

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209387

基于观测器的无人机编队自适应容错控制*

王海凤¹ 郑柏超^{1,2} 卢世筌¹ 赖琛¹

(1.南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2.江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044)

摘要: 针对多无人机编队飞行中的僚机故障问题,设计了一种基于观测器的自适应容错控制方法。首先,基于领导跟随法建立了无人机编队模型及僚机故障的编队模型,并将其划分为位置子系统与偏航角子系统。其次,基于观测器技术对位置子系统状态和故障进行观测,并结合观测的状态和故障信息构造状态反馈控制律;然后,基于自适应方法给出偏航角子系统的控制设计方案,并用 Lyapunov 理论证明系统跟踪误差最终有界收敛。通过仿真,本文算法在发生故障后对系统的完全跟踪时间和稳态误差分别比基于鲁棒故障估计的方法最大降低了 76% 和 70.3%,并且均比传统观测器的方法明显减少较大,证明了本文算法能更好的克服偏差故障带来的不利影响,有效实现四旋翼无人机群的编队飞行。

关键词: 四旋翼无人机;僚机故障;容错控制;观测器;自适应方法

中图分类号: V249.1;V279;TP302.8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Adaptive fault-tolerant control of UAV formation based on observer method

Wang Haifeng¹ Zheng Bochao^{1,2} Lu Shikun¹ Lai Chen¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To solve the problem of fault of followers in multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) formation flight, an adaptive fault-tolerant control method based on observer is designed. Firstly, based on the leader-follower method, the formation model of UAVs and the fault model of followers in the formation are established, which are divided into the position subsystem and the yaw angle subsystem. Secondly, an observer is designed to observe the fault and the state in the position subsystem, and combined with the observed state and fault, a state feedback control law is constructed. Then, the control design scheme of yaw angle subsystem is given based on the adaptive method. The final bounded convergence of the tracking error of the system is proved based on the Lyapunov theory. Through simulation, compared with the method based on the robust fault estimation, the algorithm in this paper reduces the total tracking time and steady-state error of the system by 76% and 70.3% respectively, and both of them are significantly reduced compared with the traditional observer method, which proves that the algorithm in this paper can better overcome the adverse effects caused by the deviation fault and effectively realize the formation flight of quadrotor unmanned aerial vehicles.

Keywords: quadrotor UAV; fault of followers; fault tolerant control; observer; adaptive method

0 引言

四旋翼无人机^[1-2]由于形状小巧与操作灵活等特点,广泛地被应用于军事侦察、遥感测绘、电力巡检等领域^[3-5]。随着应用场景的要求提升,单架无人机效率低下且很难完成诸多较为艰巨的任务,因此多无人机协同控制日益受到科研人员的关注。目前的无人机编队控制方法主要有:领

导跟随法^[6]、虚拟结构法^[7]、基于行为法^[8]等。因存在通信延迟、数据包丢失与外部扰动等众多因素的影响,与单机控制相比,多无人机协同控制^[9]面临着更严峻的挑战。

维持队形稳定是无人机编队控制的首要任务,科研人员对此投入了大量的研究,并斩获了丰厚的成果。文献[10]利用虚拟领导者建立于跟随者的误差动力学模型,基于图论建立无人机间的通信模式,通过反步法设计控

收稿日期:2022-03-24

* 基金项目:国家自然科学基金(61973169)、江苏省自然科学基金(BK20201392)、江苏高校“青蓝工程”(R2021Q04)项目资助

制律,使无人机能够以期望的队形飞行。文献[11]针对具有未建模动态和干扰的无人机编队问题,设计了神经自适应滑模控制器来补偿不确定性项,保证了良好的跟踪性能。文献[12]设计了降维状态观测器实现对编队无人机速度的估计,并以此为基础设计了分布式编队控制器,实现了多无人机编队控制目标。除此之外,在编队飞行过程中,无人机容易受到执行器故障、通信故障以及外部干扰所引发的故障的影响,这时就需要编队控制系统对故障机进行容错控制^[13]。近年来,观测器技术和自适应方法在容错控制领域应用非常广泛。针对连续系统的执行器故障问题,文献[14]利用传统的观测器方法对故障参数进行估计,再基于观测的故障信息设计状态反馈控制器,实现了偏差故障下的容错控制,但要求故障的变化率不能太大。针对离散系统的执行器故障和未知干扰问题,文献[15]基于鲁棒故障观测器设计容错控制器,有效的解决了故障问题的同时,还能抑制干扰带来的影响。文献[16]采用反步法设计自适应滑模容错控制律,有效的解决飞行器的失效故障问题,增强了编队系统的鲁棒性和容错能力。其大多数都是在无人机的动力学模型基础上考虑故障,相应的容错控制方法对编队模型上发生故障的场合不一定适用,所以需要相应的解决方案的提出。

本文以领导跟随法的编队模型为基础,针对编队飞行中的僚机故障问题,设计了一种基于观测器的自适应容错控制方法,将僚机故障的编队模型分为位置子系统与偏航角子系统。位置子系统采用观测器对故障和状态观测,再利用观测的信息设计状态反馈控制器;偏航角子系统采用自适应的方法设计控制器。通过观测器技术和自适应方法的结合,能够快速克服偏差故障给僚机带来的不利影响,有效实现编队僚机故障下的容错控制。通过仿真对比,本文算法对位置和偏航角的完全跟踪时间和稳态误差均要优于基于鲁棒故障估计的方法和传统的自适应观测器方法,验证了本文容错控制方法的有效性和优越性。

1 无人机编队模型

1.1 基于领导跟随法的编队模型

本节基于领导跟随法建立5架无人机的编队模型,根据分级控制的原理,将1号无人机作为一级领导者,2、3号无人机作为二级领导者,无人机的编队示意图如图1所示。其中, λ_{ix} 和 λ_{iy} 分别表示*i*号无人机与其领导者的横向距离和纵向距离。

无人机的运动学模型在编队系统中表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_{ix} \cos(\psi_i) - v_{iy} \sin(\psi_i) \\ \dot{y}_i = v_{ix} \sin(\psi_i) + v_{iy} \cos(\psi_i) \\ \dot{\psi}_i = \omega_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$, x_i 与 y_i 分别表示惯性坐标系下*i*号无人机在*x*轴和*y*轴的坐标, v_{ix} 和 v_{iy} 分别表示为机体坐标系下*i*号无人机的*x*轴和*y*轴方向的速度, ψ_i 表示*i*

