

RflySim 工具链入门使用文档

RflySim 工具链涉及无人系统开发的三维场景搭建、无人系统的动力学模型建立、底层控制、智能感知、健康评估、网络模拟、集群控制等等。如下表所示，为 “[安装目录]\PX4PSP\RflySimAPIs” 文件夹中各个子文件夹详细说明。

工具链学习路线：先学习第 1 和 2 讲的感兴趣内容，熟悉工具链的使用。然后，直接跳转到感兴趣的章节，按 Intro、PPT、API、Readme 顺序学习。

各章节资料检索

序号	章节名称	简介	例程目录名	本章详解	配套课件	API	例程检索
1	第 1 讲-绪论	RflySim 工具链简介、版本区别、安装及各功能特点。	1.RflySimIntro	Intro.pdf	PPT.pdf	API.pdf	Index.pdf
2	第 2 讲-实验平台配置	RflySim 工具链配置流程、核心组件的使用方法及实验流程等。	2.RflySimUsage	Intro.pdf	PPT.pdf	API.pdf	Index.pdf
3	第 3 讲-三维场景建模与仿真	RflySim3D 软件的构架和功能、无人系统三维建模与场景开发软件的使用等。	3.RflySim3DUE	Intro.pdf	PPT.pdf	API.pdf	Index.pdf
4	第 4 讲-载具运动建模与仿真	无人系统载具的控制模型搭建、RflySim 工具链模型开发流程等。	4.RflySimModel	Intro.pdf	PPT.pdf	API.pdf	Index.pdf
5	第 5 讲-位姿控制与滤波估计	本章包含大量无人系统底层开发例程，提供代码生成与下载功能，可以将设计的 Simulink 控制算法一键生成 PX4 固件，并烧录自驾仪中。实现 Sim2Real 的基础性实验流程。	5.RflySimFlyCtrl	Intro.pdf	PPT.pdf	API.pdf	Index.pdf
6	第 6 讲-外部控制与轨迹规划	本章通过外部控制接口对智能体发送命	6.RflySimExtCtrl	Intro.pdf	PPT.pdf	API.pdf	Index.pdf

		令，去实现更上层的轨迹规划等控制功能。					
7	第7讲-安全测试与健康评估	本章针对无人系统开发中的软件单元和集成验证、嵌入式软件和硬件验证、软硬件集成验证到整机集成与测试验证的过程。实现对上述所有的开发阶段进行故障注入与安全测试。	7.RflySimPHM	Intro.pdf	PPT.pdf	API.pdf	Index.pdf
8	第8讲-视觉感知与避障决策	本章讲述视觉传感器与相关理论，如：载体与各传感器坐标系，视觉控制的常见传感器等；介绍 Linux、ROS、MAVROS 等相关视觉开发的环境配置方式和 RflySim 工具链的视觉接口。	8.RflySimVision	Intro.pdf	PPT.pdf	API.pdf	Index.pdf
9	第9讲-通信协议与集群组网	无人系统组网的方式与现状、RflySim 工具链中的集群通信的系统架构以及无人系统组网的仿真例程。	9.RflySimComm	Intro.pdf	PPT.pdf	API.pdf	Index.pdf
10	第10讲-集群控制与博弈对抗	围绕多智能体的无人系统集群控制开发，介绍了集群编队、任务规划、博弈等技术，重点讲述 RflySim 工具链无人机集群系统的分布式控制框架和基于 MATLAB/Python 的集群控制接口，提供基于蚂蚁算法的多无人机任务规划、多无人机的编队、曲线管道控制、大规模无人机集群控制等案例，帮助读者理解集群控制的原理和实现方式。	10.RflySimSwarm	Intro.pdf	PPT.pdf	API.pdf	Index.pdf

同时，每讲的例程文件夹内部结构如下表所示，不同的文件夹中存有不同难度的实验，旨在帮助用户循序渐进的学习本讲相关内容。

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

RflySim 工具链各软件简介

序号	子软件名称	简介	说明文件
1	3DDisplay	3DDisplay 主界面界面窗口左侧以 3D 图形的方式展示多旋翼当前的飞行状态；3DDisplay 主界面右上角窗口展示了基本的飞行数据，包括电机转速，位置信息，姿态信息等；3DDisplay 主界面右下角窗口显示多旋翼的飞行轨迹。	Readme
2	CopterSim	CopterSim 是 RflySim 工具链核心软件之一，它是针对 Pixhawk/PX4 自驾仪平台开发的一款硬件在环仿真软件，可以在软件中配置多旋翼的模型，通过 USB 串口与 Pixhawk 自驾仪连接来实现硬件在环仿真，达到室内模拟室外飞行测试的效果。主要由两大部分组成一模型	Readme

