

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

基于系统模板的四轴八旋翼模型验证（DLL生成及SIL/HIL实验）

1.2 实验目的

将Simulink文件编译生成的四轴八旋翼DLL模型文件；并对生成的四轴八旋翼模型进行软硬件在环仿真测试，通过本例程熟悉平台四轴八旋翼模型的使用。

1.3 关键知识点

四轴八旋翼simulink模型基于系统模板构建，并对初始化参数（旋翼数量、大小、重量、发动机特性）及三维显示样式做了对应修改。对于多旋翼飞行器（如四旋翼、六旋翼等）来说，其动力学模型通常具有对称（旋翼的布局和旋转）和相似（主要是推力和反应特性）特性。

载具的基本动力学特性

四轴八旋翼无人机的六自由度运动，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飞机的运动状态。

地面坐标系

$$Ox_g y_g z_g$$

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），

$$x_g$$

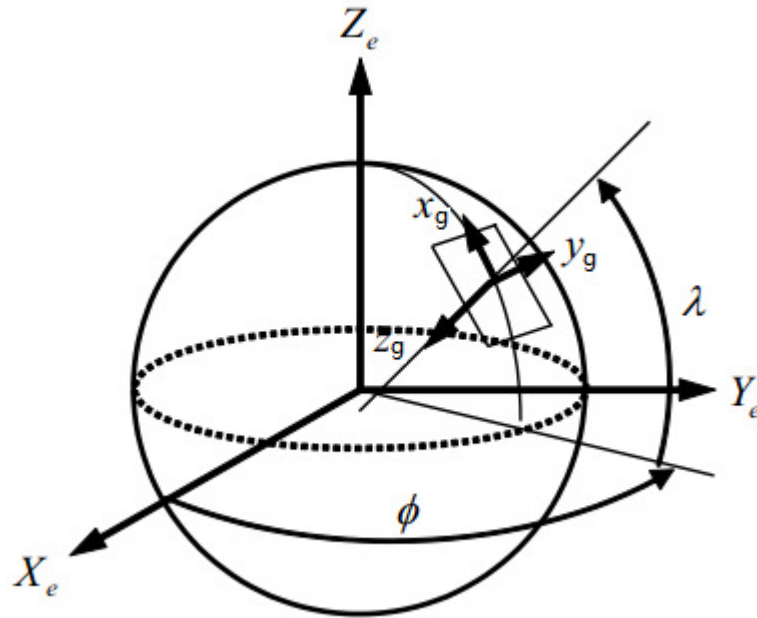
轴位于水平面内，指向某一固定方向（如正北方向、飞机的航线方向），

$$z_g$$

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

$Ox_b y_b z_b$

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

$Ox_b z_b$

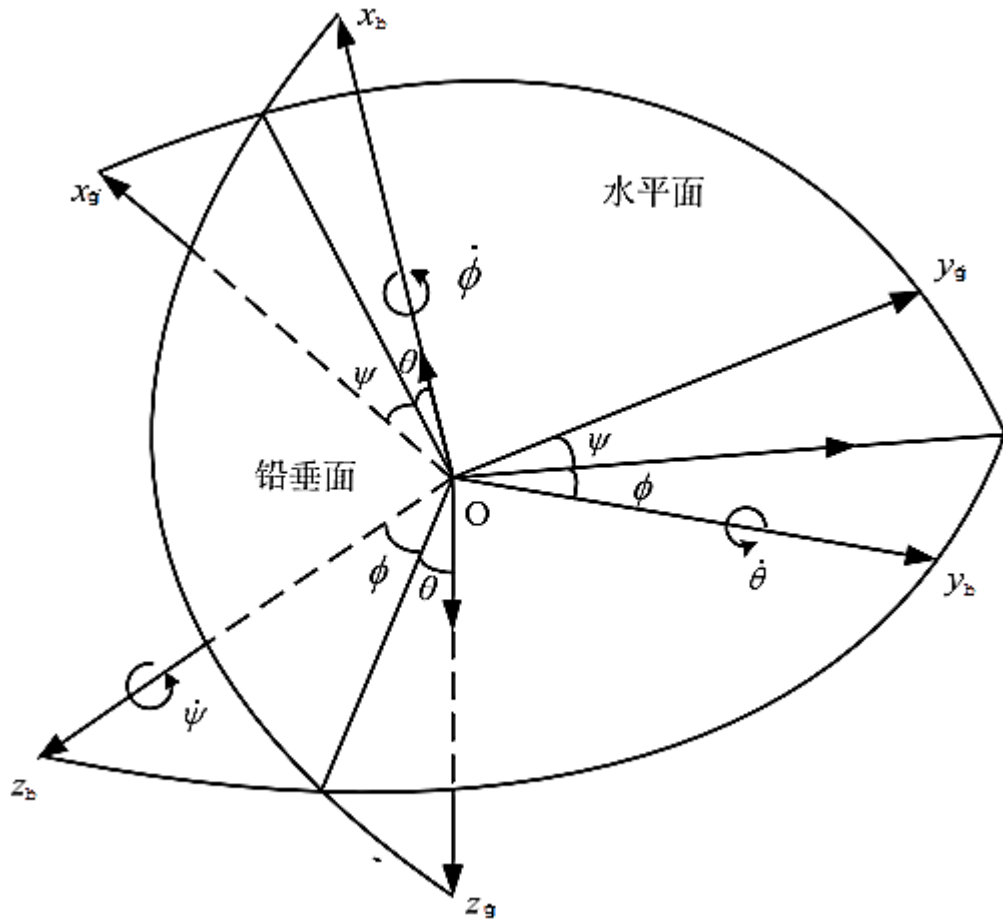
内并且垂直于纵轴，向下为正方向。

y_b

轴垂直于飞行器对称面

$Ox_b z_b$

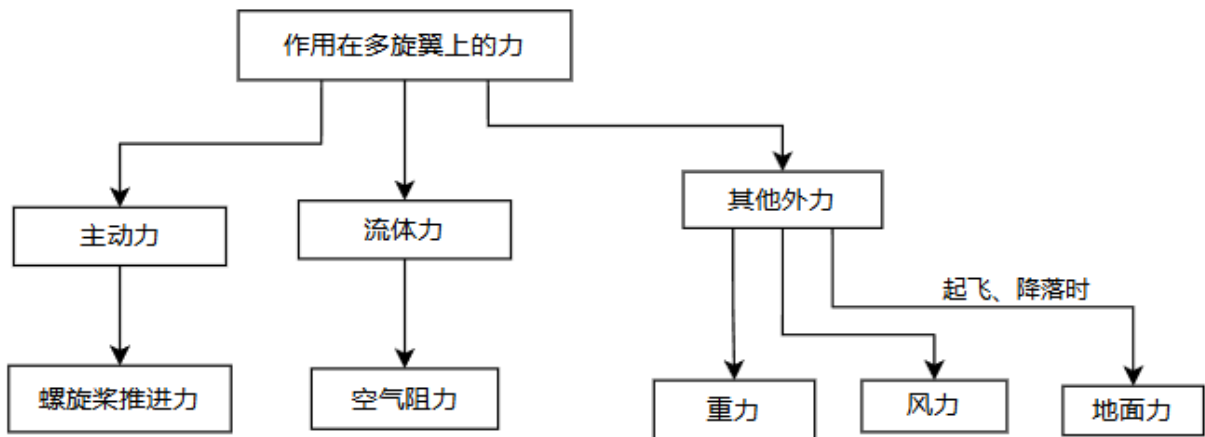
，向右为正方向。机体坐标系是作用在飞机上的力和力矩的参考坐标系。



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。

四轴八旋翼无人机运动时，作用在无人机上的力主要包括螺旋桨推进力、空气阻力、重力、风力及地面力，如图所示。



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）。运

动六自由度分解：

运动自由度	坐标轴	运动学分析
前后	前向/后向 (Fore/Aft: x轴)	以前向运动为例，加快后侧旋翼的转速，同时减慢前侧旋翼的转速，使无人机的后部上升，前部下降，从而产生俯仰运动 (Pitch)。这种姿态会产生向前的推力，使无人机向前移动。
左右	左/右 (Port/Starboard: y轴)	以向右运动为例，加快左侧旋翼的转速，同时减慢右侧旋翼的转速，使左侧上升，右侧下降，产生向右的滚转运动 (Roll)，使无人机向右平移。
上下	上/下 (Up/Down: z轴)	增加所有旋翼的转速，产生更大的升力，使无人机向上升；减小所有旋翼的转速，减少升力，使无人机下降。
滚转	绕纵轴转动 (Longitudinal Axis: x轴)	加快一侧旋翼的转速，同时减慢另一侧旋翼的转速，产生滚转运动。
俯仰	绕横轴转动 (Lateral Axis: y轴)	加快后侧旋翼的转速，同时减慢前侧旋翼的转速，使无人机的后部上升，前部下降，从而产生俯仰运动
