

# 1. 实验名称及目的

## 1.1 实验名称

基于最小系统模板搭建的固定翼模型介绍

## 1.2 实验目的

通过本例程熟悉平台固定翼模型的使用。

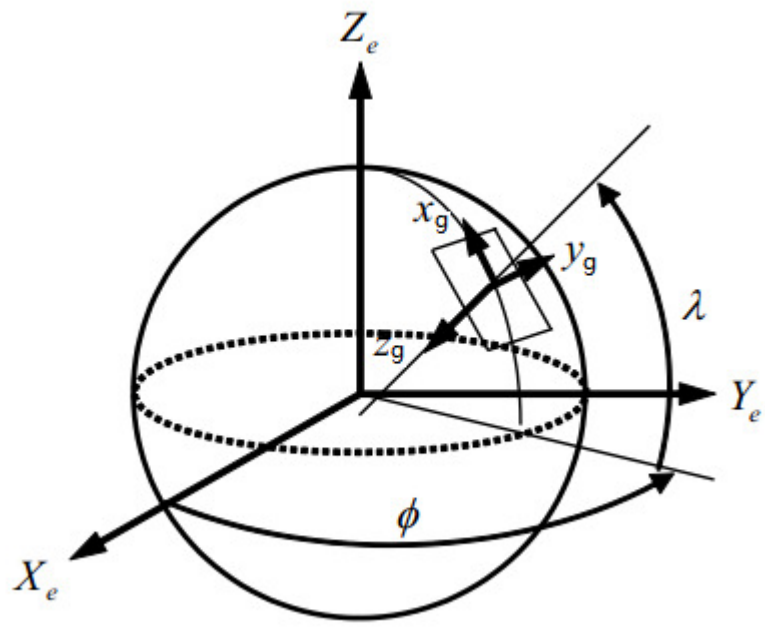
## 1.3 关键知识点

固定翼最小系统模型完成了PX4中固定翼无人机的动力学、运动学部分建模，实现的基于PX4的固定翼无人机软硬件在环仿真效果满足固定翼无人机的基本运动特性。

## 载具的基本动力学特性

固定翼无人机的六自由度运动，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得出飞机的运动状态。

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）， $z_g$  轴垂直于地面向下指向地心， $y_g$  轴则由右手定则来确定。且该坐标系固定不动，用来描述无人机的位置和姿态。



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，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

$$Ox_b z_b$$

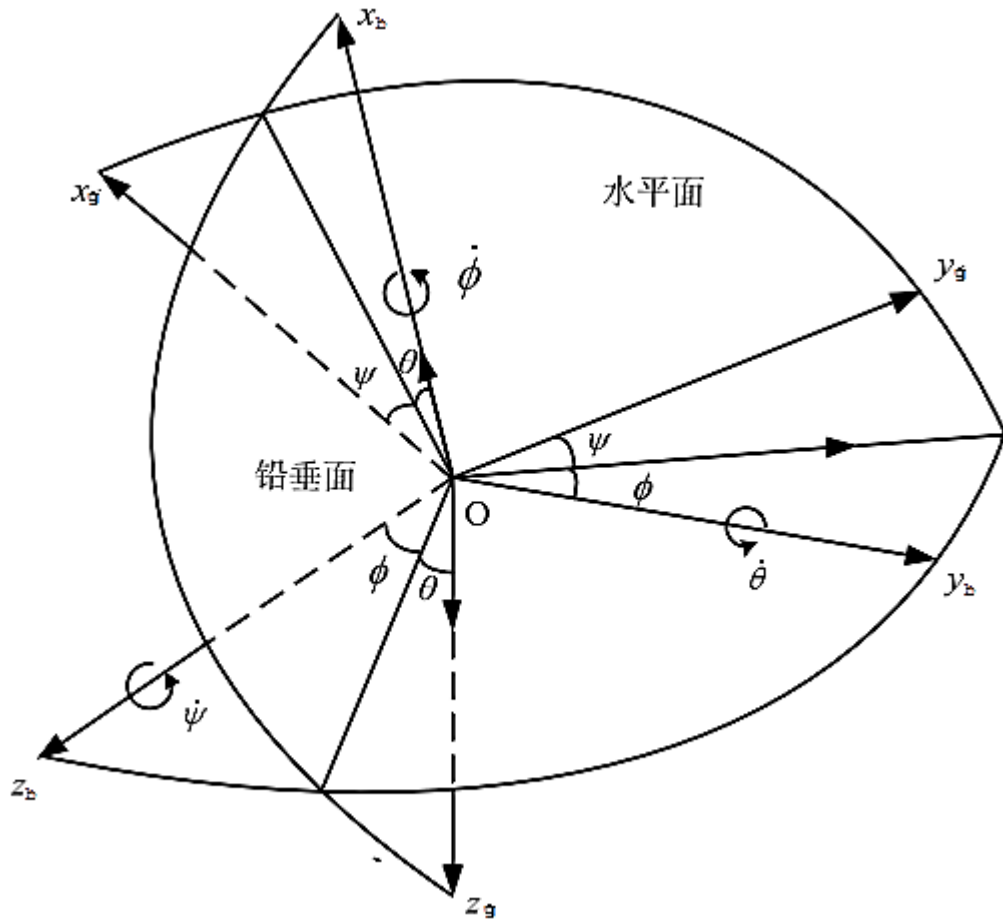
内并且垂直于纵轴，向下为正方向。

$$y_b$$

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。用来描述无人机的速度、加速度等运动状况。



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

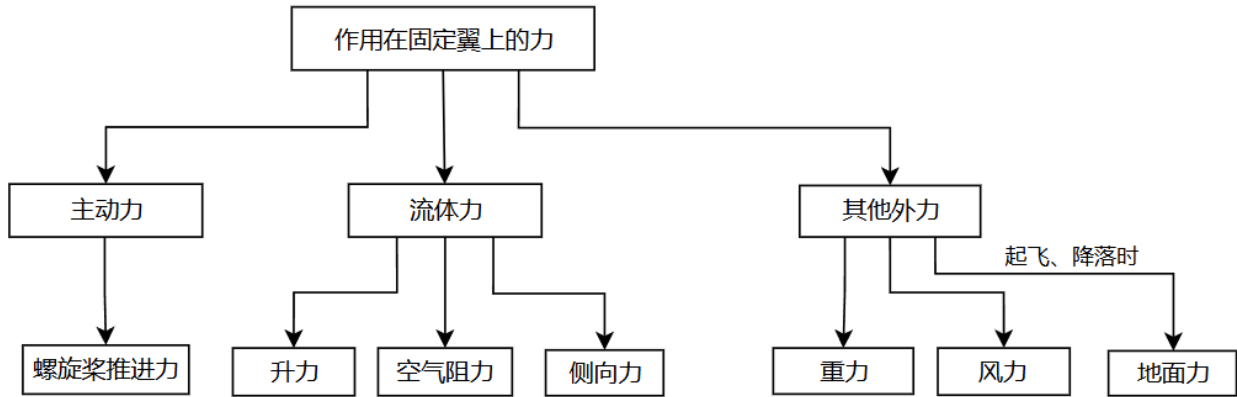
$$Ox_a z_a$$

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。

飞机受到的气动力主要是升力、阻力和侧力，参考坐标系一般是气流坐标系。所受力矩主要是滚转力矩、俯仰力矩、偏航力矩，参考坐标系一般为机体坐标系。



## 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）。

对于固定翼飞机来说，六自由度运动分为前后、左右、上下运动与滚转、俯仰、偏航运动，如下表所示，本例中的固定翼无人机考虑六个自由度。

运动自由度	坐标轴	运动学分析
前后	前向/后向 (Fore/Aft: x轴)	螺旋桨产生推力，增加推力，飞机加速向前飞行。
左右	左/右 (Port/Starboard: y轴)	横向运动通常通过倾斜机身（横滚）来实现侧向滑动。
上下	上/下 (Up/Down: z轴)	主要由升力和重力的平衡控制。拉升降舵使机头上仰，增加升力，飞机上升；推升降舵使机头下俯，减少升力，飞机下降。
滚转(Roll)	绕纵轴转动 (Longitudinal Axis: x轴)	副翼偏转时，左右两侧的机翼迎角不同，产生升力差，从而在飞机上产生滚

运动自由度	坐标轴	运动学分析
		转力矩，使飞机绕着纵轴滚转。
俯仰(Pitch)	绕横轴转动 (Lateral Axis: y轴)	升降舵偏转时，水平尾翼的上(或下)压力会增加，产生力矩，使得机头俯仰。
偏航(Yaw)	绕垂直轴转动 (Vertical Axis: z轴)	方向舵偏转时，空气在垂直尾翼处产生一个侧向力，推动机尾运动，机头偏转。

## ■ 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 [\(v1.12\)](#)

本例程固定翼无人机的机架在

`\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmw_common\init.d\airframes\2100_standard_plane`中定义如下：

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

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

执行rc.fw\_defaults脚本，它包含了固定翼无人机的默认参数设置，可以用来设置一些基本的系统参数和增益。rc.fw\_defaults中的部分代码如下：

```
set PWM_AUX_RATE 50
```

```
set PWM_AUX_OUT 1234
```

在2100\_standard\_plane中设置混控器（mixer）为AETRFG

```
set MIXER AETRFG
```

## 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：在下面的文件夹中可以找到

\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu\_common\mixers\  
AETRFG.main.mix，将推力、力矩映射到电机和舵机。

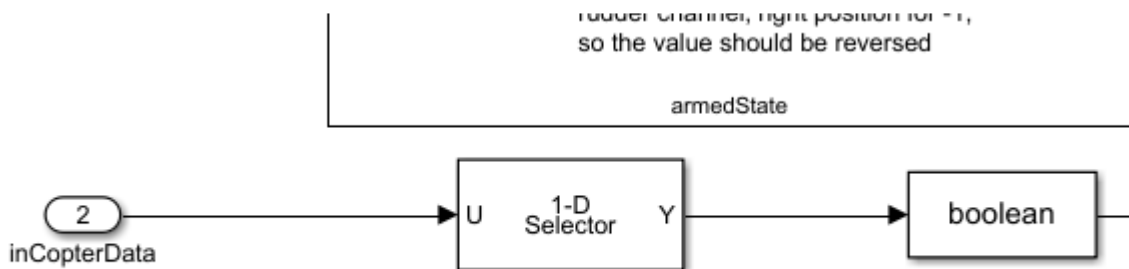
## 载具模型的整体输入输出和关键参数

### 输入输出

- 输入输出和关键参数见：  
[../RflySimSDK/html/md\\_ctrl\\_2md\\_2FixWingModel.html](http://../RflySimSDK/html/md_ctrl_2md_2FixWingModel.html)

### 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(100)
机身质量	uav.geometry.mass	8.1646626600000012
x轴转动惯量	uav.inertia.lxx	4.12
y轴转动惯量	uav.inertia.lyy	9.58
z轴转动惯量	uav.inertia.lzz	9.85
风因素标志位	env.windOn	0

