

位置控制基础实验

1. 实验目的

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. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；RflySim工具链^[1]；MATLAB 2022b及以上。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑① 1台；Pixhawk 6x飞控② 1台；遥控器③ 1台；遥控器接收器 1台；数据线、杜邦线等 若干台^[2]。

①：若使用Pixhawk 6X飞控，平台安装时的编译命令为：px4_fmuv6x_default，推荐PX4固件版本为：1.12.3。其他配套飞控及编译命令请见：<https://rflysim.com/doc/zh/1/Hardware.html>

3. 实验地址

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\6-PositionCtrl\6.1](#)

- 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

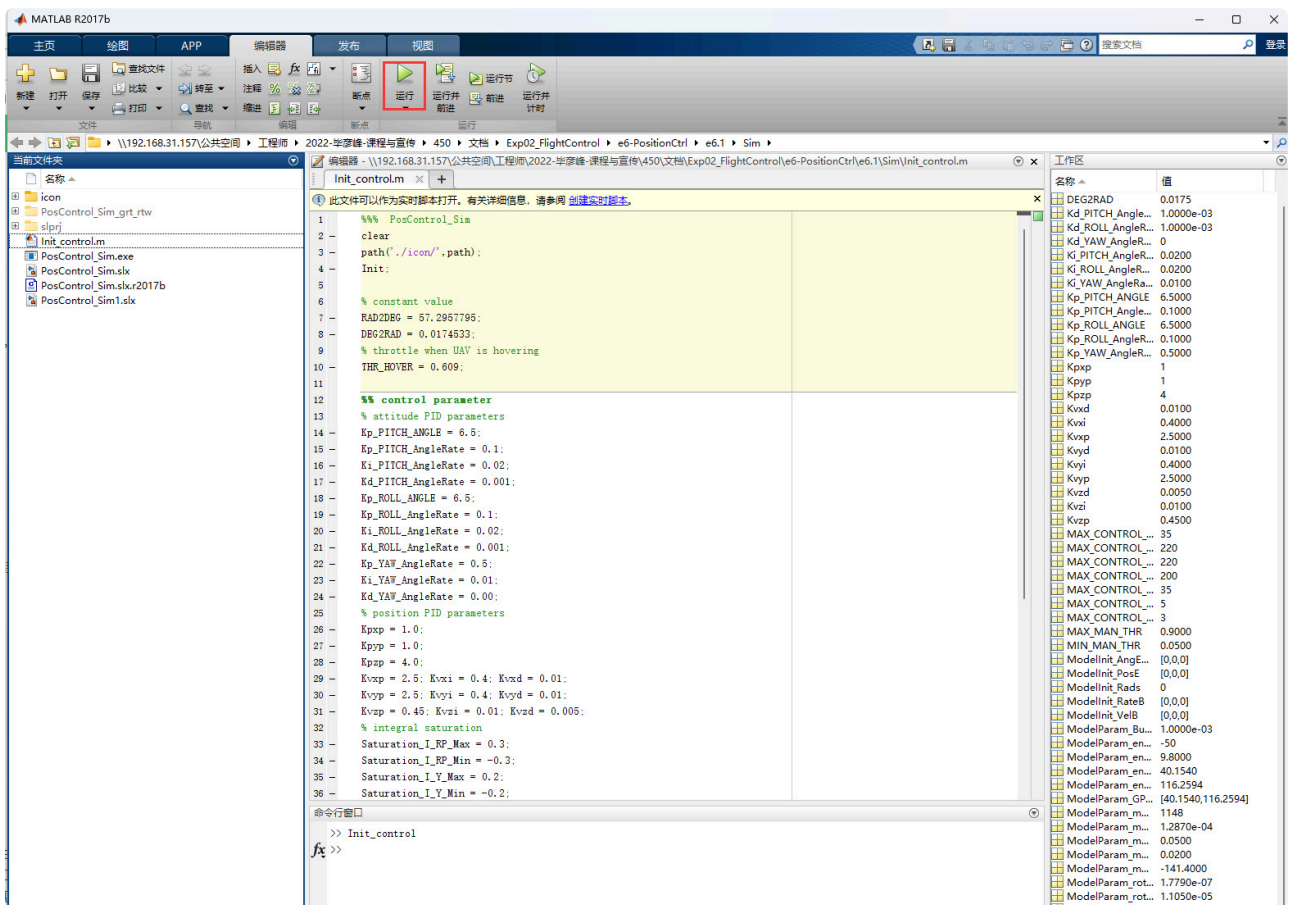
- PosControl_Sim.slx: 软件在环Simulink文件
- PosCtrl_tune.slx: 稳定裕度Simulink文件

