

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

基于系统模板的高精度无人船模型设计及验证（DLL生成及SIL/HIL实验）（仅限完整版及以上版本）

1.2 实验目的

将Simulink文件编译生成无人船的DLL模型文件；并将生成的无人船模型导入平台进行软硬件在环仿真测试，通过本例程熟悉平台无人船模型的使用。

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](#)

该模型完成了PX4中无人船动力学、运动学部分建模，实现的基于PX4的无人船软硬件在环仿真效果满足无人船的基本运动特性

载具的基本动力学特性

无人艇的六自由度摇荡运动，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，而往复线性运动称为荡动，往复转动称为摇动。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



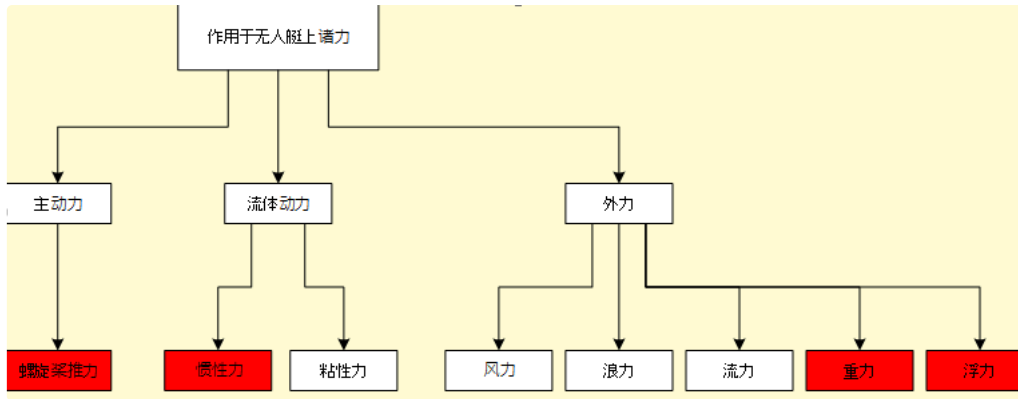
$O\xi\eta\zeta$ 为固定于地球表面的惯性坐标系（站心观测坐标系），取作全局坐标系，将坐标系建立在海平面上，原点 O 选海中任意一点，规定 ζ 轴指向正北， η 轴指向正东， ζ 轴指向地心，且该坐标系固定不动，用来描述无人艇的位置和姿态。

$Gxyz$ 为固定于无人艇上的机体坐标系（运动观测坐标系），随无人艇运动，原点取无人艇的重心处，规定 x 轴指向船艏， y 轴指向右舷， z 轴指向龙骨，用来描述无人艇的速度、加速度等运动状况。

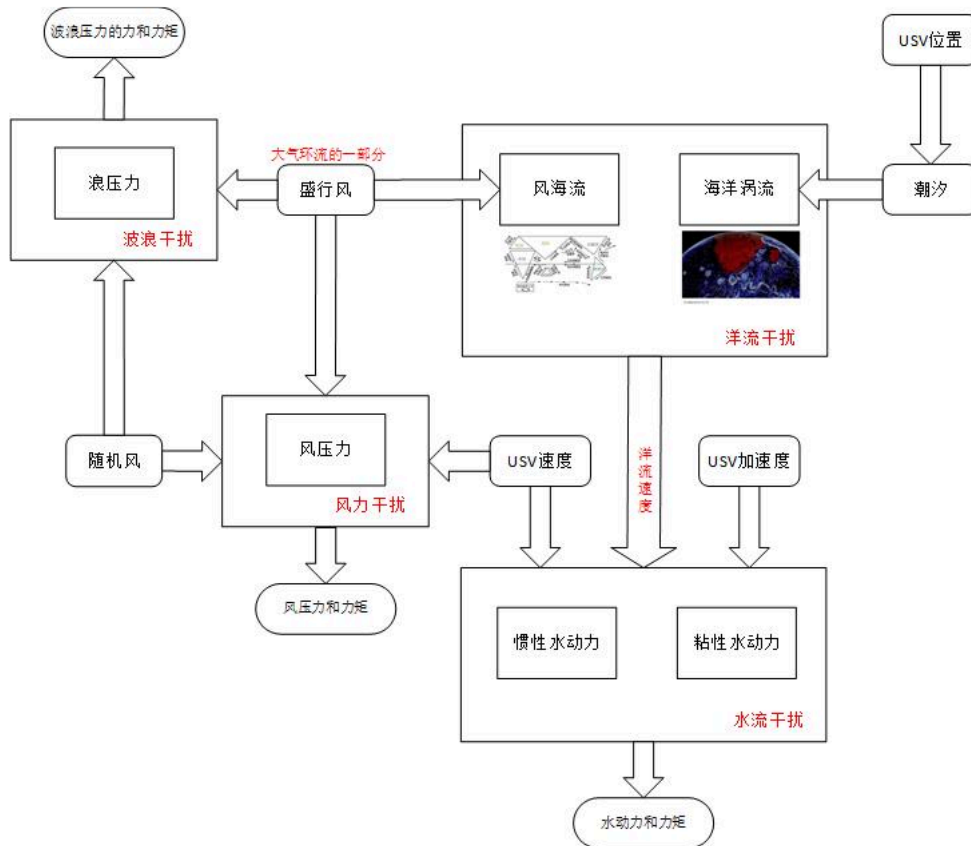
力和力矩合成

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。

无人艇在海上航行时，作用于无人艇上的力和力矩分为三部分，主要包括流体动力、主动力、外力，其构成如图所示。本例程提供的模型仅模拟了图中标红的几个作用力模块，输出均为机体坐标系下各轴向上的力和力矩，相加得到合力和合力矩



如需进一步精细化模型，可以根据如下图的各个作用力之间的关系添加相应的模块：



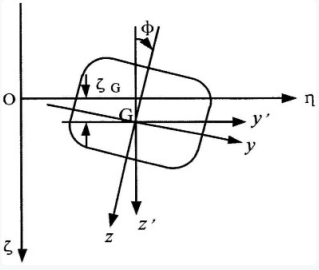
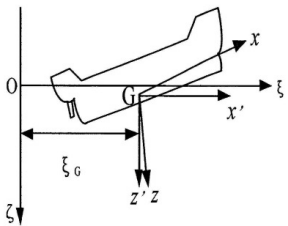
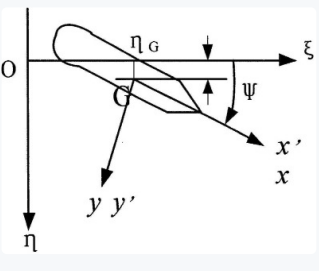
运动的六自由度分解

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）。

对于一艘细长且左右对称的无人艇来说，将六自由度的运动分成两组，即一组是横荡、横摇、艏摇，称之为横向运动；另一组是纵荡和垂荡，称之为纵向运动。纵荡运动需要单独考虑，同一组之间的摇荡运动相互关联即为耦合，而不同组之间的摇荡运动认为是相互不影响的，使得分析问题可以大为简化。

如下表所示，本例中的无人艇主要考虑纵荡和艏摇两个运动自由度，依赖两个后置螺旋桨驱动和转向，与差速轮小车的运动模式相似。

运动自由度	坐标轴	运动学分析
纵荡 (Surge)	前向/后向 (Fore/Aft: x轴)	当两个后置螺旋桨以相同的速度顺时针方向旋转时，产生的推力使小艇向前运动。小艇在机体x轴的速度变化会改变x轴的惯性水动力
横荡 (Sway)	左/右 (Port/Starboard: y轴)	需要波浪风干扰等外部因素影响
垂荡 (Heave)	上/下 (Up/Down: z轴)	需要波浪风干扰等外部因素影响

