

# 1. 实验名称及目的

## 1.1. 实验名称

姿态控制器设计-基础实验

## 1.2. 实验目的

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。

## 1.3. 关键知识点

- 多旋翼姿态控制器 PID 控制器的工作原理。
- 开环姿态控制系统进行扫频以绘制 Bode 图，闭环姿态控制系统的稳定裕度。
- RflySim 平台软硬件在环仿真。

# 2. 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。

# 3. 文件目录

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_sfun.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。

## 4. 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 工具链	Pixhawk 6X 飞控 <sup>②</sup>	1
4		遥控器 <sup>③</sup>	1
5		遥控器接收器	1
6		数据线、杜邦线等	若干

①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com>

②：须保证平台安装时的编译命令为：`px4_fmuv6x_default`，固件版本为：1.12.3。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

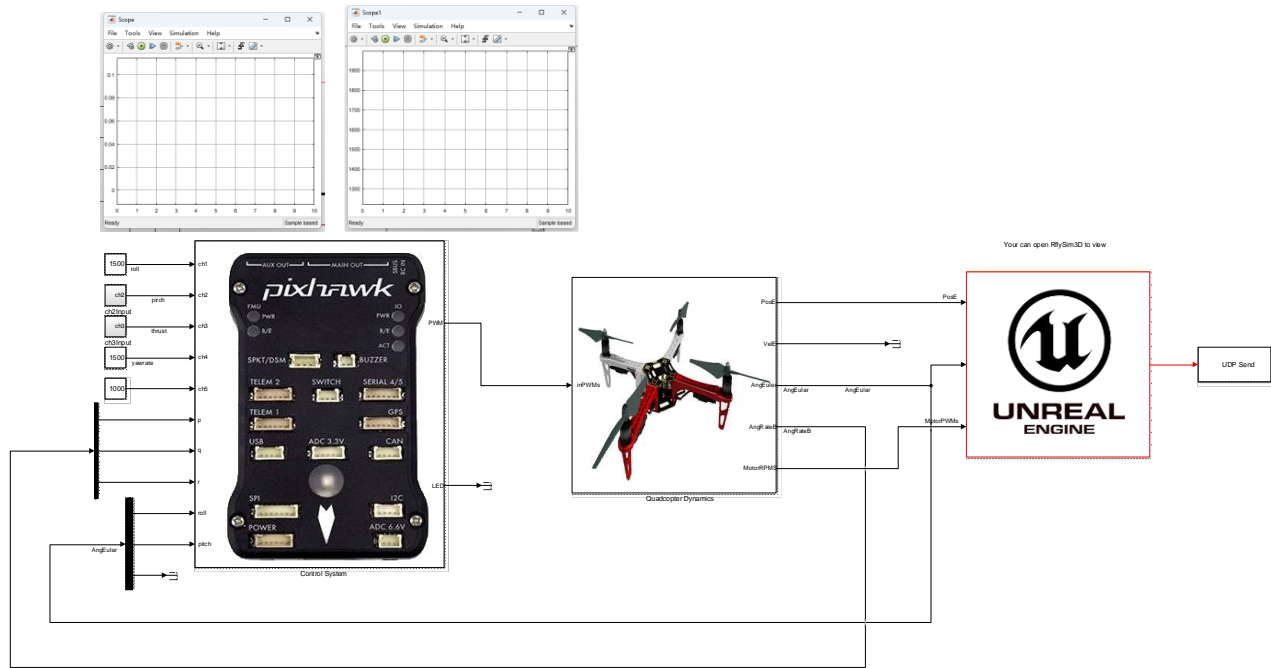
③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 WFLY-ET10、配套接收器为：WFLY-RF20 9S。遥控器相关配置见：<https://rflysim.com/doc/zh/B/3.1ET10.html>

