

基于LMI的一体化鲁棒主动容错控制器设计

刘聪^{1†}, 钱坤¹, 李颖晖², 丁奇¹

(1. 空军第一航空学院, 河南 信阳 464000; 2. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 针对一类发生执行器故障的非线性系统, 提出基于线性矩阵不等式(LMI)的一体化鲁棒主动容错控制器设计方法. 首先, 设计含自适应律的鲁棒滑模观测器, 并将观测器设计方法转化为LMI约束下的凸优化问题, 进而实现执行器故障的鲁棒重构; 然后, 提出基于状态及故障估计的一体化主动容错控制器, 同时通过LMI给出控制器增益解算方法; 最后, 通过数值算例验证容错控制器设计方法的有效性.

关键词: 主动容错; 一体化设计; 线性矩阵不等式; 滑模观测器; 故障重构

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Integrated robust active fault tolerance controller design based on linear matrix inequality

LIU Cong^{1†}, QIAN Kun¹, LI Ying-hui², DING Qi¹

(1. The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang 464000, China; 2. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: For nonlinear systems with actuator faults, an integrated robust active fault tolerant controller is designed based on the linear matrix inequality(LMI) techniques. Firstly, the robust sliding mode observer(SMO) with the adaptive algorithm is proposed, and the calculating method of the observer gain is transformed to a convex optimization under LMI constraints, thus the actuator faults can be reconstructed. Then the integrated robust active fault tolerant controller is proposed based on the state and fault estimates. Meanwhile, the calculating method of the controller gain is also given through LMI techniques. Finally, an example is provided to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: active fault tolerance; integrated design; linear matrix inequality; sliding mode observer; fault reconstruction

0 引言

一般而言, 包含故障诊断环节的主动容错控制技术由于能够处理更多的故障类型, 得到了研究人员广泛的关注. 对于主动容错控制而言, 系统在实际运行中会遭受不确定性、干扰等未知特性的影响, 同时考虑到故障诊断误差, 因而容错控制器实际应用的前提是鲁棒性. 应该指出, 主动容错控制的鲁棒性主要关注两点^[1]: 一是故障诊断的鲁棒性; 二是容错控制律重构期间的鲁棒性. 为了实现这个目标, 在主动容错控制器的设计方法中, 一体化的主动容错控制, 既考虑到故障诊断的鲁棒性指标, 又能兼顾控制律重构期间的鲁棒性要求, 是鲁棒容错控制研究的热点.

采用一体化的主动容错控制设计策略, 为了实现系统的鲁棒性指标, 要求故障诊断环节具有快速性

和有效性. 对于主动容错控制而言, 较大的故障诊断误差, 使得系统在出现故障情形时, 控制器的作用并不能保证满意的控制性能, 因而主动容错控制中有效的故障诊断策略十分重要. 滑模观测器鲁棒性强, 对未知输入具备强跟踪能力, 在故障诊断领域得到了广泛应用. 近年来, 基于滑模观测器的故障重构技术在线性系统中成果较多^[2-6], 而在非线性系统中进展缓慢. 这主要是因为各种不同非线性项的存在, 使得观测器的状态估计误差发散, 因而滑模观测器设计的一个重点是状态估计误差收敛. 另外, 采用滑模观测器实现的故障重构方法, 能够实现包含干扰在内的未知输入信号实现有效的在线估计, 但无法区分干扰和故障, 因而鲁棒性依然是基于滑模观测器故障重构研究关注的重点. 近年来, 国内外鲁棒故障重构研究

收稿日期: 2016-10-18; 修回日期: 2017-05-24.

基金项目: 国家973计划项目(2015CB755805).

作者简介: 刘聪(1988—), 男, 讲师, 博士, 从事无人机状态及故障重构设计、容错控制的研究; 钱坤(1977—), 男, 教授, 博士, 从事无人机教学科研等研究.

