

# 1、实验名称及目的

**基础实验：**（1）复现四旋翼飞行器的 Simulink 仿真，分析控制分配器的作用；（2）记录姿态的阶跃响应，并对开环姿态控制系统进行扫频以绘制 Bode 图，分析闭环姿态控制系统的稳定裕度；（3）完成四旋翼硬件在环仿真。

# 2、实验原理

姿态控制是多旋翼飞行中的关键问题，而 PID（比例-积分-微分）控制器是常用的控制算法之一。下面是多旋翼姿态控制器 PID 控制器的工作原理的解释：

1、比例（Proportional）控制：比例控制是 PID 控制器的基本组成部分。它通过测量目标值（期望姿态）与实际值（传感器测量的当前姿态）之间的误差，乘以一个比例增益参数（ $K_p$ ），得到一个补偿量。该补偿量与误差成正比，用于修正飞行器的输出，使其朝着期望姿态调整。比例控制可以实现快速响应，但可能导致超调和稳态误差。

2、积分（Integral）控制：积分控制主要用于消除比例控制中的稳态误差。积分控制器根据姿态误差的累积值，乘以一个积分增益参数（ $K_i$ ），得到一个补偿量。这个补偿量用于纠正由于比例控制导致的稳态误差。积分控制可以使系统追踪期望姿态更准确，但如果参数不恰当，可能会导致系统过度抖动或震荡。

3、微分（Derivative）控制：微分控制主要用于减小系统的超调和抑制振荡。微分控制器根据姿态误差的变化率（导数），乘以一个微分增益参数（ $K_d$ ），得到一个补偿量。这个补偿量用于预测系统未来的状态变化趋势，并减小响应的快速变化。微分控制可以提高系统的稳定性和响应速度，但过大的微分增益可能引入噪声或引发不稳定性。

PID 控制器通过组合比例、积分和微分控制三个分量，综合考虑当前误差、稳态误差和系统的动态响应，以实现姿态控制。PID 控制器的输出将用于调整多旋翼飞行器的控制输入（例如电机转速），使其姿态逐渐趋向目标值，并保持稳定飞行。

详细内容请参考上层路径文献[3]第 09 讲\_实验五\_姿态控制器设计实验.pptx，文献[4]第 11 讲\_底层飞行控制 V2.pptx。

# 3、实验效果

以多旋翼的姿态模型为依据，建立了常见的 PID 控制方法，并在 MATLAB 的 Simulink 中完成姿态控制器的设计，并在 RflySim 中显示仿真效果。

# 4、文件目录

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\5-AttitudeCtrl\5.1\](#)

	文件夹/文件名称		说明
HIL	icon	FlightGear.png	FlightGear 硬件图片。
		pixhawk.png	Pixhawk 硬件图片。
		F450.png	F450 飞机模型图片。

	AttitudeControl_HIL.slx		Simulink 仿真模型文件。
	Init_control.m		控制器初始化参数文件。
Sim	icon	UE_Logo.jpg	UE 软件的 Logo
		Init.m	模型初始化参数文件。
		FlightGear.png	FlightGear 硬件图片。
		pixhawk.png	Pixhawk 硬件图片。
		SupportedVehicleTypes.pdf	机架类型修改说明文件。
		F450.png	F450 飞机模型图片。
	AttitudeControl_Sim.slx		Simulink 仿真模型文件。
	Init_control.m		控制器初始化参数文件。
	log_data_sfuns.mexw64		
tune	icon	SupportedVehicleTypes.pdf	
		FlightGear.png	FlightGear 硬件图片。
		pixhawk.png	Pixhawk 硬件图片。
		Init.m	模型初始化参数文件。
		F450.png	F450 飞机模型图片。
		SupportedVehicleTypes.pdf	机架类型修改说明文件。
	AttitudeControl_tune.slx		Simulink 仿真模型文件。
	Init_control.m		控制器初始化参数文件。

## 5、运行环境

序号	软件要求	硬件要求	
		名称	数量
1	Windows 10 及以上版本	笔记本/台式电脑 <sup>①</sup>	1
2	RflySim 平台免费版	Pixhawk 6C 飞控 <sup>②</sup>	1
3	MATLAB 2017B 及以上	遥控器 <sup>③</sup>	1
		遥控器接收器	1
		数据线、杜邦线等	若干

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/doc/zh/HowToInstall.pdf>

②：须保证平台安装时的编译命令为：px4\_fm3-v6c\_default，固件版本为：1.13.3。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

