

基于滑模观测器的多传感器故障诊断方法*

黄宜山^{1,2} 张昌凡² 颜敏²

(1. 湖南南车时代电动汽车股份有限公司, 株洲 412007) (2. 湖南工业大学电气与信息工程学院, 株洲 412008)

摘要 针对一类非线性系统的传感器故障诊断问题, 提出了一种多传感器故障检测方法. 首先, 定义一个状态变量将传感器故障转换成伪执行器故障, 然后设计相应的滑模观测器生成残差, 来实现多故障的检测. 依据 Lyapunov 稳定性理论, 以 LMI 的形式给出了观测器存在的充分条件. 最后通过单关节机械手的实例, 验证了所提方法的有效性和可行性.

关键词 滑模观测器, 残差, 单关节机械手, 线性矩阵不等式, 故障检测

引言

由于技术发展水平的不断提高, 被诊断对象通常都是十分复杂的系统, 所发生的故障更是多种多样, 可能是多种征兆对应于一个故障, 也可能是一种或多种征兆同时对应着多个故障. 显然, 与单故障的诊断相比较, 系统多故障的诊断要复杂的多. 因此, 在多故障并发的情况下, 如何对目标故障进行检测是一个值得研究的问题.

在过去的几十年里, 人们提出了许多种故障诊断方法, 在众多的故障诊断方法中, 基于观测器的故障检测与隔离技术一直是人们研究的热点. 迄今为止, 基于观测器的故障诊断方法已得到广泛的研究并取得了丰硕的成果. 较具代表性的方法有: Luengerer 观测器^[1]、强跟踪滤波器^[2]、未知输入观测器^[3]、滑模观测器^{[4][5][6]}、自适应观测器^[7]、预测观测器^[8]等. 在故障诊断方法中, 早期的工作仅局限于单一故障的诊断, 后来才逐步的开始研究多故障的诊断问题. 如安若铭等^[9]针对一类线性系统, 提出了一种动态观测器的多故障诊断方法, 并应用到某卫星姿控系统中. Zhang Ke 等^[4]运用滑模积分观测器, 提出了一种非线性系统的多传感器故障诊断方法. 纪志成等^[10]针对一类非线性系统, 采用神经网络逼近系统非线性部分的技术路线, 提出了一种最优滤波的多故障检测观测器设计方法.

本文是在 Tan^[11]和 Edwards^[12]提出的等效变换与何静等^[5]的研究基础上, 研究非线性系统的多

故障检测问题, 对一类非线性系统提出一种基于滑模观测器的多传感器故障诊断方法. 利用一阶滤波器将传感器故障等效变换成伪执行器故障, 从而可以将执行器故障诊断方法直接推广应用到传感器的故障诊断中去, 对同时发生多个传感器故障的情况进行全面而详细的研究. 依据 Lyapunov 稳定性理论, 运用 LMI 对文献[5]的收敛条件进行了放松, 并将所提方法在单关节机械手系统中加以应用, 以验证所提方法的有效性.

1 系统描述

考虑如下含有传感器故障的一类非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + f(x, u, t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Gf_s(x, u, t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x(t) \in R^n$ 为不可测状态向量, $u(t) \in R^m$ 为可测输入向量, $y(t) \in R^p$ 为可测输出向量, $f(x, u, t) \in R^n$ 为已知的非线性函数. $f_s(x, u, t) \in R^r$ 为未知的有界非线性函数, 代表系统的传感器故障, $G \in R^{p \times r}$ 为已知的传感器故障分布矩阵. A, B, C 为已知矩阵, 其中 $A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}, C \in R^{p \times n}, n > p > q$.

假设 1 第 i 个传感器无故障时, $f_{si} = 0$; 发生故障时, f_{si} 为非零函数. 其中 f_{si} 为 f_s 第 i 行的行向量, 代表第 i 个传感器故障 ($i = 1, 2, \dots, r$).

假设 2 G 为列满秩矩阵. 它实际的工程意义就是当一个传感器发生故障时不影响其他传感器的正常工作, 即各个传感器独立工作且互不影响.