		和通信。模型是指可根据所设置的模型参数，进行计算后直接就可进行仿真；并支持运行动态模型(DLL)，并连同其他软件构成软/硬件在环仿真。	
3	drivers	用于飞控等硬件链接所用的驱动文件夹。	Readme
4	examples	MATLAB 的 PSP 官方文件夹	Readme
5	Firmware	PX4 固件是用于无人机和机器人系统的开源软件，它运行在 Pixhawk 系列飞行控制器上。PX4 固件（Firmware）提供了飞行控制、导航、通信和其他关键功能，使得开发者和爱好者能够构建和操作多种类型的飞行器，包括多旋翼、固定翼、直升机、VTOL（垂直起降）飞机、无人车、无人船和水下机器人。	Readme
6	FlightGear 2016.1.2	FlightGear 是遗传自 LaRCsim 并加入了 Navion 飞机。这带来了许多限制（最重要的是很多特性是硬编码实现的，而不是配置文件），多次尝试开发或者加入额外的飞行模型。现在导致的结果就是 FlightGear 可以支持多种不同的飞行模型，可以在运行时选择	Readme
7	labelStudio	Label Studio 是一个强大的开源数据标注工具，它支持多种数据类型的标注，包括图像、音频、文本、视频和时间序列等。这个工具被广泛用于机器学习和人工智能项目中，以准备训练数据。	Readme
8	Python38	Python38Env 是一个基于 Python 3.8 编程语言的虚拟环境（不同的项目可以拥有各自独立的库版本和设置，而不会相互干扰）。Python38Env 包含了多个特定的 Python 库，如 numpy、pymavlink、OpenCV、pyulog、torchvision、pyyaml、utils、open3d、pytorch、tensorflow、gym 等在无人系统的算法开发中常用的库。	Readme
9	QGroundControl	QGroundControl 是专为 PX4 软件最新架构的开源地面站，其使用 QT 编辑器 C++ 语言编写其核心代码，其支持源代码修改和功能二次开发，即适合无人机地面站研究实验也适合无人机地面站功能的定制及修改。	Readme
10	RflySim3D	RflySim3D 使用 UDP 通信，能够接受一些来自外部的命令，例如切换场景、创建无人机、开启 UE 内置的物理碰撞等，命令的细节将在 RflySim3D 接口与使用方法介绍中介绍，总	Readme

		之 RflySim3D 可以接受来自 CopterSim、Python、Simulink 的 UDP 命令，并返回碰撞/地形数据以及视觉图像数据。	
11	RflySimAPIs	例程文件夹	Readme
12	RflySimUE5	RflySimUE5 是一款基于 UE5.3 开发的可视化软件	Readme
13	VcXsrv	VcXsrv 是一个在 Windows 系统上运行的开源 X Server，它允许用户在 Windows 环境下运行 X Window System 设计的图形界面程序。VcXsrv 通过充当一个 X 服务器，使得在 Windows 上运行的 Linux GUI 应用程序成为可能，特别是对于那些通过 Windows Subsystem for Linux (WSL) 使用 Linux 环境的用户来说，它提供了一种在 Windows 桌面上无缝运行图形用户界面 (GUI) 应用程序的方法。	Readme
14	WinWSL	WinWSL，即 Windows Subsystem for Linux (适用于 Linux 的 Windows 子系统)，是微软为 Windows 10 和 Windows 11 操作系统引入的一项功能。它允许用户在 Windows 上运行 Linux 环境，而无需单独的虚拟机或双引导配置	Readme