偏航	绕垂直轴转动 (Vertical Axis: z轴)	以顺时针旋转为例，需要加快逆时针旋转的旋翼的转速，同时减慢顺时针旋转的旋翼的转速。这样，逆时针旋翼产生的反扭矩增大，而顺时针旋翼产生的反扭矩减小，无人机顺时针方向转动。

■ 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](#))

本例程中四轴八旋翼的机架型号为Generic 10 Octo coaxial geometry，其在\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d\airframes\12001_octo_cox中定义如下：

```
.$R/etc/init.d/rc.mc_defaults
```

执行rc.mc_defaults脚本，它包含了旋翼无人机的默认参数设置，可以用来设置一些基本的系统参数和增益。

同时在12001_octo_cox文件中设置混控文件

```
set PWM_OUT 12345678
```

```
set MIXER octo_cox
```

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\ octo_cox.main.mix，其中R:8c是定义了八个电机的布局。

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及组成模块
见：[..\..\1.BasicExps\e0_MinModelTemp\Readme.pdf](#)

关键参数

参数名	参数	值
三维样式	ModelParam_3DType	int16(10)
旋翼样式	ModelParam_uavType	int16(10)

参数名	参数	值
初始位置	ModelInit_PosE	[0,0,0]
初始姿态	ModelInit_AngEuler	[0,0,0]
初始速度	ModelInit_VelB	[0,0,0]
初始角速度	ModelInit_RateB	[0,0,0]
初始经纬度	ModelParam_GPSLatLong	[40.1540302 116.2593683]
原点的海拔高度	ModelParam_envAltitude	-50
飞机质量	ModelParam_uavMass	2.7
转动惯量	ModelParam_uavJ	[0.0411,0,0;0,0.0419,0; 0,0,0.0766]
螺旋桨拉力系数	ModelParam_rotorCt	1.681e-05
螺旋桨转矩系数	ModelParam_rotorCm	2.783e-07
机身半径	ModelParam.uavR	0.225(m)
电机螺旋桨转动惯量	ModelParam.motorJm	0.0001287 (kg/m ²)
电机响应时间常数	ModelParam.motorT	0.0214(s)
阻力系数	ModelParam.uavCd	0.055(N/(m/s) ²)
阻尼力矩系数	ModelParam.uavCCm	[0.0035 0.0039 0.0034] (N/(rad/s) ²)
油门到电机稳态转速曲线斜率	ModelParam.motorCr	842.1
油门到电机稳态转速曲线零点	ModelParam.motorWb	141.4(rad/s)

