

1、实验名称及目的

基础实验：复现四旋翼 Simulink 仿真，分析控制作用在 $o_b x_b$ 轴和 $o_b y_b$ 轴的解耦；对系统进行扫频以绘制 bode 图，分析闭环位置控制系统稳定裕度；完成硬件在环仿真。

2、实验原理

多旋翼位置控制器采用 PID(比例-积分-微分)控制原理来调节无人机在空间中的位置。PID 控制器基于当前位置与期望位置之间的误差，结合比例项、积分项和微分项来计算输出控制指令。

1、比例项 (Proportional) :

比例项根据当前位置误差的大小来计算控制指令，它扮演着快速响应的角色。具体计算方式为将位置误差乘以比例增益 (K_p)，得到比例项的输出。比例增益的选择根据系统的动态特性和稳定性要求进行调整。较大的比例增益可以提供更快的响应速度，但可能会导致超调和振荡；较小的比例增益则可能导致响应速度过慢，不能很好地跟踪期望位置。

2、积分项 (Integral) :

积分项用于补偿持续存在的偏差，它能消除比例控制的静态误差。积分项计算是将位置误差与时间的积分累加起来，并乘以积分增益 (K_i)。积分增益的选择通常需要谨慎，过大的积分增益可能导致系统的过度调整和不稳定性。

3、微分项 (Derivative) :

微分项根据位置误差的变化率来计算控制指令，它在处理快速变化的误差时起到平滑和稳定的作用。通过计算位置误差的导数并乘以微分增益 (K_d)，得到微分项的输出。微分增益的选择决定了响应的平滑程度和对误差变化率的敏感性。

将比例项、积分项和微分项加权求和，得到 PID 控制器的输出控制指令。控制指令被转换为相应的电机输出信号，通过调节旋翼的转速和角度来控制无人机的位置。PID 控制器的设计需要根据具体的应用和系统要求进行参数调整。通过反复测试和调整控制增益，可以优化控制器的性能，使无人机能够精确地控制到期望位置，同时保持稳定和抗干扰能力。

详细内容请参考上层路径文献[3]第 10 讲_实验六_定点位置控制器设计实验.pptx，文献[4]第 12 讲_基于半自主自驾仪的位置控制 V2.pptx。

3、实验效果

以多旋翼的位置模型为依据，建立了常见的 PID 控制方法，并在 MATLAB/Simulink 中完成位置控制器的设计，并在 RflySim3D 中显示仿真效果。使用 Simulink 中的 PSP 工具箱生成的代码并将其下载到 Pixhawk 自驾仪中进行硬件在环仿真实验。

4、文件目录

文件夹/文件名称	说明
HIL	硬件在环仿真

Sim	Simulink 仿真——通道解耦
tune	Simulink 仿真——稳定裕度
Init_control.m	HIL、Sim 和 tune 的 matlab 文件
PosControl_HIL.slx	硬件在环 Simulink 文件
PosControl_Sim.slx	软件在环 Simulink 文件
PosCtrl_tune.slx	稳定裕度 Simulink 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 ^①	1
2	RflySim 平台免费版	Pixhawk 6C 飞控 ^②	1
3	MATLAB 2017B 及以上	遥控器 ^③	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://doc.rflysim.com/1.1InstallMethod.html>

②：须保证平台安装时的编译命令为：px4_fmu-v6c_default，固件版本为：1.13.3。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

