

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

基于动力系统辨识的FX450四旋翼模型验证（SIL/HIL实验）

1.2 实验目的

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

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

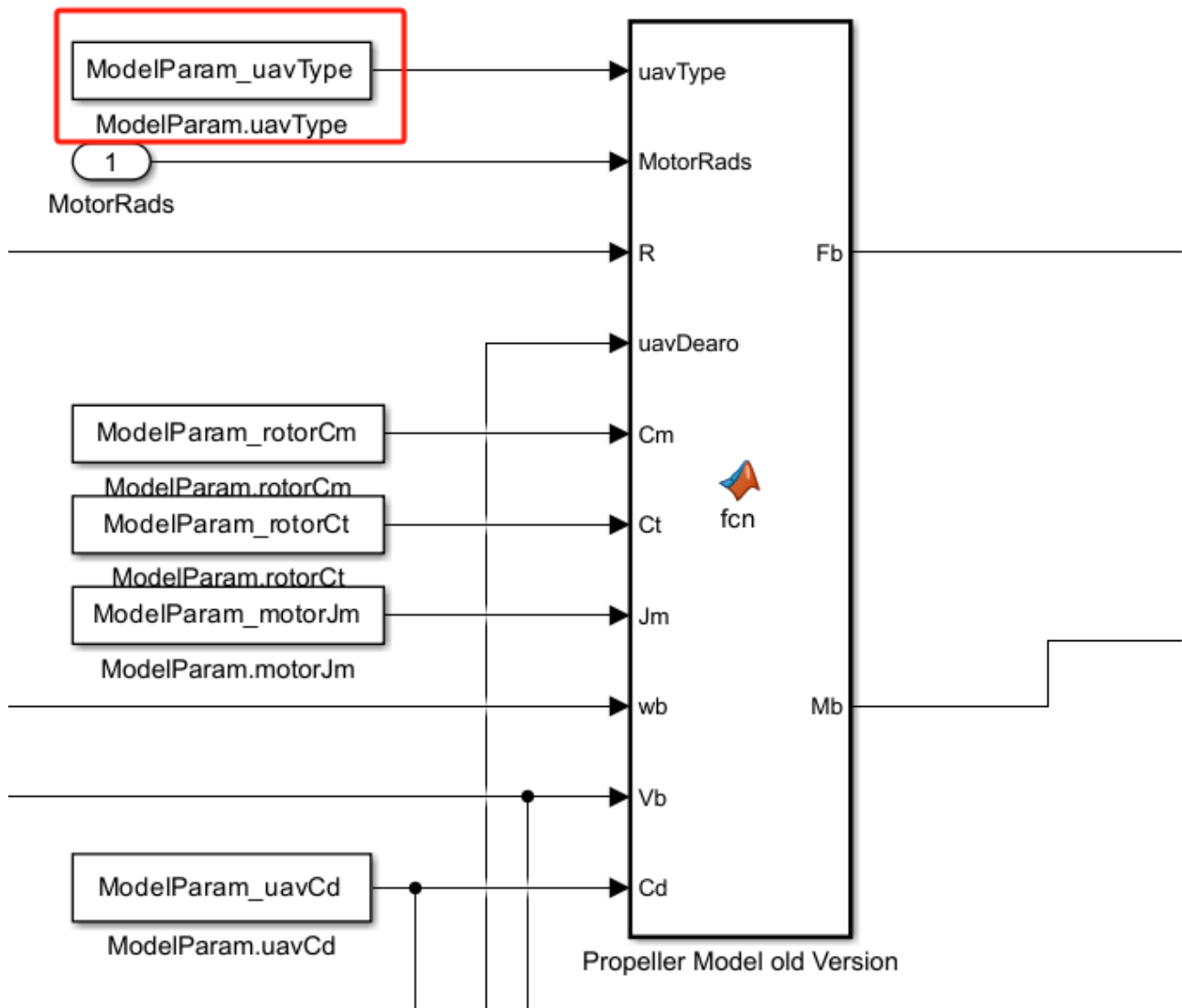
重要参数

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

飞机的机型及三维显示样式

```
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效，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。

