

DOI: 10.7652/xjtuxb201609015

基于 T-S 模糊模型的观测器和动态输出 反馈容错控制器设计

朱芳来, 蒋鹏, 李晓航
(同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海)

摘要: 针对具有执行器故障和传感器故障的非线性系统,提出了一种基于 T-S 模型的观测器设计和动态输出反馈控制器设计方法。首先,将非线性系统转化为 T-S 模型,以此模型作为设计模型,利用扩展传感器故障为辅助状态向量的方式,将系统扩展为增维的 T-S 描述系统;然后,针对增维的 T-S 描述系统,设计模糊自适应观测器以达到对非线性系统的状态、执行器和传感器故障同时估计的目的;最后,基于观测器对传感器和执行器故障的估计,设计了一种动态输出反馈容错控制器以达到容错控制的目的,其中以线性矩阵不等式的方式给出了观测器和容错控制器存在的充分性条件。通过实例仿真验证了该文设计方法的有效性。

关键词: 自适应观测器;容错控制;T-S 模型;执行器故障重构;传感器故障重构

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)09-0091-06

Design of Observer and Dynamic Output Feedback Fault Tolerant Controller Based on T-S Fuzzy Model

ZHU Fanglai, JIANG Peng, LI Xiaohang
(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: For the nonlinear systems with actuator and sensor faults, the design methodology of observer and dynamic output feedback controller based on T-S fuzzy model was discussed. Firstly, the nonlinear system was transformed into T-S fuzzy model. Then, taking the T-S fuzzy model as the design model, and extending the sensor faults to an auxiliary state to obtain an augmented T-S fuzzy descriptor system, a fuzzy adaptive observer was designed to achieve the simultaneous estimations of the states, the actuator faults and the sensor faults of the nonlinear system. In addition, the dynamic output feedback fault tolerant controller was designed to achieve the purpose of fault tolerance control based on the observer and estimate the sensor fault and actuator fault. Meanwhile, the sufficient conditions for the existence of the observer and fault tolerant controller were given in terms of the linear matrix inequalities. Finally, the effectiveness of the proposed methods was verified by a simulation example.

Keywords: adaptive observer; fault tolerant control; T-S fuzzy model; actuator fault reconstruction; sensor fault reconstruction

在实际控制系统中,故障的出现会导致系统不稳定或系统损坏,因此对故障诊断和容错控制的研究成为控制领域中的热点问题^[1-2],其中对于非线性系统容错控制器的设计成为一个具有挑战性的

课题^[3-4]。

由于 T-S 模型结构简单,且能以任意精度逼近任何一光滑非线性函数,因而结合 T-S 模糊模型和线性系统设计方法来解决非线性问题的思路受到学者们的关注^[5-9]。例如,文献[5]针对非线性动态系统将高阶滑模观测器扩展为 T-S 模糊模型方法,提出了一种传感器故障检测与隔离问题的解决方案。文献[6]针对具有传感器故障的模糊随机系统,设计了鲁棒观测器进行故障估计,同时还提出了基于观测器的模糊容错控制方案。文献[7]通过不同观测器给出的状态估计得出加权估计状态,并基于状态估计进行了容错控制器设计。文献[8]通过对 $k-1$ 步故障的估计,得出第 k 步的误差动态方程,并以此提出了故障估计方法和容错控制器设计方案。文献[9]对具有多个执行器故障的非线性不确定系统,设计了自适应容错控制器。但是,自适应故障诊断观测器通常仅适用于发生定值故障的系统^[10],且很难处理带有传感器故障的不确定性系统^[11]。文献[1-2]只考虑了线性系统的故障估计,文献[3-5,9,11]考虑的系统只有执行器故障而未考虑传感器故障的存在,具有执行器故障和传感器故障的非线性系统观测器和容错控制器的设计少有报道。

本文针对 T-S 模糊系统,在同时具有执行器故障和传感器故障的情况下,提出了一种模糊自适应观测器设计来同时估计非线性系统的状态、执行器故障和传感器故障的方法,同时还提出了基于观测器的动态输出反馈容错控制器设计方法。

