基于滑模估计的二阶无人机编队控制

王举[1]，陈立伟[1,2]，李友为[3]，宋伟[1]，王桐[1,2]，高山[1,2]，高洪元[1]
（1. 哈尔滨工程大学，黑龙江 哈尔滨 150001；2. 黑龙江省智能感知与群智计算创新研究中心（国际合作），黑龙江 哈尔滨 150001；3. 哈尔滨第一机械集团有限公司，黑龙江 哈尔滨 150056）

摘 要：针对模型不确定性与外部时变扰动影响下的多无人编队追踪问题，提出一种基于滑模控制和扩展状态观测器的固定时间二阶运动模型的编队控制方法。首先，将未知扰动和模型不确定性统一处理为总扰动，通过设计扩展状态观测器进行在线估计。然后，结合多无人机信息交互关系和编队追踪误差，构造二阶运动模型的固定时间滑模控制律，使跟随无人机能够在固定时间内完成队形保持与轨迹追踪。通过构造合理的李雅普诺夫函数证明了系统稳定性，仿真结果表明，提出的控制律能够抗扰并实现编队追踪，保证了固定时间内收敛。

关键词：无人机编队；滑模控制；扩展状态观测器；固定时间；干扰
doi：10.11959/j.issn.2096−3750.

Second-order UAV formation control based on sliding mode estimation

WANG Ju[1], CHEN Liwei[1,2], LI Youwei[3], SONG Wei[1], WANG Tong[1,2], GAO Shan[1,2], GAO Hongyuan[1]
1. Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang, 150001, China
2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory(International Cooperation) of Intelligent Perception and Swarm Intelligence Computing, Harbin, Heilongjiang, 150001, China
3. Harbin First Machinery Group Corporation, Harbin, Heilongjiang, 1500056, China

Abstract: To address the multi-UAV formation tracking problem under the influence of model uncertainty and external time-varying disturbances, a formation control method based on a fixed-time second-order motion model using sliding mode control and an extended state observer is proposed. First, the unknown disturbance and model uncertainty are treated as a unified total disturbance, which is estimated online using an extended state observer. Then, combining the information interaction relationship between multiple UAVs and the formation tracking error, a fixed-time sliding mode control law for the second-order motion model is constructed, enabling the following UAVs to maintain formation and track trajectory within a fixed time. The system stability is proven by constructing a reasonable Lyapunov function. Simulation results show that the proposed control law can resist disturbances and achieve formation tracking, ensuring convergence within a fixed time.

Key words: drone formation, sliding mode control, extended state observer, fixed time, robustness

0 引言

随着物联网的发展进步，无人机凭借机动性强、成本较低、适应环境能力强等特点，在军事侦查[1]、应急救援[2]、测绘巡检[3]、快递运输[4]以及农业植保[5]等军事和民用领域中得到了广泛应用。相较于单架无人机，无人机编队能够通过多机协同突破单机在载荷能力、航程范围和作业效率等方面的限制，从而更好地完成复杂环境下的任务需求。由于具备较高的任务执行效率、系统可靠性和协同作业能力，无人机编队在多个场景中展现出明显的应用优势[6]。近年来，随着多智能体系统理论和飞行控制技术的不断发展，无人机编队控制问题正逐步

收稿日期：XXXX−XX−XX；**修回日期：**XXXX−XX−XX
通信作者：王桐，wangtong@hrbeu.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.62372131）；黑龙江省重点研发计划资助项目（No.2023ZX01A20）
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62372131), The Key Research and Research Program of Heilongjiang Province (No.2023ZX01A20)

成为研究热点[7-9]。然而，在实际飞行任务中，系统不可避免会受到风扰、载荷变化以及模型不确定性等因素的影响，这些干扰因素若不能得到有效解决，将直接影响到系统的稳定性。因此，如何在控制系统设计中抑制扰动和处理不确定性，是无人机编队控制问题中的重要研究内容。

针对无人机编队飞行中存在的外部扰动和模型不确定性问题，国内外进行了大量研究。在早期研究中，多采用PID控制[10]、反步控制[11]、一致性控制[12]等方法实现编队的控制，这类方法为编队控制奠定了基础，但在强风扰、载荷变化及复杂动力学条件下，控制性能容易受到影响。为提高系统鲁棒性，滑模控制逐渐被应用于无人机编队控制中，由于其对系统不确定性和外部扰动的鲁棒性[13]，能够有效提高编队在复杂环境下的稳定性，得到了广泛关注。

与此同时，为提高系统的收敛速度，有限时间控制被引入多无人机编队控制中。文献[14]以四旋翼无人机为研究对象，通过设计终端滑模控制器，实现了有限时间的抗扰编队飞行。文献[15]则采用了非奇异积分终端滑模面，证明了系统状态可在有限时间内收敛。虽然上述研究实现了编队追踪要求，但有限时间控制的收敛时间通常与系统初始状态有关，当初始误差较大时，收敛时间难以统一估计。相比之下，固定时间控制能够保证系统状态在与初始条件无关的有界时间内收敛，更适合对响应速度要求较高的多无人机编队追踪任务。文献[16]提出自适应固定时间滑模控制，在四旋翼单机上进行了验证，但没有考虑到编队控制，文献[17]针对四旋翼无人机，在不确定性和外界干扰下设计了具有给定性能的自适应模糊固定时间滑模编队控制方法，该方法主要依赖自适应模糊，对扰动的估计能力有待提高。文献[18]进一步设计了二阶滑模控制器，不仅实现了快速收敛，还大大降低了传统滑模控制器的抖振问题，该文章中每个跟随者直接对领导者构造误差，虽然这种方法层次清晰、通信需求低，但缺乏分布式协同的容错能力，在复杂的干扰环境下，分布式架构往往能提供更高的系统鲁棒性。

为了应对未知的外部环境干扰，在控制器中引入观测器逐渐成为无人机抗扰控制研究的重要方法。早期研究集中在单无人机抗扰轨迹跟踪问题上，例如，Sini等人针对四旋翼单无人机设计并实现了一个基于扰动观测器的控制器，能够估计和衰减外部风扰动[19]。随后，研究开始关注滑模扰动观测器的抖振抑制能力，提高扰动估计速度，Zhe-Dong等人将超螺旋算法引入滑模扰动观测器，该方法能够在有限时间内实现扰动估计，而研究对象是固定翼无人机的容错控制，不是多无人机编队跟踪[20]。在此基础上，相关研究进一步引入固定时间扰动观测器和滑模控制，解决有限时间控制中收敛时间依赖初始状态的问题。文献[21]针对单四旋翼无人机的轨迹跟踪进行了设计并验证，并没有研究多无人机编队个体协同误差等问题。近期研究开始处理无人机不确定性等实际因素，文献[22]研究提出基于滑模扰动观测器的有限时间控制方案，用于处理不确定性和外部扰动；文献[23]将终端滑模，非线性扰动观测器和自适应容错控制结合，用于处理无人机不确定性和执行器故障。再进一步，相关研究开始进入多无人机编队控制场景，文献[24]针对多无人机编队跟踪中延迟约束，变量变换和外部扰动处理问题进行了研究；文献[25]研究了二阶多无人机系统分布式事件触发滑模控制，利用滑模控制处理编队系统的扰动和不确定性，并通过事件触发降低通信频率；文献[26]利用扩展状态观测器计算多无人机编队系统中的总扰动，并在滑模控制器中加入补偿项来实现动态补偿。但是，文献[26]的方法是在有限时间内收敛。

针对多无人机编队系统中未知模型不确定性以及存在的未知外部时变扰动并存的问题，本文的主要创新点在：1）与文献[26]有限时间观测器相比，本文设计了固定时间扩展状态观测器，保证观测误差在与初始条件无关的固定时间内收敛，从而提高了扰动补偿的实时性和精确性；2）与文献[18]集中式编队控制相比，本文提出一种分布式滑模控制方法，该方法基于局部邻居信息构造控制律，无需依赖全局通信信息，降低了通信负担和计算复杂度。通过李雅普诺夫理论分析证明了系统的稳定性，并通过仿真验证了所提方法的有效性。