2. 实验效果

实现四轴八旋翼飞机DLL模型文件生成，以及完成四轴八旋翼软硬件在环仿真。

3. 文件目录

例程目录：

[安装目录]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e2_MultiModelCtrl\5.OctoCoxRotor

文件夹/文件名称	说明
OctoCoxRotor.slx	四轴八旋翼飞机模型模板文件。
OctoCoxRotor.dll	四轴八旋翼飞机DLL模型
OctoCoxRotorHITLRun.bat	硬件在环仿真批处理文件。
OctoCoxRotorSITLRun.bat	软件在环仿真批处理文件。
GenerateModelDLLFile.p	DLL格式转化文件。
Init.m	动力学模型相关参数。
Init_control.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。

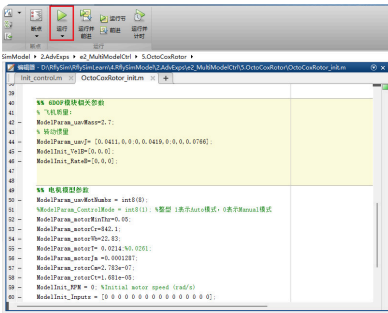
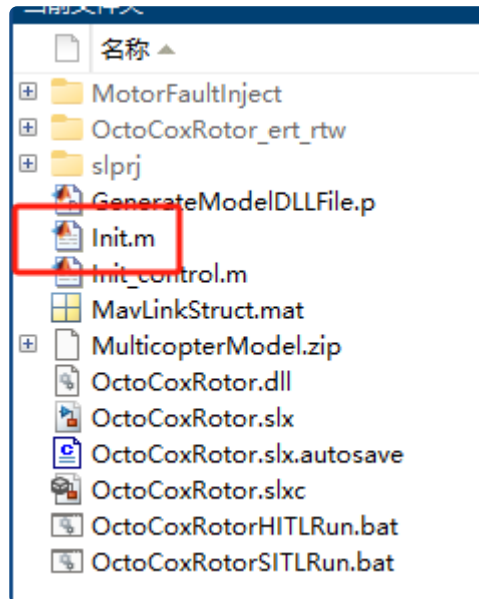
①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

5.实验步骤

5.1. 必做实验：DLL模型生成

Step 1: 运行.m文件

打开 “Init.m” 文件并运行



注意事项：从.m文件可以看出，与四旋翼模型相比，四轴八旋翼模型不同点如下：

1. 电机数量：四轴八旋翼无人机的电机数量为8（`ModelParam_uavMotNumbs = int8(8)`），而四旋翼无人机的电机数量为4（`ModelParam_uavMotNumbs = int8(4)`）。与四旋翼相比，四轴八旋翼增加4个控制通道，多控制了4个电机来驱动旋翼，这可以提高其悬停稳定性和操控性。
2. 质量：四轴八旋翼无人机的质量为2.7kg（`ModelParam_uavMass=2.7`）。

3. 转动惯量：四轴八旋翼无人机在x、y、z方向的转动惯量（ModelParam_uavJ）分别为
0.0411、0.0419、0.0766，无量纲。

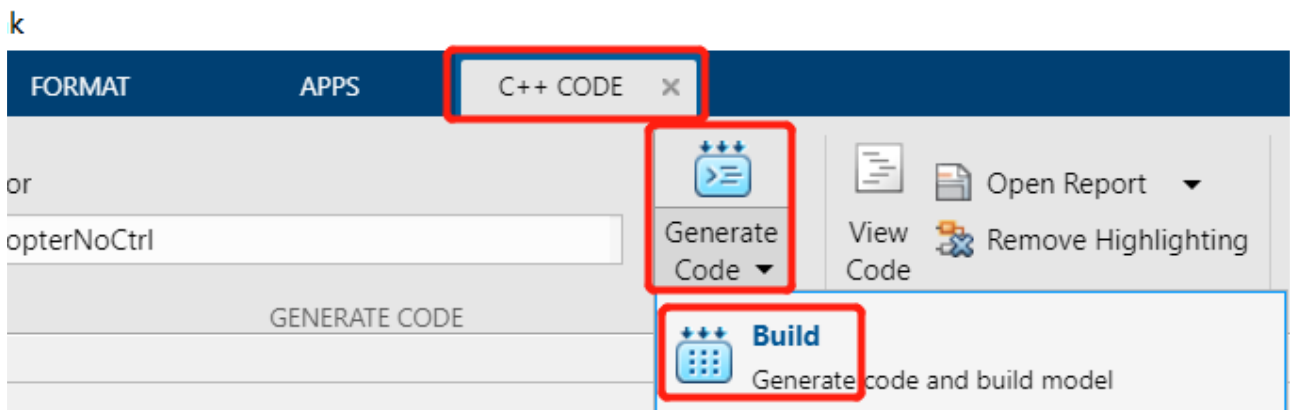
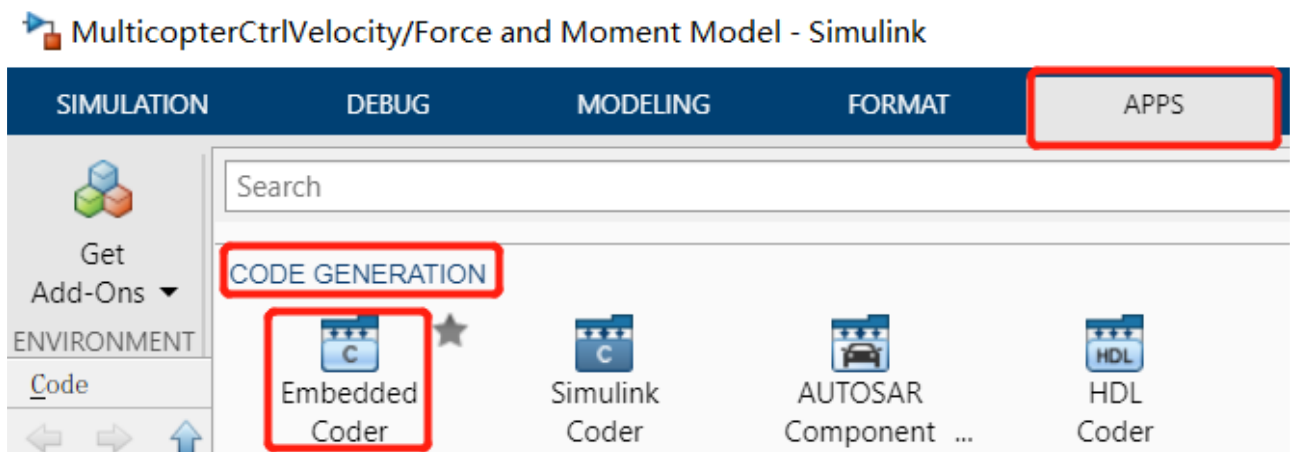
Step 2: 编译模型

