

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

基于系统模板的精细化无人车模型设计及验证（代码生成及软硬件在环仿真）（仅限完整版及以上版本）

1.2 实验目的

在Matlab将Simulink文件编译生成精细化无人车的DLL模型文件；并对生成的精细化无人车模型进行软硬件在环仿真测试，通过本例程熟悉平台精细化无人车模型的使用。

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](#)

软/硬件在环仿真（SIL/HIL）的实现

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[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。底层控制器是实际控制飞行器硬件（如电机和传感器）的部分。
- 三维引擎：这部分负责生成和处理仿真的视觉效果，提供仿真环境的三维视图，使用户能够视觉上跟踪和分析飞行器的运动。
- 外部控制：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。支持通过UDP_Full、UDP_Simple、MAVLINK_Full、MAVLINK_Simple等链接模式，获取无人机的位置、速度、姿态信息，并对无人机的位置、速度、航向进行控制。

载具的基本动力学特性

精细化小车模型相对于普通的运动仿真模型，增加了对于轮胎的建模，主要包括车轮制动系统和悬架的弹簧-阻尼系统等，所以在精细化小车的运动过程中会考虑更多的自由度。

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。

无人车模型的力和力矩都是四个轮胎的传递到整车的，所以在得到轮胎转速后无法和旋翼模型一样，通过结合升力或转矩系数直接得到力和力矩，需要先从轮胎开始分析，得到单个轮胎的力和力矩，再由此得到整车的力和力矩。精细化小车模型加入车轮制动系统和悬架的弹簧-阻尼系统，求取合力、合力矩的过程中增加了弹簧力、阻尼力等。

运动自由度分解

对精细化小车模型的自由度进行分析：

(1)垂直方向（Z轴方向）的平移运动：车颠簸时，悬架的弹簧和阻尼器会对小车进行缓冲，产生垂直方向的振动。

(2)水平方向（X轴方向）的平移运动：主要由车轮制动系统和驱动系统控制，前进或倒车。

(3)水平方向（Y轴方向）的平移运动：转弯或遇到侧向力，可能发生侧向移动。

(4)绕纵向轴线（X轴）的滚转运动：转弯或遇到侧向力时，车身可能会发生滚动，导致一侧车轮压缩，另一侧车轮伸展。

(5)绕横向轴线（Y轴）的俯仰运动：制动或路面不平，可能会出现俯仰运动，影响车身后部分的高度。

(6)绕垂直轴线（Z轴）的偏航运动：转弯时会发生偏航运动，与车轮转向角度以及路面的摩擦力相关。

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 [\(v1.12\)](#)

本例程中无人车的机架在\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d\airframes\50000_generic_ground_vehicle中定义如下：

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

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

执行.

rc.rover_defaults脚本，它包含了无人车的默认参数设置，可以用来设置一些基本的系统参数和增益。

rc.rover_defaults中的部分代码如下：

```
set PWM_OUT 1234
```

设置混控器（mixer）为rover_generic，小车的混控文件

```
set MIXER rover_generic
```

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\rover_generic.main.mix，其中只用到了PWM2和PWM4；PWM1，PWM3为空混控器。PWM2输出偏航到伺服电机来转向，PWM4输出油门给两个的主动轮电机来变速。

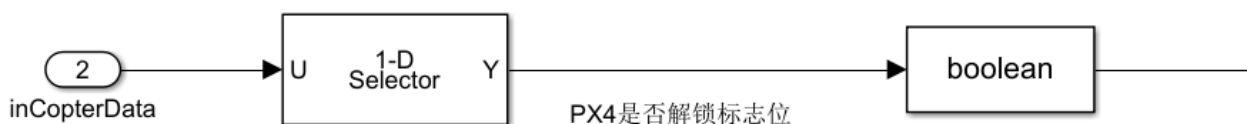
载具模型的整体输入输出和关键参数

输入输出

- 最小模板的输入输出见：[..\..\1.BasicExps\0_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(300051)
初始位置	ModelInit_PosE	[0,0,0]
初始姿态	ModelInit_AngEuler	[0,0,0]
初始经纬度	ModelParam_GPSLatLong	[40.1540302 116.2593683]
原点的海拔高度	ModelParam_envAltitude	-50
地面摩擦	ModelParam_Friction	1
车辆质量	ModelParam_VEH.Mass	5500
前轴质心距	ModelParam_VEH.FrontAxlePositionfromCG	2.3
中轴质心距	ModelParam_VEH.MiddleAxlePositionFromCG	0.9
后轴质心距	ModelParam_VEH.RearAxlePositionfromCG	2.3
迎风面积	ModelParam_VEH.FrontalArea	8.16
悬挂弹簧系数	ModelParam_VEH.Kz	[4.1446e+05,6.1204e+05,6.9848e+05]
悬挂弹簧预紧力	ModelParam_VEH.F0z	[11443,16898,19285]

参数名	参数	值
悬挂减震常数	ModelParam_VEH.Cz	[39578,58445,66700]
悬挂最大高度	ModelParam_Hmax	0.25

2. 实验效果

实现精细化无人车DLL模型文件生成，以及完成精细化无人车软硬件在环仿真。

3. 文件目录

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\3.CustExps\e4_TrailerModelCtrl\1.TrailerModelCtrl](#)

文件夹/文件名称	说明
Trailer.slx	精细化无人车模型文件。
Trailer_HITLRun.bat	硬件在环仿真批处理文件。
Trailer_SITLRun.bat	软件在环仿真批处理文件。
GenerateModelDLLFile.p	DLL格式转化文件。
Trailer_init.m	动力学模型相关参数。

