

- 1.实验名称及目的
 - 1.1实验名称
 - 1.2实验目的
 - 1.3关键知识点
 - 关键知识点1：控制系统架构
 - 关键知识点2：PID控制算法原理
 - 关键知识点3：姿态控制原理
 - 关键知识点4：速率控制原理
 - 关键知识点5：抗饱和机制
- 2.实验效果
- 3.文件目录
- 4.运行环境
 - 4.1 软件要求
 - 4.2 硬件要求
- 5.实验步骤
 - 5.1 步骤1；面向高度速度通道的PID控制硬件在环仿真实验步骤
 - 5.2 步骤2：基于矫正器控制的硬件在环仿真实验步骤
- 6.参考资料
- 7.常见问题
 - Q1：编译过程中出现"Code alignment failed"错误提示怎么办？
 - Q2：HITL仿真中无人机起飞后不稳定，出现剧烈振荡是什么原因？
 - Q3：QGroundControl无法识别飞控或者连接不稳定怎么解决？

1.实验名称及目的

1.1实验名称

小型固定翼无人机姿态控制仿真实验

1.2实验目的

(1) 实现固定翼无人机高度与速度通道的PID控制硬件在环仿真，观察给定阶跃响应的跟踪效果，并在RflySim平台中显示仿真结果。

(2) 实现基于设计实验中校正控制的硬件在环仿真，观察系统的控制效果。

1.3 关键知识点

关键知识点1：控制系统架构

本实验采用分层控制架构，包括三个主要控制层级：

1. 位置控制层：负责航迹跟踪和导航
2. 姿态控制层：实现俯仰、横滚、偏航角的精确控制
3. 速率控制层：提供快速响应的角速度控制

关键知识点2：PID控制算法原理

系统采用比例-积分-微分(PID)控制算法，传递函数为：

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s$$

其中：

- K_p : 比例系数
- K_i : 积分系数
- K_d : 微分系数

关键知识点3：姿态控制原理

姿态控制通过三轴陀螺仪测量角速度，经过积分运算得到姿态角。系统通过比较期望姿态角与实际姿态角的偏差，利用PID控制器产生相应的控制指令，最终实现对无人机姿态的精确控制。

姿态控制的状态空间表达式为：

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned}$$

关键知识点4：速率控制原理

速率控制是姿态控制的基础，采用带前馈补偿的PID控制结构。前馈项可以提高系统的响应速度，而反馈控制确保系统的稳定性。

速率控制器输出计算公式为：

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + FF$$

其中FF为前馈补偿项。

关键知识点5：抗饱和机制

系统采用了抗积分饱和机制，当执行器达到极限值时，通过条件积分防止积分项过度累积，从而避免系统超调和振荡。通过仿真测试验证系统性能，主要指标包括：

- 响应时间：小于0.5秒
- 稳态误差：小于1%
- 超调量：小于10%
- 抗干扰能力：能够有效抑制外部扰动影响

更多详细实验原理可见：全权,高文瀚,刘润潇,陈鑫泉,戴训华,吕书礼,徐琳,李悦.微小型固定翼无人机飞行控制设计与实践. 北京, 2025

2.实验效果

硬件在环仿真结果，系统在加入校正环节后能够满足频域设计要求，并实现稳定飞行。



3.文件目录

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\10-FixedWingCtrl\code_6\4-4](#)

