

# 1. 实验名称及目的

## 1.1 实验名称

基于系统模板的四旋翼尾座式垂起无人机模型验证（软硬件在环仿真）

## 1.2 实验目的

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，通过本例程熟悉平台的四旋翼尾座式垂起无人机的使用。

## 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[PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\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。

## ■ 载具的基本动力学特性

四旋翼垂尾模型, 分析其运动时可以从固定翼与多旋翼的角度出发。其六自由度运动主要分为沿机体坐标系的三个坐标轴的线性运动和绕坐标轴的转动。在实际建模过程中可以使用现成的刚体六自由度模块 [..\..\RflySimSDK\html\md\\_ctrl\\_2md\\_26DOF.html](..\..\RflySimSDK\html\md_ctrl_2md_26DOF.html) 根据载具运动时机体坐标系下合力和合力矩计算飞机的运动状态。

地面坐标系

$$Ox_gy_gz_g$$

是一种笛卡尔坐标系, 如图所示, 原点取自地面上的某一点 (如飞机在地面跑道上的起飞点),

$$x_g$$

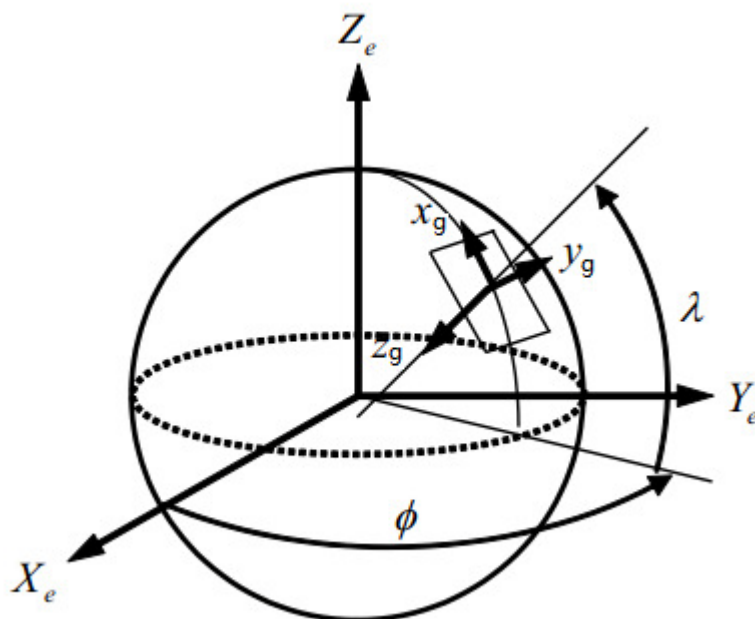
轴位于水平面内, 指向某一固定方向 (如飞机的航线方向),

$$z_g$$

轴垂直于地平面向下指向地心,

$$y_g$$

轴则由右手定则来确定。



机体坐标系

$$Ox_b y_b z_b$$

是固定在飞机本体上的一个坐标系，如图所示，其原点位于飞机的质心，

$$x_b$$

轴与飞行器纵向对称轴一致，向前为正方向。

$$z_b$$

轴在飞行器对称面

$$Ox_b z_b$$

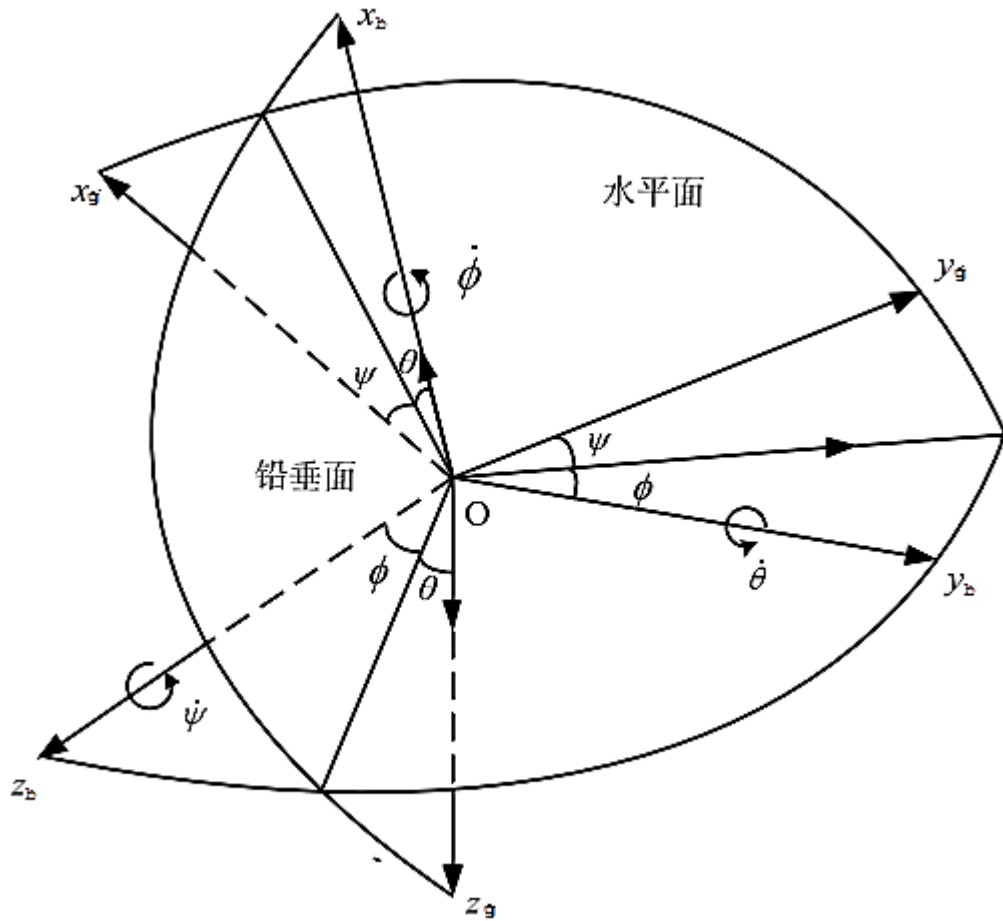
内并且垂直于纵轴，向下为正方向。

$$y_b$$

轴垂直于飞行器对称面

$$Ox_b z_b$$

，向右为正方向。机体坐标系是作用在飞机上的力和力矩的参考坐标系。



气流坐标系

$$Ox_a y_a z_a$$

也被称为风轴系，是飞机速度的参考坐标系。其原点位于质心，

$$x_a$$

轴指向飞机相对于气流的速度矢量方向；

$$z_a$$

轴位于飞机纵向对称平面，垂直于

$$x_a$$

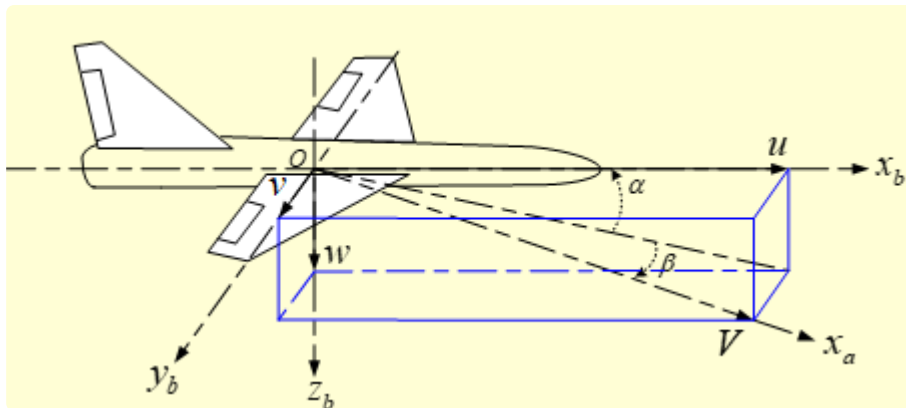
轴指向下方；

$$y_a$$

轴垂直于飞行器对称面

$$Ox_a z_a$$

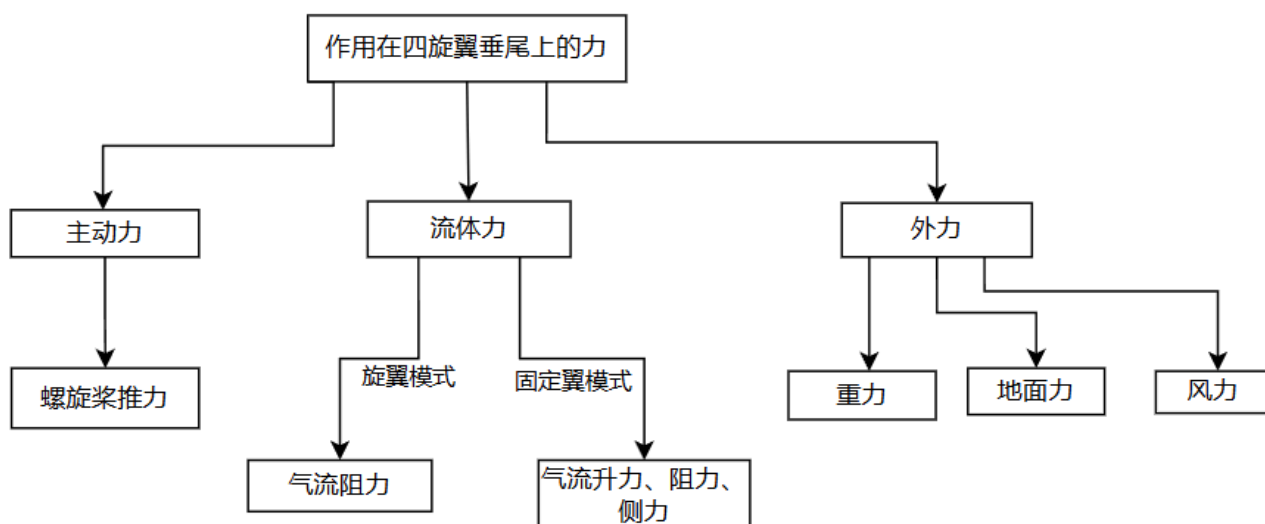
平面指向右方。



## 力和力矩合成

综合实际的执行器响应、载具运动状态以及环境干扰计算出载具实际受到的力和力矩。

四旋翼尾座式垂起无人机，有旋翼、固定翼两种模式，作用在其上的力和力矩根据其所处的模式有所区别，作用在其上的力有：螺旋桨推力、气动力(分为升力、阻力和侧力)、重力、风力及起飞和降落时的地面力。根据其所处的模式可参考多旋翼、固定翼的受力情况。



## 运动的六自由度分解

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）。运动的六自由度根据其所处的模式进行分析，固定翼模式下参考飞翼的六自由度运动，旋翼模式下参考四旋翼的六自由度运动。

