

基于二阶滑模观测器的连续系统故障估计

胡正高, 赵国荣, 黄婧丽, 陈洁

(海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对传统的滑模观测器在实现故障估计时带来的抖振问题, 设计基于 super-twisting 算法的二阶滑模观测器以稳定地估计出故障. 针对以往利用几何或齐次性方法证明 super-twisting 算法稳定性过程繁琐的缺点, 采用 Lyapunov 函数来证明稳定性. 给出的故障估计结果克服了传统的滑模观测器在估计故障时带来的时延或引进新参数等缺点. 最后, 将所提出的方法应用于某型飞控系统, 结果表明了所提出方法的有效性.

关键词: 二阶滑模观测器; super-twisting 算法; 故障估计; Lyapunov 函数

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Fault estimation of continuous-time systems based on second order sliding mode observation

HU Zheng-gao, ZHAO Guo-rong, HUANG Jing-li, CHEN Jie

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China.

Correspondent: HU Zheng-gao, E-mail: zghu001@163.com)

Abstract: For the chattering problem in the fault estimation using the traditional sliding mode observation, the second order sliding mode observation based on the super-twisting algorithm is designed to estimate the fault stably. In order to avoid the cumbersome process of proving the stability of the super-twisting algorithm using the geometric method or the homogeneity, a Lyapunov function is adopted to prove the stability of the super-twisting algorithm. The given fault estimation result can be calculated on-line. Moreover, the result overcomes the drawbacks of introducing the delay or the new parameter caused by the traditional methods. Finally, the proposed method is applied to a certain type of flight control systems, and the results show its effectiveness.

Key words: second order sliding mode observation; super-twisting algorithm; fault estimation; Lyapunov function

0 引言

由于自动控制系统可减少能量消耗以及节省人力, 被广泛应用于工业领域; 然而, 由于外部环境不可预知的变化以及元器件的磨损或老化, 导致此类系统比较容易发生故障. 故障造成的影响可能是灾难性的, 特别是对于可靠性和安全性要求高的系统, 一旦发生故障可能会带来重大的人员伤亡或经济损失. 故障诊断技术正是在这样的背景下产生的, 并得到了飞速的发展^[1-2].

基于模型的故障诊断技术已成功应用于实际系统^[3-5], 利用观测器产生残差来检测系统是否发生故障的方法已被广泛应用^[6-7]. 与故障检测和隔离相比, 故障估计的设计难度要大很多, 更富有挑战性. 通过

故障估计能够直接得到故障的幅度, 从而对系统中发生的故障有直观的认识, 而故障检测与隔离都是通过间接的残差来判断是否发生故障以及对故障进行隔离. 此外, 利用故障估计得到的故障信息还可以用来设计控制律以补偿故障对系统造成的影响, 从而实现故障系统的主动容错控制^[8-10].

目前, 对控制系统的故障估计问题, 主要采用的是观测器方法^[11-19]. 基于自适应观测器的方法往往是直接利用故障的残差信息来对故障进行估计^[11-14], 因而这是一种间接的方法, 难以实现对故障的高精度估计. 文献[15]提出了基于滑模观测器的故障估计方法, 利用等价输出介入信号来估计故障, 从而实现了故障的高精度估计; 文献[16-19]在此基础上进行

收稿日期: 2013-10-21; 修回日期: 2014-03-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61473306, 61004002); 航空科学基金项目(20110184001).

作者简介: 胡正高(1986—), 男, 博士生, 从事动态系统故障诊断的研究; 赵国荣(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事动态系统的故障诊断与容错控制等研究.

了深入研究. 滑模观测器中由于引入了不连续项, 实现了滑动模态, 然而在系统模型建立时难免有一部分未建模动态被忽略掉, 滑模观测器中的不连续项不可避免地引进了抖振, 而抖振会激起系统中的未建模动态, 进而导致误差动态系统失稳乃至崩溃, 无法对系统中的故障进行估计. 在以往的基于滑模观测器的故障估计中^[15-19]并没有考虑到这一问题.

