

特征线法分析长距离输油管道的 流动瞬变过程

鄂学全 刘国华 王 薇

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

王 平 王红霞

(东北输油管理局, 沈阳 110031)

摘 要 本文建立了基于特征线方法求解流动瞬变过程的数值模型, 编制了针对长距离输油管道流动瞬变过程的分析软件。在数值处理上, Darcy-Weisbach 摩擦力项用二阶精度格式来近似, 因此保证了高粘度流体在流动瞬变过程分析时的计算稳定性和精确度。模型考虑了埋管地形对沿线瞬变压力的影响; 当某一泵站发生水击后其它站的反应由其站控程序确定。应用该软件, 分析模拟了某一长距离输油管道在中间泵站停电或末站瞬时关阀情况下的流动瞬变过程。

关键词 流动瞬变, 特征线方法, 数值方法, 长输管道

分类号 O351.2

1 前言

石油管道输送流程一般分开式和密闭两种。密闭输油有减少节流损失、减少蒸发损耗、上下站压力可以叠加、自动化程度高等优点。因此, 国外输油管道一般都采用密闭输送方式, 我国自八十年代起也开始了老管道的密闭输油改造。然而, 对于密闭输送, 当管线中某处设备发生事故或误操作时, 引起的流动瞬变增压波和减压波将波及全线, 并引起复合水击。其结果可能引起全线范围的超压、液柱分离和泵汽蚀。因此, 分析模拟强度最烈、危险最大的流动瞬变过程, 并依此进行长输管道的设计及水击控制, 是重要的课题。

流动瞬变的研究可以上溯到十九世纪中叶。本世纪初, Allevi 从数学上建立了流动瞬变基本方程, 提出了水击分析的算术法, Bergeren 等人的图解法是三十年代到六十年代的解决流动瞬变问题的主要方法。六十年代起, Streeter 提出的特征线方法因为有超越其它解法诸多的优越性, 而被广泛接受用于求解实际流动瞬变问题。近年来, 随着计算条件的突飞猛进, 数值求解方法得到了飞速发展^[1-4]。但是, 在实际管线的水击分析中, 并无通用、成熟的模型和软件可供应用, 国外有的公司发展自己的水击分析软件, 其应用也仅限于自己的项目^[7,8]。因此, 研制、发展我们自己的流动瞬变分析模型和软件, 对于科研和生产, 都有很大的意义。

本文于 1997 年 6 月 28 日收到。

本文在第2节中描述流动瞬变问题的数学物理模型以及著名的特征线求解方法,对于摩擦力项的二阶精度数值近似,以及数值求解。在第3节,以某一输油管道为例,进行了中间泵站停电和末站瞬时关阀引起的全线流动瞬变模拟和分析。最后,是有关结论。

2 问题描述及解决方案

2.1 数学物理模型

(1) 基本假设

长管道的流动瞬变分析模型建立在以下假设的基础上:1) 流动是一维的;2) 流动具有非定常性;3) 流动是不可压缩的;4) 流动是有粘性的;5) 流动受重力影响,即需要考虑埋管地形变化对流动的影响;6) 考虑当地液柱分离;7) 某一泵站在发生流动瞬变后,其它站的反应由其站控程序^[5,6]决定。

(2) 瞬变流流动控制方程

在以上假设的基础上,流体的流动瞬变由下述流体动力学方程组控制。即满足:连续方程:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \alpha + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2)$$

上式中,各变量的涵义为: x :距离, t :时间, V :速度, p :压力, ρ :密度, g :重力加速度, f :Darcy—Weisbach 摩擦因子, D :管子内径, a :波速, α :埋管倾角。

波速 a 是与流体性质和管线弹性有关的量,

$$a^2 = \frac{k/\rho}{1 + [(k/E)(D/e)]C_1} \quad (3)$$

其中, k 代表流体体积弹性模量, E 代表管子材料 Young's 弹性模量, e 代表管壁厚度, C_1 代表反映管子固定方式的无量纲因子, $C_1 = 1 - \mu^2$, μ 代表 Poisson 比。

