

基于MC-LADRC的水空两栖倾转多旋翼无人船 水面起飞控制方法

沈跃 刘铭晖 沈亚运 刘慧

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘要: 水空两栖倾转多旋翼无人船在多鱼塘环境进行水空跨域作业时受到复杂多变的水面流体力影响, 导致船体姿态和飞行高度易发生较大波动。为了提高无人船水面起飞时的姿态稳定性, 提出了一种基于模型补偿的线性自抗扰水面起飞控制方法。首先对无人船多模态进行详细的动力学建模; 其次考虑水面起飞过程的姿态变化, 建立了基于无人船实时姿态的水面张力估算模型、浮力估算模型; 最后设计了基于模型补偿的线性自抗扰控制器。仿真结果表明, 本文方法较PID算法横滚方向收敛时间减少66.7%, 波动减少98.3%; 在无人船前进(x 轴)方向收敛时间减少34.0%; 高度收敛时间减少41.2%, 波动减少80.0%。实验结果表明, 无人船实现了飞行高度为1.2 m时, 横滚角波动小于 3° , 俯仰角波动及偏航角波动小于 2° 的水面起飞。该研究提出的控制算法有效提高了水空两栖倾转多旋翼无人船在水空跨域过程中的安全性和抗扰能力。

关键词: 倾转多旋翼无人船; 水面起飞控制; 线性自抗扰; 模型补偿

中图分类号: S22; S96 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)06-0608-10

OSID:



Surface Takeoff Control of Tilting Multi Rotor Unmanned Ship Based on MC-LADRC

SHEN Yue LIU Minghui SHEN Yayun LIU Hui

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The water air amphibious tilting multi rotor unmanned ships was subject to complex and variable surface fluid forces during cross domain operations in a multi fish pond environment, resulting in significant fluctuations in the ship's attitude and flight altitude. In order to improve the attitude stability of unmanned ships during surface takeoff, a model compensation based linear self disturbance rejection surface takeoff control method was proposed. Firstly, a detailed dynamic modeling of the multimodal unmanned ship was conducted. Secondly, considering the attitude changes during the takeoff process on the water surface, a real-time attitude estimation model and buoyancy estimation model was proposed based on unmanned ships. Then, a linear self disturbance rejection attitude and altitude controller based on model compensation was designed. Finally, a linear active disturbance rejection controller based on model compensation was designed. In the simulation experiment, compared with the PID algorithm, the proposed method reduced the roll convergence time by 66.7% and the roll fluctuation by 98.3%, reduced convergence time on the x -axis by 34%, reduced convergence time on altitude by 41.2% and the fluctuation on altitude by 80.0%. The simulation results verified the effectiveness and stability of the proposed method. In practical experiments, the unmanned ship achieved takeoff from the water surface with a flying altitude of 1.2 m, fluctuations of roll less than three degrees, and a fluctuation of pitch and yaw less than two degrees. The experimental results showed that the proposed control algorithm effectively improved the stability and anti-interference ability of the water air amphibious tilting multi rotor unmanned ships during the water air cross domain process.

Key words: tilting multi rotor unmanned ship; surface takeoff control; LADRC; model compensation

收稿日期: 2024-03-22 修回日期: 2024-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975260)

作者简介: 沈跃(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事无人农机与智能控制和农业机器人研究, E-mail: shen@ujs.edu.cn

通信作者: 刘慧(1980—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机器人智能感知与控制 and 深度学习等研究, E-mail: amity@ujs.edu.cn

0 引言

水空两栖跨域飞行器一般指在空气中和水面或水下均具备作业能力的飞行器^[1],水面-空气跨域飞行器因其多功能性、强环境适应性和作业高效性,成为国内外学者重点研究领域之一。水面-空气跨域飞行器有直接跨域和分步跨域2种跨域方式。直接跨域方式为飞行器以俯冲或滑行方式在水面降落,再通过气体或液体喷射获取初始动能脱离水面,这类飞行器多采用固定翼构型^[2],需要较长的起飞水道,且喷射气体或液体的出水方式和有限的水域环境限制了飞行器多次跨域的能力^[3]。分步跨域式为飞行器通过形态转换和动力切换的方式完成水空跨域转换,实现水面的降落和起飞,这类飞行器多采用旋翼构型。水面-空气跨域飞行器可以适应多种环境,但在跨域过程中受到自然风、时变的水面流体力(水面张力、浮力、水阻力等)等扰动影响,其动力学特性具有极大的不确定性^[4]。

现阶段,国内外对跨域飞行器的研究尚处于探索阶段^[5-8]。在控制方法方面,水面-空气跨域飞行器多采用和旋翼无人机相似的PD/PID控制器实现水空自主跨域过程^[9-13]。这些控制方法均实现了水面-空气跨域飞行器跨域工程的稳定控制,但在跨介质过程中,如从水面起飞到空中飞行或从空中降落到水面,飞行器的动力学特性会发生显著变化,目前的模型往往简化这些变化。

考虑水空两栖倾转多旋翼无人船在跨域作业时的稳定性和抗扰能力,本文从运动模型出发提出一种基于模型补偿^[14]的线性自抗扰水面起飞控制方法(Linear active disturbance rejection based on model compensation, MC-LADRC)。首先,采用Newton-Euler公式对无人船多模态进行动力学建模;其次,通过无人船的实时姿态估算当前水面张力和浮力;然后,设计基于MC-LADRC的水面起飞控制器;最后,通过仿真实验和水面起飞实验验证本文水面起飞控制方法的有效性和稳定性。

1 无人船模型

1.1 无人船结构与坐标定义

本文使用团队自主设计的水空两栖倾转多旋翼无人船为载体搭建实验平台^[15],无人船主体由碳纤维材料组成,动力部件为可倾转180°的旋翼^[16],选用朗宇X6215S系列电机和西塔X1W型舵机作为执行部件,无人船上部分动力部件采用H形布局,中间的承重碳板上搭载有控制器主板、实时定位系统、无线数传、分电板和电源控制板;电池位于船体

中心偏下的位置;船体下部分浮板采用乙烯-醋酸乙烯聚合物(Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA)泡沫材料,如图1所示。无人船通过倾转旋翼可以实现船型模式和旋翼模式多模态^[17]切换,搭载水质检测装置和鱼塘饲喂装置,满足多鱼塘环境的跨域水质监测和饲喂作业需求。