RflySim 工具链入门使用文档

各章节资料检索.....	I
RflySim 工具链各软件简介	III
1. RflySim 工具链背景	1
2. RflySim 是什么?	2
3. RflySim 工具链版本划分	3
4. RflySim 工具链特点	3
4.1. 统一性.....	4
4.2. 无人机物理特性仿真还原度高.....	4
4.3. 易用性.....	5
4.4. 完全分布式构架.....	5
4.5. 支持多种机型仿真.....	5
4.6. 支持大规模无人机集群 SIL/HIL 仿真	6
4.7. 提供高逼真的 3D 视景	7
4.8. 支持基于视觉的控制.....	7
4.9. 支持多种故障注入.....	8
5. RflySim 工具链学习资料	8
6. 工具链版本区别.....	错误!未定义书签。

1. RflySim 工具链背景

智能无人系统开发和测试通常分为基于实验和基于仿真。如表 1 所示，以无人机开发为例，基于实验的开发和测试虽然很直接，但是存在安全、空间、时间和成本等诸多痛点，以上痛点对于集群飞行测试更“痛”。基于仿真的开发和测试需要建立无人系统的数学模型，围绕模型进行开发和测试，最终回到真实的无人系统。对于基于仿真的开发和测试，痛点在于如何建立合理的模型。这导致传统仿真不真，而真的又太贵。然而，基于实验的开发和测试虽然直接但是“短期获利”行为，而基于仿真的开发和测试虽然看似“麻烦”但是“长期获利”行为。比如：特斯拉工程师表示他们花了 10 年进行能量流动的模型建，在不更换电池组的情况下实现续航里程提升。然而，据笔者所知，在国内大部分中小公司对无人机开发非常依赖实验，只有大公司和航空航天院所在开发重要的国家型号会采用基于模型的开发过程。

表 1 无人机基于实验的开发和测试与基于仿真的开发和测试对比

基于实验的开发和测试	基于仿真的开发和测试
安全痛点： 旋翼转速高，飞行过程危险高，特别对于在校学生	室内进行 只需要电脑等设备，成本低，场地受限小...
空间痛点： 室内空间又寸土寸金，而室外空域又难申请	可以仿真任何故障，并在期望的飞行环境中自动注入。
时间痛点： 无人机通常不稳定，调试测试时间花费巨大，并且大部分时间花在硬件调试而非算法	所有状态、输入、输出均可以获取，可以随时获取真值。
成本痛点： 硬件成本高，调试过程经常摔机，并且硬件更新换代时间快	可以在实验开发阶段随时进行。 结果可信度难以保证，通常仅用于开发和功能测试。

典型的无人智能体集群协同控制从仿真到实验全流程、全模块的系统架构如图 1 所示，涉及包含无人智能体系统的设计与搭建、通讯系统的设计与搭建、定位系统的搭建与设计、导航与运动控制系统的设计与搭建、载荷系统的设计与搭建、任务规划系统的设计与搭建、地面站综合控制系统的设计与搭建等在内的众多软硬件系统，是一个庞大的生态系统和工具链。

