



智能无人集群系统开发与实践

基于RflySim工具链的全栈开发案例

第5讲 位姿控制与滤波估计



目录

1. 实验平台配置及仿真流程
2. 底层开发接口及功能介绍
3. 基础案例实验介绍
5. 进阶案例实验介绍
6. 高阶案例实验介绍（完整版）
7. 小结



1.实验平台配置及仿真流程

1.1 参考教材

- 全权,戴训华,王帅著.多旋翼飞行器设计与控制实践[M].北京:电子工业出版社.2020



注:

- 左侧的《多旋翼飞行器设计与控制实践》为2020年推出的针对飞行控制算法开发的实践课程,里面包含了部分理论知识与一系列实验,使得读者可以很快地将自己算法在Simulink中编程,并下载到Pixhawk真机中做飞行实验。
- 右侧的《多旋翼飞行器设计与控制》为2017年推出的教程,主要针对多旋翼控制理论。

更多其余教材推荐可见:

<https://rflysim.com/doc/zh/C/0.BookContents.html>

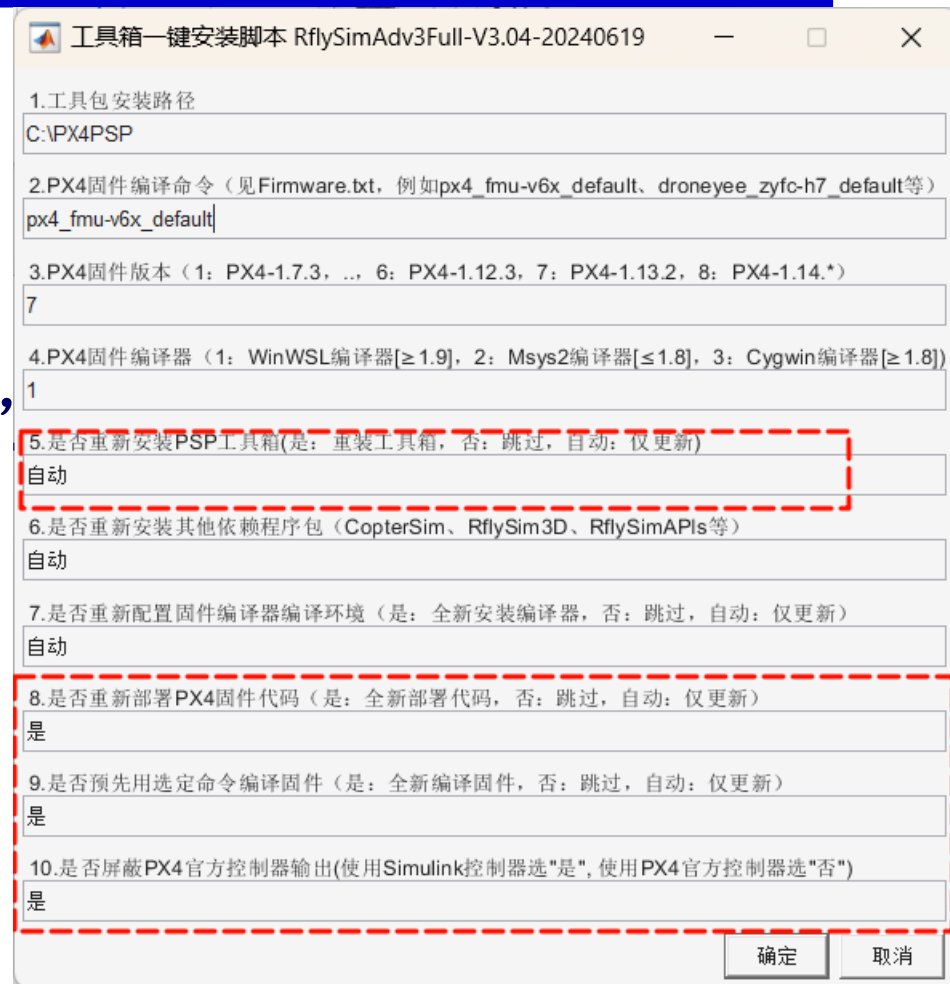


1.实验平台配置及仿真流程

1.2 RflySim工具链配置

在进行本章相关实验之前，需要确保RflySim工具链初始安装界面配置如下：

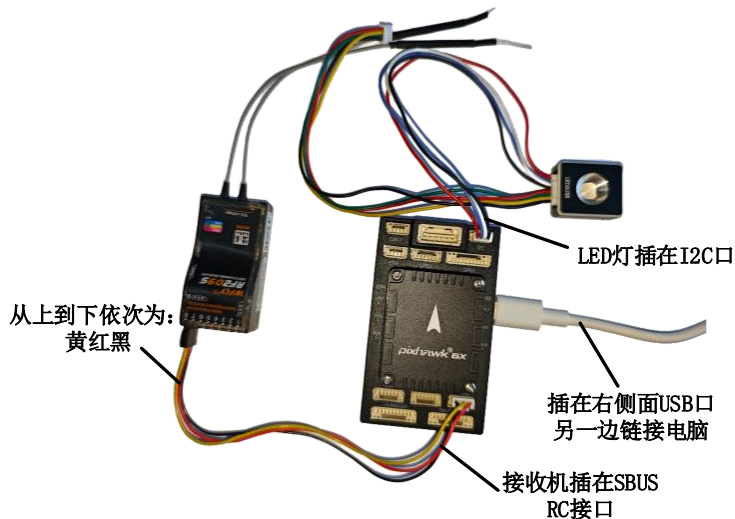
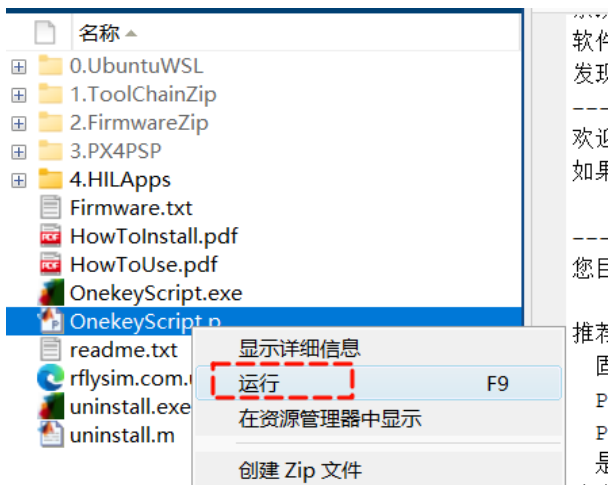
- 第2项：推荐使用的飞控为Pixhawk 6X或Pixhawk 6X mini飞控对应的编译命令：`px4_fmu-v6x_default`，其余支持飞控可见：<https://rflsim.com/doc/zh/B/2.Pixhawk.html>。
- 第5项：首次安装必须选择“是”，后期更新可设置为“自动”。
- 第8、9、10项：本章实验中第10项必选为“是”（除部分例程中特别说明），若修改第2、3、10项时，第8项必须选择为“是”。第9项可选择为“是”，以便于提高首次软、硬件仿真速度。
- 硬件仿真的链接方式如右侧所示。



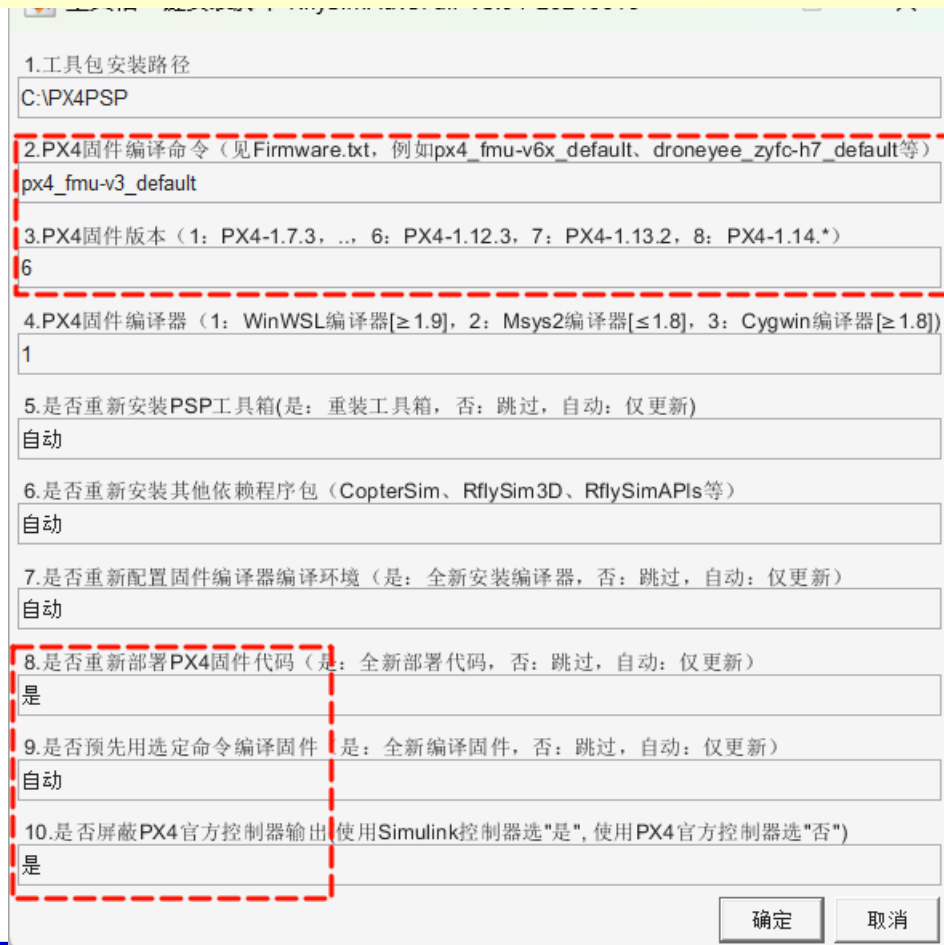


1. 实验平台配置及仿真流程

- 如果使用教材推荐的Pixhawk 1（外观见下图）的编译命令px4_fmu-v3_default。
- 重新运行安装包内“**OnekeyScript.p**”脚本。
- 使用最新PX4固件版本“6”——PX4-1.12.3，和编译器“1”——WinWSL。
- 其他配置如右图所示。



注：如果使用教程推荐的Pixhawk 1自驾仪，推荐按本页配置，也可按照书上的配置方法，选择PX4 1.7.3版本+Msys2编译器（不推荐）。

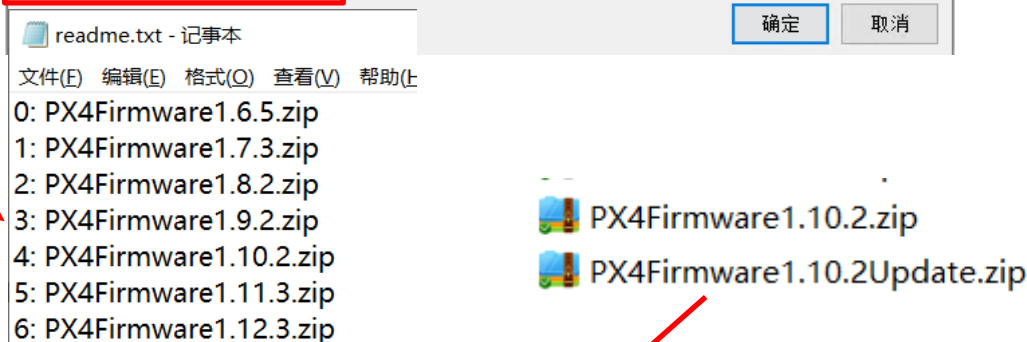
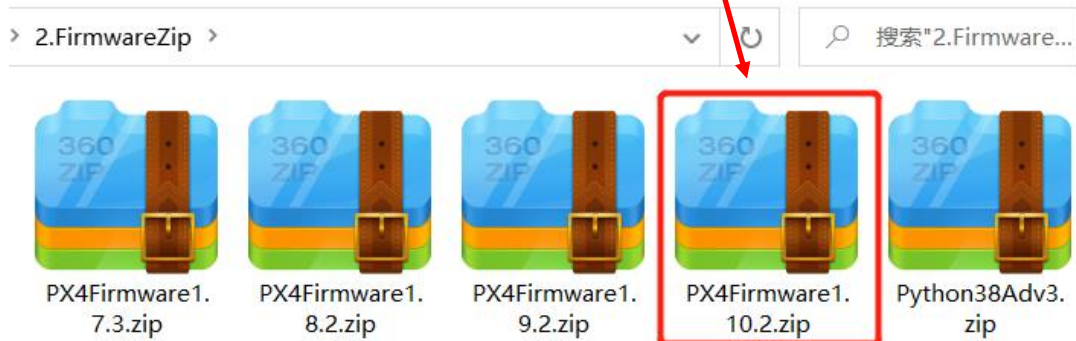
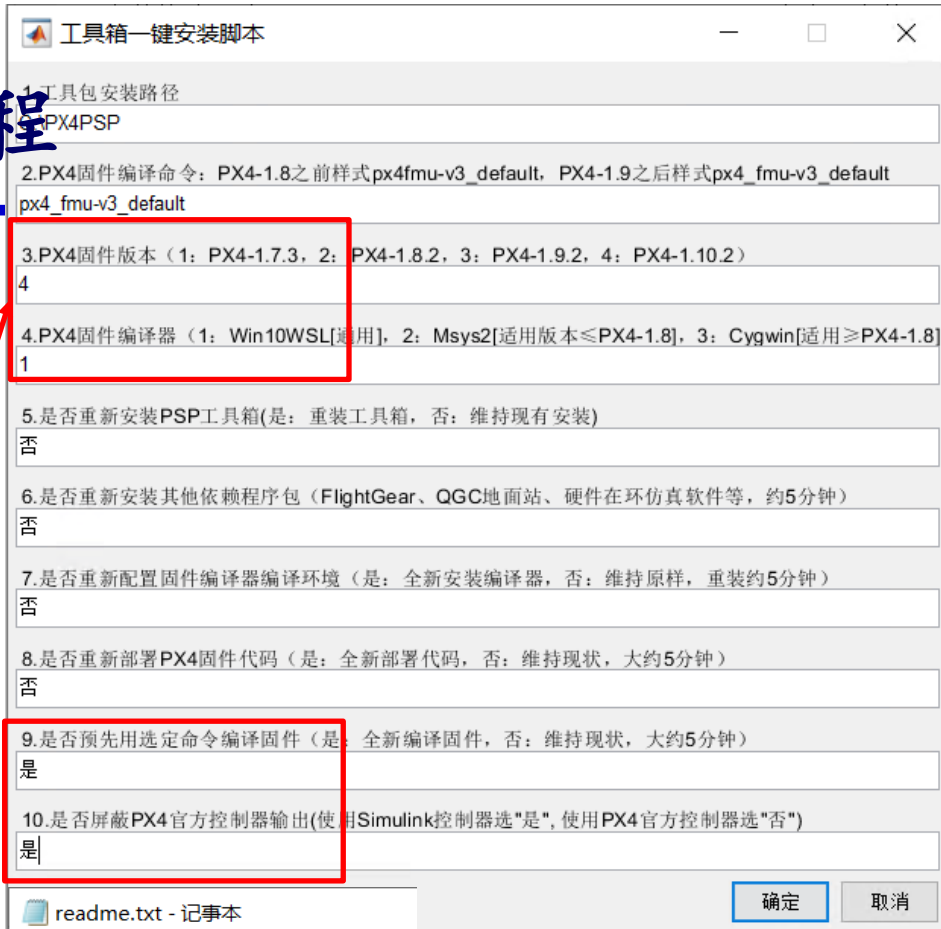


注：或者在MATLAB中输入“PX4CMD px4_fmu-v3_default”命令来快速切换。



1.实验平台配置及仿真流程

- 如果您需要使用自己的PX4固件代码，请将您的代码文件夹改名为Firmware，并压缩为Firmware.zip文件，然后根据2.FirmwareZip\readme.txt规则重命名，并选择需要固件版本。
- 例如，自己基于PX4 1.10开发的代码，命名为“PX4Firmware1.10.2.zip”，并替换原来掉“2.FirmwareZip”文件夹下的同名文件，在右图安装选项中的固件版本处选择“4”即可。
- 是否屏蔽PX4输出项目选择“是”，脚本会自动完成所有需要的固件修改以适配本平台。



