

# 1. 实验名称及目的

## 1.1 实验名称

基于系统模板的高精度四旋翼垂尾模型设计验证（代码生成及软硬件在环仿真）（仅限完整版及以上版本）

## 1.2 实验目的

通过该例程熟悉四旋翼垂尾模型的使用以及软硬件在环仿真步骤。

## 1.3 关键知识点

本实验需要电脑中部署Visual Studio 2022环境，部署方式见：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\1.RflySimIntro\2.AdvExps\6.VisualStudioInstall](#)

## 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](#)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），

$$x_g$$

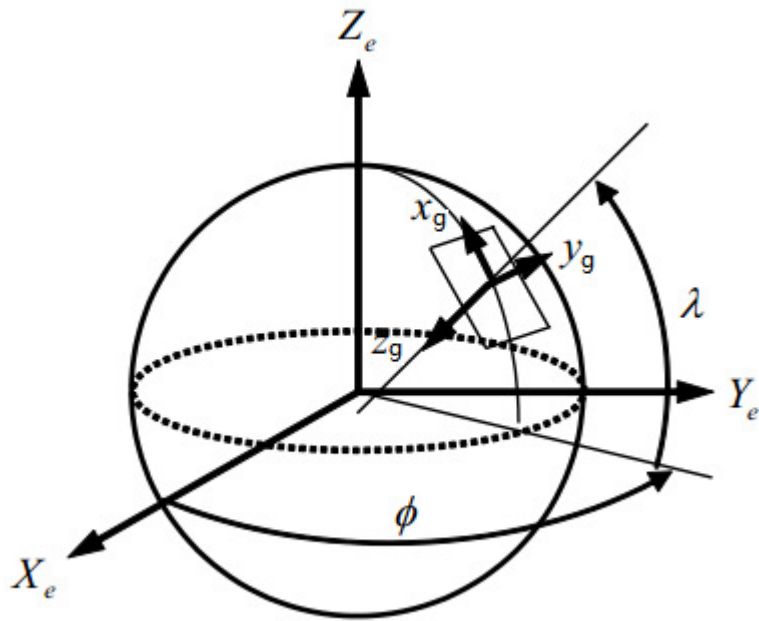
轴位于水平面内，指向某一固定方向（如飞机的航线方向），

$$z_g$$

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

$Ox_b z_b$

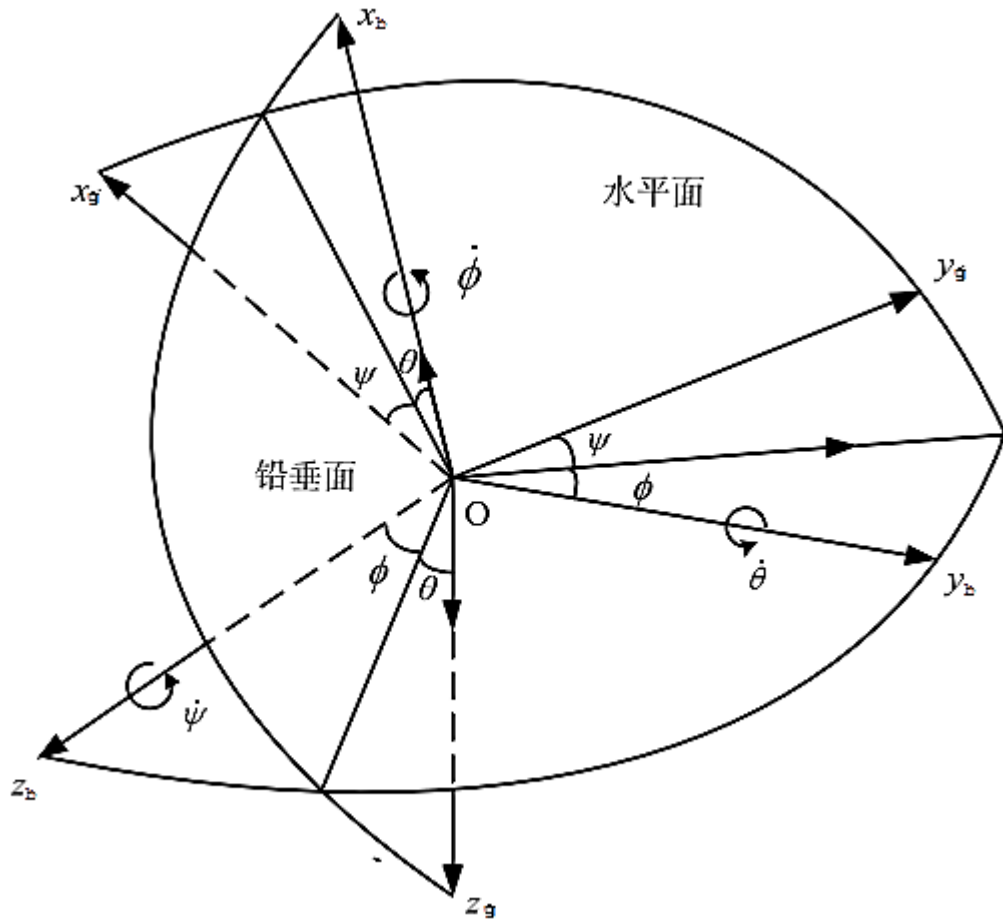
内并且垂直于纵轴，向下为正方向。

$y_b$

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

$$x_a$$

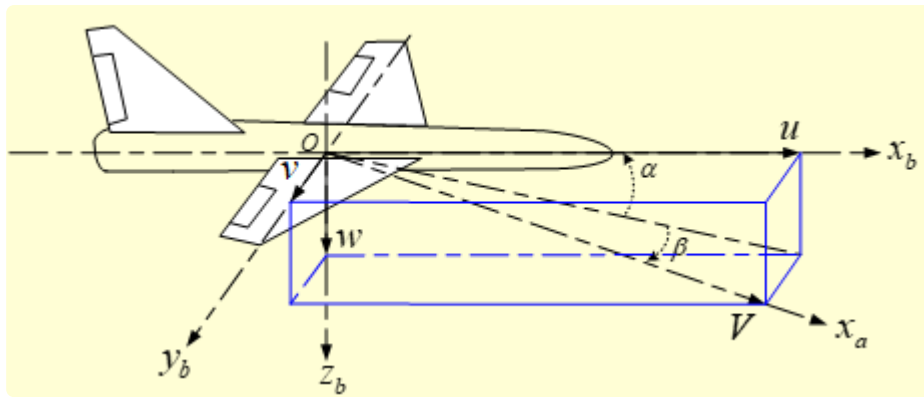
轴指向下方；

$$y_a$$

轴垂直于飞行器对称面

$$Ox_a z_a$$

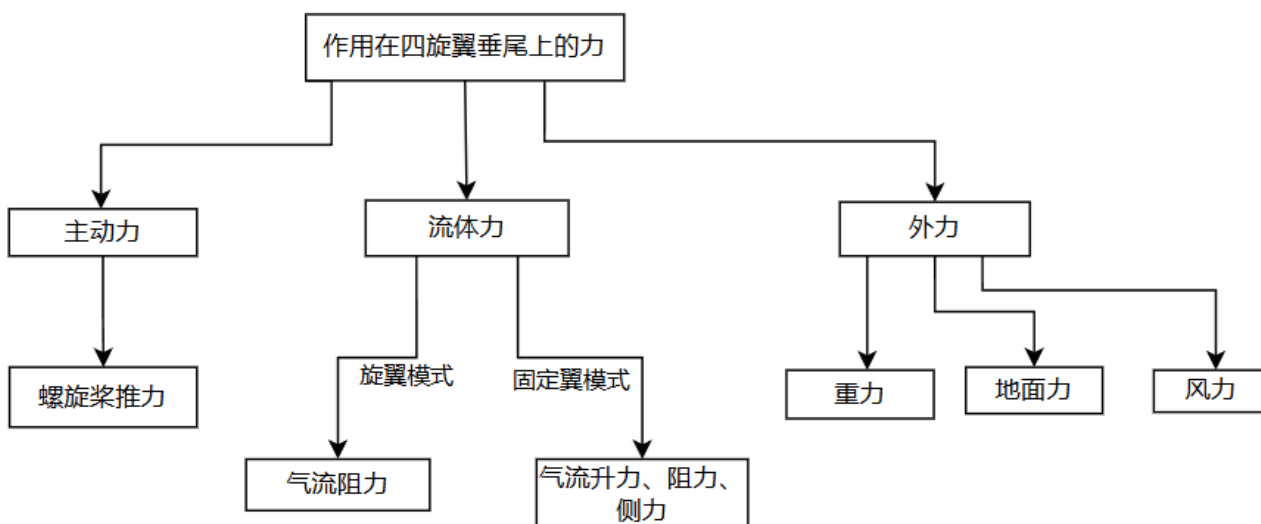
平面指向右方。



## 力 and 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。

四旋翼垂尾模型，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和关键参数

### ■ 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：..\..\1.BasicExps\e0\_MinModelTemp\Readme.pdf

### ■ inCopterData

在最小模板的基础上，多出一个输入接口inCopterData，接收其32维输入的第一位作为执行器解锁标志位。

### ■ 关键参数

参数名	参数	值
三维样式	ModelParam_uavType	int16(243)
初始位置	ModelInit_PosE	[0,0,0]
初始姿态	ModelInit_AngEuler	[0,0,0]
初始速度	ModelInit_VelB	[0,0,0]
初始角速度	ModelInit_RateB	[0,0,0]
飞机质量	ModelParam_uavMass	1.6
转动惯量	ModelParam_uavJ	[0.1476,0,0;0,0.04589,0;0,0,0.1977]
电机数量	ModelParam_uavMotNumbs	int8(4)

参数名	参数	值
电调参数模板	结构体: ESCTmp 如下: ESCTmp.isEnabled= false; ESCTmp.input_offset = 0; .....	
电机通用参数模板	结构体: motorTmp 如下: motorTmp.isEnabled=false; motorTmp.input_index = 0; .....	
固定翼参数模板	结构体: LiftDragTemp 如下: LiftDragTemp.isEnabled= false; LiftDragTemp.cla=4.752798; .....	

