

基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统设计

黄智, 张建强, 苏润丛

(中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094)

摘要: 针对四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统抗干扰能力较差, 控制性能较差的问题; 文章提出基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统, 优化设计了系统的硬件和软件部分; 硬件部分设计主控制器, 通过发生器输出的 PWM 波信号控制电机速度; 设计传感器模块, 测量姿态角与加速度等数据, 采用双陀螺仪和双加速度计结构, 避免共振对测量结果产生影响; 设计电机驱动模块, 选用 X2216 型无刷直流电机为运行提供较高的转速和响应速度; 设计无线数据传输模块, 选用 3DR 无线数据传输模块实时监测姿态位置信息数据; 构建基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统, 对角速度数据、加速度数据等进行融合改正, 再运用互补滤波器对陀螺仪和加速度计进行信号检测和控制调度, 得到精确的实时姿态角; 采用姿态控制算法和串级 PID 控制策略, 提高对系统的控制力, 保证飞行的平稳; 实验结果表明, 基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统抗干扰性强、控制能力高以及响应速度快。

关键词: 混合滤波; 四旋翼无人机; 抗干扰姿态; 控制系统

Design of Anti-jamming Attitude Control System of Quadrotor UAV Based on Hybrid Filtering

HUANG Zhi, ZHANG Jianqiang, SU Runcong

(China Shipbuilding Industry System Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

Abstract: The anti-jamming capability and control performance of the anti-jamming attitude control system of four rotor UAV are poor. This paper presents a four rotor UAV anti-jamming attitude control system based on hybrid filtering, and optimizes the hardware and software of the system. In the hardware part, the main controller is designed to control the electric speed by the PWM wave signal output from the generator; The sensor module is designed to measure the attitude angle and acceleration data. The structure of dual gyroscope and dual accelerometer is adopted to avoid the influence of resonance on the measurement results; The motor drive module is designed and x2216 brushless DC motor is selected to provide high speed and response speed for operation; The wireless data transmission module is designed, and 3DR wireless data transmission module is selected to monitor the position information data of attitude signal in real time; The anti-jamming attitude control system of quadrotor UAV Based on hybrid filter is constructed. The angular velocity data and acceleration data are fused and corrected. Then the complementary filter is used to detect and control the signal of gyroscope and accelerometer, and the accurate real-time attitude angle is obtained. The attitude control algorithm and cascade PID control strategy are adopted to improve the control force of the system and ensure the smooth flight. The experimental results show that the anti-jamming attitude control system based on hybrid filter has strong anti-jamming ability, high control ability and fast response speed.

Keywords: hybrid filtering; four-rotor unmanned aerial vehicle; anti-jamming attitude; control system

0 引言

无人飞行器是一种可以自主飞行或者遥控飞行的飞行器, 飞行器机身内部没有飞行员操控机器。近年来, 无人机在很多领域得到普及, 尤其是旋翼、扑翼类型的无人机已被广泛应用, 而四旋翼无人机以其操纵简单和控制远离, 使其可以在起飞后停在空中的特点, 在以上类型中尤为突出, 且同时灵活度较高, 控制容易, 维护方便, 目前在商

用领域和民用领域发挥着关键作用。四旋翼无人机的抗干扰能力也影响着无人机的飞行效果, 因为四旋翼无人机容易受到电磁、风力、线性扰动等外部环境的干扰, 如果四旋翼无人机的抗干扰能力较低, 会对四旋翼无人机的控制性产生很大的影响, 尤其在飞行姿态上^[1-2]。

针对四旋翼无人机容易受到外部干扰、飞行姿态控制能力低等问题, 国内学者对其展开了研究, 有学者采用了反步控制、自抗扰控制等技术设计了四旋翼无人机抗干扰

收稿日期: 2021-06-03; 修回日期: 2021-07-23。

作者简介: 黄智(1989-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事无人机飞行控制与导航方向的研究。

引用格式: 黄智, 张建强, 苏润丛. 基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 105-109.

