

基于参数估计的一类非线性系统故障诊断算法

孙 蓉, 刘 胜, 张玉芳

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对系统模型的不确定性、未知输入扰动和非线性特性, 提出一类非线性系统参数估计的故障诊断算法. 构造系统故障诊断观测器, 采用 Lyapunov 稳定性定理验证观测器的稳定性, 通过 Barbalat 引理证明满足故障诊断观测器为渐近稳定的表征故障参数的参数估计, 并总结了设计算法流程. 仿真结果表明, 所提出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; 参数估计; 观测器设计

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Fault diagnosis algorithm of a class of nonlinear system based on parameter estimation

SUN Rong, LIU Sheng, ZHANG Yu-fang

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: SUN Rong, E-mail: sunrong@hrbeu.edu.cn)

Abstract: In the view of the systems model uncertainties, the unknown input disturbances and the non-linear characteristics of the system model, the fault diagnosis algorithm of a class of nonlinear system based on parameter estimation is proposed. A fault diagnosis observer is constructed for the systems considered, and the Lyapunov stability theorem is used to verify that the fault diagnosis observer is steady. The fault diagnosis observer that characters the parameter fault systems converges asymptotically through the Barbalat lemma. Finally, the algorithm procedures are concluded. The simulation results show that the proposed algorithm has the characteristics that it converges quickly, and then has a perfect diagnosis effect on a class of nonlinear systems.

Key words: fault diagnosis; parameter estimation; design of observer

0 引 言

随着科技进步、大规模集成电路的迅猛发展, 工程技术人员对设备的工况效率、性能指标和可靠性提出了更高的要求. 由于设备的复杂性和工作环境的恶劣性, 为了避免造成较大损失甚至机毁人亡, 采用故障诊断技术对设备运行状态进行实时监控是必要的. 在过去几十年中, 故障诊断技术得到了突飞猛进的发展, Frank 认为故障诊断方法可以分为基于模型的方法^[1-3]、基于知识的方法^[4-6]、基于信号处理的方法^[7-8]. 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了系统信息, 对故障定位, 判断故障类型, 估计故障幅值, 得到了较高精度. 滤波理论在故障诊断算法中易于实

现, 推动了理论的实际应用, 针对扩展卡尔曼滤波器(EKF)滤波的一阶线性截断带来的精度低和滤波发散的问题, 学者研究了卡尔曼滤波器(UKF)和粒子滤波在故障诊断中的应用. 因此, 基于模型的故障诊断技术得到了学者的广泛研究^[9-10]. 其中, 基于参数估计的故障诊断方法在输出系统状态估计的同时可以准确估计系统故障参数, 为后续容错控制率的设计提供可靠的故障信息, 该方法在技术上具有一定的前瞻性和连贯性.

文献[11]针对一类 ARX 表述的系统模型构造了故障诊断方法, 算法可鲁棒估计出系统参数故障, 但算法假设故障参数先验已知限制了其实际应用. 文献[12]针对一类非线性系统模型表述的废水处理系统构造了故障参数估计滤波器, 通过比较设备正常工

收稿日期: 2012-12-11; 修回日期: 2013-03-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51079033); 中央高校基本科研业务费项目(HEUCF041229, HEUCF041205).

作者简介: 孙蓉(1978—), 女, 讲师, 从事故障诊断与容错控制的研究; 刘胜(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 从事人工智能理论及其应用、随机系统最优估计与控制、电磁兼容等研究.

况数据与估计的故障参数比较判断故障是否发生,但由于受扰动影响,诊断系统鲁棒性差,诊断效果欠佳.文献[15]针对线性时不变系统表征的飞行器模型,设计了动态输出反馈控制策略,采用LMI技术实现了故障补偿,针对一类卡死执行器故障诊断问题,通过仿真实验验证了设计算法的有效性.但由于系统中的未知输入扰动等影响,对线性表征的系统模型是个挑战,对其改进工作值得深入研究.

