

基于 T-S 模糊模型的四旋翼无人机姿态 H_∞ 跟踪控制刘静静¹ 闵 博¹

LIU Jingjing MIN Bo

摘 要

2024 年 3 月,“低空经济”被写入政府工作报告,无人机作为其核心产业形态,其姿态系统的精准跟踪成为关键技术问题。针对四旋翼无人机姿态状态相互耦合的跟踪控制难题,文章提出一种模糊 H_∞ 控制器。首先,在姿态误差模型的基础上,选取适当的前提变量,建立姿态 T-S 模糊误差模型并给出相应的权重函数和隶属函数;接着,针对外部扰动设计模糊 H_∞ 反馈控制器进行抑制;然后,根据李雅普诺夫函数稳定性定理得到使 T-S 模糊姿态系统满足 H_∞ 性能指标的线性矩阵不等式 (LMI) 充分条件,并给出了控制增益。仿真结果验证了所提控制方法的有效性,为四旋翼无人机姿态跟踪控制提供了可靠解决方案。

关键词

四旋翼无人机; T-S 模糊模型; H_∞ 控制; 线性矩阵不等式 (LMI)

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.02.017

0 引言

2024 年 3 月,“低空经济”被写入政府工作报告,无人飞机是“低空经济”的主要产业形态,四旋翼无人机广泛应用于民用和军事领域其广泛应用离不开其控制系统的精准跟踪控制,因此四旋翼无人机的姿态控制被广泛研究^[1-2]。

关于姿态系统的强耦合问题,文献[3]模型中耦合项的线性化方法,未解除角度的强耦合,且线性化过于理想,导致模型丢失重要的信息,控制效果不佳。文献[4]将姿态模型中耦合项作不确定性处理,设计鲁棒补偿器进行补偿,降低了模型精度,影响跟踪控制效果。文献[5]利用神经网络的非线性逼近能力处理,文献[6]利用反步法设计四旋翼无人机姿态控制器,文献[5-6]均得到良好的控制跟踪效果,但其控制器设计过程复杂,控制器参数难以调节。近几年,一些学者尝试利用 T-S 模糊模型去表示强耦合的非线性四旋翼无人机系统。T-S 模糊模型是处理非线性系统控制的简单有效的方法,它是一种利用模糊隶属函数将一系列线性的子系统模型叠加起来的模型,这种模型本质上是非线性模型,但它可用线性控制策略进行控制^[7-8]。文献[9-10]利用扇区线性化将四旋翼无人机姿态模型进行模糊化,建立四旋翼无人机模糊姿态模型,但均未考虑外部扰动和空气阻力的影响。

基于以上调查,本文针对四旋翼无人机姿态跟踪控制问题提出了模糊 H_∞ 反馈控制器。首先,基于扇区线性化理论,

建立了 T-S 模糊姿态模型;接着,考虑到四旋翼无人机姿态系统易受外部扰动的影响,设计 H_∞ 反馈控制器;然后,通过李雅普诺夫函数,得到了使模糊姿态系统满足 H_∞ 性能指标的充分条件,并给出了 LMI 形式;最后,采用 MATLAB 软件进行仿真,验证了控制器的有效性和鲁棒性。

1 四旋翼无人机姿态非线性系统及其 T-S 模糊模型

四旋翼无人机的结构图如图 1 所示, $\{B, X_B, Y_B, Z_B\}$ 表示机体坐标系; $\{I, X_I, Y_I, Z_I\}$ 表示惯性坐标系;机体坐标系相对惯性坐标系的旋转采用欧拉角为 $\xi = [\phi, \theta, \psi]$, 其中 ϕ 为滚转角; θ 为俯仰角; ψ 为偏航角; F_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为四个旋翼产生的升力; m 为四旋翼无人机的质量; g 为重力系数。

