

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

基于系统模板的高精度标准垂直起降飞机模型设计及验证（DLL生成及SIL/HIL实验）（仅限完整版及以上版本）

1.2 实验目的

在Matlab将Simulink文件编译生成标准垂直起降飞机的DLL模型文件；并对生成的垂直起降飞机模型进行软硬件在环仿真测试，通过本例程熟悉标准垂直起降飞机的建模与使用。

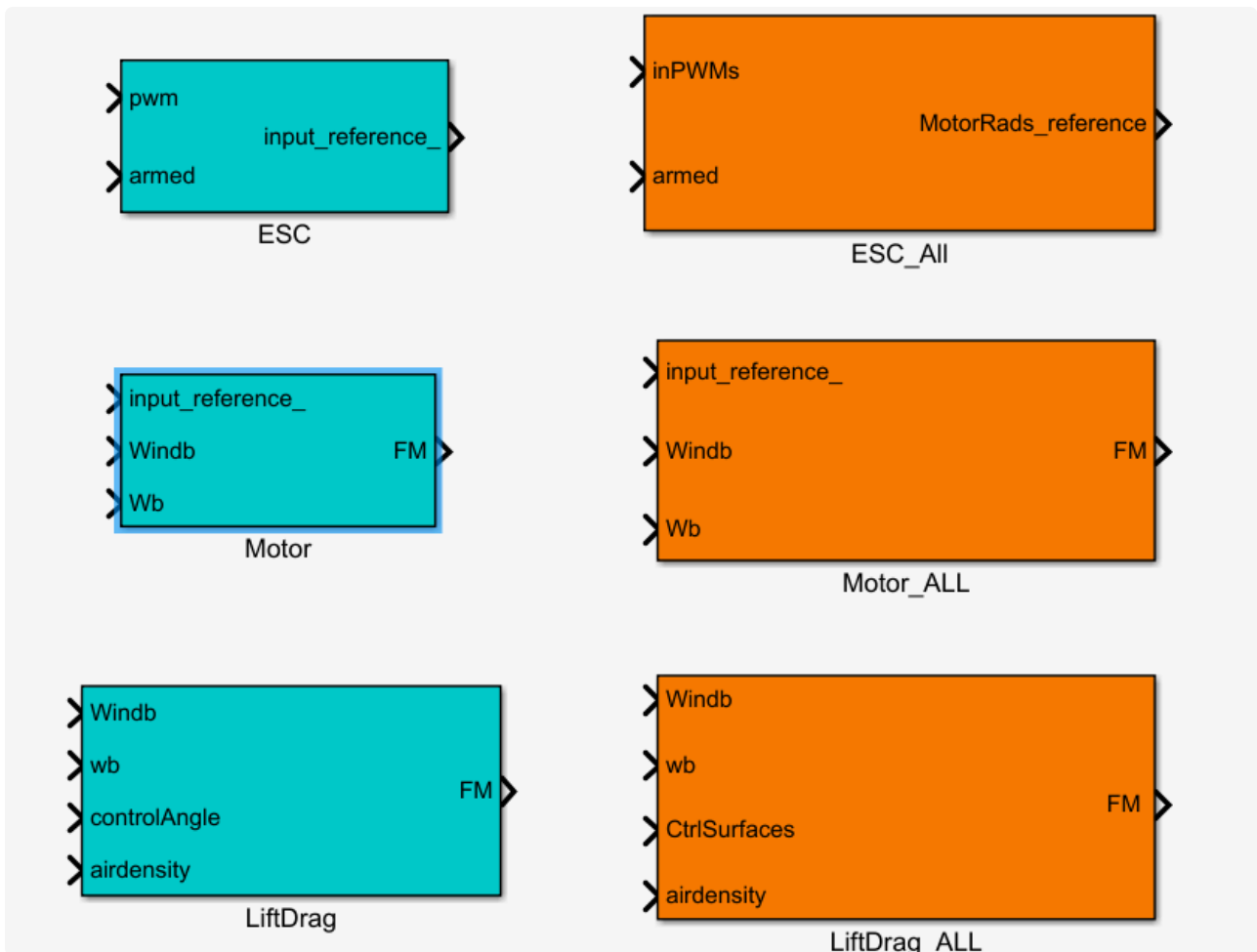
1.3 关键知识点

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

StandardVtolModel.slx是基于系统模版构建的一个四旋翼型垂直起降飞机（VTOL, Vertical Take-Off and Landing）模型。这是一种可以像直升机那样垂直起降，同时又具有像固定翼飞机那样的水平飞行能力的飞机，它需要在垂直起降模式和水平飞行模式之间平稳过渡。本标准垂直起降飞机采用的是Gazebo模型模块实现Gazebo平台支持仿真的机架类型（标准垂起）在RflySim平台上的建模。



