DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20240786

简化加权类动态摩阻与有限体积法的水锤数值模拟

马新红[1],齐慧卿[1],张俸溢[2a],冯瑞琳[2a],胡垠盈[2a],周 领[2b]

(1. 山东电力工程咨询院有限公司,山东 济南 250013;
2. 河海大学 a. 水利水电学院;b. 长江保护与绿色发展研究院,江苏 南京 210098)

摘要: 泵站、长距离供水等有压输水系统中,精准、高效的水力计算对于系统水力安全、智慧调控至关重要。然而,现有的水锤计算大多基于稳态摩阻假定,低估了水锤衰减;尤其是采用的特征线法因插值计算或调整波速,常会引起计算误差。为了精准、高效地模拟水锤问题,构建了 Urbanowicz and Zarzycki 简化加权类动态摩阻水锤模型,采用二阶 Godunov 格式进行模型求解,并设计搭建了水锤试验台,将所建模型计算结果与 Zielke 模型、Brunone 模型、传统的特征线法结果、试验结果进行对比分析。结果表明,所建模型可以精准仿真水锤压力的波动峰值与周期,与试验结果基本吻合;Zielke 模型与所建模型具有基本一致的计算精度,纳什效率系数可达 0.94,但 Zielke 模型计算耗时量巨大;Brunone 模型计算效率略优于所建模型,但计算精度较差,纳什效率系数为 0.87;当库朗数小于 1 时,特征线法会出现严重的数值耗散,而本文模型仅有轻微的数值衰减。可见,所建模型提供了一种精准、高效、稳定的水锤模拟方法。

关键词: 水锤;动态摩阻;Godunov 格式;输水系统;瞬变流

中图分类号: TV672^{+}.2;TV134.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2025)04-0177-05

1 引言

有压输水管道系统中,阀门启闭、泵启停等因素均可能发生水锤现象,影响管道系统的正常运行,甚至出现管道破坏事故。因此,对于各种水力瞬变现象的精确、高效预测和模拟是输水系统安全运行和智慧调控的基础[1-3]。针对管道系统中的水力瞬变流问题,ZHOU LING 等[4]将动态摩阻模型引入水锤模拟研究中。早期的动态摩阻模型由 ZIELKE W[5]提出,适用于粘弹性管道的层流水锤现象计算;URBANOWICZ K 等[6]推导建立了简化加权类动态摩阻水锤模型,提高了模型的计算效率;BRUNONE B 等[7]提出了适用于层流和紊流的局部水体加速度的动态摩阻模型。在水锤计算分析中,通常采用特征线法 (MOC)[8],然而特征线法往往需要进行插值或波速调整从而导致数值耗散,影响计算结果的精度。近年来,周领等[9]应用有限体积法进行管道瞬变流模拟,结果显示库朗数 C_r 越小,Godunov 格式相比于特征线法在精度一致的情况下有更高的稳定性和效率。为了精准、高效地模拟水锤问题,本文构建了 Urbanowicz and Zarzycki 简化加权类动态摩阻水锤模型,采用二阶 Godunov 格式进行模型求解,并设计搭建了水锤试验台,将所建模型计算结果与 Zielke 模型、Brunone 模型、传统的特征线法结果、试验结果进行对比分析,验证了所建模型的有效性。

2 考虑动态摩阻的水锤数值模型

2.1 水锤控制方程

考虑动态摩阻的水锤连续方程和动量方程为:

$$\frac{\partial H}{\partial t}+V\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{a^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial x}+g\frac{\partial H}{\partial x}+J=0 \tag{2}$$

$$J=J_s+J_U$$

式中,H 为测压管水头;V 为水流流速;a 为管道中波速;t 为计算时间;x 为沿管轴线方向的长度;g 为重力加速度;J_s 为稳态摩阻;J_U 为动态摩阻。

收稿日期: 2024-04-27,**修回日期:** 2024-06-14

作者简介: 马新红(1981-),女,正高级工程师,研究方向为水锤基本理论及其计算方法,E-mail:maxinhong@sdepci.com

通讯作者: 周领(1985-),男,博士、教授、博导,研究方向为水锤基本理论及其计算方法,E-mail:zlhhu@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