4. 实验内容或步骤

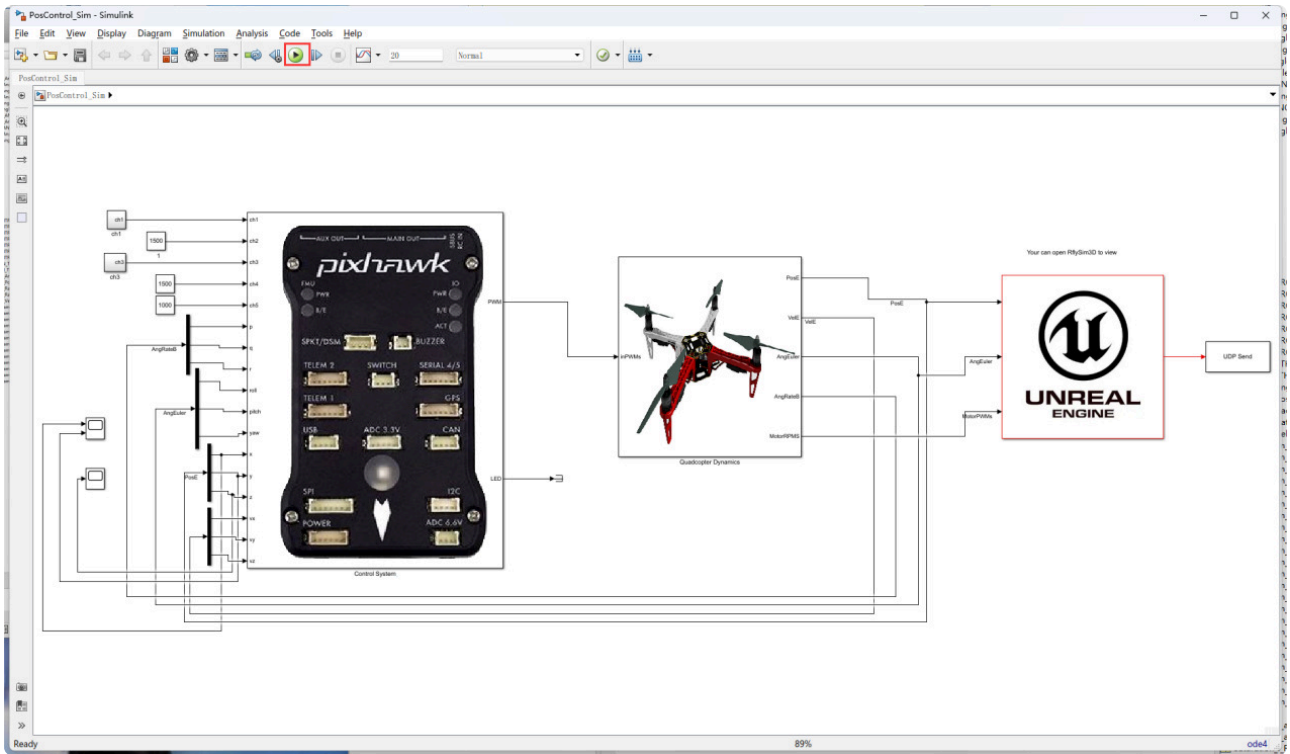
4.1 步骤1: 定点位置控制器设计-基础实验

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