

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

基于系统模板的直升机模型验证（软硬件在环仿真实验）

1.2 实验目的

通过该实验熟悉直升机模型软硬件在环仿真操作步骤。

1.3 关键知识点

软/硬件在环仿真（SIL/HIL）的实现

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。

■ 载具的基本动力学特性

机体坐标系：原点

O_b

位于飞行器的重心；

x

轴（由

x_b

表示）指向飞机正前方，位于飞行器的对称平面内；

y

轴（由

y_b

表示）指向飞机右侧；

z

轴（由

z_b

表示）指向飞机下方。在机体坐标系中表示的坐标向量附加了一个下标

b

。

NED坐标系：原点

O_n

任意固定在地球表面的一点上；

x

轴（由

x_n

表示) 指向大地北;

y

轴 (以

y_n

表示) 大地东;

z

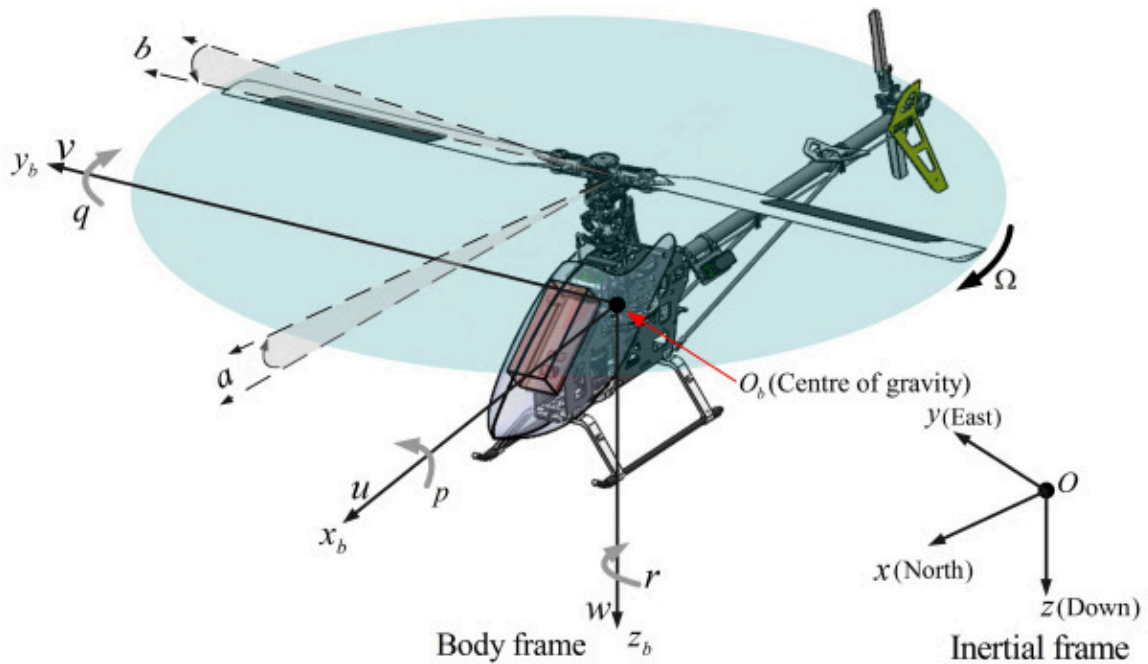
轴 (由

z_n

表示) 沿地球法线向下。在NED标系中表示的坐标向量附加了一个下标

n

。机体坐标系与NED坐标系示意图如图所示。



运动六自由度分解

根据机身受到的总力和力矩 (机体坐标系) 来计算飞机的运动状态 (包括机体系下的速度与加速度、欧拉角、角速度与角加速度; 地球坐标系下的速度、位置; 响应的旋转矩阵)。

运动自由度	坐标轴	运动学分析
前后	前向/后向 (Fore/Aft: x轴)	周期杆向前推，旋翼盘向前倾斜，产生向前的推力，使直升机前进；向后拉周期杆，直升机则后退。
左右	左/右 (Port/Starboard: y轴)	类似于前后运动，通过周期杆的左右移动改变旋翼盘的倾斜方向。
上下	上/下 (Up/Down: z轴)	由总距杆控制，增加总距角（拉起总距杆），旋翼产生更大的升力，直升机上升；降低总距角（推下总距杆），升力减小，直升机下降。
滚转	绕纵轴转动 (Longitudinal Axis: x轴)	周期杆的左右移动。周期杆向左推时，旋翼盘左侧迎角增大，右侧迎角减小，使直升机左倾。
俯仰	绕横轴转动 (Lateral Axis: y轴)	周期杆的前后移动。当周期杆向前推时，旋翼盘前侧迎角减小，后侧迎角增大，直升机机头下倾（俯冲）。
偏航	绕垂直轴转动 (Vertical Axis: z轴)	主要由尾旋翼或类似装置（如共轴直升机的对转旋翼）控制。改变尾旋翼的推力可以改变直升机的偏航角度。

■ 载具的控制通道映射

通过混控将归一化的期望力和力矩信号映射到归一化的PWM指令，再根据PWM指令计算出实际的执行器响应。下面结合PX4的混控规则介绍控制通道如何映射到载具模型的执行器输入。

■ PX4机架对应的混控器

[添加一个新的机型 | PX4 自动驾驶用户指南](#)

- 详细的PX4机架文件配置参考 ([v1.12](#))

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。

混控通道对应的执行器

[混控器和执行器 | PX4 自动驾驶用户指南](#)

- 详细的PX4混控文件逻辑见：[\(v1.12\)](#)
- 详细的映射过程可参考：[PX4混控器相关知识梳理-CSDN博客](#)

本例程中直升机的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， u_1, u_2, u_3 是三个斜盘舵机的输出， u_4 是尾舵机的输出， $\delta_c, \delta_l, \delta_p, \delta_t$ 是集体俯仰，横滚，偏航，油门的控制输入。例如，当增加俯仰输入时，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。

2. 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。

3. 文件目录

例程目录：

[安装目录]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e8_Helicopter\1.HeliCopterModel Ctrl

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

4. 运行环境

4.1 软件要求

Windows 10及以上版本；RflySim工具链；MATLAB 2017B及以上③；\。

①：若使用Pixhawk 6X飞控，平台安装时的编译命令为：px4_fmU-v6x_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://rflsim.com/doc/zh/1/Hardware.html>

4.2 硬件要求

笔记本/台式电脑① 1台；Pixhawk 6X或其它飞控② 1台；数据线 1台。

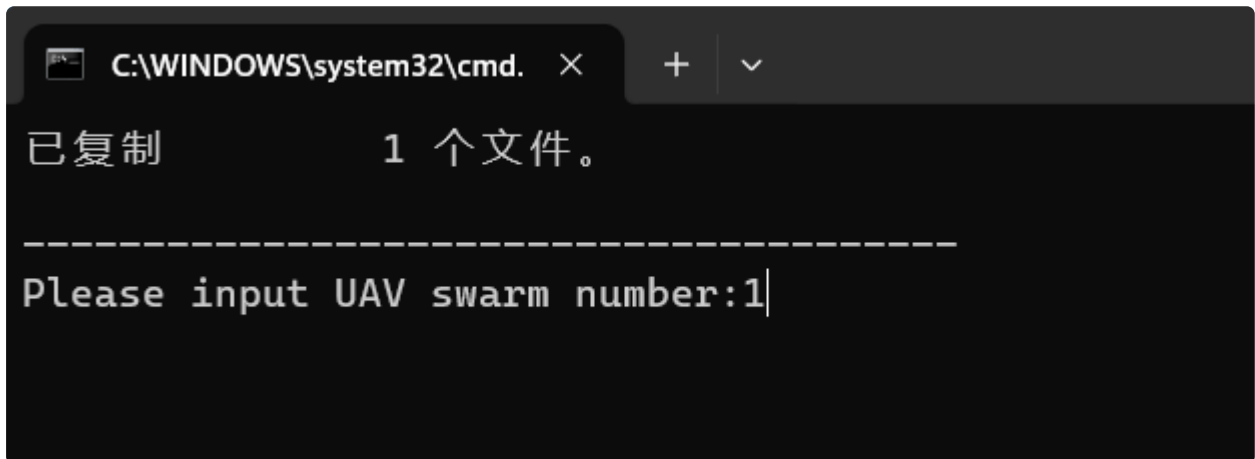
①：推荐配置请见：<https://rflsim.com/>

5. 实验步骤

5.1. 必做实验：软件在环仿真

Step 1: 启动仿真

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。



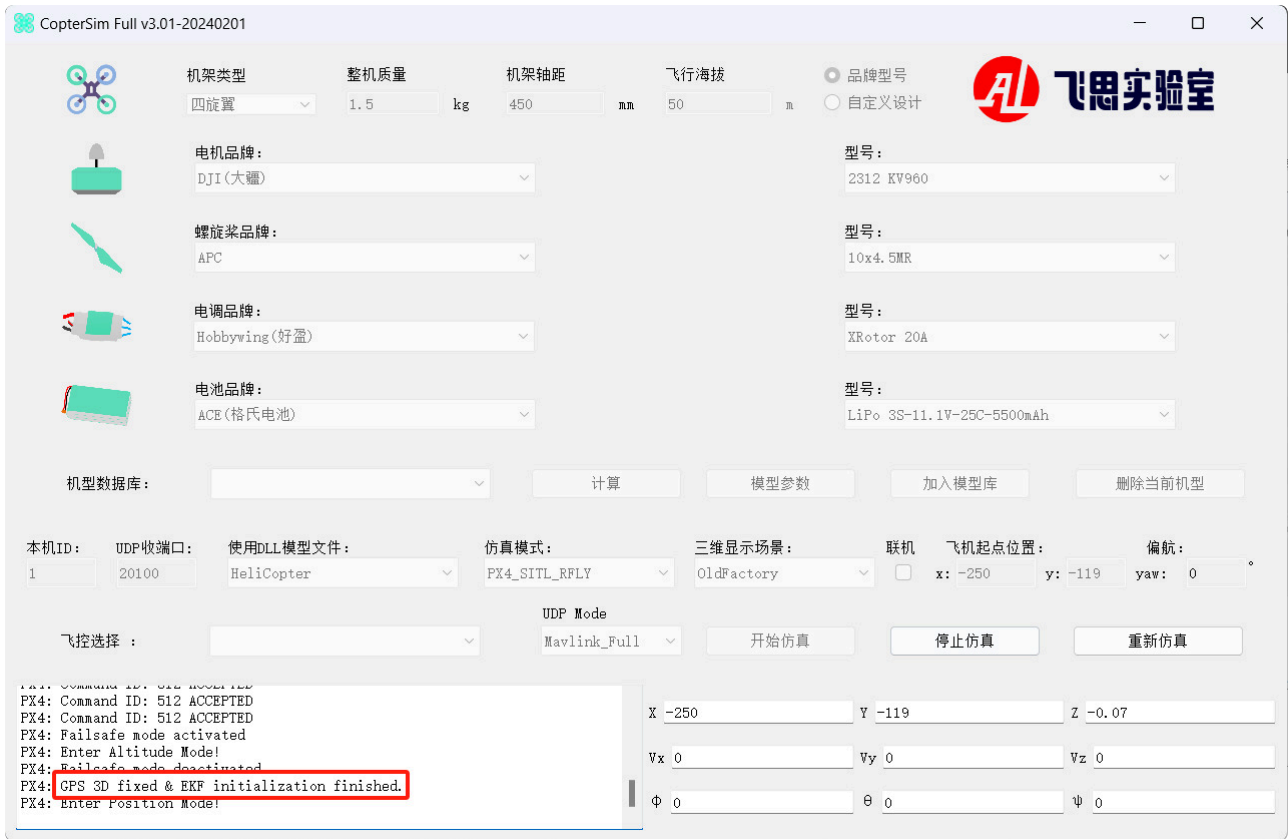
```
C:\WINDOWS\system32\cmd. x + v
已复制      1 个文件。
-----
Please input UAV swarm number:1|
```