## 2. 实验效果

能生成四旋翼垂尾的DLL模型；软硬件在环仿真时支持QGC航线任务，包括旋翼起飞、固定翼前飞、盘旋和旋翼降落。

## 3. 文件目录

例程目录：

[\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\3.CustExps\3\\_VTOLModelCtrl\4.Tailsitter](#)

文件夹/文件名称	说明
tailsitter.slx	四旋翼垂尾模型源程序。
<a href="#">tailsitter_HITL.bat</a>	四旋翼垂尾模型硬件在环仿真启动脚本。
<a href="#">tailsitter_SITL.bat</a>	四旋翼垂尾模型软件在环仿真启动脚本。
GenerateModelDLLFile.p	DLL格式转化文件。
<a href="#">tailsitter_init.m</a>	四旋翼垂尾模型参数初始化文件。
MavLinkStruct.mat	MavLink数据结构体mat文件
RflySim3D	四旋翼垂尾三维模型文件

## 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。

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/>

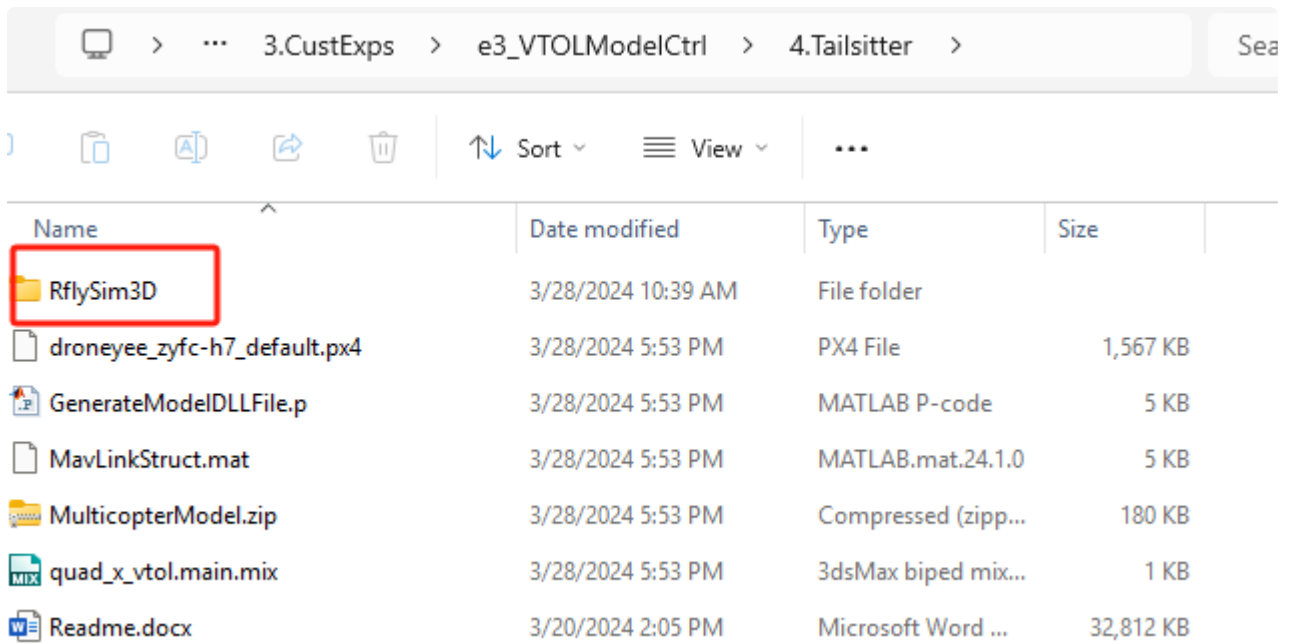
## 5. 实验步骤

### 5.1. 必做实验：添加四旋翼垂尾三维模型

#### Step 1: 添加模型文件

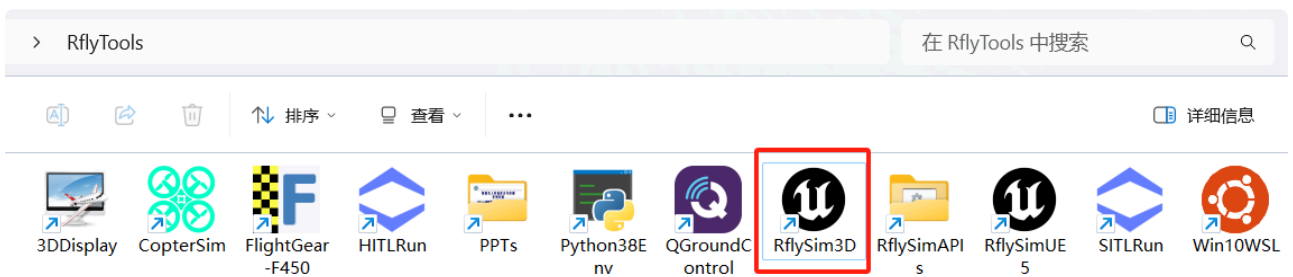
首先将RflySim3D整个文件夹，即Tailsitter文件夹复制到“C:\PX4PSP\RflySim3D\

RflySim3D\Content”（此时平台安装在C盘，若平台安装在其他盘，如D盘，则为D:\PX4PSP\\*\*）路径下。

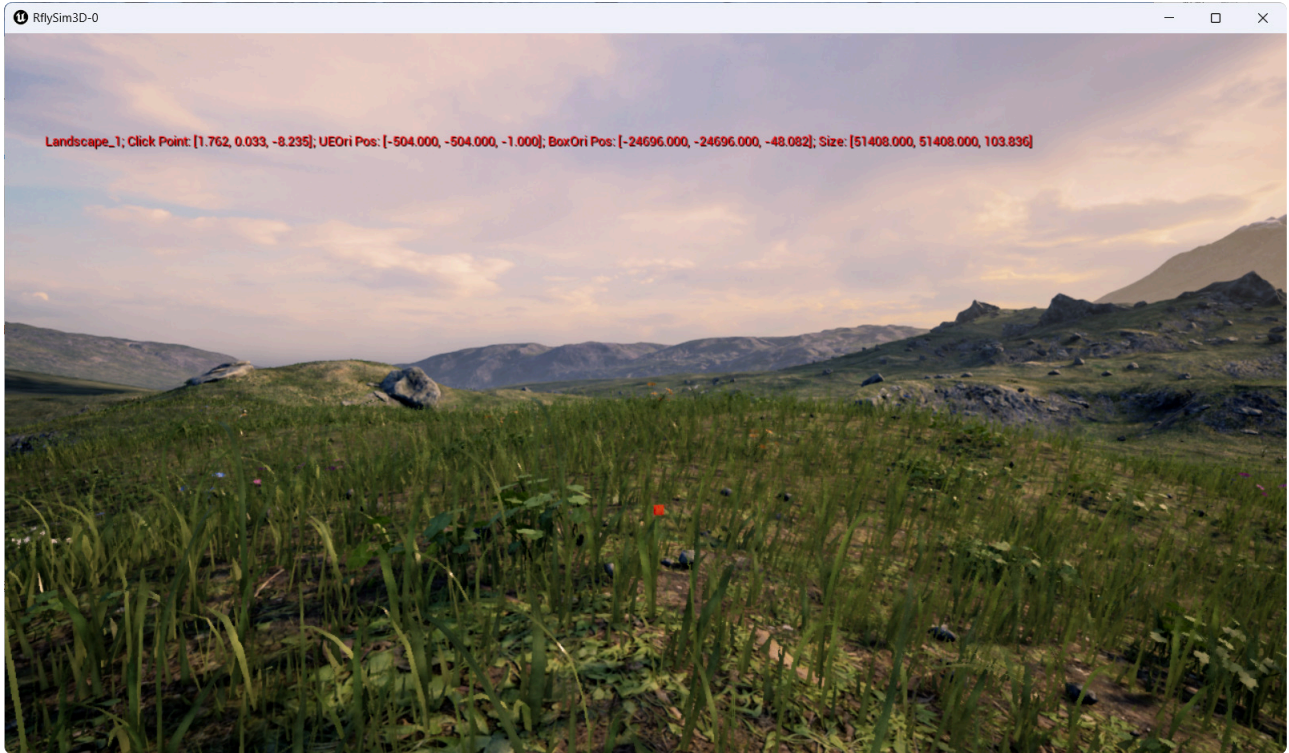


## Step 2: 打开RflySim3D

打开桌面RflyTools中的RflySim3D软件。



双击RflySim3D地图中的地面。



### Step 3: 查看导入模型

按下“O+243”，如果能看到图中模型，则四旋翼垂尾三维模型导入成功。

(243为四旋翼垂尾三维模型对应的uavtype值)。

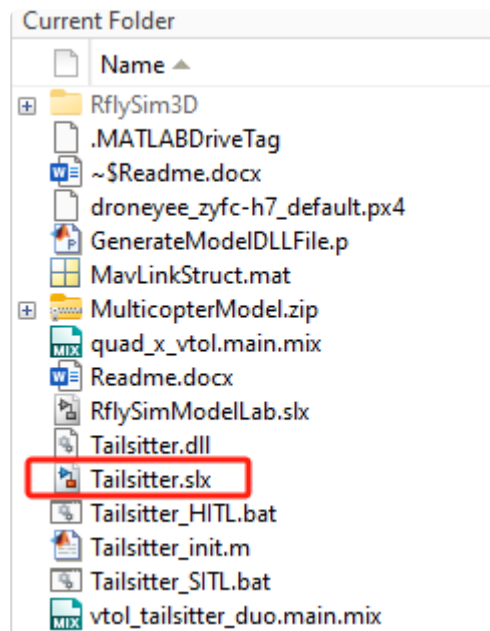


## 5.2. 必做实验：DLL模型生成

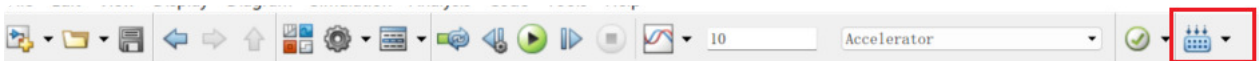
### Step 1: 编译模型

在Matlab中打开“tailsitter.slx” Simulink 文件，点击Build Model 按钮生成代码。编译配置可参考

[4.RflySimModel\0.ApiExps\2.UserDefinedC++\2.GenC++\Readme.pdf](#)

