

# 基于动态模拟的化工管路泄漏故障诊断

田文德<sup>1</sup> 孙素莉<sup>2</sup> 汪海<sup>3</sup>

(1. 青岛科技大学化工学院, 山东 青岛 266042; 2. 青岛科技大学高分子科学与工程学院, 山东 青岛 266042;  
3. 泰山医学院化学与化学工程学院, 山东 泰安 271016)

**摘要:** 提出了一种基于模型的化工管路泄漏故障诊断方法。利用动态模拟来监测管路流动过程,并在流量发生异常时及时进行故障诊断。诊断过程通过动态模型的在线参数估计完成,在实现模型校正的同时可以预测流动过程的变化趋势并判断是否存在故障。流动模型基于质量衡算和机械能衡算构建,并采用递归结构实现复杂管网的模拟。文中分析了简单管路和复杂管路应用实例,并讨论了对诊断结果起重要作用的影响因素。

**关键词:** 故障诊断; 管路泄漏; 动态模拟; 参数估计

**中图分类号:** TQ018

## 引言

化工生产中由于不可避免的管路老化、腐蚀、焊缝缺陷及其他自然或人为损坏等原因,管路泄漏事故频频发生,造成巨大的生命财产损失和严重的环境污染问题<sup>[1]</sup>。目前泄漏检测的方法较多,对埋地管道和外露管道都有成熟的检测方法,在实际中应用取得了较好的效果<sup>[1-2]</sup>。本文是利用模型对化工流程进行故障诊断思路的一部分<sup>[3]</sup>,探讨根据生产中的DCS采集数据,在不增加额外仪器和仪表的情况下检测泄露的方法。基于模型的故障诊断方法<sup>[4-6]</sup>,能够深入反映系统的动态性质并能实时诊断,已经成为管路泄漏故障诊断研究的重点。王朝晖等<sup>[7]</sup>在对输油管路沿程热量散失过程进行分析的基础上,建立了管路流动模型,提出了运用三维曲线对管路泄漏进行定位的方法。张红兵等<sup>[8]</sup>对输气管路的气体进行了微元划分,提出了以管路沿程热力、动力平衡微分方程和气体连续性方程为检测模型的输气管路泄漏检测定位方法。以上研究的对象均为简单管路,而李锋等<sup>[9]</sup>则讨论了油田树状管路网络中单个破裂故障的诊断问题。该方法采用剪枝法逐层去除树状管路网络中的双树梢管路和多树梢管路,直至确定故障位置为止。上述研究存在的

问题是:首先,着重于泄漏位置的确定,没有给出管路流量、压力等的跟踪模拟值,系统的故障检测能力不足;其次,需要大量的实测数据,而这在实践中是不易得到满足的;最后,为提高计算精度,模型内部含有数值积分项,故障预测速度较慢。

动态模拟采用严格的化工过程机理模型,可以较为全面真实地反映化工过程事故状态下的内部特征<sup>[10]</sup>。如果将其用于化工管路泄漏的故障诊断,必将提高诊断结果的全面性和机理性。本文在长期化工过程模拟研究基础上<sup>[11]</sup>,提出了基于动态模拟构建管路泄漏故障诊断系统的新方法,研究了在同一动态故障机理模型下进行故障检测和诊断的具体步骤,并分析了采集数据、检测阈值、泄漏参数等因素对诊断结果的影响。

## 1 管路泄漏模型

管路中某处发生流体外泄,可导致进入目的设备的流量降低,也可导致管路来自源设备的流入量增加,如图1所示。该图在原有正常管路1-2-4的基础上,将泄漏等价于一个分支管路2-3。为便于处理,将分支管路2-3和2-4虚拟为管路2-3-4。后者与管路1-2串联,二者再合并为总虚拟管路1-4。

在没有泄漏(2-3管路)的情况下,根据流体流动的机械能守恒定律可得到:

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gz_4 + \frac{u_4^2}{2} + \frac{p_4}{\rho} + \lambda \frac{L}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1)$$

对于常见的水平等径直管管路,  $u_1 = u_4$ ,  $z_1 = z_4$ ,  $u = Q/(\pi d^2/4)$ , 所以式(1)可化简为:

收稿日期: 2008-02-28

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金(2005-29);  
山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(2006BS05005)

第一作者: 男, 1973年生, 副教授, 工学博士

E-mail: tianwd@qust.edu.cn



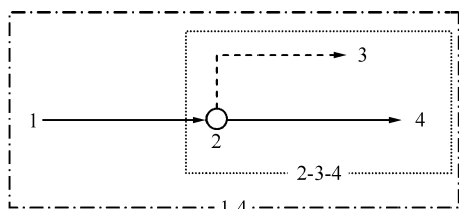


图1 管路泄漏示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the leaking pipe

$$Q = \sqrt{\frac{p_1 - p_4}{\lambda \frac{8l\rho}{\pi^2 d^5}}} = \sqrt{\frac{\Delta p}{R}} \quad (2)$$

式(2)可理解为流量的推动力/阻力计算式,其中的阻力  $R$  与管路尺寸和摩擦系数有关。

在有泄漏的情况下,需要考虑 2-3 管路的分流作用。将管路 2-3 和 2-4 合并为一个虚拟管路 2-3-4,则此时的流量关系为:

$$Q_{2-3} + Q_{2-4} = Q_{2-3-4} \quad (3)$$

合并管路 1-2 和 2-3-4 为虚拟管路 1-4。由于管路 1-2 和 2-3-4 为串联关系,所以二者流量相等,得到:

$$Q_2 = \frac{\Delta p_{1-4}}{R_{1-4}} = \frac{\Delta p_{1-2}}{R_{1-2}} = \frac{\Delta p_{2-3-4}}{R_{2-3-4}} \quad (4)$$

各段管路流量按照上述管路合并的逆序进行计算,并遵循由整体至局部的顺序完成。首先根据式(2)计算总管路 1-4 中的流量  $Q_{1-4}$ 。然后,为了计算管路 2-3 和 2-4 的流量,需要计算中间节点 2 处的压力。由式(4)可知:

$$\frac{p_1 - p_2}{R_{1-2}} = \frac{p_1 - p_{3/4}}{R_{2-3-4}} \quad (5)$$

其中的  $p_{3/4}$  为虚拟管路 2-3-4 的出口压力,为防止管路倒流,该压力取为管路 2-3 和 2-4 出口压力中的较大者,即  $p_{3/4} = \max\{p_3, p_4\}$ 。所以

$$p_2 = p_1 - (p_1 - p_{3/4}) \frac{R_{1-2}}{R_{1-4}} \quad (6)$$

最后,根据式(2)即可计算出各分支管路的流量  $Q_{2-3}$  和  $Q_{2-4}$  以及合并流量  $Q_{2-3-4}$ 。考虑到计算误差,为了防止式(3)中的分支流量与总流量不协调,还需要对分支管路流进行校正,即

$$\begin{cases} Q_{2-3} = \frac{Q_{2-3}}{Q_{2-3-4}} Q_{1-4} \\ Q_{2-4} = Q_{1-4} - Q_{2-3} \end{cases} \quad (7)$$

## 2 基于参数校正的管路泄漏故障诊断

### 2.1 管路泄漏模拟

在利用第1部分给出的模型进行故障诊断时,需要首先决定泄漏量的内部表征参数。考虑到泄漏管路 2-3 的特殊性,其流量计算式(2)中的出口压力定为 1 atm,阻力  $R_{2-3}$  则用流体流经突然变大出口的局部阻力来表示,即

$$Q_{2-3} = \frac{\sqrt{p_2 - p_a}}{\sqrt{\frac{\rho}{2A_{\text{leak}}^2}}} \quad (8)$$

其中,  $p_a$  代表常压,  $A_{\text{leak}}$  代表泄漏面积。由于泄漏量与  $A$  成正比,所以可将  $A$  作为管路泄漏参数。此外,对于管路 1-2,其阻力计算式(2)中的长度  $l$  代表了泄漏点距管路入口的距离,故可以作为表征泄漏位置的内部参数。

