本章目录

外部控制原理与控制模式

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

6.2.1 遥控控制模式

教材对应：第6.1.2.1节

6.2.2 地面控制模式

教材对应：第6.1.2.2节

6.2.3 板外控制模式

教材对应：第6.1.2.3、6.2.2.4节（进入与退出）

6.2.4 同任务对比

教材对应：第6.1.2.1–6.1.2.3节

6.2 外部控制原理与控制模式

本节导入：三种指令来源

谁给出下一个运动目标

方式	交给飞控的内容	谁持续决定下一步
遥控	摇杆与模式开关 经过模式映射解释	操控员观察运动 持续调整输入
任务模式	航点及任务动作 上传后在机上保存	机上任务执行器 按任务项目推进
板外控制	位置、速度或姿态等 连续有效的目标	外部程序依据任务 与新观测持续计算

选择控制模式，就是分配持续决策与异常接管的责任。

6.2 外部控制原理与控制模式

6.2.1 遥控控制模式：遥控器控制通道

四个通道共同改变载具运动

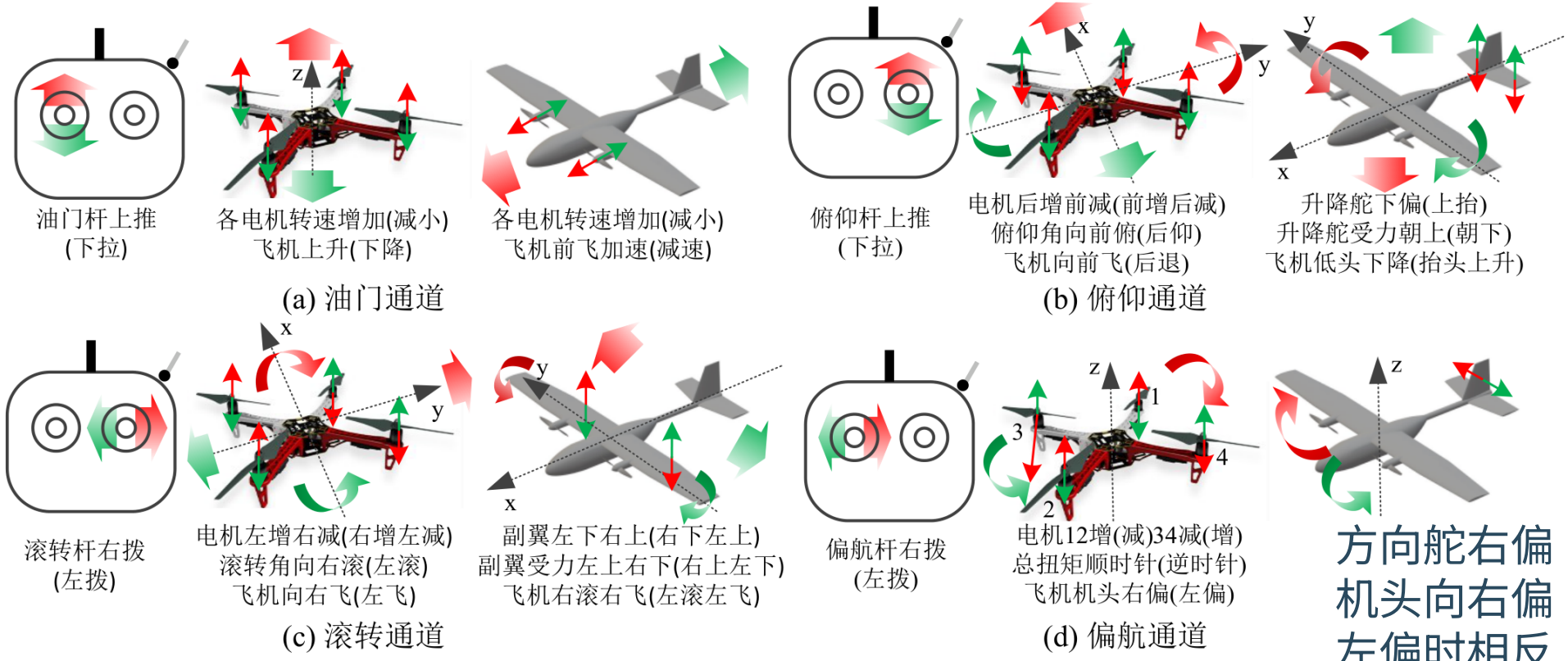
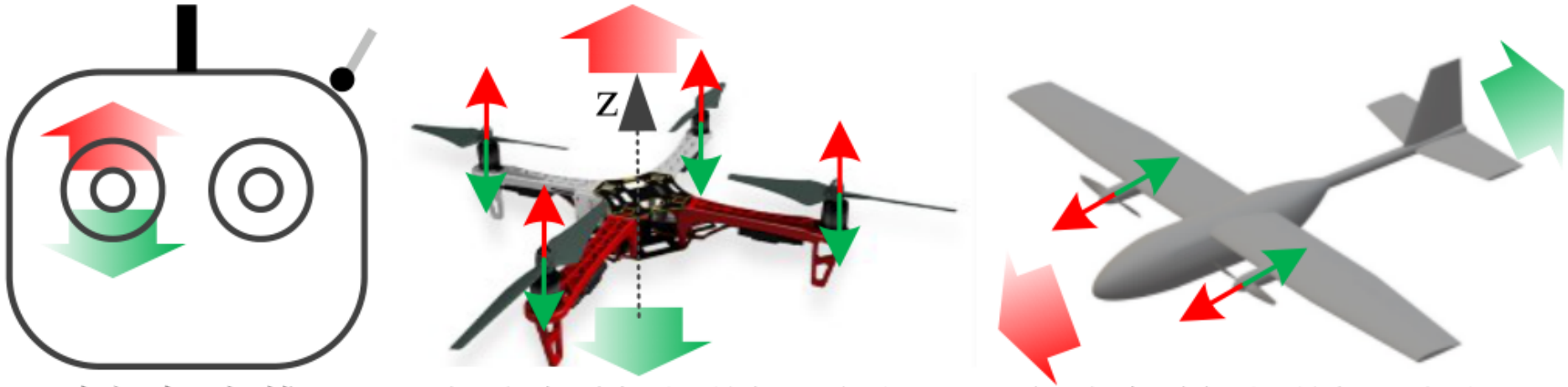


