

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

基于系统模板的含碰撞检测四旋翼模型验证（DLL生成及SIL/HIL实验）

1.2 实验目的

将Simulink文件编译生成四旋翼的DLL模型文件；并对生成的四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旋翼模型的使用。

1.3 关键知识点

该模型完成了PX4中四旋翼无人机建模，并加入碰撞检测模块，能够模拟碰撞情况。

载具的基本动力学特性

四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），

$$x_g$$

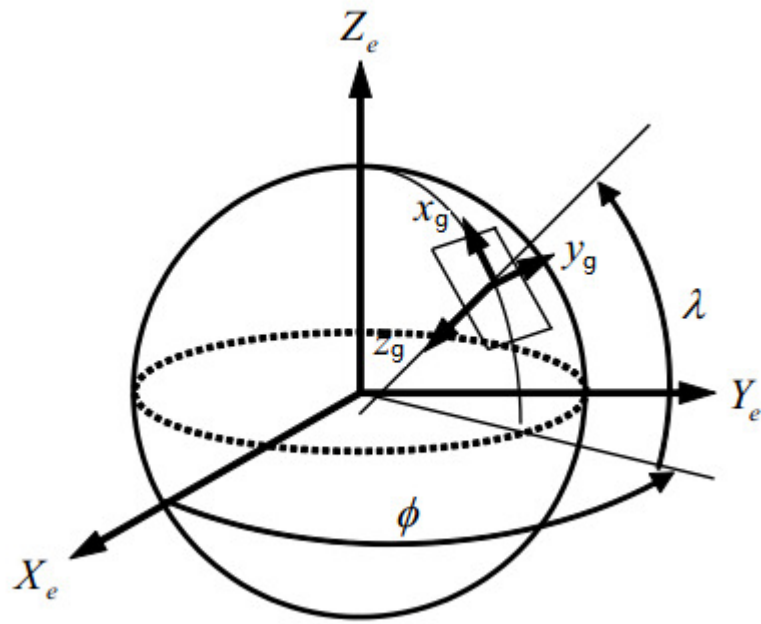
轴位于水平面内，指向某一固定方向（如飞机的航线方向），

$$z_g$$

轴垂直于地面向下指向地心，

$$y_g$$

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

$$Ox_b z_b$$

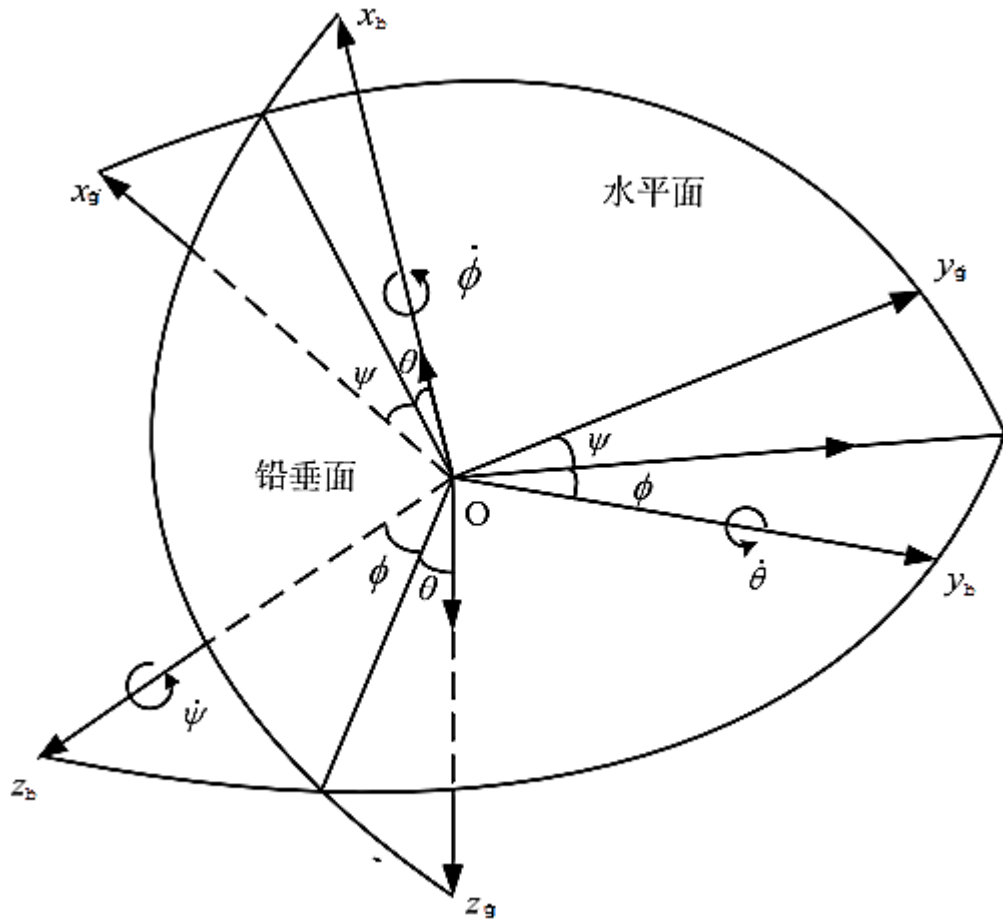
内并且垂直于纵轴，向下为正方向。

$$y_b$$

轴垂直于飞行器对称面

$$Ox_b z_b$$

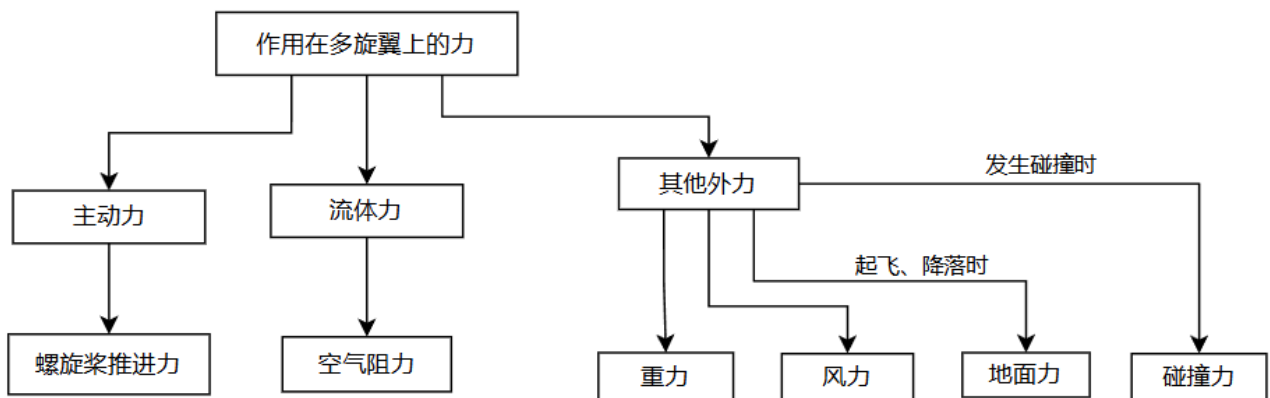
，向右为正方向。机体坐标系是作用在飞机上的力和力矩的参考坐标系。



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。

四旋翼无人机运动时，作用在无人机上的力主要包括空气阻力、螺旋桨拉力、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。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，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)	以四旋翼为例，两组旋翼（如1号和3号旋翼）以较低速度旋转，而另一对角线的旋翼（如2号和4号旋翼）以较高速度旋转，从而产生偏航力矩。

■ 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 [\(v1.12\)](#)

本例程中四旋翼的机架为（X型）Generic

Quadcopter，其在\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d\airframes\4001_quad_x中定义如下：

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

```
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。rc.mc_defaults中的关键代码如下：