2.2 Zielke 模型

1968 年，ZIELKE W[5]提出了一种适用于层流的原始加权类动态摩阻模型，其动态摩阻项为：

$$J_U=\frac{16v}{gD^2}\int_0^t\frac{\partial V}{\partial t}W(t-\alpha)\mathrm{d}\alpha \tag{3}$$

$$\tau=4vt/(D^2W)$$

式中，D 为管道直径；v 为运动粘度；α 为积分变量；W 为关于无量纲时间 τ 的函数，当 $\tau\geqslant 0.02$ 时 $W(\tau)=\sum_{i=1}^{5}\mathrm{e}^{-m_i\tau}$，当 $\tau<0.02$ 时 $W(\tau)=\sum_{i=1}^{6}n_i^{\tau^{0.5i-1}}$，其中 m_i、n_i 为加权系数[5]。

2.3 Brunone 模型

Brunone 模型[7]是将管道摩擦与局部瞬时加速度、对流加速度联系起来，提出的动态摩阻项计算公式为：

$$J_U=\frac{k_3}{g}\left(\frac{\partial V}{\partial t}-a\frac{\partial V}{\partial x}\right) \tag{4}$$

式中，k_3 为 Brunone 系数。

2.4 Urbanowicz and Zarzycki 简化加权类动态摩阻模型

URBANOWICZ K 等[6]提出了一种简化的加权类动态摩阻模型，其动态剪切应力 τ_u 为：

$$y_i(t+\Delta t)=y_i(t)\mathrm{e}^{-n_i\frac{4v\Delta t}{D^2}}+m_i\mathrm{e}^{-n_i\frac{2v\Delta t}{D^2}}[V(t+\Delta t)-V(t)] \tag{5}$$

$$\tau_u=\frac{4\rho v}{D}\sum_{i=1}^{n}y_i(t+\Delta t) \tag{6}$$

式中，Δt 为时间步长；ρ 为流体密度；$y_i(t)$为历史速度对壁面切应力的影响；N 为指数项总数；m_i、n_i 均为加权系数[6]。

3 水锤方程二阶 Godunov 格式求解

3.1 数据重构

Godunov 格式将输水管道分成若干控制单元，控制单元交界面处的离散通量为：

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+\frac{\partial f(\boldsymbol{u})}{\partial x}=0 \tag{7}$$

$$\boldsymbol{u}^t(x)=\begin{Bmatrix}\boldsymbol{U}_L^t & x<x_{i+1/2}\\ \boldsymbol{U}_R^t & x>x_{i+1/2}\end{Bmatrix} \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{u}$ 为待求向量；$\boldsymbol{U}_L^t$、$\boldsymbol{U}_R^t$ 分别为待求向量 $\boldsymbol{u}$ 在 $i+1/2$ 界面左、右两侧的平均值。

精确解为：

$$\boldsymbol{U}_{i+\frac{1}{2}}(t)=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}(H_L^t+H_R^t)+\dfrac{a}{g}(V_L^t-V_R^t)\\ (V_L^t+V_R^t)+\dfrac{g}{a}(H_L^t-H_R^t)\end{pmatrix} \tag{9}$$

式中，V_L^t、V_R^t 分别为 t 时刻流速 V 在 $i+1/2$ 界面左、右侧的平均值；H_L^t、H_R^t 分别为 t 时刻水头 H 在 $i+1/2$ 界面左、右侧的平均值。

由此，边界 $i+1/2$ 处的通量值可表示为：

$$\boldsymbol{f}_{i+1/2}=\overline{\boldsymbol{A}}_{i+1/2}\boldsymbol{U}_{i+1/2}(t) \tag{10}$$

$$\overline{\boldsymbol{A}}_{i+1/2}=\begin{pmatrix}V & a^2/g\\ g & V\end{pmatrix} \tag{11}$$

构造分段函数 $\boldsymbol{U}(x)$来代替单元平均值 $\boldsymbol{U}_i(x)$，即：

$$\boldsymbol{U}_i(x)=\boldsymbol{U}_i^t+\boldsymbol{r}_i(x-x_i)\quad x_{i-1/2}<x<x_{i+1/2} \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{r}_i$ 为 $\boldsymbol{U}_i^t$ 第 i 个计算单元中点的斜率向量。