1 T-S 模型构造

考虑一类非线性系统模型

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \varphi(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{D}\mathbf{f}_a(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}\mathbf{f}_s(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ 、 $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$ 、 $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ 分别为状态、可测输出和控制输入向量; $\mathbf{f}_a \in \mathbb{R}^r$ 、 $\mathbf{f}_s \in \mathbb{R}^w$ 分别为执行器故障和传感器故障; φ 为非线性项; $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 、 $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{n \times r}$ 、 $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{p \times n}$ 和 $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{p \times w}$ 为相应维数的矩阵。假设 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{E}$ 为列满秩矩阵。

考虑 T-S 模糊模型

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{D}\mathbf{f}_a(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}\mathbf{f}_s(t) \end{cases}$$

构造 T-S 模型

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z(t))(\mathbf{A}_i\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{D}\mathbf{f}_a(t)) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}\mathbf{f}_s(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\bar{h}$ 为模糊规则数; $\mathbf{A}_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是第 i 个局部模型相应维数的矩阵,而

$$h_i(z(t)) = \prod_{k=1}^s \delta_k^i(z_k(t)) / \sum_{i=1}^{\bar{h}} \prod_{k=1}^s \delta_k^i(z_k(t))$$

为模糊权值,且满足 $0 \leq h_i(z(t)) \leq 1$ 及 $\sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z(t)) = 1$ 。具体参数矩阵可由文献[12]得到。

引理 1^[13] 假设 ϕ 是连续可微的函数,且 $\phi(0) = 0$ 。对于任意的 $\epsilon_\phi > 0$,式(2)所示的 T-S 模糊系统可近似描述式(1),近似误差为

$$\|\phi(x) - \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z(t))\mathbf{A}_i\mathbf{x}(t)\| \leq \epsilon_\phi$$

2 鲁棒观测器设计

引入状态向量 $\bar{\mathbf{x}} = [\mathbf{x}^T \quad \mathbf{f}_s^T]^T \in \mathbb{R}^{n+w}$,定义 $\bar{\mathbf{A}}_i = [\mathbf{A}_i \quad \mathbf{0}_{n \times w}] \in \mathbb{R}^{n \times (n+w)}$, $\bar{\mathbf{C}}_i = [\mathbf{C} \quad \mathbf{E}] \in \mathbb{R}^{p \times (n+w)}$, $\mathbf{T} = [\mathbf{I}_n \quad \mathbf{0}_{n \times w}] \in \mathbb{R}^{n \times (n+w)}$,则式(2)可改写为

$$\begin{cases} \mathbf{T}\dot{\bar{\mathbf{x}}} = \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z) (\bar{\mathbf{A}}_i\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{f}_a) \\ \mathbf{y}(t) = \bar{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (3)$$

如果式(3)存在鲁棒观测器,那么可同时估计出系统状态 $\mathbf{x}$ 和传感器故障 $\mathbf{f}_s$ 。设计鲁棒观测器,即

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z) (N_i\mathbf{z} + L_i\mathbf{y} + \mathbf{G}\mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{G}\mathbf{D}\hat{\mathbf{f}}_a) \\ \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{z} - \mathbf{F}\mathbf{y} \\ \hat{\mathbf{y}} = \bar{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{x}} \\ \dot{\hat{\mathbf{f}}}_a = \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z) (\Phi_i(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{n+2}$ 为观测器状态向量; $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{\mathbf{x}}^T \quad \hat{\mathbf{f}}_s^T]^T$ 为 $\bar{\mathbf{x}} = [\mathbf{x}^T \quad \mathbf{f}_s^T]^T$ 的估计; $\hat{\mathbf{f}}_a$ 为执行器故障的估计。

文献[14]在执行器故障调节估计中是基于系统输出微分信号的,而式(4)中对执行器故障进行估计时只用到了输出估计误差。系统的微分信号不易得到,且如果在设计中使用了系统输出微分信号,则容易产生高频噪声,给设计带来不确定性。

引理 2 矩阵 $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{(n+w) \times n}$ 、 $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{(n+w) \times p}$ 满足

$$\mathbf{G}\mathbf{T} = \mathbf{I}_{n+w} + \mathbf{F}\bar{\mathbf{C}} \quad (5)$$

