
1. 实验名称及目的

1.1. 实验名称

执行器控制模块 HIL16CtrlsPWM,HIL16CtrlsNorm,Torque ThrustCtrls 验证实验

1.2. 实验目的

实验通过发送 actuator_outputs_rfly 消息，驱动 CopterSim 的 inPWMs 输入，从而控制无人机的运动。这样可以验证 Simulink 设计的控制器在实际飞行中的控制效果。

1.3. 关键知识点

预备知识

通过发送 actuator_outputs_rfly 消息，驱动 CopterSim 的 inPWMs 输入，从而控制无人机的运动。这样可以验证 Simulink 设计的控制器在实际飞行中的控制效果。

更多信息可以参考 [API.pdf](#)。

实验原理

实验一：Exp1_HIL16CtrlsPWM.slx

1、本质上是发送 actuator_outputs_rfly 消息（替换 PX4 的 actuator_outputs），并经过 HIL_ACTUATOR_CONTROLS 消息，驱动给 CopterSim 的 inPWMs 输入，控制无人机的运动。

2、isEnCtrl 的 PX4 与 Simulink 控制权切换的问题，是通过 RePX4Block 发送指令，让 PX4 决定订阅 actuator_outputs_rfly 消息（Simulink 控制器）或 actuator_outputs 消息（PX4 官方控制器）实现的，需勾选“Auto Block PX4”才会生效。

3、本实验在接收到遥控器数据后，经过一个 mixer 混控器，得到四个电机的 PWM 值，本质上是角速度环的控制。由于多旋翼是自身不稳定的，如果稍微波动摇杆，飞机就会翻转失控。

4、俯仰 pitch 摇杆前推时，飞机后两个电机转速大于前两个电机，会产生一个俯仰力矩，时飞机向前倾转。

5、当 pitch 归零时，四个电机转速回归相同，飞机回保持当前姿态继续飞行（姿态不会自动回零）。

6、CH5 通道用于控制是否启用 Simulink 控制权。在页面中勾选了 Auto Arm, Auto block PX4, Auto loiter, 会实现：isEnCtrl 变为 1 时，自动切换 Simulink 控制权，并解锁飞控；当 isEnCtrl 变为 0 时，会切回 PX4 控制器，并切换 Loiter 悬停模式，在空中悬停等待。

实验二：Exp2_HIL16CtrlsNorm.slx

实验原理和 Exp1_HIL16CtrlsPWM 模块几乎相同，只不过 HIL16CtrlsPWM 模块接收的是 PWM 控制信号，从 1000 到 2000，而 HIL16CtrlsNorm 模块接收的是-1 到 1 的执行器控制信号。他们都是通过 actuator_outputs_rfly 消息，将控制量发给 CopterSim 的 DLL 模型的 inPWMs 输入口。

注意：

1、1000 到 2000 的映射与归一化规则，在不同飞机有不同的形式，例如，多旋翼 1000 到 2000 的 PWM 值映射电机控制量是 0 到 1；而固定翼 1000 到 2000 的 PWM 值，映射的是 -1 到 1 的控制量。包括复合无人机等，其映射规则各由不同，由 PX4 内部的 Mixer 自行决定。

2、使用 HIL16CtrlsPWM 模块，最终传输给 CopterSim 的 DLL 模型的 inPWMs 数据的值范围([0,1]或[-1,1])，是没法准确确定的，需要结合 PX4 混控文件再确定。

3、使用 HIL16CtrlsNorm 模块就不会有上述问题，它的 Ctrls 的 16 维输出，会直接赋值到 DLL 模型的 inPWMs 数据接口。因此，本接口适用于固定翼、复合翼等所有模型的开发。

4、HIL16CtrlsPWM 和 HIL16CtrlsNorm 都只能用于硬件在环仿真，不能用于真机电机控制。真机控制需要切换回 PWM_output 或 Aux_output，或者使用后文的 TorqueThrustCtrls 控制接口（适用于所有载具、电调类型，兼容性更广）。

实验三：Exp3_TorqueThrustCtrls4D.slx

1、本质上是发送力和力矩（归一化后的）控制量 actuator_controls_0 消息（或到 1.14 版本中的 vehicle_torque/thrust_setpoint），并经过 PX4 自带的 Mixer 混控器计算电机转速后，驱动给 CopterSim 的 inPWMs 输入，控制无人机的运动。

2、本接口要求屏蔽 PX4 的力和力矩控制消息，同时开放 PX4 的真机和仿真控制接口，并从 Simulink 发送替代的力和力矩消息才能实现。这个功能，在 TorqueThrustCtrls 勾选“Auto Block PX4”时，会自动配置。

3、isEnCtrl 的 PX4 与 Simulink 控制权切换的问题，是通过 RePX4Block 发送指令，让 PX4 决定订阅 actuator_controls_rfly 消息（Simulink 控制器）或 actuator_controls_0 消息（PX4 官方控制器）实现的，需勾选“Auto Block PX4”才会生效。

4、本实验在接收到遥控器的归一化控制量后，直接作为力和力矩归一化控制量发给了飞控，本质上是角速度环的控制。由于多旋翼是自身不稳定的，如果稍微动摇杆，飞机就会翻转失控。因此，达到的效果和“Exp4_HIL16CtrlsPWM”实验是完全相同的。

5、当勾选 1D thrust 推力输入时，Ctrls 要设置 4 维输入，前 3 维是归一化力矩，按照 FRD 坐标系配置，第 4 位为 T 油门，范围 0 到 1，表示空油门，到满油门。

实验四：Exp3_TorqueThrustCtrls6D.slx

1、本质上是发送力和力矩（归一化后的）控制量 actuator_controls_0 消息（或到 1.14 版本中的 vehicle_torque/thrust_setpoint），并经过 PX4 自带的 Mixer 混控器计算电机转速后，驱动给 CopterSim 的 inPWMs 输入，控制无人机的运动。

2、本接口要求屏蔽 PX4 的力和力矩控制消息，同时开放 PX4 的真机和仿真控制接口，并从 Simulink 发送替代的力和力矩消息才能实现。这个功能，在 TorqueThrustCtrls 勾选“Auto Block PX4”时，会自动配置。

3、本实验在接收到遥控器的归一化控制量后，直接作为力和力矩归一化控制量发给了

飞控，本质上是角速度环的控制。由于多旋翼是自身不稳定的，如果稍微波动摇杆，飞机就会翻转失控。因此，达到的效果和“Exp1_HIL16CtrlsPWM”实验是完全相同的。

4、当勾选 1D thrust 推力输入时，Ctrls 要设置 4 维输入，前 3 维是归一化力矩，按照 F RD 坐标系配置，第 4-6 位为归一化的推力向量，范围-0 到 1。Z 方向的推力向下为正，因此需要和 4D 模式进行油门反向。

5、相对于 Exp3_TorqueThrustCtrls4D 实验，本实验勾选了 3D 的 Thrust 向量输入功能，接收归一化后的力和力矩输入。本模块配合 1.14 版本固件，可以更方便地实现各类载具，包括非正常角度安装螺旋桨机型的控制。

实验五：Exp5_PwmAndAuxOutput.slx

本实验验证 PWM 以及 AUX 是否能够正常输出，通过遥控器摇杆的 CH5 来进行解锁，通过改变无人机的输出模式来判断输出是否正常。

2. 实验效果

本实验展示了用 HIL16CtrlsPWM 模块、HIL16CtrlsNorm 模块、TorqueThrustCtrls4D 模块、TorqueThrustCtrls6D 模块，直接输出硬件在环仿真控制消息的方法。

3. 文件目录

文件夹/文件名称	说明
Exp1_HIL16CtrlsPWM.slx	PWM 控制模拟文件
Exp2_HIL16CtrlsNorm.slx	归一化控制实验模型文件
Exp3_TorqueThrustCtrls4D.slx	四维扭矩推力控制实验模型文件
Exp4_TorqueThrustCtrls6D.slx	六维扭矩推力控制实验模型文件
Exp5_PwmAndAuxOutput.slx	控制 PWM 及 AUX 输出实验文件

4. 运行环境

序号	软件要求	硬件要求	
		名称	数量
1	Windows 10 及以上版本	笔记本/台式电脑 ^①	1
2	RflySim 工具链	Pixhawk 6X 或 Pixhawk 6X mini ^②	
3	MATLAB 2022b 及以上	遥控器 ^③	1
4		遥控器接收器	1
5		数据线、杜邦线等	若干

