

文章编号: 0253-2697(2010)04-0654-05

负压波法在液体管道上的可检测泄漏率分析

孙 良^{1,2} 王建林¹ 赵利强¹

(1. 北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029; 2. 中国石油大学信息与控制工程学院 山东东营 257061)

摘要: 由于管道泄漏引发的负压波大小及其沿管道的衰减程度都与管道工况、长度、口径和介质物性等管道特性有关,因此管道特性决定了负压波法在管道上的可检测性。依据特征线理论,对管道的泄漏发生机理和压力波传播机理进行了研究,建立了管道内产生负压波及其传播中衰减程度的计算模型,并利用实际输油管道的操作数据验证了所建立的计算模型的准确性。以该计算模型为基础,进一步分析了管道特性与负压波法的可检测泄漏率等指标的关系,为管道的设计和布局提供参考,并可对基于负压波法的管道泄漏检测系统进行正确的评价。

关键词: 管道特性; 泄漏检测; 负压波法; 可检测泄漏率; 负压波衰减程度; 计算模型; 管道泄漏检测系统

中图分类号: TE973; TP274 **文献标识码:** A

Analysis on detectable leakage ratio of liquid pipeline by negative pressure wave method

SUN Liang^{1,2} WANG Jianlin¹ ZHAO Liqiang¹

(1. School of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;
2. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The characteristics of pipeline such as length, diameter, operating conditions and the property of the transferred medium have certain relations with the amplitude and propagation attenuation of the negative pressure wave induced by the leakage of pipeline. Therefore, the pipeline characteristics determine the detectable leakage ratio by the negative pressure wave method for liquid pipeline. On the basis of the Method of Characteristics (MOC) theory, the leakage occurrence mechanism of pipeline and the propagation mechanism of the pressure wave along the pipeline were studied. The computational models were established for generating the negative pressure wave induced by pipeline leakage and for calculating the propagation attenuation of the negative pressure wave along the pipeline. The model for the wave propagation attenuation was validated by the operation data of the real oil pipeline. The experimental results verified the accuracy of the model for calculating the attenuation of the negative pressure wave. The effects of pipeline characteristics on the performance indexes of the negative pressure wave method such as the detectable leakage ratio were analyzed. The computational model can provide some reference for pipeline design and layout. The leak detection system based on negative pressure wave method can be correctly evaluated as well.

Key words: pipeline characteristics; leak detection; negative pressure wave method; detectable leakage ratio; attenuation of negative pressure wave; computational model; pipeline leak detection system

泄漏检测是管道安全运行的重要保证。目前有多种管道泄漏的检测方法^[1-4],其中负压波法^[4]是根据泄漏产生的负压波到达管道两端的时间差进行泄漏定位,可在泄漏发生后最短时间内进行泄漏检测,因而在输油管道上得到了广泛应用。随着这项技术的日益成熟,研究人员开始更多地关注该方法在小泄漏下的可检测性问题,即可检测泄漏率,但主要是探讨检测系统性能改善的方法^[5-7],而忽略了管道本身对可检测性的限制。由于泄漏产生的负压波与管道的运行工况、长

度、口径和介质物性等有关,这些管道特性决定了管道本身的可检测泄漏率,从而可能使同一泄漏检测系统应用于不同管道时可检测的泄漏率不同,甚至会由于管道设计的不合理,使泄漏检测系统难以很好地发挥作用。因此研究管道特性与压力波产生和衰减之间的关系,确定管道本身可检测的泄漏率,可为管道的设计和布局提供参考,从而使基于负压波法的泄漏检测系统能够更好地发挥作用,并可对其进行正确的评价。

在对压力波的产生和衰减的研究中,Ge等^[8]根据

基金项目:北京自然科学基金项目(No. 4082022)资助。

作者简介:孙 良,女,1970年9月生,1996年获石油大学自动化专业硕士学位,现为北京化工大学在读博士研究生,主要从事石油气管道的安全监测和智能检测方面的研究。E-mail: sunl3389@163.com

管道动态响应对泄漏引发的压力波大小和压力波的传播衰减进行研究,得到了相关的计算公式,但其准确性尚待实验验证。笔者从特征线理论出发,研究管道泄漏的发生机理和压力波的传播机理,建立负压波产生和衰减的计算模型,并以实际管道的操作数据对该模型进行实验验证。在此基础上进一步分析管道特性对可检测泄漏率的影响。

1 管流方程及数值求解

假设管道口径在管长范围内保持不变,液体管道的管流方程^[9]由连续性方程和运动方程组成,即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