定义估计误差 $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$,误差动态系统表述为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}} &= \mathbf{G}\mathbf{T}\dot{\bar{\mathbf{x}}} - \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{G} \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z) (\bar{\mathbf{A}}_i\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{f}_a) - \\ &\quad \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z) (N_i\mathbf{z} + L_i\mathbf{y} + \mathbf{G}\mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{G}\mathbf{D}\hat{\mathbf{f}}_a) = \\ &\quad \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z) (\mathbf{G}\bar{\mathbf{A}}_i\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{G}\mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{G}\mathbf{D}\mathbf{f}_a - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_i z - L_i y - G B u - G D \hat{f}_a = \\ \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z) (N_i e + (G \bar{A}_i - L_i \bar{C} - N_i - \\ N_i F \bar{C}) \bar{x} + G D \tilde{f}_a) \end{aligned}$$

如果令

$$N_i = G \bar{A}_i - L_i \bar{C} - N_i F \bar{C} \quad (6)$$

定义执行器故障估计误差 $\tilde{f}_a = f_a - \hat{f}_a$, 则误差方程可表述为

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z) (N_i e + G D \tilde{f}_a) \quad (7)$$

如果令 $K_i = L_i + N_i F$, 则式(6)可表述为

$$N_i = G \bar{A}_i - K_i \bar{C} \in R^{(n+w) \times (n+w)} \quad (8)$$

$$L_i = K_i - N_i F \in R^{(n+w) \times p} \quad (9)$$

引理 3 对任意的矩阵 $K_i \in R^{(n+w) \times p}$, 由式(8)、(9)所确定的矩阵 N_i, L_i 都是式(6)的解。

根据式(4), 故障估计误差可动态表述为

$$\dot{\tilde{f}}_a = \tilde{f}_a - \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(z) (\Phi_i \bar{C} e) \quad (10)$$

令 $e = \begin{bmatrix} e \\ \tilde{f}_a \end{bmatrix}$, 将式(8)代入式(7), 结合式(10), 得

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i(\hat{x}) ((\tilde{A}_i - \tilde{L}_i \tilde{C}) e + \tilde{D} \tilde{f}_a) \quad (11)$$

式中: $\tilde{A}_i = \begin{bmatrix} G \bar{A}_i & G D \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \tilde{L}_i = \begin{bmatrix} K_i \\ \Phi_i \end{bmatrix}; \tilde{C} = [\bar{C} \quad 0]; \tilde{D} =$

$\begin{bmatrix} 0 \\ I_q \end{bmatrix}; \tilde{f}_a = \tilde{f}_a$ 。

定义

$$\|H\|_{\infty} = \sup_{\|f_a\|_{L_2} \neq 0} \frac{\|e\|_{L_2}}{\|f_a\|_{L_2}} \leq \lambda, \quad \lambda > 0 \quad (12)$$

定理 1 如果线性矩阵不等式

$$\left\{ \begin{aligned} & \min \lambda^2 \\ & \left[\begin{array}{cc} \tilde{A}_i^T P - \tilde{C}^T X_i^T + P \tilde{A}_i - X_i \tilde{C} + I & P \tilde{D} \\ * & -\lambda^2 I \end{array} \right] < 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

关于矩阵 $X_i \in R^{(n+w+r) \times p}$ 和正定矩阵 $P \in R^{(n+w+r) \times (n+w+r)}$ 有可行解, 取 $\tilde{L}_i = P^{-1} X_i$, 则式(4)是式(3)在式(12)定义下的观测器, 可得式(11)系统是稳定的。式(13)中“*”表示任意值。

通过求解式(13)可解决 2 个目标问题: ①保证误差系统(11)的鲁棒稳定; ②在减少 H_{∞} 增益的条件下提高对故障微分 $\tilde{f}_a$ 干扰的鲁棒性。 λ 越大, 则观测器在 H_{∞} 意义下估计效果就越差; 如果急剧减小 λ , 观测器系统的特征值将被配置在远离虚轴的复平面上。因此, 可通过引入 D 型稳定的概念来配

