本章目录

习题与课堂讨论

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

6.9.1 概念辨析
教材对应：第6.4节第1–3、5–6题

6.9.2 轨迹计算
教材对应：第6.4节第8–10题

6.9.3 程序与实验
教材对应：第6.4节第4、7–10题

6.9.4 综合任务与回顾
教材对应：第6.3.1、6.4节

6.9 习题与课堂讨论

6.9.1 概念辨析：教材第1题

三层控制怎样共同完成一次巡检

题目：简述外部控制的三层分级结构及其主要功能。

层次	主要输出	巡检任务中的例子
集群层	任务分配、协同约束	分配巡检区域，协调通过狭窄通道的时刻
上层	路径、轨迹与任务动作	选择接近路线，安排速度和拍摄位置
底层	运动控制与执行器作用	估计状态，跟踪位置、速度和姿态目标

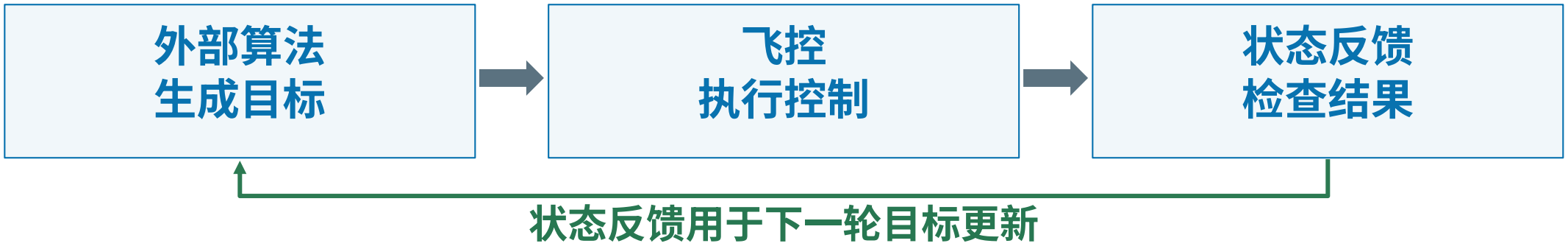
参考要点：层级由功能职责决定；部署在地面还是机载只是实现选择。

6.9 习题与课堂讨论

6.9.1 概念辨析：教材第2题

板外控制依靠持续有效的目标与反馈

题目：简述板外控制（Offboard）的特点及典型应用。



特点： 持续更新运动目标，可把视觉、规划或优化算法接入闭环。

例子： 视觉跟随、圆轨迹跟踪、依据新障碍更新速度目标。

条件： 有效状态估计、持续目标流（兼作生存信号，>2 Hz）、明确的接管与退出。

6.9 习题与课堂讨论

6.9.1 概念辨析：教材第3题

路径、轨迹、可行与最优分别回答什么

题目：简述路径与轨迹、可行性与最优性的区别及其在规划流程中的典型作用。

概念	回答的问题	判断例子
路径	从哪些位置经过?	给出一个半径5 m的圆，不指定到达时间
轨迹	何时经过哪里?	给出圆周位置随时间的变化
可行性	是否满足全部约束?	速度满足上限，仍要检查转弯加速度
最优性	按什么指标比较更好?	在可行轨迹中比较时间、能耗或平滑性

流程作用： 搜索路径→时间参数化成轨迹→检查可行性→在可行集中优化。

评价运动方案，要先说明约束与目标，再讨论哪一条更好。

6.9 习题与课堂讨论

6.9.1 概念辨析：教材第5题

位置、速度和加速度应描述同一条参考

题目：说明位置–速度–加速度（PVA）接口的含义及优势。

$$\mathbf{v}_r = \dot{\mathbf{p}}_r, \quad \mathbf{a}_r = \ddot{\mathbf{p}}_r$$

下标 r 表示参考；圆点表示对时间求导。

一致性要求：
同一时间基准
同一坐标系
单位：位置m、速度m/s、加速度m/s²

作用： 位置给到达目标，速度和加速度补充参考的变化趋势。

优势： 能提供前馈信息，减轻仅靠位置误差追赶变化参考的负担。

核对： 导数一致，消息字段与使能方式匹配，并保留状态反馈。

6.9 习题与课堂讨论

6.9.1 概念辨析：教材第6题

选择通信接口，先看系统怎样组织数据

题目：比较MAVLink与uXRCE-DDS的典型差异和适用场景。

比较项	MAVLink	uXRCE-DDS（PX4 v1.14及以上）
组织方式	消息及字段，经SDK收发	客户端–代理连接DDS数据空间
典型接入	地面站、Python、MAVSDK等	PX4与ROS 2消息集成
配置重点	系统编号、端口、消息率和字段	消息版本、代理与服务质量
选择依据	复用既有MAVLink工具链	配合ROS 2数据流与节点协作

