

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

FX450四旋翼系统辨识模型DLL生成及SIL/HIL实验（仅限完整版及以上版本）

1.2 实验目的

在Matlab将Simulink文件编译生成FX450辨识模型的DLL模型文件；并对生成的FX450辨识模型进行软硬件在环仿真测试，通过本例程熟悉平台FX450辨识模型的使用。

1.3 关键知识点

本实验需要电脑中部署Visual Studio

2022环境，部署方式见：[\[安装目](#)

[录\]\RflySimAPIs\1.RflySimIntro\2.AdvExps\6.VisualStudioInstall](#)

FX450_model.slx是基于系统模版构建的FX450辨识模型，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、输出和参数，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，可以视为最基本的多旋翼模型。

模型参数介绍[1][2]

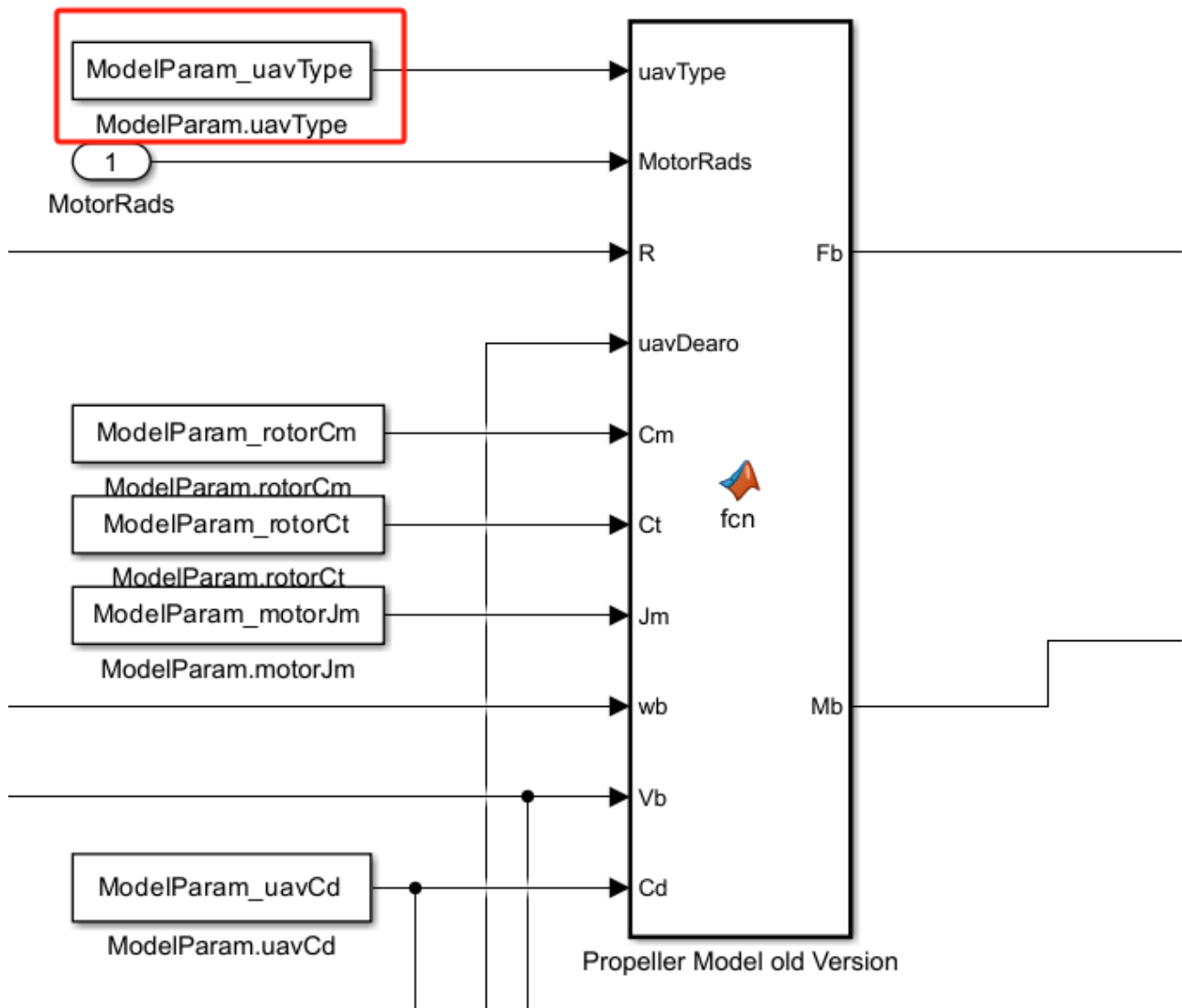
重要参数[1]

[Model_Params.m](#)中定义了FX450辨识模型的各种参数，关键数据如下。

飞机的三维显示样式

```
ModelParam_uavType = int16(3);
```

%定义机型为四旋翼，这个参数决定了飞机的三维显示样式，需要和RflySim3D的XML文件中的ClassID相匹配；同时对于多旋翼飞行器的螺旋桨模型（该模型在力和力矩模块中可见），不同的机型，要对应不同的ID以计算机架配置和力矩分配



飞机的初始位姿参数

```
ModelInit_PosE=[0,0,0];
```

%用于设置飞机的初始位置，对应了CopterSim上的X和Y初始值。Z值利用TerrainZ实现了从CopterSim中读取当前地形高度数据，使得飞机可以初始化在复杂地形的地表面（例如Grassland地图）。

```
ModelInit_AngEuler=[0,0,0];
```

%用于设定飞机的初始姿态。飞机姿态角的前两位（俯仰和滚转角）可以通过ModelInit_AngEuler参数来配置，但是偏航角需要在CopterSim中配置。针对导弹等竖直起飞的飞行器，需要设定合适的俯仰和滚转值。

QGC中显示的地图坐标和高度原点（在RflySim3D的Cesium大场景中能任意指定飞机在地球三维场景中的坐标）

```
ModelParam_GPSLatLong = [40.1540302 116.2593683];%飞机初始的纬度和精度，单位度。
```

ModelParam_envAltitude =

-50;%原点的海拔高度，竖直向下为正，高于海平面填负值，单位米。

执行器的初始参数

ModelInit_Inputs = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];%

十六维输入向量，定义电机PWM初始值，默认全0，对固定翼和小车需要修改，因为它们的油门在初始状态处于最小值 (-1)，见“Motor Model” 模块

故障接口参数

FaultInParams: 可通过外部消息动态改变的32维参数向量，在故障注入或者可变形的异构飞行器上有用，也可动态地调整传感器模型噪声等；与inSILInts和inSILFloats 形成功能互补。

FaultParamAPI.FaultInParams = zeros(32,1);% 定义了一个名为 FaultInParams 的32维向量，该向量被初始化为所有元素都为零。

FaultParamAPI.FaultInParams(3)=1; %将 FaultInParams 向量的第三个元素设置为1。

FX450辨识模型关键动力学参数如下：

参数名称	.m文件参数名称	参数值
质量	ModelParam.uavMass	1.8446 (kg)
转动惯量矩阵	ModelParam.uavJ	$\begin{bmatrix} 0.01850 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02030 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03223 \end{bmatrix}$
多旋翼机身半径	ModelParam.uavR	0.225(m)
螺旋桨拉力系数	aT	10.3223
	bT	1.7118
螺旋桨力矩系数	aM	0.478857985732115
	bM	-0.056556026938551
阻力系数xyz	ModelParam.uavCd	[0.2325, 0.2333, 0.5] (N/(m/s)^2)

参数名称	.m文件参数名称	参数值
阻尼力矩系数pqr	ModelParam.uavCCm	[0.0097 0.0085 0.0046] (N/(rad/s)^2)

参数调用过程[2]

FX450_model.slx是用于生成DLL模型的simulink动态建模模板，simulink模型启动运行（编译）时会调用 [Model_Params.m](#)



[Model_Params.m](#) 中包含了模型的参数信息，本脚本会在FX450_model.slx编译（simulink模型编译所需环境配置参考 [PX4PSP\RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf](#)中的环境配置）时被调用将参数载入MATLAB工作空间，也可以直接运行 [Model_Params.m](#) 将参数载入工作空间。Simulink模型会通过参数名称读取工作空间中的参数，故需要保证simulink模型中设置的参数名称与 `***_init.m` 中的参数名称相同。

名称 ▲	值
FaultParamAPI	1x1 struct
filepath	'F:\d2\4.RflySimMo...
HILGPS	1x1 Bus
MavLinkGPS	1x1 Bus
MavLinkSensor	1x1 Bus
MavLinkStateQuat	1x1 Bus
MavVehileInfo	1x1 Bus
ModelInit_AngEuler	[0,0,0]
ModelInit_Inputs	1x16 double
ModelInit_PosE	[0,0,0]
ModelInit_RateB	[0,0,0]
ModelInit_RPM	0
ModelInit_VelB	[0,0,0]
ModelParam_envAltitude	-50
ModelParam_GPSLatLong	[40.1540,116.2594]
ModelParam_motorCr	842.1000
ModelParam_motorJm	1.2870e-04
ModelParam_motorMinThr	0.0500
ModelParam_motorT	0.0214
ModelParam_motorWb	22.8300
ModelParam_rotorCm	2.7830e-07
ModelParam_rotorCt	1.6810e-05
ModelParam_uavCCm	[0.0035,0.0039,0.00...
ModelParam_uavCd	0.0550
ModelParam_uavDearo	0.1200
ModelParam_uavJ	[0.0211,0,0;0,0.0219...
ModelParam_uavMass	1.5150
ModelParam_uavMotNumbs	4
ModelParam_uavR	0.2250
ModelParam_uavType	3