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

式中: ρ 为液体密度, kg/m^3 ; v 为流速, m/s ; p 为压力, Pa ; λ 为水力摩擦系数; D 为管道内径, m ; α 为管道与水平轴夹角; x 为沿管道的轴向距离, m ; t 为时间, s 。

式(1)和式(2)构成了一组双曲型偏微分方程。对于此类偏微分方程目前无法获得解析解,只能通过数值方法求解,特征线解法^[10]是常用的一种数值方法。顺特征线 C^+ 及其特征方程为

$$\frac{dx}{dt} = \alpha_s \quad (3)$$

$$\frac{dp}{dt} + \rho \alpha_s \frac{dv}{dt} + g \sin \alpha = \frac{-\lambda \rho \alpha_s v |v|}{2D} \quad (4)$$

逆特征线 C^- 及其特征方程为

$$\frac{dx}{dt} = -\alpha_s \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dt} - \rho \alpha_s \frac{dv}{dt} + g \sin \alpha = \frac{\lambda \rho \alpha_s v |v|}{2D} \quad (6)$$

式中: α_s 为压力波的波速,也是介质的当地声速, m/s 。

利用有限差分法可以对特征方程进行数值求解,其原理如图1所示。在图1中,管道分成 N 段,每段管长为 Δx ,沿管道长度 x 轴的标号 $1, 2, \dots, N+1$ 分别表示管段之间的节点。沿时间 t 轴离散成若干时间层 $0, \Delta t, \dots, (j-1)\Delta t, j\Delta t$ 。为方便起见,以 j 表示 $j\Delta t$ 。

若忽略高程变化,在 j 时刻的节点 i 沿 C^+ 和 C^- 的有限差分方程分别为

$$p_{i,j} - p_{i-1,j-1} + \rho \alpha_s (v_{i,j} - v_{i-1,j-1}) = -\frac{\lambda \rho \alpha_s v_{i-1,j-1}^2 \Delta t}{2D} \quad (7)$$

$$p_{i,j} - p_{i+1,j-1} - \rho \alpha_s (v_{i,j} - v_{i+1,j-1}) = \frac{\lambda \rho \alpha_s v_{i+1,j-1}^2 \Delta t}{2D} \quad (8)$$

式中: $p_{i,j}$ 表示 i 节点 j 时刻的压力; $v_{i,j}$ 表示 i 节点 j 时刻的流速。

由于 $j-1$ 时刻各节点的参数已知,因此联立式(7)、式(8)和边界条件,即可求得 j 时刻各节点的参数值。

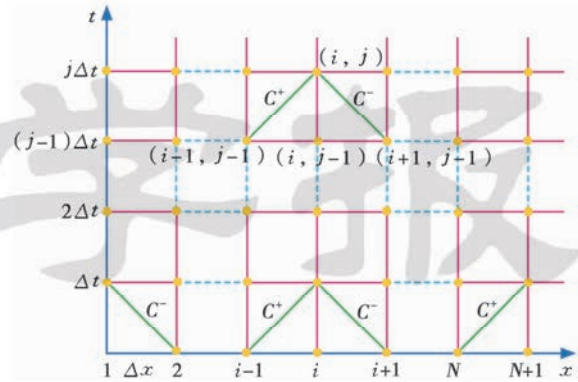


图1 特征线网格

Fig. 1 Grid of characteristic lines

2 负压波产生及衰减的计算模型

2.1 负压波产生

假设泄漏为突发,泄漏点处负压波的产生及传播见图2。设 j 时刻节点 i 处突发泄漏,并假设泄漏发生

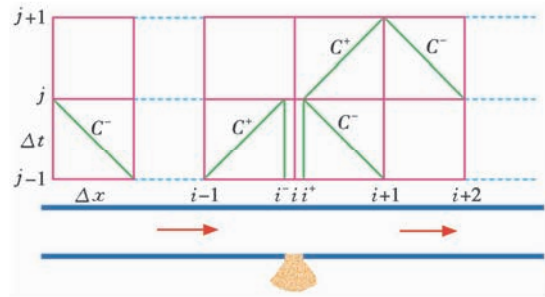


图2 泄漏点负压波的产生及传播

Fig. 2 Generation and propagation of negative pressure wave at leakage point

前 $j-1$ 时刻管道处于稳态工况。在 j 时刻的节点 i 沿 C^+ 和 C^- 特征线分别有

$$p_{i^-,j} - p_{i-1,j-1} + \rho \alpha_s (v_{i^-,j} - v_0) = \frac{-\lambda \rho \alpha_s v_0^2 \Delta t}{2D} \quad (9)$$

$$p_{i^+,j} - p_{i+1,j-1} - \rho \alpha_s (v_{i^+,j} - v_0) = \frac{\lambda \rho \alpha_s v_0^2 \Delta t}{2D} \quad (10)$$

