

# 控制与决策

Control and Decision

## 多故障并发非线性系统一体化跟踪主动容错控制器设计

刘聪, 廖开俊, 钱坤, 李颖晖, 丁奇

引用本文:

刘聪, 廖开俊, 钱坤, 李颖晖, 丁奇. 多故障并发非线性系统一体化跟踪主动容错控制器设计[J]. *控制与决策*, 2023, 38(11): 3156–3164.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1937>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### [磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制](#)

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor  
*控制与决策*. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

##### [多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制](#)

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft  
*控制与决策*. 2021, 36(5): 1049–1058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968>

##### [输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制](#)

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation  
*控制与决策*. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

##### [含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制](#)

Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system  
*控制与决策*. 2021, 36(5): 1069–1077 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

##### [四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制](#)

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV  
*控制与决策*. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

# 多故障并发非线性系统一体化跟踪主动容错控制器设计

刘 聪<sup>1†</sup>, 廖开俊<sup>1</sup>, 钱 坤<sup>1</sup>, 李颖晖<sup>2</sup>, 丁 奇<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 航空机务士官学校, 河南 信阳 464000; 2. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

**摘 要:** 针对一类执行器及传感器同时发生故障的非线性系统, 综合鲁棒滑模重构观测器及自适应滑模容错控制器设计技术, 提出一体化跟踪主动容错控制方案. 首先, 将系统增维变换为广义系统, 运用广义约束逆引入辅助矩阵, 采用线性矩阵不等式设计观测器系数矩阵, 综合自适应律给出广义鲁棒滑模观测器设计程式; 在此基础上, 通过设计鲁棒滑模微分器估计输出向量微分, 结合广义鲁棒滑模观测器状态估计结论, 实现执行器及传感器故障同时重构. 其次, 基于故障重构及状态估计结论, 提出自适应滑模的跟踪主动容错控制律设计程式. 最后, 通过开展飞行模拟转台伺服系统数值仿真, 检验一体化跟踪主动容错控制器设计方法的有效性.

**关键词:** 多故障; 鲁棒; 滑模观测器; 主动容错; 一体化

中图分类号: TM74 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1937

引用格式: 刘聪, 廖开俊, 钱坤, 等. 多故障并发非线性系统一体化跟踪主动容错控制器设计[J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3156-3164.

## Integrated active tracking fault tolerance controller design for nonlinear system with multiple actuator and sensor faults

LIU Cong<sup>1†</sup>, LIAO Kai-jun<sup>1</sup>, QIAN Kun<sup>1</sup>, LI Ying-hui<sup>2</sup>, DING Qi<sup>1</sup>

(1. The School of Aeronautics Maintenance Noncommissioned Officers, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China; 2. The Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** An active fault tolerance control algorithm is proposed for the nonlinear system with actuator and sensor faults simultaneously, which is combined with the robust sliding mode observer and adaptive sliding mode controller design. Firstly, the extended state vector is introduced, and the original system is transformed into the descriptor system. Then for the descriptor system, a descriptor robust sliding mode reconstructed observer with adaptive law is proposed, where the auxiliary matrix is introduced through generalized inverse under constraints, and the coefficient matrices are given through linear matrix inequality, meanwhile, a robust sliding mode differentiator is proposed for estimating the output vector differentiator, thus the actuator and sensor fault reconstructed results are obtained simultaneously. Thirdly, the adaptive sliding tracking fault tolerance controller is proposed based on the fault and state reconstruction results. Finally, an example of the flight simulator servo system is provided to validate the effectiveness of the fault tolerance control algorithm.

**Keywords:** multiple faults; robust; sliding mode observer; active fault tolerance; integrated

## 0 引言

实际工作中, 执行器及传感器同时出现故障的多种故障并发情形时有发生, 比如伺服系统可能出现作动电机和角度传感器同时故障, 飞机飞控系统可能出现舵面损伤和角速度传感器同时故障等. 相比执行器或者传感器单类故障而言, 多故障并发所造成的危害和后果将更严重, 如果系统仅包含有针对性单类故障

的容错控制策略, 则在多故障并发情形下, 容错控制策略可能失效, 造成系统控制性能下降, 甚至导致严重后果. 一体化的主动容错控制, 可以应对执行器及传感器同时故障的多故障并发情形, 且可保证跟踪控制性能, 为多故障并发非线性系统跟踪容错提供了解决方案, 近年来成为控制领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>.

一体化的主动容错控制, 依赖准确的故障诊断结

收稿日期: 2021-11-09; 录用日期: 2022-04-15.

基金项目: 国家重点基础研究发展项目(2105CB755805).

责任编辑: 孙宗耀.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: 598832156@qq.com.

论. 基于滑模观测器的故障重构能够直接得到故障类型、幅值信息, 为一体化主动容错控制提供技术支持. 对于多故障并发非线性系统而言, 采用滑模观测器得到准确故障重构结论并非易事, 主要有以下几个难点:

1) 执行器和传感器同时故障时, 如何保证与未知传感器故障相关的滑模运动达到滑模面, 进而得到有效故障重构结论;

2) 当系统含有非线性特性、扰动、未知故障时, 如何保证观测器状态重构误差快速有界收敛;

3) 如何区分扰动和故障, 进而得到完全解耦的故障重构结论.

针对以上难点问题, 作者之前曾发文<sup>[3]</sup>针对一类故障上界未知非线性Lipschitz系统, 提出了综合后置滤波器、 $H_\infty$ 控制及线性矩阵不等式等技术的鲁棒滑模观测器设计方法, 但是故障重构结论仍然存在误差, 且观测器设计采用多目标优化思想展开, 当非线性特性项在优化范围以内, 设计方法才会有效, 故适用范围有限. 近年来, 不少学者<sup>[4-9]</sup>针对非线性系统多故障情形提出了观测器设计方法, 取得了一大批研究成果. 但是, 这些研究方法主要是针对某一类非线性系统展开, 通用性不强, 且有的方法故障重构误差较大, 限制了实际系统的推广使用. 因此, 研究多故障并发非线性系统完全解耦滑模观测器设计方法, 是实现一体化容错控制目标的前提.

