本章目录

本章实验案例与综合验证

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.8.1 实验入口与基础验证

教材对应：第10.3.1节

10.8.2 编队与异构跟随

教材对应：第10.3.1节进阶开发实验

10.8.3 高阶案例与实现边界

教材对应：第10.3.2节

10.8.4 量化评估与综合验证

教材对应：第10.3.1–10.3.2节综合应用

10.8.1 实验入口与基础验证：三类实验

实验索引按学习目标使用

根目录：[安装目录]/RflySimAPIs/10.RflySimSwarm/
索引：Index.pdf；接口说明：API.pdf；每个实验先读同目录Readme.pdf。

目录	学习任务	代表内容
0.ApiExps	身份、通信与控制接口	Python / Simulink、HITL、地形高度
1.BasicExps	基本运动、感知与反馈	质点、固定翼、碰撞检测、灯光
2.AdvExps	协同结构与工程扩展	虚拟结构、变队、异构与多主机

3.CustExps仅限完整版及以上版本；另核依赖与资源。

10.8.1 实验入口与基础验证：从接口到综合任务

一条可逐步定位问题的实验路线

四机接口
状态与命令
→
虚拟结构
相对偏移
→
变队 / 跟随
约束与状态
→
综合验证
误差与失效

先看什么：对象ID、局部与共同坐标、控制模式以及状态是否持续更新。

再比较什么：期望与实际轨迹、队形误差、过渡最小间距和速度限幅。

最后增加什么：网络延迟、感知误差、节点失效；固定其他条件做对照。

10.8.1 实验入口与基础验证：同类目标、不同闭环

四机MAVLink与质点模型对照

共同父目录：0.ApiExps/e2.PyRflySwarmAPIExps/

模型	子目录与真实入口	初始化与收尾
PX4 / MAVLink	1.MAVLinkFull4Swarm/ MAVLinkFull4Swarm.bat / .py	initOffboard含解锁请求，并写入失效保护参数；收尾先确认着陆与上锁
Python质点	2.QuadGMAPIExp/ NoPX4SITL4Swarm.bat / .py	initPointMassModel；EndPointMassModel

仍解锁时，stopRun发送强制上锁请求；不是仅停止监听。

10.8.1 实验入口与基础验证：准备、执行、结束

四机MAVLink示例的启动与收尾

阶段	按说明操作	需要对应的反馈
准备	保存并结束其他仿真； 核对ID、坐标与参数写入	BAT申请管理员权限； 启动前结束已有CopterSim， 收尾关闭地面站与三维端。
启动环境	运行MAVLinkFull4Swarm.bat 四机CopterSim就绪后继续	GPS 3D fixed & EKF initialization finished
运行控制	Python38Run.bat终端执行： python MAVLinkFull4Swarm.py	检查模式、位置与高度； 三维窗口按S/T查看编号/轨迹
结束	默认固定等待；教学改进应 确认着陆与上锁后再清理	stopRun可能强制上锁， 不能代替着陆状态检查

10.8.1 实验入口与基础验证：可复算的边界

下降命令不能直接证明落地

教学假设：共同平地为局部z=0，准确跟踪下行速度；从z=-3 m开始，保持10 s。

$$\Delta z = v_z T = 0.2 \times 10 = 2\ \mathrm{m}$$

$$z_{\mathrm{end}} = -3 + 2 = -1\ \mathrm{m}$$

仍离地1 m。例程固定等待后清理；stopRun若检测仍解锁会请求强制上锁。应先确认着陆与上锁。

10.8.1 实验入口与基础验证：避免由现象扩大结论

基础实验分别验证什么

实验主题	输入与输出	可以支持的判断
地形 / 固定翼质点	地图高度与航点 → 初值和航路运动	坐标、地形初始化与航点切换
视觉跟随	红色目标中心 / 尺寸误差 → 速度	比例视觉伺服；目标丢失时发零速度
碰撞检测	相向轨迹 → 碰撞事件与载具ID	检测反馈链；不等于避碰控制
灯光 / 八字轨迹	显示样式 / 参数轨迹 → 场景对象	显示或跟踪；另查动力学与最小间距