运动自由度	坐标轴	运动学分析
横摇 (Roll)	 <p>绕横轴转动 (Lateral Axis: x轴)</p>	需要波浪风干扰等外部因素影响
纵摇 (Pitch)	 <p>绕纵轴转动 (Longitudinal Axis: y轴)</p>	需要波浪风干扰等外部因素影响
方向/艏摇 (Yaw)	 <p>绕垂直轴转动 (Vertical Axis: z轴)</p>	两个后置螺旋桨差速产生的扭矩 (Torque) 转弯半径的计算方法和差速小车相同，可以达成原地转弯 角速度变化会改变z轴的惯性水动力矩

注意，惯性水动力的计算把水面下的船体视为一个椭圆

■ 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](#))

由于PX4中没有针对差速小船的机架文件，这里用差速小车的机架aion_robotics_r1_rover

代替，其在\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d\airframes\

50003_aion_robotics_r1_rover中定义如下：

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

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

执行rc.rover_defaults脚本，它包含了无人潜水器的默认参数设置，可以用来设置一些基本的系统参数和增益。rc.rover_defaults中的关键代码如下：

```
set PWM_OUT 1234
```

通道3和4分别用于转向和推力。通道1和2被包括在内，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）。

set MIXER generic_diff_rover

设置混控器（mixer）为generic_diff_rover（这里用了差动小车的混控文件，该混控器用于控制任何差速驱动的载具，即左右电机分别独立驱动，可以原地转向。）。

