第41卷　第5期
2020年5月

仪　器　仪　表　学　报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 41 No. 5
May 2020

DOI：10.19650/j.cnki.cjsi.J2006169

基于故障诊断观测器的管道多点泄漏研究

郭　颖[1,2]，杨理践[1]，郎宪明[2]

（1.沈阳工业大学信息科学与工程学院　沈阳　110870；2.辽宁石油化工大学信息与控制工程学院　抚顺　113001）

摘　要：针对管道同时发生多点泄漏时，难以有效检测的问题，提出一种基于故障诊断观测器的多点泄漏检测方法。首先，基于故障诊断观测器构建残差产生器，通过残差来提取泄漏系数信息。然后，采用干扰解耦技术使观测器对未知扰动有较好的鲁棒性。结合 Lyapunov 函数和 Barbalat 引理，证明了故障诊断观测器的稳定性。该方法可以检测和估计出泄漏各点的泄漏系数。通过模拟多点泄漏实验，泄漏点的泄漏系数最大估计误差为 1×10^{-5} $m^5\cdot s^{-1}$，最小估计误差为 0.2×10^{-5} $m^5\cdot s^{-1}$，验证了该方法的可行性及有效性。

关键词：多点泄漏检测；非线性模型；故障诊断观测器；鲁棒性

中图分类号：TP18　TH878　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：510.40

Multi-leak detection in the pipeline based on fault diagnosis observer

Guo Ying[1,2], Yang Lijian[1], Lang Xianming[2]

(*1.School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;*
2.School of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: It is difficult to detect the simultaneous multi-leak of the pipeline effectively. To solve this problem, a multi-leak diagnosis algorithm based on the fault diagnosis observer is proposed. Firstly, the residual generator is formulated based on the fault diagnosis observer and the leak coefficients are extracted by the residual error. Secondly, the disturbance decoupling technique is used to make the observer robust to unknown disturbances. The stability of the fault diagnosis observer is proved by using the Lyapunov function and Barbalat lemma. The approach can detect and estimate the leak coefficients. Simulation results of the multi-leak experiment prove that the maximum error of leak coefficients is 1×10^{-5} $m^5\cdot s^{-1}$, and the minimum error of leak coefficients is 0.2×10^{-5} $m^5\cdot s^{-1}$. Field experiments evaluate the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: multi-leak detection; nonlinear model; fault diagnosis observer; robust

0　引　　言

长输管线的高效、可靠和安全对于管道运输系统至关重要，泄漏检测系统主要目的是当管道发生泄漏时，估计泄漏量并精准定位[1-5]。管道泄漏检测系统面临的主要难题是如何充分利用管道上的压力、流量等测量信号，来检测小于当前输量1%的泄漏、缓慢泄漏和多点泄漏。

目前，多数研究工作只针对管道单点泄漏[6-7]的情况，因为随着泄漏点的增加，将加大检测的难度。文献[8]采用一组未知输入观测器对管道多点泄漏情况进行检测，首先将管道模型在无泄漏，正常工作点附近用泰勒级数展开，并将其线性化，其次将状态方程中出现的单点泄漏项作为干扰项进行解耦，使观测器对干扰项具有鲁棒性，此时需要建立一组鲁棒故障诊断观测器，最后采用卡尔曼滤波确定观测器增益矩阵，以获得较准确的故障残差，通过分析残差来获得泄漏位置。文献[9]针对管道中出现任意两点泄漏位置的问题，建立了泄漏系数与泄漏位置之间的联系，通过线性化模型，采用扩展卡尔曼滤波方法对其建立两个故障诊断观测器，通过残差判断泄漏位置，仿真结果验证了此方法的可行性。文献[10-11]通过建立非线性模型，首先将其在正常工作点

收稿日期：2020-03-11　　Received Date：2020-03-11

附近线性化,然后将摩擦系数、泄漏系数和泄漏位置作为状态变量扩展到状态空间中,通过近似扩展卡尔曼滤波算法将观测器输出值和实际测量值产生的残差渐近收敛到 0,从而估计出摩擦系数、泄漏系数和泄漏位置,仿真实验中,两处泄漏位置被估计出来。当管道发生连续多点泄漏时,Delgado-Aguiñaga 等[12] 采用一组扩展卡尔曼滤波故障诊断观测器对多点泄漏进行检测。首先,当单点泄漏量超过单点泄漏阈值时,采用一个扩展卡尔曼滤波观测器估计出泄漏位置和泄漏系数,并将其保存。然后,当多点泄漏量超过设定阈值时,建立多个扩展卡尔曼滤波观测器对管道连续多点泄漏进行检测,仿真实验中,当连续出现 3 个不同位置泄漏时,需采用 3 个扩展卡尔曼滤波故障诊断观测器进行泄漏检测。

在实际应用中,随着故障诊断观测器[13-14] 的增多,系统结构变得复杂,检测效率降低。本文针对管道同时发生多点泄漏的问题,采用单一故障诊断观测器,通过分析残差来获取各泄漏点的泄漏系数,并且通过干扰解耦,使观测器残差仅受泄漏系数的影响,对其他不确定因素具有鲁棒性。

1 管道模型

在忽略对流和管道坡度影响的情况下,管道瞬变流的动量方程和连续性方程描述如下[15]:

$$\frac{\partial Q(s,t)}{\partial t} + gA_m \frac{\partial H(s,t)}{\partial s} + \mu Q(s,t) \mid Q(s,t) \mid = 0 \tag{1}$$

$$b^2 \frac{\partial Q(s,t)}{\partial s} + gA_m \frac{\partial H(s,t)}{\partial t} = 0 \tag{2}$$