[†]通讯作者. E-mail: 598832156@qq.com

也取得了一系列成果. Yan等^[7]针对一类干扰上界已知、含Lipschitz非线性项的不确定系统,采用LMI技术使得观测器增益矩阵设计方法转化为一类优化问题,保证了状态估计误差的收敛性,同时给出了一种干扰完全解耦的故障重构方法,这种处理非线性项的方法通用性较好,但是所提的鲁棒性算法在实际应用中有一定的限制;之后又提出了结合自适应律和滑模观测器的方法,实现了干扰分布矩阵变化系统的鲁棒故障重构^[8]. 文献[9-11]均结合 H_∞ 滤波器设计了鲁棒滑模观测器,且文献[9,11]中所研究的系统同时包含输出干扰,这进一步拓展了采用滑模观测器鲁棒故障重构的应用范围,但这些方法不适用于故障上界未知的系统. Habib等^[12]结合滑模和未知输入观测器设计了连续重构观测器,对非线性项采用自适应补偿的方法实现了未知输入的在线重构. 文献[13]采用线性变换及降阶滑模观测器实现了非线性Lipschitz系统执行器故障重构. 国内的进展基本与国外同步. 朱芳来等^[14-15]基于全维和降维滑模观测器并结合数值解法实现了非线性系统执行器故障的鲁棒重构. 文献[16]提出了采用多故障重构的滑模观测器设计方法. 于金泳等^[17]通过构建增维状态设计滑模观测器,并基于L2增益优化方法实现了车辆电子稳定性控制系统的传感器鲁棒故障重构,但这种方法难以推广到故障信息未知的非线性系统.

应该指出,采用鲁棒性设计策略可以提高基于滑模观测器故障重构的有效性,但在实际系统中,故障诊断环节在故障信息未知的情形下,由于诊断时延及技术不完善等因素,必然会引起诊断误差. 因此,为实现一体化容错控制的鲁棒性指标,除了设计有效的鲁棒故障诊断策略,还应采用一定的设计方法以实现容错控制律重构期间的鲁棒性. 为此,本文将故障重构误差引入容错控制器设计中,提出一体化的鲁棒容错控制器设计方法. 首先在故障信息未知的前提下,设计包含自适应律的滑模状态观测器,采用线性变换实现未知信息故障与干扰分离,确保观测器状态估计误差收敛,同时引入 H_∞ 控制以实现故障重构的鲁棒性,并将观测器增益解算方法转化为LMI约束下的凸优化问题,以实现有效的鲁棒故障重构. 在此基础上,考虑系统状态不完全可测的情形,以状态估计、故障重构值为控制输入量,结合鲁棒性指标设计一体化的容错控制器,并通过LMI给出控制器解算方法. 最后通过算例验证所提出方法的有效性.

1 问题描述

考虑一类不确定非线性系统

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

其中: $x \in R^n$ 、 $u \in R^m$ 、 $y \in R^p$ 分别为系统状态、控制输入及可测输出; $A \in R^{n \times n}$ 、 $B \in R^{n \times m}$ 、 $C \in R^{p \times n}$ 、 $E \in R^{n \times q}$ 、 $F \in R^{n \times l}$,且 $n > p \geq q, l$; $g(x)$ 为Lipschitz非线性项,满足 $\|g(x_1) - g(x_2)\| \leq \psi_g \|x_1 - x_2\|$, ψ_g 为Lipschitz常数; $f_a(t)$ 为执行器故障向量; $\xi(t)$ 为未知扰动向量.

假设1 定义矩阵 $D = [F \ E]$,系统 (A, C, D) 是最小相位的^[18],即系统 (A, C, D) 的不变零点均在左半开复平面内,或若 $\text{rank} D = q + l$,则有

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI - A & D \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + q + l.$$

假设2 执行器故障 $f_a(t)$ 、干扰 $\xi(t)$ 均有界,且 $\|\xi(t)\| \leq \beta$, β 已知,故障 $f_a(t)$ 的上界值未知.

假设3 系统系数矩阵满足滑模观测器匹配条件,即 $\text{rank}(E, B) = \text{rank}(B)$ ^[18].

假设4 系统系 (A, B) 可控.

对于满足假设1~假设4所述的系统(1),当正常工作时,即 $f_a(t) = 0$,在状态估计反馈控制的作用下,系统能够鲁棒渐近稳定. 当系统出现执行器故障时,采用一体化的容错控制设计方案,通过设计滑模观测器得到故障重构值 $\hat{f}_a(t)$,同时考虑故障及状态估计误差,采用一体化的设计方案建立容错控制律,给出系统鲁棒渐近稳定条件. 一体化鲁棒容错控制器的设计框图如图1所示.

