DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.03.008

基于 Flowmaster 的输水管道泄漏仿真模拟

杨振东[1,2]，曹亚龙[1,2]，张巧玲[1,2]，赵思茂[1,2]，李国栋[1,2]，常维宁[3]

(1.西安理工大学 水利水电学院，陕西 西安 710048；2.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；3.浙江花园新能源有限公司，浙江 金华 322100)

摘要： 输水管道泄漏事故时有发生，快速、准确地判断泄漏位置及泄漏量一直是研究的热点。运用 Flowmaster 仿真软件对输水管道泄漏过程进行模拟，研究了管内流体的瞬变特性，分析了有、无泄漏时，不同阀门关闭时间、泄漏孔大小、泄漏位置等参数对管道瞬变流动规律的影响。结果表明：入口流量以及阀门末端处压力受阀门关闭时间的影响较小；随着泄漏孔径的增大，上游流量和压力曲线的衰减速度逐渐加快，且峰值处二次突变幅值增大；泄漏位置受阀门距离的影响较大，距离越近，压力信号的幅值下降越迅速，衰减速度也会逐渐加快。该仿真结果可为瞬变流泄漏检测提供理论指导。

关键词： 泄漏检测；泄漏位置；Flowmaster 软件；仿真模拟

中图分类号： TV134.1　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1006-4710(2021)03-0361-06

Simulation study of pipeline leakage based on Flowmaster

YANG Zhendong[1,2], CAO Yalong[1,2], ZHANG Qiaoling[1,2], ZHAO Simao[1,2], LI Guodong[1,2], CHANG Weining[3]

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Zhejiang Huanergy Co., Ltd, Jinhua 322100, China)

Abstract: Water pipeline leakage accidents have occurred, which has been a hot research topic to quickly and accurately determine the location and leakage of leaks. The Flowmaster simulation software was used to simulate the leakage process of the water pipeline, with the transient characteristics of the fluid in the pipeline studied. The effects of different valve closing time, leakage hole size and leakage position on the transient flow law of the pipeline were analyzed. The results show that the inlet flow and the pressure at the end of the valve are less affected by the valve closing time. With the increase of the leakage aperture, the attenuation rate of the upstream flow and pressure curves is accelerating, and the amplitude is abrupt. The leakage position is greatly affected by the distance of the valve. The closer the distance is, the faster the pressure signal drop; the attenuation speed gradually accelerates. The simulation results provide theoretical guidance for transient flow leakage detection.

Key words: leak detection; leakage position; Flowmaster software; numerical simulation

长距离输水管道在各个领域都发挥着不可替代的作用，特别是在工、农业生产生活中，扮演着水资源运输、调配等重要角色。输水管道已在生产、生活中无处不在，难免会产生泄漏、破坏等一系列问题，如若不能及时发现，所造成的损害可能是不断加剧的，甚至是灾难性的，所以需要及时、准确、快速地确定泄漏位置，才能把对资源的浪费以及经济损失降到最低。

收稿日期： 2019-09-18；　**网络出版日期：** 2021-04-13

网络出版地址： https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20210413.1400.006.html

基金项目： 国家自然科学基金青年基金资助项目(51706180,51906201)；陕西省水利科技计划资助项目(2016slkj-14)；陕西省教育厅科学研究计划专项资助项目(16JK1542)

第一作者： 杨振东，男，博士，讲师，研究方向为高速水力学、瞬变流、气液两相流。E-mail: yangzhendong@xaut.edu.cn

近年来,国内外有关学者就输水管道的泄漏检测及定位问题开展了相关研究。陆少鸣等[1]采用沿线实时测压法来监测输水管道的泄漏,并监测泄漏位置及泄漏率,实现了在 3～5 分钟内对 1%的爆漏量报警。Jia 等[2]提出使用一系列裸光纤布拉格光栅(FBG)传感器来检测和定位管道泄漏。近年来,管道泄漏检测技术层出不穷[3],但瞬变流检测法[4,5]依旧占据着举足轻重的地位,它可根据阀门末端的压力变化来辨识泄漏量和泄漏位置。Ferrante 等[6]考虑到瞬间关闭阀门可以产生脉冲信号,故把管道末端产生的压力信号放在频域中进行求解,并且为了更加高效和准确地检测泄漏,文中采用小波变换法进行信号处理。Gong 等[7,8]通过频率响应来确定泄漏位置及泄漏大小,并对比了频率响应图的奇次和偶次信号对泄漏检测的影响。Kim[9]基于阻抗法构建了频域响应函数,分析了泄漏、摩擦系数、波速、管道长度和阀门关闭时间等参数的影响。郭新蕾等[10,11]构建了考虑非恒定摩阻的管道瞬变流数学模型。