为了既能避免抖振造成误差动态系统的不稳定, 又能保留滑模观测器在实现故障估计时的优越性, 本文采用基于 super-twisting 算法^[20]的二阶滑模观测器来实现故障估计的任务, 这样会显著削弱抖振, 进而能稳定地得到系统中的故障估计值, 克服以往研究的不足. 首先通过坐标变换, 将系统中的故障解耦; 然后, 分别设计 Luenberger 观测器和二阶滑模观测器, 采用文献 [21] 的 Lyapunov 函数证明误差动态系统的稳定性, 这样简化了二阶滑模观测器的设计, 从而克服了以往采用几何^[20, 22]或齐次性方法^[23-24]证明 super-twisting 算法稳定性过程繁琐, 以及不利于扩展到高维的缺点. 此外, 本文给出的故障估计结果只需要系统的输出信息和观测器的输出信息, 以便于在线实现. 滑模观测器是通过等价输出介入信号来得到故障估计值的. 传统的做法是通过低通滤波器^[25]或采用连续项来近似^[15]得到该信号, 然而采用低通滤波器将不可避免地带来时延; 而采用连续项逼近, 则必须引进一个新的参数. 本文采用二阶滑模观测器得到的故障估计结果可以克服这些不足. 最后, 通过某型飞控系统的仿真实验验证了所提出方法的有效性.

1 问题描述

研究如下系统:

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

其中: $x \in R^n$, $y \in R^p$, $u \in R^m$ 分别为系统的状态量、输出量和输入量; $f \in R^q$ 为系统的执行器故障, f 几乎处处可微, 且满足 $\|\dot{f}\| \leq \delta$, $\|\cdot\|$ 为向量的 Euclidean 范数或矩阵的 Frobenius 范数; A, B, C 和 D 为已知的适维常值矩阵, 矩阵 D 列满秩.

首先, 给出下面的假设和引理.

假设 1 矩阵 CD 为列满秩, 即满足等式条件 $\text{rank}(CD) = \text{rank}(D) = q$.

假设 2 矩阵对 (A, D, C) 是强可观的, 即矩阵对 (A, D, C) 没有不变零点^[26].

引理 1^[27] 假设存在一个定义在原点邻域 U 上的 C^1 正定函数 $V: R^n \rightarrow R$, 若存在实数 $c > 0$ 和

$\alpha \in (0, 1)$, 使得 $\dot{V} + cV^\alpha$ 沿系统 $\dot{x} = g(x)$ 在 U 上半负定, 则系统 $\dot{x} = g(x)$ 的零解是有限时间稳定的.

引理 2^[26] 若矩阵对 (A, D, C) 是强可观的, 则 $(\bar{A}_{11}, \bar{C}_1)$ 可观.

引理 3^[28-29] 假设系统 $\dot{x} = Ax(t)$ 是渐近稳定的, 那么存在正数 a_0, c_0 , 使得

$$\|x\| \leq c_0 \exp(-a_0 t) \|x(0)\|.$$

其中: 当 A 的特征值各异时, A 可分解为 $A = UAU^{-1}$, 可取 $a_0 = -\lambda_{\max}(A)$, $c_0 = \|U\| \|U^{-1}\|$; 当 A 有重根或复根时, A 可通过 Jordan 变换分解为 $A = VIV^{-1}$, 可取 $a_0 = -\lambda_{\max}(\text{real}(I))$, $c_0 = \|V\| \|V^{-1}\|$.

如果系统 (1) 满足以上假设, 则可通过坐标变换将故障解耦出来, 以方便后面对其进行估计.

考虑如下变换矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} D^\perp \\ (CD)^+ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} (CD)^\perp \\ (CD)^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}.$$

其中: 对于矩阵 Γ^\perp 有 $\Gamma^\perp \Gamma = 0$, $\Gamma^+ = [\Gamma^T \Gamma]^{-1} \Gamma^T$ 为 Γ 的左伪逆矩阵; T 和 S 均为非奇异矩阵, 其逆阵分别为

$$T^{-1} = [[I - D(CD)^+ C](D^\perp)^\perp, D],$$

$$U^{-1} = [[I - (CD)(CD)^+][(CD)^\perp]^\perp, CD].$$

记 $\hat{T}_1 = [I - D(CD)^+ C](D^\perp)^\perp$. 为了书写方便, 后面方程中的 $x(t)$ 简写成 x , 其余向量以此类推.