管道进口边界条件:

$$H(s=0,t) = H_{\mathrm{in}}(t) \tag{3}$$

管道出口边界条件:

$$H(s=L,t) = H_{\mathrm{out}}(t) \tag{4}$$

式中:H 为瞬时管线压力,$\mathrm{mH_2O}$;Q 为瞬时管道流量,$\mathrm{m^3/s}$;t 为时间,s;s 为沿管道轴向的坐标,m;g 为重力加速度,$\mathrm{m/s^2}$;b 为波速,m/s;$\mu = f/2DA_m$;D 为管道直径,m;A_m 为管道横截面积,$\mathrm{m^2}$;f 是沿程阻力系数;L 为管道长度,m。

当管线在 s_L 点出现泄漏时,其泄漏量可采用如下孔口方程表示[10]:

$$Q_{s_L} = \lambda_{s_L} \sqrt{H_{s_L}(t)} \tag{5}$$

式中:λ_{s_L} 为泄漏点的泄漏系数;$H_{s_L}(t)$ 为泄漏点的管道内部压力。

将式(1)和(2)中导数用有限差分近似[15]:

$$\frac{\partial H(s_i,t)}{\partial s} = \frac{H_{i+1} - H_i}{\Delta s_i} \quad \forall i = 1,\cdots,n \tag{6}$$

$$\frac{\partial Q(s_{i-1},t)}{\partial s} = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{\Delta s_{i-1}} \quad \forall i = 2,\cdots,n \tag{7}$$

将管道空间等距离分成 n 段,其中每段长度为 Δs_i,$\forall i = 1,\cdots,n$,并且 $\sum_{i=1}^{n} \Delta s_i = L$。式(6) 和(7) 中,$H_i$ 和 Q_i 分别表示为 $H(s_i,t)$ 和 $Q(s_i,t)$,为管道各分段点上的压力值和流量值。

假设管道上存在均匀分布的 $n-1$ 个泄漏点,由此可将式(1)和(2)整理可得:

$$\dot{Q}_i = a_1(H_i - H_{i+1}) - \mu Q_i \mid Q_i \mid \quad \forall i = 1,\cdots,n \tag{8}$$

$$\dot{H}_{i+1} = a_2(Q_i - Q_{i+1} - \lambda_i \sqrt{H_{i+1}}) \quad \forall i = 1,\cdots,n-1 \tag{9}$$

式中:管道进口端压力 H_1 和管道出口端压力 H_{n+1} 为管道的边界条件,$a_1 = gA_m/\Delta s_i$,$a_2 = b^2/gA_m\Delta s_i$。

通过选取状态变量为:$\boldsymbol{x} = [Q_1 \ H_2 \ Q_2 \ H_3 \ Q_3 \ H_4 \ \cdots \ Q_n]^{\mathrm{T}} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ \cdots \ x_{2n-1}]^{\mathrm{T}}$,可建立管道系统非线性状态空间模型:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{g}_1(x) + \boldsymbol{g}_1(a_2,x,\boldsymbol{\lambda}) + \boldsymbol{E}d \tag{10}$$

输入向量为:

$$\boldsymbol{u} = [H_1 \quad H_{n+1}]^{\mathrm{T}} \in \boldsymbol{R}^{2\times 1} \tag{11}$$

泄漏系数向量为:

$$\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \cdots \quad \lambda_{n-1}]^{\mathrm{T}} \in \boldsymbol{R}^{(n-1)\times 1}, \text{且 } \lambda_i \geqslant 0 \tag{12}$$

式(10)中系统矩阵如下:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & -a_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_2 & 0 & -a_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & -a_1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & -a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & -a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_1 & 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

控制矩阵如下:

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & -a_1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{g}_1(x) = -\mu [x_1 \mid x_1 \mid 0 \ \ x_3 \mid x_3 \mid 0 \ \cdots \ 0 \ \ x_{2n-1} \mid x_{2n-1} \mid]^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{g}_2(a_2,x,\boldsymbol{\lambda}) = a_2 \boldsymbol{M}\boldsymbol{F}\boldsymbol{\lambda} \tag{16}$$

其中:$\boldsymbol{A} \in \boldsymbol{R}^{(2n-1)\times(2n-1)}$;$\boldsymbol{B} \in \boldsymbol{R}^{(2n-1)\times 2}$;$\boldsymbol{g}_1(x) \in \boldsymbol{R}^{(2n-1)\times 1}$;$\boldsymbol{g}_2(x) \in \boldsymbol{R}^{(2n-1)\times 1}$;$d$ 为未知输入扰动;$\boldsymbol{E}$ 为适当维数矩阵。

$$
\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \ddots & -1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \in \boldsymbol{R}^{(2n-1)\times(n-1)}
$$

$$
\boldsymbol{F}(x)=\begin{bmatrix} \sqrt{x_2} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sqrt{x_4} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \sqrt{x_{2\times(n-1)}} \end{bmatrix} \in \boldsymbol{R}^{(n-1)\times(n-1)}
$$

当管道同时发生 $n-1$ 点泄漏时,对其进行泄漏检测需要管道系统在状态向量中选取 $n-1$ 个测量点。输出方程为:

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x} \tag{17}$$

其中:$\boldsymbol{C}\in\boldsymbol{R}^{(n-1)\times(2n-1)}$。

2　多点泄漏检测

基于故障诊断观测器的管道多点泄漏检测方法是利用管道系统的测量值和观测器的输出进行比较形成残差。当管道未发生泄漏时,残差接近于 0;而当管道发生泄漏时,残差非 0。通过对残差信号进行处理分析,实现管道多点泄漏检测,并估计出泄漏各点的泄漏系数。

假设 1　管道模型中的系统矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和输出矩阵 $\boldsymbol{C}$,满足$(\boldsymbol{A},\boldsymbol{C})$可观测条件。

