



---

# RflySim 底层飞行控制算法 开发系列课程

## 第十一讲 半自主控制模式设计实验



# 大纲

---

1. 实验原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 小结



## □ 半自主控制的三种模式

通常，根据自驾仪自主控制的程度，把处于半自主控制下的多旋翼分为3种模式：

- 自稳模式 (Stabilize Mode)
- 定高模式 (Altitude Mode)
- 定点模式 (Position Mode)



# 实验原理

## □ 半自主控制的三种模式

通常，根据自驾仪自主控制的程度，把处于半自主控制下的多旋翼分为3种模式：

- 自稳模式 (Stabilize Mode)
  - 定高模式 (Altitude Mode)
  - 定点模式 (Position Mode)
- 在自稳模式下飞控手可以利用遥控器的滚转/俯仰摇杆控制多旋翼的滚转/俯仰角，从而控制其前后左右飞行，此时，如果不同时调整升降摇杆，多旋翼的高度会改变，若想使多旋翼保持定点悬停，飞控手需要不断调整遥控器的所有摇杆。
  - 当飞控手释放摇杆时，多旋翼会自动保持自身水平，但是位置会漂移。此外，飞控手可以利用遥控器的偏航摇杆控制多旋翼的偏航角。当飞控手释放偏航摇杆时，多旋翼会保持当前机头方向。



# 实验原理

## □ 半自主控制的三种模式

通常，根据自驾仪自主控制的程度，把处于半自主

控制下的多旋翼分为3种模式：

- 自稳模式 (Stabilize Mode)
- 定高模式 (Altitude Mode)
- 定点模式 (Position Mode)

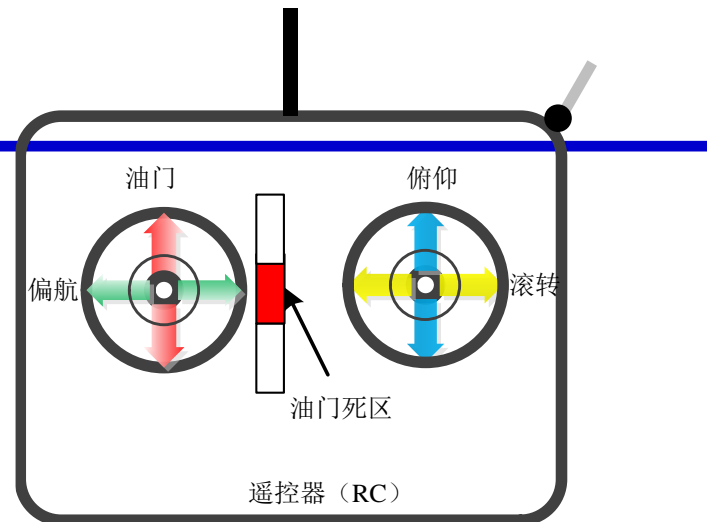


图. 遥控器摇杆示意图

- 如图所示，当油门摇杆位于死区范围时，油门被自动地调整来保持当前的高度，飞行器进入定高状态，飞控手需要不断地调整遥控器的滚转/俯仰摇杆保持悬停。
- 一旦油门摇杆离开死区范围，多旋翼将以期望的速度上升或下降。高度控制模式需要高度传感器的支持才能实现，例如气压计、超声波测距仪等。



# 实验原理

## □ 半自主控制的三种模式

通常，根据自驾仪自主控制的程度，把处于半自主控制下的多旋翼分为3种模式：

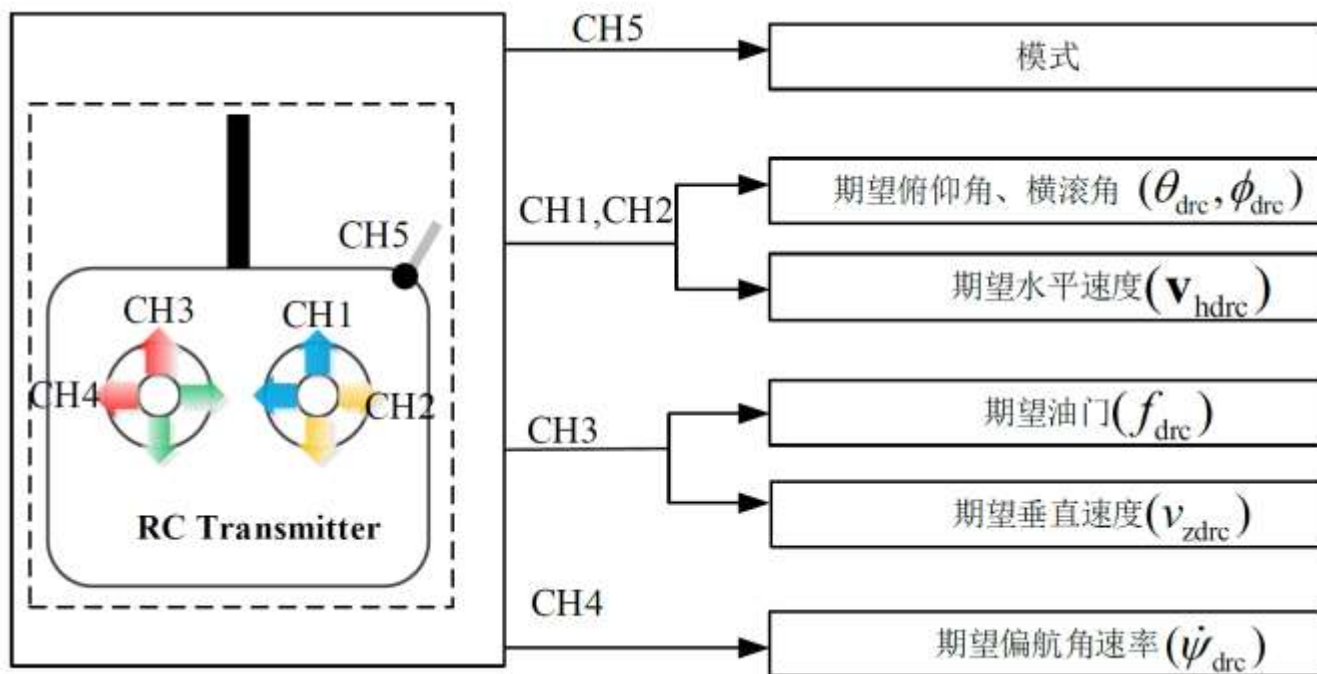
- 自稳模式 (Stabilize Mode)
- 定高模式 (Altitude Mode)
- 定点模式 (Position Mode)