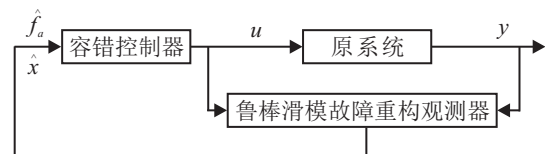


图1 一体化鲁棒容错控制器设计框图

2 含自适应律鲁棒滑模观测器设计

由上文可知,为实现一体化容错控制的鲁棒性指标,必须确保故障重构环节的鲁棒性,因此,本节将提出鲁棒滑模状态观测器的设计方法,以便于一体化容错策略的设计. 对于式(1)所描述的非线性系统,通过设计滑模状态观测器,可以得到系统的状态及故障估计值,在此基础上设计容错控制律. 针对式(1)所示的非线性系统,设计形如下式所示的滑模观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + g(\hat{x}) + G_l e_y + G_n \nu(t) + Bu, \\ \hat{y} = C\hat{x}. \end{cases} \quad (2)$$

其中: “^” 代表与原系统相对应的观测向量; G_l 为观测器增益矩阵, 设计方法将在后文中给出; $G_n = [-L^T \ I_p]^T C_2^{-1}$; $L = [L_1 \ 0]$, $L_1 \in R^{(n-p) \times (p-q)}$, L 的设计方法将在后文中给出; C_2 为线性变换降维后的系统矩阵, 详见下文; $\nu(t)$ 为滑模变结构控制输入信号, 表达式如下:

$$\nu(t) = \begin{cases} (\eta_0 + \eta(t)) \|D_2 C_2\| \frac{e_y}{\|e_y\|}, & e_y \neq 0; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: D_2 为线性变换降维后的系统矩阵, 详见下文; $e_y = y - \hat{y}$; η_0 为大于0的常数; $\eta(t)$ 为设计的自适应律, 其作用是保证系统执行器故障上界未知的情形下, 状态估计误差有界收敛, 其表达式为

$$\frac{d\eta(t)}{dt} = \rho \|P_2 C_2 D_2\| \|e_y\|. \quad (4)$$

式(4)中: ρ 为大于零的自适应常数, P_2 为待设计矩阵, 将在后文中给出. 系统的滑模面定义为 $s = \{e_y : e_y = 0\}$.

定义状态误差向量 $e = x - \hat{x}$, 则由原系统(1)及所设计的滑模观测器(2)可知, 状态误差向量方程为

$$\dot{e} = (A - G_l C)e + g(x) - g(\hat{x}) + E\xi(t) + Df_a(t) - G_n \nu(t). \quad (5)$$

为便于滑模观测器设计, 确保实现故障重构的鲁棒性, 引入线性变换矩阵 $T_0 \in R^{n \times n}$, 将原系统(1)变换为如下式所示的形式(证明过程见文献[19]):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_1 x_1 + A_2 x_2 + g_1 + E_1 \xi(t), \\ \dot{x}_2 = A_3 x_1 + A_4 x_2 + g_2 + E_2 \xi(t) + D_2 f_a(t), \\ y = C_2 x_2, \end{cases} \quad (6)$$

其中矩阵 A_1, A_2, A_3, A_4 及 E_1, E_2, D_2, C_2 变换方法详见文献[19]. 另外, 定义线性变换矩阵 $T_2 = T_0 T_1$, 其中

$$T_1 = \begin{bmatrix} I_{(n-p)} & L \\ 0 & C_2 \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}.$$

设计观测器增益矩阵 G_l 使得下式成立:

$$T_2 G_l = \begin{bmatrix} A_2 \\ A_4 - A_s \end{bmatrix}. \quad (7)$$

其中: $A_s = \text{diag}\{\mu_i\}$ 且 μ_i 为具有负实部的常数,

$$A_2 = -(A_1 + L A_3) L C_2^{-1} + (A_2 + L A_4) C_2^{-1},$$

$$A_4 = -C_2 A_3 L C_2^{-1} + C_2 A_4 C_2^{-1}.$$

若按式(7)设计观测器增益矩阵 G_l , 状态误差方程(5)经线性变换 T_2 作用, 并令 $T_2 e = T_0 T_1 e = \bar{e} = [e_1 \ e_y^T]^T$, 则式(5)变为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = (A_1 + L A_3) e_1 + (g_1(x) - g_1(\hat{x})) + \\ \quad L(g_2(x) - g_2(\hat{x})) + (E_1 + L E_2) \xi(t), \\ \dot{e}_y = C_2 A_3 e_1 + A_s e_y + C_2 (g_2(x) - g_2(\hat{x})) + \\ \quad C_2 E_2 \xi(t) + C_2 D_2 f_a(t) - \nu(t). \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 经过线性变换 T_2 , 状态误差方程 e_1 中不包含故障项, 便于观测器设计. 进一步, 为实现鲁棒故障重构, 令干扰与估计误差 \bar{e} 之间的传递函数为 H , 其中 $H = \begin{bmatrix} H_1 & 0 \\ 0 & H_2 \end{bmatrix}$, 此时有 $m = H[e_1^T \ e_y^T]^T$. 设 $\gamma = \sup_{\|\xi(t)\|_2^2 \neq 0} \frac{\|m\|_2^2}{\|\xi(t)\|_2^2}$, 最小化鲁棒性指标 γ 的取值, 能够保证故障重构结果的有效性, 从而为一体化容错控制鲁棒性指标的的实现奠定基础.