式中: v_0 为管道泄漏前的流速, m/s ; $v_{i^-,j}$ 和 $v_{i^+,j}$ 分别表示泄漏点前、后的流速, m/s ; $p_{i^-,j}$ 和 $p_{i^+,j}$ 分别表示泄漏点前、后的压力, Pa 。

泄漏点的边界条件满足:

$$v_{i^-,j} - v_{i^+,j} = 2\Delta v_i \quad (11)$$

$$p_{i,j}^- = p_{i,j}^+ = p_{i,j} \quad (12)$$

式中: $2\Delta v_i$ 表示泄漏点前、后流速的变化量, m/s。

联立式(7)~式(12), 可得到泄漏点的负压波为

$$\Delta p_{i,j} = p_{i,j} - p_{i,j-1} = -\rho\alpha_s\Delta v_i \quad (13)$$

由式(13)可知, 泄漏产生的负压波与泄漏量、介质的密度和当地声速有关。由于 Δv_i 带有量纲, 对于不同的管道和工况, 不具有可比性, 可采用泄漏率 k 作为衡量泄漏量大小的指标, 其定义为

$$k = (v_{i,j}^- - v_{i,j}^+)/v_{i,j} \quad (14)$$

综合以上各式, 可得泄漏点处产生的负压波为

$$|\Delta p_r| = \rho\alpha_s \frac{kv_0}{2-k} \quad (15)$$

式中: Δp_r 为泄漏点处产生的压力变化, Pa。

2.2 压力波衰减

根据特征线理论, 管道中的扰动信号是沿特征线在管道内传播的。如图2所示, 在 $j+1$ 时刻, 泄漏引发的负压波信号沿特征线传播到第 $i+1$ 和 $i-1$ 节点上。以 $i+1$ 节点为例, 根据 $j+1$ 时刻的 $i+1$ 节点沿 C^+ 和 C^- 的特征线差分方程, 可得相邻两个节点之间的压力衰减比 η 为

$$\eta = \frac{|\Delta p_{i+1,j+1}|}{|\Delta p_{i,j}|} = 1 - \frac{\lambda}{2D} \cdot \frac{\Delta x}{\alpha_s} \left(v_0 - \frac{\Delta v_i}{2} \right) \quad (16)$$

由式(16)可知, 压力衰减比与上一节点的流速变化 Δv_i 有关, 令 $i+1$ 节点的流速变化为 Δv_{i+1} , 根据以上各式, 则有

$$|\Delta v_{i+1}| = \left| \Delta v_i \left[1 - \frac{\lambda}{2D} \cdot \frac{\Delta x}{\alpha_s} \left(v_0 - \frac{1}{2} \Delta v_i \right) \right] \right| = |\Delta v_i \eta| \quad (17)$$

由式(17)可见, 流速变化的影响在节点之间传递时会逐渐衰弱。若泄漏量较小, 即 Δv_i 相比 v_0 较小, 可将 Δv_i 忽略不计, 则式(16)可重新整理为

$$\eta = \frac{|\Delta p_{i+1,j+1}|}{|\Delta p_{i,j}|} \approx 1 - \frac{\lambda}{2D} \cdot \frac{\Delta x}{\alpha_s} v_0 \quad (18)$$

若管道上某点由于扰动产生的压力波幅值为 $|\Delta p_d|$, 则距离该点 l 处的衰减波幅值为

$$|\Delta p_l| = |\Delta p_d| \eta^{l/\Delta x} = |\Delta p_d| \left(1 - \frac{\lambda}{2D} \cdot \frac{\Delta x}{\alpha_s} v_0 \right)^{l/\Delta x} \quad (19)$$