## 5. 实验步骤

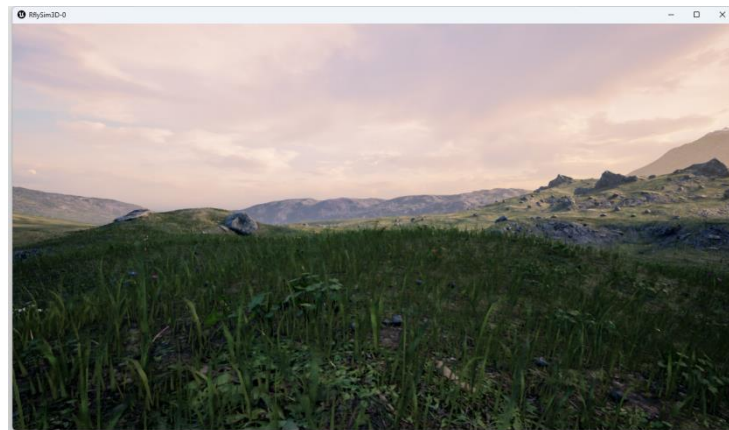
### 5.1. 姿态控制器-软件在环

软件在环仿真——控制分配器。

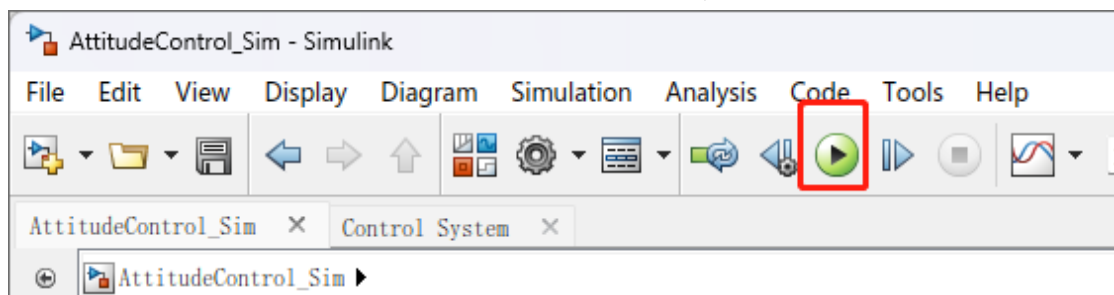
打开 MATLAB 软件，在 MATLAB 中打开“\e5-AttitudeCtrl\e5.1\Sim\Init\_control.m”文件，点击运行。同时 Simulink 文件“AttitudeControl\_Sim.slx”将会自动打开。



打开 RflySim3D 软件。



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。



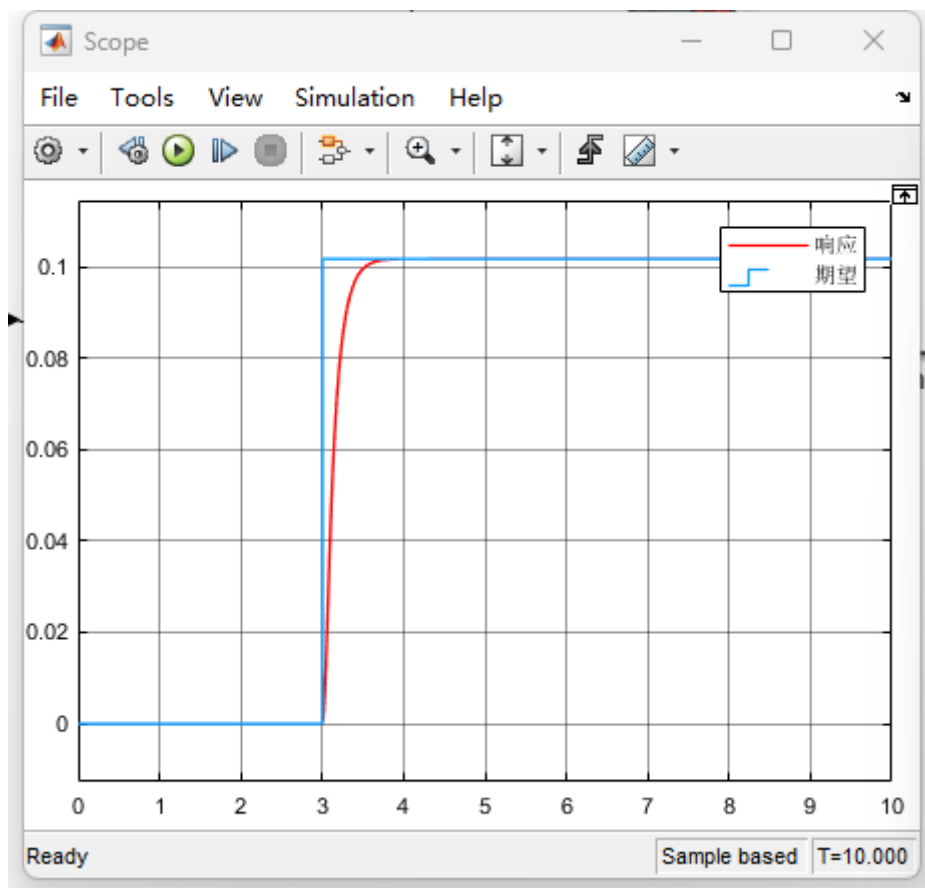
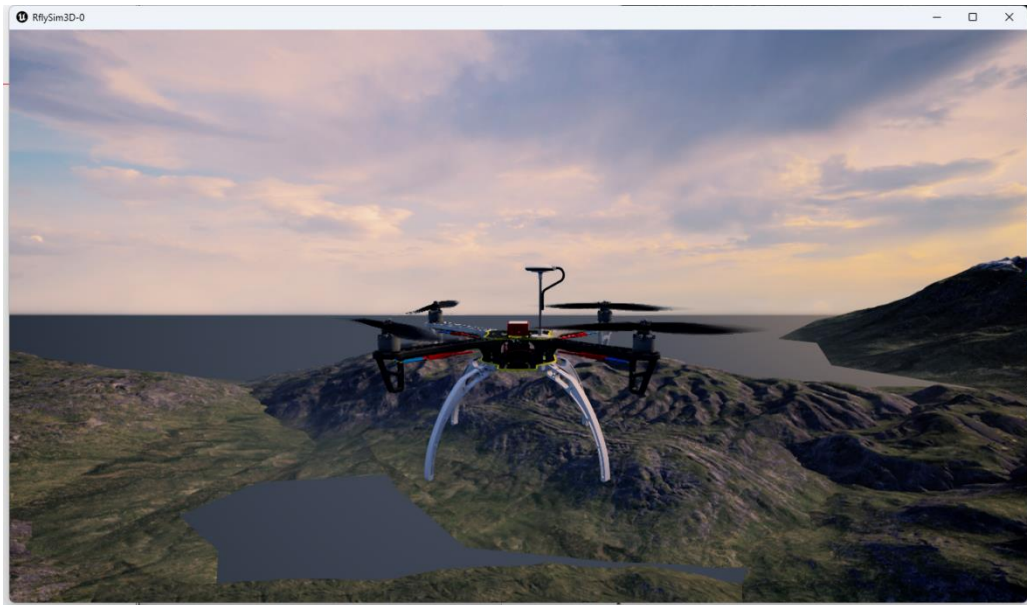


