



多旋翼飞行器设计与控制 实践

第十一讲 半自主控制模式设计实验

全权 副教授

qq_buaa@buaa.edu.cn

自动化科学与电气工程学院

北京航空航天大学



北航可靠飞行控制研究组

BUAA Reliable Flight Control Group



大纲

1. 基本原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 小结



基本原理

□ 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)





基本原理

□ 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)
 - 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。
- 定高模式 (Altitude Mode)
 - 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。
- 定点模式 (Position Mode)





基本原理

□ 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)

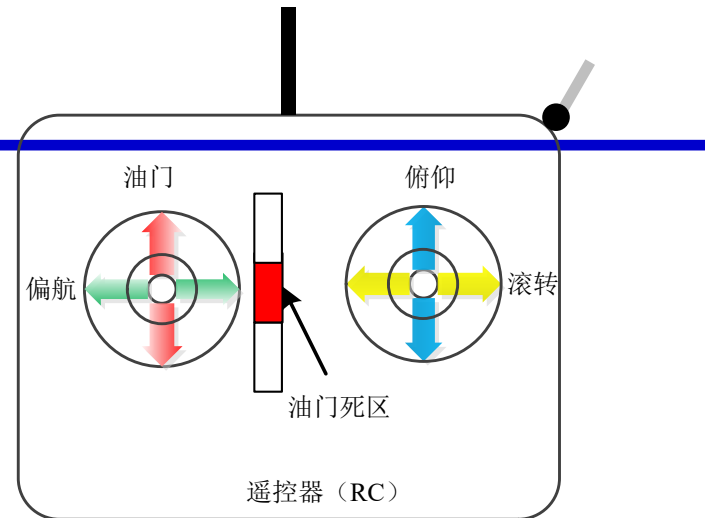


图. 遥控器摇杆示意图

- 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。





基本原理

□ 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)

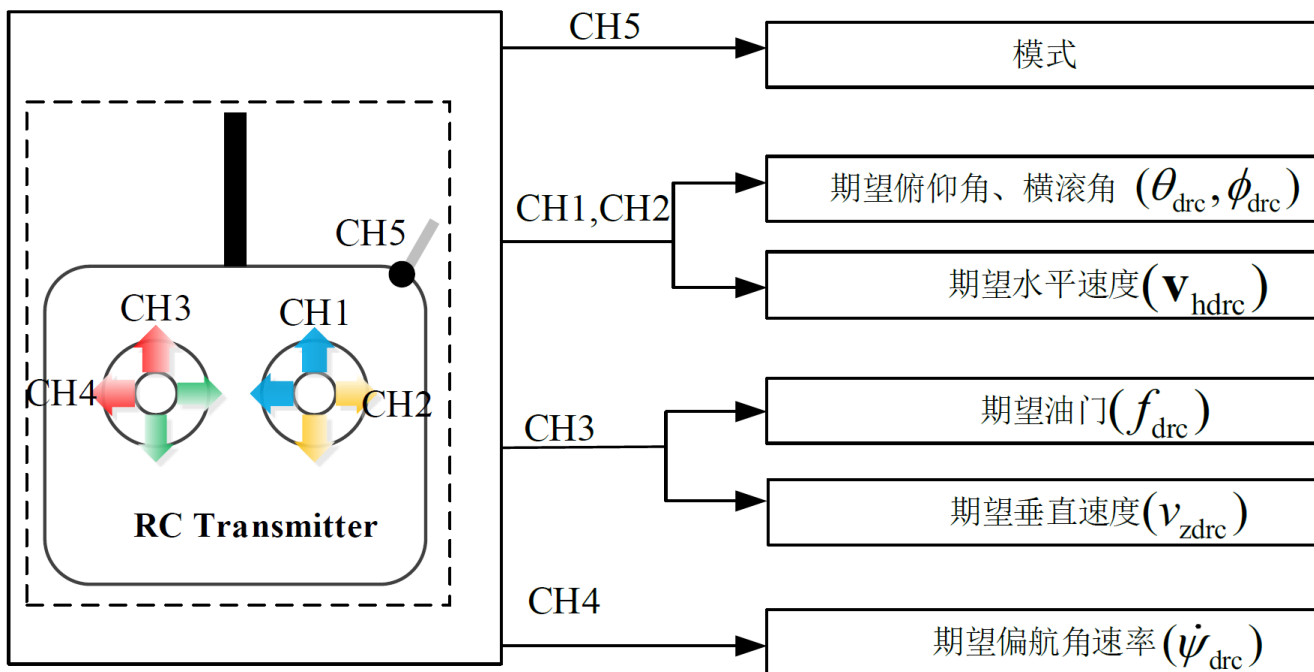
- 定点模式下，当飞控手释放滚转/俯仰摇杆，偏航摇杆，并将油门摇杆推到死区范围时，多旋翼将保持当前的水平位置、航向和高度，即进入悬停状态。高精度的GPS位置信息、磁罗盘信息以及机身低振动对保持良好的悬停效果非常重要。
- 飞控手可以通过推动摇杆使多旋翼以指定的速度在三维空间中运动。位置控制模式需要测高仪器和位置传感器的支持才能实现，例如GPS和摄像机等。





基本原理

□ 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。





基本原理

□ 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_{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 ω_d 为

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

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



基本原理

□ 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。



基本原理

□ 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

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





基本原理

□ 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

$$\dot{v}_{z_d} = -K_{v_z p} e_{v_z} - K_{v_z i} \int e_{v_z} - K_{v_z d} \dot{e}_{v_z}$$

其中 $e_{v_z} = v_z - v_{z_d}$

进一步得到期望油门值为

$$f_d = m(g + K_{v_z p} e_{v_z} + K_{v_z i} \int e_{v_z} + K_{v_z d} \dot{e}_{v_z})$$





基本原理

□ 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。





基本原理

□ 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

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





基本原理

□ 自驾仪半自主控制模式实现

(3) 定点模式 (Position Mode)

针对

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

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

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

水平通道的实现与定高模式完全相同。





基本原理

□ 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）。





基本原理

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。



基础实验

□ 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及以上的版本，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e7.1 (<https://flyeval.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位置；记录当油门回中时的位置响应；
- (2) 完成硬件在环仿真。





基础实验

□ 实验步骤

(1) 步骤一：软件在环仿真

1) 打开Simulink仿真模型

打开“e7/e7.1/SIM/Init_control.m”，文件进行参数初始化，“StabilizeControl_Sim.slx”将会自动打开如右图。可以看到模型在姿态角输出部分加了常值扰动，以模拟实际飞行过程中的偏差。

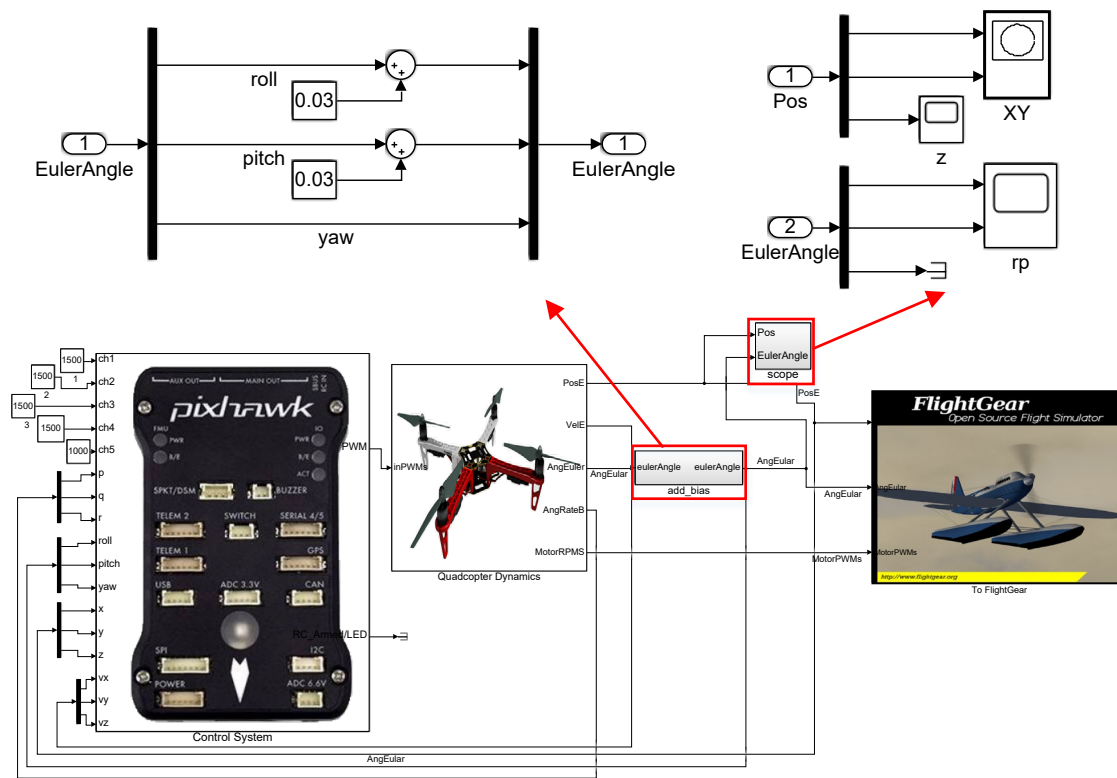


图. StabilizeControl_Sim.slx截图

为观测自稳模式下姿态和位置的输出，设置如图所示示波器观测姿态和位置的输出状态。





基础实验

□ 实验步骤

2) 开始仿真并分析记录实验结果。

点击Simulink开始仿真按钮，开始仿真，观察并记录波形，分析实验结果。

期望俯仰角和横滚角为0，实际滚转角和俯仰角如图，因为常值干扰的存在，实际的滚转角开始并不为0，然后在姿态控制器的调节下滚转角和俯仰角趋近期望滚转角，最终达到稳态，逼近期望值。

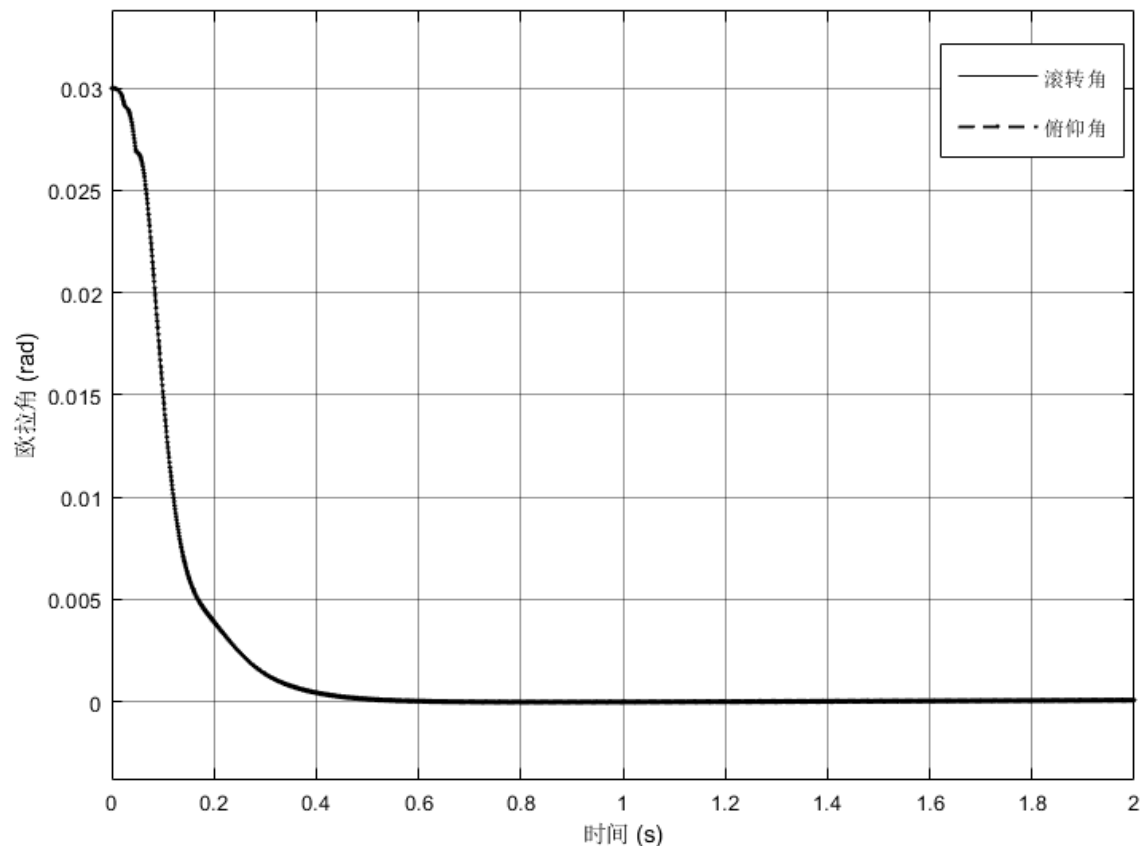


图. 实际横滚角和俯仰角响应





基础实验

□ 实验步骤

在这个过程中，产生一个非零速度，导致水平位置输出如图所示，可以看到，因为干扰的存在，水平位置又缺乏反馈控制，最终水平位置产生了漂移。

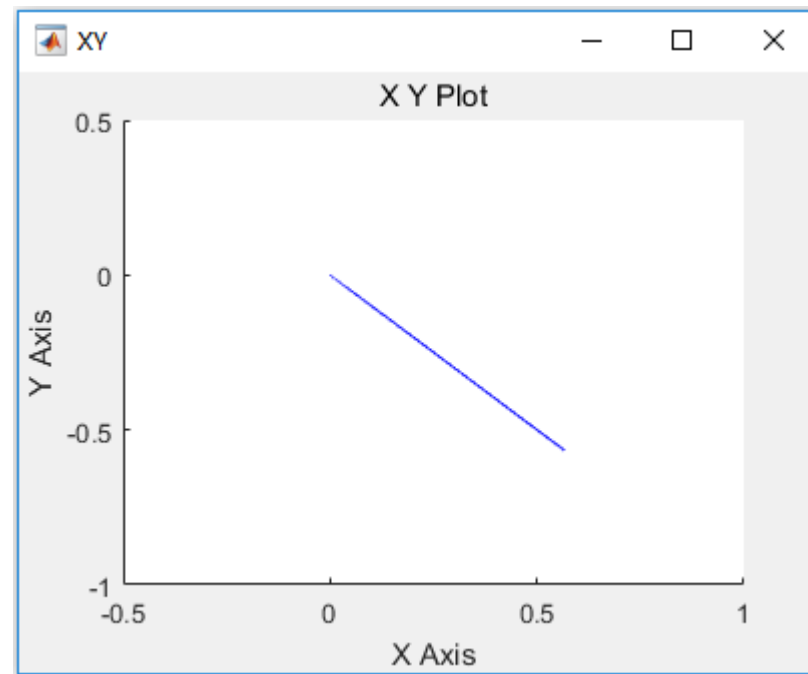


图. 滚转、俯仰摇杆在中间时水平位置输出





基础实验

□ 实验步骤

基于同样的原因，高度上也有漂移，如右图所示。所以在自稳模式下，四旋翼只能姿态稳定而不能保持位置稳定，悬停油门尽管是经过精确计算但由于舍入误差，高度仍然不能保持稳定。