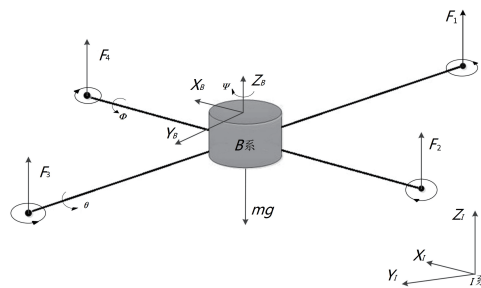


图 1 四旋翼无人机示意图

四旋翼无人机姿态模型表示为:

$$\begin{aligned}\ddot{\phi} &= -\frac{K_\phi}{I_x} \dot{\phi} + \frac{I_y - I_z}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{I_r}{I_x} \dot{\omega}_r + \frac{\tau_1}{I_x} + \frac{1}{I_x} d_\phi(t) \\ \ddot{\theta} &= -\frac{K_\theta}{I_y} \dot{\theta} + \frac{I_z - I_x}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{I_r}{I_y} \dot{\omega}_r + \frac{\tau_2}{I_y} + \frac{1}{I_y} d_\theta(t) \\ \ddot{\psi} &= -\frac{K_\psi}{I_z} \dot{\psi} + \frac{I_x - I_y}{I_z} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{\tau_3}{I_z} + \frac{1}{I_z} d_\psi(t)\end{aligned}\quad (1)$$

1. 河南交通职业技术学院 河南郑州 451460

[基金项目] 2024 年中国物流学会、中国物流与采购联合会研究课题“大型智能制造车间生产物流 AGV 综合调度研究”(2024CSLKT3-526)

式中: K_ϕ 、 K_θ 、 K_ψ 为空阻力系数; $d_\phi(t)$ 、 $d_\theta(t)$ 、 $d_\psi(t)$ 为外部扰动; I_x 、 I_y 、 I_z 、 I_r 为转动惯量; τ_1 为滚转力矩; τ_2 俯仰力矩; τ_3 为偏航力矩。

τ_1 、 τ_2 、 τ_3 与各个旋翼转速的关系用公式表示为:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= bl(w_2^2 - w_1^2); \quad \tau_2 = bl(w_3^2 - w_1^2) \\ \tau_3 &= c(w_2^2 + w_4^2 - w_1^2 - w_3^2); \quad w_r = w_1 - w_2 + w_3 - w\end{aligned}\quad (2)$$

式中: w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 为旋翼转速; l 为四旋翼无人机质心到旋翼中心的长度; b 为旋翼升力系数; c 为阻力矩系数。

令 ϕ_d 、 θ_d 、 ψ_d 分别表示期望角。定义角度误差向量:

$$\mathbf{X}_a = [\phi - \phi_d, \theta - \theta_d, \psi - \psi_d, \dot{\phi} - \dot{\phi}_d, \dot{\theta} - \dot{\theta}_d, \dot{\psi} - \dot{\psi}_d]^T \quad (3)$$

对角度误差向量求一阶时间导, 并将四旋翼无人机角度模型式 (1) 代入, 因飞行中, 无人机电机旋转速度可获, 将 w_r 做扰动处理。令 $\mathbf{X} = [\xi \quad \xi]^T$, 四旋翼无人机姿态系统重新表示为:

$$\dot{\mathbf{X}}_a = \mathbf{A}_a \mathbf{X}_a + \mathbf{B}_{a1} U_a + \mathbf{B}_{a1} f_a + \mathbf{B}_{a2} W_a \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned}\mathbf{B}_{a2} &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_{a1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0} \\ 1/I_x & 0 \\ 0 & 1/I_y \\ 0 & 0 & 1/I_z \end{bmatrix} \quad U_a = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \\ f_a &= \begin{bmatrix} (I_y - I_z)\ddot{\psi}_d - I_x\ddot{\phi}_d \\ (I_z - I_x)\ddot{\phi}_d - I_y\ddot{\theta}_d \\ (I_x - I_y)\ddot{\theta}_d - I_z\ddot{\psi}_d \end{bmatrix} \quad W_a = \begin{bmatrix} d_\phi \\ d_\theta \\ d_\psi \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_a &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0} \\ -\frac{K_\phi}{I_x} & \frac{I_y - I_z}{I_x} \dot{\psi}_d & \frac{I_y - I_z}{I_x} \dot{\theta} \\ \frac{I_z - I_x}{I_y} \dot{\psi}_d & -\frac{K_\theta}{I_y} & \frac{I_z - I_x}{I_y} \dot{\phi} \\ \frac{I_x - I_y}{I_z} \dot{\theta} & \frac{I_x - I_y}{I_z} \dot{\phi}_d & -\frac{K_\psi}{I_z} \end{bmatrix};\end{aligned}$$

