

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

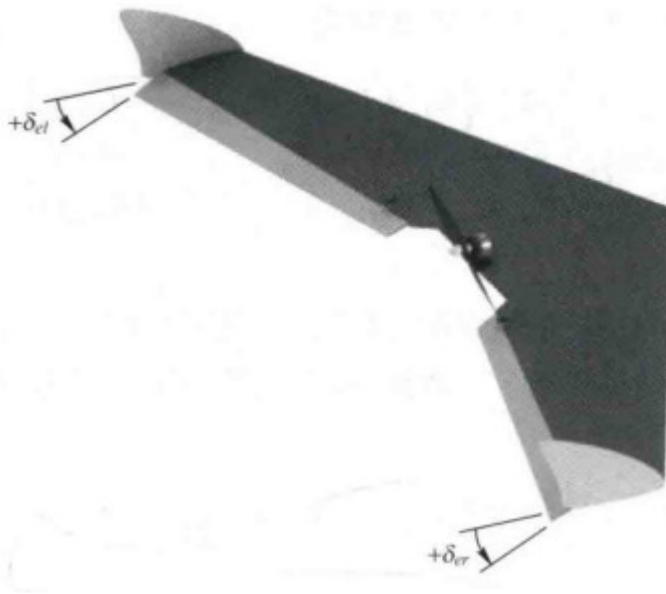
基于系统模板的飞翼布局无人机模型验证（DLL生成及SIL/HIL实验）

1.2 实验目的

在Matlab将Simulink文件编译生成飞翼的DLL模型文件；并对生成的飞翼模型进行软硬件在环仿真测试，通过本例程熟悉平台飞翼模型的使用。

1.3 关键知识点

该模型完成了飞翼的动力学、运动学部分建模，实现的基于PX4的飞翼软硬件在环仿真效果能满足飞翼的基本运动特性，飞翼的控制面相较于常规固定翼飞机有所不同，飞翼的控制舵面称为升降副翼(elevon)。



1.4 载具的基本动力学特性

飞翼的六自由度运动，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 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

$$Ox_gy_gz_g$$

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），

$$x_g$$

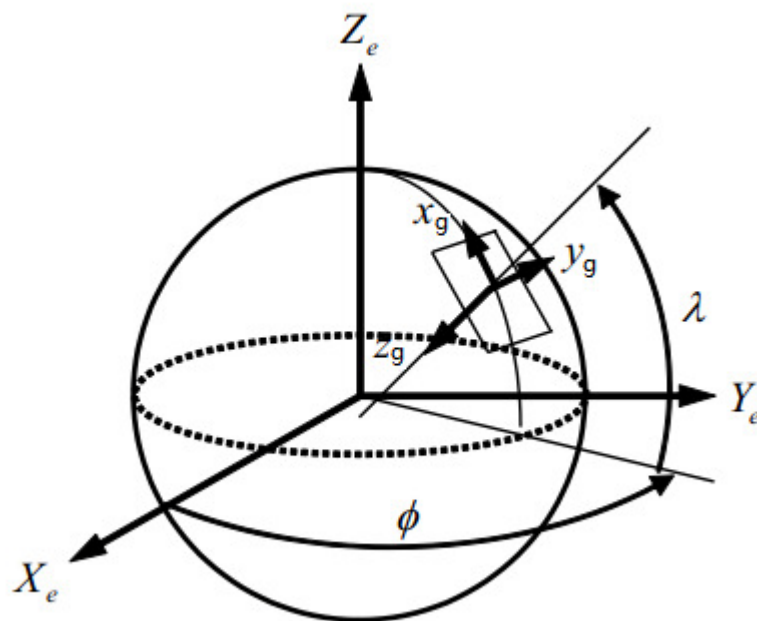
轴位于水平面内，指向某一固定方向（如飞机的航线方向），

$$z_g$$

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

$$Ox_by_bz_b$$

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_bz_b

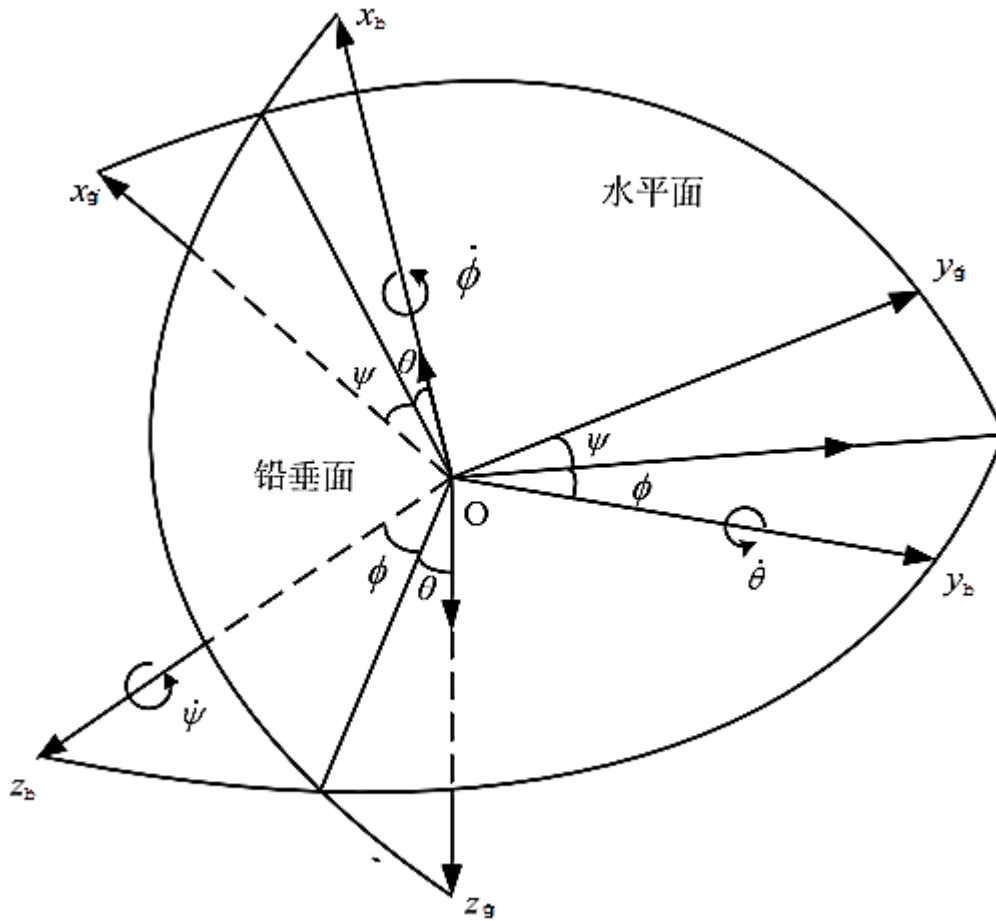
内并且垂直于纵轴，向下为正方向。

y_b

轴垂直于飞行器对称面

Ox_bz_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

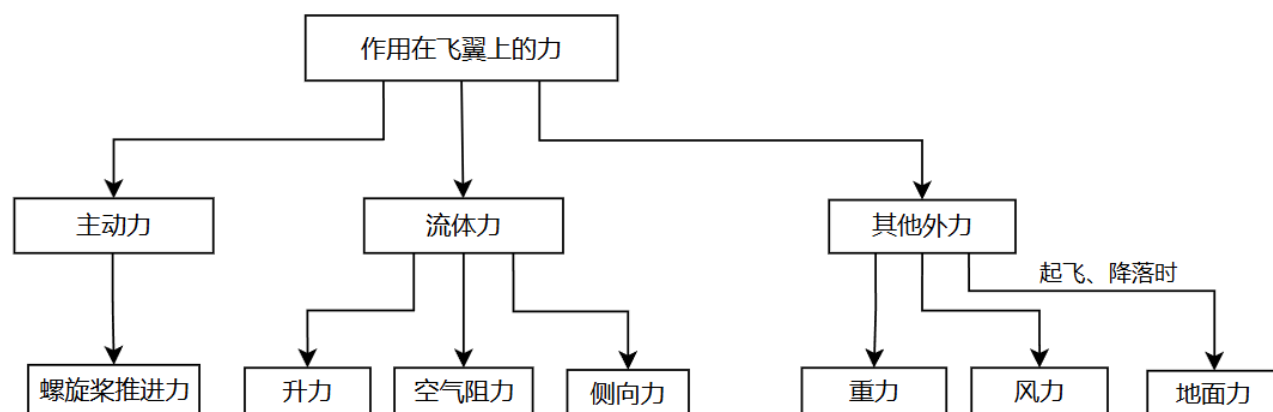
$Ox_a z_a$

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。

飞翼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。主动力由螺旋桨提供；控制面，即升降副翼改变时，飞翼受到的气动力会改变，在机体上产生力矩，进而影响飞翼的姿态。



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）。

对于飞翼来说，六自由度的运动为进退、侧移、升降运动与滚转、俯仰、偏航运动，如下表所示，本例中的飞翼无人机考虑六个自由度。

运动自由度	坐标轴	运动学分析
进退	前向/后向 (Fore/Aft: x轴)	螺旋桨产生推力， 使无人机朝机头所指方向运动。
侧移	左/右 (Port/Starboard: y轴)	通过倾斜机身（横滚）来实现侧向滑移
升降	上/下 (Up/Down: z轴)	主要由升力和重力的平衡控制。 通过改变升降舵的角度，调整飞机的俯仰角度， 使飞机上升或下降。
滚转(Roll)	绕纵轴转动 (Longitudinal Axis: x轴)	以差分的方式驱动一对升降副翼与副翼等效， 会产生关于滚转轴的扭矩。
俯仰 (Pitch)	绕横轴转动 (Lateral Axis: y轴)	以相同的方式驱动升降副翼与升降舵等效， 会产生关于俯仰轴的扭矩。
偏航(Yaw)	绕垂直轴转动 (Vertical Axis: z轴)	一侧升降副翼上移时， 左右翼附近产生非对称阻力， 从而产生偏航力矩导致飞机偏转。