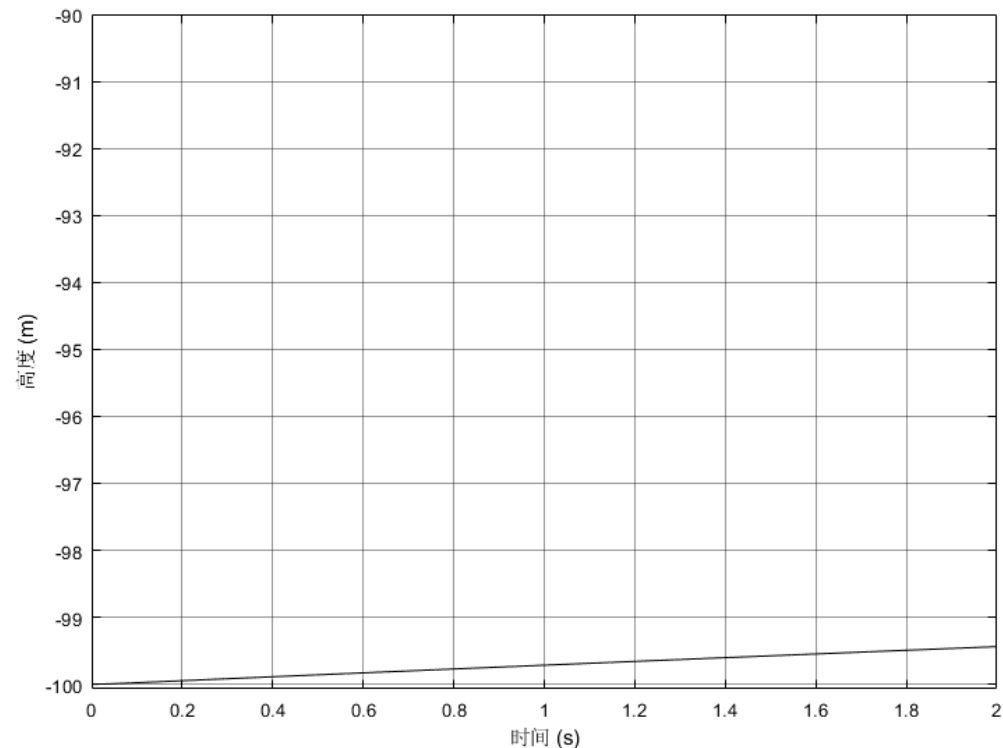


图. 油门在中间时高度输出





基础实验

□ 实验步骤

(2) 步骤二：硬件在环仿真

1) 打开Simulink仿真模型

打开

“e7/e7.1/HIL/StabilizeControl_HIL.slx”

Simulink文件，如右图。值得注意的是，

“Control System”模块和软件在环仿真的

相同。

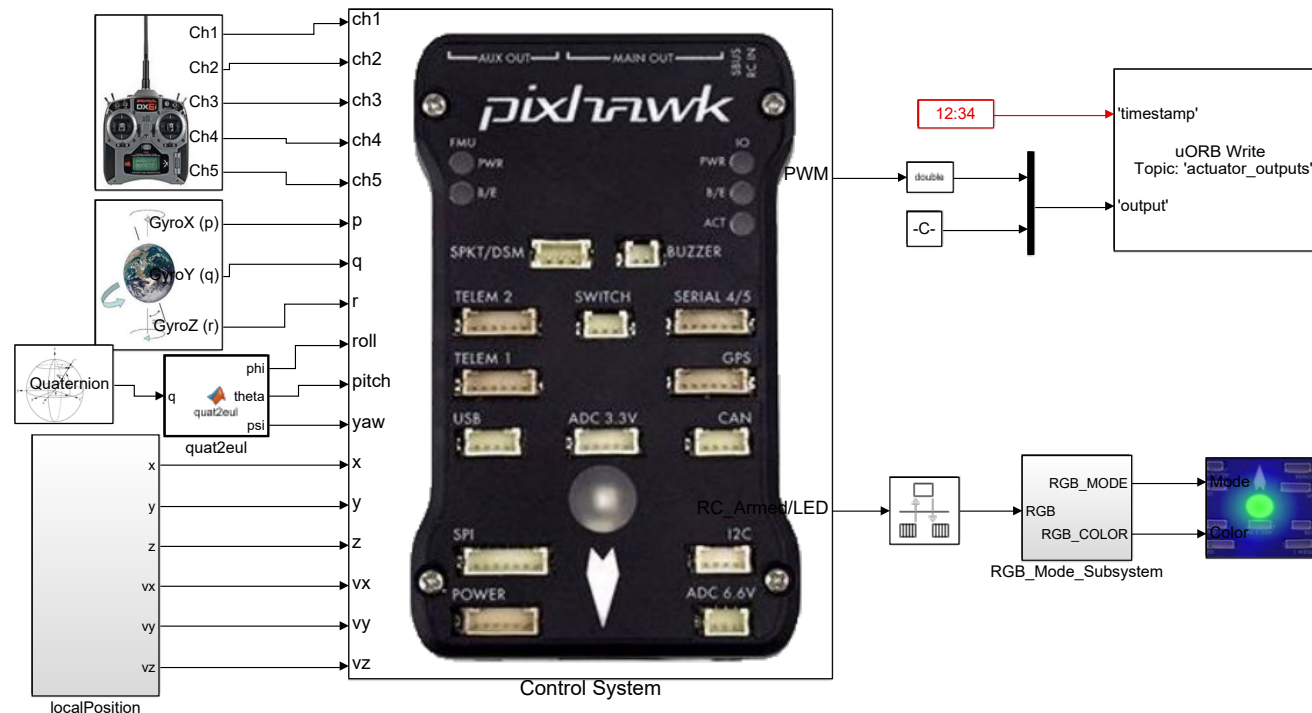


图. StabilizeControl_HIL.slx截图



基础实验

□ 实验步骤

2) 硬件连接

需要注意的是，在进行硬件在环仿真时**机架类型**应该是“**HIL Quadcopter X**”。

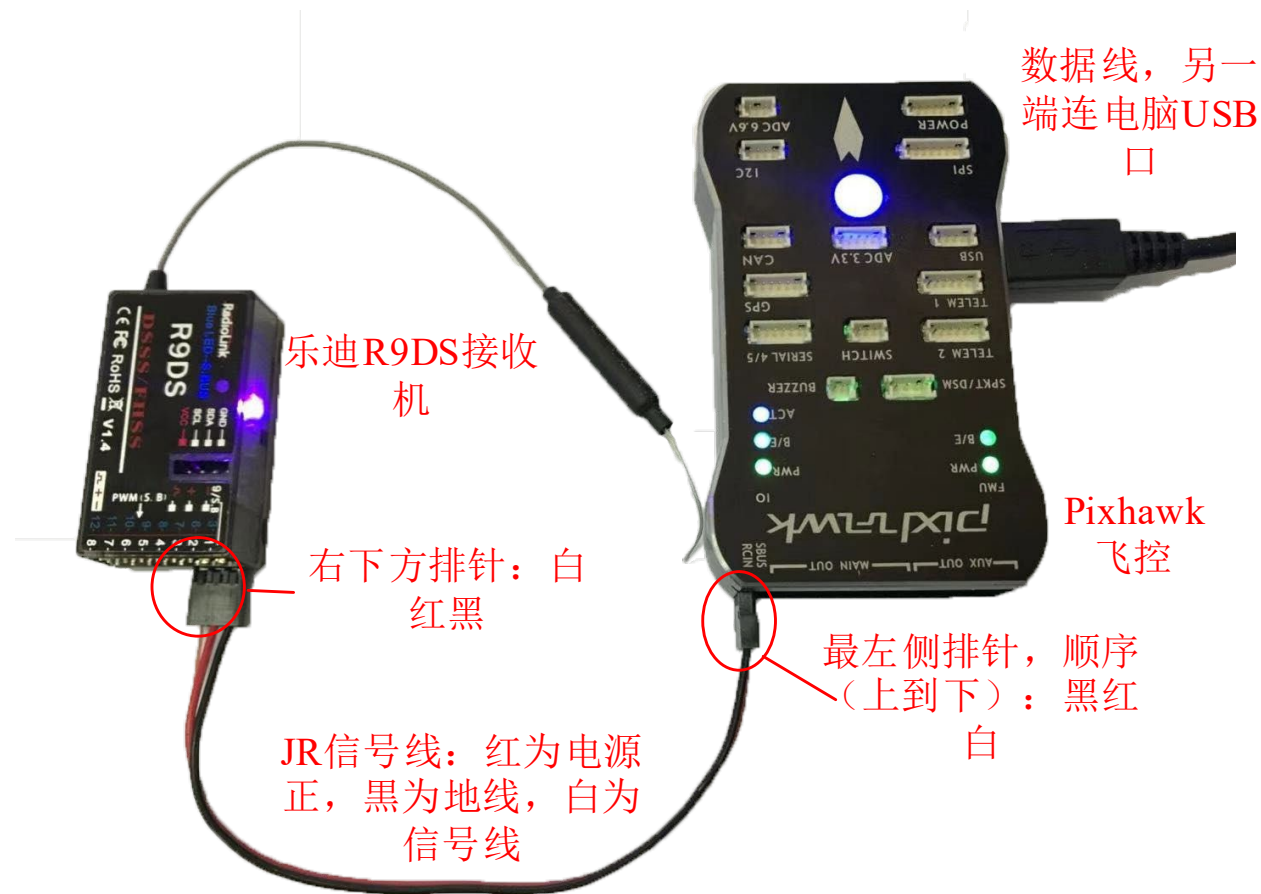


图. 硬件系统连接

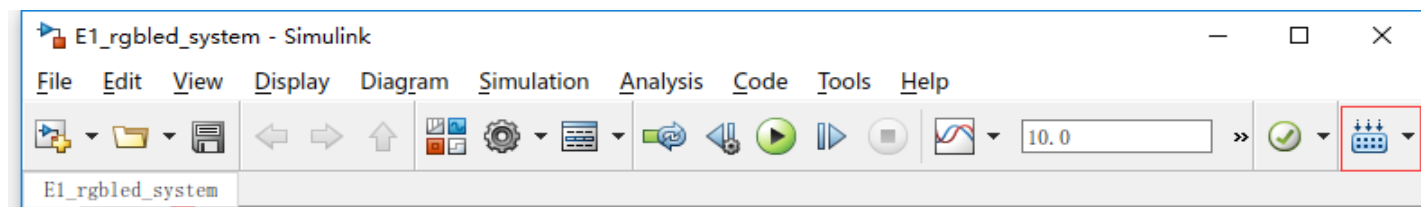


基础实验

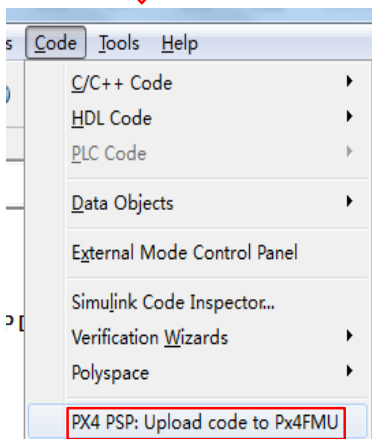
实验步骤

3) 代码编译及下载

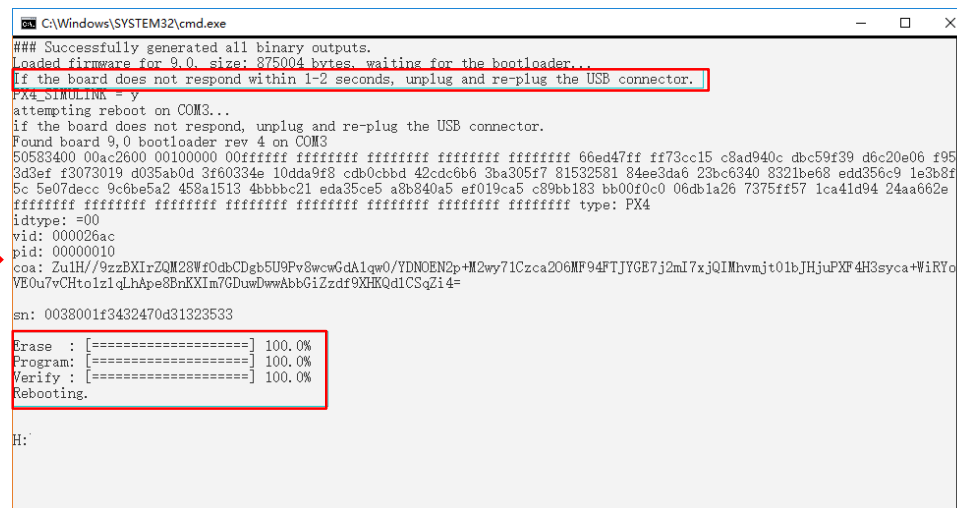
将硬件在环仿真模型编译并下载文件到Pixhawk自驾仪中。这样就可以在Pixhawk自驾仪中运行我们自己设计的姿态控制程序。



点击编译



点击下载



下载完成

图. 代码编译及下载流程





基础实验

实验步骤

4) CopterSim配置

双击CopterSim桌面快捷方式即可打开多旋翼模拟器软件。点击模型参数，可以自定义模型参数，然后点击“存储并使用参数”。也可以自己选择动力系统，点击计算，然后点击存储并使用参数。软件会自动匹配串口号，点击“开始仿真”按钮就可以进入硬件在环仿真模式。此时可以看到如右图所示的界面左下角收到飞控返回的相关消息。

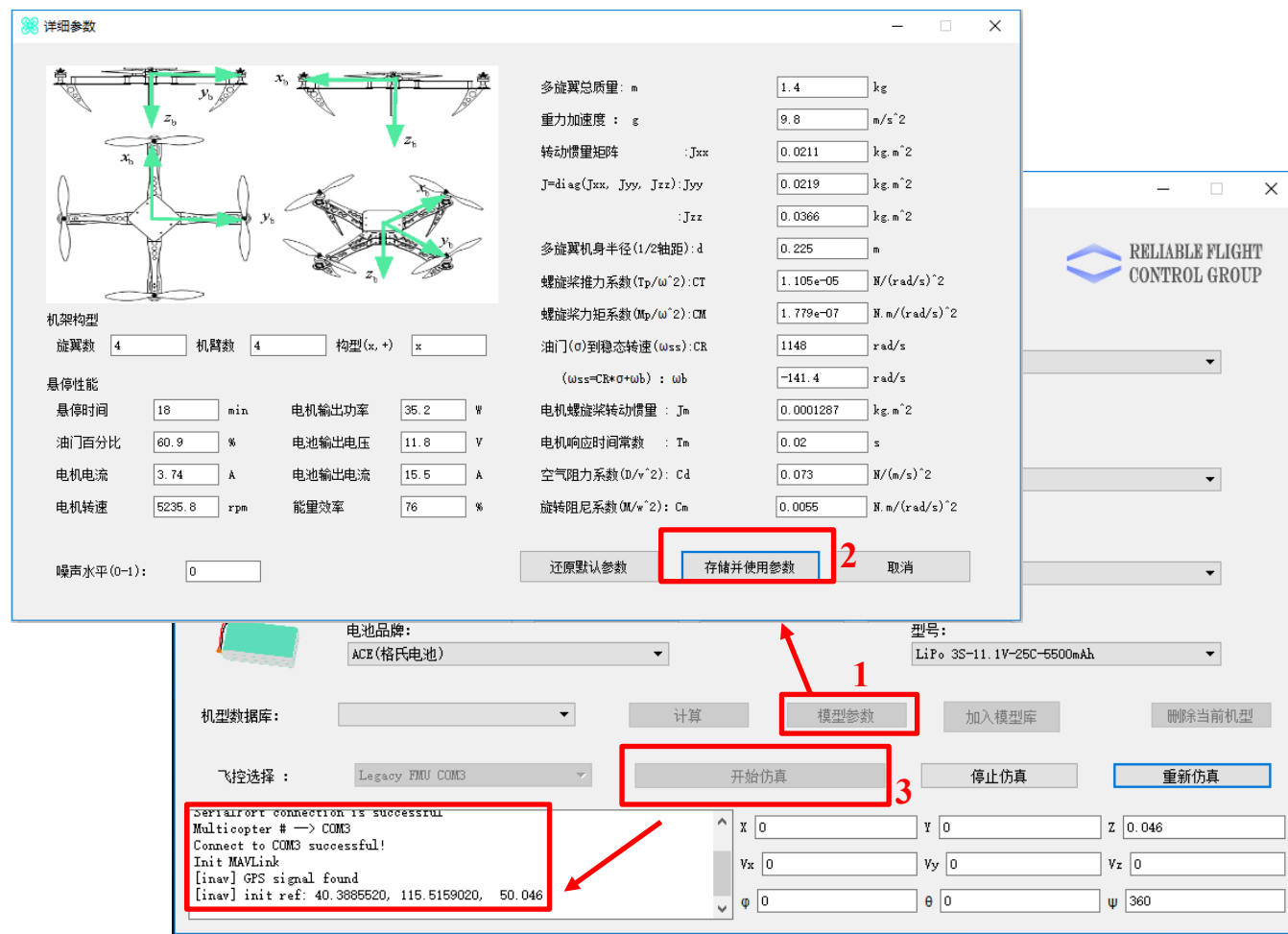


图. 模型仿真器软件配置



基础实验

□ 实验步骤

5) 3DDisplay配置

双击3DDisplay桌面快捷方式打开三维显示软件。

6) 用遥控器解锁多旋翼，实现手动控制。

通过遥控器给定四旋翼一个期望的姿态，当遥控器摇杆全部回中时，四旋翼的姿态基本保持水平，但“3DDisplay”软件界面右下角的四旋翼轨迹仍在移动，说明四旋翼位置在漂移。