假设 3 (A, C) 是可观的.

假设4 传感器故障是有界函数,即存在已知的大于0的 γ_{li} ,使得 $\|f_{si}\| \leq \gamma_{li}$.

2 多故障诊断方法

在这一部分我们首先给出所有可能的传感器故障模型,并通过引入新的状态变量将传感器故障转换成伪执行器故障,然后在此基础上提出基于滑模观测器的多故障诊断方法,与此同时给出一些关于滑模观测器多故障诊断方法的证明与推导.最后对滑模观测器的多故障诊断方法进行归纳与总结.

在多传感器故障模型建立之前,须作如下定义:

定义1 $G = [G_1 \cdots G_i \cdots G_r]$,式中 G_i 为 G 第 i 列的列向量.

定义2 $f_s = [f_{s1} \cdots f_{si} \cdots f_{sr}]^T$,式中 f_{si} 为 f_s 第 i 行的行向量.

定义3 设 r_i 表示同时发生 a 个($a \leq r$)传感器故障时的第 i 个($i=1,2,\dots,a$)故障.

基于任何时刻最多同时发生 a 个传感器故障($a \leq r$)的假设,对可能发生的故障情形建立故障模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + f(x, u, t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + \sum_{i=1}^a G_{r_i} f_{s_{r_i}}(x, u, t) \end{cases} \quad (2)$$

定义一个如下的状态变量 z 作为输出信号的一阶低通滤波器

$$\dot{z} = A_s z + B_s y$$

式中 A_s 矩阵可任意, B_s 矩阵为满秩即可^[5].在此,选取 A_s 为零矩阵, B_s 为单位矩阵.

将上式代入式(2)得

$$\dot{z} = Cx(t) + \sum_{i=1}^a G_{r_i} f_{s_{r_i}}(x, u, t) \quad (3)$$

由式(2)、(3)得到一个新的系统方程

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f(x, u, t) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \sum_{i=1}^a \begin{bmatrix} 0 \\ G_{r_i} \end{bmatrix} f_{s_{r_i}}(x, u, t) \\ z = [0 \quad I] \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

若定义 $\hat{x} = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}$, $\hat{y} = z$.并代入式(4)可整理为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \bar{A}\hat{x}(t) + \bar{f}(x, u, t) + \bar{B}u(t) + \sum_{i=1}^a \bar{G}_{r_i} f_{s_{r_i}}(x, u, t) \\ \hat{y}(t) = \bar{C}\hat{x}(t) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中,各矩阵参数为

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, \bar{f}(x, u, t) = \begin{bmatrix} f(x, u, t) \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{C} = [0 \quad I], \bar{G}_{r_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ G_{r_i} \end{bmatrix}.$$

从式(5)不难看出,通过状态变量 z 的引入,将传感器故障转换成了伪执行器故障.这样就可以运用执行器故障诊断的方法来检测传感器故障.

假设5 (\bar{A}, \bar{C})是可观^[5]的,则存在矩阵 L ,使得 $\bar{A}_0 = \bar{A} - LC$ 为稳定矩阵.

假设6 $\bar{f}(x, u, t)$ 满足 Lipschitz 条件,则存在一个正的 Lipschitz 常数 γ_3 ,使得 $\|\bar{f}(x_1, u, t) - \bar{f}(x_2, u, t)\| \leq \gamma_3 \|x_1 - x_2\|$,

假设7 P, F 满足如下等式: $\bar{P}G_{r_i} = \bar{C}^T F^T$,其中 P 为对称正定矩阵.

引理1^[13] 如果 $g(x, u, t)$ 满足 Lipschitz 条件,那么存在一个对称正定矩阵 P 满足

$$2e^T P(g(x_1, u, t) - g(x_2, u, t)) \leq \gamma^2 e^T P P e + e^T e$$

式中, $e = x_1 - x_2$, γ 是 Lipschitz 常数.