图6.3 遥控器控制通道（四个子图随后分别放大）

6.2.1 遥控控制模式：油门通道

油门给出总拉力需求，飞控分配电机输出



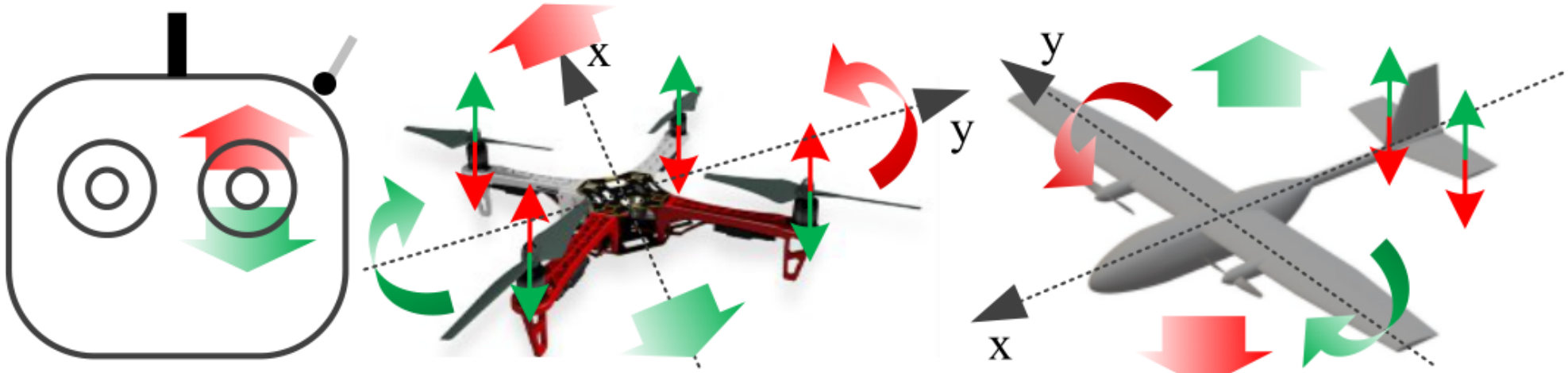
(a) 油门通道

图6.3(a) 油门通道；多旋翼改变总拉力，固定翼主要改变推力与空速

6.2 外部控制原理与控制模式

6.2.1 遥控控制模式：俯仰通道

俯仰改变倾角，也改变受力方向

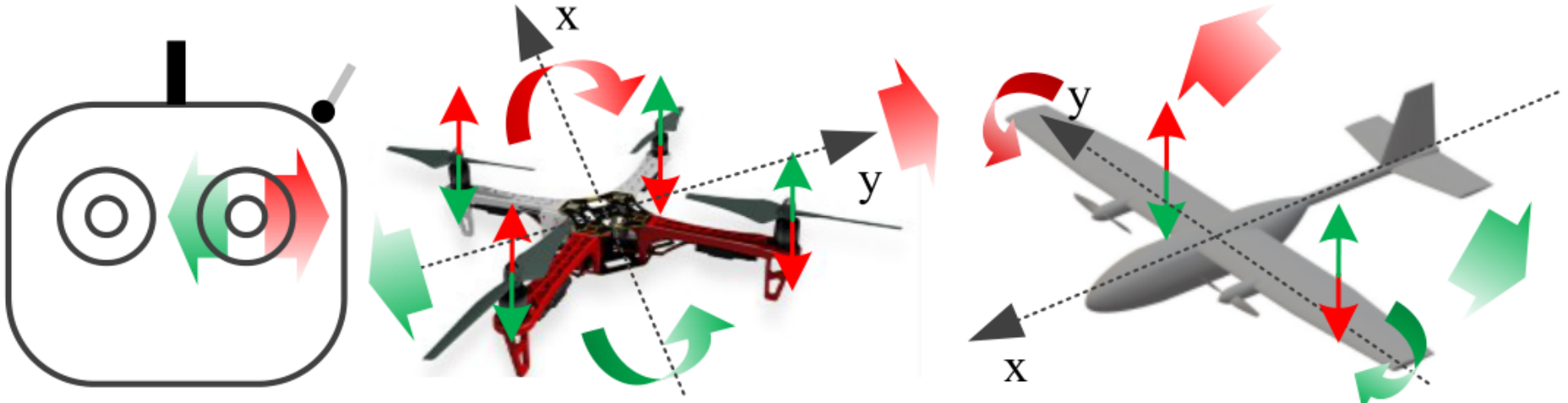


(b) 俯仰通道

图6.3(b) 俯仰通道；姿态模式下杆量给倾角目标，车船通常无俯仰通道

6.2.1 遥控控制模式：滚转通道

滚转使机体倾斜，形成横向运动



(c) 滚转通道

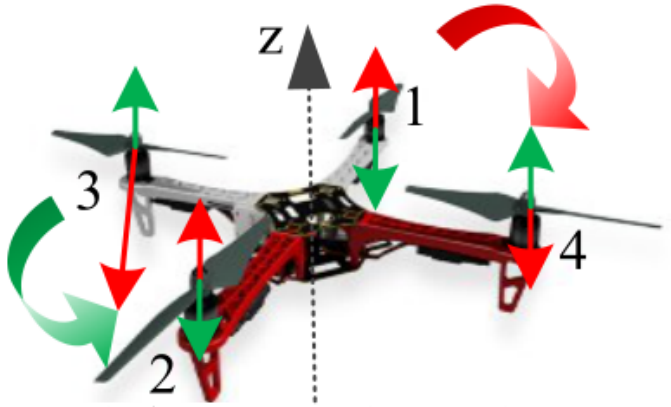
图6.3(c) 滚转通道；倾斜先改变受力，再改变运动

6.2.1 遥控控制模式：偏航通道

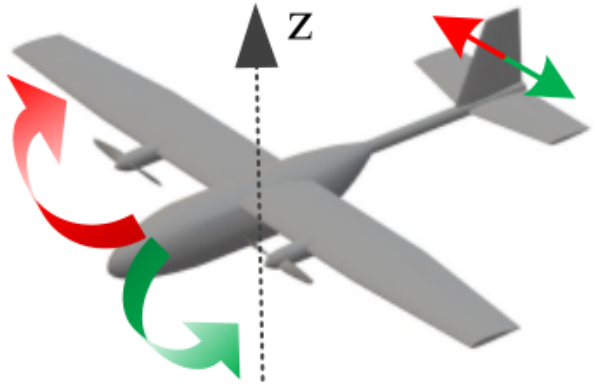
偏航改变朝向，固定翼转弯还依靠滚转



偏航杆右拨
(左拨)



电机12增(减)34减(增)
总扭矩顺时针(逆时针)
飞机机头右偏(左偏)



方向舵右偏（左偏）
尾部受力向左（向右）
机头右偏（左偏）

(d) 偏航通道

图6.3(d) 偏航通道；偏航杆多给角速度目标，电机旋向按实际构型确定

6.2.1 遥控控制模式：多旋翼模式

同一根摇杆，在三种模式中含义不同

模式	摇杆主要含义	归中后的保持能力	估计前提
自稳 **Stabilized**	倾角 + 偏航角速度 油门给总拉力需求	姿态回平 不保持高度/位置	姿态估计 人工输入
定高 **Altitude**	倾角 + 偏航角速度 油门给爬升速度	保持高度 水平仍可漂移	姿态与高度 估计有效
位置 **Position**	水平加速度/速度 油门给垂直速度	制动并保持位置 油门归中保持高度	水平定位 高度估计

安装版默认 PX4 v1.12.3，确认方法见课件5.5「控制输出的版本边界」页。