参考要点：按链路、负载与配置选择，时延以实测为准；DDS、QoS见课件6.7「机载软件通信」「uXRCE-DDS路线」页。

本章目录

习题与课堂讨论

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

6.9.1 概念辨析
教材对应：第6.4节第1–3、5–6题

6.9.2 轨迹计算
教材对应：第6.4节第8–10题

6.9.3 程序与实验
教材对应：第6.4节第4、7–10题

6.9.4 综合任务与回顾
教材对应：第6.3.1、6.4节

6.9.2 轨迹计算：教材第8题·约束建模

半径5 m的圆，应该用多快的速度飞行

题目：设计半径5 m的圆形轨迹，说明线速度与加速度约束。

本算例给定：
平面速度上限3 m/s
平面加速度上限1 m/s²

$$v = R|\omega|$$

$$a_n = R\omega^2 = \frac{v^2}{R}$$

R：半径，v：线速度
ω：角速度，a_n：向心加速度

待求： 允许的最大角速度、最短周期，以及一个留有余量的取值。

条件： 高度固定，圆心为局部原点；先计算稳定圆周段，再设计进入和退出段。

6.9.2 轨迹计算：教材第8题·一步计算

加速度约束在这个算例中先达到上限

$$|\omega| \le \min\left(\frac{v_{\max}}{R}, \sqrt{\frac{a_{\max}}{R}}\right) = \min(0.6,\ 0.447) \approx 0.447\ \text{rad/s}$$