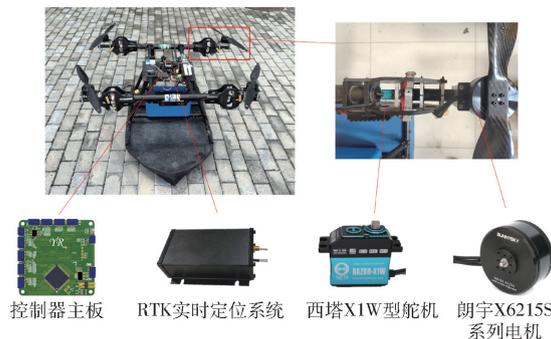


图1 无人船实验平台

Fig. 1 Unmanned ship experimental platform

定义机体坐标系原点与无人船重心 G 重合,采用北东地坐标系作为大地坐标系,如图2所示。

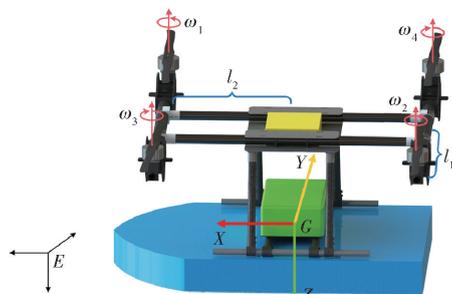


图2 无人船坐标定义示意图

Fig. 2 Unmanned ship coordinate defining diagram

机体系到大地坐标系旋转矩阵 R_b^E 为

$$R_b^E = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\theta s\phi c\psi - c\phi s\psi & s\theta c\phi c\psi + s\phi s\psi \\ c\theta s\psi & s\theta s\phi s\psi + c\phi c\psi & s\theta c\phi s\psi - s\phi c\psi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 E ——大地坐标系(E 系)

b ——机体坐标系(b 系)

ϕ ——横滚角

θ ——俯仰角

ψ ——航向角

s ——正弦函数

c ——余弦函数

考虑到无人船多模态模型复杂度,做出以下合理假设,适当简化无人船动力学模型^[18]:①无人船质量均匀且对称。②大地坐标系为惯性系。③无人船的几何中心与质心位于同一点。④重力加速度不受位置环境的影响。⑤旋翼升力与电机转速平方成正比,旋翼反扭矩与电机转速平方成正比。

1.2 无人船船型模式动力学模型

在船型模式下,前方2个倾转旋翼用于姿态调节,后方2个倾转旋翼固定角度提供推力和转向力矩,考虑到旋翼反扭矩的影响,令前方2个电机倾转角度一致,即

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_3 = \alpha \\ \alpha_2 = \alpha_4 = 90^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ——倾转旋翼角

α ——前方2个倾转旋翼角

则无人船受电机驱动力 F_t 为

$$\mathbf{F}_t = \begin{bmatrix} C_T(n_1^2 + n_3^2)s\alpha + C_T(n_2^2 + n_4^2) \\ 0 \\ -C_T(n_1^2 + n_3^2)c\alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 C_T ——旋翼升力系数

n_1, n_2, n_3, n_4 ——4个电机转速

底部浮板由长方体和半圆柱体组合,如图3所示。无人船在航行过程中的排水体积 V_p 为

$$V_p = LBh_0 + \frac{\pi}{8}B^2h_0 \quad (4)$$

式中 L, B ——长方体长、宽

h_0 ——无人船浸入水面深度

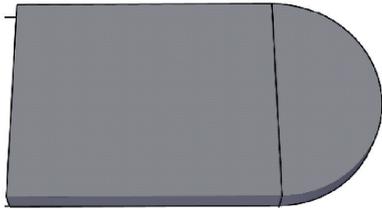


图3 无人船底部浮板

Fig. 3 Unmanned ship bottom floating plate

根据阿基米德定律,无人船所受浮力 F_f 为

$$F_f = \rho g V_p \quad (5)$$

式中 g ——重力加速度

ρ ——液体密度

无人船所受水流阻力^[19] F_z 为

$$F_z = \frac{1}{2}\rho v^2 C_d S \quad (6)$$

式中 C_d ——无人船阻力系数

v ——前进速度

S ——无人船前端浮板与水接触的横截面积

代入参数后可得

$$F_z = \frac{\pi}{4}\rho v^2 C_d B h_0 \quad (7)$$

针对无人船位于水面上时自由度受限的情况,建立 x 轴和高度方向的位置动力学模型。考虑无人船驱动力、重力、水阻力、浮力,忽略无人船所受其余力,在机体系下基于 Newton - Euler 公式建立船型模式位置动力学模型为

$$\begin{cases} \ddot{x}_b = [C_T(n_1^2 s\alpha_1 + n_3^2 s\alpha_3) + C_T(n_2^2 + n_4^2) - F_z]/m \\ \ddot{z}_b = [mg - F_f - C_T(n_1^2 c\alpha_1 + n_3^2 c\alpha_3)]/m \end{cases} \quad (8)$$

式中 m ——无人船总质量

\ddot{x}_b ——机体系下无人船 x 轴加速度

\ddot{z}_b ——机体系下无人船 z 轴加速度

考虑无人船的旋翼差速力矩和旋翼反扭矩,建立无人船船型模式姿态动力学模型。

旋翼差速力矩为

$$\begin{bmatrix} M_{dx}^b \\ M_{dy}^b \\ M_{dz}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_T(-n_1^2 c\alpha_1 + n_3^2 c\alpha_3)l_1 \\ C_T(n_1^2 c\alpha_1 + n_3^2 c\alpha_3)l_2 \\ C_T(-n_1^2 s\alpha_1 + n_2^2 s\alpha_2 + n_3^2 s\alpha_3 - n_4^2 s\alpha_4)l_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 l_1, l_2 ——力臂

$M_{dx}^b, M_{dy}^b, M_{dz}^b$ ——三轴旋翼差速力矩

旋翼反扭矩为

$$\begin{bmatrix} M_{rx}^b \\ M_{ry}^b \\ M_{rz}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_R(-n_1^2 s\alpha_1 - n_2^2 + n_3^2 s\alpha_3 + n_4^2) \\ 0 \\ C_R(n_1^2 c\alpha_1 - n_3^2 c\alpha_3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 C_R ——电机反扭矩系数

$M_{rx}^b, M_{ry}^b, M_{rz}^b$ ——三轴旋翼反扭矩

由式(9)和式(10)建立无人船船型模式姿态动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{p} = [M_{dx}^b + M_{rx}^b - (I_z - I_y)qr]/I_x \\ \dot{q} = [M_{dy}^b - (I_x - I_z)pr]/I_y \\ \dot{r} = [M_{dz}^b + M_{rz}^b - (I_y - I_x)pq]/I_z \end{cases} \quad (11)$$