摩擦系数 f 值实际上反映着在不同流动状况下,各个参数(流速、流体粘度、管道内径、粗糙度等)与摩擦损失数值的关系。对不同的流态, f 有不同的计算方法,对于长输管道稳态输油情况,流动属于湍流光滑区。摩擦系数 f 可按下式计算:

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (4)$$

式中, Re 是雷诺数,定义为: $Re = \frac{VD}{\nu}$,式中, ν 为流体运动粘度。

(3) 离散汽穴模型

在流动瞬变过程中,当压力降低到流体蒸汽压力时,流体就会气化。气泡可能是均匀地分布,也可能聚集成单个或多个大的空穴。离散汽穴模型假设一旦管道中某离散段出现压力等于或低于流体蒸汽压力,该离散段就按一固定的压力处理,压力保持为蒸汽压。按照该压力,计算该段的出流和入流流量,并按照质量守恒原理,计算汽穴的体积,模型允许汽穴增长或消失。

当存在空穴时,假设在时间 Δt 内, Q_* 是平均进入离散段的流量, Q 是平均出流流量,则空穴的体积为 $\sum (Q - Q_*) \Delta t$, \sum 表示空穴的体积应从空穴开始的时刻计算起。当空穴消失时,压力上升,其上升值可按下式求出:

$$\Delta H = \frac{a}{2gA} (Q_* - Q) \quad (5)$$

2.2 求解

(1) 特征线解法

V. L. Streeter 1962 年提出的特征线法在求解瞬变流方程时具有独到的优越性。通过组合全微分的形式,把(1)、(2)组成的偏微分方程组转换成沿特征线的常微分方程组,从而提供了方便的求解过程。它的理论严密,物理意义明确,精度高。已被广泛应用于求解流体瞬变工程问题。

等价于(1)、(2)的常微分方程组有以下形式:

$$C^+ : \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + g \sin \alpha + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (6a)$$

$$C^+ : \frac{dx}{dt} = V + a \quad (6b)$$

$$C^- : \frac{dV}{dt} - \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + g \sin \alpha + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (7a)$$

$$C^- : \frac{dx}{dt} = V - a \quad (7b)$$

C^+ 、 C^- 表示(6)、(7)只在特征线上成立。即(6a)只在 $x-t$ 平面上的(6b)曲线上成立;(7a)只在 $x-t$ 平面上的(7b)曲线上成立。 C^+ 、 C^- 在物理上的意义是表示了右传水击波和左传水击波的运动规律。

对于水击波在长输管道中的运动情况,一般地, $V \sim 2\text{m/s}$, $a > 1000\text{m/s}$, 故式(6b)和(7b)可近似为:

$$\frac{dx}{dt} = +a \quad (6b)'$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (7b)'$$

在工程上,习惯用压力水头 H 和流量 Q 来代替 p 和流速 V 。所以,用 H 和 Q 来替换 p 和 V , 并积分 C^+ 、 C^- 方程,得到:

$$\begin{cases} C^+ : \int_{H_A}^{H_p} dH + \frac{a}{gA} \int_{Q_A}^{Q_p} dQ + \sin \alpha \int_{x_A}^{x_p} dx + \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_A}^{x_p} Q|Q| dx = 0 \\ C^- : \int_{H_B}^{H_p} dH - \frac{a}{gA} \int_{Q_p}^{Q_B} dQ + \sin \alpha \int_{x_p}^{x_B} dx + \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_p}^{x_B} Q|Q| dx = 0 \end{cases} \quad (8)$$

对于摩擦力项的近似处理,有许多方法。如显式近似^{[1][3][5]}、线性隐式近似^[1]和非线性隐式近似^{[1][2][5]},以及基于 Picard 定理的迭代方法^[4]等。

$$\begin{aligned} \int_{x_A}^{x_p} Q|Q| dx &= Q_A|Q_A|(x_p - x_A) && \dots\dots \text{显式} \\ \int_{x_A}^{x_p} Q|Q| dx &= Q_p|Q_A|(x_p - x_A) && \dots\dots \text{线性隐式} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\int_{x_A}^{x_P} Q|Q|dx = |Q_A|(Q_A + \varepsilon(Q_P - Q_A))(x_P - x_A) \quad \dots\dots\varepsilon \text{ 近似}$$

$$\int_{x_A}^{x_P} Q|Q|dx = \frac{Q_P + Q_A}{2} \left| \frac{Q_A + Q_P}{2} \right| (x_P - x_A) \quad \dots\dots \text{非线性隐式}$$