$$T \ge \frac{2\pi}{0.447} \approx 14.05\ \text{s}$$

取角速度0.4 rad/s
即可留出部分运动余量。

选定角速度	线速度	向心加速度	周期
0.4 rad/s	2 m/s	0.8 m/s²	15.71 s

参考要点：每条约束分别求出上限，取其中更严格者。

6.9.2 轨迹计算：教材第8题·PVA核对

用四分之一圈检验位置与导数是否一致

采用北–东–地坐标系（NED）；角速度0.4 rad/s，高度固定5 m。

$$\mathbf{p}_r = (5\cos 0.4\,t,\ 5\sin 0.4\,t,\ -5)^{\mathsf{T}}$$

$$\mathbf{v}_r = (-2\sin 0.4\,t,\ 2\cos 0.4\,t,\ 0)^{\mathsf{T}}$$

$$\mathbf{a}_r = (-0.8\cos 0.4\,t,\ -0.8\sin 0.4\,t,\ 0)^{\mathsf{T}}$$

四分之一圈：t=(π/2)/0.4≈3.927 s

$$\mathbf{p}_r = (0,5,-5)^{\mathsf{T}}\ \mathrm{m}$$

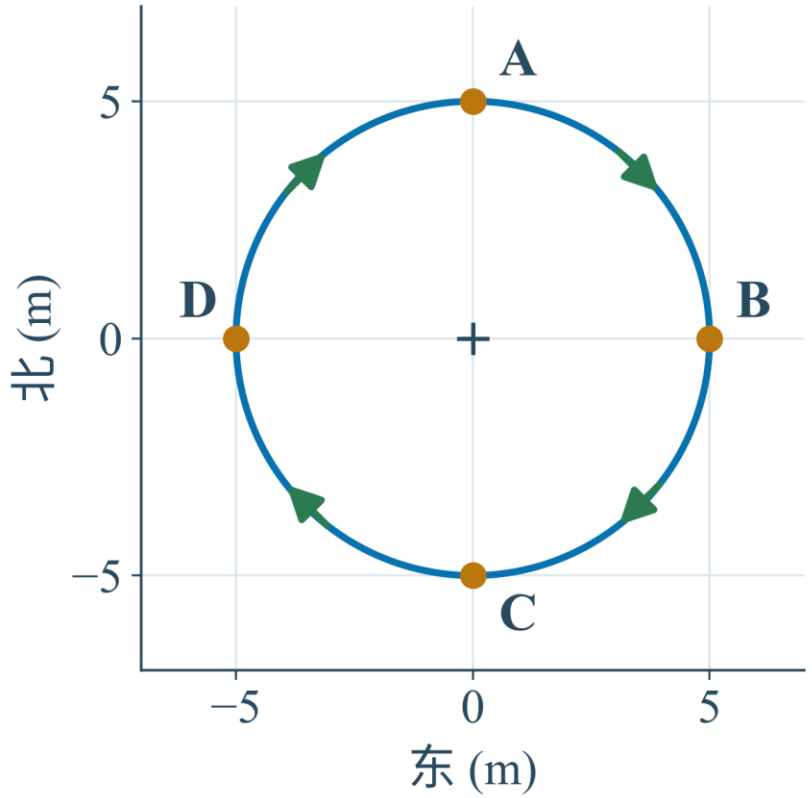
$$\mathbf{v}_r = (-2,0,0)^{\mathsf{T}}\ \mathrm{m/s}$$

$$\mathbf{a}_r = (0,-0.8,0)^{\mathsf{T}}\ \mathrm{m/s^2}$$

核对：四分之一圈时位置在东5 m，速度朝负北，加速度指向圆心（负东）。

6.9.2 轨迹计算：教材第8题·完整参考

一圈参考生成后，还要检查连接段



图：圆周参考俯视图，箭头为运动方向（教学算例）

采样点： A→B→C→D依次为t=0、T/4、T/2、3T/4，半径均为5 m。

转向： 北上东右俯视，角速度取正时由北向东转，为顺时针。

连接检查： 起飞点到圆周、匀速段到悬停，位置与速度都要连续。

实验： 安装版圆形例程见「教材第8、10题·例程运行」页。

6.9.2 轨迹计算：教材第10题·解析设计

螺旋上升：在圆周参考上叠加爬升

题目：设计以原点为中心、半径5 m的螺旋上升参考。

$$\mathbf{p}_r = (5\cos 0.4\,t,\ 5\sin 0.4\,t,\ -2-0.5t)^{\mathsf{T}}\ \mathrm{m}$$