注意，在脚本文件中确定机架为直升机对应的机架类型：

```
REM Set the vehicle-model (airframe) of PX4 SITL simulation, the default airframe is a quadcopter: iris
REM Check folder Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d-posix (or init.d/airframes) for supported airframes
REM E.g., fixed-wing aircraft: PX4SITLFrame=plane; small cars: PX4SITLFrame=rover
set PX4SITLFrame=helicopter
```

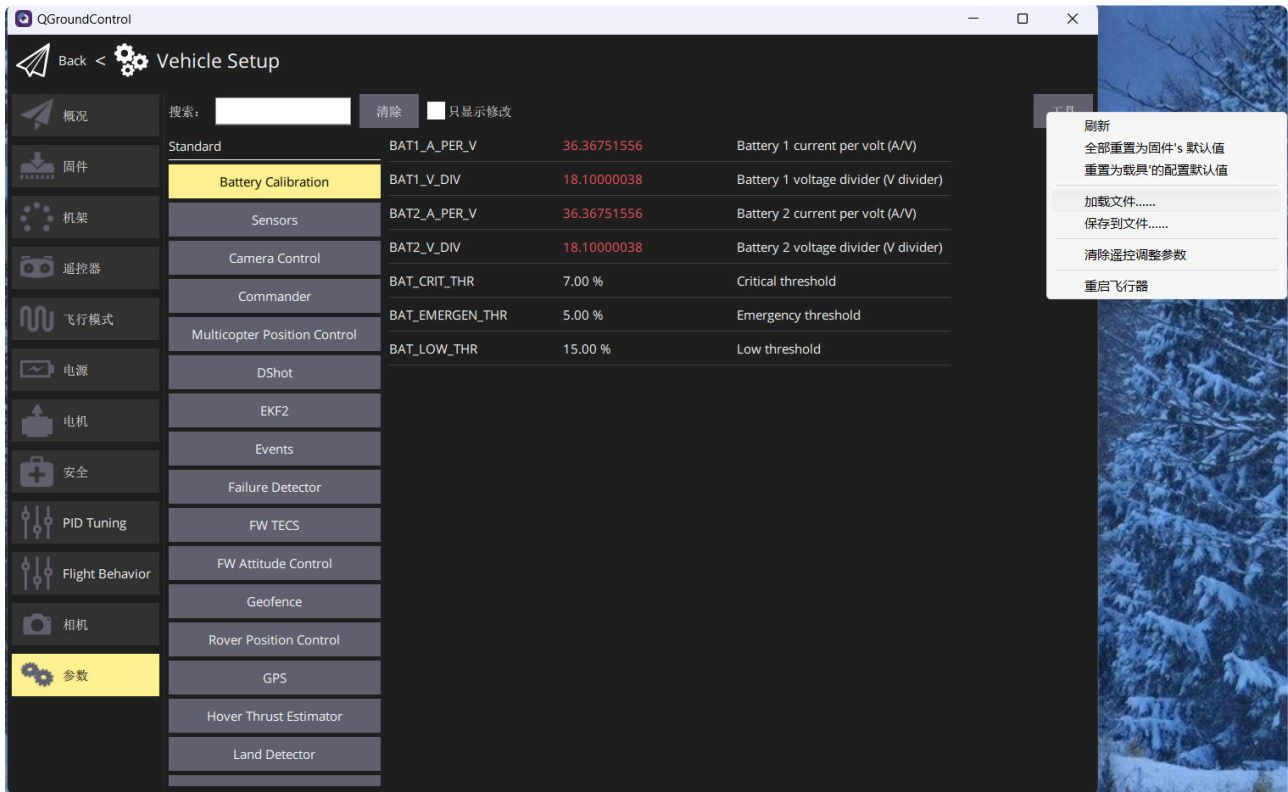
Step 2: 等待初始化完成