在给定泄漏量和泄漏位置后,即可求解第1部分的泄漏模型。由于化工管路大多用于输送液体,所以可近似认为流体密度不变。如果管路输送的为气体,则在输送压力变化不大的情况下,密度也可取平均值从而保持不变。因此,第1部分在给出泄漏故障的动态模型时,并没有考虑管路中流体的累积量。从这点来看,管路流动模型也可以认为是稳态模型。但在故障诊断过程中,需要实时求解该模型,对计算速度具有较高的要求,所以该模型又具有动态求解的性质。节点压力  $p_2$  和摩擦系数  $\lambda$  的迭代计算是导致模型求解速度较慢的主要原因,本研究采用内圈迭代与外圈积分融合的方法来加快计算速度,如图2所示。

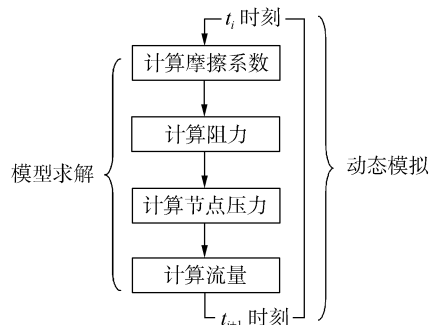


图2 管路泄漏模拟过程

Fig. 2 Simulation of pipeline leakage

在每次的模型求解中,并不要求模型完全收敛,而只需对节点压力和摩擦系数进行一次校正。前者的校正公式见式(6),后者的校正公式采用工程中较



为常用的 Colebrook 公式<sup>[12]</sup>:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.74 - 2 \log \left( \frac{2\epsilon}{d} + \frac{18.7}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (9)$$

该式适用于湍流和过渡流,如果流体处于层流状态,则采用下式计算:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

由于模型要多次计算,所以上述的单次校正过程在短时间内即可保证模型收敛,而这一收敛过程实际上是在图 2 中的动态模拟过程中实现的。这种方式在保证模型精度的同时,可以大大提高模拟的运算速度,从而满足管路泄漏故障诊断的实时计算速度要求。

## 2.2 故障诊断过程

以 2.1 节介绍的动态模拟为基础构建的故障诊断过程如图 3 所示。首先将流量的动态模拟结果与现场采集历史数据相比较,观察管路的运行情况是否与理论预测相符合,该步骤组成了故障的检测过程。如果二者相差不大,则表明管路运行正常,只需继续进行监测即可;否则表明管路发生了泄露,需要进行故障诊断以确定泄露量和泄露位置。外在的泄露量可看作是由内在的泄露面积参数的异常变化引起的,所以故障诊断可通过动态模型的在线校正完成,从而得到模型参数的变化过程。之后再根据故障参数的变化趋势,来获取当前泄露的基础原因。操作人员应根据此处得到的故障原因来采取相应的处理措施,而系统则继续监测装置的运行情况。

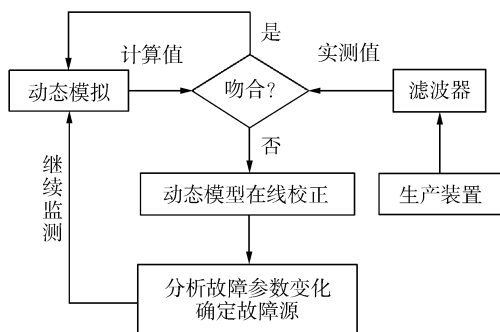


图 3 故障诊断步骤

Fig. 3 Steps involved in fault diagnosis

通过比较实测值与理论值的残差来判断故障是否存在时,为了消除实测数值过小而带来的判断误差,图 3 中的吻合程度将以相对偏差来度量:

$$\left| \frac{y - \hat{y}}{\hat{y}} \right| < \epsilon \quad (11)$$

式中的  $y$  和  $\hat{y}$  分别为模拟信号和测量信号,  $\epsilon$  为残

差阈值。由于故障诊断系统采用的是化工过程状态空间的机理模型,所以一旦残差超出了该阈值,有物理意义的状态就可以帮助分离和判断故障。 $\epsilon$  值过大,会导致诊断系统对渐变故障不敏感,使故障漏检率增加;该值过小,又可能将系统的随机干扰误判为故障,使误检率增加。

