

液柱分离型水锤新空腔模型

赵莉¹, 范闯², 申虎贲¹, 颜建国³, 杨玉思⁴, 王彤⁴

(1. 西安航空学院能源与建筑学院, 陕西 西安 710077; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 3. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 4. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:为深入探讨液柱分离型水锤的模拟计算,通过改进离散空腔模型,提出了新空腔模型。新空腔模型考虑空腔处非满流的流态,根据前后管段的水流状态,将计算管段划分为7种类型,分别建立计算模块对空腔处管段进行分类计算,使其更为准确地计算空腔处的流量同时模拟空腔处的瞬变过程,并基于简单管路和复杂管路试验对新空腔模型进行了初步验证。结果表明,与DVCN相比,新空腔模型能够更准确地模拟瞬变过程中的压力波动和空腔形态、位置及空腔体积的变化,对水柱弥合过程的压力波动峰值的模拟更接近实测数据,有助于指导实际工程中的水锤安全防护。

关键词:瞬变流;液柱分离水锤;离散空腔模型;数值模拟

中图分类号:TV134.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)02-0037-05

New cavity model for water hammer with liquid column separation//ZHAO Li¹, FAN Chuang², SHEN Huben¹, YAN Jianguo³, YANG Yusi⁴, WANG Tong⁴(1. School of Energy and Architecture, Xi'an Aeronautical Institute, Xi'an 710077, China; 2. Central & South China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 3. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. School of Architecture and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to explore the simulation and calculation of a water hammer with liquid column separation, a new cavity model was proposed based on the improvement of a discrete vapor cavity model (DVCN). The non-full flow pattern in the cavity was considered in the new cavity model, and according to the flow state of the upstream and downstream sections, the calculated sections were divided into seven types. Calculation modules were established to calculate the classified cavity sections and the transient process of the cavity was simulated more accurately. The new model was preliminarily verified by simple pipeline and complex pipeline tests. The results show that compared with the traditional DVCN, the new cavity model can more accurately predict the pressure fluctuation, cavity shape, location and volume change in the transient flow. The simulation of the peak pressure fluctuation in the process of water column bridging is closer to the measured data, which helps to guide the safety protection of water hammer in engineering.

Key words: transient flow; water hammer with liquid column separation; discrete vapor cavity model; numerical simulation

长距离输水、城市供排水等工程的管道系统中经常由于停泵、快速关阀等不当操作,导致管道系统流速和压力发生剧烈变化^[1]。当压力下降到液体的蒸汽压力时,会产生液柱分离型水锤,严重时甚至会引发爆管现象^[2-4]。因此,准确模拟这一特殊的瞬变流现象,对于管道系统的安全运行至关重要。特征线法(method of characteristics, MOC)是基于连续流受力分析建立的运动方程和连续性方程,不适用于管道出现空腔时的水锤数值模拟,当管道出现蒸

汽型空腔时主要采用离散空腔模型(discrete vapor cavity model, DVCN)^[5-6]进行模拟。DVCN是一个经典的模型,它可以描述瞬态空化流的基本特征^[7]。然而,DVCN对瞬变过程中空腔形态及水气边界的变化无法准确模拟,从而导致弥合升压出现偏差。Adamkowski等^[8]为消除DVCN模型的非真实压力峰值,对DVCN进行了改进,以压力下降到蒸汽压力的第一个截面作为主截面,将邻近几个计算节点处的蒸汽空腔体积转移到此主截面进行计

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JM-211);西安市科技局高校院所人才服务企业项目(23GXFW0039);新疆水专项(2020.C-001)

作者简介:赵莉(1982—),女,副教授,博士,主要从事长距离输水安全防护研究。E-mail:22958531@qq.com

算。Simpson 等^[9]为消除 DVCM 的非真实压力峰值,提出了离散气体空腔模型(discrete gas cavity model, DGCM)。Soares 等^[10]研究表明, DGCM 可以减少数值振荡,避免一些不现实的压力峰值。上述模型对 DVCM 进行了局部修正,减小了水锤升压的计算误差,但对于空腔处流量计算仍存在较大误差,因此导致空腔的水气边界和形态变化过程无法准确模拟,进而影响空腔弥合压力计算的准确性。本文通过改进 DVCM,提出了新空腔模型,能够更为准确地计算空腔处的流量变化,同时能够模拟空腔处的瞬变过程,使计算结果更接近实际情况。