打开“OctoCoxRotor.slx” Simulink 文件，点击Build Model 按钮生成代码。

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。

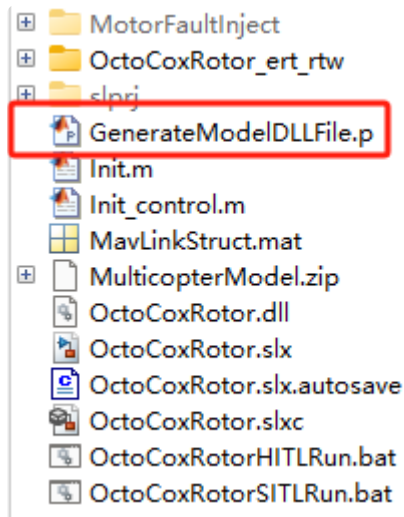


对于2019b及之后版本，点击APPS - CODE GENERATION - Embedded Coder才能弹出代码生成工具栏，在其中如下图所示点击“C++CODE” - “Generate Code” - “Build”按钮就能编译生成代码。



Step 3: 生成DLL文件

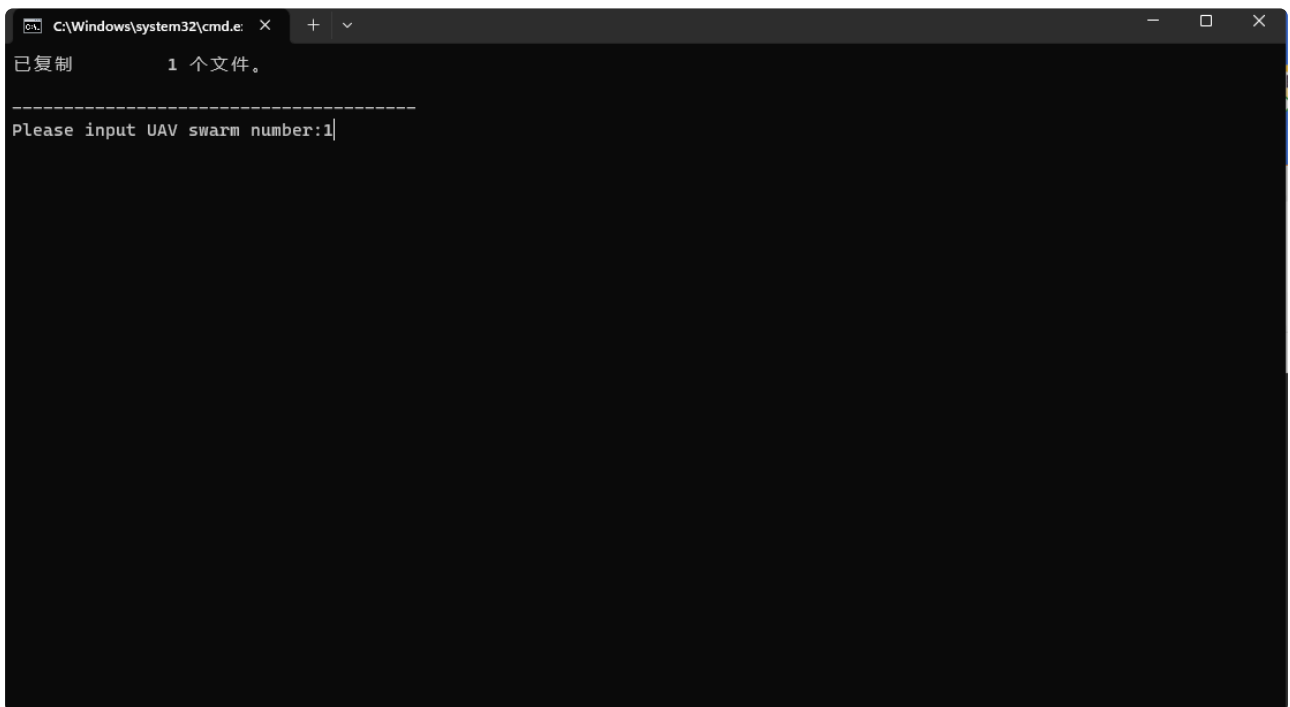
代码生成完毕后，在 Matlab 中右键“GenerateModelDLLFile.p”文件，点击运行，生成 OctoCoxRotor.dll 文件。