①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com>

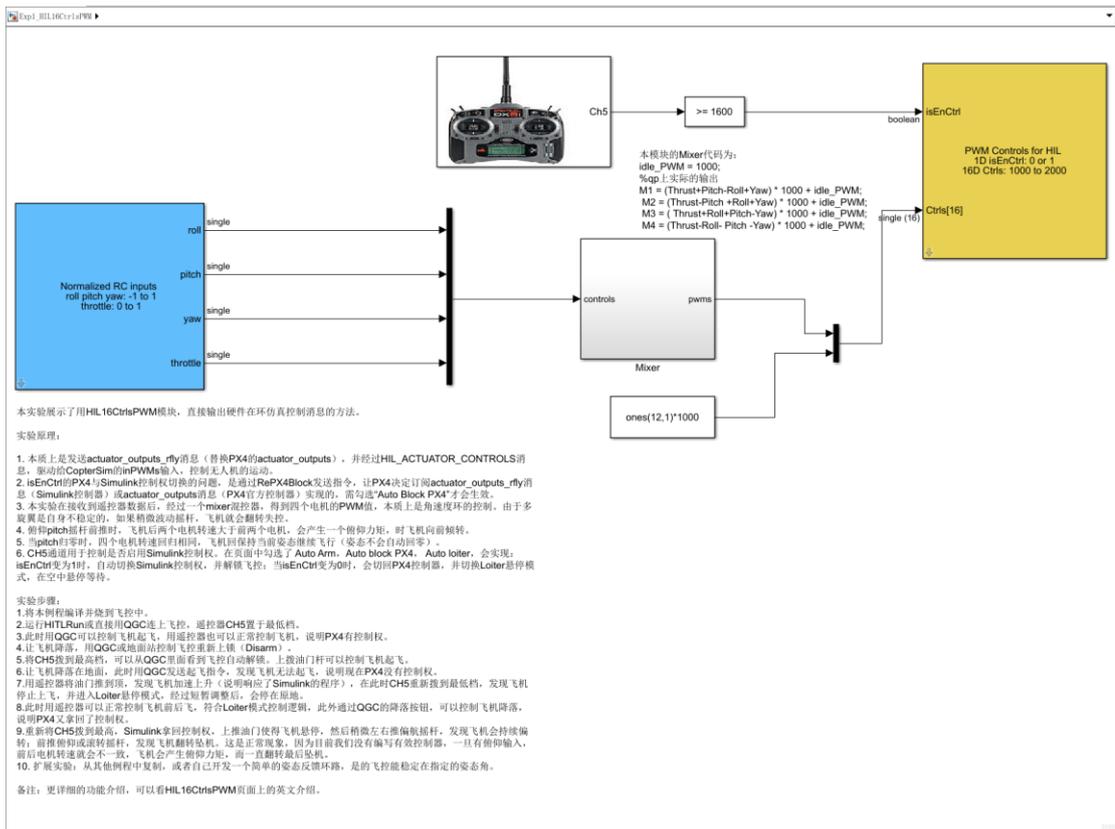
②：须保证平台安装时的编译命令为：px4_fmuv6x_default，固件版本为：1.12.3。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com>

③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 ET10、配套接收器为：WFLY RF209S。遥控器相关配置见：<https://rflysim.com/doc/zh/B/3.1ET10.html>

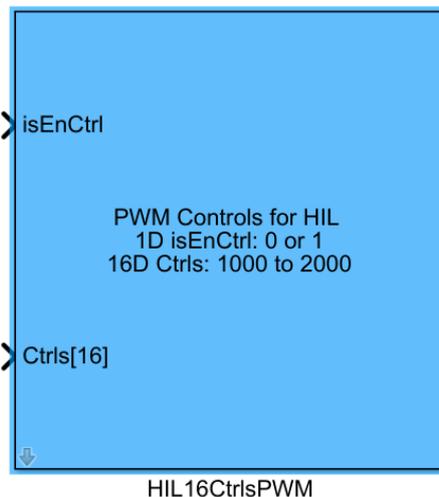
5. 实验步骤

5.1. Exp1_HIL16CtrlsPWM.slx—PWM 控制模拟文件

如下图所示，打开[安装目录]\5.RflySimFlyCtrl\0.ApiExps\16.CtrlsSingalsAPI 中的 Exp1_HIL16CtrlsPWM.slx 文件。该系统模型主要由 HIL16CtrlsPWM、InputRcNorm 和 input_rc 模块构成。

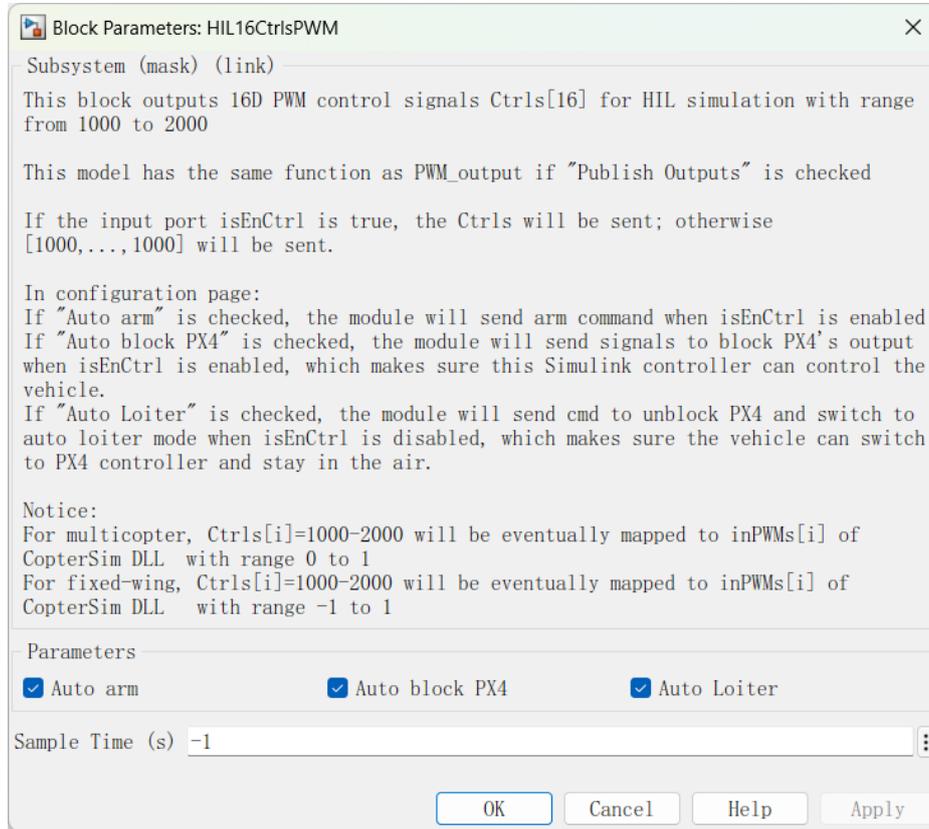


5.1.1. HIL16CtrlsPWM—硬件在环 16 维 PWM 控制信号模块



isEnCtrl: 此端口输入为 true 时，则发送 Ctrls[16]端口数据；否则将发送[1000, ..., 1000]。

CtrlS[16]: 为该模块输入 16 维 PWM 控制信号, 用于 HIL 仿真, 范围为 1000 到 2000。该模块功能等同于将 [PWM_output—电机 PWM 模块](#) 中的 “PWM_output” 勾选。对于多旋翼模型, CtrlS[i]=1000~2000 将对应匹配到 CopterSim 中 DLL 文件的 0~1; 对于固定翼模型, CtrlS[i]=1000~2000 将对应匹配到 CopterSim 中 DLL 文件的-1~1。

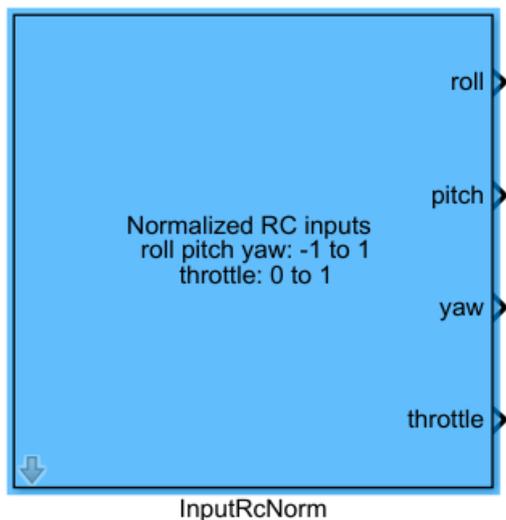


双击打开本模型的配置页面后, 其具体定义如下:

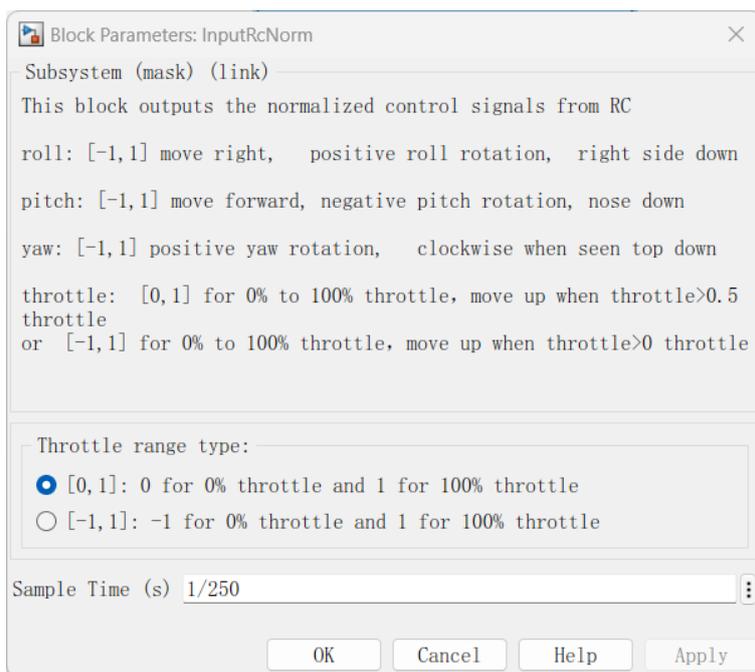
- 若勾选 **Auto arm**, 当 isEnCtrl 端口输入为 true 时, 模块将发送解锁指令。
- 若勾选 **Auto block PX4**, 则模块将发送信号屏蔽 PX4 的输出。当 isEnCtrl 接口输入为 true 时, 将使用 Simulink 控制器控制载具。
- 若勾选 **Auto Loiter**, 模块将发送命令解除对 PX4 输出的屏蔽, 并切换到自动 Loiter 模式, 当 isEnCtrl 接口输入为 false 时切换到 Loiter 模式, 从而确保载具可以切换到 PX4 控制器并保持在空中。
- **Sample Time(s)**: 采样时间。

5.1.2. InputRcNorm—遥控器信号归一化模块

将遥控器的数据通过归一化处理映射到的-1~1 范围数据中。



- CH1: 为输出滚转通道, 范围为: -1~1, 1 表示向最右方飞行;
 - CH2: 为输出俯仰通道, 范围为: -1~1, 1 表示向最下方飞行;
 - CH3: 为输出油门通道, 范围为: 0~1 或-1~1, 1 表示向最上方飞行;
 - CH4: 为输出偏航通道, 范围为: -1~1, 1 表示向右方转动;
- 双击打开本模型的配置页面后, 其具体定义如下:



- 若勾选[0,1]: 则 CH3 端口输出数据范围为 0~1。
- 若勾选[-1,1]: 则 CH3 端口输出数据范围为-1~1。
- Sample Time(s): 采样时间。

5.1.3. input_rc—遥控器输入模块

该模块允许用户访问来自 RC 发射机的信号, 通过这个模块可以选择输出的信号, 包括多个遥控器通道的值, 以及其他的一些信息。如下图所示, 这些包括:

1. Channel Selection—通道选择

- a) uint16 数据类型，表示来自控制器的 PWM(在使用中)值。
- b) 测量每个支持通道的脉冲宽度。

2. Channel Count—通道数

- a) Uint32 位数据类型，被 PX4 检测器检测的通道数。

3. RC Failsafe—遥控器信号失效保护

- a) 布尔数据类型，指示 RC Tx 正在发送 FailSafe 信号（如果设置正确）
- b) 显示 failsafe 标志：在 Tx 失败或者 Tx 超出范围时为 true, 否则为 false。
- c) 只有真实状态是可靠的，因为市场上有一些（PPM）接收器在没有明确告诉我们的情况下进入故障安全。

4. RC Input Source—遥控器信号输入源

- a) 枚举数据类型，指示 RC 输入来自哪个源。
- b) 在 ENUM 文件中找到有效值：

RC_INPUT_SOURCE_ENUM.m

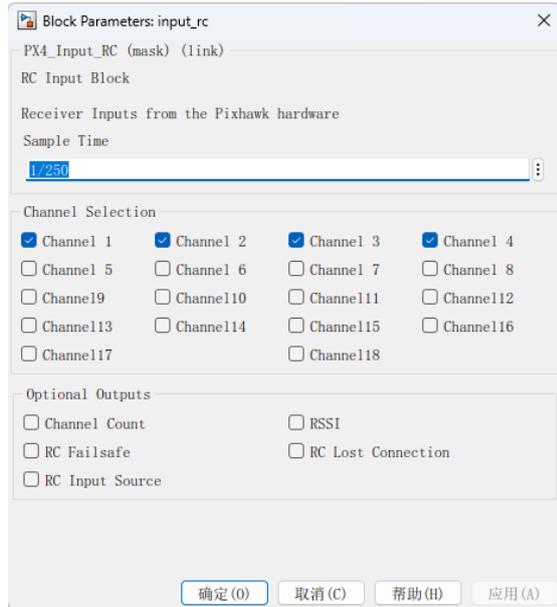
```
RCINPUT_SOURCE_UNKNOWN      (0)
RCINPUT_SOURCE_PX4FMU_PPM   (1)
RCINPUT_SOURCE_PX4IO_PPM    (2)
RCINPUT_SOURCE_PX4IO_SPEKTRUM (3)
RCINPUT_SOURCE_PX4IO_SBUS   (4)
```

5. RSSI—接收信号强度指标

- a) 接收信号强度指标（RSSI）：<0：未定义；0：无信号；255：全接收。

6. RC Lost Connection—遥控器信号丢失连接

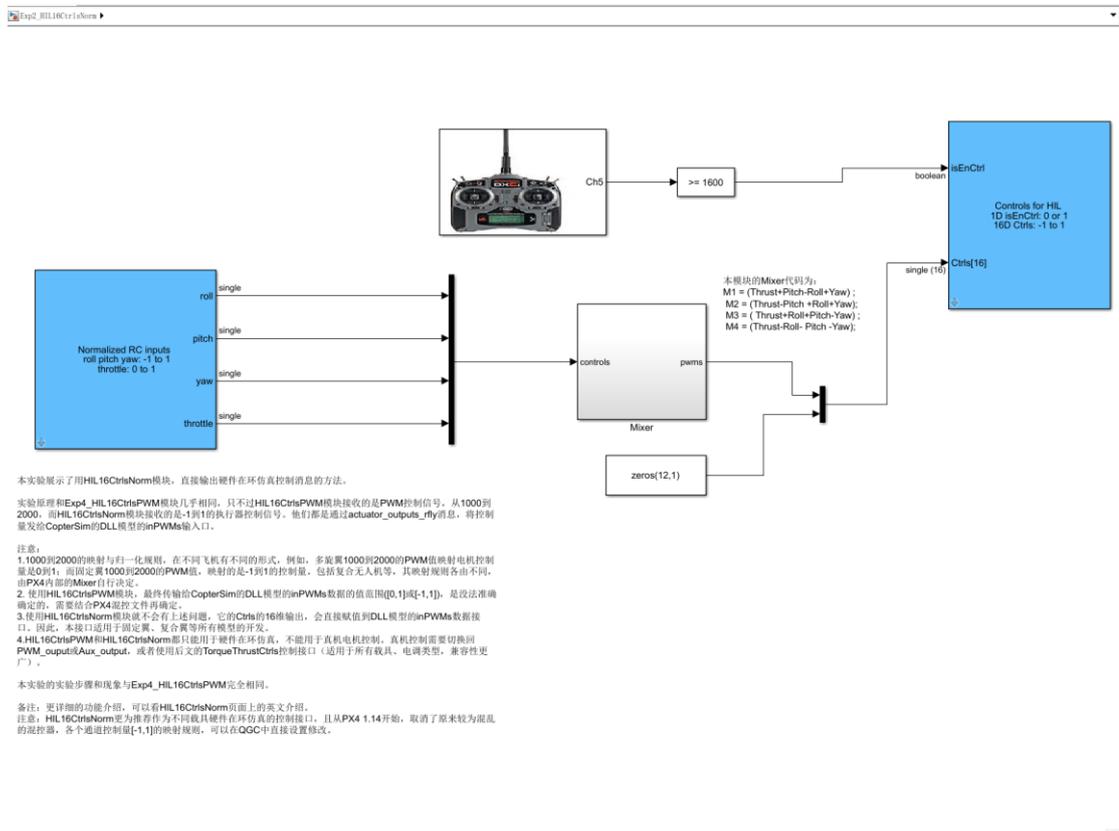
- a) 指示 RC 接收器连接状态的布尔数据类型。
- b) 如果没有帧在预期时间内到达，则为 True, 否则为 false。
- c) True 通常意味着接收器已断开连接，但也可以表示在“愚蠢的”系统上无线电链路丢失。
- d) 如果带有 failsafe 选项的 RX 在链路丢失后继续传输帧，则保持 false。



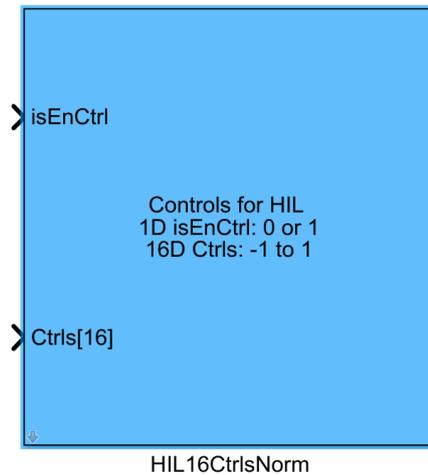
5.2. Exp2_HIL16CtrlsNorm.slx 一归一化控制实验模型文件