```
set PWM_OUT 1234
```

4个通道用于四个电机。

```
set MIXER quad_x
```

设置混控器（mixer）为quad_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\px4fmu_common\mixers\quad_x.main.mix，其中R:4x定义了四个螺旋桨的布局。

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见：[..\..\1.BasicExps\e0_MinModelTemp\Readme.pdf](#)

碰撞数据inFloatsCollision输入接口

利用inFloatsCollision实现了一个简单地物理引擎，可以根据RflySim3D回传的四周距离数据，实现碰到障碍物的回弹、碰到其他飞机便坠毁等功能

关键参数

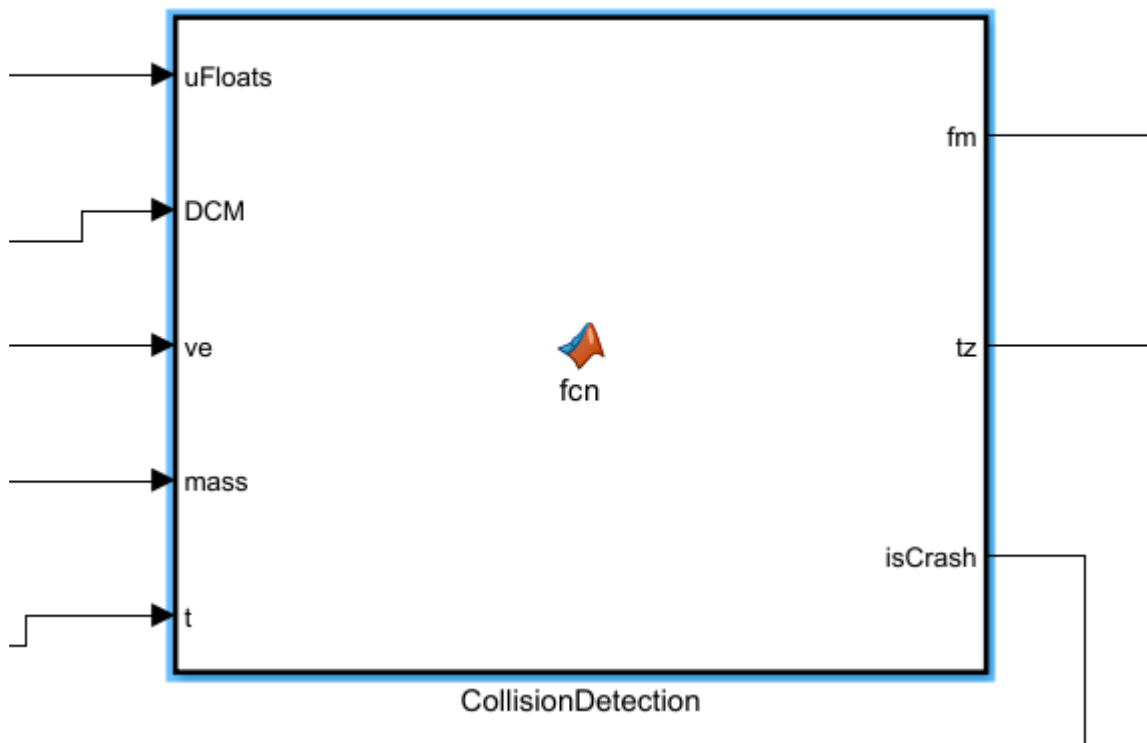
参数名	参数	值
三维样式	ModelParam_3DType	int16(3)
旋翼样式	ModelParam_uavType	int16(3)
初始位置	ModelInit_PosE	[0,0,0]
初始姿态	ModelInit_AngEuler	[0,0,0]
初始速度	ModelInit_VelB	[0,0,0]
初始角速度	ModelInit_RateB	[0,0,0]