1 模型改进方法

1.1 空腔处的瞬变计算

对于连续流管段,仍然使用特征线法进行计算。当管段中出现汽化空腔,水流的连续性被破坏,非满流水体失去了压力传导特性,空腔处水锤波的传播被阻止,水流的惯性发挥主导作用。而特征线方程是基于连续流体中的水锤波传播理论推导得出,此时如果不做处理直接使用特征线方程,空腔管段的流量不满足连续性条件,将会导致空腔处的流量计算出现较大偏差,进而无法准确模拟空腔形态,同时影响水锤压力的计算。这是现有的离散空腔模型对空腔处的瞬态变化模拟不准的主要原因。本文对 DVCM 进行改进,并根据水气边界及水体惯性方向对管段的流态进行了细分,共划分为 7 种类型。根据管段中水的流态类型,选用不同的方法计算该管段的流量 $Q_{i,j}$ 、压力水头 $H_{i,j}$ 及管段中的水量体积 $W_{i,j}$,其中 i 为计算管段编号, j 为时间片段编号。

a. 类型 1:连续满流区,上下游管段均无空腔。判断依据: $W_{i-1,j} \geq P_{i-1}, W_{i,j} \geq P_i, W_{i+1,j} \geq P_{i+1}$, 其中 P_i 为第 i 管段容积。该类型节点的压力水头和流量分别为: $H_{i,j} = \frac{C_p + C_m}{2}; Q_{i,j} = \frac{C_p - C_m}{2B}$ 。其中, $C_p = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1}|Q_{i-1}|, C_m = H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1}|Q_{i+1}|, B, R$ 为计算常数。

b. 类型 2:完全空腔区,空腔完全占满整个管段。判断依据: $W_{i,j} \leq 0$ 。该类型节点的流量和水量分别为: $Q_{i,j} = 0; W_{i,j} = 0$ 。

c. 类型 3:空腔的上游边界即上游管段无空腔,下游管段有空腔。判断依据: $W_{i,j} < P_i, W_{i-1,j} \geq P_{i-1}, W_{i+1,j} < P_{i+1}$ 。该类型节点的流量为: $Q_{i,j} = \frac{C_p - H_{i,j}}{B}$ 。

d. 类型 4:空腔的下游边界即上游管段有空腔,下游管段无空腔。判断依据: $W_{i,j} < P_i, W_{i-1,j} <$

$P_{i-1}, W_{i+1,j} \geq P_{i+1}$ 。该类型节点的流量为: $Q_{i,j} = \frac{H_{i,j} - C_m}{B}$ 。

e. 类型 5:连续空腔区,且只与上游管段水流方向一致。判断依据: $W_{i,j} < P_i, W_{i-1,j} < P_{i-1}, W_{i+1,j} < P_{i+1}, \text{sgn}(Q_{i-1,j}) = \text{sgn}(Q_{i,j}), \text{sgn}(Q_{i+1,j}) \neq \text{sgn}(Q_{i,j})$ 。该类型节点的流量为: $Q_{i,j} = \frac{C_p - H_{i,j}}{B}$ 。

f. 类型 6:连续空腔区,且与上下游管段水流方向均一致。判断依据: $W_{i,j} < P_i, W_{i-1,j} < P_{i-1}, W_{i+1,j} < P_{i+1}, \text{sgn}(Q_{i+1,j}) = \text{sgn}(Q_{i,j}), \text{sgn}(Q_{i-1,j}) = \text{sgn}(Q_{i,j})$ 。该类型节点的流量为: $Q_{i,j} = \frac{C_p - C_m}{2B}$ 。

g. 类型 7:连续空腔区,且只与下游管段水流方向一致。判断依据: $W_{i,j} < P_i, W_{i-1,j} < P_{i-1}, W_{i+1,j} < P_{i+1}, \text{sgn}(Q_{i+1,j}) = \text{sgn}(Q_{i,j}), \text{sgn}(Q_{i-1,j}) \neq \text{sgn}(Q_{i,j})$ 。该类型节点的流量为: $Q_{i,j} = \frac{H_{i,j} - C_m}{B}$ 。