注：也可以将PX4Firmware1.10.2.zip官方固件的增量文件打包并命名为“PX4Firmware1.10.2Update.zip”的格式放在2.FirmwareZip目录，安装时会自动拷贝到固件文件夹。





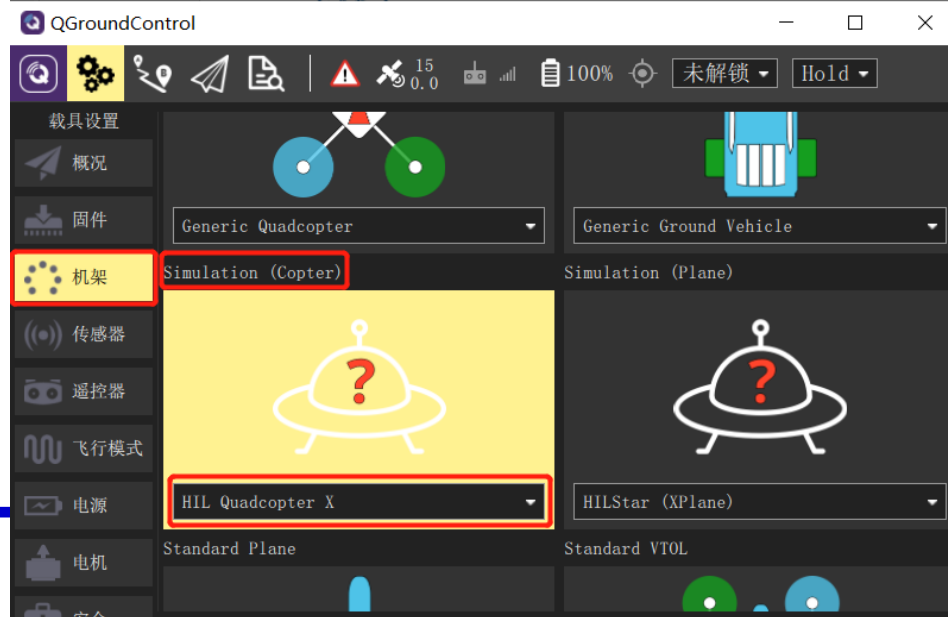
1. 实验平台配置及仿真流程

1、硬件配置方法，请参考教程链接：

<https://rflsim.com/doc/zh/B/3.RCIntro.html>。

2、确认完成以下配置：

- 确认Pixhawk已经在QGC中烧入最新的1.12版本官方固件，且LED正常闪烁
- 正确连接Pixhawk与接收机，正确连接遥控器与接收机，打开QGC地面站，确定能观察到遥控器摇杆的动作信号。
- 正确对遥控器进行配置并在QGC中校准，最低位置和最高位置满足教程链接中定义。
- 确认Pixhawk飞控已经在QGC中设置选择HIL Quadcopter X机架。
- 确认QGC中飞行模式按教程配置。





1.4 Simulink自动代码生成配置

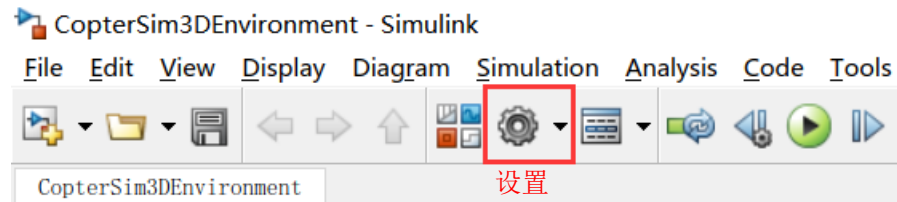
新建任意空白slx例程文件

1、进入Simulink设置页面（MATLAB 2019b及以上需要在MODELING标签页点击设置按钮）。

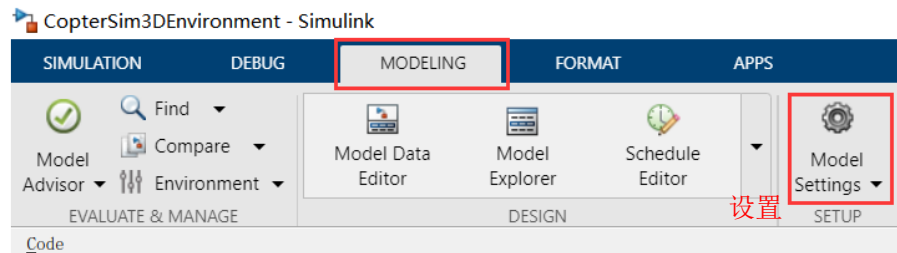
2、选择Hardware board设置为Pixhawk PX4后，会自动完成本平台需要的所有代码生成设置。

3、可以定制任务优先级。

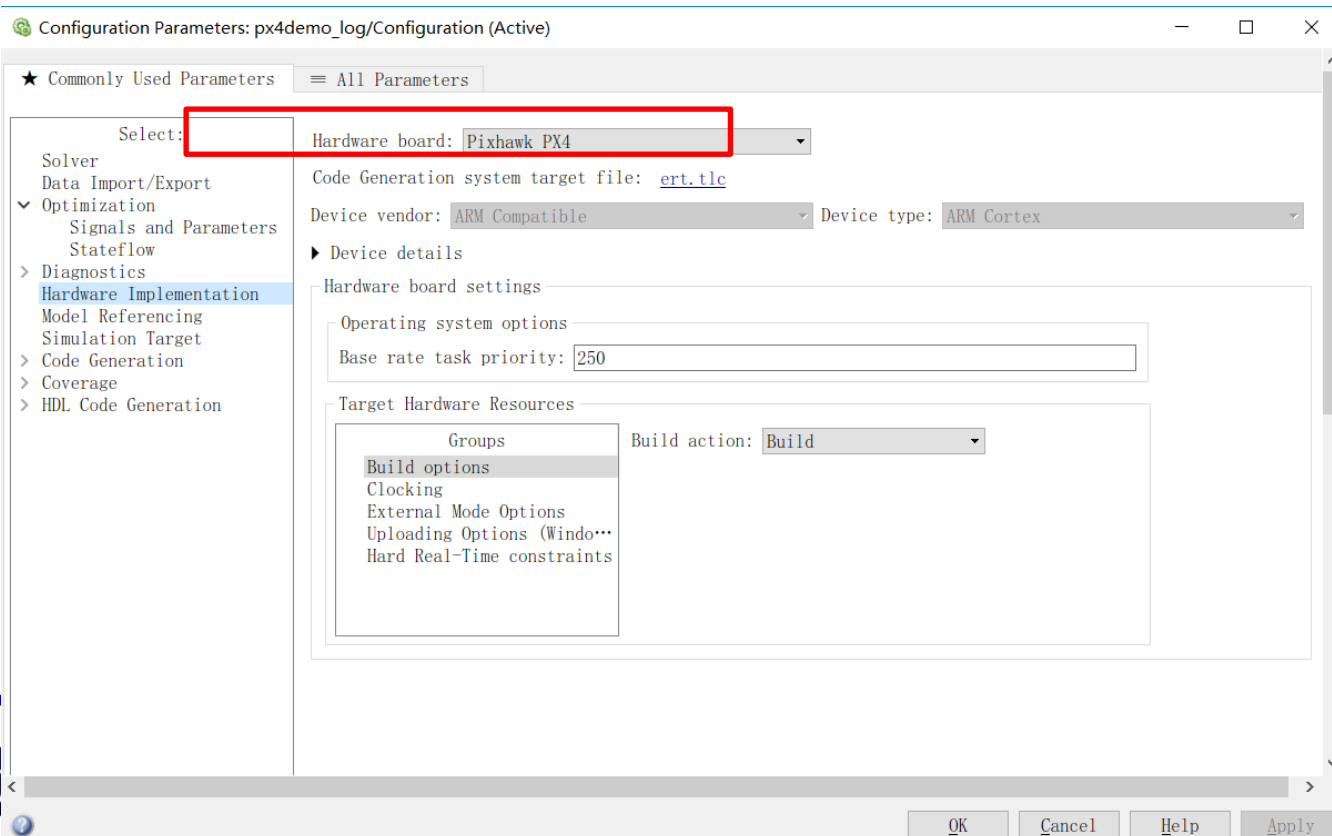
4、配置编译选项。



(a) Simulink “设置”按钮（MATLAB 2017b~2019a）



(b) Simulink “设置”按钮（MATLAB 2019b及更高版本）

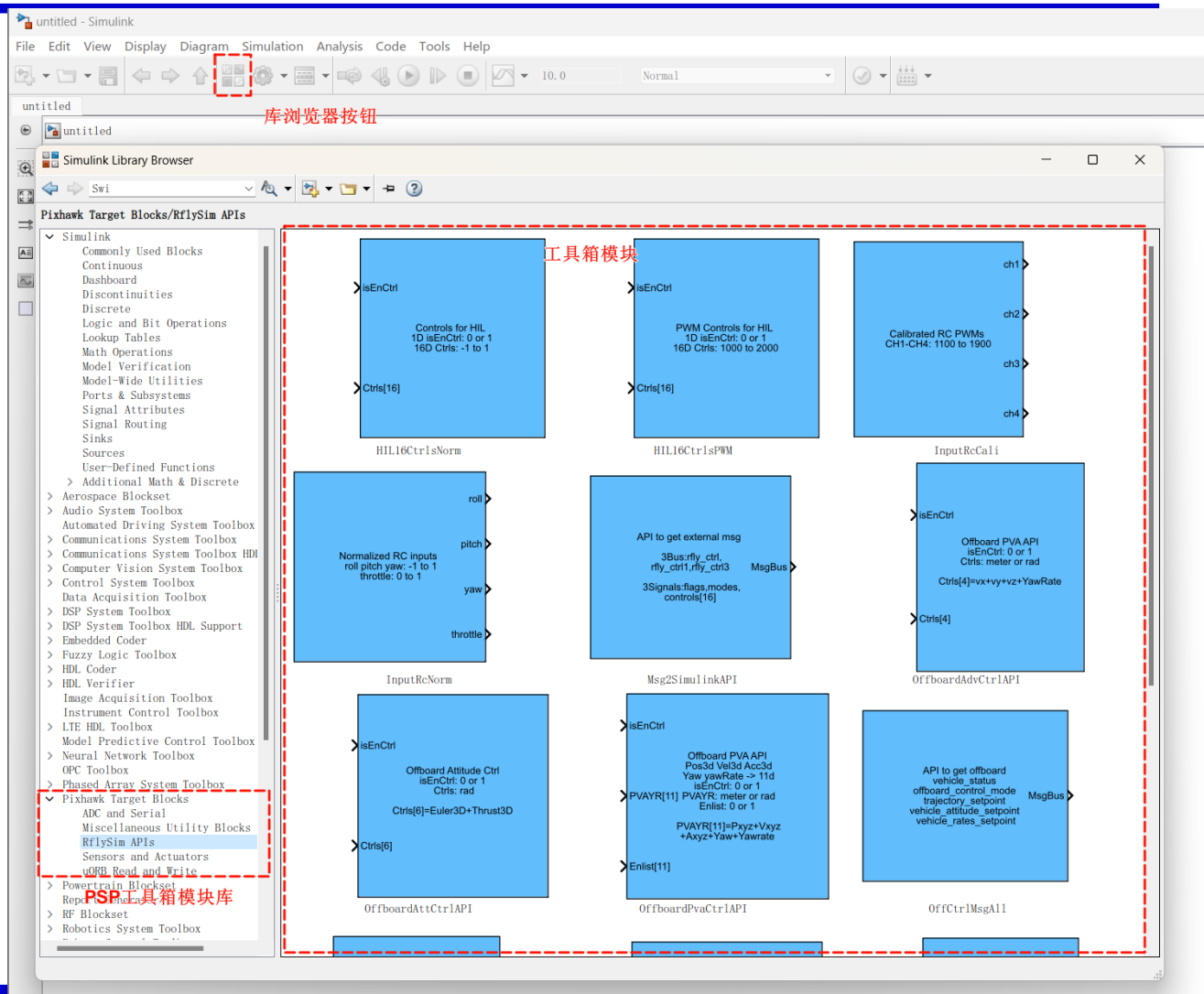




1.5 PX4PSP工具箱位置

- 任意打开一个Simulink文件，点击“库浏览器（Simulink Library Brower）”按钮，可以在其中找到PSP工具箱的“Pixhawk Target Blocks”模块库。
- 其中的模块可以看做是从PX4的uORB池中订阅或发布数据的上层封装的接口，包含了传感器、遥控器、电机、串口等功能。
- 注意：这些模块内部没有模型，只有在生成代码并编译成PX4固件时才能获取数据，在Simulink中直接运行的话，接收到的数据为全0。
- 各个模块更详细的使用方法，可以参考

[0.ApiExps](#)





目录

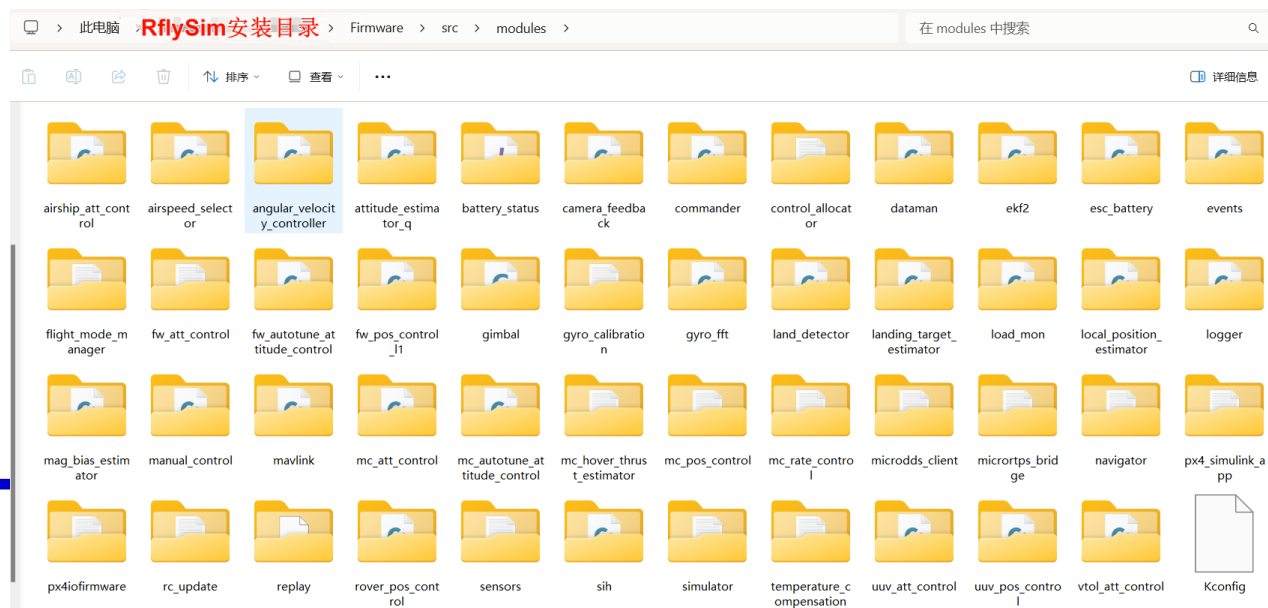
1. 实验平台配置及仿真流程
2. 底层开发接口及功能介绍
3. 基础案例实验介绍
5. 进阶案例实验介绍
6. 高阶案例实验介绍（完整版）
7. 小结



2. 底层开发接口及功能介绍

2.1 底层开发框架

PX4软件系统可以分为若干个小模块，每个模块独立运行（多线程并行），各个模块通过uORB消息模块的订阅与发布功能实现数据的传输与交互。Simulink生成的代码部署到PX4自驾仪软件之后，不会影响原生PX4自驾仪软件的运行，而是新增一个名为“px4_simulink_app”的独立模块（独立线程）并行于其他模块运行。

