

航磁探测下多旋翼无人机自适应稳定飞行控制研究

何嘉幸¹, 曾智², 李砚¹, 马桂芳¹, 张清¹

(1. 广西地震局, 南宁 530022; 2. 江苏省地震局, 南京 210000)

摘要: 多旋翼无人机在航磁探测中面临磁场干扰、风场变化和机械抖振的挑战, 这些干扰导致无人机姿态偏移、轨迹不稳和数据失真; 为了保证多旋翼无人机能够在执行航磁探测时的安全飞行, 提出航磁探测下多旋翼无人机自适应稳定飞行控制方法; 在考虑多旋翼无人机组成结构和工作原理的情况下, 模拟航磁探测下多旋翼无人机稳定飞行过程, 获取无人机飞行位姿; 解算多旋翼无人机飞行位姿, 作为控制方法的初始数据; 从磁场、风场和机械抖振 3 个方面检测无人机的干扰状态, 以计算的飞行控制量为基础, 从干扰补偿、抖振抑制、位姿自适应控制等步骤, 实现多旋翼无人机航磁探测自适应稳定飞行控制; 实验结果表明, 在单一干扰和复合干扰环境下, 应用优化设计控制算法的多旋翼无人机飞行稳定系数明显升高, 地磁强度探测误差平均值为 0.8 毫高斯。

关键词: 多旋翼无人机; 航磁探测; 自适应控制; 稳定飞行控制; 无人机控制

Research on Adaptive Stable Flight Control of Multi-Rotor UAVs under Aeromagnetic Detection

HE Jiaying¹, ZENG Zhi², LI Yan¹, MA Guifang¹, ZHANG Qing¹

(1. Guangxi Seismological Bureau, Nanning 530022, China;

2. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210000, China)

Abstract: Multi-rotor unmanned aerial vehicles (UAVs) face the challenges of magnetic field interference, wind field variation and mechanical jitter in aeromagnetic detection, which lead to UAV attitude shift, trajectory instability and data distortion. In order to ensure that multi-rotor UAVs can fly safely when performing an aeromagnetic detection, an adaptive stabilization flight control method for multi-rotor UAVs under the aeromagnetic detection is proposed. By considering the composition structure and working principle of an multi-rotor UAV, the stabilized flight process of the multi-rotor UAV under the aeromagnetic detection is simulated to obtain the UAV's flight position. The solved multi-rotor UAV flight position is used as the initial data of the control method. The disturbance state of the UAV is detected from three aspects: magnetic field, wind field and mechanical vibration, and the calculated flight control quantity is used as the basis for realizing the adaptive and stable flight control of the multi-rotor UAV under the aeromagnetic detection in terms of the steps of disturbance compensation, vibration suppression, and attitude adaptive control. Experimental results show that in single interference and composite interference environments, the optimized design control algorithm obviously improves the flight stability coefficient of the multi-rotor UAV, with an average detection error of 0.8 m Gauss for geomagnetic strength.

Keywords: multi-rotor UAV; aeromagnetic detection; adaptive control; stable flight control; drone control

0 引言

多旋翼无人机是一种具有 3 个及以上旋翼轴的无人驾驶旋翼飞行器, 因其独特的结构设计和飞行特性, 被广泛应用于测绘、安全监控、农业植保、航拍摄影等领域。航磁探测是多旋翼无人机的重要应用领域之一, 是

一种以无人机作为飞行平台, 搭载磁测仪器进行的地球磁场测量技术。该技术通过无人机的高机动性、低空飞行能力和精确控制, 实现对地球磁场强度、方向等参数的测量和收集, 为地球科学研究、矿产资源勘探、环境监测等领域提供重要的数据支持。由于多旋翼无人机在航磁探测过程中工作环境较为复杂, 存在风场、电磁等

收稿日期: 2024-07-16; 修回日期: 2024-09-14。

基金项目: 中国地震局 2024 年度震情跟踪定向工作任务(202402050)。

作者简介: 何嘉幸(1983-), 女, 硕士。

引用格式: 何嘉幸, 曾智, 李砚, 等. 航磁探测下多旋翼无人机自适应稳定飞行控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(9): 118-126.

因素的干扰,导致无人机面临严重的稳定飞行问题,不仅为无人机的飞行带来较大的安全隐患,还会影响航磁探测结果精度,为此研究多旋翼无人机航磁探测自适应稳定飞行控制成为研究的重点。

目前在无人机领域应用较为频繁的控制算法包括:文献[1]提出的基于扩张状态观测器的四旋翼无人机飞行控制算法、文献[2]提出的基于奇异摄动理论的无人机飞行控制算法、文献[3]提出的多飞行模式下尾座飞机的稳定控制算法、文献[4]提出的基于干扰补偿的四旋翼无人机控制算法以及文献[5]提出的重载荷多旋翼无人机自抗扰控制算法,其中文献[1]提出算法在深入剖析非线性、强耦合以及欠驱动等系统特性的基础上,利用非线性动态逆方法,针对四旋翼飞行器进行控制研究,为了应对无人机面临的强干扰及参数摄动挑战,引入了扩张状态观测器,实现了对无人机飞行性能的精准补偿和优化。上述算法的控制效果由扩张状态观测器决定,若观测器存在运行故障,则会直接影响对无人机飞行状态的观测结果,进而导致算法出现控制效果不佳的问题。文献[2]提出算法基于奇异摄动理论的反步法,使用测量数据生成飞行控制律,从而实现无人机的稳定飞行控制。上述算法的运行问题主要集中于其在实际应用中的复杂性和限制,可能面临模型失配和参数调整困难的问题,从而影响对无人机的控制效果。文献[3]提出算法采用基于互联和阻尼分配无源性控制技术,并补偿额外输入以处理未知动力学和时变扰动,提出基于无模型控制的全局控制器,在该控制器支持下,实现稳定飞行控制任务。上述算法能够支持飞行器的多种飞行模式,但控制对象主要为尾座飞机,将其应用到其他类型飞行器的控制工作中,无法保证控制效果。文献[4]提出算法通过姿态解算得到期望姿态,并针对四旋翼无人机姿态环设计具有强鲁棒性能的 IN-DI 姿态控制器,从而执行控制指令。上述算法能够对外部干扰进行补偿,但无法实现对内部运行偏差的有效控制,因此在该控制算法下的无人机依旧存在明显的飞行不稳定问题。另外,文献[5]提出算法在位置与姿态模型的基础上,开发自抗扰鲁棒控制算法,具体包括跟踪微分器、扩展状态观测器以及非线性误差反馈机制3个部分,旨在实现对重载荷多旋翼植保无人机的精准且鲁棒的操控,确保在各种条件下都能保持稳定的飞行性能。该控制算法主要针对的是处于重负载状态下的无人机,若无人机的飞行状态不为重负载状态,则无法保证控制效果。

