

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.15.006

## 含泄漏供水管道瞬变流动特征及泄漏定位

杨振东, 曹亚龙, 张巧玲, 赵思茂, 曹佳豪, 吴峰, 李国栋  
(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对长距离供水管道泄漏问题,采用CFD软件研究了供水管道内瞬变流动特性,分析了管道泄漏点位置的检测机制。基于流体的瞬变模型法及径向基函数(RBF)神经网络方法,开展了供水管道泄漏定位研究。利用Flowmaster仿真软件中的水力模型建立长度为1 000 m的一维管路系统,并针对此系统进行了不同泄漏位置下的数值仿真计算以产生训练样本,借助RBF神经网络开展了泄漏工况下的网络训练和预测。结果表明,瞬变流过程中泄漏孔的存在对直管道水锤波的传播周期影响较小;管道泄漏孔的存在引起压力波传播畸变,在周期首相的压力幅值变化更为明显;在出口位置设置激励和监测点的条件下,泄漏孔距离出口越近,检测点信号衰减越快;RBF神经网络具有较强的监测能力及抗噪性能。

**关键词:** 供水管道; 泄漏定位; 瞬变流; RBF神经网络

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)15-0035-06

## Transient Flow Characteristics and Leakage Location of Water Supply Pipeline with Leakage Points

YANG Zhen-dong, CAO Ya-long, ZHANG Qiao-ling, ZHAO Si-mao, CAO Jia-hao,  
WU Feng, LI Guo-dong

(Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to solve the leakage problem of long-distance water supply pipeline, transient flow characteristics in a water supply pipeline were explored by using CFD software, and the detection mechanism of the pipeline leakage point was analyzed. Based on fluid transient model method and RBF neural network method, leakage location of the water supply pipeline was explored. A one-dimensional pipeline system with a length of 1 000 m was established by hydraulic transport model in Flowmaster simulation software. For this system, numerical simulation calculations at different leakage locations were carried out to generate training samples, and network training and prediction under leakage condition was carried out by RBF neural network. The presence of leakage holes in transient flow process had little effect on propagation cycle of water hammer waves in straight pipes. However, it would cause distortion of pressure wave propagation, and the change of pressure amplitude was more obvious at the beginning of a cycle. When excitation and monitors were set at the exit position, the closer the leak hole was to the

outlet, the faster the signal attenuation at the detection point would be. The RBF neural network had a strong monitoring capability and anti-noise performance.

**Key words:** water supply pipeline; leakage location; transient flow; radial basis function neural network

随着经济社会的发展,城市用水、工业用水和农业灌溉需求量快速增长<sup>[1]</sup>。但是我国淡水资源空间分布极其不均,长距离跨流域的调水成为了解决资源型或水质型缺水问题的重要途径。长距离有压管道输水是城市原水一级输送的主要形式。一旦发生管道泄漏,除了会影响正常生产外,还会因水体流失造成经济损失,对局部环境产生破坏等后果。

可靠的输水管道泄漏检测与定位是降低泄漏损失、预防爆管事故的基础保障。管道泄漏的防微杜渐是管道使用的第一要务,管道泄漏检测作为一个系统性的复杂问题,其方法不断推陈出新。电缆监测法、声学检漏法、光纤传感检漏法以及智能球法等直接检测方法与质量流量平衡法、负压波法、压力梯度法、瞬变流模型法等间接检测方法各有优势,使用范围有所不同<sup>[2]</sup>。瞬变流模型法的监测原理是在正常运行的管道末端或者控制端处通过关闭阀门,亦或加入周期性的脉冲波引入激励的形式,让压力信号在管道中传播,通过分析压力信号途经泄漏孔处产生的压力损失特征来确定泄漏位置<sup>[3]</sup>。现阶段瞬变流模型法因检测精度较高、投资相对合理、在线应用和后期维护方便,且适用范围广而受到学者的关注。长距离输水常通过调节阀门开度来满足对需水量的调整,阀门开度调节为有压管道实施瞬变流模型法提供了可能,阀门开度调节可以作为扰动激励。