此外,考虑到化工管路的流量检测的精度偏差经常大于可能存在的泄漏量,以及实际化工流程内的管路上通常只装有单个流量计甚至没有任何仪表的事实,所以应对采集到的流量数据进行滤波处理。本研究采用一阶数字低通滤波器算法<sup>[13]</sup>:

$$\hat{y}(k) = (1 - \alpha)\hat{y}(k-1) + \alpha y(k) \quad (12)$$

其中的  $\hat{y}$  和  $y$  分别为滤波器的输出和输入信号。 $\alpha$  是介于 0 与 1 间的系数,其值取决于采样周期与滤波器的时间常数之比。 $\alpha$  越小,则对高频信号削弱得越厉害,能够通过滤波器的频率上限越低。

## 3 实例研究

为了验证基于参数校正的管路泄漏故障诊断方法的可行性,本研究将其应用于简单管路和串联管路,以考察其在简单和复杂管路中的有效性。

### 3.1 简单管路

这是仅有一个进口和一个出口的简单管路的泄漏问题,如图 4 所示。该管路由管段 B1 和 B4 组成,二者的分界点 B2 代表了泄漏点,泄漏通过调节阀 B3 的开度来模拟。管路中的流体为常温水,表 1 给出了该管路中的具体参数。

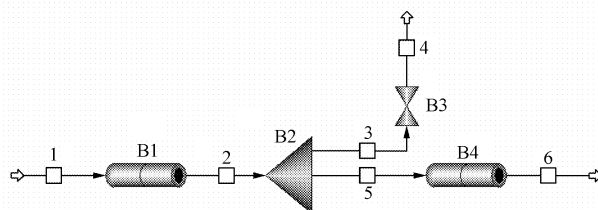


图 4 管路泄漏模拟图

Fig. 4 Simulation diagram of pipe leakage

利用 Aspen Dynamics 动态模拟图 4 流程,模拟周期为 8 h。模拟输出量为物流 1 和物流 6 的流量,将其加上均值为 0、标准偏差为 5 的随机噪声后,作为故障诊断的实时采集数据,采样间隔为 0.01 h。在 2 h 时,将阀 B3 开度在 4 h 内由 0% 按照正弦曲线增至 100%,以模拟管路中逐渐出现的泄漏故障。故障诊断程序在 Matlab 中编制,并在 Pentium4



2.93G/512M 的台式机上测试。参数估计算法采用信赖域法,由于诊断过程中需要将实测摩尔流量转化为数值上较小的体积流量,所以该算法中的函数值收敛判据取  $1.0 \times 10^{-8}$ 。式(12)中的  $\alpha$  取 0.03,式(11)中的  $\epsilon$  取 0.001。

表 1 简单管路参数

Table 1 Parameters for simple pipeline example

参数	数值
管段 B1 和 B4 的长度, m	1
管段 B1 和 B4 的内径, m	0.02
管段 B1 和 B4 的管壁绝对粗糙度, m	$4.572 \times 10^{-5}$
管段 B1 的入口压强, kPa	$1.5 \times 10^3$
管段 B4 的出口压强, kPa	$1.01 \times 10^3$
环境压强, kPa	$1.01 \times 10^3$
水密度, $\text{kg}/\text{m}^3$	1000
水黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$	0.001

管段 B1 和 B4 的参数完全相同

泄漏会导致该管路的总阻力下降,所以物流 1 的流量会增加,而泄漏对物流 5 的分流作用则会导致物流 6 的流量降低。图 5 给出了基于动态模拟的故障诊断系统跟踪泄漏前后流量变化的情况。可以看出,故障诊断系统可以较好地跟踪流量的变化,参数估计得到的  $A_{\text{leak}}$  也较为及时地反映出了水的逐渐泄漏过程。这一诊断过程仅需要泄漏点前的流量实测数据,而实际化工生产中的一段管路往往也只安装一个流量计,所以该系统可以较好地满足实际