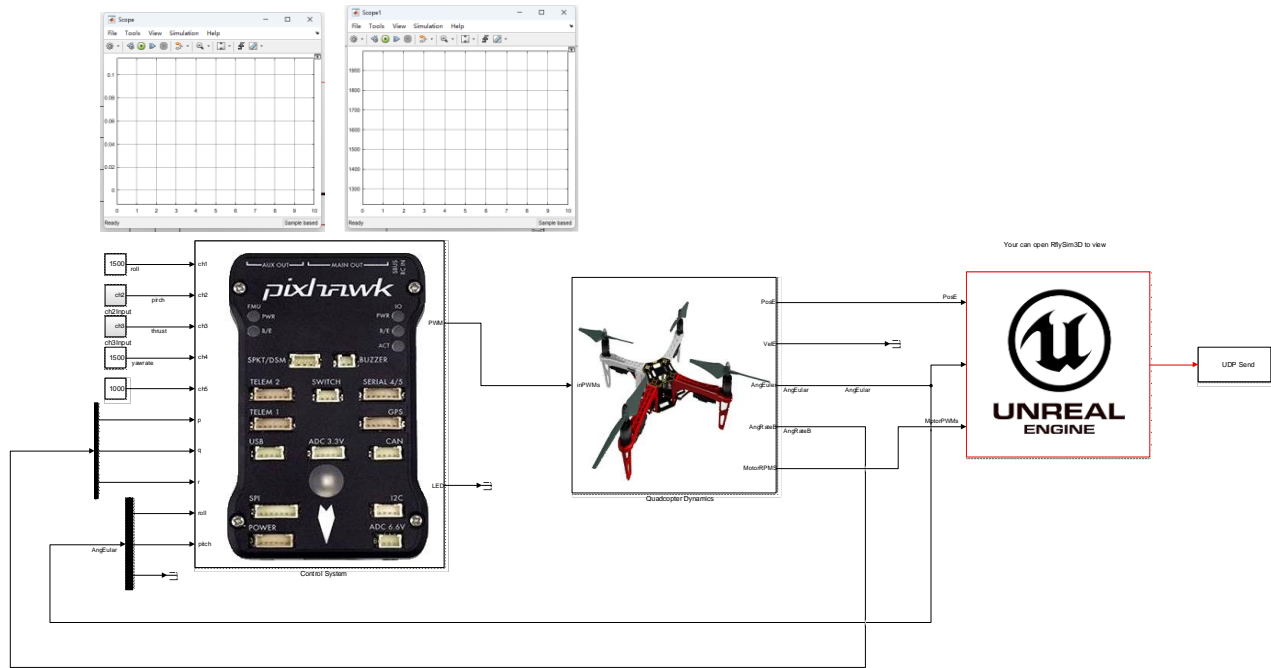
③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 WFLY-ET10、配套接收器为：WFLY-RF209 S。遥控器相关配置见：<https://rflysim.com/doc/zh/B/3.1ET10.html>

## 6、实验步骤

### Step 1:

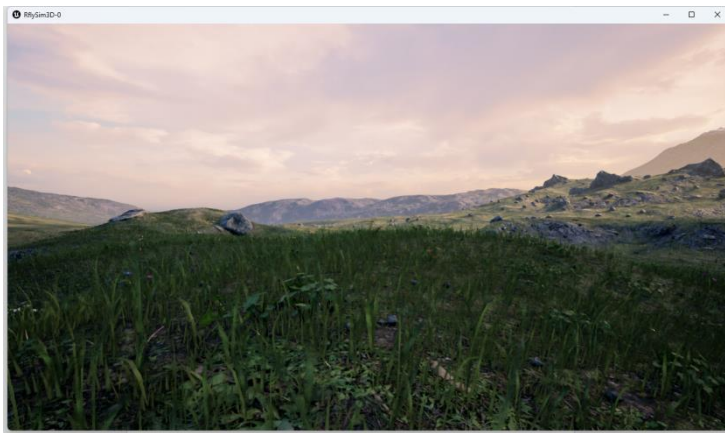
软件在环仿真——控制分配器。

打开 MATLAB 软件，在 MATLAB 中打开" \e5-AttitudeCtrl\e5.1\Sim\Init\_control.m"文件，点击运行。同时 Simulink 文件“AttitudeControl\_Sim.slx”将会自动打开。



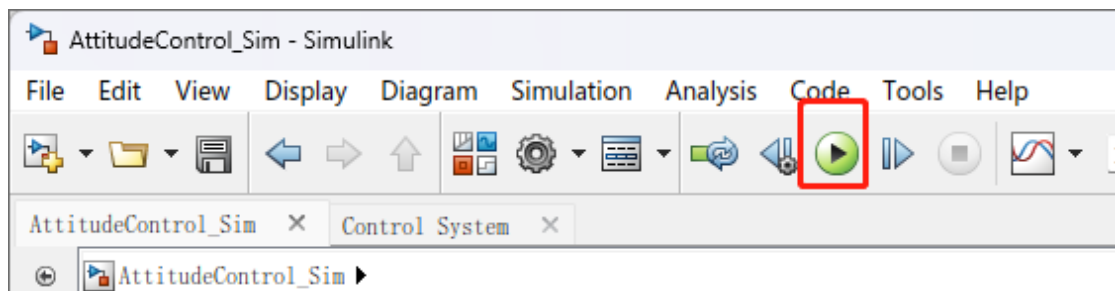
## Step 2:

打开 RflySim3D 软件。



## Step 3:

点击 Simulink“开始仿真”按钮开始仿真。此时可以在 RflySim3D 中观察多旋翼的状态。



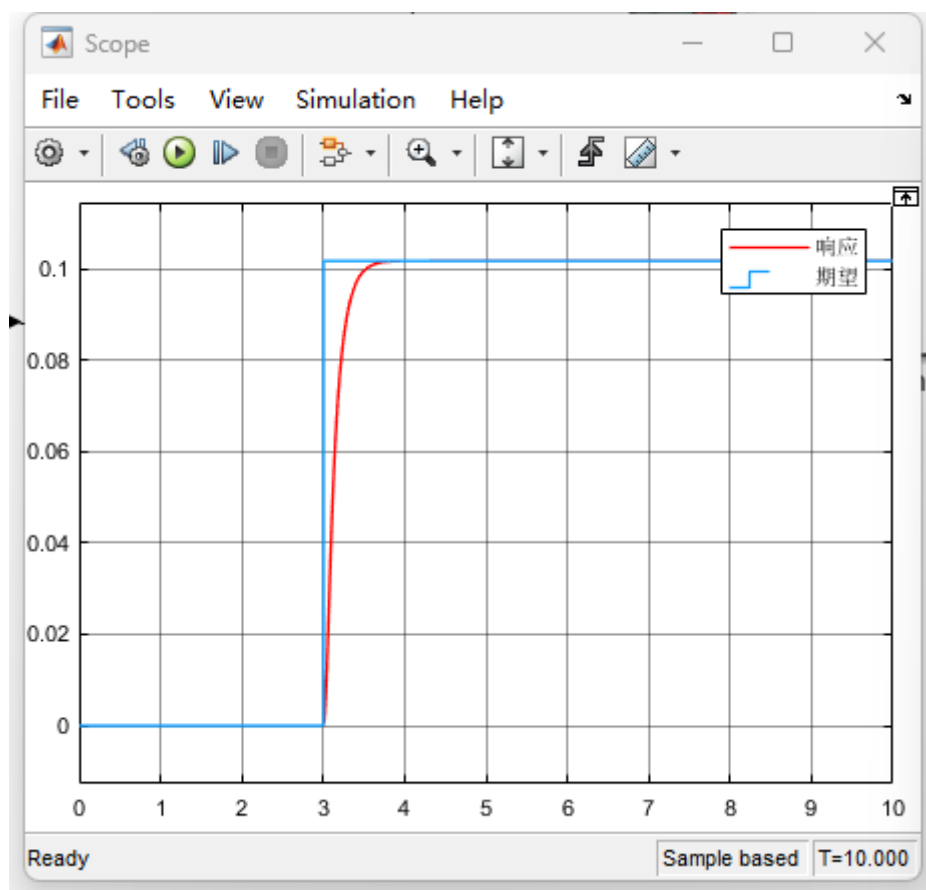
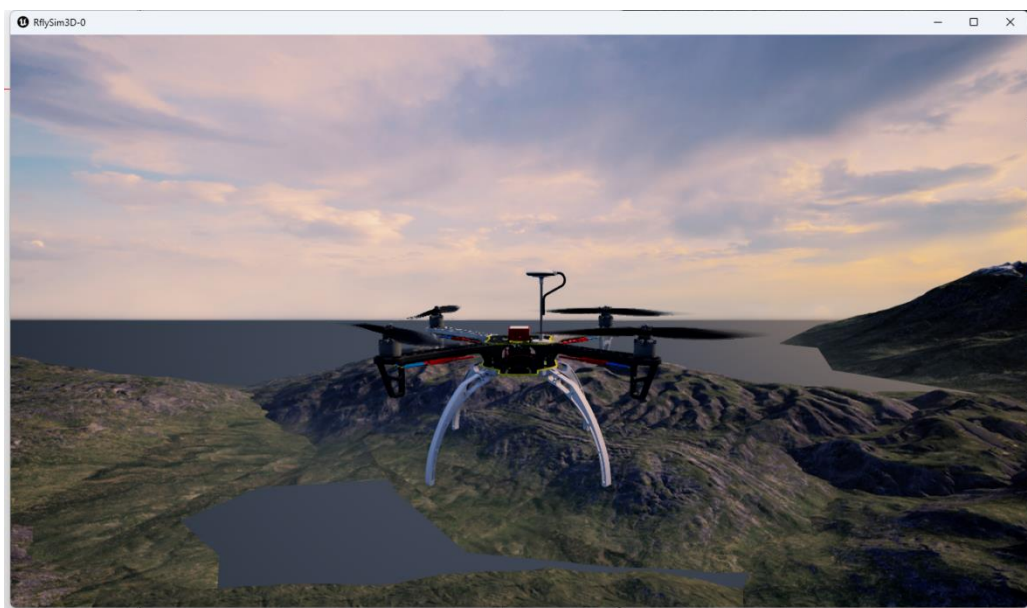


