

基于非线性未知输入观测器的航天器故障诊断

程瑶, 王日新, 徐敏强

(哈尔滨工业大学 深空探测基础研究中心, 哈尔滨 150080)

摘要:针对一类满足 Lipschitz 条件的非线性系统,设计了一组非线性未知输入观测器,并依据故障解耦的思想,产生结构化的残差集,实现非线性系统执行器的故障隔离。研究考虑了未知扰动对非线性系统的影响,并利用 Lyapunov 理论证明了所设计观测器的稳定性。最后,以三轴稳定卫星的姿态控制系统为对象,仿真验证了所提方法对各种典型执行器故障诊断的有效性。

关键词:非线性未知输入观测器; 结构化残差集; 执行器; 故障诊断; 卫星控制系统

中图分类号: V44 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2015)03-0278-05

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2015.03.015

0 引言

随着现代工业,以及航空航天领域的发展,系统的复杂性日益提高,安全性要求也越来越受到重视。过去的30年里,故障诊断技术得到了长足的发展,也出现了各种故障诊断方法,如基于模型的^[1-2]、基于信号处理的^[3]以及基于知识的^[4]。其中,基于模型的诊断方法由于应用了系统的深层次知识而受到广泛研究,如基于自适应观测器的方法^[5]、基于未知输入观测器的方法^[6]、基于滑模观测器^[7]等,但目前在此方法的研究中,对于线性系统的故障诊断问题研究得较为深入,非线性系统研究由于自身的复杂性而尚不成熟^[8],尤其是对于现代系统,往往伴随有扰动和模型不确定性的影响,使得非线性系统的故障诊断问题变得更加困难。

文献[9](2013)研究了基于模型的卫星姿控系统执行器的故障诊断问题。文献[10](2009)研究了基于降维观测器的飞控系统鲁棒诊断问题,但针对的是线性系统。文献[11](2011)研究了卫星姿态控制系统的故障诊断,考虑了非线性系统的扰动解耦,但没有解决故障分离问题。文献[12](2012)研究了基于增广观测器的非线性系统故障诊断问题,能够实现执行器故障的渐进估计,但未考虑扰动等不确定性的影响。

本文研究了一类满足 Lipschitz 条件的非线性系统,采用故障解耦的思想设计了一组诊断观测器,

产生结构化的残差,实现非线性系统执行器的故障诊断。并利用 Lyapunov 理论证明了未知输入观测器的稳定性。

对于在轨卫星,由于自身系统复杂,所处的空间环境恶劣,其姿态控制系统容易出现故障。本文以卫星姿态控制系统为仿真对象,研究了其执行器的故障诊断问题。以卡死和恒偏差两种典型故障为例,验证了所提方法的有效性。

1 问题描述

考虑如下非线性系统

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \Phi(\mathbf{x}) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{E}\mathbf{d}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{x}(t) \in R^n$ 为非线性系统的状态变量; $\mathbf{u}(t) \in R^m$ 为系统的输入向量; $\mathbf{y}(t) \in R^p$ 为系统的输出向量; $\mathbf{d}(t) \in R^q$ 为系统的未知干扰向量; \mathbf{B} 为系统输入矩阵; \mathbf{C} 为系统输出矩阵; \mathbf{E} 为干扰分布矩阵; $\Phi(\mathbf{x})$ 为系统的非线性函数项,满足如下的 Lipschitz 条件

$$\|\Phi(\mathbf{x}_1) - \Phi(\hat{\mathbf{x}}_i)\| \leq \gamma_0 \|\mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_i\| \quad (2)$$

当执行器发生故障时,系统输入向量为

$$\mathbf{u}_f(t) = \mathbf{u}(t) + \mathbf{f}(t) \quad (3)$$

其中: $\mathbf{f}(t) \in R^m$ 为执行器的故障向量函数。

$$\mathbf{f}(t) = [f_1(t) \quad f_2(t) \quad \cdots \quad f_m(t)]^T \quad (4)$$

由此,执行器故障时的非线性系统可以表达为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \Phi(x) + \mathbf{B}u(t) + B_f \mathbf{f}(t) + \mathbf{E}d(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}x(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\mathbf{B}_f = \mathbf{B}$ 是执行器故障分布矩阵, 其可进一步划分为

$$\mathbf{B}_f \triangleq [B_{f1} \quad B_{f2} \quad \cdots \quad B_{fm}] \quad (6)$$