■ 载具的基本动力学特性

标准垂直起降飞机是固定翼与多旋翼的结合，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

$$Ox_g y_g z_g$$

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），

$$x_g$$

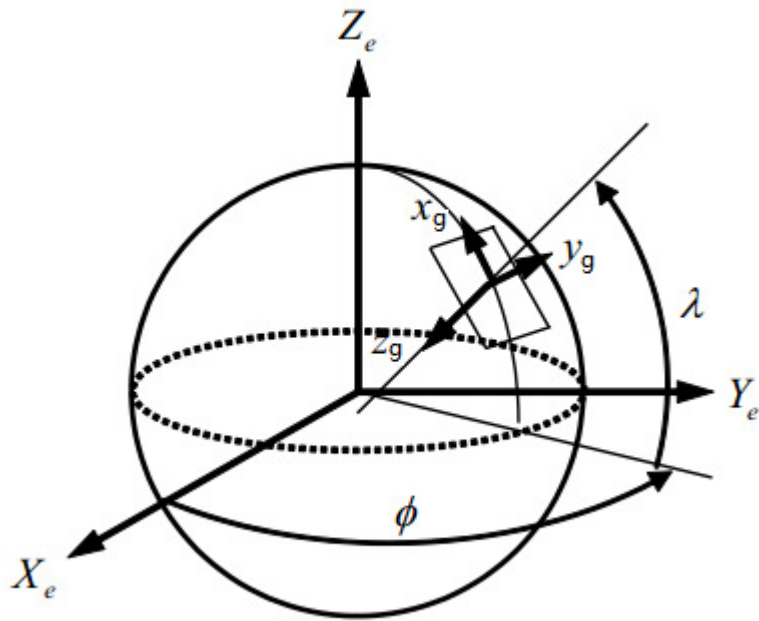
轴位于水平面内，指向某一固定方向（如飞机的航线方向），

$$z_g$$

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

$Ox_b z_b$

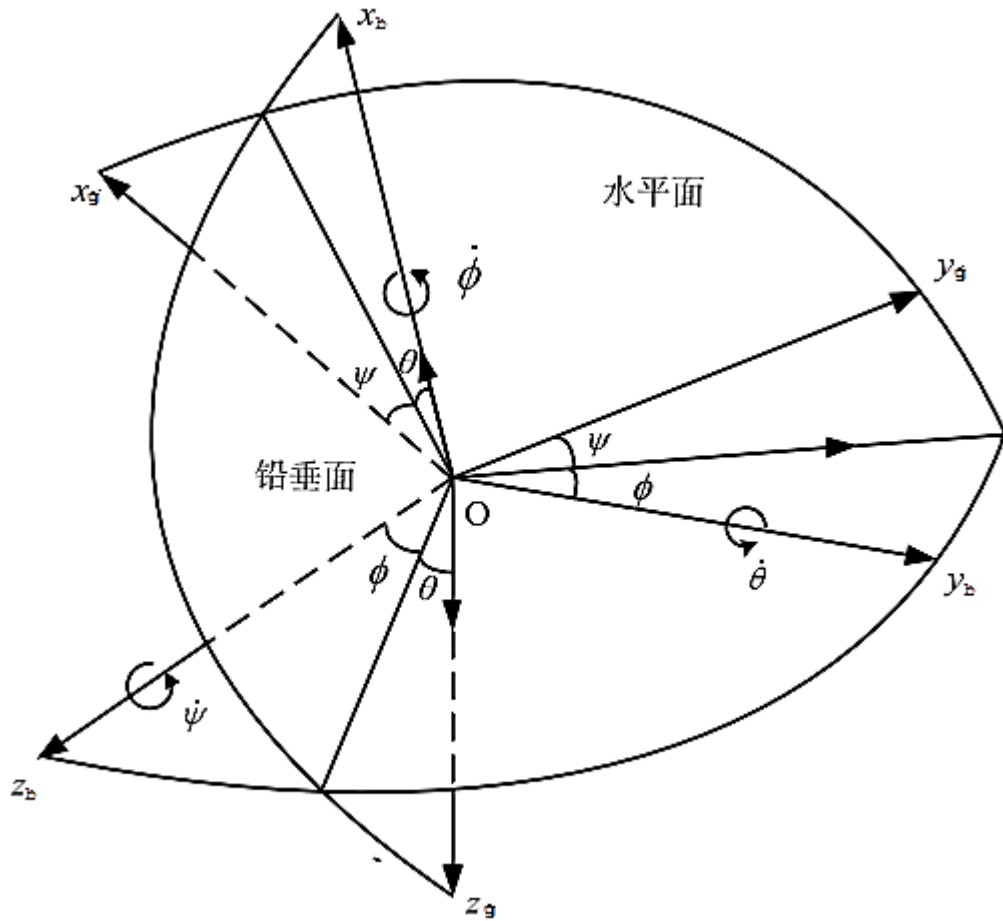
内并且垂直于纵轴，向下为正方向。

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

$$x_a$$

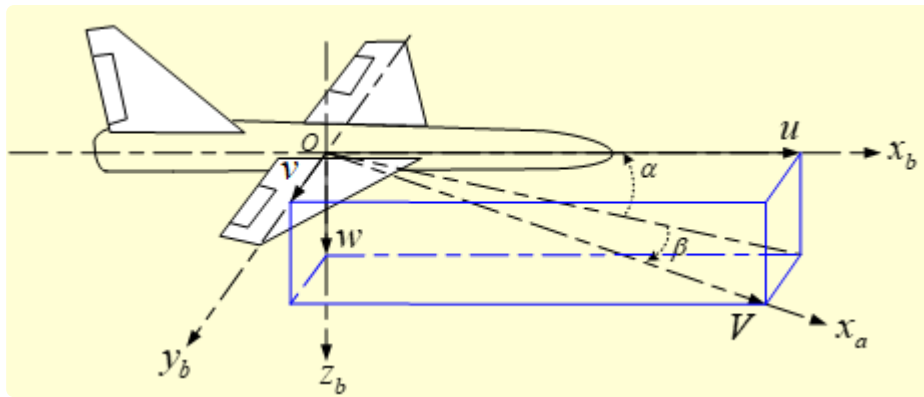
轴指向下方；

$$y_a$$

轴垂直于飞行器对称面

$$Ox_a z_a$$

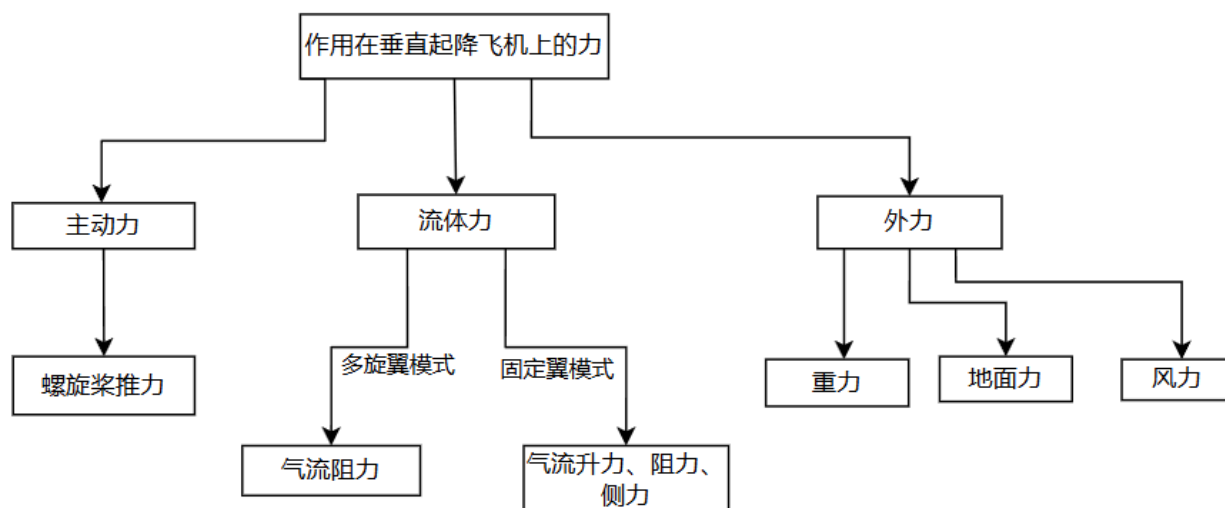
平面指向右方。



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。

标准垂直起降飞机，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）。运动的六自由度分解可参考2.AdvExps\e2_MultiModelCtrl和e3_FWingModelCtrl中的例程，固定翼模式下参考固定翼飞机的六自由度运动，多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中针对标准垂直起降飞机的机架型号为HILStandard VTOL

QuadPlane，其在\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d\airframes\1002_standard_vtol.hil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1002_standard_vtol.hil文件中设置混控器（mixer）为standard_vtol_hitl

```
set MIXER standard_vtol_hitl
```

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\  
standard_vtol_hitl.main.mix，其将推力和力矩映射到电机与舵机。
```

载具模型的整体输入输出和模块介绍

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](#)

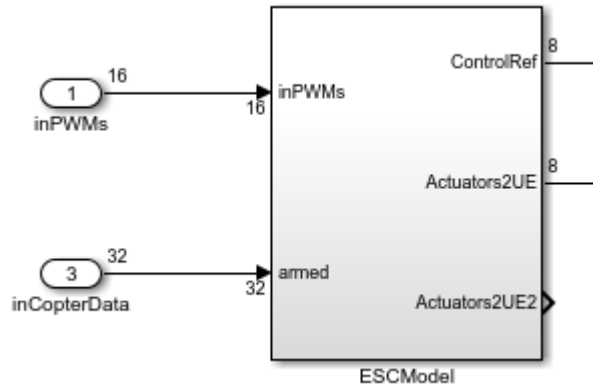
inCopterData

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。

模块介绍

适配垂直起降飞机模型，相对于最大模型模版，修改了模型参数（执行器初始参数等），并用其它动力学模块替换了电机模块（转速动态响应）、力和力矩模块（驱动力、气动力、地面支撑和阻力等）以及运动学模块。**针对与建模模板不同的模块进行介绍：**

电调模块



针对inPWMs接口

模块会提取前4维通道，并将-1到1的pwm控制信号，映射为合适的范围。例如，将方向舵从-1到1映射为-30到30度。其他的通道也进行同样操作

针对inCopterData接口

会提取第1位数据，决定飞机是否解锁，只有飞机解锁，才让飞控的控制量传入模型



模块输入

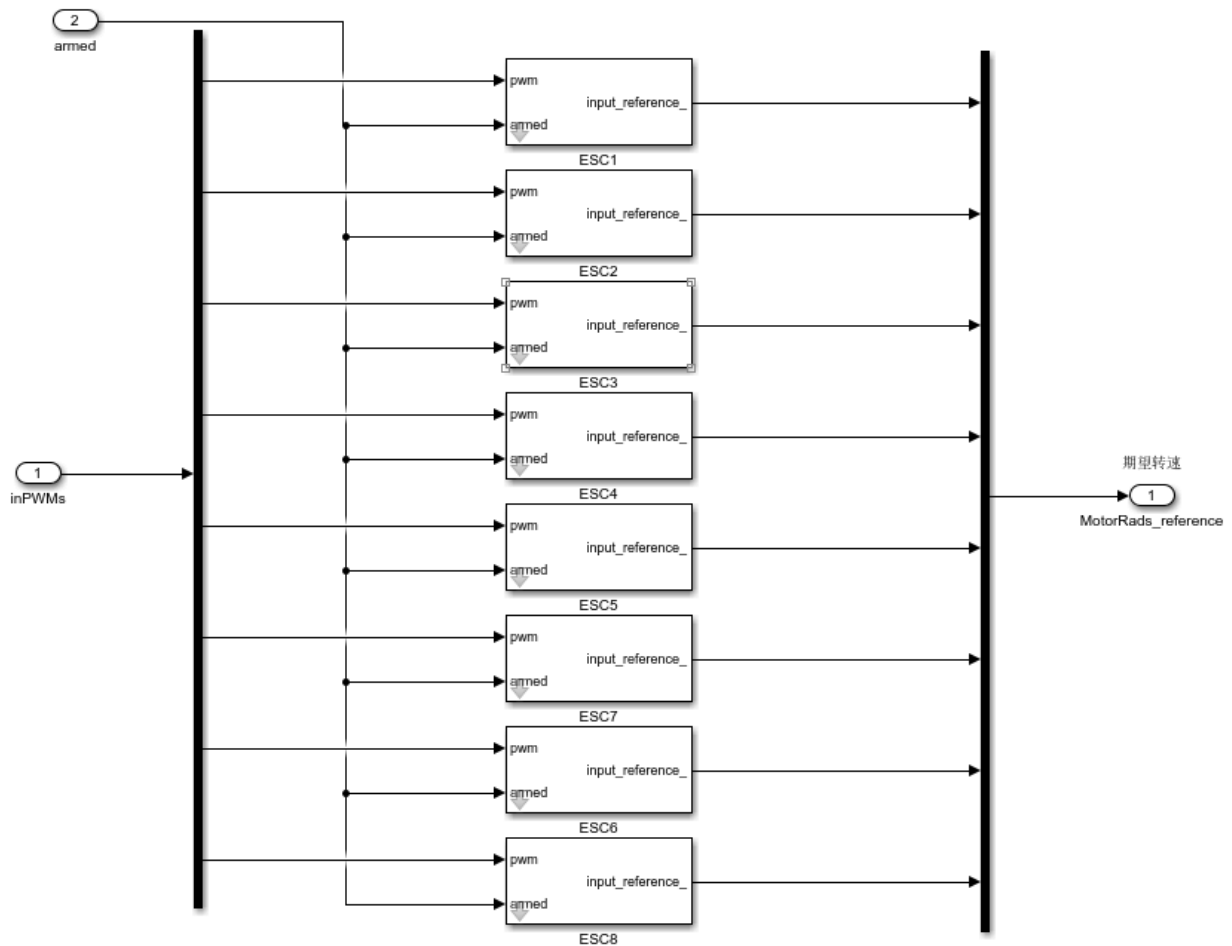
(1) inPWMs: PWM信号（8通道，数据自PX4飞控回传的电机控制MAVLink消息 mavlink_hil_actuator_controls_t 的 controls，和Gazebo中对应的“xxx.sdf”文件最末尾的 channel 定义顺序保持一致）。

(2) armed: 外部输入的布尔逻辑变量，False代表屏蔽ESC_ALL模块输出，输出为0，反之则启用ESC_ALL模块输出。这里取值一般来自于inCopterData接口的第1维数据，该数据是来自于CopterSim的解锁标志位，这样可以保证仿真过程中未解锁时，飞机电机应该不转

保持初始值，只有解锁后才能接通inPWMs输入，这样可以避免在某些情况下，开始仿真但未解锁是飞机乱动的情况。

模块输出

MotorRads_reference: 期望转速，8个电机控制信号的期望数值，包含电机转速与升降舵等部件转动两种控制类型。MotorRads_reference是一个8维的向量。



模块参数

ESC_ALL模块进行了mask封装，内部包含了8个ESC子模块。输入参数为“ModelName_init.m”文件中的“ESC”结构体向量，ESC(1)、ESC(2)、ESC(3)...等是针对每个channel通道的参数结构体，顺序与Gazebo模型对应“xxx.sdf”文件（文件路径为*\PX4PSP\Firmware\Tools\sitl_gazebo\models）末尾的channel通道定义顺序一致。

“ModelName_init.m”文件中的“ESC”结构体向量如下。

```
% 电调参数模板
```

```
ESCTmp.isEnabled= false; %是否启用本电调
```

```
ESCTmp.input_offset = 0; %输入偏移量
```

```
ESCTmp.input_scaling = 1; %输入缩放系数
```

```
ESCTmp.zero_position_disarmed = 0;%零点位置解锁值
```

```
ESCTmp.zero_position_armed = 0;%零点位置锁定值
```

```
ESCTmp.joint_control_type=1;%关节控制类型， 0:velocity,1:position,...
```

% 依据xxx.sdf.jinja文件末尾的control_channels定义ESC各通道顺序及ESCTmp参数取值。

