

# 基于 MSP432 的四旋翼无人机的设计



单源龙\*, 潘乾泉

天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222

**摘要:** 为解决无人机的灵活性、稳定性、安全性等问题, 本文设计了一种基于 MSP432 的四旋翼无人机。该无人机包括主控部分、飞行高度测量模块、陀螺仪、定点矫正模块、视觉识别模块五大部分。为了保护主控及其他部分我们设计了外围防护碳板, 使其安全性大大提高。在对目前已有的遥控飞行功能上进行深入研究的基础上, 增加了改进型自抗扰控制器, 并采用自主控制和手动控制双控制模式, 防止由于操作失误产生不必要的损失。采用 GPS 与激光测距仪结合, 可以更加精准的定点定位测量离地高度, 让操纵人员能够确定无人机的位置, 以便观察其状态。利用仿真软件对无人机各子系统集成功能和关键技术进行详细分析。实验结果表明: 该四旋翼无人机的各个部分以及外围防护碳板可为无人机的智能化、体系化发展提供一种系统化解决方案, 进一步提升无人机稳定性、灵活性、安全性和群体智能的能力, 使其在飞行过程中有更加良好的表现。

**关键词:** 四旋翼无人机; MSP432 微控制器; GPS; 激光测距仪; 外围防护碳板; 群体智能

**DOI:** [10.57237/j.cst.2022.01.006](https://doi.org/10.57237/j.cst.2022.01.006)

## Design of Quadrotor UAV Based on MSP432

Shan Yuan-long\*, Pan Qian-xiao

School of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China

**Abstract:** In order to solve the problems of UAV flexibility, stability and safety, this paper designs a quadrotor UAV based on MSP432. The UAV includes five parts: main control part, flight height measurement module, gyroscope, fixed point correction module and visual recognition module. In order to protect the main control and other parts, we designed the outer protective carbon plate, so that its security is greatly improved. Based on the in-depth study of the existing remote control flight function, an improved active disturbance rejection controller is added, and the dual control mode of autonomous control and manual control is adopted to prevent unnecessary losses due to operation errors. The combination of GPS and laser rangefinder allows for more precise fixed-point positioning and measurement of the altitude above the ground, allowing the operator to determine the position of the UAV so as to observe its status. The integration function and key technology of each subsystem of UAV are analyzed in detail by simulation software. The experimental results show that each part of the quadrotor UAV and the surrounding protective carbon plate can provide a systematic solution for the intelligent and systematic development of the UAV, further improve the stability, flexibility, safety and the ability of swarm intelligence of the UAV, and make it have a better performance in the flight process.

**Keywords:** Quadrotor Drone; MSP432 Micro-controller; GPS; Laser Range Finder; Peripheral Protective Carbon Plate; Swarm Intelligence

\*通信作者: 单源龙, 2144439795@qq.com

## 1 引言

目前, 无人机大多采用远程遥控操作[1]模式, 这一模式导致了四轴无人机在空中受人为或环境中不定因素的影响, 姿态发生变化。操作员如不能正确判断, 在遥控上产生的失误会造成无人机损坏甚至人员伤亡, 存在一定的安全隐患[2]。本文所设计的四旋翼飞行器由 MSP432 微控制器、光流传感器、直流无刷减速电机、MPU6050、Open MV、激光测距仪、GPS、电源等八部分组成, 系统地分为微控制器模块、飞行高度测量模块(激光测距仪、激光雷达系统)、飞行姿态调整模块(MPU6050)、定点校正模块(光流传感器)、视觉识别模块(Open MV)五大基本模块, 并采用自主控制和手动控制双控制模式。本文设计中所应用的改进型自抗扰控制(ADRC)器[3]对于飞行器

在各个阶段的飞行速度、加速度、高度和各种飞行姿势数据进行了处理, 保证无人机在自主飞行过程中的稳定, 防止由于失误造成不必要的损失。

## 2 微控制器模块设计

MSP432 系列的微控制器在等待功耗上和有效电流下的功耗上分别为 95uA/MHz[4]和 850nA。由图一可知, 在实现优化之后, MSP432 可以将无人机的功耗下降到最低。此外, MSP432 MCU 还可以在最低 1.62V, 最高 3.7V 的电压范围内全速运行, 符合本设计的全部要求[5]。