■ 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指令通过动态响应模型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 [\(v1.12\)](#)

本例程中中飞翼的机架设置为generic_wing。

Generic Flying Wing

```
SYS_AUTOSTART = 3000
```

Specific Outputs:

- **MAIN1:** left aileron
- **MAIN2:** right aileron
- **MAIN4:** throttle

其在\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d\airframes\3000_generic_wing中定义如下:

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

```
set MIXER fw_generic_wing
```

执行rc.fw_defaults脚本，它包含了飞翼的默认参数设置，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
```

通道1和2用于姿态调整，通道4用于推力。通道3也包括在内，因为它们属于同一个输出组（一个共享相同定时器和频率的PWM输出的逻辑分组）。

设置混控器（mixer）为fw_generic_wing。

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\  
fw_generic_wing.main.mix, 将其推力和力矩映射到电机和左右两个舵机。
```

载具模型的整体输入输出和关键参数

输入输出

- 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	Int32(101)
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
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
初始位置	ModelInit_PosE	[0,0,0]
初始姿态	ModelInit_AngEuler	[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

参数名	参数	值
阻力系数	uav.aero.CD0	0.022
侧力系数—侧滑角系数	uav.aero.CYb	-1.098
滚转力矩系数	uav.aero.Cma = -1.239	
俯仰力矩系数	uav.aero.Cm0 = 0.3	
偏航力矩系数	uav.aero.Cnb = 0.277	

2. 实验效果

实现飞翼布局无人机DLL模型文件生成，以及完成飞翼软硬件在环仿真。

3. 文件目录

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e10_Wing](#)

文件夹/文件名称	说明
Wing.slx	飞翼布局无人机模型simulink模板文件。
Wing.slx.r2017b	飞翼布局无人机模型低版本备用simulink模板文件。
WingHITLRun.bat	硬件在环仿真批处理文件。
WingSITLRun.bat	软件在环仿真批处理文件。
GenerateModelDLLFile.p	DLL格式转化文件。
Wing_Init.m	动力学模型相关参数。
InitData.m	控制器初始化参数。
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。

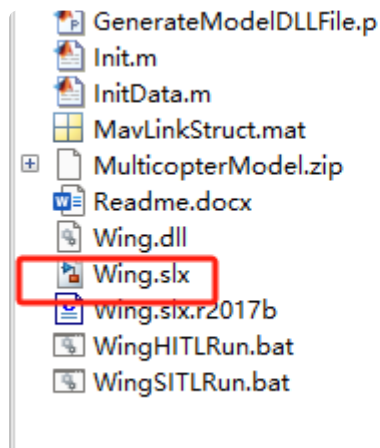
①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

5. 实验步骤

5.1. 必做实验：DLL模型生成

Step 1: 编译模型

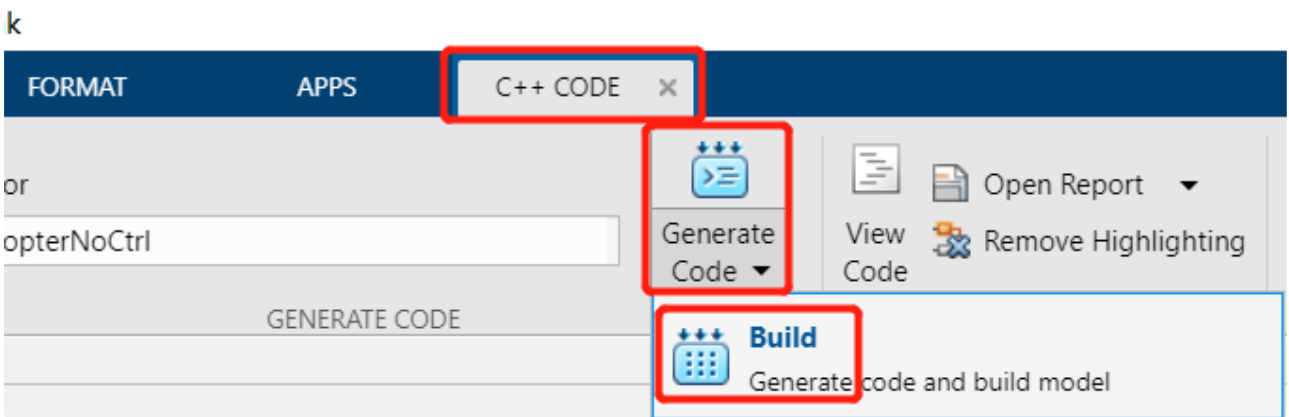
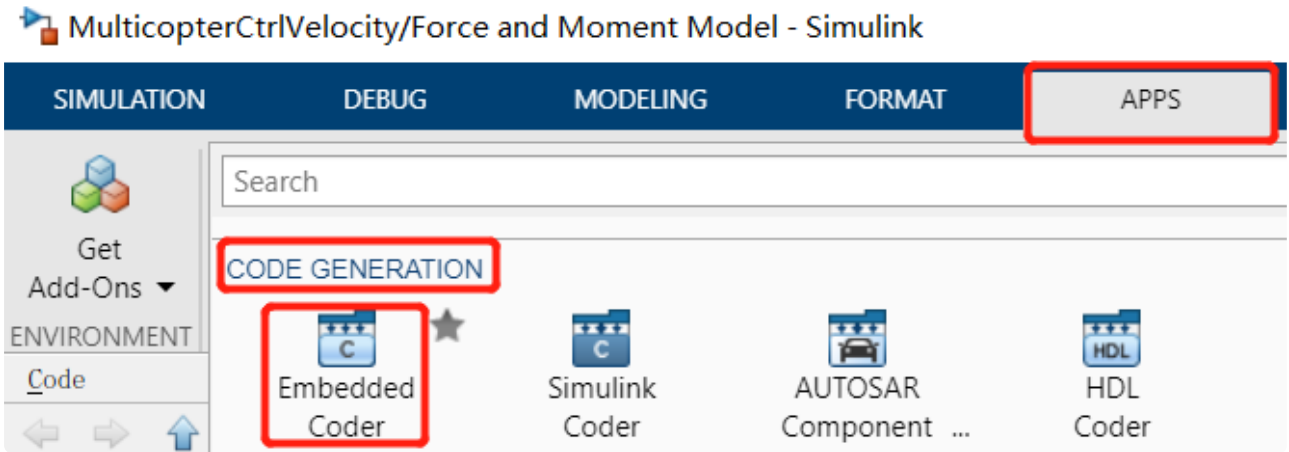
打开“Init.m”文件，并运行，之后打开“Wing.slx” Simulink 文件，点击“Build Model”按钮。



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。

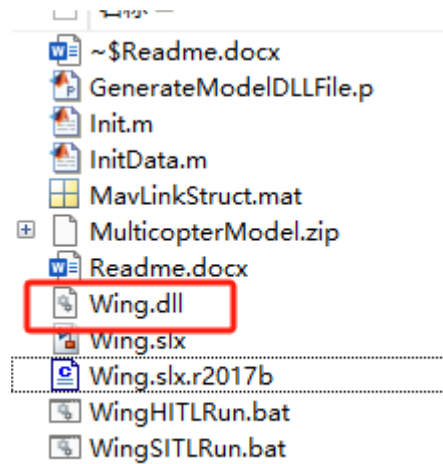
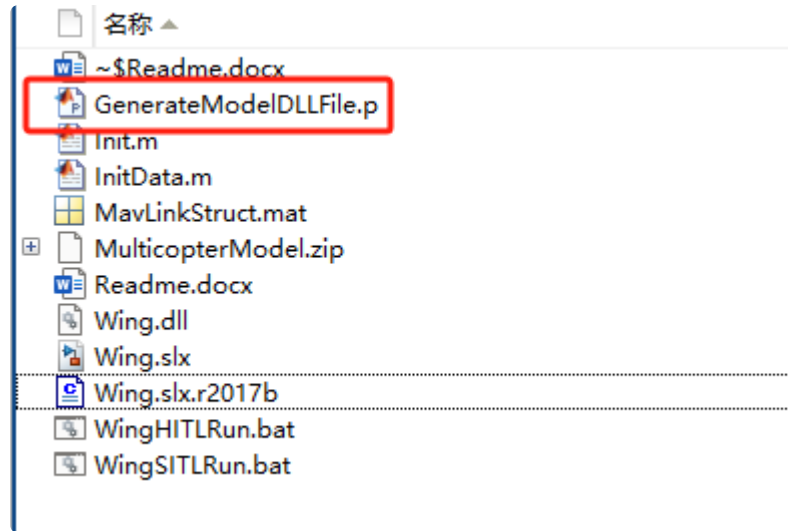