对应于第 i 个执行器的故障模型可以设计非线性未知输入观测器 UIO- i 。即把第 i 个执行器的故障作为未知扰动, 使所设计的未知输入观测器对此故障解耦, 而对其它的执行器的故障敏感。这样, 通过所设计的 m 个非线性未知输入观测器, 可以产生一组结构化的残差集, 进而对不同的执行器故障进行有效的诊断。其诊断逻辑如下所示

$$\left. \begin{cases} \|\gamma_i\| \leq \bar{\varepsilon}_i \\ \|\gamma_j\| > \bar{\varepsilon}_j, \forall j \neq i \end{cases} \right\} \Rightarrow \text{第 } i \text{ 个执行器发生故障} \quad (7)$$

其中: $\|\gamma_i\|$ 是相应于第 i 个执行器故障而设计的非线性未知输入观测器 UIO- i 的残差评价函数; $\bar{\varepsilon}_i$ 是相应的阈值。

2 故障诊断观测器的设计

非线性系统第 i 个执行器发生故障时的动态模型如下所示

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \Phi(x) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{B}_f \mathbf{f}_i(t) + \mathbf{E}d(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}x(t) \end{cases} \quad (8)$$

基于以上的第 i 执行器故障状态空间模型(8), 可以设计具有如下形式的非线性未知输入观测器

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}_i(t) = \mathbf{F}_i \mathbf{z}_i(t) + \mathbf{T}_i \mathbf{B}u_1(t) + \mathbf{T}_i \Phi(\hat{x}_i) + \mathbf{H}_i \mathbf{y}_1(t) \\ \hat{x}_i(t) = \mathbf{z}_i(t) + \mathbf{N}_i \mathbf{y}_1(t) \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\hat{x}_i(t)$ 是状态估计向量, $\mathbf{z}_i(t)$ 是未知输入观测器的状态向量。 $\mathbf{F}_i, \mathbf{T}_i, \mathbf{H}_i, \mathbf{N}_i$ 是所要设计的具有适当维数的矩阵, 以满足 $\hat{x}_i(t)$ 渐进稳定于 $x(t)$ 。

定义状态估计误差为

$$e_i(t) = x(t) - \hat{x}_i(t) \quad (10)$$

定义输出估计误差为

$$\varepsilon_i(t) = \mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}_i(t) \quad (11)$$

如果满足如下条件

$$\begin{cases} \mathbf{T}_i = \mathbf{I} - \mathbf{N}_i \mathbf{C} \\ \mathbf{F}_i = \mathbf{K}_i \mathbf{C} \\ \mathbf{H}_i = -\mathbf{K}_i (\mathbf{I} - \mathbf{C} \mathbf{N}_i) \end{cases} \quad (12)$$

其中: \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{K}_i 为适当维数的矩阵。

则可推得状态估计误差的动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}_i(t) = \\ &(\mathbf{F}_i \mathbf{N}_i \mathbf{C} - \mathbf{H}_i \mathbf{C})x(t) - \mathbf{F}_i \hat{x}_i(t) - (\mathbf{I} - \mathbf{N}_i \mathbf{C} - \\ &\quad \mathbf{T}_i) \mathbf{B}u(t) + (\mathbf{I} - \mathbf{N}_i \mathbf{C}) \mathbf{B}_f \mathbf{f}_i(t) + (\mathbf{I} - \\ &\quad \mathbf{N}_i \mathbf{C}) \mathbf{E}d(t) = \mathbf{F}_i e_i(t) + \mathbf{T}_i [\Phi(x) - \Phi(\hat{x}_i)] + \\ &\quad \mathbf{T}_i \mathbf{B}_f \mathbf{f}_i(t) + \mathbf{T}_i \mathbf{E}d(t) \end{aligned} \quad (13)$$

这样, 一旦矩阵 \mathbf{N}_i 和 \mathbf{F}_i 被确定, 则其它矩阵可以容易的通过方程组(12)来计算得到。

为了使得残差信号对第 i 个执行器故障不敏感而对其它执行器故障敏感, 如下的约束条件需要满足

$$\mathbf{T}_i \mathbf{B}_{f_i} = 0, \text{ 且 } \mathbf{T}_i \mathbf{B}_{f_j} \neq 0, j \neq i \quad (14)$$