位置模式默认按加速度映射摇杆，映射方式由 MPC_POS_MODE 选择。
自稳、定高不要求卫星定位；位置模式需要有效定位。

6.2.1 遥控控制模式：载具差异

固定翼保持航迹，并不原地悬停

模式	飞控帮助保持什么	操控与约束
自稳	滚转、俯仰姿态 无位置保持保证	油门直接给推力需求 飞行中保持足够空速
定高	高度；有相应空速输入时 还调节空速	横风下对地航迹可漂移 俯仰输入改变高度需求
位置	高度、对地航迹 及受支持的空速控制	仍沿航迹前飞 滚转控制转弯，偏航协调

相同模式名只说明控制任务，不能抹去载具的运动约束。

6.2.1 遥控控制模式：其他模式

模式开关也能触发一段自主任务

模式组	输入或触发	执行含义
特技 Acro	持续给出角速度与推力需求	适合快速翻滚等机动 不提供自动定点
起飞 / 降落 / 返航	模式开关或地面站触发 Takeoff / Land / Return	飞控执行相应过程 返航与降落都有进入条件
跟随 / 绕圈 / 保持	地面站或模式开关触发 Follow Me / Orbit / Hold	跟目标、环绕或等待 保持行为随载具而不同

模式切换先改变控制权与目标解释，再由飞控形成运动。

6.2.1 遥控控制模式：仿真例程阅读

SendRCPwms 更新的是遥控通道

[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/0.ApiExps/
e4_PX4RcCtrlAPITest/：Readme.pdf、PX4RcCtrlAPITest.py

```
pwms[2] = 1900
mav.SendRCPwms(pwms)
```

输入： pwms[2] 即第3通道（油门）；
1100→1900 μs，由后台循环发送。

预期： 解锁后持续上升约 60 s；

判据： 通道值、模式与高度一致。

例程副作用： 请求解锁（arm，允许电机输出，见课件5.6「控制器全图」页）；
initRCSendLoop 把 NAV_RCL_ACT、NAV_DLL_ACT 置0，关闭遥控与数传失联保护。

