

液体管道小泄漏检测和定位

王镛根 曹 菁 夏红云

(西北工业大学七系, 西安) (抚顺石油学院) (西北工业大学七系)

摘要 本文对德国著名学者Isermann提出的检测液体管道小泄漏的定位公式加以修正。修正后的方法考虑了液体管道发生泄漏后对泵后压力的影响。因此, 它适用于各种特性的泵所组成的液体管道系统的泄漏检测和定位, 扩大了Isermann提出的液体管道小泄漏定位的应用范围, 提高了估计泄漏位置的精度。文中应用互相关技术对量测到的信号进行处理, 提高了泄漏检测灵敏度, 同时采用递推算法进行在线检测和定位。对一条长91.6米, 内径8毫米的液体(煤油)管道的泄漏实验表明, 修正后的方法估计泄漏位置平均误差从原来的10%左右下降到3%。本方法能检测出1%的泄漏量。

关键词: 液体管道, 小泄漏, 互相关, 检测, 定位, 在线估计

引言

在长距离输送液体(如石油)过程中, 常常由于管道的破裂而造成液体的泄漏。目前, 对于液体输送管道的泄漏, 国内还没有行之有效的检测方法, 因而泄漏得不到及时制止, 不仅造成能源浪费、经济损失, 而且污染环境。因此, 探索一种简单可靠而有效的检测液体管道泄漏和定位方法是重要的研究课题。

目前, 国内通常采用的检测液体管道是否发生泄漏的方法是平衡法, 即通过量测到的输入输出液体流量, 加以比较, 采用简单的限制值检测器就可以做到自动检测以决定是否发生泄漏。这种方法对于大泄漏量的检测是十分简单而可靠的, 但它不能确定泄漏位置。另一方面, 由于量测漂移、噪声信号及动态变化的影响, 平衡法不能用来检测小泄漏量。因此, 液体管道小泄漏检测比大泄漏检测要难得多。

德国著名学者Isermann经过多年努力, 提出了用量测到的输入输出流量和压力信号的互相关检测液体小泄漏的方法^[1,2], 并在实际应用中取得满意结果。但由于该方法忽略了液体管道发生泄漏后对泵后压力的影响, 从而使该方法对于泵后压力随液体泄漏量不同而变化的管道系统的定位精度降低, 应用范围受到一定限制。

国内陶洛文等提出了检测管道堵塞和泄漏的方法(1985)^[3]。并对全长150米, 管内径为10毫米的管道进行试验(介质为水), 取得

一定成绩, 尤其对堵塞型故障检测效果甚佳。但是该方法存在某些不足之处: 只能检测大于10%泄漏量的故障, 对小泄漏无能为力; 只能离线处理; 需要建立模型且阶次较高, 计算量和存储量较大; 需要外加激励信号。

本文在Isermann方法的基础上, 提出了新的泄漏定位方法, 该方法考虑了液体泄漏后对泵后压力的影响, 使之适用于各种特性泵所组成的液体管道的检测, 扩大了应用范围, 提高了定位精度。文中还采用了数字处理技术, 提高了检测灵敏度。

2 泄漏定位

与其它工业设备不同, 管道系统通常没有完善的检测仪表, 可利用的仅仅是管道两端点所安装的流量和压力传感器, 如图1所示。设

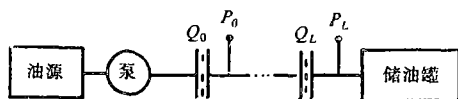


图1 被检测的液体管道简图

管道两端点内无泵站、支线和储油罐, 但允许有不大的高度差和弯度, 以至液体沿管道流动时, 局部损失与沿程损失相比可忽略不计。

当管道段之间某处 Z_L 发生小泄漏时, 管道段压力分布如图2所示。

其中 P_0 和 P_{00} 分别为泄漏前后的管道进口压力
 P_L 为管道出口压力(常为大气压)

