本章目录

习题与课堂讨论

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

5.8.1 概念与方法辨析

教材对应：第5.4节习题1–3

5.8.2 滤波与控制计算

教材对应：第5.4节习题4、5、7、8

5.8.3 系统集成与验证

教材对应：第5.4节习题6、9、10

5.8.4 综合设计与课堂讨论

基准、单项改进与报告复核

5.8 习题与课堂讨论

5.8.1 概念与方法辨析：原题与回顾

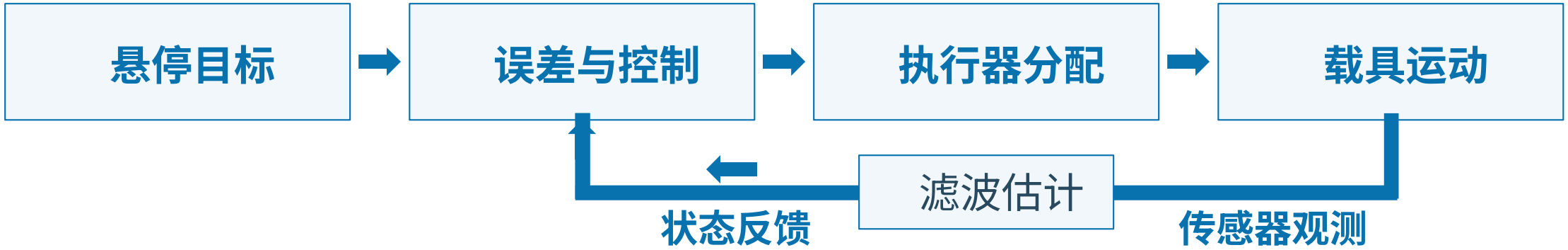
习题1–3：先读原题，再回顾对应课件

题号	教材第5.4节原题	回顾课件
题1	简述滤波估计与底层控制 在无人机系统中的定位与作用。	课件5.1（5.1.2–5.1.4）
题2	请描述互补滤波、卡尔曼滤波和 扩展卡尔曼滤波的特点与适用场景。	课件5.2（5.2.2–5.2.5）
题3	描述线性化与配平的物理含义， 以及在无人机控制设计中的典型工作点。	课件5.1（5.1.4） 课件4.4

5.8 习题与课堂讨论

5.8.1 概念与方法辨析：模块分工

习题1：估计与控制在悬停闭环中分别做什么



- **滤波估计：**融合观测与模型，输出估计状态及其可信程度。
- **底层控制：**根据目标与反馈计算纠偏作用，并满足执行器限制。
- **参考链：**目标、观测、估计、误差、请求、实现量分别标注，反馈闭合。

5.8.1 概念与方法辨析：滤波选型

习题2：方法选择要对应模型与数据条件

方法	特点与前提	适用场景与限制
互补滤波	短时陀螺＋长期重力参照； 通常采用固定融合参数	轻量姿态估计；动态加速度 会污染重力参照
卡尔曼滤波（KF）	线性模型；预测与观测协方差 决定更新权重	线性位置／速度子系统； 需核对模型与噪声假设
扩展卡尔曼滤波（EKF）	非线性状态与观测； 雅可比局部近似协方差传播	姿态／导航融合； 初值与线性化误差重要

参考：算力紧且近水平用互补滤波；线性且噪声已知用KF；非线性用EKF。

5.8.1 概念与方法辨析：配平与线性化

习题3：小扰动模型必须说明围绕什么工况

- **配平：**选定定常工况下，速度与姿态等量不变；位置可随匀速运动变化。
- **悬停：**无外扰、近零速度与角速度，推力平衡重力。
- **直线平飞：**非零空速、定高，姿态与操纵量不变。

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = A\Delta\mathbf{x} + B\Delta\mathbf{u}$$

$$A = \left.\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}}\right|_0, \quad B = \left.\frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}}\right|_0$$