结束缺口： 60 s 后直接停止，未落地；须先受控落地并确认上锁（disarm）。

本章目录

外部控制原理与控制模式

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

6.2.1 遥控控制模式

教材对应：第6.1.2.1节

6.2.2 地面控制模式

教材对应：第6.1.2.2节

6.2.3 板外控制模式

教材对应：第6.1.2.3、6.2.2.4节（进入与退出）

6.2.4 同任务对比

教材对应：第6.1.2.1–6.1.2.3节

6.2.2 地面控制模式：任务模式流程

任务上传后，由机上执行器推进

任务规划
航点与动作 → 任务上传
机上保存 → 安全配置
核对条件 → 任务启动
机上执行 → 任务结束
确认终态

任务模式（Mission）：教材称地面控制模式，地面站规划上传、机上执行；地面电脑上持续发送目标的程序属于板外控制。

地面站：编辑和上传任务，显示位置、任务进度与告警。

飞控：根据任务项目生成运动目标，并利用状态反馈推进任务。

中断与恢复：暂停、切模或重设任务项目后，重新确认当前执行位置。

6.2 外部控制原理与控制模式

6.2.2 地面控制模式：地面站任务规划

从区域、任务项目到上传

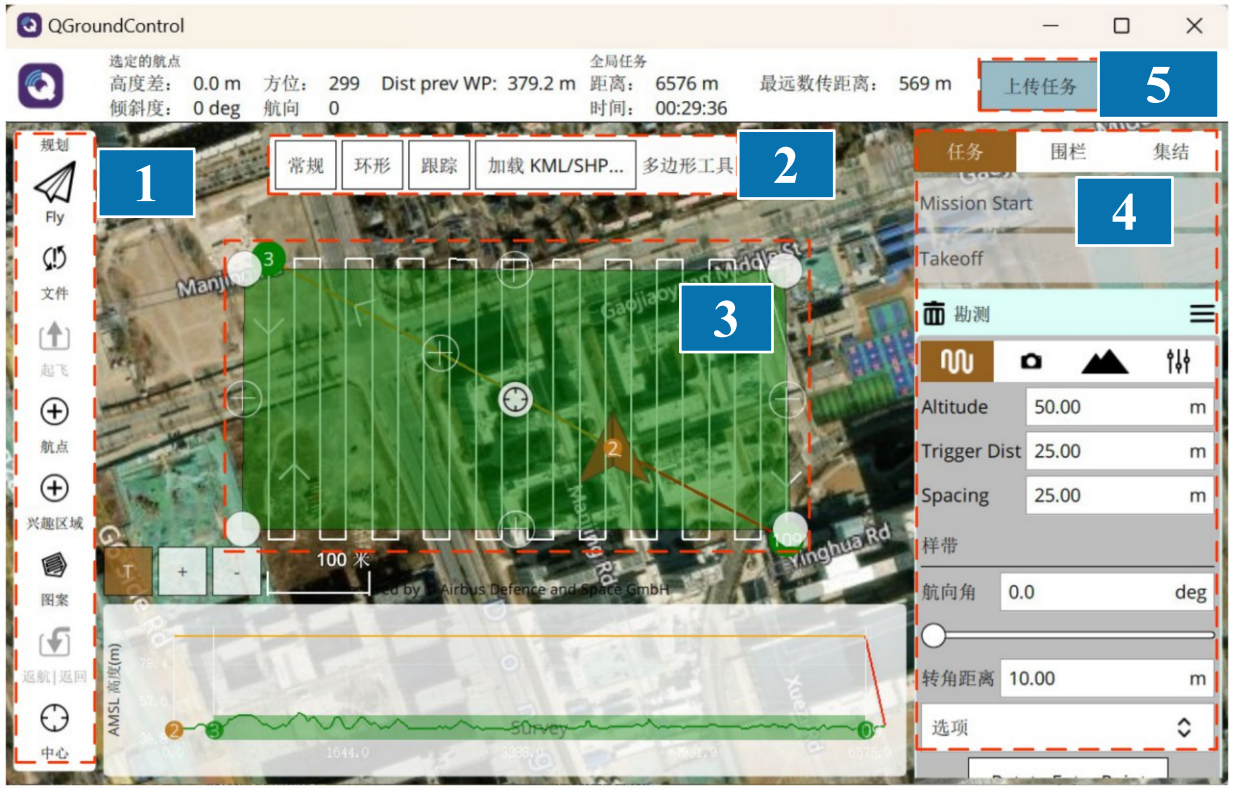


图6.4 地面站航迹规划任务（编号 1–5 见右侧）

1–2：任务工具栏与任务模板。

3：轨迹预览图，看覆盖与转弯。

4：任务点编辑，改高度与动作。

5：任务上传，把任务发到载具。

任务列表：上传成功后待启动。

6.2.2 地面控制模式：任务参数

触发距离与航线间距是两个参数



图6.4（局部）区域内的往返航线

触发距离沿航迹计；航线间距跨航迹计。

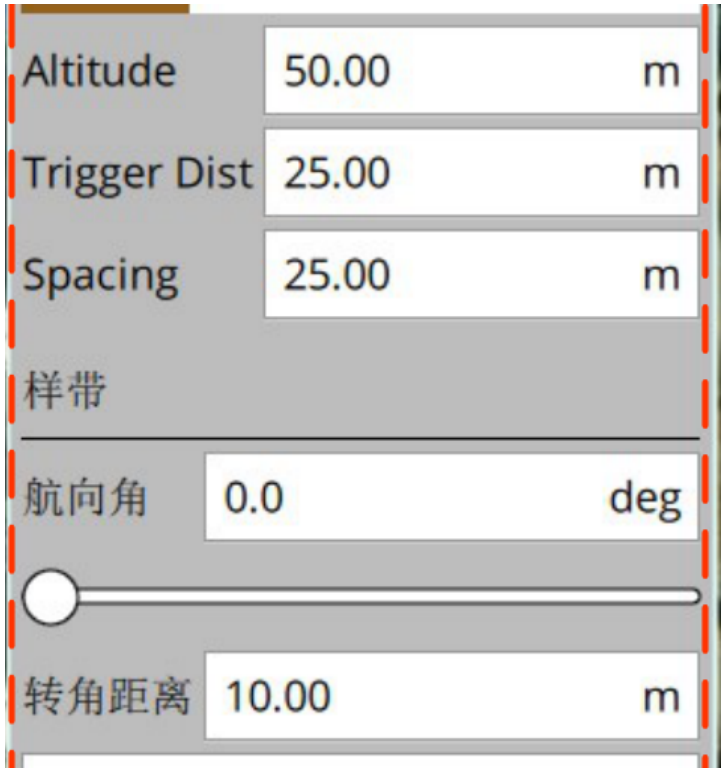


图6.4（局部）参数编辑

