



5.7 其他机型与进阶控制案例



本章目录

其他机型与进阶控制案例

第五章 滤波估计与底层控制

5.1 滤波估计与底层控制基础

5.2 传感器标定与滤波估计

5.3 控制器设计与控制分配

5.4 控制性能评估与调优

5.5 PX4架构与控制开发接口

5.6 底层控制开发与实验验证

5.7 其他机型与进阶控制案例

5.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

5.7.1 其他机型扩展

教材对应：第5.2.2.4节

5.7.2 固定翼底层飞行控制

教材对应：第5.2.2.4节

5.7.3 复杂构型控制案例

教材对应：第5.3.1、5.3.2节

5.7.4 高阶案例与实验选择

教材对应：第5.3.1、5.3.2节



5.7.1 其他机型扩展：载具全景

机型变化首先改变可施加的力与力矩

对象	主要操纵量	控制条件
多旋翼	各电机推力	推力范围、响应速度与构型
固定翼	油门与气动舵面	空速、迎角与配平状态
直升机 倾转构型	桨距、舵机 或倾转机构	旋翼耦合与工作模态
无人车 无人船	驱动力与转向量	接地／水动力约束与速度

前置：配平见课件4.4.1，空速、迎角、动压见课件4.8.2，桨距见课件4.8.4。

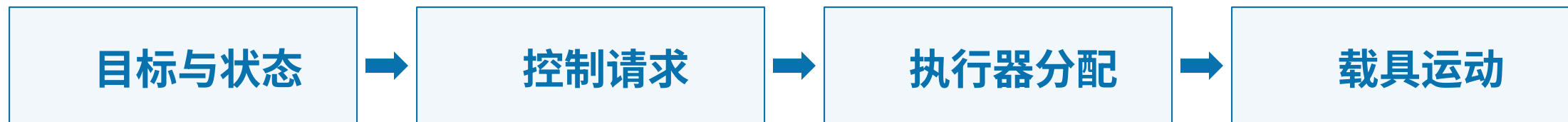
5.7.1 其他机型扩展：统一比较维度

同一闭环框架要逐项重新填入对象

比较项	四旋翼基准	固定翼变化
状态与测量	姿态、角速度、位置	关注空速、迎角 按控制与保护需求测量或估计
请求量	总推力与三轴力矩	推力与舵面产生的力矩
分配与约束	电机推力与转速限幅	舵角、舵速与气动效能
验证工况	悬停附近与扰动	配平空速附近与转弯

5.7.1 其他机型扩展：接口与物理对象

接口传递目标，控制能力由载具实现



- **可复用：** 订阅与发布结构、日志格式、逐阶段验证方法。
- **要重建：** 工作点、反馈状态、控制效能和执行器限制。
- **先判方向：** 给单通道小扰动，对照状态变化与输出方向。

通用接口减少接入工作，控制设计仍要尊重对象。



5.7 其他机型与进阶控制案例



本章目录

其他机型与进阶控制案例

第五章 滤波估计与底层控制

5.1 滤波估计与底层控制基础

5.2 传感器标定与滤波估计

5.3 控制器设计与控制分配

5.4 控制性能评估与调优

5.5 PX4架构与控制开发接口

5.6 底层控制开发与实验验证

5.7 其他机型与进阶控制案例

5.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

5.7.1 其他机型扩展

教材对应：第5.2.2.4节

5.7.2 固定翼底层飞行控制

教材对应：第5.2.2.4节

5.7.3 复杂构型控制案例

教材对应：第5.3.1、5.3.2节

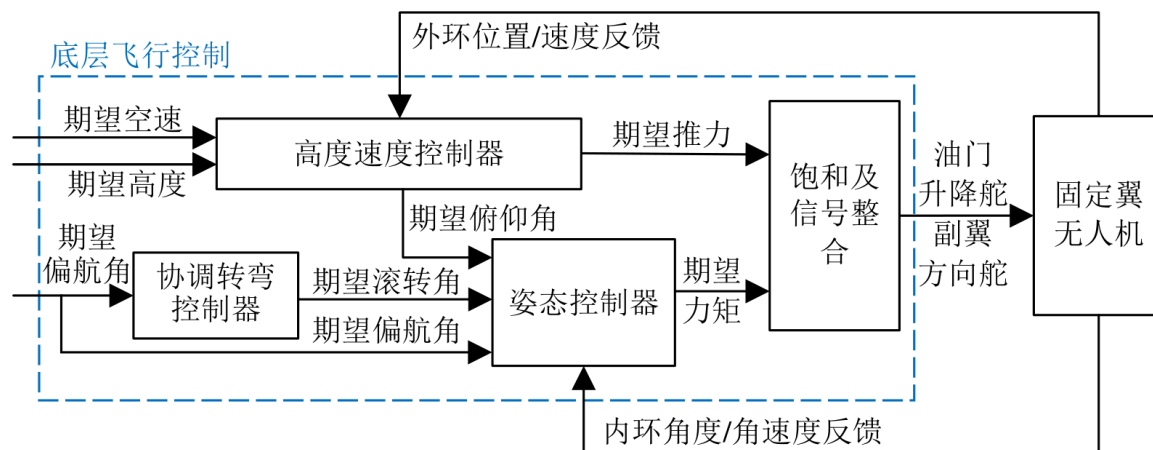
5.7.4 高阶案例与实验选择

教材对应：第5.3.1、5.3.2节

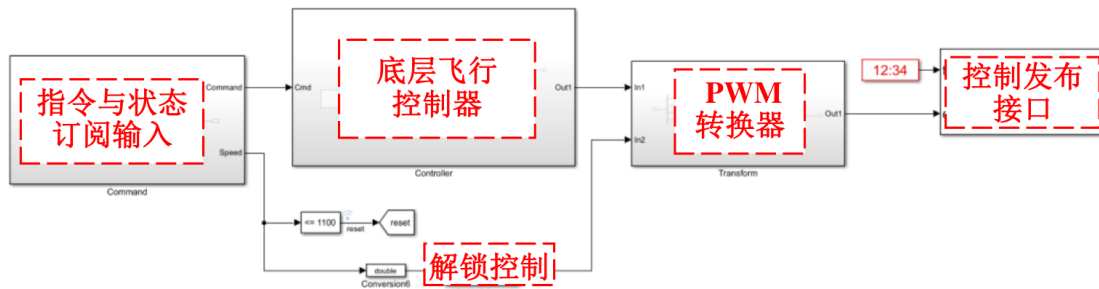


5.7.2 固定翼底层飞行控制：图5.13 总览

外环给运动目标，内环实现姿态响应



(a) 微小型固定翼无人机底层飞行控制结构图



(b) 固定翼底层控制Simulink模型框图

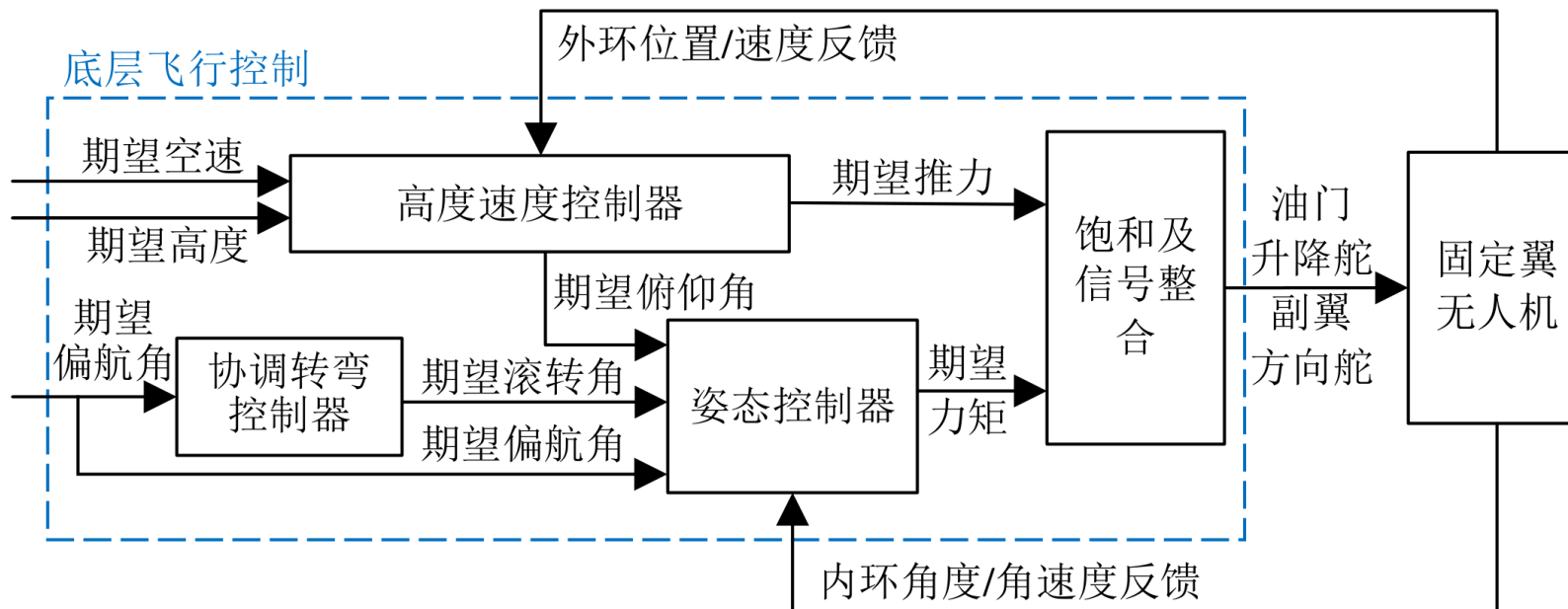
- **图5.13(a)**：高度／速度、协调转弯、姿态、执行器整合。
- **图5.13(b)**：指令与状态订阅、控制、PWM转换、发布。
- **两层反馈**：外环关注运动，内环使用角度与角速度。
- **协调转弯**：滚转使升力倾斜提供向心力，侧滑接近零。

