

文章编号:1000-582X(2008)01-0067-04

# 管线泄漏与阀动作联合作用的水力瞬变分析

周绍骑<sup>1,2</sup>, 邓松圣<sup>2</sup>, 李赵杰<sup>2</sup>, 舒丹<sup>2</sup>, 冯剑<sup>2</sup>

(1. 重庆大学自动化学院, 重庆 400030; 2. 后勤工程学院军事供油系, 重庆 400016)

**摘要:**采用特征线法建立了管线泄漏的水力瞬变数学模型,建立了泄漏及阀动作的边界条件,编制了数值计算程序对管线泄漏与阀动作联合作用情况进行模拟计算。模拟结果表明,在管线泄漏过程中其他设备动作将对压力波信号产生影响,泄漏定位应综合考虑设备动作的压力波特性和。通过对管线泄漏及设备动作引起的水力瞬变进行数值模拟,将为快速判定并准确定位泄漏提供指导。

**关键词:**泄漏; 阀动作; 模拟; 管线

中图分类号:U179.8

文献标志码:A

## Analysis of Hydraulic Transient Induced by the Joint Action of Leakage and Valve Stroking in Pipeline

ZHOU Shao-qi<sup>1,2</sup>, DENG Song-sheng<sup>2</sup>, LI Zhao-jie<sup>2</sup>, SHU Dan<sup>2</sup>, FENG Jian<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Department of Petroleum Supply Engineering, Logistic Engineering College, Chongqing 400016, P. R. China)

**Abstract:** The hydraulic transient mathematical model was developed by the method of characteristic. The boundary conditions of leakage and valve stroking were built; numerical simulation program was developed for the joint action of pipeline leakage and valve stroking while the corresponding simulation was carried out. The simulation results show that other devices' actions influence pressure wave signals in pipeline leakage process, so the characteristics of pressure wave of devices' actions should be comprehensively considered in the locating of pipeline leakage. Numerical simulation of hydraulic transient due to the joint action of pipeline leakage and devices' operations will provide guidance for quick detecting and locating of pipeline leakage.

**Key words:** leakage; valve stroking; simulation; pipeline

泄漏是管线运行过程中的重大故障之一,在现有的检测方法中<sup>[1-5]</sup>,有的采用泄漏时产生的负压波信号来进行泄漏判断和定位。然而,在泄漏过程中,若同时伴随有阀动作和泵启停等情况,将在管线中形成多个压力波迭加作用的情形,使压力波信号变得更加复杂。因此,有必要研究在泄漏过程中伴随有其他设备状态改变而引起多个压力波联合作用的情况。笔

者就管线泄漏与阀动作联合作用情况进行了模拟研究。

### 1 数学模型

水力瞬变是管道从一种稳态过渡到另一种稳态或事故的过渡工况,开阀和关阀,开泵和停泵,调节阀和安全阀动作,动力故障,管道泄漏等过程均会发生

收稿日期:2007-09-20

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(2005BB6215)

作者简介:周绍骑(1962-),男,后勤工程学院教授,重庆大学博士研究生,主要从事自动控制方面的研究。

邓松圣(联系人),男,后勤工程学院教授,博士生导师,(Tel) 13110228309;(E-mail) dsskj@yahoo.com.cn。

水力瞬变。水力瞬变过程中会产生负压波在管线中传播,通过对负压波信号进行检测并处理即可预测管道泄漏发生的位置。

### 1.1 特征线方程

下面是管道输送的水力瞬变基本方程组(阿列维方程)<sup>[6]</sup>。

运动方程

$$\left(\frac{1}{g\omega}\right)\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + fQ|Q|^{1-m} = 0, \quad (1)$$

连续性方程

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \left(\frac{a^2}{g\omega}\right)\frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

式中: $\omega$ 为管道流通面积; $H$ 为流体压头; $a$ 为水击波传播速度; $Q$ 为液流流量; $t$ 为时间; $x$ 为轴向坐标; $f$ 为列宾宗摩阻系数; $g$ 为重力加速度; $m$ 为流态指数。