注意事项：与标准固定翼模型AircraftMathworks.slx相比，该飞翼模型不同点如下：

1. 建模模版Wing.slx中 [控制通道映射模块](#) 不同，由此需要不同的机型和混控器文件

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。

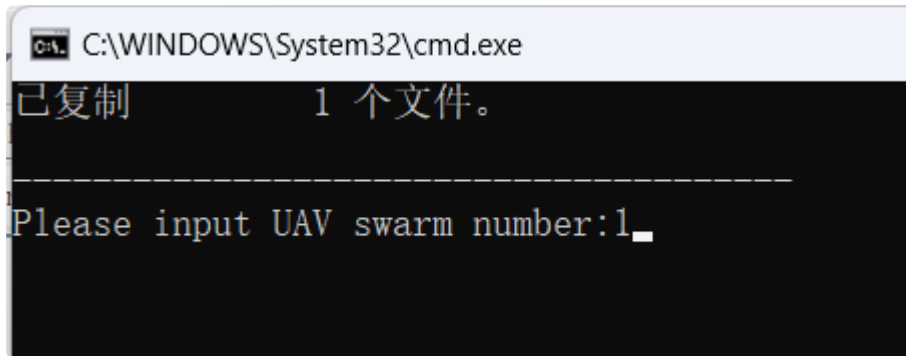


5.2. 必做实验：软件在环仿真

Step 1: 启动仿真

右键以管理员身份运行“WingSITLRun.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。

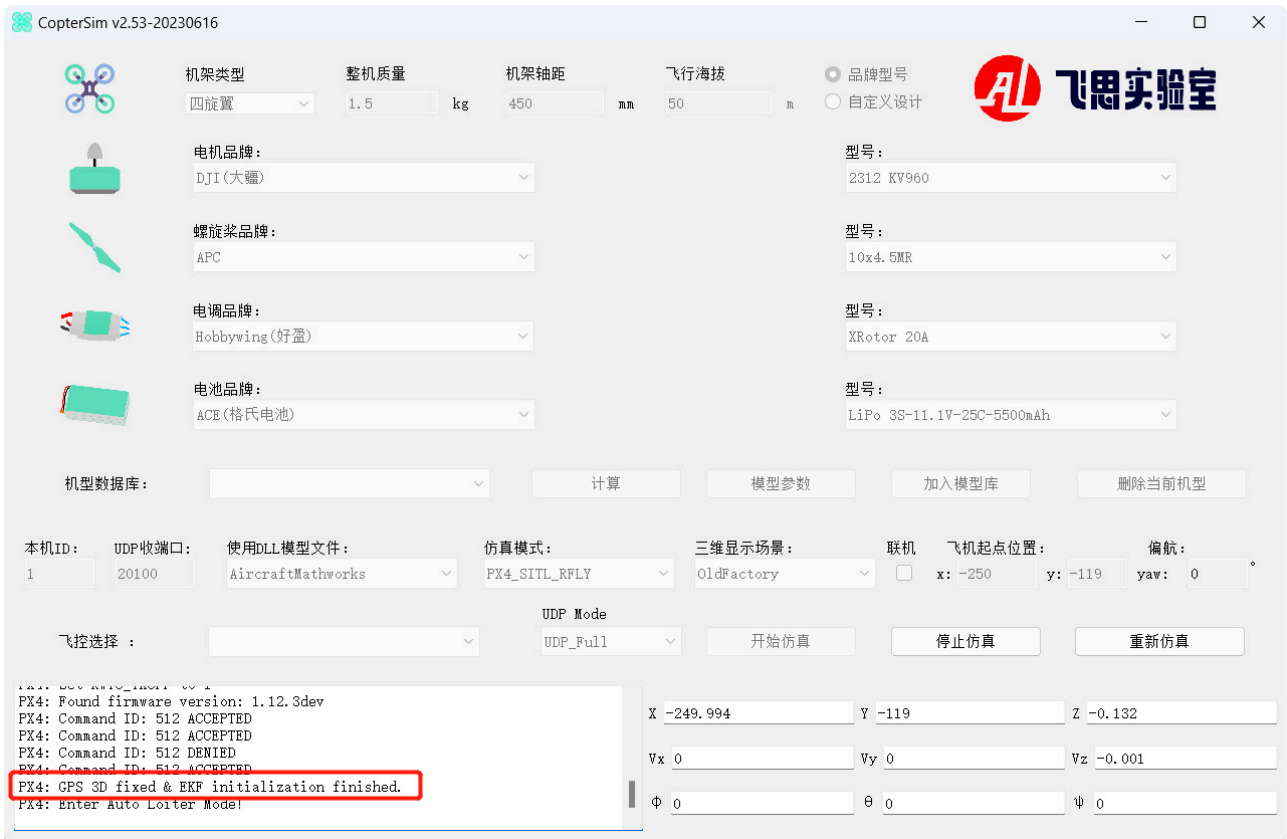
 GenerateModelDLLFile.p	2024/1/16 14:25	MATLAB P-code	6 KB
 Init.m	2024/1/16 15:44	MATLAB.m.9.13.0	5 KB
 InitData.m	2023/11/28 16:50	MATLAB.m.9.13.0	4 KB
 MavLinkStruct.mat	2023/11/28 16:50	Access.Shortcut...	5 KB
 MulticopterModel.zip	2024/1/16 15:45	Bandizip.zip	160 KB
 Readme.docx	2023/12/28 17:03	Microsoft Word ...	19,912 KB
 Wing.dll	2024/1/16 15:49	应用程序扩展	241 KB
 Wing.slx	2023/11/28 16:50	MATLAB.slx.9.13.0	173 KB
 Wing.slx.r2017b	2023/11/28 16:50	R2017B 文件	106 KB
 WingHITLRun.bat	2023/11/28 16:50	Windows 批处理...	6 KB
 WingSITLRun.bat	2024/1/16 14:36	Windows 批处理...	6 KB



```
C:\WINDOWS\System32\cmd.exe
已复制 1 个文件。
-----
Please input UAV swarm number:1_
```

