

文章编号: 1001-0920(2011)02-0258-05

一种基于全维和降维观测器的故障检测和重构方法

朱芳来¹, 岑峰¹, 董学平²

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200092; 2. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

摘要: 针对不确定性非线性系统, 讨论基于观测器的执行器故障的检测和重构方法. 首先, 通过设计滑模全维观测器, 产生对干扰具有鲁棒性、对故障具有敏感性的残差, 来达到故障检测的目的; 然后, 设计能直接消去干扰和故障影响的降维观测器来达到状态渐近收敛估计, 并在此基础上, 提出故障重构方法; 基于微分方程的数值解方法和函数微分的数值解方法, 给出一种故障重构的数值解方法; 最后, 对一个实际模型进行仿真, 结果表明了该方法的实用性.

关键词: 全维观测器; 降维观测器; 故障检测; 故障重构

中图分类号: TP13

文献标识码: A

A kind of fault detection and fault reconstruction based on full-order and reduced-order observers

ZHU Fang-lai¹, CEN Feng¹, DONG Xue-ping²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China. Correspondent: ZHU Fang-lai, E-mail: zhufanglai@tongji.edu.cn)

Abstract: In this paper, the problems of actuator fault detection and reconstruction based on observers for a kind of uncertain nonlinear system are discussed. Under some assumptions, a residual which is robust to disturbance but sensitive to actuator fault is produced by designing a kind of full-order sliding model observer. Then the residual can be used to detect the actuator fault. Under the same assumptions, a reduced-order observer which can eliminate the influences of unknown disturbance and actuator fault directly is developed. A method to reconstruct the actuator fault is provided based on the reduced-order observer. After this, a kind of numerical solution for the fault reconstruction is proposed by using the some numerical methods. Finally, the simulation results on a real model show the effectiveness of the proposed method.

Key words: full-order observer; reduced-order observer; fault detection; fault reconstruction

1 引言

控制系统的复杂性使故障检测和隔离(FDI)理论和技术成为众多学者所关注的热门研究领域之一. FDI技术的主要功能是: 当系统中某些信号或部件出现错误时, 能对它进行检测, 并能发出一个警报. 先进的建模技术使基于模型的FDI方法成为可能, 并且在过去的几十年, 提出了各种各样的基于模型的FDI方法^[1]. 其中: 由于基于观测器的FDI是各种方法中最具有实用性的方法之一, 自然得到了广泛的关注. 该方法包括基于滑模观测器的FDI^[2-6], 基于LMI或 H_∞ 鲁棒观测器的FDI^[7-9], 基于自适应观测器的FDI^[10-12]等. 基于观测器设计方法的FDI的基本思想是: 利用

系统的已知信息, 通常是系统的控制输入和系统的可测输出, 设计观测器作为检测观测器, 以其误差来产生一个残差用来标志系统是否出现故障. 通过观测残差来确定是否发生故障的方法称为基于残差的故障检测, 该方法得到了广泛的关注^[2,8,10-12,15-16]. Frank和Ding^[16]对基于观测器的鲁棒残差的产生方法进行了分析和总结, 包括: H_∞ 理论、非线性未知输入理论、自适应观测器理论和人工智能方法等. 但基于残差的故障诊断方法的一个不足是: 在很多情况下, 只能给出何时出现了故障, 而哪个执行器出现故障, 故障的偏离值是多大等信息, 却无法得到. 为此, 多观测器故障检测方法被讨论^[17]. 通过设计与执行器个数相等的观测器, 可以达到故障隔离的目的, 即给出何时间

收稿日期: 2009-11-19; 修回日期: 2010-01-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074009, 60974022, 60972035).

作者简介: 朱芳来(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 从事观测器、故障检测等研究; 岑峰(1972-), 男, 副教授, 博士, 从事多媒体通讯、模式识别等研究.

段,哪个执行器出现了故障的信息,但仍然不能给出故障值大小的信息.事实上,故障重构是基于残差方法的故障检测的有力补充.因为通过故障重构,不仅可以看出哪个执行器在哪个时间段发生了故障,同时还可以得到故障值的大小,这样就能对故障进行纠错设计.由于这样的原因,对故障重构方法的研究成为了目前研究热点之一^[2-6,13-14].