图 Pitch 角度响应

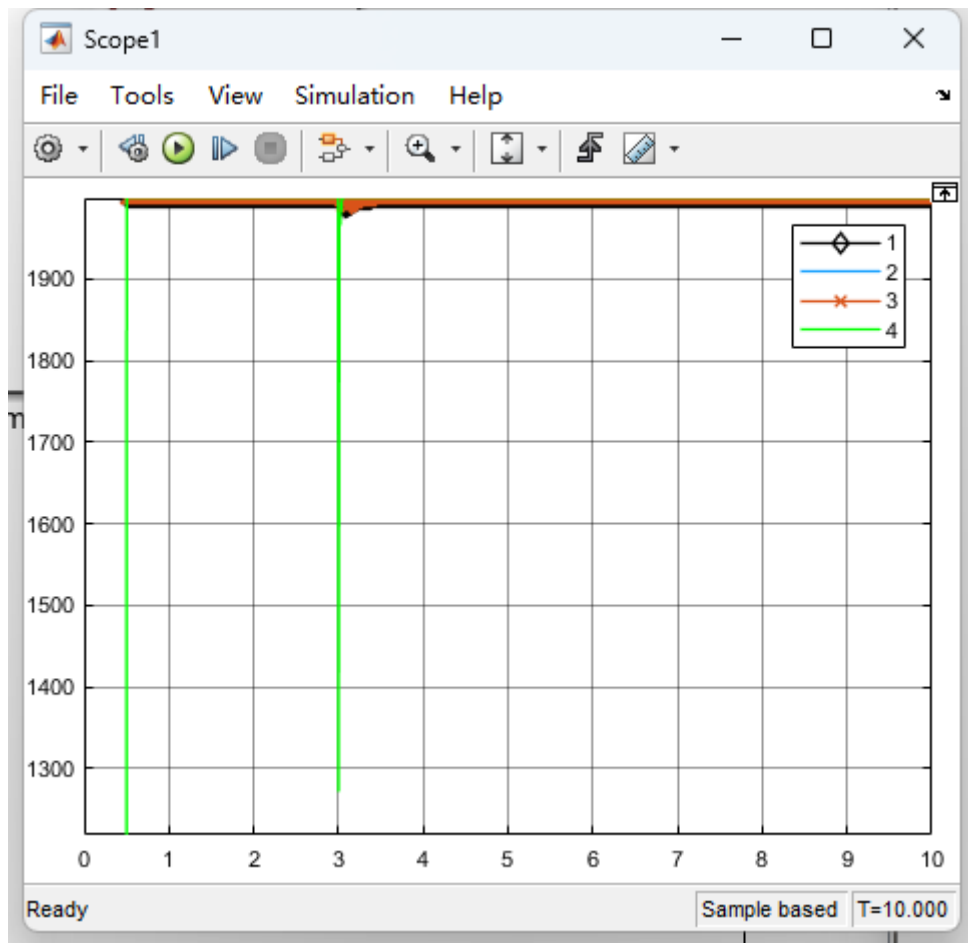


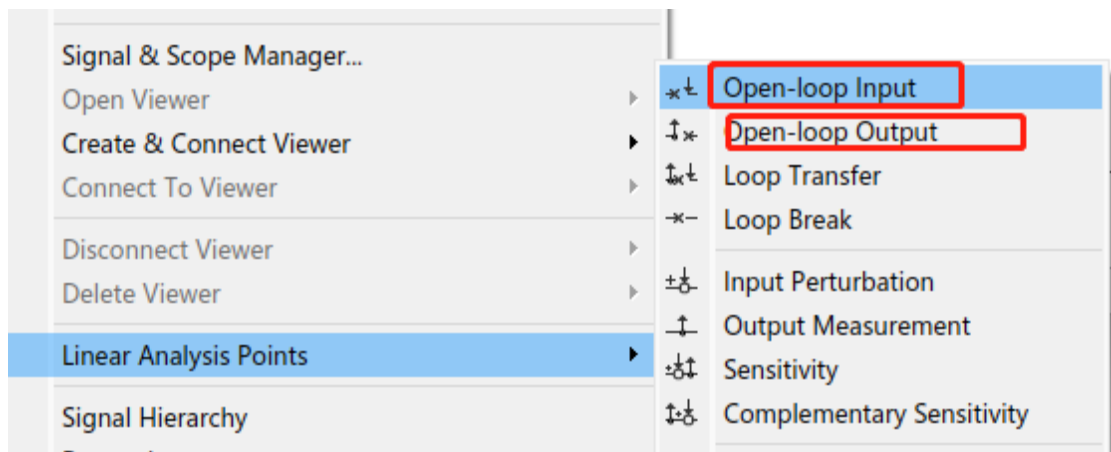
图 经过控制分配后的 PWM 值

#### Step 4:

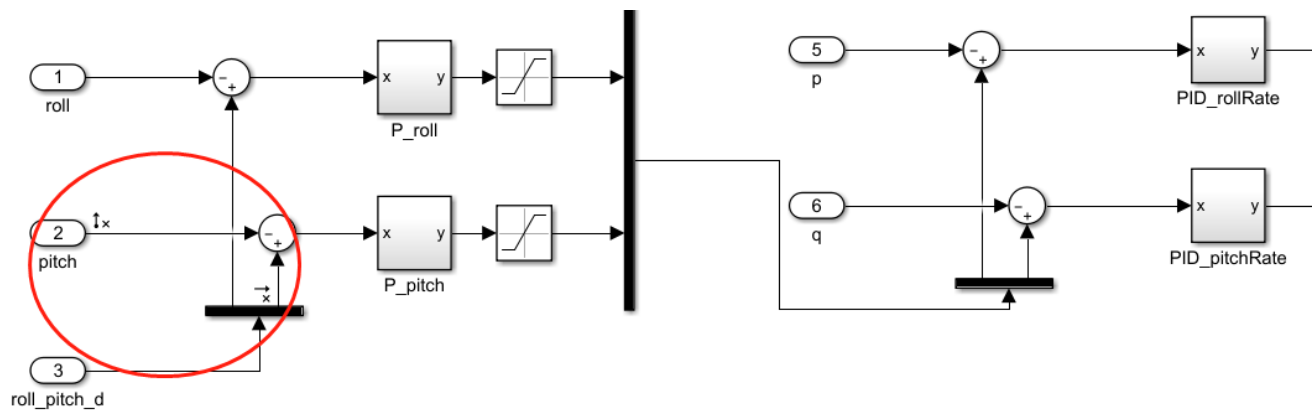
软件在环仿真——稳定裕度。

运行"`e5-AttitudeCtrl\5.1\tune\Init_control.m`"文件，“AttitudeControl\_tune.slx”文件自动打开。