还需其余各种模块参数

参数调用过程

FX450_model.slx是用于生成DLL模型的simulink动态载具建模模板，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

输入数据包括电机控制量、地形数据、碰撞数据等。

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

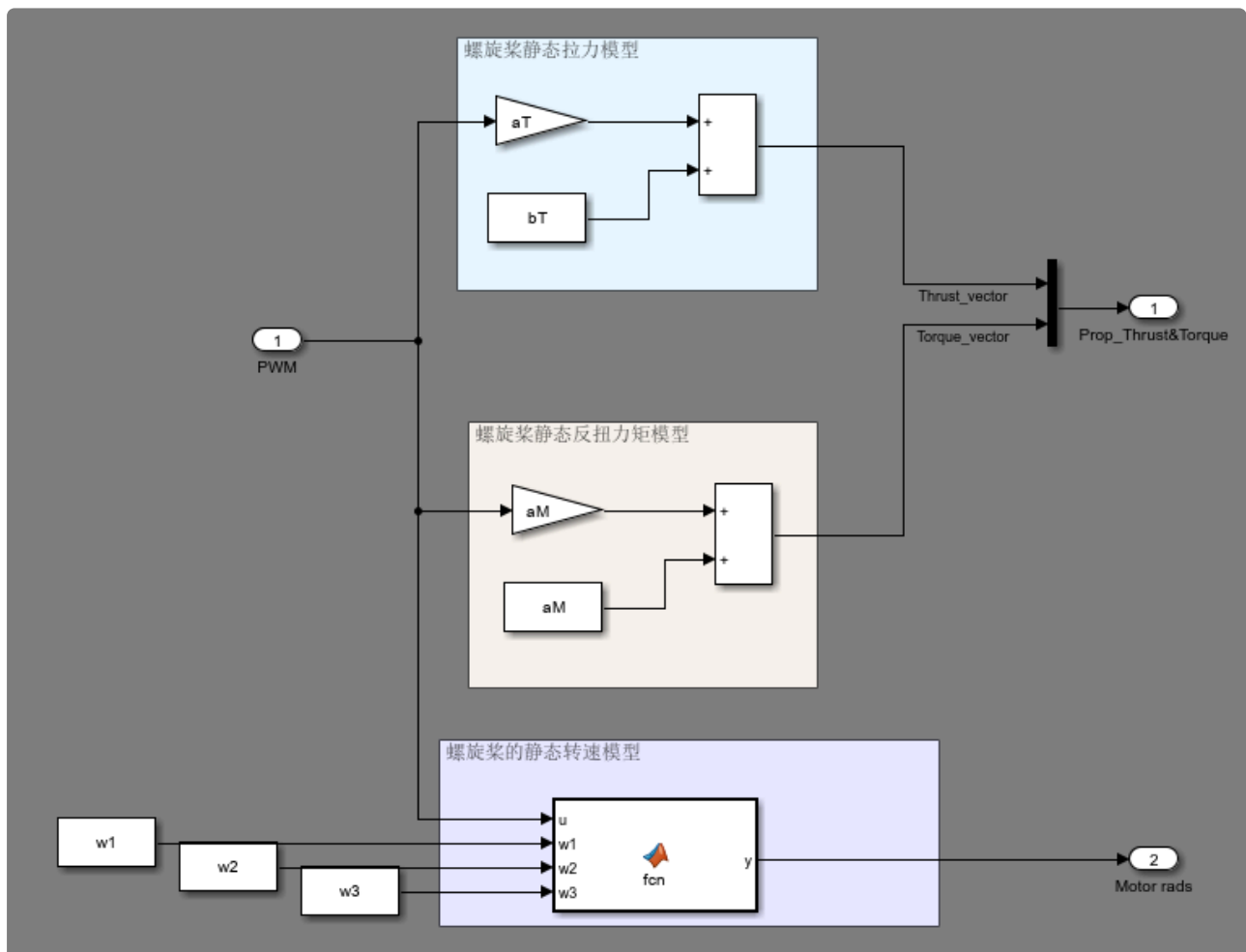
persistent landFlag;
if isempty(landFlag)
    landFlag=int8(1);
end

z=Xe(3)-terrainZ;

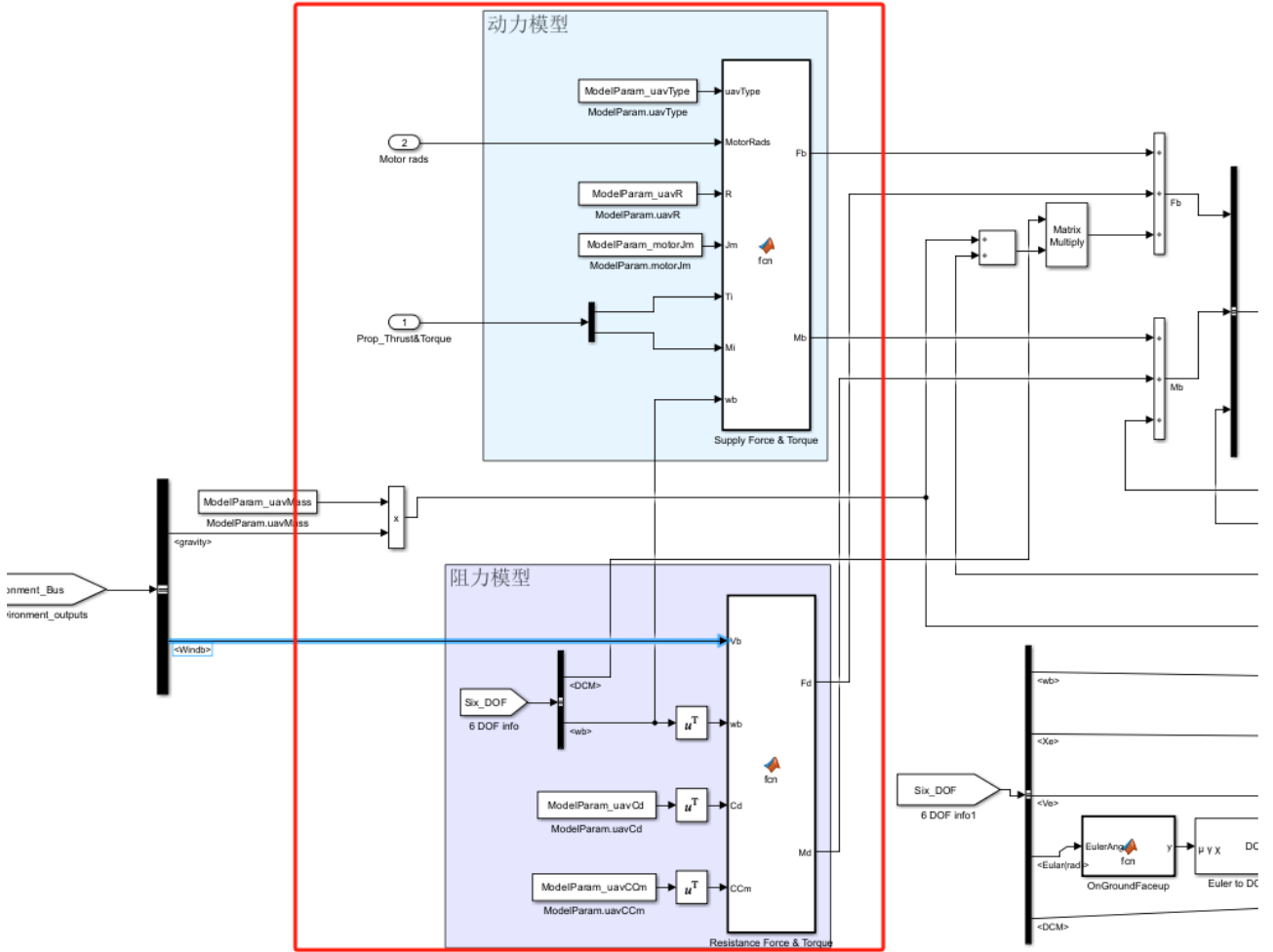
```