选择 $\dot{\psi}_d$ 、 $\dot{\phi}_d$ 、 $\dot{\theta}_d$ 、 $\dot{\phi}$ 为前提变量, 令 $N_1 = \dot{\psi}_d$ 、 $N_2 = \dot{\phi}_d$ 、 $N_3 = \dot{\theta}_d$ 、 $N_4 = \dot{\phi}$ 。在四旋翼无人机的整个飞行过程中 $\dot{\psi}_d$ 、 $\dot{\phi}_d$ 、 $\dot{\theta}_d$ 、 $\dot{\phi}$ 是有界的, 则有:

$$N_j^L \leq N_j \leq N_j^H, j = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

式中: N_j^L 为 N_j 的下界; N_j^H 为 N_j 的上界。

则权重函数为:

$$\begin{aligned}W_{N_1}: \quad w_{10} &= \frac{N_1^H - \dot{\psi}_d}{N_1^H - N_1^L}; w_{11} = \frac{\dot{\psi}_d - N_1^L}{N_1^H - N_1^L}; \\ W_{N_2}: \quad w_{20} &= \frac{N_2^H - \dot{\phi}_d}{N_2^H - N_2^L}; w_{21} = \frac{\dot{\phi}_d - N_2^L}{N_2^H - N_2^L}; \\ W_{N_3}: \quad w_{30} &= \frac{N_3^H - \dot{\theta}_d}{N_3^H - N_3^L}; w_{31} = \frac{\dot{\theta}_d - N_3^L}{N_3^H - N_3^L}; \\ W_{N_4}: \quad w_{40} &= \frac{N_4^H - \dot{\phi}}{N_4^H - N_4^L}; w_{41} = \frac{\dot{\phi} - N_4^L}{N_4^H - N_4^L}\end{aligned}\quad (6)$$

根据扇区线性化理论, 角度误差模型式 (4) 可以由下面的 16 个 T-S 模糊模型等效表示。

如果 N_1 为 N_1^L , N_2 为 N_2^L , N_3 为 N_3^H , N_4 为 N_4^H , 即 $\dot{\mathbf{X}}_a = \mathbf{A}_{a1} \mathbf{X}_a + \mathbf{B}_{a1} U_a + \mathbf{B}_{a1} f_a + \mathbf{B}_{a2} W_a$, 则:

$$\begin{aligned}p_1 &= [N_1^L, N_1^L, N_1^L, N_1^H, N_1^H, N_1^L, N_1^L, N_1^H, N_1^H, N_1^H, N_1^L, N_1^H] \\ p_2 &= [N_2^L, N_2^L, N_2^L, N_2^H, N_2^H, N_2^L, N_2^L, N_2^H, N_2^H, N_2^H, N_2^L, N_2^H] \\ p_3 &= [N_3^H, N_3^H, N_3^L, N_3^L, N_3^H, N_3^H, N_3^L, N_3^L, N_3^H, N_3^H, N_3^L, N_3^H] \\ p_4 &= [N_4^H, N_4^H, N_4^H, N_4^H, N_4^L, N_4^L, N_4^L, N_4^L, N_4^H, N_4^H, N_4^L, N_4^L] \\ \mathbf{A}_{a,i} &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0} \\ -\frac{K_\phi}{I_x} & \frac{I_y - I_z}{I_x} p_{1,i} & \frac{I_y - I_z}{I_x} p_{3,i} \\ \frac{I_z - I_x}{I_y} p_{1,i} & -\frac{K_\theta}{I_y} & \frac{I_z - I_x}{I_y} p_{4,i} \\ \frac{I_x - I_y}{I_z} p_{3,i} & \frac{I_x - I_y}{I_z} p_{2,i} & -\frac{K_\psi}{I_z} \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, 16 \\ \mathbf{B}_{a2,i} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{I_r}{I_x} p_{3,i} & -\frac{I_r}{I_y} p_{4,i} & 0 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}^T\end{aligned}$$