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\  
generic_diff_rover.main.mix，  其将推力和偏航力矩映射到左右两个电机
```

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

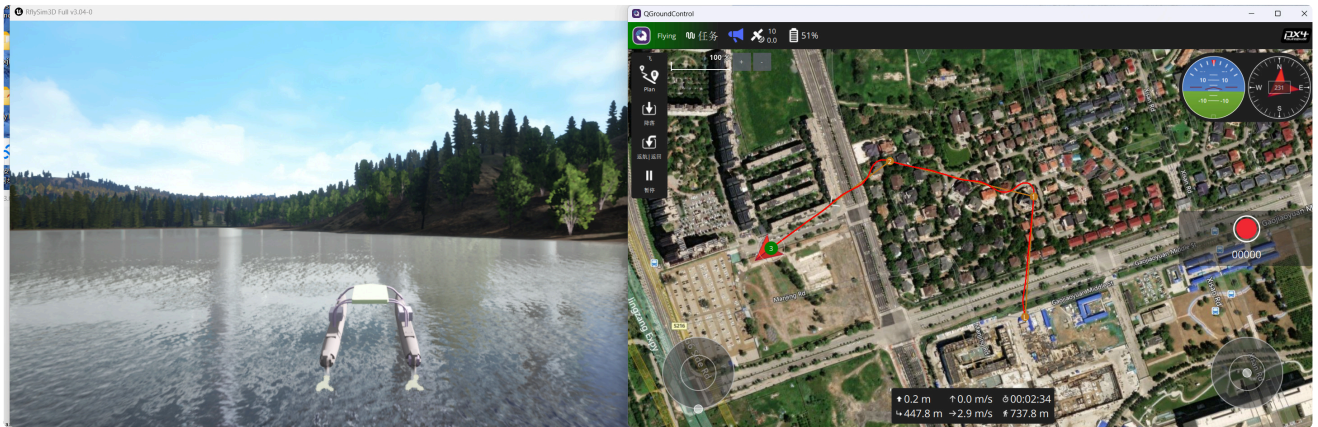
关键参数

参数名	参数	值
三维样式	ModelParam_3DType	int16(610)
电机数量	ModelParam_uavMotNumbs	int8(2)
无人船质量	ModelParam_uavMass	227
转动惯量	ModelParam_uavJxx	181.42
转动惯量	ModelParam_uavJyy	408.203
转动惯量	ModelParam_uavJzz	495.037
转动惯量矩阵	ModelParam_uavJ	[ModelParam_uavJxx,0,0;0,ModelParam_uavJyy,0;0,0,ModelParam_u
重心位置	ModelPara_coborigin	[0;0;0]
水的密度	BoatParam_waterDensity	1000
浮心的位置	BoatParam_cf	0.1
重心位置	BoatParam_cg	0.1
船的宽度	BoatParam_width	0.8
船侧边沿的斜率	BoatParam_widSlope	pi/4
船的长度	BoatParam_len	1.5
船侧边沿的斜率	BoatParam_lenSlope	pi/6
阻力系数	ModelParam_uavCd	[2 200 200]
阻力矩系数	ModelParam_uavCCm	[1 1 1]*200
空气动力中心	ModelParam_uavDearo	-0
左侧浮筒位置	USVPara.Pose_futong_left	[-0.4; 1.03; 0.2]
右侧浮筒位置	USVPara.Pose_futong_right	[-0.4; -1.03; 0.2]
船体总质量	USVPara.zw	562.1