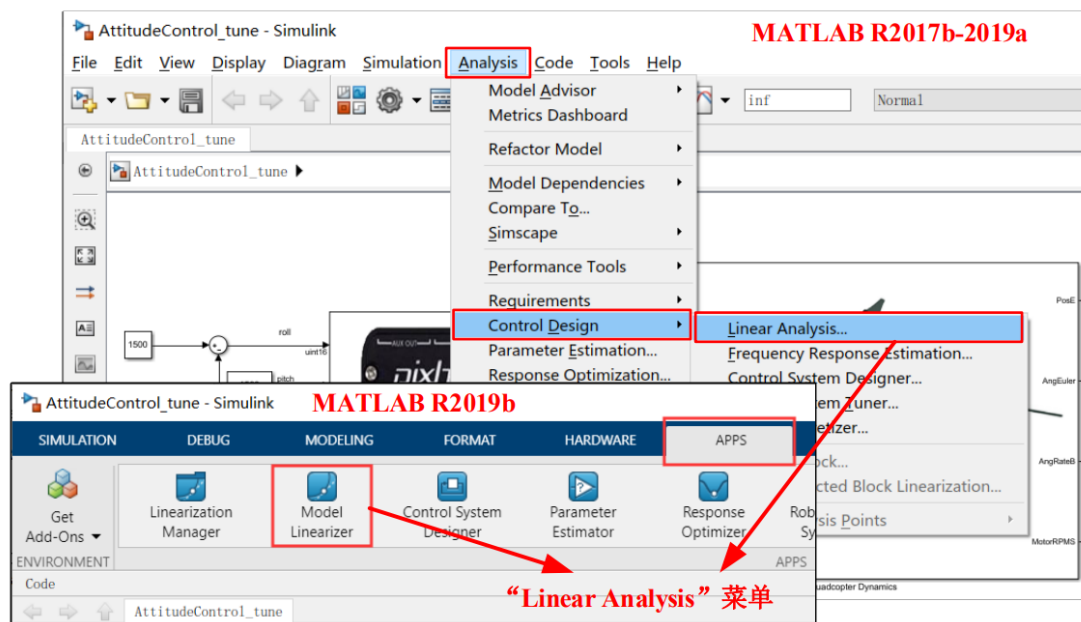


设置效果如图

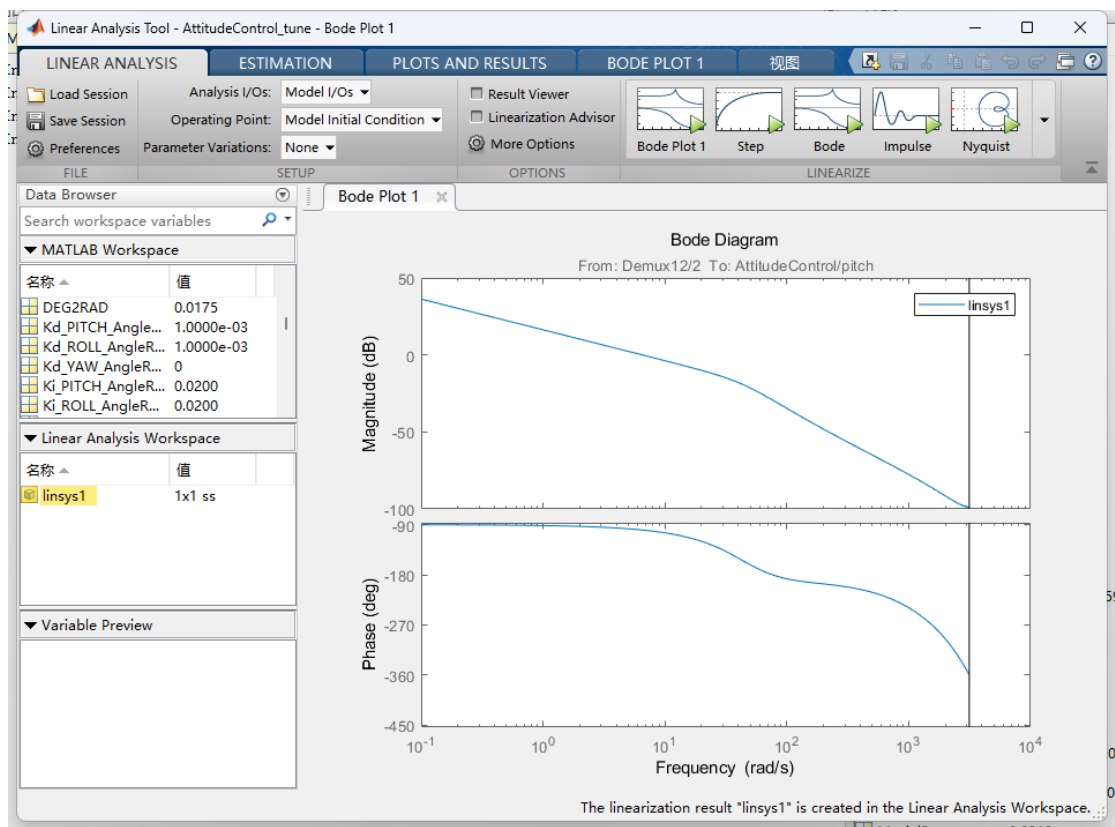


## Step 6:

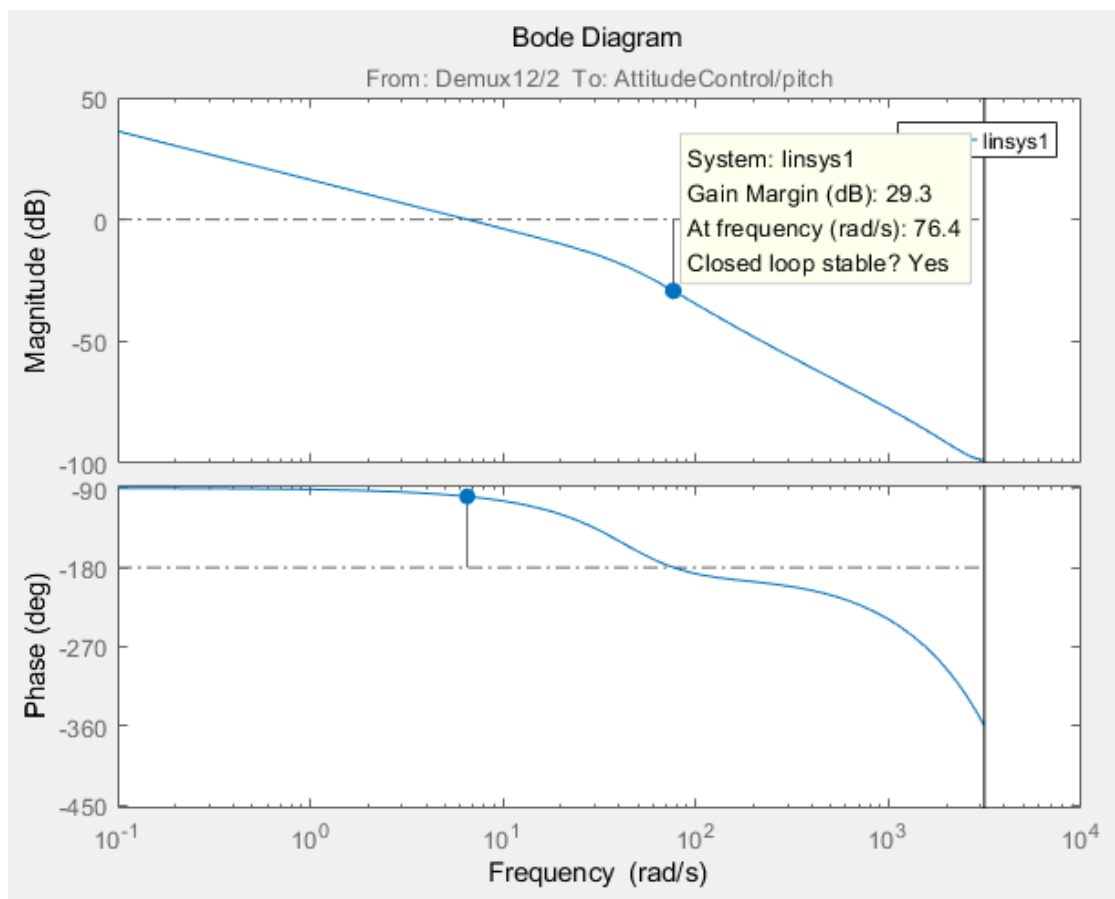
选择 Simulink 上面菜单中的“Analysis”-“Control Design”-“Linear Analysis”，在弹出的窗口中选择“LINEAR ANALYSIS”；如图所示。



