

# 1. 实验名称及目的

## 1.1 实验名称

基于系统模板的六旋翼模型验证（DLL生成及SIL/HIL实验）

## 1.2 实验目的

将Simulink文件编译生成六旋翼的DLL模型文件；并对生成的六旋翼模型进行软硬件在环仿真测试，通过本例程熟悉平台六旋翼模型的使用。

## 1.3 关键知识点

HexarotorModelCTRL.slx是基于最大系统模版构建的六旋翼模型，但本simulink模型中没有用到最大模板相对最小系统模板附加的输入输出，只是高级版的CopterSim可以读取RflySim3D场景地形高度并传输给DLL模型。

六旋翼simulink模型未对作为系统模型模版的四旋翼simulink模型做改动，仅对初始化参数（旋翼数量、大小、重量、发动机特性）做了对应修改。这是因为对于多旋翼飞行器（如四旋翼、六旋翼等），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

六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](..\..\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），

$$x_g$$

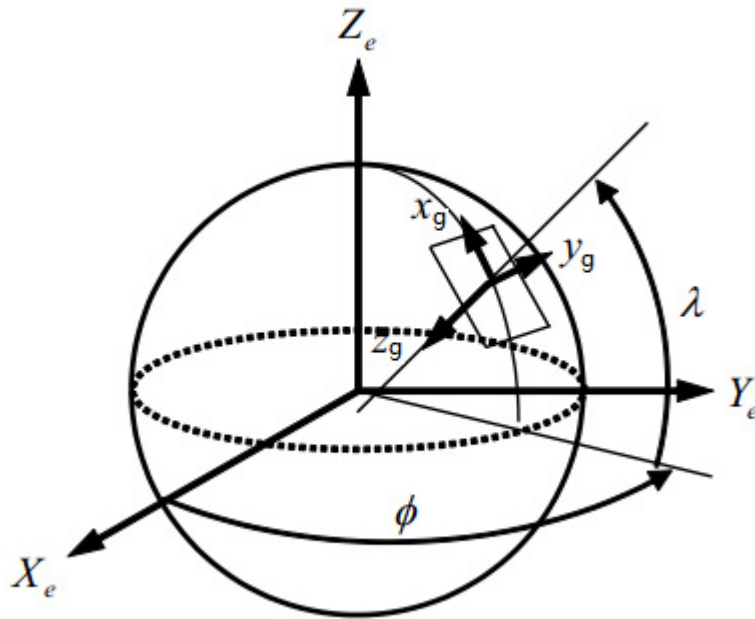
轴位于水平面内，指向某一固定方向（如飞机的航线方向），

$z_g$

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

$Ox_b z_b$

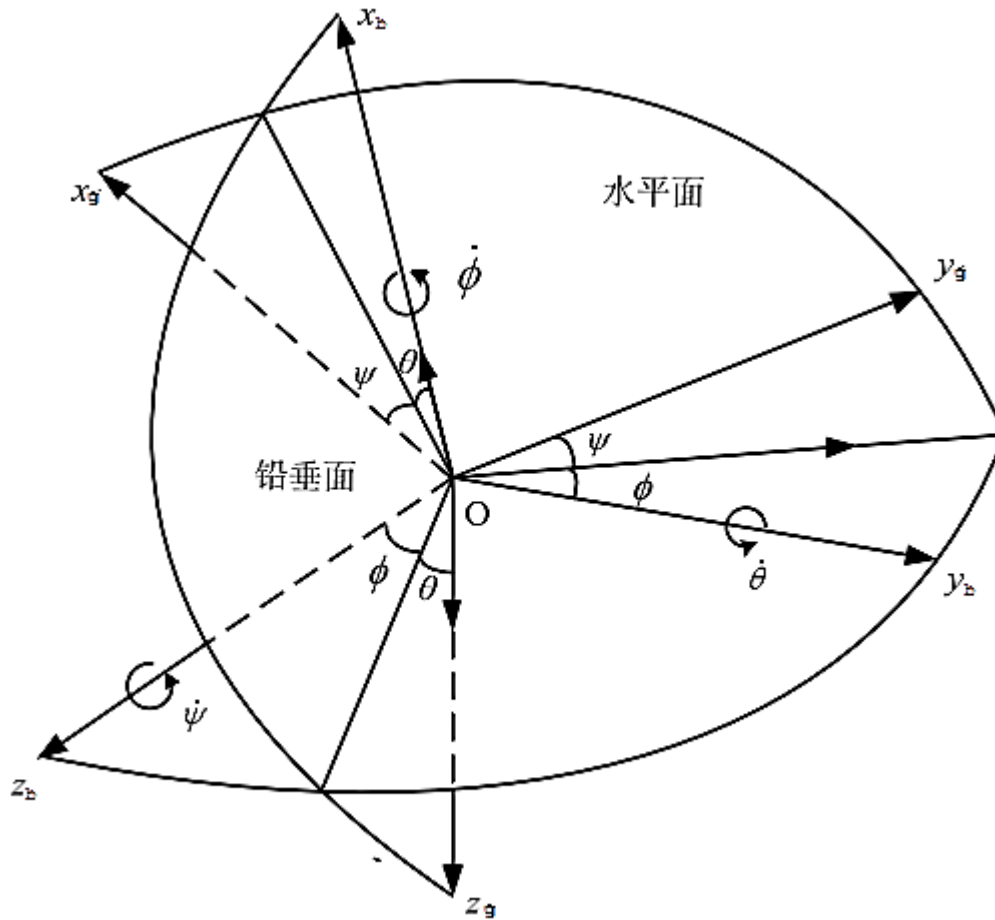
内并且垂直于纵轴，向下为正方向。

$y_b$

轴垂直于飞行器对称面

$Ox_bz_b$

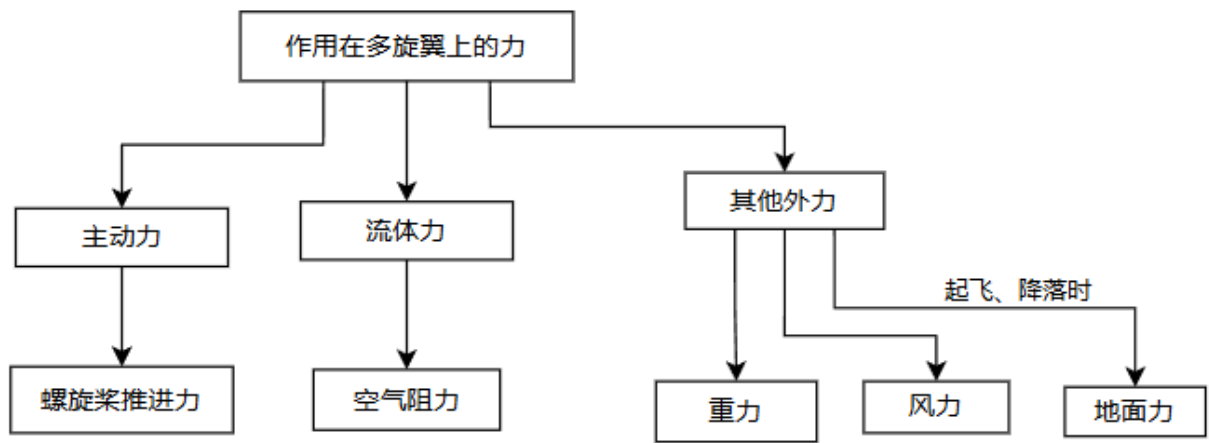
，向右为正方向。机体坐标系是作用在飞机上的力和力矩的参考坐标系。



## 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。

六旋翼无人机运动时，作用在无人机上的力主要包括螺旋桨推进力、空气阻力、重力及地面力，其构成如图所示。



## 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）。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，

运动自由度	坐标轴	运动学分析
		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，使得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 [\(v1.12\)](#)

本例程中六旋翼的机架名称 (X型): Generic Hexarotor x geometry, 其在\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu\_common\init.d\airframes\6001\_hexa\_x中定义如下:

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

```
param set-default MAV_TYPE 13
```

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

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6001\_hexa\_x文件中设置PWM输出通道与混控文件

```
set PWM_OUT 12345678
```

```
set MIXER hexa_x
```

## 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\px4fmw\_common\mixers\ hexa\_x.main.mix，其中R:6x是定义了六个电机的布局。

## 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：  
[\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/1.BasicExps/e0\\_MinModelTemp/Readme.pdf](#)

### 关键参数

参数名	参数	值
三维样式	ModelParam_3DType	int16(5)
旋翼样式	ModelParam_uavType	int16(5)
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	1.515*1.5
转动惯量	ModelParam_uavJ	[0.0211*1.5,0,0; 0,0.0219*1.5,0; 0,0,0.0366*1.5]

参数名	参数	值
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 <sup>2</sup> )
电机响应时间常数	ModelParam.motorT	0.0214(s)
阻力系数	ModelParam.uavCd	0.055(N/(m/s) <sup>2</sup> )
阻尼力矩系数	ModelParam.uavCCm	[0.0035 0.0039 0.0034] (N/(rad/s) <sup>2</sup> )
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	22.83(rad/s)

## 2. 实验效果

实现六旋翼飞机DLL模型文件生成，以及完成六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\4.HexModelCtrl](#)

文件夹/文件名称	说明
HexarotorModelCTRL.slx	六旋翼飞机模型文件。
HexarotorModelCTRLHITLRun.bat	硬件在环仿真批处理文件。
HexarotorModelCTRLSITLRun.bat	软件在环仿真批处理文件。
GenerateModelDLLFile.p	DLL格式转化文件。