## 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指令通过电调模块ESC\_ALL..\..\RflySimSDK\html\md\_ctrl\_2md\_2ESC\_\_ALL.html 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](#))

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

本例程中四旋翼垂尾模型的机架型号为Quadrotor X

Tailsitter，其在\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu\_common\init.d\airframes\13003\_quad\_tailsitter中定义如下：

```
.$R/etc/init.d/rc.vtol_defaults
```

```
param set-default ...
```

执行rc.vtol\_defaults脚本，它包含了垂直起降飞机的默认参数设置，可以用来设置一些基本的系统参数和增益。

同时在13003\_quad\_tailsitter文件中设置混控器（mixer）为quad\_x\_vtol

```
set MIXER quad_x_vtol
```

```
set PWM_OUT 1234
```

## ■ 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](#)

本例的混控文件：

\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu\_common\mixers\

quad\_x\_vtol.main.mix，其中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。

## 载具模型的整体输入输出

标准垂直起降飞机的输入输出与最小模板的基本相同，仅多出一个输入接口 inCopterData。

- 最小模板的输入输出见：

[\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/1.BasicExps/e0\\_MinModelTemp/Readme.pdf](#)

## 2. 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。

## 3. 文件目录

例程目录：

[\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e4\\_VTOLModelCtrl\2.TailsitterModelCtrl](#)

文件夹/ 文件名称	说明	
<a href="#">Tailsitter_HITL.bat</a>	硬件在环仿真批处理文件。	
<a href="#">Tailsitter_SITL.bat</a>	软件在环仿真批处理文件。	

文件夹/ 文件名称	说明	
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

## 4. 运行环境

### 4.1 软件要求

Windows 10及以上版本；RflySim工具链；\。

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://rflysim.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。

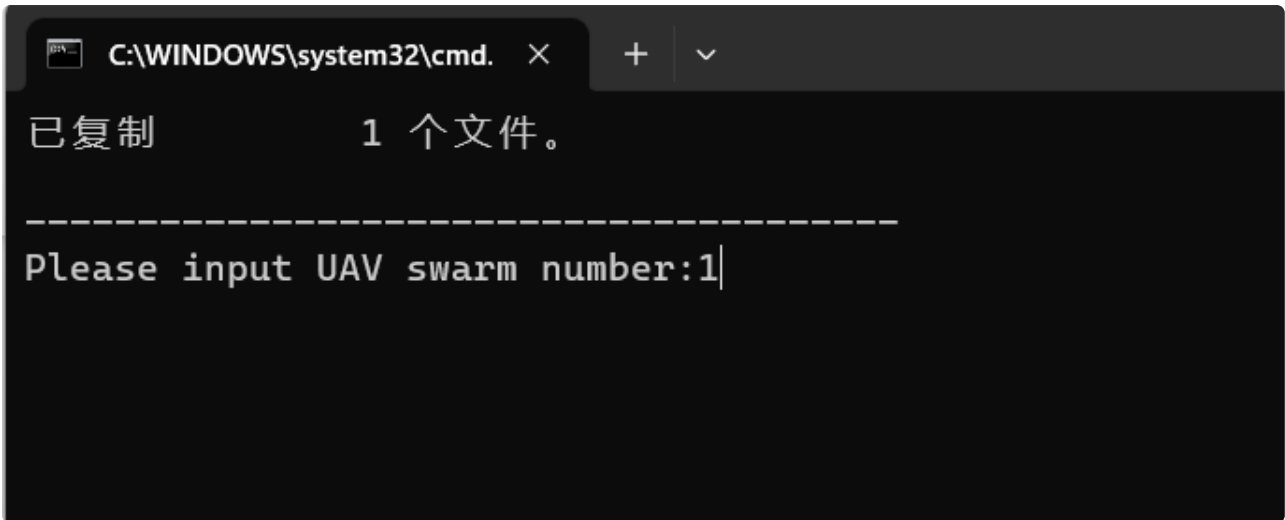
①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