```
ESC = [ESCTmp, ...
```

```
ESCTmp, ...
```

```
ESCTmp,...
```

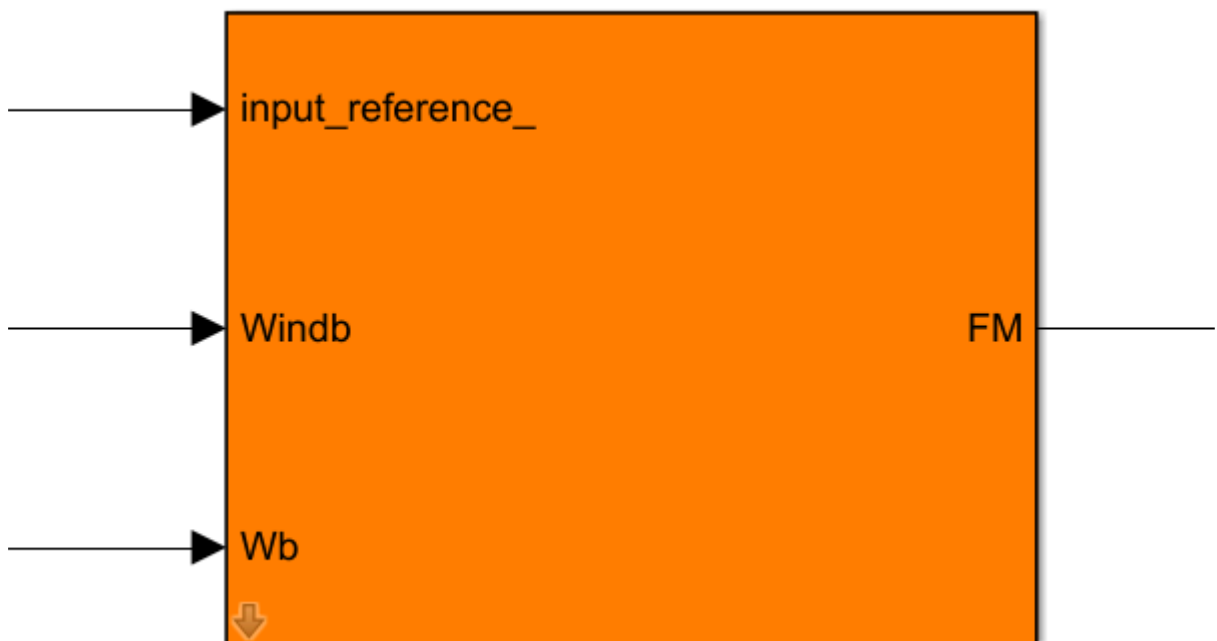
```
ESCTmp, ...
```

```
ESCTmp, ...
```

```
ESCTmp, ...
```

```
ESCTmp,...
```

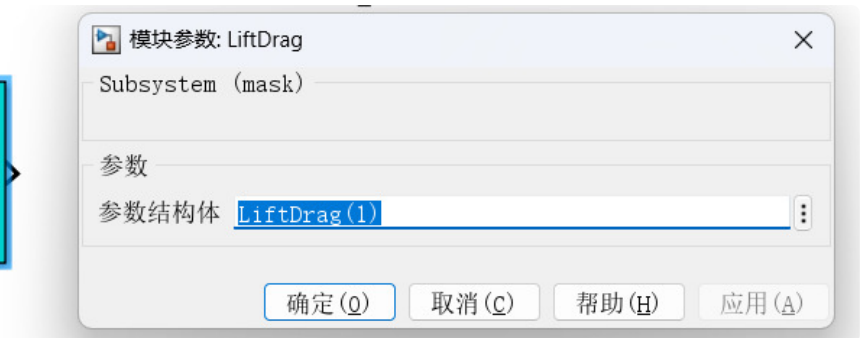
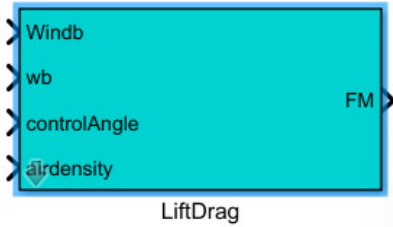
电机模块



内部包含8个电机子模块，分别处理输入input_reference_的其中一个通道控制信号，最多可支持无人机8个电机的控制。input_reference_取ControlRef的前五位对应模型的五个电

机，input_reference_后三位补零表示Motor5-8输入为零，即为不调用这几个电机。输出电机产生的力和力矩，已经做了变换，都是机体坐标系下的数值。

升阻力模块



用于计算负责升降舵、方向舵、副翼等部件的升力、阻力及力矩，LiftDrag模块输入参数来自“ModelName_init.m”文件中的LiftDrag

(1)结构体，在“ModelName_init.m”中定义并初始化。

2. 实验效果

实现标准垂直起降飞机DLL模型文件生成，以及完成垂直起降飞机软硬件在环仿真。

3. 文件目录

例程目录：

[安装目录]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\3.CustExps\e3_VTOLModelCtrl\1.VTOLModelCtrl

文件夹/文件名称	说明
StandardVtolModel.slx	标准垂直起降飞机模型文件。
StandardVtolModel_HITL.bat	硬件在环仿真批处理文件。
StandardVtolModel_SITL.bat	软件在环仿真批处理文件。
GenerateModelDLLFile.p	DLL格式转化文件。
StandardVtolModel_init.m	标准垂直起降飞机动力模型相关参数。
MavLinkStruct.mat	MavLink数据结构体mat文件
RflySimModelLab	Gazebo模块库

| 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。

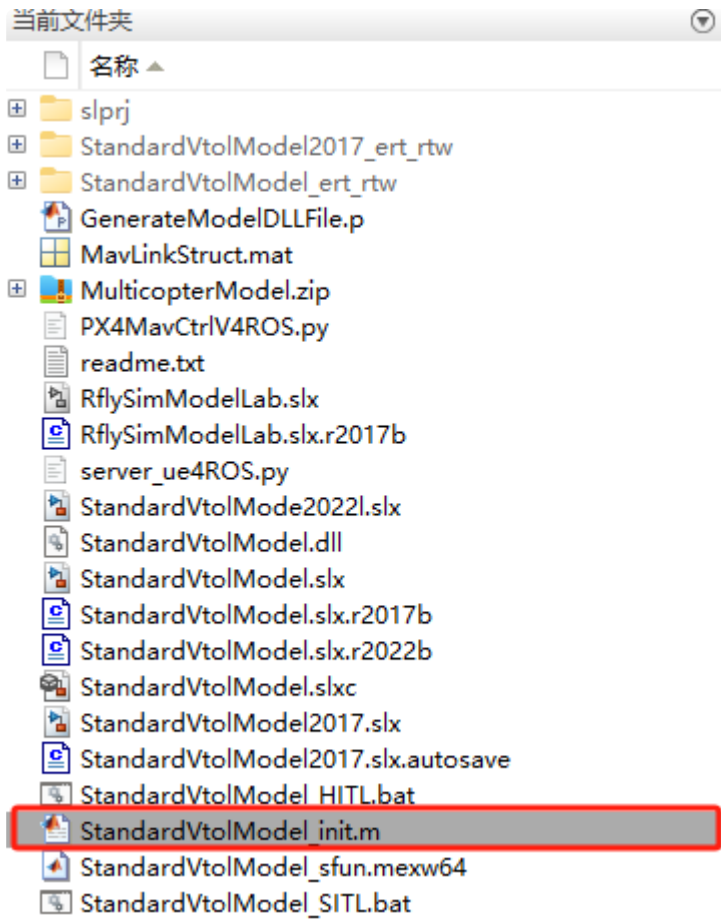
①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

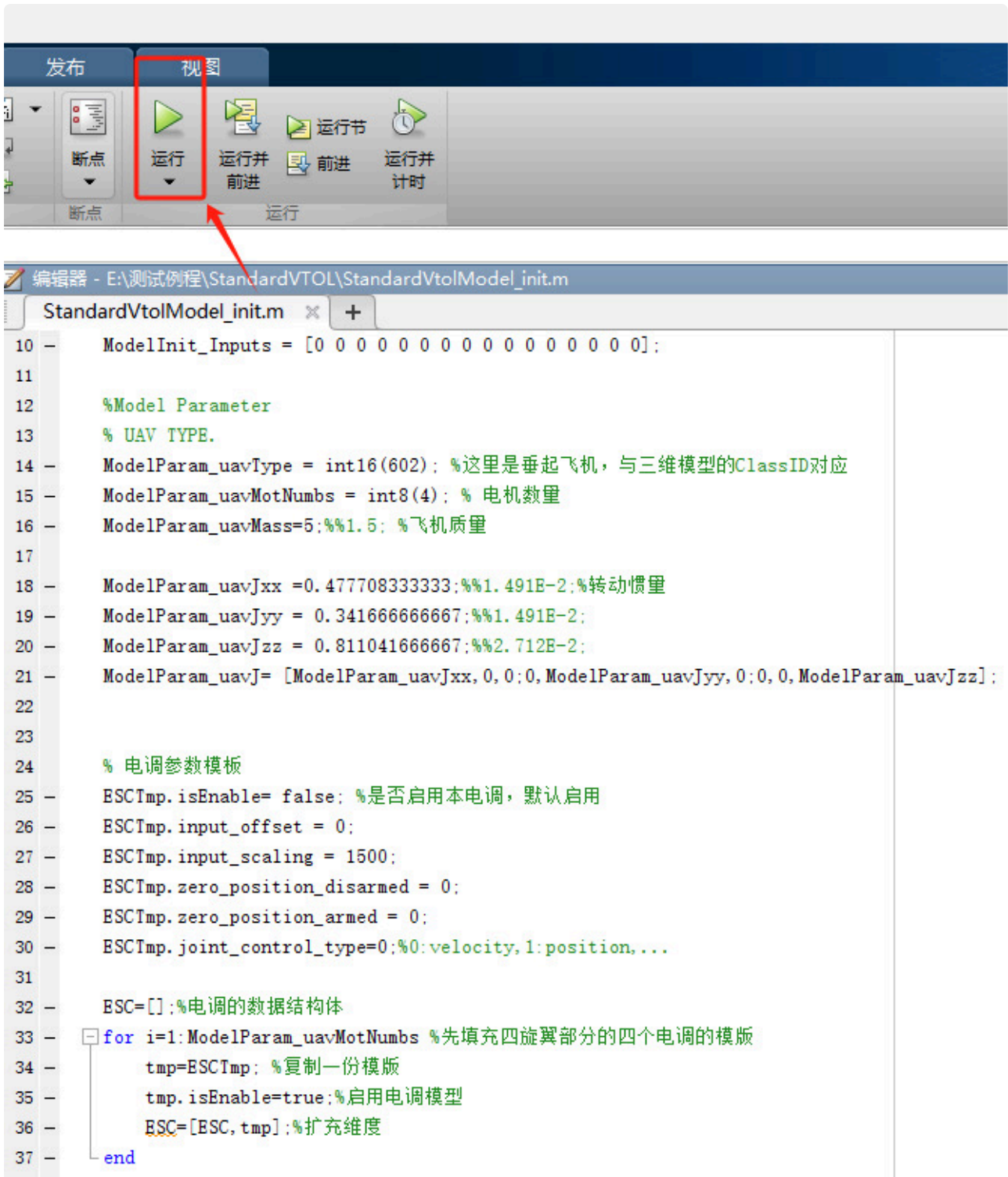
| 5.实验步骤

| 5.1. 必做实验：DLL模型生成

| Step 1: 运行.m文件

在matlab软件中打开文件夹里的“[StandardVtolModel_init.m](#)”文件，并运行。





Step 2: 编译模型

打开“StandardVtolModel.slx” Simulink 文件，点击“Build Model”按钮。编译配置可参考

