

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

基于系统模板的高精度双旋翼垂尾模型设计及验证（DLL生成及SIL/HIL实验）（仅限完整版及以上版本）

1.2 实验目的

通过该例程熟悉双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

双旋翼垂尾模型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），

$$x_g$$

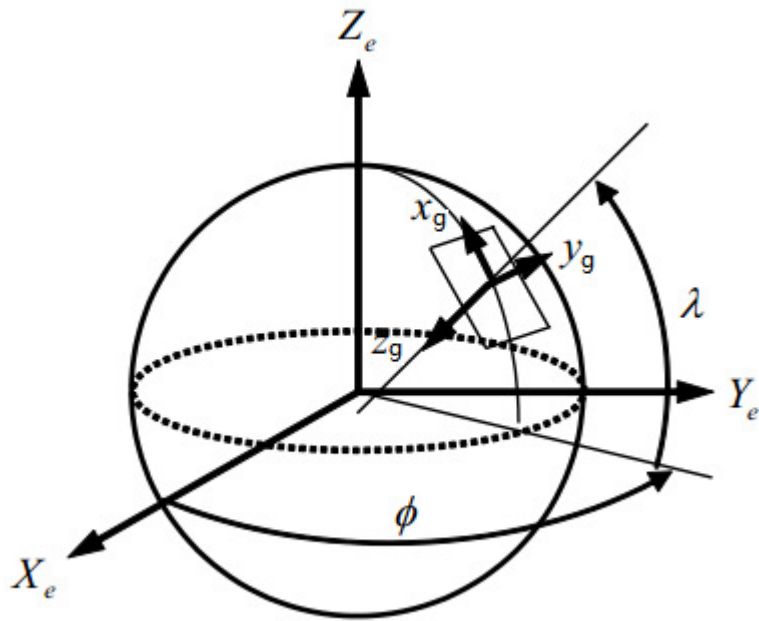
轴位于水平面内，指向某一固定方向（如飞机的航线方向），

$$z_g$$

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

$Ox_b z_b$

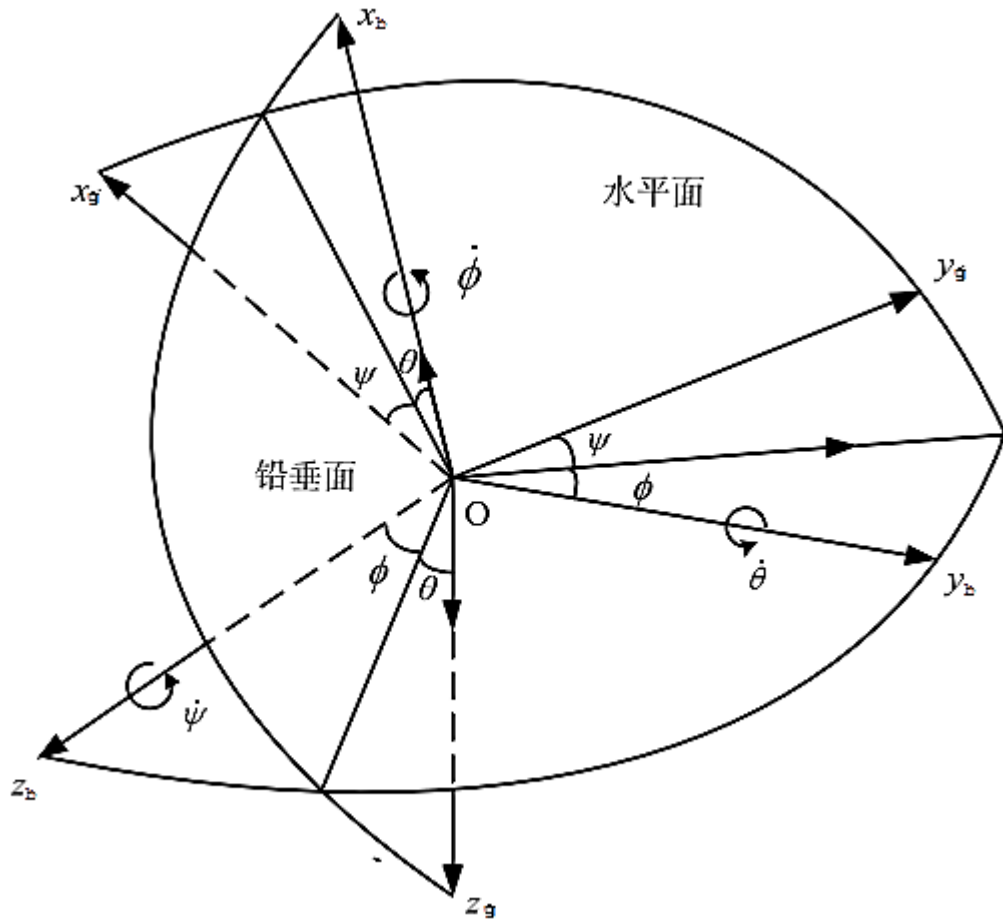
内并且垂直于纵轴，向下为正方向。

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

$$x_a$$

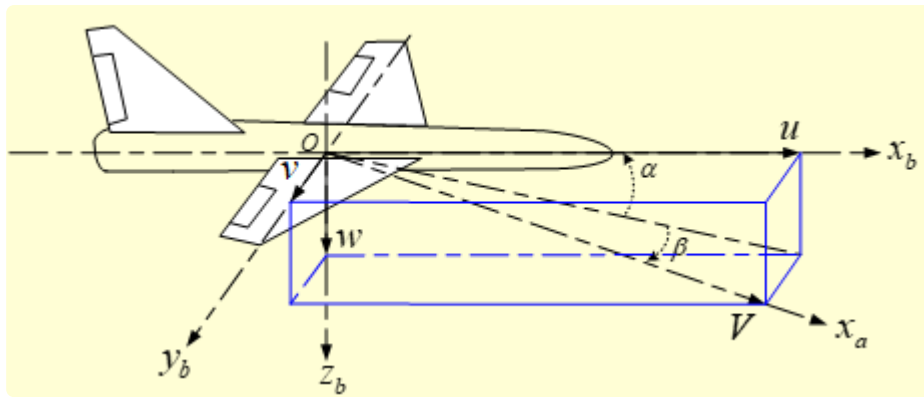
轴指向下方；

$$y_a$$

轴垂直于飞行器对称面

$$Ox_a z_a$$

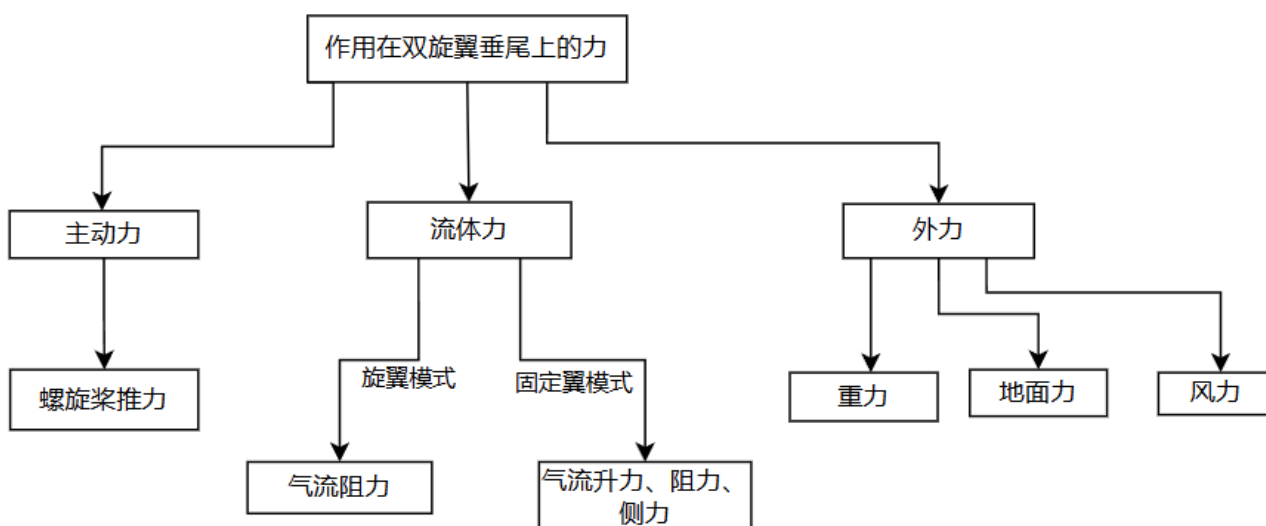
平面指向右方。



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。

双旋翼垂尾无人机，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，旋翼模式下参考多旋翼的运动。

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 [\(v1.12\)](#)

机架文件是一种用于描述模型物理结构和控制分配的脚本文件，每个机架文件都有一个唯一的ID，对应QGC中的参数SYS_AUTOSTART，双旋翼垂尾模型的机架配置在\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d\airframes\13001_caipirinha_vtol中定义如下：

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

执行rc.vtol_defaults脚本，它包含了垂起模型的默认参数设置，可以用来设置一些基本的系统参数

```
set PWM_OUT 123456
```

设置PWM输出为123456指定1~6号PWM通道是活跃的。

```
set MIXER vtol_tailsitter_duo
```

设置了混控器配置为vtol_tailsitter_duo（双旋翼垂尾飞机特定的）。

■ 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](#)

本例具体混控文件可参考\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\mixers\vtol_tailsitter_duo.main.mix，其混控逻辑如下

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

输出通道1（右电机）等于-1倍的油门输入

输出通道2（左电机）等于1倍的油门输入

输出通道3和4没有任何输入，始终为0

输出通道5（右升降舵）等于1倍的滚转输入加上1倍的俯仰输入

输出通道6（左升降舵）等于1倍的滚转输入减去1倍的俯仰输入

■ 载具模型的整体输入输出和关键参数

■ 输入输出

双旋翼垂尾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](#)

■ 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(201)
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]
初始经纬度	ModelParam_GPSLatLong	[40.1540302 116.2593683]
原点的海拔高度	ModelParam_envAltitude	-50(m)
飞机质量	ModelParam_uavMass	1.515
转动惯量	ModelParam_uavJ	[0.0211,0,0;0,0.0219,0; 0,0,0.0366]
阻力系数	ModelParam.uavCd	0.055(N/(m/s)^2)
阻尼力矩系数	ModelParam.uavCCm	[0.0035 0.0039 0.0034] (N/(rad/s)^2)

参数名	参数	值
油门到电机稳态转速曲线斜率	ModelParam.motorCr	842.1*1.5
油门到电机稳态转速曲线零点	ModelParam.motorWb	22.83(rad/s)
电机响应时间常数	ModelParam.motorT	0.0214(s)
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

能生成双旋翼垂尾的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\e3_VTOLModelCtrl\2.Tailsitter_Duo](#)

