

文章编号: 1001-0920(2016)07-1219-06

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2015.0659

基于鲁棒自适应滑模观测器的多故障重构

刘聪, 李颖晖, 吴辰, 袁国强

(空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 针对一类不确定非线性系统, 基于滑模观测器研究执行器和传感器同时故障时的鲁棒重构问题. 引入线性变换矩阵并添加后置滤波器构建增维系统, 综合 H_∞ 控制将鲁棒滑模观测器增益矩阵设计方法, 转化为LMI约束下的多目标凸优化问题. 在滑模增益中添加了自适应律, 确保状态估计误差渐近稳定, 同时滑模运动经有限时间到达滑模面, 在此基础上给出执行器和传感器故障同时重构算法. 最后通过数值算例表明了所提出方法的有效性.

关键词: 鲁棒故障重构; 自适应滑模观测器; H_∞ 控制; 多目标优化; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Design of the robust adaptive sliding mode observer for multiple fault reconstruction

LIU Cong, LI Ying-hui, WU Chen, YUAN Guo-qiang

(School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China. Correspondent: LIU Cong, E-mail: 598832156@qq.com)

Abstract: A scheme of robust fault reconstruction via the sliding mode observer(SMO) is proposed, which is used for a class of uncertain nonlinear Lipschitz system with the simultaneous actuator and sensor faults. Firstly, an orthorhombic matrix and a filter are introduced, and the augmented system is constructed, then the gain matrix of the robust SMO is calculated by the multi objective convex optimization under linear matrix inequalities. Meanwhile, an adaptive law is added in the sliding mode gain, to make the state estimated error asymptotic stable, and the sliding mode movement reaches the sliding mode surfaces in the limital time. The reconstructed algorithm is given, which includes both actuator and sensor faults. Finally, an example is presented to illustrate the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: robust fault reconstruction; adaptive sliding mode observer; H_∞ control; multiobjective optimization; linear matrix inequality

0 引言

在基于模型的故障检测技术中, 观测器方法应用较为普遍. 与基于残差的故障检测技术不同, 基于观测器的故障重构(FR)方法, 可根据已被故障影响的过程变量的测量值估计出故障值, 并对故障信号进行跟踪^[1-2], 在实现故障检测与分离的同时, 还能识别故障的类型、大小, 并对故障进行定位, 为系统的主动容错控制打下了坚实的基础, 一直受到广泛关注. 目前在非线性系统中采用观测器方法实现的故障重构成果丰硕^[3-4], 而在非线性系统中进展缓慢, 这其中故障重构的鲁棒性问题一直是研究的难点.

基于观测器的鲁棒故障重构技术的一个挑战是

区分未知扰动和故障, 即使得未知输入扰动对输出影响尽可能小, 又能较为精确地重构出故障信号. 滑模观测器以其不变性成为鲁棒故障重构领域的主要方法之一, 是近年来研究的热点. 文献[5]针对线性不确定系统建立两滑模观测器, 实现了故障和干扰完全解耦, 但是对故障输入矩阵和输出矩阵作了严格要求. 文献[6]采用线性变换方法, 通过矩阵变换将建立的滑模观测器分解为受故障影响和不受故障影响两个子系统, 采用 H_∞ 控制使得故障对状态估计误差的影响最小从而实现鲁棒性. 文献[7]提出采用右特征向量配置的方法达到鲁棒故障重构的目的, 这种配置方法将误差的一阶非齐次方程转化为齐次方程求解, 对

收稿日期: 2015-05-25; 修回日期: 2015-10-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074007); 国家973计划项目(2015CB755805).

作者简介: 刘聪(1988-), 男, 博士, 从事滑模观测器设计及故障重构、容错控制的研究; 李颖晖(1966-), 女, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制、故障诊断及容错控制等研究.

系统的条件苛刻. 文献[8-12]就线性不确定系统建立级联滑模观测器实现干扰故障解耦, 但其应用范围仍然有限, 且不适用于非线性 Lipschitz 不确定系统.