参考：对$\dot{x} = f(x,u)$在配平点（下标0）求偏导；局部模型只适用于配平点附近。

本章目录

习题与课堂讨论

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

5.8.1 概念与方法辨析

教材对应：第5.4节习题1–3

5.8.2 滤波与控制计算

教材对应：第5.4节习题4、5、7、8

5.8.3 系统集成与验证

教材对应：第5.4节习题6、9、10

5.8.4 综合设计与课堂讨论

基准、单项改进与报告复核

5.8 习题与课堂讨论

5.8.2 滤波与控制计算：原题与回顾

习题4、5、7、8：先读原题，再回顾对应课件

题号	教材第5.4节原题	回顾课件
题4	描述饱和 PID 及其抗积分饱和机制的工程意义。	课件5.3（5.3.2）
题5	分析“稳、快、准”三性指标与 P/I/D 参数的典型影响趋势。	课件5.4（5.4.1–5.4.2）
题7	给出基于互补滤波估计滚转/俯仰通道的实现方案，并讨论参数选择与抗干扰。	课件5.2（5.2.2）
题8	从六自由度非线性模型出发，说明如何得到线性化模型并用 LQR 给出初始控制律。	课件5.1（5.1.4） 课件5.4（5.4.3）

5.8.2 滤波与控制计算：抗积分饱和

习题4：请求超过上限时，积分怎样更新

归一化教学量：$K_p = 2,\ K_i = 1\ \mathrm{s}^{-1},\ e = 1,\ I = 0.5,\ \Delta t = 0.1\ \mathrm{s}$

I为含K_i的积分输出贡献；限幅$[-1,1]$；反算系数$K_b = 2\ \mathrm{s}^{-1}$。

$$u_{\mathrm{req}} = K_p e + I = 2.5, \quad u_{\mathrm{act}} = 1, \quad I^{+} = I + \Delta t\,[K_i e + K_b(u_{\mathrm{act}} - u_{\mathrm{req}})]$$

机制	本步更新	结果
继续积分	$I^{+} = 0.5 + 1 \times 1 \times 0.1$	0.60
条件积分	误差推动上限饱和，本步冻结	0.50
反算	$I^{+} = 0.5 + 0.1[1 + 2(1 - 2.5)]$	0.30

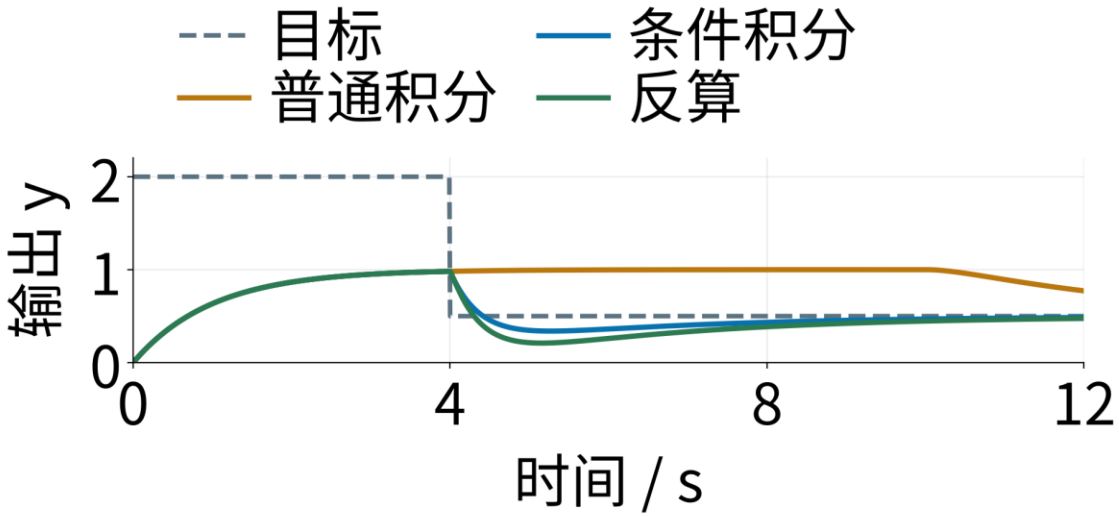
工程意义：限制积分累积，减小目标回落或退出饱和后的恢复代价。

5.8.2 滤波与控制计算：饱和恢复判读

习题4参考：相同限幅下比较目标回落后的响应

教学初值：$y(0) = I(0) = 0$；I为积分输出贡献（含K_i）；目标4 s由2降至0.5。

$$\dot{y} = -y + u, \quad |u| \le 1, \quad K_p = 2,\ K_i = 1\ \mathrm{s}^{-1},\ K_b = 2\ \mathrm{s}^{-1}$$



