

设计计算

# 长输管道瞬变流摩阻的实用算法

陈 明\* 蒲家宁

(中国人民解放军后勤工程学院)

陈 明 蒲家宁:长输管道瞬变流摩阻的实用算法,油气储运,2008,27(11) 17~21。

**摘 要** 针对传统瞬变流摩阻计算精度低的问题,对其算法进行了改进。提出采用动态摩阻系(因)数来计算瞬态摩阻,并运用辛普生方法处理摩阻积分项,提高了计算精度。算例表明,将该方法应用于长距离管道水击分析,可以在保证与传统方法相同计算精度的前提下,能够显著地减小计算量,节省计算时间。

**主题词** 长输管道 瞬变流 摩阻 动态摩阻系(因)数 辛普生方法

## 一、前 言

瞬变流摩阻与许多要素有关,例如时间、频率、流量、压力以及管壁弹性等,其处理方法要比恒定流复杂得多。在传统的水击分析计算中,为了便于计算,通常采用稳态时的摩阻系(因)数来计算整个瞬变过程的摩阻,并且采用一阶近似的方法使摩阻和流量的关系线性化。对于摩阻起重要作用的系统,各泵站的压头大部分甚至全部都消耗在管道摩阻损失上(长距离的输油管道),传统的近似方法会给计算结果带来较大的误差,而且由于误差的累加作用,可能根本得不到正确的解。

到目前为止,对瞬变流摩阻损失的机理和计算方法的研究还很不充分。虽然传统水击分析方法不能很好地模拟水击衰减过程,但却能够有效预测最大的水击升压和降压值。因此,寻找更为完善的瞬变流摩阻计算方法,进一步提高水击分析的精度,对于管道的安全运行具有重要的指导意义。

## 二、传统瞬变流摩阻计算方法的改进

### 1、 动态摩阻系数法

在我国石油储运工程界,常采用列宾宗公式进

行摩阻计算<sup>[1]</sup>:

$$h_f = fQ^{2-m}l \quad (1)$$

式中  $h_f$  ——水力摩阻损失;  
 $f$  ——列宾宗摩阻系数;  
 $Q$  ——管道流量;  
 $m$  ——流态指数;  
 $l$  ——管道长度。

传统水力瞬变分析通常采用稳定流状态下的  $f$  值来进行摩阻计算,误差较大。本研究根据瞬变状态下流量的变化情况,采用不同的公式来计算  $f$ , 即  $f$  的分区计算。文献[1]给出了层流及紊流各区的计算公式。通常情况下,雷诺数( $Re$ )是用来划分流态区的。对于一条具体的管道而言,管径与管壁的相对粗糙度均可视为定值,因此可将按  $Re$  划分流态区转化为按  $Q$  来划分。

层流区:

$$Q < 1800\nu D \quad (2)$$

紊流光滑区:

$$1800\nu D \leq Q < 7.854 \frac{\nu D^2}{K} \quad (3)$$

紊流混合摩擦区:

$$7.854 \frac{\nu D^2}{K} \leq Q < 393 \frac{\nu D^2}{K} \quad (4)$$

紊流完全粗糙区：

$$Q \geq 393 \frac{\nu D^2}{K} \quad (5)$$

式中  $\nu$  —— 液体的运动粘度；

$D$  —— 管道内径；

$K$  —— 管道的当量粗糙度。

图 1 给出了采用动态摩擦系数法进行水击分析的基本计算流程。

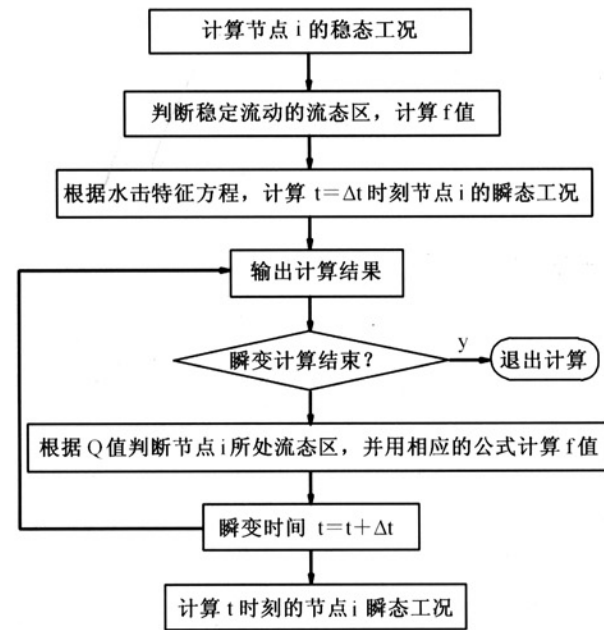


图 1 动态摩擦系数法的计算流程

文献[1]指出，只要计算出的流态区域与实际符合，用式(1)计算瞬态摩擦是准确的，或者基本上是正确的。

### 2、动态摩擦因数法

在紊流混摩区中，难以用式(1)的形式来计算摩擦损失，不得不求助于近似方法<sup>[1]</sup>，这样势必会引入附加的误差。

计算紊流混摩区最准确的公式是国际上公认的科尔布鲁克(Colebrook)式<sup>[1,2]</sup>：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{K}{3.71 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (6)$$

式中  $\lambda$  —— 达西摩擦因数。

文献[1]认为，紊流区的水力计算不分区，都采用式(6)，以利于工程计算，并可提高混摩区的计算精度。文献[2]指出，式(6)能够很好地符合 Moody

图，用其计算整个紊流区的  $\lambda$  值是切实可行的。将式(6)变形，建立  $Q$  与摩擦损失的关系，推导过程如下。

达西-韦斯巴赫 (Darcy-Weisbach) 公式表示为<sup>[1]</sup>：

$$h_f = \lambda \frac{l V^2}{D 2g} \quad (7)$$

由式(7)可以得到：

$$\lambda = \frac{h_f 2gD}{l V^2} = \frac{\pi^2 g D^5 s}{8 Q^2} \quad (8)$$

将式(8)变形为：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\frac{8}{\pi^2 g D^5}} \frac{Q}{\sqrt{s}} = a_1 \frac{Q}{\sqrt{s}} \quad (9)$$

$$a_1 = \sqrt{\frac{8}{\pi^2 g D^5}}$$

式中  $V$  —— 液流流速；

$g$  —— 重力加速度；

$s$  —— 单位管长的压头损失，即水力坡度；

$a_1$  —— 系数。

将雷诺数  $Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D \nu}$  和式(9)代入式(6)，

于是有：

$$a_1 \frac{Q}{\sqrt{s}} = -2 \lg \left[ \frac{K}{3.71 D} + \frac{2.51}{\left( \frac{4 Q}{\pi D \nu} \right)} \times a_1 \frac{Q}{\sqrt{s}} \right]$$

$$= -2 \lg \left( \frac{K}{3.71 D} + \frac{2.51 \pi D \nu a_1}{4 \sqrt{s}} \right) \quad (10)$$

令  $a_2 = \frac{2.51 \pi D \nu a_1}{4}$ ，可将式(10)转化为：

$$Q = -\frac{2}{a_1} \sqrt{s} \lg \left( \frac{K}{3.71 D} + \frac{a_2}{\sqrt{s}} \right) \quad (11)$$

式(11)建立起了流量与摩擦损失(水力坡度)的关系。已知摩擦损失可以直接计算流量，而已知流量计算摩擦损失则需要迭代。图 2 给出了采用摩擦迭代法进行水击计算的基本流程。虽然式(6)的解算过程稍显复杂，但可忽略分区问题，计算精度也能得到保证。

