

---

## 载具运动建模与仿真例程库介绍与学习指南目录

|                   |           |
|-------------------|-----------|
| 1.快速索引.....       | 1         |
| 2.学习路线.....       | 2         |
| 2.1 例程库功能概述.....  | 2         |
| 2.2 预备知识.....     | 5         |
| 2.2.1 理论知识预备..... | 错误!未定义书签。 |
| 2.2.2 平台知识预备..... | 错误!未定义书签。 |
| 2.2.3 硬件预备知识..... | 5         |
| 2.2.4 其他注意事项..... | 错误!未定义书签。 |
| 2.3 文档学习路线: ..... | 5         |
| 2.4 例程学习路线: ..... | 6         |
| 3.关键功能索引.....     | 6         |
| 4.精彩案例图文展示.....   | 7         |
| 附加资源.....         | 7         |

---

# 1.快速索引

本讲例程主要介绍本平台载具运动控制模型的建模框架和标准输入输出接口以及将模型集成到仿真平台中运行调试的方法

[0.ApiExps/Index.pdf](#) 例程库包含 RflySim 平台载具运动建模仿真开发所需的实验平台配置以及平台载具运动仿真相关功能接口（模型输入输出和初始化接口）的调用方法，通过这些接口可以操纵 CopterSim 内的载具运动模型 dll 文件

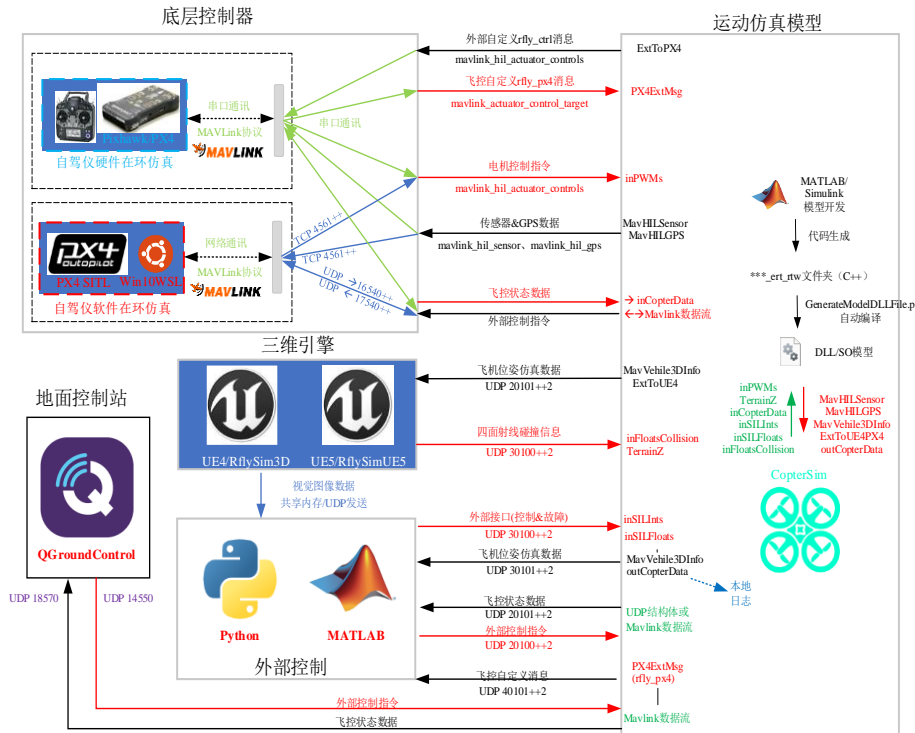
[1.BasicExps/Index.pdf](#) 例程库包含基础的载具运动模型扩展方法和仿真案例，建模方法上，依据最小系统的 Simulink 建模模版（仅提供仿真所需最基本的模型输入输出接口，包括地形输入、控制指令输入、传感器输出以及输出到 RflySim3D 的载具运动状态数据），构建几种基本构型的载具模型，包括四旋翼飞行器、标准固定翼以及无人车。仿真案例提供了将各种载具 Simulink 模型代码生成到仿真平台并进行软硬件在环仿真的完整流程。

