

# 灭火飞行器

**摘要：**本系统采用 Tiva C 系列 TM4C123G 类型单片机作为控制核心，设计并制作了一个能够寻找并扑灭火源，发现并穿越矩形框的灭火飞行器。激光测距模块、光流模块、UWB 定位模块等传感器组成姿态采集模块，把采集到的位置或者状态信息返回给 MCU。飞行器搭载两个 OpenMV，分别作为对地、对空摄像头。MCU 解算姿态信息和图像信息，使用串级 PID 来调节电调的输出，从而保持或改变飞行状态，完成起落与巡航的任务。经过测试，灭火飞行器实现了自主起飞与悬停、定高飞行巡航、寻找光源灭火、定向穿越、定点降落等功能，并且添加基于数传通信模块的调试功能和失控保护功能。

**关键词：**UWB 室内定位；互补滤波；串级 PID；特征识别；

## 一、系统方案

### 1.1 方案比较与选择

#### 1.1.1 MCU 方案选择与论证

方案一：采用 MSP432。MSP432 以 M0+相近的功耗实现了 48MHZ 的 Cortex-M4F 的性能。具有 DSP 扩展和 FPU 引擎。但是最高主频只有 48MHZ，计算能力较弱。

方案二：采用 TIVA C 系列的 TM4C123G。TM4C123G 提供了包含 FPU 的 80MHZ 的 ARM Cortex M4 内核，外设多且计算能力较高。

由于飞控系统需要实时处理大量传感器数据，对 MCU 的计算能力要求较高，因此本系统采用选择方案二。

#### 1.1.2 控制方案论证与选择

方案一：串级 PID。串级 PID 的优点在于不依赖被控对象的精确模型，因此有效地消除了飞行过程中的过冲、振荡等现象。使飞行器参数整定更快捷，环境适应能力得到提高。恢复时间缩短。缺点是对外部扰动不敏感，系统的稳健性和抗扰性直接存在不可调和的矛盾。只能通过对误差进行积分来补偿，容易发生超调导致反复震荡。

方案二：ADRC。ADRC 自抗扰控制器化解了 PID 稳健性和抗扰性的矛盾，用高增益观测器估计外部扰动，迅速补偿到飞行器上，使调参自由度变大，控制变得平顺和稳健。缺点是应用还不成熟，算法复杂，无法在短期内找到合适的参数。

方案三：模糊 PID。模糊 PID 结合自适应控制理论和模糊理论，能够实时改变飞行策略，使飞控系统的品质指标保持在最佳范围内。但是对于复杂多变的室内环境，辨识模型的精确度低，模糊 PID 的效果有限，而且需要调节的参数太多，控制不流畅。

综上所述，选择方案一。

#### 1.1.3 定位方案选择与论证

方案一：UWB 定位模块和加速度计。UWB 定位模块能够得到精度为厘米的位置参数。但是 UWB 通信存在天线延时、多址干扰和阻隔衰减等缺陷，测距数据出现高频振动，需要布置多个基站，成本太高。

方案二：光流传感器和加速度计。光流传感器具有动态响应快，噪声低的优点，输出频率在 50HZ 以上，但是测量的位移具有累计误差，产生漂移。由于方案一的数据频率带宽太低，控制增益不能增大，控制效果偏弱，而方案二存在无法克服的累积误差。

方案三：UWB 定位模块、光流传感器和加速度计。UWB 定位模块消除累计误差，光流传感器提高数据频率和精度。因为 UWB 定位与光流定位在频率特性上互补，所以可以使用互补融合滤波器进行互补滤波，同时引入加速度计，进行传感器的融合。虽然

存在设计冗余的缺点，但是提高了测量精度和系统的可靠性。

综合以上三种方案，选择方案三。

#### 1.1.4 姿态传感器方案选择与论证

方案一：九轴传感器 MPU9150。集成了加速度计、陀螺仪和磁力计，具有自校准功能，占用电路板面积小，轴向重合度高。同时内置 DMP 用于姿态融合，直接输出四元数，减少了 MCU 的工作负担，简化了程序开发。但是采用 IIC 通信，波特率不到 4K，数据传输不稳定并且更新频率低。

方案二：六轴传感器 ICM20602。使用 spi 通信协议，波特率可以达到 2M。不仅噪音比 mpu6050 小，精度比 mpu6050 高，而且陀螺仪的刷新频率达到 32K，是 mpu6050 的四倍。缺点是没有集成 DMP，得到原始的加速度计和陀螺仪数据后，利用 InvenSense 提供的算法库实现四元数的计算，才能解算出欧拉角。

