
目录

1. RflySim 平台核心组件介绍	1
1.1. CopterSim	1
1.1.1. 模型配置区	2
1.1.2. 仿真功能区	2
1.1.3. 状态显示区	3
1.2. RflySim3D/RflySimUE5	3
1.3. QGroundControl 地面站	4
1.4. Python38Env	4
1.5. MATLAB 自动代码生成工具箱	5
1.6. SITL/HITL 批处理脚本	5
1.7. PX4 Firmware 源码	5
1.8. WinWSL 子系统	6
1.9. Simulink 集群控制接口	6
1.10. RflySim 配套资料文件	6
2. RflySim 平台配套硬件系统	7
2.1. 飞思系列飞机	7
2.1.1. 飞思 X150 四旋翼无人机	7
2.1.2. 飞思 X200 四旋翼无人机	8
2.1.3. 飞思 X450 四旋翼无人机	9
2.1.4. 飞思 X680 四旋翼无人机	11
2.2. PX4 系列飞控	13
2.3. 常用遥控器配置	13
3. RflySim 平台实验流程简介	14
3.1. 底层控制系统开发实验流程	14
3.2. 顶层控制系统开发实验流程	15
3.2.1. 机载板卡硬件在环阶段	15
3.2.2. 多机 HIL 仿真阶段	16
3.2.3. 单机自主控制阶段	16
3.2.4. 半实物集群控制阶段	17
3.2.5. 真机集群控制阶段	17
3.2.6. 完全真实环境下的多机协同阶段	18

实验平台配置

1. RflySim 平台核心组件介绍

RflySim 平台包含了众多在进行无人系统建模、仿真、算法验证等开发过程中所涉及到的软件，其中，核心组件有 CopterSim、QGroundControl、RflySim3D/RflySimUE5、Python 38Env、WinWSL 子系统、SITL/HITLRun 一键运行脚本、MATLAB 自动代码生成工具箱、Simulink 集群控制接口、PX4 Firmware 源码、RflySim 配套资料文件以及配套硬件系统。用户通过对这些核心组件的学习即可快速上手无人系统的开发和测试工作。

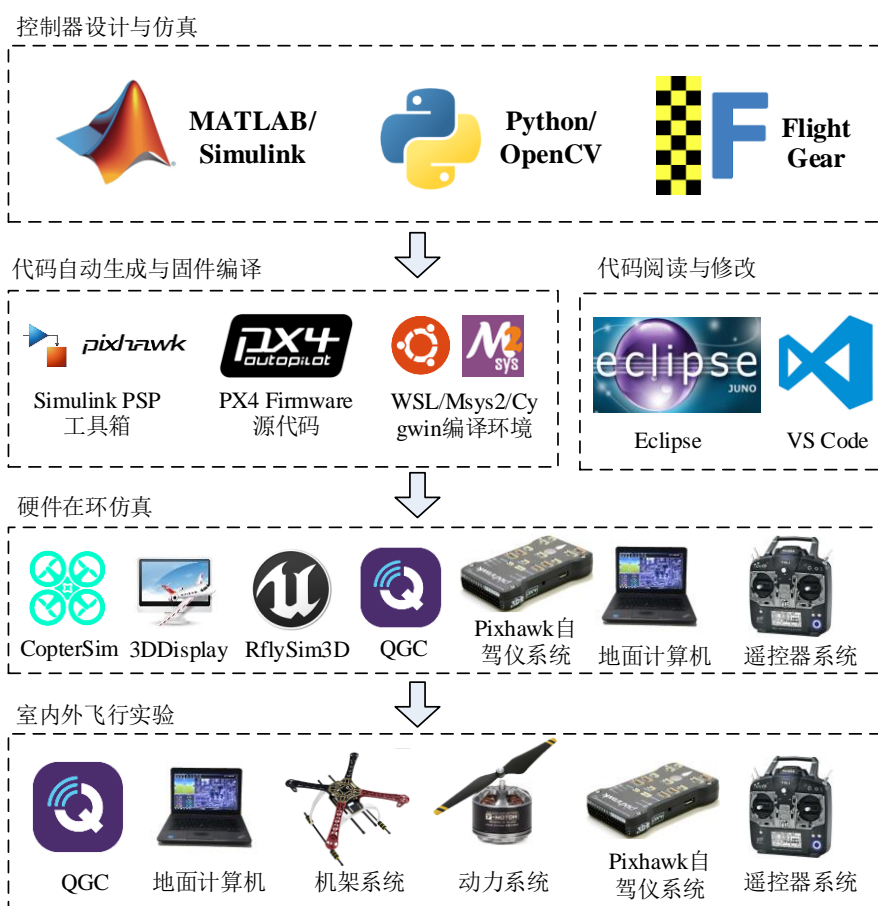


图 1 RflySim 软硬件组件与整体流程的相互关系

1.1. CopterSim

CopterSim 是 RflySim 平台核心软件之一，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—模型和通信。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。CopterSim 是所有数据通信的中心；飞控与 CopterSim 通过串口（硬件在环 HITL）或网络 TCP/UDP（软件在环 SITL）进行连接，使用 MAVLink 进行数据传输，实现控制闭环，模拟室外飞行情形；CopterSim 发