4. 运行环境

4.1 软件要求

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

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

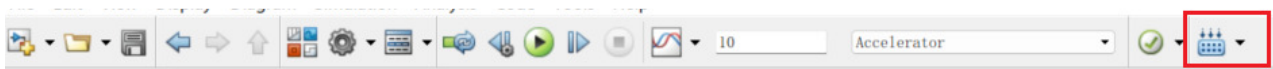
Step 1: 编译模型

打开“Trailer.slx”文件，点击Build Model

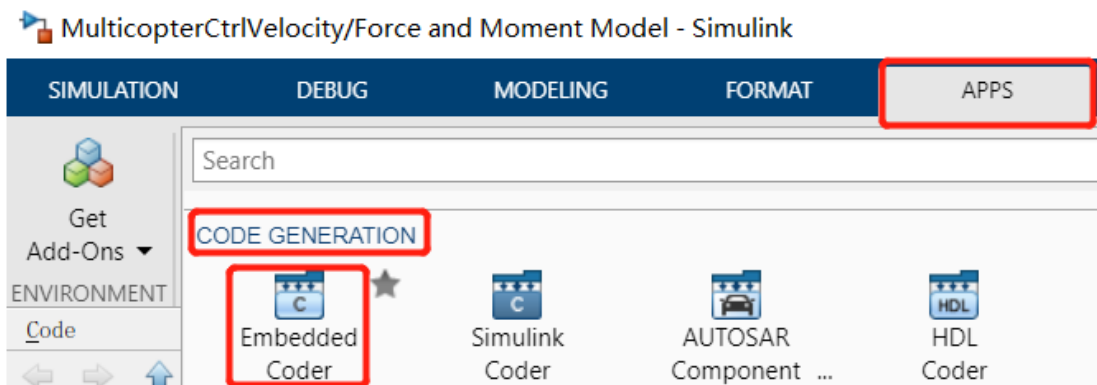
按钮生成代码。编译配置可参考 [4.RflySimModel\0.ApiExps\2.UserDefinedC++\2.GenC++\Readme.pdf](#)

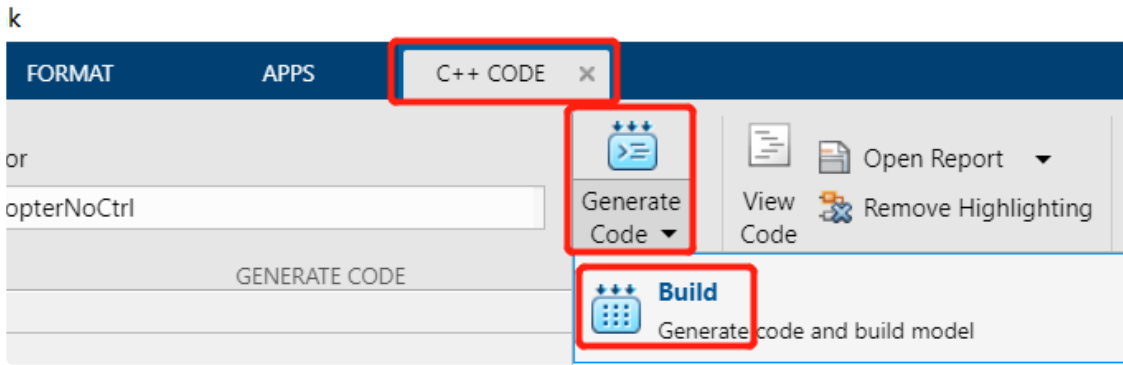
PythonCtrlAPI	2023/10/25 14:52	文件夹	
SimulinkCtrlAPI	2023/10/25 15:00	文件夹	
GenerateModelDLLFile.p	2023/9/22 18:47	MATLAB,p.9.14.0	6 KB
MavLinkStruct.mat	2022/5/9 10:27	MATLAB.mat.9.1...	5 KB
MulticopterModel.zip	2023/10/25 14:33	360压缩 ZIP 文件	371 KB
readme.docx	2023/10/25 15:08	Microsoft Word ...	0 KB
Trailer.dll	2023/10/25 14:34	应用程序扩展	354 KB
Trailer.exe	2023/10/25 14:33	应用程序	344 KB
Trailer.slx	2023/10/25 14:34	Simulink Model	269 KB
Trailer.slxc	2023/10/25 14:33	MATLAB.slxc.9.1...	4,281 KB
Trailer_HITL.bat	2023/9/20 11:43	Windows 批处理...	6 KB
Trailer_init.m	2023/10/25 14:31	MATLAB Code	2 KB
Trailer_SITL.bat	2023/9/20 11:43	Windows 批处理...	6 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。



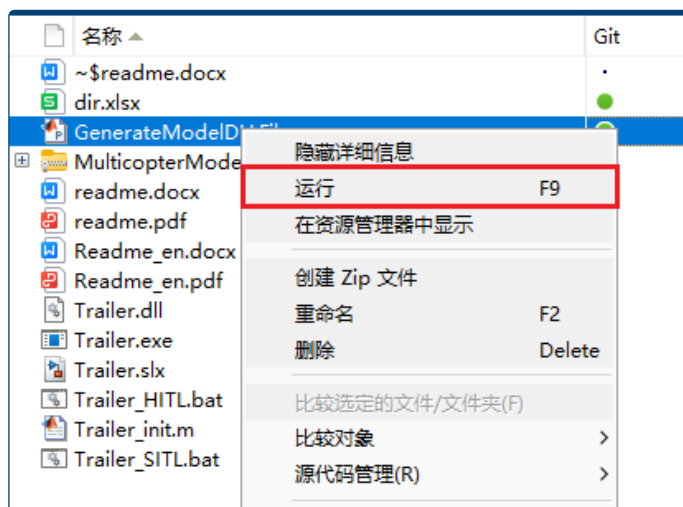
对于2019b及之后版本，点击APPS - CODE GENERATION - Embedded Coder才能弹出代码生成工具栏，在其中如下图所示点击“C++CODE” - “Generate Code” - “Build”按钮就能编译生成代码。