4.运行环境

4.1 软件要求

Windows 10及以上版本; RflySim工具链;MATLAB2022B以上版本。

4.2 硬件要求

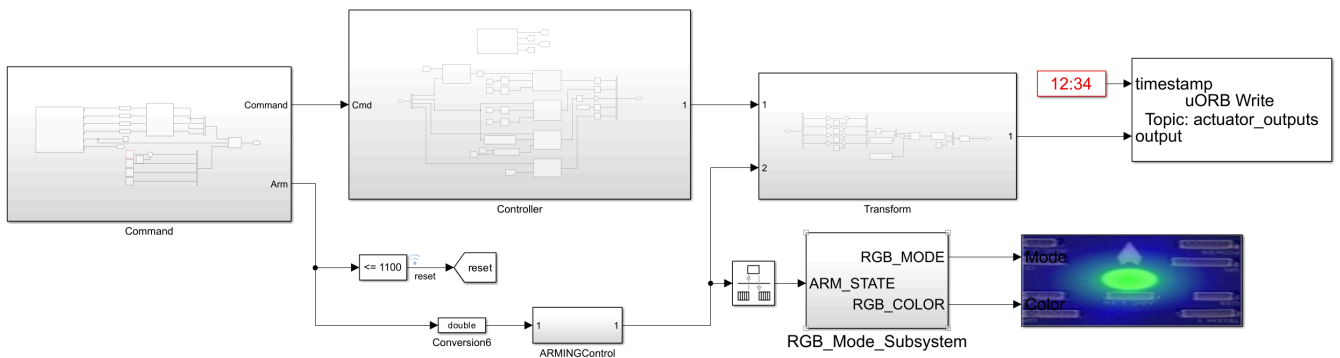
笔记本/台式电脑1台

①: 推荐配置请见: <https://rflysim.com/>

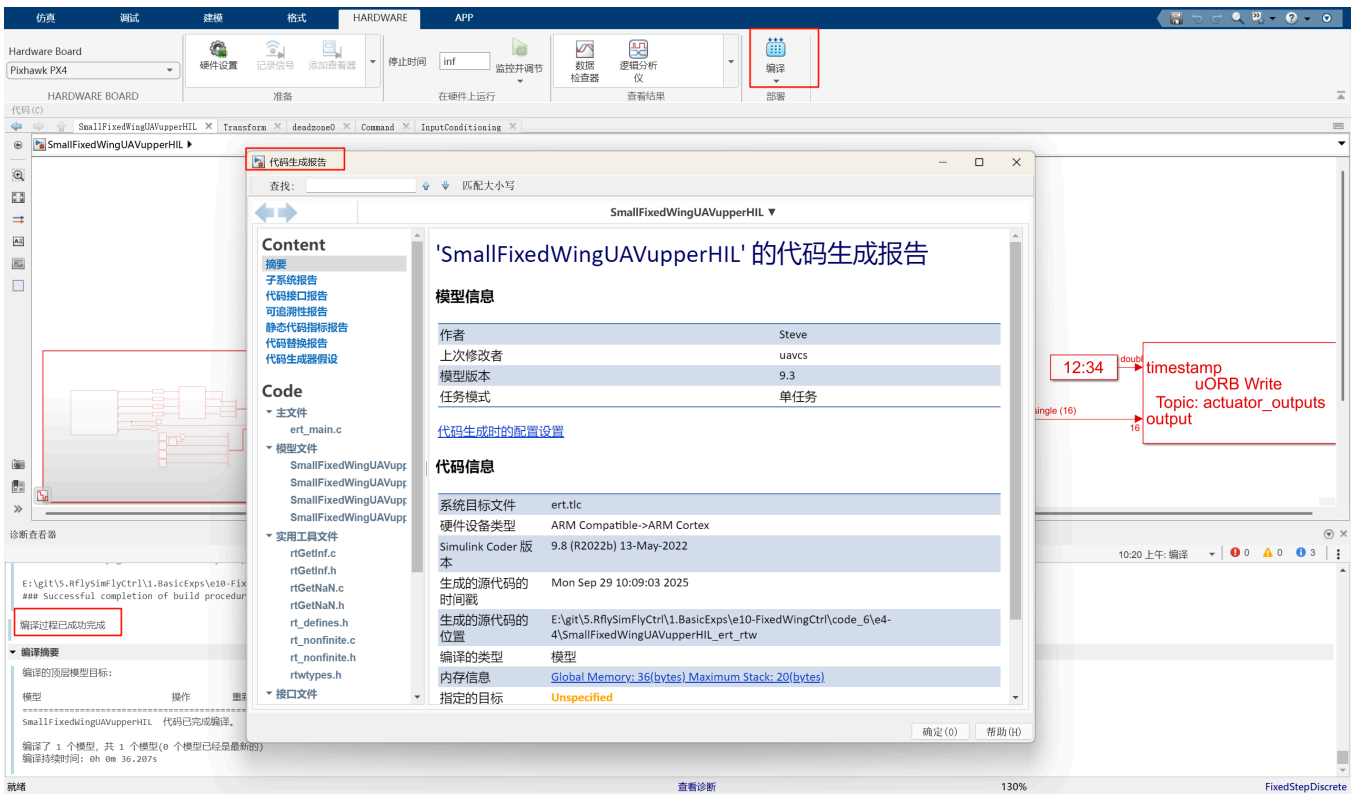
5.实验步骤

5.1 步骤1; 面向高度速度通道的PID控制硬件在环仿真实验步骤

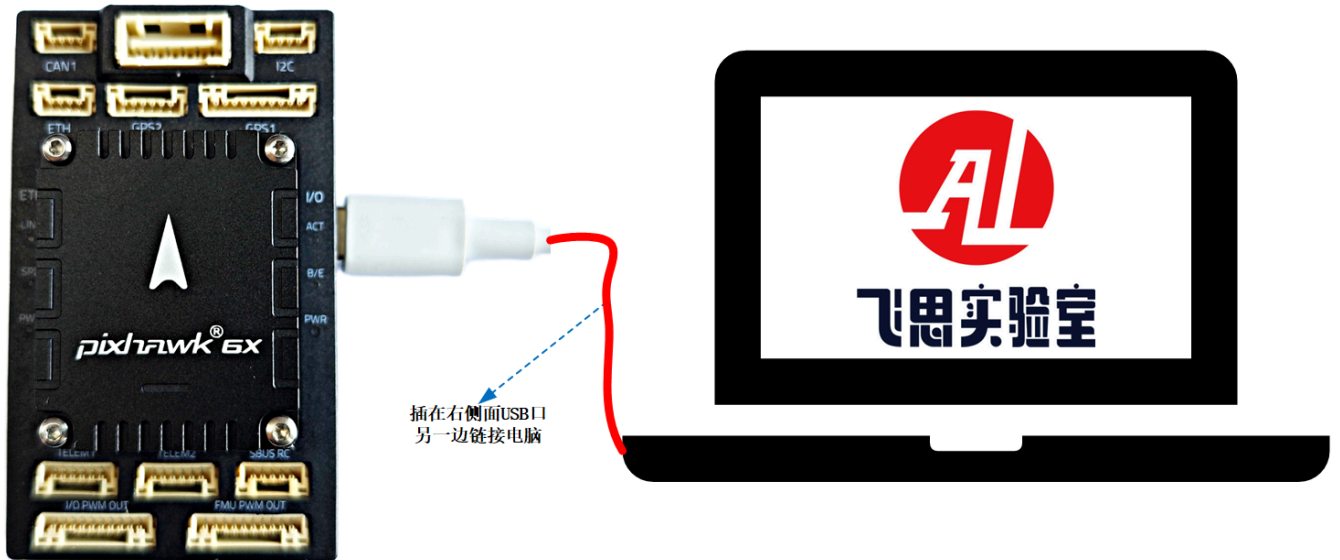
1. 使用MATLAB运行InitDatactrl.m,并打开SmallFixedWingUAVupperHIL.slx



