

文章编号: 1001- 2486(2009) 02- 0112- 04

一种基于滑模变结构观测器的故障检测方法*

何 静, 邱 静

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 提出一种基于滑模变结构观测器的残差生成及故障检测方法。利用滑模变结构所具有的对未知输入扰动的不变性, 移除外界扰动对残差的影响, 使残差只对故障信号敏感, 从而提高故障检测的准确性, 较好地解决基于状态估计的故障检测方法中检测鲁棒性与灵敏度之间的矛盾。仿真验证结果表明了该故障检测方法有较高的检测鲁棒性, 同时对小幅值故障较为灵敏。

关键词: 故障检测; 残差; 观测器; 滑模变结构

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

A Fault Detection Approach Based on Sliding Mode Observers

HE Jing, QIU Jing

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to achieve an optimal trade-off between the robustness against unknown inputs and the fault detectability, an observer-based residue generation and fault detection method applying sliding mode observer is presented in this paper. Taking advantage of the essential feature of sliding mode variable structure technology, being completely insensitive to unknown input disturbances, the generated residue of the designed fault detection system is not affected by the unknown input, but still keeps high sensitivity to the fault signal. Simulation results show the effectiveness of the proposed approach.

Key words: fault detection; residue; observer; sliding mode variable structure

基于状态估计的残差生成与辨识技术是系统故障检测与诊断领域的重要方法之一。将系统输出的实际测量值与通过状态观测器获得的估计值作比较生成残差信号, 在无故障情况下, 理想的残差信号应很小或是趋近于零, 而当系统中执行器、传感器或其他元件发生故障时, 残差会出现一个明显的变化, 对此变化人为给定一个阈值, 即可判定故障的产生。实际系统中的残差信号受到系统建模误差、参数摄动以及外界噪声、干扰等未知输入的影响较大, 使得阈值的选取较为困难, 导致系统故障漏报率或误报率增加^[1-4]。目前状态估计方法的研究热点在于如何解决故障检测系统中鲁棒性与灵敏度这对矛盾, 即使系统对于未知输入有较强的鲁棒性, 而对于早期故障或小故障有较高的灵敏度。相关的研究成果如广义似然比、自适应非线性观测器以及卡曼滤波器等方法从不同的角度提出了解决的办法^[3-5]。滑模变结构控制因其特有的滑模运动, 使得当建模误差、参数变化或是干扰等不确定因素满足“匹配条件”时, 系统对这些不确定因素具有比鲁棒性更强的不变性^[6]。

1 问题描述

考虑以下非线性系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + f(x, u, t) + E(y, u)f_a + Dd(x, u, t) + Bu(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Gf_s \quad (2)$$

式中, $x(t) \in R^n$ 为不可测状态变量, $u(t) \in R^m$ 、 $y(t) \in R^p$ 分别为可测输入及输出, $f(x, u, t)$ 为满足 Lipschitz 条件的非线性函数, $d(x, u, t)$ 为系统建模误差和不确定性的扰动, 即未知输入扰动, f_s 、 f_a 分别为未知传感器故障及执行器故障, $E(y, u)$ 、 G 为相应已知故障系数矩阵, A 、 B 、 C 、 D 为适当维数的已知矩阵。提出以下假设:

* 收稿日期: 2008- 09- 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60774069); 湖南省自然科学基金资助项目(07JJ3118&06JJ2064)

作者简介: 何静(1971-), 女, 博士生。

假设 1: (A, C) 是可观测矩阵对, 那么存在矩阵 $L \in R^{n \times p}$, 使 $A_0 = A - LC$ 为稳定矩阵。

假设 2: 存在正定对称矩阵 $Q \in R^{n \times n}$ 、 $P \in R^{n \times n}$, 满足 Lyapunov 方程 $A_0^T P + PA_0 = -Q$ 。

假设 3: 存在正的 Lipschitz 常数 γ , 使得 $\|f(x_1, u, t) - f(x_2, u, t)\| \leq \gamma \|x_1 - x_2\|$ 。

假设 4: $PD = C^T F^T$, 式中 F 为使该等式成立的待定矩阵。

假设 5: 未知输入扰动 $d(x, u, t)$ 为有界函数, 即存在正的 ρ , 使得 $\|d(x, u, t)\| \leq \rho$ 。 ρ 为常数或是时间 t 的函数。