图5.13 固定翼无人机的一种底层飞行控制结构图

5.7 其他机型与进阶控制案例

5.7.2 固定翼底层飞行控制：分层控制结构

高度与空速通过俯仰和推力相互耦合



(a) 微小型固定翼无人机底层飞行控制结构图

图5.13(a) 外环给出推力与俯仰目标，内环用角度与角速度反馈

耦合：抬头爬升会使空速下降，加油门会增速并爬升，两者须协调。

分层：外环可加积分消除高度／空速稳态误差；内环用角速率反馈增强阻尼。

5.7.2 固定翼底层飞行控制：俯仰一步计算

反馈把俯仰误差变成受限升降舵请求

独立教学模型：配平附近、单俯仰通道，内部采用弧度。

θ ：俯仰角； q ：机体俯仰角速度（rad/s）。

δ_e ：相对配平的归一化升降舵增量，限幅 $[-0.25, 0.25]$ 。

$$\dot{\theta} = q, \quad \dot{q} = -2q + 4\delta_e$$

$$\delta_e = \text{sat}_{[-0.25, 0.25]}[(\theta_r - \theta) - 0.3q]$$

$$\theta_r = 10^\circ = 0.17453 \text{ rad}, \quad \theta(0) = q(0) = 0$$

系数：-2 为气动俯仰阻尼，4 为升降舵效能，0.3 为角速率反馈增益（增强阻尼）。

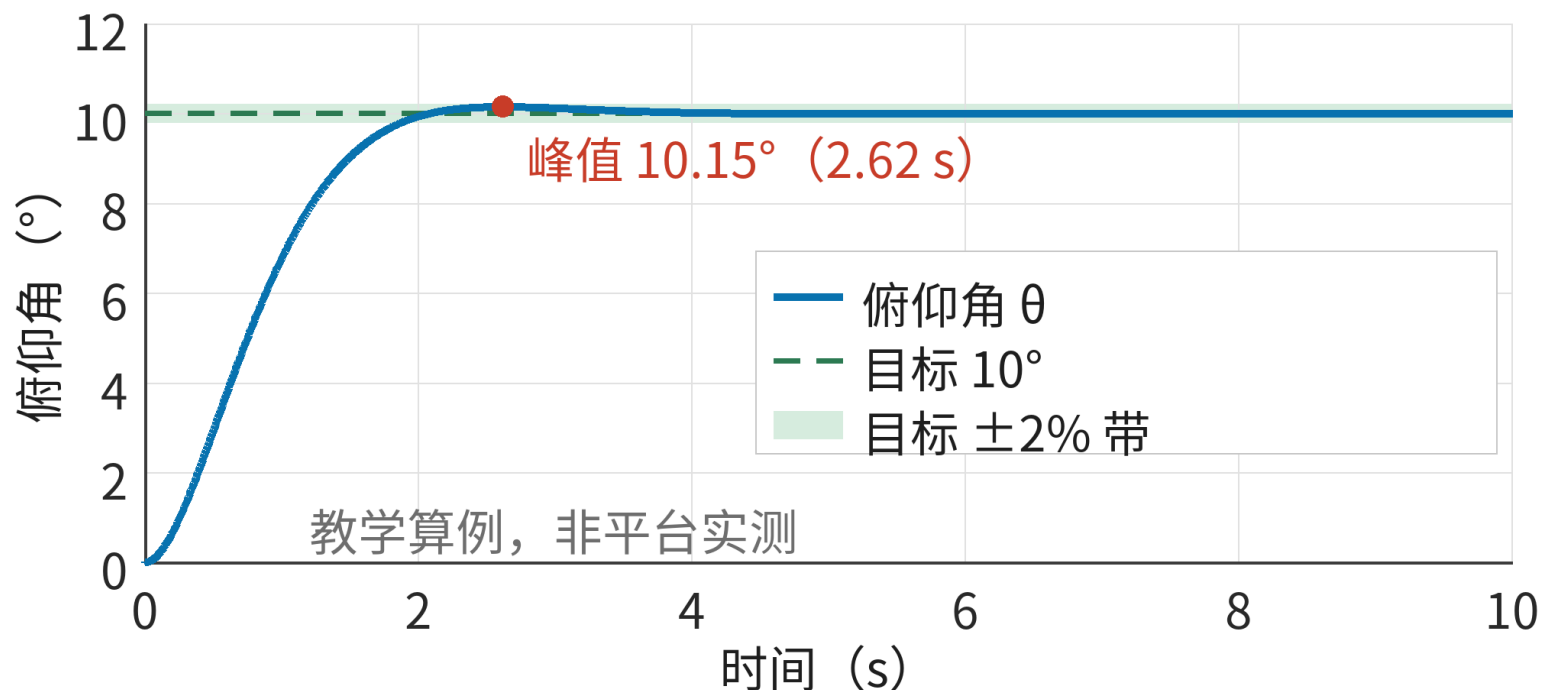
一步： $\dot{q}(0) = 4 \times 0.17453 = 0.698 \text{ rad/s}^2$ ；欧拉近似 $q(0.01) \approx 0.0070 \text{ rad/s}$

RK45 积分到 $t = 0.01 \text{ s}$ ： $q = 0.006870 \text{ rad/s}$, $\theta = 0.001979^\circ$

5.7.2 固定翼底层飞行控制：同一模型的完整响应

俯仰角约2.6 s达到峰值，随后收敛到目标

结论：约1.9 s进入目标 $\pm 2\%$ ，2.62 s达峰 10.152° （超调1.52%）。



图：局部俯仰教学模型的俯仰角响应（教学算例，非平台实测）

5.7.2 固定翼底层飞行控制：完整响应判读

角度达到目标还要检查舵面与工作点

同一独立教学模型；升降舵为相对配平的归一化增量。

时间 / s	俯仰 / °	角速度 / $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	升降舵增量
0	0.0000	0.00000	0.17453
0.5	2.9087	0.14760	0.07949
1	6.7594	0.10948	0.02372
2	9.9335	0.01602	-0.00364
5	9.9980	-0.00005	0.00005
10	10.0000	-0.00000	0.00000

结论：峰值 10.152° ，超调1.52%；舵请求绝对峰值0.17453，低于上限0.25。

5.7.2 固定翼底层飞行控制：空速与舵面效能

空速变化会改变同一舵角的控制作用

q_∞ ：动压； ρ ：空气密度； V_a ：空速（相对空气的速度）。

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho V_a^2$$

$$M_\delta = q_\infty S \bar{c} C_{m\delta_e} \delta_e$$

S ：机翼面积； $\bar{c}$ ：平均气动弦长； $C_{m\delta_e}$ ：升降舵力矩系数。

教学空速	动压计算 ($\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$)	结果
10 m/s	$0.5 \times 1.225 \times 10^2$	61.25 Pa
20 m/s	$0.5 \times 1.225 \times 20^2$	245.00 Pa