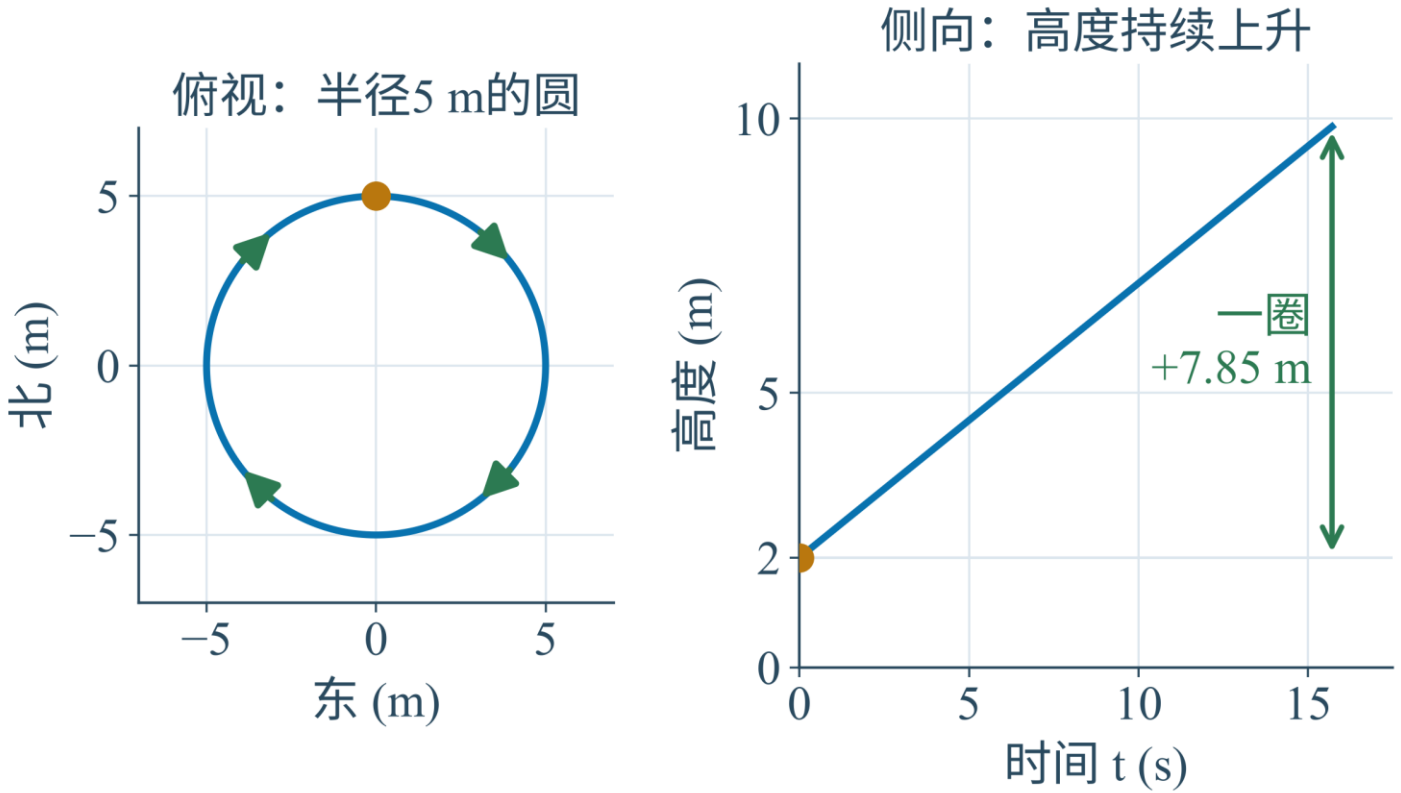
$$v_z = -0.5\ \mathrm{m/s},\quad a_z = 0 \qquad \|\mathbf{v}_r\| = \sqrt{2^2+0.5^2} \approx 2.06\ \mathrm{m/s}$$

本例选定：起始高度2 m，爬升0.5 m/s，ω=0.4 rad/s。
一圈结果：周期15.71 s，上升7.85 m；第三坐标从−2 m减小到约−9.85 m。