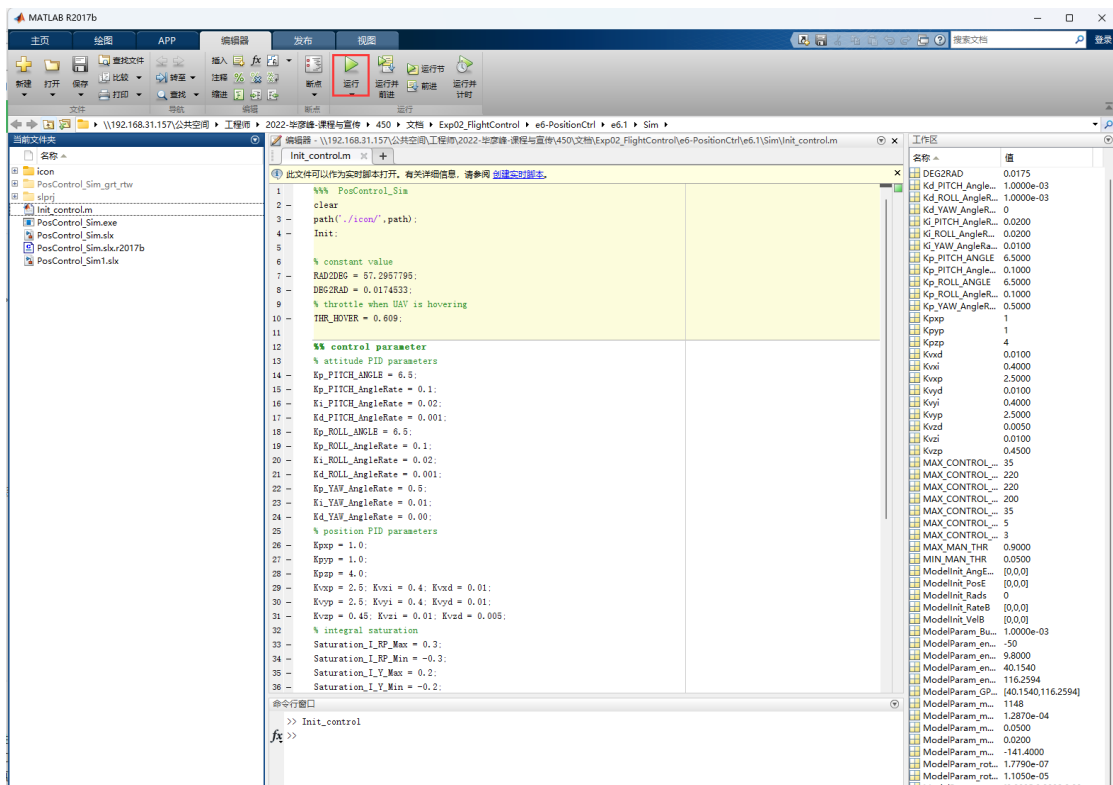
③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 WFLY-ET10、配套接收器为：WFLY-RF209S。遥控器相关配置见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

6、实验步骤

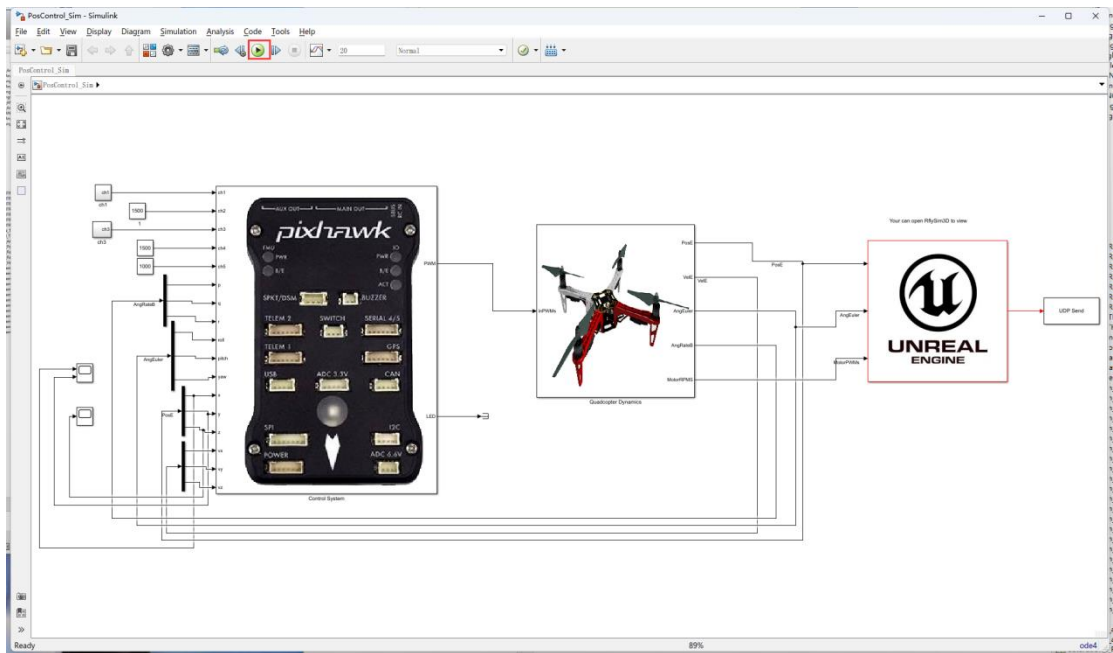
Step 1:

Simulink 仿真——通道解耦

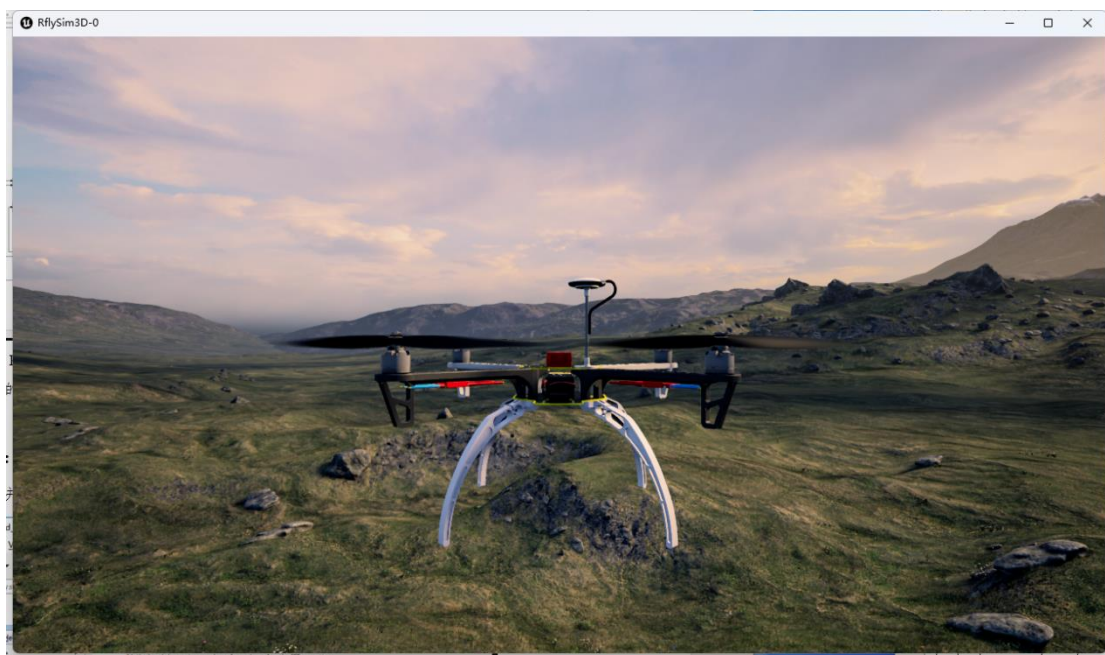
打开” e6-PositionCtrl\PID-Config\e6.1\Sim\Init_control.m 文件。如图，点击运行，进行参数初始化。



