

## 1. 实验名称及目的

**UUV 模型硬件在环仿真实验：**在 Matlab 将 Simulink 文件编译生成四旋翼的 UUV 模型文件；并对生成的 UUV 模型通过遥控器进行硬件在环仿真测试，通过本例程熟悉平台 UUV 模型的使用。

## 2. 实验原理

### 软/硬件在环仿真（SIL/HIL）的实现[1][2]

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。

### 机架配置

机架文件是一种用于描述模型物理结构和控制分配的脚本文件，每个机架文件都有一个唯一的 ID，对应 QGC 中的参数 SYS\_AUTOSTART，无人潜水器模型的机架配置在 \PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu\_common\init.d\airframes\60002\_uuv\_bluerov2\_heavy 中定义如下：

```
. ${R}etc/init.d/rc.uuv_defaults
```

执行 rc.uuv\_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

```
set PWM_OUT 12345678
```

PWM（脉冲宽度调制）是自驾仪系统用来控制电机和舵机的一种信号。设置 PWM 输出为 12345678 指定 1~8 号 PWM 通道是活跃的。

```
set MIXER vectored6dof
```

设置了混控器配置为 vectored6dof（系统采用六自由度的向量控制）。具体混控文件可参考\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu\_common\mixers\vectored6dof.main.mix，其混控逻辑如下

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ M_r \\ M_p \\ M_y \end{bmatrix}$$

其中，Tx, Ty, Tz 分别表示了水平面内的前后、左右、上下方向的推力；Mr, Mp, My 分别表示了横滚、俯仰、偏航方向的力矩；u1 到 u8 分别表示了八个电机的油门。

### 3. 实验效果

遥控器标定以后，可以通过遥控器操控 UUV 模型的姿态和油门。



### 4. 文件目录

文件夹/文件名称	说明
MulticopterNoCtrl.slx	四旋翼飞机模型文件。
MulticopterNoCtrl_HITLRun.bat	硬件在环仿真批处理文件。
MulticopterNoCtrl_SITLRun.bat	软件在环仿真批处理文件。

GenerateModelDLLFile.p	DLL 格式转化文件。
MulticopterNoCtrl_init.m	动力学模型相关参数。
MavLinkStruct.mat	MavLink 数据结构体 mat 文件

## 5. 运行环境

序号	软件要求	硬件要求	
		名称	数量
1	Windows 10 及以上版本	笔记本/台式电脑 <sup>①</sup>	1
2	RflySim 平台免费版	Pixhawk 6C <sup>②</sup>	1
3	MATLAB 2017B 及以上 <sup>③</sup>	数据线	1
4	/	天地飞 ET10 遥控器及接收机	1

①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com/1.1InstallMethod.html>

②：平台安装时的推荐编译命令为：px4\_fmu-v6c\_default,，PX4 固件版本为：1.12.3（或 1.13.3）。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>。