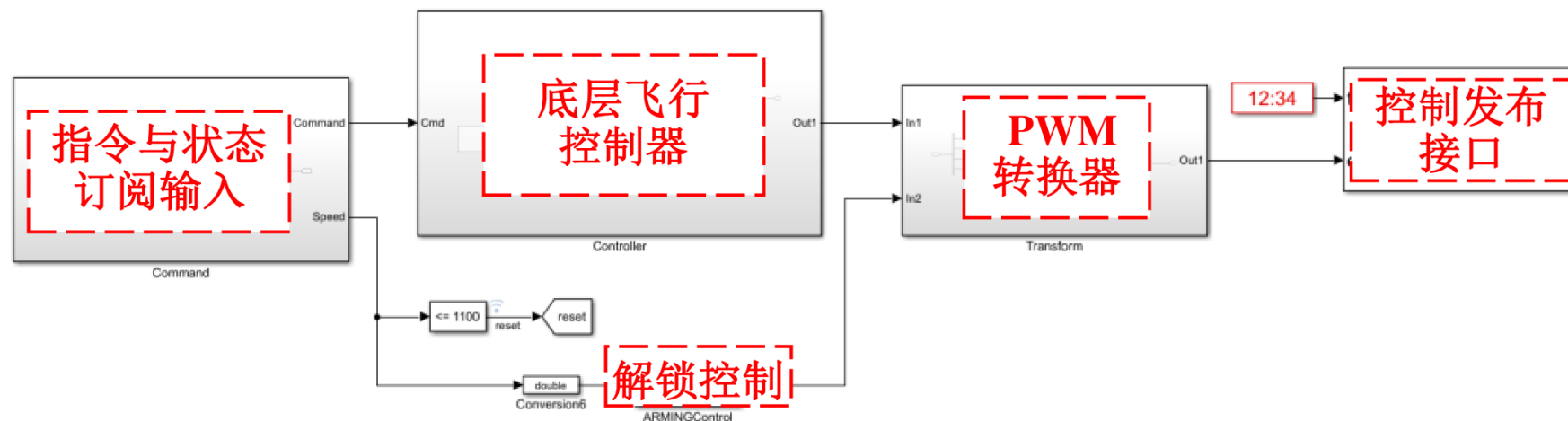
结论：空速加倍，动压与同一舵角的俯仰力矩约增至4倍。

增益调度：舵效与阻尼随空速变化，常按空速调度控制增益。

失速保护：低速、大迎角易失速，需迎角限制与最小空速保护。

5.7.2 固定翼底层飞行控制：程序与发布接口

控制计算与解锁条件共同决定输出



(b) 固定翼底层控制Simulink模型框图

图5.13(b) 程序实现：订阅输入 → 控制器 → PWM转换 → 发布

- **协议转换：**电机与舵机分别配置归一化范围、PWM范围和通道。
- **输出许可：**解锁、数据有效性与唯一控制源共同约束发布。

5.7.2 固定翼底层飞行控制：俯仰通道例程

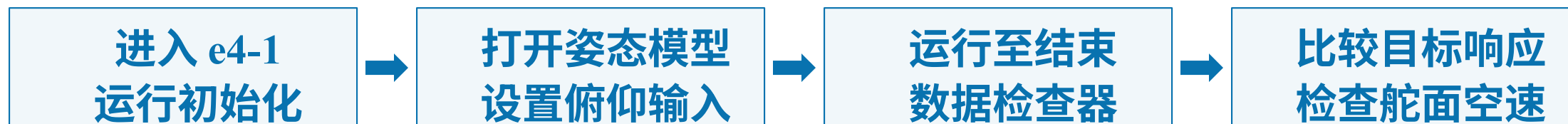
先读俯仰链，再比较模型与硬件输入

根目录：[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl/

1.BasicExps/e10-FixedWingCtrl/code_6/e4-1/

先读 Readme.pdf；运行 InitDatactrl.m；打开 SmallFixedWingUAVattitude.slx

俯仰输入：Command / PitchCH2 阶跃模块：阶跃时间 10，终值 100。



HITL（硬件在环）对照：code_6/e4-4/SmallFixedWingUAVattitudeHIL_pitch.slx

- **验收：**俯仰角跟踪阶跃目标并收敛，舵角不持续饱和。
- **排查：**发散先查PID参数、初始化与阶跃幅值；无曲线时开启仿真数据记录。

本章目录

其他机型与进阶控制案例

第五章 滤波估计与底层控制

5.1 滤波估计与底层控制基础

5.2 传感器标定与滤波估计

5.3 控制器设计与控制分配

5.4 控制性能评估与调优

5.5 PX4架构与控制开发接口

5.6 底层控制开发与实验验证

5.7 其他机型与进阶控制案例

5.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

5.7.1 其他机型扩展

教材对应：第5.2.2.4节

5.7.2 固定翼底层飞行控制

教材对应：第5.2.2.4节

5.7.3 复杂构型控制案例

教材对应：第5.3.1、5.3.2节

5.7.4 高阶案例与实验选择

教材对应：第5.3.1、5.3.2节

5.7.3 复杂构型控制案例：直升机操纵量

总距、周期变距和尾桨承担不同作用

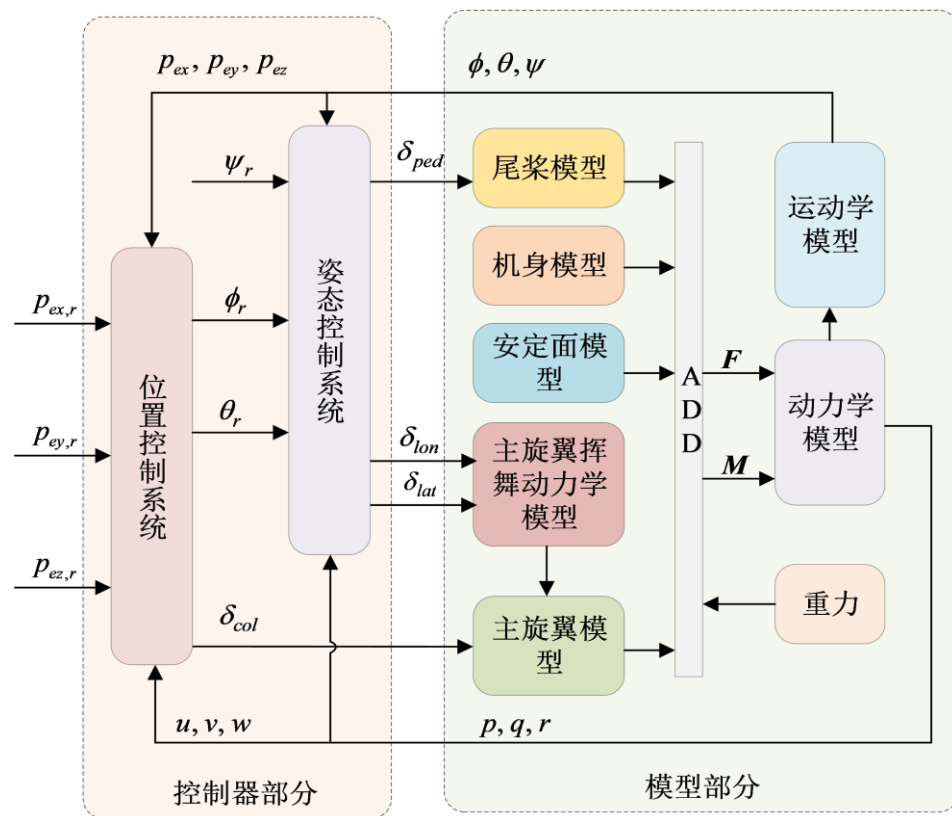


图5.14(d) 直升机模型部分放大

- **总距** δ_{col} : 共同改变桨距，调节旋翼总推力。
- **周期变距**: δ_{lon} (纵向)、 δ_{lat} (横向)，随方位改变桨距，控制旋翼作用方向。
- **尾桨** δ_{ped} : 参与偏航控制，平衡主旋翼反扭矩。
- **分配**: 舵机经斜盘合成总距与周期变距；桨距上限与机构响应限制动作。