CopterSim右下角显示以下信息时，表明仿真初始化完成。

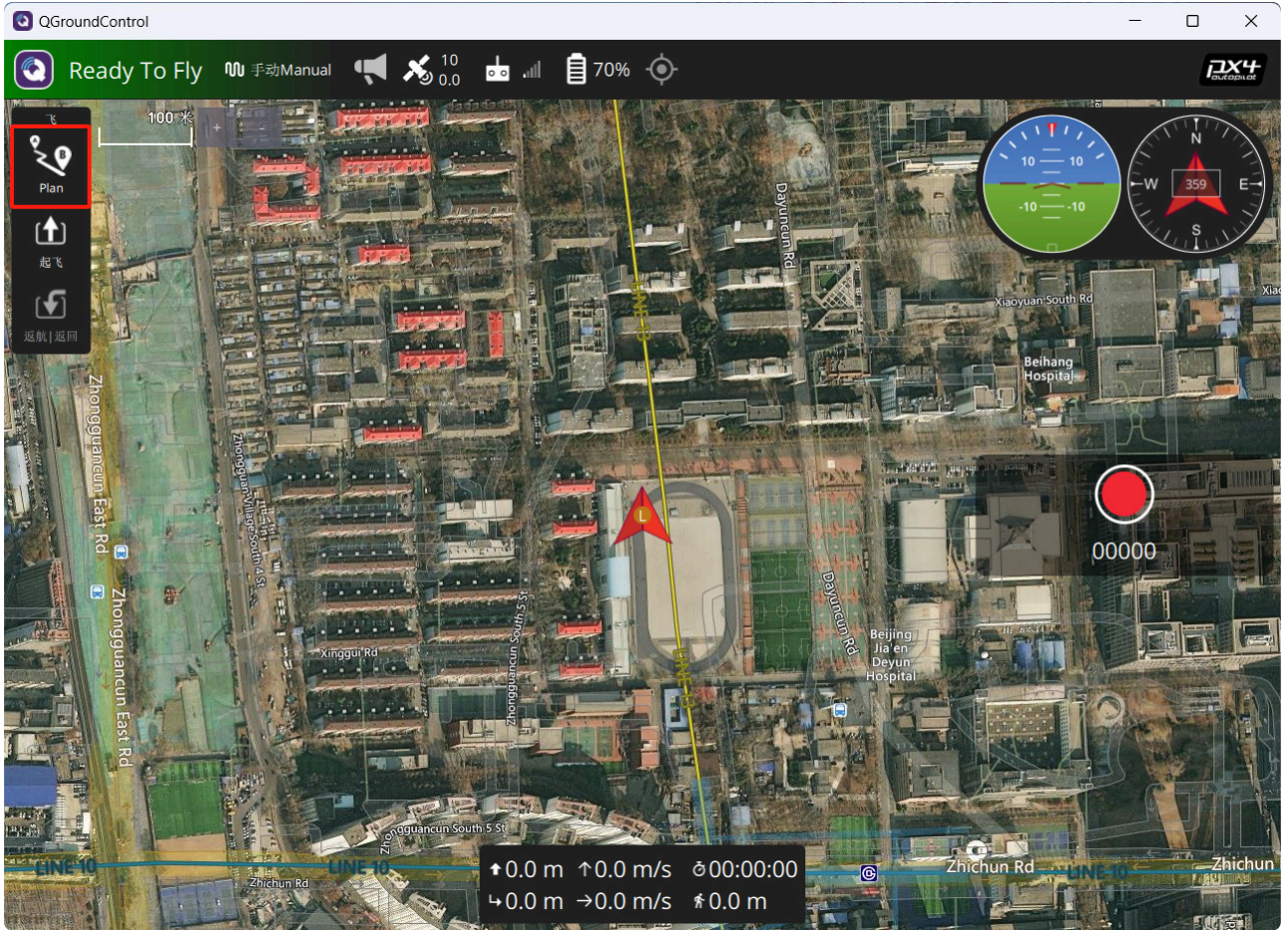


Step 3: 配置调谐参数

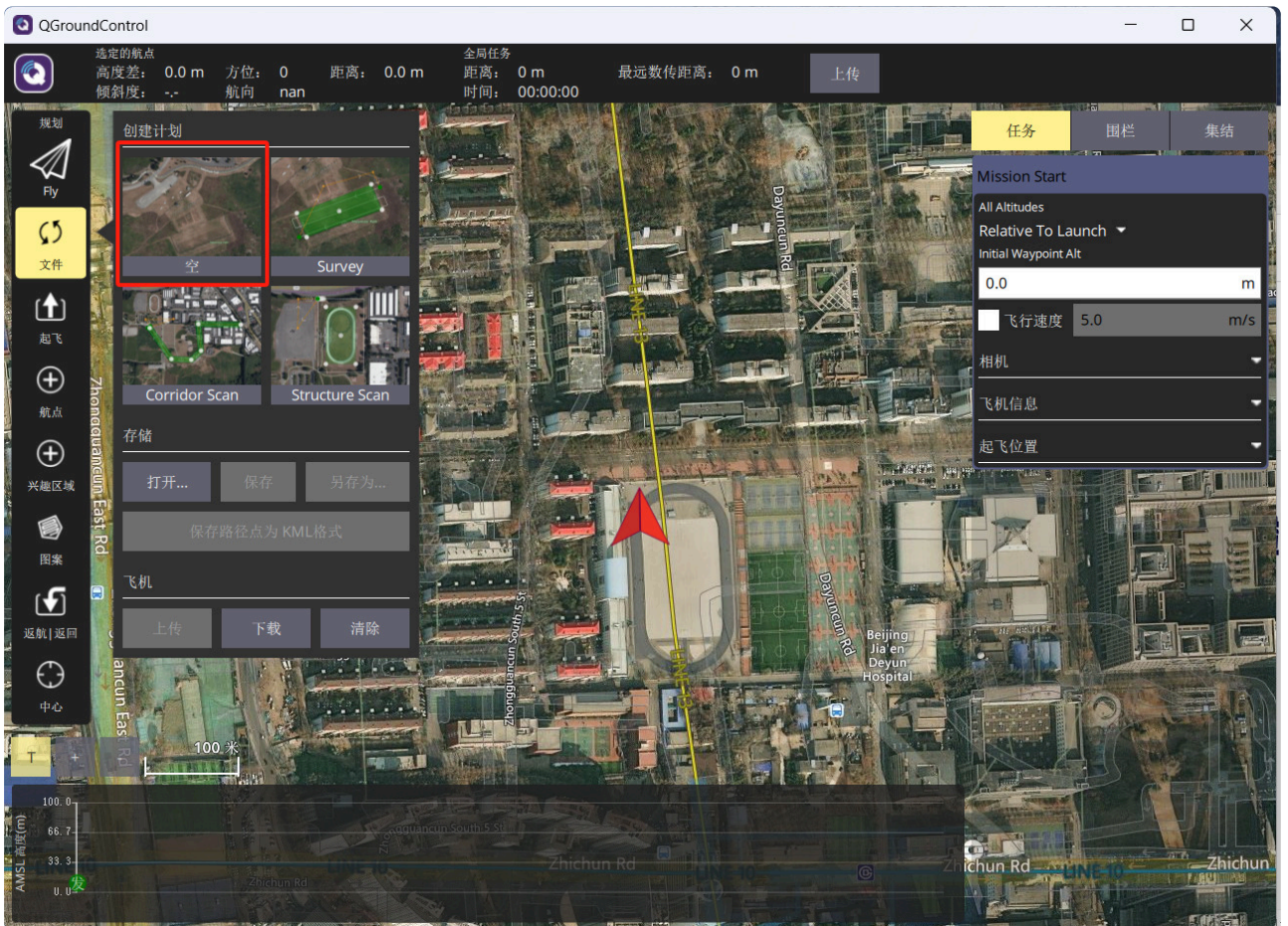
选择“参数”，点击“工具”，选择“加载文件”。



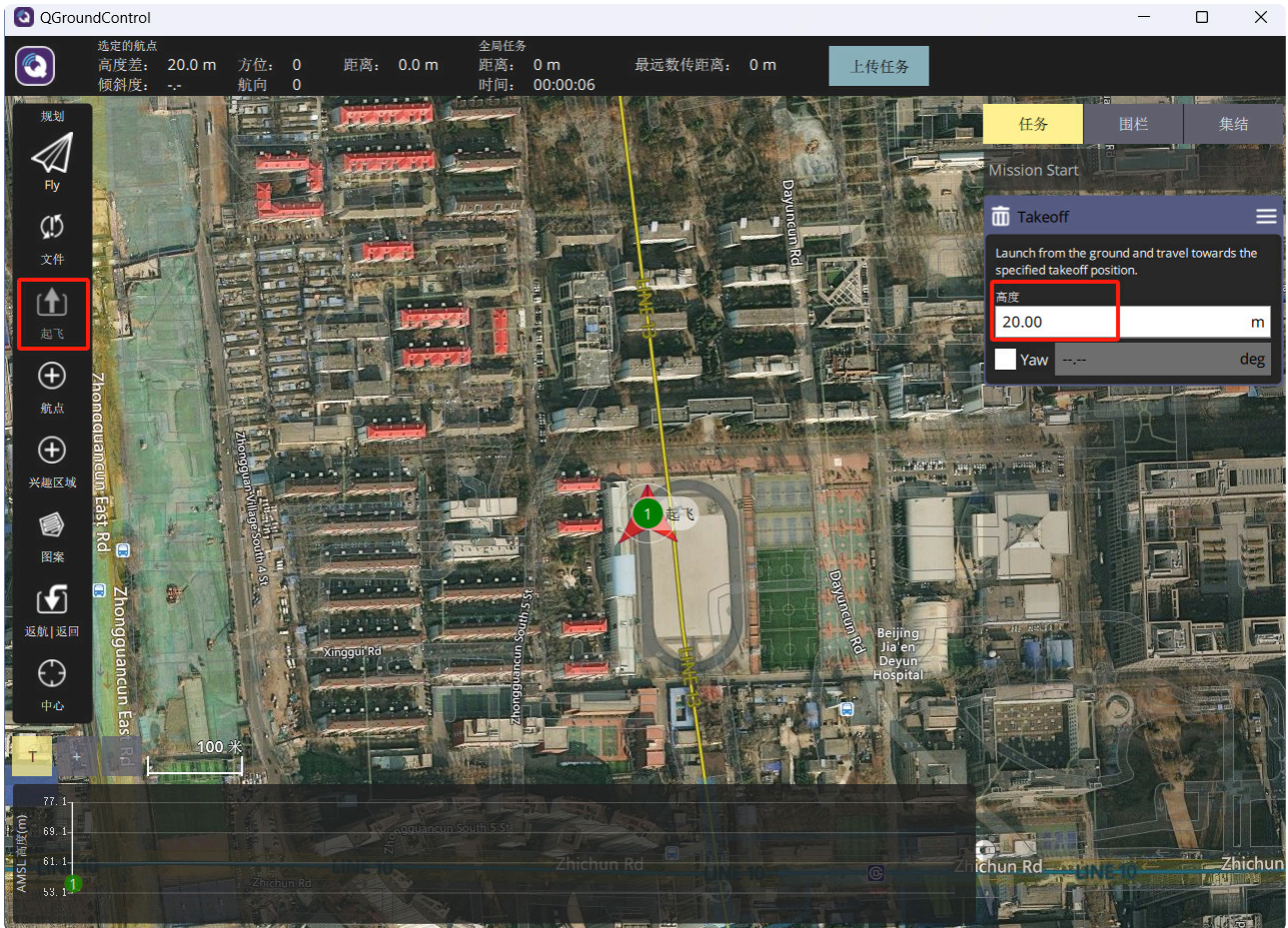
选择“HIL.params”，点击打开。



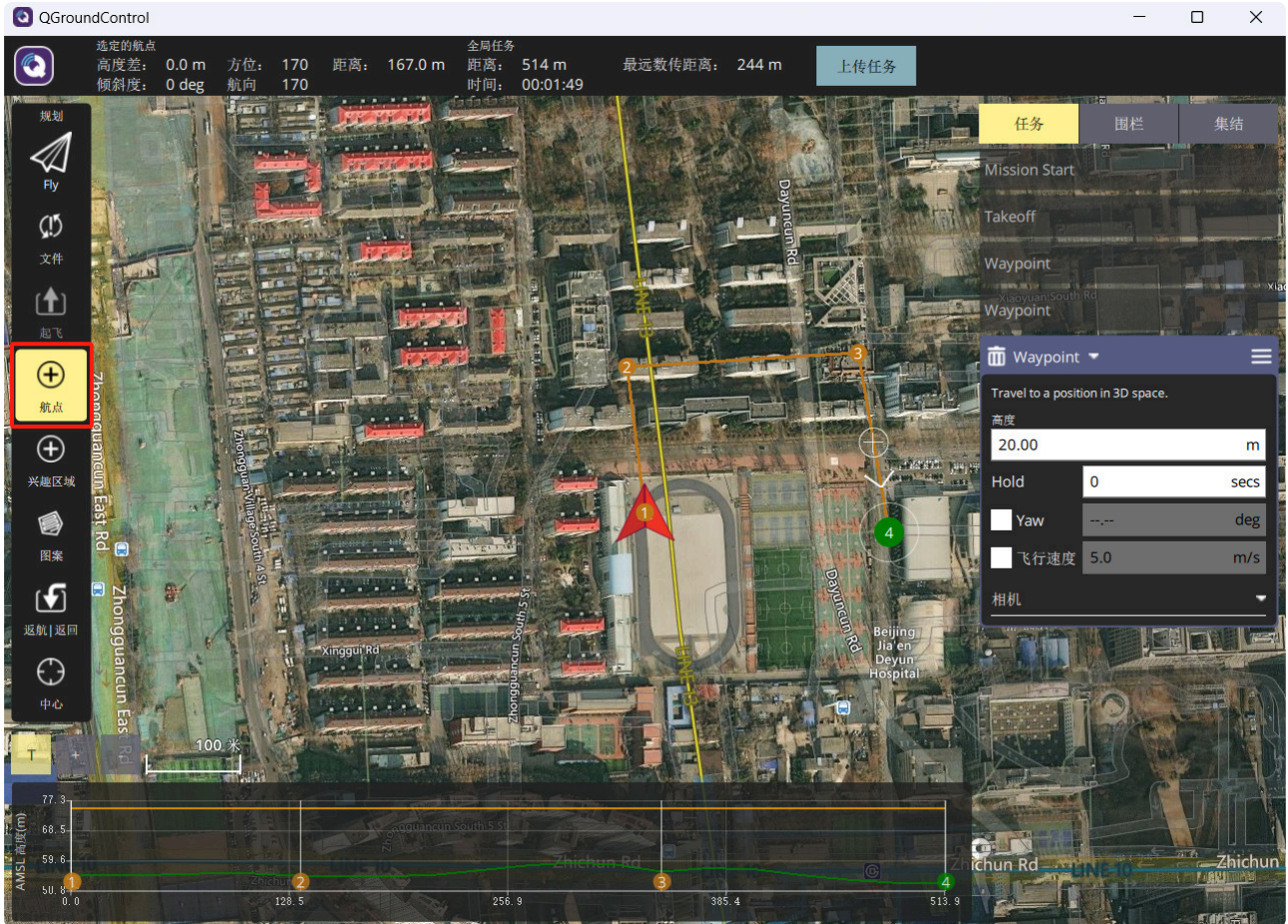
点击“空”。



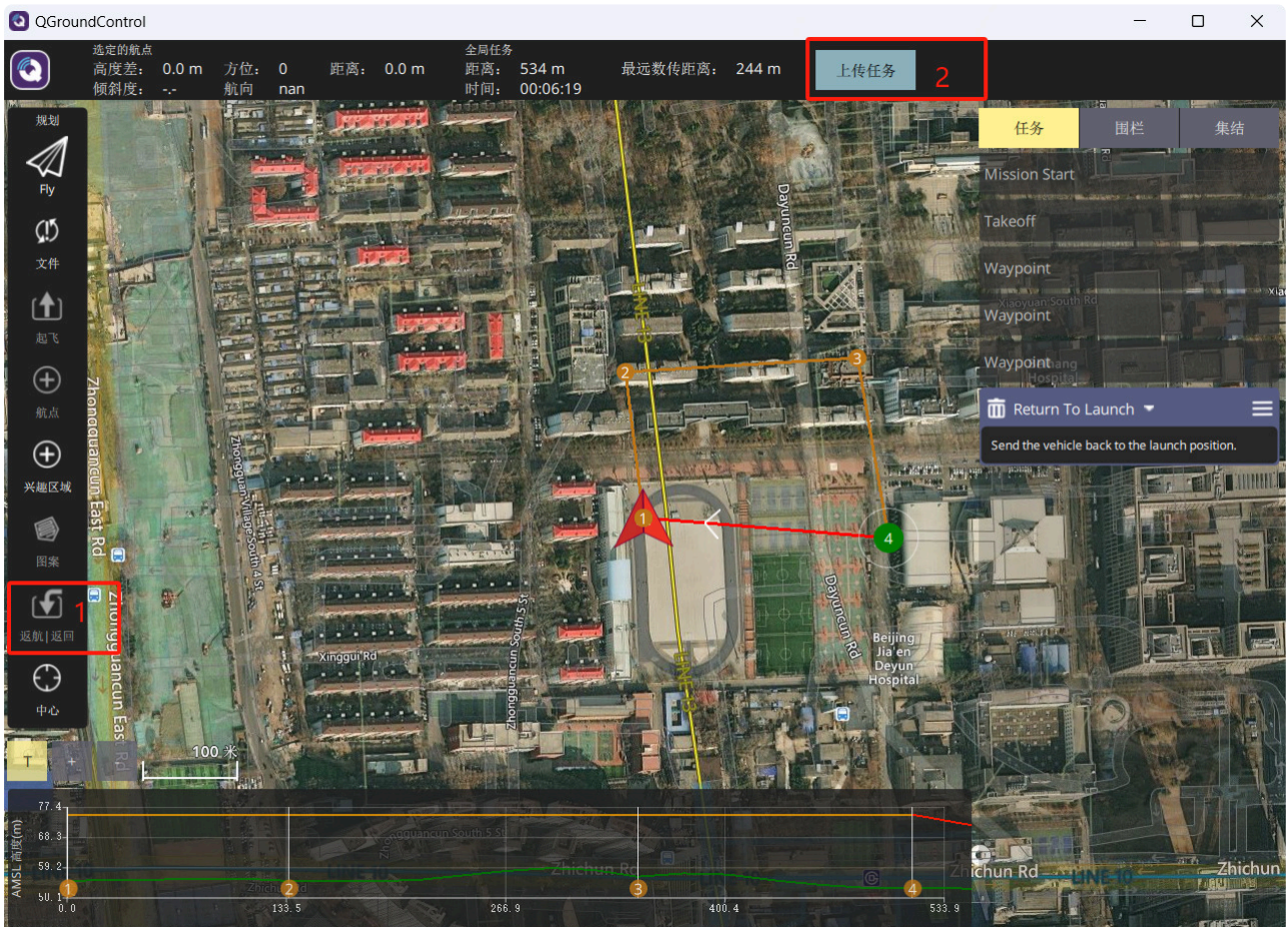
点击“起飞”，在右侧设置起飞高度。



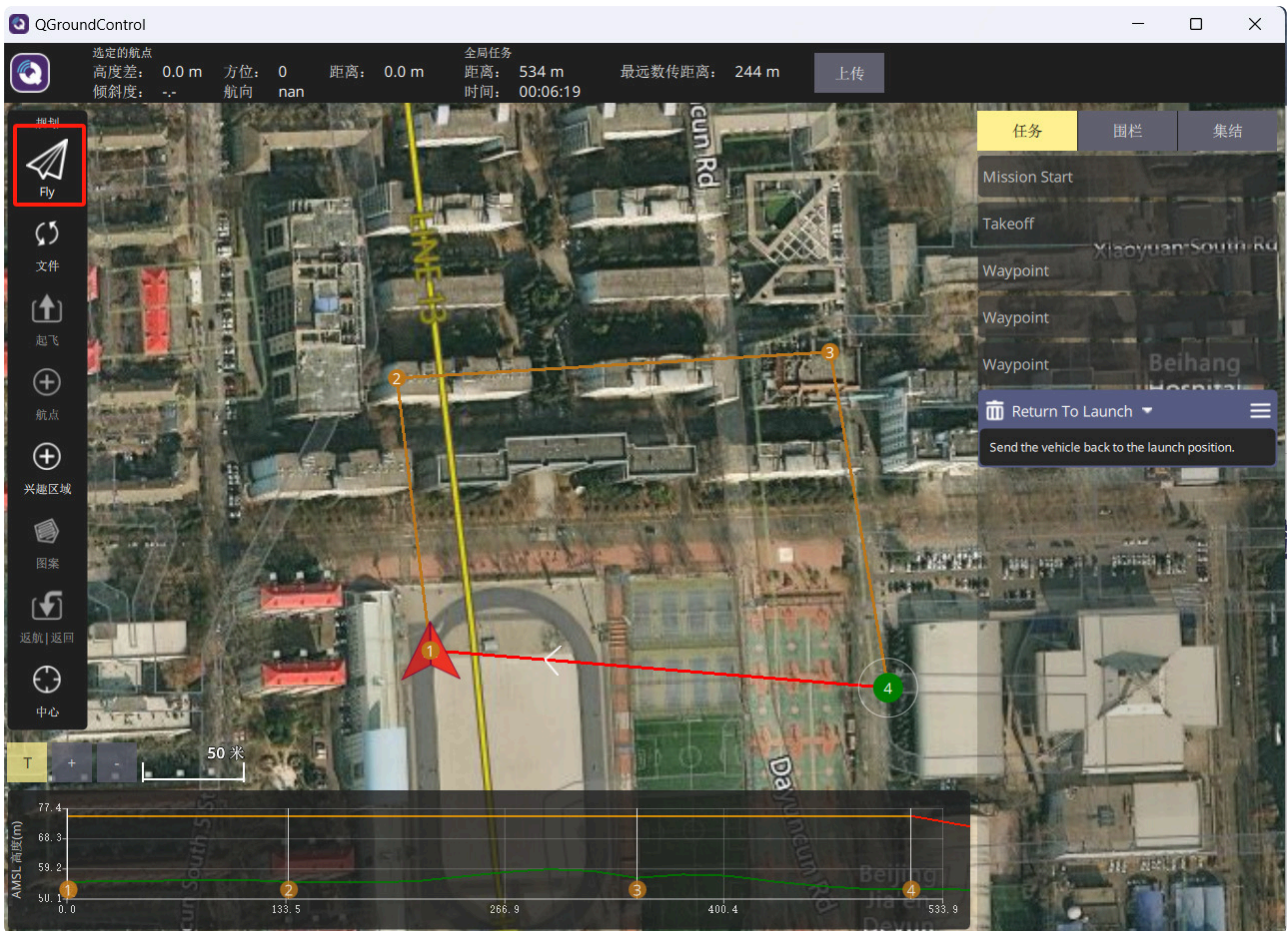
点击“航点”，随机设置几个航点。



点击“返航|返回”，并点击上方“上传任务”。