文件夹/文件名称	说明
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。

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。

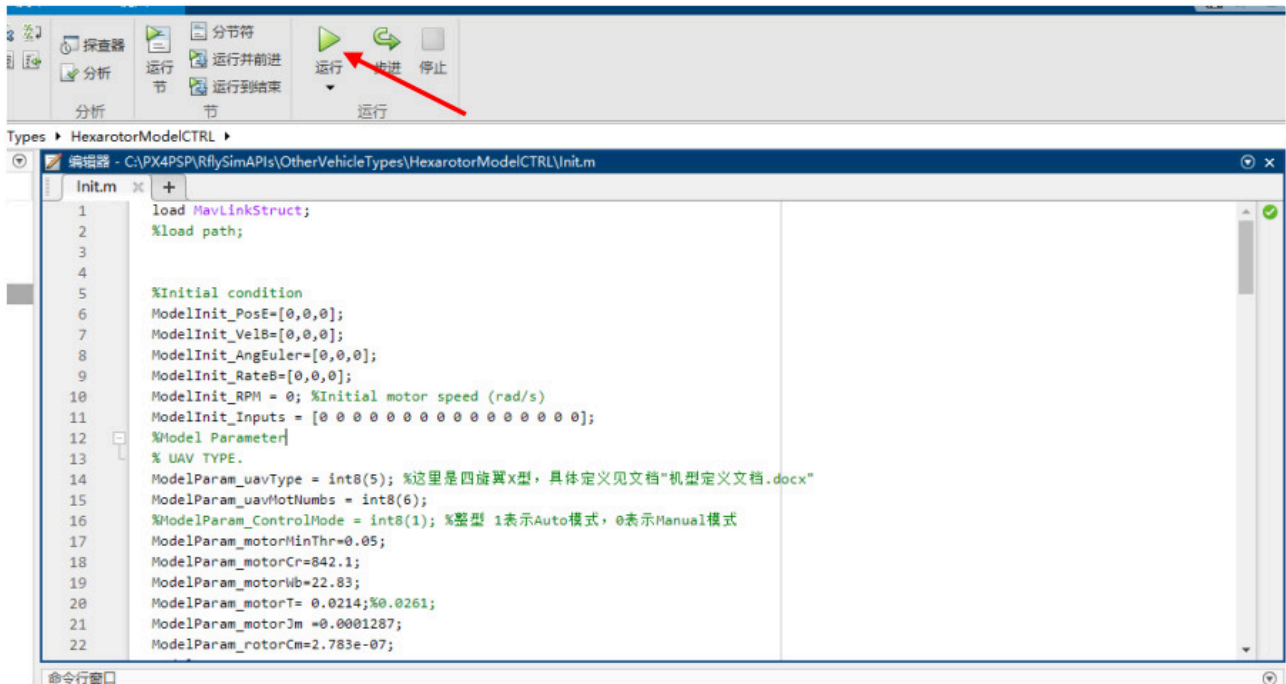
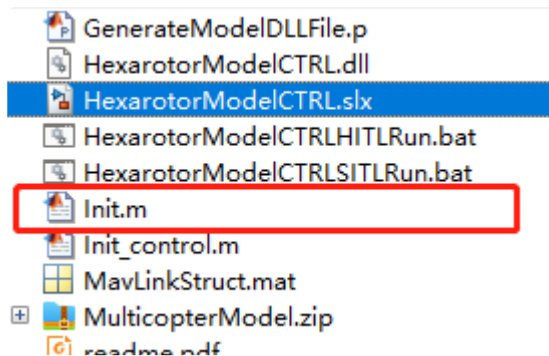
①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

## 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



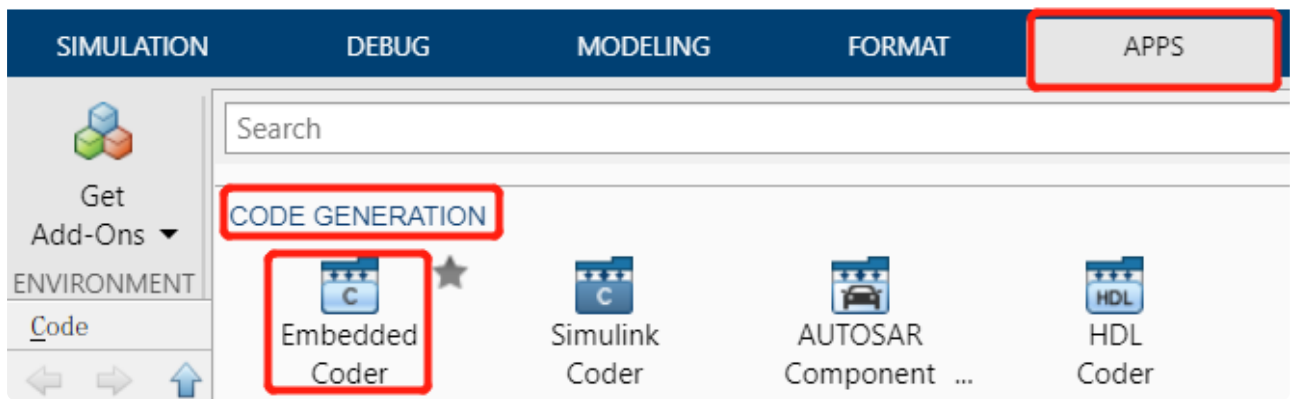
## Step 2: 编译模型

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

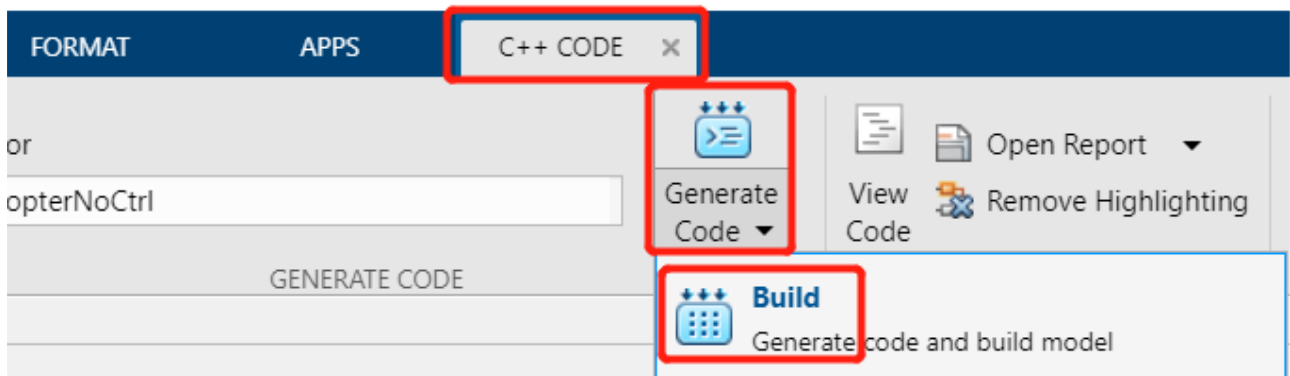
对于MATLAB 2019a及之前版本，工具栏样式见下图，直接点击它的编译按钮“Build”即可。



