

1. 实验名称及目的

1.1 实验名称

多无人机定点编队控制实验

1.2 实验目的

本实验旨在通过Matlab软件，实现多无人机的定点飞行控制。

1.3 关键知识点

核心技术原理

UDP通信机制与数据传输

本实验采用UDP（用户数据报协议）作为Matlab/Simulink控制系统与外部设备的通信桥梁。UDP协议具有传输速度快、实时性高的特点，适合无人机控制系统对低延迟的要求。

UDP通信架构：

- 发送端：** Matlab控制系统 → UDP发送模块 → 网络传输
- 接收端：** 外部设备状态 → UDP接收模块 → Matlab处理
- 端口配置：** 起始端口27000，每架无人机占用两个连续端口（发送端： $27000+2*(i-1)$ ，接收端： $27001+2*(i-1)$ ）

数据格式规范：

```

1  % 接收数据格式 (21个双精度浮点数)
2  struct ReceiveData {
3      double id;           // 飞机ID
4      double batV;        // 电池电压
5      double batLevel;    // 电量百分比
6      double locPos[3];   // 本地位置 [x,y,z]
7      double angle[3];    // 姿态角 [roll,pitch,yaw]
8      double gpsPos[3];   // GPS位置
9      double gpsHome[3];  // GPS原点
10     double locVel[3];   // 本地速度
11     double res;         // 保留字段
12     double cState;      // 连接状态
13     double sState;      // 系统状态
14 }
15
16 % 发送数据格式 (8个双精度浮点数)
17 struct SendData {
18     double id;           // 飞机ID
19     double param1;       // 控制参数1 (速度Vx或位置X)
20     double param2;       // 控制参数2 (速度Vy或位置Y)
21     double param3;       // 控制参数3 (速度Vz或位置Z)
22     double param4;       // 保留参数
23     double param5;       // 保留参数
24     double param6;       // 保留参数
25     double cmd;          // 控制指令
26 }

```

多旋翼飞行控制系统架构

多旋翼无人机控制系统采用分层控制架构，将复杂的六自由度控制问题分解为三个相对独立的控制通道：

控制通道分离原理：

1. **高度通道**：控制垂直方向运动，输入 u_T 控制输出 p_{Ze}
2. **偏航通道**：控制绕Z轴旋转，输入 u_{ω_z} 控制输出 ψ
3. **水平通道**：控制X-Y平面运动，输入 u_h 控制输出 p_h

坐标系转换机制：

- **惯性坐标系 (NED)**：北-东-地坐标系，用于全局定位
- **机体坐标系**：以无人机重心为原点的坐标系
- **转换矩阵**：
$$\mathbf{R}_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}$$

PID控制算法设计原理

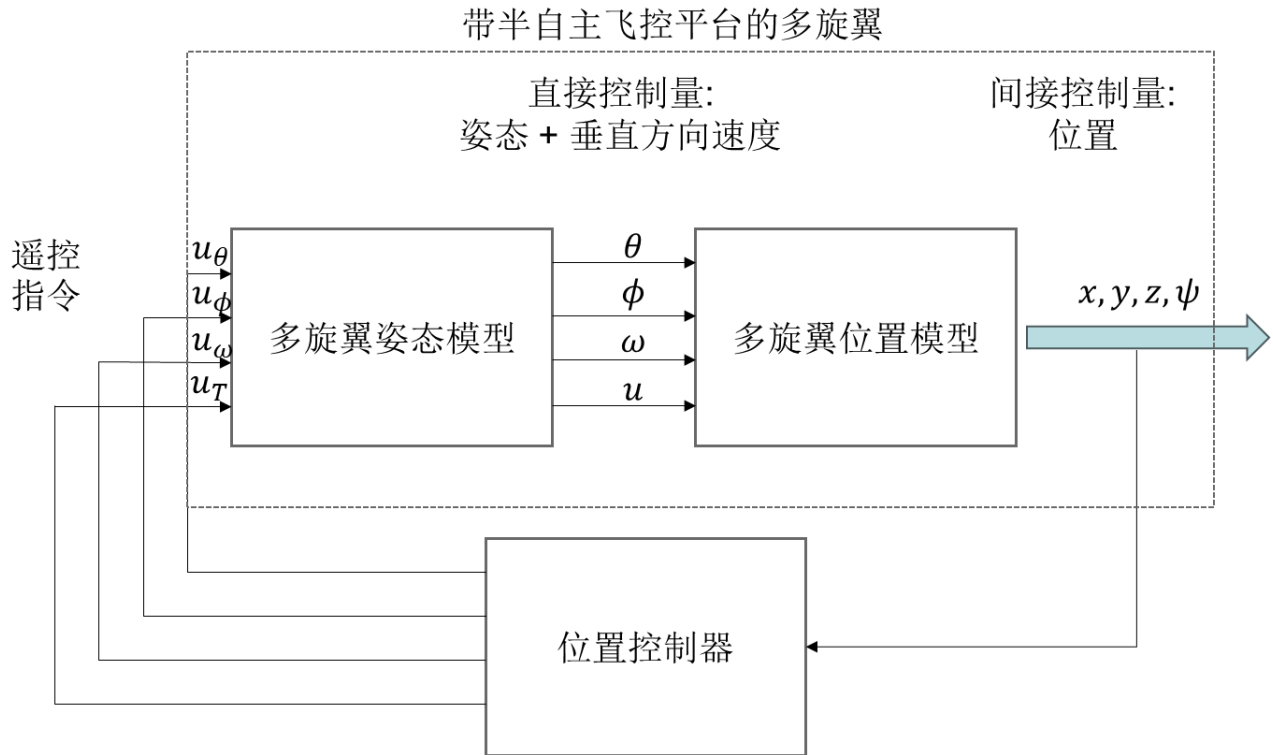


图1 多旋翼控制结构图

本系统采用经典PID控制器实现无人机的精确位置控制。

PID控制方程：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中：

- K_p ：比例增益，决定系统响应速度
- K_i ：积分增益，消除稳态误差
- K_d ：微分增益，提高系统稳定性

核心程序架构解析

文件依赖关系

主要执行流程：

1. `iniScript4Model.m` → 初始化系统参数 → `multiuav.slx`
2. `multiuav.slx` → 调用轨迹函数 → `UAVTrjExpect1.m`
3. `UAVTrjExpect1.m` → 根据编队标志调用 → `Dingdian.m` 或 `Dingdian1.m`