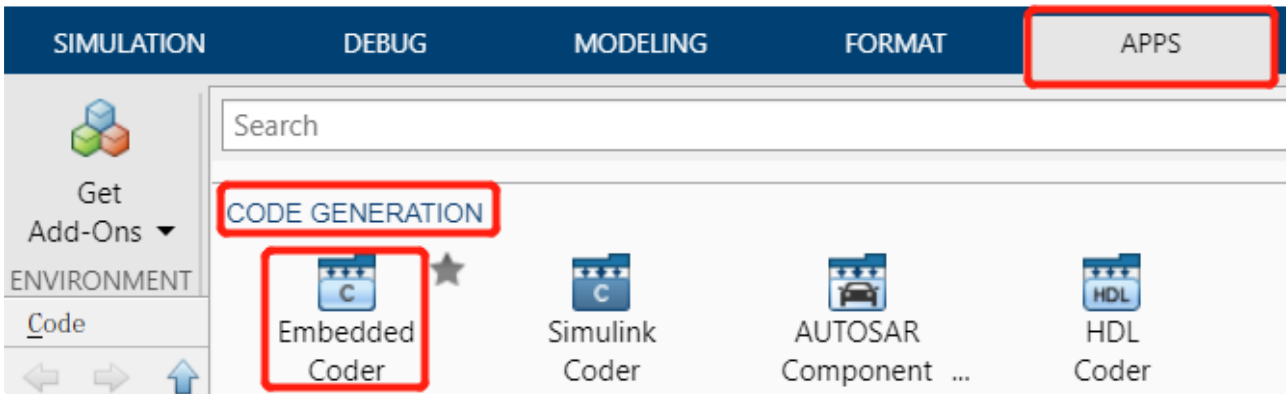
[4.RflySimModel\0.ApiExps\2.UserDefinedC++\2.GenC++\Readme.pdf](#)

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。

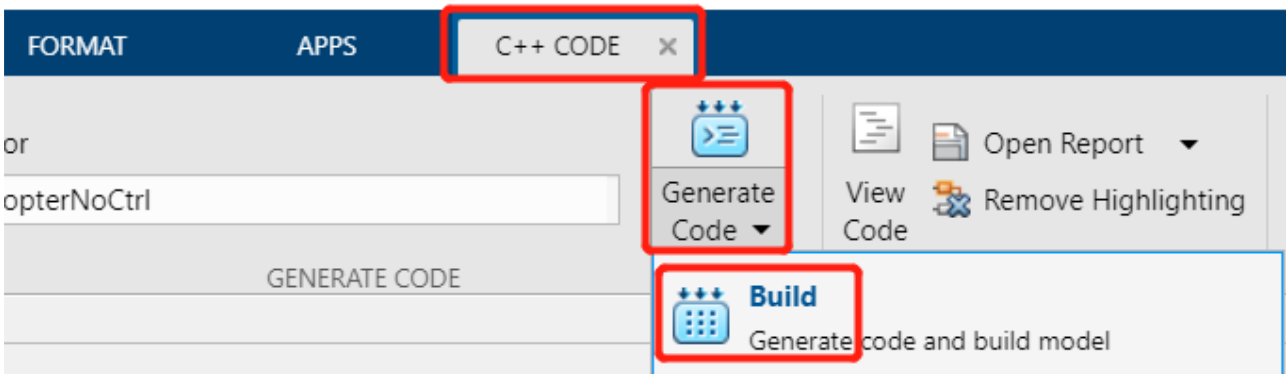


对于2019b及之后版本，点击APPS - CODE GENERATION - Embedded Coder才能弹出代码生成工具栏，在其中如下图所示点击“C++CODE” - “Generate Code” - “Build” 按钮就能编译生成代码。

MulticopterCtrlVelocity/Force and Moment Model - Simulink

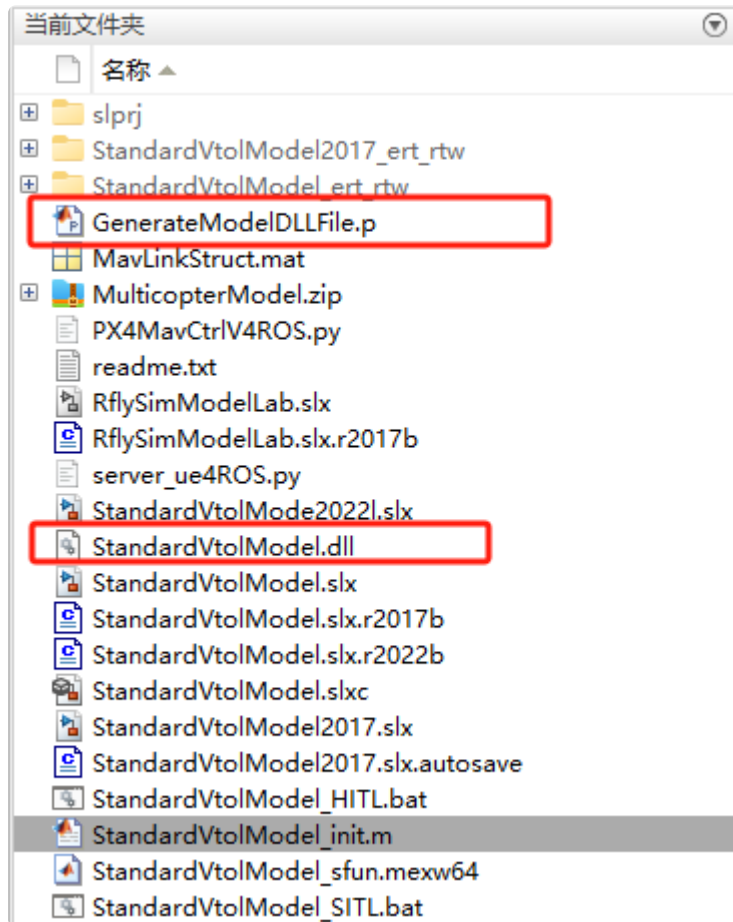


k



Step 3: 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。



5.2. 必做实验：软件在环仿真

Step 1: 启动仿真

双击“[StandardVtolModel_SITL.bat](#)”批处理文件，在弹出的终端窗口中输入1，启动一架垂直起降飞机的软件在环仿真。等待编译完成，不报错，且CopterSim能正确3D Fixed说明配置正确。

 StandardVtolMode20221.slx	2024/2/5 11:24	Simulink Model	93 KB
 StandardVtolModel.dll	2024/2/5 11:24	应用程序扩展	269 KB
 StandardVtolModel.slx	2024/2/5 11:23	Simulink Model	95 KB
 StandardVtolModel.slx.r2017b	2022/7/27 17:35	R2017B 文件	71 KB
 StandardVtolModel.slx.r2022b	2023/11/16 15:17	R2022B 文件	124 KB
 StandardVtolModel.slxc	2024/2/5 11:22	MATLAB.slx.9.1...	7,478 KB
 StandardVtolModel_HITL.bat	2022/8/22 13:03	Windows 批处理...	6 KB
 StandardVtolModel_init.m	2022/9/22 9:26	MATLAB Code	9 KB
 StandardVtolModel_sfun.mexw64	2024/2/5 11:22	MATLAB Mex	125 KB
 StandardVtolModel_SITL.bat	2022/8/22 13:04	Windows 批处理...	6 KB
 StandardVtolModel2017.slx	2024/2/5 14:04	Simulink Model	71 KB
 StandardVtolModel2017.slx.autosave	2024/2/5 14:11	AUTOSAVE 文件	56 KB

注意，在“StandardVtolModel_SITL.bat”文件中，机架设置处确认是对应的机架。