点击“Fly”，回到主界面。

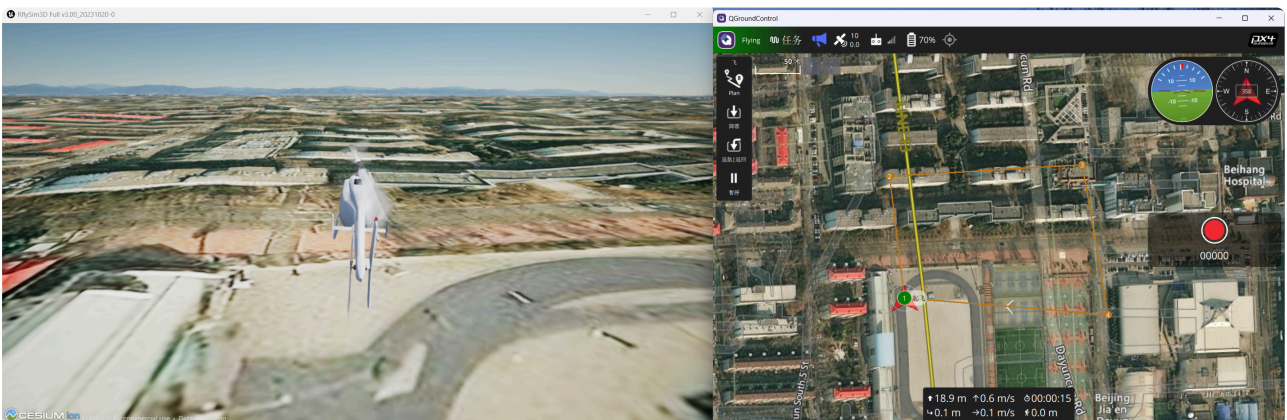


拖动滑块，开始航线任务。

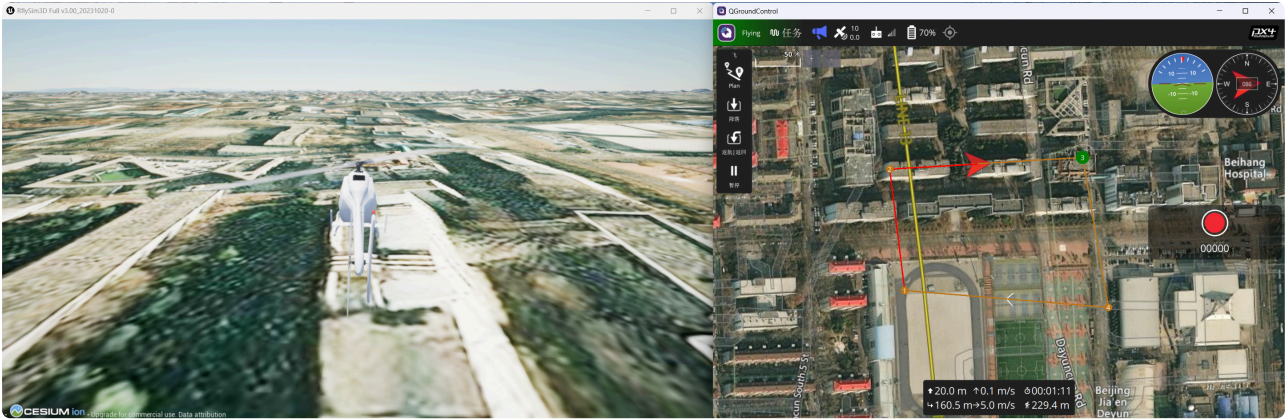
Step 5: 观察结果

在RflySim3D和QGC中观察是否按航线执行飞行任务。

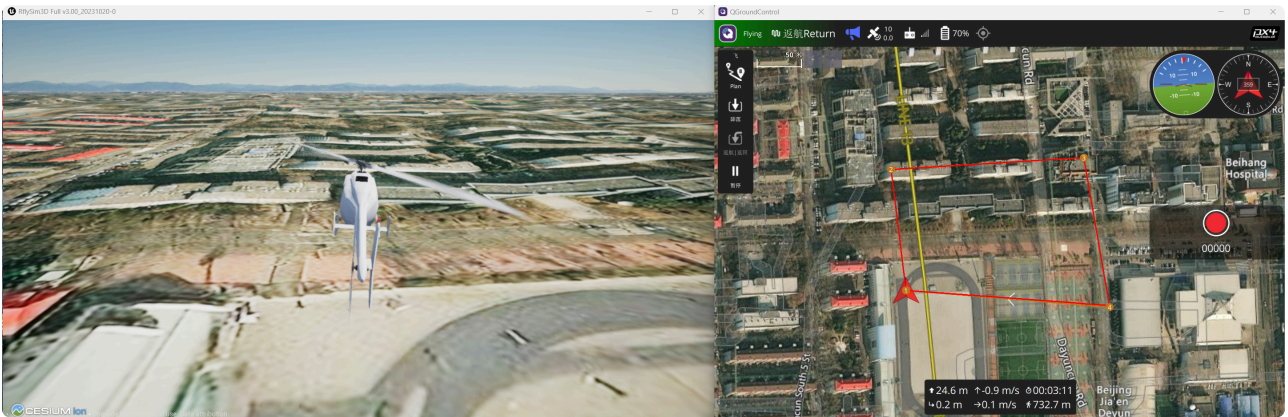
起飞中:



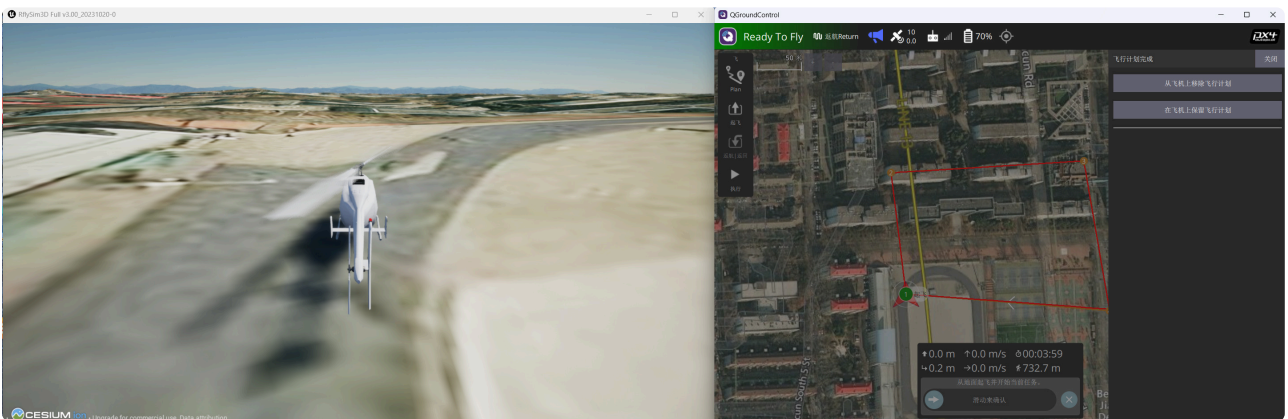
按航点前飞:



降落中：



着陆：



5.2. 选做实验：硬件在环仿真—QGC控制















Step 1: 连接飞控

硬件在环仿真需要准备一个飞控，如下图所示，将飞控通过USB线连接电脑，并确保完成硬件在环仿真配置。注意，本图使用Pixhawk6x飞控，其他飞控配置方法类似（推荐使用Pixhawk飞控）。

