

一种非线性系统被控对象故障诊断方法

黄俊杰^{1,2}, 蒋 蓁¹, 徐新立¹, 曾炳寿¹

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 控制系统中的传感器、执行器和被控对象的故障检测与诊断往往是把执行器和被控对象视为一个整体来研究, 这不利于故障的决策与处理. 对此, 设计了非线性系统故障诊断的滑模观测器, 提出一种诊断被控对象故障的方法, 即对非线性系统和执行器同时进行观测, 根据两观测器残差的变化情况判断出非线性系统中传感器、执行器和被控对象故障. 最后以单输入单输出非线性系统为例进行仿真, 验证了该方法的有效性.

关键词: 非线性系统; 滑模观测器; 被控对象; 故障诊断; 仿真

中图分类号: TP271

文献标志码: A

Method on component fault diagnosis for nonlinear systems

HUANG Jun-jie^{1,2}, JIANG Zhen¹, XU Xin-li¹, ZENG Bing-shou¹

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China. Correspondent: JIANG Zhen, E-mail: zhjiang@shu.edu.cn)

Abstract: The actuator and component fault is always regarded as a whole for the fault detection and diagnosis in control systems, which does not favor the decision and processing. The sliding mode observer is designed for the nonlinear fault diagnosis and the method is proposed for the fault diagnosis of the component. The whole nonlinear system and the actuator system are simultaneously observed. The faults of the sensor, the actuator and the component are diagnosed according to the residual value changes of the two observers. Finally, the single-input single-output nonlinear system is simulated, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: nonlinear systems; sliding mode observer; components; fault diagnosis; simulation

0 引言

随着计算机技术和控制理论的发展, 机电一体化设备得到了广泛应用, 控制系统和被控对象成为这类设备的主要组成结构. 由于其非线性和强耦合性等特点使得系统运行的可靠度和安全性下降, 非线性系统的故障检测方法和技术一直是该领域研究的热点.

故障检测与诊断方法主要有基于解析模型的故障诊断方法^[1-2], 基于信号处理的方法和基于知识的智能故障诊断方法等^[3]. 被控对象元部件(特别是机械转子系统)^[4-5]故障检测与诊断大多是依靠测量元件获得信号, 然后通过信号变换获取其相关函数、谱密度和熵等信息并判断是否发生故障以及故障的严重程度, 进而采取相应的措施. 目前控制系统中传感器和执行器的故障诊断^[6-11]常用方法有观测器方法、滤波器方法、参数估计及辨识等. 现有的文献几乎都把

执行器故障和被控对象元部件故障视为一个整体进行研究, 而没有从系统非线性数学模型的角度直接或间接地诊断被控对象元部件故障.

由于滑模观测器对非线性系统外界干扰和参数摄动具有鲁棒性, 在电机控制及故障诊断、机器人控制、故障诊断与容错控制等方面^[12-16]得到了广泛应用. 本文针对整个非线性系统和执行器系统设计两个滑模观测器, 通过两观测器残差值的变化情况可判断出传感器故障、执行器故障和被控对象元部件故障, 最后对单输入单输出非线性系统进行仿真, 验证了该方法的有效性. 该方法从非线性数学模型角度实现了被控对象故障的诊断, 为控制系统的重构创造了条件.

1 滑模观测器

当存在传感器故障、执行器故障和被控对象元部件故障时, 非线性系统的数学模型可表示为

收稿日期: 2013-02-26; 修回日期: 2013-04-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61175092).