## 6. 实验步骤

### 6.1. 飞控配置












#### Step 1:

推荐使用 Pixhawk 6C 飞控，固件版本 1.12.3。按下图所示将飞控与计算机连接。

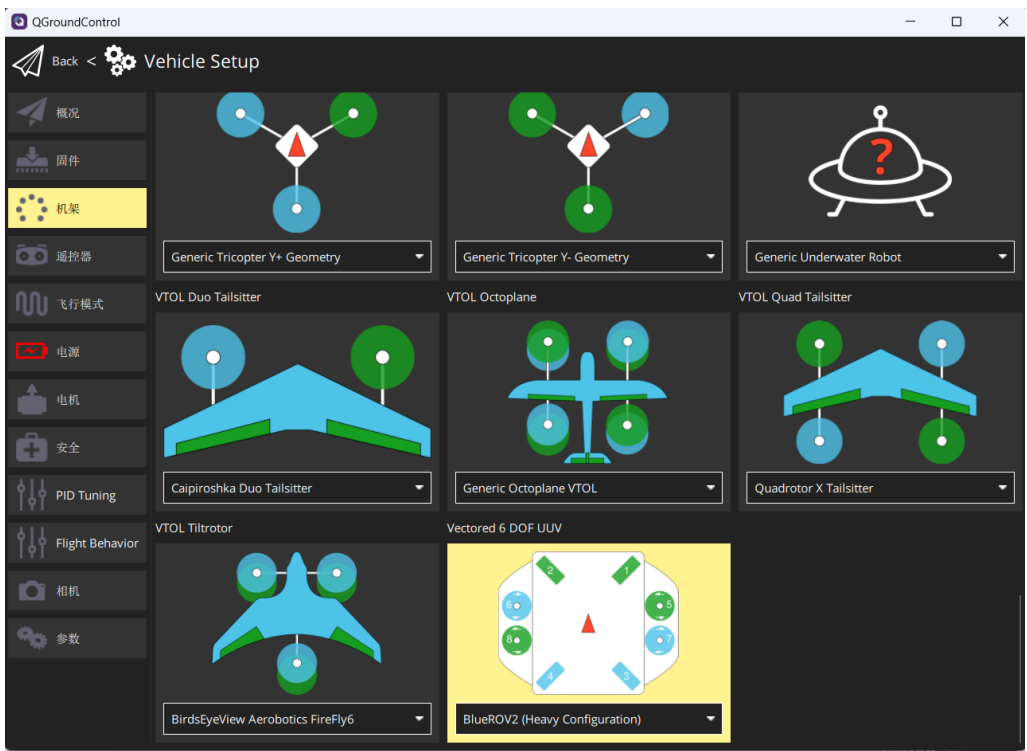


Step 2:

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

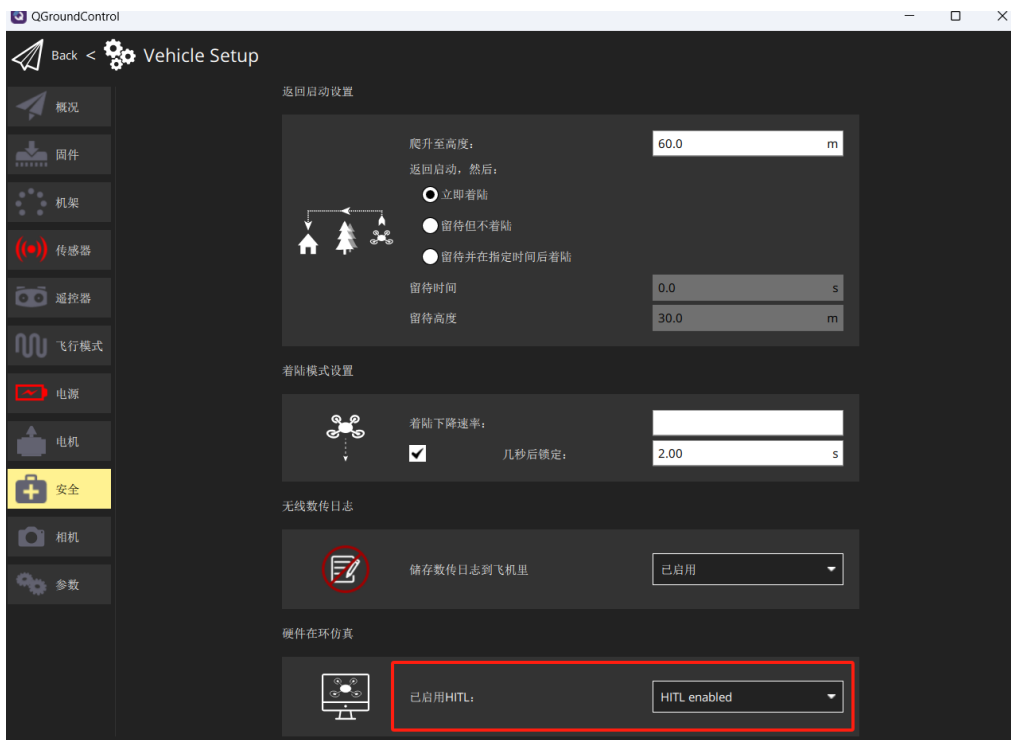
	3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷方式	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“BlueRov2(Heavy Configuration)”，设置完毕后点击右侧 “应用并重启”。