初始经纬度	ModelParam_GPSLatLong	[40.1540302 116.2593683]
原点的海拔高度	ModelParam_envAltitude	-50(m)
飞机质量	ModelParam_uavMass	1.515
转动惯量	ModelParam_uavJ	[0.0211,0,0;0,0.0219,0; 0,0,0.0366]
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	22.83(rad/s)

物理碰撞检测模块

为模拟碰撞情况，加入物理碰撞模块，碰撞模块能检测多旋翼飞行过程中是否碰撞到了物体，以及所碰撞物体的类型并做出符合物理规律的反应。开启碰撞模式后，在碰撞到飞机时多旋翼的速度满足冲量定理，在碰撞到房屋等固定物体时，多旋翼会朝着障碍物反向的反弹回去，反弹速度为原速度的1/10。

由图可知，碰撞模块的输入为uFloats

、DCM、ve、mass、t,输出为fm、tz、isCrash。其中uFloats为20维外部输入浮点信号，该端口为碰撞模型预留，可以通过UDP网络从UE4传输。DCM为方向余弦矩阵，ve为碰撞时的速度，mass为多旋翼质量，t为时间戳。输出fm为力和力矩直接作用到6DOF对机体运动产生影响，tz则表示多旋翼离地面的高度和XYZ的坐标，isCrash则为碰撞判断，如果碰撞发生则三个电机损坏。具体碰撞逻辑可以点击进入该模块详细了解。



2.实验效果