5.2. 必做实验：软件在环仿真

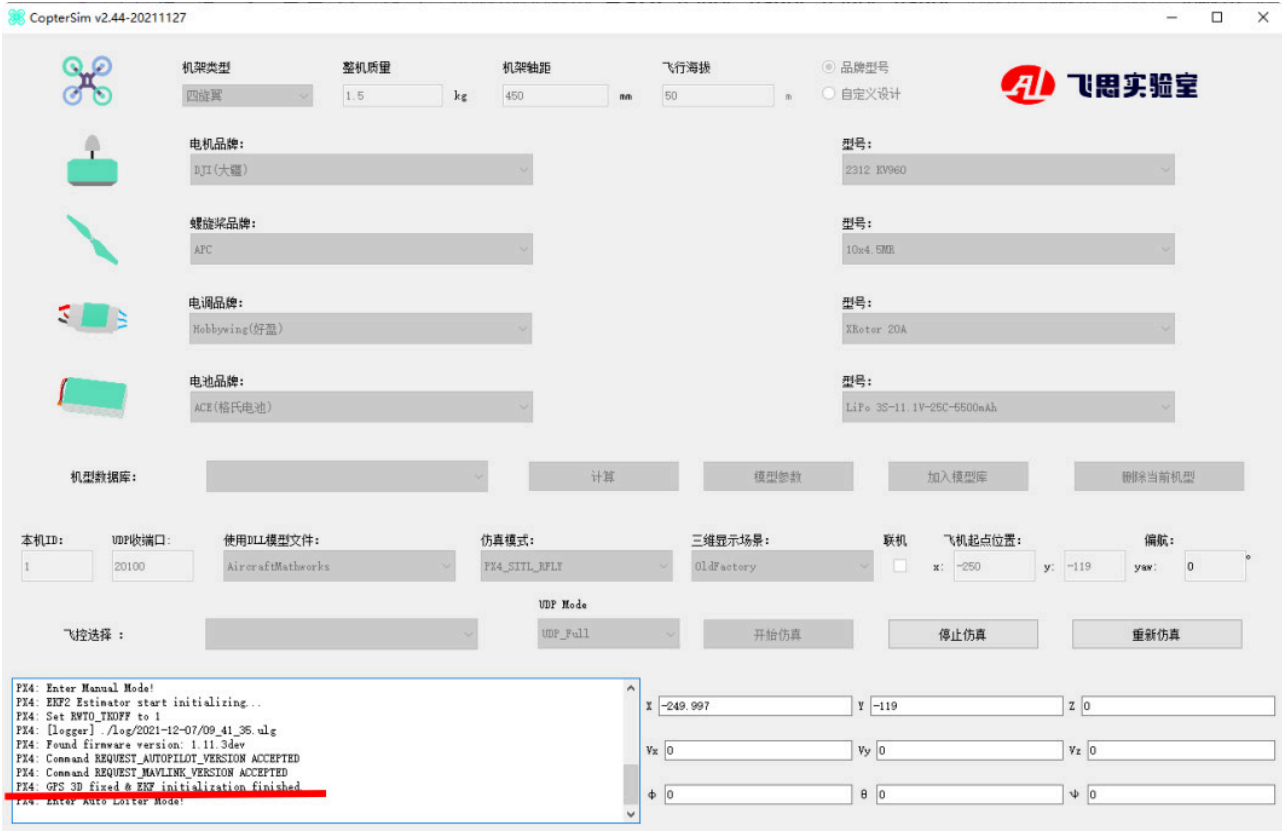
Step 1: 启动仿真

以管理员身份运行“[OctoCoxRotorSITLRun.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。