图. 3D Display



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：Matlab2017b及以上的版本，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“e7.2” (<https://flyeval.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。



分析实验

实验步骤

(1) 步骤一：软件在环仿真

1) 设置遥控器输入的定高死区

若给 u 输入
[1000, 2000]的
斜坡信号，则对
应的输出如右图，
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]。

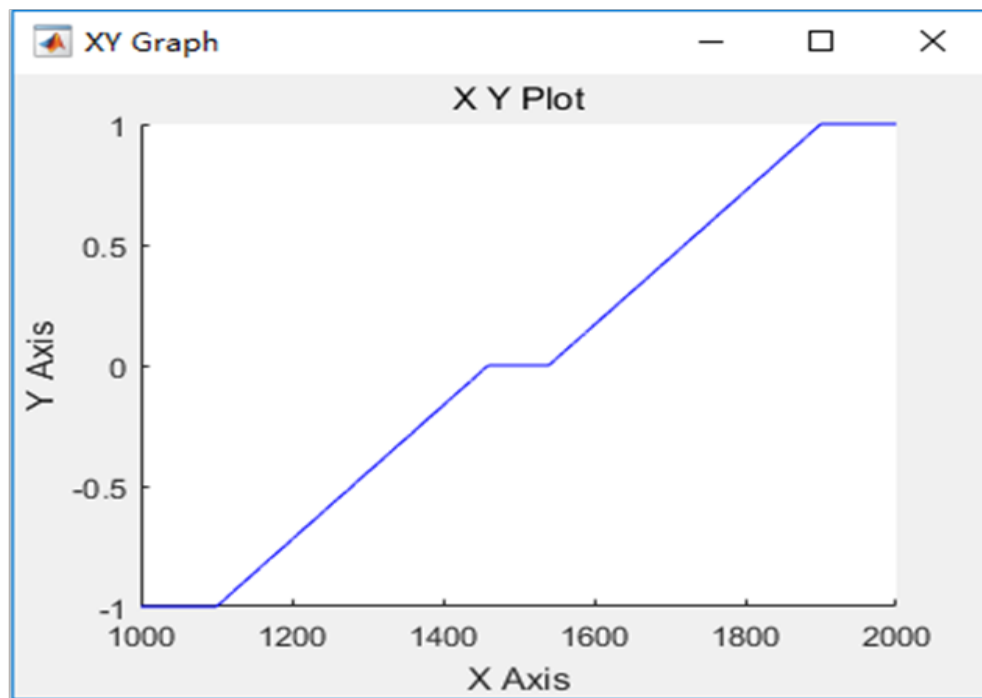
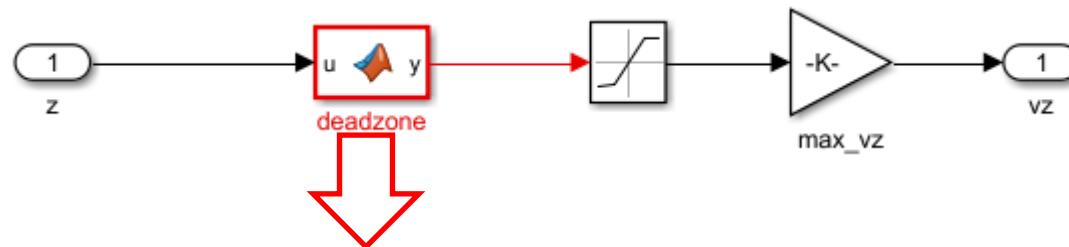


图. 高度通道遥控器信号响应



```
1 function [y] = fcn(u)
2 %将遥控输入的范围控制在1100~1900，同时设置一个死
3 区，死区大小为±deadZone
4 RCMin = 1100;
5 RCMax = 1900;
6 RCMid = (RCMin+RCMax)/2;
7 deadZoneRate = 0.05;
8 deadZone = deadZoneRate*(RCMax-RCMin);
9 k=1/(RCMax-RCMid-deadZone);
10 %限幅
11 if(u < RCMin)
12     u = RCMin;
13 elseif(u > RCMax)
14     u = RCMax;
15 end
16 %死区
17 if(u > RCMid+deadZone)
18     y = (u-RCMid-deadZone)*k;
19 elseif(u < RCMid-deadZone)
20     y = (u-RCMid+deadZone)*k;
21 else
22     y = 0;
23 end
24
25 end
```



分析实验

□ 实验步骤

2) 设置期望位置

当油门杆偏离中间时，期望位置即为当前位置，在这样的期望高度下，高度误差为零所以位置反馈不工作，只存在速度反馈。当油门杆在中间位置时，即期望位置为摇杆回到中间时刻的当前位置，若遥感一直在中间位置，期望位置一直不变，即一直保持当前位置不变，设计如右图所示。

```
1 function [vx_d,vy_d,vz_d,x_d,y_d,z_d] = fcn(vzd,x,y,z,vx,vy,vz)
2 persistent z1;
3 if isempty(z1)
4     z1=z;
5 end
6 persistent hold_z_flag;
7 if isempty(hold_z_flag)
8     hold_z_flag=0;
9 end
10
11 if abs(vzd)<0.001&&abs(vz)<6
12     hold_z=1;
13 else
14     hold_z=0;
15     hold_z_flag = 0;
16 end
17 %油门在中间位置，保持高度
18 if (hold_z>0.5)&&(hold_z_flag<0.5)
19     z1=z;
20     hold_z_flag=1;
21 end
22 %油门不在中间位置，期望高度即为当前高度。高度控制器只有速度环起作用
23 if hold_z<0.5
24     z1=z;
25     hold_z_flag = 0;
26 end
27 x_d=x;y_d=y;z_d=z1;
    vx_d=vx;vy_d=vy;vz_d=vzd;
```





分析实验

□ 实验步骤

3) 建立高度控制模型

将前面设计的死区和期望位置模块加入自稳模式模型中，并将“mode”的输入由0改为1，表示使用高度控制模式，即得到高度控制模型。

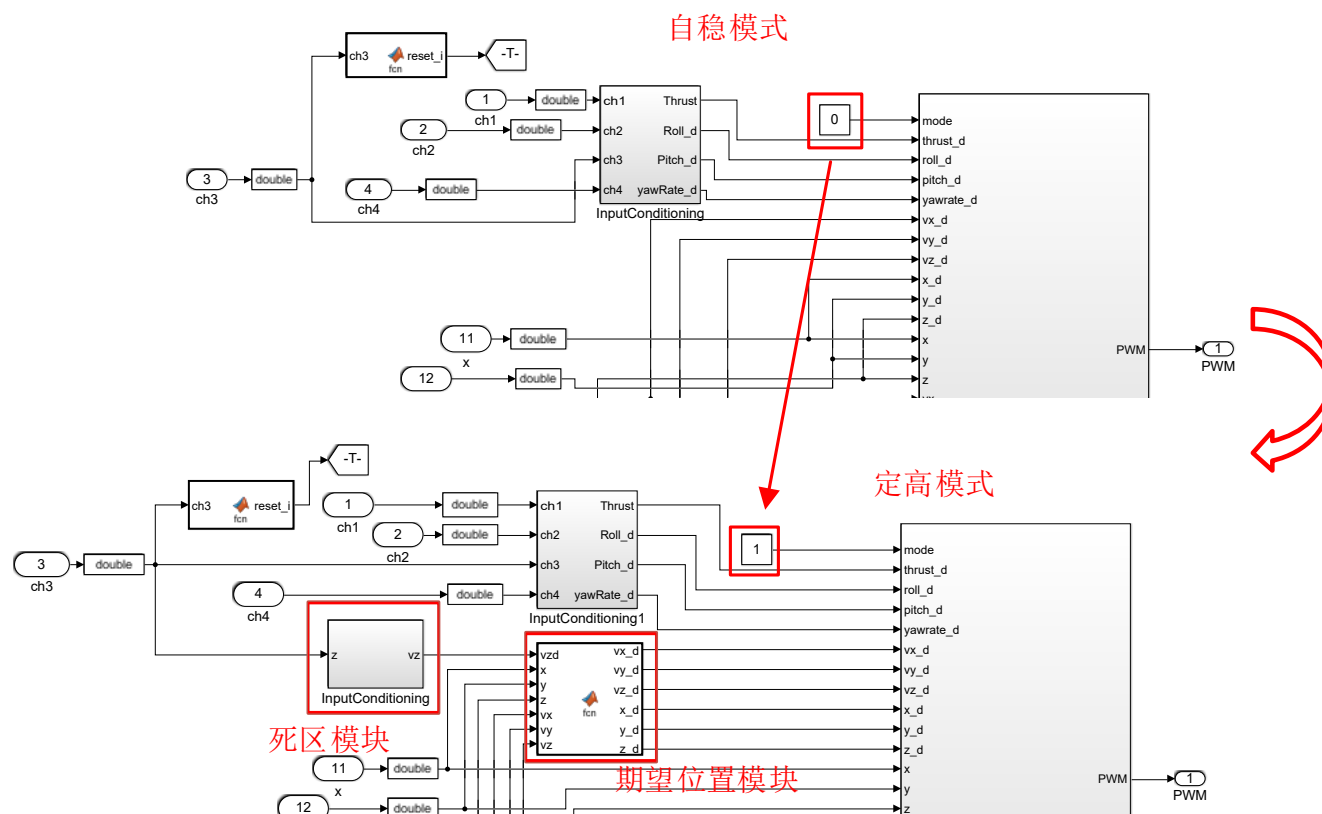


图. 高度控制模式控制结构



分析实验

□ 实验步骤

4) 开始仿真并进行试验结果分析

姿态和水平位置输出与自稳模式下相同，即姿态能保持稳定，水平位置不能保持稳定。

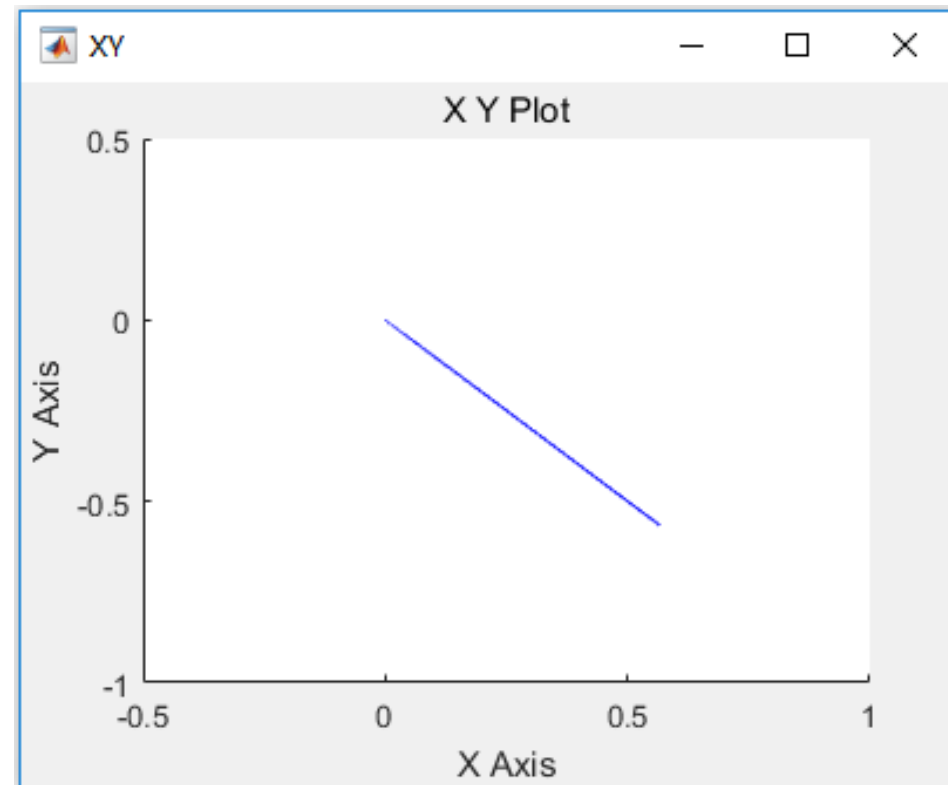


图. 位置变化



分析实验

□ 实验步骤

4) 开始仿真并进行试验结果分析

当高度输入在1460~1540之间时，即油门遥感在中间死区时，如右图。可以看到高度波动很小误差在 $\pm 0.002\text{m}$ 之间，可以认为高度保持稳定成立。