GenerateModelDLLFile.p是将slx模型转化为DLL模型文件的脚本，使用RflySim平台进行载具软硬件在环仿真时，需要将DLL(windows下)/SO (Linux下) 模型导入到CopterSim，形成运动仿真模型，因此，在Simulink模型编译完成后，需要将模型对应的C++文件打包成DLL/SO模型。

输入信号[4]

输入数据包括电机控制量、地形数据等。

电机数据inPWMs

输入接口inPWMs，16维执行器控制量输入，已归一化到-1到1尺度(通常电机是0-1，舵机是-1~1)，它的数据来自飞控回传的电机控制MAVLink消息mavlink_hil_actuator_controls_t的controls，具体定义如下：

```
typedef struct __mavlink_hil_actuator_controls_t {  
  
    uint64_t time_usec; //时间戳，从开机后的时间，单位ms  
  
    uint64_t flags; //标志位，用于显示当前的飞行状态  
  
    float controls[16]; //控制量，16维电机的控制量，发送到模型中，驱动飞机飞行  
  
    uint8_t mode; //模型，用于显示飞机当前的飞行模式和是否上锁等信息}  
mavlink_hil_actuator_controls_t;
```

软件在环仿真时，电机控制指令从PX4 SITL控制器通过TCP 4561系列端口以MAVLink协议发送到运动仿真模型的inPWMs接口，而硬件在环仿真时，该指令是从飞控通过串口以MAVLink协议发送到运动仿真模型的inPWMs接口。

地形高度terrainZ

最大模板可以利用TerrainZ

实现从CopterSim中读取当前地形高度数据，使得飞机初始化在复杂地形的地表面（例如RflySim3D中的Grassland地图）。这个值是由CopterSim读取DLL模型初始位置参数ModelInit_PosE中的xy坐标，根据地形校准文件及高程信息解算出地形高度TerrainZ，通过Mavlink消息传输给DLL模型的TerrainZ接口，在DLL模型中通过PhysicalCollisionModel/ GroundSupportModel/ Ground Model函数中重新定义模型初始位置的高度，最后会通过MavVehile3DInfo接口传给RflySim3D中的三维显示模型。

```

Ground Model x SensorOutput x
function [F1,M1] = fcn(mg,wb,Xe,Ve,Quet,terrainZ)
% This is a ground model that can provides reaction force and re

% persistent z0;
% if isempty(z0)
%     z0=0;
% end

persistent takeoffFlag;
if isempty(takeoffFlag)
    takeoffFlag=int8(0);
end

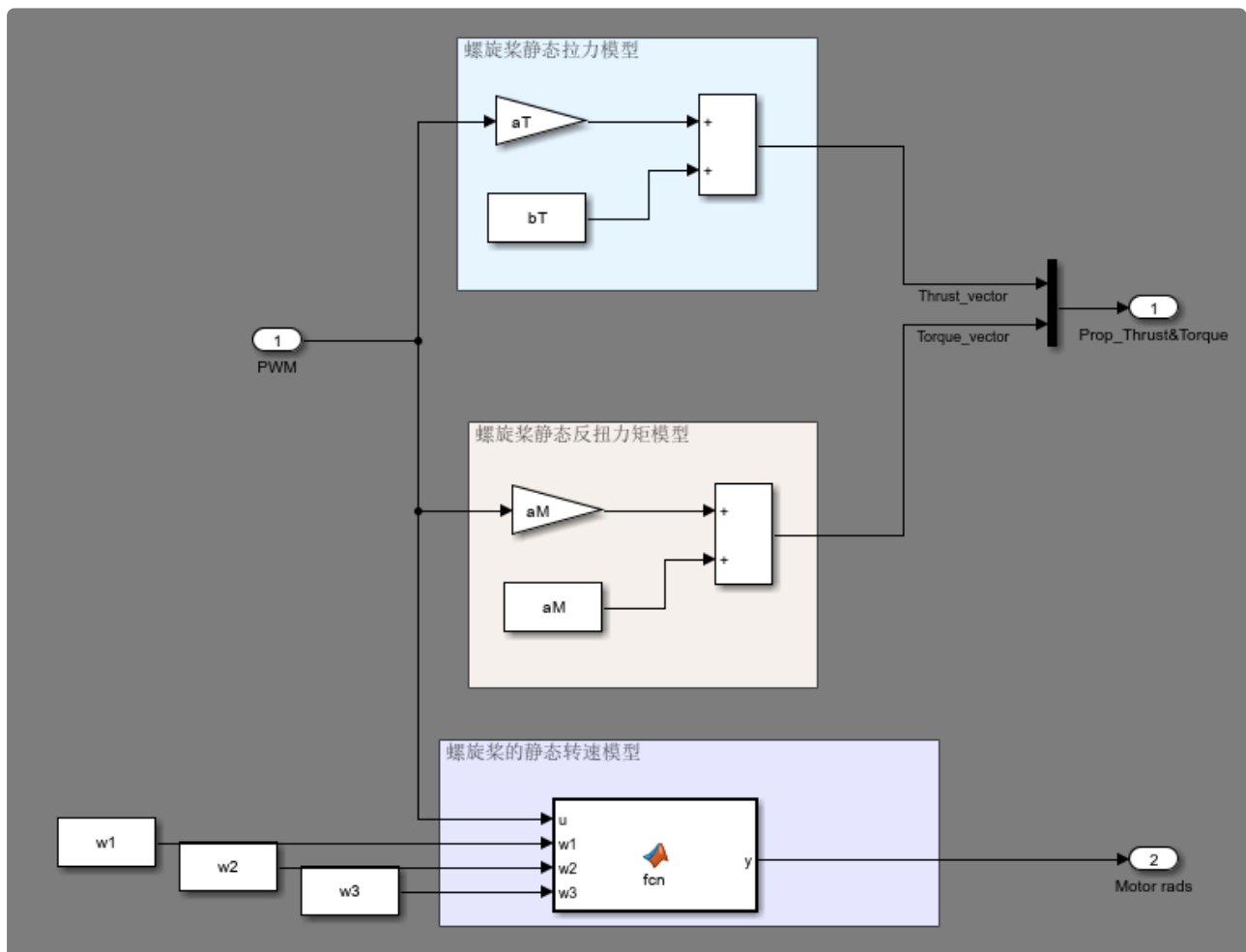
persistent landFlag;
if isempty(landFlag)
    landFlag=int8(1);
end

z=Xe(3)-terrainZ;

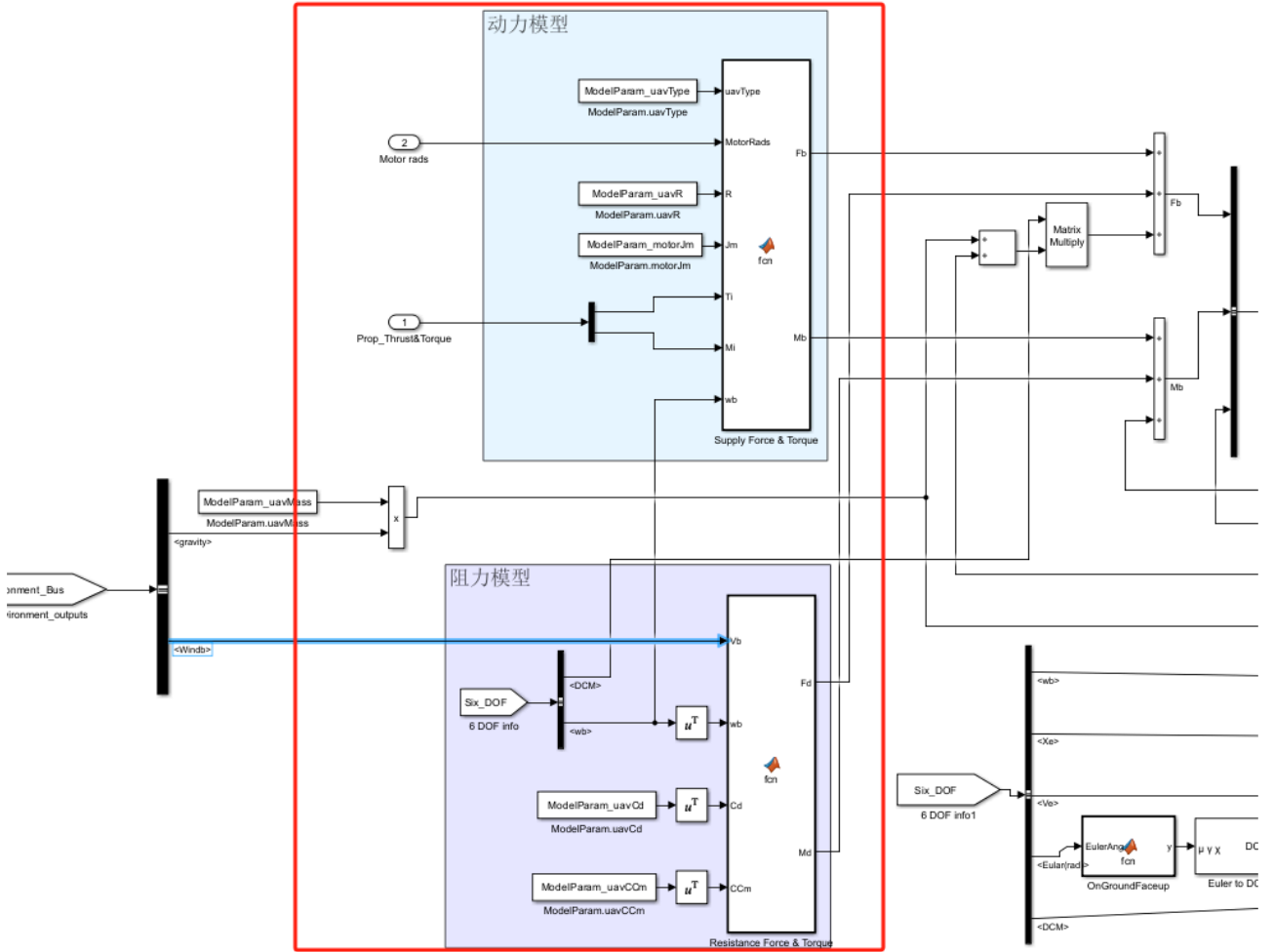
```