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。



k

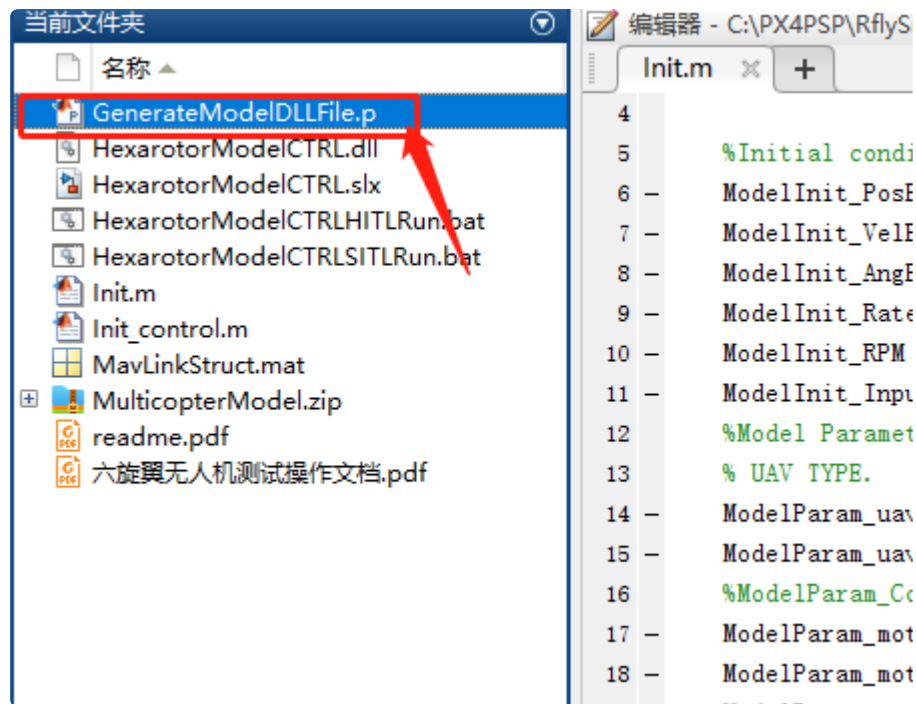


注意事项：与四旋翼模型相比，六旋翼模型不同点如下：

- 1) 从.m文件可以看出六旋翼与四旋翼相比，其质量参数与转动惯量为四旋翼的1.5倍。
- 2) 与四旋翼相比，六旋翼增加两个控制通道，多控制了二个电机来驱动旋翼。