姿态控制系统，但系统在提升四旋翼无人机的抗干扰能力和姿态控制性能方面效果不明显^[3-4]。

为了解决以上出现的问题，本文设计了基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统，采用硬软件结合的方式实现对无人机姿态的控制，通过实验去验证文中系统的可行性。

1 基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统硬件设计

本文设计的基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统的硬件结构图如图 1 所示。

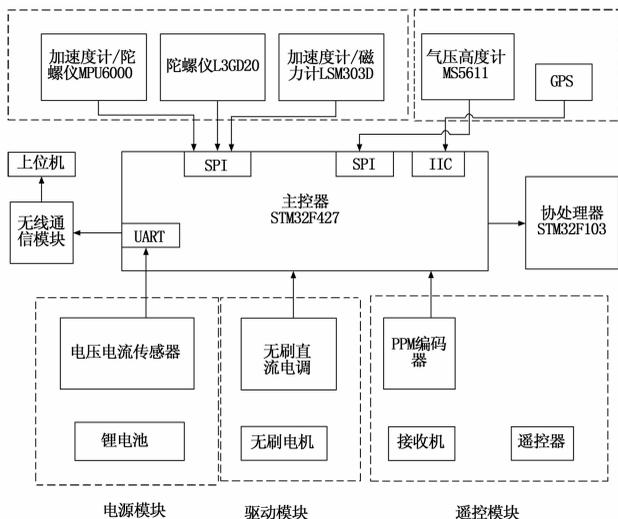


图 1 基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统硬件结构

四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统硬件结构由电源模块、驱动模块、遥控模块和无线通信模块共同构成。电源模块包括电压电流传感器和锂电池，锂电池为电压电流传感器提供能量。驱动模块包括无刷电机与无刷直流电调两个部分，主要作用是驱动四旋翼无人机的飞行。遥控模块包括 PPM 编码器、接收机和遥控器，对四旋翼无人机的飞行起控制作用。电源模块、驱动模块以及遥控模块在主控制器的作用下，将数据传输到协处理器以及无线通信模块中。各个模块相互作用，共同完成四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统的硬件构造。

1.1 主控制器设计

四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统的设计需要提供硬件支撑，采用最新型的微处理器并且接口充足的主控制器作为系统设计的辅助，主控制器的接口主要包括 SPI 接口、USB 接口、串行通信接口、UART 接口，方便与系统中其他硬件进行数据的传输。主控制器结构如图 2 所示。

主控制器具有很高的工作频率，在对四旋翼无人机的姿态信息和受干扰信息进行解算时，较高的工作频率可提高解算的速度^[5]。主控制器是由多个时钟发生器组成的，发生器的作用是输出 PWM 波信号并达到控制电机转速的

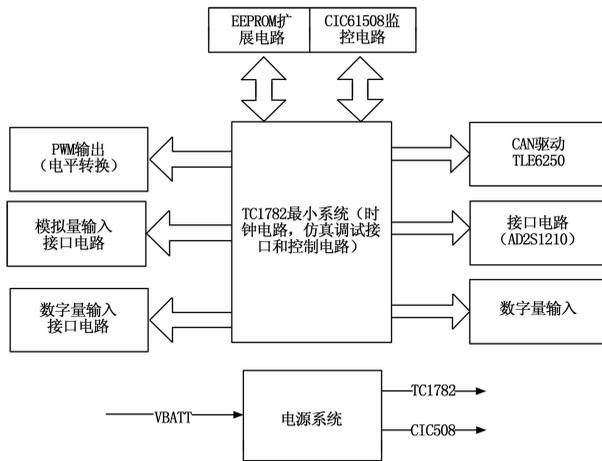


图 2 主控制器结构图

目的，当四旋翼无人机受到较多干扰，造成主处理器发生故障无法正常运行时，为了保护控制系统，在主控制器上集成了一片协处理器，协助主控制器对四旋翼无人机的姿态信息进行控制，并提升整个控制系统的稳定性，使四旋翼无人机可以安全飞行^[6]。