6.2.2 地面控制模式：航点与动作

航点规定去哪里，任务命令规定做什么

任务内容	常见任务命令	巡检中的作用
导航	NAV_TAKEOFF NAV_WAYPOINT / NAV_LAND	起飞、到达指定位置 并在预定位置降落
载荷动作	DO_MOUNT_CONTROL DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	调节云台 按航行距离触发拍照
速度与顺序	DO_CHANGE_SPEED DO_JUMP	改变速度 重复或跳转任务项目

全局参数还包括默认速度、朝向策略与等待条件；循环须有明确出口。

6.2.2 地面控制模式：任务上传

上传成功、开始执行、任务完成是三件事

声明任务数量 → 请求与传输项目 → 确认接收结果 → 机上保存待执行

观察到的状态	能够说明什么	还缺哪一步
上传被接受	机上已接受这份任务列表	确认可执行条件并启动
当前项目在推进	任务执行器正在运行	确认动作、路径与最终状态
最后项目已完成	任务列表的结束条件达到	确认终态、落地及上锁状态

6.2.2 地面控制模式：启动条件与失效保护

任务检查覆盖已知规则，不能替代环境判断

载具状态：定位与高度估计、电量、姿态和解锁条件满足任务要求。

任务规则：围栏与必要起降项目通过检查；距离告警需人工复核航点。

异常动作：为遥控丢失、数传丢失、电量和定位异常设置可执行的处置。

环境约束：另查障碍、地形、起降空间、最小转弯半径与载荷。

围栏限定“允许去哪里”，失效保护规定“异常时怎样处置”。

6.2.2 地面控制模式：任务启动与结束

启动需确认模式，结束需确认终态

阶段	下达意图	从反馈确认
启动	地面站启动、遥控切模 或程序请求任务模式	当前模式、解锁状态 任务项目开始推进
正常结束	预先指定返航、降落 或保持等待	最终位置与任务状态 降落时还要确认落地
意外中断	按异常与配置执行 保持、返航或降落等	触发原因、实际模式 所选动作是否具备条件