Step 2: 生成DLL文件

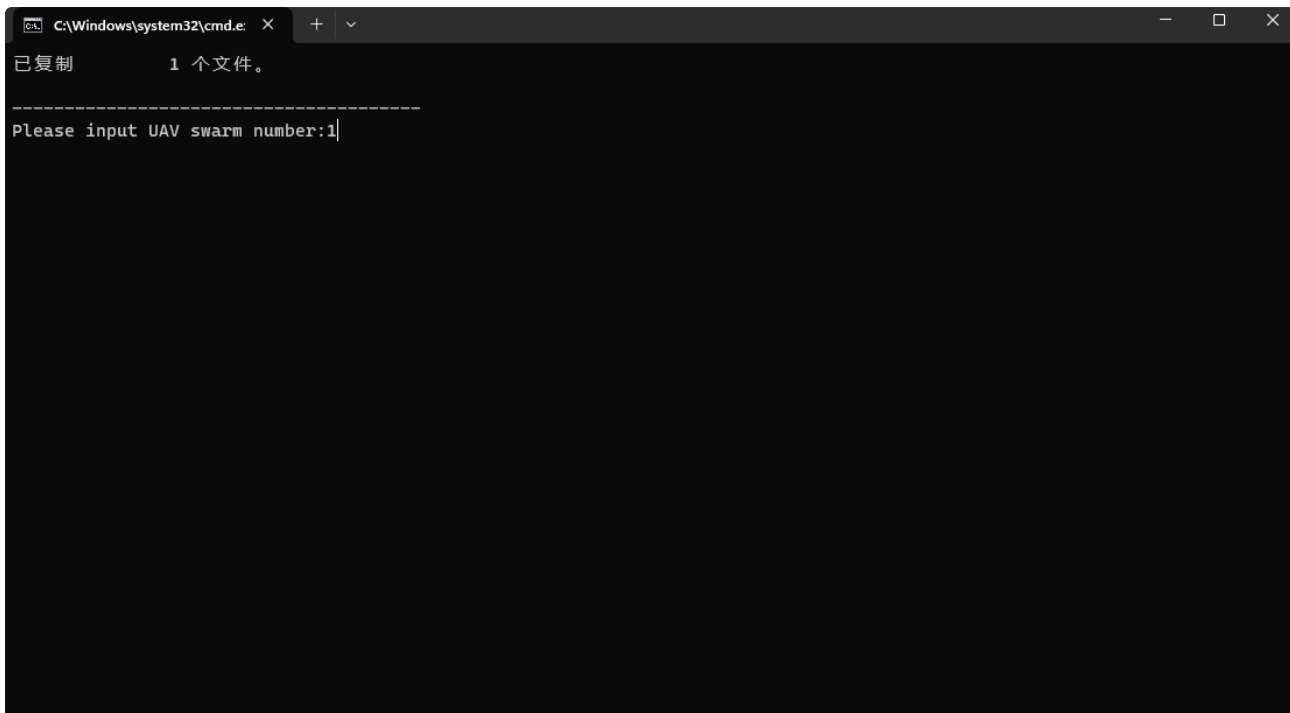
代码生成完毕后，在 Matlab 中右键“GenerateModelDLLFile.p”文件，点击运行，生成 DLL 文件。



5.2. 必做实验：软件在环仿真

Step 1: 启动仿真

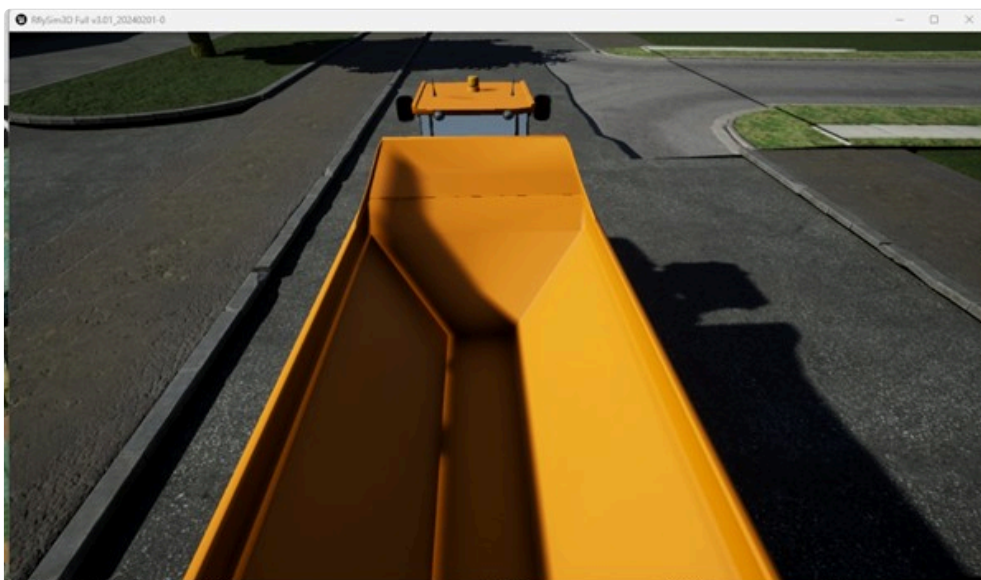
双击运行“Trailer_SITL.bat”批处理文件，在弹出的终端窗口中输入
1, 启动一辆车的软件在环仿真，并在bat脚本文件中注意对应机架的设置。



```
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 for supported airframes (Note: You can also
REM E.g., fixed-wing aircraft: PX4SITLFrame=plane; small cars: PX4SITLFrame=rover
set PX4SITLFrame=r1_rover
```