方程(1)和(2)有限差分方程为

$$c^+ \begin{cases} \frac{\Delta x}{\Delta t} = +a, \\ \frac{a}{g\omega}(Q_P - Q_A) + (H_P - H_A) + fQ_P|Q_A|^{1-m}a\Delta t = 0, \end{cases}$$

$$c^- \begin{cases} \frac{\Delta x}{\Delta t} = -a, \\ \frac{a}{g\omega}(Q_P - Q_B) - (H_P - H_B) + fQ_P|Q_B|^{1-m}a\Delta t = 0, \end{cases}$$

式中: $c^+$ 为正特征线; $c^-$ 为负特征线; $A$ 、 $P$ 、 $B$ 分别为管道上相邻3个节点编号,如图1所示。

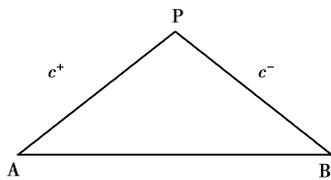


图1 特征线

将上面的差分方程整理为

$$c^+ \quad H_P = R_A^+ - S_A^+ Q_P, \quad (3)$$

$$c^- \quad H_P = R_B^- + S_B^- Q_P, \quad (4)$$

式中: $R_A^+ = H_A + C_w Q_A$ ;  $R_B^- = H_B - C_w Q_B$ ;  $S_A^+ = C_w + f|Q_A|^{1-m}a\Delta t$ ;  $S_B^- = C_w + f|Q_B|^{1-m}a\Delta t$ ;  $C_w = a/g\omega$ ,  $C_w$ 为惯性水击系数。 (5)

联解式(3)和(4)可得中间结点流量:

$$Q_P = \frac{(R_A^+ - R_B^-)}{(S_A^+ + S_B^-)}, \quad (6)$$

将 $Q_P$ 代入式(3)和(4),可求得中间结点的压头 $H_P$ 。

### 1.2 边界条件

#### 1.2.1 管线泄漏边界条件

对如图2所示的泄漏点,具有公共的节点压头

$H_P$ ,进出泄漏点流量的代数和等于零。

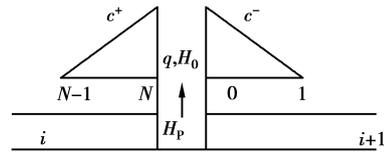


图2 泄漏点边界条件

泄漏点前后特征线方程为

$$H_P = R_{i,N-1}^+ - S_{i,N-1}^+ Q_{i,N}, \quad (7)$$

$$H_P = R_{i+1,1}^- + S_{i+1,1}^- Q_{i+1,0}, \quad (8)$$

$$Q_{i,N} = Q_{i+1,0} + q_p, \quad (9)$$

式中: $q_p$ 为泄漏量, $q_p = C_0 \sqrt{2g(H_P - H_0)}$ ;  $H_0$ 为漏孔外部的压头; $C_0$ 为漏孔的流量系数。

联解可得

$$H_P = \frac{1}{A^2} \left[ (AB + gC_0^2) - \sqrt{(AB + gC_0^2)^2 - A^2(B^2 + 2gC_0^2 H_0)} \right], \quad (10)$$

式中: $A = \frac{1}{S_{i,N-1}^+} + \frac{1}{S_{i+1,1}^-}$ ;

$$B = \frac{R_{i,N-1}^+}{S_{i,N-1}^+} + \frac{R_{i+1,1}^-}{S_{i+1,1}^-}.$$

#### 1.2.2 阀动作边界条件

阀的阻力特性为

$$\Delta H = \frac{\zeta}{2g\omega_j^2} Q^2 = KQ^2,$$

$$K = \frac{12.96 \times 10^7}{K_V},$$

式中: $\zeta$ 为阻力系数; $K$ 为集合系数; $\omega_j$ 为阀门通道的截面积; $K_V$ 为流量系数。

阀动作时,阀前后流量不变,阀门前后压力发生变化。同时,阀动作时其边界为扰动边界,其阻力特性随时间改变。阀的边界如图3所示。

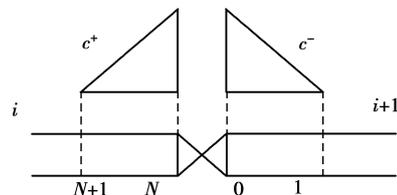


图3 阀的边界条件

阀动作的边界条件为:

$$H_{i,N} = R_{i,N-1}^+ - S_{i,N-1}^+ Q_P, \quad (11)$$

$$H_{i+1,0} = R_{i+1,1}^- + S_{i+1,1}^- Q_P, \quad (12)$$

$$H_{i,N} - H_{i+1,0} = KQ_P^2. \quad (13)$$

联解式(11) - (13)可得阀处的流量:

$$Q_P = \frac{1}{K} \left[ - \left( \frac{S_{i,N-1}^+ + S_{i+1,1}^-}{2} \right) + \right]$$

$$\sqrt{\frac{(S_{i,N-1}^+ + S_{i+1,1}^-)^2}{4} + K(R_{i,N-1}^+ - R_{i+1,1}^-)} \quad (14)$$

## 2 模拟计算

### 2.1 模拟对象

根据差分方程及边界条件,采用 Visual Basic 6.0进行编程,对管线泄漏、阀动作、泄漏与阀动作联动的情况进行了数值模拟。模拟对象为 120 km 水平管段,管道规格为  $\Phi 159 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ,单泵站运行,设 DK45 - 60  $\times$  6 型泵两台(串联),进站恒液位 20 m,管道末端出口液位恒定为 20 m,阀设置在管线末端。输送油品为柴油,温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ 。

终端阀为缩径球阀,流量系数如表 1 所示。未在表中列出的某一开度的流量系数采取线性插值的方法求得。

表 1 流量系数表

| 相对开度/% | $K_v / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | 相对开度/% | $K_v / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ |
|--------|--|--------|--|
| 100    | 1 542                                    | 50     | 231                                      |
| 90     | 1 172                                    | 40     | 170                                      |
| 80     | 771                                      | 30     | 123                                      |
| 70     | 540                                      | 20     | 69                                       |
| 60     | 339                                      | 10     | 31                                       |

### 2.2 模拟结果

模拟条件为泄漏点距泵 30 km 处,泄漏孔径分别为 5、10、15、20、30 mm。图 4 - 7 为开阀与泄漏联合作用的模拟结果,阀门的初始状态为 10% 开度,在 9 s 内阀门全开。图 8 - 11 为关阀与泄漏联合作用的模拟结果,阀门的初始状态为全开,在 9 s 内阀门关至 10%。图 4 - 11 中各线型代表的状态如下所示:

- 泄漏与阀动作联合作用;
- - - - 泄漏单独作用;
- ..... 阀单独作用。

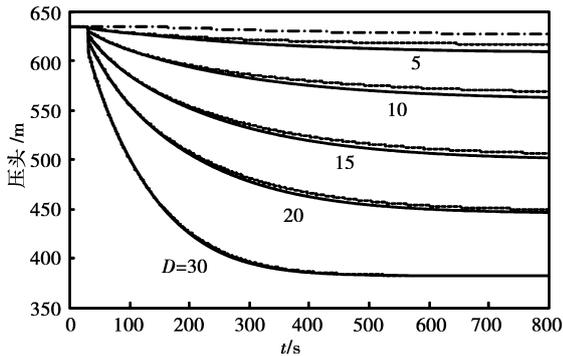


图 4 开阀与泄漏联合作用泵出口压头变化规律

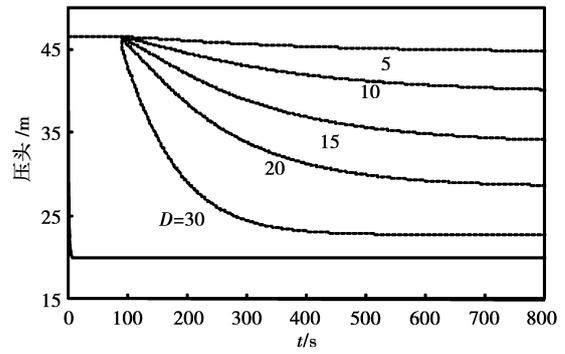


图 5 开阀与泄漏联合作用管线末端压头变化规律

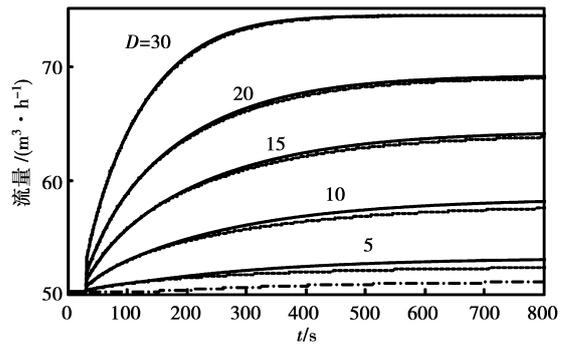


图 6 开阀与泄漏联合作用泵出口流量变化规律

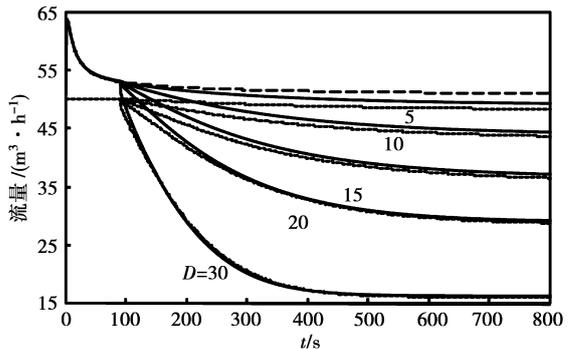


图 7 开阀与泄漏联合作用管线末端流量变化规律

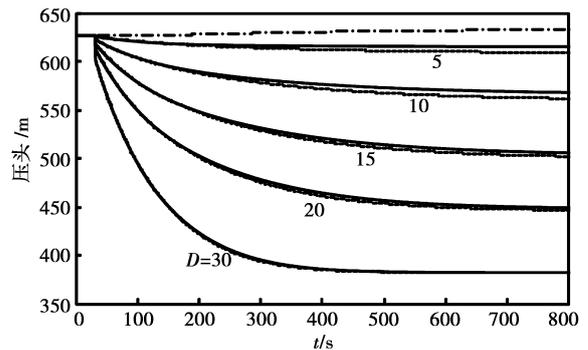


图 8 关阀与泄漏联合作用泵出口压头变化规律

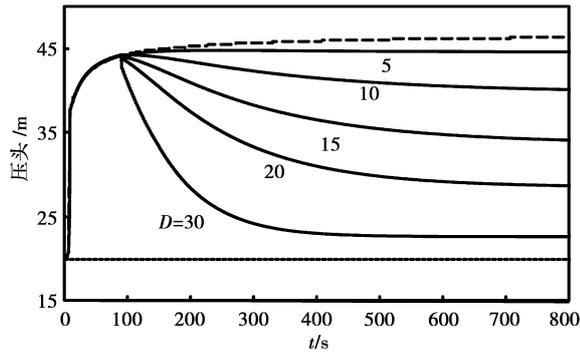


图 9 阀门与泄漏联合作用管线末端压头变化规律

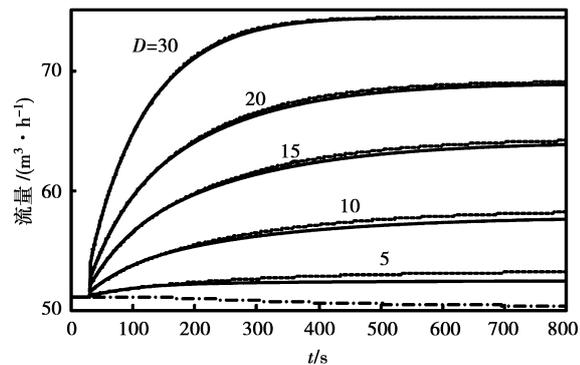


图 10 阀门与泄漏联合作用泵出口流量变化规律

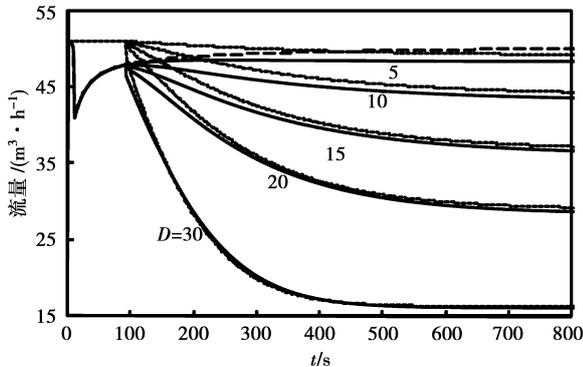


图 11 阀门与泄漏联合作用管线末端流量变化规律

### 2.3 结果分析

分析模拟计算结果,可得:

1) 阀门动作影响泄漏信号的变化,通过采集流量、压力信号分析泄漏时,应计及阀门动作等其他因素的影响。

2) 阀门动作与泄漏联合作用相当于阀门动作的压力波与管线泄漏的压力波相迭加,泄漏过程中压力、流量信号的变化取决于各压力波的作用特性。

3) 泄漏使管线局部出现分流,管线前半段流量增加,后半段流量减少,泵出口压头减小。开阀相当于减小局部摩阻,使全线流量增加,泵出口压强减小。因此,开阀与泄漏联合作用时对泵出口及末端压力的影响是效果迭加,对末端流量的影响是效果抵消。其结果是增加泵出口压头的降低幅度以及流量的增加幅度,减小管线末端流量的降低幅度。

4) 阀门与开阀相反,相当于增大局部摩阻,使全线流量减小,泵出口压强增加。阀门动作的压力波与管线泄漏的压力波相迭加,减小泵出口压头的降低幅度以及流量的增加幅度,增加管线末端流量的降低幅度。

5) 阀门动作对泄漏信号的影响幅度,随泄漏孔径的增加而减小,随泄漏孔距泵站距离的增加而增加。

## 3 结论

通过对阀门动作与管道泄漏联合作用的水力瞬变过程进行了模拟,分析了长输管线多个水击波迭加过程中压力、流量的变化规律。研究表明,水击波迭加过程中的压力、流量信号的变化取决于各水击波特性。通过对泄漏过程的各种工况进行模拟,并建立相应参数的数据库,可在实际运行中与采集的数据进行对比分析,为快速判断并定位泄漏位置提供数据支持。