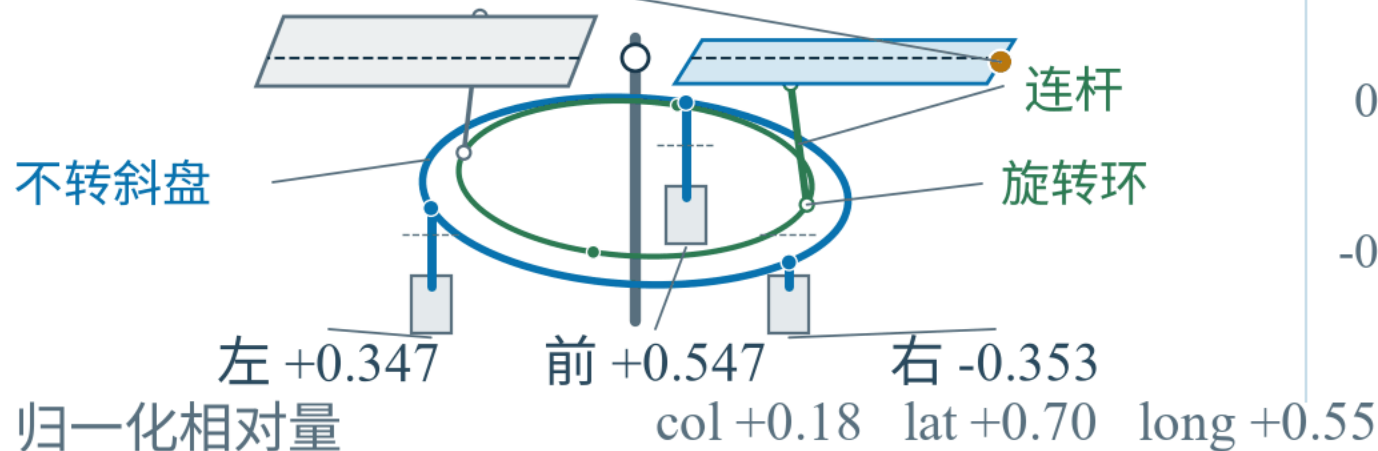
5.7.3 复杂构型控制案例：斜盘混控

三路舵机的共同量改总距，差动量改周期变距

共同量使斜盘平移；差动使桨距随方位变化

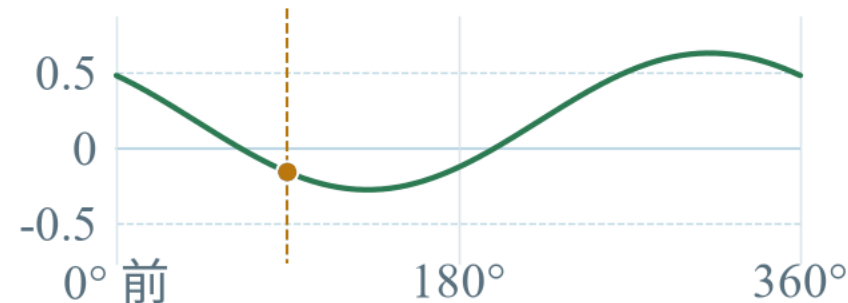
三分量叠加

标记桨叶



标记桨叶的相对桨距

方位 090° $p = -0.16$



一周均值 = +0.18

图：三舵机驱动斜盘与周期变距。

读法：舵机读数为e4混控的归一化相对输出；跟踪标记桨叶，观察桨距随方位变化。

5.7.3 复杂构型控制案例：直升机验证链

姿态内环稳定后再加入位置反馈

硬件在环：需 Pixhawk 6X 与遥控器；推荐固件 1.12.3，机架 Blade 130X。

2.AdvExps/e4_HELI-CtrlExp/1.AttitudeControl/

Readme.pdf • Init_AttControl.m • AttitudeControl.slx • HITLRun.bat

运行：编译烧录 → QGC 设机架、启用 HITL → 运行 HITLRun.bat → 遥控解锁

$$\begin{bmatrix} s_f \\ s_r \\ s_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.667 \\ 1 & -0.5 & -0.333 \\ 1 & 0.5 & -0.333 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{col} \\ \delta_{lat} \\ \delta_{lon} \end{bmatrix}$$

斜盘混控 (u2servo)： s_f 、 s_r 、 s_l 为前、右、左舵机；三路同加总距，差动产生周期变距。

位置扩展（完整版）：2.PositionControl/PosControl.slx；增加位置／速度外环。

- **判据：** CopterSim 提示 EKF 初始化完成后再解锁；单杆小输入时对应姿态跟随，其余通道不被明显带动。
- **排查：** 固件版本与编译命令见 Readme1.pdf 常见问题。

5.7.3 复杂构型控制案例：倾转两模态

旋翼模态与固定翼模态使用不同的作用方式

简化两模态；示例固件1.13.2；安装第10项“是否屏蔽PX4自身控制器输出”选“是”。

比较项	本例旋翼模态	本例固定翼模态
运动目标	姿态稳定、定点或定高	定速、航迹与协调转弯
关键反馈	姿态、角速度 位置与速度	另包含空速 与航迹状态
输出作用	每侧三舵机合成 总距与纵向周期变距	气动舵面；推进需求 通过总距同步实现

模型位置：Helicopter Mode / FixedWing Mode

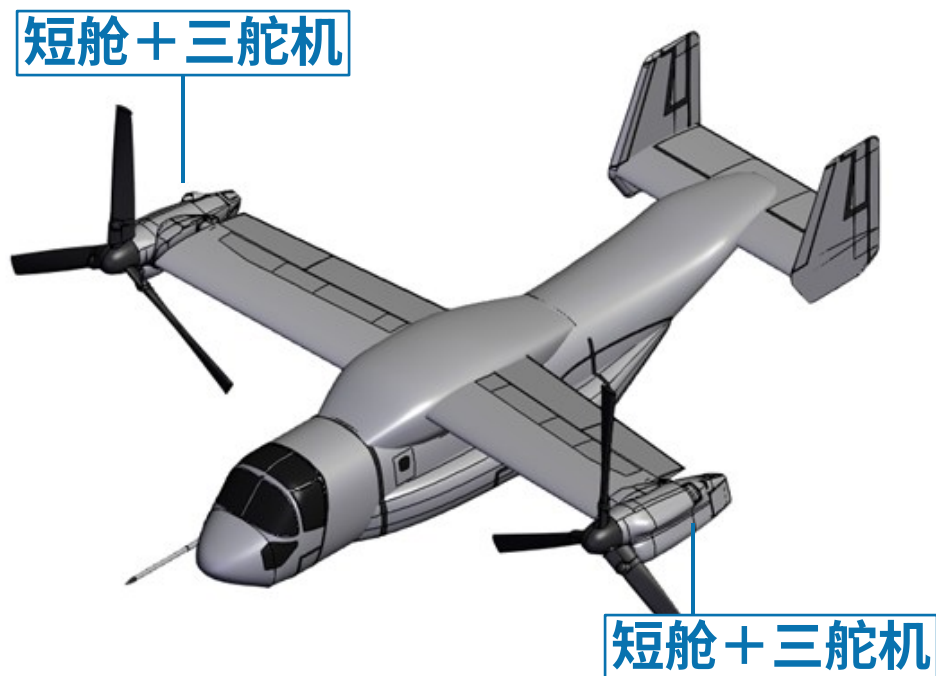
2.AdvExps/e6_Tiltrotor_CtrlExp/Readme.pdf

Controller/Init_AllMode_HIL.m • Tiltrotor_AllMode_HIL.slx

运行：烧录 → 启用 HITL → CopterSim 仿真 → CH7解锁 → CH5定点后CH6切模态

5.7.3 复杂构型控制案例：倾转机外形与判据

两侧短舱可倾转，每侧三舵机改变该侧桨距

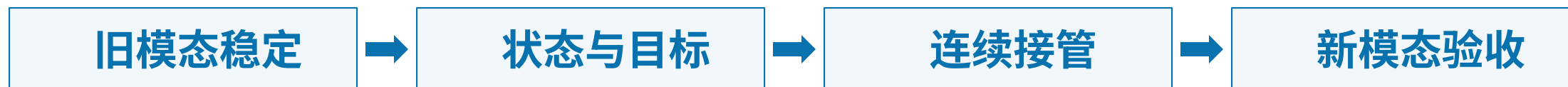


图：e6 倾转旋翼外形（例程模块图标）

- **构型**：横列双旋翼，两侧短舱可倾转。
- **旋翼模态**：总距差动→滚转，纵向周期同步→俯仰，纵向周期差动→偏航，总距同步→垂向。
- **固定翼模态**：舵面产生力矩，推进由总距同步提供。
- **判据**：EKF初始化解锁后，CH5定点/定速，再拨CH6核对3D过渡。
- **排查**：先复制 QZXY 与“倾转旋翼.xml”到 RflySim3D 路径。

5.7.3 复杂构型控制案例：模式衔接

切换时的输出连续性需要单独检验



同一执行通道的归一化输出：旧控制器0.35，新控制器0.62。

$$\Delta u = 0.62 - 0.35 = 0.27 > 0.05$$

- **教学阈值：**0.05 是允许的输出跳变量，与跟踪误差阈值分开设定。
- **连续接管：**切换时把新控制器的积分贡献设为“0.35-比例贡献”，新输出即等于0.35；方法见课件5.5「控制源切换算例」页。
- **有效范围：**再检查空速、倾转角、舵速、数据有效性与切换失败回退。