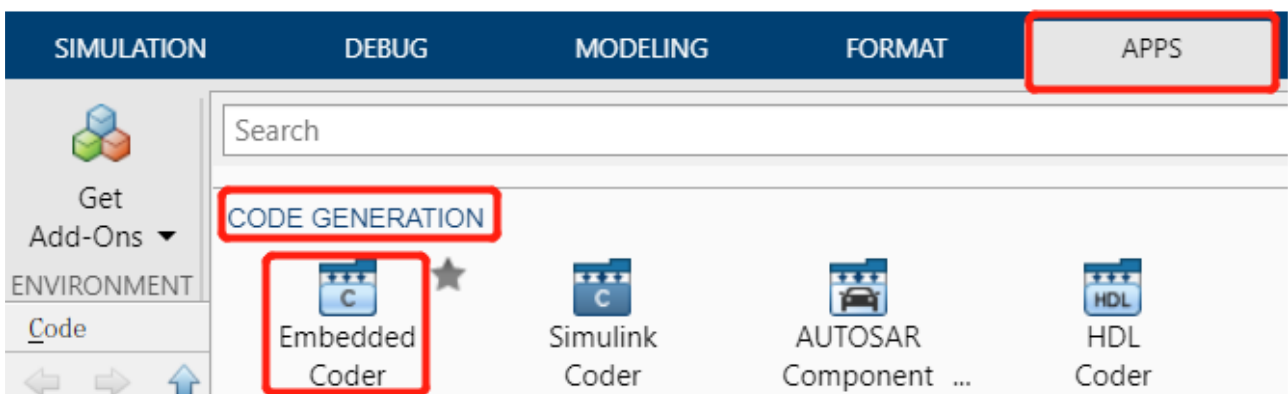


对于MATLAB 2019a及之前版本，工具栏样式见下图，直接点击它的编译按钮“Build”即可。

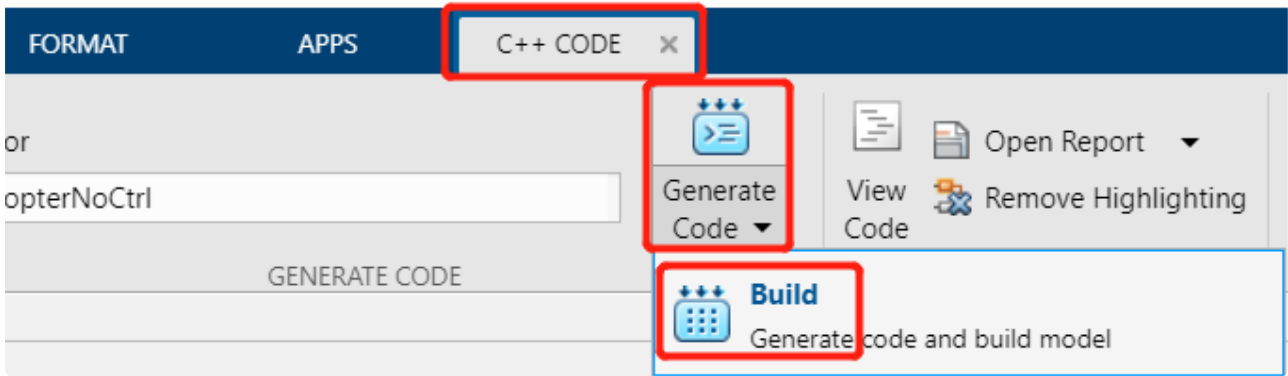


对于2019b及之后版本，点击APPS - CODE GENERATION - Embedded Coder才能弹出代码生成工具栏，在其中如下图所示点击“C++CODE” - “Generate Code” - “Build”按钮就能编译生成代码。

MulticopterCtrlVelocity/Force and Moment Model - Simulink

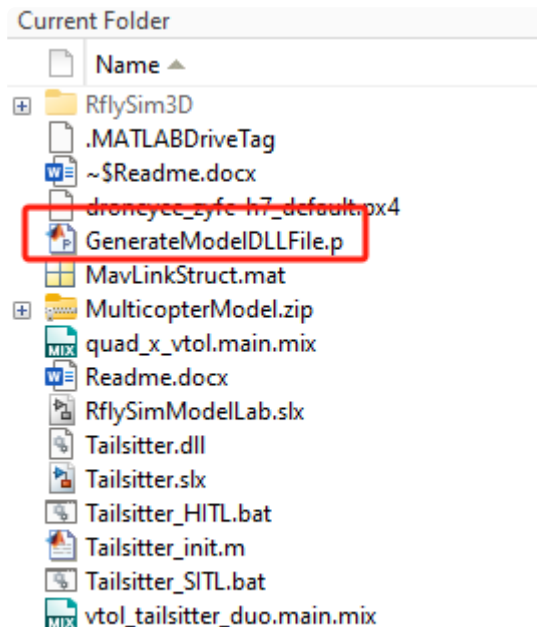


k



## Step 2: 生成DLL文件

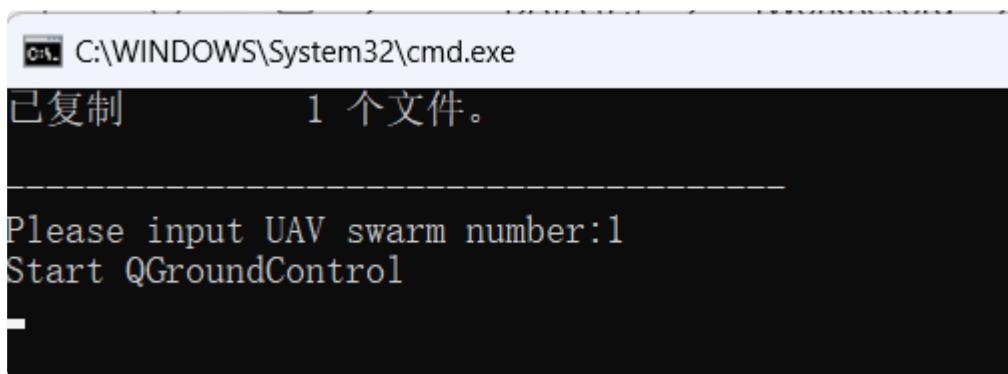
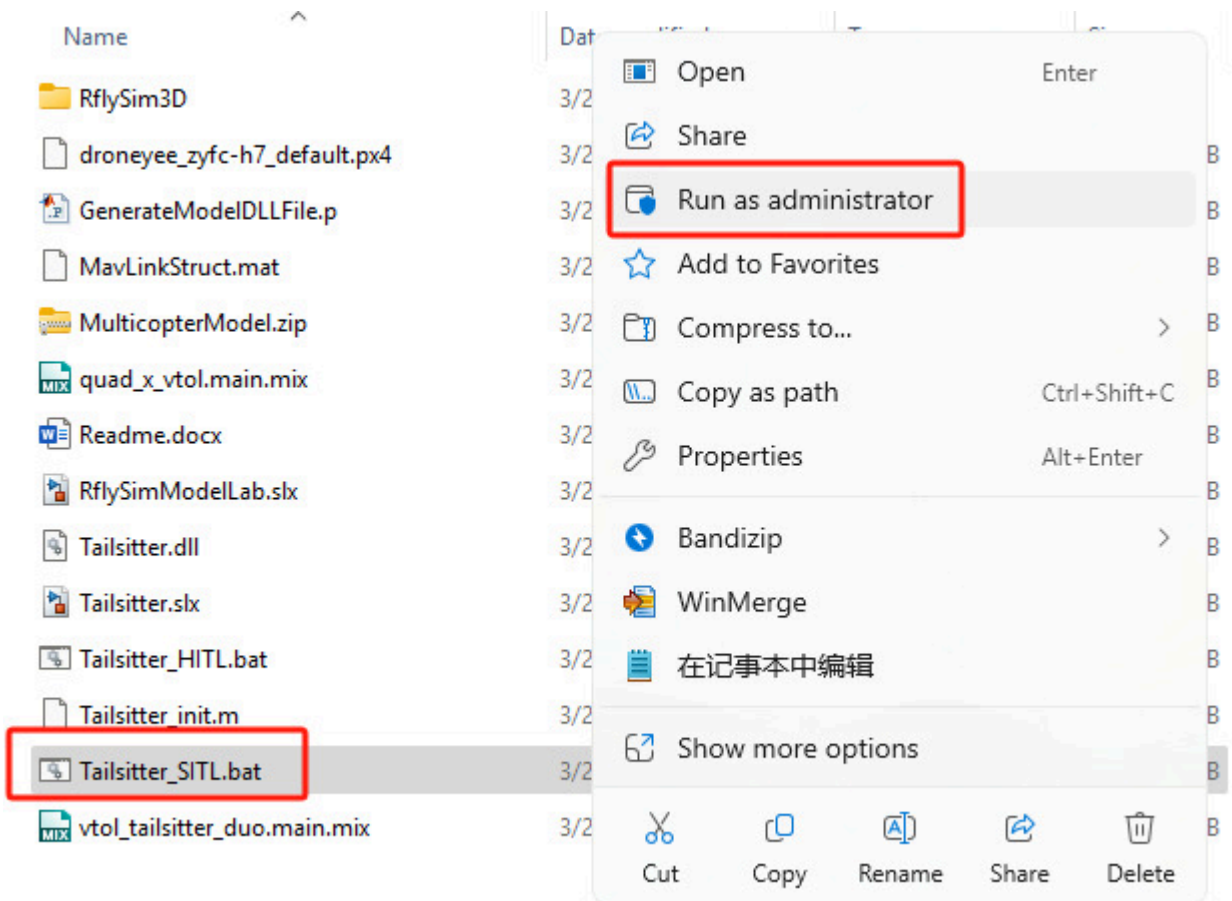
代码生成完毕后，在 matlab 中右键“GenerateModelDLLFile.p”文件，点击运行，生成 DLL 文件。