对于显式格式,当流体粘性大或管道很长时,累积误差可能使计算结果偏离实际情况很远,造成计算不稳定。非线性格式和基于 Picard 定理的算法虽然可以改变这一情况,但需要迭代,这将给程序编制和求解带来很大的不利。这里,采用线性隐式近似,一方面它具有二阶精度,可以消除计算不稳定;另一方面它不需要迭代,可以方便求解。

用二阶线性隐式格式来近似摩擦力项,可以得到描述长输管道中压力水头 H 和流量 Q 的瞬时变化的代数关系。

$$\begin{cases} C^+ : & H_P = C_P - B_P Q_P \\ C^- : & H_P = C_M + B_M Q_P \end{cases} \quad (10)$$

其中,

$$\begin{cases} C_P = H_A + BQ_A - Z_{AP} \\ B_P = B + R_1 |Q_A| \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} C_M = H_B - BQ_B + Z_{BP} \\ B_M = B + R_2 |Q_B| \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} B = \frac{a}{gA} \\ R_1 = \frac{f_A \Delta x}{2gDA^2} \\ R_2 = \frac{f_B \Delta x}{2gDA^2} \\ Z_{AP} = \frac{1}{2}(\sin\alpha_A + \sin\alpha_P)\Delta x = Y_P - Y_A \\ Z_{BP} = \frac{1}{2}(\sin\alpha_B + \sin\alpha_P)\Delta x = Y_P - Y_B \end{cases} \quad (13)$$

各变量的涵义为: H 代表压力水头, Q 代表流量, A 代表流动截面积, B 代表中间量, 波传导项系数, C 代表中间量, 特征不变量, Y 代表海拔高度, Z 代表中间量, 重力项, Δx 代表特征网格距离。 H 和 Q 的下标 A 、 B 和 P 表示节点 A 、 B 和 P , 如图 1 所示。 C 的下标 P 和 M 分别表示沿 C^+ 和 C^- 的特征不变量。

在每一求解步中, A 、 B 两点的值是已知的, P 点的值通过求解瞬变方程得到。

解方程组(10), 得到 H_P 和 Q_P 的显式形式:

$$\begin{cases} H_P = \frac{C_P B_M + C_M B_P}{B_P + B_M} \\ Q_P = \frac{C_P - C_M}{B_P + B_M} \end{cases} \quad (14)$$

流动瞬变问题通常是从一个定常态条件开始的, 假设该时刻为 $t = 0$, 则在 $t = 0$ 时刻, H 和 Q 的初始值是已知的, 所要解决的就是找到在 $t = \Delta t$ 时刻, 各相应节点上的 H 和 Q 值。然后, 依次在不同的时刻 $t = 2\Delta t, t = 3\Delta t, \dots$ 求解 H 和 Q 。这个过程一直进行到所需的时间。

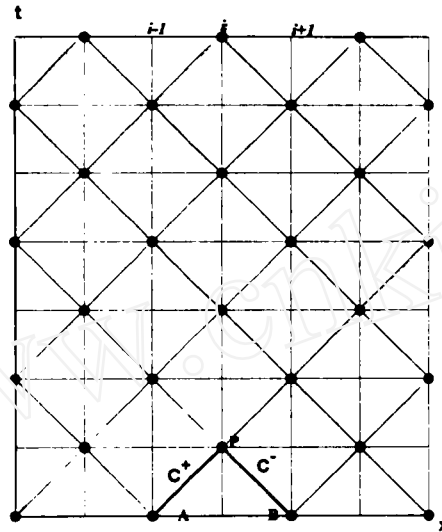


图1 特征线方法计算用网格示意图

交错网格在相同的计算精度前提下,可以减少工作量,而且可以简化程序。所以,我们选用交错网格作为计算网格。图1表示了这一网格分布,求解仅在加黑点的交叉点上进行,而其它的交叉点不求解。

