

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验证（软硬件在环仿真）

1.2 实验目的

对Simulink文件编译生成精细化无人车的DLL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

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）。

■ 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`，普通小车的混控文件

```
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

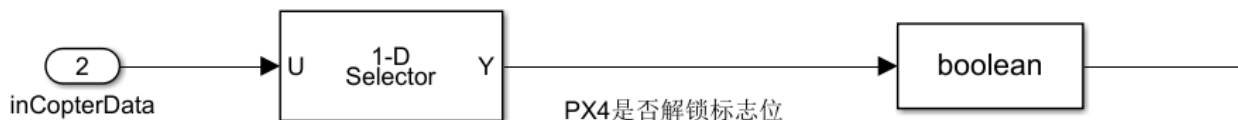
`\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\mixers\rover_generic.main.mix`，其中只用到了PWM2和PWM4；PWM1，PWM3为空混控器。PWM2输出偏航到伺服电机来转向，PWM4输出油门给两个的主动轮电机来变速。

■ 载具模型的整体输入输出

- 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



2. 实验效果

完成精细化无人车软硬件在环仿真，可通过地面站控制小车的前进、转向。

3. 文件目录

例程目录：

[安装目录]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e7_TrailerModelCtrl\1.TrailerModeI Ctrl

文件夹/文件名称	说明
Trailer.dll	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。