实现四旋翼飞机DLL模型文件生成，以及完成四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\2.MultiModelCtrlColl

文件夹/文件名称	说明
MulticopterNoCtrlWithCollision.slx	四旋翼飞机模型文件(含碰撞检测)。
MulticopterNoCtrlWithCollision_HITLRun.bat	硬件在环仿真批处理文件(含碰撞检测)。
MulticopterNoCtrlWithCollision_SITLRun.bat	软件在环仿真批处理文件(含碰撞检测)。
GenerateModelDLLFile.p	DLL格式转化文件。
MulticopterNoCtrlWithCollision_init.m	动力学模型相关参数。
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/>

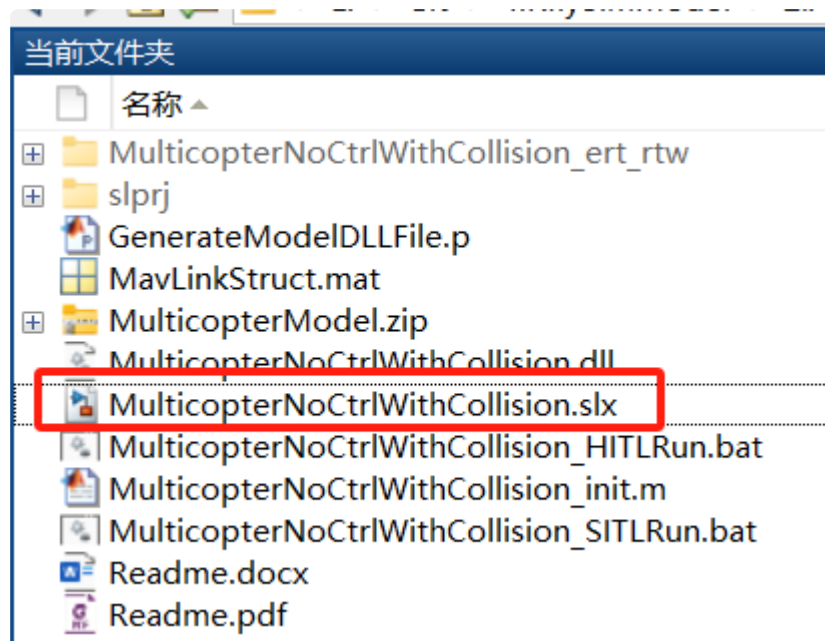
5. 实验步骤

5.1. 必做实验：DLL模型生成

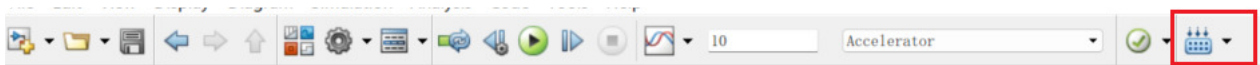
Step 1: 编译模型

在Matlab中打开“MulticopterNoCtrlWithCollision.slx” Simulink 文件，点击Build Model

