

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

固定翼综合模型设计及仿真验证（仅限完整版及以上版本）

1.2 实验目的

在Simulink的固定翼模型基础上，基于MATLAB/Simulink设计固定翼控制器，并将控制器和动力学模型放在同一个slx文件中，依据特定的输入输出接口，形成一个固定翼整体仿真闭环，即综合模型。在得到综合模型后，通过外部控制的方法实现顶层控制。

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](#)

1.3.1 背景

在原有动力学模型的基础上实现控制器，构成综合模型。控制器使用MATLAB/Simulink实现基本姿态控制、定点功能。控制器直接拿取模型的真实状态作为输入。

PX4能够通过有线或者wifi被独立的辅助计算机控制，辅助计算机通常通过MAVLink API进行通信。载具执行辅助计算机通过MAVLink设定的位置、速度、姿态指令。Offboard模式主要用于做空中机动，至于起飞、降落、返航则选用相应专有的模式更为合适。

综合模型Offboard控制的消息主要参考pymavlink实现，pymavlink Offboard控制主要分为两类，一类是位置类，常用于编队飞行；一类是姿态类，常用于特技动作。

#

设置期望位置、速度、加速度消息、偏航角、偏航角速率，对于位置使用经纬高时会化为整数

```
set_position_target_local_ned_send(self, time_boot_ms, target_system,
target_component, coordinate_frame, type_mask, x, y, z, vx, vy, vz, afx, afy,
afz, yaw, yaw_rate, force_mavlink1=False)
```

设置期望姿态、角速率、油门

```
set_attitude_target_send(self, time_boot_ms, target_system, target_component,
type_mask, q, body_roll_rate, body_pitch_rate, body_yaw_rate, thrust,
force_mavlink1=False)
```

1.3.2 综合模型输入接口

1) inSILInts协议

inSILInts的第0个数字用于表征和修改状态，相应位为1时表明系统为相应的状态。例如，第1位表示仿真模式，当接收到的inSILInts[0]第1位为1时表明系统进入仿真模式。

只有当0:hasCMD为1时才去设置一次状态，否则综合模型将沿用原有状态。原有状态可以来自设置外部设置值，也可以是内部状态自动转换。例如，接收到起飞命令后，首先切换到起飞模式，起飞完成后自动切换到定点模式。以下为inSILInts[0]协议具体定义，该协议采用的按位选取，比如，如果需要输入解锁指令，则需要将inSILInts[0]置为2的2次方，4；同理可以解析其他标志位。

inSILInts[0] Vehicle Command Bitmap

0: hasCMD	1: SIL	2: Armed	3:	4:	5:	6:	7:
有新命令	仿真	解锁					
8: Takeoff	9: Position	10: Land	11: Return	12: Lotier	13: Height	14: Hor	15:
起飞	定点/waypoint	着陆	返航	盘旋 (固定翼)	定高模式	水平位置控制	
16: OffboardPos	17: OffboardAtt	18:	19:	20:	21:	22:	23:
Offboard 位置控制系列	Offboard 位置姿态系列						
24:	25:	26:	27:	28:	29:	30:	31:

注：当使能位置控制时，水平位置和竖直位置同时使能。

inSILInts[1]的第0-7位为位置类标志位，第8-15位为姿态类标志，解析规则同上。

注：当仅作为位置控制时对应的值为1，当仅作为速度控制时对应的值为2，当仅作为偏航角控制时对应的值为8，当仅作为角速率控制时对应的值为16。如果需多种控制结合，则将单独控制时的值相加。

2) inSILFloats协议

inSILFloats用于存放实际的数据，其具体含义可根据inSILInts的设定发生一些变化。如前3维表示位置，但具体是哪个坐标系下的则由inSILInts控制。

inSILFloats[0-2]=pos;

inSILFloats[3-5]=vel; //

速度|遥控器俯仰、滚转、偏航信号|inSILFloats[3]可以用作速率

inSILFloats[6-8]=acc;

inSILFloats[9-11]=att; // 姿态控制使用欧拉角，对于用户来说更加直观。

```
inSILFloats[12-14]=attRate;
```

```
inSILFloats[15]=thrust; // 油门
```

1.3.3 固定翼综合模型实现

1) 协议解析

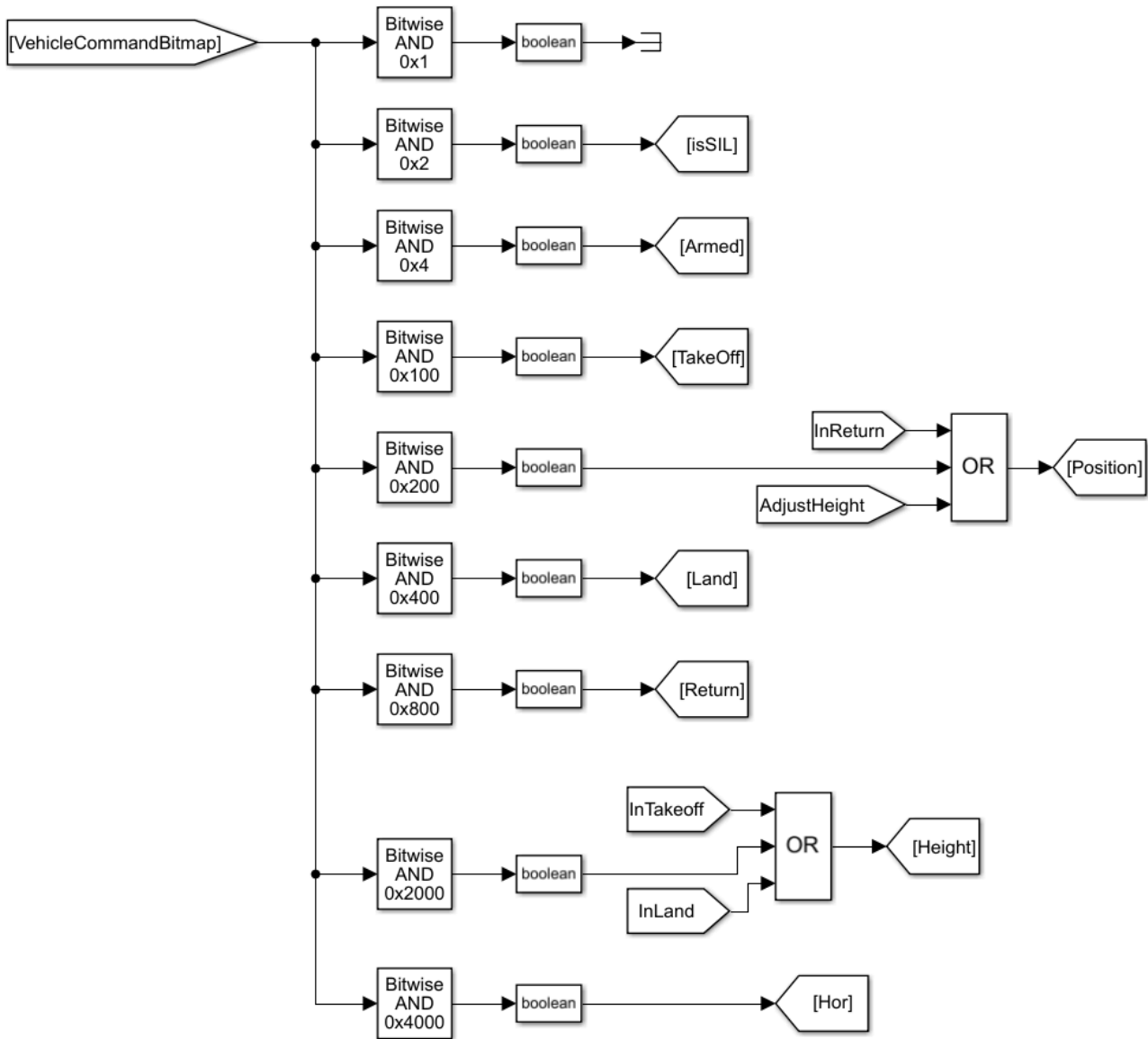
固定翼和旋翼相比遵循相互兼容的协议，但是固定翼的模式与旋翼有所不同，因为固定翼并不能像四旋翼那样悬停。如下图所示，是固定翼综合模型内的协议解析。增加了Position、Height、Hor，而且起飞、返航、降落的行为也与旋翼机有所不同。

