

考虑动态摩阻的管道泄漏水力瞬变数值模拟

李赞杰¹, 周 领¹, 欧传奇², 刘德有¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 国际小水电中心, 浙江 杭州 310002)

摘要:为了提高管道系统泄漏的模拟和判断精度,将瞬态加速类(Brunone 模型)和加权函数类(Zielke 模型和 Vardy 模型)两类动态摩阻模型用于水力瞬变泄漏建模和模拟,并将计算结果与已有的试验数据、模拟结果进行对比分析。结果表明:与传统摩阻模型和存在简化误差的 Brunone 模型相比,Zielke 模型和 Vardy 模型能更加精确地模拟泄漏管中压力和流量信号变化;管道泄漏会引起管道压力和流量畸变,这种畸变是由泄漏导致的压力和流量产生新的信号反射造成的;泄漏流量和泄漏位置均会影响管中压力和流量的畸变、幅值和衰减程度。

关键词:水力瞬变;泄漏检测;动态摩阻;特征线法

中图分类号:TV134.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)01-0062-07

Numerical simulation of hydraulic transient in a leakage pipe considering unsteady friction//LI Yunjie¹, ZHOU Ling¹, OU Chuanqi², LIU Deyou¹(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. International Center on Small Hydro Power, Hangzhou 310002, China)

Abstract: To improve the simulation and judgment accuracy of leakage in pipeline systems, two distinct unsteady friction models, including the Brunone model of the transient acceleration type and the weighting function type (Zielke and Vardy models), were introduced to simulate the hydraulic transient leakage, and the results were compared with the experimental and simulation data in the published papers for further analyses. The calculated results show that Zielke model and Vardy model can simulate the pressure and flow signal changes more accurately compared with traditional friction models and the Brunone model due to simplification errors. The leakage leads to the distortion of pressure and flow because of new signal reflection caused by the leakage in the pipeline. Both the leakage discharge and position affect the degree of distortion, amplitude and attenuation of the transient pressure and the flow in the pipeline.

Key words: hydraulic transient; leakage detection; unsteady friction; method of characteristics

管道漏损广泛存在于流域输水、城市供水等工程中,泄漏不仅造成巨额的经济损失,而且可能造成次生灾害,如影响水质、损坏建筑基础等,因此寻求准确有效的泄漏检测方法是一个重要的研究课题。目前,泄漏检测方法主要有目视观测法、探地雷达检漏法、示踪剂检漏法、振动声学检漏法、光纤传感技术法、瞬态检漏法^[1]以及稳态水力模型法等,其中,瞬态检漏法是泄漏检测的主要手段^[2-3]。泄漏主要通过增加阻尼率和在产生的压力中创建新的反射信号两个方面影响瞬态信号,识别和量化这些影响是瞬态泄漏检测技术的核心^[4]。

Pudar 等^[1]在 1992 年第一次提出基于压力测量的检漏程序和逆问题的解决方法,即已知压力和

流量求管道粗糙度和泄漏情况。误差分析表明系统摩擦系数估计的误差带来的影响比水头测量误差的影响大得多,摩擦系数的精确性是逆瞬态法的关键^[5-7]。目前,为了提高泄漏检测的精确度,除了较大泄漏问题,水力瞬变模型中一般均需要考虑动态摩阻的影响^[2,8-10]。Zielke^[11]推导出适用于管道瞬变层流的卷积加权模型,该模型考虑了管道瞬时平均流速和加权历史流速变化,被认为是精确动态摩阻模型;Vardy 等^[12-14]在 Zielke^[11]的基础上建立了光滑管和粗糙管内流动的瞬态摩擦加权函数模型,将卷积加权模型推广到阻力平方区;Brunone 等^[15]在 Daily 等^[16]研究基础上考虑对流加速度,引入动态摩阻系数,提出了适用于层流和紊流的动态摩阻

模型,该模型能很好地平衡运算量和计算精度的问题;Bergant 等^[17]和 Vitkovsky 等^[18]对 Brunone 模型分别进行了公式改进和近似求解,使 Brunone 模型更加简洁、适用。郭新蕾等^[3]根据实际工程需要研究了 Brunone 模型的离散网格和求解方法,将其应用于管道泄漏模拟,压力波形对比表明该模型比传统的准恒定泄漏摩阻模型更加精确。然而,加权函数类动态摩阻模型很少用于管道泄漏检测的研究。