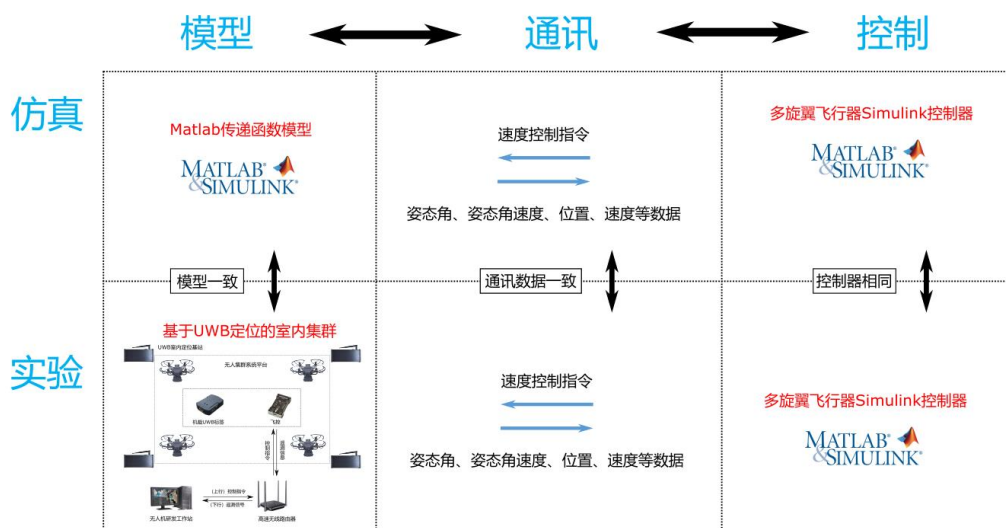


图 1 典型无人智能体集群协同控制仿真与实验系统框图

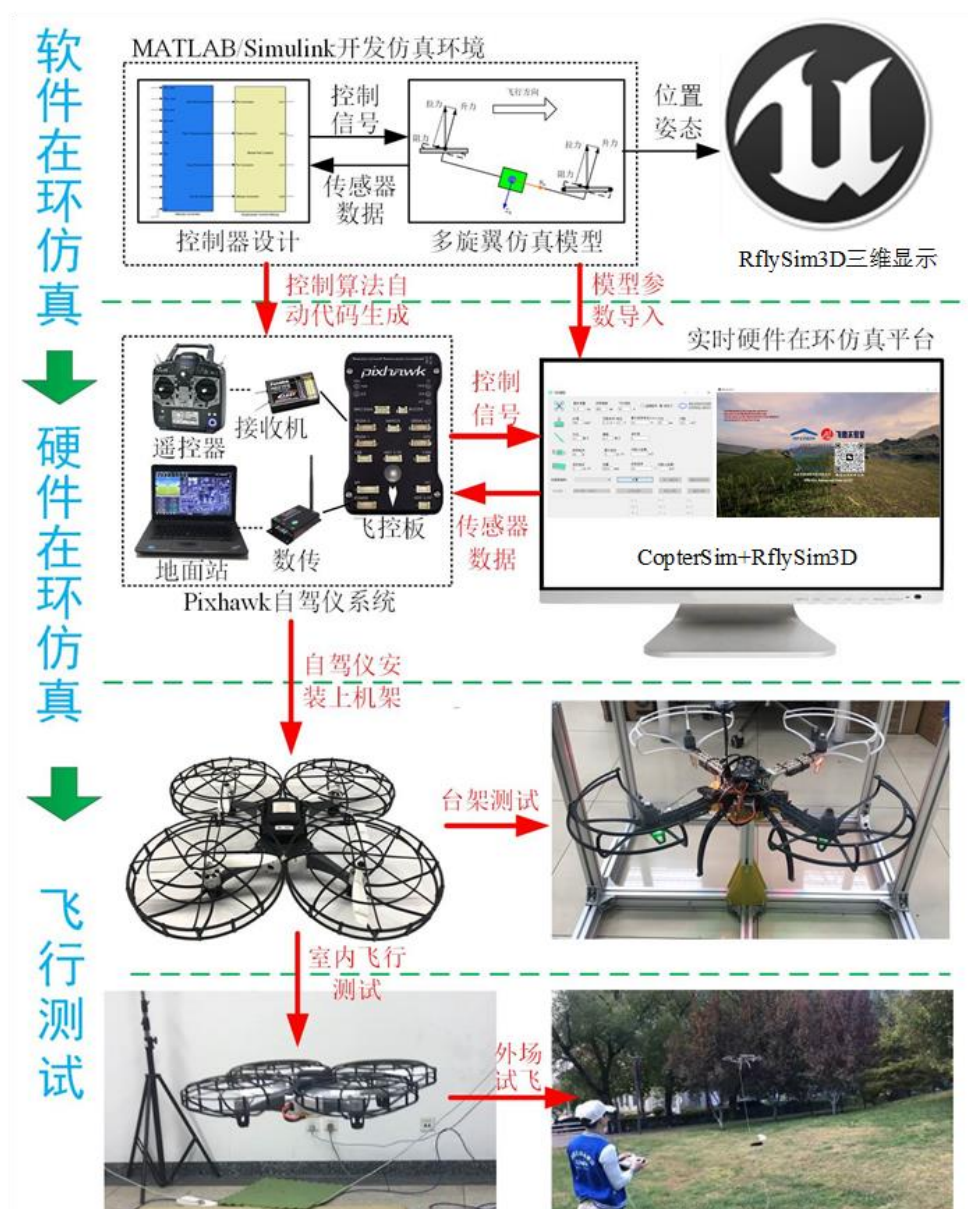
目前大多数高校和科研所在开展多智能体协同控制相关研究领域时，往往存在以下困难：

- 整个平台设计工具链复杂庞大，从零开始搭建费时费力；
- 缺乏系统性的平台搭建力量，研究初期，人员精力被消耗在非核心研究职责方向上；
- 现有各分散的软硬件存在使用标准、软件接口、通讯协议不统一，相关源码不开放，学习掌握和二次开发难度较大。
- 部分开源平台，服务支撑能力不足，无法满足本土科研需求。