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。

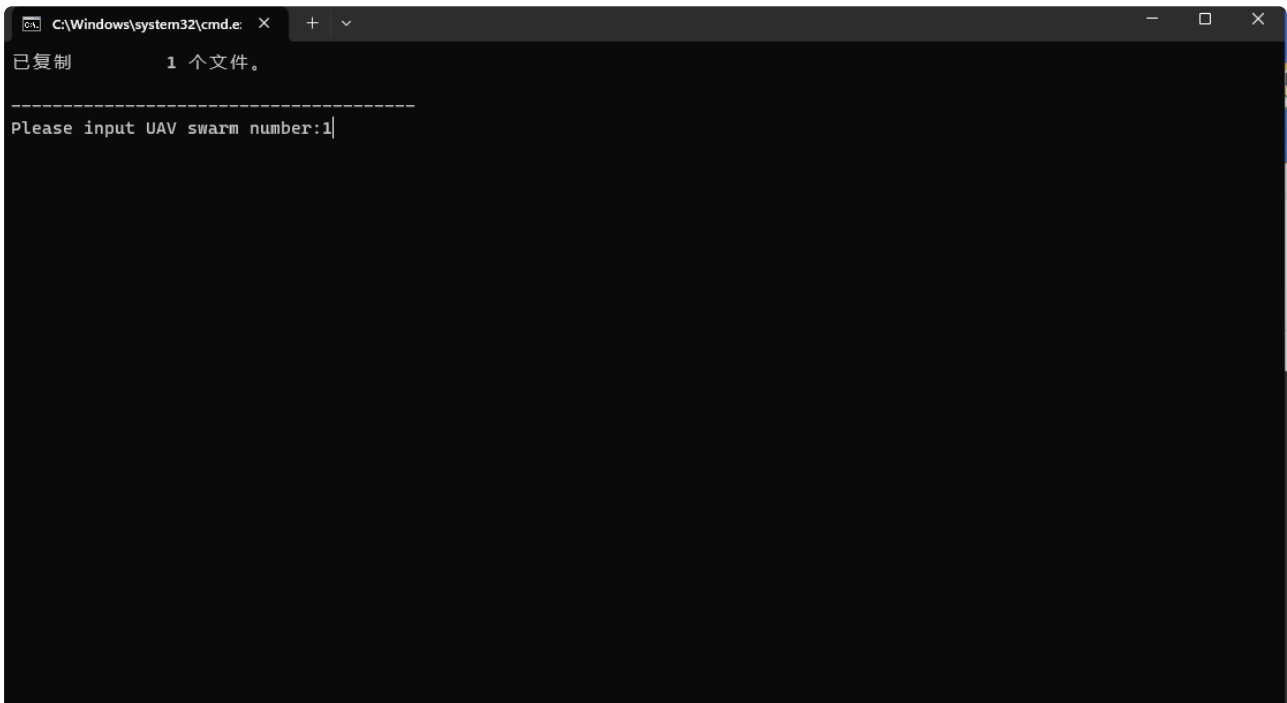
①：推荐配置请见：<https://rfllysim.com/>

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。



```
C:\Windows\system32\cmd.e  X  +  v
已复制      1 个文件。
-----
Please input UAV swarm number:1
```

```
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
```

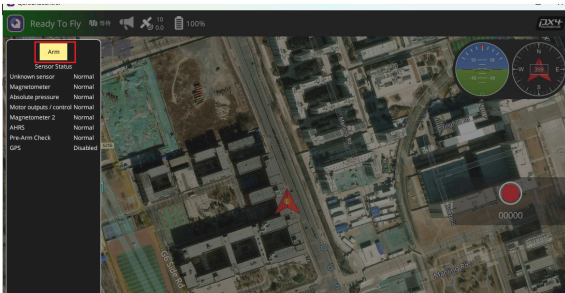
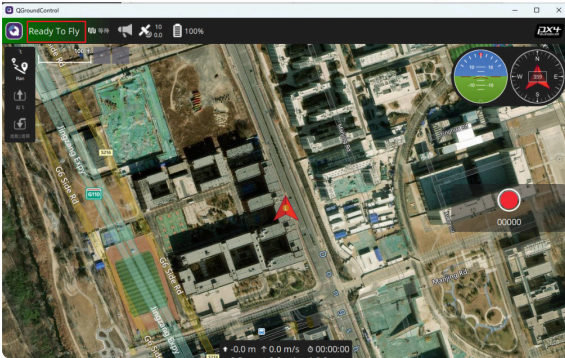