变换后的状态和输出向量为

$$\bar{x} = Tx = \begin{bmatrix} T_1 x \\ T_2 x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix},$$

$$\bar{x}_1 \in R^{n-q}, \bar{x}_2 \in R^q;$$

$$\bar{y} = Sy = \begin{bmatrix} S_1 y \\ S_2 y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \end{bmatrix},$$

$$\bar{y}_1 \in R^{p-q}, \bar{y}_2 \in R^q.$$

其中

$$\bar{x}_1 = D^\perp x, \bar{x}_2 = (CD)^+ Cx;$$

$$\bar{y}_1 = (CD)^\perp y, \bar{y}_2 = (CD)^+ y.$$

通过简单的代数计算, 可以得到在新坐标下的动态系统为

$$\dot{\bar{x}}_1 = \bar{A}_{11} \bar{x}_1 + \bar{A}_{12} \bar{x}_2 + D^\perp Bu,$$

$$\dot{\bar{y}}_1 = \bar{C}_1 \bar{x}_1, \quad (2)$$

$$\dot{\bar{x}}_2 = \bar{A}_{21} \bar{x}_1 + \bar{A}_{22} \bar{x}_2 + (CD)^+ CBu + f,$$

$$\dot{\bar{y}}_2 = \bar{x}_2. \quad (3)$$

其中

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix} = TAT^{-1}, \bar{C}_1 = (CD)^+CT_1.$$

后面将针对系统(2)和(3)设计观测器,并证明误差动态系统的稳定性;然后,利用设计的二阶滑模观测器得到系统(1)中执行器故障 f 的估计值.

2 观测器设计

针对系统(2)和(3),分别设计 Luenberger 观测器和二阶滑模观测器如下:

$$\dot{\hat{x}}_1 = \bar{A}_{11}\hat{x}_1 + \bar{A}_{12}\bar{y}_2 + D^+Bu + L(\bar{y}_1 - \bar{C}_1\hat{x}_1), \quad (4)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = \bar{A}_{21}\hat{x}_1 + \bar{A}_{22}\bar{y}_2 + (CD)^+CBu + v, \quad (5)$$

其中 L 为要设计的 Luenberger 观测器的增益阵. 令 $e_1 = \hat{x}_1 - \bar{x}_1, e_2 = \hat{x}_2 - \bar{x}_2$. v 为基于 super-twisting 算法的二阶滑模项,即

$$\begin{aligned} v &= v_1 + v_2, \\ v_1 &= -k_1|e_2|^{1/2}\text{sgn}(e_2), \\ \dot{v}_2 &= -k_2\text{sgn}(e_2). \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $k_1, k_2 > 0$ 为要设计的二阶滑模增益值; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数.

滑模面选为

$$\sigma = |e_2|^{1/2}\text{sgn}(e_2) = 0. \quad (7)$$

其中 σ 写成分量形式如下:

$$\sigma = [|e_{21}|^{1/2}\text{sgn}(e_{21}), |e_{22}|^{1/2}\text{sgn}(e_{22}), \dots, |e_{2q}|^{1/2}\text{sgn}(e_{2q})]^T.$$

由式(4)减去(2)中的第 1 个方程,式(5)减去(3)中的第 1 个方程,可得到如下的误差动态系统:

$$\dot{e}_1 = (\bar{A}_{11} - L\bar{C}_1)e_1, \quad (8)$$

$$\dot{e}_2 = \bar{A}_{21}e_1 - f + v. \quad (9)$$

定理 1 若系统(1)满足假设 1 和假设 2, 参数 k_1, k_2 满足如下条件:

$$k_1 > 0, k_2 > 2\gamma^2/k_1^2 + \gamma, \quad (10)$$

其中

$$\gamma = \|\bar{A}_{21}\| \|\bar{A}_{11} - L\bar{C}_1\| c_0 \exp(-a_0 t) \|e_1(0)\| + \delta,$$

这里 a_0 和 c_0 可由引理 3 得到. 则可以设计 Luenberger 观测器(4)和二阶滑模观测器(5),使得误差动态系统(8)是渐近稳定的,误差动态系统(9)是有限时间稳定的.