由于$(\boldsymbol{A},\boldsymbol{C})$可观,对管道模型(10)和(17)构造如下非线性故障诊断观测器:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}=\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}+\boldsymbol{g}_1(\hat{x})+\boldsymbol{g}_2(a_2,\hat{\boldsymbol{x}},\hat{\boldsymbol{\lambda}}+\boldsymbol{K}(y-\hat{y}) \tag{18}$$

$$\hat{\boldsymbol{y}}=\boldsymbol{C}\hat{\boldsymbol{x}} \tag{19}$$

$$\boldsymbol{e}=\boldsymbol{x}-\hat{\boldsymbol{x}} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{H}(\boldsymbol{y}-\hat{\boldsymbol{y}}) \tag{21}$$

式中:$\hat{\boldsymbol{x}}$ 为状态估计;$\hat{\boldsymbol{y}}$ 为系统输出估计;$\hat{\boldsymbol{\lambda}}$ 为泄漏各点的泄漏系数估计,$\hat{\boldsymbol{\lambda}}=\begin{bmatrix}\hat{\lambda}_1 & \hat{\lambda}_2 & \cdots & \hat{\lambda}_{n-1}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{e}$ 为状态估计误差;$\boldsymbol{K}$ 为观测器的增益矩阵;$\boldsymbol{H}$ 为适当维数矩阵;$\boldsymbol{r}$ 为残差。则:

$$
\begin{aligned}
\dot{\boldsymbol{e}}&=\dot{\boldsymbol{x}}-\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}+\boldsymbol{g}_1(x)+a_2\boldsymbol{M}\boldsymbol{F}(x)\lambda+\boldsymbol{E}d-\\
&\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}-\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}-\boldsymbol{g}_1(\hat{\boldsymbol{x}})-aa_2\boldsymbol{M}\boldsymbol{F}(\hat{\boldsymbol{x}})\hat{\boldsymbol{\lambda}}-\boldsymbol{K}(y-\hat{y})=\\
&(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{K}\boldsymbol{C})\boldsymbol{e}+(\boldsymbol{g}_1(x)-\boldsymbol{g}_1(\hat{x}))+a_2\boldsymbol{M}(\boldsymbol{F}(x)\lambda-\\
&F(\hat{\boldsymbol{x}})\hat{\boldsymbol{\lambda}})+\boldsymbol{E}d
\end{aligned} \tag{22}
$$

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{C}\boldsymbol{e} \tag{23}$$

假设 2　1)泄漏系数 λ_i 有界($i\in[1,2,\cdots,n-1]$),满足 $\lambda_i\leqslant\lambda_0$,且具有如下特性:当管道无泄漏时,$\lambda_i=0$,$\lambda_i=\hat{\lambda}_i$;当管道各点出现泄漏时,$\lambda_i\neq 0$。

2)非线性项 $\boldsymbol{M}\boldsymbol{F}(x)\lambda$ 满足 Lipschitz 条件,即存在常数 ρ,使 $\|\boldsymbol{M}\boldsymbol{F}(x)\lambda-\boldsymbol{M}\boldsymbol{F}(\hat{x})\lambda\|\leqslant\rho\|\boldsymbol{x}-\hat{\boldsymbol{x}}\|$。

根据管道模型的特征,参数设置满足假设 2 的条件。

定理 1　给定非线性模型式(10)和(17),构造非线性故障诊断观测器(18)和(19),当管道未出现泄漏时,状态估计误差渐近收敛至 0,即 $\lim\limits_{t\to+\infty}\boldsymbol{e}=0$,则故障诊断观测器参数需满足如下条件:

$$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{K}\boldsymbol{C})+(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{K}\boldsymbol{C})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}=-\boldsymbol{Q} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{R}\boldsymbol{M}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\kappa \tag{25}$$

$$\boldsymbol{R}\boldsymbol{E}=0 \tag{26}$$

其中 $\boldsymbol{Q}>0$,$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}>0$,$\kappa$ 为常数。

证明　构造 Lyapunov 函数如下:

$$v_1=\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{e} \tag{27}$$

可得:

$$
\begin{aligned}
\dot{v}_1&=\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{e}+\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\dot{\boldsymbol{e}}=[(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{K}\boldsymbol{C})\boldsymbol{e}+(\boldsymbol{g}_1(x)-\boldsymbol{g}_1(\hat{x}))+\\
&a_2\boldsymbol{M}(F(x)-F(\hat{x}))\lambda+Ed]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{e}+\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}[(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{K}\boldsymbol{C})\boldsymbol{e}+\\
&(g_1(x)-\boldsymbol{g}_1(\hat{x}))+a_2\boldsymbol{M}(\boldsymbol{F}(x)-F(\hat{x}))\lambda+\boldsymbol{E}d]
\end{aligned} \tag{28}
$$

整理可得:

$$
\begin{aligned}
\dot{v}_1&=\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{R}(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{K}\boldsymbol{C})+(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{K}\boldsymbol{C})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}]\boldsymbol{e}+\\
&2a_2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{M}(F(x)-\boldsymbol{F}(\hat{x}))\lambda+2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{g}_1(x)-\boldsymbol{g}_1(\hat{x}))
\end{aligned} \tag{29}
$$

因为:

$$\boldsymbol{g}_1(x)=-\mu[x_1|x_1|0\ \ x_3|x_3|0\ \cdots\ 0\ \ x_{2n-1}|x_{2n-1}|]^{\mathrm{T}},$$

所以 $\boldsymbol{g}_1(x)-\boldsymbol{g}_1(\hat{x})=-\mu\boldsymbol{e}[(\boldsymbol{x}+\hat{\boldsymbol{x}})]$,由此可得:

$$2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}(g_1(x)-g_1(\hat{x}))<0$$

因为非线性函数 $\boldsymbol{M}\boldsymbol{F}(x)\lambda$ 满足 Lipschitz 条件,即 $2a_2\|\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{M}(F(x)-F(\hat{x}))\lambda\|\leqslant 2a_2\|\boldsymbol{e}\|^2\|\boldsymbol{R}\|\rho$。

$$\dot{v}_1\leqslant-\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e}+2a_2\|\boldsymbol{e}\|^2\|\boldsymbol{R}\|\rho-2\mu\boldsymbol{e}\boldsymbol{R}\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}[(\boldsymbol{x}+\hat{\boldsymbol{x}})] \tag{30}$$