作者简介: 黄俊杰(1978—), 女, 副教授, 博士生, 从事故障诊断与容错控制、机器人技术的研究; 蒋蓁(1961—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事微机电系统及应用等研究.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + f(x, u, t) + Bu(t) + Ed(x, u, t) + \\ &\quad H(f_a + f_c), \\ y(t) &= Cx(t) + Sf_s. \end{aligned} \quad (1)$$

对于控制系统的故障诊断分析,常常把执行器故障视为加性故障,因此执行器故障的非线性模型可表示为

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Wz(t) + g(z, u, t) + Uu(t) + Vm(z, u, t), \\ n(t) &= Gz(t) + Jf_a. \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $(x(t), z(t)) \in R^n$ 为不可测状态变量; $u(t) \in R^l$ 为可测输入; $y(t) \in R^p, n(t) \in R^q$ 为可测输出; $f(x, u, t), g(z, u, t)$ 为满足 Lipschitz 条件的非线性函数; $d(x, u, t), m(z, u, t)$ 为未知干扰和系统不确定误差; f_c, f_a, f_s 分别为被控对象故障、执行器故障和传感器故障; $H(x, u, t), J(z, u, t), S(x, u, t)$ 为相应已知故障系数矩阵; A, B, E, C, W, U, G 为适当维数的已知矩阵。

为便于分析,作以下假设^[12,17-18]:

假设 1 若系统 (A, C) 可观,则存在 $L \in R^{n \times p}$ 使得 $A-LC$ 的特征值位于虚轴的左半平面,存在对称正定实矩阵 $P \in R^{n \times n}, Q \in R^{n \times n}$, 满足 Lyapunov 方程 $(A-LC)^T P + P(A-LC) = -Q$.

假设 2 若非线性函数 $f(x, u, t)$ 满足 Lipschitz 条件,则有 $\|f(x_1, u, t) - f(x_2, u, t)\| \leq \gamma \|x_1 - x_2\|$ ($\gamma > 0$) 成立。

假设 3 存在 $M \in R^{m \times p}$, 使得 $PE = C^T M^T$.

假设 4 存在一个有界函数 ρ , 使得 $\|d(x, u, t)\| \leq \rho$.

构造如下观测器 1:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + f(\hat{x}, u, t) + Bu(t) + \\ &\quad L(y - \hat{y}) + Ev, \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t). \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$v = \begin{cases} \rho \frac{Me_y}{\|Me_y\|}, & e_y \neq 0; \\ 0, & e_y = 0; \end{cases}$$

\hat{x}, \hat{y} 为 x, y 的观测值。

$e = x(t) - \hat{x}(t)$ 为状态偏差方程, $e_y = y(t) - \hat{y}(t)$ 为观测器 1 的残差, 而

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{\hat{x}} = (A-LC)e + f(x, u, t) - \\ &\quad f(\hat{x}, u, t) + E(d(x, u, t) - v) + H(f_a + f_c), \\ r_1 &= e_y = y - \hat{y} = Ce + Sf_s. \end{aligned} \quad (4)$$

基于假设 1~假设 4, 当 $\lambda_{\min}(Q) - 2\gamma\lambda_{\max}(P) \geq 0$ 时, 在无故障情况下观测器 1 的偏差方程以指数形式收敛于零^[18], 因此对于干扰具有鲁棒性。同理, 下列观测器 2 对于干扰同样具有鲁棒性:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}(t) &= Z\hat{z}(t) + g(\hat{z}, u, t) + Uu(t) + \\ &\quad K(n - \hat{n}) + Vw, \\ \hat{n}(t) &= G\hat{z}(t). \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$w = \begin{cases} \rho \frac{Fe_n}{\|Fe_n\|}, & e_n \neq 0; \\ 0, & e_n = 0; \end{cases}$$

\hat{z}, \hat{n} 为 z, n 的观测值。

$e'_z = z(t) - \hat{z}(t)$ 为状态偏差方程, $e'_n = n(t) - \hat{n}(t)$ 为观测器 1 的残差, 而

$$\begin{aligned} \dot{e}' &= \dot{z} - \dot{\hat{z}} = \\ &\quad (Z - KG)e' + g(z, u, t) - \\ &\quad g(\hat{z}, u, t) + V(m(z, u, t) - w), \\ r_2 &= e'_n = n - \hat{n} = Ge' + Jf_a. \end{aligned} \quad (6)$$