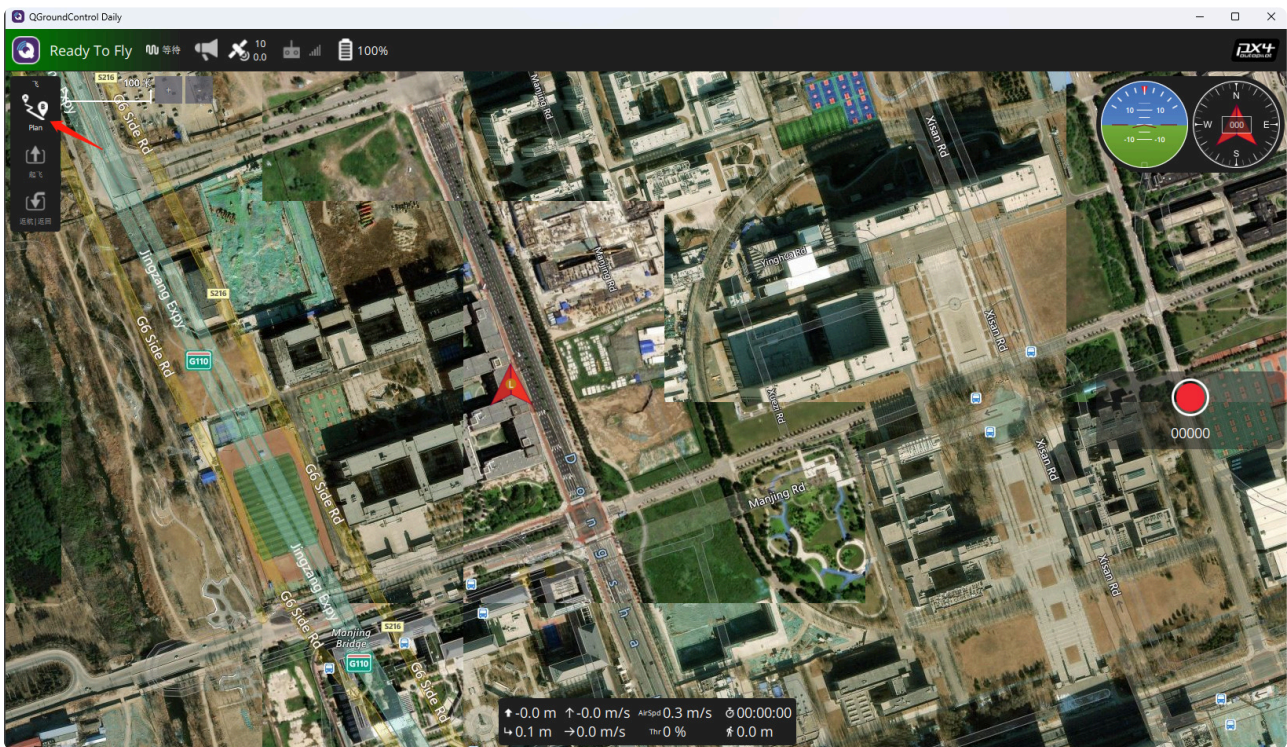
Step 2: 等待初始化完成

等待 CopterSim 中显示连接上 RflySim3D，完成初始化。

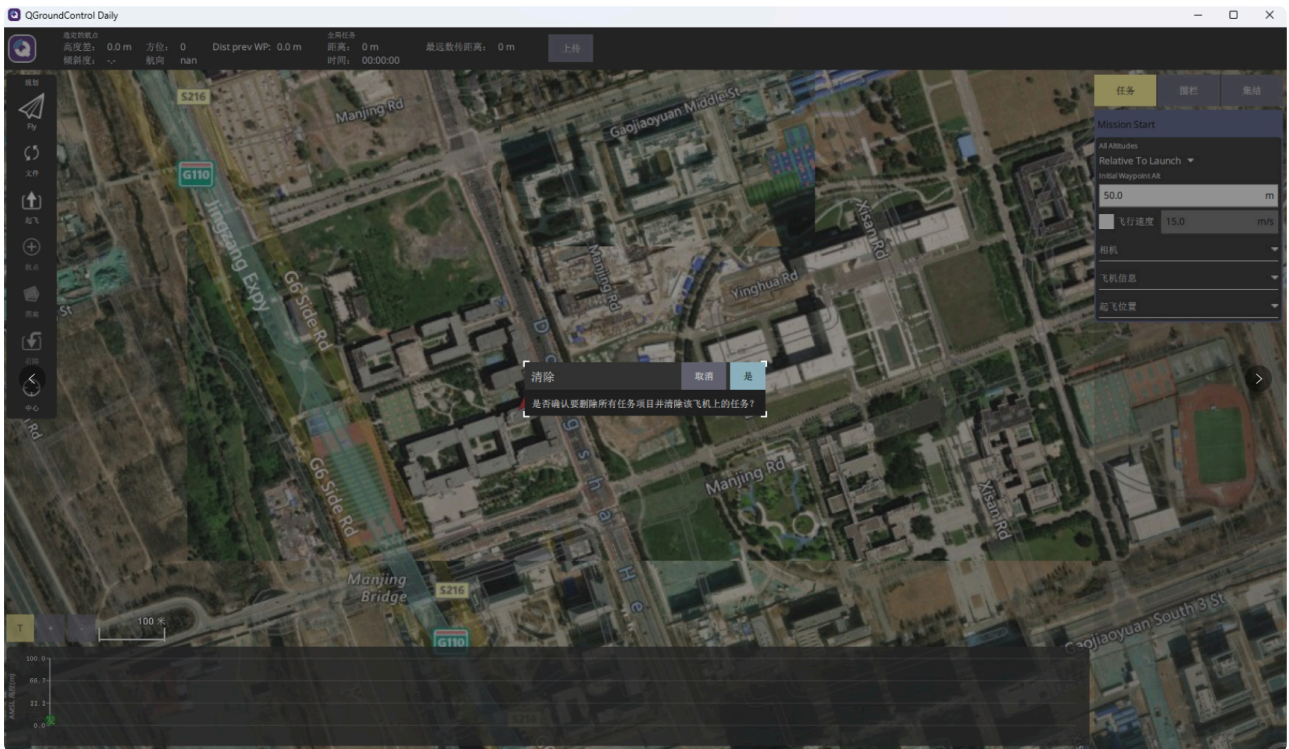
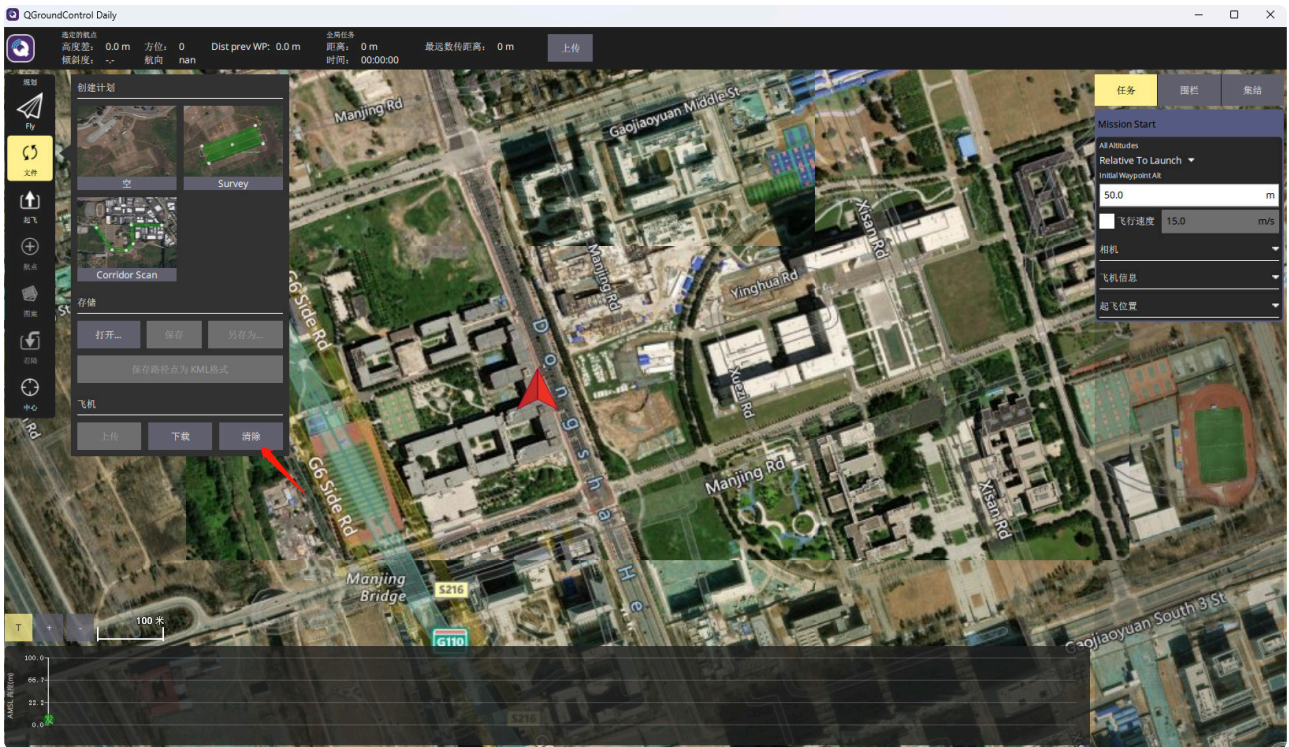