本文将瞬态加速类(Brunone 模型)和加权函数类(Zielke 模型和 Vardy 模型)两类动态摩阻模型用于水力瞬变泄漏建模和模拟,并将计算结果与已有的试验数据和模拟结果进行对比,采用 3 种模型进行了算例计算分析,通过对比不同瞬变流模型泄漏过程中的压力和流量变化情况,分析泄漏畸变点突变原因、Brunone 模型计算误差和泄漏中部分参数的敏感性。

1 动态摩阻模型

常见的动态摩阻模型主要有以下两类^[10,19]: ①基于加权函数考虑历史速度和历史加速度对当前流态影响的加权函数类模型,如 Zielke 模型和 Vardy 模型;②基于瞬时加速度的模型,如 Brunone 模型及其改进型。本文将 Zielke 模型、Vardy 模型和 Brunone 模型用于管道泄漏检测的水力瞬态建模。

1.1 Zielke 模型

Zielke^[11]在考虑管道瞬时平均流速和加权历史流速变化的情况下,推导出了适用于层流的动态摩阻项 J_U :

$$J_U = \frac{16\nu}{gD^2} \int_0^t \frac{\partial v}{\partial t} W(t-u) du \tag{1}$$

其中

$$W(\tau) = \begin{cases} \sum_{j=1}^6 m_j \tau^{\frac{j-2}{2}} & \tau \leq 0.02 \\ \sum_{i=1}^5 e^{n_i \tau} & \tau > 0.02 \end{cases}$$

式中: ν 为运动黏性系数; g 为重力加速度; v 为管道瞬时平均流速; u 为积分变量; W 为关于无量纲时间 τ 的加权函数, $\tau=\frac{4\nu t}{D^2}$; t 为时间; D 为管道直径; m_j 、 n_i 为系数, m_j ($j=1, 2, \cdots, 6$) 的值分别为 0.282 095, -1.250 000, 1.057 855, 0.937 500, 0.396 696 和 -0.351 563, n_i ($i=1, 2, \cdots, 5$) 的值分别为-26.3744, -70.849 3, -135.0198, -218.9216 和 -322.5544。

1.2 Vardy 模型

Vardy 等^[12]建立了光滑管内流动的瞬态摩擦加权函数模型,并假定湍流黏度在均匀流速核心周围

的剪切层内呈线性变化,对于高雷诺数的流动,给出了水力光滑管道动态摩阻模型:

$$W(\tau, Re) = \frac{A^* e^{-B^* \tau}}{\sqrt{\tau}} \tag{2}$$

式中: Re 为雷诺数; A^* 、 B^* 为系数,层流时 $A^* = \sqrt{\frac{1}{4\pi}}$, $B^* = 210$,紊流时 $A^* = \sqrt{\frac{1}{4\pi}}$, $B^* = 0.135 Re^\kappa$, $\kappa = \lg(14.3/Re^{0.05})$ 。

基于上述模型,随后 Vardy 等^[13-14]给出了改进模型,将水力光滑管道动态摩阻模型推广到阻力平方区,并给出了两种不同的近似算法:①当管道为光滑管时, $A^* = 1/2 \sqrt{\pi}$, $B^* = Re^\kappa/12.86$, $\kappa = \lg(15.29/Re^{0.0567})$; ②当管道为粗糙管时, $A^* = 0.0103 \sqrt{Re} (\varepsilon/D)^{0.39}$, $B^* = 0.352 Re (\varepsilon/D)^{0.41}$, ε/D 为相对粗糙度。

1.3 Brunone 模型及其改进型

Brunone 等^[15]结合局部瞬时加速度 $\frac{\partial v}{\partial t}$ 和位变加速度 $\frac{\partial v}{\partial x}$ 给出了动态摩阻模型,可表达为

$$J_U = \frac{k_3}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} - a \frac{\partial v}{\partial x} \right) \tag{3}$$

式中: x 为沿管道中心线方向的距离; a 为波速; k_3 为 Brunone 动态摩阻系数,取值的适当性对模型精确程度有很大影响, k_3 的确定方法有两种:一是由试验确定;二是采用 Vardy 等^[12]所给的系数公式:

$$k_3 = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \tag{4}$$

式中: C^* 为系数,层流时 $C^* = 0.004\,76$,紊流时 $C^* = \frac{7.41}{Re^{\lg(\frac{14.3}{Re^{0.05}})}}$ 。

Bergant 等^[17]发现 Brunone 模型动态摩阻项计算公式具有局限性;对于某些加速或减速条件,该公式对流项符号错误,因此他们在其基础上提出了改进模型:

$$J_U = \frac{k_3}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + a \operatorname{sign} v \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right| \right) \tag{5}$$