构型转换改变控制作用，衔接过程也要成为验证对象。



5.7 其他机型与进阶控制案例



本章目录

其他机型与进阶控制案例

第五章 滤波估计与底层控制

5.1 滤波估计与底层控制基础

5.2 传感器标定与滤波估计

5.3 控制器设计与控制分配

5.4 控制性能评估与调优

5.5 PX4架构与控制开发接口

5.6 底层控制开发与实验验证

5.7 其他机型与进阶控制案例

5.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

5.7.1 其他机型扩展

教材对应：第5.2.2.4节

5.7.2 固定翼底层飞行控制

教材对应：第5.2.2.4节

5.7.3 复杂构型控制案例

教材对应：第5.3.1、5.3.2节

5.7.4 高阶案例与实验选择

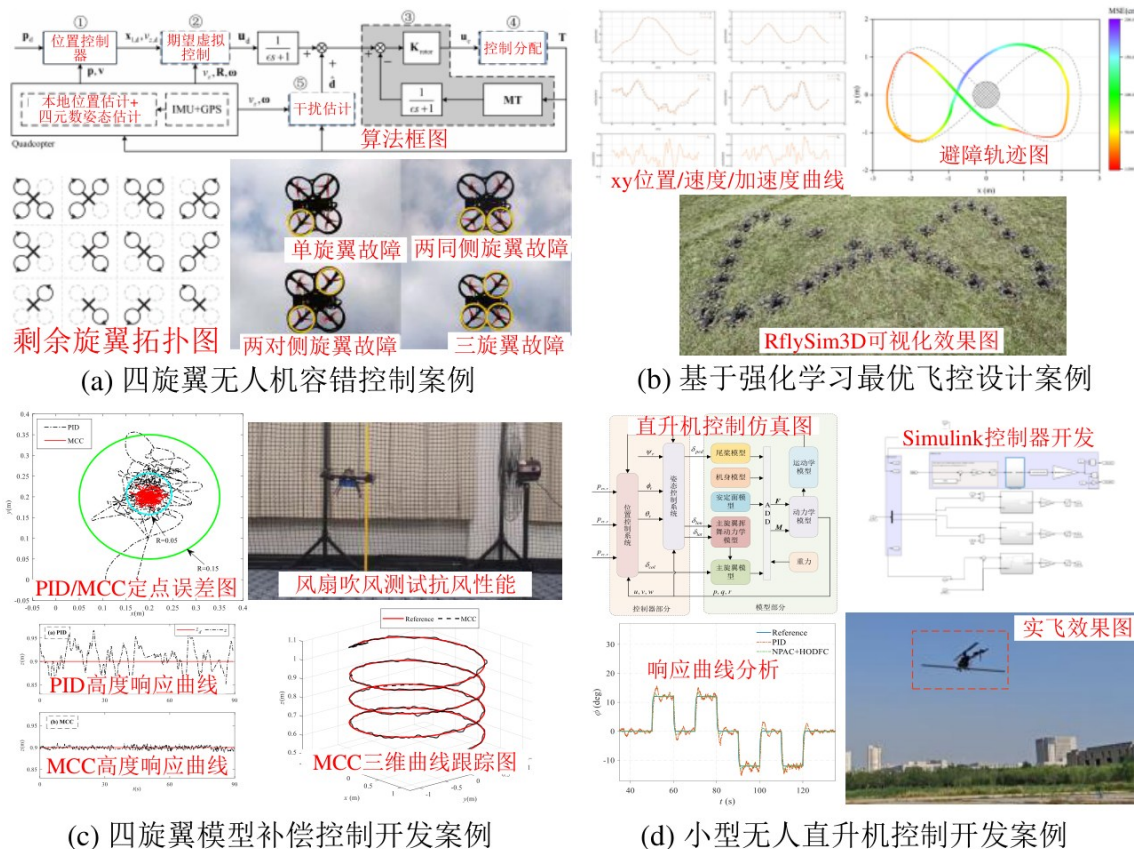
教材对应：第5.3.1、5.3.2节



5.7 其他机型与进阶控制案例

5.7.4 高阶案例与实验选择：高阶案例总览

先确定研究问题，再读方法与证据



- 图5.14(a) 容错：一至三桨失效后还能控制哪些状态。
- 图5.14(b) 强化学习：近似策略迭代跟踪轨迹并避障。
- 图5.14(c) 模型补偿：抵消模型误差与外扰。
- 图5.14(d) 直升机：姿态与位置解耦的建模与控制。

图5.14 高阶案例展示

5.7 其他机型与进阶控制案例

5.7.4 高阶案例与实验选择：容错机制

干扰估计与动态分配共同适应执行能力

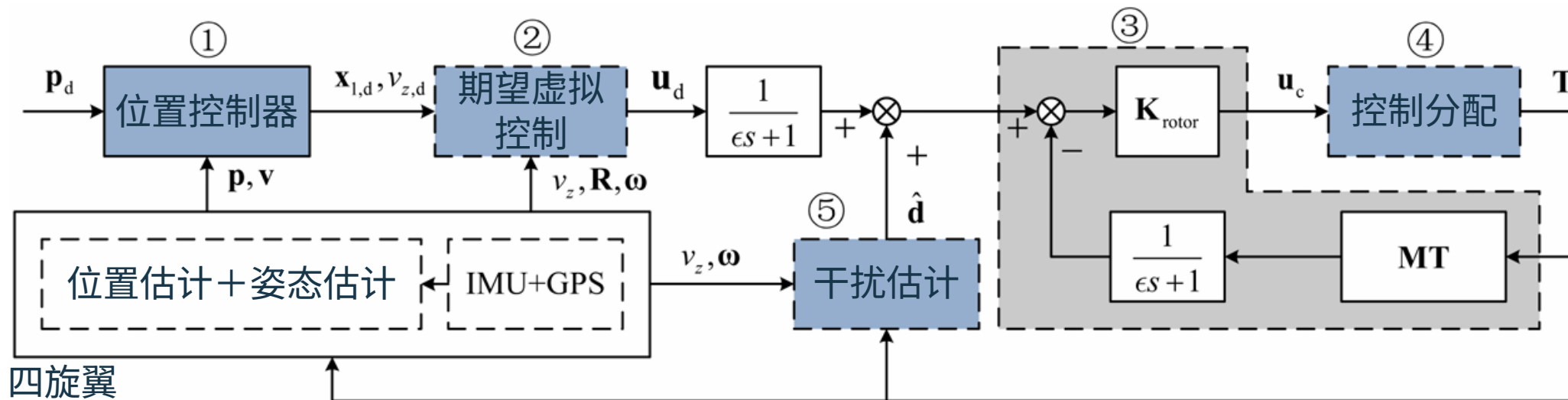
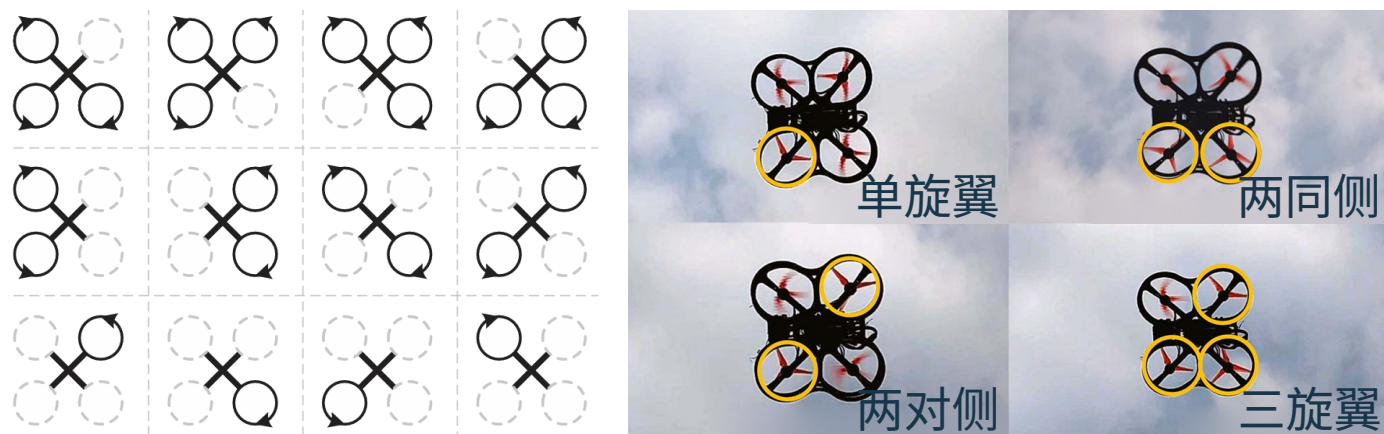


图5.14(a) 容错控制算法框图放大

- **读图：** ①位置控制 ②期望虚拟控制 ③ K_{rotor} 内环 ④控制分配 ⑤干扰估计。
- **干扰估计：** 估计量 $\hat{d}$ 叠加到滤波后的期望虚拟控制量上。
- **失效工况：** 单旋翼、两同侧、两对侧与三旋翼失效，分别比较。

