

1. 实验名称及目的

姿态控制器设计实验：熟悉 Simulink 控制器与仿真平台、软件在环仿真、硬件在环仿真以及实飞实验的流程，本实验以一个设计好的姿态控制系统为例，介绍整个实验的基本操作流程。

2. 实验原理

四旋翼无人机姿态控制器是无人机控制系统中的重要组成部分，其原理主要包括以下几个方面：四旋翼飞行原理，四旋翼无人机是由四个旋转的旋翼提供升力和推力的无人机，其飞行原理是通过控制旋翼的转速和方向来控制飞机的升力和推力。在四旋翼无人机中，控制旋翼的转速和方向是实现姿态控制的关键。姿态控制器的设计，四旋翼无人机的姿态控制器需要通过对飞机的角度和速度进行控制来实现平稳飞行。姿态控制器可以采用 PID 控制器或其他控制方法进行设计。PID 控制器是一种常用的控制方法，可以根据控制信号和实际输出信号之间的误差来调节控制信号的大小，以达到平稳飞行的目的。控制算法的实现，四旋翼无人机的姿态控制器需要通过控制算法来实现。控制算法需要根据姿态控制器的输出信号来实现旋翼的控制。

3. 实验效果

实现软件在环仿真、硬件在环仿真。

4. 文件目录

文件夹/文件名称		说明
icon	Init.m	模型初始化参数文件。
	MavLinkStruct.mat	MAVLink 结构体数据文件。
	pixhawk.png	Pixhawk 硬件图片。
	readme.pdf	机架类型修改说明文件。
	UE_Logo.jpg	RflySim3D 软件图片。
	F450.png	F450 飞机模型图片。
FLY_X450		飞思 X450 飞机实飞例程文件夹(详见内部 Readme.pdf)
Init_control.m		控制器初始化参数文件。
Exp1_AttitudeController.slx		控制模型文件。
Exp2_ControlSystemDemo.slx		软件在环仿真模型文件。
Exp3_BlankTemp.slx		代码生成模板文件。
Exp4_AttitudeSystemCodeGen.slx		硬件在环仿真模型文件(遥控器输入归一化)。
Exp4_AttitudeSystemCodeGen_old.slx		硬件在环仿真模型文件。
Exp4.5_Rotarytable		台架实验文件夹(详见内部)

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 或 Pixhawk 6C mini ^②	1
		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>

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>

③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 ET10、配套接收器为：WFLY RF209S。遥控器相关配置见：..\e11_RC-Config\Readme.pdf

6. 软件仿真实验步骤

Step 1:

打开 MATLAB 软件，在 MATLAB 中打开 Init_control.m 文件，点击运行。

Step 2:

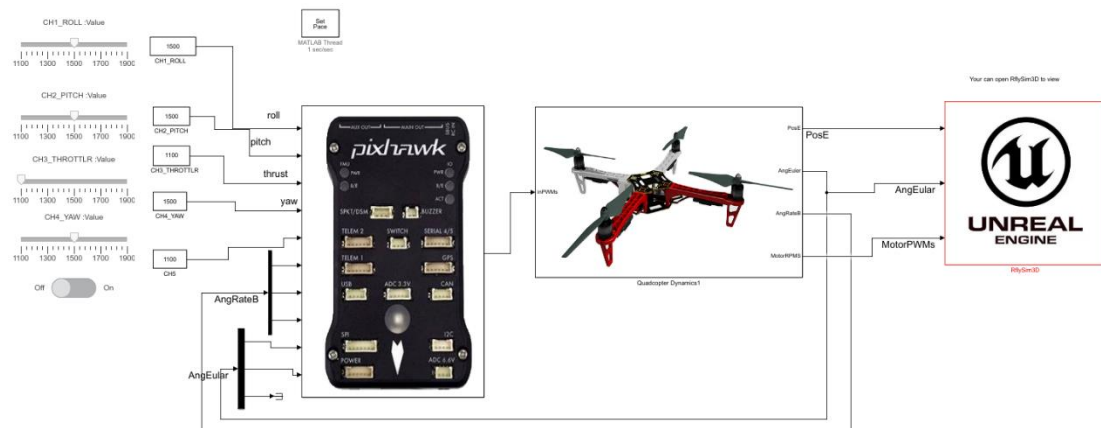
打开 RflySim3D 软件。

Step 3:

打开 Exp2_ControlSystemDemo.slx 文件，在 Simulink 中，点击运行。可看到在 RflySim3D 中加载出一个四旋翼模型。

Step 4:

点击下图左侧 CH5 的 Slide Switch 模块到 on，即代表无人机解锁，解锁之后 CH1~CH4 的 Slide 模块即可实现对无人机的横滚、俯仰、油门、偏航的调整。同时，在 RflySim3D 中也可看到飞机的飞行情况，完成软件仿真。



7. 硬件在环仿真实验步骤

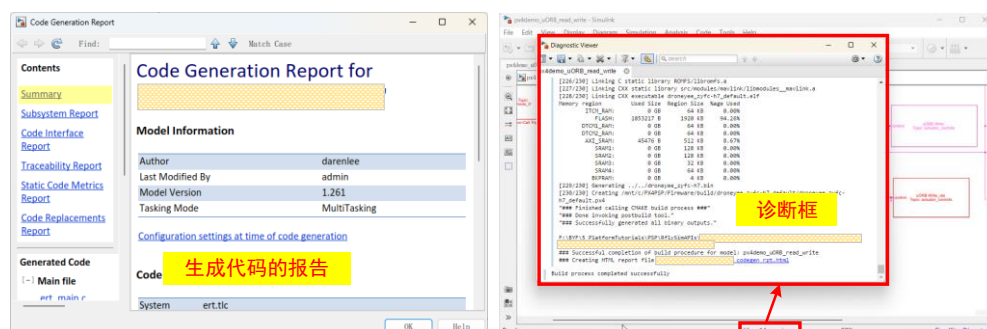
Step 1:

打开 Exp4_AttitudeSystemCodeGen.slx(或 Exp4_AttitudeSystemCodeGen_old.slx)文件，在 Simulink 中，点击编译命令。



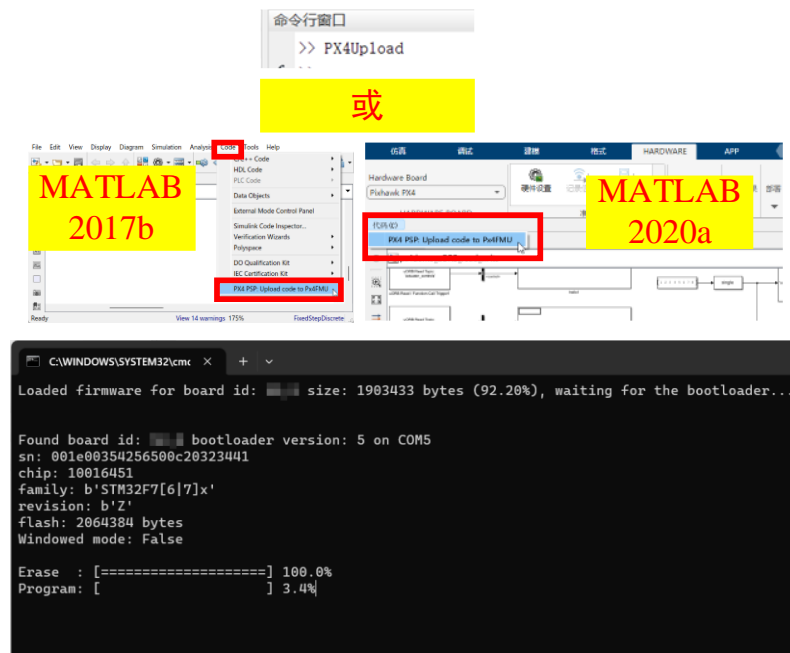
Step 2:

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 3:

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。

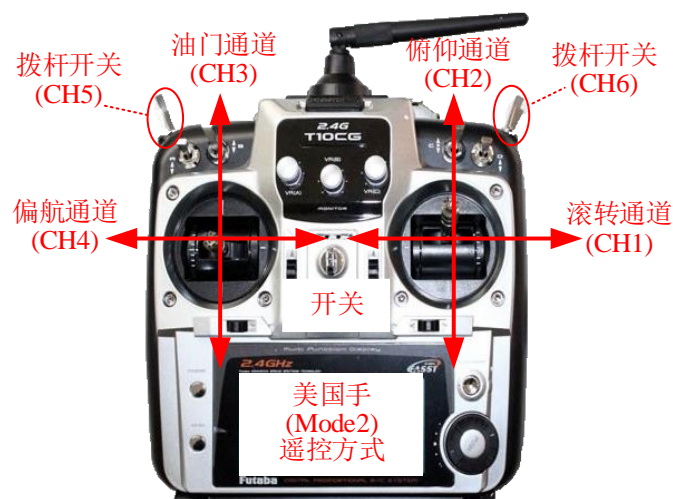


Step 4:

上传成功后，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。即可在 QGroundControl 中设置飞机起飞等操作。

Step 5:

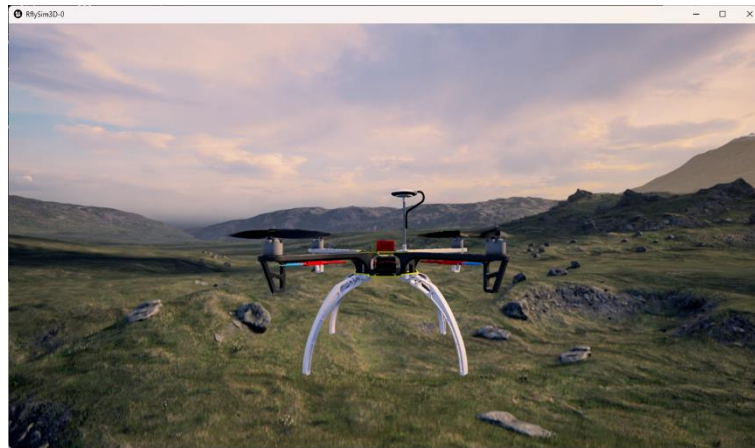
遥控器的设置如下图，通过控制不同的通道即可在 RflySim3D 中观察到无人机的飞行姿态，完成硬件在环仿真。**注：**具体设置请见本平台的[遥控器配置手册](#)。



Step 6:

通过 CH5 解锁之后，在 RflySim3D 中即可看到飞机正常起飞，通过 Step 8 中 CH1~CH

4 调整飞机姿态和高度。



8. 参考资料

- [1]. Quan Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Springer, Singapore, 2017
- [2]. 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.
- [3]. 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.
- [4]. 全权 等.多旋翼无人机远程控制实践[M].电子工业出版社,2022.

9. 常见问题

Q1: ****

A1: ****

1. 实验目的

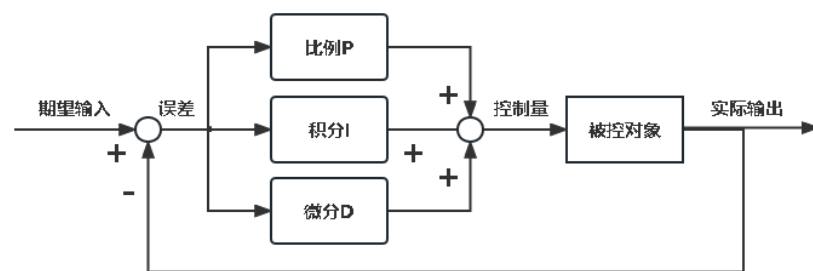
本实验通过在 MATLAB/Simulink 中搭建多旋翼飞行控制器，并通过 Simulink 发送控制指令，控制转台上的四旋翼无人机姿态。熟练掌握 MAVLINK 通信运用，熟练掌握四旋翼无人机姿态控制与参数整定。

2. 实验原理

本实验的关键内容分为两个部分，一部分是 MAVLINK 通信，一部分是控制器设计。本实验中 MAVLINK 协议用于飞控与上位机之间进行通信，一方面 MATLAB 发送的控制指令通过 MAVLINK 协议传递给飞控。另一方面飞控将关键状态通过 MAVLINK 协议传递给 MATLAB 进行显示，便于调试和分析。控制器则采用经典的 PID 控制器，为了让控制器更加安全，有必要对各个通道的计算结果进行限幅。

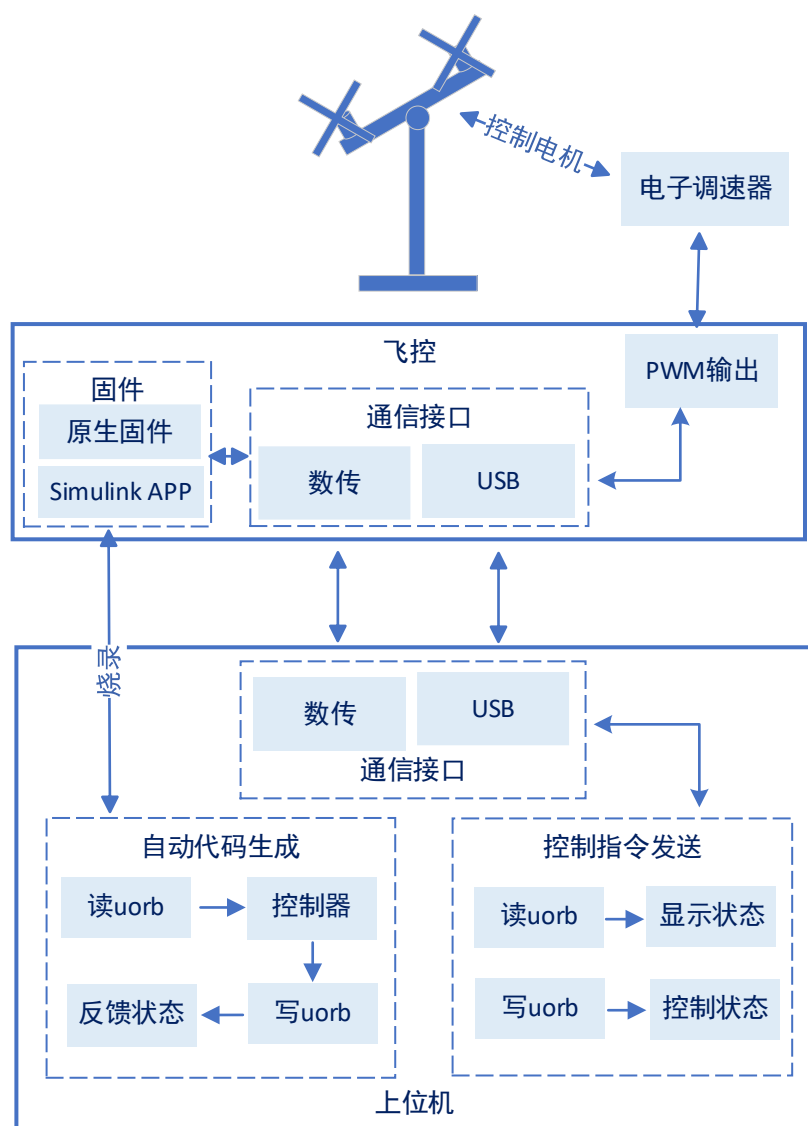
MAVLink (Micro Air Vehicle Link) 是一种用于小型无人载具的通信协议，于 2009 年首次发布。该协议广泛应用于地面站 (Ground Control Station, GCS) 与无人载具 (Unmanned vehicles) 之间的通信，同时也应用在载具上机载计算机与 Pixhawk 之间的内部通信中，协议以消息库的形式定义了参数传输的规则。MAVLink 协议支持无人固定翼飞行器、无人旋翼飞行器、无人车辆等多种载具。

控制器则采用应用最为广泛的 PID 控制器。PID 控制算法是由比例 P (Proportion)、积分 I (Integration)、微分 D (Differentiation) 组成的一种控制算法。PID 控制就是将变量偏差的比例、积分和微分之和作为控制输入，计算输出值的一种控制方法。传统 PID 控制系统的结构框图如图所示。