综上所述,上述传统算法均存在不同程度的控制效果不佳的问题,为此以航磁探测工作状态下的多旋翼无人机为控制对象,对自适应稳定飞行控制算法进行优化设计。多旋翼无人机航磁探测自适应稳定飞行控制方法

的主要创新内容在于其针对航磁探测特殊应用场景,综合考虑了磁场、风场和机械抖振等多重干扰因素,设计了包括干扰补偿、抖振抑制和位姿自适应控制在内的自适应稳定飞行控制算法。该方法通过模拟航磁探测条件下的无人机飞行过程,获取飞行位姿数据,并基于实时飞行状态和环境参数动态调整控制策略,有效提升了无人机的飞行稳定性和航磁探测精度,特别是在复杂干扰环境下的表现尤为突出。

1 无人机稳定飞行控制方法

在针对多旋翼无人机在航磁探测中面临的磁场干扰、风场变化和机械抖振等挑战,提出了一种新的解决方案。该方案集成了精细化动力学模型与干扰建模、智能控制算法以及主动机械抖振抑制系统。通过实时测量与预测结合,动态调整磁力仪校准参数以补偿磁场干扰;利用风场估计的自适应飞行控制策略,优化飞行姿态和速度以对抗风场影响;同时,部署主动机械抖振抑制系统,实时监测并抑制机体振动,确保飞行稳定性和探测数据精度。这一设计不仅显著提高了航磁探测的准确性和可靠性,还增强了无人机在复杂环境中的自适应能力和稳定性。实验验证显示,该方法相较于传统方法展现出明显优势,具有较高的理论水平和实用价值。

1.1 航磁探测下多旋翼无人机动力学模型建立

基于多旋翼无人机的组成结构和工作原理,建立了无人机的动力学模型,并设定了稳定飞行的控制目标。模拟航磁探测下的飞行过程旨在验证模型的有效性并为控制指令的生成提供数据基础。以多旋翼无人机中的四旋翼无人机为例,无人机整体结构主要包括机架、动力系统以及控制系统三部分组成,机架部分以机身作为平台,承载螺旋桨、电机、电子调速器、信号接收器、飞行控制板等设备部件,机架中的机臂决定了四旋翼的轴距,即对角线上两电机轴心的距离^[6]。动力系统作为四旋翼无人机的核心,主要负责为其供应飞行所需的能量。它接收来自遥控器的指令信号,并通过4个电子调速器精确调控4个电机及螺旋桨的旋转速度。这种调控能够精准地调整无人机的升力和扭矩输出,从而实现多种飞行姿态,包括但不限于起降悬停、俯仰倾斜、横滚翻滚以及偏航转向等动作,确保了无人机在空中的灵活性和稳定性^[7]。指挥控制系统用来接收、发送和执行地面站的控制指令。根据牛顿-欧拉方程可以将四旋翼无人机的动力模型建立为:

$$\begin{cases} \mathbf{G}' + \mathbf{v} \times \mathbf{G} = \mathbf{J} \\ \mathbf{J} = \mathbf{F}_{\text{pull}} + \mathbf{F}_{\text{Reaction}} + \mathbf{J}_f \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{G}$ 为惯性张量矩阵, $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{v}'$ 分别为无人机绕每个坐标轴旋转的角速度及其一阶分量, $\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{J}_f$ 分别为力矩和阻力矩, $\mathbf{F}_{\text{pull}}$ 和 $\mathbf{F}_{\text{Reaction}}$ 对应的是四旋翼的拉力和

反作用力力矩。

在实际的飞行过程中,确保电池电量充足、机械结构完好情况下,动力系统被启动,电机带动螺旋桨开始旋转,为无人机提供必要的升力。一旦升力足够,无人机便能够垂直起飞,进入悬停状态。通过遥控器,操作人员可以精确控制无人机的飞行姿态和位置,实现前进、后退、左右平移、上升和下降等动作,在任务执行过程中,操作人员会根据实时情况调整无人机的飞行参数和姿态,确保任务的高效完成^[8]。任务完成后,无人机需要保持稳定的姿态和速度,通过遥控器逐渐降低螺旋桨的转速,使无人机平稳降落到预定地点。在受力平衡条件约束下,结合多旋翼无人机的飞行轨迹规划结果,得出多旋翼无人机稳定飞行控制目标 l 为:

$$l = m_{\text{aircraftg}} \left[\frac{(x - x_0)(y_e - y_0)}{x_e - x_0} + y_0 \right] \quad (2)$$

式中, (x_0, y_0) 和 (x_e, y_e) 分别表示多旋翼无人机稳定飞行规划轨迹的起始位置坐标和终点位置坐标,是基于多旋翼无人机在执行航磁探测任务时,需要精确控制其飞行轨迹和姿态以获取准确的地磁数据这一实际需求而设定的。这一控制目标直接关联到无人机的飞行控制系统设计,它要求无人机在飞行过程中能够按照预设的航线(从起始点到终点)稳定飞行,同时保持预定的姿态角,以确保磁力仪能够稳定地采集地球磁场的细微变化。受力平衡条件约束为:

$$m_{\text{aircraftg}} = 4 \times [F_{\text{propeller}} + (F_{\text{pull}} - F_{\text{Reaction}})] \quad (3)$$

式中 $m_{\text{aircraftg}}$ 为四旋翼无人机自身质量, $m_{\text{aircraftg}}$ 为无人机重力值, $F_{\text{propeller}}$ 表示的是任意旋翼产生的推力值。同理可以得出多旋翼无人机飞行姿态的稳定飞行条件,由此得出包含位置和姿态两个部分的飞行控制目标。

1.2 多旋翼无人机航磁探测流程

在航磁探测任务中,无人机的稳定飞行对于获取准确的地磁数据至关重要。因此,确定了无人机的稳定飞行控制目标,即确保无人机在受力平衡的条件下,按照预定的轨迹和姿态进行飞行。多旋翼无人机航磁探测过程的模拟可以确定无人机的飞行工况,确定航磁探测过程中多旋翼无人机可能遇到的稳定干扰因素,进而确定多旋翼无人机稳定飞行控制对象。综合考虑四旋翼无人机的内部组成结构和工作原理,按照图 1 表示过程执行航磁探测任务。