证明 对于误差动态系统(8),由假设 2 和引理 2 可知 $(\bar{A}_{11}, \bar{C}_1)$ 可观,进而可以通过设计 L 阵使系统(8)渐近稳定.

由式(8)可知

$$e_1 = \exp\{(\bar{A}_{11} - L\bar{C}_1)t\}e_1(0). \quad (11)$$

由于误差动态系统(8)是渐近稳定的,由引理 3 可知存在正数 a_0 和 c_0 使得

$$\|e_1\| \leq c_0 \exp(-a_0 t) \|e_1(0)\|. \quad (12)$$

由式(8)和(12)可得

$$\begin{aligned} \|\dot{e}_1\| &= \|(\bar{A}_{11} - L\bar{C}_1)e_1\| \leq \\ &\|\bar{A}_{11} - L\bar{C}_1\| \|e_1\| \leq \\ &\|\bar{A}_{11} - L\bar{C}_1\| c_0 \exp(-a_0 t) \|e_1(0)\|. \end{aligned} \quad (13)$$

下面证明误差动态系统(9)的有限时间稳定性. 为了后续分析方便,简记 $\omega = \bar{A}_{21}e_1 - f$,再记

$$\varphi = \omega - \int_0^t k_2 \text{sgn}(e_2) d\tau, \quad (14)$$

则误差动态系统(9)可化为

$$\dot{e}_2 = -k_1|e_2|^{1/2}\text{sgn}(e_2) + \varphi, \quad (15)$$

$$\dot{\varphi} = -k_2\text{sgn}(e_2) + \dot{\omega}. \quad (16)$$

由式(13)可知

$$\begin{aligned} \|\dot{\omega}\| &= \|\bar{A}_{21}\dot{e}_1 - \dot{f}\| \leq \\ &\|\bar{A}_{21}\| \|\dot{e}_1\| + \|\dot{f}\| \leq \\ &\|\bar{A}_{21}\| \|\bar{A}_{11} - L\bar{C}_1\| c_0 \exp(-a_0 t) \|e_1(0)\| + \delta, \end{aligned}$$

则有

$$\|\dot{\omega}\| \leq \gamma. \quad (17)$$

下面证明误差动态系统(15)和(16)的有限时间稳定性,从而得到误差动态系统(9)的有限时间稳定性.

记 $z = [\sigma^T \ \varphi^T]^T$; z 的分量 $z_i = [\sigma_i \ \varphi_i]^T, i = 1, 2, \dots, q$; ω 写成分量形式为 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_q]^T$. 取 Lyapunov 函数为

$$V_i = z_i^T P z_i, \quad i = 1, 2, \dots, q,$$

其中

$$P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 4k_2 + k_1^2 & -k_1 \\ -k_1 & 2 \end{bmatrix}.$$

由 $k_1, k_2 > 0$ 可知 P 正定. 对 V_i 求导可得

$$\dot{V}_i = -\frac{1}{|e_{2i}|^{1/2}} z_i^T Q z_i + \dot{\omega}_i a^T z_i. \quad (18)$$

其中

$$Q = \frac{k_1}{2} \begin{bmatrix} 2k_2 + k_1^2 & -k_1 \\ -k_1 & 1 \end{bmatrix}, \quad a^T = [-k_1 \ 2].$$

通过计算可知

$$\dot{\omega}_i a^T z_i = \frac{1}{|e_{2i}|^{1/2}} (z_i^T M_i^T P z_i + z_i^T P M_i z_i), \quad (19)$$