管道泄漏检测技术是目前亟需改进、完善和解决的重要课题,随着计算机技术等诸多关联学科的日渐成熟,多种方法相结合成为泄漏检测技术发展的必然趋势。Sun 和曹峥[12,13]等采用神经网络和基于数据的驱动方法实现了泄漏定位。

通过瞬变流检测法定位泄漏,本质上是根据已知流场确定边界条件的反问题求解。管内流场数据包括管道实际运行中的各种工况数据源,无法通过有限的监测点获得,但各工况下的管道压力和流量数据却是泄漏定位和监测运行的基础,因此,通过精准建模并通过 CFD 方式获取管道内的运行参数,成为获取数据源的一种重要途径。利用成熟的商用软件是获取基础数据的方式之一。付锴等[14]利用 Flowmaster 软件模拟输水管道发生水锤时管内压力和空腔的波动变换,分析了水锤对下游末端设备的压力影响。吴绍科等[15]应用 Flowmaster 软件搭建离心泵运行模型,获得了离心泵的瞬时启动转速、流量、功率和出口压力的特性曲线,进而进行了量纲化分析。

Flowmaster 可实现离心泵及输水管道的水锤流动仿真。为了深入研究输水管道泄漏瞬时过程特性,本文采用 Flowmaster 仿真分析软件对输水管道泄漏进行数值模拟,在瞬变水击过程中模拟了不同泄漏位置、阀门关闭时间、泄漏孔大小等参数的影响,并且分析了有、无泄漏状态下各参数的瞬态变化规律,研究结果可为瞬变流泄漏检测的实际应用提供理论指导。

1 Flowmaster 仿真模型

为了更好地模拟管道泄漏时的运行特征,本文利用 Flowmaster 软件对不同泄漏位置、泄漏孔大小以及阀门关闭时间进行仿真模拟,其计算模型如图 1 所示。管道全长为 100 m,实验管段的有效长度为 90 m(即从水库上游起始端到阀门处管道的长度为 90 m),这段管道的内径为 0.04 m,而管壁的绝对粗糙度参考工程实例取为 0.025 mm,下游水库水位为 2 m,管道上端上游水库水位为 50 m,并且在管道 90 m 位置处安装一阀门,管道内水击波的传播速度为 1 000 m/s。如若管道发生泄漏,泄漏孔外界的压力为大气压。

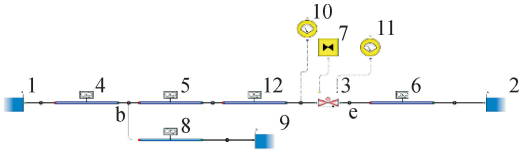


图 1 简单直管泄漏的 Flowmaster 建模模型

Fig. 1 Flowmaster model of pipe leakage

图 1 中,元件 1 处为上游恒水位水库、2 处为下游恒水位水库、9 连接外界大气压;元件 4、5、6、12 代表可压缩弹性管段;元件 3 代表球型阀门,元件 7 代表控制器,元件 10、11 代表显示仪表,通过元件 11 观察阀门的开关情况;节点 e 用来监测阀门末端压力流量变化,节点 b 代表泄漏点;通过在管道 40m 处(节点 b)连接一长为 1 mm、内径为 ad 的管道元件 8 来表示发生泄漏。计算时长设置为 20s,而计算时间的步长设置为 0.002 s,所需数据主要包括:泄漏节点 b、节点 e 阀门末端的压力变化,以及元件 4 的流入流量和元件 8 的泄漏流量。

2 仿真模型验证

作者在文献[16]中建立了考虑非恒定摩阻的管道瞬变流模型,并与郭新蕾[10]的实验数据进行了对比,吻合很好。本文对比分析了 Flowmaster 仿真结果与编程模拟结果,验证了仿真计算的正确性,如图 2 所示。

