
1. 实验名称及目的

四旋翼尾座式垂起无人机软硬件在环仿真：该例程介绍了如何使用平台四旋翼尾座式垂起无人机进行软硬件在环仿真。

2. 实验原理

2.1. 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。飞控与 CopterSim 通过串口（硬件在环 HITL）或网络 TCP/UDP（软件在环 SITL）进行连接，使用 MAVLink 进行数据传输，实现控制闭环。
- **三维引擎：**这部分负责生成和处理仿真的视觉效果，提供仿真环境和模型的三维视图，使用户能够视觉上跟踪和分析飞行器的运动。CopterSim 发送飞机位姿、电机数据到三维引擎，实现可视化展示。
- **外部控制（offboard）：**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。

2.2. 混控器通道映射[3]

PX4 混控器定义是指如何将控制器的输出信号（如滚转、俯仰、偏航、油门等）转换为执行器的输入信号（如电机或舵机的转速或角度）。混控器使用一种简单的文本语法来描述这种转换，可以根据飞行器的不同类型和布局进行定制。混控器的文件可以在 PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\mixers 这个目录下找到，其中包含了一些预定义的飞行器模型的混控器文件，可以作为定制或测试的基础。

因为有多组控制组(例如飞行控制、有效载荷等)。 和多个输出组(总线) ，一个控制组可以向多个输出组发送命令。针对不同的机架会设置不同的混控文件，可参考\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d\airframes 中的机架文件

本例程的混控器文件 [mixfile/quad_x_vtol.main.mix](#) 定义了尾坐式飞行器的混控方案，该飞行器有四个电机，呈 X 型布局，还有两个升降舵。所有的控制量都混合了 100%，其混控矩阵如下：

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

矩阵的每一行对应一个输出通道，分别是电机 1、电机 2、电机 3、电机 4、左升降舵和右升降舵。矩阵的每一列对应一个输入通道，分别是滚转、俯仰、偏航和油门。

3. 实验效果

在平台软硬件在环仿真下，通过 QGC 上传航迹的方式控制四旋翼尾座式垂起无人机起飞、模式切换、前飞、返航和降落的过程。

4. 文件目录

文件夹/文件名称		说明
Tailsitter_HITL.bat		硬件在环仿真批处理文件。
Tailsitter_SITL.bat		软件在环仿真批处理文件。
GenerateModelDLLFile.p		DLL 格式转化文件。
Tailsitter.dll		四旋翼尾座式垂起无人机生成的 DLL 模型
mixfile	quad_x_vtol.main.mix	修改后的硬件在环混控文件
px4file	px4_fmu-v6c_default	修改后的 Pixhawk 6C 的固件
MavLinkStruct.mat		MavLink 协议相关结构体
Tailsitter_Cooked.zip		四旋翼尾座式垂起无人机的三维模型

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	Pixhawk 6C ^②	1
3	MATLAB 2022b ^③	数据线	1

① 推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com/1.1InstallMethod.html>

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

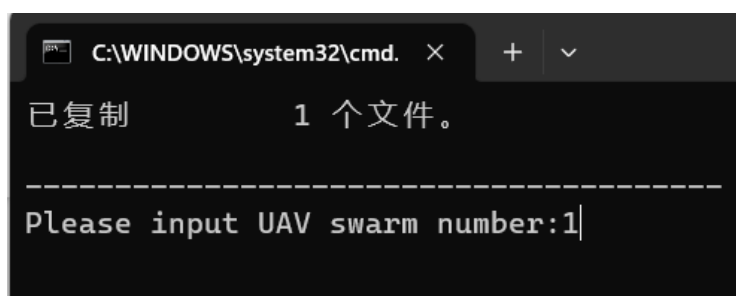
请见: <http://doc.rflysim.com/hardware.html>