定理1 对于系统(1), 考虑执行器故障上界未知的情形, 设计如式(2)所示的滑模观测器, 若存在对称正定矩阵 $P_1 \in R^{(n-p) \times (n-p)}$ 、 $P_2 \in R^{p \times p}$ 、 $P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix}$ 、矩阵 $W \in R^{(n-p) \times p}$ 及大于0的 γ 值, 使得下列LMI约束下的凸优化问题有解:

$$\begin{cases} \min \gamma; \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} & \Pi_{13} & P_1 \\ * & \Pi_{22} & \Pi_{23} & 0 \\ * & * & -\gamma I_k & 0 \\ * & * & * & -\varepsilon I_{n-p} \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \end{bmatrix} \rightarrow \\ \begin{bmatrix} 0 & I_{n-p} & 0 \\ P_2 & 0 & I_P \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\varepsilon I_p & 0 & 0 \\ * & -\delta I_{n-p} & 0 \\ * & * & -\delta I_p \end{bmatrix} < 0, \\ \Pi_{11} = \\ A_1^T P_1 + P_1 A_1 + W A_3 + A_3^T W^T + H_1^T H_1, \\ \Pi_{12} = A_3^T C_2^T P_2, \Pi_{13} = P_1 E_1 + W E_2, \\ \Pi_{22} = P_2 A_s + A_s^T P_2 + H_2^T H_2, \Pi_{23} = P_2 C_2 E_2, \\ P_1 = P_1^T > 0, P_2 = P_2^T > 0, \\ \gamma > 0, \varepsilon > 0, \delta > 0. \end{array} \right. \end{cases} \quad (9)$$

其中包含*的矩阵为对称矩阵(如第4行第1列的表达式为 P_1^T). 则状态误差向量渐近稳定,即滑模状态观测器(2)状态能渐近跟踪原系统(1),且观测器矩阵设计方法为 $L = P_1^{-1}W$.

由定理1可知,当式(9)有解时,一体化滑模观测器的状态估计误差收敛,同时为了实现故障重构过程中的鲁棒性,必须使得一体化滑模观测器的滑模运动在有限时间内到达,为此提出如下定理.

定理2 对于发生未知故障的非线性系统(1)设计如式(2)所示的鲁棒滑模观测器,按照式(4)所示的形式设计滑模增益自适应律,且式(9)所示的LMI优化问题有解,若滑模增益 η_0 取值满足

$$\eta_0 \geq \frac{\kappa(\|C_2\| \|A_3\| + \|C_2\| \psi_g) + \beta \|E_2\| \|C_2\|}{\|C_2\| \|D_2\|} + \tau,$$

其中 τ 为任意小的正实数,则输出误差的滑模运动经有限时间到达并维持在滑模面 $s = \{e_y : e_y = 0\}$ 上.

在定理1和定理2成立的前提下,考虑发生未知故障的非线性系统(1),建立如式(2)所示的鲁棒滑模观测器,若定理1中的LMI有解,且按照定理2设计滑模增益,则根据滑模运动的等效控制输出误差注入原理,可以得到执行器故障的重构值为

$$\hat{f}_a(t) = E_2^+ C_2^{-1} \nu(t). \quad (10)$$

定义 $e_f = f_a(t) - \hat{f}_a(t)$,于是有

$$e_f = -D_2^+ [A_3 e_1 + (g_2(x) - g_2(\hat{x})) + E_2 \xi(t)]. \quad (11)$$

进一步可知

$$\|e_f\|_2 \leq \beta \|D_2^+\| (\gamma (\|A_3\| + \delta) \|H^{-1}\|_2 + \|E_2\|). \quad (12)$$

由式(12)可以看出,最小化 γ 值,使得扰动对状态估计误差的鲁棒性最强,可以得到有效的故障重构结果,从而为一体化容错控制的鲁棒性指标实现奠定了基础.