(2) 波速调整

长输管道一般是多管段系统,对于所有的管段,时间步长 Δt 必须一致。这就给各段的离散加了一个约束,对每一管段,要求满足

$$\Delta t = \frac{L_j}{a_j N_j} \quad (15)$$

这里, L_j 表示第 J 段管子的长度, a_j 表示在第 J 段管子的波速, N_j 表示第 J 段管子的离散段数, Δt 表示时间步长。

另外,交错网格要求 N_j 为偶数。在多管段系统中,要精确地满足方程(15)是很难做到的,需要进行近似。本文采用调整波速的方法来解决。

(3) 边界条件

长输管道流动瞬变模型一般有下面几种边界条件:

1) 首站进站压力水头恒定 $H = \text{const}$

首站进行压力恒值控制时使用该条件,流量 Q 由特征方程 C^- 求出。

即:

$$C^-: \quad Q_b = \frac{H_b - C_M}{B_M} \quad (16)$$

下标 b 表示边界点,下标为 M 的值由下游内点得到,下标为 p 的值由上游内点得到。这一约定适用于以下其它种类的边界条件。

2) 关阀条件,流量 $Q = 0$

末端关阀时应用该条件。压力水头 H 由特征方程 C^+ 求出。

即:

$$C^+ : H_b = C_p \quad (17)$$

3) 末端压力水头恒定 $H_c = \text{const}$

末端未关阀时应用该条件。流量 Q 由特征方程 C^+ 和阀条件联合求出。即:

$$\begin{aligned} H_b &= H_c + \Delta H \\ H_b &= C_p - B_p Q_b \\ \Delta H &= \zeta Q_b^2 \end{aligned} \quad (18)$$

ζ 表示阀阻力系数,与开度有关。

4) 无泄压时中间泵站条件:流量守恒 $Q_1 = Q_2 = Q_r$

该条件适用于中间泵站无泄压的情况。 Q_1, H_1 是进站流量和压力水头, Q_2, H_2 是出站流量和压力水头。它们由泵条件和 C^-, C^+ 关系联合求出。即:

$$\begin{cases} H_2 - H_1 = \sum_i (C_i Q_b^2 + d_i) - DRAG \\ H_1 = C_p - B_p Q_b \\ H_2 = C_M + B_M Q_b \end{cases} \quad (19)$$

DRAG 为调节阀与站内管段的阻力,由上一时刻定出。 i 表示开泵台数, $i = 0$ 时,表示该站处于停泵状态。参数 c, d 为各泵特性曲线拟合系数。

5) 泄压时中间泵站条件:流量守恒 $Q_1 = Q_2 + Q_r$

该条件适用于中间泵站泄压的情况,类似 4),但附加泄压条件 $H_1 = H_s$,其中 H_s 为泄压压力。中间泵站各参数应满足的条件为:

$$\begin{cases} H_2 - H_1 = \sum_i (C_i Q_b^2 + d_i) - DRAG \\ H_1 = C_p - B_p Q_1 \\ H_2 = C_M + B_M Q_2 \\ H_1 = H_s \\ Q_r = Q_1 - Q_2 \end{cases} \quad (20)$$

6) 阻力阀条件

非泵站中间站中的阀门和其它产生阻力的部件是一边界条件,用相当阻力条件来模拟。其方程组为:

$$\begin{cases} H_2 - H_1 = \zeta Q_2^2 \\ H_1 = C_p - B_p Q_1 \\ H_2 = C_M + B_M Q_2 \end{cases} \quad (21)$$

结合泄压或不泄压条件

$$\text{泄压: } \begin{cases} H_2 = H_s \\ Q_r = Q_1 - Q_2 \end{cases} \quad (22)$$