置式(11)的极点。

定义 $D_r = \{\gamma \in C \mid |\gamma| < \alpha, \operatorname{Re}(\gamma) < \beta\}$, 并应用文献[15]所提 D 型稳定, 可得约束方程

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} -\alpha P & P \hat{A}_i \\ \hat{A}_i^T P & -\alpha P \end{bmatrix} < 0 \\ \hat{A}_i^T P + P \hat{A}_i + 2\beta P < 0 \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $\hat{A}_i = \tilde{A}_i - \tilde{L}_i \tilde{C}$ 。误差系统在满足式(14)和定理 1 的条件下是 D 型稳定的。定理 1 给出了增广状态向量 x 的状态估计 $\hat{x}$, 原系统状态估计和传感器故障估计可分别由 $\hat{x} = [I_n \quad 0] \hat{x}$ 和 $\hat{f}_s = [0 \quad I_w] \hat{x}$ 得到, 执行器故障 f_a 可由式(4)在线估计。

3 容错控制器设计

基于观测器的设计, 在一定假设下提出一种动态输出反馈容错控制设计方法, 可使得系统的稳定性在该容错控制器下得到保证。

假设 $\operatorname{rank}[B \quad D] = \operatorname{rank}(B)$, 则有矩阵 $B^* \in R^{m \times n}$, 使得 $(I_n - BB^*)D = 0$ [16], 动态输出反馈容错控制为

$$\xi(t) = \sum_{j=1}^{\bar{h}} h_j(z) [A_{Kj} \xi(t) + B_{Kj} (y(t) - E \hat{f}_s(t))] \quad (15)$$

$$u(t) = \sum_{j=1}^{\bar{h}} h_j(z) [C_{Kj} \xi(t) + D_{Kj} (y(t) - E \hat{f}_s(t)) - B^* D \hat{f}_a(t)] \quad (16)$$

式中: $\xi(t) \in R^n$ 为控制器的状态向量。将式(16)代入式(2), 得

$$\begin{aligned} \dot{x} = \sum_{i=1}^{\bar{h}} h_i \left[A_i x + B \left(\sum_{j=1}^{\bar{h}} h_j (C_{Kj} \xi + \right. \right. \\ \left. \left. D_{Kj} (y - E \hat{f}_s) - B^* D \hat{f}_a) + D f_a \right) \right] = \\ \sum_{i=1}^{\bar{h}} \sum_{j=1}^{\bar{h}} h_i h_j (A_i x + B C_{Kj} \xi + B D_{Kj} C x + \\ B D_{Kj} E \tilde{f}_s - B B^* D \hat{f}_a + D f_a) = \\ \sum_{i=1}^{\bar{h}} \sum_{j=1}^{\bar{h}} h_i h_j [(A_i + B D_{Kj} C) x + B C_{Kj} \xi + \\ B D_{Kj} E \tilde{f}_s + D \tilde{f}_a] \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\tilde{f}_s = f_s - \hat{f}_s$ 。结合式(15)、(16), 可得

$$\dot{\hat{x}} = \sum_{i=1}^{\bar{h}} \sum_{j=1}^{\bar{h}} h_i h_j (\hat{A}_{ij} \hat{x} + \hat{D}_{ij} \mu) \quad (18)$$

其中

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix}; \hat{A}_{ij} = \begin{bmatrix} A_i + B D_{Kj} C & B C_{Kj} \\ B_{Kj} C & A_{Kj} \end{bmatrix}$$

$$\mu = \begin{bmatrix} \hat{f}_s \\ \hat{f}_a \end{bmatrix}; \hat{D}_{ij} = \begin{bmatrix} BD_{Kj}E & D \\ B_{Kj}E & 0 \end{bmatrix}$$