其中

$$\operatorname{sign} v = \begin{cases} 1 & v \geq 0 \\ -1 & v < 0 \end{cases}$$

Vitkovsky 等^[18]随后给出了该模型的显性和隐性近似解法。

2 考虑动态摩阻的管道泄漏数学模型

管道泄漏的数学模型由控制方程、动态摩阻和边界条件 3 部分组成。本文采用特征线法对管道泄漏模型进行求解。动态摩阻的求解一般包含隐式和

显式求解两种格式^[3]:隐式求解格式中,将稳态摩阻项和动态摩阻项共同作为管道流中摩擦引起的水头损失代入双曲型微分方程,这种方法改变了特征线网格,运算复杂且求解时间长,优点是更为精确;显式求解格式中,将动态摩阻作为附加项单独计算,可以较好地代入各种模型,模型简单且计算时间短。综合考虑模型精度和运算效率,本文采用第二种方法。

2.1 控制方程

管道瞬变流的连续性方程和动量守恒方程^[20-22]如下:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + J = 0 \tag{7}$$

其中

$$J = \frac{f}{2gD} v |v| + J_u$$

式中: H 为测压管水头; J 为管道水体运动摩擦引起的单位长度的水头损失; f 为Darcy-Weisbach摩擦系数,其值大小依赖于雷诺数和管道相对粗糙度。

如图1所示,将线性双曲型微分方程(6)(7)变换为常微分方程,采用一阶有限差分近似,分别沿着正负特征线进行积分,得到如下 C^+ 、 C^- 特征线方程:

$$C^+ : v_P - v_R + \frac{g}{a} (H_P - H_R) + gJ_R \Delta t = 0 \tag{8}$$

$$C^- : v_P - v_S - \frac{g}{a} (H_P - H_S) + gJ_S \Delta t = 0 \tag{9}$$

式中: v_P 、 H_P 分别为在 t 时刻节点 P 处的流速和水头; v_R 、 H_R 分别为在 $t-\Delta t$ 时刻节点 R 处的流速和水头; v_S 、 H_S 分别为在 $t-\Delta t$ 时刻节点 S 处的流速和水头; J_R 、 J_S 分别为在 $t-\Delta t$ 时刻节点 R 、 S 处的水头损失; Δt 为计算时间间隔。

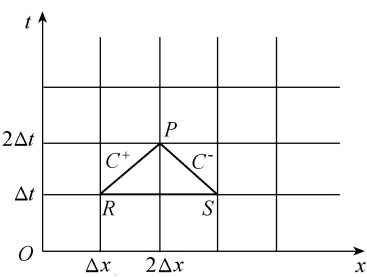


图1 特征线积分网格

2.2 边界条件

上游端为已知水位的水库,下游为一阀门,泄漏孔口边界条件如图2所示。

假定泄漏发生在第 i 个节点处,泄漏孔口外部为大气压,正负特征线测压管水头 H_1 、 H_2 与泄漏处测压管水头相等。由孔口出流公式得泄漏孔口的流量为

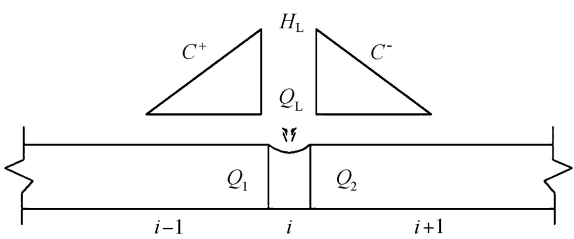


图2 泄漏孔边界条件

$$Q_L = C_d A_g \sqrt{2g\Delta H_L} \tag{10}$$

式中: C_d 为泄漏孔口的流量系数,可由试验确定具体值,取值范围一般在0.60~0.61之间^[23]; A_g 为泄漏孔口面积; ΔH_L 为泄漏点的压力水头, $\Delta H_L = H_L - z_L$,其中 H_L 为管道泄漏处的测压管水头, z_L 为管道泄漏点高程。

由连续性方程可得:

$$Q_1 = Q_2 + Q_L \tag{11}$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为泄漏节点处的正向特征线和负向特征线对应的流量。将式(10)(11)与式(8)(9)联立求解,可得流量 Q_1 、 Q_2 、 Q_L 和测压管水头 H_1 、 H_2 、 H_L 。