其中

$$M_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dot{\omega}_i \operatorname{sgn}(e_{2i}) & 0 \end{bmatrix}.$$

由式(18)和(19)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= -\frac{1}{|e_{2i}|^{1/2}} z_i^T Q z_i + \dot{\omega}_i a^T z_i = \\ & -\frac{1}{|e_{2i}|^{1/2}} z_i^T (Q - M_i^T P - P M_i) z_i = \\ & -\frac{1}{|e_{2i}|^{1/2}} z_i^T \tilde{Q}_i z_i. \end{aligned}$$

其中

$$\tilde{Q}_i = \frac{k_1}{2} \begin{bmatrix} 2k_2 + k_1^2 + 2\dot{\omega}_i \operatorname{sgn}(e_{2i}) & -k_1 - \frac{2\dot{\omega}_i \operatorname{sgn}(e_{2i})}{k_1} \\ -k_1 - \frac{2\dot{\omega}_i \operatorname{sgn}(e_{2i})}{k_1} & 1 \end{bmatrix}.$$

记

$$\tilde{Q}_{0i} = \begin{bmatrix} 2k_2 + k_1^2 + 2\dot{\omega}_i \operatorname{sgn}(e_{2i}) & -k_1 - \frac{2\dot{\omega}_i \operatorname{sgn}(e_{2i})}{k_1} \\ -k_1 - \frac{2\dot{\omega}_i \operatorname{sgn}(e_{2i})}{k_1} & 1 \end{bmatrix}.$$

由于 $k_1 > 0$, 只要 \tilde{Q}_{0i} 正定, 则 \tilde{Q}_i 正定. \tilde{Q}_{0i} 正定的充分必要条件为

$$2k_2 + k_1^2 + 2\dot{\omega}_i \operatorname{sgn}(e_{2i}) > 0 \text{ 且 } \det \tilde{Q}_{0i} > 0. \quad (20)$$

通过化简可知式(20)等价于

$$k_2 > -\frac{k_1^2}{2} - \dot{\omega}_i \operatorname{sgn}(e_{2i}) \text{ 且 } k_2 > \frac{2\dot{\omega}_i^2}{k_1^2} + \dot{\omega}_i \operatorname{sgn}(e_{2i}). \quad (21)$$

再由式(17)和定理1中的条件 $k_2 > 2\gamma^2/k_1^2 + \gamma$ 可知式(21)成立, 从而 \tilde{Q}_{0i} 正定, 进而可得 \tilde{Q}_i 正定.

此外, 有

$$\lambda_{\min}(P) \|z_i\|^2 \leq V_i = z_i^T P z_i \leq \lambda_{\max}(P) \|z_i\|^2, \quad (22)$$

其中 $\lambda_{\min}(P)$ 和 $\lambda_{\max}(P)$ 分别为 P 的最小和最大特征值. 从而有

$$|e_{2i}|^{1/2} \leq \|z_i\| \leq \frac{V_i^{1/2}}{[\lambda_{\min}(P)]^{1/2}}, \quad (23)$$

其中

$$\|z_i\|^2 = |\sigma_i|^2 + |\varphi_i|^2.$$

由式(22)和(23)可知

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= -\frac{1}{|e_{2i}|^{1/2}} z_i^T \tilde{Q}_i z_i \leq \\ & -\frac{1}{|e_{2i}|^{1/2}} \lambda_{\min}(\tilde{Q}_i) \|z_i\|^2 \leq -\mu_i V_i^{1/2}, \quad (24) \end{aligned}$$

其中

$$\mu_i = \frac{[\lambda_{\min}(P)]^{1/2} \lambda_{\min}(\tilde{Q}_i)}{\lambda_{\max}(P)}.$$

由式(24)并根据引理1可知 e_2 和 φ 在有限时间

内收敛到0, 从而误差动态系统(9)是有限时间稳定的. 由式(7)可知, σ 和 $\dot{\sigma}$ 在有限时间内收敛到0, 从而实现了二阶滑模观测器的设计. 由此定理得证. \square

3 故障估计

本节在上节的基础上, 通过前面设计的二阶滑模观测器来实现对执行器故障的估计.