10.8.1 实验入口与基础验证：仿真检测实验

碰撞事件与轨迹记录相互对应

目录：1.BasicExps/e5.CollisionExps/2.CollMAVLinkAPI_Py/
入口：CollisionDemo.bat → CollisionDemo.py

两机相向轨迹 → 三维端碰撞检测 → isVehicleCrashID → 事件与轨迹对时

操作：按Readme启用相应碰撞反馈，检查两机ID，再执行仿真中的相向运动。

判据：同一时段的轨迹、碰撞ID与事件状态对应，区分未发生、未检测和未回传。

本章目录

本章实验案例与综合验证

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.8.1 实验入口与基础验证

教材对应：第10.3.1节

10.8.2 编队与异构跟随

教材对应：第10.3.1节进阶开发实验

10.8.3 高阶案例与实现边界

教材对应：第10.3.2节

10.8.4 量化评估与综合验证

教材对应：第10.3.1–10.3.2节综合应用

10.8.2 编队与异构跟随：控制原理

虚拟结构：公共中心与个体偏移

公共中心轨迹 随时间变化	+	每机固定偏移 定义队形	=	各机位置目标 交给跟踪控制器

$$p_i^*(t) = c(t) + d_i, \qquad p_i^* - p_j^* = d_i - d_j$$

位置目标、中心与偏移均以m计，使用同一坐标系。固定偏移保持目标形状，不保证实际间距或无碰撞。

10.8.2 编队与异构跟随：中心轨迹加偏移

当前例程的一次目标计算

$$c(t) = \begin{bmatrix} 0.75\cos(0.15t) \\ 0.5\sin(0.3t) \end{bmatrix} \text{ m}$$

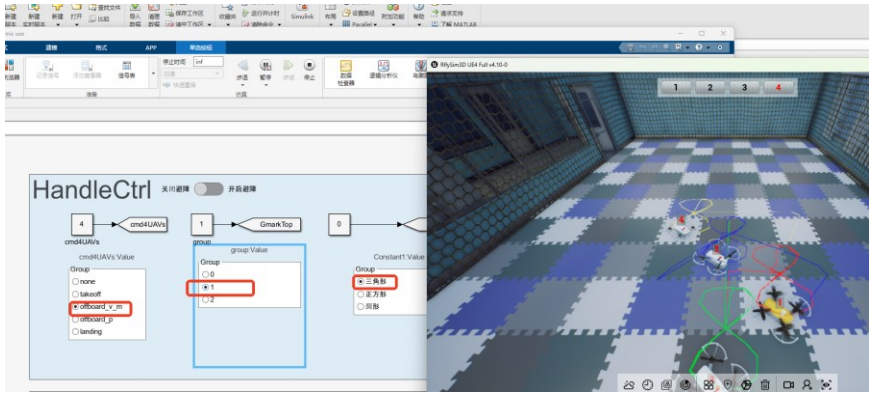
时间单位为s，角频率单位为rad/s；取前三个三角形偏移，在t=0代入。

载具	偏移 / m	中心 / m	目标 / m
1	(0,1)	(0.75,0)	(0.75,1)
2	(1,0)	(0.75,0)	(1.75,0)
3	(-1,0)	(0.75,0)	(-0.25,0)

2号减3号为(2,0) m：这是目标关系的代入，非运行结果。

10.8.2 编队与异构跟随：真实文档截图

虚拟结构例程的模式与轨迹选择



图：模式、队形与轨迹选择

阶段	参数与动作（六机SITL）
通信	UDPmode=Simpledata；127.0.0.1 初始化后启6机，确认EKF就绪
模式	none→运行→takeoff；稳定后 选offboard_v_m或offboard_p
轨迹	中间0/1/2：保持 / 8字 / 圆； 最右侧控件选择队形
结束	左侧land，确认着陆与上锁， 再停止控制程序。

2.AdvExps/e1.MatCentCtrlUAVsSim/7.RflyUdpSimpleVirStruct/
iniScript4Model.m → SITLRun6uavs.bat → multiuav.slx

