

基于滑模观测器和广义观测器的故障估计方法

文传博¹ 邓露¹ 吴兰²

摘要 针对受未知干扰影响的一类非线性系统, 提出一种基于滑模观测器和广义观测器的执行器故障和传感器故障估计方法. 首先通过线性变换将原系统解耦为两个降阶的子系统, 其中一个子系统受执行器故障和干扰的影响, 另一个含有传感器故障和干扰, 进一步将后一个子系统转化为广义系统. 对两类子系统分别设计滑模观测器和广义观测器, 给出估计误差一致最终有界的条件, 得到系统状态和未知干扰的估计值. 然后, 利用等效输出控制原理重构执行器故障, 引入干扰补偿保证重构算法的鲁棒性, 再根据广义观测器的结果获得传感器故障的估计值. 最后, 通过计算机仿真验证了本文方法的有效性.

关键词 执行器故障, 传感器故障, 广义观测器, 滑模观测器, 故障估计

引用格式 文传博, 邓露, 吴兰. 基于滑模观测器和广义观测器的故障估计方法. 自动化学报, 2018, 44(9): 1698–1705

DOI 10.16383/j.aas.2017.c160730

Fault Estimation Approaches With Sliding Mode Observer and Descriptor Observer

WEN Chuan-Bo¹ DENG Lu¹ WU Lan²

Abstract In this paper, the problem of actuator fault and sensor fault estimation based on sliding mode observers and descriptor observers is addressed for a sort of nonlinear systems subject to unknown disturbances. First, the considered system is transformed into two reduced-order subsystems by linear transformation matrices. One subsystem is subject to actuator fault and the disturbance, and the other is affected by sensor fault and the disturbance, which is then further transformed into a descriptor system. A sliding mode observer and a descriptor observer are designed to process the above two subsystems, respectively. A sufficient condition is presented to ensure that estimation errors are uniformly bounded, and the estimates of system state as well as the unknown disturbance are obtained. Furthermore, by using the equivalent output injection concept, actuator fault reconstruction is achieved, whose robustness is ensured by employing the estimation of disturbance as compensation. The estimate of sensor fault is also obtained according to the output of the descriptor observer. Finally, a numerical example is employed to demonstrate the effectiveness and robustness of the proposed approach.

Key words Actuator fault, sensor fault, descriptor observer, sliding mode observer, fault estimation

Citation Wen Chuan-Bo, Deng Lu, Wu Lan. Fault estimation approaches with sliding mode observer and descriptor observer. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(9): 1698–1705

随着科学技术的飞速发展, 控制系统变得日益复杂, 各类故障时常发生. 无论执行器故障还是传感器故障都将影响系统的性能, 甚至导致系统的不稳定, 进而引发严重的安全事故. 为了增加系统的可靠性, 及时做出故障诊断就显得尤为重要^[1–3]. 相较于故障检测和隔离, 故障估计直接获得故障的幅值, 还

可为进一步实现故障调节和容错控制服务. 因此故障估计更具有实际意义, 但同时困难也大. 故障估计的众多技术中, 基于各类观测器的估计方法受到研究人员的青睐, 取得了丰富的研究成果^[4–5].

当执行器发生故障时, 文献 [6] 依次研究了正常系统和不确定系统的故障估计问题, 提出了相应的自适应观测器, 还通过调整参数增强了算法的鲁棒性. 针对多输入多输出系统的执行器故障, 文献 [7] 利用降阶的卡尔曼滤波器联合估计了系统状态和故障, 并设计控制器消除故障带来的影响. 在此基础上, 文献 [8] 进一步研究了非线性广义系统执行器故障的鲁棒估计和故障容错问题. 针对一类不满足利普希茨条件的非线性不确定系统, 文献 [9] 通过解一组线性矩阵不等式和设计多个滑模观测器依次实现了故障检测、隔离和估计. 滑模观测器同样被应用在一类线性时变系统的执行器故障估计中, 其中设计的观测器增益包含了干扰矩阵的信息, 从而保证了观

收稿日期 2016-10-23 录用日期 2017-02-03
Manuscript received October 23, 2016; accepted February 3, 2017

国家自然科学基金 (61374136, 61473159), 上海市人才发展资金 (201511), 上海电机学院登峰计划 (15DFXK01) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61374136, 61473159), Developing Foundation for Talents of Shanghai (201511), and Climbing Peak Discipline Project of Shanghai Dianji University (15DFXK01)

本文责任编辑 文成林

Recommended by Associate Editor WEN Cheng-Lin

1. 上海电机学院电气学院 上海 201306 2. 河南工业大学电气工程学院 郑州 450001

1. College of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306 2. College of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001

测器的稳定性^[10-11].

当传感器发生故障时, 通常将传感器故障转化为伪执行器故障, 再利用已有的方法实现重构^[2, 12-15]. 例如, 文献 [2] 提出的两种方法均是传感器故障转化为执行器故障, 再分别设计滑模观测器得到故障的估计值, 并论证观测器存在的充分条件. 文献 [12] 首先设计执行器故障的滑模观测器, 而后通过系统变换, 用类似的方法解决了传感器故障的重构问题, 并将结果进一步推广到广义系统. 文献 [13] 针对一类非线性系统, 研究了传感器故障、系统噪声和输出噪声同时存在时的故障估计问题, 得到了系统状态和传感器故障的联合估计值. 通过将系统解耦为两个子系统, 文献 [14] 实现了一类不确定系统的故障观测器设计, 并将系统稳定性的问题转化为求解一个线性矩阵不等式问题. 文献 [15] 设计了同时实现状态与执行器故障联合估计的未知输入观测器, 并将其应用到传感器故障诊断中.

实际应用中, 系统的故障往往并非单独发生的, 更多的是出现执行器和传感器并发故障, 还时常受未知干扰的干扰. 对于这类故障, 文献 [16] 针对一类非线性系统设计了同时实现两类故障估计的观测器, 但未考虑外界干扰带来的影响. 文献 [17] 对于受缓变干扰影响的系统, 给出了干扰的自适应估计方法, 在此基础上重构了干扰和传感器故障, 但该方法对故障的形式有严格的限制. 文献 [18] 进一步研究了含有执行器故障、传感器故障且受未知干扰系统的故障重构问题, 利用滑模抵消干扰的影响, 估计了传感器故障, 但只能实现执行器故障的检测, 却无法重构. 因此, 能同时估计执行器故障和传感器故障及干扰的方法, 有待进一步的研究.

本文针对一类同时存在执行器故障、传感器故障和未知干扰的非线性系统, 开展故障估计的研究. 首先, 利用非奇异变换将原系统转化为两个降阶的子系统; 然后, 设计广义观测器方法估计部分状态变量及传感器故障, 同时给出干扰的自适应估计算法; 接着设计带干扰补偿的滑模观测器, 结合等效输出控制原理重构执行器故障; 最后, 用计算机仿真验证本文算法的有效性.