## 5. 实验步骤

### 5.1. 必做实验：软件在环仿真

#### Step 1: 启动仿真

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

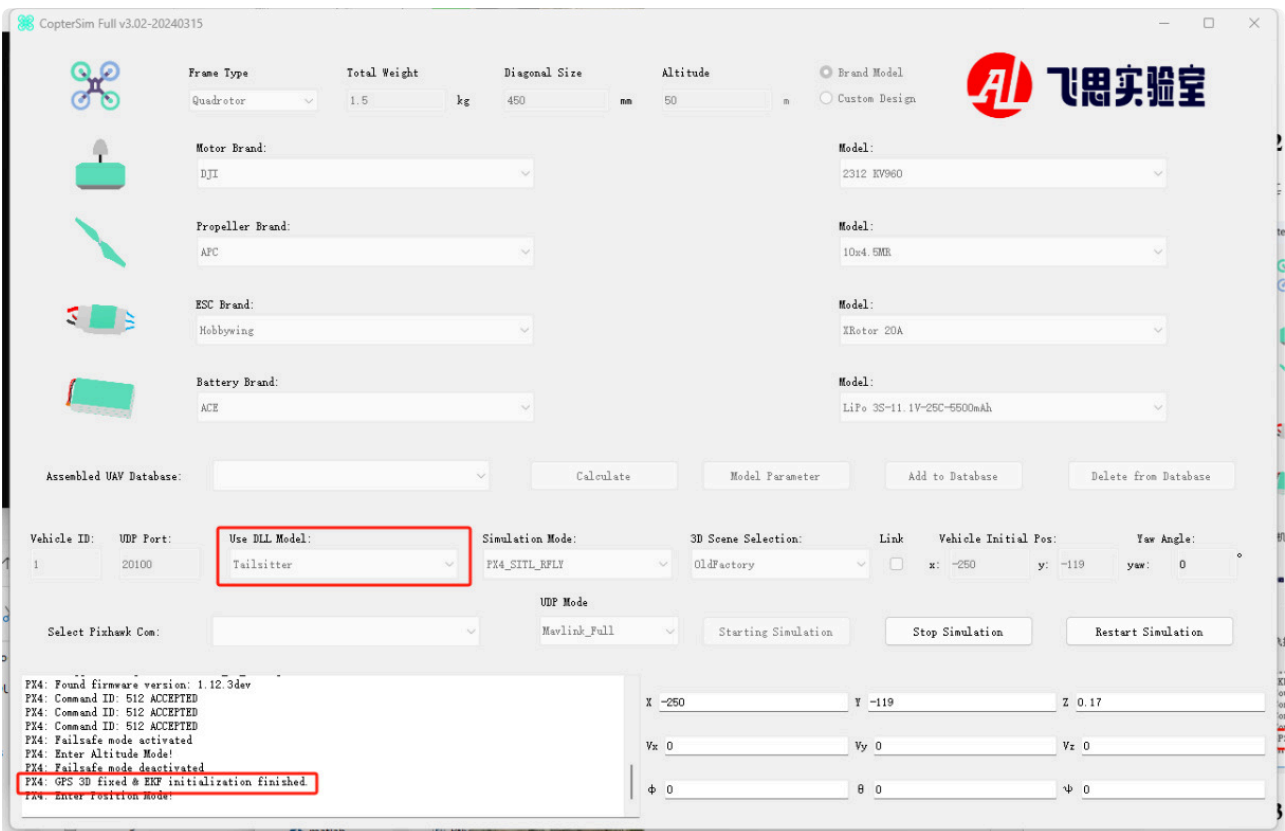


在“Tailsitter\_SITL.bat”软件在环的脚本文件中，确认对应的机架类型。

```
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 (Note: You can also
REM E.g., fixed-wing aircraft: PX4SITLFrame=plane; small cars: PX4SITLFrame=rover generic_vtol_tailsitter quad+_tailsitter
set PX4SITLFrame=tailsitter
```