- 定点模式下，当飞控手释放滚转/俯仰摇杆，偏航摇杆，并将油门摇杆推到死区范围时，多旋翼将保持当前的水平位置、航向和高度，即进入悬停状态。高精度的GPS位置信息、磁罗盘信息以及机身低振动对保持良好的悬停效果非常重要。
- 飞控手可以通过推动摇杆使多旋翼以指定的速度在三维空间中运动。位置控制模式需要测高仪器和位置传感器的支持才能实现，例如GPS和摄像机等。



# 实验原理

## □ 遥控（RC）输出



- ch5是一个三段式开关，可以对应输出三种模式（自稳模式、定高模式、定点模式）。
- ch1、ch2通道的输出可同时转换成期望姿态角和期望的水平速度。
- ch3通道的输出可同时转换成期望的油门和期望的垂直速度。
- ch4通道直接转换成期望的偏航角速率，对角速率积分得到期望偏航角。



# 实验原理

## □ 自驾仪半自主控制模式实现

### (1) 自稳模式 ( Stabilize Mode )

自稳模式根据期望姿态  $\theta_{\text{drc}}, \phi_{\text{drc}}, \psi_{\text{drc}}$  产生期望扭矩，期望油门即为  $f_{\text{drc}}$ ，相当于纯姿态控制。已知期望姿角  $\Theta_d = [\theta_{\text{drc}} \ \phi_{\text{drc}} \ \psi_{\text{drc}}]^T$ ，设计控制器使得  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_{\Theta}(t)\| = 0$ ，其中  $\mathbf{e}_{\Theta} \triangleq \Theta - \Theta_d$ 。为了达到这个目的，我们先针对

$$\dot{\Theta} = \omega$$

设计角速度的期望  $\omega_d$  为

$$\omega_d = -\mathbf{K}_{\Theta} \mathbf{e}_{\Theta}$$

其中  $\mathbf{K}_{\Theta} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  所有元素都大于0。以上两式构成了角度控制环。





# 实验原理

## □ 自驾仪半自主控制模式实现

### (1) 自稳模式 ( Stabilize Mode )

针对

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\tau}$$

设计转矩的期望  $\boldsymbol{\tau}_d$  :

$$\boldsymbol{\tau}_d = -\mathbf{K}_{\omega_p} \mathbf{e}_{\omega} - \mathbf{K}_{\omega_i} \int \mathbf{e}_{\omega} - \mathbf{K}_{\omega_d} \dot{\mathbf{e}}_{\omega}$$

其中  $\mathbf{e}_{\omega} \triangleq \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}_d$  ,  $\mathbf{K}_{\omega_p}, \mathbf{K}_{\omega_i}, \mathbf{K}_{\omega_d} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  。以上两式构成了角速度控制环。



## □ 自驾仪半自主控制模式实现

### (2) 定高模式 ( Altitude Mode )

定高模式下，期望的油门不再由遥控器直接指定，而是通过位置控制器中高度通道的输出给定。期望的力矩仍然由遥控器输入的期望姿态角经姿态控制器产生，这一点与自稳模式相同。

若给定期望高度，对

$$\dot{p}_z = v_z$$

设计期望的速度为

$$v_{z_d} = K_{p_z} (p_{z_d} - p_z) + v_{z_{drc}}$$



## □ 自驾仪半自主控制模式实现

### (2) 定高模式 ( Altitude Mode )

针对

$$\dot{v}_z = g - \frac{f}{m}$$

设计期望的加速度为

$$\dot{v}_{zd} = -K_{vzp}e_{v_z} - K_{vzi}\int e_{v_z} - K_{vzd}\dot{e}_{v_z}$$

其中  $e_{v_z} = v_z - v_{zd}$

进一步得到期望油门值为

$$f_d = m(g + K_{vzp}e_{v_z} + K_{vzi}\int e_{v_z} + K_{vzd}\dot{e}_{v_z})$$



# 实验原理

## □ 自驾仪半自主控制模式实现

### (2) 定高模式 ( Altitude Mode )

油门摇杆进入死区范围的时刻记为  $t_d$ ，此时高度估计量  $\hat{p}_z(t_d)$  被保存为  $p_{z_{dold}} = \hat{p}_z(t_d)$ ， $v_{z_{drc}} = 0$ 。