[2.AdvExps/Index.pdf](#) 例程库包含进阶的载具运动模型扩展方法和仿真案例，建模方法上，在原有模板上扩充了输入输出接口。仿真案例上，提供了多旋翼类、固定翼类以及无人小车类的全流程建模仿真案例，还新增了几种特殊构型载具的仿真案例，包括高精度拖车模型、直升机模型、水下无人潜航器。

[3.CustExps/Index.pdf](#) 例程库包含完整版特有的模型输入输出接口和模型扩展方法，新增功能接口目前包括扩展的输入接口、增加与三维场景的交互支持（环境感知等）、GPS 初始化模式以及模型控制参数实时修改；建模方法上，提供了系统辨识模型、带控制器的综合模型的源码及完整开发流程以及几种特殊构型载具的高精度模型移植方案

## 2.学习路线

### 2.1 载具运动建模仿真 workflow



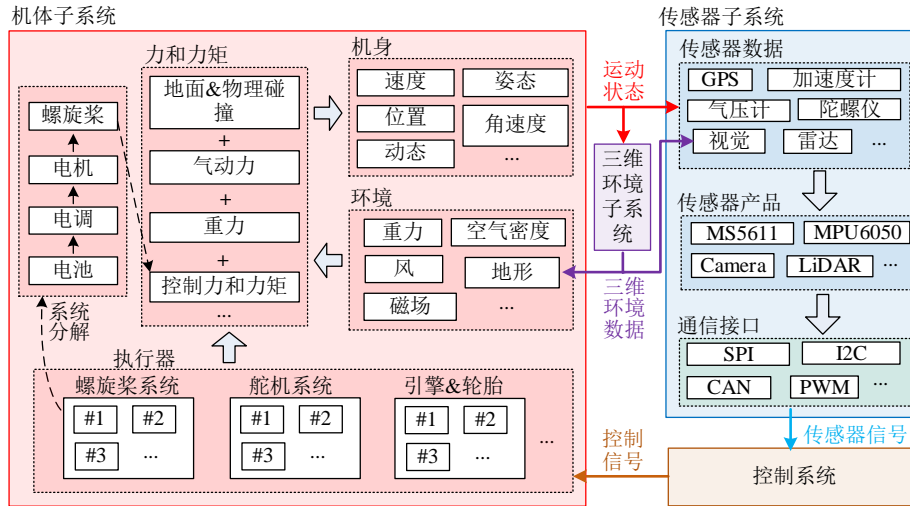
载具运动建模仿真 workflow 来自基于模型设计的理念（快速迭代设计原型），是从载具运动模型的建立到仿真验证的一系列步骤，本平台用于运动仿真的主要工具是 CopterSim 中由 Simulink 开发得到的 DLL 模型，通过 CopterSim 与平台中其余部分交互，其相关 Python 接口库如 [\[安装目录\]\RflySimAPIs\RflySimSDK\RflySimSDK\ctrl](#) 下的 [DllSimCtrlAPI.py](#)（模型的输入输出接口）、[PX4MavCtrlV4.py](#)（载具模型控制接口）、[ReqCopterSim.py](#)（仿真初始化接口）

#### 载具运动模型的建立：

根据载具的运动原理，在建立数学模型，描述载具在给定的输入和扰动下的运动状态。

本平台的运动建模完全基于 Simulink 开发，适配统一的输入输出接口，且将建模所需功能模块封装到了模块库中（拖放即用），针对用户二次开发的需求还提供了完整的建模模版，开发完成的模型可以通过代码生成的方式得到高性能的 C/C++ 代码，移植到不同的嵌入式系统中进行仿真。

本平台不仅提供了适应不同构型载具的统一建模框架和标准子系统模块，还针对一些特殊的仿真需求，开发了如系统辨识模型、高精度动力学模型（从 Gazebo 等专业动力学引擎或工业设计软件中移植），除此之外，本平台还提供将底层控制器和动力学模型集成到一起的建模方案，即综合模型。



### 载具运动模型的仿真实证：

将建立的载具运动模型以代码生成的方式导入仿真平台，设置仿真参数，运行仿真，观察载具的运动状态。通过对比仿真结果和期望数据，验证载具运动模型的正确性和精度，对模型进行调整和优化。