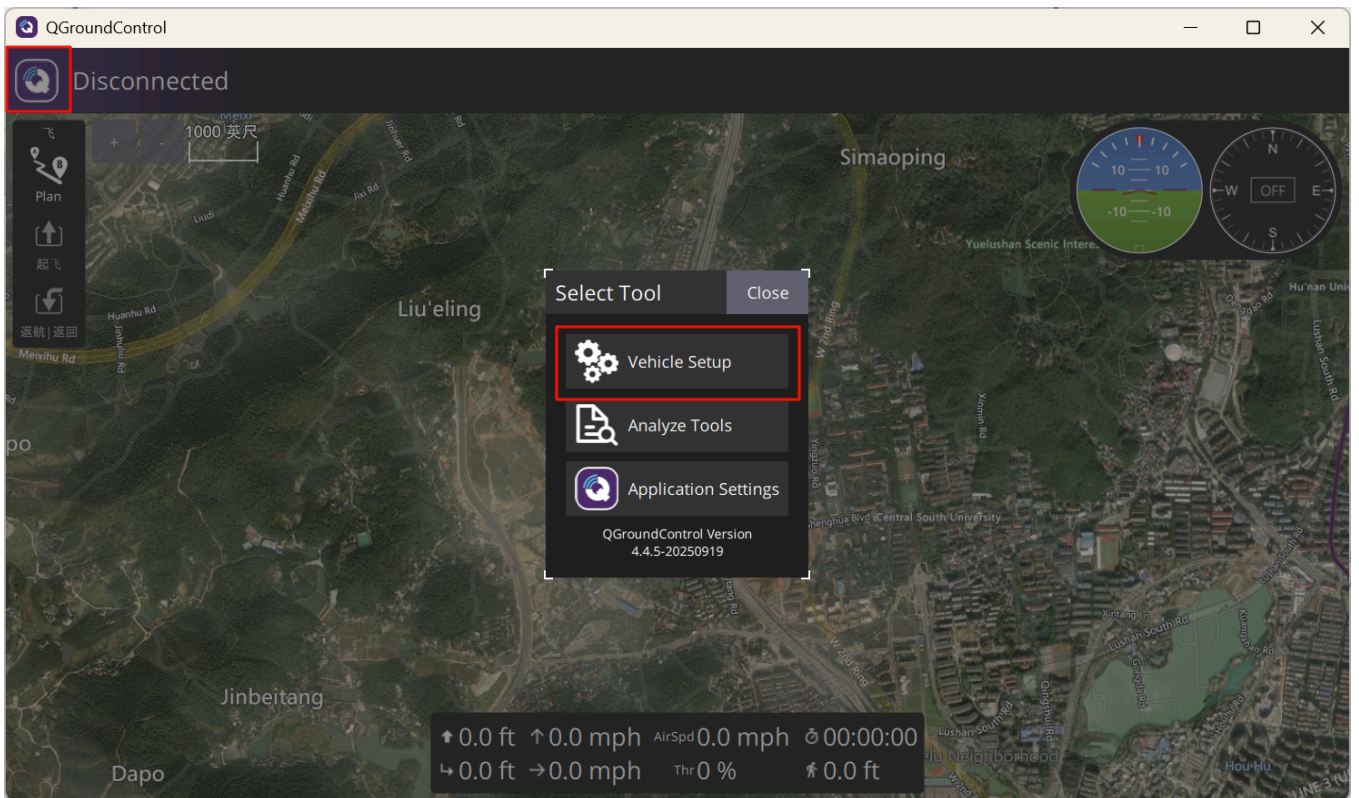
2. 在工具栏中点击编译, 等待编译成功, 会有编译报告弹出。



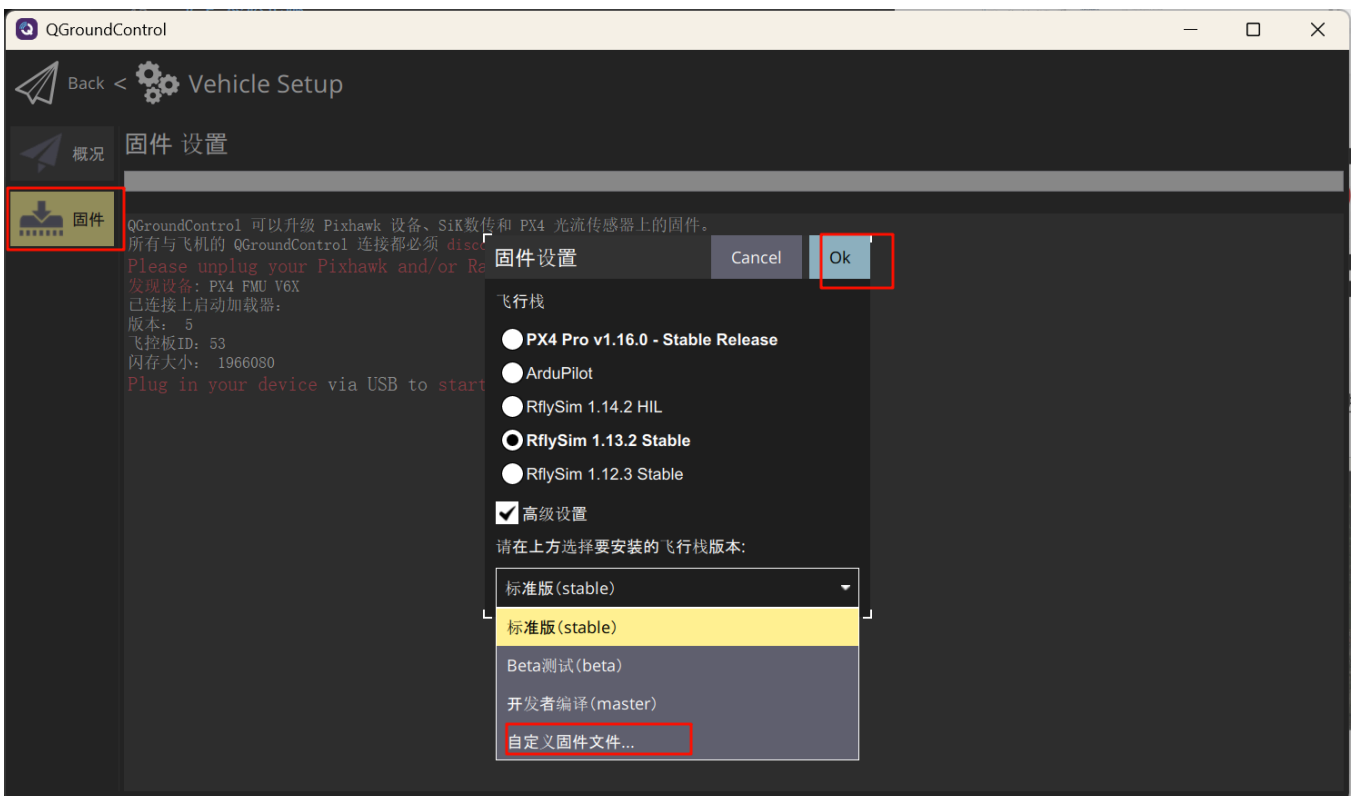