模型模块简介[3]

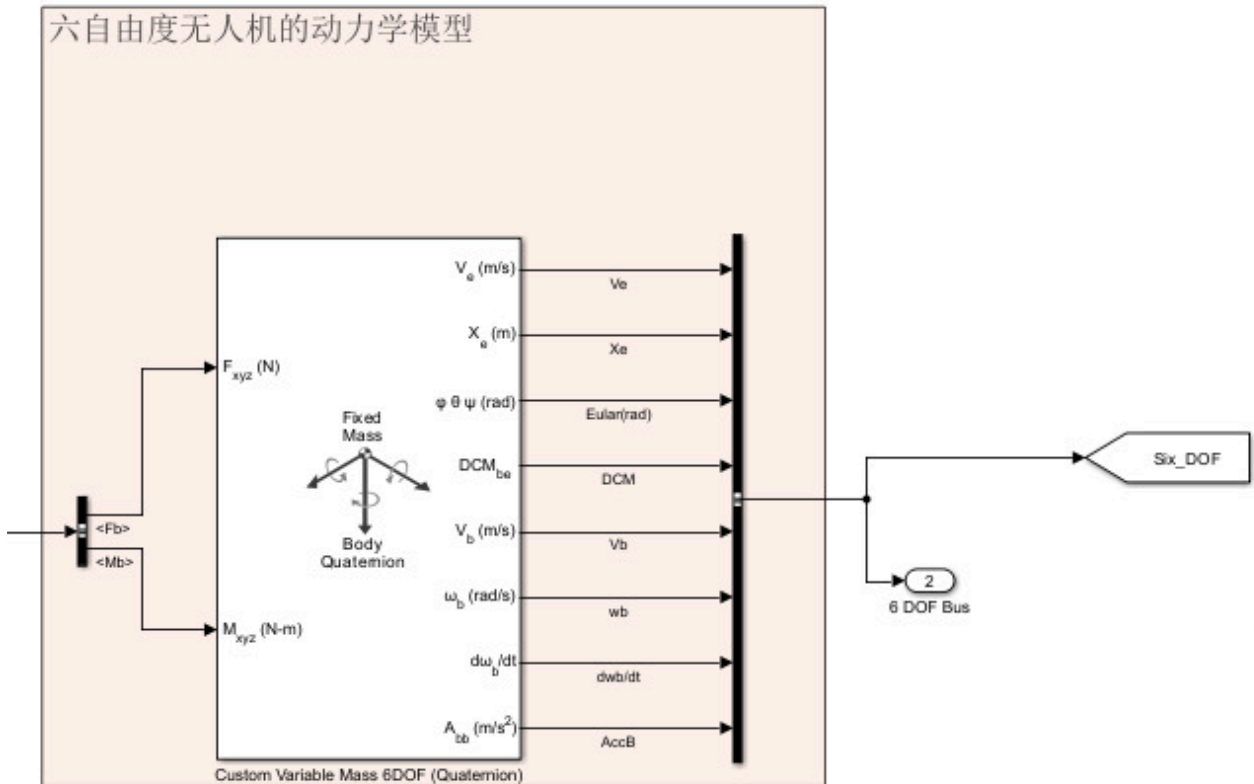
静态螺旋桨模块



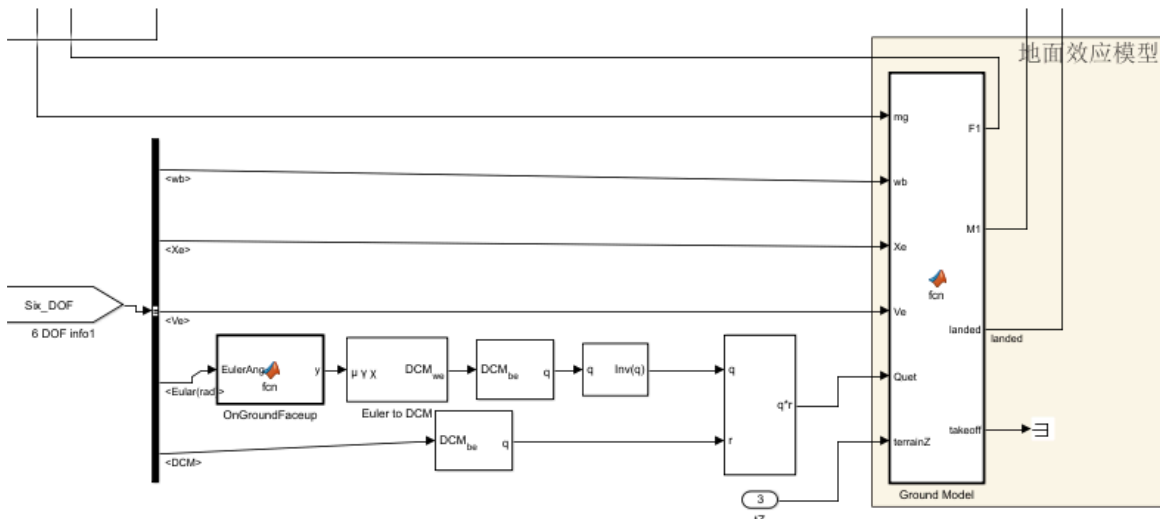
动态力和力矩模块



6DOF六自由度刚体模块



GroundSupportModel地面支撑模块

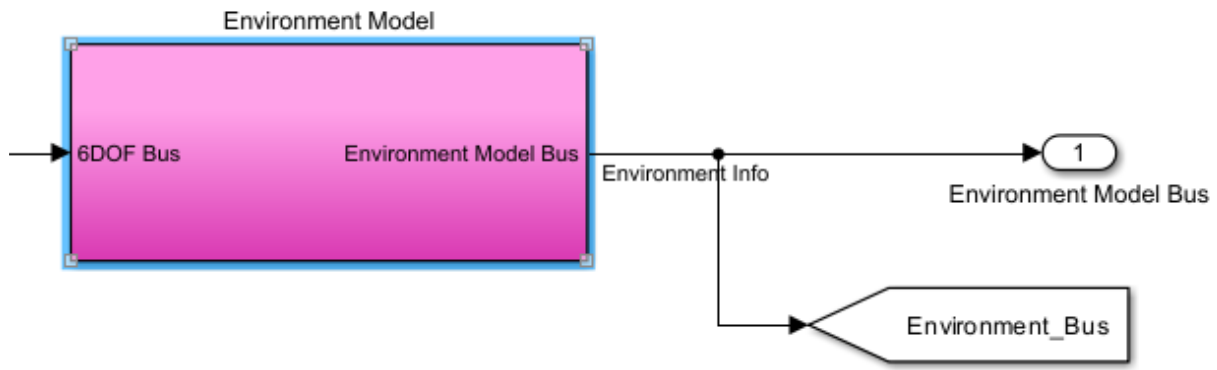


SensorOutput传感器输出模块

该模块中包括了环境模型、传感器模型和GPS模型。

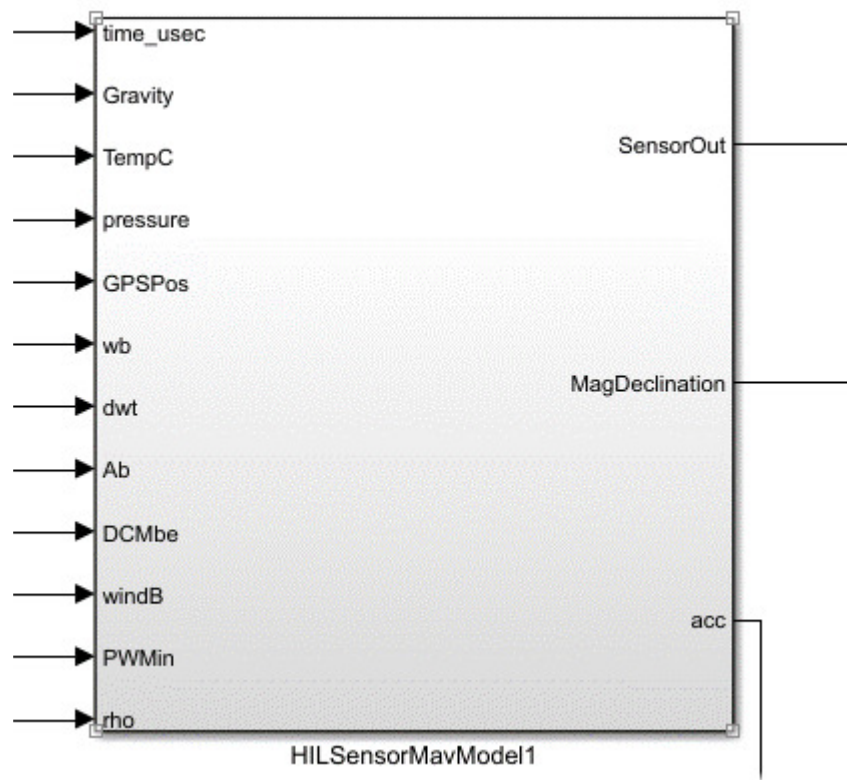
环境模型

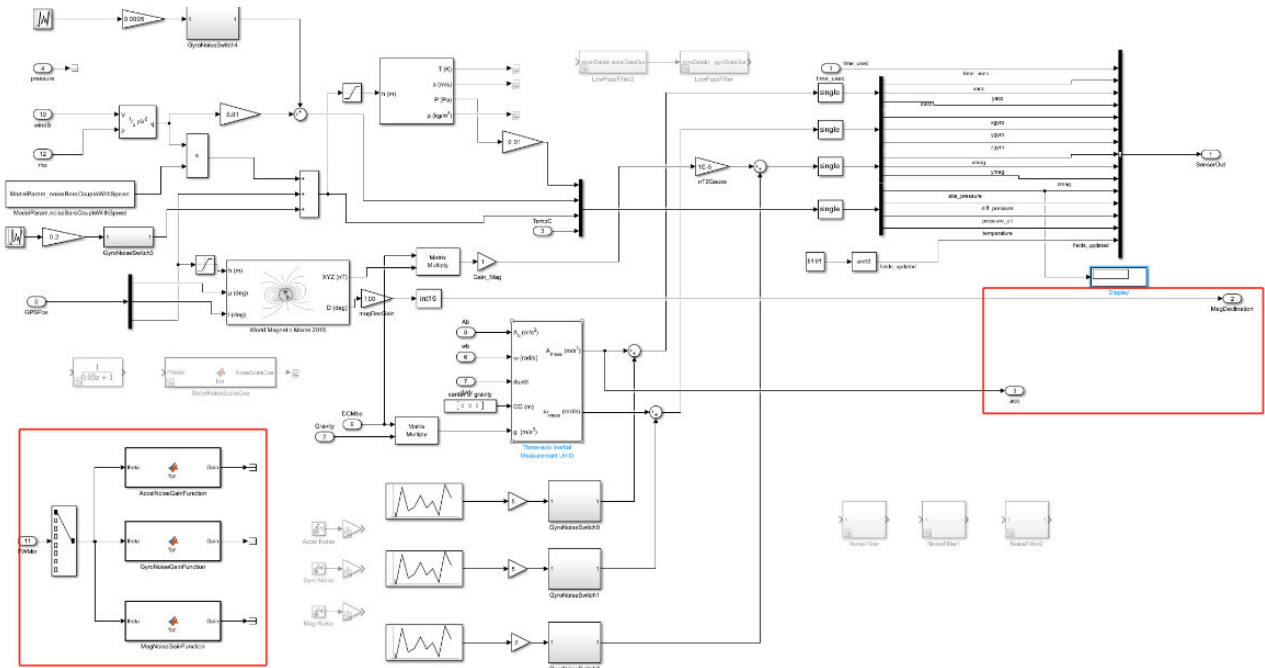
环境模型对重力和大气压强对无人系统飞行产生的影响进行了模拟



传感器模型

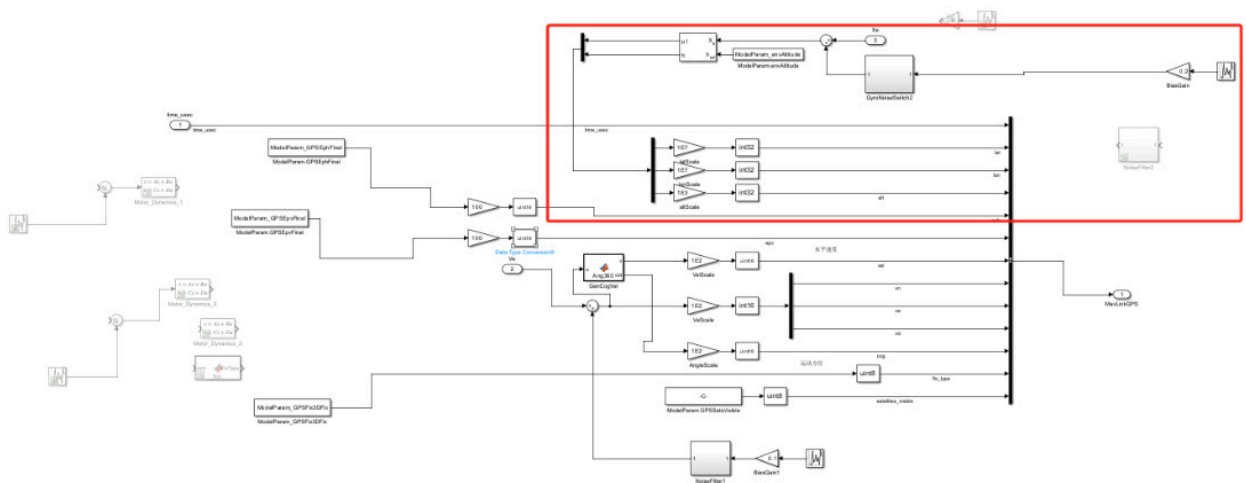
传感器模型中不仅对磁力计、惯性导航进行了建模，同时加入了噪声模拟





GPS模型

GPS模型用于计算GPS数据，在仿真时反馈回PX4控制器



输出信号[4]

输出信号，分别是HILSensor30d、HILGPS30d、VehicleInfo60d、。

■ HILSensor30d (传感器接口集合)

模型发送给飞控的各种传感器数据的集合，对应了MAVLink的mavlink_hil_sensor_t消息，本结构体包含了，加速度传感器的加速度值、陀螺仪传感器的角速度值、磁罗盘传感器的磁场值，气压和空速传感器的气压值等。这些传感器的值在仿真时由我们的模型提供，在真机飞行时由真实传感器芯片提供。

```
typedef struct __mavlink_hil_sensor_t {  
  
    uint64_t time_usec; /*时间戳，单位毫秒*/  
  
    float xacc; /*机体坐标系x方向加速度，单位m/s^2 */  
    float yacc; /*机体坐标系y方向加速度，单位m/s^2 */  
    float zacc; /*机体坐标系z方向加速度，单位m/s^2 */  
    float xgyro; /*机体坐标系x方向角速度，单位rad/s */  
    float ygyro; /*机体坐标系y方向角速度，单位rad/s */  
    float zgyro; /*机体坐标系z方向角速度，单位rad/s */  
    float xmag; /*机体坐标系x方向磁通量，单位Gauss =T/10000*/  
    float ymag; /*机体坐标系y方向磁通量，单位Gauss =T/10000*/  
    float zmag; /*机体坐标系z方向磁通量，单位Gauss =T/10000*/  
    float abs_pressure; /*绝对气压值，单位 millibar=100Pa*/  