参数名	参数	值
空气密度	env.ISA_rho0	1.225
翼展	uav.geometry.span	2.795
机翼面积	uav.geometry.S	0.982
引擎最大油门	uav.engine.ThK	2.17
引擎最小油门	uav.engine.MinThK	0
副翼最大/小值	uav.aileron.max uav.aileron.min	$90/180 \cdot \pi$ $-90/180 \cdot \pi$
升降舵最大/小值	uav.elevator.max uav.elevator.min	$90/180 \cdot \pi$ $-90/180 \cdot \pi$
方向舵最大/小值	uav.rudder.max uav.rudder.min	$90/180 \cdot \pi$ $-90/180 \cdot \pi$
初始位置	Modellnit_PosE	[0;0;0]
风速	env.windBase	12
风向	env.windDirTurb	180
高空风向	env.windDirHor	90
升力子系数—常值项	uav.aero.CL0	0.38
升力子系数—迎角系数	uav.aero.CLa	18.5
升力子系数—迎角导数系数	uav.aero.CLa_dot	2.64
升力子系数—俯仰角速度系数	uav.aero.CLq	7.4
升力子系数—升降舵系数	uav.aero.CLDe	0.24
升力子系数—襟翼系数	uav.aero.CLDf	0.4
阻力系数	uav.aero.CD0	0.022
侧力系数—侧滑角系数	uav.aero.CYb	-1.098
侧力系数—方向舵系数	uav.aero.CYDr	0.143

## 2. 实验效果

在Matlab将固定翼Simulink模型编译并生成DLL模型文件，并通过QGC上传航线的方式进行固定翼无人机的软硬件在环仿真。



## 3. 文件目录

例程目录：[\[安装目录\]](#)\RflySimAPIs\4.RflySimModel\1.BasicExps\e2\_FixWingModelCtrl

文件夹/文件名称	说明
AircraftMathworks.slx	固定翼无人机模型文件。
<a href="#">AircraftMathworks_HITLRun.bat</a>	硬件在环仿真批处理文件。
<a href="#">AircraftMathworks_SITLRun.bat</a>	软件在环仿真批处理文件。
GenerateModelDLLFile.p	DLL格式转化文件。
<a href="#">AircraftMathworks_init.m</a>	动力学模型相关参数。
<a href="#">InitData.m</a>	固定翼气动参数。
MavLinkStruct.mat	MavLink数据结构体mat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：DLL模型生成

#### Step 1: 编译模型

在MATLAB中打开“AircraftMathworks.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](#)

名称	修改日期	类型	大小
 AircraftMathworks.dll	2023/10/26 14:42	应用程序扩展	255 KB
 AircraftMathworks.slx	2023/10/24 15:33	Simulink Model	84 KB
 AircraftMathworks_HITLRun.bat	2023/10/24 15:33	Windows 批处理...	6 KB
 AircraftMathworks_init.m	2023/10/24 15:33	Objective C 源文件	2 KB
 AircraftMathworks_SITLRun.bat	2023/10/24 15:33	Windows 批处理...	6 KB
 GenerateModelDLLFile.p	2023/10/24 15:33	MATLAB.p.9.14.0	6 KB
 InitData.m	2023/10/24 15:33	Objective C 源文件	4 KB
 MavLinkStruct.mat	2023/10/24 15:33	MATLAB Data	5 KB
 MulticopterModel.zip	2023/10/26 14:42	压缩(zipped)文件...	120 KB
 Readme.docx	2023/10/26 14:47	Microsoft Word ...	20,009 KB
 Readme.pdf	2023/10/24 15:33	Foxit PhantomP...	2,767 KB

注意事项：与多旋翼模型相比，固定翼模型改进如下：

1) 在AircraftMathworks.slx的Motor

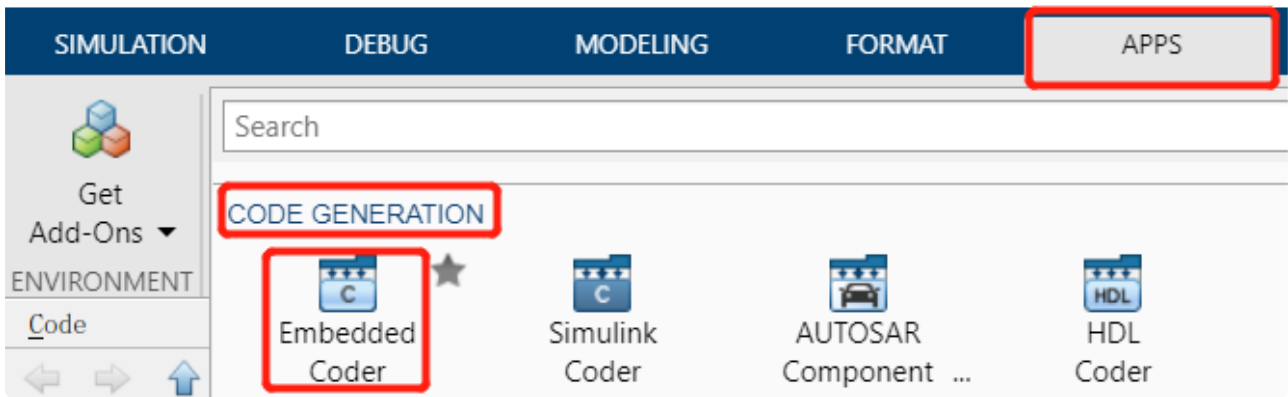
Model中，设置了只响应1、2、3、4号PWM信号，分别控制升降舵、副翼、方向舵和油门值。

2) 通过油门值控制驱动力大小，升降舵控制俯仰力矩、副翼控制滚转力矩以及方向舵控制偏航力矩。通过舵面与油门联合控制固定翼的速度以及姿态。

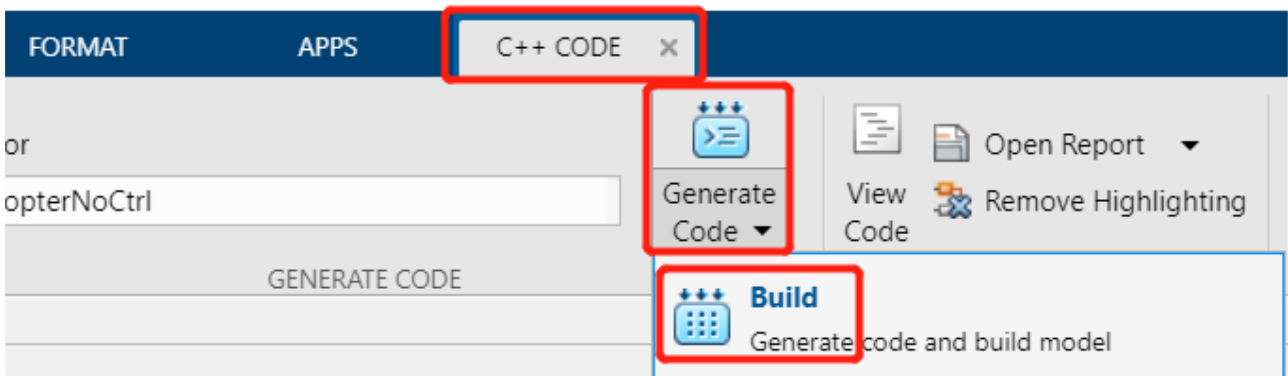
对于MATLAB 2019a及之前版本，工具栏样式见下图，直接点击它的编译按钮“Build”即可。



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。



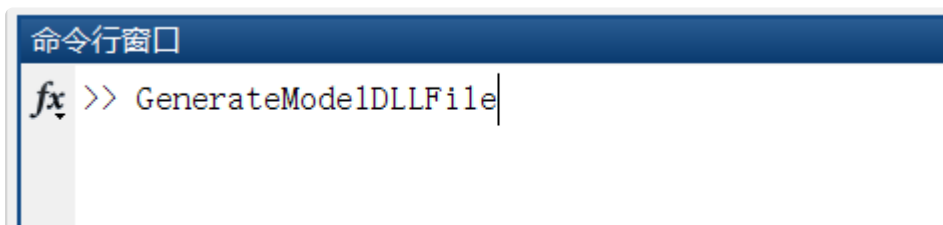
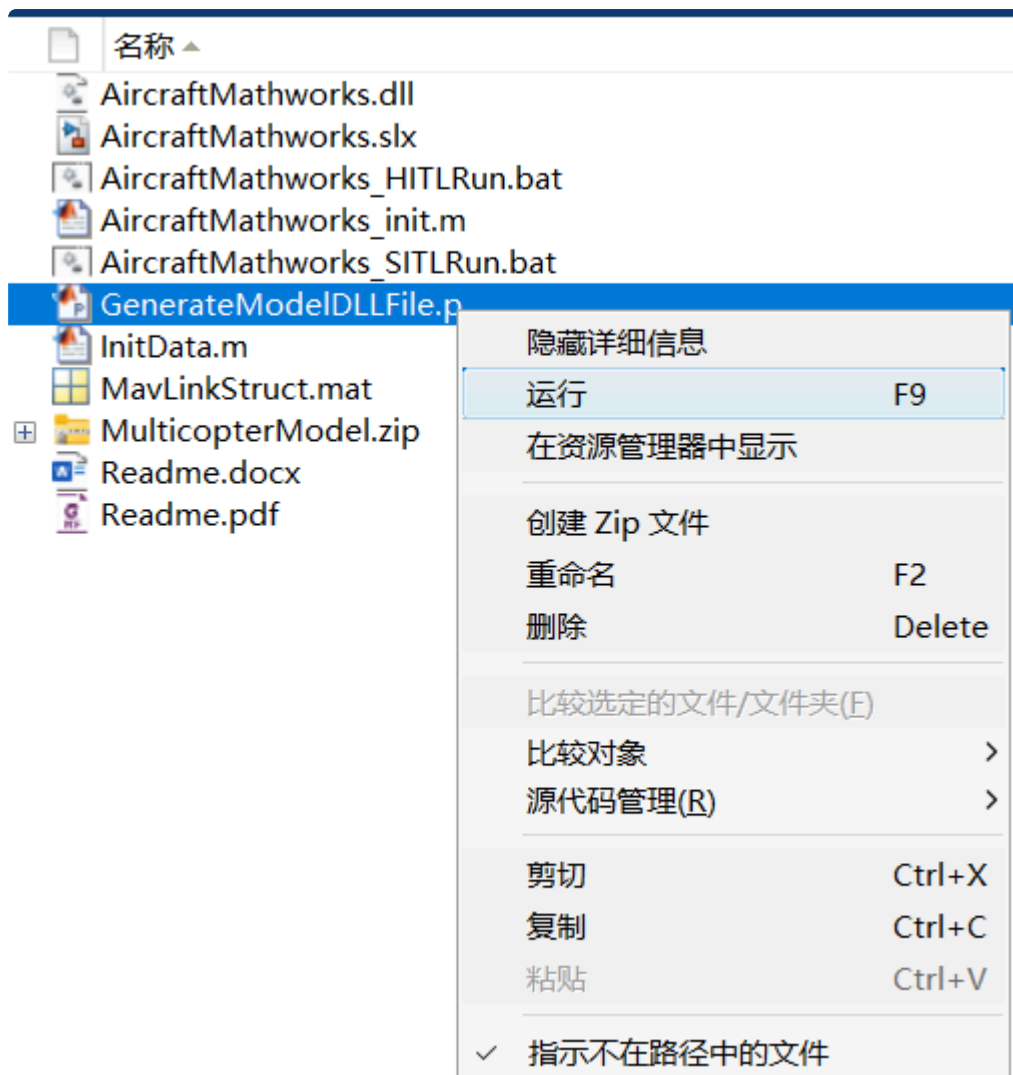
k