3. 使用数据线连接到Windows电脑上，



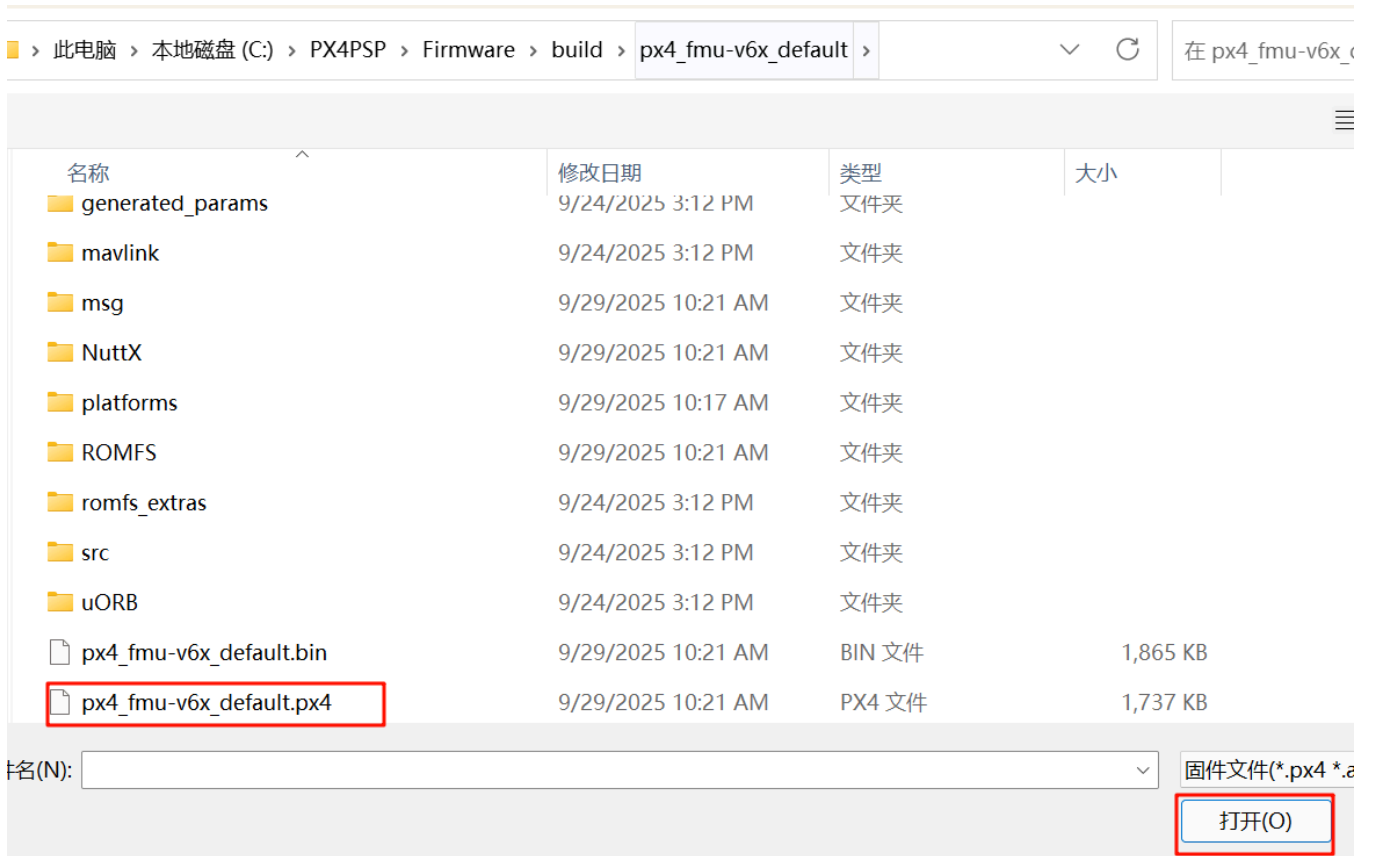
4. 在桌面进入到RflyTools文件夹下打开QGroundControl，点击左上角图标，进入到Vehicle