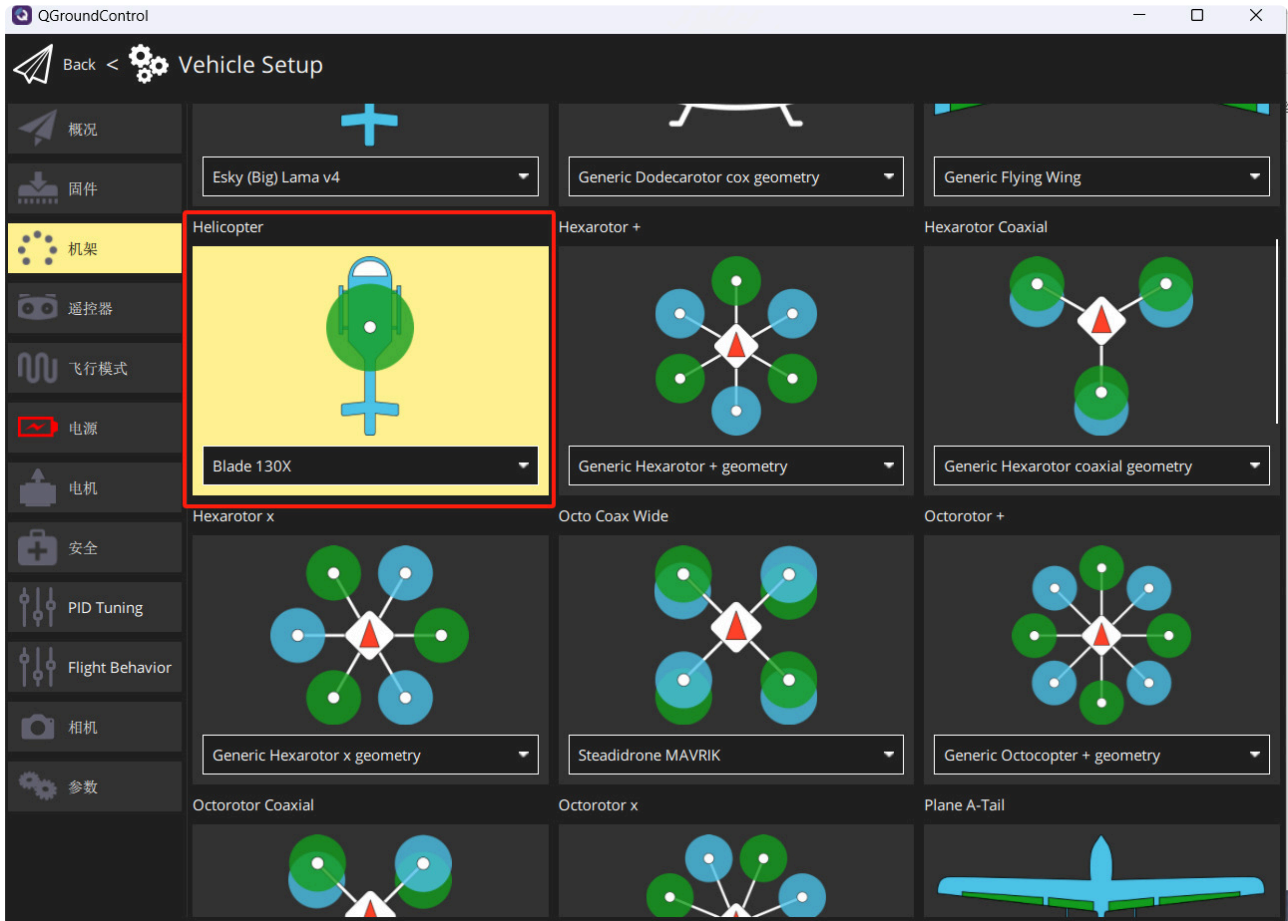


Step 2: 设置硬件在环机架

在桌面的RflyTools文件夹中打开QGroundControl。

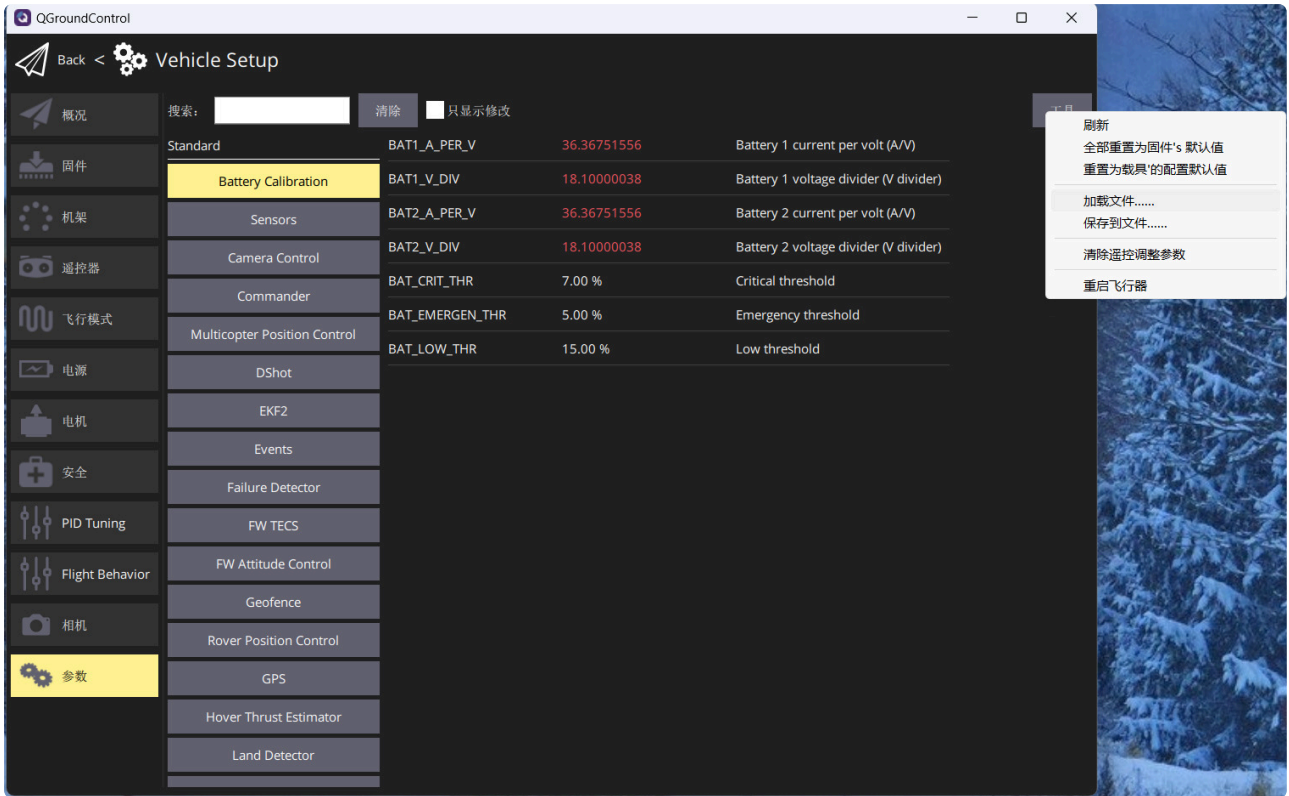
	3DDisplay	2023/11/8 12:56	快捷方式	1 KB
	CopterSim	2023/11/9 16:13	快捷方式	1 KB
	FlightGear-F450	2023/11/8 12:56	快捷方式	2 KB
	HITLRun	2023/11/13 9:43	快捷方式	2 KB
	HowToUse	2023/11/9 16:13	快捷方式	1 KB
	PPTs	2023/9/12 14:05	快捷方式	1 KB
	Python38Env	2023/11/13 9:43	快捷方式	2 KB
	QGroundControl	2023/11/13 9:43	快捷方式	1 KB
	rflysim.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