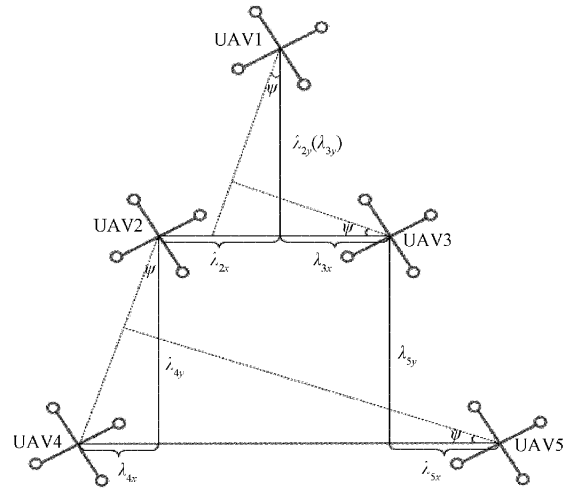


图1 无人机编队示意图

号无人机的偏航角, ω_i 表示*i*号无人机的偏航角速度。

假设*l*号机为*i*号机的领导者,根据图1求得:

$$\lambda_{ix} = (x_i - x_l) \cos(\psi_l) + (y_i - y_l) \sin(\psi_l) \quad (2)$$

$$\lambda_{iy} = -(x_i - x_l) \sin(\psi_l) + (y_i - y_l) \cos(\psi_l) \quad (3)$$

对式(2)和(3)关于时间*t*求导,令 $e_{i\psi} = \psi_i - \psi_l$,并将式(1)代入整理得:

$$\dot{\lambda}_{ix} = \lambda_{iy} \omega_l - v_{lx} + v_{ix} \cos(e_{i\psi}) - v_{iy} \sin(e_{i\psi}) \quad (4)$$

$$\dot{\lambda}_{iy} = -\lambda_{ix} \omega_l - v_{ly} + v_{ix} \sin(e_{i\psi}) + v_{iy} \cos(e_{i\psi}) \quad (5)$$

假设期望的横向距离和纵向距离分别为 λ_{ix}^d 和 λ_{iy}^d ,定义横向误差和纵向误差分别为 $e_{ix} = \lambda_{ix}^d - \lambda_{ix}$ 和 $e_{iy} = \lambda_{iy}^d - \lambda_{iy}$ 。假设无人机的期望距离为大于0的常数,对 e_{ix} 和 e_{iy} 关于时间*t*求导得:

$$\begin{cases} \dot{e}_{ix} = -(\lambda_{iy}^d - e_{iy}) \omega_l + v_{lx} - v_{ix} \cos(e_{i\psi}) + v_{iy} \sin(e_{i\psi}) \\ \dot{e}_{iy} = (\lambda_{ix}^d - e_{ix}) \omega_l + v_{ly} - v_{ix} \sin(e_{i\psi}) - v_{iy} \cos(e_{i\psi}) \\ \dot{e}_{i\psi} = \omega_i - \omega_l \end{cases} \quad (6)$$

令 $\mathbf{X}_i = [e_{ix}, e_{iy}, e_{i\psi}]^T$, $\mathbf{U}_i = [v_{ix}, v_{iy}, \omega_i]^T$,将式(6)写成状态空间表达式:

$$\dot{\mathbf{X}}_i = \mathbf{H}(\mathbf{X}_i) + \mathbf{G}(\mathbf{X}_i) \mathbf{U}_i \quad (7)$$

其中,非线性项 $\mathbf{H}(\mathbf{X}_i) = \begin{bmatrix} e_{iy} \omega_l + v_{lx} - \omega_l \lambda_{iy}^d \\ -e_{ix} \omega_l + v_{ly} + \omega_l \lambda_{ix}^d \\ -\omega_l \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{G}(\mathbf{X}_i) = \begin{bmatrix} -\cos(e_{i\psi}) & \sin(e_{i\psi}) & 0 \\ -\sin(e_{i\psi}) & -\cos(e_{i\psi}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

1.2 僚机故障的编队模型

无人机在编队飞行中,容易受到风速和气流等外部干扰的影响,导致僚机在机体轴方向的速度和角速度产生偏移。在无人机编队系统式(7)的基础上,考虑文献[17]中的偏差故障,得到僚机故障的编队系统为:

$$\dot{\mathbf{X}}_i = \mathbf{H}(\mathbf{X}_i) + \mathbf{G}(\mathbf{X}_i) (\mathbf{U}_i + \mathbf{F}_i) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{F}_i = [f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}]^T$ 为未知的偏差故障。

假设 1 系统中的故障 f_{ik} 有界, 且一阶导存在, 即 $\|f_{ik}\| \leq f_0, \|\dot{f}_{ik}\| \leq f_1, k \in \{1, 2, 3\}$ 。

2 自适应故障观测器设计

根据编队故障系统式(8), 由于矩阵 $\mathbf{G}(\mathbf{X}_i)$ 中含有状态, 那么一般的观测器设计方法无法满足要求。因此, 为实现无人机编队系统在僚机发生故障下的编队飞行稳定性及性能, 本文将编队故障系统式(8)分为两个子系统, 即位置子系统式(9)和偏航角子系统式(10)。编队容错控制结构如图 2 所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{ix} \\ \dot{e}_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(e_{i\phi}) & \sin(e_{i\phi}) \\ -\sin(e_{i\phi}) & -\cos(e_{i\phi}) \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} v_{ix} \\ v_{iy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{i1} \\ f_{i2} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} e_{iy}\omega_l + v_{ix} - \omega_l\lambda_{iy}^d \\ -e_{ix}\omega_l + v_{iy} + \omega_l\lambda_{ix}^d \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\dot{e}_{i\phi} = \omega_i + f_{i3} - \omega_i \quad (10)$$

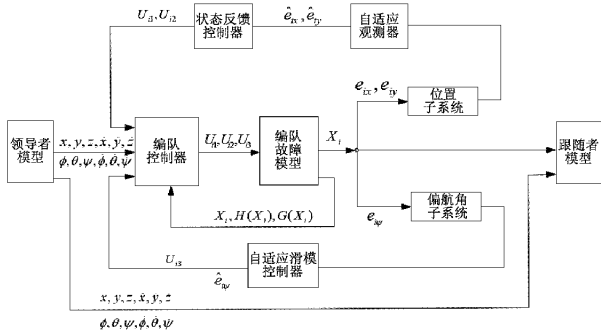


图 2 编队容错控制结构图

首先, 本文对位置子系统设计自适应故障观测器, 将式(9)写成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{m}}_i = \mathbf{B}(\mathbf{u}_i + \mathbf{f}_i) + \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) + \mathbf{g}_2(t) \\ \mathbf{y}_i = \mathbf{C}\mathbf{m}_i \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{m}_i = [e_{ix} \ e_{iy}]^T, \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) = [-e_{iy}\omega_l \ e_{ix}\omega_l]^T,$

$$\mathbf{g}_2(t) = \begin{bmatrix} -v_{ix} + \omega_l\lambda_{iy}^d \\ -v_{iy} - \omega_l\lambda_{ix}^d \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\cos(e_{i\phi}) & \sin(e_{i\phi}) \\ -\sin(e_{i\phi}) & -\cos(e_{i\phi}) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{f}_i = \begin{bmatrix} f_{i1} \\ f_{i2} \end{bmatrix}.$$