此时多旋翼将进入高度保持状态

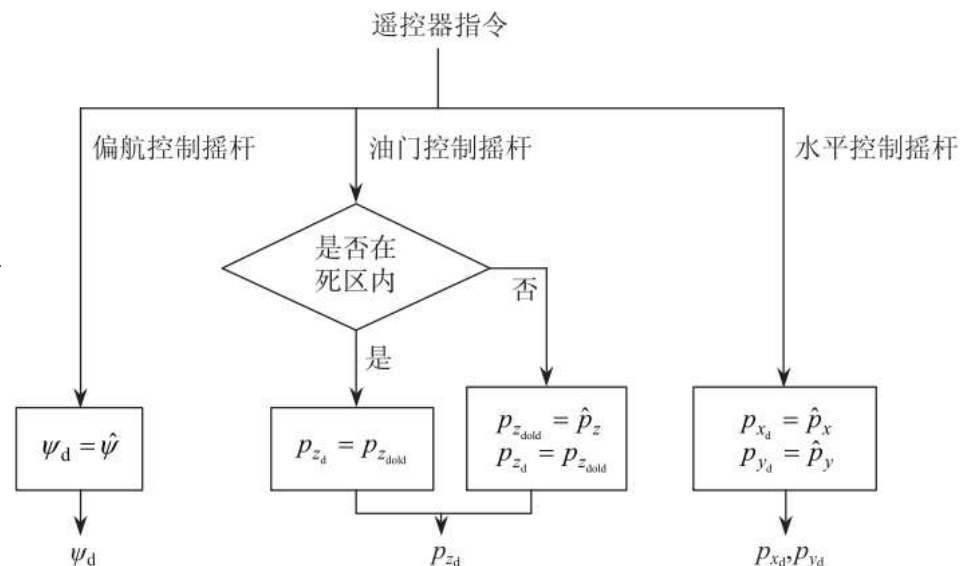
$$p_{z_d} = p_{z_{dold}}$$

多旋翼高度被自动调节在  $\hat{p}_z(t_d)$ 。

当油门摇杆不在死区范围内时，多旋翼进入手动控制模式

$$p_{z_d} = \hat{p}_z \quad v_{z_d} = v_{z_{drc}}$$

此时油门通道控制的是Z轴方向的速度。与自稳模式相似，由于没有水平位置反馈，多旋翼不能保持悬停。高度保持模式通常用在测高仪器可以正常使用而位置传感器不可使用的场合。





## □ 自驾仪半自主控制模式实现

### (3) 定点模式 (Position Mode)

定点模式下，期望的油门由位置控制器中高度通道的输出给定，这点与高度控制模式相同。

期望力矩由位置控制器中水平位置通道产生的期望姿态角再经姿态控制器得出。

给定期望水平位置，对

$$\dot{\mathbf{p}}_h = \mathbf{v}_h$$

设计期望的速度为

$$\mathbf{v}_{hd} = \mathbf{K}_{Ph} (\mathbf{p}_{hd} - \mathbf{p}_h) + \mathbf{v}_{hdrc}$$



# 实验原理

## □ 自驾仪半自主控制模式实现

### (3) 定点模式 (Position Mode)

针对

$$\dot{\mathbf{v}}_h = -g \mathbf{A}_\psi \Theta_h$$

设计期望的加速度为

$$\dot{\mathbf{v}}_{hd} = -\mathbf{K}_{vhp} \mathbf{e}_{v_h} - \mathbf{K}_{vhi} \int \mathbf{e}_{v_h} - \mathbf{K}_{vhd} \dot{\mathbf{e}}_{v_h}$$

其中  $\mathbf{e}_{v_h} = \mathbf{v}_h - \mathbf{v}_{hd}$

进一步得到期望姿态角为

$$\Theta_{hd} = -g^{-1} \mathbf{A}_\psi^{-1} (-\mathbf{K}_{vhp} \mathbf{e}_{v_h} - \mathbf{K}_{vhi} \int \mathbf{e}_{v_h} - \mathbf{K}_{vhd} \dot{\mathbf{e}}_{v_h})$$