10.8.2 编队与异构跟随：结果判据

跟踪误差与队形误差分别计算

$$e_i(t) = p_i(t) - p_i^*(t)$$

$$e_{ij}^F(t) = (p_i - p_j) - (d_i - d_j) = e_i - e_j$$

共同坐标、相同时间戳；误差单位为m。分别报告个体误差、相对队形误差和全时段最小间距。

例：全队都向东偏0.5 m，队形可以完整平移，但没有准确跟踪公共参考。

10.8.2 编队与异构跟随：真实文档截图

三机队形切换的目标与过程



图：三机横一队形的文档示例

目标：三角、横一、竖一队形之间切换。

结构：目标吸引 + 机间排斥 + 速度限幅。

记录：轨迹、队形误差、最小间距和形成时间。

目录：2.AdvExps/e5.AntiCollFormCtrlExps/3.SwarmEarthVelCtrlCollUdp_Mat/

10.8.2 编队与异构跟随：过渡安全与形成时间

三机变队的量化验收

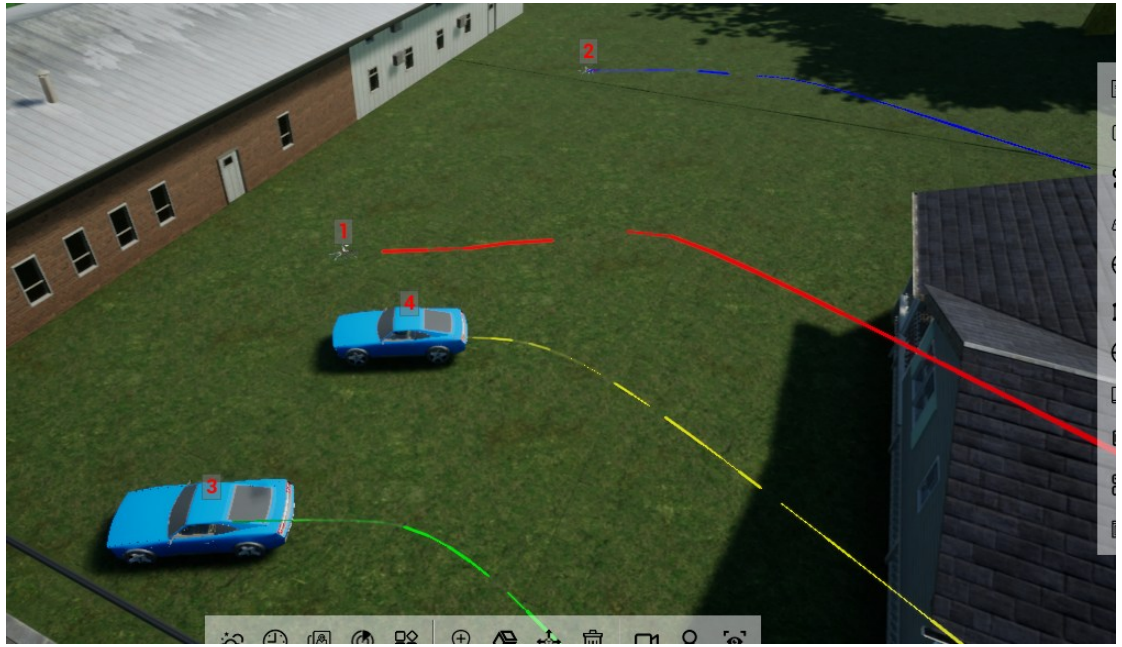
核对初值和参数 → 运行模型
控制器触发置1 → 记录切换时刻 → 统计完整过渡

入口：SwarmFormSITL.bat → SwarmFormEarthVelCTRLUdpAPI.slx；
参数文件：Init_control.m。

教学判据（自定）	统计方式	解释
中心间距至少1.2 m	从切换前到结束计算所有机对	另计机体尺寸、定位误差与采样间隔
10 s内误差进入0.2 m并连续保持2 s	共同坐标中逐机对比较目标偏移	区分瞬时穿过阈值与稳定形成