不泄压: $Q_1 = Q_2$

7) 变截面条件

如果管子内径有一变化,在计算时应该以变截面条件加以考虑,条件表达式为:

$$\begin{cases} Q_1 = Q_2 \\ H_1 = H_2 \\ C^+ : H_1 = C_P - B_P Q_1 \\ C^- : H_2 = C_M + B_M Q_2 \end{cases} \quad (24)$$

8) 分岔点条件

存在分输站时,应用分岔点条件,即:

$$\begin{cases} Q_1 = Q_2 + Q_3 \\ H_1 = H_2 = H_3 \\ C^+ : H_1 = C_P - B_P Q_1 \\ C^- : H_2 = C_M + B_M Q_2 \\ C^- : H_3 = C_M + B_M Q_3 \end{cases} \quad (25)$$

以上各式中,下标 1 表示上游边界,2 和 3 表示下游边界。

3 算例及分析

我们以某一输油管道为例,进行中间泵站断电和末站瞬时关阀引起的流动瞬变分析。该输油管道是长距离密闭输油管道。干线全长 434.87Km,在距首站 420.43Km 处设置有分输站向支线供油,支线全长 23.11Km。干线设有 5 个中间热泵站,支线设有一计量站。各站均设置压力调节阀(PCV)用于控制出站压力过高和进站压力过低,并且配有进站压力超低和出站压力超高的停泵保护设施。输油管道线路布局如图 2 所示。

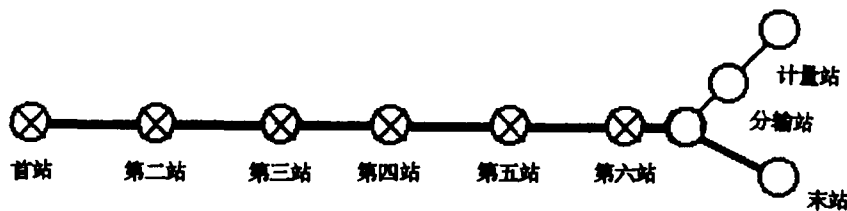


图 2 输油管道示意图

3.1 末站瞬时关阀引起的全线流动瞬变结果

图 3 描述了当末站瞬时关阀后引起的全线流动瞬变过程。这里图示了水击开始后前 10 分钟的情形。图 3(a)显示了末站关阀 2s 后全线的压力分布和流量分布。图中横坐标上方的点指示了沿线的泵站、分输站、计量站和末站等,在横坐标 450Km 处开始的图线表示支线上的情况。沿线压力剖面图中水平实线表示该管段最大允许运行压力值,虚线表示该管段超过最大允许运行压力 10% 的压力值,按^[5]和^[6]的论述,管线强度设计有 10% 的裕量,管线压力短时