定理2 若系统(1)满足假设1和假设2, 参数 k_1 和 k_2 满足式(10), 则通过设计的二阶滑模观测器(9), 可以得到系统(1)中执行器故障 f 的估计值为

$$\hat{f} = -k_2 \int_0^t \operatorname{sgn}(e_2) d\tau. \quad (25)$$

证明 由定理1可知, 在有限时间内 $\varphi \rightarrow 0$, 由式(14)可知

$$\omega - \int_0^t k_2 \operatorname{sgn}(e_2) d\tau \rightarrow 0.$$

而 $\omega = \bar{A}_{21} e_1 - f$, 则有

$$\bar{A}_{21} e_1 - f - \int_0^t k_2 \operatorname{sgn}(e_2) d\tau \rightarrow 0. \quad (26)$$

此外, 由定理1可知误差动态系统(8)是渐近稳定的, 故 $e_1 \rightarrow 0$, 从而由式(26)可得执行器故障 f 的估计值

$$\hat{f} = -k_2 \int_0^t \operatorname{sgn}(e_2) d\tau.$$

由此定理得证. \square

注1 由式(25)可知, 只需知道二阶滑模观测器(5)的输出与系统(3)的输出之差 e_2 便可估计出系统(1)中的执行器故障 f , 从而实现对故障的在线估计.

注2 由于二阶滑模项 $-k_2 \int_0^t \operatorname{sgn}(e_2) d\tau$ 是连续的, 本文采用基于 super-twisting 算法设计的二阶滑模观测器得到的故障估计式(25), 可以避免传统的滑模观测器在实现故障估计时所带来的时延或需要引进新参数等问题.

4 仿真分析

考虑文献[30]中的L-1011飞控系统模型, 系统矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1540 & -0.0042 & 1.5400 & 0 \\ 0 & 0.2490 & -1.0000 & -5.2000 & 0 \\ 0.0386 & -0.9960 & -0.0003 & -0.1170 & 0 \\ 0 & 0.5000 & 0 & 0 & -0.5000 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.7440 & -0.0320 \\ 0.3370 & -1.1200 \\ 0.0200 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

状态向量

$$x = [\phi \ r \ p \ \beta \ x_5]^T,$$

各个状态分量分别为倾斜角、偏航角速度、滚转角速度、侧滑角和洗出滤波状态. 控制输入

$$u = [\delta_r \ \delta_a]^T,$$

分别为方向舵偏转角和副翼偏转角. 输出向量

$$y = [r_{wo} \ p \ \beta \ \phi]^T,$$

其中 r_{wo} 为洗出偏航角速度.

由于执行器故障发生在控制输入通道, 令 $D = B$. 通过计算可知 $\text{rank}(CD) = \text{rank}(D) = 2$, 矩阵对 (A, D, C) 没有不变零点, 所以矩阵对 (A, D, C) 是强可观的, 从而假设 1 和假设 2 均满足. 通过线性变换将系统中的故障解耦, 得到式 (2) 和 (3), 从而可以设计观测器 (4) 和 (5). 系统 (1) 的初始值设为 $(0.3489, 0.0872, 0.5233, 0.0698, 0.0215)$, 观测器系统的初始值为 $(0, 0, 0, 0, 0)$. 仿真步长为 0.001 s , 参数 $k_1 = 5, k_2 = 1.1$, 根据式 (25) 可得故障的估计值.

执行器故障可分为突变故障和缓变故障, 分别考虑系统中发生这两类执行器故障. 首先假设第 1 个执行器发生的突变故障如下:

$$f_1(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 0.5; \\ \pi/90, & 0.5 \leq t \leq 5. \end{cases}$$

仿真结果如图 1 所示. 由图 1 可知, 本文基于 super-twisting 算法的二阶滑模观测器 (STASOSMO) 的故障估计方法能快速地实现对突变故障的高精度估计. 然后, 考虑第 2 个执行器发生的缓变故障如下:

$$f_2(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 1; \\ \pi/90 \sin(2\pi t), & 1 \leq t \leq 5. \end{cases}$$

仿真结果如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 缓变故障的估计值能快速地收敛到缓变故障的真实值.