```
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=standard_vtol
```

Step 2: 等待初始化完成

等待 CopterSim 中显示连接上 RflySim3D。



机架类型: 四旋翼

整机质量: 1.5 kg

机架轴距: 450 mm

飞行海拔: 50 m

品牌型号: 品牌型号 自定义设计



飞思实验室

电机品牌:	DJI (大疆)	型号:	2312 KV960
螺旋桨品牌:	APC	型号:	10x4.5MR
电调品牌:	Hobbywing (好盈)	型号:	XRotor 20A
电池品牌:	ACE (裕氏电池)	型号:	LiPo 3S-11.1V-25C-550mAh

机型数据库:

计算

模型参数

加入模型库

删除当前机型

本机ID: 1

UDP收端口: 20100

使用DLL模型文件: VtolHighModel

仿真模式: PX4_SITL_RFLY

三维显示场景: OldFactory

联机:

飞机起点位置: x: -250 y: -119 yaw: 0

偏航: 0

飞控选择:

UDP Mode: Mavlink_Full

开始仿真

停止仿真

重新仿真

```

PX4: Initializing of EKF2 for position estimation...
PX4: EKF2 Estimator start initializing...
PX4: Found firmware version: 1.12.3dev
PX4: Command ID: 512 ACCEPTED
PX4: Command ID: 512 ACCEPTED
PX4: Command ID: 512 ACCEPTED
PX4: GPS 3D fixed & EKF initialization finished.