船体半径	USVPara.HullRadius	0.213

参数名	参数	值
圆筒相对于船体的质心的高度	USVPara.z_cb	0.2
船体长度	USVPara.BoatLength	4.9
船体宽度	USVPara.BoatWidth	2.4
船体长度划分段数	USVPara.LengthN	1
水的密度	USVPara.WaterDensity	997.8
惯性矩阵	USVPara.Ma	[...[5 0 0 0 0];...[0 5 0 0 0];...[0 0 0 1 0 0];...[0 0 0 0 1 0 0];...[0 0 0 0];...[0 0 0 0 1];...]
阻尼矩阵	USVPara.Dmat	[...[30 0 0 0 0];...[0 300 0 0 0];...[0 0 300 0 0];...[0 0 0 600 0 0];...[0 600 0];...[0 0 0 0 300];...]

2. 实验效果

实现水面无人艇DLL模型文件生成，以及完成水面无人艇软硬件在环仿真。



3. 文件目录

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\3.CustExps\e2_USV](#)

文件夹/文件名称	说明
USV.slx	无人船模型文件。
USV_HITL.bat	硬件在环仿真批处理文件。
USV_SITL.bat	软件在环仿真批处理文件。
GenerateModelDLLFile.p	DLL格式转化文件。
USV_init.m	动力学模型相关参数。
MavLinkStruct.mat	MavLink数据结构体mat文件
Modify.params	仿真前需修改的飞控参数文件

4. 运行环境

4.1 软件要求

Windows 10及以上版本；RflySim工具链；MATLAB 2022A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

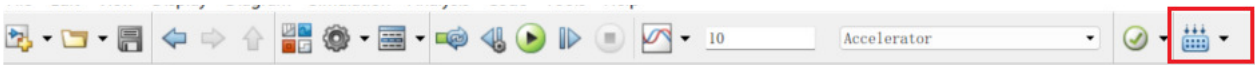
Step 1：编译模型