3 模型验证

3.1 无泄漏纯水锤情况

不考虑泄漏情况,将本文动态摩阻模型(Zielke模型、Vardy模型和Brunone模型)的模拟结果与Bergant等^[17]的实测数据进行对比。试验装置基本参数如下:管道长 $L=37.23\text{ m}$,直径 $D=0.0221\text{ m}$,上游水箱恒定水头 $h=32\text{ m}$,波速 $a=1319\text{ m/s}$,管道初始流速 $v_0=0.3\text{ m/s}$,雷诺数 $Re=5600$ 。阀门瞬间关闭,模拟的阀门处压力(用测压管水头 H_v 表示)如图3所示。由图3可知,与不考虑动态摩阻的传统摩阻模型相比,动态摩阻模型能精准描述瞬变管道压力幅值和衰减,随着周期数增加,动态摩阻模型的模拟值与实测值仍能吻合较好,而传统摩阻模型模拟的压力波在两个周期后误差逐渐增大,相位偏移加大。

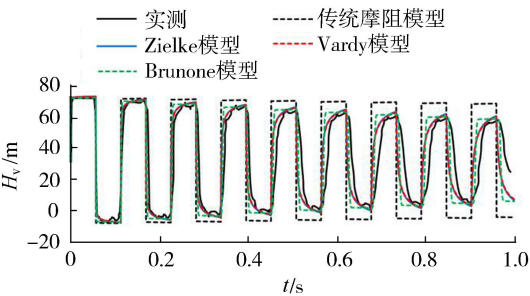


图3 不同摩阻模型模拟的阀门处测压管水头与实测值对比

3.2 存在泄漏情况

考虑管道泄漏情况,将本文模拟结果与 Lee 等^[24]模拟的结果进行对比,其模拟参数为: $L=2\,000\text{ m}$,波速 $a=1\,000\text{ m/s}$, $D=0.5\text{ m}$, $h=50\text{ m}$,初始管道流量 $Q_0=0.02\text{ m}^3/\text{s}$, $Re=50\,000$, $f=0.02$,泄漏孔口距上游水库 300 m ,初始泄漏量 $Q_L=0.2Q_0$ 。不考虑动态摩阻的影响,模拟结果见图 4。从图 4 可以看出,两次模拟的压力幅值和衰减几乎完全一致,从而证明了本文模型的正确性。

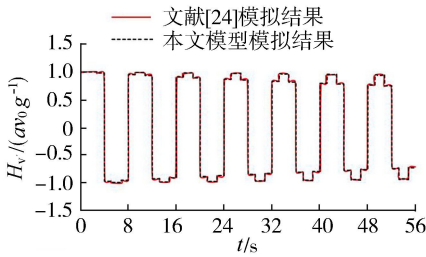


图 4 泄漏情况下阀门处压力对比

4 算例分析

如图 5 所示,选择水库-管道-阀门(RPV)模型进行管道泄漏瞬变模拟。假定管道为一水平直管,模型参数为: $L=2\,000\text{ m}$, $D=0.2\text{ m}$,上游水库水位恒定为 60 m , $a=1\,000\text{ m/s}$, $Q_0=0.02\text{ m}^3/\text{s}$, $Re=85\,000$, $f=0.03$ 。

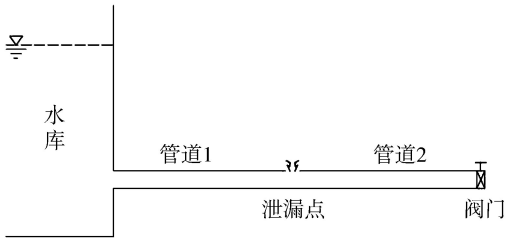


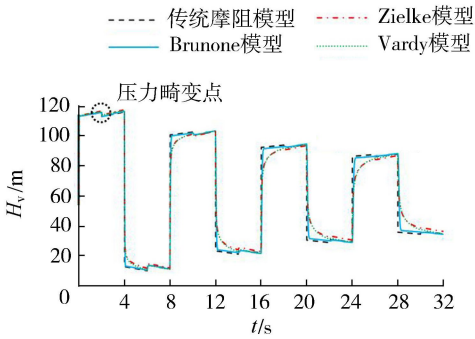
图 5 泄漏管道概化物理模型

4.1 畸变点分析

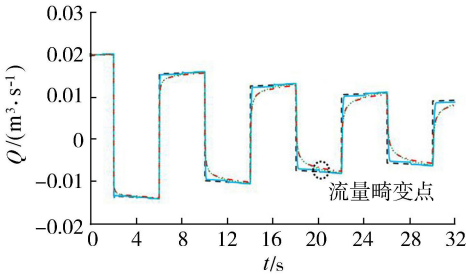
假设泄漏孔外界为大气压强,泄漏位置(距上游水库的距离) $X_L=1\,000\text{ m}$, $Q_L=0.1Q_0$ 。节点数 $N=100$, $t=0$ 时末端阀门瞬间关闭,计算时间为 32 s ,分别模拟了该泄漏情况下的阀门处压力 H_v 和管道入口处流量 Q ,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,管道出现泄漏时,管中压力和流量会出现畸变。相比于流量,压力畸变更加容易观察,因此使用压力畸变信号能更好地探寻泄漏点。

