

---

# 目录

1. 本讲例程检索.....	1
2. 快速入门指南.....	1
2.1. 本讲详解.....	1
2.2. 预备知识.....	1
2.2.1. 理论知识预备.....	1
2.2.2. 平台知识预备.....	2
2.2.3. 硬件预备知识.....	2
2.2.4. 其他注意事项.....	2
2.3. 文档学习路线.....	2
2.3.1. API 学习路线.....	2
2.3.2. Readme 学习路线.....	3
2.3.3. PPT 学习路线.....	3
2.4. 例程学习路线.....	3
3. 本章关键功能索引.....	4
4. 精彩案例展示.....	4
4.1. RflySim 自动代码生成系统.....	4
4.2. Simulink/PSP 工具箱模块.....	4
4.3. 自定义 PX4 软件系统源码导入.....	6
4.4. 多种 MATLAB 命令行运行指令.....	7
4.5. PX4 多模块并行开发.....	7
4.6. PX4 任意源码一键屏蔽与替换.....	8
4.7. 多种实飞&仿真日志记录与分析.....	8
4.8. 自定义控制器与外部数据通信.....	8
4.9. 丰富的飞控与外部数据通信助力快速 Debug.....	8
4.10. SITL 仿真下验证 HITL 仿真固件.....	9
5. 附加资源.....	9

# 1. 本讲例程检索

序号	文件/文件夹名称	说明	Readme
1	0.ApiExps	基础接口例程文件夹	<a href="#">0.ApiExps\Intro.pdf</a>
2	1.BasicExps	基础例程文件夹	<a href="#">1.BasicExps\Intro.pdf</a>
3	2.AdvExps	进阶例程文件夹	<a href="#">2.AdvExps\Intro.pdf</a>
4	3.CustExps	自定义例程文件夹 (限完整版及以上)	<a href="#">3.CustExps\Intro.pdf</a>
5	Intro.pdf	本讲介绍文件	<a href="#">Intro.pdf</a>
6	API.pdf	本讲接口说明文件	<a href="#">API.pdf</a>
7	PPT.pdf	本讲配套课件文件	<a href="#">PPT.pdf</a>
8	Readme.pdf	本讲所有例程检索文件	<a href="#">Readme.pdf</a>

## 2. 快速入门指南

### 2.1. 本讲详解

本文件夹主要介绍了基于 RflySim 平台进行位姿控制与滤波估计开发的实验内容。通过本文件夹，我们可以学习到以下内容：

- ✓ 利用 RflySim 平台完成从底层飞行控制算法搭建、仿真验证到实际飞行的全流程实验。
- ✓ 实现仿真数据的记录和读取功能。
- ✓ 学习在 PX 4 软件中读取和写入 uORB 消息的功能。
- ✓ 掌握底层控制算法与外部通信的方法。
- ✓ 探索多旋翼动力系统的的设计和评估方法。
- ✓ 搭建和验证多旋翼姿态、位置、半自主控制模型。
- ✓ 学会在 PX 4 系列飞控中获取和标定传感器数据。
- ✓ 设计、开发和验证滤波器算法。
- ✓ 实现多旋翼失效保护逻辑。
- ✓ 掌握 PX 4 软件中多模块并行开发技术。
- ✓ 学习更多新型控制器算法的设计、仿真与实际飞行，例如扩张状态观测器、基于强化学习的最优控制器、模型补偿控制器、自抗扰控制器等底层控制器的设计和实现。

### 2.2. 预备知识

#### 2.2.1. 理论知识预备

**飞行动力学：**多旋翼飞行器的动力学理论，包括姿态控制、位置控制和轨迹跟踪等方面。了解飞行器的运动学和动力学方程，以及如何应用这些方程进行控制。

**控制理论：**PID 控制器：了解基本的比例、积分、微分控制器及其在飞行器控制中的应用。**高级控制算法：**包括扩张状态观测器 (ESO)、强化学习、模型补偿控制器 (MCC)

---

和自抗扰控制器（ADRC）等。

**状态估计：**了解卡尔曼滤波器及其变种（如扩展卡尔曼滤波器）等状态估计方法。学习传感器噪声、漂移等特性，以及如何通过滤波器来处理传感器数据，例如卡尔曼滤波器、互补滤波器等。

**传感器技术：**了解常见飞行器传感器，如陀螺仪、加速度计、磁力计和 GPS 等，并学会如何获取、校准和融合这些传感器数据。

**失效保护与安全：**学习飞行器的失效检测、容错和安全机制，包括传感器故障检测、电机失效检测和姿态控制失效恢复等。

### 2.2.2. 平台知识预备

**PX4 软件系统：**学习 PX4 自动驾驶系统的架构和工作原理，包括 uORB 消息通信机制等。理解 PX4 中常用的飞行模式（例如手动、定高、定点、自动等）以及如何在 PX4 中编写和调试飞行控制算法，详细的软件框架介绍可见：<https://docs.px4.io/v1.14/en/>