由此得到 $\boldsymbol{U}_i^L$、$\boldsymbol{U}_i^R$ 分别为：

$$\boldsymbol{U}_i^L=\boldsymbol{U}_i^t-\boldsymbol{r}_iDx/2 \tag{13}$$

$$\boldsymbol{U}_i^R=\boldsymbol{U}_i^t+\boldsymbol{r}_i\Delta x/2 \tag{14}$$

为避免产生虚假振荡的现象，选择斜率限制器函数 MINMOD(σ_j^t，σ_{j-1}^t)，即：

$$\boldsymbol{r}_i=\mathrm{MINMOD}(\sigma_j^t,\sigma_{j-1}^t)=\begin{cases}\sigma_j^t & |\sigma_j^t|<|\sigma_{j-1}^t|;\sigma_j^t\sigma_{j-1}^t>0\\ \sigma_j^t & |\sigma_j^t|>|\sigma_{j-1}^t|;\sigma_j^t\sigma_{j-1}^t>0\\ 0 & \sigma_j^t\sigma_{j-1}^t<0\end{cases} \tag{15}$$

其中

$$\sigma_j^t=(\boldsymbol{U}_{j+1}^t-\boldsymbol{U}_j^t)/\Delta x$$

$$\sigma_{j-1}^t=(\boldsymbol{U}_j^t-\boldsymbol{U}_{j-1}^t)/\Delta x$$

3.2 时间推进

时间推进计算公式为：

$$\boldsymbol{U}_i^{L*}=\boldsymbol{U}_i^L-\frac{1}{2}\frac{\Delta t}{\Delta x}[\boldsymbol{f}(\boldsymbol{U}_i^R)-\boldsymbol{f}(\boldsymbol{U}_i^L)] \tag{16}$$

$$\boldsymbol{U}_i^{R*}=\boldsymbol{U}_i^R-\frac{1}{2}\frac{\Delta t}{\Delta x}[\boldsymbol{f}(\boldsymbol{U}_i^R)-f(\boldsymbol{U}_i^L)] \tag{17}$$

式中，$\boldsymbol{U}_i^{L*}$、$\boldsymbol{U}_i^{R*}$ 分别为计算单元 i 左、右侧对应的变量值。

3.3 Riemann 问题的近似求解

Riemann 问题的近似求解公式为：

$$\boldsymbol{U}_L^t=\boldsymbol{U}_i^{R*} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{U}_R^t=\boldsymbol{U}_{i+1}^{L*} \tag{19}$$

3.4 虚拟边界

上游水库的虚拟单元为：

$$\boldsymbol{U}_{-1}^t=\boldsymbol{U}_0^t=\boldsymbol{U}_{1/2} \tag{20}$$

$$H_{1/2}-V_{1/2}a/g=H_1^t-V_1^ta/g \tag{21}$$

式中，$U_{1/2}$ 为虚拟单元边界的变量值；$\boldsymbol{U}_{-1}^t$、$\boldsymbol{U}_0^t$ 分别为虚拟单元－1、0 的变量值；$H_{1/2}$、$V_{1/2}$ 分别为虚拟单元边界处的水头、流速。

下游水库的虚拟单元为：

$$\boldsymbol{U}_{N+2}^t=\boldsymbol{U}_{N+1}^t=\boldsymbol{U}_{N+1/2} \tag{22}$$

$$H_{N+1/2}+V_{N+1/2}a/g=H_N^t+V_N^ta/g \tag{23}$$

中国知网 https://www.cnki.net

式中,$H_{N+1/2}$、$V_{N+1/2}$ 分别为虚拟单元 $N+1$ 边界处的水头、流速;$\boldsymbol{U}_{N+1/2}$ 为虚拟单元 $N+1$ 边界处的变量值;$\boldsymbol{U}_{N+1}^{t}$ 为虚拟单元 $N+1$ 的变量值;$\boldsymbol{U}_{N+2}^{t}$ 为虚拟单元 $N+2$ 的变量值。