Step 2：等待初始化完成

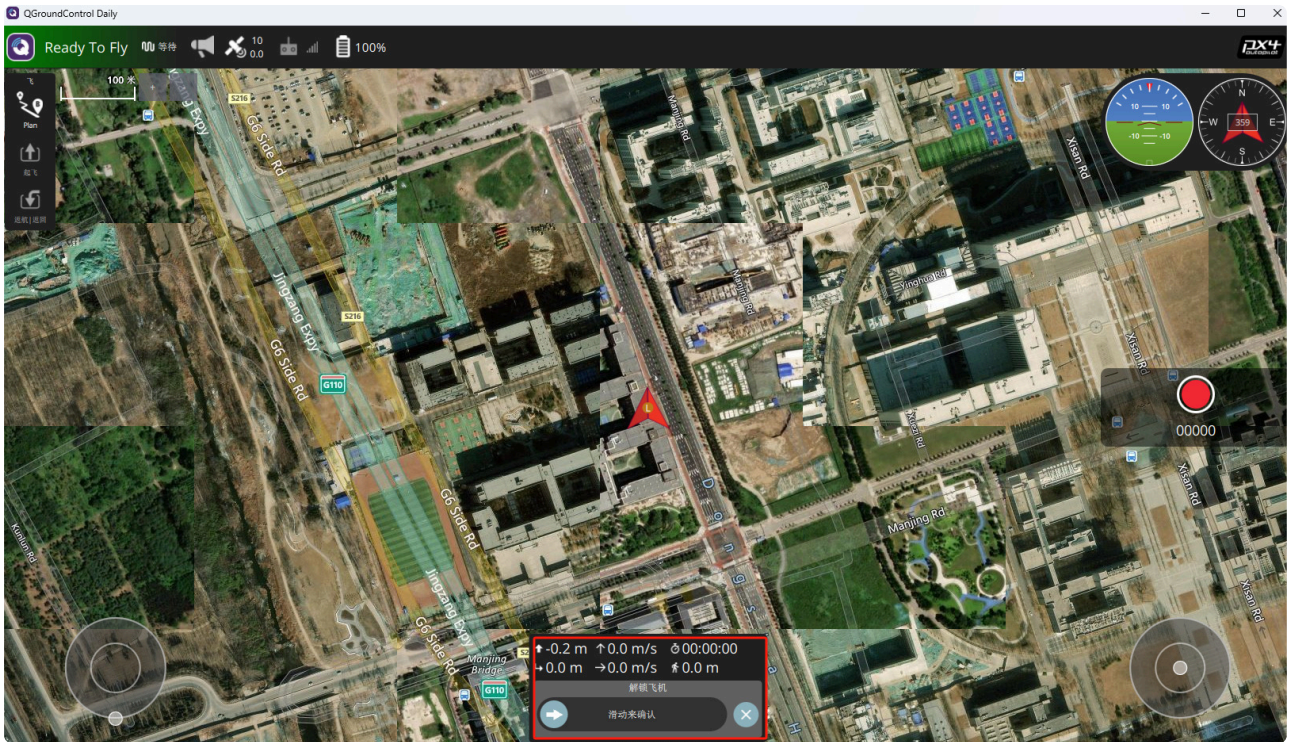
等待车辆初始化完成。



Step 3: 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。

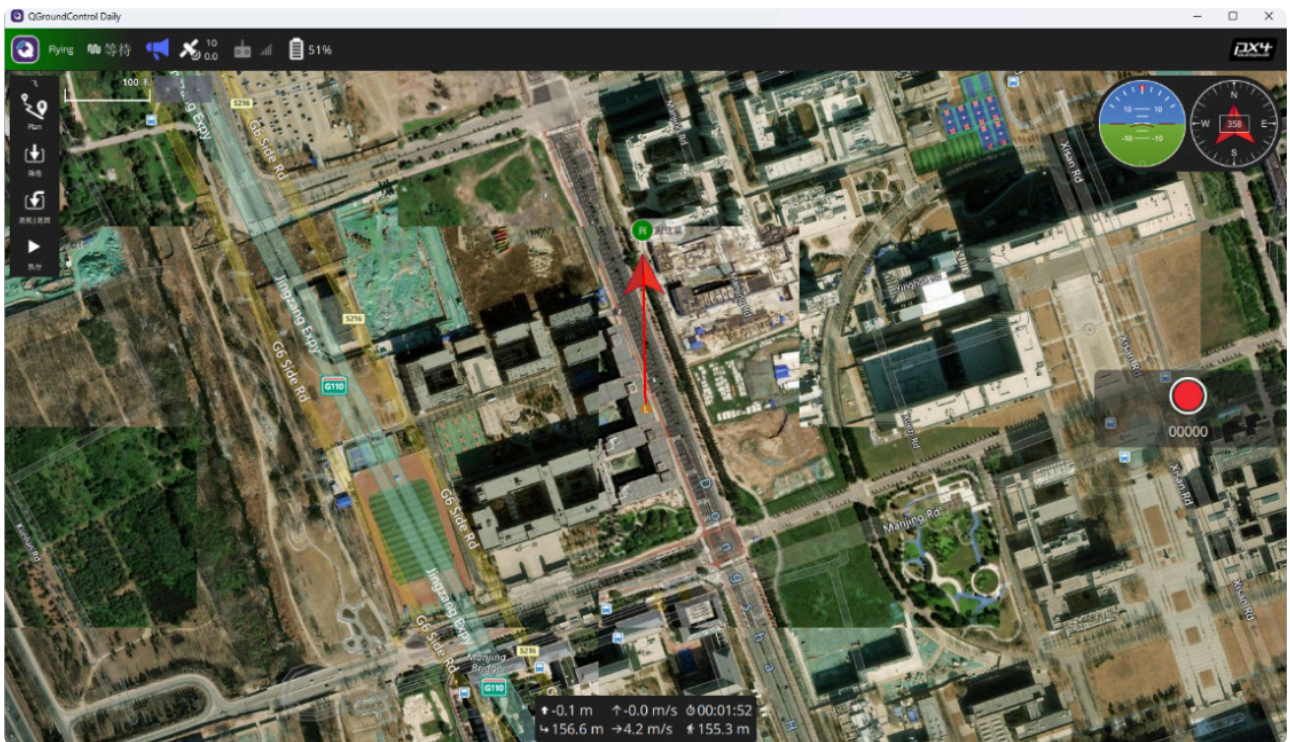




2、在QGC中点击地图后确认“Go to location”，滑动上方“将飞机移动到指定位置”完成目标位置确定。



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）。

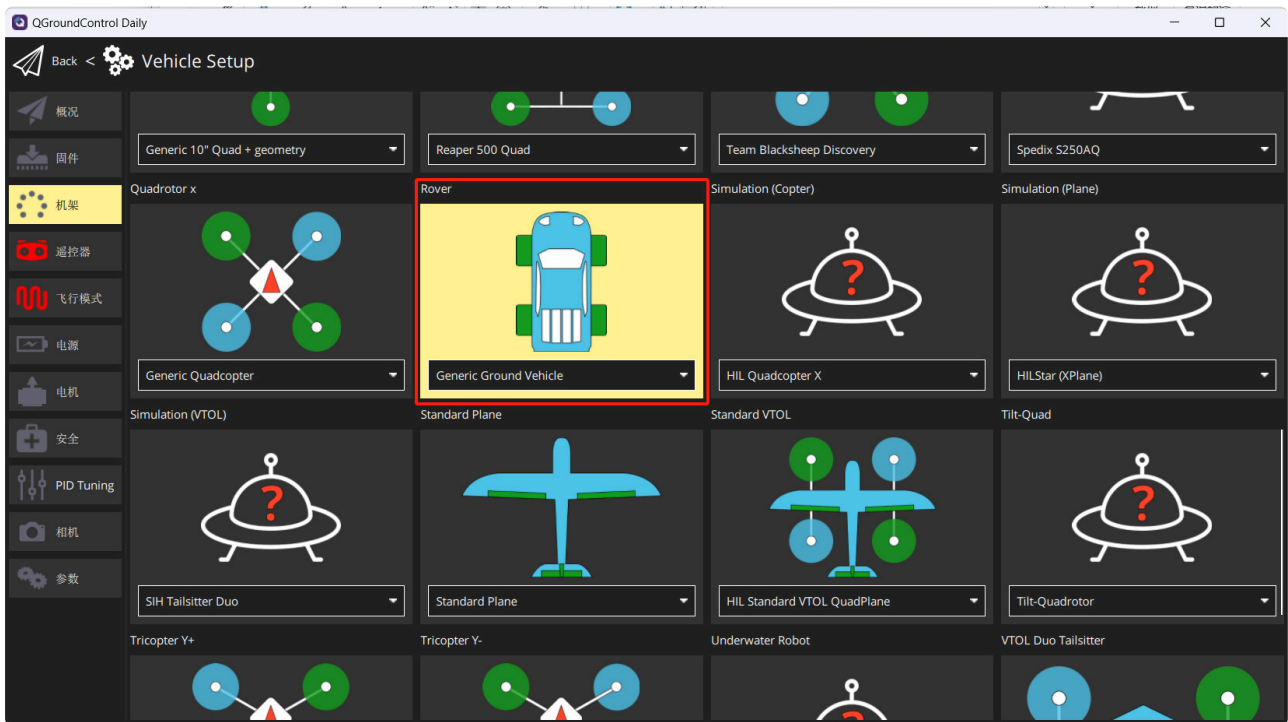


Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