## Step 2: 生成DLL文件

模型编译完成后，在 matlab

中右键“GenerateModelDLLFile.p”文件，点击运行，或者在MATLAB的命令行窗口中输入GenerateModelDLLFile后回车)，即可以得到“Exp1\_MinModelTemp.dll”的DLL模型文件。



```
命令行窗口
版权所有 (C) Microsoft Corporation。保留所有权利。

modeldllgen.cpp
    cl modeldllgen.obj AircraftMathworks.obj /link /DLL /out:AircraftMathworks.dll
用于 x64 的 Microsoft (R) C/C++ 优化编译器 19.16.27051 版
版权所有 (C) Microsoft Corporation。保留所有权利。

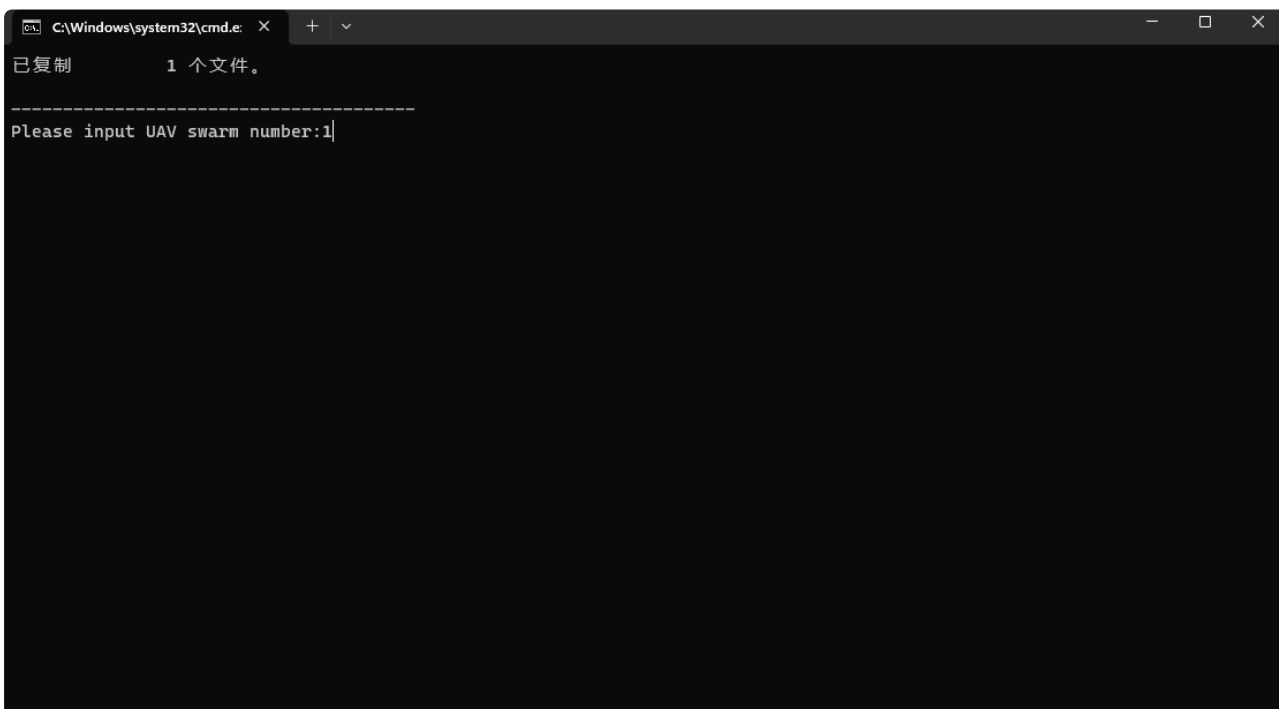
Microsoft (R) Incremental Linker Version 14.16.27051.0
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

/out:modeldllgen.exe
/DLL
/out:AircraftMathworks.dll
modeldllgen.obj
AircraftMathworks.obj
    正在创建库 AircraftMathworks.lib 和对象 AircraftMathworks.exp
Compiling successfully, the AircraftMathworks.dll has been generated.
fx >>
```

## 5.2. 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 “[AircraftMathworks\\_SITLRun.bat](#)” 批处理文件，在弹出的终端窗口中输入1，启动一架飞机的软件在环仿真。



注：在 “[AircraftMathworks\\_SITLRun.bat](#)” 软件在环的脚本文件中，需要设置对应固定翼的DLL名：

```
REM Set use DLL model name or not, use number index or name string
REM This option is useful for simulation with other types of vehicles instead of multicopters
set DLLModel=AircraftMathworks
```

在SimMode处选择CopterSim中对应的软件在环仿真模式：

```
REM Set the simulation mode on CopterSim, use number index or name string
REM e.g., SimMode=2 equals to SimMode=PX4_SITL_RFLY
set SimMode=2
```

在机架设置处设置固定翼的对应机架，若不设置对应机架则仿真的默认机架则为四旋翼：

```
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 create your airframe file here)
REM E.g., fixed-wing aircraft: PX4SITLFrame=plane; small cars: PX4SITLFrame=rover
set PX4SITLFrame=standard_plane
```

## Step 2: 等待初始化完成

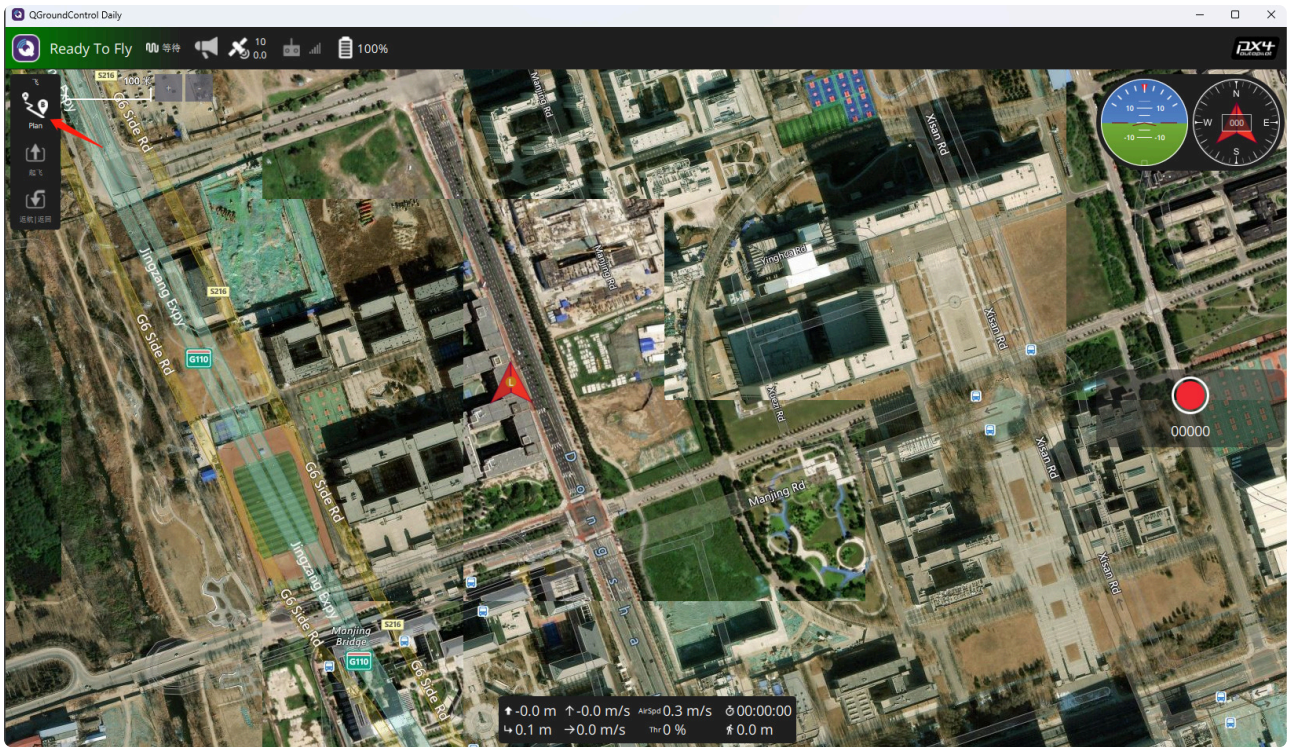
当RflySim3D显示“CopterSim/PX4 EKF 3D Fixed:1/1”，CopterSim显示“PX4: GPS 3D fixed

& EKF initialization

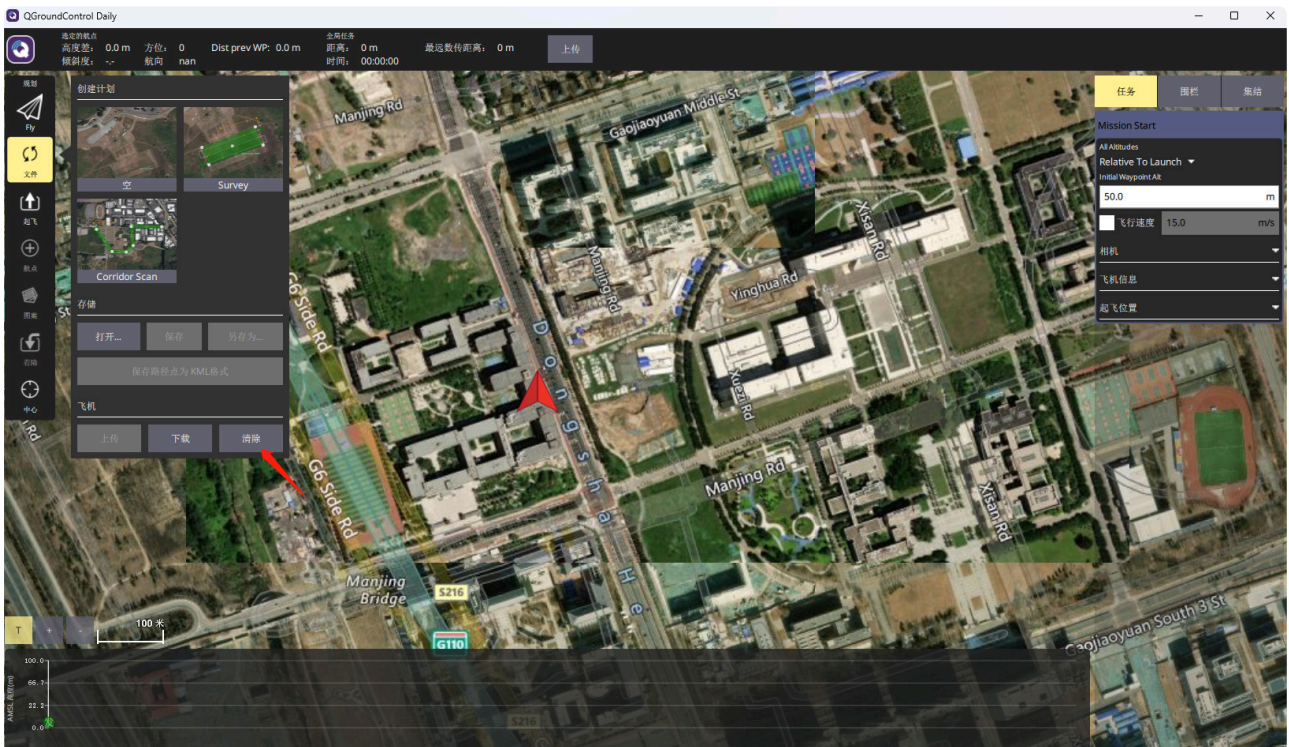
finished.”时，表明RflySim平台已完成初始化，可以进行软件在环仿真。