角度子系统误差模型的 T-S 模型为:

$$\dot{\mathbf{X}}_a = \sum_{i=1}^{16} h_{a,i} (\mathbf{A}_{a,i} \mathbf{X}_a + \mathbf{B}_{a1} U_a + \mathbf{B}_{a1} f_a + \mathbf{B}_{a2} W_a) \quad (7)$$

则:

$$\begin{aligned}h_{a,1} &= w_{10} w_{21} w_{31} w_{41}; \quad h_{a,2} = w_{10} w_{20} w_{31} w_{41}; \quad h_{a,3} = w_{10} w_{20} w_{30} w_{41}; \\ h_{a,4} &= w_{10} w_{21} w_{30} w_{41}; \quad h_{a,5} = w_{11} w_{20} w_{30} w_{41}; \quad h_{a,6} = w_{10} w_{21} w_{31} w_{40}; \\ h_{a,7} &= w_{11} w_{20} w_{31} w_{40}; \quad h_{a,8} = w_{10} w_{20} w_{30} w_{40}; \quad h_{a,9} = w_{10} w_{21} w_{30} w_{40}; \\ h_{a,10} &= w_{11} w_{20} w_{30} w_{40}; \quad h_{a,11} = w_{11} w_{21} w_{31} w_{41}; \\ h_{a,12} &= w_{11} w_{20} w_{31} w_{41}; \quad h_{a,13} = w_{11} w_{21} w_{30} w_{41}; \quad h_{a,14} = w_{11} w_{21} w_{30} w_{40}; \\ h_{a,15} &= w_{10} w_{20} w_{31} w_{40}; \quad h_{a,16} = w_{11} w_{21} w_{31} w_{40}\end{aligned}$$

2 姿态模糊 H_∞ 反馈控制器设计

考虑到四旋翼无人机姿态系统易受外部扰动的问题, 我们设计了模糊 H_∞ 反馈控制器对外部扰动进行抑制并完成轨迹跟踪。

基于并行分布补偿的方法对角度 T-S 模糊误差模型 (3), 设计角度模糊鲁棒 H_∞ 控制器:

$$U_a = \sum_{i=1}^{16} h_{a,i} \mathbf{K}_{a,i} \mathbf{X}_a - f_a \quad (8)$$

式中: $\mathbf{K}_{a,i}$ 是角度控制器增益矩阵。

将式 (8) 代入四旋翼无人机姿态 T-S 模糊模型 (3), 联合式 (7), 可得无人机姿态模糊增广系统:

$$\dot{\mathbf{X}}_a = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} h_{a,i} h_{a,j} (\mathbf{A}_{a,i} \mathbf{B}_{a1} \mathbf{K}_{a,j}) \mathbf{X}_a + \mathbf{B}_{a2} W_a \quad (9)$$

定义模糊闭环系统的输出为 $Y_a = [\eta - \eta_d]^T$, 则有:

$$Y_a = C_a \mathbf{X}_a \quad (10)$$

式中: $C_a = [I_{3 \times 3}, \mathbf{0}_{3 \times 3}] \in \mathbf{R}^{3 \times 6}$ 。可以推导出以下定理:

定理: 对于给定的正常数 ε_a 、 γ_a , 如果存在实对称正

定矩阵 $\mathbf{Q}_a$ 、正常数 α_a 、 β_a 和矩阵 $\mathbf{M}_{a,i}$ ($i=1, 2, \dots, 16$) 使得 LMIs 成立:

$$\begin{bmatrix} R_{a,i} & * & * \\ B_{a,2}^T & -\gamma_a I & * \\ C_{a,a} \mathbf{Q} & 0 & -\gamma_a I \end{bmatrix}^T < 0 \quad (11)$$