考虑系统的非线性特性使得区分干扰与故障问题变得更加复杂, 文献[13]针对 Lipschitz 非线性系统建立滑模观测器实现鲁棒故障诊断, 但要求故障上界已知, 且鲁棒解耦条件苛刻. 文献[14]提出了 Lipschitz 非线性系统的故障重构方法, 但是并未区分干扰和故障对估计误差的影响, 在实际应用中有一定的困难. 文献[15]提出了基于全维和降维滑模观测器的故障重构方法, 但要求故障上界已知且不适用于执行器和传感器同时故障的情形. 文献[16]研究了不确定线性系统多故障并发的鲁棒重构方法, 但结论难以推广到非线性系统. 文献[17]考虑同时含干扰和输出噪声的 Lipschitz 非线性系统, 提出了干扰和故障同时重构方法, 但要求 Lipschitz 系数、干扰上界已知.

本文以一类同时含执行器和传感器故障的非线性 Lipschitz 系统为研究对象, 考虑非线性特性、干扰和未知信息故障同时存在的前提下, 研究基于滑模观测器的鲁棒故障重构方法. 与文献[16]处理方法相比, 本文突破了线性系统的限制, 放松了故障信息已知的假设前提, 设计的滑模观测器使得系统包含更多的性能指标, 在实际系统中具有更广的应用范围.

1 问题描述

研究如下同时包含执行器和传感器故障的不确定非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_P = A_p x_p + g(x_p, u) + D_p f_a(t) + E_p \xi(t), \\ y_P = C_p x_p + N_p f_s(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_p \in R^n$, $u \in R^m$, $y_p \in R^p$ 分别为系统状态、系统控制输入、系统的可测输出; $A_p \in R^{n \times n}$, $C_p \in R^{p \times n}$, $D_p \in R^{n \times q}$, $E_p \in R^{n \times k}$, $N_p \in R^{p \times h}$; $g(x_p, u)$ 为 Lipschitz 非线性项, 满足 $\|g(x_{p1}, u) - g(x_{p2}, u)\| \leq \psi_g \|x_{p1} - x_{p2}\|$, ψ_g 为 Lipschitz 未知常数; $f_a(t) \in R^q$ 为执行器故障向量, $f_s(t) \in R^h$ 为传感器故障向量; $\xi(t)$ 为未知扰动等不确定向量.

假设 1 $f_a(t)$ 、 $f_s(t)$ 有界但上界未知, 即 $\|f_a(t)$, $f_s(t)\| \leq \alpha$, α 未知; $\xi(t)$ 有界且界已知, 即 $\|\xi(t)\| \leq \beta$, β 已知.

假设 2 系统(1)满足匹配条件, 即

$$\text{rank}(C_p [D_p \ E_p]) = \text{rank}([D_p \ E_p]),$$

且 C_p 、 E_p 、 D_p 均为列满秩.

假设 3 系统 (A_p, C_p, D_p) 是最小相位的, 即系统 (A_p, C_p, D_p) 的所有不变零点均在左半开复平面内, 或者对于所有满足 $\text{Re}(s) \geq 0$ 的复数, 下式成立:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI - A_p & D_p \\ C_p & 0 \end{bmatrix} = n + q. \quad (2)$$

针对系统(1), 根据文献[16], 存在正交变换矩阵 $T_R \in R^{p \times p}$, 使得

$$T_R y_P := \begin{cases} y_1 = C_{p1} x_p, \\ y_2 = C_{p2} x_p + N_1 f_s(t). \end{cases} \quad (3)$$

