

伴随层流-紊流交替的管流水击衰减特性分析*

万五一, 朱 嵩, 胡云进

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

(周哲玮推荐)

摘要: 为了模拟低流速情况下的流态转换和水击波的实际衰减过程, 针对管流瞬时流速接近临界流速而导致的层流-紊流交替出现的情况, 分别将层流摩擦损失公式和紊流摩擦损失公式引入到传统的特征线法瞬变计算模型, 建立改进后的瞬变模拟复合数学模型. 通过数值方法对伴随层流-紊流交替情况下的水击全过程进行模拟得到关阀瞬变的压力波动时程, 与传统瞬变模型计算结果相比, 该波动过程线具有更快的衰减速度. 结果分析表明, 瞬变波的衰减过程实质是弹性波的能量衰减过程, 摩擦损失是导致瞬变波衰减的直接原因, 当流速较大时, 能量消散以紊流摩擦为主, 当流速较小时, 能量消散以层流摩擦为主. 对于瞬变波衰减的模拟, 考虑层流区的实际摩擦损失后的衰减速度比传统水击模型计算的衰减速度快, 因此, 在瞬变波衰减的模拟中必须充分考虑层流摩擦的效应.

关键词: 流体瞬变; 层流; 紊流; 特征线法

中图分类号: TV134.1;TV272.6 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2010.10.002

引 言

特征线水击计算方法是管流非恒定数值模拟最常用的方法^[1]. 该方法能够较好地模拟管路中的最大瞬变压力. 但 Silva 等^[2]的数值模拟和沙毅等^[3]的试验表明, 通过此方法模拟关阀情况下的水击波衰减过程时, 水击波最后阶段的衰减速度很慢, 这和水击波衰减的实际情况不相符. 相关文献对水击波的衰减存在诸多异议. Brunone 等^[4]及 Wahba^[5]通过研究发现层流情况下该问题更加突出, 并指出层流情况下的水击摩擦应该进行修正. 杨玲霞等^[6]认为数值模拟的水击波衰减缓慢是由于水击方程的推导本身存在一定问题, 并且对方程进行了一定改进. 但 Jayasinghe 等^[7], Arfaie 等^[8], Brunone 等^[9]和 Masashi 等^[10]认为水击波的衰减由能量的摩擦项决定, 当流速很小时, 水击波的能量损失与非恒定摩擦相关, 因此导致水击计算衰减过慢的主要原因是没有正确模拟水击中的实际摩擦. Vardy 等^[11]和 Warda 等^[12]对非恒定摩擦的特性进行研究; Brunone 等^[13], 李进平等^[14]通过二维模型对瞬变流情况下的摩擦进行了模拟. Pezzinga^[15]对瞬变流的数值计算结果和相关试验进行对比, 定性地说明了数值模拟的水击衰减过程和实际的不符, 数值模拟的水击衰减过程通常较实际情况的慢.

* 收稿日期: 2010-04-01; 修订日期: 2010-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50709029); 水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2009ZX07424-004)

作者简介: 万五一(1975—), 男, 湖南安乡人, 副教授, 博士(联系人. E-mail: wanwuyi@zju.edu.cn).

本文认为,传统的水击特征线计算方法采用紊流规律计算水流摩阻是导致模拟的水击波在低流速下衰减缓慢的主要原因。根据水流运动和能量损失变化规律,液流状态可分为层流和紊流两种形态,只有在流速非常小时管流的流态才是层流,实际水流运动通常为紊流。这是传统的水击特征线计算方法采用紊流规律计算水流摩阻的主要原因之一。该方法可以近似模拟水击的最大压力,但是低估了层流的摩阻损失,所以无法准确模拟水击波的实际衰减过程。本文从不同流态下的管流能量损失规律出发,分析阀门关闭时压力管道水击波的变化过程,依据层流损失规律和紊流损失规律建立改进后的层流和紊流情况下的瞬变复合数学模型,通过该模型更准确地模拟水击波的实际衰减过程,以及流态交替变化对水击衰减和最大水击压力的影响。

1 瞬变模拟的基本原理

瞬变流的计算经历了公式法、图解法、特征线法和有限元法等几个阶段。其中特征线方法具有精度高、结构简单、易于编程等特点。Wylie 和 Streeter 在文献[1]中对该方法进行了系统阐述。随着计算技术的发展,该方法在封闭管道的流体瞬变模拟中得到了最广泛的应用。