假设 2 系统能观测。

假设 3 非线性项 $\mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i)$ 满足 Lipschitz 连续条件, 即 $\|\mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_1) - \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_2)\| \leq \gamma \|\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2\|$ 成立, γ 为大于 0 的常数。

引理 1^[18] 若非线性项 $\mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i)$ 满足 Lipschitz 连续条件, 则存在正定对称矩阵 \mathbf{P} , 使得:

$$2\mathbf{e}^T \mathbf{P} [\mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_1) - \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_2)] \leq \gamma^2 \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{e} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{e} = \mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2$ 。

引理 2^[19] 假设 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 为适当维数的向量, 那么满足:

$$2\mathbf{X}^T \mathbf{Y} \leq \tau \mathbf{X}^T \mathbf{X} + \frac{1}{\tau} \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} \quad (13)$$

其中, $\tau > 0$ 。

在满足以上条件的基础上, 本文设计如下自适应故障观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{m}}}_i = \mathbf{B}(\mathbf{u}_i + \hat{\mathbf{f}}_i) + \mathbf{g}_1(t, \hat{\mathbf{m}}_i) + \mathbf{g}_2(t) - \mathbf{L}_i(\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}) \\ \dot{\hat{\mathbf{y}}}_i = \mathbf{C}\hat{\mathbf{m}}_i \\ \dot{\hat{\mathbf{f}}}_i = -\mathbf{\Gamma}_i \mathbf{F}_i \mathbf{y}_{ie} + \sigma_i \mathbf{\Gamma}_i^{-1} \hat{\mathbf{f}}_i \end{cases} \quad (14)$$

定义观测误差:

$$\begin{cases} \mathbf{m}_{ie} = \hat{\mathbf{m}}_i - \mathbf{m}_i \\ \mathbf{y}_{ie} = \hat{\mathbf{y}}_i - \mathbf{y}_i \\ \mathbf{f}_{ie} = \hat{\mathbf{f}}_i - \mathbf{f}_i \end{cases} \quad (15)$$

对 \mathbf{m}_{ie} 求导并结合式(11)和(14)可得:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{m}}_{ie} = (-\mathbf{L}_i \mathbf{C}) \mathbf{m}_{ie} + \mathbf{B} \mathbf{f}_{ie} + \mathbf{g}_1(t, \hat{\mathbf{m}}_i) - \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) \\ \dot{\mathbf{y}}_{ie} = \mathbf{C} \mathbf{m}_{ie} \end{cases} \quad (16)$$

定理 1 针对僚机存在未知偏差故障的无人机编队系统式(8), 若存在矩阵 $\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_i^T > 0, \mathbf{Q}_i = \mathbf{Q}_i^T > 0$, 并且有矩阵 \mathbf{F}_i 满足:

$$\mathbf{P}_i(-\mathbf{L}_i \mathbf{C}) + (-\mathbf{L}_i \mathbf{C})^T \mathbf{P}_i + \gamma_i^2 \mathbf{P}_i \mathbf{P}_i + \mathbf{I} + \mathbf{Q}_i < 0 \quad (17)$$

$$\mathbf{B}^T \mathbf{P}_i = \mathbf{F}_i \mathbf{C} \quad (18)$$

那么存在自适应故障估计律式(14), 能够保证 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{m}_{ie} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{f}_{ie} = 0$, 其中, $\mathbf{\Gamma}_i = \mathbf{\Gamma}_i^T > 0, \sigma_i > 0$ 为自适应律参数。

证明过程如下。首先选取如下 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \mathbf{m}_{ie}^T \mathbf{P}_i \mathbf{m}_{ie} + \mathbf{f}_{ie}^T \mathbf{\Gamma}_i^{-1} \mathbf{f}_{ie} \quad (19)$$

对式(19)关于时间 t 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \mathbf{m}_{ie}^T [\mathbf{P}_i(-\mathbf{L}_i \mathbf{C}) + (-\mathbf{L}_i \mathbf{C})^T \mathbf{P}_i] \mathbf{m}_{ie} + \\ & 2\mathbf{m}_{ie}^T \mathbf{P}_i [\mathbf{g}_1(t, \hat{\mathbf{m}}_i) - \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i)] + 2\mathbf{m}_{ie}^T \mathbf{P}_i \mathbf{B} \mathbf{f}_{ie} + \\ & 2\mathbf{f}_{ie}^T \mathbf{\Gamma}_i^{-1} (\dot{\hat{\mathbf{f}}}_i - \dot{\mathbf{f}}_i) = \mathbf{m}_{ie}^T [\mathbf{P}_i(-\mathbf{L}_i \mathbf{C}) + (-\mathbf{L}_i \mathbf{C})^T \mathbf{P}_i] \mathbf{m}_{ie} + \\ & 2\mathbf{m}_{ie}^T \mathbf{P}_i [\mathbf{g}_1(t, \hat{\mathbf{m}}_i) - \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i)] + 2\sigma_i \mathbf{f}_{ie}^T \mathbf{f}_i + \\ & 2\sigma_i \mathbf{f}_{ie}^T \mathbf{f}_{ie} - 2\mathbf{f}_{ie}^T \mathbf{\Gamma}_i^{-1} \dot{\mathbf{f}}_i \end{aligned} \quad (20)$$

由引理 1 得:

$$2\mathbf{m}_{ie}^T \mathbf{P}_i [\mathbf{g}_1(t, \hat{\mathbf{m}}_i) - \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i)] \leq \gamma_i^2 \mathbf{m}_{ie}^T \mathbf{P}_i \mathbf{P}_i \mathbf{m}_{ie} + \mathbf{m}_{ie}^T \mathbf{m}_{ie} \quad (21)$$

$$2\sigma_i \mathbf{f}_{ie}^T \mathbf{f}_i \leq \sigma_i (\|\mathbf{f}_{ie}\|^2 + \mathbf{f}_0^2) \quad (22)$$

$$2\mathbf{f}_{ie}^T \mathbf{\Gamma}_i^{-1} \dot{\mathbf{f}}_i \leq \lambda_{\max}(\mathbf{\Gamma}_i^{-1}) (\|\mathbf{f}_{ie}\|^2 + \mathbf{f}_1^2) \quad (23)$$

将式(21)、(22)和(23)一并代入式(20)得到:

$$\dot{V}_1 \leq -d_{i1} \|\mathbf{m}_{ie}\|^2 - d_{i2} \|\mathbf{f}_{ie}\|^2 + \beta_i \quad (24)$$

