Yongxin², HU Yinying², ZHOU Ling² (1. State Grid Electric Power Research Institute/NARI Group Corporation, Nanjing 211000, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Most existing water hammer calculations in drainage pipe networks are based on the assumption of constant friction, neglecting the damping effect of dynamic friction on pressure fluctuations. To address this issue, a dynamic friction water hammer model was developed and solved using the method of characteristics. A water hammer test system was designed to verify the model, and the verified model was used to calculate and analyze an actual complex drainage pipe network with a pump group system. The results indicate that, compared with the conventional constant friction water hammer model, the dynamic friction water hammer model not only accurately simulates the first peak pressure but also precisely simulates the fluctuation peaks and periods of water hammer pressure throughout the entire transient process. For continuous and sustained water hammer events, the cumulative calculation error caused by neglecting dynamic friction cannot be ignored. The installation of air valves can reduce the maximum water hammer pressure by 22.7% and increase the maximum negative pressure in the pipeline by 73%.

Key words: drainage pipe network; hydraulic transient process; method of characteristics; dynamic friction; water hammer protection

近年来,城乡污水排水管网规模越来越大,所形成的泵组群-阀门群-管线群系统越来越复杂。在此类有压输排水系统中,阀门启闭、泵启停、工况切换等均会产生水锤等链锁、持续的瞬变事件,多事件过程中压力的耦合叠加极易引起异常压力波动,影响系统安全运行,甚至导致管道破坏事故^[1-4]。因此,精准水力瞬变计算对于城市污水排水管网泵群系统的水力安全和智慧调控至关重要。

现有的污水排水管网系统水锤计算通常采用恒定摩阻模型,忽略了实际水力瞬变过程中多种复杂因素对摩阻的影响,导致计算结果与实测数据存在

一定偏差,低估了水力瞬变压力的衰减,尤其对于复杂排水管网泵群系统的链锁、持续的瞬变事件,累计误差不容忽视^[5-7]。不少学者开展了动态摩阻研究^[8-9],并构建了不同类型的表达形式。动态摩阻模型主要有两种:①瞬时加速度模型,即 Brunone 模型^[10-11];②加权类模型,以 Zielke 模型^[12]和 Vardy-Brown 模型^[13-14]为典型。原始加权类模型计算效率极低,Vardy 等^[15]提出了一种简化的加权类动态摩阻方法,即 Trikha-Vardy-Brown (TVB) 方法。然而,实际输水系统水锤计算几乎不考虑动态摩阻效应,尤其对于实际复杂排水管网泵群系统尚未见动态摩

基金项目: 国电南瑞科技项目(5246C5220001)
作者简介: 舒依娜(1984—),女,高级工程师,硕士,主要从事水利水务信息化研究。E-mail:shuyina@sgepri.sgcc.com.cn
通信作者: 周领(1985—),男,教授,博士,主要从事输水管道瞬变流及水电站、泵站水力学研究。E-mail:zllhu@163.com

对于水锤控制方程的求解,特征线法由于计算简单、高效,已被广泛用于水锤问题的数值求解。特征线法最早由 Wylie 等^[16]提出,是一种基于特征理论求解双曲型偏微分方程的计算方法,大多采用固定网格计算。但在城市排水管网泵群系统中,由于各管道长度、波速等不同,当采用固定网格、统一时间步长时,为确保库朗数等于 1,需要调整部分管段的长度或波速,引起一定的简化误差^[17-18]。Karney 等^[19-21]分析比较了多种不同的插值格式以及波速调整方式的准确性,结果表明:根据不同波速进行步长调整的特征线法的模拟结果与试验值最为接近,而未插值的固定网格的特征线法模拟结果最差。然而,实际输水系统水锤计算基本上采用固定网格的特征线法,存在一定的数值计算误差。

综上所述,精准水锤数值仿真计算对于系统水力安全、智慧调控至关重要;动态摩阻对水锤压力的衰减效应对于减小累计误差的作用也至关重要。为了提高水锤瞬态模拟的准确度,本文引入 TVB 方法,建立了动态摩阻水锤仿真模型,采用特征线法进行求解,并设计水锤试验系统进行验证。针对实际复杂排水管网泵群系统,采用本文所建模型进行计算分析,比较了设水锤防护措施前后的管线安全状况。

1 动态摩阻水锤仿真模型

1.1 水锤控制方程

一维水锤模型的基本控制方程为

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + J = 0 \quad (2)$$

式中: H 为测压管水头; v 为流速; t 为时间; a 为水锤波速; g 为重力加速度; x 为沿管轴线的距离; J 为管道流体中摩擦引起的单位长度的水头损失。

