

# 1. 实验名称及目的

## 1.1 实验名称

基于系统模板的标准垂直起降飞机模型验证（SIL/HIL实验）

## 1.2 实验目的

利用Simulink文件编译生成的标准垂直起降飞机的DLL模型文件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软硬件在环仿真流程。

## 1.3 关键知识点

### 软/硬件在环仿真实现原理

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

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](..\..\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),

$$x_g$$

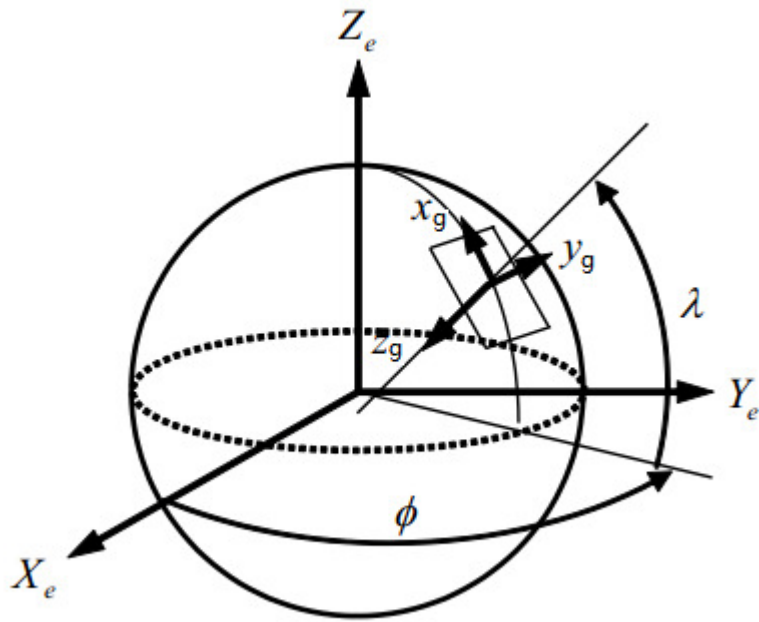
轴位于水平面内, 指向某一固定方向 (如飞机的航线方向),

$$z_g$$

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

$$Ox_b z_b$$

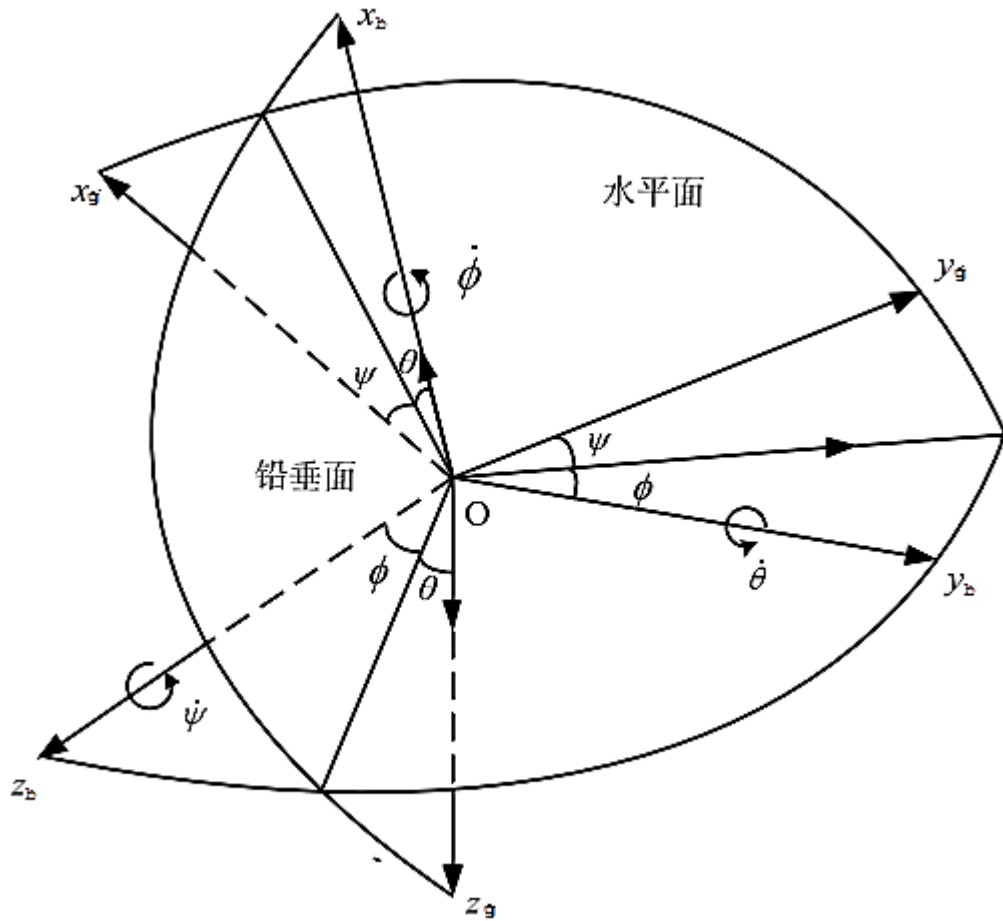
内并且垂直于纵轴，向下为正方向。

$$y_b$$

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

$$x_a$$

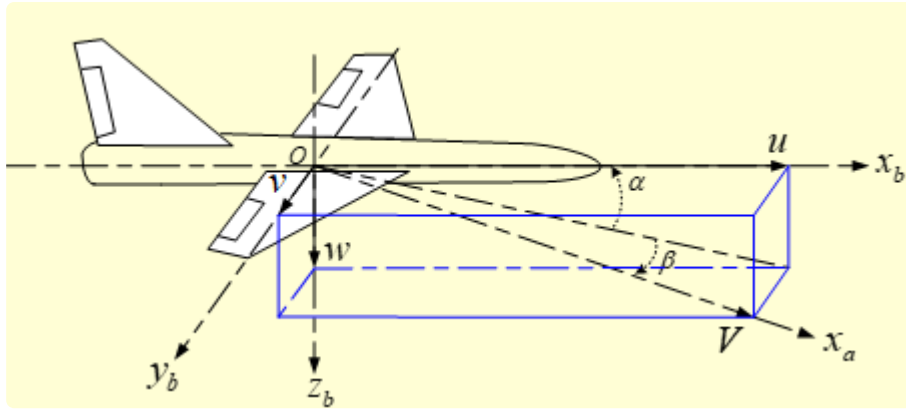
轴指向下方；

$$y_a$$

轴垂直于飞行器对称面

$$Ox_a z_a$$

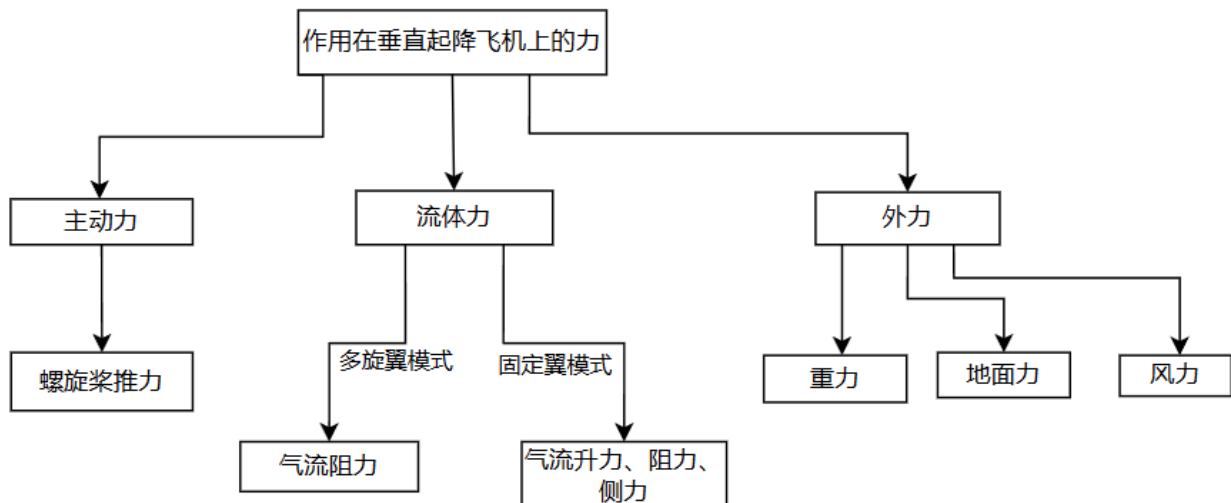
平面指向右方。



## 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。

## ■ 2.实验效果

启动标准垂直起降飞机软硬件在环仿真，并能通过QGC地面站控制标准垂直起降飞机的运动。



## 3. 文件目录

例程目录：

[安装目录]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e4\_VTOLModelCtrl\1.VTOLModelCtrl

| 文件夹/文件名称                   | 说明           |
|----------------------------|--------------|
| 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。 |
| StandardVtolModel.dll      | 标准垂起DLL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； \。

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

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。

|  |                 |                    |           |
|--|-----------------|--------------------|-----------|
|  Readme.pdf                 | 2024/8/16 0:14  | WPS PDF 文档         | 2,520 KB  |
|  Readme_en.docx             | 2024/7/25 13:25 | Microsoft Word ... | 11,060 KB |
|  Readme_en.pdf              | 2024/7/25 13:25 | WPS PDF 文档         | 1,991 KB  |
|  StandardVtolModel.dll      | 2024/7/25 13:25 | 应用程序扩展             | 317 KB    |
|  StandardVtolModel_HITL.bat | 2024/8/16 0:14  | Windows 批处理...     | 6 KB      |
|  StandardVtolModel_SITL.bat | 2024/8/16 0:14  | Windows 批处理...     | 6 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

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 (格氏电池) | 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°