送飞机位姿、电机数据到三维引擎，实现可视化展示；转发 MAVLink 消息到 Python 视觉或 QGC 地面站，传输飞机实时状态，实现顶层规划控制；等等。同时，CopterSim 软件对 MAVLink 数据进行压缩后以 UDP 结构体形式发给集群控制软件，达到通信精简目的（大规模集群需求）。

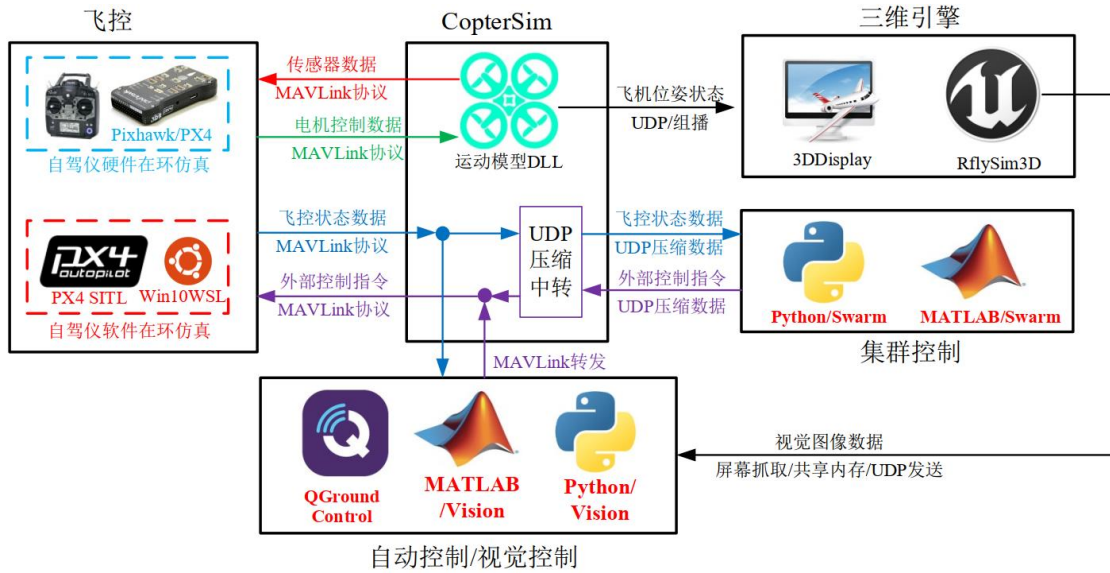


图 2 CopterSim 软件的数据通信结构图

CopterSim 的主界面主要分为模型配置区、仿真功能区、状态显示区三部分，如下图所示。



1.1.1. 模型配置区

可以配置定制多旋翼的构型、尺寸、重量等数据，CopterSim 将计算出指定多旋翼模型的参数，实现不同机型的仿真。

1.1.2. 仿真功能区

支持设置飞机的 ID、通信接口、仿真模式、三维场景、分布式联机仿真、地图初始位置、飞控 COM 串口选择、通信模式等配置；同时可以控制仿真的开始、暂停和重新启动；

1.1.3. 状态显示区

左侧会显示模型和 Pixhawk 回传状态，右边是模型的仿真数据。一个代表性小实验，用于介绍 DLL 模型的导入功能。

1.2. RflySim3D/RflySimUE5

Unreal Engine 具有强大的图形引擎，支持高品质的 3D 图形和视觉效果；内置的蓝图可视化脚本系统，使得开发者可以使用图形化的方式来创建复杂的逻辑和交互行为，而无需编写代码；拥有庞大的社区支持和资源库，包括模型、纹理、音效、插件等等，这些资源可以帮助开发者加快开发进程和提高模型品质；支持多个平台，包括 PC、主机、移动设备和虚拟现实设备等等；开发者可以根据自己的需求来自定义和扩展引擎的功能和工具，使得 Unreal Engine 适用于各种类型的游戏和应用程序开发。

RflySim3D/RflySimUE5 是基于 Unreal Engine 引擎开发的无人系统高逼真仿真软件，继承了 Unreal Engine 引擎的各种优势，通过 UDP 的形式与平台其他软件进行通信，实现高逼真的无人系统仿真，同时，可通过屏幕抓取、共享内存等方式将视觉图像数据传输到 QGroundControl、MATLAB、Python 等软件，实现无人系统的视觉算法验证仿真，如图 3 所示。