iniScript4Model.m程序解析

```
1 %% 初始运行文件，初始化各类飞行参数
2 close all; clear; clc; clf;
3
4 % 总组数设置
5 GropTotalNum = 30;
6 for i = 1:GropTotalNum
7     eval(['Grop', int2str(i), ' = i;']);
8 end
9
10 % PID控制器参数
11 KP_x = 1; KI_x = 0.000001; KD_x = 0.00; % X轴PID参数
12 KP_y = 1; KI_y = 0.000001; KD_y = 0.00; % Y轴PID参数
13 ki_z = 0.02; kp_z = 0.7; kd_z = 0.002; % Z轴PID参数
```

功能说明：

- **环境初始化：**清除工作空间和图形窗口，确保实验环境清洁
- **参数配置：**设置仿真步长、边界条件、PID控制器参数
- **坐标系设置：**建立北东地坐标系，设置仿真空间边界

关键技术：

- Matlab工作空间管理和变量动态生成
- PID参数调优策略和稳定性分析
- 仿真环境的数值积分方法设置

设计模式：

采用配置文件模式，将所有系统参数集中管理，便于调试和部署。

multiuav.slx架构解析

Simulink模型采用模块化设计，主要包含三大子系统：

HandleCtrl子系统：

```
1 % 控制模式切换逻辑
2 switch control_mode
3     case 0: % ARM模式 - 解锁准备
4     case 1: % TAKEOFF模式 - 起飞悬停
5     case 2: % OFFBOARD_V模式 - 速度控制
6     case 3: % OFFBOARD_P模式 - 位置控制
7     case 4: % LAND模式 - 降落
8 end
```

- **仿真/实飞切换**: 通过开关选择数据源和控制目标
- **安全保护机制**: 电量监控和紧急降落逻辑
- **控制模式管理**: 解锁、起飞、悬停、降落状态机

Communication子系统:

分析UDP通信的数据流向和处理逻辑:

- **UDP接收模块**: 解析外部设备发送的状态数据
- **数据预处理**: 坐标系转换和数据滤波
- **指令封装**: 将控制量打包为标准通信协议格式

UAVs子系统:

- **轨迹规划器**: 调用用户自定义函数生成期望轨迹
- **编队控制算法**: 多机协调和避障逻辑
- **安全监控**: 电量监控和异常保护机制

UAVTrjExpect1.m 程序说明

`UAVTrjExpect1.m` 是 Simulink `multiuav.slx` 中调用的轨迹期望生成函数。该函数根据当前时间、无人机编号、控制命令和编队标志, 输出单架无人机在该时刻的期望位置 (x,y,z) 。

函数原型

```
1 | function [x, y, z] = UAVTrjExpect1(timestamp, uavnum, cmdFlag, stat, Gmark)
```

输入 (Inputs)

- `timestamp` (double): 当前仿真/实飞时间 (s)
- `uavnum` (int): 无人机编号 (用于索引固定队形或参数)
- `cmdFlag` (int): 控制命令标志, 常用值:
 - 2: 悬停 (Hover)
 - 4: 速度控制 (Offboard velocity)
 - 8: 位置控制 (Offboard position)
- `stat` (1x3 double): 当前无人机状态位置 $[x\ y\ z]$ (用于连续模式下返回当前位置信息)
- `Gmark` (int): 队形标志 (0 默认, 1 队形1 (Dingdian), 2 队形2 (Dingdian1))

输出 (Outputs)

- `x, y, z` (double): 函数返回的期望位置坐标 (单位: 米, 坐标系为 NED, 注意 Z 为负值表示高于地面)

内部机制与关键点

- 使用 `persistent` 变量保存初始位置 (`x0, y0`) 和状态持久信息, 确保重入时能正确保持历史状态。
- 根据 `cmdFlag` 的值选择工作模式:
 - 若为 `2` (悬停): 返回初始悬停高度 `ZHoverIni` (通常为 -1) 且 x,y 保持为记录的初始值。
 - 若为 `4` 或 `8` (速度/位置控制): 依据 `Gmark` 选择目标: 0 保持初始点, 1 调用 `Dingdian(uavnum)`, 2 调用 `Dingdian1(uavnum)`。
 - 其他情况: 返回 `stat` 中当前的位置 (保持当前轨迹)。

Dingdian.m和Dingdian1.m解析

定点飞行配置函数, 定义无人机编队的空间布局:

```

1 function [x, y, z] = Dingdian(num)
2     switch num
3         case 1: x = 0; y = 0; z = -1; % 编队中心位置
4         case 2: x = 0; y = 1; z = -1; % 编队右侧位置
5         case 3: x = 1; y = 0; z = -1; % 编队前侧位置
6         case 4: x = 1; y = 1; z = -1; % 编队前右位置
7         case 5: x = 0.5; y = 0.5; z = -1; % 编队几何中心
8     end
9 end

```

配置功能:

- **编队模式1:** 正方形编队布局, 间距1米
- **编队模式2:** 菱形编队布局, 适合狭窄空间
- **高度统一:** 所有无人机保持相同飞行高度-1米