Step 2: 等待初始化完成

等待车辆初始化完成。



Step 3: 运行车辆并观察结果

1、在QGC界面左上角点击“Ready To Fly”处进行解锁，最后滑动QGC下方解锁飞机进度条。

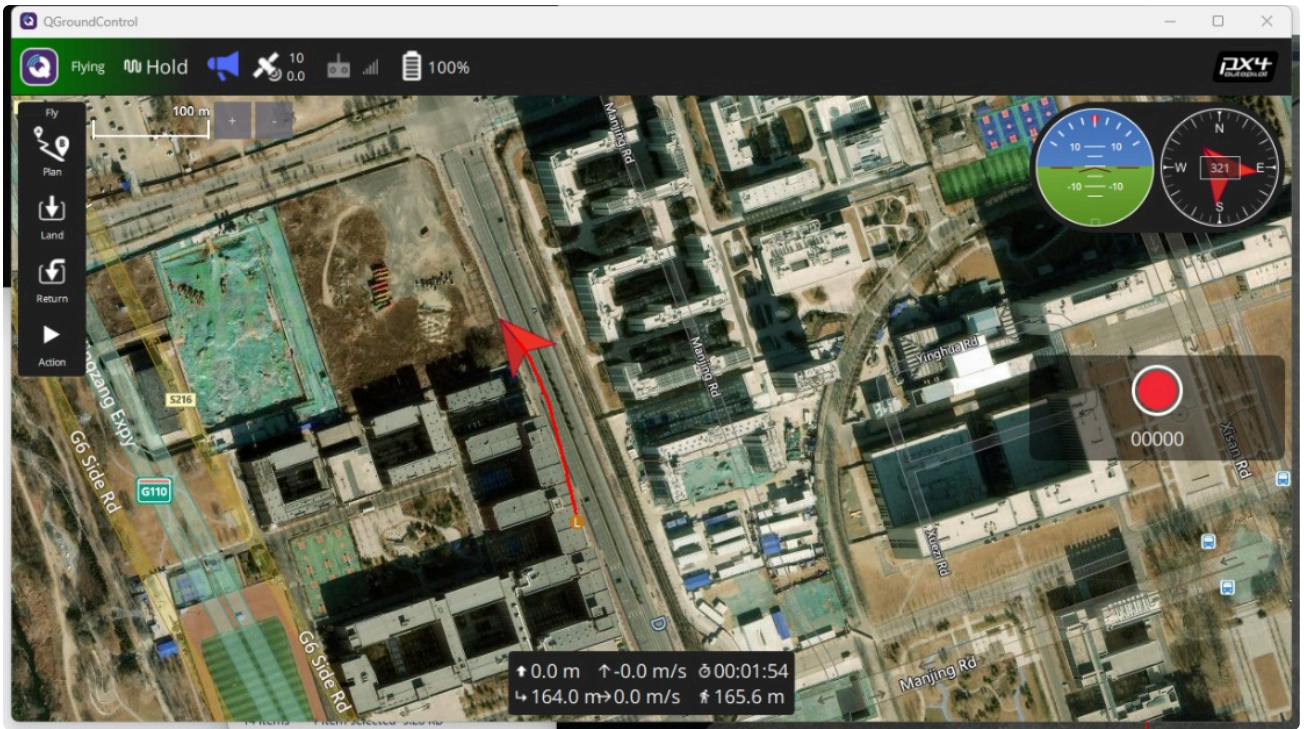


2、在QGC中点击地图后确认“Go to location”,滑动上方“将飞机移动到指定位置”完成目标位置确定。



3、在UE4与QGC中观察无人车的运动状态与运动轨迹，按“T”键显示运动轨迹。





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）。