航磁探测的最终目的是利用航空平台搭载的高精度磁力仪来测量地球磁场的细微变化,进而推断出地下地质结构、矿产分布、构造特征等信息。在航磁探测之前,首先确定探测区域,根据地形、地貌和探测需求规划合理的航线布局,确保无人机能够全面覆盖目标区域。同时,选择合适的无人机平台和磁力仪设备,将其安装到多旋翼无人机设备上^[9]。

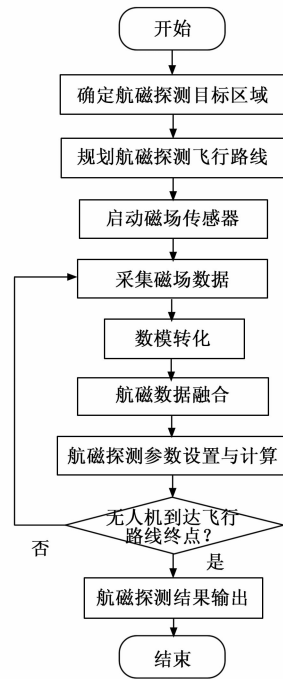


图 1 多旋翼无人机航磁探测流程图

1.3 航磁探测下多旋翼无人机稳定飞行位姿获取

在飞行阶段,多旋翼无人机搭载高精度磁力仪设备起飞,并按照预设的航线进行飞行。在飞行过程中,无人机需要实时采集地球磁场数据,根据实际情况对航线进行调整和优化。多旋翼无人机航磁探测结果包括磁化强度 $Q_{\text{magnetization}}$ 、磁化率 δ 、磁力异常值 Y 等,上述航磁参数的探测结果为:

$$\begin{cases} Q_{\text{magnetization}} = \frac{n \times I}{L} \\ \delta = \frac{Q_{\text{magnetization}}}{Q_c} \\ Y = Q_{\text{observation}} - Q_{\text{reference}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, n 、 I 和 L 分别表示的是四旋翼无人机上安装磁场传感器的励磁线圈匝数、磁励电流和有效磁路长度, Q_c 、 $Q_{\text{observation}}$ 和 $Q_{\text{reference}}$ 分别表示的是磁化强度、磁场强度、磁场强度的观测值和参考值。另外,地磁场三分量的探测结果如下:

$$\begin{bmatrix} \theta_{cx} \\ \theta_{cy} \\ \theta_{cz} \end{bmatrix} = l \begin{bmatrix} \delta \cos \theta_q \cos \theta_p \\ \delta \cos \theta_q \sin \theta_p \\ \delta \cos \theta_q \sin \theta_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, θ_q 和 θ_p 分别为磁倾角和磁偏角^[10]。按照上述方式可以得出四旋翼无人机所处环境中任意位置上磁场数据的采集结果,进而得出航磁探测结果。在磁场作用下,多旋翼无人机的飞行参数变化情况可以表示为:

$$\begin{cases} x_{\text{magnetism}} = Q_{\text{magnetization}} \times x \times \theta_c \cos \varphi \\ y_{\text{magnetism}} = Q_{\text{magnetization}} \times y \times \theta_c \sin \varphi \\ \vartheta_{\text{magnetism}} = \vartheta + \varphi \end{cases} \quad (6)$$

其中: (x, y) 为多旋翼无人机飞行位置坐标, φ 为磁场方向角, ϑ 为无人机飞行姿态角。

通过模拟飞行和航磁探测过程, 获取了航磁探测下多旋翼无人机的稳定飞行位姿, 这为后续的稳定飞行控制策略设计提供了重要的参考依据。

1.4 解算多旋翼无人机飞行位姿初始控制数据

在解算多旋翼无人机在航磁探测中的飞行位姿初始控制数据时, 提出了一种创新性的方法, 该方法不仅深入分析了遥控信号传输机理, 还结合了无人机动力学模型与航磁探测特性, 实现了对无人机飞行位姿的精确解算与动态跟踪^[11]。通过精确记录遥控信号的发送时间、发送角度以及无人机的回应时间, 并融合无人机姿态传感器数据, 构建了一个高精度的飞行位置解算模型。这一模型不仅考虑了信号传输的延迟与误差, 还通过算法优化减少了外部环境因素(如磁场干扰、风场变化)对解算结果的影响。此外, 引入了先进的滤波技术和预测算法, 对飞行位姿进行实时校正与未来预测, 从而确保了无人机在复杂环境下的稳定飞行与精准探测。

在已知遥控器位置 prc 的情况下, 记录遥控信号的发送时间、发送角度 θ_r 以及无人机的响应时间 $t_{response}$ 。通过这些参数, 可以估算出无人机相对于遥控器的位置, 如公式 (7) 所示:

$$pdrone^{rel} = prc + v_{drone} \cdot t_{response} \cdot \frac{d(\theta_r)}{|d(\theta_r)|} \quad (7)$$

其中: $d(\theta_r)$ 为根据发射角度计算出的方向向量, v_{drone} 为无人机的速度。

为了获得无人机的绝对位置, 集成了 GPS 系统。GPS 接收器直接提供无人机的经纬度及高度信息 p_{drone}^{abs} , 这些信息与遥控信号的相对位置估算相结合, 可以进一步提高位置解算的准确性和可靠性。因此, 在实际应用中, 无人机的最终位置通常是由 GPS 数据和遥控信号数据综合得出的。

将相关数据代入到公式 (7) 中, 即可完成对多旋翼无人机飞行位置的更新与跟踪。

另外多旋翼无人机的飞行姿态主要利用内置到无人机中的传感器设备对位姿角度进行直接采集, 传感器与无人机通过稳定的通信界面相连, 确保数据的实时传输和处理, 定期从传感器读取数据, 以融合陀螺仪和加速度计的信息, 从而得到精确的偏航角、横滚角和俯仰角采集结果^[12]。那么多旋翼无人机绕 Z 轴转动位姿可以表示为:

$$Z(z) = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_{Yaw} - \vartheta) & -\sin(\vartheta_{Yaw} - \vartheta) & 0 \\ \sin(\vartheta_{Yaw} - \vartheta) & \cos(\vartheta_{Yaw} - \vartheta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: ϑ_{Yaw} 为传感器输出的偏航角, 按照上述方式可以得出多旋翼无人机绕 X 和 Y 轴转动位姿的解算结