当 $2a_2\|\boldsymbol{R}\|\rho-2\mu\|\boldsymbol{R}\|(\boldsymbol{x}+\hat{\boldsymbol{x}})-\eta_{\max}(Q)<0$ 时,$\lim\limits_{t\to+\infty}\boldsymbol{e}=0$,$\eta_{\max}(Q)$ 为矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 的最大特征值。因为在无泄漏时,$\lambda_i=0$,所以根据公式可得 $\lim\limits_{t\to+\infty}\boldsymbol{e}=0$。

当同时发生多点泄漏,各点的泄漏系数为常数值 $\lambda_i=\lambda_{if}$,且满足 $\lambda_{if}\leqslant\lambda_0$,$\boldsymbol{\lambda}_f=[\lambda_{1f}\ \ \lambda_{2f}\ \ \cdots\ \ \lambda_{(n-1)f}]^{\mathrm{T}}$。定义泄漏系数估计差值:$e_{if}=\lambda_{if}-\hat{\lambda}_i$,并且 $\boldsymbol{e}_f=[e_{1f}\ \ e_{2f}\ \ \cdots\ \ e_{(n-1)f}]^{\mathrm{T}}$,其中 $i\in[1,2,\cdots,n-1]$。设计非线性故障诊断观测器使 $\lim\limits_{t\to+\infty}e=0$,$\lim\limits_{t\to+\infty}\boldsymbol{e}_{if}=0$。

定理 2　给定非线性模型式(10)和(17),当存在多点泄漏故障诊断观测器时,存在权值 $\varepsilon>0$,使得泄漏系数估计满足 $\dot{\hat{\boldsymbol{\lambda}}}=a_2\varepsilon^{-1}\boldsymbol{F}(\hat{x})\boldsymbol{\kappa}\boldsymbol{r}$,则泄漏系数估计误差满足 $\lim\limits_{t\to+\infty}e_{if}=0$。

证明　构造 Lyapunov 函数如下:

$$\boldsymbol{v}_2 = \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{e} + \varepsilon e_f^2 \tag{31}$$

可得:

$$\dot{\boldsymbol{v}}_2 = -\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e} - 2\varepsilon \boldsymbol{e}_f\dot{\hat{\boldsymbol{\lambda}}} + 2a_2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{M}(F(x)\lambda_f - F(\hat{x})\hat{\boldsymbol{\lambda}}) + 2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}(g_1(x) - g_1(\hat{x})) \tag{32}$$

因为 $F(x)\lambda_f - F(\hat{x})\hat{\boldsymbol{\lambda}} = (F(x) - F(\hat{x}))\lambda_f + F(\hat{\boldsymbol{x}})\boldsymbol{e}_f$, 则

$$\dot{\boldsymbol{v}}_2 = -\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e} - 2\varepsilon \boldsymbol{e}_f\dot{\hat{\boldsymbol{\lambda}}} + 2a_2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{M}((F(x) - F(\hat{x}))\lambda_f + 2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{g}_1(x) - \boldsymbol{g}_1(\hat{x})) + 2a_2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{M}F(\hat{x})\boldsymbol{e}_f \tag{33}$$

因定义 $\dot{\hat{\boldsymbol{\lambda}}} = a_2\varepsilon^{-1}F(\hat{\boldsymbol{x}})\boldsymbol{\kappa}\boldsymbol{r}$, 则式(33)改写如下形式:

$$\boldsymbol{v}_2 \leqslant -\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e} + 2a_2\|\boldsymbol{e}\|^2\|\boldsymbol{R}\|\rho - 2\mu\boldsymbol{e}\boldsymbol{R}\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}[(\boldsymbol{x} + \hat{\boldsymbol{x}})] \tag{34}$$

当 $2a_2\|\boldsymbol{R}\|\rho - 2\mu\|\boldsymbol{R}\|(\boldsymbol{x} + \hat{\boldsymbol{x}}) - \eta_{\max}(Q) < 0$时, 即 $\boldsymbol{v}_2 < 0$。

引理 1(Barbalat 引理) 如果函数 $\psi(t)$ 有界, 且 $\psi(t)$ 平方可积,则 $\lim\limits_{t\to+\infty}\psi(t) = 0$。 由 Barbalat 引理可知, 则 $\lim\limits_{t\to+\infty}\boldsymbol{e} = 0$。 由定理 2 可知,当管道同时发生多点泄漏时,通过残差信号可以估计出各泄漏点的泄漏系数。

3 实 验

3.1 仿真实验

本文在 Simulink 环境下进行仿真试验, 采用文献[9]中的液体管道水力参数,具体取值如表 1 所示。

表 1 管道水力参数

Table 1 Pipeline characteristics

参数	符号	值	单位
管道长度	L	132	m
管道内径	D	1×10^{-1}	m
阻力系数	f	0.04±0.01	
重力加速度	g	9.8	m/s^2
管道横截面积	A_m	7.85×10^{-3}	m^2
压力波速	b	1 250	m/s

将管道空间等距离分为 4 段,同时发生三点泄漏的位置如图 1 所示,按照表 1 提供的管道水力参数,依据式(8)和(9), $a_1 = 2.33\times10^{-3}$, $a_2 = 6.154\,75\times10^{5}$。 边界条件为:管道进口端压力 H_1 = 10 MPa, 出口端压力 H_5 = 2 MPa。根据式(14)和(15),可得到管道模型的系统矩阵和控制矩阵, 输出矩阵取 $\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$。