。

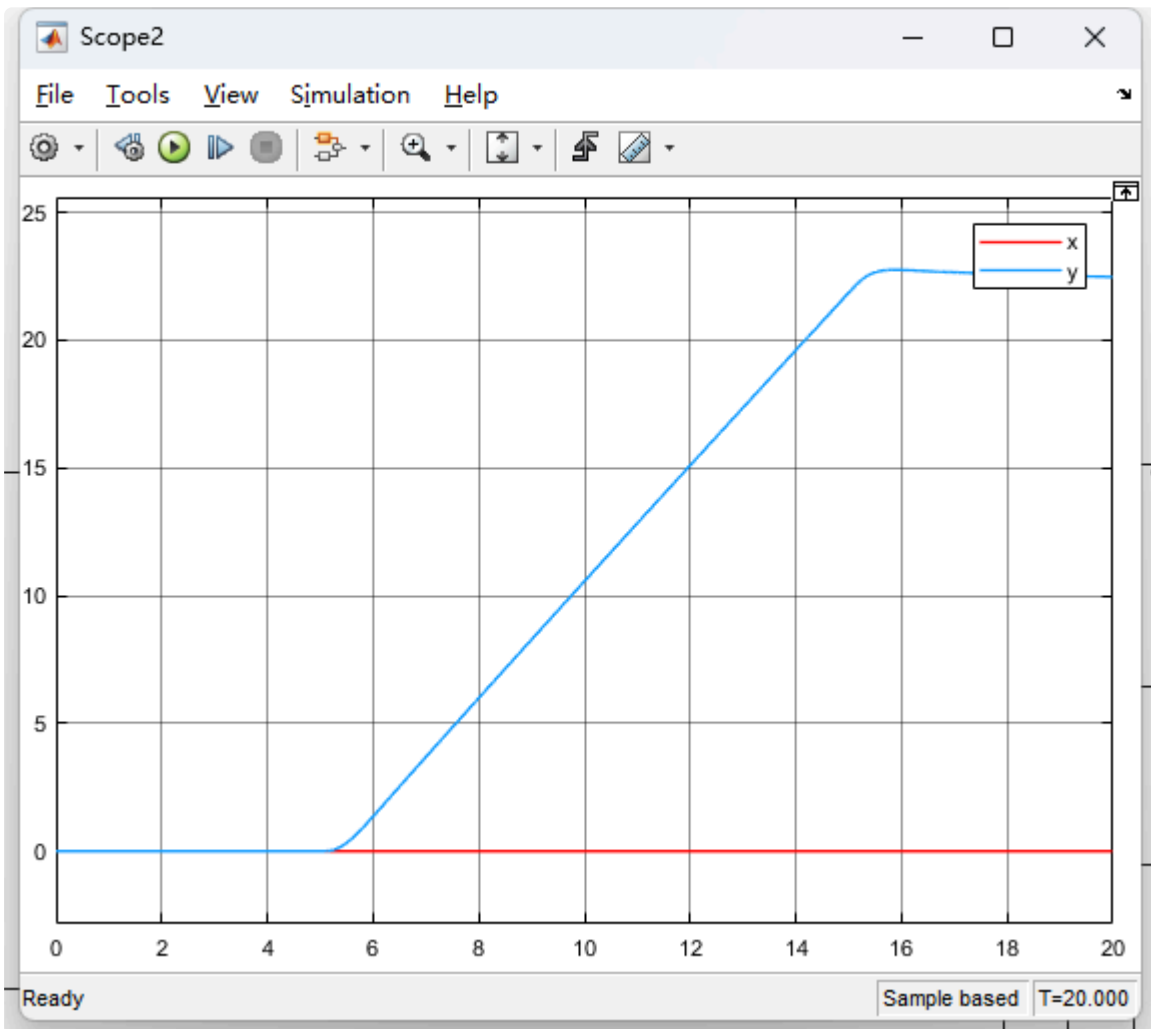
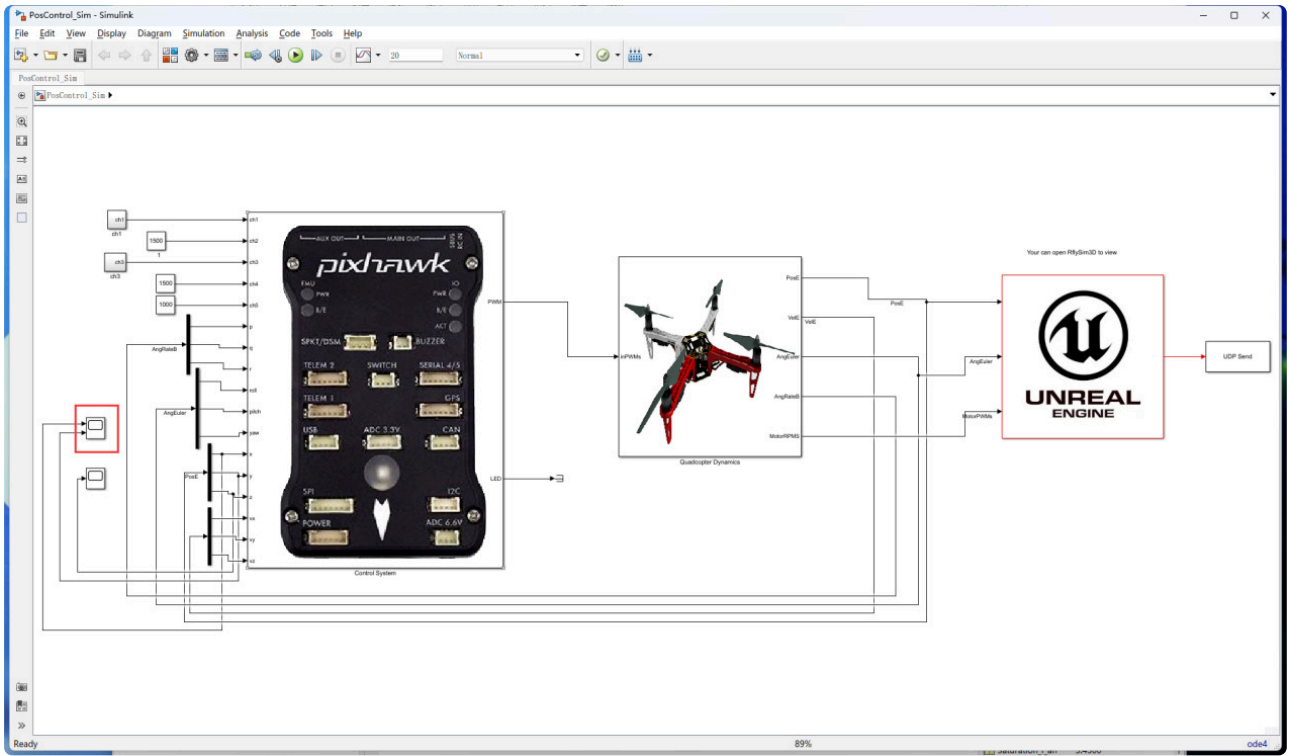