式中 I_x, I_y, I_z ——无人船三轴转动惯量

p, q, r ——无人船三轴机体角速度

$\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ ——无人船三轴机体角加速度

1.3 无人船旋翼模式动力学模型

无人船在旋翼模式飞行时,通过倾转旋翼结构倾角变化进行 x 轴方向平动,实现 x 轴位置和俯仰角间的解耦控制^[20]。为平衡旋翼反扭矩,应使倾转旋翼结构的倾角一致,即

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha \quad (12)$$

则无人船受电机驱动力 F_t 为

$$\mathbf{F}_t = \mathbf{R}_b^E \begin{bmatrix} C_T s\alpha \sum_{i=1}^4 n_i^2 \\ 0 \\ -C_T c\alpha \sum_{i=1}^4 n_i^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

在大地坐标系下基于 Newton - Euler 公式建立无人船旋翼模式位置动力学模型为

$$\begin{cases} \ddot{x}_E = \left[c\theta c\psi C_T s\alpha \sum_{i=1}^4 n_i^2 - (s\theta c\phi c\psi + s\phi s\psi) C_T c\alpha \sum_{i=1}^4 n_i^2 \right] / m \\ \ddot{y}_E = \left[c\theta s\psi C_T s\alpha \sum_{i=1}^4 n_i^2 - (s\theta c\phi s\psi - s\phi c\psi) C_T c\alpha \sum_{i=1}^4 n_i^2 \right] / m \\ \ddot{z}_E = \left(-s\theta C_T s\alpha \sum_{i=1}^4 n_i^2 - c\theta c\phi C_T c\alpha \sum_{i=1}^4 n_i^2 + mg \right) / m \end{cases} \quad (14)$$

式中 \ddot{x}_E 、 \ddot{y}_E 、 \ddot{z}_E ——大地坐标系下无人船三轴加速度

在建立无人船姿态动力学模型时,考虑无人船的旋翼差速力矩、旋翼反扭矩和陀螺效应力矩。

旋翼差速力矩为

$$\begin{bmatrix} M_{dx}^b \\ M_{dy}^b \\ M_{dz}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_T (-n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 - n_4^2) l_1 c\alpha \\ C_T (n_1^2 - n_2^2 + n_3^2 - n_4^2) l_2 c\alpha \\ C_T (-n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 - n_4^2) l_1 s\alpha \end{bmatrix} \quad (15)$$

旋翼反扭矩为

$$\begin{bmatrix} M_{rx}^b \\ M_{ry}^b \\ M_{rz}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_R (-n_1^2 - n_2^2 + n_3^2 + n_4^2) s\alpha \\ 0 \\ C_R (n_1^2 + n_2^2 - n_3^2 - n_4^2) c\alpha \end{bmatrix} \quad (16)$$

陀螺效应力矩为

$$\mathbf{M}_g^b = \begin{bmatrix} J_r q h_1 \\ -J_r p h_1 - J_r r h_2 \\ J_r q h_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中 $h_1 = (n_1 + n_2 - n_3 - n_4) c\alpha$ (18)

$h_2 = (n_1 + n_2 - n_3 - n_4) s\alpha$ (19)

式中 J_r ——电机及桨叶绕转轴转动惯量

由式(15)~(17)建立无人船旋翼模式姿态动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{p} = [M_{dx}^b + M_{rx}^b + M_{gx}^b - (I_z - I_y)qr] / I_x \\ \dot{q} = [M_{dy}^b + M_{gy}^b - (I_x - I_z)pr] / I_y \\ \dot{r} = [M_{dz}^b + M_{rz}^b + M_{gz}^b - (I_y - I_x)pq] / I_z \end{cases} \quad (20)$$

旋翼模式时,为实现俯仰角 θ 为 0,需控制无人船横向运动(y 轴)方向的差速力矩 M_{dy}^b 为 0;为保证船体稳定,需控制 x 轴方向的反扭矩 M_{rx}^b 为 0,即

$$\begin{cases} M_{dy}^b = C_T (n_1^2 - n_2^2 + n_3^2 - n_4^2) l_2 c\alpha = 0 \\ M_{rx}^b = C_R (-n_1^2 - n_2^2 + n_3^2 + n_4^2) s\alpha = 0 \end{cases} \quad (21)$$

则求解式(21)可得

$$\begin{cases} n_2 = n_3 \\ n_1 = n_4 \end{cases} \quad (22)$$

取中间控制量 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 ,则

$$\begin{cases} U_1 = C_T (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 + n_4^2) s\alpha \\ U_2 = C_T (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 + n_4^2) c\alpha \\ U_3 = C_T (-n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 - n_4^2) l_1 c\alpha \\ U_4 = C_T (-n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 - n_4^2) l_1 s\alpha \end{cases} \quad (23)$$

无人船在飞行过程中,其姿态变化较小,因此可假设机体角加速度等于欧拉角加速度,忽略模型中科氏效应和陀螺效应力矩中的二阶小量部分,可得无人船旋翼模式动力学模型为

$$\begin{cases} \ddot{x}_E = (c\psi U_1 - s\phi s\psi U_2) / m \\ \ddot{y}_E = (s\psi U_1 + s\phi c\psi U_2) / m \\ \ddot{z}_E = (-c\phi U_2 + mg) / m \\ \ddot{\phi} = [U_3 + M_{rx}^b - (I_z - I_y)qr] / I_x \\ \ddot{\theta} = [M_{dy}^b - (I_x - I_z)pr] / I_y \\ \ddot{\psi} = [U_4 + M_{rz}^b - (I_y - I_x)pq] / I_z \end{cases} \quad (24)$$

式中 $\ddot{\phi}$ ——横滚角加速度

$\ddot{\theta}$ ——俯仰角加速度

$\ddot{\psi}$ ——航向角加速度

由式(23),取虚拟控制量为 $n_1^2 s\alpha$ 、 $n_2^2 s\alpha$ 、 $n_1^2 c\alpha$ 、 $n_2^2 c\alpha$,可得无人船旋翼模式控制分配模型为

$$\begin{bmatrix} n_1^2 s\alpha \\ n_2^2 s\alpha \\ n_1^2 c\alpha \\ n_2^2 c\alpha \end{bmatrix} = \mathbf{B}^{-1} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 2C_T & 2C_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2C_T & 2C_T \\ 0 & 0 & -2C_T & 2C_T \\ -2C_T & 2C_T & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中 \mathbf{B}^{-1} ——控制分配矩阵

1.4 水面张力估算模型

水面张力是指液体表面层由于分子引力不均衡而产生的沿浮船表面作用于水面界线上的张力,水面张力与液面相切,并与液面的任何两部分分界线垂直。本文设计的水空两栖倾转多旋翼无人船底部浮板与水面有很大的接触面,在无人船水面起飞的瞬间,无人船系统会受水面张力影响导致姿态不稳。因此结合无人船起飞时姿态动作和抬升方式,对无人船水面起飞时受到的水面张力进行建模。