机制	$I(4\,\mathrm{s})$	$y(6\,\mathrm{s})$
普通	4.982	0.998
条件	0.000	0.362
反算	−0.553	0.260

前向Euler，$\Delta t = 0.01\,\mathrm{s}$

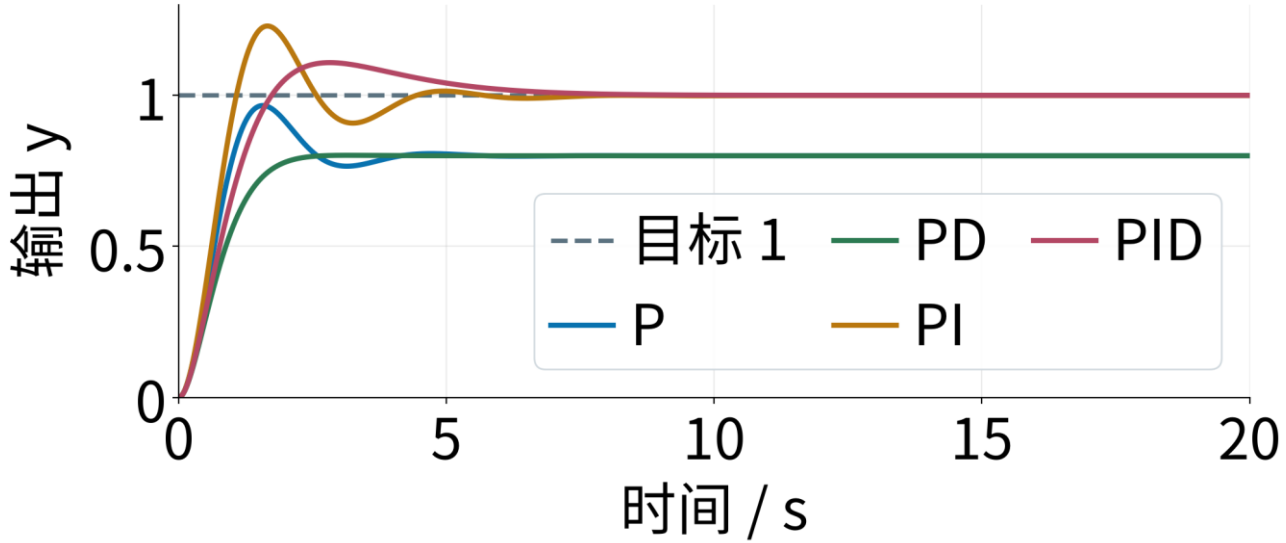
结论：普通积分累积到4.982，约10 s才离开上限；三者均未稳定进入0.49–0.51带。

5.8.2 滤波与控制计算：参数影响读图

习题5：加入积分与微分怎样改变稳快准

$$\ddot{y} + 2\dot{y} + y = u, \quad u = K_p(1 - y) + K_i\int (1 - y)dt - K_d\dot{y}$$

t=0起单位阶跃；$K_p = 4$；PI用$K_i = 2$，PD用$K_d = 2$，PID两项皆用；零初值。



教学算例

结论：P／PD终值0.8，仍有0.2误差；PI／PID误差趋于零；加微分减小超调。

5.8 习题与课堂讨论

5.8.2 滤波与控制计算：共同数据指标

习题5参考：先约定终值与阈值，再比较指标

10%→90%与2%带均按各自终值；超调分母也取各自终值。

参数 (P,I,D)	上升 / s	超调 / %	2%调节 / s	稳态误差
P (4,0,0)	0.689	20.79	3.736	0.20
PD (4,0,2)	1.278	0.19	2.075	0.20
PI (4,2,0)	0.727	22.96	4.172	0.00
PID (4,2,2)	1.173	10.84	5.990	0.00

终值：P／PD为0.8，PI／PID为1；控制量峰值均低于检查界5（课件5.4）。

5.8.2 滤波与控制计算：稳快准与PID

习题5参考：参数趋势要同时说明代价

参数增大	典型作用	条件与代价
比例增益	纠偏更强，常加快响应； 常值误差可能减小	超调、振荡与输入需求 可能增加
积分增益	累积误差，消除常值偏差	更易饱和；恢复时间与 稳定性可能变差
微分作用	增加阻尼，减轻超调	放大噪声；需滤波； 不能忽略额外时延