1 模型描述

考虑如下的非线性系统:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + g(\mathbf{x}, t) + D\mathbf{f}_a(t) + M\boldsymbol{\zeta}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{F}\mathbf{f}_s(t) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ 为系统状态变量, $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^m$ 为输入, $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^p$ 为测量输出. $\mathbf{f}_a(t) \in \mathbf{R}^l$ 和 $\mathbf{f}_s(t) \in \mathbf{R}^q$ 分别表示范数有界的执行器故障和传感器故障, 满足 $\|\mathbf{f}_a(t)\| \leq \vartheta$ 和 $\|\mathbf{f}_s(t)\| \leq \omega$, 其中 ϑ 和

ω 均为正标量, $\boldsymbol{\zeta}(t) \in \mathbf{R}^r$ 为未知干扰, $g(\mathbf{x}, t) \in \mathbf{R}^n$ 是系统的已知非线性部分, 在区域 Ξ 上满足 Lipschitz 条件: $\|g(\mathbf{x}_1, t) - g(\mathbf{x}_2, t)\| \leq L_g\|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2\|$, $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in \Xi$, $L_g \in \mathbf{R}^+$ 是已知的 Lipschitz 常数, $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{M}$ 和 \mathbf{F} 是已知的适维矩阵. 不失一般性, 假设 \mathbf{C}, \mathbf{D} 和 \mathbf{M} 列满秩, 对于传感器故障分布矩阵 \mathbf{F} , 存在非奇异变换 \mathbf{S}_0 使得 \mathbf{F} 满足:

$$\mathbf{S}_0\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{F}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_2 \in \mathbf{R}^{(p-l) \times q}.$$

假设 1. 系统 $(\mathbf{A}, \mathbf{D}, \mathbf{C})$ 满足:

$$\text{rank}(\mathbf{C}\mathbf{D}) = \text{rank}(\mathbf{D}) \quad (3)$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} s\mathbf{I}_n - \mathbf{A} & \mathbf{D} \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} = n + l, \quad \text{Re}(s) \geq 0 \quad (4)$$

假设 2. 系统 $(\mathbf{A}, \mathbf{M}, \mathbf{C})$ 满足:

$$\text{rank}(\mathbf{C}\mathbf{M}) = \text{rank}(\mathbf{M}) \quad (5)$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} s\mathbf{I}_n - \mathbf{A} & \mathbf{M} \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} = n + r, \quad \text{Re}(s) \geq 0 \quad (6)$$

引理 1^[3]. 对于故障系统 (1) 和 (2), 若假设 1 的式 (3) 成立, 则存在非奇异变换矩阵 \mathbf{T} 和 \mathbf{S} , 使得:

$$\mathbf{T}\mathbf{A}\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_3 & \mathbf{A}_4 \end{bmatrix}, \mathbf{T}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{M}_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S}\mathbf{C}\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_4 \end{bmatrix}, \mathbf{S}\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{F}_2 \end{bmatrix}$$

其中, $\mathbf{A}_1, \mathbf{C}_1, \mathbf{D}_1 \in \mathbf{R}^{l \times l}$, $\mathbf{A}_4 \in \mathbf{R}^{(n-l) \times (n-l)}$, $\mathbf{B}_1 \in \mathbf{R}^{l \times m}$, $\mathbf{M}_1 \in \mathbf{R}^{l \times r}$, $\mathbf{C}_4 \in \mathbf{R}^{(p-l) \times (p-l)}$, $\mathbf{F}_2 \in \mathbf{R}^{(p-l) \times q}$, $\mathbf{C}_1, \mathbf{D}_2$ 均为可逆矩阵.

相应的, 令 $\tilde{\mathbf{x}} := \mathbf{T}\mathbf{x} := \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix}$, $\tilde{\mathbf{y}} := \mathbf{S}\mathbf{y} :=$

$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{bmatrix}$, 原系统变为如下两个降阶的子系统.

子系统 1:

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t) = \mathbf{A}_1\mathbf{x}_1(t) + \mathbf{A}_2\mathbf{x}_2(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{u}(t) + g_1(\mathbf{T}^{-1}\tilde{\mathbf{x}}, t) + \mathbf{D}_1\mathbf{f}_a(t) + \mathbf{M}_1\boldsymbol{\zeta}(t) \quad (7)$$

$$\mathbf{y}_1(t) = \mathbf{C}_1\mathbf{x}_1(t) \quad (8)$$

子系统 2:

$$\dot{\mathbf{x}}_2(t) = A_3\mathbf{x}_1(t) + A_4\mathbf{x}_2(t) + B_2\mathbf{u}(t) + g_2(T^{-1}\tilde{\mathbf{x}}, t) + M_2\boldsymbol{\zeta}(t) \quad (9)$$

$$\mathbf{y}_2(t) = C_4\mathbf{x}_2(t) + F_2\mathbf{f}_s(t) \quad (10)$$

其中, $(g_1^T, g_2^T)^T = Tg$. 记 $S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}$, 其中 $S_1 \in \mathbf{R}^{l \times p}$, $S_2 \in \mathbf{R}^{(p-l) \times p}$, 则由式 (6) 易得 $\mathbf{x}_1(t) = C_1^{-1}S_1\mathbf{y}(t)$.

令 $\bar{\mathbf{x}}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2 \\ F_2\mathbf{f}_s \end{bmatrix}$, 则式 (9) 和 (10) 可重写为

$$\bar{E}\dot{\bar{\mathbf{x}}}_2(t) = \bar{A}_4\bar{\mathbf{x}}_2(t) + \bar{A}_3\mathbf{x}_1(t) + \bar{B}_2\mathbf{u}(t) + \bar{g}_2(T^{-1}\tilde{\mathbf{x}}, t) + \bar{M}_2\boldsymbol{\zeta}(t) + \bar{N}\mathbf{f}_s(t) \quad (11)$$

$$\mathbf{y}_2(t) = \bar{C}_4\bar{\mathbf{x}}_2(t) \quad (12)$$

其中

$$\bar{E} = \begin{bmatrix} I_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{A}_3 = \begin{bmatrix} A_3 \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{B}_2 = \begin{bmatrix} B_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{A}_4 = \begin{bmatrix} A_4 & 0 \\ 0 & -I_{(p-l)} \end{bmatrix}, \bar{g}_2 = \begin{bmatrix} g_2(T^{-1}\tilde{\mathbf{x}}, t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{M}_2 = \begin{bmatrix} M_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{N} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_2 \end{bmatrix}, \bar{C}_4 = [C_4 \quad I_{p-l}]$$

相应的, 式 (7) 和 (8) 变为

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t) = A_1\mathbf{x}_1(t) + \bar{A}_2\bar{\mathbf{x}}_2(t) + B_1\mathbf{u}(t) + g_1(T^{-1}\tilde{\mathbf{x}}, t) + D_1\mathbf{f}_a(t) + M_1\boldsymbol{\zeta}(t) \quad (13)$$

$$\mathbf{y}_1(t) = C_1\mathbf{x}_1(t) \quad (14)$$

其中 $\bar{A}_2 = [A_2 \quad 0]$.