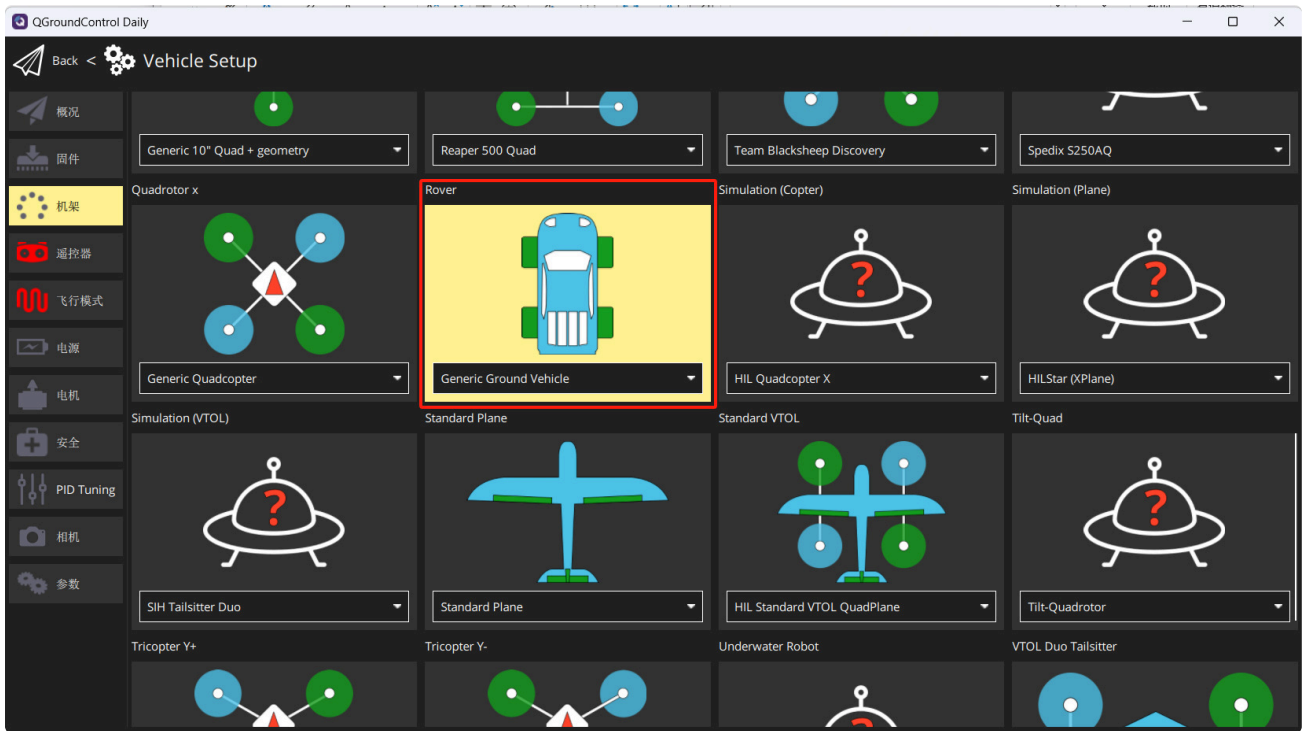


Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

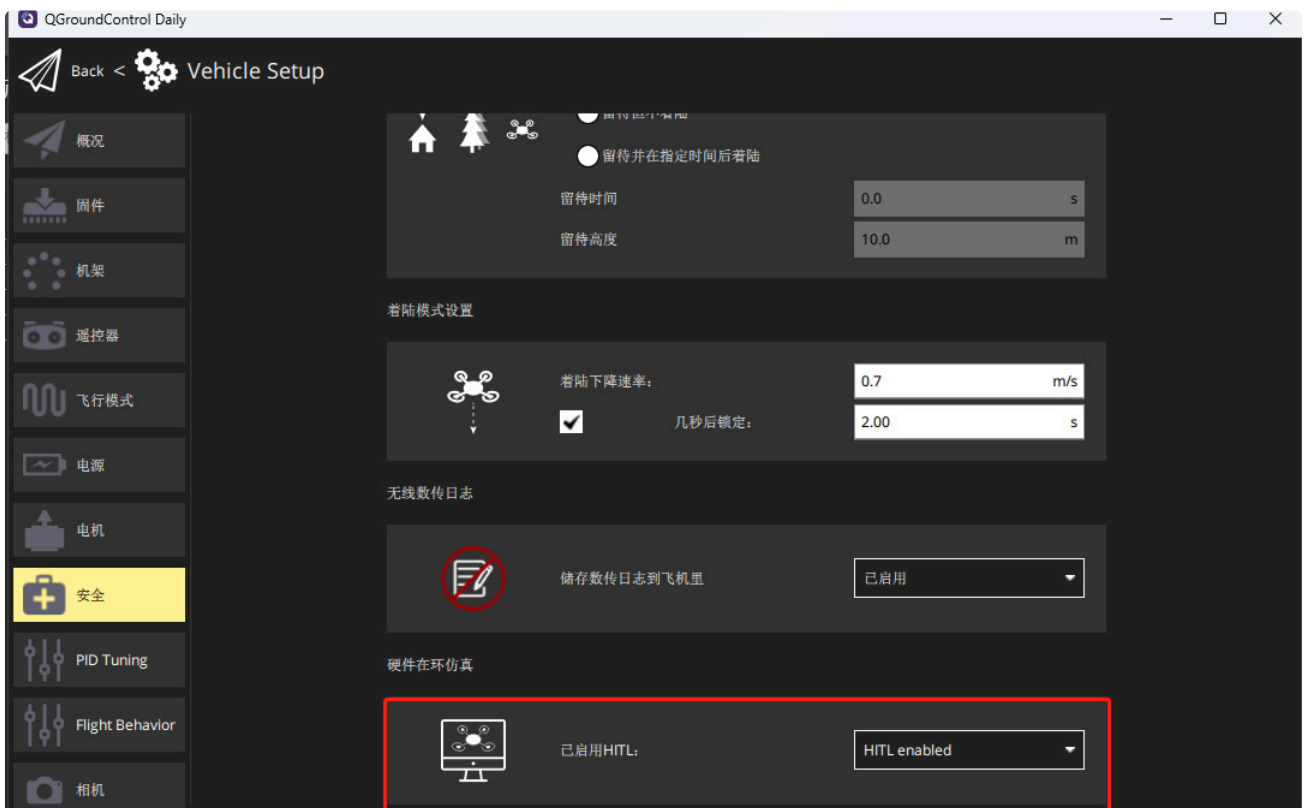
 3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷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

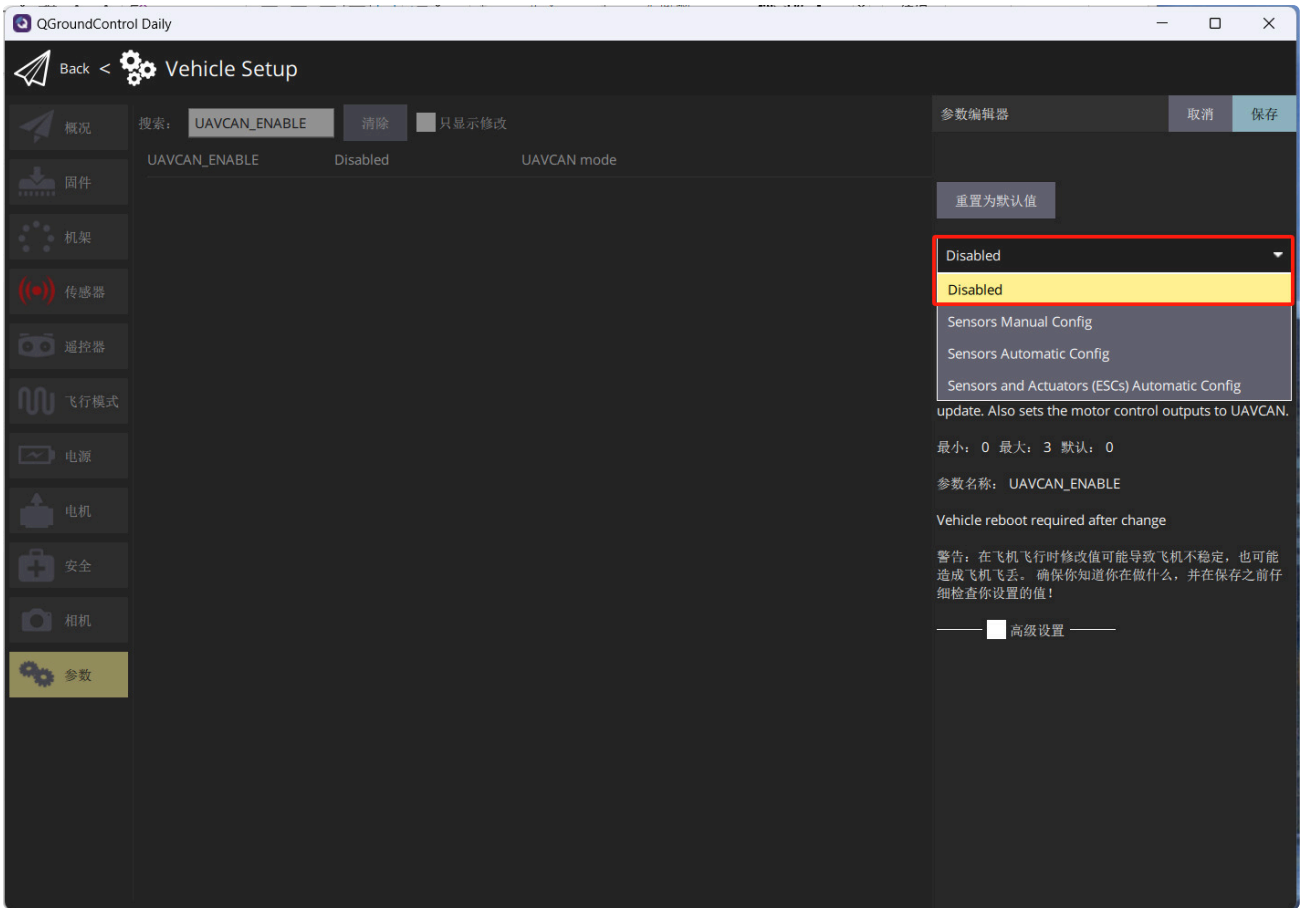
机架设置为“Generic Ground Vehicle”，点击QGC右上角的“应用并重启”。