考虑到飞行器对于姿态解算频率和精度的要求，本系统选择方案二。

### 1.2 总体方案描述

本系统以 TM4C123G 为控制核心。采用激光测距模块、气压计和加速度计 检测高度，ICM20602 六轴姿态传感器采集姿态角数据，使用光流模块实现定点悬停，并配合室内定位模块获取无人机此时的坐标，OpenMV 进行目标追踪和空中避障。主控核心 TM4C123G 处理来自各传感器的数据后，使用串级 PID 控制器实现飞行器的平稳飞行，并运用 FSM 有限状态机设计方法完成整个灭火任务。

## 二、理论分析与计算

### 2.1 飞行建模

四旋翼飞行器是一个非线性、多变量、高度耦合、欠驱动的系统，具有 6 个自由度，4 个输入量。控制系统较为复杂，提出以下假设：

- 1) 机体坐标系的原点为飞行器的质心，并且与飞行器几何中心重合；
- 2) 只考虑螺旋桨产生的气流，而空气流动速度及空气阻力忽略不计；
- 3) 飞行器机体与螺旋桨均为刚体结构，机体的几何构造及质量对称；
- 4) 螺旋桨旋转时产生的反扭矩与转速的平方成正比，螺旋桨产生的升力与转速的平方成正比。

根据以上条件，设  $F$  为飞行器受到的外力和， $m$  为飞行器质量， $V$  为飞行速度， $M$  为飞行器所受力矩之和， $H$  是飞行器相对于导航坐标系的相对动量矩。根据 Newton-Euler 方程得到平移方程： $Fdt = mdV$ ；旋转方程： $Mdt = dH$

设螺旋桨的转速为  $\Omega$ ，升力系数为  $b$ ，那么总升力为  $U_1 = \sum F_i = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)$

根据角动量守恒，设绕  $x, y, z$  轴上受到的力矩分别为  $M_\phi, M_\theta, M_\psi$ ，受到的阻力系数分别为  $K_{x\phi}, K_{y\theta}, K_{z\psi}$ ，根据假设 1 和 3，把惯性张量定义为对角阵  $I = \text{diag}[I_x, I_y, I_z]$ ，那么当三轴的力矩平衡时，忽略空气阻力的影响，得到简化后的模型

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = \frac{U_2}{I_x} \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{U_3}{I_y} \quad \frac{d^2\psi}{dt^2} = \frac{U_z}{I_z}$$

因此，在飞行器的姿态控制模型中，对任何角度均可采用 PID 进行控制。

## 2.2 互补滤波

假设飞行器处于近似悬停状态，把机体的瞬时加速度作为噪声处理后，得到俯仰与横滚方向的修正矢量，然后经过截止频率为 1Hz 的低通滤波，作为对陀螺仪的修正参数。为了实现稳态控制并消除累积误差，采用 PI 控制器进行修正，随后作为陀螺仪信息参与方向余弦矩阵的数据，进行迭代更新处理。

加速度计的静态稳定性更好，陀螺仪的动态稳定性更好。互补滤波的优点是结构简单、代码量和运算量较小，能够在一定程度上补偿加速度计和陀螺仪的优势和劣势。同样应用在室内定位模块，UWB 模块和光流传感器的融合滤波。

由于每个传感器分配的权重固定，并不能有效地根据实际传感器的测量运动，来进行动态调整。所以系统还引入了 Kalman 滤波，采用最优误差估计的方法来动态调整传感器各自的权重分配，达到最小方差的无偏估计

## 2.3 室内定位

$$\begin{cases} x_0^2 + y_0^2 = d_0^2 \\ x_0^2 + (y_0 - b)^2 = d_1^2 \\ (x_0 - b) + y_0^2 = d_2^2 \end{cases} \quad \begin{cases} x_1^2 + y_1^2 = d_1^2 \\ x_1^2 + (y_1 - b)^2 = d_3^2 \\ (x_1 - b) + y_1^2 = d_0^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_2^2 + y_2^2 = d_2^2 \\ x_2^2 + (y_2 - b)^2 = d_3^2 \\ (x_2 - b) + y_2^2 = d_0^2 \end{cases} \quad \begin{cases} x_3^2 + y_3^2 = d_3^2 \\ x_3^2 + (y_3 - b)^2 = d_1^2 \\ (x_3 - b) + y_3^2 = d_2^2 \end{cases}$$