假设 3. 基于引理 1 中的线性变换矩阵 T , 系统 (A_1, C_1, D_1) 的不变零点均在左半开复平面内, 即对所有满足 $\text{Re}(s) \geq 0$ 的复数 s , 有:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_l - A_1 & D_1 \\ C_1 & 0 \end{bmatrix} = 2l \quad (15)$$

为了观测器设计的需要, 我们再引入如下引理:

引理 2^[17]. 对于矩阵 \bar{E} 和 \bar{C}_4 , 存在矩阵 $\bar{L} = \begin{bmatrix} \bar{L}_1 \\ \bar{L}_2 \end{bmatrix}$, 其中 $\bar{L}_1 \in \mathbf{R}^{(n-1) \times (p-l)}$, $\bar{L}_2 \in \mathbf{R}^{(p-1) \times (p-l)}$, 使得矩阵 $\bar{E} + \bar{L}\bar{C}_4$ 非奇异.

引理 3^[19]. 若函数 $g(\mathbf{x}, t)$ 满足 Lipschitz 条件, 则存在正定对称矩阵 P 满足下式:

$$2\boldsymbol{\varepsilon}^T P(g(\mathbf{x}_1, t) - g(\mathbf{x}_2, t)) \leq L^2\boldsymbol{\varepsilon}^T P^2\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon}$$

其中 $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2$, L 是 Lipschitz 常数.

引理 4^[20]. 存在矩阵 $K_1 \in \mathbf{R}^{r \times l}$, $K_2 \in \mathbf{R}^{r \times (p-l)}$, $P_1 \in \mathbf{R}^{l \times l}$ 和 $P_2 \in \mathbf{R}^{(n+p-2l) \times (n+p-2l)}$, 使得:

$$K_1 C_1 = M_1^T P_1 \quad (16)$$

$$K_2 \bar{C}_4 = (\Lambda \bar{M}_2)^T P_2 \quad (17)$$

成立, 其中 $\Lambda = (\bar{E} + \bar{L}\bar{C}_4)^{-1}$.

引理 5^[21]. 对于任意向量 $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbf{R}^n$, 正标量 μ 和正定矩阵 P , 有如下不等式成立:

$$2\mathbf{x}^T P \mathbf{y} \leq \frac{1}{\mu} \mathbf{x}^T P \mathbf{x} + \mu \mathbf{y}^T P \mathbf{y}$$

2 观测器设计

在第 1 节解耦所得两个降阶系统的基础上, 本节将分别设计广义观测器和滑模观测器, 在得到系统状态以及未知干扰的估计值, 为下节重构执行器和传感器故障做准备.

对子系统 (13), (14) 和 (11), (12) 分别设计观测器:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_1(t) = A_1\hat{\mathbf{x}}_1(t) + \bar{A}_2\hat{\mathbf{x}}_2(t) + B_1\mathbf{u}(t) + g_1(T^{-1}\hat{\mathbf{x}}, t) + D_1\boldsymbol{\nu}(t) + M_1\hat{\boldsymbol{\zeta}}(t) + L_1(S_1^{-1}\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}_1(t)) \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_1(t) = C_1\hat{\mathbf{x}}_1(t) \quad (19)$$

和

$$\begin{aligned} (\bar{E} + \bar{L}\bar{C}_4)\dot{\mathbf{z}}(t) &= (\bar{A}_4 - \bar{K}\bar{C}_4)\mathbf{z}(t) + \bar{B}_2\mathbf{u}(t) + \\ &\bar{A}_4(\bar{E} + \bar{L}\bar{C}_4)^{-1}\bar{L}\mathbf{y}_2(t) + \bar{g}_2(T^{-1}\hat{\mathbf{x}}, t) + \\ &\bar{M}_2\hat{\boldsymbol{\zeta}}(t) + \bar{A}_3C_1^{-1}S_1^{-1}\mathbf{y}(t) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_2(t) = \mathbf{z}(t) + (\bar{E} + \bar{L}\bar{C}_4)^{-1}\bar{L}\mathbf{y}_2(t) \quad (21)$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\zeta}}}(t) = -\Gamma(K_1C_1(\bar{\mathbf{e}}_1 + \dot{\bar{\mathbf{e}}}_1) + K_2\bar{C}_4(\bar{\mathbf{e}}_2 + \dot{\bar{\mathbf{e}}}_2)) \quad (22)$$

式中, $\hat{\mathbf{x}}_1(t)$, $\hat{\mathbf{x}}_2(t)$, $\hat{\mathbf{y}}_1(t)$ 和 $\hat{\boldsymbol{\zeta}}(t)$ 分别表示 $\mathbf{x}_1(t)$, $\bar{\mathbf{x}}_2(t)$, $\mathbf{y}_1(t)$ 和 $\boldsymbol{\zeta}(t)$ 的估计值, 正标量 Γ 是学习率, $\bar{\mathbf{e}}_1(t) = \hat{\mathbf{x}}_1(t) - \mathbf{x}_1(t)$, $\bar{\mathbf{e}}_2(t) = \hat{\mathbf{x}}_2(t) - \bar{\mathbf{x}}_2(t)$, $L_1 = (A_1 - A_1^0)C_1^{-1}$, A_1^0 稳定; \bar{L} 和 \bar{K} 为待设计的反馈矩阵. 滑模块 $\boldsymbol{\nu}$ 定义为

$$\boldsymbol{\nu} = \begin{cases} \rho \frac{D_1^T P_1 \bar{\mathbf{e}}_1}{\|D_1^T P_1 \bar{\mathbf{e}}_1\|}, & \bar{\mathbf{e}}_1 \neq 0 \\ 0, & \bar{\mathbf{e}}_1 = 0 \end{cases} \quad (23)$$

其中, $\rho \geq \partial + \rho_0$, ρ_0 为待设计的滑模增益.