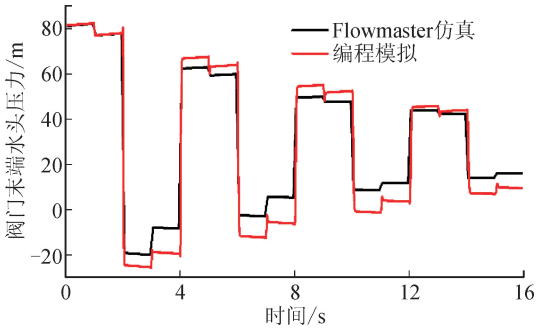


图 2 阀门末端压力变化对比图

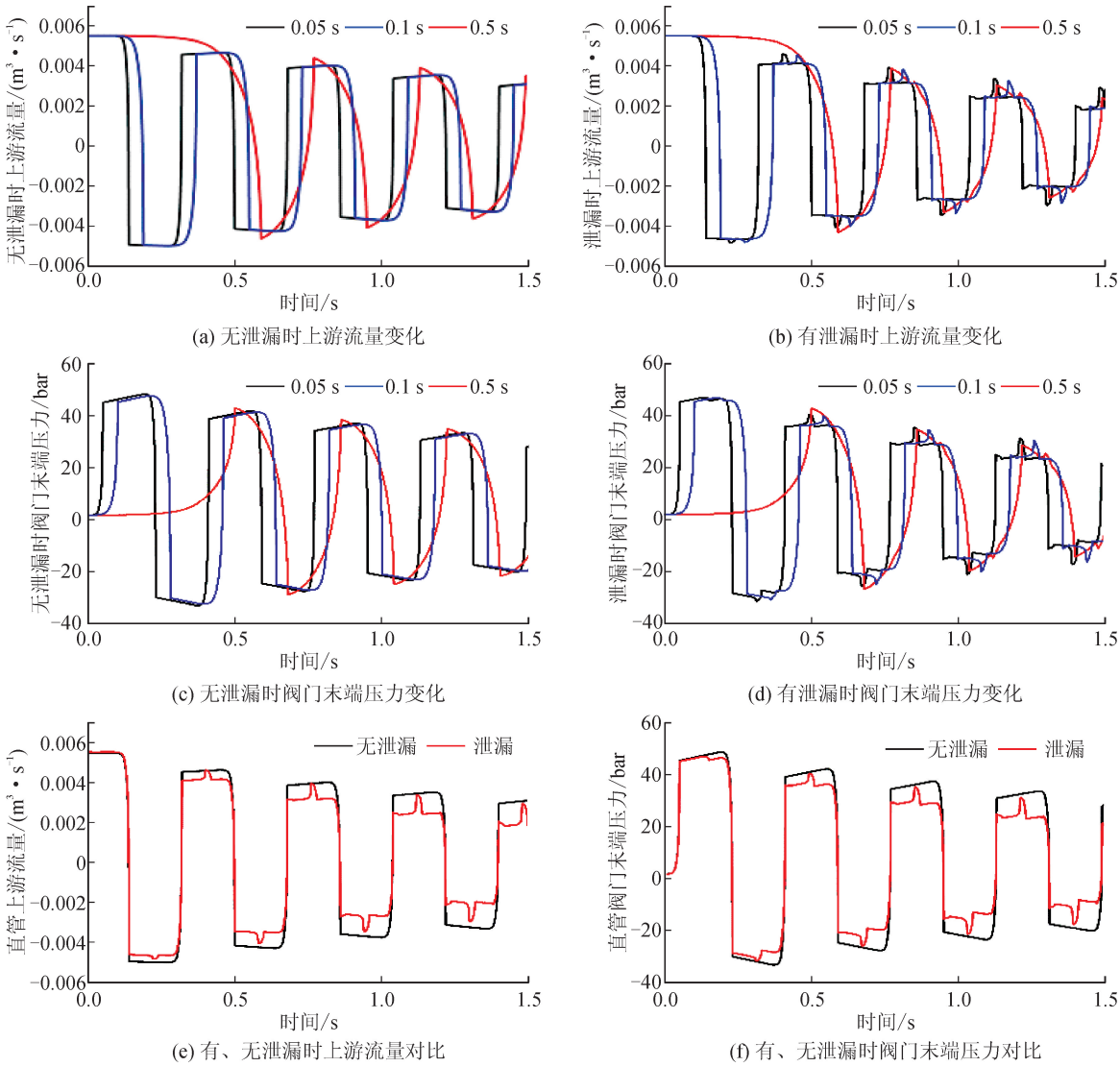
Fig. 2 Valve end pressure change contrast diagram