图中的比例“P”参数起到矫正偏差的作用，P 参数越大对误差的灵敏度越高，误差的矫正速度越快，从而系统的动作也越快，但是过大的 P 参数会使系统出现过大的超调。积分“I”参数可以起到提高精度的作用，I 越大跟踪误差越小，系统跟踪越精确。微分“D”参数可以起到抑制超调的作用，可以反应误差信号的变化率，能在跟踪快要达到期望目标时提前减速，一般 D 参数不会太大，过大的 D 参数会引起系统震荡。

PID 控制算法被广泛应用，因为其结构简单、稳定性好、可靠性高且调节方便而成为工业控制的主要技术之一。其最大的优势在于不需要对系统建模或者系统辨识，只需设计完成后在实验中反复调节即可。对于一般的无人系统其建模复杂，所以 PID 控制算法使用频率很高。




本实验的总体框架如上图所示，在上位机上使用 PSP 工具箱设计 MATLAB 控制器。MATLAB 控制器可以直接编译成可在飞控上使用的 Simulink APP。将 Simulink APP 烧录到飞控当中，控制器即可计算控制律并对转台上的无人机进行控制。在上位机上，可以通过 Simulink 读取飞控的状态或者发送控制指令给飞控。上位机与飞控的物理连接可以通过数传或者 USB，数传连接时通信速率较慢部分消息不可用，而 USB 连接时通信速率高，可以显示所有信息。

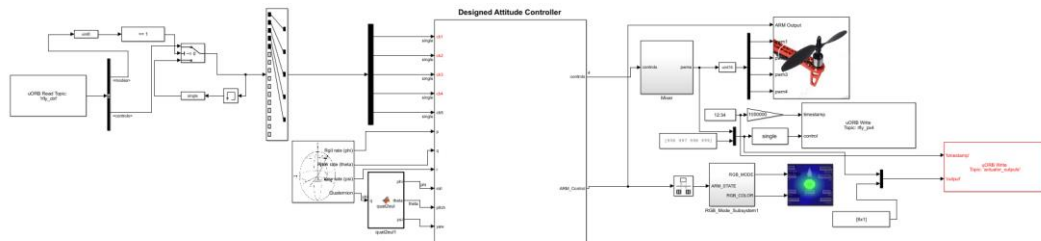
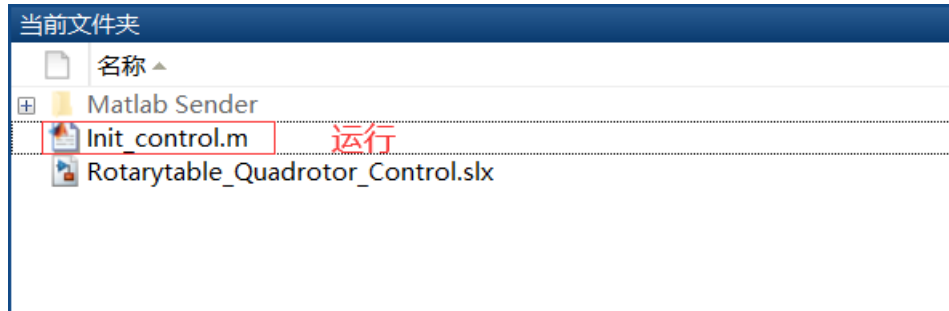
3. 实验器材

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
2	RflySim 平台最新版	卓翼 X200 飞机	1

4. 实验步骤

Setp1:

在桌面双击打开 MATLAB  软件，在 MATLAB 软件中打开文件："*\demo\Init_control.m"。Init_control.m 运行后会自动打开 Rotarytable_Quadrotor_Control.slx。



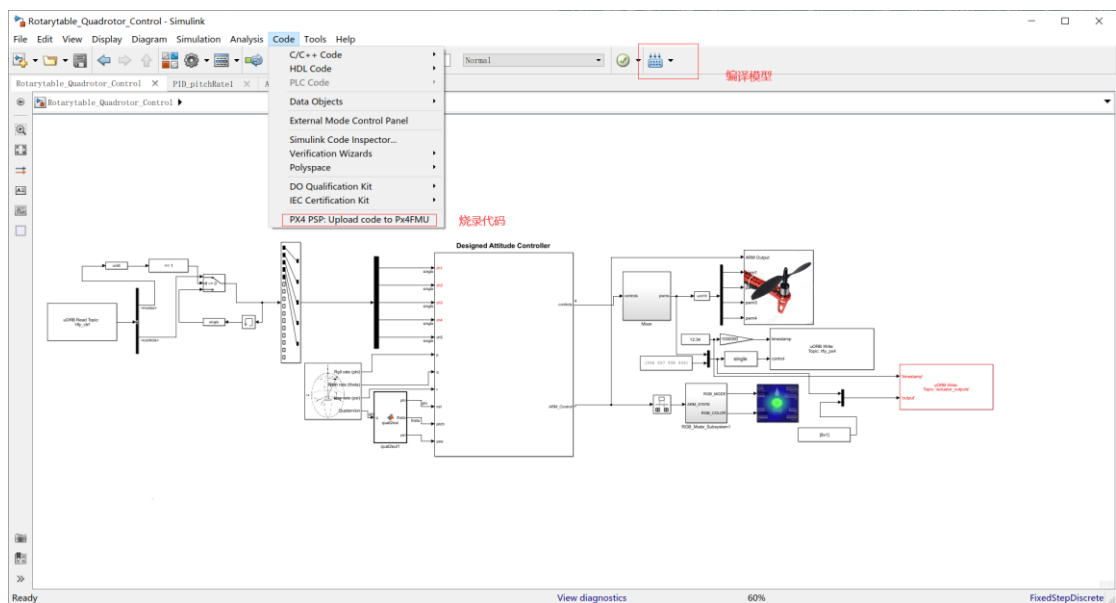
Setp2:

在打开 Init_control.m 文件，查看参数设置。如下参数适用于立式转台的 X200 飞机。可对 P 参数和 I 参数进行微调，优化控制效果。


```
Init_control.m  x  +
1
2 % 俯仰
3 Kp_PITCH_ANGLE = 5;
4 Kp_PITCH_AngleRate = 0.1;
5 Ki_PITCH_AngleRate = 0.05;
6 Kd_PITCH_AngleRate = 0.0001;
7
8 % 滚转
9 Kp_ROLL_ANGLE = 5;
10 Kp_ROLL_AngleRate = 0.1;
11 Ki_ROLL_AngleRate = 0.05;
12 Kd_ROLL_AngleRate = 0.0001;
13
14 % 偏航
15 Kp_YAW_ANGLE = 2;
16 Kp_YAW_AngleRate = 0.1;
17 Ki_YAW_AngleRate = 0.01;
18 Kd_YAW_AngleRate = 0.00;
19
20 % 积分饱和
21 Saturation_I_RP_Max = 0.2;
22 Saturation_I_RP_Min = -0.2;
23 Saturation_I_Y_Max = 0.1;
24 Saturation_I_Y_Min = -0.1;
25
26 % 最大角速率限制, rad/s
27 MAX_CONTROL_ANGLE_RATE_PITCH = 5;
28 MAX_CONTROL_ANGLE_RATE_ROLL = 5;
29 MAX_CONTROL_ANGLE_RATE_YAW = 3;
30
31 % 启动模型
32 Rotarytable_Quadrotor_Control
33
```

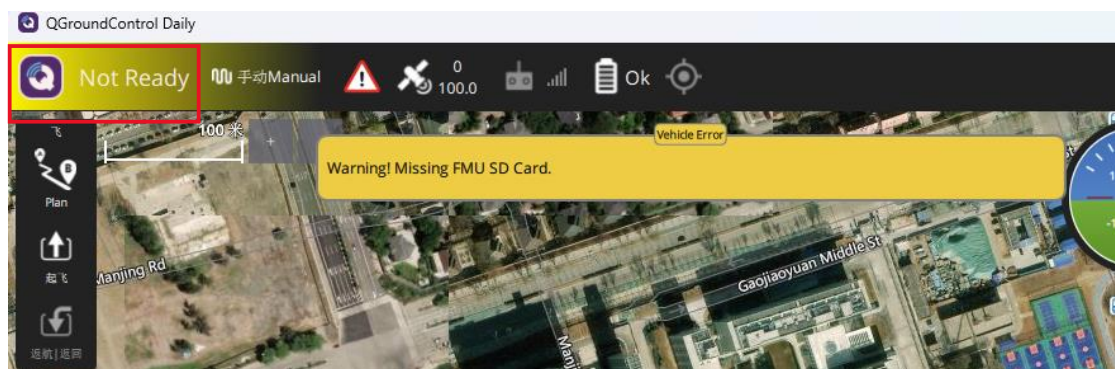
Setp3:

编译模型，连接卓翼 X200 飞机，烧录代码。

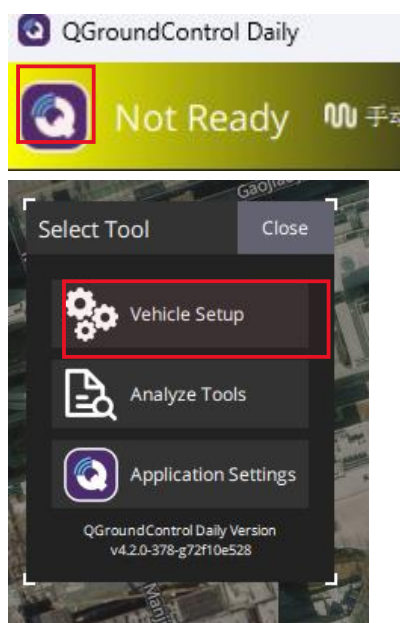


Setup4:

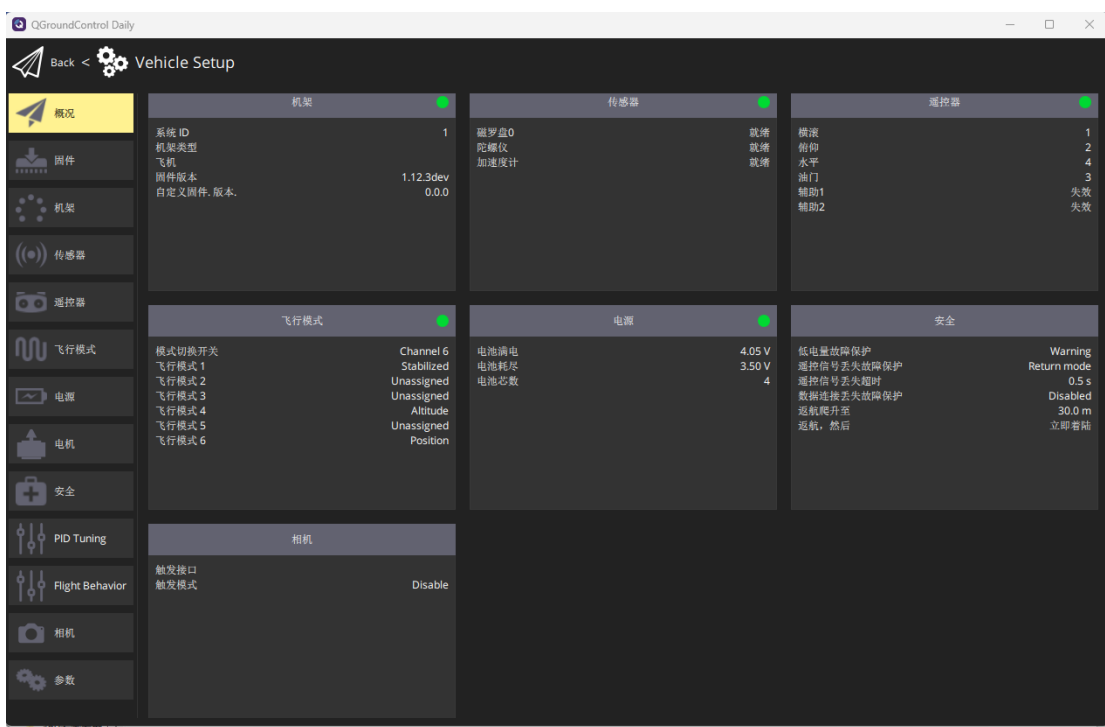
飞机校准，将代码烧录进去之后，打开 QGC，显示 Not Ready。



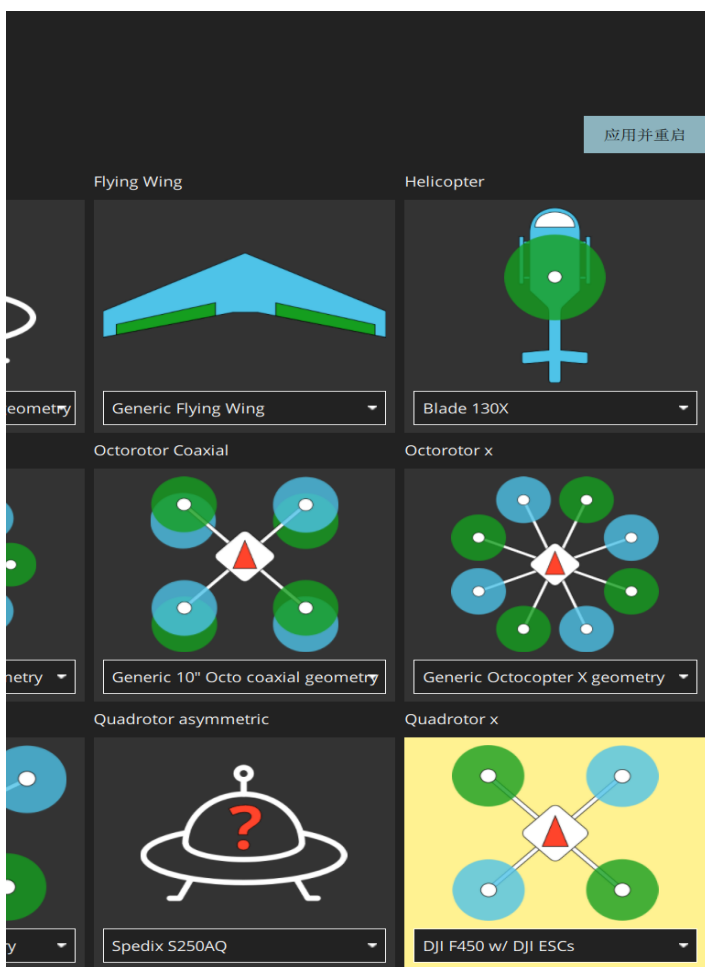
点击 QGC 图标，打开选择工具，打开设置。



完成传感器校准等工作。



机架类型选择，在机架选择之后，需要点击应用并重启。

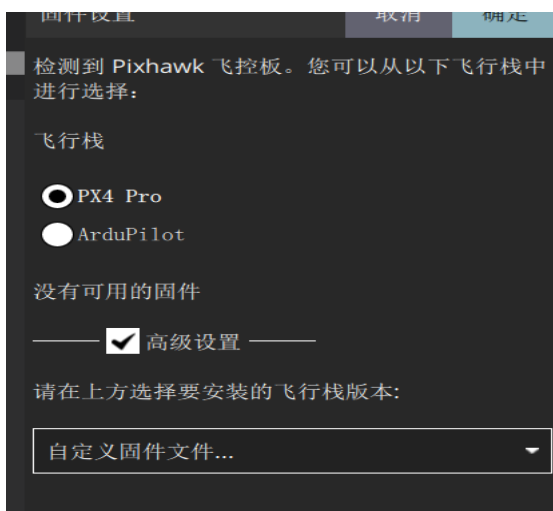
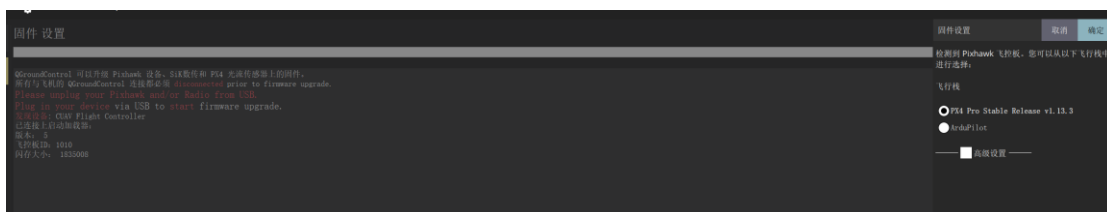