定理 1. 对于满足假设 1 和 2 的非线性系统 (1) 和 (2), 设计观测器式 (18)~(22), 令 $\bar{\mathbf{e}} =$

$[\bar{\mathbf{e}}_1^T \ \bar{\mathbf{e}}_2^T \ \mathbf{e}_\zeta^T]^T$, 其中 $\mathbf{e}_\zeta = \hat{\zeta} - \zeta$, 若存在正定矩阵 $P_1 \in \mathbf{R}^{l \times l}$, $P_2 \in \mathbf{R}^{(n+p-2l) \times (n+p-2l)}$ 满足:

$$-\Omega = \begin{bmatrix} \Phi_1 & P_1 \bar{A}_2 & -K_1 C_1 A_1^0 \\ * & \Phi_2 & -K_1 C_1 \bar{A}_2 - K_2 \bar{C}_4 A_4^0 \\ * & * & \Phi_3 \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= (A_1^0)^T P_1 + P_1 A_1^0 + (L_g T^{-1})^2 P_1^2 + I, \\ \Phi_2 &= (A_4^0)^T P_2 + P_2 A_4^0 + \Lambda (L_g T^{-1})^2 P_2^2 + I, \\ \Phi_3 &= -2K_1 C_1 M_1 - 2K_2 \bar{C}_4 \Lambda \bar{M}_2 - 2\Lambda L_g T K_2 \bar{C}_4 - \\ &\quad 2L_g K_1 C_1 \end{aligned}$$

则观测误差一致最终有界:

$$\left\{ \bar{\mathbf{e}} : \|\bar{\mathbf{e}}\| < \frac{2\|P_2 \Lambda \bar{N}\| \omega}{\lambda_{\min}(\Omega)} + \varepsilon_0, \varepsilon_0 > 0 \right\} \quad (25)$$

其中, $\lambda_{\min}(\Omega)$ 为 Ω 的最小特征值, ε_0 取为任意的较小正标量.

证明. 由式 (13)、(14)、(18) 和 (19) 得:

$$\dot{\bar{\mathbf{e}}}_1 = A_1^0 \bar{\mathbf{e}}_1 + \bar{A}_2 \bar{\mathbf{e}}_2 + D_1(\mathbf{f}_a - \boldsymbol{\nu}) + M_1 \mathbf{e}_\zeta + g_1 - \hat{g}_1 \quad (26)$$

由引理 2 得:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} I_{n-l} & -\bar{L}_1 (\bar{L}_2)^{-1} \\ -C_4 & (I_{n-l} + \bar{L}_1 C_4) (\bar{L}_2)^{-1} \end{bmatrix} \quad (27)$$

则有:

$$\bar{C}_4 \Lambda \bar{L} = [C_4 \ I_{p-l}] \begin{bmatrix} 0 \\ I_{p-l} \end{bmatrix} = 0 \quad (28)$$

将式 (21) 代入式 (20), 再结合式 (28) 得:

$$\begin{aligned} (\bar{E} + \bar{L} \bar{C}_4) \dot{\hat{\mathbf{x}}}_2(t) &= (\bar{A}_4 - \bar{K} \bar{C}_4) \hat{\mathbf{x}}_2(t) + \bar{B}_2 \mathbf{u}(t) + \\ &\quad \bar{K} \mathbf{y}_2(t) + \bar{L} \dot{\mathbf{y}}_2(t) + \bar{M}_2 \hat{\zeta}(t) + \bar{g}_2(T^{-1} \hat{\tilde{\mathbf{x}}}, t) + \\ &\quad \bar{A}_3 C_1^{-1} S_1^{-1} \mathbf{y}(t) \end{aligned} \quad (29)$$

另外, 式 (11) 两边同时加上 $L \dot{\mathbf{y}}_2(t)$ 得:

$$\begin{aligned} (\bar{E} + \bar{L} \bar{C}_4) \dot{\hat{\mathbf{x}}}_2(t) &= (\bar{A}_4 - \bar{K} \bar{C}_4) \hat{\mathbf{x}}_2(t) + \bar{B}_2 \mathbf{u}(t) + \\ &\quad \bar{N} \mathbf{f}_s(t) + \bar{M}_2 \zeta(t) + \bar{K} \mathbf{y}_2(t) + \bar{L} \dot{\mathbf{y}}_2(t) + \\ &\quad \bar{g}_2(T^{-1} \hat{\tilde{\mathbf{x}}}, t) + \bar{A}_3 C_1^{-1} S_1^{-1} \mathbf{y}(t) \end{aligned} \quad (30)$$

式 (29) 减去式 (30) 得:

$$\dot{\bar{\mathbf{e}}}_2 = A_4^0 \bar{\mathbf{e}}_2 + \Lambda \bar{N} \mathbf{f}_s + \Lambda \bar{M}_2 \mathbf{e}_\zeta + \Lambda (\bar{g}_2 - \hat{g}_2) \quad (31)$$

其中, $A_4^0 = \Lambda (\bar{A}_4 - \bar{K} \bar{C}_4)$.

再由 (22) 可得:

$$\dot{\mathbf{e}}_\zeta = -\Gamma (K_1 C_1 (\bar{\mathbf{e}}_1 + \dot{\bar{\mathbf{e}}}_1) + K_2 \bar{C}_4 (\bar{\mathbf{e}}_2 + \dot{\bar{\mathbf{e}}}_2)) - \dot{\zeta} \quad (32)$$

取李雅普诺夫函数 $V = V_1 + V_2 + V_3$, 其中 $V_1 = \bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 \bar{\mathbf{e}}_1$, $V_2 = \bar{\mathbf{e}}_2^T P_2 \bar{\mathbf{e}}_2$, $V_3 = \mathbf{e}_\zeta^T \Gamma^{-1} \mathbf{e}_\zeta$, 分别求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \bar{\mathbf{e}}_1^T ((A_1^0)^T P_1 + P_1 A_1^0) \bar{\mathbf{e}}_1 + 2\bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 \bar{A}_2 \bar{\mathbf{e}}_2 + \\ &\quad 2\bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 \bar{M}_1 \mathbf{e}_\zeta + 2\bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 (g_1 - \hat{g}_1) + \\ &\quad 2\bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 D_1 (\mathbf{f}_a - \boldsymbol{\nu}) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \bar{\mathbf{e}}_2^T ((A_4^0)^T P_2 + P_2 A_4^0) \bar{\mathbf{e}}_2 + 2\bar{\mathbf{e}}_2^T P_2 \Lambda \bar{N} \mathbf{f}_s + \\ &\quad 2\bar{\mathbf{e}}_2^T P_2 \Lambda \bar{M}_2 \mathbf{e}_\zeta + 2\bar{\mathbf{e}}_2^T P_2 \Lambda (\bar{g}_2 - \hat{g}_2) \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -2\mathbf{e}_\zeta^T K_1 C_1 (\bar{\mathbf{e}}_1 + \dot{\bar{\mathbf{e}}}_1 - 2\mathbf{e}_\zeta^T K_2 \bar{C}_4) (\bar{\mathbf{e}}_2 + \dot{\bar{\mathbf{e}}}_2) \\ &\quad - 2\mathbf{e}_\zeta^T \Gamma^{-1} \dot{\zeta} \end{aligned} \quad (35)$$