$$4x = x_0 + x_1 + (b - x_2) + (b - x_3)$$

$$4y = y_0 + y_1 + (b - y_2) + (b - y_3)$$

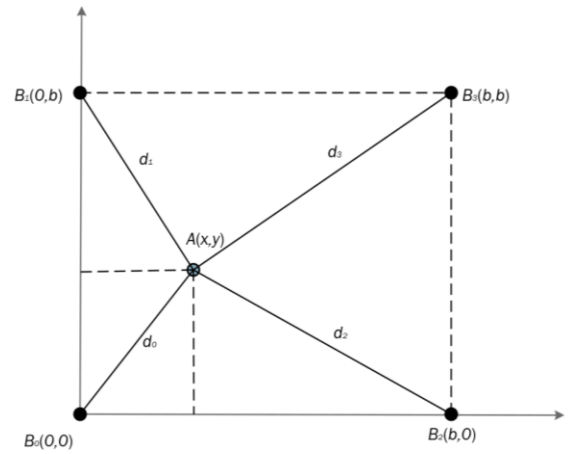


图 1 UWB 原理图

UWB 是一种无载波通信技术，信号频带很宽，接收多径容易分离，抗衰落性能好，能够实现很高的定位精度。飞行器携带发射 UWB 信号的定位标签，通过布设在室内的基站，接收 UWB 信号，滤波后反馈给 MCU。如果飞行器和基站中间有障碍物，UWB 信号会发生绕射、折射、反射和散射，这就是“多路径效应”。这会导致接收的时间变长，测量距离偏大，特别是在结构各异、材料不同的室内传播环境。为了消除多路径效应。为了消除“多路径效应”，系统引入了 TODA 算法。

2.4 特征识别

OpenMV 支持广泛的图像处理功能和神经网络计算,利用 Hough 变换识别圆和直线, ncc 算法进行模板匹配, FAST/AGAST 算法进行目标追踪, canny 算子实现快速边缘检测。在白色背景下,如果亮度允许,通过调节 OV7725 图像传感器的曝光度和对比度,能够把 LED 灯与周围环境分开。查询色块函数或者分辨直线函数,能够获取黑线条的位置。调用识别矩形或者直角的函数,能够检测到矩形框。