Setup。



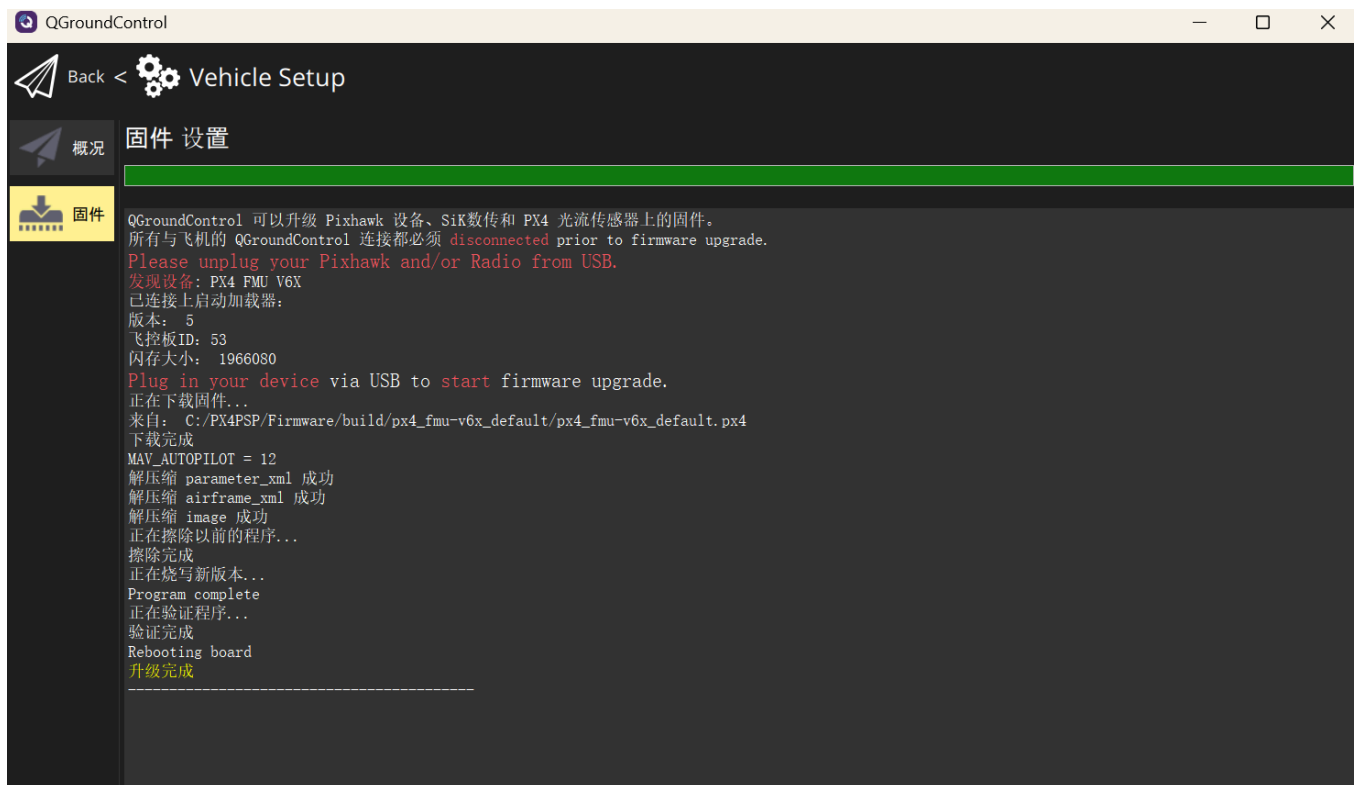
5. 点击固件后，重新插拔飞控，在弹出的固件设置点击高级固件，选择自定义固件文件，点击ok。