    float diff_pressure; /*相气压值，单位 millibar=100Pa*/  
    float pressure_alt; /*气压解算高度值，单位m*/  
    float temperature; /*温度，单位摄氏度*/  
  
    uint32_t fields_updated; /*传感器参数初始化标志位， bit 0 = xacc, bit 12:  
    temperature, bit 31:全部重新初始化 */  
  
} mavlink_hil_sensor_t;
```

■ HILGPS30d (GPS接口)

模型发送给飞控的GPS数据值，它对应了MAVLink消息的mavlink_hil_gps_t结构体。输出信号中包含了经纬高、水平竖直精度、地速、北东地的速度、偏航角、定位状态和卫星数量

等数据。

这些传感器的值在仿真时由我们的模型提供，在真机飞行时由真实GPS模块提供。

```
typedef struct __mavlink_hil_gps_t {  
  
    uint64_t time_usec; /*时间戳，单位毫秒ms*/  
  
    int32_t lat; /*纬度(WGS84地球模型), 单位度，再乘以 1E7*/  
  
    int32_t lon; /*经度(WGS84地球模型), 单位度，再乘以 1E7*/  
  
    int32_t alt; /*高度 (AMSL地球模型，而不是 WGS84), 单位m，再乘以1000  
(向上为正)*/  
  
    uint16_t eph; /*GPS水平方向定位精度，单位cm，如果不知道设为 65535*/  
  
    uint16_t epv; /*GPS垂直方向定位精度，单位cm，如果不知道设为 65535*/  
  
    uint16_t vel; /*GPS地速，单位cm/s，如果不知道设为 65535*/  
  
    int16_t vn; /*GPS地速朝北方向分量，单位cm/s */  
  
    int16_t ve; /*GPS地速朝东方向分量，单位cm/s */  
  
    int16_t vd; /*GPS地速朝下方向分量，单位cm/s */  
  
    uint16_t cog; /*运动方向，单位和范围0~359.99度，再乘以100 degrees *  
100，如果不知道设为 65535*/  
  
    uint8_t fix_type; /*定位类型 0-1: no fix, 2: 2D fix, 3: 3D fix. */  
  
    uint8_t satellites_visible; /*可见卫星数，如果不知道设为255*/  
  
} mavlink_hil_gps_t;
```