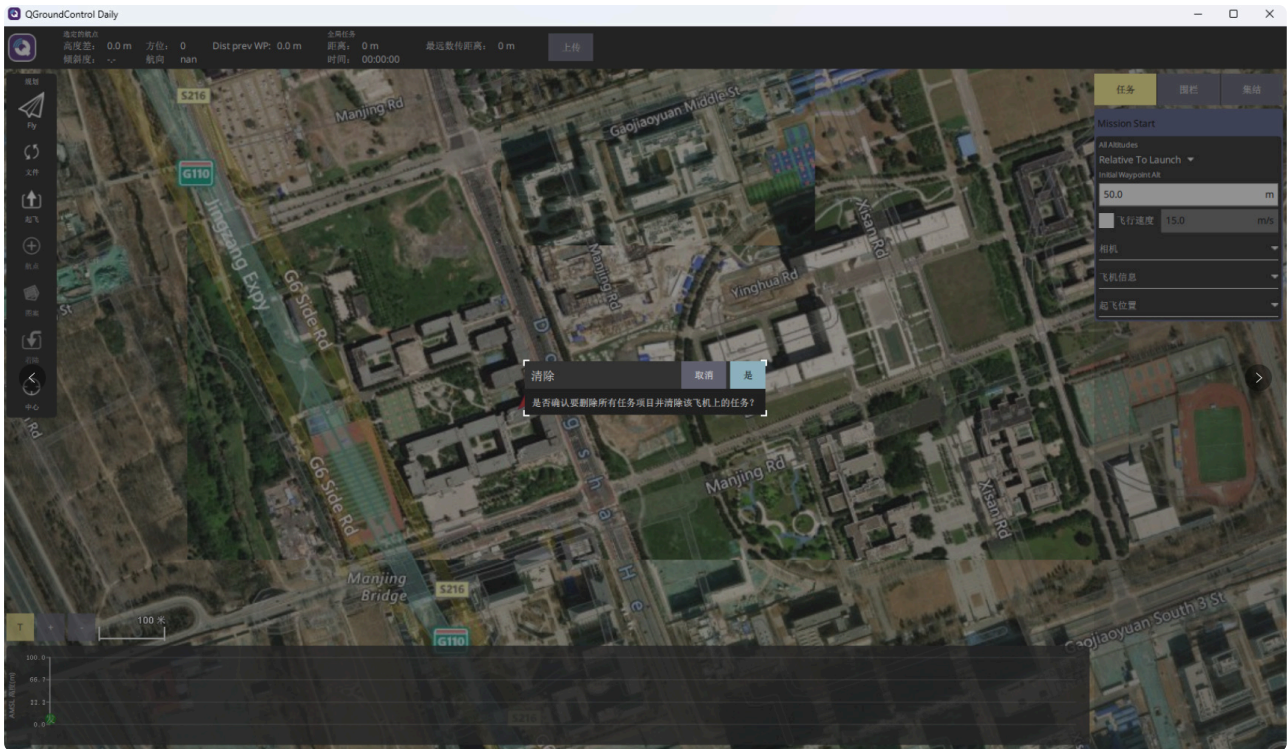
## Step 3: 航路设置页面

点击QGC左上角的Plan，进入航路设置页面。



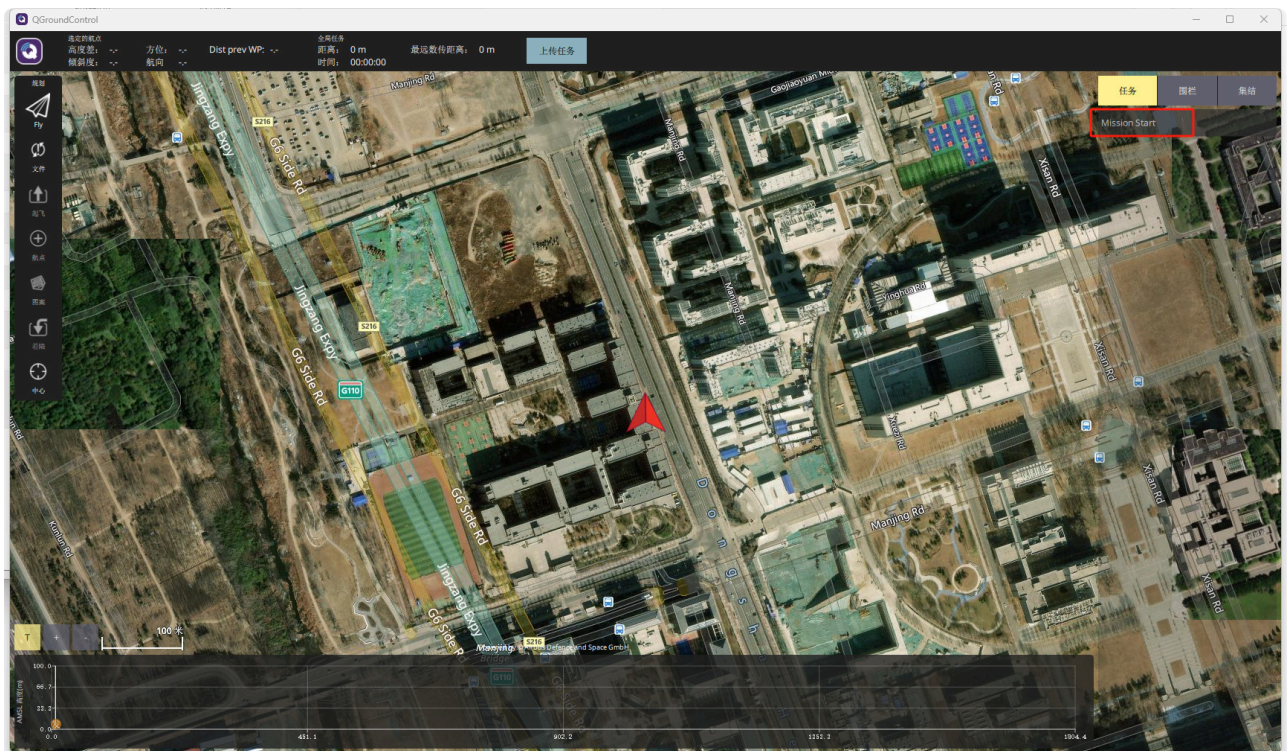
若已存在航路，则先点击文件按钮，之后点击“清除”按钮清除航路，在弹出界面选择“是”。