其中: $y_1 \in R^{p-h}$, $y_2 \in R^h$; N_1 为 $R^{h \times h}$ 的非奇异矩阵. 定义状态 $z_p \in R^h$ 为 y_2 经滤波器的输出, 此时有

$$\dot{z}_p = -A_f z_p + A_f C_{p2} x_p + A_f N_1 f_s(t), \quad (4)$$

其中: A_f 为选定的 $R^{h \times h}$ 滤波矩阵. 由式(1)、(3)和(4)可构造 $n + h$ 维状态方程, 如下所示:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_P \\ \dot{z}_p \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} A_p & 0 \\ A_f C_{p2} & -A_f \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} x_p \\ z_p \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{G(x,u)} g(x_p, u) + \underbrace{\begin{bmatrix} D_p & 0 \\ 0 & A_f N_1 \end{bmatrix}}_D \underbrace{\begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_s(t) \end{bmatrix}}_{f_{a,s}} + \underbrace{\begin{bmatrix} E_p \\ 0 \end{bmatrix}}_E \xi(t), \quad (5)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ z_p \end{bmatrix}}_y = \underbrace{\begin{bmatrix} C_{p1} & 0 \\ 0 & I_h \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} x_p \\ z_p \end{bmatrix}}_x. \quad (6)$$

引理 1 式(5)中, 由于 $g(x_p, u)$ 是 Lipschitz 非线性项, $G(x, u)$ 也是 Lipschitz 非线性项.

引理 2 对于增维系统(5)和(6), 其匹配条件仍然满足, 即 $\text{rank}(C[D \ E]) = \text{rank}([D \ E])$.

引理 3 系统 (A, C, D) 是最小相位的, 即系统 (A, C, D) 的所有不变零点均在左半开复平面内, 对于所有满足 $\text{Re}(s) \geq 0$ 的复数 s , 下式成立:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI - A & D \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + q + 2h. \quad (7)$$

由式(5)和(6)可以发现, 对于同时存在执行器和传感器故障的系统(1), 经过滤波器扩展为增维系统, 变换成只包含“虚拟执行器”故障的非线性 Lipschitz 系统, 后续篇幅主要针对系统(5)和(6)开展执行器故障重构研究.

在假设 1~假设 3 存在的前提下, 引理 1~引理 3 成立. 根据文献[6], 存在线性变换矩阵

$$T_0 \in R^{(n+h) \times (n+h)}, \quad T_0 x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}.$$

其中 $x_1 \in R^{n+h-p}$, $x_2 \in R^p$. 将增维系统(5)和(6)变换为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_1x_1 + A_2x_2 + G_1 + E_1\xi(t), \\ \dot{x}_2 = A_3x_1 + A_4x_2 + G_2 + E_2\xi(t) + D_2f_{a,s}(t), \\ y = C_2x_2. \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$T_0AT_0^{-1} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}, A_1 \in R^{(n+h-p) \times (n+h-p)},$$

$$A_2 \in R^{(n+h-p) \times p}, A_3 \in R^{p \times (n+h-p)};$$

$$T_0G(x) = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}, G_1 \in R^{(n+h)-p}, G_2 \in R^p;$$

$$T_0D = \begin{bmatrix} 0 \\ D_2 \end{bmatrix}, D_2 \in R^{p \times (q+h)};$$

$$T_0E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$CT_0 = [0 \ C_2],$$

$C_2 \in R^{p \times p}$ 为非奇异矩阵. 具体证明过程见文献 [18], 本文不再赘述.

2 鲁棒自适应滑模观测器的设计

对于增维系统 (5) 和 (6), 设计如下形式的滑模观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + G(\hat{x}, u) + G_l e_y + G_n \nu(t), \\ \hat{y} = C\hat{x}. \end{cases} \quad (10)$$

其中: $G_n = \begin{bmatrix} -L \\ I_p \end{bmatrix} C_2^{-1}$; $L = [L_1 \ 0]$; $L_1 \in R^{(n+h-p) \times (p-q-h)}$; G_l 为待设计的观测器增益矩阵; $\nu(t)$ 为滑模变结构输入信号, 其表达式为

$$\nu(t) = \begin{cases} (\eta(t) + \eta_0) \|D_2 C_2\| \frac{e_y}{\|e_y\|}, e_y \neq 0; \\ 0, \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