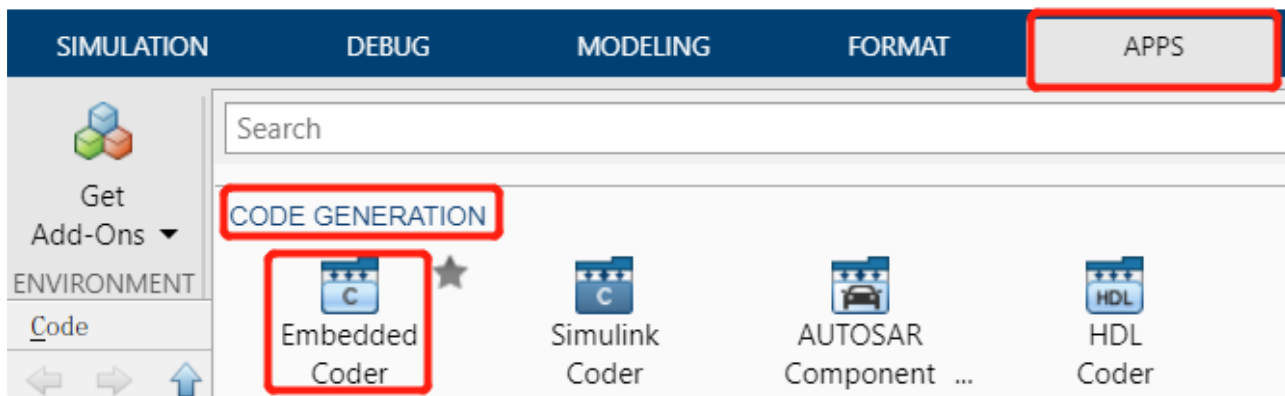
按钮编译生成代码。



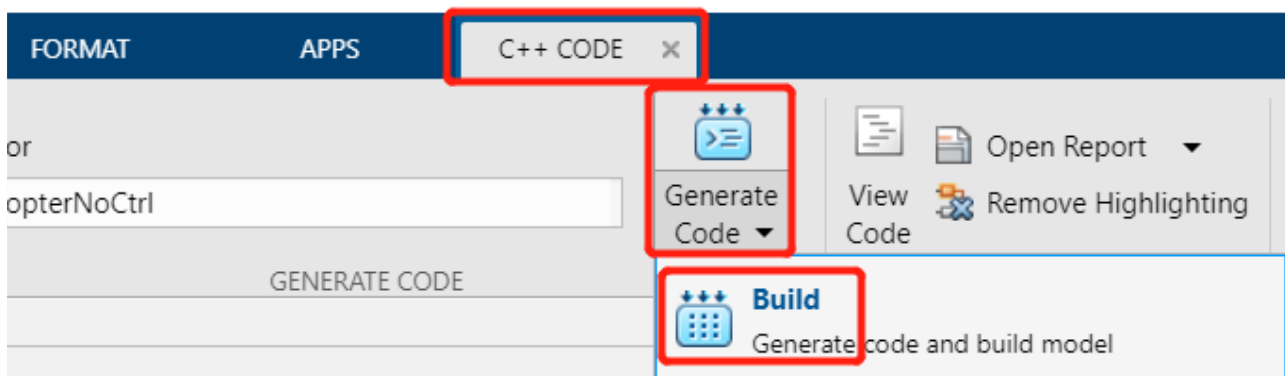
对于MATLAB 2019a及之前版本，工具栏样式见下图，直接点击它的编译按钮“Build”即可。



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

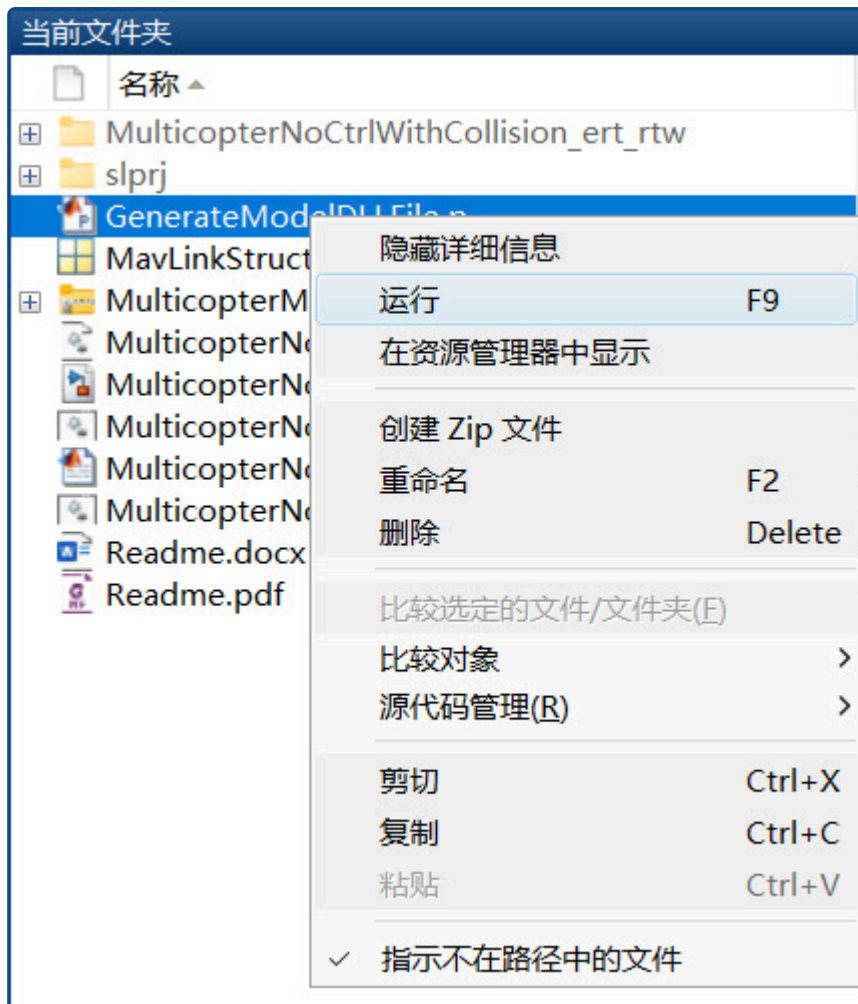


注意事项：与四旋翼模型MulticopterNoCtrl.slx相比，该四旋翼模型不同点如下：

1. MulticopterNoCtrlWithCollision.slx中碰撞模块中除了地面模块之外，还有碰撞判断模块，在确认碰撞后会输出力和力矩并影响电机的输出。
2. UE通过inFloatsCollision端口给模型发送碰撞信号。

Step 2: 生成DLL文件

编译完成后，在 matlab 中右键“GenerateModelDLLFile.p”文件，点击运行，生成 DLL 文件。

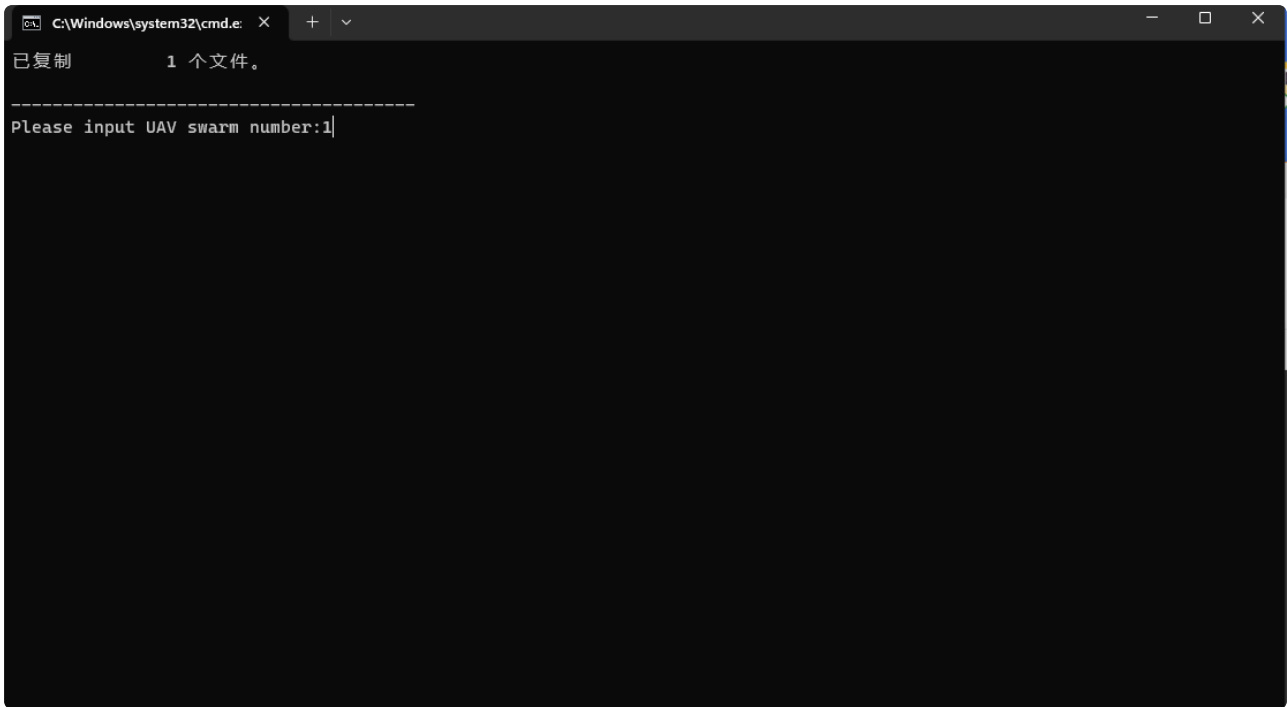


5.2. 必做实验：软件在环仿真

Step 1: 启动仿真

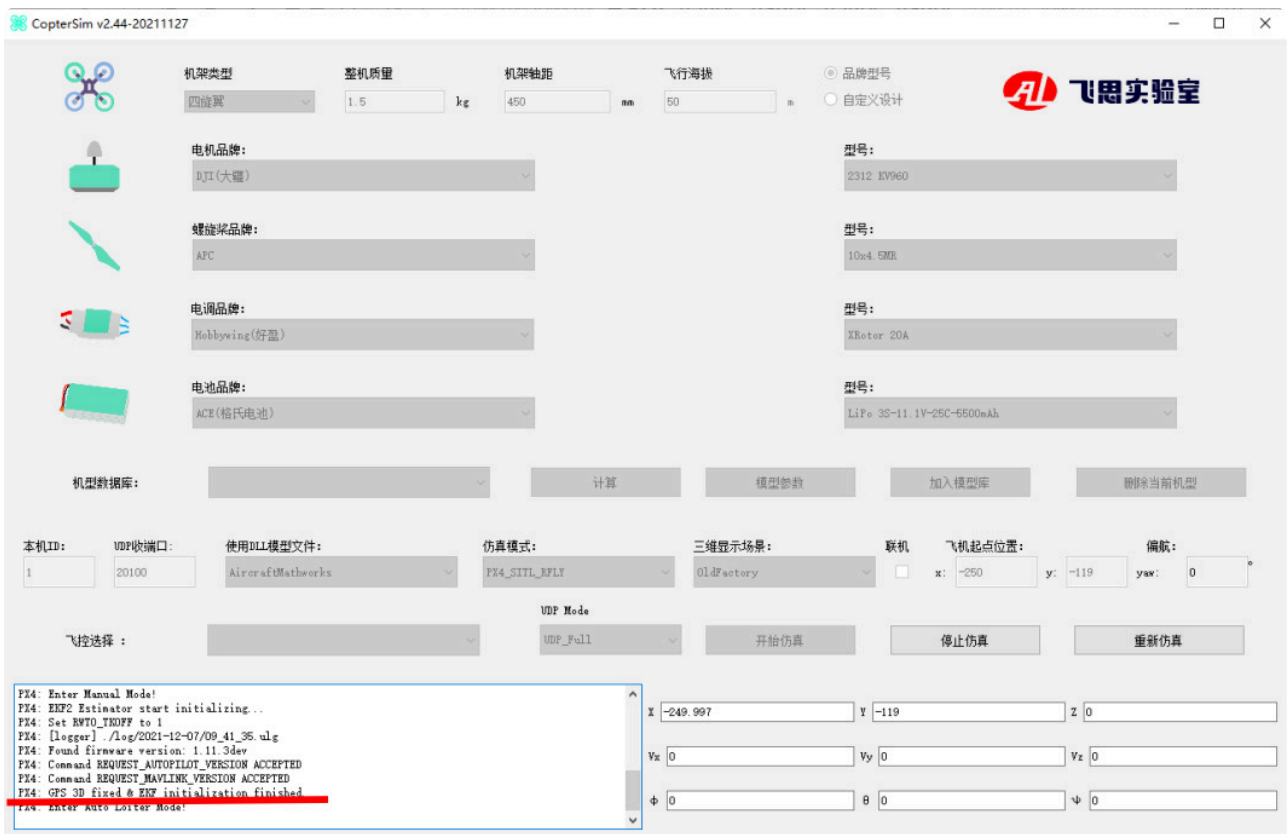
双击运行“[MulticopterNoCtrlWithCollision_SITLRun.bat](#)”批处理文件，在弹出的终端窗口中输入