以泄漏时阀门处的压力变化为例,阀门关闭前,管道中水体处于恒定流状态,水库水位保持恒定,压强为 p_0 ,当阀门突然关闭时,紧靠阀门处的水体流速瞬间变为零,压强立刻升高 Δp ,上游水体碰到静止不动的水体时就像碰到完全关闭的阀门一样,类似状态以波速 a 向上游传播,这种波称为主压力波,



(a) 阀门处压力



(b) 管道入口处流量

图 6 有泄漏时不同摩阻模型模拟的阀门处压力和管道入口处流量

主压力波对管道压力和流量变化起主要作用。当主压力波到达泄漏点时,泄漏处的压力发生突然变化,在泄漏点形成向泄漏两侧传播的次压力波,次压力波也会影响管道压力变化。图 7 给出了管道泄漏时该工况下不同时刻的压力波运动图形。

由图 7(a)可知 $t=2\text{ s}$ 时阀门处压力畸变的原因:主压力波从阀门向上游传播,经过泄漏点时形成新的次压力波。主压力波从阀门传递至泄漏点前引起水体压力增大,当这种增压波遇到泄漏点(假定为大气压)时,由于压差作用会向阀门处反射一个引起水体压力减小的减压信号,在 $t=2\text{ s}$ 时到达阀门,引起阀门处压力突降。

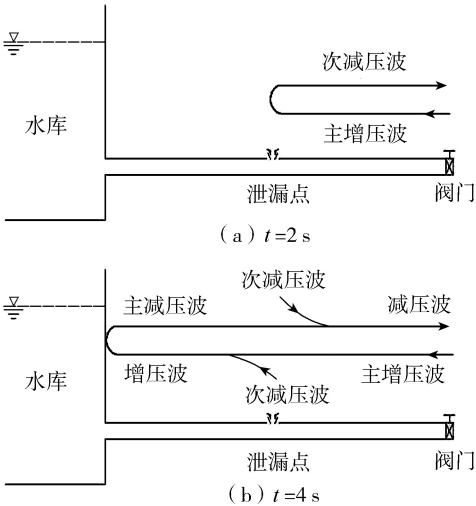


图 7 泄漏时不同时刻管道的压力波运动

由图 7(b)可知 $t=4\text{ s}$ 时阀门处压力骤降的原

因为:增压波从阀门向水库传播,引起逐段的水体压力增大,传播至泄漏点时,不仅有向阀门处的减压波,也会产生向水库方向的次压波,这种波也为减压波。由于主压力波起主导作用,主增压波和次减压波叠加仍然会使泄漏点上游的管道压力增加,传播至水库时,由于压力差 Δp 的作用,水库向阀门反射一个使下游压力降低的波,在 $t = 3\text{ s}$ 时又到达泄漏处产生新的次波,此时仍有从泄漏点反射的其他次波,同样的叠加作用使得泄漏点下游管道压力降低, $t = 4\text{ s}$ 时到达阀门导致阀门处压力骤降。

4.2 Brunone 模型计算误差分析

Zielke 模型主要适用于层流,也可用于雷诺数不高 ($Re < 10^6$) 的湍流;Vardy 水力光滑管道动态摩阻模型^[12] 适合于湍流情况,Vardy 改进模型^[13] 给出了雷诺数在 $2 \times 10^3 \sim 10^8$ 情况下更为精确的系数计算公式;Brunone 模型在层流和紊流时均可适用。Zielke 模型和 Vardy 模型通常被认为是精确动态摩阻模型,Brunone 模型有简化,存在一定的简化误差^[25]。在 $X_L = 1\,000\text{ m}$, $Q_L = 0.1Q_0$ 工况下得到压力如图 8 所示,其中图 8(a) 为 3 种动态摩阻模型模拟的阀门处实际压力对比,图 8(b) 是以 Vardy 模型为标准,3 种模型模拟的阀门处的压力分别减去 Vardy 模型的模拟值所得到的压力对比曲线。