本文首先基于全维观测器,讨论了一种故障检测方法.本文的主要创新点是在同样的前提条件下,提出一种能直接消去未知干扰和执行器故障影响的降维观测器,并在此基础上提出一种新的故障重构方法.

2 执行器故障检测

2.1 系统描述及基本假设

考虑受到未知干扰的非线性系统为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + \Phi(x, u) + Df(u, t) + E\eta(x, t), \\ y = Cx. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n$ 为状态; $y \in R^p$ 为可测输出; $u \in R^m$ 为已知控制输入; $\eta(x, t) \in R^r$ 为系统的不确定干扰; $f(u, t) \in R^q$ 为执行器故障; $A \in R^{n \times n}$, $E \in R^{n \times r}$, $D \in R^{n \times q}$ 和 $C \in R^{p \times n}$ 为常数矩阵. 当 $f(u, t) = 0$ 时表示无故障发生. 而 $\Phi(x, u)$ 为系统的非线性项,它是 Lipschitz 函数,即满足如下的假设3.

假设1 $(A \ C)$ 可观测,且存在常数矩阵 $L \in R^{n \times p}$,使得对某个正定矩阵 Q ,代数方程组

$$\begin{cases} (A - LC)^T P + P(A - LC) = -Q, \\ D^T P = H_1 C, \\ E^T P = H_2 C \end{cases} \quad (2)$$

有正定解 P ,其中 $H_1 \in R^{q \times p}$ 和 $H_2 \in R^{r \times p}$ 为已知矩阵.

注1 寻找矩阵 L ,使代数方程组(2)对正定矩阵 Q 有正定解,根据 Kalman-Yakubovich-Popov 引理^[18]进行讨论,指出如果选取 L 可使传递函数

$$G(s) = C(sI - (A - LC))^{-1}G$$

严格正实(SPR),则式(2)有正定解 P ,其中 $G = [D \ E]$.

假设2 对干扰和执行器故障部分有如下假设:

1) $\text{Rank}(G) = r + q \leq p$;

2) $\|f(u, t)\| \leq \rho_1(u, t)$, $\|\eta(x, t)\| \leq \rho_2(y, t)$,其中 $\rho_1(u, t)$ 和 $\rho_2(y, t)$ 均为已知.

假设3 系统非线性项 $\Phi(x, u)$ 为连续 Lipschitz 函数,即有

$$\|\Phi(x, u) - \Phi(\hat{x}, u)\| \leq L_\Phi \|x - \hat{x}\|, \quad (3)$$

其中 Lipschitz 常数

$$L_\Phi \leq \lambda_{\min}(Q)/(2\lambda_{\max}(P)). \quad (4)$$

2.2 观测器设计及其故障检测

为了对故障进行检测,考虑如下形式的滑模鲁棒观测器:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \Phi(\hat{x}, u) + L(y - C\hat{x}) + \alpha(\hat{x}, y, t), \quad (5)$$

其中

$$\alpha(\hat{x}, y, t) = \rho_2(y, t) \frac{EH_2(y - C\hat{x})}{\|H_2(y - C\hat{x})\|}. \quad (6)$$

观测器误差动态方程可由式(5)减去(1)的第1式得到,即

$$\dot{\tilde{x}} = (A - LC)\tilde{x} + \tilde{\Phi} + E\eta + Df - \alpha. \quad (7)$$

其中: $\tilde{x} = x - \hat{x}$, $\tilde{\Phi} = \Phi(x, u) - \Phi(\hat{x}, u)$.

定理1 设假设1~假设3成立,在执行器故障不出现的前提下(即 $f(u, t) \equiv 0$),则由式(5)和(6)描述的系统是能渐近收敛估计原系统(1)状态的鲁棒观测器.