打开Rflysim3D.exe，然后点击Simulink"Run"按钮开始仿真。此时可以在UE5中观察多旋翼的状态，如下图可以看到多旋翼先上升到空中，然后向OeOy轴方向飞行，最后悬停。



通道解耦分析：

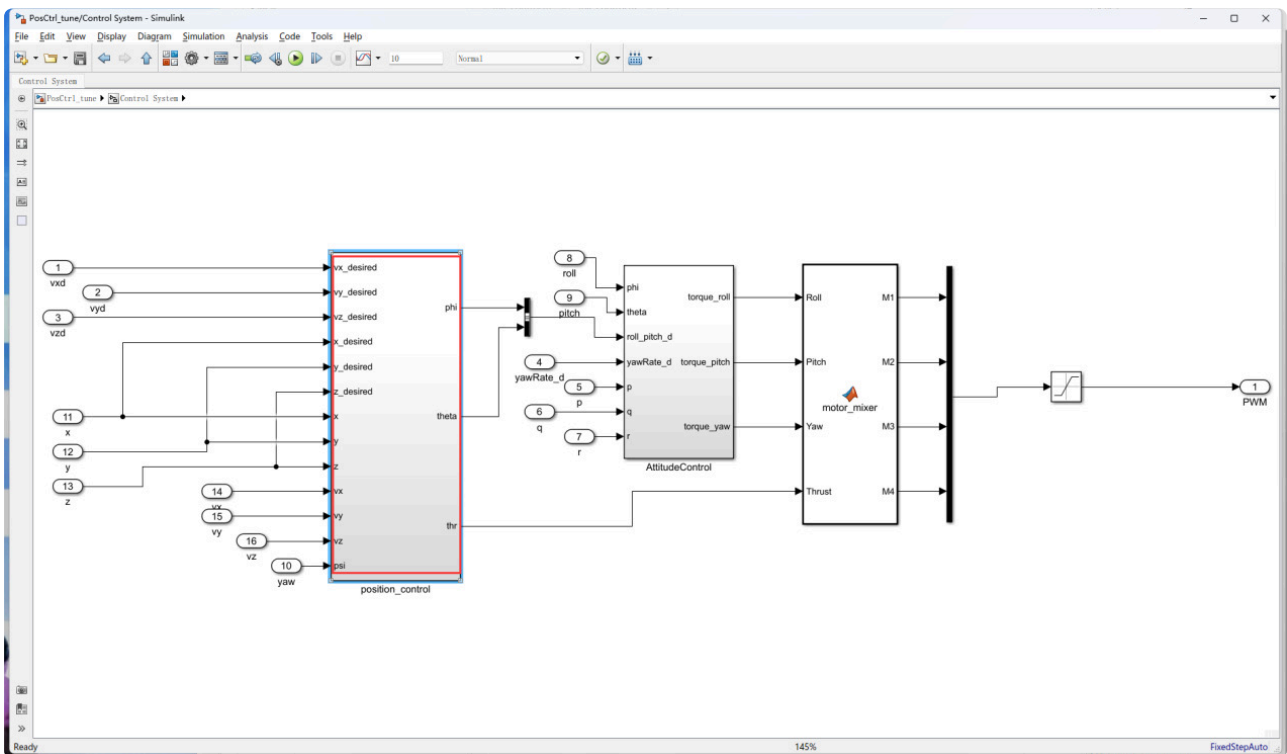
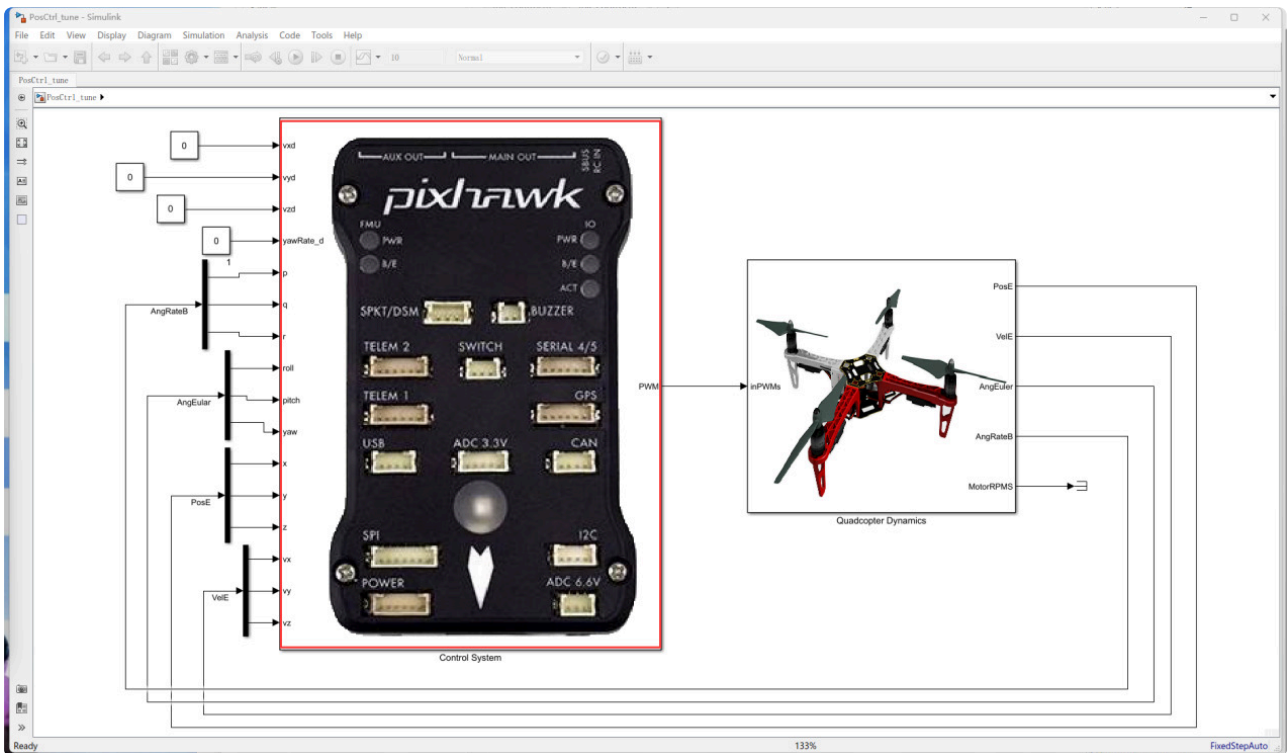
在PosControl_Sim.slx文件中双击Scope2可以观测四旋翼的位置信息，如下图所示。