## 5.3. 必做实验：软件在环仿真

### Step 1: 启动仿真

以管理员身份运行“tailsitter\_SITL.bat”批处理文件，在弹出的终端窗口中输入 1，启动1架四旋翼垂尾的软件在环仿真。

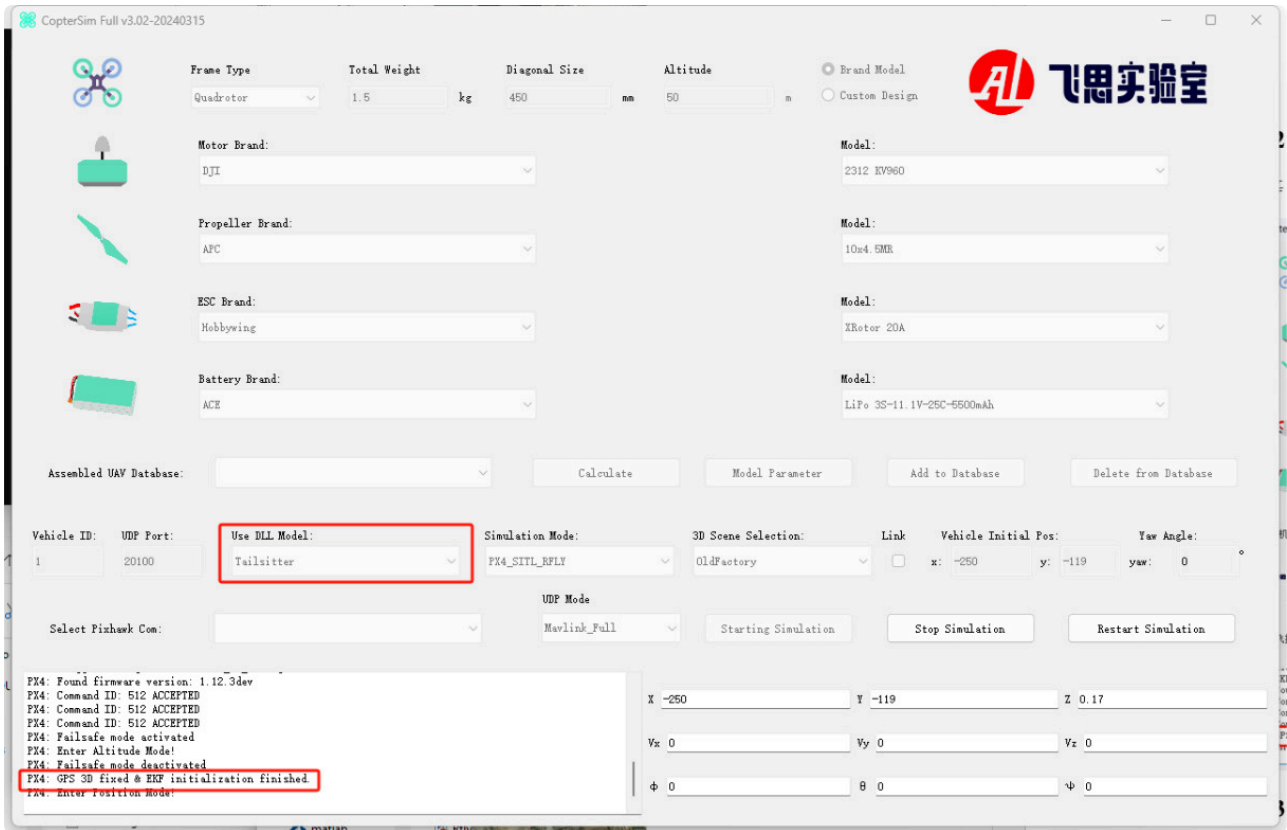


在“tailsitter\_SITL.bat”软件在环的脚本文件中，确认对应的机架类型。

```
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

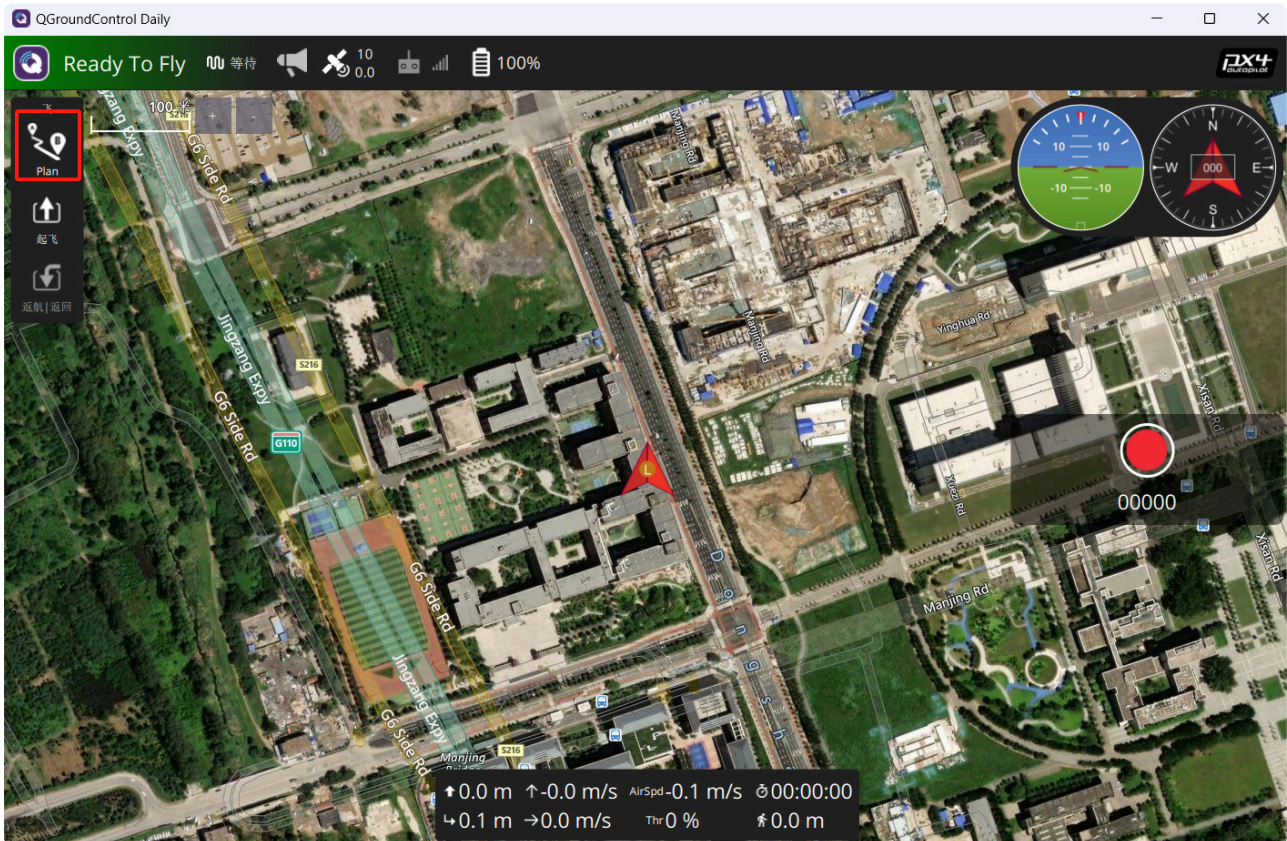
等待 CopterSim 中显示连接上 RflySim3D。



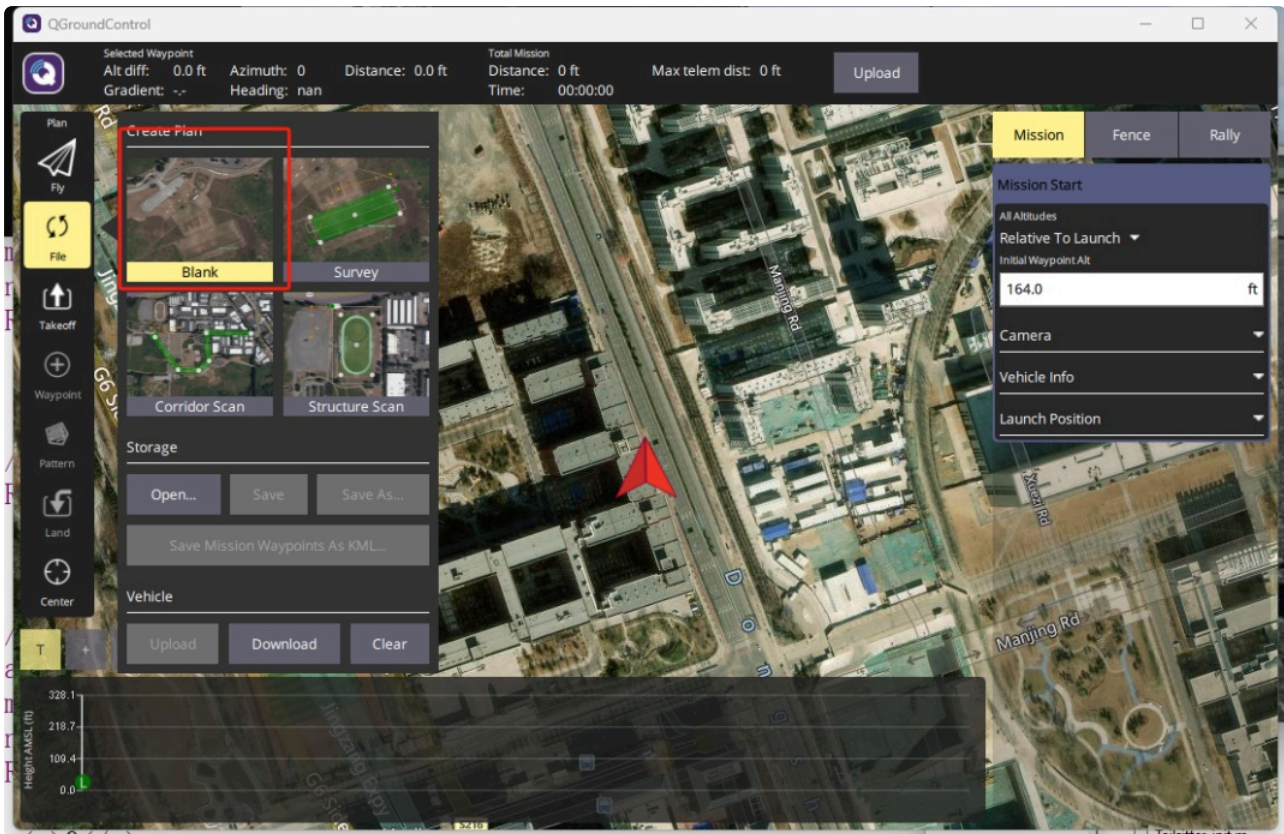
## Step 3: 上传航线

在QGC中上传航线:

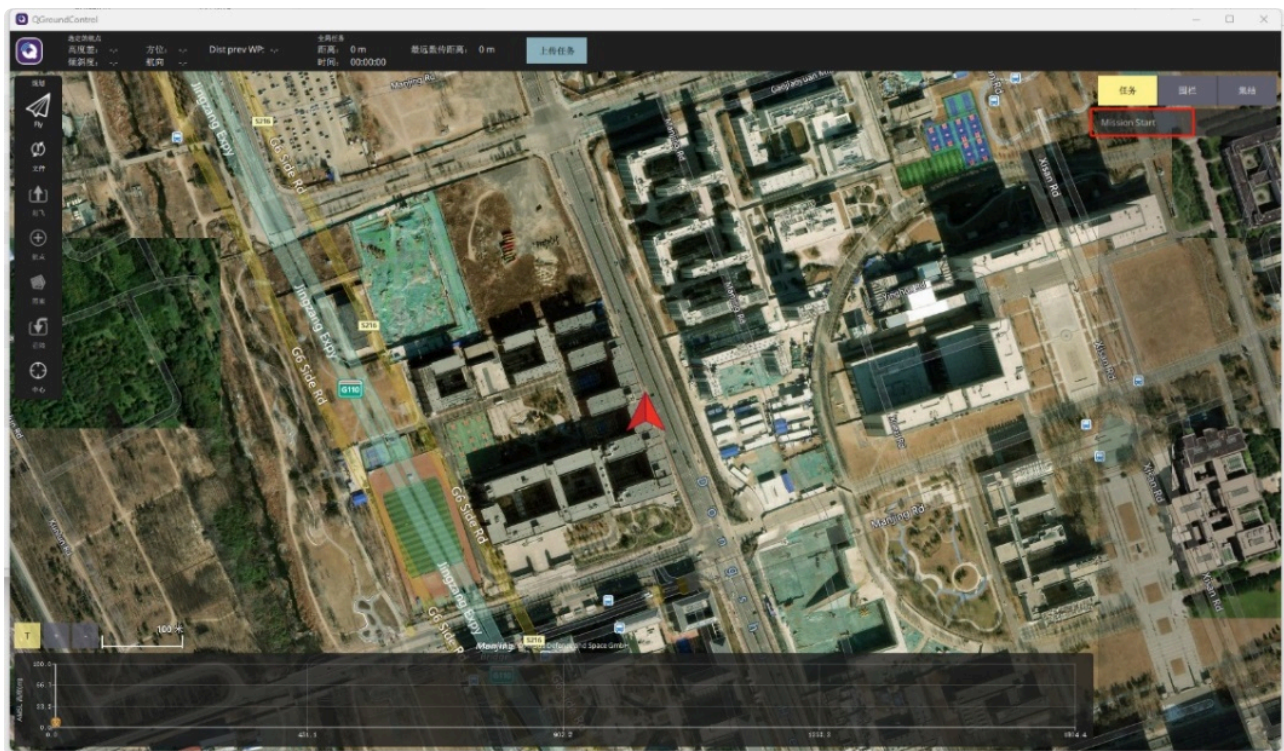
1. 点击QGC左上角的“Plan”。



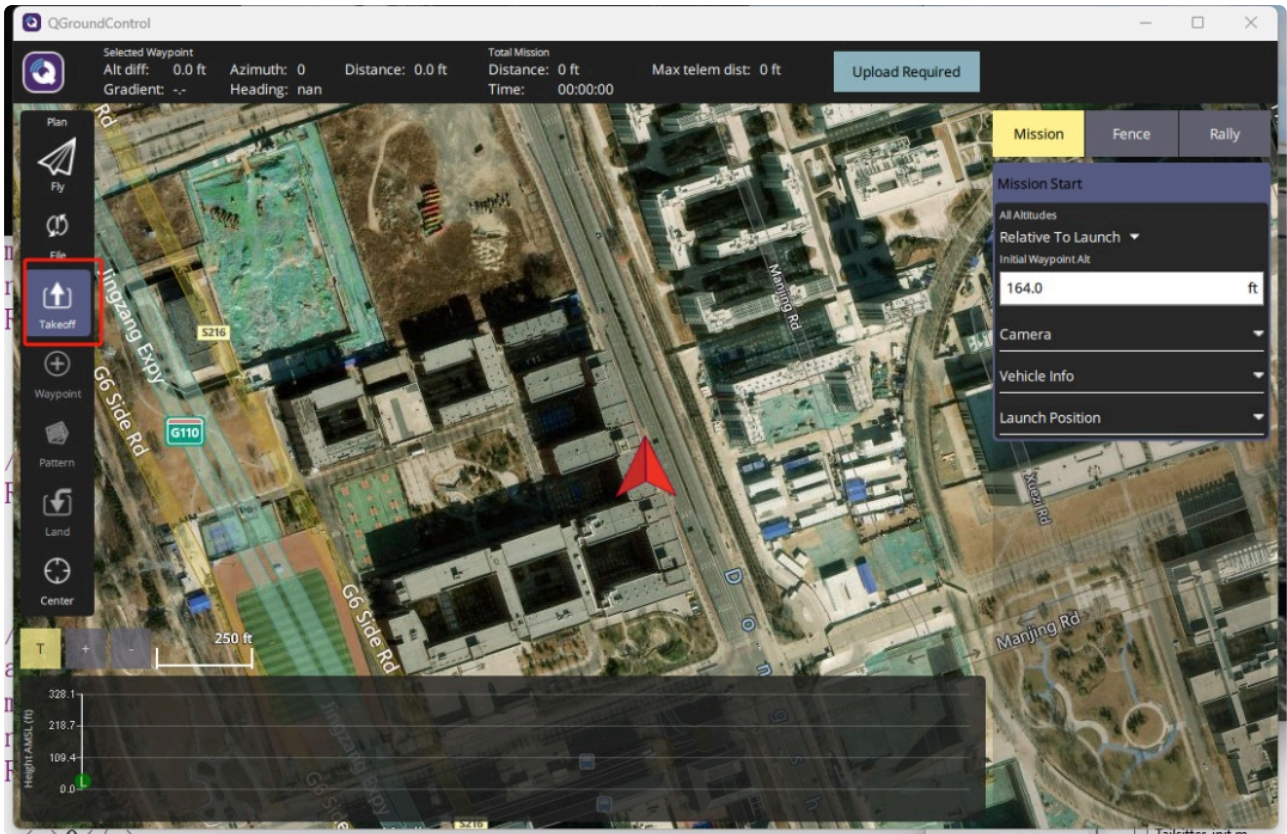