此时，PosControl_Sim.slx 将会自动打开，如下图。

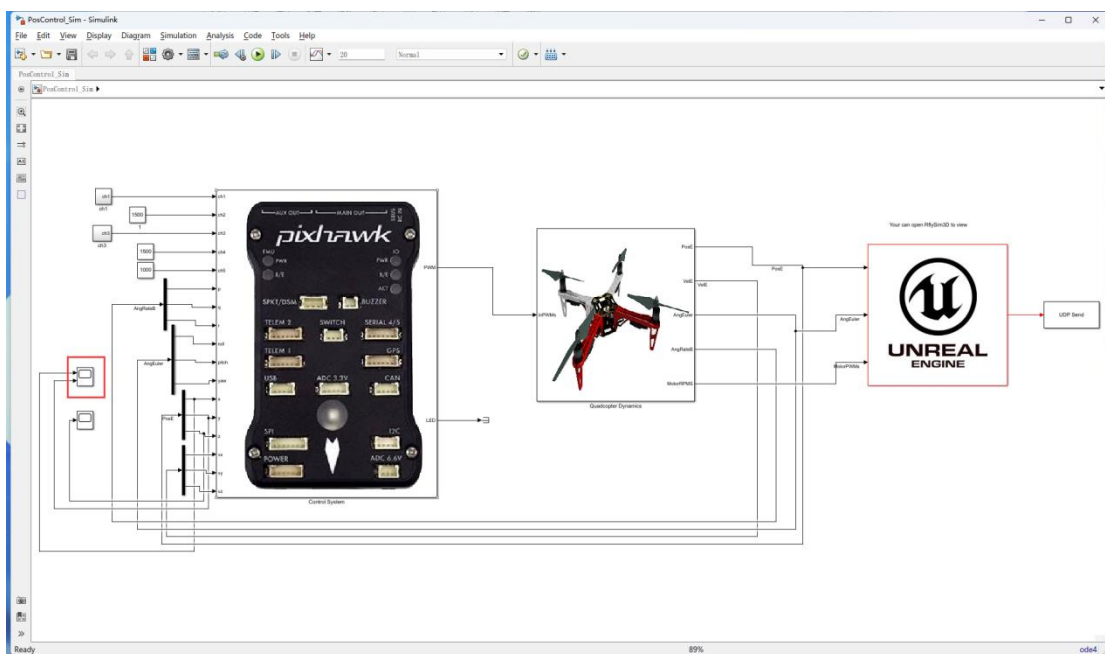


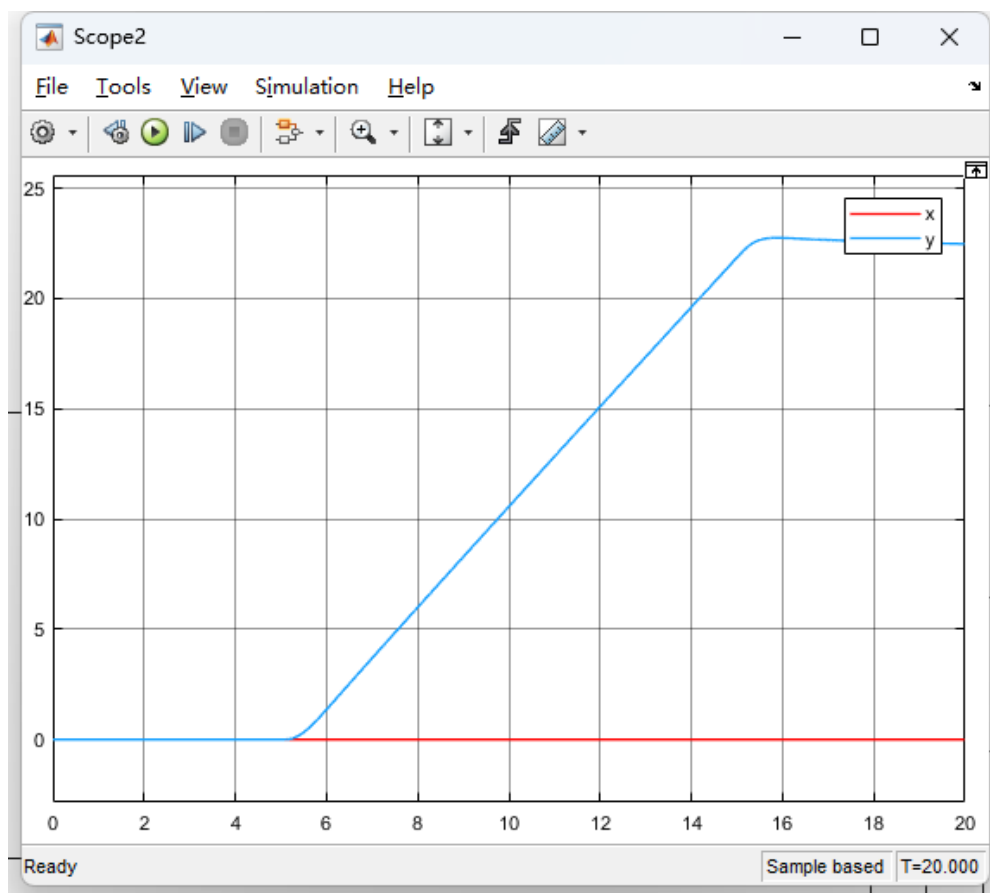
打开 `Rflysim3D.exe`，然后点击 Simulink “Run” 按钮开始仿真。此时可以在 UE5 中观察多旋翼的状态，如下图可以看到多旋翼先上升到空中，然后向 `OeOy` 轴方向飞行，最后悬停。



通道解耦分析:

在 PosControl_Sim.slx 文件中双击 Scope2 可以观测四旋翼的位置信息，如下图所示。



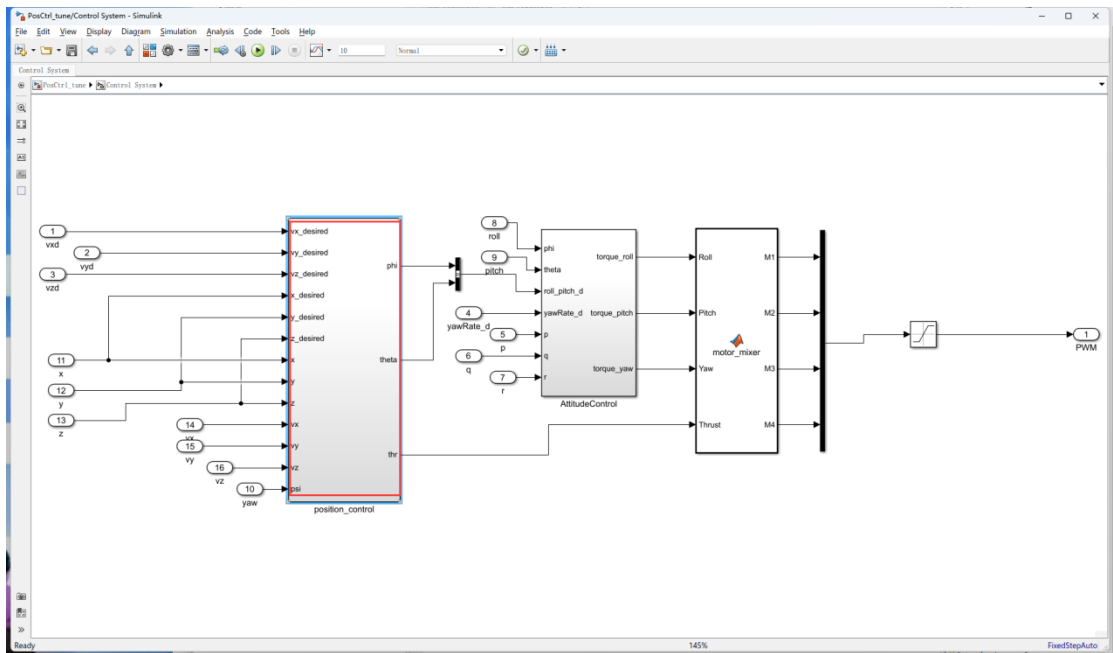
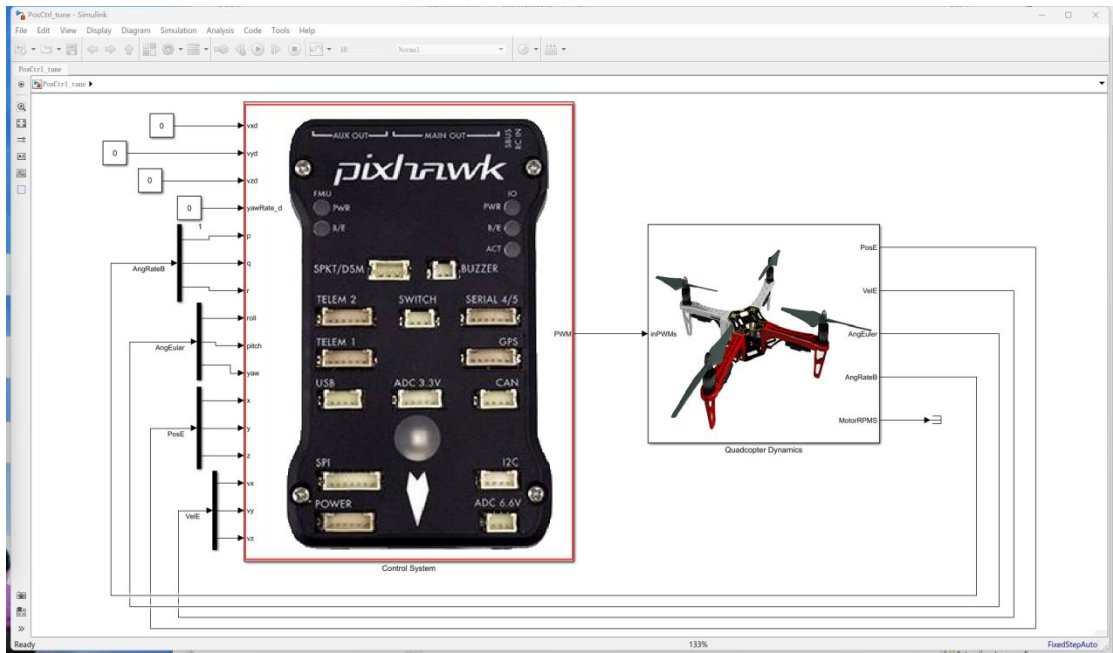