PX4: Enter Auto Loiter Mode!

```

X: -249.996

Y: -119

Z: -0.07

Vx: 0

Vy: 0

Vz: 0

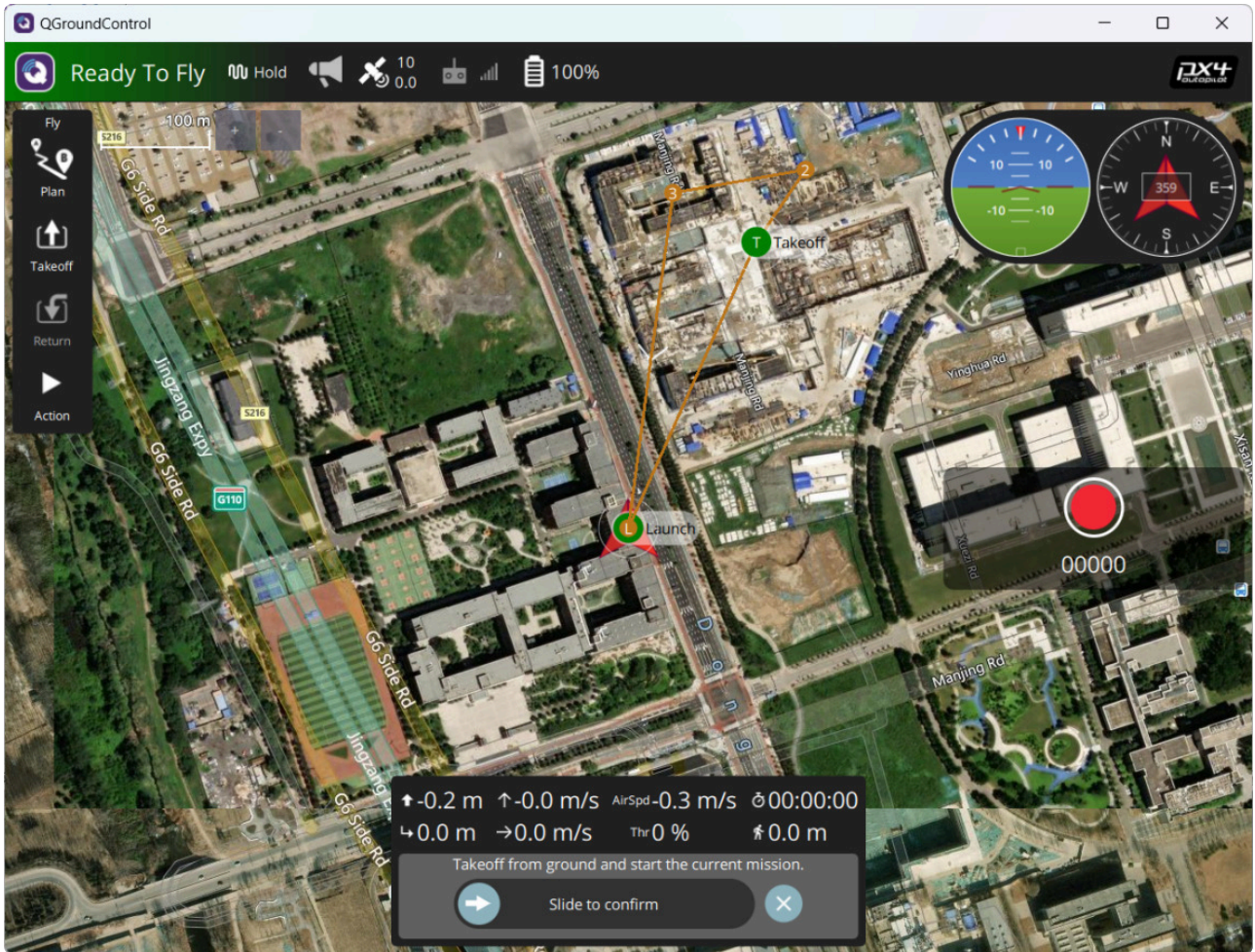
φ: 0

θ: 0

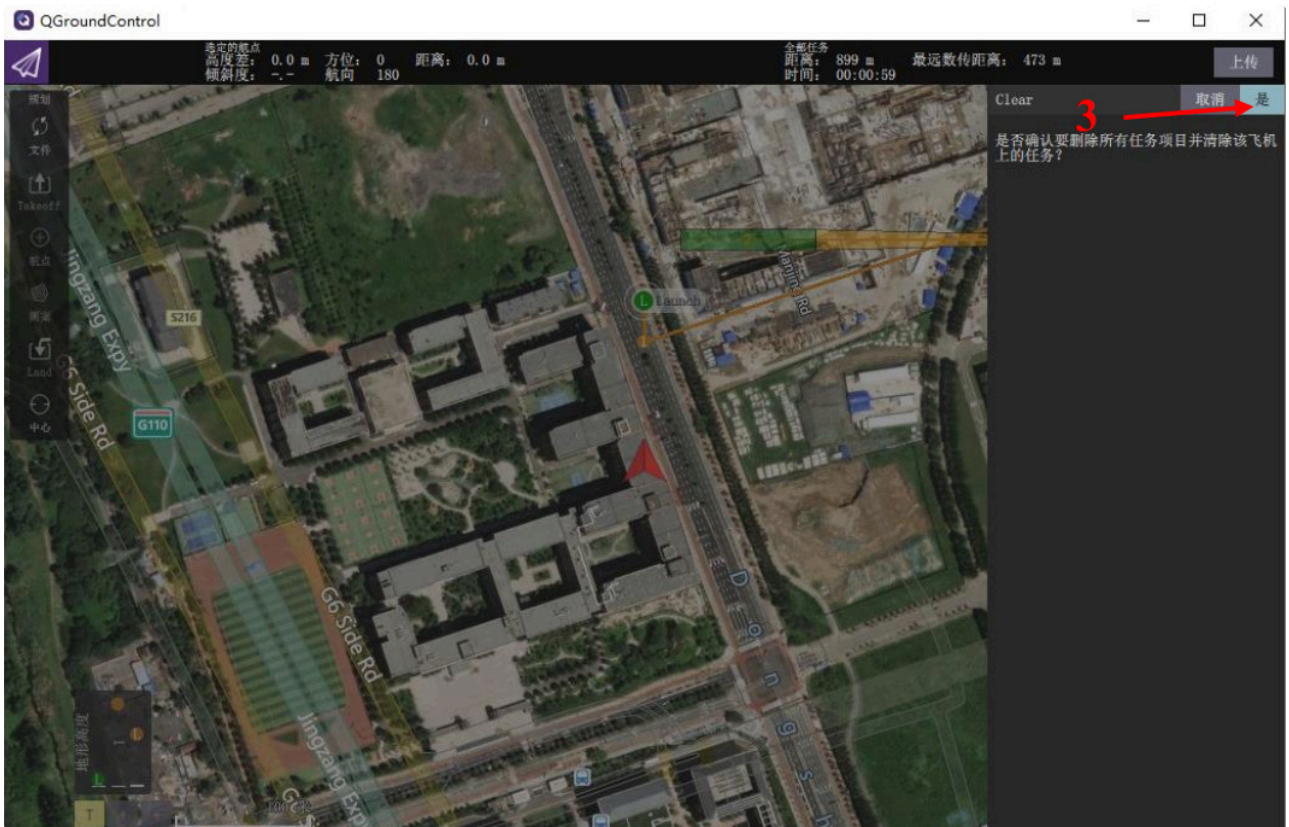
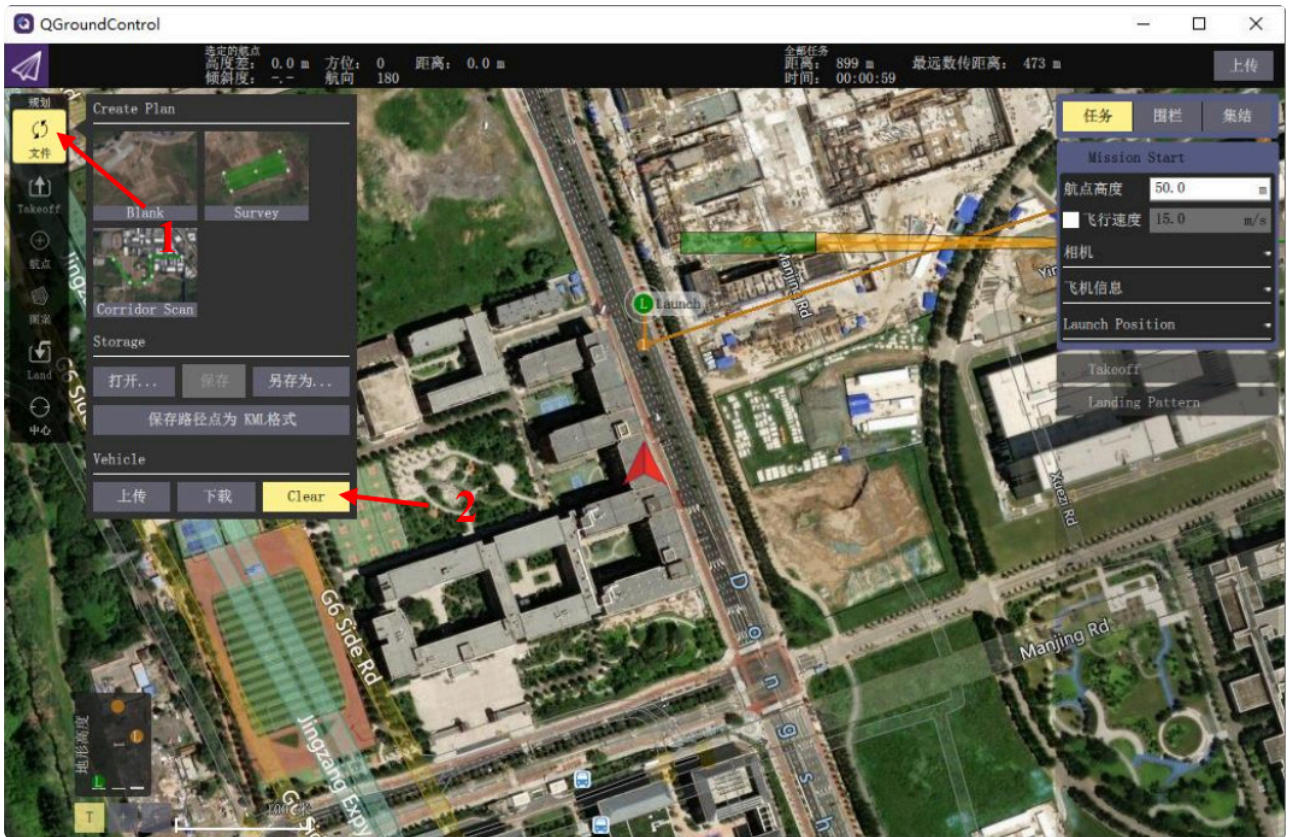
ψ: 0

Step 3: 航路设置页面

在 QGC 中进入航路设置页面。

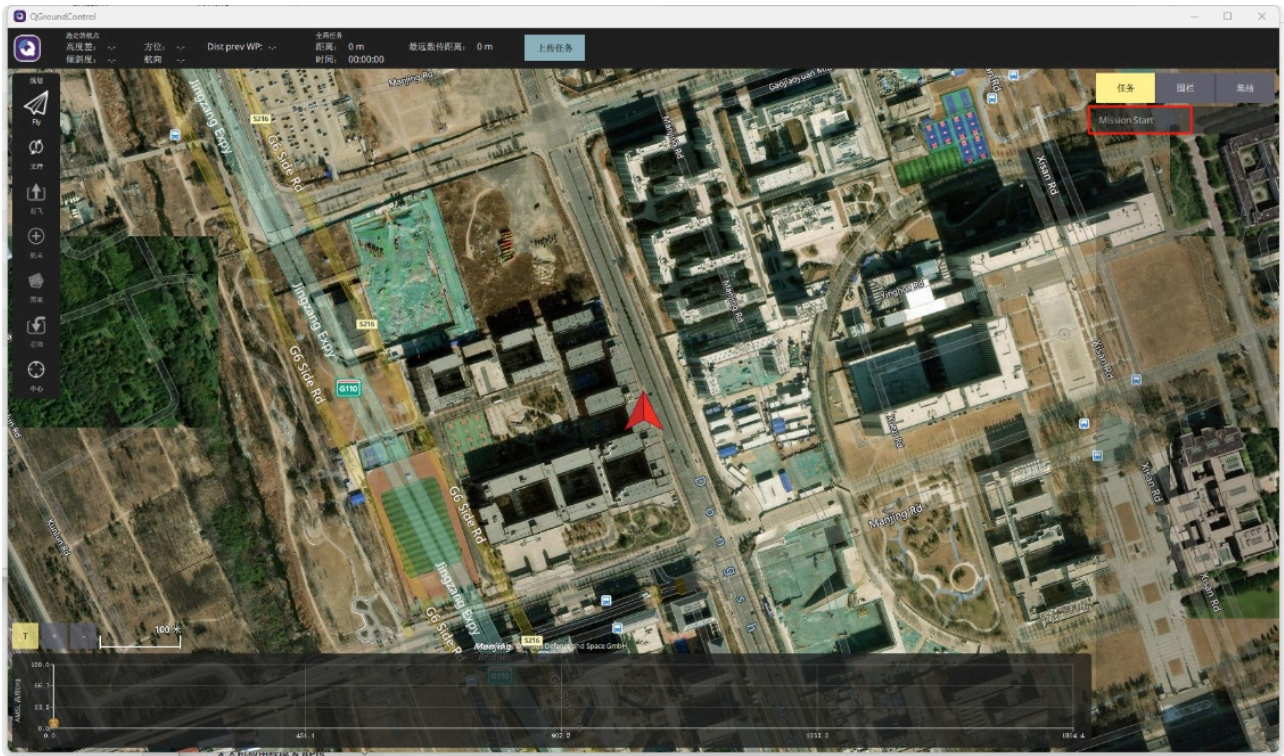


若已存在航路，则先点击文件按钮，之后点击 clear 按钮清除航路，在弹出界面选择“是”。

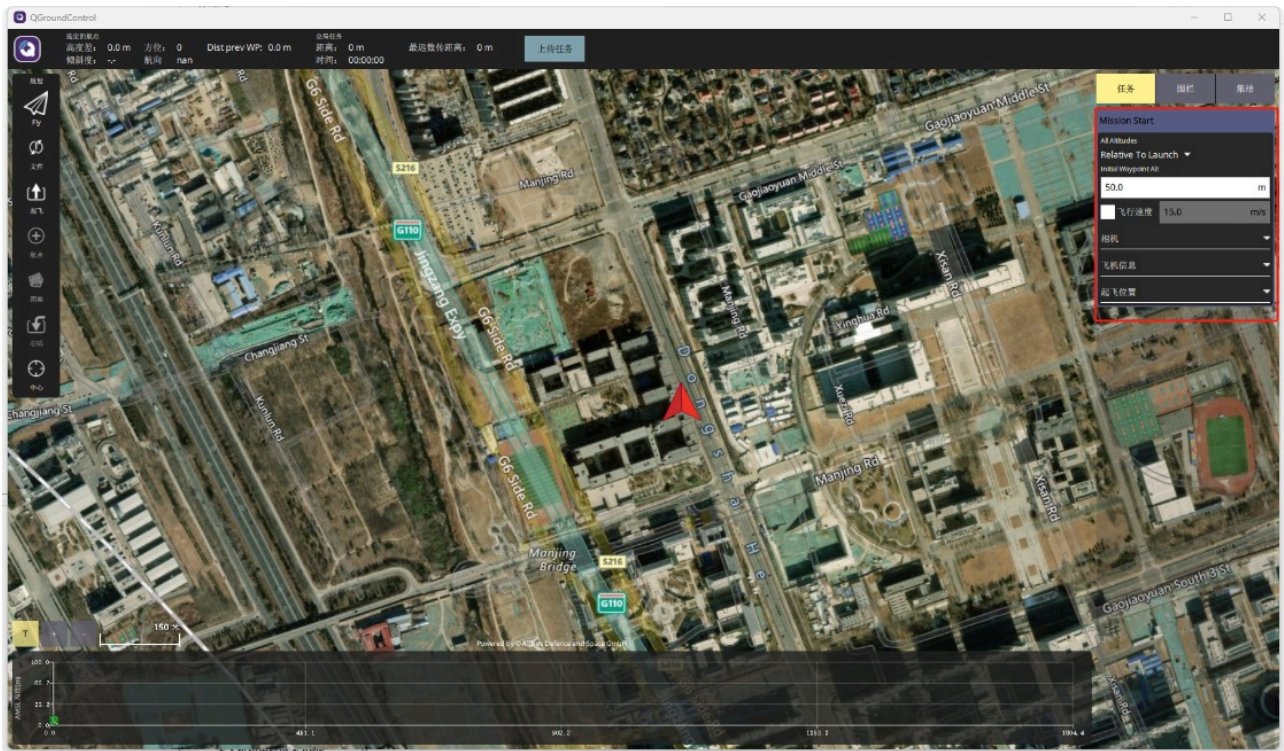


Step 4: 设置起飞点

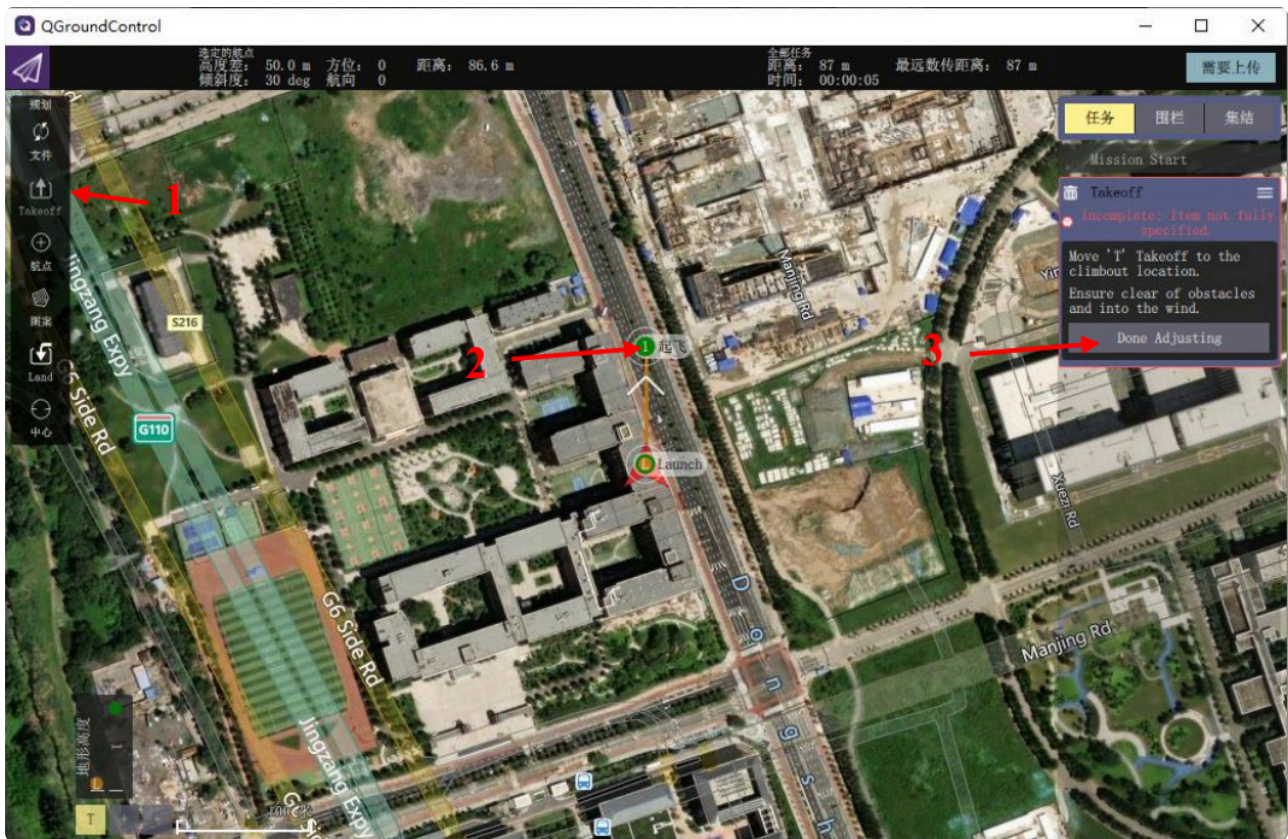
首先点击“任务开始”按钮



之后会弹出飞机初始化信息



点击“takeoff”按钮，可拖动绿色“起飞”点来设置起飞位置，之后点击右侧“Done Adjusting”按钮。



可设置起飞高度和角度，本例中采用默认值。



Step 5: 设置航点

点击“航点”按钮，之后在地图上点击任意位置可设置航点，同上一步可设置高度和速度（航点可设置多个，本例中只设置一个）。

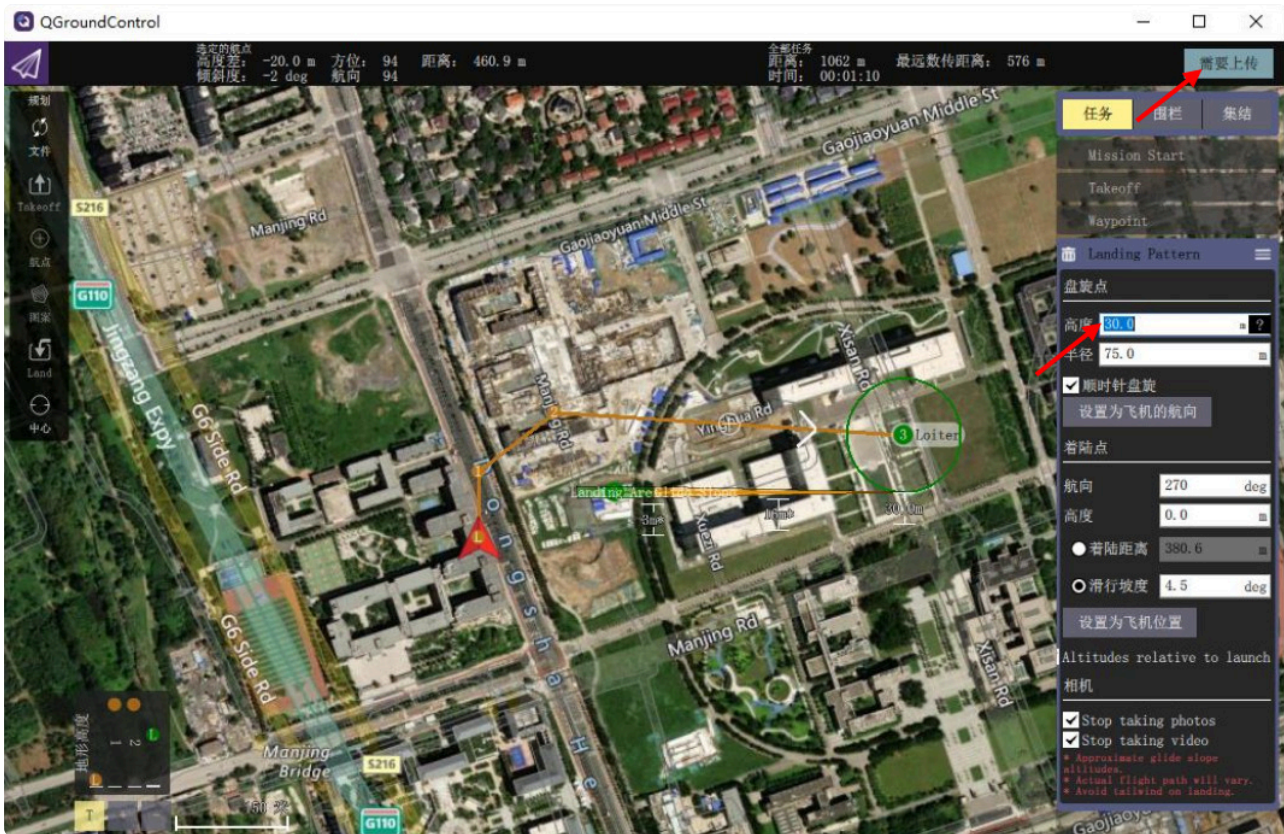


Step 6: 设置降落点并上传任务

点击“land”按钮，并在地图上点击位置设置降落点，拖动绿色“Loiter”图标可更改盘旋位置，之后点击右侧“Done Adjusting”。

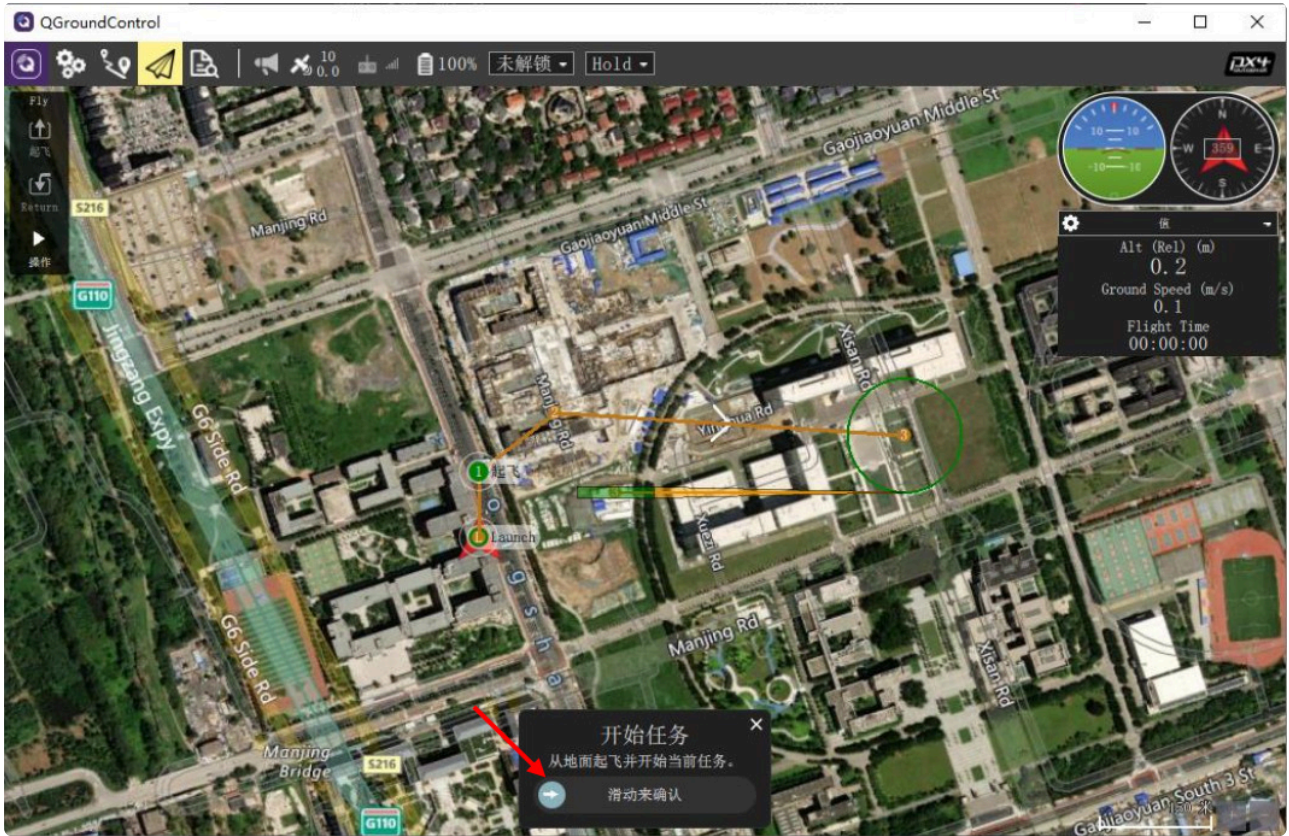