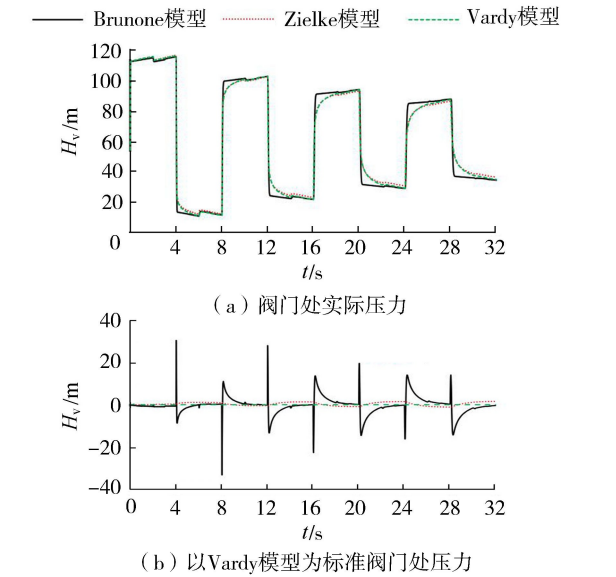


图 8 不同动态摩阻模型模拟的泄漏时阀门处压力对比曲线

由图 8(a) 可知, Brunone 模型在前半个周期内所模拟的压力幅值和衰减与 Zielke 模型、Vardy 模型基本一致,随着时间增长,因泄漏导致的压力畸变值虽趋于一致,但其整体压力衰减值小于 Zielke 模型和 Vardy 模型,两个周期后的压力曲线与 Zielke 模型和 Vardy 模型产生明显差异。图 8(b) 可以更

好地印证图 8(a) 中所观察到的现象, Brunone 模型在 $t = 4\text{ s}$ 时开始与 Zielke 模型和 Vardy 模型产生明显偏离,偏离值随时间增长而增大,并每隔半个周期出现一次较大的异变点, Zielke 模型和 Vardy 模型在图 8(a) (b) 中均无明显差异。可能的原因是简化的 Brunone 模型有一定的模型误差, Brunone 模型的系数 k_3 对模型的精确程度有较大影响,需要现场率定。

4.3 参数敏感性分析

以 Vardy 模型为例,考虑泄漏模型在不同泄漏量和不同泄漏位置情况下的管道压力、流量变化。模型参数不变,泄漏位置距上游水库 $1\,000\text{ m}$, 初始泄漏量 Q_L 分别取 $0.01Q_0$ 、 $0.05Q_0$ 、 $0.1Q_0$ 和 $0.2Q_0$, 图 9 比较了 4 种工况下阀门处压力 H_v 、泄漏处压力 H_L 、管道入口处流量 Q 和泄漏处流量 Q_L 。由图 9 可见,初始泄漏量越大,阀门起始压力越小,这可由水