	型 号	位 数	性 能 优 劣
方案一	STM32系列	32	优点: 功耗低, 运算速度快 不足: 未集成内部 EEPROM
方案四	MSP432系列	32	低能耗且运算速度快, 价格适中
方案三	三星 Artik5芯片	32	优点: 功耗低, 高度集成, 计算能力较强 缺点: 价格较高, 适用范围较小

图 1 无人机中常用微控制器的性能比较

微控制器模块是飞行器设计的核心部分。飞行器在飞行时的姿态控制、速度调节等各个环节生成的数据都是通过微控制器模块进行处理进而完成飞行器各个基本模块之间的配合, 从而实现飞行器正常起飞以及其他功能。因此, 微控制器模块处理数据的能力对于保证飞行器正常起飞以及自主飞行过程中的稳定起到了至关重要的作用[6]。

## 3 飞行高度测量模块设计

本设计采用激光测距仪结合 GPS 构成飞行器的飞行高度测量模块。GPS 可以实时反映飞行器的位置信息。激光测距仪具有很高的指向性[4], 常用于距离测量, 因此可以实时反映飞行器的飞行高度。

### 3.1 激光脉冲测距仪

激光脉冲测距仪是激光类测距仪中最常用的, 也是本设计选用的测距仪类型。距离测量是将激光脉冲经过光电转换成电脉冲后, 利用电脉冲实现距离测量。因此将主波脉冲和回波脉冲转换成电脉冲。在电脉冲控制触发器产生的定时脉冲持续时间  $t$  内由频率为  $f=1/T$  的时钟脉冲计数。假时钟脉冲的个数为  $N$ , 那么持续时间为:

$$t = \frac{N}{f} \quad (1)$$

距离为:

$$D = c \times \frac{t}{2} \bar{n} = \frac{c}{2f} \times \bar{n} N = KN \quad (2)$$

(2)式中： $\bar{n}$ 表示空气的平均折射率， $K$ 表示测距脉冲当量，即单位计数脉冲对应的距离。

其中， $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$ ， $f=150 \text{MHz}$ 。

### 3.2 激光雷达系统

一个基本的激光雷达系统包括一个由旋转镜反射的顶部激光测距仪，反射出来的激光在被数字化的一维或二维场景周围被扫描，以一定的角度间隔收集与实体的距离测量值。

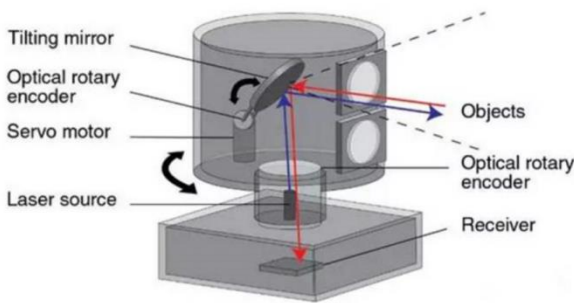


图 2 激光雷达工作示意图

激光雷达通过有源传感器提供自己的光源，通过光源产生的能源撞击物体，反射的能量由传感器接受

和测量[7]。通过记录发射脉冲和反向散射脉冲之间的时间并使用光速计算速度，可以确定到激光雷达到物体的距离。因为相机能够发射更大的激光并利用返回的能量来检测区域的空间关系和尺寸，因此 Flash 激光雷达可以进行 3D 成像。由于不需要将捕获的帧缝合在一起，失真较小，因此可以实现更精确的成像。

## 4 飞行姿态调整模块

MPU6050 陀螺仪（以下简称 MPU6050）可以在同一时间测量六个不同方向的加速度，精度高、结构简单。因此，选用 MPU6050 作为本设计的飞行姿态调整模块是最佳选择。

MPU6050 能够直接实现精确地安全感知和自动测量范围为  $\pm 250$ 、 $\pm 500$ 、 $\pm 1000$  和  $\pm 2000$  %sec (dps) 的不同角速度。用户自己设计可以直接进行完全程式化自动控制加速器的全格感测范围为  $\pm 2\text{g}$ 、 $\pm 4\text{g}$  和  $\pm 8\text{g}$ 。其他的特征主要包括具有内建的温度传感器、外部部件包括在运作环境中只有  $\pm 1\%$  温度变动的频率振荡器。

Gyro Full Scale Range	Gyro Sensitivity	Gyro Rate Noise	Accel Full Scale Range	Accel Sensitivity
( $^{\circ}/\text{sec}$ )	(LSB/ $^{\circ}/\text{sec}$ )	dps/HZ	(g)	LSB/g
$\pm 250$	131	0.005	$\pm 2$	16384
$\pm 500$	65.5	0.005	$\pm 4$	8192
$\pm 1000$	32.8	0.005	$\pm 8$	4096
$\pm 2000$	16.4	0.005	$\pm 16$	2048