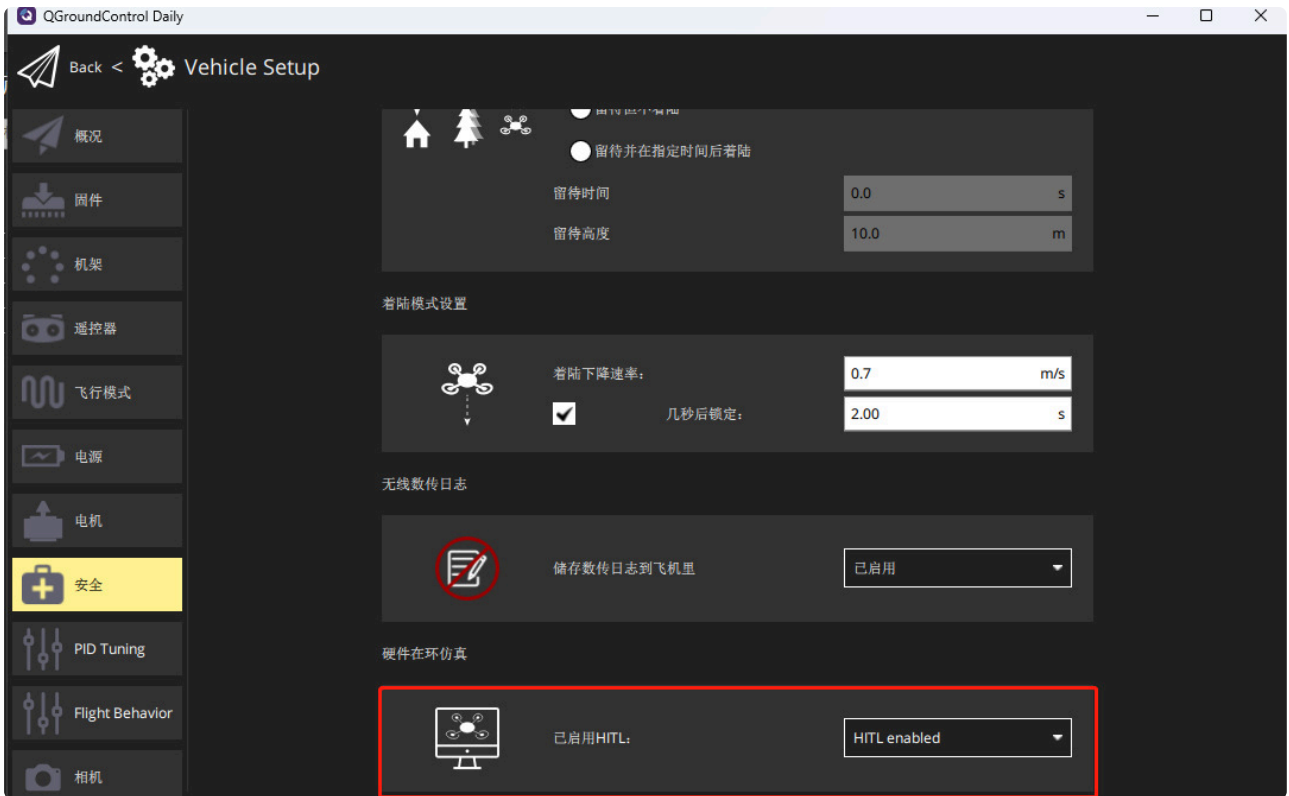
	3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷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

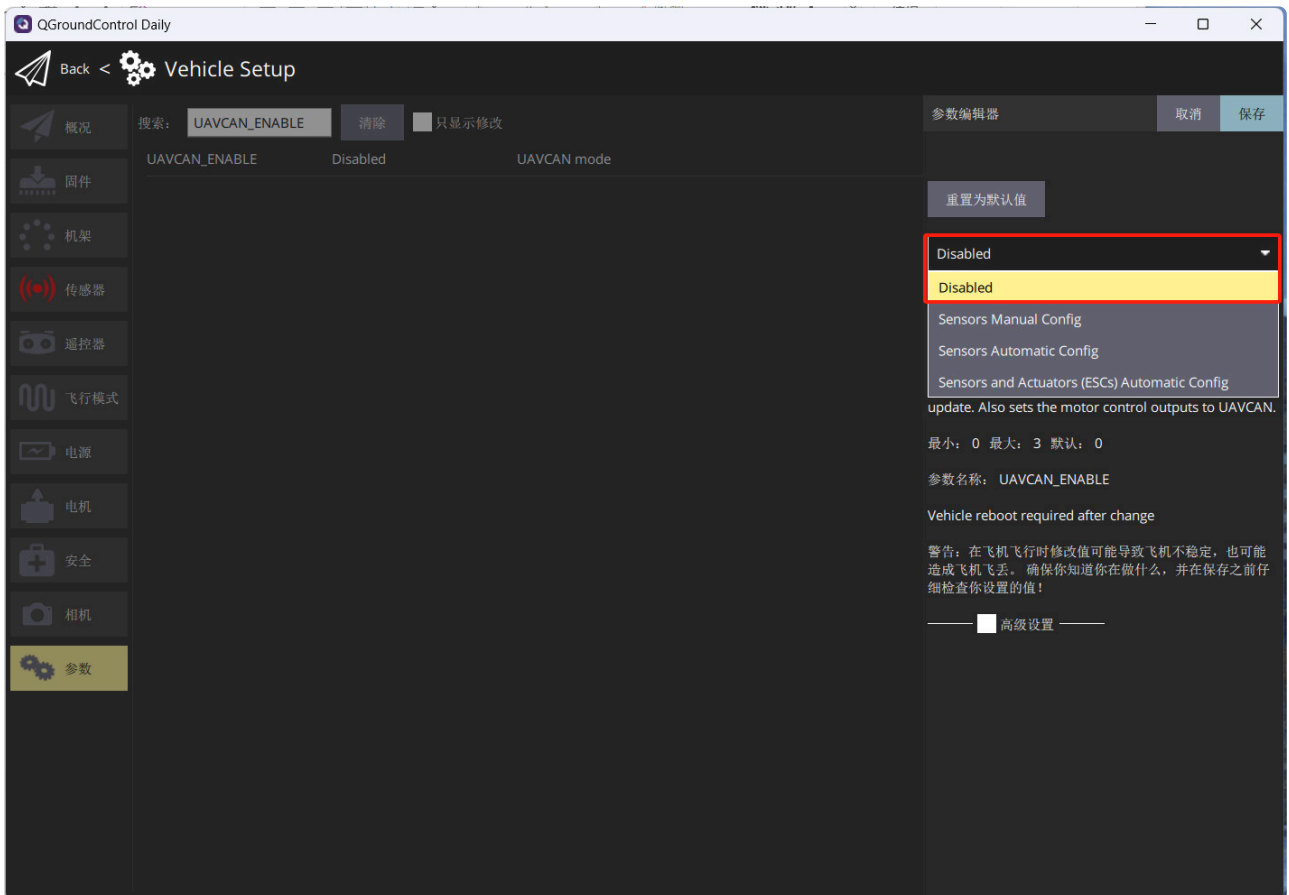


Step 3: 配置硬件在环参数

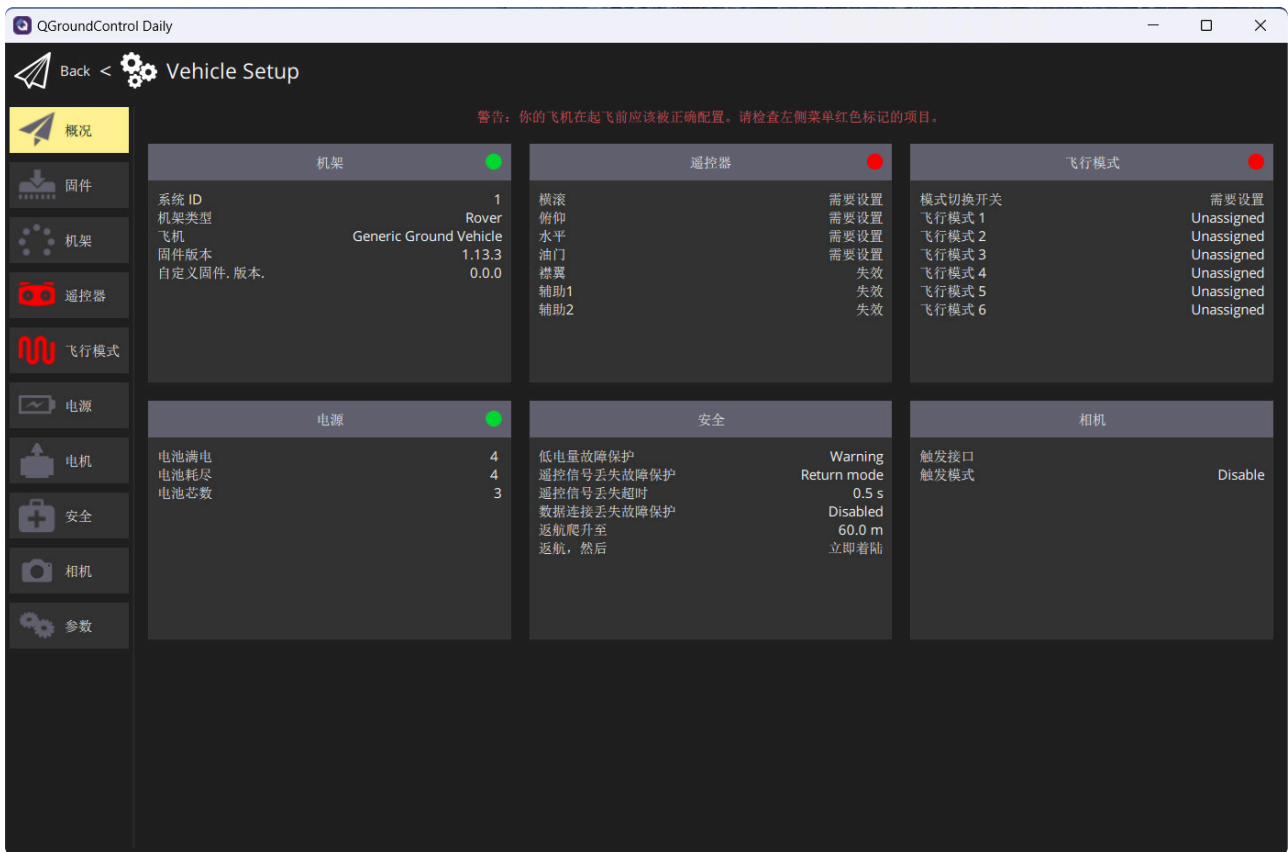
在“安全”界面，选择“HITL enabled”启动硬件在环仿真，之后在概况界面中确认配置完成后，重新插拔飞控完成设置。



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。



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 ???