由于故障重构结论存在一定延时, 在故障重构期间, 基础容错控制器可能无所作为, 导致系统失稳引发严重后果. 因此, 在设计鲁棒滑模观测器的同时, 需要展开故障重构期间的容错控制器设计, 以实现一体化主动容错控制目标. 目前, 诸多学者提出了基于状态反馈<sup>[10-12]</sup>的容错控制策略, 取得了故障诊断期间满意的容错性能. 但是, 对于多故障并发的非线性系统而言, 传感器故障引入, 使得基于状态反馈的容错方案可能失效. 因此, 基于状态反馈的控制方案, 不适用于多故障并发非线性系统故障重构期间的容错控制. 一体化主动容错控制中的故障重构滑模观测器, 不仅可以提供故障重构结论, 还能得到系统状态估计值. 这样一来, 状态估计可以用来设计容错控制器, 使得传感器故障不会影响容错控制效果. 对于多故障并发非线性系统而言, 基于状态估计的容错控制方案需要解决以下问题:

1) 当系统存在未知扰动和故障时, 如何确保系统稳定;

2) 如何保证故障重构期间系统输出能够跟踪上预期指令.

因此, 针对多故障并发非线性系统设计故障重构期间有效容错控制方案, 是实现一体化容错控制目标的关键.

本文以一类执行器及传感器同时故障非线性系统为研究对象, 提出基于鲁棒滑模故障重构观测器的一体化主动容错控制器设计方案, 并以飞行模拟转台伺服系统为例, 检验一体化主动容错控制方案的有效性.

## 1 问题描述

考虑如下一类执行器及传感器同时发生故障的非线性系统:

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

其中:  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ ,  $y \in R^p$  分别为系统状态、控制输入以及可测输出, 且  $n > p$ ;  $g(x, t)$  为系统非线性特性项, 满足Lipschitz条件, 即  $|g(x_1, t) - g(x_2, t)| < \delta|x_1 - x_2|$ ,  $\delta$  为Lipschitz正常数;  $f_a(t) \in R^q$  为执行器故障向量;  $f_s(t) \in R^h$  为传感器故障向量, 且满足  $|\dot{f}_s(t)| < \mu_s$ ,  $\mu_s$  为正常数;  $\xi(t)$  为未知扰动等不确定向量;  $A, B, C, D, E, F$  为相应维数实数矩阵.

**假设1**<sup>[13]</sup> 系统  $(A, C, E)$  的所有不变零点均在左半开复平面内, 或者对所有满足  $\text{Re}(s) \geq 0$  的复数  $s$ , 有下式成立:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI - A & E \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + k. \quad (2)$$

**假设2** 系统状态  $x$  及  $\dot{x}$  均有界, 且  $f_a(t)$ 、 $f_s(t)$ 、 $\xi(t)$  均有界, 满足以下条件:

$$\|f_a(t), \xi(t)\| \leq \alpha, \|f_s(t)\| \leq \mu, \quad (3)$$

其中  $\alpha$  和  $\mu$  分别为未知正常数.

**假设3** 系统(1)满足匹配条件, 即以下秩条件成立:

$$\text{rank}(C [E \ F]) = \text{rank} [E \ F]. \quad (4)$$

本文首先针对执行器及传感器等多种故障同时发生的非线性系统(1), 设计鲁棒滑模重构观测器, 得到系统状态  $x$ 、执行器故障  $f_a(t)$  及传感器故障  $f_s(t)$  的重构值  $\hat{x}$ 、 $\hat{f}_a(t)$ 、 $\hat{f}_s(t)$ . 在此基础上, 将重构信号作为系统的控制输入, 设计含自适应律的滑模主动容错控制器, 确保多故障并发非线性系统输出能够跟踪上指令信号. 多故障并发非线性系统主动容错跟

踪控制器的结构如图1所示. 其中:SMC表示设计的滑模容错控制器,  $u$ 为待设计的滑模变结构容错控制输入,  $y_d$ 为系统的参考指令信号(为便于简化分析,本文研究对象的参考指令信号及导函数 $y_d$ 和 $\dot{y}_d$ 假定已知),  $y$ 为实际系统输出.

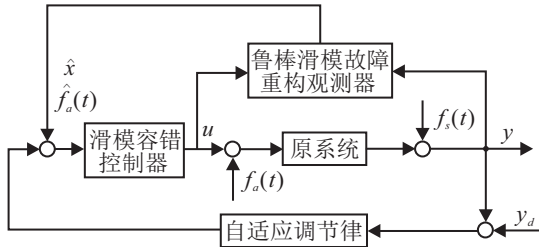


图1 多故障并发一体化跟踪容错控制结构

本文所提出的一体化主动跟踪容错控制器的设计目标,是在满足假设前提条件下,当系统同时出现执行器及传感器故障时,考虑干扰、噪声等不确定性影响,设计基于故障重构观测器和自适应调节律的滑模控制输入,使得系统输出  $y$  能够跟踪给定的指令信号  $y_d$ .

## 2 多故障并发鲁棒滑模重构观测器设计

为了实现执行器及传感器等多故障的同时重构,首先将传感器故障向量  $f_s(t)$  与系统状态向量  $x \in R^n$  一起构建增广状态向量  $\bar{x} = [x^T \ f_s^T(t)]^T$ ,于是系统(1)可等效为如下广义系统:

$$\begin{cases} W\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + g(\bar{x}, t) + Bu + Ef_a(t) + F\xi(t), \\ y = \bar{C}\bar{x}. \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} W &= [I_n \ 0] \in R^{n \times (n+h)}, \\ \bar{A} &= [A \ 0] \in R^{n \times (n+h)}, \\ \bar{C} &= [C \ D] \in R^{p \times (n+h)}. \end{aligned}$$

对于变换后的广义系统(5),设计如下形式的鲁棒广义滑模观测器:

$$\begin{cases} \dot{z} = Kz + Jy + UB_u + Ug(\hat{x}, t) + \frac{1}{2}\hat{\beta}UU^T P(\bar{C}^T \bar{C})^{-1} \bar{C}^T e_y + \nu(t), \\ \hat{x} = z - Vy. \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $z$ 为观测器的中间状态变量;  $\hat{x}$ 为增广状态向量  $\bar{x}$ 的重构值;  $K$ 、 $J$ 为观测器设计矩阵,其表达式分别为  $K = U\bar{A} - L\bar{C}$ ,  $J = L - KV$ ,  $U$ 、 $V$ 为观测器辅助矩阵,  $L$ 、 $P$ 亦为待设计观测器系数矩阵,  $U$ 、 $V$ 、 $L$ 、 $P$ 设计方法均在后文中给出;  $\hat{\beta}$ 为设计的自适应

律;  $e = (\bar{x} - \hat{x})$ 为状态重构误差;  $e_y = \bar{C}(\bar{x} - \hat{x})$ 为输出误差;  $\nu(t)$ 为设计的观测器滑模控制输入项.