3.5　时间积分

采用二阶精度龙格库塔法进行计算。计算公式为:

$$\boldsymbol{U}_{1i}^{t+\Delta t}=\boldsymbol{U}_{i}^{t}-(\boldsymbol{f}_{i+1/2}^{t}-\boldsymbol{f}_{i-1/2}^{t})\Delta t/\Delta x \tag{24}$$

$$\boldsymbol{U}_{2i}^{t+\Delta t}=\boldsymbol{U}_{1i}^{t}+\boldsymbol{s}(\boldsymbol{U}_{i}^{t+\Delta t})\Delta t/2 \tag{25}$$

$$\boldsymbol{U}_{i}^{t+\Delta t}=\boldsymbol{U}_{1i}^{t+\Delta t}+\boldsymbol{s}(\boldsymbol{U}_{2i}^{t+\Delta t})\Delta t \tag{26}$$

其中　$\boldsymbol{s}(\boldsymbol{U}_{i}^{t+\Delta t})=\begin{cases}0\\ -g[J_{s}(\boldsymbol{U}_{i}^{t+\Delta t})+J_{U}(\boldsymbol{U}_{i}^{t})]\end{cases}$

式中,$\boldsymbol{U}_{1i}^{t+\Delta t}$ 为时刻 $t+\Delta t$ 的变量值;$\boldsymbol{U}_{2i}^{t+\Delta t}$ 为考虑时间 $\Delta t/2$ 更新源项后的变量值;$\boldsymbol{U}_{i}^{t+\Delta t}$ 为考虑时间 Δt 更新源项后的变量值。

4　简化加权类动态摩阻与有限体积法的水锤数值模拟

4.1　水锤试验系统及方案

为了验证所建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。该平台由上游压力罐、下游水箱、盘旋压力钢管及管道附件组成。压力罐最大承压 1.6 MPa,容积为 2.2 m^3。试验的玻璃管长度 $L=241.52$ m,管道直径 $D=0.05$ m。管线波速 a 为 1 280 m/s,水头损失系数为 0.019 2。通过压力罐来改变初始水头,通过阀门来改变阀门关闭时间,试验所用的液体运动黏度为 $\upsilon=4.01\times10^{-6}\ m^2/s$,通过压力传感器来收集管道阀门的水头压力。试验中,为保证上游压力罐的压力保持近似恒定,有 3 种方式来实现:①压力罐采用水泵恒压供水,即压力罐向下游管线供水过程中,一旦压力低于设定值,水泵向压力罐补水;试验发现水泵启停会引起一定的压力干扰;②水泵(压力罐在水泵出口方向)持续运行向下游管线供水,试验发现上游水泵持续供水,压力罐压力存在不稳定现象;③仅用压力罐供水,试验前通过水泵向压力罐补水,使其压力高于所需压力,此时调节下游阀门开度得到不同初始流量,当管道基本达到稳态流动,快速关阀产生水锤,关阀操作会使流量为 0,上游压力罐压力会由于水流出而低于初始压力,但在关阀水力瞬变过程中,压力罐压力近似恒压状态。试验中,管道稳态流量较小,且压力罐容积较大,采用第 3 种方法进行上游压力控制。为了验证所建模型的准确性,选取 5 种试验水锤工况,具体见表 1。工况 1～3 为不同初始压力情况,工况 1、4、5 为不同流速情况。

表 1　试验工况参数

Tab. 1　Parameters of experimental conditions

工况编号	上游稳压罐初始水头 H/m	流速 V/(m·s^{-1})
1	24.5	0.22
2	23.2	0.22
3	22.4	0.22
4	24.5	0.18
5	30.1	0.26

4.2　计算分析

将所建模型计算结果与 Zielke 模型、Brunone 模型、传统的特征线法结果、试验结果进行对比分析,研究所建模型的准确性、高效性、稳定性。首先,基于 5 种水锤事件的试验数据,验证所建模型的准确性,并与 Zielke 模型、Brunone 模型进行比较分析;随后,针对模型的计算效率,比较分析了所建模型、Zielke 模型、Brunone 模型 3 种模型计算耗散;最后,通过改变库朗数,比较本文模型所采用的二阶 Godunov 格式与传统的特征线法,分析模型的准确性与稳定性。