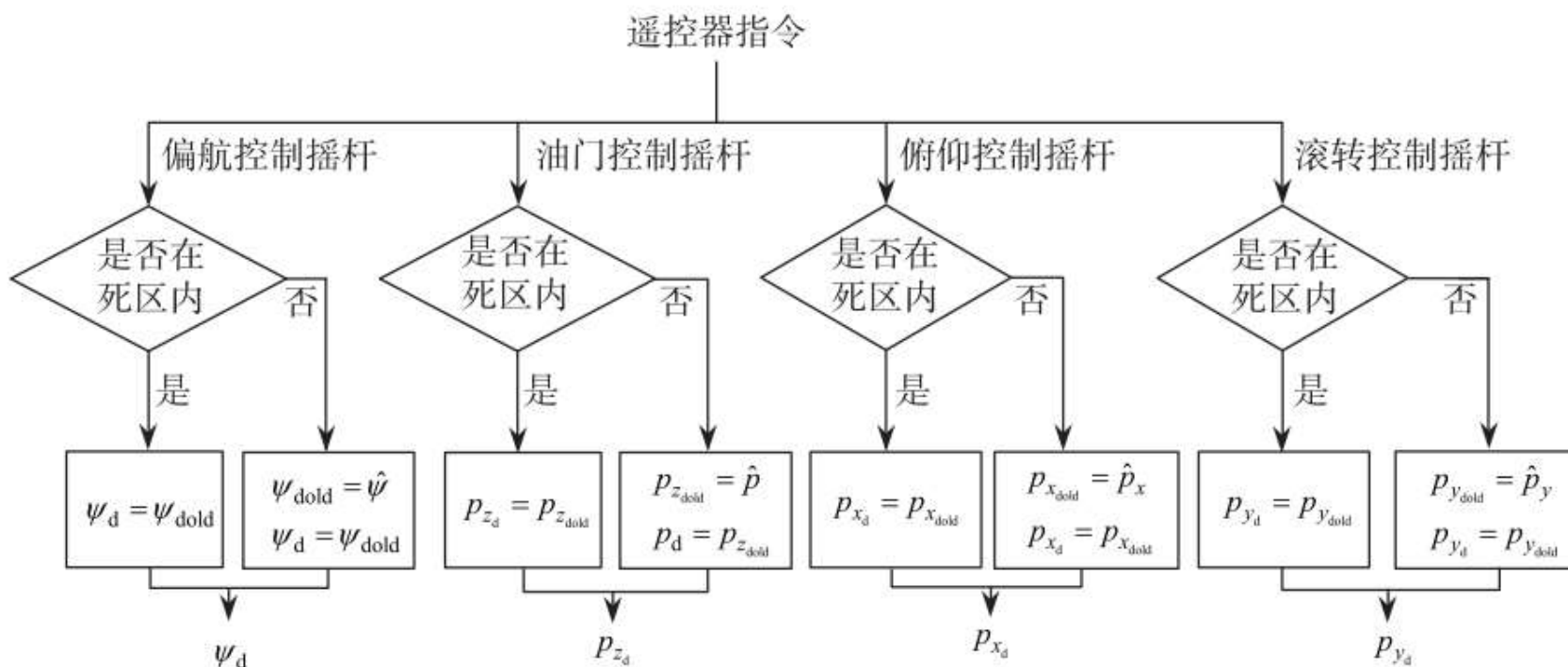
水平通道的实现与定高模式完全相同。



# 实验原理

## □ 自驾仪半自主控制模式实现

### (3) 定点模式 (Position Mode)





# 实验原理

## □ 自驾仪半自主控制模式实现

### (3) 定点模式 (Position Mode)

俯仰/滚转摇杆进入死区范围的时刻记为  $t_d$ ，此时水平位置估计量  $\hat{\mathbf{p}}_h(t_d)$  被保存为  $\mathbf{p}_{hdold} = \hat{\mathbf{p}}_h(t_d)$ ， $\mathbf{v}_{hdrc} = 0$ 。此时多旋翼将进入位置保持状态

$$\mathbf{p}_{hd} = \mathbf{p}_{hdold}$$

多旋翼水平位置被自动调节在  $\hat{\mathbf{p}}_h(t_d)$ 。

当俯仰/滚转摇杆不在死区范围内时，多旋翼进入手动控制模式

$$\mathbf{p}_{hd} = \hat{\mathbf{p}}_h \quad \mathbf{v}_{hd} = \mathbf{v}_{hdrc}$$

此时俯仰/滚转通道控制的是水平方向的速度。

当多旋翼进入位置保持状态和高度保持状态时，即此时摇杆全部回中，多旋翼将保持定点悬停（偏航通道仍可手动控制）。





## 实验原理

---

以上原理可以详细参考“Quan Quan. *Introduction to Multicopter Design and Control*. Springer, Singapore, 2017”或者“全权著. 杜光勋, 赵峙尧, 戴训华, 任锦瑞, 邓恒译. 《多旋翼飞行器设计与控制》, 电子工业出版社, 2018.”的第11、13章。





## □ 实验目标

### ■ 已知

- (1) 硬件：Pixhawk 自驾仪系统，多旋翼硬件系统；
- (2) 软件：MATLAB 2017b 或以上的版本，基于 Simulink 的控制器设计与仿真平台，硬件在环仿真平台，实验指导包 “[RflySim3D\Exp02\\_FlightControl\c7-SemiAutoCtrl\c7.1](https://rflysim.com/course)” (<https://rflysim.com/course>)。

### ■ 目标

- (1) 在基于 Simulink 的控制器设计与仿真平台上，复现仿真实验分析四旋翼姿态和位置响应的特点；记录当期望姿态为零时的水平位置响应；记录当油门回中时的高度响应；
- (2) 完成硬件在环仿真。



# 基础实验

---

## □ 实验步骤

见“[RflySim3D\Exp02\\_FlightControl\7-SemiAutoCtrl\7.1\readme.docx](#)”



# 分析实验

---

## □ 实验目标

### ■ 已知

- (1) 硬件：Pixhawk 自驾仪系统，多旋翼硬件系统。
- (2) 软件：MATLAB 2017b 或以上的版本，基于 Simulink 的控制器设计与仿真平台，硬件在环仿真平台，实验指导包 “[RflySimAPI\Exp02\\_FlightControl\e7-SemiAutoCtrl\e7.2](https://rflsim.com/course)” （下载地址：<https://rflsim.com/course>）。