定理 2 对于给定的 $\epsilon > 0$, 当且仅当存在对称的正定矩阵 $X, Y \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和矩阵 $\hat{A}_{ij} \in \mathbb{R}^{n \times n}, \hat{B}_{ij} \in \mathbb{R}^{n \times p}, \hat{C}_j \in \mathbb{R}^{m \times n}, \hat{D}_j \in \mathbb{R}^{m \times p}$ 满足

$$\begin{bmatrix} X & I_n \\ I_n & Y \end{bmatrix} > 0 \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & B\hat{D}_jE & D & X \\ * & \pi_{22} & \hat{B}_{ij}E & YD & I_n \\ * & * & -\epsilon I_w & 0 & 0 \\ * & * & * & -\epsilon I_r & 0 \\ * & * & * & * & -\epsilon I_n \end{bmatrix} < 0 \quad (20)$$

则动态输出反馈容错控制器可使系统状态鲁棒稳定, 满足 $\|\hat{x}\|_2 < \epsilon \|\mu\|_2$, 其中

$$\pi_{11} = A_iX + XA_i^T + B\hat{C}_j + \hat{C}_j^TB^T$$

$$\pi_{12} = \hat{A}_{ij}^T + A_i + B\hat{D}_jC$$

$$\pi_{22} = YA_i + A_i^TY + \hat{B}_{ij}C + C^T\hat{B}_{ij}^T$$

可得鲁棒 H_∞ 动态输出反馈控制器的参数矩阵为

$$D_{Kj} = \hat{D}_j$$

$$C_{Kj} = (\hat{C}_j - D_{Kj}CX)M^{-T} \quad (21)$$

$$B_{Kj} = N^{-1}(\hat{B}_{ij} - YBD_{Kj})$$

$$A_{Kj} = N^{-1}(\hat{A}_{ij} - Y(A_i + BD_{Kj}C)X)M^{-T} -$$

$$B_{Kj}CXM^{-T} - N^{-1}YBC_{Kj}$$

$M, N \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 满足 $MN^T = I_n - XY$ 。

本文设计方法原理如图 1 所示。

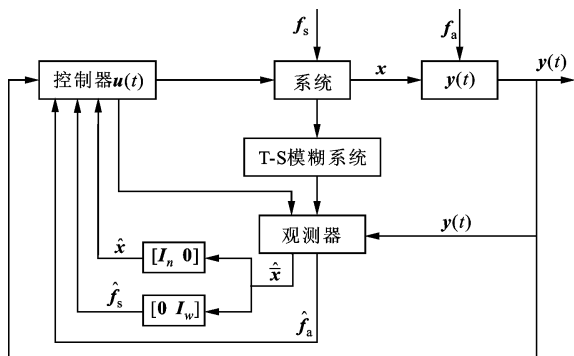


图 1 观测器和容错控制器原理

4 仿真分析

倒立摆系统是研究控制理论的实验平台, 由于与火箭飞行及两足机器人行走有很大的相似性, 因而对倒立摆的研究具有一定的意义。

考虑由直流电机驱动的如图 2 所示的倒立摆^[17-18], 系统状态空间可表述为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ k_1 \sin x_1 + k_2 x_3 \\ k_3 x_2 + k_4 x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_5 \\ 0 \\ k_6 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} k_7 \\ 0 \\ k_8 \end{bmatrix} f_a$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_9 \\ k_{10} \end{bmatrix} f_s \quad (22)$$

式中: $x_1 = \theta$ 为倒立摆转动角度; $x_2 = \dot{\theta} = \omega$ 为倒立摆角速度; $x_3 = I$ 为电流。具体参数为: $k_1 = 9.8, k_2 = 1.0, k_3 = -10, k_4 = -10, k_5 = 1, k_6 = 10, k_7 = 1, k_8 = 10, k_9 = 0.01, k_{10} = -2$ 。

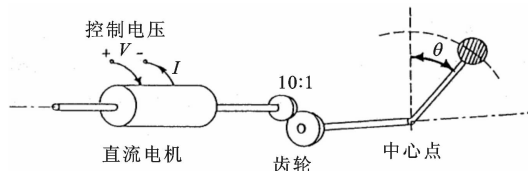


图 2 倒立摆示意图

取两个平衡点 $x_0^1 = [0 \ 0 \ 0]^T, x_0^2 = [\pi/2 \ 0 \ 0]^T$, 式(22)可转化为局部线性系统

$$\dot{x} = A_i x + Bu + Df_a; y = Cx + Ef_s$$

式中

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 9.8 & 0 & 1 \\ 0 & -10 & -10 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -10 & -10 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; E = \begin{bmatrix} 0.01 \\ -2 \end{bmatrix}$$