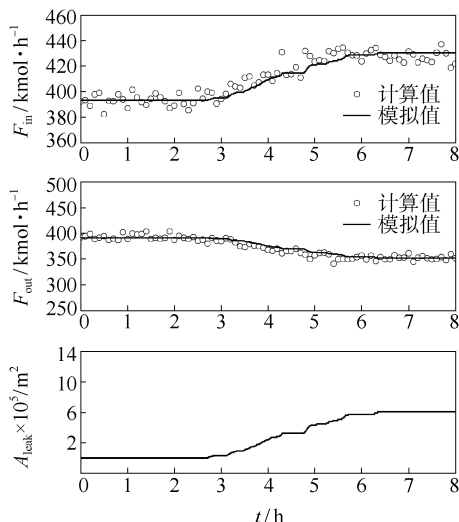


图 5 简单管路泄漏的故障诊断结果

Fig. 5 Fault diagnosis procedure for a simple pipeline example

管路的故障诊断需要。 $A_{\text{leak}}$  的逐渐增加表明泄漏量的逐渐增加,所以  $A_{\text{leak}}$  可以较流量  $F_{\text{in}}$  更为清晰地反映泄漏故障,从而实现了由表观故障数据到内在故障参数的空间映射。此外,如果已知实测值为泄漏点后的流量,那么由于诊断过程基于管路流动的机理模型构建,所以系统也可以正常工作。

目前,长距离输送管道的泄露定位,多采用直接探测法和压力波变化法来检测。然而,对于化工流程中的短距离管路,管路连接复杂,测量数据有限(通常单个管道上仅有一个流量计,甚至没有任何测量仪表),所以从流量的变化来反映泄露点位置是十分重要的。从图 5 也可以看出,泄漏点前后的流量变化是截然相反的,所以可通过检测流量计与泄漏点的前后位置关系来粗略判断泄露点位置。在未知二者关系的情况下,可先假设泄漏点位于测量点之前,然后进行故障参数估计。如果在故障参数校正后,预测流量与实测流量的偏差减小,则说明假设正确,否则交换二者的位置,继续进行故障诊断。采用这种思路得到的诊断结果如图 6 所示,图中的  $F_{\text{ratio}}$  代表位置关系,1 表示测量点位于泄漏点之前,0 表示测量点位于泄漏点之后。可以看出,虽然得到的  $A_{\text{leak}}$  可以反映出泄漏的趋势,但由于  $F_{\text{ratio}}$  波动太大而致使趋势模糊化。分析原因, $F_{\text{ratio}}$  的大幅波动是由式(11)中的  $\epsilon$  过小而导致的误诊断造成的,所以增加  $\epsilon$  可以部分消除这一现象。图 7 给出了  $\epsilon$  增至 0.01 时的诊断结果,可以看出在有故障发生时, $F_{\text{ratio}}$  及时调整为了 1,正确地反映出实测流量位于泄漏点之前。但也可以发现, $A_{\text{leak}}$  和  $F_{\text{ratio}}$  的诊断结果都有一定的滞后,这是由  $\epsilon$  的取值较大所造成的。因此,在实际计算中,应综合考虑诊断的实时性和准确性来确定一合适的  $\epsilon$  值。