在Matlab中打开“USV.slx” Simulink 文件，点击Build Model 按钮生成代码。

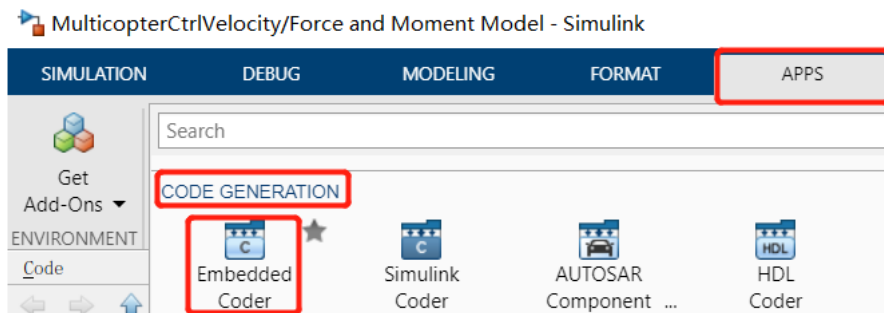
编译配置可参考 [4.RflySimModel\0.ApiExps\2.UserDefinedC++\2.GenC++\Readme.pdf](#)

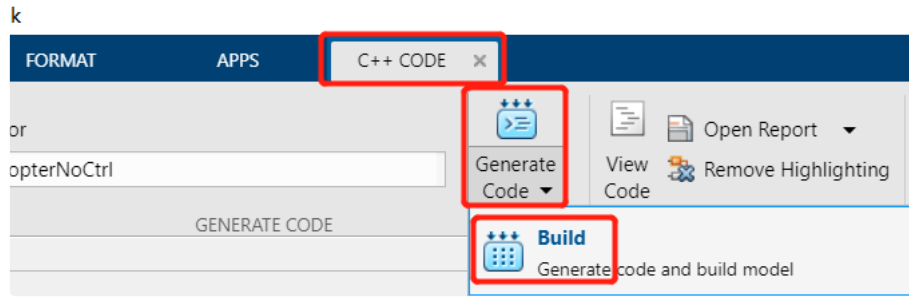
名称	修改日期	类型	大小
GenerateModelDLLFile.p	2024/6/20 17:07	MATLAB.p.23.2.0	7 KB
MavLinkStruct.mat	2022/7/14 16:53	MATLAB Data	5 KB
Modify.params	2024/7/30 17:23	PARAMS 文件	1 KB
MulticopterModel.zip	2024/7/30 17:28	压缩(zipped)文件...	148 KB
RflySimModelLab.slx	2022/9/4 20:33	Simulink Model	89 KB
USV.dll	2024/7/30 17:29	应用程序扩展	266 KB
USV.slx	2024/7/30 17:27	Simulink Model	137 KB
USV_HITL.bat	2024/7/30 16:02	Windows 批处理...	6 KB
USV_init.m	2024/7/30 15:28	Objective C 源文件	8 KB
USV_SITL.bat	2024/7/30 14:56	Windows 批处理...	6 KB
Readme.docx	2024/7/30 17:38	Microsoft Word ...	7,370 KB

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。



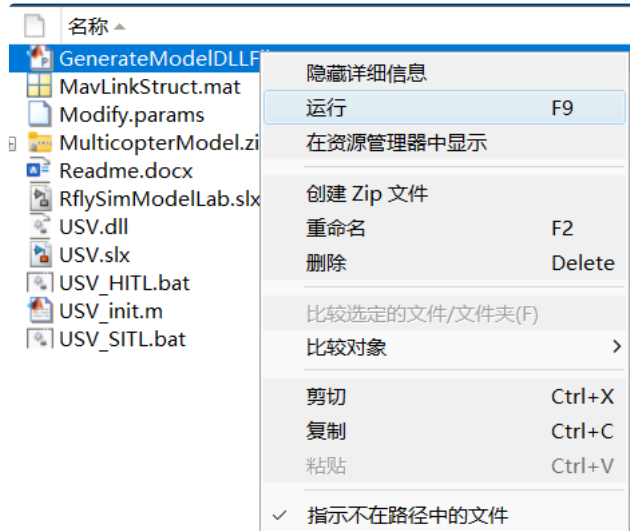