约束核对：平面速度2 m/s≤3 m/s，平面加速度0.8 m/s²≤1 m/s²；合速度约2.06 m/s，竖直速度与进出爬升段的过渡另行检查。

6.9.2 轨迹计算：教材第10题 · 三维检查

俯视是圆，侧向观察还应看到持续上升



图：螺旋参考俯视图与高度–时间图（教学算例）

俯视：北向与东向坐标组成半径5 m的圆，橙点为起点。

高度：每圈增加约7.85 m；图中高度等于NED第三坐标的相反数。

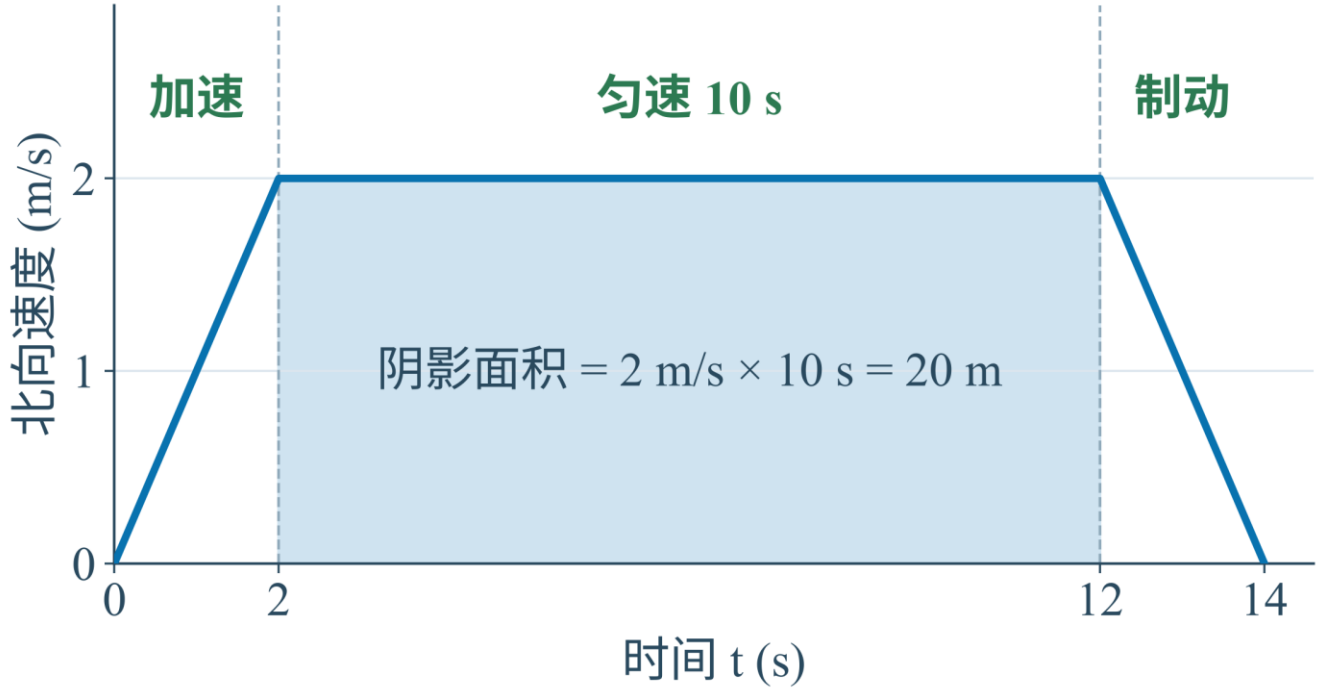
实验：用状态反馈核对实际爬升、平面半径与模式。

6.9 习题与课堂讨论

6.9.2 轨迹计算：教材第9题·基准计算

2 m/s持续10 s，对应20 m匀速段

题目：使用RflySim的Simulink模块，控制无人机以2 m/s的速度向前飞行10 s。



图：速度–时间梯形参考（教学算例，非平台实测）

$$\Delta x = \int_0^{10} 2\,\mathrm{d}t = 20\ \mathrm{m}$$

方向：本例前向取北向；偏航保持不变。

阶段：起飞、加速、匀速、制动与降落分别计时。

判据：比较反馈位移与速度积分，定位误差出现的阶段。

本章目录

习题与课堂讨论

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

6.9.1 概念辨析
教材对应：第6.4节第1–3、5–6题

6.9.2 轨迹计算
教材对应：第6.4节第8–10题

6.9.3 程序与实验
教材对应：第6.4节第4、7–10题

6.9.4 综合任务与回顾
教材对应：第6.3.1、6.4节

6.9.3 程序与实验：教材第4题·状态获取

先读取状态，再把状态用于任务判断

题目：用Python接口实时获取飞行状态；在未解锁（arm）时先验证读取。

```
import time
import PX4MavCtrlV4 as PX4MavCtrl
mav = PX4MavCtrl.PX4MavCtrler(1)
mav.InitMavLoop()
while True:
    print(mav.uavPosNED, mav.uavVelNED)
    time.sleep(0.1)
```

读到什么：局部NED位置和速度的最新缓存值。

更新是谁：SDK接收线程，打印周期不等于遥测更新周期。

何时可用：收到有效且新鲜的状态后，再参与控制。

入口：[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/0.ApiExps/e1_PX4MavCtrlAPITest/Readme.pdf
运行：PX4MavCtrlAPITest.bat 启动软件在环（SITL）仿真，待 CopterSim 显示初始化完成；再在 Python38Run.bat 中运行本例脚本，Ctrl+C 停止；bat 窗口按回车关闭仿真。

6.9 习题与课堂讨论

6.9.3 程序与实验：教材第4题·记录与验收

能打印数字，还不等于反馈可用于闭环

需要记录	判断什么	常见误判
位置消息有效性	确实收到对应状态	把缓存初值当成已定位
采样与接收时刻	数据是否新鲜、是否能对齐	用打印周期证明遥测频率
位置、速度、模式	运动与控制模式是否相符	只保存目标，不保存反馈
缺包、超时、终态	任务是否有中断及恢复过程	仅保留一张三维截图