执行器故障 $f_a = \cos t + 0.2 \sin t$ 和传感器故障 $f_s = 5 \cos t$ 。系统初始状态 $x_0 = [0.01 \ 0 \ 0]^T$, 观测器初始状态 $\hat{x}_0 = [0.03 \ 0 \ 0]^T$ 。选取隶属度函数 $\delta_1^1(z(t)) = \frac{\sin t - 2}{4}, \delta_1^2(z(t)) = 1 - \delta_1^1(z(t))$ 。因为 $\delta_1^1(z(t)) + \delta_1^2(z(t)) = 1$, 所以模糊权值函数与隶属度函数相

等, 模糊权值函数为 $\begin{cases} h_1(z(t)) = \frac{\sin t + 2}{4} \\ h_2(z(t)) = 1 - h_1(z(t)) \end{cases}$ 。设

H_∞ 性能指标 $\lambda = 0.033$, 选取 $\epsilon = 1, \alpha = 50, \beta = -1$ 。

通过求解式(13), 可得

$$K_1 = \begin{bmatrix} 71.37 & 0.39 \\ 27.90 & 0.23 \\ 1301.78 & 6.56 \\ 650.69 & 2.71 \end{bmatrix}; K_2 = \begin{bmatrix} 71.37 & 0.39 \\ 19.04 & 0.20 \\ 1301.78 & 6.51 \\ 650.69 & 2.68 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_1=[4\ 761.88\ 26.25];\Phi_2=[4\ 761.88\ 26.25]$$

由式(8)、(9)可得

$$N_1=\begin{bmatrix}-71.37 & 0.52 & -0.37 & 0.07 \\ -18.10 & 0 & 0.76 & 0.19 \\ -1\ 301.78 & -10.00 & -16.56 & 0.10 \\ -650.69 & -5.00 & -7.71 & -1.08\end{bmatrix}$$

$$N_2=\begin{bmatrix}-71.37 & 0.52 & -0.37 & 0.08 \\ -19.04 & 0 & 0.79 & 0.21 \\ -1\ 301.78 & -10.00 & -16.51 & 0.003 \\ -650.69 & -5.00 & -7.68 & -1.13\end{bmatrix}$$

$$L_1=\begin{bmatrix}35.68 & 0.17 \\ 18.85 & 0.09 \\ 650.86 & 3.25 \\ 325.33 & 1.62\end{bmatrix};L_2=\begin{bmatrix}35.68 & 0.17 \\ 9.52 & 0.04 \\ 650.86 & 3.25 \\ 325.33 & 1.62\end{bmatrix}$$

求解式(19)、(20),可得容错控制器参数矩阵

$$A_{k1}=\begin{bmatrix}-12.42 & -9.77 & -41.62 \\ -1.55 & 0.17 & 5.14 \\ -7.06 & -25.87 & -89.79\end{bmatrix}$$

$$A_{k2}=\begin{bmatrix}-12.39 & -9.74 & -41.30 \\ -1.90 & -0.17 & 4.09 \\ -7.21 & -26.40 & -89.14\end{bmatrix}$$

$$B_{k1}=\begin{bmatrix}5.66 & 0.02 \\ -174.12 & -0.87 \\ 474.66 & 2.52\end{bmatrix};B_{k2}=\begin{bmatrix}-7.18 & -0.03 \\ -65.07 & -0.32 \\ 435.33 & 2.35\end{bmatrix}$$