证明 考虑 Lyapunov 函数 $V = \tilde{x}^T P \tilde{x}$,它沿着误差方程(7)的微分为

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \tilde{x}^T [(A - LC)^T P + P(A - LC)] \tilde{x} + \\ & 2\tilde{x}^T P \tilde{\Phi} + 2\tilde{x}^T P E \eta - 2\tilde{x}^T P \alpha. \end{aligned} \quad (8)$$

由于

$$2\tilde{x}^T P \tilde{\Phi} \leq 2\|P\| \|\tilde{x}\| \|\tilde{\Phi}\| \leq 2L_\Phi \lambda_{\max}(P) \|\tilde{x}\|^2, \quad (9)$$

$$2\tilde{x}^T P E \eta(x, t) \leq 2\rho_2 \|H_2 C \tilde{x}\|, \quad (10)$$

如果 $\alpha(\hat{x}, y, t)$ 由式(6)确定,则有

$$2\tilde{x}^T P \alpha(\hat{x}, y, t) = 2\rho_2 \|H_2 C \tilde{x}\|. \quad (11)$$

于是将式(2)的第1式,(9)~(11)代入(8)得到

$$\dot{V} \leq -\tilde{x}^T [Q - 2L_\Phi \lambda_{\max}(P)I] \tilde{x}.$$

由式(4)可知,矩阵 $Q - 2L_\Phi \lambda_{\max}(P)I$ 为正定矩阵,于是有 $\dot{V} < 0$. 由 Lyapunov 稳定性理论可知,由式(5)和(6)描述的系统是原系统(1)在无执行器故障下的渐近收敛观测器. \square

如果由观测器的输出误差 $e_y = y - \hat{y}$ 来定义残差,其中 $\hat{y} = C\hat{x}$,则由式(5)和(6)所确定的观测器可作为执行器故障检测观测器. 因为从观测器的设计过程来看,观测器对干扰 $\eta(x, t)$ 具有鲁棒性,但当执行器故障 $f(u, t)$ 出现时,残差 $e_y = y - \hat{y}$ 会受到它的影响;而当执行器故障不出现时(即当 $f(u, t) = 0$ 时),残差会渐近收敛于零. 所以,通过对如下关于残差 e_y 的逻辑分类检查:

$$d(t) = \begin{cases} \|e_y\| \leq \lambda, & \text{无执行器故障出现;} \\ \|e_y\| > \lambda, & \text{至少有一个执行器故障出现} \end{cases}$$

可以确定出故障是否出现,其中 λ 为人为设定的故障检测界线.

3 执行器故障重构

上节中,通过设计一滑模鲁棒观测器的方法,提

出了一种可以对执行器故障进行检测的故障检测观测器. 通过对所产生的残差的观察, 可以确定执行器是否发生故障, 何时发生故障. 但该故障检测方法有以下不足: 当 $q > 1$ 时, 即执行器的个数不止一个时, 以上方法不能确定到底是哪个出现了故障, 即没有达到故障隔离的目的. 另一种方法是进行故障重构来达到故障隔离的目的, 同时它还具有可以得知故障值大小的优点. 本节通过设计降维观测器的方法, 直接消去未知干扰和故障的影响; 然后在状态被渐近收敛估计的基础上, 提出一种故障重构方法.

3.1 独立于故障的降维观测器

对状态 x 和矩阵 A, P 和 Q 进行如下矩阵分块:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ P_2^T & P_3 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 \\ Q_2^T & Q_3 \end{bmatrix}.$$

其中: $x_1 \in R^{n-p}, A_{11} \in R^{(n-p) \times (n-p)}, D_1 \in R^{(n-p) \times q}, E_1 \in R^{(n-p) \times r}, P_1, Q_1 \in R^{(n-p) \times (n-p)}$.