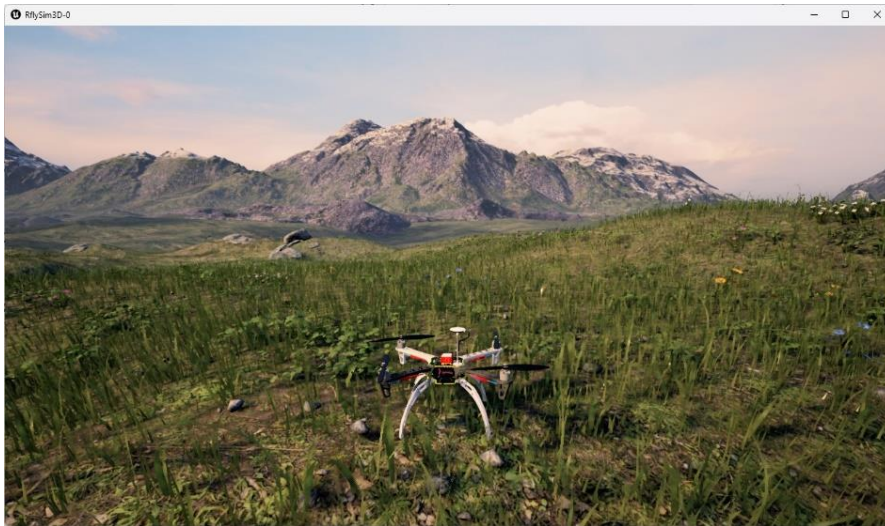


图 3 RflySim3D/RflySimUE5 显示主界面

同时，针对电脑配置较低的用户，RflySim 平台提供另两种三维仿真软件，分别为：FlightGear 和 3DDisplay。FlightGear 的开发团队来自世界各地，包括程序员、飞行员、物理学家和飞机制造商等领域的专家，提供了多种不同类型的飞机模型和场景，包括各种民用和军用飞机模型，以及多种不同的场景和环境模拟。它是一款非常受欢迎的开源飞行模拟器软件，可以通过 UDP 接收 Simulink 发送的飞行状态，方便地观测 Simulink 仿真时飞机的飞行状态。3DDisplay 是由北航可靠飞行控制研究组开发的虚拟飞行模拟器软件，提供了三维模型和虚拟环境，支持多种飞机模型和场景。用户可根据个人电脑的配置情况，自由切换 RflySim3D/RflySimUE5、FlightGear、3DDisplay 三款仿真软件。



1.3. QGroundControl 地面站

无人机地面站是无人机应用控制系统的关键组成部分，操作员可以通过鼠标、触摸屏、遥控手柄操作地面站以达到控制无人机的目的，并且通过在地面站上设定航点信息以及规划航线，可以使无人机按照预设的路径飞行，并在飞行途中完成航点任务，包括拍照，飞机动作，录像等。目前主流开源地面站为 QGroundControl 和 MissionPlanner，而 QGroundControl 是专为 PX 4 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。相比来说 QGroundControl 的优势有：1) 开源性：QGroundControl 是一个完全开源的软件，这意味着用户可以根据需要自由修改和定制它。2) 易于性：用户界面非常清晰、现代化和易于使用，使用户可以快速进行任务规划和飞行计划。3) 多平台支持：QGroundControl 可在多种操作系统上运行，如 Windows、Linux 和 MacOS 等。4) 模块化架构：QGroundControl 的模块化架构使得开发人员可以轻松地添加和扩展新功能，而不会影响到现有的功能和性能。总体而言，QGroundControl 是一个现代化、易于使用、开源且高度可定制的地面站软件，它在多平台支持、多语言支持、模块化架构等方面具有明显的优势。

1.4. Python38Env

Python 是一种高级的、面向对象的解释型编程语言。它最初由 Guido van Rossum 于 1989 年创建，现在已经成为一种流行的编程语言，用于开发 Web 应用程序、数据分析、人工智能、科学计算、网络编程等等。Python 是一种简单易学、易读、易编写的语言，因此也

被广泛用于教学和入门级编程。

Python38Env 是一个 Python 3.8 的编程语言的虚拟环境，包含了 numpy、pymavlink、OpenCV、pyulog 等库，可快速进行无人系统的相关算法开发，无需用户部署 python 运行环境和各种功能库。

1.5. MATLAB 自动代码生成工具箱

MATLAB 自动代码生成工具箱是一个 MATLAB 的扩展工具包，用于从 Simulink 模型中生成 C 代码、可执行文件、静态库和动态库等各种形式的可执行文件。这些可执行文件可以直接在嵌入式平台上运行，而不需要进行手动编写和调试。支持多种嵌入式平台，包括 ARM Cortex-M 和 A 系列处理器、NXP MPC55xx 和 MPC56xx 系列、Pixhawk 系列等。

该模块库中包含 GPS 数据模块、电池数据模块、uORB 模块等众多模块。基于 RflySim 和 Pixhawk Support Package 平台，用户可实现：① 在 Simulink 中设计和模拟控制算法；② 从 Simulink 模型自动生成 C 代码和 PX4 固件，并将其直接烧录到 Pixhawk 板上；③ 使用 MATLAB 脚本和函数配置和校准 Pixhawk 板及其外围设备；④ 实时读写与 Pixhawk 板的数据等等。

1.6. SITL/HITL 批处理脚本

批处理技术是指计算机可分组处理收集到的若干任务，整个过程完全自动化，无需人工干预，这也可以称为工作负载自动化 (WLA) 和作业调度。它具有速度和成本节约、准确性、操作简单等优点。

RflySim 基于批处理技术开发了众多批处理脚本，让用户可以快速一键启动部署多架、多种、多样无人系统组合式仿真。提高了无人系统开发和仿真速度。平台较常用的批处理脚本：① SITLRun.bat：是开启多机软件在环仿真的批处理文件，其本质是通过脚本方式启动并配置 RflySim 平台的部分软件和选项，② HITLRun.bat：是开启多机硬件在环仿真的批处理文件，插入多个飞控之后，再双击该批处理文件，根据提示输入想要参与仿真的 Pixhawk 串口号，即可开启多机的硬件在环仿真（以输入串口顺序进行飞机 ID 排序）。除此之外 RflySim 平台还提供众多批处理脚本文件，如：SITLRunPos.bat、SITLRunLowGPU.bat、SITLRunMAVLink.bat、HITLRunPos.bat、HITLPosSysID.bat、HITLPosStr.bat 等等，用户可以通过编辑器打开这些文件，根据个人需求修改其中的参数，实现自定义开发，快速开始仿真或算法的验证。