### 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 HexarotorModelCTRL.dll 文件。

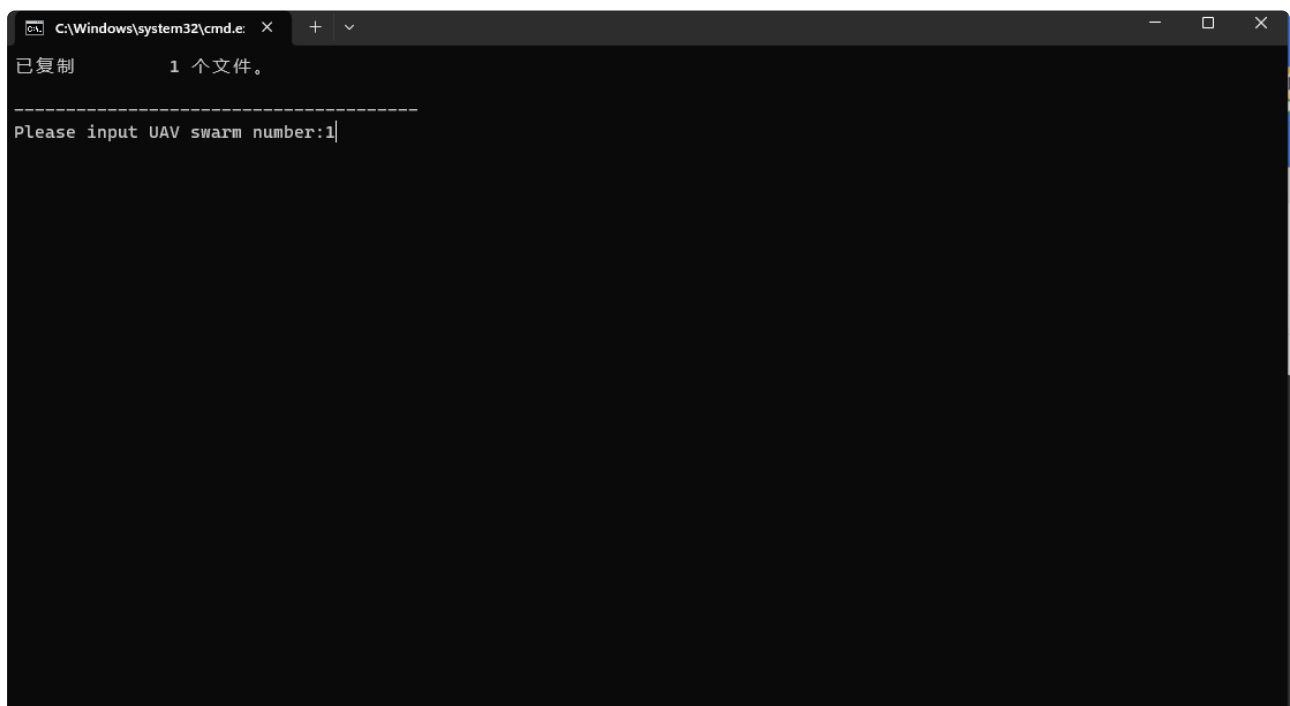


## 5.2. 必做实验：软件在环仿真

### Step 1: 启动仿真

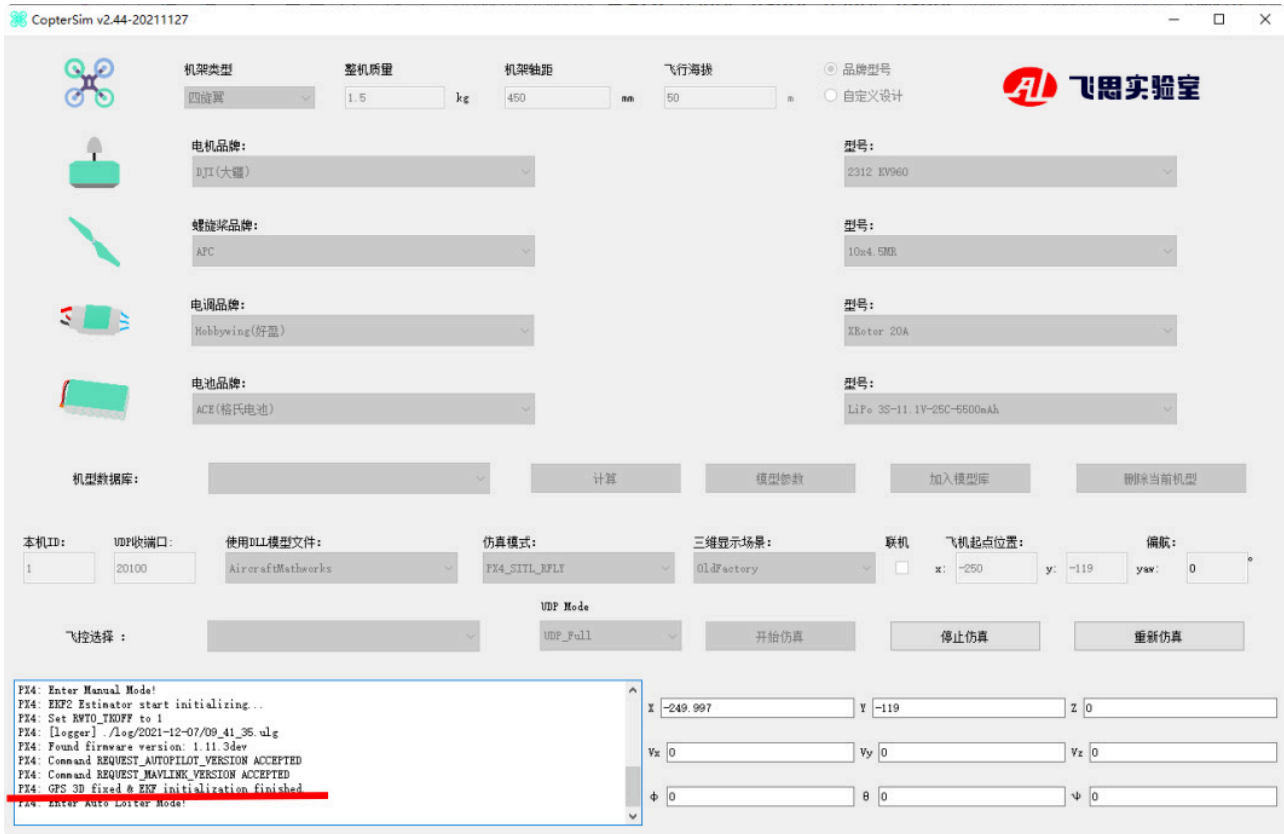
以管理员身份运行“HexarotorModelCTRLSITLRun.bat”批处理文件，在弹出的终端窗口中输入