**MATLAB/Simulink 软件：**熟悉 MATLAB 的基本操作、语法和常用函数的使用熟悉 Simulink 工具箱，能够使用 Simulink 进行系统建模、仿真和实时仿真，实现多旋翼系统的建模与仿真，详细的软件介绍可见：<https://ww2.mathworks.cn/products/matlab.html>

**RflySim 平台：**熟悉基于 RflySim 平台的无人系统载具的运动模型开发流程，RflySim3D 软件的三维场景和模型的切换方式等。见：<..\..\HowToUse.pdf>

### 2.2.3. 硬件预备知识

**飞控：**RflySim 平台支持 PX 4 软件系列的飞控硬件，如 Pixhawk 系列、雷迅系列等，推荐使用飞控为 Pixhawk 6X mini，详细的配置可见：[..\1.RflySimIntro\2.AdvExps\2\\_FCUIntro\Readme.pdf](..\1.RflySimIntro\2.AdvExps\2_FCUIntro\Readme.pdf)

**遥控器：**根据平台所支持的飞控，基本上大多数遥控器均支持，推荐使用的遥控器为天地飞 ET10，以及与之对应的遥控器接收机，详细的配置可见：[..\1.RflySimIntro\2.AdvExps\1\\_RCIntro\Readme.pdf](..\1.RflySimIntro\2.AdvExps\1_RCIntro\Readme.pdf)

**飞机：**根据我们的软件系统，飞思实验室还有众多飞机，具有不同的轴距飞机，推荐使用飞思 X200 型无人机，详细配置可见：[..\1.RflySimIntro\2.AdvExps\5\\_UAVConfig\Readme.pdf](..\1.RflySimIntro\2.AdvExps\5_UAVConfig\Readme.pdf)

### 2.2.4. 其他注意事项

本讲实验中涉及到实飞实验，请按照相关硬件的配置手册进行设置。

## 2.3. 文档学习路线

### 2.3.1. API 学习路线

1. 理解 RflySim 和 PX4 的关系，了解 RflySim 是如何作为一个工具箱集成在 Simulink 中，以及它如何帮助用户自动生成用于无人机控制的代码。掌握 PX4 的基本架构和模块化设计，了解它是如何通过 uORB 消息系统进行内部通信的。

---

2. 掌握 Simulink/PSP 工具箱模块，熟悉传感器和执行器接口库：学习如何使用工具箱中提供的传感器和执行器接口模块，例如 `Battery_measure`、`Input_rc` 和 `PWM_output` 等，来获取无人机的电池状态、遥控器输入和控制电机输出。

3. 学习代码生成和自定义接口，了解如何配置 Simulink 模型以生成适用于 PX4 的代码，并学习如何将这些代码集成到 PX4 中。学习如何将自己的 PX4 源码导入到 RflySim 平台中，并掌握如何替换或修改现有的 PX4 源码。

4. 生成 PX4 固件：按照文档中的指导，生成适用于特定硬件（如 Pixhawk 飞控）的 PX4 固件。使用 HIL 仿真来测试生成的代码，确保控制算法在模拟环境中的有效性和稳定性。

5. 深入理解外部通信和数据记录，掌握如何使用 `rfly_ctrl.msg`、`rfly_ext.msg` 等消息接口进行无人机的外部控制和数据传输。了解如何获取和分析飞行日志数据，以便对无人机的性能进行评估和优化。

6. 掌握高级接口和性能优化，学习如何更高效地使用 uORB 消息机制进行模块间的数据发布和订阅，提高系统的响应速度和数据处理能力。通过文档中的示例和指导，学习如何优化你的控制算法，以提高无人机的飞行性能和稳定性。掌握使用 Simulink 和 PX4 提供的工具进行系统性能分析和调试的方法，以便快速定位并解决问题。