1.7. PX4 Firmware 源码

PX4 由瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH)计算机视觉与几何实验室的一个软硬件项目 PIXHAWK 演变而来，该飞控系统完全开源，为全球各地的飞控爱好者和研究团队提供一款低成本高性能的高端自驾仪。经过来自工业界和学术界的世界级开发人员多年的开发与完善，目前 PX4 飞控系统已经形成完善合理的软件架构，配合 Pixhawk 系列自驾仪硬件平台上，构成了 Pixhawk PX4 自驾仪软硬件平台，可控制多旋翼、固定翼、飞艇等多种载具，是目

前世界范围内广泛应用的开源无人机自驾仪软硬件平台。

RflySim 平台支持一键部署 PX4 编译环境，可自定义选择不同的 PX4 固件编译命令和固件版本，平台会将选定的 PX4 Firmware 源代码部署在设定的安装路径上，如果固件存在，会删除旧的固件文件夹，并进行全新部署，极大的提高了 PX4 环境部署的效率。

1.8. WinWSL 子系统

WinWSL 子系统是一种 Windows 操作系统上的子系统，用户可在 Windows 系统中运行 Linux 应用程序，使用 Linux 命令行界面（CLI）并安装 Linux 发行版，RflySim 平台一键安装的 Linux 系统为 Ubuntu18.04.5，主要是用于 PX4 源代码的编译，

本平台还提供另两套编译环境来实现 Windows 平台下对 Linux 编译环境的模拟，分别是：基于 Msys2 的 Msys2Toolchain 编译环境和基于 Cygwin 的 CygwinToolchain 编译器。用户可根据自己的 PX4 版本选择不同的编译环境，且在一键部署安装界面不同的选择即可完成不同编译环境的切换。

1.9. Simulink 集群控制接口

RflySim 平台基于 Simulink S 函数开发了集群控制接口，如图 4 所示，该接口是通过 Simulink S 函数通过 C++混编实现，配合 Simulink 自带的 UDP 模块优点，具有效率高、运算小、延迟低、更可靠、扩展性强等优点。用户可通过复制粘贴的方式，将该模块加载到自己的控制系统中，帮助用户快速实现无人系统集群控制开发。

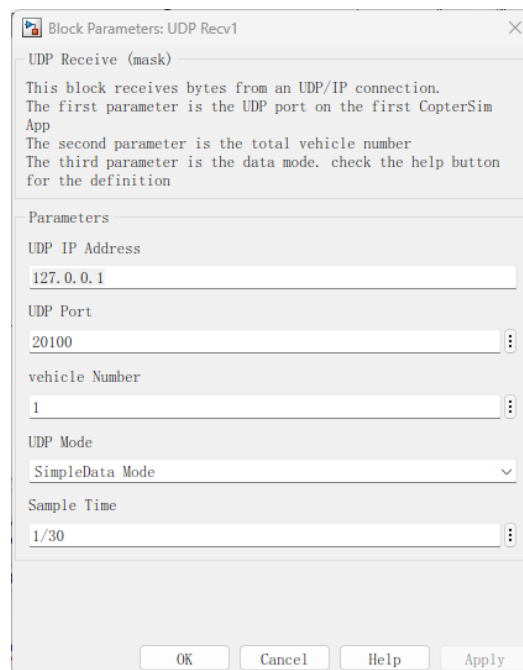


图 4 集群控制接口界面

1.10. RflySim 配套资料文件

RflySim 平台提供非常完善的学习资料及例程文件，通过 PPT 课件资料和 RflySimAPIs

例程文件，使用户循序通过渐进、层层递进的学习方式，从无人系统底层控制算法→中层决策算法→顶层学习算法的开发与验证，一站式搭建、开发出自己所需的无人系统。

2. RflySim 平台配套硬件系统

RflySim 平台提供了一套完整的配套硬件系统，包括四旋翼无人机、飞控、遥控器等组件。这些组件均能与平台完美兼容，可以在 RflySim 平台中是实现软、硬件在环仿真实验，基于生成的固件实现无人机在真实环境下的飞行。

2.1. 飞思系列飞机

目前支持的飞机有飞思 X150、飞思 X200、飞思 X450 等四旋翼无人机，其中飞思 X150 为室内集群控制科研全新设计的微型四旋翼无人机，

2.1.1. 飞思 X150 四旋翼无人机

为室内集群控制科研全新设计的微型四旋翼无人机，对称电机轴距 140mm，创新式全防护结构设计，摒弃以往碳板冗杂布线，碳尼 3D 打印高强度、轻质量机体，采用激光定高与光流定点，整机一体化方案，全面提升室内集群科研效率。



科研方向：光学定位系统导航定位开发；集中式/分布式集群编队算法开发车机组合天地一体协同编队控制开发；ROS 二次开发；matlab 二次开发；

版本与性能

产品配置	标准版	旗舰版
基础配置	光流定点、激光定高、外置磁罗盘	
机载板卡	ZYpi-3566	
板卡性能	CPU: RK3566 内存: 4GB, DDR4 存储: 32GB WIFI: 集成 wifi6	
视觉传感器	无	单目传感器*2, 200 万像素
定位系统	室内光学定位系统	室内光学定位系统 /GPS
通讯方式	WIFI	
基础软件环境	各传感器驱动	