观察图 2 可知，两类模拟结果在第一周期内因管道泄漏而造成的压力大小以及下降位置较为一致，同时压力曲线衰减趋势和周期较为一致。分析发现，Flowmaster 软件自带的管道元件有着较为复杂的物理特性，而且微小短管与泄漏孔模型亦存在区别，这使得 Flowmaster 仿真计算结果在阀门处的压力计算值略低于编程模拟计算结果，但两者相对误差最大值仅为 8.4%。

3 计算结果与讨论

3.1 阀门关闭时间的影响

利用 Flowmaster 对有、无泄漏情况的管道的流动特性和不同的阀门线性关闭时间进行仿真模拟，阀门线性关闭时间分别取 0.05 s、0.5 s 和 1 s。观察阀门末端压力以及直管上游流量的变化规律，分析不同阀门关闭时间对其的影响，结果如图 3 所示。



(a) 无泄漏时上游流量变化

(b) 有泄漏时上游流量变化

(c) 无泄漏时阀门末端压力变化

(d) 有泄漏时阀门末端压力变化

(e) 有、无泄漏时上游流量对比

(f) 有、无泄漏时阀门末端压力对比

图 3 阀门线性关闭所用时间的影响

Fig. 3 Effect of valve linear closing time

由图 3(a)～(d)可知，无论是否发生泄漏，阀门关闭时间为 0.05 s、0.1 s 时，入口流量、阀门末端处压力均呈现出明显的周期性变化。加大阀门线性关闭时间，流量和压力的变化曲线会逐渐趋于光滑，当阀门线性关闭时间为 0.5 s 时，压力流量变化曲线的周期未发生明显改变，但在最大幅值处会突变成为尖点。

从图 3(b)可以进一步看出，当阀门线性关闭时间为 0.5 s 时，管道存在泄漏的信息不易识别，可见，阀门的关闭时间是瞬变模型法的一个重要影响因素。

由图 3(e)、(f)可知，当管道内部发生泄漏时，相较于管道无泄漏的状态，流量以及压力曲线会在最大及最小幅值的峰值位置处发生明显的二次突变，这与编程模拟计算[17]得到的变化规律相一致。由此可知，Flowmaster 可以模拟管内瞬变流动的特征。

3.2　泄漏孔径的影响

利用 Flowmaster 软件对不同大小的泄漏孔径(ad)进行仿真模拟,选取的孔径大小为 0(即无泄漏)、1 mm、2 mm、3 mm。观察泄漏点压力、阀门末端压力、泄漏流量以及上游流量的变化,如图 4 所示。