面对上述的需求和不足，目前亟需一款面向无人系统开发、仿真及测试的全流程软件生态系统或工具链。

2. RflySim 是什么？

RflySim 智能无人集群系统自动化设计与开发工具链（RflySim 工具链，RflySim Toolchain）。由飞思实验室联合北航+中南团队，打造的专业、免费、开放的开发工具链，提供无人系统从算法开发、到硬件在环仿真、再到真机部署实验的全流程自动化解决方案。该工具链采用基于模型（MBD）的设计理念，基于 PX4、MATLAB/Simulink 和 ROS 等软件系统以及相关智能硬件，可开展(不限于)无人智能体控制、集群、视觉等领域的仿真与实操。针对上述问题的研究时，可以开展无人系统建模、控制器设计、软件在环仿真（Software-In-the-Loop, SIL）、硬件在环仿真（Hardware-In-the-Loop, HIL），通过 MATLAB/Simulink 的自动代码生成技术，控制器能够被方便地自动下载到硬件中，用于 HIL 仿真和实际飞行测试，实现仿真到真机的无缝过渡（Sim2Real）。



3. RflySim 工具链版本划分

RflySim 工具链目前分为了三个版本：免费版、完整版、企业定制版，请咨询 service@rflysim.com。

- **免费版：** 最多支持 8 个飞机（8 个飞机的软硬件在环仿真）；支持 1 个飞机的视觉板卡在环仿真。注：当 CopterSim 的 CopterID 为 1 时，可开启局域网通信模式，支持与虚拟机或 NX 板卡，实现视觉在环仿真；带直升机、垂起飞机、水下潜航器等 DLL 动态模型，能够进行任务级别的软硬件在环仿真，但是不提供模型源码。不支持联机按钮，无法向局域网发送消息。只能单电脑仿真，不支持分布式多电脑组网，形成大规模集群仿真。不支持 HITL_NET 等高级仿真模式，无法连接局域网中的带网口的 Pixhawk（例如，6x），或第三方飞控进行硬件在环仿真。
- **完整版：** 保留 RflySim 全部功能，RflySim3D 支持接收局域网数据（默认关闭，选

择性开启)，支持生成红外图像，CopterSim 支持联机模式（UDP 方式，小规模分布式仿真）不支持 Redis 通信协议，不支持 RflySimCloud 大规模集群框架（用于大规模分布式集群仿真）不支持 LOGO 替换或屏蔽（用于企业定制）带基于 UDP 的分布式视觉集群仿真例程、数字孪生例程等。

- **企业定制版：**CopterSim 和 RflySim3D 支持隐藏或自定义 LOGO；支持多电脑分布式组网构架大规模集群仿真；支持 Redis 通信协议（用于大规模分布式集群仿真）。带定制化的大型进阶例程（直升机、倾转旋翼、多机集群实验等）；支持 Windows 高性能电脑，或 Linux 服务器进行部署（RflySimCloud 云平台）；基于 FPGA 的超高实时硬件在环仿真平台（支持 Ardupilot 等飞控）。