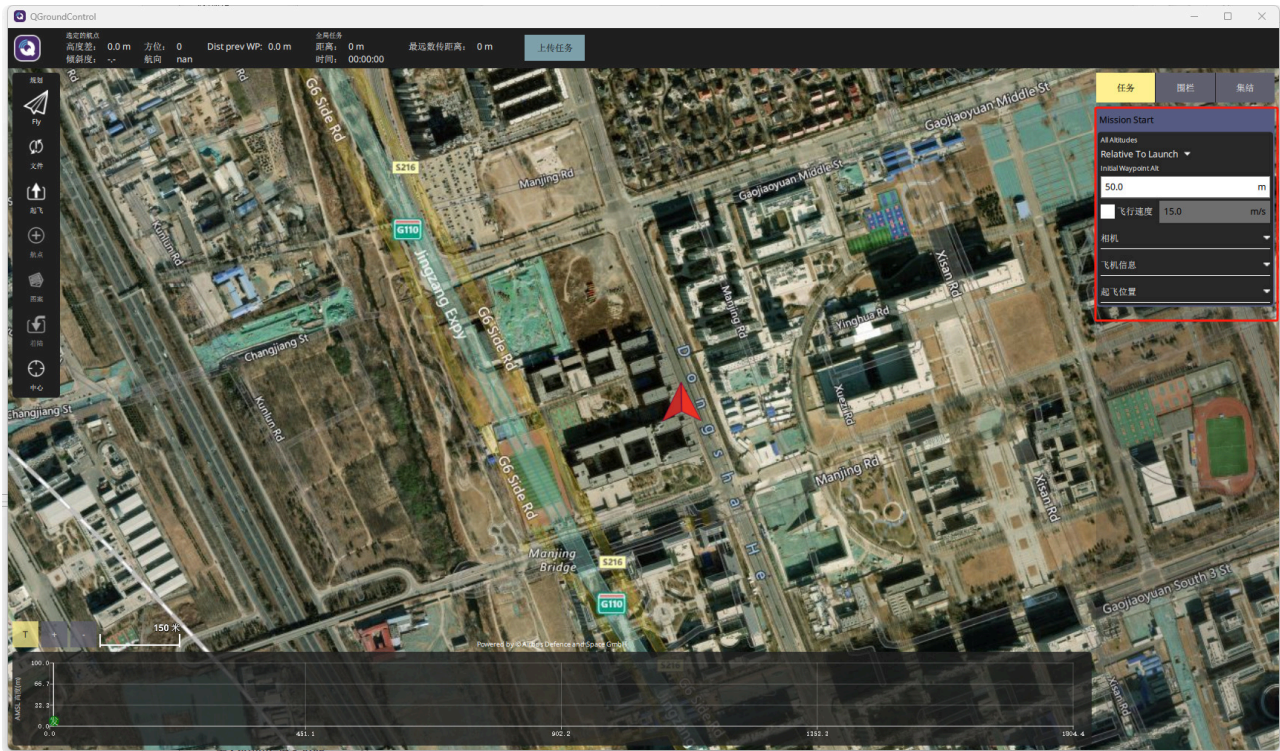


## Step 4: 设置起飞位置

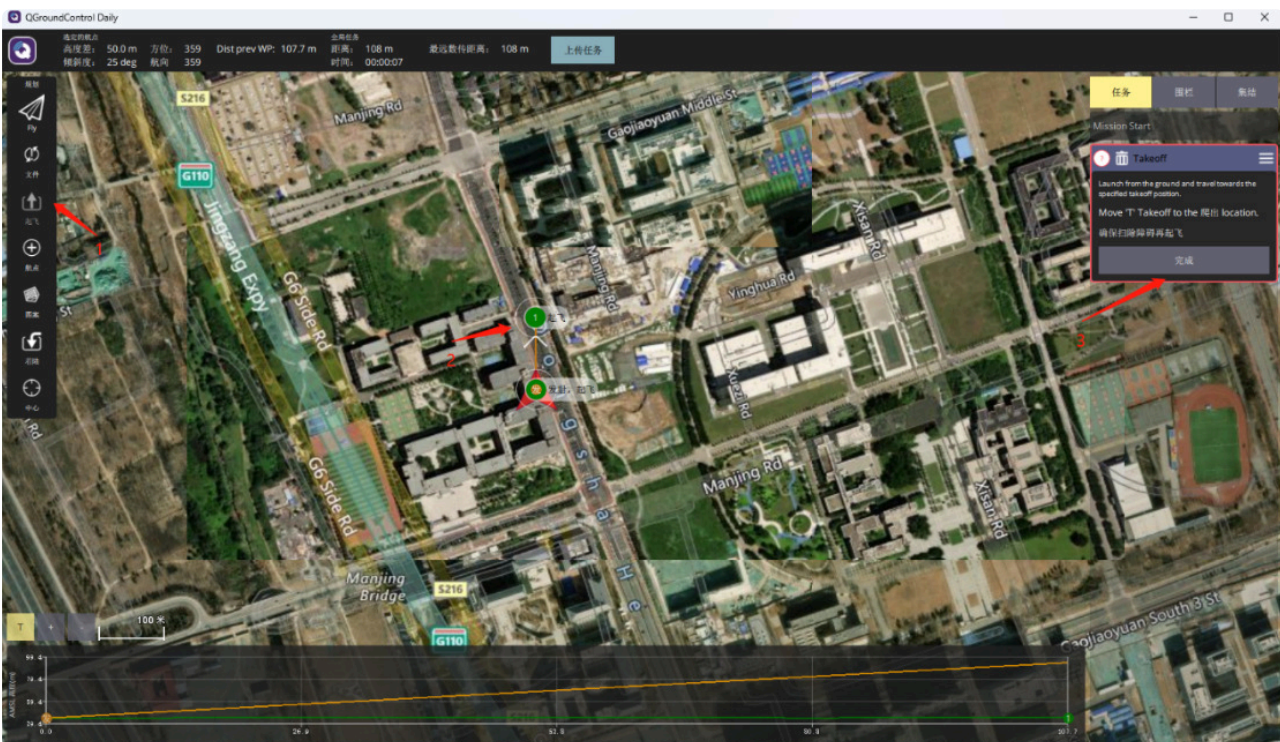
首先点击“任务开始”按钮



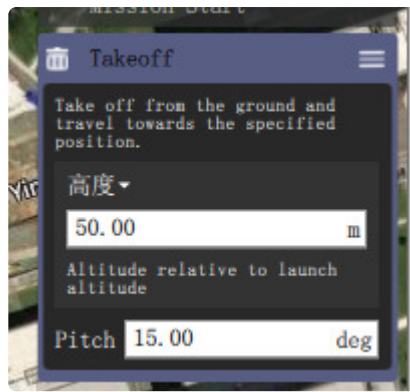
之后会弹出飞机初始化信息



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



可设置起飞高度和速度，本例中采用默认值。



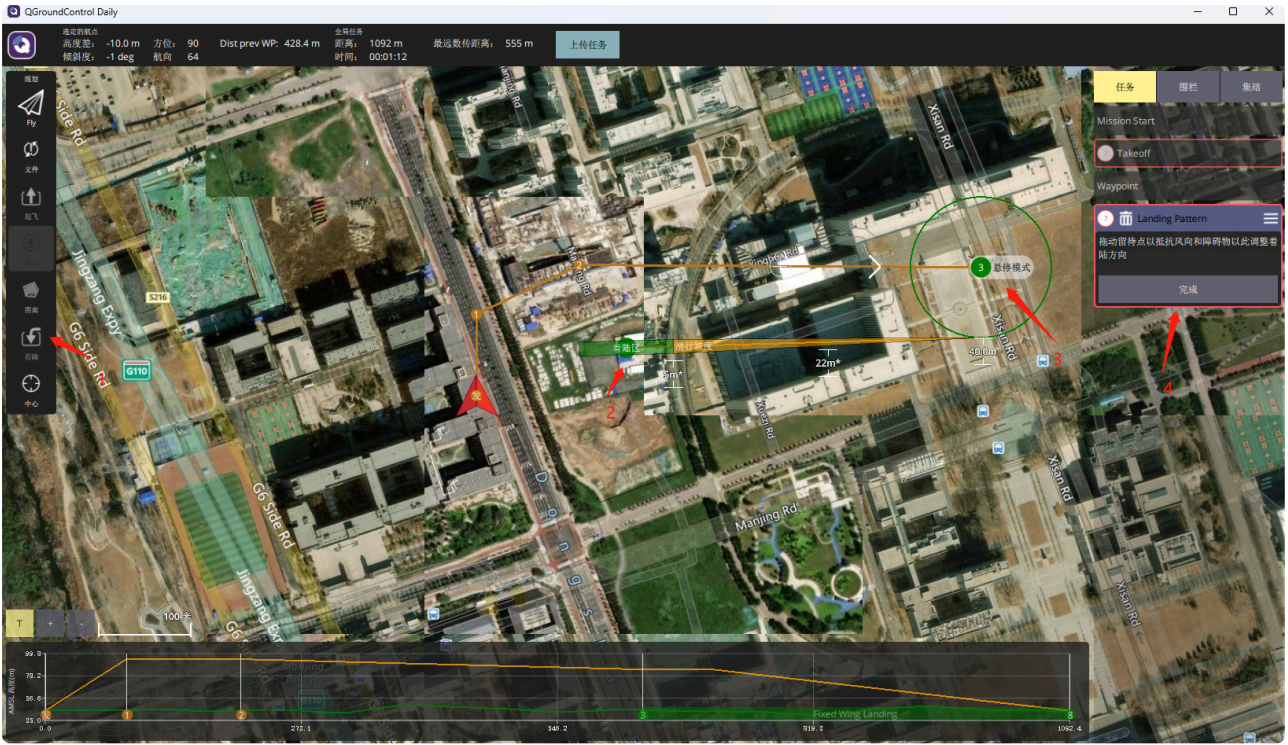
## Step 5: 设置航点

点击“航点”按钮，之后在地图上点击任意位置可设置航点，同上一部可设置高度和速度（航点可设置多个，本例中只设置一个）。

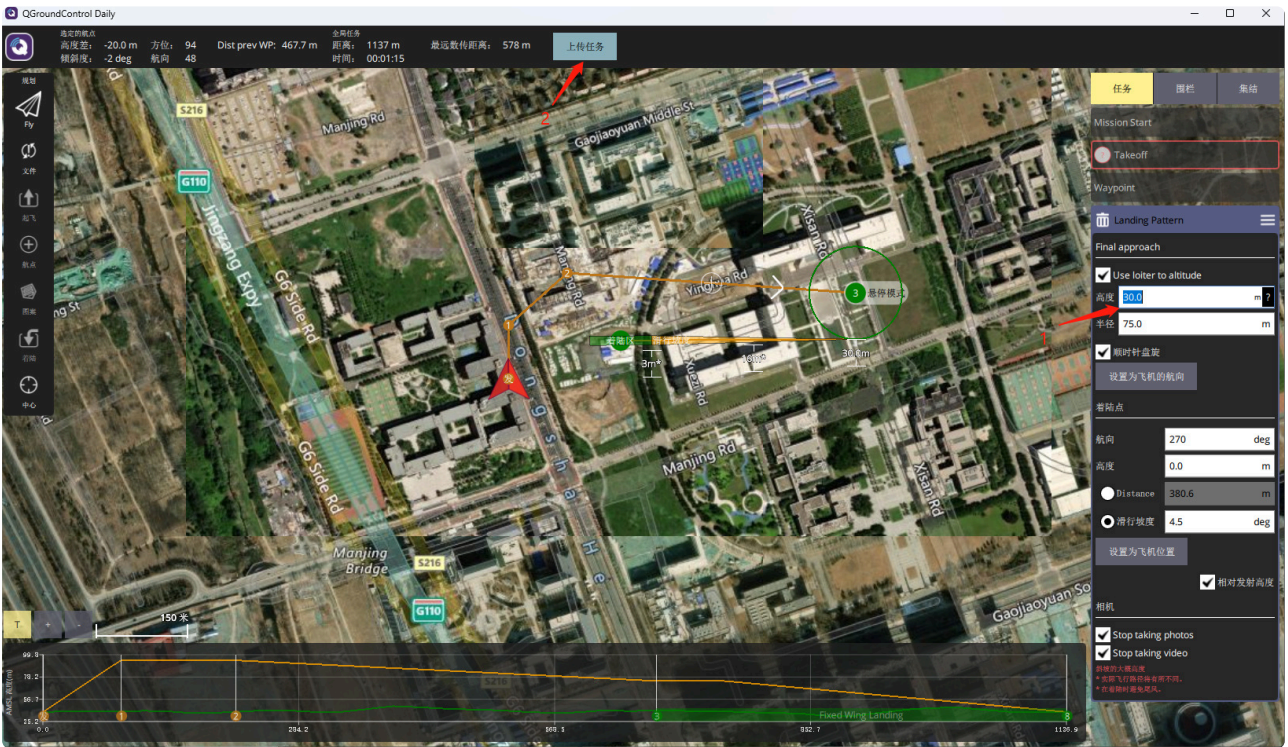


## Step 6: 设置降落点并上传航线

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

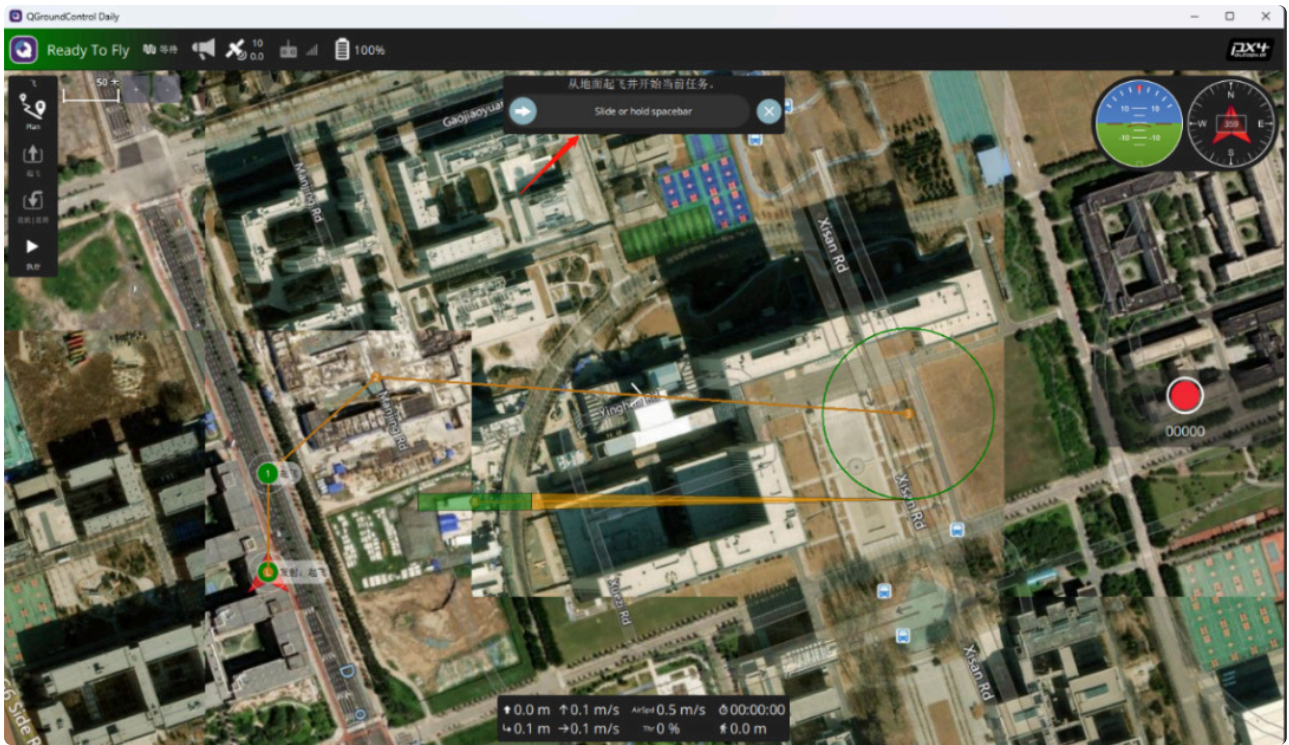


之后可设置降落高度等其他参数，本例中设置降落高度为30m，之后点击“上传任务”按钮上传航路。



## Step 7: 执行任务

返回初始界面后，滑动上方滑块开始执行任务。



## Step 8: 观察结果

在 RflySim3D中观察是否按QGC规划轨迹飞行。



## 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

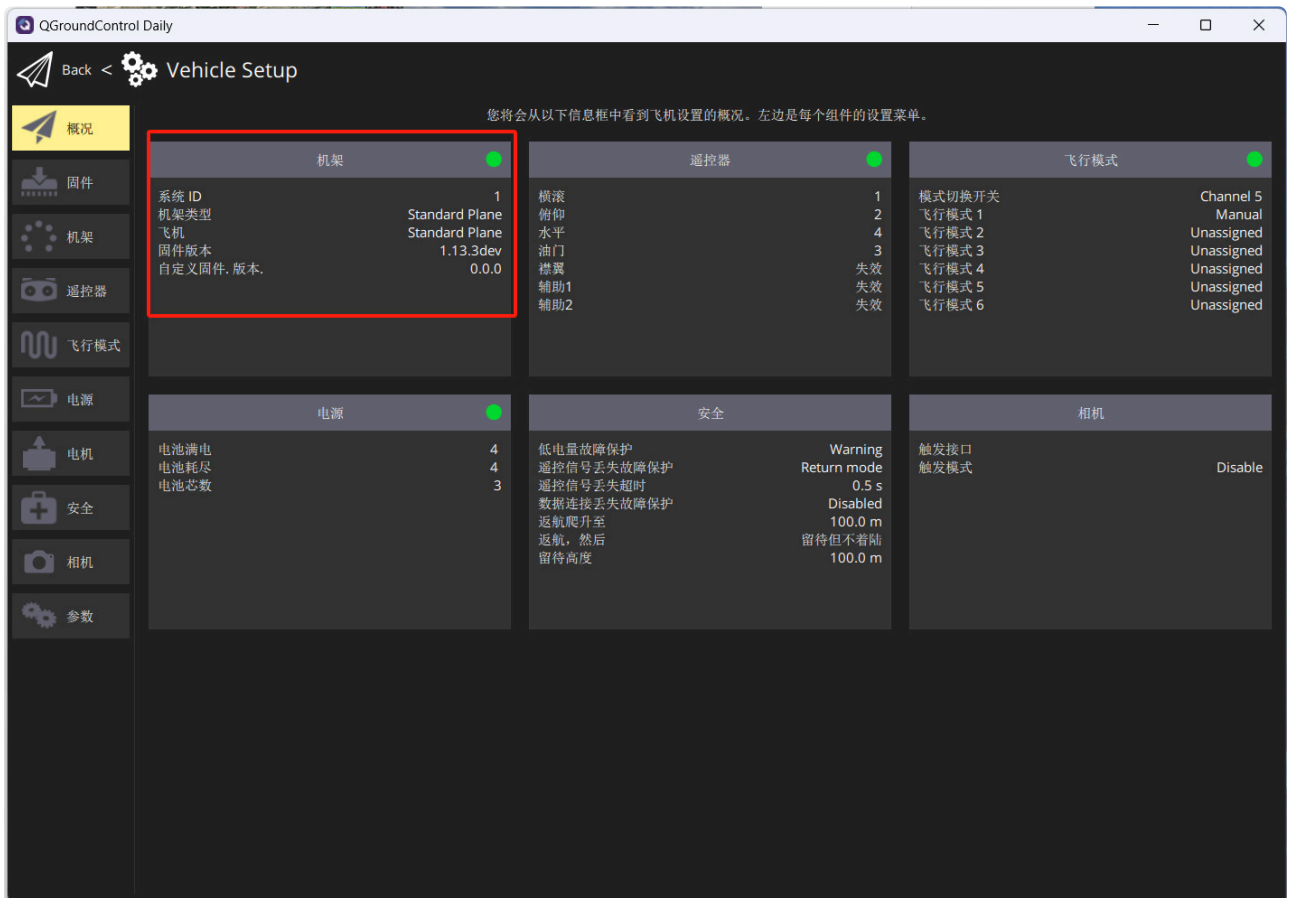
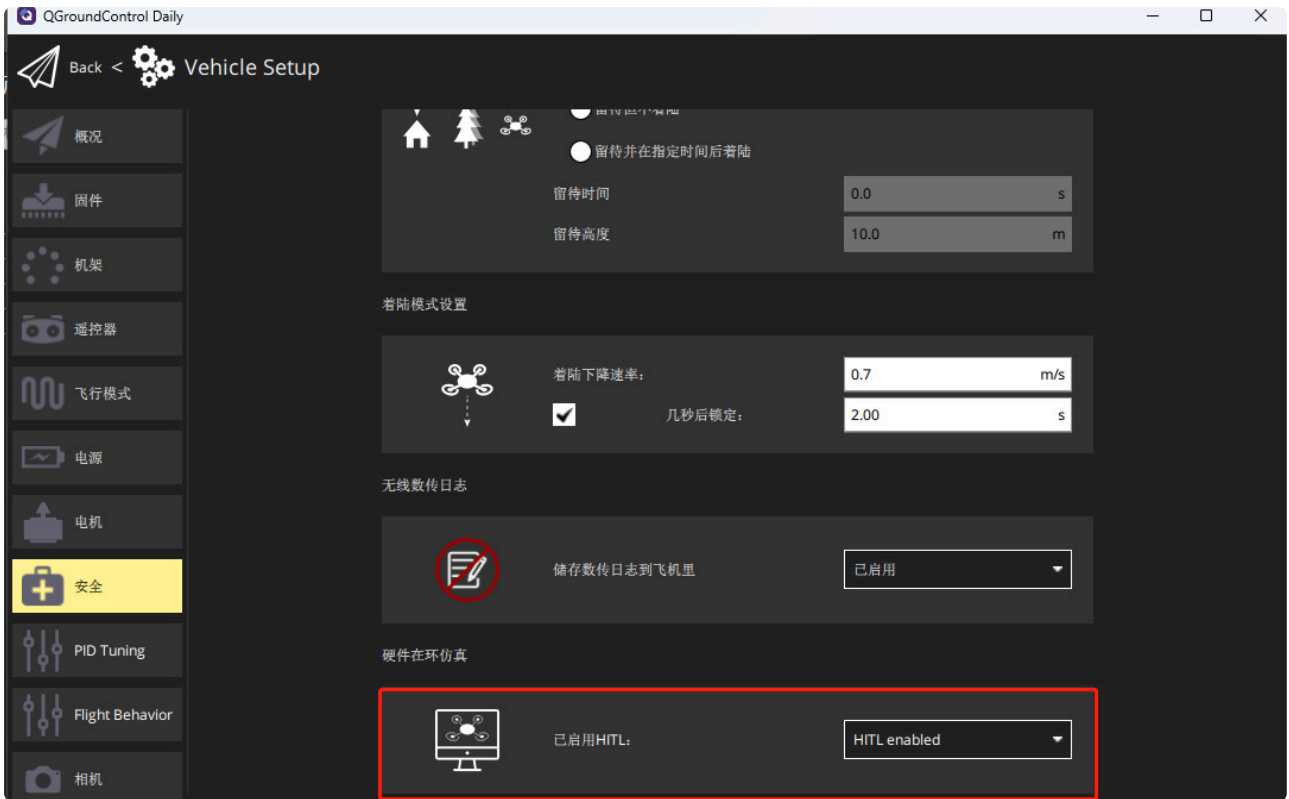
机架设置为“Standard Plane”，点击QGC右上角的“应用并重启”。



## 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。












注：使用1.13版本固件，还需要点击“参数”，在搜索栏中输入“UAVCAN\_ENABLE”，在弹出框中设置为“Disabled”，保存。



## Step 4: 启动仿真

右键以管理员身份运行

“[AircraftMathworks\\_HITLRun.bat](#)”批处理文件，在弹出的终端窗口中根据串口提示输入串口号，启动一架飞机的硬件在环仿真。