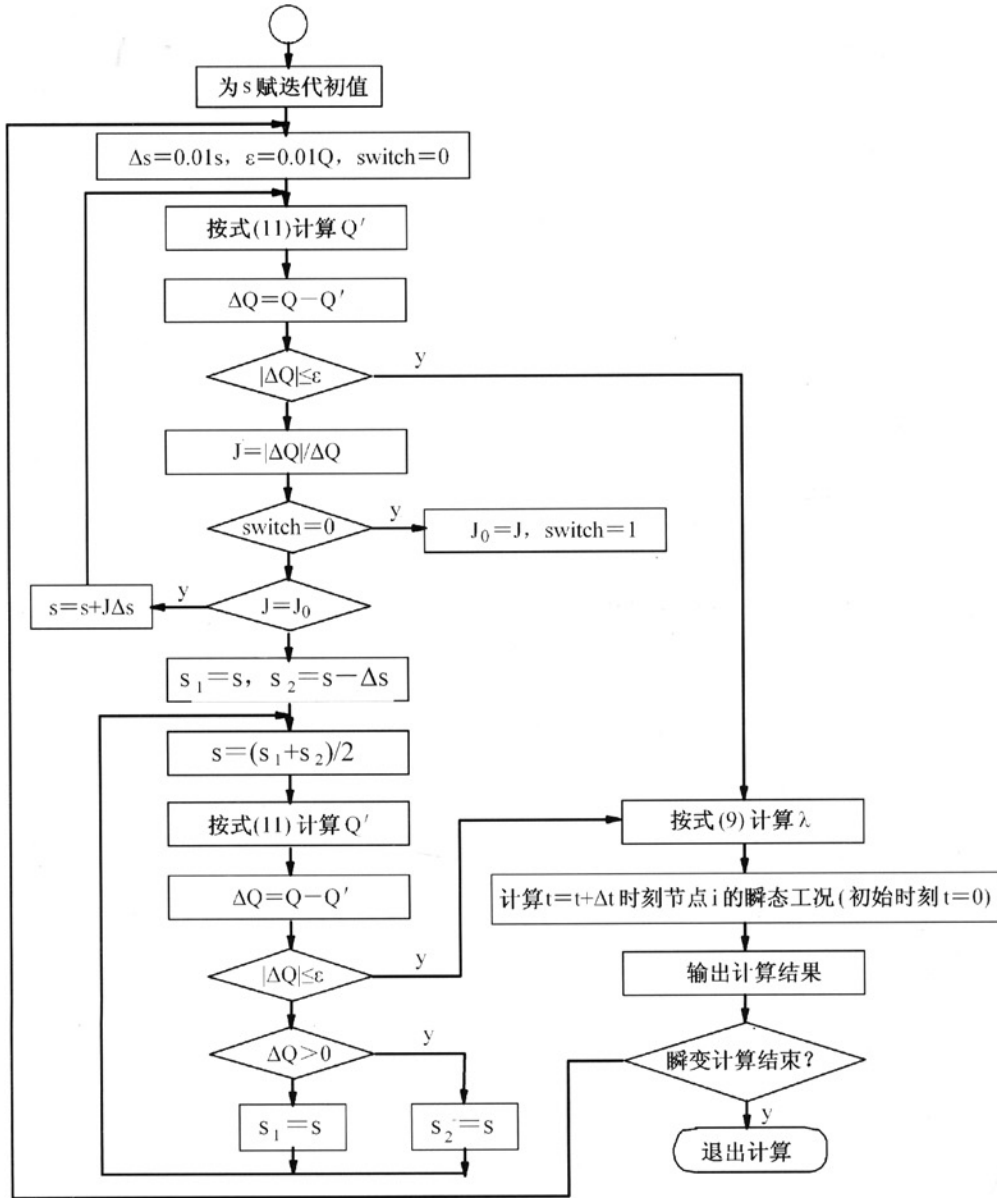


图 2 瞬变摩擦阻迭代计算流程

### 三、辛普生方法处理摩擦阻积分项

水击基本微分方程中的摩擦项通常有两种表达式,即  $fQ|Q|^{1-m}$  和  $\frac{8\lambda}{\pi^2 g D^5} Q|Q|$ , 现采用后者进行分析。根据辛普生方法<sup>[3,4]</sup>, 令:

$$R = \int_{t_1}^{t_2} Q|Q| dt \approx \frac{1}{6} (Q_1 Q_1 + 4Q_X |Q_X| + Q_2 |Q_2|) \Delta t \quad (12)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

式中  $Q_X$  ——  $\frac{t_1+t_2}{2}$  时刻的流速值。

将式(12)代入正向和负向特征线差分方程, 得到:

$$H_P - H_A + C(Q_P - Q_A) + G(\lambda_A Q_A |Q_A| + 4\lambda_L Q_L |Q_L| + \lambda_P Q_P |Q_P|) = 0 \quad (13)$$

$$H_P - H_B - C(Q_P - Q_B) - G(\lambda_B Q_B |Q_B| + 4 \lambda_R Q_R |Q_R| + \lambda_P Q_P |Q_P|) = 0 \quad (14)$$

$$C = \frac{a}{gA} \quad (15)$$

$$G = \frac{a \Delta t}{12gDA^2} \quad (16)$$

式中  $A$  ——管道截面积；  
 $a$  ——水击波速；  
 $Q_L$  ——特征线  $AP$  中点的流量；  
 $Q_R$  ——特征线  $BP$  中点的流量(见图 3)。