由式 (23) 得:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 D_1 (\mathbf{f}_a - \boldsymbol{\nu}) &= \\ \bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 D_1 \mathbf{f}_a - \bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 D_1 \rho \frac{D_1^T P_1 \bar{\mathbf{e}}_1}{\|D_1^T P_1 \bar{\mathbf{e}}_1\|} &\leq \\ \partial \|\bar{\mathbf{e}}_1 P_1 D_1\| - \rho \|\bar{\mathbf{e}}_1 P_1 D_1\| &= \\ -\rho_0 \|\bar{\mathbf{e}}_1 P_1 D_1\| &< 0 \end{aligned} \quad (36)$$

另外, 由引理 3 得:

$$2\bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 (g_1 - \hat{g}_1) \leq (L_g T^{-1})^2 \bar{\mathbf{e}}_1^T P_1^2 \bar{\mathbf{e}}_1 + \bar{\mathbf{e}}_1^T \bar{\mathbf{e}}_1 \quad (37)$$

$$2\bar{\mathbf{e}}_2^T P_2 \Lambda (\bar{g}_2 - \hat{g}_2) \leq \Lambda (L_g T^{-1})^2 \bar{\mathbf{e}}_2^T P_2^2 \bar{\mathbf{e}}_2 + \bar{\mathbf{e}}_2^T \bar{\mathbf{e}}_2 \quad (38)$$

根据 (33)、(36) 和 (37) 可知:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq \bar{\mathbf{e}}_1^T ((A_1^0)^T P_1 + P_1 A_1^0 + (L_g T^{-1})^2 P_1^2 + I) \bar{\mathbf{e}}_1 + \\ &\quad 2\bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 \bar{A}_2 \bar{\mathbf{e}}_2 + 2\bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 M_1 \mathbf{e}_\zeta \end{aligned} \quad (39)$$

将式 (38) 代入 (34) 得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq \bar{\mathbf{e}}_2^T ((A_4^0)^T P_2 + P_2 A_4^0 + \Lambda (L_g T^{-1})^2 P_2^2 + I) \bar{\mathbf{e}}_2 + \\ &\quad 2\bar{\mathbf{e}}_2^T P_2 \Lambda \bar{N} \mathbf{f}_s + 2\bar{\mathbf{e}}_2^T P_2 \Lambda M_2 \mathbf{e}_\zeta \end{aligned} \quad (40)$$

由引理 4 可知:

$$\mathbf{e}_\zeta^T K_2 \bar{C}_4 \bar{\mathbf{e}}_2 = \mathbf{e}_\zeta^T \bar{M}_2^T \Lambda^T P_2 \bar{\mathbf{e}}_2 \quad (41)$$

$$\mathbf{e}_\zeta^T K_1 C_1 \bar{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{e}_\zeta^T M_1^T P_1 \bar{\mathbf{e}}_1 \quad (42)$$

进一步的, 由引理 5 可得:

$$-2\mathbf{e}_\zeta^T \Gamma^{-1} \dot{\zeta} \leq -\mathbf{e}_\zeta^T \mathbf{e}_\zeta - \|\dot{\zeta}\|^2 \lambda_{\max}(\Gamma^{-2}) \quad (43)$$

其中, $\lambda_{\max}(\Gamma^{-2})$ 为 Γ^{-2} 的最大特征值.

由式 (37) ~ (43) 得:

$$\dot{V} \leq -\bar{\mathbf{e}}^T \Omega \bar{\mathbf{e}} + 2\bar{\mathbf{e}}_2^T P_2 \Lambda \bar{N} \mathbf{f}_s - \|\dot{\zeta}\|^2 \lambda_{\max}(\Gamma^{-2})$$

根据式 (24), 有:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\|\bar{\mathbf{e}}\| (\lambda_{\min}(\Omega) \|\bar{\mathbf{e}}\| - 2\|P_2 \Lambda \bar{N}\| \omega) - \\ &\quad \|\dot{\zeta}\|^2 \lambda_{\max}(\Gamma^{-2}) \end{aligned}$$

因此, 当 $\|\bar{\mathbf{e}}\| \geq 2\lambda_{\min}^{-1}(\Omega)\|P_2\Lambda\bar{N}\|\omega$ 时, 式 (25) 成立, 状态估计误差和干扰估计误差一致最终有界. \square

注 1. 假设 3 中的式 (15) 和秩条件 $\text{rank}(C_1D_1) = \text{rank}(D_1)$ 是子系统 1 滑模观测器存在的条件^[1]. 而由 $\text{rank}(CD) = \text{rank}\left(\begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_4 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} D_1 \\ 0 \end{bmatrix}\right) = \text{rank}(C_1D_1)$, 可知式 (3) 保证了该条件的成立.

注 2. 式 (31) 中 $(\Lambda\bar{A}_4, \bar{C}_4)$ 可检测时, 可配置极点使误差稳定, 即其满足:

$$\text{rank}\begin{bmatrix} sI_{n+p-2l} - \Lambda\bar{A}_4 \\ \bar{C}_4 \end{bmatrix} = n+p-2l, \quad \text{Re}(s) > 0.$$

上式成立的充要条件是 (A_4, C_4) 可检测^[16], 即 (A, C) 可检测^[22], 式 (4) 保证了误差动态系统 (31) 的稳定.

注 3. 在出现执行器和传感器并发故障时, 文献 [3] 用 H_∞ 方法处理未知干扰, 最小化干扰对故障重构误差的影响, 但不能估计出干扰, 文献 [17] 构造的估计器只含估计误差的纯积分项, 仅对定值或缓变干扰有效, 但实际应用中突变干扰更常见. 为此, 我们引入了误差项的比例项, 如式 (22) 所示, 有助于改善观测器的快速性, 进一步消除了未知干扰对状态估计误差的影响.

3 故障估计

观测器 (20)~(22) 得到了系统状态和干扰的估计值, 在此基础上, 本节依次给出执行器故障和传感器故障的估计方法.

3.1 执行器故障重构

当故障存在时, 为使状态误差 (26) 的滑模运动在有限时间内到达并维持在滑模面 S 上, 我们将设计滑模项 ν 的增益 ρ_0 . 根据式 (23), 定义滑模面为:

$$S = \{t \in \mathbf{R}^+ : s(t) = 0 | s(t) = \bar{\mathbf{e}}_1\}$$

定理 2. 对于子系统式 (13) 设计观测器 (18) 和 (19), 滑模项为 (23), 当式 (25) 有解时, 误差 $\bar{\mathbf{e}}$ 有界, 若增益 ρ_0 满足:

$$\rho_0 \geq \|D_1^{-T}\| \times (\|A_1^0\| + \|\bar{A}_2\| + \|M_1\| + L_g|T^{-1}|)\boldsymbol{\varepsilon} + \eta_0 \quad (44)$$

其中, η_0 为任意的较小正标量, 则状态估计误差 (26) 将在有限时间内到达并维持在滑模面上.