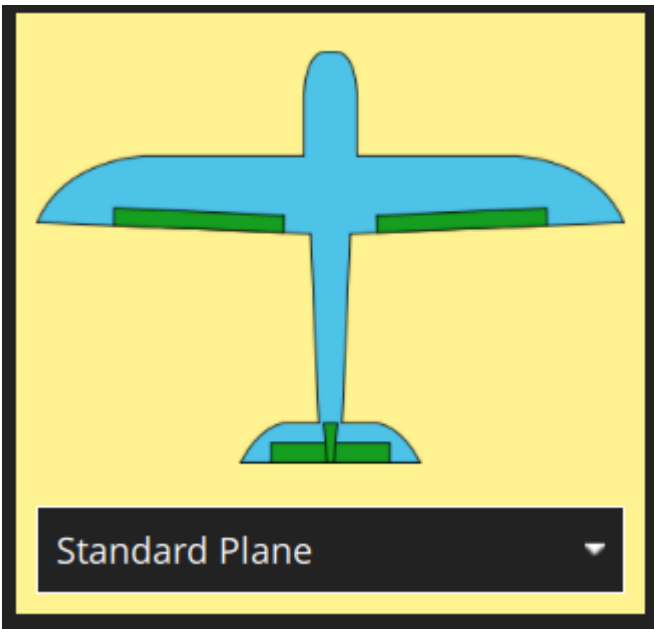
6. 进入到[安装目录]\PX4PSP\Firmware\build[飞控编译命令]文件夹下，选择生成的.PX4固件，点击打开