落地后确认已上锁再回收；Kill 急停只用于紧急情况。

本章目录

外部控制原理与控制模式

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

6.2.1 遥控控制模式

教材对应：第6.1.2.1节

6.2.2 地面控制模式

教材对应：第6.1.2.2节

6.2.3 板外控制模式

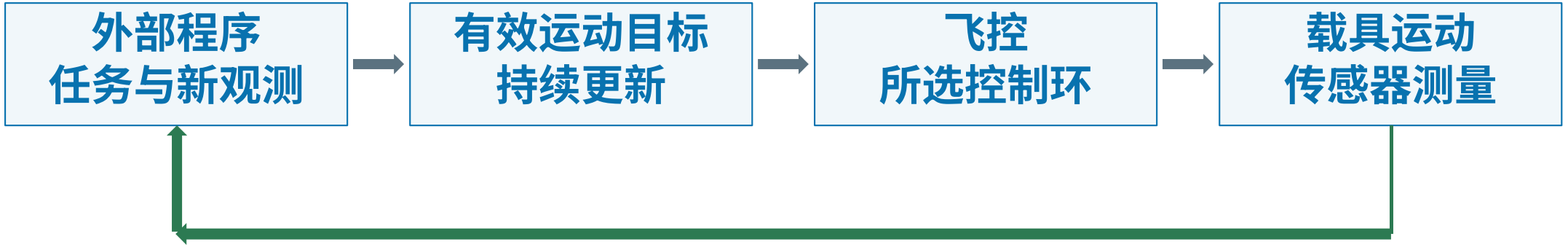
教材对应：第6.1.2.3、6.2.2.4节（进入与退出）

6.2.4 同任务对比

教材对应：第6.1.2.1–6.1.2.3节

6.2.3 板外控制模式：板外控制机制

外部程序持续更新目标，飞控执行所选控制环



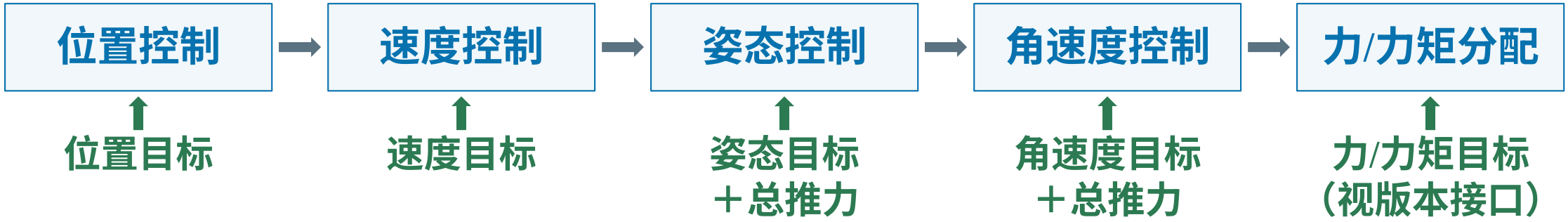
实际状态返回外部程序，参与下一次决策

板外控制：飞控之外（机载计算机或地面电脑）的程序
经 MAVLink 持续下发位置、速度或姿态等目标。

名称对应：PX4 称 Offboard 模式，ArduPilot 对应 Guided 模式；
应用于视觉跟踪、多机协同、动态导航与精准投送。

6.2.3 板外控制模式：位置、速度、姿态与力

选择目标类型，也选择自己承担的控制工作



读图：绿色箭头是外部目标的接入点；箭头所指的环及其右侧由飞控执行，左侧的环改由外部程序承担。

位置/速度目标：飞控执行其后各环与分配，需有效的位置/速度估计。

姿态/角速度目标：外部另给总推力；飞控保留未旁路的内环。

力/力矩目标：外部满足动力学与执行器限制；飞控只做受支持的分配。

支持组合由 PX4 版本、接口和载具决定；字段见课件6.7「位置指令与发送」页。

6.2.3 板外控制模式：多类载具

同一外部控制思想，需要不同运动约束

载具	可用运动与输入	必须保留的约束
固定翼	前飞、转弯、爬升 航点/姿态与推力	空速、迎角、转弯半径 不能按多旋翼方式悬停
多旋翼 / 直升机	悬停与三维运动 旋翼及操纵机构有差异	平移和姿态耦合 总推力与倾角受限
地面 / 水面	速度、转向或航向 多为欠驱动运动	转弯半径、路面/水流 不能任意侧移
潜航器等	推进、舵面、浮力 以及机械臂等载荷执行机构	多执行器协调 按实际平台支持实现