### 2.3.2. Readme 学习路线

本文件中罗列了本讲所有的例程文件，可以快速检索本章中的所有例程。首先，可逐步完成基础接口类 [0.ApiExps\Intro.pdf](#) 和基础功能性实验 [1.BasicExps\Intro.pdf](#)，巩固所学。在掌握基础知识后，然后，挑战进阶性实验 [2.AdvExps\Intro.pdf](#)，提升技能。对于有特定需求的项目，探索定制性实验 [3.CustExps\Intro.pdf](#)。

### 2.3.3. PPT 学习路线

为了高效学习智能无人集群系统开发与实践的课程，首先应配置实验平台，包括熟悉教材、设置 Pixhawk 自驾仪和 PX4 固件，以及 Simulink 控制器代码生成。接着，通过关键接口介绍，掌握软件在环仿真和自动代码生成工具箱的使用，并设计姿态控制器，实现从仿真到实飞的完整流程。在此基础上，完成一系列基础实验，如动力系统设计、动态建模、传感器标定等，然后逐步过渡到进阶接口实验，学习屏蔽 PX4 模块输出、重命名应用等高级操作。最后，探索扩展案例中的高级控制策略，如扩张状态观测器和基于强化学习的最优控制，以提升开发能力。通过这一连贯的学习路径，您将能够全面掌握无人集群系统开发的理论与实践。

## 2.4. 例程学习路线

首先，可逐步完成基础接口类 [0.ApiExps\Intro.pdf](#) 和基础功能性实验 [1.BasicExps\Intro.pdf](#)，巩固所学。在掌握基础知识后，然后，挑战进阶性实验 [2.AdvExps\Intro.pdf](#)，提升技能。对于有特定需求的项目，探索定制性实验 [3.CustExps\Intro.pdf](#)。

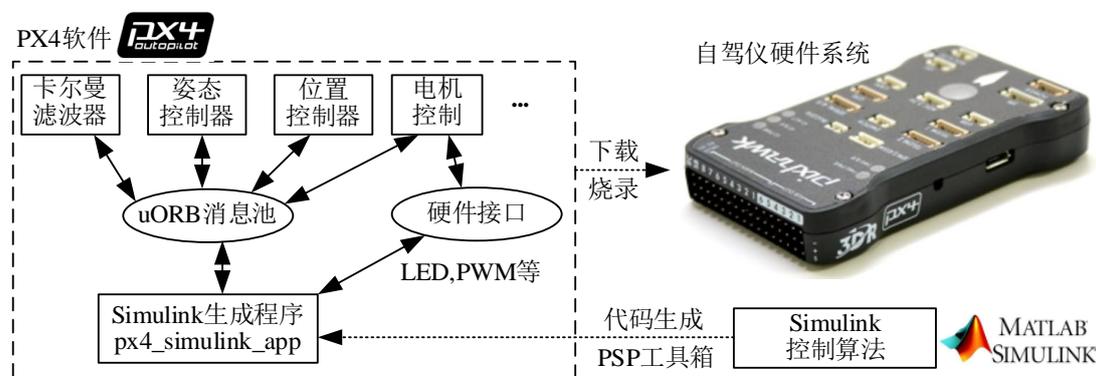
### 3. 本章关键功能索引

知识点	实现例程
如何创建自定义的 uORB 消息?	<a href="#">0.ApiExps\7.uORB-Create\Readme.pdf</a>
如何获取到飞控中的 IMU 传感器系统输出的数据?	<a href="#">0.ApiExps\11.SenorDataGet\Readme.pdf</a>
如何进行多旋翼动力系统设计和评估?	<a href="#">1.BasicExps\1-FlightEval\Readme.pdf</a>
如何?	
如何进行多旋翼姿态、位置控制器设计?	<a href="#">1.BasicExps\5-AttitudeCtrl\Readme.pdf</a> <a href="#">1.BasicExps\6-PositionCtrl\Readme.pdf</a>
如何设计多旋翼的半自主控制模型?	<a href="#">1.BasicExps\7-SemiAutoCtrl\Readme.pdf</a>
如何设计多旋翼的失效保护逻辑模型?	<a href="#">1.BasicExps\8-FailsafeLogic\Readme.pdf</a>
如何快速自定义屏蔽 PX 4 软件中的某行、段代码?	<a href="#">2.AdvExps\10_AdvApiExps\1.CusMaskPX4Code\Readme.pdf</a>
如何基于 RflySim 平台在 PX 4 软件中并行开发多个模块?	<a href="#">2.AdvExps\10_AdvApiExps\4.MultPX4App\Readme.pdf</a>
如何设计出更加高级的底层控制器?	<a href="#">3.CustExps\Intro.pdf</a>