文件夹/文件名称	说明
tailsitter_duo.slx	双旋翼垂尾模型源程序。
tailsitter_duo_HITL.bat	双旋翼垂尾模型硬件在环仿真启动脚本。

文件夹/文件名称	说明
tailsitter_duo_SITL.bat	双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。
tailsitter_duo_init.m	双旋翼垂尾模型参数初始化文件。
MavLinkStruct.mat	MavLink数据结构体mat文件
FSV900	双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://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：添加双旋翼垂尾三维模型

Step 1: 添加三维模型文件

将“FSV900”整个文件夹复制到“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。

名称	修改日期	类型	大小
硬件在环调试.docx	2023/11/2 14:13	Microsoft Word ...	35,861 KB
软件在环录屏.mkv	2023/11/1 16:41	MKV 文件	315,415 KB
tailsitter_duo_SITL.bat	2023/11/1 16:30	Windows 批处理...	6 KB
tailsitter_duo_init.m	2023/11/2 14:12	Objective C 源文件	11 KB
tailsitter_duo_HITL.bat	2023/11/1 16:58	Windows 批处理...	6 KB
tailsitter_duo.slx	2023/11/1 16:31	Simulink Model	261 KB
tailsitter_duo.dll	2023/11/1 16:32	应用程序扩展	286 KB
RflySimModelLab.slx	2023/5/22 16:53	Simulink Model	85 KB
readme.docx	2023/10/27 16:58	Microsoft Word ...	14,476 KB
MulticopterModel.zip	2023/11/1 16:31	压缩(zipped)文件...	207 KB
MavLinkStruct.mat	2022/5/9 10:27	MATLAB Data	5 KB
GenerateModelDLLFile.p	2023/10/5 11:51	MATLAB.p.9.14.0	6 KB
FSV900	2023/11/2 14:14	文件夹	

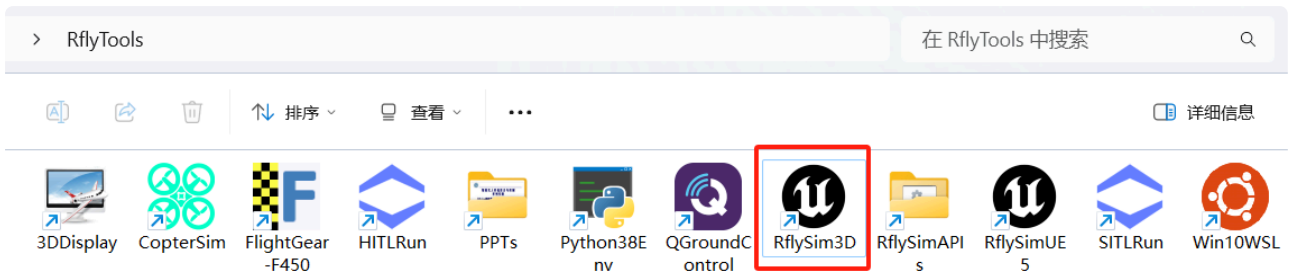
> ... Windows (C:) > PX4PSP > RflySim3D > RflySim3D > Content > 在 Content 中搜索

📁 排序 ▾ 查看 ▾ ...

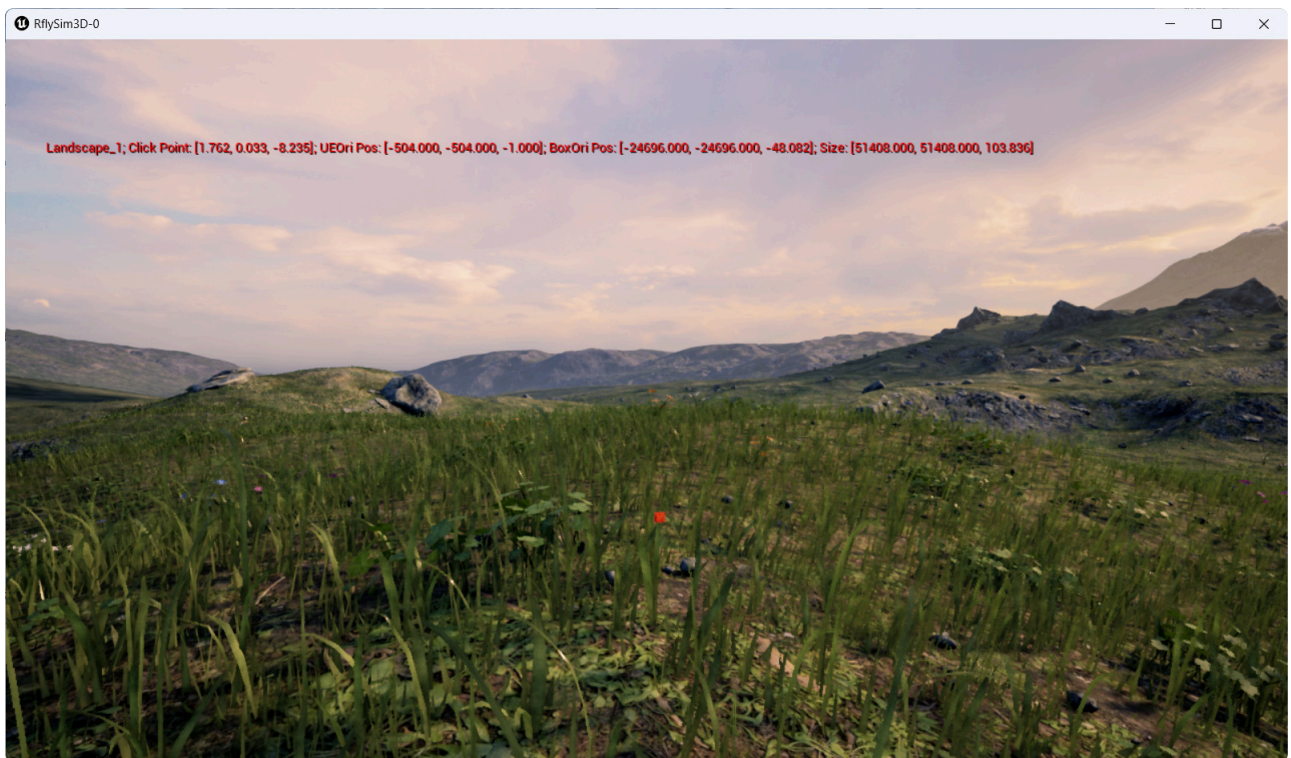
名称	修改日期	类型	大小
OldFactory	2023/9/12 14:36	文件夹	
Roller8	2023/9/12 14:37	文件夹	
Roller9	2023/9/12 14:37	文件夹	
Trunk	2023/9/12 14:37	文件夹	
Balloon	2023/9/12 14:37	文件夹	
paver	2023/9/12 14:37	文件夹	
obstacle	2023/9/12 14:37	文件夹	
SimulationScenario	2023/9/12 14:37	文件夹	
X8	2023/9/12 14:37	文件夹	
导弹	2023/9/14 10:58	文件夹	
FSV900	2023/9/14 14:50	文件夹	
paver.xml	2021/3/24 22:28	XML 源文件	4 KB
Roller8.xml	2021/3/24 22:28	XML 源文件	4 KB
Roller9.xml	2021/3/24 22:29	XML 源文件	4 KB
Trunk.xml	2021/3/24 22:29	XML 源文件	4 KB
Changsha.uexp	2022/7/28 21:53	UEXP 文件	4 KB
Changsha.umap	2022/7/28 21:53	UMAP 文件	7 KB
Changsha_BuiltData.uasset	2022/7/28 21:53	UASSET 文件	2 KB

Step 2: 打开RflySim3D软件

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+201”，如果能看到图中模型，则双旋翼垂尾三维模型导入成功。（201为uavtype）。

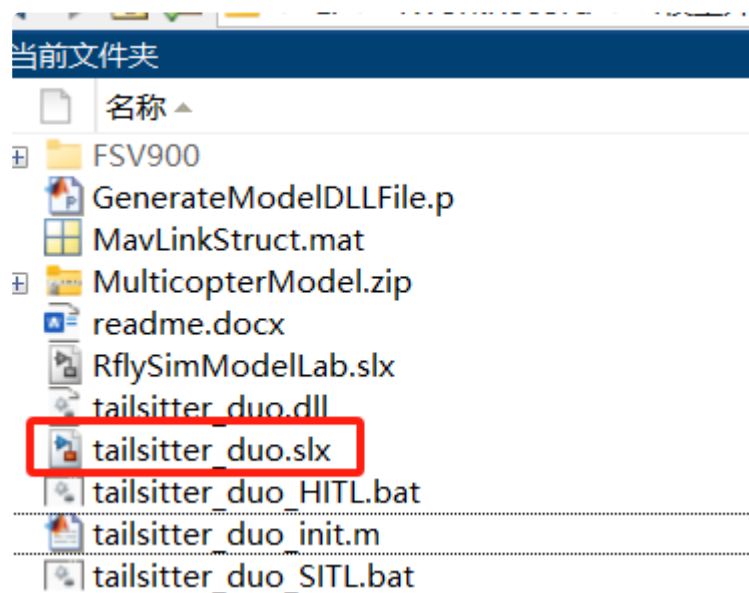


5.2. 必做实验：DLL模型生成

Step 1: 编译模型

在Matlab中打开“tailsitter_duo.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](#)