飞控选择:  | UDP Mode: Mavlink\_Full | 开始仿真 | 停止仿真 | 重新仿真

```

PX4: Initializing on-board sensors for position control...
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。

QGroundControl

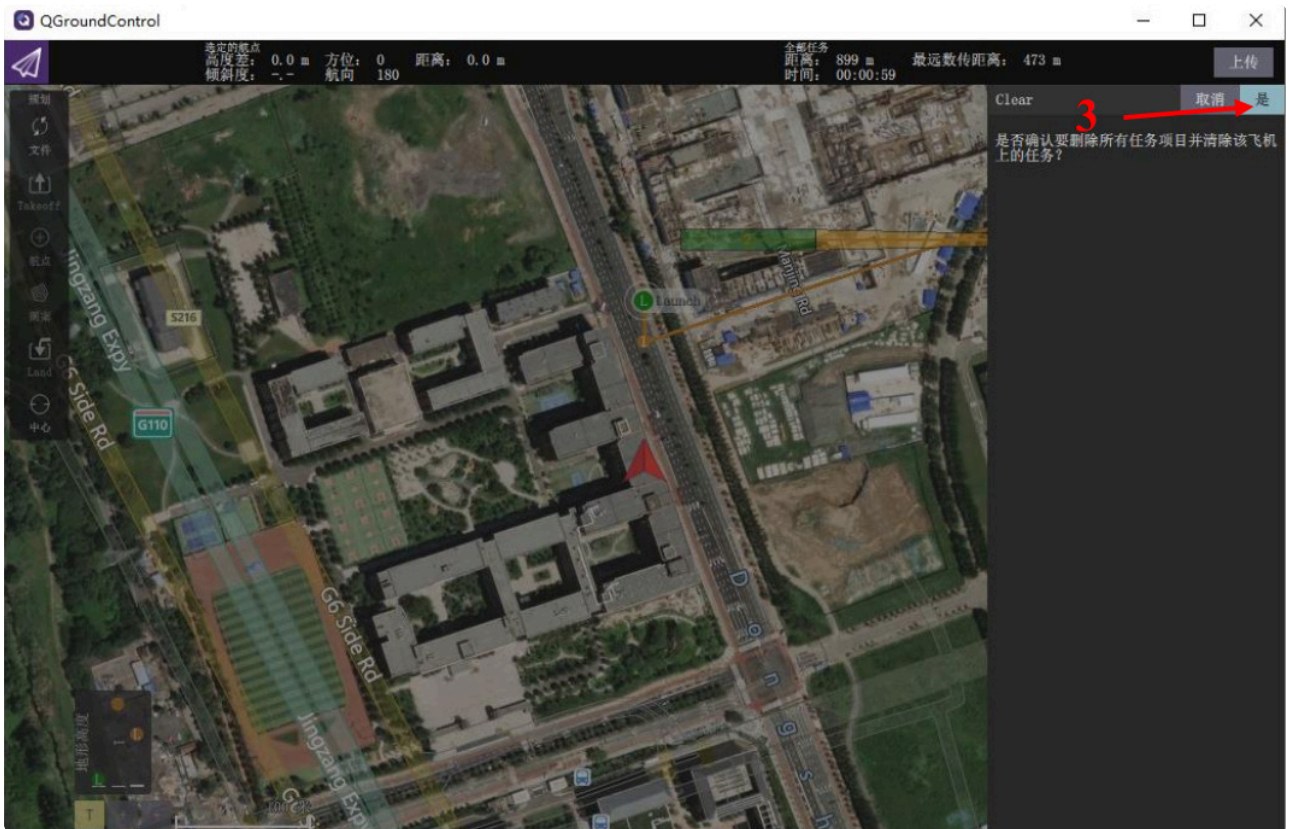
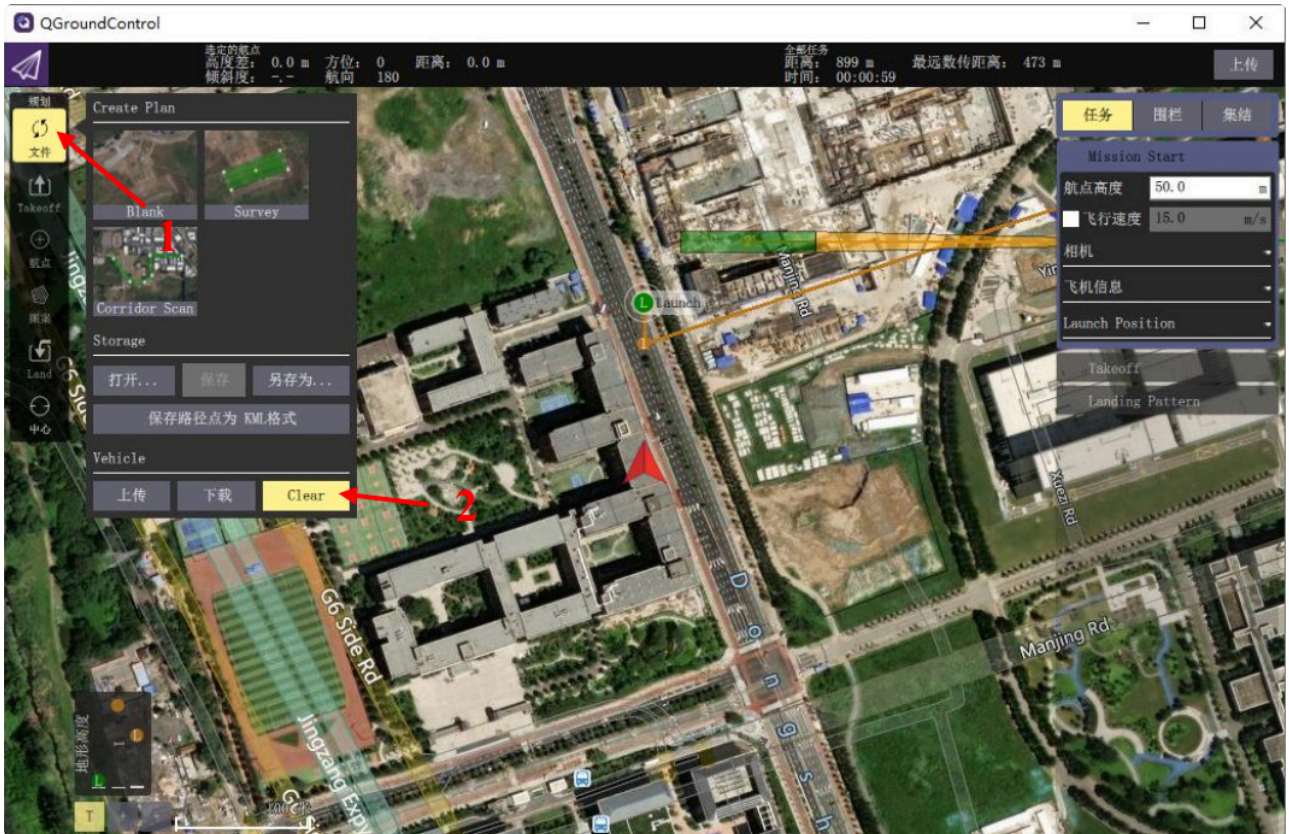
Ready To Fly | Hold | 10 0.0 | 100%

Flight Path: Launch (Green) → Takeoff (Green)

Status: ↑ -0.2 m | ↖ -0.0 m/s | AirSpd -0.3 m/s | ⌚ 00:00:00  
↙ 0.0 m | → 0.0 m/s | Thr 0% | ⚡ 0.0 m