注：GPS数据的发送频率与真实传感器硬件基本相同为10Hz，因此飞控的实时位置并不能靠GPS直接提供，需要与IMU等传感器进行融合滤波估计得到。

● VehileInfo60d（真实仿真数据输出）

模型发送给RflySim3D的真实仿真数据，是平滑的理想值，这些数据可用于Simulink下的飞控与模型进行软件仿真测试。

```
struct SOut2Simulator {  
  
    int copterID; //飞机ID，用于区分局域网内不同飞机
```

```
int vehicleType;
//飞机样式，区分同种飞机（如四旋翼）下的不同样式（例如，大疆、AR.Drone）

double runnedTime; //时间戳，当前时刻的时间，单位毫秒

float VelE[3]; //速度向量，地球坐标系的xyz速度（z向下为正），单位m/s

float PosE[3];
//位置向量，地球坐标系下的xyz方向（z向下为正，单位m，以起飞点为坐标原点

float AngEuler[3]; //姿态角，飞机的欧拉角，定义于机体坐标系，单位弧度

float AngQuatern[4]; //四元数，飞机姿态的四元数，定义于机体坐标系

float MotorRPMS[8]; //电机转速，飞机的各个旋翼转速，单位转每分

float AccB[3]; //加速度，飞机的运动加速度，单位m/s^2

float RateB[3]; //角速度，飞机的转动角速度，单位rad/s

double PosGPS[3]; //GPS坐标，飞机的经纬高坐标，单位度、度、米

};
```

2. 实验效果

实现FX450四旋翼系统辨识模型DLL生成，完成FX450辨识模型的软硬件在环仿真测试。

3. 文件目录

例程目录：

[\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\3.CustExps\e6_IdentificationModel\FX450](#)

文件夹/文件名称	说明
FX450_model.slx	四旋翼飞机模型文件。
FX450_model_HITLRun.bat	硬件在环仿真批处理文件。
FX450_model_SITLRun.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
Model_Params.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/>

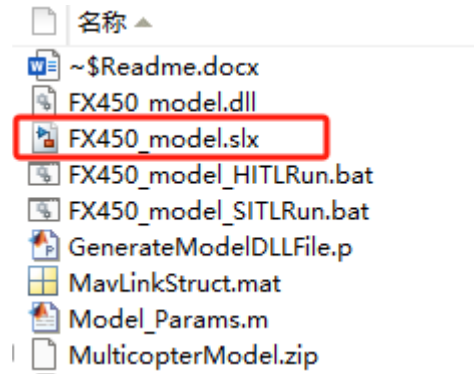
5. 实验步骤

5.1. 必做实验：DLL模型生成

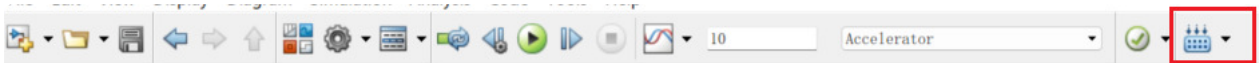
Step 1: 编译模型

在Matlab中打开“FX450_model.slx” Simulink 文件，点击Build Model 按钮生成代码。编译配置可参考

[4.RflySimModel\0.ApiExps\2.UserDefinedC++\2.GenC++\Readme.pdf](#)

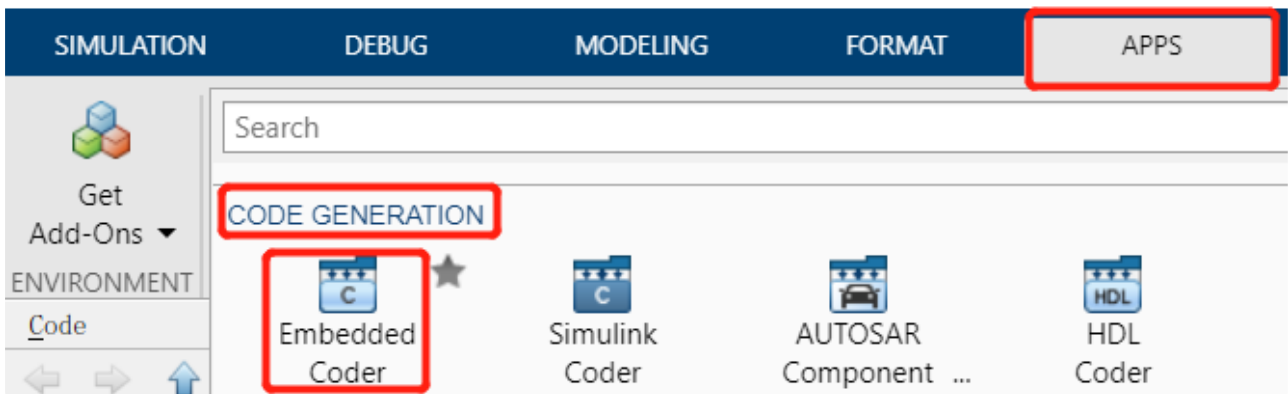


对于MATLAB 2019a及之前版本，工具栏样式见下图，直接点击它的编译按钮“Build”即可。

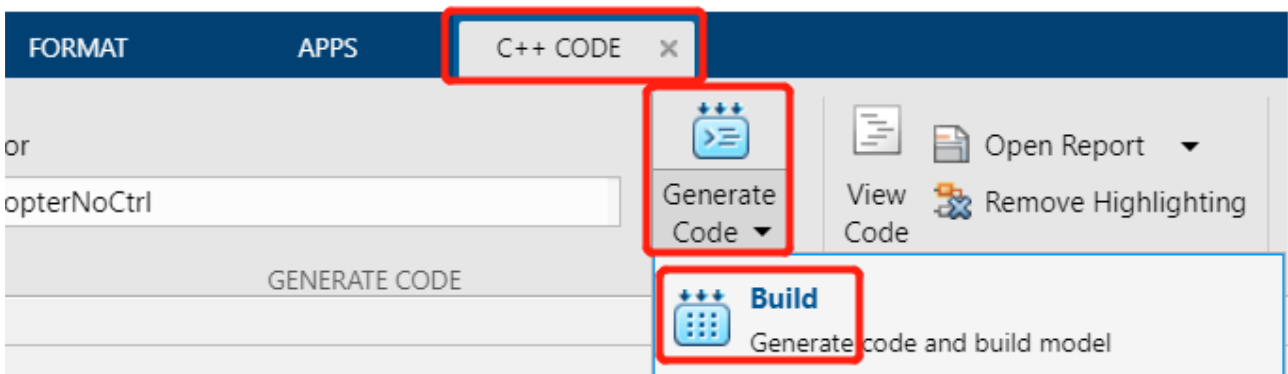


对于2019b及之后版本，点击APPS - CODE GENERATION - Embedded Coder才能弹出代码生成工具栏，在其中如下图所示点击“C++CODE” - “Generate Code” - “Build”按钮就能编译生成代码。