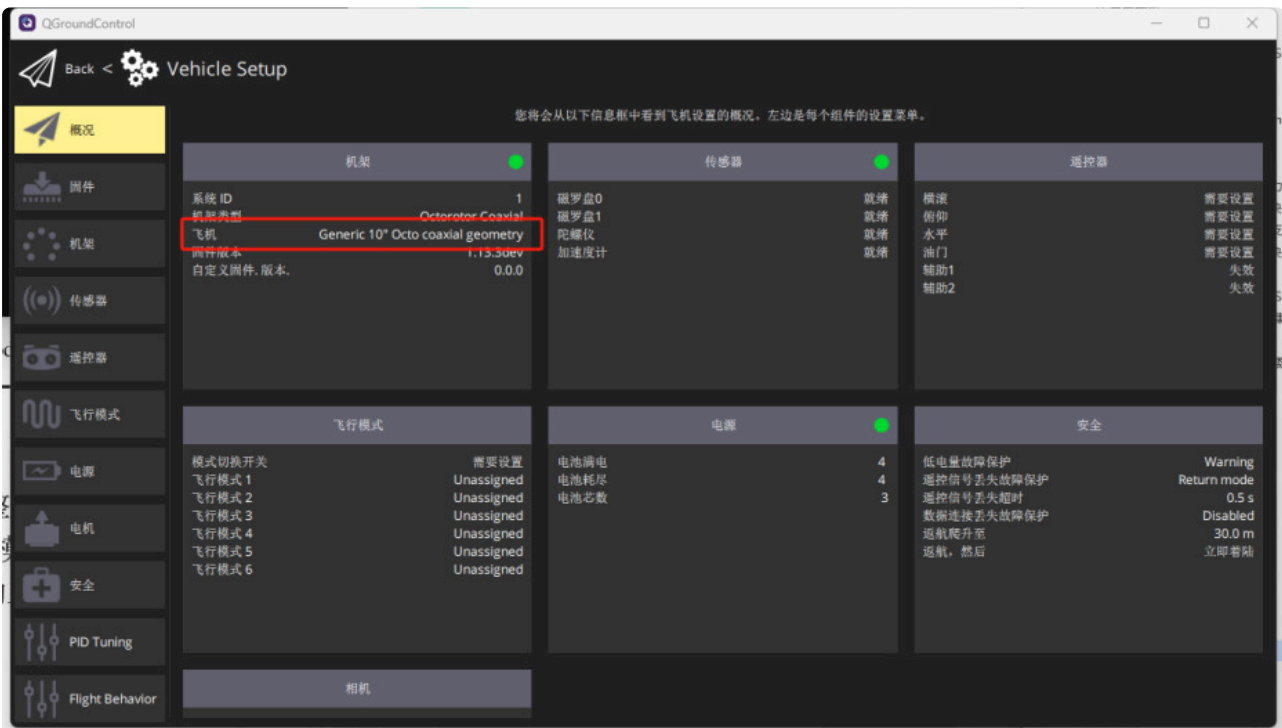
Step 2: 等待初始化完成

等待 CopterSim 中显示连接上 UE4。



Step 3: 起飞

确保QGC中机架设置如图



在 QGC 中点击起飞按钮，并设置一定的起飞高度，之后滑动确认。



注意：从 [OctoCoxRotorSITLRun.bat](#) 文件中可以找到定义机架类型的语句

```
set PX4SITLFrame=octo_cox
```

四轴八旋翼模型的机架配置在

`\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fm_u_common\init.d\airframes\octo_cox`中定义