流体瞬变计算的基本方程包括连续方程和动量方程,其中有两个因变量,即速度和水力坡度线高度,两个自变量,即沿管线距离和时间。虽然这两个方程完整地描述了流体的运动规律,但无法获得这两个双曲偏微分方程的解析解。特征线法通过规定的积分路径将方程转换为常微分方程,然后将这些方程离散成差分形式,通过差分方程求解瞬变流的数值解。

经过特征线路径积分并离散成差分格式的等价方程组为

$$h_{i,t+\Delta t} - h_{i-1,t} + \frac{a}{g}(v_{i,t+\Delta t} - v_{i-1,t}) + \lambda \frac{\Delta x}{d} \frac{1}{2g} v_{i-1,t} |v_{i-1,t}| = 0, \quad (1)$$

$$h_{i,t+\Delta t} - h_{i+1,t} - \frac{a}{g}(v_{i,t+\Delta t} - v_{i+1,t}) - \lambda \frac{\Delta x}{d} \frac{1}{2g} v_{i+1,t} |v_{i+1,t}| = 0, \quad (2)$$

式中, h 为测压管水头, v 为流速, a 为水击波速, R 为管道的水力半径, g 为重力加速度, Δx 为管道单元长度, λ 为沿程阻力系数, 根据 Darcy 公式 $\lambda = 8g/C^2$, 下标 i 为节点序号, 下标 t 为时间标识, x 为节点位置, C 为 Chezy 系数。

如图 1 所示,在求解压力管道瞬变过程的水力参数时,通常是从一个已知的初始恒定状态 ($t = 0$) 开始,这时所有节点的流速和压力可以通过求解恒定流直接得出,即可以确定起始时刻的状态边界条件。根据 t 时刻已知结点的参数可求解除

进出口以外的任何中间结点 $t + \Delta t$ 时刻的压力和流速,进出口结点可以利用一个特征线方程和边界约束方程联合求解,约束方程由端点边界确定。从 0 时刻开始,重复以上步骤可以求得 $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, n\Delta t$ 时刻的各个结点水力参数,依此类推,可模拟水流随时间的变化过程。

2 伴随层流-紊流交替的流体瞬变分析

对于有压管流阀门关闭的正水击过程,当流速接近 0 时,管流的流态可能随着流速波动而交替变化。如图 2 所示为管流发生水击时压力与流速的时程线。图中 $p-t$ 曲线为阀门突然关闭

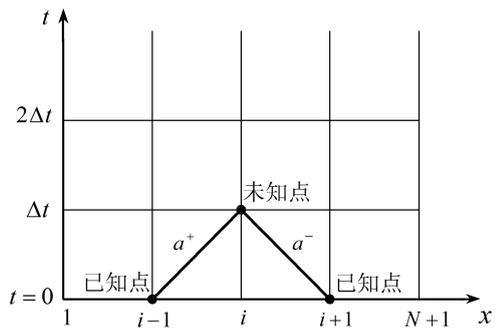


图 1 $x-t$ 计算平面网格

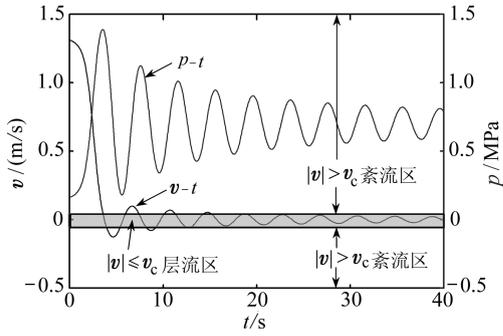


图2 瞬变压力与流速变化过程分析

的水击压强变化过程,水击压力从开始增加到最大的过程为增压区,此后水击进入衰减区;图中 $v-t$ 曲线为流速变化过程,当流速 $|v| > v_c$ 时为紊流区,当 $|v| \leq v_c$ 时为层流区。在起始阶段,流速随阀门关闭而逐渐减小,当管中的流速小于下临界流速时,流体形态从紊流区过渡到层流区,管道中的压力上升;此后管中流速在层流区和紊流区波动,水击波开始衰减。从以上分析可知,水击在衰减过程中任意时刻的能量损失既可能是紊流情况下的摩擦损失,也可能是层流情况下的摩擦损失。