图 3 MPU6050 相关数据

### 4.1 MPU6050 的初始化

MPU6050 的初始化主要完成以下几项设置：

- I2C\_Write\_Byte(MPU6050\_ADDRESS, PWR\_MGMT\_1, 0x80); //复位
- I2C\_Write\_Byte(MPU6050\_ADDRESS, SMPLRT\_DIV, 0x00); //陀螺仪采样率，0x00(1000Hz)
- I2C\_Write\_Byte(MPU6050\_ADDRESS, PWR\_MGMT\_1, 0x03); //设置设备时钟源，陀螺仪 Z 轴
- I2C\_Write\_Byte(MPU6050\_ADDRESS, CONFIG\_L, 0x04); //低通滤波频率，0x04(20Hz)
- I2C\_Write\_Byte(MPU6050\_ADDRESS, GYRO\_CONFIG, 0x18); //+-2000deg/s
- I2C\_Write\_Byte(MPU6050\_ADDRESS, ACCEL\_CONFIG, 0x18); //+-16

图 4 MPU6050 初始化的设置

### 4.2 MPU6050 数据模型

(1) 校正加速度计的测量模型

$$a_m^b = a^b + b_a + n_a \quad (3)$$

其中  $a_m^b$  表示校正后测量的比力； $a^b$  表示真实的加速度； $b_a$  表示漂移； $n_a$  表示高斯白噪声。

(2) 加速度计的误差模型

$${}^b\mathbf{a}_m = \mathbf{T}_a \mathbf{K}_a ({}^b\mathbf{a}'_m + \mathbf{b}'_a)$$

标定后三轴加速度值

$$\mathbf{T}_a = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\psi_x & -\Delta\theta_x \\ -\Delta\psi_x & 1 & \Delta\phi_x \\ \Delta\theta_x & -\Delta\phi_x & 1 \end{bmatrix}$$

微小旋转

$$\mathbf{K}_a = \begin{bmatrix} s_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & s_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & s_{az} \end{bmatrix}$$

尺度因子

标定前三轴加速度值

$$\mathbf{b}'_a = \begin{bmatrix} b'_{ax} \\ b'_{ay} \\ b'_{az} \end{bmatrix}$$

偏移

图5 加速度计的误差模型

### (3) 陀螺仪的测量模型

$${}^b\boldsymbol{\omega}_m = \mathbf{T}_g \mathbf{K}_g ({}^b\boldsymbol{\omega}'_m + \mathbf{b}'_g)$$

标定后三轴角速度

$$\mathbf{T}_g = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\psi_g & -\Delta\theta_g \\ -\Delta\psi_g & 1 & \Delta\phi_g \\ \Delta\theta_g & -\Delta\phi_g & 1 \end{bmatrix}$$

微小旋转

$$\mathbf{K}_g = \begin{bmatrix} s_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & s_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & s_{gz} \end{bmatrix}$$

尺度因子

标定前三轴角速度

$$\mathbf{b}'_g = \begin{bmatrix} b'_{gx} \\ b'_{gy} \\ b'_{gz} \end{bmatrix}$$

偏移

图6 陀螺仪的测量模型

### (4) 陀螺仪的误差模型

$${}^b\boldsymbol{\omega}_m = {}^b\boldsymbol{\omega} + \mathbf{b}_g + \mathbf{n}_g$$

校正后测量的角速度

真实的角速度

漂移

白噪声

图7 陀螺仪的误差模型

## 5 定点校正模块

本设计选用 Pix Art 公司的 PMW3901 光流传感器（以下简称光流传感器）以及直流无刷减速电机组成定点校正模块，实现无人机的自动悬停功能。



图8 光流传感器

在合适的高度和光照下，设定光流传感器的工作频率为 100Hz，已知高度为  $h$ 。在高度已知的情况下，变量系数  $H$ [8]和分辨率系数  $R$ [9]之间的关系为：

$$H = hR \quad (4)$$

(4)式中  $R$  表示常数 0.002131946，它代表着 1m 高度下光流传感器所检测到的 1 个像素所对应的实际位移。 $H$  即为飞行器当前高度下一个像素所对应的实际位移大小。