设计原理:

- 采用查找表方式, 根据无人机ID返回目标坐标
- 支持运行时动态切换编队队形
- 坐标采用NED系统, Z轴负值表示地面以上高度

bat脚本解析

批处理脚本用于启动RflySim仿真环境:

启动流程：

1. **环境变量设置**：配置软件路径和通信模式
2. **仿真软件启动**：启动CopterSim物理仿真引擎
3. **地面站连接**：启动QGroundControl监控界面
4. **通信建立**：建立UDP通信链路

2. 实验效果

多无人机定点飞行实验成功实现4架无人机的协调编队控制，各无人机精确到达指定坐标点并保持稳定编队队形，控制精度和系统稳定性均达到预期指标。

3. 文件目录

例程目录：

[[安装目录](#)]\RflySimAPIs\10.RflySimSwarm\2.AdvExps\e1.MatCentCtrlUAVsSim\2.RflyUdpSimplePosCtrl

序号	文件名	文件描述
1	multiuav.slx	主要控制系统模型，包含通信、控制和轨迹规划模块
2	iniScript4Model.m	系统初始化脚本，设置PID参数、仿真环境和系统变量
3	UAVTrjExpect1.m	轨迹期望生成函数，根据控制指令和编队标志生成目标位置
4	Dingdian.m	编队队形1定义函数，设置5架无人机的正方形编队位置
5	Dingdian1.m	编队队形2定义函数，设置5架无人机的菱形编队位置
6	SITLRun.bat	软件在环仿真环境一键启动脚本
7	HITLRunPX4Net.bat	硬件在环仿真启动脚本
8	unresolvedSymbols.txt	Simulink模型中未解析符号列表，用于调试参考

4. 运行环境

4.1 软件要求

Windows 10及以上版本；RflySim工具链；MATLAB 2022b及以上版本

①：若使用Pixhawk 6X飞控，平台安装时的编译命令为：px4_fmu-v6x_default，推荐PX4固件版本为：1.14.4。其他配套飞控及编译命令请见：

<https://rflsim.com/doc/zh/1/Hardware.html>

4.2 硬件要求

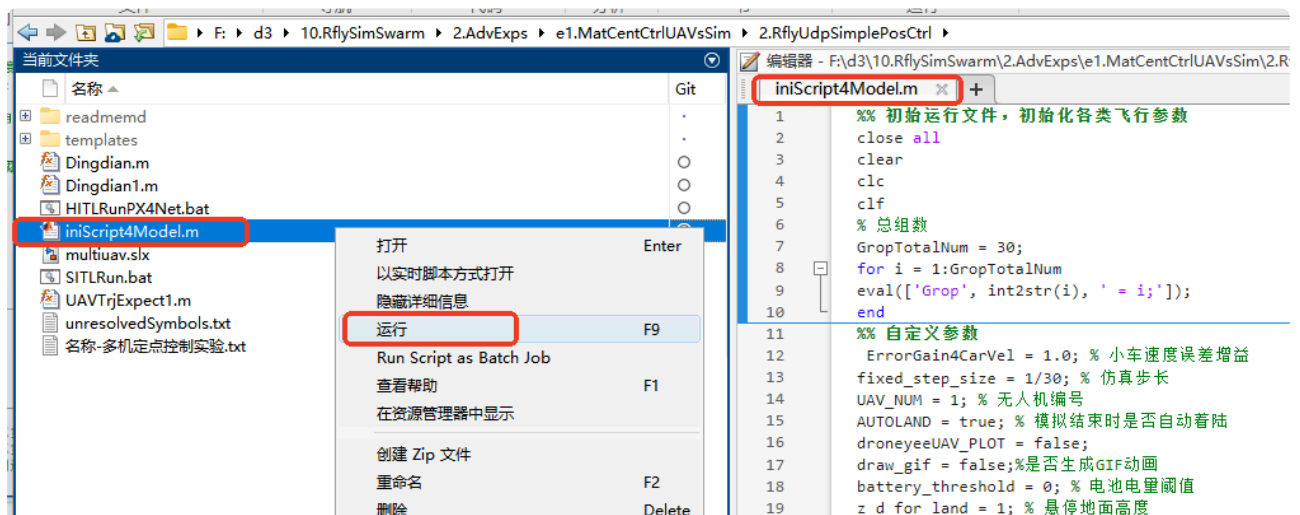
笔记本/台式电脑① 1台；集群控制仿真单元 1台。

①：推荐配置请见：<https://rflsim.com/>

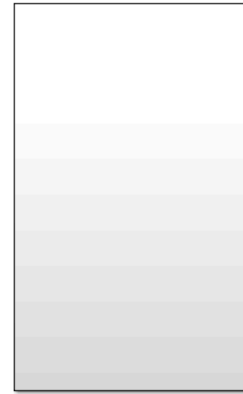
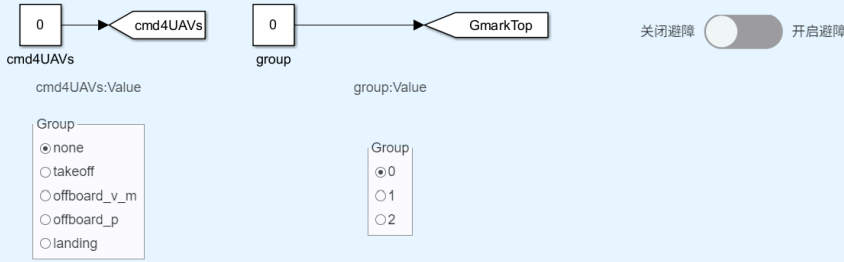
5. 实验步骤