果。重复上述操作, 对多旋翼无人机实时飞行位姿进行更新, 完成位姿数据的解算工作。

1.5 实现多旋翼无人机航磁探测自适应稳定飞行控制

1.5.1 计算无人机航磁探测自适应稳定飞行控制量

在航磁探测任务中, 多旋翼无人机需克服磁场干扰、风场变化和机械抖振等多重挑战, 以确保稳定飞行和精确探测。为此, 模拟了航磁探测下的无人机稳定飞行过程, 深入考虑了其组成结构和工作原理, 成功获取了无人机的飞行位姿。进而, 基于计算得到的飞行控制量, 对无人机的飞行位姿进行精确解算。为了实现对无人机航磁探测自适应稳定飞行控制, 从位姿、速度偏差和干扰补偿等方面, 计算多旋翼无人机航磁探测工作的稳定飞行控制量。这一步骤不仅能够实时反应无人机的飞行状态, 为自适应稳定飞行控制提供准确依据, 确保航磁探测的准确性和效率。

计算多旋翼无人机航磁探测工作的稳定飞行控制量, 其中位姿和速度控制量的计算公式如下:

$$\begin{cases} K_p = [x(t) - x_m] + [y(t) - y_m] \\ K_z = Z(z) - Z_m \\ V = V_t - V_c \end{cases} \quad (9)$$

其中: (x_m, y_m) 和 Z_m 分别为多旋翼无人机的飞行目标位置和目标姿态, V_t 表示目标速度, V_c 表示当前速度。根据公式 (9) 计算结果的正负属性, 确定多旋翼无人机的控制方向^[11]。另外多旋翼无人机飞行干扰补偿量的计算, 需要对多旋翼无人机航磁探测干扰状态进行检测。执行航磁探测工作中的多旋翼无人机在飞行过程中会受到环境因素、磁场条件以及无人机内部振动等因素的影响, 采用数据采集、特征提取以及特征匹配等方式, 判定当前多旋翼无人机是否处于干扰状态, 并确定具体的干扰类型。稳态干扰磁场包括剩余磁场和感应磁场, 假定飞机上的磁性物体均为均匀磁化体, 且各磁性体刚性连接, 那么磁场稳态干扰场的分布情况如图 2 所示。

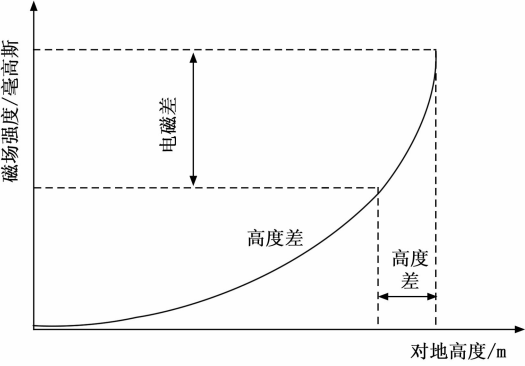


图 2 多旋翼无人机探测磁场稳态干扰场分布图

图 2 表示的稳态干扰磁场可以量化表示为:

$$H_{\text{magnetism}} = \kappa \cdot r_{\text{Geomagnetism}} V(\cos X + \cos Y + \cos Z) \quad (10)$$

其中: κ 为磁场的强度系数, $r_{\text{Geomagnetism}}$ 为地磁信号, $\cos X$ 、 $\cos Y$ 和 $\cos Z$ 为地磁场方向分别和多旋翼无人机坐标系 x 、 y 和 z 轴夹角的余弦^[13]。在已知稳态干扰磁场分布的情况下, 多旋翼无人机的实际飞行和探测航磁特征可以表示为 $\tau_{\text{c-fly}}$ 和 $\tau_{\text{c-detect}}$ 。按照多旋翼无人机飞行与航磁探测过程的模拟结果, 获取实际飞行与探测数据, 并利用公式 (11) 对多旋翼无人机的工作特征进行提取。公式 (11) 通过对无人机飞行过程中采集到的实际飞行数据和航磁探测数据进行处理, 提取出关键特征, 这些特征不仅为后续的磁场干扰、风场干扰及机械干扰的检测提供了基础数据支持, 还直接参与到控制策略的调整和稳定飞行控制量的计算中。通过对比这些特征与无干扰状态下的标准特征, 能够及时发现并量化无人机所受的各类干扰, 进而采取相应的补偿措施, 确保无人机在复杂环境下能够稳定执行航磁探测任务。

$$\begin{cases} \tau_{\text{fly}} = H_{\text{magnetism}} \sum_{i=1}^{N_{\text{fly}}} (K_p + K_z) u_{\text{fly}}(i) \\ \tau_{\text{detect}} = H_{\text{magnetism}} \sum_{i=1}^{N_{\text{detect}}} (K_p + K_z) u_{\text{detect}}(i) \end{cases} \quad (11)$$

其中: $u_{\text{fly}}(i)$ 和 $u_{\text{detect}}(i)$ 为多旋翼无人机飞行和航磁探测的第 i 个采集数据, K_p 为多旋翼无人机在飞行过程中所受到的比例增益, K_z 为多旋翼无人机在航磁探测过程中所记录的磁场特征值, N_{fly} 和 N_{detect} 为无人机飞行和航磁探测数据的总采集数量^[14]。那么多旋翼无人机磁场干扰 s_c 的检测结果为:

$$s_c = \frac{\tau_{\text{fly}} \cdot \tau_{\text{c-fly}}}{\|\tau_{\text{fly}}\| \cdot \|\tau_{\text{c-fly}}\|} \cdot \frac{\tau_{\text{detect}} \cdot \tau_{\text{c-detect}}}{\|\tau_{\text{detect}}\| \cdot \|\tau_{\text{c-detect}}\|} \quad (12)$$