2. 点击“空”，选择一个空的计划。



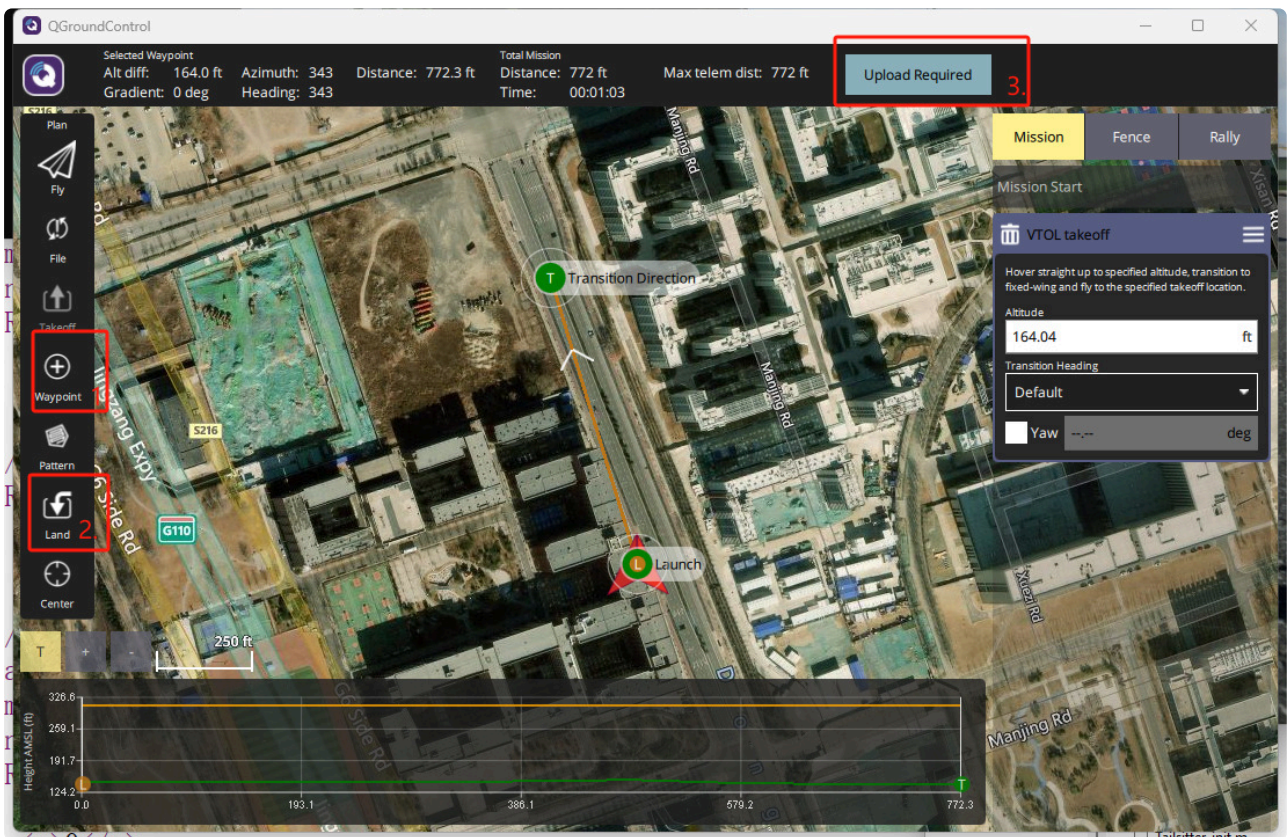
首先点击“任务开始”按钮



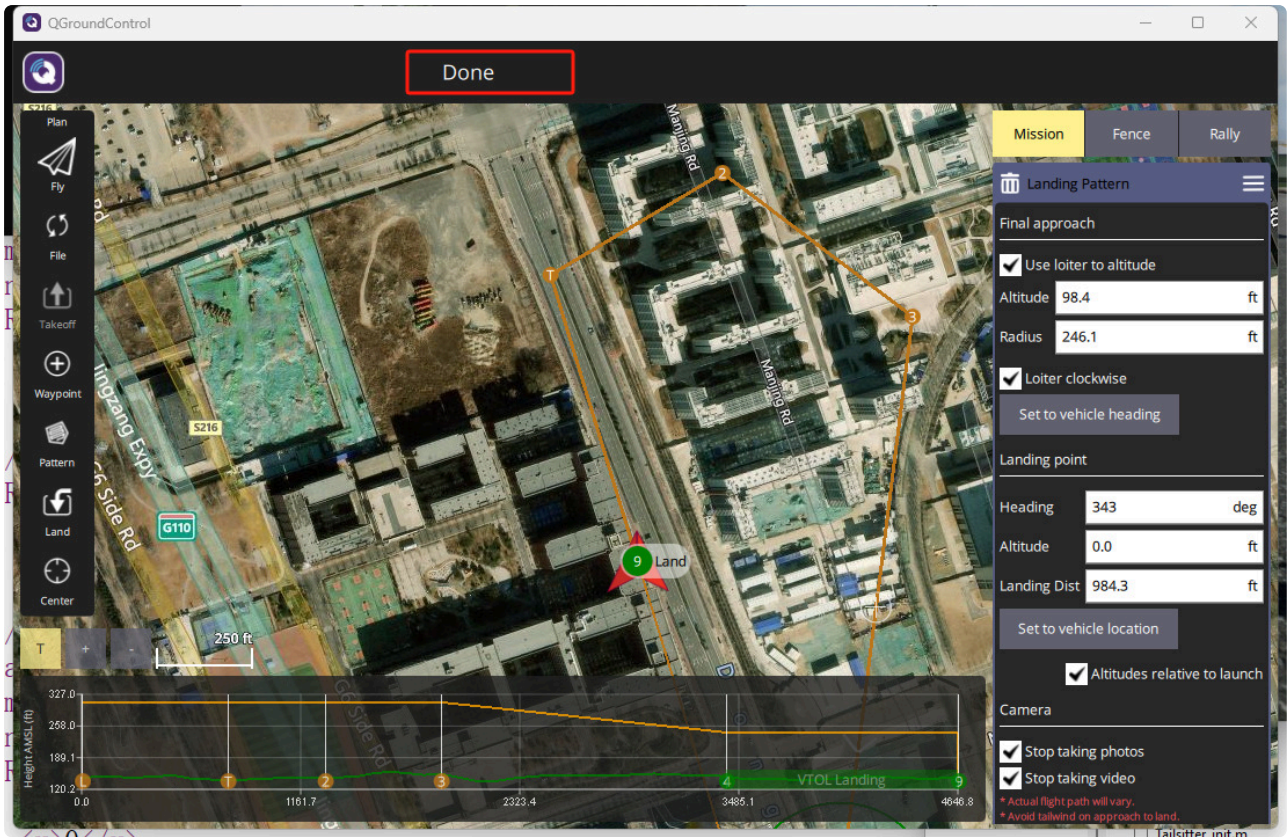
3) 点击“起飞”。



4) 点击“航点”，在地图上随意添加几处航点；再点击“着陆”，在右侧选择“设置为飞机位置”；最后点击“上传任务”。

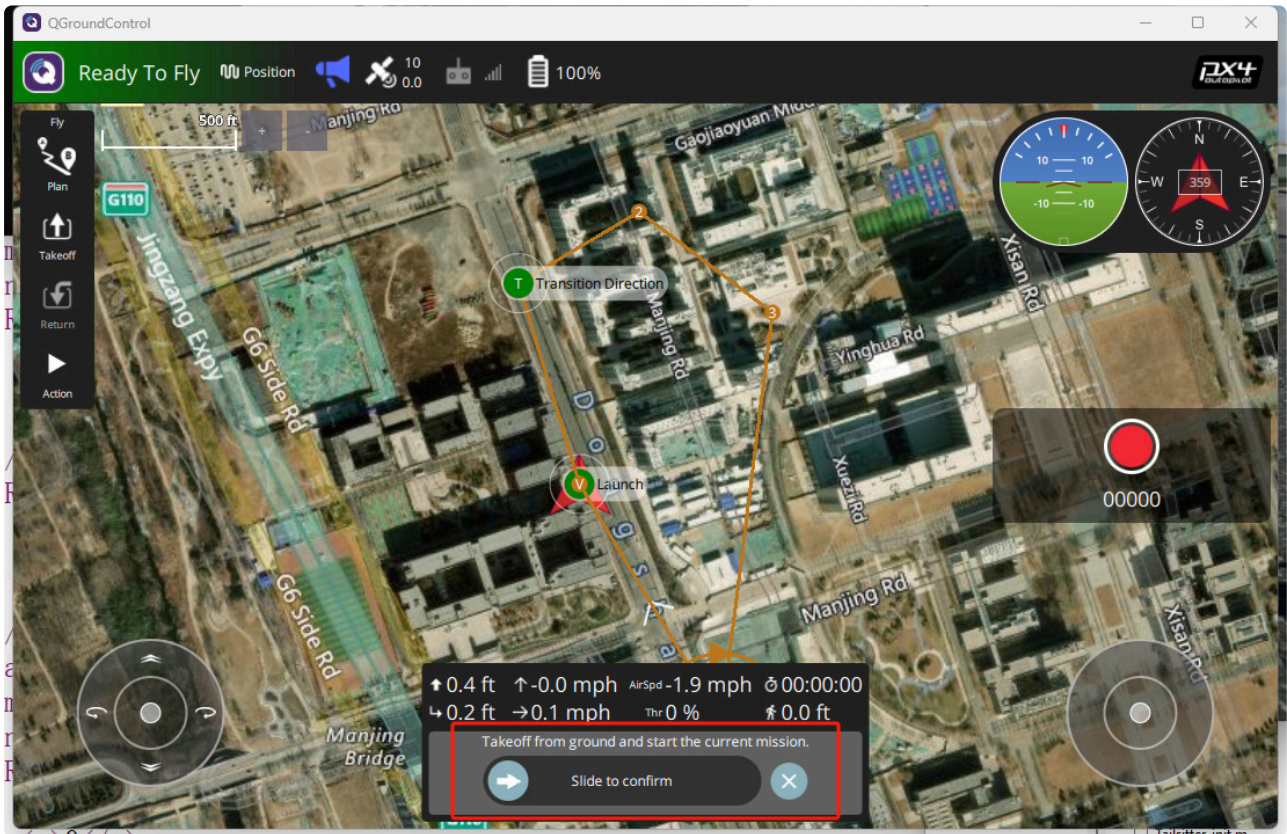


此时表明航线上传成功。



## Step 4: 执行任务

滑动滑块来解锁飞机并开始当前航线任务。

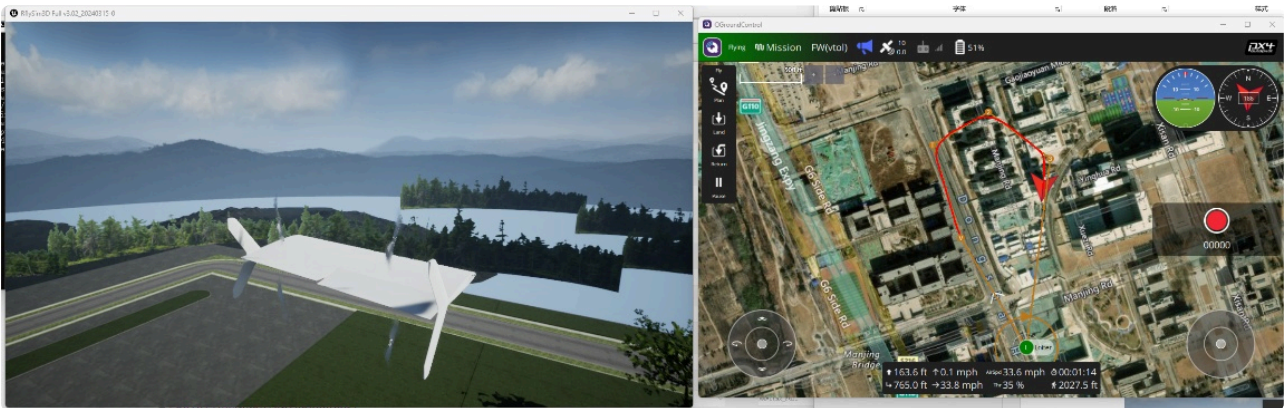
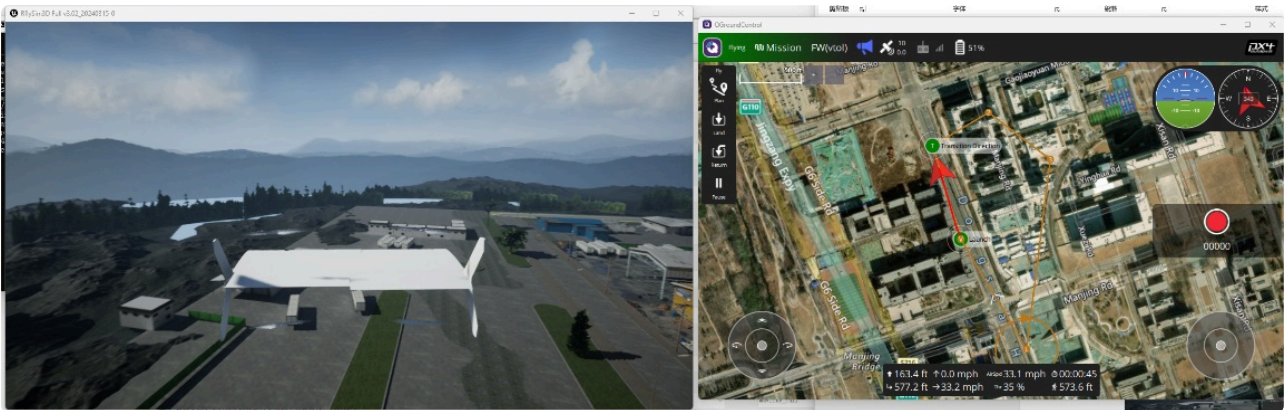


## Step 5: 观察结果

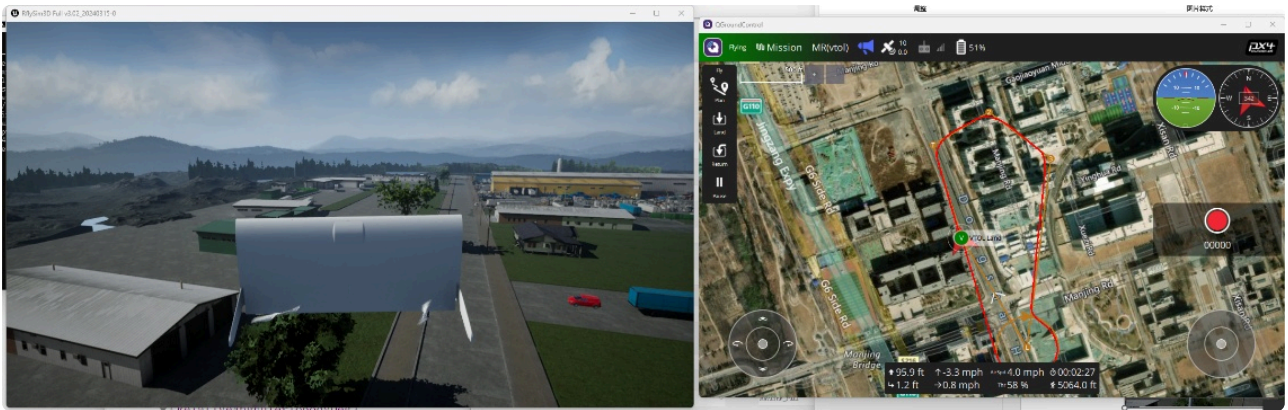
可看到飞机先以旋翼模式起飞。



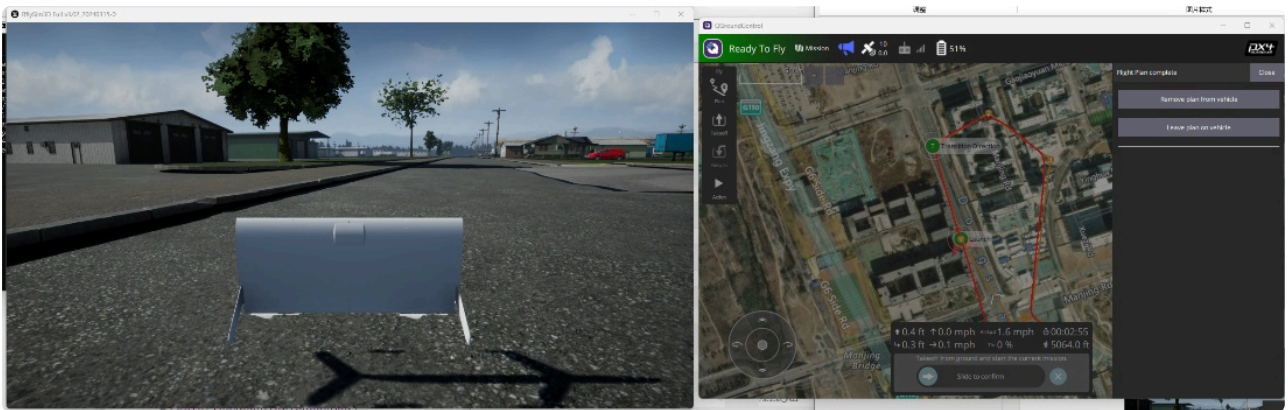