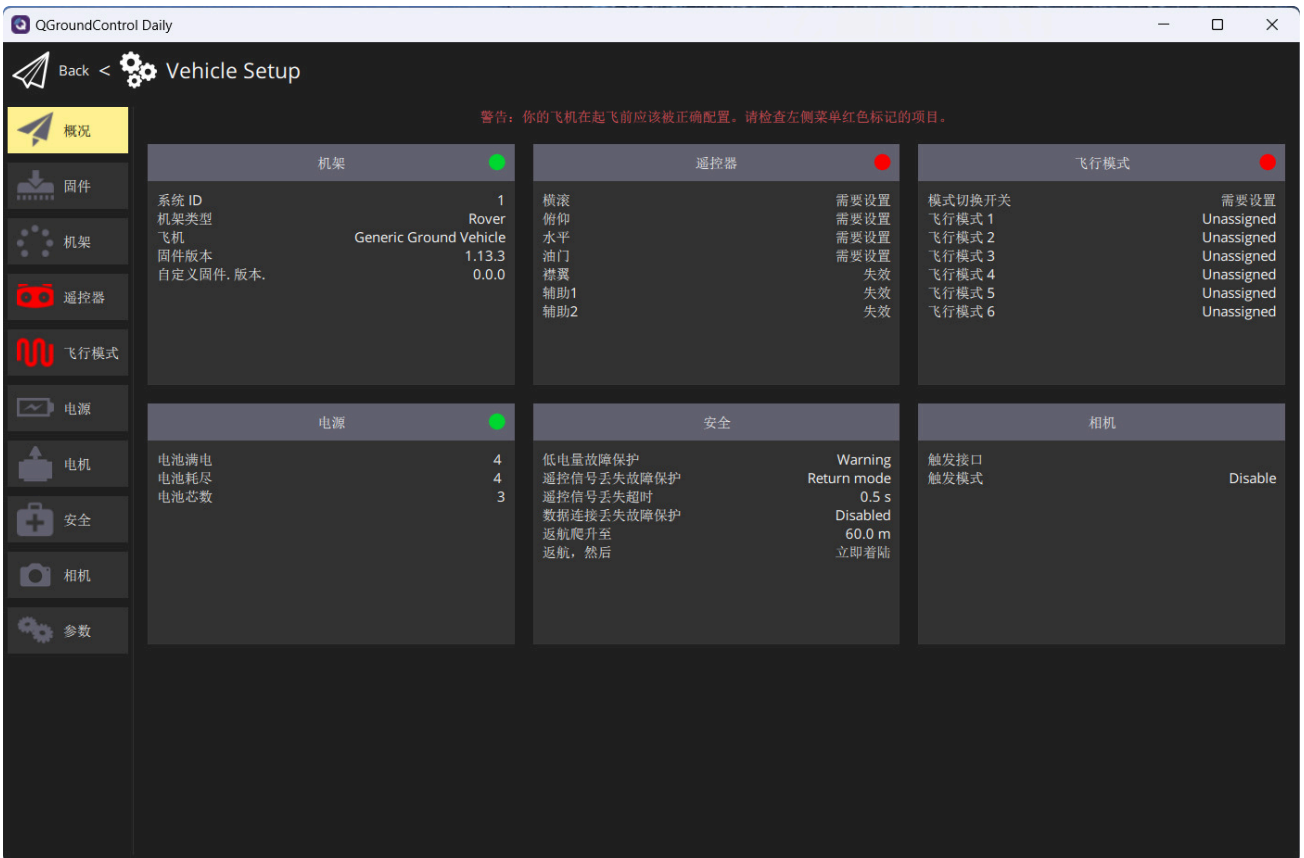
Step 3: 配置硬件在环参数

点击“安全”，设置硬件在环仿真为“HITL enabled”，并且点击“参数”，在搜索栏中输入“UAVCAN_ENABLE”，在弹出框中设置为“Disabled”，保存后重新插拔飞控即可。





下图为完成硬件在环仿真相关配置后的示意图。



Step 4: 启动仿真

右键以管理员身份运行“Trailer_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，启动一辆无人车的硬件在环仿真。

PythonCtrlAPI	2023/10/25 14:52	文件夹	
SimulinkCtrlAPI	2023/10/25 15:00	文件夹	
slprj	2023/10/25 15:48	文件夹	
Trailer_ert_rtw	2023/10/25 15:48	文件夹	
GenerateModelDLLFile.p	2023/9/22 18:47	MATLAB.p.9.14.0	6 KB
MavLinkStruct.mat	2022/5/9 10:27	MATLAB.mat.9.1...	5 KB
MulticopterModel.zip	2023/10/25 15:48	360压缩 ZIP 文件	371 KB
readme.docx	2023/10/25 15:08	Microsoft Word ...	0 KB
Trailer.dll	2023/10/25 15:49	应用程序扩展	354 KB
Trailer.exe	2023/10/25 15:48	应用程序	344 KB
Trailer.slx	2023/10/25 14:34	Simulink Model	269 KB
Trailer.slxc	2023/10/25 15:48	MATLAB.slxc.9.1...	4,281 KB
Trailer_HITL.bat	2023/9/20 11:43	Windows 批处理...	6 KB
Trailer_init.m	2023/10/25 14:31	MATLAB Code	2 KB
Trailer_SITL.bat	2023/9/20 11:43	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