点击“机架”，选择“Blade 130X”，点击右上角“应用并重启”。

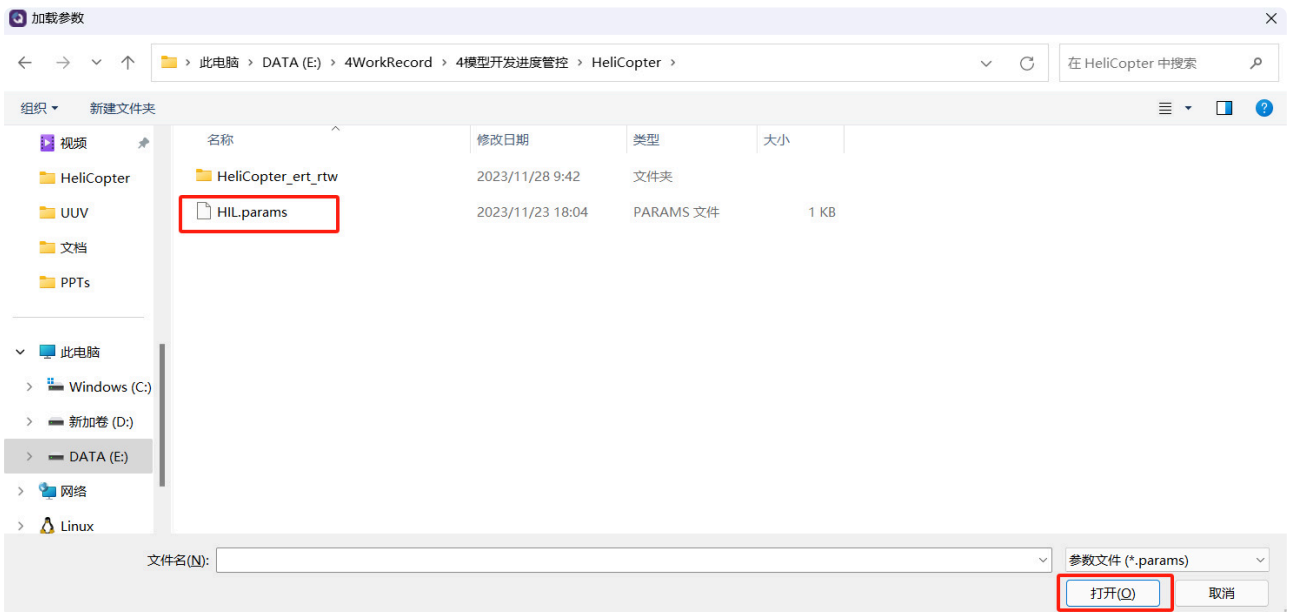


Step 3: 配置硬件在环参数

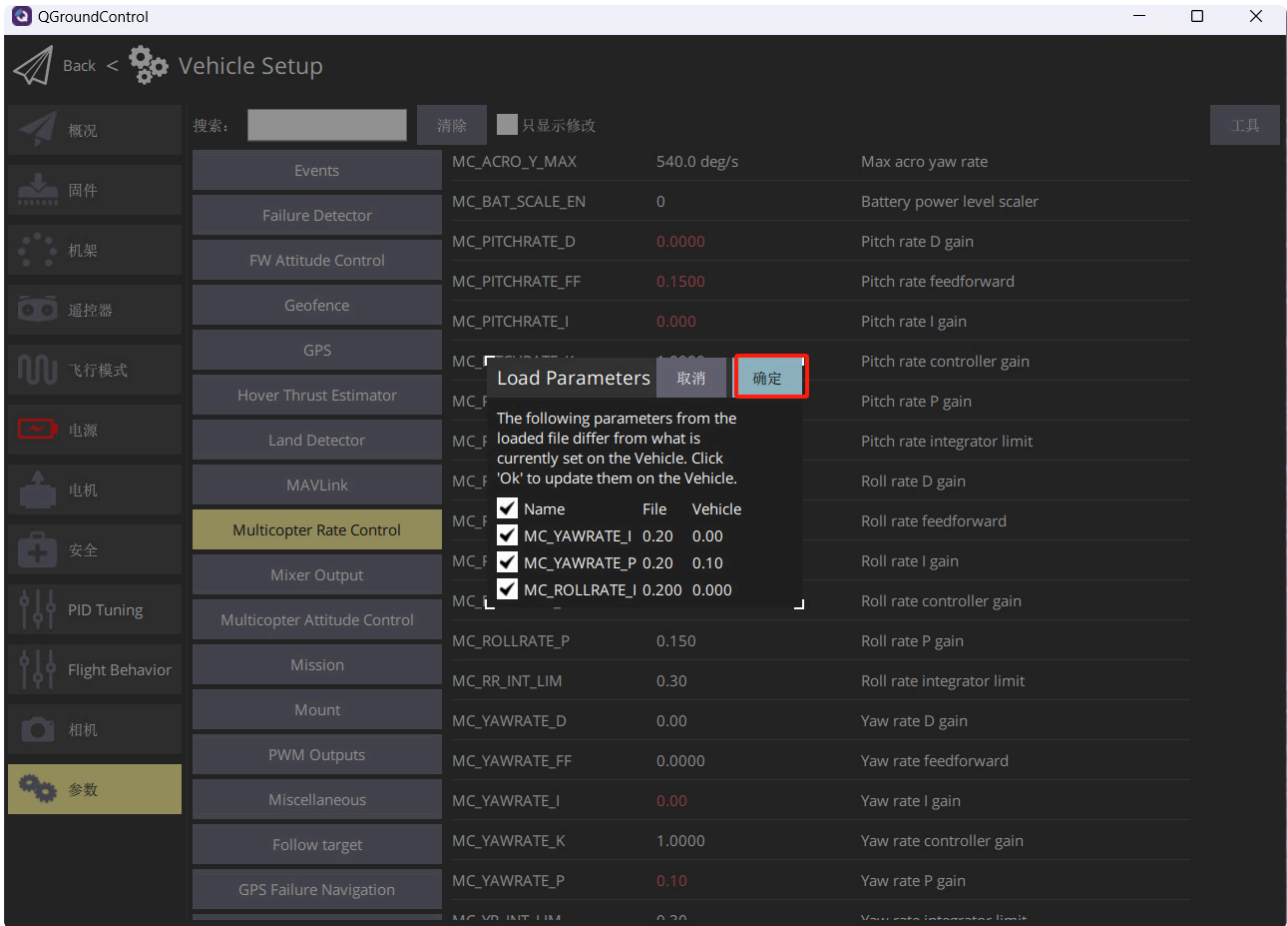
选择“参数”，点击“工具”，选择“加载文件”。



选择“HIL.params”，点击打开。

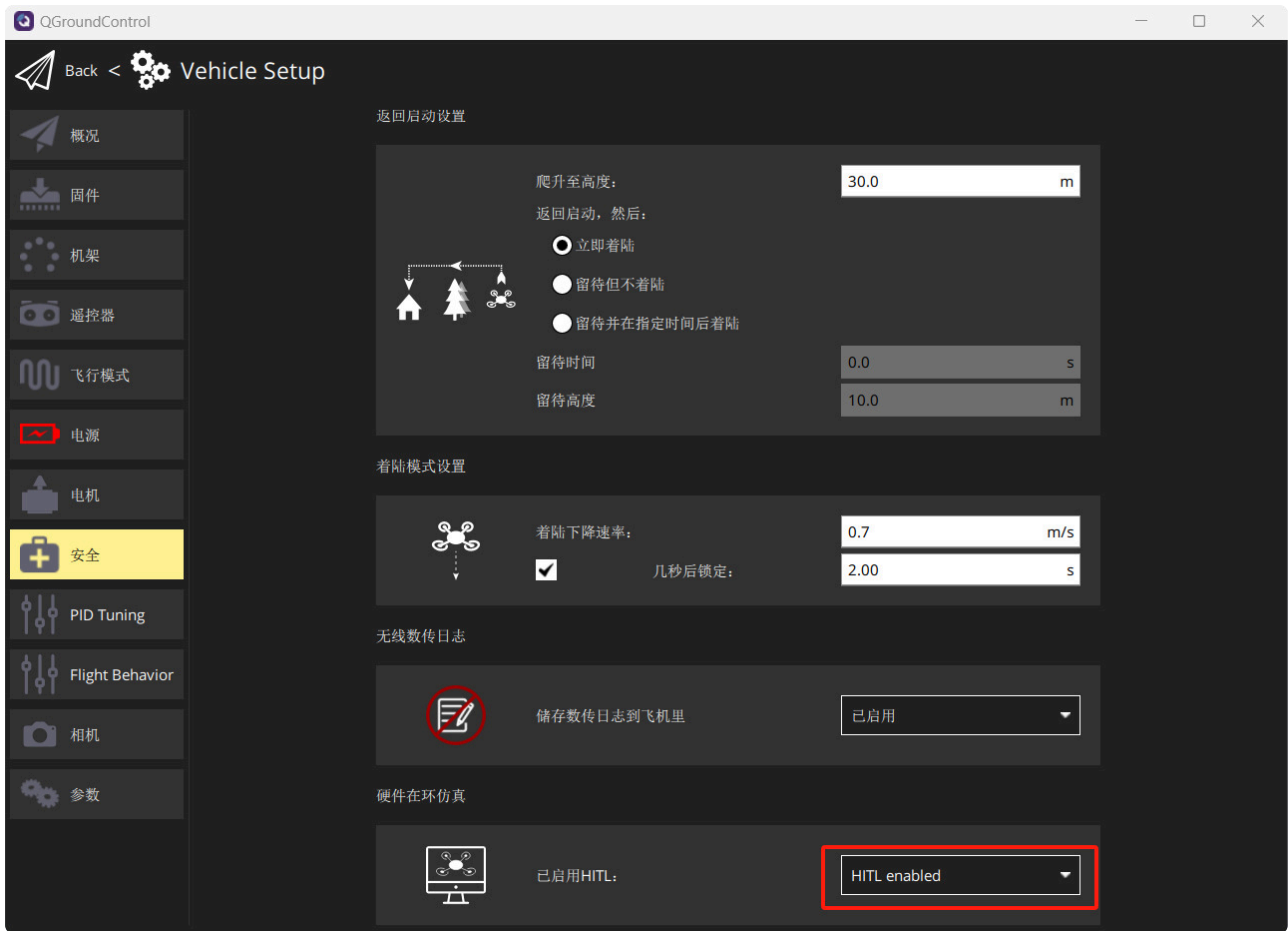


点击“确定”。



Step 4: 安全界面设置

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



Step 5: 启动仿真

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。

名称	修改日期	类型	大小
dir.xlsx	2024/7/25 13:25	XLSX 工作表	11 KB
HeliCopter.dll	2024/7/25 13:25	应用程序扩展	226 KB
Helicopter_HITLRun.bat	2024/8/10 22:36	Windows 批处理文件	6 KB
Helicopter_SITLRun.bat	2024/7/25 13:25	Windows 批处理文件	6 KB
HIL.params	2024/7/25 13:25	PARAMS 文件	1 KB

```
C:\Windows\system32\cmd.e: X + v
已复制      1 个文件。

-----
Please input the Pixhawk COM port list for HIL
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

Available COM ports on this computer are:
COM3: ??????????
COM4: ??????????
COM5: USB ???
COM6: ??????????
COM7: ??????????

Recommended COM list input is: 3,4,5

-----
My COM list for HITL simulation is:5|
```

Step 6: 仿真过程

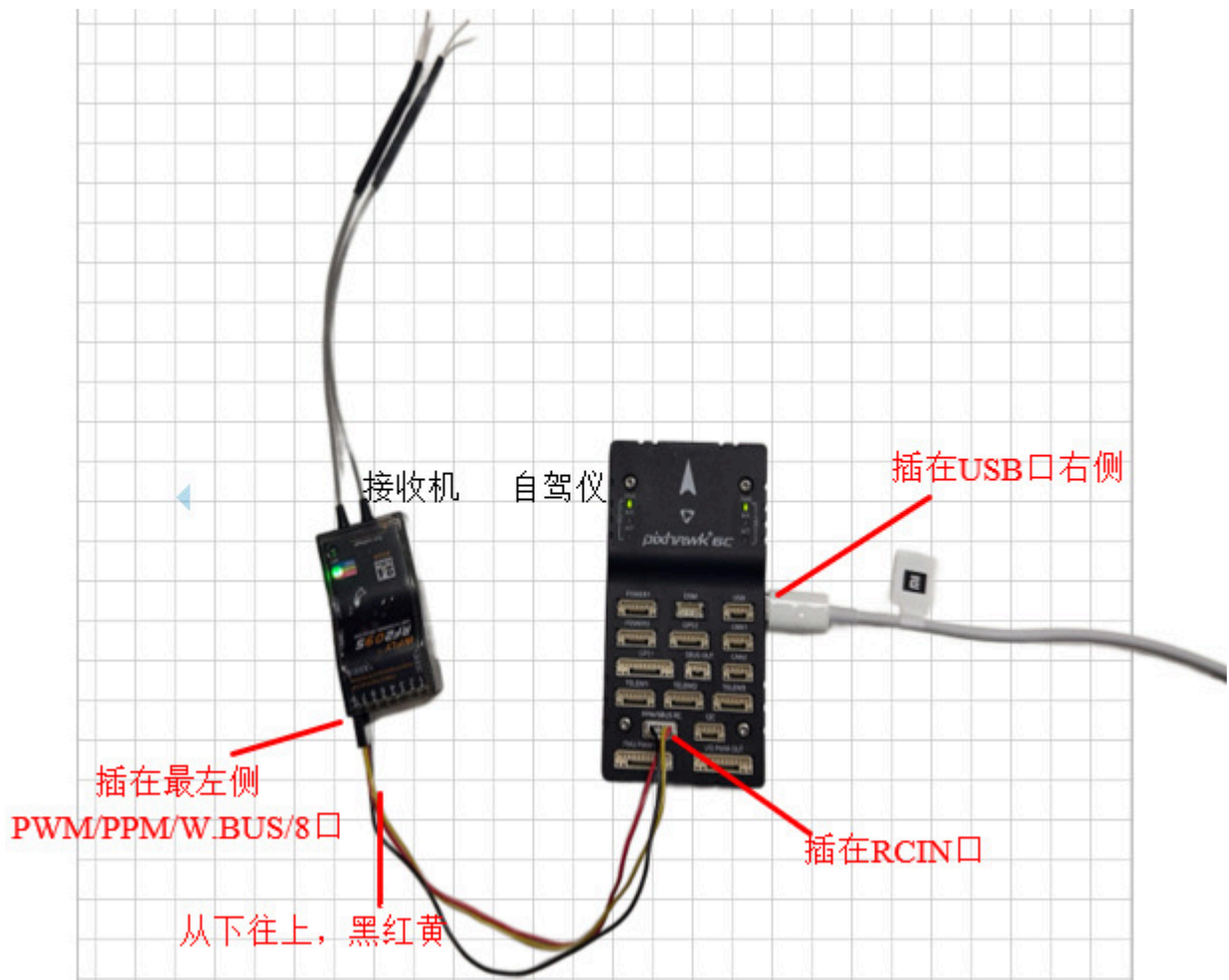
之后测试步骤与软件在环仿真的步骤相同，等待初始化完成后，上传航线任务并观察结果。

5.3. 选做实验：硬件在环仿真——遥控器控制

Step 1: 连接接收机

遥控器控制时飞控的配置与5.2中的飞控配置一致，参考5.2 Step 1 – Step 6。

按如下图所示连接接收机和飞控。



Step 2: 对码

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: 确认摇杆模式

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”

模式2



Step 4: 机型选择

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

其他遥控器配置参考“*:\PX4PSP\RflySimAPIs\2.RflySimUsage\1.BasicExps\e11_RC-Config\Readme.pdf”，需要完成遥控器校准以及飞行模式。

Step 6: 启动仿真

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。

名称	修改日期	类型	大小
dir.xlsx	2024/7/25 13:25	XLSX 工作表	11 KB
HeliCopter.dll	2024/7/25 13:25	应用程序扩展	226 KB
Helicopter_HITLRun.bat	2024/8/10 22:36	Windows 批处理文件	6 KB
Helicopter_SITLRun.bat	2024/7/25 13:25	Windows 批处理文件	6 KB
HIL.params	2024/7/25 13:25	PARAMS 文件	1 KB

```
C:\Windows\system32\cmd.e: X + v
已复制 1 个文件。
-----
Please input the Pixhawk COM port list for HIL
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

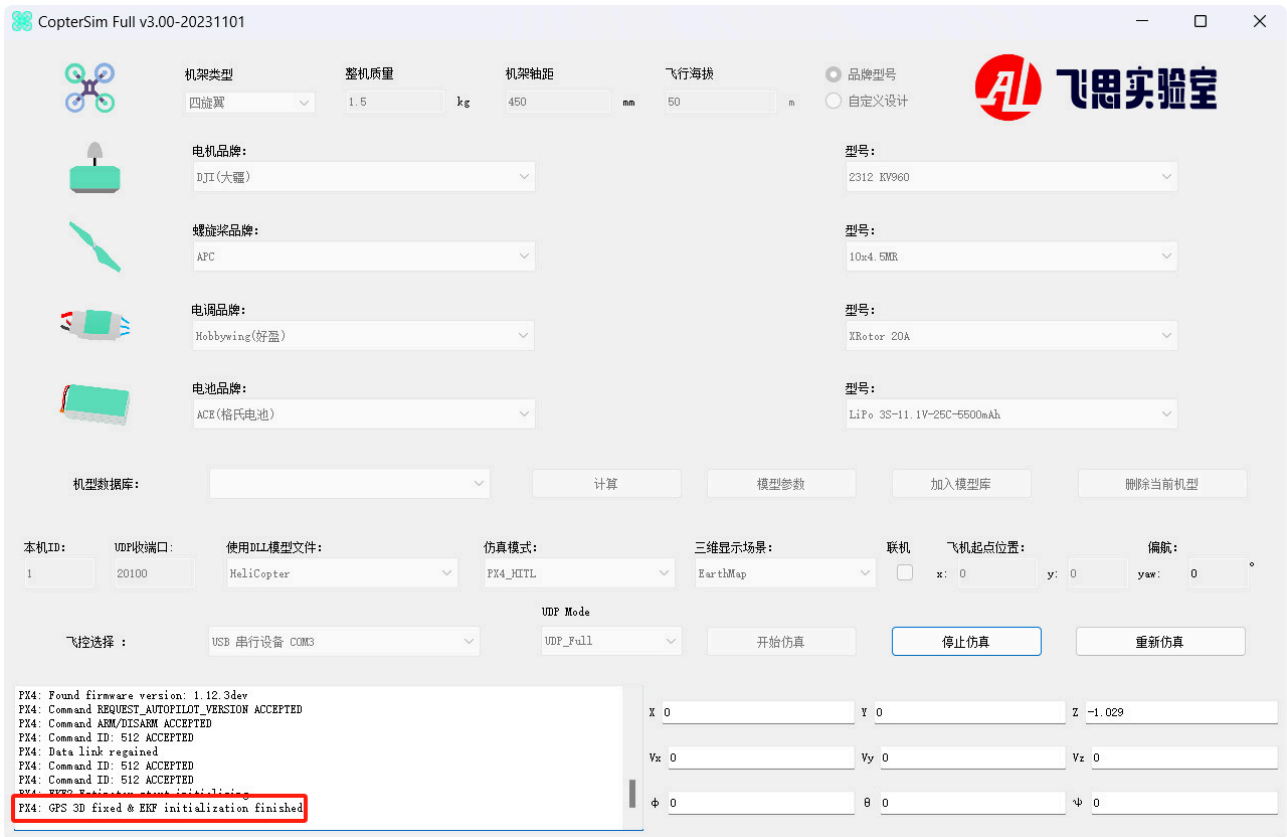
Available COM ports on this computer are:
COM3: ???????????
COM4: ???????????
COM5: USB ???
COM6: ???????????
COM7: ???????????

Recommended COM list input is: 3,4,5

-----
My COM list for HITL simulation is:5|
```