图 Pitch 角度响应

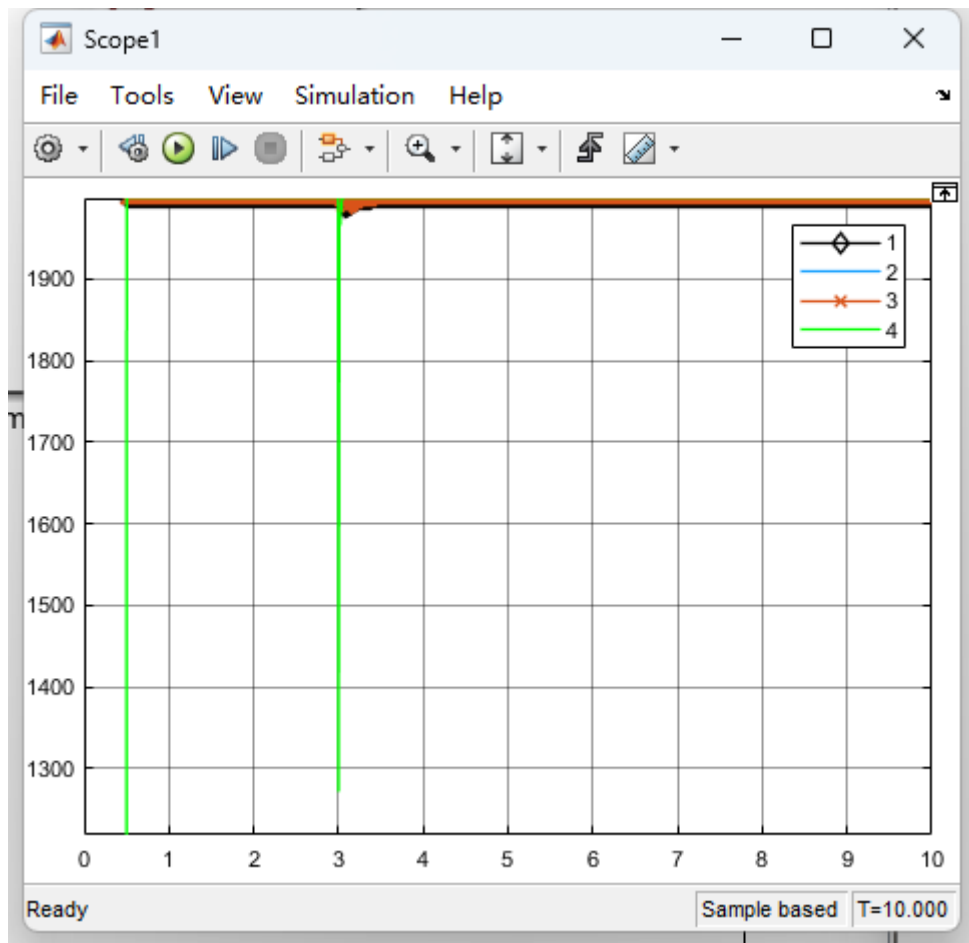
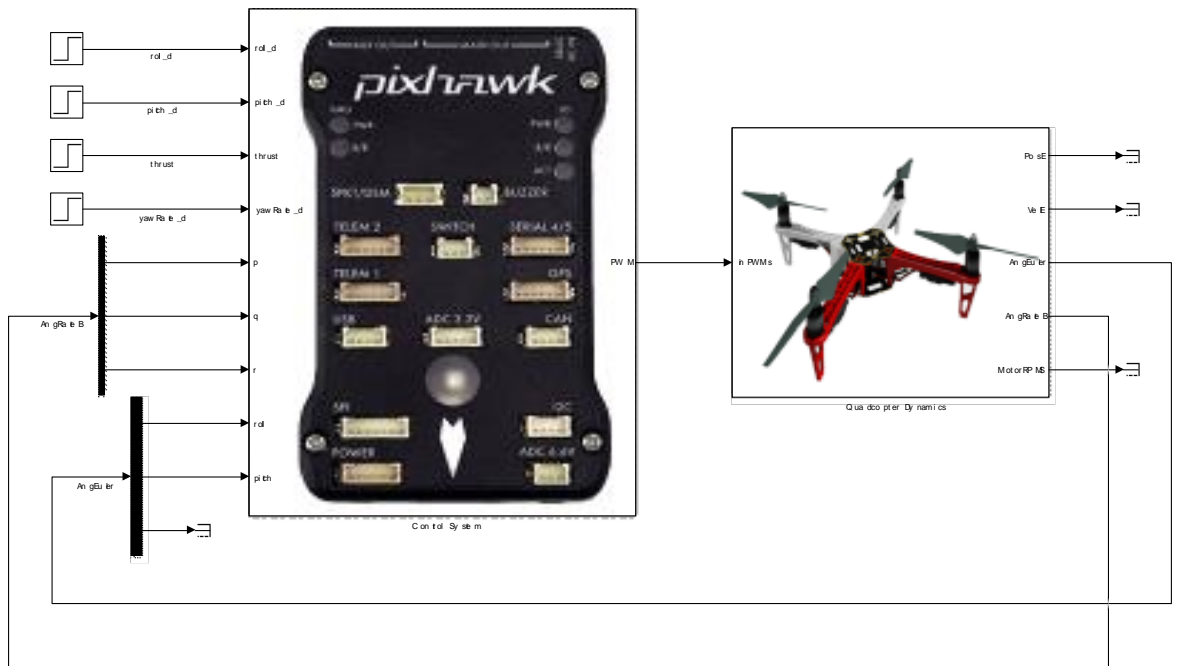