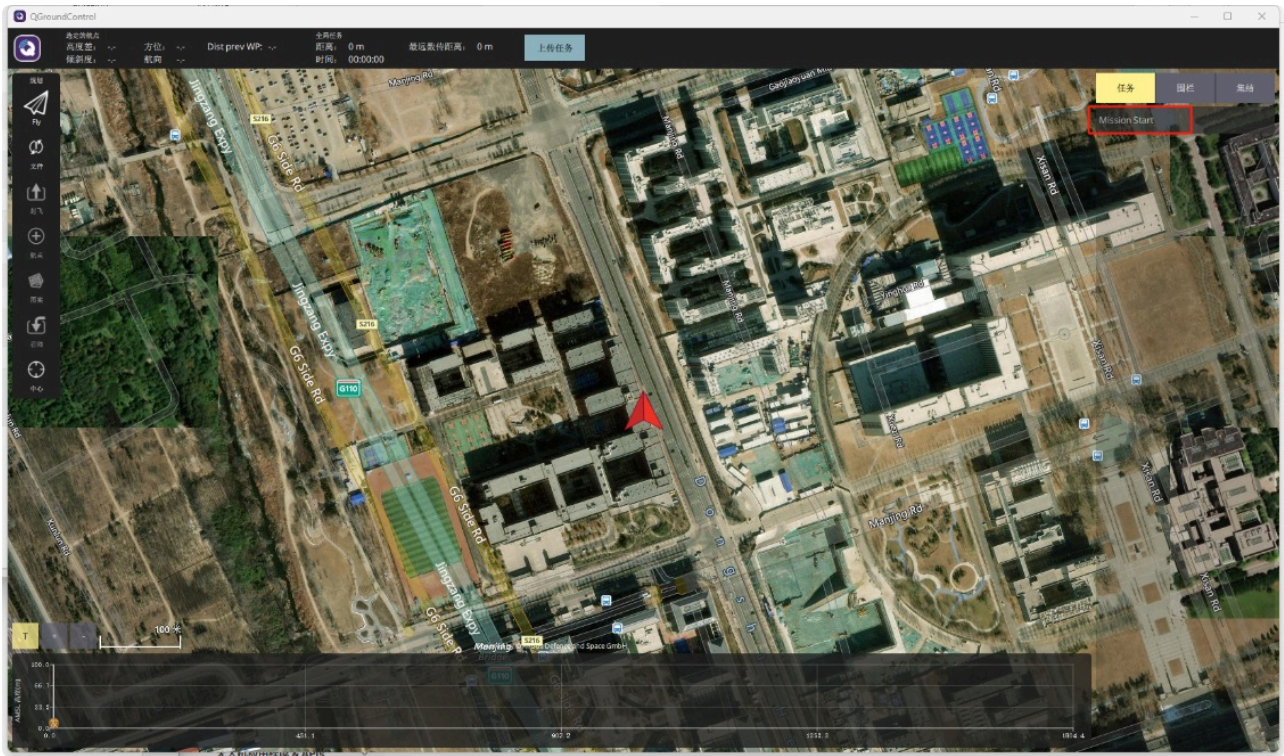
Takeoff from ground and start the current mission.  
Slide to confirm

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”。

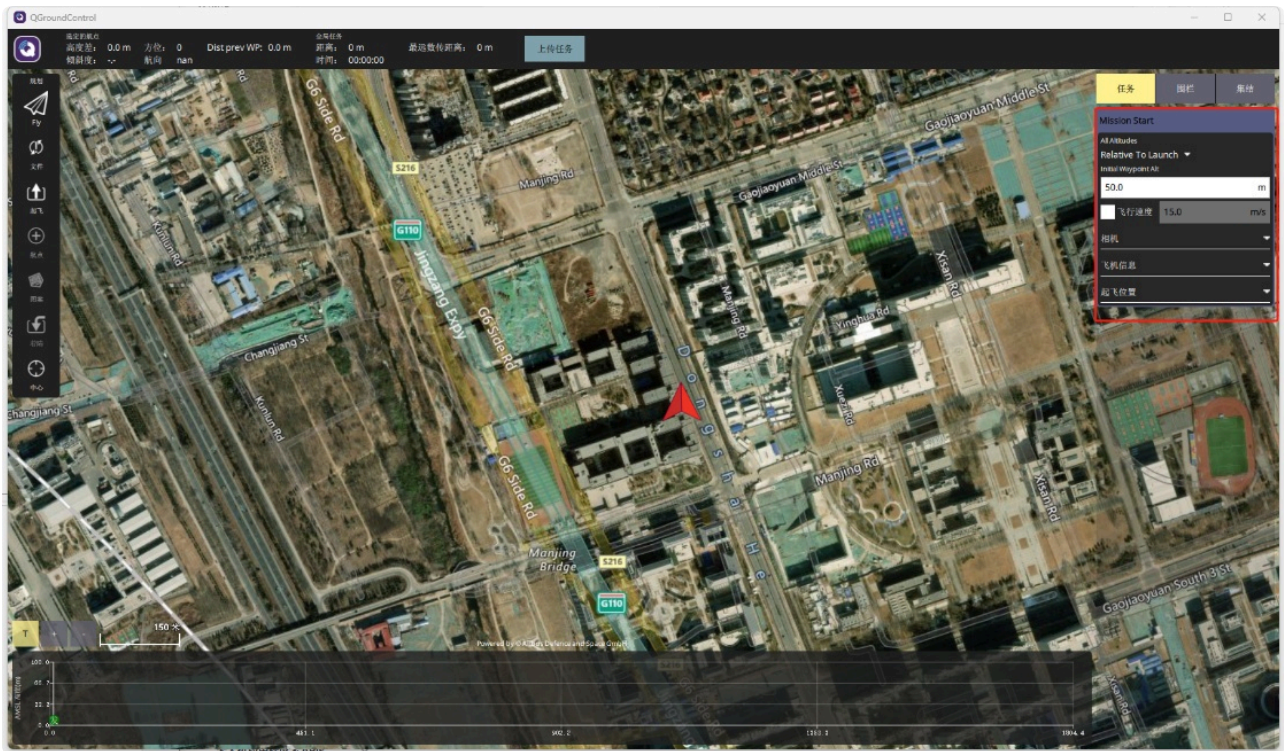


## Step 4: 设置起飞点

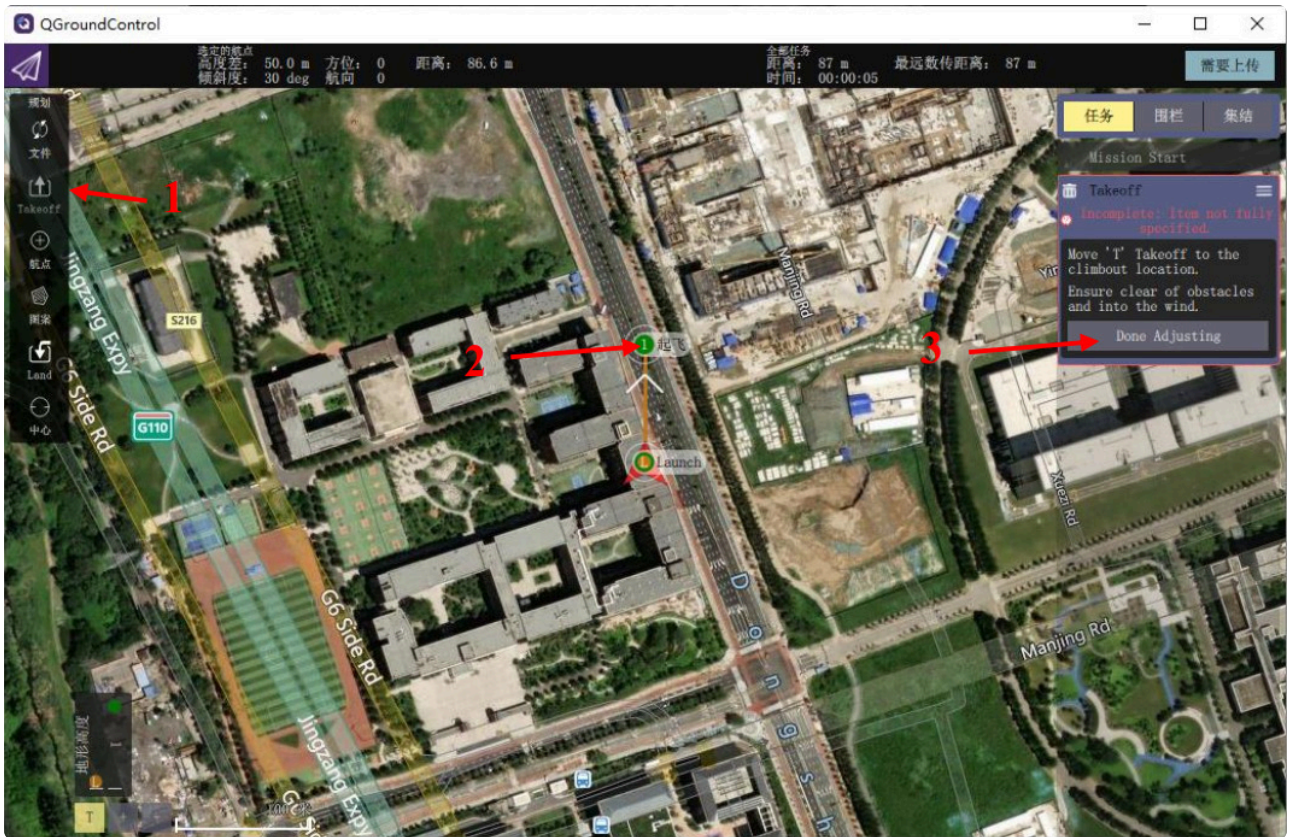
首先点击“任务开始”按钮



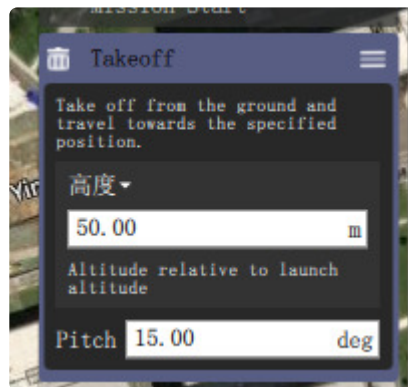
之后会弹出飞机初始化信息



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）。

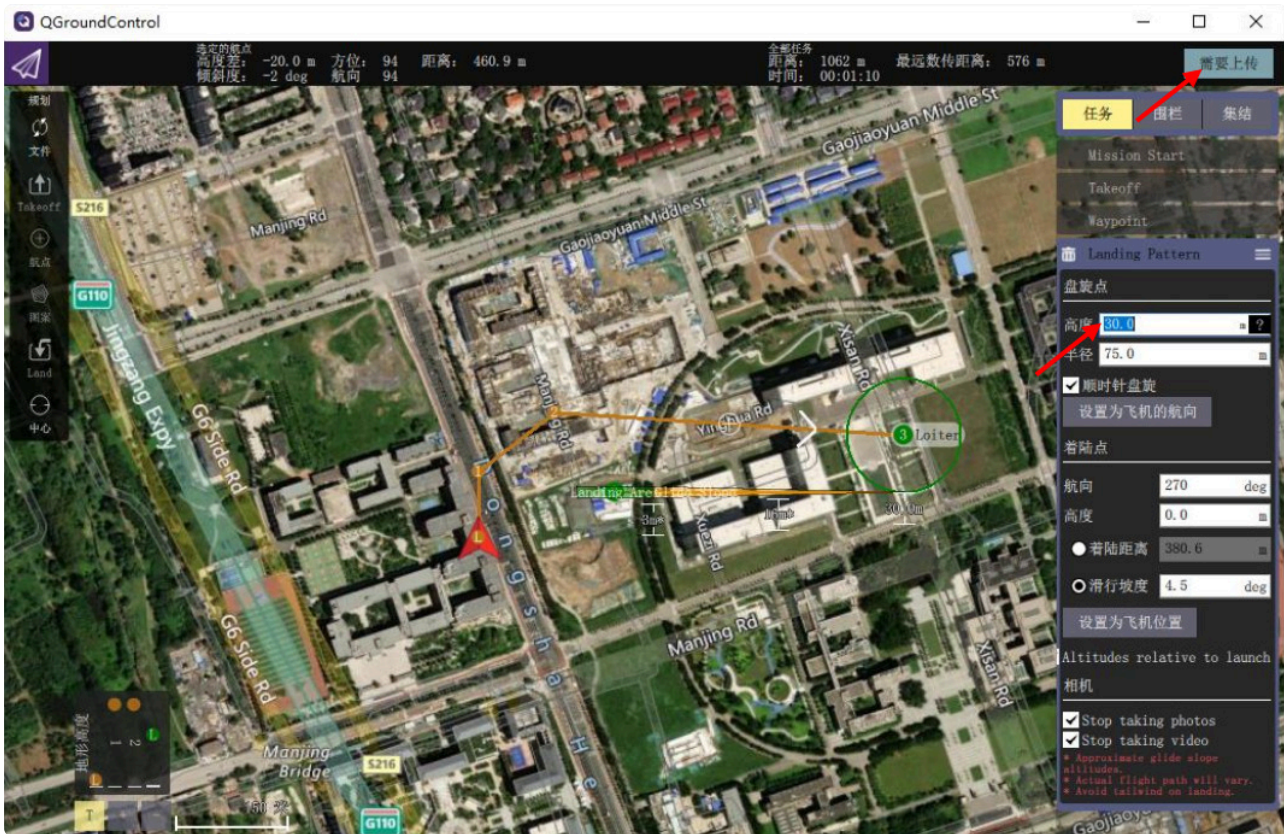