4.2.1　模型准确性验证与对比分析

图 1 为 5 种水锤试验工况下,所建模型(UZ)、Zielke 模型、Brunone 模型、稳态摩阻计算结果与试验结果的压力波动曲线对比。结果显示,传统的稳态摩阻模型在第一个压力周期与试验值吻合良好,随着时间推进与试验值的差距逐渐增大,该模型低估了水锤的能量耗散,难以用于整个瞬变过程的压力波动的模拟与分析。相对于传统的稳态摩阻模型,上述 3 种动态摩阻模型的数值模拟结果与试验波动曲线吻合度较高;在第

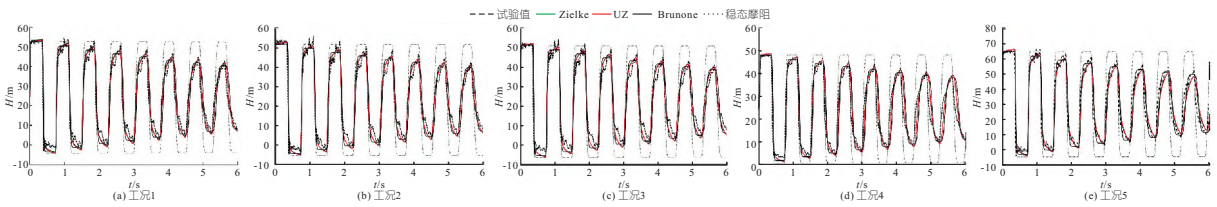


图 1　模型计算结果、试验结果对比

Fig. 1　Comparison of model calculation results and experimental data

中国知网　https://www.cnki.net

一个瞬变峰值动态摩阻与稳态摩阻模拟结果区别不大，随着时间变化，与试验值趋于一致，这是因为动态摩阻充分考虑了水体瞬变过程的动态剪切力引起能量耗散及其累计效应。所建模型(UZ)、Zielke 模型两者模拟结果基本一致(曲线基本重合)，与 Brunone 模型相比更接近试验值。

采用纳什效率系数(E_{NSE})来量化 3 种动态摩阻模型的误差，E_{NSE} 越接近 1 表示偏差越小，该模型准确性越高。$C_r=0.98$ 时 3 种模型的纳什效率系数见表 2。表 2 表明不同工况下，Zielke 动态摩阻和 UZ 动态摩阻模型均有较高的精度，而 Brunone 动态摩阻模型精度较低，E_{NSE} 系数在 0.9 左右。

表 2 C_r 为 0.98 时 3 种模型的纳什效率系数

Tab. 2 N_{NSE} of three models at $C_r=0.98$

模型	E_{NSE}				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
Zielke	0.941	0.958	0.947	0.896	0.946
UZ	0.939	0.960	0.952	0.892	0.936
Brunone	0.830	0.914	0.916	0.774	0.891

4.2.2 模型计算效率对比分析

图 2 给出了所建模型(UZ)、Zielke 模型、Brunone 模型 3 种动态摩阻模型不同工况下计算时间对比图。结果表明，在 5 种不同水锤工况下，Zielke 模型的计算时间最长，5 次计算时间均值为 0.55 s，Brunone 模型的计算时间最短，5 次计算时间均值为 0.04 s。UZ 模型的 5 次计算时间均值为 0.07 s，介于 Brunone 模型与 Zielke 模型之间。

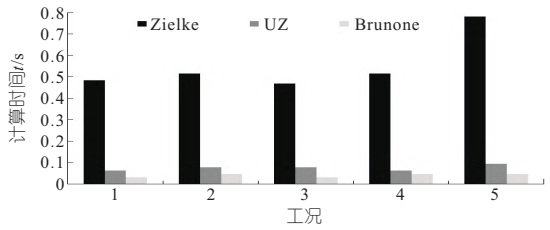


图 2 3 种动态摩阻模型不同工况下计算时间对比

Fig. 2 Comparison of calculation time for three unsteady friction models under different operating conditions