1.2 传感器模块

传感器模块由位置传感器和姿态传感器构成，位置传感器用于测量无人机所处的位置，主要分为接触式和接近式；姿态传感器由三轴的陀螺仪、加速度计以及电子罗盘等运动传感器组成，其作用是通过 ARM 处理器得出三维姿态与方位等数据。四旋翼无人机在执行空中目标飞行任务时，会产生姿态信息，对姿态信息进行分析计算可以得到飞行的姿态角，运用加速计我们可以得出无人机飞行时的加速度，轴向的加速度属于四旋翼无人机轴向受力，其经过运算后形成飞行速度，通过飞行速度和飞行距离，可以对四旋翼无人机的线运动进行描述^[7]。四旋翼无人机姿态传感器如图 3 所示。



图 3 四旋翼无人机姿态传感器

观察上图可知，位置传感器内部集成了气压高度计和 GPS，气压高度计用于观测飞行时的海拔高度，GPS 用于实时定位，保证飞机在飞行过程中的安全。四旋翼无人机在进行自主飞行或遥控飞行时，飞行的最大高度主要使用气压高度计进行测量，在空中悬停时，相对于地面的位置由 GPS 进行远程定位。传感器模块内部主要包括三轴加速度计/三轴陀螺仪 MPU6000，LSM6DS3 中的陀螺仪感测无人机的角速

度非常准确, 对无人机的快慢飞行动作也可准确追踪, 同时加速度计可准确测量四旋翼无人机在各个方向的加速度。为了提升四旋翼无人机的抗干扰能力, 额外增加了三轴陀螺仪/三轴加速度计 MPU6000, 其采样频率为 2 kHz, 当无人机发生共振时, 可与 LSM6DS3 构成双陀螺仪和双加速度计结构, 避免由于发生共振, 测量过程出现问题^[8-9]。

1.3 电机驱动控制模块

为保障四旋翼无人机的稳定、安全飞行, 四旋翼无人机的电机选用无刷直流电机, 无刷直流电机主要包括电机主体以及驱动器两个部分, 该电机是自动式运行的, 但是运行时需要具有较高的转速和响应速度, 因此选用型号为朗宇 X2216 的无刷直流电机, 该款电机具有较好的稳定性, 由于无刷电机的驱动依赖于无刷电流的驱动, 因此本文选用好盈天行者 60 A 无刷电流电调, 其额定输出电流为 60 A, 最高瞬时电流可达到 70 A, 可对本文选用的无刷直流电机进行快速调速^[10-12]。电动机驱动控制模块电路图如图 4 所示。

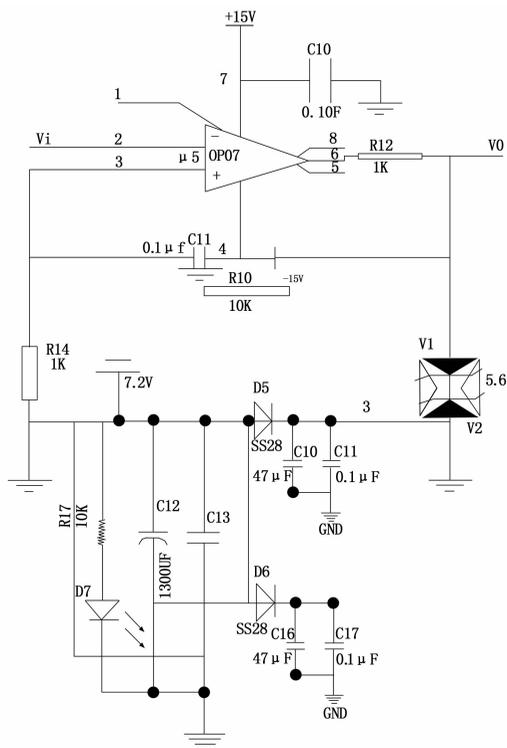


图 4 电动机驱动控制模块电路图

1.4 无线数据传输模块

传感器采集的姿态信息数据和位置信息数据需要实时显示在上位机上, 以此监控四旋翼无人机的飞行状态, 为了实现四旋翼无人机的稳定、安全飞行, 选用 3DR 无线数据传输模块, 可传输无人机的飞行数据, 发射频率最高为 500 MHz, 功率为 450 MW, 在于主控制器进行通信时, 选用 SPI 接口作为通信接口^[13], SPI 接口具有操作性强、传输数据快等特点, 被广泛的应用于数据的传输中。无线数据传输模块^[14]接口如图 5 所示。