针对扩维后的广义系统(5),设计如式(6)所示的扩展滑模重构观测器. 为了得到有效状态重构值,进而得到准确的鲁棒故障重构结论,以下重点论述鲁棒广义滑模观测器相关矩阵  $U$ 、 $V$ 、 $L$ 、 $P$ 及自适应律  $\hat{\beta}$ 和滑模控制输入项  $\nu(t)$ 的设计方法.

### 2.1 辅助矩阵 $U$ 、 $V$ 的设计

式(6)中的观测器辅助矩阵  $U$ 和  $V$ ,通过求解广义约束逆的方法求得. 具体而言,对于变换后的系统(5),存在辅助矩阵  $U \in R^{(n+h) \times n}$ ,  $V \in R^{(n+h) \times p}$ ,使得下式成立:

$$[U \ V] \begin{bmatrix} W \\ \bar{C} \end{bmatrix} = I_{(n+h) \times (n+h)}, \quad (7)$$

$$UF = 0. \quad (8)$$

另外,对于广义系统(5),如果下式成立:

$$\text{rrank}(I_{n+h}) = \text{rank} \begin{bmatrix} W \\ \bar{C} \\ I_{n+h} \end{bmatrix} = n + h, \quad (9)$$

则式(6)中的辅助矩阵  $U \in R^{(n+h) \times n}$ ,  $V \in R^{(n+h) \times p}$ ,可以通过解算下式得到:

$$[U \ V] = \Omega^+ - Z(I_{n+p} - \Omega\Omega^+). \quad (10)$$

其中:  $\Omega = \begin{bmatrix} W \\ \bar{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ C & D \end{bmatrix} \in R^{(n+p) \times (n+h)}$ ,  $\Omega^+ = (\Omega^T \Omega)^{-1} \Omega^T$ 为矩阵  $\Omega$ 的广义逆矩阵,  $Z \in R^{(n+h) \times (n+p)}$ 是任意适维矩阵. 由式(10)可以看出,当  $Z = [0]$ 时,可以得到辅助矩阵  $U$ 和  $V$ 的一个特解,于是有辅助矩阵  $U$ 和  $V$ 的设计方法如下所示:

$$U = (\Omega^T \Omega)^{-1} \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix}, V = (\Omega^T \Omega)^{-1} \begin{bmatrix} C^T \\ D^T \end{bmatrix}. \quad (11)$$

### 2.2 系数矩阵 $L$ 、 $P$ 的设计

对于扩展的广义系统(5),设计如式(6)所示的鲁棒滑模重构观测器,依据文献[14]中的结论,存在对称正  $P \in R^{(n+h) \times (n+h)}$ ,  $Q \in R^{(n+h) \times (n+h)}$ 及矩阵  $L \in R^{(n+h) \times p}$ ,  $M \in R^{(k+h) \times p}$ ,使得下列矩阵方程成立:

$$\begin{cases} (U\bar{A} - L\bar{C})^T P + P(U\bar{A} - L\bar{C}) = -Q, \\ P(UV) = (M\bar{C})^T. \end{cases} \quad (12)$$

矩阵方程(12)中的相关系数矩阵,可通过求解如下线性矩阵不等式约束下的最小化问题<sup>[15]</sup>得到:

$$\min \gamma.$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \gamma I & E^T U^T P - M\bar{C} \\ PUE - \bar{C}^T M^T & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0; \\ \gamma \geq 0; \\ PU\bar{A} + \bar{A}^T U^T P + G\bar{C} + \bar{C}^T G^T < 0; \\ P > I. \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $\gamma$  为待优化正常数, 通过求解式 (13), 可以求得  $L = -P^{-1}G$ .

通过求解式 (13), 可以求得观测器系统矩阵  $L$ 、 $P$ , 在此基础上, 需要提出自适应律  $\hat{\beta}$  及观测器滑模控制输入项  $\nu(t)$  的设计方案, 确保观测器状态估计误差在有限时间内有界收敛.

### 2.3 自适应律 $\hat{\beta}$ 及滑模控制输入 $\nu(t)$ 设计

式 (6) 中的自适应律  $\hat{\beta}$  表达式如下:

$$\hat{\beta} = \gamma_1 \|U^T P e\|^2, \quad (14)$$

其中  $\gamma_1$  选定大于 0 的自适应正常数. 此外, 为了便于扩展状态观测器设计, 定义一个与 Lipschitz 常数  $\delta$  有关的常数,  $\beta$  取值要求满足约束

$$\det \begin{bmatrix} \frac{\lambda_m(Q)}{2} & -\delta \\ -\delta & \beta \end{bmatrix} \geq 0, \quad (15)$$

其中  $\lambda_m(Q)$  表示对称正定矩阵  $Q$  的最大特征值. 在自适应律  $\hat{\beta}$  基础之上, 为确保所设计的滑模观测器具有鲁棒性, 提出滑模观测器控制输入

$$\nu(t) = \begin{cases} (\hat{\alpha}(t) + \alpha_0) P^{-1} \bar{C}^T M^T \frac{M(y - \bar{C}\hat{x})}{\|M(y - \bar{C}\hat{x})\|}, & y \neq \bar{C}\hat{x}; \\ 0, & y = \bar{C}\hat{x}. \end{cases} \quad (16)$$

其中: 矩阵  $M$ 、 $P$  由式 (13) 确定,  $\alpha_0$  为大于 0 的滑模增益参数,  $\hat{\alpha}(t)$  为用于修正上界未知故障的自适应律, 表达式如下所示:

$$\hat{\alpha}(t) = \eta \|M(y - \bar{C}\hat{x})\|, \quad (17)$$

$\eta$  为大于 0 的正常数.

针对扩展系统 (5), 设计如式 (6) 所示的扩展状态观测器, 再按照式 (11)、(13)、(14)、(16)、(17) 设计观测器相关系数矩阵, 分析扩展观测器状态重构误差  $e = (\bar{x} - \hat{x})$  的收敛情况.