引理2^[14] 矩阵的 Schur 补性质,对给定的对称矩阵 $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$,其中 $S_{11} \in r \times r$.以下三个条件是等价的:

- (1) $S < 0$;
- (2) $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$;
- (3) $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$;

定义4 状态误差 $\hat{e} = \hat{x} - \bar{x}$,输出误差 $\hat{e}_y = \hat{y} - \bar{y}$.式中,上标“ $\hat{\cdot}$ ”代表相应状态变量的观测值.

由 Walcott - Zak 观测器^[15]和滑模观测器设计原理,对式(4)所述情况下的故障模型构造 a 个滑模观测器如下所示:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_{r(j)}(t) = \bar{A}\hat{x}(t) + \bar{f}(\hat{x}, u, t) + Bu(t) - L(\hat{y} - \bar{y}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^a \bar{G}_{r_i} w_{r_i} \\ \hat{y}(t) = \bar{C}\hat{x}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)为构造的第 j 个观测器,表示除第 j 个($j=1, 2, \dots, a$)故障外,对其余 $a-1$ 个故障均构造观测

器,其中 w_{r_i} 为滑模变结构输出信号,表达式为

$$w_{r_i} = \begin{cases} -\rho_{r_i} \frac{F^{r_i} \bar{e}_y^{r_i}}{\|F^{r_i} \bar{e}_y^{r_i}\| + \sigma_i} & \text{if } \bar{e}_y^{r_i} \neq 0 \\ 0 & \text{if } \bar{e}_y^{r_i} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 ρ_{r_i} 为可调参数, F^{r_i} 为第 r_i 行的行向量, ($i = 1, 2, \dots, a$ 且 $i \neq j$), w_{r_i} 用来切断故障 f_{sr_i} 对系统的影响,而 σ_i 是为消除滑模抖动而引入的标量参数.

由式(5)和(6)得最多同时发生 a 个传感器故障时,第 j 个观测器偏差方程为:

$$\dot{\bar{e}}_{r(j)} = (\bar{A} - L\bar{C})\bar{e}_{r(j)} + \tilde{f}(\hat{x}, u, t) - \tilde{f}(x, u, t) - \bar{G}_{r_j} f_{sr_j} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^a (\bar{G}_{r_i} (w_{r_i} - f_{sr_i})) \quad (8)$$

式(8)表示第 j 个偏差方程,即除第 j 个 ($j = 1, 2, \dots, a$) 故障外对其余 $a - 1$ 个故障构造观测器而得到的偏差方程.

定理 1 基于前面所作的假设,对偏差方程 $\bar{e}_{r(j)}$,

若参数 $\rho_{r_i} > \gamma_{li}$, $\left[\begin{array}{ccc} (\bar{A} - L\bar{C})^T P + P(\bar{A} - L\bar{C}) + I & & P \\ & P & \\ & & -\frac{1}{\gamma_3^2} \end{array} \right] <$

0,则当同时发生 a 个故障时 ($a \leq r$), $\bar{e}_{r(j)}$ 均不收敛到零域;当同时发生 $a - 1$ 个故障,假设在 a 个故障中第 m 个 ($m = 1, 2 \dots a$) 故障不发生时,则除偏差 $\bar{e}_{r(m)}$ 按指数规律收敛到零域外,其余偏差均不收敛到零域;当同时发生 $a - 2$ 个故障时,偏差方程是否收敛到零域可依次类推.

证明 选取如下的 Lyapunov 函数

$$V = \bar{e}^T P \bar{e} \quad (9)$$

Step1:以同时发生 $a - 1$ 个故障为例(假设在 a 个故障中第 m 个故障不发生)

由式(8)得

$$\bar{e}_{r(m)} = (\bar{A} - L\bar{C})\bar{e}_{r(m)} + \tilde{f}(\hat{x}, u, t) - \tilde{f}(x, u, t) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^a (\bar{G}_{r_i} (w_{r_i} - f_{sr_i})) \quad (10)$$