功能特点	专注于实现集中式和分布式集群编队功能	在实现集中式和分布式集群编队功能基础上，并可以进行一般性视觉功能开发应用；可基于 GPS 定位进行飞行
------	--------------------	---

飞行器指标

飞思 X150 智能无人机	
尺寸 (含桨)	200*200*85mm
对称电机轴距	140mm
飞行器重量	205g
电池	3s, 1300mAh 105g
整机重量 (含电池)	310g
最大上升速度	2m/s
最大下降速度	2m/s
最大水平飞行速度	5m/s
最大起飞海拔高度	3500m
续航时间 (空载)	8 分钟
工作环境温度	-20° C 至 50° C

应用场景：完善的室内微型无人机集群协同编队科研解决方案，适合高等院校教学科研，以及军工单位科研，主要应用于室内无人机集群控制、分布式集群算法验证领域。

2.1.2. 飞思 X200 四旋翼无人机

室内小型智能无人机，对称电机轴距 200mm，全碳纤维防护机体设计，螺旋桨下沉式安装方式，采用内部激光定高与光流定点，适用于室内无人机集群协同编队应用，具有分布式集群无人机协同控制能力。可搭载可见光摄像头与机载视觉处理板卡，具有进行视觉导航、目标识别、目标跟随能力。



科研方向

- 基于模型设计开发；
- ROS 控制开发；
- matlab 控制开发；
- 集中式/分布式集群控制算法开发；

进行视觉导航、目标识别、目标跟随算法验证；

产品版本

产品配置	标准版	单目版	模型设计版
基础配置	光流定点、激光定高、外置磁罗盘		
飞控	Racer 飞控		
机载板卡	NX Xavier		NX Xavier/ZYpi3566
视觉传感器	T265	单目相机	无
通讯方式	WIFI		
基础软件环境	各传感器驱动		
功能特点	采用 T265 进行定位，进行高精度室内集中式/分布式集群控制算法开发	集中式/分布式集群控制算法开发；目标识别、目标跟随算法验证	基于模型设计开发；ROS 控制开发；

飞行器指标

飞思 X200 智能无人机	
尺寸（含桨）	300*300*160mm
对称电机轴距	200mm
飞行器重量	580g
电池	4s, 5300mAh, 469g
整机重量（含电池）	1049g
额外最大载重	200g
最大上升速度	2m/s
最大下降速度	2m/s
最大水平飞行速度	10m/s
最大起飞海拔高度	4000m
续航时间（空载）	20 分钟
工作环境温度	-20° C 至 50° C

应用场景

室内小型无人机集群协同编队科研解决方案，作为专业面向高校及科研院所的智能飞行器产品，主要应用以下科研领域:基于模型设计开发；室内集中式/分布式集群算法开发；视觉导航；目标跟随；目标识别。

2.1.3. 飞思 X450 四旋翼无人机

专业的室外小型智能四旋翼无人机，对称电机轴距 450mm，整机模块化设计，在搭载机载计算机的同时，配备搭载深度相机和激光雷达等功能模块，形成完善的室外智能飞行器，优异的产品性能可以应对复杂的室外飞行环境，是面向室外集群编队算法开发、slam 导航等研究领域的智能飞行器科研平台。



科研方向

- 基于模型设计开发；
- ROS 二次开发；
- matlab 二次开发；
- 无人机集中式/分布式集群控制；
- 视觉 slam 导航、激光 slam 导航开发；

产品版本

产品配置	领航版	旗舰版	高阶版
基础配置	光流定点、激光定高、外置磁罗盘		
飞控	Racer 飞控		
机载板卡	NX Xavier		
视觉里程计	T265 相机		
空间探测	D435i 深度相机	思岚 S1 激光雷达	D435i 深度相机 思岚 S1 激光雷达
定位系统	GPS/RTK		
通讯链路	200m 范围内—板载 WiFi； 3km—ZY-H3； 10km—ZY-H12		
基础软件环境	各传感器驱动 无人机 offboard 控制示例程序		
功能特点	可进行长达二十多分钟续航的室外集群编队飞行控制；单机实现视觉 slam 导航算法验证与开发	室外集群编队飞行控制；单机实现激光 slam 导航算法验证与开发	在集群的功能基础上，单机同时实现视觉 slam 导航、激光 slam 导航算法验证与开发功能

飞行器指标

飞思 X450 智能无人机	
尺寸（不含桨）	420*420*240mm
对称电机轴距	450mm
飞行器重量	1200g
电池	6s, 6000mAh, 862g

整机重量（含电池）	2062g
额外最大载重	1000g
定位精度	GPS：垂直：±0.5m；水平：±2m
	RTK：垂直：±3cm；水平：±5cm
最大上升速度	2m/s
最大下降速度	2m/s
最大水平飞行速度	8m/s
最大起飞海拔高度	4000m
续航时间（空载）	30min
工作环境温度	-20° C 至 50° C

应用场景

完善的室外小型无人机集群协同编队科研解决方案，适合高等院校教学科研，以及军工单位科研，应用于 Slam 算法开发/验证；路径规划/避障算法开发；AI 算法开发/验证等领域。