郭新蕾等<sup>[4]</sup>针对管道瞬变流的研究做了大量的工作,通过传递矩阵法分析了由阀门的定期打开和关闭产生的稳态振荡流,并绘制了阀门处的频率响应图。考虑非恒定摩阻的影响可进一步提高泄漏检测的精度,范晓丹<sup>[5]</sup>结合 Brunone 的 Instantaneous Acceleration Based (IAB) 经典摩阻模型和 TVD 格式模拟了水击瞬变的压力峰值衰减和畸变全过程。现有研究表明,当实际管道中存在泄漏点时,波动信号的特征与无泄漏情况存在差异。利用小波方法分析首个瞬变压力波衰减和畸变的关键点来辨识泄漏信息,其优势更明显<sup>[6]</sup>。近年来,随着机器学习技术的发展,很多学者采用神经网络实现工程问题模式

识别与寻优<sup>[7]</sup>。

综上所述,利用非恒定流中压力波的传播特性可以实现泄漏定位,但有压管道中压力波传播机制较为复杂,受到物理性质、泄漏点大小、泄漏点位置等诸多因素的影响。各影响因素制约着微小泄漏的识别,理清各因素对泄漏定位的影响意义明显。基于此,笔者对含泄漏孔的管道进行了精细模拟,分析了有、无泄漏两种状态下管内压力波的传播特征,并采用径向基函数(RBF)神经网络对模拟泄漏点进行定位检测。

## 1 计算模型

### 1.1 几何模型及工况

将具体的实际问题抽象成简单的物理模型并进行 CFD 精细模拟,模型管道长度均为 100 m,管道直径为 65 mm。本次数值模拟工况见表 1。

表 1 数值模拟工况

Tab. 1 Numerical simulation conditions

工况编号	管道长度/m	泄漏孔相对进口沿程距离/m	出口压力/kPa	进出口压差/kPa	阀门关闭时间/s
工况 1	100	无泄漏	100	50	0.01
工况 2	100	25	100	50	0.01
工况 3	100	50	100	50	0.01
工况 4	100	75	100	50	0.01

### 1.2 控制方程

湍流模型是目前应用最广泛的两方程紊流模型,实验室测试结果表明,近壁面处理采用标准壁面函数法,该模型可以很好地预测管道内水体的流动。

本研究采用有限体积法对控制方程进行离散,控制方程中对流项采用二阶迎风格式,联立动量方程和连续性方程,采用 SIMPLE 算法求解变量。所用工质为水,忽略热量的交换与损失。入口边界条件设为压力进口,出口设为压力出口,出口压力约为 100 kPa。为模拟瞬态波的传输特性,水的物理性质设置为可压缩流体,密度取  $998.2 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量取  $2.2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ,泊松比为 0.5。

### 1.3 边界条件

管道在特定位置加上泄漏孔,将本研究中的泄

漏孔模型简化为一段细小管道,直径为 3 mm,长度为 20 mm,泄漏孔面积占管道截面积的 0.213%。管道末端采用动态边界条件设置,设定流量( $q$ )与时间( $t$ )的函数关系用来代替阀门的关闭开度,流量线性减半。以用户自定义函数(UDF)定义管道出口参数。泄漏口处网格采用非结构化网格划分并进行边界层加密,泄漏口处网格如图 1 所示。