## Step 6: 设置降落点并上传任务

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”。

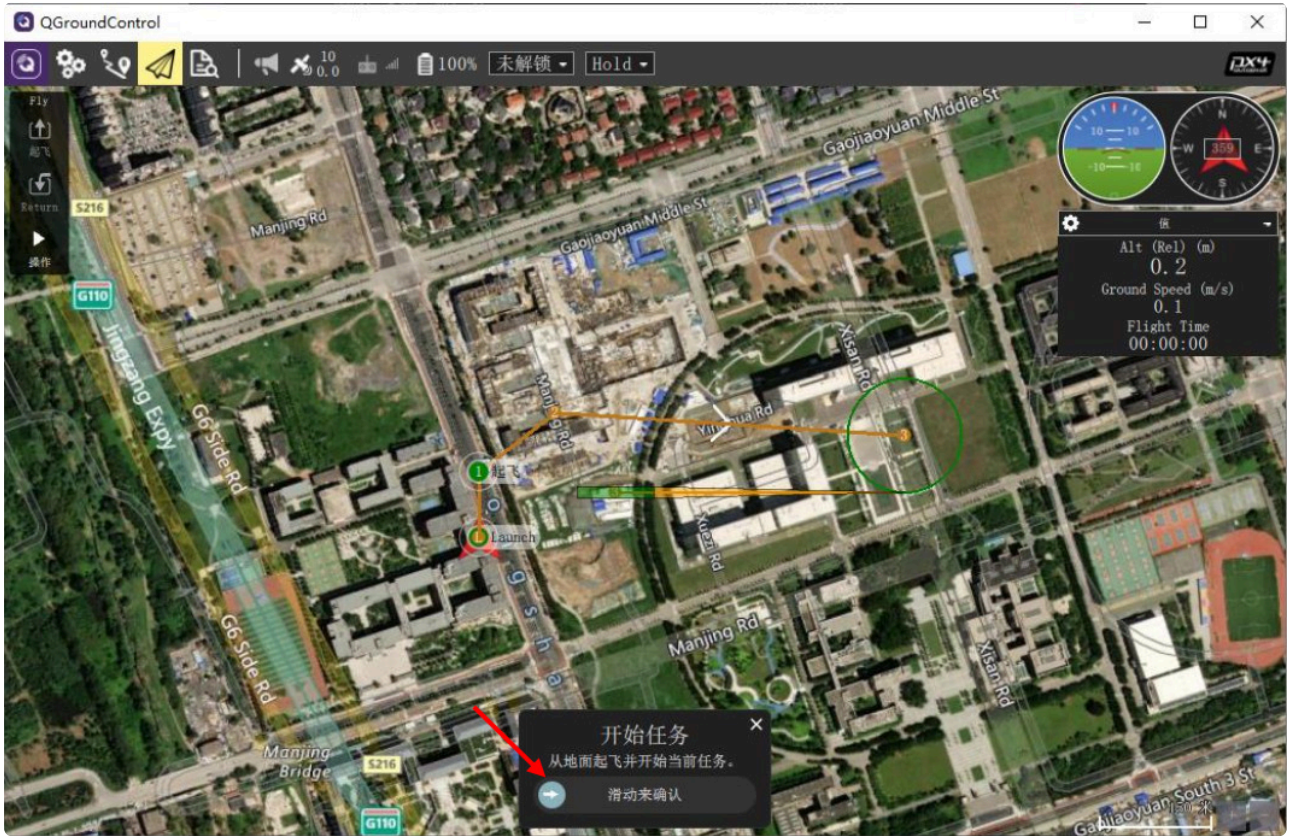


之后可设置降落高度等其他参数，本例中设置降落高度为30m，之后点击“需要上传”按钮上传航路。



## Step 7: 执行任务

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。



## 5.2. 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）。

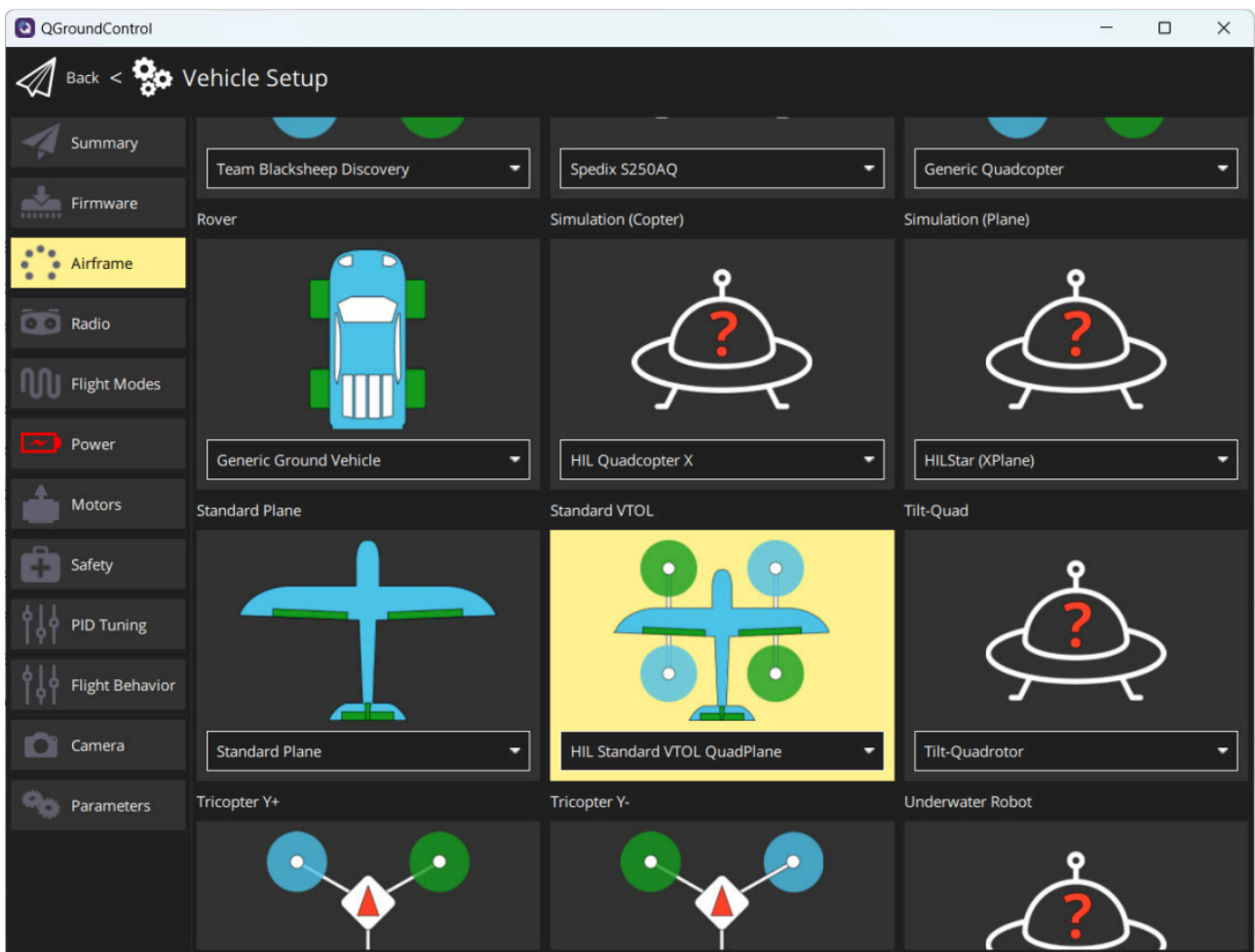


## Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

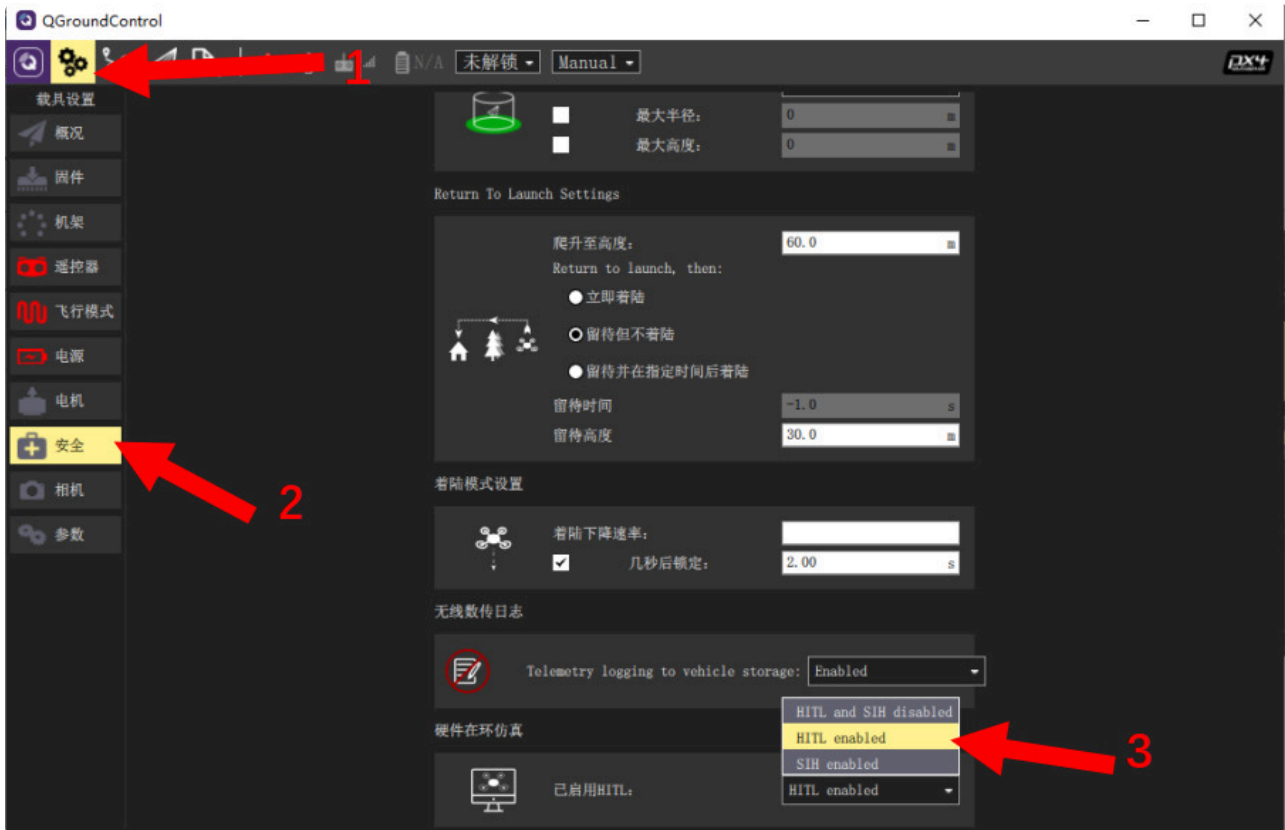