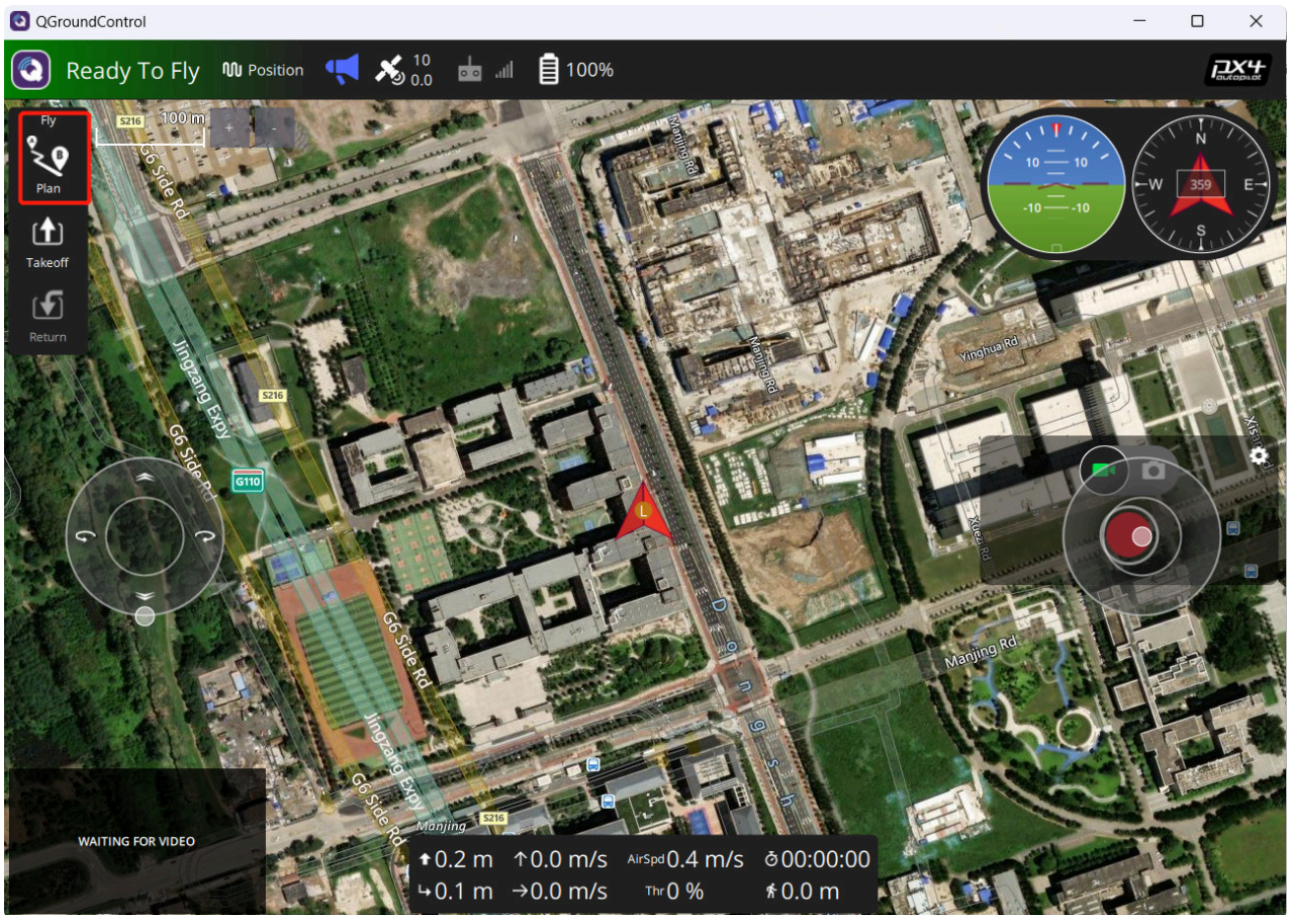
## Step 2: 等待初始化完成

等待 CopterSim 中显示连接上 RflySim3D。

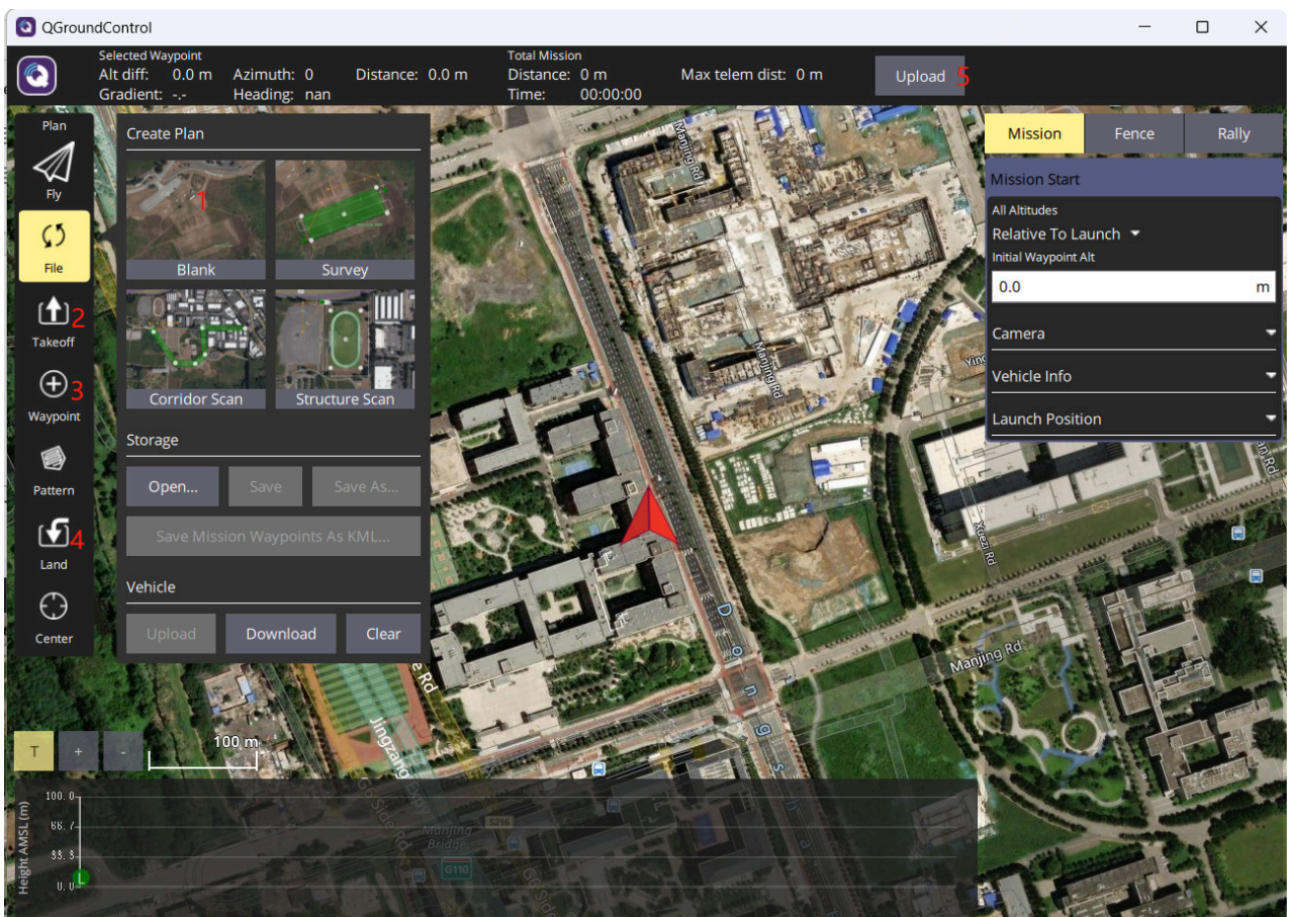


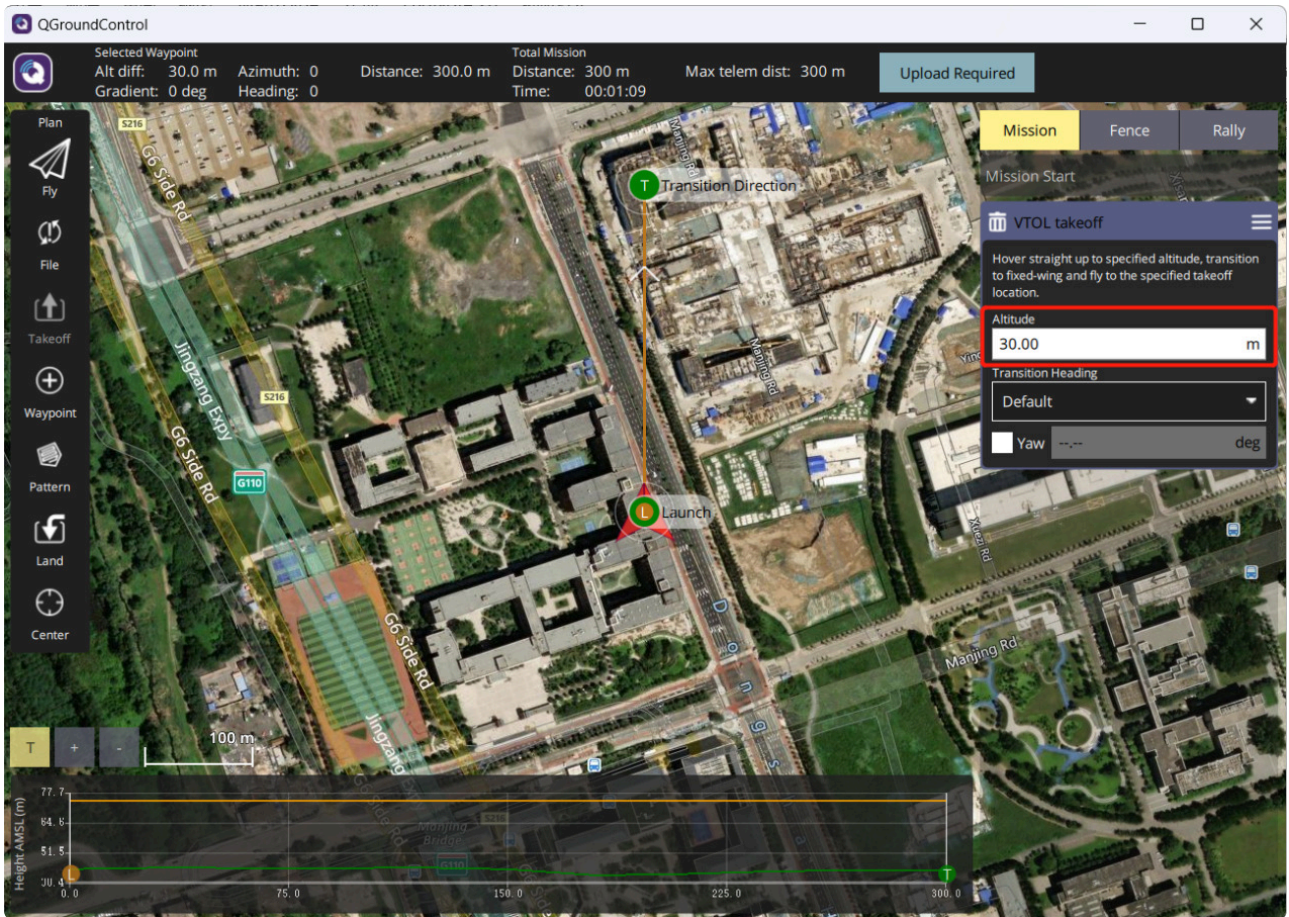
## Step 3: 上传航线

等待初始化完成后，点击QGC上的Plan。

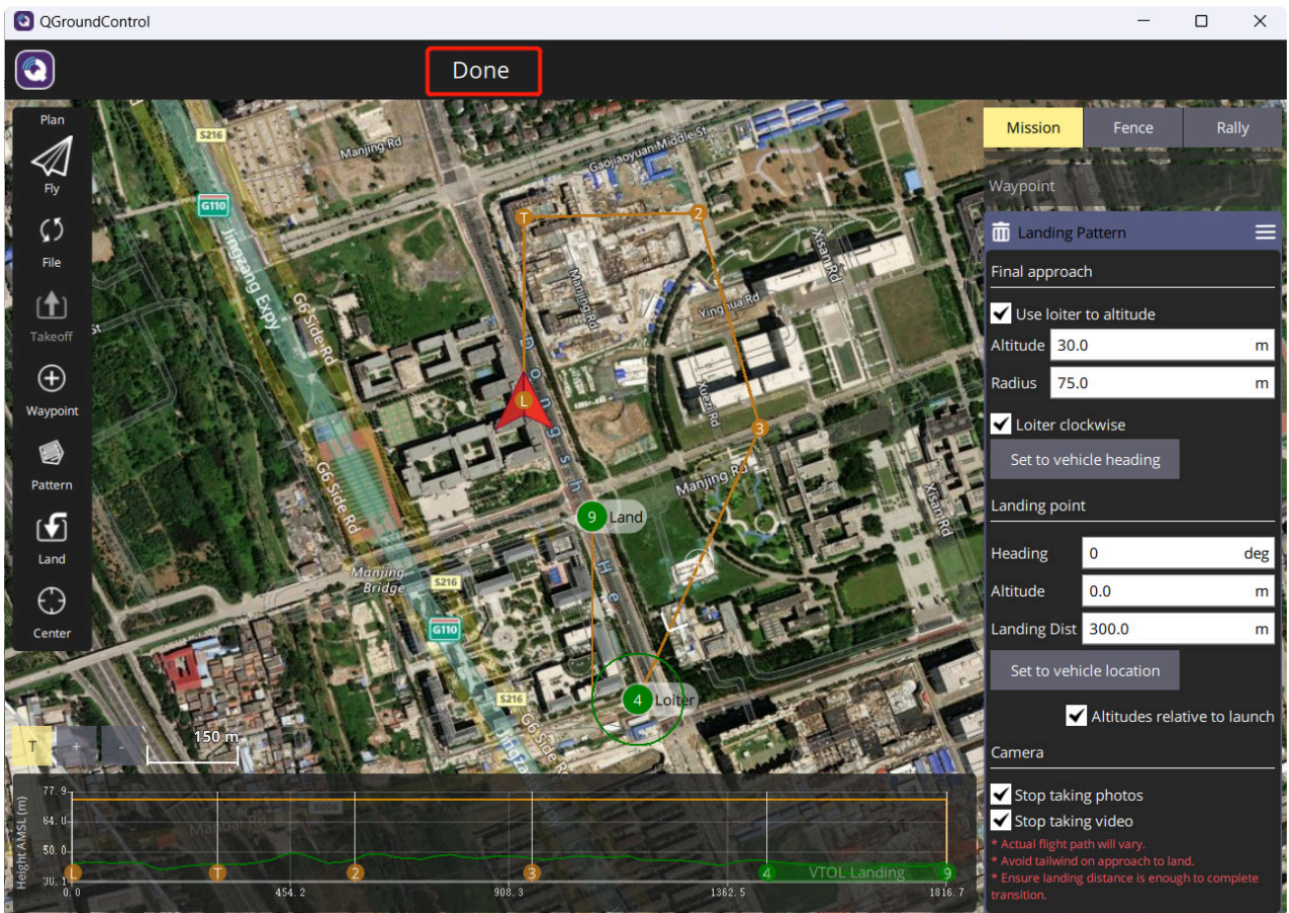


按照下图标注的序号依次点击，要注意在设置起飞点时需要设置高度，否则仿真飞机会触地,本次仿真中高度设置为30m。



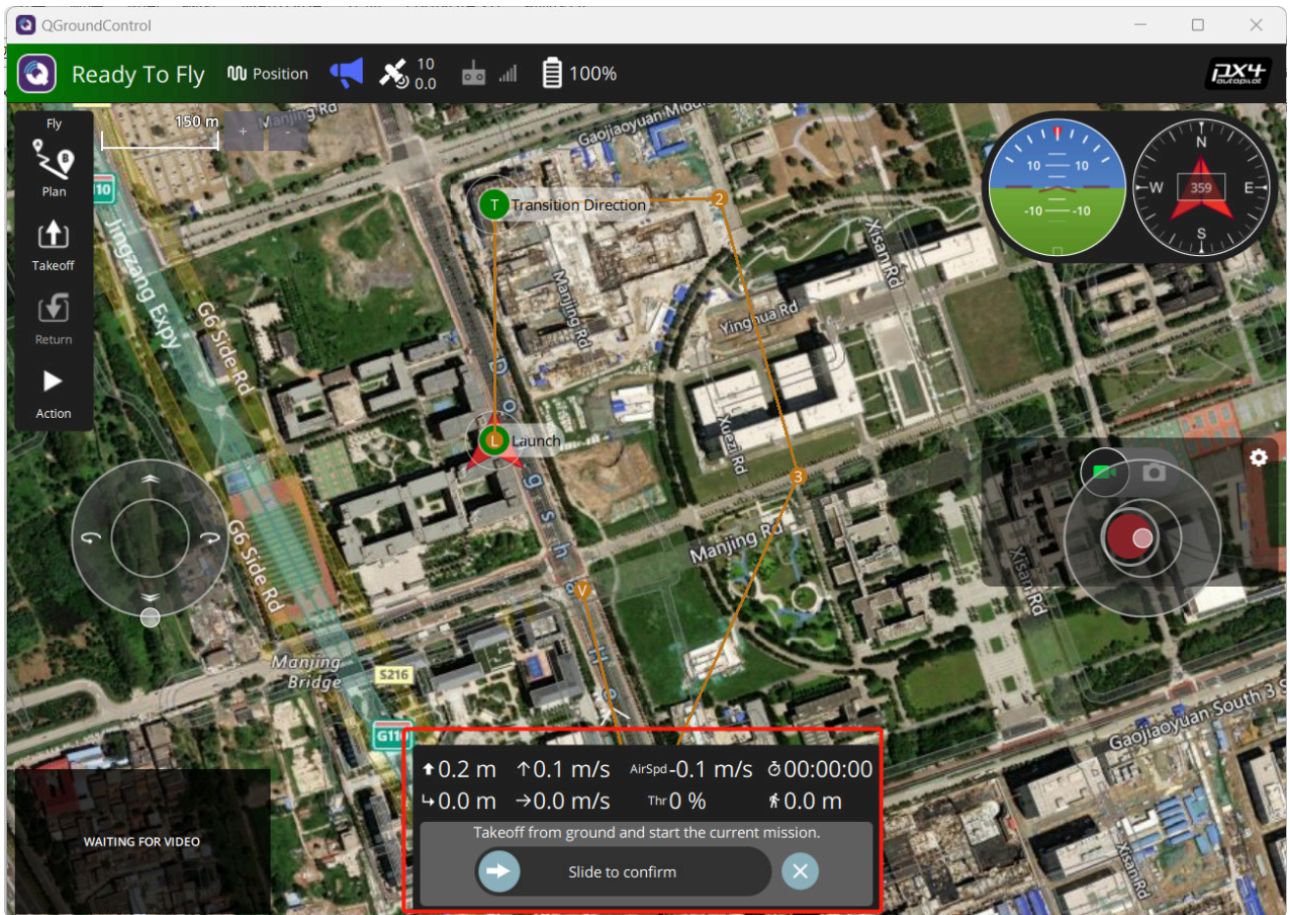


按照上述步骤依次操作后，在QGC上方能看到“Done”表示航线任务上传成功。