之后可设置降落高度等其他参数，本例中设置降落高度为30m，之后点击“需要上传”按钮上传航路。



Step 7: 开始执行

返回初始界面后，滑动下方滑块开始执行任务。



Step 8: 观察结果

在 UE4 中观察是否正常飞行。



5.3. 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）。

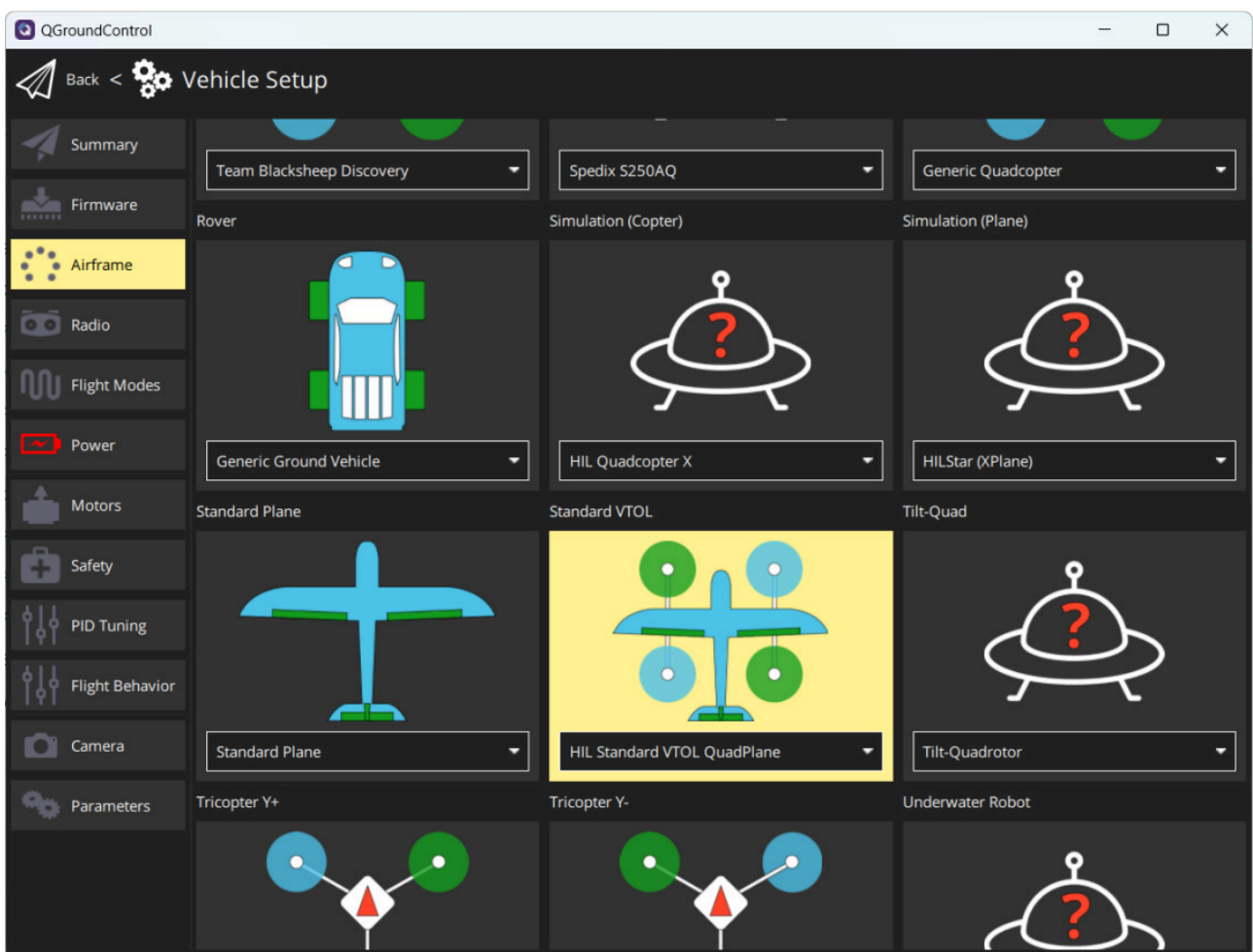


Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

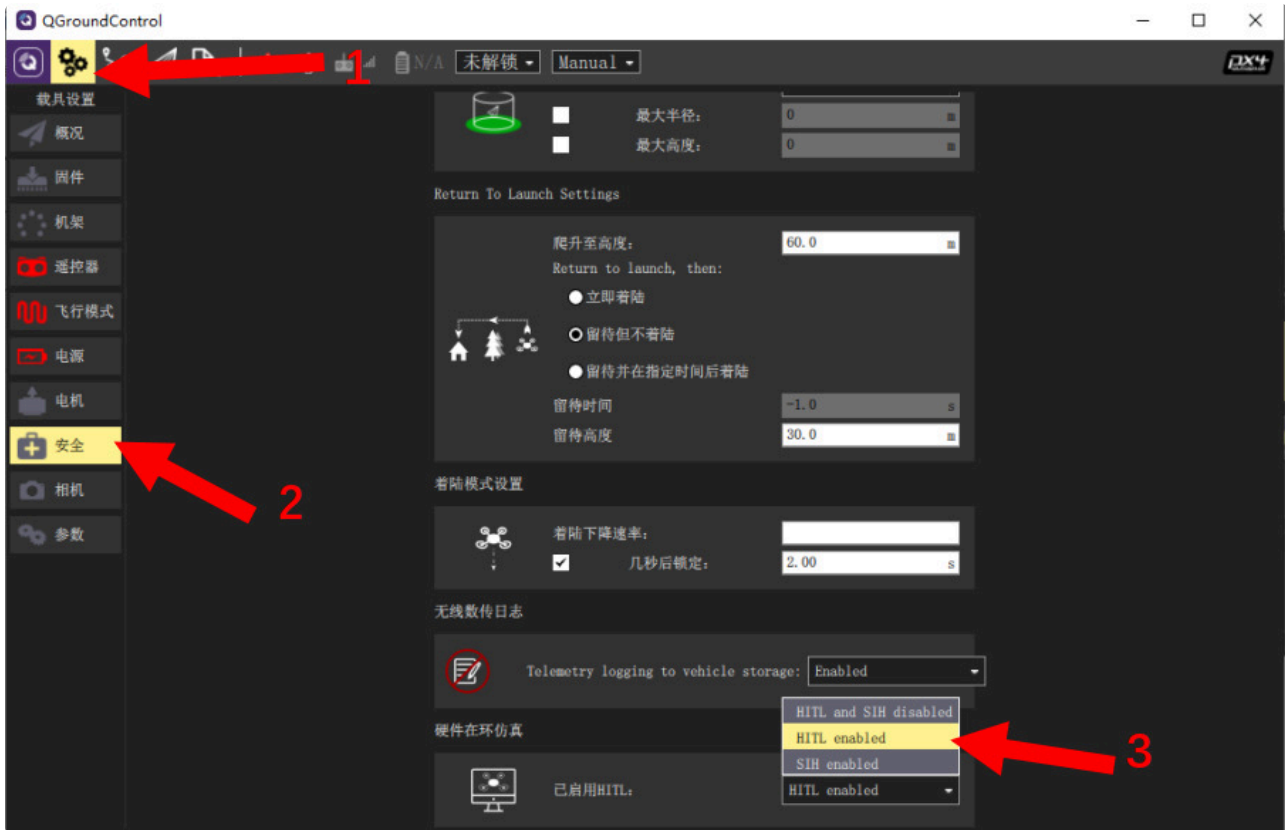
 3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷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

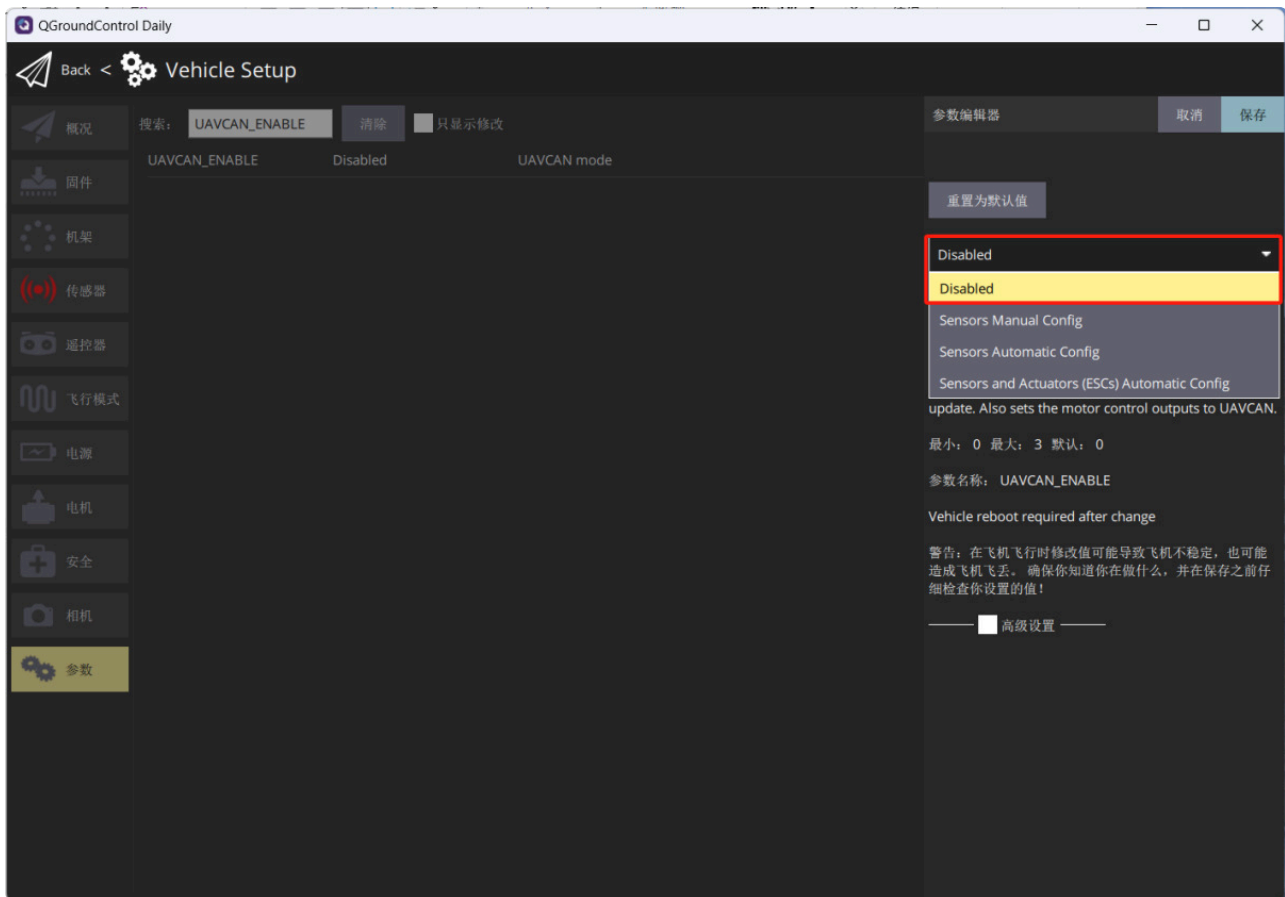
进入 Vehicle Setup 页面，在机架界面设置机架型号为“HILStandard VTOL QuadPlane”，设置完毕后点击右侧“应用并重启”。



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，点击“参数”，并在搜索栏中输入“UAVCAN_ENABLE”，在弹出框中设置为“Disabled”，点击保存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

双击“[StandardVtolModel_HITL.bat](#)”批处理文件，在弹出的终端窗口中输入串口号，启动一架飞机的硬件在环仿真。