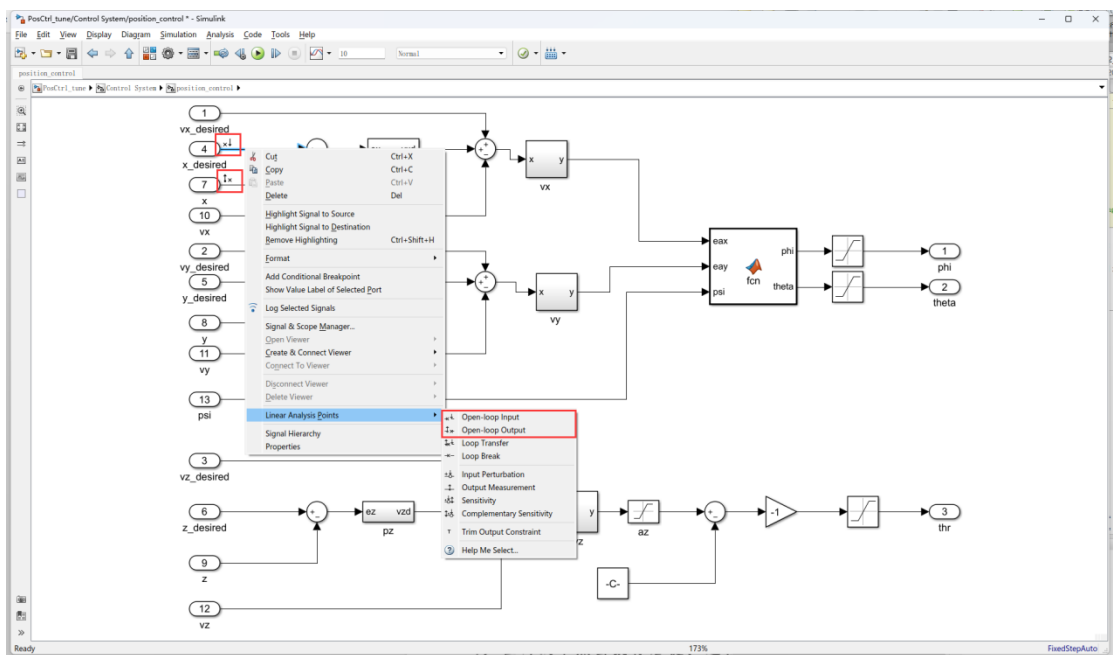
Step 2:

Simulink 仿真——稳定裕度

打开文件“e6-PositionCtrl\PID-Config\6.1\tune\Init_control.m”文件初始化参数，“Pos Control_tune.slx”将会自动打开。

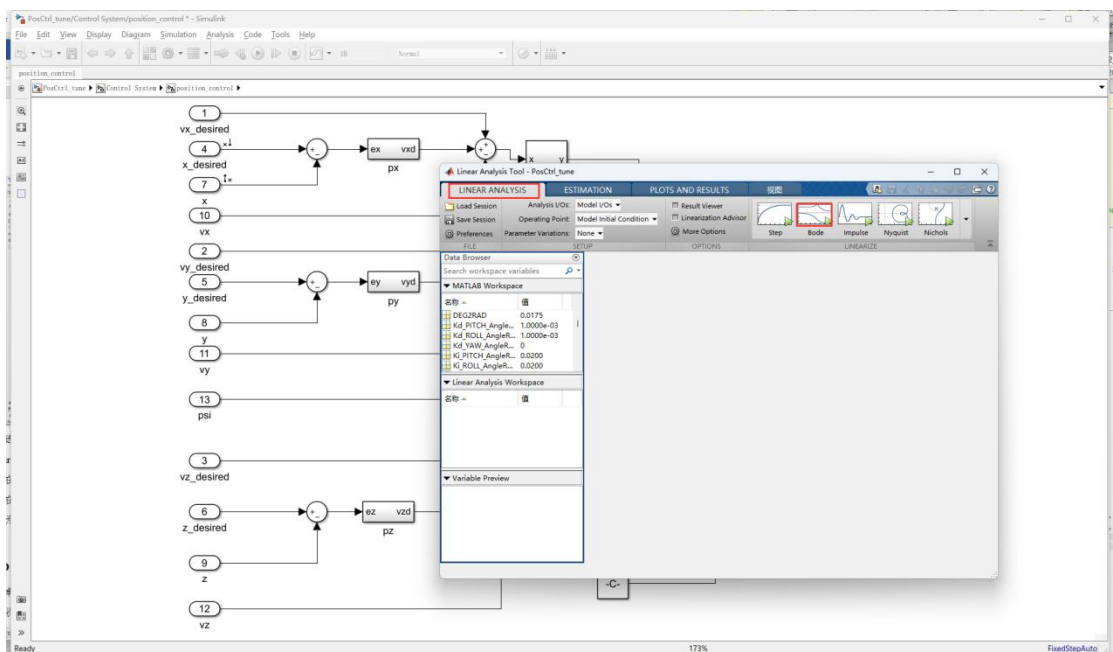
如下图，双击打开上述文件的”Control System”，进入子模块，双击子模块中的”position_control”模块，进入目标模块，将期望 x 通道输入线设为”Open-loop Input”，x 通道的实际输出设置为”Open-loop Output”。