显然,$(\boldsymbol{A},\boldsymbol{C})$可观测。

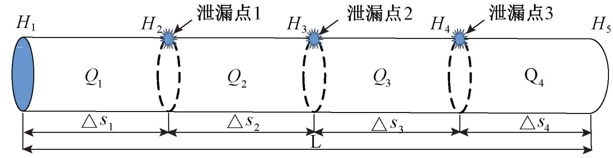

图 1 管道同时发生三点泄漏

Fig.1 A diagram of three leaks at the same time

令 $\boldsymbol{E} = [0\ \ 0\ \ 1\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ -1]^{\mathrm{T}}$, 未知输入干扰 $d(t)$ 取值如图 2 所示。

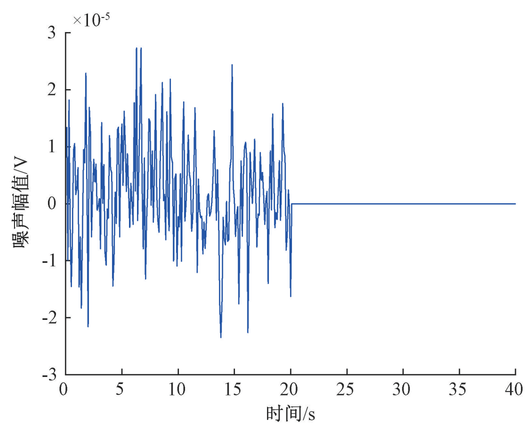

图 2 未知输入干扰

Fig.2 Unknown input disturbances

管道模型的仿真初始值为 $\boldsymbol{x}_0 = [0.007\,58\ \ 8\ \ 0.007\,58\ \ 6\ \ 0.007\,58\ \ 4\ \ 0.007\,58]^{\mathrm{T}}$。采用故障诊断观测器算法时, 观测器估计初值为 $\hat{\boldsymbol{x}}_0 = [0.007\,5\ \ 8.001\ \ 0.007\,5\ \ 5.999\ \ 0.007\,5\ \ 4.001\ \ 0.007\,5]^{\mathrm{T}}$, 其参数选取如下:

$$\boldsymbol{Q} = 10^{-6}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} 25.011\,8 & -3.006\,6 & 3.038\,8 \\ 552\,280 & -601\,990 & -13\,680 \\ -23.113\,3 & 55.080\,7 & -12.048\,3 \\ 677\,620 & 741\,480 & 855\,570 \\ 14.986\,5 & -81.488\,1 & -2.933\,2 \\ -711\,650 & -156\,280 & -1\,440\,900 \\ -16.818\,0 & 34.130\,8 & 8.907\,5 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} 2.091\,8\times10^{-8} & -1.562\,8\times10^{-6} & -3.383\,7\times10^{-8} & 5.054\,6\times10^{-4} & 6.707\,4\times10^{-8} & -5.052\,6\times10^{-4} & -3.991\,3\times10^{-8} \\ -1.562\,8\times10^{-6} & 0.539 & 6.228\,7\times\times10^{-4} & -11.680\,8 & -9.599\times10^{-4} & 12.078\,2 & 6.214\,4\times10^{-4} \\ -3.383\,7\times10^{-8} & 6.228\,7\times10^{-6} & 3.131\,6\times10^{-6} & -0.057\,4 & -5.044\,9\times10^{-6} & 0.057\,8 & 3.126\,3\times10^{-6} \\ 5.034\,6\times10^{-4} & -11.680\,8 & -0.057\,4 & 1.076\,9\times10^{3} & 0.091\,2 & -1.084\,9\times10^{3} & -0.057\,6 \\ 6.707\,4\times10^{-8} & -9.599\times10^{-4} & -5.044\,9\times10^{-6} & 0.091\,2 & 8.327\,8\times10^{-6} & -0.091\,9 & -5.083\,2\times10^{-6} \\ -5.052\,6\times10^{-4} & 12.078\,2 & 0.057\,8 & -1.084\,93\times10^{3} & -0.091\,9 & 1.094\,1\times10^{3} & 0.058 \\ -3.991\,3\times10^{-8} & 6.214\,4\times10^{-4} & 3.126\,3\times10^{-6} & -0.057\,6 & -5.083\,2\times10^{-6} & 0.058 & 3.170\,7\times10^{-6} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix} 0.961\,9 & 0 & -309.867\,3 & 0 & 0 & 0 & 310.975\,1 \\ -3.317\,2\times10^{5} & 0 & 7.189\,3\times10^{6} & 0 & 0 & 0 & -74338\times10^{6} \\ -383.362\,5 & 0 & 3.530\,5\times10^{4} & 0 & 0 & 0 & -3.557\,6\times10^{4} \\ 7.189\,3\times10^{6} & 0 & -6.627\,9\times10^{8} & 0 & 0 & 0 & 6.627\,5\times10^{8} \\ 590.791\,9 & 0 & -5.612\,6\times10^{4} & 0 & 0 & 0 & 5.653\,8\times10^{4} \\ -7.433\,8\times10^{6} & 0 & 6.677\,5\times10^{8} & 0 & 0 & 0 & -6.733\,9\times10^{8} \\ -382.478\,1 & 0 & 3.542\,2\times10^{4} & 0 & 0 & 0 & -3.569\,2\times10^{4} \end{bmatrix}$$

$\kappa=1,\rho=0.1$。此时 $\boldsymbol{R}\times\boldsymbol{E}$ 矩阵中保证每个元素近似为 0。

当管道未出现泄漏时,即 $\lambda_1=0$、$\lambda_2=0$ 和 $\lambda_3=0$,则管道各分段的流量仿真波形如图 3 所示,各分段的压力仿真波形如图 4 所示。