对式(9)求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \bar{e}_{r(m)}^T ((\bar{A} - L\bar{C})^T P + P(\bar{A} - L\bar{C})) \bar{e}_{r(m)} + \\ & 2\bar{e}_{r(m)}^T P [\tilde{f}(\hat{x}, u, t) - \tilde{f}(x, u, t)] + \\ & 2\bar{e}_{r(m)}^T P \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^a [\bar{G}_{r_i} (w_{r_i} - f_{sr_i}(x, u, t))] \end{aligned} \quad (11)$$

将引理 1 和引理 2 代入式(11)有

$$\dot{V} \leq \bar{e}_{r(m)}^T ((\bar{A} - L\bar{C})^T P + P(\bar{A} - L\bar{C})) \bar{e}_{r(m)} + \gamma_3^2 \|\bar{e}_{r(m)}\|^2 + \|\bar{e}_{r(m)}\|^2 -$$

$$\begin{aligned} & 2 \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^a (\|F^{r_i} \bar{e}_y^{r_i}\| (\rho_{r_i} - \gamma_{li})) \leq \bar{e}_{r(m)}^T [(\bar{A} - \\ & L\bar{C})^T P + P(\bar{A} - L\bar{C}) + \gamma_3^2 PP + I] \bar{e}_{r(m)} - \\ & 2 \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^a (\|F^{r_i} \bar{e}_y^{r_i}\| (\rho_{r_i} - \gamma_{li})) \end{aligned}$$

当满足 $\rho_{r_i} > \gamma_{li}$, $\left[\begin{array}{ccc} (\bar{A} - L\bar{C})^T P + P(\bar{A} - L\bar{C}) + I & & P \\ & P & \\ & & -\frac{1}{\gamma_3^2} \end{array} \right] <$

0时,有 $\dot{V} < 0$ 负定. 故有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{e}_{r(m)} = 0$.

Step2:在所有包含第 m 个故障(假设 $m \neq 1$)的偏差中以偏差方程 $\bar{e}_{r(1)}$ 为例进行收敛性论证,

$$\begin{aligned} \bar{e}_{r(1)} = & (\bar{A} - L\bar{C})\bar{e}_{r(1)} + \tilde{f}(\hat{x}, u, t) - \\ & \tilde{f}(x, u, t) + \sum_{\substack{i=2 \\ i \neq m}}^a \bar{G}_{r_i} (w_{r_i} - f_{sr_i}) + (\bar{G}_{r_m} w_{r_m} - \bar{G}_{r_1} f_{sr_1}) \end{aligned}$$

由假设 2 知, \bar{G} 为列满秩,则 \bar{G}_{r_m} 与 \bar{G}_{r_1} 线性无关,因此 $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{e}_{r(1)} \neq 0$. 同理可得,在所有包含第 m 个故障的偏差中均不收敛到零域.

显而易见,当 a 个故障同时发生时,偏差 $e_{r(j)}$ 均 ($j = 1, 2 \dots a$) 不收敛到零域. 用同样的方法也可以证明,当同时发生 $a - 2$ 个故障时,偏差方程是否收敛到零域,证毕.

定义 5 残差 $r_{r(j)} = \|\bar{e}_y^{r(j)}\|$, 其中 $r_{r(j)}$ 表示在同时发生 a 个故障中除第 j 个故障外,对其余 $a - 1$ 个故障构造观测器而得到的残差.

基于以上分析,可得多传感器故障诊断的方法为:当同时发生 a 个故障 ($a \leq r$) 时,残差 $r_{r(j)}$ 均对故障敏感且不收敛到零域;当同时发生 $a - 1$ 个故障时,假设在 a 个故障中第 m 个故障不发生,则除残差 $r_{r(m)}$ 对其不敏感且收敛到零域外,其余残差均对故障敏感且不收敛到零域. 由此可以列出每一种故障发生时所有 a 个残差各自的状态,从而构成一个多故障情况下的故障判别规则表(如表 1),即可实现对同时发生的多个传感器故障进行判别诊断.