飞到指定高度后，切换为固定翼模式，并按航点飞行。



到达目标点后，以旋翼模式降落。



航线任务执行完成。



## 5.4. 选做实验：硬件在环仿真












### 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）。

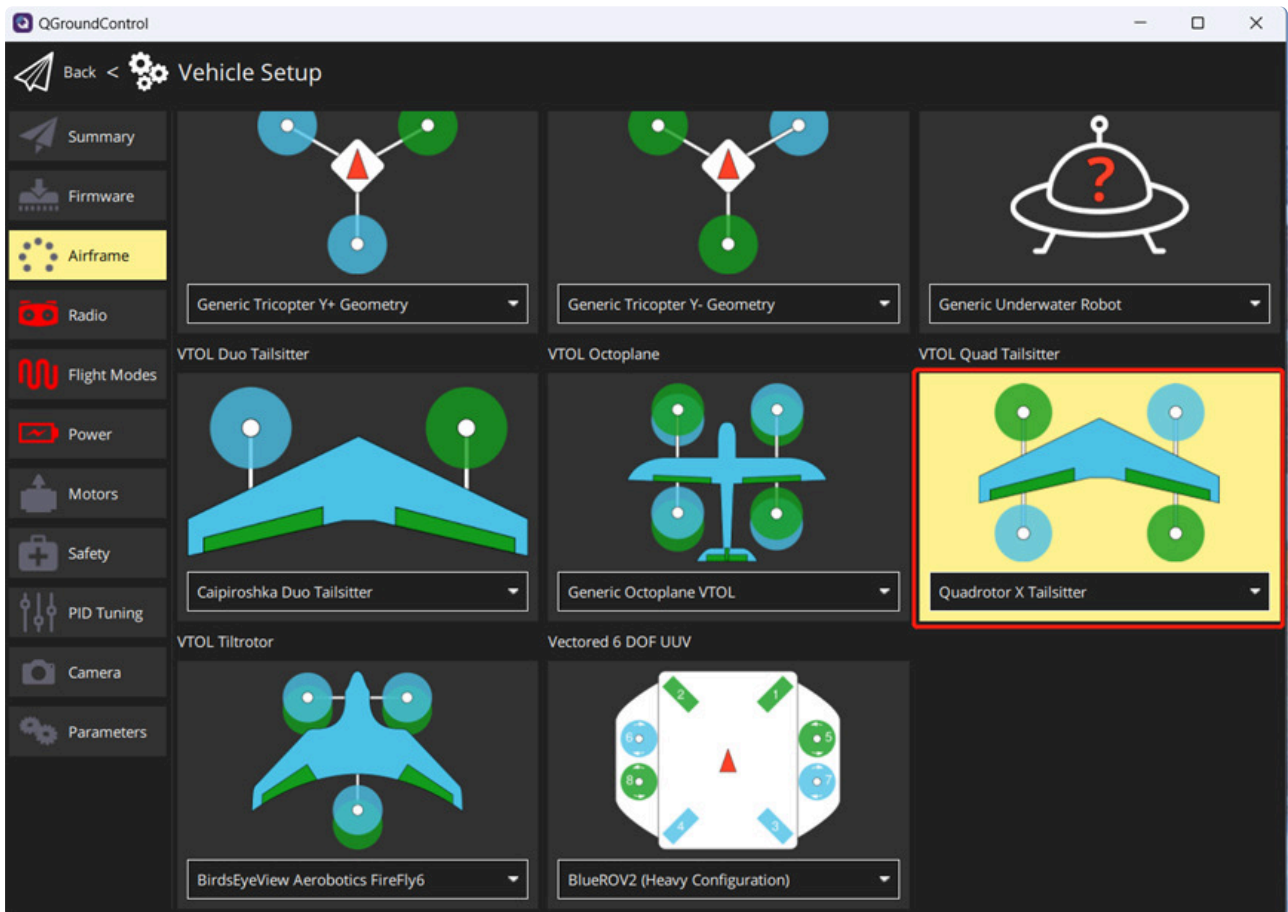


## Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

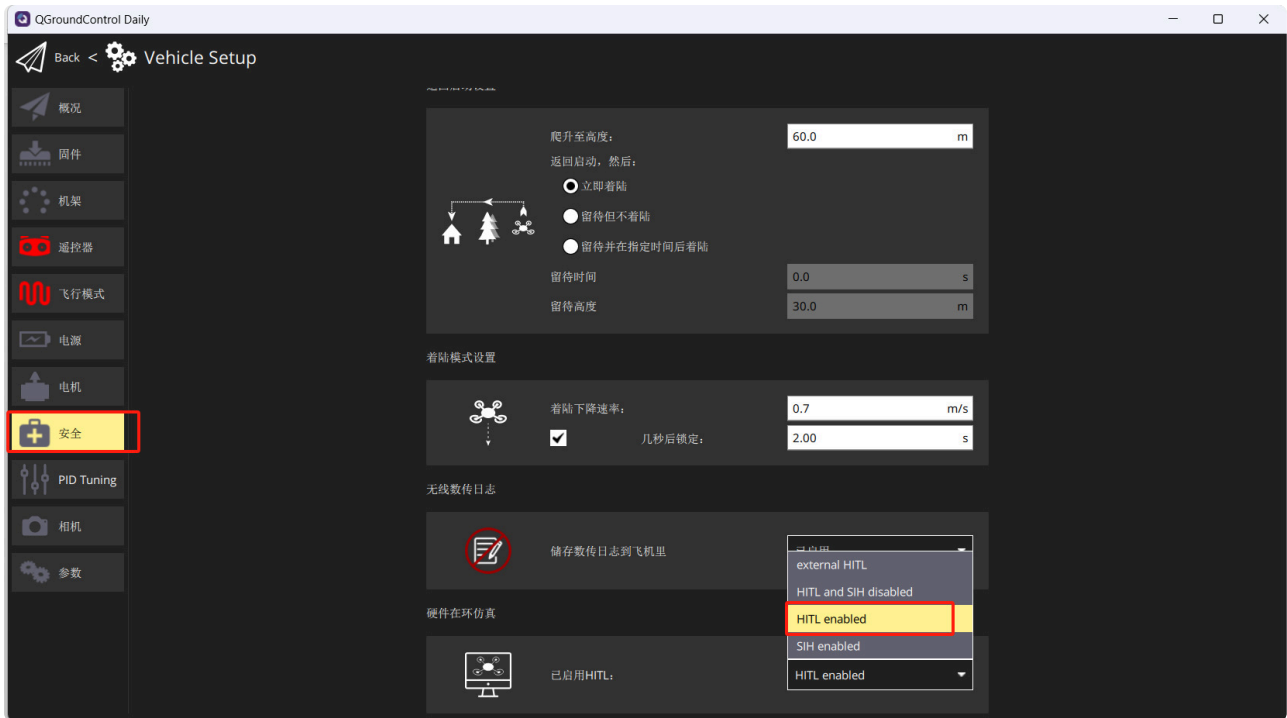
 3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷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

点击“机架”，设置机架类型为Quadrotor X Tailsitter，点击右上角的“应用并重启”。