2.1.4. 飞思 X680 四旋翼无人机

中型智能四旋翼无人机对称电机轴距 680mm，整机采用工业化设计，高强度机身可作为多任务载荷飞行平台，采用激光定高光流定点，并配备深度相机和激光雷达等功能模块，在具备视觉导航开发与目标跟随等开发条件的同时，可以进行较大载荷任务飞行，是一款兼顾载重、长时续航和科研开发的多功能智能无人机。



科研方向：

- 基于模型设计开发；
- 无人机集中式/分布式集群控制；
- 室外机载集群控制算法开发；
- ROS 控制开发、支持 matlab 控制开发；
- 与无人车结合进行天地一体协同编队控制；
- 进行视觉导航、目标识别、目标跟随算法验证；

产品版本：

产品配置	标准版	定制版
------	-----	-----

基础配置	光流定点、激光定高、外置磁罗盘	
飞控	H7 飞控	
机载板卡	NX Xavier	
空间探测	D435i	激光雷达
吊舱	无	G1 云台吊舱
其他功能模块	无	定制搭载
定位系统	GPS/RTK	
通讯链路	3km—ZY-H3; 10km—ZY-H12	
基础软件环境	各传感器驱动	
功能特点	载重较大，长时续航；室外可进行多任务载荷集群编队飞行；搭载 NX 板卡，同时进行多种复杂算法验证，单机实现目标识别、视觉导航等人工智能应用开发。	可根据具体的应用需求进行定制化搭载传感器或功能模块设备，满足图像识别、目标跟随等多种功能需求，推荐选择搭载 G1 云台吊舱、激光雷达、RTK 高精度定位模块、定制版云台吊舱等。

飞行器指标

飞思 X680 智能无人机	
尺寸（不含桨）	567*567*400mm
对称电机轴距	680mm
飞行器重量	2550g
电池	6s, 16000mAh, 1475g
整机重量（含电池）	4025g
额外最大载重	2000g
定位精度	GPS: 垂直: $\pm 0.5\text{m}$; 水平: $\pm 2\text{m}$
	RTK: 垂直: $\pm 3\text{cm}$; 水平: $\pm 5\text{cm}$
最大上升速度	2m/s
最大下降速度	2m/s
最大水平飞行速度	12m/s
最大起飞海拔高度	5000m
续航时间（空载）	40 分钟
工作环境温度	-20° C 至 50° C

应用场景

完善的室外中型智能无人机解决方案，适合高等院校教学科研，以及军工单位科研，主要应用于室内无人机集群控制、分布式集群算法验证领域。

2.2. PX4 系列飞控

由于 RflySim 平台是基于 PX4 软件系统开发而成，正常情况下，只要支持 PX4 软件系统的飞控均可在 RflySim 平台上使用。目前长期支持的飞控 Pixhawk 2.4.8(又名 Pixhawk 1)、Pixhawk 6C、Pixhawk 6X。

2.3. 常用遥控器配置

本平台使用的遥控器推荐使用“美国手”的操纵方式，即左侧摇杆对应的油门与偏航控制量，而右侧摇杆对应滚转与俯仰。遥控器中滚转、俯仰、油门和偏航分别对应了接收机的 CH1~CH4 通道，左右上侧拨杆对应了 CH5/CH6 号通道，用于触发飞行模式切换。

油门杆（CH3 通道）从最下端和最上端分别对应了 PWM 信号从 1100 到 1900 附近波动（通道不同或遥控器不同都会存在区别，因此需要校准）；滚转（CH1 通道）和偏航（CH4 通道）摇杆从最左端到最右端对应 PWM 信号从 1100 到 1900；俯仰（CH2 通道）摇杆从最下端到最上端对应 PWM 信号从 1900 到 1100；CH5/6 为三段开关，从顶部（最远离使用者的档位）到底部（最靠近使用者的档位）档位对应 PWM 信号为 1100、1500 和 1900。