类型 1 为连续满流区,令管段中的水量体积等于管段容积;类型 2 ~ 7 均为空腔区,管段压力等于水体的汽化压力。除类型 2 水量为 0 外,类型 3 ~ 7 的水量体积均满足 $W_{i,j} = W_{i,j-1} + \Delta t \cdot \frac{1}{2}(Q_{i+1,j} - Q_{i-1,j} + Q_{i+1,j-1} - Q_{i-1,j-1})$, 其中 Δt 为计算时间步长。

图 1 列举了管路系统某时刻的两个局部空腔,标注了各管段所属的流态,管段中的数字代表管段的流态类型,管道下方数字代表管段编号,红色箭头代表管段水流的方向。图 1 中管段编号 3 ~ 7 的空腔正在收缩,管段编号 14 ~ 23 的空腔正在膨胀。

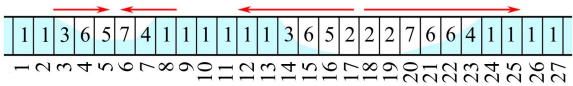


图 1 流态分类示意图

1.2 非恒定摩阻

根据 Brunone 非恒定摩阻模型理论^[11],水锤计算微分方程中的摩阻耗散项 J 可表示为

$$J = J_1 + J_2 = \frac{f_1}{D} \frac{v|v|}{2g} + \frac{K}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} - a \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (1)$$

其中 $K = \sqrt{C}/2$ 式中: J_1 为拟恒定摩阻耗散项; J_2 为非恒定摩阻耗散项; f_1 为达西摩擦因数; D 为管道内径; v 为流速; g 为重力加速度; a 为水锤波速; K 为 Brunone 摩阻系数; C 为剪切衰减系数。

根据雷诺数 Re 不同,使用不同公式计算上述参数:当 $Re \leq 2300$ 时,水流流态为层流,此时 $f_1 = \frac{64}{Re}$,

$C=0.0476$;当 $Re>2300$ 时,水流流态为紊流,此时 $f_1 = \frac{0.316}{Re^{0.25}}, C = \frac{12.86}{Re^\eta}$,其中 $\eta = \lg\left(\frac{15.29}{Re^{0.0567}}\right)$,将该摩擦损耗散项应用于水锤基本微分方程中^[12],便可对水锤计算模型压力震荡收敛缓慢的问题进行优化。

2 模型验证

2.1 简单管路系统验证

采用辛普森关阀水锤试验,试验由上游稳压水箱、管线、尾阀和下游水箱4部分组成。管线总长为36 m,直径为19.05 mm,厚度为1.588 mm,在管线36 m位置安装有一球阀。管线具有1 m高的高差,在管线沿线有3处压力监测点,分别位于9、27、36 m处。试验管路具体参数和流体主要参数见文献[13]。

由图2可见,相比DVCM模型,新空腔模型更接近实测值。以阀门处压力值为例,根据辛普森关阀试验的实测数据可以看出,瞬态过程中的最大压力出现在第二次升压,压力水头最大值为90.7 m,并于第二次升压开始压力波动逐渐变小,第三次升压压力水头峰值为70.2 m,第四次升压压力水头峰值为53 m。DVCM模型模拟得到的第二次升压压力