Step 3: 航路设置页面

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”。

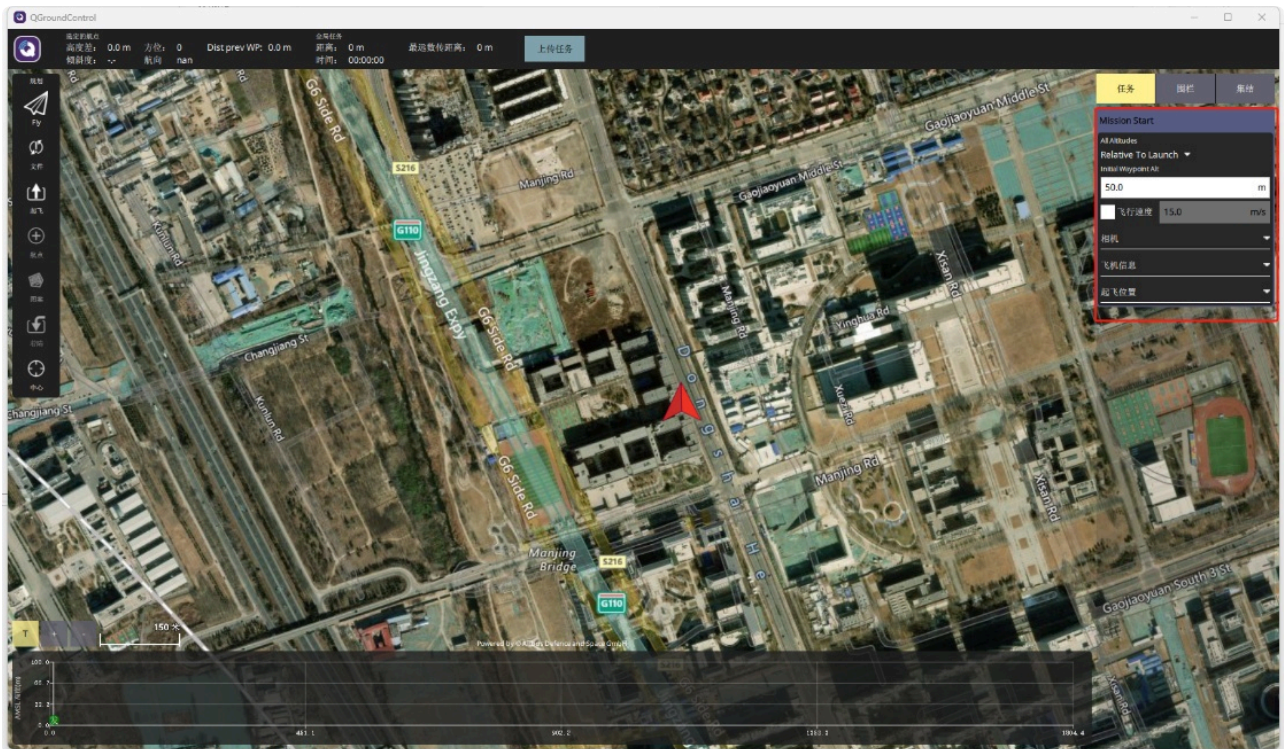


Step 4: 设置起飞点

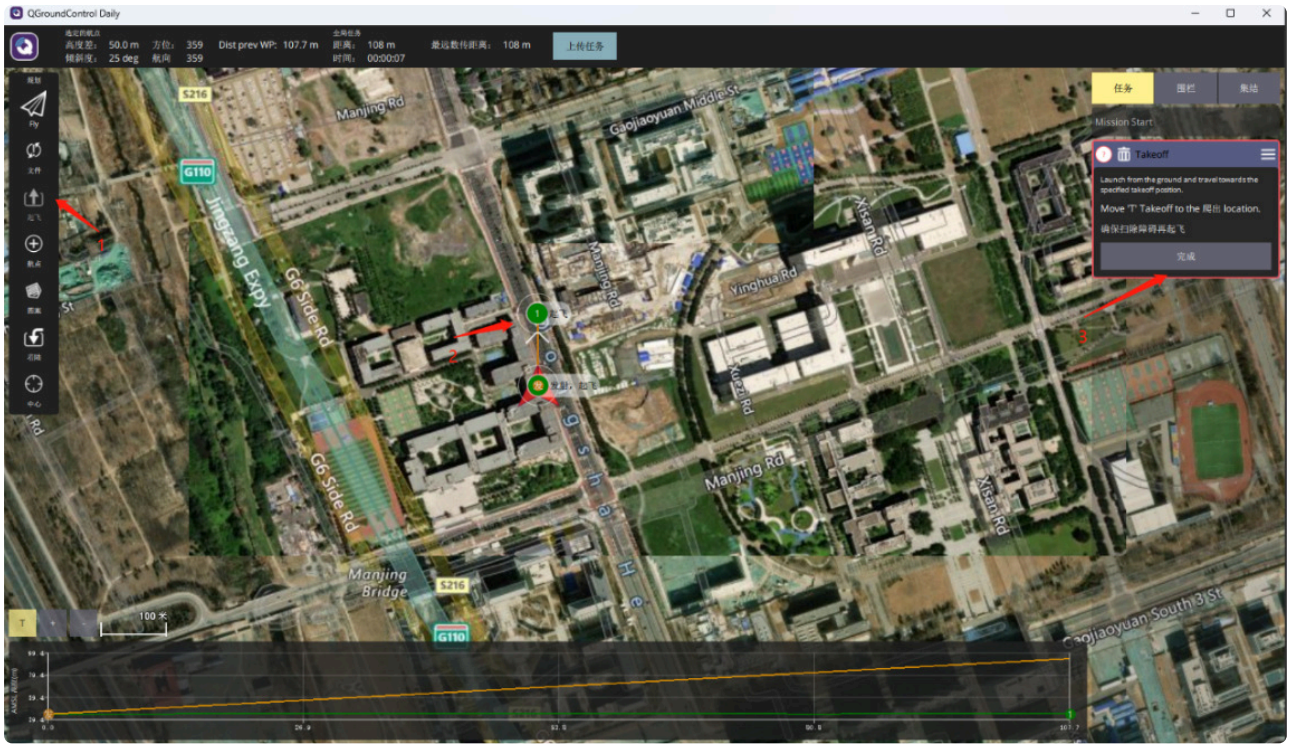
首先点击“任务开始”按钮



之后会弹出飞机初始化信息



点击“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。



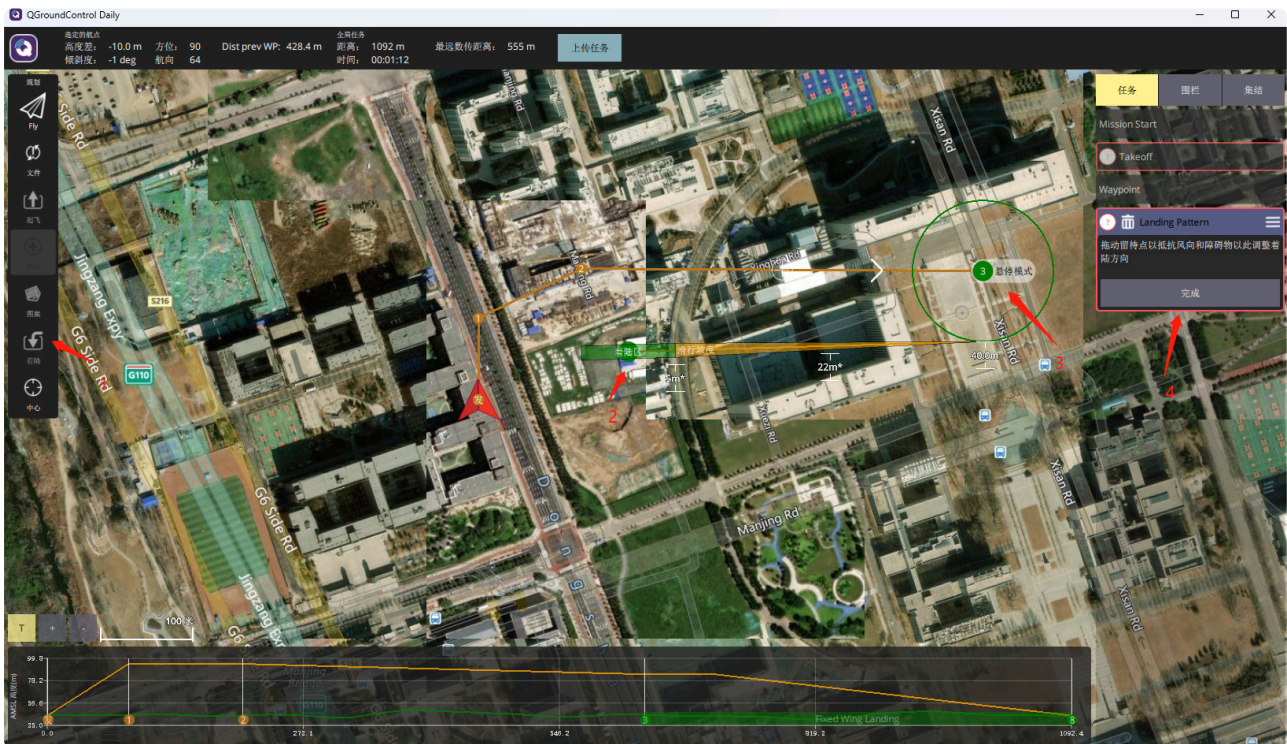
Step 5: 设置航点

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）。

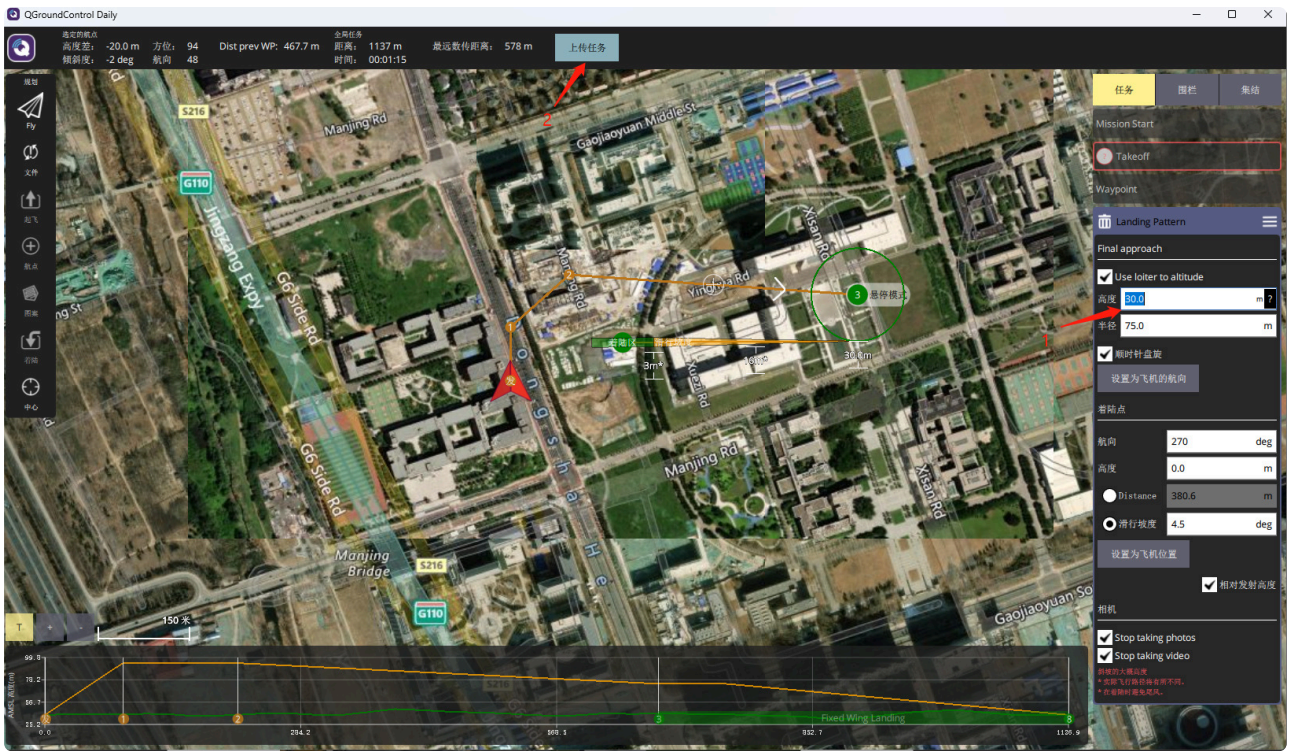


Step 6: 设置降落点并上传航路

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”。