$\eta(t)$ 为设计的自适应律, e_y 为输出误差, 滑模面定义为 $s = \{e_y : e_y = 0\}$, 且有

$$\frac{d\eta(t)}{dt} = \rho \|P_2 C_2 D_2\| \|e_y\|, \quad (12)$$

ρ, η 为大于 0 的常数. 定义状态估计误差为 $e = x - \hat{x}$, 由式 (5) 和 (9) 得到增维系统的状态误差方程为

$$\begin{aligned} \dot{e} &= (A - G_l C)e + G(x) - G(\hat{x}) + \\ &E\xi(t) + Df_{a,s}(t) - G_n \nu(t). \end{aligned} \quad (13)$$

定义线性变换矩阵 $T = T_0 T_1$. 其中

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

经 T_1 变换后, 有

$$T_1 \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} T_1^{-1} = \begin{bmatrix} A_1 + LA_3 & A_2 \\ C_2 A_3 & A_4 \end{bmatrix}.$$

其中

$$\begin{aligned} A_2 &= -(A_1 + LA_3)LC_2^{-1} + (A_2 + LA_4)C_2^{-1}, \\ A_4 &= -C_2 A_3 LC_2^{-1} + C_2 A_4 C_2^{-1}, \end{aligned}$$

$$T_1 \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 + LG_2 \\ C_2 G_2 \end{bmatrix},$$

$$T_1 \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 + LE_2 \\ C_2 E_2 \end{bmatrix},$$

$$T_1 \begin{bmatrix} 0 \\ D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 D_2 \end{bmatrix}, [0 \ C_2]T_1^{-1} = [0 \ I_p]. \quad (14)$$

定义 $T_2 e = \bar{e} = [e_1 \ e_y]^T$, $T_2 G_l = [G_{l1} \ G_{l2}]^T$, 选取观测器增益矩阵 G_l 使得

$$T_2 G_l = \begin{bmatrix} A_2 \\ A_4 - A_s \end{bmatrix}. \quad (15)$$

其中: $A_s = \text{diag}\{\mu_i\}$, μ_i 为具有负实部的常数. 在线性变换矩阵 T_2 的作用下, 增益矩阵 G_l 按式 (14) 取值, 误差方程由式 (12) 变为

$$\begin{aligned} \dot{\bar{e}} &= \\ &A_0 \bar{e} + T_2(G(T_2^{-1}z) - G(T_2^{-1}\hat{z})) + D_0 f_{a,s}(t) + \\ &E_0 \xi(t) - G_0 \nu(t). \end{aligned} \quad (16)$$

其中

$$A_0 = T_2(A - G_l C)T_2^{-1}, D_0 = T_2 D,$$

$$E_0 = T_2 E, G_0 = T_2 G_n.$$

式 (15) 进一步可表示为

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \\ &(A_1 + LA_3)e_1 + (G_1(x) - G_1(\hat{x})) + \\ &L(G_2(x) - G_2(\hat{x})) + (E_1 + LE_2)\xi(t), \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_y &= \\ &C_2 A_3 e_1 + A_s e_y + C_2(G_2(x) - G_2(\hat{x})) + \\ &C_2 E_2 \xi(t) + C_2 D_2 f_{a,s}(t) - \nu(t). \end{aligned} \quad (18)$$

设干扰 $\xi(t)$ 到估计误差的传递函数为 H , 即

$$m = H \begin{bmatrix} e_1 \\ e_y \end{bmatrix},$$

其中 $H = \begin{bmatrix} H_1 & 0 \\ 0 & H_2 \end{bmatrix}$. 设 $\mu^2 = \sup_{\|\xi(t)\|_2 \neq 0} \frac{\|m\|_2^2}{\|\xi(t)\|_2^2}$. 为实现鲁棒故障重构, 观测器增益的设计目标是使得估计误差克服 Lipschitz 非线性项的影响, 同时鲁棒性最强即 μ 值最小, 且未知上界故障不影响状态误差的收敛性和滑模的可达性. 本文在文献 [19] 处理方法的基础上提出观测器增益矩阵的设计方法, 即定理 1.