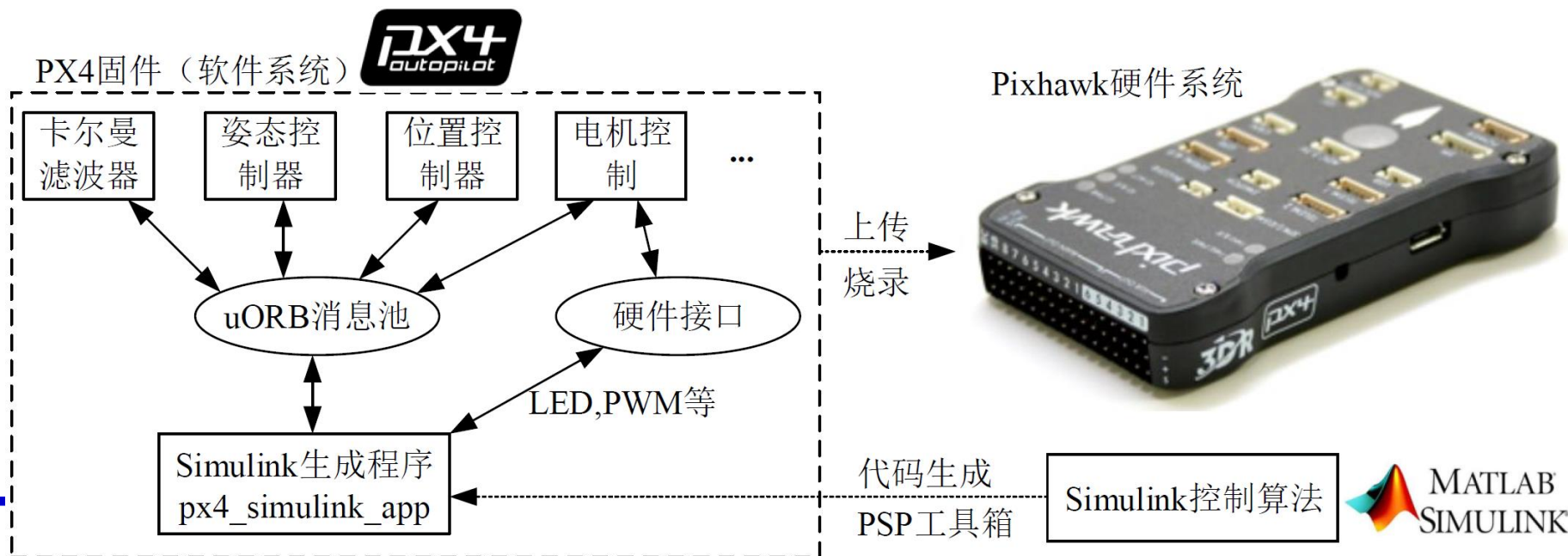




2. 底层开发接口及功能介绍

2.1 底层开发框架

由于原生PX4控制算法可能需要访问和“px4_simulink_app”同样的硬件输出资源，这会产生读写冲突。因此，平台一键部署脚本提供了自动屏蔽PX4原生固件对执行器的选项，以确保只有“px4_simulink_app”模块能够输出电机控制量，如下图所示。

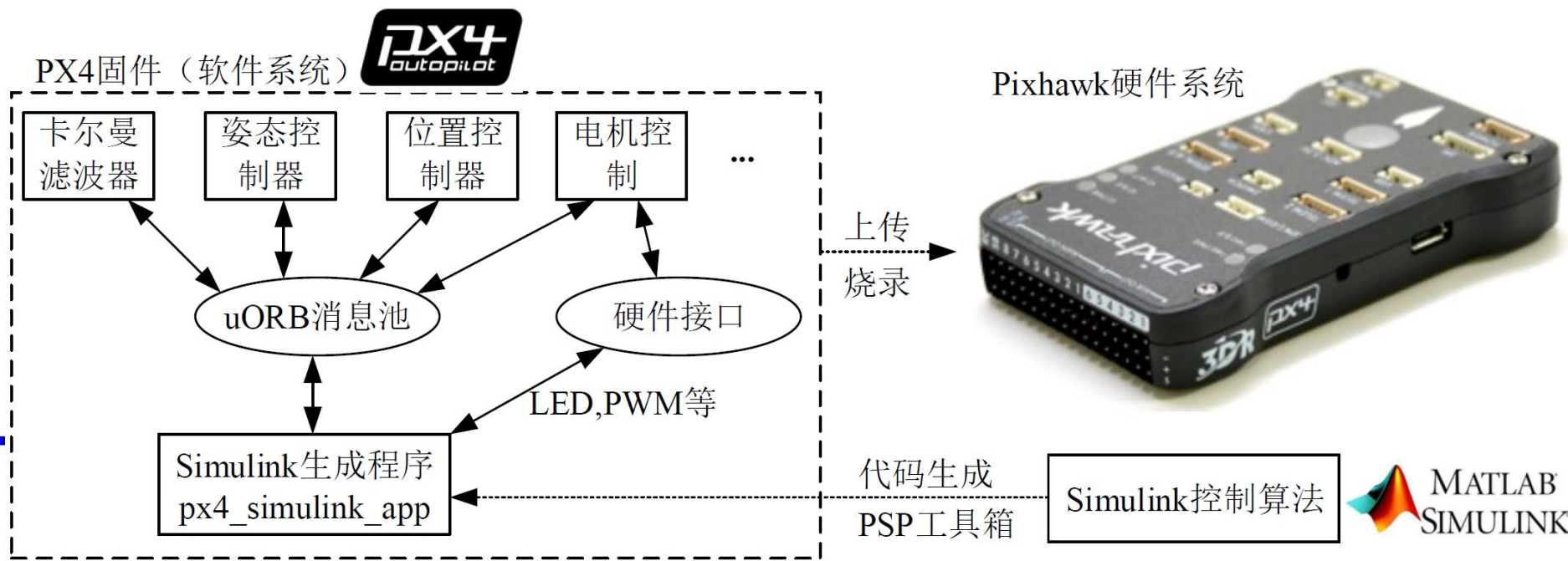




2. 底层开发接口及功能介绍

2.1 底层开发框架

PSP工具箱将在Simulink中设计的控制算法生成C代码；将该代码导入到PX4软件系统的源代码中，生成一个“px4_simulink_app”独立运行的程序；工具箱调用编译工具将所有代码编译为“****.px4”的PX4软件固件文件；将得到的固件下载到飞控中并烧录，由飞控执行带有生成的算法代码的PX4软件。

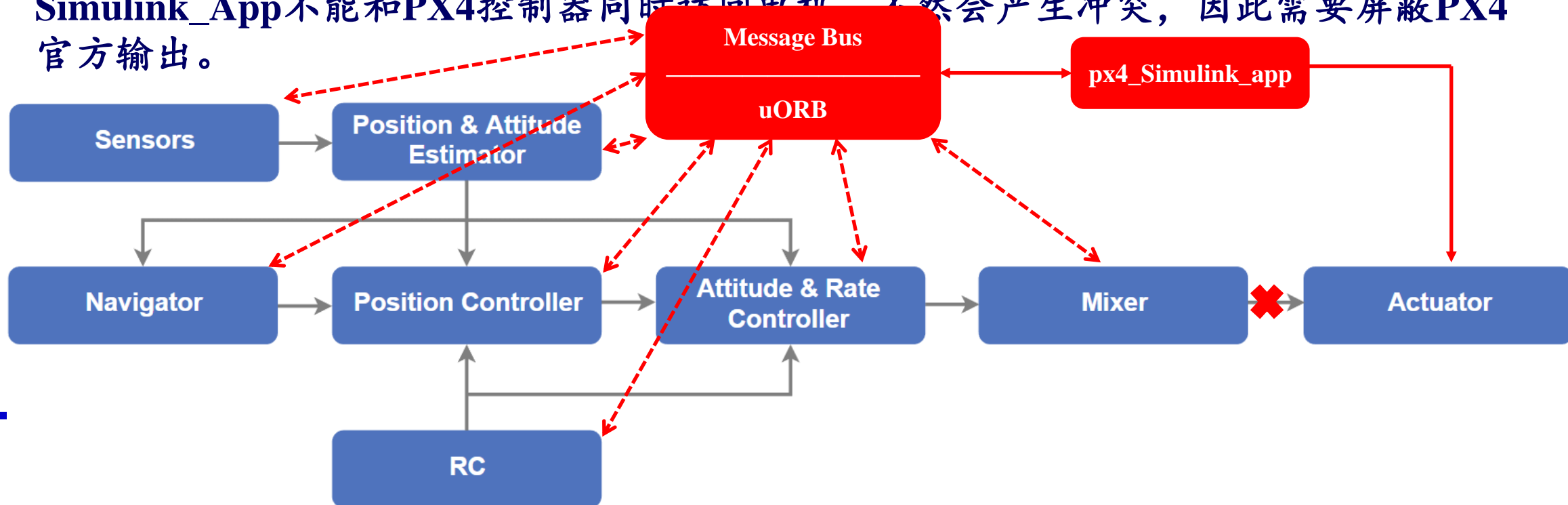




2. 底层开发接口及功能介绍

2.2 为何屏蔽PX4输出

- PX4采用uORB发布与订阅消息机制，任何APP都可以从uORB消息池中获取和发布数据。
- Simulink代码生成到Pixhawk后生成名为px4_Simulink_app的一个APP，可以通过uORB消息池机制与其他APP通信。
- Simulink_App不能和PX4控制器同时访问电机，不然会产生冲突，因此需要屏蔽PX4官方输出。

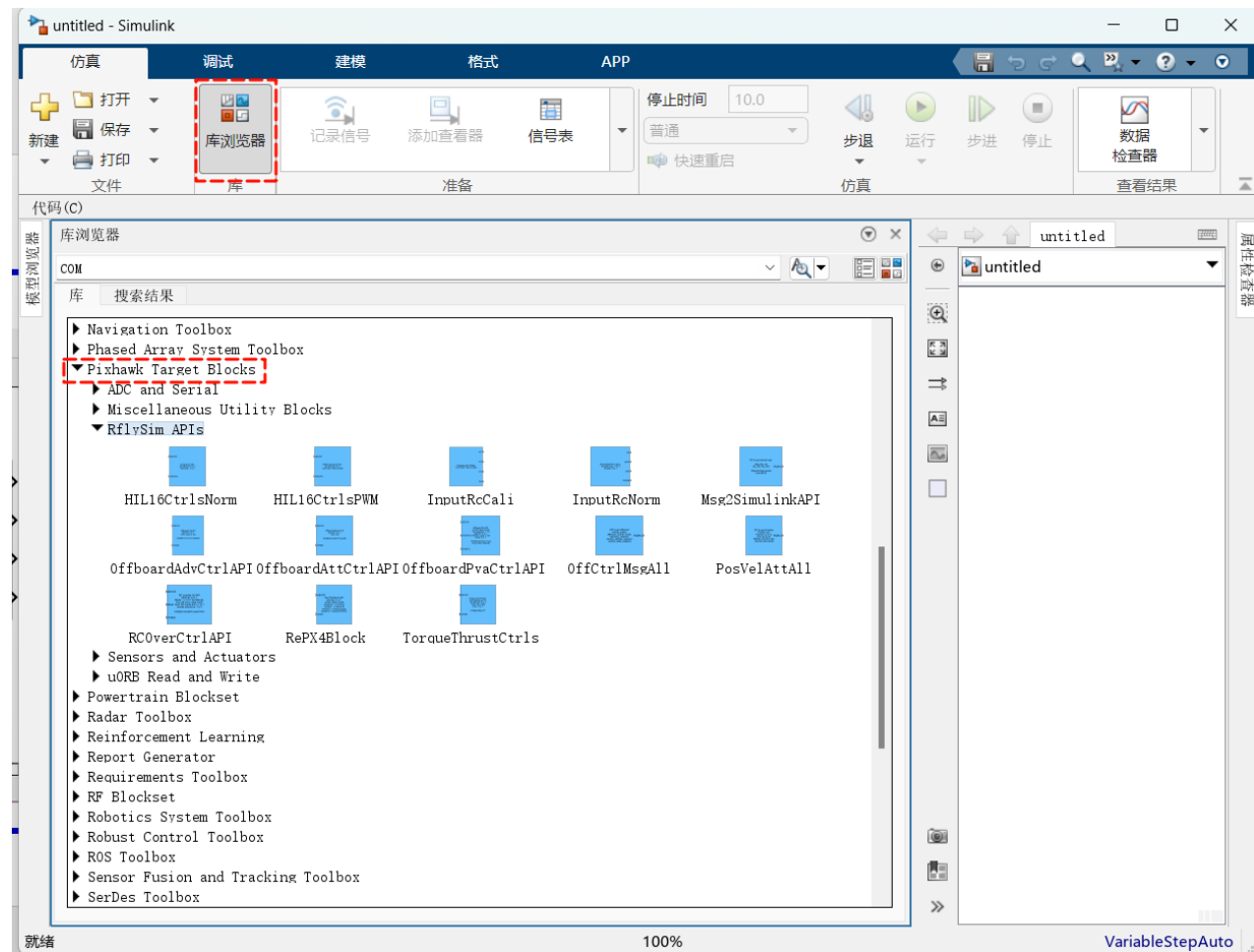




2. 底层开发接口及功能介绍

2.3 Simulink/PSP工具箱模块接口

PSP工具箱提供了一些Simulink模块作为Pixhawk的硬件接口，这些模块只负责生成相应的接口代码而不包含外围硬件的建模。这些硬件模块可以在Simulink的工具箱Pixhawk Target Blocks中查看，如下图所示，它由5个子库组成：**ADC and Serial—ADC和串口通信库、Miscellaneous Utility Blocks—其他库、Sensors and Actuators—传感器和执行器接口库、RflySim APIs—RflySim平台自定义接口库、uORB Read and Write—uORB消息读取和写入库。**