证明. 由定理 1, $\bar{\mathbf{e}}$ 收敛到 $\{\bar{\mathbf{e}} : \|\bar{\mathbf{e}}\| \leq \boldsymbol{\varepsilon}\}$, 其中

$$\boldsymbol{\varepsilon} := \frac{2\|P_2\Lambda\bar{N}\|\omega}{\lambda_{\min}(\Omega)} + \boldsymbol{\varepsilon}_0$$

取李雅普诺夫函数 $V_s = 0.5S^T P_1 S$, 根据式 (26), 对 V_s 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &= \bar{\mathbf{e}}_1^T P_1 (A_1^0 \bar{\mathbf{e}}_1 + \bar{A}_2 \bar{\mathbf{e}}_2 + D_1(\mathbf{f}_a - \boldsymbol{\nu}) + M_1 \mathbf{e}_\zeta + g_1 - \hat{g}_1) \leq \\ &\|\bar{\mathbf{e}}_1^T P_1\| (\|A_1^0\| \|\bar{\mathbf{e}}_1\| + \|\bar{A}_2\| \|\bar{\mathbf{e}}_2\| + \|M_1\| \|\mathbf{e}_\zeta\| + L_g|T^{-1}| \|\bar{\mathbf{e}}_1\|) - \rho_0 \|D_1^T P_1 \bar{\mathbf{e}}_1\| \leq \\ &\|D_1^T P_1 \bar{\mathbf{e}}_1\| [\|D_1^{-T}\|(\|A_1^0\| + \|\bar{A}_2\| + \|M_1\| + L_g|T^{-1}|)\boldsymbol{\varepsilon} - \rho_0] \end{aligned}$$

当 ρ_0 满足式 (44) 时, $\dot{V}_s < -\eta_0 \|D_1\| \sqrt{\lambda_{\min}(P_1)} \sqrt{V_s}$, 因此滑模运动可以在有限时间内到达滑模面 $S = \{t \in \mathbf{R}^+ : s(t) = 0 | s(t) = \bar{\mathbf{e}}_1\}$. \square

滑模运动到达后, $\bar{\mathbf{e}}_1 = \dot{\bar{\mathbf{e}}}_1 = 0$, 误差方程 (26) 变为

$$\bar{A}_2 \bar{\mathbf{e}}_2 + D_1(\mathbf{f}_a - \boldsymbol{\nu}_{eq}) + M_1 \mathbf{e}_\zeta + g_1 - \hat{g}_1 = 0$$

其中, $\boldsymbol{\nu}_{eq}$ 为不连续项 $\boldsymbol{\nu}$ 的等效输出控制信号, 维持滑模运动, 因此

$$\|\boldsymbol{\nu}_{eq} - \mathbf{f}_a\| \leq \mathcal{K}$$

其中, $\mathcal{K} = \|D_1^{-1}\bar{A}_2 + D_1^{-1}M_1 + D_1^{-1}L_g T^{-1}\|\boldsymbol{\varepsilon}$.

当 \mathcal{K} 足够小时, 可以得到:

$$\boldsymbol{\nu}_{eq} \approx \mathbf{f}_a$$

基于等效输出控制原理, $\boldsymbol{\nu}_{eq}$ 可由下式以任意精度逼近^[1]:

$$\boldsymbol{\nu}_{eq} \approx \rho \frac{D_1^T P_1 \bar{\mathbf{e}}_1}{\|D_1^T P_1 \bar{\mathbf{e}}_1\| + \delta}$$

其中, δ 为较小的正标量, 用以减小滑模运动的抖振.

3.2 传感器故障估计

令 $\hat{\mathbf{x}}_2 = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_2 \\ F_2 \hat{\mathbf{f}}_s \end{bmatrix}$, 其估计值可由观测器 (20)~(22) 得到, 故可得:

$$\hat{\mathbf{f}}_s(t) = (F_2^T F_2)^{-1} F_2^T [0_{n-l} \quad I_{p-l}] \hat{\mathbf{x}}_2(t)$$

由式 (25) 易知 $\|\bar{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{x}}_2\| \leq \boldsymbol{\varepsilon}$, 则 $\|\mathbf{f}_s - \hat{\mathbf{f}}_s\| \leq \boldsymbol{\varepsilon}$, 对于足够小的 $\boldsymbol{\varepsilon}$, 有:

$$\mathbf{f}_s(t) \approx \hat{\mathbf{f}}_s(t)$$

需要指出的是, 在 $\bar{E} + \bar{L}\bar{C}_4$ 非奇异的前提下, 可设计参数降低 \mathbf{f}_s 对状态估计误差的影响, 结合式 (27) 有:

$$\Lambda\bar{N} = \begin{bmatrix} -\bar{L}_1 \\ I_{p-l} + C_4 \bar{L}_1 \end{bmatrix} (\bar{L}_2)^{-1} F_2 \quad (45)$$

由式 (45) 代入式 (31):

$$\dot{\bar{e}}_2 = A_4^0 \bar{e}_2 + \begin{bmatrix} -\bar{L}_1 \\ I_{p-l} + C_4 \bar{L}_1 \end{bmatrix} (\bar{L}_2)^{-1} F_2 \mathbf{f}_s + \Lambda \bar{M}_2 \mathbf{e}_\zeta + \Lambda (\bar{g}_2 - \hat{g}_2)$$

由 \mathbf{f}_s 的系数项可看出, 可以选择一个低增益 \bar{L}_1 , 高增益 \bar{L}_2 来减弱有界故障 \mathbf{f}_s 的影响. 而由式 (25) 可得:

$$\|\bar{e}\| < 2\omega \frac{\|P_2 \Lambda \bar{N}\|}{\lambda_{\min}(\Omega)} + \varepsilon_0$$

易知低增益 \bar{L}_1 , 高增益 \bar{L}_2 同样能够有效地降低误差的上界.

4 计算机仿真

本节通过计算机仿真验证算法的有效性. 考虑同时发生传感器故障和执行器故障的系统 (1) 和 (2), 其中参数为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & -3.7 & 0 \\ 1 & 2.5 & -6 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0.4 & 1 \\ 0.3 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5 \sin \mathbf{x}_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

执行器故障、传感器故障和干扰函数分别为

$$\mathbf{f}_a(t) = \begin{cases} t-3, & 3s \leq t < 6s \\ -t+9, & 6s \leq t < 9s \\ 0, & 0 \leq t < 3s, t \geq 9s \end{cases}$$

$$\mathbf{f}_s(t) = \begin{cases} 2t-2, & 1s \leq t < 3s \\ 4, & 3s \leq t < 5s \\ -2t+14, & 5s \leq t < 7s \\ 0, & 0 \leq 0 \leq t < 1s, t \geq 7s \end{cases}$$

$$\zeta(t) = \begin{cases} 0.2 \sin(6(t-4)) + 0.25 \sin(8(t-4)) + 6, & t > 4s \\ 0, & t \leq 4s \end{cases}$$

初值为 $\mathbf{x}(0) = [0 \ 0.1 \ 0.1]^T$.