$j > i \quad \text{s.t.} \quad h_{a,i} h_{a,j} \neq 0$

则角度 T-S 模糊闭环系统式 (9) 和式 (10) 渐近稳定且满足 H_∞ 性能指标 γ_a , 控制增益 $\mathbf{K}_{a,i} = \mathbf{M}_{a,i} \mathbf{Q}_a^{-1}$, 其中:

$$\begin{aligned} R_{a,i} &= \mathbf{Q}_a A_{a,i}^T + A_{a,i} \mathbf{Q}_a + (B_{a,1} \mathbf{M}_{a,i})^T + B_{a,1} \mathbf{M}_{a,i}; \\ R_{a,ij} &= ((G_{a,ji}^* + G_{a,ij}^*)/2)^T + ((G_{a,ji}^* + G_{a,ij}^*)/2); \end{aligned}$$

假设外部扰动 $\mathbf{W}_a$ 恒为 0, 选取李雅普诺夫函数:

$$V(\mathbf{X}_a) = \mathbf{X}_a^T \mathbf{P}_a \mathbf{X}_a \quad (12)$$

式中: $\mathbf{P}_a$ 为对称正定矩阵。

对上式求取一阶时间导数, 将角度闭环模糊误差模型 (3) 代入可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{X}_a) &= \dot{\mathbf{X}}_a^T \mathbf{P}_a \mathbf{X}_a + \mathbf{X}_a^T \mathbf{P}_a \dot{\mathbf{X}}_a \\ &= \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} h_{a,i} h_{a,j} \mathbf{X}_a^T [A_{a,i}^T + (B_{a,1} \mathbf{K}_{a,j})^T] \mathbf{P}_a \mathbf{X}_a \\ &\quad + \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} h_{a,i} h_{a,j} \mathbf{X}_a^T \mathbf{P}_a [A_{a,i} + B_{a,1} \mathbf{K}_{a,j}] \mathbf{X}_a \end{aligned} \quad (13)$$

如果 $\dot{V}(\mathbf{X}_a) < 0$ 成立, 则角度闭环模糊系统稳定。

在角度闭环模糊系统稳定且外部扰动不恒为 0 的情况下, 对于给定正常数 γ_a , 考虑 H_∞ 性能指标:

$$J_a = \int_0^{+\infty} (\mathbf{Y}_a^T \mathbf{Y}_a - \gamma_a^2 \mathbf{W}_a^T \mathbf{W}_a) dt \quad (14)$$

因为角度闭环模糊系统稳定, 则 $V(\mathbf{X}_a(+\infty)) = 0$, 系统初始条件为 0, 则 $V(\mathbf{X}_a(0)) = 0$, 将式 (9) (10) 代入后得:

$$\begin{aligned} J_a &= \int_0^{+\infty} \left[\mathbf{Y}_a^T \mathbf{Y}_a - \gamma_a^2 \mathbf{W}_a^T \mathbf{W}_a + \frac{d}{dt} V(\mathbf{X}_a) \right] dt \\ &\leq \int_0^{+\infty} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{X}_a \\ \mathbf{W}_a \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_a^T C_a & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_a \\ \mathbf{W}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{X}_a \\ \mathbf{W}_a \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Pi_{a,1} & \mathbf{P}_a B_{a,2} \\ * & -\gamma_a^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_a \\ \mathbf{W}_a \end{bmatrix} \right) dt \quad (15) \\ &= \int_0^{+\infty} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{X}_a \\ \mathbf{W}_a \end{bmatrix}^T \Pi_{a,2} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_a \\ \mathbf{W}_a \end{bmatrix} \right) dt \end{aligned}$$

式中:

$$\Pi_{a,2} = \begin{bmatrix} \Pi_{a,1} + C_a^T C_a & \mathbf{P}_a B_{a,2} \\ * & -\gamma_a^2 I \end{bmatrix}.$$

如果 $\Pi_{a,2} < 0$, $J_a < 0$, 即角度闭环模糊系统是式 (9) 和 (10) 满足 H_∞ 性能指标 γ_a 。根据式 (15) 可知, $\Pi_{a,2} < 0$ 是双线性矩阵不等式。定义 $\mathbf{Q}_a = \mathbf{P}_a^{-1}$, 用 $\mathbf{Q}_{a,1} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_a & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$ 左右乘以上式 $\Pi_{a,2} < 0$,