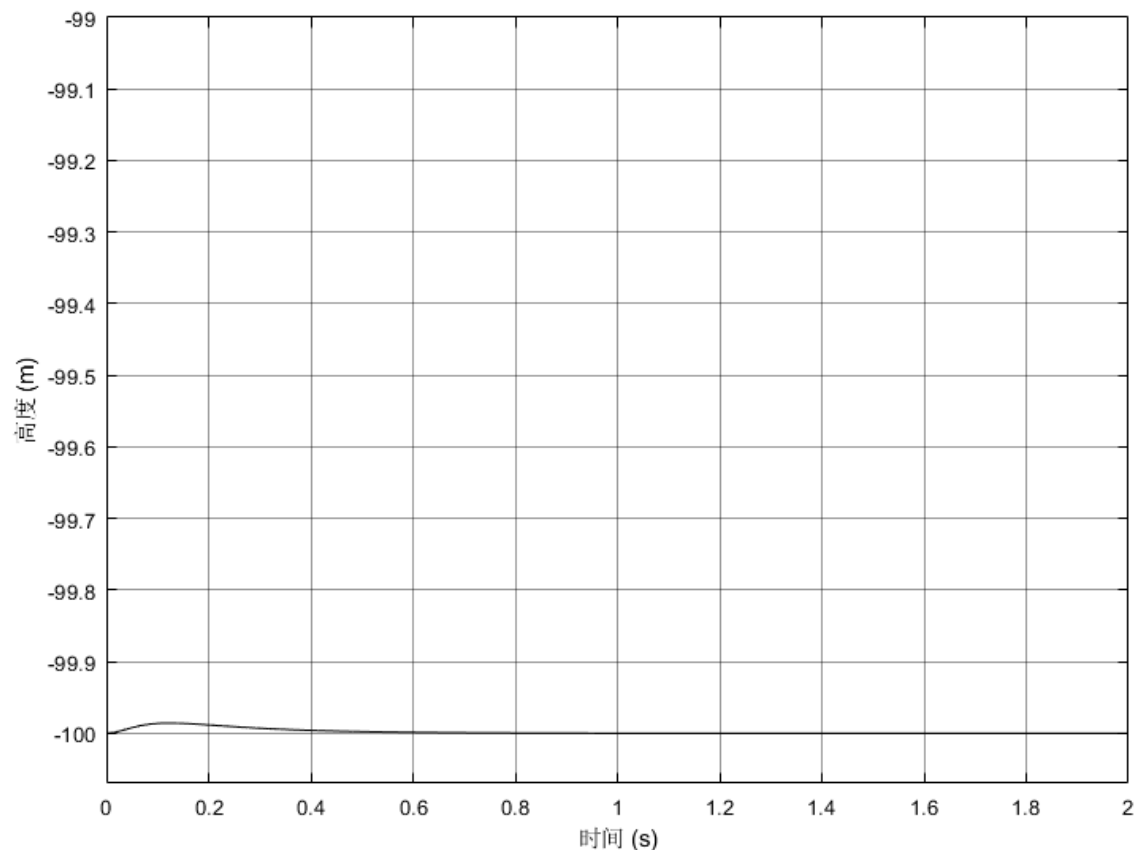


图. 油门遥感在死区时高度输出





分析实验

□ 实验步骤

4) 开始仿真并进行试验结果分析

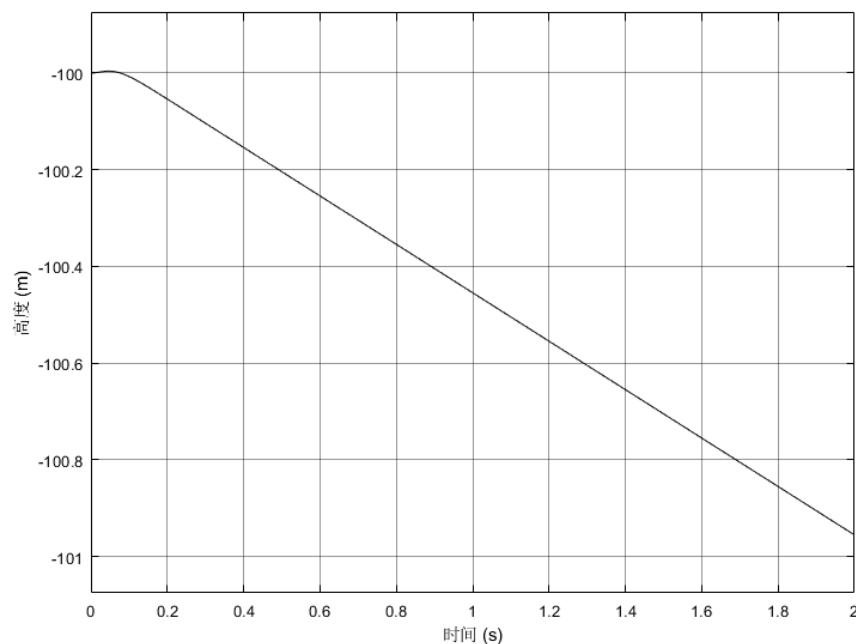


图. 油门为1600时高度输出

当油门超过死区, 如油门输入为1600时, 可以看到 $o_e z_e$ 轴实际速度跟随期望速度并保持稳定, 高度持续升高。

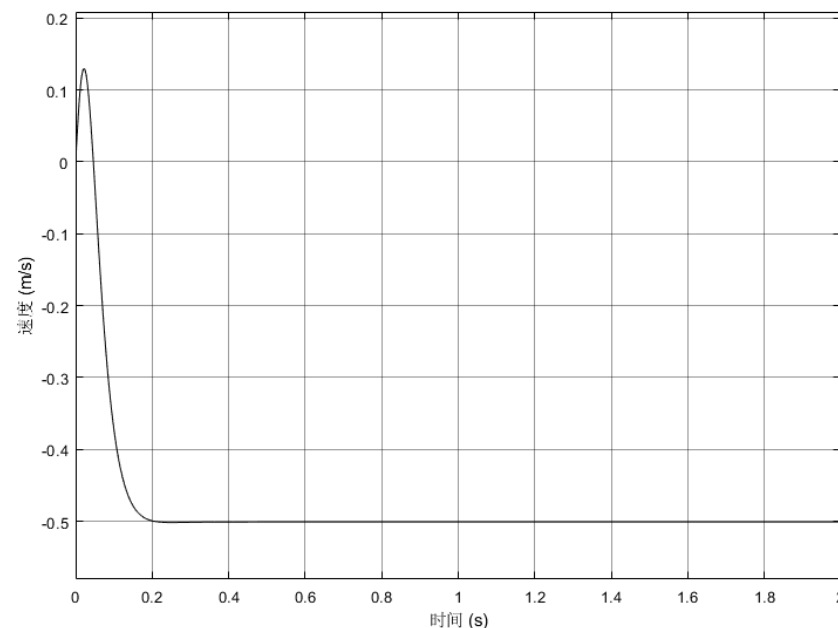


图. 油门为1600时z轴速度输出



分析实验

□ 实验步骤

(2) 步骤二：硬件在环仿真

1) 搭建硬件在环仿真模型

将“StabilizeControl_HIL.slx”模型中的“Control System”模块替换成高度控制模式的Simulink模型中的Control System模块即可得到高度控制模式的处理器在环仿真模型HeightControl_HIL.slx.

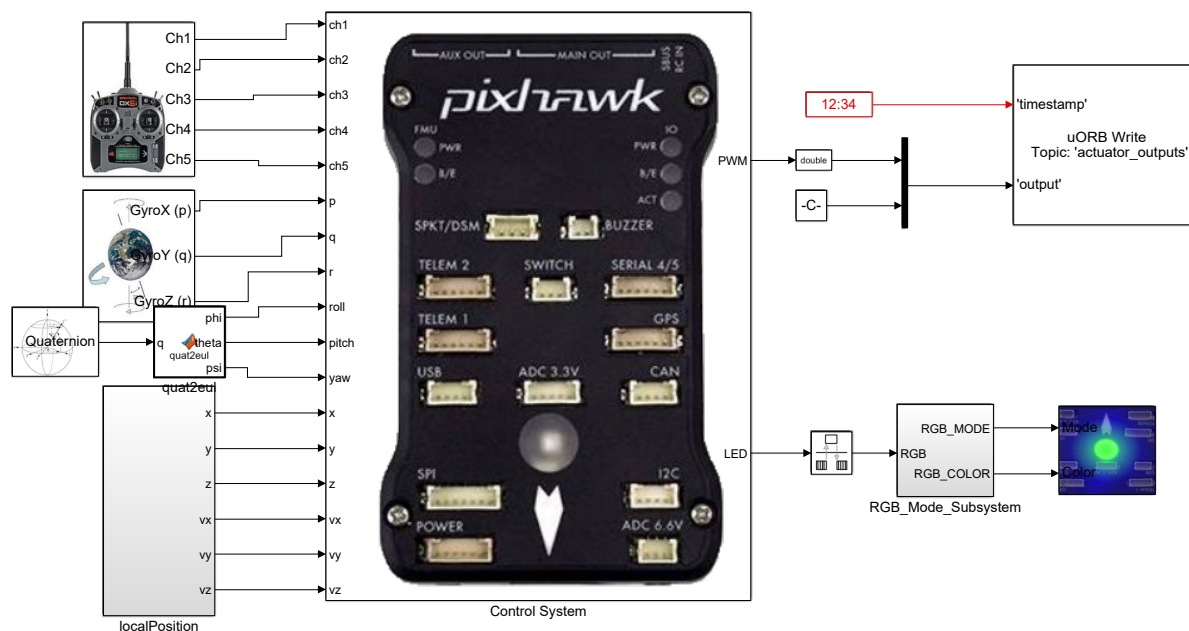


图. HeightControl_HIL.slx截图



分析实验

□ 实验步骤

2) 硬件连接

需要注意的是，在进行硬件在环仿真时**机架类型**应该是“**HIL Quadcopter X**”。

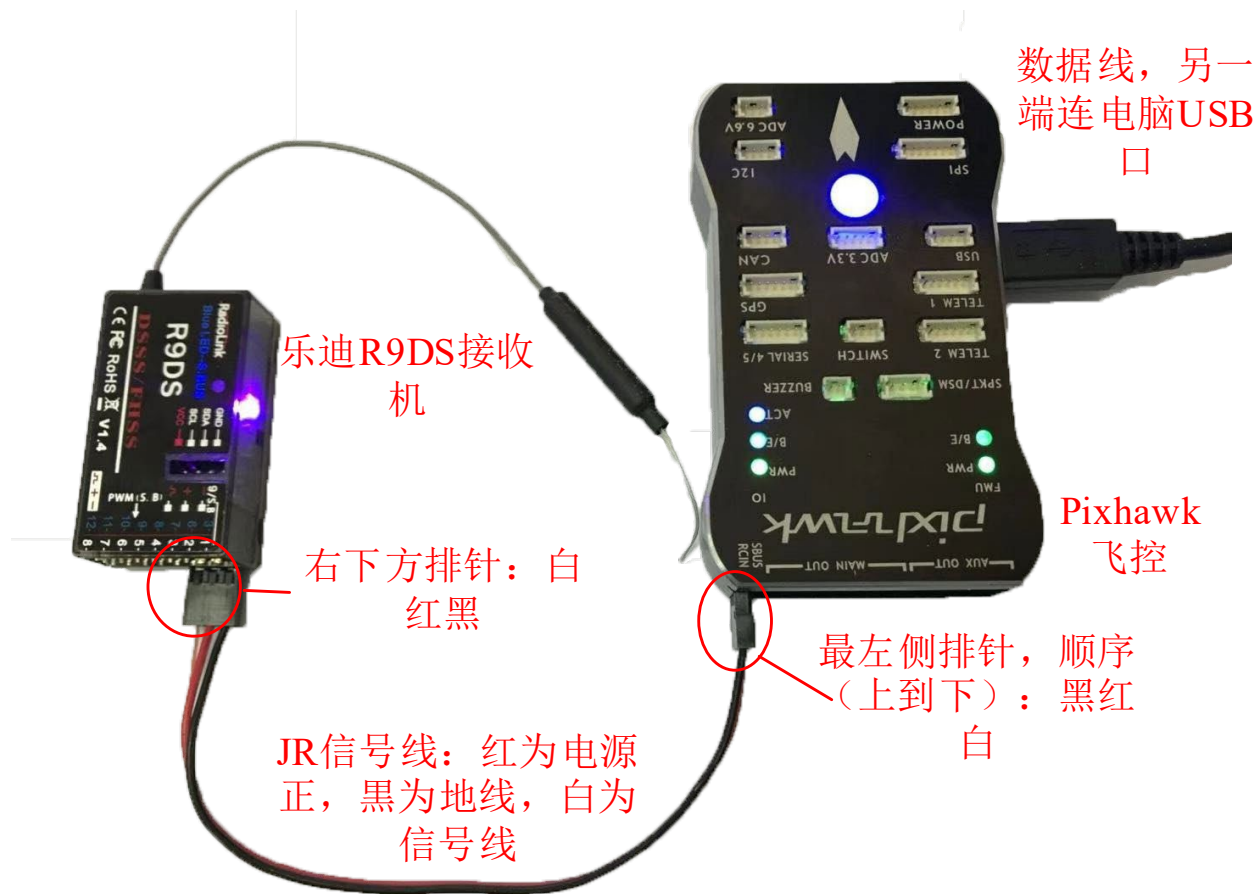


图. 硬件系统连接



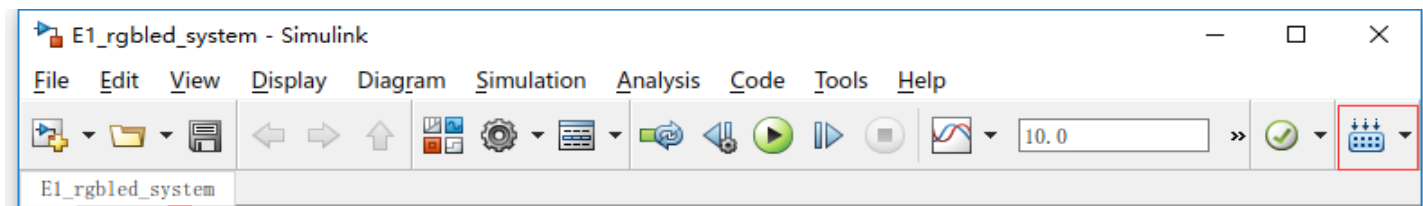


分析实验

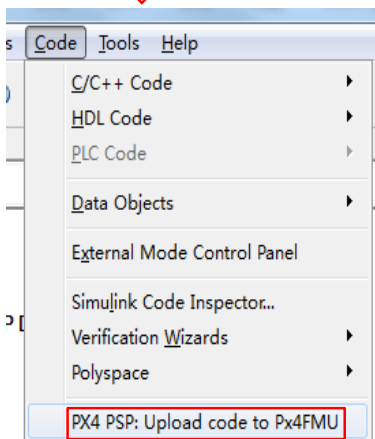
实验步骤

3) 代码编译及下载

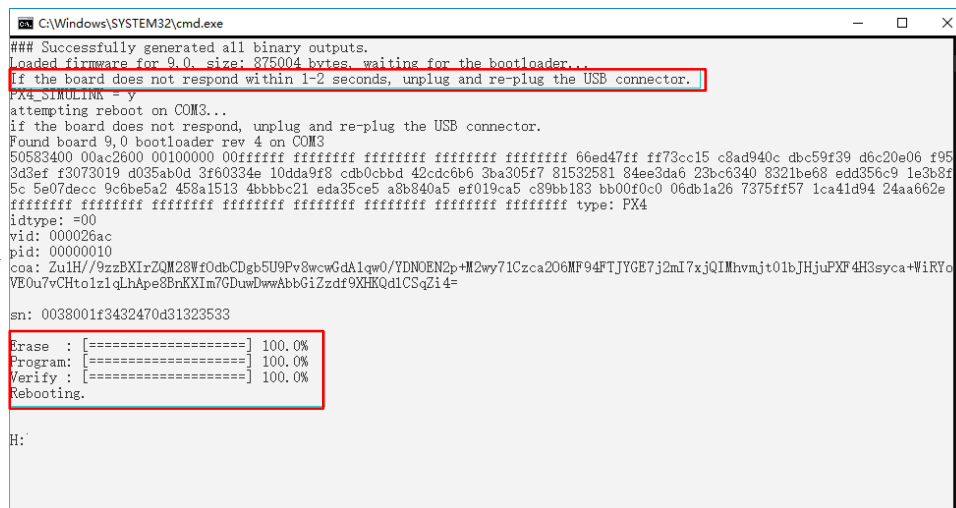
将硬件在环仿真模型编译并下载文件到Pixhawk自驾仪中。这样就可以在Pixhawk自驾仪中运行我们自己设计的姿态控制程序。