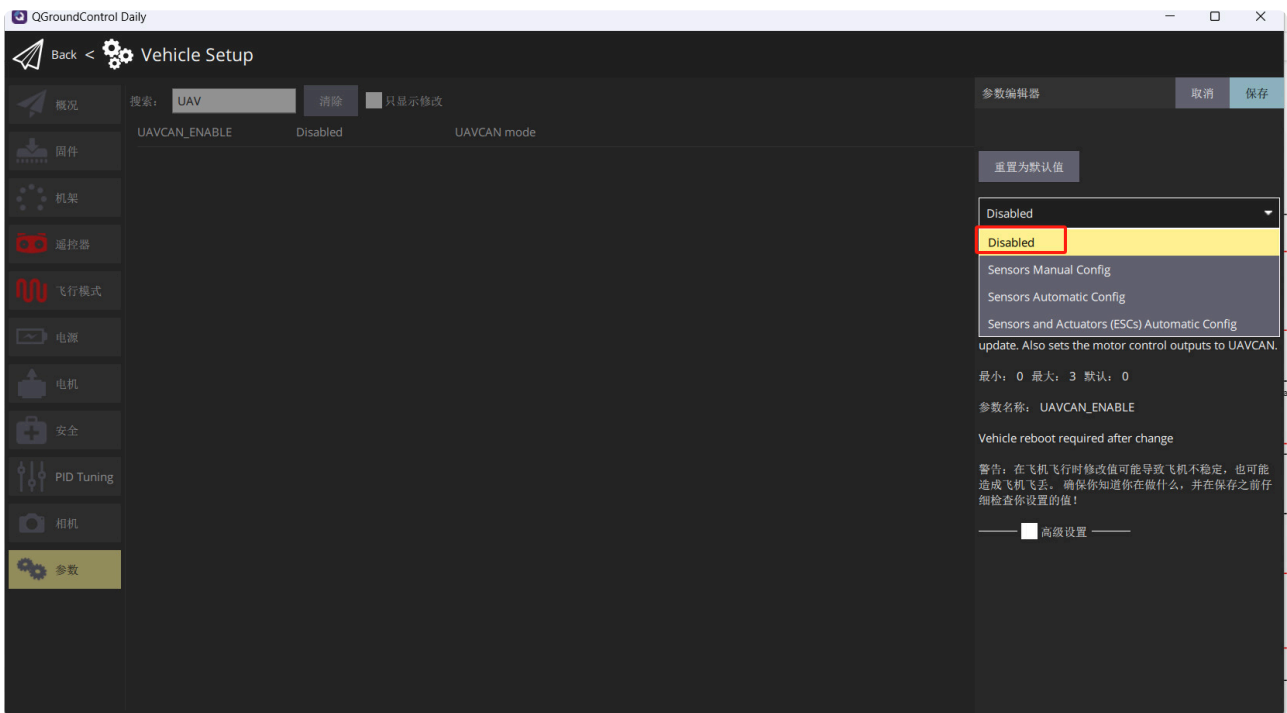


### Step 3: 配置硬件在环参数

点击“安全”，设置为“HITL enabled”



点击“参数”，搜索UAVCAN\_ENABLE，设置为“Disabled”，重新插拔飞控。



## Step 4: 启动仿真

右键以管理员身份运行“[tailsitter\\_HITL.bat](#)”，在弹出的终端窗口中输入串口号，启动硬件在环仿真。

RflySimModelLab.slx	2024/7/25 13:25	Simulink Model	85 KB
Tailsitter.dll	2024/7/25 13:25	应用程序扩展	271 KB
Tailsitter.slx	2024/7/25 13:25	Simulink Model	46 KB
<b>Tailsitter_HITL.bat</b>	2024/8/16 0:14	Windows 批处理	6 KB
Tailsitter_init.m	2024,		
Tailsitter_SITL.bat	2024,		
Readme.docx	2024,		