收到本文的时间是1987年7月29日。

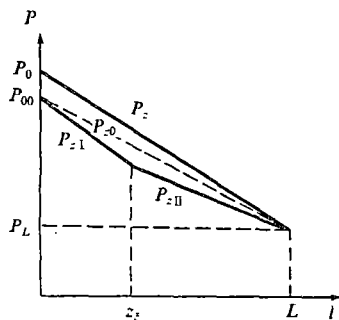


图2 泄漏后管道压力分布图

P_z 为泄漏前管道段的压力梯度

P_{z1} 和 P_{z11} 分别为泄漏后在泄漏点前后段的压力梯度

P_{z0} 为泄漏后虚拟管道段的压力梯度

L 为管道段全长

由图2不难导出泄漏位置 Z_i 的估值为

$$\hat{Z}_i = (P_{z0} - P_{z11}) \cdot L / (P_{z1} - P_{z11}) \quad (1)$$

由(1)式可见,只要量测压力梯度 P_{z1} , P_{z11} 和 P_{z0} ,就能估计出泄漏位置。由于泄漏位置是随机的,因此压差传感器只能安装在紧靠管道的进口和出口处。用一小段管道的压力梯度代替长管道上的压力梯度,势必带来误差。为了提高信号的量测精度,用流量代替压力梯度。当流体在紊流区时,其压力损失与流量的1.75—2次方成正比(若流体在层流区时,问题较简单,此时压力损失与流量成线性关系),即

$$P = Q^m / C \quad (2)$$

其中 $m = 1.75-2$,

C 是与管道结构和工质有关的常数。

众所周知, m 的大小与流体的粘度、管道粗糙度等因素有关,不能从理论上准确计算出来,只能靠实验测定。对实测的七组数据(每组50对流量和压力信号,流量为82.10至172.71cm³/s,压力为4.333至18.353kg/cm²)用最小二乘拟合得出,当 m 为1.94时, C 基本上是一个常数,其最大相对误差小于1%。此时(1)式可改为

$$\hat{Z}_i = (Q_{z0}^{1.94} - Q_{z11}^{1.94}) \cdot L / (Q_{z1}^{1.94} - Q_{z11}^{1.94}) \quad (3)$$

(3)式即是所需要的估计泄漏位置的实用公式。其中 Q_{z1} 和 Q_{z11} 分别为泄漏点前段和泄漏

点后段的流量。

Q_{z0} 为泄漏后管道进口压力从 P_0 下降到 P_{00} ,管道出口压力仍为 P_L ,管道压力梯度为 P_{z0} 相应的虚拟流量,其值由下式确定

$$Q_{z0} = (C \cdot P_{00})^{1/1.94} \quad (4)$$

由于 C 只与管道结构和工质有关,而虚拟管道与实际管道结构和工质都一样,所以 C 值可借助于泄漏前管道系统求得

$$\hat{C} = 1/N \cdot \sum_{k=1}^N (Q_{0k}^{1.94} / P_0(k)) \quad (5)$$

其中 N 为采样次数。当压力和流量信号受噪声污染严重时, N 应取大些,本实验取 $N=50$ 。

为了在线估计泄漏位置,采取下述递推形式

$$\begin{aligned} \hat{Z}_i(k) = & \lambda_1 \hat{Z}_i(k-1) + (1-\lambda_1) L \\ & (Q_{z0}^{1.94} - Q_{z11}^{1.94}) / (Q_{z1}^{1.94} - Q_{z11}^{1.94}) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 λ_1 为加权系数, $0 < \lambda_1 < 1$ 。若系统(包括量测)的噪声较大时, λ_1 应选大些;反之,则应选小些。

3 泄漏报警

上述泄漏位置的估计只有当管道系统发生泄漏报警后才执行。泄漏报警最简单的方法是平衡法,当管道进出口流量差值超过一个规定的限制值时,发出泄漏报警信号。由于量测中不可避免有噪声污染,这种纯平衡的方法不适合小泄漏的情况。众所周知,互相关技术能有效地抑制噪声的干扰。为了提高互相关的灵敏度,引入进出口流量的参考值,然后求差值

$$\begin{aligned} \Delta X(k) &= Q_{z1}(k) - Q_{z1}^*(k) \\ \Delta Y(k) &= Q_{z11}(k) - Q_{z11}^*(k) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $Q_{z1}^*(k)$ 和 $Q_{z11}^*(k)$ 分别为泄漏前管道进出口流量参考值。

k 为采样时刻。

由于泄漏后进口流量增加,出口流量减小,所以泄漏后 $\Delta X(k) > 0$, $\Delta Y(k) < 0$,见图3。

计算流量差值 ΔX , ΔY 的互相关

$$\Phi_{\Delta X \Delta Y}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} 1/N \sum_{k=1}^N \Delta X(k-\tau) \Delta Y(k) \quad (8)$$