## Step 4: 执行任务

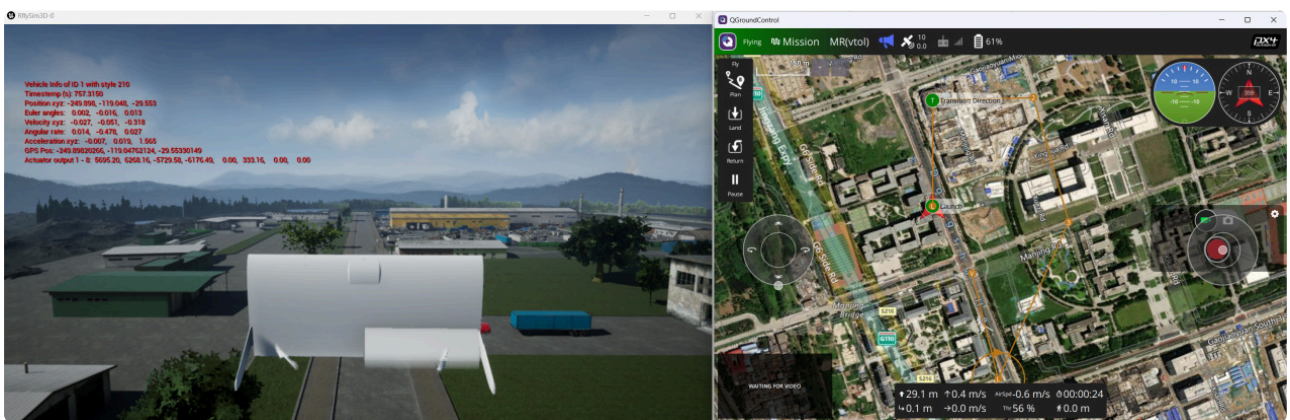
滑动解锁开启航线任务。



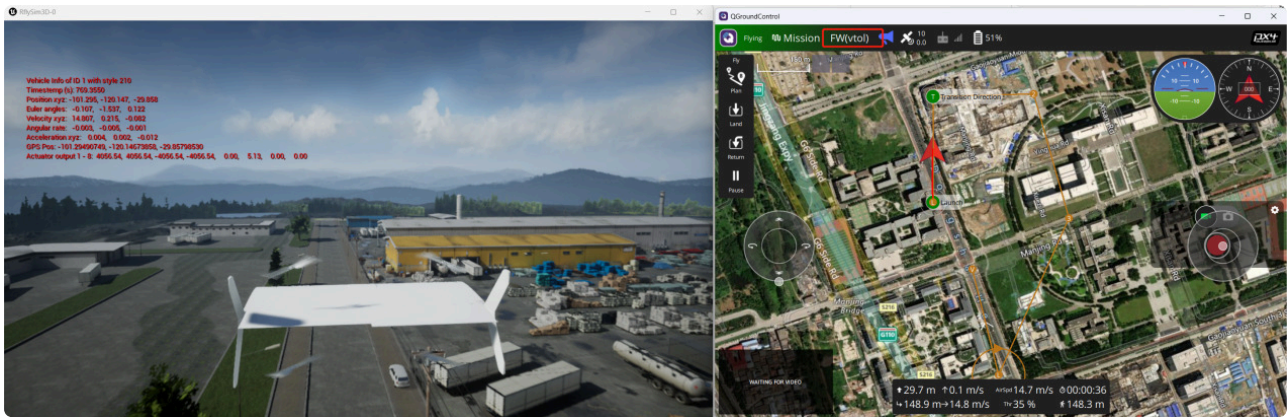
## Step 5: 观察结果

观察飞机的飞行情况：

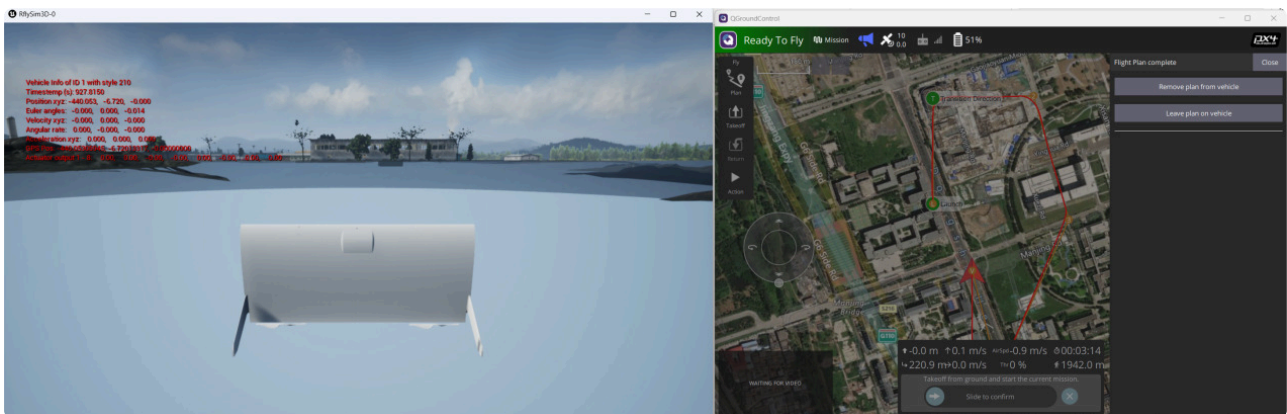
首先，飞机会以旋翼模式起飞到指定高度



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，到达降落点后，飞机切换至旋翼模式降落到指定地点。



## 5.2. 选做实验：硬件在环仿真

### 5.2.1. 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。

按以下步骤进行操作，生成固件。