表 1 故障诊断判别规则

Table 1 Fault Diagnosis Decision Rules

$r_{r(1)}$	$r_{r(2)}$	.....	$r_{r(a)}$	Fault Decisions
0	0	.....	0	fault free
1	0	.....	0	only fault f_{s1}
1	1	.....	0	fault f_{s1} and f_{s2} , simultaneously
⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	.....	0	except fault f_{sa} , other fault occur
1	1	.....	1	all fault

3 应用案例

考虑一个在垂直平面内旋转的柔性单关节机械手的动态系统模型^[16]如下所示:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{q}_1 + F_1 \dot{q}_1 + k(q_1 - q_2) + mgl \sin q_1 = 0 \\ J_m \ddot{q}_2 + F_m \dot{q}_2 - k(q_1 - q_2) = u \end{cases} \quad (12)$$

式中: q_1 、 q_2 分别为关节点位置和连杆转动位置, J_1 为关节转动惯量, J_m 为电机转动惯量, k 为弹性系数, m 为关节质量, g 为地心引力常数, l 为连杆长度, F_1 为粘性摩擦系数, F_m 为正常数, u 为控制输入力矩信号。

选取状态变量 $x_1 = q_1, x_2 = \dot{q}_1, x_3 = q_2, x_4 = \dot{q}_2$ 。

假设该机械手分别有 f_{s1} 、 f_{s2} 和 f_{s3} 三个传感器故障, 则具有传感器故障的单关节机械手模型可表述为如下四阶非线性状态方程:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k}{J_1} & -\frac{F_1}{J_1} & \frac{k}{J_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k}{J_m} & 0 & -\frac{k}{J_m} & -\frac{F_m}{J_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{mgl}{J_1} \sin x_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_m} \end{bmatrix} u \\ y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{bmatrix}^T + Gf_s \end{cases} \quad (13)$$

选取机械手参数分别为:

$$k = 2Nm/rad, F_m = 1, F_1 = 0.5Nm/(rad/s), J_m = 1Nm^2, J_1 = 2Nm^2, m = 0.15kg, g = 9.8, l = 0.3m.$$

引入新的状态变量 z 后, 相应的式(13)变换为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{f}(x, u, t) + \bar{B}u(t) + \bar{G}f_s(x, u, t) \\ \bar{y}(t) = \bar{C}\bar{x}(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中,

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -0.25 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & -2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{f}(x, u, t) = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.2205 \sin x_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$f_s(x, u, t) = \begin{bmatrix} f_{s1} \\ f_{s2} \\ f_{s3} \end{bmatrix}, \bar{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

从式(13)可知, 系统最多在 3 个不同的反馈通道发生传感器故障. 由于本文提出的故障诊断方法, 对故障形式没有限制, 适用于突变、缓变或其它任何类型的故障, 故本例中, 用缓变故障、间歇性故障和突变故障来模拟同一传感器不同的故障类型或多个不同传感器的故障类型. 应用 Matlab7.0 中的 LMI 工具箱求解不等式, 并选取矩阵 L, F 以满足假设 5 和假设 7.

$$L = \begin{bmatrix} 1.2789 & 0.2831 & 0.1396 \\ 0.0801 & -0.0693 & -0.2262 \\ 0.2876 & 1.2807 & -0.1284 \\ 0.1419 & -0.1256 & 1.1750 \\ 3.0481 & -0.0375 & -0.0129 \\ -0.0375 & 3.0482 & 0.0102 \\ -0.0129 & 0.0102 & 3.0633 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 1.7508 & -0.1540 & -0.0792 \\ -0.1540 & 1.7497 & 0.0715 \\ -0.0792 & 0.0715 & 1.7918 \end{bmatrix}.$$

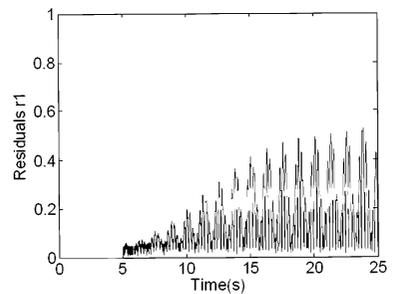


图1 情况1时, 残差的波形

Fig.1 the waveform of residual

设仿真步距为 0.001, 仿真算法为 ode45. 仿真初始条件为 $x_1(0) = 0.3, x_2(0) = 0.5, x_3(0) = 0.1, x_4(0) = 0.25, z_1(0) = 0.1, z_2(0) = 0.1, z_3(0) = 0.1$. 三个观测器的所有状态变量初值为 0. 仿真参数为 $\sigma_1 = 0.01, \sigma_2$