起飞，控制高度和速度。当固定翼收到起飞命令时以固定的俯仰角，默认15°进行起飞。用户可以设置起飞高度，当到达起飞高度时，模型内部会进行判断，退出起飞模式。当起飞成功后，如果没有收到进一步的操作指令，将继续向前飞行，不会进行油门、俯仰、滚转的调整。

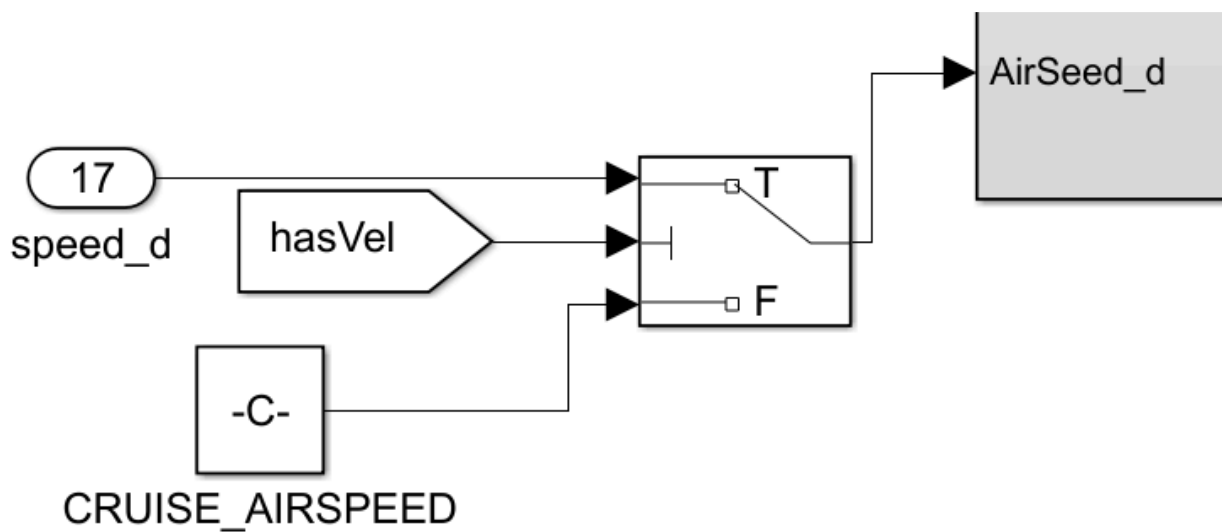
Position，同时控制水平位置和高度。用户可以通过inSILInts直接指定模式为位置控制，当返航或者降落时系统也可以自动触发位置模式。在位置模式下，如果设定了相应的位置，先飞到相应的位置。到达指定位置之后，如果没有指定下一个位置，将自动盘旋。在返航模式时，本质上就是水平位置回到出发点并且支持指定返航高度，所以这个功能可以使用Position模式进行实现。而在降落时，首先会调整飞机的高度，图中AdjustHeight就是描述的这一过程。调整飞机的高度是通过盘旋的方式完成的，在盘旋时水平位置也会发生变化，所以也采用位置模式进行控制。

Height模式是控制高度和空速，而不对水平位置进行控制，即飞机只会朝前飞。在起飞时采用Height模式，而在降落的末尾阶段（飞机高度已经达到相应高度）也将进入Height模式。

Hor模式是单独控制水平位置。这个模式当前的模型支持，但一般较少使用。



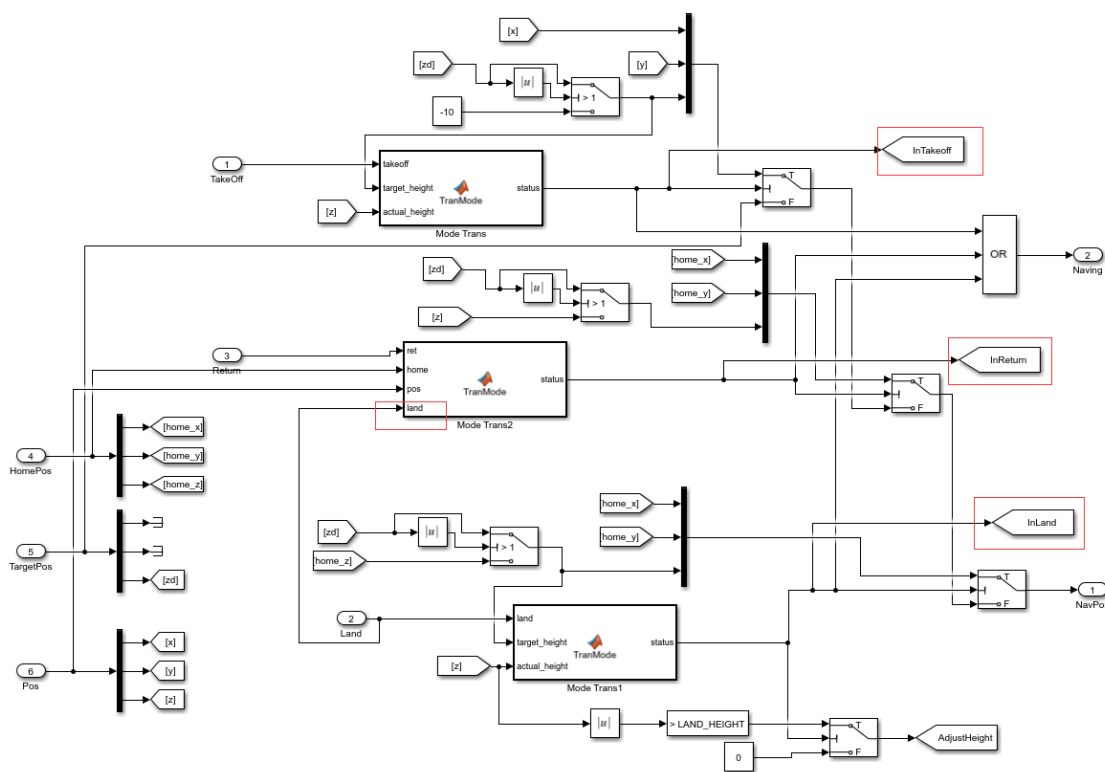
与旋翼机不同，固定翼并不能自由的控制各个方向的速度。但是支持设置水平方向的速度。在完整的协议中，期望的速度有3个分量，在固定翼中仅使用第一个分量作为水平方向的速度。