Step 4: 观测结果

在 RflySim3D 中观察是否正常飞行。



5.3. 选做实验：硬件在环仿真

Step 1: 连接飞控

硬件在环需要准备一个飞控，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）。

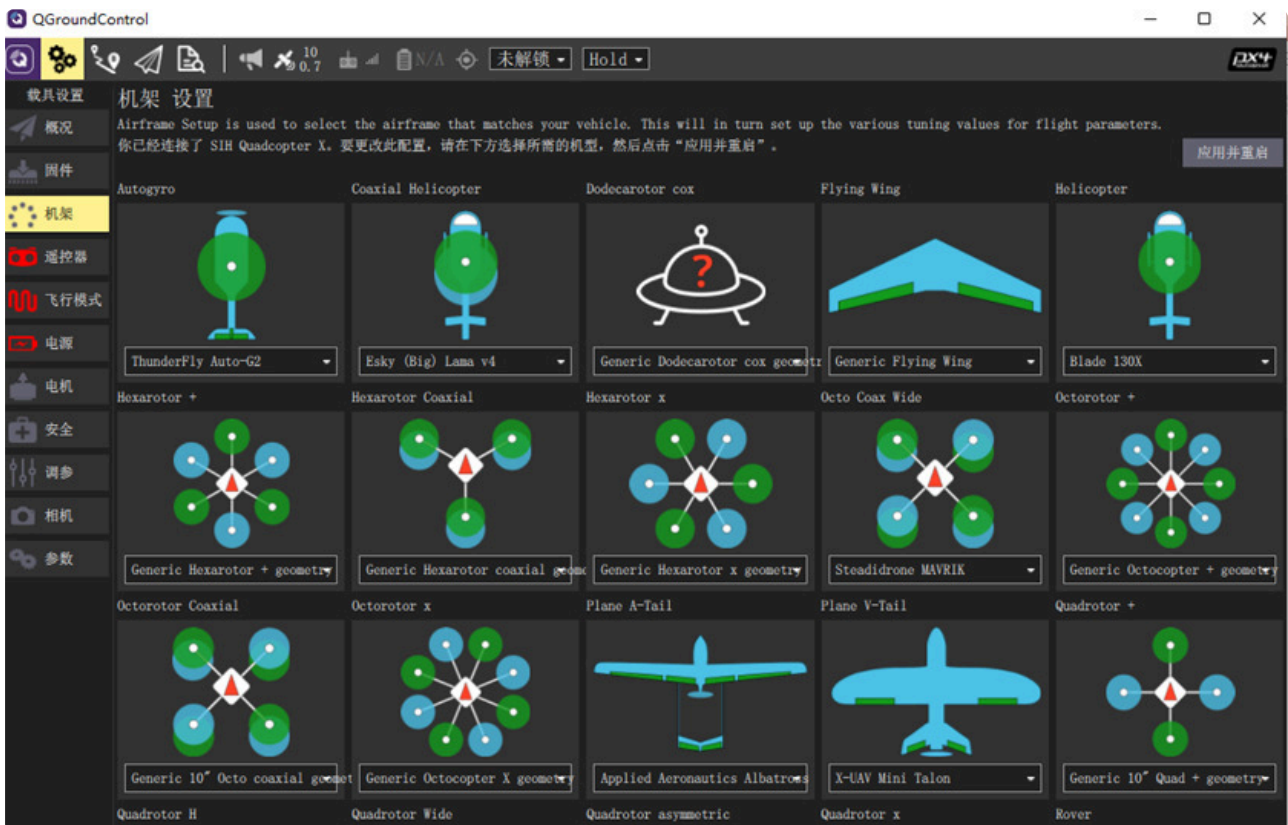


Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

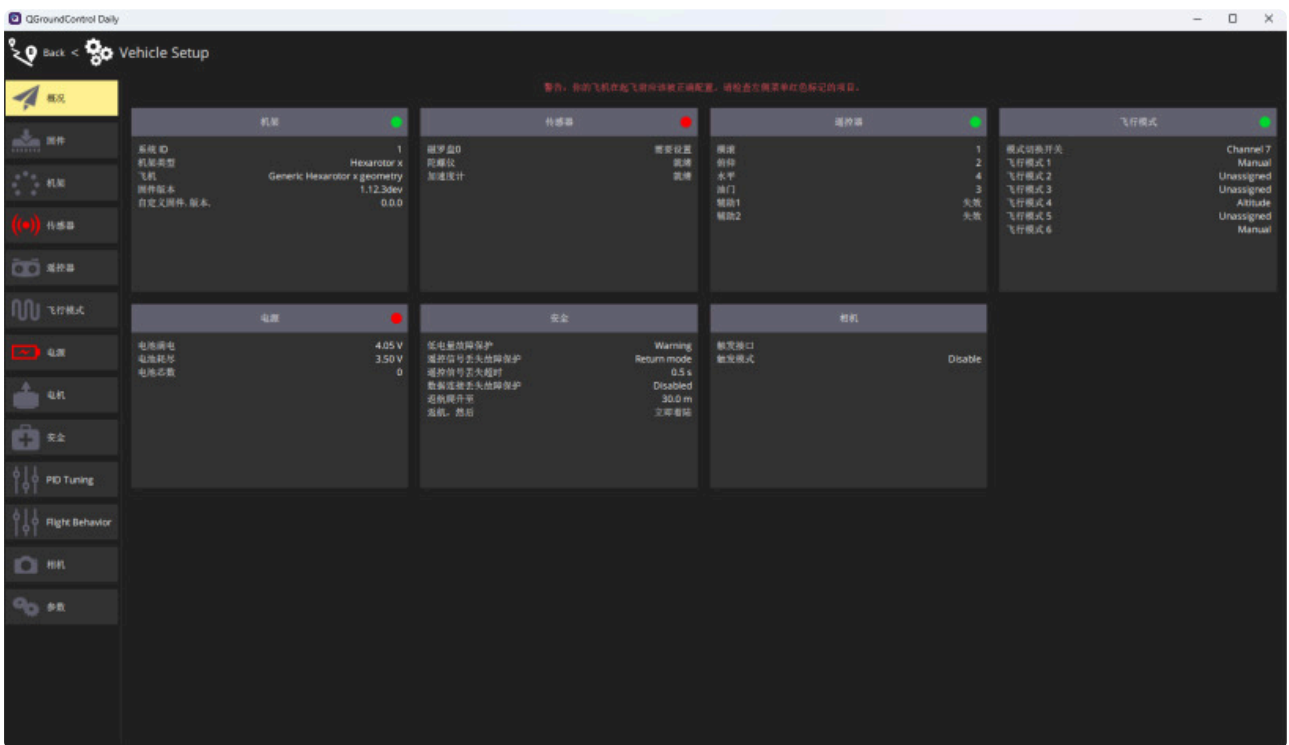
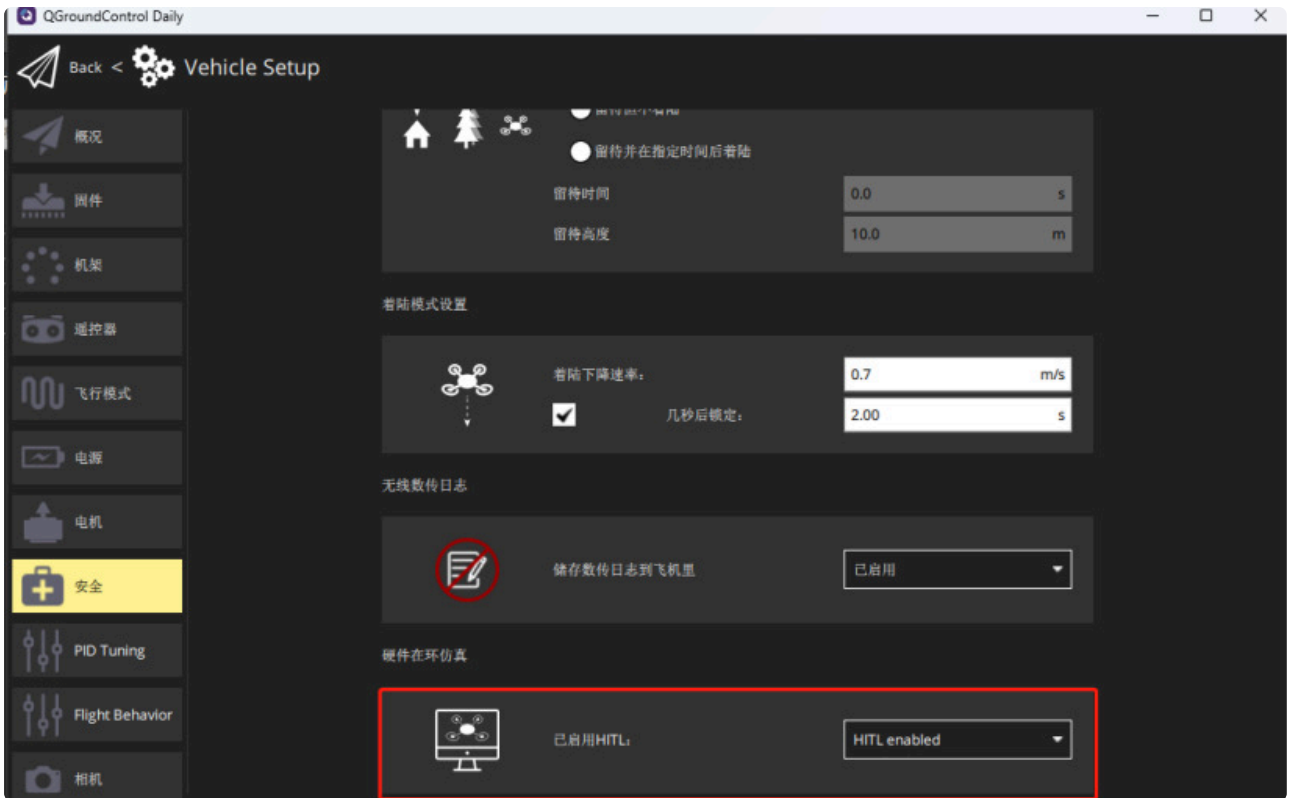
3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
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 10 Octo coaxial geometry”，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“OctoCoxRotorHITLRun.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。