10.8.2 编队与异构跟随：异构协同

车机跟随：目标状态成为位置指令



图：车机状态跟随的文档示例

状态：无人机先到起始高度，再转入跟随。

目标：车辆水平位置为目标；保持飞行高度。

判据：水平误差、高度误差、转弯滞后及目标丢失响应。

2.AdvExps/e6.Hetero_SwarmExps/2.Car_UAVCoTraking/
MultiVehicleRunALL.bat → Python38Run.bat → UDPSimpleMultiVehicleSwarm.py

10.8.2 编队与异构跟随：部署与模型对照

工程扩展保留同一组任务指标

扩展主题	代表路径 / 控制文件	保持并新增的观察
双电脑八机	2.AdvExps/e2.MatDISCtrlUAVsSim/ 1.BroadNetSwarm_Mat/	轨迹误差保持同一口径； 新增状态年龄与周期超期
PX4 + 质点	2.AdvExps/e4_PX4+MPSwarm/ HybridSwarmCtrl.py	保留相对误差；区分两类模型动态
车机模型与配置	CarR1Diff.dll、MulticopterNoCtrl.dll、 Standard_Car_Blue.xml	保持任务判据；核对安装资源和XML替换后的模型对应

替换全局XML前备份原件，实验结束后恢复，避免影响其他实验。

本章目录

本章实验案例与综合验证

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.8.1 实验入口与基础验证

教材对应：第10.3.1节

10.8.2 编队与异构跟随

教材对应：第10.3.1节进阶开发实验

10.8.3 高阶案例与实现边界