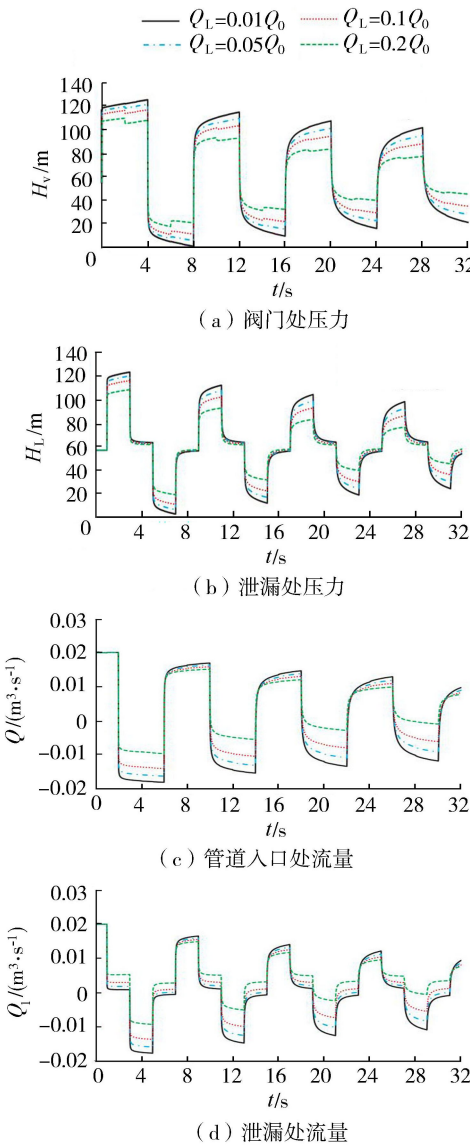


图 9 不同泄漏量影响下的管道压力、流量变化

锤基本公式验证。随着泄漏量增加,压力和流量阻尼增大,收敛速度加快,压力畸变点随着泄漏量增加变得越来越清晰,畸变量与初始泄漏量呈正相关,与时间呈负相关。

为了分析不同泄漏位置情况下的管道压力、流量变化,固定 $Q_L=0.1Q_0$ 不变,泄漏位置 X_L 分别取距上游水库 500 m、1 000 m、1 500 m,模拟结果如图 10 所示。由图 10 可知,不同泄漏位置会导致压力和流量畸变点位置变化,以阀门压力第一周期为例,泄漏点越靠近阀门,畸变越早,畸变时间基本与泄漏距阀门距离成正比,据此可根据畸变时间反推泄漏位置,其他压力和流量畸变情况类似,可由压力波运动情况推得;泄漏量相同,泄漏位置不同时压力和流量的幅值不同,阻尼不同,泄漏位置越靠近阀门,压力和流量曲线幅值越小,衰减越快。

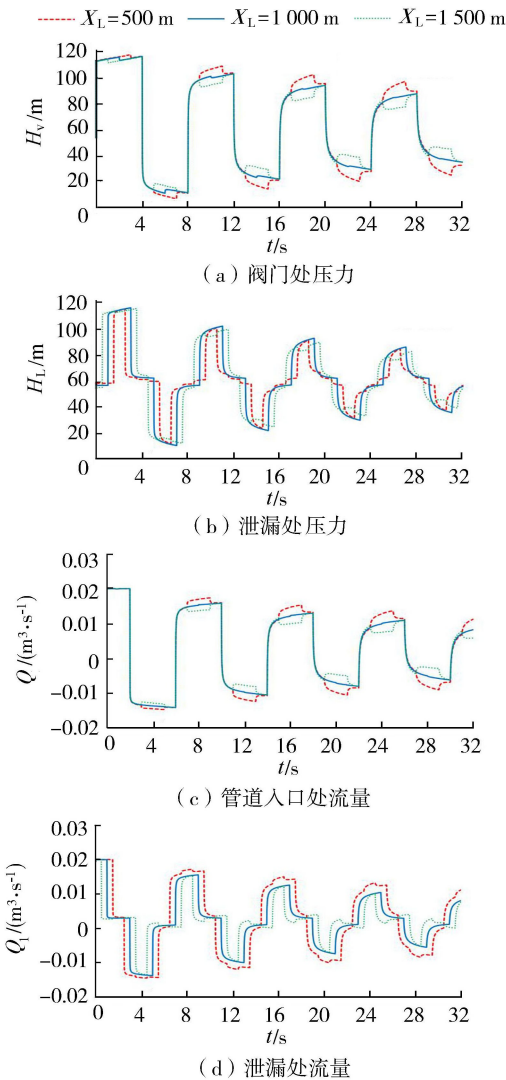


图 10 不同泄漏位置影响下的管道压力、流量变化

5 结 论

a. 动态摩阻模型比传统准恒定摩阻模型更加

精确,能更好地模拟管道泄漏时管中各点的压力和流量变化。与 Zielke 和 Vardy 动态摩阻模型相比, Brunone 模型存在一定的简化误差,模型系数须现场率定。

b. 与流量畸变信号相比,在管道中用压力畸变信号探寻泄漏点更加方便快捷。泄漏参数敏感性分析发现,管道泄漏量与泄漏位置均对管道压力和流量信号产生影响。

参考文献:

[1] PUDAR R S, LIGGETT J A. Leaks in pipe networks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118(7): 1031-1046.

[2] 杨开林, 郭新蕾. 管道系统泄漏检测的全频域法[J]. 水利水电科技进展, 2008, 39(3): 40-44. (YANG Kailin, GUO Xinlei. Hydraulic transient model in frequency domain for leak detection in pipeline systems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 39(3): 40-44. (in Chinese))

[3] 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): 42-47. (GUO Xinlei, GUO Yongxin. Study of unsteady friction models in transient flow for leak detection [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(1): 42-47. (in Chinese))

[4] WANG X J, LAMBERT M F, SIMPSON A R, et al. Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7): 697-711.

