

## 一类非线性系统故障诊断观测器设计

孙蓉<sup>†</sup>, 刘胜, 张玉芳

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 大多故障诊断算法集中在线性系统方面, 在非线性的方面只考虑故障对状态起线性影响的那些系统. 本文根据系统的非线性本质特性, 提出了基于模型的一类非线性系统故障诊断观测器设计方法. 应用系统的 $(B, K, \phi)$ 实现精确分解后的系统模型, 对它们的状态故障起非线性的影响. 采用干扰解耦技术, 获得的残差对未知扰动有很好的鲁棒性. 在Lyapunov意义下, 验证了算法的稳定性. 仿真验证表明, 所提算法具有快速收敛性, 对一类非线性系统诊断效果较好.

**关键词:** 故障诊断; 非线性系统; 观测器设计

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## Design of fault diagnosis observer for a class of nonlinear systems

SUN Rong<sup>†</sup>, LIU Sheng, ZHANG Yu-fang

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** Most of fault diagnosis algorithms deal with linear systems and nonlinear systems with states depending linearly on faults. According to essential properties of a nonlinear system, we propose a fault diagnosis algorithm for a class of nonlinear systems based on parameter estimation. The systems model is decomposed by the  $(B, K, \phi)$  realization into models in which the states are affected nonlinearly by faults. By using the decoupling technology for disturbances, we make the resultant residuals to be completely robust to the unknown input disturbances. Stability of the algorithm is verified by using the Lyapunov function. Simulation results show that the proposed algorithm converges rapidly and provides perfect diagnosis for a class of nonlinear systems.

**Key words:** fault diagnosis; nonlinear systems; design of observer

### 1 引言(Introduction)

基于模型的故障诊断算法实际就是故障辨识的过程, 给定当前系统信息以及后续系统统计特性、系统无故障/故障时的系统先验信息, 便可确定系统是否发生故障. 系统故障可分为结构性故障、参数故障以及传感器、执行器故障. 而系统的结构性故障可导致系统的机毁人亡, 对系统有不可逆的影响. 参数故障、传感器以及执行器故障通常可通过设计故障诊断观测器实时监测到, 当观测器残差超出预设门限时, 系统发出预警, 可避免系统的结构性故障.

随着科学的发展和技术的进步, 系统现代化水平日益提高. 与此同时, 系统的投资和规模也越来越大, 复杂性越来越高. 这类复杂系统一旦发生事故, 便会造成巨大的财产损失和人员伤亡. 在2006年2月国务院发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要2006–2020年》中, 已将“重大产品和重大设施寿命预测技术”列为需要重点研究的前沿技术之一, 而故障

诊断技术正是其核心技术之一.

在过去几十年中, 故障诊断技术得到了突飞猛进的发展, 国际故障诊断权威专家P. M. Frank教授认为故障诊断方法可以分为: 基于模型的方法(model-based)<sup>[1–3]</sup>、基于知识的方法(knowledge-based)<sup>[4–6]</sup>、基于信号处理的方法(signal-processing-based)<sup>[7–8]</sup>. 在众多故障诊断方法中, 智能故障诊断方法强依赖于诊断系统, 诊断效率受制于诊断系统信息的完整性, 而基于模型的故障诊断方法充分利用系统信息, 对故障定位、判断故障类型以及估计故障幅值, 得到了很高的诊断精度. 因此, 基于模型的故障诊断技术得到了学者广泛研究<sup>[9–10]</sup>. 然而, 由于系统的非线性本质特性, 基于模型的非线性系统故障诊断方法值得深入研究.

文献[11]针对线性系统模型表述的航天器系统, 采用未知输入观测器(unknown input observer, UIO)框架, 构造了一组UIO, 达到了检测及隔离故障的效

果,但系统非线性本质的特性制约了算法的推广.文献[12]基于UIO的方法,针对线性时延系统的故障进行研究,但系统的非线性本质亦制约了算法的推广.文献[13]结合了无损卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)与UIO技术,对连续搅拌反应釜(continuous stirred tank reactor, CSTR)系统进行了故障诊断研究,UKF技术拓展了UIO应用的局限性,算法对未知扰动有很好的鲁棒性,但算法诊断结果缺少故障幅值的估计.