各个版本之间的更多区别请见：<https://rflysim.com/doc/zh/RflysimVersions.pdf>

4. RflySim 工具链特点

RflySim 工具链高级版及定制版其具有如下特点：

4.1. 统一性

整个研究框架扩展到所有的无人控制系统，形成一个标准的自动开发、测试与评估框架体系；



4.2. 无人机物理特性仿真还原度高

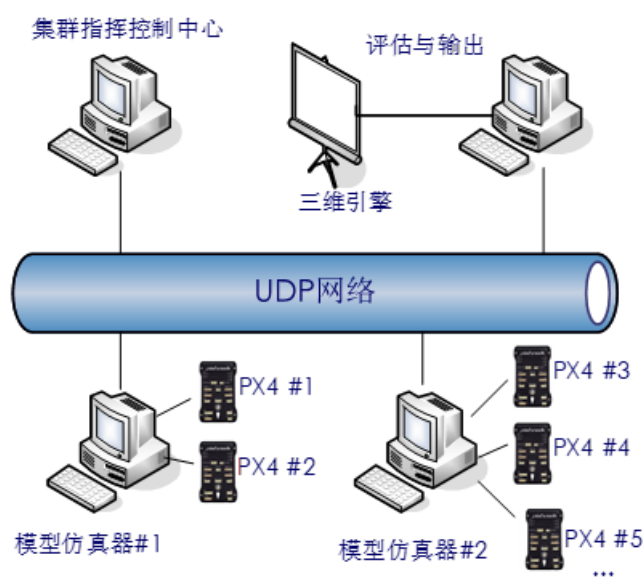
其开发者均为无人机研究团队，具有丰富的无人机领域研究经验；

4.3. 易用性

在 Windows 平台下进行一键安装、一键代码生成、一键固件部署、一键软硬件在环仿真和快速实飞, 非常方便易用。用户不需要了解飞控源码、Linux 编程、C/C++编程、网络通信、飞机组装等底层知识, 只需具备基础的 Simulink (或 Python) 知识, 即可快速将自己的算法经过层层验证并应用于真机上, 有助于更专注于算法的开发与测试。

4.4. 完全分布式构架

所有应用软件都可以在同一台或多台电脑上多开, 并且各个应用之间可以通过 UDP 网络相互收发消息, 这种分布式的构架非常适合于大规模带视觉的无人机集群仿真测试;



4.5. 支持多种机型仿真

支持小车、固定翼、垂直起降飞行器 (VTOL) 等多种机型。用户可以在 Simulink 中根据规范的接口搭建机架模型, 然后自动生成 DLL 文件用于 HIL 仿真。进一步实验平台能被拓展到任意无人系统中;



4.6. 支持大规模无人机集群 SIL/HIL 仿真

在同一局域网下，开发者可以使用 CopterSim 连接多个 Pixhawk 进行硬件或软件在环仿真。同时，还可以使用 Simulink 或者 C++ 程序控制飞行器，控制指令会由 Mavlink 协议经过串口（数传）或者网络（WIFI）发送给 Pixhawk；