定理 1 针对增维系统 (5) 和 (6) 设计如式 (9) 所示的滑模观测器, 若存在对称正定矩阵 $P_1 \in R^{(n+h-p) \times (n+h-p)}$ 、 $P_2 \in R^{p \times p}$ 、矩阵 $W \in R^{(n+h-p) \times p}$ 、可行的 $0 \leq \lambda \leq 1, \zeta = \mu^2$, 使得下列最优化问题有解:

$$\begin{aligned} & \min(\delta + \varepsilon); \\ & \text{s.t. } [S_{7 \times 7}] < 0, \delta, \varepsilon > 0, 0 \leq \lambda \leq 1. \end{aligned} \quad (19)$$

其中: $S_{7 \times 7}$ 为 7×7 阶对称矩阵, 各元素组成为

$$\begin{aligned} S_{11} &= A_1^T P_1 + P_1 A_1 + W A_3 + A_3^T W^T + H_1^T H_1, \\ S_{12} &= A_3^T C_2^T P_2, S_{13} = P_1 E_1 + W E_2, \\ S_{14} &= P_1, S_{16} = I_{(n+h-p)}, \\ S_{22} &= P_2 A_s + A_s^T P_2 + H_2^T H_2, \\ S_{23} &= P_2 C_2 E_2, S_{25} = P_2, S_{27} = I_p, \\ S_{33} &= -\mu^2 I_k, S_{44} = -\varepsilon I_{(n+h-p)}, \\ S_{55} &= -\varepsilon I_p, S_{66} = -\delta I_{(n+h-p)}, S_{77} = -\delta I_p, \end{aligned}$$

其他元素均为 0 组成的矩阵. 则观测器状态估计误差最终有界稳定, 且观测器增益 $L = P_1^{-1} W$. 上述 LMI 约束优化问题 δ, ε, S 的最优值分别为 $\delta_1, \varepsilon_1, S_1$, 最大化非线性项 Lipschitz 常数为

$$\psi_g^1 = \max(\psi_g) = \frac{1}{\sqrt{\delta_1 \varepsilon_1}},$$

鲁棒性能指标为

$$\mu_1 = \min(\mu) = \sqrt{\zeta_1}.$$

由定理 1 可知, 本文提出将观测器增益矩阵设计方法等效为 LMI 约束下的多目标凸优化问题, 能够确保状态估计误差克服 Lipschitz 非线性项影响保持渐近稳定, 且保证了故障重构的鲁棒性. 为确保滑模运动的可达性, 提出如下定理.

定理 2 考虑增维系统 (5) 和 (6), 设计如式 (12) 所示的滑模观测器, 若式 (10) 中的滑模增益 η_0 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 为任意小的正数, 则滑模运动将在有限时间内到达并维持在滑模面 $s = \{e_y : e_y = 0\}$.

由定理 1 和定理 2 可知, 本文提出的观测器增益矩阵设计方法, 通过设计合适的李氏函数能够克服故障上界未知对状态偏差收敛的影响, 提出的多目标约束优化思想既能克服最大化的 Lipschitz 非线性项对估计误差的影响, 又使得干扰对观测器跟踪误差影响最小, 实现了鲁棒性, 并且在滑模增益中设计自适应律, 确保了滑模的可达性.

3 鲁棒故障重构

由定理 1 和定理 2 可知, 当滑模运动到达时, $e_y = \dot{e}_y = 0$, 由定理 1 可得, $\|m\|_2 \leq \mu \|\xi(t)\|_2$, 且 $\bar{e} = H^{-1} m$, 于是有

$$\|\bar{e}\|_2 = \|H^{-1}\|_2 \|m\|_2 \leq \mu \|H^{-1}\|_2 \|\xi(t)\|_2. \quad (20)$$

误差方程 (17) 变为如下形式:

$$\begin{aligned} & A_3 e_1 + (G_2(x) - G_2(\hat{x})) + \\ & E_2 \xi(t) + D_2 f_{a,s}(t) - C_2^{-1} \nu(t) = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