5.1 步骤1：初始化Simulink控制主程序

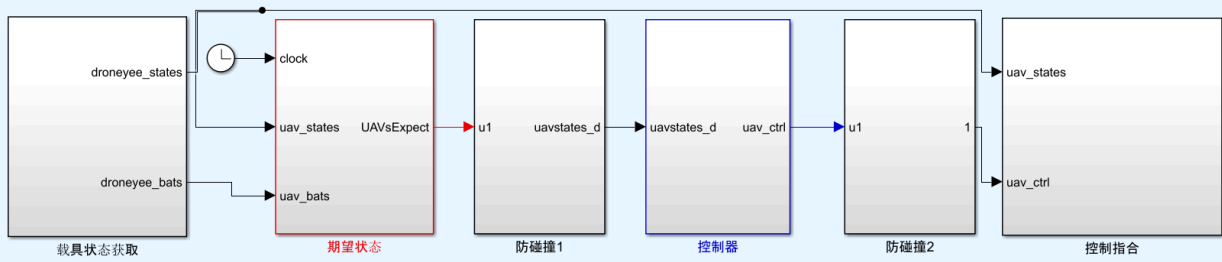
使用matlab打开本例程目录，双击打开iniScript4Model.m文件和multiuav.slx文件。其中iniScript4Model.m文件是初始化参数文件，先运行初始化文件之后才可以运行.slx文件（如果matalb版本是2022b,运行iniScript4Model.m初始化文件后multiuav.slx自动弹出）。