参考要点：局部位置用该消息自身的时间；不同消息的缓存未必同刻。

6.9.3 程序与实验：教材第7题·任务设计

到达(10, 0, −5)后返回，先写清任务阶段

题目：从原点到(10, 0, −5)悬停后返回；采用局部NED，单位m。

阶段	位置或动作	切换依据
起飞	到(0, 0, −5)	高度建立，速度降低
前往与悬停	到(10, 0, −5)，驻留	位置误差及速度满足阈值
返程	回到(0, 0, −5)	返回起点上方且状态稳定
结束	降落到原点	接地、上锁（disarm）后清理连接

参考要点：到达坐标、稳定悬停、返回上方、降落结束是不同状态。

6.9.3 程序与实验：教材第7题·到达判据

用反馈条件切换航段，而不是只等待几秒

本算例验收阈值：位置误差≤0.3 m，速度≤0.2 m/s，连续保持2 s。

$$\|\mathbf{p}-\mathbf{p}_{\text{goal}}\| \le 0.3\ \text{m}, \quad \|\mathbf{v}\| \le 0.2\ \text{m/s}$$

每航段entered=None；now为单调时间(s)；首次满足全部条件时开始计时。

```
if state_ok and pos_ok and vel_ok:
    if entered is None: entered = now
    if now - entered >= 2.0:
        advance_to_next_stage()
else:
    entered = None
```

pos_ok、vel_ok：对应上式。
state_ok：状态有效、及时、连续。
中断或超时：重置计时，暂停推进并进入已配置的安全分支。

6.9 习题与课堂讨论

6.9.3 程序与实验：教材第7题·退出过程

程序结束前，必须确认载具已结束运动

进入： initOffboard()→SendPosNED(x, y, z, yaw)→读回模式与解锁状态

请求降落 观察模式	→	确认接地 确认上锁	→	关闭通信 保存日志

endOffboard()： 停止板外目标发送，不等于已降落。

stopRun()： 已解锁时会强制上锁，只在确认接地后调用。

initOffboard()： 含自动解锁及参数修改，见课件6.7「SDK副作用」页。

接口基线： 6.RflySimExtCtrl/0.ApiExps/e1_PX4MavCtrlAPITest/PX4MavCtrlAPITest.py
题7改编： 复制脚本，按「任务设计／到达判据」替换定时起降段。

6.9 习题与课堂讨论

6.9.3 程序与实验：教材第4、7题·预期与排查

原脚本检查连通，题7按往返任务验收

前提：PX4MavCtrlAPITest.bat启动QGC、CopterSim和两个RflySim3D，日志出现GPS 3D fixed & EKF initialization finished。

第4题读取脚本
终端约每0.1 s刷新一行，位置、速度各含北、东、地三个分量。

原SDK接口连通基线
约1.7 m起飞，10 s后向下0.2 m/s持续约10 s。
题7另用改编副本完成往返。

题7验收：到(10, 0, −5)悬停，返回(0, 0, −5)后降落到原点。
按到达判据切换，保存5 m高度、10 m航段、悬停及接地上锁的反馈。

排查：模块缺失先查Python38Run.bat环境；无法解锁或起飞先查初始化与QGC连接。
位置全零时核对消息到达、有效标志及时间戳，再判断是否仍在原点。

6.9.3 程序与实验：教材第9题 · 实验步骤

在Simulink中实现10 s匀速段

题目：使用RflySim的Simulink模块，控制无人机以2 m/s的速度向前飞行10 s。
入口：6.RflySimExtCtrl/1.BasicExps/e2_VelCtrl/Velocity.slx

步骤	需要完成	验收结果
准备	按Readme.pdf建立仿真与状态估计	模式、坐标及速度单位明确
建立高度	先起飞并稳定，偏航保持不变	10 s从匀速稳定后起算
匀速段	加速至北向2 m/s，稳定后 计时10 s，再平滑制动	记录参考速度与反馈速度
核对结束	核对积分与位移，再受控降落	匀速段约20 m；另评过渡段

前向在本题中取北向；若改用机体系速度，需同步明确偏航及坐标变换。
排查：无法解锁→等初始化完成；无响应→确认板外模式已激活、设定值合理。

6.9.3 程序与实验：教材第10题·程序检查

螺旋程序先做导数自检，再接控制接口

先离线核对参考；连接后按课件6.7「结束与异常处理」页执行和结束。

```
theta = omega * t
x = 5 * math.cos(theta)
y = 5 * math.sin(theta)
z = -2 - 0.5 * t
vx = -5 * omega * math.sin(theta)
vy = 5 * omega * math.cos(theta)
ax, ay = -omega**2 * x, -omega**2 * y
vz, az = -0.5, 0.0
```