在进行机架选择之后，需要分别对传感器，遥控器，飞行模式以及电源进行校验。



在对电源进行校验时，需要先使用官方固件。

点击固件，数据线重新插拔，显示固件设置，选择高级设置，选择自定义固件文件，安装官方固件。



安装官方固件后，当显示升级完成后，需要重新对传感器等进行校验，这时可以对电源进行校验。再进行校验之后，便可以重新烧录自己的固件。在烧录自己的固件时，需要

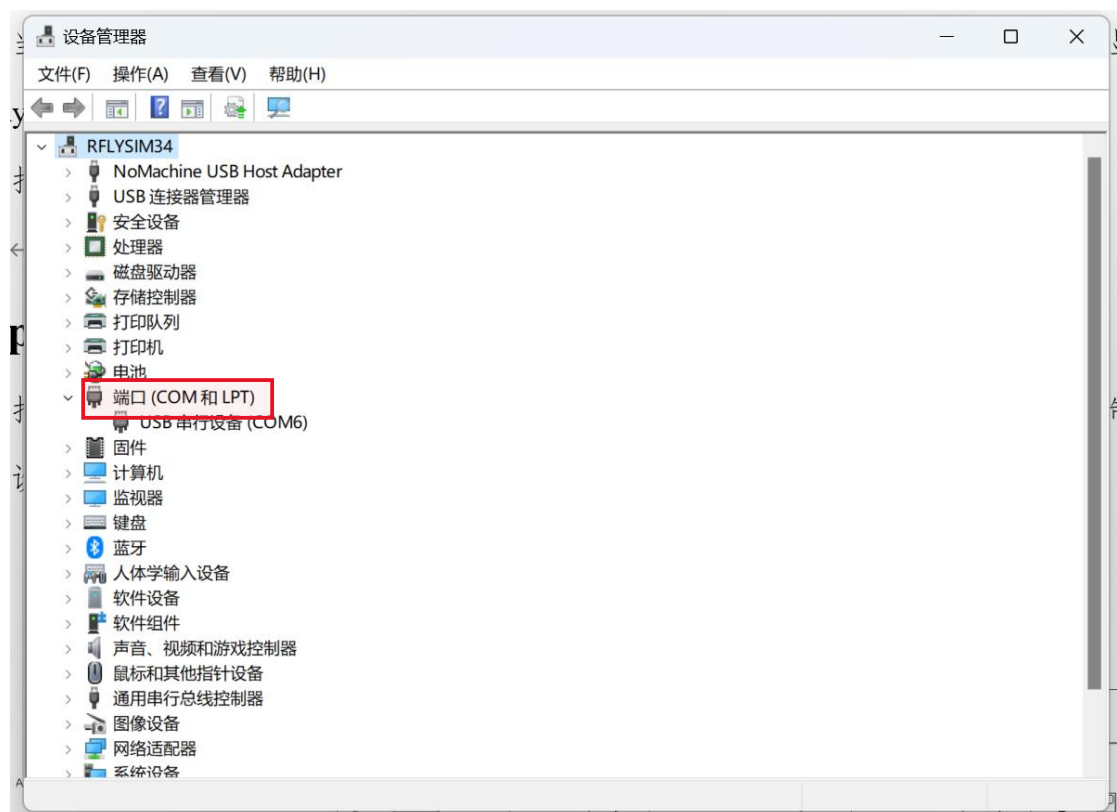
先关闭 QGC。

烧录自己的固件之后，无人机的校验结果应该是直接显示完成的。

Setp5: 飞机固定

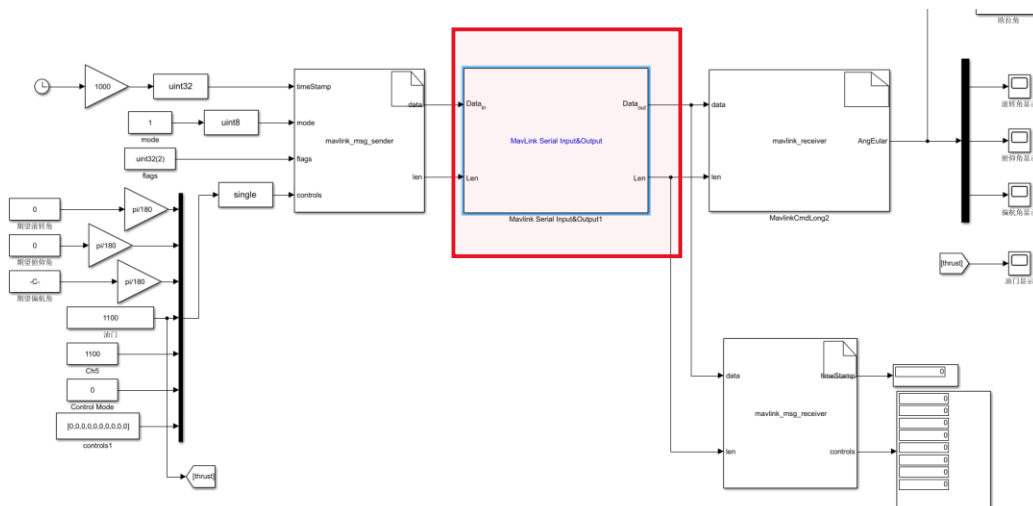
飞机固定在台架上，并连接数传。当连接数传之后，我们可以在 QGC 上看到数传与无人机是否建立连接，当 QGC 显示 Ready to fly,需要关闭 QGC，否则会抢占端口，使后续工作无法完成。

打开设备管理器，找到端口。



之后，需要在 Simulink 中相应的模块改为对应的端口。

注：若数传链接电脑之后，未显示端口号，请根据数传型号下载相关驱动文件，本平台提供 3DR X6 平台数传驱动地址为："*\\PX4PSP\\RflySimAPIs\\Exp02_FlightControl\\e0-PlatformStudy\\0.Device-Driver\\3DR-X6_Radio_Telemetry_Driver.zip"。



Block Parameters: Mavlink Serial Input&Output1

Custom (mask)

This module is for receiving and sending MAVLink message

Data_out sends 2048-D unit8 vector, and Len is the valid data length of the Data_out

Data_in receives a 300-D uint8 vector, and Len is the valid data length of the Data_in