1　无人机编队模型

1.1　无人机动力学模型

考虑由N架跟随无人机和1架虚拟领航者组成的系统。第i架跟随无人机的动力学模型表示为：

$$\begin{cases} \dot{p}_i = v_i \\ \dot{v}_i = u_i + d_i + f_i(p_i, v_i) \end{cases} \tag{1}$$

其中，$p_i \in \mathbb{R}^2, v_i \in \mathbb{R}^2$ 分别是位置和速度，$u_i \in \mathbb{R}^2$ 是控制输入，$d_i \in \mathbb{R}^2$ 是外部扰动，f_i 代表模型不确定性，用于表示由参数变化和未建模动态等因素引起的实际系统与理想模型之间的偏差[27]，定义总扰动 $D_i = d_i + f_i$，第 i 架跟随无人机的动力学写为：

$$\begin{cases} \dot{p}_i = v_i \\ \dot{v}_i = u_i + D_i \end{cases} \tag{2}$$

领导者动力学模型公式为：

$$\begin{cases} \dot{p}_0 = v_0 \\ \dot{v}_0 = a_0(t) \end{cases} \tag{3}$$

其中 $a_0(t)$ 是已知的有界函数。

1.2　无人机编队拓扑模型（图论）

对于多无人机编队控制的研究，通常采用图论方法来描述个体间的通信拓扑与信息交互关系[28]。设包含 N 架跟随无人机和 1 架领导者无人机组成的通信网络可表示为无向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$，其中：

节点集 $\mathcal{V} = \{v_0, v_1, \cdots, v_N\}$ 代表编队中的各无人机成员；边集 $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 代表信息通道，若节点 i 与节点 j 之间存在通信链路，则表示为 $(v_i, v_j) \in \mathcal{E}$。在本研究中，假设通信链路是双向的，即该图为无向图；$\mathcal{A} = [a_{ij}]$ 表示为邻接矩阵，若 $(v_j, v_i) \in \mathcal{E}$，则 $a_{ij} > 0$，否则 $a_{ij} = 0$。

为进一步描述各节点在拓扑结构中的关联性，定义度矩阵为 $\mathcal{D} = diag\{d_1, \cdots, d_N\}$，其对角线元素 $d_i = \sum_{j=1}^{N} a_{ij}$ 代表第 i 架无人机的入度[29]。在此基础上，拉普拉斯矩阵定义为 $\mathcal{L} = \mathcal{D} - \mathcal{A}$，在领航-跟随架构中，除了跟随者间的交互外，还需考虑领航机与跟随者间的信息传递。定义领航增益矩阵 $\mathcal{G}_L = \text{diag}\{g_1, g_2, \cdots, g_N\}$，其中权重 g_i 表示第 i 架跟随者能否获取领航者的状态信息，若该跟随者能接收到领航者的状态信息，则 $g_i > 0$；反之，$g_i = 0$[30]。

假设 1：通信拓扑包含以领导者为根节点的有向生成树，从而保证各跟随者均可直接或间接获取领导者信息。

1.3　相关引理

在进行系统设计和详细分析之前，引入以下必要的数学引理：

引理 1（固定时间稳定性）[31]：考虑非线性系统 $\dot{x} = f(x)$，如果存在一个连续可导的李雅普诺夫函数 $V(x)$ 满足：

$$\dot{V}(x) \leqslant -\alpha V^p(x) - \beta V^q(x) + \delta \tag{4}$$

其中 $\alpha, \beta > 0, 0 < p < 1, q > 1$，且 $\delta \geqslant 0$，那么该系统是稳定的，其收敛时间上界为：

$$T_{max} \leqslant \frac{1}{\alpha(1-p)} + \frac{1}{\beta(q-1)} \tag{5}$$

引理 2（杨氏不等式）[32]：对于任意的 $x, y \in \mathbb{R}$ 和 $\epsilon > 0$，有

$$xy \leqslant \frac{\epsilon}{2} x^2 + \frac{1}{2\epsilon} y^2 \tag{6}$$

引理 3（范数不等式）[33]：对于任意 $\epsilon_i > 0 (i = 1, \ldots, n)$ 以及 $0 < m < 1, r > 1$，满足：

$$\sum_{i=1}^{n} \epsilon_i^m \geqslant \left(\sum_{i=1}^{n} \epsilon_i \right)^m, \sum_{i=1}^{n} \epsilon_i^r \geqslant n^{1-r} \left(\sum_{i=1}^{n} \epsilon_i \right)^r \tag{7}$$

2　固定时间扩展状态观测器

2.1　扩展状态观测器设计

在实际多无人机编队系统中，会受到模型不确定性和未知外部扰动的影响，部分状态信息难以直接测量，为此引入扩展状态观测器实时估计模型不确定性和未知外部扰动。为便于观测器设计，把无人机相关状态变量定义为扩展状态变量：$x_{i1} = p_i$，$x_{i2} = v_i$，$x_{i3} = D_i$。观测器的输入和输出分别为 u_i 和 y_i，扩展状态空间模型为：

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1} = x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} = x_{i3} + u_i \\ \dot{x}_{i3} = \omega_i(t) \\ y_i = x_{i1} \end{cases} \tag{8}$$

假设 2：输出 $y_i = x_{i1}$ 以及 $x_{i2} = v_i$ 可测，而状态 x_{i3} 不可测。

假设 3：$\omega_i(t)$ 为平滑有界时变函数，存在关系 $|\omega_i(t)| \leqslant W_0$。其中，常数 $W_0 > 0$。

固定时间扩展状态观测器设计如下：

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_{i1} = \hat{x}_{i2} + l_{1\alpha} \text{sig}^{\alpha}(\tilde{x}_{i1}) + l_{1\beta} \text{sig}^{\beta}(\tilde{x}_{i1}) \\ \dot{\hat{x}}_{i2} = \hat{x}_{i3} + u_i + l_{2\alpha} \text{sig}^{\alpha}(\tilde{x}_{i2}) + l_{2\beta} \text{sig}^{\beta}(\tilde{x}_{i2}) \\ \dot{\hat{x}}_{i3} = l_{3\alpha} \text{sig}^{\alpha}(\tilde{x}_{i3}) + l_{3\beta} \text{sig}^{\beta}(\tilde{x}_{i3}) \end{cases} \tag{9}$$

其中，$sig^{\gamma}(z) = |z|^{\gamma} \text{sign}(z)$，$\hat{x}_{ij}$ 为状态 x_{ij} 的估计值，观测误差 $\tilde{x}_{ij} = x_{ij} - \hat{x}_{ij} (j = 1, 2, 3)$，控制参数 $\alpha > 1$，$0 < \beta < 1$，$l_{j\alpha} > 0$，$l_{j\beta} > 0$。

2.2 扩展状态观测器稳定性分析

基于观测误差$\tilde{x}_{i1}$、$\tilde{x}_{i2}$以及$\tilde{x}_{i3}$，可得观测误差微分方程为：

$$\begin{cases}\dot{\tilde{x}}_{i1}=\tilde{x}_{i2}-l_{1\alpha}\mathrm{sig}^{\alpha}(\tilde{x}_{i1})-l_{1\beta}\mathrm{sig}^{\beta}(\tilde{x}_{i1})\\ \dot{\tilde{x}}_{i2}=\tilde{x}_{i3}-l_{2\alpha}\mathrm{sig}^{\alpha}(\tilde{x}_{i2})-l_{2\beta}\mathrm{sig}^{\beta}(\tilde{x}_{i2})\\ \dot{\tilde{x}}_{i3}=\omega_i(t)-l_{3\alpha}\mathrm{sig}^{\alpha}(\tilde{x}_{i3})-l_{3\beta}\mathrm{sig}^{\beta}(\tilde{x}_{i3})\end{cases}\tag{10}$$

针对观测误差$\tilde{x}_{i1}$、$\tilde{x}_{i2}$以及$\tilde{x}_{i3}$，构建验证扩展状态观测器稳定性的李雅普诺夫函数为：

$$V_{obs}=\frac{1}{2}\tilde{x}_{i1}^2+\frac{1}{2}\tilde{x}_{i2}^2+\frac{1}{2}\tilde{x}_{i3}^2\tag{11}$$