2) Navigator

固定翼Navigator的实现与旋翼机类似，但是新增了InTakeoff、InReturn、InLand、AdjustHeight等标志。因为固定翼在起飞、返航、降落的过程中有不同的操作，所以用这些标志来进行区分。在起飞时，屏蔽TECS控制器俯仰的输出，直接设置为一个固定角度 15° 。而在返航过程中，需要自动触发完整的位置控制。降落时，则分为两个阶段一个是高度调整阶段，用AdjustHeight标识，此阶段触发完整的位置控制；另一个是降落阶段，仅对高度进行控制，由于地面摩擦力没有建模，所以降落时的速度暂时也没有进行控制。

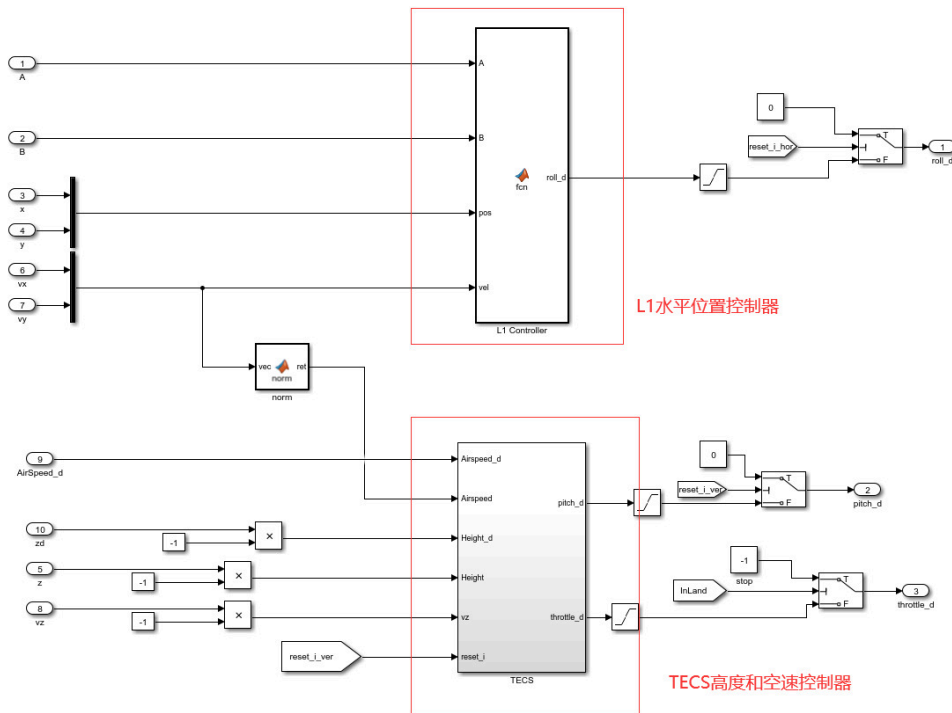
此外，返航模式执行后，只能执行降落模式。下面的模式切换中，只有收到降落指令才会从返航模式中退出。



3) 控制器

固定翼的位置控制器和旋翼机的位置控制器大相径庭，原因是固定翼一旦起飞就需要保持一定的速度。

如下图，使用L1控制器控制水平位置。这里不解释控制器的内部实现，只关注控制器的输入输出。L1控制器需要根据当前的期望水平位置、上一个期望水平位置、当前的水平位置、当前水平速度联合计算出期望的滚转角。由此可见，L1控制器输入很多，但是输出只有一个滚转角。L1控制器并不会在整个飞行过程中都生效，采用switch的这种方式简化了L1控制器的内部实现。



使用TECS控制器进行高度和速率控制。对于固定翼而言只控制器空速，不能任意控制各个方向的速度。TECS提供了一种解决方案，即根据能量而不是初始设定值来反映问题。一架飞行器的总能量是飞行器动能和势能之和。推力（通过油门控制）可以增加飞机的总能量。一个给定的总能量状态可以通过势能和动能的任意组合来实现。