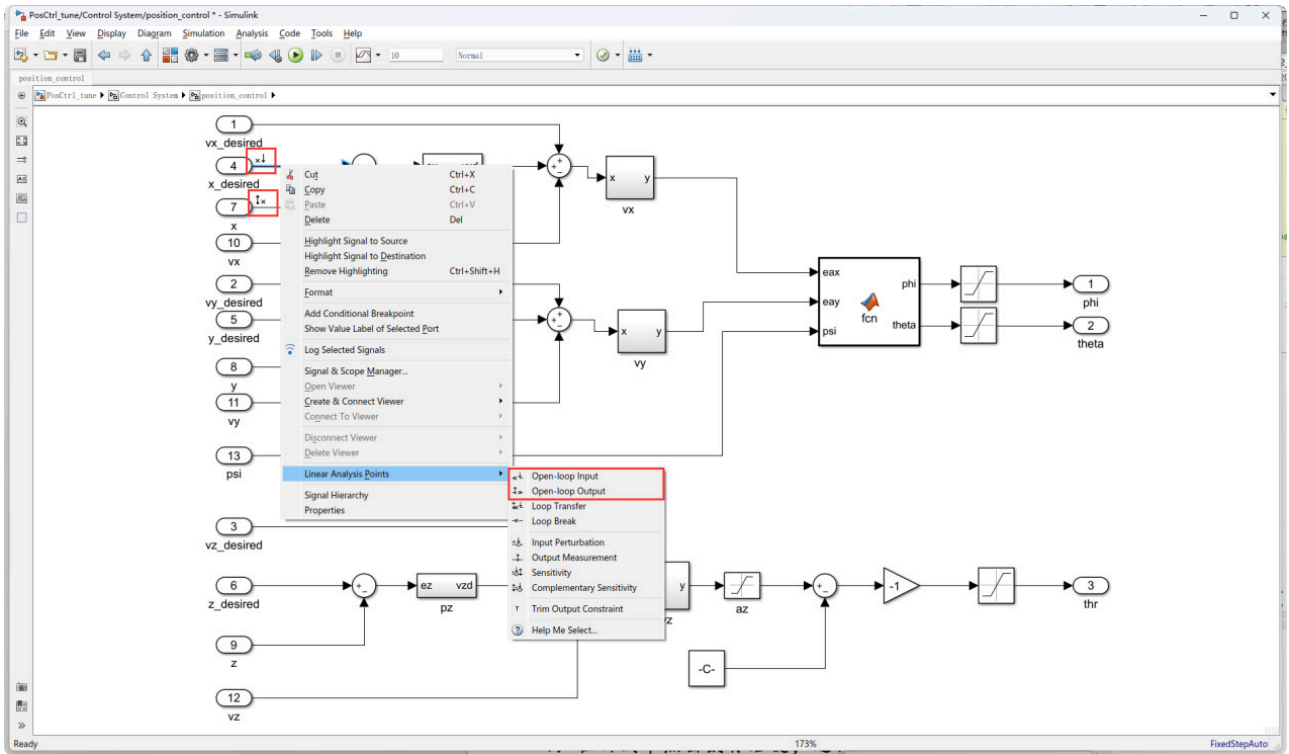


4.2 步骤3: Simulink仿真——稳定裕度

打开文件"e6-PositionCtrl\PID-Config\e6.1\tune\Init_control.m"文件初始化参数, "PosControl_tune.slx"将会自动打开。

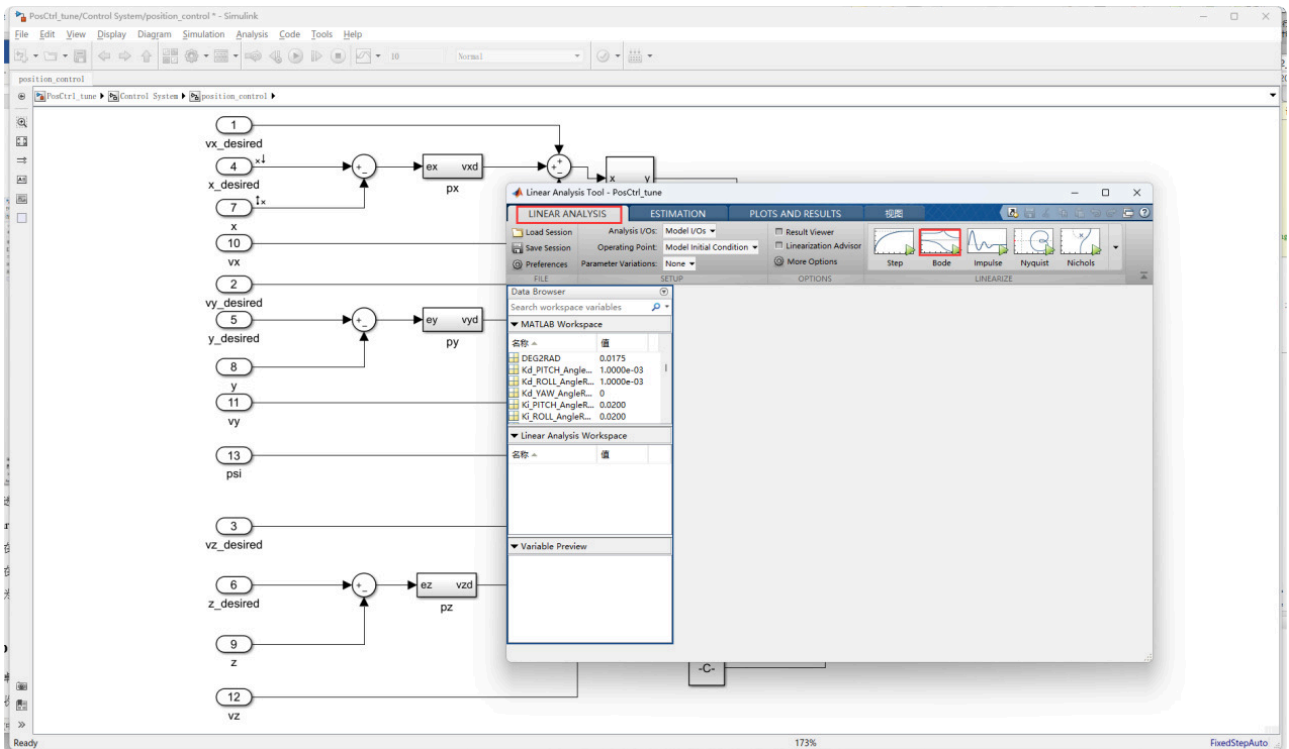
如下图, 双击打开上述文件的"Control System", 进入子模块, 双击子模块中的"position_control"模块, 进入目标模块, 将期望x通道输入线设为"Open-loop Input", x通道的实际输出设置为"Open-loop Output"。