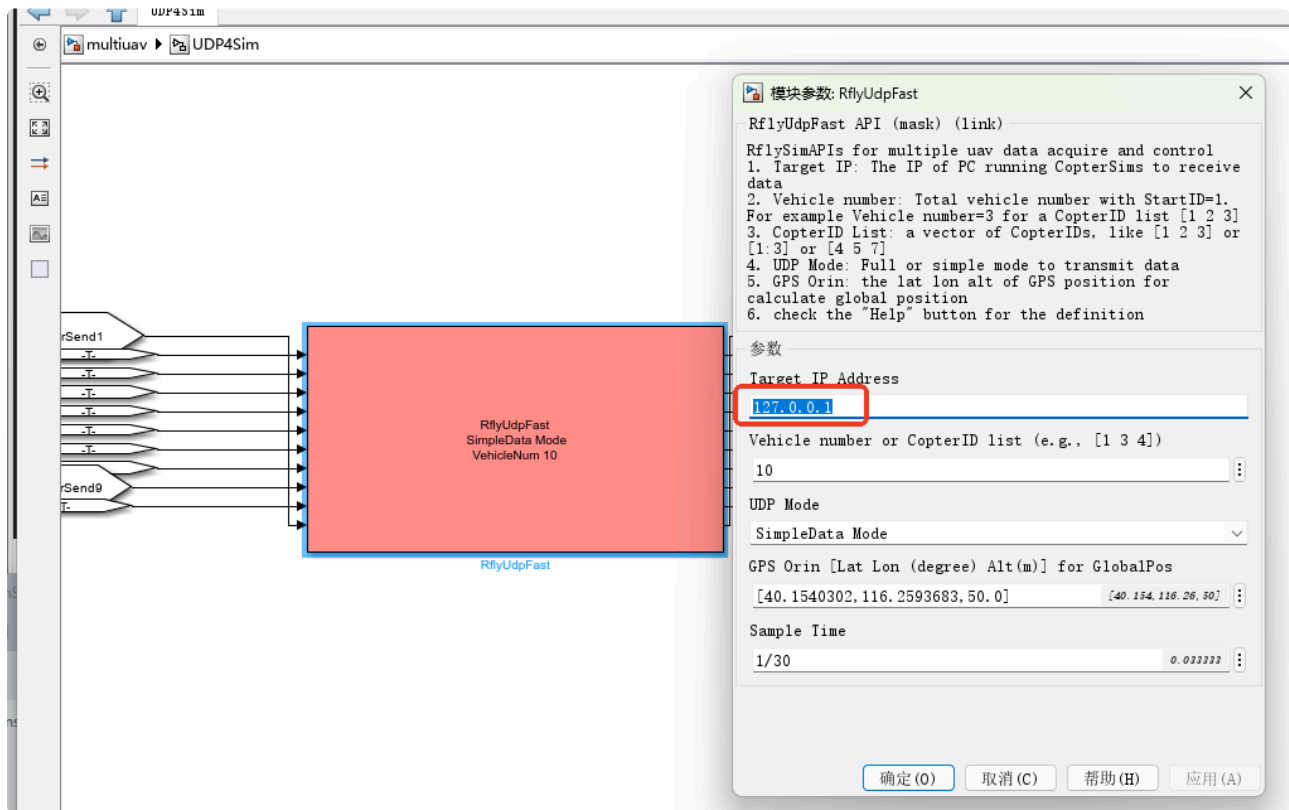
HandleCtrl



UAVs

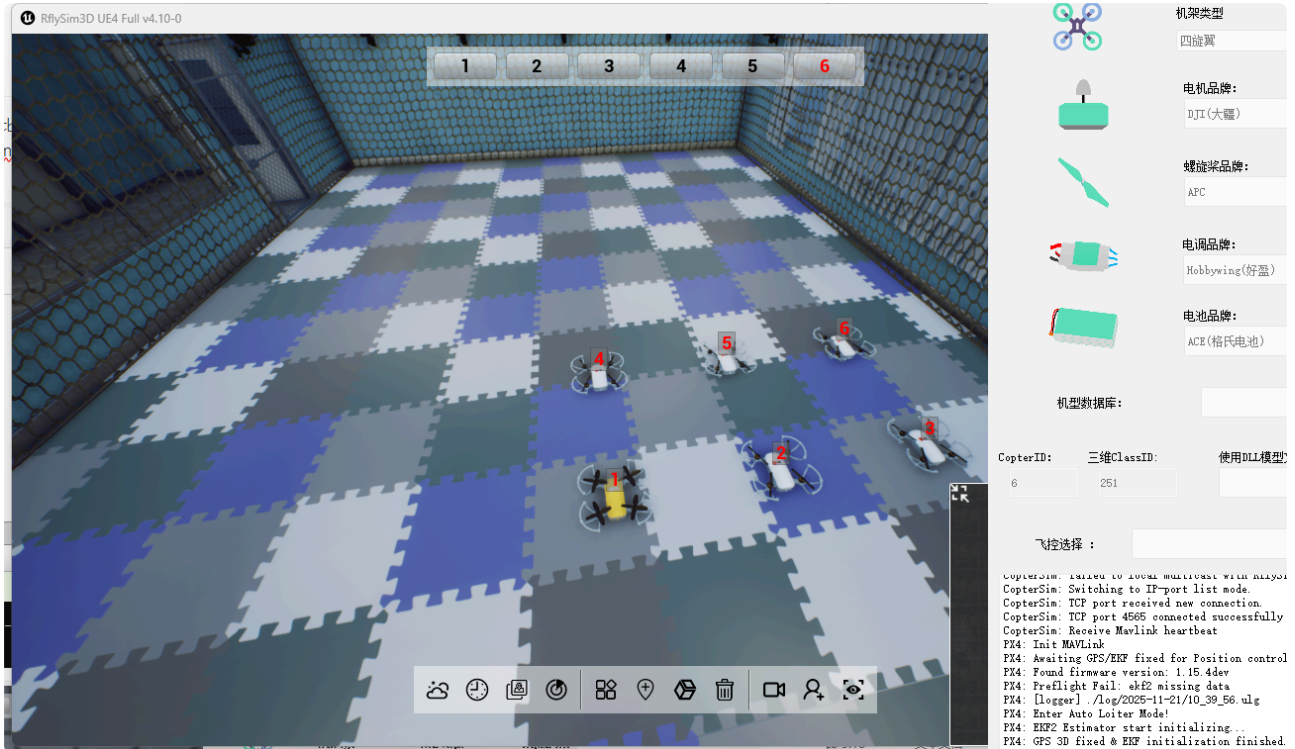


仿真实验前，点击UDP通信模块，设置UDP通信地址127.0.0.1，UDPmode设为Simpledata，保证与bat脚本中仿真软件通信配置保持一致



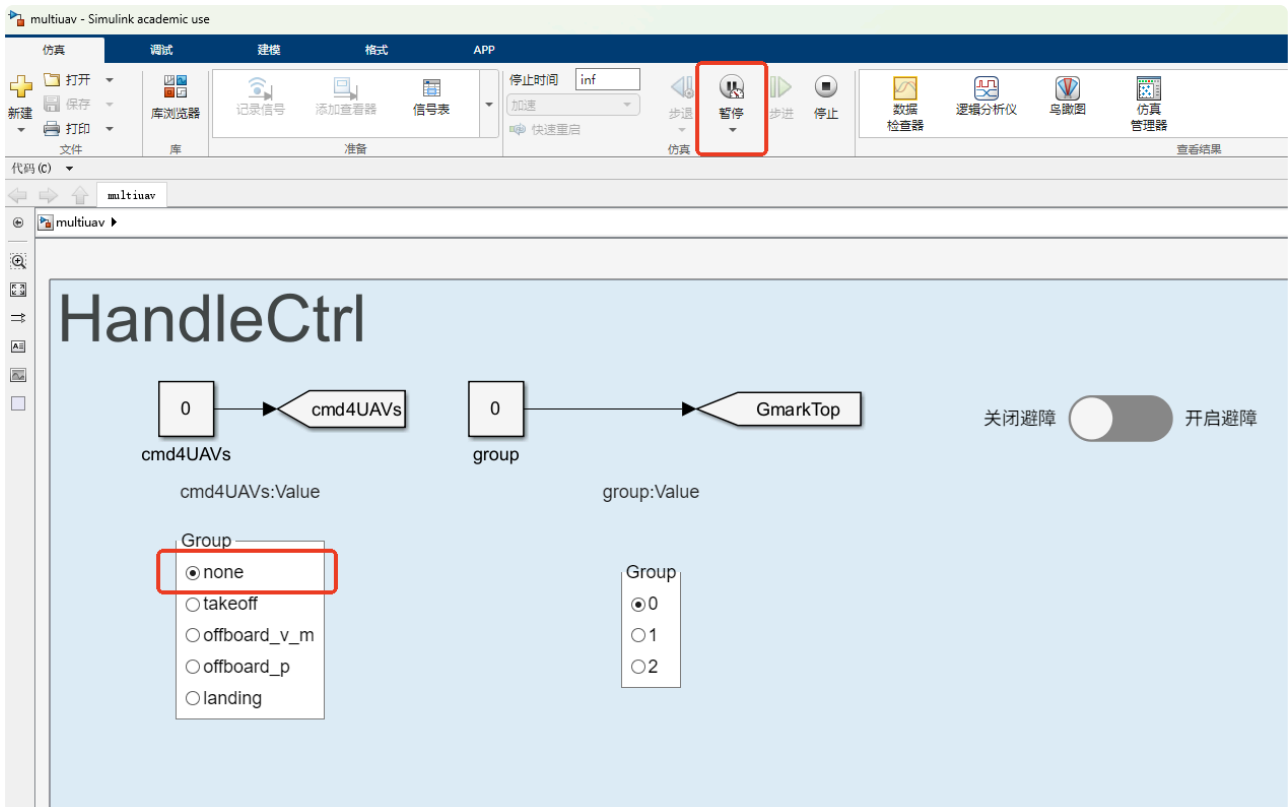
5.2步骤2：启动软件在环仿真

双击SITLRun6uavs.bat启动6架飞机的软件在环，会自动弹出CopterSim、QGroundControl、RflySim3D/RflySimUE5等软件终端界面，待CopterSim弹出PX4: GPS 3D fixed & EKF initialization finished.证明启动正常。