[5] 坎标, 高运, 徐盛松, 等. 主动调压型微孔壁管道流场特性数值仿真[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(2): 183-187. (KAN Biao, GAO Yun, XU Shengsong, et al. Numerical simulation of flow field characteristics of pressure controllable pipe with microporous walls [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(2): 183-187. (in Chinese))

[6] WANG Huiyan, LIU Xiaobing, JIANG Qifeng, et al. Numerical simulation of cavitation turbulence in Francis turbine runner with splitter blades [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(1): 45-51.

[7] 袁益超, 朱波, 于文汇, 等. 湍流减阻多级转换特性及湍流特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(3): 242-247. (YUAN Yichao, ZHU Bo, YU Wenhui, et al. Analysis on turbulent drag reduction multistage transition and turbulence characteristics in a channel flow [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(3): 242-247. (in Chinese))

[8] 才建, 宫敬, 宋生奎. 瞬变流动中液体管道摩阻损失计

- 算方法综述[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(2): 90-94. (CAI Jian, GONG Jing, SONG Shengkui. A review of calculation methods for friction-induced loss of transient flow in pipes [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(2): 90-94. (in Chinese))
- [9] 卢坤铭, 周领, 曹波, 等. 起伏管道内水流冲击滞留气团的三维动态特性模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(4): 384-389. (LU Kunming, ZHOU Ling, CAO Bo, et al. Three dimensional simulations on dynamic characteristics of flow impacting entrapped air-pocket in undulating pipeline [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(4): 384-389. (in Chinese))
- [10] 方玉建, 袁寿其, 赵丽伟, 等. 负压输水光滑管道水力摩擦系数的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(1): 58-61. (FANG Yujian, YUAN Shouqi, ZHAO Liwei, et al. Experimental study on friction factors for water flow in smooth pipe flow under negative pressure [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(1): 58-61. (in Chinese))
- [11] ZIELKE W. Frequency-dependent friction in transient pipe flow[J]. Journal of Basic Engineering, 1968, 90(1): 109-115.
- [12] VARDY A E, BROWN J M B. Transient, turbulent, smooth pipe friction[J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 33(4): 435-456.
- [13] 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.
- [14] VARDY A E, BROWN J M B. Transient turbulent friction in fully rough pipe flows[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 270(1): 233-257.
- [15] BRUNONE B, GOLIA U M, GRECO M. Some remarks on the momentum equation for fast transients [C]//International Meeting on Hydraulic Transients with Water Column Separation (9th Round Table of the IAHR Group). Valencia: Universidad Politecnica de Valencia, 1991: 201-209.
- [16] DAILY J, HANKEY Jr W, OLIVE R, et al. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Cambridge, 1955.
- [17] BERGANT A, SIMPSON A R, VITKOVSKY J. Developments in unsteady pipe flow friction modelling [J]. Journal of Hydraulic Research, 2001, 39(3): 249-257.
- [18] VITKOVSKY J, LAMBERT M, SIMPSON A, et al. Advances in unsteady friction modelling in transient pipe flow [C]//The 8th International Conference on Pressure Surges. The Hague: BHR, 2000: 12-14.
- [19] 王思琪, 俞晓东, 倪尉翔, 等. 长距离供水工程空气罐调压塔联合防护水锤[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(5): 406-412. (WANG Siqi, YU Xiaodong, NI Weixiang, et al. Water hammer protection combined with air vessel and surge tanks in long-distance water supply project [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(5): 406-412. (in Chinese))
- [20] WYLIE E B, STREETER V L. Fluid transients in systems[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [21] 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))
- [22] 张小莹, 张健, 陈胜, 等. 岩塞爆破工程水锤压力计算及防护措施[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 27-32. (ZHANG Xiaoying, ZHANG Jian, CHEN Sheng, et al. Water hammer pressure calculation and protective measures for rock plug blasting engineering [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 27-32. (in Chinese))
- [23] 付强, 余健恩, 闫强, 等. 基于Flowmaster的不同阀门开度对供水管网优化[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(3): 266-270. (FU Qiang, YU Jianen, YAN Qiang, et al. Flowmaster-based optimization study of water supply pipe network with different valve openings [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(1): 58-61. (in Chinese))
- [24] LEE P J, DUAN HF, TUCK J, et al. Numerical and experimental study on the effect of signal bandwidth on pipe assessment using fluid transients [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(2): 401-407.
- [25] ADAMKOWSKI A, LEWANDOWSKI M. Experimental examination of unsteady friction models for transient pipe flow simulation [J]. Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(6): 1351-1363.

(收稿日期: 2020-01-05 编辑: 雷燕)