```

C:\WINDOWS\System32\cmd.exe
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: USB ???

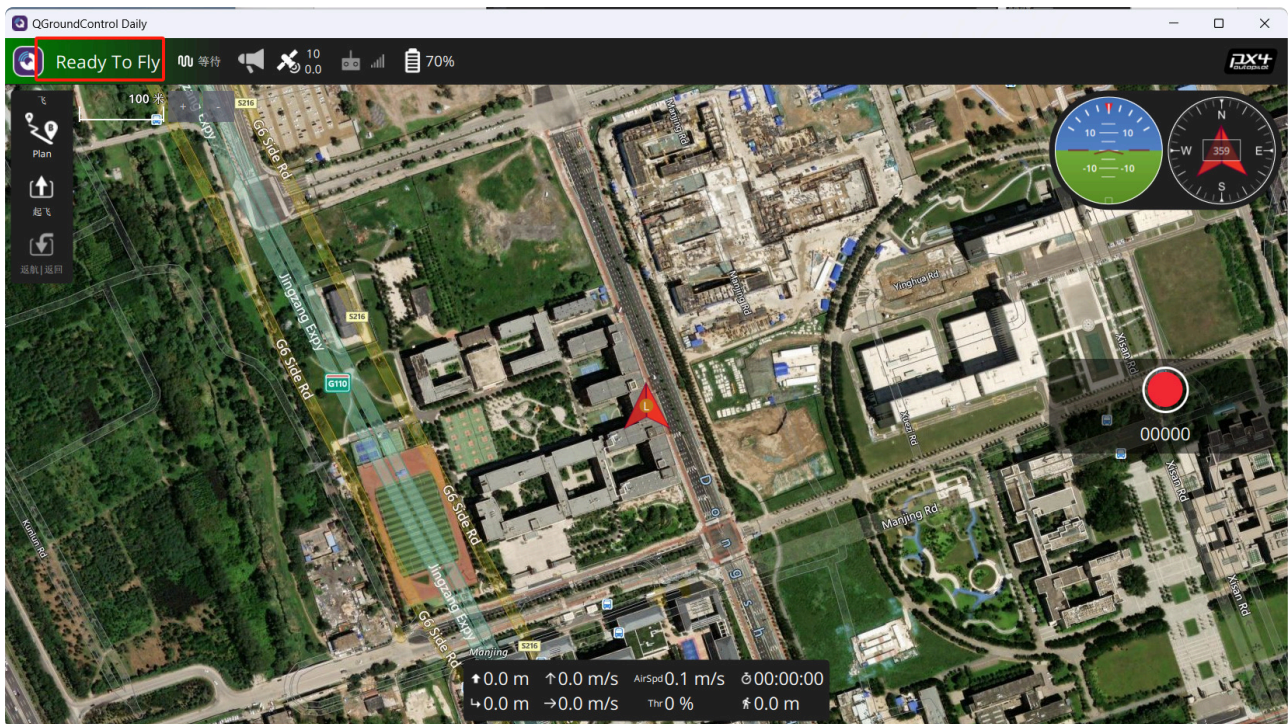
Recommended COM list input is: 3

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

```

## Step 5: 等待初始化完成

QGC左上角显示“Ready To Fly”，并且CopterSim左下角显示“GPS 3D fixed &EKF initialization finished”时，表明初始化完成，可以开始硬件在环仿真。



## Step 6: 仿真过程

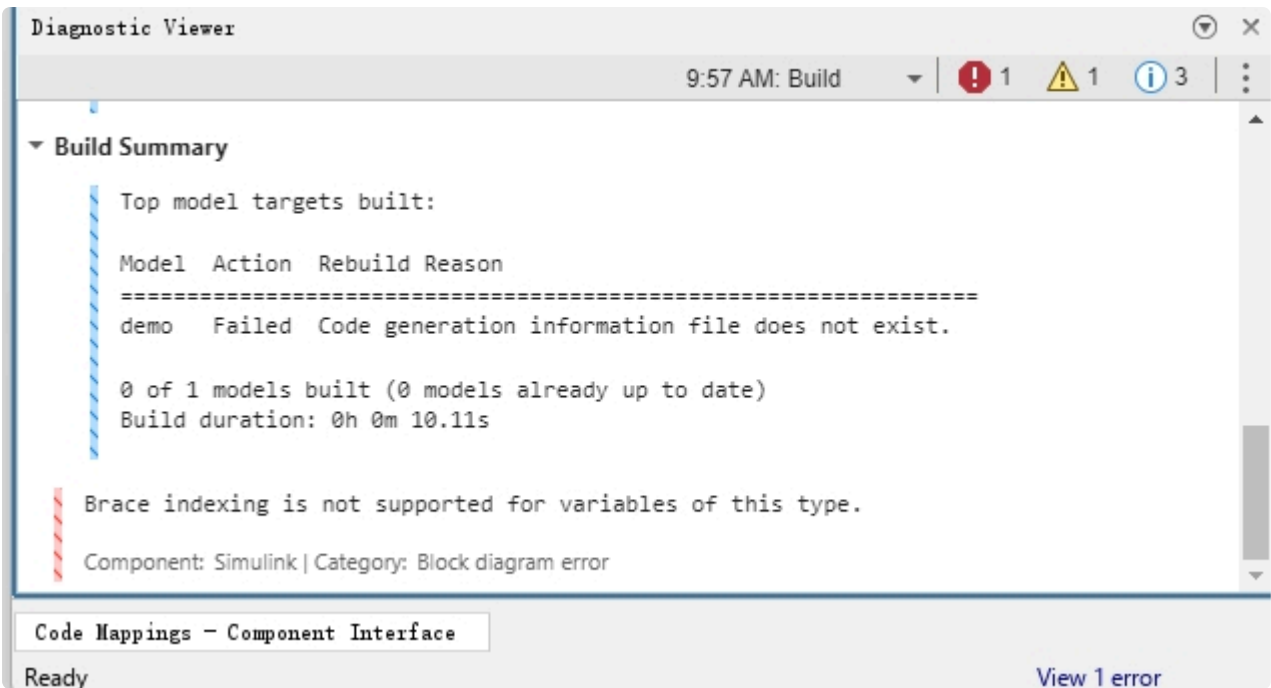
之后测试步骤与软件在环仿真的步骤相同，上传航线并观察四旋翼垂尾的运动状况。

## 6. 参考资料

1. PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf中DLL/SO模型与通信接口的重要参数部分。
2. PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf中的环境配置
3. PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf中的Simulink建模模板介绍

## 7. 常见问题

Q1: 未正确安装visual studio c++编译环境并配置mex，导致Simulink文件编译失败



A1: 首先将低于当前MATLAB版本的Visual Studio C++编译环境安装到VS默认安装目录，然后在MATLAB的命令行窗口中输入指令“mex -setup”，一般来说会自动识别并安装上支持的编译器，命令行显示“MEX 配置使用 ‘Microsoft Visual C++ 2017’ 以进行编译”的字样说明安装正确。详细环境配置参考” [RflySim平台安装目录]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf “中的环境配置



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