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.

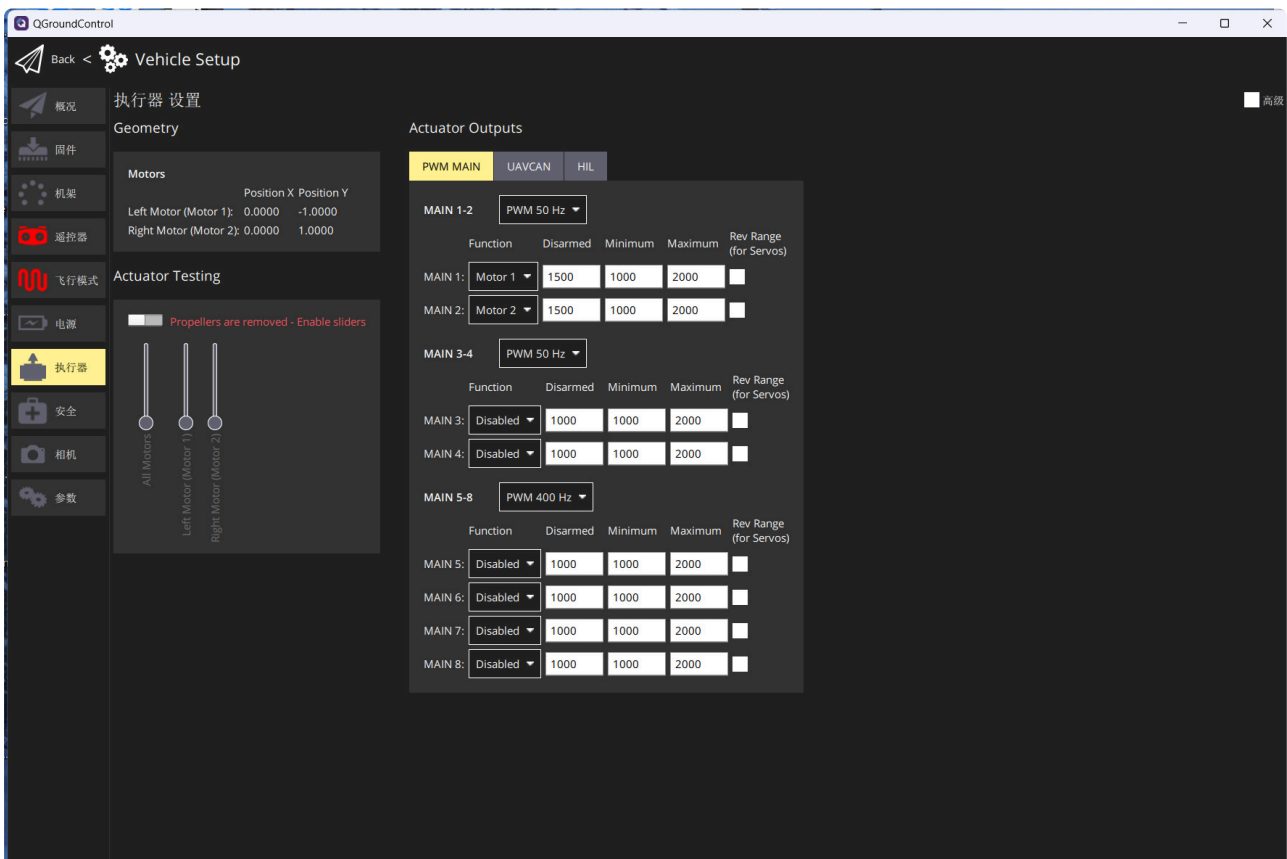
7. 常见问题

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

[控制分配](#)

[\(混控\) | PX4 自动驾驶用户指南](#)