考虑系统非线性本质特性,为了减小上述方法的不足,提出了基于参数估计的一类非线性系统故障诊断算法.系统充分考虑了扰动对系统的影响,用一类平滑的非线性函数表征系统扰动,构造了自适应故障诊断观测器.在Lyapunov意义下,证明了故障诊断观测器稳定的条件,依据Barbalat引理,验证了构造的故障诊断观测器为渐近稳定,在多约束条件下,可得到构造的自适应故障诊断观测器增益阵和其他参数.所提出的故障诊断算法可估计出故障参数幅值,在故障工况下,对后续容错控制率的重构具有积极意义.

1 问题描述

由表征故障特征的参数描述的非线性系统模型,在实际系统中有着广泛的应用^[13-14],为此本节提出一类非线性系统模型.考虑如下带有参数表述故障的一类非线性系统:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + g(u(t), y(t)) + B\theta(t)f(u(t), y(t), x(t)), \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (2)$$

其中: 状态向量 $x(t) \in R^n$, 系统控制输入 $u(t) \in R^m$, 系统量测输出 $y(t) \in R^r$; 函数 $g(u(t), y(t)), f(u(t), y(t), x(t))$ 为平滑的非线性函数; 表征故障特性的参数 $\theta(t) \in R$, 当系统出现故障时, 参数 $\theta(t) \in R$ 变化.

假设 1 1) (A, C) 可观测, 且 A 为 Hurwitz 阵.

2) 参数 $\theta(t)$ 有界, 且 $\theta(t) \leq |\theta_0|$, $\theta_0 \in R^+$, 参数 $\theta(t)$ 表征的故障特性为

$$\begin{cases} \theta(t) = \theta_H, & \text{fault free;} \\ \theta(t) \neq \theta_H, & \text{fault case.} \end{cases}$$

参数 $\theta(t) = \theta_H$ 表征系统无故障工况模型.

3) 非线性函数 $f(u(t), y(t), x(t))$ 满足 Lipschitz 条件, 存在 $\lambda_0 \in R^+$, 使得

$$\|f(u(t), y(t), x_1(t)) - f(u(t), y(t), x_2(t))\| \leq \lambda_0 \|x_1(t) - x_2(t)\|. \quad (3)$$

引理 1 (Barbalat Lemma) 若函数 $\zeta(t)$ 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续, 且广义积分 $\int_0^{+\infty} \zeta(t)dt$ 存在, 则有

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \zeta(t) = 0.$$

定义 1 若 $G(s)$ 在开右半平面内解析, 对于 $\forall s$ 存在 $\text{Re}(s) > 0$, 使得 $G(s) + G^*(s) \geq 0$, 则称 $G(s)$ 是正实的. $\exists \varepsilon > 0$, 使得 $G(s - \varepsilon)$ 为正实, 则称 $G(s)$ 是严格正实的.

定义 1 描述的严格正实条件等价于如下表述: 存在矩阵 $Q > 0, P = P^T > 0$ 和常数 α 使得下式成立:

$$\begin{cases} (A - KC)^T P + P(A - KC) = -Q, \\ PB = C^T \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

设计目标为: 设计一渐近收敛故障诊断观测器, 其增益 K 满足式 (4), 设计的故障诊断算法可估计出故障参数 $\theta(t)$.

2 故障诊断观测器设计

由于 (A, C) 为可观测矩阵对, 对系统 (1) 和 (2) 构造如下形式的故障诊断观测器:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= \\ A\hat{x}(t) + g(u(t), y(t)) + \\ B\theta_H f(u(t), y(t), \hat{x}(t)) + K(y(t) - \hat{y}(t)), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t). \quad (6)$$

其中: $\hat{x}(t)$ 为系统状态估计, $\hat{y}(t)$ 为系统量测估计. 定义故障诊断观测器 (5) 和 (6) 的状态估计误差以及残差分别为

