
1. 实验名称及目的

直升机模型软硬件在环仿真实验：通过该实验熟悉直升机模型软硬件在环仿真操作步骤。

2. 实验原理

软/硬件在环仿真（SIL/HIL）的实现[1][2]

从实现机制的角度分析，可将 RflySim 平台分为运动仿真模型、底层控制器、三维引擎、外部控制四部分。

- **运动仿真模型：**这是模拟飞行器运动的核心部分。在 RflySim 平台中，运动仿真模型是通过 MATLAB/Simulink 开发的，然后通过自动生成的 C++ 代码转化成 DLL（动态链接库）文件。在使用 RflySim 平台进行软硬件在环仿真时，会将 DLL 模型导入到 CopterSim，形成运动仿真模型。这个模型在仿真中负责生成飞行器的运动响应，它拥有多个输入输出接口与底层控制器、三维引擎、地面控制站和外部控制进行数据交互，具体数据链路、通信协议及通信端口号见 [API.pdf 中的通信接口部分](#)。
- **底层控制器：**在软/硬件在环仿真（SIL/HIL）中，真实的飞行控制硬件（如 PX4 飞行控制器）被集成到一个虚拟的飞行环境中。在软件在环仿真（SIL）中，底层控制器（通过 wsl 上的 PX4 仿真环境运行）通过网络通信与运动仿真模型交互数据。在硬件在环仿真（HIL）中，它（将 PX4 固件在真实的飞行控制器（即飞控）硬件上运行）则通过串口通信与运动仿真模型进行数据交互。底层控制器是实际控制飞行器硬件（如电机和传感器）的部分。
- **三维引擎：**这部分负责生成和处理仿真的视觉效果，提供仿真环境的三维视图，使用户能够视觉上跟踪和分析飞行器的运动。
- **外部控制：**从仿真系统外部对飞行器进行的控制，包括自动飞行路径规划、远程控制指令等。在平台例程中主要通过地面控制站（QGC）、MATLAB 和 Python 调用对应接口实现。支持通过 UDP_Full、UDP_Simple、MAVLINK_Full、MAVLINK_Simple 等链接模式，获取无人机的位置、速度、姿态信息，并对无人机的位置、速度、航向进行控制。

机架配置

直升机模型的机架配置在 \PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d\airframes\16001_helicopter 中定义如下：

```
. ${R}etc/init.d/rc.mc_defaults
```

执行 rc.mc_defaults 脚本，它包含了旋翼飞行器的默认参数设置，可以用来设置一些基本的系统参数

```
param set-default MAV_TYPE 4
```

设置了参数 MAV_TYPE 的默认值为 4，在 MAVLink 协议中，MAV_TYPE 参数用于指定飞行器的类型，数值 4 代表直升机。

set PWM_OUT none

PWM（脉冲宽度调制）是飞控系统用来控制电机和舵机的一种信号。设置 PWM 输出为 none 表示这个配置不使用标准的 PWM 输出，这是因为直升机的控制方式与一般的多旋翼不同。

set MIXER blade130

设置了混控器配置为 blade130（一个特定类型的直升机混控器配置）。在 PX4 中，混控器定义了飞控如何控制飞行器的不同电机或舵机。具体混控文件可参考 \PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\mixers\blade130.main.mix，其混控逻辑如下

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0 & -0.8 \\ 0.13054 & 0.1 & 0 & -0.8 \\ 0.13054 & 0.1 & 0 & -0.8 \\ 0 & 0 & 0.1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_c \\ \delta_l \\ \delta_p \\ \delta_t \end{bmatrix}$$

其中，u1,u2,u3 是三个斜盘舵机的输出，u4 是尾舵机的输出，δc,δl,δp,δt 是集体俯仰，横滚，偏航，油门的控制输入。例如，当增加集体俯仰输入时，所有的斜盘舵机都会增加输出，从而提升直升机的升力；当增加横滚输入时，左右两个斜盘舵机的输出会相反变化，从而产生横滚力矩；当增加偏航输入时，尾舵机的输出会增加，从而产生偏航力矩。

3. 实验效果

软硬件在环仿真时，直升机可以顺利完成航线任务，响应航点指令；通过遥控器进行硬件在环仿真时，自稳模式、定高模式和定点模式下直升机均可稳定响应遥控指令。

4. 文件目录

文件夹/文件名称	说明
HeliCopter.dll	直升机模型动态链接库
Helicopter_HITLRun.bat	硬件在环仿真启动脚本
Helicopter_SITLRun.bat	软件在环仿真启动脚本
HIL.params	参数增量文件
px4_fmu-v6c_default.px4	Pixhawk 6C 1.12.3 版本固件

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 平台收费版	Pixhawk6C ^②	1
3	MATLAB 2017B 及以上 ^③	数据线	1
4	\	遥控器及接收机	

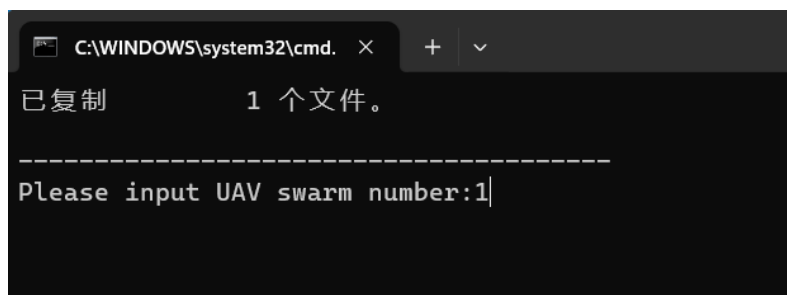
- ①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com>
- ②：平台安装时的推荐编译命令为：px4_fmu-v6c_default，PX4 固件版本为：1.12.3。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>。

6. 实验步骤

6.1. 软件在环仿真

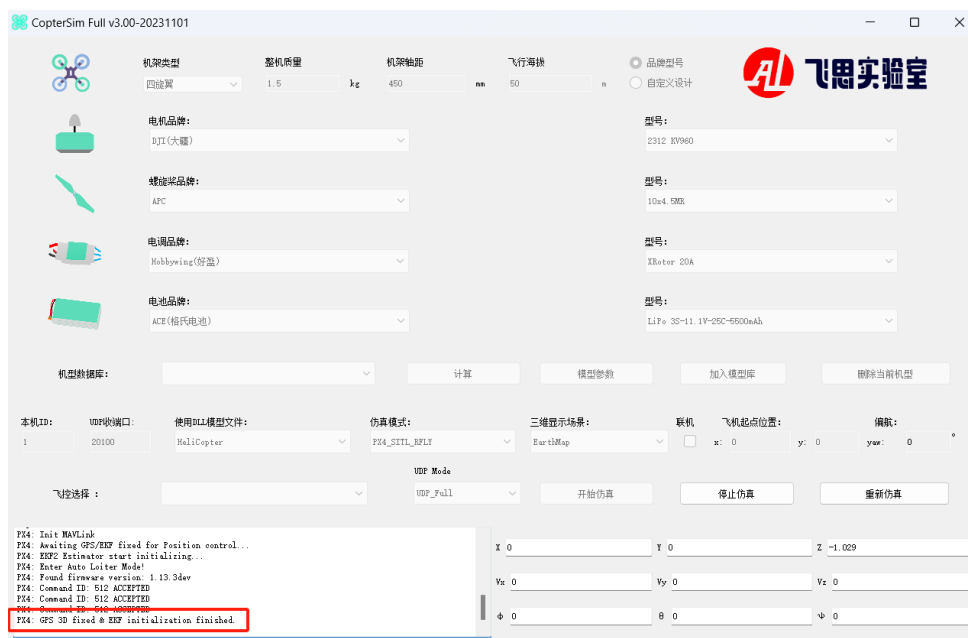
Step 1:

以管理员身份运行 Helicopter_SITLRun.bat，输入 1 后回车启动 1 架直升机的软件在环仿真。



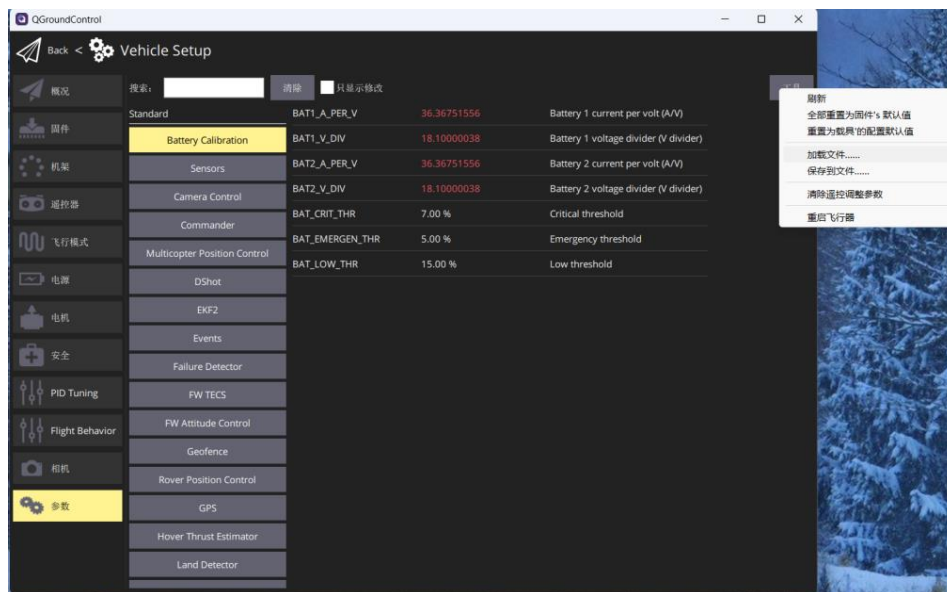
Step 2:

CopterSim 右下角显示以下信息时，表明仿真初始化完成。

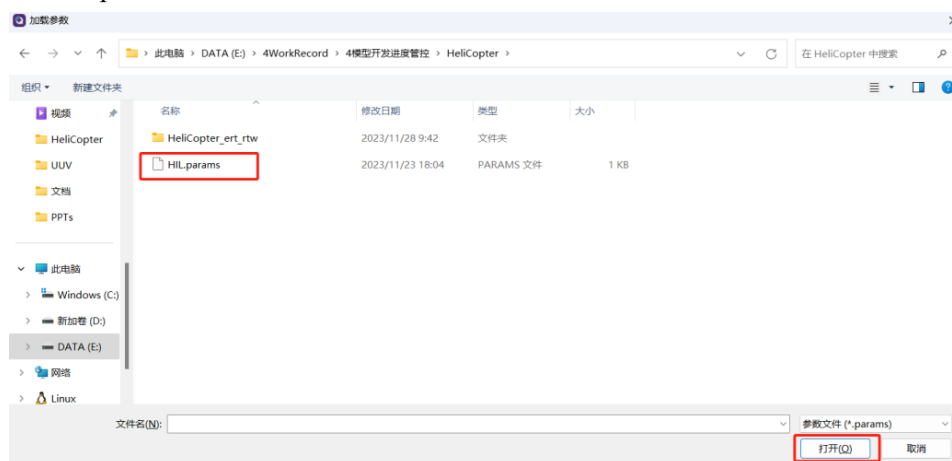


Step 3:

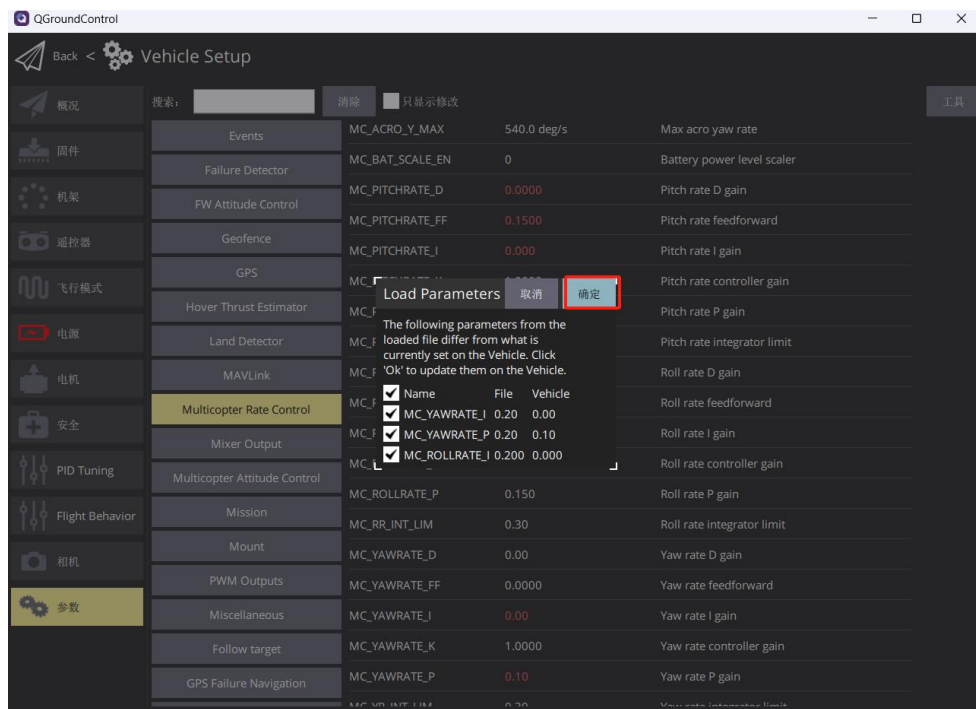
选择“参数”，点击“工具”，选择“加载文件”。



选择“HIL.params”，点击打开。

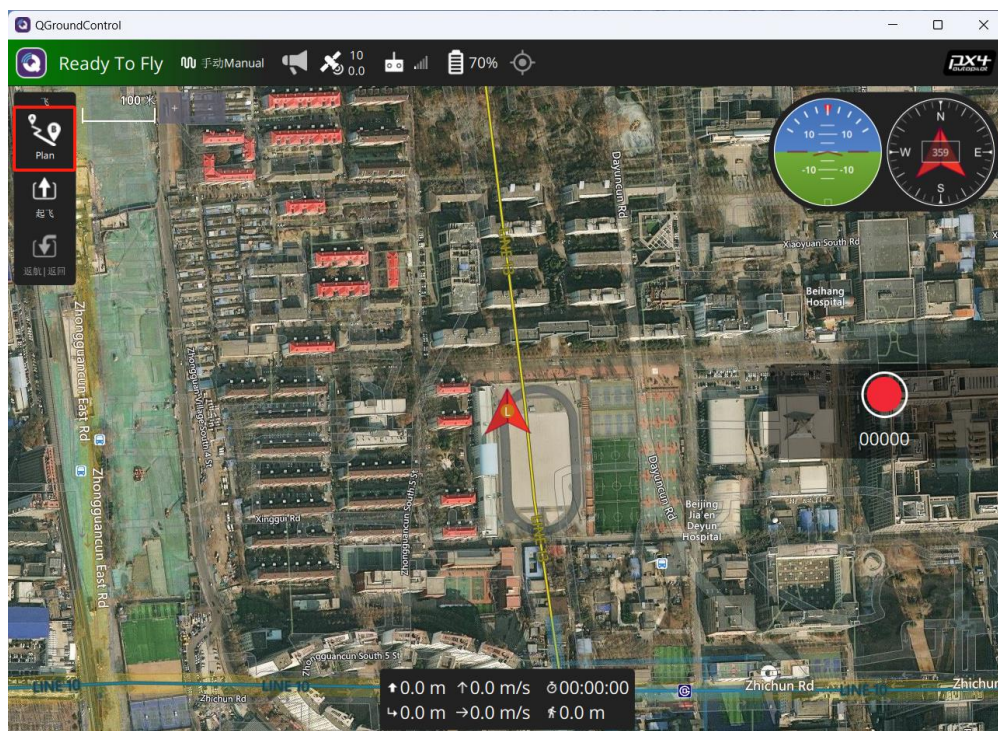


点击“确定”。

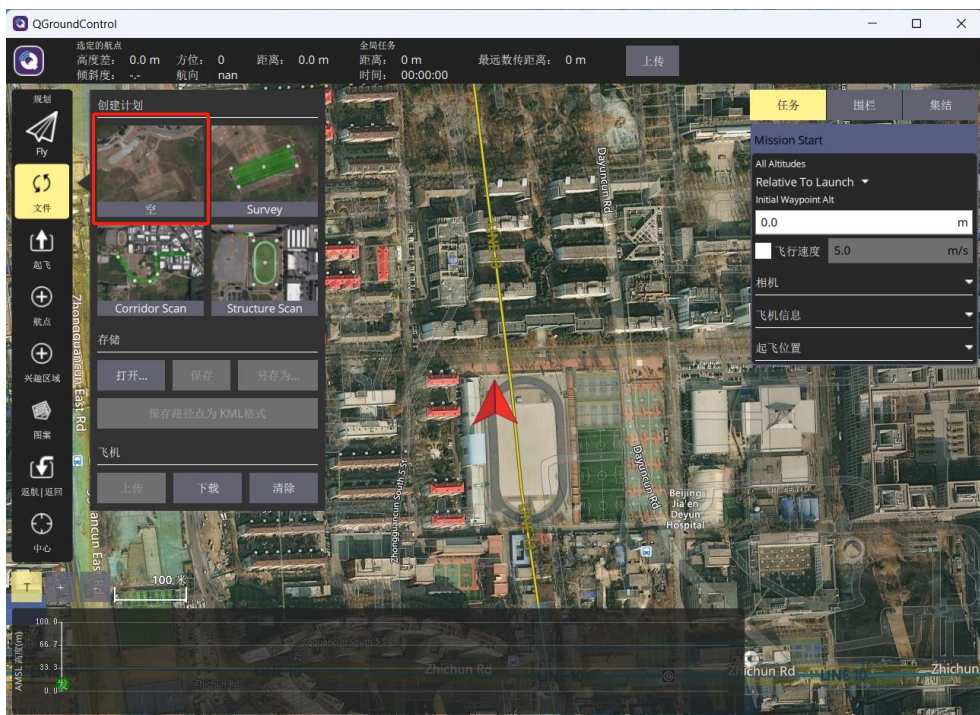


Step 4:

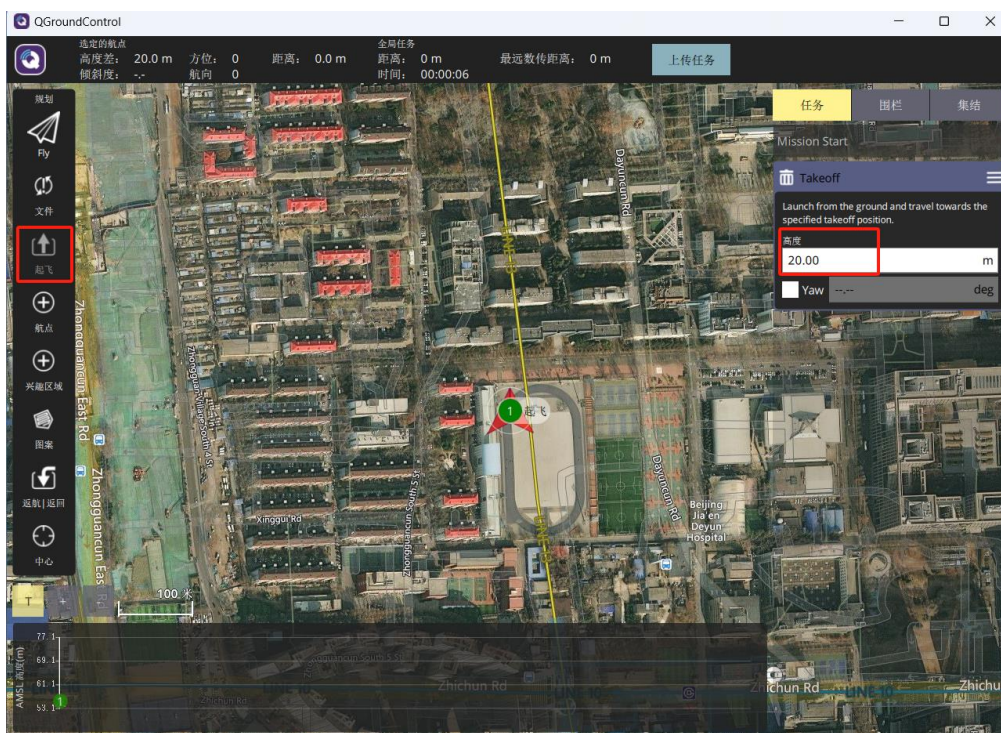
点击右上角“Plan”，进入航线规划页面。



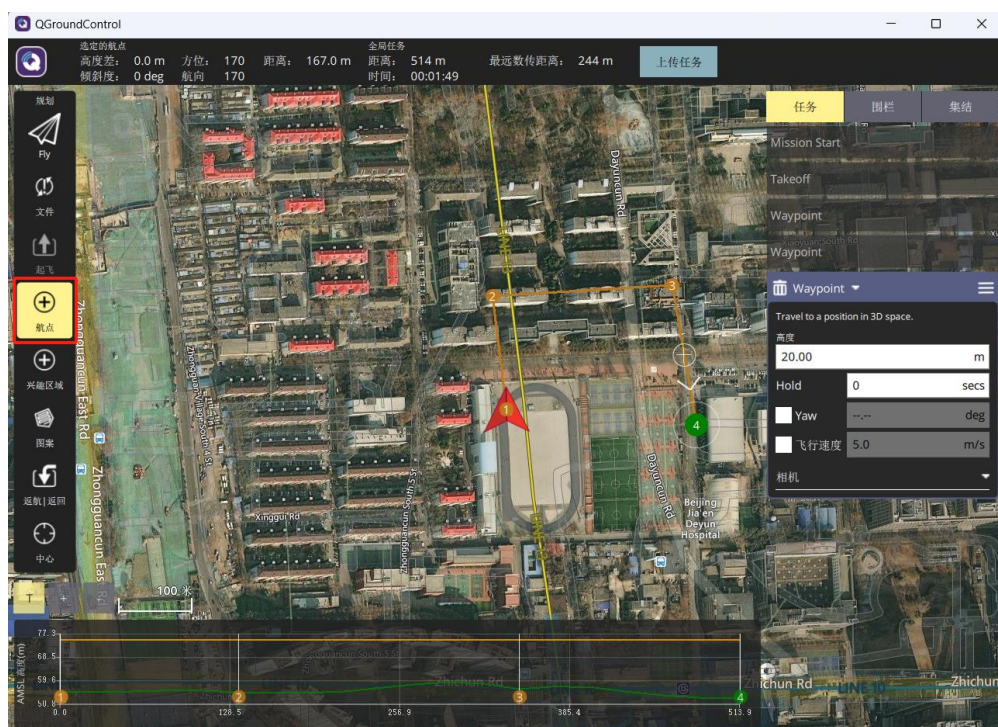
点击“空”。



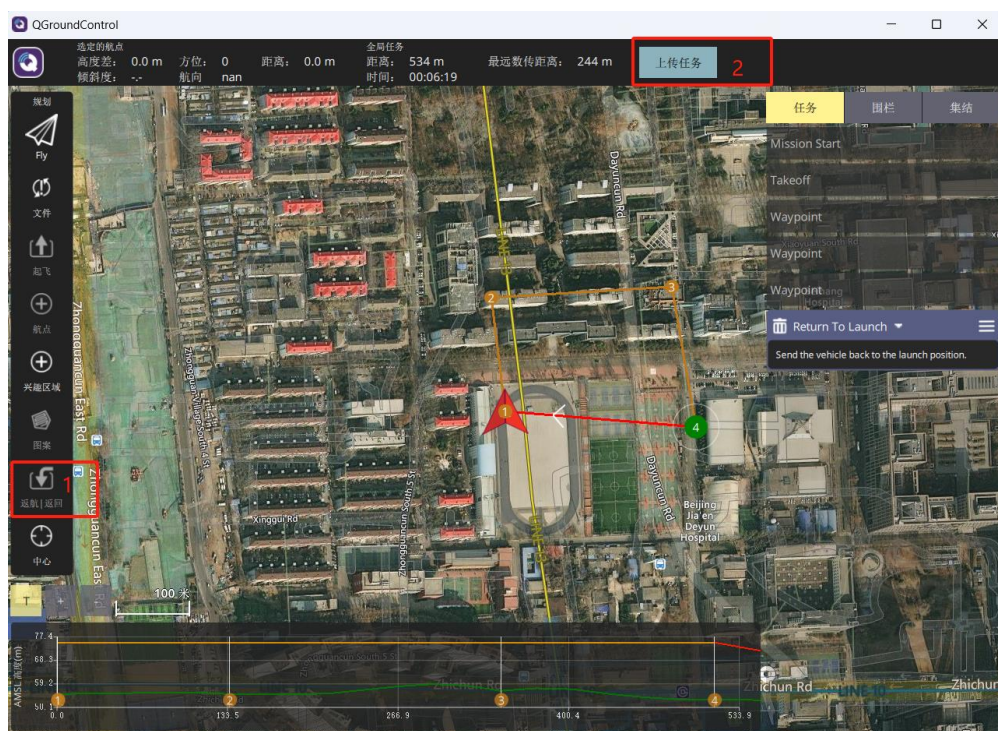
点击“起飞”，在右侧设置起飞高度。



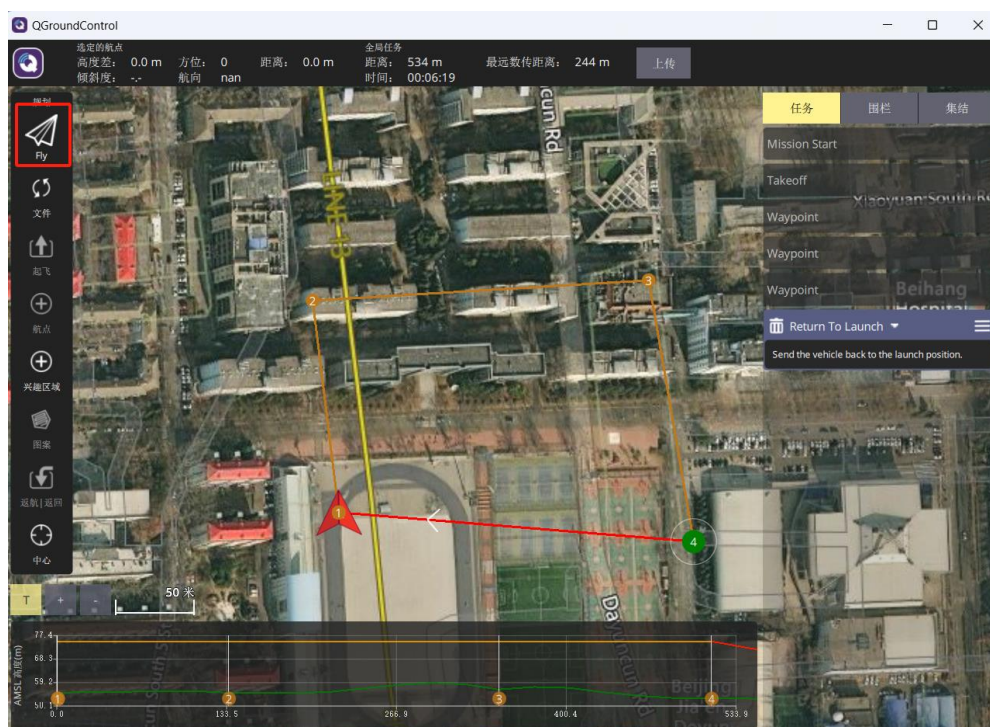
点击“航点”，随机设置几个航点。



点击“返航|返回”，并点击上方“上传任务”。



点击“Fly”，回到主界面。

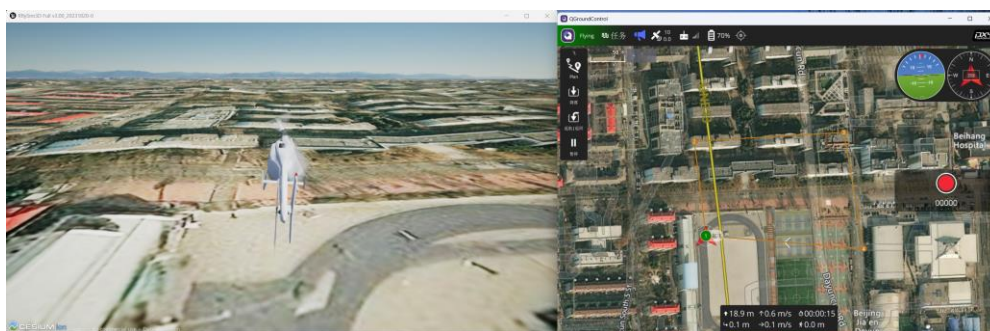


拖动滑块，开始航线任务。

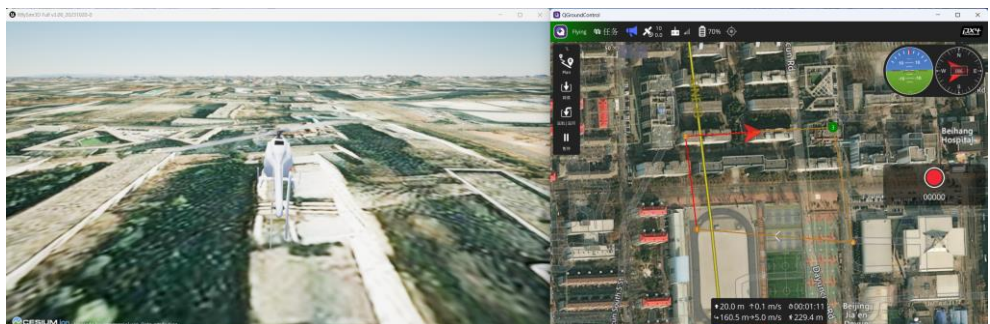
Step 5:

在 RflySim3D 和 QGC 中观察是否按航线执行飞行任务。

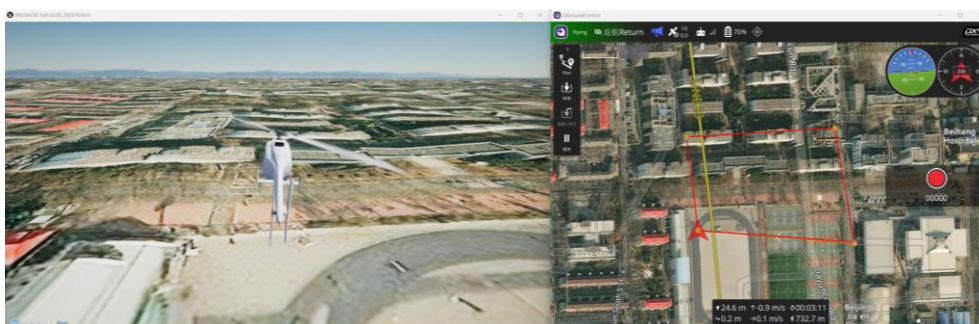
起飞中:



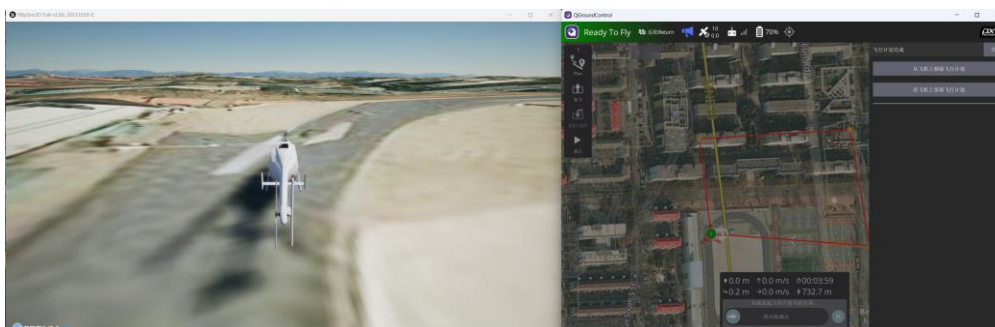
按航点前飞:



降落中:



着陆：



6.2. 硬件在环仿真—QGC 控制















Step 1:

在硬件在环仿真前,首先需要完成相关硬件的配置工作。其中飞控推荐使用 Pixhawk 6C, 固件版本使用 1.12.3 (或 1.13.3)。

通过 USB-TypeC 线连接飞控与电脑。

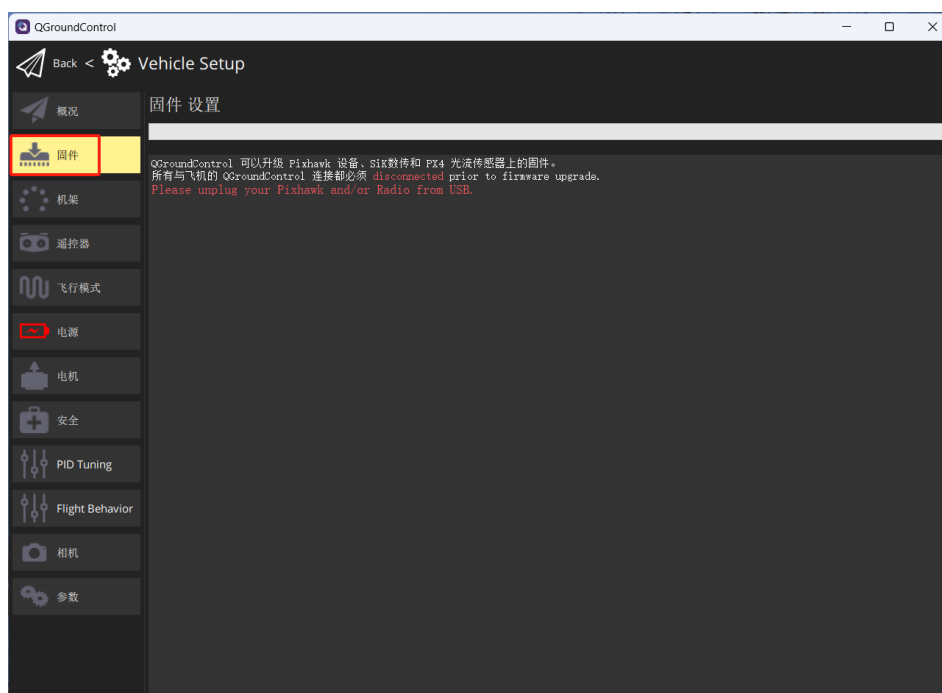


在桌面的 RflyTools 文件夹中打开 QGroundControl。

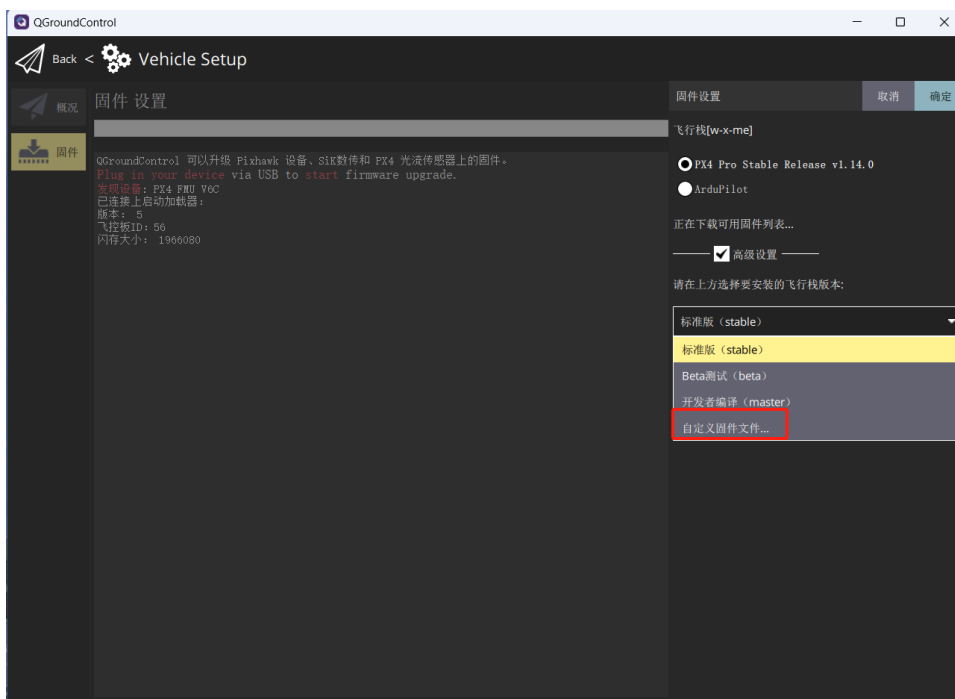
	3DDisplay	2023/11/8 12:56	快捷方式	1 KB
	CopterSim	2023/11/9 16:13	快捷方式	1 KB
	FlightGear-F450	2023/11/8 12:56	快捷方式	2 KB
	HITLRun	2023/11/13 9:43	快捷方式	2 KB
	HowToUse	2023/11/9 16:13	快捷方式	1 KB
	PPTs	2023/9/12 14:05	快捷方式	1 KB
	Python38Env	2023/11/13 9:43	快捷方式	2 KB
	QGroundControl	2023/11/13 9:43	快捷方式	1 KB
	rflsim.com	2022/11/30 13:12	Internet 快捷方式	1 KB
	RflySim3D	2023/11/9 16:13	快捷方式	1 KB
	RflySimAPIs	2023/11/13 9:43	快捷方式	1 KB
	RflySimUE5	2023/11/9 16:13	快捷方式	1 KB
	SITLRun	2023/11/13 9:43	快捷方式	2 KB
	Win10WSL	2023/11/9 18:14	快捷方式	2 KB

Step 2:

点击左上角，进入“固件”设置页面，重新插拔飞控。

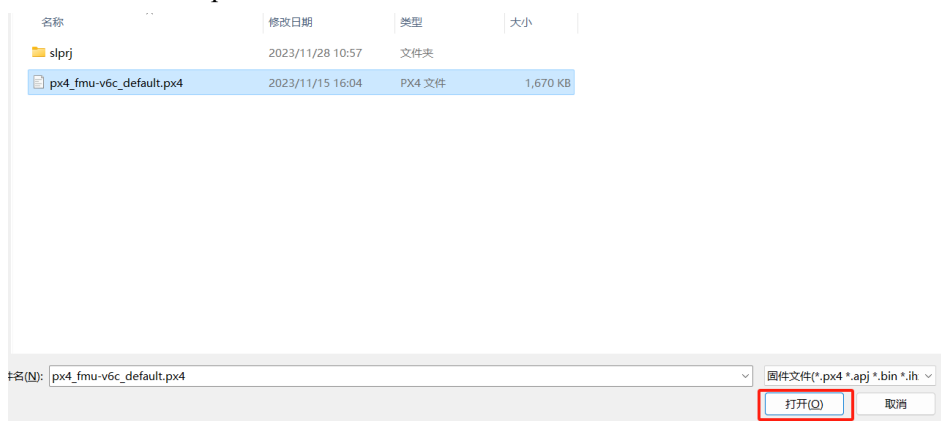


点击“高级设置”，下拉选择“自定义固件”选项后点击右上角“确定”。



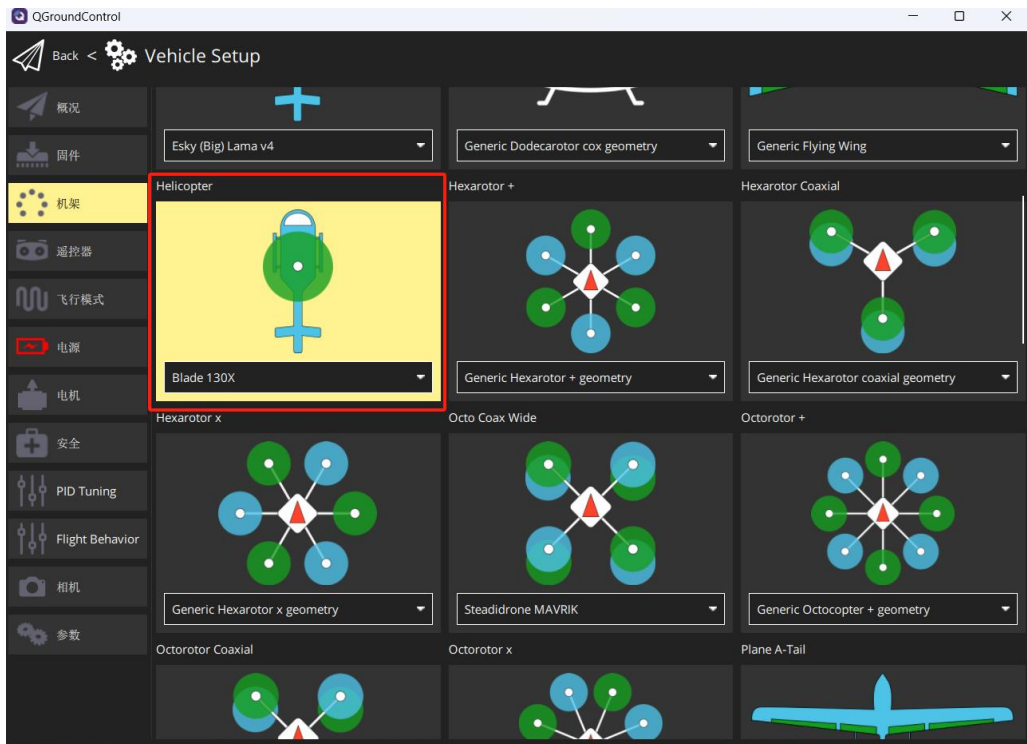
Step 3:

选择文件夹中的.px4 文件，点击打开，开始固件烧录。



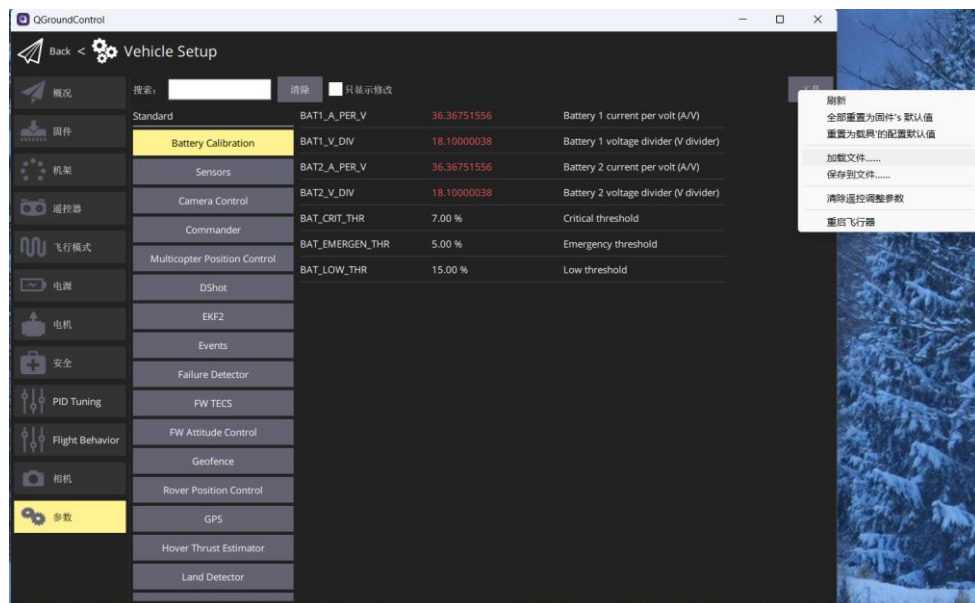
Step 4:

点击“机架”，选择“Blade 130X”，点击右上角“应用并重启”。

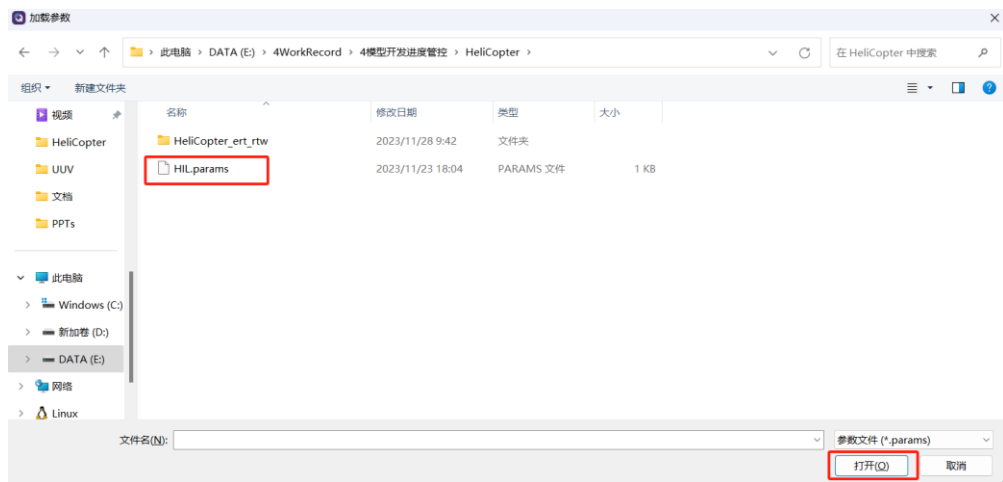


Step 5:

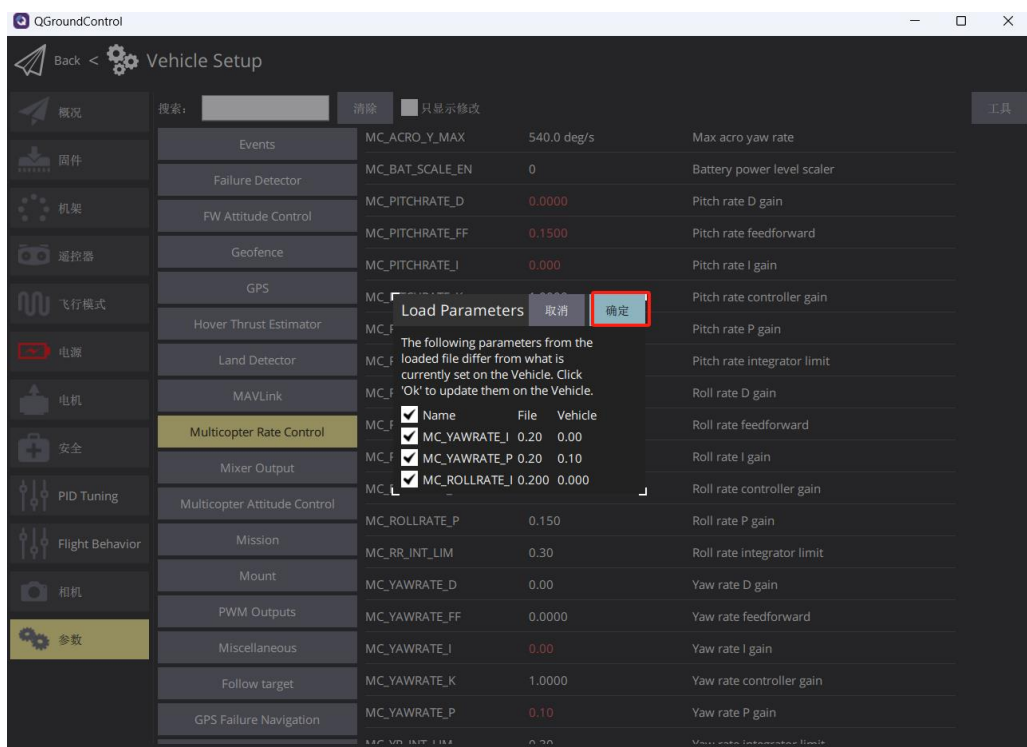
选择“参数”，点击“工具”，选择“加载文件”。



选择“HIL.params”，点击打开。

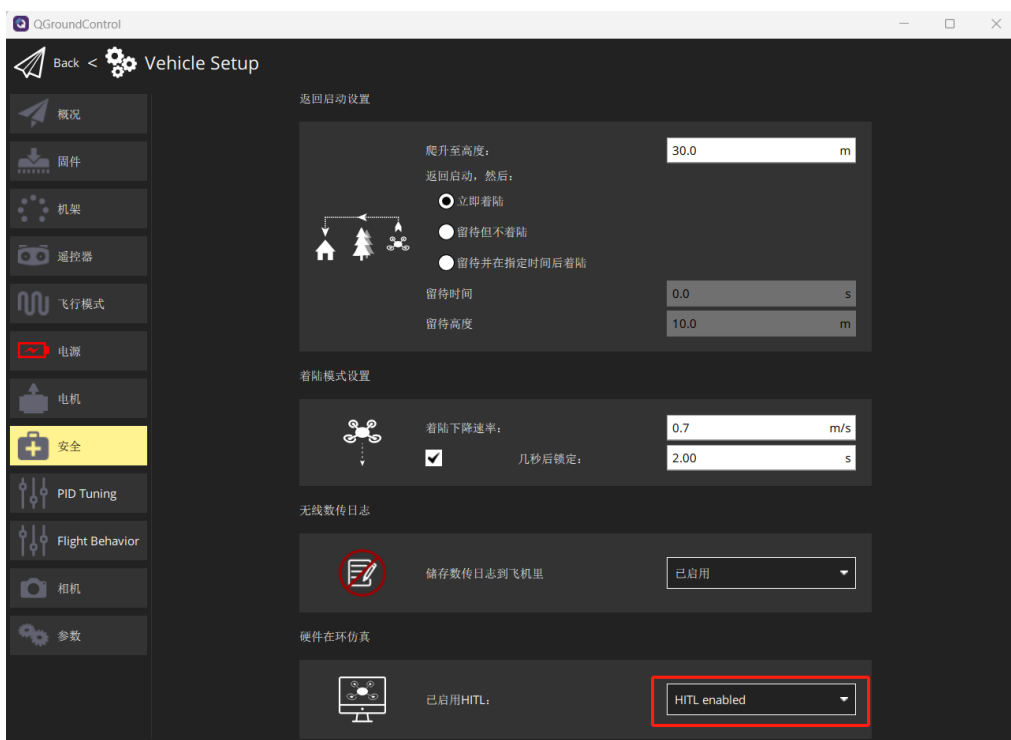


点击“确定”。



Step 6:

点击“安全”，设置硬件在环仿真选项为“HITL enabled”，重新插拔飞控。

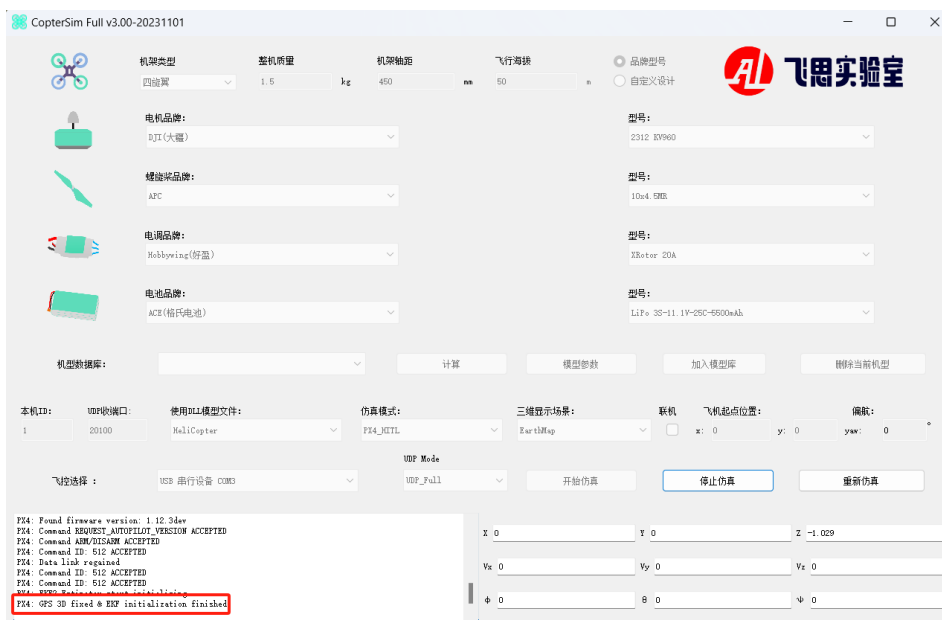


Step 7:

运行 Helicopter_HITLRun.bat, 在弹出窗口中输入飞控端口号, 启动飞控硬件在环仿真。

Step 8:

CopterSim 右下角显示以下信息时, 表明仿真初始化完成。



Step 9:

航线任务上传步骤参考 6.1 Step 4。

Step 10:

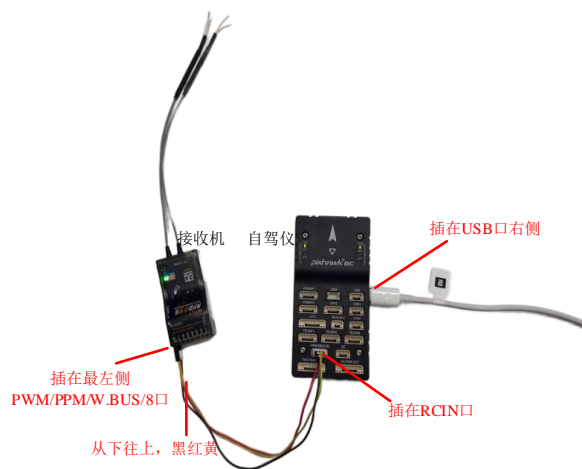
仿真效果和 6.1 Step 5 一致。

6.3. 硬件在环仿真—遥控器控制

Step 1:

遥控器控制飞控配置与 QGC 配置一致，参考 5.2 Step 1 – Step 6。

按如下图所示连接接收机和 Pixhawk 6C 飞控。



Step 2:

通电后，长按接收机上的 SET3 秒，橙灯慢闪，等待发射机对码指令。然后，点击遥控器界面中左上角“WFLY”的图标，点击“通信设置”，点击“对码”。对码成功后，接收机绿灯常亮，发射机 RF 灯常亮。



Step 3:

点击待机界面中的“WFLY”，进入“系统设置”，确认“摇杆模式”为“模式 2”



Step 4:

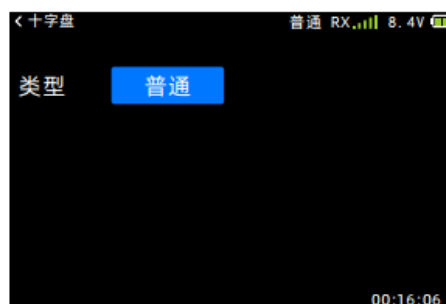
设置直升机模型：在“WFLY”→“系统设置”→“模型选择”中选择“Model11”。



“机型选择”设置为“直升机”。



在“模型功能”→“十字盘设置”中设置为“普通”类型。



将辅助通道设置如下



Step 5:

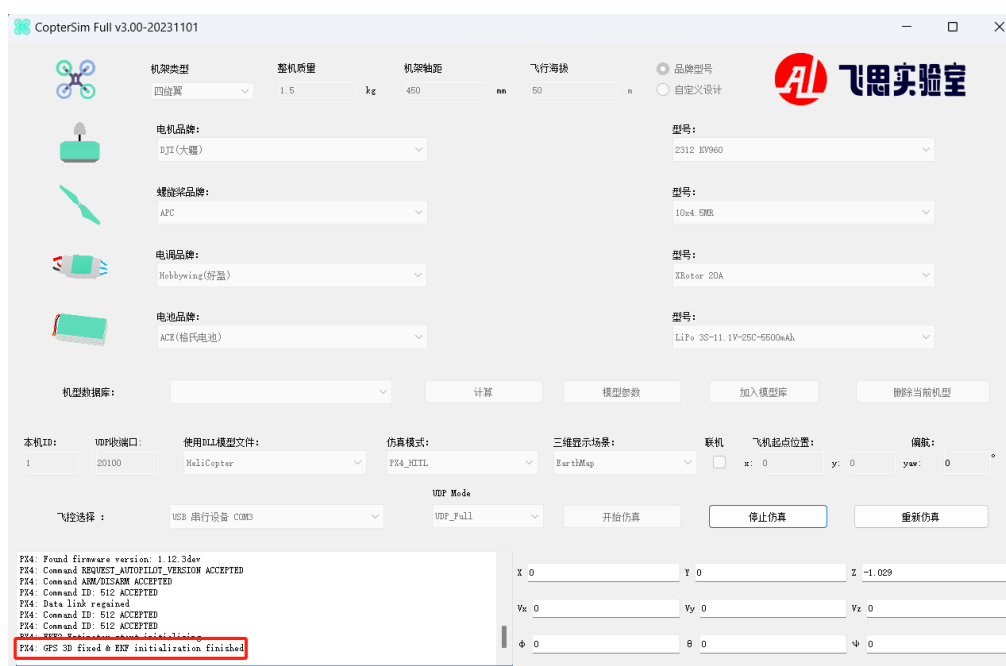
其他遥控器配置参考“*:\PX4PSP\RflySimAPIs\2.RflySimUsage\1.BasicExps\c11_RC-Config\Readme.pdf”，需要完成遥控器校准以及飞行模式。

Step 6:

运行 Helicopter_HITLRun.bat, 在弹出窗口中输入飞控端口号, 启动飞控硬件在环仿真。

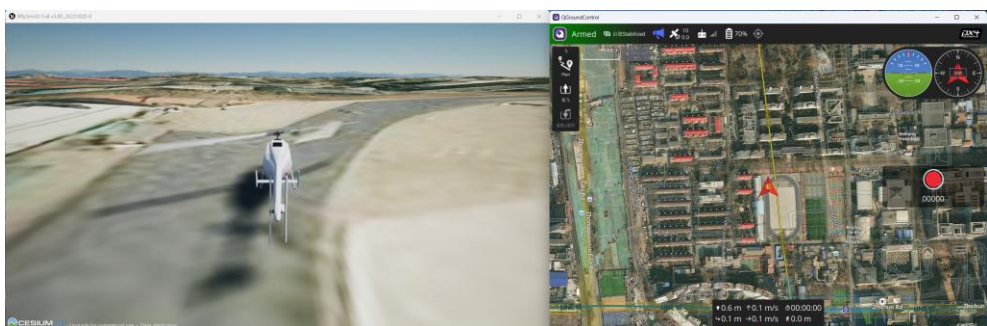
Step 7:

CopterSim 右下角显示以下信息时, 表明仿真初始化完成, 可以通过遥控器开始硬件在环仿真。



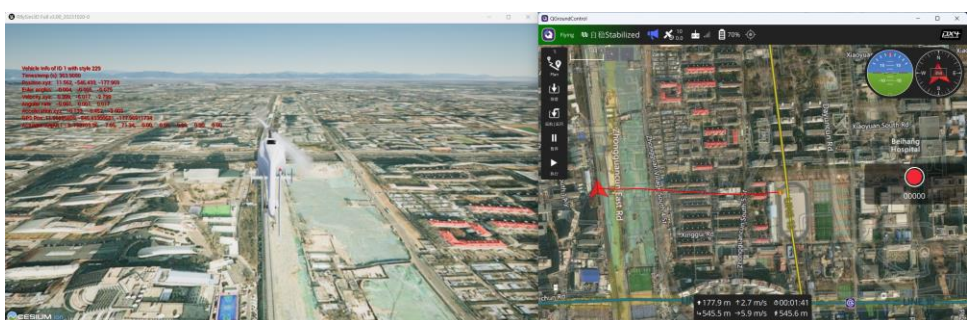
Step 8:

拨动转换开关, 解锁飞机。



自稳模式：

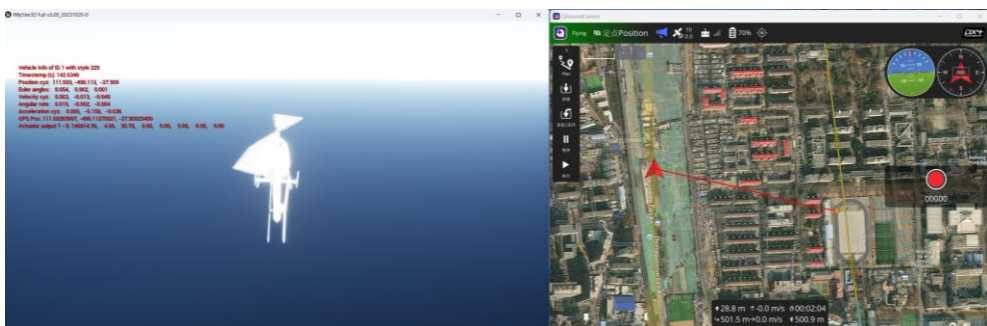
在油门 60%左右时，可以维持姿态稳定。可以通过操作左右摇杆控制直升机姿态和油门。



定高模式：

在 52%左右油门时，可以定住高度。

定点模式：



7. 参考资料

- [1]. DLL/SO 模型与通信接口 [..\..\API.pdf](#)
- [2]. 外部控制接口 [..\..\API.pdf](#)

8. 常见问题

Q1.

A1.