方向： omega取正或负，必须同时进入相位和导数。

自检： 用中心差分估计速度，与解析速度比较。

数据： 分别保存参考PVA、状态反馈和任务阶段。

入口：6.RflySimExtCtrl/2.AdvExps/e4.TrajPlanExps/4.SpiralTrajMotion/UAVCtrl.py
运行：先修正X速度方向；步骤见「教材第8、10题·例程运行」页。

6.9.3 程序与实验：教材第8题·参数适配

把6 m接口基线改为教材的5 m圆

原SDK基线： main()调用半径6 m、高度10 m、clockwise=True。
题8副本采用半径5 m、高度5 m，与「轨迹计算」单元一致。

题8参数： 在main()的调用处修改，不能只改函数默认值。
radius=5.0, height=-5.0, angular_velocity=0.4,
duration=30.0, clockwise=False, center_x=0.0, center_y=0.0

起点： 随参数成为(5, 0, −5)；按反馈确认到位，再平滑进入圆周段。
clockwise=False使direction=+1，与正角速度的理论算例相同。

PVA核对： 去掉X速度多乘的direction，位置及导数用同一elapsed。
沿用「教材第8题·PVA核对」的三组公式，并核对四分之一圈。

接口： SendVelNEDNoYaw只发送V；P、A用于参考核对与记录。
终端计算位置仍是参考；补录状态反馈，并设计平滑启停与受控降落。

6.9.3 程序与实验：教材第8、10题·例程运行

圆形与螺旋例程：先修正副本，再按日志顺序运行

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/2.AdvExps/e4.TrajPlanExps/
第8题：3.CirularTrajMotion/　第10题：4.SpiralTrajMotion/　入口：UAVCtrl.py

改编：复制UAVCtrl.py；题8按「参数适配」页改参，两题均修正X速度的direction。补反馈记录、平滑启停与受控降落；导数依据见课件6.5「圆形轨迹」。

启动：以管理员身份运行SITLRun.bat，它会先关闭已开的CopterSim，再启动QGC、CopterSim与RflySim3D。

等待：CopterSim日志栏出现GPS 3D fixed & EKF initialization finished。

运行：在Python38Run.bat窗口输入python UAVCtrl.py；在RflySim3D中依次按D、T显示状态与轨迹。

关闭：在SITLRun.bat窗口按任意键，关闭CopterSim、QGC与RflySim3D。

6.9 习题与课堂讨论

6.9.3 程序与实验：教材第8、10题·预期与排查

用反馈核对圆心、半径和高度，再确认结束状态

第8题：5 m圆形改编
起点(5, 0, −5)，高度5 m
0.4 rad/s、30 s，约1.9圈
速度2 m/s，加速度0.8 m/s²
平滑减速后受控降落

螺旋 4.SpiralTrajMotion
解锁后飞到(5, 0, −10)
半径5 m、0.6 rad/s、40 s
高度由10 m升到25 m
减速后调用endOffboard()

转向：题8取clockwise=False，修正后顺时针；题10保留默认值，修正后逆时针。

判据：题8反馈圆心在原点、半径5 m、高度5 m；与2 m/s、0.8 m/s²参考对照。
核对3 m/s、1 m/s²上限；两题结束均确认降落模式、接地与上锁。

排查：无初始化日志先查环境、启动日志、进程与端口；连接失败再查防火墙日志。
仅在确认误拦截时，对可信程序定向放行，再重试SITLRun.bat。

本章目录

习题与课堂讨论

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

6.9.1 概念辨析
教材对应：第6.4节第1–3、5–6题

6.9.2 轨迹计算
教材对应：第6.4节第8–10题

6.9.3 程序与实验
教材对应：第6.4节第4、7–10题

6.9.4 综合任务与回顾
教材对应：第6.3.1、6.4节

6.9.4 综合任务与回顾：本章实验列表

按学习目标选择本章实验入口

实验类别	本节可用入口	交付重点
接口学习	0.ApiExps/e1_PX4MavCtrlAPITest/	状态、目标、模式与时刻
基础使用	1.BasicExps/e1_PosCtrl/ 1.BasicExps/e2_VelCtrl/	定点与速度基线、可解释的运动结果
轨迹跟踪	1.BasicExps/ e9_TrajectoireFollowing_Segment/	参考与响应对照 模型与参数比较
进阶开发	2.AdvExps/e4.TrajPlanExps/ 3.CirularTrajMotion/、4.SpiralTrajMotion/	参考生成、导数一致性与接口适配