其中, $d_{i1} = \lambda_{\min}(\mathbf{Q}_i), d_{i2} = \lambda_{\max}(\mathbf{\Gamma}_i^{-1}) - \sigma_i > 0, \beta_i =$

$$\sigma_i f_0^2 - \lambda_{\max}(\mathbf{\Gamma}_i^{-1}) f_1^2.$$

对式(19)放缩得:

$$\mathbf{V}_1 \leq \lambda_{\max}(\mathbf{P}_i) \|\mathbf{m}_{ie}\|^2 + \lambda_{\max}(\mathbf{\Gamma}_i^{-1}) \|\mathbf{f}_{ie}\|^2 \leq \max\{\lambda_{\max}(\mathbf{P}_i), \lambda_{\max}(\mathbf{\Gamma}_i^{-1})\} (\|\mathbf{m}_{ie}\|^2 + \|\mathbf{f}_{ie}\|^2) \quad (25)$$

则式(24)可写成:

$$\dot{\mathbf{V}}_1 \leq -\alpha_i \mathbf{V}_1 + \beta_i \quad (26)$$

$$\text{其中, } \alpha = \frac{\min(d_{i1}, d_{i2})}{\max\{\lambda_{\max}(\mathbf{P}_i), \lambda_{\max}(\mathbf{\Gamma}_i^{-1})\}}, \beta_i = \sigma_i f_0^2 - \lambda_{\max}(\mathbf{\Gamma}_i^{-1}) f_1^2.$$

$$\text{定义集合 } S_i = \left\{ (\mathbf{y}_{ie}, \hat{\mathbf{f}}_i) \mid \frac{\lambda_{\min}(\mathbf{P}_i)}{\|\mathbf{C}\|^2} \|\mathbf{y}_{ie}\|^2 + \frac{\lambda_{\min}(\mathbf{\Gamma}_i^{-1})}{2} \|\hat{\mathbf{f}}_i\|^2 \leq \lambda_{\min}(\mathbf{\Gamma}_i^{-1}) f_0^2 + \frac{\beta}{\alpha} \right\}, \text{令 } \bar{S}_i \text{ 为集合 } S_i \text{ 的补集, 那}$$

么当 $(\mathbf{y}_{ie}, \hat{\mathbf{f}}_i) \in S_i$ 时, 有如下不等式成立:

$$\mathbf{V}_1 \geq \lambda_{\min}(\mathbf{P}_i) \|\mathbf{m}_{ie}\|^2 + \lambda_{\min}(\mathbf{\Gamma}_i^{-1}) \|\mathbf{f}_{ie}\|^2 \geq \frac{\lambda_{\min}(\mathbf{P}_i)}{\|\mathbf{C}\|^2} \|\mathbf{y}_{ie}\|^2 + \lambda_{\min}(\mathbf{\Gamma}_i^{-1}) \left[\frac{1}{2} \|\hat{\mathbf{f}}_i\|^2 - f_0^2 \right] \geq \frac{\beta}{\alpha} \quad (27)$$

由式(26)和(27)可知, 当 $(\mathbf{y}_{ie}, \hat{\mathbf{f}}_i) \in S_i$ 时,

$$\dot{\mathbf{V}}_1 \leq 0 \quad (28)$$

根据 Lyapunov 定理, 极限 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{m}_{ie} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{f}_{ie} = 0$.

注1 由于式(17)不是严格的线性矩阵不等式, 不能直接用 MATLAB 中的 LMI 工具箱求解, 需要采用 Schur 补定理将其化为线性矩阵不等式进行求解。同时, 式(18)是等式也不能直接求解, 本文将其转化为广义特征值最小化问题进行求解。最终式(17)和(18)的求解问题转化为如下优化问题:

$$\begin{aligned} & \text{Min } \delta \\ & \text{s.t. } \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i(-L_i\mathbf{C}) + (-L_i\mathbf{C})^T\mathbf{P}_i + \mathbf{I} + \mathbf{Q}_i & \mathbf{P}_i \\ & \mathbf{P}_i & -\gamma_i^{-2}\mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} -\delta_i\mathbf{I} & \mathbf{B}^T\mathbf{P}_i - \mathbf{F}_i\mathbf{C} \\ (\mathbf{B}^T\mathbf{P}_i - \mathbf{F}_i\mathbf{C})^T & -\delta_i\mathbf{I} \end{bmatrix} > 0 \quad (30)$$

3 容错控制器设计

根据观测器估测出的信息, 本文首先对位置子系统, 即对系统式(11)设计状态反馈控制器:

$$\mathbf{u}_i = -\mathbf{K}_i \hat{\mathbf{m}}_i - \hat{\mathbf{f}}_i - \mathbf{B}^{-1} \mathbf{g}_2(t) \quad (31)$$

将控制器式(31)代入到系统式(11)中得:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{m}}_i &= \mathbf{B}(-\mathbf{K}_i \hat{\mathbf{m}}_i - \hat{\mathbf{f}}_i - \mathbf{B}^{-1} \mathbf{g}_2(t) + \mathbf{f}_i(t)) + \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) + \mathbf{g}_2(t) = -\mathbf{BK}_i \mathbf{m}_{ie} - \mathbf{B} \mathbf{f}_{ie} - \mathbf{BK}_i \mathbf{m}_i + \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) = -\mathbf{BK}_i \mathbf{m}_i + \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) - \mathbf{G}_i \mathbf{h}_i \end{aligned} \quad (32)$$

其中, $\mathbf{G}_i = [\mathbf{BK}_i \quad \mathbf{B}], \mathbf{h}_i = [\mathbf{m}_{ie}^T \quad \mathbf{f}_{ie}^T]^T$.

定理2 对于给定的正常数 $\bar{\gamma}_i$, 若存在对称正定矩阵 $\bar{\mathbf{P}}_i = \bar{\mathbf{P}}_i^T > 0$, 矩阵 $\bar{\mathbf{Q}}_i$ 和常数 $\tau_i > 0$, 使得不等式:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi}_i & -\mathbf{BK}_i \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} & -\mathbf{B} & \mathbf{C} \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} & \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} \mathbf{C}^T \\ * & \bar{\gamma}_i^2 (\mathbf{I} - 2\bar{\mathbf{P}}_i^{-1}) & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma_i^2 \mathbf{I} & 0 & 0 \\ * & * & * & -\tau_i \mathbf{I} & 0 \\ * & * & * & * & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (33)$$

成立, 则闭环系统式(32)渐近稳定, 且具有 H_∞ 性能指标 $\bar{\gamma}_i$ 。即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{m}_i = 0, \mathbf{h}_i = 0 \quad (34)$$

$$\int_0^t \mathbf{y}^T \mathbf{y} ds < \bar{\gamma}_i^2 \int_0^t \mathbf{h}^T \mathbf{h} ds, \mathbf{h}_i \neq 0 \quad (35)$$