2 故障诊断方法与决策

非线性系统故障诊断原理如图 1 所示。

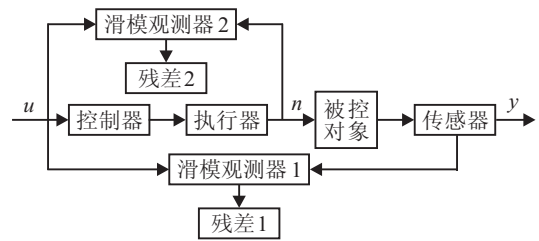


图 1 故障诊断原理框图

假设非线性系统中不会同时出现两种以上的故障,则具体诊断决策如下。

Step 1: 若残差 r_1 在故障时刻偏离零值出现跳变,则非线性系统出现传感器故障,即 $f_s \neq 0$;

Step 2: 若残差 r_1 没有立刻跳变,只有当故障信号大到足以破坏滑模条件时才会出现偏离零值,则可根据滑模条件来判断是否出现了执行器或被控对象故障,即 $f_c \neq 0$ 或 $f_a \neq 0$;

Step 3: 执行器系统是否出现故障由残差 r_2 决定,若 $r_2 \neq 0$,则认为执行器出现故障,即 $f_a \neq 0$;

Step 4: 若观测器 2 的残差 $r_2 = 0$,残差 r_1 满足 Step 2, 则能诊断出被控对象出现故障,即 $f_c \neq 0$ 。

3 实例与仿真

观测器 1 各参数值分别为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B = [1 \ 1]^T, C = [1 \ 0],$$

$$f(x, u, t) = [0.05e^{-|x_2|} \cos x_1 \ 0]^T,$$

$$E = [1 \ 1]^T, H = [1 \ 1]^T,$$

$$S = 1, d(u, x, t) = 5 \cos(2.5x_2).$$

由于 (A, C) 可观,观测器的极点配置^[19]在 $(-2,$

-1), 选取

$$M = 1, P = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 8 & -3 \\ -3 & 2 \end{bmatrix},$$

系统和观测器的初值分别为 $x(0) = [0 \ 0]^T, \hat{x}(0) = [0.5 \ 0.5]^T, \rho = 5, u = 0.3(t)$.

观测器2中各参数值分别为

$$W = \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, U = [2 \ 1]^T, G = [0 \ 1],$$

$$g(z, u, t) = 0.02[e^{-|z_1|} \cos z_2 \ \sin(z_1 + z_2)]^T,$$

$$V = [3 \ -1]^T, J = 1, m(u, z, t) = 0.05 \cos(2.5t).$$

由于 (W, G) 可观, 极点配置在 $(-1, -2)$, 选取 $F = 1, P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.667 \\ 0.667 & 1.583 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 系统和观测器的初值分别为 $z(0) = [0 \ 0]^T, \hat{z}(0) = [0.5 \ 0.5]^T, \rho = 0.05, u = 0.3(t)$.

1) 无故障时, 观测器1和观测器2的残差值的仿真结果^[20]如图2和图3所示.

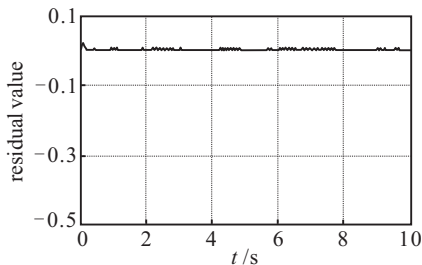


图2 无故障时观测器1的残差

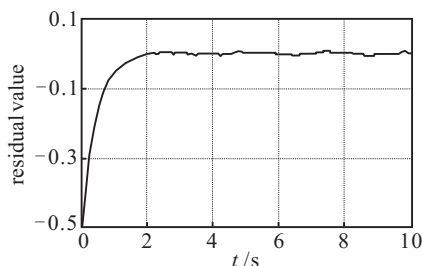


图3 无故障时观测器2的残差

2) 传感器出现故障, 即

$$f_s = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 3; \\ 4 \sin t, & t > 3. \end{cases}$$

观测器1的残差仿真结果如图4所示.