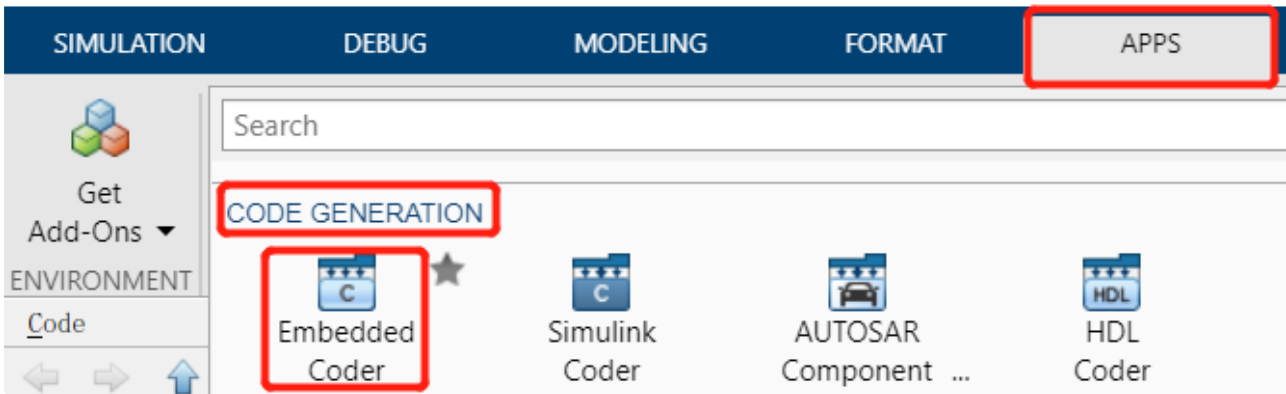


对于MATLAB 2019a及之前版本，工具栏样式见下图，直接点击它的编译按钮“Build”即可。

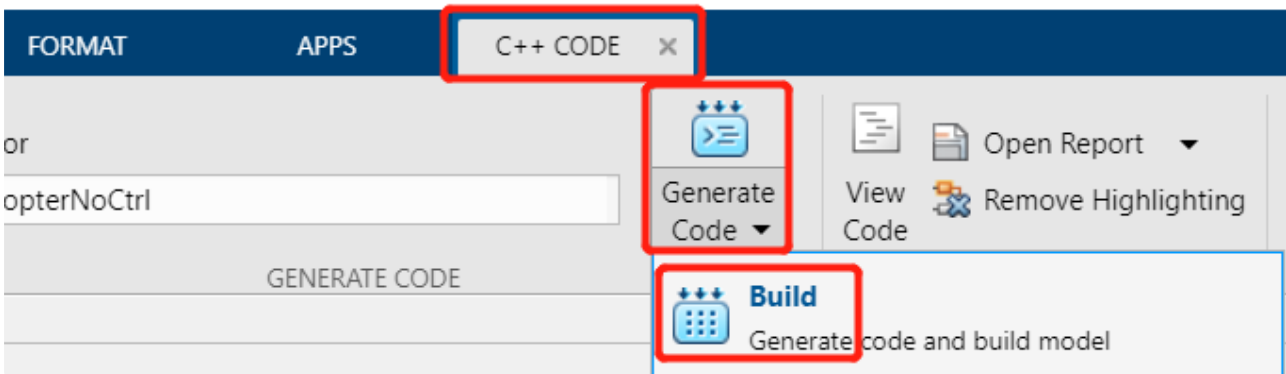


对于2019b及之后版本，点击APPS - CODE GENERATION - Embedded Coder才能弹出代码生成工具栏，在其中如下图所示点击“C++CODE” - “Generate Code” - “Build” 按钮就能编译生成代码。

MulticopterCtrlVelocity/Force and Moment Model - Simulink

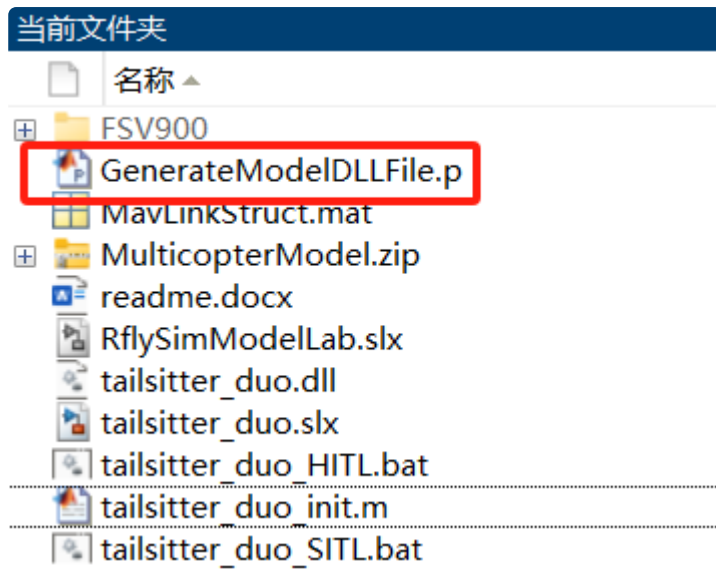


k



Step 2: 生成DLL文件

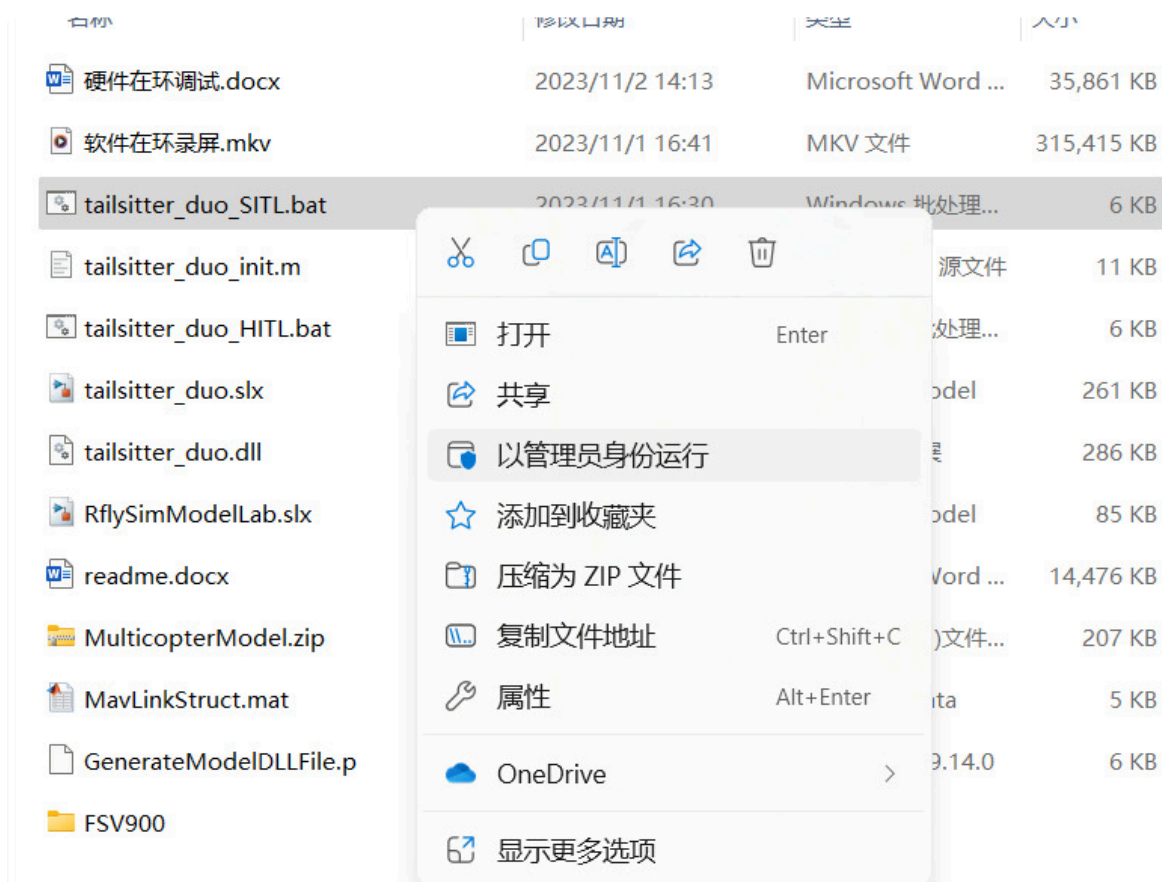
代码生成完毕后，在 Matlab 中右键“GenerateModelDLLFile.p”文件，点击运行，生成DLL文件。

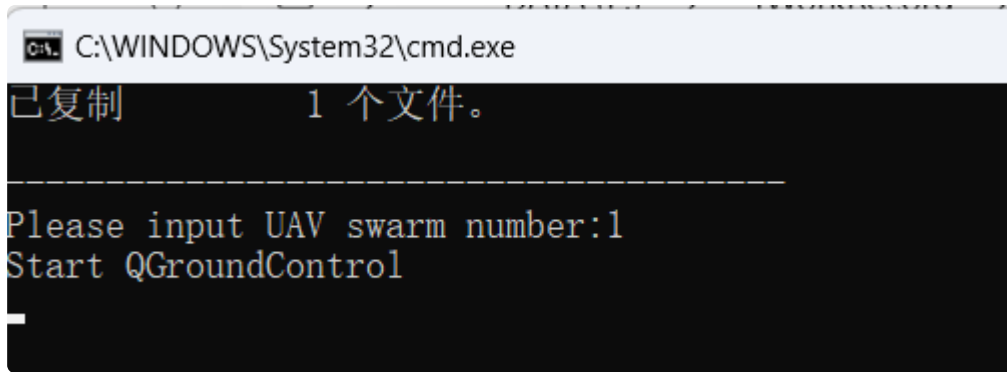


5.3. 必做实验：软件在环仿真

Step 1: 启动仿真

以管理员身份运行“[tailsitter_duo_SITL.bat](#)”批处理文件，在弹出的终端窗口中输入1，启动1架双旋翼垂尾的软件在环仿真。



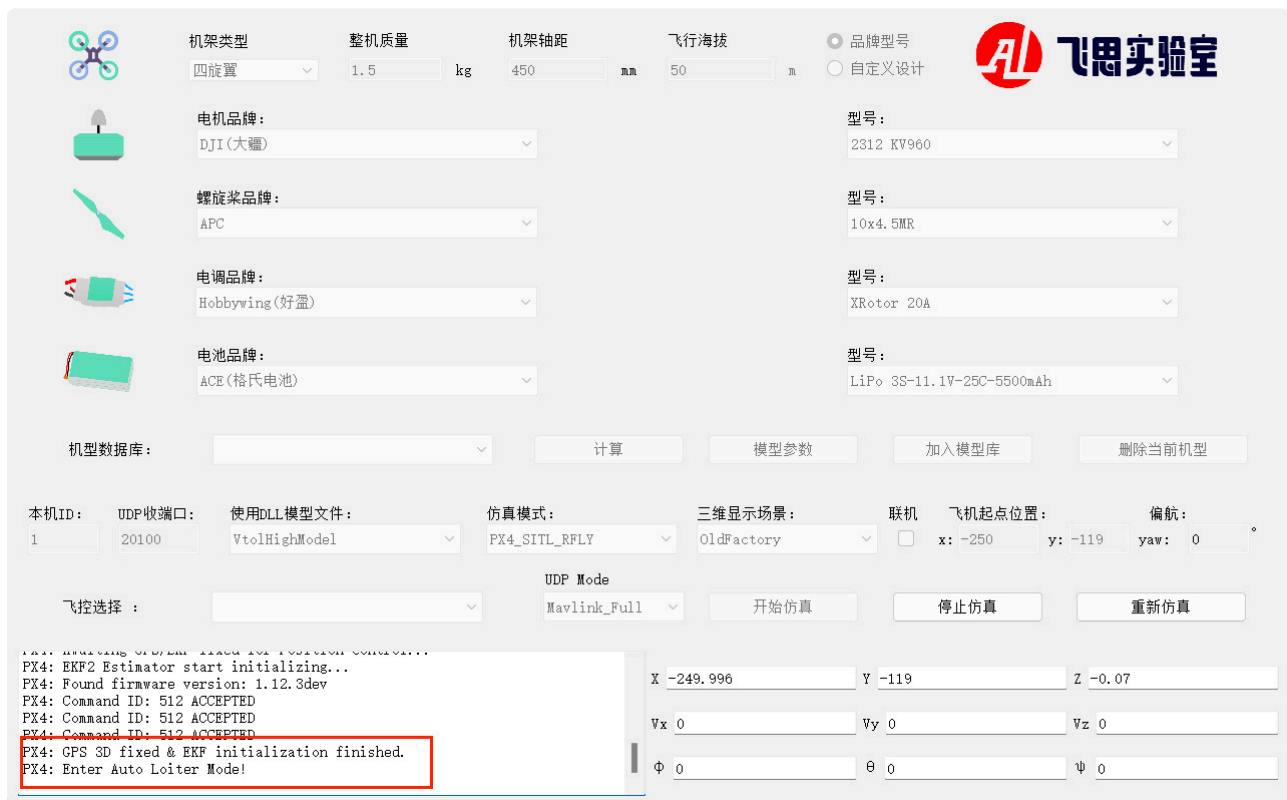


注意，在“[tailsitter_duo_SITL.bat](#)”软件在环的脚本文件中对应处设置机架类型。

```
REM Set the vehicle-model (airframe) of PX4 SITL simulation, the default airframe is a quadcopter: iris
REM Check folder Firmware\ROMFS\px4-fmu-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=caipirinha_vtol
```