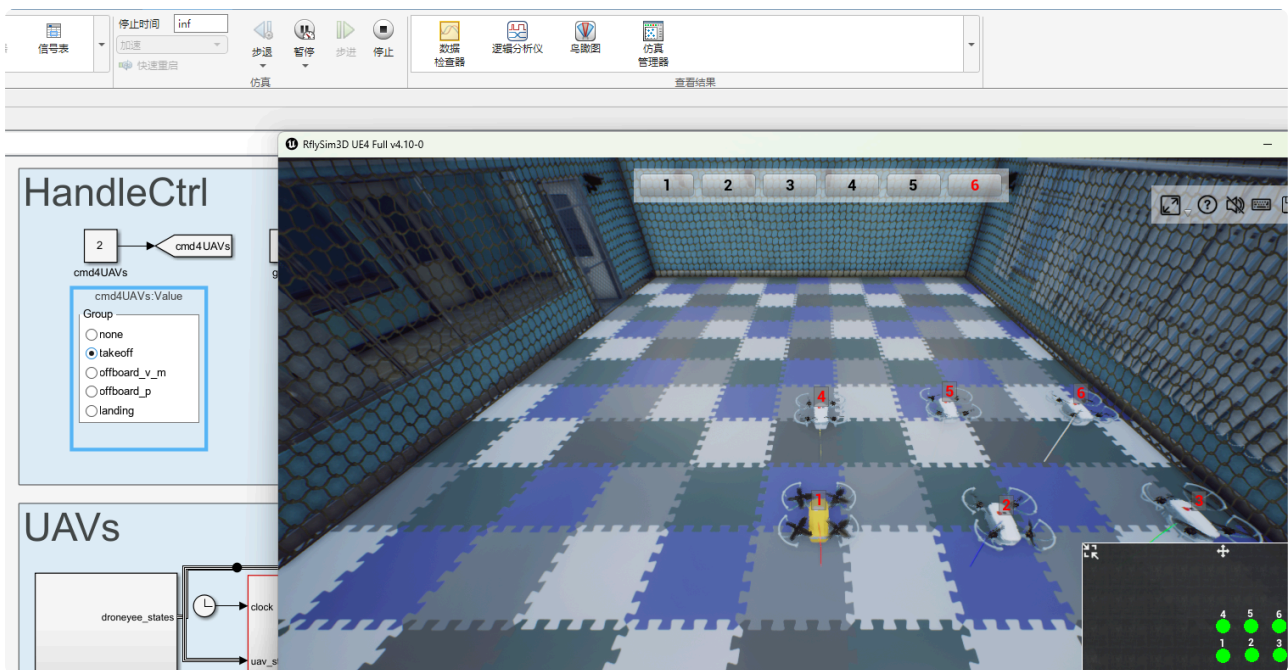
5.3步骤3：运行Simulink控制程序

在multiuav.slx中将初始飞行模式设为none，点击“运行”，如下图

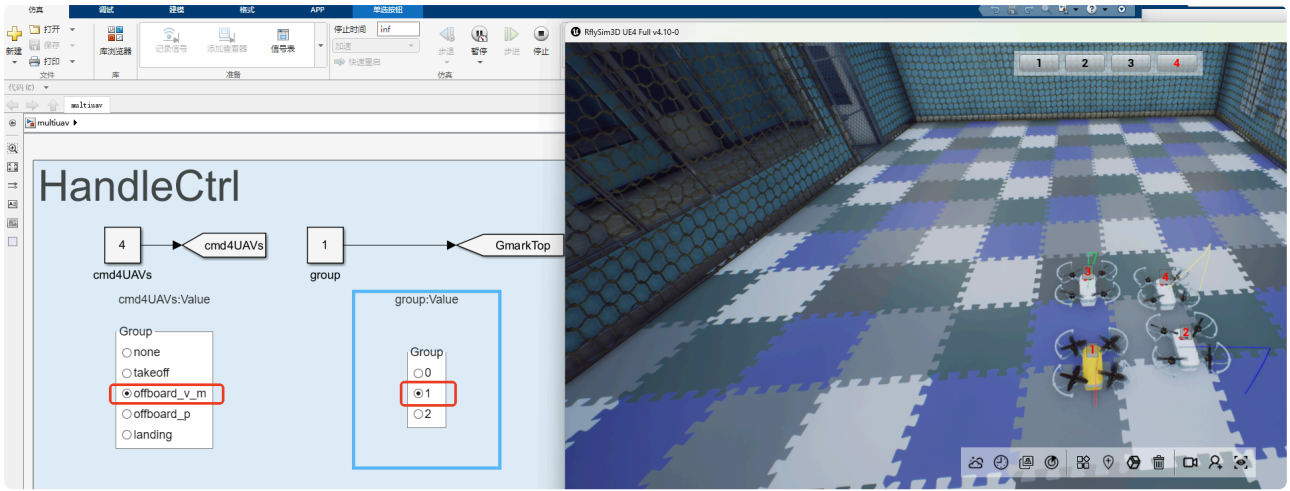


5.4步骤4：执行起飞并切换模式完成队形变换

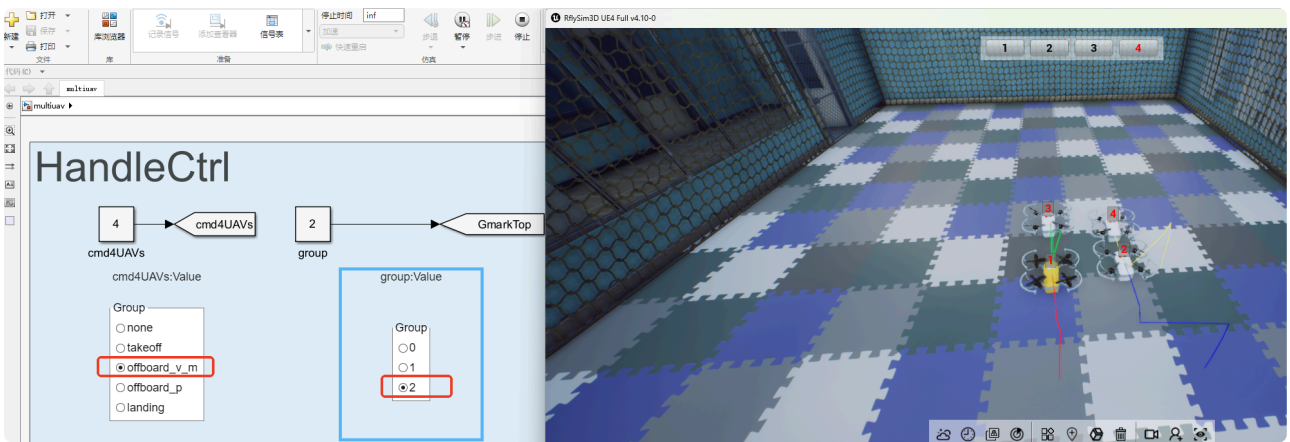
左侧按键先置于takeoff，待飞机平稳后，切换为offboard_v_m或者offboard_p，并且将右侧按键置于0，此时无人机按照UAVTrjExpect1.m的主函数设定的位置到达初始点。



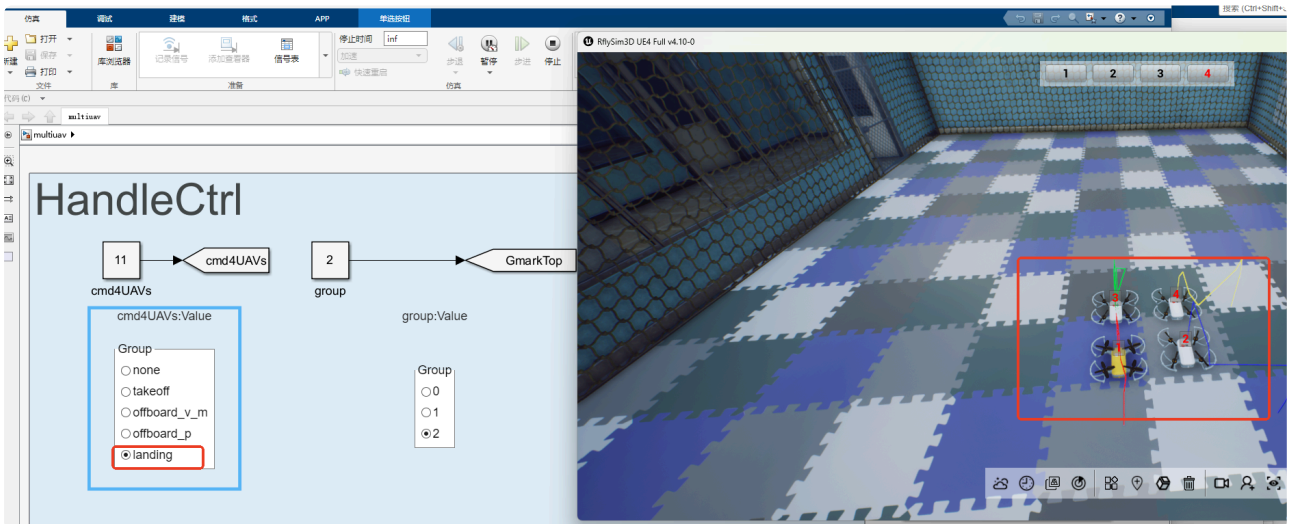
右侧按键置于1时会按照dingdian.m文件中设置的点位坐标进行飞行。



右侧按钮置于2时会按照dingdian1.m文件中设置的点位坐标进行飞行。



待程序飞完以后，左侧按钮置于land无人机降落。



5.5 硬件在环仿真（选做）

首先参考例程

[【安装目录】 \RflySimAPIs\1.RflySimIntro\2.AdvExps\e9.ConfigTools\e2.FeisiSwarmBox_Config](#)