如下图所示，打开[安装目录]\5.RflySimFlyCtrl\0.ApiExps\16.CtrlsSingalsAPI 中的 Exp2_HIL16CtrlsNorm.slx 文件。该系统模型主要由 HIL16CtrlsNorm、InputRcNorm 和 input_rc 模块构成。

InputRcNorm 和 input_rc 模块的详细介绍请参考：[InputRcNorm](#) 和 [input_rc](#)



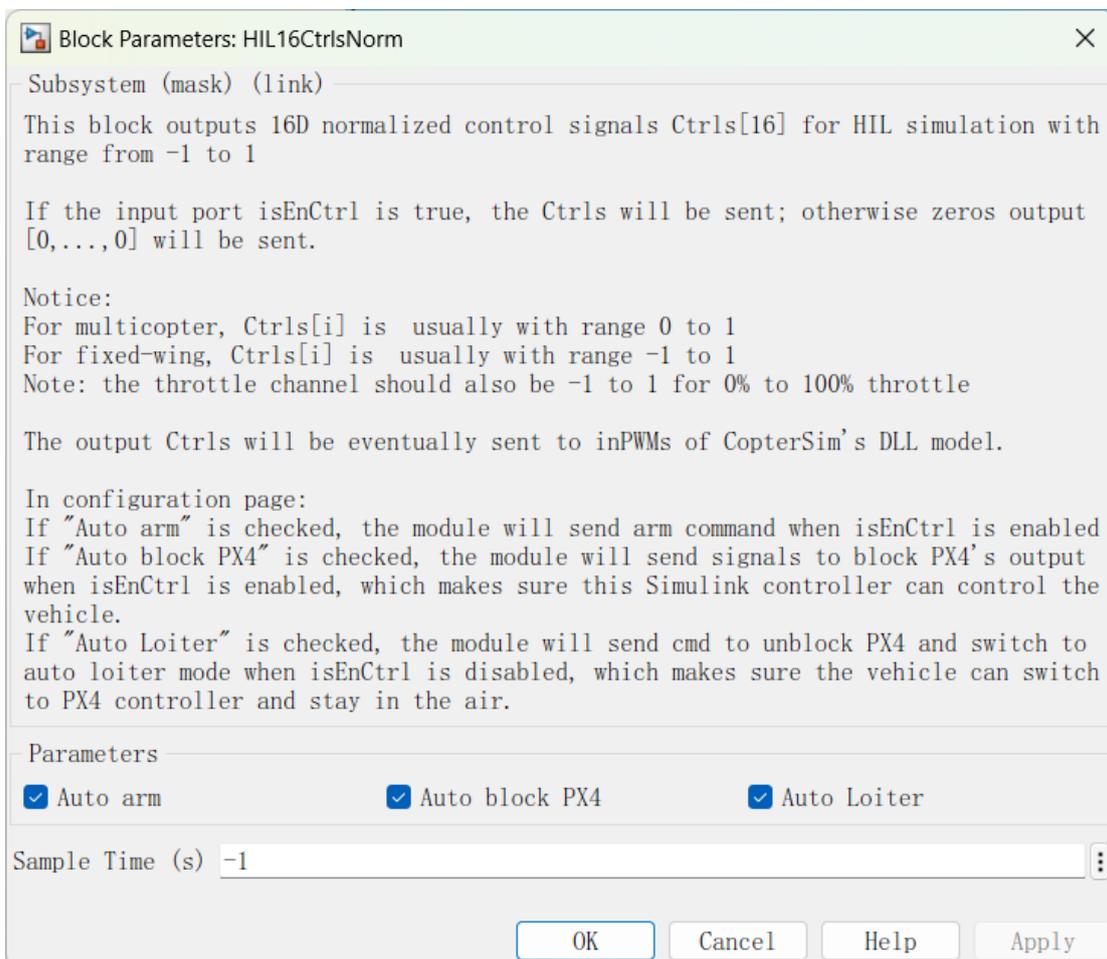
5.2.1. HIL16CtrlsNorm—硬件在环 16 维归一化控制信号模块



isEnCtrl: 当 isEnCtrl 端口输入为 true 时，则发送 Ctrls[16] 端口数据；否则将发送 [0, ..., 0]。

Ctrls[16]: 为该模块输入 16 维归一化控制信号，用于 HIL 仿真，范围为 -1 到 1。对于多旋翼模型，Ctrls[i] 通常在 0 到 1 的范围内；对于固定翼模型，Ctrls[i] 通常是 -1 到 1 的范围。其中 0% 至 100% 的油门，油门通道也应为 -1 至 1。

输出的 Ctrls[16] 最终将被发送到 CopterSim 的 DLL 模型的 inPWM 接口中。



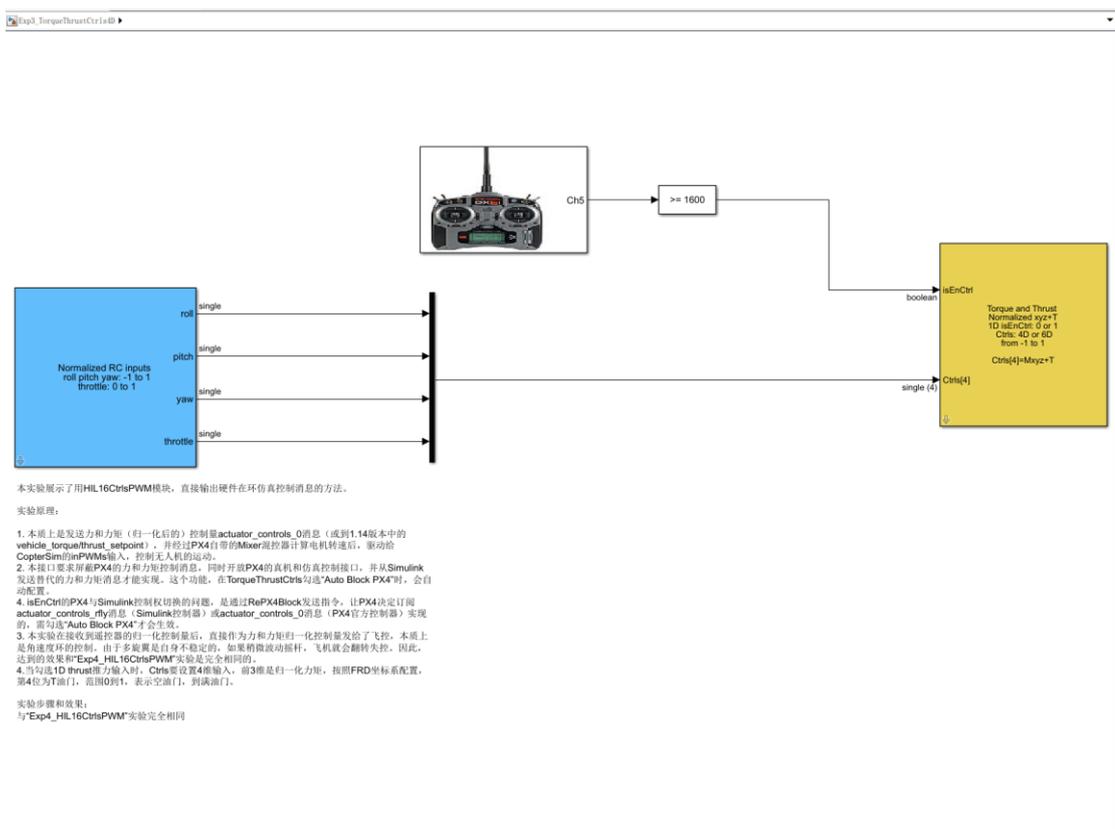
双击打开本模型的配置页面后，其具体定义如下：

- 若勾选 **Auto arm**，则启用 **isEnCtrl** 时，模块将发送解锁指令。
- 若勾选 **Auto block PX4**，则模块将发送信号屏蔽 PX4 的输出。当 **isEnCtrl** 接口输入为 **true** 时，将使用 **Simulink** 控制器控制载具。
- 若勾选 **Auto Loiter**，模块将发送命令解除对 PX4 输出的屏蔽，并切换到自动 **Loiter** 模式，当 **isEnCtrl** 接口输入为 **false** 时切换到 **Loiter** 模式，从而确保载具可以切换到 PX4 控制器并保持在空中。
- **Sample Time(s)**: 采样时间。

5.3. Exp3_TorqueThrustCtrls4D.slx—四维扭矩推力控制实验模型文件

如下图所示，打开[\[安装目录\]\5.RflySimFlyCtrl\0.ApiExps\16.CtrlsSingalsAPI](#) 中的 **Exp3_TorqueThrustCtrls4D.slx** 文件。该系统模型主要由 **Torque ThrustCtrls**、**InputRcNorm** 和 **input_rc** 模块构成。