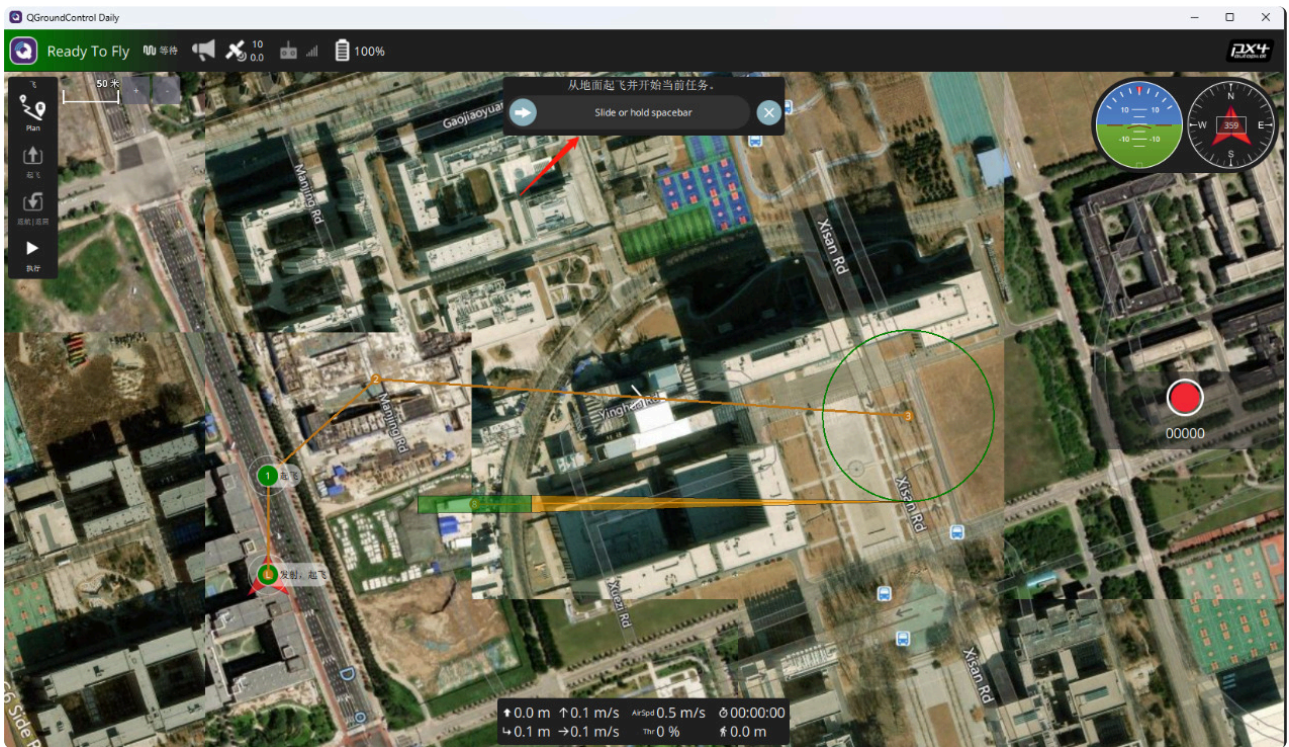


之后可设置降落高度等其他参数，本例中设置降落高度为30m，之后点击“上传任务”按钮上传航路。



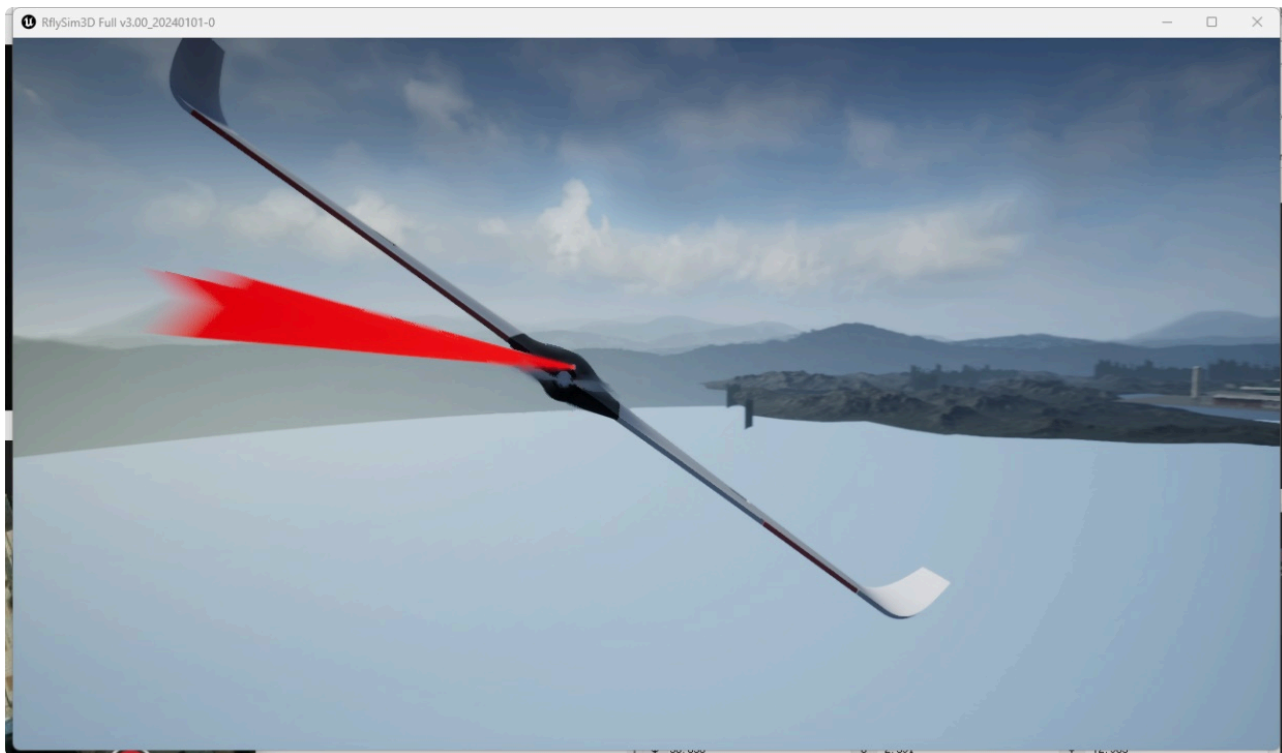
Step 7: 执行任务

返回初始界面后，滑动上方滑块开始执行任务。



Step 8: 观测结果

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）。

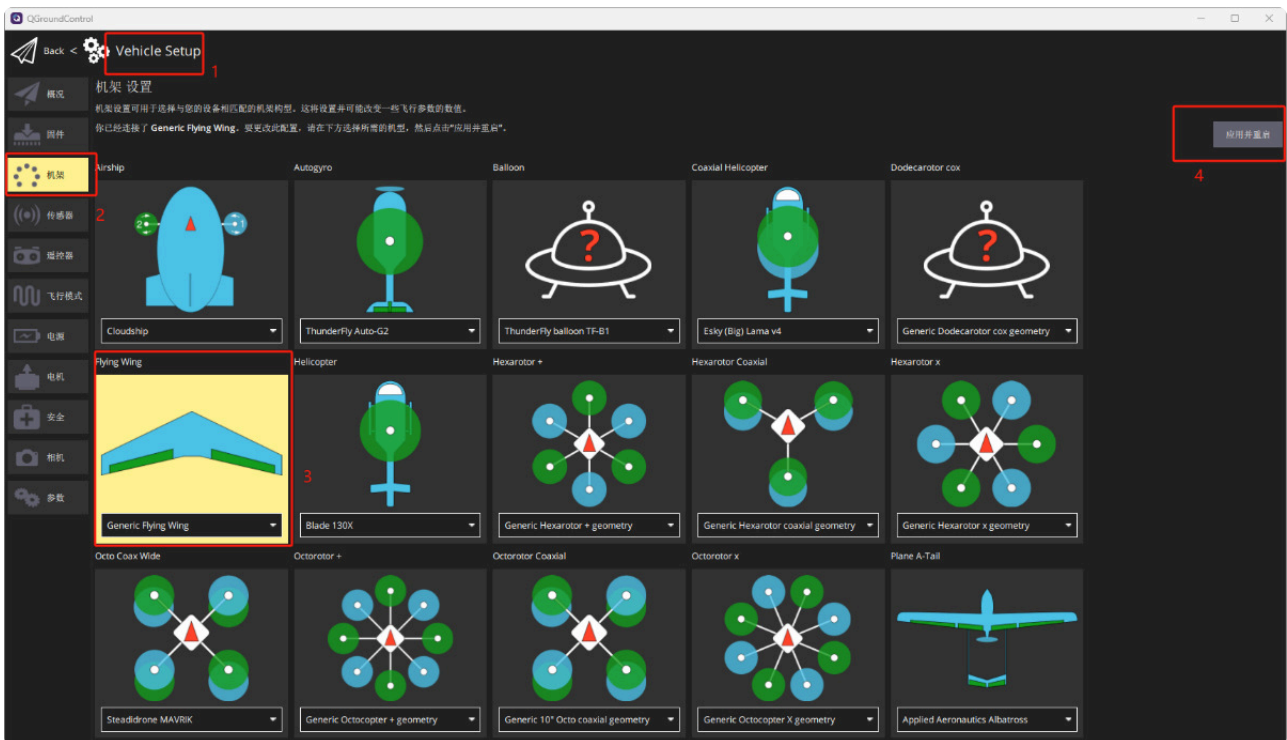


Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

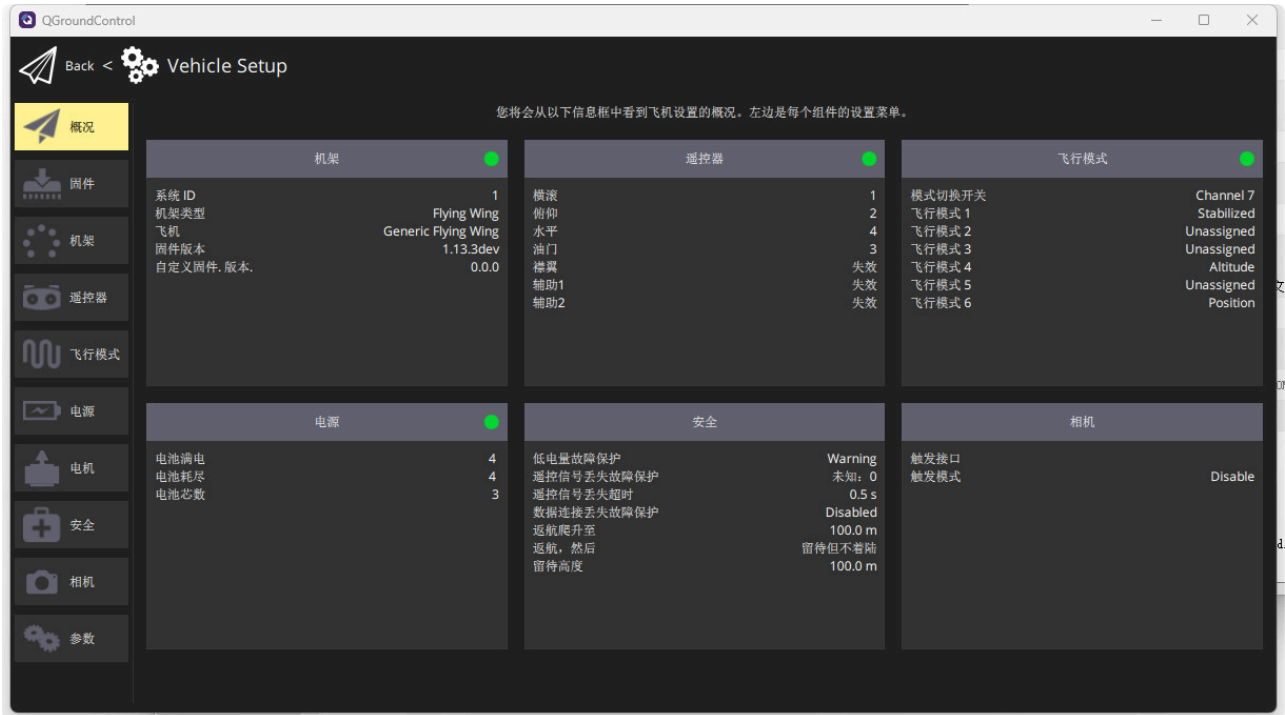
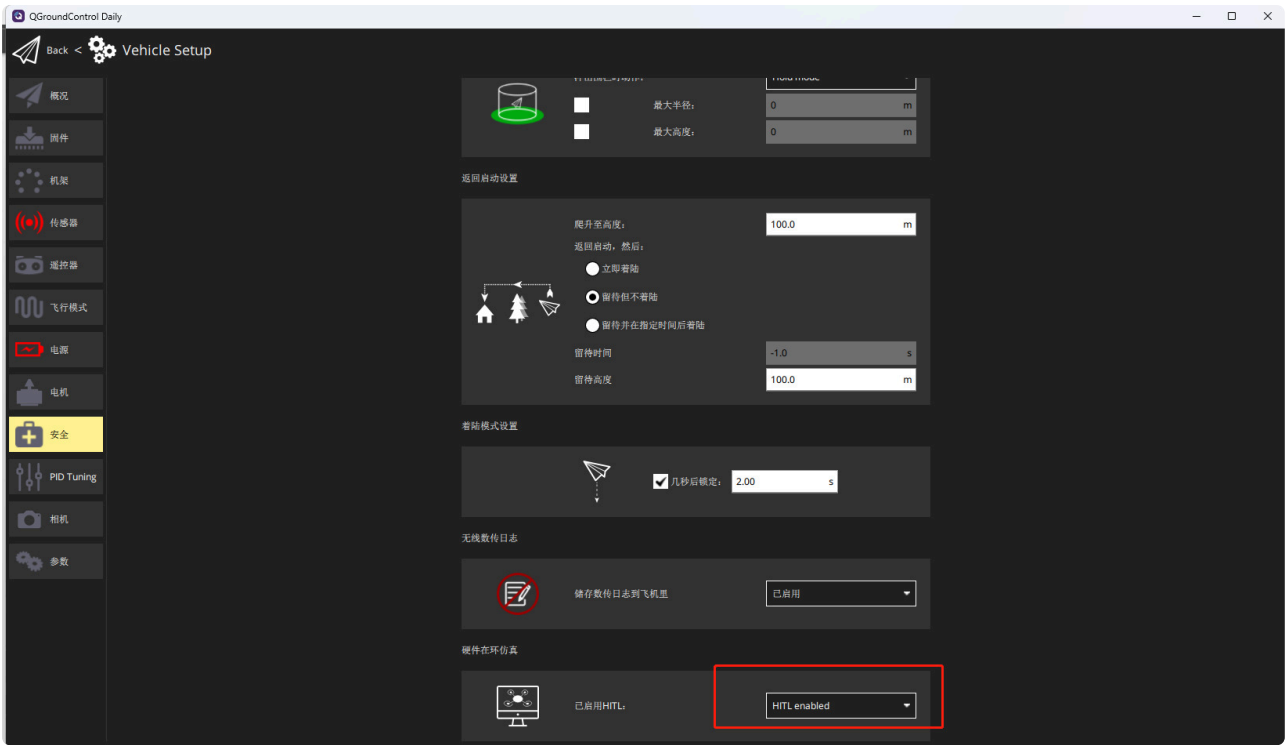
	3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷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