### 4. 精彩案例展示

#### 4.1. RflySim 自动代码生成系统

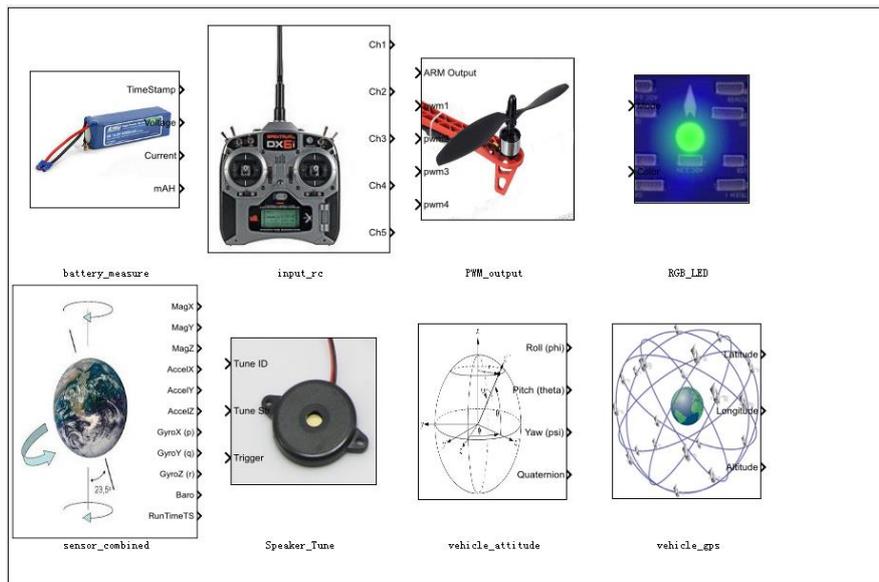
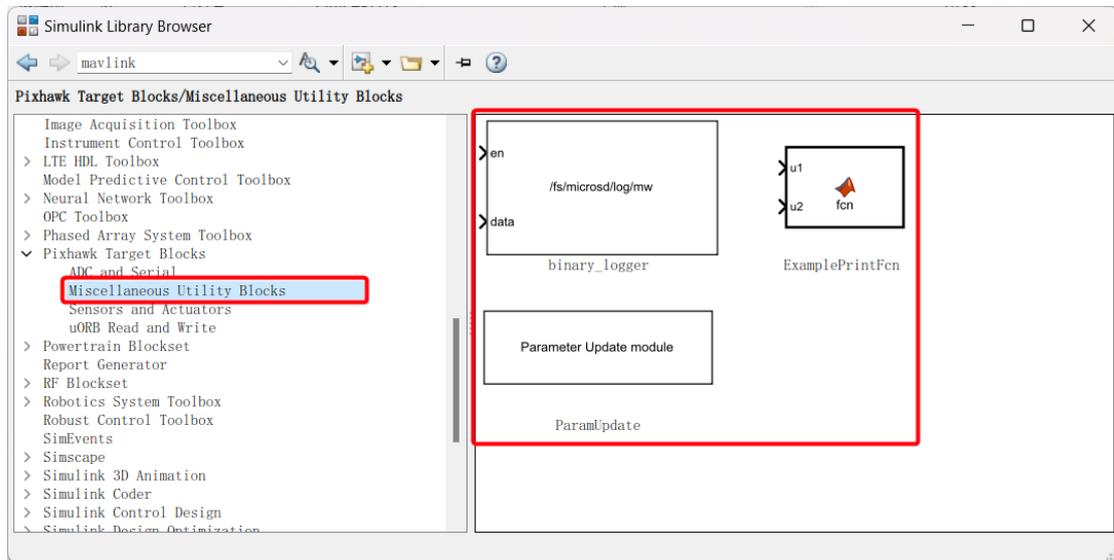
PX4 软件系统可以分为若干个小模块，每个模块独立运行（多线程并行），各个模块通过 uORB 消息模块的订阅与发布功能实现数据的传输与交互。Simulink 生成的代码部署到 PX4 自动驾驶软件之后，不会影响原生 PX4 自动驾驶软件运行，而是新增一个名为“px4\_simulink\_app”的独立模块（独立线程）并行于其他模块运行。由于原生 PX4 控制算法可能需要访问和“px4\_simulink\_app”同样的硬件输出资源，这会产生读写冲突。因此，平台一键部署脚本提供了自动屏蔽 PX4 原生固件对执行器的选项，以确保只有“px4\_simulink\_app”模块能够输出电机控制量。