换句话说，飞行器在高海拔以低空速飞行和在低海拔以高空速飞行时的总能量是等价的。我们称这种情况叫做比能量平衡，它是根据当前高度和真实空速设定值计算的。

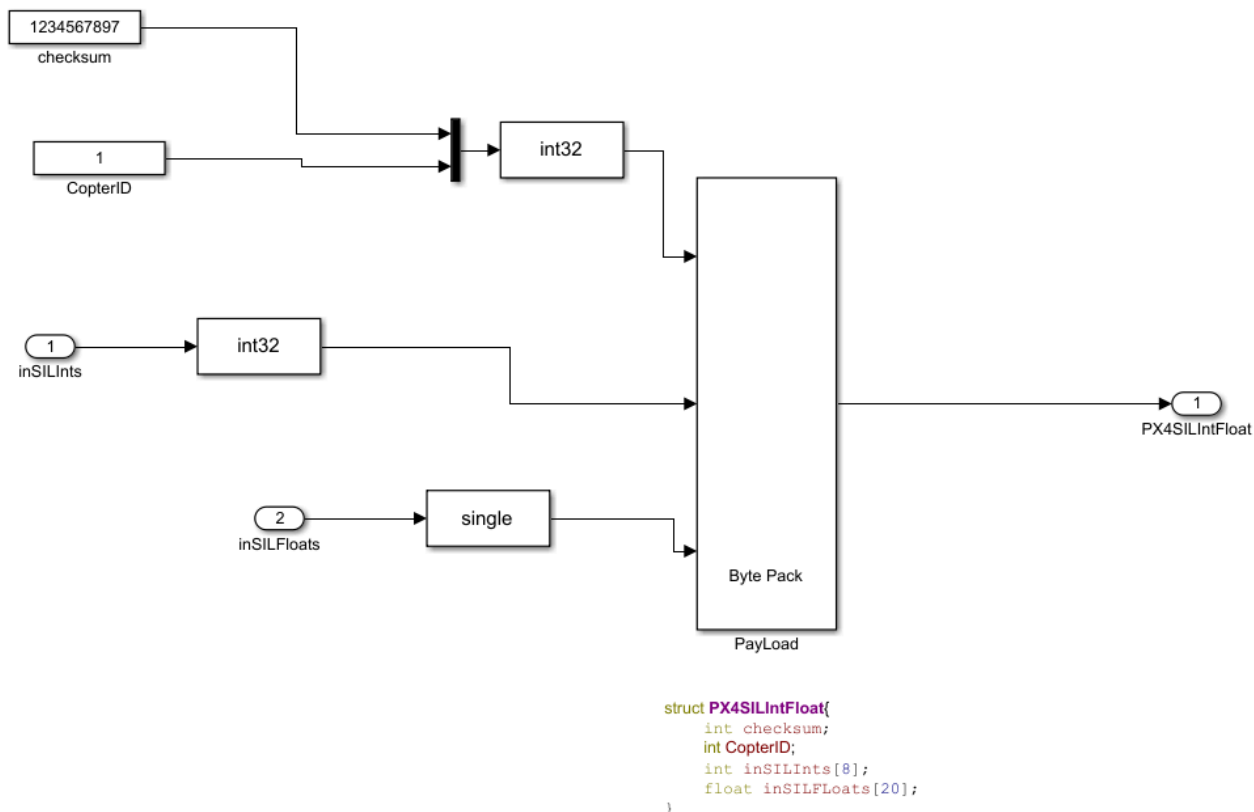
可以通过控制俯仰角来控制飞行器的比能量平衡。俯仰角增加将动能转变为势能，俯仰角减少则情况相反。这样，通过将初始空速和海拔设定值转化为能量大小（空速和海拔存在耦合，而能量大小可以独立控制），就可以把控制问题解耦。我们利用油门调节飞行器的特定总能量，利用俯仰角来维持势能（高度）和动能（真空速）的特定平衡点。

TECS控制器输入期望的速率和高度值，并输入当前的高度和速率值，最后输出期望的俯仰角和油门值。

4) 模型

如下图所示是固定翼的模型。该模型可以接收内部控制器的输入，也可以接收外部控制器的输入。这两种模式通过inSIL进行控制，当该标志为true时，表明是仿真模式，从内部控制器获得PWM波脉宽。当该标志为false时将从外部获得PWM波。

模型中包含的主要模块：电机模型、动力学模型、6DOF运动学模型、环境模型、传感器输出模型。对于内部控制，由于没有设计滤波器，所以直接使用真值。同时将真实仿真数据发送给RflySim3D，用于仿真显示与测试。



2. 实验效果

通过RflySim平台启动固定翼综合模型仿真后，可以通过外部控制向综合模型发送解锁、起飞、期望位置等指令，可在RflySim3D中观察综合模型运动情况。

3. 文件目录

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\3.CustExps\e5_CopterSimSILNoPX4\1.FixedWing](#)

文件夹/文件名称	说明
AircraftMathworksNoPX4.slx	固定翼综合模型
CopterSender.slx	外部控制文件
AircraftMathworksNoPX4.bat	固定翼综合模型启动脚本
AircraftMathworksNoPX4.dll	固定翼综合模型动态链接库，由AircraftMathworksNoPX4.slx自动代码生成后打包形成
GenerateModelDLLFile.p	用于将自动代码生成的C++文件封装成动态链接库
Init.m	固定翼模型参数
Init_control.m	控制器参数

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_fmuv6x_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

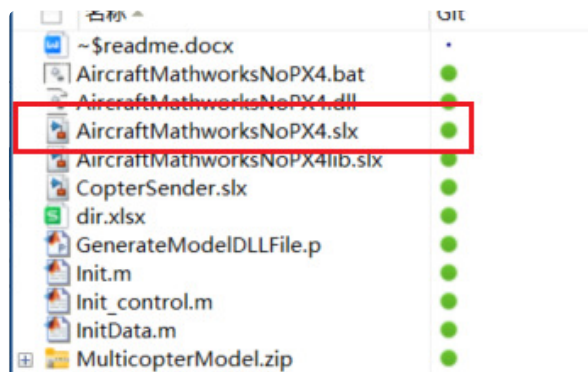
笔记本/台式电脑① 1台；\\台；\\台。

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

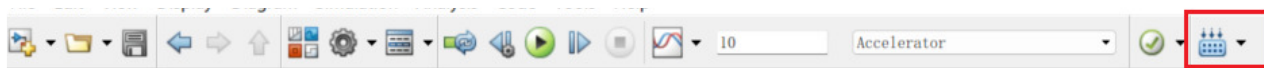
5. 实验步骤

Step 1: 编译模型

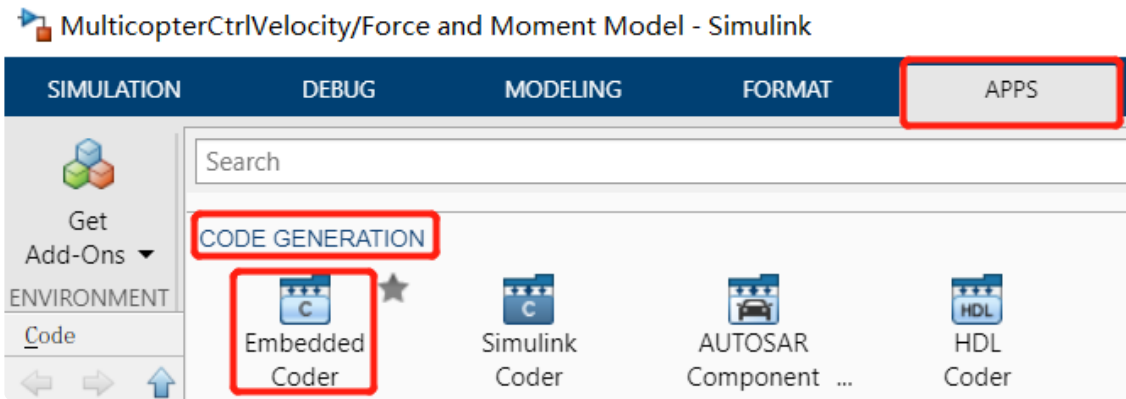
在MATLAB中打开AircraftMathworksNoPX4.slx文件，在Simulink中，点击编译命令。编译配置可参考[4.RflySimModel\0.ApiExps\2.UserDefinedC++\2.GenC++\Readme.pdf](#)