对于2019b及之后版本，点击APPS - CODE GENERATION - Embedded Coder才能弹出代码生成工具栏，在其中如下图所示点击“C++CODE” - “Generate Code” - “Build” 按钮就能编译生成代码。





Step 2: 生成DLL文件

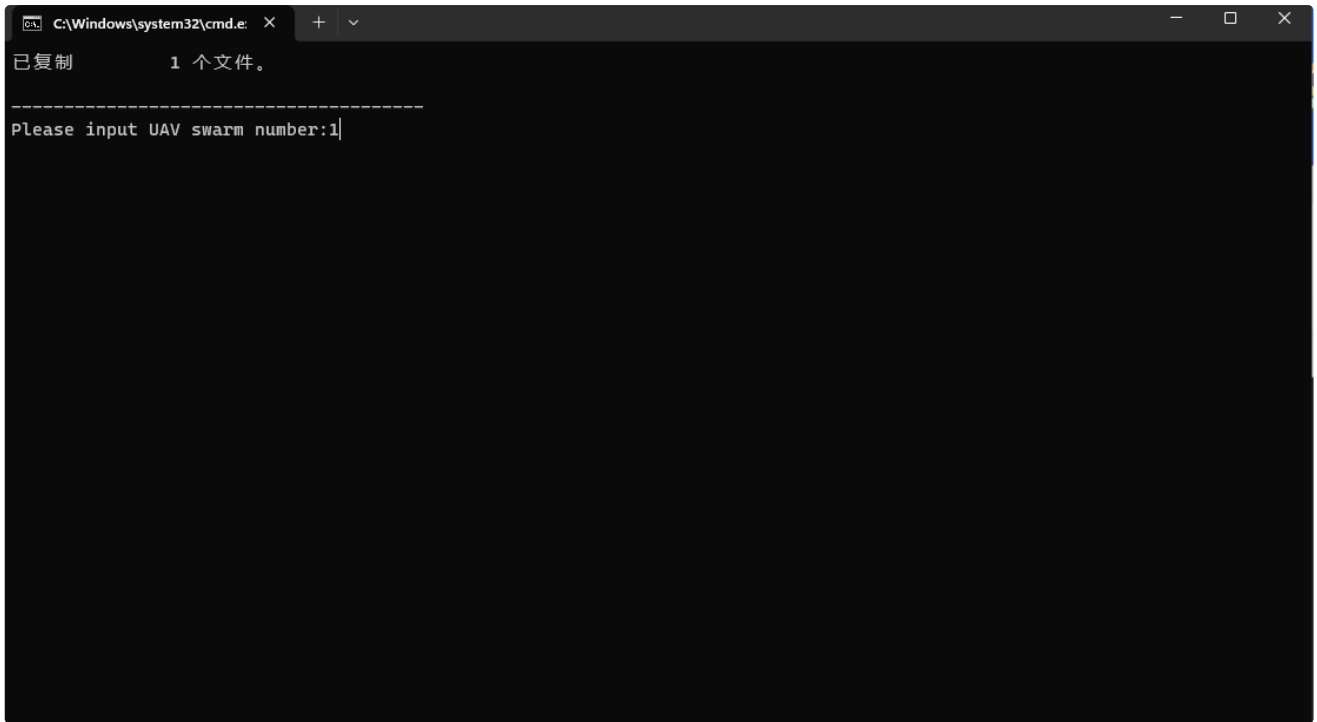
模型编译完成后，在 matlab 中右键 “GenerateModelDLLFile.p” 文件，点击运行，生成 DLL 文件。



5.2. 必做实验：软件在环仿真

Step 1: 启动仿真

双击运行 “USV_SITL.bat” 批处理文件，在弹出的终端窗口中输入 1，启动一架无人船的软件在环仿真。

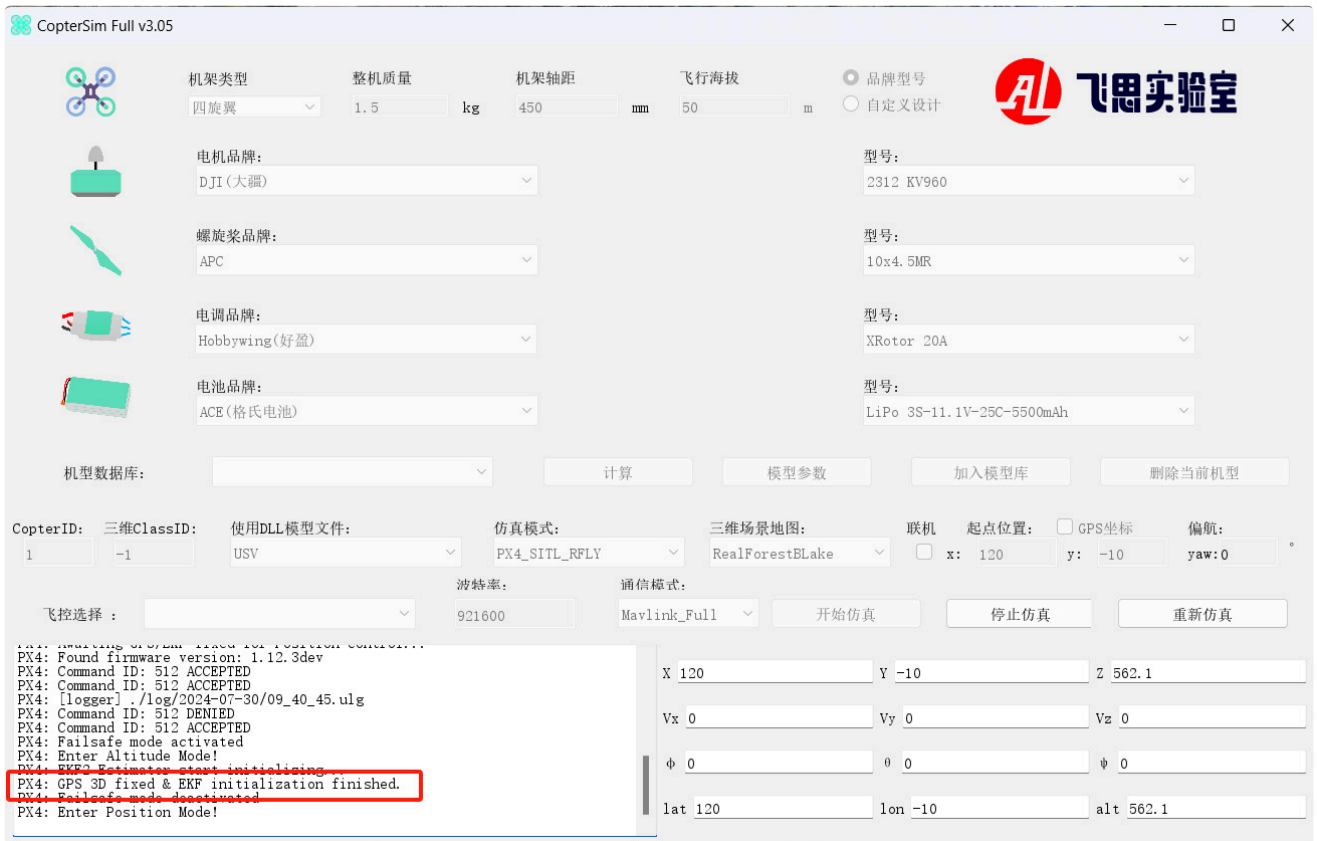


注意，在“USV_SITL.bat”软件在环的脚本文件中需要设置对应机架

set PX4SITLFrame=boat

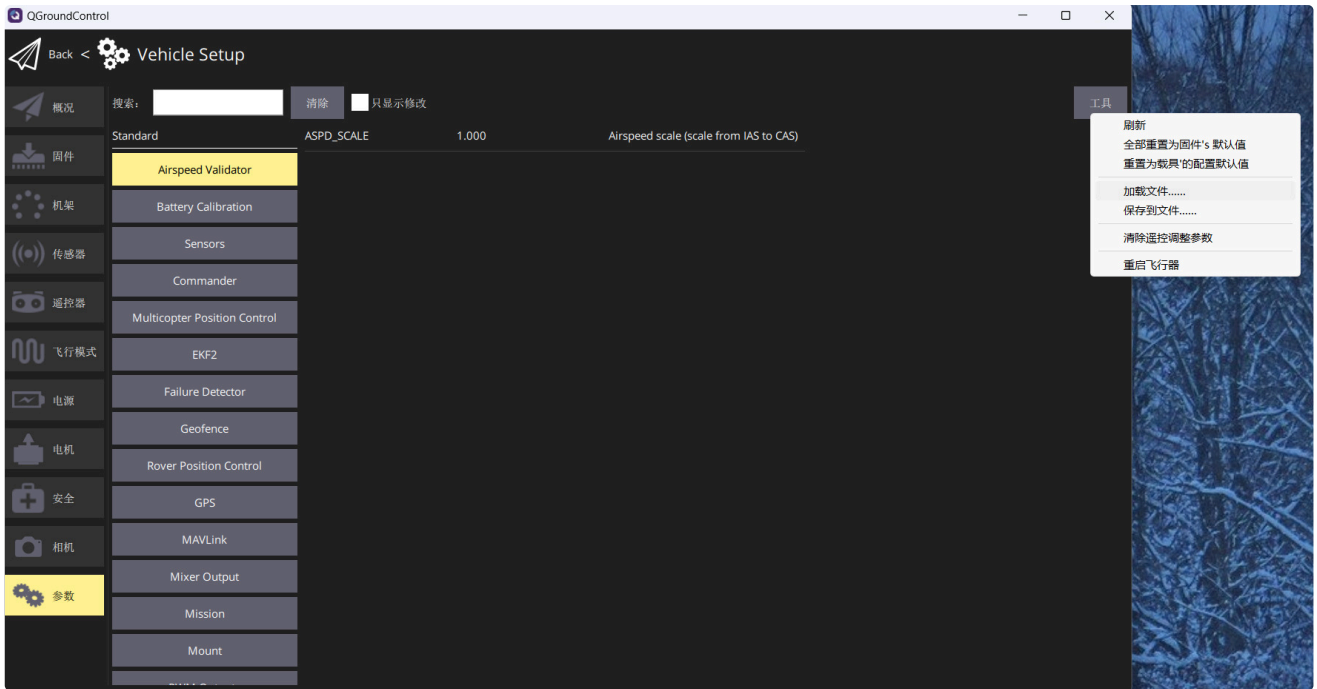
Step 2: 等待初始化完成

等待 CopterSim 中显示连接上 RflySim3D。




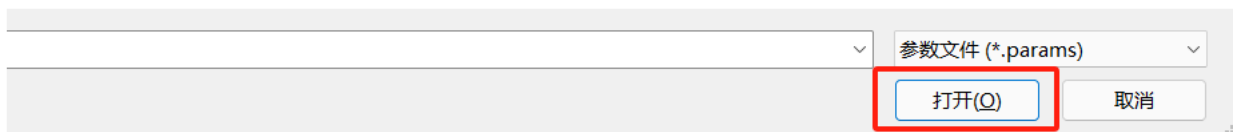
Step 3: 配置调谐参数

进入QGC的设置页面，依次点击QGC的“参数”、“工具”、加载文件。



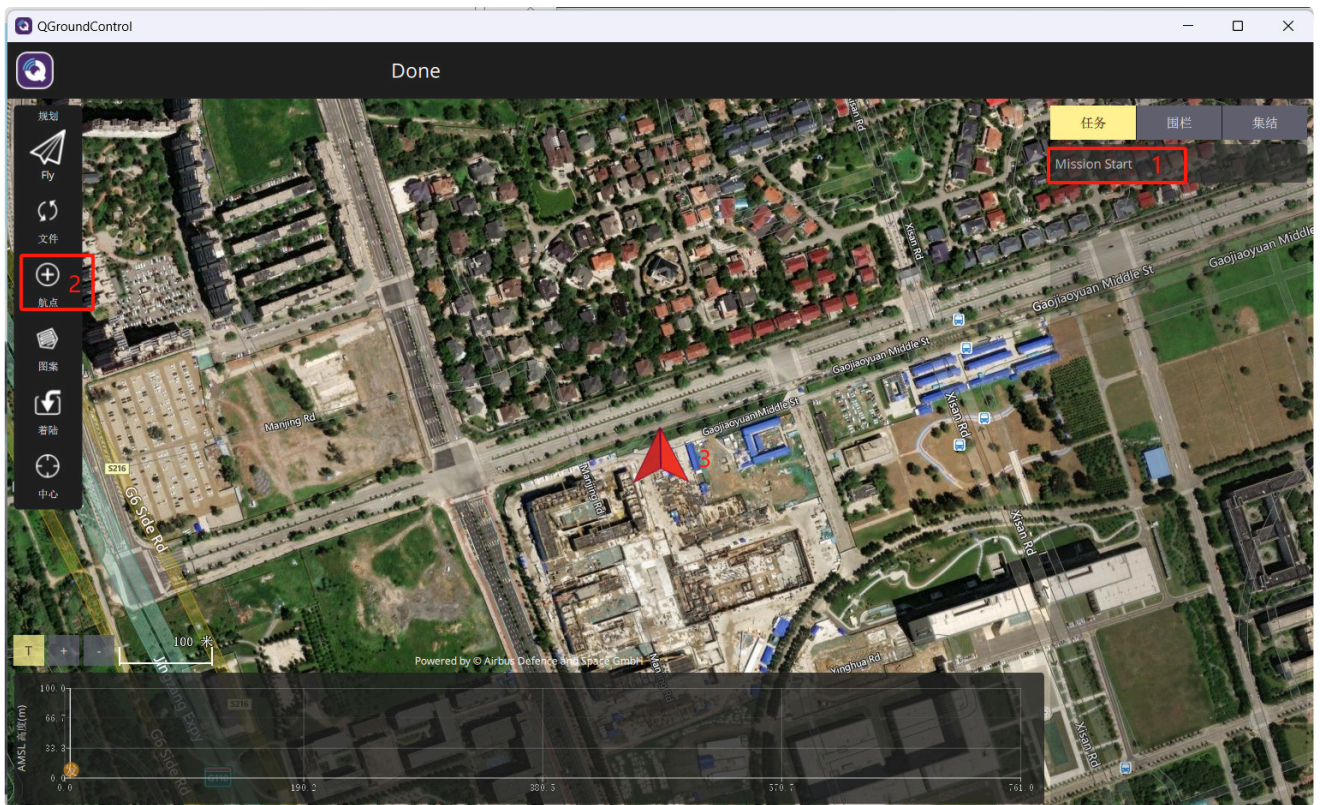
定位到例程文件夹，选择Modify.params参数文件并打开后，点击确认修改参数。

名称	修改日期	类型	大小
 Modify.params	2024/7/30 17:23	PARAMS 文件	1 KB

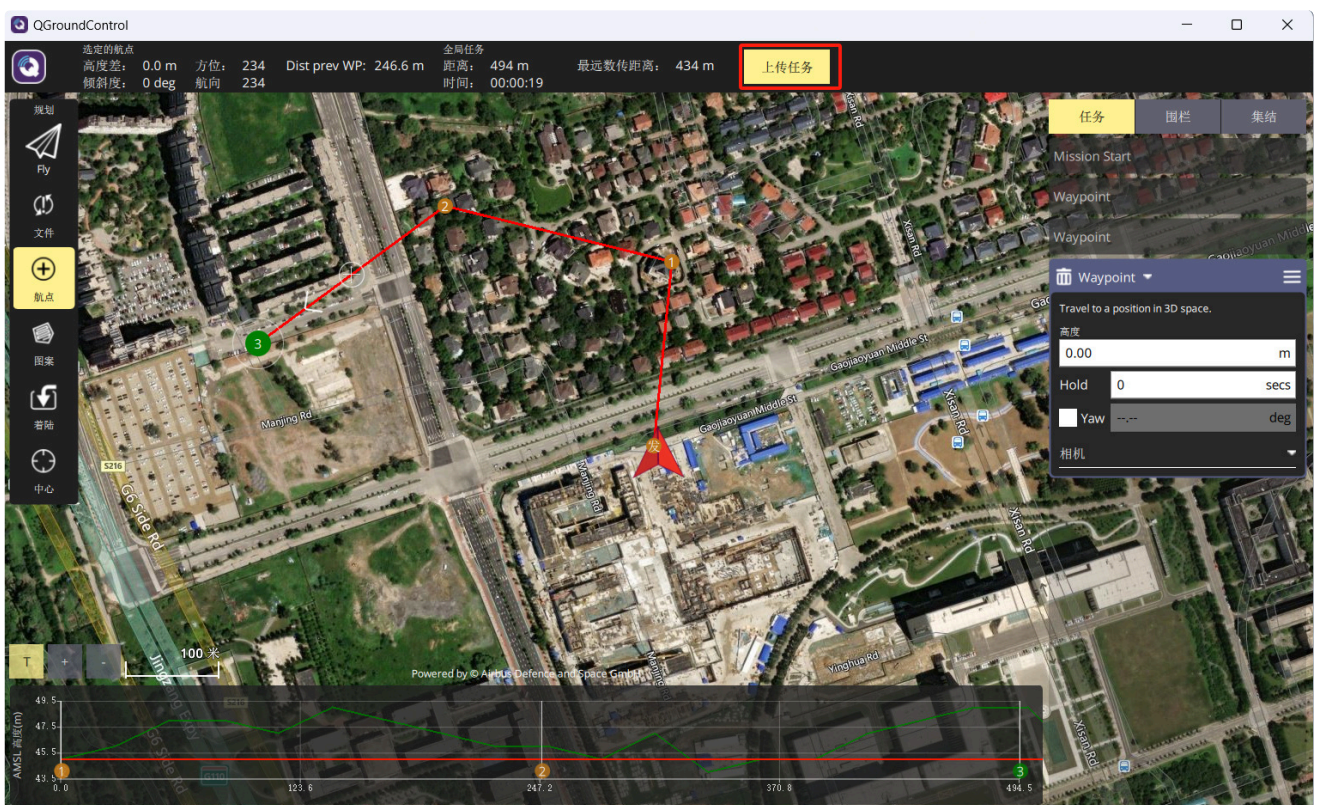


Step 4: 上传航线任务

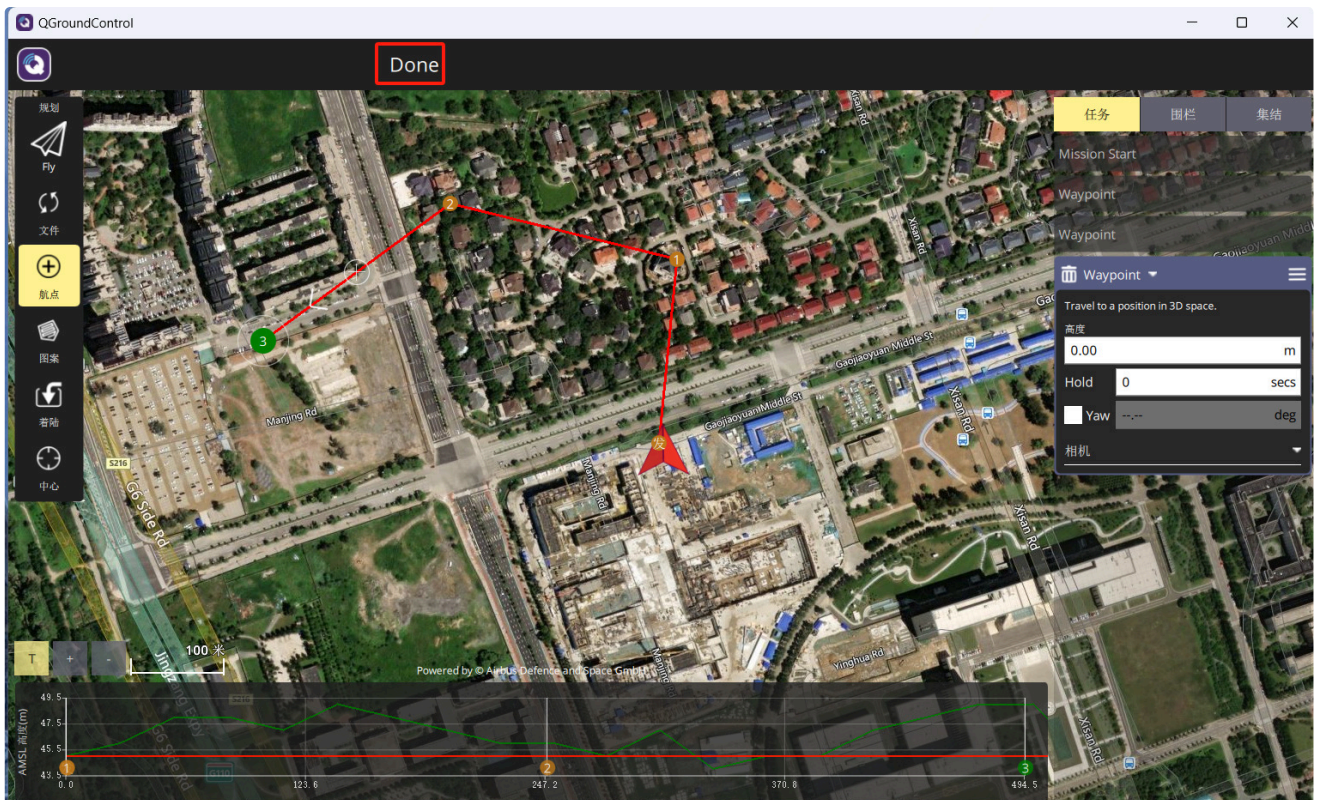
依次点击“Mission Start”、航点以及QGC界面上任意点，设置无人船的期望航点。



设置完成期望航点后，上传任务。

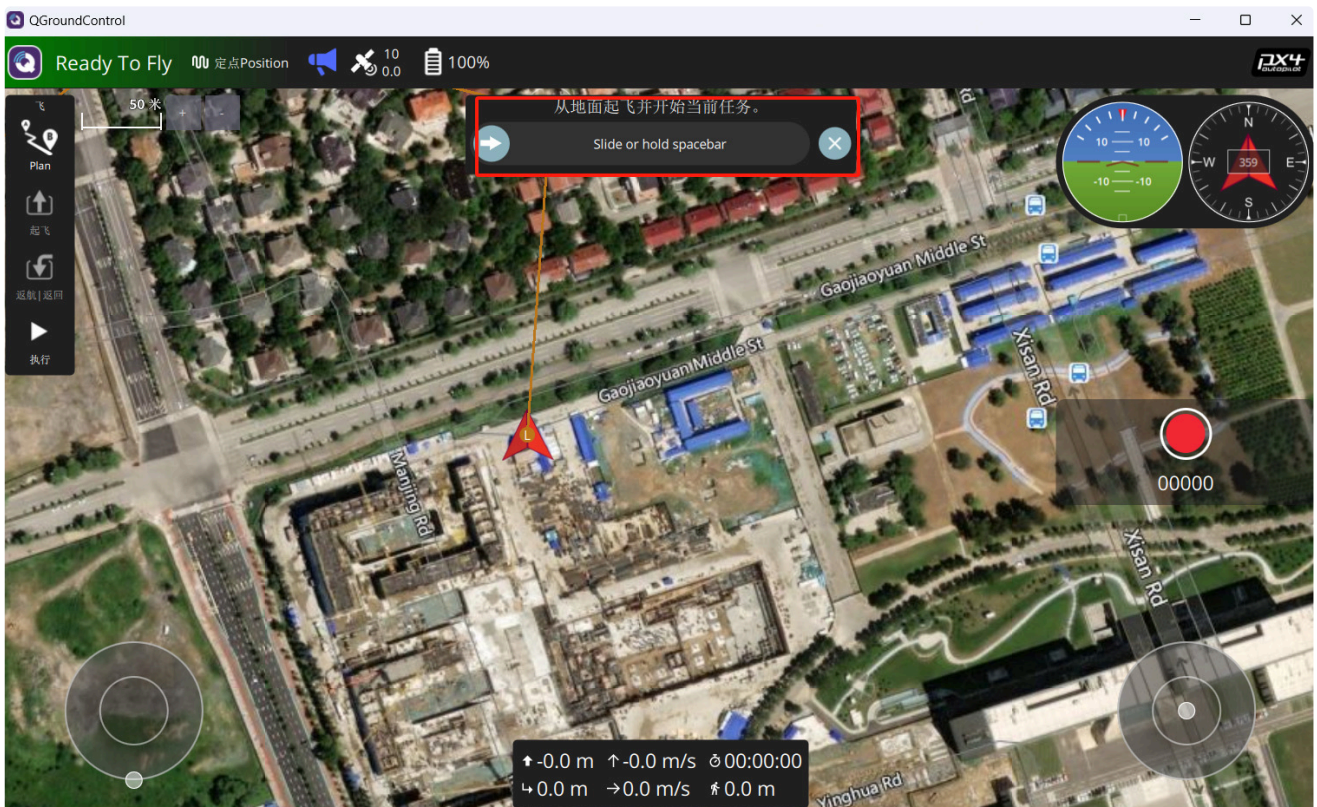


任务上传成功。