油门：控制上下运动，对应固定翼油门杆
偏航：控制机头转向，对应固定翼方向舵
俯仰：控制前后运动，对应固定翼升降舵
滚转：控制左右运动，对应固定翼副翼

3. RflySim 平台实验流程简介

3.1. 底层控制系统开发实验流程

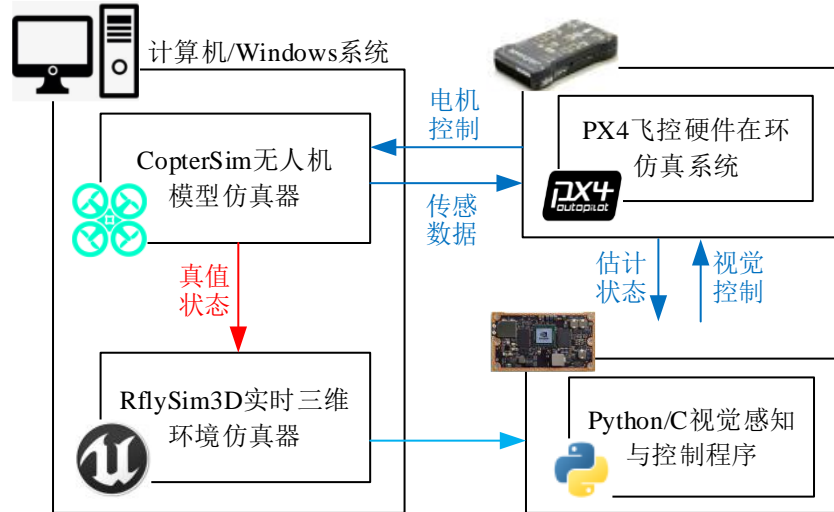
底层控制系统开发依据从易到难的依次顺序分为：算法开发与数字仿真验证阶段、简化模型联调阶段、软件在环仿真阶段、硬件在环仿真阶段、室内外飞行实验；算法开发与数字仿真验证阶段主要任务是基于简化的无人系统模型，进行底层控制算法的开发及验证，使所开发的算法满足最初的需求。基于上一阶段的开发，简化模型联调阶段的主要任务是通过外部控制的方式，实现无人系统的顶层控制，使其无人系统的仿真形成一个闭环，达到无人系统联调的目的。软件在环仿真(Software-in-the-loop Simulation, SIL)是指在主机上编译生成的源代码并将其作为单独的进程执行。通过比较普通模式仿真结果和 SIL 仿真结果，测试模型与生成的代码之间是否存在数值等效性。RflySim 平台的 SIL 仿真整个阶段可在 MATLAB/Python 环境下进行，利用给定无人载具仿真模型和例程，在 Simulink/Python 中进行控制算法设计，并正确连接模型和控制器，确保输入输出信号与实际无人系统一致。如：多旋翼无人机系统：多旋翼模型将传感器数据或状态估计信息（例如，姿态角、角速率、位置和速度等）发送给控制器，控制器将每个电机 PWM 控制指令发回给模型，从而形成一个 SIL 仿真闭环系统。用户可以观察控制性能，自行修改或设计控制器来达到期望的性能需求。硬件在环仿真(Hardware-in-the-loop Simulation, HIL)阶段是一种用于实时嵌入式系统的开发和测试技术。HIL 仿真提供动态系统模型，可以模拟真实的系统环境，加入相关动态系统的数学表示法，并通过嵌入式系统的输入输出将其与仿真系统平台相连[3]。RflySim 平台可将 Simulink 无人载具模型参数导入到 CopterSim 中，并将 Simulink 控制器算法生成代码下载到 Pixhawk 自驾仪，然后用 USB 实体信号线替代 Simulink 中的虚拟信号线。CopterSim 将传感器数据（例如，加速度计、气压计、磁力计等）通过 USB 数据线发送给 Pixhawk 系统；Pixhawk 系统中的 PX4 自驾仪软件将收到传感器数据进行滤波和状态估计，将估计的状态信息通过内部的 uORB 消息总线发送给控制器；控制器再通过 USB 数据线将每个电机的 PWM 控制指令发回给 CopterSim，从而形成一个硬件在环仿真闭环。



3.2. 顶层控制系统开发实验流程

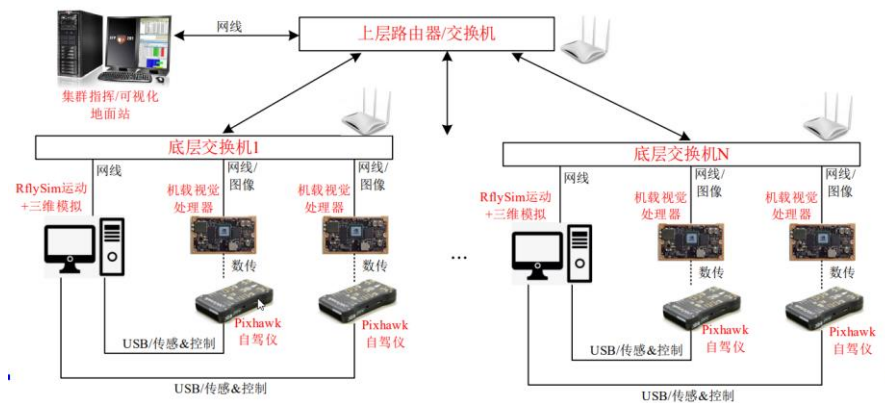
3.2.1. 机载板卡硬件在环阶段

基于 HIL 仿真阶段，本阶段加入更多的硬件，如：组网通信模块、视觉处理模块、数据采集模块等。在这个阶段，我们需将系统部署到实际的硬件设备上，对不同的硬件进行集成和调试，以确保它们能够相互配合，以实现整个系统的高效运行。这个阶段是整个开发过程中的重要环节，也是确保系统最终能够在实际场景中正常运行的关键阶段。