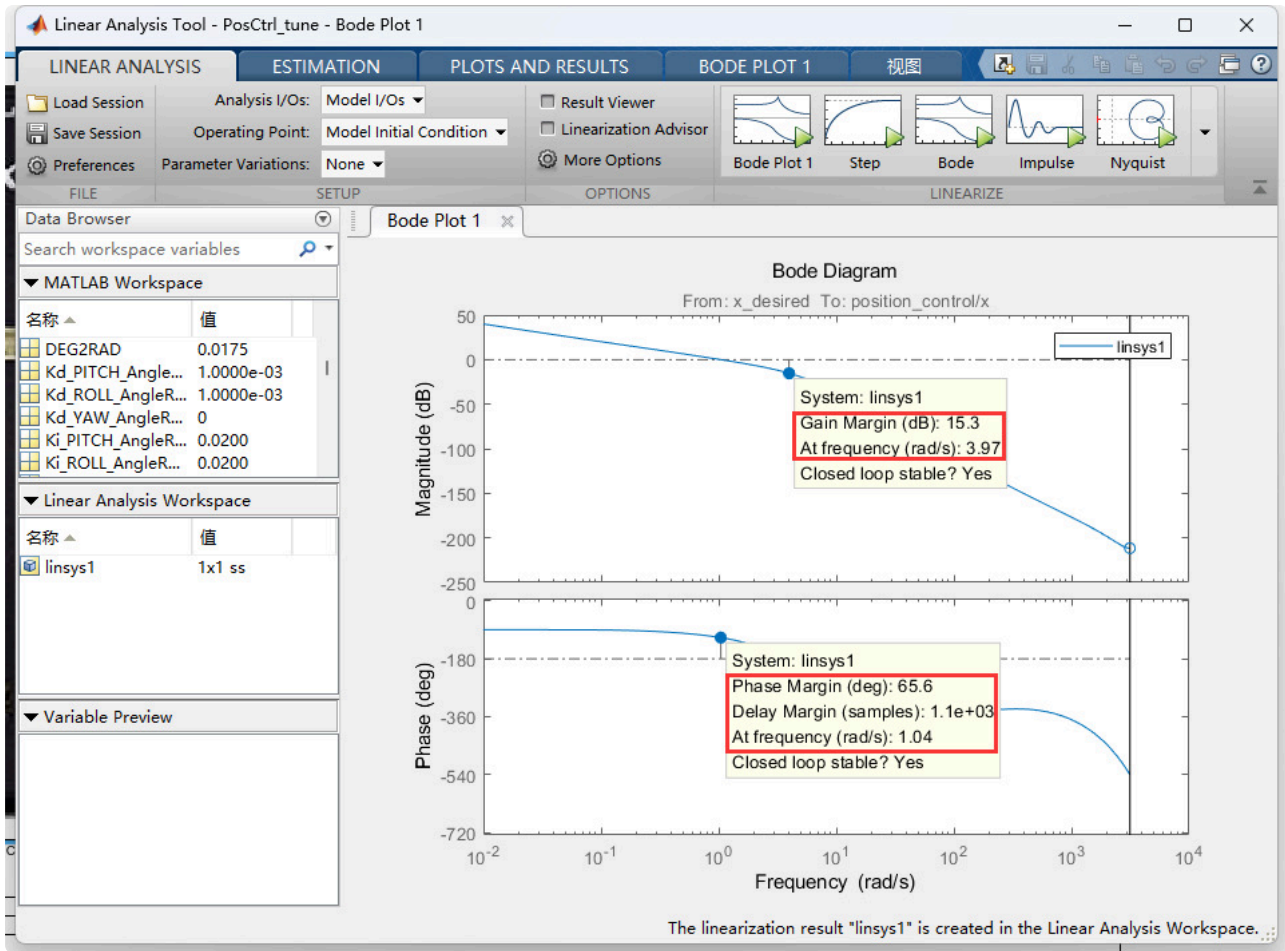


选择Simulink上面菜单中的"Analysis", 在下拉菜单中选择"Control Design", 选择"Linear Analysis".