### ■ 目标

- (1) 在自稳模式的基础上改成定高模式。根据实验分析，与自稳模式相比，多旋翼在定高模式下姿态和位置输出值的变化。
- (2) 完成硬件在环仿真。

## □ 实验分析

自稳模式闭环控制框图如图所示，Switch1 选择  $\theta_{\text{drc}}$  和  $\phi_{\text{drc}}$  作为期望姿态角（期望偏航角在三种模式下的来源相同），而Switch2 选择  $f_{\text{drc}}$  作为期望油门。

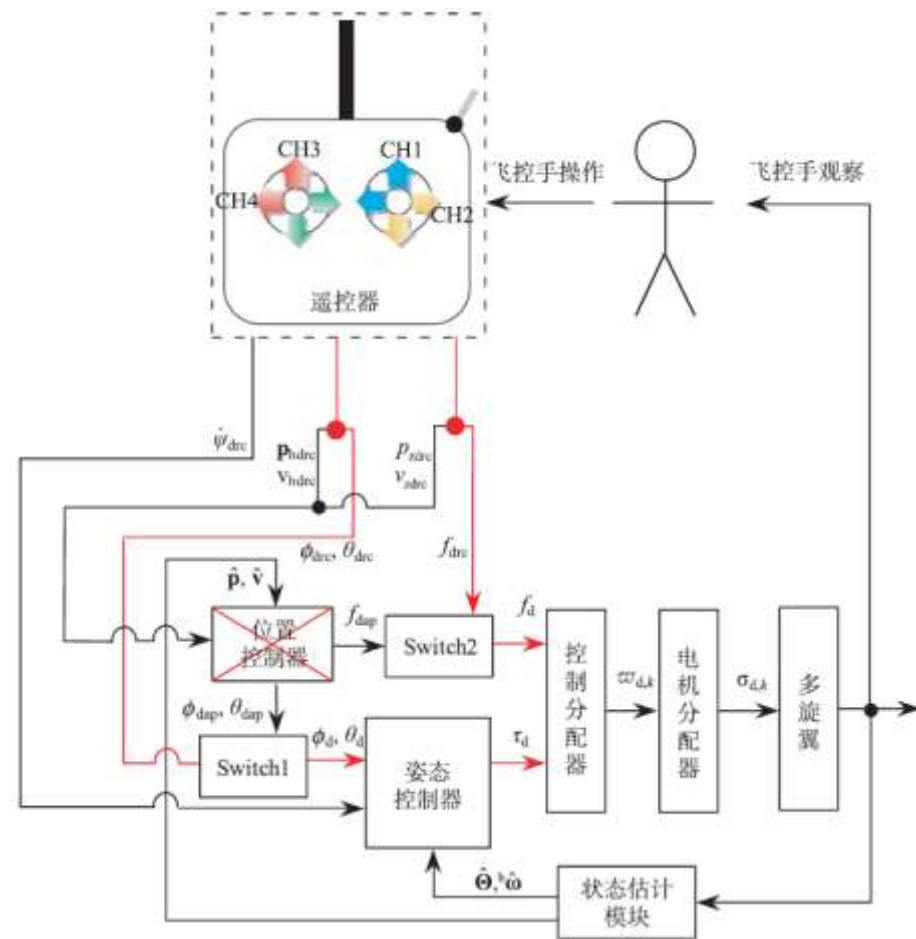


图. 自稳模式实现闭环



# 分析实验

## □ 实验分析

高度控制模式下，Switch1 选择  $\theta_{\text{drc}}$  和  $\phi_{\text{drc}}$  作为期望姿态角，而 Switch2 选择  $f_{\text{dap}}$  作为期望油门，高度控制闭环控制框图如图所示。

为实现高度控制，需要将遥控器CH3的输入转化为  $v_{\text{zdrc}}$ ，它经过高度控制器之后会产生期望油门  $f_{\text{dap}}$ 。