6.2.3 板外控制模式：外部控制流程

先建立有效目标流，再请求进入模式

连接与读状态 → 确认估计有效 → 预发送安全目标 → 请求模式/解锁

预发送：目标流兼作生存信号（证明外部程序仍在发送），以 >2 Hz 持续发送后再请求切模；v1.16 文档另要求超过 1 s。

状态确认：读取实际模式与解锁状态；拒绝或超时就停止推进。

持续运行：发送目标、读取状态、判断异常，循环进行。

进入模式是一次状态转换，持续控制是一份长期约定。

6.2.3 板外控制模式：Offboard 生存条件

生存信号证明外部控制器仍在工作

$$f_{\text{live}} > 2\ \text{Hz}$$

生存信号频率（Hz，次/秒）

进入前与运行中持续保持

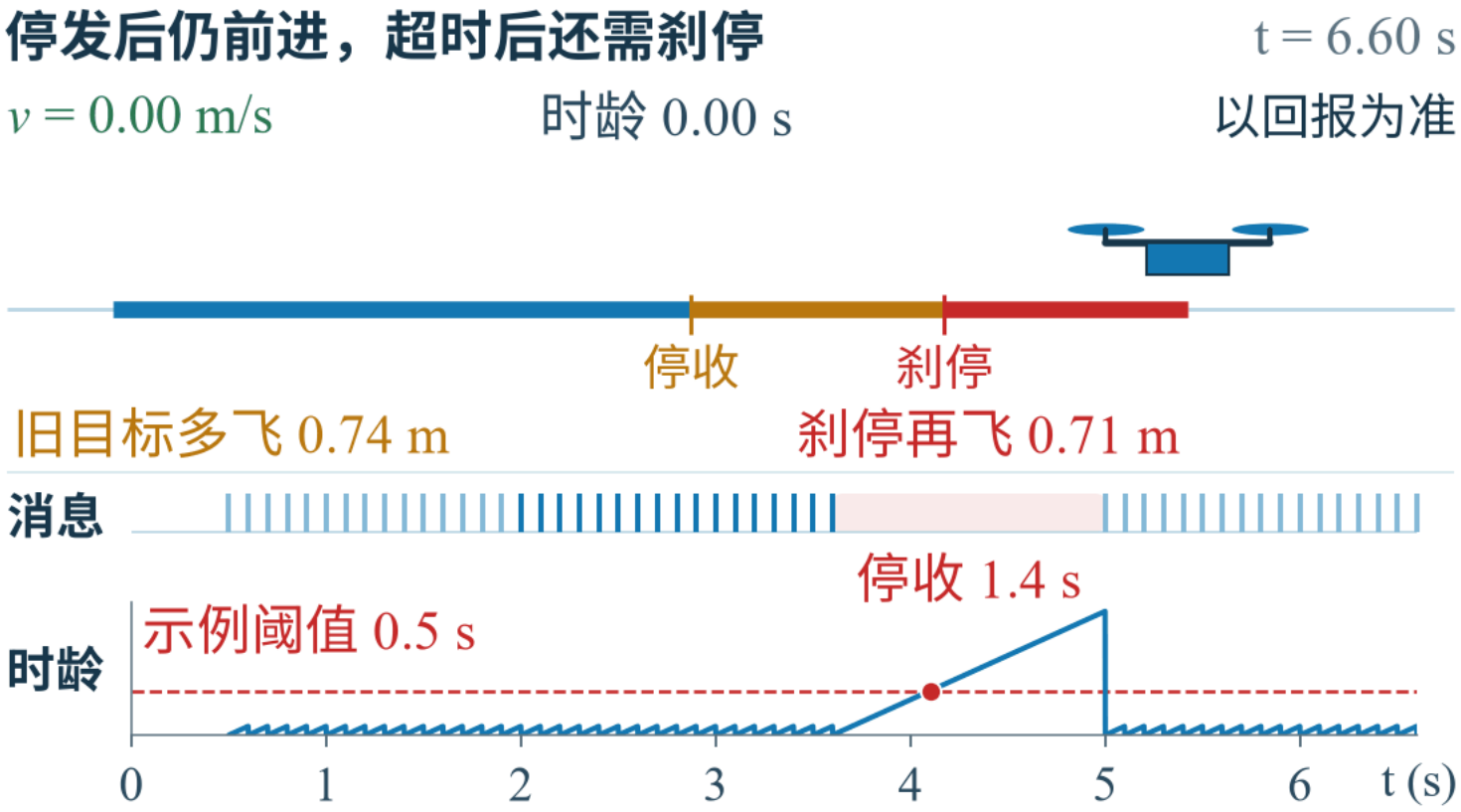
v1.16：进入前超过 1 s

接口	持续发送什么	保持同一点时
MAVLink **飞行通信协议**	受支持的目标消息 兼做生存信号	同一位置目标 仍要持续发送
ROS 2 **机器人操作系统**	OffboardControlMode 目标由相应话题提供	持续发控制模式消息 目标话题按需发布

PX4 v1.16 文档：进入、持续接收与退出条件（v1.12 文档无 1 s 要求）
https://docs.px4.io/v1.16/en/flight_modes/offboard