由舒尔补知 $\Pi_{a,2} < 0$ 等价于:

$$\Pi_{a,3} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_a \Pi_{a,1} \mathbf{Q}_a & B_{a,2} & (C_a \mathbf{Q}_a)^T \\ * & -\gamma_a^2 I & 0 \\ * & * & I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

如果 $\Pi_{a,3} < 0$, 则角度模糊闭环系统式 (9) 和式 (10) 稳定且满足 H_∞ 性能指标 γ_a 。根据舒尔补定理可知式 (16) 等价于式 (11)。对于给定的正常 ϵ_a 、 γ_a , 如果存在 $\alpha_a > 0$ 、 $\beta_a > 0$ 和对称正定 $\mathbf{Q}_a$, 角度闭环模糊系统式 (9) 和式 (10) 稳定且满足 H_∞ 性能指标, 其控制器增益为 $\mathbf{K}_a = \mathbf{M}_a \mathbf{Q}_a^{-1}$ 。

3 仿真结果

为了验证所设计的姿态控制器的鲁棒性和有效性, 本文采用 MATLAB 仿真软件对四旋翼无人机姿态系统进行跟踪仿真, 并与文献 [3] 中的姿态 H_∞ 反馈控制器对比。

四旋翼无人机姿态模型参数为: $I_x = 0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $c = 0.05 = 0.05$; $I_y = 0.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $I_z = 0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $I_r = 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}$; $K_\phi = K_\theta = K_\psi = 0.012 \text{ Ns/m}$; $m = 2.245 \text{ kg}$; $l = 0.245 \text{ m}$; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

利用 LMI 工具箱求解定理 1 中的式 (11), 取 $\rho = 1.6$, 得到 $\mathbf{K}_{a,i}$ ($i=1, 2, \dots, 16$) 值及控制器增益:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -22.7 & 0.00 & 0.00 & -15.8 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & -27.2 & 0.00 & 0.00 & -19.0 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & -185 & 0.00 & 0.00 & -129 \end{bmatrix}$$

案例 1: 期望姿态轨迹 $\theta_d = \psi_d = \phi_d$, 在 150~200 s 时, 本文考虑幅值为 0.05 的正弦外部扰动, 本文方法与 H_∞ 反馈控制的姿态跟踪误差曲线如图 2 所示。

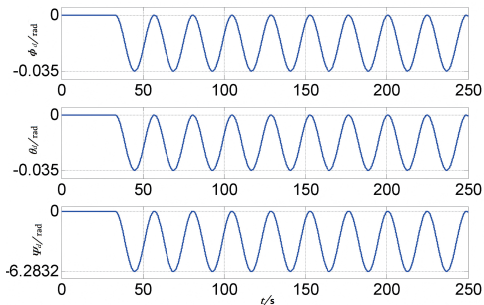


图 2 case1 中期望姿态轨迹图

从图 2 可知, 未加入外部扰动时采用本文方法的滚转角误差小于采用 H_∞ 反馈控制的滚转角误差; 同理可知本文提出方法的偏航角误差和俯仰角跟踪误差均小于 H_∞ 反馈控制, 因此本文方法的姿态跟踪误差更小。在加入外部扰动时, 明显看出本文方法的姿态跟踪误差更小, 能更好地抑制外部扰动。

案例 2: 选取与 case1 中相同的期望姿态轨迹。在 150~200 s 时, 加入如图 3 所示外部扰动。本文方法与 H_∞ 反馈控制的姿态跟踪误差曲线如图 4 所示。从图 5 可知在加入外部扰动时, 明显看出本文方法的姿态跟踪误差更小, 能更好地抑制外部扰动。故本文所提出的姿态模糊 H_∞ 控制器比姿态 H_∞ 反馈控制跟踪效果更好且抑制外部扰动能力更强。