记

$$K = P_1^{-1}P_2 \in R^{(n-p) \times p}, \quad (12)$$

为讨论方便起见, 进一步假设 $C = [0 \ I_p]$. 作如下等价变换:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{n-p} & K \\ 0 & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}.$$

其中: $z_1 \in R^{n-p}$ 和 $z_2 \in R^p$ 为新坐标状态. 由于 C 的特别形式, 如果 K 由式 (12) 确定, 则由式 (2) 的第 2 和第 3 式可知: $[I_{n-p} \ K]D = 0$ 和 $[I_{n-p} \ K]E = 0$ 两式成立. 在等价变换下, 原系统前面 $n-p$ 个状态方程和输出方程等价于

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = (A_{11} + KA_{21})z_1 + [A_{12} + KA_{22} - (A_{11} + KA_{21})K]y + [I_{n-p} \ K]\Phi\left(T^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ y \end{bmatrix}, u\right), \\ y = z_2. \end{cases} \quad (13)$$

定理 2 设假设 1~假设 3 成立, 且 $C = [0 \ I_p]$, 则系统

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = (A_{11} + KA_{21})\hat{z}_1 + [A_{12} + KA_{22} - (A_{11} + KA_{21})K]y + [I_{n-p} \ K]\Phi\left(T^{-1} \begin{bmatrix} \hat{z}_1 \\ y \end{bmatrix}, u\right), \\ \hat{x} = \begin{bmatrix} I_{n-p} & -K \\ 0 & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{z}_1 \\ y \end{bmatrix} \end{cases} \quad (14)$$

为原系统的一个渐近收敛 $(n-p)$ 维降维观测器.

证明 式 (13) 的第 1 式减去 (14) 的第 1 式可得

误差方程

$$\dot{\tilde{z}}_1 = (A_{11} + KA_{21})\tilde{z}_1 + [I_{n-p} \ K]\tilde{\Phi}, \quad (15)$$

其中 $\tilde{z}_1 = z_1 - \hat{z}_1$ 为降维状态误差. 考虑 Lyapunov 方程 $V_1 = \tilde{z}_1^T P_1 \tilde{z}_1$, 其沿着误差方程式 (15) 进行微分可得

$$\dot{V}_1 = \tilde{z}_1^T [(A_{11} + KA_{21})^T P_1 + P_1(A_{11} + KA_{21})]\tilde{z}_1 + 2\tilde{z}_1^T P_1 [I_{n-p} \ K]\tilde{\Phi}. \quad (16)$$

由 $x_2 = z_2 = y$ 可得 $\tilde{x}_2 = \tilde{z}_2 = 0$. 在式 (9) 中令 $\tilde{x}_2 = 0$, 得到

$$2\tilde{z}_1^T P_1 [I_{n-p} \ K]\tilde{\Phi} \leq L_\Phi \lambda_{\max}(P) \|\tilde{x}_1\|^2.$$

又由 $x_1 = z_1 + Kz_2$ 可得 $\tilde{x}_1 = \tilde{z}_1 + K\tilde{z}_2 = \tilde{z}_1$, 将其代入上式便有

$$2\tilde{z}_1^T P_1 [I_{n-p} \ K]\tilde{\Phi} \leq L_\Phi \lambda_{\max}(P) \|\tilde{z}_1\|^2. \quad (17)$$

对式 (2) 的第 1 式按分块展开, 并由第 1 个分块得到

$$(A_{11} + KA_{21})^T P_1 + P_1(A_{11} + KA_{21}) = -Q_1. \quad (18)$$

将式 (17) 和 (18) 代入 (16) 可得

$$\dot{V}_1 = -\tilde{z}_1^T [-Q_1 + L_\Phi \lambda_{\max}(P) I_{n-p}]\tilde{z}_1.$$

而当式 (4) 成立时, 有

$$L_\Phi \leq \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\lambda_{\max}(P)} \leq \frac{\lambda_{\min}(Q_1)}{2\lambda_{\max}(P)}.$$

这说明 $\dot{V}_1 < 0$, 因而式 (14) 是 (1) 的降维观测器. \square

注 2 从降维观测器设计过程来看, 降维观测器可以在不受到干扰和故障的影响下达到状态的渐近估计, 这为本文提出故障重构带来方便.

3.2 数值解故障重构方法

记 $G = [D \ E]$, 由假设 2 可知 G 列满秩, 于是可提出故障和未知干扰的一个估计为

$$\hat{\Phi} = (G^T G)^{-1} G^T (\dot{\hat{x}} - A\hat{x} - \Phi(\hat{x}, u)), \quad (19)$$

其中 $\hat{\Phi} = [\hat{f}^T \ \hat{\eta}^T]^T$ 为由故障估计和未知干扰估计所组成的向量. 于是有

$$\hat{f} = [I_m \ 0_{m \times q}]\hat{\Phi}, \ \hat{\eta} = [0_{q \times m} \ I_q]\hat{\Phi}.$$

定理 3 在假设 2 下, 式 (19) 所给出的估计是渐近收敛估计.