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t), \quad (7)$$

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t). \quad (8)$$

将式 (1), (5) 代入 (7) 得到

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) = \\ Ax(t) + g(u(t), y(t)) + B\theta(t)f(u(t), y(t), x(t)) - \\ A\hat{x}(t) - g(u(t), y(t)) - \\ B\theta_H f(u(t), y(t), \hat{x}(t)) - K(y(t) - \hat{y}(t)) = \\ (A - KC)e(t) + B[\theta(t)f(u(t), y(t), x(t)) - \\ \theta_H f(u(t), y(t), \hat{x}(t))], \end{aligned} \quad (9)$$

$$r(t) = Ce(t). \quad (10)$$

定理 1 带有形式 (5) 和 (6) 的故障诊断观测器的系统 (1) 和 (2), 其故障诊断观测器在无故障时为渐近收敛, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$.

证明 构造如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V_1(t) = e^T(t)Pe(t), \quad (11)$$

其中矩阵 P 为正定阵, 如定义 1 所示. 式 (11) 关于时间的微分为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &= \\ \{e^T(t)(A - KC)^T + [f(u(t), y(t), x(t)) - \\ f(u(t), y(t), \hat{x}(t))]^T B^T \theta_H\} Pe(t) + \end{aligned}$$

$$e^T(t)P\{(A-KC)e(t)+B\theta_H[f(u(t),y(t),x(t))-f(u(t),y(t),\hat{x}(t))]\}, \quad (12)$$

整理得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) = & e^T(t)[P(A-KC)+(A-KC)^TP]e(t)+ \\ & e^T(t)PB\theta_H[f(u(t),y(t),x(t))- \\ & f(u(t),y(t),\hat{x}(t))]+[f(u(t),y(t),x(t))- \\ & f(u(t),y(t),\hat{x}(t))]^TB^T\theta_HP e(t). \end{aligned} \quad (13)$$

由式(11)构造的 Lyapunov 函数为标量函数, 因此式(13)可等价于

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) = & e^T(t)[P(A-KC)+(A-KC)^TP]e(t)+ \\ & 2e^T(t)PB\theta_H[f(u(t),y(t),x(t))- \\ & f(u(t),y(t),\hat{x}(t))]. \end{aligned} \quad (14)$$

非线性函数 $f(u(t),y(t),x(t))$ 满足 Lipschitz 条件, 由式(3)和(10)可知

$$\begin{aligned} & 2\|e^T(t)PB\theta_H[f(u(t),y(t),x(t))- \\ & f(u(t),y(t),\hat{x}(t))]\| \leq \\ & 2\|e(t)\|^2\|C\|\theta_H|\alpha|\lambda_0. \end{aligned} \quad (15)$$

将式(4)、(15)代入(14), 有

$$\dot{V}_1(t) \leq -e^T(t)Qe(t) + 2\|e\|^2\|C\|\theta_H|\alpha|\lambda_0. \quad (16)$$

当 $\dot{V}_1(t) \leq 0$ 时, 故障诊断观测器(5)和(6)渐近收敛, 所以当式(16)满足

$$\vartheta_1 = 2\|C\|\theta_H|\alpha|\lambda_0 - \lambda_{\max}(Q) < 0 \quad (17)$$

时, $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$, 其中 $\lambda_{\max}(\cdot)$ 为矩阵 $(\cdot)$ 的最大特征值. 可见, 式(16)等价于

$$\dot{V}_1(t) \leq \vartheta_1\|e(t)\|^2 < 0. \quad (18)$$

综上, 定理 1 得证. $\square$

由定理 1 可知, 当故障诊断观测器达到稳态时, 系统的故障特征可由残差特性表征, 即

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 0, \text{ fault free;} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} r(t) \neq 0, \text{ fault case.} \end{cases}$$

当系统为故障模式时, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) \neq 0$, 如何估计表征系统故障的参数 $\theta(t)$ 是本文的重要目的. 设计自适应故障诊断观测器估计系统故障参数, 对系统(1)和(2)构造如下形式的故障诊断观测器:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) = & A\hat{x}(t) + g(u(t),y(t)) + B\hat{\theta}(t)f(u(t), \\ & y(t),\hat{x}(t)) + K(y(t) - \hat{y}(t)), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t). \quad (20)$$

其中: $\hat{\theta}(t)$ 为故障参数 $\theta(t)$ 的估计, 当系统无故障时,

$\theta(t) = \theta_H$, 当发生故障时, 故障参数为常值 $\theta(t) = \theta_f$, 且 $|\theta_f| < \theta_0$; 其他参数说明见式(5)和(6).