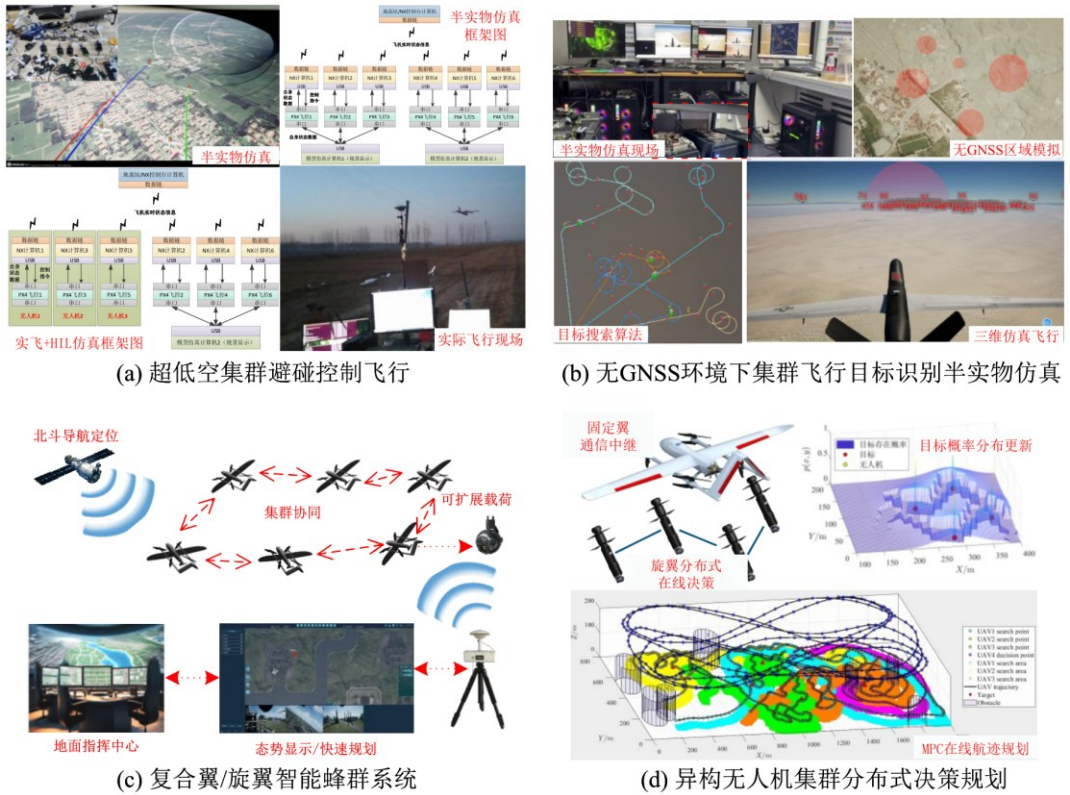
教材对应：第10.3.2节

10.8.4 量化评估与综合验证

教材对应：第10.3.1–10.3.2节综合应用

10.8.3 高阶案例与实现边界：任务与技术组合

教材四项高阶案例总览



(a) 超低空集群避碰控制飞行　(b) 无GNSS环境下集群飞行目标识别半实物仿真

(c) 复合翼/旋翼智能蜂群系统　(d) 异构无人机集群分布式决策规划

图10.10 高阶案例概览

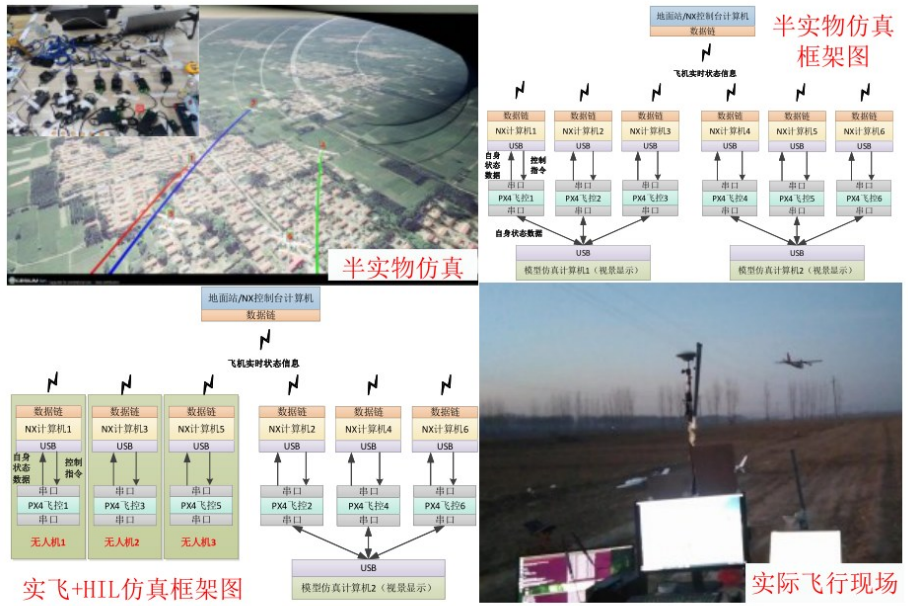
读图顺序：任务条件、观测来源、决策输出逐项对应。

共同要求：按统一时间关联感知、通信、控制与结果。

结果依据：案例展示任务形态，性能还需量化记录。

10.8.3 高阶案例与实现边界：定位、时钟与预测

超低空集群避碰控制飞行



(a) 超低空集群避碰控制飞行

图10.10(a) 超低空集群避碰控制飞行

数据流： NTP同步与融合位姿 → 丢包补偿 → 预测控制。

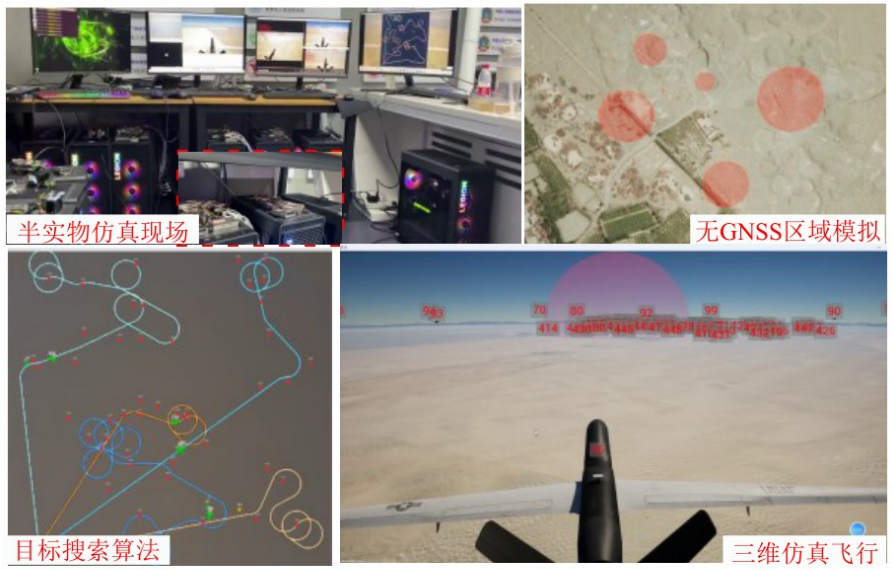
关注量： 地面 / 障碍净距、机间距、状态年龄和控制周期。

对照： 固定参考航迹与初值，分别改变同步误差、丢包和补偿策略。

自定教学判据：60 s内障碍净距≥0.5 m；时钟偏差≤5 ms。

10.8.3 高阶案例与实现边界：视觉导航与决策

无GNSS环境下的集群飞行与识别



(b) 无GNSS环境下集群飞行目标识别半实物仿真

图10.10(b) 无GNSS环境下的集群飞行与识别

数据流：图像 / 点云经视觉定位、地图重定位与识别，形成飞行目标。

关注量：定位漂移、重定位时间、识别精度及任务完成率。