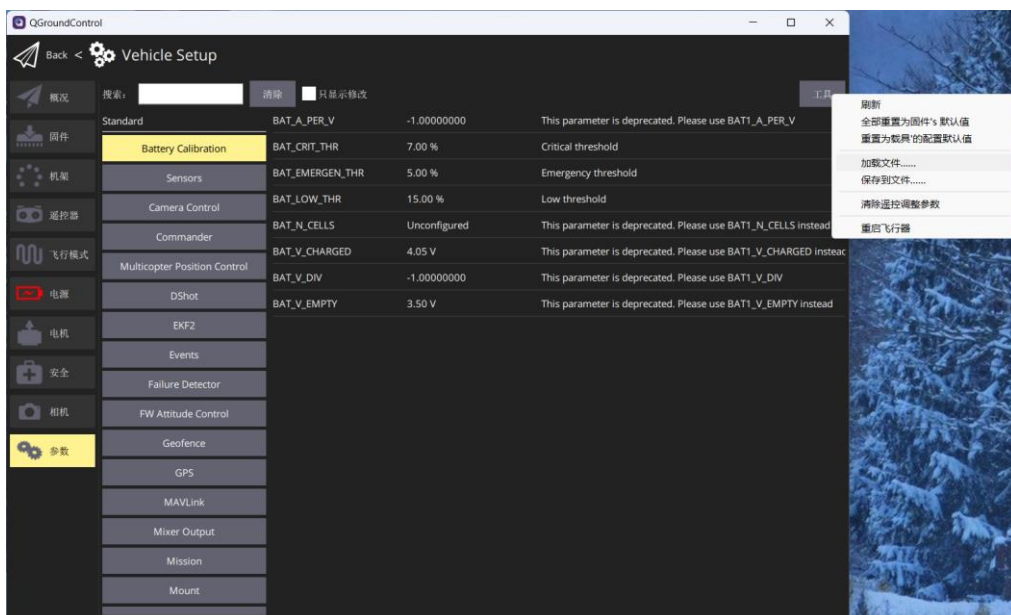
Step 3:

在“安全”界面，选择“HITL enabled”启动硬件在环仿真，重新插拔飞控。

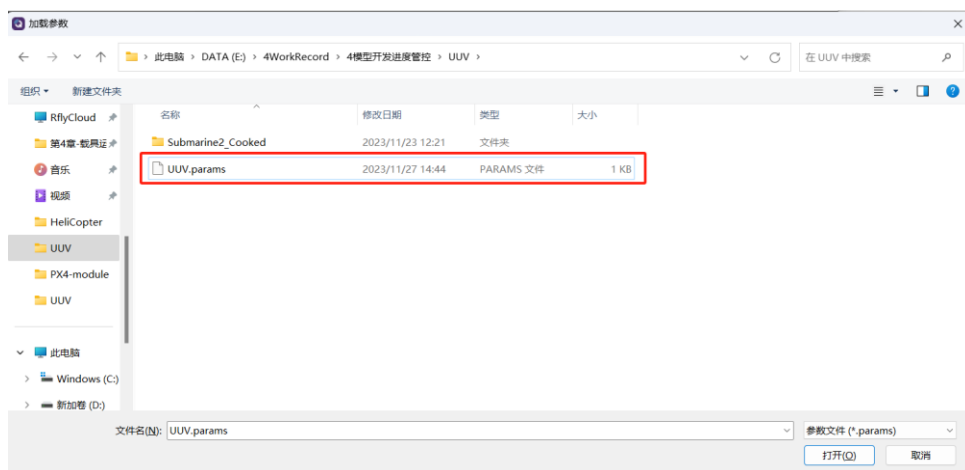


#### Step 4:

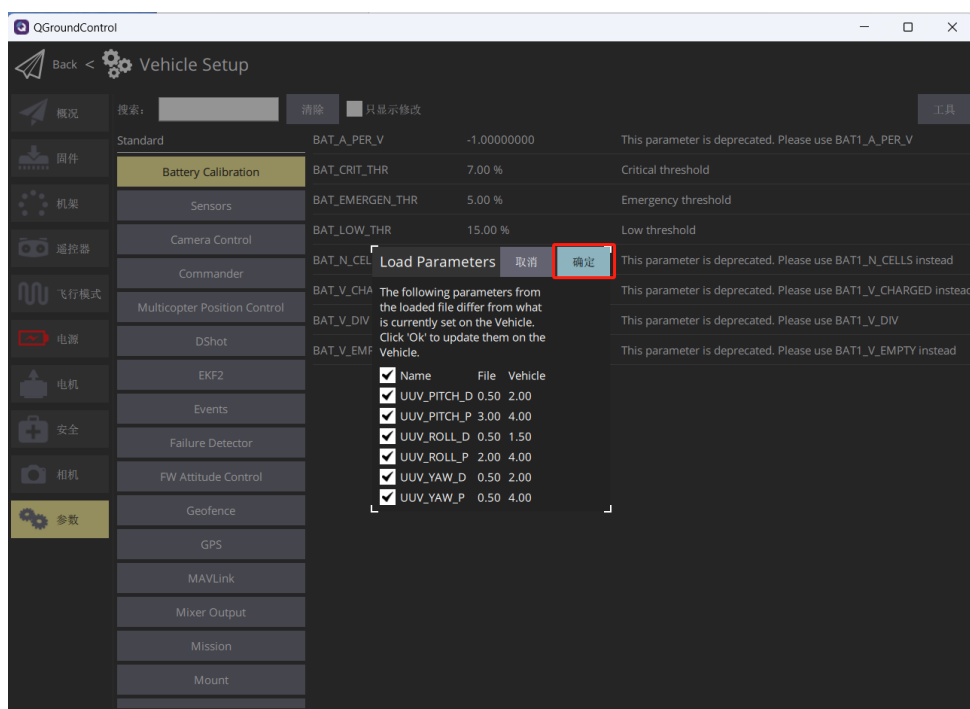
点击“参数”，右键“工具”，选择“加载文件”。



打开“UUV.params”参数文件。



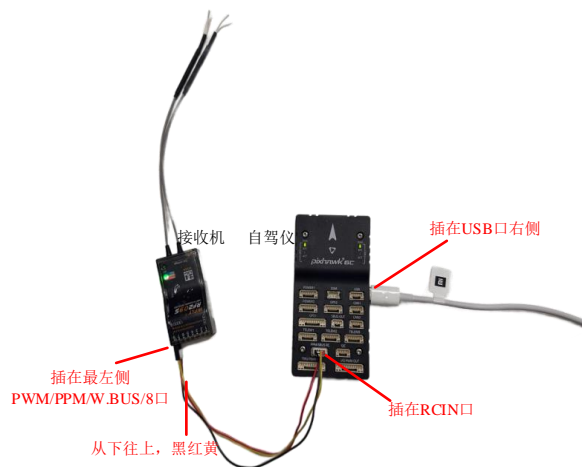
在弹出界面中点击“确定”。



## 6.2. 遥控器配置

### Step 1:

按如下图所示连接接收机和 Pixhawk 6C 飞控，并通过 USB-TypeC 线将飞控连接至电脑。



## Step 2:

通电后，长按接收机上的 SET3 秒，橙灯慢闪，等待发射机对码指令。然后，点击遥控器界面中左上角“WFLY”的图标，点击“通信设置”，点击“对码”。对码成功后，接收机绿灯常亮，发射机 RF 灯常亮。



## Step 3:

点击待机界面中的“WFLY”，进入“系统设置”，确认“摇杆模式”为“模式2”



## Step 4:

该遥控器没有专用的 UUV 模型，在“WFLY”→“系统设置”→“模型选择”中选择

“Model11”。



“机型选择” 设置为 “直升机”。



在 “模型功能” → “十字盘设置” 中设置为 “普通” 类型。



## Step 5:

其他遥控器配置参考 “\*:\PX4PSP\RflySimAPIs\2.RflySimUsage\1.BasicExps\c11\_RC-Config\Readme.pdf”。