式(1)和式(2)可简化为标准双曲型偏微分方程,从而可利用特征线法将其转化成同解的管道水锤计算特征相容方程。故本文采用特征线法对污水管网系统建立数学模型。

对于一段长度为 L 的管道,其两端 A、B 在 t 时刻的瞬态水头 $H_{A,t}$ 、 $H_{B,t}$ 和瞬态流量 $Q_{A,t}$ 、 $Q_{B,t}$ 可建立如下特征相容方程:

$$C^-: H_{A,t} = C_M + R_M Q_{A,t} \quad (3)$$

$$C^+: H_{B,t} = C_P - R_P Q_{B,t} \quad (4)$$

其中

$$C_M = H_{B,t-k\Delta t} - (a/gA) Q_{B,t-k\Delta t}$$

$$R_M = a/gA + \varphi |Q_{B,t-k\Delta t}|$$

$$C_P = H_{A,t-k\Delta t} + (a/gA) Q_{A,t-k\Delta t}$$

$$R_P = a/gA + \varphi |Q_{A,t-k\Delta t}|$$

式中: Δt 为计算时间步长; A 为管道过流截面面积; ΔL 为特征线网格管段长度, $\Delta L = a\Delta t$ (库朗条件); k 为特征线网格管段数, $k = L/\Delta L$; φ 为水头损失系数, $\varphi = \Delta h/Q^2$,其中 Δh 为水头差, Q 为瞬态流量。

式(3)和式(4)均只有两个未知数,将其分别与 A、B 节点的边界条件联立求解,即可求得 A、B 节点的瞬态参数。

1.2 加权类动态摩阻方法

TVB 方法中, $t + \Delta t$ 时刻的非定常剪切应力 $\tau_{wu,t+\Delta t}$ 表示为

$$\tau_{wu,t+\Delta t} \approx \frac{2\rho\nu}{R} \sum_{i=1}^N \left[Y_{ai,t} e^{-(n_i\nu/R^2)\Delta t} + \frac{m_i R^2}{n_i \nu \Delta t} (1 - e^{-(n_i\nu/R^2)\Delta t}) (v_{t+\Delta t} - v_i) \right] \quad (5)$$

式中: ρ 为流体密度; ν 为运动黏度; R 为管道半径; $Y_{ai,t}$ 为 t 时刻历史速度对壁面切应力的影响; N 为指数项总数; v_i 为 t 时刻的流速; m_i 、 n_i 为 TVB 模型加权函数系数,根据流态取值,若为层流, $i = 1, 2, \dots, 9$,若为紊流, m_i 中 $i = 1, 2, \dots, 17$, n_i 中 $i = 1, 2, \dots, 9$ 。

1.3 水泵节点控制方程

a. 水泵全特性曲线。根据水泵的无量纲相似特性,通过如下转换处理得到水泵的全特性曲线公式:

$$W_H(x) = h/(q^2 + n^2) \quad (6)$$

$$W_B(x) = m/(q^2 + n^2) \quad (7)$$

其中 $x = \pi + \tan^{-1}(q/n)$ $h = h_1/h_2$

$$m = m_1/m_2 \quad n = n_1/n_2 \quad q = q_1/q_2$$

式中: $W_H(x)$ 为扬程特性曲线公式; $W_B(x)$ 为功率特性曲线公式; h 、 m 、 n 、 q 分别为扬程、轴力矩、转速和流量经过无量纲化处理得到的值; h_1 、 m_1 、 n_1 、 q_1 分别为实际的扬程、轴力矩、转速和流量; h_2 、 m_2 、 n_2 、 q_2 分别为额定扬程、轴力矩、转速和流量。

b. 水泵边界水头平衡方程。设水泵上、下边界节点编号为 1、2,则水泵边界水头平衡方程为

$$h = \frac{(C_{M2} - C_{P1}) + q(R_{M2} + R_{P1})Q_r - \Delta H_p}{H_r} \quad (8)$$

式中: H_r 为水泵额定扬程; Q_r 为水泵额定流量; ΔH_p 为水泵出口控制阀门的水头损失。

c. 机组转动动力矩平衡方程为

$$n = n_0 + [(m_g + m_{g0}) - (m + m_0)] \Delta t / 2T_\alpha \quad (9)$$

其中

$$T_\alpha = GD^2 |n_r| / 374.7 M_r$$

式中: T_α 为机组惯性时间常数; GD^2 为机组转动惯性力矩; n_r 为水泵额定转速; M_r 为水泵额定轴力矩; m_g 为水泵动力矩无量纲值; n_0 、 m_0 、 m_{g0} 分别为 n 、

$m、m_g$ 的前一计算时步的值。

联立式(6)~(9),结合给定的水泵出口控制阀启闭规律 $y=y(t)$ (阀门开启高度 y 设定为随时间 t 变化的函数),即可求出各种工况的水泵节点的瞬态参数 $h、m、n、q$ 等。

1.4 管道摩阻测量

任意取一段管道,两断面 1、2 之间的伯努利方程为

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_f + h_j \quad (10)$$

式中: $Z_1、Z_2$ 为断面 1、2 的高程; $p_1、p_2$ 为断面 1、2 的压强; $v_1、v_2$ 为断面 1、2 的流速; h_f 为沿程损失; h_j 为局部阻力损失。