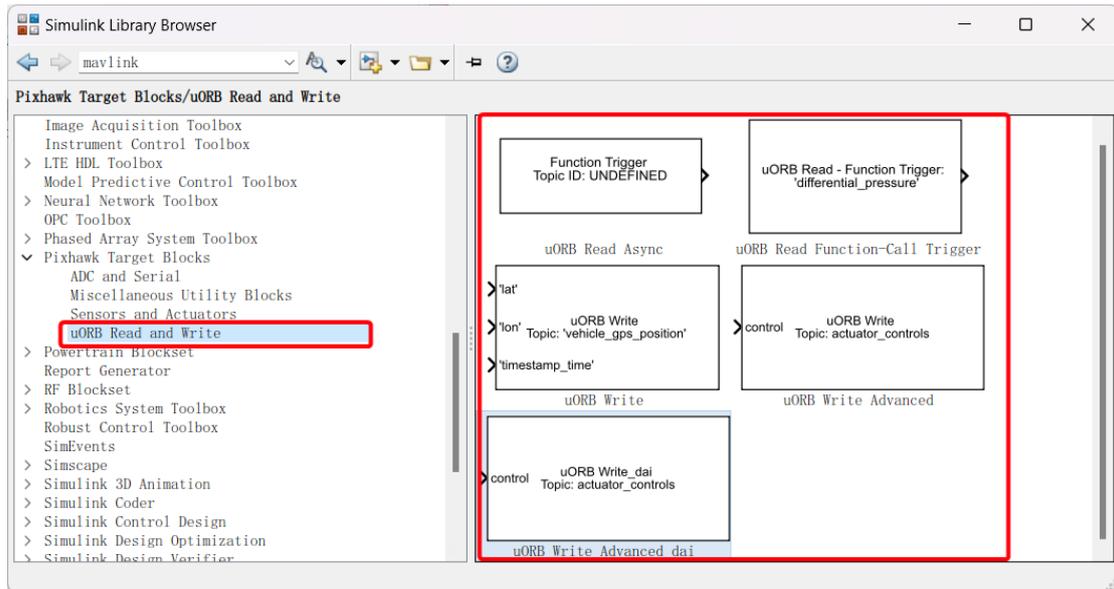


#### 4.2. Simulink/PSP 工具箱模块

Pixhawk Pilot Support Package (PSP, 自动驾驶仪支持包) 工具箱是 Mathworks 公司官方为 Pixh

awk 推出的一个工具箱。该工具箱能在 Simulink 中利用嵌入式代码产生器 (Embedded Code r) 将 Simulink 模型自驾仪算法自动编译和部署到 Pixhawk 硬件系统中。RflySim 平台支持该工具箱模块的完全部署。