1, 启动一架飞机的软件在环仿真。



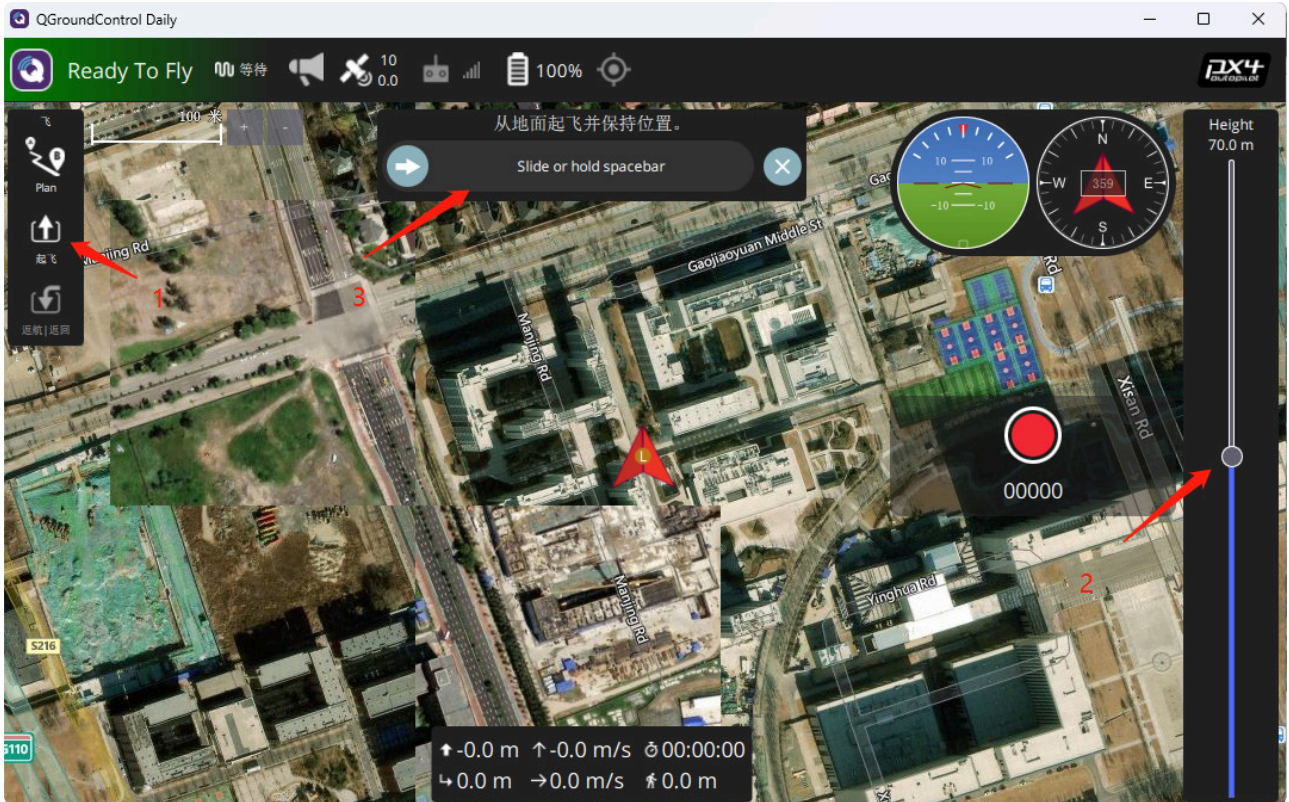
## Step 2: 等待初始化完成

等待 CopterSim 中显示连接上 UE4。



## Step 3: 起飞

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。



## Step 4: 观测结果

在QGC中控制六旋翼运动，并在 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）。

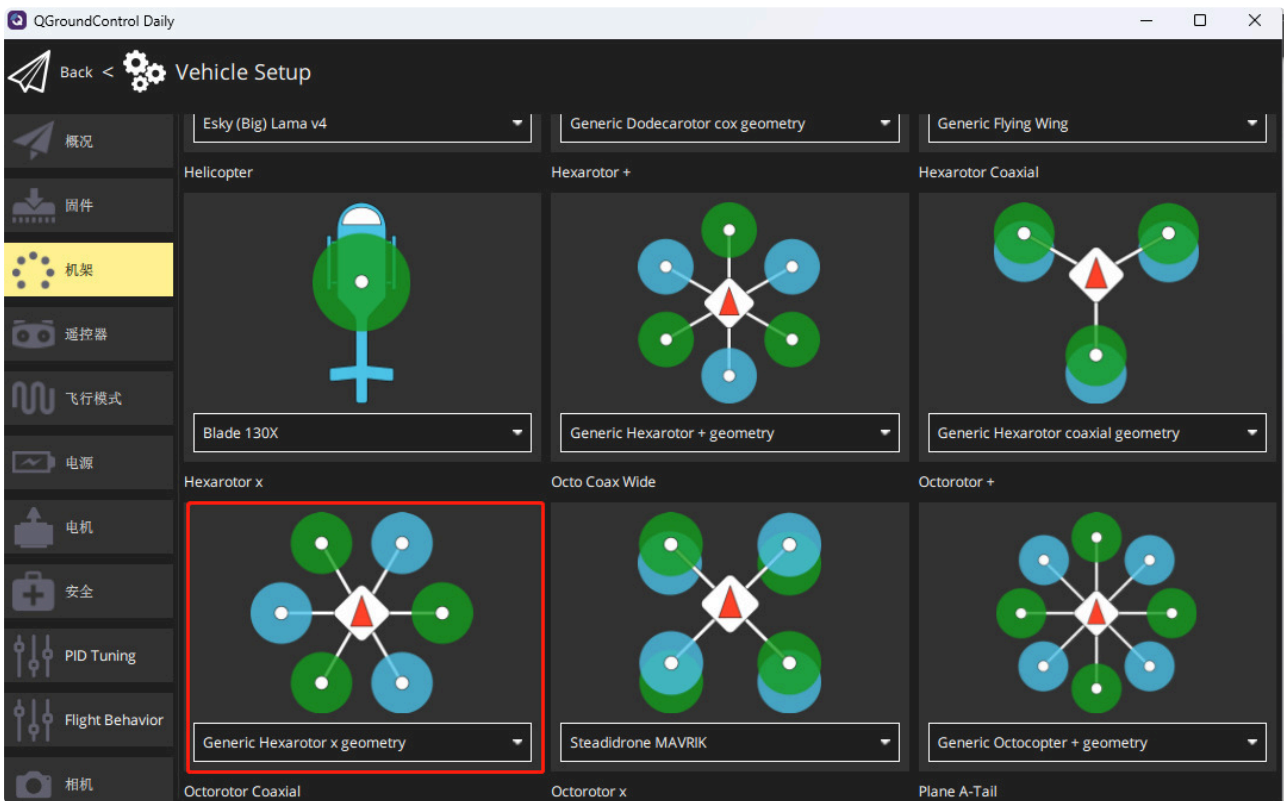


## Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