名称	修改日期	类型	大小
 AircraftMathworks.dll	2023/10/26 14:42	应用程序扩展	255 KB
 AircraftMathworks.slx	2023/10/24 15:33	Simulink Model	84 KB
 AircraftMathworks_HITLRun.bat	2023/10/24 15:33	Windows 批处理...	6 KB
 AircraftMathworks_init.m	2023/10/24 15:33	Objective C 源文件	2 KB
 AircraftMathworks_SITLRun.bat	2023/10/24 15:33	Windows 批处理...	6 KB
 GenerateModelDLLFile.p	2023/10/24 15:33	MATLAB.p.9.14.0	6 KB
 InitData.m	2023/10/24 15:33	Objective C 源文件	4 KB
 MavLinkStruct.mat	2023/10/24 15:33	MATLAB Data	5 KB
 MulticopterModel.zip	2023/10/26 14:42	压缩(zipped)文件...	120 KB
 README.pdf	2023/10/24 15:33	Foxit PhantomP...	2,767 KB
 README.docx	2023/10/26 15:00	Microsoft Word ...	19,527 KB

```
C:\Windows\system32\cmd.e: X + v
已复制      1 个文件。

-----
Please input the Pixhawk COM port list for HITL
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|
```

注：在“AircraftMathworks\_HITLRun.bat”硬件在环的脚本文件中，同样需要设置对应固定翼的DLL名：

```
REM Set use DLL model name or not, use number index or name string
REM This option is useful for simulation with other types of vehicles instead of multicopters
set DLLModel=AircraftMathworks
```