考虑系统非线性本质特性,为减小上述方法的不足,本文提出了基于模型的非线性系统故障诊断观测器设计方法,采用系统的 $(B, K, \phi)$ 实现精确分解了系统模型,分解后的系统模型,故障非线性的影响系统状态,避免了传统方法的局限性.应用扰动解耦方法获得了对故障高敏感性以及对未知扰动的抗强扰动性.最后,采用Lyapunov函数,验证了设计的故障诊断系统为渐近稳定的.

### 2 问题描述(Problem statement)

考虑下列广义非线性系统模型:

$$\dot{x}(t) = \psi(x, u, d, f_1), \quad (1)$$

$$y(t) = \eta(x, f_1), \quad (2)$$

其中: 状态向量 $x(t) \in \mathbb{R}^n$ , 系统控制输入 $u(t) \in \mathbb{R}^m$ , 系统量测输出 $y(t) \in \mathbb{R}^p$ ,  $d \in \mathbb{R}^d$ ,  $f_1 \in \mathbb{R}$ 为预诊断的故障. 函数 $\psi(\cdot), \eta(\cdot)$ 为平滑的非线性函数. 系统模型如式(1)–(2)形式的故障诊断的策略为: 设计如下形式的故障诊断观测器

$$\dot{z}(t) = \hat{\psi}(u, y, z), \quad (3)$$

$$r(t) = \hat{\eta}(y, z), \quad (4)$$

其中状态观测器初始状态 $z(0) = z_0$ . 当故障诊断观测器系统(3)–(4)的残差 $r(t)$ 受故障 $f_1$ 影响,而未知输入扰动 $d \in \mathbb{R}^d$ 不影响残差,并且故障诊断观测器的残差为渐近收敛到零时,称这种故障诊断观测器为未知输入故障诊断观测器,即观测器残差对干扰解耦,对故障有敏感性.因此,根据系统残差的这种特性,可设计适当的故障诊断观测器跟踪残差,判断故障是否发生.

然而,当系统出现多维故障时,非线性系统模型(1)–(2)不能完全表征系统故障特性.定义:  $f = [f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_l]^T$ , 则系统模型为

$$\dot{x}(t) = \psi(x, u, d, f), \quad (5)$$

$$y(t) = \eta(x, f). \quad (6)$$

构造型如式(3)–(4)的故障诊断观测器,值得注意的是,设计的故障诊断观测器系统残差 $r_i$ 仅受故障 $f_i$ 影响,未知输入扰动 $d \in \mathbb{R}^d$ 以及其他故障不影响残差特性,并且故障诊断观测器的残差渐近收敛到零.因此,针对多维同时故障诊断的问题即为设计一组满足这样残差特征的故障诊断观测器.但是,在实际应用中,这

样的设计代价大,系统的可靠性较差,具有一定的局限性.本文针对多维故障设计了单一故障诊断观测器,解决了传统故障诊断观测器结构复杂、效率低的缺陷.构造的故障诊断观测器,使残差 $r(t)$ 与故障 $f$ 具有对角关系,残差 $r_i$ 仅受故障 $f_i$ 影响不受其他故障影响,系统结构框图如图1所示.

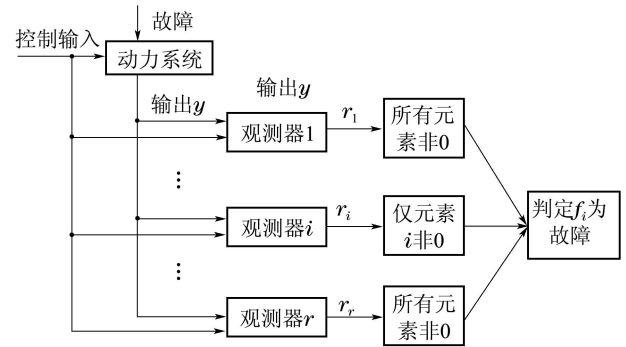


图 1 故障诊断观测器

Fig. 1 Fault diagnosis observer

### 3 故障诊断观测器设计(Design of fault diagnosis observer)

考虑如下形式非线性系统模型:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Ed(t) + g(x_m, u(t), f(t)), \quad (7)$$

$$y(t) = Cx(t) + Gf(t), \quad (8)$$

其中:  $x(t), y(t), u(t), d(t), f(t)$  定义如前所述,  $x_m = Nx(t)$  为状态  $x(t)$  的线性组合. 定义矩阵  $N^*$ , 使得其满足下式:

$$x_m = Nx = N^*Cx = N^*(y - Gf),$$

$$g(x_m, u, f) = g'(y, u, f),$$

代入式(7), 可得

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Ed(t) + g'(y, u, f). \quad (9)$$