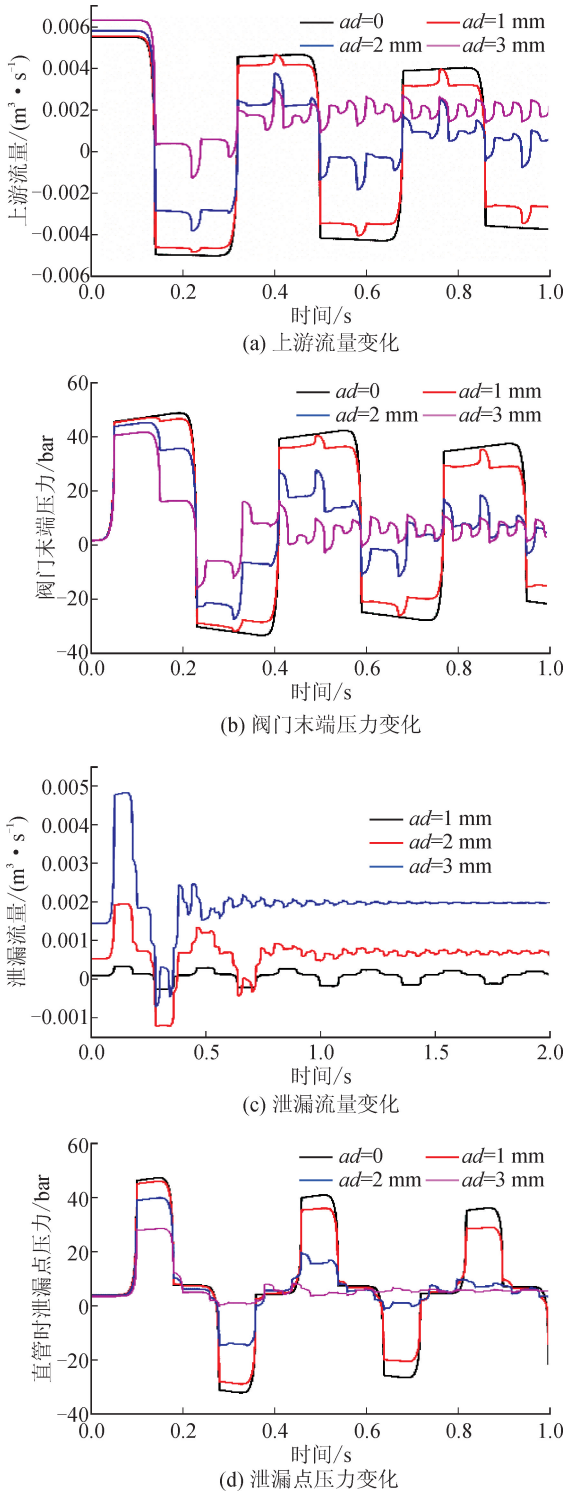


图 4　不同泄漏孔径的影响

Fig. 4　Influence of different leakage hole diameters

从图 4 可以观察到,随着泄漏孔径的增大,流量及压力的突变程度在逐渐加大,压力曲线以及上游流量的衰减速度不断加快。孔径越大,压力下降就越大,并且压力曲线在各个幅值处的压降点均吻合在同一时刻。在图 4(c)、(d)中,泄漏量的大小与泄漏孔径成正比关系,而且当泄漏孔径增大时,泄漏孔的压力幅值变小,泄漏流量达到稳定所需的时间变短,如果泄漏孔的压力值在该段时间内出现了负值,则泄漏流量也是负值,这一点在图 4(d)中得到了证实。因为管道长度较短,在管道内部形成了水击波传播的叠加状态。压力和流量信号在泄漏孔较小以及无泄漏状态下不会受到明显影响,但当图中 ad 取 2 mm 和 3 mm 时,阀门末端泄漏点压力以及上游流量曲线的波动较为明显,由此可知,当泄漏孔径超过一定值时,其对流量以及压力信号的影响较大,可通过压力波动信号来识别。

3.3　泄漏位置的影响

利用 Flowmaster 软件对不同的泄漏位置(距上游水库的距离 xl)进行仿真模拟,固定泄漏孔径 $ad=1$ mm,选择不同的泄漏位置,其距上游水库的距离分别为 10 m、40 m、50 m 和 80 m。观察泄漏流量和泄漏点压力、上游流量以及阀门末端压力的变化,如图 5 所示。

由图 5 可知,上游流量和阀门末端压力曲线幅值受泄漏位置的影响较大,当泄漏位置距离阀门不断变近时,阀门处的末端压力和上游流量曲线的各个幅值处均会从上凸状态逐渐变为下凹状态,且幅值会逐渐减小。由图 5(b)中阀门末端压力变化曲线的第一个压力波形状分析可知,每个位置的上下游流量和压力曲线的幅值都是对称变化的,不同的泄漏位置与压力畸变存在一定的联系,压力畸变的时间越早说明泄漏位置距离阀门越近,但压力下降的程度是一样的,由此可知,泄漏孔位置距离末端阀门越近,泄漏流量以及泄漏点的压力变化就越大,因此可在阀门末端设置压力检测设备,对管道泄漏位置进行准确检测和定位。从图 5(c)、(d)可以看出,当泄漏孔位于不同的位置时,泄漏点压力变化幅值几乎没有差别。

3.4　瞬变流检测方法应用讨论

在实际工程中,末端阀门突然关闭会引起长距离输水管路中压力的骤然变化,而在瞬变的过程中,压力过高、过低都会对系统或者管道产生不良影响。瞬变法的首要因素是通过合理激励的方式,控制压力变化的振幅;相应的矛盾是在控制压力变化的情况下,泄漏的响应信号也会减弱。