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

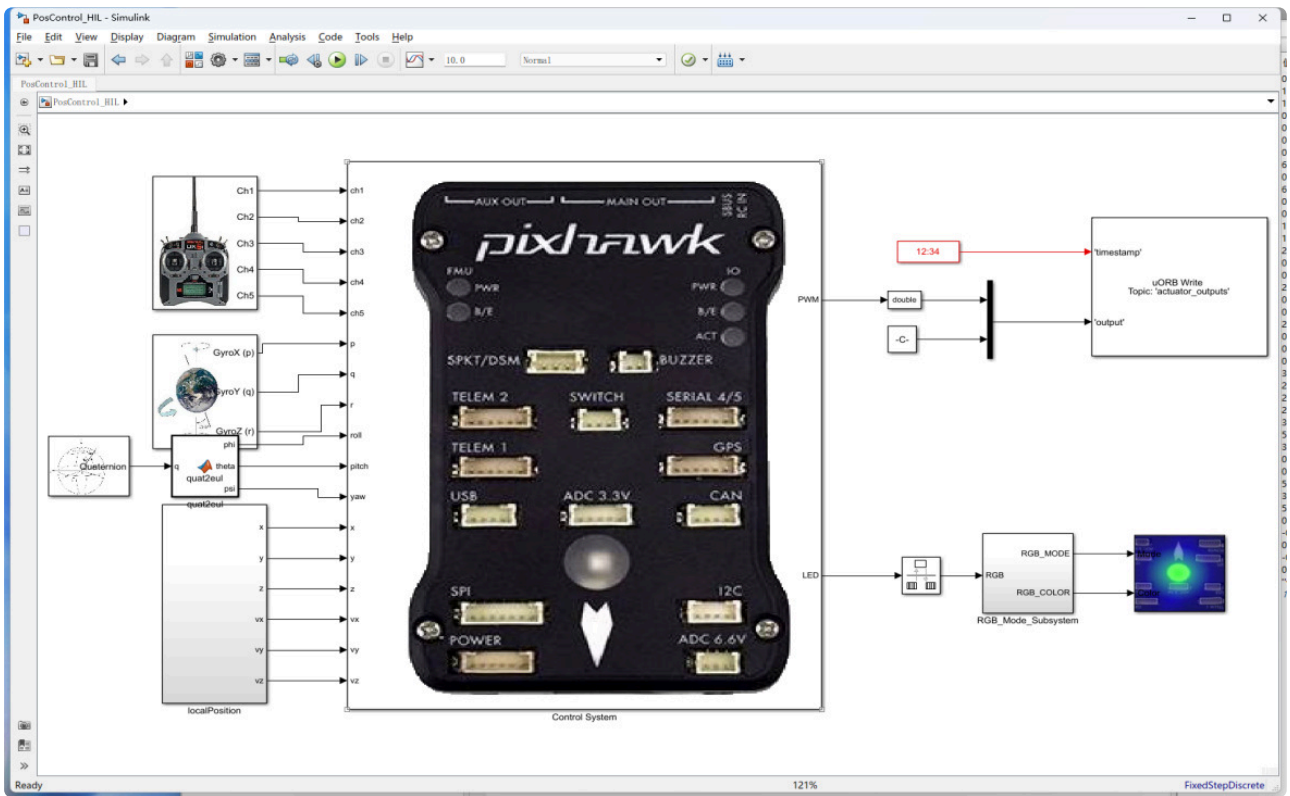
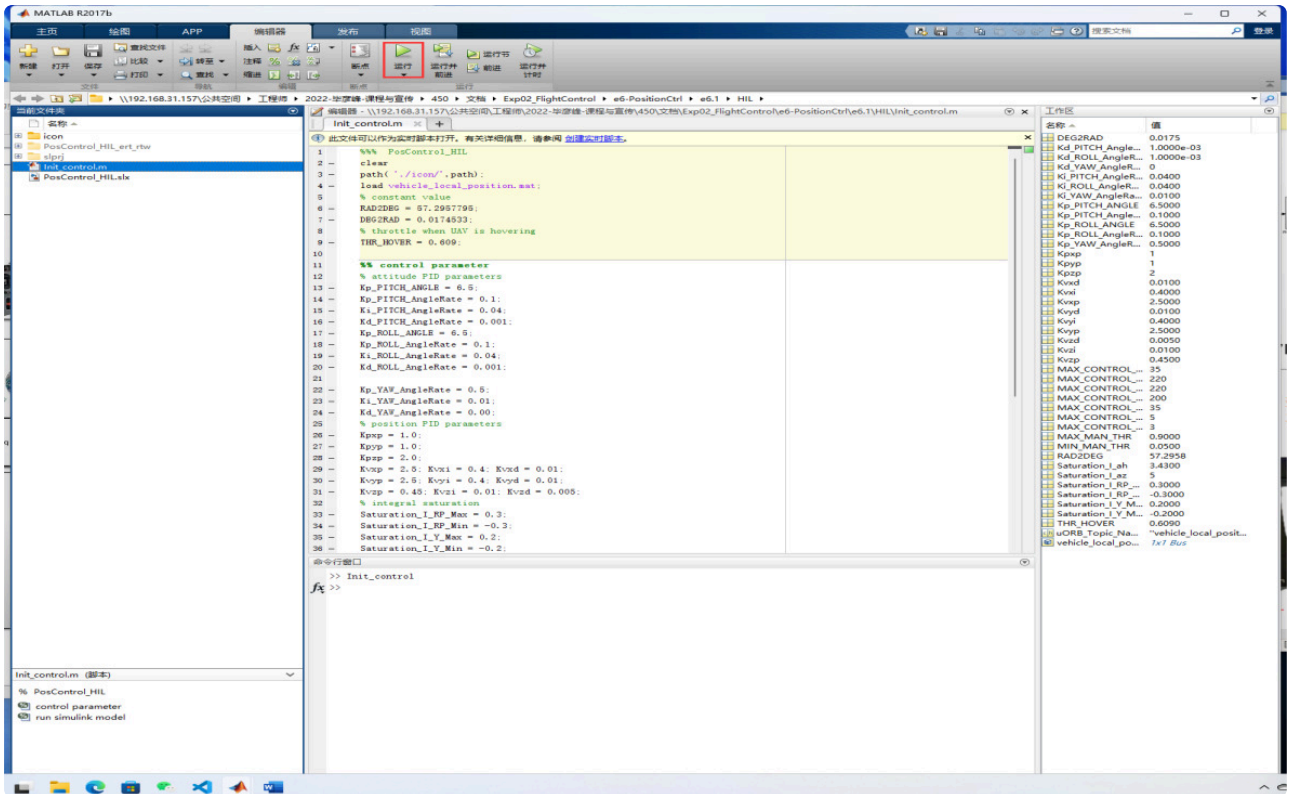


在曲线中点击鼠标右键, 选择"Characteristics"->"All Stability Margins", 可得到幅值裕度为15.3dB, 此时的频率为3.97rad/s; 相位裕度为65.5, 频率为1.04 rad/s。



4.3 步骤3：硬件在环仿真

运行文件"e6-PositionCtrl\PID-Config\e6.1\HIL\Init_control.m"进行参数初始化，"PosControl_HIL.slx"将会自动打开，如下图所示。