MulticopterCtrlVelocity/Force and Moment Model - Simulink



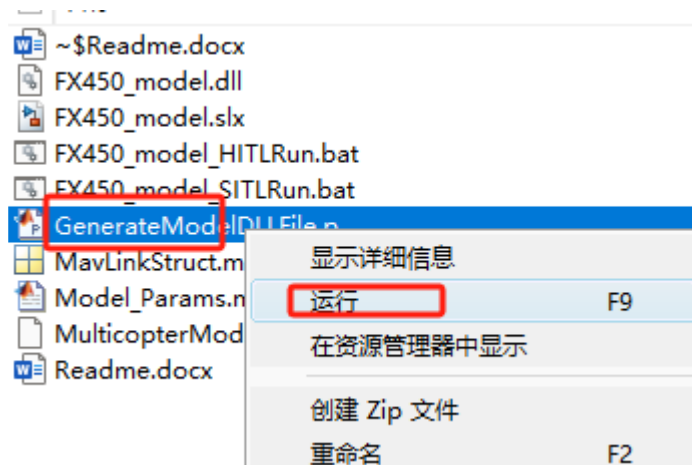
k



Step 2: 生成DLL文件

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

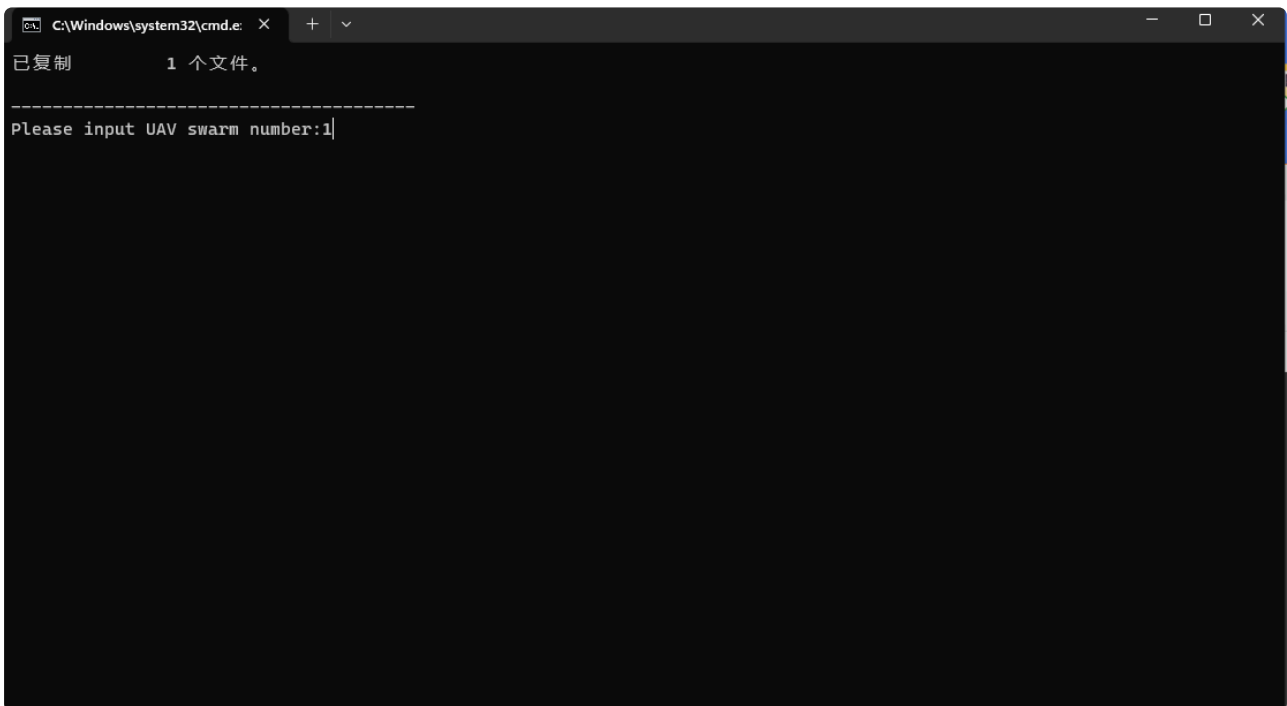
文件。



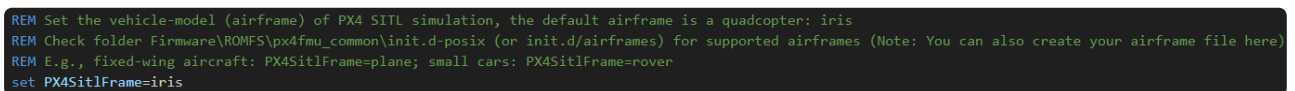
5.2. 必做实验：软件在环仿真

Step 1: 启动仿真

双击运行“FX450_model_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。

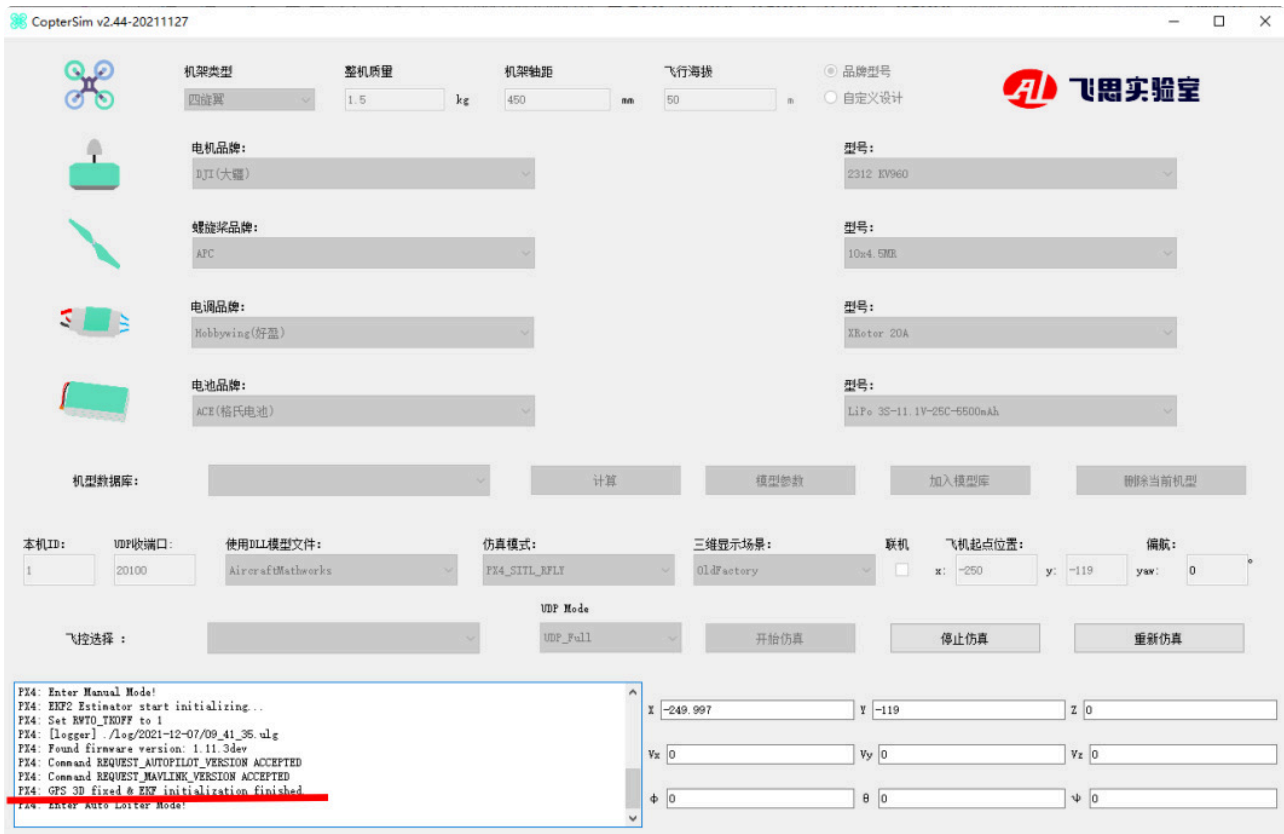


注意，在“FX450_model_SITLRun.bat”文件中，机架设置处确认为FX450模型对应的机架。