模型模块简介

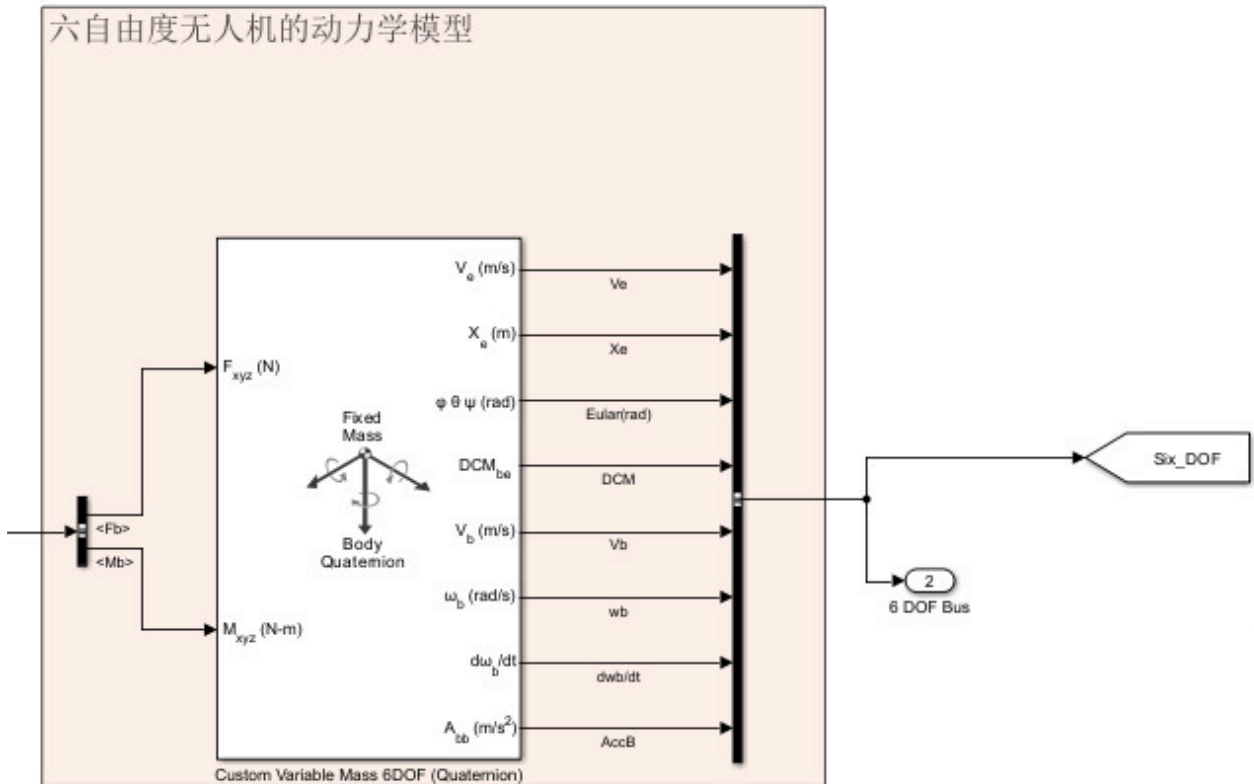
静态螺旋桨模块



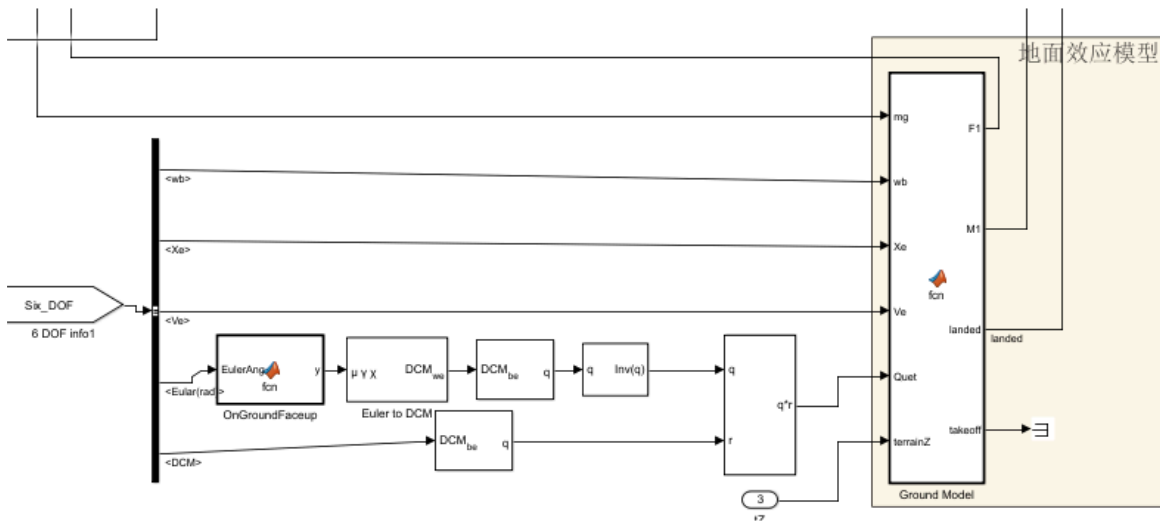
动态力和力矩模块



6DOF六自由度刚体模块



GroundSupportModel地面支撑模块

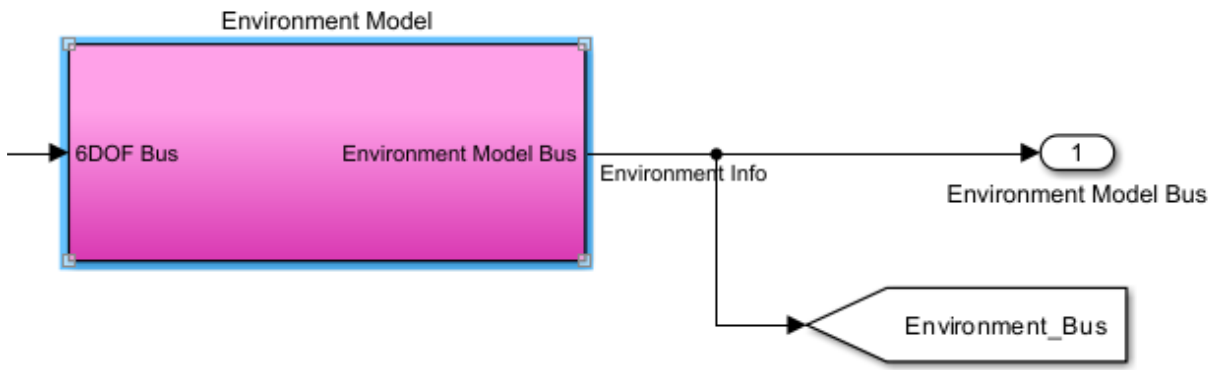


SensorOutput传感器输出模块

该模块中包括了环境模型、传感器模型和GPS模型。

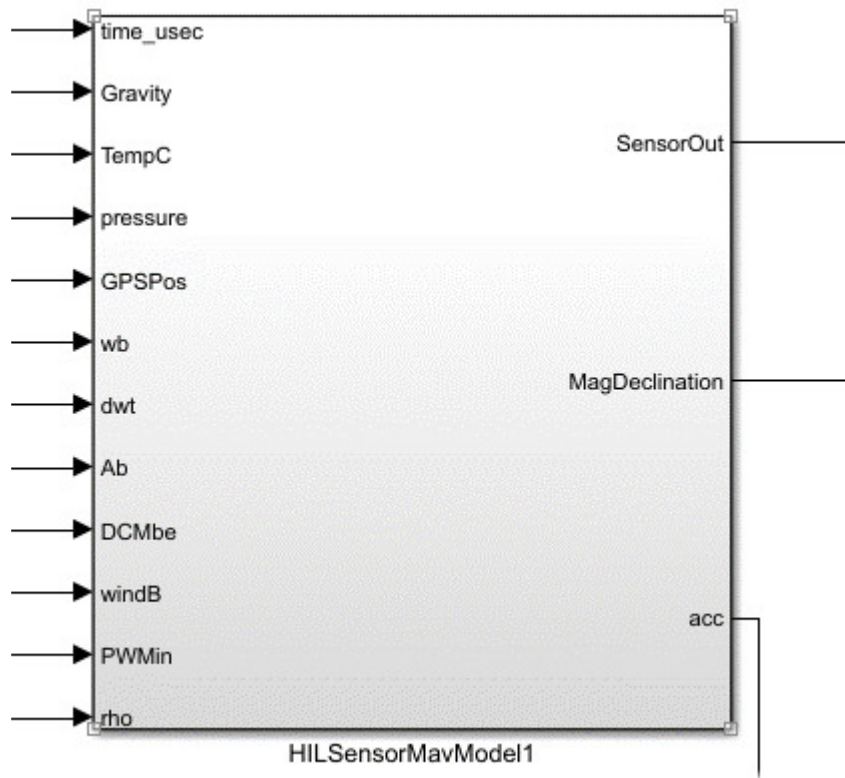
环境模型

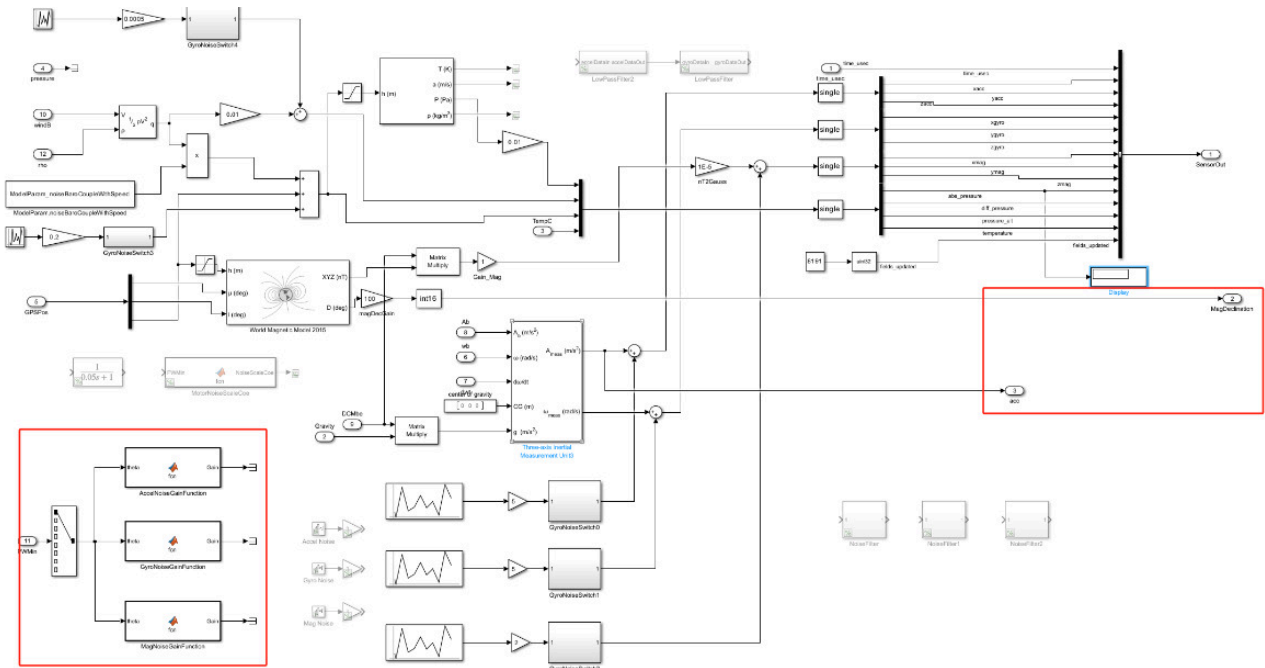
环境模型对重力和大气压强对无人系统飞行产生的影响进行了模拟



传感器模型

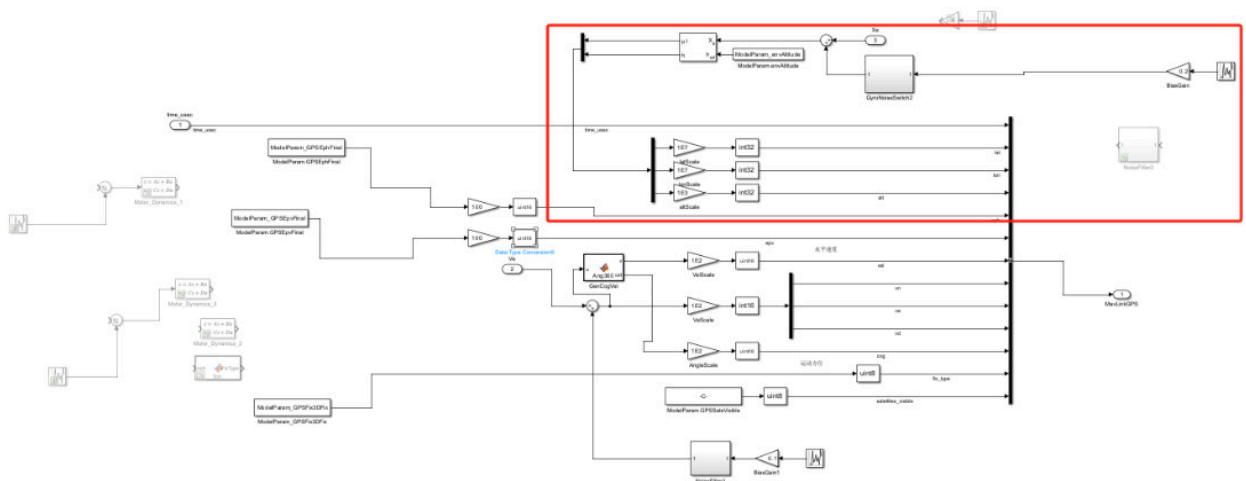
传感器模型中不仅对磁力计、惯性导航进行了建模，同时加入了噪声模拟





GPS模型