根据达西-魏斯巴赫公式可得沿程损失为

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (11)$$

式中: λ 为管道沿程阻力损失系数; l 为管道长度; d 为管径。

局部阻力损失的计算公式为

$$h_j = \sum \xi \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$

式中 ξ 为管道局部阻力损失系数。

当管径沿管线不变且管道水平时, $Z_1=Z_2$, 可以假设 $\alpha_1=\alpha_2$, 则有

$$h_f + h_j = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} \quad (13)$$

若两断面间为管道, $h_j=0$, 即只考虑沿程损失 h_f , 可由下式计算管道摩阻系数 λ_p :

$$\lambda_p = \frac{p_1 - p_2}{\rho} \frac{2d}{lv^2} \quad (14)$$

2 模型验证

为了验证本文模型在水锤计算中的准确性,设计搭建了水库-管道-阀门水锤试验系统。如图 1 所示,该系统包括上游的压力罐、潜水泵、电磁流量计、手动阀门、压力传感器、下游水箱和以环绕形式固定的管道。试验通过控制阀门的快速关闭来激发水锤现象,并通过阀门前的压力传感器记录水力瞬变时的压力变化。其中,使用的 BYP300 高精度压力传感器具有 4~20 mA 的输出范围,精度为 0.2%,测量范围为 0~1.0 MPa;电磁流量计的测量范围为 0.707~10 m³/h。利用 LabVIEW 软件进行数据采集,采样频率为 2000 Hz。

试验上下游水位差为 49.4 m,管道为一根长 241.52 m 的钢管,管径为 50 mm,试验率定管道摩阻为 0.014,计算得波速为 1328 m/s,内部水体工况运



图 1 输水系统水锤试验布置

动黏度取 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 工况 1 水体流速为 0.28 m/s, 工况 2 水体流速为 0.35 m/s, 由高速摄像机拍摄记录可知关阀时间为 0.014 s, 数值模拟时取库朗数为 1。计算恒定摩阻水锤、动态摩阻水锤与试验结果对比如图 2 所示。由图 2 给出的两种工况可知,传统的恒定摩阻水锤模型仅能准确模拟第一峰值压力,对于其后水锤压力波动,压力峰值计算值与试验值差异越来越大。与恒定摩阻模型相比,考虑动态摩阻效应的水锤模型,各个波动周期内压力峰值更接近试验值。关阀过程中,管道末端的模型计算压力和试验值曲线基本吻合,压力波动周期与幅值均偏差较小,整体相对误差小于 2%,具有较高的模拟精度。由此可得,本文模型可进一步用于复杂排水管网系统的水力计算。

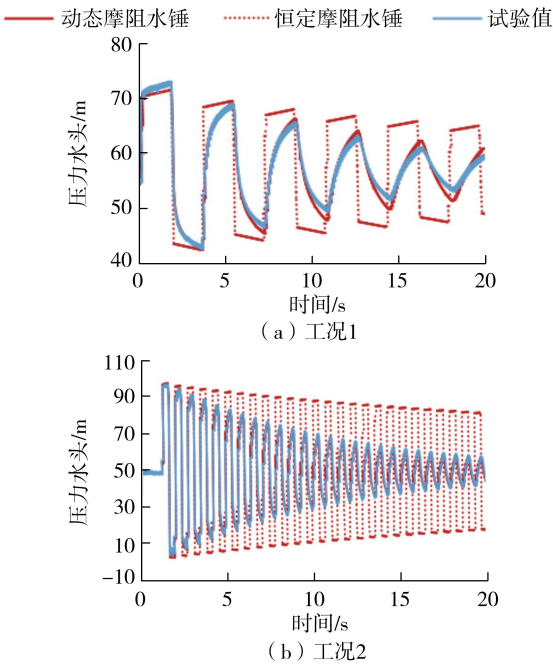


图 2 恒定摩阻水锤、动态摩阻水锤与试验结果对比

3 连续启闭阀门下动态摩阻效应的影响

在实际工程中,可能因系统中多个水力元件(水泵、阀门等)的连续动作,而出现多个水锤事件的耦合叠加现象,此时如忽略动态摩阻效应,可能会导致计算误差累积。本文以设计的水锤试验为例,

研究多个连续水锤事件下动态摩阻对计算结果的影响。采用连续动态启闭阀门来实现多个水锤事件,阀门启闭过程为:首先阀门从全开关闭至开度为0.2,然后开启至全开状态,最后从全开关闭至全关状态(开度为0.0)。采用快、慢两种不同的关阀时间,即0.2 s和2 s。阀门连续启闭过程曲线及数值模拟结果如图3所示。由图3可见,在阀门连续启闭所引起的多个连续水锤事件中,当阀门完全关闭后,动态摩阻会影响压力波动峰值的衰减速度,此时若忽略动态摩阻效应,峰值压力计算误差较大。此外,相对于阀门直接关闭情况,阀门连续启闭会使水锤波最大峰值压力变大,关阀时间为0.2、2 s的两种关阀工况都能体现该规律。在0.2 s快关工况下,直接关闭阀门时水锤波峰值压力为98.03 m(本文压力用压力水头表示),而连续启闭时峰值压力为108.77 m。动态摩阻影响水锤波压力峰值使其衰减幅度更大。在该快关工况下,直接关闭阀门时考虑动态摩阻和不考虑动态摩阻时第15个波峰的峰值