对V_{obs}求导，将式(10)代入，可得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_{obs}&=\tilde{x}_{i1}\dot{\tilde{x}}_{i1}+\tilde{x}_{i2}\dot{\tilde{x}}_{i2}+\tilde{x}_{i3}\dot{\tilde{x}}_{i3}\\&=\tilde{x}_{i1}\left(\tilde{x}_{i2}-l_{1\alpha}\mathrm{sig}^{\alpha}(\tilde{x}_{i1})-l_{1\beta}\mathrm{sig}^{\beta}(\tilde{x}_{i1})\right)\\&\quad+\tilde{x}_{i2}\left(\tilde{x}_{i3}-l_{2\alpha}\mathrm{sig}^{\alpha}(\tilde{x}_{i2})-l_{2\beta}\mathrm{sig}^{\beta}(\tilde{x}_{i2})\right)\\&\quad+\tilde{x}_{i3}\left(\omega_i(t)-l_{3\alpha}\mathrm{sig}^{\alpha}(\tilde{x}_{i3})-l_{3\beta}\mathrm{sig}^{\beta}(\tilde{x}_{i3})\right)\end{aligned}\tag{12}$$

展开可得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_{obs}&=\tilde{x}_{i1}\tilde{x}_{i2}+\tilde{x}_{i2}\tilde{x}_{i3}+\tilde{x}_{i3}\omega_i(t)\\&\quad-l_{1\alpha}|\tilde{x}_{i1}|^{\alpha+1}-l_{1\beta}|\tilde{x}_{i1}|^{\beta+1}\\&\quad-l_{2\alpha}|\tilde{x}_{i2}|^{\alpha+1}-l_{2\beta}|\tilde{x}_{i2}|^{\beta+1}\\&\quad-l_{3\alpha}|\tilde{x}_{i3}|^{\alpha+1}-l_{3\beta}|\tilde{x}_{i3}|^{\beta+1}\end{aligned}\tag{13}$$

根据引理2，可得下列不等式关系：

$$\tilde{x}_{i1}\tilde{x}_{i2}\leqslant\|\tilde{x}_{i1}\|\|\tilde{x}_{i2}\|\leqslant\frac{\delta_1}{2}\|\tilde{x}_{i1}\|^2+\frac{1}{2\delta_1}\|\tilde{x}_{i2}\|^2\tag{14}$$

$$\tilde{x}_{i2}\tilde{x}_{i3}\leqslant\|\tilde{x}_{i2}\|\|\tilde{x}_{i3}\|\leqslant\frac{\delta_2}{2}\|\tilde{x}_{i2}\|^2+\frac{1}{2\delta_2}\|\tilde{x}_{i3}\|^2\tag{15}$$

$$\tilde{x}_{i3}\omega_i(t)\leqslant\|\tilde{x}_{i3}\|\|\omega_i(t)\|\leqslant\frac{\delta_3}{2}\|\tilde{x}_{i3}\|^2+\frac{1}{2\delta_3}\|\omega_i(t)\|^2\tag{16}$$

其中，$\delta_1>0$，$\delta_2>0$，$\delta_3>0$。

将式（14），式（15）和式（16）分别代入式（13），可得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_{obs}&\leqslant-l_{1\alpha}|\tilde{x}_{i1}|^{\alpha+1}-l_{1\beta}|\tilde{x}_{i1}|^{\beta+1}+\frac{\delta_1}{2}\|\tilde{x}_{i1}\|^2\\&\quad-l_{2\alpha}|\tilde{x}_{i2}|^{\alpha+1}-l_{2\beta}|\tilde{x}_{i2}|^{\beta+1}+\left(\frac{1}{2\delta_1}+\frac{\delta_2}{2}\right)\|\tilde{x}_{i2}\|^2\\&\quad-l_{3\alpha}|\tilde{x}_{i3}|^{\alpha+1}-l_{3\beta}|\tilde{x}_{i3}|^{\beta+1}+\left(\frac{1}{2\delta_2}+\frac{\delta_3}{2}\right)\|\tilde{x}_{i3}\|^2\\&\quad+\frac{1}{2\delta_3}\|\omega_i(t)\|^2\\\dot{V}_{obs}&\leqslant-l_{1\alpha}|\tilde{x}_{i1}|^{\alpha+1}-l_{1\beta}|\tilde{x}_{i1}|^{\beta+1}+c_1\|\tilde{x}_{i1}\|^2\\&\quad-l_{2\alpha}|\tilde{x}_{i2}|^{\alpha+1}-l_{2\beta}|\tilde{x}_{i2}|^{\beta+1}+c_2\|\tilde{x}_{i2}\|^2\\&\quad-l_{3\alpha}|\tilde{x}_{i3}|^{\alpha+1}-l_{3\beta}|\tilde{x}_{i3}|^{\beta+1}+c_3\|\tilde{x}_{i3}\|^2+\frac{1}{2\delta_3}\|\omega_i(t)\|^2\end{aligned}\tag{17}$$

其中，$c_1=\frac{\delta_1}{2}$，$c_2=\frac{1}{2\delta_1}+\frac{\delta_2}{2}$，$c_3=\frac{1}{2\delta_2}+\frac{\delta_3}{2}$。

由于$\alpha+1>2$，$1<\beta+1<2$。对于任意标量s，有$/\!/\ s\ /\!/^{2}\leqslant|s|^{\alpha+1}+|s|^{\beta+1}$。因此，可得：

$$c_j\|\tilde{x}_{ij}\|^2\leqslant c_j|\tilde{x}_{ij}|^{\alpha+1}+c_j|\tilde{x}_{ij}|^{\beta+1},j=1,2,3\tag{18}$$

根据式（17）和（18），可得:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{obs}&\leqslant-\left(l_{1\alpha}-c_1\right)|\tilde{x}_{i1}|^{\alpha+1}-\left(l_{1\beta}-c_1\right)|\tilde{x}_{i1}|^{\beta+1}\\&\quad-\left(l_{2\alpha}-c_2\right)|\tilde{x}_{i2}|^{\alpha+1}-\left(l_{2\beta}-c_2\right)|\tilde{x}_{i2}|^{\beta+1}\\&\quad-\left(l_{3\alpha}-c_3\right)|\tilde{x}_{i3}|^{\alpha+1}-\left(l_{3\beta}-c_3\right)|\tilde{x}_{i3}|^{\beta+1}+\varepsilon\end{aligned}\tag{19}$$

其中，$\varepsilon=\frac{1}{2\delta_3}W_0{}^2$为常数。

若参数满足：$l_{1\alpha}>c_1$，$l_{1\beta}>c_1$，$l_{2\alpha}>c_2$，$l_{2\beta}>c_2$，$l_{3\alpha}>c_3$，$l_{3\beta}>c_3$，即$l_{1\alpha},l_{1\beta}>\frac{\delta_1}{2}$，$l_{2\alpha},l_{2\beta}>\frac{1}{2\delta_1}+\frac{\delta_2}{2}$，$l_{3\alpha},l_{3\beta}>\frac{1}{2\delta_2}+\frac{\delta_3}{2}$，则存在正常数$\lambda_\alpha>0$，$\lambda_\beta>0$使得：

$$\dot{V}_{obs}\leqslant-\lambda_\alpha\sum_{j=1}^{3}|\tilde{x}_{ij}|^{\alpha+1}-\lambda_\beta\sum_{j=1}^{3}|\tilde{x}_{ij}|^{\beta+1}+\varepsilon\tag{20}$$

根据引理3，可得：

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^{3}|\tilde{x}_{ij}|^{\alpha_1+1}&\geqslant3^{\frac{1-\alpha_1}{2}}(2V_{obs})^{\frac{\alpha_1+1}{2}}\\\sum_{j=1}^{3}|\tilde{x}_{ij}|^{\beta_1+1}&\geqslant(2V_{obs})^{\frac{\beta_1+1}{2}}\end{aligned}\tag{21}$$