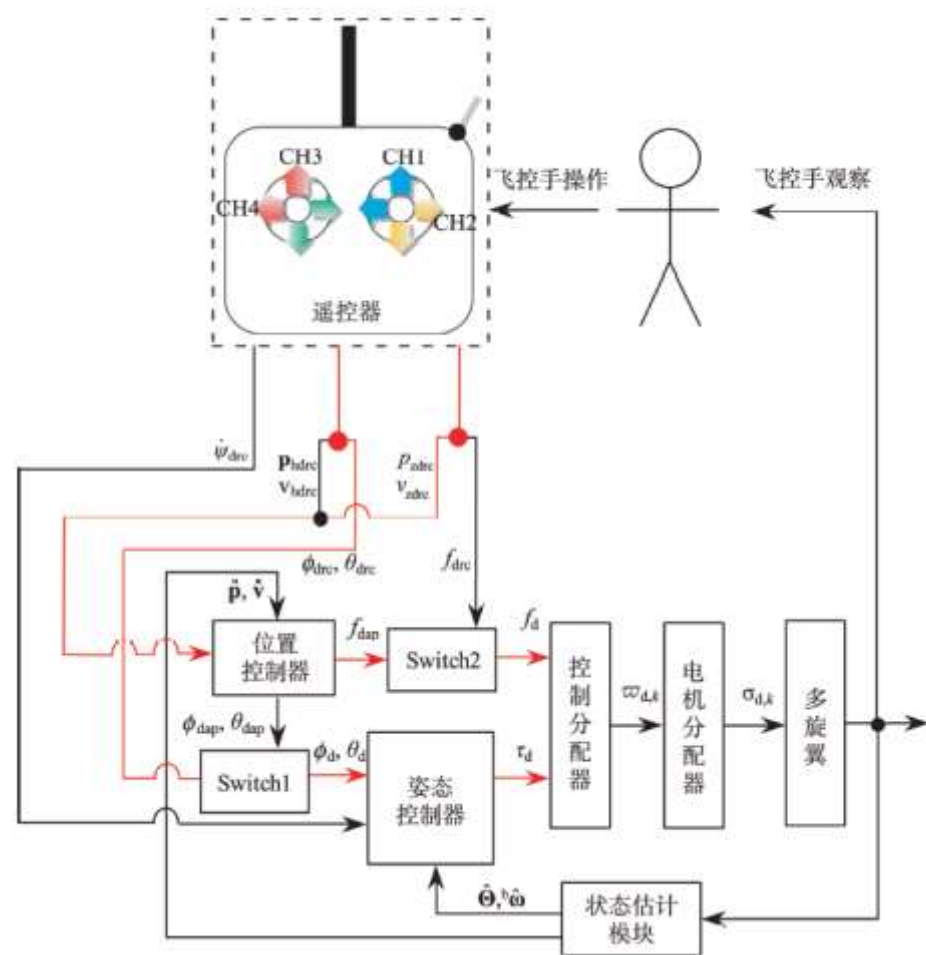


图. 高度控制实现闭环



# 分析实验

---

## □ 实验步骤

见“[RflySim3D\Exp02\\_FlightControl\7-SemiAutoCtrl\7.2\readme.docx](#)”

图. 高度通道遥控器信号响应





# 设计实验

---

## □ 实验目标

### ■ 已知

- (1) 硬件：Pixhawk 自驾仪系统，多旋翼硬件系统。
- (2) 软件：MATLAB 2017b 或以上的版本，基于 Simulink 的控制器设计与仿真平台，硬件在环仿真平台，实验指导包 “[RflySim3D\Exp02\\_FlightControl\e7-SemiAutoCtrl\e7.3](#)” （下载地址：<https://rflsim.com/course>）。

### ■ 目标

- (1) 在自稳模式的基础上改成定点模式。根据实验分析，与自稳模式相比，多旋翼在定点模式下姿态和位置输出值的变化。
- (2) 利用三段拨码开关实现三种模式的自由切换，完成硬件在环仿真实验和实飞实验。

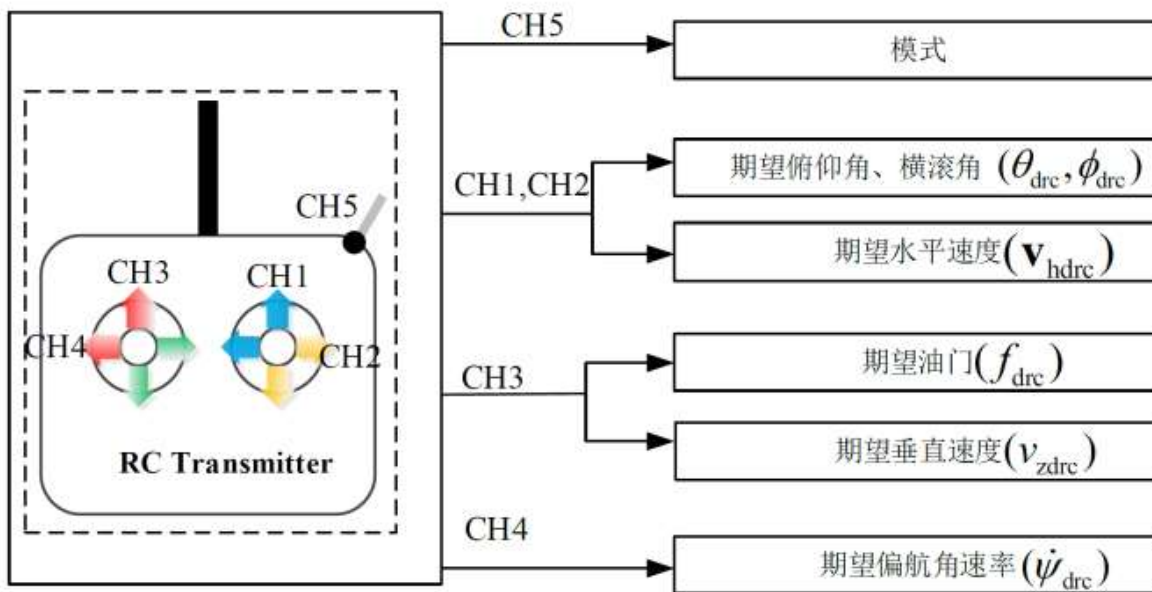




## □ 实验设计

### 1) 位置控制模式设计

- 遥控器ch3的输入被转换成两种输出，一个是期望油门  $f_{\text{drc}}$ ，另一个是给位置控制器的期望的z轴速度  $v_{\text{zdrc}}$ 。
- ch1和ch2的输入也被转换成两种输出，一个是期望俯仰角和滚转角  $\theta_{\text{drc}}, \phi_{\text{drc}}$ ，另一个是给位置控制器的期望x、y轴速度  $v_{\text{hdrc}}$ 。