#### Step 1: 修改混控文件

机架对应的默认混控文件为

```
C:\PX4PSP\Firmware\R0MFS\px4fmu_common\mixers\quad_x_vtol.main.mix
```

```

1 Mixer for Tailsitter with x motor configuration and elevons
2 =====
3 # @board px4_fmu-v2 exclude
4 # @board omnibus_f4sd exclude
5
6 This file defines a single mixer for tailsitter with motors in X configuration. All controls
7 are mixed 100%.
8
9 R: 4x
10
11 # left elevon
12 M: 2
13 S: 1 0 -5000 -5000 0 -10000 10000
14 S: 1 1 5000 5000 0 -10000 10000
15
16 # right elevon
17 M: 2
18 S: 1 0 -5000 -5000 0 -10000 10000
19 S: 1 1 -5000 -5000 0 -10000 10000
20

```

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。

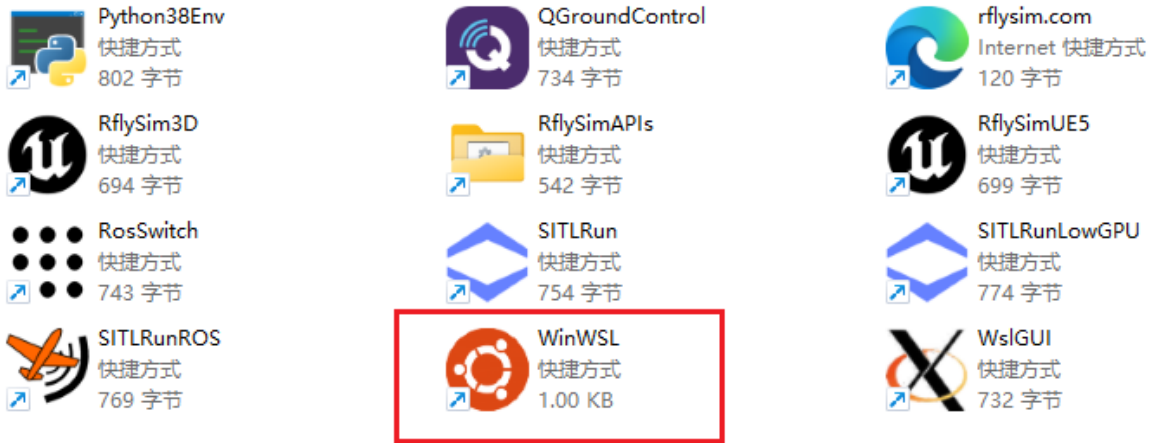
```

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: 重新编译固件

打开RflyTools中的WinWSL。



确保在/mnt/[平台安装目录]/PX4PSP/Firmware文件夹下，输入编译指令：