定义如下故障参数估计差值:

$$e_\theta(t) = \theta_f - \hat{\theta}(t). \quad (21)$$

将式(1)、(19)代入(7)得到状态估计误差

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) = & \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) = \\ & Ax(t) + g(u(t),y(t)) + \\ & B\theta(t)f(u(t),y(t),x(t)) - \\ & A\hat{x}(t) - g(u(t),y(t)) - \\ & B\hat{\theta}(t)f(u(t),y(t),\hat{x}(t)) - K(y(t) - \hat{y}(t)) = \\ & (A-KC)e(t) + B[\theta(t)f(u(t),y(t),x(t)) - \\ & \hat{\theta}(t)f(u(t),y(t),\hat{x}(t))]. \end{aligned}$$

设计自适应故障诊断观测器的目的是设计诊断算法使得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_\theta(t) = 0.$$

定理 2 带有故障诊断观测器(19)和(20)的系统(1)和(2), 存在权值 $\omega > 0$, 使得故障参数估计满足

$$\frac{d\hat{\theta}(t)}{dt} = \omega f^T(u(t),y(t),\hat{x}(t))\alpha r(t).$$

进而故障参数估计误差满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_\theta(t) = 0$.

证明 构造如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V_2(t) = e^T(t)Pe(t) + \omega^{-1}e_\theta^2(t). \quad (22)$$

$V_2(t)$ 关于时间的微分为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) = & -e^T(t)Qe(t) - 2\omega^{-1}e_\theta(t)\dot{\hat{\theta}}(t) + \\ & 2e^T(t)PB[\theta_f f(u(t),y(t),x(t)) - \\ & \hat{\theta}(t)f(u(t),y(t),\hat{x}(t))]. \end{aligned} \quad (23)$$

故障参数估计误差 $e_\theta(t) = \theta_f - \hat{\theta}(t)$, 代入式(23)得到

$$\begin{aligned} & \theta_f f(u(t),y(t),x(t)) - \hat{\theta}(t)f(u(t),y(t),\hat{x}(t)) = \\ & \theta_f[f(u(t),y(t),x(t)) - f(u(t),y(t),\hat{x}(t))] + \\ & e_\theta(t)f(u(t),y(t),\hat{x}(t)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) = & -e^T(t)Qe(t) - 2\omega^{-1}e_\theta(t)\dot{\hat{\theta}}(t) + \\ & 2e^T(t)PB\theta_f[f(u(t),y(t),x(t)) - \\ & f(u(t),y(t),\hat{x}(t))] + \\ & 2e^T(t)PB e_\theta(t)f(u(t),y(t),\hat{x}(t)). \end{aligned}$$

定义

$$2\omega^{-1}e_\theta(t)\dot{\hat{\theta}}(t) = 2e^T(t)PB e_\theta(t)f(u(t),y(t),\hat{x}(t)),$$

故障参数估计误差为标量, 因此有

$$\frac{d\hat{\theta}(t)}{dt} = \omega f^T(u(t),y(t),\hat{x}(t))\alpha r(t). \quad (24)$$

将式(24)代入(23)有

$$\begin{aligned}\dot{V}_2(t) = & -e^T(t)Qe(t) + 2e^T(t)PB\theta_f[f(u(t), y(t), x(t)) - \\ & f(u(t), y(t), \hat{x}(t))] \|2e^T(t)PB\theta_f[f(u(t), y(t), x(t)) - \\ & f(u(t), y(t), \hat{x}(t))] \| \leq \\ & 2\|e(t)\|^2\|C\|\theta_0|\alpha|\lambda_0,\end{aligned}$$