$= 0.01, \sigma_3 = 0.01, \rho_1 = 150, \rho_2 = 100, \rho_3 = 100.$

情况 1 仅发生 f_{s1} 故障, 未发生 f_{s2} 和 f_{s3} 故障

图 1 - 图 3 为情况 1 时, 残差 $r_{r(1)}$ 、 $r_{r(2)}$ 和 $r_{r(3)}$ 的仿真波形. 从图中可以看出残差 $r_{r(2)}$ 和 $r_{r(3)}$ 保持在零域, 而残差 $r_{r(1)}$ 在 $t = 5s$ 发生了突变, 代表此时 f_{s1} 发生了故障.

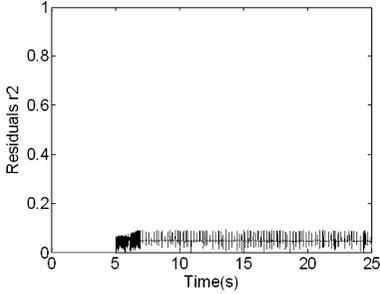


图 2 情况 1 时, 残差的波形

Fig. 2 the waveform of residual

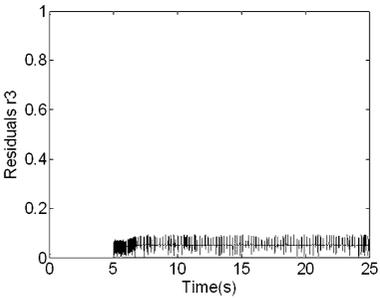


图 3 情况 1 时, 残差的波形

Fig. 3 the waveform of residual

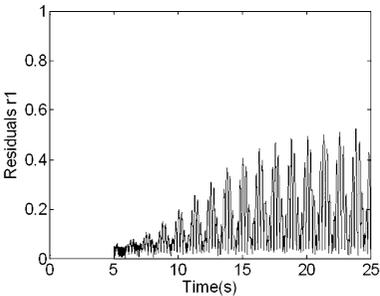


图 4 情况 2 时, 残差的波形

Fig. 4 the waveform of residual

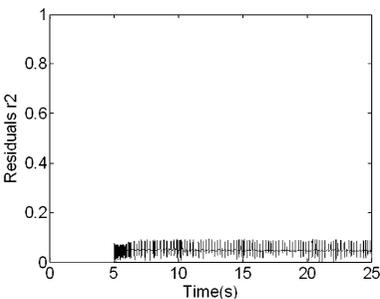


图 5 情况 2 时, 残差的波形

Fig. 5 the waveform of residual

情况 2 同时发生 f_{s1} 、 f_{s3} 故障, 未发生 f_{s2} 故障

图 4 - 图 6 为情况 2 时, 残差 $r_{r(1)}$ 、 $r_{r(2)}$ 和 $r_{r(3)}$ 的仿真波形. 从图中可以看出只有残差 $r_{r(2)}$ 保持在零域, 而残差 $r_{r(1)}$ 和 $r_{r(3)}$ 在 $t = 5s$ 均发生了突变, 由此代表这时 f_{s1} 和 f_{s3} 发生了故障.