三、电路与程序设计

3.1 系统组成描述

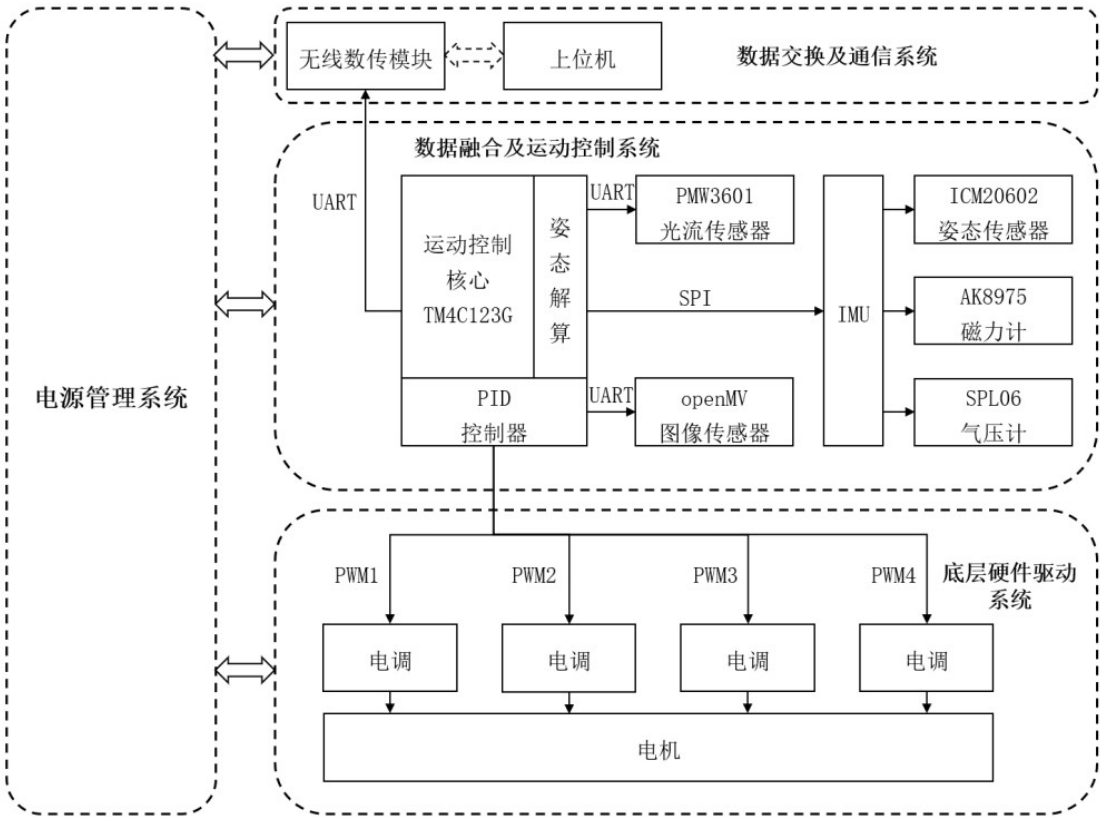


图 2 系统组成框图

系统硬件主要包括电源管理系统、数据交换与通信系统、底层硬件驱动系统、数据融合及运动控制四个子系统。电源管理系统通过分压模块给 MCU 和底层硬件驱动系统供电，数据融合及运动控制用于数据融合、姿态解算与调节，控制协调各模块的工作。数据交换与通信系统用于数传和电脑终端的通信；底层硬件驱动系统由电调、电机、螺旋桨组成，为飞行器提供升力和推动力；IMU 为飞行器提供姿态和高度等信息，激光发射器作为执行器模拟灭火操作。

3.2 电路设计

3.2.1 供电电路

飞行器供电采用 2200mA 航模锂电池，供电  $12V \pm 0.5V$ ，为了给系统提供稳定工作电压，需要降压电路。降压电路采用 TPS5430 开关电源芯片，该芯片能高效地将 12V 电压转化为 5V 低电压，输出电流最大为 3A，满足控制系统系统用电，能够直接给 TIVA 供电，再利用单片机自带稳压电路，得到 3.3V。同时，添加了电压监测电路，利用简单的分压电路，得到实时的电池电压值，防止电源电压不足导致的无人机飞行不稳定或是过度放电导致电池损坏。详细的电路图被放置在附录中。

3.2.1 IMU 传感器电路

考虑到机身震动对姿态传感器测量带来的误差，将相关传感器与其他部分分隔开，利用物理减震装置优化姿态传感器测量环境。同时考虑到 MCU 大量通信口占用，采用同一 SPI 通信多个使能端对 ICM20602、SPL06、AK8975 进行信息读取。详细的电路图被放置在附录中。

3.2 程序设计

3.2.1 航线规划

飞行器从 A 处进入防区，依次扫描 T1、T2、T3、T4 是否有火源。到达 T4 区后，如果已经熄灭全部火源，则从 B 处推出，否则返回 T1 区，开始新一轮巡逻。如果已知火源的数量，那么在灭火数量足够的情况下返航。如果火源的数量是未知的，只能覆盖飞行整个区域后才能返航。