根据文献 [8] 中线性变换矩阵的求法, 求得引理

1 中矩阵 T, S :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

并计算 $\text{rank} = \begin{bmatrix} sI - A_1 & D_1 \\ C_1 & 0 \end{bmatrix} = 2$, 即式 (15)

成立, 取 $A_1^0 = -3$, 使得子系统 1 的观测器稳定. 根据第 3.2 节中 \bar{L} 的设计原则, 取 $\bar{L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}$, 使 Λ 非奇异. 将矩阵 $(\Lambda \bar{A}_4 - \Lambda \bar{K} \bar{C}_4)$ 的极点配置在 $(-5 + i, -5 - i, -7, -8)$, 求得:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 5.2377 & 0.1994 & -0.1332 & -0.2364 \\ 1.5567 & -0.2130 & -0.0606 & 0.0447 \end{bmatrix}$$

根据引理 4 求得 $K_1 = 0.2, K_2 = [1 \ -3]$, 再求解式 (24) 得:

$$P_1 = 0.2, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 3 & 10 \end{bmatrix}$$

图 1~3 显示了该类观测器对状态变量的估计. 从图中可以看出除了初始阶段之外, 观测器对系统状态的三个变量都有较好的估计. 图 4 为传感器故障 \mathbf{f}_s 的实际值与估计值曲线, 可以看出估计值在第 1s 至第 7s 之间明显偏离了 0, 能跟踪故障的真实值, 但存在一定的延迟.

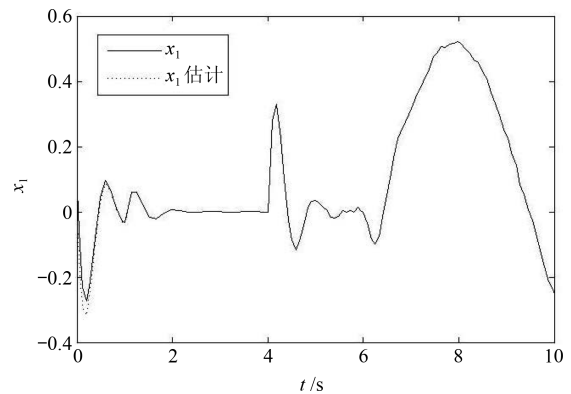


图 1 状态 x_1 的真实值与估计值

Fig. 1 The actual state and the estimate of x_1

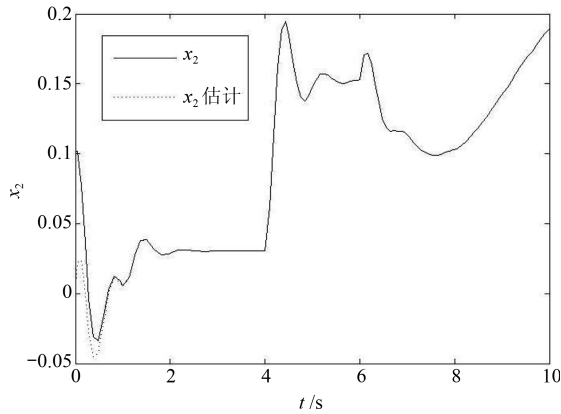


图 2 状态 x_2 的真实值与估计值

Fig. 2 The actual state and the estimate of x_2

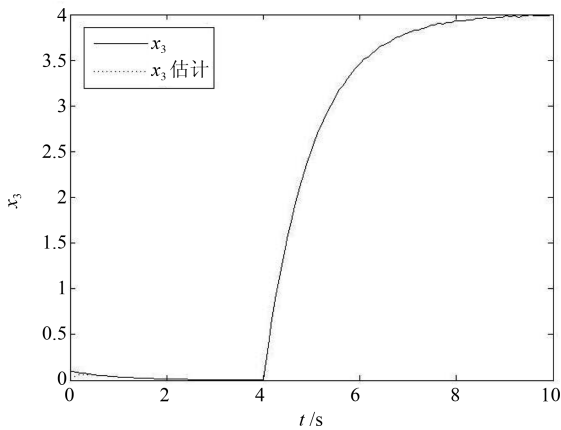


图 3 状态 x_3 的真实值与估计值

Fig. 3 The actual state and the estimate of x_3

图 5 为未知干扰的真实曲线与估计曲线, 为了说明对干扰估计的效果, 我们还给出了利用文献 [17] 得到的估计曲线. 从图 5 中可以看出, 本文方法的估计效果更好, 这是由于该方法中增加了误差比例项, 有效地提升估计的快速性, 估计效果有明显改善, 为执行器故障的精确重构提供了保障.