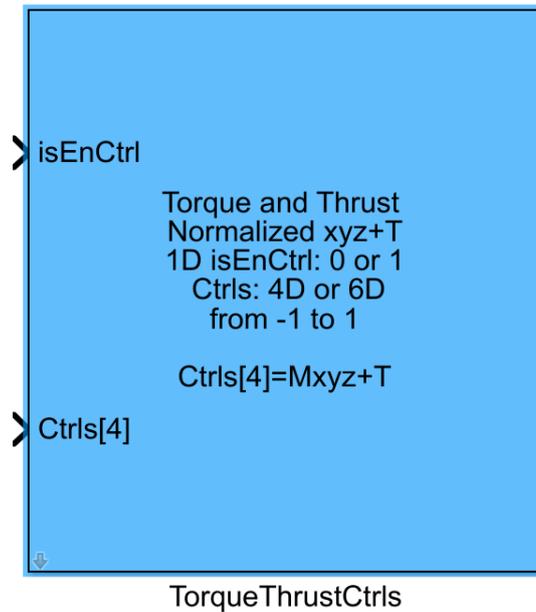
InputRcNorm 和 **input_rc** 模块的详细介绍请参考：[InputRcNorm](#) 和 [input_rc](#)



5.3.1. Torque ThrustCtrls—力和力矩控制信号模块

发送力和力矩（归一化后的）控制量 **actuator_controls_0** 消息（或 PX4 v1.14 版本中的 **vehicle_torque/thrust_setpoint**），并经过 PX4 自带的 Mixer 混控器计算电机转速后，驱动给 C

opterSim 的 inPWMs 输入，控制无人机的运动。真机实飞时，则直接驱动飞机进行飞行。



isEnCtrl: 若输入为 true，则发送 Ctrls 控制量，反则发送[0,0,...0,0]。

Ctrls[*]: 输入 single 数据类型的控制量，具体协议如下：

第 1 控制通道：对于 PX4 版本为 v1.7~v1.13 版本，该模块将发送 `actuator_controls_0` 的 uORB 消息。对于 PX4 版本为 v1.14 版本，该模块将发送 `vehicle_torque_setpoint` 和 `vehicle_torque_setpoint` 的 uORB 消息。

方式一：Ctrls[4]

X: 机体坐标系下绕 X 轴力矩

Y: 机体坐标系下绕 Y 轴力矩

Z: 机体坐标系下绕 Z 轴力矩

Thrust 1D: 机体坐标系下沿 Z 轴推力，大于 0 表示向上飞行。

方式二：Ctrls[6]

X: 机体坐标系下绕 X 轴力矩

Y: 机体坐标系下绕 Y 轴力矩

Z: 机体坐标系下绕 Z 轴力矩

Thrust 3D: 机体坐标系下沿 X、Y、Z 轴推力，沿 Z 轴大于 0 表示向上飞行。

使能第 2 通道（针对于 VOTLs）：对于 PX4 版本为 v1.7~v1.13 版本，该模块将发送 `actuator_controls_1` 的 uORB 消息。对于 PX4 版本为 v1.14 版本，该模块将发送 `vehicle_torque_setpoint1` 和 `vehicle_torque_setpoint1` 的 uORB 消息。

方式一：Ctrls[8]

X: 机体坐标系下绕 X 轴力矩

Y: 机体坐标系下绕 Y 轴力矩

Z: 机体坐标系下绕 Z 轴力矩

Thrust 1D: 机体坐标系下沿 Z 轴推力，大于 0 表示向上飞行。

X1: 机体坐标系下绕 X1 轴力矩

Y1: 机体坐标系下绕 Y1 轴力矩

Z1: 机体坐标系下绕 Z1 轴力矩

Thrust1 1D: 机体坐标系下沿 Z1 轴推力，大于 0 表示向上飞行。

方式二：Ctrls[12]

X: 机体坐标系下绕 X 轴力矩

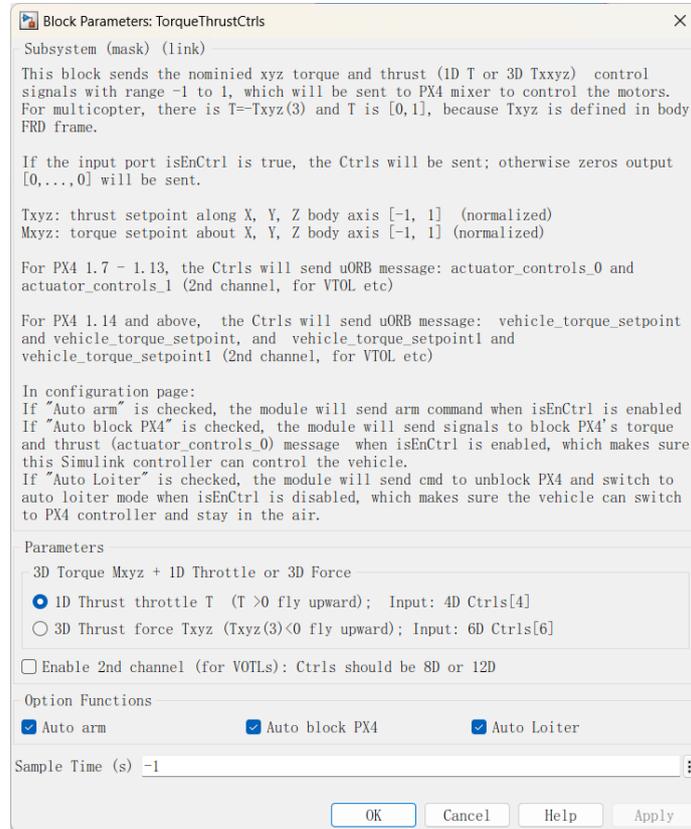
Y: 机体坐标系下绕 Y 轴力矩

Z: 机体坐标系下绕 Z 轴力矩

Thrust 3D: 机体坐标系下沿 X、Y、Z 轴推力，沿 Z 轴大于 0 表示向上飞行。

X1: 机体坐标系下绕 **X1** 轴力矩
Y1: 机体坐标系下绕 **Y1** 轴力矩
Z1: 机体坐标系下绕 **Z1** 轴力矩
Thrust1 3D: 机体坐标系下沿 **X1**、**Y1**、**Z1** 轴推力，沿 **Z1** 轴大于 **0** 表示向上飞行。

双击打开本模型的配置页面后，其具体定义如下：



- **Parameters:** 可自定义选择控制信号中力矩的维度，具体定义见上述。
- **Enable 2nd channel:** 若勾选，则表示开启第 2 控制通道。
- 若勾选 **Auto arm**，当 **isEnCtrl** 端口输入为 **true** 时，模块将发送解锁指令。
- 若勾选 **Auto block PX4**，则模块将发送信号屏蔽 PX4 的输出。当 **isEnCtrl** 接口输入为 **true** 时，将使用 Simulink 控制器控制载具。
- 若勾选 **Auto Loiter**，模块将发送命令解除对 PX4 输出的屏蔽，并切换到自动 Loiter 模式，当 **isEnCtrl** 接口输入为 **false** 时切换到 Loiter 模式，从而确保载具可以切换到 PX4 控制器并保持在空中。

Sample Time(s): 采样时间

5.4. Exp4_TorqueThrustCtrls6D.slx—六维扭矩推力控制实验模型文件

如下图所示，打开[\[安装目录\]\5.RflySimFlyCtrl\0.ApiExps\16.CtrlsSingalsAPI](#) 中的 Exp4_TorqueThrustCtrls6D.slx 文件。该系统模型主要由 Torque ThrustCtrls、InputRcNorm 和 input_rc 模块构成。

InputRcNorm 和 input_rc 模块的详细介绍请参考：[InputRcNorm](#) 和 [input_rc](#)

Torque ThrustCtrls 模块的详细介绍请参考：[Torque ThrustCtrls](#)

本实验展示了用TorqueThrustCtrls模块，直接输出力和力矩控制量的方法。本模块同时适用于硬件在环仿真与真机，且适用于各类载具的控制（需要在QGC中设置好载具Mixer混控规则）。