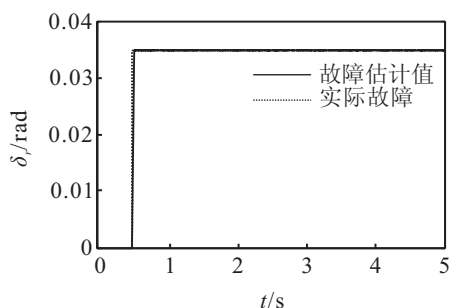


图 1 基于 STASOSMO 的突变故障估计

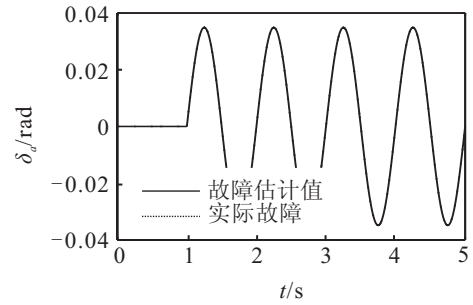


图 2 基于 STASOSMO 的缓变故障估计

下面用传统的滑模观测器 (TSMO)^[15-19]来估计突变故障和缓变故障, 仿真结果如图 3 和图 4 所示. 由图 3 和图 4 可以看出, 传统方法需要通过高频切换才能得到故障的估计值, 与传统方法相比, 本文提出的方法能快速稳定地实现对故障的估计.

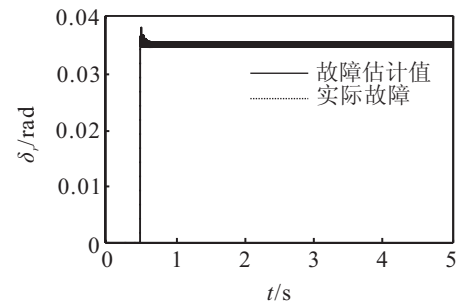


图 3 基于 TSMO 的突变故障估计

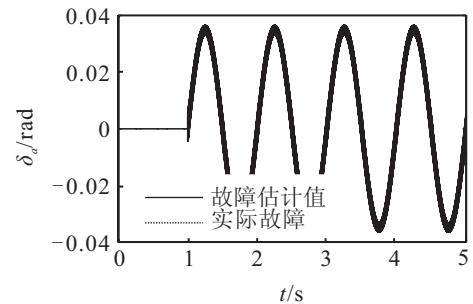


图 4 基于 TSMO 的缓变故障估计

5 结 论

本文采用基于 super-twisting 算法的二阶滑模观测器来研究连续系统的执行器故障估计问题, 极大地提高了误差动态系统的稳定性, 从而能稳定地实现对故障的估计. 利用 Lyapunov 函数证明了误差动态系统的稳定性, 简化了二阶滑模观测器的设计. 本文给出的故障估计结果只需要系统的输出信息和观测器的输出信息, 便于在线实现. 将本文方法扩展到非线性系统的故障估计中, 并在有干扰的情况下实现对故障的估计, 以及进一步提高故障估计的效果, 将是下一步重点研究的内容.

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: 1-10.