Step 2: 等待初始化完成

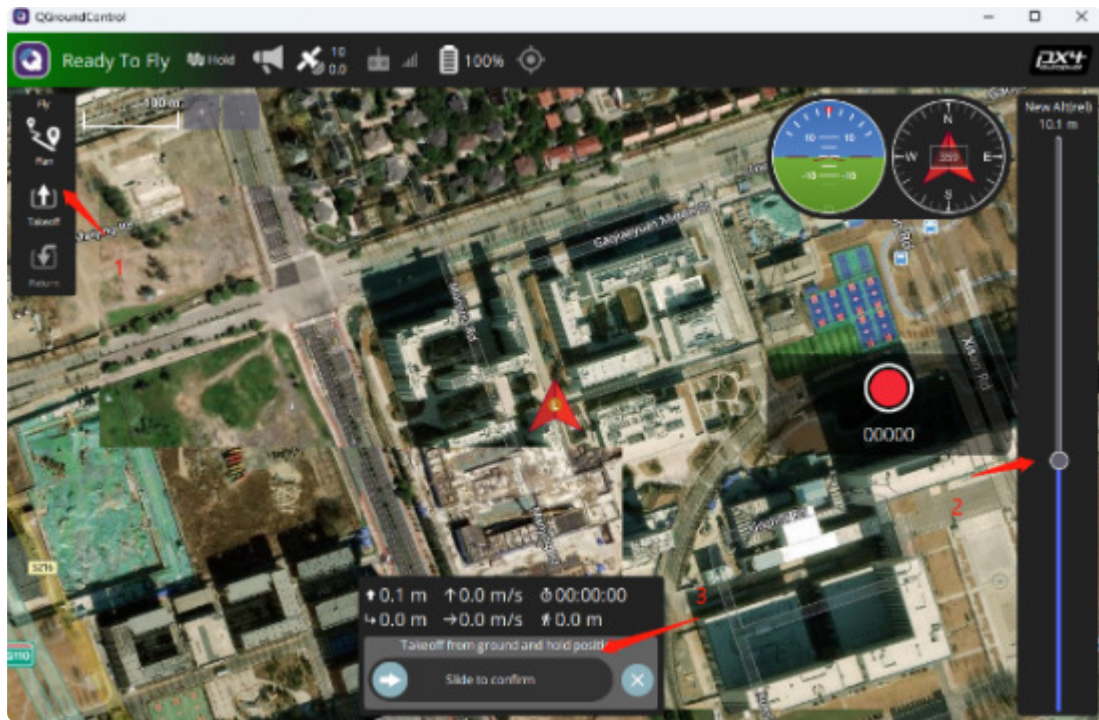
等待 CopterSim 中显示连接上 RflySim3D。



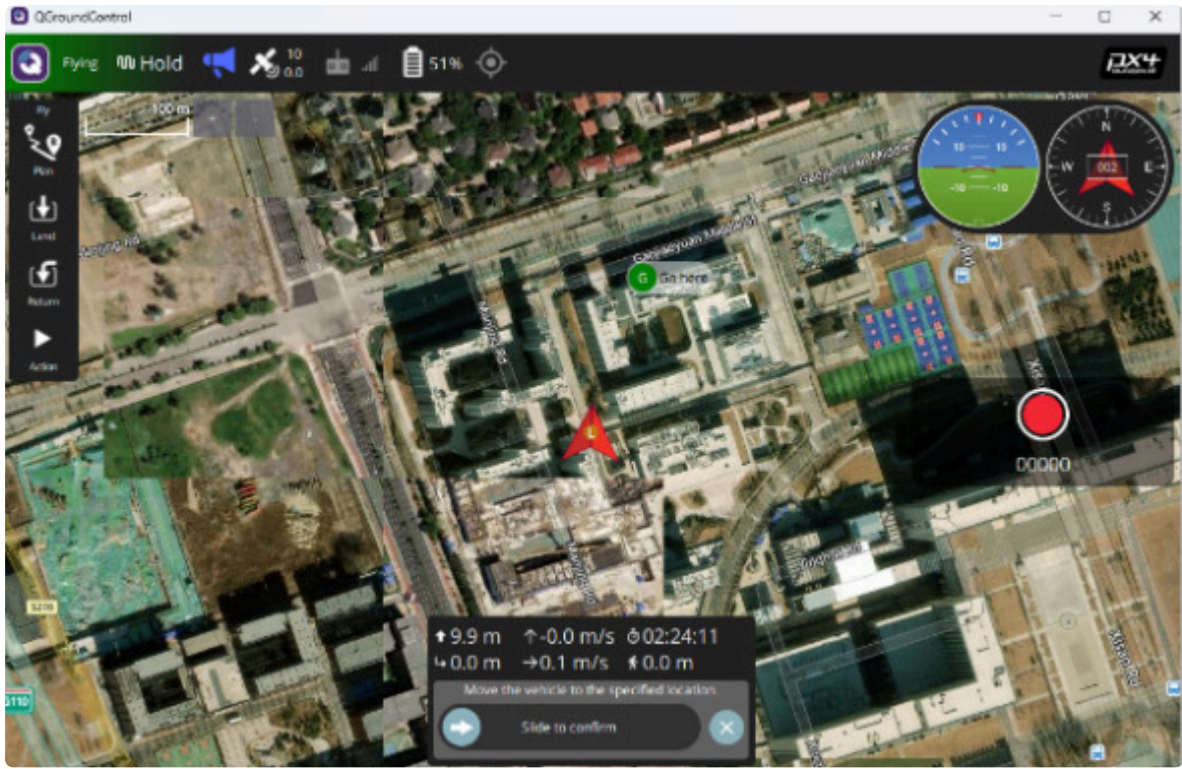
Step 3: 观测结果

在 RflySim3D中观察是否正常起飞、降落以及按照指令飞行。

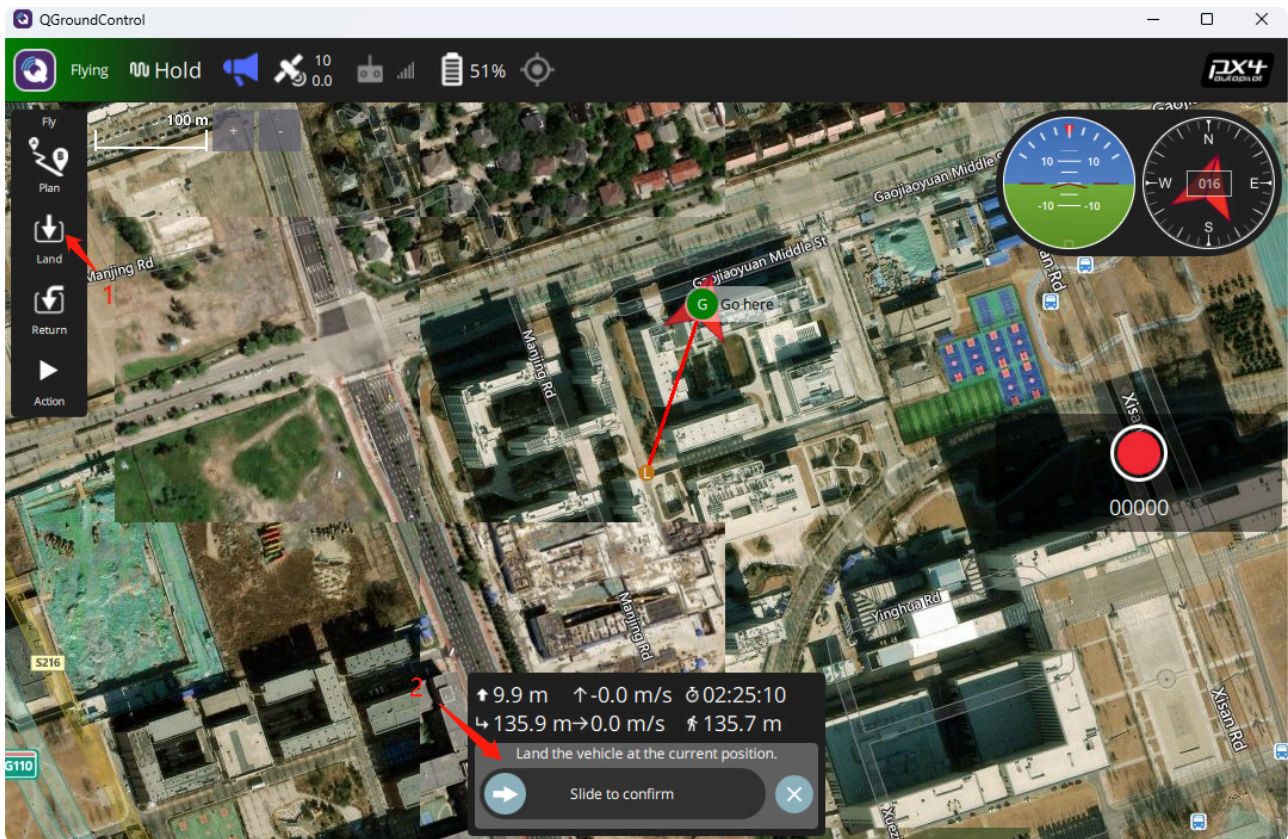
1. 起飞



2. 飞行



3. 着陆



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。

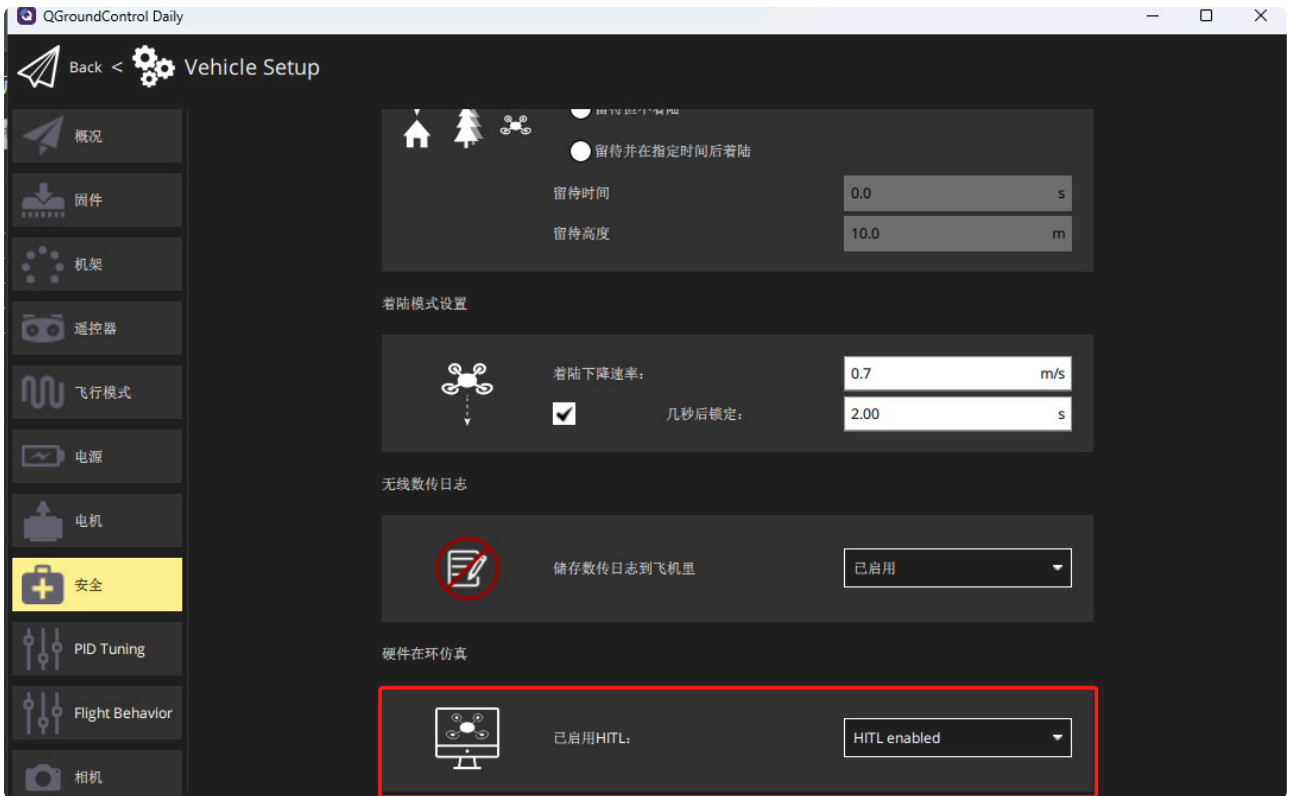
 3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷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