实验原理：

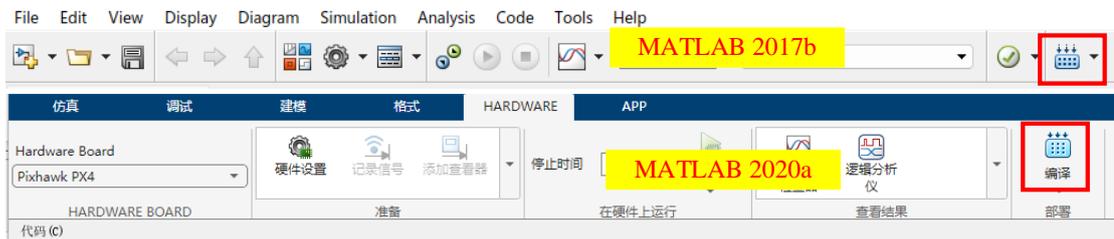
1. 本质上是发送力和力矩（归一化后的）控制量actuator_controls_0消息（或到1.14版本中的vehicle_torqueThrust_setpoint），并经过PX4自带的Mixer混控器计算电机转速后，驱动给CopterSim的inPWMs输入，控制无人机的运动。
2. 本接口要求刷写PX4的力和力矩控制消息，同时开启PX4的真机和仿真控制接口，并从Simulink发送替代的力和力矩消息才能实现。这个功能，在TorqueThrustCtrls勾选“Auto Block PX4”时，会自动配置。
3. 本实验在接收到混控器的归一化控制量后，直接作为力和力矩归一化控制量发送给了飞控。本质上是角度闭环的控制。由于多旋翼是自身不稳定的，如果稍微抖动杆，飞机就会翻转失控。因此，达到的效果跟Exp4_HIL16CtrlsPWM实验是完全相同的。
4. 当勾选ID Thrust推力输入时，Ctrls设置4根输入，前3根是归一化力矩，按照FRD中坐标配置，第4根为归一化的推力输入。滚轴动时，Z方向的推力向下为正，俯滚需要和滚轴一起进行偏航方向。
5. 相对于Exp6_TorqueThrustCtrls4D实验，本实验勾选了3D的Thrust推力输入功能。接收归一化后的力和力矩输入。本模块配合1.14版本固件，可以更方便地实现各类载具，包括非正常角度安装螺旋桨类型的控制。

实验步骤和效果：
与“Exp4_HIL16CtrlsPWM”实验完全相同

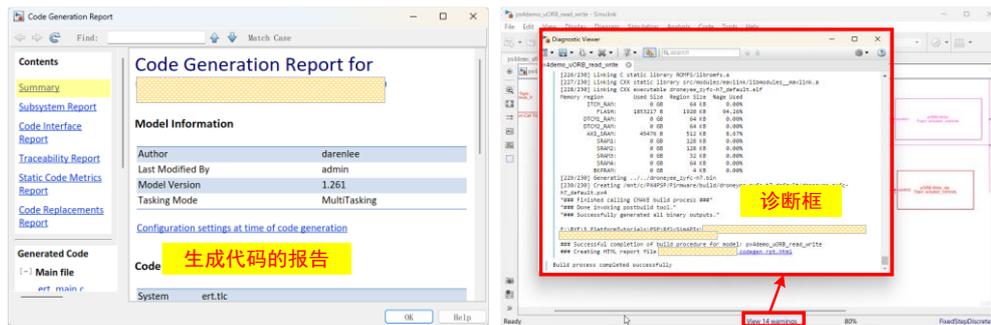
5.5. PWM 控制实验

本实验展示了用 HIL16CtrlsPWM 模块，直接输出硬件在环仿真控制消息的方法。本质上是发送 actuator_outputs_rfly 消息（替换 PX4 的 actuator_outputs），并经过 HIL_ACTUATOR_CONTROLS 消息，驱动给 CopterSim 的 inPWMs 输入，控制无人机的运动。

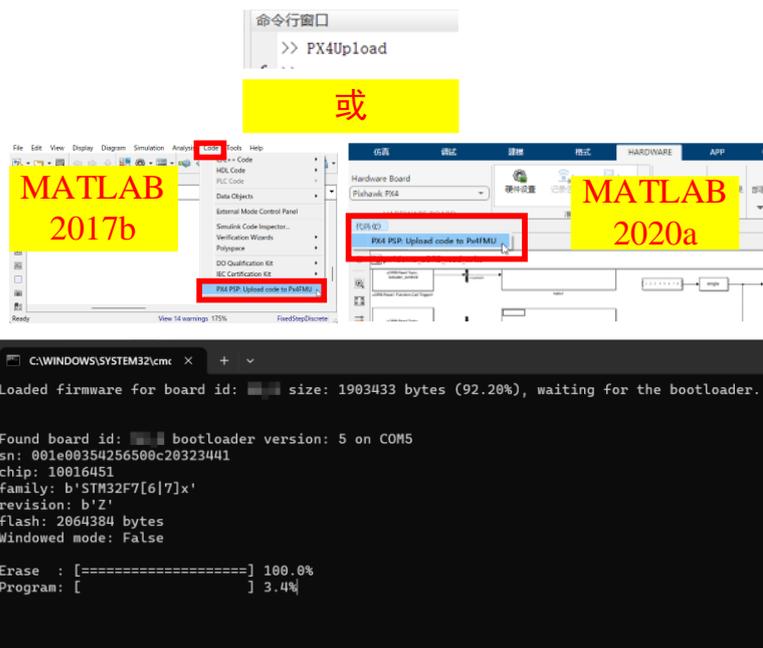
打开 MATLAB 软件，在 MATLAB 中打开 [Exp1_HIL16CtrlsPWM.slx](#) 文件，并点击编译命令。



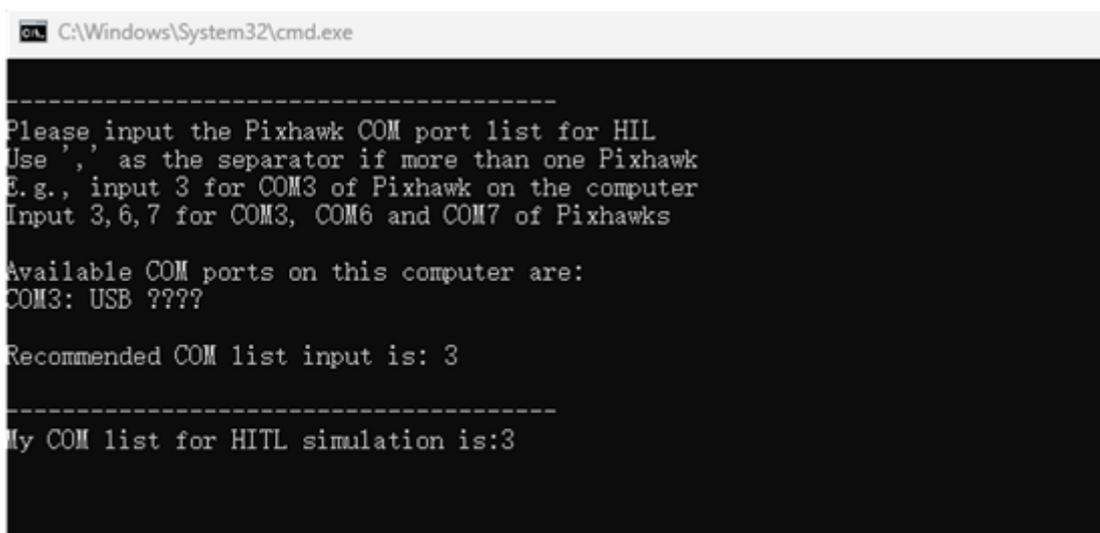
在 Simulink 的下方点击 View diagnostics 指令，即可弹出诊断对话框，可查看编译过程。在诊断框中弹出 Build process completed successfully，即可表示编译成功，左图为生成的编译报告。



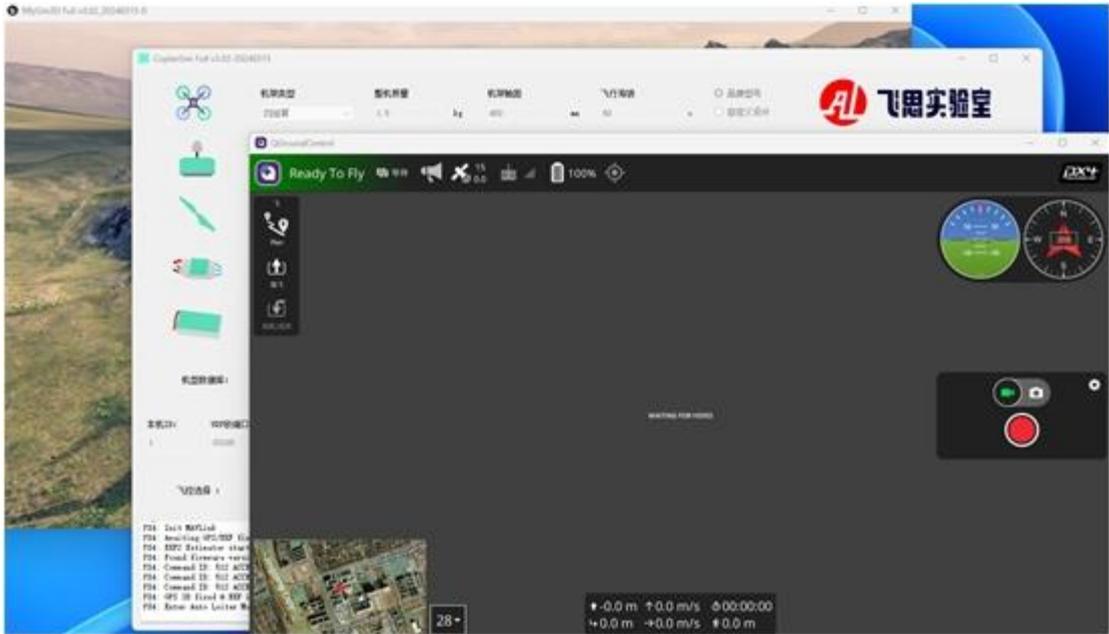
用 USB 数据线链接飞控与电脑。在 MATLAB 命令行窗口输入：PX4Upload 并运行或点击 PX4 PSP: Upload code to Px4FMU，弹出 CMD 对话框，显示正在上传固件至飞控中，等待上传成功。