|   |                 |      |      |
|---|-----------------|------|------|
|  3DDisplay       | 2023/7/27 15:02 | 快捷方式 | 1 KB |
|  CopterSim       | 2023/7/27 15:02 | 快捷方式 | 1 KB |
|  FlightGear-F450 | 2023/7/27 15:02 | 快捷方式 | 2 KB |
|  HITLRun         | 2023/7/27 15:02 | 快捷方式 | 2 KB |
|  Python38Env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

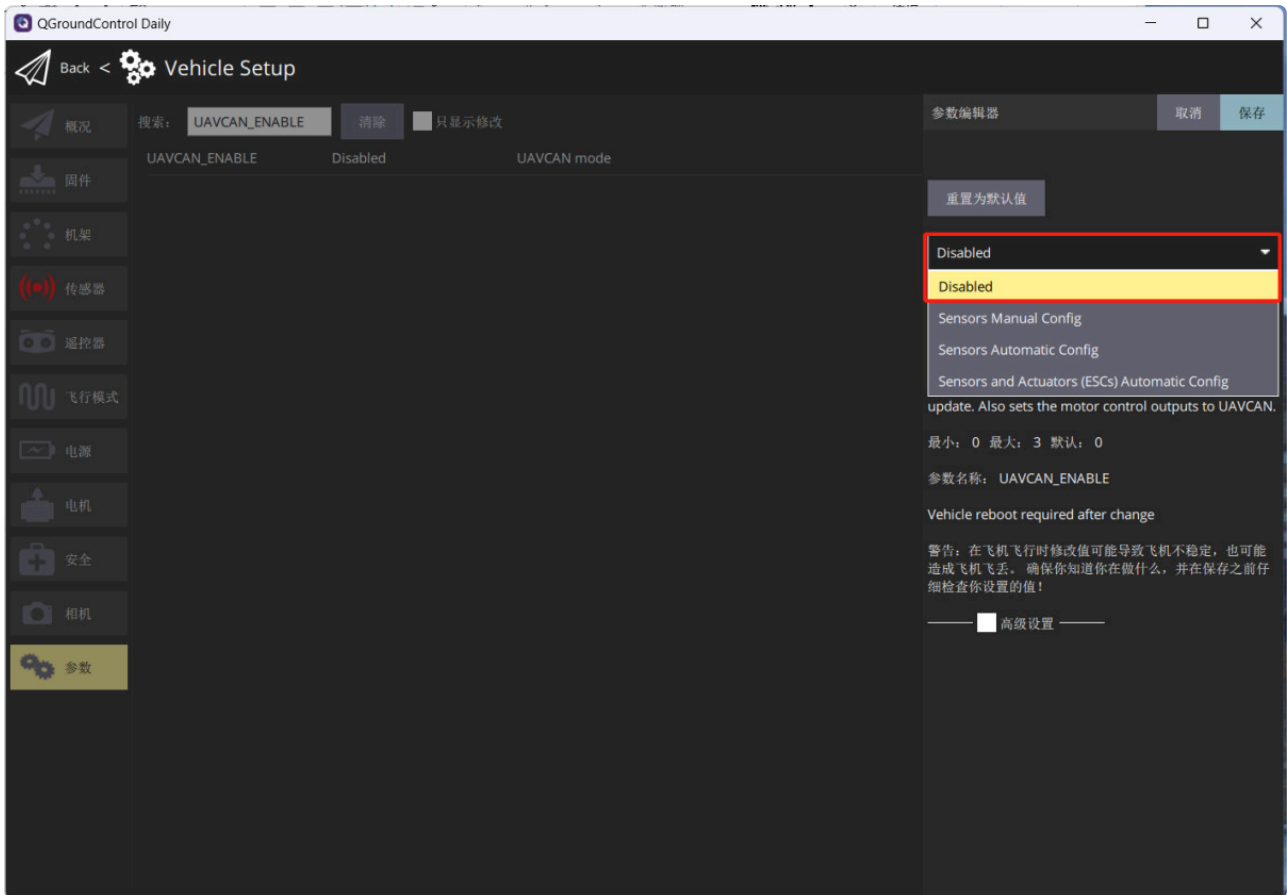
进入 Vehicle Setup 页面，在机架界面设置机架型号为“HILStandard VTOL QuadPlane”，设置完毕后点击右侧“应用并重启”。



## 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，之后重新插拔飞控完成设置。如果使用1.13版本的固件，点击“参数”，进入界面后在搜索栏中输入“UAVCAN\_ENABLE”，在弹出框中设置为“Disabled”。





## 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。

|                            |                 |                |          |
|----------------------------|-----------------|----------------|----------|
| Readme_en.pdf              | 2024/7/25 13:25 | WPS PDF 文档     | 1,991 KB |
| StandardVtolModel.dll      | 2024/7/25 13:25 | 应用程序扩展         | 317 KB   |
| StandardVtolModel_HITL.bat | 2024/8/16 0:14  | Windows 批处理... | 6 KB     |
| StandardVtolModel_SITL.bat | 2024/8/16 0:14  | Windows 批处理... | 6 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，上传航线任务并起飞，观察无人机能否按照期望的轨迹航行。

## 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.

## 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