因此,要正确模拟水击的全过程必须考虑不同流态下的摩擦损失规律,流速大于临界 Reynolds 数时采用紊流摩擦规律,而流速小于临界 Reynolds 数时采用层流摩擦规律。

3 层流与紊流复合模型

3.1 层流与紊流的能量损失规律

层流是指流体质点互不混掺的有序流动;紊流是指流体质点相互掺混且作不规则的随机脉动的水流现象。由于这两种流动的机理不同,因此二者的能量损失规律也不相同。Reynolds 试验表明,圆管层流情况下流体的能量损失与平均流速成正比,圆管紊流情况下的能量损失与平均流速的 1.75 ~ 2.0 次方成正比,对于紊流的 2 次阻力平方区的能量损失与流速的 2.0 次方成正比。层流和紊流的能量损失公式可分别表示为:

层流沿程损失

$$h_f = \frac{64}{\nu d/\nu} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}; \quad (3)$$

紊流沿程损失

$$h_f = \frac{8gn^2}{R^{1/3}} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (4)$$

式中, h_f 为压力管道的水头损失, ν 为流体的运动粘滞系数, d 为压力管道直径, l 为压力管道长度, v 为管道断面平均流速, n 为糙率系数, R 为管道的水力半径。

根据 Reynolds 试验的研究结果,不同流态情况下水头损失与流速的变化规律如图 3 所示,其中层流的水力摩擦与流速的 1 次方成正比,而紊流水力摩擦与流速的 2 次方成正比。该图表明,管流位于层流区时,用紊流公式计算的摩擦损失比实际情况(层流公式)的小,也就是说采用紊流公式计算水击全过程时,低估了层流区域的流动摩擦损失,这是传统水击模型导致水击波衰减变慢的主要原因之一。因此水击的实际消散过程应该比按紊流规律计算的水击衰减过程快,要得到水击的实际衰减过程需考虑层流区的实际摩擦对水击衰减的影响。分析表明,当流速趋于 0 时,用层流摩擦公式计算的能量损失是紊流摩擦公式计算损失的无穷倍,即

$$\lim_{v \rightarrow 0} \left(\frac{64}{\nu d/\nu} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} / \left(\frac{8gn^2}{R^{1/3}} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \right) \right) = \infty,$$