本文故障诊断观测器的设计, 技术关键为式(9)中非线性函数  $g'(y, u, f)$  的表示问题. 本文提出了一种系统非线性项的  $(B, K, \phi)$  实现方法. 因此, 系统状态方程式(9)可表示为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Ed(t) + B(y, u) + K(y, u)f + \phi(y, u, f). \quad (10)$$

式(10)中: 非线性函数  $B(y, u)$  为不关于故障的确定函数,  $K(y, u)f$  为故障的线性确定函数,  $\phi(y, u, f)$  为确定的非线性函数. 通过上述分析可知, 式(10)准确的表征的非线性系统(7)–(8)的系统模型, 提出的  $(B, K, \phi)$  实现方法为非线性系统故障诊断方法提出了新的思路.

针对系统模型(8)(10)构造如下形式的故障诊断观测器:

$$\dot{z} = Rz + J(y, u) + Sy + T\phi(y, u, r), \quad (11)$$

$$r = L_1(y, u)z + L_2(y, u)y. \quad (12)$$

**定理 1** 给定非线性系统模型(7)–(8)以及其( $B, K, \phi$ )实现(8)(10), 构造的故障诊断观测器系统(11)–(12)出现故障时, 残差 $r$ 渐近收敛到故障 $f$ , 则故障诊断观测器参数满足

$$TA - RT = SC, \tag{13}$$

$$J = TB, \tag{14}$$

$$TE = 0, \tag{15}$$

$$L_1T + L_2C = 0, \tag{16}$$

$$R = -\lambda I_1, \lambda > 0, \tag{17}$$

$$L_1(SG - TK) = (RL_2G - R), \tag{18}$$

$$\|L_1T(\phi(y, u, f) - \phi(y, u, r))\| \leq$$

$$\gamma\|f - r\| \gamma < \lambda. \tag{19}$$

**证** 定义状态估计误差 $e = z - Tx$ . 因此, 关于状态估计误差的微分如下:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{z} - T\dot{x} = \\ &Rz + (SC - TA)x - Ted + (J - TB) + \\ &(SG - TK)f + T(\phi(y, u, f) - \phi(y, u, r)) = \\ &Rz - RTx + (SG - TK)f + \\ &T(\phi(y, u, f) - \phi(y, u, r)) = \\ &Re + (SG - TK)f + T(\phi(y, u, f) - \phi(y, u, r)). \end{aligned} \tag{20}$$

构造如下形式Lyapunov函数:

$$v = \frac{1}{2}(r - f)^T(r - f). \tag{21}$$

定义阶跃故障函数:

$$f(t) = [f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_l]U(t - t_0).$$

函数 $U(\cdot)$ 为单位阶跃函数. 对 $\forall t$ 有 $\dot{f}(t) = 0$ . Lyapunov函数(21)关于时间的微分为

$$\begin{aligned} \dot{v} &= (r - f)^T(\dot{r} - \dot{f}) = (r - f)^T\dot{r} = \\ &(r - f)^T(L_1(y, u)\dot{z} + L_2(y, u)\dot{y}) = \\ &(r - f)^TL_1\dot{e}. \end{aligned} \tag{22}$$

代入状态估计误差式(20)得

$$\begin{aligned} \dot{v} &= (r - f)^T[L_1R(z - Tx) + L_1(SG - TK)f] + \\ &(r - f)^TL_1T(\phi(y, u, r) - \phi(y, u, f)). \end{aligned} \tag{23}$$

由上式分析可得

$$\begin{aligned} &L_1R(z - Tx) + L_1(SG - TK)f = \\ &L_1Rz - L_1RTx + L_1(SG - TK)f = \\ &Rr - RL_1Tx + L_1(SG - TK)f = \\ &Rr - R(L_2Cx + L_1Tx) + \\ &(L_1(SG - TK) - RL_2G)f = \\ &R(r - f). \end{aligned} \tag{24}$$