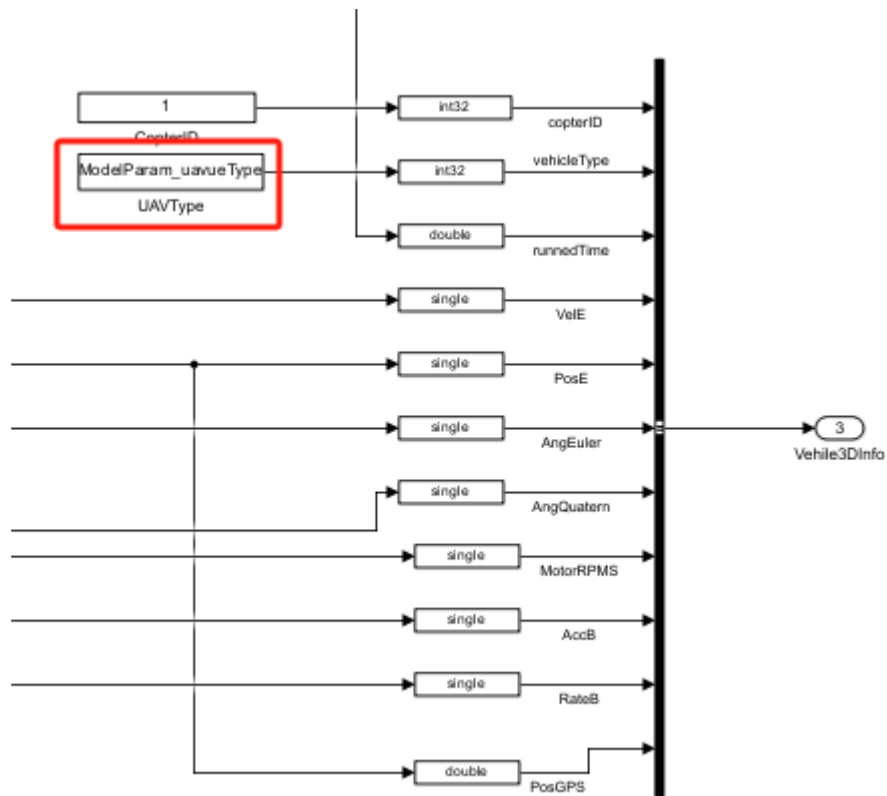
GPS模型用于计算GPS数据，在仿真时反馈回PX4控制器



3DOutput三维显示模块

该模块会将ModelParam_uavueType（三维显示ID）、来自电机模型的ActuatorToUE以及来自6DOF模型的6DOF

Bus的位置、速度、姿态和加速度等输出为MavVehile3DInfo，并按协议对输入信息进行数据打包后通过该接口将数据发送至三维引擎



输出信号

最大模型模版包含了6个输出信号，分别是HILSensor30d、HILGPS30d、VehileInfo60d、outCopterData、ExtToUE4、ExtToPX4。

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ms*/  
  
    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竖直方向定位精度, 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