### 2.4 状态估计误差 $e$ 收敛情况分析

根据构建的扩展系统 (5) 和所设计的滑模重构观测器 (6), 可以得到  $e = (\bar{x} - \hat{x})$  的微分表达式

$$\dot{e} = \dot{\bar{x}} - \dot{\hat{x}} - V\bar{C}\dot{\hat{x}} = (I - V\bar{C})\dot{\bar{x}} - \dot{z} =$$

$$\begin{aligned} & Ke + U(g(\bar{x}, t) - g(\hat{x}, t)) + \\ & U E f_a(t) - \frac{1}{2} \hat{\beta} U U^T P e - \nu(t). \end{aligned} \quad (18)$$

为使得设计的广义滑模观测器状态能够跟踪上构建的增维系统状态, 确保状态重构误差渐近稳定, 提出如下定理.

**定理 1** 针对系统增维后的广义系统 (5), 设计如式 (6) 所示的扩展滑模重构观测器, 若观测器相关系数矩阵按照式 (11)、(14)~(17) 设计, 且式 (13) 的线性矩阵不等式有解, 则式 (18) 所示的观测器状态估计误差在有限时间内渐近稳定.

由定理 1 可以发现, 观测器重构误差可以克服未知扰动及故障影响, 在有限时间内保持渐近稳定, 但同时也注意到, 滑模观测器控制输入  $\nu(t)$  处于高频切换状态, 会给仿真带来计算负担, 因此经过平滑处理的滑模控制输入才更具有实用价值. 基于此分析, 通常将滑模观测器控制输入  $\nu(t)$  设计成如下形式:

$$\nu_1(t) = \begin{cases} (\hat{\alpha}(t) + \alpha_0) P^{-1} \bar{C}^T M^T \frac{M(y - \bar{C}\hat{x})}{\|M(y - \bar{C}\hat{x})\| + \theta}, \\ y \neq \bar{C}\hat{x}; \\ 0, & y = \bar{C}\hat{x}. \end{cases} \quad (19)$$

其中  $\tau$  是充分小的正常数.

## 3 执行器及传感器故障同时重构

通过设计鲁棒广义滑模观测器 (6), 得到增广状态向量  $\bar{x} = [x^T \quad f_s^T(t)]^T$  的估计值  $\hat{x}$ , 这样一来便可得到传感器故障  $f_s(t)$  的重构值; 同时, 为了通过鲁棒滑模观测器得到执行器故障重构值, 还需要知道广义系统输出微分值. 为此, 设计鲁棒滑模微分器实现对广义系统输出的微分估计.

### 3.1 输出向量微分 $\dot{y}$ 估计

依据广义系统状态方程 (5), 输出向量  $y$  的微分  $\dot{y}$  描述为

$$\dot{y} = \bar{C}\dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \vdots \\ \dot{y}_p \end{bmatrix}, \quad \dot{y}_i = \bar{C}_i \dot{\hat{x}}, \quad i = 1, 2, \dots, p. \quad (20)$$

对于式 (20) 所描述的输出向量微分形式, 可以设计如下的鲁棒滑模微分器, 从而实现输出向量微分  $\dot{y}$  的估计:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{i,1} = \phi_{i,2} - \omega_{i,1}, \\ \dot{\phi}_{i,2} = -\omega_{i,2}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \omega_{i,0} = \phi_{i,1} - y_i, \\ \omega_{i,j} = k_{i,j} |\omega_{i,j-1}|^{(2-j)/(3-j)} \text{sgn} \omega_{i,j-1}. \end{cases} \quad (21)$$

其中:  $\phi_{i,1}$  为系统输出向量的估计值  $y_i$ ,  $\phi_{i,2}$  为系统输出向量微分  $\dot{y}_i$  的估计值,  $k_{i,j} > 0$  ( $j = 1, 2$ ) 为滑模微分器的增益.

设输出向量  $y_i$  与其估计值  $\phi_{i,1}$  的误差为  $e_{y_i} = y_i - \phi_{i,1}$ , 同时定义输出量的微分  $\dot{y}_i$  与其估计值  $\phi_{i,2}$  的误差为  $e_{\dot{y}_i} = \dot{y}_i - \phi_{i,2}$ . 定义微分器滑模面  $s$  为  $\{s | s = e_{y_i} = e_{\dot{y}_i} = 0\}$ . 由文献[15]的结论可知, 通过设计合适的增益  $k_{i,j}$  可以使得滑模运动经有限时间到达滑模面  $\{s | s = e_{y_i} = \dot{e}_{y_i} = 0\}$ . 由此可知, 基于微分器(21)可以实现输出微分  $\dot{y}_i$  的精确估计, 且输出向量微分  $\dot{y}$  的估计值  $\hat{\dot{y}}$  为

$$\hat{\dot{y}} = (\phi_{1,2}, \phi_{2,2}, \dots, \phi_{p,2})^T. \quad (22)$$

### 3.2 执行器及传感器故障重构

基于式(21)所建立的鲁棒滑模微分器, 得到如式(22)所示的输出微分  $\dot{y}$  估计值  $\hat{\dot{y}}$ . 在此基础之上, 结合前文提出的鲁棒滑模重构观测器, 首先给出执行器故障重构方法, 即

$$\begin{aligned} \hat{f}_a(t) = & (\bar{C}UE)^+ [(I - \bar{C}V)\phi - \bar{C}U\bar{A}\hat{x} - \\ & \bar{C}Ug(\hat{x}, t) - \bar{C}UBu], \end{aligned} \quad (23)$$

其中  $\hat{f}_a(t)$  为执行器故障  $f_a(t)$  的重构值. 令执行器故障重构误差为  $\tilde{f}_a(t) = f_a(t) - \hat{f}_a(t)$ , 根据扩展系统状态方程(5), 综合式(7), 可以将式(5)描述为

$$\begin{aligned} \bar{C}(I - V\bar{C})\dot{\hat{x}} = \\ \bar{C}U\bar{A}\hat{x} + \bar{C}Ug(\hat{x}, t) + \bar{C}UBu + \bar{C}UEf_a(t). \end{aligned} \quad (24)$$