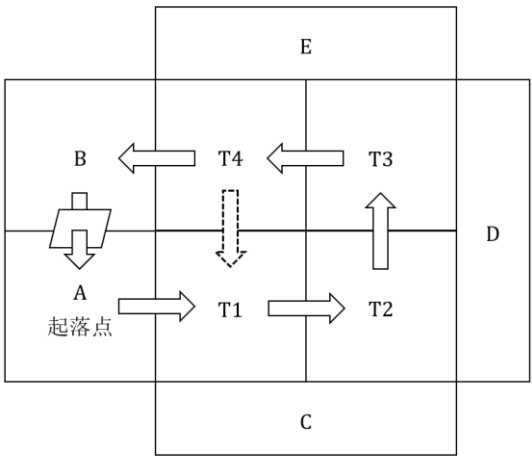


图 3 航线规划图

3.2.2 主程序流程图

本系统采用 FSM 有限状态机设计方法，实现整个灭火过程的程序控制。系统根据飞行器的需要执行的任务，主要分为以下七个状态：

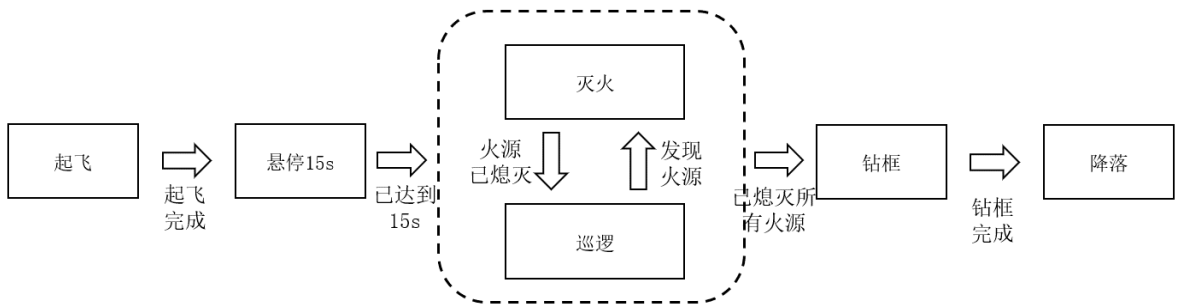


图 4 系统流程图

- 1)起飞悬停：初始化定位模块和对地 OpenMV 模块。
- 2)查找火源：根据 OpenMV 的输入视野大小和整个防区面积，计算和规划最优的防区覆盖飞行路线。接近防区边缘时，通过识别色块和直线确定终点。
- 3)发现火源：由于 OpenMV 对于灯光十分敏感，主要利用红色 LED 的颜色识别
- 4)灭火：通过串级 PID 算法，控制飞行器的移动以及激光二极管的侧偏动作。
- 5)找框：利用定位模块，确认框所在的可疑区域。飞行器原点悬停，对空 OpenMV 打开，识别相互垂直的直线，交点位置就是框的顶点的位置。
- 6)钻框：对空 OpenMV 进行矩形识别。如果没有找到矩形，飞行器就会悬停转向，调整中心位置，旋转对空 OpenMV 重新识别。在框占据 OpenMV 中心位置后，借助矩形的位置和像素数目的变化，计算框的中心位置与自身位置的偏差。采用 PID 调整飞行航路，使飞行器在矩形框正面的中心位置穿越矩形框。
- 7)返航：根据整个飞行过程中记录的航线数据，在定位模块协助下，推算自身位置后反复靠近返航点。当返航点处于对地 OpenMV 视野中心时，准备降落。