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。



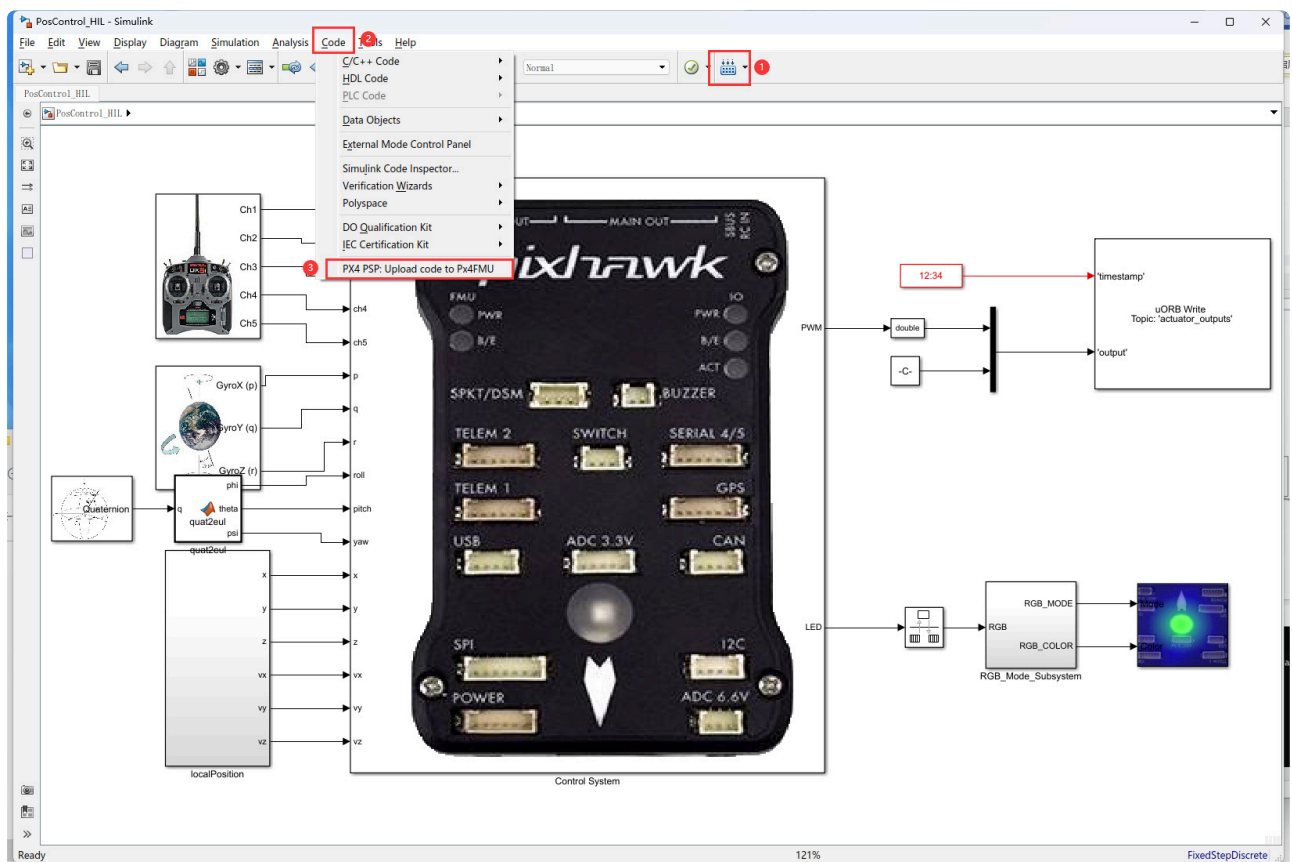
注意：电源线接线顺序从上到下依次为黑红黄

代码编译及下载：

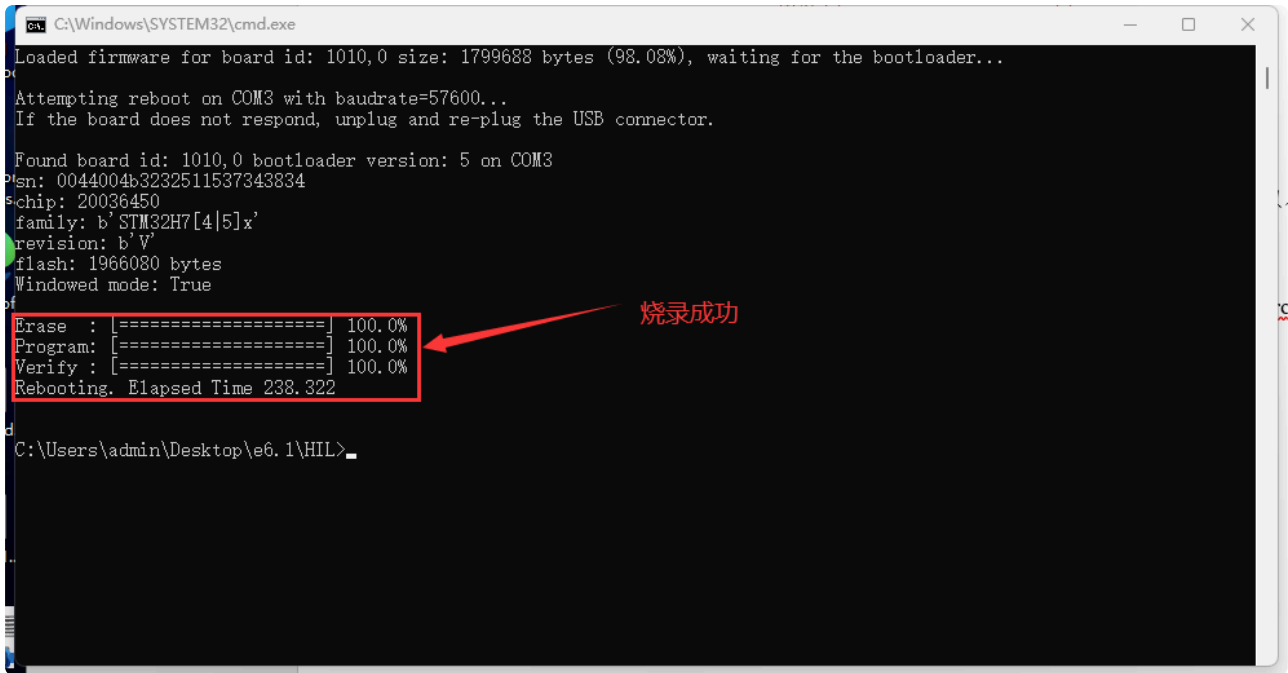
将硬件在环仿真模型编译并下载文件到Pixhawk

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：



模型仿真器软件配置：

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。

5. 关键知识点

- PID控制器原理。
- 系统扫频绘制Bode图，分析闭环位置控制系统的稳定裕度。
- RflySim平台软硬件在环仿真。

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. [RflySim官方文档](#)

7. 常见问题

Q1: 硬件在环仿真时飞控无法连接或连接不稳定怎么办?

A1: 检查串口连接是否正常，确认CopterSim中显示的串口号与实际连接飞控的串口号一致。确保使用质量较好的USB转串口线，并尝试更换USB端口。若问题仍然存在，可尝试重新插拔飞控与电脑的连接线，或重新烧录固件。

Q2: 仿真过程中多旋翼飞行器出现不稳定或振荡现象如何处理?

A2: 这可能是PID参数不合适导致的。可以先减小PID控制器中的比例增益和积分增益，逐步调节直到系统稳定。同时检查控制系统的相位裕度和幅值裕度是否满足要求，若裕度过小则需要重新调节控制器参数。

Q3: 扫频分析时Bode图显示的稳定裕度不满足要

求如何改进?

A3: 如果幅值裕度或相位裕度不足, 可以调整PID控制器参数。通常可以尝试减小控制器增益, 或者增加相位超前补偿网络。另外, 也可以考虑在控制器中加入滤波器来改善高频特性, 提高系统稳定裕度。

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