由于图3所示的浮板形状会增加无人船的水面张力建模的复杂性,考虑到长方体周长与浮板周长近似相等,因而将无人船浮板近似为长方体,长、宽、高分别为 l 、 y 、 h , $l = L + y/2$ 。假设整机重心不发生水平移动,无人船水面起飞示意如图4所示,无人船前端先抬起,后端再抬起使整机脱离水面。

估算无人船水面张力模型时,需考虑俯仰角 $\theta_k = 0$ 和底面中心与水面的距离 $r_k = 0$ 的情况,记无人船与水面接触的边缘长度为 d ,则

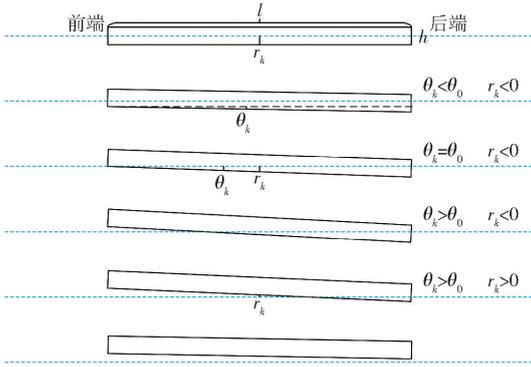


图4 无人船水面起飞示意图(时序从上到下)
Fig. 4 Schematic of unmanned ship taking off from water surface (Time sequence from top to bottom)

$$\theta_0 = \arctan \frac{2|r_k|}{l} \quad (27)$$

式中 θ_0 ——无人船前端脱离水面时的俯仰角度

当俯仰角 $\theta_k < \theta_0$ 时

$$d = 2 \left(\frac{l}{c\theta_k} + y \right) \quad (28)$$

当俯仰角 $\theta_k \geq \theta_0$ 时

$$d = 2 \left(\frac{|r_k|c\theta_k}{s\theta_k} + \frac{l}{2c\theta_k} + y \right) \quad (r_k \leq 0) \quad (29)$$

$$d = 2 \left(\frac{l}{2c\theta_k} - \frac{r_kc\theta_k}{s\theta_k} + y \right) \quad (r_k > 0) \quad (30)$$

由表面张力概念,动力船脱离水面时受到的水面张力 F_s 为

$$F_s = Td \quad (31)$$

式中 T ——水面张力系数

1.5 无人船浮力估算模型

无人船的水面起飞过程中所受浮力会在极短的时间内发生较大变化,在此过程中,旋翼升力逐渐替代浮力以抵消无人船重力。浮力变化使旋翼升力突变,对倾转旋翼产生较大负荷,降低倾转结构使用寿命,甚至会造成无人船系统失控,因此建立无人船浮力估算模型。

在计算过程中忽略小部分横滚角变化带来的影响,并认定 r_k 始终将无人船的长边平分,无人船浸没在水中的体积 V_b 为:

$$\text{当俯仰角 } \theta_k < \theta_0 \text{ 时} \quad V_b = l|r_k|y \quad (32)$$

当俯仰角 $\theta_k \geq \theta_0$ 时

$$V_b = \frac{y}{2} \left(|r_k|c\theta_k + \frac{ls\theta_k}{2c\theta_k} \right) \left(\frac{|r_k|}{s\theta_k} + \frac{l}{2} \right) \quad (r_k \leq 0) \quad (33)$$

$$V_b = \frac{y}{2} \left(\frac{ls\theta_k}{2c\theta_k} - r_kc\theta_k \right) \left(\frac{l}{2} - \frac{r_k}{s\theta_k} \right) \quad (r_k > 0) \quad (34)$$

由阿基米德定律,无人船浮力 F_b 为

$$F_b = \rho g V_b \quad (35)$$

2 水面起飞控制系统

自抗扰控制 (Active disturbance rejection control, ADRC) 是由韩京清^[21]提出的一种不依赖对象模型的控制算法,该控制器由微分跟踪器、非线性控制率和扩张状态观测器组成。针对 ADRC 参数整定困难的问题,GAO^[22]提出了线性自抗扰控制算法 (Linear active disturbance rejection controller, LADRC)。

采用线性自抗扰控制算法^[23-25]设计无人船控制系统,并在无人船姿态控制器和高度控制器上进行估算模型补偿,控制结构如图5所示。

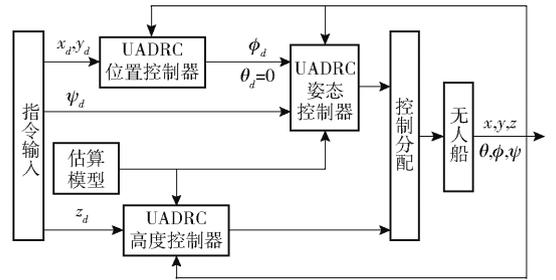


图5 无人船系统控制框图

Fig. 5 Unmanned ship system control block diagram

2.1 姿态控制器

MC-LADRC 姿态控制器由角度控制器、估算模型补偿器和线性扩张状态观测器 (Linear extended state observer, LESO) 3 个模块构成,如图6所示。其中估算模型补偿器通过无人船的实时姿态和高度信息估算出当前的水面张力和浮力。

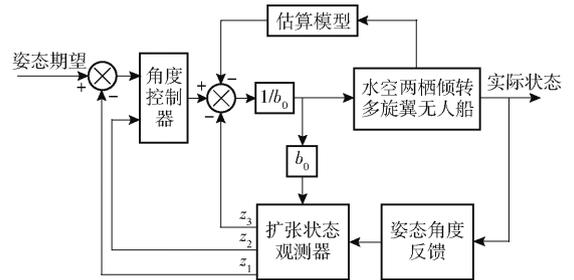


图6 无人船姿态控制框图

Fig. 6 Unmanned ship attitude control block diagram

由式(24)可知无人船三轴姿态模型相似,故以横滚控制器为例进行控制器设计说明,无人船横滚角模型为

$$\dot{\phi} = [U_3 + M_{rx}^b - (I_z - I_y)qr]/I_x + f_1 \quad (36)$$

式中 f_1 ——总扰动

根据 LADRC 算法,设计无人船横滚角控制器。

(1) 线性扩张状态观测器设计

对于无人船,采用二阶线性扩张状态观测器实

现对未知扰动的观测。定义 $z_1 = \phi, z_2 = \dot{\phi}$, 则横滚角的空间状态方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = f_1 + b_0 u \\ \phi = z_1 \end{cases} \quad (37)$$