6. 实验步骤

6.1. 软件在环仿真

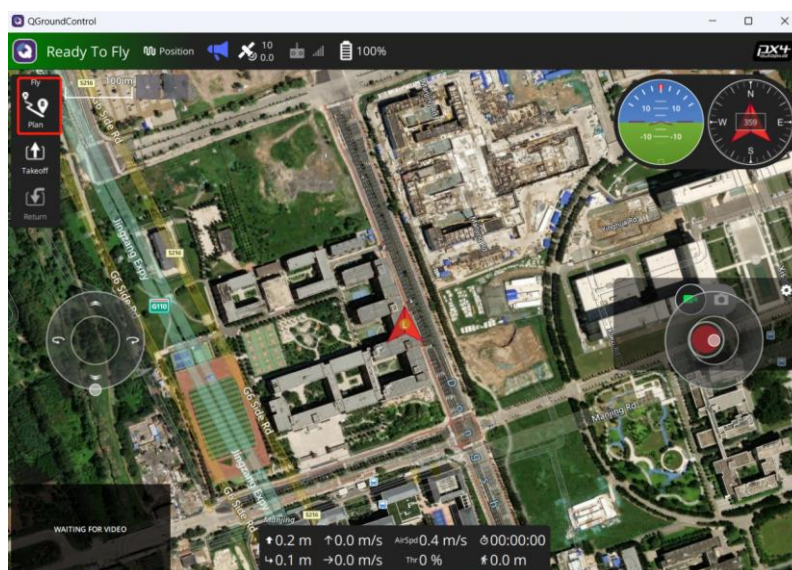
Step 1:

右键以管理员身份运行”Tailsitter_SITL.bat”, 输入 1, 启动 1 架四旋翼尾座式垂起飞机的软件在环。



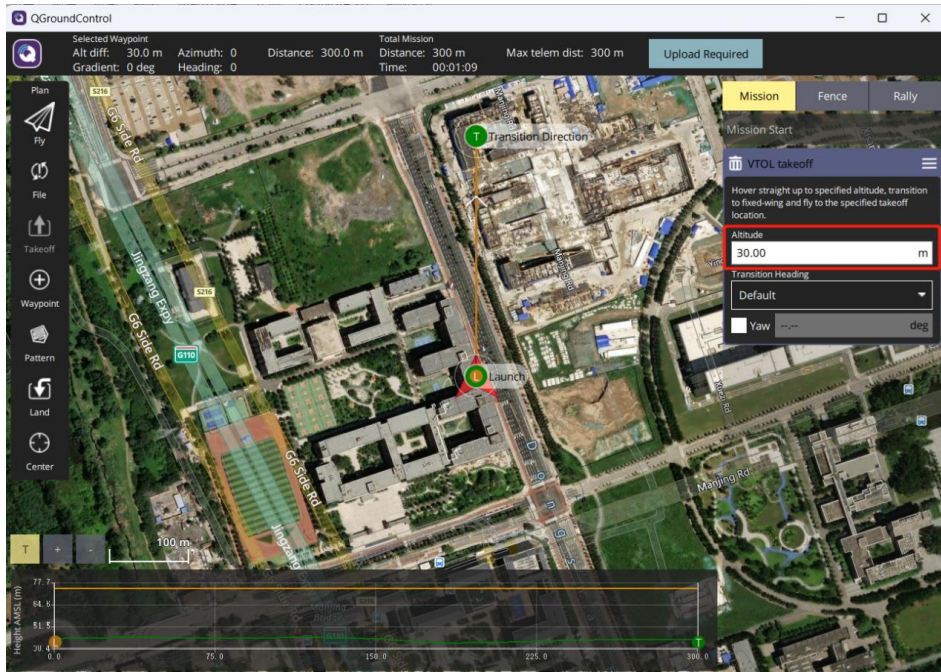
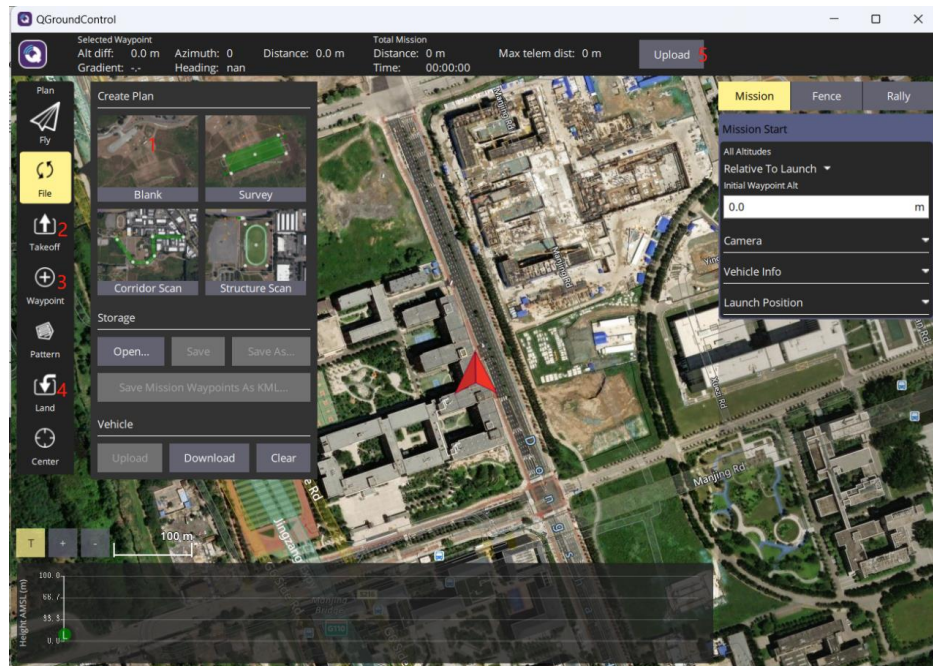
Step 2:

点击 QGC 上的 Plan。



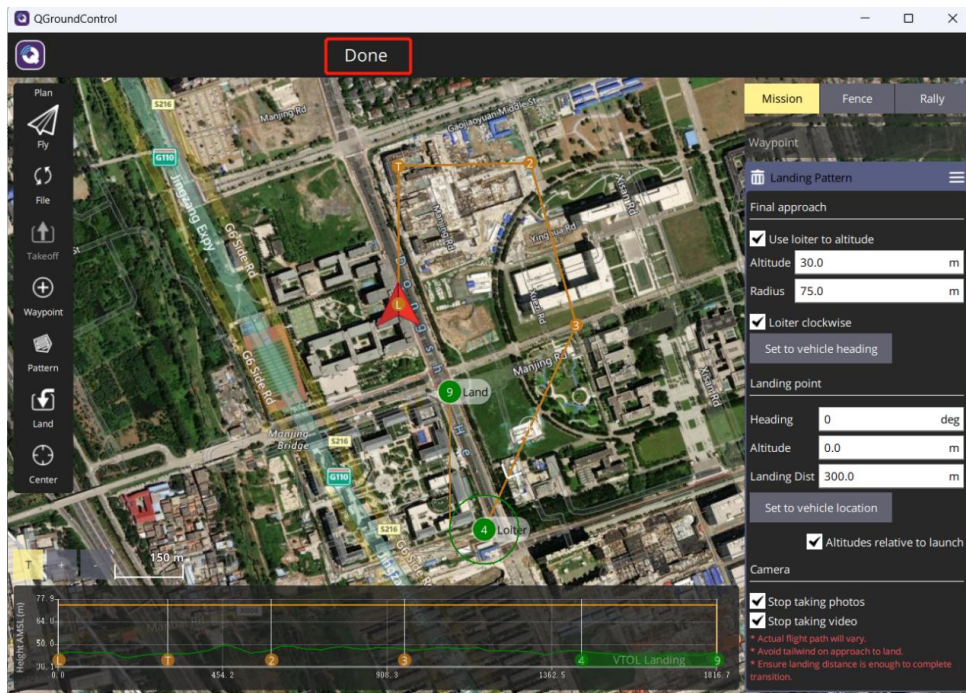
Step 3:

按照下图标注的序号依次点击, 要注意在设置起飞点时需要设置高度, 否则仿真飞机会触地, 本次仿真中高度设置为 30m。



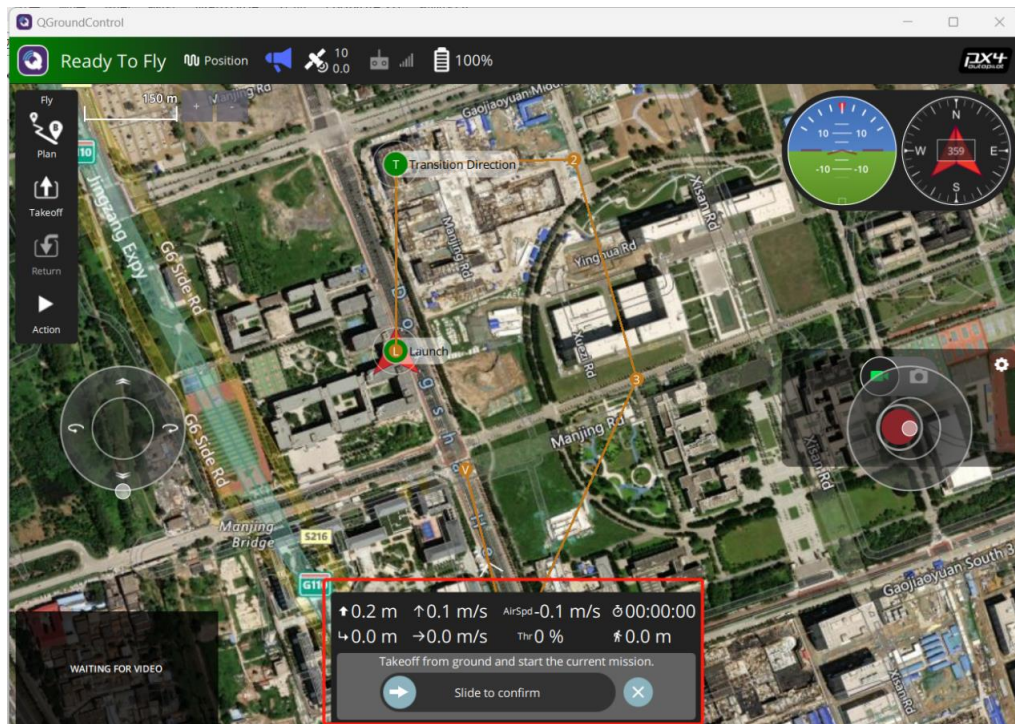
Step 4:

按照 Step3 依次操作后，在 QGC 上方能看到“Done”表示航线任务上传成功。



Step 5:

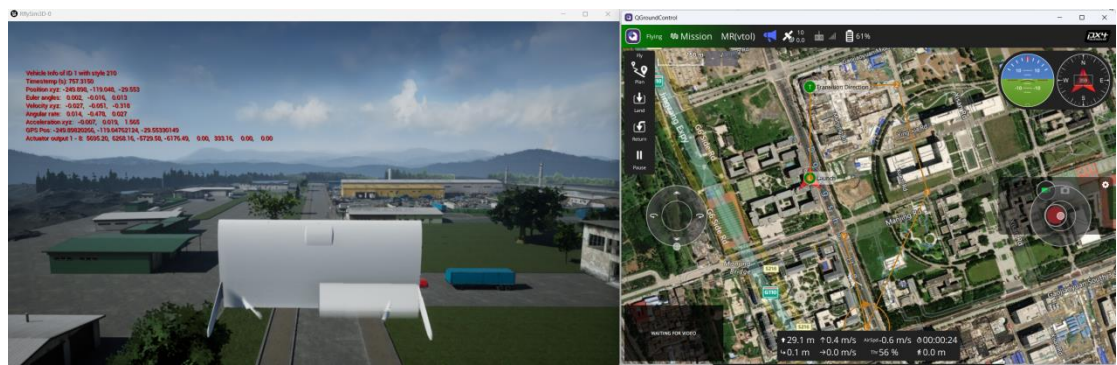
滑动解锁开启航线任务



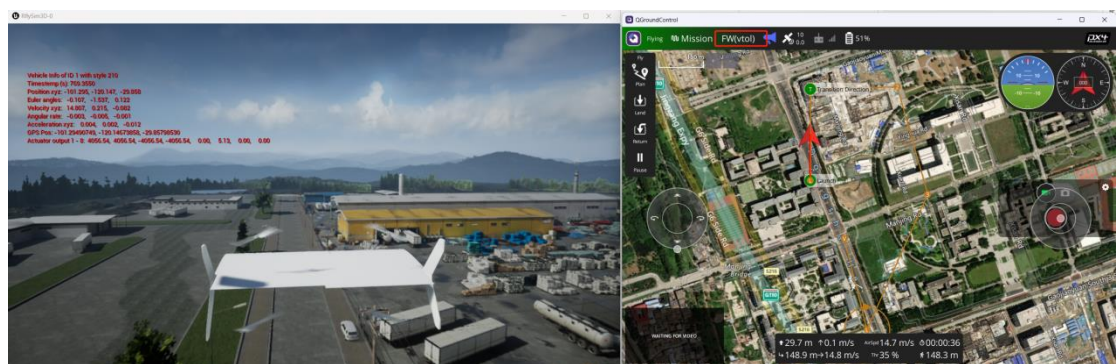
Step 6:

观察飞机的飞行情况:

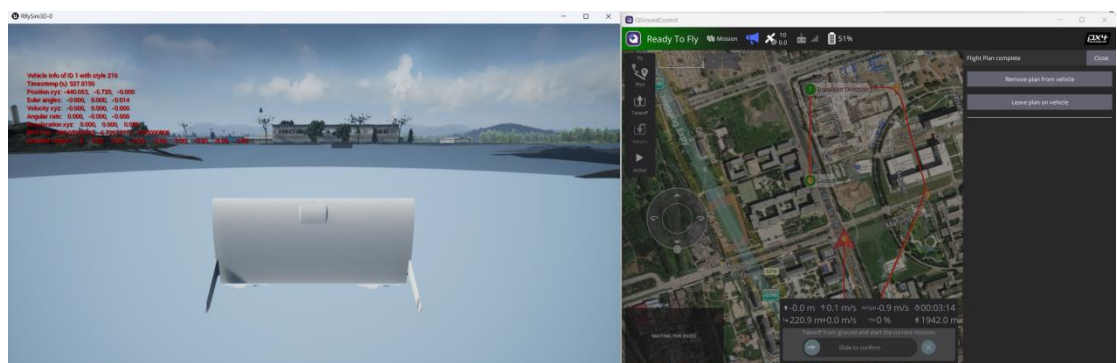
首先, 飞机会以旋翼模式起飞到指定高度



然后，起飞到指定高度后飞机会自动切换到固定翼模式，前飞。



最后，到达降落后，飞机切换至旋翼模式降落到指定地点。



6.2. 硬件在环仿真

6.2.1. 仿真前准备

由于软硬件在环仿真混控文件对应的控制通道是不相同的，所以在硬件在环仿真前，需要得到修改混控后的固件，下面有两种方式来获取固件：

方式一：

按以下步骤进行操作，生成固件

Step 1:

机架对应的默认混控文件为

C:\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\mixers\quad_x_vtol.main.mix


```

C: > PX4PSP > Firmware > ROMFS > px4fmu_common > mixers > quad_x_vtol.main.mix
1 Mixer for Tailsitter with x motor configuration and elevons
2 =====
3
4 This file defines a single mixer for tailsitter with motors in X configuration. All controls
5 are mixed 100%.
6
7 R: 4x
8
9 # left elevon
10 M: 2
11 S: 1 0 -10000 -10000 0 -10000 10000
12 S: 1 1 -10000 -10000 0 -10000 10000
13
14 # right elevon
15 M: 2
16 S: 1 0 10000 10000 0 -10000 10000
17 S: 1 1 -10000 -10000 0 -10000 10000
18

```

将混控文件修改如下，修改后保存，也可将本文件*\\mixfile\\quad_x_vtol.main.mix 复制到此处进行替换。

```

C: > PX4PSP > Firmware > ROMFS > px4fmu_common > mixers > quad_x_vtol.main.mix
1 Mixer for Tailsitter with x motor configuration and elevons
2 =====
3
4 This file defines a single mixer for tailsitter with motors in X configuration. All controls
5 are mixed 100%.
6
7 R: 4x
8
9 Z:
10
11 # left elevon
12 M: 2
13 S: 1 0 -10000 -10000 0 -10000 10000
14 S: 1 1 -10000 -10000 0 -10000 10000
15
16 # right elevon
17 M: 2
18 S: 1 0 10000 10000 0 -10000 10000
19 S: 1 1 -10000 -10000 0 -10000 10000
20

```

Step 2:

将飞控拔出电脑，并输入如下指令

```

./BkFile/Env0ri.sh
make px4_fmu-v6c_default
# 回车，开始编译

```

等待编译完成，编译完成后固件位置为 C:\PX4PSP\Firmware\build\px4_fmu-v6c_default\px4_fmu-v6c_default.px4。