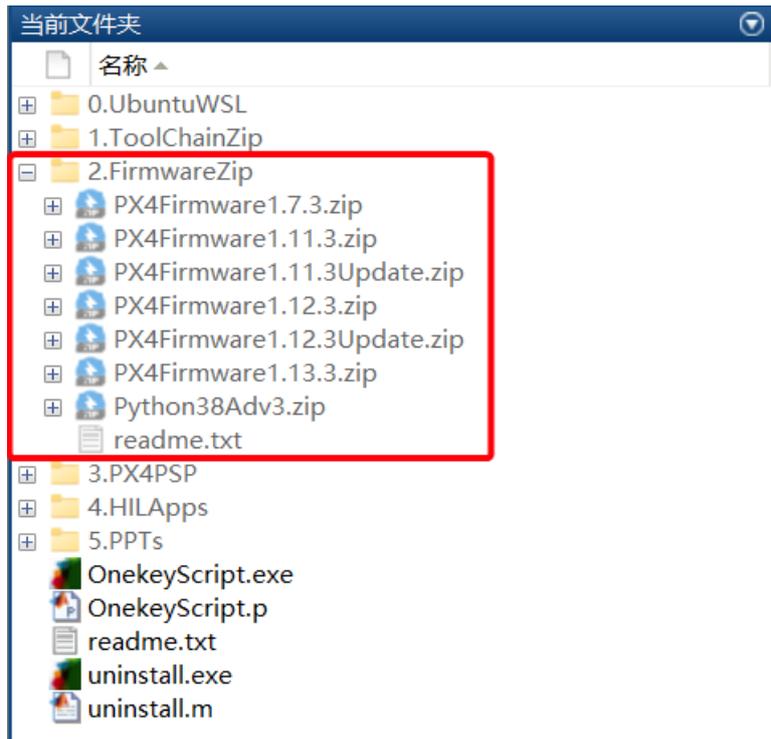
### 4.3. 自定义 PX4 软件系统源码导入

RflySim 平台的安装包中的 2.FirmwareZip 目录中存放了各种 PX4 源码固件，且支持导入自己开发的 PX4 源码。在一键安装脚本在重新部署固件时，会先删除 `*\PX4PSP\Firmware` 文件夹；然后根据选项去解压 “2.FirmwareZip\PX4Firmware\*\*\*.zip” 到 `*\PX4PSP` 目录下；最后，解压 `PX4Firmware***Update.zip` 里面的内容，强制覆盖到 `Firmware` 里面。

其中 `PX4Firmware***.zip` 里面存放的是官方源码，从 Github 上下载，没有做任何改动。`PX4Firmware***Update.zip` 里面包含了我们修改的文件，会覆盖到 `Firmware` 目录。因此，进行自己的源码部署，可通过下面两种方式。

- 1) 直接将自己修改后的 `Firmware` 目录打包，根据自己的版本重命名为 `PX4Firmware****.zip` 格式的名字（命名规则见 `2.FirmwareZip\readme.txt`），并删除 `PX4Firmware***Update.zip` 文件。这样一键安装脚本，会使用你自己的脚本进行部署。
- 2) 也可以直接将自己修改的部分源码，按文件目录结构，直接存在 `PX4Firmware***Update.zip` 里面，在部署时会被复制进去，强制替换原来的代码。

RflySim 平台还支持其他的 PX4 固件版本，例如，1.9.2、1.10.2 等，见 `2.FirmwareZip\readme.txt` 文件，如下图所示。



#### 4.4. 多种 MATLAB 命令行运行指令

- PX4 编译固件一键上传指令—PX4Upload。该指令可一键将 “\*\PX4PSP\Firmware\build\\*\*\\*.px4” 路径下的固件上传到插入电脑的飞控中。
- PX 4 固件编译指令快速替换指令—PX4CMD。不同的飞控硬件往往对应不同的编译环境，RflySim 平台中直接运行该指令切换成自己飞控对应的编译环境。
- PX4 固件快速编译指令—PX4Build。PX4 软件系统中的固件编译往往需要在 Linux 系系统下进行，RflySim 在安装之初，已经安装完全了 WSL 系统并与 MATLAB 完成适配，可在 MATLAB 直接运行该指令进行编译。
- 自动代码生成的模块名称一键修改—PX4AppName。PX4 软件系统中不同模块都是独立多线程并行运行的，模块名称具有唯一性，但 Simulink 自动代码生成的模块名称总是 px4\_simulink\_app，以至于每次只能创建一个模块，该指令即可创建多个 PX4 模块。
- 加载 PX4 软件系统模块指令—PX4AppLoad。PX4 软件系统的二次开发不仅局限于 simulink 自动代码生成的方式，也可以直接编写独立的模块通过该指令嵌入 PX4 软件系统中。
- PX4 软件系统任意代码替换指令—PX4ModiFile。该指令可通过 Excel 方式进行替换 PX4 软件中的任意位置的任意代码。

#### 4.5. PX4 多模块并行开发

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

---

“多种 MATLAB 命令行运行指令”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。

## 4.6. PX4 任意源码一键屏蔽与替换

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。

例如：我们需要屏蔽 PX4 软件系统中的姿态角速率环控制器的模块(该位置为 PX4-1.12.3 版本，其他版本请查看 PX4 官方帮助文件)在：`*\PX4PSP\Firmware\src\modules\mc_rate_control`。打开该文件夹中的“`MulticopterRateControl.cpp`”文件，根据 `px4` 的源码构架可知，姿态角速率环的输出 uORB 消息是“`actuator_controls_0`” (该消息详细定义可以参考 <https://docs.px4.io/v1.12/en/concept/mixing.html>)。找到需要屏蔽或替换的目标代码后，RflySim 提供多种一键替换方式。