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 RflySim3D。



Step 3: 四旋翼起飞

通过QGC使四旋翼飞机起飞到空中：点击“起飞”，确认起飞高度后，滑动下方滑块解锁起飞。



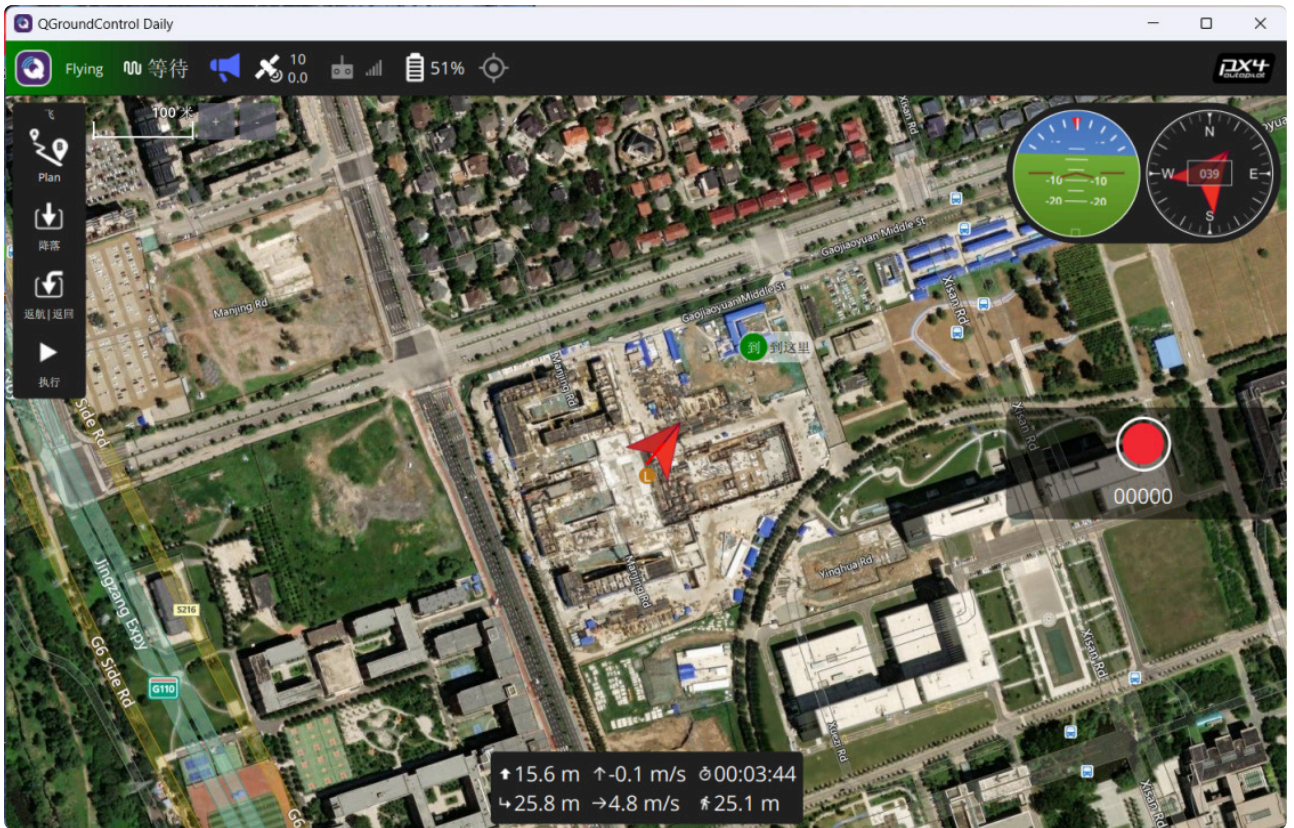
Step 4: 开启碰撞检测

点击RflySim3D，按下“P”键，RflySim3D左上角显示“Enable Collision Detection!”，表示碰撞检测已开启。



Step 5: 观察结果

通过QGC选取一个点，让飞机朝障碍物飞去。这里的障碍物是一个小山坡。



可以看到当飞机和小山坡接触时，RflySim3D左上角提示“Vehicle #1 crashed with #Landscape_1 at PosE ***”，说明碰撞检测成功。



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。

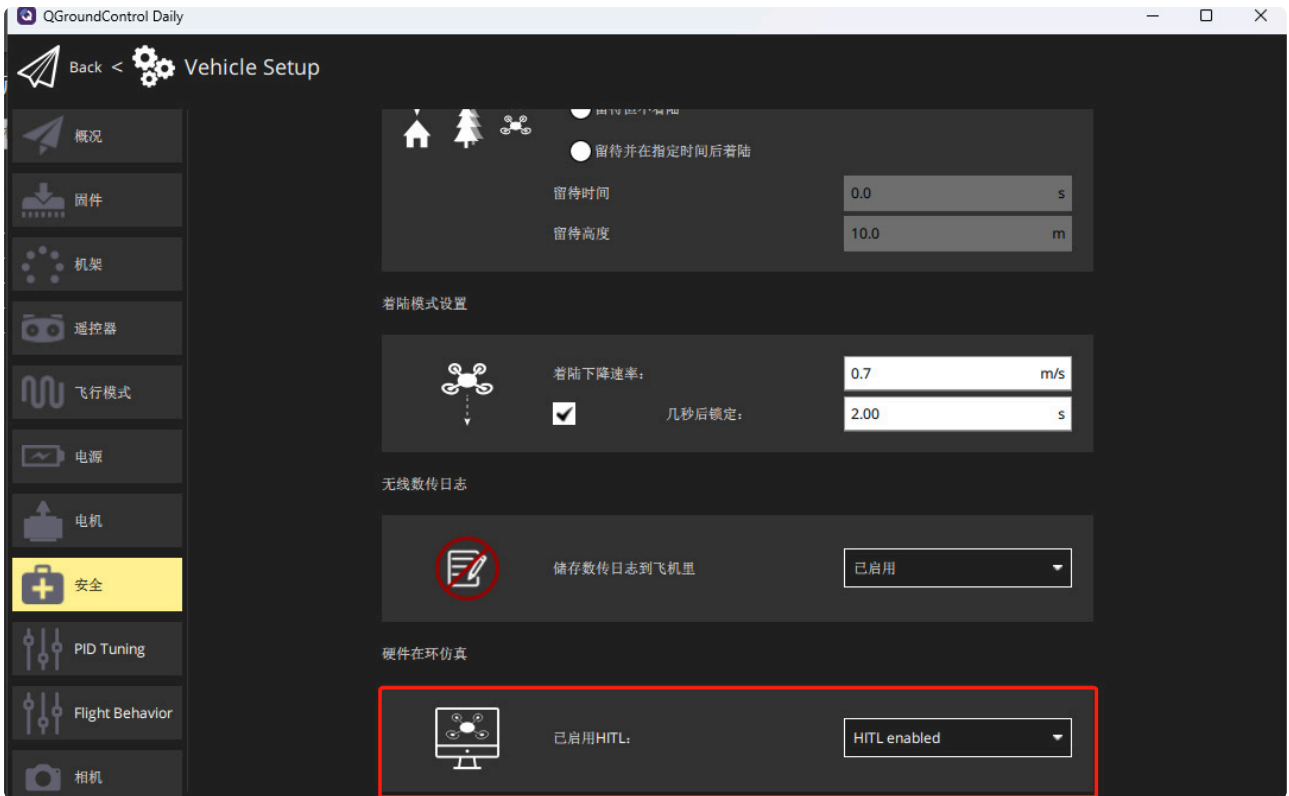
 3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷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