因此层流区的水力摩擦对水击波衰减的影响不能忽略。

3.2 考虑不同损失规律下的复合模型

如图 2 所示的阀门完全关闭的水击过程,弹性波的作用使管道中的水体振动,此时流体来

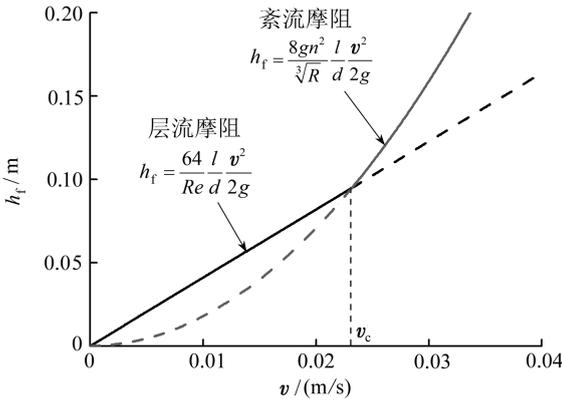


图3 层流与紊流的水头损失规律分析

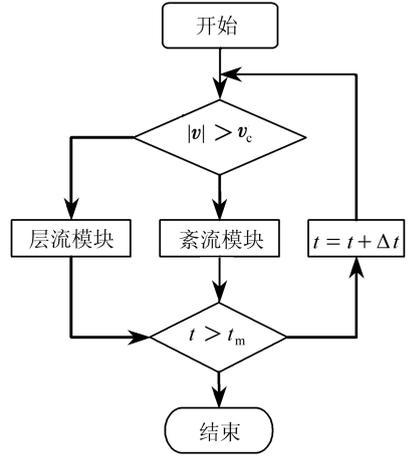


图4 层流-紊流瞬变模型的计算流程

回振动,平均速度接近 0,管流流态必然会变化为层流,要完全模拟水击的衰减过程必须对管流中的流态变化进行分析.管流为紊流状态时需要依据紊流摩阻规律计算能量损失,管流为层流状态时需要依据层流摩阻规律计算能量损失.传统的水击数学模型只引用了紊流摩阻计算流体能量损失,不能准确地模拟层流区的水流摩阻损失.为了模拟水击波的真实衰减过程,需要将层流摩阻的损失规律引入到数学模型中,从而建立包含层流和紊流摩阻损失规律的复合数学模型.层流-紊流的复合模型需要通过节点所在断面的瞬时平均流速判断过流断面的水流流态,并且引用相应的摩阻损失规律计算能量损失,从而更加准确地模拟水击的真实衰减过程.

为了对能量损失规律进行概化,忽略层流和紊流之间的过渡区,并依据式(3)和式(4)分别计算层流和紊流的水力摩阻损失,将式(3)代入方程(1)和(2)可得层流情况下瞬变流的水击数值方程(5)和(6),同理,将式(4)代入方程(1)和(2)可得紊流情况下瞬变流的水击数值方程(7)和(8).

层流瞬变流数值模型

$$h_{i,t+\Delta t} - h_{i-1,t} + \frac{a}{g}(v_{i,t+\Delta t} - v_{i-1,t}) + \frac{32\nu\Delta x}{gd^2}v_{i-1,t} = 0, \tag{5}$$

$$h_{i,t+\Delta t} - h_{i+1,t} - \frac{a}{g}(v_{i,t+\Delta t} - v_{i+1,t}) - \frac{32\nu\Delta x}{gd^2}v_{i+1,t} = 0; \tag{6}$$

紊流瞬变流数值模型

$$h_{i,t+\Delta t} - h_{i-1,t} + \frac{a}{g}(v_{i,t+\Delta t} - v_{i-1,t}) + \frac{4n^2\Delta x}{R^{1/3}}v_{i-1,t} |v_{i-1,t}| = 0, \tag{7}$$

$$h_{i,t+\Delta t} - h_{i+1,t} - \frac{a}{g}(v_{i,t+\Delta t} - v_{i+1,t}) - \frac{4n^2\Delta x}{R^{1/3}}v_{i+1,t} |v_{i+1,t}| = 0. \tag{8}$$

由于水击过程伴随着层流和紊流的交替,在任何初始计算时刻,需要判断管流的流态,根据流态选择相应的计算模型,此后循环计算下一时刻.将层流模型和紊流模型进行结合处理后的复合模型的计算流程如图4所示.该图表达的是单个节点在特定时刻上的计算,在整体差分计算网格中,只要有流态发生变化,差分迭代过程需满足同一时刻不同节点之间的数据交换,以及同一节点在不同时刻的数据交换.改进后的数值计算模型的基本思路为:对任何已知流动状态,首先根据节点的瞬时流速确定相应过流断面的流态,如果是层流则对该点采用层流的瞬

变计算模块,如果是紊流则采用紊流的瞬变计算模块,根据计算时间的要求,复合数学模型具有循环计算的功能。

4 层流-紊流复合水击模型的运用

4.1 阀门全关过程的水击模拟

管流水击计算通常注重水击发生后的最大增压和最小负压,对水击的衰减和消散过程并没有引起足够的重视。水击数值模拟通常只计算水击发生后振幅较大的几个压力波动过程,水击波的衰减过程和消散时间被忽视。传统水击模型引用紊流摩阻公式计算水击过程的能量损失,许多研究表明,这种方法在计算水击衰减过程时,水击波的在最后阶段的衰减速度很慢,甚至长时间不衰减。