StandardVtolMode2022l.slx	2024/2/5 11:24	Simulink Model	93 KB
StandardVtolModel.dll	2024/2/5 11:24	应用程序扩展	269 KB
StandardVtolModel.slx	2024/2/5 11:23	Simulink Model	95 KB
StandardVtolModel.slx.r2017b	2022/7/27 17:35	R2017B 文件	71 KB
StandardVtolModel.slx.r2022b	2023/11/16 15:17	R2022B 文件	124 KB
StandardVtolModel.slxc	2024/2/5 11:22	MATLAB.slxc.9.1...	7,478 KB
StandardVtolModel_HITL.bat	2022/8/22 13:03	Windows 批处理...	6 KB
StandardVtolModel_init.m	2022/9/22 9:26	MATLAB Code	9 KB
StandardVtolModel_sfun.mexw64	2024/2/5 11:22	MATLAB Mex	125 KB
StandardVtolModel_SITL.bat	2022/8/22 13:04	Windows 批处理...	6 KB
StandardVtolModel2017.slx	2024/2/5 14:04	Simulink Model	71 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

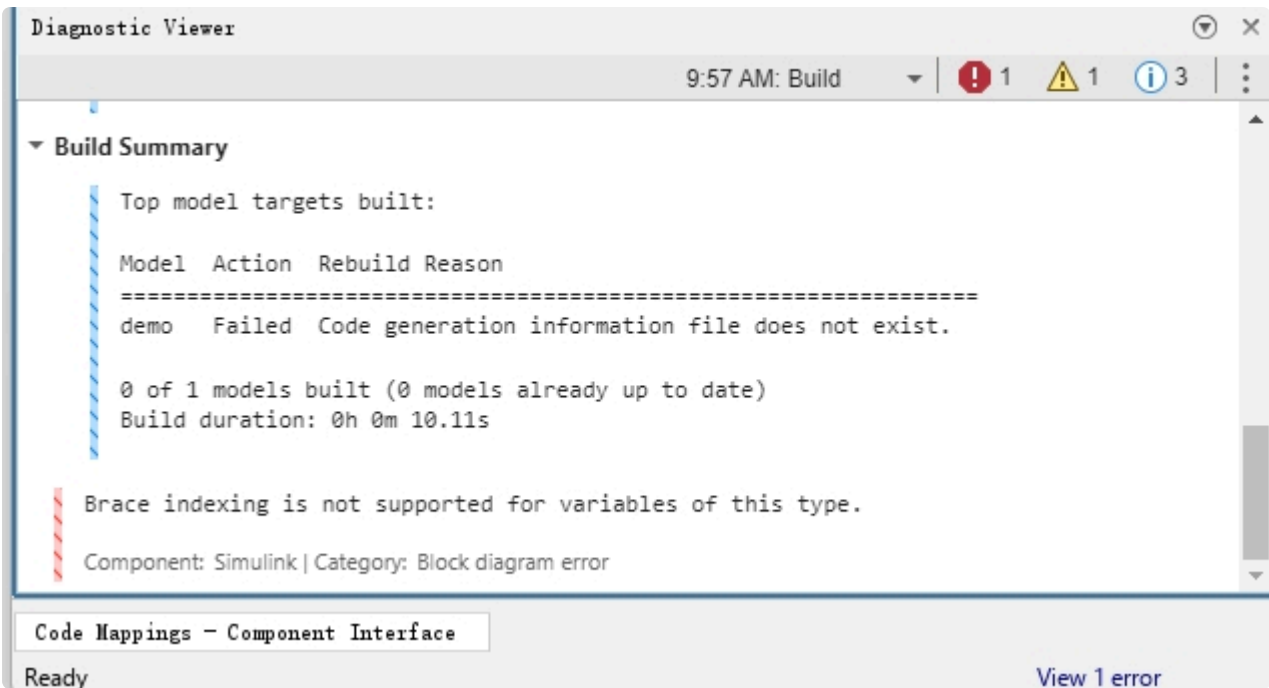
之后测试步骤与软件在环仿真的步骤相同。

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