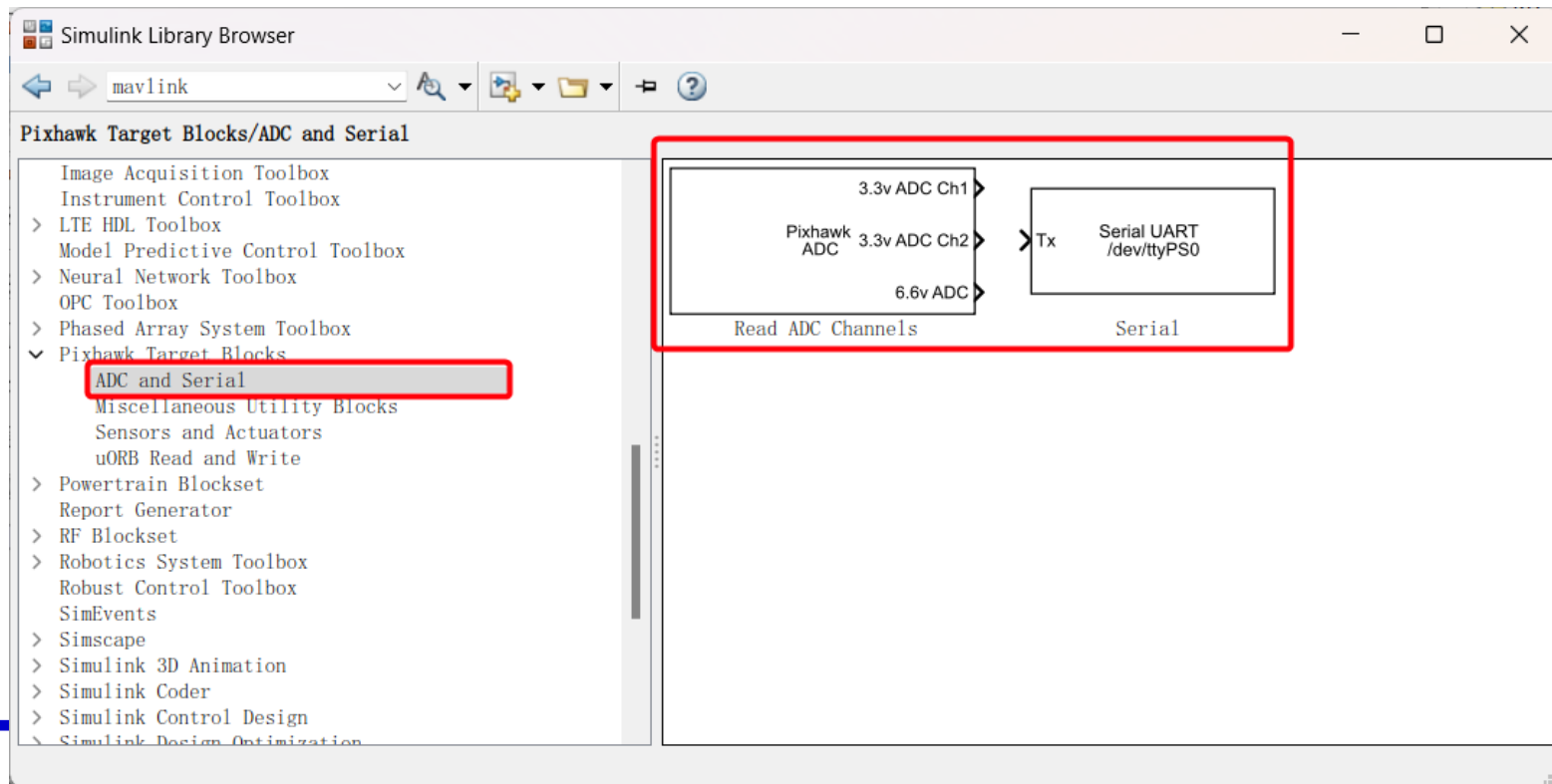




2. 底层开发接口及功能介绍

2.3 Simulink/PSP工具箱模块接口

ADC and Serial—ADC和串口通信库：**ADC**读模块可以获取3个外部ADC通道的数据，**串口**模块可以对指定串口进行读写操作。



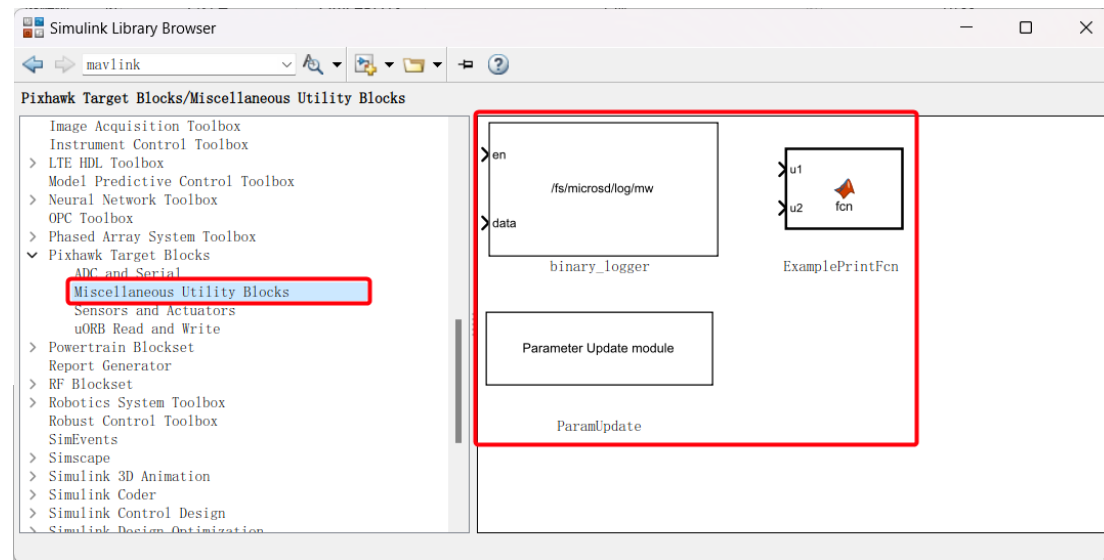


2. 底层开发接口及功能介绍

2.3 Simulink/PSP工具箱模块接口

Miscellaneous Utility Blocks—其他库：本库中包含有三个模块分别为**binary_logger**（数据记录模块），这个模块将数据记录为double型存储到SD卡中，如果在内存中缓存打开，则当en变低或达到指定的最大记录数时写入数据，相关例程可见：[0.ApiExps\5.Log-Write-Read\Readme.pdf](#)。

ExamplePrintFcn（打印函数示例模块）这个模块将信号数据内容打印到PX4 Nuttx控制台终端。
ParamUpdate（自定义存储类参数更新模块）该模块为更新自定义的PX4软件参数。

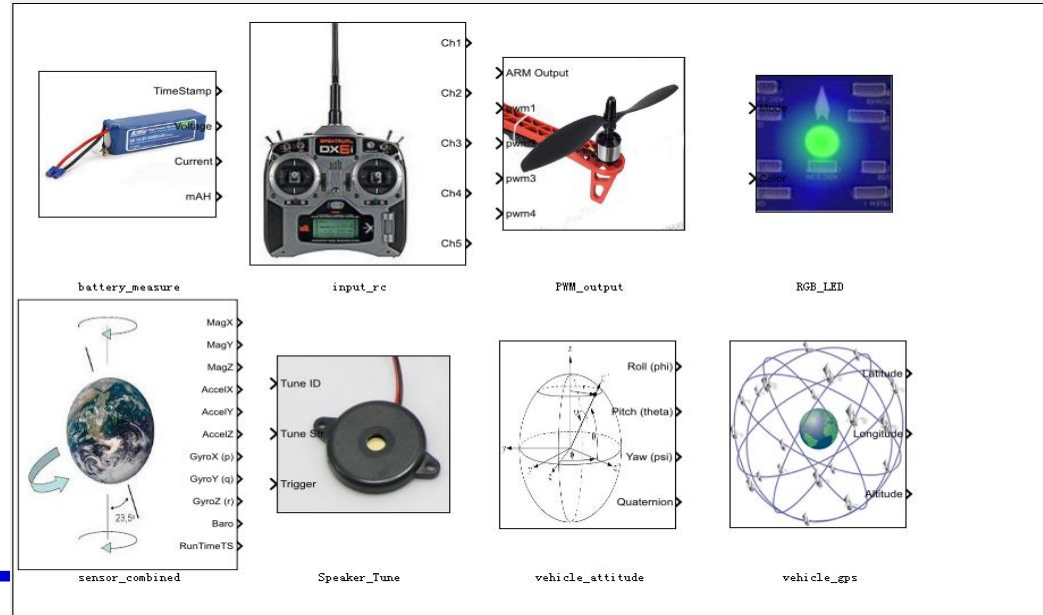




2. 底层开发接口及功能介绍

2.3 Simulink/PSP工具箱模块接口

Sensors and Actuators—传感器和执行器接口库：Battery_measure（电池数据模块）、Input_rc（遥控器输入模块）PWM_output（电机PWM模块）、RGB_LED（LED灯）、sensor_combined（传感器组合模块）、Speaker_Tune（蜂鸣器模块）、vehicleattitude（姿态数据模块）、vehiclegps（GPS数据模块）。相关例程详细说明可见：0.ApiExps\11.StateDataGatAPI\Readme.pdf



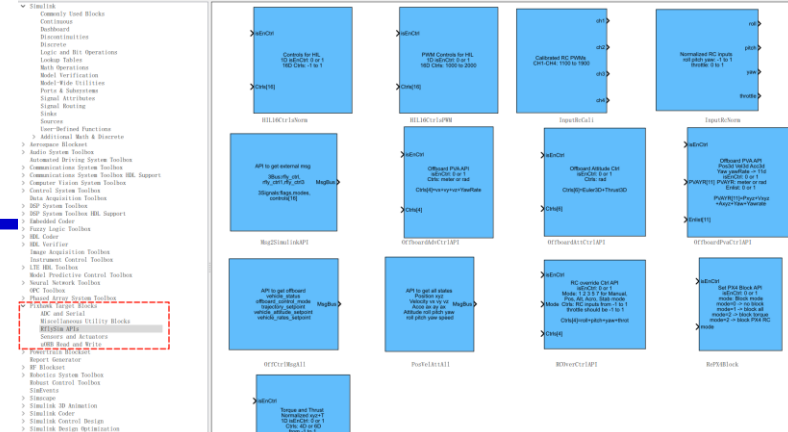


2. 底层开发接口及功能介绍

2.3 Simulink/PSP工具箱模块接口

RflySim APIs—RflySim平台自定义接口库:

- **HIL16CtrlsNorm**: 硬件在环16维归一化控制信号模块, 相关例程详细说明可见: [0.ApiExps\11.StateDataGatAPI\Readme.pdf](#)。
- **HIL16CtrlsPWM**: 硬件在环16维PWM控制信号模块, 相关例程详细说明可见: [0.ApiExps\11.StateDataGatAPI\Readme.pdf](#)。
- **InputRcCali**: 校准遥控器PWM模块, 相关例程详细说明可见: [0.ApiExps\15.InputSourceAPI\Readme.pdf](#)。
- **InputRcNorm**: 遥控器信号归一化模块, 相关例程详细说明可见: [0.ApiExps\15.InputSourceAPI\Readme.pdf](#)。
- **Msg2SimulinkAPI**—rfly_ctrl消息不同ID数据输出模块, 相关例程详细说明可见: [0.ApiExps\9.PX4CtrlExternalTune\Readme.pdf](#)
- **OffboardAdvCtrlAPI**—Offboard模式高级控制模块, 相关例程详细说明可见: [0.ApiExps\17.OffboardCtrlsAPI\Readme.pdf](#)
- **OffboardAttCtrlAPI**—Offboard模式姿态控制模块, 相关例程详细说明可见: [0.ApiExps\17.OffboardCtrlsAPI\Readme.pdf](#)
- **OffCtrlMsgAll**—Offboard模式相关控制消息, 相关例程详细说明可见: [0.ApiExps\17.OffboardCtrlsAPI\Readme.pdf](#)
- **PosVelAttAll**—载具状态量获取模块, 相关例程详细说明可见: [0.ApiExps\11.StateDataGatAPI\Readme.pdf](#)
- **RCOverCtrlAPI**—遥控器手动控制信号的覆盖模块, 相关例程详细说明可见: [0.ApiExps\15.InputSourceAPI\Readme.pdf](#)
- **RePX4Block**—在线屏蔽PX4输出模块, 相关例程详细说明可见: [2.AdvExps\10 AdvApiExps\5.RePX4Func\Readme.pdf](#)
- **TorqueThrustCtrls**—力和力矩控制信号模块, 相关例程详细说明可见: [0.ApiExps\17.OffboardCtrlsAPI\Readme.pdf](#)





2. 底层开发接口及功能介绍

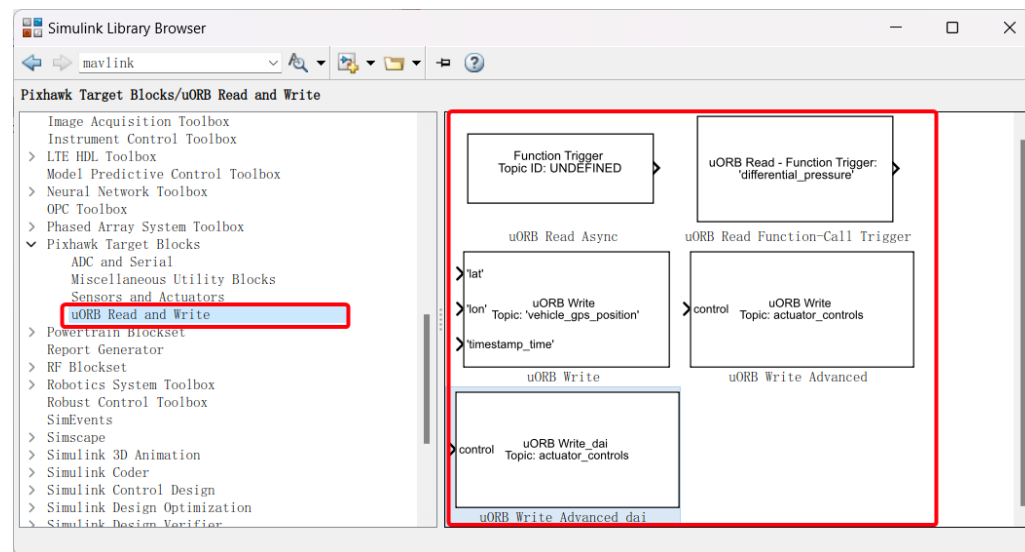
2.3 Simulink/PSP工具箱模块接口

uORB Read and Write—uORB消息读取和写入库：

- uORB Read Async—获取与uORB Topic相关的数据。
- uORB Read Function-Call Trigger—uORB消息读取回调函数触发模块。
- uORB Write—uORB消息数据发布接口模块。
- uORB Write Advanced—uORB消息数据发布接口高级模块。
- uORB Write Advanced_dai—uORB消息数据发布接口进阶模块。

具体例程实验见文件：

- ✓ [0.ApiExps\5.Log-Write-Read\Readme.pdf](#)
- ✓ [0.ApiExps\6.uORB-Read-Write\Readme.pdf](#)





2. 底层开发接口及功能介绍

2.3 MATLAB命令行接口

序号	命令	简介	执行方式	相关例程
1	PX4Upload	上传PX4固件到飞控中。	在MATLAB命令行直接运行：PX4Upload	/
2	PX4CMD	固件编译选项替换。	如需切换到Pixhawk6C飞控的编译环境，可进行如下操作：PX4CMD('px4_fm-v6c_default')或PX4CMD px4_fm-v6c_default	/
3	PX4Build	进行固件编译。	在MATLAB命令行直接运行：PX4Build	/
4	PX4AppName	重命名PX4软件中 'px4_simulink_app' 模块名称，使得支持多个自动代码生成程序。	PX4AppName('rfly_simulink_app')或PX4AppName'rfly_simulink_app'	2.AdvExps\AdvApiExps\1.CusMaskPX4Code\Readme.pdf 、 2.AdvExps\AdvApiExps\2.RenamePX4App\Readme.pdf
5	PX4AppLoad	加载重命名的PX4软件的App，用于导入之前开发的APP程序。	PX4AppLoad('C:\PX4PSP\rfly_simulink_app')或PX4AppLoad 'C:\PX4PSP\rfly_simulink_app'	2.AdvExps\AdvApiExps\3.LoadPX4App\Readme.pdf



2. 底层开发接口及功能介绍

2.3 MATLAB命令行接口

序号	命令	简介	执行方式	相关例程
6	PX4ModiFile	通过Excel方式进行替换PX4软件中的部分代码。	PX4ModiFile('C:\Users\dream\Desktop\自定义屏蔽UORB消息的例子px4Block.xlsx')	2.AdvExps\AdvApiExps\1.CusMaskPX4Code\Readme.pdf 、 2.AdvExps\AdvApiExps\2.RenamePX4App\Readme.pdf
7	PX4Official	通过执行命令，可以直接生成官方固件（未带输出屏蔽），可以用于还原飞控进行HITL的外部控制，或修复有问题的飞控。	在MATLAB命令行直接运行：PX4Official	/
8	PX4SitlSet	使得当前自动代码生成的控制器px4_simulink_app，支持SITL仿真。使用方法：Simulink程序，点击Build生成硬件在环的.px4文件后，直接运行PX4SitlSet，然后运行SITLRun（常规四旋翼），或其他由DLL模型驱动SITL仿真脚本，即可对自动代码生成的算法硬件软件在环仿真。	在MATLAB命令行直接运行：PX4SitlSet	0.ApiExps\14.SITLVeriGenCodeFirm\Readme.pdf
9	PX4SitlRec	在SITL仿真的代码中，剔除掉自动代码生成控制器的px4_simulink_app，回归到正常的软件在环仿真模式，重新支持QGC控制以及Offboard外部控制。注意：运行PX4SitlSet测试完Simulink的控制器，如果再要运行平台的官方视觉或外部控制等例程，请先使用PX4SitlRec还原环境。	在MATLAB命令行直接运行：PX4SitlRec	