[\(main\)](#)



控制分配 (混控)

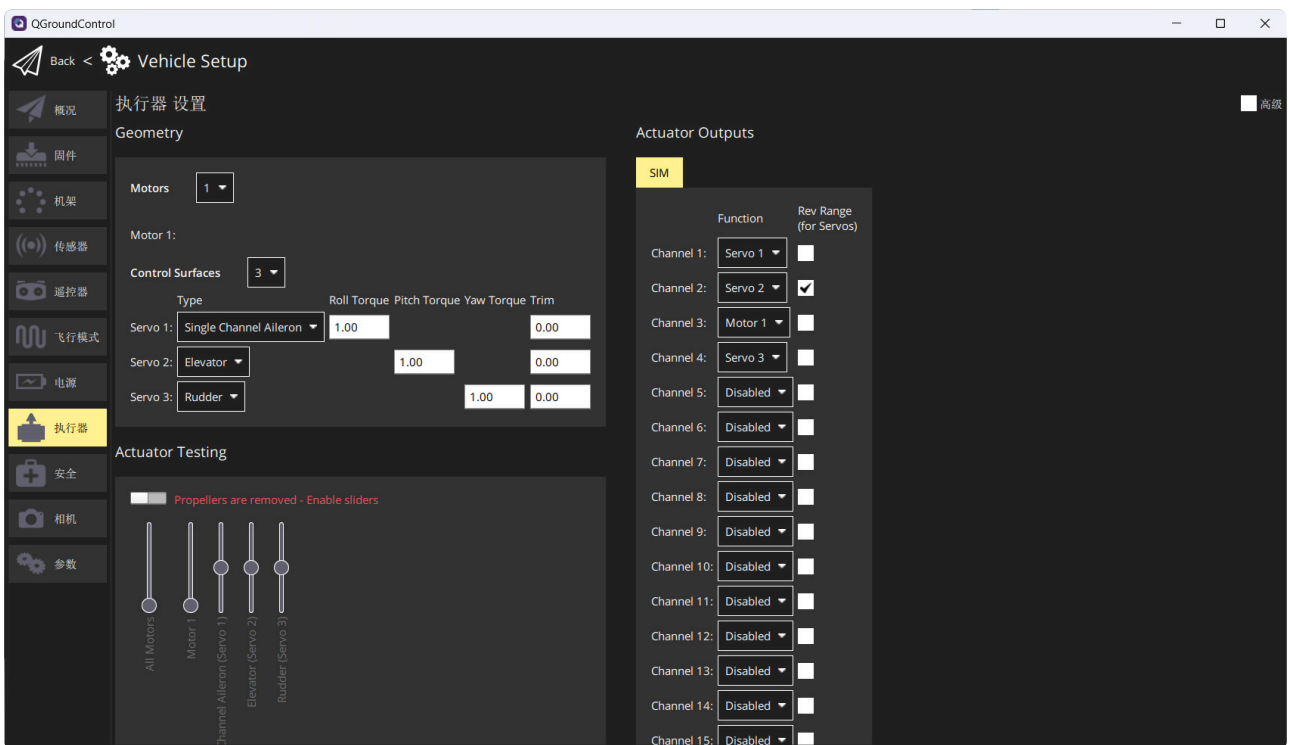
注解

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：

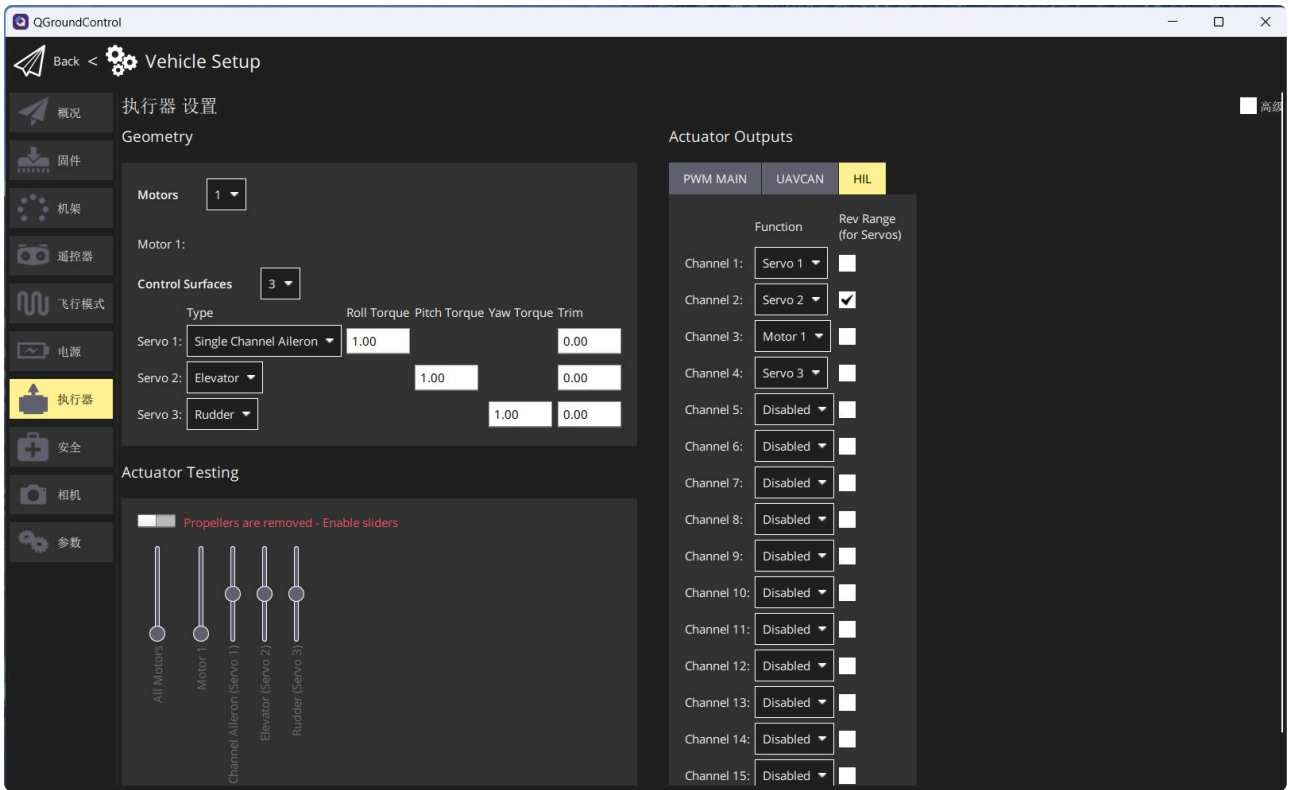
1. 软件在环仿真：