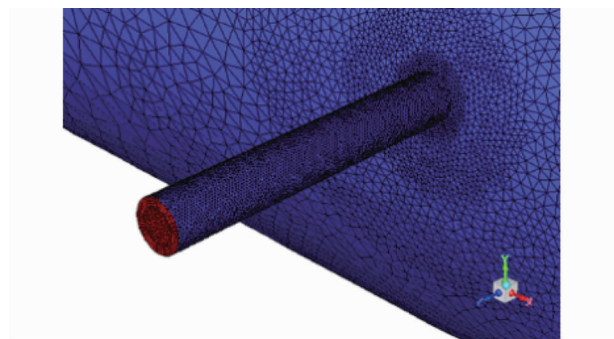


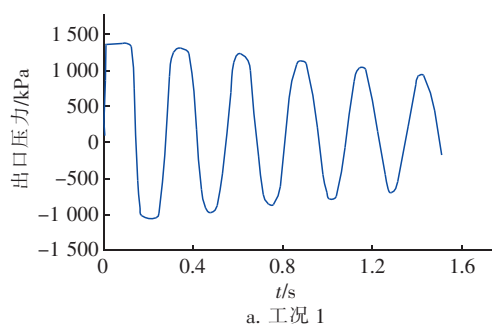
图1 泄漏孔模型

Fig. 1 Model of leakage hole

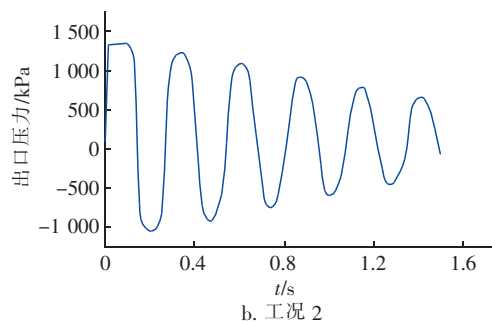
## 2 模拟结果与分析

### 2.1 泄漏管道内的波动传播特性分析

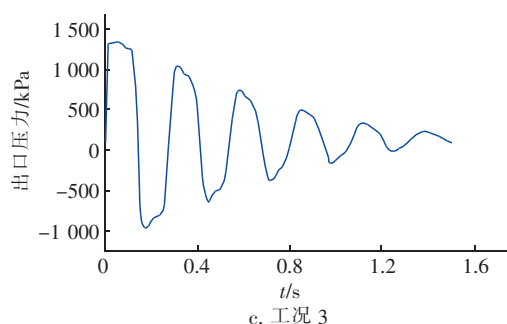
管道内的波动传播特性如图 2 所示。可以看出,工况 4 中管道末端压力衰减速度最快,压力波在 4 个水锤周期之后基本趋于稳定。工况 2 中管道末端的压力振幅相较于无泄漏工况仅有所减小,在水锤传播 5 个周期后管道末端仍有明显的压力波动。可见,泄漏孔位置更靠近管道末端时,管道末端压力衰减更快,泄漏更容易被识别。



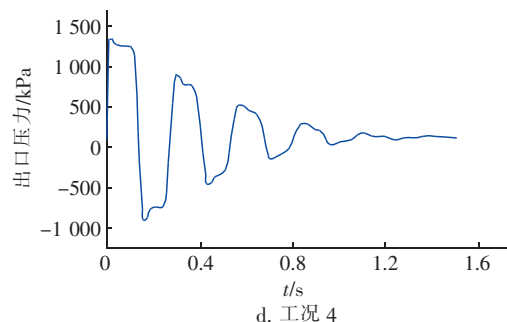
a. 工况 1



b. 工况 2



c. 工况 3



d. 工况 4

图2 直管道工况末端出口压力与时间的关系

Fig. 2 Relationship between outlet pressure and time at the end of a straight pipe

无泄漏管道的管道末端压力变化符合直接水锤下管道末端压力变化的规律,通过计算其周期为 0.278 s。对比泄漏工况与无泄漏工况的压力波传播特性,泄漏管道的周期通过峰值相关法进行统计推算,其水锤波周期趋于一致都认定是 0.278 s,即在瞬变流过程中泄漏孔的存在对直管道水锤波的传播周期影响不大。

瞬变过程中泄漏孔泄漏量的变化规律见图 3。

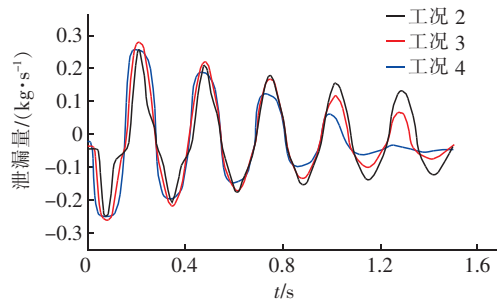


图3 动态边界条件下直管道泄漏工况泄漏量与时间的关系

Fig. 3 Relationship between leakage and time of a straight pipe under dynamic boundary conditions

管道的泄漏量与泄漏孔处的压力有密切关系。在模拟过程中未考虑两相流,因此存在压力低而未空化的现象。本研究泄漏孔外部设置为流体域,所以在泄漏孔出现负压时水吸入管道。泄漏孔处的流

量有向外射出工质的峰值,也有向内吸入外界工质的峰值,其与泄漏孔处负压出现时刻相吻合。

## 2.2 泄漏管道的定位机制

对比分析 100 m 长度的直管道在泄漏工况与无泄漏工况下的瞬变流数值模拟结果,从而总结出进行直管道泄漏定位的具体方法。图 4 为直管道出口压力随时间的变化趋势。可以看出,泄漏位置不同,其压力波幅衰变量亦有差异,同时也能明显观察到压力波在第一周期中剧烈变动位置与泄漏位置紧密相关。由此可知,根据泄漏管道第一相水锤的压降变化可以判断出泄漏孔的位置。存在泄漏时,泄漏位置处会产生反射波,其与来波发生叠加,这是第一相的水锤压力发生衰减的本质原因。在压力波传播时间  $0 < t < 2L/C$  时,管道末端为升压段,压力值保持为最大水锤压力值。因泄漏位置反射传播至此的压力波,其反射波与原压力波在管道末端处两波叠加造成波幅下降。叠加时刻与泄漏位置密切相关,两波叠加后产生压降,该压降发生的时刻理论上应是压力变化率最大值所对应的时间点。