式(15)和式(19)即为负压波产生和衰减的计算模型。综合两式可知, 若泄漏点距离管道始端的距离为 L_r , 泄漏率为 k , 则管道两端检测到的 NPW 幅值可表示为

$$|\Delta p_s| = \left| \rho\alpha_s \frac{kv_0}{2-k} \right| \left(1 - \frac{\lambda}{2D} \cdot \frac{\Delta x}{\alpha_s} v_0 \right)^{L_r/\Delta x} \quad (20)$$

$$|\Delta p_e| = \left| \rho\alpha_s \frac{kv_0}{2-k} \right| \left(1 - \frac{\lambda}{2D} \cdot \frac{\Delta x}{\alpha_s} v_0 \right)^{(L-L_r)/\Delta x} \quad (21)$$

式中: Δp_s 为管道入口的压力变化, Pa; Δp_e 为管道出口的压力变化, Pa; L 为管道的总长度, m。

3 压力波衰减的实验验证

采用石太线石家庄到高庄段的输油管道进行验证, 该管道管长为 52.735 km, 内径为 341.4 mm, 油品密度约为 840 kg/m^3 , 摩阻系数约为 0.0194。

3.1 计算实例 I

该实例是高庄站内的下载阀执行打开的操作。由于下载阀是向其他分支管道输油, 该阀打开会在管道末端形成扰动波, 传递到管道首端形成衰减波。管道两端压力相对操作前的变化如图3所示。压力数据采集周期为 10 ms。

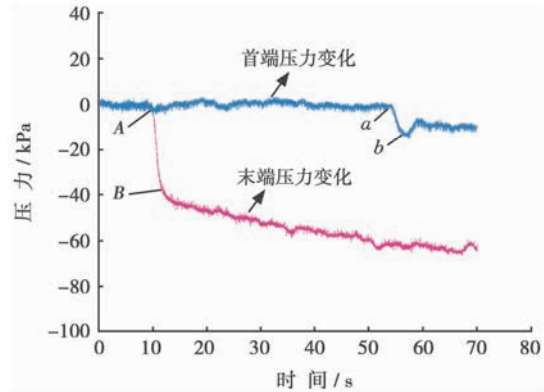


图3 实例 I 管道两端压力变化曲线

Fig. 3 Changes of pressure at ends of pipeline for Case I

图3中 A 和 B 为扰动波的波头和波尾; a 和 b 为衰减波的波头和波尾。根据扰动波 A—B 的幅值, 按式(19)即可计算出衰减波 a—b 的幅值。波的实测值与计算值的对比见表1。

3.2 计算实例 II

该实例为高庄站内的过滤器执行注油排气的操作, 该操作导致管道末端的压力发生波动。管道两端压力相对于操作前的变化如图4所示。

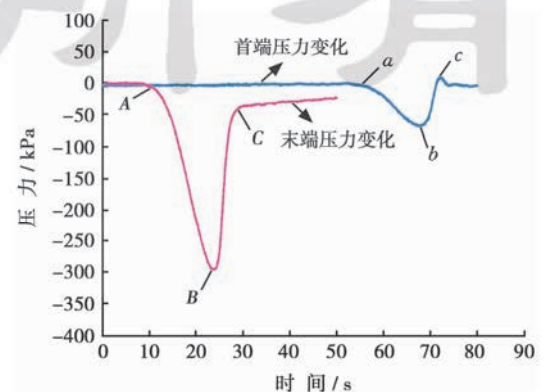


图4 实例 II 管道两端压力变化曲线

Fig. 4 Changes of pressure at ends of pipeline for Case II

图4中将扰动波A—B—C分成波段A—B和B—C,两者的过渡时间不同,它们分别对应的衰减波

为a—b段和b—c段。按式(19)分别对两个波段进行计算,结果见表1。

表1 压力波衰减的实测值与计算值对比

Table 1 Comparison between the measurements and calculations of pressure wave attenuation

名称	波过渡时间/s	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	计算波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	扰动波实测/ kPa	衰减波实测/ kPa	η 实测值	衰减波计算/ kPa	η 计算值
实例I	3.8	0.8536	1180	36.65	12.20	0.9760	12.40	0.9756
实例II (A—B)	14	0.8843	1146	290.30	63.40	0.9782	90.90	0.9716
实例II (B—C)	4	0.9043	1146	247.04	75.35	0.9777	75.33	0.9777

3.3 实验结果

3.3.1 压力波过渡时间的影响

由表1可知,对于过渡时间较短的压力波,计算值与实测值非常接近,而实例II的A—B段波的过渡时间较长,计算结果与实测值之间存在较大的误差。这是由于管道边界条件受到管道入口设备的流动特性的限制,压力变化不再符合压力波衰减的规律。这表明,负压波法进行泄漏检测时,只能针对突发的泄漏。而对于缓泄,管道两端的压力变化容易受到边界条件的限制。此外,由于波的衰减,很难从噪声中将衰减波的波头确定出来,从而造成泄漏定位的困难。