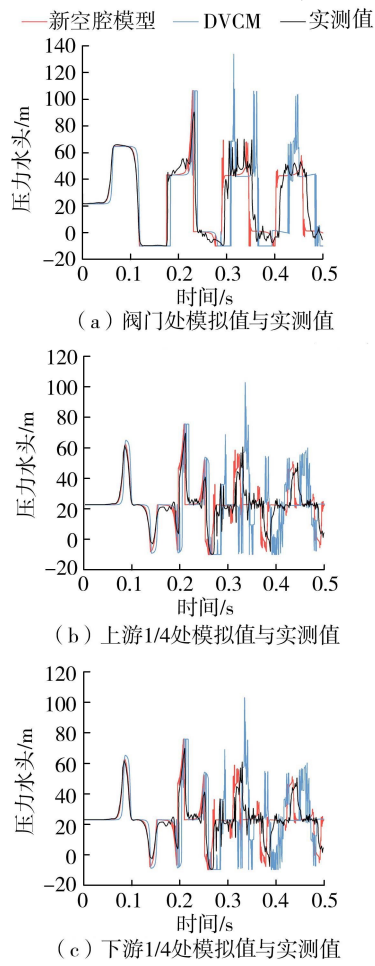


图2 简单管路水锤压力水头验证

水头最大值为106.6 m,略高于试验值。但在第三次升压时,出现了比第二次升压更大的压力波动,压力水头最大值为134.2 m。第四次升压压力水头峰值为103.8 m,压力波动无明显衰减。改进后的新空腔模型模拟得到的最大升压出现在第二次升压,压力水头最大值为106.8 m,且后续压力震荡数值与实测基本一致,第三次升压压力水头峰值为69.5 m,第四次升压压力水头峰值为53.9 m。压力波动的衰减与试验值一致。

综上所述,对于简单管路系统,无论是最大压力值还是压力波形,新空腔模型相比DVCM更接近实测值。

2.2 复杂管路系统验证

2.2.1 试验系统

从水泵出口快关阀至末端水箱总长为190.7 m,由DN100钢管和有机玻璃管组成。从水泵向高位水箱供水实现有压管路试验系统。高位水箱水位低于管道末端出口,管道末端采用敞口出流。试验管道布置如图3所示。通过停泵可以同时产生两处空腔,分别位于1号和2号有机玻璃观测管段处,并通过压力传感器分别记录空腔的瞬时压力变化过程。试验系统的水锤波速、管道沿程和局部阻力系数采用实测值,试验的设备和管路参数参见Zhao等^[14]的研究成果。

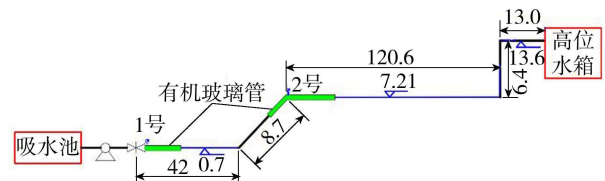


图3 试验系统布置示意图(单位:m)

通过对试验系统停泵工况的模拟计算来验证新空腔模型的准确性。试验系统正常运行时流量为70.5 m³/h,流速为2.49 m/s,关阀时间为0.4 s,此工况产生的断流空腔最为明显,因此选取此组工况进行对比验证。实测温度为24℃,气压为97.8 kPa,有机玻璃管的平均沿程阻力系数为0.01905,钢管的平均沿程阻力系数为0.0318,90°弯头的平均阻力系数为0.4921,45°弯头的平均阻力系数为0.2686。阀门阻力系数如下:90°开度的局部阻力系数为1.067,72°开度的局部阻力系数为1.283,54°开度的局部阻力系数为3.229,36°开度的局部阻力系数为171.987,18°开度的局部阻力系数为775.275,0开度的局部阻力系数为2000。实测钢管水锤波速为1222 m/s,有机玻璃管水锤波速为500.7 m/s。模型计算步长为0.1 m,即每个计算管段的长度为0.1 m。瞬变试验过程中,由于1号空腔在阀门处运动现象

不明显,因此选取运动现象明显的 2 号空腔运动的模拟值与实验室实测数据进行对比。

2.2.2 空腔瞬变过程验证

通过录像视频采集空腔运动的过程,进行模拟值和实测值的对比,对应的空腔形态见图 4。图 4(a)(c)(e)为模拟结果,图中管道中的浅蓝色表示水体,管道中的白色代表空腔。图 4(b)(d)(f)为试验结果,为突出实测录像中管道空腔位置,图中用亮线勾勒出水气交界面。

流态细分后的模型使得空腔区管段水流的连续性规律与真实管道基本保持一致。同时,由于空腔区管段压力均为汽化压力,水体受上下游管段压力相互抵消,与运动方程中所计算的受力情况一致。此时选取各流态所对应的相容性方程模拟计算,新空腔模型所得的空腔处流量误差比 DVCM 大大减小。通过试验对比验证,新空腔模型得到的空腔形态与空腔边界变化和实测结果较为一致。以水泵出口控制阀处为位置 0 点,沿着水流方向进行桩号标记。停泵时刻为时间 0 点,模拟与实测数据见表 1。