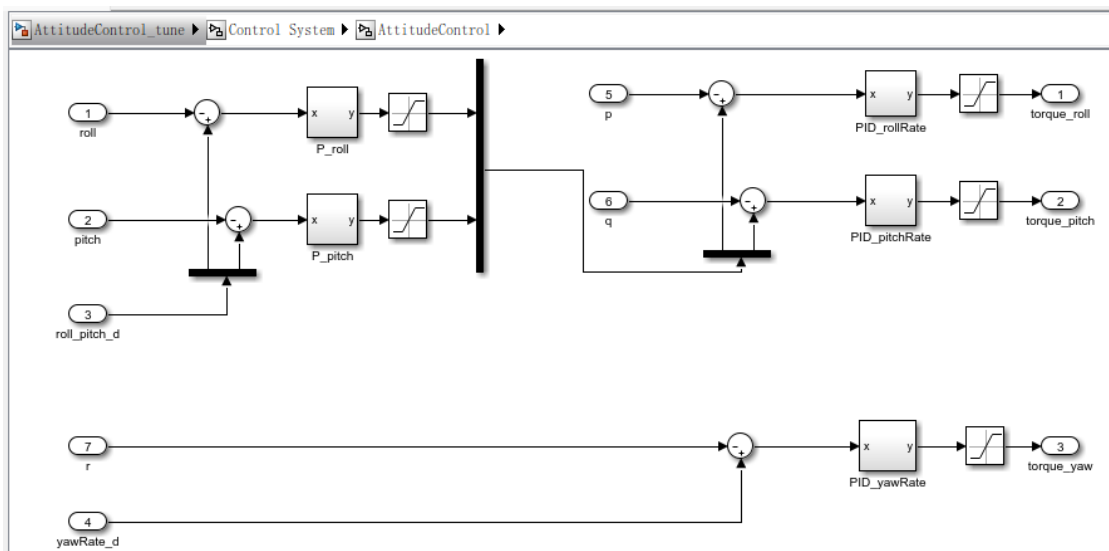
图 经过控制分配后的 PWM 值

软件在环仿真——稳定裕度。

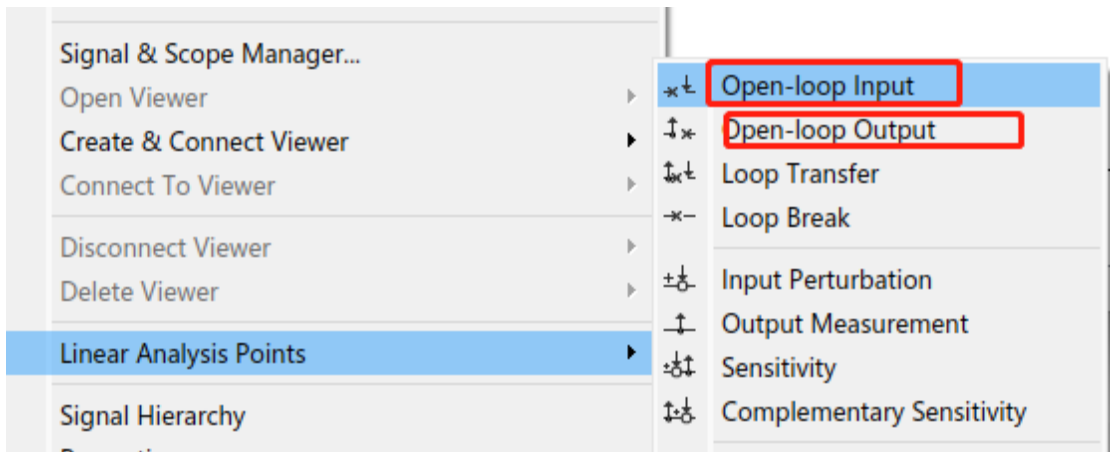
运行"`e5-AttitudeCtrl\5.1\tune\Init_control.m`"文件，“AttitudeControl\_tune.slx”文件自动打开。