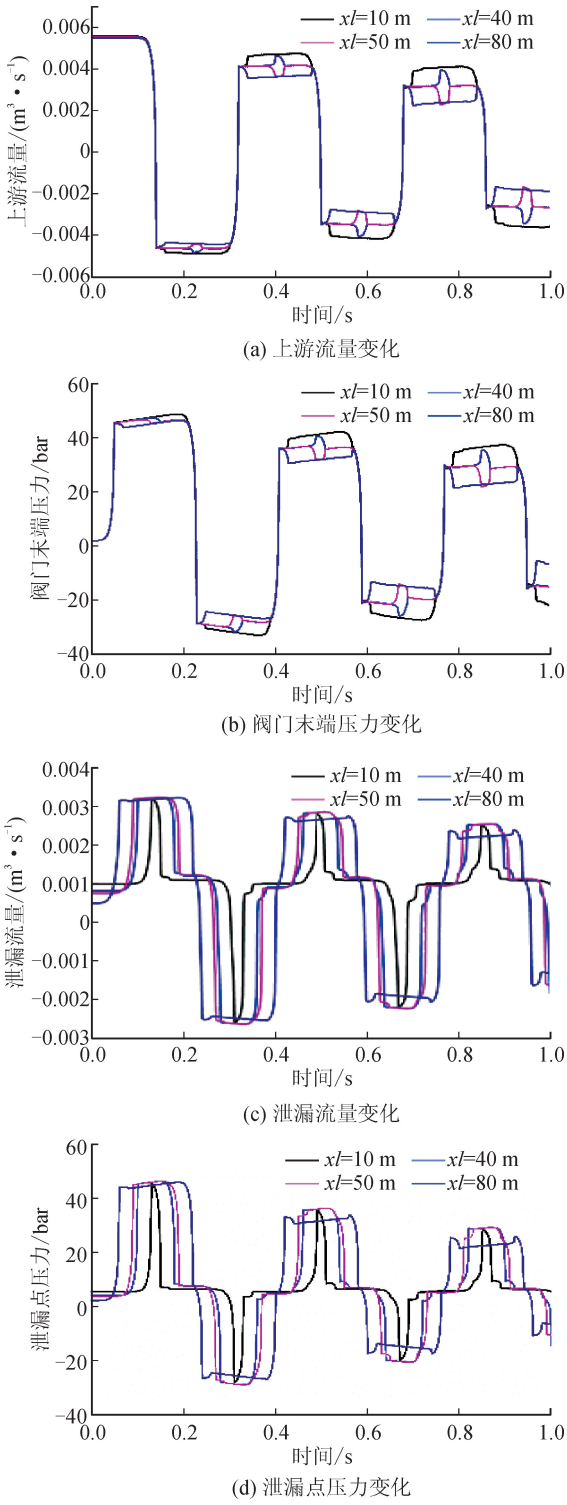


图 5　不同泄漏位置的影响

Fig. 5　Influence of different leakage position on pipeline

如图 5(b)所示，当泄漏量占总流量的 1.5%时(ad=1 mm)，在前两个周期内因泄漏引起的压力畸变幅度小于总的响应幅度的 4%，因此，需要采取合理的激励方式。次要因素为监测位置及采样的频率。由图 5 可知，模拟中泄漏点处压力的畸变幅度与下游阀门处监测到的变幅没有明显差异，为了实施方便，检查点可以适当靠近激励源；同时，为了增强识别效果，压力传感器的响应时间宜小于 1 ms。

4　结　论

本文对比分析了 Flowmaster 仿真结果与编程模拟计算结果，验证了仿真计算的正确性。通过 Flowmaster 软件进一步分析了有、无泄漏时，不同阀门关闭时间、泄漏孔大小、泄漏位置等参数对管道瞬变流动规律的影响，并对管内瞬变特性进行了仿真模拟。

1）无论泄漏是否存在，随着阀门关闭时间的增大，流量以及压力变化曲线都逐渐趋于光滑，且当阀门关闭时间较长时，由于瞬变波叠加，压力和流量曲线的峰值会变为尖点，此时泄漏的信息不易分辨。