对照：改变纹理与光照；加入遮挡，检查失效后的保持、退出和恢复。

自定教学判据：定位RMSE≤0.3 m、识别F1≥0.90；需有参考真值。

RMSE：均方根误差；F1：精确率与召回率的调和平均。

10.8.3 高阶案例与实现边界：异构能力与任务分工

复合翼与旋翼智能蜂群系统



(c) 复合翼/旋翼智能蜂群系统

图10.10(c) 复合翼与旋翼智能蜂群系统

数据流： 指挥任务 → 角色与航迹分配 → 不同平台执行。

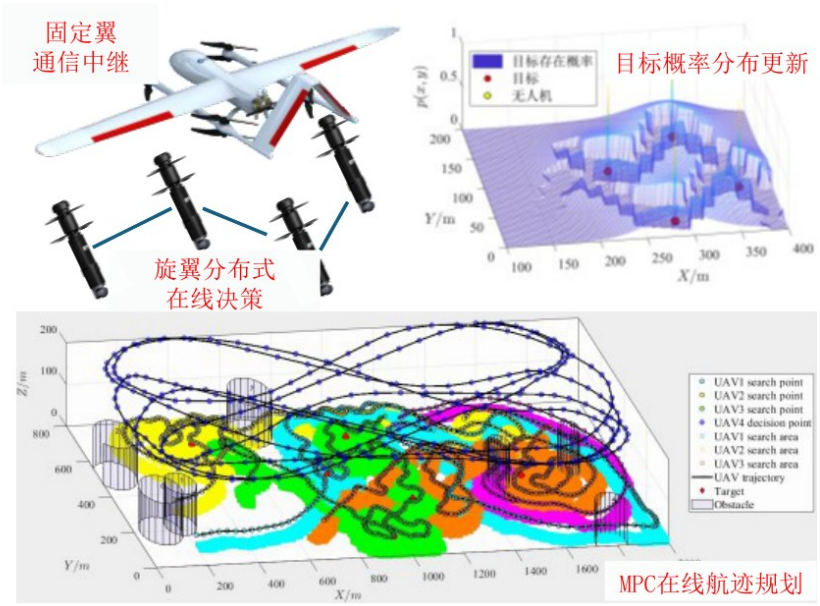
约束： 分别约束航速、续航、转弯、载荷与通信覆盖。

判据： 覆盖率、完成时间、能耗与约束违规分别统计。

自定教学判据：约定任务窗口内覆盖率≥95%，运动约束违规为0。

10.8.3 高阶案例与实现边界：概率图与滚动规划

异构集群分布式策略规划



(d) 异构无人机集群分布式决策规划

图10.10(d) 异构集群分布式策略规划

数据流： 概率图更新 → MPC 滚动规划 → 邻居共享与再规划。

约束： 预测时域、邻居信息范围、通信延迟与航迹可行性。

判据： 搜索覆盖、信息收益、重复覆盖比例和规划超时。

自定教学判据：覆盖率≥90%；按5 Hz规划时，计算耗时P95<0.2 s。
P95：耗时的第95百分位。超期另列：次数、比例、最大耗时。

10.8.3 高阶案例与实现边界：实现边界

规则策略、单机PPO与MARL分清

材料	实际内容	课堂用法
MARLExps 定制材料	单机四旋翼PPO；多环境训练	讲训练到SITL接口；不称作现成MADDPG
区域防守例程	规则策略；依赖按SDK版本核验	分析状态与决策流程；复现前核验依赖与场景
教材MADDPG / CTDE	多智能体训练信息与执行信息设计	按10.5原理设计观测、动作、奖励、回放与联合评价