以上目录位于 [安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/，总表见该目录 Index.pdf。

6.9.4 综合任务与回顾：任务设计

综合任务先建立基准，再选择一项扩展

共同基准
起飞、到点、返回

记录要求：
参考、反馈、模式与终态

选做分支	只改变一项条件
轨迹与速度	同一路径，比较两种完成时间
约束与避障	保持运动能力，增加已知障碍 目录：e11_Avoidance_Segment
控制接口	同一参考，对比位置与PVA方式

先建立可复现的基准，才能把性能变化归因到具体设计。

6.9.4 综合任务与回顾：结果计算

误差大小与任务完成必须一起评价

计算练习：三次同刻配对的位置误差模长为0.1、0.3、0.4 m。
求均方根（RMS）误差与最大误差。

$$e_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{0.1^2 + 0.3^2 + 0.4^2}{3}} \approx 0.294\ \mathrm{m}$$

$$e_{\max} = 0.4\ \mathrm{m}$$

再检查：
约束是否满足？任务是否完成？

数据对齐：先按时间戳把参考与反馈配对，再逐点求误差。

阶段区分：起飞、稳定跟踪与降落分别统计，解释误差发生的时间和原因。

6.9.4 综合任务与回顾：失败分析

结果不符合预期时，沿信息流定位原因

参考	指令	响应	终态
坐标、转向、导数	消息到达、模式	限幅、时延、误差	降落、接地、上锁

位置不变→指令：查消息时间与接收记录，当前模式是否匹配。

转向相反→参考：查坐标约定、转向符号与导数，用四分之一圈核对。

加速后偏离→响应：对照参考/反馈曲线，查限幅、参考变化与时延。

退出后仍在飞→终态：查结束分支是否发起，模式、接地与上锁状态。

排查顺序：参考→指令→响应→终态；前一环有误，后一环的现象就无从解释。

6.9.4 综合任务与回顾：综合任务交付

一份能复核的实验报告需要哪些证据

必须说清	提交内容	自查问题
任务与条件	初始状态、路径或目标、阈值、接口与版本	相同条件下能否再次比较
输入与响应	参考/反馈轨迹、误差及速度曲线	曲线是否同坐标、同时间
约束与终态	最小间隔、限幅、模式与接地记录	间距是否达标 降落是否完成
问题与改进	一次单因素对比和原因分析	改动是否能解释结果变化

课堂练习

三个反例检查你是否真正闭合了任务

情形一：实际位置始终在参考圆上，但总落后一个固定角度。

参考要点：路径误差可能为零，同刻位置误差却不为零。

情形二：完成时间加倍，能否直接宣布跟踪性能更好?

参考要点：先说明速度和加速度要求降低，再用同一指标比较结果。

情形三：外部程序停止运行，任务是否已经安全结束?

参考要点：以飞行状态为准，确认模式、接地与上锁（disarm）。

本章小结

外部控制把任务要求变成可检验的运动

任务与分工 按职责分层 → **接口与反馈** 持续目标与反馈 → **轨迹与约束** 先可行后最优 → **跟踪与评价** 同刻误差与终态

概念： 外部控制是控制职责和接口边界；板外控制是具体模式。

方法： 按需求选遥控、任务或板外控制模式；搜索、采样或优化先给可行参考，APF、DWA、MPC 随反馈局部避障，再用同刻反馈评价；学习方法同样检验。

边界： 外部程序给所选入口的目标，入口以下的闭环由飞控完成；语言或 VLA 输出须经有坐标、单位、周期和条件的受限接口；仿真结论上真机前需再验证。

易错点： 参考≠实测，消息频率≠时延，样点无碰撞≠整段安全，停止发送≠完成降落。

衔接： 停止发送不等于安全结束，异常如何检测与处置由第七章回答。

自主能力不仅在于会生成动作，也在于能观察结果并持续修正。