本平台提供了从软件在环仿真到硬件在环仿真的验证思路，这两种流程的区别在于是否需要连接真实的飞控器，硬件在环仿真可以更真实地反映载具的运动状态，软件在环仿真则可以更快速地模拟不同的飞行场景。

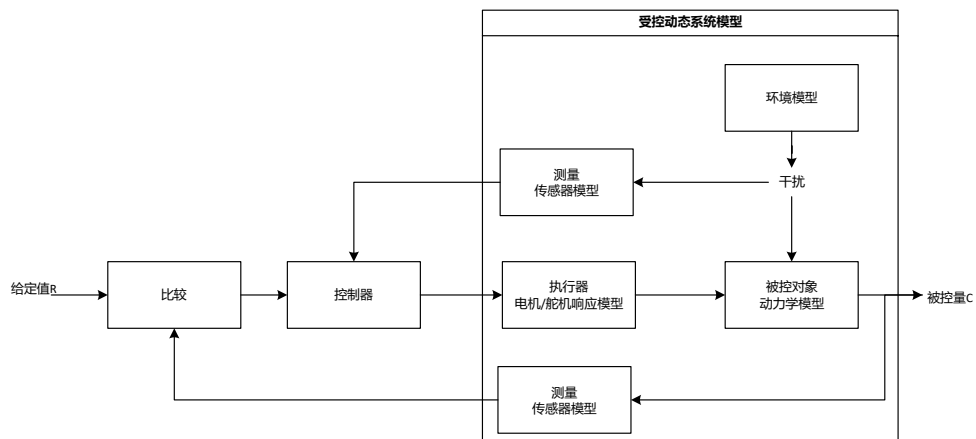
硬件在环仿真流程：CopterSim 配置模型参数或 Simulink 导入 DLL 模型 → QGC 配置 Pixhawk 进入对应的机架 → QGC 配置进入硬件在环仿真模式 → 一键启动硬件在环

软件在环仿真流程：CopterSim 配置模型参数或 Simulink 导入 DLL 模型 → PX4 源码中配置机架文件 → bat 启动脚本中选定机架样式 → 一键启动软件在环

## 2.2 预备知识

### 2.2.1 理论知识预备

了解自动控制的基本概念（包括控制的基本方式、性能指标等）



了解物理仿真的典型实现方式（动力学引擎/仿真平台）

了解基于模型设计的原则和基本实现方式（可以参考 MATLAB 的工作流，核心是自动代码生成）

了解网络通信的分层和协议（传输层协议 UDP/TCP）

### 2.2.2 平台知识预备

本平台提供了关于载具运动建模仿真所需软件工具的简单使用入门教程

| 实验名称                   | 平台例程地址   | 官方教程  |
|------------------------|--|---|
| RflySim 平台飞控固件生成介绍     | <a href="#">0.ApiExps\1.PX4FirmwareGen\Readme.pdf</a>          | <a href="#">编译 PX4 软件   PX4 Guide (main)</a>                                |
| Simulink 调用 C 代码实验     | <a href="#">0.ApiExps\2.UserDefinedC++\1.CallC\Readme.pdf</a>  | <a href="#">0.ApiExps\2.UserDefinedC++\1.CallC\ref\coder_gs_zh_CN.pdf</a>   |
| Simulink 生成 C/C++ 代码实验 | <a href="#">0.ApiExps\2.UserDefinedC++\2.GenC++\Readme.pdf</a> | <a href="#">0.ApiExps\2.UserDefinedC++\2.GenC++\ref\coder_ref_zh_CN.pdf</a> |

**熟悉 MATLAB/Simulink 的用户界面和语言特点；**

Simulink 是 MATLAB 的一个附加产品，提供了一个图形化环境，用于多领域的模拟和基于模型的设计。它允许用户通过拖放的方式来构建模型，并且能够模拟连续的、离散的或混合的动态系统。