由于输出向量微分  $\dot{y}$  可描述为  $\dot{y} = \bar{C}\dot{\hat{x}}$ , 于是有

$$\begin{aligned} (I - \bar{C}V)\dot{\hat{y}} = \\ \bar{C}U\bar{A}\hat{x} + \bar{C}Ug(\hat{x}, t) + \bar{C}UBu + \bar{C}UEf_a(t). \end{aligned} \quad (25)$$

这样一来, 执行器故障  $f_a(t)$  可描述为

$$\begin{aligned} f_a(t) = & (\bar{C}UE)^+ [(I - \bar{C}V)\dot{\hat{y}} - \bar{C}U\bar{A}\hat{x} - \\ & \bar{C}Ug(\hat{x}, t) - \bar{C}UBu]. \end{aligned} \quad (26)$$

根据式(23)和(26), 可得执行器故障重构误差  $\tilde{f}_a(t)$  的表达式

$$\begin{aligned} \tilde{f}_a(t) = & (\bar{C}UE)^+ [(I - \bar{C}V)(\dot{\hat{y}} - \phi) - \bar{C}U\bar{A}e - \\ & \bar{C}U(g(\hat{x}, t) - g(\hat{x}, t))], \end{aligned} \quad (27)$$

其中  $(\bar{C}UE)^+$  为  $\bar{C}UE$  的广义逆.

根据定理1及所设计鲁棒滑模微分器(21)的结论可知,  $(\dot{\hat{y}} - \phi)$ 、 $e$  及  $(g(\hat{x}, t) - g(\hat{x}, t))$  均在有限时间

内有界收敛, 故执行器故障重构误差  $\tilde{f}_a(t)$  有界收敛, 可以发现  $\hat{f}_a(t)$  是执行器故障  $f_a(t)$  的有效重构值. 此外, 根据构建的鲁棒滑模重构观测器, 得到增维状态向量  $\bar{x}$  的重构值  $\hat{\bar{x}}$ , 而扩展状态重构值  $\hat{\bar{x}}$  中包含有传感器故障  $f_s(t)$ , 于是传感器故障重构值可以表示为

$$\hat{f}_s(t) = [0_{q \times n} \quad I_q] \hat{\bar{x}}. \quad (28)$$

由定理1可知, 扩展状态重构误差  $e$  稳定有界, 故  $\hat{f}_s(t)$  是传感器故障  $f_s(t)$  的有效重构值.

## 4 基于观测器的自适应滑模跟踪容错控制器设计

针对式(1)设计跟踪容错控制器, 再设计鲁棒滑模重构观测器, 并且在得到执行器及传感器重构结果的基础上, 提出采用含自适应律的滑模跟踪容错控制器设计方法. 首先定义滑模面  $s_1$  为系统输出与指令信号的跟踪误差, 此时有

$$s_1 = y - y_d. \quad (29)$$

由式(1)及(29)可知, 滑模面  $s_1$  的导函数  $\dot{s}_1$  为

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 = & C(Ax + g(x, t) + Bu + Ef_a(t) + \\ & F\xi(t) + Df_s(t) - \dot{y}_d). \end{aligned} \quad (30)$$

基于设计的鲁棒故障重构观测器, 得到系统(1)状态估计  $\hat{x}$  及执行器故障重构值  $\hat{f}_a(t)$ , 基于此设计含自适应律的滑模跟踪容错控制输入

$$\begin{aligned} u = & B^T C^T (CBB^T C^T)^+ (\dot{y}_d - D\hat{f}_s(t) - CA\hat{x} - \\ & Cg(\hat{x}, t) - CE\hat{f}_a(t) - \eta_1 s_1 - \eta_2 \text{sgn}(s_1)). \end{aligned} \quad (31)$$

其中:  $(CBB^T C^T)^+$  为  $(CBB^T C^T)$  的广义逆,  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为大于0的滑模增益参数;  $\hat{x}$ 、 $\hat{f}_a(t)$  为通过鲁棒滑模重构观测器得到的重构值;  $\hat{f}_s(t)$  为设计的自适应调节律, 有

$$\hat{f}_s(t) = \int \gamma_s D^T s_1 dt, \quad (32)$$

$\gamma_s$  为选取大于0的自适应常数.

本文设计跟踪容错控制器的目标是, 在滑模控制器(31)的作用下, 通过设计合适的增益参数, 使得故障系统(1)输出  $y$  能够跟踪给定指令信号  $y_d$ , 为此提出如下定理.

**定理2** 考虑执行器及传感器同时故障的非线性系统(1), 在鲁棒故障重构观测器的基础上设计如式(31)所示的滑模容错控制律, 并按式(32)设计自适应调节律, 其中  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\gamma_s$  均为大于零的常数, 则系统输出跟踪误差渐近稳定.

由定理2可以看出,按照式(30)~(32)设计主动容错控制器,在故障重构的基础上,可以使得系统在执行器及传感器同时故障的情形下,输出能够跟踪指令信号.

**注1** 为减小滑模的抖振现象给容错控制带来的不利影响,将滑模控制输入中的符号函数项引入边界层保护,此时式(31)修正为

$$u = B^T C^T (C B B^T C^T)^{-1} \left( \dot{y}_d - D \hat{f}_s(t) - C A \hat{x} - C g(\hat{x}, t) - C E \hat{f}_a(t) - \eta_1 s_1 - \eta_2 \text{sat}\left(\frac{s_1}{\rho}\right) \right). \quad (33)$$

其中:  $\rho$  为一充分小的正常数,  $\text{sat}\left(\frac{s_1}{\rho}\right)$  的表达式<sup>[16]</sup>为

$$\text{sat}\left(\frac{s_1}{\rho}\right) = \begin{cases} 1, & s_1 > \rho; \\ \frac{s_1}{\rho}, & \|s_1\| \leq \rho; \\ -1, & s_1 < -\rho. \end{cases} \quad (34)$$

### 5 飞行模拟转台伺服系统仿真

为检验滑模跟踪容错控制器设计方法的有效性,本文以飞行模拟转台伺服系统为例开展仿真验证研究.某简化的飞行模拟转台伺服系统结构如图2所示.