$$C_{k1}=[-0.47\ -0.40\ -3.67]$$

$$C_{k2}=[-0.47\ -0.47\ -3.46]$$

$$D_{k1}=[-1.17\ -0.006];D_{k2}=[-1.15\ -0.003]$$

系统状态估计如图 3 所示,传感器故障和执行器故障的重构如图 4、5 所示。

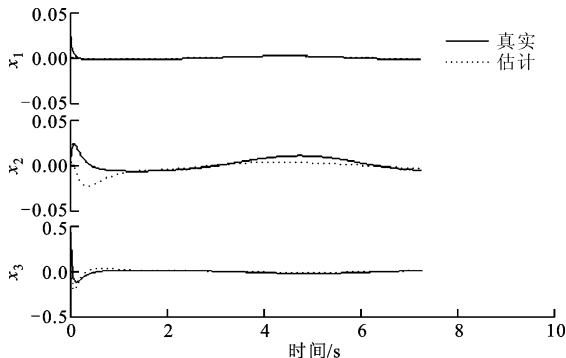


图 3 容错控制下的状态及状态估计

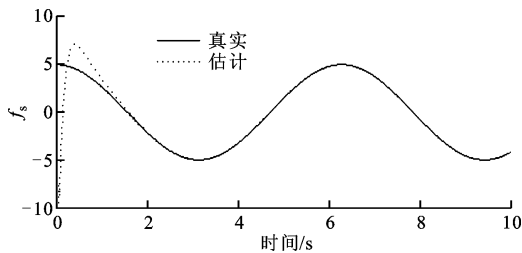


图 4 传感器故障 f_s 的重构

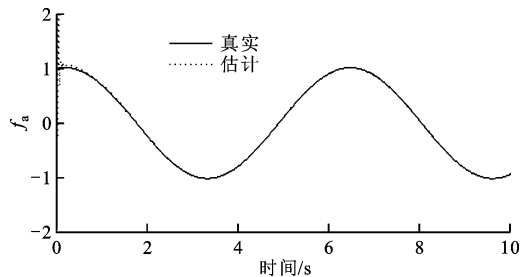


图 5 执行器故障 f_a 的重构

观测器设计方法,达到了对非线性系统状态、执行器故障和传感器故障同时估计的目的。此外,基于设计的观测器,提出了一种动态输出反馈容错控制器设计方法,以达到容错控制的目的。利用线性矩阵不等式,给出了观测器和容错控制器存在的充分性条件。仿真结果验证了所提方法对非线性系统的有效性。

参考文献:

- [1] CHEN J, PATTON R J. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems [M]. New York, USA: Springer Publishing Company, 2012.
- [2] 杨俊起, 张良, 朱芳来, 等. Lipschitz 非线性系统未知输入观测器设计 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(8): 87-92.
YANG Junqi, ZHANG Liang, ZHU Fanglai, et al. Design of observer with unknown input for Lipschitz nonlinear systems [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(8): 87-92.
- [3] EDWARDS C, SPURGEON S K, PATTON R J. Sliding mode observers for fault detection and isolation [J]. Automatica, 2000, 36(4): 541-553.
- [4] YAN X G, EDWARDS C. Adaptive sliding-mode-observer-based fault reconstruction for nonlinear systems with parametric uncertainties [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(11): 4029-4036.
- [5] HAOUARI F A, DJEMAI M, CHERKI B. Sliding mode observers for T-S fuzzy systems with application