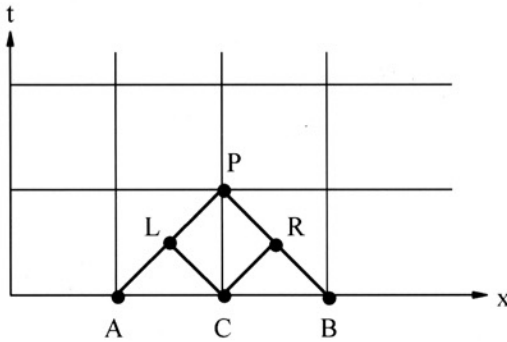


图 3 差分计算网格

对  $Q_L$  和  $Q_R$  的求解不采用辛普生方法, 因为特征线  $AL$ 、 $LC$  及  $RC$ 、 $RB$  中点的流量始终是未知量, 这样是无法求出  $Q_L$  和  $Q_R$  的。考虑到计算方便和保证精度的要求, 这里采用将摩擦阻项处理成线性隐式的方法<sup>[1,5]</sup>。

对于特征线  $AL$ :

$$\int_{t_A}^{t_L} Q |Q| dt \approx Q_L |Q_A| \Delta t' \quad (17)$$

对于特征线  $CL$ :

$$\int_{t_C}^{t_L} Q |Q| dt \approx Q_L |Q_C| \Delta t' \quad (18)$$

对  $Q_R$  的处理方法类似。采用这种方法, 计算精度比一阶近似模型要高, 而且算法也比较容易实现。求出  $Q_L$  和  $Q_R$  后, 再联立式(13)和式(14), 可解出  $H_P$  和  $Q_P$ 。

辛普生方法的截断误差为:

$$E_r = -\frac{(\Delta t)^5}{2 \cdot 880} [Q(\xi) |Q(\xi)|]^{(4)} \quad (19)$$

其中  $t_1 \leq \xi \leq t_2$ 。辛普生方法计算精度高的原因除了其本身具有三阶精度外, 还引入了  $Q_L$  和  $Q_R$  两个参数。这表明, 在计算点  $P$  的物理量时, 不仅考虑了前一时步相邻两点  $A$ 、 $B$  的影响, 还考虑了前一时步同一点流动状态的影响, 这与水击波传播的实际情况是相符的。而采用一阶近似模型时, 完全没有考虑  $AP$  或  $BP$  间流量的变化, 精度必然很差。采用二阶精度模型时, 虽然考虑了流量的变化, 但是同一点的物理量, 要经过两个时步之后才能产生影响, 这与真实的物理过程有偏差, 其计算精度自然也会受到一定影响。

在与传统方法相同计算时步下, 采用辛普生方法, 水击计算精度虽明显优于传统方法, 但其计算量会相应增加, 这主要是由于需要计算中点流量的缘故。如果再加上瞬态摩擦的计算时间, 则总的计算量还将进一步增加。考虑到本文方法的计算精度比传统方法高, 因此, 即使在较大的计算时步下, 此方法仍可获得与传统方法相同甚至更高的精度。对于长输管道水击计算而言, 采用该方法可以适当加大步长, 在保证计算精度的同时, 增加的计算量可能并不多甚至没有增加。因为计算量与管道分段数  $N$  的平方成正比, 增大步长可以显著地减小计算量<sup>[6]</sup>。

## 四、算 例

图 4 为一简单管道, 管道内径  $D=0.15 \text{ m}$ , 上游为水库, 下游接球阀, 稳态时球阀全开, 自由流出, 波速  $a=1000 \text{ m/s}$ , 计算终端阀门关闭时, 管道末端的最大水击压头。

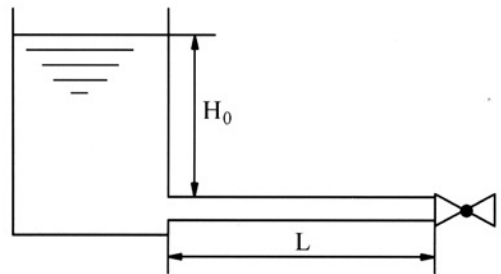


图 4 简单管道示意图

表 1 列出了管道长  $3000 \text{ m}$  时三种方法的计算结果, 表中的  $n$  表示管道的差分段数。根据不同初始流量和上游压头, 分别用三种方法计算了管道末端的最大水击压力, 每种方法又分别采用不同的计算步长进行了计算。