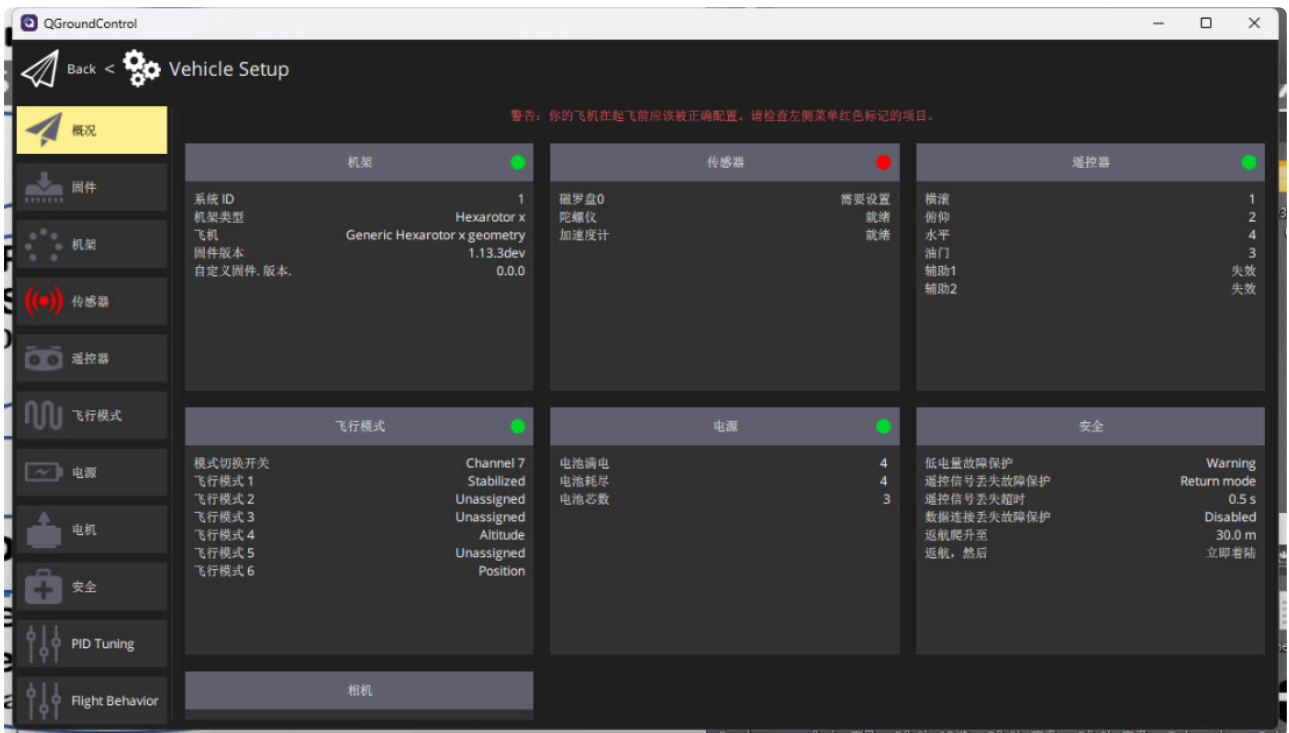
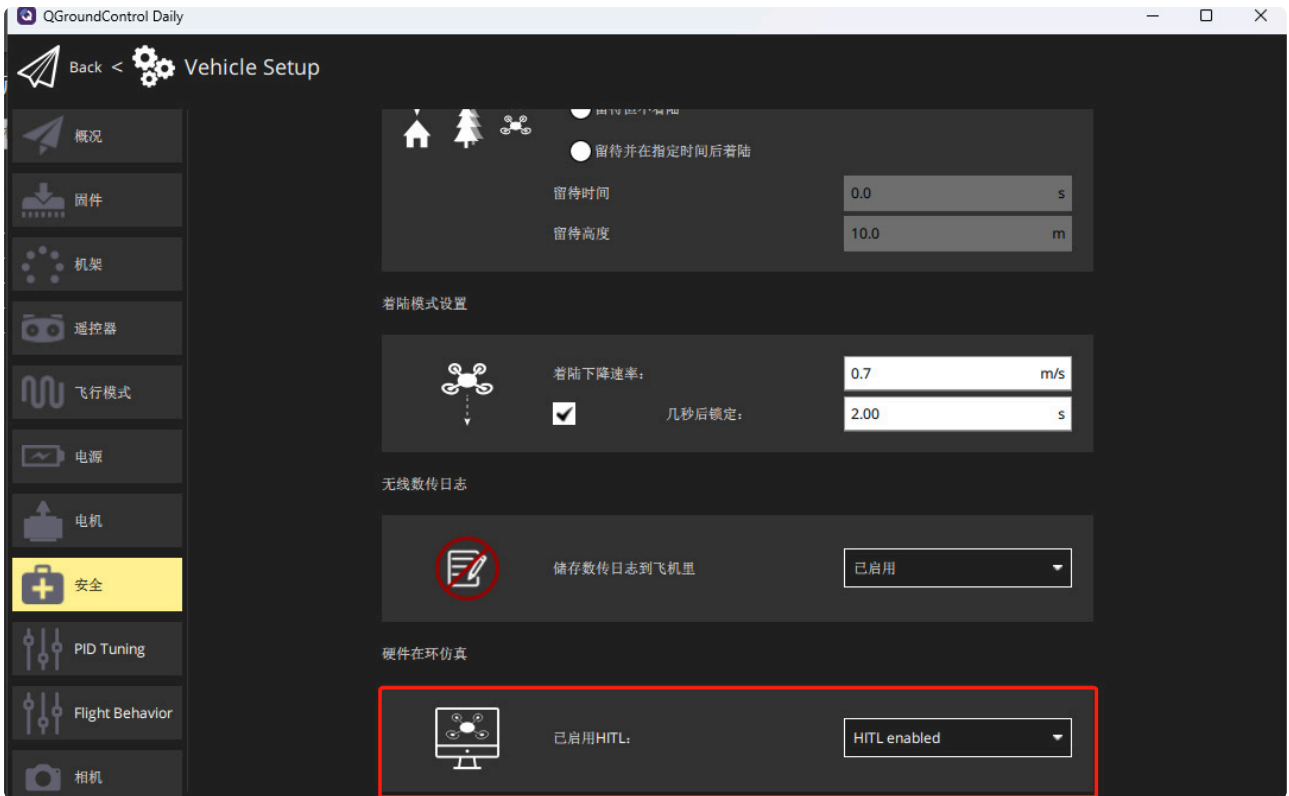
	3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷方式	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 Hexarotor x 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“HexarotorModelCTRLHITLRun.bat”批处理文件，自动完成所有配置，启动一架飞机的硬件在环仿真。