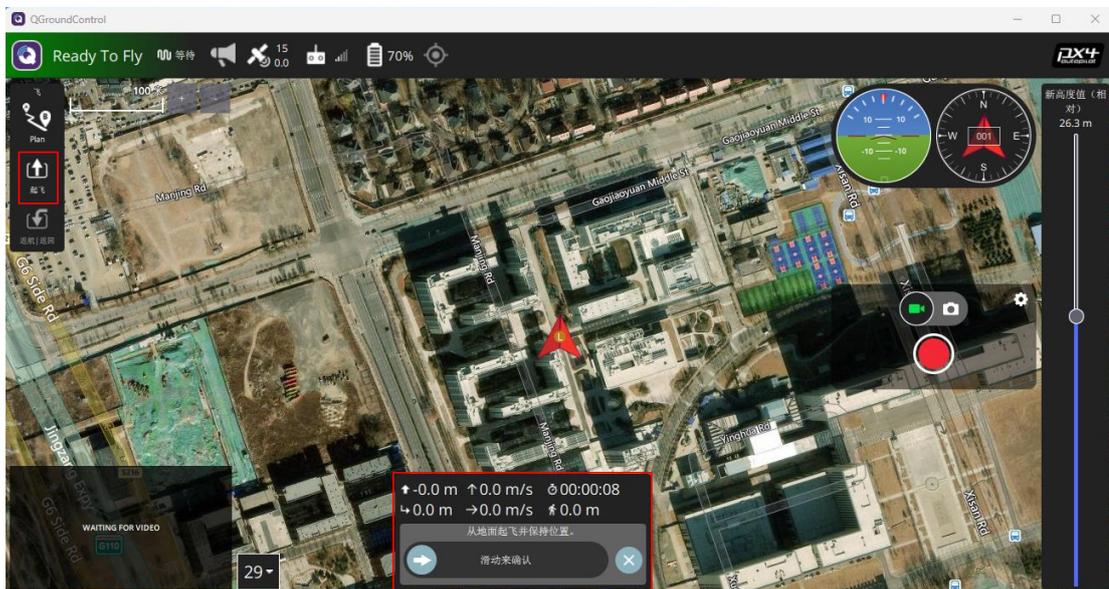
将遥控器 CH5 置于最低档，双击打开桌面 “*\桌面\RflyTools\HITLRun” 软件，启动硬件在环仿真。在出现的终端界面输入本电脑所识别到的飞控 COM 端口号：3。



RflySim 平台将启动 QGC、CopterSim、RflySim3D 软件，等待 CopterSim 左下方的消息栏中显示：PX4: GPS 3D fixed & EKF initialization finished，代表 PX4 软件初始化完成。



当遥控器油门杆置于最低点，CH5 置于最低档。在 QGC 可以控制飞机起飞，点击 QGC 界面左边起飞，在界面中下方出现滑动来确认，滑动后，飞机起飞。如下图所示：

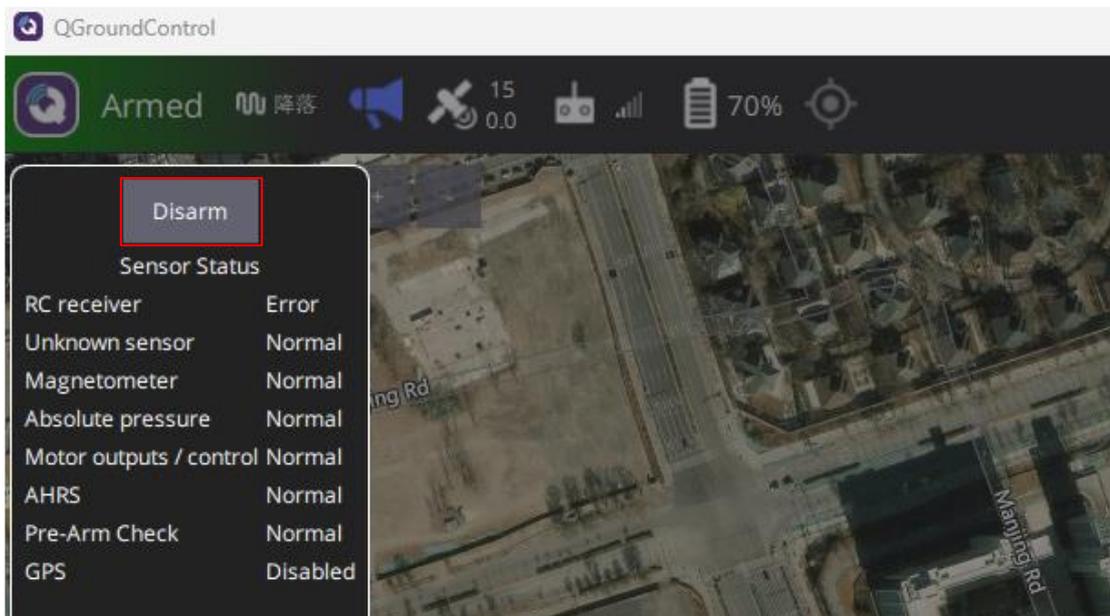


此时用遥控器也可以正常控制飞机，说明 PX4 有控制权。



让飞机降落，用 QGC 或地面站控制飞控重新上锁（Disarm）。

将 CH5 拨到最高档，QGC 界面看到飞控自动解锁，上拨油门杆飞机起飞。



用遥控器操作飞机降落，此时用 QGC 发送起飞指令，发现飞机无法起飞，说明现在 PX4 没有控制权。

用遥控器将油门推到顶，发现飞机加速上升（说明响应了 Simulink 的程序），在此时 CH5 重新拨到最低档，发现飞机停止上飞，并进入 Loiter 悬停模式，经过短暂调整后，会停在原地。用遥控器可以正常控制飞机前后飞，符合 Loiter 模式控制逻辑，此外通过 QGC 的降落按钮，可以控制飞机降落，说明 PX4 又拿回了控制权。



重新将 CH5 拨到最高，Simulink 拿回控制权，上推油门使得飞机悬停。

5.6. 归一化控制实验

本实验展示了用 HIL16CtrlsNorm 模块，直接输出硬件在环仿真控制消息的方法。HIL16CtrlsNorm 模块接收的是-1 到 1 的执行器控制信号，通过 `actuator_outputs_rfly` 消息，将控制量发给 CopterSim 的 DLL 模型的 `inPWMs` 输入口。

同实验一 Step1-4 一样。打开 MATLAB 软件，在 MATLAB 中打开 [Exp2_HIL16CtrlsNorm.slx](#) 文件，并点击编译命令。编译完成后，上传固件至飞控。

按照实验 1Step5-8 进行操作，观察实验现象与实验一是否一致。

5.7. 四维扭矩推力控制实验

本实验展示了用 HIL16CtrlsPWM 模块，直接输出硬件在环仿真控制消息的方法。本质上是发送力和力矩（归一化后的）控制量 `actuator_controls_0` 消息（或到 1.14 版本中的 `vehicle_torque/thrust_setpoint`），并经过 PX4 自带的 Mixer 混控器计算电机转速后，驱动给 CopterSim 的 `inPWMs` 输入，控制无人机的运动。

同实验一 Step1-4 一样。打开 MATLAB 软件，在 MATLAB 中打开 [Exp3_TorqueThrustCtrls4D.slx](#) 文件，并点击编译命令。编译完成后，上传固件至飞控。

按照实验一 Step5-8 进行操作，观察实验现象是否与实验 1 一致。

5.8. 六维扭矩推力控制实验

本实验展示了用 TorqueThrustCtrls 模块，直接输出力和力矩控制量的方法。本质上是发送力和力矩（归一化后的）控制量 `actuator_controls_0` 消息（或到 1.14 版本中的 `vehicle_torque/thrust_setpoint`），并经过 PX4 自带的 Mixer 混控器计算电机转速后，驱动给 CopterSim 的 `inPWMs` 输入，控制无人机的运动。

同实验一 Step1-4 一样。打开 MATLAB 软件，在 MATLAB 中打开 [Exp4_TorqueThrustCtrls6D.slx](#) 文件，并点击编译命令。编译完成后，上传固件至飞控。