点击编译



点击下载



下载完成

图. 代码编译及下载流程





分析实验

实验步骤

4) CopterSim配置

双击文件“模型配置与仿真程序.exe”即可以打开多旋翼模拟器软件。点击模型参数，可以自定义模型参数，然后点击存储并使用参数。也可以自己选择动力系统，点击计算，然后点击存储并使用参数。软件会自动匹配串口号，点击“开始仿真”按钮就可以进入硬件在环仿真模式。此时可以看到如右图所示的界面左下角收到飞控返回的相关消息。

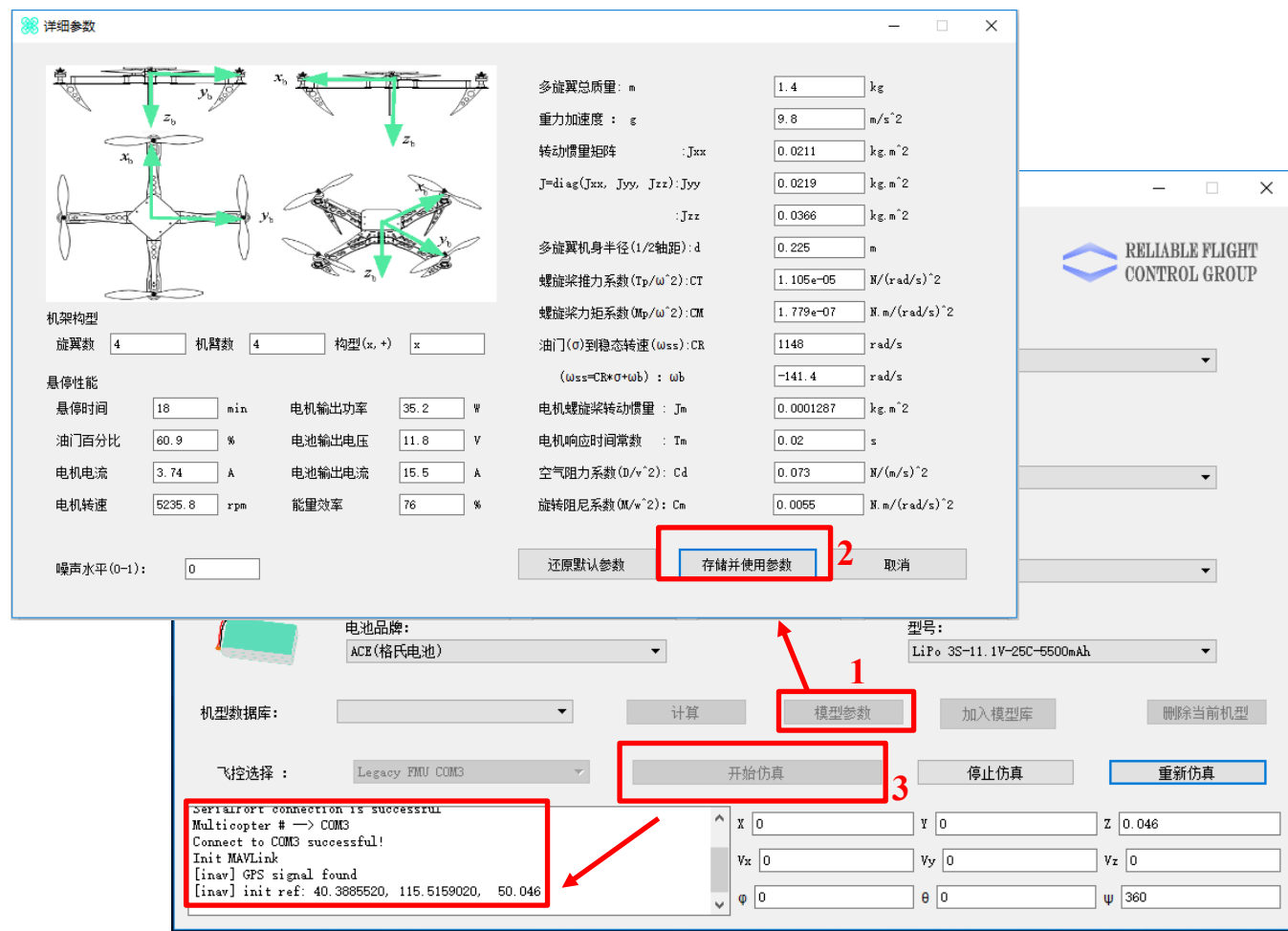


图. 模型仿真器软件配置



分析实验

实验步骤

5) 3DDisplay配置

双击3DDisplay桌面快捷方式打开三维显示软件。

6) 用遥控器解锁多旋翼，实现手动控制。

使用遥控器控制四旋翼时，四旋翼的姿态与水平位置的表现与自稳模式相同，当友们摇杆回中时，四旋翼高度能保持稳定。



图. 3D Display



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及以上的版本， 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“e7.3” (<https://flyeval.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。

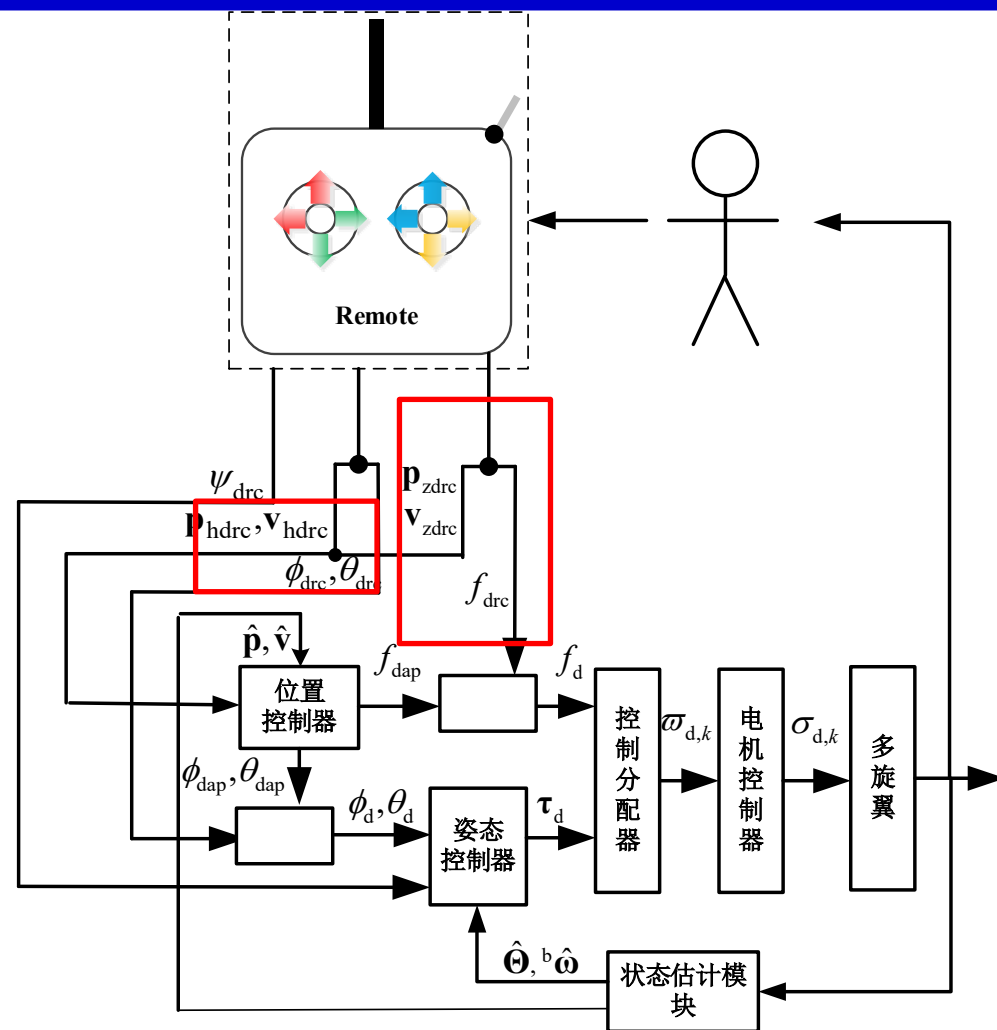


设计实验

□ 自驾仪半自主控制三种模式实现

- 遥控器ch3的输入被转换成两种输出，一个是期望油门 f_{drc} ，另一个是给位置控制器的期望的z轴速度 v_{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 θ_{drc}, ϕ_{drc} ，另一个是给位置控制器的期望x、y轴速度 v_{hdrc} 。





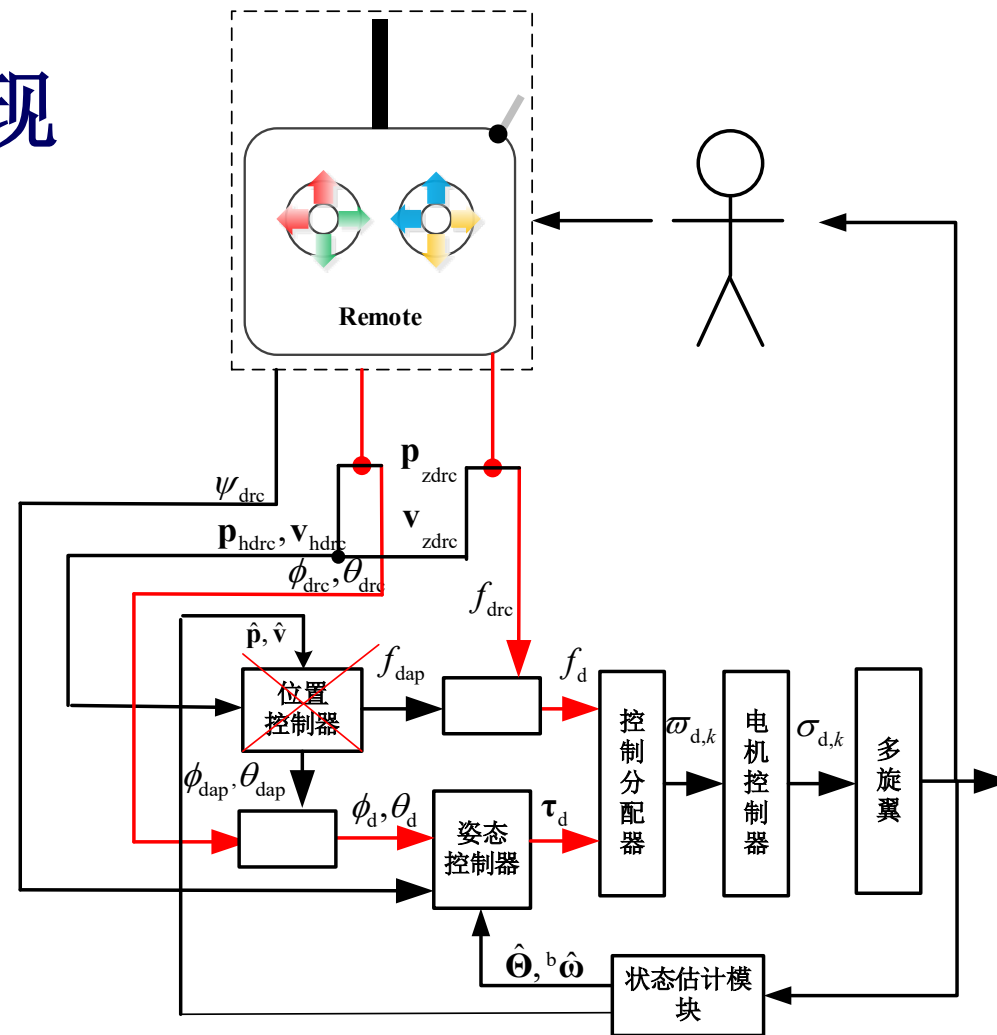
设计实验

□ 自驾仪半自主控制三种模式实现

自稳模式: switch1选择 $\theta_{\text{drc}}, \phi_{\text{drc}}$ 作为期望姿态角

(期望偏航角在三种模式下的来源相同),

switch2选择 f_{drc} 作为期望油门。

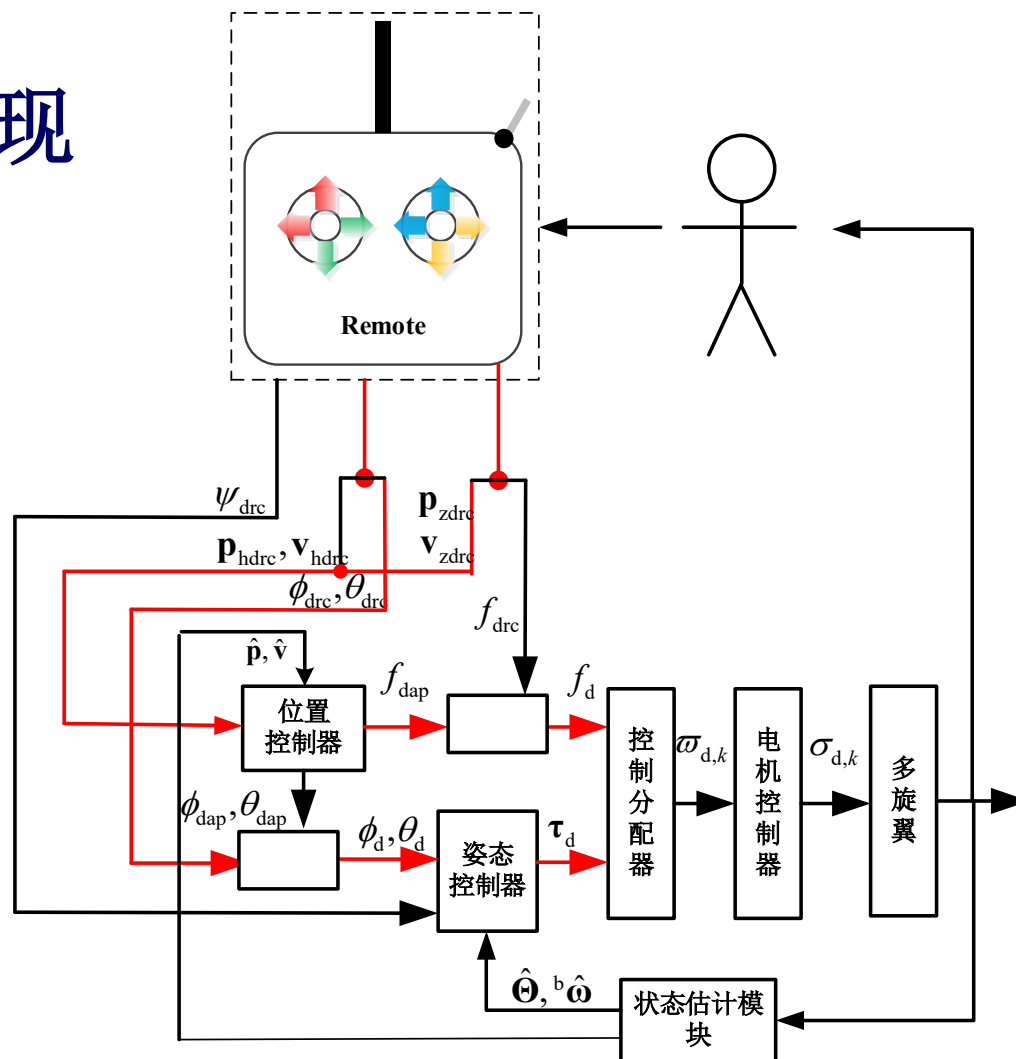




设计实验

□ 自驾仪半自主控制三种模式实现

高度控制模式: switch1选择 $\theta_{\text{drc}}, \phi_{\text{drc}}$ 作为期望姿态角, switch2选择 f_{dap} 作为期望油门。