- [2] 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: 1-18.
(Zhou D H, Ye Y Z. Modern fault diagnosis and fault tolerant control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 1-18.)
- [3] Yoo S J. Actuator fault detection and adaptive accommodation control of flexible-joint robots[J]. Control Theory & Applications, 2012, 6(10): 1497-1507.
- [4] Gao C, Zhao Q, Duan G. Robust actuator fault diagnosis scheme for satellite attitude control systems[J]. J of the Franklin Institute, 2013, 350(9): 2560-2580.
- [5] Zhang X, Tang L, Decastro J. Robust fault diagnosis of aircraft engines: A nonlinear adaptive estimation-based approach[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2013, 21(3): 861-868.
- [6] Alcorta Garcia E, Frank P M. Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis: A survey[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(5): 663-670.
- [7] Hwang I, Kim S, Kim Y, et al. A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2010, 18(3): 636-653.
- [8] Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault accommodation for nonlinear dynamic systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(9): 1578-1583.
- [9] Zhang K, Staroswiecki M, Jiang B. Static output feedback based fault accommodation design for continuous-time dynamic systems[J]. Int J of Control, 2011, 84(2): 412-423.
- [10] Dong Q, Zhong M, Ding S X. Active fault tolerant control for a class of linear time-delay systems in finite frequency domain[J]. Int J of Systems Science, 2012, 43(3): 543-551.
- [11] Qiu J, Ren M, Niu Y, et al. Fault estimation for nonlinear dynamic systems[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2012, 31(2): 555-564.
- [12] Gao C, Duan G. Robust adaptive fault estimation for a class of nonlinear systems subject to multiplicative faults[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2012, 31(6): 2035-2046.
- [13] Zhang K, Jiang B, Cocquempot V. Adaptive observer-based fast fault estimation[J]. Int J of Control Automation and Systems, 2008, 6(3): 320-326.
- [14] 张柯, 姜斌, 刘京津. 基于自适应观测器控制系统的快速故障调节[J]. 控制与决策, 2008, 23(7): 771-775.
(Zhang K, Jiang B, Liu J J. Fast fault accommodation of control systems by using adaptive observer[J]. Control and Decision, 2008, 23(7): 771-775.)
- [15] Edwards C, Spurgeon S K, Patton R J. Sliding mode observers for fault detection and isolation[J]. Automatica, 2000, 36(4): 541-553.
- [16] 赵瑾, 顾幸生, 申忠宇. 不确定动态系统的执行器故障检测与重构[J]. 控制与决策, 2007, 22(5): 510-514.
(Zhao J, Gu X S, Shen Z Y. Actuator fault detection and reconstruction in the uncertain dynamical system[J]. Control and Decision, 2007, 22(5): 510-514.)
- [17] Alwi H, Edwards C, Tan C P. Sliding mode estimation schemes for incipient sensor faults[J]. Automatica, 2009, 45(7): 1679-1685.
- [18] Edwards C, Alwi H, Tan C P. Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control with application to aerospace systems[J]. Int J of Applied Mathematics and Computer Science, 2012, 22(1): 109-124.
- [19] He J, Zhang C. Fault reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012: 1-22.
- [20] Levant A. Robust exact differentiation via sliding mode technique[J]. Automatica, 1998, 34(3): 379-384.
- [21] Moreno J A, Osorio M. A Lyapunov approach to second order sliding mode controllers and observers[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Decision and Control. New York, 2008: 2856-2861.
- [22] Levant A. Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control[J]. Int J of Control, 2003, 76(9-10): 924-941.
- [23] Levant A. Homogeneity approach to high-order sliding mode design[J]. Automatica, 2005, 41(5): 823-830.
- [24] Levant A. Principles of 2-sliding mode design[J]. Automatica, 2007, 43(4): 576-586.
- [25] Utkin V I. Sliding modes in control and optimization[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992: 206-217.
- [26] Molinari B. A strong controllability and observability in linear multivariable control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1976, 21(5): 761-764.
- [27] Bhat S P, Bernstein D S. Continuous finite-time stabilization of the translational and rotational double integrators[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(5): 678-682.
- [28] Halanay A. Differential equations: Stability, oscillations, time lags[M]. New York and London: Academic Press, 1966: 39-46.
- [29] Yan X G, Edwards C. Robust sliding mode observer-based actuator fault detection and isolation for a class of nonlinear systems[J]. Int J of Systems Science, 2008, 39(4): 349-359.
- [30] Edwards C, Spurgeon S K. On the development of discontinuous observers[J]. Int J of control, 1994, 59(5): 1211-1229.