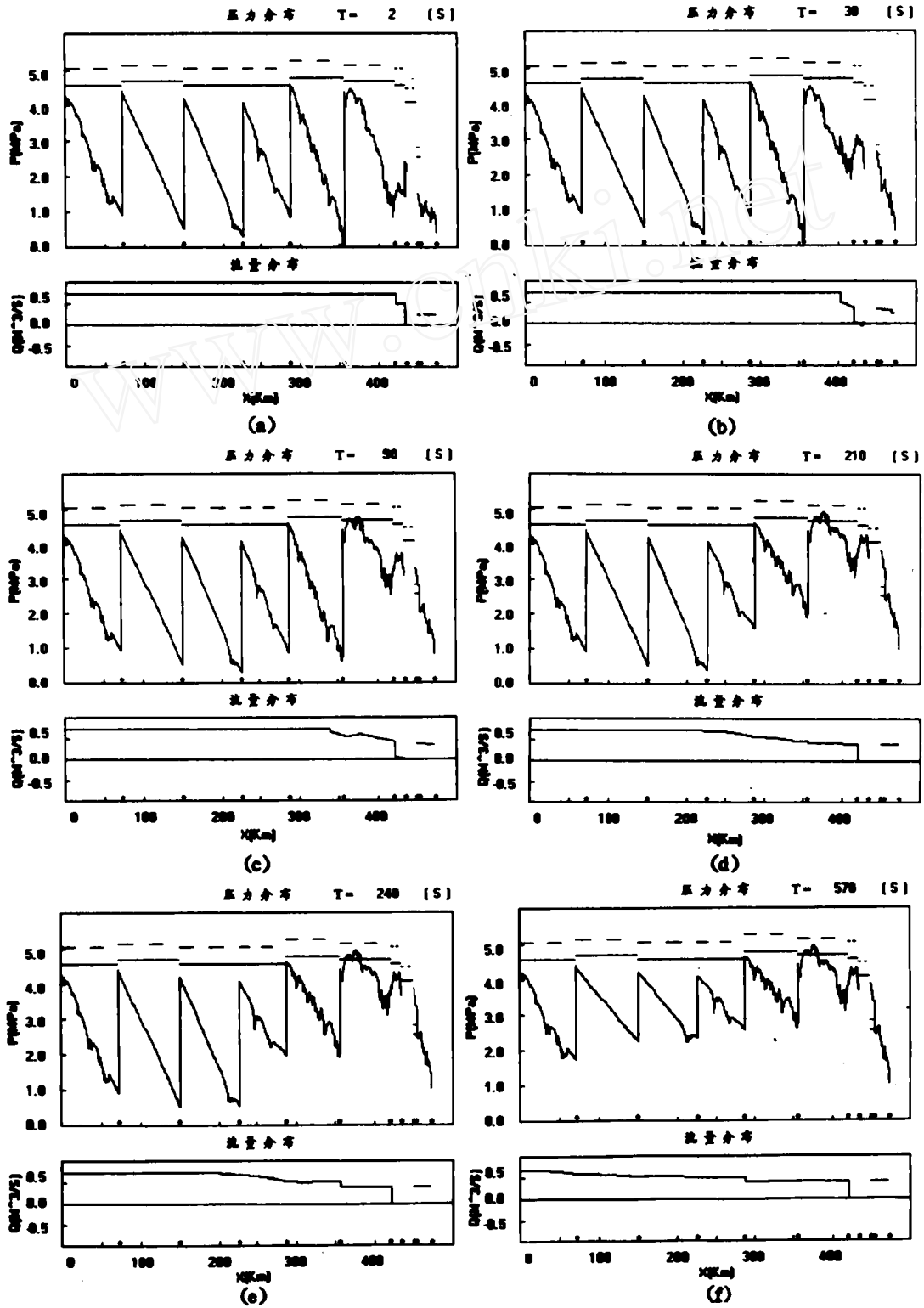


图3 末站瞬时关阀情况下全线各站的压力及流量随时间的变化

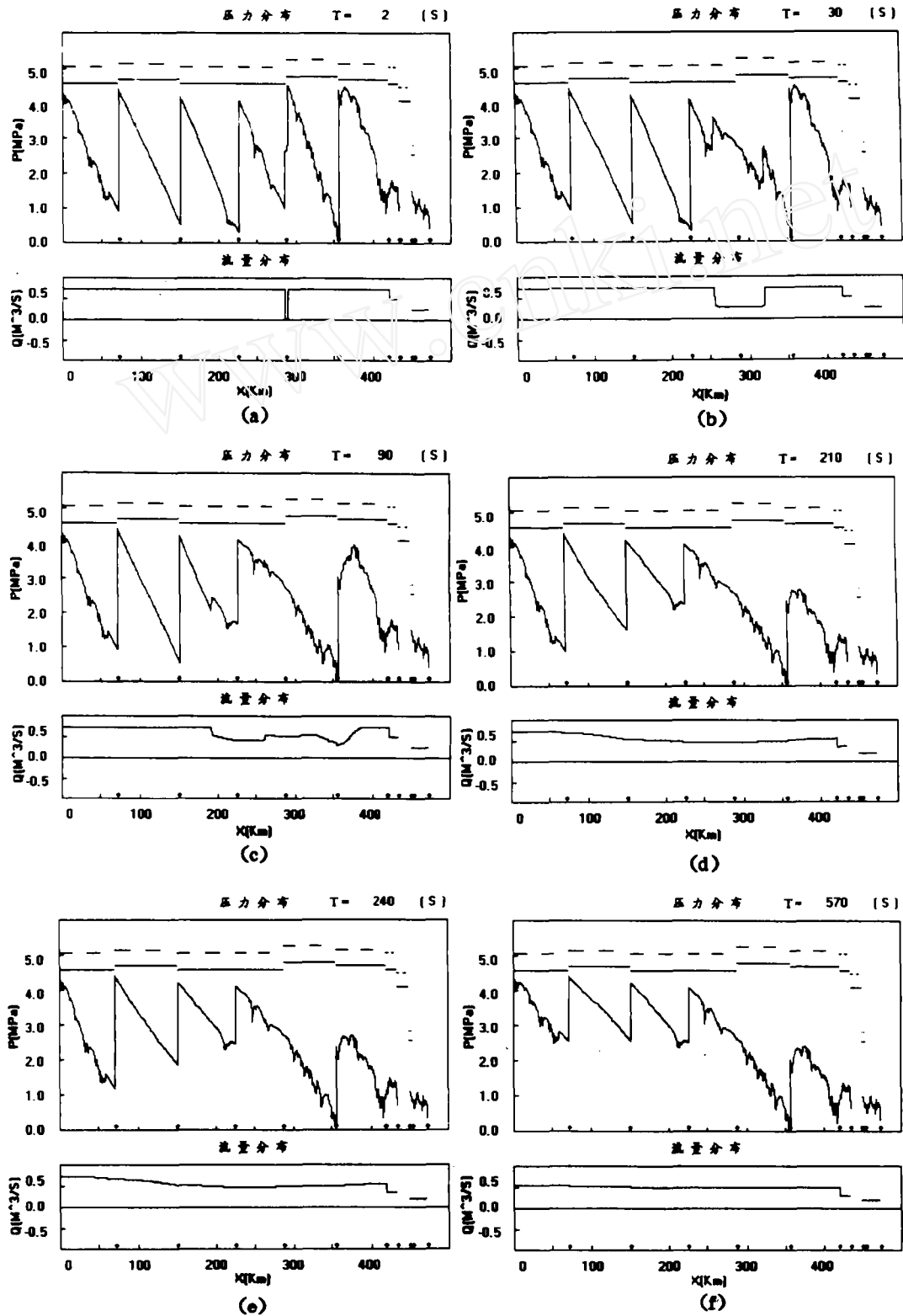


图4 中间泵站断电情况下全线各站的压力及流量随时间的变化

间达到实线时,并不破裂,但不能超过虚线。在该时刻,末站压力瞬时上升,该站流量变为零,瞬时压力上升即为由势涌引起的水击压力。管线其他段与发生水击前一致,无变化。图 3(b)显示了 30s 时的全线压力和流量分布情况,这时末站附近管线压力继续上升,部分区域流动反向;水击波前锋继续向上游推进,由于这时水击波前锋已越过分输站,除了干线上游受到影响外,支线也受到其影响,从图中可以看到,支线上游(即近分输站处)压力大幅度增加,流量也有增加,该影响域已接近支线末站。当 $t = 90\text{s}$ 时(图 3(c)),水击波前锋已越过第六泵站,该泵站按照站控程序,在出压高时,调节压力控制阀(PCV)开度,减少了流量,控制出压,同时也使进压提高,泵站下游由于充填,管线压力持续上升,在泵站出口附近,受地形共同影响,部分管段压力超过最大允许运行压力(即实线),支线流量继续增加。 $t = 210\text{s}$ 时(图 3(d)),水击波前峰已越过第四、五、六站,由于衰减,前锋压力波增量已很小,但各段的充填影响显著,第五、六两站进口端的压力升高幅度大,尤其在第六站进口压力已经接近该站低压泄压阀开启压力(该站设定为 2.0MPa)。下游管线继续受充填作用,压力上升,支线段也有部分管段压力超过实线。这时,从分输站至末站的干线管段流量已为零,表示该段流动瞬变过程已经结束,达到新平衡(静止)。 $t = 240\text{s}$ 时(图 3(e)),第六站进口压力已经达到该站低压泄压阀开启压力,该站已经泄压。以后水击波前锋边衰减边向上游传播,水击波过后出现压力充填,各泵站分别按照站控程序进行压力调节,当进站压力超过低压泄压阀开启值时,就开始泄压。这一过程一直持续到全线达到新的平衡。