式中 b_0 ——控制器参数 u ——控制量

假设 f_1 可微, 将其扩展为一个新的状态量 z_3 。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 + b_0 u \\ \dot{z}_3 = \dot{f}_1 \end{cases} \quad (38)$$

由 Luenberger 提出的状态观测器理论, LESO 方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = \beta_1 (\phi - \hat{z}_1) + \hat{z}_2 \\ \dot{\hat{z}}_2 = \beta_2 (\phi - \hat{z}_1) + \hat{z}_3 + b_0 u \\ \dot{\hat{z}}_3 = \beta_3 (\phi - \hat{z}_1) \end{cases} \quad (39)$$

式中 $\hat{z}_1, \hat{z}_2, \hat{z}_3$ ——LESO 的状态变量

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ ——观测器增益

通过适当选取 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, 可实现状态观测器对系统中各状态变量的跟踪。

LESO 对应的特征方程为

$$L^*(s) = s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3 \quad (40)$$

将观测器的 3 个极点统一配置到 s 平面左半实轴 $-w_0$ 处, 则为

$$L^*(s) = (s + w_0)^3 \quad (41)$$

从而可确定观测器增益为

$$\begin{cases} \beta_1 = 3w_0 \\ \beta_2 = 3w_0^2 \\ \beta_3 = w_0^3 \end{cases} \quad (42)$$

由式 (31)、(35)、(39), 确定估算建模后的 LESO 方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = 3w_0 (\phi - \hat{z}_1) + \hat{z}_2 \\ \dot{\hat{z}}_2 = 3w_0^2 (\phi - \hat{z}_1) + \hat{z}_3 + b_0 u \\ \dot{\hat{z}}_3 = w_0^3 (\phi - \hat{z}_1) - F_s - F_b \end{cases} \quad (43)$$

(2) 线性误差反馈控制率设计

采用 PD 算法搭建角度控制器, 其控制器方程为

$$\begin{cases} e = i - \hat{z}_1 \\ u_0 = k_p e - k_d \hat{z}_2 \\ u = (u_0 - \hat{z}_3) / b_0 \end{cases} \quad (44)$$

式中 i ——期望信号 e ——跟踪误差

u_0 ——虚拟控制量

k_p, k_d ——控制器增益

根据式 (44) 计算控制器传递函数

$$G(s) = \frac{k_d s^2}{s^2 + k_d s + k_p} \quad (45)$$

可得特征方程为

$$C(s) = s^2 + k_d s + k_p \quad (46)$$

将控制器的 2 个极点配置到 s 平面左半实轴 $-w_c$ 处, 则

$$C(s) = (s + w_c)^2 \quad (47)$$

从而可确定控制器增益为

$$\begin{cases} k_p = w_c^2 \\ k_d = 2w_c \end{cases} \quad (48)$$

由式 (43) 和式 (44), 加入水面张力估算模型补偿, 则控制量 u 为

$$u = [u_0 - \hat{z}_3 - (F_s + F_b)] / b_0 \quad (49)$$

2.2 位置控制器

考虑无人船在水面上的自由度受限, 难以完成定点控制, 所以只实现无人船旋翼模式的位置控制, 其位置控制框图如图 7 所示。

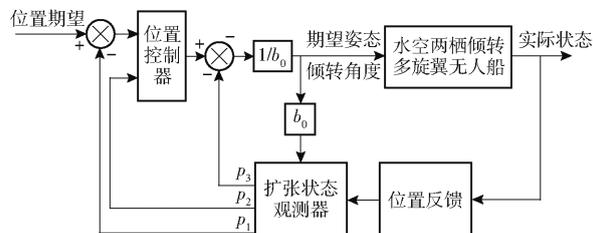


图 7 无人船位置控制框图

Fig. 7 Unmanned ship position control block diagram

控制器 LESO 方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{p}}_1 = 3w_0 (p_0 - \hat{p}_1) + \hat{p}_2 \\ \dot{\hat{p}}_2 = 3w_0^2 (p_0 - \hat{p}_1) + \hat{p}_3 + b_0 u \\ \dot{\hat{p}}_3 = w_0^3 (p_0 - \hat{p}_1) \end{cases} \quad (50)$$

式中 $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3$ ——LESO 状态变量

p_0 ——无人船大地坐标系下平面位置

线性误差反馈控制率为

$$\begin{cases} e = i - \hat{p}_1 \\ u_0 = k_p e - k_d \hat{p}_2 \\ u = (u_0 - \hat{p}_3) / b_0 \end{cases} \quad (51)$$

由 1.2 节可知, 通过旋翼倾角实现无人船 x 轴的平动, 无人船倾转结构执行部件为舵机, 考虑到舵机的延迟性以及倾转角度限制, 对 x 轴位置控制器输出进行限幅以及换算处理后再生成脉冲调制波输入到舵机, 无人船旋翼模式 y 轴位置控制方式与传统四旋翼无人机一致。

2.3 高度控制器

无人船在水面起飞过程中, 受水面张力和浮力影响, 会导致无人船高度在脱离水面的瞬间发生突

变,降低无人船的控制裕量,因此在无人船高度控制中加入估算模型补偿,平缓无人船的高度上升过程。无人船高度控制框图如图8所示。

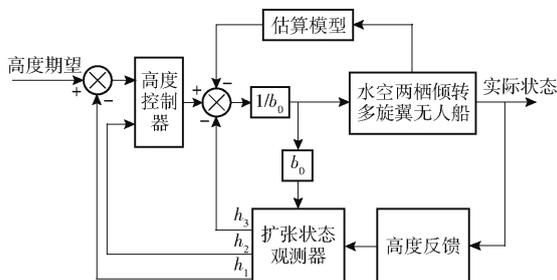


图8 无人船高度控制框图

Fig.8 Unmanned ship altitude control block diagram

控制器 LESO 方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{h}}_1 = 3w_0(z - \hat{h}_1) + \hat{h}_2 \\ \dot{\hat{h}}_2 = 3w_0^2(z - \hat{h}_1) + \hat{h}_3 + b_0 u \\ \dot{\hat{h}}_3 = w_0^3(z - \hat{h}_1) - F_s - F_b \end{cases} \quad (52)$$

式中 \hat{h}_1 、 \hat{h}_2 、 \hat{h}_3 ——LESO 状态变量

z ——无人船高度

线性误差反馈控制率为

$$\begin{cases} e = i - \hat{h}_1 \\ u_0 = k_p e - k_d \hat{h}_2 \\ u = [u_0 - \hat{h}_3 - (F_s + F_b)] / b_0 \end{cases} \quad (53)$$