打开QGC地面站，机架设置为“Generic Quadcopter”，点击QGC右上角的“应用并重启”。



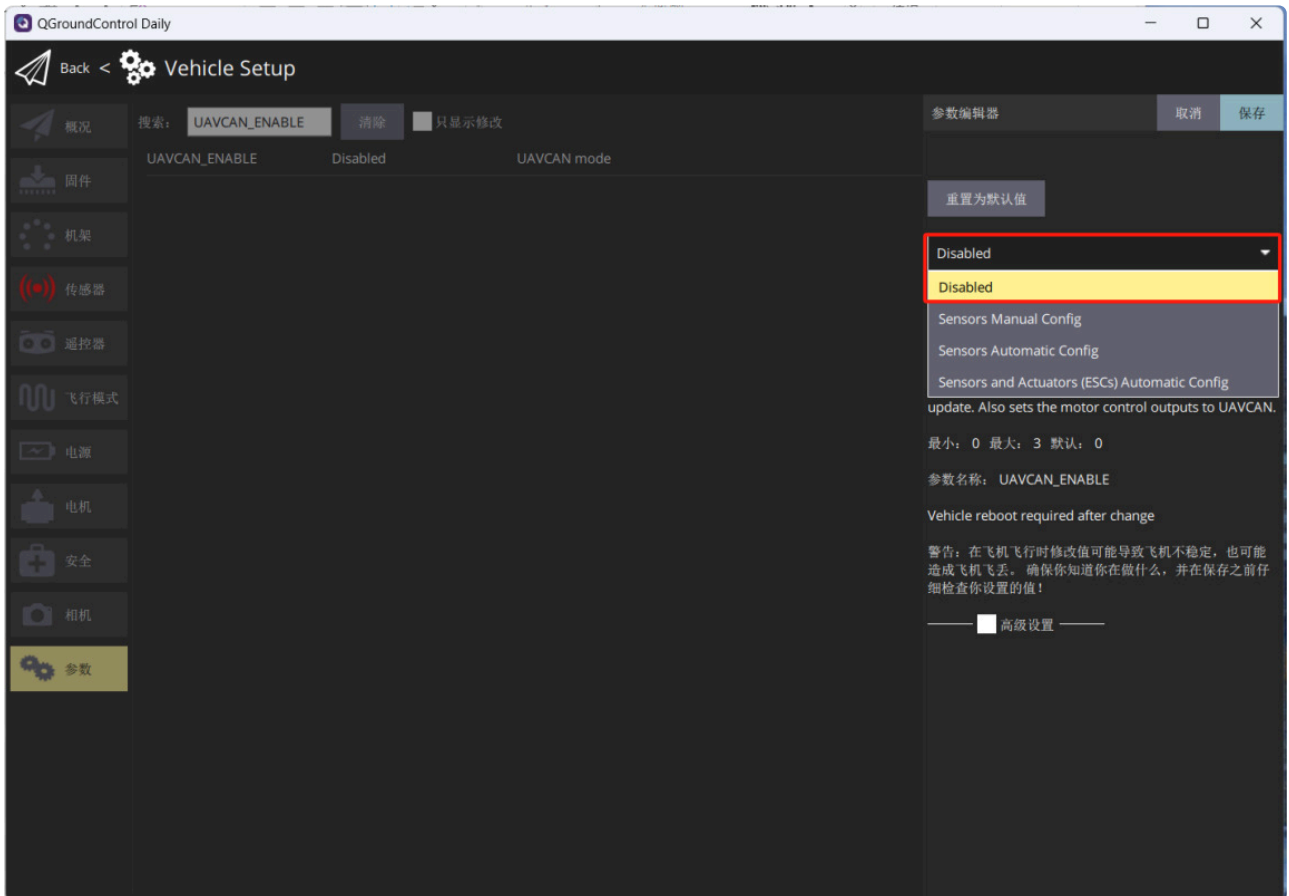
Step 3: 配置硬件在环参数

点击“安全”，设置硬件在环仿真为“HITL enabled”。



如果使用PX4

1.13版本固件，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。



Step 4: 启动仿真

右键以管理员身份运行“MulticopterNoCtrlWithCollision_HITLRun.bat”批处理文件，自动完成所有的配置，启动一架飞机的硬件在环仿真。

名称	修改日期	类型	大小
MulticopterNoCtrlWithCollision_ert_rtw	2023/11/8 18:01	文件夹	
slprj	2023/11/8 18:01	文件夹	
GenerateModelDLLFile.p	2023/10/24 15:35	MATLAB.p.9.14.0	6 KB
MavLinkStruct.mat	2023/10/17 15:11	MATLAB Data	5 KB
MulticopterModel.zip	2023/11/8 18:01	压缩(zipped)文件...	108 KB
MulticopterNoCtrlWithCollision.dll	2023/11/8 18:02	应用程序扩展	236 KB