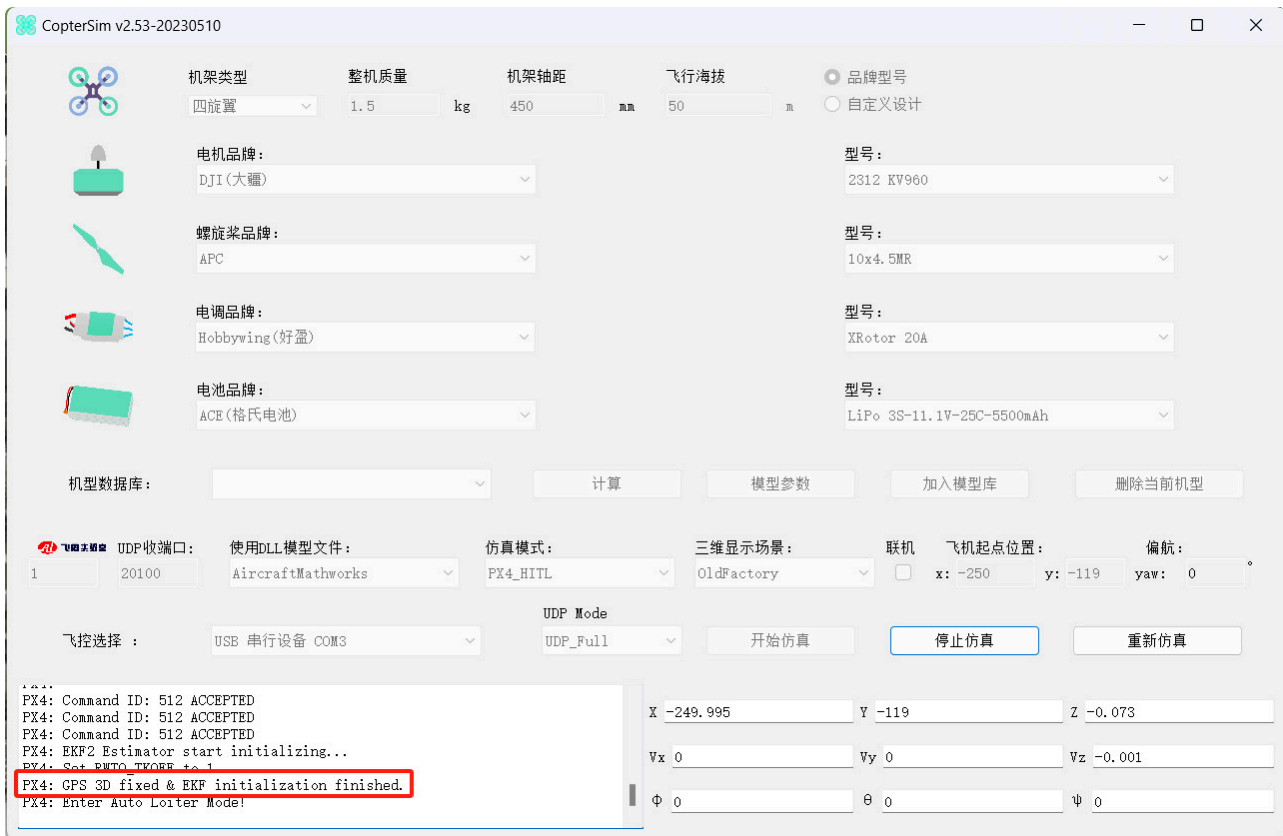
在SimMode处选择CopterSim中对应的硬件在环仿真模式：

```
REM Set the simulation mode on CopterSim, use number index or name string
REM e.g., SimMode=0 equals to SimMode=PX4_HITL
set SimMode=0
```

与软件在环仿真不同的是，在之前的配置准备环节中已经在QGC中设置了对应机架，所以在该脚本文件中不用设置机架。

## Step 5: 等待初始化完成

等待 CopterSim 中显示连接上 RflySim3D，完成初始化。



## Step 6: 仿真过程

之后测试步骤与软件在环的相同，运行之后在 RflySim3D 中观察是否按QGC规划轨迹飞行。

## 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. [\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/API.pdf](#)
3. [\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/API.pdf](#)
4. [\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/API.pdf](#)
- 5.

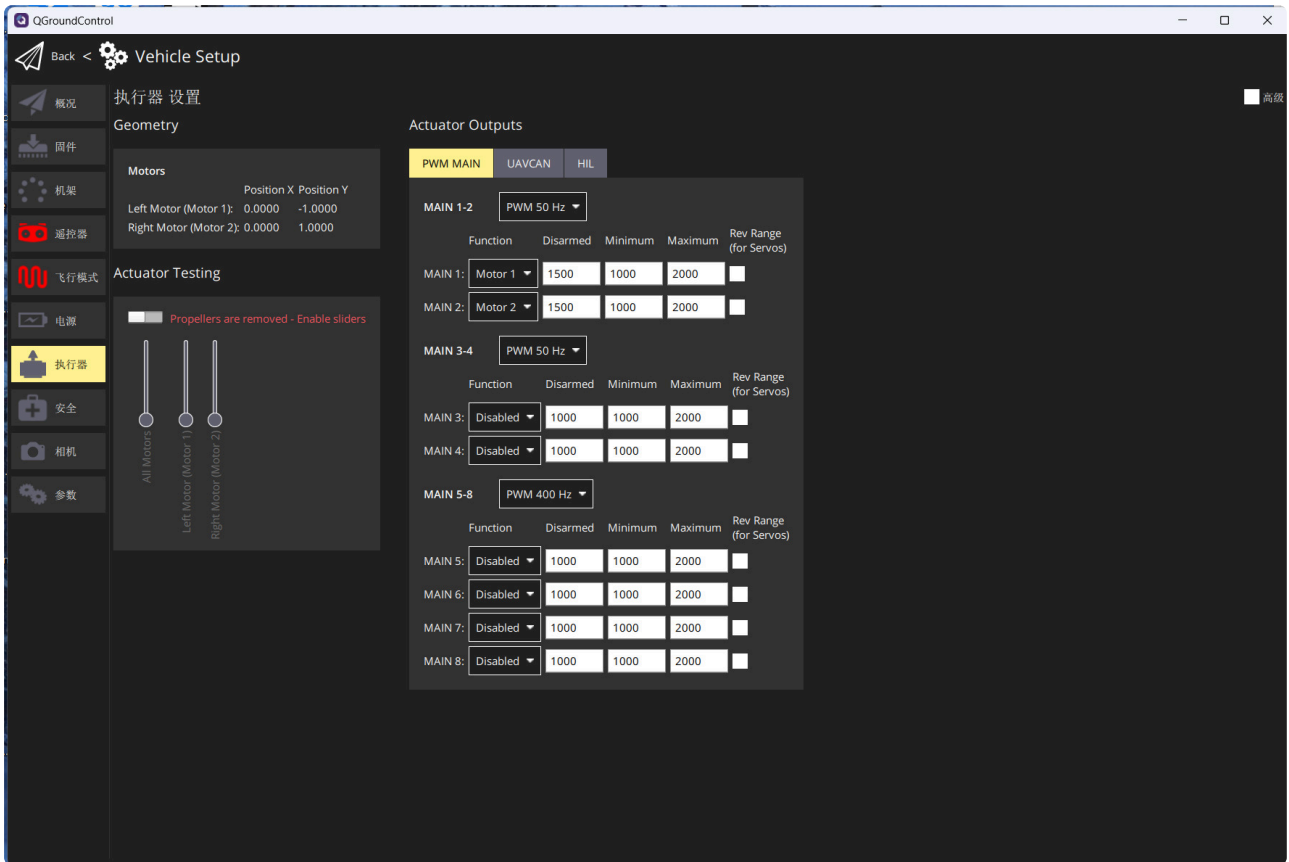
## 7. 常见问题

1. PX41.14版本固件全面启用了动态混控的规则，体现在使用1.14版本固件进行软硬件在环仿真时，QGC车辆设置页面会新增“执行器”页面，具体内容见

## 控制分配

(混控) | PX4 自动驾驶用户指南

(main)



## 控制分配 (混控)

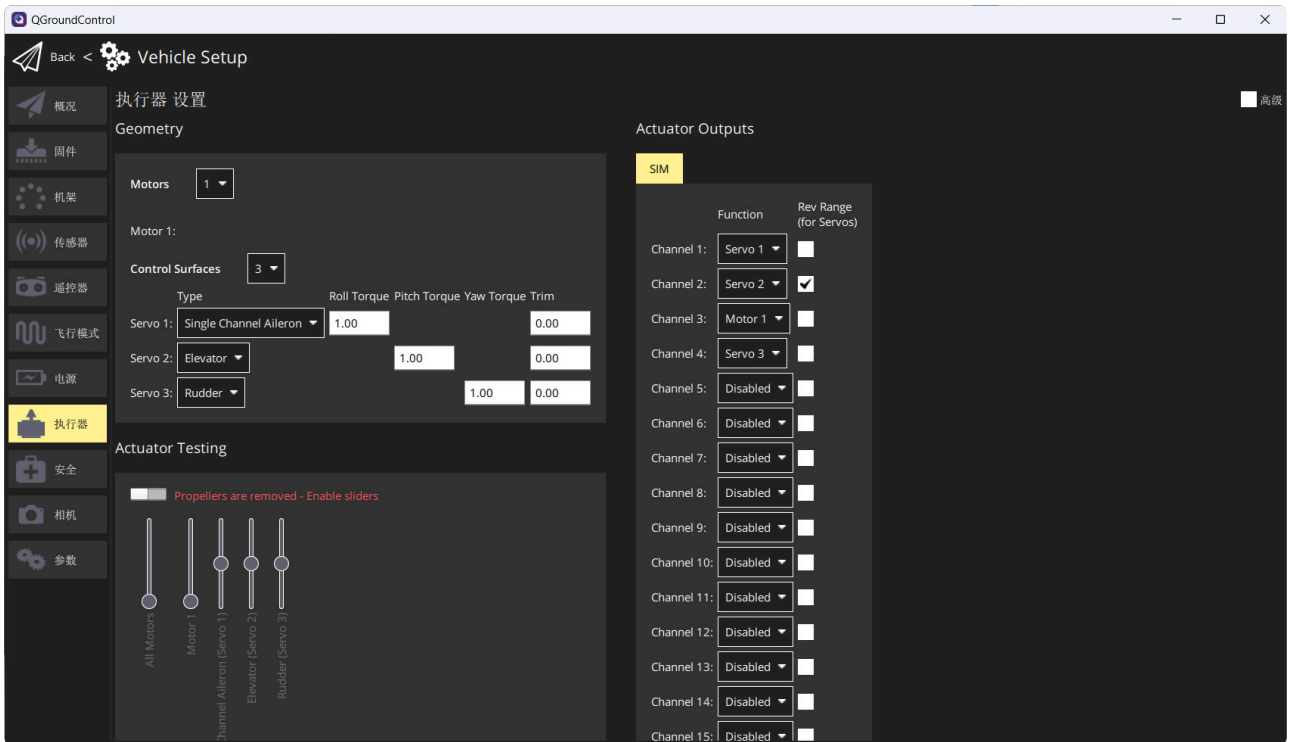
### 注解

控制分配取代了在 PX4 v1.13 中使用的旧的混控方法。PX4 v1.13 文档见：[混控& 驱动器](#)，[构型文件](#) 和 [添加一个新的机型配置](#)。