3.3.2 计算管长 Δx 的选取

在压力波衰减的计算模型中,需要适当选取计算管段 Δx 的值。特征线差分法的计算要求 Δx 越小,计算精度越高。但在压力衰减的计算中, Δx 过小,会导致压力衰减比的计算截断误差增大,从而增大计算误差。选取 Δx 为1 km,通过仿真发现,减小 Δx 对计算结果并没有太大影响,但增大 Δx ,计算误差会逐渐增大。

4 管道可检测泄漏率的计算

负压波法能否检测到泄漏的关键在于负压波传播到管道两端时其幅值须超过一定的检测阈值,而这个检测阈值主要由仪表精度、数据采集系统的精度以及噪声级别决定。目前仪表技术的发展使仪表和数据采集系统都可以达到相当高的精度,因此检测阈值主要取决于噪声的级别。噪声包括流体传输过程引起的水力噪声和站内及附近电气设备引起的信号噪声。一般来说,这个噪声约为0.04个大气压,也可通过对管道的稳态工况进行实测获得噪声的级别。

设距离管道入口 L_r 处突发泄漏率为 k 的泄漏,由式(20)和式(21)得到在管道入口和出口可检测的泄漏率分别为

$$k_{in} = \frac{2W_s}{\rho\alpha_s v_0 \eta^{L_r/\Delta x} + W_s} \quad (22)$$

$$k_{out} = \frac{2W_e}{\rho\alpha_s v_0 \eta^{(L-L_r)/\Delta x} + W_e} \quad (23)$$

式中: k_{in} 为管道入口端可检测的泄漏率; k_{out} 为管道出口端可检测的泄漏率; W_s 表征管道入口端的检测阈值, W_e 表征管道出口端的检测阈值,Pa。

仍以石家庄—高庄的管道为例,正常工况下该管道两端压力噪声的标准方差 σ_{ps} 和 σ_{pe} 分别为1.45 kPa和1.10 kPa。设 $W_s = \alpha\sigma_{ps}$, α 为系数,选取 α 取决于泄漏检测系统信号处理部分的性能,这里 α 取2。根据式(22)和式(23),可得到管道两端可检测的泄漏率随泄漏位置的变化情况,如图5所示。

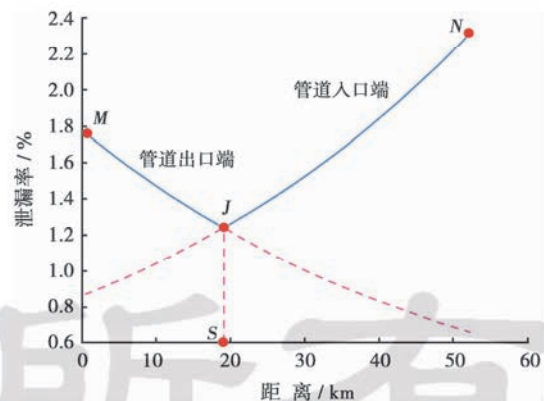


图5 管道两端可检测的泄漏率与泄漏位置的关系曲线
Fig. 5 The relationship between the detectable leakage ratio of ends and leak position

由图5可知,管道入口端可检测的泄漏率与管道出口端可检测的泄漏率两者随泄漏位置的变化而发生相反的变化。因此为保证所发生的泄漏在管道两端都可检测到,则管道上的可检测泄漏率应为图5中的实线部分。其中两条曲线的交叉点J所对应的泄漏率最小,为管道上最小可检测的泄漏率。J点所对应的泄漏位置为管道上的灵敏点S,在S点附近,基于负压波的泄漏检测系统的灵敏度最高。而M点和N点对

应管道两端的极限情况,它们所对应的泄漏率的最大值表征泄漏检测系统可达到的可检测泄漏率,即管道上任一点大于此泄漏率的泄漏都应可以检测到。综合式(22)和式(23),可得到管道灵敏点的位置为

$$L_{rs} = \frac{L + \Delta x \cdot \ln(W_s/W_e)/\ln \eta}{2} \quad (24)$$

负压波法在管道上可检测的最小泄漏率为

$$k_{\min} = \frac{2W_s}{\rho \alpha_s v_0 \eta^{L_{rs}/\Delta x} + W_s} \quad (25)$$