Step 2: 等待初始化完成

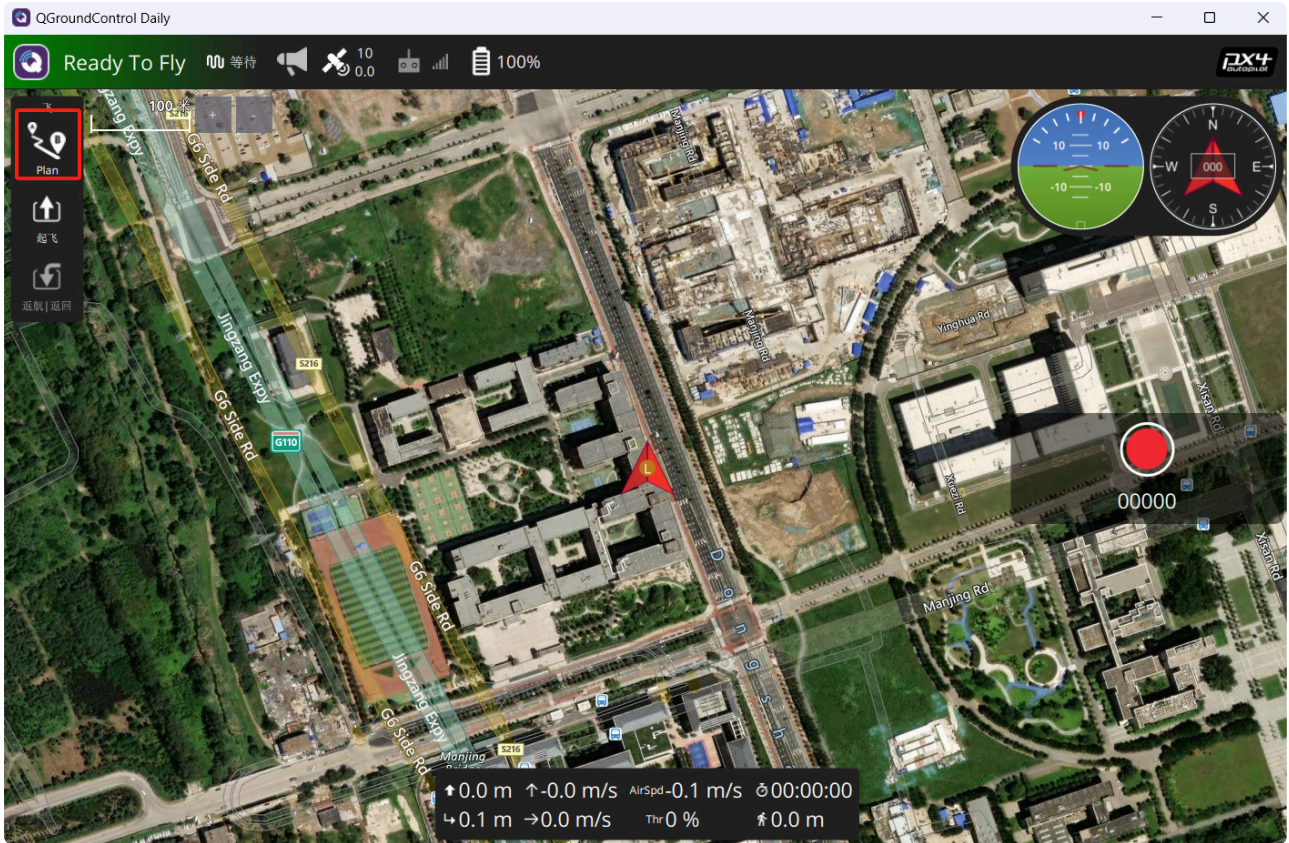
等待 CopterSim 中显示连接上 RflySim3D。



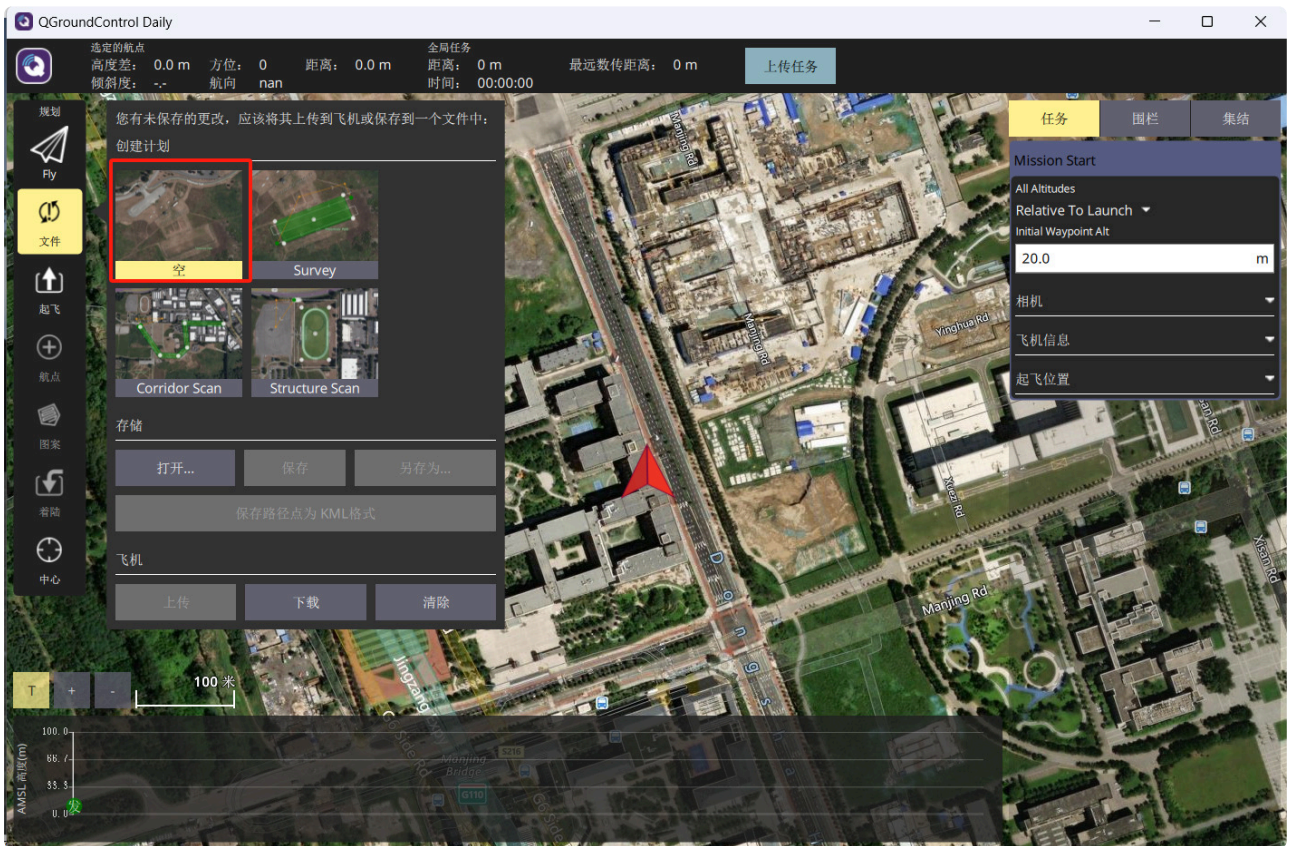
Step 3: 上传航线任务

在QGC中上传航线：

- 1) 点击QGC左上角的“Plan”。



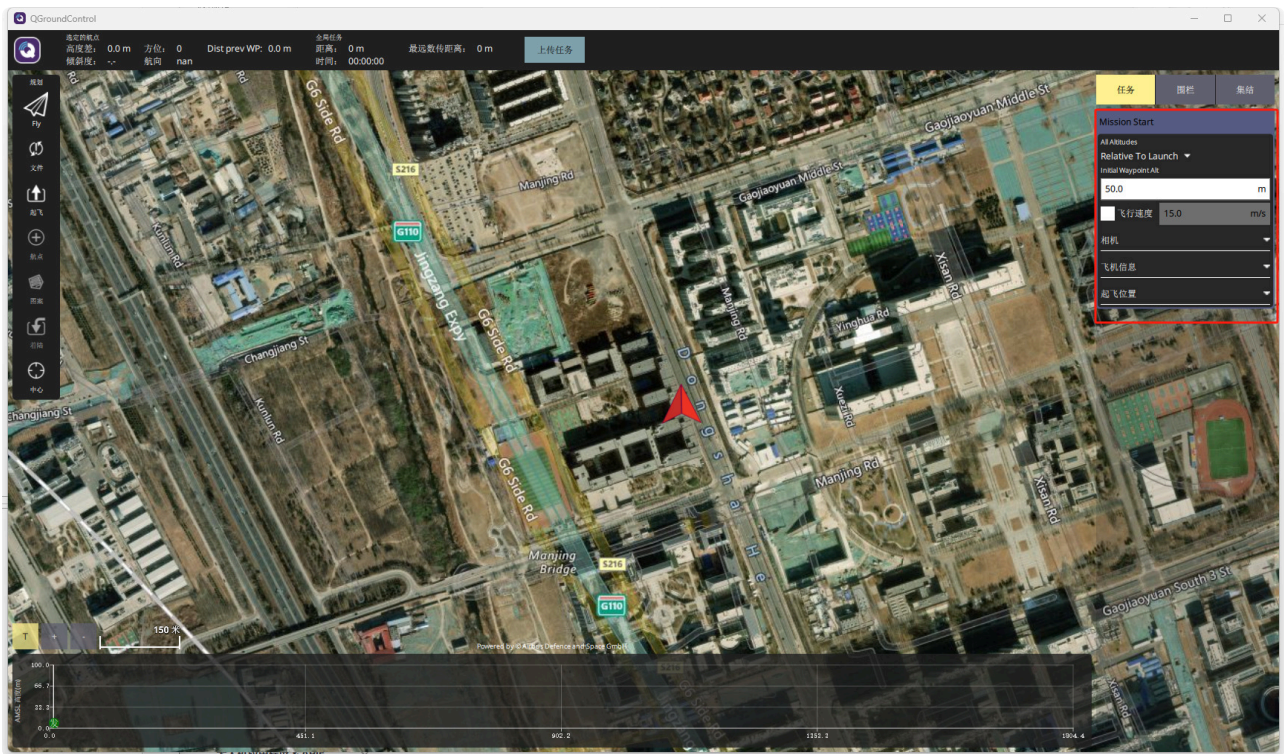