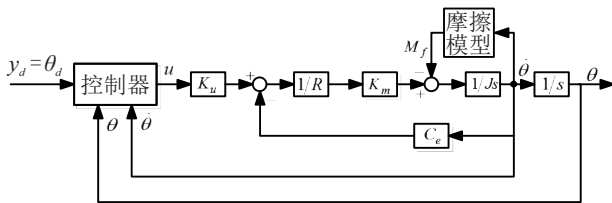


图2 某简化飞行模拟转台伺服系统结构

图2中:  $\theta_d$  为设定的角度信号;  $K_u$  为PWM功率放大器放大倍数;  $R$  为电枢电阻;  $u$  为设计的控制输入电压;  $K_m$  为电机力矩系数;  $J$  为电机的转动惯量;  $C_e$  为电压反馈系数;  $\theta$  为角位置;  $\dot{\theta}$  为角速度;  $\ddot{\theta}$  为角加速度;  $M_f$  为非线性摩擦力矩,  $M_f = \sigma_0 z + \sigma_1 dz/dt + \sigma_2 \dot{\theta}$ ,  $\sigma_0$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为刚毛刚度系数、刚毛阻尼系数以及粘性摩擦系数常量. 考虑伺服系统本身存在的不确定因素,以角度信号作为系统输出,此时可以得到飞行模拟转台伺服系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = ax_2 + bu - \frac{M_f}{J} + \xi(t), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (35)$$

其中:  $x_1 = \theta$ ,  $x_2 = \dot{\theta}$ ,  $a = -K_m C_e / J R$ ,  $b = K_u K_m / J R$ ,  $\xi(t)$  为不确定项. 式(35)描述的是飞行模拟转台

伺服系统正常工作时的工作特性,同时也注意到,作为伺服系统执行机构的直流电机不可避免地会发生定子、转子等多种类型的故障,使得执行器输出出现恒增益或恒偏差、时变偏差等变化,甚至卡死而不能正确执行控制命令的现象,此时系统的输入变为  $u + f_a(t)$ ,  $f_a(t)$  为执行器故障项;同时用于系统控制和量测的角度及速度传感器可能会出现失效、偏差、漂移及精度下降等故障,此时系统的输出变为  $x_1 + f_s(t)$ ,  $f_s(t)$  为传感器故障项. 由此可以得到受多故障、摩擦及未知干扰影响的飞行模拟转台伺服系统的状态方程和输出方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = ax_2 + b(u + f_a(t)) - \frac{M_f}{J} + \xi(t)k, \\ y = x_1 + f_s(t). \end{cases} \quad (36)$$

飞行模拟转台伺服系统的具体参数如表1所示.将表1中的参数代入式(36)所描述的摩擦模型,可以得到摩擦力矩随角速度的变化曲线,如图3所示.

表1 飞行模拟转台伺服系统的参数值

参数	单位	数值
$R$	$\Omega$	7.77
$K_m$	$N \cdot m \cdot A^{-1}$	6
$J$	$kg \cdot m^2$	0.6
$K_u$		11
$C_e$	$V / (rad \cdot s^{-1})$	1.2
$\sigma_0$	$N \cdot m$	$10^5$
$\sigma_1$	$N \cdot m$	0.5
$\sigma_2$	$N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$	2
$M_c$	$N \cdot m$	26
$M_s$	$N \cdot m$	36
$\dot{\theta}_s$	$rad \cdot s^{-1}$	0.517

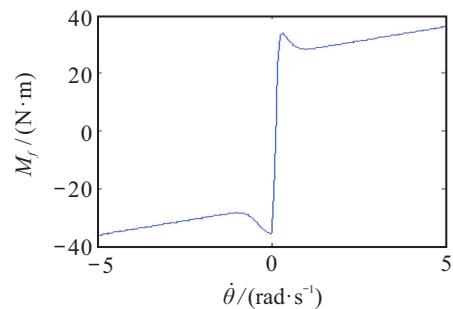


图3 摩擦力矩随角速度变化曲线

由图3可以看出,采用非线性摩擦环节  $M_f$  连续不可导,能够满足Lipschitz条件,故式(36)所描述的飞行模拟转台伺服系统模型,满足式(1)所述非线性系统要求. 基于式(36)所述的模型,结合表1中系统模型的各项参数值,首先给出鲁棒滑模观测器相关系数矩阵设计方法,可以得到观测器相关的设计矩阵.

设定系统所受干扰幅值为1.5的白噪声信号,执行器故障设定为:伺服系统执行机构的直流电机内部发生线圈绕组短时虚搭现象,具体表现为电机输出角速度出现恒差,其数学描述为故障类型的幅值为2的突变信号,故障注入时间为3s;传感器故障设定为:直流电机角度传感器由于内部线路原因发生漂移故障,其数学描述表示为正弦缓变故障,当伺服系统开始工作时,直流电机角度传感器便出现了漂移故障.根据上述解算得到的相关增益矩阵和系数矩阵,设计鲁棒滑模故障重构观测器,可以得到伺服系统状态 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $\dot{x}_1$ 及 $\dot{x}_2$ ,即角位置 $\theta$ 、角速度 $\dot{\theta}$ 及角加速度 $\ddot{\theta}$ 的响应曲线,如图4和图5所示.

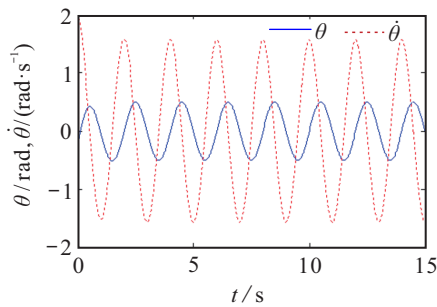


图4 伺服系统 $\theta$ 、 $\dot{\theta}$ 状态变化曲线

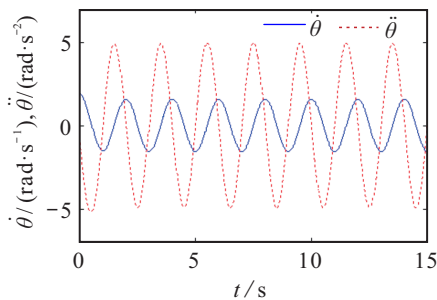


图5 伺服系统 $\ddot{\theta}$ 、 $\dot{\theta}$ 状态变化曲线

由图4和图5所示的仿真结果可以看出,角位置 $\theta$ 、角速度 $\dot{\theta}$ 及角加速度 $\ddot{\theta}$ 的响应均有上界,且上界幅值不大于8,与本文所提假设一致.此外,按照前文提出的故障重构式(30)及(35),可以得到执行器及角度传感器故障重构的波形,如图6和图7所示.