其中, $\boldsymbol{\Psi}_i = (-\mathbf{BK}_i) \bar{\mathbf{P}}_i + \bar{\mathbf{P}}_i (-\mathbf{BK}_i)^T + \tau_i \mathbf{I}$, 控制器增益为 $\mathbf{K}_i = \bar{\mathbf{Q}}_i \bar{\mathbf{P}}_i^{-1}$ 。

为证明位置子系统的稳定性, 选取 Lyapunov 函数为:

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{m}_i^T \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{m}_i \quad (36)$$

对式(36)关于时间 t 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_2 &= \mathbf{m}_i^T [\mathbf{P}_i (-\mathbf{BK}_i) + (-\mathbf{BK}_i)^T \mathbf{P}_i] \mathbf{m}_i + 2\mathbf{m}_i^T \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) - 2\mathbf{m}_i^T \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{G}_i \mathbf{h}_i \end{aligned} \quad (37)$$

由引理2得:

$$2\mathbf{m}_i^T \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) \leq \tau_i \mathbf{m}_i^T \bar{\mathbf{P}}_i \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{m}_i + \frac{1}{\tau_i} \mathbf{g}_1^T(t, \mathbf{m}_i) \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) \quad (38)$$

因为 $\mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i)$ 满足:

$$\|\mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) - \mathbf{g}_1(t, 0)\| \leq \xi_i \|\mathbf{m}_i\| \quad (39)$$

即 $\|\mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i)\| \leq \xi_i \|\mathbf{m}_i\|$ 成立, 有:

$$\mathbf{g}_1^T(t, \mathbf{m}_i) \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) \leq \xi_i^2 \mathbf{m}_i^T \mathbf{m}_i \quad (40)$$

将式(38)和(40)代入式(37)得:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_2 &= \mathbf{m}_i^T [\mathbf{P}_i (-\mathbf{BK}_i) + (-\mathbf{BK}_i)^T \mathbf{P}_i] \mathbf{m}_i + 2\mathbf{m}_i^T \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{g}_1(t, \mathbf{m}_i) - 2\mathbf{m}_i^T \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{G}_i \mathbf{h}_i = \\ & \mathbf{m}_i^T \left[\bar{\mathbf{P}}_i (-\mathbf{BK}_i) + (-\mathbf{BK}_i)^T \bar{\mathbf{P}}_i + \tau_i \bar{\mathbf{P}}_i \bar{\mathbf{P}}_i + \frac{\xi_i^2}{\tau_i} \mathbf{I} \right] \mathbf{m}_i - 2\mathbf{m}_i^T \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{G}_i \mathbf{h}_i \end{aligned} \quad (41)$$

当 $\mathbf{h}_i = 0$ 时, 有:

$$\dot{\mathbf{V}}_2 \leq \mathbf{m}_i^T \left[\bar{\mathbf{P}}_i (-\mathbf{BK}_i) + (-\mathbf{BK}_i)^T \bar{\mathbf{P}}_i + \tau_i \bar{\mathbf{P}}_i \bar{\mathbf{P}}_i + \frac{\xi_i^2}{\tau_i} \mathbf{I} \right] \mathbf{m}_i \quad (42)$$

由此可知, 只要 $\bar{\mathbf{P}}_i (-\mathbf{BK}_i) + (-\mathbf{BK}_i)^T \bar{\mathbf{P}}_i + \tau_i \bar{\mathbf{P}}_i \bar{\mathbf{P}}_i + \frac{\xi_i^2}{\tau_i} \mathbf{I}$ 成立, 则 $\dot{\mathbf{V}}_2 < 0$, 进而极限 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{m}_i = 0$ 成立。

当 $\mathbf{h}_i \neq 0$ 时, 令 $J = \dot{\mathbf{V}}_2 + \mathbf{y}_i^T \mathbf{y}_i - \bar{\gamma}_i^2 \mathbf{h}_i^T \mathbf{h}_i$, 则有:

$$\begin{aligned} J &\leq \mathbf{m}_i^T \left[\bar{\mathbf{P}}_i (-\mathbf{BK}_i) + (-\mathbf{BK}_i)^T \bar{\mathbf{P}}_i + \tau_i \bar{\mathbf{P}}_i \bar{\mathbf{P}}_i + \frac{\xi_i^2}{\tau_i} \mathbf{I} + \mathbf{C}^T \mathbf{C} \right] \mathbf{m}_i - 2\mathbf{m}_i^T \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{G}_i \mathbf{h}_i - \bar{\gamma}_i^2 \mathbf{h}_i^T \mathbf{h}_i = \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{m}_i \\ \mathbf{h}_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_i & -\bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{G}_i \\ * & -\bar{\gamma}_i^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{m}_i \\ \mathbf{h}_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (43)$$

其中, $\mathfrak{g}_i = \mathbf{P}_i(-\mathbf{BK}_i) + (-\mathbf{BK}_i)^\top \mathbf{P}_i + \tau_i \mathbf{P}_i \mathbf{P}_i + \frac{\xi_i^2}{\tau_i} \mathbf{I} + \mathbf{C}^\top \mathbf{C}$.

考虑到 $\bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{G}_i = [\bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{BK}_i \quad \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{B}]$, 那么可以将

$$\begin{bmatrix} \mathfrak{g}_i & -\bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{G}_i \\ * & -\bar{\gamma}_i^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \text{ 改写成:}$$

$$\begin{bmatrix} \mathfrak{g}_i & -\bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{BK}_i & -\bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{B} \\ * & -\gamma_i^2 \mathbf{I} & 0 \\ * & * & -\bar{\gamma}_i^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (44)$$

矩阵不等式(44)左右两边同乘 $\text{diag}\{\bar{\mathbf{P}}_i^{-1}, \bar{\mathbf{P}}_i^{-1}, \mathbf{I}\}$ 得:

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} \mathfrak{g}_i \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} & -\mathbf{BK}_i \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} & -\mathbf{B} \\ * & -\gamma_i^2 \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} \mathbf{P}_i^{-1} & 0 \\ * & * & -\bar{\gamma}_i^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (45)$$

由引理 2 得:

$$\mathbf{I} + \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} \mathbf{P}_i^{-1} \geq \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} + \mathbf{P}_i^{-1} \quad (46)$$

即:

$$-\bar{\mathbf{P}}_i^{-1} \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} \leq \mathbf{I} - 2\bar{\mathbf{P}}_i^{-1} \quad (47)$$

矩阵不等式(45)成立, 则如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} \mathfrak{g}_i \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} & -\mathbf{BK}_i \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} & -\mathbf{B} \\ * & \gamma_i^2 (\mathbf{I} - 2\bar{\mathbf{P}}_i^{-1}) & 0 \\ * & * & -\bar{\gamma}_i^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (48)$$

最后再根据 Schur 补定理, 矩阵不等式(48)成立, 则如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \mathfrak{g}_i & -\mathbf{BK}_i \mathbf{P}_i^{-1} & -\mathbf{B} & \mathbf{C} \mathbf{P}_i^{-1} & \mathbf{P}_i^{-1} \mathbf{C}^\top \\ * & \bar{\gamma}_i^2 (\mathbf{I} - 2\bar{\mathbf{P}}_i^{-1}) & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma_i^2 \mathbf{I} & 0 & 0 \\ * & * & * & -\tau_i \mathbf{I} & 0 \\ * & * & * & * & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (49)$$

其中, $\bar{\mathfrak{g}}_i = (-\mathbf{BK}_i) \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} + \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} (-\mathbf{BK}_i)^\top + \tau_i \mathbf{I}$.