注：若遇到编译失败，可删除 C:\PX4PSP\Firmware 下面的 build 文件夹，来清空旧的编译信息，再在子系统中重新运行编译命令。

注：px4file 文件夹中的固件为修改了混控之后编译的固件，可直接使用。

名称	修改日期	类型	大小
mixfile	2023/8/29 14:24	文件夹	
px4file	2023/8/29 14:24	文件夹	
RflySim3D	2023/8/29 14:24	文件夹	
GenerateModelDLLFile.p	2023/6/28 22:26	MATLAB.p.9.14.0	5 KB
MavLinkStruct.mat	2022/7/14 16:53	MATLAB Data	5 KB
MulticopterModel.zip	2023/8/29 14:25	压缩(zipped)文件...	135 KB
readme.docx	2023/8/29 15:28	Microsoft Word ...	11,597 KB
readme.pdf	2023/6/2 11:07	Foxit PhantomP...	2,531 KB
RflySimModelLab.slx	2022/7/27 15:03	Simulink Model	51 KB
Tailsitter.dll	2023/8/29 14:25	应用程序扩展	304 KB
Tailsitter.slx	2023/8/29 14:24	Simulink Model	88 KB
Tailsitter_HITL.bat	2023/5/30 17:59	Windows 批处理...	6 KB
Tailsitter_init.m	2023/6/2 10:05	MATLAB Code	10 KB
Tailsitter_SITL.bat	2023/6/2 10:56	Windows 批处理...	6 KB

Step 3

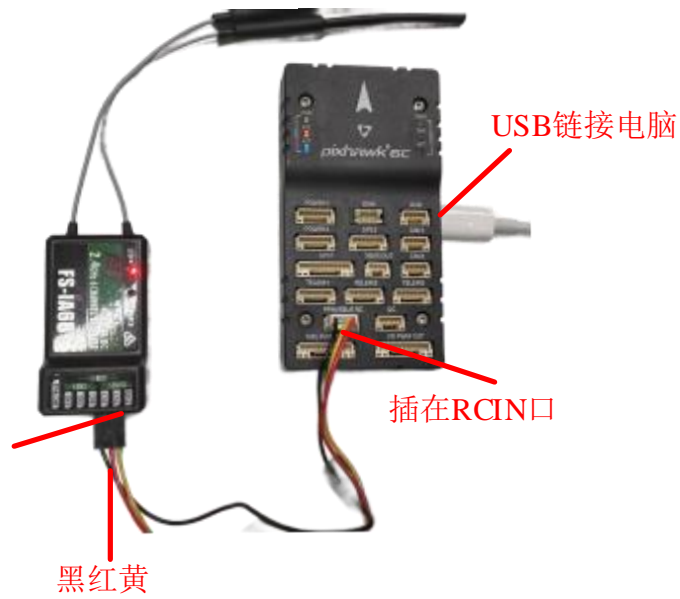
打开 QGC 将上一步编译的固件烧录到 Pixhawk 6C 飞控中，烧录过程请查看飞控固件烧录的视频教程：https://www.bilibili.com/video/BV1sa4y1V7hv/?spm_id_from=333.999.0.0。



6.2.2. 仿真流程

Step 1:

按下图所示将飞控与计算机连接。

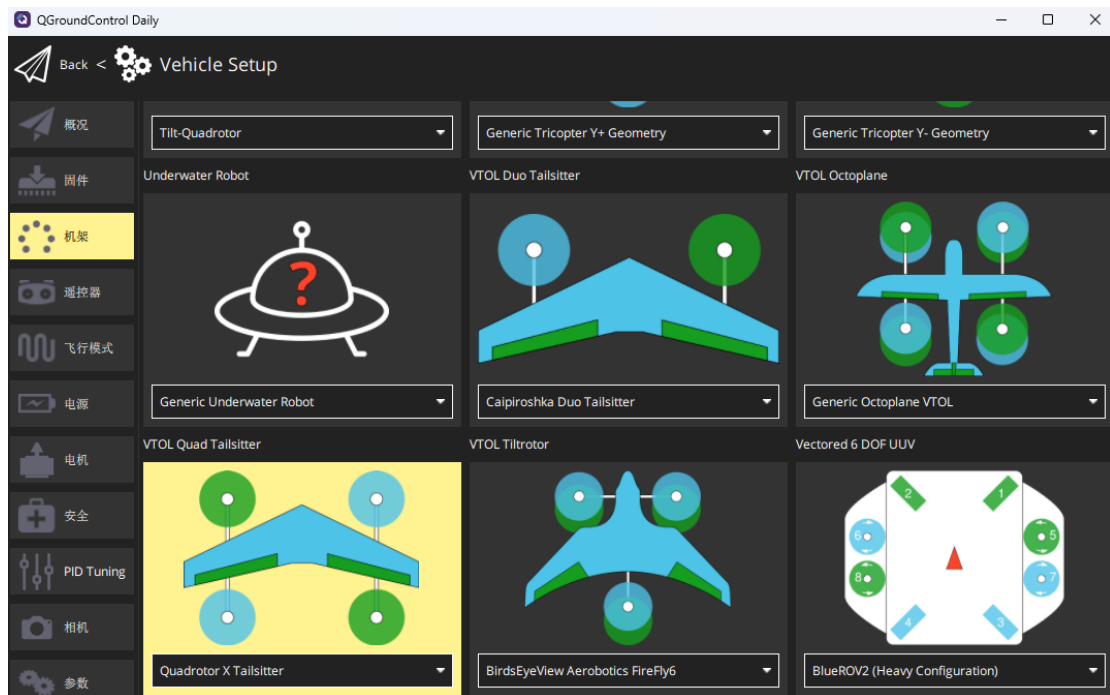


Step 2:

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

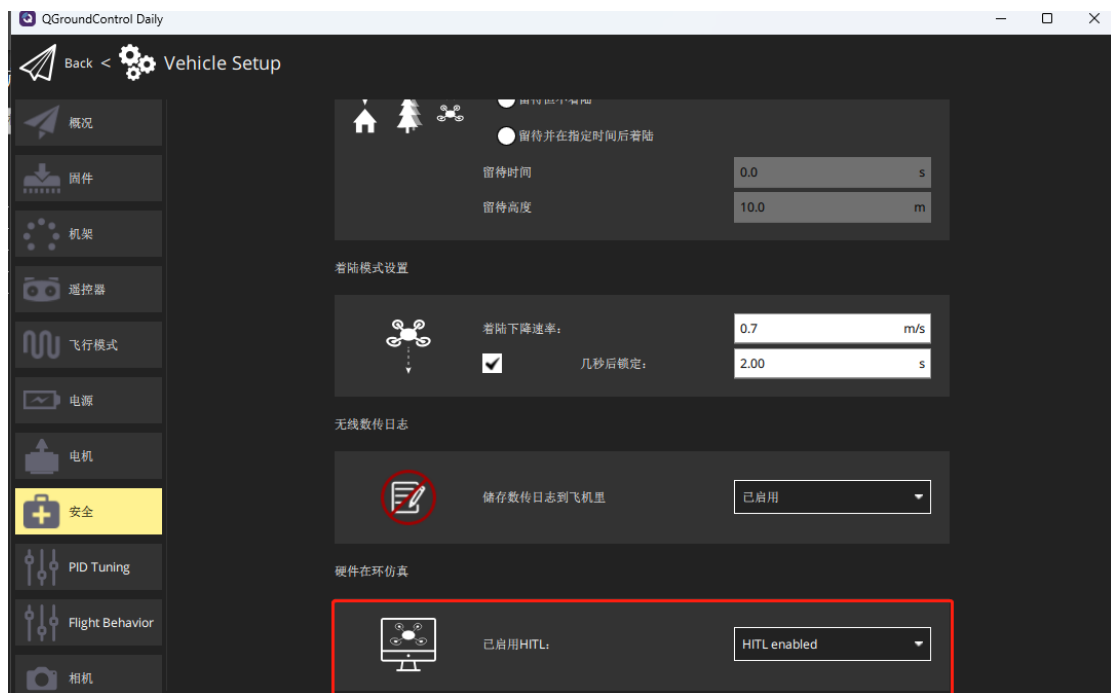
	3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySimUE5	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	SITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	Win10WSL	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB

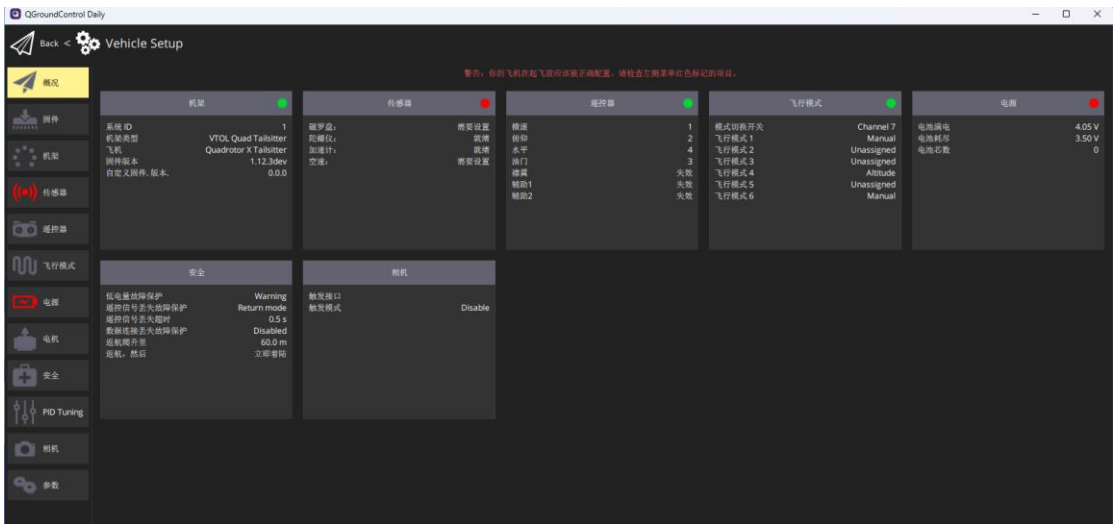
在机架界面设置机架型号为“Quadrotor X Tailsitter”，设置完毕后点击右侧“应用并重启”。



Step 3:

在“安全”界面，选择“HITL enabled”启动硬件在环仿真，之后在概况界面中确认配置完成后，重新插拔飞控完成设置。





Step 4:

右键以管理员身份运行 “Tailsitter_HITL.bat”批处理文件，在弹出的终端窗口中根据提示输入串口号 5，启动一架飞机的硬件在环仿真。

mixfile	2023/10/23 14:17	文件夹	
px4file	2023/10/23 14:17	文件夹	
slprj	2023/11/10 14:56	文件夹	
Tailsitter_ert_rtw	2023/11/10 14:57	文件夹	
GenerateModelDLLFile.p	2023/10/17 15:11	MATLAB.p.9.14.0	6 KB
MavLinkStruct.mat	2023/10/17 15:11	MATLAB Data	5 KB
MulticopterModel.zip	2023/11/10 14:57	压缩(zipped)文件...	131 KB
Readme.docx	2023/10/17 15:11	Microsoft Word ...	12,288 KB
Readme.pdf	2023/10/24 15:33	Foxit PhantomP...	2,050 KB
RflySimModelLab.slx	2023/10/17 15:11	Simulink Model	51 KB
Tailsitter.dll	2023/11/10 14:59	应用程序扩展	301 KB
Tailsitter.slx	2023/11/10 15:02	Simulink Model	59 KB
Tailsitter_HITL.bat	2023/10/17 15:11	Windows 批处理...	6 KB
Tailsitter_init.m	2023/11/10 14:56	MATLAB Code	6 KB
Tailsitter_SITL.bat	2023/10/17 15:11	Windows 批处理...	6 KB
untitled.asv	2023/11/10 14:38	ASV 文件	7 KB


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

-----
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

Available COM ports on this computer are:
COM3: ??????????
COM4: ??????????
COM5: USB ?????
Recommended COM list input is: 3,4,5

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

Step 5:

之后测试步骤与软件在环 Step2 到 Step6 相同,运行之后可在 RflySim3D 中观察无人机是否按照既定轨迹飞行。

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](#)
- [3]. 混控器规则 [..\..\API.pdf](#)

8. 常见问题

Q1.

A1.