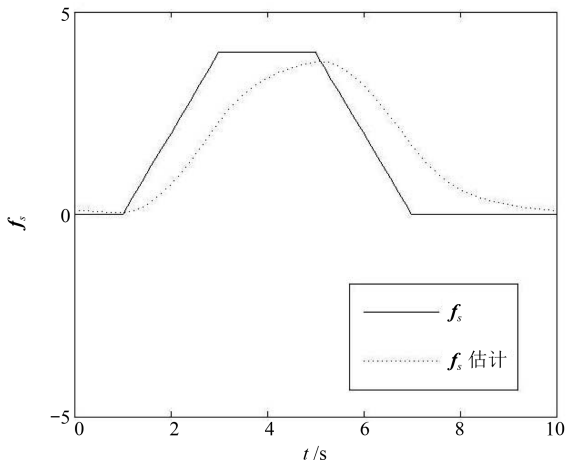


图 4 故障 f_s 的真实值与估计值

Fig. 4 The actual state and the estimate of fault f_s

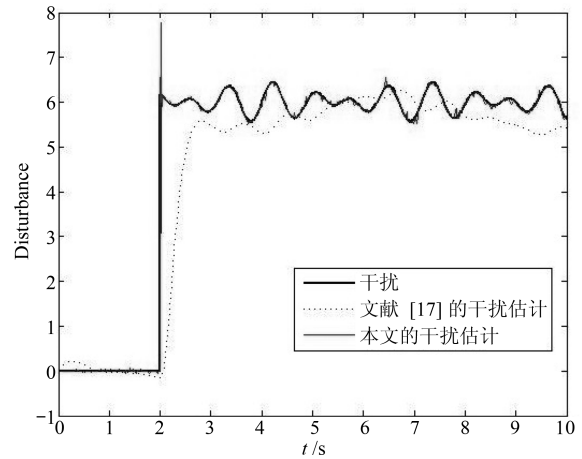


图 5 干扰 ζ 的真实值与估计值

Fig. 5 The actual state and the estimate of disturbance ζ

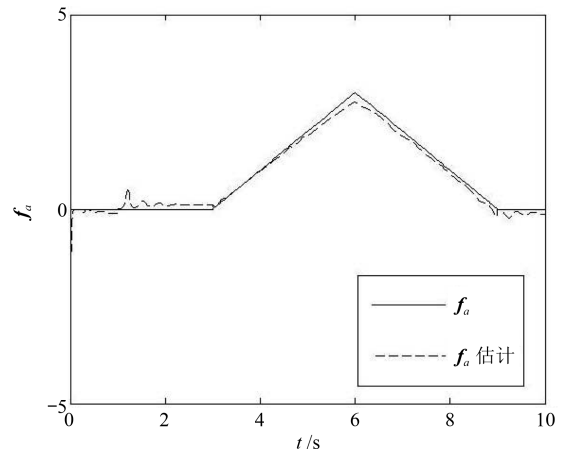


图 6 故障 f_a 的真实值与估计值

Fig. 6 The actual state and the estimate of fault f_a

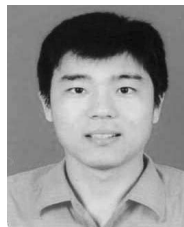
图 6 给出了执行器故障的估计曲线, 其中 ρ 取 15, δ 取 0.01. 可以看出, 在初始阶段估计值有抖动, 在第 3s 故障发生之后, 估计值能较好地跟踪故障真实值, 说明了滑模观测器的有效性.

5 结论

本文针对非线性系统的执行器故障和传感器故障, 提出了一种基于广义观测器和滑模观测器的估计方法. 利用系统变换, 将执行器故障和传感器故障分别解耦在两个子系统中, 然后设计广义观测器和滑模观测器估计系统状态和干扰, 在此基础上, 根据等效输出控制原理重构了执行器故障, 利用广义观测器的估计结果得到了传感器故障的估计值, 并探讨了通过调整观测器增益来降低故障对系统负面影响的方法. 需要指出的是, 本文所研究系统的参数要求满足一些假设条件, 所提方法的应用范围受到了一定的限制, 接下来, 我们将研究更一般系统的故障估计问题.

References

- 1 Tan C P, Edwards C. Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor faults. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2003, **13**(5): 443–463
- 2 Tan C P, Edwards C. Sliding mode observers for detection and reconstruction of sensor faults. *Automatica*, 2002, **38**(10): 1815–1821
- 3 Raoufi R, Marquez H J, Zinober A S I. H_∞ sliding mode observers for uncertain nonlinear Lipschitz systems with fault estimation synthesis. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2010, **20**(16): 1785–1801
- 4 Lan J L, Patton R J. A new strategy for integration of fault estimation within fault-tolerant control. *Automatica*, 2016, **69**: 48–59
- 5 Qiu A B, Jiang B, Wen C L, Mao Z L. Fault estimation and accommodation for networked control systems with nonuniform sampling periods. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2015, **29**(4): 427–442
- 6 Wang H, Daley S. Actuator fault diagnosis: an adaptive observer-based technique. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, **41**(7): 1073–1078
- 7 Jiang B, Chowdhury F N. Fault estimation and accommodation for linear MIMO discrete-time systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, **13**(3): 493–499
- 8 Gao Z W, Ding S X. Actuator fault robust estimation and fault-tolerant control for a class of nonlinear descriptor systems. *Automatica*, 2007, **43**(5): 912–920
- 9 Chen W, Saif M. Observer-based strategies for actuator fault detection, isolation and estimation for certain class of uncertain nonlinear systems. *IET Control Theory & Applications*, 2007, **1**(6): 1672–1680
- 10 Alwi H, Edwards C, Marcos A. Fault reconstruction using a LPV sliding mode observer for a class of LPV systems. *Journal of the Franklin Institute*, 2012, **349**(2): 510–530
- 11 Chen L J, Patton R, Goupil P. Application of model-based LPV actuator fault estimation for an industrial benchmark. *Control Engineering Practice*, 2016, **56**: 60–74
- 12 Yu J Y, Liu Z Y. Fault reconstruction based on sliding mode observer for linear descriptor systems. In: Proceedings of the 7th Asian Control Conference. Hong Kong, China: IEEE, 2009. 1132–1137
- 13 Gao Z, Ding S X. Sensor fault reconstruction and sensor compensation for a class of nonlinear state-space systems via a descriptor system approach. *IET Control Theory & Applications*, 2007, **1**(3): 578–585
- 14 Zhang J, Swain A K, Nguang S K. Robust sensor fault estimation scheme for satellite attitude control systems. *Journal of the Franklin Institute*, 2013, **350**(9): 2581–2604
- 15 Gao Z W, Liu X X, Chen M Z Q. Unknown input observer-based robust fault estimation for systems corrupted by partially decoupled disturbances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(4): 2537–2547
- 16 Raoufi R, Marquez H J. Simultaneous sensor and actuator fault reconstruction and diagnosis using generalized sliding mode observers. In: Proceedings of the 2010 American Control Conference. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2010. 7016–7021
- 17 Gao Z W, Wang H. Descriptor observer approaches for multivariable systems with measurement noises and application in fault detection and diagnosis. *Systems & Control Letters*, 2006, **55**(4): 304–313
- 18 Yang J Q, Zhu F L, Wang X, Bu X H. Robust sliding-mode observer-based sensor fault estimation, actuator fault detection and isolation for uncertain nonlinear systems. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, **13**(5): 1037–1046
- 19 Zhang C F, Yan M, He J, Luo C. LMI-based sliding mode observers for incipient faults detection in nonlinear system. *Journal of Applied Mathematics*, 2012, 2012: Article No. 528932
- 20 Corless M, Tu J. State and input estimation for a class of uncertain systems. *Automatica*, 1998, **34**(6): 757–764
- 21 Zhang K, Jiang B, Cocquempot V. Adaptive observer-based fast fault estimation. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2008, **6**(3): 320–326
- 22 Hui S, Žak S H. Observer design for systems with unknown inputs. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2005, **15**(4): 431–446



文传博 上海电机学院电气学院副教授。2015 年获得上海交通大学控制理论与控制工程博士学位。主要研究方向为故障诊断, 数据融合。本文通信作者。

E-mail: chuanbowen@163.com

(WEN Chuan-Bo Associate professor at the College of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University.

He received his Ph. D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2015. His research interest covers fault diagnosis and data fusion. Corresponding author of this paper.)



邓露 上海电机学院电气学院硕士研究生。主要研究方向为基于模型的故障诊断。E-mail: 18721615736@163.com

(DENG Lu Master student at the College of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University. Her research interest covers model-based fault diagnosis.)



吴兰 河南工业大学电气工程学院教授。主要研究方向为智能故障诊断, 系统建模与控制。

E-mail: richod@126.com

(WU Lan Professor at the College of Electrical Engineering, Henan University of Technology. Her research interest covers intelligent fault diagnosis,

system modeling, and control.)