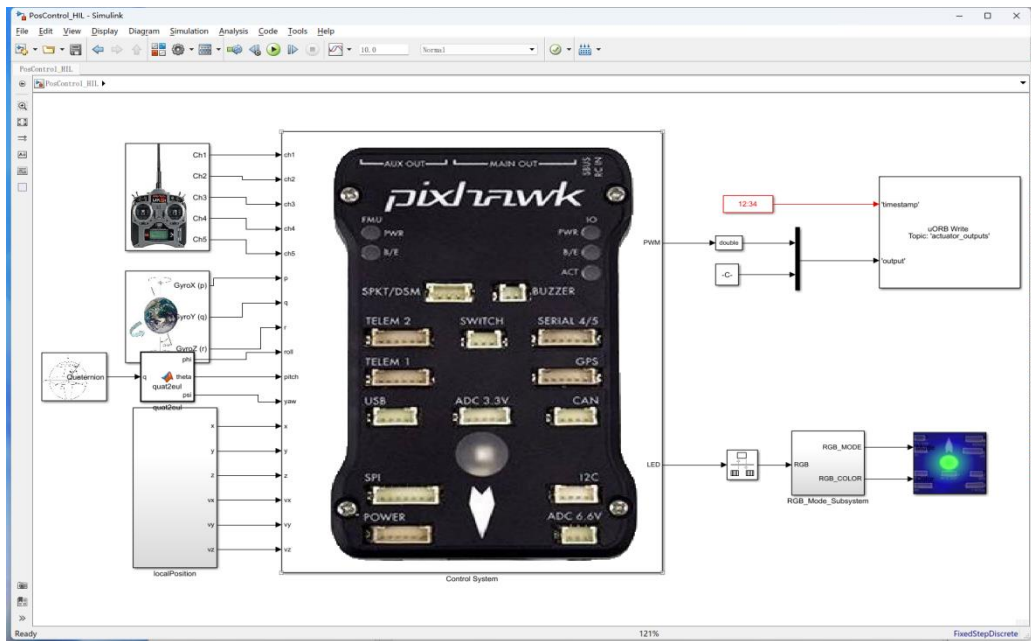


选择 Simulink 上面菜单中的”Analysis”，在下拉菜单中选择”Control Design”，选择”Linear Analysis”。

在弹出的窗口选择” LINEAR ANALYSIS”，点击 Bode 得到 Bode 图。

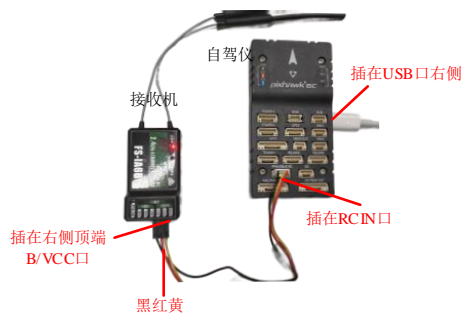


在曲线中点击鼠标右键，选择”Characteristics” - ”All Stability Margins”，可得到幅值裕度为 15.3dB，此时的频率为 3.97rad/s；相位裕度为 65.5，频率为 1.04 rad/s。