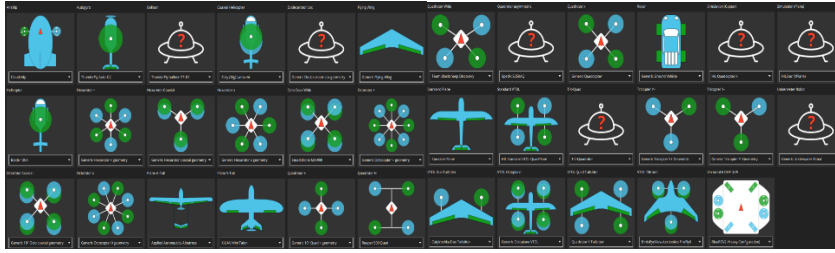
MATLAB/Simulink 的 Embedded Coder 模块可生成可读、紧凑且快速的 C 和 C++ 代码，以便用于大规模生产中使用的嵌入式处理器。它扩展了 MATLAB Coder 和 Simulink Coder 的功能，支持通过高级优化对生成的函数、文件和数据进行精确控制。这些优化可提高代码效率，并有助于与已有代码、数据类型和标定参数集成。可以集成第三方开发工具，以便为嵌入式系统或快速原型板上的全套部署构建可执行文件。

**了解 PX4 软件系统整体框架，尤其是 PX4 机架参考、uORB 消息、MAVLink 通信机制；**

详见 [PX4 系统架构概述 | PX4 Guide \(main\)](#): <https://docs.px4.io/main/zh/concept/architecture.html>

整体框架: PX4 是一个开源的飞行控制软件堆栈，用于控制多旋翼和固定翼无人机等无人系统载具。它的架构设计允许高度模块化，易于扩展。PX4 包括多个子系统，如导航、控制、任务计划以及与传感器和执行器的接口。

PX4 机架参考: RflySim 平台支持任意 [PX4 可控机型](#)的软硬件在环仿真，并提供了大部分模型的 dll 文件。所有支持机型可从 QGroundControl 的 Airframe（机架）页面中查看，如下图所示。目前免费版的 RflySim 平台包含了旋翼类、固定翼类和无人车类的模型的 Simulink 模板，更多其他模型需要用户根据平台提供的建模模板自行 Simulink 搭建，或直接使用完整版的 RflySim 平台。



**uORB 消息:** uORB 是 PX4 中的一个发布/订阅 (pub/sub) 消息传递系统。它允许模块之间以松耦合的方式交换数据。每个 uORB 消息代表特定类型的数据结构, 如传感器数据、控制命令等。

**MAVLink 通信机制:** MAVLink 是一种轻量级的消息协议, 用于无人机 (UAVs) 和地面控制站 (GCS) 之间的通信。PX4 使用 MAVLink 进行命令传输、实时数据传输以及任务管理。它支持多种编程语言, 便于与外部系统集成。

**PX4 固件编译工具链:** PX4 固件是无人机飞控系统的核心程序, 负责控制无人机的飞行状态、执行飞行任务、与地面站通信等功能。PX4 固件编译工具链是一套用于编译和上传 PX4 固件的软件, 包括 PX4 源码、编译器、模拟器、调试工具等。

### 2.2.3 硬件配置

| 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 <sup>①</sup>                     | 1  |
| 2  | RflySim 基础版及以上版本 | Pixhawk 6X 或 Pixhawk 6X mini <sup>②</sup> | 1  |
|    |                  | 遥控器 <sup>③</sup>                          | 1  |
|    |                  | 遥控器接收器                                    | 1  |
|    |                  | 数据线、杜邦线等                                  | 若干 |

①: 推荐配置请见: <https://rflysim.com/doc/zh/HowToInstall.pdf>

②: 须保证平台安装时的编译命令为: px4\_fmu-v6x\_default, 固件版本为: 1.13.2。其他配套飞控请见: <https://rflysim.com/doc/zh/B/2.Pixhawk.html>

### 2.3 文档学习路线:

| 内容               | 描述   | 文件                        |
|------------------|--|---------------------------|
| 载具运动建模与仿真 API 文件 | 载具运动建模与仿真开发所使用的全部 API 接口文档                   | <a href="#">API.pdf</a>   |
| 载具运动建模与仿真课件      | 该文件全面的讲解了基于 RflySim 平台的载具运动建模与仿真开发的实验以及效果展示。 | <a href="#">PPT.pdf</a>   |
| 载具运动建模与仿真入门介绍    | 载具运动建模与仿真开发的核心功能介绍                           | <a href="#">Intro.pdf</a> |

|               |             |                           |
|---------------|-------------|---------------------------|
| 载具运动建模与仿真例程索引 | 包含本讲全部例程的索引 | <a href="#">index.pdf</a> |
|---------------|-------------|---------------------------|