6.2.3 板外控制模式：进入、保持与失联

从进入到恢复，都要看接收年龄与实际模式



图：Offboard 进入、保持与失联处置（教学算例，非平台实测）

进入：估计有效、预发送超过 1 s 后请求 Offboard 并读回实际模式。

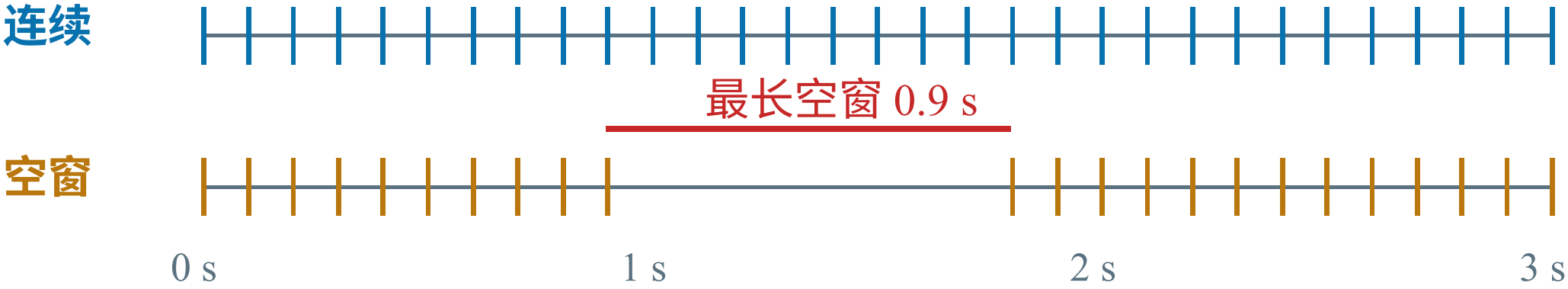
接收年龄：最近一条目标已收到多久。
停发后仍执行旧目标，达到时效阈值才处置。

重新确认：收到消息不等于恢复控制；
先读实际模式再续任务。

6.2.3 板外控制模式：可复算接收时序

平均频率合格，也可能出现超时空窗

教学计算：0–3 s内每0.1 s一次，应收31条；中途缺8条，实收23条。



$$f_{\text{avg}} = \frac{23 - 1}{3 - 0} = 7.33\ \text{Hz}$$

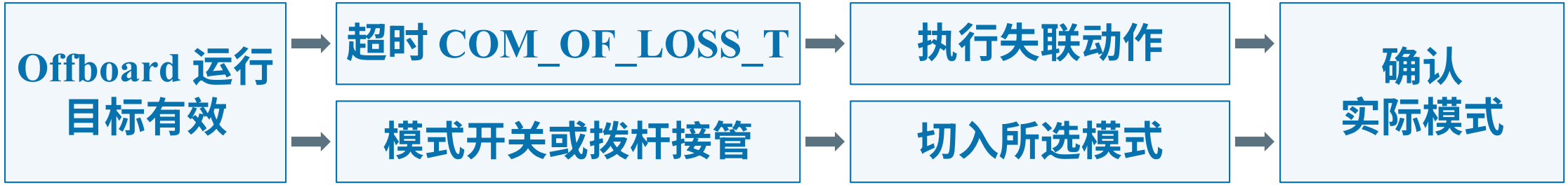
阈值 0.5 s（示例）：超时
阈值 1.0 s（默认）：不触发

23条消息有22个间隔，平均频率按首末3 s计算；阈值即 COM_OF_LOSS_T。

结论：平均频率合格仍可能超时，要逐段看接收年龄（见课件6.7）。

6.2.3 板外控制模式：超时与接管

失联处置与人工接管各有触发条件



超时配置：COM_OF_LOSS_T，单位 s，默认 1.0；最近目标超过此时长即判丢失。

退出动作：v1.12.3 有遥控时按 COM_OBL_RC_ACT（默认 Position），
无遥控时按 COM_OBL_ACT（默认 Land）；v1.14 及以上只用 COM_OBL_RC_ACT。

人工接管：模式开关可切模；拨杆接管由 COM_RC_OVERRIDE 决定，
默认只在自动模式启用，Offboard 中不启用。

失联处置由参数自动触发；人工接管靠模式开关或已启用的拨杆接管。

6.2.3 板外控制模式：正常退出

先转交控制权，确认上锁后再清理通信



状态依据：任务终态、实际模式、着陆状态与解锁状态共同确认。

调用顺序：确认已转入降落或接管模式后即可停发目标；
确认着陆并上锁后再 stopRun()。

endOffboard()：不发送降落命令；函数行为见课件6.7「SDK副作用」页，
结束顺序见课件6.7「结束与异常处理」页。

本章目录

外部控制原理与控制模式

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

6.2.1 遥控控制模式

教材对应：第6.1.2.1节

6.2.2 地面控制模式

教材对应：第6.1.2.2节

6.2.3 板外控制模式

教材对应：第6.1.2.3、6.2.2.4节（进入与退出）

6.2.4 同任务对比

教材对应：第6.1.2.1–6.1.2.3节

6.2.4 同任务对比：巡检任务

同一巡检任务，持续决策的位置不同

比较维度	遥控	任务模式	板外控制
输入内容	杆量与模式	航点和任务动作	连续运动目标
持续更新者	操控员	机上任务执行器	外部程序
反馈用于	人判断下一步 飞控稳住运动	机上判定到点 地面站监控	外部更新目标 飞控执行
适用情形	现场判断 人工干预	已知路线 重复巡检	动态跟踪 实时调整

6.2.4 同任务对比：任务变化

遇到新障碍，三种方式由谁改变路线

方式	新障碍由谁处理	必须具备的条件
遥控	操控员判断并修改输入 必要时切入保持或退出	观察与通信足够及时 保留可执行的接管模式
任务模式	受支持的避障模块；或 暂停、重规划、更新任务	确认任务推进与恢复位置 不能假定航点自带避障
板外控制	外部感知和规划程序 持续给出新的有效目标	感知、规划和状态估计有效 满足接口生存与运动约束

模式提供控制入口，感知与规划才决定怎样应对新变化。

6.2.4 同任务对比：异常与接管

链路中断后，要看丢失的是什么

中断对象	直接影响	应读取的证据
遥控输入	操控员不能再更新杆量	遥控有效标志、失联原因 当前模式与接管条件
地面数传	地面失去监控/修改能力 机上任务可能仍在	任务项目、数传失效动作 当前模式及任务配置
板外目标流	外部目标不再持续有效 可能触发Offboard丢失	消息时间、模式、估计有效性 超时与退出动作配置

接管是否成立，以实际模式与控制响应为准，不以请求已经发出为准。

课堂练习

判断控制权，并说明下一步看什么

情形	参考判断	观察或处置要点
多旋翼定高松杆后水平漂移	定高保持高度 不承诺保持水平位置	检查模式与高度响应； 定点还需定位和位置模式
上传被接受却未开始任务	上传完成只表明 机上接受任务	检查启动、当前模式 可执行条件和当前项目
消息到达 0、0.2、0.4、1.6、1.8、2.0 s；阈值取默认 1.0 s	平均 5÷2 s=2.5 Hz>2 Hz 但空窗 1.2 s，1.4 s 判丢失	按失联动作切模； 1.6 s 恢复后先读模式

课堂练习

遇到新障碍：先判断谁能改路线

情形	参考判断	观察或处置要点
任务模式巡检，航线上新立起吊车，未启用避障功能	执行器仍按原航点推进，不会自动绕开	暂停或切保持；改航点并重新上传，确认当前项目再启动
板外程序按预设航点插值发送位置目标，无感知模块	Offboard 只提供目标接口，程序仍发原路线目标	接入感知与规划改写目标；未接入时由人接管
遥控以 5 m/s 飞向障碍，图传延迟 1 s	操控员负责改路线；看到时已多飞 5 m/s×1 s=5 m	降速并加大安全距离；必要时切保持模式

本节小结

用输入含义、更新责任和终态选择模式

遥控：先看飞行模式如何解释杆量；手动操纵仍可有闭环辅助。

任务模式：先规划并上传，再启动和监控；把任务结束状态写清。

板外控制：目标类型、有效估计、生存信号与退出动作一起设计。

同任务对比：模式只提供控制入口，应对新障碍要靠感知与规划。

易错点：输入通道不是电机输出；停止程序不是完成降落；
平均频率合格仍可能超时；SDK 初始化会关闭失联保护；
进入 Offboard 不等于具备避障。