定制目录仅限完整版及以上版本；依赖、权重与场景另核。

本章目录

本章实验案例与综合验证

第十章 集群协同与博弈对抗

10.1 集群协同基础与控制架构

10.2 一致性与编队控制

10.3 智能博弈与强化学习基础

10.4 单智能体强化学习经典算法

10.5 多智能体强化学习与规模扩展

10.6 集群关键技术与挑战

10.7 RflySim集群框架与接口

10.8 本章实验案例与综合验证

10.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

10.8.1 实验入口与基础验证

教材对应：第10.3.1节

10.8.2 编队与异构跟随

教材对应：第10.3.1节进阶开发实验

10.8.3 高阶案例与实现边界

教材对应：第10.3.2节

10.8.4 量化评估与综合验证

教材对应：第10.3.1–10.3.2节综合应用

10.8.4 量化评估与综合验证：假设与参数

三机跟踪的解析教学实验

$$\dot{p}_i = \dot{c} - k(p_i - c - d_i), \qquad e_i(t) = e_i(0)e^{-kt}$$

假设：一阶点模型、统一坐标、无延迟与噪声；中心轨迹及偏移沿用本节算例。

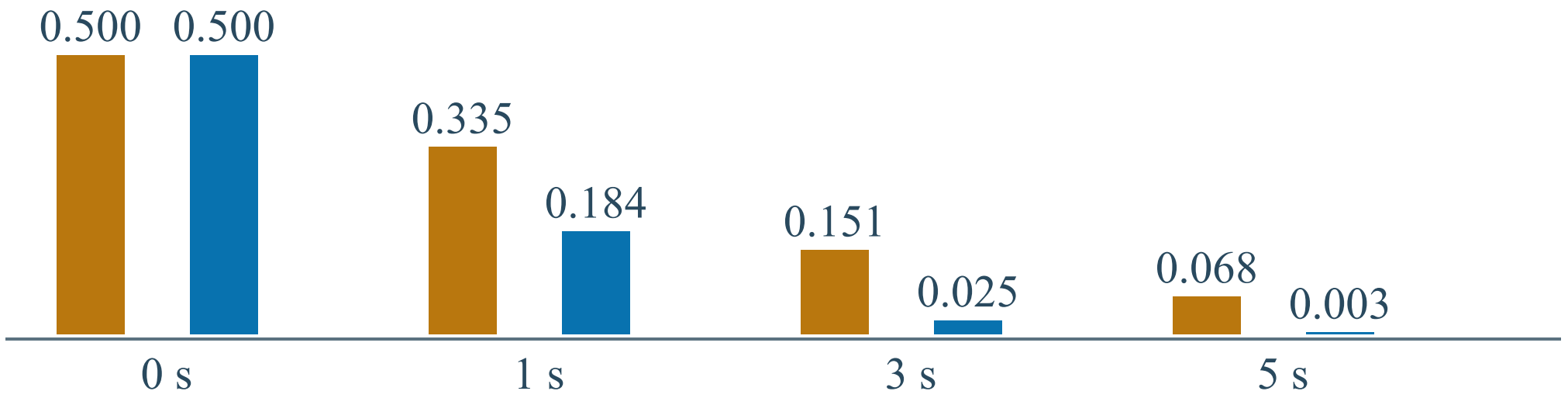
教学设定	数值与单位
初始误差 / m	1号(0.4,0.3)；2号(0.2,-0.2)；3号(-0.3,-0.1)
增益与记录	增益0.4或1.0 /s；0–5 s，每0.01 s计算解析状态
自定判据	5 s最大误差≤0.05 m；间距≥1.2 m；速度≤0.8 m/s