Parameters

Serial Port

COM5

Baud rate

57600

Sample Time

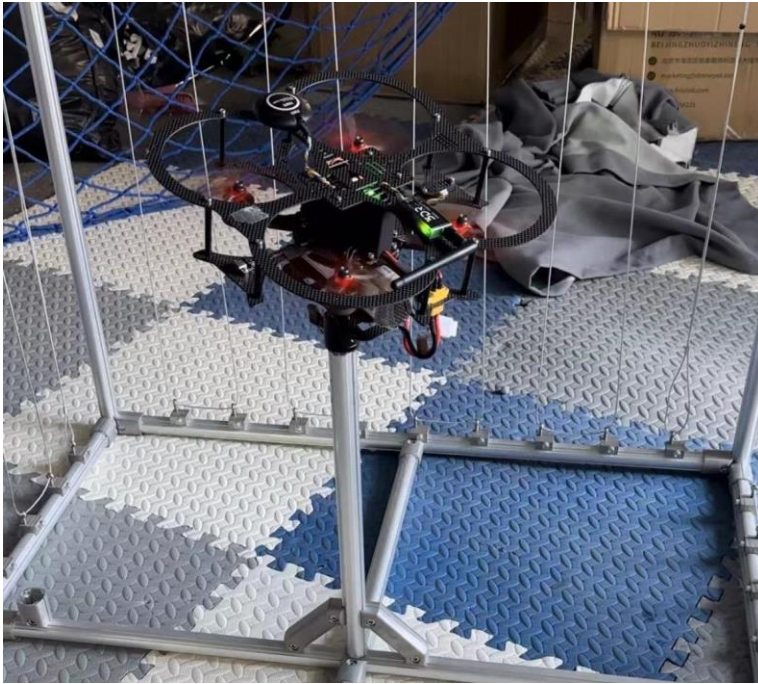
-1

OK

Cancel

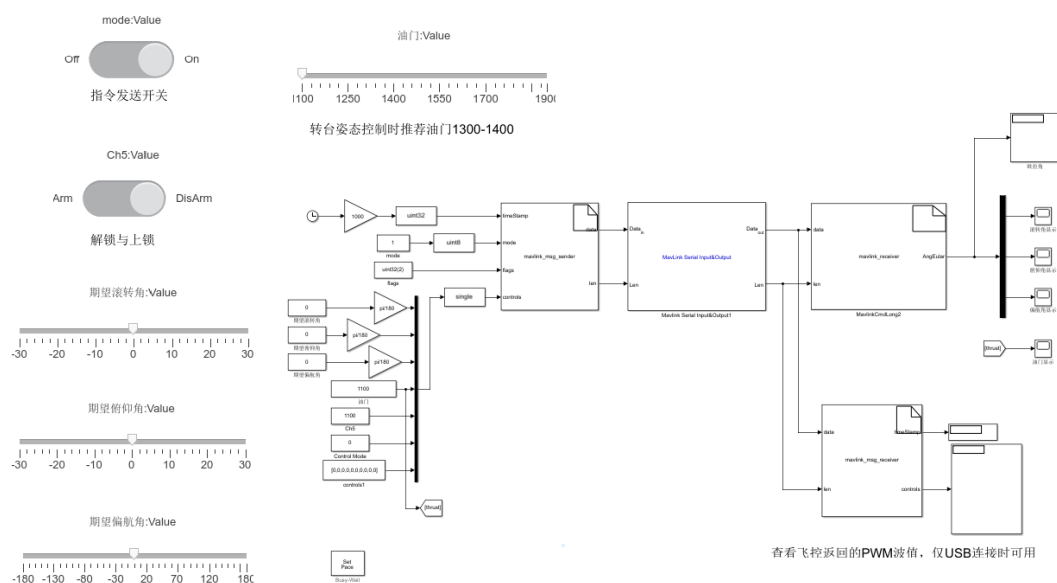
Help

Apply



Setp6: 打开 Mav_Control_Quadrotor.slx

打开 Mav_Control_Quadrotor.slx 发送消息控制无人机，整体形式如下图所示。控制指令的设置集中在左侧和上部，返回结果的显示集中在右侧。



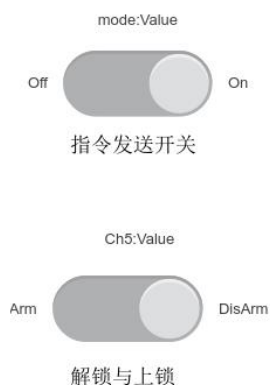
下面详细介绍每一个部分的功能。如下图所示，是发送端的两个关键控制开关，排在上面的是“指令发送开关”，排在下面的是“解锁与上锁”开关。

当“指令发送开关”设置为 **Off** 时，Mav_Control_Quadrotor.slx 上的任何修改都不起作用，即不会发送任何有效指令。当“指令发送开关”设置为 **On** 时，“解锁与上锁”开关将变得有效，同时滚转、俯仰、偏航及油门的设置也将生效。

“解锁与上锁”开关用于控制电机解锁。在首次解锁时，需要三步才能将电机进行解锁：第一步将“解锁与上锁”开关打到 **Arm**，等待 2s，电机将会发出一声滴答声；第二步将“解锁与上锁”开关打到 **DisArm**，等待 2s，电机将会发出一声滴答声；第三步，将“解锁与上锁”开关打到 **Arm**，将完成电机的解锁。

警告△：电机解锁前，应仔细检查油门、期望滚转角、期望俯仰角、期望偏航角的设置，否则可能应转速过大损坏飞机或者造成人员受伤。

建议：首次实验时，油门值设定为最低，期望滚转角、期望俯仰角、期望偏航角设置为 0。待熟悉了平台的基本使用后，再调整油门值、期望滚转角、期望俯仰角、期望偏航角。



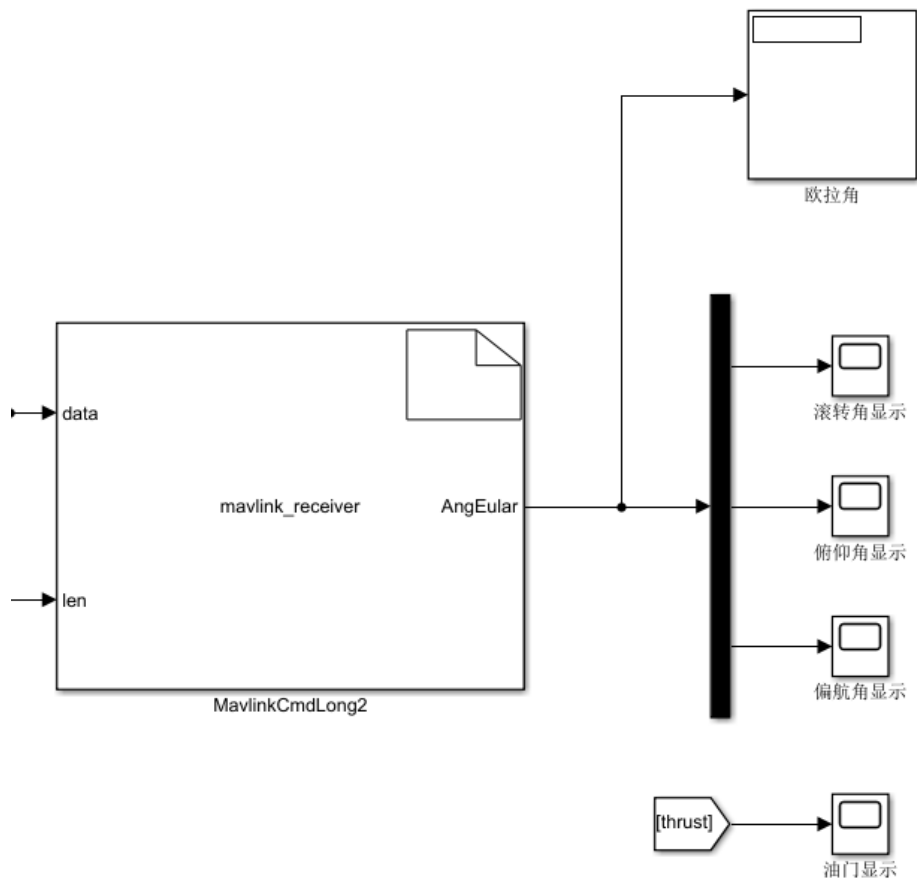
油门值设置。如下图滑杆，可以设置油门值。油门值可以理解为 PWM 脉宽，通常无刷电机支持的脉宽是 1000-2000，但为了安全起见仅支持设置 1100-1900。当滑杆打到最左侧时，将设置为最低值 1100，当打到最右侧时将设置为最大值 1900。在做转台上 V200 飞机**姿态控制**时，建议将油门设置为 **1300-1400**。



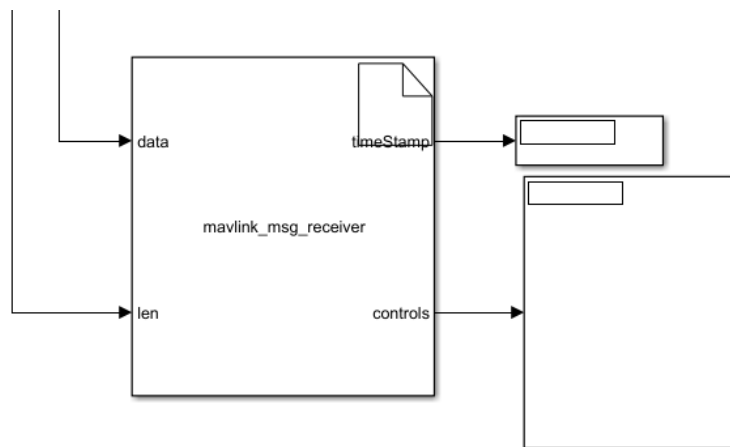
期望姿态设置。如下可设置期望滚转角、期望俯仰角、期望偏航角。期望滚转角、期望俯仰角可设置 -30° ~ 30° ，在开始调试时建议最大倾角不超过 20° 。偏航角支持 -180° ~ 180° ，偏航角可随意设置，对系统稳定性影响较小。



在 Mav_Control_Quadrotor.slx 的右侧，可以显示实时欧拉角的数值，也可以通过示波器查看欧拉角的曲线。在最下面的一个示波器，可以显示油门值。