将提取的多旋翼无人机工作特征提取结果代入到公式 (12) 中, 若计算得出 s_c 的值高于阈值 s'_c , 则证明当前多旋翼无人机航磁探测环境存在磁场干扰, 否则检测结果表示无人机航行环境无磁场干扰。考虑风场的叠加性和多变性, 对风场环境进行模拟, 确定风场与多旋翼无人机之间的影响关系。鉴于四旋翼无人机采用骨架式结构设计, 其机身与空气的接触面相对较小, 因此, 在飞行过程中, 风速对机身的直接作用影响可忽略, 而主要聚焦于风速对旋翼的影响分析^[15]。此外, 为简化计算, 风速梯度的影响也不在此次考量之列。根据风场特性的叠加性原理, 结合切变风和大气紊流的特点, 进行了风场叠加计算, 从而构建了一个抗风性能测试的叠加风场, 可以量化表示为:

$$W = V_{\text{wind}} + V_{\text{tur}} \quad (13)$$

其中: V_{wind} 和 V_{tur} 分别为切变风和大气紊流的风速值。根据实时风场分布, 将风扰作为风扰因子加入动力

学模型中, 确定风场干扰下多旋翼无人机的标准工作特征^[16]。按照相同的特征提取与匹配方式, 判断多旋翼无人机的飞行环境中是否存在风场干扰。机械干扰就是检测多旋翼无人机是否存在内部干扰, 从而产生抖振现象, 利用加速度传感器测量无人机在飞行过程中产生的加速度变化, 结合角速度和角度变化率的检测结果, 判定多旋翼无人机是否存在机械干扰。多旋翼无人机存在机械干扰的判定条件如下:

$$\tau_{\text{dithering}} \geq \xi \quad (14)$$

式中, $\tau_{\text{dithering}}$ 为提取的多旋翼无人机飞行抖动幅值特征, ξ 为设定的抖动幅值阈值条件^[17]。若提取的无人机飞行抖动幅值满足公式 (14) 表示条件, 则证明当前多旋翼无人机存在内部机械干扰。最终将航磁探测磁场干扰、风场干扰和机械干扰的检测结果进行融合输出, 完成多旋翼无人机航磁探测干扰状态的检测工作, 并得出多旋翼无人机航磁探测干扰控制量的计算结果为:

$$B = b_c + b_w + b_d + s_c \quad (15)$$

式中, b_c 、 b_w 和 b_d 分别表示的是磁场干扰量、风场干扰量和机械振动干扰量。结合多旋翼无人机电机以及各旋翼与飞行状态之间的关系, 推导出直接作用在电机和驱动器上的控制量^[18]。

根据多旋翼无人机实时飞行状态的跟踪检测结果, 对位姿控制量以及环境干扰补偿量的计算结果进行自适应调整与更新, 得出执行航磁探测任务下多旋翼无人机稳定飞行控制量的自适应计算结果。

1.5.2 生成并执行无人机自适应稳定飞行控制指令

在航磁探测任务中, 多旋翼无人机的自适应稳定飞行控制是确保数据精确采集与任务顺利执行的关键。以航磁探测自适应稳定飞行控制量的计算结果为控制内容, 从干扰补偿、抖振抑制等方面, 生成稳定飞行控制指令, 完成航磁探测任务执行状态下多旋翼无人机的自适应飞行控制。

1) 干扰补偿控制:

综合考虑多旋翼无人机执行的航磁探测任务, 针对磁场、风场环境, 对外界干扰进行自适应补偿控制。图 3 表示的是磁场干扰自适应补偿控制过程。

针对磁场、风场等外界环境干扰, 无人机需实施自适应补偿控制。通过机载传感器实时获取地磁场强度和方向数据, 并与预存的标准地磁数据进行对比, 计算出地磁干扰矢量。利用自适应算法动态调整无人机的姿态控制参数 (如俯仰角、横滚角、偏航角控制增益)^[19], 以抵消地磁干扰对无人机飞行状态的影响。磁场干扰补偿控制指令 χ_c 可表示为:

$$\chi_c = \kappa_{\text{compensate}} H_{\text{magnetism}}^{-1} \quad (16)$$

其中: $\kappa_{\text{compensate}}$ 为磁场补偿系数, 根据干扰程度动态调整。类似地, 对于风场干扰, 通过风速风向传感器检

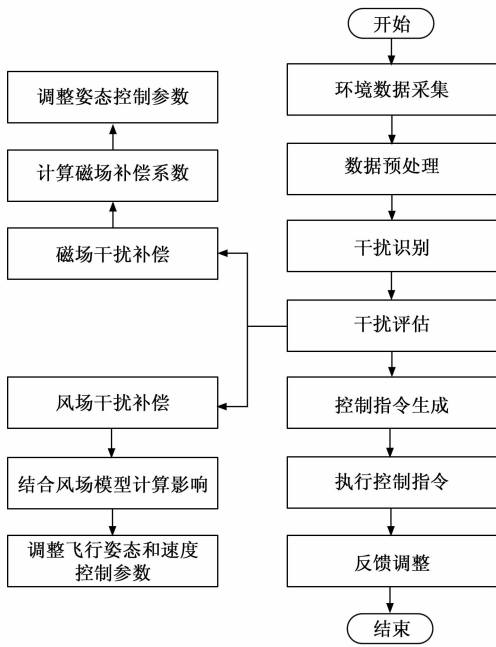


图 3 磁场干扰自适应补偿控制流程图

测数据, 结合风场模型计算风场干扰影响, 并相应调整无人机的飞行姿态和速度控制参数, 确保无人机在复杂风场环境中也能稳定飞行。

2) 抖振抑制控制:

针对机械结构振动、气流扰动等引起的抖振问题, 设计抖振抑制策略。通过加速度计、陀螺仪等传感器实时监测无人机的振动情况, 结合飞行状态数据计算抖振抑制控制量。根据抖振抑制算法, 生成抖振抑制控制指令 $\chi_{\text{Trembling}}$:

$$\chi_{\text{Trembling}} = \kappa_{\text{Trembling}} B^{-1} \quad (17)$$

其中: $\kappa_{\text{Trembling}}$ 为无人机抖振抑制系数, 根据抖振程度动态调整, B 为干扰控制量的计算结果。控制指令直接作用于无人机的电机控制系统, 通过调整旋翼转速、相位差等参数, 有效抑制抖振, 保持飞行稳定。

3) 位姿自适应控制:

为确保无人机飞行位置与姿态与预期一致, 实施位姿自适应控制。基于 GPS、INS (惯性导航系统) 等传感器数据, 实时获取无人机的当前位置、速度及姿态信息, 并与预设的航点、姿态指令进行比对。一旦发现偏差, 立即根据偏差大小和方向, 通过调整无人机的飞行控制参数 (如推力分配、姿态控制角速度等) 进行修正。位姿自适应控制指令可综合上述干扰补偿与抖振抑制控制指令, 形成最终的控制指令集 χ :

$$\chi = \chi_c + \chi_w + \chi_{\text{Trembling}} + \chi_p \quad (18)$$

其中: χ_w 为风扰控制指令, χ_p 为位置和姿态调整指令。

在飞行过程中, 飞控系统持续监测飞行状态, 并根

据实时数据动态调整控制指令, 确保无人机在各种复杂环境下都能保持高精度的稳定飞行, 同时满足航磁探测的精度要求。

4) 退出条件与持续优化:

当飞行环境中的干扰因素显著减小或无人机的飞行数据与预期数据高度一致时, 飞控系统评估当前飞行状态, 若满足退出自适应稳定飞行控制的条件, 则逐步减少补偿与抑制控制量, 最终恢复到常规飞行控制模式。同时, 系统持续收集飞行数据, 通过机器学习、优化算法等手段, 不断优化控制参数和策略, 以进一步提升无人机的自适应飞行能力。

2 控制效果测试实验分析

为了测试优化设计多旋翼无人机航磁探测自适应稳定飞行控制算法的控制效果, 设计效果测试实验, 此次实验共包含两个部分, 分别为控制精度效果测试和控制算法应用效果测试, 为保证优化设计算法能够适应不同的干扰环境, 布设单一干扰和复合干扰两种实验环境, 分别在两种实验环境下, 对多旋翼无人机样机的实际飞行数据以及航磁探测结果进行统计, 得出反映优化设计算法控制效果和应用效果的测试结果, 并通过与传统算法的对比, 反映出优化设计算法在控制和应用效果方面的优势。

2.1 选择多旋翼无人机控制样机

此次实验选择 RQ-28A 型号的四旋翼无人机作为样机, 即稳定飞行的控制对象, 该无人机采用碳纤维和镁合金材料制造, 以减轻重量并提高耐用性。RQ-28A 型号四旋翼无人机具备强大的侦察能力, 能够为作战人员提供实时的态势感知, 配备 6.8 英寸 LED 触摸屏, 在内置天线的帮助下, 操作员可以与无人机进行通信, 无人机在飞行中使用 5 GHz 无线连接从最远 3.6 英里远的地方进行通信。选择四旋翼无人机样机机架对角轴距为 450 mm, 电子调速器和飞控板型号分别为 430 lite30 A 和 Pixhawk 2.4.8, 遥控器和接收机对应的是 FLYSKY FS-i6X 和 FS-1A6B。无人机中四旋翼在 x 、 y 和 z 轴方向上的转动惯量分别为 $0.0035/\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $0.0035/\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 和 $0.0067/\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。四旋翼无人机每一次飞行之前都必须对飞行器进行全面的校准与细致的检查。

在飞行控制系统启动之前, 必要的校对步骤必不可少, 这包括对传感器的初始化校准和系统结构的全面检查。以罗盘校准为例, 四旋翼无人机会按照预设程序在各个方向进行旋转, 飞行控制主板会记录下每个方向的数据, 并通过这些数据计算出各方向坐标轴的误差, 从而有效消除由于固定干扰磁场可能导致的方位检测偏差。按照这样的流程, 确保四旋翼无人机中的所有组件都经过精确的调试, 为安全飞行提供有力保障。采用无

人机结构内部调整的方式,将选择的四旋翼无人机样机调整至抖振状态。

2.2 布设多旋翼无人机飞行环境

选择相同的飞行环境作为实验环境,通过对实验环境状态的设置与过滤,得出两种不同的飞行环境,分别为单一干扰环境和复合干扰环境。

单一干扰环境:此环境主要模拟了地磁干扰对无人机飞行的影响。地磁干扰的分布情况如图 4 所示,实验选择了 527 至 585 毫高斯范围内的磁场强度进行试验,这一范围覆盖了常见的地磁干扰水平。

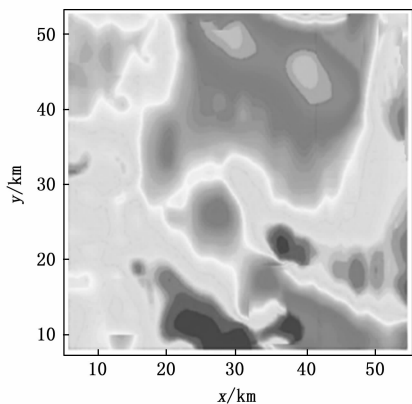


图 4 飞行环境中地磁干扰分布示意图

复合干扰环境:在单一干扰环境的基础上,进一步引入了风场干扰,并设定风场风速为 30 km/h。这一风速的选择是基于典型飞行环境中可能遇到的风速范围,旨在模拟无人机在复杂气象条件下的飞行状态。通过地磁场与风场的叠加,构建了一个复合干扰环境,以全面评估无人机的抗干扰能力。

为降低环境中无关因素对实验结果产生的影响,在实验环境中安装屏蔽仪,最大程度的减少飞行环境中的无关信号量。

2.3 稳定飞行控制器安装与参数设定

将自适应稳定飞行控制器安装到选择的四旋翼无人机控制样机中,四旋翼无人机飞行控制结构如图 5 所示。

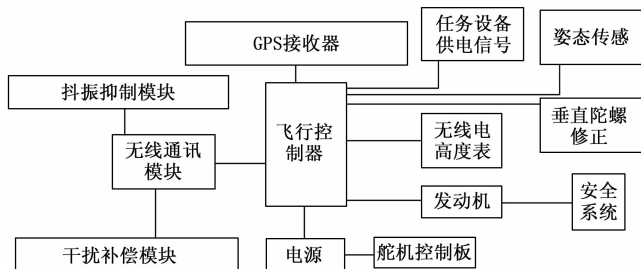


图 5 四旋翼无人机飞行控制结构

在确定稳定飞行控制器运行正常且与四旋翼无人机样机相匹配的情况下,将控制器安装在无人机的中心位

置上,以保持无人机在飞行过程中的平衡,同时保证安装位置有足够的空间供飞行控制器散热,并避免与无人机其他部件发生碰撞。根据飞行控制器的电源要求,将其与无人机电源连接。确保电源连接稳定、可靠,避免在飞行过程中出现电源中断的情况。安装稳定控制器的姿态保持参数为 2° ,航向保持参数为 1° 。

2.4 描述控制效果测试实验过程及代码实现

优化设计的多旋翼无人机航磁探测自适应稳定飞行控制算法的实现涉及多个步骤,包括代码编写、编译、固件下载以及实地测试。以下详细描述了这一过程。

2.4.1 代码编写

选择 Notepad++ 作为代码编写工具,因其轻便且支持多种编程语言。在编写过程中,采用 C/C++ 语言,这是因为大多数开源飞行控制器(如 Pixhawk, ArduPilot 等)都支持 C/C++。代码中包含了自适应稳定控制算法的核心逻辑,该算法结合了干扰补偿、抖振抑制和位姿自适应控制策略。算法通过读取无人机的姿态传感器数据,结合 GPS 定位信息和遥控器输入,实时计算并调整无人机的控制指令,以实现稳定飞行。