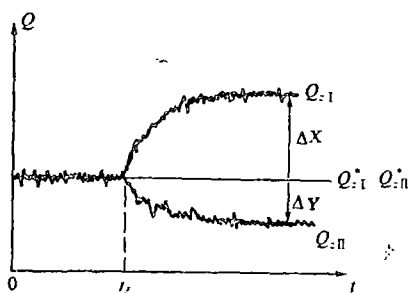


图3 泄漏前后的流量

为了进一步减小干扰信号的影响，建立 $\Phi_{\Delta X \Delta Y}(\tau)$ 在 $-M$ 至 $+M$ 之间的均值

$$\Phi_{\Sigma} = 1/(2M+1) \sum_{\tau=-M}^M \Phi_{\Delta X \Delta Y}(\tau) \quad (9)$$

此处 M 为大于零的整数，它的选取视信号的信噪比决定。当信噪比较大时， M 取小些，利于快速计算；反之， M 取大些，以利于互相关值的平滑性。本文取 $M=20$ 。为了在线报警，采用递推算法

$$\Phi_{\Delta X \Delta Y}(\tau, k) = \lambda_2 \Phi_{\Delta X \Delta Y}(\tau, k-1) + (1-\lambda_2)[\Delta X(k-\tau)\Delta Y(k)] \quad (10)$$

其中 λ_2 为加权系数， $0 < \lambda_2 < 1$ 。

λ_2 的选取取决于互相关函数对新值 $\Delta X(k-\tau)$, $\Delta Y(k)$ 的依赖程度。 λ_2 选得大，表明本时刻的互相关函数受新值影响小，计算值 $\Phi_{\Delta X \Delta Y}$ 比较稳定，但会使报警延时时间增加；当 λ_2 选得小时，可使报警延时缩短，但互相关值波动较大，本文取 $\lambda_2 = 0.99$ 。

当互相关值小于一个规定的门限值时，即

$$\Phi_{\Sigma} < \Phi_{\Sigma 0} \quad (11)$$

系统发出泄漏报警，如图4所示。

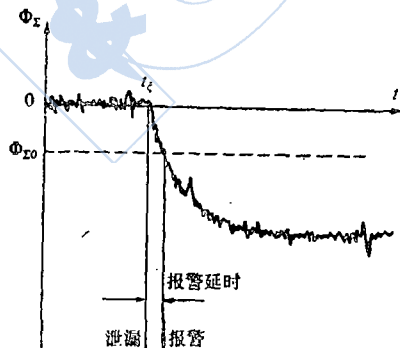


图4 互相关泄漏报警

其中 $\Phi_{\Sigma 0}$ 为泄漏报警门限。报警门限的选择受两个因素的制约，一方面要避免产生误报警，另一方面要考虑报警的灵敏度，本文选 $\Phi_{\Sigma 0} = -0.01$ 。

为了检测小泄漏而同时避免产生误报警，需要对流量采样信号进行平滑处理

$$Q_{xi}(k) = \lambda_3 Q_{xi}(k-1) + (1-\lambda_3) Q_{xi}(k) \quad (12)$$

$$i = I, II$$

此处 $0 < \lambda_3 < 1$ ， λ_3 选取原则同 λ_2 。

特别需要说明的是引进参考流量不仅提高对小泄漏的反应灵敏，而且使报警门限的选择与流量本身大小无关，给选择报警门限带来方便。参考流量的选择原则是尽可能地与管道未发生泄漏时流量相同，而一旦泄漏报警，则令参考流量保持不变。因此，可按下式计算参考流量

$$Q_{xi}^*(k) = \lambda_4 Q_{xi}^*(k-1) + (1-\lambda_4) Q_{xi}^*(k), \quad (13)$$

$$i = I, II$$

此处 $\lambda_4 = 0.997$ (泄漏报警前) 或 $\lambda_4 = 1$ (泄漏报警后)。这里选用进出口不同流量参考值，不仅可以隔离两端口不同干扰的影响，而且可以补偿各自传感器的标定误差。

4 实验

实验系统示于图5，管道由长为91.6米，内径为8毫米的钢管组成。沿程有四个供人为泄漏用的开关 T_1-T_4 ，距进口压力传感器距离分别为24米、28.5米、47.44米和72米。液体介质为煤油。流量传感器为涡轮流量计LW型。压力传感器为BPR型。计算机为PS-80，CPU为Z-80，模/数转换器精度为12位比特，单