MulticopterNoCtrlWithCollision.slx	2023/11/8 18:03	Simulink Model	79 KB
MulticopterNoCtrlWithCollision_HITLRun.bat	2023/10/17 15:11	Windows 批处理...	6 KB
MulticopterNoCtrlWithCollision_init.m	2023/10/24 15:35	Objective C 源文件	3 KB
MulticopterNoCtrlWithCollision_SITLRun.bat	2023/10/17 15:11	Windows 批处理...	6 KB
Readme.docx	2023/10/17 15:11	Microsoft Word ...	5,395 KB
Readme.pdf	2023/10/24 15:33	Foxit PhantomP...	1,233 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

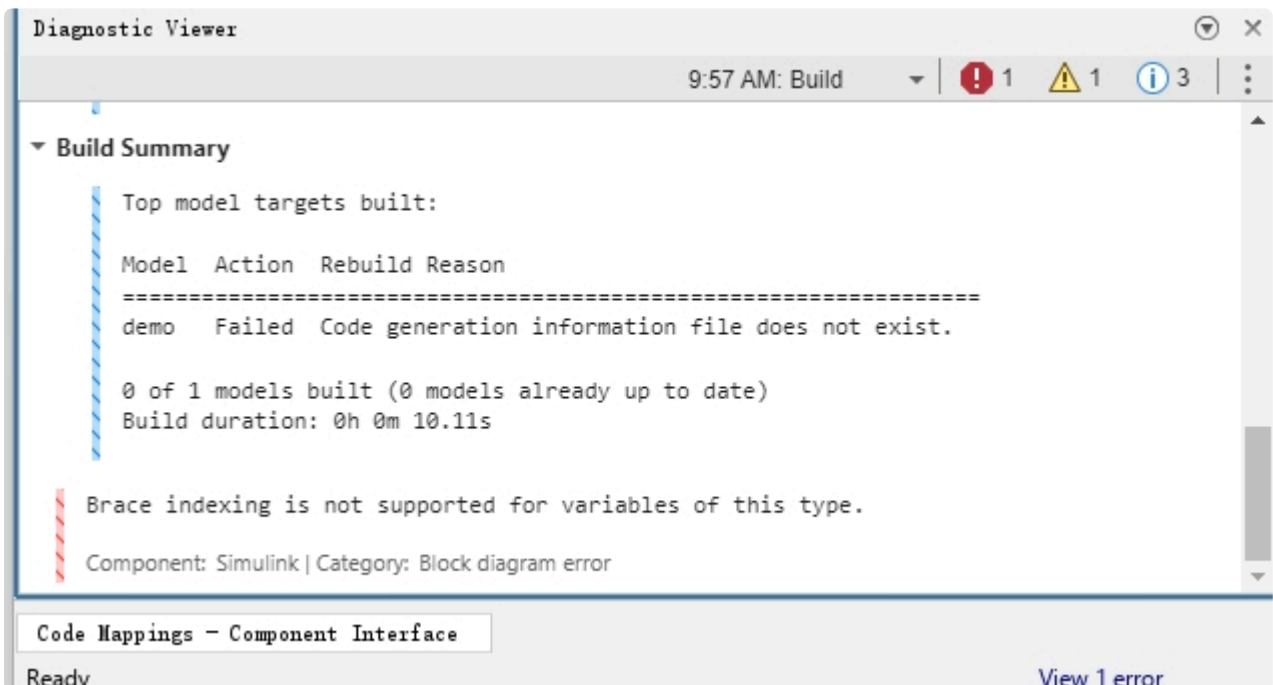
之后测试步骤与软件在环仿真的Step 2到Step 5相同，运行之后观察四旋翼能否按照指令飞行，并检测碰撞情况。

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