证明 由于 G 列满秩, 故由式 (1) 可得

$$\Phi = (G^T G)^{-1} G^T [\dot{x}(t) - Ax(t) - \Phi(x, u)],$$

其中 $\phi = [f^T \ \eta^T]^T$. 上式减去式 (19) 得到

$$\tilde{\Phi} = (G^T G)^{-1} G^T [\dot{\hat{x}}(t) - A\hat{x}(t) - \tilde{\Phi}],$$

其中

$$\tilde{\Phi} = \phi - \hat{\Phi}, \ \tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t).$$

由于 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x}(t) = 0 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\hat{x}}(t) = 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\Phi} = 0$, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\Phi} = \phi$. \square

在式 (19) 中, 出现了系统状态微分的信息, 为

此,考虑一种数值解方法. 设考虑的时间区间是 $[T_1, T_2]$, 对其 N 等份, 得到 $N + 1$ 个时间点 $t_i = t_0 + ih$ ($i = 0, 1, \dots, N$), 其中 $h = \frac{T_2 - T_1}{N}$. 记 $\dot{x}(t_i) = \frac{dx(t)}{dt}|_{t=t_i}$ 的近似值为 m_i , 补充两个边界条件: 假设 $\dot{x}(t_0)$ 和 $\dot{x}(t_N)$ 为已知, 则如下关于 m_i 的线性代数方程组^[19]:

$$\begin{cases} m_{i-1} + 4m_i + m_{i+1} = \frac{3}{h}(x(t_{i+1}) - x(t_{i-1})), \\ m_0 = \dot{x}(t_0), m_N = \dot{x}(t_N), \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (20)$$

的两个边界条件可由如下相对简单的微分数值解3点公式给出^[19]:

$$\begin{cases} m_0 = \frac{-3x(t_0) + 4x(t_1) - x(t_2)}{2h}, \\ m_N = \frac{x(t_{N-2}) - 4x(t_{N-1}) + 3x(t_N)}{2h}. \end{cases} \quad (21)$$

该算法具体步骤如下:

Step 1: 对区间 $[T_1, T_2]$ 进行 N 等份;

Step 2: 对可测输出信息 $y(t)$ 取值, 得到 $y(t_i)$;

Step 3: 设定初值 $\hat{z}_1(0)$, 对式(14)进行微分方程数值解^[19], 得到 $\hat{z}_1(t_i)$, 根据式(14)的第2式计算出 $\hat{x}(t_i)$;

Step 4: 根据式(20), (21)求得 $m_i = \dot{\hat{x}}(t_i)$;

Step 5: 对式(19), 令 $t = t_i$, 有

$$\hat{\phi}(t_i) = (G^T G)^{-1} G^T [m - A\hat{x}(t_i) - \Phi(x(t_i), t_i)].$$

4 仿真分析

4.1 模型描述

考虑 HIRM 飞行器系统的简化模型, 该模型经过一定的等价变换, 可以描述成式(1)的形式^[4], 其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ -0.0367 & -0.0318 & 0.0831 & -0.0008 \\ 0 & -0.0716 & -1.4850 & 0.9848 \\ 0 & -0.2797 & -5.6725 & -1.0253 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.0120 & -0.0071 \\ -0.3058 & -0.0223 \\ -22.4293 & 7.8777 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 2.0275 \\ 10 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \ I_3],$$

$$\Phi(x, u) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.0120u_1 - 0.0071u_2 \\ -0.3058u_1 - 0.0223u_2 + \frac{F_e}{M}(\sin x_3)/(1 + x_2) \\ -22.4293u_1 + 7.8777u_2 \end{bmatrix},$$