从而得到：

$$\dot{V}_{obs}\leqslant-\lambda_{obs1}V_{obs}^{\frac{\alpha_1+1}{2}}-\lambda_{obs2}V_{obs}^{\frac{\beta_1+1}{2}}+\varepsilon\tag{22}$$

其中，$\lambda_{obs1}>0$，$\lambda_{obs2}>0$是正常数。

因此，由引理1可知，观测器的收敛时间上界满足$T_{obs}\leqslant\frac{2}{\lambda_{obs2}(1-\beta_1)}+\frac{2}{\lambda_{obs1}(\alpha_1-1)}$。进而观测误差$\tilde{x}_{i1}$、$\tilde{x}_{i2}$以及$\tilde{x}_{i3}$将在固定时间$T_{obs}$内收敛到原点邻域内，即$\lim\limits_{t\to T_{obs}}|\tilde{x}_{i1}|=\varepsilon_0$，$\lim\limits_{t\to T_{obs}}|\tilde{x}_{i2}|=\varepsilon_0$，$\lim\limits_{t\to T_{obs}}|\tilde{x}_{i3}|=\varepsilon_0$，其中，$\varepsilon_0$是充分小的正常数，从而为后续编队控制器提供了有效的扰动补偿。

3 分布式固定时间滑模控制器

3.1 编队控制器设计

对于无人机i，基于其邻居无人机的状态信息，定义编队位置和速度追踪误差：

$$e_{i,p}=\sum_{j\in N_i}a_{ij}(p_i-p_j-h_{ij})+g_i(p_i-p_0-h_{i0})\tag{23}$$

$$e_{i,v}=\sum_{j\in N_i}a_{ij}(v_i-v_j)+g_i(v_i-v_0)\tag{24}$$

其中，h_{ij}是无人机i和无人机j之间的期望相对位置向量，h_{i0}表示跟随无人机i与领导无人机0之间的期望相对位置向量。

基于$e_{i,p}$和$e_{i,v}$，可定义一阶和二阶滑模面：

$$s_{i1} = e_{i,v} + \lambda_1 e_{i,p} + \lambda_2 sig^{\alpha_s}(e_{i,p}) + \lambda_3 sig^{\beta_s}(e_{i,p}) \tag{25}$$

$$s_{i2}(t) = s_{i1}(t) + \int_0^t [\,\mu_1 s_{i1} + \mu_2 sig^{\alpha_s}(s_{i1}) + \mu_3 sig^{\beta_s}(s_{i1})\,]\,d\tau \tag{26}$$

其中，$\alpha_s > 1$，$0 < \beta_s < 1$。

将基于式（9）的固定时间扩展状态观测器的二阶滑模控制输入设计为：

$$u_i = -\hat{x}_{i3} + \frac{1}{\chi_i}\left[\sum_{j\in N_i} a_{ij}\hat{a}_j + g_i a_0 + v_i\right] \tag{27}$$

$$\begin{aligned} v_i = {} & -\lambda_1 e_{i,v} - \lambda_2 \alpha_c |e_{i,p}|^{\alpha_s - 1} e_{i,v} - \lambda_3 \beta_c |e_{i,p}|^{\beta_s - 1} e_{i,v} \\ & - e_{i,p} - \mu_1 s_{i1} - \mu_2 \mathrm{sig}^{\alpha_s}(s_{i1}) - \mu_3 \mathrm{sig}^{\beta_s}(s_{i1}) \\ & - k_{2\alpha}\mathrm{sig}^{\alpha_2}(s_{i1} + s_{i2}) - k_{2\beta}\mathrm{sig}^{\beta_2}(s_{i1} + s_{i2}) \\ & - \rho_i \mathrm{sign}(s_{i1} + s_{i2}) \end{aligned} \tag{28}$$

其中，$\chi_i = \sum_{j\in N_i} a_{ij} + g_i$（$\chi_i > 0$），$\sum_{j\in N_i} a_{ij}\hat{a}_j$表示第$i$架无人机根据所有邻居加速度估计信息构造的补偿项，$\hat{a}_j = u_j + \hat{x}_{j3}$，$g_i$表示第$i$架无人机与领导者无人机0的通信权重，$a_0$表示领导者加速度，$g_i a_0$表示第$i$架无人机对领导者加速度信息的补偿项，$v_i$表示虚拟控制输入。

3.2　编队控制器稳定性分析

基于式（9）的扩展状态观测器达到收敛后，可以认为总扰动D_i被估计，设计验证编队控制器u_i稳定性的李雅普诺夫函数为：

$$V_{total} = \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{1}{2}e_{i,p}^T e_{i,p} + \frac{1}{2}s_{i1}^T s_{i1} + \frac{1}{2}s_{i2}^T s_{i2}\right) \tag{29}$$

其中，$V_{total} \geqslant 0$；当$V_{total} = 0$时，有$e_{i,p} = 0$，$s_{i1} = 0$，$s_{i2} = 0$，该函数可用于分析稳定性[34]。对V_{total}求导，可得：

$$\dot{V}_{total} = \sum_{i=1}^{N}(e_{i,p}^T \dot{e}_{i,p} + s_{i1}^T \dot{s}_{i1} + s_{i2}^T \dot{s}_{i2}) \tag{30}$$

1）由于$\dot{e}_{i,p} = e_{i,v}$，所以$e_{i,p}^T \dot{e}_{i,p} = e_{i,p}^T e_{i,v}$。由式（25）得：

$$e_{i,v} = s_{i1} - \lambda_1 e_{i,p} - \lambda_2 \mathrm{sig}^{\alpha_s}(e_{i,p}) - \lambda_3 \mathrm{sig}^{\beta_s}(e_{i,p}) \tag{31}$$

基于式（31），可得：

$$\begin{aligned} e_{i,p}^T e_{i,v} &= e_{i,p}^T s_{i1} - \lambda_1 /\!/ e_{i,p} /\!/ ^2 - \lambda_2 e_{i,p}^T sig^{\alpha_s}(e_{i,p}) \\ &\quad - \lambda_3 e_{i,p}^T sig^{\beta_s}(e_{i,p}) \\ &= e_{i,p}^T s_{i1} - \lambda_1 /\!/ e_{i,p} /\!/ ^2 - \lambda_2 \sum |e_{i,p}|^{\alpha_s + 1} \\ &\quad - \lambda_3 \sum |e_{i,p}|^{\beta_s + 1} \end{aligned} \tag{32}$$

2）对式（24）求导，并且代入$\dot{v}_i = u_i + D_i$，可得：

$$\dot{e}_{i,v} = \chi_i(u_i + D_i) - \sum_{j\in N_i} a_{ij}(u_j + D_j) - g_i a_0 \tag{33}$$

由式（27），可得：

$$\begin{aligned} u_i + D_i &= D_i - \hat{x}_{i3} + \frac{1}{\chi_i}\left[\sum_{j\in N_i} a_{ij}\hat{a}_j + g_i a_0 + v_i\right] \\ &= \tilde{D}_i + \frac{1}{\chi_i}\left[\sum_{j\in N_i} a_{ij}\hat{a}_j + g_i a_0 + v_i\right] \end{aligned} \tag{34}$$

其中，$\tilde{D}_i = D_i - \hat{x}_{i3}$。

将式（34）代入式（33），可得：

$$\begin{aligned} \dot{e}_{i,v} &= \chi_i \tilde{D}_i + \sum_{j\in N_i} a_{ij}\hat{a}_j + g_i a_0 + v_i \\ &\quad - \sum_{j\in N_i} a_{ij}(u_j + D_j) - g_i a_0 \\ &= \chi_i \tilde{D}_i + v_i + \sum_{j\in N_i}\left(a_{ij}\hat{a}_j - a_{ij}u_j - a_{ij}D_j\right) \\ &= \chi_i \tilde{D}_i + v_i + \sum_{j\in N_i}\left[a_{ij}\left(u_j + \hat{x}_{j3}\right) - a_{ij}u_j - a_{ij}D_j\right] \\ &= v_i + \chi_i \tilde{D}_i - \sum_{j\in N_i} a_{ij}\tilde{D}_j \end{aligned} \tag{35}$$