当矩阵不等式(49)成立时, 则有 $J = V_2 + \mathbf{y}_i^\top \mathbf{y}_i - \bar{\gamma}_i^2 \mathbf{h}_i^\top \mathbf{h}_i < 0$, 即闭环系统式(32)渐近稳定, 且具有 H_∞ 性能指标 $\bar{\gamma}_i$. 证明完毕.

下面对偏航角子系统式(10)采用自适应的方法设计控制器. 首先, 设计积分滑模函数为:

$$s_i = e_{i\psi} + c_i \int e_{i\psi} dt \quad (50)$$

其中, c_i 为大于 0 的常数.

对积分滑模函数关于 t 求导, 并将式(10)代入得:

$$\dot{s}_i = \dot{e}_{i\psi} + c_i e_{i\psi} = \omega_i + f_{i3} - \omega_i + c_i e_{i\psi} \quad (51)$$

本文最终设计偏航角子系统控制律为:

$$\omega_i = \omega_i - \hat{f}_{i3} - c_i e_{i\psi} - \alpha_i s_i - n_i \text{sgn}(s_i) \quad (52)$$

其中, α_i 和 n_i 为大于 0 的常数. 故障的自适应律为:

$$\dot{\hat{f}}_{i3} = \mu_i s_i \quad (53)$$

其中, $\mu_i > 0$.

定理 3 针对偏航角子系统式(10), 若设计控制律如式(52)所示, 则编队系统发生故障时, 能保证跟随者与领导者的偏航角速度误差仍能收敛到 0.

为证明偏航角子系统的稳定性, 选取 Lyapunov 函数为:

$$V_3 = \frac{1}{2} s_i^2 + \frac{1}{2\mu_i} \tilde{f}_{i3}^2 \quad (54)$$

对 V_3 关于时间 t 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= s_i \dot{s}_i + \frac{1}{\mu_i} \tilde{f}_{i3} \dot{\hat{f}}_{i3} = s(\omega_i - \omega_i + f_{i3} + c_i e_{i\psi}) + \\ &\frac{1}{\mu_i} \tilde{f}_{i3} \dot{\hat{f}}_{i3} = -\alpha_i s_i^2 - n_i |s_i| \end{aligned} \quad (55)$$

由式(55)看出, 系统稳定, 跟随者与领导者的偏航角速度误差收敛. 证明完毕.

编队系统发生故障后, 采用本文提出的控制方法, 发生故障的跟随者在 x, y 方向的跟踪误差以及偏航角速度的误差均可以收敛到 0, 能够精准跟踪领导者的轨迹, 快速恢复到期望的编队队形.

4 仿真实验

在 Matlab/Simulink 环境下搭建无人机编队系统模型并进行仿真实验, 领导者的跟踪轨迹设置为 $x_d = 0.5 \cos(0.5t), y_d = 0.5 \sin(0.5t), z_d = 0.1t + 2$, 编队控制系统参数设置为 $c_i = 0.5, \alpha_i = 1, \tau_i = 2, n_i = 0.8, \gamma_i = 2, \bar{\gamma}_i = 0.6, \mu_i = 1.2, \lambda_{iy}^d = 0, \lambda_{2x}^d = 0.25, \lambda_{3x}^d = \lambda_{4x}^d = \lambda_{5x}^d = 0.5$. 自适应观测器用到的参数矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_i &= \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}, \mathbf{\Gamma}_i = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{P}_i &= \begin{bmatrix} 178.44 & 0 \\ 0 & 178.44 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{P}}_i = \begin{bmatrix} 0.99 & 0 \\ 0 & 0.99 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_i = \\ &\begin{bmatrix} -178.44 & 0 \\ 0 & -178.44 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} -11.47 & 0 \\ 0 & -11.47 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

设置编队系统中无人机个数为 5 个, 编队飞行仿真时间为 20 s, 在 1 s 时编队系统中的 4 号无人机发生偏差故障, 即:

$$\begin{aligned} f_{41} &= \begin{cases} 0, & t \in [0, 1) \\ 1 + \sin t, & t \geq 1 \end{cases} \\ f_{42} &= \begin{cases} 0, & t \in [0, 1) \\ 2 \sin t, & t \geq 1 \end{cases} \\ f_{43} &= \begin{cases} 0, & t \in [0, 1) \\ 1, & t \geq 1 \end{cases} \end{aligned}$$

为了体现本文设计的容错控制方法的优越性, 与文献[14]和[15]的方法以及不采取容错控制的情况进行对比. 图 3~5 分别给出了 3 个通道中偏差故障的估计曲线, 图 6~8 为 4 号机在 x, y 方向的跟踪误差以及偏航角速度