对该系统的设计目标为: 在存在未知输入扰动的情况下, 利用可测的输入与输出, 对传感器故障和执行器故障分别进行检测。

2 状态观测器设计

式(1)中若 $f(x, u, t)$ 和 f_a 均为零, 则成为一个具有未知输入扰动的线性系统。Walcott 和 Zak 针对此线性系统提出了 Walcott-Zak 观测器设计方法^[7]。本文以该方法为基础, 针对式(1)所描述的非线性函数构造观测器。

定义 状态误差 $e = \hat{x} - x$, 输出误差 $e_y = \hat{y} - y$ 。

构造观测器

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

式中上标“ $\hat{\cdot}$ ”代表所对应变量的观测值。 v 为滑模变结构输入信号, 其表达式为

$$v = \begin{cases} -\rho \frac{Fe_y}{\|Fe_y\|} & \text{if } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{if } e_y = 0 \end{cases} \quad (5)$$

状态误差动态方程为

$$\dot{e} \geq (A - LC)e + f(\hat{x}, u, t) - f(x, u, t) + D(v - d(x, u, t)) - E(y, u)f_a + LGf_s \quad (6)$$

在无故障情况下, $f_a = f_s = 0$, 相应状态误差动态方程为

$$\dot{e} \geq A_0 e + f(\hat{x}, u, t) - f(x, u, t) + D(v - d(x, u, t)) \quad (7)$$

定理 考虑式(1)、(2)所示非线性系统, 在满足假设 1~5 的前提下, 对于任意初始条件 $x_i(0)$, 若 γ

$\leq \frac{1}{2} \frac{\lambda_{\min}(Q)}{\lambda_{\max}(P)}$, 则系统状态误差动态方程(7)按指数规律趋向于零。

证明 选取如下正定函数作为 Lyapunov 函数

$$V = e^T P e \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -e^T Q e + 2\|e\| \cdot \|P\| \cdot \|f(\hat{x}, u, t) - f(x, u, t)\| + 2(FCe)^T (v - d(x, u, t)) \\ &\leq -(\lambda_{\min}(Q) - 2\gamma\|P\|)\|e\|^2 - 2\|Fe_y\|(\rho - \|d(x, u, t)\|) \end{aligned} \quad (9)$$

由假设 5 及 $\gamma \leq \frac{1}{2} \frac{\lambda_{\min}(Q)}{\lambda_{\max}(P)}$, 可得

$$\dot{V} \leq -(\lambda_{\min}(Q) - 2\gamma\lambda_{\max}(P))\|e\|^2 = -\xi\|e\|^2 \leq 0$$

式中 $\xi = (\lambda_{\min}(Q) - 2\gamma\lambda_{\max}(P)) > 0$ 。

根据 Lyapunov 稳定性原理, 状态误差动态方程(7)按指数规律趋向于零, 证毕。

说明 1 当未知输入扰动 $d(x, u, t)$ 为有界函数时, 滑模变结构观测器在不连续性非线性 v 的作用下, 将产生一种特殊的滑模运动方式, 因而在滑模面上运动时, 系统对这些未知输入扰动具有鲁棒性。若未知输入扰动满足“匹配条件”, 则滑模面上运动对这些未知输入扰动具有比鲁棒性更强的不变性^[6]。

说明 2 定理中 $\gamma \leq \frac{1}{2} \frac{\lambda_{\min}(Q)}{\lambda_{\max}(P)}$ 条件即为 Thau 观测器条件^[8], 因此式(3)、(4)所示观测器实际上是由 Thau 观测器和 Walcott-Zak 观测器组合构成的。前者用于抑制非线性部分对系统影响, 后者则用于克服不确定部分对系统影响。为了减少抖动并消除其带来的高频干扰, 可用方程(10)所示饱和函数代替(5)式中的符号函数^[9]。

$$v = -\rho \frac{Fe_y}{\|Fe_y\|_+ \delta} \quad (10)$$

式中, δ 为一取值较小的标量。

在上述滑模变结构观测器的基础上提出的残差生成及故障检测方法原理如下:

选取输出误差 e_y 作为残差信号, 即

$$r(t) = Ce - Gf_s(x, u, t) \quad (11)$$

(1) 无故障情况下, 即 $f_a = f_s = 0$

尽管存在未知输入扰动 $d(x, u, t)$, 但由上述定理可知残差为零, 即 $r(t) = 0$ 。

(2) 发生传感器故障, 即 $f_a = 0, f_s \neq 0$

由式(11)可看出, 故障发生瞬间, 残差将从零值跳变到 Gf_s 。此后, 若故障信号大到足以破坏系统的滑模条件, 则残差会继续增大; 否则, 系统滑模条件仍满足, 经过有限时间的过渡后, 残差会重新回到零值。因此, 传感器故障的发生可由残差是否偏离零值来判别。