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\2.AdvExps\e2_MultiModelCtrl\7.IdentificationModel\FX450

文件夹/文件名称	说明
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
FX450_model.dll	FX450辨识模型动态链接库文件

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://rflsim.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。

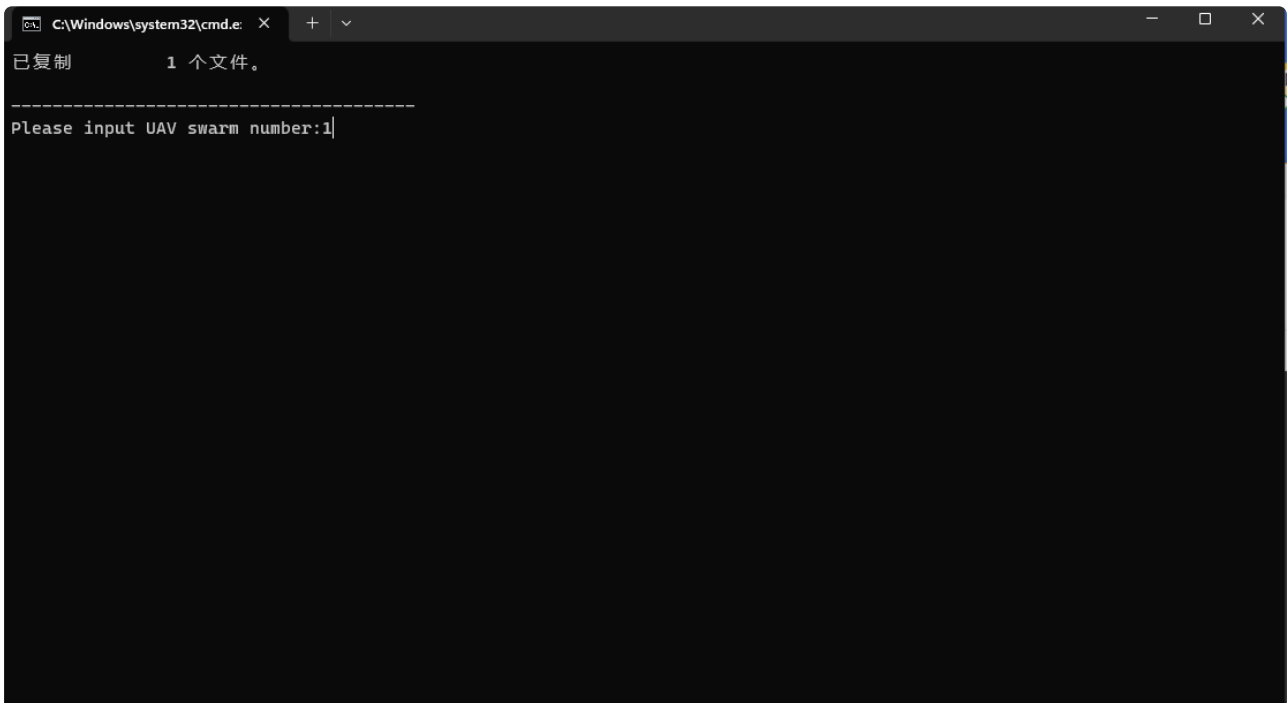
①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