# 设计实验

## □ 实验设计

### 1) 位置控制模式设计

位置控制模式：switch1选择  $\theta_{\text{dap}}, \phi_{\text{dap}}$

作为期望姿态角，switch2选择  $f_{\text{dap}}$  作为

期望油门。

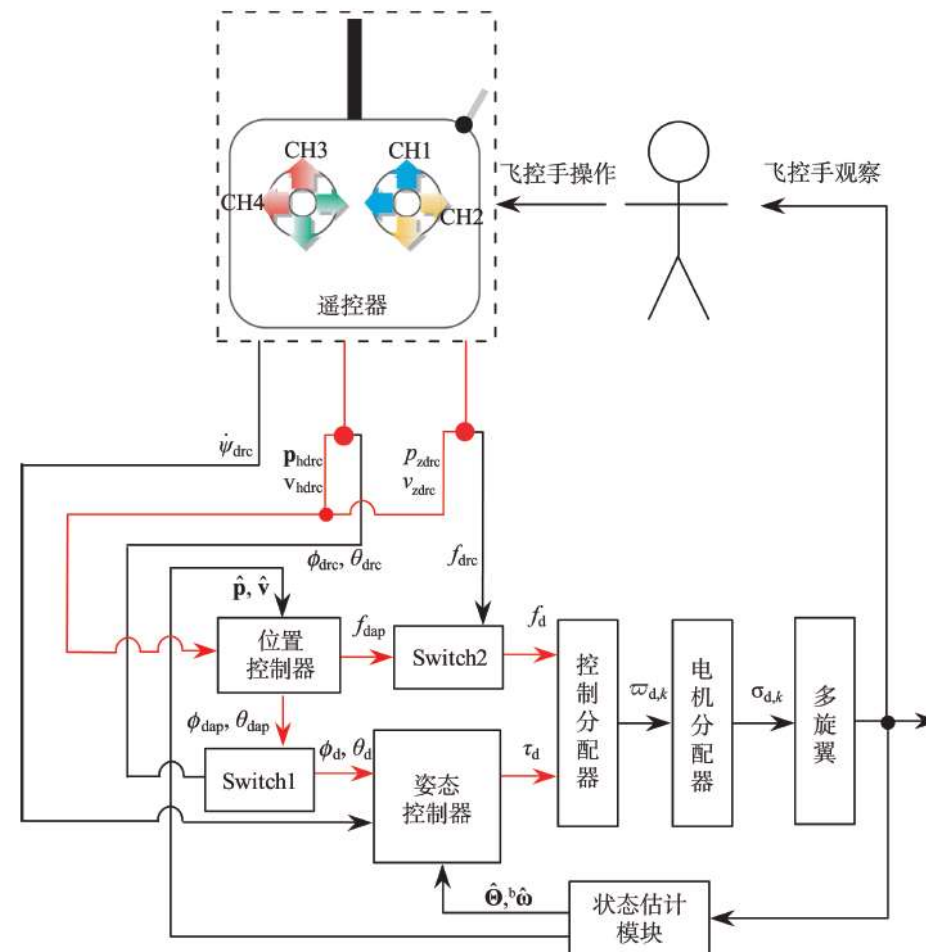


图. 位置控制实现闭环



## □ 实验设计

### 2) 设置位置保持死区

位置保持死区设置与定高的死区设置相同。若给u输入[1000, 2000]的斜坡信号，则对应的输出如图，这里同时对输入信号进行了归一化处理所以输出的信号幅值在 $[-1, 1]$ 。