对于长距离管线水锤计算，其计算网格数将远高于该部分试验系统的计算网格数。为了分析计算网格数 N 对各模型计算效率的影响，表 3 给出不同 N 下各模型的计算耗时。N 为 16 时，Zielke 模型分别为 UZ 模型和 Brunone 模型运行时长的 8、10 倍；网格数 N 为 100 时，Zielke 模型分别为 UZ 模型和 Brunone 模型运行时长的 101、119 倍。具体原因为 N 越多，计算精度越高，模型运行时间越长。对于实际输水管网，可能出现 C_r 小于 1 的情况，表 4 为不同库朗数 C_r 下各模型的计算耗时。C_r 为 0.98 时，Zielke 模型分别为 UZ 模型、Brunone 模型运行时长的 8、16 倍；C_r 为 0.2 时，Zielke 模型分别为 UZ 模型、Brunone 模型运行时长的 45、81 倍。

表 3 不同计算网格数 N 下 3 种模型的运行时间

Tab. 3 The running time of the three models with different number of computing grids N

模型	运行时间/s			
	$N=16$	$N=40$	$N=65$	$N=100$
Zielke	0.484	10.422	31.297	135.250
UZ	0.063	0.250	0.594	1.344
Brunone	0.047	0.141	0.359	1.141

表 4 不同库朗数 C_r 下 3 种模型的运行时间

Tab. 4 The running time of the three models with different Courant number C_r

模型	运行时间/s			
	$C_r=0.98$	$C_r=0.70$	$C_r=0.50$	$C_r=0.20$
Zielke	0.500	1.344	2.156	12.594
UZ	0.063	0.094	0.125	0.281
Brunone	0.031	0.063	0.078	0.156

综上所述，Zielke 模型的计算耗时受 N、C_r 的影响较大，在 N 很大、C_r 小于 1 的情况下，Zielke 模型的计算效率极低。Brunone 模型和 UZ 模型的计算耗时受 N、C_r 的影响较小，计算效率效高。Brunone 模型计算效率略优于所建模型。

4.2.3 所建模型与特征线法对比

在实际输水管道系统中常存在 C_r 小于 1 的情况。图 3 给出了特征线法(MOC)、二阶 Godunov 格式在 C_r 分别为 0.98、0.60、0.20 时模拟结果。

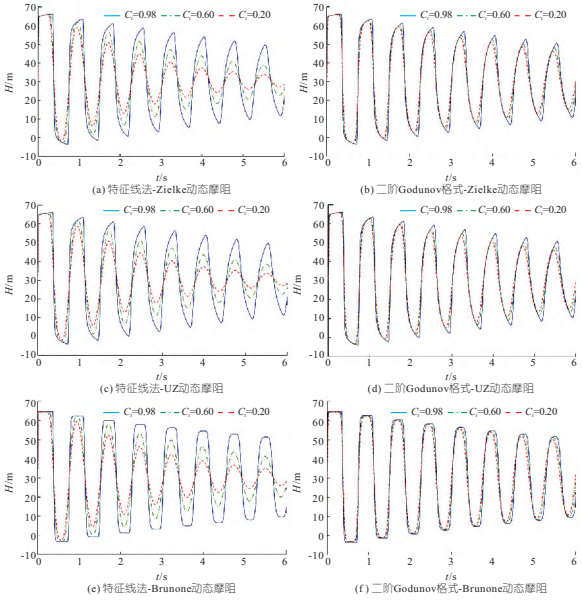


图 3 不同库朗数 C_r 条件下 MOC 格式和 Godunov 格式的数值模拟结果

Fig. 3 Results of MOC and Godunov under different C_r conditions

中国知网 https://www.cnki.net

图 3(a)、(c)、(e)表明，Zielke 模型、UZ 模型和 Brunone 模型在采用 MOC 进行数值模拟时，随着库朗数 C_r 的减小均出现较明显的数值耗散。图 3(b)、(d)、(f)表明，Zielke 模型、UZ 模型、Brunone 模型采用 Godunov 格式进行数值模拟时，随着 C_r 的减小仅出现了轻微的数值衰减。总的来说，MOC 模拟结果随着 C_r 的减小存在严重的数值耗散，而二阶 Godunov 格式模拟结果具有良好的数值稳定性和准确性，数值耗散相对较小。