在机架界面设置机架型号为“Generic Flying Wing”，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，之后在概况界面中确认配置完成后，重新插拔飞控完成设置。使用1.13版本固件还需在参数界面的搜索栏中输入“UAVCAN_ENABLE”，并在弹出框中设置为“Disabled”，保存即可。



Step 4: 启动仿真

右键以管理员身份运行

“WingHITLRun.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。

GenerateModelDLLFile.p	2024/1/16 14:25	MATLAB P-code	6 KB
Init.m	2024/1/16 15:44	MATLAB.m.9.13.0	5 KB
InitData.m	2023/11/28 16:50	MATLAB.m.9.13.0	4 KB
MavLinkStruct.mat	2023/11/28 16:50	Access.Shortcut...	5 KB
MulticopterModel.zip	2024/1/16 15:45	Bandizip.zip	160 KB
Readme.docx	2023/12/28 17:03	Microsoft Word ...	19,912 KB
Wing.dll	2024/1/16 15:49	应用程序扩展	241 KB
Wing.slx	2023/11/28 16:50	MATLAB.slx.9.13.0	173 KB
Wing.slx.r2017b	2023/11/28 16:50	R2017B 文件	106 KB
WingHITLRun.bat	2023/11/28 16:50	Windows 批处理...	6 KB
WingSITLRun.bat	2024/1/16 14:36	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 ????
COM6: ??????????
COM7: ??????????

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的Step3到Step11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. [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
[PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf](#)中DLL/SO模型与通信接口的数据协议
4. 部分
- 5.

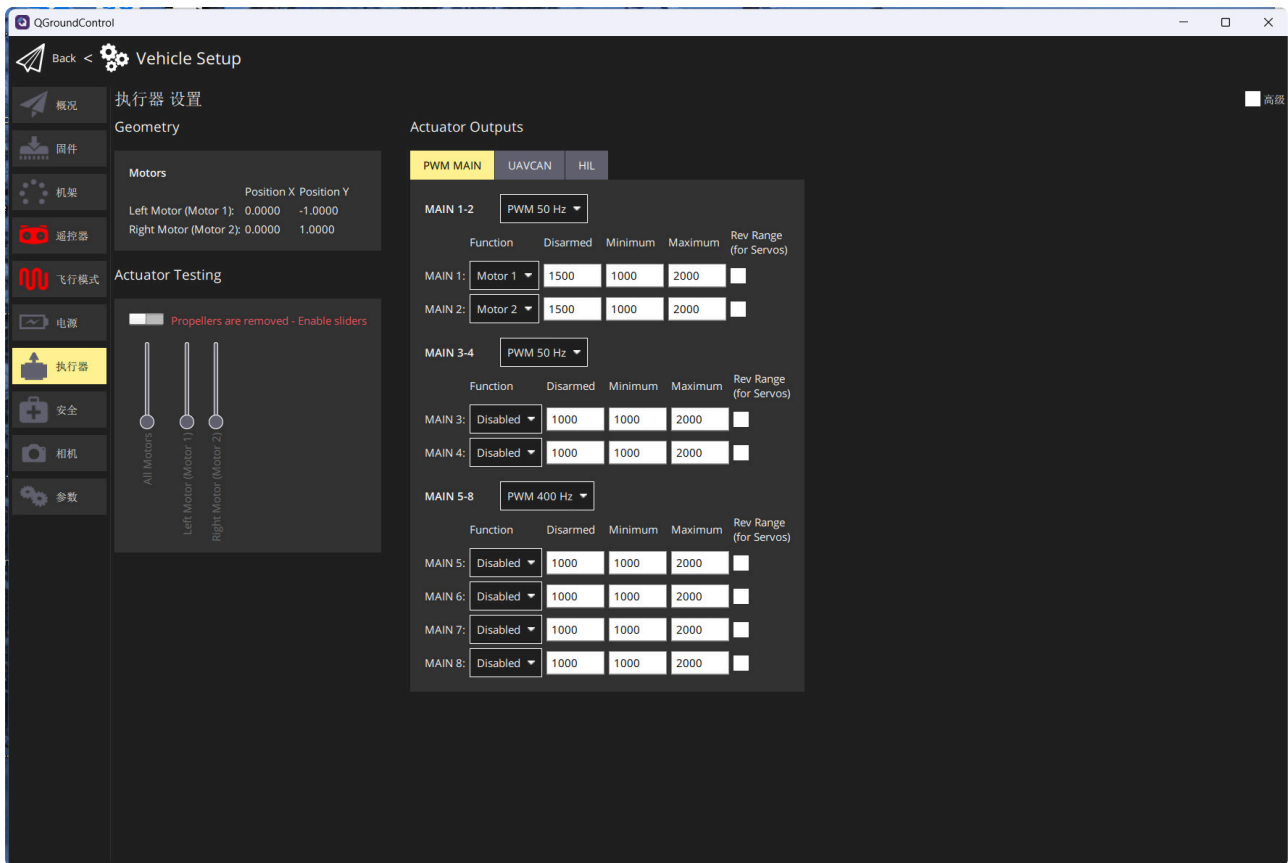
7. 常见问题

Q1.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)

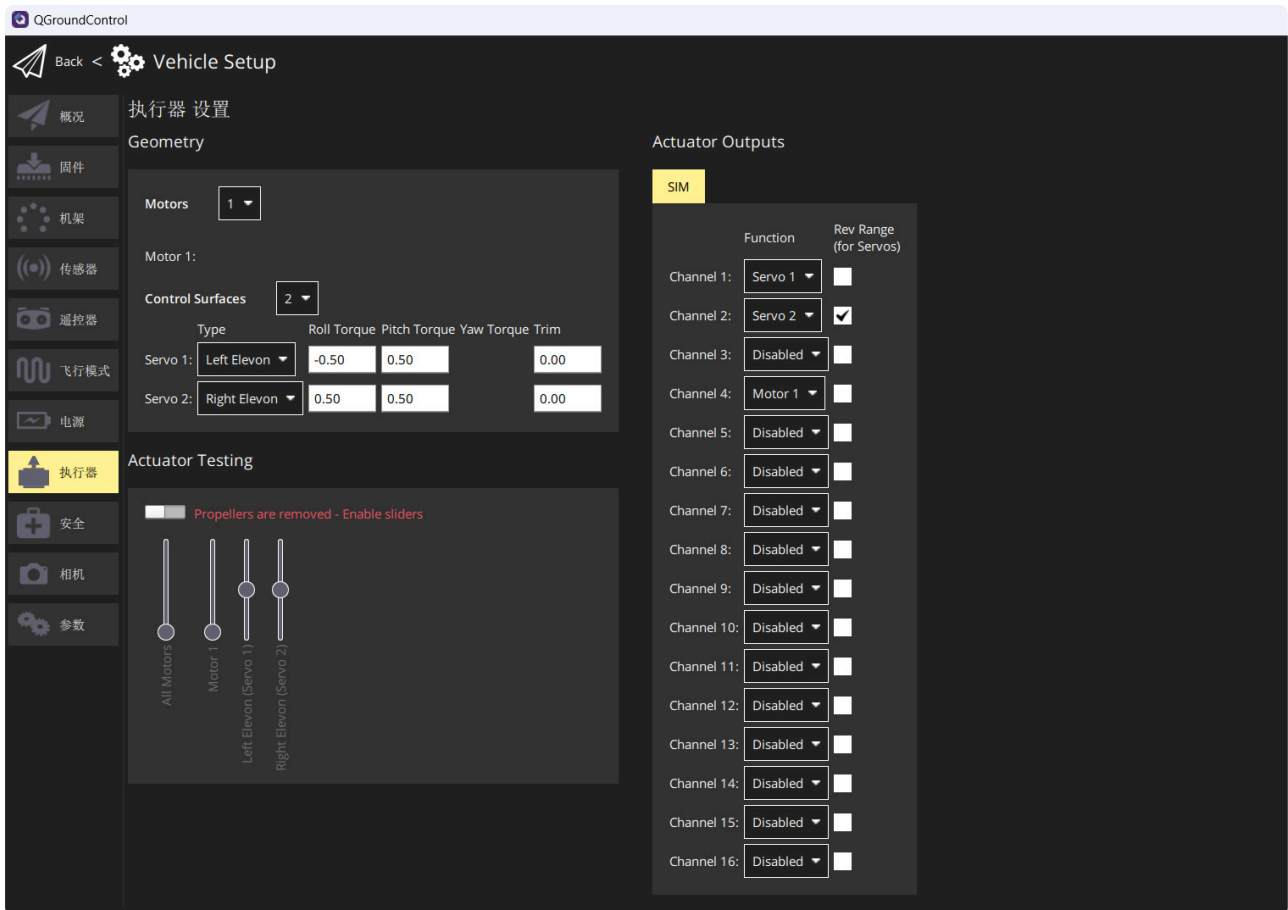
注解

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版本固件进行飞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 [Wing_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，并且将UAVCAN设置为Disabled，即可正常仿真。