为了确保光流传感器能够获得稳定又平滑的数据，需要根据⑤式对传感器所得数据进行滤波处理。

$$v_n = cv_{n-1} + (1 - c)v_n \quad (5)$$

(5)式中  $c$  为低通滤波系数； $v_n$  为当前时刻传感器的检测值； $v_{n-1}$  为传感器上一时刻的检测值。

## 6 视觉识别模块

通过 OpenMv 采集的目标轨迹图像经过图像滤波之后[10]，对目标轨迹进行色块检测[11]和二值化图像处理[12]，得到目标轨迹之后，对目标轨迹进行二值化回归分析处理，并可以分别得到目标轨迹的直线参数和目标色块参数，进而继续判断是否与该目标轨迹匹配。如果没有匹配到，则应放弃该图像的处理，并取出下一帧图像；如果成功匹配目标轨迹，则计算出该目标轨迹与无人机的偏离角度。[13]在此基础上经过运算转换成无人机应该旋转的角度，通过串口将对应的数据帧发送给飞控，在飞控端再进行帧格式解析，最后得出对应的数据，完成飞机姿态的相应调整[14]。

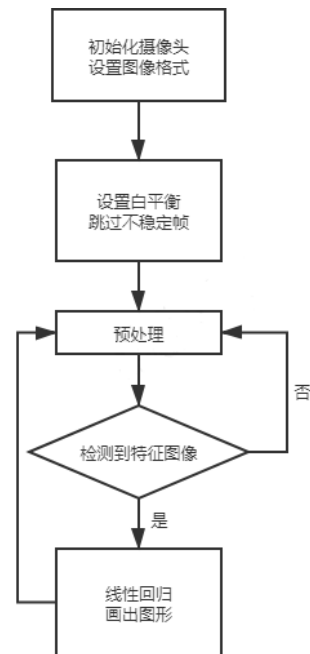


图9 程序流程图



## 7 外围防护装置

无人机在飞行过程中通常有六种运动状态，分别是垂直运动，俯仰移位运动，翻滚移位运动，航向移位运动，前后移位运动和侧向移位运动。大多数无人机在结构设计师忽略了由于飞行过程中由于机身故障或操作失误而对无人机造成的损伤。笔者通过查阅大量资料，由于碳纤维板具有拉伸强度高[15]、耐腐蚀性、抗震性、抗冲击性等良好性能，最终决定选用碳纤维板来搭建飞行器的外围防护装置。但由于碳纤维板具有导电性，所以在设计外围防护装置时采用树脂立柱将碳纤维板与 MSP432 微控制器的引脚分开一定距离，在防止微控制器短路的同时也留有一定的缓冲距离，实现了对飞行器核心硬件的保护。建模及无人机整体结构如图所示。

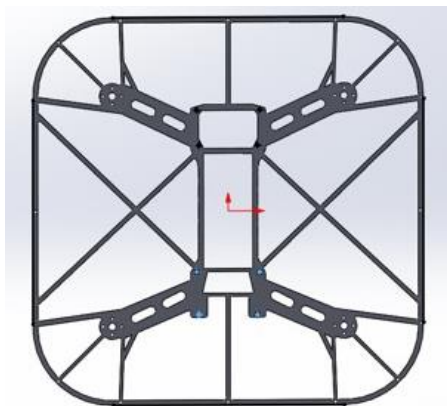


图 10 外围防护装置建模图



图 11 无人机外围防护装置整体展示图

## 8 ADRC 自抗扰算法

ADRC 算法不依赖对象以及干扰的具体模型便可对之进行估计，并给予控制量的补偿，弥补了传统 PID 控制器难以兼顾超调量与调节时间性能指标的不

足。本文所应用的改进型自抗扰控制器相较于标准的 ADRC 算法增强了对无人机姿态角控制的稳定性，控制的四旋翼无人机在仿真和实物试验中都表现出了良好的抗干扰能力。设姿态角向量  $\varphi = (\phi, \theta, \psi)$ ，分别取姿态角度和姿态角速度作为外、内环的反馈。改进型自抗扰控制器的结构如下图所示。