这样可以容易的设计 \mathbf{N}_i , 进而确定 \mathbf{T}_i 。

定理

对于给定的常数 γ_0 和 σ_i , 如果存在矩阵 \mathbf{F}_i 和对称正定矩阵 \mathbf{P}_i 满足

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \Delta + \mathbf{C}^T \mathbf{C} & \mathbf{P}_i \mathbf{T}_i \mathbf{E} \\ * & -\sigma_i^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0$$

$$\Delta = \mathbf{F}_i^T \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \mathbf{F}_i + \gamma_0^2 \mathbf{P}_i \mathbf{T}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{P}_i + \mathbf{I} \quad (15)$$

那么, 基于第 i 个执行器故障所设计的诊断观测器对相应故障鲁棒, 且具有如下性质: (1) 当不考虑未知扰动时, 状态估计误差渐进趋近于零; (2) 当考虑未知扰动的存在时, 输出误差有界, 且 $\|\varepsilon_i(t)\|$ 可以作为残差评价函数。

证明.

(1) 构造如下形式的 Lyapunov 函数

$$V(t) = e_i^T(t) \mathbf{P}_i e_i(t) \quad (16)$$

求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \dot{e}_i^T(t) \mathbf{P}_i e_i(t) + e_i^T(t) \mathbf{P}_i \dot{e}_i(t) = \\ &e_i^T(t) [\mathbf{F}_i^T \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \mathbf{F}_i] e_i(t) + 2e_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{T}_i (\Phi(x_1) - \\ &\quad \Phi(\hat{x}_i)) + 2e_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{T}_i \mathbf{E}d(t) \end{aligned} \quad (17)$$

由于 $\|\Phi(x) - \Phi(\hat{x}_i)\| \leq \gamma_0 \|x - \hat{x}_i\| = \gamma_0 \|e_i\|$

可知,

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq e_i^T(t) [\mathbf{F}_i^T \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \mathbf{F}_i] e_i(t) + \\ &\quad \gamma_0^2 e_i^T(t) \mathbf{P}_i \mathbf{T}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{P}_i e_i(t) + \\ &\quad e_i^T(t) e_i(t) + 2e_i^T(t) \mathbf{P}_i \mathbf{T}_i \mathbf{E}d(t) = \\ &e_i^T(t) [\mathbf{F}_i^T \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \mathbf{F}_i + \gamma_0^2 \mathbf{P}_i \mathbf{T}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{P}_i + \mathbf{I}] e_i(t) + \\ &\quad 2e_i^T(t) \mathbf{P}_i \mathbf{T}_i \mathbf{E}d(t) = \\ &\quad e_i^T(t) \Delta e_i(t) + 2e_i^T(t) \mathbf{P}_i \mathbf{T}_i \mathbf{E}d(t) \end{aligned} \quad (18)$$

如果未知扰动不存在, 则

$$\dot{V} \leq -\|e_i\|^2 \lambda_{\min}(-\Delta) \quad (19)$$

由 Schur 补引理, 可知是 Δ 负定矩阵。

因此, 观测器渐进稳定趋近于零, 即

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e_i(t) \rightarrow 0$

(2) 鲁棒稳定性

定义

$$J = \|\varepsilon_i(t)\|^2 - \sigma_i^2 \|\mathbf{d}(t)\|^2 - V(0) \quad (20)$$

则, 根据 L_2 范数定义推得

$$\begin{aligned} J &= \int_0^\infty [\varepsilon_i^T(t)\varepsilon_i(t) - \sigma_i^2 \mathbf{d}^T(t)\mathbf{d}(t) + \dot{V}] dt - \\ V(\infty) &< \int_0^\infty [\varepsilon_i^T(t)\varepsilon_i(t) - \sigma_i^2 \mathbf{d}^T(t)\mathbf{d}(t) + \dot{V}] dt < \\ &\int_0^\infty [e_i^T \Delta e_i + 2e_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{T}_i \mathbf{E} \mathbf{d} + e_i^T(t) \mathbf{C}^T \mathbf{C} e_i(t) - \\ &\sigma_i^2 \mathbf{d}^T(t)\mathbf{d}(t)] dt = \int_0^\infty [\xi_i^T(t) \Xi \xi_i(t)] dt \quad (21) \end{aligned}$$