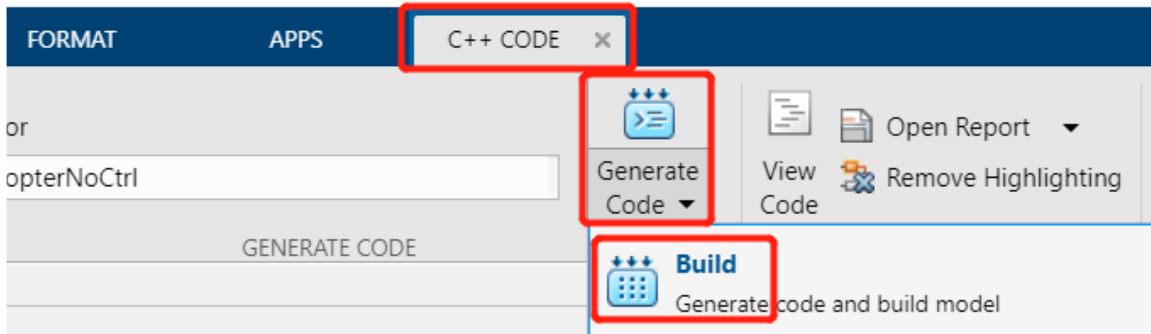
对于MATLAB 2019a及之前版本，工具栏样式见下图，直接点击它的编译按钮“Build”即可。



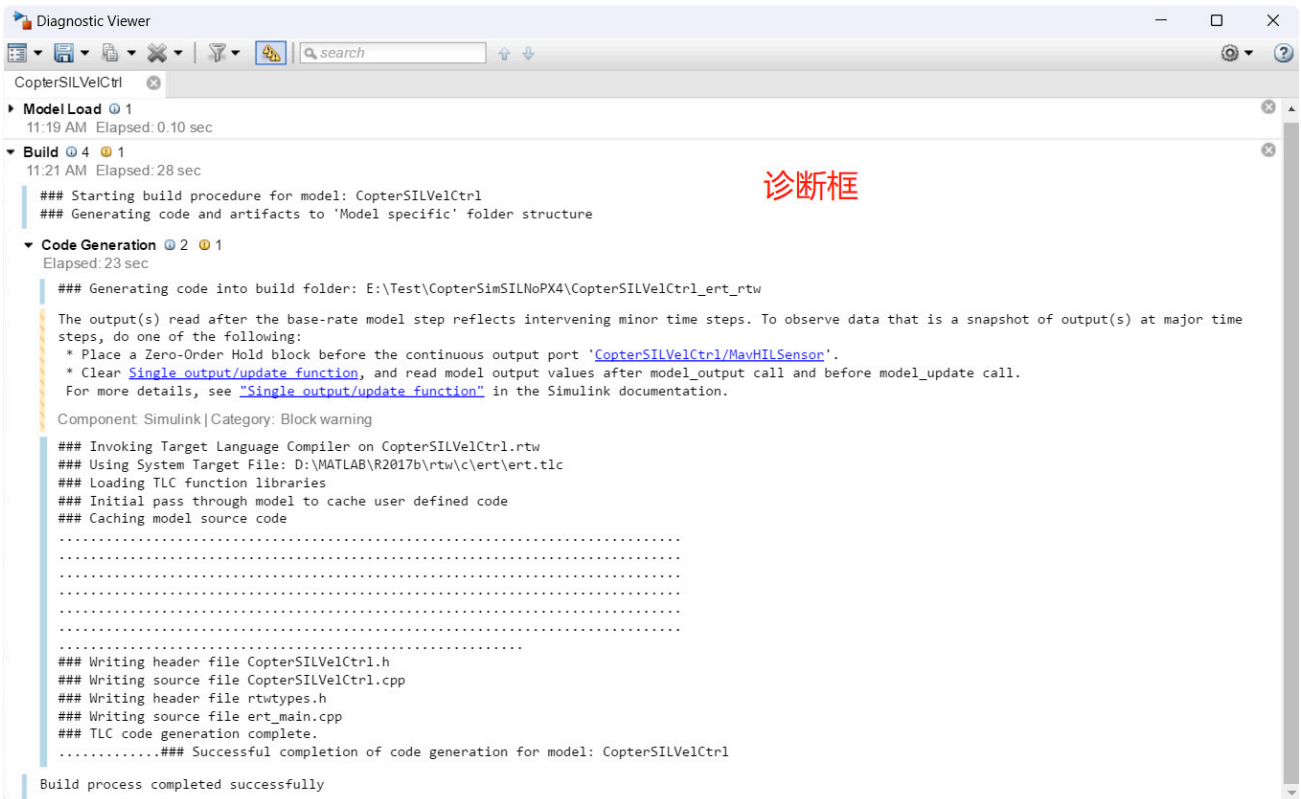
对于2019b及之后版本，点击APPS - CODE GENERATION - Embedded Coder才能弹出代码生成工具栏，在其中如下图所示点击“C++CODE” - “Generate Code” - “Build”按钮就能编译生成代码。



k



在Simulink的下方点击View diagnostics指令，即可弹出诊断对话框，可查看编译过程。在诊断框中弹出Build process completed successfully，即表示编译成功。