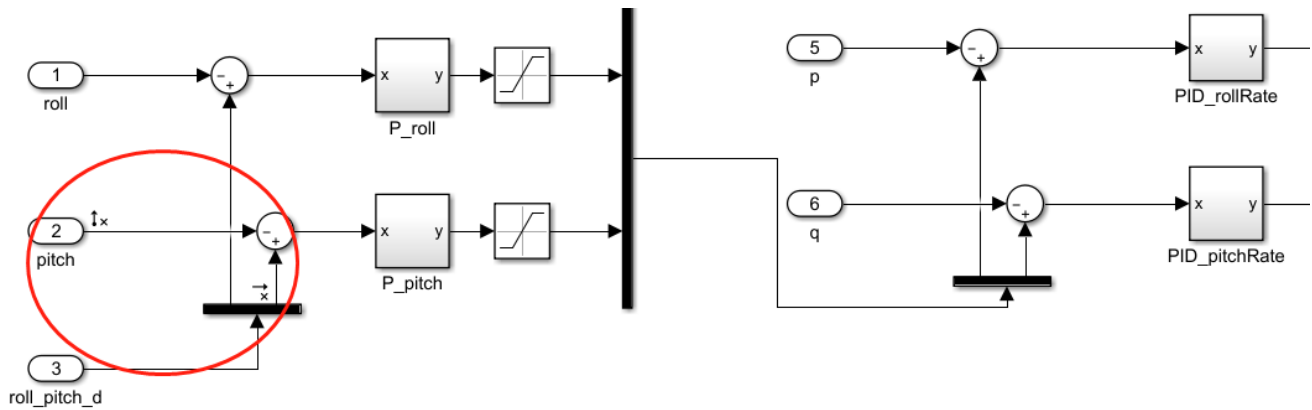
在“Control System” - “AttitudeControl”子模块中可见如图所示的姿态控制系统模型。



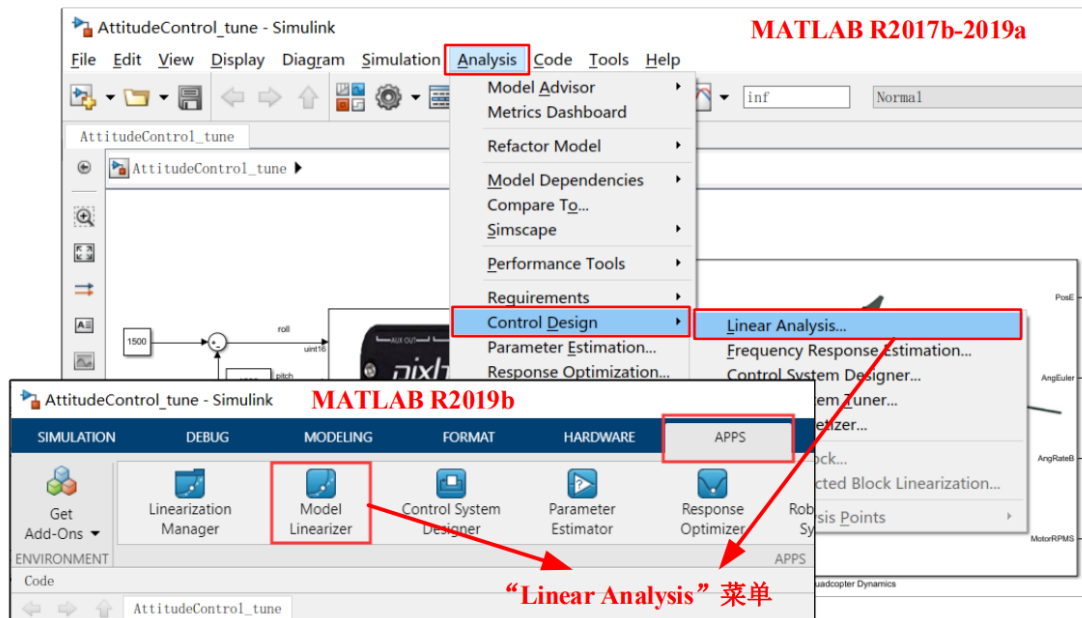
设置信号的输入输出点：选中信号线，点击鼠标右键，选择“Linear Analysis Points”  
如图选择输入或输出