完成集群控制仿真单元的配置，使用本实验目录的HITLRunPX4Net.bat启动硬件在环仿真环境。其余仿真步骤与5.1软件在环仿真完全一致。

7. 常见问题

环境配置类问题

问题1: RflySim软件无法启动或无人机数量设置错误

- **现象:** 双击SITLRun.bat后，软件启动失败或显示无人机数量与预期不符
- **原因:** 软件路径配置错误或批处理脚本中的路径设置不正确
- **解决方案:**
 - i. 检查SITLRun.bat中的软件安装路径是否正确
 - ii. 确认CopterSim和QGroundControl软件已正确安装
 - iii. 以管理员权限运行批处理脚本
 - iv. 检查输入的无人机数量是否为5
- **预防措施:** 安装软件时记录安装路径，定期检查软件更新

问题2: Matlab与RflySim通信失败

- **现象:** Simulink模型运行后，UDP通信显示连接失败或数据传输异常
- **原因:** IP地址设置错误、端口被占用或防火墙阻止通信
- **解决方案:**
 - i. 确认UDP通信地址设置为127.0.0.1（仿真模式）
 - ii. 检查端口27000-27009是否被其他程序占用
 - iii. 临时关闭Windows防火墙测试连接
 - iv. 重启Matlab和RflySim软件重新建立连接
- **预防措施:** 使用专用的网络端口，避免与其他应用冲突