点击“Bode”，即可得到 Bode 图，如图所示。



右键点击曲线，选择“Characteristic”- “All Stability Margins”，可以看到截止频率、幅值裕度和相角裕度等。

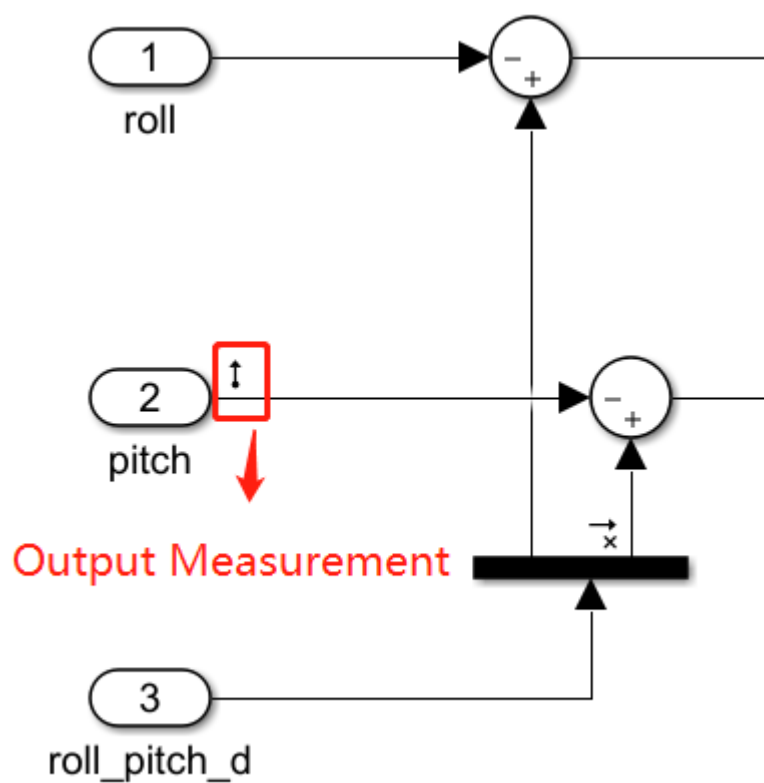




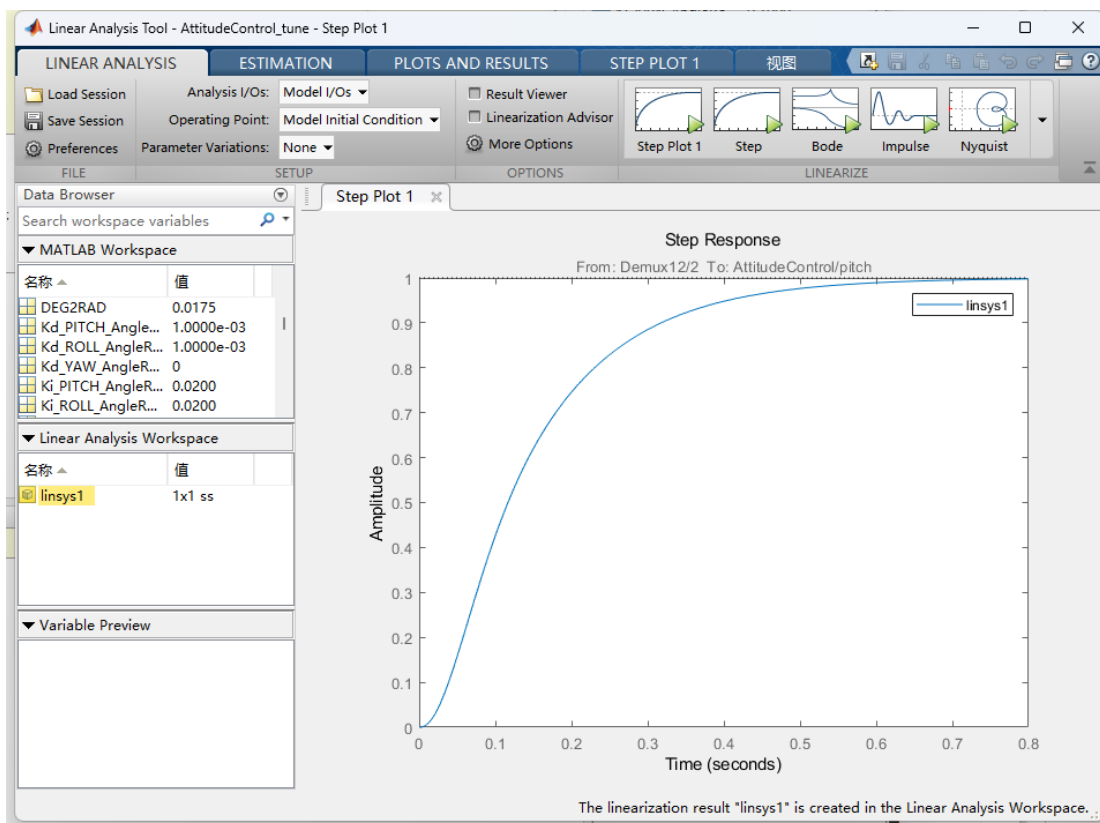
## Step 7:

软件在环仿真——阶跃响应。

先初始化 “AttitudeControl\_tune.slx” 文件。设置信号的输入输出点：选中信号线，点击鼠标右键，选择“Linear Analysis Points”– 输入选“Open-loop Input”；输出点设置最后选择 Output Measurement。



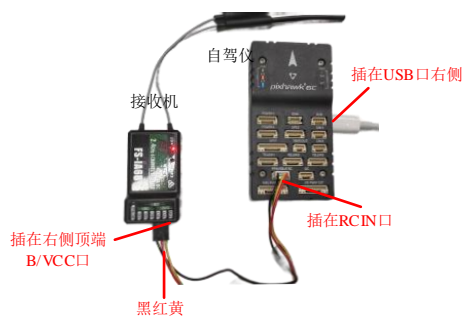
进入 Simulink 的“Linear Analysis”界面，点击“Step”即可得到阶跃响应曲线。



## 7、硬件在环仿真实验步骤

### Step 1:

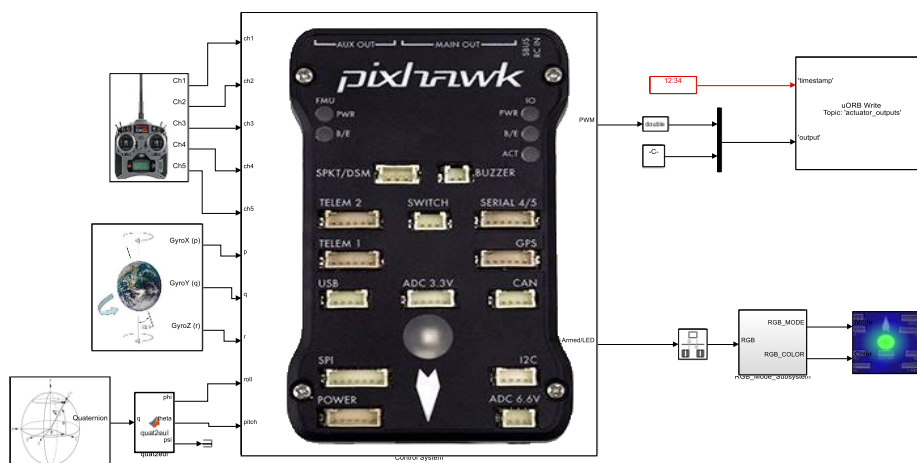
将遥控器与遥控器接收器对码完成并在飞控中插入 SD 卡后，如图将遥控器接收机和飞控连接好。