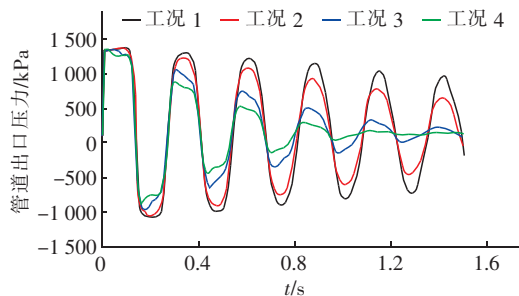


图 4 直管道出口压力随时间的变化趋势

Fig. 4 Change trend of a straight pipe outlet pressure with time

图 5 为直管道瞬变流工况下管道末端压力变化率随时间的变化趋势。可以看出,工况 2、3、4 不同泄漏位置对应的第一相水锤压降变化率最大值所对应的时间点分别为  $t_{\text{trans工况2}} = 0.107 \text{ s}$ 、 $t_{\text{trans工况3}} = 0.073 \text{ s}$ 、 $t_{\text{trans工况4}} = 0.039 \text{ s}$ 。推求出直管道泄漏位置分别为  $L_{\text{工况2}} = 75.874 \text{ m}$ 、 $L_{\text{工况3}} = 51.281 \text{ m}$ 、 $L_{\text{工况4}} = 27.329 \text{ m}$ ,可见与预设泄漏孔的位置相差最大为 2.3%。但管道运输系统具有强非线性和强干扰性等特点,实际运行中的管道通常存在噪声干扰和输入输出信息缺失的情况,难以简单地通过纯理论分析实现管道泄漏位置的识别,神经网络辨识在解决辨识问题方面具有较大的优越性。

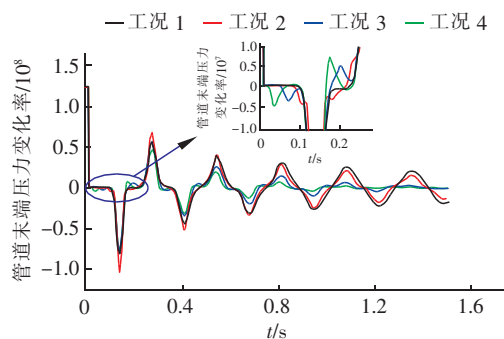


图 5 直管道瞬变流工况下管道末端压力变化率随时间的变化趋势

Fig. 5 Change trend of pressure mutative rate at the end of a straight pipe with time under transient flow conditions

## 2.3 径向基神经网络管道泄漏定位

径向基神经网络是一种前馈型的神经网络,其网络结构包含输入层、隐含层、输出层 3 层,从输入节点到隐含层节点的变换是非线性的,而从隐含层节点到输出节点的变换是线性的(见图 6)。高斯函数因形式简单,整体上为正态分布,在径向上对称且各阶导数都存在,易于进行理论分析,其常作为基函数,本研究采用高斯函数作为径向基函数。

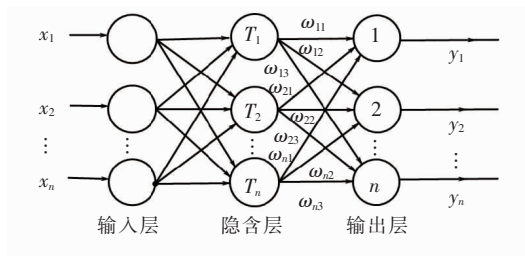


图 6 神经网络示意

Fig. 6 Schematic diagram of neural network

为了提高生产数据的效率,采用 Flowmaster 软件对管道进行建模,并收集不同泄漏位置下管道内的波动数据。模型为含一段分叉管道的 1 000 m 长直管道,上游水位设为 30 m,下游水位设为 27.7 m,管道直径为 0.2 m。模型采用定波速,  $a = 1\,000 \text{ m/s}$ ,下游主管阀门快速关闭,分叉管下游阀门为常开状态,分别取不同泄漏位置进行仿真模拟,计算步长为 0.01 s,采集总时长为 20 s。以模型生产的数据作为训练集和测试集,训练 RBF 神经网络,RBF 神经网络神经元个数为 1 000,当扩散因子设置为 100 时各测点绝对误差的平均值达到最小,选定该值作为计算参数。在现有参数设置下,共产生 37 组数据,其中 33 组数据作为训练集数据,4 组数据作为测试数据。将测试数据输入训练后的模型,模型将