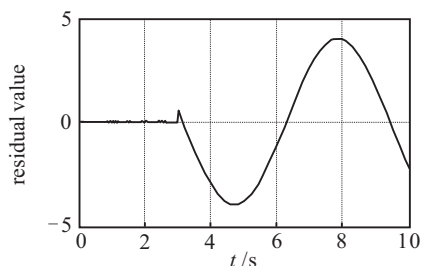


图4 传感器故障时观测器1的残差

3) 执行器出现故障, 即

$$f_a = \begin{cases} 0.04 \cos t, & 0 \leq t \leq 4; \\ 4 \sin t, & t > 4. \end{cases}$$

观测器1和观测器2的残差仿真结果如图5和图6所示.

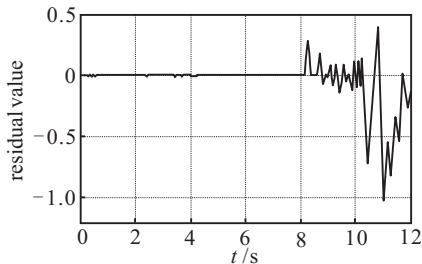


图5 执行器故障时观测器1的残差

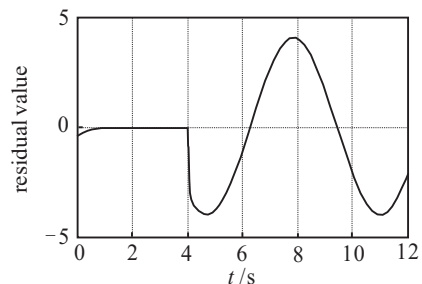


图6 执行器故障时观测器2的残差

4) 被控对象故障, 即

$$f_c = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 4; \\ 8 \sin t + 10, & t > 4. \end{cases}$$

观测器1的残差仿真结果如图7所示.

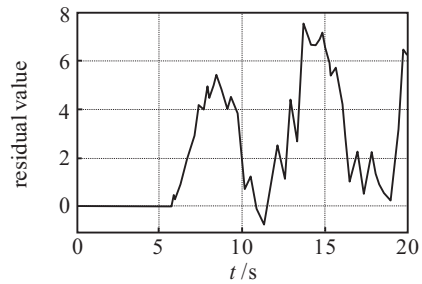


图7 被控对象故障时观测器1的残差

由图2~图7可知: 系统无故障时, 观测器1和观测器2对干扰均具有鲁棒性, 其残差几乎都为零; 当出现传感器故障时, 在故障发生时刻 ($t = 3$) 观测器2的残差发生了突变; 当执行器出现故障时, 观测器1的残差在故障时刻 ($t = 4$) 滞后一段时间发生偏离, 同时观测器2的残差也发生了改变; 当被控对象出现故障时, 观测器1的残差在故障发生时刻 ($t = 4$) 并未发生改变而是滞后了一段时间, 此时观测器2的残差并不会发生改变.

4 结 论

1) 本文设计了一类用于非线性系统故障诊断的滑模观测器, 该观测器对系统的干扰和不确定性具有

鲁棒性;

2) 提出了一种诊断被控对象元部件故障的方法, 用滑模观测器对非线性系统和执行器系统同时进行观测, 根据观测器残差的变化情况可依次判断出非线性系统中传感器故障、执行器故障和被控对象元部件故障, 该方法不能诊断同时发生两种以上的故障;

3) 通过仿真验证了该方法的有效性, 该方法从非线性数学模型角度实现了被控对象故障的诊断, 为控制系统的重构创造了条件。

参考文献(References)