硬件连接：

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。

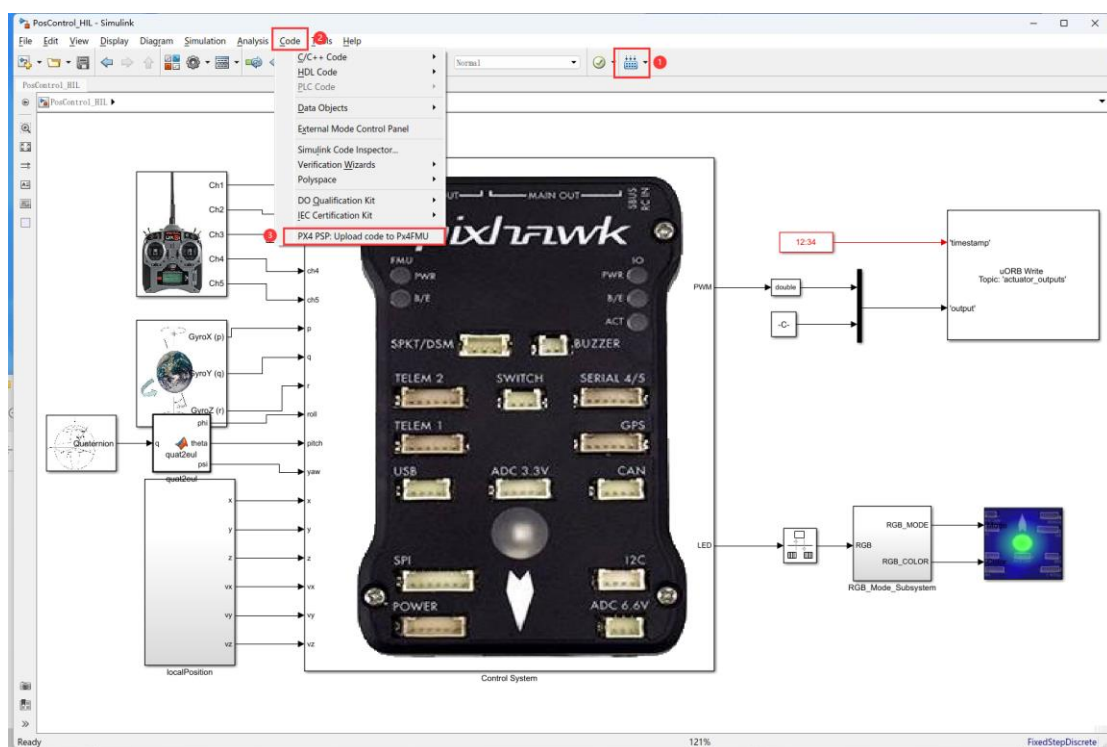


注意：电源线接线顺序从上到下依次为黑红黄

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位置控制程序。

将飞控连接好后，通过数据线连接到 PC。然后进入” PosControl_HIL.slx” 界面，进行如下图操作。



烧录成功显示如下图所示：

```

C:\Windows\SYSTEM32\cmd.exe
Loaded firmware for board id: 1010,0 size: 1799688 bytes (98.08%), waiting for the bootloader...
Attempting reboot on COM3 with baudrate=57600...
If the board does not respond, unplug and re-plug the USB connector.

Found board id: 1010,0 bootloader version: 5 on COM3
Psn: 0044004b3232511537343834
chip: 20036450
family: b' STM32H7[4|5]'
revision: b'V'
flash: 1966080 bytes
Windowed mode: True

Erase : [=====] 100.0%
Program: [=====] 100.0%
Verify : [=====] 100.0%
Rebooting. Elapsed Time 238.322

C:\Users\admin\Desktop\ae6.1\HIL>
  
```

模型仿真器软件配置：

双击 CopterSim 桌面快捷方式即可打开 CopterSim。读者可以选择不同的动力系统模型，步骤如下：单击“模型 参数”自定义参数，然后单击“存储并使用参数”存储并使用参数。软件会自动匹配串口号，单击“开始仿真”按钮就可以进入硬件在环仿真模式。此时可以看到如下图所示的界面左下角收到自驾仪返回的相关消息。



3D 仿真:

打开 Rflysim3D.exe, 使用遥控器控制多旋翼进行硬件在环仿真。

7、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 10 讲_实验六_定点位置控制器设计实验.pptx.
- [4]. 第 12 讲_基于半自主自驾仪的位置控制 V2.pptx.

8、常见问题

Q1: 无

A1: 无