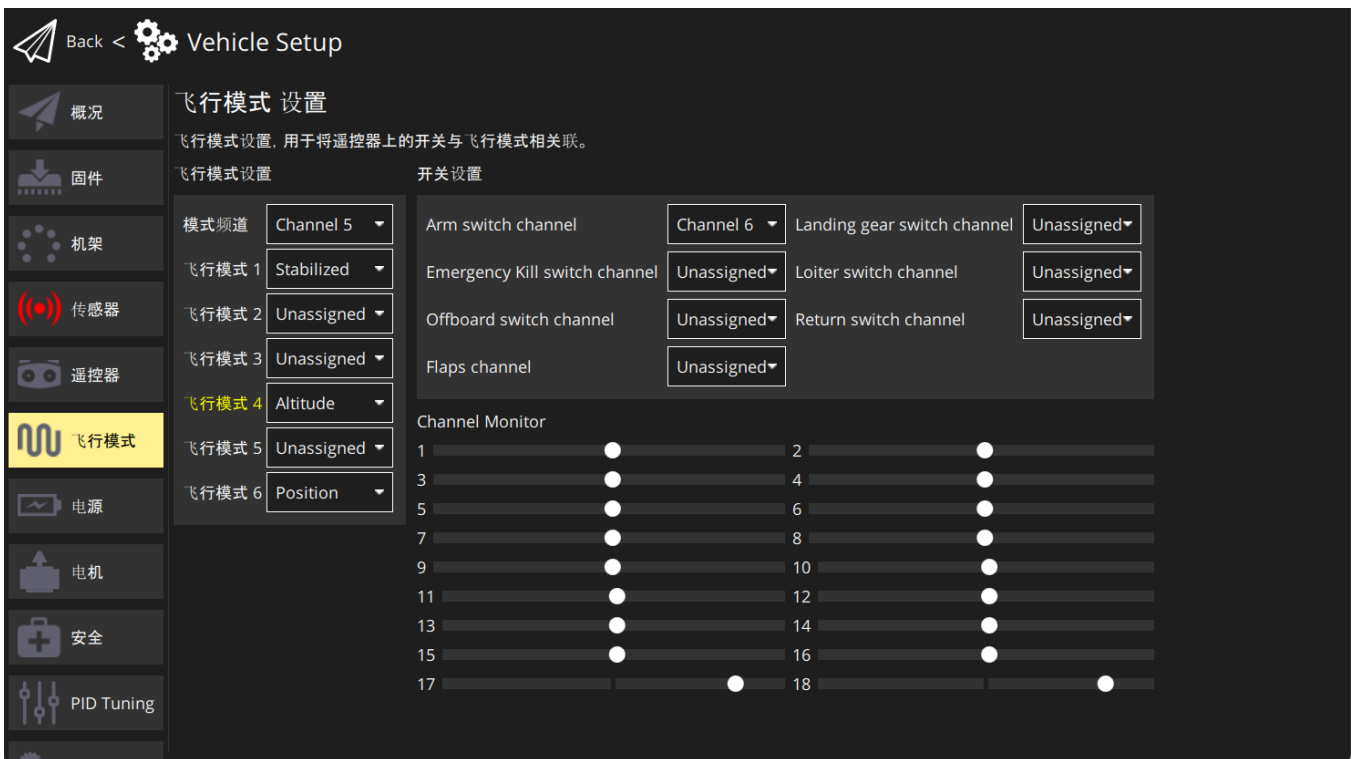
7. 等待固件上传成功。



8. 在机架页面选择Standard Plane机架。



9. 飞行模式CH5设置为2段式，CH6设置为3段式。



10. 打开[SmallFixedWingUAVHITLRun.bat](#)脚本，在CMD命令行输入端口号。会打开一个CopterSim，一个RflySim3D，一个QGC，等待CopterSim信息栏出现GPS 3D fixed & EKF initialization finished.

```
The system cannot find the file specified.

-----
Please input the Pixhawk COM port list for HITL
Use ',' as the separator if more than one Pixhawk
E.g., input 3 for COM3 of Pixhawk on the computer
Input 3,6,7 for COM3, COM6 and COM7 of Pixhawks
-----
All COM ports on this computer are:

COM3: USB 串行设备 * (Pixhawk with SysID=1)

-----
Recommended COM list input is: 3

-----
My COM list for HITL simulation is: 3
```

CopterID: 3DClassID: Use DLL Model: Simulation Mode: 3D Scene Map: Link In

1 234 SmallFixedWingUAVnoctr PX4_HITL OldFactory x:

FCU COM: USB 串行设备 COM3 Baudrate: 921600 Comm Mode: UDP_Simple Start Simulation Stop

PX4: Detect no GPS switched to POS. v
PX4: Init MAVLink
CopterSim: CopterID is 1, PX4 SysID is 1
PX4: Awaiting GPS/EKF fixed for Position control...
PX4: EKF2 Estimator start initializing...
PX4: Set RWTO_TKOFF to 1
PX4: GPS 3D fixed & EKF initialization finished.
CopterSim: failed to local multicast with RflySim3D.
CopterSim: Switching to IP-port list mode.
PX4: Found firmware version: 1.13.2dev

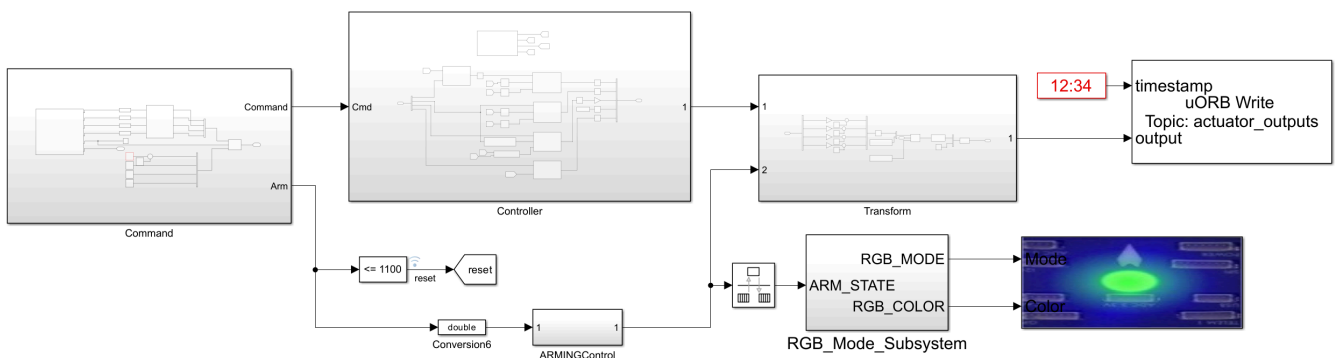
X -249.999 Y -119
Vx 0 Vy 0
φ 0 θ 0
lat -249.9986239834 lon -119
SimHz: 956, SensorHz: 253, PwmHz: 18

11. 使用遥控器将CH5通道切换到arm模式（2段式开关），CH6切换到最下方（3段式），可以使用遥控器进行控制飞机。此操作需要提前设置好遥控器通道，以及遥控器设置。