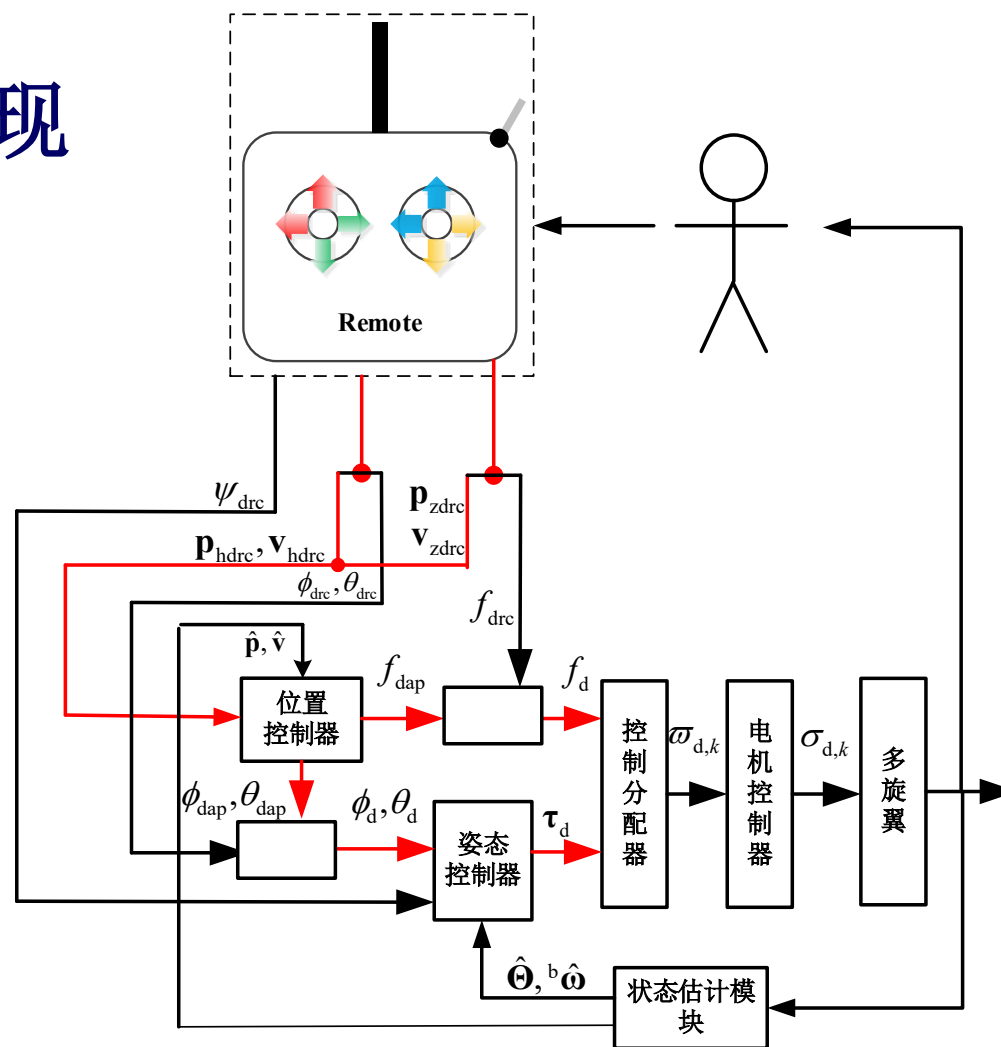
设计实验

□ 自驾仪半自主控制三种模式实现

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_{dap} 作为

期望油门。





设计实验

实验步骤

(1) 步骤一：软件在环仿真

1) 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]。

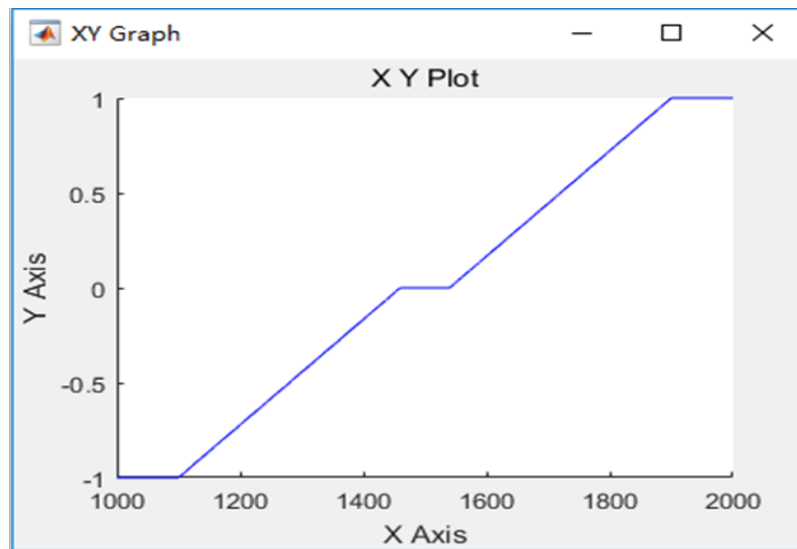


图. 遥控器信号响应

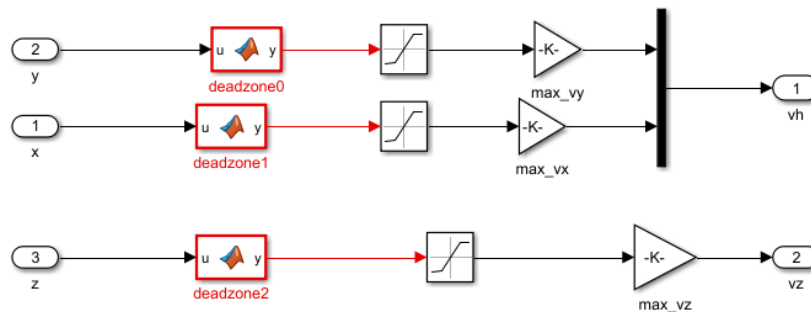


图. 遥控器信号处理



设计实验

□ 实验步骤

2) 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RC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当前位置，若摇杆一直在中间位置，期望位置一直不变。

```
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;
```



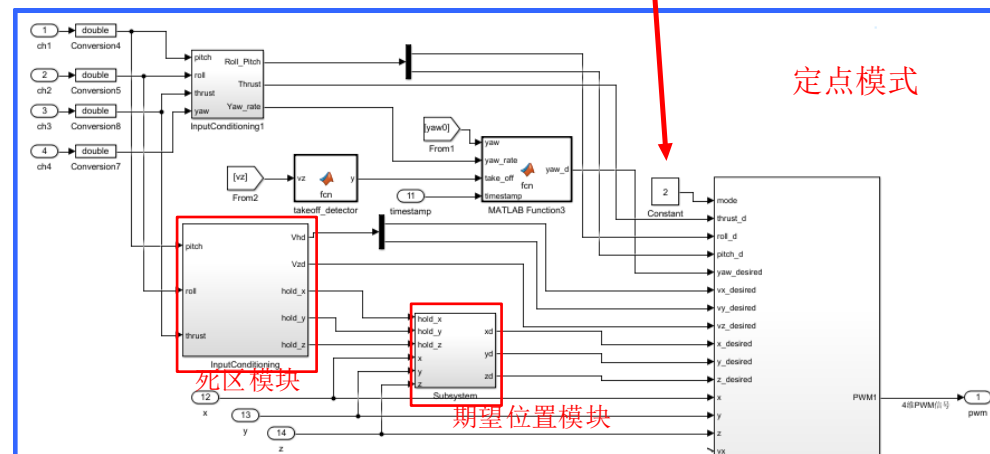
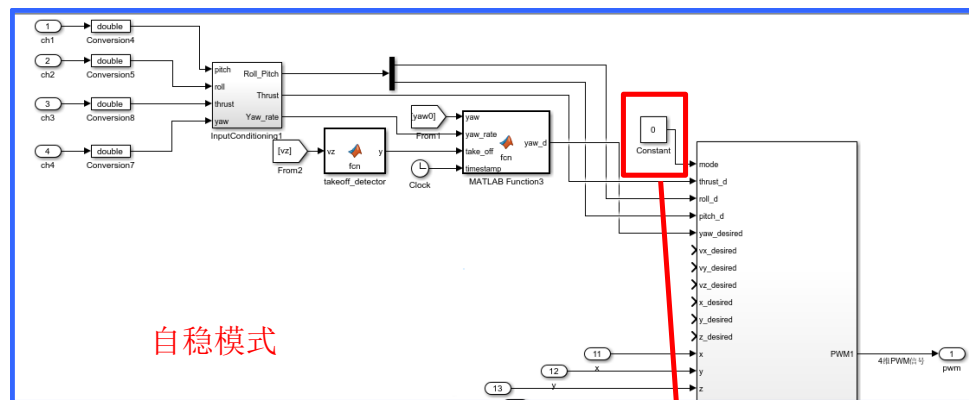


设计实验

实验步骤

3) 建立位置控制模型

将前面设计的死区和期望位置模块加入自稳模式模型中，并将mode的输入由0改为2，表示使用位置控制模式，即得到位置控制模型。





设计实验

□ 实验步骤

4) 开始仿真并进行试验结果分析

高度输出与高度控制模式相同，即高度能保持稳定。

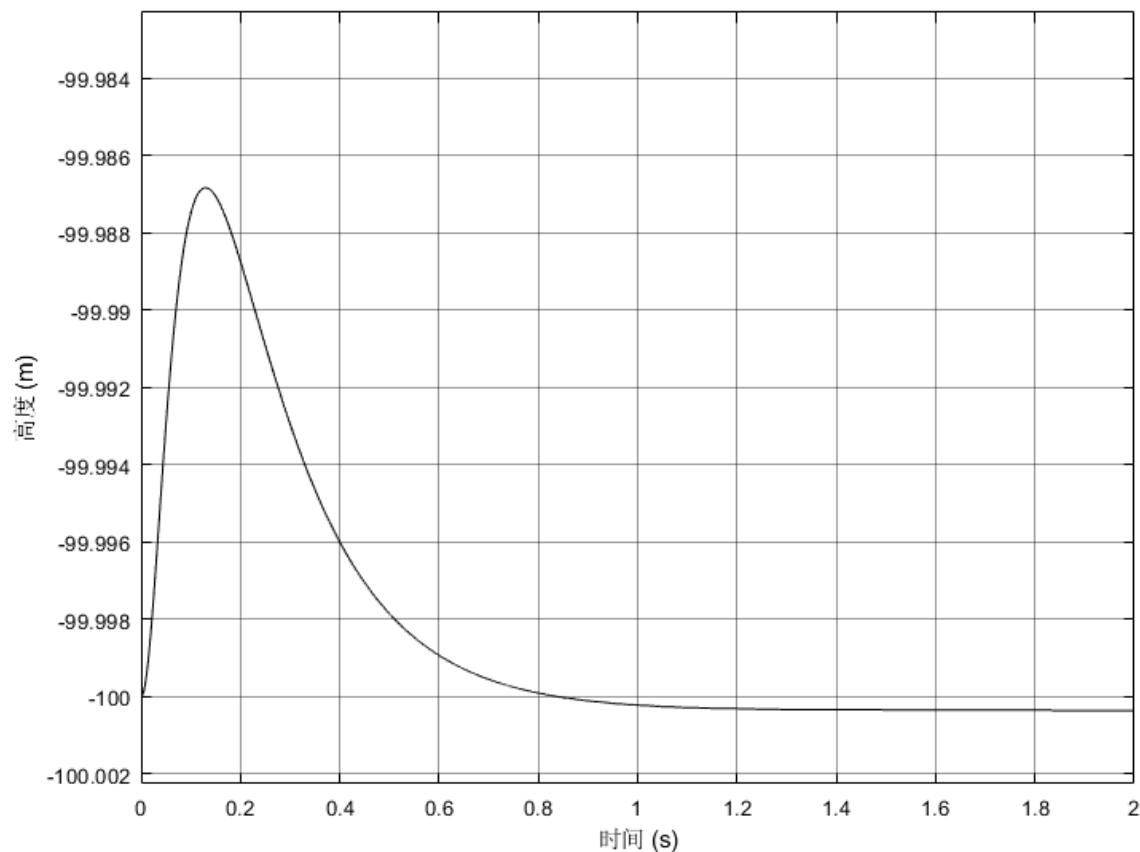


图. 中间位置时的高度变化



设计实验

□ 实验步骤

4) 开始仿真并进行试验结果分析

当滚转、俯仰摇杆输入在1460~1540之间时，水平位置输出和水平速度输出如图。可以看到，尽管滚转、俯仰通道上固定干扰，但是在定点模式下，这种干扰被很好地抑制了。