```
make px4_fmu-v6x_default
```

# 回车，开始编译

The image shows a terminal window with a black background and white text. The terminal prompt is 'root@LAPTOP-30I1D2M0:/mnt/d/PX4PSP/Firmware#'. The command 'make px4\_fmu-v6x.default' has been entered and is being executed. The terminal title bar shows 'root@LAPTOP-30I1D2M0: /m'.

等待编译完成，编译完成后固件位置为[安装目录]\PX4PSP\Firmware\build\px4\_fmu-v6x\_default\px4\_fmu-v6x\_default.px4。

注1：若遇到编译失败，可删除…\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2：使用其他飞控，按照上述操作编译时，输入“make 对应名”，并在对应文件夹内寻找编译好的固件。px4file文件夹中的固件为修改了混控之后编译的固件，分为droneyee\_zyfc-h7\_default.px4和px4\_fmu-v6c\_default.px4，使用对应飞控的可直接进行烧录。

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(zip)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: 固件烧录演示

打开QGC将上一步编译的固件烧录到对应飞控中，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](https://www.bilibili.com/video/BV1sa4y1V7hv/?spm_id_from=333.999.0.0)。



## 5.2.2 仿真流程












### 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）。

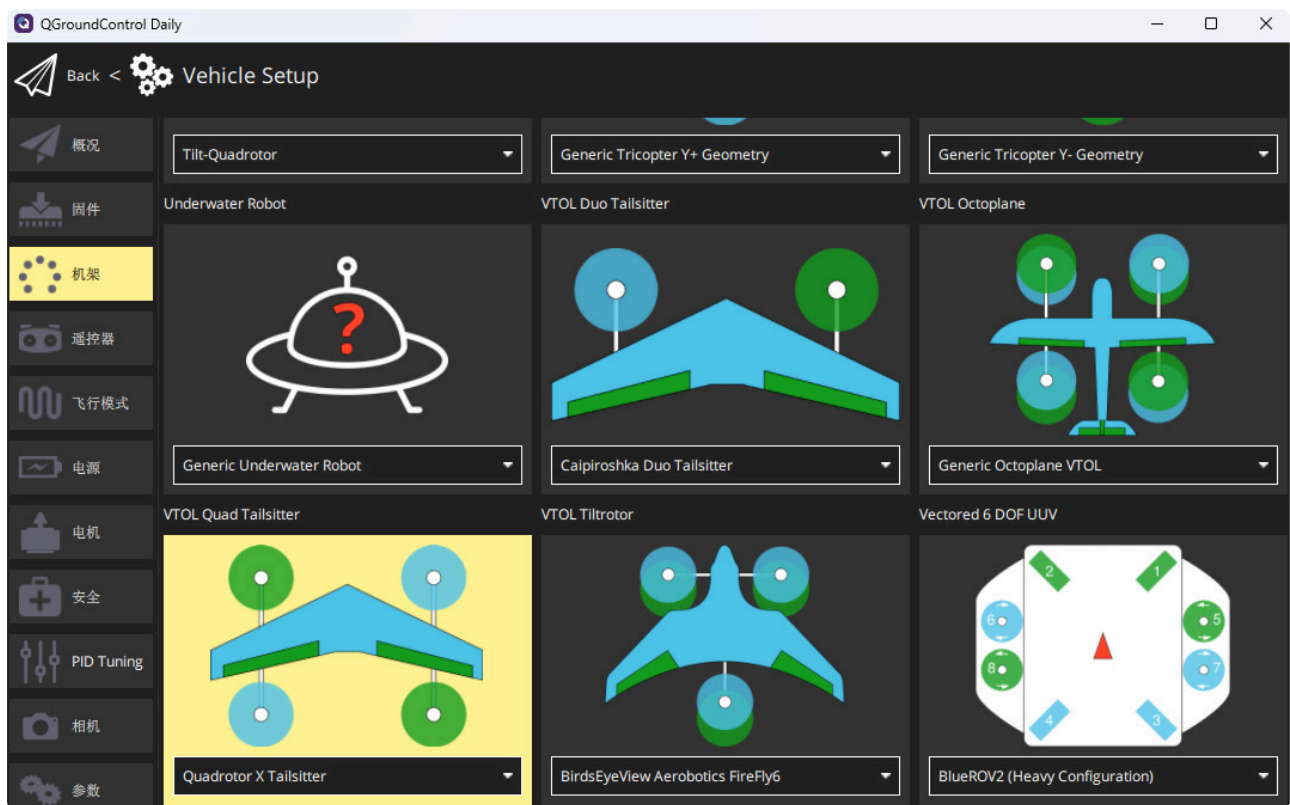


### Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

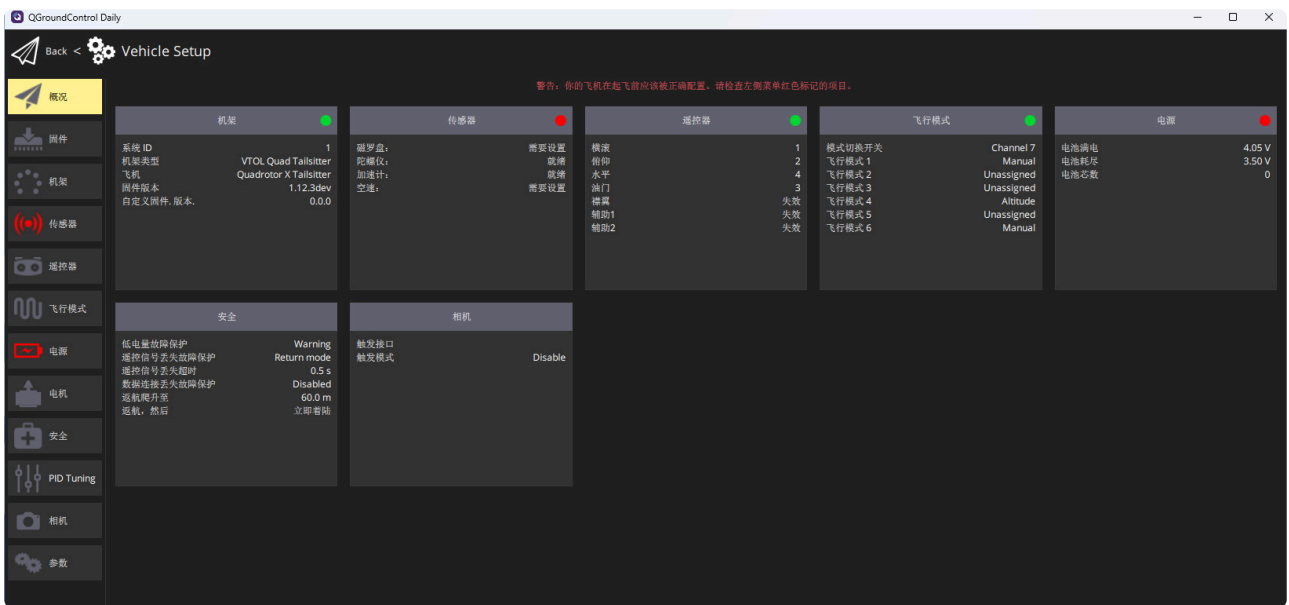
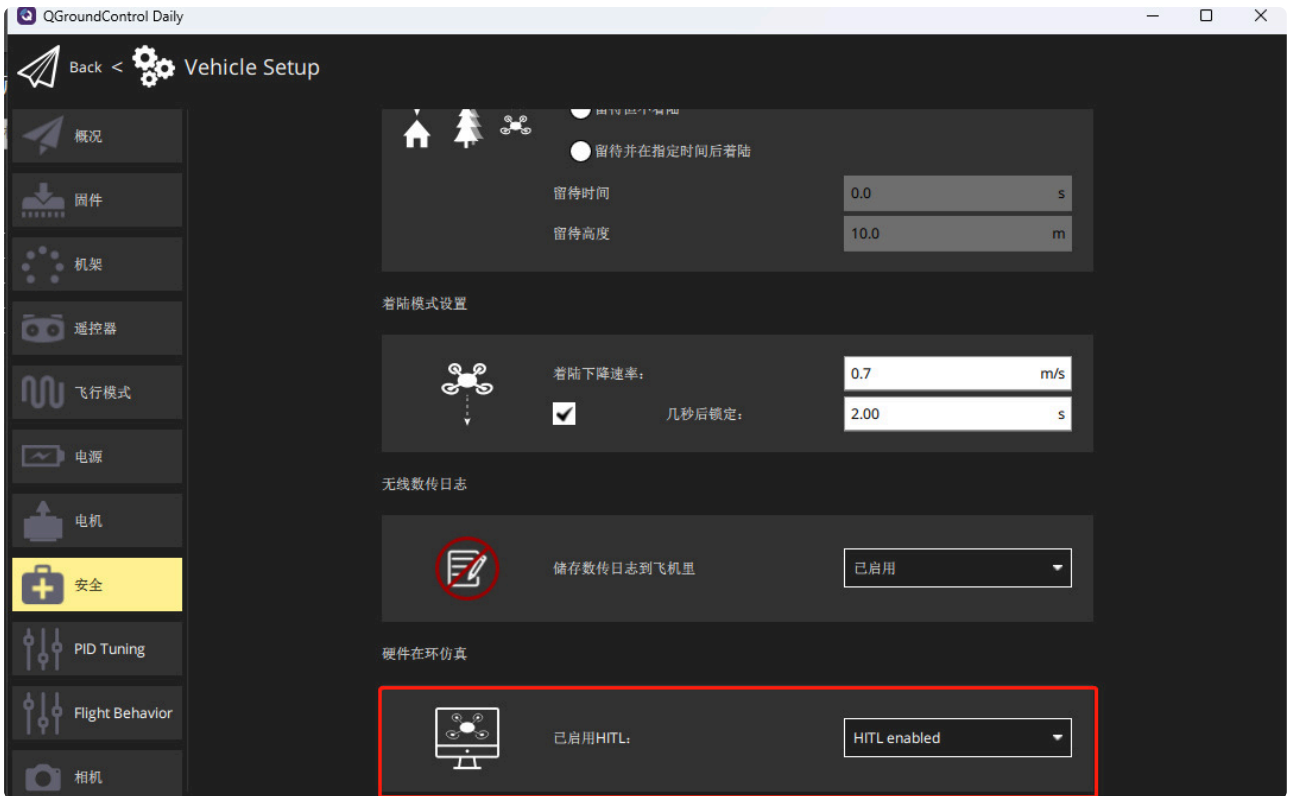
	3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	QGrounControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷方式	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: 配置硬件在环参数

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: 启动仿真

右键以管理员身份运行

“Tailsitter\_HITL.bat” 批处理文件，自动完成所有配置，启动一架飞机的硬件在环仿真。

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

Recommended COM list input is: 3,4,5

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

### Step 5: 仿真过程

之后测试步骤与软件在环仿真的步骤相同，初始化完成后，上传航线并观察无人机的运动状况。

## 6. 参考资料

1. DLL/SO模型与通信接口 [..\..\PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf](#)
2. 外部控制接口 [..\..\PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf](#)
3. 混控器规则 [..\..\PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf](#)
- 4.

## 7. 常见问题

Q1:

A1:

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