这里 F_e 和 M 分别为发动机推进力参数和飞行器质量. 假设干扰为 $\eta(x, t) = 0.5 \sin(0.43x_2 + 2.5)$. 对于该

模型, 如果选取

$$L = \begin{bmatrix} -27.2784 & 0.9086 & 0.9544 \\ 1.9682 & 0.0609 & 0.0000 \\ -0.0716 & 0.0150 & 0.9848 \\ -0.2787 & -5.6725 & 0.9747 \end{bmatrix},$$

则对于

$$Q = \begin{bmatrix} -1.0011 & -27.3120 & 0.6061 & -0.0223 \\ -27.3120 & -746.1141 & 16.5329 & -0.6103 \\ 0.6061 & 16.5329 & -1.3668 & 0.0135 \\ -0.0223 & -0.6103 & 0.0135 & -1.0007 \end{bmatrix},$$

Lyapunov 方程式(2)有正定解

$$P = \begin{bmatrix} 0.5000 & 13.6392 & -0.3029 & 0.0114 \\ 13.6392 & 372.5563 & -8.2621 & 0.3113 \\ -0.3029 & -8.2621 & 0.5168 & -0.0069 \\ 0.0114 & 0.3113 & -0.0069 & 0.2503 \end{bmatrix},$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0.0150 & -0.1024 & -5.6082 \\ -0.0086 & -0.0072 & 1.9697 \end{bmatrix},$$

$$H_2 = [0 \ 0.6758 \ 2.5000].$$

4.2 故障检测仿真

对于故障检测, 原系统状态初值置为 $x(0) = [-0.5 \ 0.2 \ 0.3 \ 4.7]^T$, 而全维观测器状态估计初值置为 $\hat{x}(0) = [-0.4 \ 0.8 \ -0.6 \ 3.9]^T$. 图1为在无执行器故障出现的情况下的状态估计效果, 由图1可以看出状态估计效果令人满意.

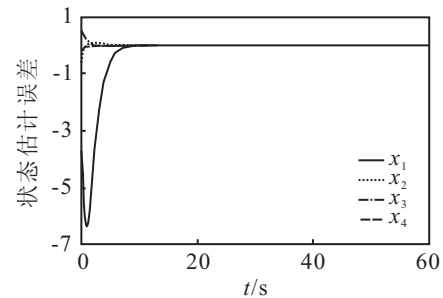


图1 无故障下的状态估计误差

在仿真实验中, 执行器有两个, 因而表示执行器故障的 f 是二维列向量 $f = [f_1^T \ f_2^T]^T$. 现假设在 11~25 时间单位内, 第 1 个执行器发生故障偏离值为 1; 在 41~49 时间单位内, 第 1 个执行器发生故障偏离值为 0.5, 即假设

$$f_1 = \begin{cases} 1, & 11 \leq t < 25; \\ 0.5, & 41 \leq t < 49; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

同时假设第 2 执行器没有发生故障, 即 $f_2 \equiv 0$. 此时, 观测器(5)和(6)便可作为故障检测器, 通过观测其残差的输出变化来判定何时出现了故障. 图2为执行器的故障检测图. 从图2可以看出, 大约在时间段 11~25 和 41~50 左右, 发生了故障. 图2为执行器的故

障检测图. 但该故障检测器并没有告之是第 1 还是第 2 个执行器发生故障, 故障偏离值为多大. 为此, 需要进行故障重构, 通过故障重构可以回答上述问题.

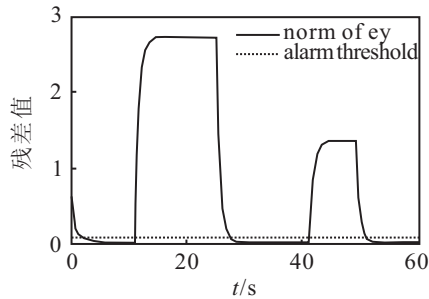


图 2 故障检测

4.3 故障重构仿真

故障重构的仿真结果如图 3 所示. 图中: 直线代表实际干扰值, 虚线代表估计干扰值. 图 3(a) 给出的是第 1 个执行器的故障重构, 图中表明: 第 1 个执行器在 11~25 和 41~49 时间单位内分别发生了故障, 其故障偏离值分别为 1 和 0.5. 同时, 由图 3(b) 可知, 第 2 个执行器没有发生故障. 由此可知, 本文方法不仅能对故障进行重构, 同时还能对干扰进行估计. 从图 3(c) 可以看出, 对干扰的估计是令人满意的.