5.7.4 高阶案例与实验选择：失效条件与目标

剩余旋翼构型决定能够保留的控制目标



- **构型：** 区分剩余旋翼位置与旋向。
- **降级：** 严重失效放弃独立偏航控制。
- **证据：** 特定参数下的HITL与室外试验。

左图三行：单、双、三旋翼失效；实线圈为剩余旋翼（箭头示旋向），虚线圈为失效旋翼。

图5.14(a) 剩余旋翼拓扑（左）与四类旋翼失效实飞（右）

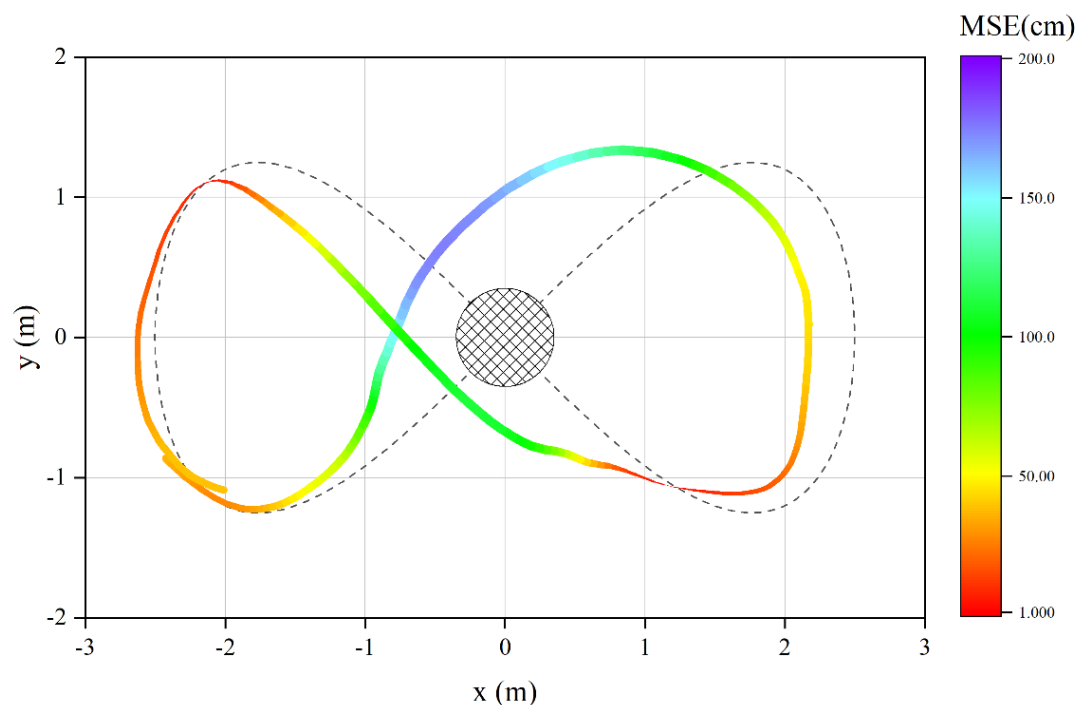
论文：Ke C, Cai K-Y, Quan Q. Uniform passive fault-tolerant control of a quadcopter with one, two, or three rotor failure. IEEE T-RO, 2023, 39(6).

<https://doi.org/10.1109/TRO.2023.3297048>

5.7.4 高阶案例与实验选择：强化学习控制

策略优化仍要接受相同跟踪与约束检验

虚线：指令轨迹；彩线：实际轨迹

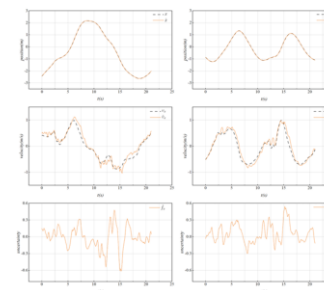


坐标单位：m；色标 MSE(cm)：1-200

图5.14(b) 强化学习控制案例

- **ESO（扩张状态观测器）**：把外扰与未建模动态扩张为状态，与位置、速度一并估计。
- **动作**：输出水平加速度修正。
- **避障**：CBF（控制障碍函数）按状态与障碍物修正动作。

放大见「强化学习证据放大」页



场景背景

5.7.4 高阶案例与实验选择：强化学习证据放大

ESO 给出的位置、速度估计贴近实际值

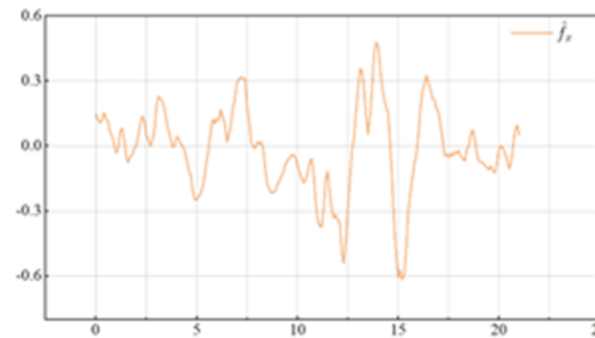
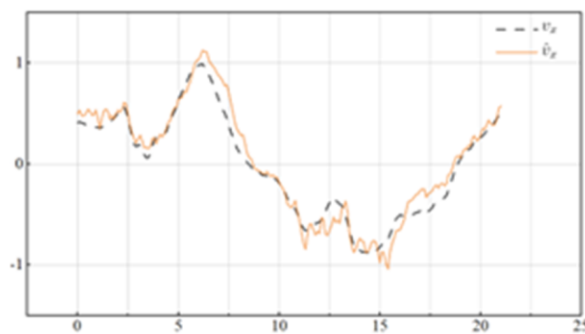
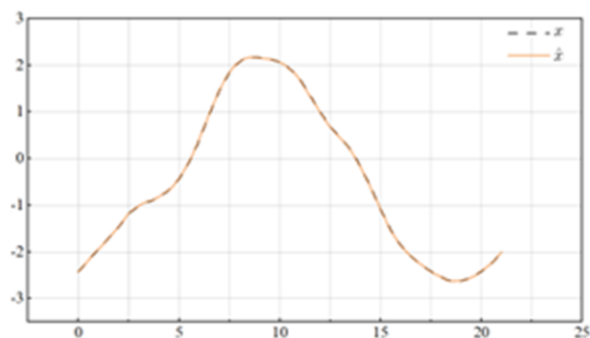
虚线：实际值；橙线：ESO 估计；横轴：时间 (s)，约0–21 s

位置 (m)

速度 (m/s)

不确定项估计

x 轴



y 轴

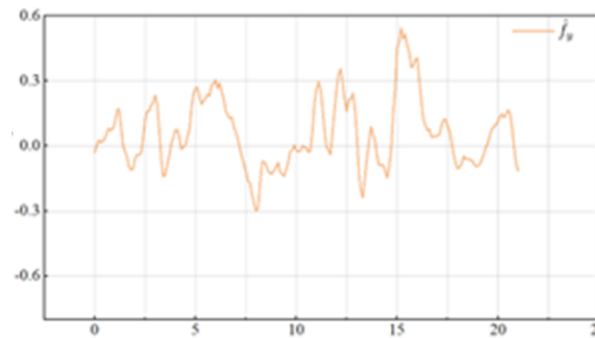
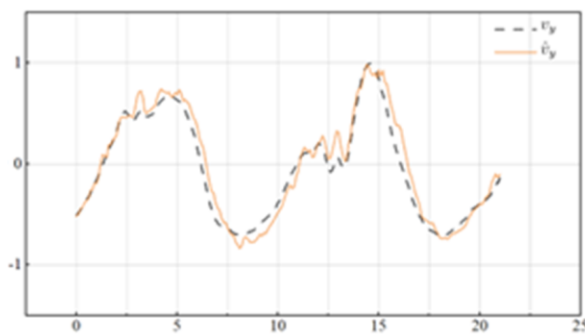
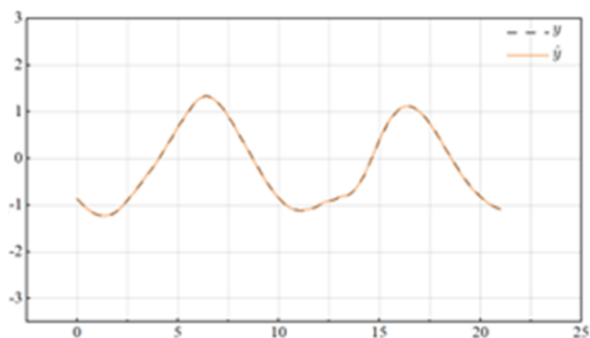