(3) 发生执行器故障, 即 $f_a \neq 0, f_s = 0$

与传感器故障的判别不同, 只有当执行器故障信号大到足以破坏系统滑模条件时, 残差才会偏离零值; 否则, 系统滑模条件仍满足, 残差保持零值不变。因此, 执行器故障的发生可由滑模条件是否被破坏来判别。

因此, 为提高该故障检测系统的整体可靠性, 设计滑模观测器时, 须选择相应参数以确保发生故障后滑模条件被破坏。即当发生故障时应令假设 5 不成立, 即式(5)中的 ρ 取 $d(x, u, t)$ 的上界值。

3 应用验证

本文中通过一个实际的三相感应电动机系统仿真应用实例来说明所设计方法的有效性。以该系统为对象设计了传感器故障检测方案, 针对两种不同类型的传感器故障进行了仿真验证。鼠笼式异步电动机由于转子结构简单, 价格低廉, 工作可靠, 在实际中应用最为广泛。当电机工作环境恶劣、工作时间长且启动频繁时, 容易出现各种故障。当发生传感器故障时, 传感器不能准确获取被测量信息, 则对象变量的测量值与其实际值之间存在差别, 从而影响到对系统的准确监测与控制。相对来说, 传感器可能出现的故障形式通常有: 跳变故障, 即输出信息在某个瞬时发生跳变; 渐变故障, 即输出信息逐渐偏离实际值; 完全失效故障, 即输出信息长时间保持一固定值不变。本案例中选择对三相异步电动机的电流传感器故障进行检测。限于篇幅, 只对跳变故障形式进行仿真。三相感应电动机 Park 数学模型^[10]根据 $d-q$ 坐标的不同取法, 可得不同情况下的状态方程。本例中采用定子轴系 ($\theta_s = 0, \theta_r = -p\Omega$), 并选取状态变量为

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T = [\Phi_d \quad \Phi_q \quad i_{sd} \quad i_{sq}]^T$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \beta(Mx_3 - x_1) - p\Omega x_2 \\ \dot{x}_2 &= \beta(Mx_4 - x_2) + p\Omega x_1 \\ \dot{x}_3 &= \gamma x_3 + \delta(\beta x_1 + p\Omega x_2) + \frac{1}{L_s} v_{sd} \\ \dot{x}_4 &= \gamma x_4 + \delta(\beta x_2 - p\Omega x_1) + \frac{1}{L_s} v_{sq} \end{aligned} \quad (12)$$

输出方程为

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \quad (13)$$

式中 θ_s 代表定子 (a, b, c) 和定子 (d, q) 之间的转角, θ_r 代表转子 (a, b, c) 和转子 (d, q) 之间的转角, M 代表互感, p 代表极对数, Ω 为电机角速度, Φ_d, Φ_q 分别代表转子 d 轴和 q 轴磁通, v_{sd}, v_{sq} 分别代表 d, q 轴定子电压, i_{sd}, i_{sq} 分别代表 d, q 轴定子电流, R_s, L_s 分别代表定子电阻和电感, R_r, L_r 分别代表转子电阻和电感, $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$, $\gamma = -\frac{1}{\sigma}(\alpha + (1 - \sigma)\beta)$, $\beta = \frac{R_r}{L_r}$, $\alpha = \frac{R_s}{L_s}$, $\delta = \frac{pM}{L_r L_s \sigma}$

在式(1)、(2)所示系统中若只考虑含有未知输入扰动及传感器故障,则电机模型为

$$\dot{x} \geq Ax + Bu + Dd \quad y = Cx + Gf_s \quad (14)$$

选取电机参数为 $\Omega = 500\text{r/min}$, $R_s = 10\Omega$, $L_s = 0.38\text{H}$, $R_r = 3.5\Omega$, $L_r = 0.3\text{H}$, $p = 2$, $M = 0.3\text{H}$, $D = [1.0000 \quad -0.8980 \quad -45.0000 \quad 41.1905]^T$, $G = [1 \quad \mathbf{0}]^T$ 。假设系统未知输入扰动 d 为 $[-2, 2]$ 的随机噪声, 故选滑模参数为 $\rho = 2$, $\delta = 0.01$ 。选取残差信号为 $r = \hat{y}_1 - y_1$ 。