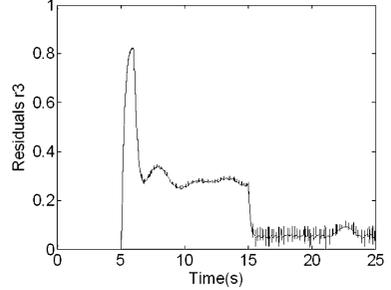


图 6 情况 2 时, 残差的波形

Fig. 6 the waveform of residual

情况 3 同时发生 f_{s1} 、 f_{s2} 和 f_{s3} 故障

图 7 - 图 9 为情况 3 时, 残差 $r_{r(1)}$ 、 $r_{r(2)}$ 和 $r_{r(3)}$ 的仿真波形. 从图中可以看出三个残差均发生了不同时刻的突变, 残差 $r_{r(1)}$ 和 $r_{r(3)}$ 在 $t = 5s$ 发生突变, 代表此时 f_{s1} 和 f_{s3} 发生了故障, 而残差 $r_{r(2)}$ 在 $t = 10s$ 发生突变, 代表 f_{s2} 在 $t = 10s$ 的时刻发生了故障.

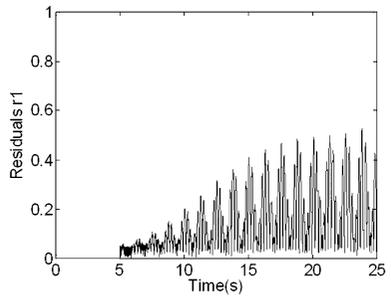


图 7 情况 3 时, 残差的波形

Fig. 7 the waveform of residual

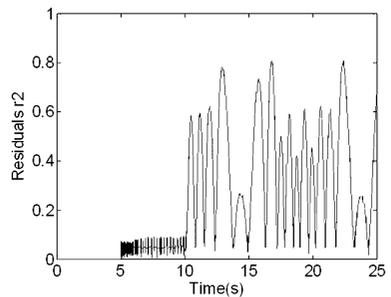


图 8 情况 3 时, 残差的波形

Fig. 8 the waveform of residual

从上述 3 种情况的实验结果可看出, 当仅发生 f_{s1} 故障, 未发生 f_{s2} 和 f_{s3} 故障时, 残差 $r_{r(2)}$ 和 $r_{r(3)}$ 均维持在零域而 $r_{r(1)}$ 发生突变; 当同时发生 f_{s1} 、 f_{s3} 故

障,未发生 f_{s2} 故障时,残差 $r_{r(2)}$ 维持在零域而残差 $r_{r(1)}$ 和 $r_{r(3)}$ 均发生突变;当同时发生 f_{s1} 、 f_{s2} 和 f_{s3} 故障时,残差 $r_{r(1)}$ 、 $r_{r(2)}$ 和 $r_{r(3)}$ 均发生突变,由多故障规则判别表1即可达到判别故障源的目的。

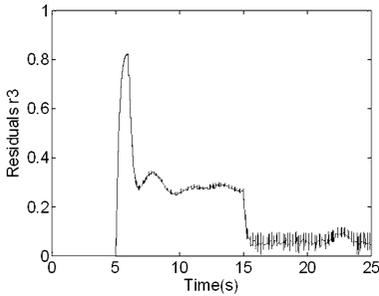


图9 情况3时,残差的波形

Fig. 9 the waveform of residual

4 结论

针对一类非线性系统,在满足一定几何条件下,提出了一种基于滑模观测器的多传感器故障诊断方法。通过定义一个辅助的状态变量,将传感器故障转化成“伪执行器”故障,不需要任何的坐标转换。通过设计一组滑模观测器来检测、隔离所有可能的传感器故障,仿真结果验证了算法的有效性。