图5.14(b) 位置、速度与不确定项估计（按 x、y 两行重排）

5.7 其他机型与进阶控制案例

5.7.4 高阶案例与实验选择：强化学习的状态、动作与代价

跟踪代价优化动作，安全反馈另行处理避障



以x轴为例，状态为位置与速度跟踪误差；动作 u_x 是水平加速度修正。

误差状态

$$e_x = \begin{bmatrix} x - x_r \\ v_x - v_{x,r} \end{bmatrix}$$

瞬时代价：此刻的跟踪与用力代价

$$\ell_x = e_x^T \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} e_x + u_x^2$$

- **策略评估：**Critic（评价器）估计当前策略下未来累计的瞬时代价。
- **策略改进：**训练中据评估结果更新 Actor（策略），运行时直接输出动作。
- **代价权衡：**误差项约束跟踪，动作项抑制过大的加速度修正。
- **安全修正：**避障由 CBF 处理，再经限幅送入内环。

5.7.4 高阶案例与实验选择：模型补偿

用补偿项修正模型误差与扰动影响

红实线：给定0.9 m；黑点划线：实际高度
时间：0–90 s；高度刻度：0.85、0.90、0.95 m

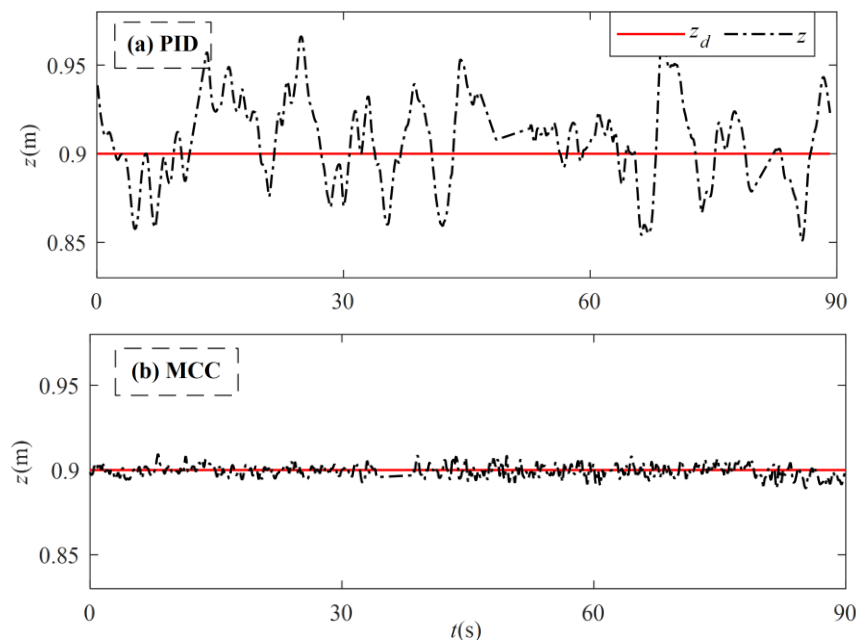


图5.14(c) 风扰高度：PID（上） / MCC（下）

模型补偿控制（MCC）

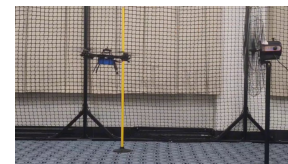
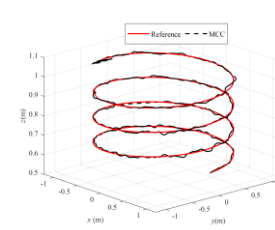
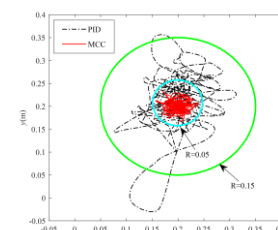
教学分解：