2. 底层开发接口及功能介绍

2.4 自动代码生成外部通信接口

RflySim在运行一键安装脚本时，平台会对Firmware目录下的源码进行修改，在其中增加了4个uORB消息，并在*\PX4PSP\Firmware\msg\CMakeLists.txt中已进行注册，详细介绍可见[API.pdf](#)文件。

- rfly_ctrl.msg: 从外部通过UDP或mavlink协议传输进到PX4内部。
- rfly_ext.msg: 从DLL模型直接传输进到PX4内部。
- rfly_px4.msg: 将PX4内部数据，通过UDP或mavlink协议传输外部。
- rfly_insils.msg: 用于PX4内部数据传输使用。

相关例程可见：[0.ApiExps\9.PX4CtrlExternalTune\Readme.pdf](#)。



2. 底层开发接口及功能介绍

2.5 飞行日志记录接口

仿真真值数据分析：① 离线获取方式，对于第i号飞机，只需要在PX4PSP\CopterSim下新建一个CopterSim+i+.csv的文件（例如，CopterSim1.csv），然后每次仿真后会记录仿真真值数据（同RflySim3D接收数据，包含了位置、速度、电机转速等信息）。详细操作步骤请见：<..\2.RflySimUsage\1.BasicExps\e14 Log-Get\Readme.pdf>。② 在线获取方式，RflySim提供两种方式的仿真数据获取和分析，方式一：MATLAB/Simulink版的详细操作步骤见：..\10.RflySimSwarm\0.ApiExps\6.DataAnalysis_Mat\Readme.pdf；方式二：Python版的详细操作步骤见：..\10.RflySimSwarm\0.ApiExps\7.DataAnalysis_Py\Readme.pdf。

飞行数据分析：离线 Log 分析，离线 Log 日志分析详细操作步骤见：<..\2.RflySimUsage\1.BasicExps\e4 Log-Reads-Python38Env\Readme.pdf>。在线Log分析，访问<https://logs.px4.io/>上传ulog文件，即可分析。



2. 底层开发接口及功能介绍

2.6 控制器与外部数据通信接口

控制器与外部的接口指的是控制器的输出如何作用到动力学模型或硬件，实现仿真或实飞。

- **actuator_output**消息：HIL仿真接口。
- **pwm_output**消息：HIL&实飞接口。
- **actuator_control_0**消息：HIL&实飞接口。
- **TorqueThrustCtrls**消息：力和力矩控制信号模块，支持仿真和实飞。



2. 底层开发接口及功能介绍

2.6 代码屏蔽与替换接口

基于RflySim底层控制算法开发时，为了验证所开发的控制算法，我们需要屏蔽掉PX4软件中的输出，在大多数情况下，我们只需要直接屏蔽掉PX4软件系统中的电机输出即可。但是，某些特定开发任务需要屏蔽的是PX4软件系统中某个模块的某个中间量，以此满足开发需求。

相关例程的具体说明可见：[2.AdvExps/e0 AdvApiExps\1.CusMaskPX4Code\Readme.pdf。](#)

2.7 多模块并行开发接口

RflySim平台最新版支持快速创建多个模块并行开发的功能，基于PX4软件系统中的多进程运行状态，MATLAB自动代码生成的PX4应用名称为：`px4_simulink_app`，可通过“MATLAB命令行接口”中的PX4应用重命名的方式，将`px4_simulink_app`改名，这样就可以继续通过Simulink搭建模型生成另一个`px4_simulink_app`名称的应用，若要再次新增应用可继续进行名称修改，以此类推，理论上可实现众多PX4的应用创建，以满足开发需求。具体接口使用详见实验文件：[2.AdvExps/e0 AdvApiExps\4.MultPX4App\Readme.pdf。](#)



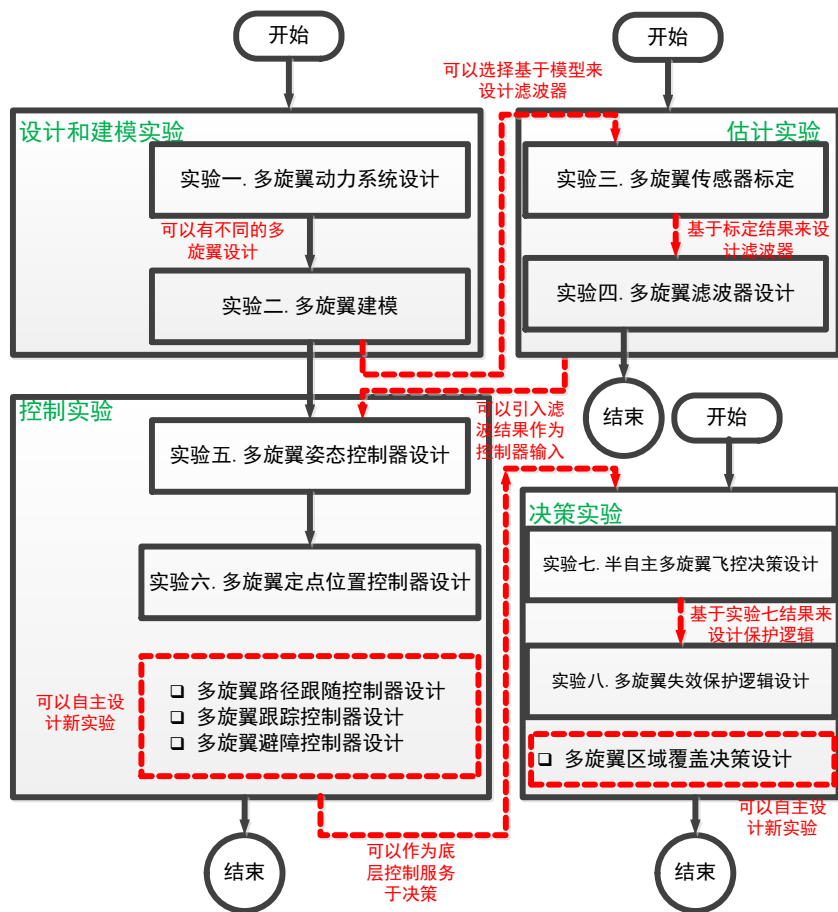
目录

1. 实验平台配置及仿真流程
2. 底层开发接口及功能介绍
3. 基础案例实验介绍
5. 进阶案例实验介绍
6. 高阶案例实验介绍（完整版）
7. 小结



3.进阶实验

3.0 进阶实验总览



■ 本平台提供的例程可以保证每个实验或者每个板块的实验可以被**单独完成**

■ 为了使任务目标有差异化，我们课程可以按照一种递进的结构完成。递进路线可以分为：

(1) 设计和建模实验 -> 控制实验

(2) 设计和建模实验 -> 控制实验-> 决策实验

(3) 设计和建模实验 -> 估计实验-> 控制实验-> 决策实验

■ 需要**设计不同的飞行器**，这样将会使**模型各不相同**，而且**建模方法也可以各不相同**，**控制实验的设计也各不相同**。

■ 教师还可以自行**增加附加实验**



3. 基础实验案例

3.0 进阶实验总览

打开例程，阅读并运行程序代码，然后观察并记录分析数据。

指导读者修改例程，运行修改后的程序并收集和分析数据。

在上述两个实验的基础上，针对给定的任务，进行独立的设计。



3. 基础实验案例

3.0 进阶实验总览

表. 实验类型、目标和内容

目标	基础实验	分析实验	设计实验
熟悉开发平台	✓	✓	✓
熟悉分析过程	×	✓	✓
熟悉设计方法	×	×	✓
进行软件在环仿真	✓	✓	✓
进行硬件在环仿真	✓	✓	✓
实际实验测试	×	×	✓



3. 基础实验案例

3.1 动力系统设计实验

本实验的目标如下：

- 1、利用[多旋翼飞行评估网站](#)，设计多旋翼飞行器动力系统；
- 2、根据已知信息，设计出多旋翼飞行器的动力系统并与[多旋翼飞行评估网站](#)生成的参数进行对比，分析在不同城市、温度、螺旋桨大小和数量对多旋翼飞行器的悬停事件影响。

具体实验原理请学习进阶版课程，实验操作步骤见文件 [1.BasicExps\e1-FlightEval\Readme.pdf](#)。

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.1 动力系统设计实验

实验效果如下(部分):

详细信息					
悬停性能:		最大油门性能:		整体性能:	
悬停时间	: 22.5 min.	飞行时间	: 7 min.	正常使用	: 17.8 min.
油门百分比	: 63.6 %	总升力	: 94.3 N	整机重量	: 4.56 kg
电调电流	: 6.69 A	电机电流	: 21.8 A	剩余载重	: 2.8 kg
电机转速	: 4623.5 rpm	电机转速	: 6716.3 rpm	最大起飞海拔	: 3.85 km
电机输出功率	: 132.2 W	电机输出功率	: 417.8 W	最大倾斜角度	: 51.7 °
电池输出电压	: 23.7 V	电池输出电压	: 22.9 V	最大平飞速度	: 12.4 m/s
电池输出电流	: 27.2 A	电池输出电流	: 87.3 A	单程飞行距离	: 8.5 km
能量效率	: 80.9 %	能量效率	: 79.8 %	抗风等级	: 4 级

地点	海拔/m	悬停时间/min
上海	4	16.5
北京	43.5	16.5
长沙	500	16.1
拉萨	3658	13.5

螺旋桨尺寸/英寸	悬停时间/min
10	17
9.4	16.5
9	15.9
8	14.5

温度/°C	悬停时间/min
0	17.1
10	16.8
20	16.6
40	16.1

更多详细接口请见: [API](#), 更多例程请见: [Readme](#)。





3. 基础实验案例

3.2 动态建模实验

本实验的目标如下：

1、分析多旋翼总质量、转动惯量矩阵、螺旋桨推力系数、螺旋桨拉力系数对整个多旋翼飞行性能产生的影响。

2、建立完整的多旋翼飞行器模型，并在RflySim3D中添加四旋翼的三维模型。

具体实验原理请学习进阶版课程，实验操作步骤见文件 [1.BasicExps\e2-UavModeling\Readme.pdf](#)。

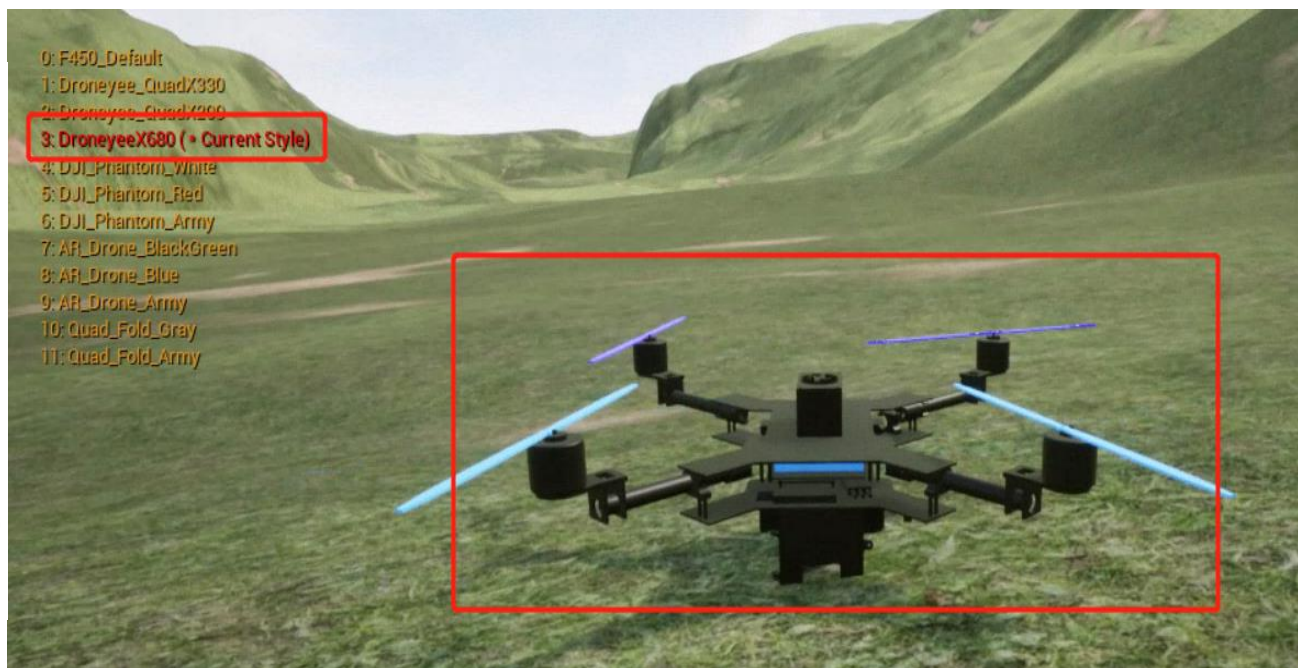
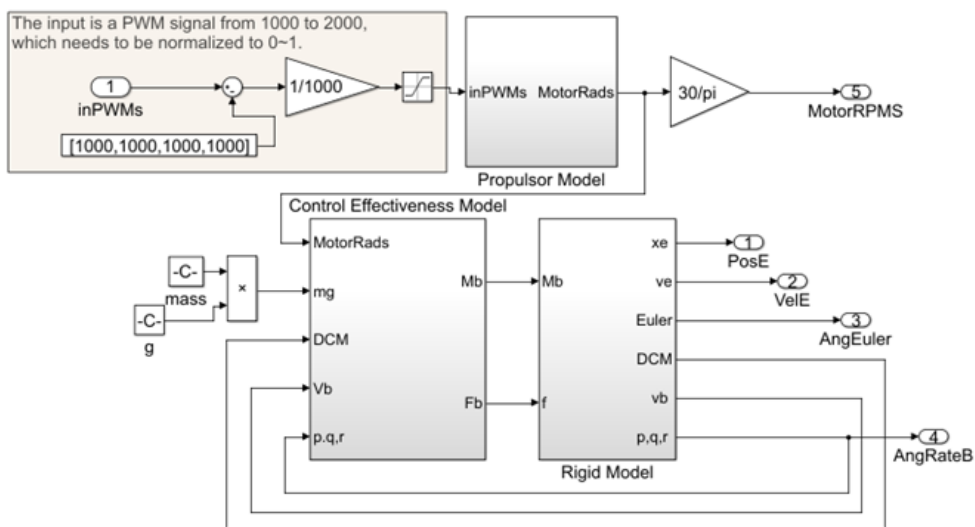
更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.2 动态建模实验

实验效果如下(部分):



更多详细接口请见: [API](#), 更多例程请见: [Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.3 传感器标定实验

本实验的目标如下：

- 1、根据实验步骤完成加速度的标定。
- 2、根据给出的磁力计误差模型，设计磁力计数据采集模型，用测得的数据和LM 算法函数求出模型参数的最优解，完成磁力计的标定。

具体实验原理请学习进阶版课程，实验操作步骤见文件 [1.BasicExps\3-SensorCalib\readme.pdf](#)。

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.3 传感器标定实验

实验效果如下(部分):