3 基于LMI解算的一体化鲁棒容错控制器设计

针对式(1)所描述的非线性系统,在建立故障重构滑模观测器的基础上,以故障及状态联合估计值为输入量,设计一体化鲁棒容错控制器,形式如下:

$$u = L_2 \hat{x} + L_3 \hat{f}_a, \quad (13)$$

其中 L_2 和 L_3 为待设计的容错控制器增益矩阵. 此时将式(13)代入原系统(1),且将 $e = x - \hat{x}$ 和 $e_f = f_a(t) - \hat{f}_a(t)$ 代入,于是有

$$\dot{x} = (A + BL_2)x + g(x) + (E + BL_3)f_a(t) + F\xi(t) - BL_2e - BL_3e_f. \quad (14)$$

由假设可知,存在矩阵使得 $E = BG$,设计反馈控制器增益为 $L_3 = -G$,此时有 $E + BL_3 = 0$. 定义 $e_0 = [e^T e_f^T]^T$,于是式(14)变为

$$\dot{x} = (A + BL_2)x + g(x) + F\xi(t) - B[L_2 L_3]e_0. \quad (15)$$

对于式(15)描述的系统,设计一体化的鲁棒容错反馈增益矩阵 $\bar{L} = [L_2 L_3]$,使得容错控制律重构期间,当系统存在状态估计及故障重构误差时,系统状态渐近稳定,且对于给定的标量 λ ,满足 $\|x\|_2 < \lambda \|\xi(t)\|_2$,最小化 λ 值为一体化容错控制器的鲁棒性指标值. 基于这一目标,本文提出一体化鲁棒容错控制器设计方法.

定理3 对于式(1)所描述的系统,若如式(9)的LMI有解,且按照定理2的方法设计滑模增益,进而提出如式(13)的一体化鲁棒容错控制器,此时存在对称正定矩阵 Y 、矩阵 Φ 以及可行的标量 λ ,使得以下LMI约束的优化问题有解:

$$\begin{aligned} & \min \lambda; \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \begin{bmatrix} YA^T + \Phi^T B^T + AY + B\Phi + \psi_g^2 I & Y & F \\ Y^T & -\frac{1}{2}I & 0 \\ F^T & 0 & -\lambda^2 I \end{bmatrix} < 0; \\ Y = Y^T > 0, \lambda > 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

则按照式(13)形式设计的一体化容错控制器能够使系统在执行器故障的情形下状态渐近稳定,且一体化鲁棒容错控制器的增益矩阵解算方法为 $L_2 = \Phi Y^{-1}$,最小化 λ 的优化值 λ_{opt} 为一体化容错控制器的鲁棒性指标.

4 数值仿真

为验证一体化鲁棒主动容错控制器设计方法的有效性,本文以由发动机引擎和客车厢组成的火车系统^[20]为例开展仿真研究,其中系数矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.487 & -4.9 & 0.487 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.974 & 0 & -0.974 & -4.9 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1(x_2 + x_4)^2 \\ 0 \\ 0.2(x_2 + x_4)^2 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

假设系统分别发生间歇和缓变两种故障类型,其中缓变故障类型 $f_{a1}(t)$ 及间歇故障类型 $f_{a2}(t)$ 的表达式如下:

$$f_{a1}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 20; \\ 5\sin(\pi t - 1.7), & t \geq 20. \end{cases}$$

$$f_{a2}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 25; \\ 5 + 5e^{0.01(t-30)}, & 25 \leq t < 35; \\ 5 - 10e^{0.05(t-60)}, & 35 \leq t < 45; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

当系统发生缓变故障类型 $f_{a1}(t)$ 时,设置系统干扰为幅值为1的白噪声.此时 $H_1 = 0.4, H_2 = 0.4I_3$, 其中 I_3 为3阶单位矩阵,可以按照式(9),运用Matlab里的LMI工具箱,解算求得鲁棒滑模故障重构观测器的增益矩阵,有 $L = [51.26 \ -63.62]$. 在此基础上,设计滑模增益 $\eta_0 = 5$,自适应律 $\rho = 0.1$,于是可以按照式(2)设计鲁棒自适应滑模观测器,得到观测器的状态估计误差,如图2所示.在得到状态估计误差的基础上,按照式(10)可以得到故障的重构值,如图3所示.