空腔瞬变过程验证的结果表明,新空腔模型模拟瞬变过程中空腔的运动过程与实测录像基本一致,空腔边界达到的位置(空腔的长度)与实测值接近。模拟的空腔水面曲线变化过程与实测图像还存在一定误差,主要原因是模型未考虑水气交界面的表面张力,对其他摩阻耗散项考虑不足。

表 1 瞬变过程中空腔位置变化

瞬变过程	空腔长度/m		发生时间/s	
	模拟值	实测值	模拟值	实测值
水平管空腔最大时	1.7	1.80		3.11
空腔整体长度最大时	2.2	2.65	3.8364	3.61
水平管空腔消失时	0.7	0.95	5.0739	4.64

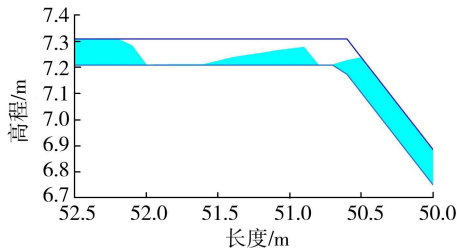
2.2.3 新空腔模型与 DVCM 的空腔体积对比

以 2 号空腔为例,比较 DVCM 与新空腔模型的空腔体积计算结果。图 5 为新空腔模型和 DVCM 计算的空腔体积,均为空腔最大时的数据。图 5 横坐标为空腔附近的管段标号,每个管段长度为 0.1 m,每个管段容积为 $7.853\,98\times10^{-4}\text{ m}^3$,纵坐标为对应管段中的空腔体积。

从图 5 可以看出,新空腔模型可以较好地模拟空腔区域的空腔体积,而 DVCM 计算的空腔体积会在某些管段中大大超过管段最大容积,附近其他管段的空腔体积也与实际相差较大,不符合实际情况。这是因为 DVCM 没有考虑管段容积的上限,并且空腔处非满流管段没有考虑水体运动惯性,因此空腔区域管段流量计算不准确,计算结果误差较大。

2.2.4 压力瞬变过程验证

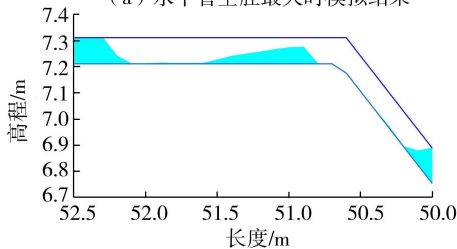
图 6 为 2 号测压点模拟值与实测值的对比,正常运行情况下 2 号测压点压力水头为 17.5 m,最大压力水头实测值为 51.8 m。DVCM 计算的最大压力水头为 129.6 m,且收敛性较差。新空腔模型结合恒