2.4.2 编译与固件下载

代码编写完成后,使用开源工具 Arduino 进行编译。Arduino IDE 提供了方便的编译环境,能够自动处理代码中的依赖关系,并生成适用于飞行控制器的固件。在编译无误后,通过 USB 或其他通信接口将固件下载到四旋翼无人机的飞行控制器中。

2.4.3 实地测试

将装有新固件的四旋翼无人机放置到预设的飞行环境中,该环境包含模拟的地磁干扰、风场变化等条件。通过规划无人机的飞行路线,并启动无人机及稳定飞行控制程序,开始进行实验。在飞行过程中,无人机上的传感器实时采集数据,并通过飞行控制器中的算法进行处理,输出控制指令,以维持无人机的稳定飞行并进行精确的航磁探测。图 6 表示的是无人机的稳定飞行控制结果以及输出的航磁探测结果。

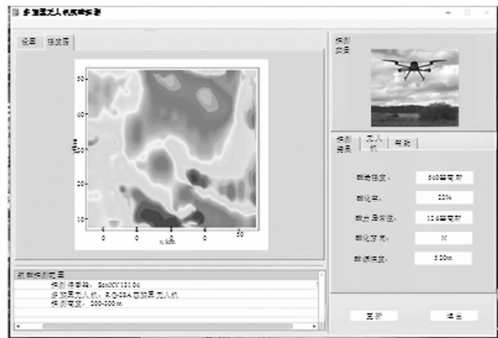
根据地磁干扰场景的设置情况,得出四旋翼无人机航磁探测的期望值,并对其进行记录。按照上述方式可以得出航磁探测任务执行过程中,任意时刻无人机飞行控制结果和航磁探测结果。分别在单一干扰和复合干扰两种实验环境下,得出优化设计控制算法下的飞行结果和探测结果。为体现出优化设计算法的效果优势,设置传统的基于扩张状态观测器的四旋翼无人机飞行控制算法和基于奇异摄动理论的无人机飞行控制算法作为实验对比,在两种飞行环境下,通过对比算法的运行得出最终的实验结果数据。

2.5 设置控制效果测试指标

根据实验目的,从控制效果和控制算法应用效果两



(a) 多旋翼无人机航磁探测自适应稳定飞行控制界面



(b) 多旋翼无人机航磁探测界面

图 6 实验运行输出界面

个方面设置测试指标, 其中稳定飞行控制效果的测试指标设置为四旋翼无人机飞行稳定系数, 该指标的数值结果为:

$$\lambda = \frac{A_{\text{Trembling}} \times n_{\text{Trembling}} + |\theta_s - \theta_{\text{limit}}|}{t_{\text{flight}}} \quad (19)$$

其中: $A_{\text{Trembling}}$ 和 $n_{\text{Trembling}}$ 分别表示的是无人机飞行抖振强度和抖振信号量, θ_s 和 θ_{limit} 分别为无人机的实际飞行角度和飞行极限角度, t_{flight} 为无人机的飞行时间。最终计算得出飞行稳定系数取值越高, 证明对应算法的控制效果越优。另外控制算法应用效果的测试指标为航磁探测误差, 该指标的测试结果如下:

$$\epsilon = |H_{\text{magnetism}} - H_a| \quad (20)$$

式中, $H_{\text{magnetism}}$ 和 H_a 分别为地磁场强度的探测值和实际值, 其中 H_a 的具体取值由飞行环境的布设情况决定。计算得出航磁探测误差越小, 说明对应控制算法的应用性能越优。

2.6 控制效果测试实验结果与分析

2.6.1 单一干扰环境下的控制效果测试结果

在单一干扰飞行环境下, 针对四旋翼无人机实施了不同控制算法的飞行测试, 实时记录了无人机的飞行数据。利用这些数据结合位姿自适应控制策略(公式(18)作为其中一部分)及其他评估方法, 计算了一系列关键评估指标, 以全面反映各控制算法在应对干扰时的性能。通过公式(19)的计算得出反映算法控制效果的测试结果, 如图 7 所示。

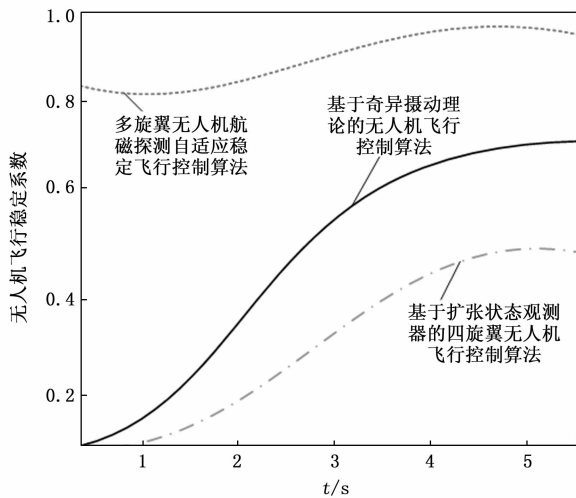


图 7 单一干扰飞行环境下控制效果对比结果

在图 8 所呈现的实验结果中, 可以明显观察到, 经过优化设计算法的四旋翼无人机在相同飞行环境下展现出了卓越的飞行稳定性。其飞行稳定系数持续稳定地保持在 0.8 以上的高水平, 显著优于其他两种测试方法。这一显著成果不仅凸显了优化设计算法在无人机控制领域的先进性和精确性, 更验证了其在确保无人机飞行平稳性和安全性方面的显著优势。通过精细调整无人机的控制参数和策略, 优化设计算法使无人机在复杂飞行环境中展现出更强的适应能力和鲁棒性, 为无人机技术的进一步发展提供了强有力的支撑。