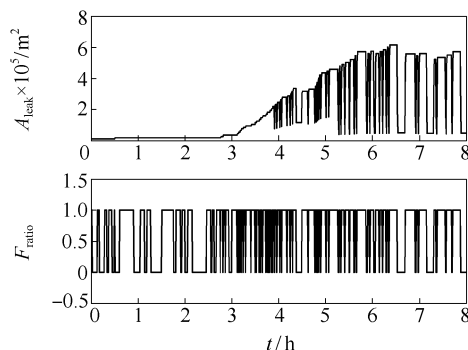


图 6 低故障检测阈值对参数估计的影响

Fig. 6 Variation of fault parameter with low threshold



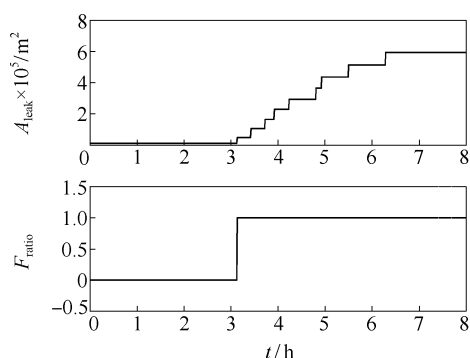


图 7 高故障检测阈值对参数估计的影响

Fig. 7 Variation of fault parameter with high threshold

### 3.2 串联管路

图 8 给出了由管段 B4、B7 和 B3 所构成的串联管路, B6 和 B1 为两处泄漏点, 通过打开阀 B5 和 B2 来模拟两处的泄漏故障。该管路中可测量为物流 1、5、6 和 10 的摩尔流量, B11、B15、B12 和 B13 分别为对应的测量点, 并已经加入了噪声发生器 B8、B14、B9 和 B10 所产生的均值为 0、标准偏差为 5 的随机噪声。图 8 中各管段参数与图 4 中的管段参数完全相同, 流动介质同样为水, 物性见表 1。物流 1 的进口压力为 1.5 atm, 物流 10 的出口压力为 1 atm, 泄漏物料 4 和 9 的出口压力均为 1 atm。Aspen Dynamics 模拟周期为 15 h, 在 2~6 h 期间按照正弦曲线开启阀 B5, 在 8~12 h 期间按照正弦曲线开启阀 B2, 模拟两个依次出现的泄漏故障。

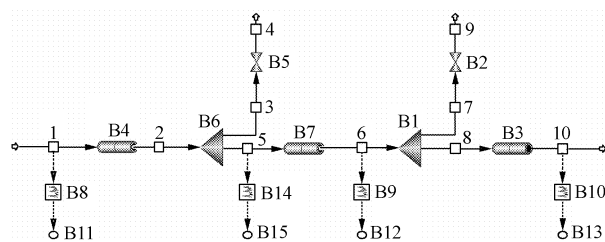


图 8 串联管路泄漏模拟图

Fig. 8 Simulation diagram of pipe leakage for pipeline in series

模拟该串联管路时, 采用与第 2 部分相同的先合并阻力再计算流量的思路。这种方法可以统一复杂管路和简单管路的模拟过程, 有利于提高计算和编程的效率。将物流 1 和 10 的流量采集值输入故障诊断系统, 得到的结果如图 9 所示。此计算过程中采用的参数值与 3.1 部分相同, 在此不再赘述。图 9 中的  $F_{in1}$ 、 $F_{out1}$ 、 $F_{in2}$  和  $F_{out2}$  分别表示图 8 中的物流 1、5、6 和 10 的流量,  $A_{leak1}$  和  $A_{leak2}$  分别表示 B6 和 B1 处的泄漏面积。可以看出, 串联管路的流量变化关系更为复杂, 仅从流量本身的波动来辨析泄漏量的大小已经变得较为困难。

但经过诊断, 图 9 中的  $A_{leak1}$  和  $A_{leak2}$  仍然清晰地显示了串联前后管路的泄漏情况。所以在面对实际生产过程中众多测量数据的情况下, 本研究提出的诊断方法可以更为直观地找出故障源。