输出泄漏位置。输入数据为二维矩阵形式,见式(1)。矩阵由33组列向量组成,分别对应33组训练数据,每一个列向量表示压力波幅值的时间序列,数值表示压力大小。径向基神经网络预测结果如图7所示。

$$\begin{bmatrix} 3.656\ 33 & 3.656\ 33 & \cdots & 3.656\ 33 & 3.656\ 33 \\ 3.657\ 90 & 3.657\ 91 & \cdots & 3.658\ 00 & 3.658\ 11 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 3.662\ 54 & 3.662\ 59 & \cdots & 3.662\ 93 & 3.663\ 38 \end{bmatrix} \quad (1)$$

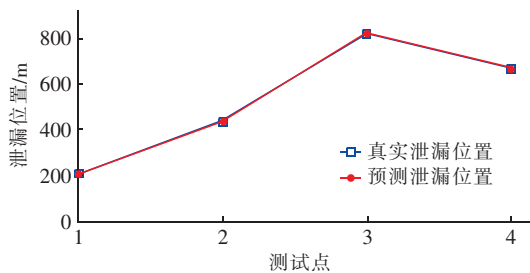


图7 测试数据泄漏位置真实值与预测值对比

Fig.7 Comparison of leakage position actual value and predicted value of the test data

从图7可以看出,预测值与真实泄漏位置误差很小,最大相对误差为0.54%,4个测试点上的数据基本重合,证实了径向基神经网络算法结合瞬变流模型的方式可以实现泄漏检测。

在泄漏检测时,考虑管道的环境噪声和测量仪器的测量精度,测点上采集到的信号是有噪声的,为了检验训练的神经网络对含噪声信号的识别能力,人为加入白噪声。白噪声采用rand函数,产生0~1之间随机分布的数组,现有计算模型下1倍的白噪声约为监测信号的10%。加入白噪声后信号的特征如图8所示。可以看出,加噪声之后的信号一直围绕原始信号波动,显然噪声信号的幅值越来越大,信号波动也越来越明显,与原始信号的相似程度也越来越差。

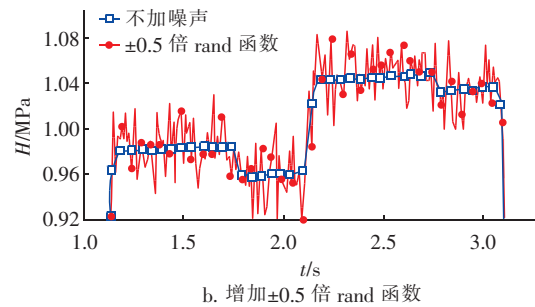
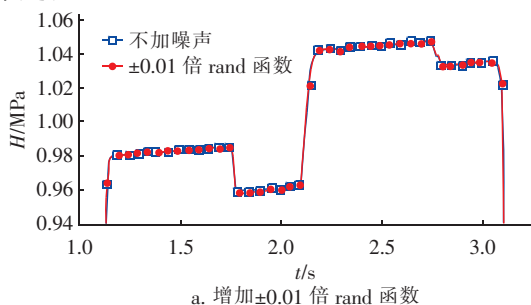


图8 加入不同幅度rand函数的变化

Fig.8 Change of rand function of different amplitudes

在阀门末端压力波中加入0.01倍rand函数的噪声后,人为设置泄漏位置在202、440、670和820 m处,神经网络预测位置分别为203.85、437.29、670.04、822.78 m,最大偏差为2.78 m,相对误差在1%以内;当加入了0.5倍rand函数的噪声后,进行泄漏位置的预测,人为设置泄漏位置在202、440、670和820 m处,预测位置分别为195.97、438.38、665.72和816.93 m,最大偏差为6.03 m,相对误差在3%以内,最大偏差出现在202 m位置。由此可以看出,在噪声信号幅值较小时,预测值与真实值之间的误差较小,噪声信号幅值较大时预测值与真实值之间的误差也不断增大,但即使在0.5倍rand函数的噪声信号下泄漏定位的最大相对误差仅为3%。整体来说,本研究建立的RBF神经网络可以很好地进行预测,在精确建模前提下,RBF神经网络对采集到的含噪声数据也具有较强的识别能力,抗噪声能力强。