5 结 论

本文基于 T-S 模糊模型,对具有传感器故障和执行器故障的非线性系统,提出了一种鲁棒自适应

- to sensor fault estimation [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [6] LIU M, CAO X, SHI P. Fault estimation and tolerant control for fuzzy stochastic systems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2013, 21(2): 221-229.
- [7] LCHALA D, MARX B, RAGOT J, et al. Sensor fault tolerant control of nonlinear Takagi-Sugeno systems: application to vehicle lateral dynamics [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2015, 26(7): 1376-1394.
- [8] HUANG Shengjuan, YANG Guang hong. Fault tolerant controller design for T-S fuzzy systems with time-varying delay and actuator faults: a k -step fault-estimation approach [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(6): 1526-1540.
- [9] YANG Qinmin, SAM GE Shuzhi, SUN Youxian. Adaptive actuator fault tolerant control for uncertain nonlinear systems with multiple actuators [J]. Automatica, 2015, 60: 92-99.
- [10] JIANG Bin, WANG Jianliang, SOH Y C. An adaptive technique for robust diagnosis of faults with independent effects on system outputs [J]. International Journal of Control, 2002, 75(11): 792-802.
- [11] JIANG B, STAROSWIECKI M, COCQUEMPOT V. Fault accommodation for nonlinear dynamic systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(9): 1578-1583.
- [12] TEIXEIRA M, ZAK S. Stabilizing controller design for uncertain nonlinear systems using fuzzy models [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1999, 7(2): 133-142.
- [13] GAO Qing, ZENG Xiaojun, FENG Gang, et al. T-S fuzzy-model-based approximation and controller design for general nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Systems, 2012, 42(4): 1143-1154.
- [14] ZHANG J, SWAIN A K, NGUANG S K. Robust H_∞ adaptive descriptor observer design for fault estimation of uncertain nonlinear systems [J]. Journal of the Franklin Institute, 2014, 351(11): 5162-5181.
- [15] LEE D J, PARK Y. Robust H_∞ sliding mode descriptor observer for fault and output disturbance estimation of uncertain systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57: 2928-2934.
- [16] ZHANG Ke, JIANG Bin, LIU Jingjin. Fast fault accommodation of control systems by using adaptive observer [J]. Control and Decision, 2008, 23(7): 771-775.
- [17] KAWAMOTO S. Nonlinear control and rigorous stability analysis based on fuzzy system for inverted pendulum [C]//Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996: 1427-1432.
- [18] KAZUO T, TAKAYUKI L, HUA O W. Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based designs [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1998, 6(2): 250-265.

[本刊相关文献链接]

- 孙泽宇, 伍卫国, 曹仰杰, 等. 无线传感器网络中能量均衡参数可控覆盖算法. 2016, 50(8): 77-83. [doi:10.7652/xjtuxb201608013]
- 赵皓, 高智勇, 高建民, 等. 一种采用相空间重构的多源数据融合方法. 2016, 50(8): 84-89. [doi:10.7652/xjtuxb201608014]
- 潘艳芝, 王栋, 巩大利, 等. 一种计量稠油中油气水三相流的方法和装置研究. 2016, 50(7): 140-144. [doi:10.7652/xjtuxb201607021]
- 郝维娜, 令锋超, 刘志刚, 等. 轴承滚珠面型误差激光干涉测量系统的研究. 2016, 50(6): 83-89. [doi:10.7652/xjtuxb201606013]
- 王悍泉, 刘凌, 吴华伟. 改进型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制策略. 2016, 50(6): 104-109. [doi:10.7652/xjtuxb201606016]
- 张平, 张小栋, 董晓妮, 等. 滑动轴承润滑油膜厚度光纤动态精密检测模型. 2016, 50(5): 45-50. [doi:10.7652/xjtuxb201605007]
- 杜鹏, 卢义玉, 汤积仁, 等. 新型直旋混合射流破岩特性及机理分析. 2016, 50(3): 81-89. [doi:10.7652/xjtuxb201603013]
- 宋汝君, 单小彪, 李晋哲, 等. 压电储能器涡激振动俘能的建模与实验研究. 2016, 50(2): 55-60. [doi:10.7652/xjtuxb201602010]
- 刘雅琳, 上官博, 徐自力. 干摩擦阻尼对失谐叶盘系统受迫振动的影响. 2016, 50(2): 111-117. [doi:10.7652/xjtuxb201602019]
- 权双璐, 刘杰, 韩罗峰, 等. 一种机械系统非线性类别辨识方法. 2015, 49(12): 104-111. [doi:10.7652/xjtuxb201512017]
- 刘聪, 李颖晖, 刘勇智, 等. 采用高阶终端滑模观测器的执行器未知故障重构. 2015, 49(9): 126-133. [doi:10.7652/xjtuxb201509021]
- 韩冬, 刘俊. 采用代数建模方法的自适应观测器设计. 2015, 49(7): 88-91. [doi:10.7652/xjtuxb201507015]
- 张梦楠, 徐洪泽. 城轨列车反推自动停车控制算法. 2014, 48(9): 136-142. [doi:10.7652/xjtuxb201409023]

(编辑 赵炜)