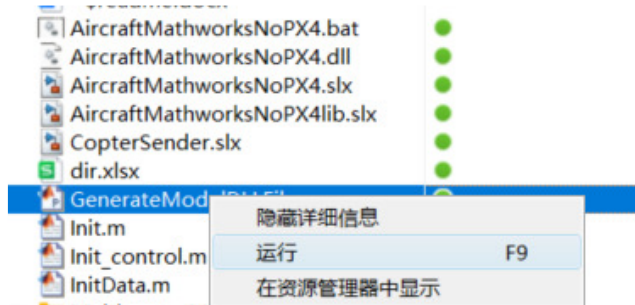
Step 2: 生成DLL模型

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。

命令行窗口

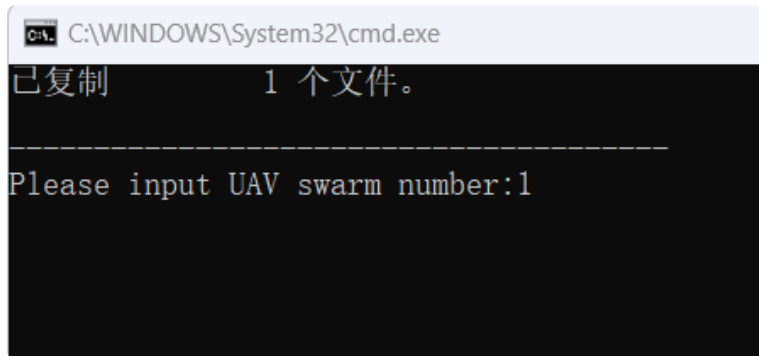
>> GenerateMode1DLLFile

或



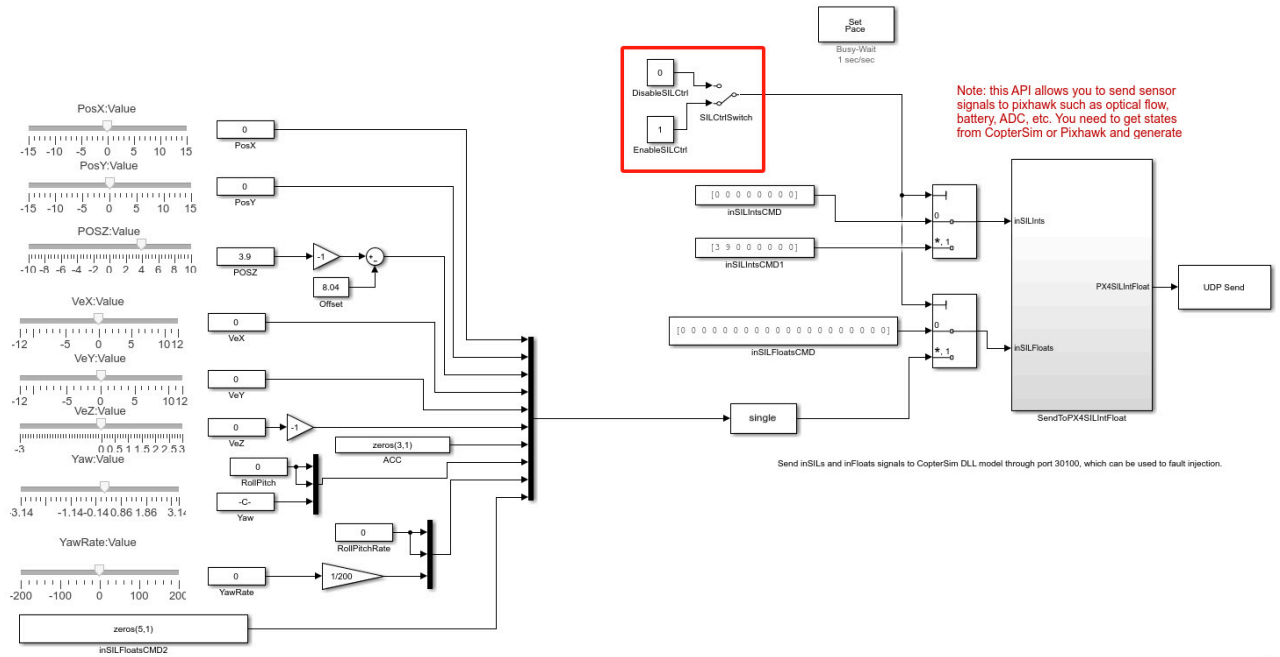
Step 3: 启动仿真

右键点击 [AircraftMathworksNoPX4.bat](#) 并以管理员身份运行，输入1，启动1架固定翼综合模型的 Simulink&dll综合仿真