注意：电源线接线顺序从上到下依次为黑红黄

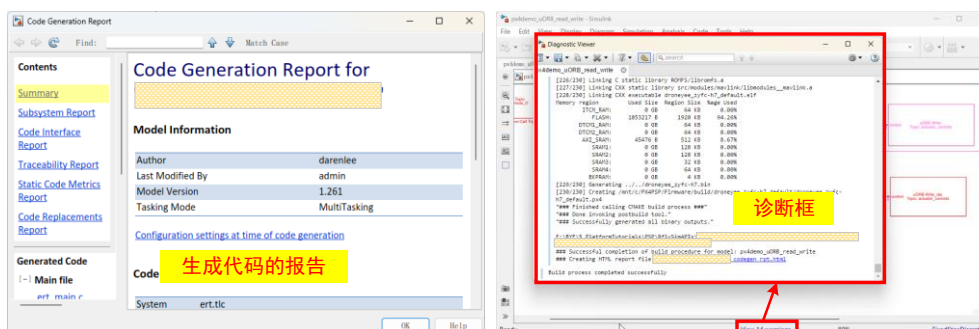
### Step 2:

打开“e5\e5.1\HIL\AttitudeControl\_HIL.slx”文件。值得注意的是，“Control System”模块和软件在环仿真相同。



### Step 3:

在 Simulink 的下方点击 View diagnostics 指令，即可弹出诊断对话框，可查看编译过程。在诊断框中弹出 Build process completed successfully，即可表示编译成功，左图侧为生成的编译报告。



### Step 4:

用 USB 数据线链接飞控与电脑。在 MATLAB 命令行窗口输入：PX4Upload 并运行，弹出 CMD 对话框，显示正在上传固件至飞控中，等待上传成功。



```
C:\WINDOWS\SYSTEM32\cmd
Loaded firmware for board id: size: 1903433 bytes (92.20%), waiting for the bootloader...

Found board id: bootloader version: 5 on COM5
sn: 001e0035425650c20323441
chip: 10016451
family: b'STM32F7[6|7]x'
revision: b'Z'
flash: 2064384 bytes
Windowed mode: False

Erase : [=====] 100.0%
Program: [ ] 3.4%
```

## Step 5:

上传成功后，在 QGC 中校准遥控器并设置飞行模式，完成后双击打开"\*桌面\RflyTools\HITLRun.lnk"或"\*PX4PSP\RflySimAPIs\HITLRun.bat"文件，在弹出的 CMD 对话框中输入插入的飞控 Com 端口号，即可自动启动 RflySim3D、CopterSim、QGroundControl 软件，等待 CopterSim 的状态框中显示：PX4: GPS 3D fixed & EKF initialization finished。

```
PX4: Init MAVLink
CopterSim: CopterID is 1, PX4 SysID is 1
PX4: Awaiting GPS/EKF fixed for Position control...
PX4: Enter Manual Mode!
PX4: Found firmware version: 1.12.3dev
PX4: Command ARM/DISARM ACCEPTED
PX4: Command REQUEST_AUTOPILOT_VERSION ACCEPTED
PX4: EKF2 Estimator start initializing...
PX4: GPS 3D fixed & EKF initialization finished.
```

## Step 6:

遥控器的设置如下图，通过控制不同的通道即可在 RflySim3D 中观察到无人机的飞行姿态，完成硬件在环仿真。

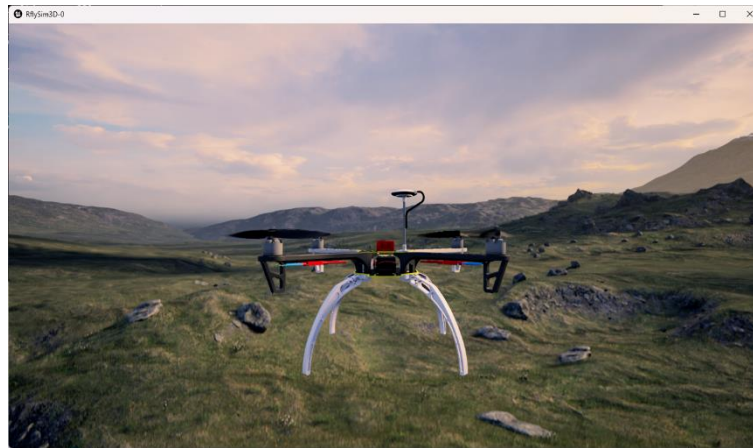


## Step 7:

通过 CH5 解锁之后，在 RflySim3D 中即可看到飞机正常起飞，通过 Step 12 中 CH1~C

---

H4 调整飞机姿态和高度。



## 8、参考文献

- [1]. 全权,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[M],电子工业出版社, 2018.
- [2]. 全权,戴训华,王帅.多旋翼飞行器设计与控制实践[M],电子工业出版社, 2020.
- [3]. 第 09 讲\_实验五\_姿态控制器设计实验.pptx.
- [4]. 第 11 讲\_底层飞行控制 V2.pptx.

## 9、常见问题

Q1: 无

A1: 无