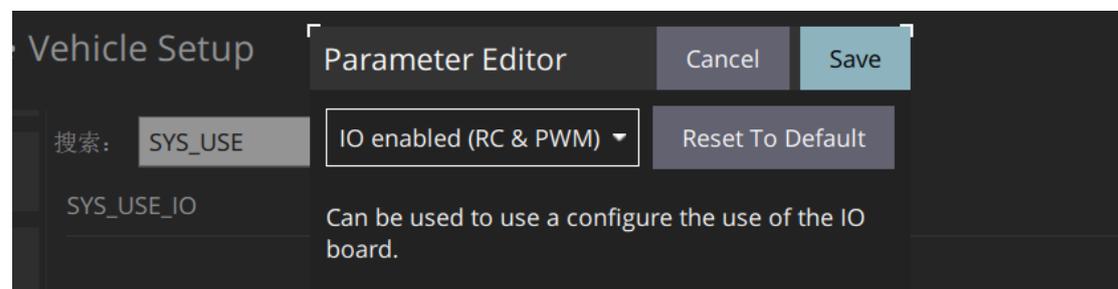
按照实验一 Step5-8 进行操作，观察实验现象与实验一是否一致。

5.9. PWM 及 AUX 输出测试实验

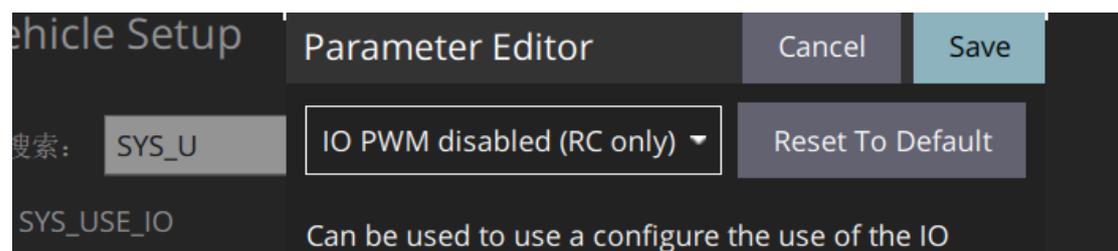
同实验一 Step1-4 一样。打开 MATLAB 软件，在 MATLAB 中打开 [Exp5_PwmAndAuxOutput.slx](#) 文件，并点击编译命令。编译完成后，上传固件至飞控。

在不同的飞控版本下，由于飞控中的参数进行了变更，后续实验分为 1.14 版本之前以及 1.14 版本之后两种情况进行实验。

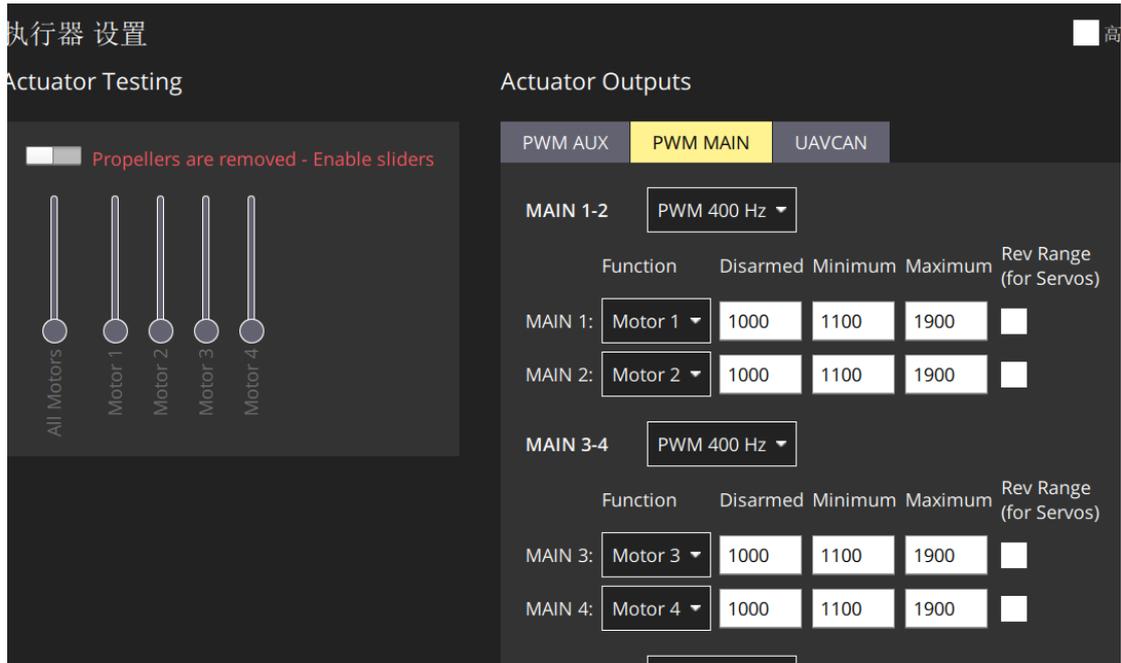
(1) 1.14 版本之前以 1.13.2 版本固件为例：首先，将电机输出接在 I/O PWM OUT 接口上，连接地面站，在参数界面中搜索 SYS_USE_IO 参数，将其修改为 IO enable (RC&PWM)，即使用 PWM 模式，之后连接电源，通过 CH5 通道进行解锁，观察无人机电机是否正常转动。



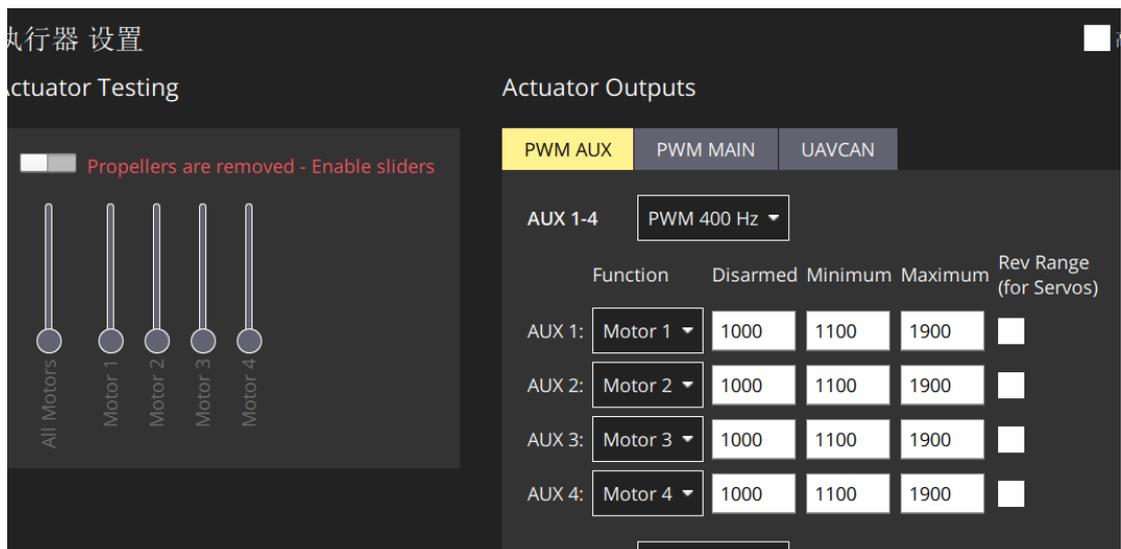
之后，将电机输出接在 FMU PWM OUT 接口上，连接地面站，在参数界面中搜索 SYS_USE_IO 参数，将其修改为 IO PWM disabled (RC only)，即使用 AUX 模式。连接电源，通过 CH5 通道进行解锁，观察无人机电机是否正常转动。



(2) 1.14 版本之后，由于设置中多出了执行器选项，同时，参数中没有了 SYS_USE_IO，我们需要在执行器中进行设置。首先，将电机输出接在 I/O PWM OUT 接口上，连接地面站，在 PWM MAIN 中对四个电机进行设置，之后，重启飞行器，连接电池，通过 CH5 解锁后，观察无人机电机是否转动。



之后，将电机输出接在 FMU PWM OUT 接口上，连接地面站，将之前在 PWM MAIN 中设置的电机选项进行屏蔽，在 PWM AUX 设置中对四个电机进行设置。之后，重启飞行器，连接电池，通过 CH5 解锁后，观察无人机电机是否转动。



6. 参考资料

- [1]. Quan Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Springer, Singapore, 2017
- [2]. 全权 杜光勋 赵峙尧 戴训华 任锦瑞 邓恒译 多旋翼飞行器设计与控制 [M] 电子工业出版社 2018.
- [3]. 全权 戴训华 王帅 多旋翼飞行器设计与控制 实践 [M] 电子工业出版社 2020.
- [4]. 全权 等.多旋翼无人机远程控制实践[M].电子工业出版社,2022.

7. 常见问题

Q1: ***

A1: ***