为验证本文方法能够更有效地进行故障重构的结论,将本文故障重构仿真结果与文献[3]中鲁棒故

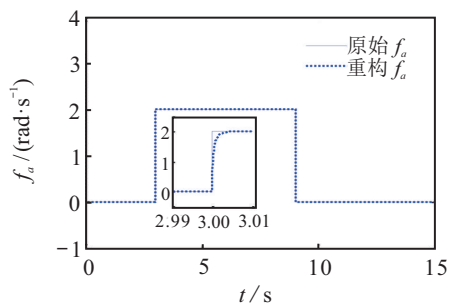


图6 采用本文方法的执行器故障重构波形

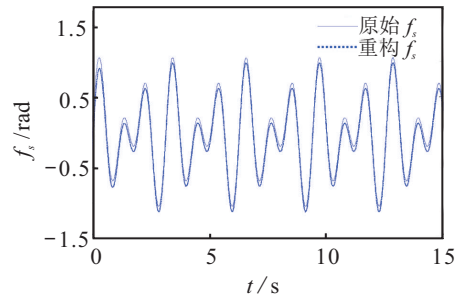


图7 采用本文方法的传感器故障重构波形

障重构仿真结果进行对比分析,采用文献[3]方法得到的执行器故障重构结果如图8和图9所示.

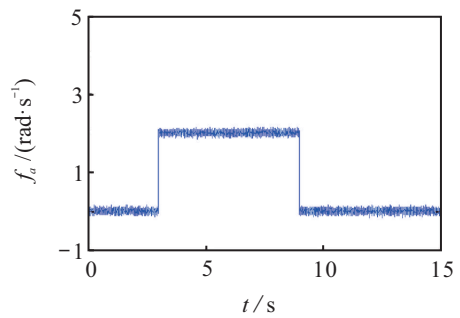


图8 采用文献[3]方法的执行器故障重构波形

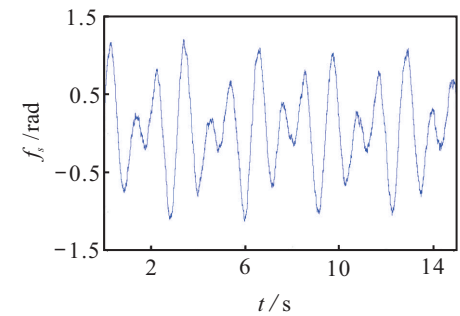


图9 采用文献[3]方法的传感器故障重构波形

对比图6和图8的仿真结果可以发现,采用本文的执行器故障重构时间大约为0.01s,且能得到更精确的执行器故障重构结论;对比图7和图9的仿真结果也可发现,本文方法传感器故障重构的精度更高.在设计鲁棒滑模故障重构观测器的基础上,基于状态估计值 $\hat{\theta}$ 、 $\hat{\dot{\theta}}$ 及故障重构值 $\hat{f}_a(t)$ 、 $\hat{f}_s(t)$ ,对发生角度传感器故障的系统输出进行补偿,有 $\bar{y} = y - \hat{f}_s(t) = x_1 - e_{fs}$ ,  $e_{fs} = f_s(t) - \hat{f}_s(t)$ ,令角度跟踪误差为 $e_\theta = \bar{y} - \theta_d$ ,其中 $\theta_d$ 为伺服系统设定的指定跟踪指令,滑模面设计为 $s = \dot{e}_\theta + \tau e_\theta$ ,基于滑模主动容错控制输入设计为 $u = (\tau \dot{e}_\theta + \eta_1 s + \eta_2 \text{sgn}(s) + \ddot{\theta}_d - 1.544 \hat{x}_2 + M_f(\hat{x}_2) - 14.157 \hat{f}_a(t))/14.157$ ,同时符号函数 $\text{sgn}(\cdot)$ 引入边界层保护,以减小滑模抖振现象对伺服系统角度跟踪效果的影响.设定伺服系统的角度跟踪指令为 $\theta_d = 0.5 \sin(\pi t)$  rad,考虑系统同时发生执行器及角度传感器故障情形,在主动容错控制器

的作用下,飞行模拟转台伺服系统角度跟踪输出曲线如图10所示.若在设计控制器过程中不采用主动容错控制器的设计方法,仅采用滑模控制设计方法,则当系统出现多故障并发的情形时,在基础PI控制器作用下,飞行模拟转台伺服系统的角度跟踪输出曲线如图11所示.

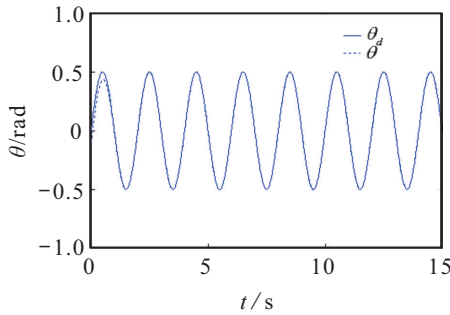


图10 一体化主动容错跟踪控制器作用下角度跟踪曲线

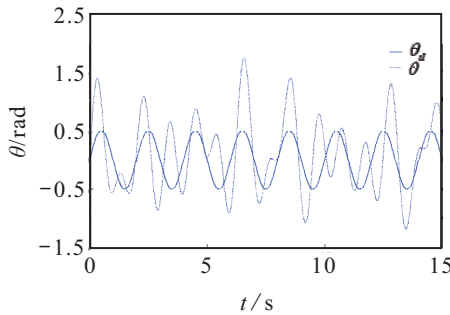


图11 PI控制器作用下角度跟踪曲线

由图10和图11所示的仿真结果可以看出,在故障重构基础上设计的主动容错控制器跟踪效果好,当伺服系统出现执行器及角度传感器故障时,跟踪的角度输出仍能较好地跟踪指令转角信号,而仅采用滑模控制的控制器不能确保系统输出能够跟踪上给定的指令角度信号.这一结果表明,采用本文方法设计的鲁棒故障重构观测器,能够实现故障的在线重构,确保飞行模拟转台伺服系统同时出现执行器故障、角度传感器偏差故障时,系统角度输出仍能较好地跟踪指令信号,保证各种飞行模拟实验的可靠进行.