5. 实验步骤

5.1. 必做实验：软件在环仿真

Step 1：启动仿真

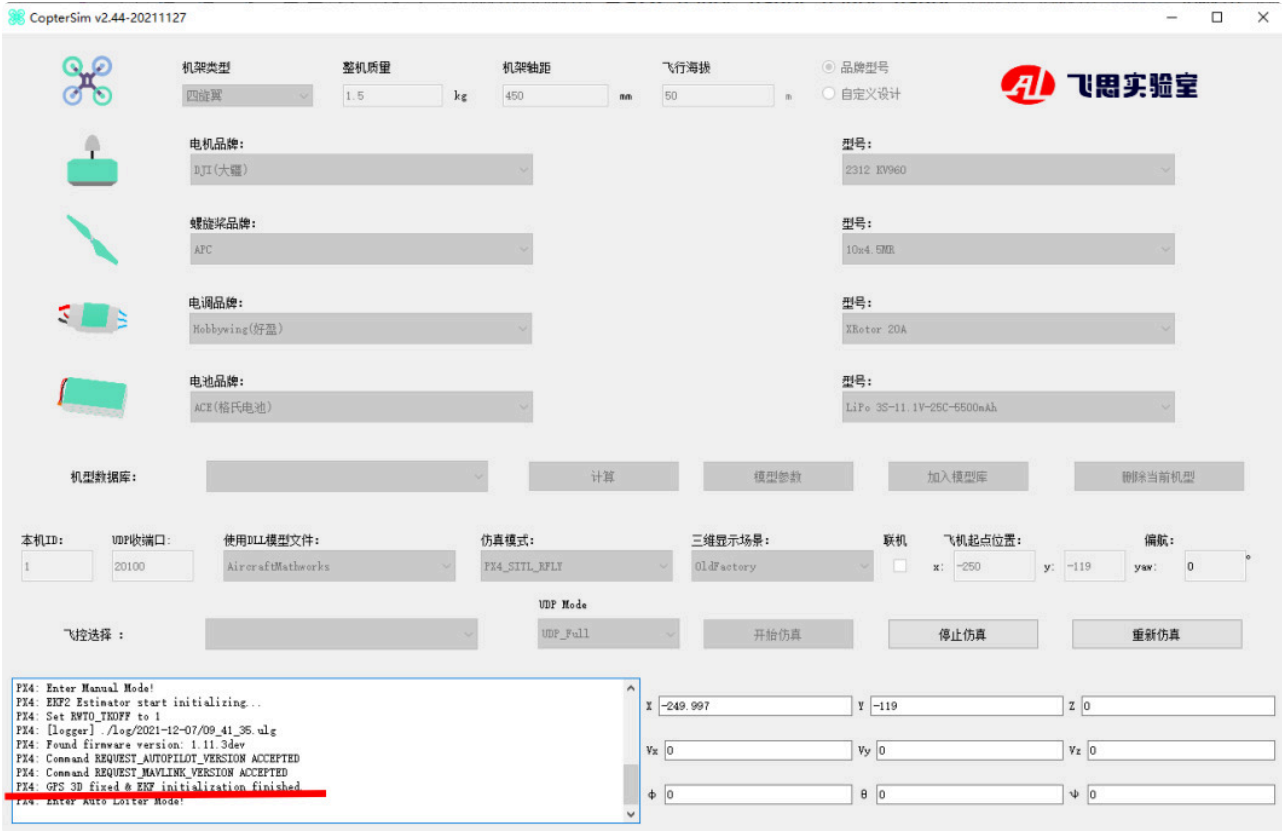
双击运行“FX450_model_SITLRun.bat”批处理文件，在弹出的终端窗口中输入1，启动一架飞机的软件在环仿真。



```
C:\Windows\system32\cmd.e  X  +  v
已复制      1 个文件。
-----
Please input UAV swarm number:1|
```