问题3: 动捕系统相机识别失败

- **现象:** CMTracker软件启动后看不到相机画面或反光球识别异常
- **原因:** 相机供电不足、网络连接问题或标定参数丢失
- **解决方案:**
 - i. 检查交换机和路由器是否正常供电
 - ii. 确认网线连接牢固，LED指示灯正常闪烁
 - iii. 重新启动CMTracker_Server和CMTracker_Client软件

iv. 如果问题持续，重新进行相机标定

- **预防措施：**定期备份标定参数，使用稳定的电源供应

I 运行状态类问题

问题4：无人机解锁失败或无法进入Offboard模式

- **现象：**Matlab控制界面显示解锁失败，或无人机无法响应位置控制指令
- **原因：**飞控状态异常、传感器未准备就绪或通信延迟过大
- **解决方案：**
 - i. 检查QGroundControl中飞控连接状态和传感器状态
 - ii. 使用遥控器手动解锁测试飞控是否正常
 - iii. 校准加速度计、陀螺仪和磁力计传感器
 - iv. 确认GPS信号状态显示为"3D fixed"
- **预防措施：**飞行前进行全面的传感器检查和校准

问题5：无人机起飞后位置漂移或震荡

- **现象：**无人机起飞后无法稳定悬停，出现位置漂移或高频震荡
- **原因：**PID参数不合适、定位系统精度不足或控制频率过低
- **解决方案：**
 - i. 调整iniScript4Model.m中的PID参数（降低P参数，增加D参数）
 - ii. 检查动捕系统的定位精度和更新频率
 - iii. 确认控制系统运行频率为30Hz
 - iv. 检查无人机质心与几何中心是否一致
- **预防措施：**使用标准的PID调参方法，逐步优化控制参数

问题6：编队飞行时无人机发生碰撞

- **现象：**多架无人机在编队切换过程中出现碰撞或接近碰撞
- **原因：**轨迹规划不合理、响应时间不一致或安全距离设置不足
- **解决方案：**
 - i. 增大编队间距，修改Dingdian.m和Dingdian1.m中的坐标值
 - ii. 添加轨迹平滑算法，避免急剧的位置变化
 - iii. 实现分时起飞，避免同时切换目标位置
 - iv. 启用防碰撞算法（如果available）
- **预防措施：**在仿真环境中充分测试编队参数，确保安全间距

配置参数类问题

问题7: Simulink模型编译错误或运行异常

- **现象:** 点击运行按钮后出现编译错误或模型停止响应
- **原因:** Matlab版本不兼容、缺少必要的工具箱或模型文件损坏
- **解决方案:**
 - i. 确认Matlab版本为R2022b或更新版本
 - ii. 检查是否安装Simulink和相关工具箱
 - iii. 重新加载iniScript4Model.m初始化参数
 - iv. 清除Matlab工作空间后重新运行
- **预防措施:** 使用推荐的Matlab版本, 定期备份项目文件

问题8: 动捕数据与Matlab坐标系不匹配

- **现象:** 无人机移动方向与预期相反, 或位置坐标数值异常
- **原因:** 坐标系定义不一致, 动捕系统使用东北天, Matlab使用北东地坐标系
- **解决方案:**
 - i. 确认动捕系统坐标系设置 (长轴为X轴正方向)
 - ii. 检查无人机摆放方向 (机头朝向X轴正方向)
 - iii. 在Matlab代码中添加坐标转换逻辑
 - iv. 验证Z轴方向 (负值表示地面以上高度)
- **预防措施:** 建立标准的坐标系设置流程, 制作参考标识

问题9: 电量监控异常或自动降落触发

- **现象:** 无人机在电量充足时意外触发低电量保护降落
- **原因:** 电量检测算法错误、电压阈值设置过高或通信数据异常
- **解决方案:**
 - i. 检查battery_threshold参数设置 (当前为0, 表示禁用)
 - ii. 验证电池电压读取是否正确 (单体>3.8V, 总电压>11.2V)
 - iii. 在QGroundControl中检查电池状态显示
 - iv. 调整电压阈值参数或禁用自动降落功能
- **预防措施:** 实验前检查电池电量, 设置合理的保护阈值

问题10: 网络通信延迟过大

- **现象:** 控制指令响应慢, 无人机跟踪轨迹出现明显延迟
- **原因:** 网络负载过重、路由器性能不足或UDP数据包丢失

- **解决方案:**
 - i. 使用有线网络连接代替WiFi
 - ii. 关闭其他占用网络的应用程序
 - iii. 检查网络设备性能和配置
 - iv. 增加UDP通信的重传机制
- **预防措施:** 使用专用网络环境，定期测试网络性能

6. 参考资料

1. [RflySim官方文档](#)
 2. [QGroundControl用户指南](#)
 3. [PX4开发指南](#)
 4. [Matlab/Simulink官方文档](#)
 5. [MAVLink通信协议规范](#)
 6. [UDP网络通信协议标准](#)
 7. [室内定位系统技术规范](#)
 8. 《多旋翼飞行器设计与控制》，全权，杜光勋，赵峙尧，戴训华，任锦瑞，邓恒译，电子工业出版社，2018
 9. 《多旋翼飞行器设计与控制实践》，全权，戴训华，王帅，电子工业出版社，2020
 10. 《多旋翼飞行器:从原理到实践》，全权，电子工业出版社，2023
 11. 《无人机集群控制理论与应用》，沈林成，电子工业出版社，2021
 12. 《室内定位技术与应用》，刘军发，清华大学出版社，2019
 13. [RflySim多机仿真教程系列](#)
 14. [Matlab/Simulink无人机控制入门](#)
-