为了说明层流区的摩阻损失对水击波衰减的影响,分别用传统水击模型(考虑紊流摩阻)和复合模型(考虑层流和紊流摩阻)对阀门关闭的水击波衰减过程进行模拟。计算条件为水头差 $h_0 = 30$ m,管道长 $l = 3$ km,波速 $a = 1\ 000$ m/s,阀门变化 $\tau = 1.0 \rightarrow 0$,不同模型的计算的的压力波和流速变化时程曲线如图 5 和图 6 所示。图中线 1 为复合模型计算的水击压力波和流速衰减过程,线 2 为传统水击模型计算的水击压力波和流量衰减过程。如图 7 所示,采用传统水击模型计算的水击波在最后阶段的衰减速度很慢,而考虑层流区的实际摩阻损失后,本文模型计算出的水击波衰减速度比传统水击模型计算的衰减速度快。在水击发生的大波动阶段,流态以紊流状态为主,此时用两种方法计算的波动过程是相近的,但在小波动区域,层流状态占的比重越来越大,此时层流摩阻对水击波的衰减作用不可忽略,也不能用紊流摩阻公式来取代。与传统水击模型相比,采用层流-紊流复合模型计算的水击波能够在较短的时间内衰减,这和相关的水击试验结论相符。该计算也说明了以往水击波计算结果衰减缓慢的主要原因是没有充分考虑到层流区的摩阻损失对水击衰减的影响。

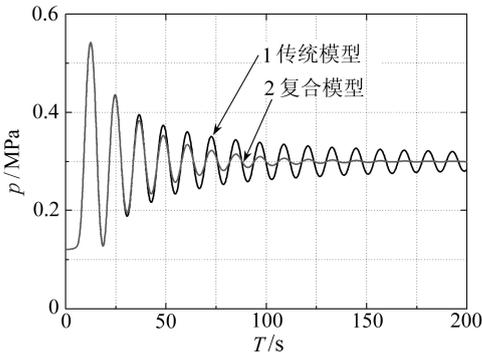


图 5 压力波的时程变化曲线

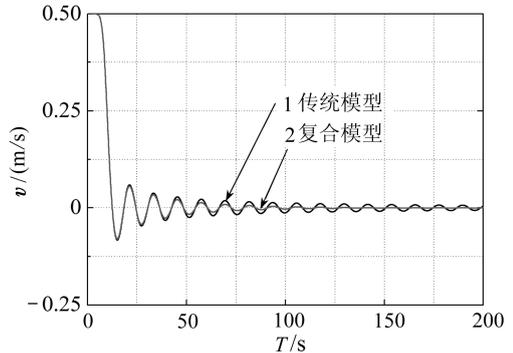


图 6 流速时程变化曲线

4.2 阀门部分关闭过程的水击计算

实际上,管流中的水流型态通常为紊流,只有当流速非常小(常温下, $d = 0.1$ m时,临界流速 $v_c \approx 0.03$ m/s)时才可能产生层流。阀门部分关闭情况下管中的最小流速可能大于临界流速,即 $v_{\min} > v_c$,整个水击过程中的水流均处于紊流状态,流体的能量损失始终符合紊流摩阻规律。这种阀门部分关闭的水击过程的波动衰减过程与层流区没有关系,采用传统水击模型和复合水击模型计算所得结果应该相同。