令$\Delta_i = \chi_i \tilde{D}_i - \sum_{j\in N_i} a_{ij}\tilde{D}_j$，其中，$\Delta_i$表示观测器补偿后的扰动误差项。那么，$\dot{e}_{i,v} = v_i + \Delta_i$。对式（25）求导，可得：

$$\begin{aligned} \dot{s}_{i1} = {} & v_i + \Delta_i + \lambda_1 e_{i,v} + \lambda_2 \alpha_s |e_{i,p}|^{\alpha_s - 1} e_{i,v} \\ & + \lambda_3 \beta_s |e_{i,p}|^{\beta_s - 1} e_{i,v} \end{aligned} \tag{36}$$

基于式（36），可得：

$$\begin{aligned} s_{i1}^T \dot{s}_{i1} = {} & s_{i1}^T \Delta_i - s_{i1}^T e_{i,p} - \mu_1 /\!/ s_{i1} /\!/ ^2 \\ & - \mu_2 \sum |s_{i1}|^{\alpha_s + 1} - \mu_3 \sum |s_{i1}|^{\beta_s + 1} - k_{2\alpha} s_{i1}^T \mathrm{sig}^{\alpha}(s_{i1} + s_{i2}) \\ & - k_{2\beta} s_{i1}^T \mathrm{sig}^{\beta}(s_{i1} + s_{i2}) - \rho_i s_{i1}^T \mathrm{sign}(s_{i1} + s_{i2}) \end{aligned} \tag{37}$$

3）对式（26）求导，得：$\dot{s}_{i2} = \dot{s}_{i1} + \mu_1 s_{i1} + \mu_2 sig^{\alpha_s}(s_{i1}) + \mu_3 sig^{\beta_s}(s_{i1})$ (38)

将式（27）代入式（36）得：

$$\begin{aligned} \dot{s}_{i1} = {} & \Delta_i - e_{i,p} - \mu_1 s_{i1} - \mu_2 \mathrm{sig}^{\alpha_s}(s_{i1}) - \mu_3 \mathrm{sig}^{\beta_s}(s_{i1}) \\ & - k_{2\alpha}\mathrm{sig}^{\alpha_s}(s_{i1} + s_{i2}) - k_{2\beta}\mathrm{sig}^{\beta_s}(s_{i1} + s_{i2}) \\ & - \rho_i \mathrm{sign}(s_{i1} + s_{i2}) \end{aligned} \tag{39}$$

由式（38）和式（39），可得：

$$\begin{aligned} \dot{s}_{i2} = {} & \Delta_i - e_{i,p} - k_{2\alpha}\mathrm{sig}^{\alpha_s}(s_{i1} + s_{i2}) \\ & - k_{2\beta}\mathrm{sig}^{\beta_s}(s_{i1} + s_{i2}) - \rho_i \mathrm{sign}(s_{i1} + s_{i2}) \end{aligned} \tag{40}$$

由式（40）得：

$$\begin{aligned} s_{i2}^T \dot{s}_{i2} = {} & s_{i2}^T \Delta_i - s_{i2}^T e_{i,p} - k_{2\alpha} s_{i2}^T sig^{\alpha_s}(s_{i1} + s_{i2}) \\ & - k_{2\beta} s_{i2}^T sig^{\beta_s}(s_{i1} + s_{i2}) - \rho_i s_{i2}^T sign(s_{i1} + s_{i2}) \end{aligned} \tag{41}$$

将式（32）、式（37）和式（41）代入到式（30）可得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_{total}=\sum_{i=1}^{N}\Big[&-\lambda_1\| e_{i,p}\|^2-\lambda_2\sum\left|e_{i,p}\right|^{\alpha_s+1}-\lambda_3\sum\left|e_{i,p}\right|^{\beta_s+1}\\&-\mu_1\|s_{i1}\|^2-\mu_2\sum|s_{i1}|^{\alpha_s+1}-\mu_3\sum|s_{i1}|^{\beta_s+1}\\&-s_{i2}^Te_{i,p}+(s_{i1}+s_{i2})^T\Delta_i\\&-k_{2\alpha}(s_{i1}+s_{i2})^Tsig^{\alpha_s}(s_{i1}+s_{i2})\\&-k_{2\beta}(s_{i1}+s_{i2})^Tsig^{\beta_s}(s_{i1}+s_{i2})\\&-\rho_i(s_{i1}+s_{i2})^T\mathrm{sign}(s_{i1}+s_{i2})\Big]\end{aligned}$$

(42)由$x^T\mathrm{sign}(x)=/\!/\,x\,/\!/_1$，可得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_{total}=\sum_{i=1}^{N}\Big[&-\lambda_1\left\|e_{i,p}\right\|^2-\lambda_2\sum\left|e_{i,p}\right|^{\alpha_s+1}-\lambda_3\sum\left|e_{i,p}\right|^{\beta_s+1}\\&-\mu_1\left\|s_{i1}\right\|^2-\mu_2\sum\left|s_{i1}\right|^{\alpha_s+1}-\mu_3\sum\left|s_{i1}\right|^{\beta_s+1}\\&-s_{i2}^Te_{i,p}+\left(s_{i1}+s_{i2}\right)^T\Delta_i\\&-k_{2\alpha}\sum\left|s_{i1}+s_{i2}\right|^{\alpha_s+1}-k_{2\beta}\sum\left|s_{i1}+s_{i2}\right|^{\beta_s+1}\\&-\rho_i\left\|s_{i1}+s_{i2}\right\|_1\Big]\end{aligned}\tag{43}$$

假设$\rho_i>\bar{\Delta}_i$，那么，$\left(s_{i1}+s_{i2}\right)^T\Delta_i-\rho_i\left\|s_{i1}+s_{i2}\right\|_1\leqslant-\left(\rho_i-\bar{\Delta}_i\right)\left\|s_{i1}+s_{i2}\right\|_1\leqslant 0$

(44)

基于引理2，可得：$-s_{i2}^Te_{i,p}\leqslant\frac{1}{2}/\!/\,e_{i,p}\,/\!/^2+\frac{1}{2}/\!/\,s_{i2}\,/\!/^2$。又因为$s_{i2}=(s_{i1}+s_{i2})-s_{i1}$，所以可得：

$$\left\|s_{i2}\right\|^2\leqslant 2\left\|s_{i1}+s_{i2}\right\|^2+2\left\|s_{i1}\right\|^2\tag{45}$$

因此，可得：

$$-s_{i2}^Te_{i,p}\leqslant\frac{1}{2}/\!/\,e_{i,p}\,/\!/^2+/\!/\,s_{i1}+s_{i2}\,/\!/^2+/\!/\,s_{i1}\,/\!/^2\tag{46}$$

由于$\alpha_s>1$，$0<\beta_s<1$，对任意分量x有$|x|^2\leqslant|x|^{\alpha_s+1}+|x|^{\beta_s+1}$。那么，可得：

$$/\!/\,s_{i1}+s_{i2}\,/\!/^2\leqslant\sum\left|s_{i1}+s_{i2}\right|^{\alpha_s+1}+\sum\left|s_{i1}+s_{i2}\right|^{\beta_s+1}\tag{47}$$

由式（46）和式（47），可得：

$$\begin{aligned}-s_{i2}^Te_{i,p}\leqslant&\frac{1}{2}\left\|e_{i,p}\right\|^2+\left\|s_{i1}\right\|^2\\&+\sum\left|s_{i1}+s_{i2}\right|^{\alpha_s+1}+\sum\left|s_{i1}+s_{i2}\right|^{\beta_s+1}\end{aligned}\tag{48}$$

将式（48）代入式（43）中，可得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_{total}\leqslant-\sum_{i=1}^{N}\Big[&\left(\lambda_1-\frac{1}{2}\right)/\!/\,e_{i,p}\,/\!/^2+(\mu_1-1)/\!/\,s_{i1}\,/\!/^2\\&+\lambda_2\sum|e_{i,p}|^{\alpha_s+1}+\lambda_3\sum|e_{i,p}|^{\beta_s+1}\\&+\mu_2\sum|s_{i1}|^{\alpha_s+1}+\mu_3\sum|s_{i1}|^{\beta_s+1}\\&+(k_{2\alpha}-1)\sum|s_{i1}+s_{i2}|^{\alpha_s+1}\\&+(k_{2\beta}-1)\sum|s_{i1}+s_{i2}|^{\beta_s+1}\Big]\end{aligned}\tag{49}$$