压力相差14.25 m,而连续启闭时和第15个波峰的峰值压力相差18.44 m。2 s慢关工况由于关阀较慢,在波形上与0.2 s快关工况有所不同,但整体规律一致。由此可见,阀门连续启闭会使动态摩阻效应的影响增强。

为比较图3是否考虑动态摩阻的差异,引入均方根误差(RMSE)。将考虑动态摩阻的水头作为实际值,不考虑动态摩阻的水头作为预测值。图3(a)工况不考虑动态摩阻与考虑动态摩阻的差距对应的RMSE为18.04 m;图3(b)中误差集中在波动段,取统计时段为6~16 s,RMSE为1.73 m,可见不考虑动态摩阻时模型结果偏差较大。

4 考虑动态摩阻的排水管网泵群系统水力计算分析

针对实际排水管网泵群系统进行考虑动态摩阻的水力计算分析。排水管网(图4)采用有压输水,管网总长约4.8 km,管径均为100 mm。以主线为

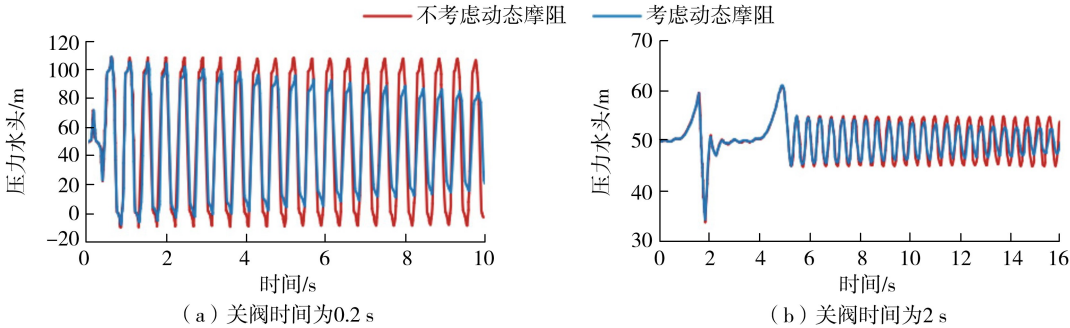


图3 阀门连续启闭动态摩阻效应对水锤压力的影响

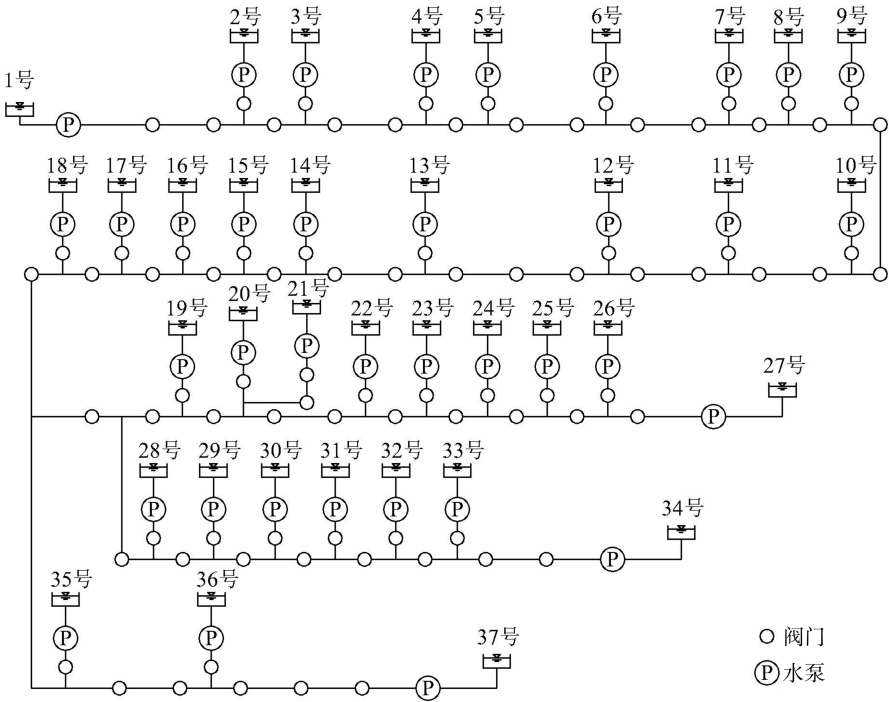


图4 排水管网系统布置

例,系统从 1 号起点处进行泵站给水,由主管管道进行输送,并相继与支管汇流,相连支管依次经过 2 号泵站、3 号泵站直至 27 号污水池。另有交错的两条管线为:37 号泵站至 27 号污水池,34 号泵站至 27 号污水池。支管沿线共包含 36 台有压潜水泵,每根支管连接 2 台同型号水泵,一台正常工作时使用,一台事故工况时备用;由于各节点流量较小,故污水提升泵站选用潜污泵。系统中,主管水泵入口高程以及最低启泵水位已知,低于最低启泵水位则水泵无法正常启动,其中 7 号水泵入口水位高程最高,30 号水泵处支管预计输送流量最大。