5　结论

a. 基于简化加权类动态摩阻与有限体积法的水锤模型，可以精准仿真水锤压力的波动峰值与周期，与试验结果基本吻合。传统的稳态摩阻模型在第一个压力周期与试验值吻合良好，随着时间推进与试验值的差距逐渐增大，该模型低估了水锤的能量耗散，难以用于整个瞬变过程的压力波动的模拟与分析。

b. Zielke 模型与所建模型具有基本一致的计算精度，纳什效率系数达 0.94，但 Zielke 模型计算耗时量巨大，在网格数很大、库朗数小于 1 的情况下，可达到所建模型的 100 倍。当库朗数小于 1 时，传统的特征线法会出现严重的数值耗散，而本文模型仅有轻微的数值衰减。

c. Brunone 模型计算效率略优于所建模型，但计算精度略差，纳什效率系数低于所建模型。

参考文献：

[1] 汪怡然，俞晓东，韩笑笑，等. 考虑泥沙颗粒影响的长距离供水工程单向塔水锤防护[J]. 农业工程学报，2023，39(4)：84-91.

[2] 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)：164-169，187.

[3] 胡晓慧. 泵站有压输水工程水锤调控及优化方法研究[D]. 武汉：华中科技大学，2022.

[4] ZHOU LING，CAO YUN，KARNEY BRYAN，et al. Unsteady friction in transient vertical-pipe flow with trapped air[J]. Journal of hydraulic research，2021，59(5)：820-834.

[5] ZIELKE W. Frequency-dependent friction in transient pipe flow[D]. ProQuest Dissertations Publishing，1966.

[6] URBANOWICZ K，ZARZYCKI Z，KUDZMA S. Universal weighting function in modeling transient cavitating pipe flow[J]. Journal of theoretical and applied mechanics，2012，50(4)：889-902.

[7] BRUNONE B，GOLIA U M，GRECO M. Some remarks on the momentum equation for fast transients[J]. International meeting on hydraulic transients with water column separation(9th Round Table of the IAHR Grap)，1991.

[8] 练继建，王俊，万五一，等. 变时步的特征线法计算复杂输水系统的水力过渡过程[J]. 水利水电技术，2003，39(9)：12-14，72.

[9] 周领，李文娟，刘德有，等. 管道内水流冲击滞留气团的二阶 Godunov 数学模型[J]. 水电能源科学，2021，39(4)：95-99.

Simplified Numerical Simulation of Water Hammer by Weighted Unsteady Friction and Finite Volume Method

MA Xin-hong[1]，QI Hui-qing[1]，ZHANG Feng-yi[2a]，FENG Rui-lin[2a]，HU Yin-ying[2a]，ZHOU Ling[2b]

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co.，Ltd.，Jinan 250013，China；
2a. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering；2b. Yangtze Institute for Conservation and Development，Hohai University，Nanjing 210098，China)

Abstract：In pressurized water conveyance systems such as pump stations and long-distance water supply，accurate and efficient hydraulic calculation is crucial for the hydraulic safety and intelligent regulation of the system. However，most of the existing water hammer calculations are based on the assumption of steady-state friction and underestimate the attenuation of water hammer. In particular，the method of characteristics used often causes calculation errors due to interpolation calculation or adjustment of wave speed. In order to simulate the water hammer problem accurately and efficiently，this paper constructs a simplified weighted unsteady friction water hammer model of Urbanowicz and Zarzycki，and uses the second-order Godunov scheme to solve the model. A water hammer test bench is designed and constructed，and the calculation results of the model are compared with the Zielke model，the Brunone model，the traditional method of characteristics and the experimental results. The results show that the proposed model can accurately simulate the fluctuation peak and period of water hammer pressure，which is basically consistent with the experimental results. The Zielke model has the same calculation accuracy as the proposed model，and the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient can reach 0.94，but the Zielke model is very time-consuming. The computational efficiency of the Brunone model is slightly better than that of the proposed model，but the computational accuracy is poor，and the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient is 0.87. When the Courant number is less than 1，the method of characteristics will have serious numerical dissipation，and the proposed model has only a slight numerical attenuation. Therefore，this paper provides an accurate，efficient and stable water hammer simulation method.

Key words：water hammer；unsteady friction；Godunov scheme；water conveyance system；transient flow

中国知网　https://www.cnki.net