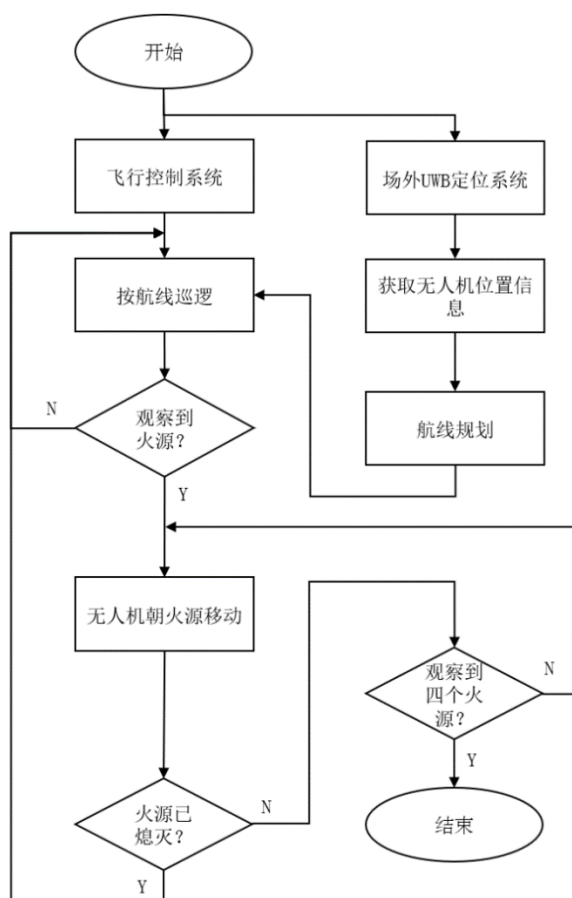


图 5 灭火流程图

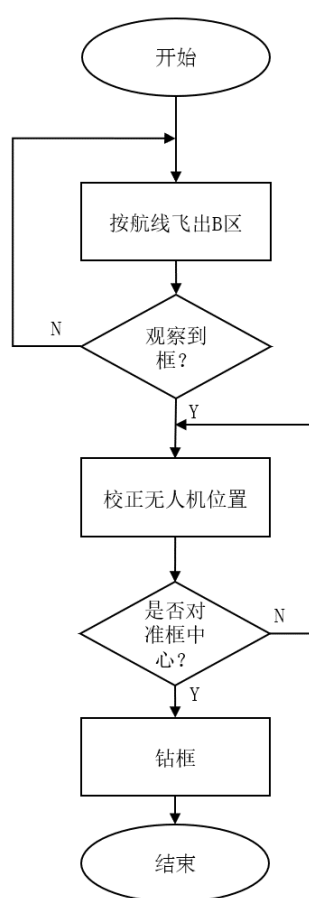


图 6 钻框流程图

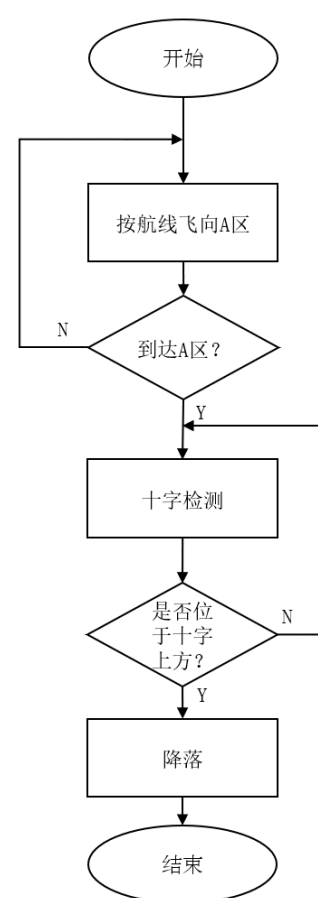


图 7 降落流程图

### 3.2.3 串级 PID

位置环 PID 负责飞行器的导航飞行，通过识别地面的参照物，自动规划飞行路线。姿态环使用串级 PID 控制器，在单级角度控制器的基础上，添加内环角速度闭环控制器。内环角速度控制器的输入为外环角度控制器的输出。先对外环输出进行离散化处理，量化区间为[0, 1]，再与最大允许角速度相乘得到具体的期望角速度，陀螺仪测量出当前的实际角速度，它们的偏差作为内环 PID 调节的输入量。由于实际角速度不经过积分处理，能够快速直接地反应。

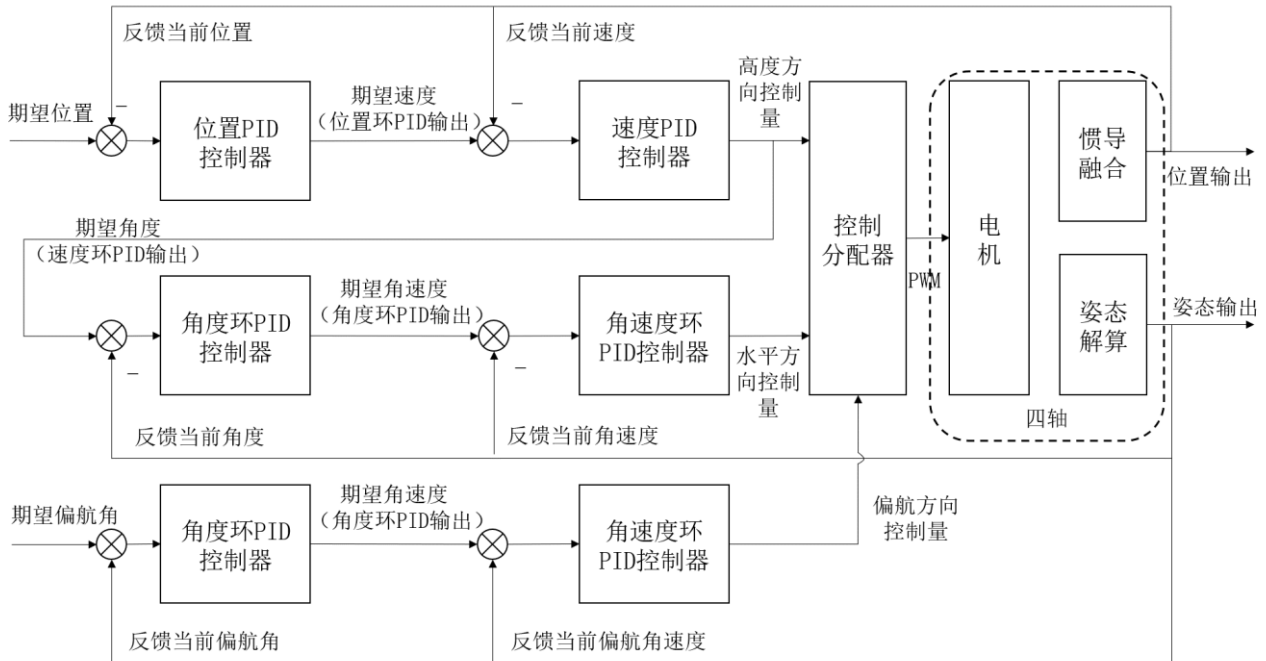


图 8 本系统采用的串级 PID

### 3.2.3 特征识别

利用 OpenMV 采集彩色或者灰度图像，然后对像素点进行二值化处理。OpenMV 自身的抖动会带来较大误差，因此需要根据机身倾斜角度进行投影变换，变换成水平面上的投影坐标系。由于场地背景是白色，识别红色 LED 灯或者黑色线条时，可以直接搜索图片中的黑色块、红色块及线条。通过获取目标点的中心坐标与拍摄图像的像素长度、飞行高度计算出飞行器与目标的水平位置，并和上一帧的位置比较，作为控制飞行器移动方向的变量。