为了分析阀门部分关闭(最小流速不小于临界流速)情况下的水击波衰减规律和层流摩阻的关系,分别采用复合模型和传统模型对阀门部分关闭的水击过程进行模拟。计算工况为水

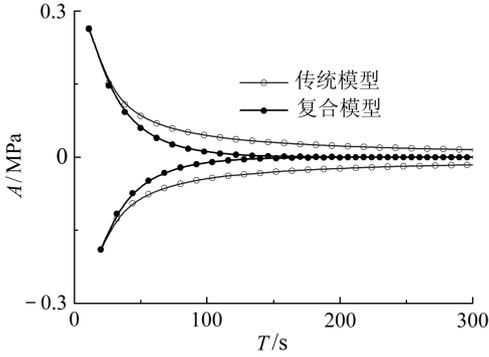


图 7 水击波振幅衰减趋势比较

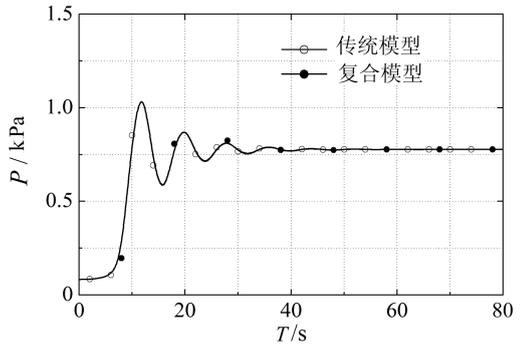


图 8 不完全关闭情况下的水击波比较

头差 $h_0 = 80$ m, 管道长 $l = 3$ km, 波速 $a = 1\ 000$ m/s, 阀门变化 $\tau = 1.0 \rightarrow 0.08$, 数值计算结果如图 8 所示. 计算结果表明, 对于阀门部分关闭的水击过程, 复合模型和传统模型计算的结果相同, 而且这种水击过程的衰减过程也较快. 这是因为阀门部分关闭时, 管中的流速依然较大, 能够通过紊流摩擦将水击波的能量消耗, 此外水击波的能量也可以通过阀门开口处的流体带走.

结合阀门全关过程的水击波衰减特性可知, 水击波的衰减过程实质是弹性波的能量衰减过程. 这说明摩擦损失是导致水击波衰减的直接原因, 当流速较大时, 能量消散以紊流摩擦为主, 当流速很小时, 能量消散以层流摩擦为主.

4.3 层流对最大水击压力的影响

图 5 计算结果表明, 水击最大压力通常发生在大波动阶段, 此时层流所占的比重非常小, 复合模型计算的最大压力与传统模型的计算结果基本相同, 这说明层流对水击的最大水击压力的影响较小. 表 1 为不同模型计算的水击最大压力比较和误差, 表中 $p_{1\max}$ 是传统模型计算的最大压力值, $p_{2\max}$ 是复合模型计算的最大压力值, ε 为误差, 可通过

$$\varepsilon = [(p_{2\max} - p_{1\max}) / p_{1\max}] \times 100\%$$

得出. 该表说明了对于一般的水击压力计算, 采用传统的水击模型就能够获得水击的最大压强值, 因此传统的水击模型计算结果能够满足一般的常规需求.

表 1 不同方法的最大压力与计算误差 ($l = 3$ km)

x	0	0.2l	0.4l	0.6l	0.8l	l
$p_{1\max}/\text{MPa}$	0.300 0	0.548 4	0.609 0	0.556 3	0.560 3	0.617 7
$p_{2\max}/\text{MPa}$	0.300 0	0.552 8	0.609 3	0.556 8	0.561 5	0.616 0
$\varepsilon/(%)$	0.00	0.80	0.05	0.09	0.21	-0.28

4.4 衰减规律与波动频率分析

水击波的衰减与能量损失项是直接相关的, 对于小振幅(流速很小)情况下, 流体能量损失和流速的 1 次方成正比(层流摩擦规律), 采用传统的方法已经不符合实际的流体能量损失规律, 此时水击波消散速度非常缓慢, 甚至不消散, 这和实际情况是不相符的. 采用实际的摩擦损失规律建立的复合模型对阀门全关情况下的水击进行计算表明, 水击波在实际的水流摩擦下的衰减是较明显, 这比传统模型计算的衰减规律更加符合实际的水击衰减过程. 大量计算结果表明, 采用两种模型计算的水击波衰减频率相同, 且 $T = 2l/a$, 这说明能量损失规律没有影响水击波的频率. 复合模型计算的水击过程考虑了不同流速情况下的摩擦特性, 它不仅能够计算水击的最大压力和最小压力, 而且也更加合理地计算水击波在小波动情况下的衰减过程.

5 结 论

本文从流体能量损失的规律出发,以实际的水流摩阻损失规律为基础,建立了伴随层流-紊流交替的瞬变流的复合模型,该模型将层流和紊流的两种摩阻损失规律引入瞬变计算模型中。通过对不同情况下的水击全过程进行模拟和分析,得到如下结论:

1) 根据流体不同流态的摩阻损失规律,建立了层流-紊流交替情况下的复合瞬变流计算模型。该模型考虑了不同流速情况下的摩阻特性,不仅可以计算水击的最大升压和最小压力,而且能够更加准确地模拟水击波实际衰减过程;

2) 传统的水击计算模型可以计算水击波在紊流状态下的波动过程,但由于采用的摩阻公式不适应低流速(层流)时的摩阻计算,因此无法正确模拟关阀水击(振荡流速很小)情况下的水击波衰减过程;