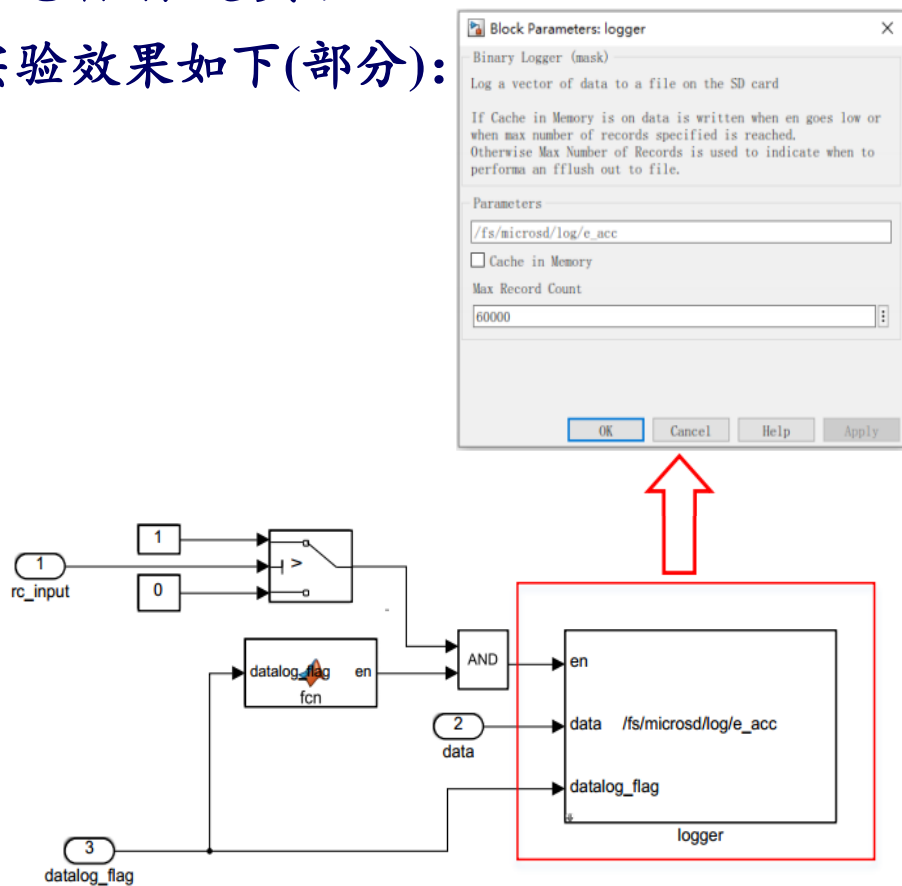


图. 加速度数据采集“binary_logger”模块

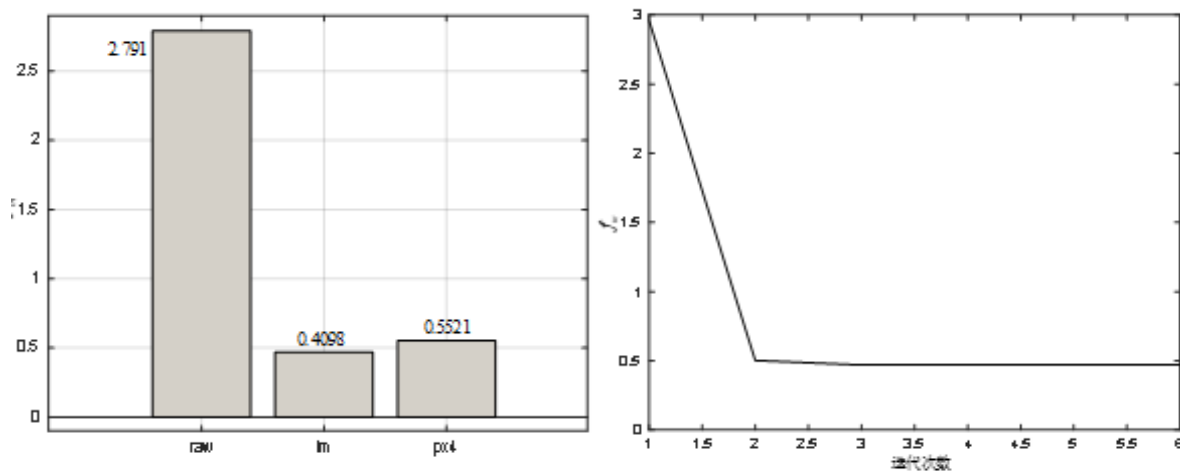


图. 磁力计校正对比值

更多详细接口请见: [API](#), 更多例程请见: [Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.4 传感器标定实验

本实验的目标如下：

1、根据实验中所提供的数据，完成互补滤波，与原数据和Pixhawk自带的滤波器算出的数据进行比较，以理解互补滤波器的优点。

2、改进互补滤波器中的参数，分析互补滤波器参数对滤波效果的影响。

3、理解卡尔曼滤波原理，设计卡尔曼滤波器实现滤波器，处理加速度和角速度数据，并绘制出相关姿态角得数据图。

具体实验原理请学习进阶版课程，实验操作步骤见文件 [1.BasicExps\e4-FilterDesign\Readme.pdf](#)。

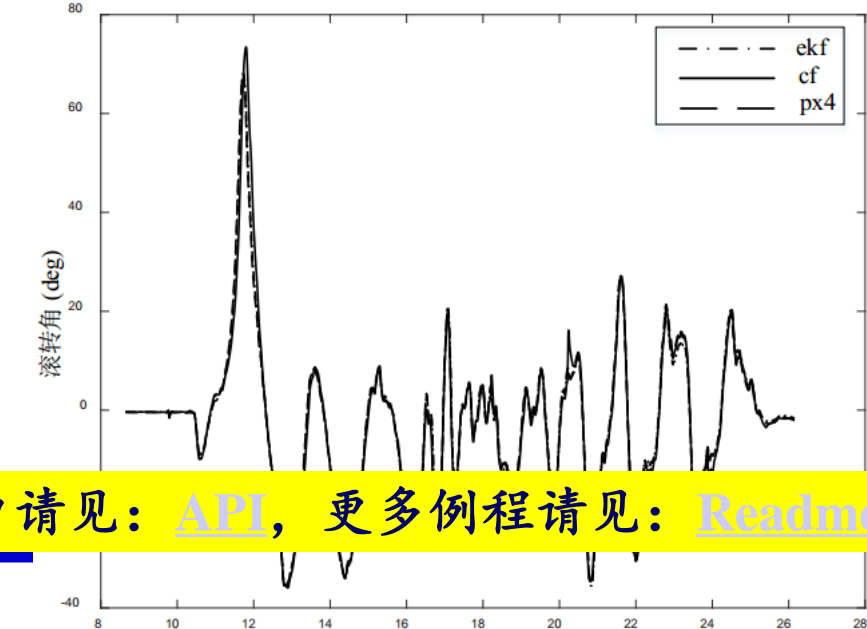
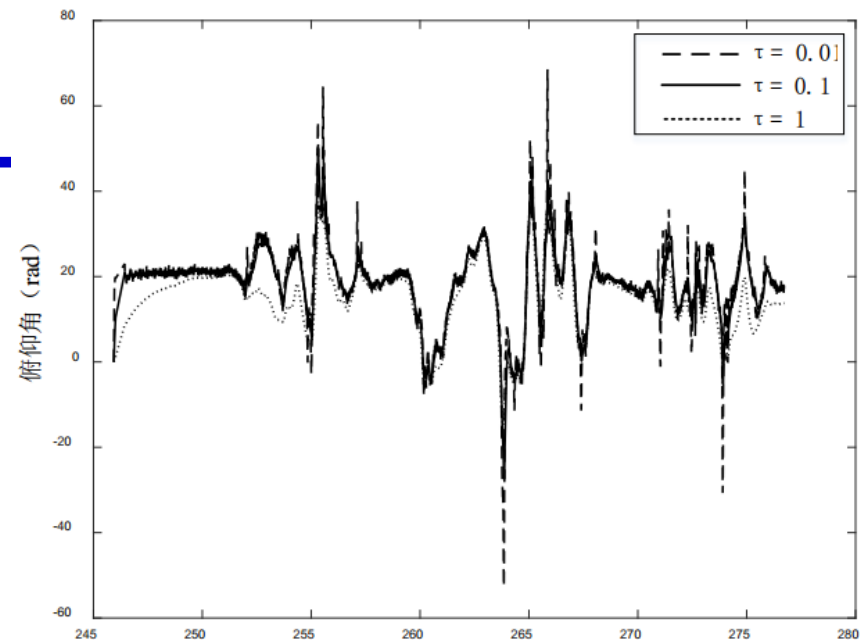
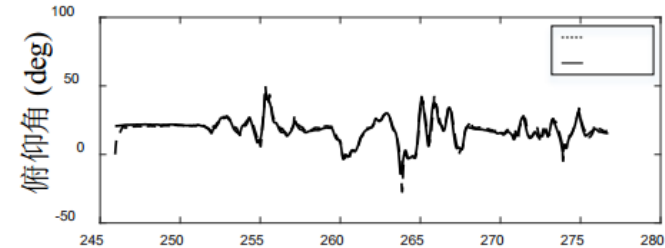
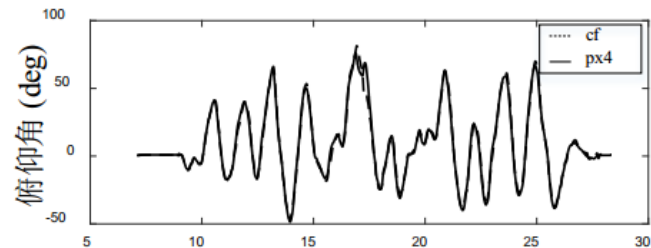
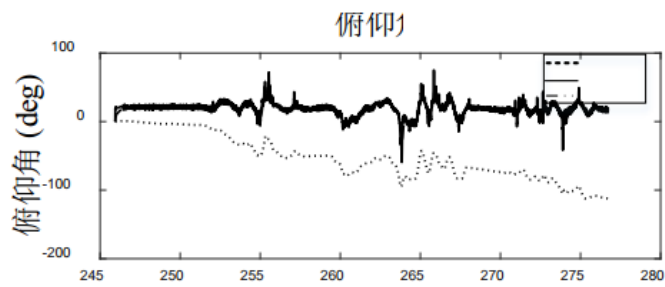
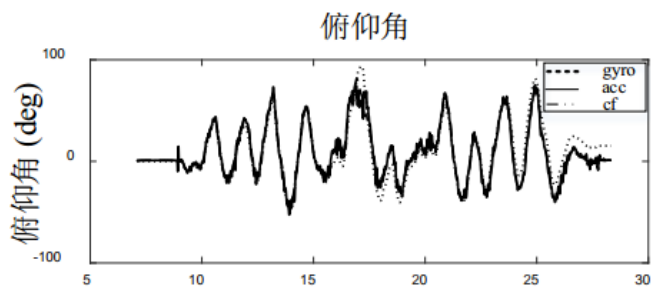
更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.4 传感器标定实验

实验效果如下(部分):



更多详细接口请见: [API](#), 更多例程请见: [Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.5 姿态控制器设计实验

本实验的目标如下：

1、复现四旋翼飞行器的Simulink仿真，分析控制分配器的作用；记录姿态的阶跃响应，并对开环姿态控制系统进行扫频以绘制Bode图，分析闭环姿态控制系统的稳定裕度；完成四旋翼硬件在环仿真。

2、调节PID控制器相关参数以改善控制性能并记录超调量和调节时间，得到一组恰当参数；使用调试后的参数，对系统进行扫频以绘制Bode图，观察系统幅频响应,相频响应曲线，分析其稳定裕度。

3、建立姿态控制通道的传递函数模型，设计校正控制器；使用自己设计得控制器进行软、硬件仿真实验及实飞实验。

具体实验原理请学习进阶版课程，实验操作步骤见文件 [1.BasicExps\e5-AttitudeCtrl\Readme.pdf](#)。

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。

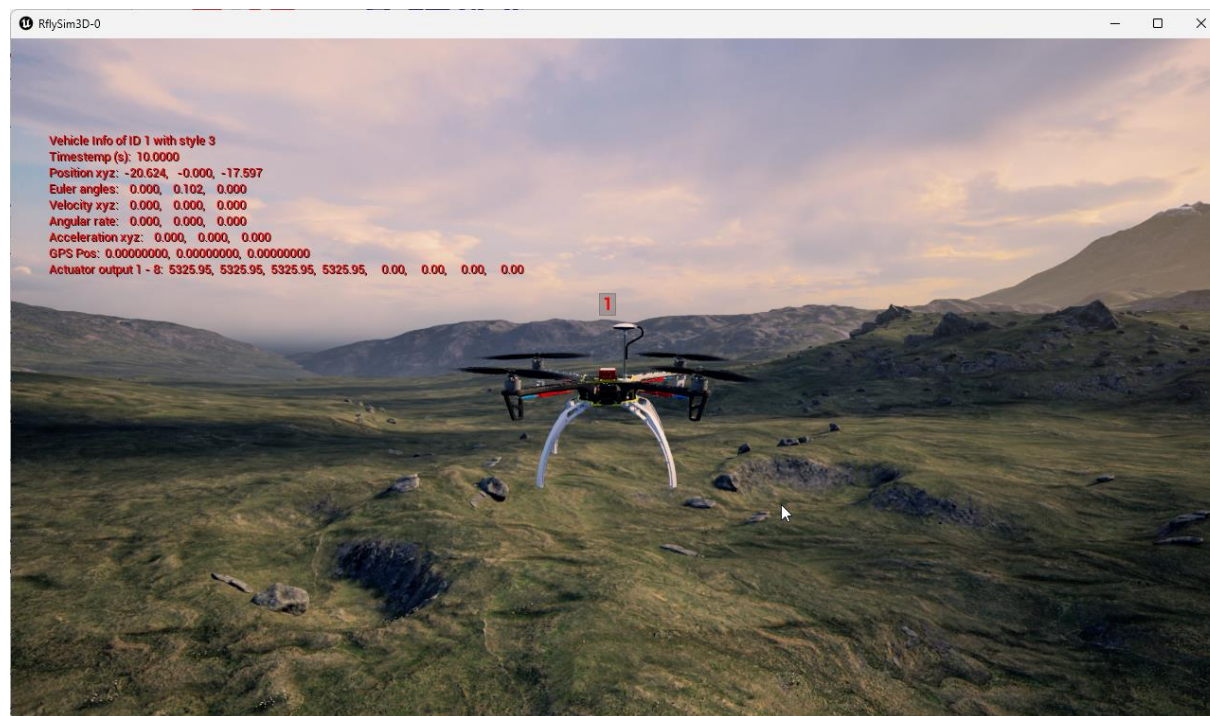
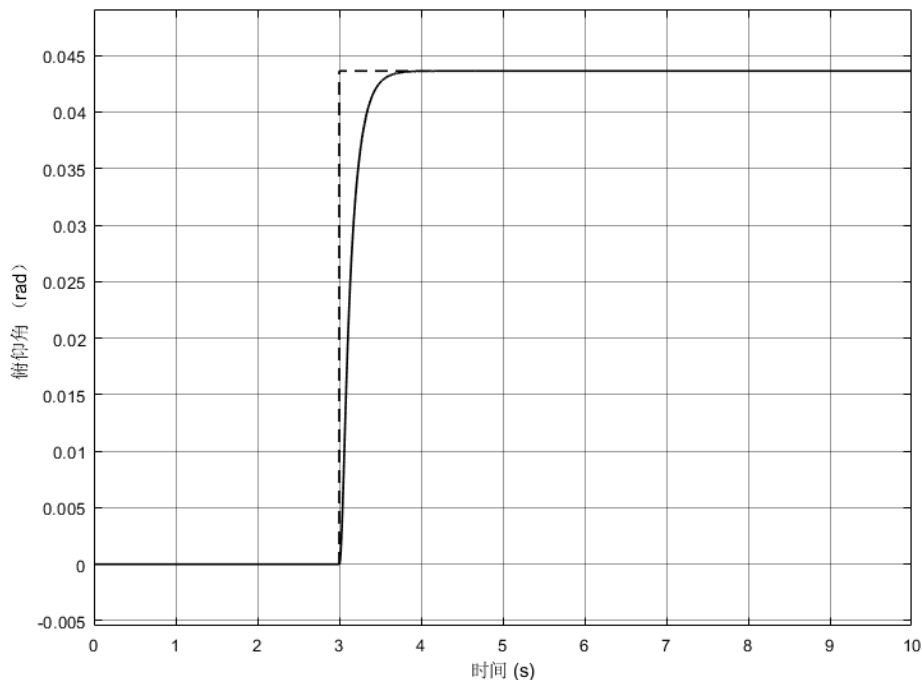




3. 基础实验案例

3.5 姿态控制器设计实验

实验效果如下(部分):



更多详细接口请见: [API](#), 更多例程请见: [Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.6 定点位置控制器设计实验

本实验的目标如下：

1、复现四旋翼Simulink仿真，分析控制作用在 $O_b x_b$ 轴和 $O_b y_b$ 轴的解耦；对系统进行扫频以绘制bode图，分析闭环位置控制系统稳定裕度。