因此

$$\dot{V}_2(t) = -e^T(t)Qe(t) + 2\|e(t)\|^2\|C\|\theta_0|\alpha|\lambda_0.$$

设

$$\vartheta_2 = 2\|C\|\theta_0|\alpha|\lambda_0 - \lambda_{\max}(Q) < 0,$$

可见

$$\dot{V}_2(t) \leq \vartheta_2\|e(t)\|^2 < 0,$$

由 Barbalat 引理可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$. $\square$

观测器未知参数设计方法如下.

Step 1: 选取故障诊断观测器增益阵满足 $A - KC$ 稳定和 $C[sI - (A - KC)]^{-1}B$ 严格正实.

Step 2: 选取矩阵 Q 满足

$$(A - KC)^T P + P(A - KC) = -Q,$$

$$PB = C^T \alpha, \vartheta_2 < 0.$$

Step 3: 存在矩阵 P 和 α 使得

$$(A - KC)^T P + P(A - KC) = -Q,$$

$$PB = C^T \alpha.$$

由上述算法设计出自适应渐近稳定故障诊断观测器.

3 仿真实验

本节验证了所提出的参数估计的一类非线性系统故障诊断算法. 为了表明其有效性, 采用如下系统:

$$\dot{x} =$$

$$\begin{aligned}& \begin{bmatrix} -\frac{F_n \sigma_2}{m} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\sigma_0}{\sigma_1} & 0 \\ -\frac{1}{rm} & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \theta \frac{\sigma_0 |r\omega - v|}{g(v_r)} z + \\ & \begin{bmatrix} \frac{J F_n \sigma_2}{m} + r^2 F_n \sigma_2 - \sigma_\omega \\ \frac{J \sigma_0}{\sigma_1} - \sigma_\omega \\ r \end{bmatrix} y + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u, \quad (25)\end{aligned}$$

$$y = [0 \ 1/J \ -rF_n\sigma_1/J]x. \quad (26)$$

系统 (25) 和 (26) 参数如表 1 所示.

系统 (25) 和 (26) 的系统矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -0.005 & 0 & 0 \\ 0 & -8.0923 & 0 \\ -0.8 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \ 4.2662 \ 73.8927].$$

显然, 系统矩阵对 (A, C) 为可观测.

表 1 模糊控制规则

parameter	value
$\sigma_0/(1/m)$	40
$\sigma_1/(s/m)$	4.948 7
$\sigma_2/(s/m)$	0.001 8
r/m	0.25
m/kg	5
$J/(kg \cdot m^2)$	0.234 4
$F_n/(kg \cdot m^2/s^2)$	14

下面验证非线性函数 $f(u(t), y(t), x(t))$ 是否有界. 存在

$$f(u(t), y(t), x(t)) =$$

$$\frac{\sigma_0 |r\omega - v|}{g(v_r)} z \leq \frac{\sigma_0 |r\omega - v|}{\mu_c} z \leq \frac{\sigma_0}{\mu_c} (|r\omega| + |v|) |z| \leq$$

$$\frac{\sigma_0}{\mu_c} \left[\left(r + \frac{J}{rm} \right) y_{\max} + \frac{|\xi|}{rm} \right] |z| \triangleq q(\|x\|).$$