其中,

$$\xi_i = \begin{bmatrix} e_i(t) \\ \mathbf{d}(t) \end{bmatrix}$$

由此可知

$$J < - \int_0^\infty [\|e_i\|^2 \lambda_{\min}(-\Xi)] dt < 0 \quad (22)$$

因此,

$$\|\varepsilon_i(t)\|^2 < \sigma_i^2 \|\mathbf{d}(t)\|^2 + V(0)$$

3 仿真分析

本部分, 以卫星姿态控制系统为例, 对其执行机构进行故障诊断的仿真研究, 以验证所提方法的有效性。首先建立卫星姿态控制系统的动力学模型, 其表达为如下状态空间的形式。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \Phi(\mathbf{x}) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_f \mathbf{f}(t) + \mathbf{E}\mathbf{d}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (23)$$

其中: $\mathbf{u}(t) = [M_x \quad M_y \quad M_z]^T$ 是执行器的控制输入; $\mathbf{y}(t) = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T$ 是陀螺的测量输出; $\mathbf{d}(t) = [T_{dx} \quad T_{dy} \quad T_{dz}]^T$ 是空间环境的未知扰动力矩; $\mathbf{f}(t) = [f_1(t) \quad f_2(t) \quad f_3(t)]^T$ 分别对应三个轴上执行器的故障函数; $\Phi(\mathbf{x})$ 是卫星姿态动力学系统的非线性部分。

$$\begin{aligned} \Phi(\mathbf{x}) &= \\ &\left[\frac{I_y - I_z}{I_x} \omega_y \omega_z \quad \frac{I_z - I_x}{I_y} \omega_z \omega_x \quad \frac{I_x - I_y}{I_z} \omega_x \omega_y \right]^T \end{aligned} \quad (24)$$

卫星运行的姿态角度一般不大, 其姿态控制系统一般都满足 Lipschitz 条件。即, $\Phi(\mathbf{x})$ 是满足 Lipschitz 条件的。

系统的输入, 输出, 扰动矩阵如下所示

$$\mathbf{B} = \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1/I_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/I_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/I_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

故障分布矩阵可划分为如下形式

$$\mathbf{B}_f = \mathbf{B} \underline{\Delta} [B_{f1}, B_{f2}, B_{f3}]$$

由此, 可以设计三个非线性未知输入观测器, 分别用于相应 X, Y, Z 轴上三个执行器的故障诊断。

仿真参数如下:

惯性主轴转动惯量

$$\begin{cases} I_x = 930 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ I_y = 800 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ I_z = 1070 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{cases}$$

扰动力矩

$$\mathbf{T}_d(t) = [A_x \sin \omega_d t \quad A_y \sin \omega_d t \quad A_z \sin \omega_d t]^T$$

其中: $A_x = 1.4 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$; $A_y = 1.5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$; $A_z = 1.6 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$, $\omega_d = 0.02 \text{ rad/s}$ 。

首先, 考虑执行器没有发生故障时, 3 个观测器的输出残差如图 1 所示。

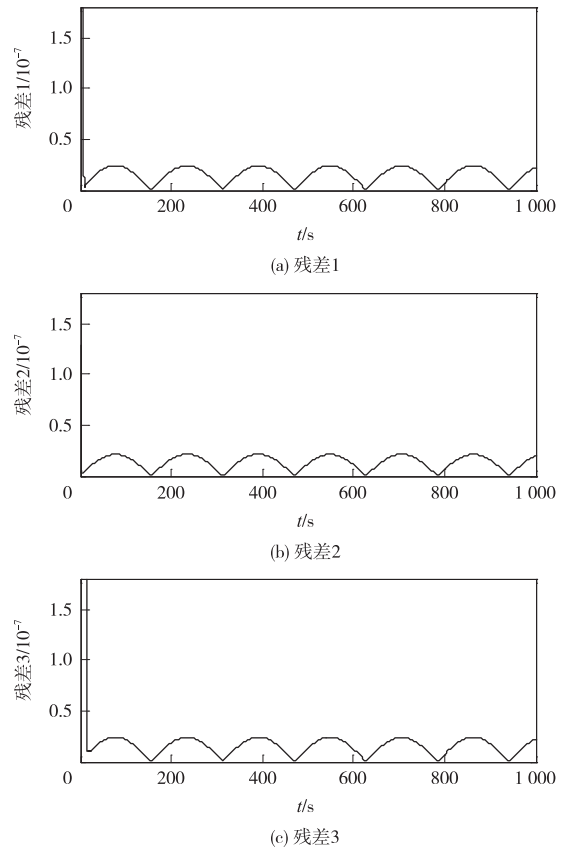


图 1 无执行器故障时的残差

Fig. 1 Residual for fault-free of actuators

可见, 3 个观测器的输出残差均在较小范围内波动, 即 3 个观测器对于未发生飞轮故障的系统, 能

够有效跟踪其状态。由于未知扰动所引起残差波动均维持在 3×10^{-8} 以下,所以可以选取各观测器的故障检测阈值 $\bar{\epsilon}_1 = \bar{\epsilon}_2 = \bar{\epsilon}_3 = 5 \times 10^{-8}$ 。从而,可得故障诊断逻辑为

$$\left. \begin{aligned} \|\gamma_i\| &\leq 5 \times 10^{-8} \\ \|\gamma_j\| &> 5 \times 10^{-8}, \forall j \neq i \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