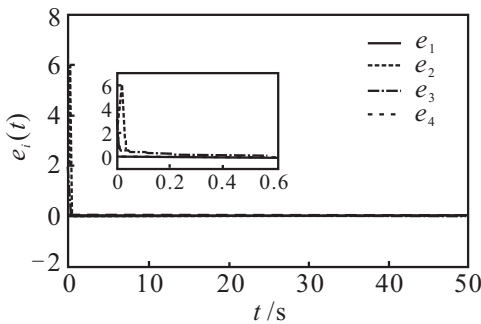


图2 状态估计误差

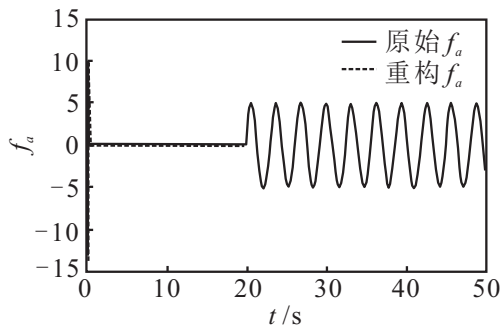


图3 执行器故障 $f_{a1}(t)$ 及重构仿真结果

由图2可以看出: e_1, e_3, e_4 的数值从一开始就迅速减小; e_2 的数值刚开始增大,经过不到0.1s的时间

便开始减小;4个状态估计误差大约经过0.5s后趋于渐近稳定.说明采用本文方法设计的鲁棒滑模观测器,在系统存在故障和干扰时,能够保证状态估计误差有界稳定,确保重构状态能够跟踪上系统状态值,从而实现有效的故障重构.

由图3可以看出:刚开始时,故障重构的误差值较大,这主要是由状态估计误差造成的;2s以后,重构值就能迅速跟踪上故障值.说明当系统存在白噪声扰动时,采用本文方法设计的故障重构观测器,可以得到比较准确的故障重构值,从而为一体化主动容错控制的鲁棒性指标的的实现奠定了基础.

在故障重构的基础上,针对执行器故障类型1,采用本文方法设计主动容错控制器,通过求解式(16)所示的LMI问题,可以得到容错控制器的参数矩阵, $L_x = [-497.075 \ 3, -113.683 \ 4, -188.908 \ 3, -35.363 \ 9]$, $L_f = -1$,同时可以得到一体化容错控制的鲁棒性指标值 $\lambda_{opt} = 0.501 \ 3$,进而得到系统的容错控制输入 u ,结果如图4所示.由图4可以看到,控制输入在20s时突然发生跳变,以后大致呈正弦形状,这主要是由于在20s时突然发生故障,控制输入中的 \hat{f}_a 发生突变,从而 u 也随之突变.

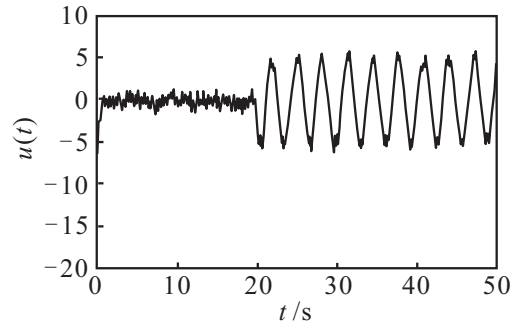


图4 鲁棒容错控制器输入 u

另外,为了进一步检验控制器的容错性能,将本文提出的容错控制器设计方法与PI控制器设计方法进行对比,得到以下结果.以系统的第1个输出为例,PI控制器和容错控制器作用下的系统输出如图5、图6所示.

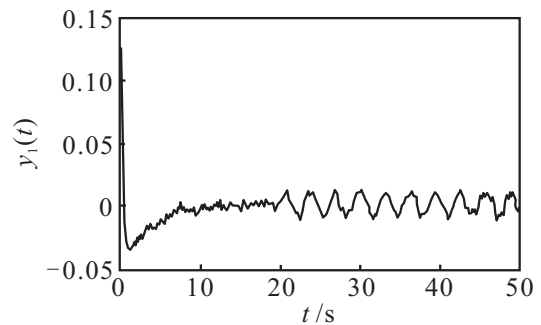


图5 PI控制器作用下的系统输出 y_1 (缓变故障)

由图5和图6可以看出:采用本文方法设计的鲁

棒容错控制器可以确保系统输出渐近稳定,同时可以抑制干扰对系统输出的影响;而在PI控制器作用下,当系统发生故障时,输出会出现振荡不稳定的现象,破坏了系统的控制性能。

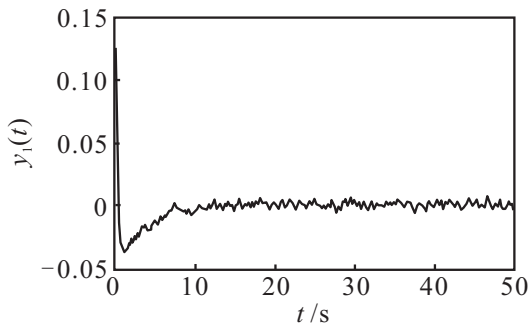


图6 鲁棒容错控制器作用下的系统输出 y_1 (缓变故障)