1) 无故障情况

图1为无故障情况下,残差 r 的波形图。为了进一步说明滑模观测器的作用,在 $t = 1\text{s}$ 时才加入观测器中的滑模变结构信号 v 。由图1可见,由于在系统中施加了随机噪声以模拟系统未知输入扰动信号,当 $t < 1\text{s}$ 时,残差较大,故障检测阈值受此影响需选取较大的值,从而降低了对小故障的检测灵敏度。而当 $t > 1\text{s}$ 时,由于滑模项 v 投入,扰动信号的影响被移除,残差近似为零,有利于检测幅值较小的故障。

2) 发生故障情况,设传感器故障 $f_s(t)$ 为如下跳变形式

$$f_{s1}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0.5\text{s} \\ 0.5 & t \geq 0.5\text{s} \end{cases} \quad (15)$$

图2为此故障情况下残差 r 的波形图。图中可见,由于滑模观测信号切断了未知输入扰动对系统残差的影响,使残差对故障信号更加敏感。本文提出的残差生成方法对于系统在 $t = 0.5\text{s}$ 发生的不同类型的故障,甚至是信号幅值较小的故障,均可有效地检测。

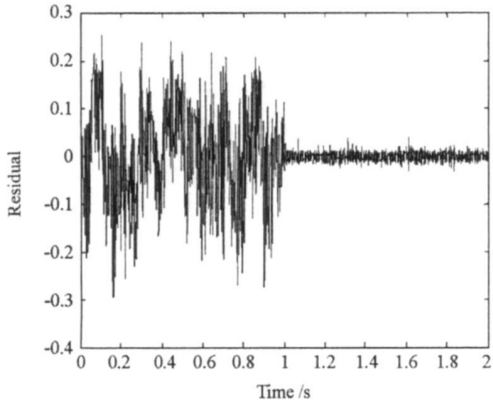


图1 无故障情况,残差 r 波形图

Fig. 1 Fault free residue

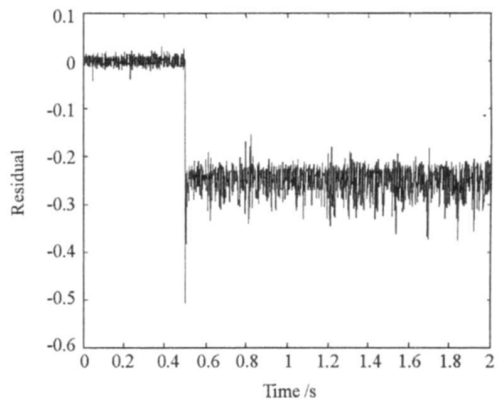


图2 发生故障情况,残差 r 波形图

Fig. 2 Detection of fault for case 1

4 结论

本文利用滑模变结构具有的对未知输入扰动的不变性构成滑模观测器进行残差生成,将扰动信号从系统残差信号中移除,使得利用残差进行的故障检测不受未知输入扰动的影响,同时通过选取较低的阈值来保证检测系统对故障信号有较高的灵敏度。仿真结果显示在含有未知输入扰动时,滑模观测器可使无故障情况下的残差值接近于零,而故障幅值较小时也可准确检测。

参考文献:

- [1] Frank P M, Ding X. Survey of Robust Residual Generation and Evaluation Methods in Observer-based Fault Detection Systems[J]. Journal of Process Control, 1997, 7(6): 403-424.
- [2] Reble M, Munz U, Algow er F. Diagnosis of Parametric Faults in Multivariable Nonlinear Systems[C]. The 46th IEEE Conference on Decision and Control, 2007: 366-371.
- [3] Thoma M, Morari M. Nonlinear Observers and Applications[M]. Springer Berlin Heidelberg Press, 2007.
- [4] 姜云春, 邱静, 刘冠军, 等. 基于最优未知输入观测器的BIT降虚警技术[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(6): 97-100.
- [5] Wang Y, Flynn A. A Block Triangular Observer Form for Non-linear Observer Design[J]. International Journal of Control, 2008, 81(2): 177-188.
- [6] Utkin V I. Sliding Mode in Control Optimization[M]. Springer, 1992.
- [7] Walcott B L, Corless M J, Zak S H. Comparative Study of Nonlinear State-observation Techniques[J]. Int. Jour. of Control, 1987, 45: 2109-2132.
- [8] Thau F E. Observing the State of Nonlinear Dynamical Systems[J]. International Journal of Control, 1973, 17: 471-479.
- [9] Edwards C, Spurgeon S K. On the Development of Discontinuous Observers[J]. International Journal of Control, 1994, 59(5): 1211-1229.
- [10] Staroswiecki M, Jiang B. Fault Identification for a Class of Linear Systems Based on Adaptive Observer[C]//Proc. of 40th IEEE Conference on Decision & Control, 2001, 2283-2288.