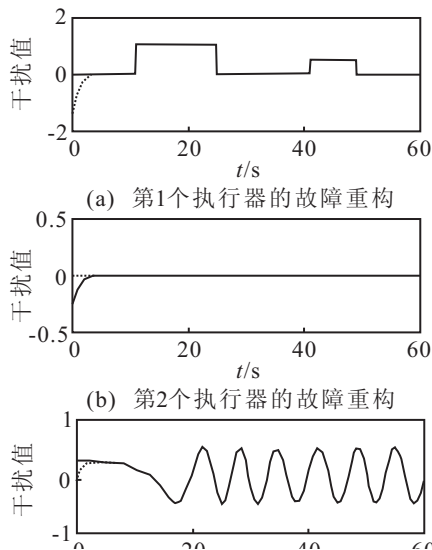


图 3 故障重构和干扰估计

5 结 论

本文针对不确定非线性系统, 讨论了基于观测器的执行器故障检测和重构问题. 基于滑模全维观测器设计方法, 提出一种对未知干扰具有鲁棒性、对故障具有敏感性的故障检测观测器. 通过观测该观测器所产生的残差, 可以判断执行器何时出现故障. 但该基于残差的故障检测方法有不足之处: 不能确定具体哪个执行器发生故障, 更不能提供故障值大小的信息. 为此, 本文重点讨论了基于降维观测器的故障重构方

法. 通过选取特别形式的降维观测器的增益矩阵, 可达到直接消去未知干扰和故障影响的目的, 从而达到状态渐近估计. 在此基础上, 提出了故障的重构方法, 并讨论了数值解方法. 最后, 针对一个实际模型进行了仿真分析, 仿真结果表明, 本文所提出的方法具有实用性.

参考文献(References)

- [1] Chen J, Patton R J. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] Edwards C, Spurgeon S K, Patton R J. Sliding mode observers for fault detection and isolation[J]. Automatica, 2000, 36(4): 541-553.
- [3] Yan X G, Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding mode observer[J]. Automatica, 2007, 43(9): 1605-1614.
- [4] Yan X G, Edwards C. Robust sliding mode observer-based actuator fault detection and isolation for a class of nonlinear systems[C]. Proc of 44th IEEE Conf on Decision and Control and the European Control Conf. Seville, 2005: 12-15.
- [5] Tan C P, Edwards C. Sliding mode observers for detection and reconstruction of sensor faults[J]. Automatica, 2002, 38(10): 1815-1821.
- [6] Tan C P, Edwards C. Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator faults[J]. Int J of Robust Nonlinear Control, 2003, 13(5): 443-463.
- [7] Tan C P, Edwards C. An LMI approach for designing sliding model observers[C]. Proc of the 39th IEEE Conf on Decision and Control. Sydney, 2000: 2587-2592.
- [8] Wang H B, Lam J. Robust fault detection for uncertain discrete-time systems[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 2002, 25 (2): 291-302.
- [9] Pertew A M, Marquez H J, Zhao Q. LMI-based sensor fault diagnosis for nonlinear Lipschitz systems[J]. Automatica, 2007, 43(8): 1464-1469.
- [10] Xu A, Zhang Q. Nonlinear system fault diagnosis based on adaptive estimation[J]. Automatica, 2004, 40(7): 1181-1193.
- [11] Jiang B, Fahmida N, Chowdhury. Parameter fault detection and estimation of a class of nonlinear systems using observers[J]. J of the Franklin Institute, 2005, 342(7): 725-736.
- [12] Michael A, Demetriou. Using unknown input observers for robust adaptive fault detection in vector second-order systems[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(2): 291-309.
- [13] Vijayaraghavan K, Rajamani R, Bokor J. Quantitative fault estimation for a class of non-linear systems[J]. Int J of Control, 2007, 80 (1): 64-74.

(下转第 270 页)