将式(24)代入式(23)得

$$\begin{aligned} \dot{v} &= (r - f)^TR(r - f) + \\ &(r - f)^TL_1T(\phi(y, u, r) - \phi(y, u, f)) \leq \\ &-\lambda\|r - f\|^2 + |(r - f)^TL_1T(\phi(y, u, r) - \\ &\phi(y, u, f))| \leq \\ &-\lambda\|r - f\|^2 + \|(r - f)\| \|L_1T(\phi(y, u, r) - \\ &\phi(y, u, f))\|. \end{aligned} \tag{25}$$

由Cauchy-Schwarz不等式,  $\exists c_0 > 0$ 使得式(25)满足下式:

$$\begin{aligned} \dot{v} &\leq (-\lambda + \gamma)\|r - f\|^2 \leq -c_0\|r - f\|^2 \leq \\ &-2c_0v. \end{aligned} \tag{26}$$

因此, 由式(26)可知, 当 $t \rightarrow +\infty$ 时, 有 $\lim_{t \rightarrow +\infty} v = 0$ , 即 $\|r - f\| \rightarrow 0$ , 可见残差渐近收敛到故障 $f$ .

#### 4 故障诊断观测器存在条件(Existence condition of fault diagnosis observer)

定理1的证明给出了系统在( $B, K, \phi$ )实现下故障诊断观测器设计方法, 本节给出了存在形式如式(11)–(12)的故障诊断观测器存在条件.

**定理 2** 非线性系统(7)–(8)存在对角形式故障诊断观测器系统(11)–(12)时, 则系统参数同时满足如下条件:

- 1) 系统状态可观, 并且矩阵 $C$ 为可逆的满秩阵;
- 2) 系统矩阵维数满足 $l \leq n - d$ ;
- 3) 存在式(9)的( $B, K, \phi$ )实现, 使得参数满足:

$$TE = 0, \tag{27}$$

$$K = AC^{-1}G - T', \tag{28}$$

$$\begin{aligned} &\|(TT')^{-1}T(\phi(y, u, f) - \phi(y, u, r))\| \leq \\ &l \leq \|f - r\|, \ l < 1. \end{aligned} \tag{29}$$

- 4)  $T$ 为行满秩.

**证** 定义 $T = MQ$ . 式(9)的( $B, K, \phi$ )实现为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Ed(t) + B(y, u) + \\ &(AC^{-1}G - T')f + \phi(y, u, f). \end{aligned} \tag{30}$$

定义如下矩阵:

$$R = -\lambda I_1, \lambda > 0, \tag{31}$$

$$S = (TA - RT)C^{-1}, \tag{32}$$

$$J = TB, \tag{33}$$

$$L_1 = -(TT')^{-1}R, \tag{34}$$

$$L_2 = -L_1TC^{-1}. \tag{35}$$

显而易见, 上述矩阵的选取满足定理1中式(13)–(17), 式(18)–(19)可通过简单的代数运算得到. 因此, 通过定理1, 存在矩阵 $L_1, L_2, S, T, R, J$ 使得故障诊断观测器结构为对角形式.

### 5 仿真实验及分析(Simulations and analysis)

为了阐述本文算法的有效性, 本节在Matlab环境下给出了系统仿真验证. 系统仿真参数如下所示:

$$A = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -2 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -3 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & -3 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$x_m = [x_1 \ x_2]^T = [y_1 \ y_2 - f_3]^T,$$

$$g(x_m, u, f) = \begin{bmatrix} u_1^2 + \frac{x_1^2}{5} \\ u_2^2 + \frac{x_2^2}{5} \\ u_1^2 \\ u_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.01(1 + \frac{x_1^2}{6})f_1 f_2 \\ 0.01(1 + \frac{x_2^2}{3})f_2^2 \\ 0.01u_1^2 f_1^2 \\ u_2^2 \cos f_2 \end{bmatrix},$$

其中:  $f_1, f_2$  为参数故障,  $f_3$  为影响系统输出 $y_2$ 的传感器故障,  $x_1, x_2$  为系统可达状态, 因此系统的状态空间描述为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Ed(t) + \begin{bmatrix} u_1^2 + \frac{x_1^2}{5} \\ u_2^2 + \frac{x_2^2}{5} \\ u_1^2 \\ u_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.01(1 + \frac{x_1^2}{6})f_1 f_2 \\ 0.01(1 + \frac{x_2^2}{3})f_2^2 \\ 0.01u_1^2 f_1^2 \\ u_2^2 \cos f_2 \end{bmatrix}. \quad (36)$$