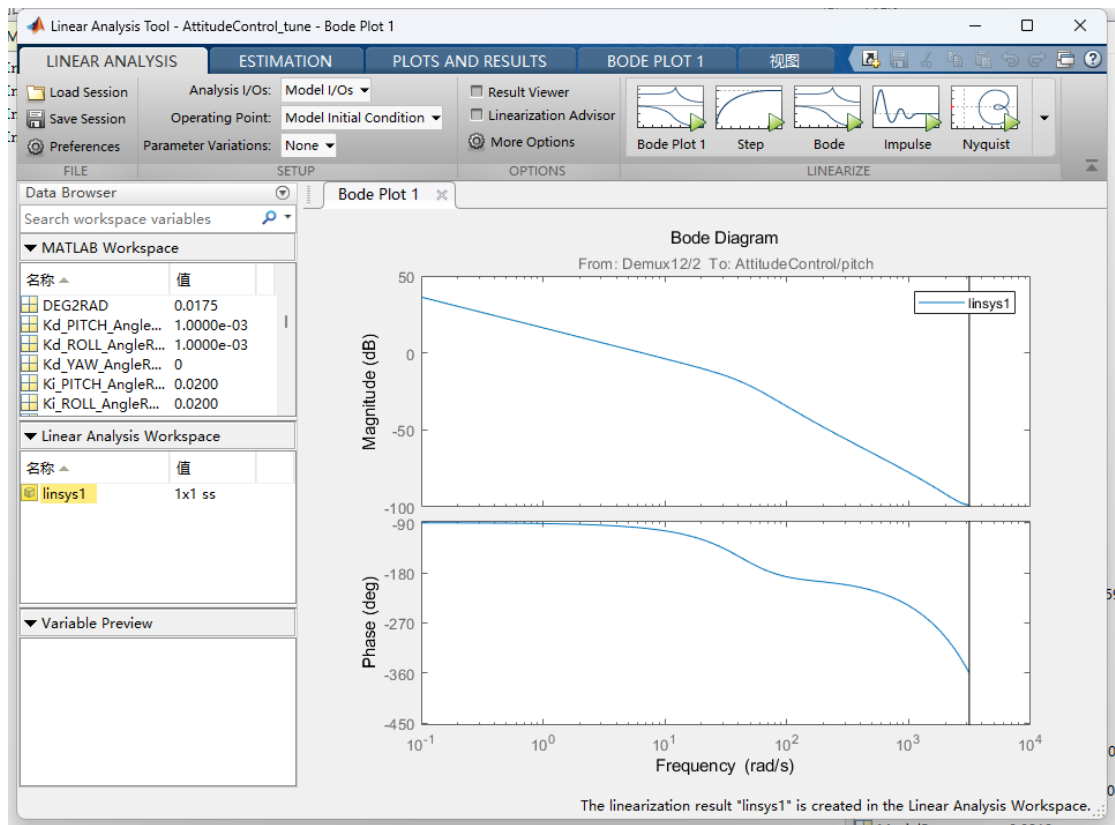
设置效果如图



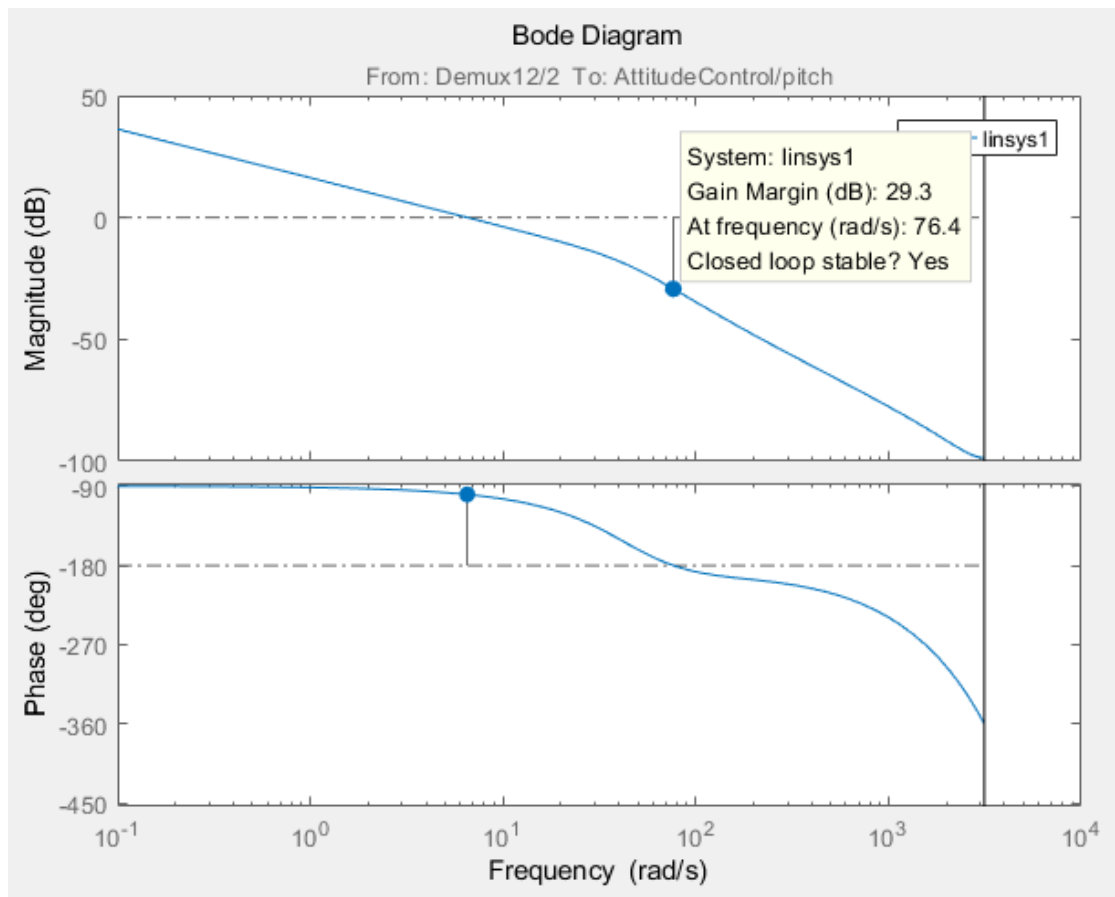
选择 Simulink 上面菜单中的“Analysis”-“Control Design”-“Linear Analysis”，在弹出的窗口中选择“LINEAR ANALYSIS”，如图所示。