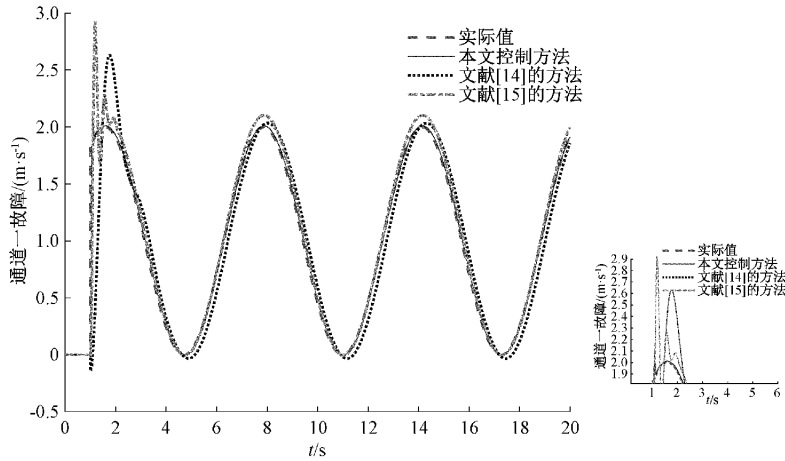


图 3 通道一故障估计曲线

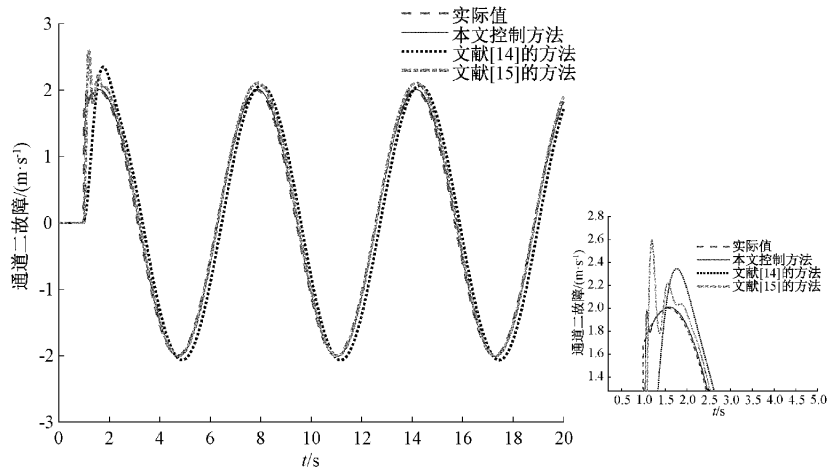


图 4 通道二故障估计曲线

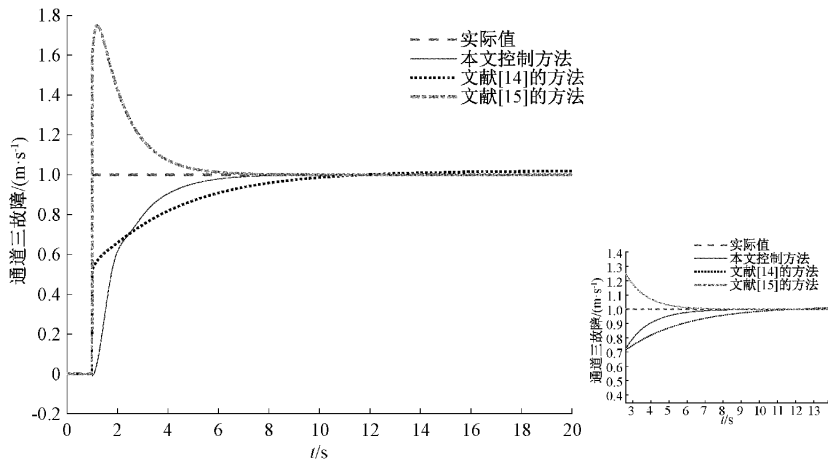


图 5 通道三故障估计曲线

的误差,图 9 为经本文方法容错控制后的三维编队示意图,具体的性能指标如表 1~3 所示。从位置 x 的跟踪情况可见,本文算法在故障发生后 0.28 s 便可实现对期望位置的完全跟踪,分别比文献[14]与[15]的方法减少了

87.9%和 76.5%;同时稳态误差可以达到 0.001 8,相比其他两种方法分别减少了 96.7%和 63.3%,实现了故障僚机对位置 x 的精准跟踪,提高了系统的控制精度。在对位置 y 和偏航角 ψ 的跟踪情况中,能够发现本文算法

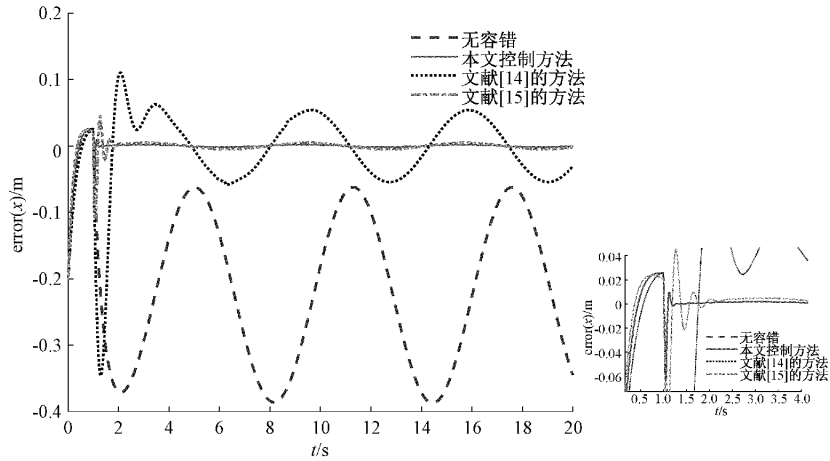


图 6 4号机 x 方向跟踪误差

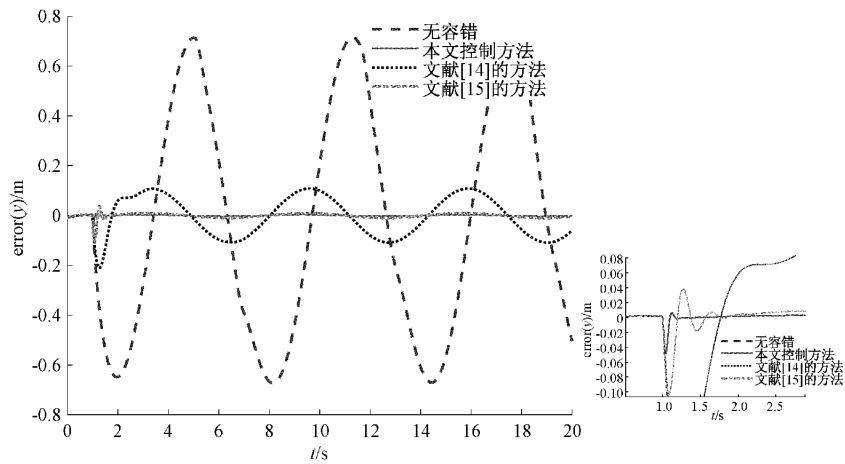


图 7 4号机 y 方向跟踪误差

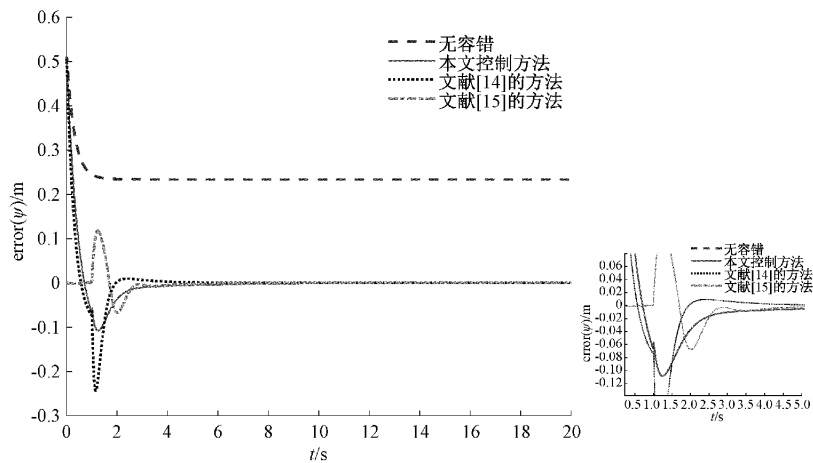


图 8 4号机偏航角速度跟踪误差

的完全跟踪时间比文献[14]和[15]更快,且稳态误差比两者都要小,保证了系统的鲁棒性需求的同时,有效实现了对编队故障系统的容错控制。根据图 3~5 可知,本文算法在故障估计时能够快速收敛到真实值,且观测误差