第 i 个执行器发生故障

假设 Y 轴执行器在 $t=500$ s 时,发生恒偏差类型的故障,即执行器的输出为

$$u_{\text{true}}(t) = \begin{cases} u_{\text{cmd}}(t) & t < 500 \text{ s} \\ u_{\text{cmd}}(t) + \Delta & t \geq 500 \text{ s} \end{cases}$$

其中:增益大小 $\Delta = -1 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

仿真结果如图 2 所示。

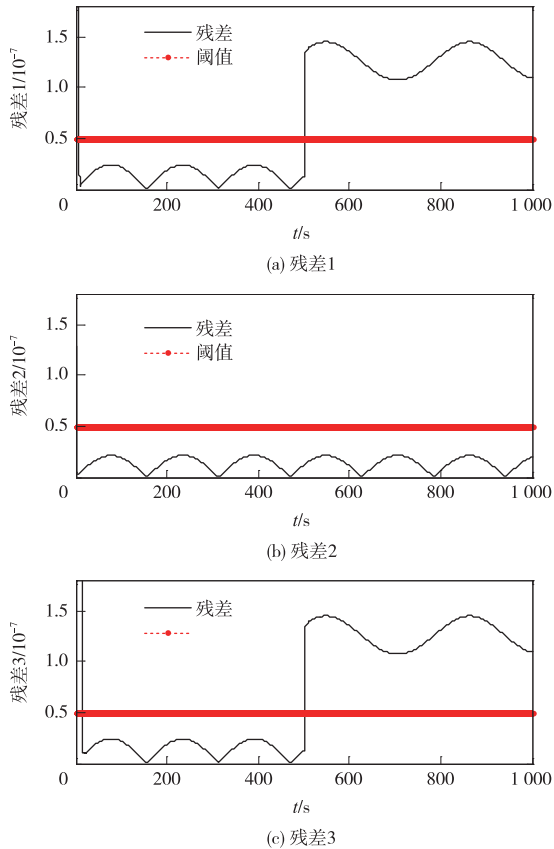


图 2 Y 轴执行器恒偏差故障的残差

Fig. 2 Residual for bias fault in Y-axis actuator

可见,残差 1 和残差 3 均超出阈值(见图中水平线),而残差 2 无明显变化。即,根据 Y 轴执行器故障而设计的观测器 2,其残差仍在阈值之下,其对 Y 轴执行器故障具有鲁棒性,不因摩擦力矩增大故障的发生而增大。反应了其对于 Y 轴执行器故障解耦的有效性,由此,可成功分离 Y 轴执行器故障。

假设 Z 轴执行器在 $t=500$ s 时,发生卡死故障,

即执行器的输出为

$$u_{\text{true}}(t) = \begin{cases} u_{\text{cmd}}(t) & t < 500 \text{ s} \\ 0 & t \geq 500 \text{ s} \end{cases}$$