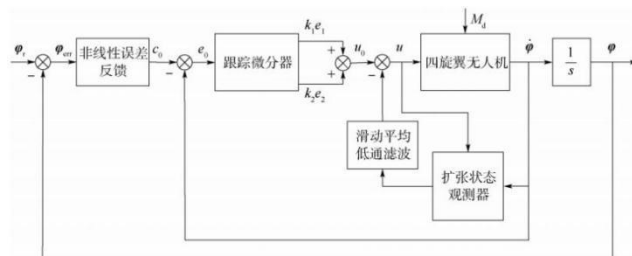


图 12 控制器系统框图

向控制系统中加入  $z_b$  轴方向的幅值为  $0.01 \text{ N m}$ 、频率为  $1\text{Hz}$  的正弦波时，控制系统做出的响应如图 12 所示。

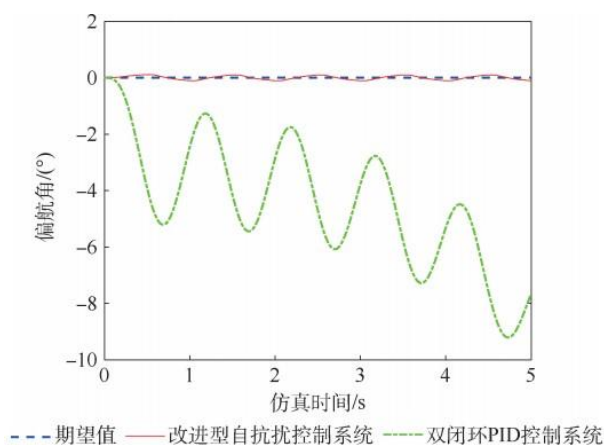


图 13 正弦波干扰下响应对比

从图 12 的仿真结果中可以看到，当双闭环 PID 控制系统因受到干扰而无法收敛时，自抗扰控制系统输出姿态角的振荡幅度虽有增加，但仍然保持着可控的状态。

## 9 结束语

笔者在现有四旋翼无人机的基础上，论述了 MSP432 系列微控制器在小型民用自主飞行器的控制原理，相比于传统无人机运行更加稳定、更加安全。与此同时，如何进一步提升无人机飞行过程中处理飞行轨迹数据的能力需要进一步的研究和讨论。

## 参考文献

- [1] 王秀丽 李军. 美无人机近十年安全事故原因分析 [N]. 科技日报, 2012-2-7 (12).
- [2] 洪涛, 梁晓瑜, 马榕, 胡斌. 四轴无人机姿态测量及三维模型显示系统设计 [J]. 中国测试, 2020, 46 (04): 109-115.
- [3] 石嘉, 裴忠才, 唐志勇, 等. 改进型自抗扰四旋翼无人机控制系统设计与实现 [J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47 (9): 1823-1831.
- [4] TEXAS INSTRUMENTS. 高性能低功耗 32 位 MSP432 微控制器 [J]. 今日电子, 2015 (5): 62.
- [5] 德州仪器推出 32 位 MSP432(TM)微控制器 [J]. 电脑与电信, 2015 (03) :9-10.
- [6] 李金娴, 丁玉萧, 张昂, 林华. 基于 MSP432 单片机的自动植保飞行器设计与实现 [J]. 电子制作, 2022, 30 (09): 70-72+10.
- [7] 屈利伟, 莫宏伟. 无人机环绕目标飞行控制技术研究 [J]. 人工智能与机器人研究, 2017, 6 (04): 125-134.
- [8] 夏杰, 熊俊俏. 基于光流传感器的微型四轴悬停校正系统设计 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (22): 117-120.
- [9] 张毅, 高进可, 王琪 等. 视觉导引智能车的自适应路径规划及控制研究, 测控技术, 2017 年第 11 期 23 页.
- [10] 丁多斌, 冯向萍, 丁燕, 孙元明. 基于 STM32 四轴无人机自主巡线设计 [J]. 电子设计工程, 2021, 29 (02): 142-145.
- [11] 刘义亭, 董梦超 等. 基于 Open MV 的目标跟踪系统设计, 南京工程学院学报 (自然科学版), 2019 年第 3 期.
- [12] 梅妍玘, 傅荣, 基于 Open MV 的小车定位系统研究, 扬州职业大学学报, 2017 年第 12 期.
- [13] 刘义亭, 董梦超 等. 基于 Open MV 的目标跟踪系统设计, 南京工程学院学报(自然科学版), 2019 年第 3 期.
- [14] 梅妍玘, 傅荣, 基于 Open MV 的小车定位系统研究, 扬州职业大学学报, 2017 年第 12 期.
- [15] 衡倩. 预应力碳纤维板锚具系统性能研究 [D]. 重庆大学, 2020.