系统包含污水井、闸阀和止回阀,在支管计入主干管节点前 2 m 处设置止回阀,止回阀位置设钢筋混凝土阀门井保护;污水泵后布置止回阀,发生倒流时,止回阀快速关闭。止回阀局部阻力系数参考文献[22],取值为 6.5。

由于排水管网泵群系统多台水泵同时运行,可能产生单个水锤事件或叠加的水锤问题。单个水锤事件以及连续启闭阀门水锤事件过程中,忽略动态摩阻会引起一定的计算误差,尤其对于水锤压力后续衰减程度的计算误差呈现累计增大趋势;考虑动态摩阻时,压力波动周期与幅值均偏差较小,整体相对误差小于 2%,具有较高的模拟精度。因而需要采取更精确的动态摩阻模型进行分析。

4.1 典型工况选取

根据实际调查,由于该排水管网系统较为复杂,很少出现多台水泵同时启用的情况。即使在排水高峰期,最多有 3 台水泵同时运行。因而,需根据预期的水泵综合特性曲线和进水池水位,分别计算 1、2、3 台水泵联合运行的工作参数;选定的水泵联合运行时其他水泵默认停机。

基于输水系统的特点和设计方案,考虑泵站运行状况、同时运行的水泵所在的管线距离最长、排水流量最大等危险工况以及可能出现的事故停机工况,选取如表 1 所示的 18 组多台水泵联合运行的典型工况。由于每台工作水泵后都设有止回阀,当水泵发生事故停机导致出现倒流时,止回阀迅速关闭。

4.2 无水锤防护措施下水力瞬态计算分析

针对不设置防护措施时有压管道的情况,分析水泵事故时管道系统各控制参数是否满足条件,统计结果见表 2。对于有压管道,若负压控制在 -5.0 m 以上,原则上可以保证气体流入空气阀的速度不超过临界流速^[23]。本工程无防护措施下,管线最小压力达到 -19.2 m,远超控制标准,不满足水锤防护标准,管道已经发生汽化。应通过设置空气阀来减小水锤压力,保证排水管网输水系统的安全稳

表 1 水泵事故停机工况

工况	工作水泵	瞬态工况		
		泵 1	泵 2	泵 3
JH1	1 号(主干线起点泵)	事故停机		
JH2	26 号(污水池前泵)	事故停机		
JH3	34 号(最长支线起点泵)	事故停机		
JH4	37 号(短支线起点泵)	事故停机		
JH5	30 号(支管流量最大泵)	事故停机		
JH6	1 号、37 号	正常运行	事故停机	
JH7	1 号、37 号	事故停机	正常运行	
JH8	1 号、34 号	正常运行	事故停机	
JH9	1 号、34 号	事故停机	正常运行	
JH10	1 号、7 号、34 号	正常运行	正常运行	事故停机
JH11	1 号、7 号、34 号	正常运行	事故停机	正常运行
JH12	1 号、7 号、34 号	事故停机	正常运行	正常运行
JH13	32 号、33 号、34 号 (最长支管起始片区)	正常运行	正常运行	事故停机
JH14	32 号、33 号、34 号	正常运行	事故停机	正常运行
JH15	32 号、33 号、34 号	事故停机	正常运行	正常运行
JH16	35 号、36 号、37 号 (短支管片区)	正常运行	正常运行	事故停机
JH17	35 号、36 号、37 号	正常运行	事故停机	正常运行
JH18	35 号、36 号、37 号	事故停机	正常运行	正常运行

表 2 无防护措施下各工况管线压力水头统计结果

单位:m

工况	最大 值	最小 值	工况	最大 值	最小 值	工况	最大 值	最小 值
JH1	29.4	-16.9	JH7	31.5	-13.4	JH13	24.6	-6.1
JH2	10.0	-8.6	JH8	31.5	-4.7	JH14	27.3	-0.3
JH3	19.3	-9.5	JH9	29.5	-13.0	JH15	23.4	-1.6
JH4	28.5	-19.2	JH10	32.9	-4.7	JH16	37.4	-6.5
JH5	23.6	-15.3	JH11	33.3	0.5	JH17	33.2	-0.8
JH6	31.2	-10.4	JH12	30.1	-2.4	JH18	32.8	-1.5

定运行。同时,考虑了动态摩阻的计算结果表明,多台水泵同时正常运行时其中一台水泵失电的工况相对更安全,而单台水泵正常运行并发生失电的工况更危险,这是因为其余正常运行的水泵可防止主管内水流动速突然减小,对减小水锤压力有一定帮助。

由表 2 可见,JH1、JH4、JH5 工况产生的系统最大负压最危险,其瞬态测压管水头(即高程与压力水头的和)的包络线如图 5 所示。在 JH4 工况下,37 号单泵失电停机,管线产生了 -19.2 m 的极大负压,远超最低标准(-5 m);在 JH5 工况下,此时水泵失电停机时虽未发生倒转,但沿线最小测压管水头均低于管道高程线,形成了大范围负压。