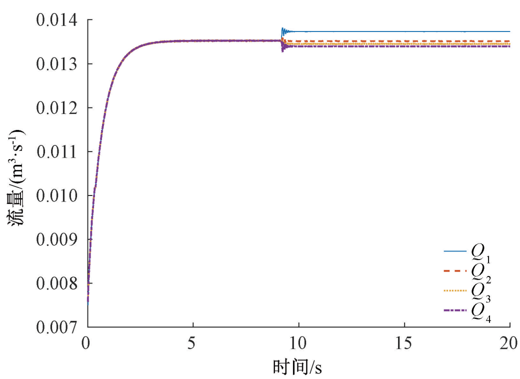

图 3　管道各分段流量值

Fig.3　Flow rates at the pipeline of each segment

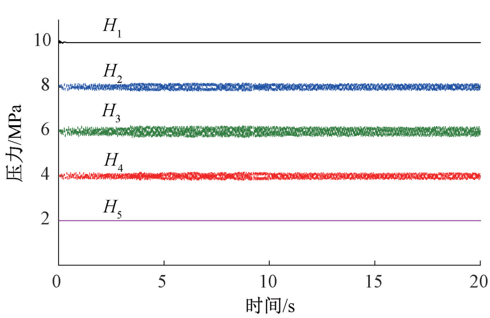

图 4　管道各分段压力值

Fig.4　Pressure heads at the pipeline of each segment

在未发生泄漏情况下,采用非线性故障诊断观测器估计管道各分段的流量状态值、压力状态值,流量估计的波形如图 5 所示,压力估计的波形如图 6 所示。

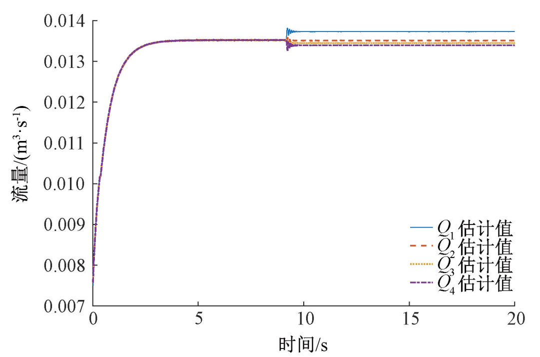

图 5　管道各分段流量估计值

Fig.5　Flow estimation rates at the pipeline of each segment

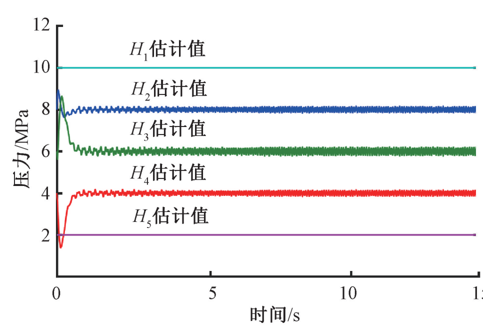

图 6　管道各分段压力估计值

Fig.6　Estimation of pressure heads at the pipeline of each segment

从图 5 和 6 中可以看出,设计的非线性故障诊断观测器算法,在状态方程中存在未知输入干扰的情况下,流量、压力估计值分别收敛到了管道各分段的流量、压力仿真值,说明了本文算法对未知输入进行了解耦,证明了算法的鲁棒性和有效性。

当管道同时发生三点泄漏时，即 $t=20$ s 时，各点泄漏系数设定为 $\lambda_1=8\times10^{-5}$、$\lambda_2=2\times10^{-5}$ 和 $\lambda_3=3\times10^{-5}$。此时非线性故障诊断观测器估计的流量波形如图 7 所示，估计的压力波形如图 8 所示。

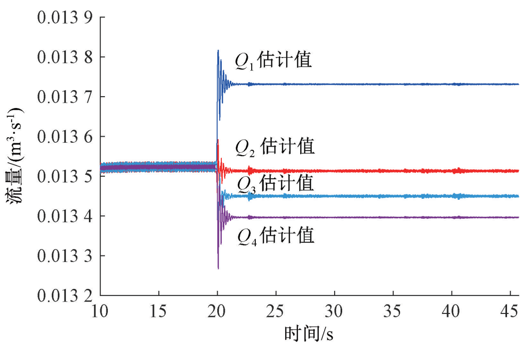

图 7 管道各分段流量估计值

Fig.7 Estimation of flow rates at the pipeline of each segment

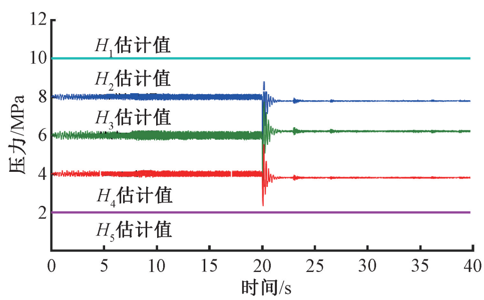

图 8 管道各分段压力估计值

Fig.8 Estimation of pressure heads at the pipeline of each segment

当同时发生三点泄漏的情况下，管道实际流量测量值与观测器模型输出流量估计值的残差将体现出泄漏的发生，其中管道出口流量的残差如图 9 所示。

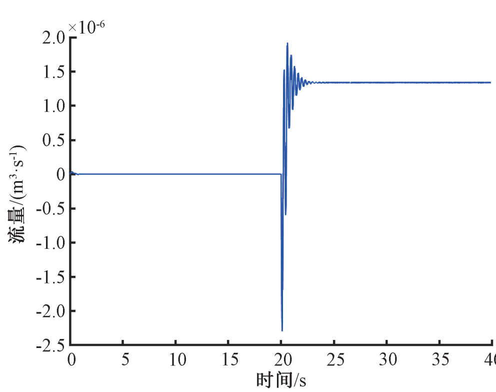

图 9 管出口流量的测量值与估计值的残差

Fig.9 Residual value of measured and estimated values of pipeline outlet flow

从图 9 中可见，残差信号渐近收敛，验证了算法的有效性。为了验证本文方法的优越性，在管道未发生泄漏时，对管道模型在时间区间[0,20]内加入如图 2 所示的未知输入干扰，分别采用非线性故障诊断观测器算法和文献[12]中提出的基于扩展卡尔曼滤波多点泄漏诊断算法估计各个泄漏点的泄漏系数，泄漏系数 λ_1、λ_2 和 λ_3 的估计值分别如图 10～12 所示。从图 10～12 中可以看出，当未知输入干扰发生在时间区间[0,20]时，由本文方法得到的估计值可以明显地抑制未知输入扰动带来的影响；而文献[12]中的方法不能较好地抑制未知输入扰动带来的影响，使估计值不收敛至真实值。与文献[12]中的方法相比，在管道模型存在未知输入扰动时，设计的非线性故障诊断观测器算法对未知输入扰动有较好的鲁棒性。