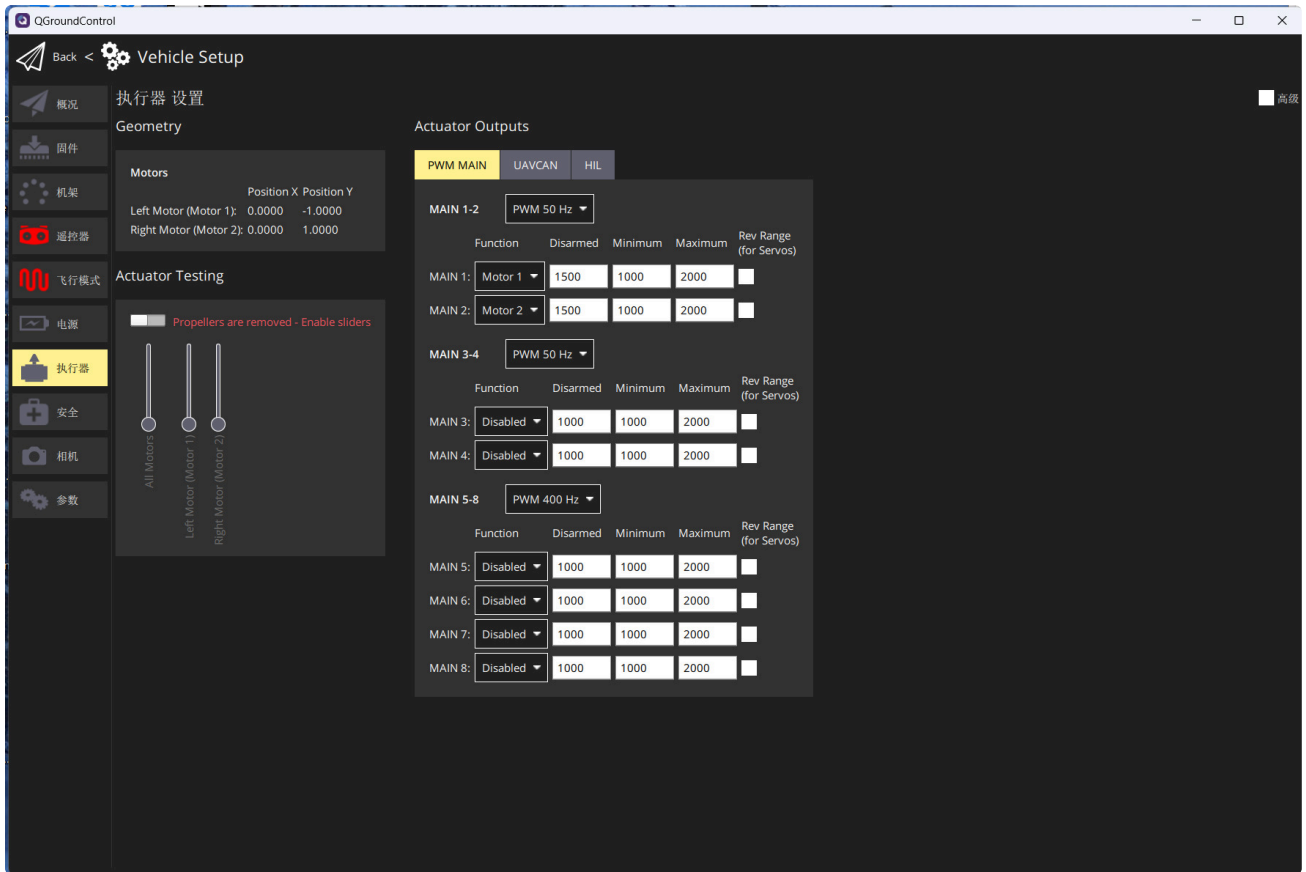
之后测试步骤与软件在环仿真的Step2到Step3相同，运行之后观察精细化无人车能否按照指令运动。

6. 参考资料

1. DLL/SO模型与通信接口..\..\API.pdf
2. 外部控制接口..\..\API.pdf
- 3.

7. 常见问题

1. PX4.1.14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[\(main\)](#)。
[控制分配](#)
[\(混控\) | PX4 自动驾驶用户指南](#)



控制分配 (混控)