由此可见,在无防护措施时,典型危险工况下系统存在较大的负压风险,需进一步开展相应的防护分析研究。

4.3 水锤防护条件下水力瞬态计算分析

针对上述负压现象,采取沿程布置空气阀的措施来解决事故工况下管道中的负压问题^[24-26]。空气阀布置在出现最大负压的位置,尺寸取管径的

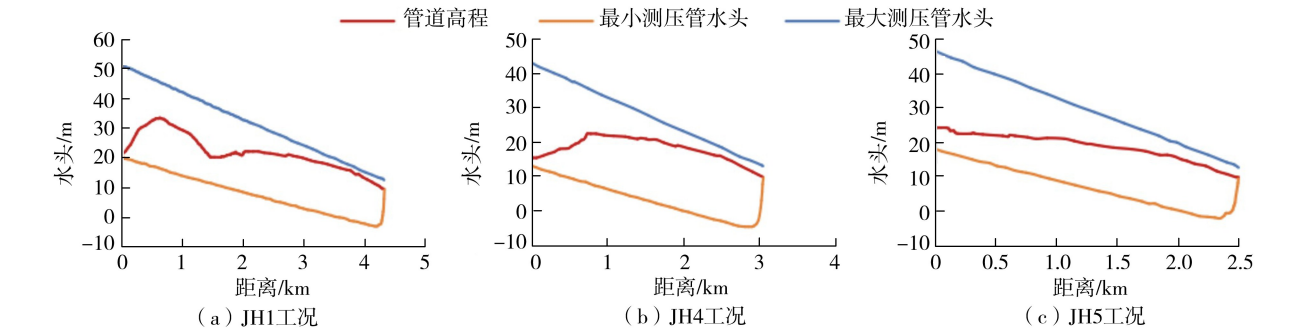


图5 不同工况下瞬态测压管水头包络线

1/12~1/8,即 8.3~12.5 mm^[27]。

在上述水锤防护措施下,选取典型工况进行水泵失电情况计算,计算结果见表 3。其中 FH1 工况为 JH1 工况基础上添加空气阀作为防护措施,其余工况以此类推。由表 3 可知,在空气阀的作用下,水泵失电过程中管道沿线的负压情况得到了很大的消除,管线中最大负压提升约 73%,在安全标准以内;且产生的正压波动较小,最大压力水头为 28.9 m,降低约 22.7%,在 GB 50265—2022《泵站设计规范》规定的安全允许范围之内。

表 3 增加防护措施后负压情况统计结果

序号	对应工况	增加防护措施后负压力 /m	增加防护措施后管线最大压力/m
FH1	JH1	-3.7	29.2
FH2	JH2	-4.9	9.3
FH3	JH3	-3.4	18.5
FH4	JH4	-4.8	28.1
FH5	JH5	-3.4	22.1
FH6	JH6	-5.0	31.1
FH7	JH7	-2.7	31.3
FH8	JH9	-1.9	31.1
FH9	JH13	-2.9	22.9

综上所述,通过排水管网输水系统布置空气阀,可较大幅度地改善管线的水锤负压风险。原因在于,当管线压力急剧下降时,空气阀可迅速进气,以此阻断水锤传播路径,从而避免管线出现大面积负压。

对 JH1、JH4、JH5 工况增加防护措施后对应工况为 FH1、FH4、FH5,其瞬态测压管水头的包络线如图 6 所示。

5 结 论

a. 与恒定水锤摩阻模型相比,动态摩阻水锤模型得到的各个波动周期内的压力峰值更接近试验值,压力计算数据和试验数据曲线基本吻合,压力波动周期与幅值均偏差较小,整体相对误差小于 2%,模拟精度较高。

b. 对于连续多个持续的水锤事件,是否考虑动态摩阻对水锤计算结果的影响明显,0.2 s 快关工况

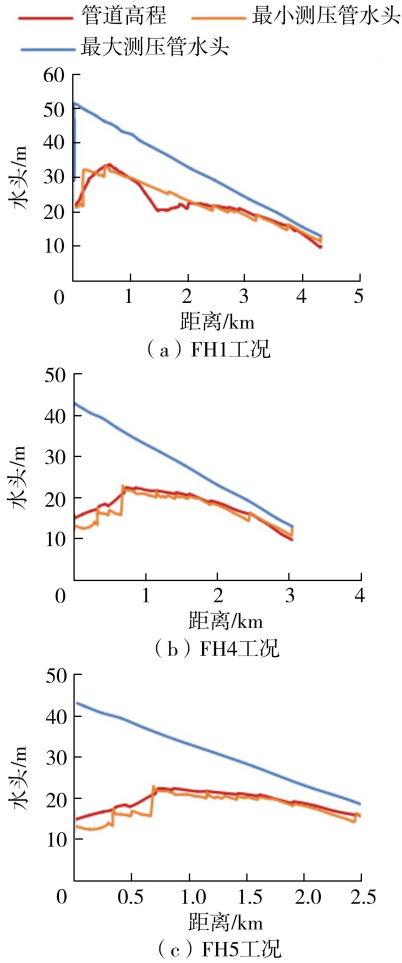


图6 增加防护措施后瞬态测压管水头包络线

下 RMSE 达到 18.04 m,2 s 慢关工况下 RMSE 达到 1.73 m,故因忽略动态摩阻而产生的累计误差不容忽视。

c. 动态摩阻模型适用于实际复杂排水管网泵群系统。在不设水锤防护措施的情况下,管路沿线最大和最小内水压力均超控制标准;通过合理设置空气阀,管线中最大负压可提升 73%,有效地控制了管道负压风险;同时也使产生的正压波动降低 22.7%,保证了输水系统的安全稳定运行。