在巡航开始与结束时，利用 OpenMV 识别黑色线条来找出左右区域边界。通过黑色块反馈像素点的数目来修正航向。识别到正前方的黑色块后，放慢巡航速度，当黑色块的像素数目到达阈值时，开始向两侧偏航，随后返航，多次重复直到发现黑色方框。穿越黑色框后，利用识别四周的四个矩形，间接识别红色的“十”字，找到下落的位置。

## 四、测试方案和结果



#### 4.1 测试条件

光照均匀，地面避免反光材料，具有一定纹理，0.5W 的红色 LED 灯代替火源，测试场地干净而宽敞，矩形框位置可以移动。

#### 4.2 测试要求与结果

测试要求 1：飞行器从起飞地点垂直起飞升高到 $150cm \pm 10cm$  的巡航高度

测试结果 1：起飞时飞行器稳步上升，到达预定高度

测试要求 2：在起飞点的巡航高度上悬停 15 秒后，以巡航高度从 A 处进入防区巡航飞行

测试结果 2：飞行器在到达指定高度时缓慢减速，稳定在当前位置

测试要求 3：飞行器发现防区内的火源后，飞往火源上方用激光笔照射火源作为灭火，激光笔光斑以火源为中心，直径 20cm 圆形区域保持 2 秒及以上视为灭火成功。

测试结果 3：飞行器发现了所有火源，在火源上方停留了 3 秒以上直至灭火成功。

测试要求 4：飞行器从 B 处飞离防区

测试结果 4：飞行器成功进入 B 区并从 B 区返航。

测试要求 5：返航途中穿过一个宽高  $100 \times 70cm$  的矩形框

测试结果 5：多次移动框的位置后，飞行器依然能够发现并且穿越矩形框。

测试要求 6：回到降落点上方，垂直下降，准确平稳地落在降落点

测试结果 6：飞行器找到降落点，并且沿垂直方向平稳地降落

测试要求 7：整个飞行过程的计时

测试结果 7：飞行器在 2 分钟内实现了整个过程，最短 1 分 5 秒，最多 1 分 30 秒。

### 五、总结

本系统采用 Tiva 和 OpenMV 相结合。飞行器能够从起飞点飞往灭火防区，发现火源后，进行灭火动作，完成灭火工作之后返航，其中返航要求穿越指定的矩形框。本系统能快速准确完成功能要求，但在提高灵敏度，如识别矩形框，选取 PID 参数等方面还有改进空间。灭火飞行器能够稳定地飞行、精确地定位。灭火飞行器飞行时高度准确并可以任意调整，飞行姿态稳定，响应迅速。综上所述，本系统实现了题目的所有要求，并且具有一定的指标拓展，功能全面，性能稳定。