(a) 水平管空腔最大时模拟结果



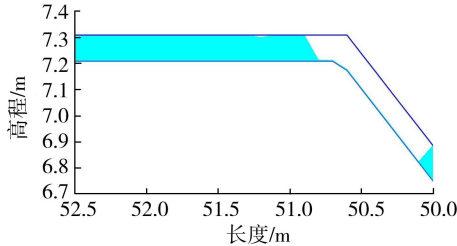
(b) 水平管空腔最大时试验结果



(c) 空腔整体长度最大时模拟结果



(d) 空腔整体长度最大时试验结果



(e) 水平管空腔消失时模拟结果



(f) 水平管空腔消失时试验结果

图 4 2 号空腔瞬变运动过程

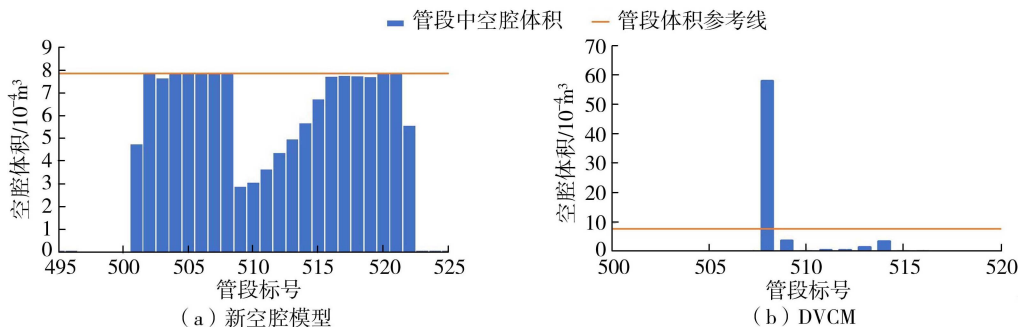


图5 新空腔模型与 DVCM 空腔体积仿真对比

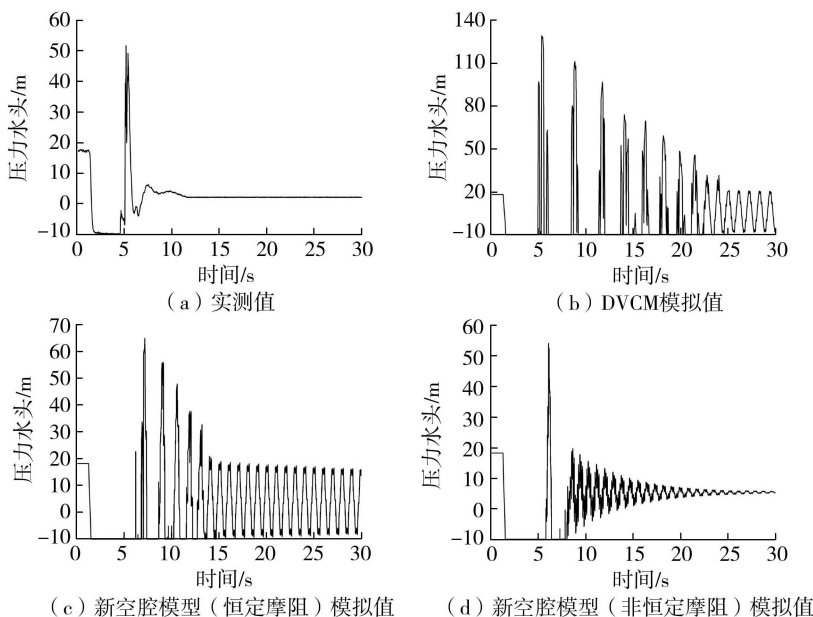


图6 2号测压点实测值与模拟值

定摩阻计算的最大压力水头为 66.9 m,且收敛性较差。新空腔模型结合非恒定摩阻计算的最大压力水头为 54.9 m,且收敛性较好。使用非恒定摩阻后,压力收敛速度加快^[15],但仍慢于试验数据,这是由于模型未考虑水气交界面的表面张力及存在某些其他能量耗散项,如实验室管道振动问题^[16-17]。综上所述,相比 DVCM,无论是最大压力值还是压力波形对比,新空腔模型都更接近实测值。当管路越复杂,空腔体积越大且存在的持续时间越长时,空腔模型对压力瞬态变化的影响越大。

3 结 论

a. 新空腔模型可以较准确地模拟瞬变过程中空腔的形态、位置及水气边界位置的变化。对各管段空腔体积的模拟值也比 DVCM 更为合理,应用新空腔模型计算得到的最大弥合升压数值比 DVCM 更接近实测值,有利于空气阀的安装位置指导及管道系统的水锤安全防护。

b. 简单管路系统和复杂管路系统的实测值与模拟值对比结果表明,相比 DVCM,新空腔模型对水柱弥合过程的压力波动峰值的模拟更接近实测值,且

在复杂管路中更能体现出新空腔模型的优势,这得益于新空腔模型对空腔形态及边界变化的准确模拟。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 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.
- [3] 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))

(下转第 53 页)