- [1] József Bokor, Zoltán Szabó. Fault detection and isolation in nonlinear systems[J]. *Annual Reviews in Control*, 2009, 33(2): 113-123.
- [2] 贾庆贤, 张迎春, 管宇, 等. 基于解析模型的非线性系统故障诊断方法综述[J]. *信息与控制*, 2012, 41(3): 356-364.
(Jia Q X, Zhang Y C, Guan Y, et al. Fault diagnosis of nonlinear systems based on analytical models: A survey[J]. *Information and Control*, 2012, 41(3): 356-364.)
- [3] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 6.
(Zhou D H, Ye Y Z. *Modern fault diagnosis and fault-tolerant control*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 6.)
- [4] Frank P M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: A survey and some new results[J]. *Automatica*, 1990, 26(3): 459-474.
- [5] 钟秉林, 黄仁. 机械故障诊断学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 1-131.
(Zhong B L, Huang R. *Machine fault diagnosis*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007: 1-131.)
- [6] Chen W, Saif M. Adaptive actuator fault detection, isolation and accommodation(FDIA) in uncertain systems[J]. *Int J of Control*, 2007, 80(1): 45-63.
- [7] Heredia G, Ollero A, Bejar M, et al. Sensor and actuator fault detection in small autonomous helicopters[J]. *Mechatronics*, 2008, 18(2): 90-99.
- [8] Zhang Changfan, Liu Xinzhi, He Jing. Robust sensor fault reconstruction for nonlinear systems using observers[J]. *Int J of Bifurcation and Chaos*, 2012, 22(2): 1250031-1250037.
- [9] Sunan Huang, Kok Kiong Tan, Tong Heng Lee. Fault diagnosis and fault-tolerant control in linear drives using the Kalman filter[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronic*, 2012, 59(11): 4285-4292.
- [10] Chen W, Saif M. Observer-based strategies for actuator fault detection, isolation and estimation for certain class of uncertain nonlinear systems[J]. *IET Control Theory Application*, 2007, 1(6): 1672-1680.
- [11] Aditya Tulsyan, Biao Huang, Bhushan Gopaluni R, et al. On simultaneous on-line state and parameter estimation in nonlinear state-space models[J]. *J of Process Control*, 2013, 23(4): 516-526.
- [12] Edwards C, Spurgeon S, Patton R. Sliding mode observers for fault detection[J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 541-553.
- [13] Xing-Gang Yan, Christopher Edwards. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding mode observer[J]. *Automatica*, 2007, 43(9): 1605-1614.
- [14] Tan C, Edwards C. Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor faults[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2003, 38(10): 443-463.
- [15] Mien Van, Hee-Jun Kang, Young-Soo Suh, et al. A robust fault diagnosis and accommodation scheme for robot manipulators[J]. *Int J of Control, Automation, and Systems*, 2013, 11(2): 377-388.
- [16] Parisa Doostdar, Jafar Keighobadi. Design and implementation of SMO for a nonlinear MIMO AHRS[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 32: 94-115.
- [17] 朱芳来, 岑峰, 董学平. 一种基于全维和降维观测器的故障检测和重构方法[J]. *控制与决策*, 2011, 26(2): 258-264.
(Zhu F L, Cen F, Dong X P. A kind of fault detection and fault reconstruction based on full-order and reduced-order observers[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(2): 258-264.)
- [18] 何静. 基于观测器的非线性系统鲁棒故障检测与重构方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机械工程与自动化学院, 2009.
(He J. *On observer-based robust fault detection and reconstruction for nonlinear systems*[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2009.)
- [19] 张嗣瀛, 高立群. 现代控制理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 191-196.
(Zhang S Y, Gao L Q. *Modern control theory*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 191-196.)
- [20] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 171-267.
(Xue D Y, Chen Y Q. *System simulation technology and application based on Matlab/Simulink*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 171-267.)

(责任编辑: 李君玲)