2、调节PID控制器的相关参数改善系统控制性能；在得到满意参数后，对系统进行扫频以绘制Bode图。

3、建立位置控制通道的传递函数模型，使用MATLAB“ControlSystemDesigner”设计校正控制器，并调节系统误差、相对裕度等参数。

具体实验原理请学习进阶版课程，实验操作步骤见文件 [1.BasicExps\e6-PositionCtrl\Readme.pdf](#)。

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.6 定点位置控制器设计实验

实验效果如下(部分):

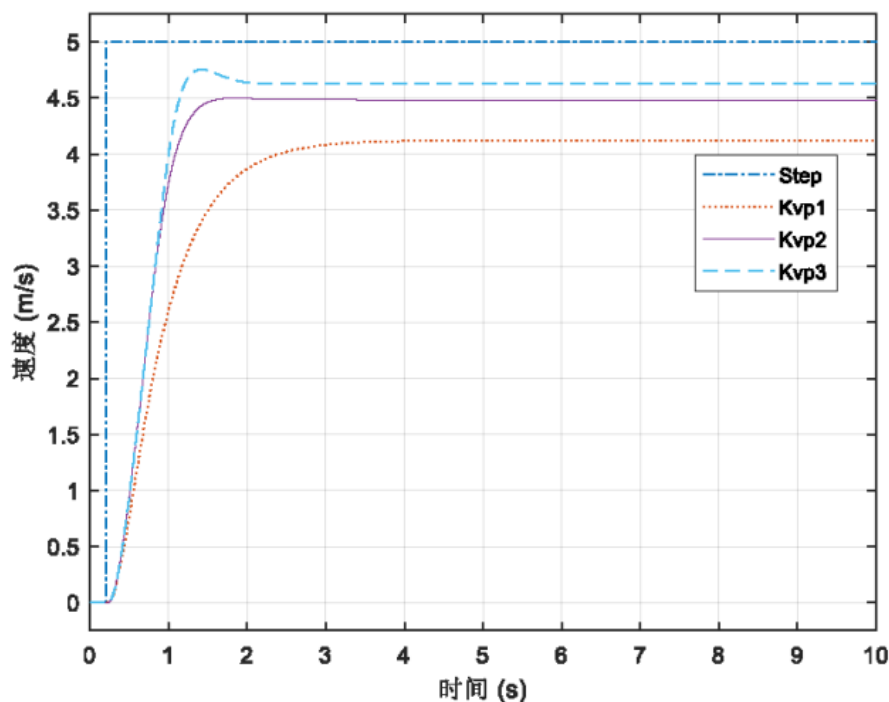
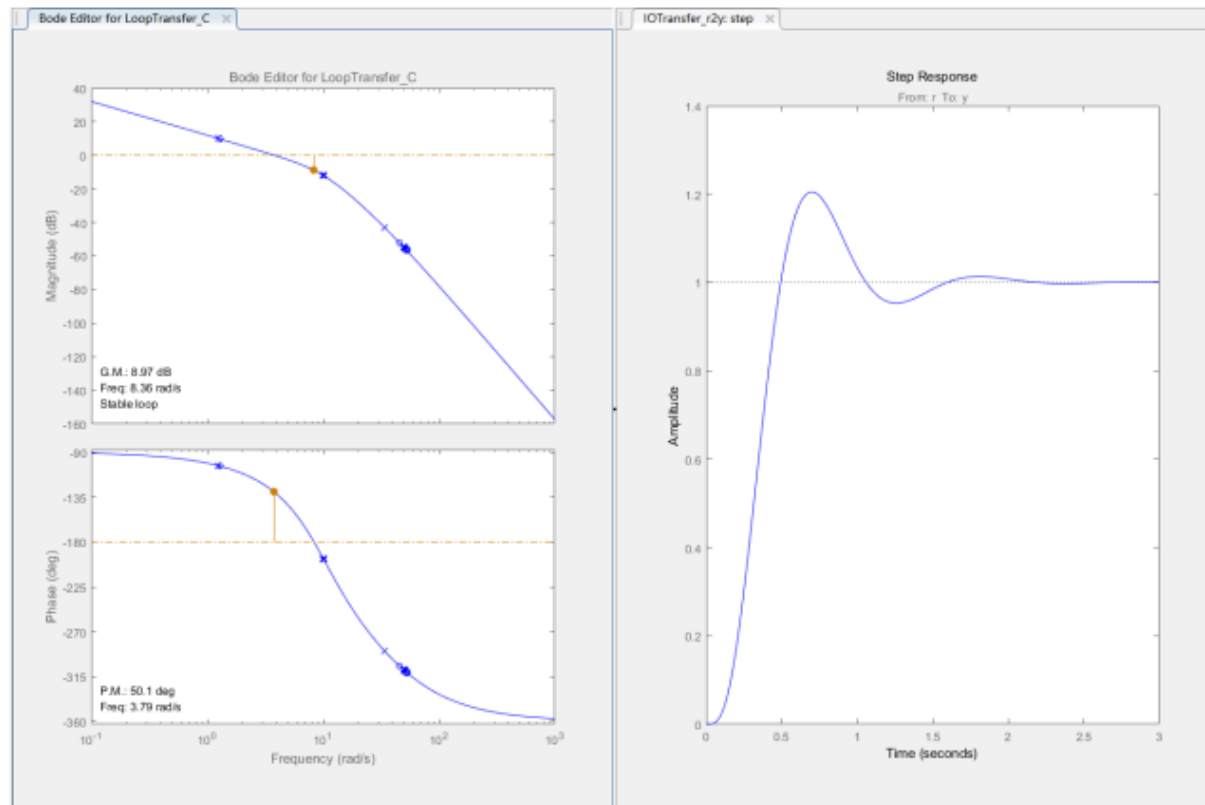


图. 不同比例项系数下的阶跃响应



更多详细接口请见: [API](#), 更多例程请见: [Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.7 半自主控制模式设计实验

本实验的目标如下：

- 1、在基于Simulink的控制器设计与仿真平台上，复现仿真实验分析四旋翼姿态和位置响应的特点；
- 2、在自稳模式的基础上改成定高模式。根据实验分析，与自稳模式相比，多旋翼在定高模式下姿态和位置输出值的变化。
- 3、在自稳模式的基础上改成定点模式。根据实验分析，与自稳模式相比，多旋翼在定点模式下姿态和位置输出值的变化；并利用三段拨码开关实现三种模式的自由切换。

具体实验原理请学习进阶版课程，实验操作步骤见文件 [1.BasicExps\7-SemiAutoCtrl\Readme.pdf](#)。

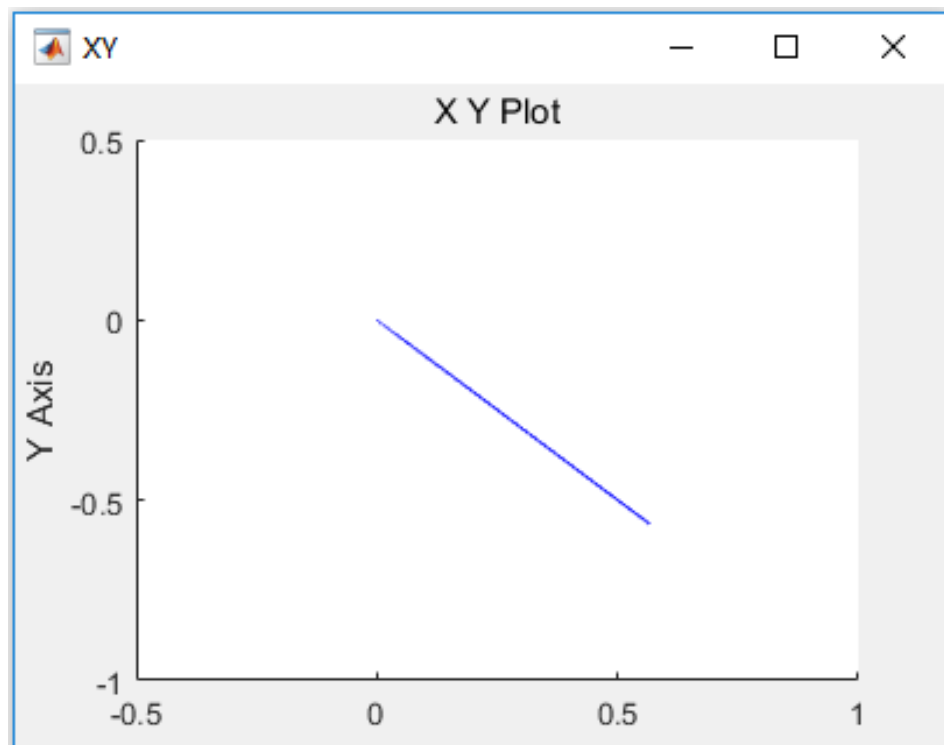
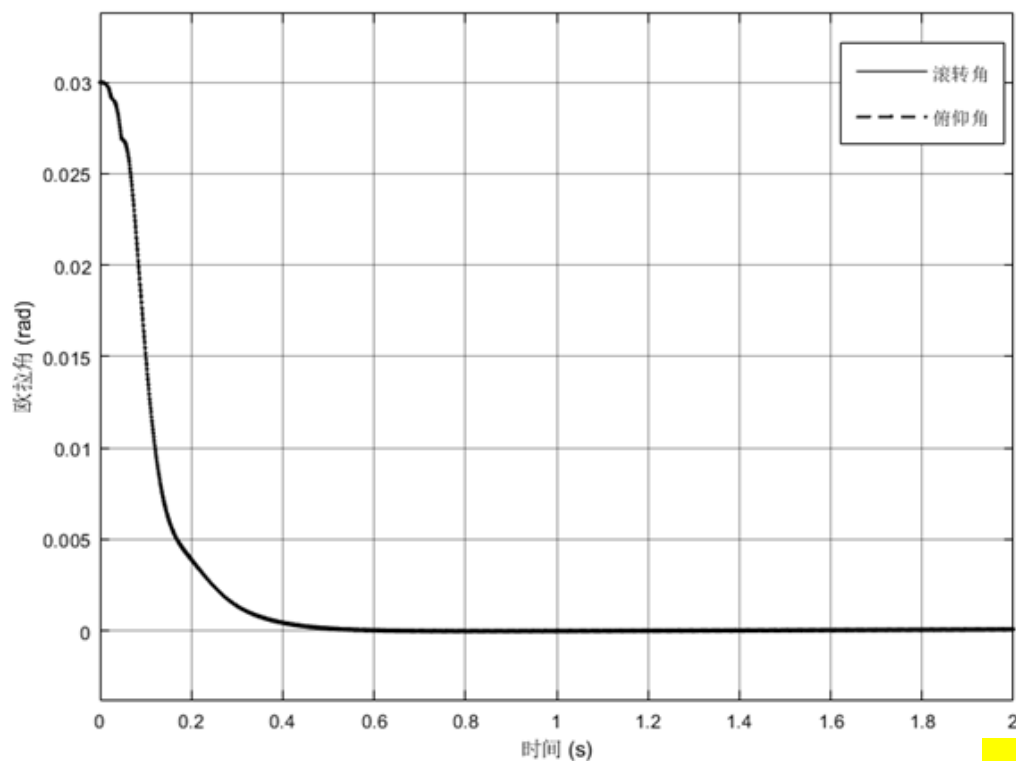
更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.7 半自主控制模式设计实验

实验效果如下(部分):



更多详细接口请见: [API](#), 更多例程请见: [Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.8 失效保护逻辑设计实验

本实验的目标如下：

- 1、在Simulink仿真环境中，在手动模式下，实现飞行器的返航与着陆，并记录和分析仿真结果。
- 2、在基础实验的基础上，添加相应的状态转移，在手动模式下，实现飞行器的返航和着陆，并且返航和着陆之间可以相互切换。
- 3、在前面实验的基础上，增加遥控器断电失联事件，完成新的模态和切换设计，即加入失效返航和失效着陆两个状态，完成状态机的设计。

具体实验原理请学习进阶版课程，实验操作步骤见文件 [1.BasicExps\8-FailsafeLogic\Readme.pdf](#)。

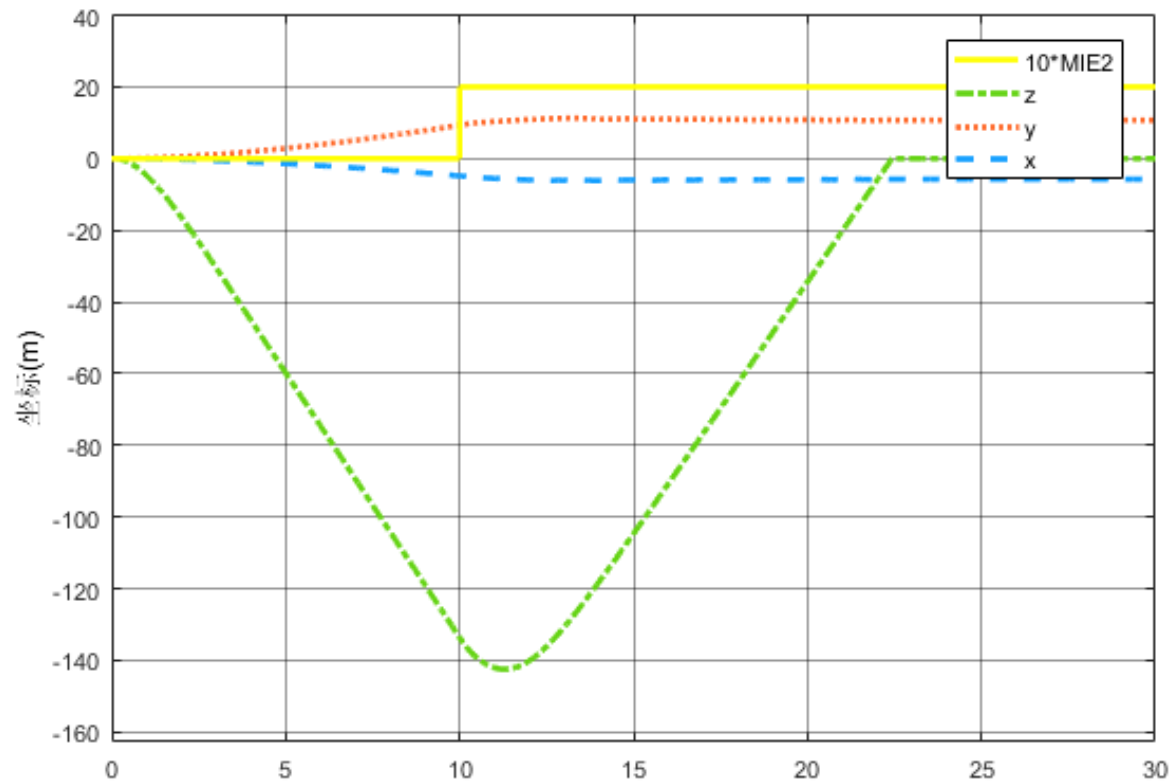
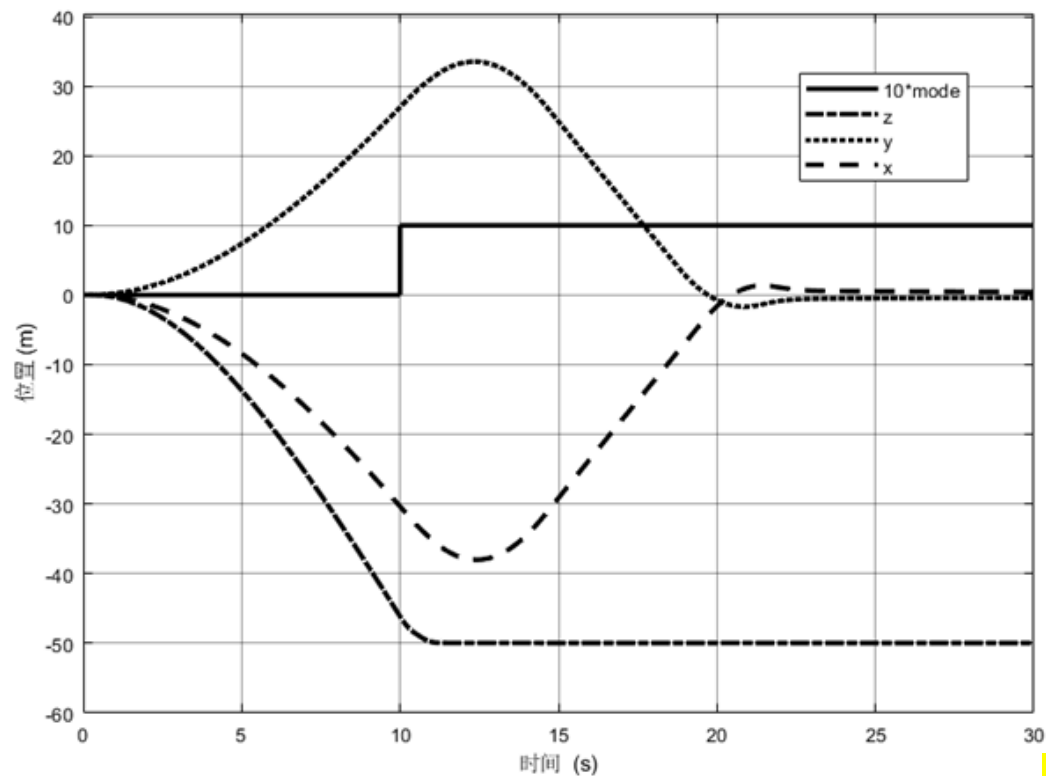
更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.8 失效保护逻辑设计实验