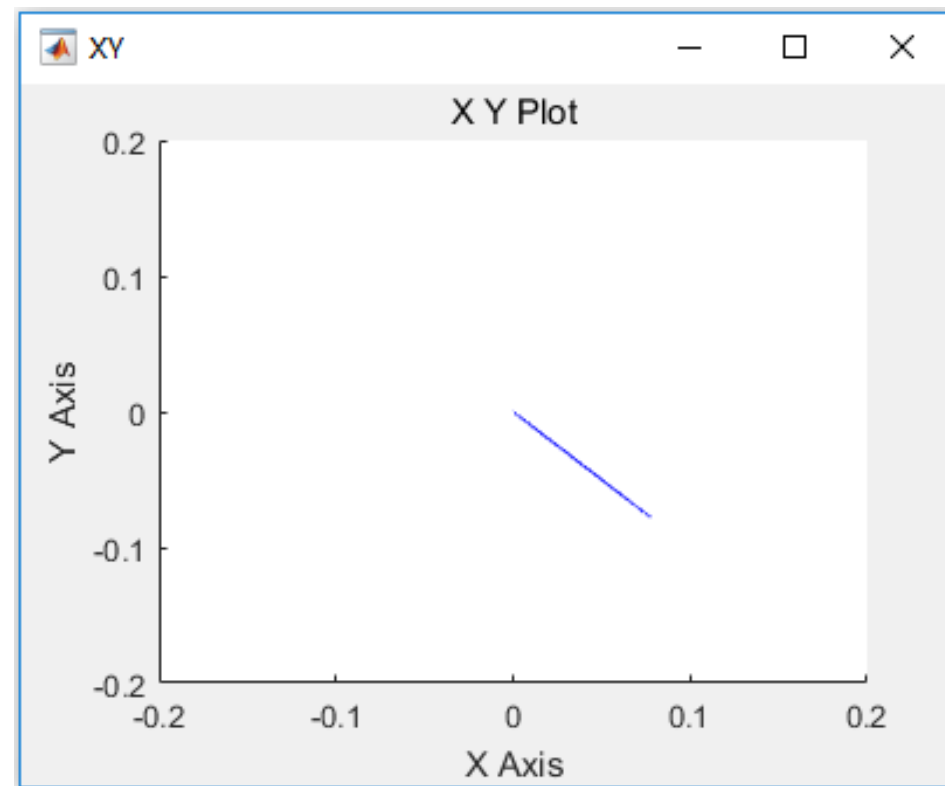


图 . 滚转、俯仰遥感在中间时水平位置输出



设计实验

4) 开始仿真并进行试验结果分析

当俯仰输入为1600时，观测的X轴的速度如下图所示。速度输出能够比较好的跟随期望速度。

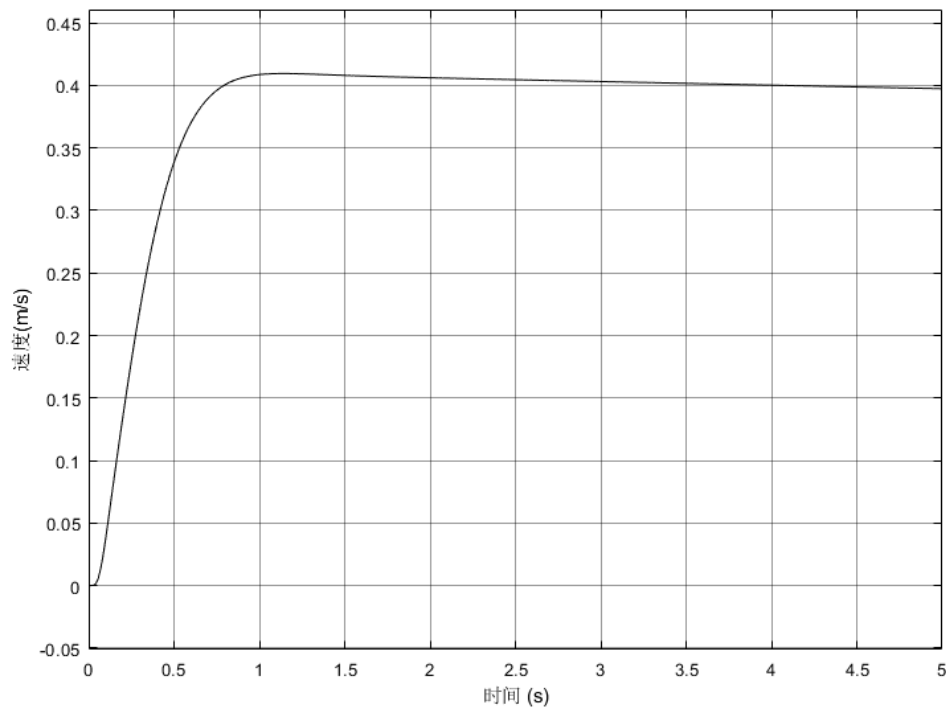


图. 俯仰输入为1600时X轴速度输出

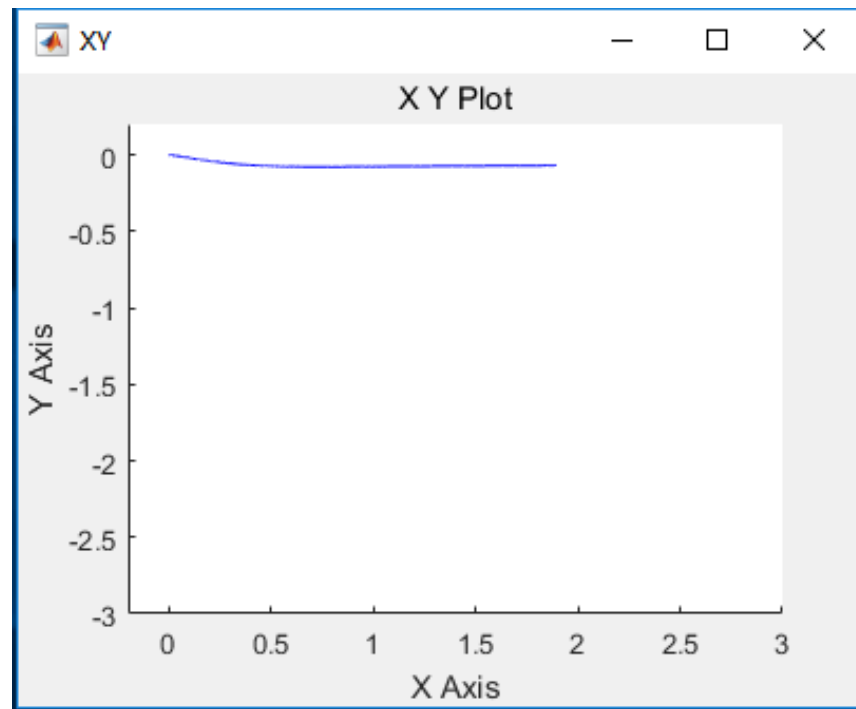


图. 俯仰输入为1600时水平位置的偏移



设计实验

□ 实验步骤

(2) 步骤二：硬件在环仿真

1) 将遥控器输入转换成对应模式

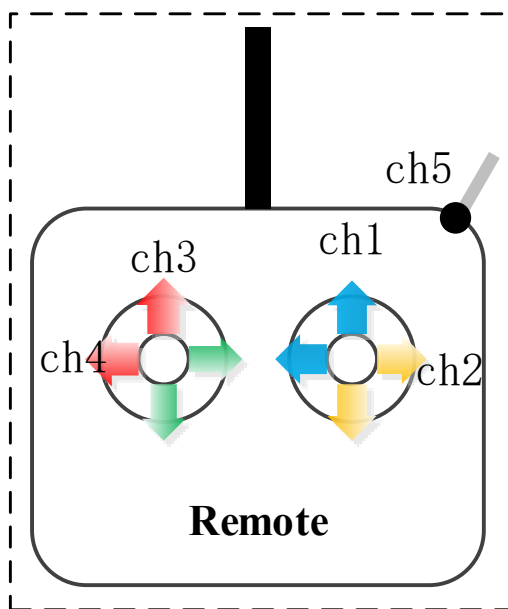


图. 遥控器示意图

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

2) 搭建硬件在环仿真模型

将StabilizeControl_HIL.slx模型中的 Control System模块替换成位置控制模式的Simulink模型中的Control System模块，并加入遥控器的ch5通道进行模式切换，即可得到三种模式切换的硬件在环仿真模型ModeSwitch_HIL.slx.

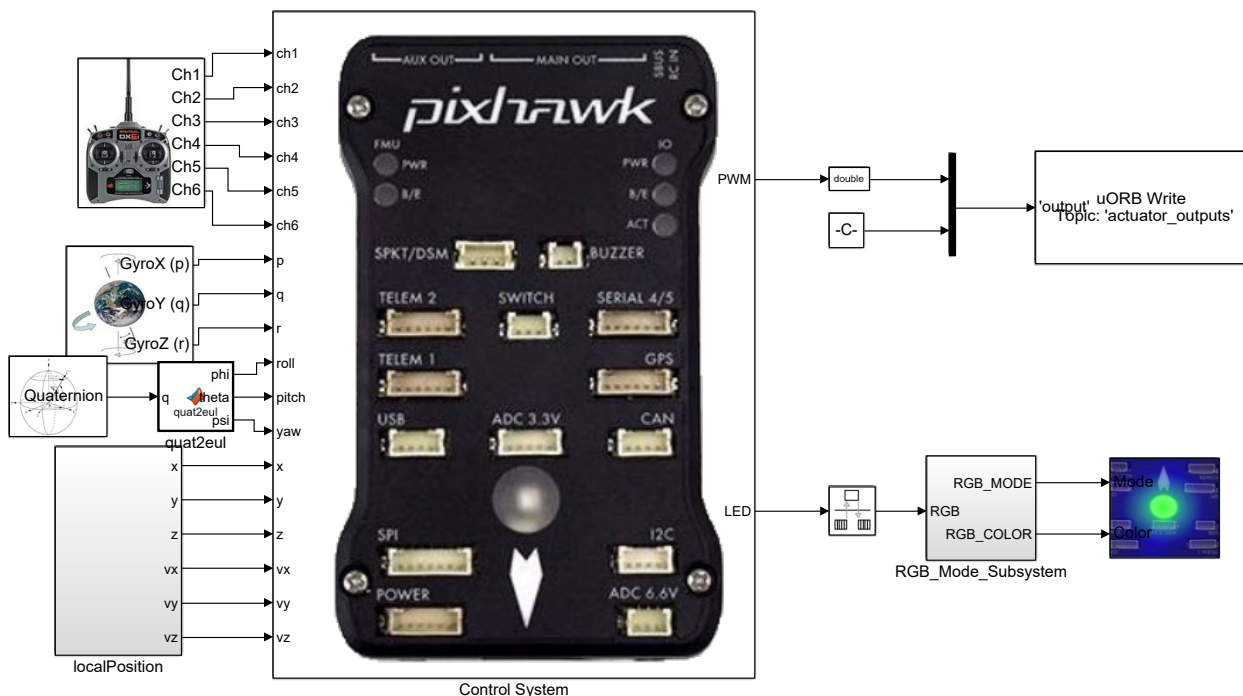


图. ModeSwitch_HIL.slx截图





设计实验

□ 实验步骤

2) 硬件连接

需要注意的是，在进行硬件在环仿真时**机架类型**应该是“**HIL Quadcopter X**”。

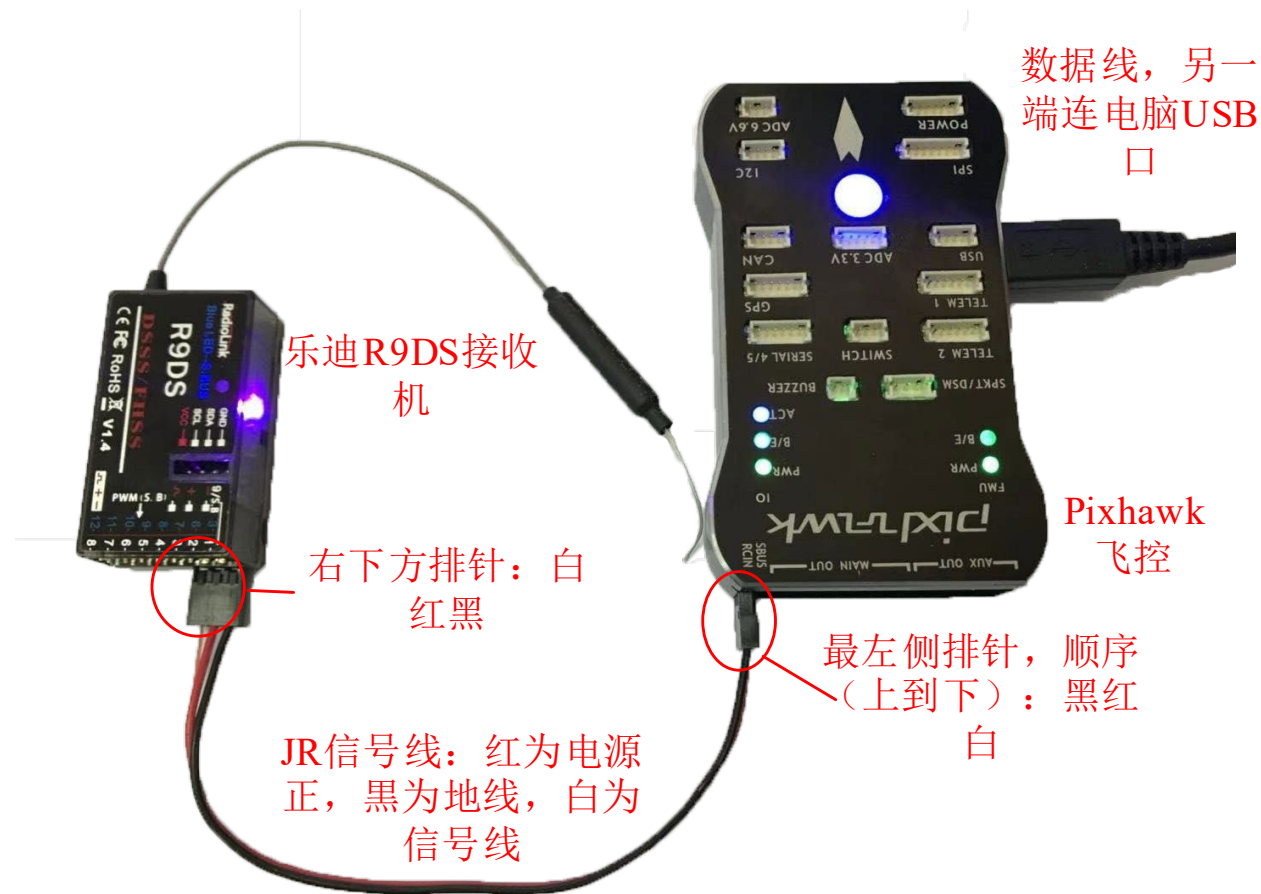


图. 硬件系统连接



设计实验

实验步骤

3) 代码编译及下载

将硬件在环仿真模型编译并下载文件到Pixhawk自驾仪中。这样就可以在Pixhawk自驾仪中运行我们自己设计的姿态控制程序。

The image shows the process of compiling and downloading code from Simulink to a Pixhawk autopilot. It consists of three main parts:

- Simulink Interface:** The top window shows the 'E1_rgbled_system' model in Simulink. The 'Code' menu is open, and the 'PX4 PSP: Upload code to Px4FMU' option is highlighted. A red arrow points from this option to the command prompt.
- Command Prompt Output:** The bottom window shows the output of the 'PX4 PSP: Upload code to Px4FMU' command. The output includes the following text:

```
### Successfully generated all binary outputs.  
Loaded firmware for 9.0, size: 875004 bytes, waiting for the bootloader...  
if the board does not respond within 1-2 seconds, unplug and re-plug the USB connector.  
PX4_SIMULINK = y  
attempting reboot on COM3...  
if the board does not respond, unplug and re-plug the USB connector.  
Found board 9.0 bootloader rev 4 on COM3  
50583400 00ac2600 00100000 00ffffff ffffffff ffffffff ffffffff 66ed47ff ff73cc15 c8ad940c dbc59f39 d6c20e06 f95  
3d3ef f3073019 d035ab0d 3f60334e 10dda9f8 cdb0cbbd 42cdc6b6 3ba305f7 81532581 84ee3da6 23bc6340 8321be68 edd356c9 1e3b8f  
5c 5e07decc 9c6be5a2 458a1513 4bbbbc21 eda35ce5 a8b840a5 ef019ca5 c89bb183 bb00f0c0 06db1a26 7375ff57 1ca41d94 24aa662e  
ffffffff ffffffff ffffffff ffffffff ffffffff ffffffff ffffffff type: PX4  
idtype: =00  
vid: 000026ac  
pid: 00000010  
coa: ZuIH//9zzBXIrZQM28Wf0dbCDgb5U9Pv8wcwGdA1qw0/YDNOEN2p+M2wy71Czca206MF94FTJYGE7j2m17xjQIMhvmjt01bJHjuPXF4H3syca+W1RYo  
VEOu7vCHto1z1qLhApe8BnKXIm7GDuwDwwAbbG1Zzdf9XHKQd1CSqZi4=  
sn: 0038001f3432470d31323533  
Erase : [=====] 100.0%  
Program: [=====] 100.0%  
Verify : [=====] 100.0%  
Rebooting.  
H:
```
- Annotations:** Red boxes highlight the 'PX4 SIMULINK = y' line, the 'if the board does not respond within 1-2 seconds...' warning, and the progress bars for Erase, Program, and Verify. A red arrow points from the Simulink 'PX4 PSP: Upload code to Px4FMU' option to the command prompt. The text '点击下载' (Click to download) is written below the Simulink window, and '下载完成' (Download complete) is written below the command prompt window.