较小,而文献[14]和[15]方法的超调量较大,且在峰值处估计误差较大。综上所述,本文算法能更好的克服偏差故障给僚机带来的不利影响,有效实现四旋翼无人机群的编队飞行。

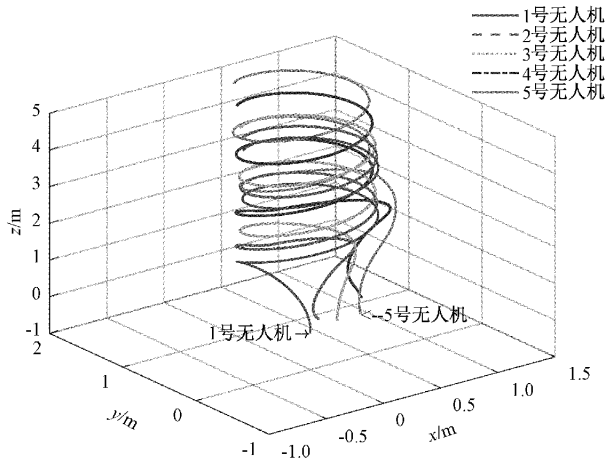


图9 容错控制后的三维编队示意图

表1 位置 x 的跟踪性能对比

性能指标	本文方法	文献[14]方法	文献[15]方法
完全跟踪时间/s	0.28	2.32	1.19
稳态误差	0.001 8	0.050 3	0.004 9

表2 位置 y 的跟踪性能对比

性能指标	本文方法	文献[14]方法	文献[15]方法
完全跟踪时间/s	0.24	1.54	0.89
稳态误差	0.003 1	0.106 3	0.009 4

表3 偏航角 ψ 的跟踪性能对比

性能指标	本文方法	文献[14]方法	文献[15]方法
完全跟踪时间/s	1.40	2.57	1.85
稳态误差	0.002 4	0.009 3	0.008 1

5 结 论

本文针对无人机编队飞行的僚机故障问题,设计了一种基于观测器的自适应容错控制方法。根据领导跟随法建立了编队故障模型,并对位置子系统基于观测器设计状态反馈控制器;偏航角子系统采用自适应的方法设计控制器。仿真表明,在无人机编队飞行僚机发生故障后,采用本文的方法能使系统跟踪误差收敛到0,发生故障的无人机能快速调整到期望编队队形,验证了该容错控制算法的有效性。

参考文献

- [1] 罗俊海. 无人机探测与对抗技术发展及应用综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(3): 530-544.
- [2] 刘伟, 黄军辉, 王赞. 多负载无线充电技术在无人机应

- 用分析[J]. 国外电子测量技术, 2021, 35(6): 38-43.
- [3] WANG H M, ZHANG Y, ZHANG X, et al. Secrecy and covert communications against UAV surveillance via multi-hop networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(1): 389-401.
- [4] 彭继慎, 孙礼鑫, 王凯, 等. 基于模型压缩的 ED-YOLO 电力巡检无人机避障目标检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 161-170.
- [5] 邓耀华, 姚可星, 孙成, 等. 无人机航测高精度 RTK 接收机信号捕获与跟踪仿真方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 240(12): 43-48.
- [6] SINHA A, KUNAR S R. Supertwisting control-based cooperative salvo guidance using leader-follower approach[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(5): 3556-3565.
- [7] 邵壮, 祝小平, 周洲. 三维动态环境下多无人机编队分布式保持控制 [J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1065-1072.
- [8] DUAN H B, XIN L, SHI Y H. Homing pigeon-inspired autonomous navigation system for unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(4): 2218-2224.
- [9] 李朋月, 刘松林, 郝向阳. 无人机编队控制技术研究[J]. 电子测量技术, 2019, 320(12): 106-112.
- [10] ZHANG J L, YAN J G, ZHANG P. Multi-UAV formation control based on a Novel back-stepping approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 2437-2448.
- [11] YU Y J, GUO J. Neural adaptive distributed formation control of nonlinear multi-UAVs with unmodeled dynamics [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022, DOI: 10.1109/TNNLS.2022.3157079.
- [12] 丁磊, 孙智孝, 苗亚因. 基于输出反馈的四旋翼飞行器分布式编队控制[J]. 控制工程, 2020, 185(5): 855-861.
- [13] 周克敏. 故障诊断与容错控制的一个新框架[J]. 自动化学报, 2021, 47(5): 1035-1042.
- [14] LIU X H, HAN J, ZHANG H F, et al. Adaptive fault estimation and fault-tolerant control for nonlinear system with unknown nonlinear dynamic [J]. IEEE Access, 2019, DOI:10.1109/ACCESS.2019.2942387.
- [15] 戴邵武, 罗鑫辉, 戴洪德. 基于鲁棒故障观测器的非线性离散系统容错控制设计 [J]. 飞行力学, 2020, 38(2): 34-39.
- [16] 黄鑫, 王婕, 马晓. 高超声速飞行器自适应故障估计与容错控制[J]. 控制工程, 2019, 178(10): 1850-1856.
- [17] REN X L. Observer design for actuator failure of a quadrotor [J]. IEEE Access, 2020, DOI: 10.1109/

ACCESS. 2020. 3017522.

- [18] NGOC P N, SUNG K H. Sliding mode thau observer for actuator fault diagnosis of quadcopter UAVs[J]. Applied Sciences, 2018, 8(10): 1893.

- [19] 赵静, 王鹏, 丁筱茜, 等. 基于观测器的四旋翼容错控制及仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(1): 1-10.

作者简介

王海风, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机编队控制。

E-mail: Whaif666@163.com

郑柏超(通信作者), 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为无人系统控制、滑模控制、机器人控制、信息物理系统。

E-mail: zhengbochao81@126.com

卢世堃, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机编队控制。

E-mail: 245442473@qq.com

赖琛, 硕士研究生, 主要研究方向为信息物理系统。

E-mail: 814135884@qq.com