负压波法在管道上可检测的泄漏率为

$$k_{pr} = \frac{2W}{\rho \alpha_s v_0 \eta^{L/\Delta x} + W} \quad (26)$$

式中: W 为管道两端检测阈值中的较大者,即 $W = \max(W_s, W_e)$, Pa。

由式(25)和式(26)可知,管道上最小可检测的泄漏率和可检测的泄漏率与管道的工况、长度、口径、摩阻系数和介质的物性等有关。管道长度越短,管道上最小可检测的泄漏率就越小,可检测的泄漏率也越小,但会大大增加管道的安装费用。由于负压波法在输油管道中应用广泛,因此在输油管道的设计初期,可以根据负压波产生和衰减的计算模型,对这两个指标加以估计。从经济性和可检测性上综合考虑,合理地调整管道长度和工况,从管道本身的特性上保证达到所需要的可检测泄漏率,从而满足小泄漏的检测要求。此外,可以对目前在役的管道进行可检测泄漏率的估算,与基于负压波的泄漏检测系统所能达到的可检测泄漏率进行对比,从而对泄漏检测系统的性能进行评价。

5 结论

(1) 从特征线理论出发,研究管道泄漏发生机理和负压波的传播机理,建立负压波产生和传播衰减的计算模型。由该模型可知,负压波的产生和传播衰减与管道的长度、口径、管道的工况、摩阻系数以及介质的声速和密度等管道特性有关。实验验证表明,该计算模型可以准确估算快速变化的压力波沿管道的衰减。

(2) 基于所建立的计算模型,对管道上的最小可检测泄漏率和可检测泄漏率等指标进行定义和分析。在管道设计阶段,对这两个指标进行估算,可为管道设计提供参考。合理选择管长和确定工况,确保从管道本身上满足小泄漏的检测要求。此外也可用于对基于负压波的泄漏检测系统的性能进行正确评价。

参考文献

- [1] 唐恂,张琳,苏欣,等.长输管道泄漏检测技术发展现状[J].油气储运,2007,26(7):11-14,29.
Tang Xun, Zhang Lin, Su Xin, et al. Technology and development globally in leak detection of pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26(7): 11-14, 29.
- [2] 李炜,朱芸.长输管线泄漏检测与定位方法分析[J].天然气工业,2005,25(6):105-109.
Li Wei, Zhu Yun. Analysis on leakage detection and location techniques for long transmission pipeline[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(6): 105-109.
- [3] Andrew F C, Pedro L, Bryan W K. A selective literature review of transient-based leak detection methods[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2009, 4(2): 212-227.
- [4] 王立宁,李健,靳世久.热输原油管道瞬态压力波法泄漏点定位研究[J].石油学报,2000,21(4):93-96.
Wang Lining, Li Jian, Jin Shijiu. Pressure wave leak point instantaneous location of crude oil heating transport pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(4): 93-96.
- [5] 张东领,王树青,张敏.热输油管道泄漏定位技术研究[J].石油学报,2007,28(1):131-133,138.
Zhang Dongling, Wang Shuqing, Zhang Min. Leakage orientation technique for oil pipelines based on pressure wave[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 131-133, 138.
- [6] 夏海波,张来斌,王朝晖,等.小波分析在管道泄漏信号识别中的作用[J].中国石油大学学报:自然科学版,2003,27(2):78-80.
Xia Haibo, Zhang Laibin, Wang Zhaohui, et al. Application of wavelet transform to signal detection of pipeline leakage[J]. Journal of the Petroleum University of China: Edition of Natural Science, 2003, 27(2): 78-80.
- [7] 崔谦,靳世久,王力坤,等.基于序贯检验的管道泄漏检测方法[J].石油学报,2005,26(4):123-126.
Cui Qian, Jin Shijiu, Wang Likun, et al. Detection method for pipeline leakage based on sequential probability ration test[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(4): 123-126.
- [8] Ge Chuanhu, Wang Guizeng, Ye Hao. Analysis of the smallest detectable leakage flow rate of negative pressure wave-based leak detection systems for liquid pipelines[J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32(8): 1669-1680.
- [9] Finnemore E J, Franzini J B. Fluid mechanics with engineering applications[M]. 10th ed. New York: McGraw-Hill, 2003: 1013-1018.
- [10] 姚光镇.输气管道设计与管理[M].东营:中国石油大学出版社,2006:173-185.
Yao Guangzhen. The design and management of gas transmission line[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 173-185.

(收稿日期 2009-10-05 改回日期 2010-01-18 编辑 仇学艳)