2) 点击“空”，选择一个空的计划。



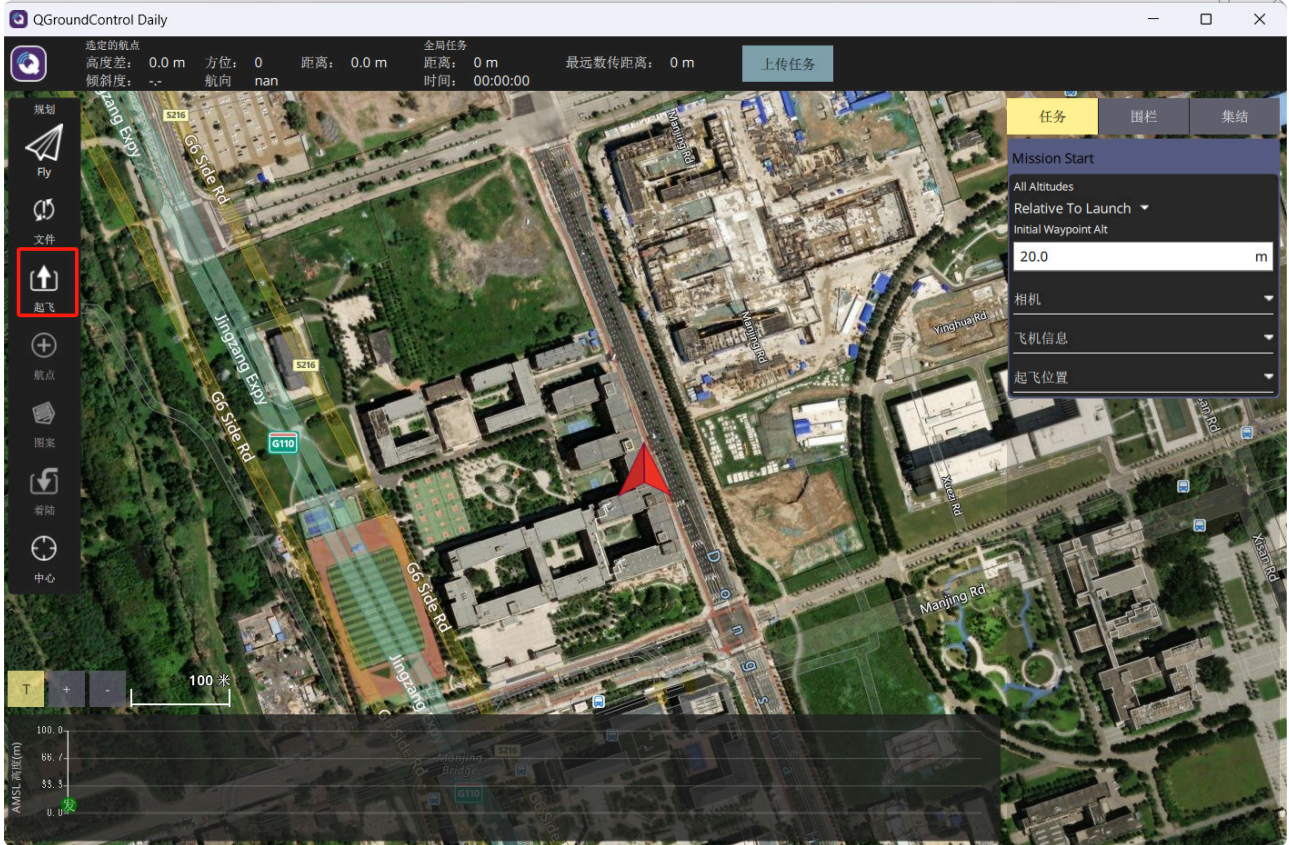
3) 首先点击“任务开始”按钮



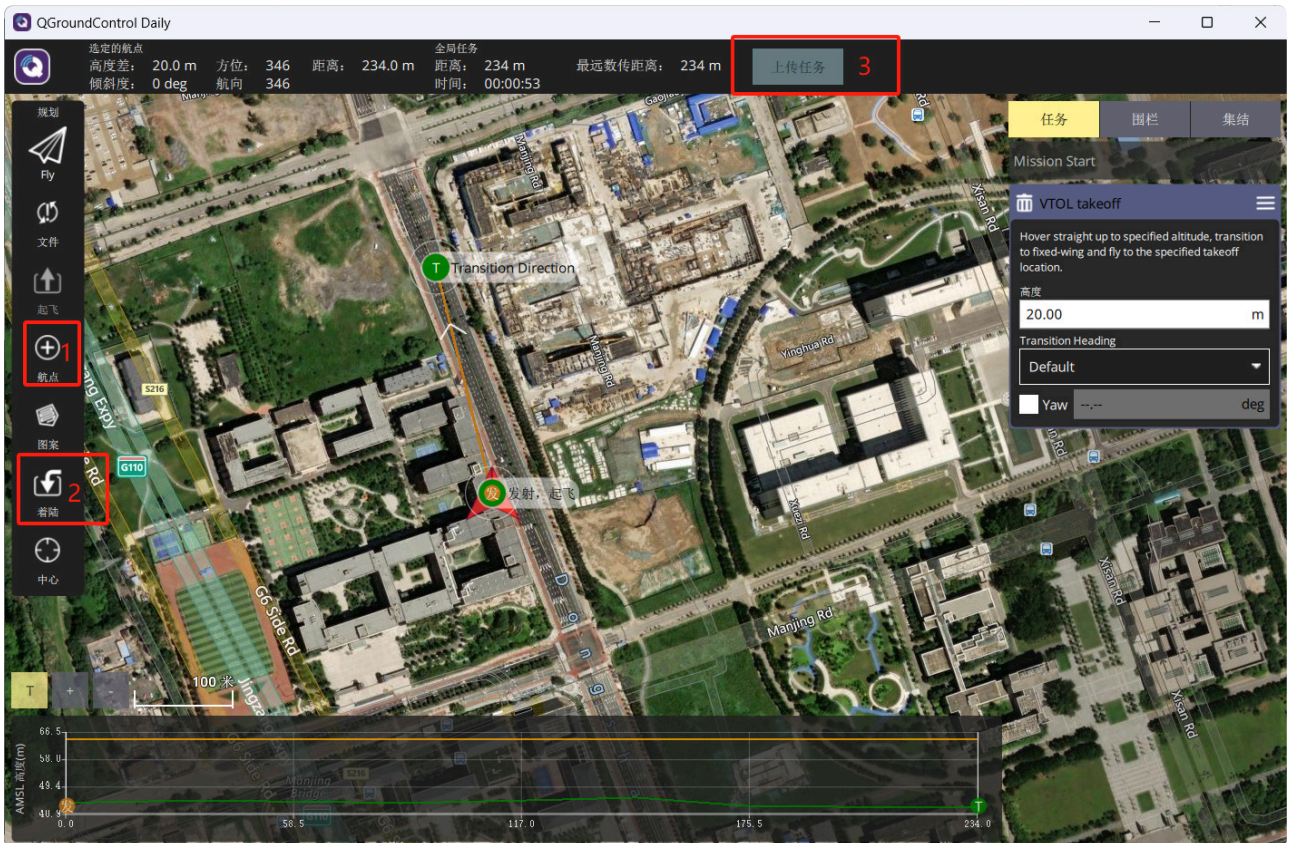
之后会弹出飞机初始化信息



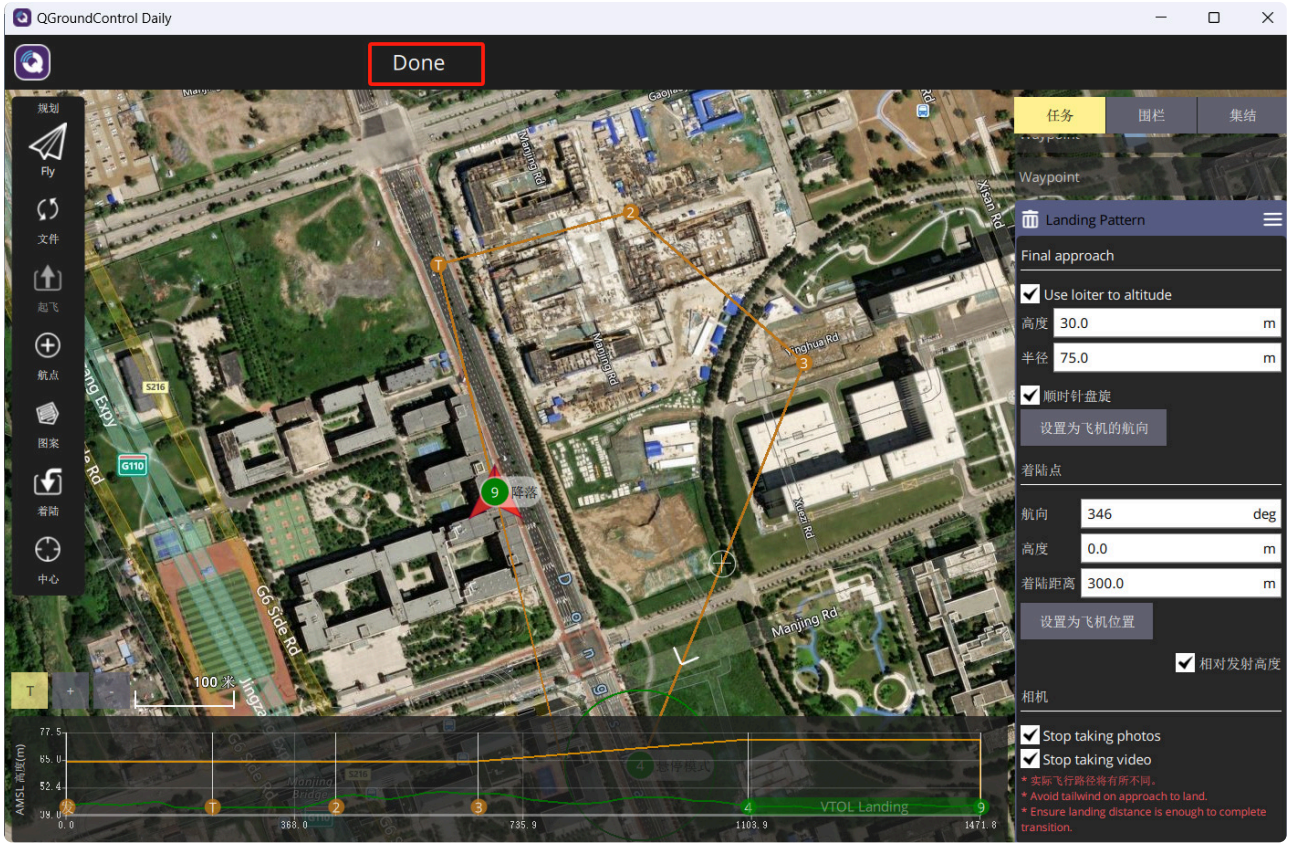
4) 点击“起飞”。



5) 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”。