在设计控制器时，往往需要验证控制逻辑是否符合预期，这时需要查看控制器的原始输出。如下图的模块可以显示控制器的原始输出，即每一个电机对应的 PWM 波的脉宽。该功能仅使用 USB 连接飞控时可用，因为使用数传连接时速率太低，相应的消息不会发送。



查看飞控返回的PWM波值，仅USB连接时可用

5. 实验结果分析

实验结果表明所设计的控制器能够支持 MATLAB 发送指令控制姿态。

6. 实验总结

(1) MAVLink 消息可用于上位机控制无人机, MATLAB 有相应的模块支持从 MAVLink 收发消息。

(2) PID 控制器需要限幅, 这样能提升控制器的鲁棒性。

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]. MAVLink 官方使用文档网站: <https://mavlink.io/en/messages/common.html>

1. 实验名称及目的

姿态控制器设计实验：让多旋翼的姿态能够跟随我们给定的期望姿态。姿态控制器的好坏直接决定了多旋翼能否平稳飞行。

2. 实验效果

实现飞思 X450 无人机正常起飞，完成姿态控制。

3. 文件目录

文件夹/文件名称		说明
icon	Init.m	模型初始化参数文件。
	MavLinkStruct.mat	MAVLink 结构体数据文件。
	pixhawk.png	Pixhawk 硬件图片。
	readme.pdf	机架类型修改说明文件。
	UE_Logo.jpg	RflySim3D 软件图片。
	F450.png	F450 飞机模型图片。
Init_control.m		控制器初始化参数文件。
Exp5_AttitudeSystemCodeGenRealFlight.slx		实飞模型文件(遥控器输入归一化处理)。
Exp5_AttitudeSystemCodeGenRealFlight_all.slx		实飞模型(调试)文件，用于在硬件在环仿真中调整参数。
Exp5_AttitudeSystemCodeGenRealFlight_old.slx		实飞模型文件。

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 ^①	1
2	RflySim 平台免费版	飞思 X450 飞机 ^②	1
3	MATLAB 2017B 及以上	遥控器 ^③	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：本实验在进行实飞时，安全环境下进行，飞机相关配置见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

③：本实验演示所使用的遥控器为：福斯 FS-i6S、配套接收器为：FS-iA6B。遥控器相关配置见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

5. 官方固件实飞步骤

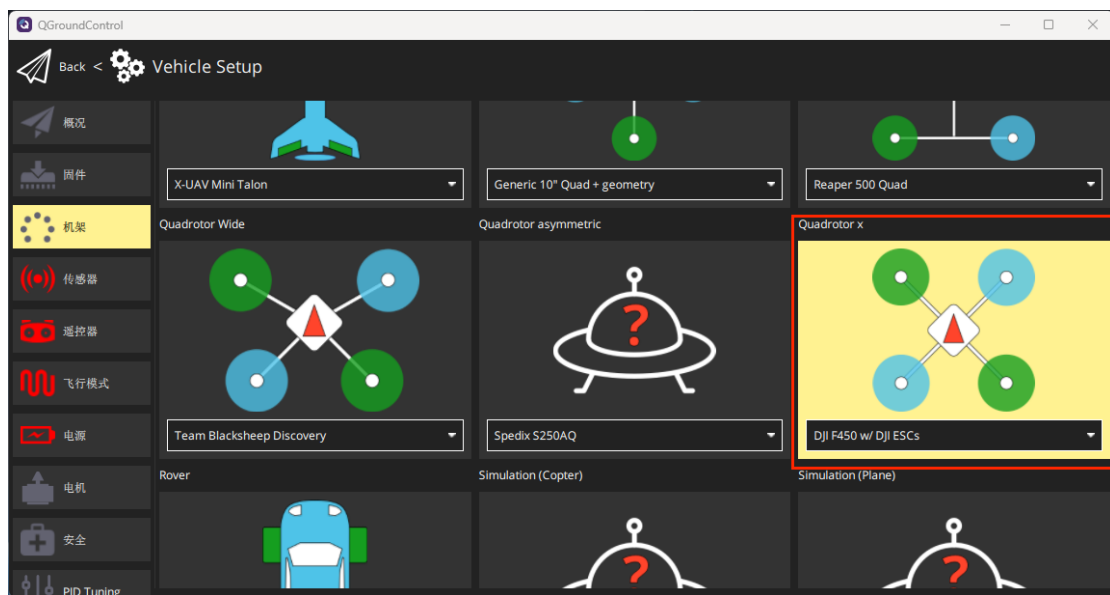
Step 1:

通过 QGC 烧录给飞控的官方固件。具体操作如下：



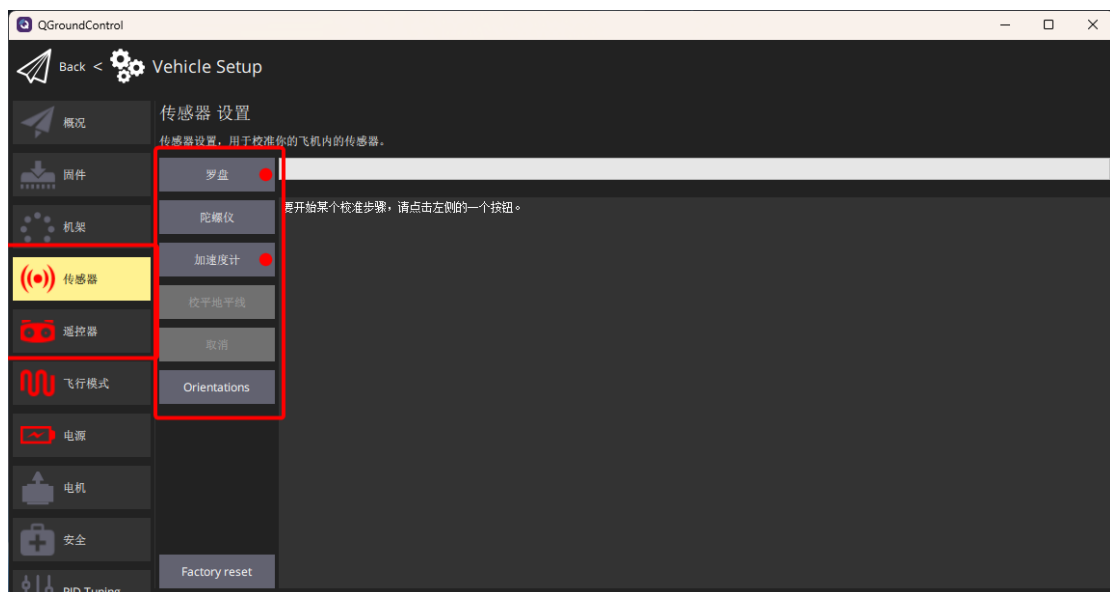
Step 2:

将飞机通过 USB 与电脑进行连接，打开 QGC 软件，设置机架为：DJI F450 w/ DJI ES Cs;



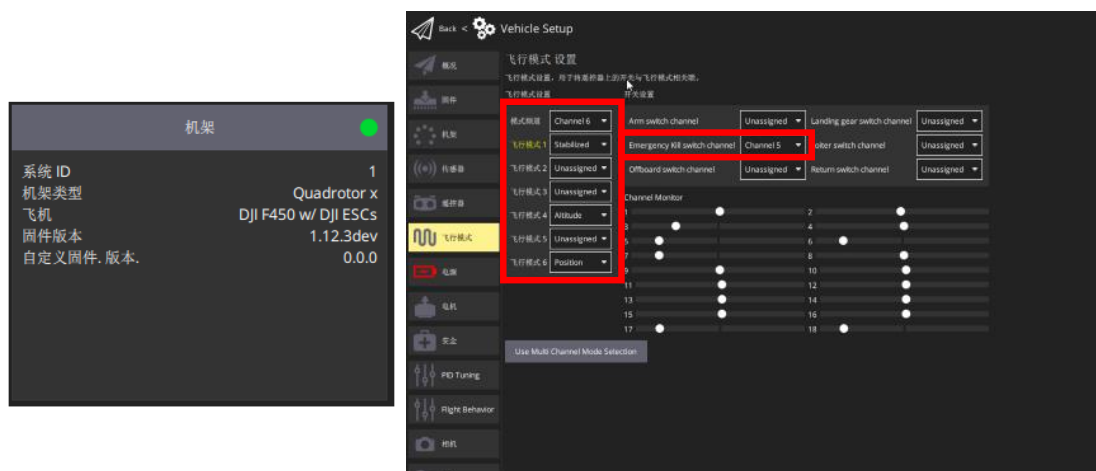
Step 3:

依次校准传感器、遥控器和电池。



Step 4:

设置飞行模式如下：



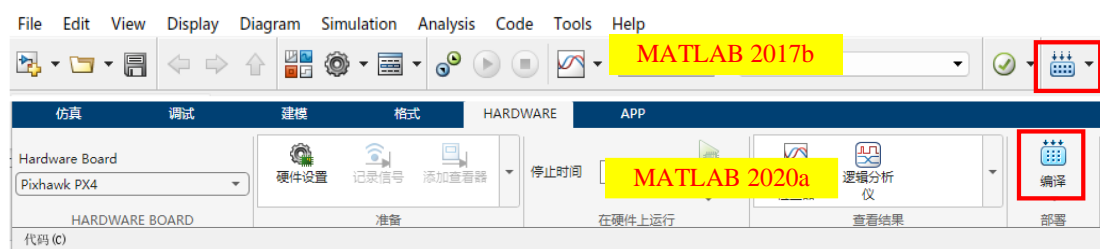
Step 6:

请在指定飞场进行无人机实飞，若正常起飞，说明无人机状态良好；若未正常起飞，请检查传感器校准、参数设置等，具体请联系飞机生产厂家进行解决。**请务必保证飞机状态良好的情况下，再进行下一步操作。**

6. 本实验步骤

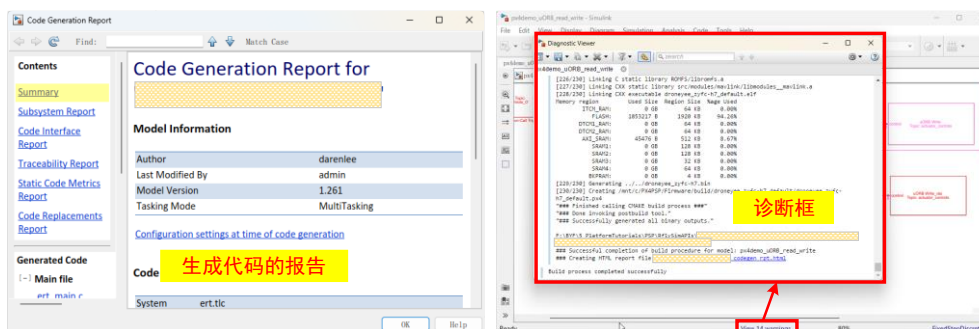
Step 1:

打开 Exp5_AttitudeSystemCodeGenRealFlight.slx(或 Exp5_AttitudeSystemCodeGenRealFlight_old.slx、Exp5_AttitudeSystemCodeGenRealFlight_all.slx)文件，在 Simulink 中，点击编译命令。



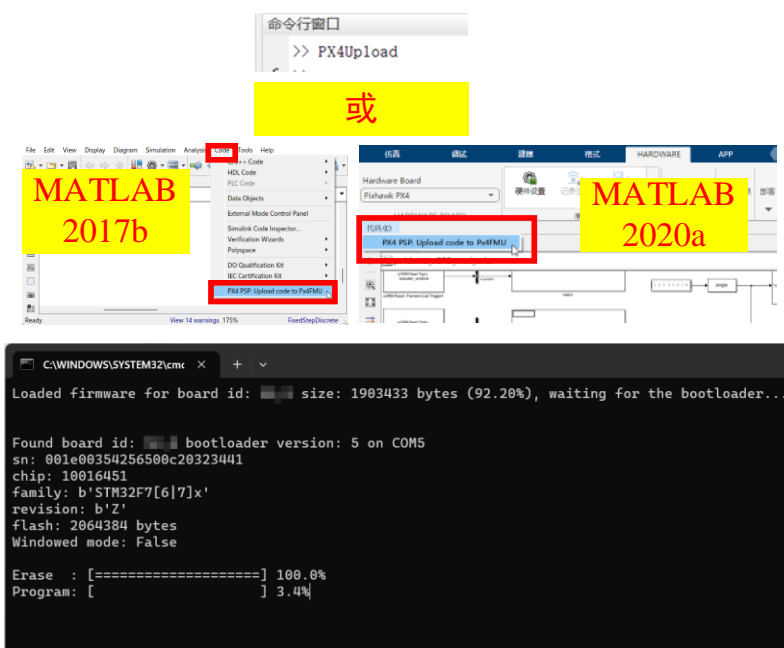
Step 2:

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，左侧为生成的编译报告。



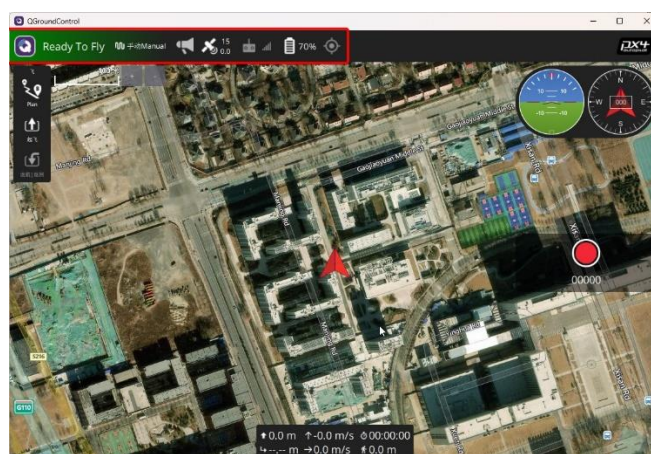
Step 3:

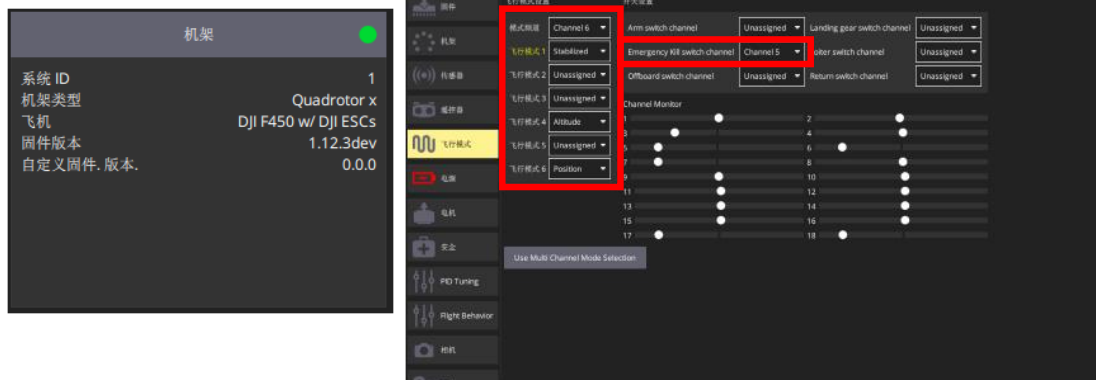
用 USB 数据线链接飞控(或飞机)与电脑。在 MATLAB 命令行窗口输入：PX4Upload 并运行，弹出 CMD 对话框，显示正在上传固件至飞机中，等待上传成功。



Step 4:

打开 QGroundControl 软件，等待飞机连接成功。确认无人机机架类型选择如下图，并设置遥控器通道如下，其中 CH5 为解锁，CH6 为模式切换。





Step 5:

遥控器的设置如下图。注：遥控器设置中，CH5 通道需设置为二段式开关，CH6 通道设置为三段式开关。具体设置请见本平台的[遥控器配置手册](#)。



Step 6:

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。飞行时人在安全半径以外，在姿态模式下，高度可能比较难控，注意不要急推油门，让油门在中位附近，缓慢推油门。



7. 参考资料

- [5]. Quan Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Springer, Singapore, 2017
- [6]. 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.
- [7]. 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.
- [8]. 全权 等.多旋翼无人机远程控制实践[M].电子工业出版社,2022.

8. 常见问题

Q1: ****

A1: ****