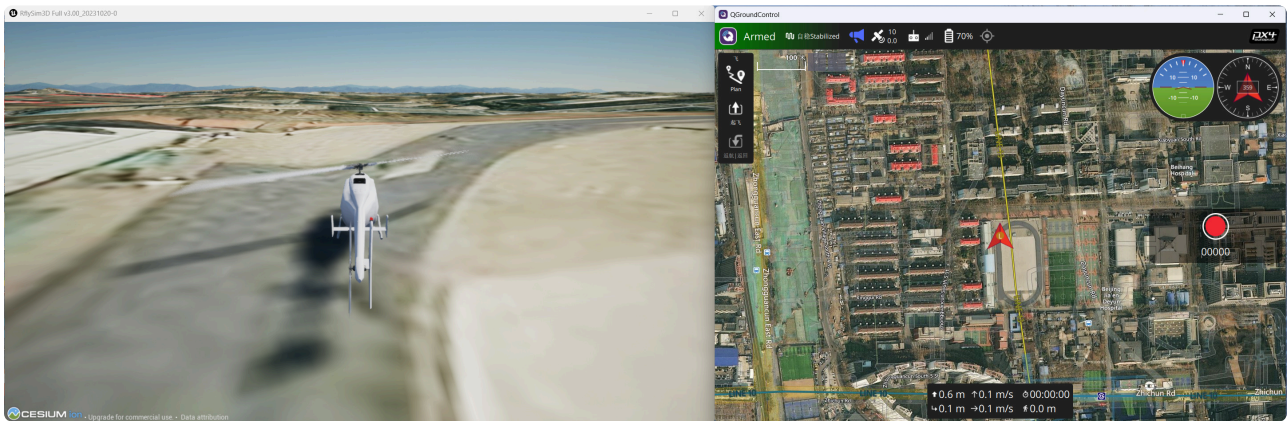
Step 7: 等待初始化完成

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。



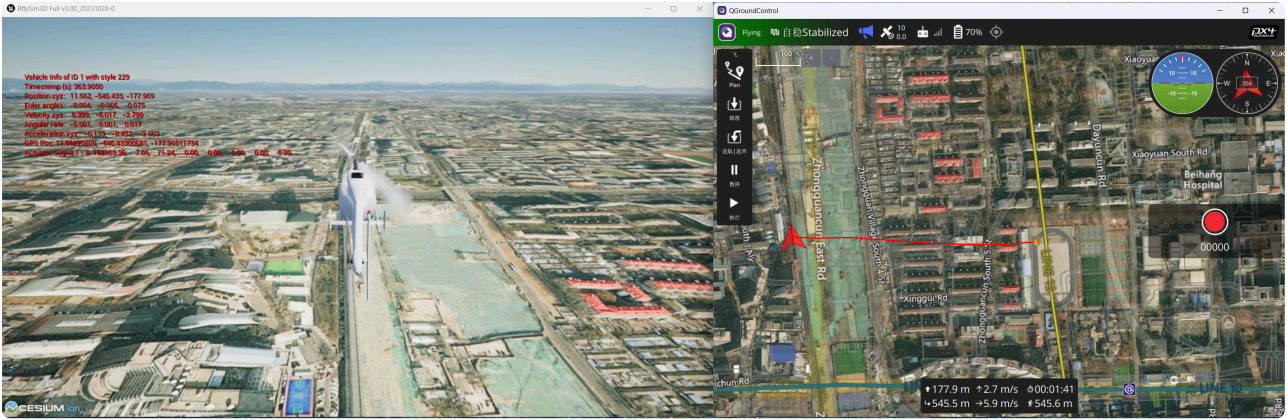
Step 8: 遥控操作

拨动转换开关，解锁飞机。



自稳模式：

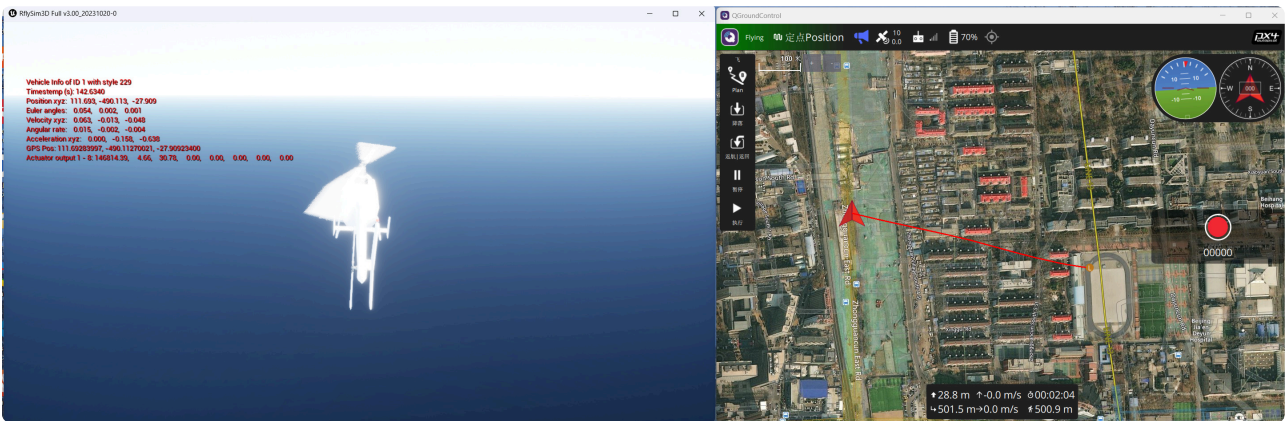
在油门60%左右时，可以维持姿态稳定。可以通过操作左右摇杆控制直升机姿态和油门。



定高模式：

在52%左右油门时，可以定住高度。

定点模式：



6.参考资料

1. DLL/SO模型与通信接口..\..\API.pdf
2. 外部控制接口..\..\API.pdf
- 3.

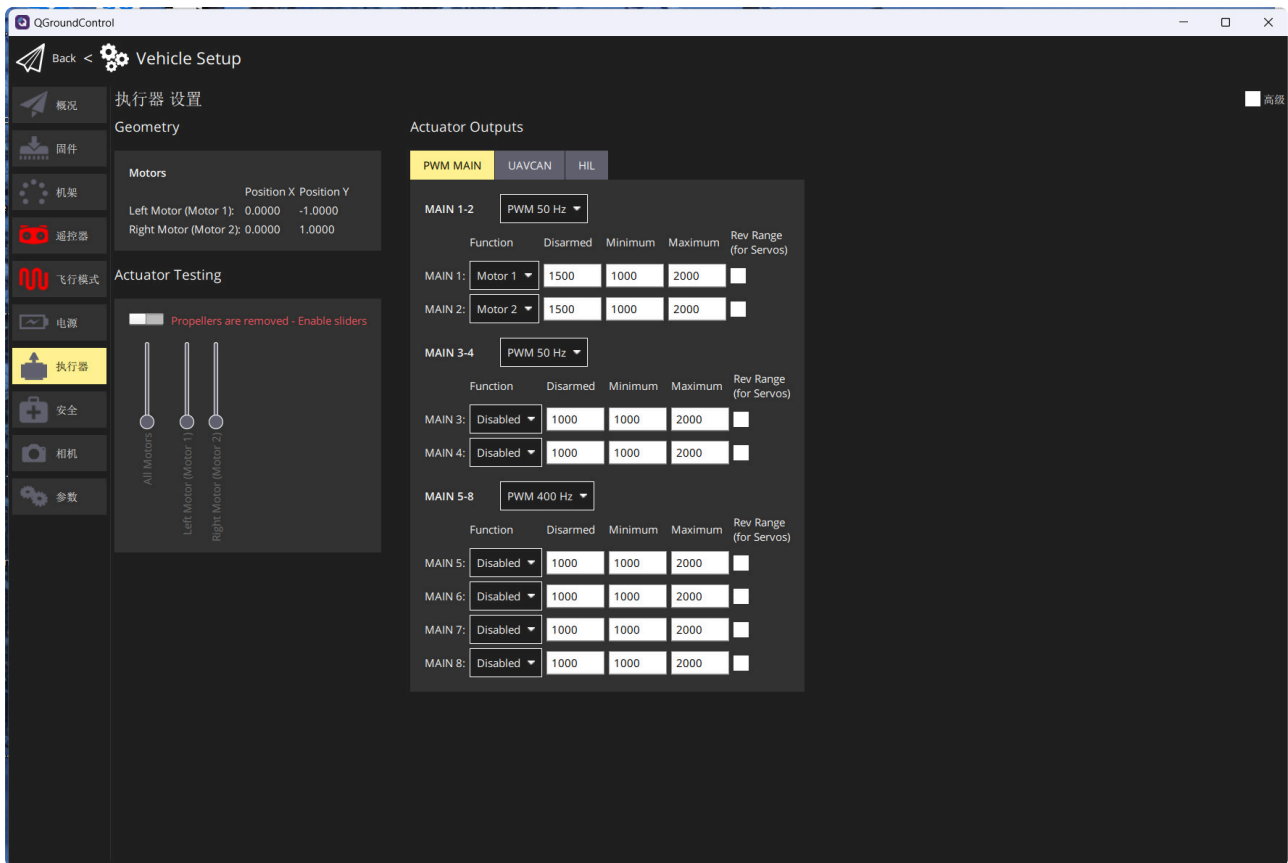
7.常见问题

PX4.14版本固件全面启用了动态混控的规则，体现在使用1.14版本固件进行软硬件在环仿真时，QGC车辆设置页面会新增“执行器”页面，具体内容见

[控制分配](#)

[\(混控\) | PX4 自动驾驶用户指南](#)

[\(main\)](#)



控制分配 (混控)