2.6.2 复合干扰环境下的控制效果测试结果

将实验环境调整至复合干扰飞行环境, 重复上述控制数据数据采集操作, 得出反映控制效果的测试结果, 如图 8 所示。

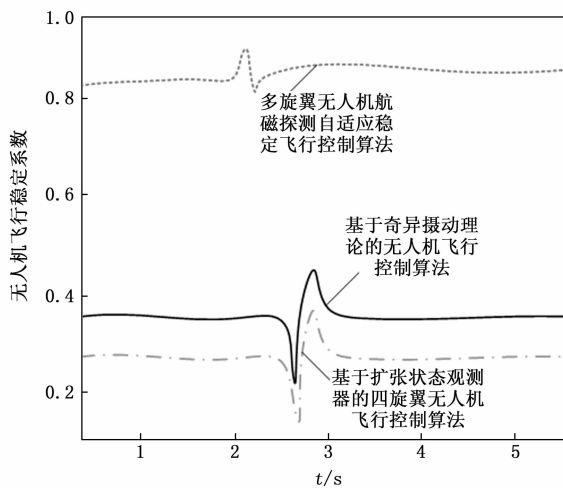


图 8 复合干扰飞行环境下控制效果对比结果

从图 8 中可以看出, 与单一干扰飞行环境相比, 在 3 种控制算法作用下, 四旋翼无人机的飞行稳定系数存在不同程度的降低, 而与两种传统控制算法相比, 在优

化设计控制算法作用下,无人机的飞行稳定系数仍保持在 0.8 以上。这一结果不仅彰显了优化设计控制算法在应对复杂飞行环境中的强大适应能力,同时也再次证明了其相对于传统控制算法的优越性,为四旋翼无人机在多变环境下的稳定飞行提供了可靠的保障。

2.6.3 控制算法应用效果测试结果

在不同的稳定飞行控制算法作用下,统计四旋翼无人机输出的航磁探测结果数据,得出反映控制算法应用效果的测试结果,如表 1 所示。

表 1 控制算法应用效果测试数据表

实验组别	磁场强度实际值/毫高斯	应用基于扩张状态观测器的四旋翼无人机飞行控制算法输出磁场强度探测值/毫高斯	应用基于奇异摄动理论的无人机飞行控制算法输出磁场强度探测值/毫高斯	应用多旋翼无人机航磁探测自适应稳定飞行控制算法输出磁场强度探测值/毫高斯
1	541	545	544	540
2	564	567	566	564
3	527	523	525	528
4	585	581	582	584
5	572	579	576	571
6	555	550	552	554

表 1 中实验组别 1、2 和 3 为单一干扰飞行环境,组别 4、5 和 6 为复合干扰飞行环境,将表 1 中的数据代入到公式 (20) 中,得出 3 种控制算法作用下无人机输出磁场强度探测误差的平均值分别为 4.5 毫高斯、2.8 毫高斯和 0.8 毫高斯。

3 结束语

本研究针对多旋翼无人机在航磁探测过程中遇到的磁场干扰、风场变化和机械抖动等挑战,设计并实现了一种自适应稳定飞行控制方法。该方法通过构建的多旋翼无人机动力学模型与控制目标,集成了干扰补偿、抖动抑制及位姿自适应控制策略,显著增强了无人机的飞行稳定性与航磁探测的精准度。实验验证表明,在单一和复合干扰环境下,采用该优化设计控制算法的多旋翼无人机展现出显著增强的飞行稳定性,并且地磁强度探测误差平均值为 0.8 毫高斯,有效提升了航磁探测的精度和无人机的飞行安全。

参考文献:

[1] 曾子元,李云桓. 基于扩张状态观测器的四旋翼无人机飞行控制系统研究 [J]. 微特电机, 2022, 50 (1): 41 - 44.

[2] 李 勇,常绪成,李树豪. 基于奇异摄动理论的无人机反步飞行控制律设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42 (3): 89 - 96.

[3] ZOU, XU, et al. Stable and accurate tracking control of

tail-sitter aircraft in all flight modes [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2023, 95 (6): 858 - 868.

[4] 范文茹,刘权威,田栢苓. 基于干扰补偿的四旋翼无人机轨迹跟踪控制 [J]. 现代防御技术, 2024, 52 (2): 87 - 93.

[5] 谭丹丹. 重载荷多旋翼植保无人机自抗扰鲁棒控制算法 [J]. 江苏农业科学, 2022, 50 (1): 163 - 169.

[6] 刘肩山,唐 毅,谢志明. 四旋翼无人机吊挂飞行减摆控制 [J]. 电光与控制, 2023, 30 (8): 74 - 79.

[7] 沈 跃,储金城,沈亚运,等. 直线型倾转多旋翼植保无人机建模与控制 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45 (1): 250 - 258.

[8] 李鸿一,王 琰,姚得银,等. 基于事件触发机制的多四旋翼无人机鲁棒自适应滑模姿态控制 [J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53 (1): 66 - 80.

[9] 庞宇翔,陈泽茂. 基于属性访问控制策略的无人机飞控安全方案 [J]. 计算机科学, 2024, 51 (4): 366 - 372.

[10] 刘 勇,杨 浩,盘宏斌,等. 基于改进线性自抗扰的四旋翼无人机姿态控制 [J]. 电光与控制, 2023, 30 (7): 8 - 14.

[11] 陈 宝,周祖鹏,卫 欢,等. 基于专家 PID 的带臂四旋翼无人机控制方法 [J]. 计算机应用, 2022, 42 (8): 2637 - 2642.

[12] 丁 娃,吴功平,何文山,等. 四旋翼飞行器姿态角的自切换串级 PID 控制方法 [J]. 机械设计与制造, 2022 (6): 208 - 213.

[13] 齐国元,李 阔,王 琨. 基于补偿函数观测器的四旋翼无人机姿态受限控制 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2023, 53 (3): 853 - 862.

[14] 苏亚楠,佟 刚,王 锋. 混合动力多旋翼的改进型模糊 PID 控制方法设计 [J]. 机械设计与制造, 2023 (5): 77 - 82.

[15] 修 杨,邓宏彬,危怡然,等. 基于参数估计的四旋翼无人机自适应鲁棒路径跟随控制器 [J]. 兵工学报, 2022, 43 (8): 1926 - 1938.

[16] 樊有容,王 皓,杨 乐,等. 基于过渡走廊的倾转旋翼无人机纵向控制研究 [J]. 飞行力学, 2022, 40 (2): 61 - 66.

[17] 徐雪松,倪 赟,吴仪政. 一种六旋翼无人机的多模型容错控制方法 [J]. 火力与指挥控制, 2022, 47 (3): 45 - 50.

[18] 刘金龙,张泽旭,徐田来,等. 基于自适应通信拓扑的无人机集群弱路径约束下的分布式控制器设计 [J]. 宇航学报, 2022, 43 (5): 665 - 674.

[19] 成利梅,张春美,郭红戈. 基于差分进化算法的四旋翼自适应滑模控制 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (6): 66 - 71.