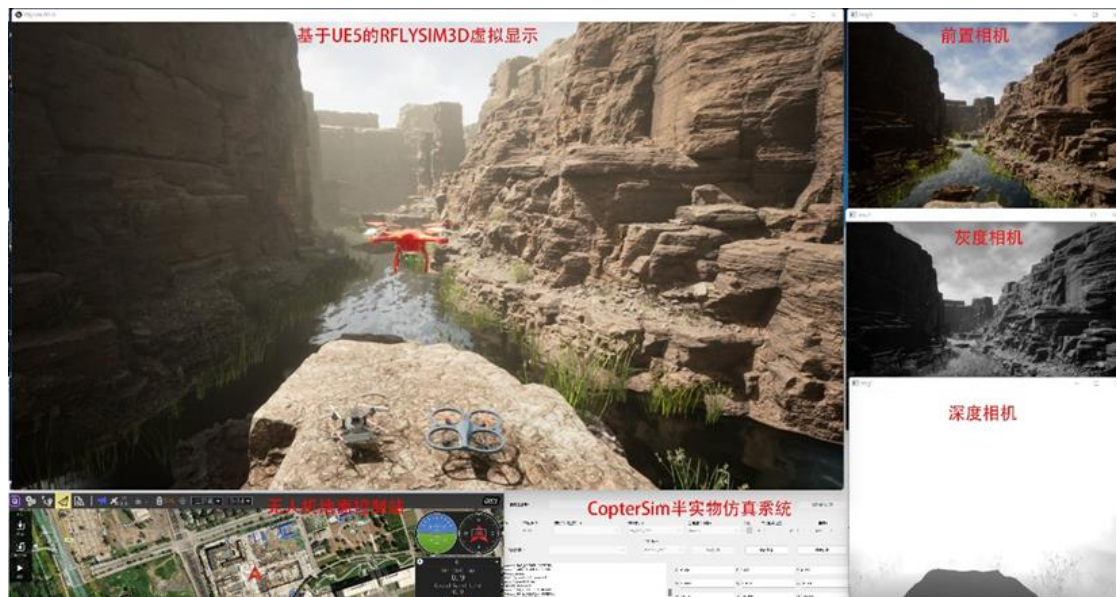
4.7. 提供高逼真的 3D 视景

提供源码和教程帮助开发者在虚幻（Unreal Engine, UE）中搭建高度逼真的 3D 场景，用于室内外环境仿真或者基于视觉算法的开发；场景支持物理碰撞引擎，全球地形和地图，OSGB+Cesium 倾斜摄影视景地图导入，自定义 GPS 坐标，任意多窗口切换观察，RGB、深度、灰度、IMU、激光雷达等传感器数据输出，支持共享内存或者 UDP 图片直发指定 IP 地址，可用于机载计算机硬件在环 SLAM 仿真。



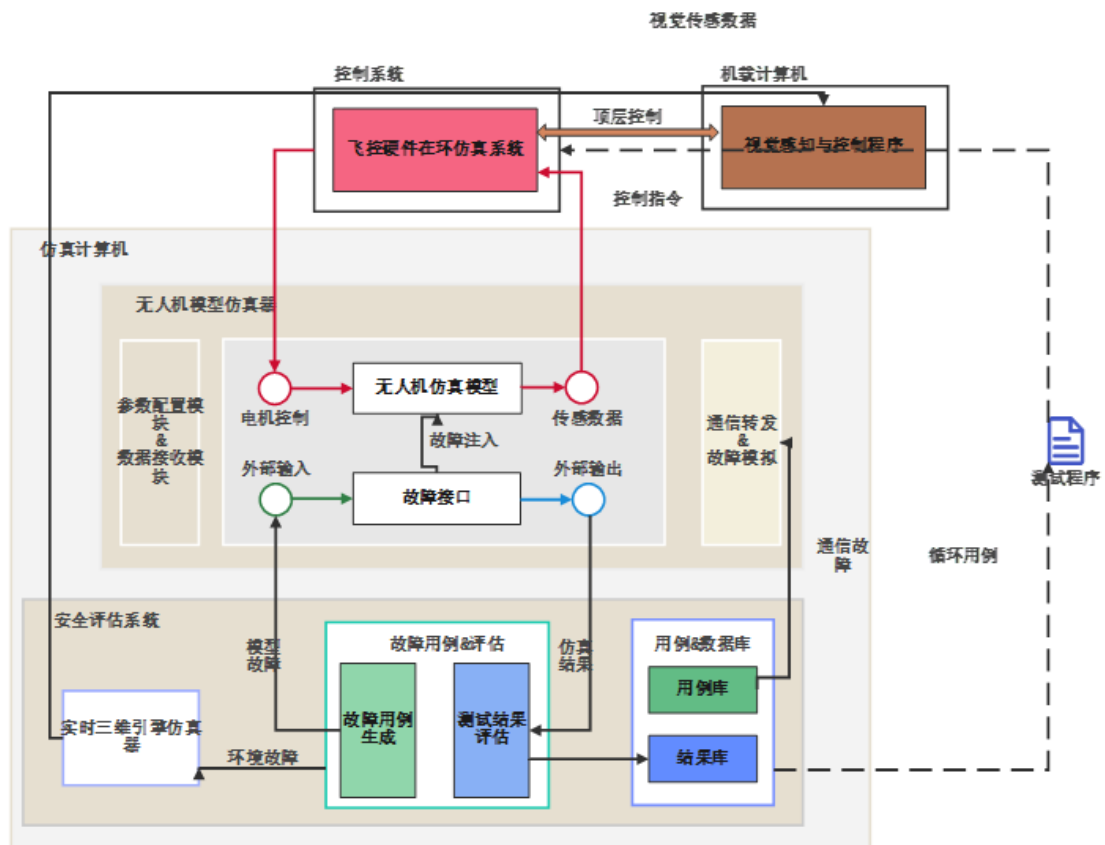
4.8. 支持基于视觉的控制

基于 UE 的三维视景平台还支持视角切换功能，可以获取方便地获取到多个视角的图像数据。还支持通过共享内存的方式在 Simulink、Python、C/C++ 等代码平台中实时获取到图像数据并进行处理，处理得到的视觉数据可以通过 UDP 再返回给 CopterSim 或者 Simulink 控制，形成带有视觉的硬件在环仿真闭环。