定义故障重构向量为 $\hat{f}_{a,s}(t) = D_2^+ C_2^{-1} \nu(t)$, 其中 D_2^+ 为 D_2 的广义逆, 则故障的估计误差为

$$\begin{aligned} e_f &= \hat{f}_{a,s}(t) - f_{a,s}(t) = \\ & D_2^+ (A_3 e_1 + (G_2(x) - G_2(\hat{x})) + E_2 \xi(t)). \end{aligned} \quad (22)$$

进而有如下不等式成立:

$$\begin{aligned} \|e_f\|_2 &\leq \\ & \beta \|D_2^+\| (\mu (\|A_3\| + \psi_g) \|H^{-1}\|_2 + \|E_2\|). \end{aligned} \quad (23)$$

由定理 1 可知, 最小化 ψ_g, μ 能够使观测器克服非线性项的影响, 保证状态估计误差有界收敛, 同时干扰对故障重构的估计误差值影响最小, 实现鲁棒故障重构的效果, 从而有 $\hat{f}_{a,s}(t) \approx f_{a,s}(t)$.

注 1 由定理 1 和定理 2 可知, 状态和输出估计误差能够在未知上界故障的影响下渐近稳定, 同时确保了滑模运动在有限时间内能够到达滑模面, 即 $e_y = \dot{e}_y = 0$, 但会造成滑模输入控制 u_r 无穷大^[1], 实际上通常将滑模控制输入 (10) 调整为

$$\nu(t) = \begin{cases} (\eta(t) + \eta_0) \|D_2 C_2\| \frac{e_y}{\|e_y\| + \theta}, & e_y \neq 0; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (24)$$

其中 θ 为充分小的正常数. 这样可以减小滑模运动的抖振.

鲁棒故障重构表达式为

$$\begin{aligned} \hat{f}_{a,s}(t) &= \\ & D_2^+ C_2^{-1} (\eta(t) + \eta_0) \|D_2 C_2\| \frac{e_y}{\|e_y\| + \theta}. \end{aligned} \quad (25)$$

执行器和传感器鲁棒故障重构表达式为

$$\hat{f}_a(t) = [I_q \ 0] \hat{f}_{a,s}, \hat{f}_s(t) = [0 \ I_h] \hat{f}_{a,s}. \quad (26)$$

4 仿真算例

为证实本文提出的执行器和传感器同时故障重构算法的可行性, 以文献 [13] 的数值算例为例开展仿真研究, 系统矩阵为

$$\begin{aligned} A_p &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -48.6486 & -12.4320 & 48.6486 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 19.3548 & 0 & -19.3548 & 0 \end{bmatrix}, \\ E_p &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, g(x_P, u) = \begin{bmatrix} 0 \\ 21.62u \\ 0 \\ -3.33 \sin x_{p3} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$C_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, D_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 21.62 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, N_p = [0 \ 0 \ 1]^T.$$

选取 $T_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 滤波器增益矩阵 $A_f =$

0.4, 另外取 $T_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 定义 $A_s =$

$$\begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & -4 \end{bmatrix}, H_1 = 0.2I_2, H_2 = 0.4I_3, I_2, I_3 \text{ 分}$$

别为二阶三阶单位阵.

按照所提出的观测器设计方法, 由定理2通过LMI工具箱求解, 得到观测器各待求矩阵为

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1.8026 & 3.7340 \\ 3.7340 & 36.6970 \end{bmatrix},$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 11.3996 & 0 & 0.0176 \\ 0 & 0.0917 & -0.1390 \\ 0.0176 & -0.1390 & 22.6604 \end{bmatrix},$$

观测器增益矩阵为 $L = \begin{bmatrix} 5.5231 & 0 & 0 \\ -26.6406 & 0 & 0 \end{bmatrix}$.