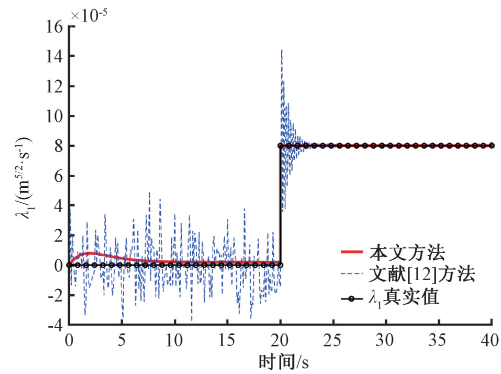

图 10 泄漏系数 λ_1 的估计值

Fig.10 Estimation of leak coefficient λ_1

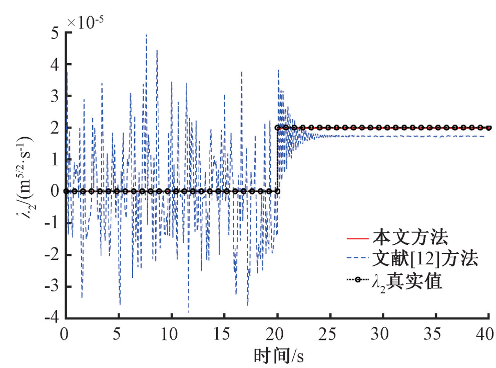

图 11 泄漏系数 λ_2 的估计值

Fig.11 Estimation of leak coefficient λ_2

当 $t=20$ s 时，管道同时发生三点泄漏，从图 10～12 可以看出，本文的方法可以较快地估计出各泄漏点的泄漏系数，使估计值收敛到真实值；而文献[12]中的方法虽然也可以使估计值收敛，但 λ_2、λ_3 的估计值与真实值存在一定误差。从而说明本文的方法具有响应速度快、估计精度高等优点。

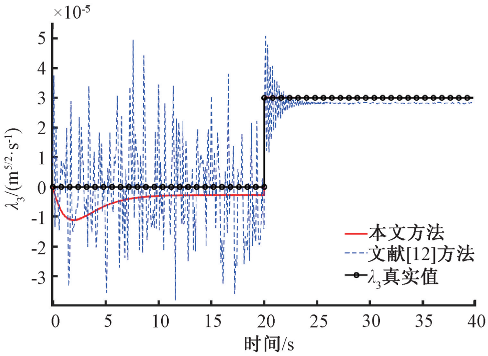

图 12　泄漏系数 λ_3 的估计值

Fig.12　Estimation of leak coefficient λ_3

3.2　现场实验

多点泄漏检测与定位实验在某成品油管线上进行,管道总长 15 800 m,管道内径是 DN250,多点泄漏位置分别距离管道首站 10 900、8 000 和 7 000 m,泄漏孔径分别为 25、20 和 20 mm,外界环境温度是 25℃,管道流体流量是 200 m^3/h。首站压力 4.5 MPa,末站压力0.5 MPa,压力波速为 1 250 m/s,阻力系数根据现场设置为 0.05,现场实验如图 13 所示。

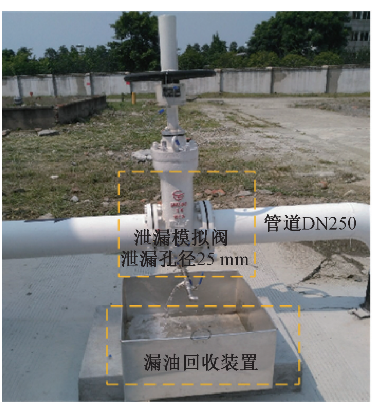

图 13　现场实验

Fig.13　Field test

当 $t=120$ s 时,成品油管道同时发生三点泄漏,通过本文方法对三点泄漏的泄漏系数进行估计,泄漏系数 λ_1、λ_2 和 λ_3 的估计值如图 14~16 所示。