当$\lambda_1>\frac{1}{2}$，$\mu_1>1$，$k_{2\alpha}>1$，$k_{2\beta}>1$时，式（49）变为：

$$\begin{aligned}\dot{V}_{total}\leqslant-\sum_{i=1}^{N}\Big[&\lambda_2\sum|e_{i,p}|^{\alpha_s+1}+\mu_2\sum|s_{i1}|^{\alpha_s+1}\\&+(k_{2\alpha}-1)\sum|s_{i1}+s_{i2}|^{\alpha_s+1}\\&+\lambda_3\sum|e_{i,p}|^{\beta_s+1}+\mu_3\sum|s_{i1}|^{\beta_s+1}\\&+\left(k_{2\beta}-1\right)\sum|s_{i1}+s_{i2}|^{\beta_s+1}\Big]\end{aligned}\tag{50}$$

由杨氏不等式得：

$$\begin{aligned}&\sum_{i=1}^{N}\left(\left\|e_{i,p}\right\|^2+\|s_{i1}\|^2+\|s_{i2}\|^2\right)\\&\leqslant 3\sum_{i=1}^{N}\left(\left\|e_{i,p}\right\|^2+\|s_{i1}\|^2+\|s_{i1}+s_{i2}\|^2\right)\end{aligned}\tag{51}$$

由于$2V_{total}=\sum_{i=1}^{N}\left(\|e_{i,p}\|^2+\|s_{i1}\|^2+\|s_{i2}\|^2\right)$，得：

$$\sum_{i=1}^{N}(\|e_{i,p}\|^2+\|s_{i1}\|^2+\|s_{i1}+s_{i2}\|^2)\geqslant\frac{2}{3}V_{total}\tag{52}$$

存在正常数$c_1>0$和$c_2>0$，基于式（52）可得：

$$\sum_{i=1}^{N}\Big[\sum|e_{i,p}|^{\alpha_s+1}+\sum|s_{i1}|^{\alpha_s+1}+\sum|s_{i1}+s_{i2}|^{\alpha_s+1}\Big]\geqslant c_1V_{total}^{\frac{\alpha_s+1}{2}}\tag{53}$$

并且$\sum_{i=1}^{N}\Big[|e_{i,p}|^{\beta_s+1}+\sum|s_{i1}|^{\beta_s+1}+\sum|s_{i1}+s_{i2}|^{\beta_s+1}\Big]\geqslant c_2V_{total}^{\frac{\beta_s+1}{2}}$

(54)

于是得到

$$\dot{V}_{total}\leqslant-c_1V_{total}^{\frac{\alpha_s+1}{2}}-c_2V_{total}^{\frac{\beta_s+1}{2}}\tag{55}$$

其中，$c_1>0$，$c_2>0$，系统固定时间收敛上界为：

$$T\leqslant T_{obs}+\frac{2}{c_1(\alpha_s-1)}+\frac{2}{c_2(1-\beta_s)}\tag{56}$$

因此，由引理1可知，观测器的收敛时间上界满足$T\leqslant T_{obs}+\frac{2}{c_1(\alpha_s-1)}+\frac{2}{c_2(1-\beta_s)}$。进而位置误差$e_{i,p}$以及速度误差$e_{i,v}$将在固定时间$T$内收敛到原点邻域内，即$\lim_{t\to T}\left|e_{i,p}\right|=\varepsilon_1$，$\lim_{t\to T}\left|e_{i,v}\right|=\varepsilon_1$，其中，$\varepsilon_1$

是充分小的正常数。

4　仿真分析

为了验证所提出的控制方法的有效性，进行了数值仿真。无人机编队系统包括一架领航式无人机UAV0和五架跟随无人机UAV1、UAV2、UAV3、UAV4、UAV5，通信关系如图1所示。

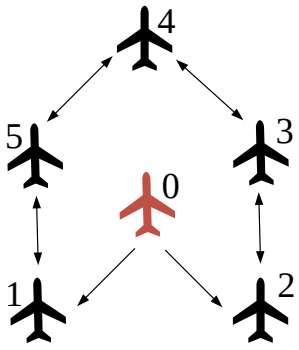

图1　通信结构图

邻接矩阵与领导者连接指示向量分别如下:

$$A=\begin{bmatrix}0&0&0&0&1\\0&0&1&0&0\\0&1&0&1&0\\0&0&1&0&1\\1&0&0&1&0\end{bmatrix},\quad g=\begin{bmatrix}1\\1\\0\\0\\0\end{bmatrix}$$

领导者采用平滑时变轨迹，其位置、速度和加速度分别设定为：

$$\begin{cases}p_0(t)=[\,0.5t,7\sin(0.16{*}t)\,]^T\\v_0(t)=[\,0.5,1.12\cos(0.16{*}t)\,]^T\\a_0(t)=[\,0,-0.17\sin(0.16{*}t)\,]^T\end{cases}$$

本文期望编队队形设置为以领导者为中心的正五边形，各跟随者期望偏移量定义为$h_i=[5\cos\theta_i,5\sin\theta_i]^T$,$\theta_i=\dfrac{2\pi(i-1)}{5}+\dfrac{\pi}{2}$，$i=1,\cdots,5$。

相关参数设定为$\lambda_1=1.4$，$\lambda_2=0.35$，$\lambda_3=0.5$，$\mu_1=1.3$，$\mu_2=0.35$，$\mu_3=0.45$，$\alpha_s=1.25$，$\beta_s=0.75$，$k_{2\alpha}=1.1$，$k_{2\beta}=1.2$。仿真中将模型不确定性和外部扰动统一等效为总扰动D_i，总扰动D_i表示为$D_i=\left[D_{ix}(t),D_{iy}(t)\right]^T$，其在$x$和$y$方向上的扰动分别为：

$$\begin{aligned}D_{ix}(t)=&\,0.4\sin(0.55t+0.7i)+0.22\cos(0.21t+i)\\&+(1.2+0.15i)e^{-0.35t}\sin(1.6t+0.5i)\\&+(0.8+0.1i)e^{-0.55t}\cos(2.4t+0.3i)\\&+0.8(-1)^i\exp\left[-\left(\frac{t-1.2}{0.45}\right)^2\right]\end{aligned}\tag{57}$$

$$\begin{aligned}D_{iy}(t)=&\,0.36\cos(0.5t+0.5i)+0.2\sin(0.27t+0.3i)\\&+(1.1+0.12i)e^{-0.35t}\cos(1.5t+0.4i)\\&-(0.75+0.1i)e^{-0.50t}\sin(2.2t+0.2i)\\&+0.7(-1)^{i+1}\exp\left[-\left(\frac{t-1.6}{0.55}\right)^2\right]\end{aligned}\tag{58}$$

观测误差为实际速度与估计速度之间的差值，仿真结果如图2—图8所示。

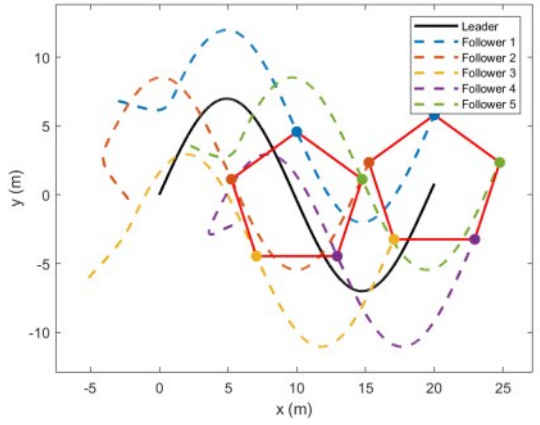

图2　编队运动轨迹图

图2表示领导者和跟随无人机在二维平面内的运动轨迹，黑色实线表示领导者轨迹，虚线表示各跟随无人机轨迹。从图中可以看出，各跟随无人机从不同初始位置出发，逐渐跟踪领导者轨迹并保持期望的正五边形队形；图3和图4分别表示各跟随无人机在x方向和y方向上的真实扰动和观测器估计对比图，由图3和图4可知所设计的观测器能够对x、y两个方向上的扰动进行有效估计；图5表示各跟随无人机的扰动估计误差图，在初期观测器估计值与真实扰动之间存在初始偏差，估计误差较大，随后误差减小，并在小范围内波动。