对比图5和图6的仿真结果可以发现,采用本文方法设计的容错控制器可以确保系统出现未知故障时其输出能够渐近稳定.相似的结果还有,向系统注入间歇故障类型,分别对比容错控制器和PI控制器作用下的系统输出.同样仍以系统的第1个输出为例进行对比,结果如图7和图8所示。

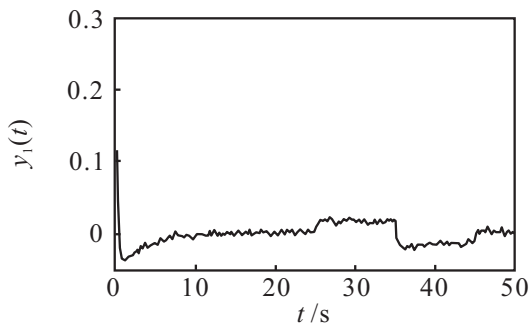


图7 PI控制器作用下的系统输出 y_1 (间歇故障)

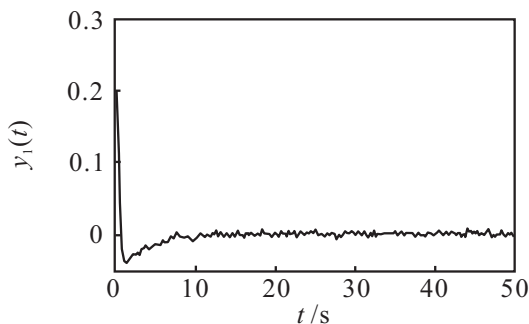


图8 鲁棒容错控制器作用下的系统输出 y_1 (间歇故障)

图7、图8的结果进一步表明:采用本节方法设计的容错控制器,当系统出现故障时可以确保输出渐近稳定;而在PI控制器的作用下系统输出不稳定.从而验证了本文所提出的一体化鲁棒容错控制器设计方法的有效性。

5 结论

本文研究了执行器故障情形下一体化鲁棒主动容错控制器的设计方法.容错控制的鲁棒性指标通

过故障重构及控制律重构期间的鲁棒性来实现.本文的主要结论有:

1) 采用本文方法设计的滑模观测器(2),可以确保当系统发生未知故障时,观测器重构的状态能够跟踪上系统状态,从而确保了故障重构值是有效的。

2) 解算式(9)所示的LMI约束不等式,能够求出观测器的增益矩阵,简化了观测器设计方法。

3) 通过解算2个LMI约束不等式,可以得到一体化控制器增益矩阵的数值,从而实现系统的鲁棒性。

本文提出的一体化鲁棒容错控制器设计方法,针对的是系统发生执行器故障的情形,但是实际系统不仅会发生执行器故障,还可能出现传感器故障.当系统同时出现执行器和传感器故障时,如何设计控制器以实现容错控制的鲁棒性指标,这是下一步的研究内容。

参考文献(References)

- [1] Han Jian, Zhang Hua-guang, Wang Ying-chun, et al. Robust state/fault estimation and fault tolerant control for T-S fuzzy systems with sensor and actuator faults[J]. J of the Franklin Institute, 2016, 28(8): 615-641.
- [2] Lee Kee-sang, Parkb Tae-geon. An actuator fault reconstruction scheme for linear systems[J]. J of Process Control, 2016, 44(8): 106-119.
- [3] Tan C P, Edwards C. Robust fault reconstruction in uncertain linear systems using multiple sliding mode observers in cascade[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2010, 55(4): 855-867.
- [4] Damiano Rotondo, Francisco-Ronay López-Estradac, Fatiha Nejjari, et al. Actuator multiplicative fault estimation in discrete-time LPV systems using switched observers[J]. J of the Franklin Institute, 2016, 353(5): 3176-3191.
- [5] Chen Li-heng, Huang Xian-lin, Fu Sha-sha. Observer-based sensor fault-tolerant control for semi-Markovian jump systems[J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2016, 22(1): 161-177.
- [6] Kok Yew Ng, Chee Pin Tan, Denny Oetomo. Disturbance decoupled fault reconstruction using cascaded sliding mode observers[J]. Automatica, 2012, 48(5): 794-799.
- [7] Yan Xing-gang, Edwards Christopher. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding mode observer[J]. Automatica, 2007, 43(9): 1605-1614.
- [8] Yan Xing-gang, Edwards Christopher. Adaptive sliding-mode-observer based fault reconstruction for nonlinear systems with parametric uncertainties[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55(11): 4029-4036.
- [9] Reza Raoufi, Marquez H J, Zinober A S I. H_∞ sliding mode observers for uncertain nonlinear Lipschitz systems with fault estimation synthesis[J]. Int J of Robust and