## 6 结论

本文考虑一类执行器和传感器同时出现故障的非线性系统,研究了一体化的跟踪主动容错控制器设计方法.首先将传感器故障作为增广向量,构建广义系统,对于等效变换后的广义系统,为得到完全解耦的多故障重构结论,引入辅助矩阵、系数矩阵以及自适应律设计程式,确保观测器状态估计偏差有界收敛.在此基础上,通过设计鲁棒滑模微分器,得到执行器及传感器故障同时重构的结论.其次,基于设计的广义鲁棒滑模重构观测器,提出了基于自适应滑模

的主动容错控制器设计方案,确保故障重构期间跟踪容错控制性能,实现一体化主动容错控制目标.最后,通过飞行模拟转台伺服系统数值仿真结果表明,本文提出的一体化主动容错控制器,能够保证非线性系统在多故障并发时实现跟踪容错控制目标.需要指出的是,本文所提出的一体化主动容错控制器设计的前提是,参考指令信号及导函数已知,对于参考指令信号及导函数未知的情形,将是下一步重点研究和关注的方向.

## 参考文献(References)

- [1] 刘聪, 钱坤, 李颖晖, 等. 基于LMI的一体化鲁棒主动容错控制器设计[J]. 控制与决策, 2018, 33(1): 53-59. (Liu C, Qian K, Li Y H, et al. Integrated robust active fault tolerance controller design based on linear matrix inequality[J]. Control and Decision, 2018, 33(1): 53-59.)
- [2] Zhang H G, Han J, Luo C M, et al. Fault-tolerant control of a nonlinear system based on generalized fuzzy hyperbolic model and adaptive disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(8): 2289-2300.
- [3] 刘聪, 李颖晖, 吴辰, 等. 基于鲁棒自适应滑模观测器的多故障重构[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.)
- [4] Kharrat D, Gassara H, El Hajjaji A, et al. Adaptive observer and fault tolerant control for Takagi-Sugeno descriptor nonlinear systems with sensor and actuator faults[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2018, 16(3): 972-982.
- [5] Chen L H, Liu M, Fu S S. Adaptive sliding mode control for stochastic jump systems against sensor and actuator failures[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(16): 2000-2009.
- [6] Li X H, Lu D K, Zeng G H, et al. Integrated fault estimation and non-fragile fault-tolerant control design for uncertain Takagi-Sugeno fuzzy systems with actuator fault and sensor fault[J]. IET Control Theory & Applications, 2017, 11(10): 1542-1553.
- [7] Gao M Z, Cai G P, Nan Y. Robust adaptive fault-tolerant  $H_\infty$  control of reentry vehicle considering actuator and sensor faults based on trajectory optimization[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2016, 14(1): 198-210.
- [8] Yang J Q, Zhu F L, Wang X, et al. Robust sliding-mode observer-based sensor fault estimation, actuator fault detection and isolation for uncertain nonlinear systems[J].

- International Journal of Control, Automation and Systems, 2015, 13(5): 1037-1046.
- [9] Yin S, Yang H Y, Kaynak O. Sliding mode observer-based FTC for Markovian jump systems with actuator and sensor faults[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(7): 3551-3558.
- [10] Zhu J W, Yang G H. Adaptive sliding-mode control for stochastic Markovian jumping systems with actuator faults[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(6): 664-673.
- [11] Shen Q K, Jiang B, Shi P. Active fault-tolerant control against actuator fault and performance analysis of the effect of time delay due to fault diagnosis[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2017, 15(2): 537-546.
- [12] Yu X, Liu Z X, Zhang Y M. Fault-tolerant flight control design with finite-time adaptation under actuator stuck failures[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(4): 1431-1440.
- [13] 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. Adaptive sliding-mode observer for actuator fault reconstruction in nonlinear system with mismatched uncertainties[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(4): 431-437.)
- [14] Levant A. High-order sliding modes: Differentiation and outputfeedback control[J]. International Journal of Control, 2003, 76(10): 427-434.
- [15] Corless M, Tu J. State and input estimation for a class of uncertain systems[J]. Automatica, 1998, 34(6): 757-764.
- [16] 梁昆淼. 数学物理方法[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2010: 41-60.  
(Liang K M. Mathematical and physical method [M]. The 4th edition. Beijing: Higher Education Press, 2010: 41-60.)

### 作者简介

刘聪(1988—), 男, 讲师, 博士, 从事非线性系统滑模重构观测器设计的研究, E-mail: 598832156@qq.com;

廖开俊(1981—), 男, 副教授, 博士, 从事无人机非线性飞行控制、容错控制等研究, E-mail: liaokaijun81@163.com;

钱坤(1977—), 男, 教授, 博士, 从事无人机飞行控制、非线性控制、容错控制等研究, E-mail: qiankun@163.com;

李颖晖(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制、容错控制等研究, E-mail: liyinghui1966@163.com;

丁奇(1982—), 男, 讲师, 从事航空电气系统非线性控制、容错控制等研究, E-mail: dingqi1982@163.com.

## 下 期 要 目

- 冗余机械臂逆运动学求解方法研究进展 . . . . . 贾龙飞, 等
- 考虑时空相似性的动态图卷积神经网络交通流预测 . . . . . 谷振宇, 等
- 预设跟踪性能下车辆队列执行器故障主动容错控制 . . . . . 刘小敏, 等
- 三阶段拉格朗日启发式算法求解带同时取送货的绿色车辆路径问题 . . . . . 李熠胥, 等
- 基于估值不确定度排序顺序均值采样的昂贵高维多目标进化算法 . . . . . 王 浩, 等
- 基于非线性云化的自适应帝王蝶优化算法 . . . . . 李晓平, 等
- 求解复杂约束优化问题的多策略混合麻雀搜索算法 . . . . . 刘耿耿, 等
- 基于蚁群信息素辅助的Q学习路径规划算法 . . . . . 田晓航, 等
- 面向交通能源融合的路侧单元传输控制优化策略 . . . . . 代 亮, 等
- 虚假数据注入攻击下多智能体系统的均方二分一致性研究 . . . . . 纪良浩, 等
- 基于倍频卷积和注意力机制的图像去雨 . . . . . 杨 青, 等
- 一种利用反插值操作的隐蔽中毒攻击方法 . . . . . 陈晋音, 等
- 异构多目标差分-动态窗口算法及其在移动机器人中的应用 . . . . . 王洪斌, 等