仿真结果如图 3 所示。

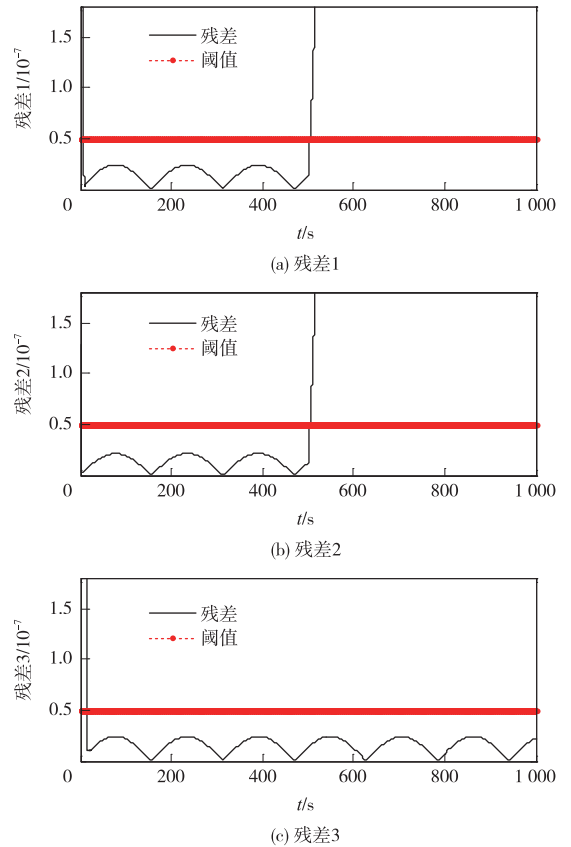


图 3 Z 轴执行器卡死故障的残差

Fig. 3 Residual for jam fault in Z-axis actuator

由图 3 可以看出,Z 轴执行器发生的卡死故障对于其它两轴所设计的观测器均产生影响,使得输出残差 1 和 2 超出阈值(图中水平线)。而由于其对 Z 轴故障解耦的缘故,残差 3 仍在阈值之下。可见,所设计的观测器组可以有效完成执行器的故障诊断。

4 结论

1) 通过设计一组诊断观测器,产生结构化的残差,从而实现了一类满足 Lipschitz 条件的非线性系统的执行器故障诊断。

2) 诊断观测器的设计采用了非线性未知输入观测器的形式,并证明了其在扰动存在条件下的稳定性。

3) 以卫星姿态控制系统为例,仿真分析了所提方法对各轴执行器故障诊断的有效性。

参 考 文 献

- [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]. *Int J of General Systems*, 2007, 36(4):375-398.
- [3] 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.
- [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] Xu A, Zhang Q. Nonlinear system fault diagnosis based on adaptive estimation [J]. *Automatica*, 2004, 40(7):1181-1193.
- [6] Demetriou M A. 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.
- [7] Edwards C, Spurgeon S K, Patton R J. Sliding mode observers for fault detection and isolation[J]. *Automatica*, 2000, 36(4):541-553.
- [8] Wang Z, Zhang H. Robust fault diagnosis for a class of nonlinear systems [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2006, 4(3):245-251.
- [9] Gao C, Zhao Q, Duan G. Robust actuator fault diagnosis scheme for satellite attitude control systems[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2013(9):2560-2580.
- [10] 郭玉英, 姜斌. 基于降维 UIO 的飞控系统鲁棒故障诊断[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013(9):2560-2580. [Guo Y Y, Jiang B. Reduced-order UIO based robust fault diagnosis for flight control systems[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013(9):2560-2580.]
- [11] 贾庆贤, 张迎春, 李化义, 等. 卫星姿态控制系统鲁棒故障诊断方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(3):19-22. [Jia Q X, Zhang Y C, Li H Y, et al. NUIO/LMI based robust fault diagnosis for satellite attitude control system [J]. *Journal of Harbin University of Technology*, 2011, 43(3):19-22.]
- [12] 王振华, 沈毅, 张筱磊. 基于增广观测器的非线性系统执行器故障诊断[J]. *宇航学报*, 2012, 33(12):1742-1746. [Wang Z H, Shen Y, Zhang X L. Augmented observer-based actuator fault diagnosis for nonlinear systems [J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(12):1742-1746.]

作者简介:

程瑶(1987—),男,博士研究生,主要研究方向:航天器故障诊断。

通讯地址:哈尔滨市南岗区一匡街2号哈尔滨工业大学科学园3030信箱(150080)

电话:(0451)86418320-311

E-mail:chengyaohit@126.com

Spacecraft Actuator Fault Diagnosis Based on Nonlinear Unknown Input Observer

CHENG Yao, WANG Rixin, XU Minqiang

(Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In this paper, we study the fault diagnosis of spacecraft actuators for a class of nonlinear system with Lipschitz constraints. To isolate the faulty actuator from others, we propose a bank of isolation observers to generate the structured residuals. Each isolation observer is designed based on nonlinear unknown input idea of decoupling the actuator fault as disturbance. The robust stability of the observer is analyzed with the Lyapunov theory. Finally, the proposed approach is applied to three-axis stabilized satellite attitude control system, and the effectiveness of the approach is verified for typical faults diagnosis of the satellite actuators.

Key words: nonlinear unknown input observer; structured residual; actuator; fault diagnosis; satellite attitude control system

[责任编辑:宋宏]