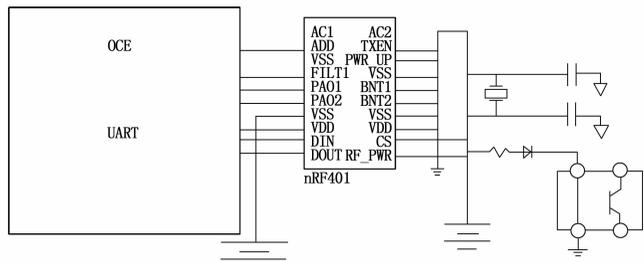


图 5 无线数据传输模块接口示意图

无线数据传输模块等硬件进行设计, 可以提高无人机飞行时的抗干扰能力。对主控制器进行设计可以保证无人机在遭遇干扰时, 可以及时的恢复到稳定的状态, 避免对无人机飞行造成影响; 对传感器模块进行设计可以准确得出实时的姿态信息、姿态角以及飞行加速度, 保证无人机飞行时的速度与姿态角处于安全范围内, 实现对自身进行控制, 达到抗干扰的目的; 对电机驱动控制模块进行设计可以调节无人机飞行时的速度, 同时可以根据飞行情况对速度进行及时调整。对无线数据传输模块进行控制可以及时了解外界情况, 在遭遇干扰前可以采取相应的应对措施。

2 基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统软件设计

通过本文设计的系统软件实现四旋翼无人机的稳定飞行, 并使基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统可以正常运行, 根据下发的飞行任务指令对四旋翼无人机的姿态进行控制^[15]。

本文设计的基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统的软件流程如图 6。

首先, 将系统进行初始化。当系统发送中断请求时, 姿态传感器采集的姿态信息数据由主控制器进行读取, 如果读取失败, 则需要重新读取姿态数据。

然后, 通过姿态解算得到飞行姿态角。为了获得四旋翼无人机的飞行姿态角^[16], 采用双陀螺仪对四旋翼无人机在飞行过程中产生的仰俯角进行测量, 测量过程需要用双加速度计^[17]计算加速度, 再运用得到的姿态信息, 得出飞行中的飞行姿态角。陀螺仪在进行测量工作时, 在较短的测量周期内, 测量的准确度较好, 但四旋翼无人机也存在一些弊端, 容易受到外界因素的影响, 稳定性较差, 测量误差会不断的增加, 累积到一定程度就会造成低频干扰和漂移。四旋翼无人机在执行空中目标飞行任务时, 由于振动会产生较高的高频干扰信号, 该干扰信号严重影响了加速度计的测量, 导致瞬时倾角误差较高。陀螺仪和加速度在短时间内虽然会存在一定的测量误差, 但该测量误差不随时间的增加而增加, 飞行过程得出的姿态信息需要计算, 并对角速度数据、加速度数据、误差数据进行融合、改正, 获得处理过的姿态角, 再采用互补滤波器分别对陀螺仪和加速度计进行信号检测和控制调度, 获得经过检测和调度的瞬时姿态角, 为了得到精确的实时姿态角, 需要将飞行中某一时刻的姿态角和飞行过程中