图6表示各跟随无人机在x和y方向上的控制输入图；图7表示各跟随无人机的速度和位置误差图，表明各跟随无人机不仅能够在位置上形成期望编队，而且在速度上能够实现与领导者保持一致。

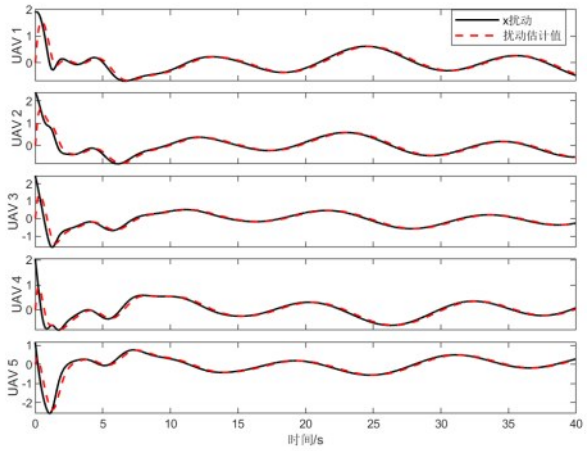

图3　跟随者在x上扰动估计图

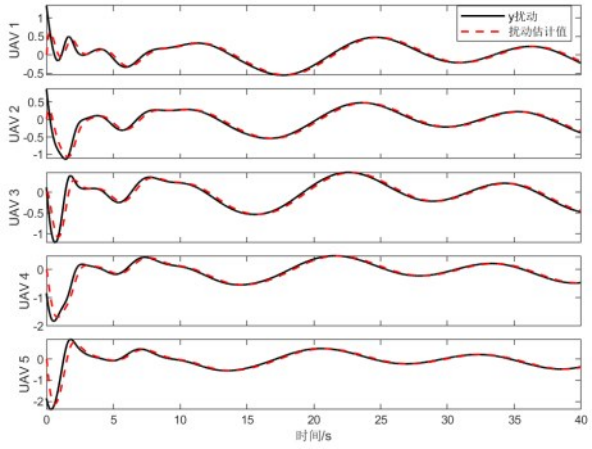

图4　跟随者在y上扰动估计图

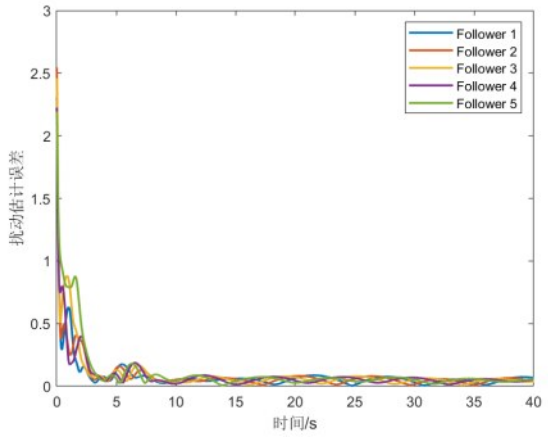

图5　扰动估计误差图

为进一步验证所设计控制方法的编队追踪性能，将本文方法与文献[18]中的固定时间二阶滑模控制方法进行对比，将其编队调整为相同的正五边形，两种方法采用相同的领导者轨迹，初始状态及外部扰动条件，其中x方向和y方向扰动分别设置为：

$$d_x(t)=0.4\sin(0.55t+0.7)+0.22\cos(0.21t+1)+1.35\sin(1.6t+0.5)+0.9\cos(2.4t+0.3)$$

$$d_y(t)=0.36\cos(0.5t+0.5)+0.2\sin(0.27t+0.3)+1.22\cos(1.5t+0.4)-0.85\sin(2.2t+0.2)$$

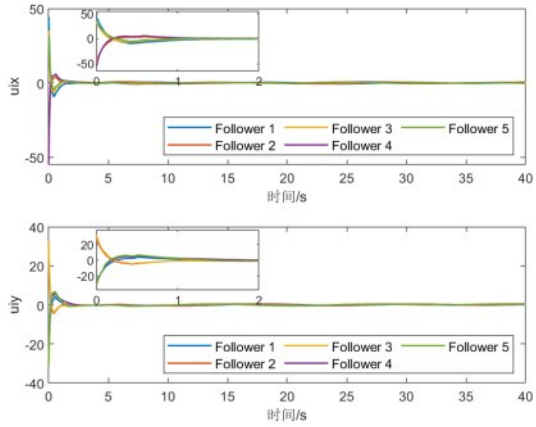

图6　控制输入图

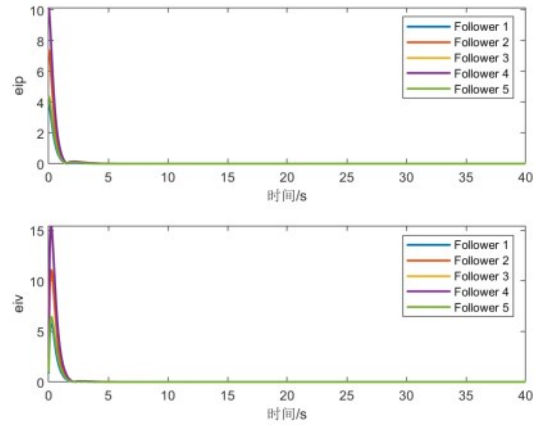

图7　位置和速度误差图

两种方法的整体编队位置误差和速度误差对比如图8所示，其中图8中的对比方法为文献[18]所提方法。由图可见，本文方法的位置误差和速度误差均能快速收敛至零附近，且波动较小；文献[18]的方法在收敛后仍存在较明显的波动。结果表明，本文方法具有更快的误差收敛速度和更小的稳态跟踪误差，验证了其编队跟踪与抗扰性能。

5　结束语

本文研究了模型不确定性和未知扰动下的多无人机固定时间编队追踪问题，提出了基于固定时间扩展状态观测器和固定时间滑模控制的编队控制方

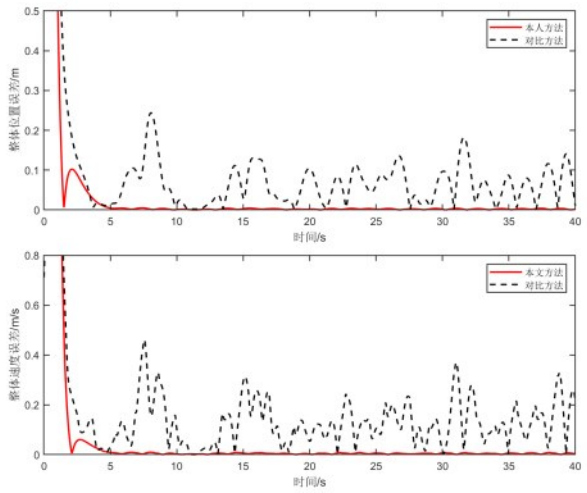

图8　误差对比图

法，该方法能够对未知扰动进行估计，并保证了编队误差在固定时间内收敛。理论分析和仿真结果表明，所设计的控制器能够实现编队追踪，具有良好的鲁棒性。未来将进一步考虑通信时延等问题。

参考文献：

[1] Alquwayzani Alanoud A, Albuali Abdullah A. A systematic literature review of zero trust architecture for military UAV security systems[J]. IEEE Access, 2024, 12: 176033-176056

[2] J Senthilnath, K Harikumar, S Sundaram. Metacognitive Decision-Making Framework for Multi-UAV Target Search Without Communication[J].IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2025:1-11.

[3] Coops NC, Tompalski P, Goodbody TRH, et al. Framework for near real-time forest inventory using multi source remote sensing data[J]. Forestry, 2023, 96(1): 1-19.