点击“Bode”，即可得到 Bode 图，如图所示。

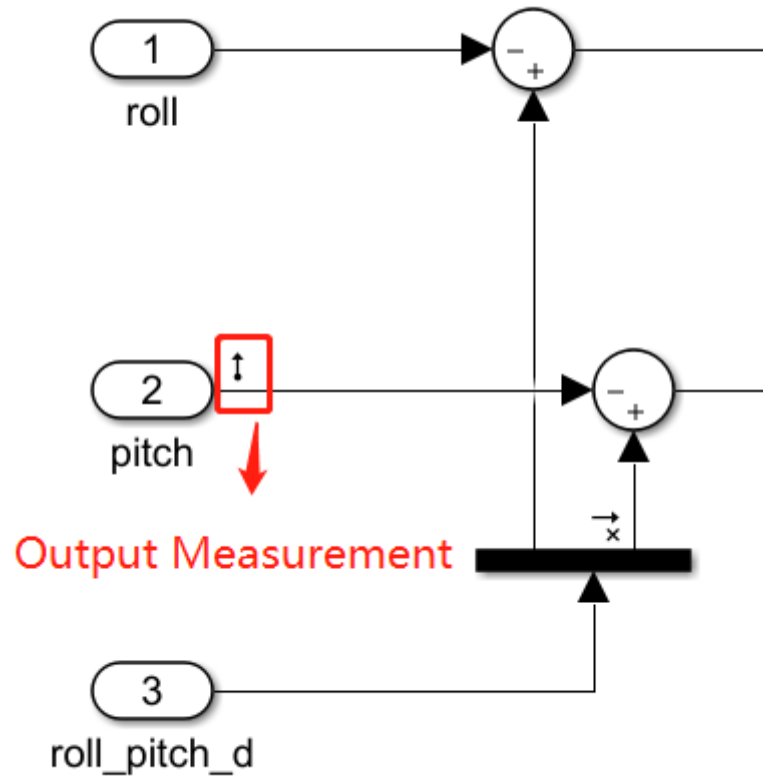


右键点击曲线，选择“Characteristic”-“All Stability Margins”，可以看到截止频率、幅值裕度和相角裕度等。

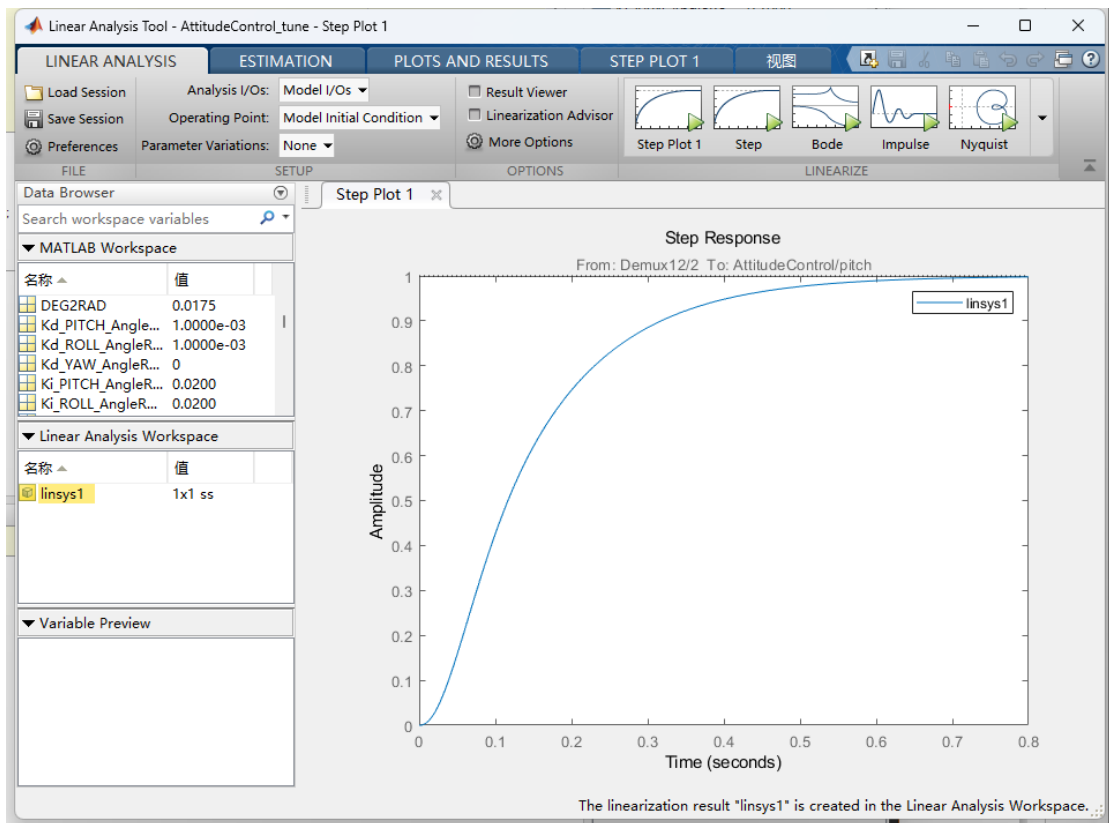


软件在环仿真——阶跃响应。

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。

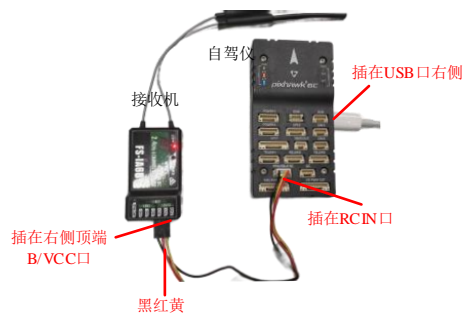


进入 Simulink 的“Linear Analysis”界面，点击“Step”即可得到阶跃响应曲线。



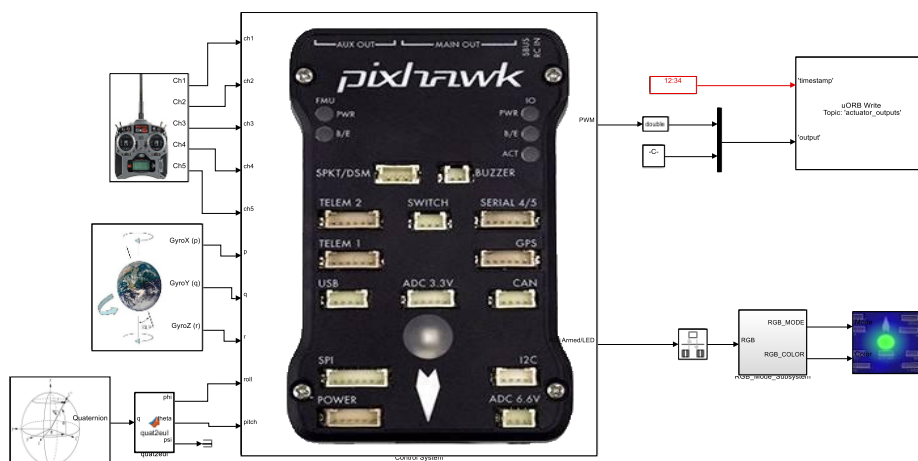
## 5.2. 姿态控制器-硬件在环

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。

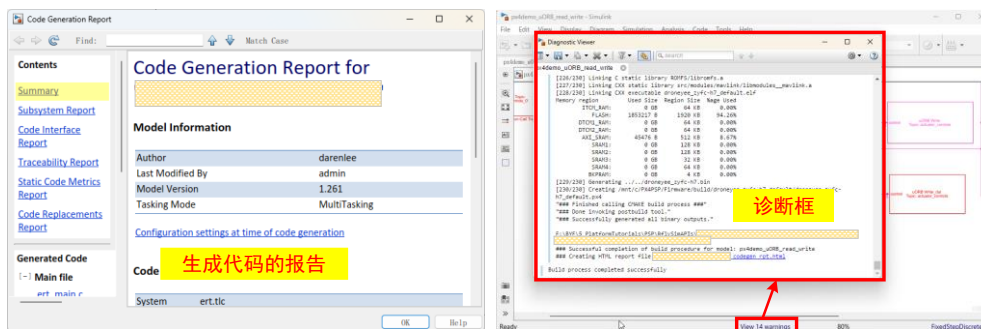


注意：电源线接线顺序从上到下依次为黑红黄

打开“e5\5.1\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。



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。



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: [REDACTED] size: 1903433 bytes (92.20%), waiting for the bootloader...