通过第3节故障诊断观测器设计方法设计可检测同时发生的故障. 选取适当的矩阵 $T$ 使得 $TE = 0$ , 因此, 可选取

$$T = -0.01 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \lambda = -0.1.$$

式(36)由定理2描述的 $(B, K, \phi)$ 实现为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Ed(t) + \begin{bmatrix} u_1^2 + \frac{x_1^2}{5} \\ u_2^2 + \frac{x_2^2}{5} \\ u_1^2 \\ u_2^2 \end{bmatrix} + (AC^{-1}G - T')f + \begin{bmatrix} 0.01(1 + \frac{x_1^2}{6})f_1 f_2 \\ 0.01(1 + \frac{(y_2 - f_2)^2}{3})f_2^2 + \frac{f_3^2 - 2y_2 f_3}{2} \\ 0.01u_1^2 f_1^2 \\ u_2^2 \cos f_2 \end{bmatrix} -$$

$$(AC^{-1}G - T')f.$$

假设系统故障参数分别为:  $f_1 = 1, f_2 = 0.5, f_3 = 0.5$ . 由定理1-2的故障诊断观测器参数设计方法, 可得到故障诊断观测器参数 $L_1, L_2, S, J$ .

在系统干扰如图2所示时, 故障及残差效果图如图3-5所示, 可见系统残差分别渐近的收敛到故障, 有效的估计了系统的故障幅值, 对后续容错控制的研究提供了保证, 仿真结果有效的验证了定理1的描述, 获得的残差对于干扰有很好的鲁棒性.

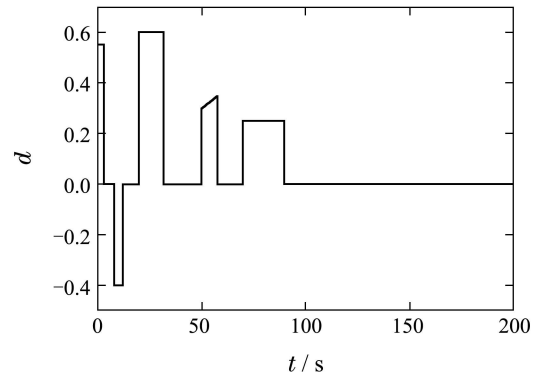


图 2 系统干扰

Fig. 2 The systems disturbances

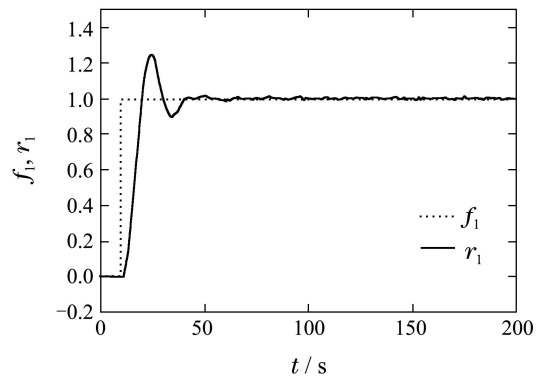


图 3 故障及残差效果图( $f_1, r_1$ )

Fig. 3 The effect of the fault and residual ( $f_1, r_1$ )

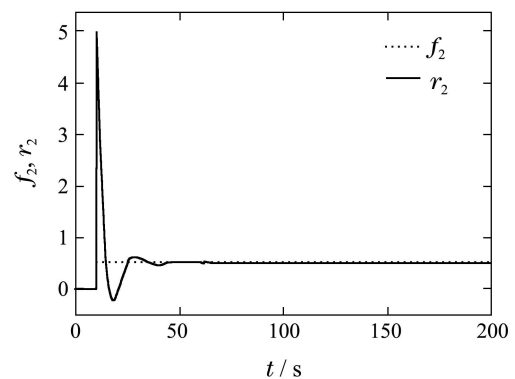


图 4 故障及残差效果图( $f_2, r_2$ )

Fig. 4 The effect of the fault and residual ( $f_2, r_2$ )