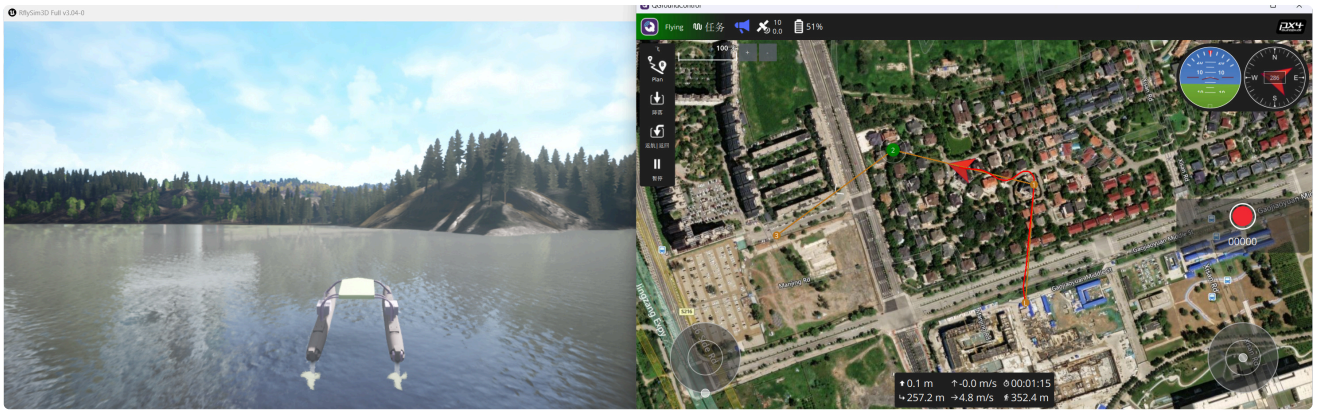


Step 5: 观测结果

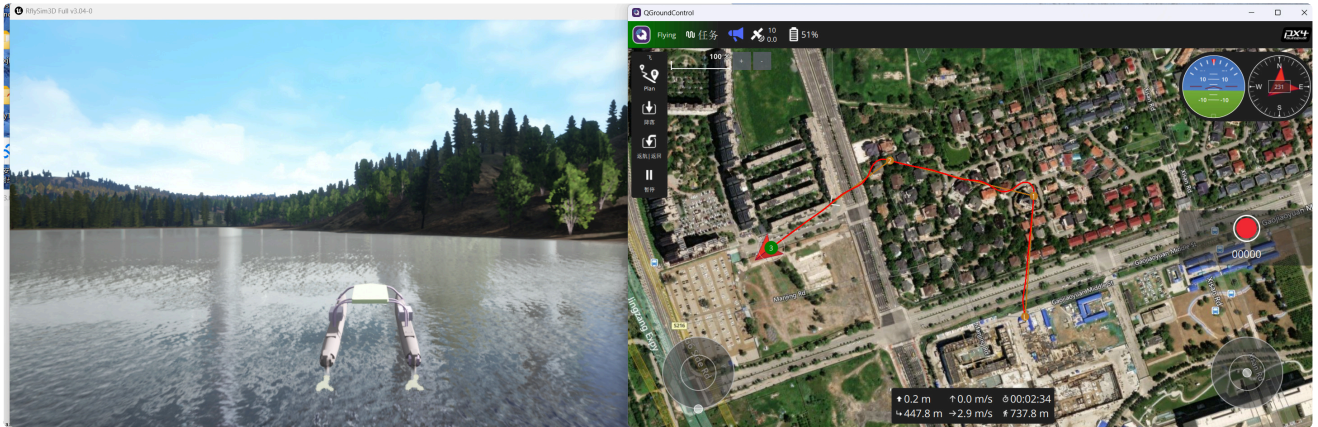
滑动滑块解锁，开始当前任务。



在RflySim3D中观察仿真效果，可以看到无人船是按照航迹前行的。（注：航路点切换时会有轨迹偏移的现象是因为无人船类似于阿克曼小车，存在拐弯半径，所以在切换航路点时无人船需要一定位移才能把期望航向切换过来，属于正常现象。）



无人船完成期望航点飞行。



5.3. 选做实验：硬件在环仿真

Step 1: 连接飞控

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）。

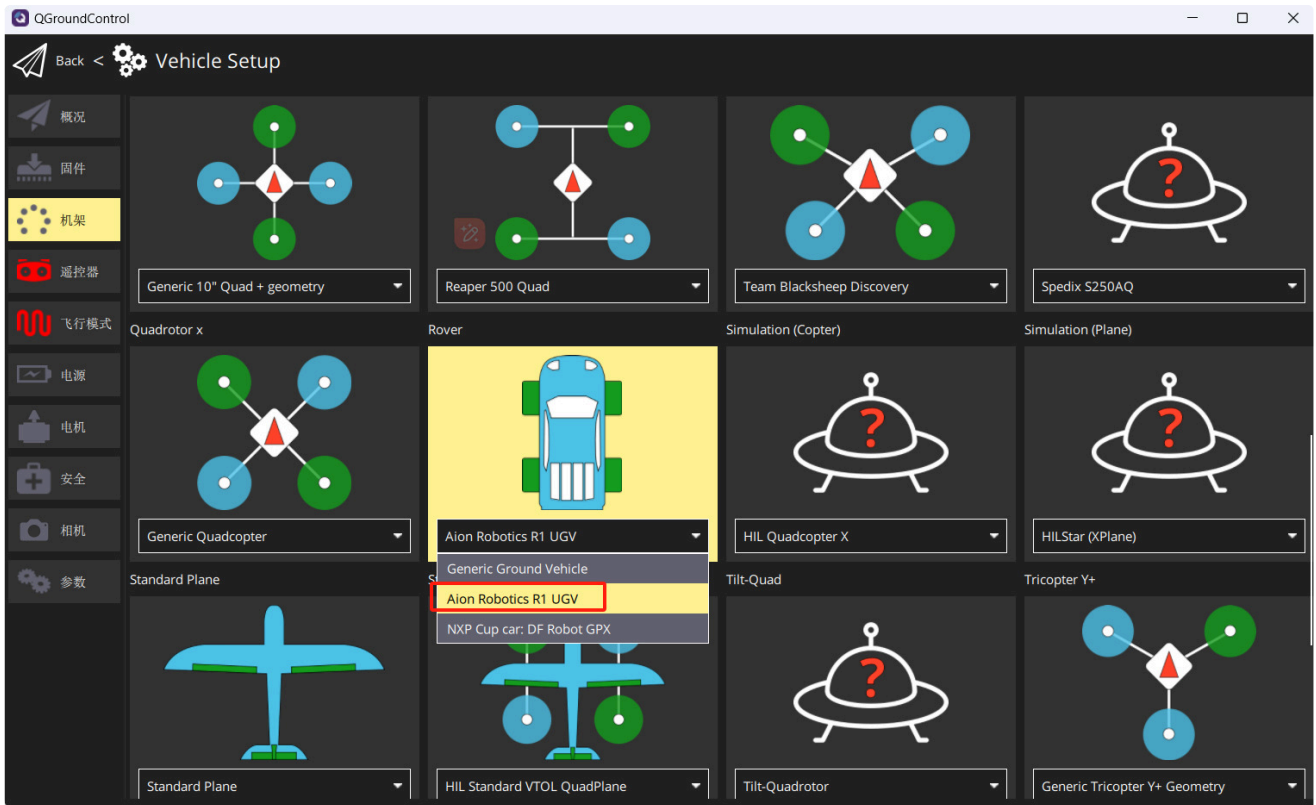


Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

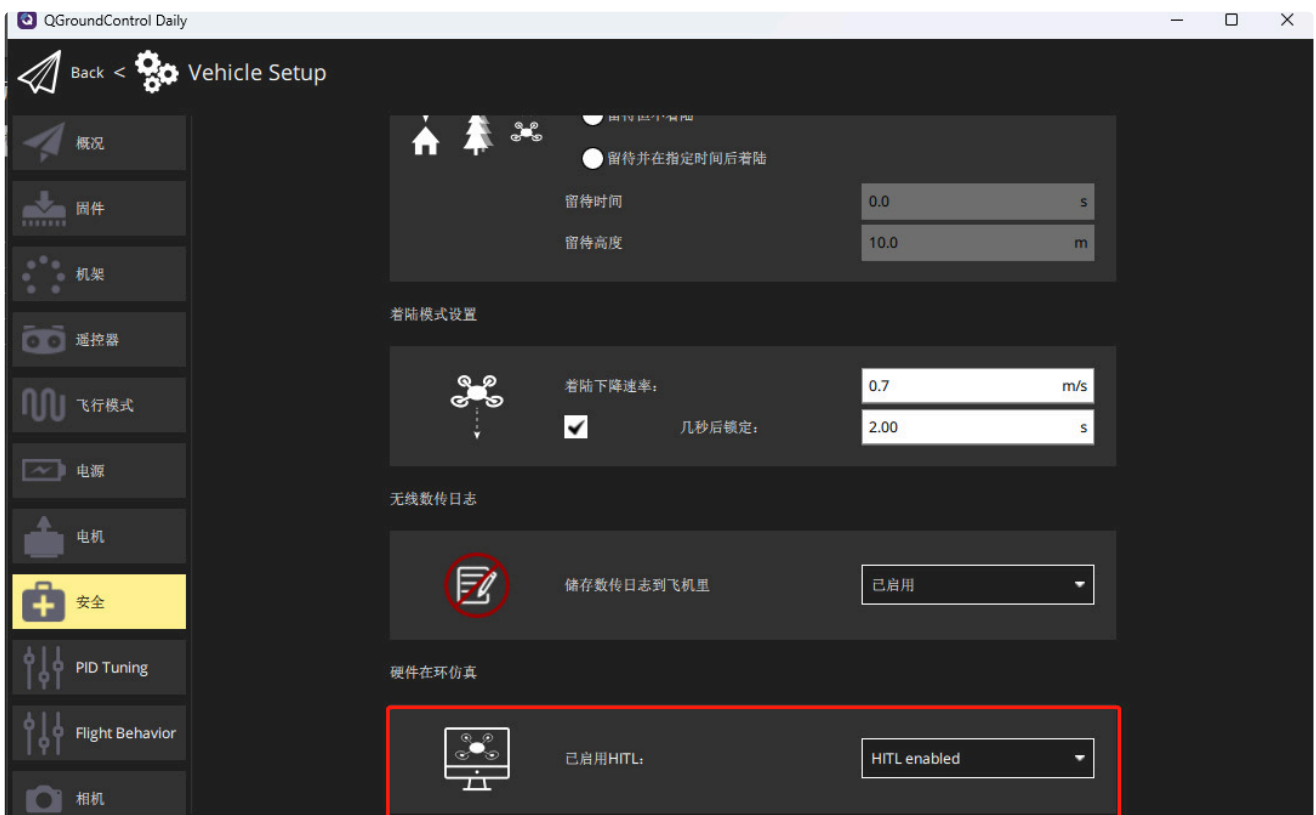
3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB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

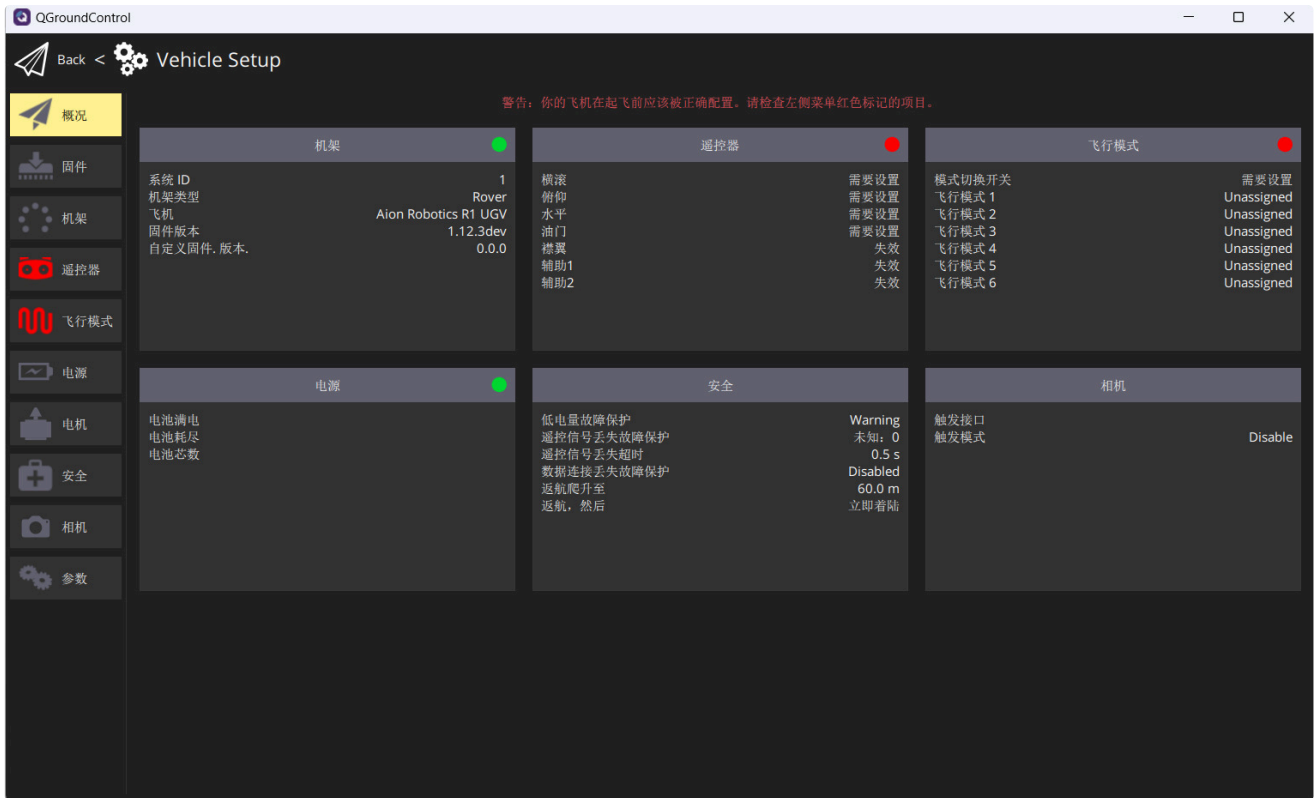
在机架界面设置机架型号为“aion_robotics_r1_rover”，设置完毕后点击右侧“应用并重启”。



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。





Step 4: 启动仿真

右键以管理员身份运行“USV_HITL.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5，启动一架飞机的硬件在环仿真。

GenerateModelDLLFile.p	2024/6/20 17:07	MATLAB.p.23.2.0	7 KB