参 考 文 献

- Ibaraki S, Suryanarayanan S, Tomizuka M. Design of Luenberger state observers using fixed-structure H_{∞} optimization and its application to fault detection in lane-keeping control of automated vehicles. *IEEE /ASME Trans. On Mechatronics*, 2005,10(1):34~42
- 周东华,叶银忠. 现代故障诊断与容错控制. 北京:清华大学出版社,2000 (Zhou D H, Ye Y Z. Modern fault diagnosis and fault-tolerant control. Bei Jing; TsingHua University Press,2000 (in Chinese))
- 张正道,胡寿松. 基于未知输入观测器的非线性时间序列故障预报. 控制与决策, 2005, 20(7): 769~777 (Zhang Z D, Hu S S. Fault prediction for nonlinear time series based on unknown input observer. *Control and Decision*, 2005,20(7):769~777 (in Chinese))
- Zhang K, Hu S S, Jing B. Sliding mode integral observers for sensor faults detection and isolation in nonlinear systems. *IEEE International Conference on Control and Automation, Guang zhou*, 2007:147~151
- 何静,邱静,张昌凡. 一种滑模观测器的多故障诊断方法. 动力学与控制学报,2009,7(1):84~91 (He J, Qiu J, Zhang C F. Multiple faults diagnosis method based on sliding mode observer. *Journal of Dynamics and Control*, 2009,7(1):84~91 (in Chinese))
- Wu Q, Saif M. An overview of robust model-based fault diagnosis for satellite systems using sliding mode and learning approaches. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Montreal, QC, Canada*, 2007:3746~3751
- Chen W, Saif M. Adaptive actuator fault detection isolation and accommodation in uncertain systems. *International Journal of Control*, 2007,80(1):45~63
- 颜秉勇,田作华,施颂椒. 基于预测观测器的时滞系统故障诊断. 控制与决策,2008,23(2):233~236 (Yan B Y, Tian Z H, Shi S J. Fault diagnosis for time-delay systems based on predictive observer. *Control and Decision*, 2008,23(2):233~236 (in Chinese))
- 安若铭,张帆,吴月忠等. 基于动态观测器的多故障诊断技术的应用研究. 航天控制, 2009, 27(4): 88~91 (An R M, Zhang F, Wu Y Z, et al. Application research of multi-fault diagnosis technology based on dynamic observer. *Aero space Control*, 2009,27(4):88~91 (in Chinese))
- 纪志成,苏晓丹,沈艳霞. 一类非线性系统的多故障检测方法研究. 系统仿真学报, 2007, 19(9): 1979~1982 (Ji Z C, Su X D, Shen Y X. Study on multiple-fault detecting method for non-linear system. *Journal of system simulation*, 2007,19(9):1979~1982 (in Chinese))
- Tan C P, Edwards C. Sliding mode observers for detection and reconstruction of sensor faults. *Automatica*, 2002,38(10):1815~1821
- Edwards C, Tan C P. Sensor fault tolerant control using sliding mode observers. *Control Engineering Practice*, 2006,14(8):897~908
- 厉小润,赵辽英,赵光宙. 参数不确定混沌系统的自适应同步. 浙江大学学报(工学版),2005,39(12):1993~1997 (Li X R, Zhao L Y, Zhao G Z. Adaptive synchronization of parameter uncertain chaotic systems. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2005,39(12):1993~1997 (in Chinese))
- 俞立. 鲁棒控制-线性矩阵不等式处理方法. 北京:清华大学出版社,2002 (Yu L. Robust control-linear matrix inequality processing method. Bei Jing; TsingHua University Press,2002 (in Chinese))

- 15 Walcott B L, Corless M J, Zak S H. Comparative study of nonlinear state observation techniques. *Int. Jour. of Control*, 1987, 45: 2109 ~ 2132
- 16 Zhang X D, Thomas Parisini, Marios M P. Sensor bias fault isolation in a class of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(3): 370 ~ 376

DIAGNOSIS OF MULTIPLE SENSOR FAULTS BASED ON SLIDING MODE OBSERVER*

Huang Yishan^{1,2} Zhang Changfan² Yan Min²

(1. Hunan CSR Times Electric Vehicle Co., Ltd, Zhuzhou 412007, China)

(2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

Abstract A multiply sensor faults detection method was proposed for a class of nonlinear system of sensor fault diagnosis problem. First, we defined a state variable to convert the sensor fault as pseudo actuators fault, and then generated the residual through the corresponding sliding – mode observer to realize the fault detection. Based on Lyapunov stability theory, a sufficient condition for observer was derived in the form of linear matrix inequality (LMI). Finally, the correctness and effectiveness of the method were verified through a single link robot simulated experiments.

Key words sliding mode observer, residuals, a single link robot, LMI, fault detection