由第 1 节提出的故障诊断观测器算法可知, 在 Matlab 环境下, 满足 $A - KC$ 稳定, 满足 $C[sI - (A - KC)]^{-1}B$ 严格正实, 且存在矩阵 P 和 α 使得

$$(A - KC)^T P + P(A - KC) = -Q,$$

$$PB = C^T \alpha, K = \begin{bmatrix} -0.125 \\ -0.2308 \\ 0.0661 \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0.0548 & 0.2738 & 9.0206 \\ 0.2738 & 38.1191 & 29.4727 \\ 9.0206 & 29.4727 & 576.3141 \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} 5.4797 & -0.0305 & 0 \\ -0.0305 & 2.51 & 4.2662 \\ 0 & 4.2662 & 73.8927 \end{bmatrix},$$

$$\alpha = -1.$$

故障参数 $\theta(t)$ 设置为

$$\theta(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 2; \\ 0.2, & 2 \leq t \leq 6; \\ 2.4, & 6 \leq t \leq 12. \end{cases}$$

故障诊断残差效果和参数故障估计如图 1 和图 2 所示.

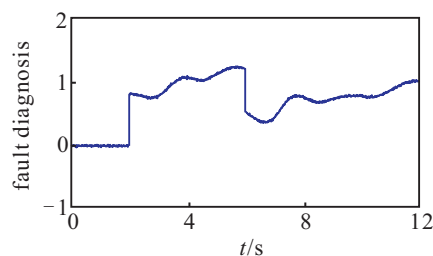


图 1 残差信号 $\|r(t)\|$

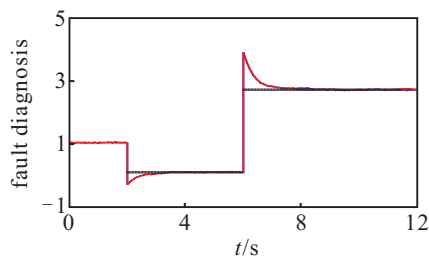


图 2 参数故障(虚线)和估计(实线)

由图 1 可见, 残差信号是渐近收敛的. 由图 2 可见, 设计的故障诊断算法有效地估计了参数故障, 获得了高精度的跟踪故障效果.

4 结 论

针对一类参数表征系统故障特性的非线性系统, 提出了基于参数估计的故障诊断观测器设计方法, 证明了故障诊断观测器系统在 Lyapunov 意义下渐近稳定. 仿真实验表明, 所提出算法在一类非线性系统中的故障诊断效果良好, 适用于量测方程为线性系统模型. 下一步将对非线性描述的量测方程的故障诊断算法进行深入研究.

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]. J 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]. Int J of General Systems, 2007, 36(4): 375-398.
- [3] Guo Jin-chao, Huang Xin-han, Cui Yu. 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. Frame work 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 Chang-qing, Zhou Jian-zhong, Qin Hui, 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, Müller P, Zheng C. A simple nonlinear observer for a class of uncertain mechanical systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(7): 1340-1345.
- [10] Zhang Ying-wei, Zhang Yang. Fault detection of non-Gaussian processes based on modified independent component analysis[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(16): 4630-4639.
- [11] Bloch G, Ouladsine M, Thomas P. On-line fault diagnosis of dynamic of dynamic systems via robust parameter estimation[J]. Control Engineering Practice, 1995, 3(12): 1709-1717.
- [12] Fuente M J, Vega P, Zarrop M, et al. Fault detection in a real wastewater plant using parameter estimation techniques[J]. Control Engineering Practice, 1996, 4(8): 1089-1098.
- [13] Bellali B, Hazzaba A, Bousserhane I K, et al. Parameter estimation for fault diagnosis in nonlinear systems by ANFIS[J]. Procedia Engineering, 2012, 29(6): 2016-2021.
- [14] Srinivasan Rajaraman, Juergen Hahn, Mannan M Sam. Sensor fault diagnosis for nonlinear processes with parametric uncertainties[J]. J of Hazardous Materials, 2006, 130(1/2): 1-8.
- [15] 金小峥, 杨光红, 常晓恒, 等. 容错控制系统鲁棒 H_∞ 和自适应补偿设计[J]. 自动化学报, 2013, 39(1): 31-42.
(Jin X Z, Yang G H, Chang X H, et al. Robust fault-tolerant H_∞ control with adaptive compensation[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(1): 31-42.)

(责任编辑: 郑晓蕾)