- innovative hourly water demand forecasting preprocessing framework with local outlier correction and adaptive decomposition techniques[J]. *Water*,2021,13(5):582.
- [16] ALSAQR A M. Remarks on the use of Pearson's and Spearman's correlation coefficients in assessing relationships in ophthalmic data[J]. *African Vision and Eye Health*,2021,80(1):a612.
- [17] EDEN S K, LI Chun, SHEPHERD B E. Nonparametric estimation of Spearman's rank correlation with bivariate survival data[J]. *Biometrics*,2022,78(2):421-434.
- [18] 余鹏明,管孝艳,陈俊英,等. 基于 Spearman 秩相关的再生水利用量影响因素研究[J]. *节水灌溉*,2019(10):78-82. (YU Pengming, GUAN Xiaoyan, CHEN Junying, et al. Study on factors affecting reclaimed water utilization based on spearman rank correlation[J]. *Water Saving Irrigation*,2019(10):78-82. (in Chinese))
- [19] SHEVADE S K, KEERTHI D S. Improvements to the SMO algorithm for SVM regression[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*,2000,11(5):1188-1193.
- [20] LECUN Y, BOSER B, DENKER J S, et al. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition[J]. *Neural Computation*,1989,1(4):541-551.
- [21] 陈珺,黄燕华,洪朋,等. 基于机器学习模型的河道水位预测[J]. *水利水电科技进展*,2023,43(3):9-14. (CHEN Jun, HUANG Yanhua, HONG Peng, et al. Prediction of river water level based on machine learning model[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2023,43(3):9-14. (in Chinese))
- [22] 郭冠呈,刘书明,李俊禹,等. 基于双向长短时神经网络的水量预测方法研究[J]. *给水排水*,2018,44(3):123-126. (GUO Guancheng, LIU Shuming, LI Junyu, et al. Study on water quantity prediction method based on bidirectional long and short time neural network[J]. *Water & Wastewater Engineering*,2018,54(3):123-126. (in Chinese))
- [23] 王亦斌,孙涛,梁雪春,等. 基于 EMD-LSTM 模型的河流水量水位预测[J]. *水利水电科技进展*,2020,40(6):40-47. (WANG Yibin, SUN Tao, LIANG Xuechun, et al. Prediction of river water flow and water level based on EMD-LSTM model[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2020,40(6):40-47. (in Chinese))

(收稿日期:2023-03-01 编辑:俞云利)

(上接第 41 页)

- [4] PAN T, ZHOU L, OU C, et al. Smoothed particle hydrodynamics with unsteady friction model for water hammer pipe flow[J]. *Hydraul Eng*, 2022,148:04021057.
- [5] BERGANT A, SIMPSON A R, TIJSELING A S. Water hammer with column separation; a historical review[J]. *Fluids Struct*,2006,22:135-171.
- [6] MOUSAVIFARD M, NOROOZ R. Numerical analysis of transient cavitating pipe flow by Quasi 2D and 1D models[J]. *Hydraul Res*,2022,60:295-310.
- [7] AUTRIQUE R, RODAL E, SÁNCHEZ A, et al. Physical model studies of water column separation[C]// 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Beijing:IOP,2012:1-8.
- [8] ADAMKOWSKI A, LEWANDOWSKI M. A new method for numerical prediction of liquid column separation accompanying hydraulic transients in pipelines[J]. *Hydraul Eng*, 2009,131:071302.
- [9] SIMPSON A R, BERGANT A. Numerical comparison of pipe-column-separation models[J]. *Hydraul Eng*,1994,120:361-377.
- [10] SOARES A K, MARTINS N, COVAS D I C. Investigation of transient vaporous cavitation: experimental and numerical analyses[C]// Proceedings of Computing and Control for the Water Industry (CCWI2015):Sharing the Best Practice in Water Management. Leicester, England; [s. n.],2015:235-242.
- [11] BRUNONE B, GOLIA U M, GRECO M. Some remarks on the momentum equation for fast transients[C]// Proc Int Conf on Hydraulic Transients with Water Column Separation. Valencia, Spain;[s. n.],1991:140-148.
- [12] VARDY A, BROWN J. Transient turbulent friction in smooth pipe flows[J]. *Journal of Sound and Vibration*,2003,259(5):1011-1036.
- [13] SIMPSON A R. Large water hammer pressures due to column separation in sloping pipes(transient cavitation)[D]. Michigan:University of Michigan,1986.
- [14] ZHAO L, YANG Y, WANG T, et al. An experimental study on the water hammer with cavity collapse under multiple interruptions[J]. *Water*,2020,12:2566.
- [15] 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*, Madrid, 2020,40(2):69-75. (in Chinese))
- [16] AHME D F, EAMES I, AZARBADEGAN A, et al. Acoustics and vibrations in a complex piping network with pump startup-shutdown transients[J]. *Int J Mech Sci*,2022,227:107357.
- [17] MIAO Y, QIU Z, ZHANG X, et al. Effects of a water hammer and cavitation on vibration transients in a reservoir-pipe-valve system[J]. *Theor Appl Mech*,2021,59:611-622.

(收稿日期:2023-01-08 编辑:骆超)