在第六站下游出现超压,并持续长时间,在实际运行中这必然使管线破裂,造成事故。因此,对于末站瞬时关阀这种情况,虽然支线能起到一定的泄流保护作用,但在无其他保护措施情况下,是不安全的。为避免水击造成事故,可以采用在末站安装泄压装置等方法。

3.2 中间泵站断电引起的全线流动瞬变结果

图 4 表示了当第五泵站断电后引起的全线流动瞬变的结果。这里也图示了水击开始后前 10 分钟的情形。模拟结果表明,第五泵站断电后,在该泵站将出现断流,向上游传播增压波,向下游传播减压波。经过一段时间后,该站旁路越站阀开启,在该站发生压力越站。瞬变压力波传播的结果是第五泵站上游各站均进站压力升高,有的站甚至进站压力高至低压泄压阀设定值;该站下游泵站出站压力降低。全线流量在瞬变过程中有变化。在流动瞬变结束后,新的输量将比发生流动瞬变前减少。具体情况参见图 4 系列。

4 结论

本文通过建立基于特征线方法求解流动瞬变过程的数值模型,应用针对长距离输油管道流动瞬变过程的分析软件,分析了模拟了长距离输油管道在中间泵站停电或末站瞬时关阀情况下的流动瞬变过程。

通过引入离散穴模型,有效地修正了当流动瞬变压力低于流体蒸汽压时的计算压力不真实,解决了计算分析的局限性问题。这一点对埋管地形变化较大的情形尤其有利。

在数值处理上,Darcy—Weisbach 摩擦力项用二阶精度格式来近似,因此保证了流动瞬变过程分析时的计算稳定性和精确度。

参 考 文 献

- 1 Wylie E B & Streeter V L. Fluid Transients in Systems, 1993.
- 2 Chaudhry H M. Applied Hydraulic Transients. 1987.
- 3 Watters G Z. Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines. 1984.

- 4 Ghidaoui M S & Karney B W. A New Solution Procedure of the Fluid Transients Equation Using Picard's Method. First Asian Computational Fluid Dynamics Conference, 1995, Hong Kong.
- 5 严大凡. 输油管道设计与管埋. 石油工业出版社, 1979.
- 6 曲慎扬. 原油管道工程. 石油工业出版社, 1991.
- 7 Robert T. Pipeline Hydraulic Surges Are Shown in Computer Simulations. Oil & Gas Journal, 1976. 74(47).
- 8 Snamprogetti. Seminar on Pipeline Systems Technologies. 1995, Beijing.

作者简介

鄂学全, 1937年12月生, 男, 研究员, 博导。

The Dynamic Flowing Variation Process Analyzing of the Long-distance Pipeline by Characteristic Method

E Xue-quan Liu Guo-hua Wang Wei

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Wang Ping Wang Hong-xia

(Northeastern Oil Administrating Bureau, Shengyang 110031)

Abstract Based on the characteristic analyzing method, this paper establishes a numerical model to solve the flowing dynamic variation process. The analytic software of the long-distance oil pipeline is also set up to assure the computational stability and accuracy during the dynamic flowing variation process for high viscosity fluids, the Darcy-Weisbach friction term is discretized by 2nd-order scheme. Also the present model considers the effect of topology in area of buried pipeline on the dynamic pressure of the pipeline; when a waterhammer occurs at a pump station, the reactions of other stations are determined by their station-controlling program. Finally, under the condition that the intermediary stations' electricity supplies are cut or the end-station shuts up the valve abruptly, the dynamics flowing variation of a long distance oil pipeline is present.

Key words dynamics flowing, characteristic method, numerical method, long-distance pipeline.