MotorFaultInject	2023/12/27 9:43	文件夹	
dir.xlsx	2023/12/26 19:01	Microsoft Excel ...	6 KB
GenerateModelDLLFile.p	2022/12/16 16:35	MATLAB P-code	5 KB
MavLinkStruct.mat	2019/6/27 16:28	Access.Shortcut...	5 KB
MulticopterModel.zip	2023/12/27 14:23	Bandizip.zip	99 KB
OctoCoxRotor.dll	2023/12/27 14:23	应用程序扩展	225 KB
OctoCoxRotor.slx	2023/12/27 14:23	Simulink Model	66 KB
OctoCoxRotor_init.m	2023/12/27 14:23	MATLAB Code	3 KB
OctoCoxRotorHITLRun.bat	2023/5/16 16:00	Windows 批处理...	6 KB
OctoCoxRotorSITLRun.bat	2023/5/16 16:00	Windows 批处理...	6 KB
Readme.docx	2023/12/28 13:55	Microsoft Word ...	3,660 KB
Readme.pdf	2023/12/26 19:00	Microsoft Edge ...	2,116 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

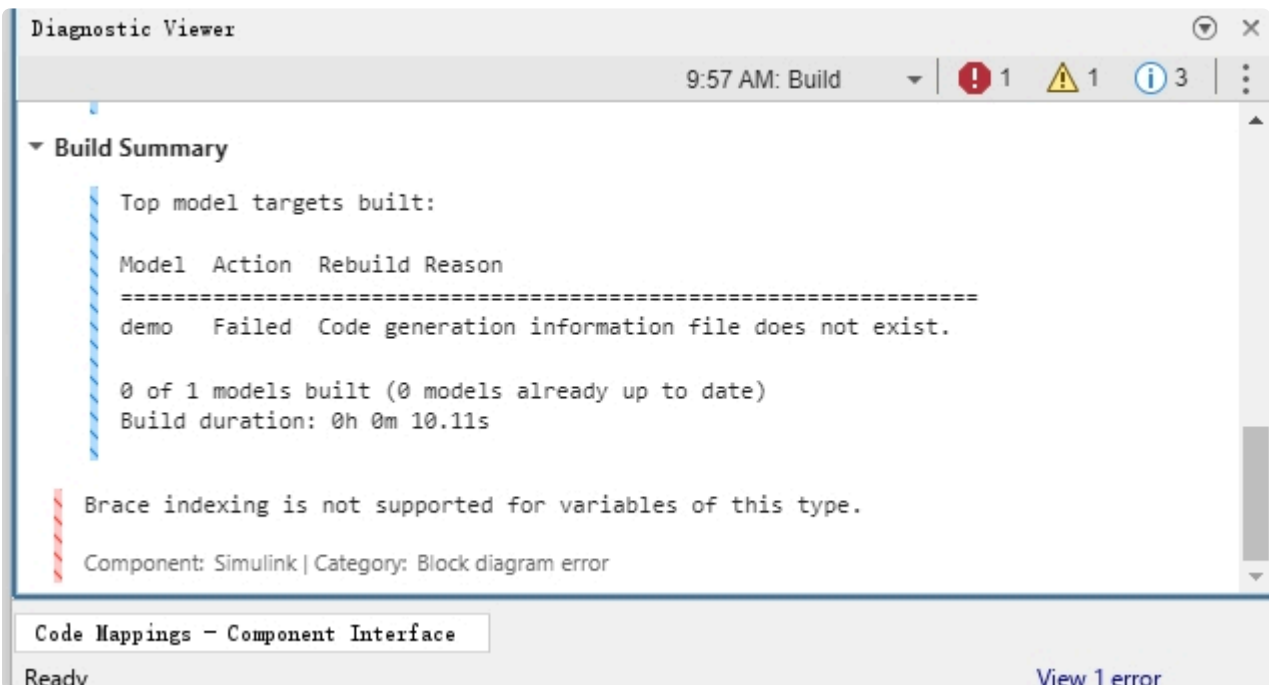
之后测试步骤与软件在环的Step2到Step4相同，运行之后在 RflySim3D 中观察是否按指令飞行。

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. [\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/API.pdf](#)
3. [\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/API.pdf](#)
4. [\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/API.pdf](#)
- 5.

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



```
命令窗口
>> mex -setup
MEX 配置为使用 'Microsoft Visual C++ 2017 (C)' 以进行 C 语言编译。
警告: MATLAB C 和 Fortran API 已更改, 现可支持
包含 2^32-1 个以上元素的 MATLAB 变量。您需要
更新代码以利用新的 API。
您可以在以下网址找到更多的相关信息:
http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab\_external/upgrading-mex-files-to-use-64-bit

要选择不同的 C 编译器, 请从以下选项中选择一种命令:
Microsoft Visual C++ 2013 (C) mex -setup:D:\MATLAB\R2017b\bin\win64\mexopts\msvc2013.xml C
Microsoft Visual C++ 2015 (C) mex -setup:D:\MATLAB\R2017b\bin\win64\mexopts\msvc2015.xml C
Microsoft Visual C++ 2017 (C) mex -setup:C:\Users\dream\AppData\Roaming\MathWorks\MATLAB\R2

要选择不同的语言, 请从以下选项中选择一种命令:
mex -setup C++
mex -setup FORTRAN
fx >>
```

Q2: 编译报错, 无法加载库文件



```
诊断查看器
下午4:48: 编译
-----
Exp1_MiniModelTemp 信息:保存文件完成工作状况。 无法编译。有关详细信息, 请参阅编译日志。 ad
编译了 0 个模型, 共 1 个模型(0 个模型已经是最新的)
编译持续时间: 0h 0m 3.7699s
-----
无法加载 'pixhawk_slib_adv/CopterForcerModel' 引用的库 'pixhawk_slib_adv'。
附件: Simulink | 美国 | Block diagram 错误
代码映射 - 应用程序
```

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