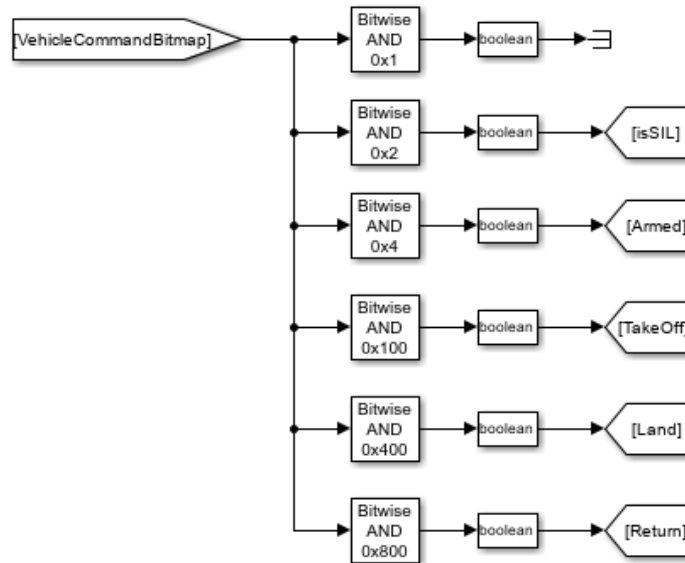
Step 4: 运行控制模型

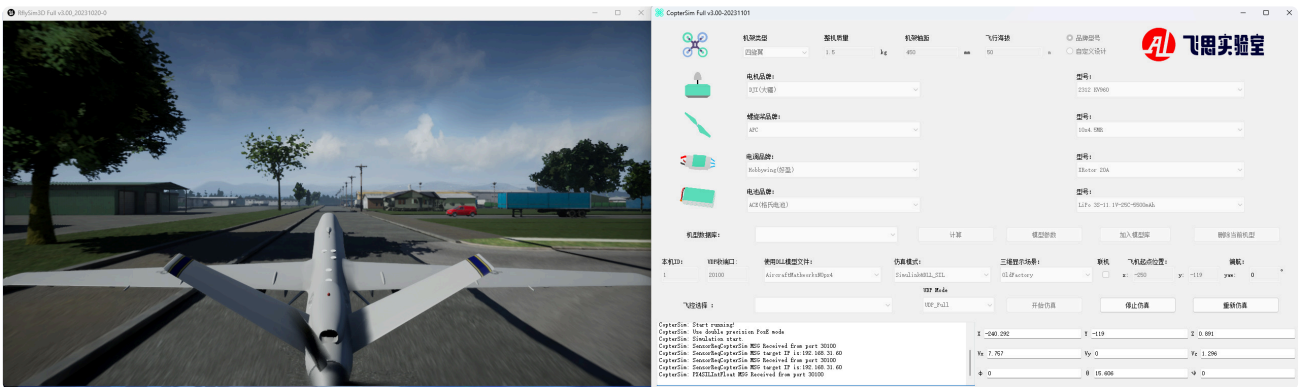
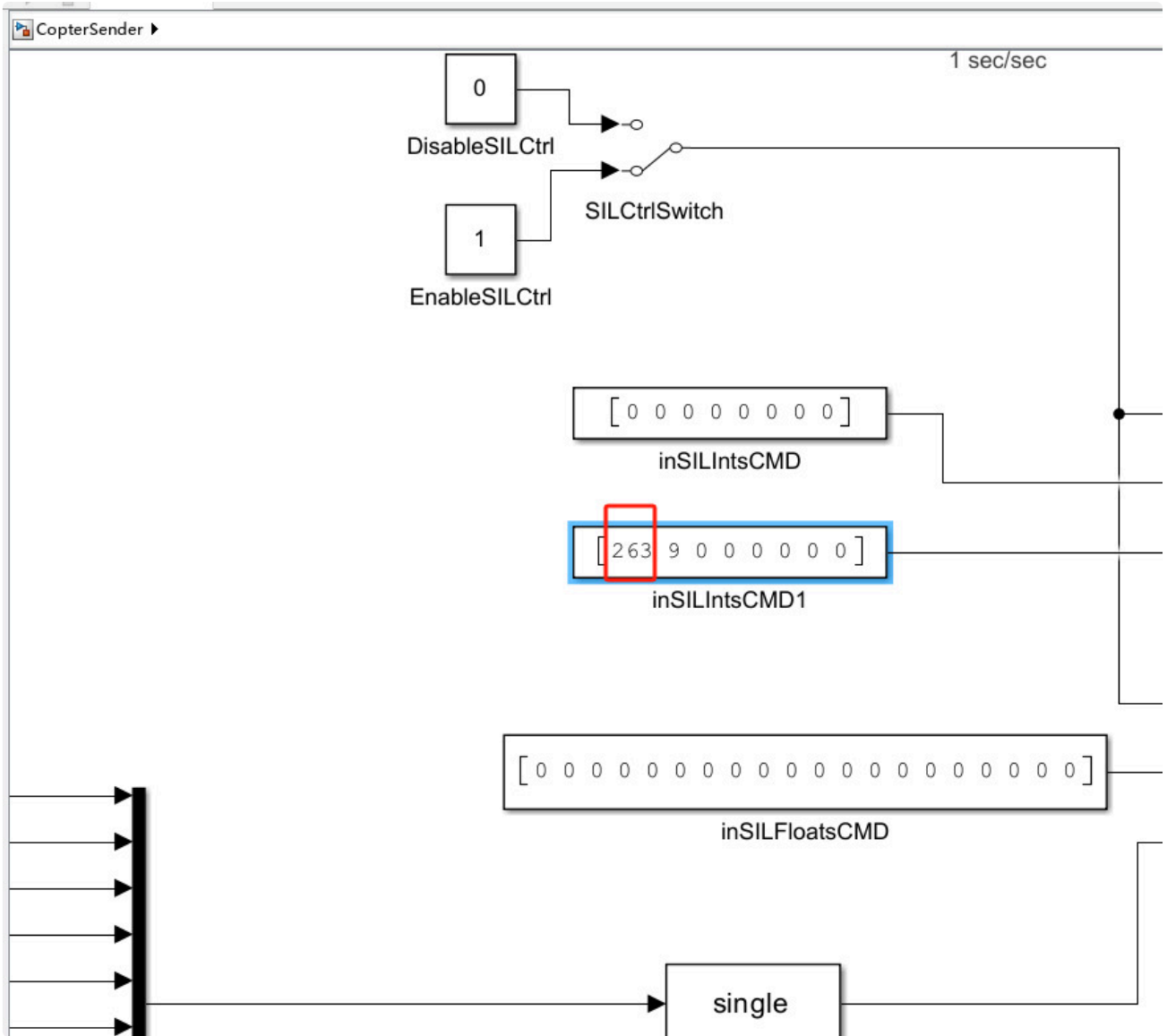
右键打开CopterSender.slx，运行该文件，点击红色框框住的SILCtrlSwitch将使能标志切换到 EnableSILCtrl。



Step 5: 解锁并起飞

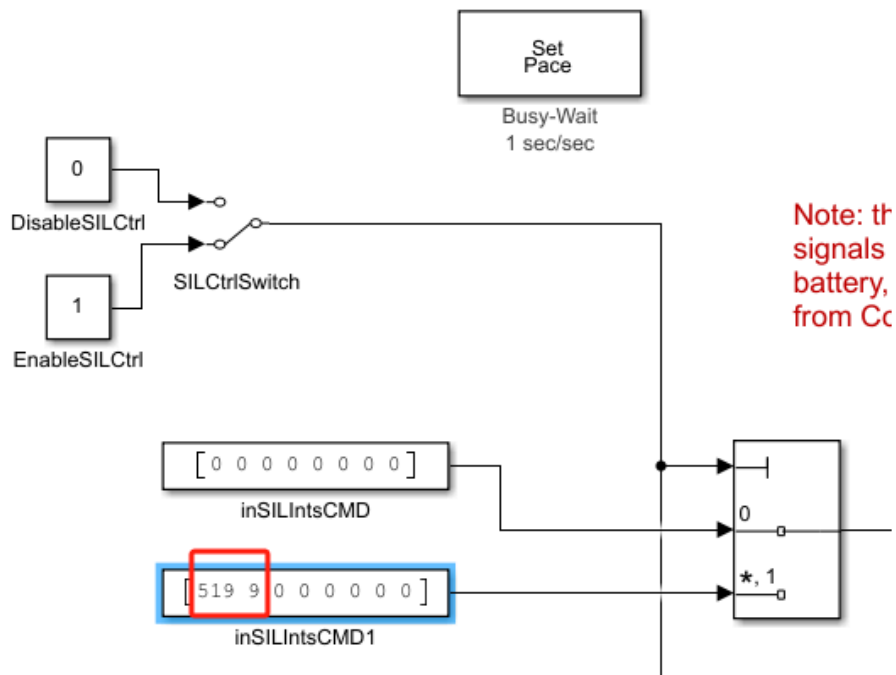
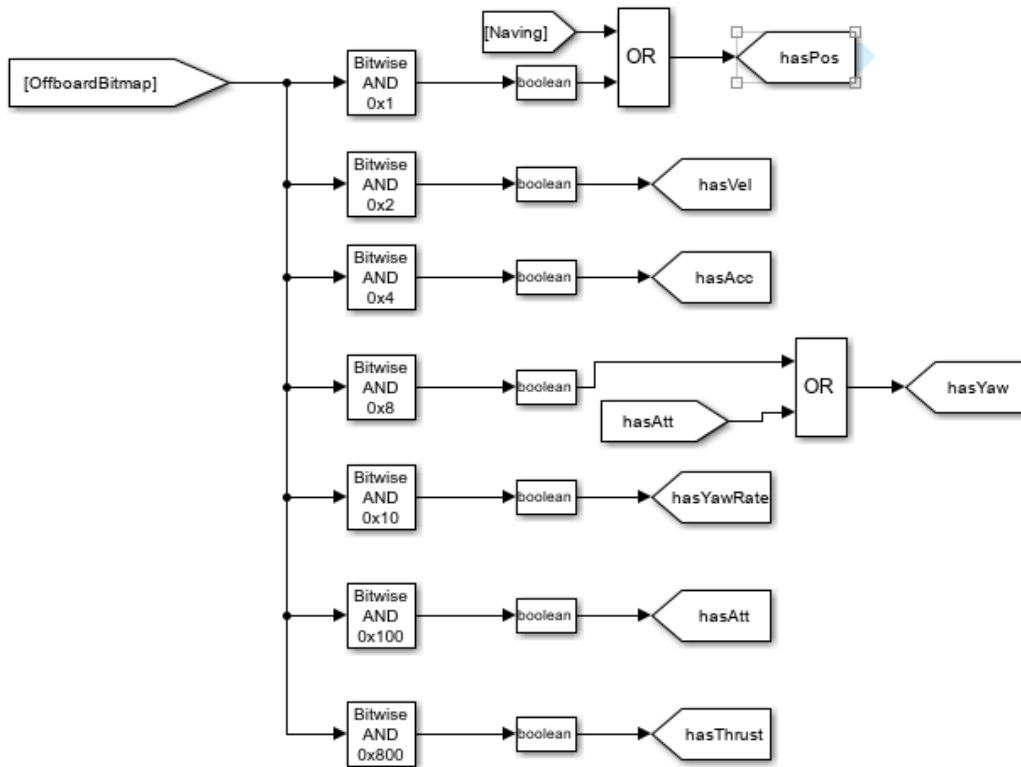
根据模型Bitmap，在inSILInts[0]为263时固定翼解锁并起飞，接收控制指令。