3 实验与分析

3.1 仿真实验

结合 1.2 节无人船动力学模型,在 Matlab 中搭建无人船仿真模型,无人船参数如表 1 所示。

表 1 无人船参数

Tab.1 Unmanned ship parameters

参数	数值
无人船质量 m/kg	17.45
拉力系数 C_T	2.22×10^{-6}
力矩系数 C_R	5.54×10^{-8}
力臂 l_1/m	0.44
力臂 l_2/m	0.36
x 轴转动惯量 $I_x/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.17
y 轴转动惯量 $I_y/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.47
z 轴转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.80
旋翼转动惯量 $J_r/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	7.56×10^{-3}

考虑自然风、水面张力估算模型和浮力估算模型,设定扰动条件如下:用噪声功率 0.004,采样时间 0.01 s 的高斯白噪声模拟自然风扰动;对于高度,用振幅 4.9 m/s^2 ,频率 2π Hz,偏移 4.9 m/s^2 的余弦波模拟无人船 0 ~ 0.5 s 时受到的浮力及张力模型。

扰动波形如图 9 所示。

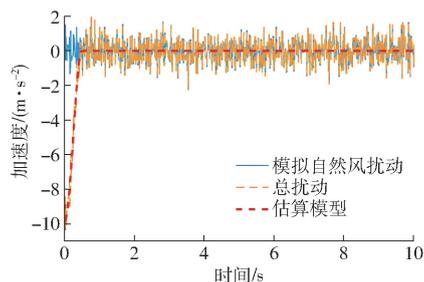


图9 仿真扰动波形

Fig.9 Simulation disturbance waveform

在仿真实验中,考虑到本文无人船部分模型不确定性和扰动的时变性,采用 PID 与 MC-LADRC 进行对比,控制器参数分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 MC-LADRC 控制器参数

Tab.2 MC-LADRC controller parameters

控制器	b_0	w_0	w_c
x 轴	25.000 0	800	3.2
y 轴	90.000 0	650	1.7
高度	0.002 0	800	3.1
俯仰	0.008 0	800	50.0
横滚	0.009 0	800	24.0
偏航	0.000 6	570	2.9

表 3 PID 控制器参数

Tab.3 PID controller parameters

控制器	k_p	k_i	k_d
x 轴	80	0	50
y 轴	10	0	0
高度	15.0	0	19.0
俯仰	8.5	0	1.0
横滚	8.5	0	1.0
偏航	14.5	0	5.0

无人船 x 轴位置、横滚角和高度控制波形对比如图 10 ~ 12 所示。

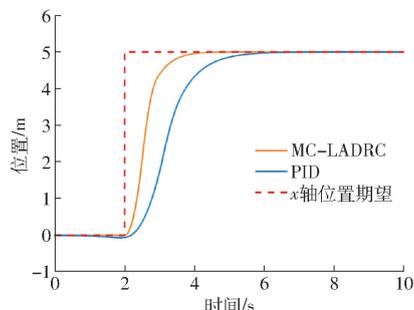


图 10 x 轴位置控制波形图

Fig.10 x -axis position control waveform

采用 MC-LADRC 控制方法,在加入扰动的情况下,角度控制器及位置控制器均能够完成收敛。由图 10 可知,在横滚轴上输入 $\pi/12 \sim -\pi/12$ 的方波期望,横滚角收敛时间为 0.44 s,且横滚角波动较

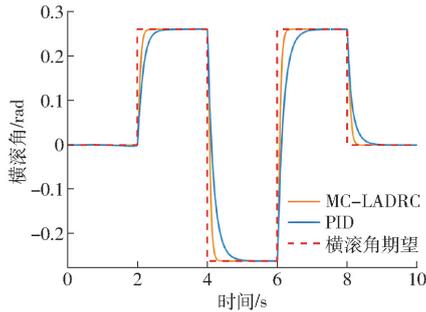


图 11 横滚角控制波形图

Fig. 11 Roll angle control waveform

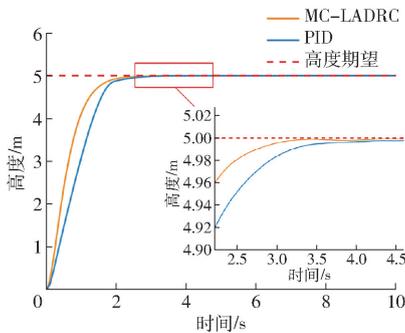


图 12 高度控制波形图

Fig. 12 Altitude control waveform

小;由图 11 可知,在 x 轴上输入 5 m 的期望, x 轴位置收敛时间为 3.10 s,且 x 轴位置波动较小;由图 12 可知,在高度上输入 5 m 的期望,高度收敛时间为 3.35 s,且高度波动在 $\pm 2 \times 10^{-3}$ m 之内。

在加入扰动的情况下,从控制器的收敛时间和波动值来看,PID 控制方法抗扰能力较差,收敛时间较长。无人船在实际水面起飞时受到自然风、时变的水面流体力(水面张力、浮力、水阻力等)等扰动影响,无人船姿态收敛较慢可能造成无人船失控翻船的情况。

PID 与 MC-LADRC 控制效果对比如表 4 所示,MC-LADRC 较 PID 算法 x 轴收敛时间减少 34.0%, x 轴波动提高 100.0%,但是 PID 控制效果下, x 轴波动频率较高;横滚收敛时间减少 66.7%,横滚波动减少 98.3%;高度收敛时间减少 41.2%,高度波动减少 80.0%。仿真结果表明 MC-LADRC 抗扰能力较强且控制器收敛时间较短。

表 4 MC-LADRC 和 PID 控制效果对比

Tab. 4 Control effect of MC-LADRC and PID

参考量	MC-LADRC	PID
x 轴收敛时间/s	3.10	4.70
x 轴波动/m	$\pm 2.00 \times 10^{-3}$	$\pm 1.00 \times 10^{-3}$
横滚收敛时间/s	0.44	1.32
横滚波动/rad	$\pm 3.00 \times 10^{-5}$	$\pm 1.00 \times 10^{-3}$
高度收敛时间/s	3.35	5.70
高度波动/m	$\pm 2.00 \times 10^{-3}$	$\pm 1.50 \times 10^{-2}$

3.2 水面起飞实验

为验证水空两栖倾转多旋翼无人船的水面起飞能力以及水面起飞过程中的姿态稳定性,在江苏省镇江市某水域(32°12'15"N,119°30'43"E)进行无人船水面起飞实验,实验环境风力为 1 级风,实验现场如图 13 所示。