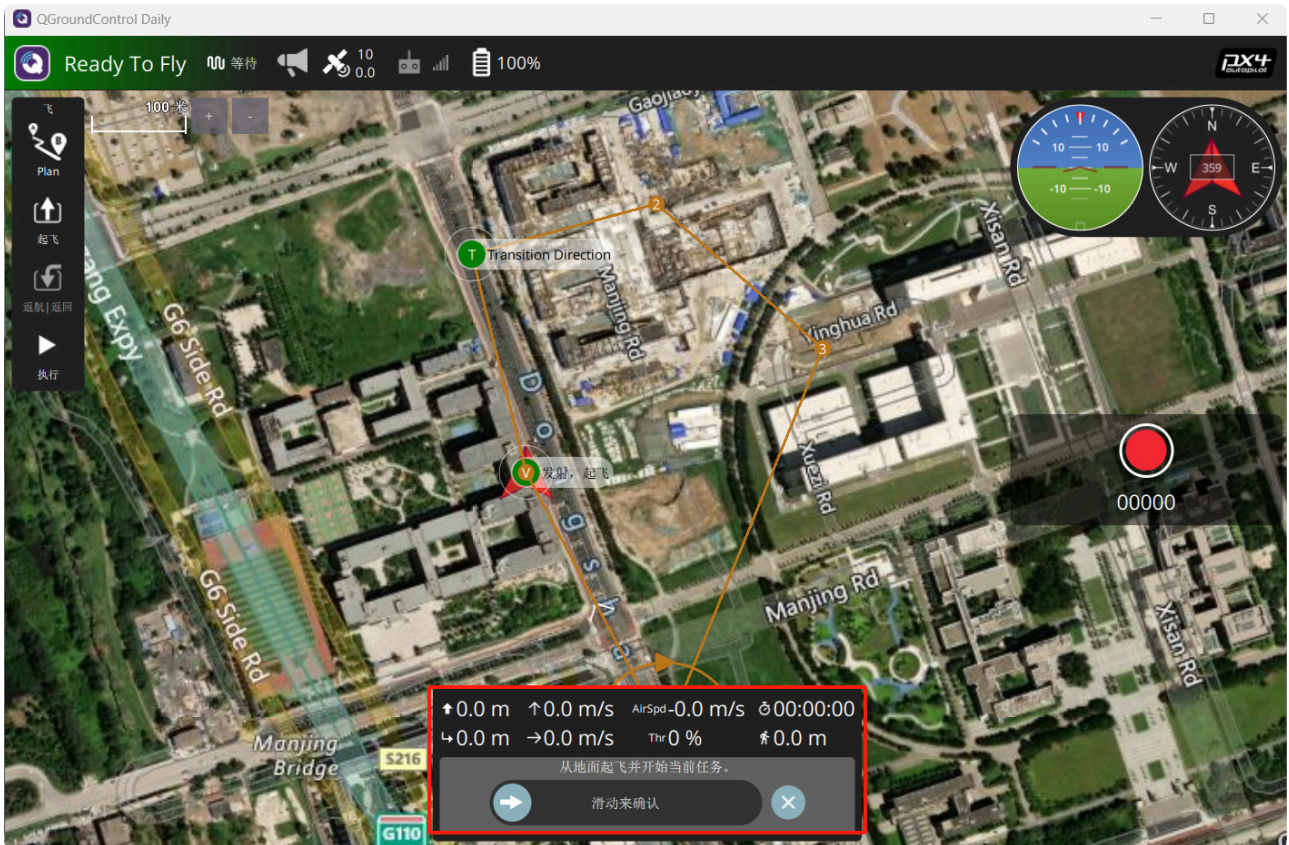


此时表明航线上传成功。



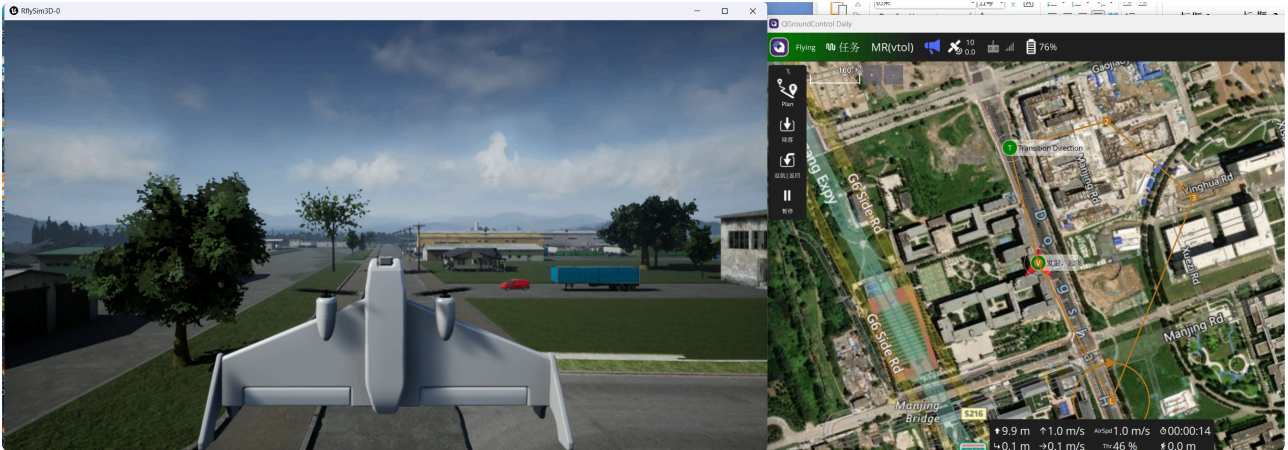
Step 4: 开始执行

滑动滑块来解锁飞机并开始当前航线任务。

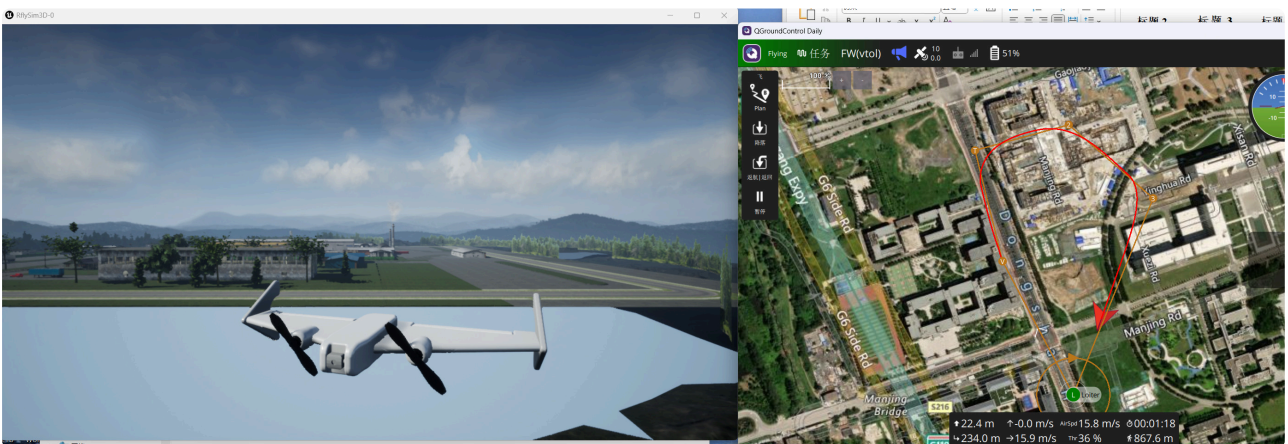
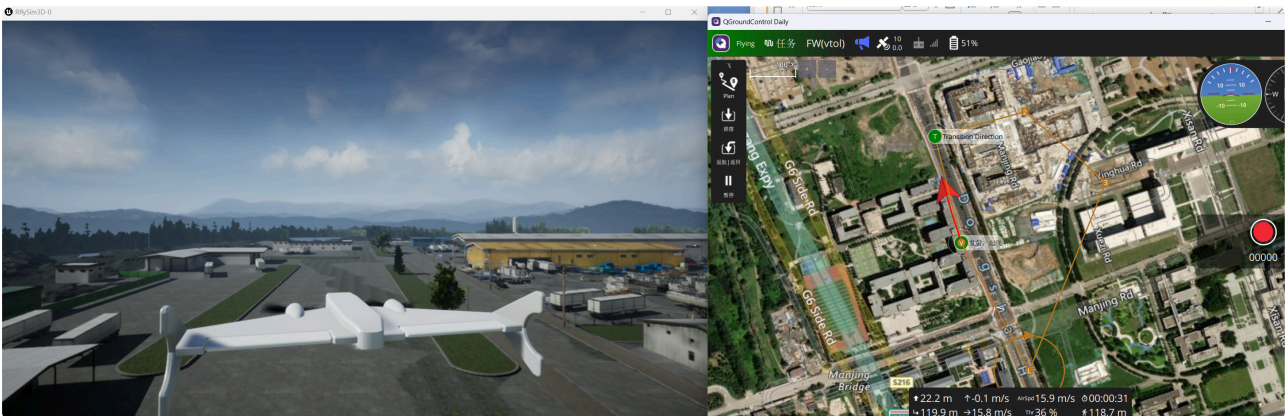