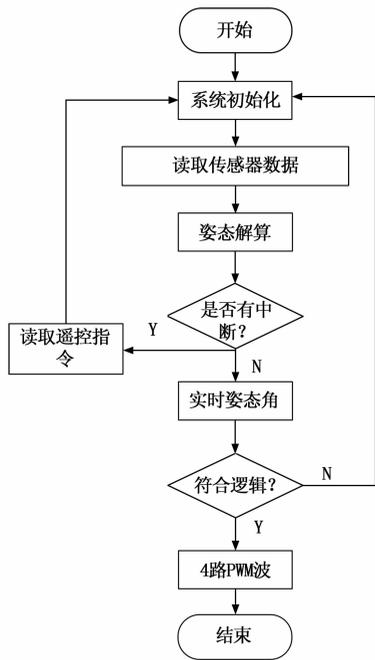


图 6 基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统软件流程

的姿态角进行修改并统一^[18]。

最后实现对四旋翼无人机的飞行控制。飞行的具体控制过程是获取飞行最优姿态角—传感器读取飞行指令—测算最优姿态角—实现四旋翼无人机的控制，整个控制过程都离不开对姿态控制算法^[19]的运用，其主要起到支撑的作用。由于四旋翼无人机对电磁、磁场等干扰较敏感，因此为了提升四旋翼无人机飞行的抗干扰能力，采用串级 PID 控制策略提升控制系统的稳定性^[20]，并在串级 PID 的外环内存入四旋翼无人机的姿态信息和误差数据，主控制器读取误差数据，并将误差数据作为 PID 内环输入，最后运用 PWM 波信号控制电机转速^[21-22]。

通过对四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统进行软件设计，可以提高无人机飞行时的飞行精度，同时设计使用串级控制提升了系统的稳定性，保证了无人机飞行时的平稳。对软件进行设计可以不断地对传感器读取的数据进行判断并修正，提高了数据的准确性以及自身对于数据的判断能力，可以有效地解决飞行中的干扰问题。

3 实验结果与分析

为了验证本文设计系统的抗干扰性、控制能力以及响应速度，选用传统控制系统与本文设计的基于混合滤波的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统进行对比实验，通过比较偏航角以及滚动角变化的情况，判断系统的稳定性，根据实验结果可以得出本文设计的系统具有较强的抗干性和控制力，同时响应速度较快。

为了模拟最真实的干扰情况，在偏航角和滚动角的通道上加入高斯白噪声，模拟飞行中受到的干扰。设计实验在 MATLAB 平台上进行，同时为了保证干扰最接近真实情

况，选用均值为 0、方差为 10 的高斯白噪声。具体实验结果如图 7 所示。

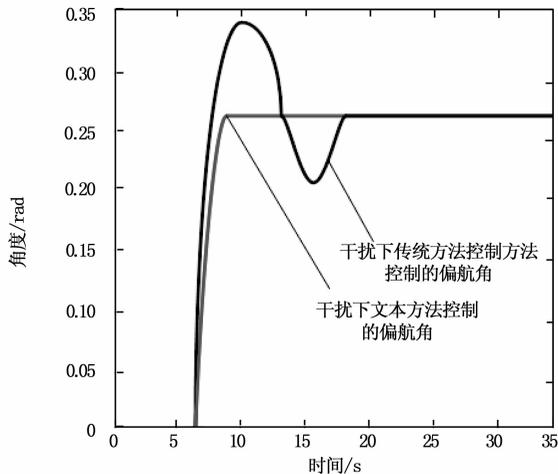


图 7 干扰下控制的偏航角

由 8 图可知，本文方法控制的俯仰角在干扰条件下，偏航角一直保持在 0.25 rad，并持续稳定，而传统方法的偏航角由 0.33 rad 变为 0.25 rad 后，偏航角突然变为了 0.20 rad，之后随时间的变化一直保持在 0.25 rad。