[4] Akhtar Adeel, Saleem Sajid, et al. Path invariant controllers for a quadrotor with a cable-suspended payload using a global parameterization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(5): 2002-2017

[5] T Bao, A Syed, W Kennedy and M Kantarci. SDOR Analysis for Task Offloading in Smart Farm Secure UAV-Assisted Communication Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol, 2024, 11(8): 17776-17781.

[6] Bu Y J, Yan Y, et al. Advancement challenges in UAV swarm formation control: A comprehensive review[J]. Drones, 2024, 8(7): 8070320

[7] Seisa A S, Lindqvist B, Satpute S G, et al. E-cnmpc: Edge-based centralized nonlinear model predictive control for multiagent robotic systems[J]. IEEE Access, 2022, 10: 121590-121601.

[8] Xu L X, Wang Y L, Wang X F, et al. Distributed active disturbance rejection formation tracking control for quadrotor UAVs[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2024, 54(8): 4678-4689.

[9] Ranjan P K, Sinha A, Cao Y C, et al. Relational maneuvering of leader-follower unmanned aerial vehicles for flexible formation [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2024, 54(10): 5598-5609.

[10] Song W, Li Z, Xu B, et al. Research on improved control algorithm of quadrotor UAV based on fuzzy PID [C]. Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), 2022, 361-365.

[11] Moeini A, Lynch A, Zhao Q. A backstepping disturbance observer control for multirotor UAVs: Theory and experiment [J]. International Journal of Control, 2022, 95(9): 2364-2378.

[12] 刘磊,李志宇,郭剑东.基于一致性的异构多无人机编队控制[J].计算机测量与控制,2026,34(04):105-114+121.DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2026.04.014.
Liu Lei, Li Zhiyu, Guo Jiandong. Heterogeneous multi-UAV formation control based on consistency [J]. Computer Measurement&Control, 2026, 34(04): 105-114+121. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2026.04.014.

[13] 董洋洋，夏泽群，王永滨，等. 基于改进ESO的反馈线性化四旋翼无人机姿态控制[J]. 机械与电子，2023，41(12):31-37.
Dong Yangyang, Xia Zequn, Wang Yongbin, et al. Attitude control of quadrotor UAV based on improved ESO feedback linearization [J].Mechanical and Electronic,2023,41(12):31-37.

[14] Y. Xin, H. Ni, Z. Huang, Y. He and S. Xia, "Anti-Disturbance Formation Control of Quadrotor UAVs Based on Terminal Sliding Mode Control, " 2023 China Automation Congress (CAC), Chongqing, China, 2023, pp. 5381-5385, doi: 10.1109/CAC59555.2023.10450878.

[15] Y. Li, "Design of UAV Formation Cooperative Controller Based on Terminal Integral Sliding Mode," 2024 IEEE 7th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITN EC), Chongqing, China, 2024, pp. 1286-1290, doi: 10.1109/ITNEC60942.2024.10733320.

[16] Amin Najafi, Saleh Mobayen, Abolfazl Jalilvand, "Fixed-time anti-saturation and fault-tolerant control for quadrotor UAVs using event-trigger adaptive barrier sliding mode control, "ISA Transactions,Volume 167, Part A,2025, ISSN 0019-0578.

[17] F. Hu, T. Ma and X. Su, "Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Fixed-Time Control for Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles With Prescribed Performance," in IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 32, no. 7, pp. 4109-4120, July 2024, doi: 10.1109/TFUZZ.2024.3393763.

[18] Z. Zhou, X. Feng, F. Pan, T. Xie and Z. Li, "Fixed-time Second-order Sliding Mode Control Based on Disturbance Observer for UAV Formation*," 2024 14th Asian Control Conference (ASCC), Dalian, China, 2024, pp. 2011-2016.

[19] Sini S, Ananthan T. A disturbance observer based control for quadrotor aircraft subject to wind gusts[C]. 2022 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems. (SPICES). IEEE, 2022, 1: 491-496.

[20] Dong Z.; Liu K.; Wang S. Sliding Mode Disturbance Observer-Based Adaptive Dynamic Inversion Fault-Tolerant Control for Fixed-Wing UAV. Drones 2022, 6, 295.

[21] Cheng X., Liu, ZW., Hou H.et al. Disturbance observer-based non-singular fixed-time sliding mode tracking control for a quadcopter. Science.China Information. Sciences. 65, 192202 (2022).

[22] Miao H., Song T., Liu J., & Ye J. (2024). Adaptive disturbance observer-based fast nonsingular terminal sliding mode control for quadrotors. Journal of the Franklin Institute, 361(14).

[23] Mobayen, S., Mofid, O. Analytical design and stability analysis of a terminal sliding mode reaching law-based disturbance observer for quadrotors. Nonlinear Dynamics 113, 29533–29551(2025).

[24] Wei Q., Zhang C., Li Y. et al. Fixed-time Distributed Formation Tracking Control for Quadrotor UAVs With Deferred Constraints. Int. J. Control Autom. Syst. 23, 2491–2502 (2025).

[25] Fuyin Yao, Hongwei Ren, Distributed event-triggered sliding-mode control of second-order multi-UAV system with a dynamic leader, Neurocomputing, Volume638, 2025, 130189, ISSN 0925-2312.

[26] R. Wang, T. Mei, W. Ma and W. Hao, "Disturbance Rejection Control for Multi-UAV Formations Based Extended State Observer," 2025 40th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation(YAC), Zhengzhou, China, 2025, pp. 2144-2149, doi:10.1109/YAC66630.2025.11150314.

[27] Yuxia Wu, Hongjing Liang, Shuxing Xuan, Xilin Zhang, Extended state observer based finite-time fault-tolerant formation control for multi-UAVs, Journal of the Franklin Institute, Volume 361, Issue 16, 2024, 107158, ISSN 0016-0032.

[28] 卫强强，刘蓉，等. 四旋翼无人机高阶一致性编队控制方法[J]. 电光与控制，2019,26(08): 1-5.
Wei Qiangqiang, Liu Rong, et al. High-order consistency formation control method for quadrotor UAVs [J]. Electro-Optics and Control, 2019, 26(08): 1-5.

[29] 沙宏晟.基于不确定性与扰动估计器的多无人机鲁棒编队控制研究[D]. 上海大学，2025. DOI: 10.27300/d. cnki. gshau. 2025. 000020.
Sha Hongsheng. Research on robust formation control of multi-UAVs based on uncertainty and disturbance estimator [D]. Shanghai University, 2025. DOI:10.27300/d.cnki.gshau.2025.000020.

[30] 施俊鹏, 刘剑慰, 杨蒲, 等. 基于滑模观测器的无人机编队故障诊断[J]. 物联网学报, 2017, 1(2): 68-75. DOI：10.11959/j. issn. 2096-3750.2017.00020.
Jun-peng SHI, Jian-wei LIU, Pu YANG, et al. Fault diagnosis based on sliding mode observer for formation of UAVs[J]. ChineseJournal on Internet of Things, 2017, 1(2): 68-75. DOI：10.11959/j.issn.2096-3750.2017.00020.

[31] Li D, Chen M, et al. Fixed-time tracking control of manipulators based on non-singular fast terminal sliding surface[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2024, 46(1): 2971-2979.

[32] Y. Liu and L. Li, “Adaptive leader-follower consensus control of multiple drones flexible manipulators with actuator failures and parameter uncertainties,”in IEEE/CAA J. Autom. Sinica, vol. 10, no. 4, pp. 1020–1031, 2023.

[33] Z. Zuo, “Nonsingular fixed-time consensus tracking for second-order multi-agent networks,”Automatica, vol. 54, pp. 305–309, 2015.

[34] 熊凯, 杨金跃, 段安娜, 等. 面向先进空中交通的无人机协同感知编队控制方法[J/OL]. 物联网学报, 2026.
Xiong Kai, Yang Jinyue, Leng Supeng. Collaborative Sensing-oriented Formation Control Method for UAVs in Advanced Air Mobility[J/OL]. Chinese Journal on Internet of Things, 2026.