Step 5: 观察结果

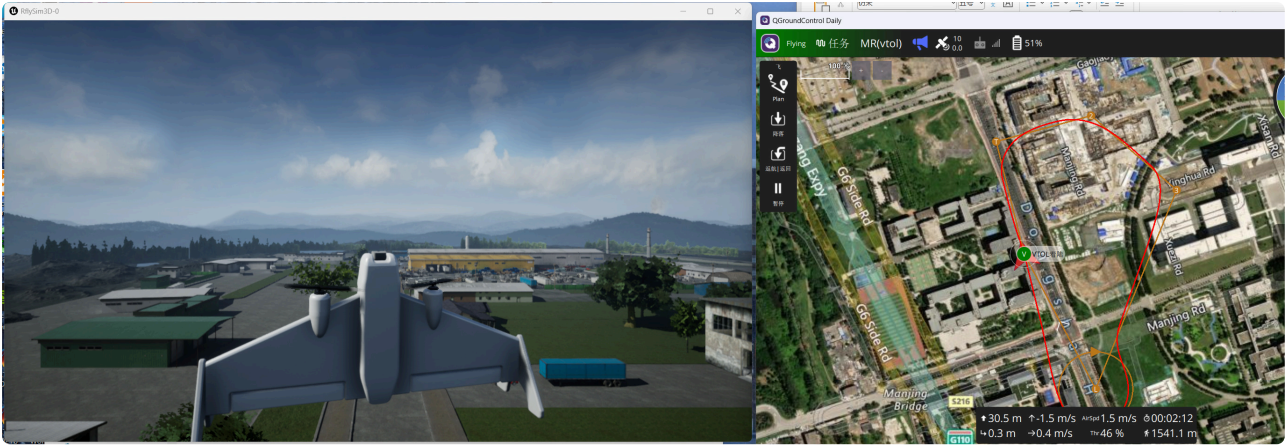
可看到飞机先以旋翼模式起飞。



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）。

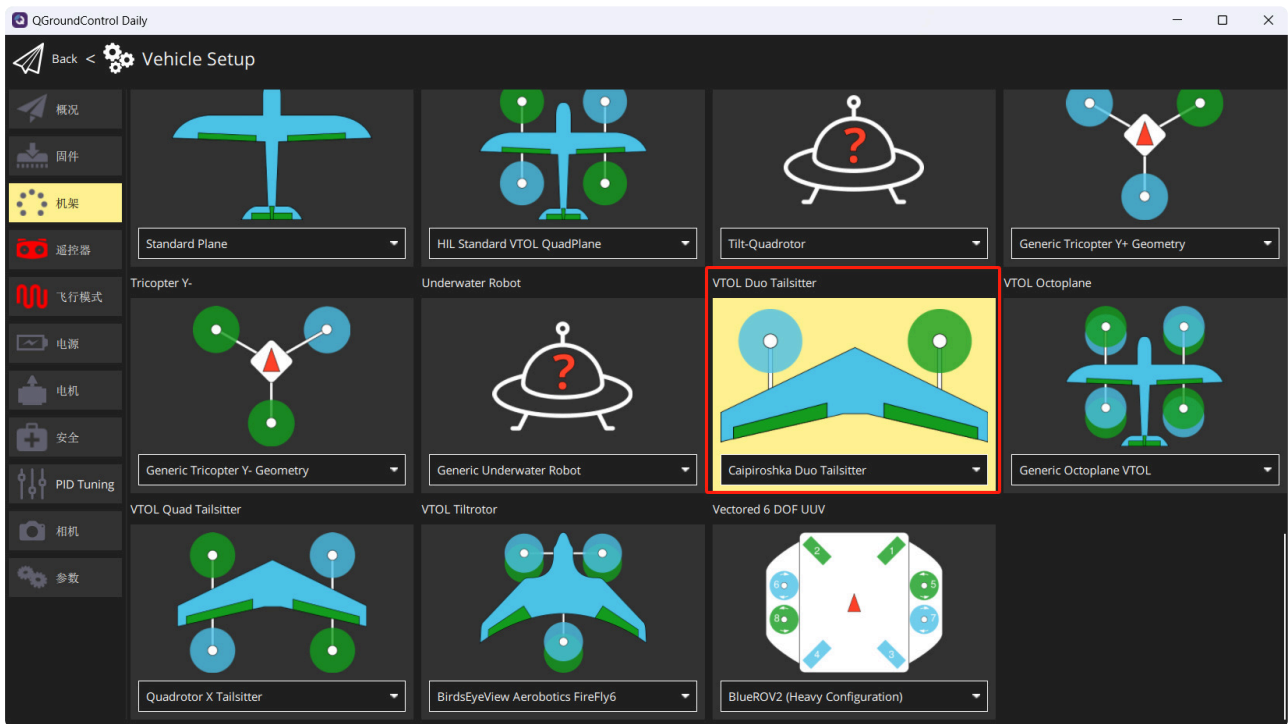


Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

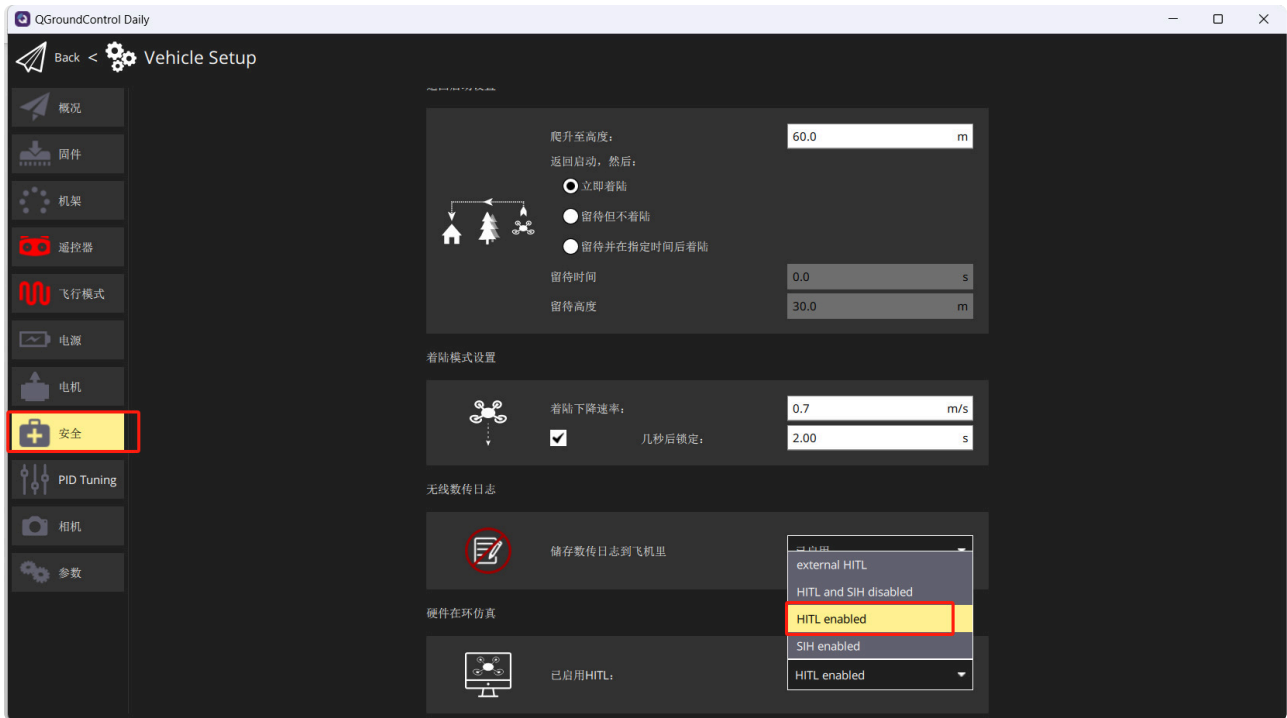
 3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷方式	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Caipiroshka Duo Tailsitter，点击右上角的“应用并重启”。

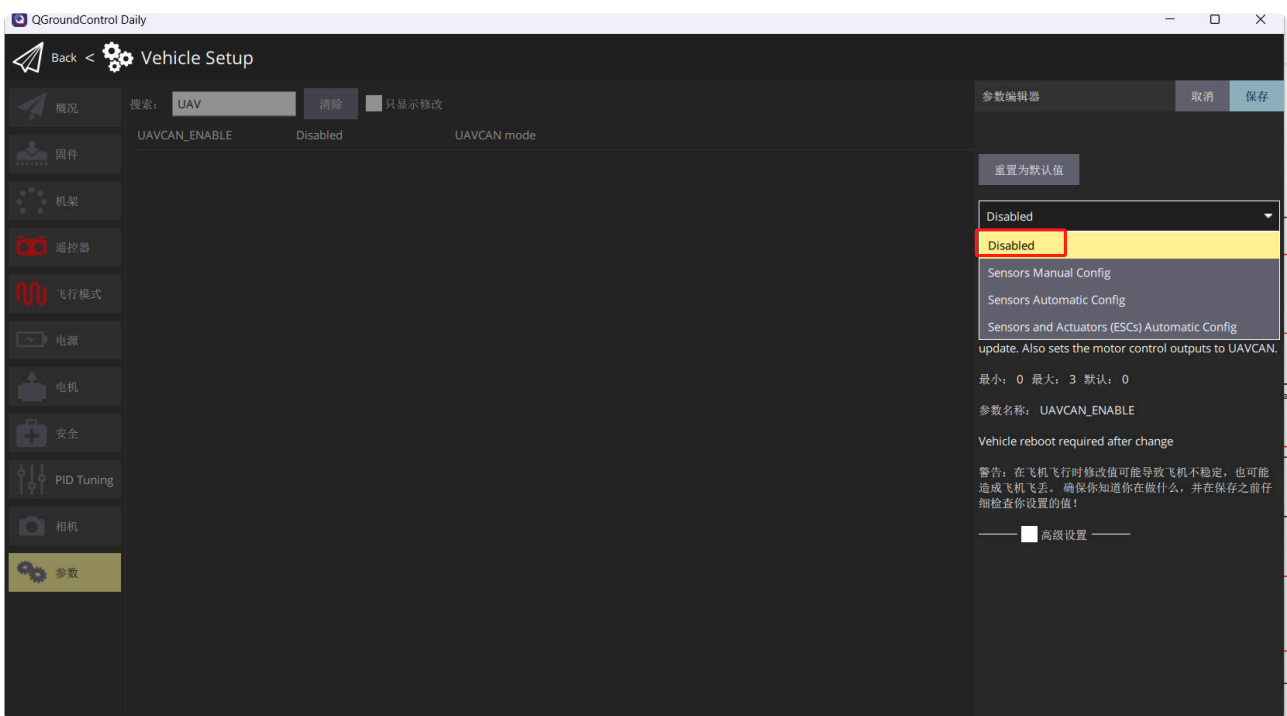


Step 3: 配置硬件在环参数

点击“安全”，设置为“HITL enabled”