MavLinkStruct.mat	2022/7/14 16:53	MATLAB Data	5 KB
Modify.params	2024/7/30 17:23	PARAMS 文件	1 KB
MulticopterModel.zip	2024/7/30 17:28	压缩(zipped)文件...	148 KB
Readme.docx	2024/7/30 18:14	Microsoft Word ...	20,925 KB
RflySimModelLab.slx	2022/9/4 20:33	Simulink Model	89 KB
USV.dll	2024/7/30 17:29	应用程序扩展	266 KB
USV.slx	2024/7/30 17:27	Simulink Model	137 KB
USV_HITL.bat	2024/7/30 16:02	Windows 批处理...	6 KB
USV_init.m	2024/7/30 15:28	Objective C 源文件	8 KB
USV_SITL.bat	2024/7/30 14:56	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

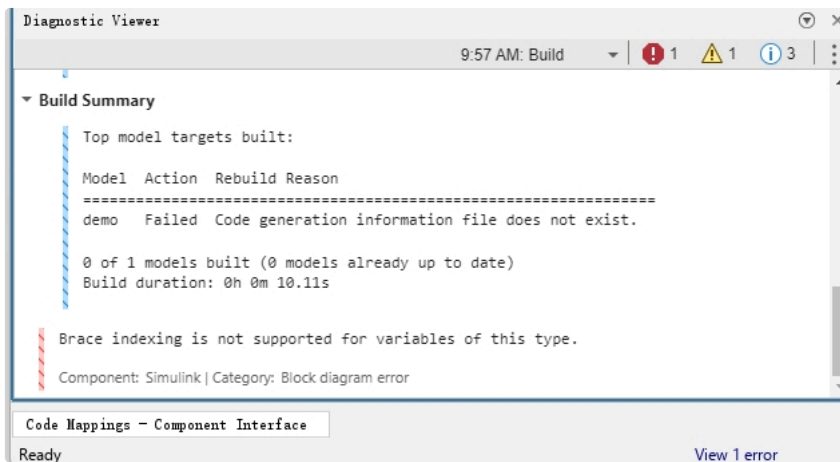
之后测试步骤与软件在环仿真的Step3到Step5相同，依次导入Modify.params参数文件、上传航迹任务（硬件在环支持返航），运行之后观察无人船能否按照期望轨迹航行。

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. PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf中的Simulink建模模板介绍
4. PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf中DLL/SO模型与通信接口的数据协议部分
水面无人艇的建模与运动特性仿真 - 豆丁网
5. (docin.com)

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