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

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

```

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。

```

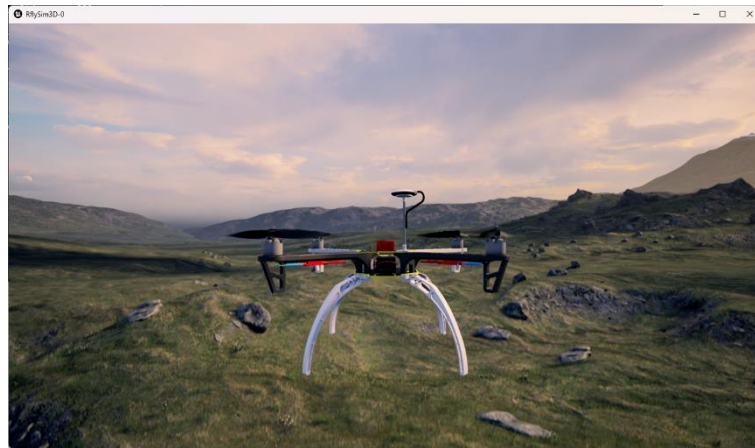
PX4: Init MAVLink
CopterSim: CopterID is 1, PX4 SysID is 1
PX4: Awaiting GPS/EKF fixed for Position control...
PX4: Enter Manual Mode!
PX4: Found firmware version: 1.12.3dev
PX4: Command ARM/DISARM ACCEPTED
PX4: Command REQUEST_AUTOPILOT_VERSION ACCEPTED
PX4: EKF2 Estimator start initializing..
PX4: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

```

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。



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~CH4 调整飞机姿态和高度。



## 6. 参考资料

- [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.

## 7. 常见问题

Q1: \*\*\*

A1: \*\*\*