稳：稳定与衰减；快：上升／调节时间；准：稳态／跟踪误差。

5.8.2 滤波与控制计算：互补滤波方案

习题7：由六轴测量得到滚转与俯仰估计

机体FRD（前、右、下）；角度rad、角速度rad/s、比力m/s²。

$$\theta_a = \arcsin\frac{f_x}{\|\mathbf{f}\|}, \quad \phi_a = -\arcsin\frac{f_y}{\|\mathbf{f}\|\cos\theta_a}$$

$$\hat{\theta}_k = \alpha(\hat{\theta}_{k-1} + q_m\Delta t) + (1-\alpha)\theta_a$$

$$\hat{\phi}_k = \alpha(\hat{\phi}_{k-1} + p_m\Delta t) + (1-\alpha)\phi_a, \quad \alpha = \frac{\tau_c}{\tau_c + \Delta t}$$

适用近水平与重力主导工况；机体角速度一般不等于欧拉角导数。

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl/1.BasicExps/e4-FilterDesign/e4.1/
本题脚本：Attitude_estimator0.m，读随包 e4_A.bin，循环内直接写互补滤波式
函数写法：同目录 Attitude_cf.m，接口见本节「互补滤波计算」页
运行与读图：见课件5.2「e4.1与e4.2例程」页

5.8.2 滤波与控制计算：互补滤波计算

习题7参考：采样时间和融合权重都要代入

$$\Delta t = 0.1\ \text{s},\ \tau_c = 0.9\ \text{s},\ \alpha = 0.9$$

$$\hat{\theta}_{k-1} = 10^\circ,\ q_m = 2^\circ/\text{s},\ \theta_a = 9^\circ$$

$$\hat{\phi}_{k-1} = 5^\circ,\ p_m = 1^\circ/\text{s},\ \phi_a = 4^\circ$$

$$\hat{\theta}_k = 0.9(10 + 2 \times 0.1) + 0.1 \times 9 = 10.08^\circ$$

$$\hat{\phi}_k = 0.9(5 + 1 \times 0.1) + 0.1 \times 4 = 4.99^\circ$$

代码接口：Attitude_cf(dt, z, phi_cf_k, theta_cf_k, tao)；dt=Δt，tao=τ_c（s）。

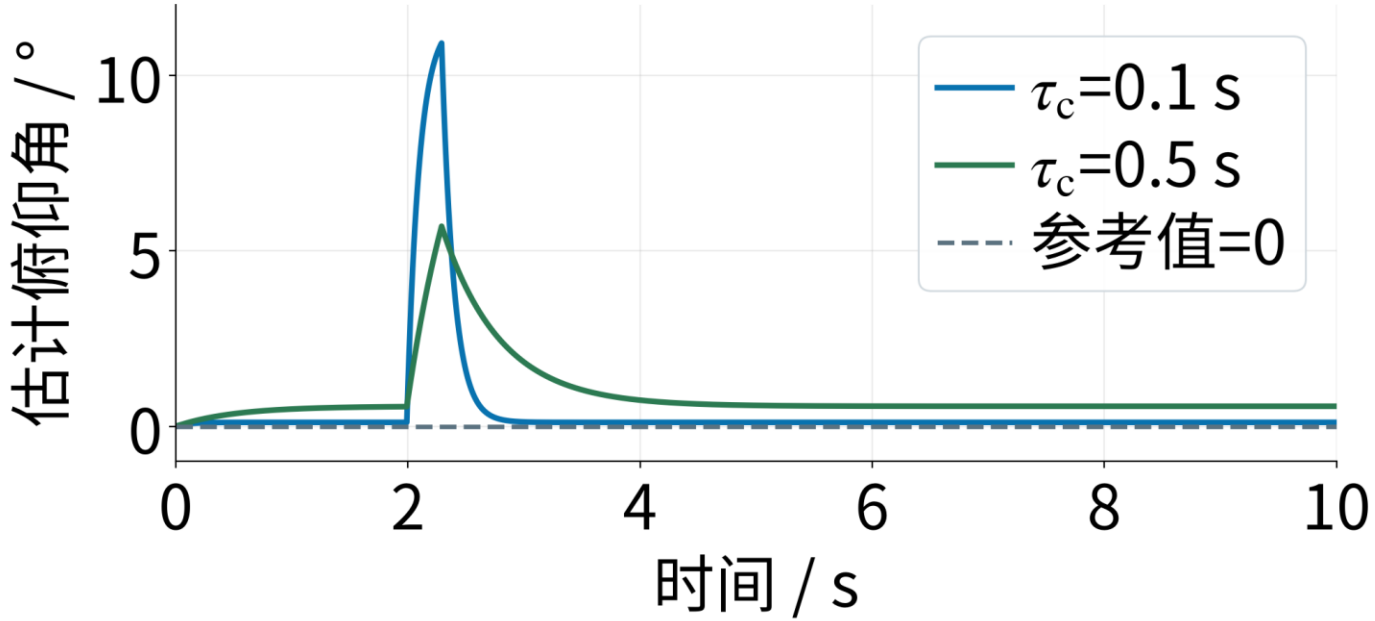
$\mathbf{z} = [p_m, q_m, r_m, f_x, f_y, f_z]^T$（rad/s、m/s²）；角度输入、输出均用rad。