## 4.7. 多种实飞&仿真日志记录与分析

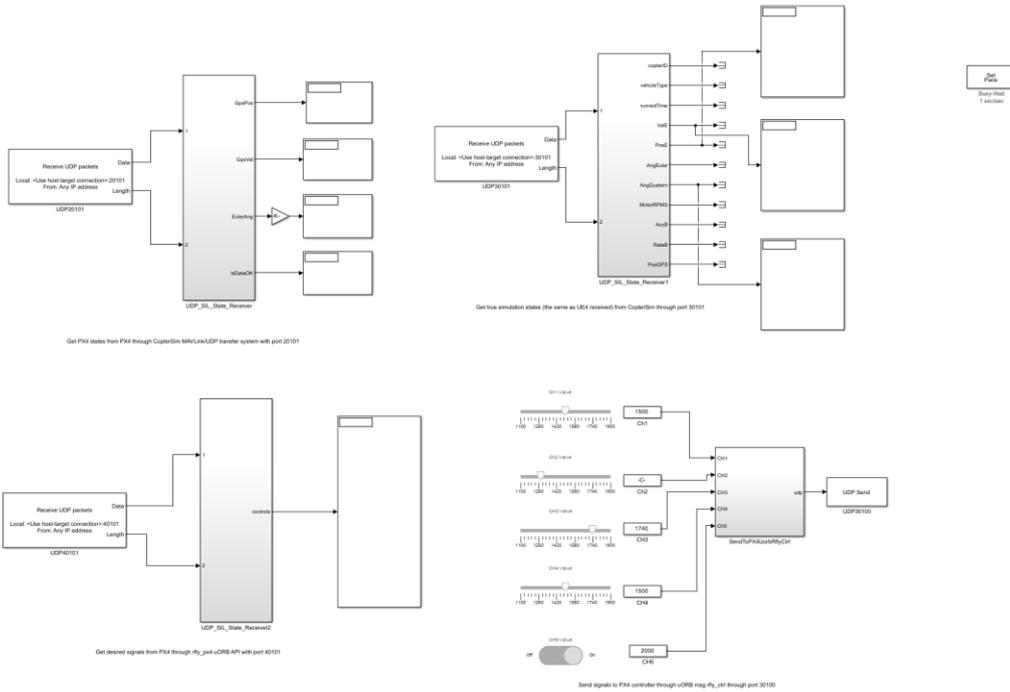
实飞&仿真数据，RflySim 平台提供离线和在线两种日志获取方式，支持单机、多机的 SITL、HITL 仿真下的日志获取，提均有详细的日志分析例程引导用户完成分析。

## 4.8. 自定义控制器与外部数据通信

PX4 是一个较为庞大、复杂的软件系统，要是实现 Sim2Real 的功能，就需要在 SITL、HITL 以及实飞等不同阶段下频繁的切换调试控制器参数，RflySim 支持将 `actuator_control_0`、`pwm_output` 的 uORB 消息直接用于硬件在环仿真和实飞，实现仿真与实飞的无缝切换。

## 4.9. 丰富的飞控与外部数据通信助力快速 Debug

RflySim 中的软件 `CopterSim` 定义了多种 UDP 端口用于在实验过程中的 Debug，如：20100 系列端口主要接收 PX4 内部状态估计值；30100 系列端口—接收 `CopterSim` 飞行仿真值并向飞控发送 `rfly_ctrl` 消息；40100 系统端口—接收飞控内部 `rfly_px4` 的 uORB 消息。在进行多机集群飞行仿真时，不同飞机的端口都会以“端口号+(2\*i-1)”的方式自动创建。



## 4.10. SITL 仿真下验证 HITL 仿真固件

我们在进行硬件在环仿真实验时，往往需要有飞控、遥控器等其他硬件，硬件的成本也增加了实验的成本。RflySim 平台支持在软件在环仿真环境下，来验证你编写生成的硬件在环仿真固件，从而降低你的实验成本。

## 5. 附加资源

官方文档：RflySim 官方文档：<https://rflysim.com/doc/zh/>

社区交流：加入 RflySim 技术交流群：951534390