如果需要以1.14版本固件进行固定翼模型软硬件在环仿真，那么需要进行以下设置：

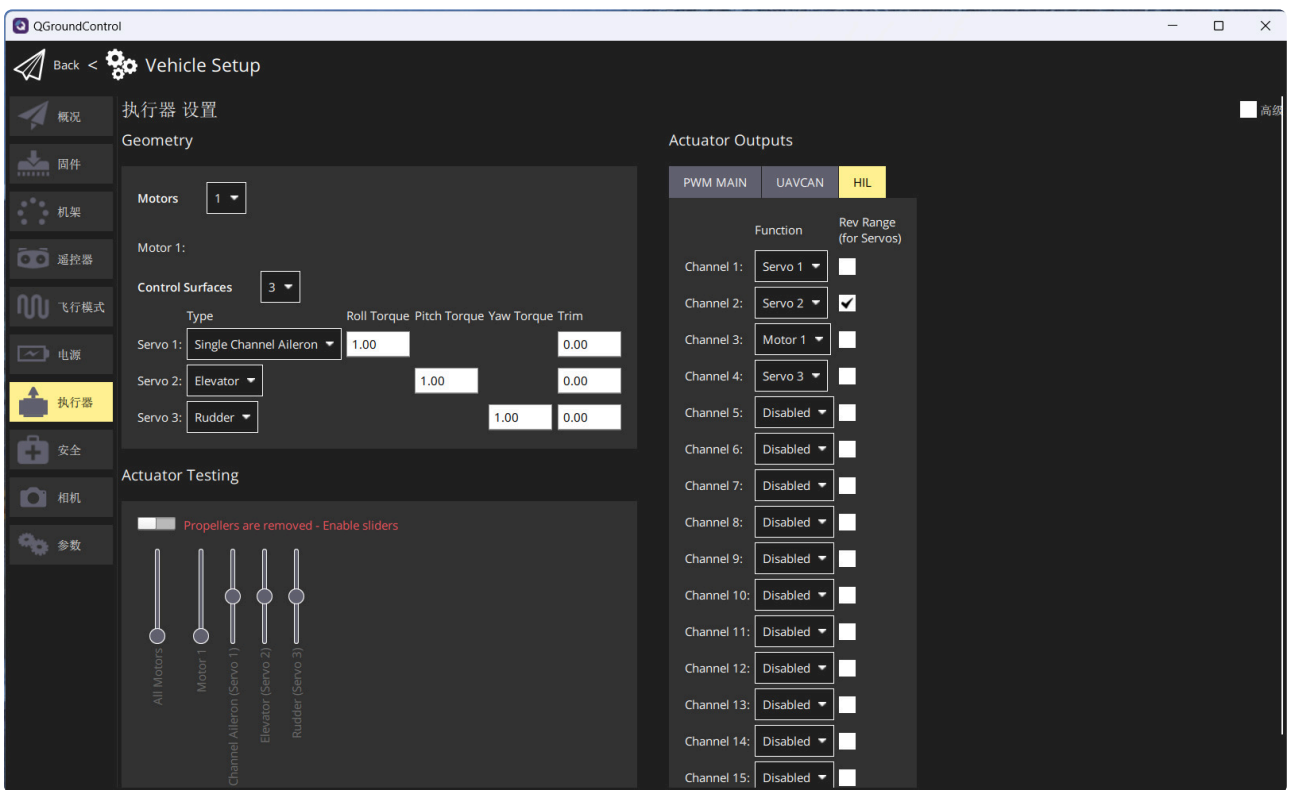
### 1. 软件在环仿真：

通过 [AircraftMathworks\\_SITLRun.bat](#) 启动仿真并完成初始化后，在QGC执行器页面中按如下图所示完成设置，即可正常仿真。

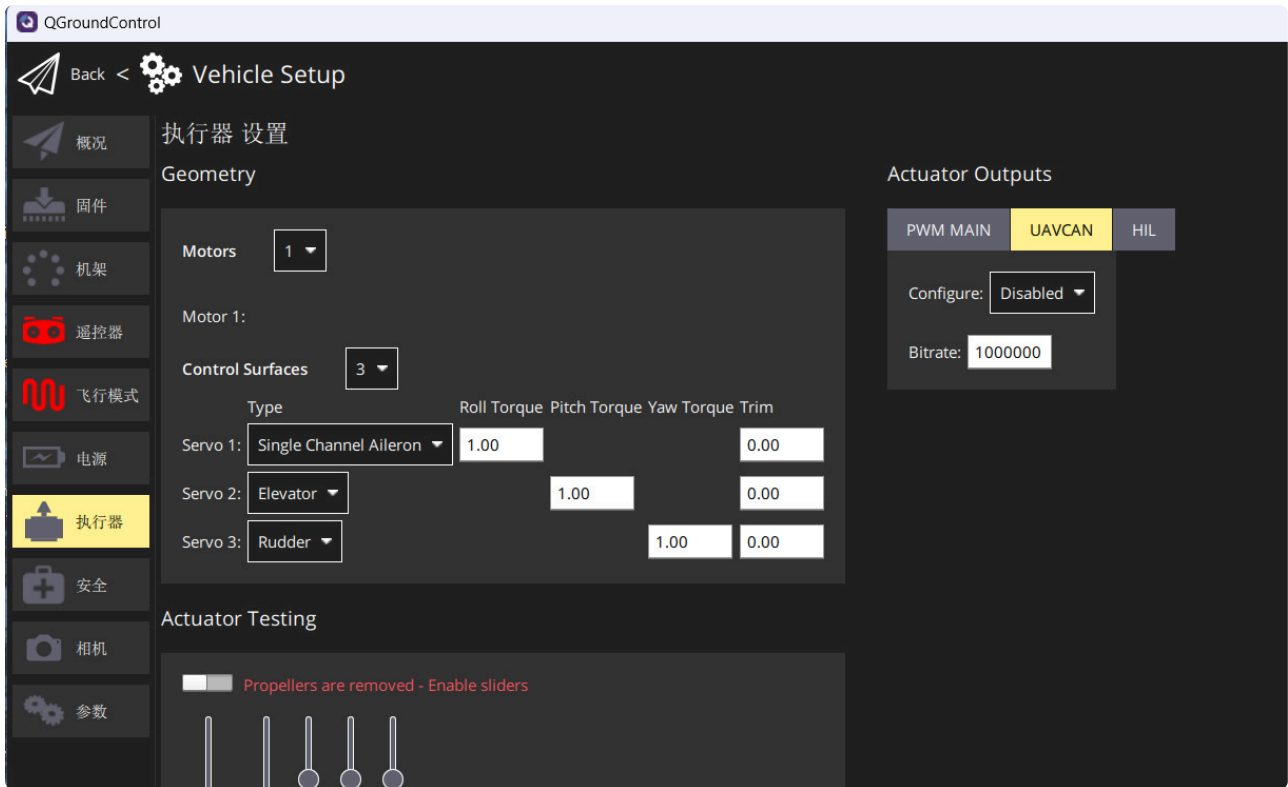


## 2) 硬件在环仿真:

除了硬件在环通常要设置的选项，还需要在QGC执行器页面中按如下图所示完成Actuator Outputs HIL设置:



并且需要设置UAVCAN为Disabled，完成设置后，重新插拔飞控即可正常仿真。



## Q2.关于执行航线任务时，模型卡在起飞跑道上的问题



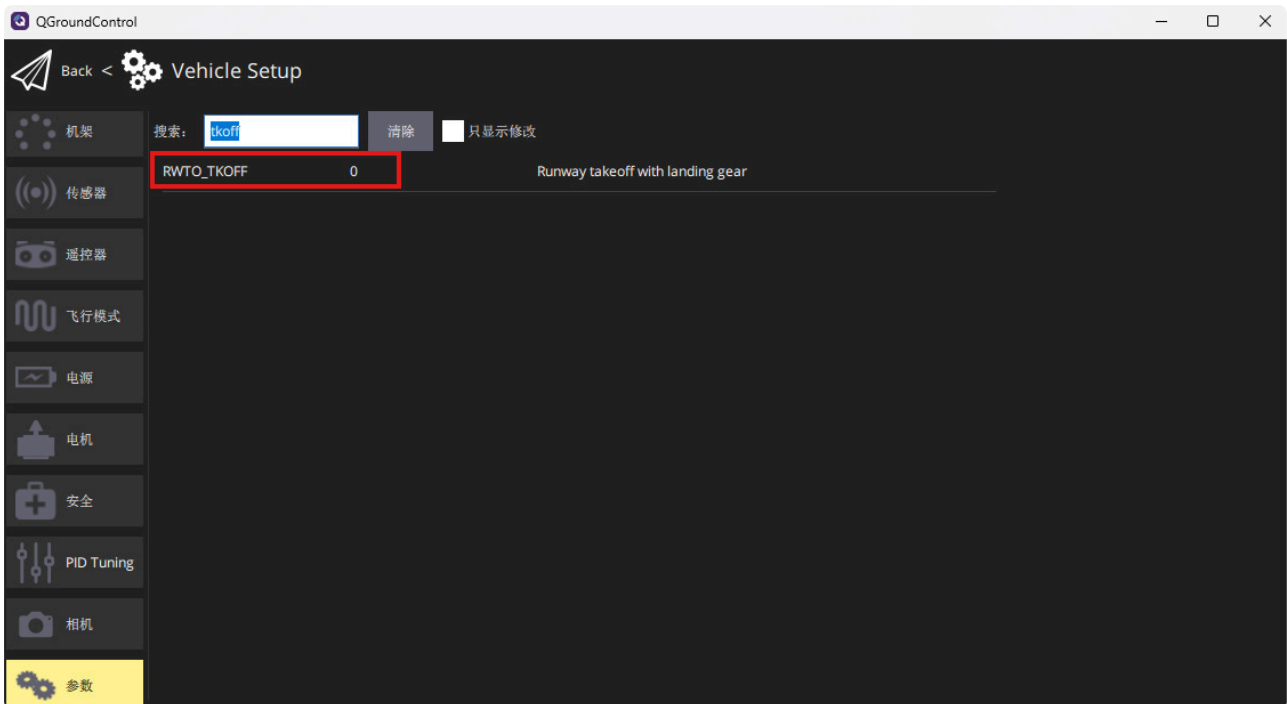
A2.

PX4的固定翼模型默认不能滑跑起飞，在起飞前需要使能跑道参数RWTO\_TKOFF（修改为1）。修改步骤如下：

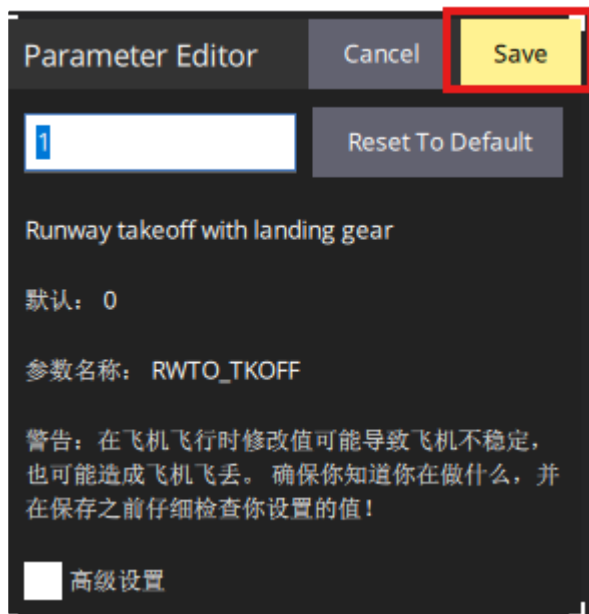
启动软件在环脚本或硬件在环脚本，使QGroundControl自动连接上PX4控制器。

在QGroundControl中，导航到Vehicle

Setup（车辆设置）页面，然后点击Parameters（参数）。在参数搜索栏中输入RWTO\_TKOFF，查找到该参数。



将RWTO\_TKOFF参数的值设置为1（启用）。



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