结论：俯仰估计10.08°、滚转估计4.99°；代码用rad，10.08°=0.175929 rad。

5.8.2 滤波与控制计算：滤波参数与抗干扰

习题7参考：减小脉冲影响会留下更大的偏置误差

人工俯仰通道：真角0；步长0.01 s；陀螺偏置0.02 rad/s；2–2.3 s参照受扰0.2 rad。



τ_c / s	残差 / °	峰值 / °
0.1	0.115	10.917
0.5	0.573	5.700

教学算例，非平台实测

结论：10 s残差≈偏置×τ_c（0.115°／0.573°）；τ_c越大，脉冲峰值越小。

5.8.2 滤波与控制计算：六自由度到LQR（无外扰悬停）

习题8：先确定工作点，再求局部反馈初值

六自由度模型 ➡ 配平点线性化 ➡ 尺度归一化 ➡ LQR初始律

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = A\Delta\mathbf{x} + B\Delta\mathbf{u}, \quad \Delta\mathbf{u} = -K\Delta\mathbf{x}$$

$$J = \int_0^\infty (\Delta\mathbf{x}^\mathsf{T} Q \Delta\mathbf{x} + \Delta\mathbf{u}^\mathsf{T} R \Delta\mathbf{u})\, dt$$

悬停配平：$T = mg,\ \phi = \theta = 0,\ \boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}$；小角度下$\Delta\ddot{p}_\mathrm{N} \approx -g\,\Delta\theta$（偏航角取0）。

状态可用于反馈；(A, B)可稳定，$(A, Q^{1/2})$可检测；$Q \succeq 0,\ R \succ 0$。

可检测：未被代价惩罚的模态必须稳定。

完整机型还要检验耦合与约束。

5.8 习题与课堂讨论

5.8.2 滤波与控制计算：标量LQR基准（课件5.4）

习题8参考：权重变大并不自动提高全部指标

$$\dot{x} = u, \quad x(0) = 1, \quad Q = 1, \quad -P^2/R + 1 = 0$$

$$P = \sqrt{R}, \quad K = P/R = 1/\sqrt{R}, \quad u = -Kx$$

未限幅响应按共同权重$Q_e = R_e = 1$评价代价；输入上限0.6只检查初始请求。

输入权重	反馈与初始输入	共同评价代价	初始请求检查
$R = 1$	$K = 1,\ u(0) = -1$	1.00	初始请求超限
$R = 4$	$K = 0.5,\ u(0) = -0.5$	1.25	未超限

P：Riccati解；R：设计输入权重；权重大时请求较小，收敛较慢。

5.8.2 滤波与控制计算：二阶LQR一步计算

习题8扩展：由权重得到增益，再计算输入

$\Delta\mathbf{x} = [\Delta p_{\mathrm{N}}, \Delta v_{\mathrm{N}}]^{\mathrm{T}}$，$\Delta u$为北向加速度增量；内环足够快，轴间耦合可忽略。