Step 2：等待初始化完成

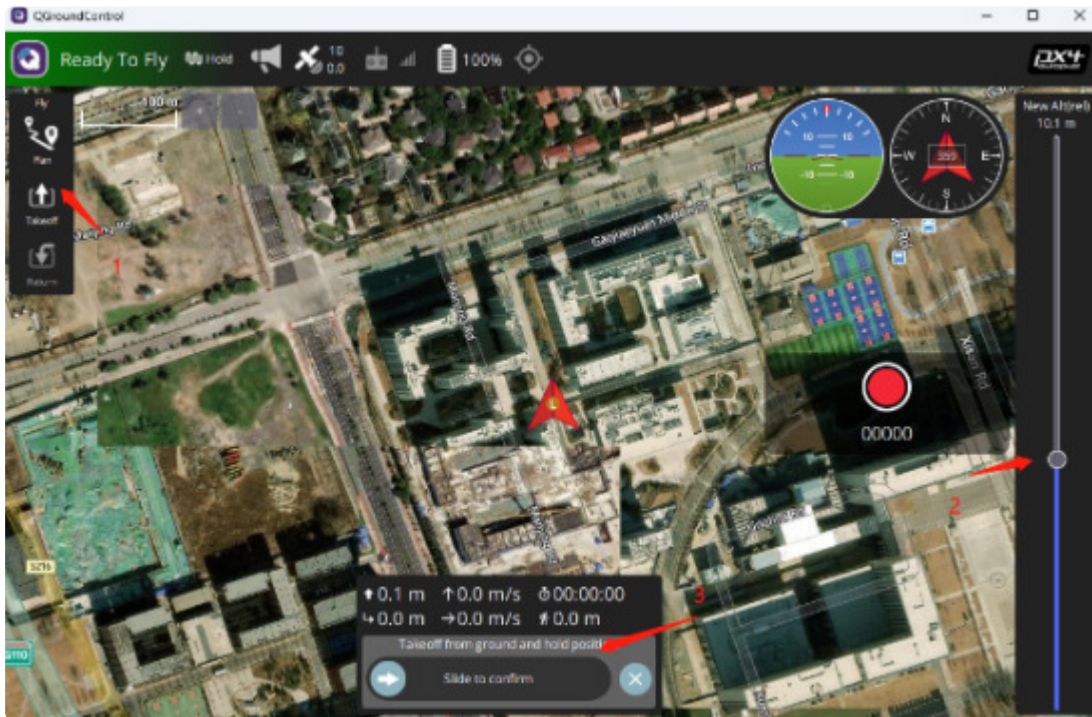
等待 CopterSim 中显示连接上 RflySim3D。



Step 3: 观测结果

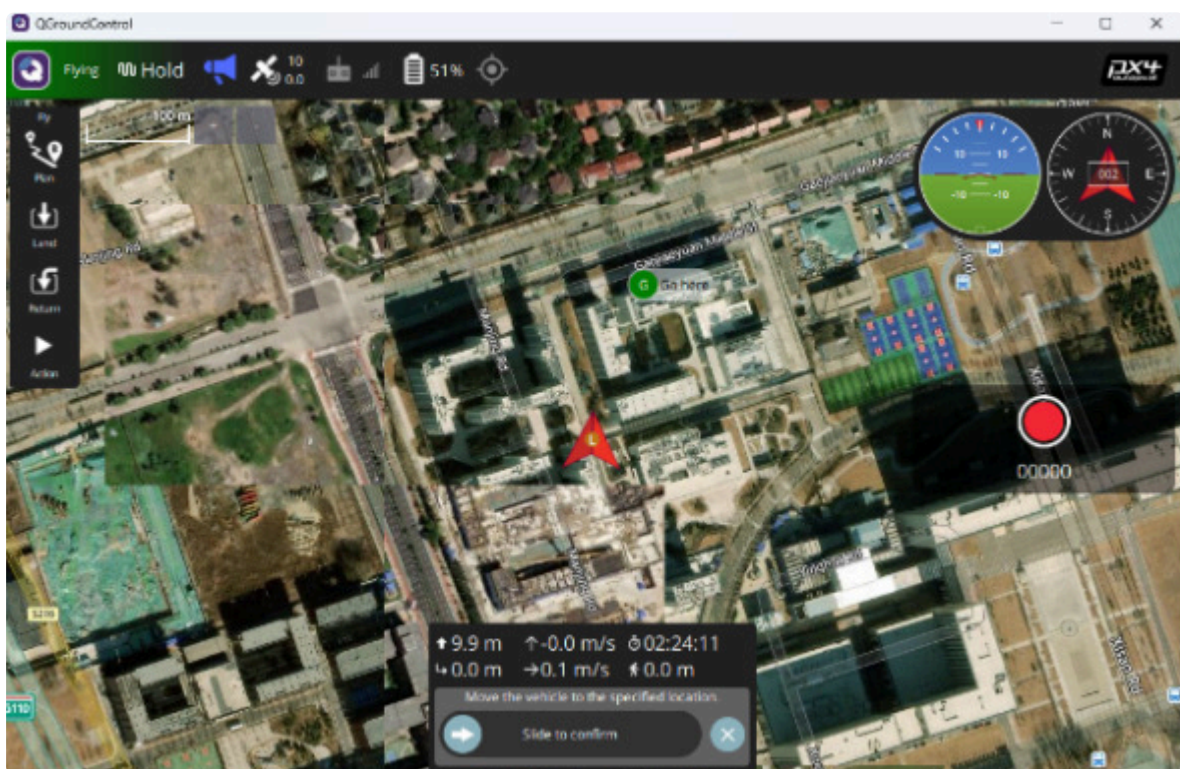
在 RflySim3D中观察是否正常起飞、降落以及按照指令飞行。

1. 起飞



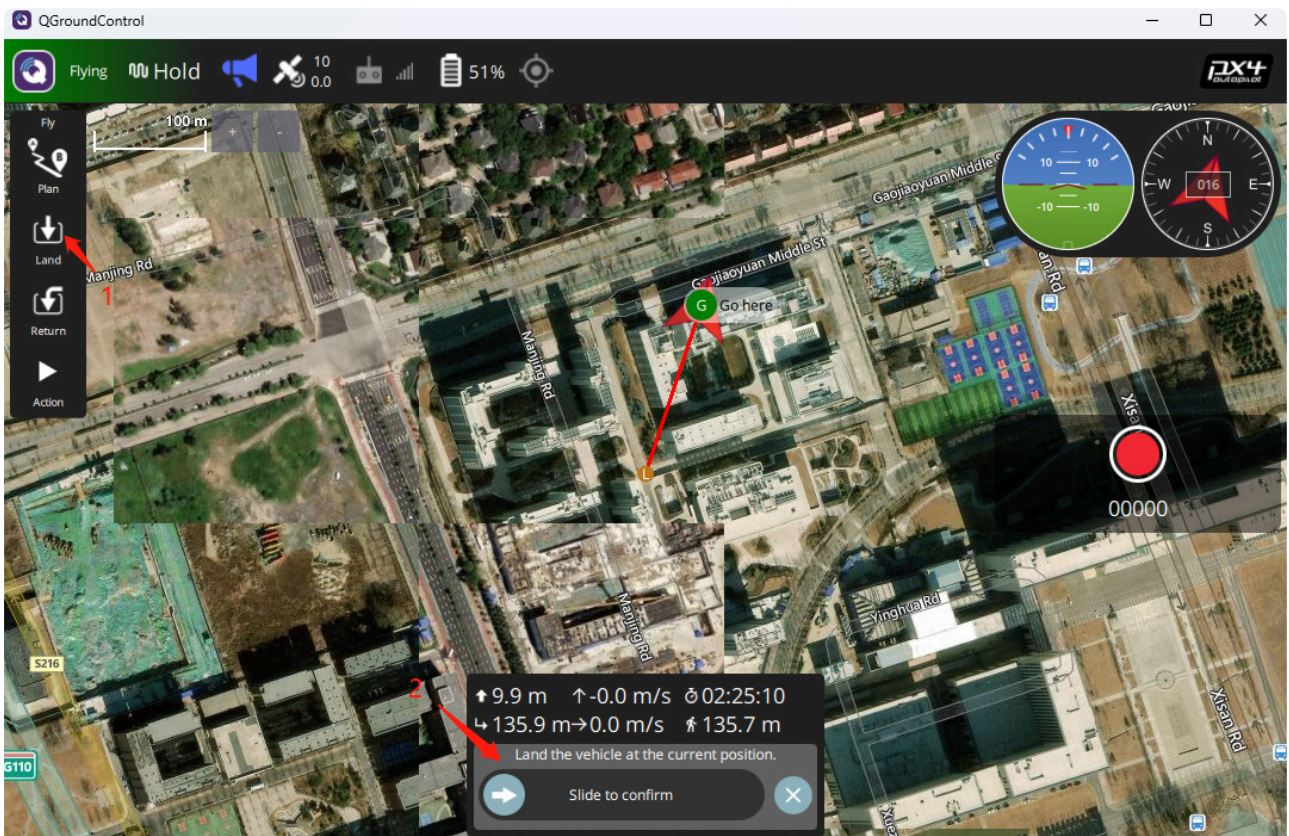


2. 飞行





3. 着陆





5.3. 选做实验：硬件在环仿真












Step 1: 连接飞控

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。

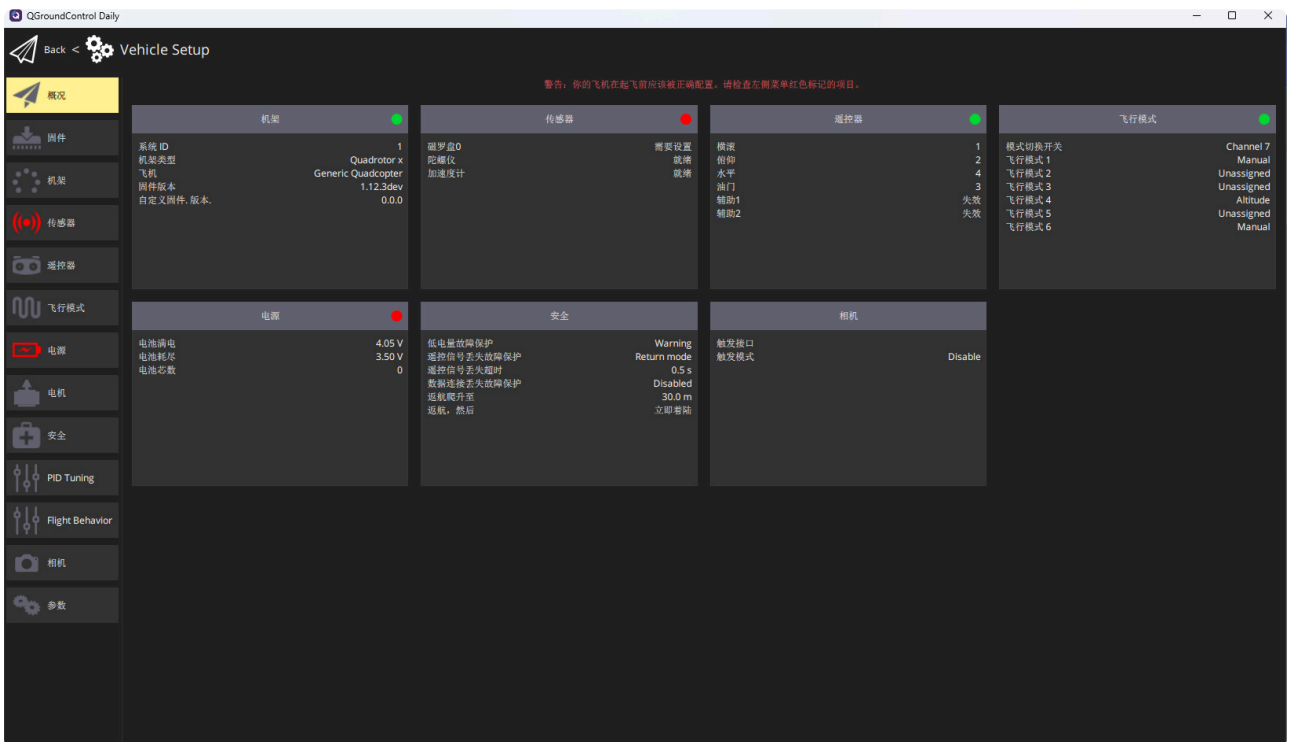
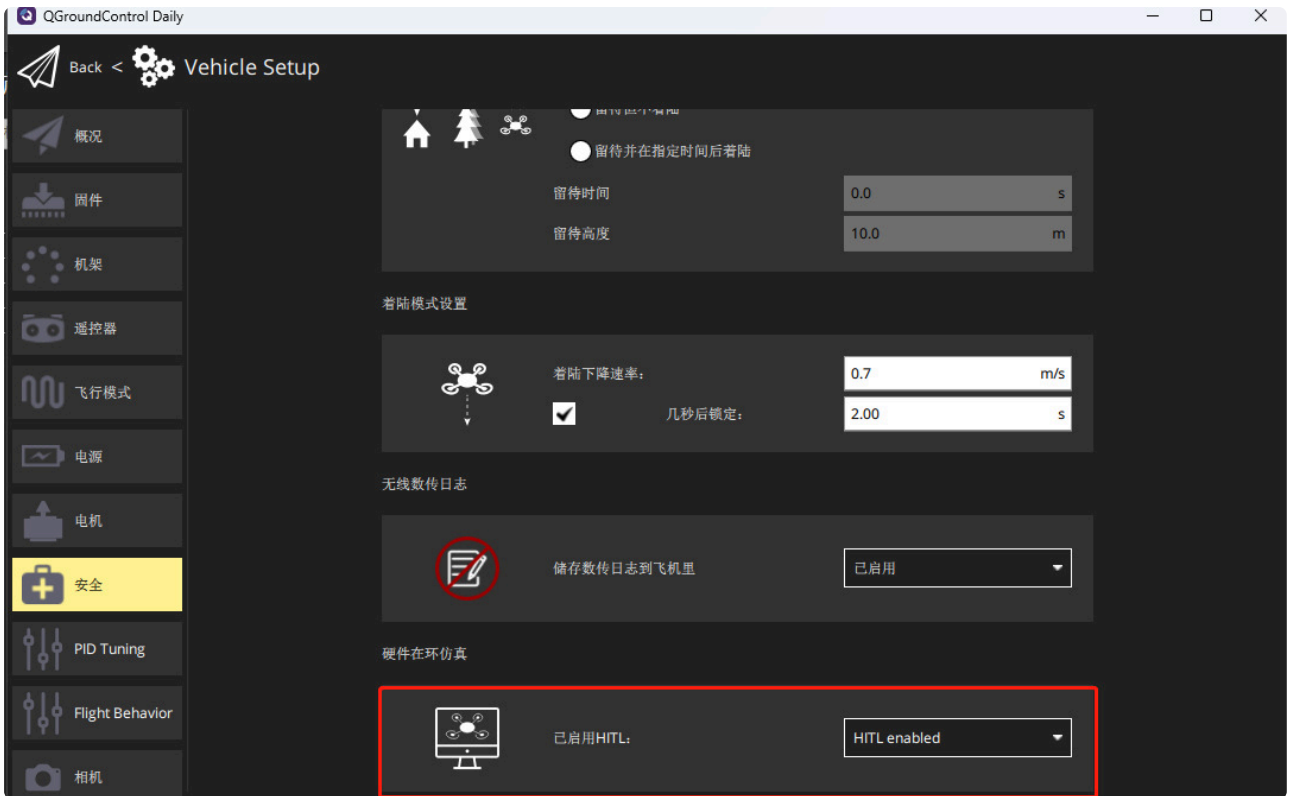
	3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
	QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
	RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷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



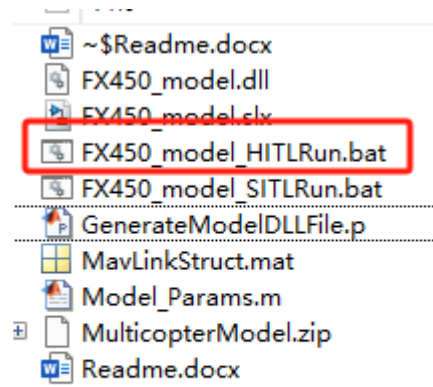
Step 3: 配置硬件在环参数

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。



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 ?????
COM6: ???????????
COM7: ???????????

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:

A1:

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