- 概况
- 固件
- 机架
- 遥控器
- 飞行模式
- 电源
- 执行器**
- 安全
- 相机
- 参数

执行器 设置

Geometry

Motors 1 ▾

Motor 1:

Control Surfaces 2 ▾

Type	Roll Torque	Pitch Torque	Yaw Torque	Trim
Servo 1: Left Elevon ▾	-0.50	0.50		0.00
Servo 2: Right Elevon ▾	0.50	0.50		0.00

Actuator Testing

Propellers are removed - Enable sliders

All Motors

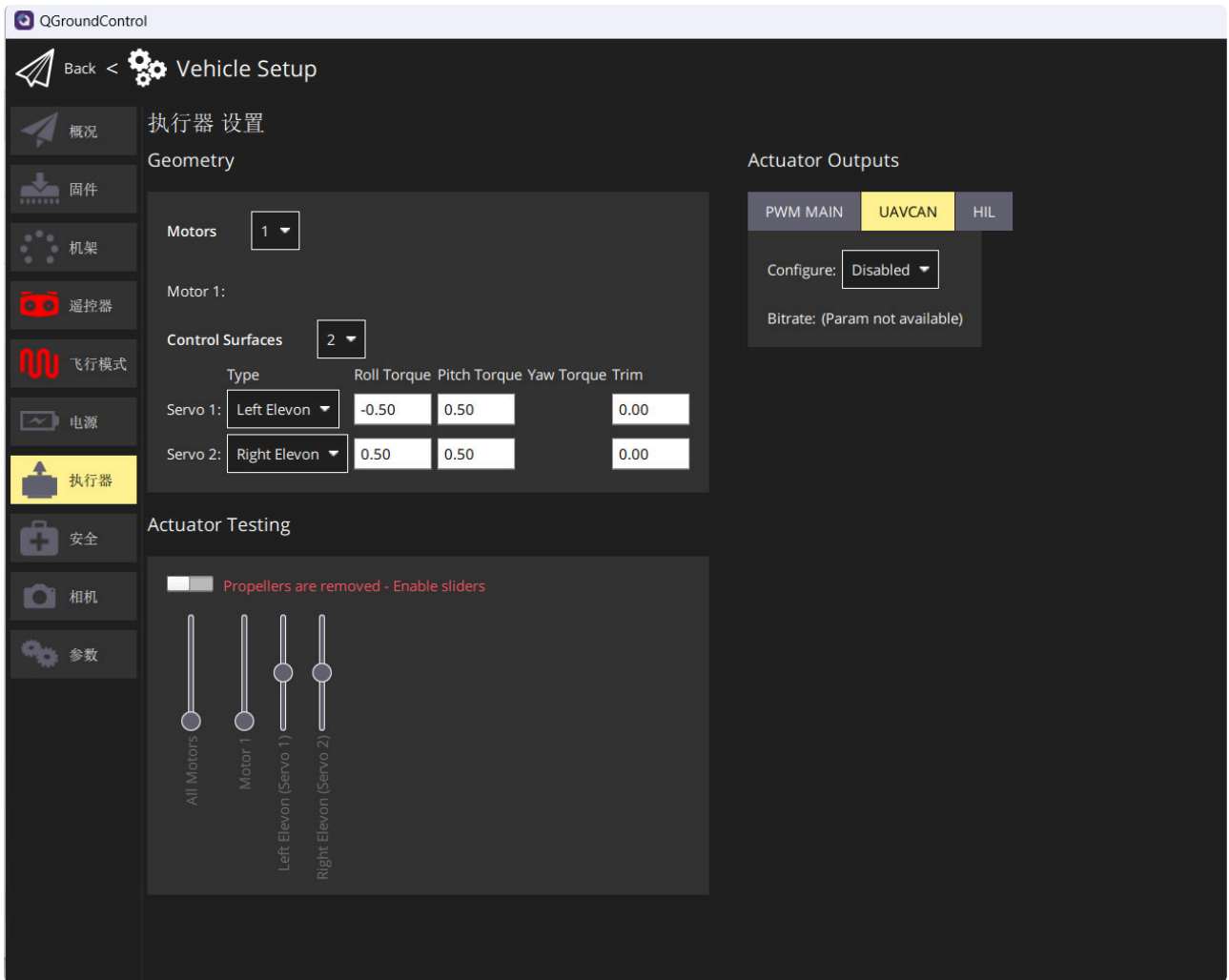
Motor 1

Left Elevon (Servo 1)

Right Elevon (Servo 2)

Actuator Outputs

	PWM MAIN	UAVCAN	HIL
Channel 1:	Servo 1 ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 2:	Servo 2 ▾	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 3:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 4:	Motor 1 ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 5:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 6:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 7:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 8:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 9:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 10:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 11:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 12:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 13:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 14:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 15:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Channel 16:	Disabled ▾	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Q2.关于执行航线任务时，模型卡在起飞跑道上的问题



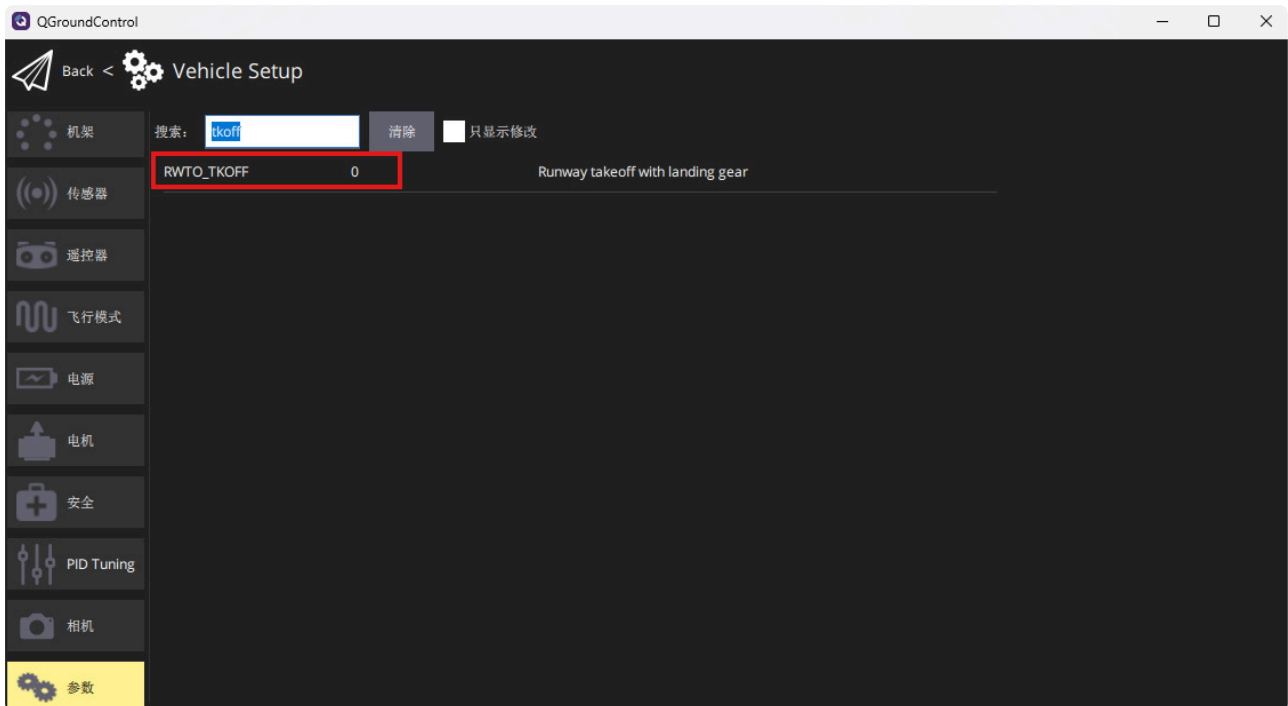
A2.

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：

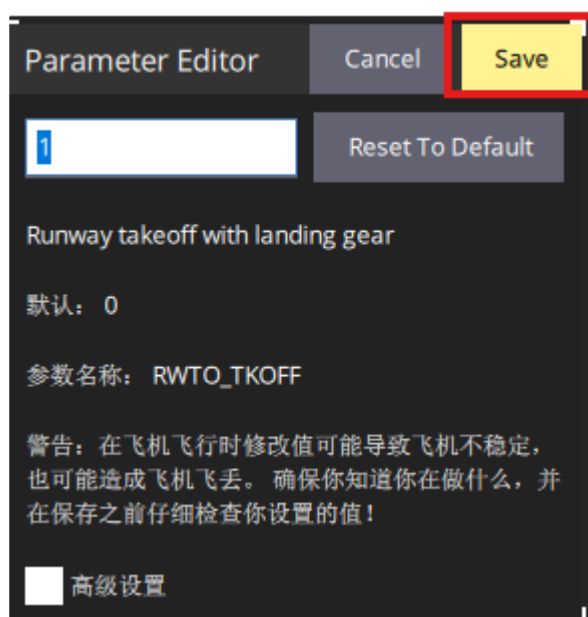
启动软件在环脚本或硬件在环脚本，使QGroundControl自动连接上PX4控制器。

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