4.9. 支持多种故障注入

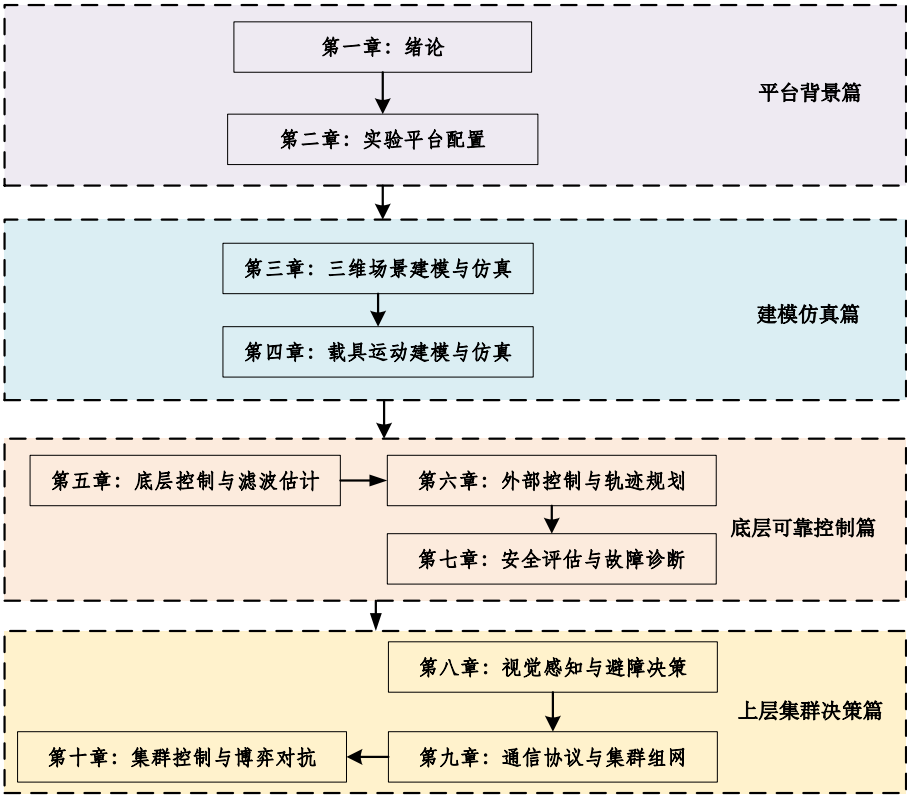
可实现的故障类型包括模型故障、通信故障和环境故障等。



5. RflySim 工具链学习资料

本工具链主要根据无人系统开发过程阶段将其划分为 10 个不同得章节。其内容包括利用 RflySim 对场景搭建、无人系统的动力学模型建立、底层控制、智能感知、健康评估、

网络模拟、集群控制等等。其中第二章关于 RflySim 工具链使用上手，通过该章可以完成软件平台的安装方法和硬件平台配置。通过一二章，读者可以对研究对象和使用工具有个总体的了解，这为后续开发设计打下了基础。在第三、四章中为三维模型与场景开发，以及无人载具系统建模开发，其中前者涉及无人系统工作的环境，后者涉及无人系统的数学模型。基于第三、四章的实践，进入第五、六章中，包含底层控制开发实践涉及如何控制无人系统的动力单元，而远程控制开发实践涉及如何控制无人系统的速度等高层指令。后者涉及的无人系统是“无人系统+自动驾驶仪”的复合系统，其中自动驾驶仪可以用于控制无人系统的速度。远程控制开发实践多服务于高层决策。在第七章中故障注入与安全测试开发实践内容主要涉及如何设计带故障注入的无人系统模型，以及如何进行故障注入等。这部分工作可以用于测试系统的可靠性和容错能力等等。第八章中讲解了很多智能系统都离不开视觉这一信息量丰富的传感器。视觉算法开发实践内容主要涉及如何接入视觉传感器，并完成视觉输入到控制。第十章中包括集群通信组网开发实践和集群控制开发实践。集群相关工作也可以与单机相关工作进行结合，构建不同场景。整体框架如下：



各章节资料检索及 RflySim 工具链各软件简介请见：[各章节资料检索](#)、[RflySim 工具链各软件简介](#)。