3) 水击波的衰减过程说明了它是一种弹性波,水击波的衰减实质上是流体的机械能衰减和损失过程,其波动频率不受能量损失规律的影响,但衰减的速率与流体的摩阻能量损失规律密切相关;

4) 计算表明,摩阻损失是导致水击波衰减的直接原因,以往水击波不能衰减的主要原因是没有考虑到层流摩阻损失对水击衰减的影响。当流速很小时,水击波的消散以层流摩阻为主,考虑层流摩阻后的水击波能够在较短的时间内衰减,这符合水击的实际衰减情况。

参考文献:

- [1] Wylie E B, Streeter V L. *Fluid Transient*[M]. New York: McGraw-Hill International Book Company, 1978: 131-143.
- [2] Silva A, Walter F, Chaudhry M H. Computation of energy dissipation in transient flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1997, **123**(2): 108-115.
- [3] 沙毅,王春林,刘涛,邵霞,闻建龙. 圆管流动水击压力波测量及水力计算[J]. *实验力学*, 2007, **22**(5): 527-533.
- [4] Brunone B, Ferrante M, Cacciamani M. Decay of pressure and energy dissipation in laminar transient flow [J]. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2004, **126**(6): 928-934.
- [5] Wahba E M. Modelling the attenuation of laminar fluid transients in piping systems [J]. *Applied Mathematical Modelling* 2008, **32**(12): 2863-2871.
- [6] 杨玲霞,李树慧,侯咏梅,范如琴. 水击基本方程的改进[J]. *水利学报*, 2007, **38**(8): 948-952.
- [7] Jayasinghe D A P, Letelier M S, Leutheusser H J. Frequency-dependent friction in oscillatory laminar pipe flow [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1974, **16**(11): 819-827.
- [8] Arfaie M, Suwan K, Anderson A. Stability and accuracy of pipe friction approximations in method of characteristics solutions for waterhammer[J]. *Mathematical Engineering in Industry*, 1994, **4**(4): 265-281.
- [9] Brunone B, Karney B W M, Mecarelli M F. Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2000, **126**(4): 236-244.
- [10] Masashi S, Jim B, Alan V. Estimating friction errors in MOC analyses of unsteady pipe flows [J]. *Computers & Fluids*, 2007, **36**(7): 1235-1246.

- [11] Vardy A E, Hwang K L. Characteristics model of transient friction in pipes [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1991, **29**(5): 669-684.
- [12] Warda H A, Kandil H A, Elmiligui A A. Modeling unsteady friction in rapid transient pipe flows[J] *AEJ - Alexandria Engineering Journal*, 2001, **40**(6): 783-795.
- [13] Brunone B, Golia U M, Greco M. Effects of two-dimensionality on pipe transients modeling [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1995, **121**(12): 906-912.
- [14] 李进平, 杨建东. 非恒定摩阻对管道水力过渡过程的影响[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2002, **35**(2): 13-17.
- [15] Pezzinga G. Evaluation of unsteady flow resistance by quasi-2D or 1D models[J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 2000, **126**(10): 778-785.

Attenuation Analysis of Hydraulic Transients With Laminar-Turbulent Flow Alternations

WAN Wu-yi, ZHU Song, HU Yun-jin

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University,
Hangzhou 310058, P. R. China)

Abstract: An improved compound mathematical model was established to simulate attenuation of hydraulic transients with laminar-turbulent alternations, usually occurred when pipeline flow velocity fluctuates near the critical velocity. Laminar friction resistance and turbulent friction resistance were considered respectively in this model by applying different resistance schemes to the characteristics method of fluid transient analysis. The hydraulic transients of valve closing process were simulated using the model. More reasonable attenuation of hydraulic transients was obtained. Accurate attenuation is more distinct than that obtained from traditional models. The research shows that hydraulic transient is a type of energy waves, and its attenuation is caused by friction resistance. Laminar friction resistance is more important than turbulent friction resistance if the flow velocity is smaller than the critical velocity. Otherwise turbulent friction resistance is more important. Laminar friction resistance is important in the attenuation of hydraulic transients for valve closing process. Therefore it is significant to consider different resistances separately in order to obtain more accurate attenuation of hydraulic transients.

Key words: fluid transient; laminar flow; turbulent flow; method of characteristics(MOC)