表 1 管道(L=3 000 m)终端阀门处的最大水击压头

关阀时间 (s)	稳态流量 (m <sup>3</sup> /s)	上游压头 (m)	传统方法计算的最大水击压头(m)			动态摩阻系数法计算的最大水击压头(m)			动态摩阻因数法计算的最大水击压头(m)		
			n=30	n=20	n=50	n=3	n=5	n=10	n=3	n=5	n=10
0	0.040 8	100	298.7	326.4	329.3	326.4	328.7	330.4	330.1	332.3	334.0
0	0.038 8	100	288.9	316.5	319.4	316.6	318.8	320.5	316.0	318.2	319.9
0	0.049 6	150	382.6	423.8	428.1	423.6	426.9	429.5	424.2	427.5	430.1
0	0.047 6	200	403.8	457.9	463.6	456.0	460.5	463.9	454.3	458.8	462.2
5	0.033 2	120	267.5	279.5	281.2	280.7	281.1	281.9	280.0	280.3	281.1
5	0.058 2	220	473.6	493.7	496.5	491.7	494.8	496.3	487.1	490.9	492.1
10	0.063 9	300	535.0	561.5	565.1	561.3	565.8	566.9	558.9	563.1	564.3
10	0.051 0	200	398.4	418.5	421.1	419.4	421.0	422.8	417.0	418.8	420.5

从表 1 中的数据可以看出,变摩阻系数法或动态摩阻因数法取 n=3 时,其计算结果接近于传统方法取 n=20 时的结果;而取 n=10 时,又十分接近于传统方法取 n=50 时的计算结果。这说明为了得到相同的计算精度,用变摩阻系数法或动态摩阻因数法,再结合辛普生方法,可以将计算时步加大为传统方法的 5~7 倍左右,从而显著节省计算时间。

表 2 列出了不同长度的长输管道终端关阀时,末端的最大水击压头。从表 2 数据可以看出,在保证与传统方法具有相同计算精度的前提下,应用动态摩阻因数法计算所需要的 n 值远小于传统方法,并且管道越长,所需 n 值越小。这说明,对长距离管道而言,应用该方法能够大大减小计算工作量,同时还能保证相同甚至更高的计算精度。

表 2 管道末端的最大水击压头

关阀时间 (s)	稳态流量 (m <sup>3</sup> /s)	上游压头 (m)	管道长度 (m)	管道末端的最大水击压头 (m)		
				传统方法	动态摩阻系数法	动态摩阻因数法
0	0.023 7	200	12 000	310.7(n=100)	310.6 (n=15)	308.8 (n=15)
0	0.012 5	320	75 000	332.4(n=100)	332.2 (n=8)	332.9 (n=5)
8	0.015 4	180	30 000	230.9(n=100)	229.8 (n=10)	231.1 (n=6)
15	0.014 9	400	75 000	413.9(n=100)	413.4 (n=8)	414.0 (n=3)

但没有增加,甚至还会大大降低,这在长距离管道水击计算上体现得更为明显。

### 五、结 论

从两个方面对传统瞬变流摩阻计算进行了改进,即在计算水击基本微分方程中的摩阻项时,紧密结合流量变化,采用动态摩阻系(因)数,并结合辛普生法计算瞬变摩阻,提高了计算精度,进而提高了长输管道水击数值分析的准确度。计算单个节点的压力和流量时,采用该方法的计算工作量要大于传统方法。但对于整条管道,为了获得相同计算精度的解,传统方法所需的计算节点数是该方法的数倍,对长距离管道而言,甚至高达数十倍,算例中的计算结果也充分说明了这一点。因此,该方法可以用较大的时间步长来进行管道水击分析,其计算工作量不

### 参 考 文 献

- 1, 蒲家宁:管道水击分析与控制,机械工业出版社(北京),1991。
- 2, 蒋 明:野战输油管线水击分析研究(博士论文),中国人民解放军后勤工程学院(重庆),2000。
- 3, 叶宏开:水击计算中摩擦项的处理,水利学报,1987(6)。
- 4, Steven C Chapra, Raymond P Canale: 工程中的数值方法(影印版第三版),科学技术出版社(北京),2000。
- 5, 岑 康 李长俊 廖柯熹等:液体管道瞬变流摩阻的计算方法,西南石油学院学报,2005,27(3)。
- 6, 刘 刚:瞬变流摩阻计算及摩阻对水力瞬变的影响,力学与实践,2003,25(1)。

(收稿日期:2007-10-08)

编辑:孟凡强