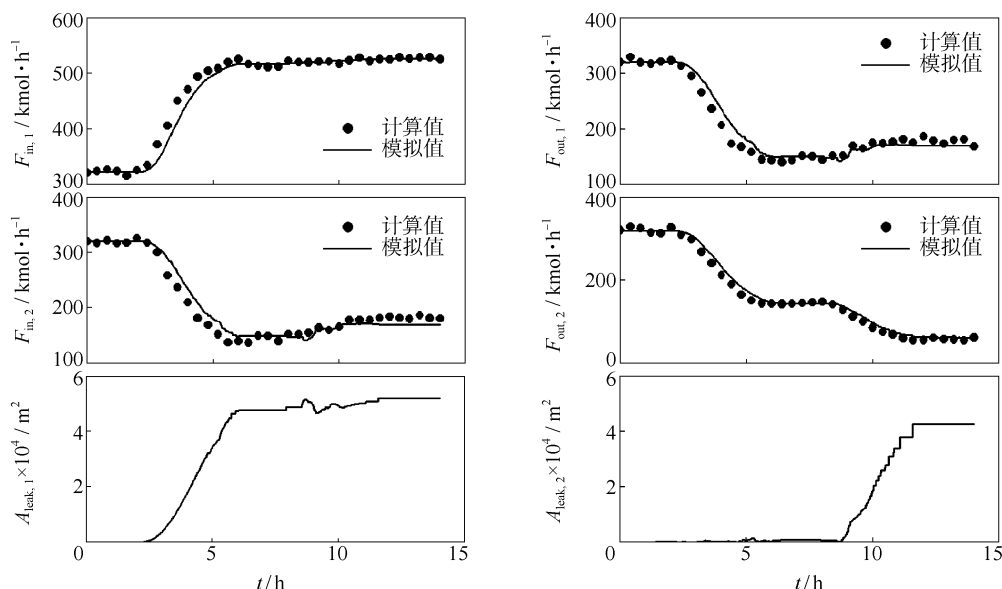


图 9 串联管路泄漏的故障诊断结果

Fig. 9 Fault diagnosis procedure for pipeline in series



## 4 结论

提出了一种基于动态模拟的化工管路泄漏诊断方法。该方法利用机理模型去动态模拟管路发生泄漏前后的流量变化,可以同时实现模型校正和故障诊断功能。准确地确定流量测量点与泄漏点间的前后位置关系,是有效跟踪管路动态流量数据的重要步骤,需要根据参数校正结果来确定。简单管路和串联管路的应用实例说明,该方法对简单管路和复杂管路均有效,对单故障和多故障也同时有效。

### 参考文献:

- [1] 王占山,张化光,冯健,等. 长距离流体输送管道泄漏检测与定位技术的现状与展望[J]. 化工自动化及仪表, 2003, 30(5): 5-10.
- [2] 张其敏,严宏东. 管道泄漏检测技术及评价[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2006, 8(2): 33-35.
- [3] Tian Wende, Sun Suli. On-line dynamic model correction based fault diagnosis in chemical processes[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007, 7(5): 952-959.
- [4] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin Kewen, et al. A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27: 293-311.
- [5] Huang Yuanjie, Reklaitis G V, Venkatasubramanian V. Dynamic optimization based fault accommodation[J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24: 439-444.
- [6] Grantham S D, Ungar L H. A first principles approach to automated troubleshooting of chemical plants[J]. Computers and Chemical Engineering, 1990, 14(7): 783-798.
- [7] 王朝晖,李文苓. 管道泄漏检测中实时模型法的研究[J]. 石油机械, 2005, 33(4): 41-43.
- [8] 张红兵,李长俊,彭善碧. 输气管道故障诊断中的实时模型法[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 103-105.
- [9] 李锋,李晓艳. 油田管道网络故障诊断的理论与方法[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2001, 40(1): 67-72.
- [10] Gabbar H A, Shinohara S, Shimada Y, et al. Experiment on distributed dynamic simulation for safety design of chemical plants[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2003, 11: 109-123.
- [11] 田文德,万斌,姚飞. 一步法生产乙醛的动态实时模拟[J]. 北京化工大学学报, 2001, 28(1): 6-9.
- [12] 时钧,汪家鼎,余国琮,等. 化学工业手册: 上卷[M]. 二版. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [13] 蒋慰孙,俞金寿. 过程控制工程[M]. 二版. 北京: 中国石化出版社, 1999.

## Dynamic simulation-based fault diagnosis in chemical pipeline leakages

TIAN WenDe<sup>1</sup> SUN SuLi<sup>2</sup> WANG Hai<sup>3</sup>

(1. College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao Shandong 266042;

2. School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao Shandong 266042;

3. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Taishan Medical University, Taian Shandong 271016, China)

**Abstract:** Diagnosis of leakage faults in pipeline transportation is an important area in chemical processing, and is mostly carried out using process history based methods and knowledge based methods. In this paper we propose a novel leakage fault detection and diagnosis method, using dynamic simulation to monitor the fluid flow process and identify leakages when large flow rate deviations occur. The inner leakage parameters are continuously updated *via* on-line correction, allowing the flow trends to be monitored and the existence of malfunctions to be detected simultaneously. The flow model is based on the principles of mass balance and mechanical energy balance, and is simulated using a recursive solution. Case studies of the proposed method are presented for a simple pipeline and a series pipeline, and the effects of different factors on the results are analyzed.

**Key words:** fault diagnosis; pipeline leakage; dynamic simulation; parameter estimation