图. 代码编译及下载流程





设计实验

实验步骤

4) CopterSim配置

双击CopterSim桌面快捷方式即可以打开多旋翼模拟器软件。点击“模型参数”，可以自定义模型参数，然后点击“存储并使用参数”。也可以自己选择动力系统，点击计算，然后点击“存储并使用参数”。软件会自动匹配串口号，点击“开始仿真”按钮就可以进入硬件在环仿真模式。此时可以看到如右图所示的界面左下角收到飞控返回的相关消息。

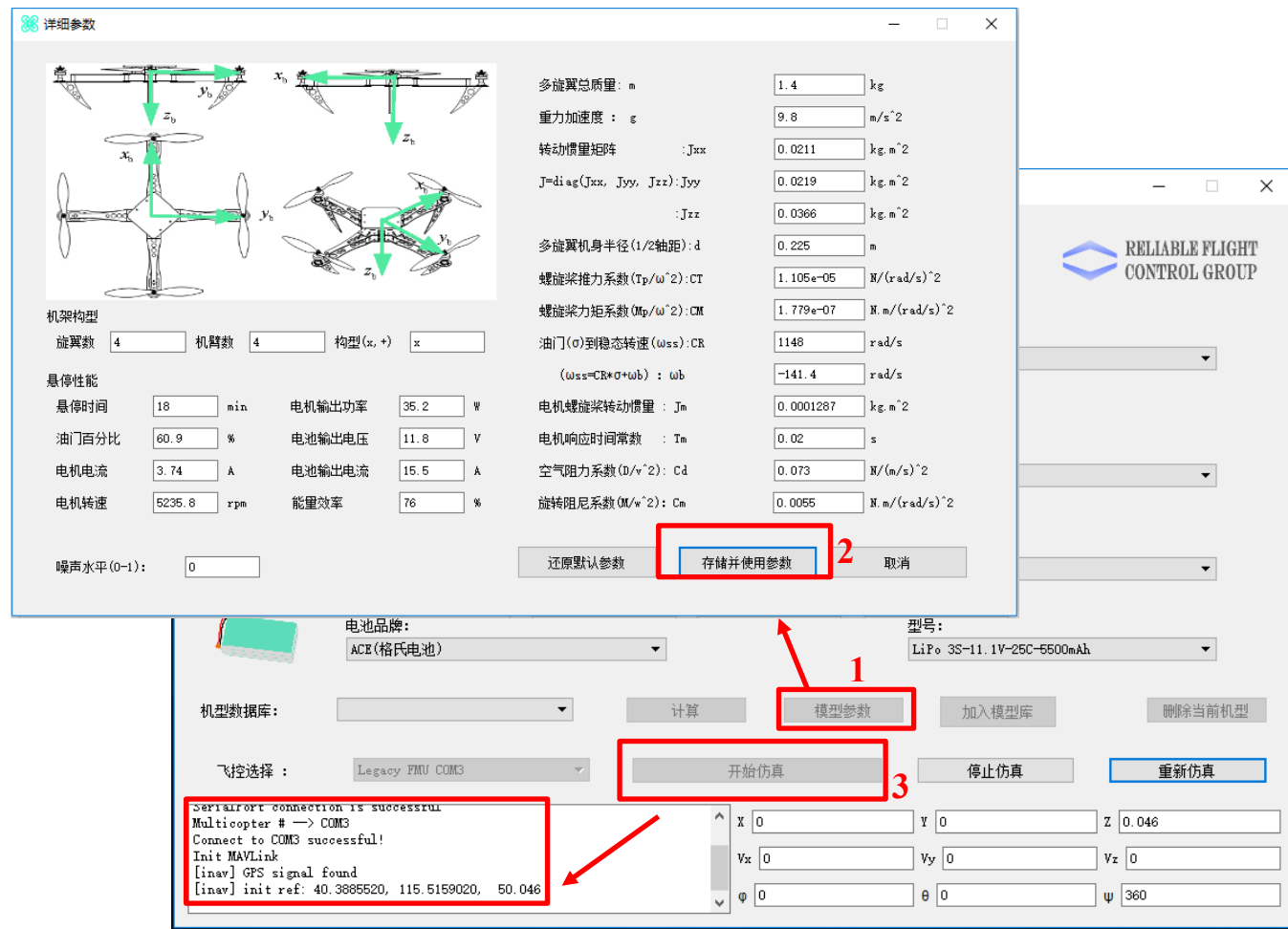


图. 模型仿真器软件配置





设计实验

□ 实验步骤

5) 3DDisplay配置

双击3DDisplay桌面快捷方式打开三维显示软件。

6) 解锁多旋翼，实现手动控制。当拨动CH5拨码开关切换到自稳模式时，四旋翼的响应与基础实验中的一致；当切换到定高模式时，四旋翼的表现与设计实验时一致；当切换到定点模式时，摇杆全部回中，四旋翼经过调整后在空中悬停。

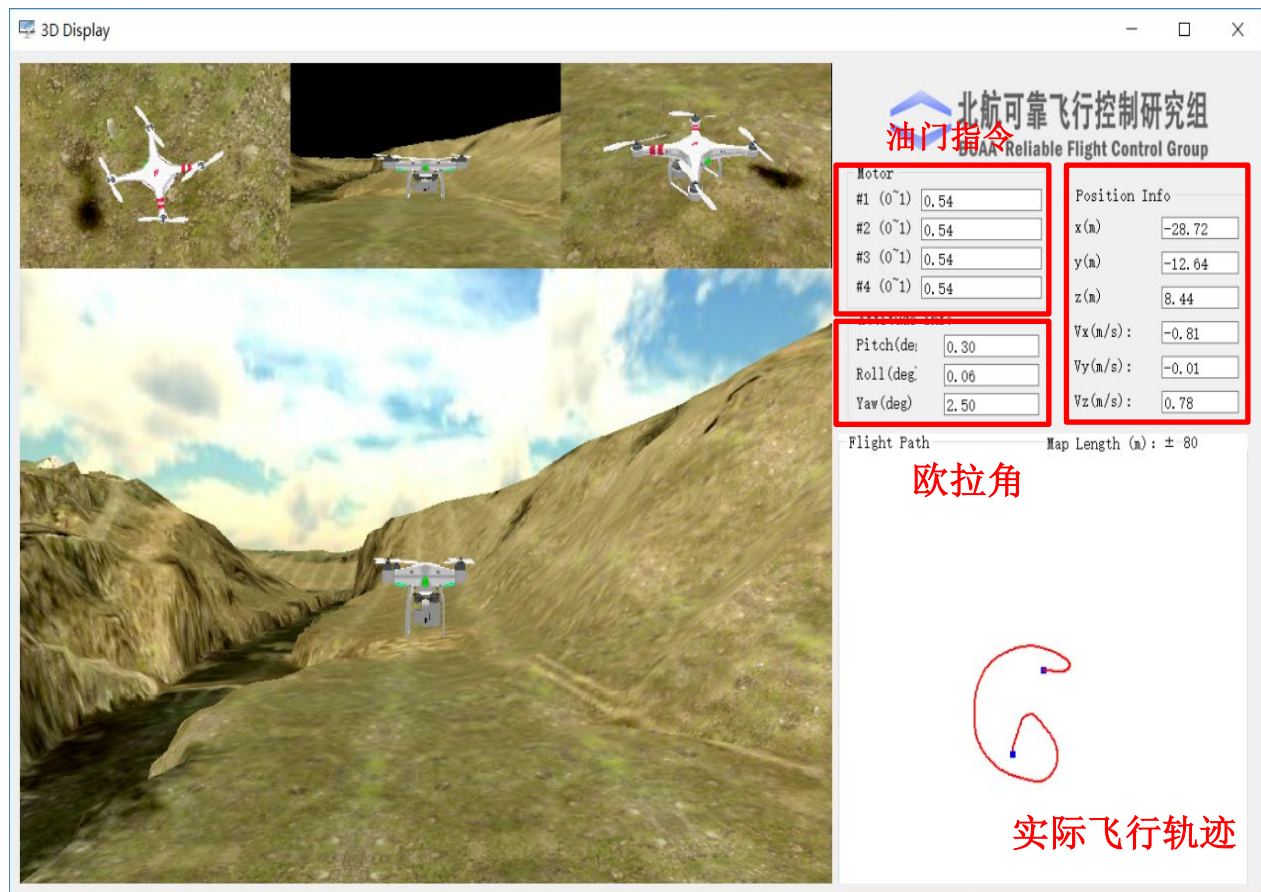


图. 3DDisplay



实飞实验

□ 实验目标

■ 已知

(1) 硬件方面：遥控器，遥控器接收机，四旋翼飞行器。

(2) 软件方面： MATLAB2017b, Pixhawk Pilot Support Package (PSP) 代码生成与烧录工具箱，模式切换实飞Simulink模型及相关代码文件 “e7.4” (<https://flyeval.com/course>) 。

■ 目标

实飞验证模式切换效果。



设计实验

□ 实飞实验步骤

(1) 步骤一：四旋翼设置

实际飞行试验所采用的多旋翼为F450 四旋翼，如图所示，在实际飞行时需要在QGC 中将Pixhawk 的机架类型从“HIL Quadcopter X”修改为“DJI Flame Wheel F450”，并完成传感器校准。



图. F450 机架示意图





实飞实验

实验步骤

(2) 实飞模型

相对硬件在环仿真模型，这里将其PWM输出部分进行了替换。另外将仿真中的安全高度设置为5m，以保证实验安全。

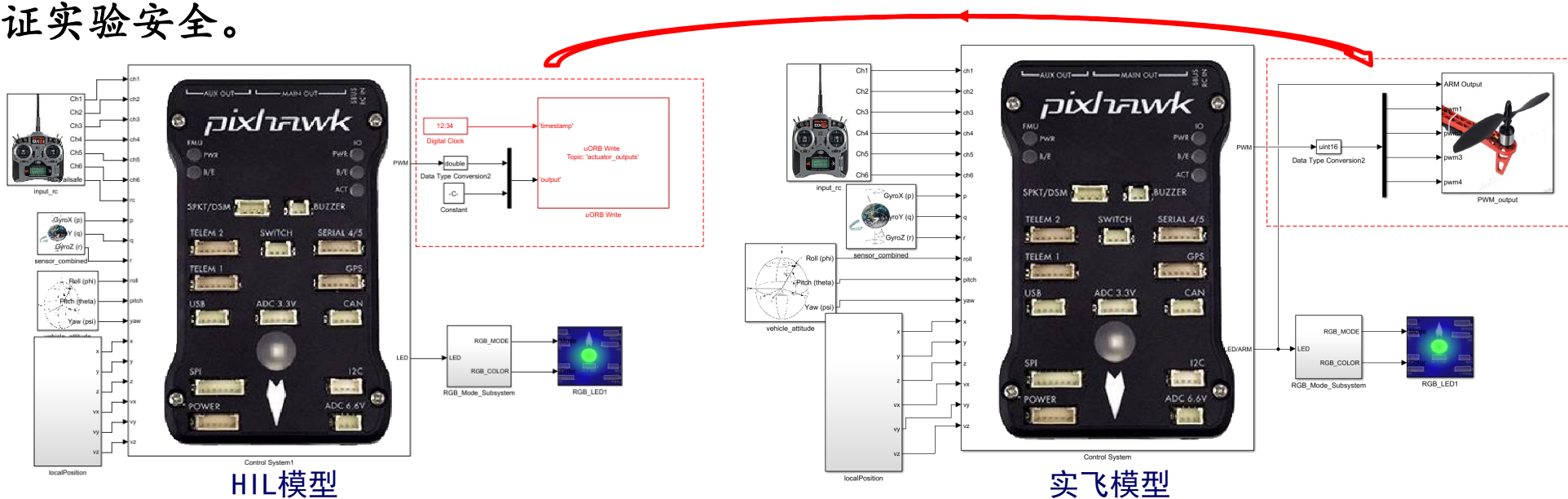


图. 替换PWM输出





实飞实验

□实验步骤

(3) 步骤三：下载代码

与硬件在环仿真过程中编译下载代码过程完全一致。

(4) 步骤四：室外实飞测试

为确保安全，可在飞机上系上安全绳，并将安全绳的另一端固定在重物上，如右图所示。另外应在空旷场地上进行实验，以确保GPS信号良好。



图. 室外实飞





实飞实验

□ 实验结果

读取飞控的log数据，如图所示。前60s左右是自稳模式，如图中a，然后切换到定高模式。进入定高模式后，如图中b，油门摇杆居中，高度保持稳定，之后油门摇杆偏离中心，高度下降，然后切换到位置控制模式。进入位置控制模式后，如图中c，俯仰和横滚摇杆居中，水平位置基本固定；油门摇杆也居中，高度保持不变，此时多旋翼为定点状态。实际飞行的效果和实验数据都表明多旋翼能够实现三种模式之间的切换。

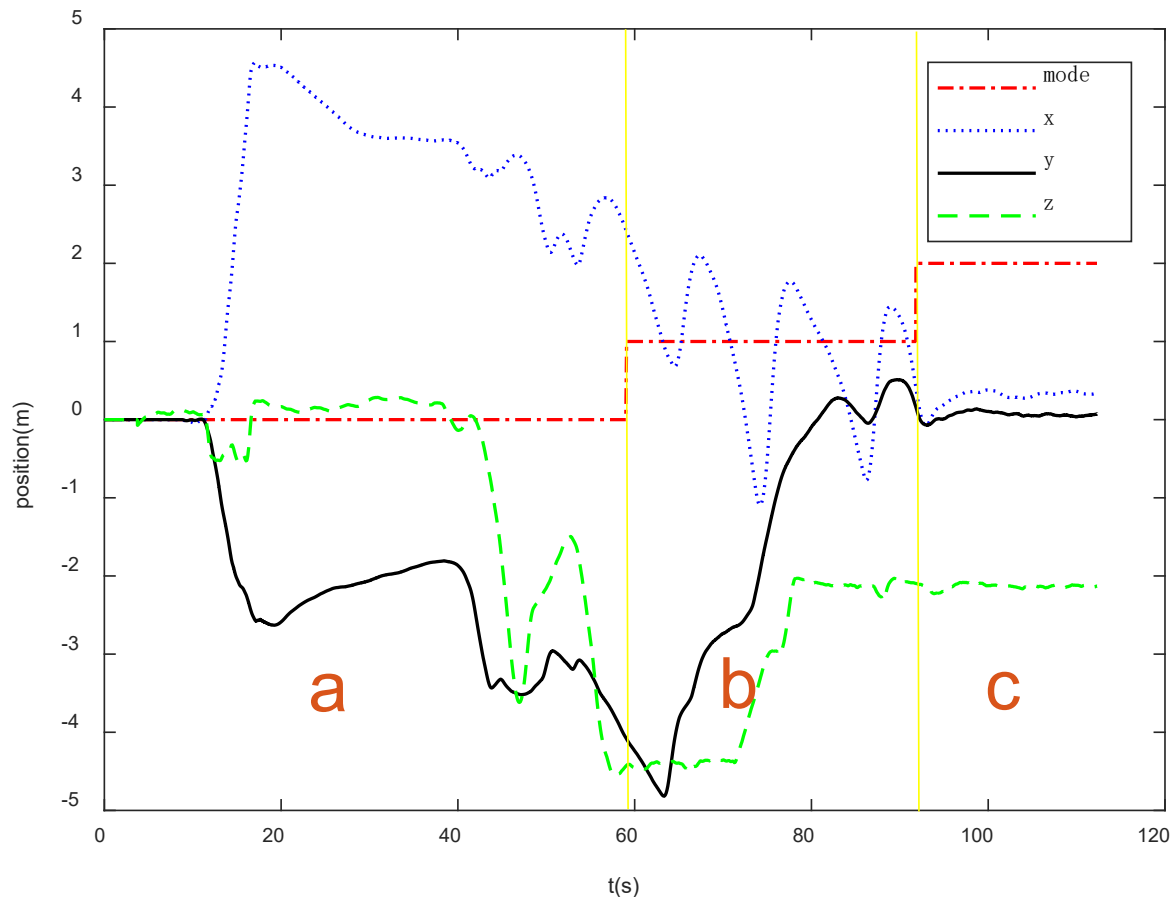


图. 半自主实飞数据





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。



谢 谢！



北航可靠飞行控制研究组
BUAA Reliable Flight Control Group