参考文献:

[1] 韩凯,丁法龙,茅泽育.长距离有压输水工程泵站水锤的

- 数值分析[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):69-75. (HAN Kai,DING Falong,MAO Zeyu. Numerical analysis of water hammer in a long-distance pressurized water transfer project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(2):69-75. (in Chinese))
- [2] 周领,胡安妮,吴金远. 泵站水力瞬变的二阶 Godunov 格式模型构建[J]. 农业工程学报,2022,38(19):42-50. (ZHOU Ling,HU Anni,WU Jinyuan. Construction of the second-order Godunov scheme model for hydraulic transients in pumping stations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (19):42-50. (in Chinese))
- [3] SHI Lin,ZHANG Jian,YU Xiaodong,et al. Water hammer protection for diversion systems in front of pumps in long-distance water supply projects[J]. Water Science and Engineering,2023,16(2):211-218.
- [4] 莫世川,谢坤,陈华,等. 城市厂网河一体化模拟与调度研究进展[J]. 中国农村水利水电,2022(10):42-46. (MO Shichuan,XIE Kun,CHEN Hua,et al. Research on the integrated modeling and operation of urban drainage systems and rivers [J]. China Rural Water and Hydropower,2022(10):42-46. (in Chinese))
- [5] 周领,刘静,欧传奇,等. 水力瞬变中动态摩阻的改进加权类模型[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(2):164-169. (ZHOU Ling,LIU Jing,OU Chuanqi,et al. Improved weight-function model of unsteady friction in hydraulic transients [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40 (2): 164-169. (in Chinese))
- [6] 李赞杰,周领,欧传奇,等. 考虑动态摩阻的管道泄漏水力瞬变数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2021,41(1):62-68. (LI Yunjie,ZHOU Ling,OU Chuanqi,et al. Numerical simulation of hydraulic transient in a leakage pipe considering unsteady friction [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (1):62-68. (in Chinese))
- [7] 刘光,吴国鸿,吴如坤. 基于 MIAB 摩阻模型的有压管道水锤数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(10):1037-1042. (LIU Guang, WU Guohong, WU Rukun. Numerical simulation on water hammer in pressurized pipeline based on MIAB model[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41 (10):1037-1042. (in Chinese))
- [8] ZHOU Ling, CAO Yun, KARNEY B, et al. Unsteady friction in transient vertical-pipe flow with trapped air[J]. Journal of Hydraulic Research,2021,59(5):820-834.
- [9] HU Yinying,ZHOU Ling,PAN Tianwen,et al. Godunov-type solutions for free surface transient flow in pipeline incorporating unsteady friction [J]. AQUA: Water Infrastructure,Ecosystems and Society,2022,71(4):546-562.
- [10] BRUNONE B, KARNEY B W, MECARELLI M, et al. Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow [J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2000,126(4):236-244.
- [11] 赵莉,范闯,申虎贲,等. 液柱分离型水锤新空腔模型[J]. 水利水电科技进展,2024,44(2):37-41. (ZHAO Li,FAN Chuang,SHEN Huben,et al. New cavity model for water hammer with liquid column separation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(2):37-41. (in Chinese))
- [12] ZIELKE W. Frequency-dependent friction in transient pipe flow[J]. Journal of Basic Engineering,1968,90(1):109-115.
- [13] VARDY A E,BROWN J M B. Transient,turbulent,smooth pipe friction[J]. Journal of Hydraulic Research,1995,33(4):435-456.
- [14] VARDY A E,BROWN J M B. Transient turbulent friction in smooth pipe flows[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003,259(5):1011-1036.
- [15] VARDY A E,BROWN J M B. Transient turbulent friction in fully rough pipe flows [J]. Journal of Sound and Vibration,2004,270(1/2):233-257.
- [16] WYLIE E B,STREET V L,SUO L S. Fluid transients in systems[M]. New Jersey:Prentice Hall,1993.
- [17] LIU Yue, LIU Jianwei, CHEN Jian, et al. Finite volume method for transient pipe flow with an air cushion surge chamber considering unsteady friction and experimental validation[J]. Water,2023,15(15):2742.
- [18] 周领,王小龙,张海丽,等. 基于有限体积法的含无压段泵站水锤模拟及调压井优化[J]. 农业工程学报,2023,39(20):66-75. (ZHOU Ling,WANG Xiaolong,ZHANG Haili,et al. Finite volume method for simulating water hammer in pumping stations with free-surface flow and optimization of surge chamber[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39 (20):66-75. (in Chinese))
- [19] KARNEY B W,GHIDAoui M S. Flexible discretization algorithm for fixed-grid MOC in pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1997,123(11):1004-1011.
- [20] SELEK B,KIRKGÖZ M S,SELEK Z. Comparison of computed water hammer pressures with test results for the Catalan power plant in turkey [J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2004,31(1):78-85.
- [21] 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))
- [22] 上海市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册(第10册):技术经济[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[23] 刘有亮,胡斌超.超高昂程及长距离泵站水锤分析及防护设置[J].中国农村水利水电,2020(11):112-117. (LIU Youliang,HU Binchao. An analysis of water hammer in super high lift and long distance pump stations [J]. China Rural Water and Hydropower,2020(11):112-117. (in Chinese))