图 13 无人船水面起飞实验场地

Fig. 13 Unmanned ship surface takeoff experimental site

无人船在水面起飞过程中,控制系统通过调节姿态可以使其位置稳定,但是对无人船水面起飞影响较大;因此在进行实际水面起飞实验时,关闭 x 轴和 y 轴的位置控制。无人船先后完成岸边起飞、空入水、水面航行、水跨空的实验任务,水面起飞过程如图 14 所示,无人船各项参数如表 5 所示。

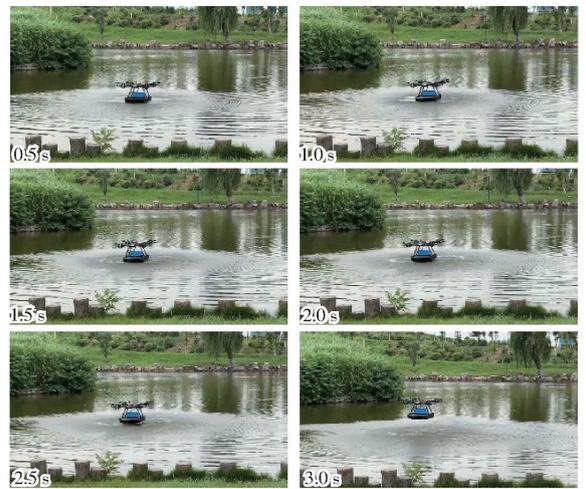


图 14 无人船水面起飞过程

Fig. 14 Unmanned ship surface takeoff experiment

表 5 无人船实验参数

Tab. 5 Unmanned ship experimental parameters

参数	数值
浮板长方体长 L /m	1.02
浮板长方体宽 b /m	0.54
浮板高 h /m	0.11
重力加速度 g /($m \cdot s^{-2}$)	9.80
实验水域液体密度 ρ /($kg \cdot m^{-3}$)	998.00
无人船前端脱离水面时俯仰角 θ_0 /(°)	3.55
水面张力系数 T /($N \cdot m^{-1}$)	0.07

无人船水面起飞过程及飞行任务中,为保证无人船顺利从水面起飞,在无人船水面起飞过程中,关闭无人船 x 轴和 y 轴的位置控制器。

以无人船起飞前机体系为坐标系,无人船 x 轴位置、 y 轴位置、高度波形如图 15 所示,无人船在 6.5 s 时降落,停止记录数据并将数据置零。

由图 15a 和图 15b 可知,无人船 x 轴和 y 轴位置在水面起飞过程中均有一定的偏移,在 2.7 s 处,无人

船脱离水面后, x 轴和 y 轴位置逐渐跟随期望,控制效果有一定滞后,但在可接受范围内。由图 15c 可知,无人船起飞时高度上升过程平稳,不存在高度突变的现象,无人船飞行高度稳定攀升到 1.2 m,并完成飞行任务,无人船高度控制误差小于 0.1 m。

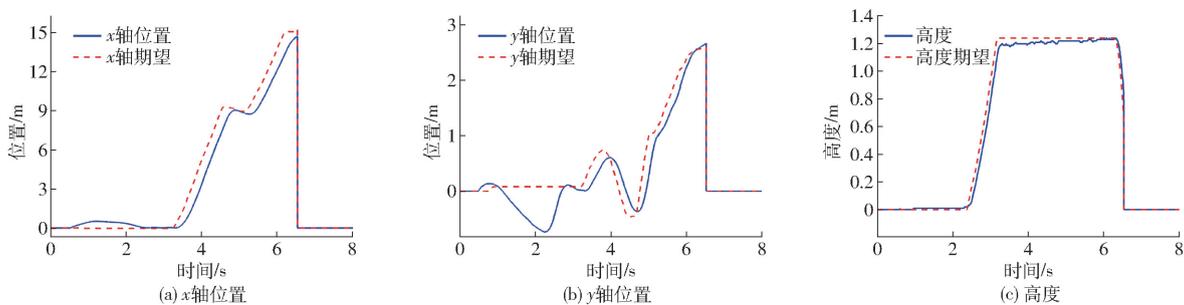


图 15 无人船位置波形图

Fig. 15 Unmanned ship position waveform

无人船水面起飞过程(时间 0 ~ 3 s)中,俯仰角、横滚角、偏航角波形如图 16 所示。在无人船旋翼起转到完成水面起飞过程中,船体姿态有一定的波动,俯仰角波动在 2° 以内,横滚角波动在 3° 以内,偏航角波动在 2° 以内;无人船在起飞过程中,俯仰角波动符合本文提到的无人船起飞时的姿态动作(即前端先抬起脱离水面,后端再抬起完成水面起飞),无人船完成水面起飞后,船体姿态可以迅速稳定,完成高度攀升;实验结果证明了 MC-LADRC 的有效性和鲁棒性。

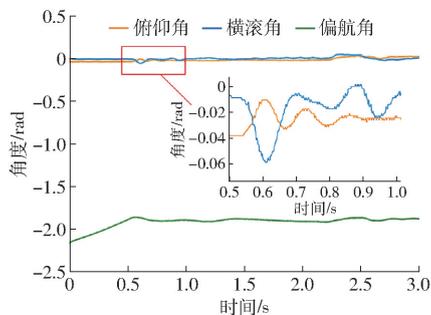


图 16 无人船姿态角度波形图

Fig. 16 Unmanned ship attitude angle waveform

4 结论

(1) 为保障水空两栖倾转多旋翼无人船的跨域作业质量,提高作业安全性和鲁棒性,本文提出一种基于模型补偿的线性自抗扰水面起飞控制算法。首先对水空两栖倾转多旋翼无人船多模态模型进行详细建模,构建控制分配矩阵;其次通过无人船水面起飞的实时姿态,建立无人船水面张力估算模型和浮力估算模型;最后,引入补偿系数,设计基于 MC-LADRC 的无人船水面起飞控制器。

(2) 仿真实验结果表明,MC-LADRC 较 PID 算法 x 轴、横滚和高度收敛时间分别减少 34.0%、66.7% 和 41.2%,横滚和高度波动分别减少 98.3% 和 80.0%;证明了 MC-LADRC 能减少无人船的姿态收敛时间,提高无人船抗扰能力和稳定性。