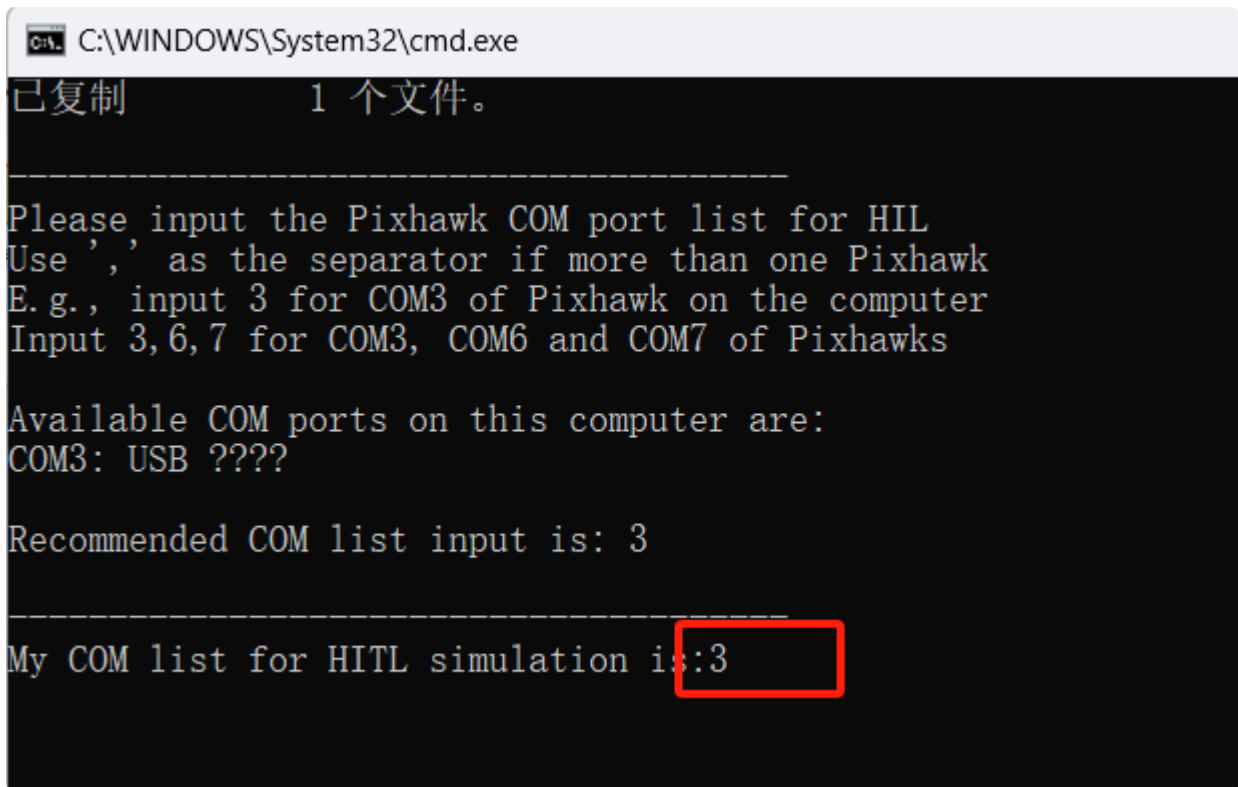


点击“参数”，搜索UAVCAN_ENABLE，设置为“Disabled”，重新插拔飞控。



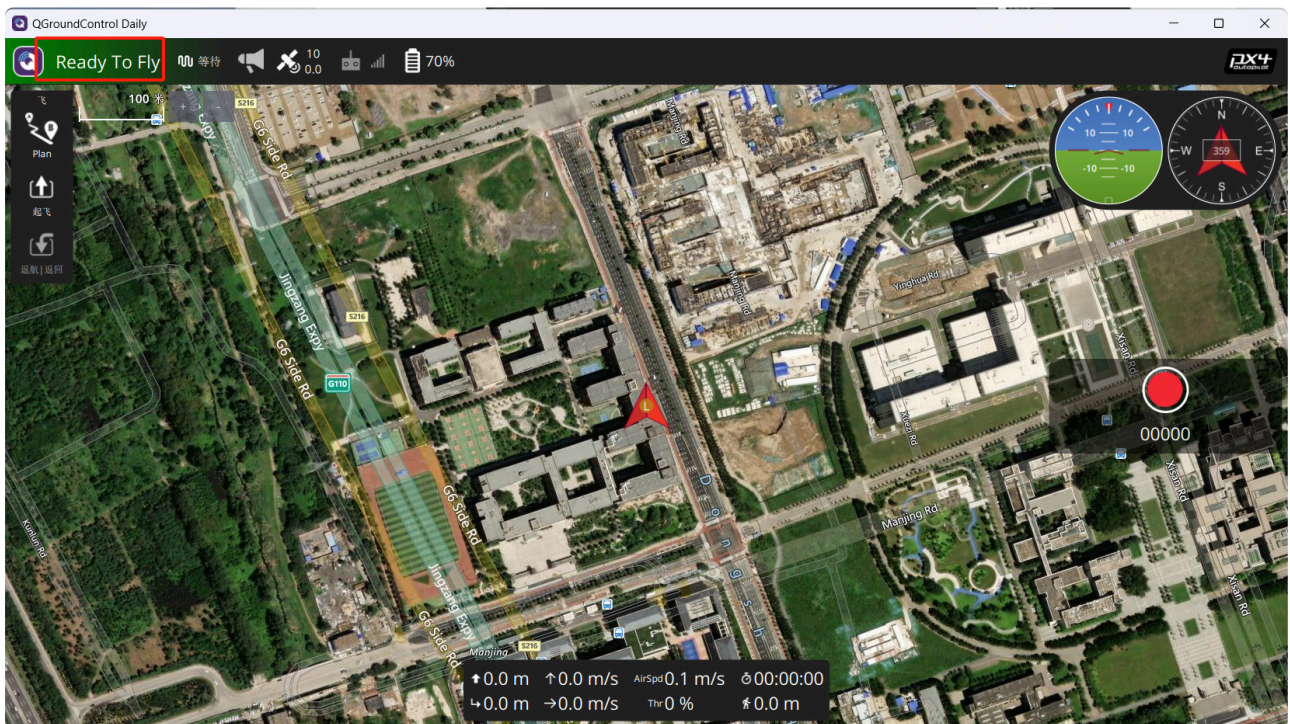
Step 4: 启动仿真

右键以管理员身份运行“[tailsitter_duo_HITL.bat](#)”，在提示框中输入飞控端口号后回车，启动一架飞机的硬件在环仿真。



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

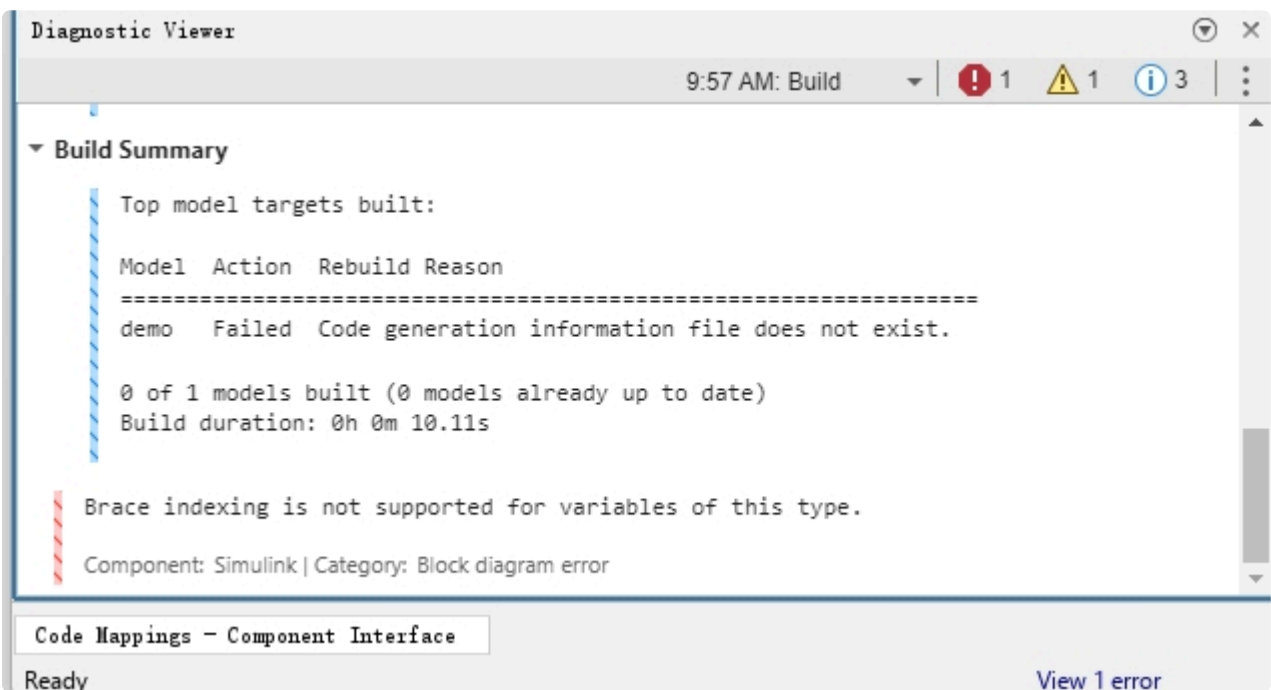
之后测试步骤与软件在环仿真的步骤相同，上传航线任务并观察无人机飞行状况。

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

```
命令窗口
>> mex -setup
MEX 配置为使用 'Microsoft Visual C++ 2017 (C)' 以进行 C 语言编译。
警告: MATLAB C 和 Fortran API 已更改, 现可支持
包含 2^32-1 个以上元素的 MATLAB 变量。您需要
更新代码以利用新的 API。
您可以在以下网址找到更多的相关信息:
http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab\_external/upgrading-mex-files-to-use-64-bit

要选择不同的 C 编译器, 请从以下选项中选择一种命令:
Microsoft Visual C++ 2013 \(C\) mex -setup:D:\MATLAB\R2017b\bin\win64\mexopts\msvc2013.xml C
Microsoft Visual C++ 2015 \(C\) mex -setup:D:\MATLAB\R2017b\bin\win64\mexopts\msvc2015.xml C
Microsoft Visual C++ 2017 \(C\) mex -setup:C:\Users\dream\AppData\Roaming\MathWorks\MATLAB\R2

要选择不同的语言, 请从以下选项中选择一种命令:
mex -setup C++
mex -setup FORTRAN
fx >>
```

Q2: 编译报错, 无法加载库文件

```
诊断台
下午4:48: 编译
-----
Epl_modelTemp 信息: 保存文件完成工作失败。 无法编译。 有关详细信息, 请参阅编译日志。  ed
编译了 0 个模型, 共 1 个模型(0 个模型已经是最新的)
编译持续时间: 0h 0m 3.7699s
-----
无法加载 "pixhawk_slib_adv\interface\model" 引用的库 "pixhawk_slib_adv1"。
附件: Simulink | 类别: Block diagram 错误
代码映射 - 组件接口
```

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