假设输入为0, 干扰为 $\xi(t) = 0.6 \sin(0.2t + 2)$, 选取 $\eta_0 = 30$, 自适应律 $\rho = 0.2$, $\theta = 0.001$, 执行器故障为由

$$f_a(t) = \begin{cases} 0.4 \left(\sin \frac{\pi}{180} t \right), & 6 \leq t \leq 13 \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

幅值为0.4, 周期为2s, 占空比为0.5的方波信号组成, 设置故障的持续注入时间为6~13s, 传感器故障的数学表达式为

$$f_s(t) = \begin{cases} 0.6 \sin \pi t, & t \geq 8; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

此时基于本文方法设计的滑模观测器可以得到状态估计误差如图1所示, 滑模面的收敛曲线如图2所示, 执行器故障和重构信号如图3所示, 传感器故障和重构信号如图4所示.

由图1可见, 采用本文方法设计的鲁棒滑模观测器可以确保观测器估计状态能够在有限时间内跟踪上系统原状态, 状态估计误差在有限时间内渐近稳定. 由图2可见, 在滑模增益中添加了自适应律, 由定理3确定的滑模增益可以确保滑模运动在不到3s的

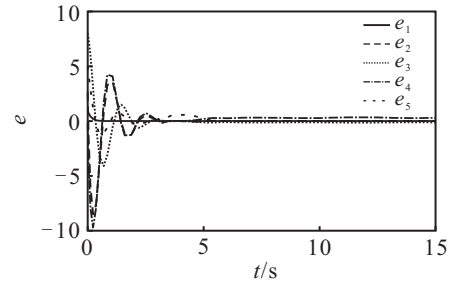


图1 基于鲁棒自适应滑模观测器的状态估计误差

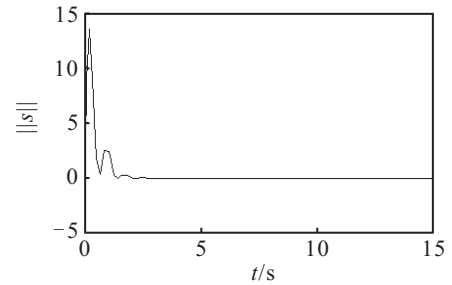


图2 滑模面 ||s|| 的收敛曲线

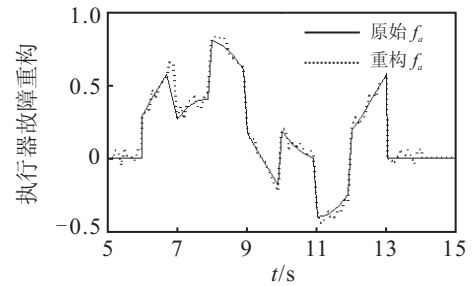


图3 执行器故障及重构信号的仿真波形

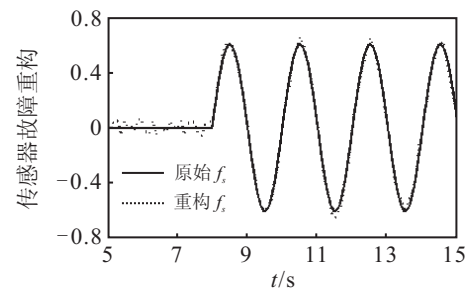


图4 传感器故障及重构信号的仿真波形

时间内到达滑模面, 确保了鲁棒故障重构的精度. 由图3和图4可见, 采用本文方法设计的故障重构方法可以减小干扰等不确定性对重构结果的影响, 但是无法避免重构误差, 同时对于突变的执行器故障和缓变的传感器故障, 采用所提出方法设计的故障重构算法, 均能快速地实现故障在线跟踪和重构, 突出了滑模观测器故障重构方法的优势.