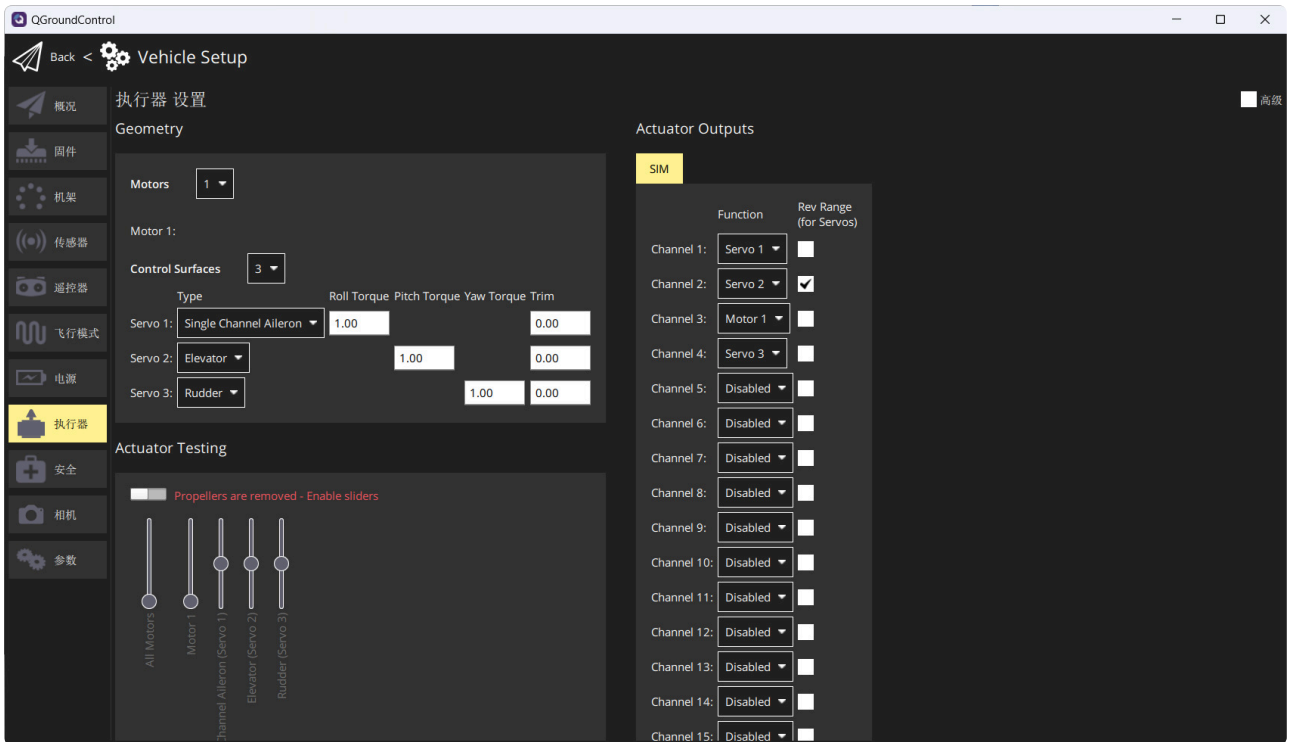
注解

控制分配取代了在 PX4 v1.13 中使用的旧的混控方法。PX4 v1.13 文档见：[混控& 驱动器](#)，[构型文件](#) 和 [添加一个新的机型配置](#)。

如果需要以1.14版本固件进行直升机模型软硬件在环仿真，那么需要进行以下设置：

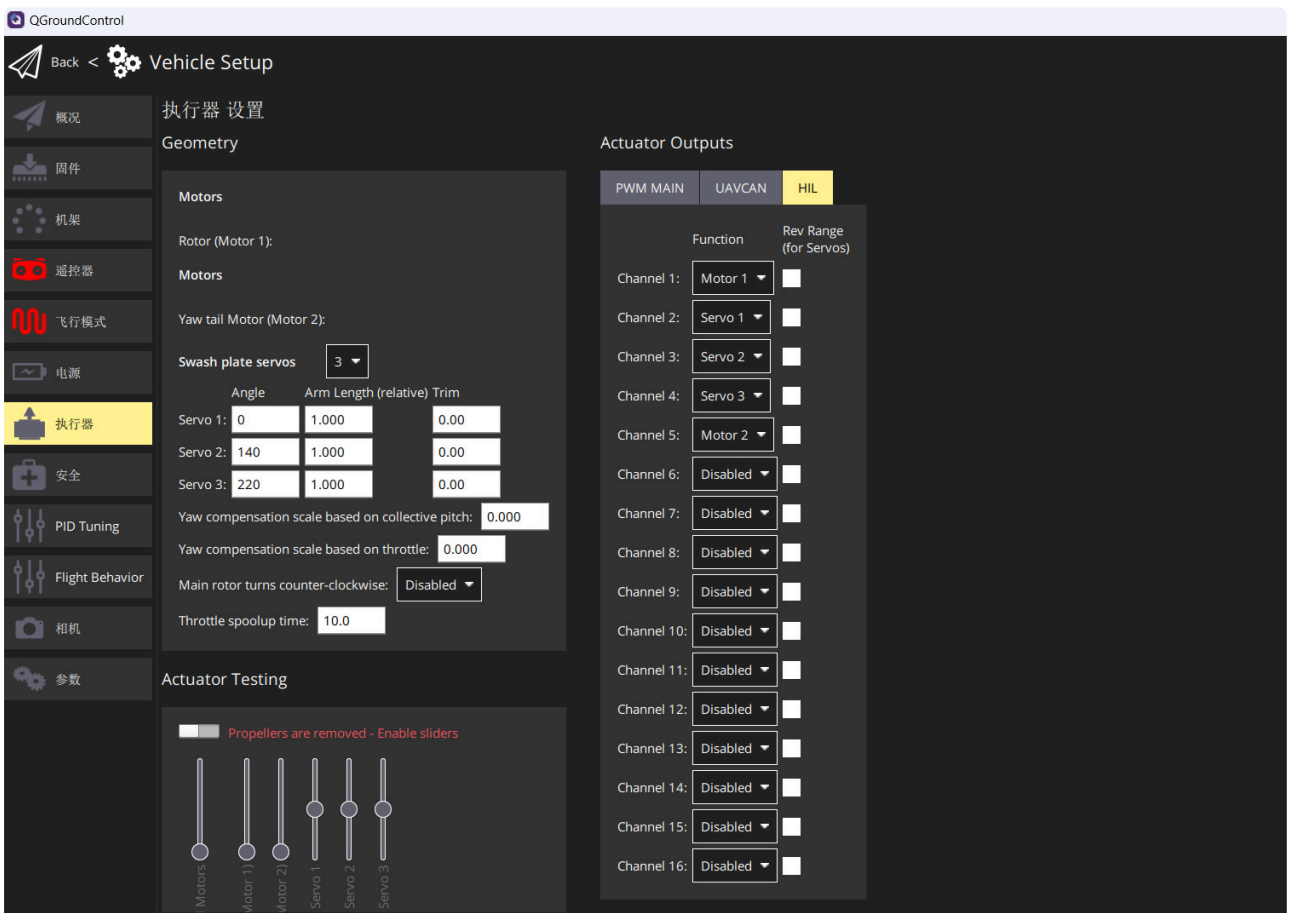
1. 软件在环仿真：

通过 [Helicopter_SITLRun.bat](#) 启动仿真并完成初始化后，在QGC执行器页面中按如下图所示完成设置，即可正常仿真。

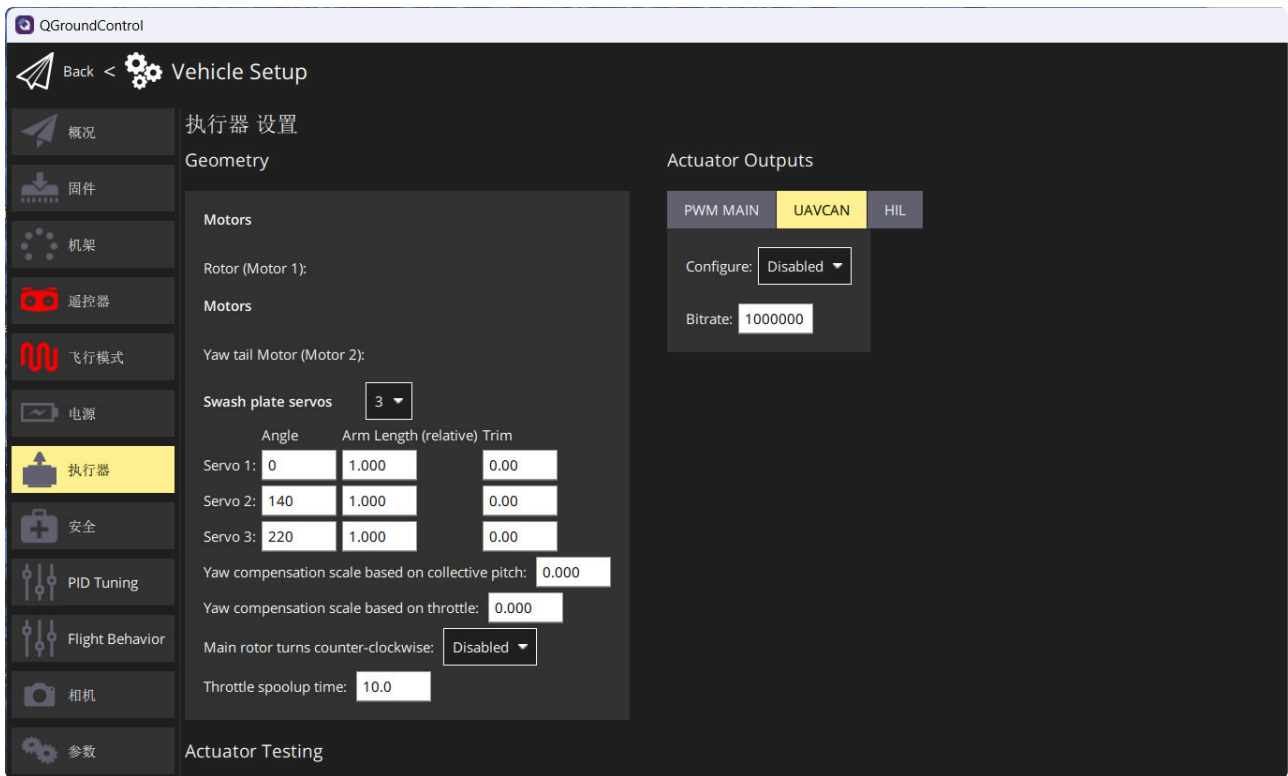


2) 硬件在环仿真:

除了硬件在环通常要设置的选项，还需要在QGC执行器页面中按如下图所示完成Actuator Outputs HIL设置:



并且需要设置UAVCAN为Disabled，设置完毕后重新插拔飞控，即可正常仿真。



Q2: 编译报错，无法加载库文件



A2: 这可能是由于安装平台时PX4PSP工具箱未更新到最新版，更新RflySim安装包后按照如下配置重新安装平台即可

Toolbox one-key installation script: RflySimA... — □ ×

(1) Software package installation directory
C:\PX4PSP

(2) PX4 firmware compiling command: firmware versions <= PX4-1.8 use format px4fmu-v3_default; >= PX4-1.9 use format px4_fmu-v3_default
px4_fmu-v6c_default

(3) PX4 firmware version (1: PX4-1.7.3, ... , 6: PX4-1.12.3, 7: PX4-1.13.2, 8: PX4-1.14.4, 9: PX4-1.15.0)
9

(4) PX4 firmware compiling toolchain (1: WinWSL[suitable for all versions], 2: Msys2[suitable for <= PX4-1.8], 3: Cygwin[for >=PX4-1.8])
1

(5) Whether to reinstall PSP toolbox (yes to reinstall and no to remain current installation)
yes

(6) Whether to reinstall the dependent software packages (CopterSim, QGroundControl, CopterSim, etc. About 5 minites)
no

(7) Whether to reinstall the selected compiling toolchain (yes to reinstall and no to remain unchanged, about 5 minites)
no

(8) Whether to reinstall the selected PX4 firmware source code (yes to reinstall and no to remain unchanged, about 5 minites)
no

(9) Whether to pre-compile the selected firmware with the selected command (yes to compile and no to remain unchanged, about 5 minites)
no

(10) Whether to block the actuator outputs in the PX4 firmware code ("yes" to use Simulink controller, "no" to use PX4 official controller)
no

OK Cancel