## 2.4 例程学习路线:

| 内容              | 描述  | 学习路线                                  |
|-----------------|---|---------------------------------------|
| 实验平台配置及模型接口调用实验 | 本文件夹中的所有实验均为本讲中接口使用类的实验，旨在帮助用户快速熟悉本讲各种接口以便于后续实验开发。  | <a href="#">0.ApiExps/Intro.pdf</a>   |
| 基础建模仿真案例        | 本文件夹中的所有实验均为本讲中基础性的功能实验，用户可快速上手熟悉一些简单的功能性实验，本讲中包含有最小模板使用介绍、固定翼无人机软硬件在环仿真、阿克曼底盘无人车模型代码生成及软硬件在环仿真等。   | <a href="#">1.BasicExps/Intro.pdf</a> |
| 进阶建模仿真案例        | 本文件夹中的所有实验均为本讲中进阶的实验，基于 0.ApiExps、1.BasicExps 文件夹中的实验，用户在已经熟悉基于 RflySim 平台开发本章中的实验，该文件夹中的实验均为本讲的进阶例程，如：平台建模模板之最大模板使用介绍、固定翼飞机模型 DLL 生成及 SIL/HIL 实验(含碰撞检测)等等。 | <a href="#">2.AdvExps/Intro.pdf</a>   |
| 扩展模型接口及建模仿真案例   | 本文件夹中的所有实验均为部分项目中的拆解实验，相比其他文件夹中的实验，该文件夹中的实验更加完整、复杂，满足更多的项目或者科研需求。   | <a href="#">3.CustExps/Intro.pdf</a>  |

## 3.关键功能索引

| 知识点                       | 实现例程                                       |
|---------------------------|--|
| 如何将所需控制器固件集成到基于 PX4 固件编译工 | <a href="#">1.PX4FirmwareGen/Intro.pdf</a> |

|   |  |
|---|--|
| 具链的仿真环境   |  |
| 如何将 Simulink 搭建的动力学模型编译生成可以移植到嵌入式平台的 C/C++代码以生成 dll 模型  | <a href="#">2.UserDefinedC++\Intro.pdf</a>   |
| 基于平台最小系统建模模板实现软硬件在环仿真所需的最低限度的输入输出接口                     | <a href="#">.\1.BasicExps\el_MinModelTemp\Intro.pdf</a>                                  |
| 如何实现针对 dll 模型（动力学模型）的外部控制接口通信                           | <a href="#">3.ExtCtrlAPI\Intro.pdf</a>   |
| 如何在不退出仿真的情况下快捷实现初始仿真设置重设                                | <a href="#">4.InitAPI\Intro.pdf</a>  |
| 如何在不修改 init.m 文件并重新生成 dll 模型的情况下，通过外部参数注入实时修改动力学模型的参数设置 | <a href="#">5.ParamAPI\Intro.pdf</a>   |
| 如何将感兴趣的 dll 模型状态数据实时转发到三维引擎 RflySim3D 中                 | <a href="#">6.ExtToUE4\Intro.pdf</a>   |
| 如何将感兴趣的 dll 模型状态数据实时传输到飞控硬件中                            | <a href="#">7.ExtToPX4\Intro.pdf</a>   |
| 如何将感兴趣的 dll 模型状态数据输出到日志文件中                              | <a href="#">8.OutCopterData\Intro.pdf</a>  |
| 如何将更多飞控消息传输到 dll 模型中以实现更复杂的控制闭环（如多种控制模式切换）              | <a href="#">9.inCopterData\Intro.pdf</a>   |
| 如何将三维场景中的碰撞数据输入 dll 模型，并实现包括碰撞检测和响应在内的物理引擎              | <a href="#">10.InFloatsCollision\Intro.pdf</a>   |
| 如何将自定义外部控制数据实时传入 dll 模型以实现更精细的仿真                        | <a href="#">11.InSILIntsFloats\Intro.pdf</a><br><a href="#">12.inDoubCtrls\Intro.pdf</a> |

## 4.精彩案例图文展示

### 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