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。

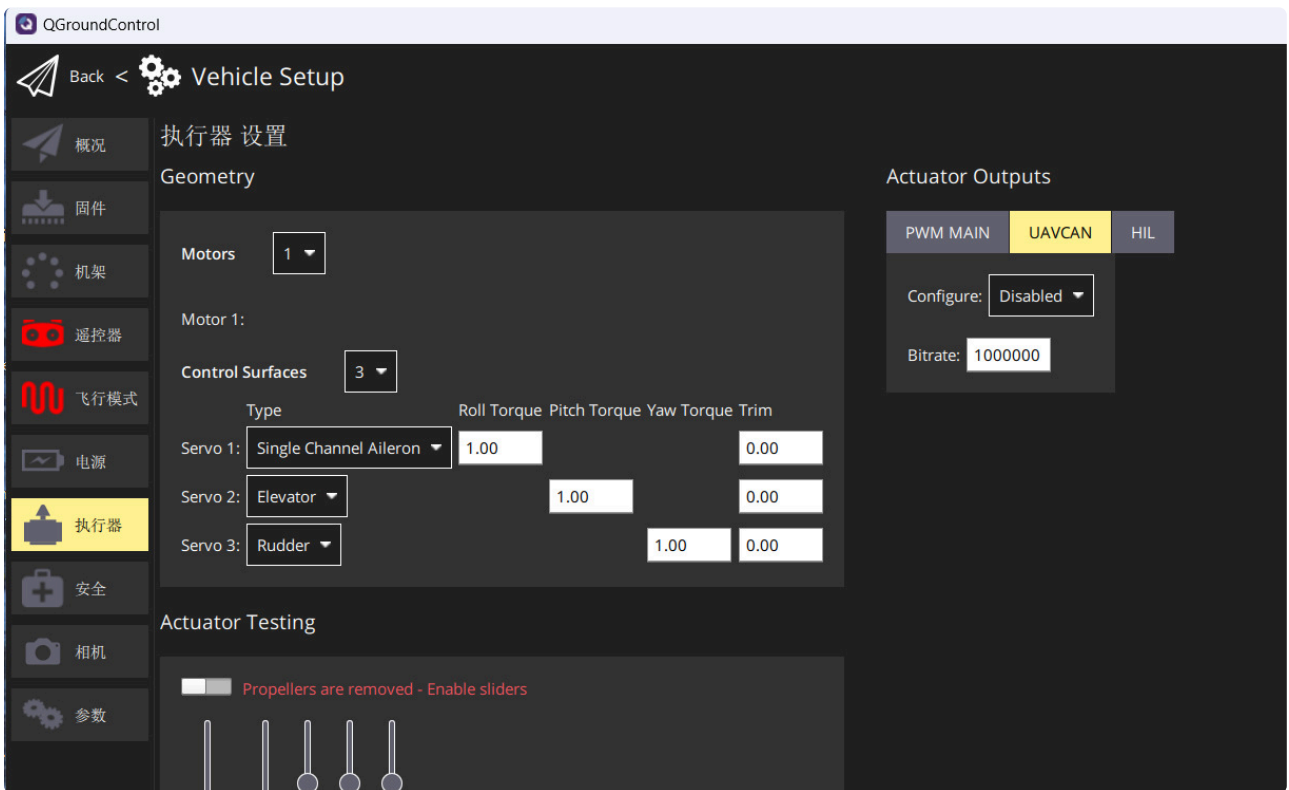


2) 硬件在环仿真：

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: 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