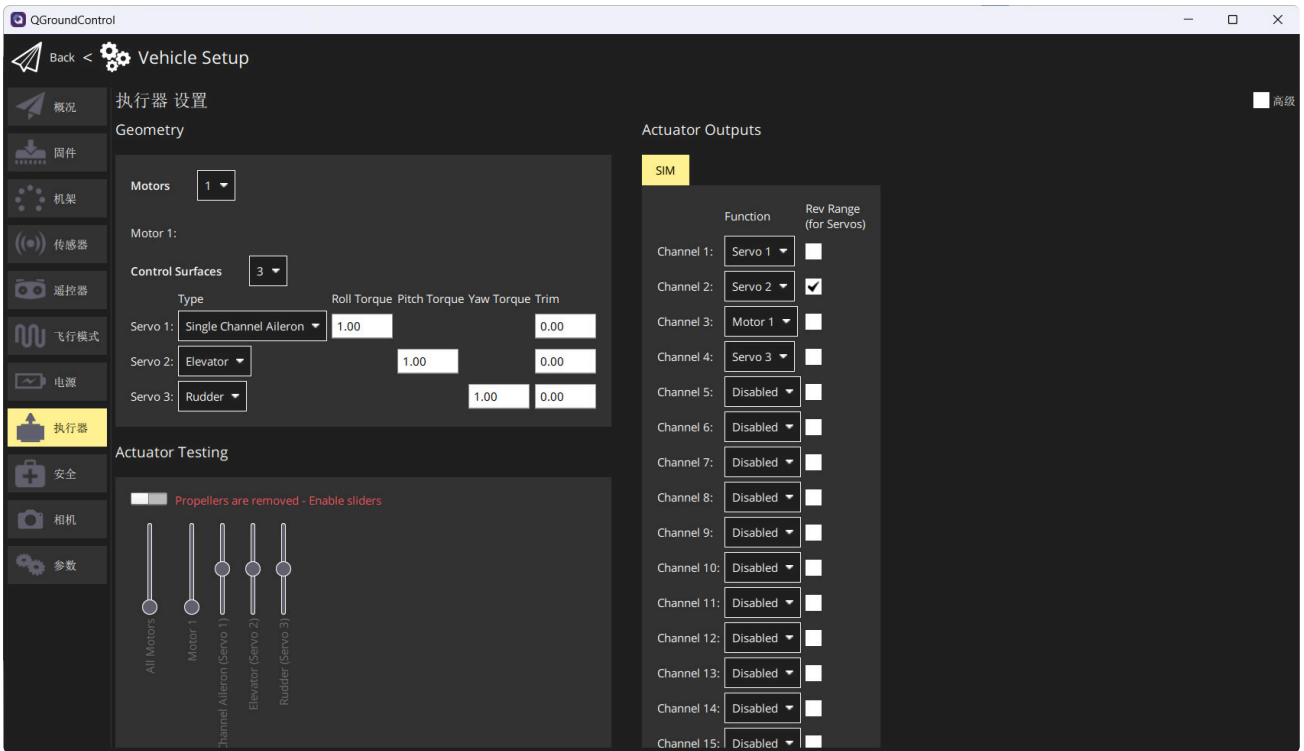
注解

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：

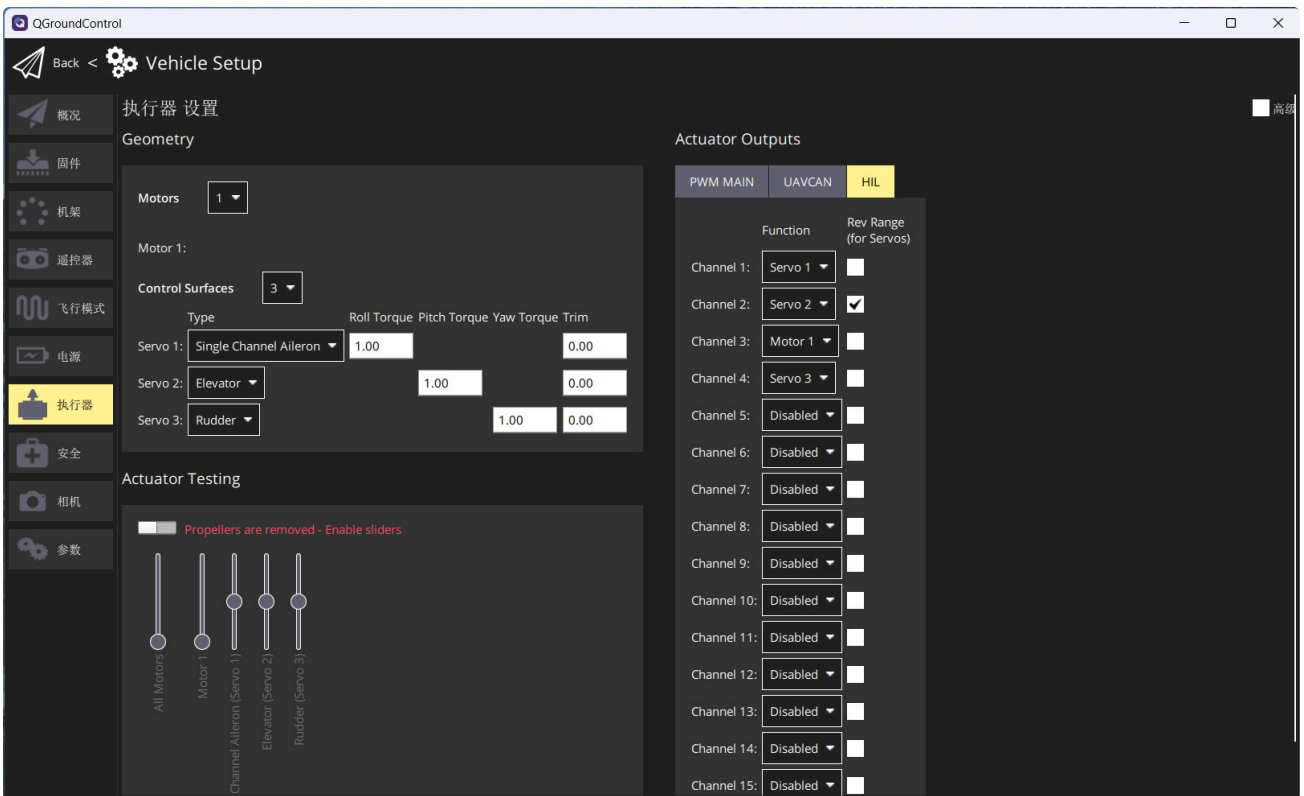
1. 软件在环仿真：

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。

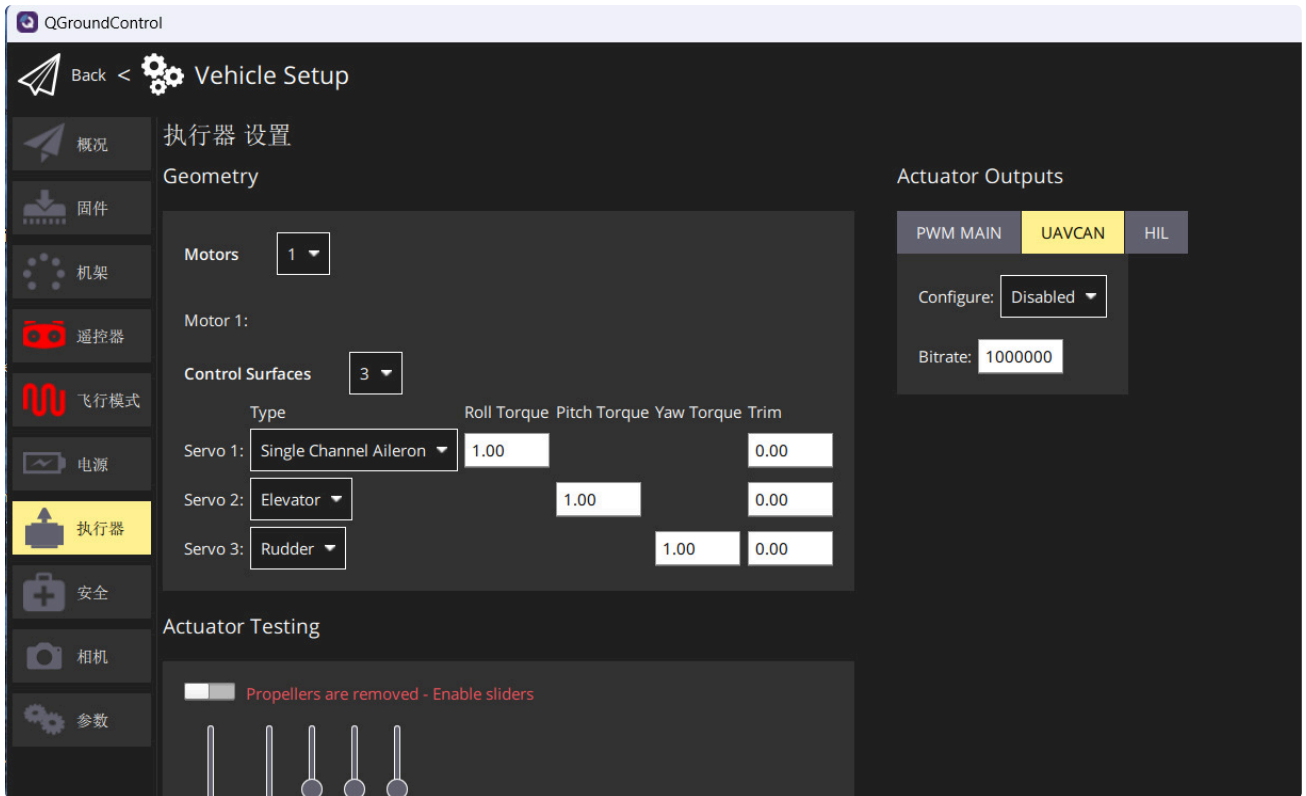


2) 硬件在环仿真:

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: 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