- Nonlinear Control, 2010, 20(16): 1785-1801.
- [10] Slim Dhahri, Anis Sellami, Fayal Ben Hmida. Robust H_∞ sliding mode observer design for fault estimation in a class of uncertain nonlinear systems with LMI optimization approach[J]. Int J of Control, Automation, and Systems, 2012, 10(5): 1032-1041.
- [11] Lee Dongjae, Park Youngjin, Park Younsik. Robust sliding mode descriptor observer for fault and output disturbance estimation of uncertain systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2012, 57(11): 2928-2934.
- [12] Habib Dimassi, Antonio Loria. Continuously implemented sliding mode adaptive unknown input observers under noisy measurements[J]. Systems and Control Letters, 2012, 61(12): 1194-1202.
- [13] Veluvolu K C, Soh Y C. Fault reconstruction and state estimation with sliding mode observers for Lipschitz non-linear systems[J]. IET Control Theory and Applications, 2011, 5(11): 1255-1263.
- [14] Zhu Fang-lai, Cen Feng. Full-order observer-based actuator fault detection and reduced-order observer-based fault reconstruction for a class of uncertain nonlinear systems[J]. J of Process Control, 2010, 20(10): 1141-1149.
- [15] 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): 258-270.
(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): 258-270.)
- [16] 刘聪, 李颖晖, 吴辰, 等. 基于鲁棒自适应滑模观测器多故障重构[J]. 控制与决策, 2016, 31(7): 1219-1224.
(Liu C, Li Y H, Wu C, et al. Design of the robust adaptive sliding mode observer for multiple fault reconstruction[J]. Control and Decision, 2016, 31(7): 1219-1224.)
- [17] 于金泳, 刘志远, 陈虹. 基于滑模观测器的车辆电子稳定性控制系统故障重构[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(10): 1057-1063.
(Yu J Y, Liu Z Y, Chen H. Fault reconstruction in the vehicle electronic stability control based on sliding mode observer[J]. Control Theory & Application, 2009, 26(10): 1057-1063.)
- [18] 刘聪, 李颖晖, 朱喜华, 等. 基于自适应滑模观测器的不匹配非线性系统执行器故障重构[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(4): 431-437.
(Liu C, Li Y H, Zhu X H, et al. The adaptive sliding mode observer for the actuator fault reconstruction of nonlinear system with mismatched uncertainties[J]. Control Theory & Application, 2014, 31(4): 431-437.)
- [19] Edwards C, Spurgeon S. On the development of discontinuous observers[J]. Int J of Control, 1994, 59(5): 1211-1229.
- [20] 杨俊起, 朱芳来. 未知输入和可测噪声重构之线性矩阵不等式非线性观测器设计[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(4): 538-544.
(Yang J Q, Zhu F L. Linear-matrix-inequality observer design of nonlinear systems with unknown input and measurement noise reconstruction[J]. Control Theory & Application, 2014, 31(4): 538-544.)

(责任编辑: 李君玲)

《控制与决策》荣获中国精品科技期刊荣誉称号

本刊讯 2017年10月31日,由国家科学技术部中国科学技术信息研究所主办的“2017年中国科技论文统计结果发布会”在北京国际会议中心举行。会上发布了《2017中国科技论文统计结果》,《控制与决策》在信息科学与系统科学类期刊综合评价指标排名第三,在全国共2008种核心期刊中排名第177位,被评为“第4届中国精品科技期刊”,即“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)项目来源期刊”。这是本刊第4次获此殊荣,并连续被收录为“中国科技核心期刊”。

同时,会上公布了“2016年中国百篇最具影响国内学术论文”。本年度选取2012年~2016年中国科技论文与引文数据库收录的科技论文,统计全部论文

的累积被引用次数,进入相应发表年度和所属学科领域的前千分之一的论文作为本年度的候选论文,参考多方面评价指标,从中择优选取“中国百篇最具影响国内学术论文”。本刊于2013年第2期发表的由哈尔滨工程大学孙枫等撰写的《Cubature卡尔曼滤波与Unscented卡尔曼滤波估计精度比较》一文获此殊荣。

此外,中国科学技术信息研究所在中国精品科技期刊中遴选优秀学术论文,建设了“领跑者5000——中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”,集中对外展示和交流我国的优秀学术论文,本刊共有16篇文章入选2017年F5000。