实验效果如下(部分):



更多详细接口请见: [API](#), 更多例程请见: [Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.9 PX4模块替换实验

本实验的目标如下：

实现利用生成的Simulink代码快速替换PX4控制软件的某些原生模块(传感器、滤波器、姿态控制器等)，该实验提供两种方法来实现，分别是：

- 1、打开“Firmware\src\modules\ekf2\ekf2_main.cpp”文件，手动注释掉需屏蔽的模块代码；
- 2、修改PX4模块启动脚本文件“Firmware\ROMFS\px4fmu_common\init.d\rcS”，并注释掉需屏蔽的模块。

具体实验原理请学习进阶版课程。实验操作步骤见文件 [1.BasicExps\e9-ReplacePX4Module\Readme.pdf](#)。

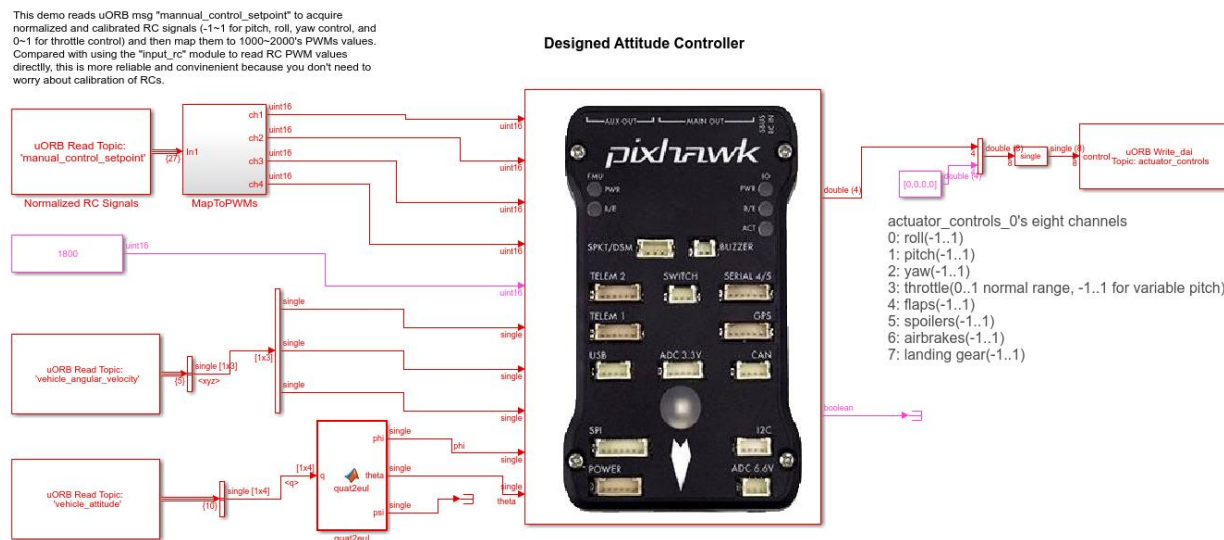
更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



3. 基础实验案例

3.9 PX4模块替换实验

本实验对“Position & Attitude Estimator”滤波器模块进行了屏蔽，将2.3小节(姿态控制器设计实验)进行改造，搭建了“Exp6_ReplacePX4AttitudeCtrler.slx”模型，如下：



注：在本实验开发完成后，请务必将修改的代码回归原位，以免影响其他功能的开发。

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



目录

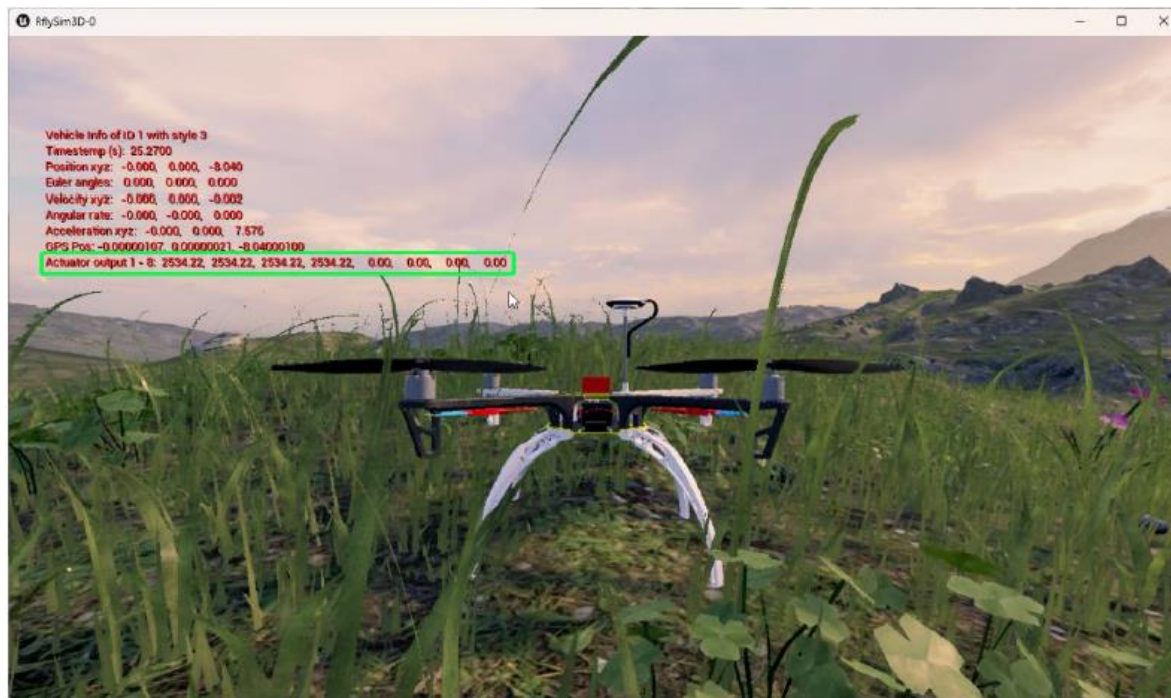
1. 实验平台配置及仿真流程
2. 底层开发接口及功能介绍
3. 基础案例实验介绍
5. 进阶案例实验介绍
6. 高阶案例实验介绍（完整版）
7. 小结



4. 进阶接口实验

4.1 自定义屏蔽PX 4中任意模块输出

本实验通过替换PX4中的姿态角速率环的uORB消息“actuator_controls_0”语句和替换修改好的CPP文件替换的方式屏蔽PX4相关功能为例详细阐述实验步骤。具体操作步骤见文件 [2. AdvExps\e0 AdvApiExps\1.CusMaskPX4Code\Readme.pdf](#)，(部分)实验效果如下：



更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



4. 进阶接口实验

4.2 重命名PX4应用名称实验：

基于PX4软件系统中的多进程运行状态，MATLAB自动代码生成的PX4应用名称为：`px4_simulink_app`，本实验可将其进行重命名并新增创建一个全新的应用在PX4软件系统中并编译。具体操作步骤见文件 [2.AdvExps/e0 AdvApiExps/2.RenamePX4App\Readme.pdf](#)，(部分)实验效果如下：

```
>> PX4AppName 'rfly_simulink_app'  
Firmware目录中已存在rfly_simulink_app目录。  
当前的编译命令为: px4_fmu-v5_default  
成功找到px4_fmu-v5_default的cmake文件  
重命名完成。  
开始重新添加px4_simulink_app模版...
```

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



4. 进阶接口实验

4.3 加载PX 4应用 实验：

RflySim 平台支持加载自定义开发完成的 PX 4 应用，根据本实验所提供的 PX 4 应用程序可直接加载到 PX 4 软件系统中进行固件编译。具体操作步骤见文件 [2.Adv Exps\3.LoadPX4App\Readme.pdf](#)，(部分)实验效果如下：

```
>> PX4AppLoad('C:\PX4PSP\rfly_simulink_app')
当前的编译命令为: px4_fmu-v5_default
Firmware目录中已存在rfly_simulink_app目录。
当前的编译命令为: px4_fmu-v5_default
成功找到px4_fmu-v5_default的cmake文件
重命名完成。
开始重新添加px4_simulink_app模版...
```

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



4. 进阶接口实验

4.4 创建多个PX4应用实验：

基于PX4软件系统中的多进程运行状态，MATLAB自动代码生成的PX4应用名称为：`px4_simulink_app`，本实验可将其进行重命名后，再通过MATLAB自动代码生成新的PX4应用，以此即可实现同时创建多个PX4应用。具体操作步骤见文件 [2.AdvExps\AdvApiExps\4.MultPX4App\Readme.pdf](#)，(部分)实验效果如下：

```
>> PX4AppName 'rfly_simulink_app'  
Firmware目录中已存在rfly_simulink_app目录。  
当前的编译命令为: px4_fmu-v5_default  
成功找到px4_fmu-v5_default的cmake文件  
重命名完成。  
开始重新添加px4_simulink_app模版...
```

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



4. 进阶接口实验

4.4 创建多个PX4应用实验：

基于PX4软件系统中的多进程运行状态，MATLAB自动代码生成的PX4应用名称为：`px4_simulink_app`，本实验可将其进行重命名后，再通过MATLAB自动代码生成新的PX4应用，以此即可实现同时创建多个PX4应用。具体操作步骤见文件 [2.AdvExps\AdvApiExps\4.MultPX4App\Readme.pdf](#)，(部分)实验效果如下：

```
>> PX4AppName 'rfly_simulink_app'  
Firmware目录中已存在rfly_simulink_app目录。  
当前的编译命令为: px4_fmu-v5_default  
成功找到px4_fmu-v5_default的cmake文件  
重命名完成。  
开始重新添加px4_simulink_app模版...
```

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



4. 进阶接口实验

4.4 HITL/SITL控制输出替换实验：

基于PX4软件系统本实验主要讲解了在进行HITL/SITL仿真实验时，进行相关接口的屏蔽和替换相关设置。具体操作步骤见文件 [2.AdvExps/e0_AdvApiExps/5.RepPX4Func/Readme.pdf](#)，(部分)实验效果如下：

```
actuator_output.msg = actuator_armed.msg ...
Ctrl > 2.AdvExps > e0_AdvApiExps > 5.RepPX4Func > 2.RflyAdvDemo >
1  uint64 timestamp    # time since system start (m
2
3  bool armed          # Set to true if system is armed
4  bool prearmed       # Set to true if the actuato
5  bool ready_to_arm   # Set to true if system is r
6  bool lockdown       # Set to true if actuators a
7  bool manual_lockdown # Set to true if manual
8  bool force_failsafe # Set to true if the actuato
9  bool in_esc_calibration_mode # IO/FMU should ign
10 bool soft_stop      # Set to true if we need to ESCs
11
12 # TOPICS actuator_armed actuator_armed_rfly
13
```

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



目录

1. 实验平台配置及仿真流程
2. 底层开发接口及功能介绍
3. 基础案例实验介绍
5. 进阶案例实验介绍
6. 高阶案例实验介绍（完整版）
7. 小结



6. 扩展案例（完整版）

6.1 扩张状态观测器设计实验：

该方案适用于在扰动和非确定性条件下的飞行器控制问题。通过将飞行器解耦成多个级联SISO系统，系统包括一个名义模型和一个不确定项，该不确定项包括模型/识别的不确定性，控制失配，以及外部扰动。为了估计系统状态和总的 uncertainty，设计了一个扩张状态观测器 (ESO)，利用ESO的输出，控制器在线补偿总的 uncertainty。具体操作步骤见文件 [3.CustExps\e1 ESO-CtrlExp\Readme.pdf](#)。

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



6. 扩展案例（完整版）

6.2 基于强化学习的最优控制实验：

利用基于模型的强化学习方法，使用了近似策略迭代算法，将最优控制问题分解为两个阶段：近似策略评估和策略提升。在近似策略评估阶段，使用一个线性结构的逼近器来近似值函数，并利用系统模型和贝尔曼方程来更新逼近器的参数。在策略提升阶段，使用一个线性结构的逼近器来近似最优控制策略，并利用值函数和系统模型来更新逼近器的参数。这两个阶段交替进行，直到收敛到一个近似最优解。基于此，本实验首先基于扩张状态观测器观测飞行器模型的不确定性，并对其进行补偿，然后利用基于模型的强化学习最优控制方法近似被补偿系统的最优价值函数，进而确定最优控制律，接着基于控制屏障函数对最优控制律设计安全反馈项，保证闭环系统安全集的正向不变性。具体操作步骤见文件 [3.CustExps\e2_RL-CtrlExp\Readme.pdf](#)。



更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



6. 扩展案例（完整版）

6.3 模型补偿控制(MCC)器设计实验：

本文件夹中的所有实验均为模型补偿控制(MCC)器设计实验例程，MCC中摒弃了传统的 ESO（Extended State Observer, ESO）观测器，采用更高精度的补偿函数观测器（Compensation Function Observer, CFO）实现对复杂扰动或快速时变扰动的高精度估计，并将总扰动的估计反馈给控制器，实现无人机系统的高精度跟踪控制。本文件夹包含了四旋翼无人机的姿态、定高、定点以及半自助模式控制器设计例程。具体操作步骤见文件 [3.CustExps\3_MCC-CtrlExp\Readme.pdf](#)。

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



6. 扩展案例（完整版）

6.4 自抗扰控制(ADRC)器设计实验：

本文件夹中的所有实验均为基于四旋翼的自抗扰控制(ADRC)器设计实验例程，ADRC是一种无模型控制方法，适用于为具有未知动态特性以及内部和外部扰动的被控对象设计控制器。此算法只需要对被控对象动态特性进行逼近，即可设计具有稳健抗扰功能的无超调的控制器。本文件夹包含了四旋翼无人机的姿态、定高、定点以及半自助模式控制器设计例程。具体操作步骤见文件 [3.CustExps/e4 ADRC-CtrlExp/Readme.pdf](#)。

更多详细接口请见：[API](#)，更多例程请见：[Readme](#)。



目录

1. 实验平台配置及仿真流程
2. 底层开发接口及功能介绍
3. 基础案例实验介绍
5. 进阶案例实验介绍
6. 高阶案例实验介绍（完整版）
7. 小结



7. 小结

- 本讲主要对飞行控制算法的开发课程进行讲解，分为基础实验和进阶实验两部分，使各位学员能够尽快熟悉多旋翼的理论设计、RflySim平台仿真、物理真机控制等开发流程。
- 基础实验是基于RflySim平台软件在环和硬件在环仿真流程学习为主，进阶实验是从多旋翼理论设计和建模实验→估计实验→控制实验→决策实验的学习路线进行教学。

如有疑问，请到<https://doc.rflysim.com/>查询更多信息。



RflySim更多教程



扫码咨询与交流



飞思RflySim技术交流群



谢谢！