名称	修改日期	类型	大小
GenerateModelDLLFile	2022/12/16 16:35	MATLAB P-code	5 KB
HexarotorModelCTRL.dll	2022/7/27 19:19	应用程序扩展	228 KB
HexarotorModelCTRL	2022/10/5 23:29	Simulink Model	84 KB
HexarotorModelCTRLHITLRun	2023/6/13 15:11	Windows 批处理...	6 KB
HexarotorModelCTRLSITLRun	2023/6/13 15:11	Windows 批处理...	6 KB
Init	2023/6/13 17:37	MATLAB Code	4 KB
Init_control	2019/7/30 22:18	MATLAB Code	2 KB
MavLinkStruct	2022/5/9 10:27	MATLAB Data	5 KB
MulticopterModel	2022/7/27 19:19	360压缩 ZIP 文件	103 KB
readme	2022/10/29 23:54	Foxit PDF Reade...	270 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

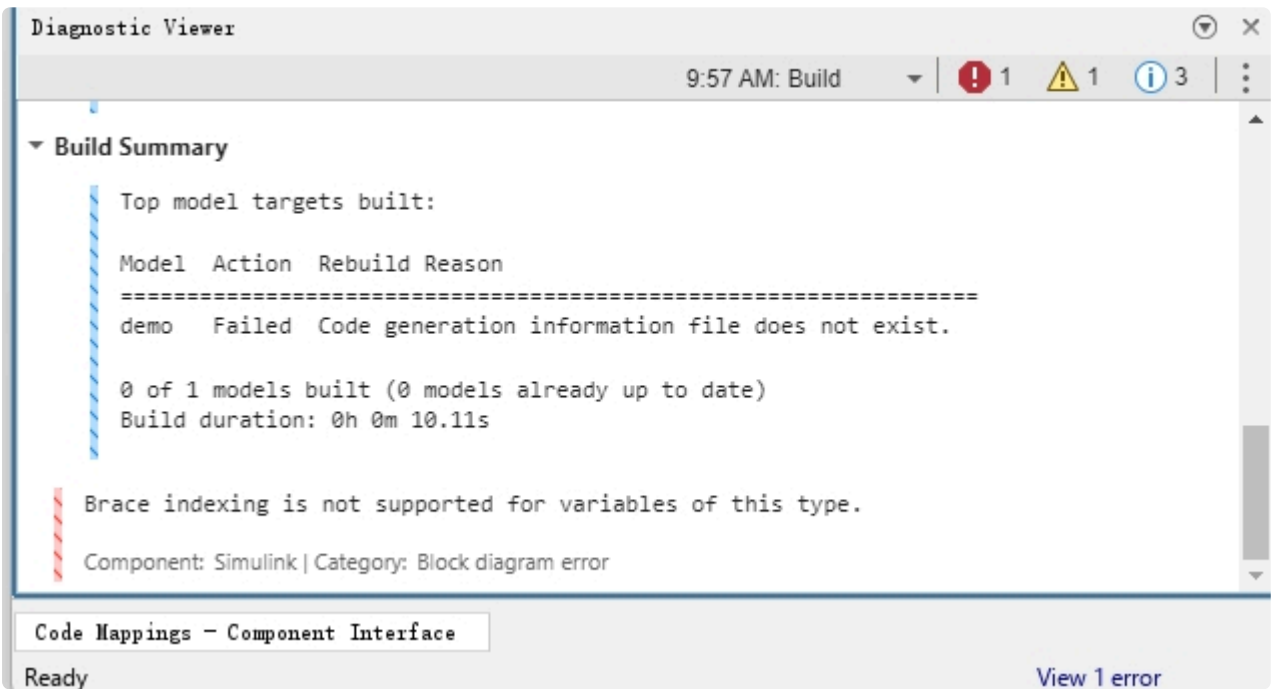
之后测试步骤与软件在环的Step2到Step4相同，运行之后在 RflySim3D 中观察是否按指令飞行。

## 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



```
诊断台
下午4:48: 编译
-----
Exp1_modelTemp 信息: 保存文件完成工作失败。 无法编译。 有关详细信息, 请参阅编译日志。  ed
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\interface\model" 引用的库 "pixhawk_slib_adv1"。
附件: Simulink | 类别: Block diagram 错误
代码映射 - 组件接口
```

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