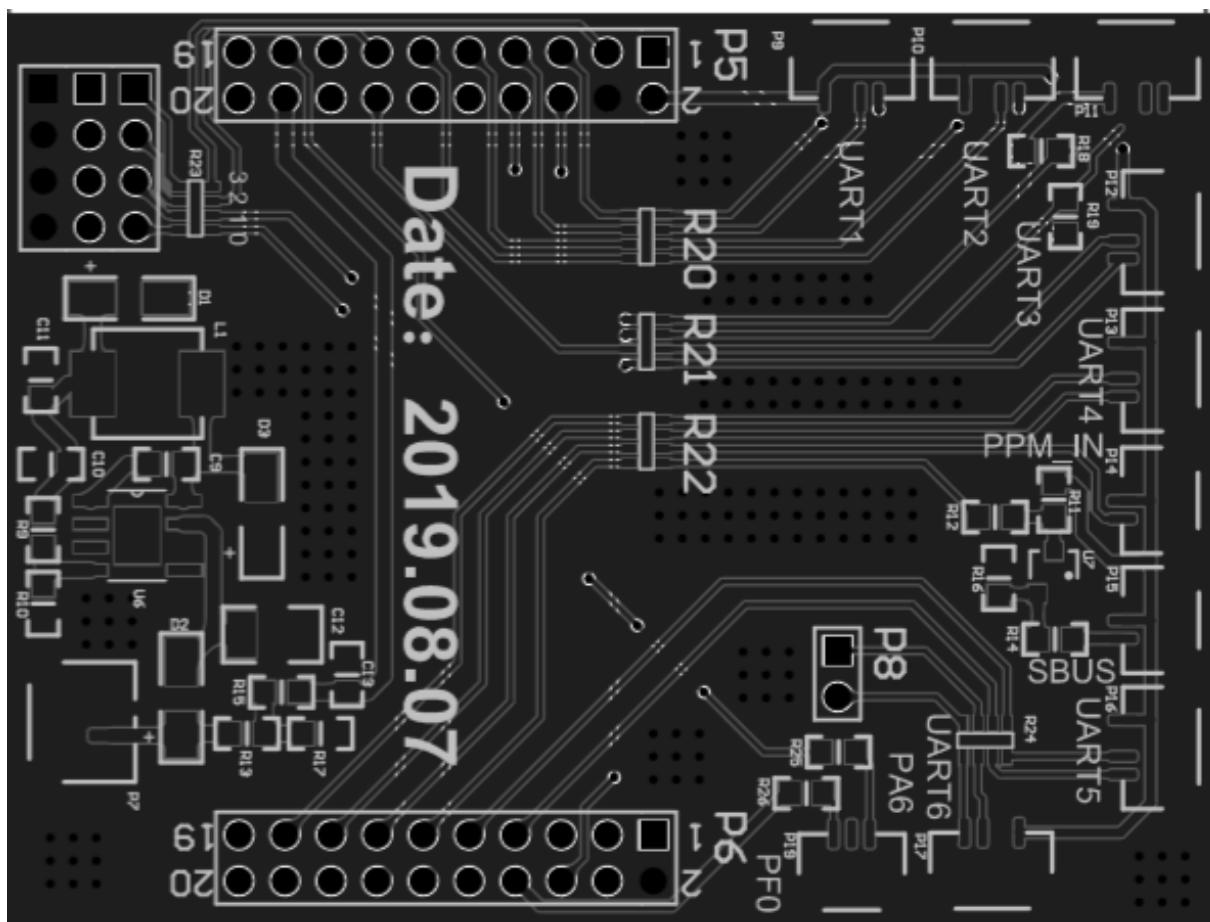


图 10 飞行器 pcb 电路板

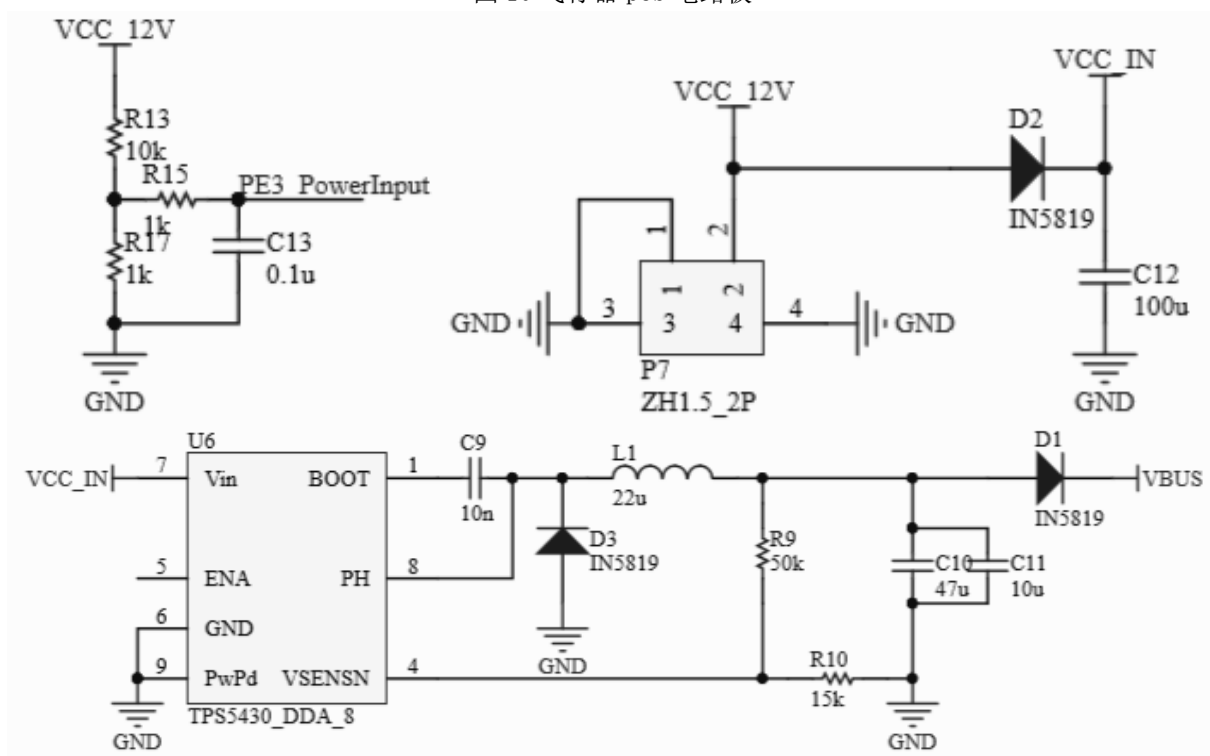


图 11 供电模块原理图