## 6.3. 硬件在环仿真

### Step 1:

运行 “UUVModel\_HITL.bat”，输入飞控端口号后，启动硬件在环仿真。



名称	修改日期	类型	大小
Submarine2_Cooked	2023/11/23 12:21	文件夹	
GenerateModelDLLFile.p	2023/11/22 16:18	MATLAB.p.9.14.0	5 KB
UUV.params	2023/11/27 14:44	PARAMS 文件	1 KB
UUVModel_HITL.bat	2023/11/22 16:18	Windows 批处理...	6 KB
MavLinkStruct.mat	2023/11/22 16:18	MATLAB Data	5 KB
MulticopterModel.zip	2023/11/22 16:18	压缩(zipped)文件...	116 KB
Readme.docx	2023/11/27 11:37	Microsoft Word ...	988 KB
RflySimModelLab.slx	2023/11/22 16:18	Simulink Model	72 KB
UUVModel.dll	2023/11/22 16:18	应用程序扩展	292 KB
UUVModel.slx	2023/11/22 16:18	Simulink Model	68 KB
UUVModel.slxc	2023/11/21 18:02	MATLAB.slxc.9.1...	134 KB
UUVModel_2017B backup 2022.10.1...	2023/11/22 16:18	压缩(zipped)文件...	86,958 KB
UUVModel_2017B.7z	2023/11/22 16:18	WinRAR 压缩文件	14,854 KB
UUVModel_init.m	2023/11/22 16:18	MATLAB Code	8 KB
UUVModel_SITL.bat	2023/11/22 16:18	Windows 批处理...	6 KB

```

C:\WINDOWS\system32\cmd. 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: USB ????

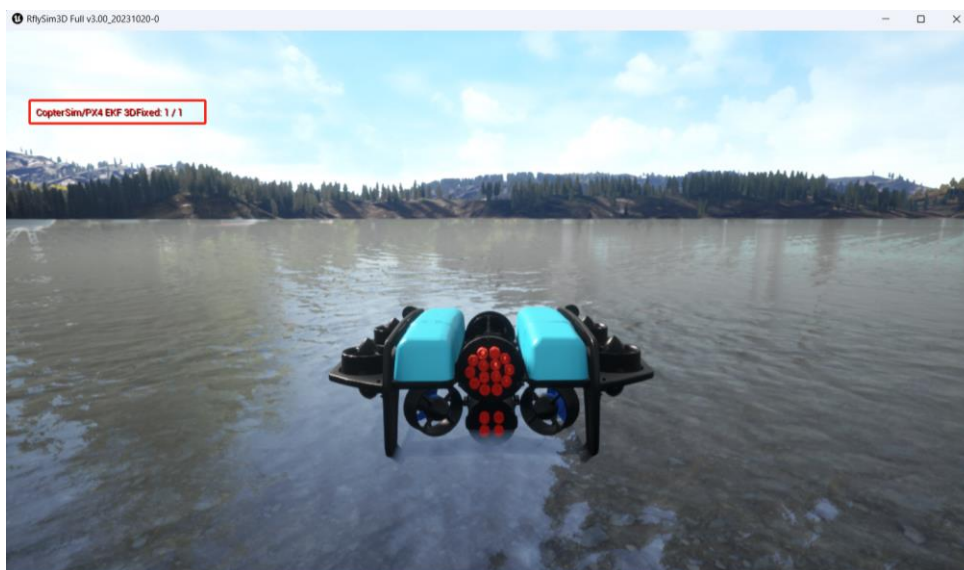
Recommended COM list input is: 3

-----
My COM list for HITL simulation is:3
Kill all CopterSims
Start QGroundControl
请按任意键继续. . . |

```

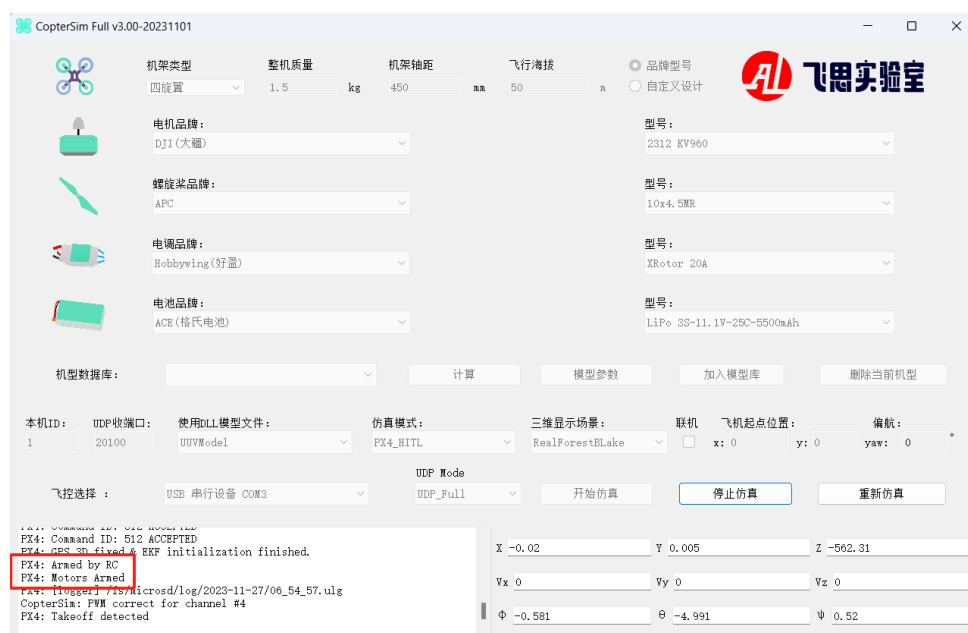
## Step 2:

RflySim3D 左上角显示该信息，即表明仿真完成初始化，可以开始通过遥控器进行操控。



### Step 3:

拨动遥控器转换开关，UUV 解锁。



### Step 4:

拨动遥控器油门推杆，在三维场景中可以看到UUV在前进，UUV最大前进速度为1.5m/s。



## Step 5:

拨动遥控器方向推杆，在三维场景中可看到 UAV 偏航角迅速变化，左上角数据中也可以看到偏航角速率增大/减小。



## Step 6:

以相应的方式，可以操控滚转/俯仰通道。

## 7. 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](#)

## 8. 常见问题

Q1.

A1.