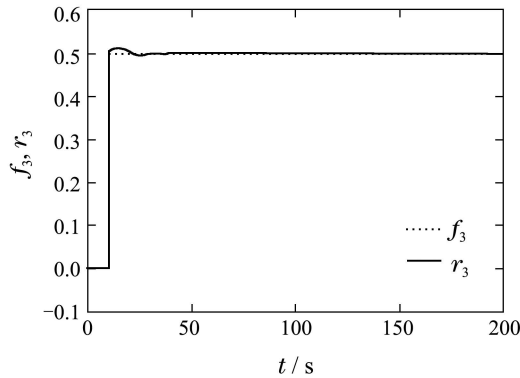


图5 故障及残差效果图( $f_3, r_3$ )

Fig. 5 The effect of the fault and residual ( $f_3, r_3$ )

## 6 结论(Conclusions)

本文针对一类非线性系统描述的模型设计了鲁棒故障观测器算法,应用系统的( $B, K, \phi$ )实现,处理了系统模型,构造了新的系统模型,通过使用干扰解耦技术,设计的算法获得了很好的鲁棒性。仿真验证表明,构造的系统残差有效的跟踪了系统故障,对未知扰动解耦效果良好,可有效的估计出故障幅值,为后续容错控制的研究提供了技术保证。

## 参考文献(References):

- [1] KARIMI H R, ZAPATEIRO M, LUO N. A linear matrix inequality approach to robust fault detection filter design of linear systems with mixed time varying delays and nonlinear perturbations [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2010, 347(6): 957 – 973.
- [2] TSAI J S H, LIN M H, ZHENG C H, et al. Actuator fault detection and performance recovery with Kalman filter-based adaptive observer [J]. *International Journal of General Systems*, 2007, 36(4): 375 – 398.
- [3] GUO J C, HUANG X H, CUI Y. Design and analysis of robust fault detection filter using LMI tools [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2009, 57(11/12): 1743 – 1747.

- [4] CHAKRABARTI C, RAMMOHAN R, LUGER G F. Diagnosis using a first-order stochastic language that learns [J]. *Expert Systems with Applications*, 2007, 32(3): 832 – 840.
- [5] CHEN Y M, WANG S C. Framework of agent-based intelligence system with two-stage decision-making process for distributed dynamic scheduling [J]. *Applied Soft Computing*, 2007, 7(1): 229 – 245.
- [6] DA SILVA J C, KLUSCH M. Inference in distributed data clustering [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2006, 19(4): 363 – 369.
- [7] AVCI E, TURKOGLU I, POYRAZ M. Intelligent target recognition based on wavelet packet neural network [J]. *Expert Systems with Applications*, 2005, 29(1): 175 – 182.
- [8] WANG C Q, ZHOU J Z, QIN H, et al. Fault diagnosis based on pulse coupled neural network and probability neural network [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(11): 14307 – 14313.
- [9] SU Y X, MÜLLER P C, ZHENG C H. A simple nonlinear observer for a class of uncertain mechanical systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(7): 1340 – 1345.
- [10] ZHANG Y W, ZHANG Y. Fault detection of non-Gaussian processes based on modified independent component analysis [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(16): 4630 – 4639.
- [11] KIYAK E, CETIN O, KAHVECIOGLU A. Aircraft sensor fault detection based on unknown input observers [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2008, 80(5): 545 – 548.
- [12] DIND S X, ZHONG M Y, TANG B Y, et al. An LMI approach to the design of fault detection filter for time-delay LTI systems with unknown inputs[C] // *Proceeding of the American Control Conference*. Arlington, VA: IEEE, 2001: 2137 – 2142.
- [13] JAFAR Z, JAVAD P. Design of nonlinear unknown input observer for process fault detection [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(22): 11443 – 11452.

## 作者简介:

孙蓉 (1978-), 女, 博士研究生, 目前研究方向为故障诊断与容错控制方面的研究, E-mail: sunrong@hrbeu.edu.cn;

刘胜 (1957-), 男, 博士生导师, 教授, 目前研究方向为人工智能理论及其应用、船舶航行与姿态控制等, E-mail: liu.sch@163.com;

张玉芳 (1982-), 女, 博士研究生, 目前研究方向为非线性控制、飞行器控制, E-mail: zhangyf001@aliyun.com.