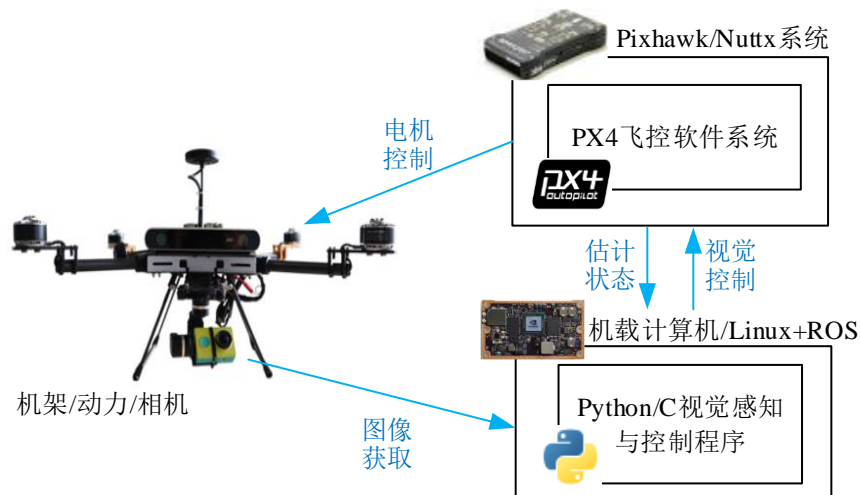
3.2.2. 多机 HIL 仿真阶段

本阶段的整个仿真系统可看作是由多个 HIL 仿真的子系统组成，但不是简单的子系统叠加，需要考虑不同硬件之间的系统拓扑和配置、网络和通信的模型结构以及仿真主机的资源调度和管理等。仿真过程中需对各个硬件设备进行适当的配置和调试，确保各个硬件设备可以正常工作。无论从多机 HIL 仿真的角度，还是从无人系统真实集群控制的角度，通信带宽和计算性能永远是制约集群数量增加的重要瓶颈。由于仿真计算机的性能存在瓶颈，且单台计算机只能够连接数量有限的 Pixhawk 进行 HIL 仿真。同时，随着无人机数量的增加，飞机间相互通信的数据量暴增，直到通信带宽达到饱和。因此，RflySim 平台通过多台电脑组网方式，实现无人机数量的任意扩展，将无人机集群整体分为若干子群，采用网络分层的方式，实现更大规模的集群仿真，如[错误!未找到引用源。](#)所示。



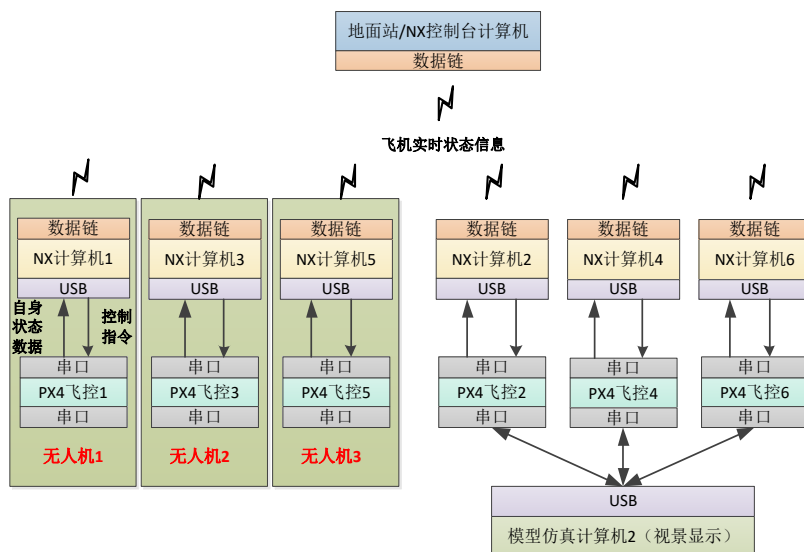
3.2.3. 单机自主控制阶段

单机自主控制即单机在没有人干预的情况下独立自主进行任务规划和执行的能力。如一架自主式无人机应该具备内部和外部状态感知系统、机载系统之间的内部通讯链、机载故障管理系统和面对战场环境变化的任务重规划系统[错误!未找到引用源。](#)。基于 RflySim 平台可快速开发出无人系统领域的顶层控制算法，如：SLMA 算法、轨迹规划算法、避障算法等。



3.2.4. 半实物集群控制阶段

半实物集群控制阶段是指在仿真实验系统的仿真回路中接入部分实物的实时仿真。它是一种在复杂控制系统开发过程中的典型应用，可以用来验证和优化集群协同控制决策算法。本书第 10.3.5 小节即为多机半实物仿真案例，实验以无人机集群超低空避碰算法的开发和验证为依据，采用“3 实 3 虚”的固定翼无人机半实物仿真实验，完成无人机密集集群超低空避碰算法移植验证、无人机数字孪生模型开发、虚实协同等实验任务。



3.2.5. 真机集群控制阶段

真机集群控制阶段是指在真实的环境中，使用真实的设备，进行集群控制的实验或测试，可以验证系统的性能和可靠性。真机集群控制阶段需要考虑很多实际的因素，如通信、干扰、故障、安全等。例如：使用光学动捕系统进行无人机的室内动捕，来捕捉无人机的位置、姿态、速度等运动信息。可以用于研究和验证无人机的运动控制、导航、编队、协同等功能。一般需要使用高速、高分辨率的摄像头，以及在无人机上贴上反光标记，来实现高精度、高实时性、高稳定性的动捕效果。



3.2.6. 完全真实环境下的多机协同阶段

本阶段是指在真实的环境中，使用多架无人机，通过机间通信和群体智能，合作分工完成某一共同任务的阶段，是无人机集群协同技术的最高水平，用于研究和验证无人机集群的路径规划、态势感知、任务协作等功能^{错误!未找到引用源。}。无人机完全真实环境下的多机协同阶段需要使用高性能、高可靠性、高安全性的无人机、通信、控制系统，来实现高效率、高灵活性、高鲁棒性的协同效果。如^{错误!未找到引用源。}所示为无人机集群虚实结合仿真构架。