### 参考文献:

- [1] 杨杰,王桂增. 输气管道泄漏诊断技术综述[J]. 化工自动化及仪表,2004,31(3):1-5.  
YANG JIE, WANG GUI-ZENG. Leakage detection and location methods for gas transport pipelines[J]. Control and Instruments in Chemical Industry,2004,31(3):1-5.
- [2] 彭柯,王立坤,李健,等. 基于 CADA 系统的泄漏检测与定位[J]. 化工自动化及仪表,2004,31(1):50-51.  
PENG KE, WANG LI-KUN, LI JIAN, et al. A new pipeline leak monitoring system based on SCADA[J]. Control and Instruments in Chemical Industry,2004,31(1):50-51.
- [3] 张其敏,严宏东. 管道泄漏检测技术及评价[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2006,8(2):33-35.  
ZHANG QI-MIN, YAN HONG-DONG. Leak detection techniques and its evaluation of pipeline[J]. Journal of Chongqing University:Natural Science Edition,2006,8(2):33-35.
- [4] YE HAO, WANG CUI-ZENG, FANG CHONG-ZHI. Application of wavelet transform to leak detection and location in transport pipelines[J]. Engineering Simulation, 1996,13:1025-1032.
- [5] HAN WEN-HUA, QUE PEI-WEN. Wavelet domin adaptive filtering algorithm for removing the seamless pipe noise contained in the magnetic flux leakage data[J]. High Technology Letters, 2006, 21(12):170-174.
- [6] 蒲家宁. 管道水击分析与控制[M]. 北京:机械工业出版社,1991.

(编辑 李胜春)