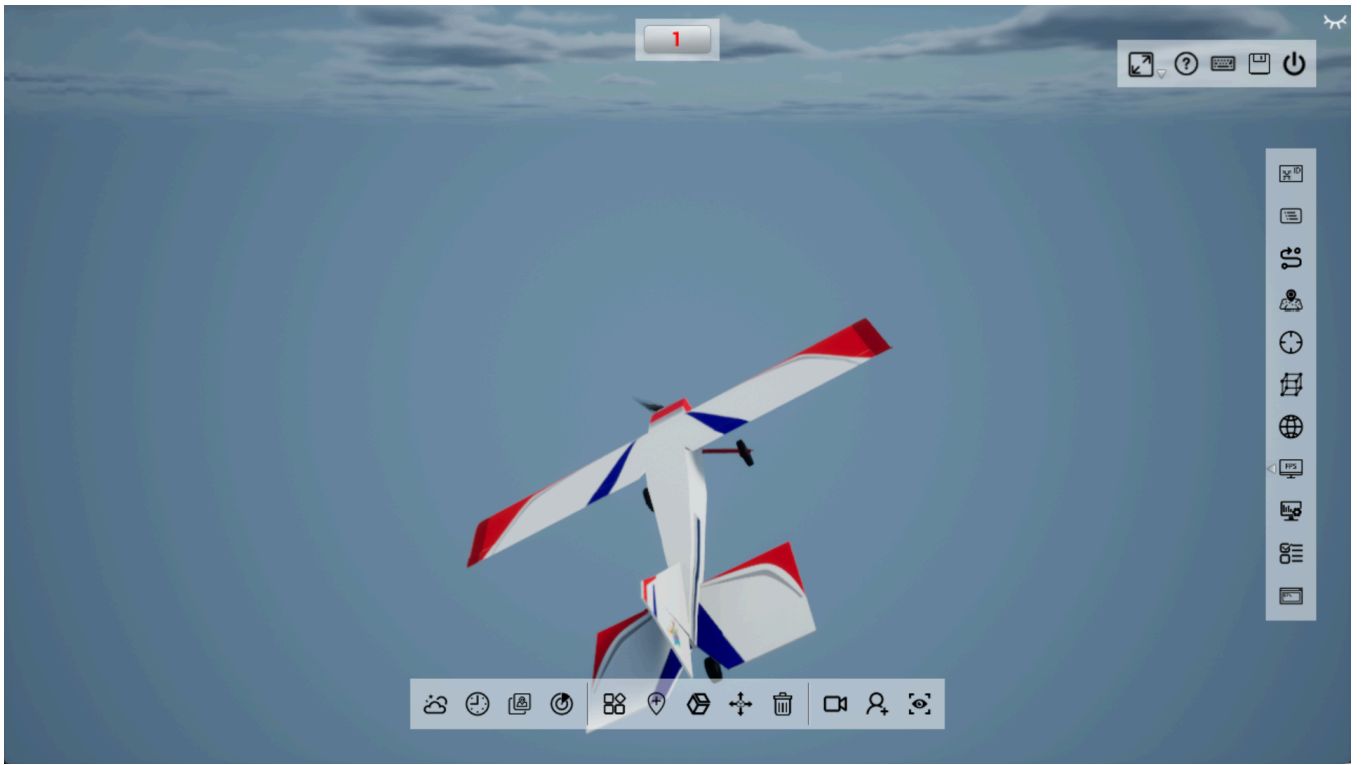


5.2 步骤2：基于矫正器控制的硬件在环仿真实验步骤

1. 使用MATLAB运行InitDatactrl.m,并打开SmallFixedWingUAVattitudeHIL_pitch.slx。



2. 重复步骤1中第2步到第11步。当固定翼无人机达到一定飞行高度后，松开操作杆，固定翼保持平飞状态。



6.参考资料

1. 全权,高文瀚,刘润潇,陈鑫泉,戴训华,吕书礼,徐琳,李悦.微小固定翼无人机飞行控制设计与实践.北京, 2025.

7.常见问题

Q1: 编译过程中出现"Code alignment failed"错误提示怎么办?

A1: 这是由于模型中某些模块的采样时间设置不一致导致的。解决方法是检查模型中所有模块的采样时间设置，确保它们是模型采样时间的整数倍。可以在模型配置参数中统一设置固定步长，或者手动调整各个模块的采样时间。

Q2: HITL仿真中无人机起飞后不稳定，出现剧烈振荡是什么原因?

A2: 首先排查是否是电脑性能问题。再查看PID控制器参数调节。可以尝试减小比例系数(Kp)来降低系统响应速度，同时适当增加微分系数(Kd)来抑制振荡。如果问题依然存在，需要检查传感器数据是否正常，特别是陀螺仪和加速度的数据是否存在噪声干扰。

Q3: QGroundControl无法识别飞控或者连接不稳定怎么解决?

A3: 首先检查USB数据线是否正常工作, 尝试更换数据线或USB接口。确认设备管理器中是否正确识别了飞控设备。如果设备识别正常但连接不稳定, 可能是波特率设置问题, 可以在QGroundControl的通信设置中尝试不同的波特率选项, 通常使用57600或115200。