$$u = u_{\text{base}} + u_{\text{comp}}$$

u_{base} ：基准反馈控制量。

u_{comp} ：由非线性动力学模型与补偿器算出，补偿模型误差与扰动。

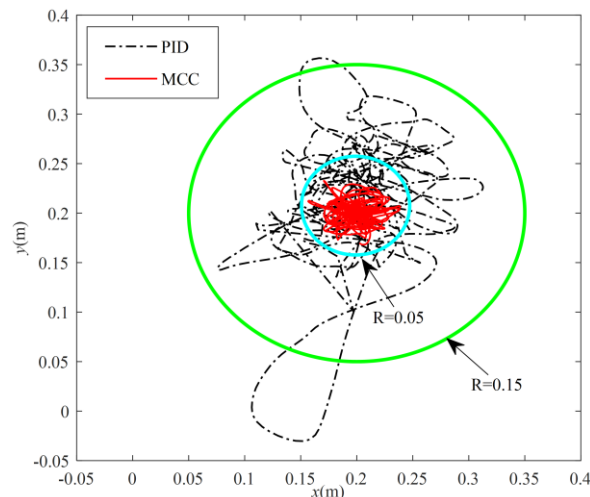
三图放大见「模型补偿证据放大」页



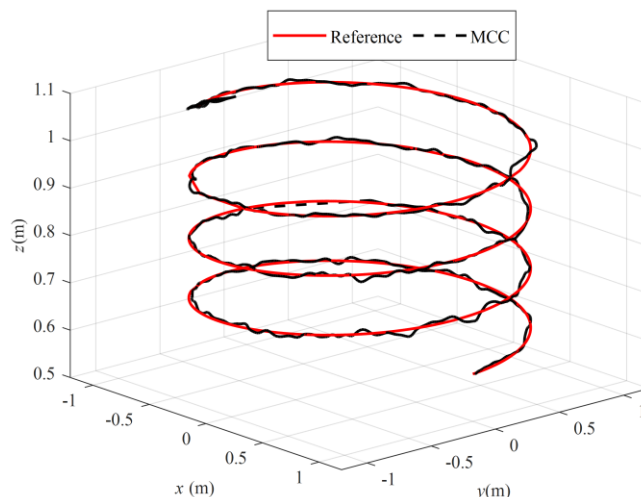
相加后的输出仍受执行器限制。

5.7.4 高阶案例与实验选择：模型补偿证据放大

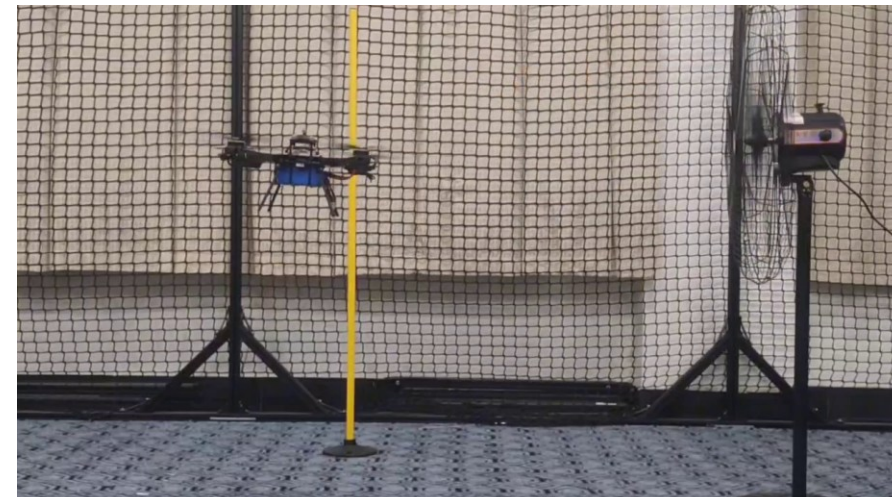
MCC 的定点散布更小，螺旋轨迹贴近参考



定点：黑点划线PID，
红线MCC



螺旋：红实线参考，
黑虚线MCC



风扰：电扇从侧面吹向悬停的多旋翼

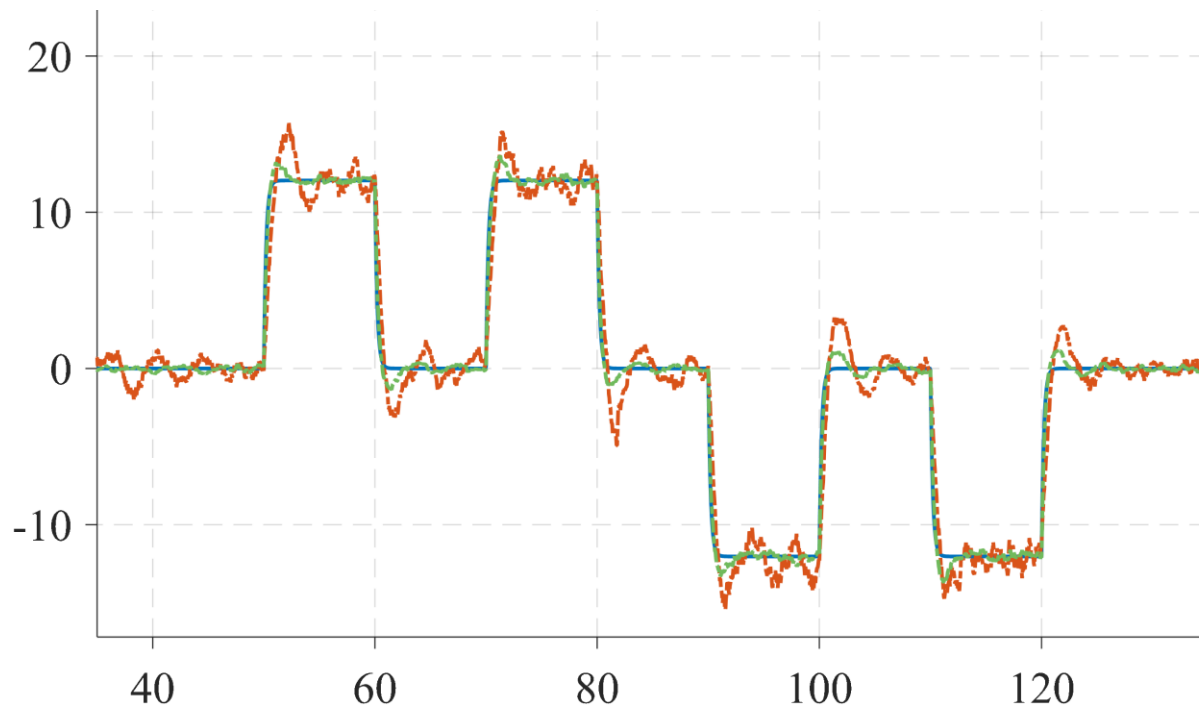
图5.14(c) 模型补偿案例：定点对比、螺旋轨迹与风扰场景

结论：图示工况下 MCC 定点轨迹落在青圈（半径0.05 m）内；PID 多次越出青圈，下方一大段、上方一小段越出绿圈（0.15 m）；螺旋跟踪中 MCC 贴近参考。

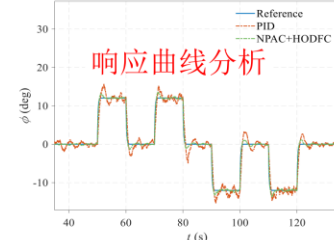
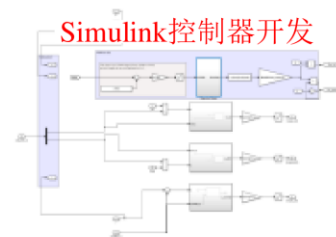
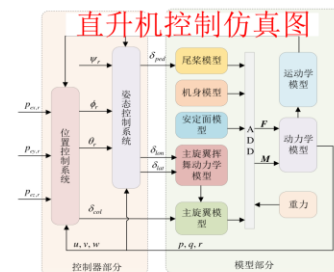
5.7.4 高阶案例与实验选择：直升机研究证据

建模、响应曲线与飞行画面各回答不同问题

蓝实线：给定；橙虚线：PID
绿点划线：研究控制器（原图标注 NPAC+HODFC）



横轴：时间 (s) ； 纵轴：滚转角 ($^{\circ}$)



(d) 小型无人直升机控制开发案例

图5.14(d) 直升机案例

读法：模型与程序看状态与耦合，
响应看给定与误差，实飞看场景；
性能结合日志。



5.7 其他机型与进阶控制案例



5.7.4 高阶案例与实验选择：全章例程索引（接口）

按节查找本章用到的接口例程

父目录：[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl/；完整实验列表见 Index.pdf。

用途／分组目录	子目录入口	对应课件与内容
状态与消息 0.ApiExps/	11.StateDataGatAPI 6.uORB-Read-Write	5.5：原始量、 估计量与时间戳
控制与日志 0.ApiExps/	3.DesignExps • 5.Log-Write-Read 16.CtrlsSingalsAPI	5.1、5.3、5.5–5.6：控制链 5.4–5.6：日志读写
输入与外部目标 0.ApiExps/	15.InputSourceAPI 17.OffboardCtrlsAPI	5.5：遥控输入、 Offboard外部目标
切换与调参 0.ApiExps/	21.SwitchPX4Simulink 10.QGC-Param-Tune	5.5–5.6：控制源切换 5.5：参数实时调整



5.7.4 高阶案例与实验选择：全章例程索引（接口与基础）

通信、在环验证与基础功能例程

父目录同上；14号代码生成实验仅限完整版（见 Index.pdf）。

用途／分组目录	子目录入口	对应课件与内容
通信与验证 0.ApiExps/	8.Mavlink-Msg-Echo 14.SITLVeriGenCodeFirm	5.5：消息回传 5.6：软件在环验证
设计与估计 1.BasicExps/	e1-FlightEval • e2-UavModeling e3-SensorCalib • e4-FilterDesign	拓展：动力与模型 5.1–5.2、5.8题7
闭环控制 1.BasicExps/	e5-AttitudeCtrl e6-PositionCtrl	姿态：5.1、5.4、5.8题6 位置：5.6
模式与保护 1.BasicExps/	e7-SemiAutoCtrl e8-FailsafeLogic	5.6：目标切换 5.8题10：失效保护



5.7 其他机型与进阶控制案例



5.7.4 高阶案例与实验选择：全章例程索引（进阶与定制）

例程按问题分支选择，版本条件随入口阅读

3.CustExps及Index.pdf标注的子实验为完整版；固件见课件5.5「控制输出的版本边界」页。

方向／分组目录	子目录入口	对应课件与任务
模块与机型 1.BasicExps/	e9-ReplacePX4Module e10-FixedWingCtrl	5.5、5.8题9：唯一控制源 5.7：空速与舵面
状态反馈 2.AdvExps/	e5_LQR-CtrlExp/ 2.ModelID2LQRSimple	5.4：按A/B求反馈 区分place与lqr
复杂构型 2.AdvExps/	e4_HELI-CtrlExp e6_Tiltrotor_CtrlExp	5.7：机构分配 两模态与衔接
研究案例 3.CustExps/	e2_RL-CtrlExp e3_MCC-CtrlExp	5.7：强化学习与 模型补偿案例



5.7.4 高阶案例与实验选择：进阶选题与对照

一次主要改动对应一组可比较的证据

分支	主要改变	共同对照与验收
滤波	时间常数或观测权重	同段数据；误差、噪声与滞后
控制律	抗饱和／状态反馈	同模型与限幅；响应及输入
分配	输出上限／有效执行器	同请求；残差与受限通道
机型迁移	模型、状态与操纵量	同验证方法；新工况与耦合

课堂讨论

空速由10 m/s增至20 m/s，俯仰控制器还能直接用吗

情境：「俯仰一步计算」页的模型对应 10 m/s；空速增至 20 m/s，控制律、增益与限幅 ± 0.25 均不变。

① 舵效

同一舵角的俯仰力矩怎样变？舵效系数 4 变为多少？

观察：初始俯仰角加速度

② 阻尼与响应

阻尼项 $-2q$ 怎样变？闭环阻尼比与超调怎样变？

观察：峰值与超调

③ 调度与保护

空速降低时有什么风险？增益与保护怎样安排？

观察：迎角与舵角饱和

提示：用「空速与舵面效能」页的动压关系推算，再对照「参考要点」页。

参考要点

同一组增益仍稳定，但响应性质已经改变

检查项	推算结果（教学算例）	观察信号
舵效	动压 $61.25 \rightarrow 245 \text{ Pa}$; 舵效系数 $4 \rightarrow 16 \text{ } (\propto V^2)$	初始俯仰 角加速度
阻尼与响应	阻尼系数 $-2 \rightarrow -4 \text{ } (\propto V)$; 阻尼比 $0.8 \rightarrow 1.1$ ，超调消失	峰值、超调 上升时间
调度与保护	按空速调度增益；低速端保留迎角限制 与最小空速保护	空速、迎角 舵角饱和

特征方程： $s^2 + 3.2s + 4 \rightarrow s^2 + 8.8s + 16$ ， $\omega_n \text{ } 2 \rightarrow 4 \text{ rad/s}$ ，90%用时约 $1.5 \rightarrow 1.1 \text{ s}$ 。

本节小结

可迁移的方法要落到新对象与新证据

- **机型迁移**：先确定状态和操纵量，再检查方向、范围与耦合响应。
- **固定翼**：空速 $\neq$ 地速；空速变化时舵效与阻尼同时改变，增益需重新确定或调度。
- **复杂构型**：直升机经斜盘把舵机行程合成总距与周期变距；倾转构型切换模态时要单独检验输出连续性。
- **控制与分配**：请求量要匹配实现能力，检查跟踪、限幅与分配残差。
- **研究案例**：在共同基准下比较改进，写明条件、数据、代价与失败范围。
- **易错**：接口通用 $\neq$ 算法通用；单一工况通过 $\neq$ 全包线有效；演示 $\neq$ 能力保证。