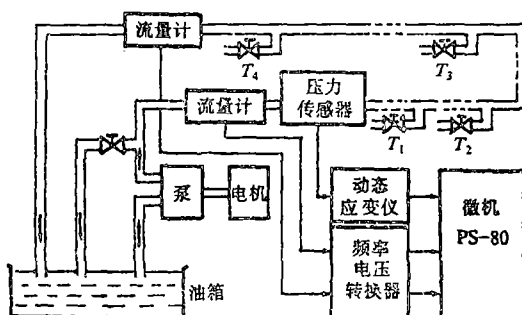


图5 管道泄漏检测实验图

端输入有12个通道。程序用 BASIC 语言编写。不同泄漏位置的检测结果示于表 1。

表 1 不同泄漏位置的检测结果

序 号	泄漏比 (%)				泄漏定位 (米)					定位误差 (%)				
	24米	28.5米	47.44米	72米	24米	28.5米	47.44米 (*)	47.44米 (**)	72米	24米	28.5米	47.44米 (*)	47.44米 (**)	72米
1	0.97	2.00	1.69	1.73	28.3	30.2	45.80	39.28	73.00	4.69	1.86	1.79	8.91	1.08
2	1.26	2.00	2.01	1.90	22.1	28.8	48.63	/	69.45	2.07	0.33	1.30	/	2.78
3	1.51	2.70	2.32	2.70	21.0	27.6	50.00	59.62	75.40	3.28	0.98	2.80	13.3	3.71
4	2.26	3.30	2.60	2.73	24.3	30.9	52.44	/	72.86	0.33	2.64	5.46	/	0.94
5	2.90	3.60	3.14	3.01	21.9	29.5	43.90	37.55	74.20	2.29	1.09	3.87	10.8	2.40
6	3.57	3.60	3.40	3.41	21.6	27.7	48.30	/	42.80	2.62	0.87	0.94	/	0.87
7	3.90	3.90	3.52	3.62	25.6	32.1	44.71	56.9	71.80	1.75	3.92	2.99	10.3	0.22
8	4.10	4.40	3.93	4.01	23.5	26.0	46.10	57.8	72.50	0.55	2.73	1.46	11.3	0.55
平均定位误差										2.20	1.80	2.68	10.92	1.57

说明: 1. 带*号的是用本文方法, 带**号的是用Isermann方法;

2. 泄漏比 = 泄漏量/总流量 · 100%;

3. 定位误差 = $|\hat{Z}_L - Z_L|/L \cdot 100\%$, Z_L 为泄漏位置, \hat{Z}_L 为泄漏位置的估值, L 为管道总长。

5 结论

管道泄漏后, 考虑泵后压力的下降将使定位误差从原来的10%左右下降到3%, 采用数字处理技术, 可以检测1%的小泄漏。本方法量测的信号只有进出口流量和进口压力且无需外加激励信号源, 因此具有简单可靠适于在线估计等优点。本方法的主要缺点是需要量测管道出口流量, 在长距离管道系统中, 需采用遥测技术。

参 考 文 献

- 1 Siebert H, Isermann R. Leckerkennuns und Lokalisierung bei Pipelines durch On-korrelation Mit Einem Prozeßrechner. Regelungstechnik Praxis 25J, abrgang 1977
- 2 Isermann R. Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods—A Survey. Automatica, 1984; 20(4):387—404
- 3 陶洛文, 方崇智, 肖德云. 以辨识为基础的长输管线故障定位. 清华大学学报, 1986; 26(2)

DETECTION AND LOCATION OF LITTLE LEAKAGE IN FLUID PIPELINE

WANG Yonggen CAO Jing XIA Hongyun

(Aero-Engine Engineering Dept., Northwestern polytechnical University, xi'an)

ABSTRACT

This paper presents a new method to locate little leakage in fluid pipeline. This method modified the formula suggested by Isermann. Considering the effect upon the pressure at the pump output after leakage in the pipeline, We can detect and locate the leakage in the pipeline using different pump. So we extended the application of the formula suggested by Isermann and improved the precision of estimation. The experiments had been carried out on a pipeline of 91.6m long and 8 mm in diameter and had shown that our method is suitable not only to detect the leakage as small as merely 1%, but also to decrease the estimated mean error from 10% original to less than 3%.

Keywords: fluid pipeline, leakage, cross correlation, detection, location, on-line estimation