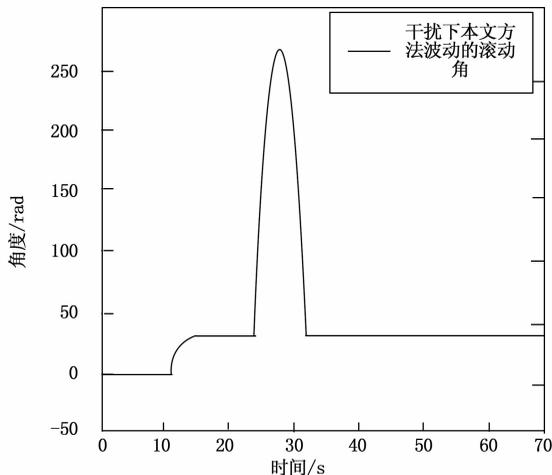
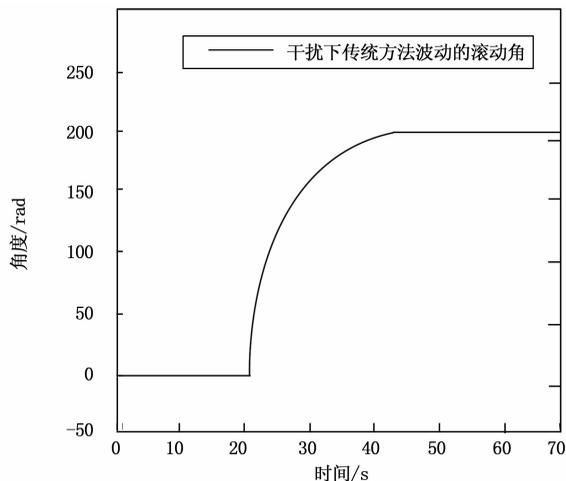


图 8 干扰控制下的滚动角

由图 9 可知, 当传统系统与本文系统处于稳定状态时, 给每个系统较大的外在干扰力矩, 两个系统的总力矩比原始力矩增加了很多, 传统系统的滚动角姿态信息马上出现了严重失稳状态, 滚动角由 0 变为 200 rad, 随无人机的运行, 滚动角一直保持在 200 rad, 但是由于受到耦合因素的影响导致整个传统控制系统处于失控状态, 说明传统方法容易受到干扰, 并且自身不具有控制能力。但是在本文设计的基于混合滤波的四旋翼无人机姿态控制系统中, 滚动角虽受到了一定扰动影响, 但很快又恢复了原始滚动角的角度, 系统一直处于稳定状态, 对四旋翼无人机的姿态控制没有产生影响, 除了对比两个系统的抗干扰能力外, 还对两种系统的姿态控制性能进行了比较, 对比结果如图 9 所示。

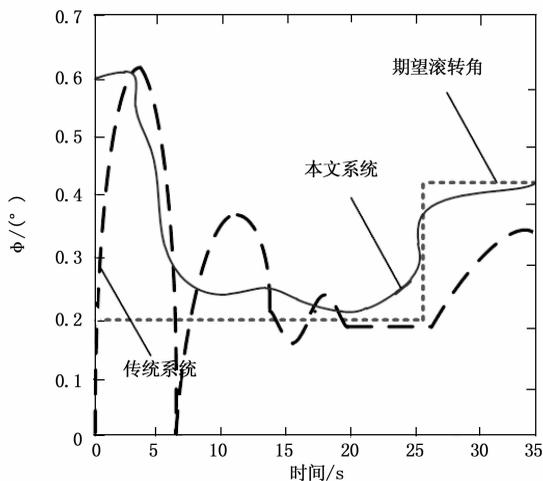


图 9 姿态控制性能实验结果

由图可知, 姿态角的度数在一定范围内时, 传统系统与本文系统的控制性能无明显区别, 当姿态角 $> 1^\circ$ 时, 本文系统的波动与期望滚转角的波动较吻合, 而传统方法波动性较大, 与期望滚转角曲线差别较大。

4 结束语

基于传统控制系统出现的; 本文利用了混合滤波的四旋翼无人机姿态控制系统, 并为该系统提供了一系列的硬件设备包括主控制器以及各种模块, 为了实现对控制系用的充分运用, 然后在系统软件方面, 给出了软件流程, 最后通过与传统系统进行实验对比, 验证了本文设计的基于混合滤波的四旋翼无人机姿态控制系统优于传统系统, 该系统在抗干扰和控制能力方面具有较大的优越性, 并且能够及时响应, 得出的数据也较为精准, 实现了四旋翼无人机的安全、稳定飞行, 具有一定的应用价值。