为分析泄漏孔大小对管道泄漏检测及定位的影响。模拟中分别采用直径为6、8、12、15和20 mm的泄漏孔进行研究,泄漏孔的位置均在距离管道进口670 m处。表2给出了不同泄漏孔条件下模型定位的相对误差。可以看出,相同位置处泄漏孔的大小对泄漏定位的影响并不显著,且定位误差限都在1.5%以内。

表2 泄漏孔大小对泄漏定位的影响

Tab.2 Influence of leakage hole sizes on leakage location

泄漏孔直径/mm	实际泄漏位置距进口的距离/m	定位位置距进口的距离/m	定位误差限/%
6	670	668.59	0.14
8	670	672.01	0.20
12	670	668.22	0.18
15	670	672.55	0.26
20	670	655.85	1.42

### 3 结论

① 采用 CFD 仿真精确计算供水管内压力的传播过程,本算例下周期为 0.278 s,与理论值基本一致。对比泄漏工况与无泄漏工况的压力波传播特性,泄漏孔的存在对压力波周期的影响很小。

② 在管道出口设置激励点和监测点的情况下,泄漏孔距离出口越近,瞬变压力波衰减越快。泄漏点位置不同,压力波的首个周期中压力畸变的位置差异明显。

③ 在精确建模条件下,RBF 神经网络对采集到的含噪声数据具有较强的识别能力,模型抗噪声能力强。

### 参考文献:

- [1] 梁焱. 城市供水管网瞬变流模型研究与应用示范 [D]. 北京:清华大学,2016.  
LIANG Yi. Research on Water Distribution Network Transient Flow Model and Its Application Demonstration [D]. Beijing:Tsinghua University,2016(in Chinese).
- [2] 张毅鹏. 管道瞬变流特性与泄漏检测数值模拟和试验研究 [D]. 武汉:武汉大学,2018.  
ZHANG Yipeng. Numerical Simulation and Experimental Research on Transient Characteristic and Leak Detection of Pressurized Pipeline [D]. Wuhan:Wuhan University, 2018(in Chinese).
- [3] 佟淑娇,吴宗之,王如君,等. 基于 TLNET 的长输油管道瞬变泄漏模拟与分析 [J]. 安全与环境工程,2016,23(1):128-132,139.  
TONG Shujiao, WU Zongzhi, WANG Rujun, et al. Simulation and analysis of transient leakage for long distance oil pipelines based on TLNET [J]. Safety and Environmental Engineering,2016,23(1):128-132,139

(in Chinese).

- [4] 郭新蕾,杨开林,郭永鑫,等. 管道系统泄漏检测的瞬变水击压力波法 [J]. 应用基础与工程科学学报,2011,19(1):20-28.  
GUO Xinlei, YANG Kailin, GUO Yongxin, et al. Transient pressure rise method for leak detection in pipeline systems [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2011,19(1):20-28(in Chinese).
- [5] 范晓丹. TVD 格式数值模拟四通管水击过程研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.  
FAN Xiaodan. Study on the Numerical Simulation Model of Water Hammer in Four-way Pipe with TVD Scheme [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017 (in Chinese).
- [6] 郭新蕾,马慧敏,李甲振,等. 管道系统漏损控制技术进展 [J]. 水利水电技术,2018,49(6):65-71.  
GUO Xinlei, MA Huimin, LI Jiazhen, et al. Review on advance of technique for leakage control of pipeline system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2018,49(6):65-71(in Chinese).
- [7] 曹峥,邓建强,王泽良,等. 基于 Elman 神经网络的流体管道泄漏点检测定位 [J]. 装备环境工程,2020,17(4):8-13.  
CAO Zheng, DENG Jianqiang, WANG Zeliang, et al. Leakage detection and localization of fluid pipeline based on Elman neural network [J]. Equipment Environmental Engineering,2020,17(4):8-13(in Chinese).

作者简介:杨振东(1986-),男,山东莱芜人,博士,讲师,主要研究方向为输水管道瞬变流特征及泄漏定位。

E-mail:yangzhendong@xaut.edu.cn

收稿日期:2020-07-28

修回日期:2020-11-18

(编辑:任莹莹)

做好水文监测分析预报,保障国家水安全