5 结 论

本文研究了一类非线性系统执行器和传感器同时故障时的鲁棒重构问题. 首先引入变换矩阵并添加后置滤波器, 构造增维系统将原系统转化为只包含

“执行器故障”的非线性 Lipschitz 系统. 引入 H_∞ 控制将滑模观测器增益矩阵的求解转化为多目标优化问题, 并通过 LMI 以定理的形式给出观测器增益的求解方法. 针对未知上界故障设计了包含自适应律的滑模增益, 以确保滑模运动在有限时间到达并维持在滑模面, 给出了执行器和传感器的故障重构方法. 仿真算例验证了所提出方法的有效性.

通过全文的分析和研究结果可见, 所提出的基于滑模观测器的鲁棒故障重构方法适应于一类最小相位非线性系统, 拓展和深化所提出方法的应用范围是下一步的研究方向.

参考文献(References)

- [1] 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 & Applications, 2014, 31(4): 431-437.)
- [2] 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[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(9): 135-142.
(Liu C, Li Y H, Liu Y Z, et al. Unknown actuator fault reconstruction based on the high order terminal sliding mode observer[J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(9): 135-142.)
- [3] 杨俊起, 朱芳来. 基于高增益鲁棒滑模观测器的故障检测和隔离[J]. 自动化学报, 2012, 38(9): 1-9.
(Yang J Q, Zhu F L. FDI based on high gain robust sliding mode observers[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(9): 1-9.)
- [4] Halim Alwi, Edwards C, Tan C P. Sliding mode estimation schemes for incipient sensor fault[J]. Automatica, 2009, 45(7): 1679-1685.
- [5] Tan C P, Cruscab F, Aldeenc M. Extended results on robust state estimation and fault detection[J]. Automatica, 2008, 44(8): 2027-2033.
- [6] Tan C P, Edwards C. Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor faults[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2003, 13(5): 443-463.
- [7] Tan C P, Edwards C, Kuang Y. Robust sensor fault reconstruction using right eigenstructure assignment[C]. IEEE Int Workshop on Electronic Design, Test and Applications. Kuala Lumpur, 2006: 435-440.
- [8] Kok Yew Ng, Tan C P, Denny Oetomo. Disturbance decoupled fault reconstruction using cascaded sliding mode observers[J]. Automatica, 2012, 48(7): 794-799.
- [9] 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.
- [10] Ng K Y, Tan C P, Edwards C A R. Disturbance decoupled fault reconstruction using sliding mode observers[J]. Asian J of Control, 2010, 12(5): 656-660.
- [11] Ng K Y, Tan C P, Akmeliawati R Z. New results in disturbance decoupled fault reconstruction in linear uncertain systems using two sliding mode observers in cascade[J]. Int J of Control, Automation and Systems, 2010, 8(3): 506-518.
- [12] Tan C P, Edwards C. Robust fault reconstruction using multiple sliding mode observers in cascade: Development and design[C]. American Control Conf. Hyatt Regency Riverfront: IEEE, 2009: 3411-3416.
- [13] Yan Xing-gang, Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding mode observer[J]. Automatica, 2007, 43(9): 1605-1614.
- [14] Veluvolu K C, Soh Y C. Fault reconstruction and state estimation with sliding mode observers for Lipschitz nonlinear systems[J]. IET Control Theory and Applications, 2010, 5(11): 1255-1263.
- [15] 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.
- [16] Ali Ben Brahim, Slim Dhahri, Faycal Ben Hmida, et al. Robust and simultaneous reconstruction of actuator and sensor faults via sliding mode observer[C]. Int Conf on IEEE Electrical Engineering and Software Applications(ICEESA). Hammamet: IEEE, 2013: 1-6.
- [17] Lee D J, Park Y J, Park Y S. Robust H_∞ sliding mode descriptor observer for fault and output disturbance estimation of uncertain systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2012, 57(11): 2928-2934.
- [18] Edwards C S S. On the development of discontinuous observers[J]. Int J of Control, 1994, 59(5): 1211-1229.
- [19] Masoud A, Horacio J Marquez. LMI optimization approach to robust H_∞ observer design and static output feedback stabilization for discrete-time nonlinear uncertain systems[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2009, 19(3): 313-340.

(责任编辑: 郑晓蕾)