2）随着泄漏孔径的增大，幅值处的突变程度逐渐加大，但幅值却在逐渐减小，压力曲线以及上游流量的衰减速度逐渐加大；孔径越大，压力下降就越大，说明突变程度与泄漏量大小相关，可根据突变点来判断是否有泄漏发生，并确定泄漏位置及泄漏量。

3）泄漏位置对管道内的瞬变特性影响也很大，随着泄漏位置的增大，上游流量和阀门末端压力曲线幅值由凸起逐渐变为凹陷状态，且幅值越来越小。泄漏点压力和泄漏流量衰减得越快，泄漏位置距离末端阀门越近，因此，可通过在末端阀门处安装监测设备，来实现管道泄漏位置的定位。

参考文献：

[1] 陆少鸣，刘哲，赖源平，等. 沿线实时测压法用于监测大型长距离输水管爆漏[J]. 中国给水排水，2010，26(6)：58-62.
LU Shaoming，LIU Zhe，LAI Yuanping，et al. Real-time manometry for burst leakage monitoring along large-scale and long-distance pipelines[J]. China Water & Wastewater，2010，26(6)：58-62.

[2] JIA Z，REN L，LI H，et al，Performance study of FBG hoop strain sensor for pipeline leak detection and localization[J]. Journal of Aerospace Engineering，2018，31(5)：04018050.

[3] ZHANG T，TAN Y，ZHANG X，et al. A novel hybrid technique for leak detection and location in straight pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2015，35：157-168.

[4] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题[J]. 水利学报，2016，47(3)：424-435.
YANG Kailin. Review and frontier scientific issues of hydraulic control for long distance water diversion[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2016，47(3)：

424-435.

[5] VERDE C, MOLINA L, TORRES L. Parameterized transient model of a pipeline for multiple leaks location [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 29: 177-185.

[6] FERRANTE M, BTUNONE B, MENICONI S. Wavelets for the analysis of transient pressure signals for leak detection[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(11): 1274-1282.

[7] GONG J Z, LAMBER M F, SIMPSON A R, et al. Single-event leak detection in pipeline using first three resonant responses[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(6): 645-655.

[8] GONG J Z, ZECCHIN A C, SIMPSON A R, et al. Frequency response diagram for pipeline leak detection: comparing the odd and even harmonics[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2014, 140 (1): 65-74.

[9] KIM S. Holistic diagnosis of pipeline system with impedance method[J]. Procedia Engineering, 2014, 70: 924-933.

[10] 郭新蕾，郭永鑫. 管道泄漏检测中瞬变流非恒定摩阻模型的研究[J]. 水力发电学报，2008，27(1):42-27.
GUO Xinlei, GUO Yongxin. Study of unsteady friction models in transient flow for leak detection[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(1): 42-27.

[11] 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.

[12] SUN C, PARELLADA B, PUIG V, et al. Leak localization in water distribution networks using pressure and data-driven classifier approach[J]. Water, 2020, 12(1):54.

[13] 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. Leak detection and location of fluid pipeline based on Elman neural network [J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17 (4): 8-13

[14] 付锴，马立，李洪凤. 利用 Flowmaster 对水锤现象的研究[J]. 制冷与空调(四川)，2015，29(5): 597-600.
FU Kai, MA Li, LI Hongfeng. Research of water hammer based on Flowmaster[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2015, 29(5): 597-600.

[15] 吴绍科，张跃文，张鹏. 离心泵瞬时启动过程的仿真[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(6): 461-465.
WU Shaoke, ZHANG Yuewen, ZHANG Peng. Simulation on performance of centrifugal pump during rapid startup period[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(6): 461-465.

[16] 张巧玲，常维宁，杨振东，等. 基于非恒定摩阻的管道泄漏数值模拟[J]. 水动力学研究与进展，2018，33 (5): 627-634.
ZHANG Qiaoling, CHANG Weining, YANG Zhendong, et al. Simulation study of pipeline leakage based on unsteady friction[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(5): 627-634.

[17] 常维宁. 基于非恒定摩阻的输水管道泄漏检测数值模拟及试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.
CHANG Weining. Numerical simulation and experimental study on leak detection of water pipeline based on unsteady friction[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.

(责任编辑 周 蓓)