仿真结果表明,本文采用单一故障诊断观测器可以估计出管道同时发生多点泄漏时各泄漏点的泄漏系数,简化了文献[12]需要多个故障诊断观测器进行多点泄漏检测的结构。

4　结　　论

本文针对管道同时发生多点泄漏设计了非线性故障

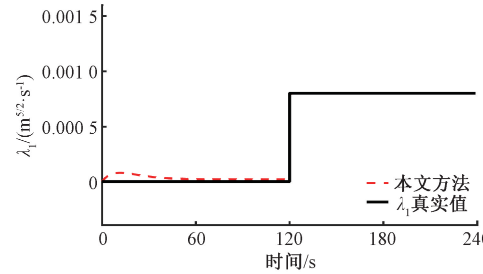

图 14　泄漏系数 λ_1 的估计值

Fig.14　Estimation of leak coefficient λ_1

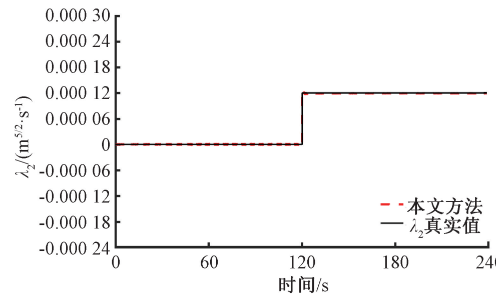

图 15　泄漏系数 λ_2 的估计值

Fig.15　Estimation of leak coefficient λ_2

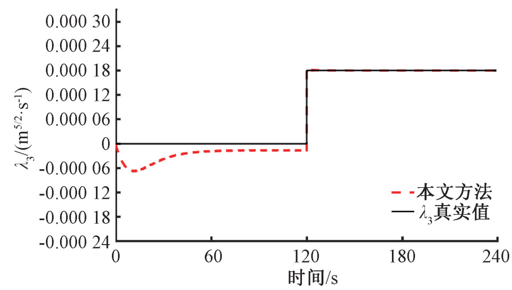

图 16　泄漏系数 λ_3 的估计值

Fig.16　Estimation of leak coefficient λ_3

诊断观测器算法。本文算法通过使用干扰解耦技术,使算法对管道外界未知输入扰动具有很好的鲁棒性。并且通过现场多点同时泄漏模拟仿真实验,本文算法估计泄漏点的泄漏系数最大估计误差为 $1\times10^{-5}\mathrm{m}^{5/2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$,最小估计误差为 $0.2\times10^{-5}\mathrm{m}^{5/2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$。实验结果表明,通过故障诊断观测器残差可以有效判断管道是否发生了泄漏,并且可以快速估计出管道同时发生多点泄漏时各泄漏点的泄漏系数。由于管道多点同时泄漏是小概率事件,并且由于实际管道现场存在外界各种干扰,如何能更加有效检测多点泄漏系数及精确定位,需要进一步研究。

参考文献

[1]　DATTA S, SARKAR S. A review on different pipeline fault detection methods[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2016,41:97-106.

[2] OSTAPKOWICZ P. Leak detection in liquid transmission pipelines using simplified pressure analysis techniques employing a minimum of standard and non-standard measuring devices [J]. Engineering Structures, 2016, 113(15):194-205.

[3] 李帅永,夏传强,杨丽丽.不同方向的气体管道泄漏声发射信号模态特性分析[J].仪器仪表学报,2018,39(5):195-204.
LI SH Y, XIA CH Q, YANG L L. Modal characteristics of leakage-induced acoustic emission in different directions of gas pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(5):195-204.

[4] 刘金海,臧东,汪刚.基于 Markov 特征的油气管道泄漏检测与定位方法[J].仪器仪表学报,2017,38(4):944-951.
LIU J H, ZANG D, WANG G. Leakage detection and location method of oil and gas pipelines based on Markov features[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(4):944-951.

[5] 方丽萍,李玉星,刘翠伟,等.气液管道泄漏检测及信号处理技术[J].电子测量与仪器学报,2018,32(11):26-34.
FANG L P, LI Y X, LIU C W, et al. Multiphase leakage detection and leakage signal processing technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32(11):26-34.

[6] 刘翠伟,李雪洁,李玉星,等.基于音波法的输气管道泄漏检测与定位[J].化工学报,2014,65(11):4633-4642.
LIU C W, LI X J, LI Y X, et al. Leak detection and location for natural gas pipelines based on acoustic waves[J]. CIESC Journal,2014,65(11):4633-4642.

[7] 孙洁娣,肖启阳,温江涛,等.改进 LMD 及高阶模糊度函数的管道泄漏定位[J].仪器仪表学报,2015,36(10):2215-2223.
SUN J D, XIAO Q Y, WEN J T, et al. Pipeline leakage localization based on ELMD and high-order ambiguity function[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(10):2215-2223.

[8] VERDE C. Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines[J]. Control Engineering Practice, 2001,9(6):673-682.

[9] VERDE C. Accommodation of multi-leak location in a pipeline [J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(8):1071-1078.

[10] TORRES L, BESANCON G, GEORGES D. EKF-Like observer with stability for a class of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(6):1570-1574.

[11] TORRES L, VERDE C, VÁZQUEZ H O. Parameter identification of marine risers using kalman-like observers[J]. Ocean Engineering, 2015,93:84-97.

[12] DELGADO-AGUIÑAGA J A, BESANCON G, BEGOVICH O, et al. Multi-leak diagnosis in pipelines based on extended kalman filter[J]. Control Engineering Practice,2016,49:139-148.

[13] 孙蓉,刘胜,张玉芳.一类非线性系统故障诊断观测器设计[J].控制理论与应用,2013,30(11):1462-1466.
SUN R, LIU SH, ZHANG Y F. Design of fault diagnosis observer for a class of nonlinear systems [J]. Control Theory & Applications, 2013,30(11):1462-1466.

[14] 陶洪峰,陈大朋,杨慧中.基于扩展滤波器的非线性系统迭代学习故障诊断算法[J].控制与决策,2015,30(6):1027-1032.
TAO H F, CHEN D P, YANG H ZH. Iterative learning fault diagnosis algorithm for nonlinear systems based on extended filter[J]. Control and Decision, 2015,30(6):1027-1032.

[15] VERDE C, MOLINA L, TORRES L. Parameterized transient model of a pipeline for multiple leaks location[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 29(5):177-185.

作者简介

郭颖,2002 年和 2012 年于辽宁石油化工大学分别获得学士学位和硕士学位,现为沈阳工业大学博士研究生,主要研究方向为长输油气管道泄漏检测与定位技术。
E-mail: guoyingfs@163.com

Guo Ying received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Liaoning Shihua University in 2002 and 2012, respectively. She is currently a Ph. D. candidate at Shenyang University of Technology. Her main research interests include leakage detection and location of long distance oil and gas pipeline.

杨理践,1981 年于沈阳工业大学获得学士学位,1984 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,现为沈阳工业大学教授,主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论、无损检测技术。
E-mail: yanglijian888@163.com

Yang Lijian received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 1981, received his M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1984. He is currently a professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include the in-detection technology of long distance oil and gas pipeline and related theory, nondestructive testing technology.