在机架界面设置机架型号为“Generic Quadcopter”，设置完毕后点击右侧“应用并重启”。

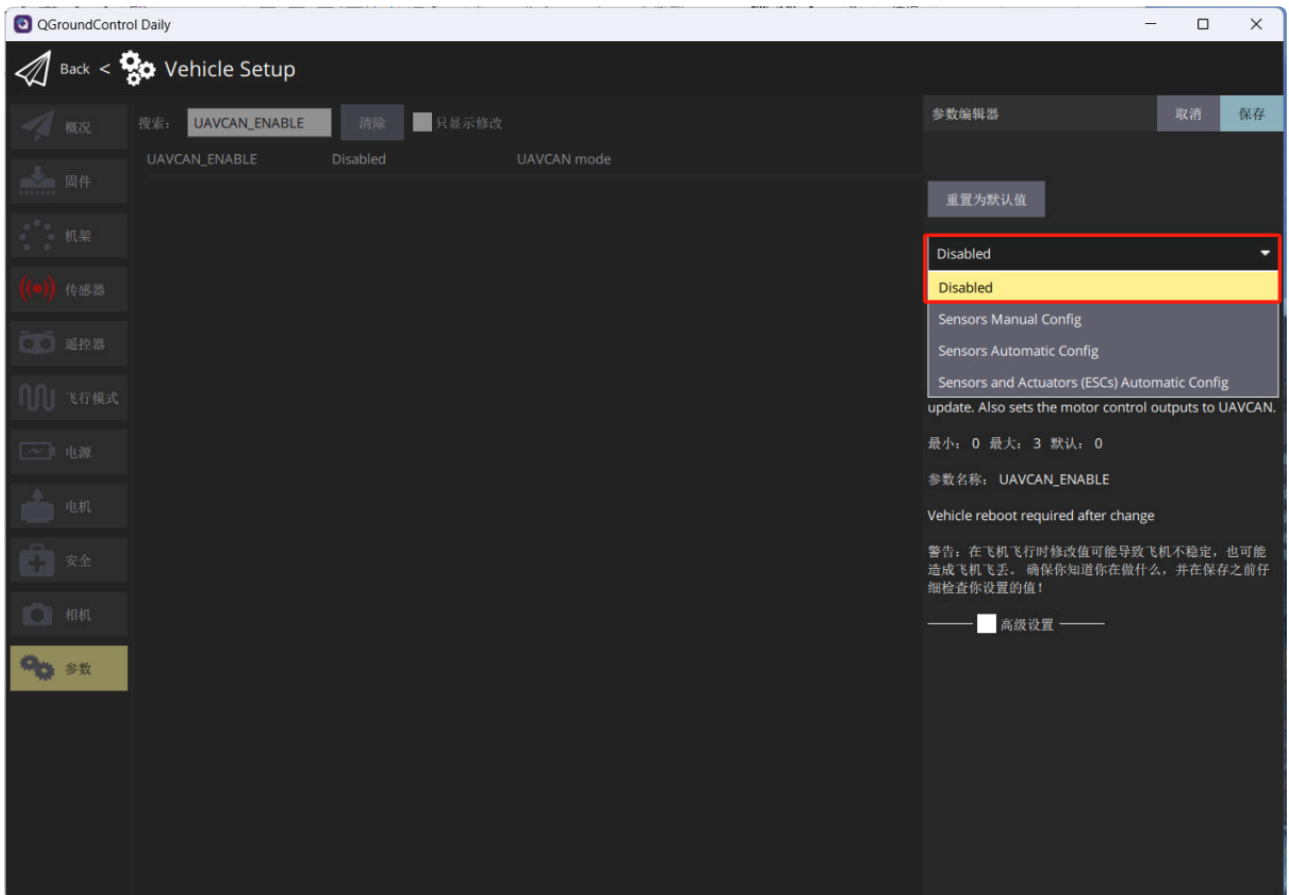


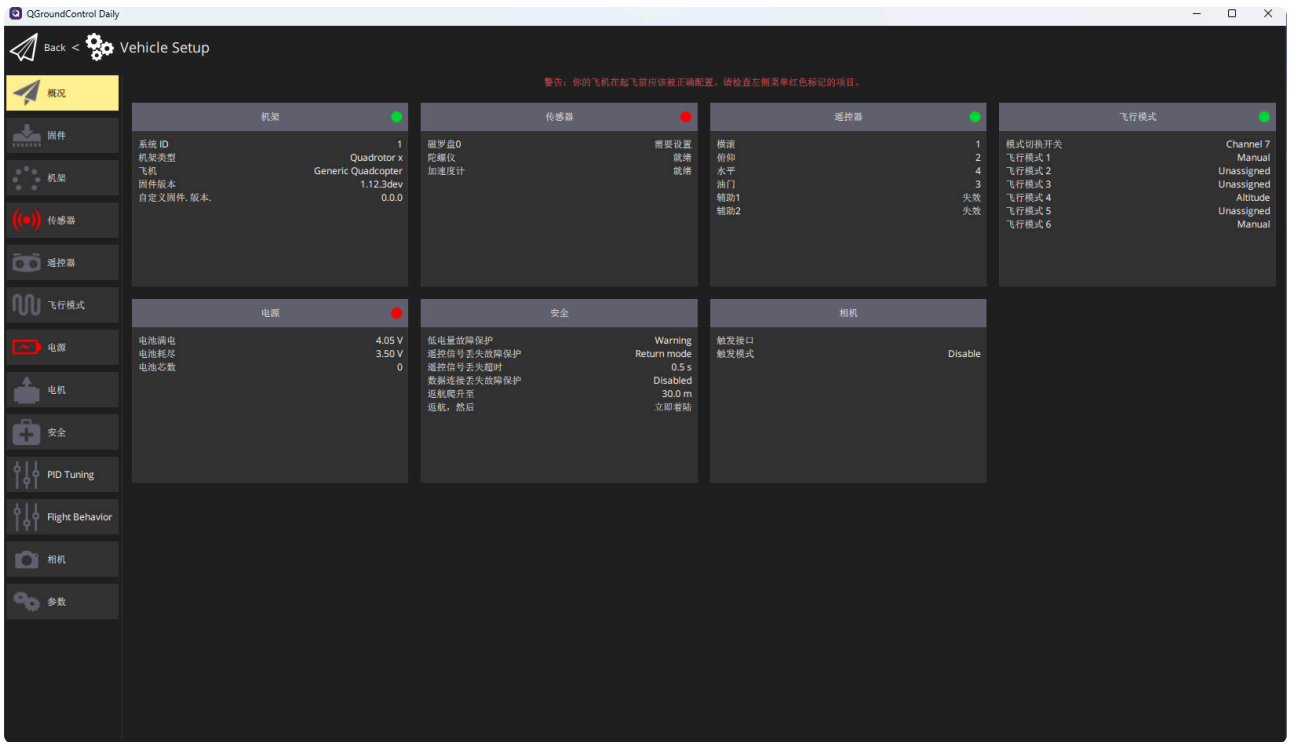
Step 3: 配置硬件在环参数

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。



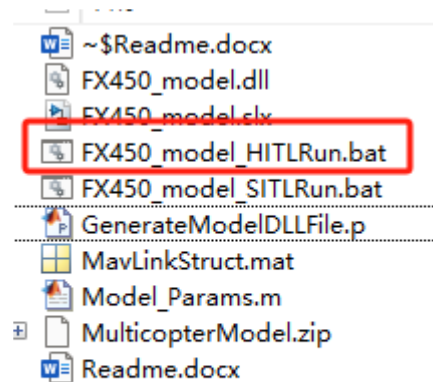
点击“参数”，并在搜索栏中输入“UAVCAN_ENABLE”，在弹出框中设置为“Disabled”，点击保存之后在概况界面中确认配置完成后，重新插拔飞控完成设置。





Step 4: 启动仿真

右键以管理员身份运行“FX450_model_HITLRun.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。



```
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

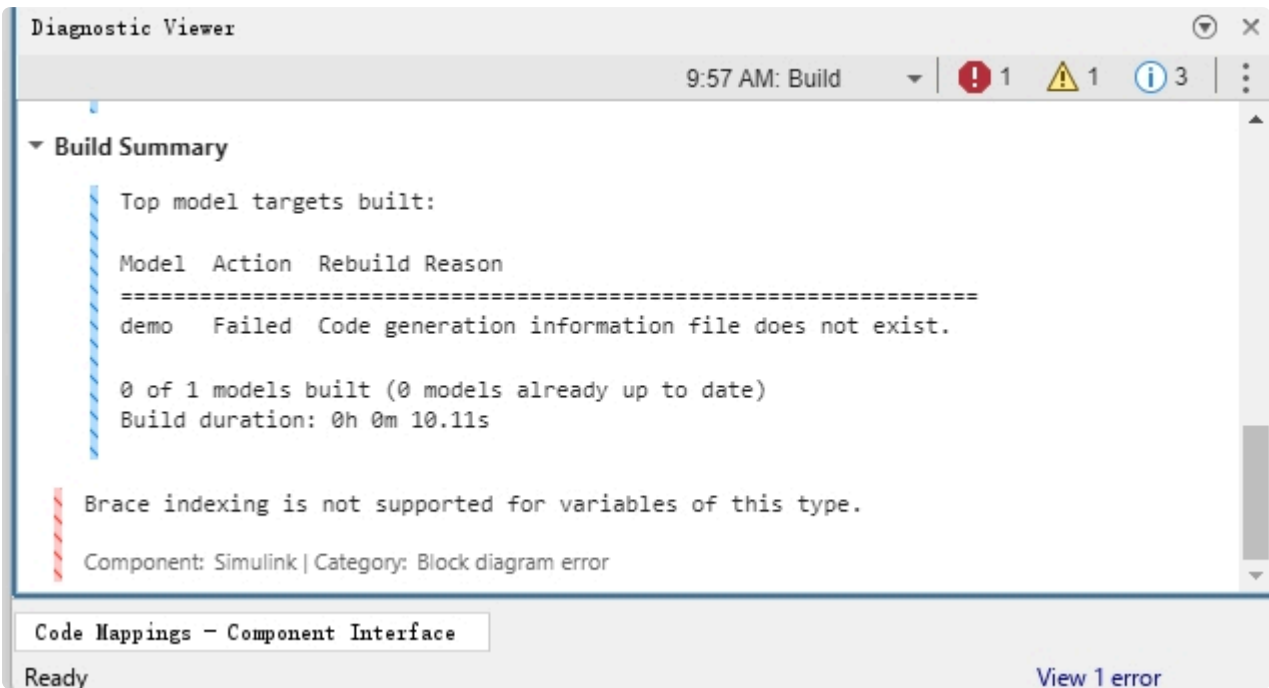
之后测试步骤与软件在环仿真的Step2到Step3相同，运行之后观察四旋翼能否按照指令飞行。

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](#)

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



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

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