[24] 蔡付林,樊子凯,周建旭,等.长距离多支线有压输水系统启动水锤防护[J].水利水电科技进展,2024,44(4):1-6. (CAI Fulin,FAN Zikai,ZHOU Jianxu, et al. Start-up water hammer protection for long-distance multi-branch pressurized water conveyance systems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(4):1-6. (in Chinese))

[25] 毛艳艳,闫观清,毛艳民,等.空气阀在长距离供水工程水锤防护中的作用[J].人民黄河,2011,33(12):123-125. (MAO Yanyan,YAN Guanqing,MAO Yanmin, et al. Water hammer prevention by air valve in long distance water transportation projects [J]. Yellow River, 2011, 33 (12):123-125. (in Chinese))

[26] 梁圣辰,张健,贺蔚,等.长距离输水系统串联多阻抗调压室的水锤防护效果[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):170-175. (LIANG Shengchen,ZHANG Jian,HE Wei, et al. Water hammer protection effect of series throttled surge chambers in long-distance water conveyance system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):170-175. (in Chinese))

[27] 徐放,李志鹏,王东福,等.水锤防护空气阀研究综述[J].流体机械,2018,46(6):33-38. (XU Fang, LI Zhipeng,WANG Dongfu, et al. A review on air valve performance and water hammer protection [J]. Fluid Machinery,2018,46(6):33-38. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-23 编辑:俞云利)

(上接第 31 页)

[33] 张炳昌,许栋,及春宁,等.大宽深比变曲率弯道水动力结构大涡模拟研究[J].水力发电学报,2019,38(6):77-91. (ZHANG Bingchang,XU Dong,JI Chunning, et al. Large eddy simulations of hydrodynamic structure in channel bends with large width-depth ratios and variable curvatures [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019,38(6):77-91. (in Chinese))

[34] 曹玉芬.弯曲河道水动力不稳定性及床面短期演变特性[D].天津:天津大学,2020.

[35] 韩汝婷.模拟植被对明渠流动力学特性的影响研究[D].北京:北京林业大学,2022.

[36] FUREBY C, TABOR G, WELLER H G, et al. A comparative study of subgrid scale models in homogeneous isotropic turbulence[J]. Physics of Fluids, 1997, 9 (5): 1416-1429.

[37] SEO I W, PARK S W, CHOI H J. A study of pollutant mixing and evaluating of dispersion coefficients in laboratory meandering channel [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009:485-490.

[38] 陆圣杰,朱海,徐洁如,等.连续弯曲河道点源污染物输运特性三维数值模拟[J].水利水电科技进展,2023,43(2):16-26. (LU Shengjie, ZHU Hai, XU Jieru, et al. Three-dimensional numerical simulations of transport characteristics of point source pollutant in a sinuous open channel [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(2):16-26. (in Chinese))

[39] LIU Fangqing. A thorough description of how wall functions are implemented in OpenFOAM [C]// Proceedings of the CFD with OpenSource Software. Gothenburg, Sweden, 2016.

[40] SHUKRY A. Flow around bends in an open flume [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1950,115(1):751-778.

[41] WEBER L J, SCHUMATE E D, MAWER N. Experiments on flow at a 90° open-channel junction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127 (5): 340-350.

[42] BRADBROOK K F, BIRON P M, LANE S N, et al. Investigation of controls on secondary circulation in a simple confluence geometry using a three-dimensional numerical model [J]. Hydrological Processes, 1998, 12 (8):1371-1396.

[43] BIRON P M, RAMAMURTHY A S, HAN S. Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(3):243-253.

[44] LI Gang, ABRAHAMS A D, ATKINSON J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21 (6):509-515.

[45] ZHU Hai, LIN Chang, WANG Lingling, et al. Numerical investigation of internal solitary waves of elevation type propagating on a uniform slope [J]. Physics of Fluids, 2018,30(11):116602.

[46] YAN Chao, NEPF H M, HUANG Weixi, et al. Large eddy simulation of flow and scalar transport in a vegetated channel [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2017, 17 (3):497-519.

[47] FISCHER H B, LIST E J, KOH R C Y, et al. Mixing in inland and coastal waters [M]. San Diego: Academic Press, 1979.

[48] DENEV J A, FRÖHLICH J, BOCKHORN H. Large eddy simulation of a swirling transverse jet into a crossflow with investigation of scalar transport [J]. Physics of Fluids, 2009,21(1):015101.

(收稿日期:2024-05-10 编辑:俞云利)