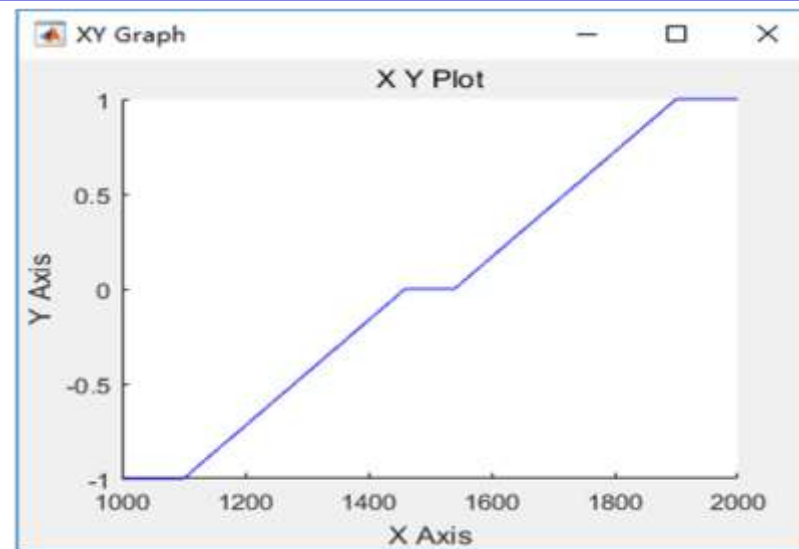


图. 遥控器信号响应

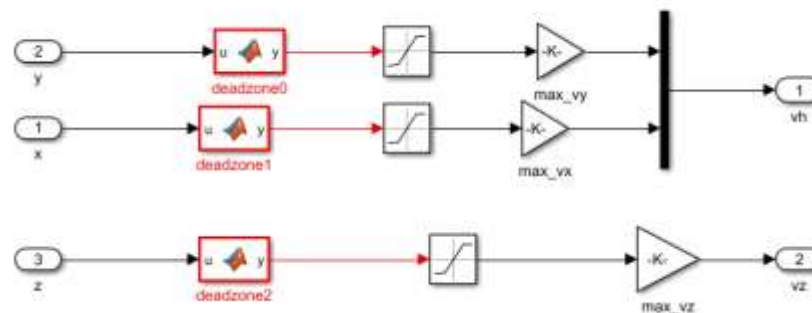


图. 遥控器信号处理



## □ 实验设计

### 3) 设置期望水平位置。

当遥控器摇杆偏离中间时，对于AC来说，期望位置即为当前位置，此时位置反馈无效，只存在速度反馈。当摇杆在中间位置时，期望位置为摇杆回到中间时刻的位置  $p_{dold}$ ，若摇杆一直在中间位置，期望位置一直保持  $p_{dold}$  不变。

```
1 function [vx_d,vy_d,vz_d,x_d,y_d,z_d] = fcn(vxd,vyd,vzd,x,y,z,vx,vy,vz)
2 persistent x1;
3 if isempty(x1)
4     x1=0;
5 end
6 ...
7 persistent hold_x_flag;
8 if isempty(hold_x_flag)
9     hold_x_flag=0;
10 end
11 ...
12 if abs(vxd)<0.001&&abs(vx)<8 %摇杆进入死区，且速度较小，启用位置控制
13     hold_x=1;
14 else
15     hold_x=0;
16 end
17
18 if (hold_x>0.5)&&(hold_x_flag<0.5)%启用了位置控制，进入定点状态
19     x1=x;
20     hold_x_flag=1;
21 end
22
23 if hold_x<0.5%没有启用定高，期望位置即为当前位置
24     x1=x;
25     hold_x_flag = 0;
26 end
27 x_d=x1;y_d=y1;z_d=z1;
    vx_d=vxd;vy_d=vyd;vz_d=vzd;
```





## □ 实验设计

### 4) 设计模式转换控制器

设置遥控器的一个三段开关为模式切换开关，这里将遥控器CH5设置为模式切换开关。

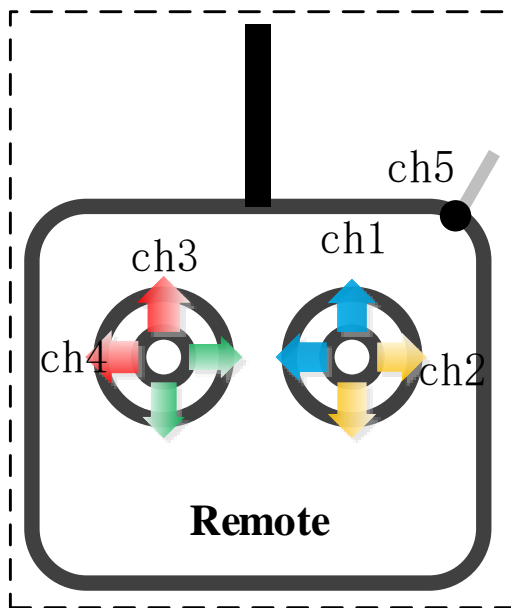


图. 遥控器示意图

对于ch5，将其设置为值在 1000–1400 时，多旋翼为自稳模式；值在 1400–1600 时，多旋翼为高度控制模式；值在 1600–2000 时，多旋翼为位置控制模式。

```
1  function control_mode = fcn(ch5)
2  %0: 自稳模式
3  %1: 定高模式
4  %2: 定点模式
5  if ch5<1400
6      control_mode=0;
7  elseif ch5<1600
8      control_mode=1;
9  else
10     control_mode=2;
11 end
```





# 设计实验

---

## □ 实验步骤

见 “[RflySim3D\Exp02\\_FlightControl\e7-SemiAutoCtrl\e7.3\readme.docx](#)”





## 小结

---

(1) 在基础实验中，如果不存在常值扰动时，是属于理想状态，此时不会出现任何偏差，多旋翼飞行器会在自稳模式下，保持期望的姿态和位置，但是由于环境的干扰和存在的测量误差，则会出现像仿真过程中给出的小扰动一样的结果，多旋翼飞行器出现了位置偏移。

(2) 在自稳模式的设计中，主要是用到姿态控制器，将俯仰和滚转摇杆的值转化为期望的角度，从而将通过姿态控制器控制。而对定高的设计主要是将油门杆的死区设定好，在死区时，主要以位置反馈为主，从而保证高度不变，而对于不在死区的情况，主要是将其转换为速度，以速度进行反馈，实现对高度的控制。

(3) 在自主设计实验中，要在理解定高模式设计的基础上，完成对定点模式的控制设计，利用滚转和俯仰摇杆控制水平 (X,Y) 的变化。对于模式切换的设计，只要是学会利用遥控器中的拨键，将输入转换成相应的控制量，实现对三种模式的自由切换，知道在控制器之中如何实现控制的转换。

如有疑问，请到 <https://doc.rflysim.com> 查询更多信息。



**谢 谢！**