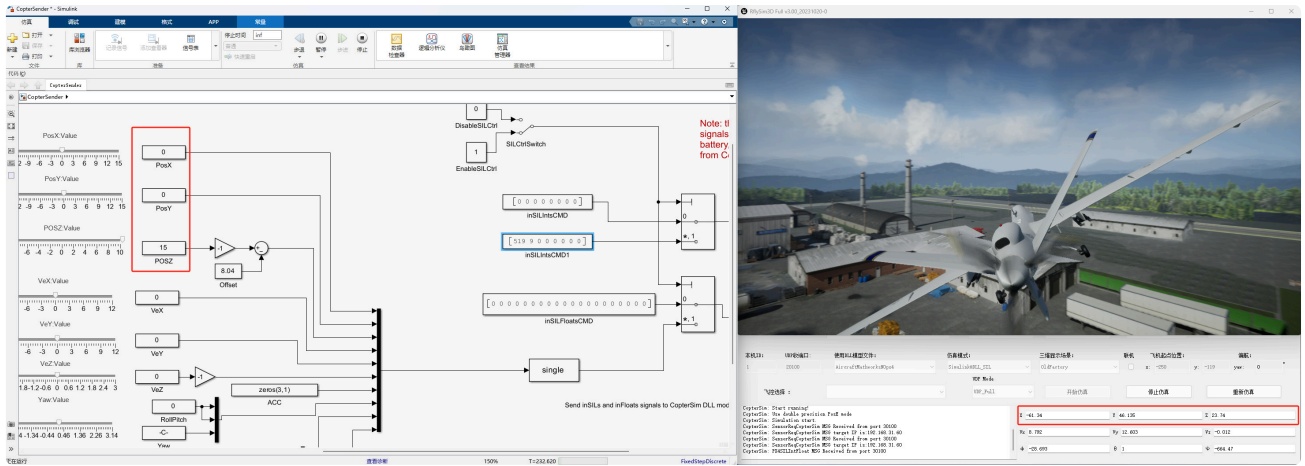


Step 6: 位置与偏航角速率控制

起飞完成后固定翼将自动进入定点模式；或者，可以手动将`inSILInts[0]`修改为519切换为定点模式，`inSILInts[1]`表示的是使能固定翼综合模型Offboard控制，也就是typemask，当`inSILInts[1]`为9时，即代表位置控制和偏航角速率控制使能为1，表明可以通过外部控制来控制固定翼综合模型的位置和偏航角速率。

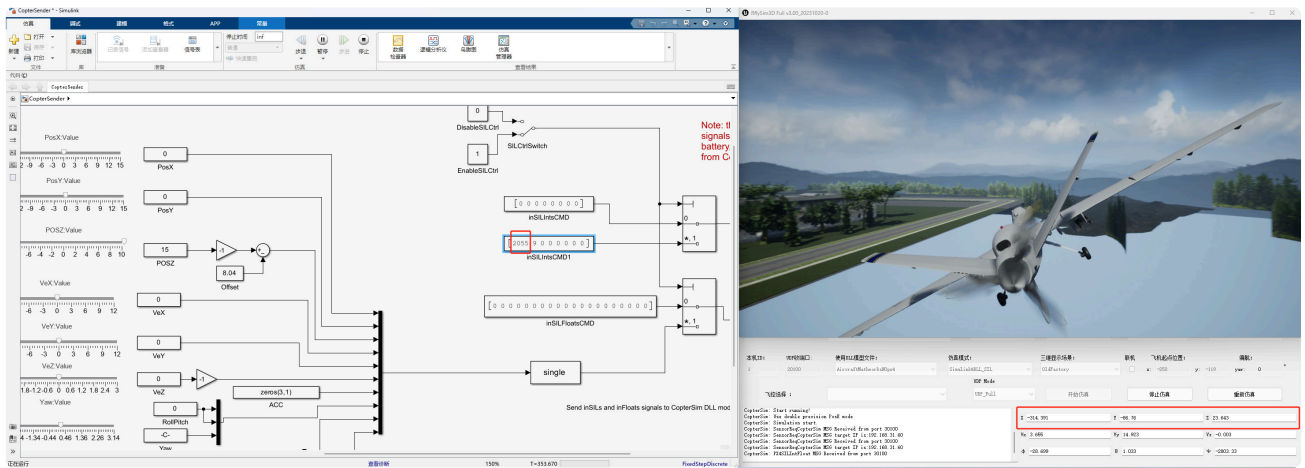


因此，我们可以通过CopterSender.slx右侧的滑块控制固定翼的位置与偏航角速率，当发送期望位置和期望偏航角速率时，飞机会以期望的偏航角速率绕该位置进行盘旋。



Step 7: 返回起始位置

当inSILInts[0]为2055时固定翼会返回起始位置，到达后盘旋在起始位置上空。



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