(3) 无人船水面起飞实验结果表明,MC-LADRC 在水空两栖倾转多旋翼无人船的水面起飞控制上表现良好。在无人船水面起飞过程中,俯仰角波动及偏航角波动小于 2° ,横滚角波动小于 3° ,高度上升曲线平缓,证明本文方法能够有效提高无人船实际跨域作业的安全性和鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] 霍雨佳,李一平,封锡盛. 基于深度强化学习的水空跨域机器人水面起飞运动控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(12): 139-150.
HUO Yujia, LI Yiping, FENG Xisheng. Water-surface take-off control of aquatic-aerial trans-domain robot with reinforcement learning[J]. Electric Machines and Control, 2019, 25(12): 139-150. (in Chinese)
- [2] 陈怀远. 跨介质飞行器设计及流体动力学特性分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019.
CHEN Huaiyuan. The design and analysis of fluid dynamic characteristics for submersible unmanned aerial vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [3] ZHANG Hanwen, ZENG Zheng, YU Caoyang, et al. Predictive and sliding mode cascade control for cross-domain locomotion of a coaxial aerial underwater vehicle with disturbances[J]. Applied Ocean Research, 2020, 100: 102183.
- [4] 苏波,江磊,刘宇飞,等. 移动机器人跨域跃质关键技术综述[J]. 兵工学报, 2023, 44(9): 2556-2567.
SU Bo, JIANG Lei, LIU Yufei, et al. A review of key technologies for cross-domain and trans-medium of mobile robotics[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(9): 2556-2567. (in Chinese)

- [5] 夏元清, 谢超, 高寒, 等. 天空地一体化网络环境下多运动体系系统跨域协同控制与智能决策[J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1176-1199.
XIA Yuanqing, XIE Chao, GAO Han, et al. Cross-domain cooperative control and intelligent decision-making of multi-dynamic agents in space-air-ground integrated network environment: a review[J]. Control and Decision, 2019, 38(5): 1176-1199. (in Chinese)
- [6] LU Di, XIONG Chengke, ZHOU Hexiong, et al. Design, fabrication, and characterization of a multimodal hybrid aerial underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2020, 219: 108324.
- [7] STWART W, WEISLER W, MACLEOD M, et al. Design and demonstration of a seabird-inspired fixed-wing hybrid UAV-UUV system[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2018, 13(5): 056013.
- [8] ZUFFEREY R, ANCEL O A, FARINHA A, et al. Consecutive aquatic jump-gliding with water-reactive fuel[J]. Science Robotics, 2019, 4(34): eaax7330.
- [9] ALZU'BI H, MANSOUR L, RAWASHDEH O. Loon copter: implementation of a hybrid unmanned aquatic-aerial quadcopter with active buoyancy control[J]. Journal of Robotic Systems, 2018, 35(5): 764-778.
- [10] LIU Huanxiao, MENG Zihan, YANG Xiaofei, et al. The controller design of the water-aerial vehicle based on variable gain PID[C]//2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2020.
- [11] HU Junhua, XU Baowei, FENG Jinfu, et al. Research on water-exit and take-off process for morphing unmanned submersible aerial vehicle[J]. China Ocean Engineering, 2017, 31(2): 202-209.
- [12] MA Zongcheng, FENG Jinfu, YANG Jian. Research on vertical air-water trans-media control of hybrid unmanned aerial underwater vehicles based on adaptive sliding mode dynamical surface control[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15(2): 172988141877053.
- [13] 颜奇民, 胡俊华, 陈国明, 等. 双层四旋翼跨介质飞行器水空跨越建模与控制[J]. 飞行力学, 2020, 38(5): 50-56.
YAN Qimin, HU Junhua, CHEN Guoming, et al. Modeling and control of air-water crossing of a double-layer quadcopter trans-media vehicle[J]. Flight Dynamics, 2020, 38(5): 50-56. (in Chinese)
- [14] 姚倩倩, 齐国元. 四旋翼无人机系统模型补偿最优控制[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(11): 2061-2070.
YAO Qianqian, QI Guoyuan. Model compensation optimal control for quadrotor UAV system [J]. Control Theory & Applications, 2024, 41(11): 2061-2070. (in Chinese)
- [15] 沈跃, 叶华生, 沈亚运, 等. 一种基于矢量四旋翼的水空两栖飞行器及控制方法: CN20221001944.0[P]. 2022-09-20.
- [16] 许景辉, 马贺, 周建峰, 等. 倾转三旋翼垂直起降无人机悬停姿态控制[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 16-22.
XU Jinghui, MA He, ZHOU Jianfeng, et al. Hovering attitude control of tilt rri-rotor VTOL aircraft[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 16-22. (in Chinese)
- [17] 郑礼雄, 王博, 招启军, 等. 倾转旋翼机多模态耦合动力学建模和气弹稳定性参数影响[J]. 航空动力学报, 2025, 40(3): 20230445.
ZHENG Lixiong, WANG Bo, ZHAO Qijun, et al. Multi-mode coupling dynamic modeling and influence analysis of aeroelastic stability parameters of tiltrotor aircraft[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(3): 20230445. (in Chinese)
- [18] 朱立成, 赵智宇, 韩振浩, 等. 基于自抗扰控制的双重转向运动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 391-401.
ZHU Licheng, ZHAO Zhiyu, HAN Zhenhao, et al. Design and experiment of dual-steering control system based on active disturbance rejection control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 391-401. (in Chinese)
- [19] 刘雨青, 向军, 曹守启. 基于改进蚁群算法的水下自主航行机器人路径规划[J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(3): 536-544.
LIU Yuqing, XIANG Jun, CAO Shouqi. AUV path planning based on improved ant colony algorithm [J]. Computer Engineering & Science, 2022, 44(3): 536-544. (in Chinese)
- [20] 徐旻, 吴炎焯, 王正杰, 等. 小型涵道风扇无人机自适应解耦控制律设计[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(3): 235-238, 301.
XU Min, WU Yanxuan, WANG Zhengjie, et al. Design of adaptive decoupling control law for miniature duct-fan UAV[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(3): 235-238, 301. (in Chinese)
- [21] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [22] GAO Zhiqiang. Scaling and parameterization based controller tuning[C]//American Control Conference, 2003.
- [23] 陈学深, 方贵进, 马旭, 等. 基于线性自抗扰的稻田除草对行控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 19-27.
CHEN Xuoshen, FANG Guijin, MA Xu, et al. Design and experiment of control system for weeding alignment in rice field based on linear active disturbance rejection control[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 19-27. (in Chinese)
- [24] 刘一莎, 杨晟萱, 王伟. 四旋翼飞行器的自抗扰飞行控制方法[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1351-1360.
LIU Yisha, YANG Shengxuan, WANG Wei. An active disturbance-rejection flight control method for quad-rotor unmanned aerial vehicles[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(10): 1351-1360. (in Chinese)
- [25] 夏明海, 朱群为, 殷谦, 等. 模块化仿生波动推进器设计与控制研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 513-522.
XIA Minghai, ZHU Qunwei, YIN Qian, et al. Design and control of modular bionic undulating fin propeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 513-522. (in Chinese)