10.8.4 量化评估与综合验证：解析计算结果，非实测

增益改变误差衰减速度

最大个体误差 / m；解析模型计算，非SDK运行结果。

橙：增益0.4 /s；蓝：增益1.0 /s



5 s：0.068 m（未达误差判据） / 0.003 m（达到误差判据）。
采样最小间距1.444 / 1.416 m；最大速度0.244 / 0.427 m/s。

10.8.4 量化评估与综合验证：判据的适用条件

采样间距与连续时间安全

$$d_{\min,continuous} \geq d_{\min,sampled} - 2v_{\max}\Delta t$$

$$1.4156 - 2 \times 0.8 \times 0.01 = 1.3996\ \text{m} > 1.2\ \text{m}$$

本例速度界可由“中心速度上界 + 增益×初始最大误差”保守估计，小于0.8 m/s。

点模型下界还不能代表实机净距；另计机体尺寸、定位误差和状态陈旧。

10.8.4 量化评估与综合验证：固定条件与改变因素

真实例程的对照实验设计

阶段	固定条件	改变与比较
接口基线	ID、共同坐标、初值、目标与窗口	先证明命令与反馈一一对应
模型对照	相同参考、控制层级与统计方法	质点与PX4的跟踪和限幅差异
网络 / 感知	相同参考轨迹、算法、控制周期	逐项改变延迟、丢包、定位噪声
失效与恢复	相同任务与触发时刻	断联、无效定位、节点退出的响应

10.8.4 量化评估与综合验证：日志字段与统计窗口

能够复算结果的最小记录

记录组	建议字段	用于计算
身份与版本	运行编号、脚本/模型版本、载具ID、参数	复现同一工况并排除串线
时间与模式	生成 / 接收 / 使用时刻、模式、有效标志	状态年龄、超期与失效分支
任务与运动	共同位置、期望位置、速度、控制指令	个体与队形误差、最小间距
阶段与事件	起飞、切换、到位、碰撞、结束时间	形成时间、超限时长与任务完成率

10.8.4 量化评估与综合验证：结果解释

按数据流定位未达标原因

现象	优先检查	区分依据
整队固定平移	局部 / 共同原点与目标生成	相对队形可能正确，绝对跟踪错误
转弯时明显落后	状态年龄、速度限幅和控制周期	按时间对齐目标、状态与指令
变队间距骤降	目标分配、过渡轨迹和排斥参数	检查全过渡最小距离，不只看终态
识别后任务仍失败	坐标关联、决策条件与执行状态	检测、目标生成与模式反馈对时

练习与讨论

讨论：怎样判断实验结论

问题1：三机终态间距都大于2 m，是否足以证明变队全程安全？还缺什么记录？

问题2：全队都向东偏0.5 m，个体误差和相对队形误差各是什么？

问题3：多个单机PPO环境并行采样，是否就是MADDPG？怎样从数据流判断？

参考要点

参考答案：结论与证据一一对应

问题	参考结论	需要的证据
1 终态整齐	不足以证明全程安全	全时段轨迹、最小间距、 采样与速度界、机体尺寸
2 公共平移	每架个体误差0.5 m； 相对队形误差为0	共同坐标中分别算绝对误差和差分
3 多环境PPO	并行采样不等于多智能体协作； 不能据此称MADDPG	联合任务、各智能体观测/动作、 训练与执行的信息依赖

本节小结

本节小结：任务、记录与结论

任务：先写输入、约束和成功判据，再选择接口、基础或进阶例程。

关系：虚拟中心生成目标，相对状态形成跟随；控制、部署与模型分别判断。

证据：教材图片、文档预期、解析计算和实测记录分别使用，结论不超出证据范围。

评价：共同坐标与时间轴上记录误差、间距、时序和失败；保留参数与原始数据以便复算。