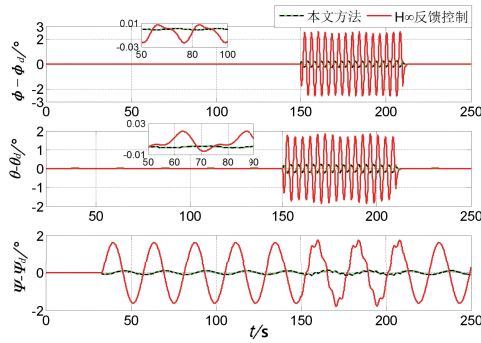


图3 案例1中姿态跟踪误差曲线

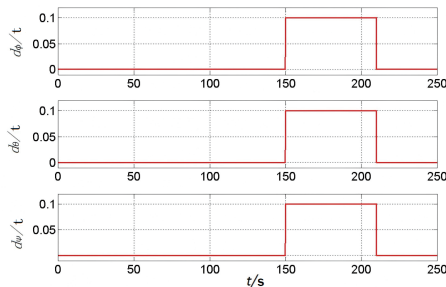


图4 案例2中外部扰动图

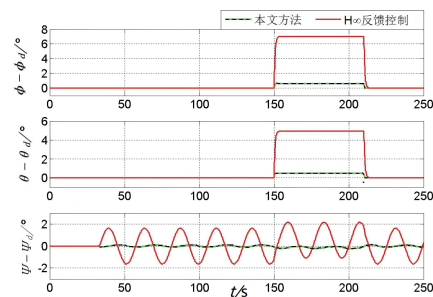


图5 案例2中姿态跟踪误差曲线

4 结论

本文研究了强耦合的四旋翼无人机姿态系统,提出了基于T-S模糊模型的四旋翼无人机姿态 H_∞ 控制器的设计方法。首先,选择合适的前提变量,建立四旋翼无人机姿态T-S模糊误差模型;接着,设计了姿态模糊 H_∞ 反馈控制器以抑制外部扰动,根据李雅普诺夫函数稳定性定理得出了使四旋翼无人机姿态模糊系统满足 H_∞ 跟踪性能指标的LMI充分条件,并给出了控制增益的求解方法;最后仿真结果证明了所设计控制方法的有效性和抗扰动的性能。

参考文献:

- [1] 聂佩晗,赵振华,曹东.基于预设性能的四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制[J].指挥与控制学报,2024,10(5):611-619.

- [2] 杨洋,苏伟.基于改进滑模观测器的四旋翼无人机轨迹控制[J].电光与控制,2024,31(7):20-26.
- [3] 孙妙平,刘静静,年晓红,等.基于区间矩阵的四旋翼无人机鲁棒跟踪控制[J].控制理论与应用,2017,34(2):168-178.
- [4] LIU H, LI D J, ZUO Z Y, et al. Robust three-loop trajectory tracking control for quadrotors with multiple uncertainties[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2016, 63(4): 2263-2274.
- [5] DIERKS T, JAGANNATHAN S. Output feedback control of a quadrotor UAV using neural networks[J]. IEEE transactions on neural networks, 2010, 21(1):50-66.
- [6] MADANI T, BENALLEGUE A. Backstepping control for a quadrotor helicopter[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.Piscataway: IEEE, 2006: 3255-3260.
- [7] TANAKA K, WANG H O. Fuzzy control systems design and analysis:a linear matrix inequality approach[EB/OL].(2001-09-12)[2025-12-30].<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471224596>.
- [8] KIM H S,PARK J B,JOO Y H. Position control of quadrotor via robust fuzzy controller with decay rate[C]//The SICE Annual Conference 2013.Piscataway:IEEE,2013:2542-2547.
- [9] RABHI A, CHADLI M, PEGARD C. Robust fuzzy control for stabilization of a quadrotor[C]//2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR).Piscataway: IEEE, 2011: 471-475.
- [10] MAO X, ZHANG H B, HAN D F. T-S fuzzy control for a quad-rotor UAV[C]//2015 34th Chinese Control Conference (CCC). Piscataway: IEEE, 2015: 3617-3622.

【作者简介】

刘静静(1991—),女,河南郑州人,硕士研究生,研究方向:职业教育、无人机控制。

闵博(1994—),男,河南郑州人,硕士研究生,助教,研究方向:职业教育、无人机控制。

(收稿日期:2025-08-13 修回日期:2026-02-03)