参考文献:

[1] 胡改玲, 桂 亮, 权双璐, 等. 串联模糊 PID 控制的四旋翼无人机控制系统设计 [J]. 实验技术与管理, 2019, 36 (3): 132-135.
 [2] 余小燕, 孙宪坤, 熊玉洁, 等. 基于改进 ADRC 的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统设计 [J]. 电光与控制, 2020, 27

(12): 78-83.
 [3] 潘 捷, 牛萍娟, 张伟龙, 等. 基于 GD-FNN 的四旋翼无人机姿态控制系统设计 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020, 56 (6): 128-131.
 [4] 徐一鸣, 李 笑, 杨凯凯, 等. 基于深度学习的四旋翼无人机控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (5): 129-133.
 [5] 孟庆霄, 邵星灵, 杨 卫. 基于扩张状态观测器的四旋翼无人机姿态受限控制 [J]. 飞行力学, 2019, 37 (6): 37-42.
 [6] 王春阳, 姜明瑞, 史红伟. 四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统设计 [J]. 电光与控制, 2019, 26 (3): 107-111.
 [7] 杨则允, 李 猛, 孙钦鹏. 四旋翼无人机控制系统仿真设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (4): 68-71.
 [8] 于文妍, 杨坤林. 四旋翼无人机串级模糊自适应 PID 控制系统设计 [J]. 机械设计与制造, 2019, 335 (1): 234-238.
 [9] 唐舒放, 王志胜, 张舵. 基于光流定位的四旋翼飞行器技术研究 [J]. 机械与电子, 2019, 37 (7): 56-59.
 [10] 姚博誉, 路 平, 杨 森, 等. 四旋翼飞行器飞行控制技术综述 [J]. 航空兵器, 2020, 27 (1): 13-20.
 [11] 张文清, 徐雪松, 刘 瑞. 基于反馈线性化的四旋翼无人机姿态控制研究 [J]. 计算机仿真, 2019, 36 (1): 94-98.
 [12] 王术波, 韩 宇, 陈 建, 等. 基于 ADRC 迭代学习控制的四旋翼无人机姿态控制 [J]. 航空学报, 2020, 41 (12): 319-331.
 [13] 谢 檬, 张安莉, 高 原. 四旋翼无人机虚拟控制系统的设计 [J]. 电子技术应用, 2020, 46 (12): 67-71.
 [14] 谭 雯, 沈三民, 谭秋林, 等. 一种用于旋转环境的无线激光数据传输模块设计 [J]. 电子器件, 2021, 44 (3): 525-529.
 [15] 龙诗科, 孙山林, 赵海盟. 基于滑模和 ESO 的四旋翼飞行器遥感机动观测姿态控制 [J]. 地球信息科学学报, 2019, 21 (4): 62-71.
 [16] 李二闯, 张建杰, 袁 亮, 等. 基于四元数互补滤波的小型四旋翼姿态解算 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019, 000 (3): 37-39.
 [17] 苟 欢. 导向钻井工具双加速度计姿态测量方法研究 [J]. 云南化工, 2021, 48 (1): 74-76.
 [18] 尹 豪, 唐 猛, 侯 凡. 四旋翼无人机 PDF 控制系统设计和抗干扰分析 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 91-96.
 [19] 曹竞豪, 黄 欢, 张 帅, 等. 基于模糊 PID 的整平机姿态控制算法设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (7): 85-88.
 [20] ST A, MFS B, MRD C. GNSS jamming detection of UAV ground control station using random matrix theory—ScienceDirect [J]. ICT Express, 2020, 7 (2): 239-243.
 [21] WU J, LIU R, ZHAO S. The Cognitive Communication based Anti-jamming Method for UAV Swarm Communication [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 799 (1): 012043-012049.
 [22] ROHR D, STASTNY T, VERLING S, et al. Attitude and Cruise Control of a VTOL Tiltwing UAV [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4 (3): 2683-2690.