尺度：位置1 m、速度1 m/s、输入1 m/s²；下方数值按这些尺度归一化。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad Q = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = 1$$

$$A^{\mathrm{T}}P + PA - PBR^{-1}B^{\mathrm{T}}P + Q = 0$$

$$P = \begin{bmatrix} 2\sqrt{5} & 2 \\ 2 & \sqrt{5} \end{bmatrix}, \quad K = R^{-1}B^{\mathrm{T}}P = [2 \quad \sqrt{5}]$$

$$\Delta\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ -0.1 \end{bmatrix}, \quad \Delta u_0 = -2(0.2) - \sqrt{5}(-0.1) = -0.176393\ \mathrm{m/s^2}$$

5.8.2 滤波与控制计算：LQR完整响应

习题8参考：闭环稳定还要检查输入上限

$$\lambda(A-BK) = -1.1180 \pm 0.8660j, \quad |\Delta u| \le 1\ \mathrm{m/s^2}$$

时间 / s	位置偏差 / m	速度偏差 / (m/s)	加速度 / (m/s²)
0	0.200000	−0.100000	−0.176393
1	0.077905	−0.104054	0.076864
2	0.011625	−0.033390	0.051412
4	−0.002684	0.002288	0.000250
8	0.000032	−0.000037	0.000018

$$J = \Delta \mathbf{x}_0^{\mathrm{T}} P \Delta \mathbf{x}_0 = 0.121246$$

反例：$\Delta p_N = 2\ \mathrm{m},\ \Delta v_N = 0$时请求$\Delta u = -4\ \mathrm{m/s^2}$，超过同一上限。

本章目录

习题与课堂讨论

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

5.8.1 概念与方法辨析

教材对应：第5.4节习题1–3

5.8.2 滤波与控制计算

教材对应：第5.4节习题4、5、7、8

5.8.3 系统集成与验证

教材对应：第5.4节习题6、9、10

5.8.4 综合设计与课堂讨论

基准、单项改进与报告复核

5.8 习题与课堂讨论

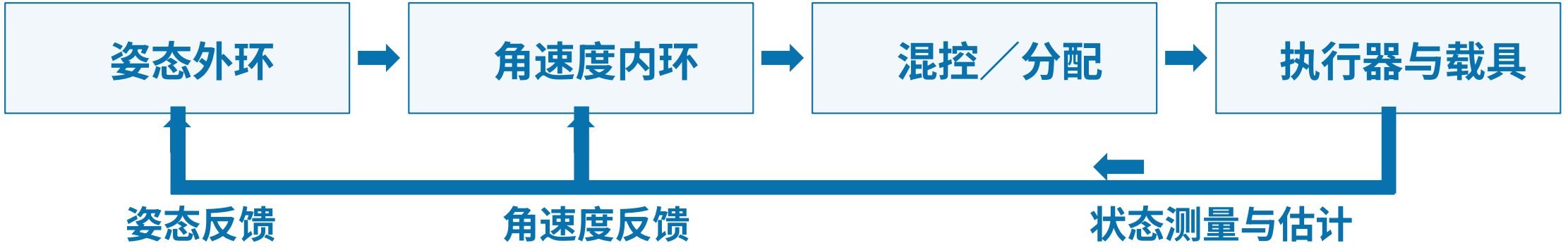
5.8.3 系统集成与验证：原题与回顾

习题6、9、10：先读原题，再回顾对应课件

题号	教材第5.4节原题	回顾课件
题6	设计四旋翼姿态内外环控制与混控结构，并说明与 PX4/uORB 的对接方式。	课件5.3（5.3.3–5.3.4） 课件5.5（5.5.2）
题9	在 RflySim+PX4+Simulink 工具链中完成从仿真到真机的闭环控制开发流程，并说明如何避免控制模块冲突。	课件5.5「模型与固件关系」 课件5.6（5.6.3–5.6.5）
题10	简述在通信中断、IMU异常等多种故障情景下的失效保护机制的实现方案。	本节第27、35页 第七章（拓展）

5.8.3 系统集成与验证：内外环与混控设计

习题6：姿态内外环与四路混控怎样连接



$$p_{\mathrm{r}} = K_{\mathrm{att}}(\phi_{\mathrm{r}} - \hat{\phi}), \quad \tau_{x,\mathrm{req}} = K_p(p_{\mathrm{r}} - p_{\mathrm{m}}) + I - K_d\dot{p}_{\mathrm{m}}$$

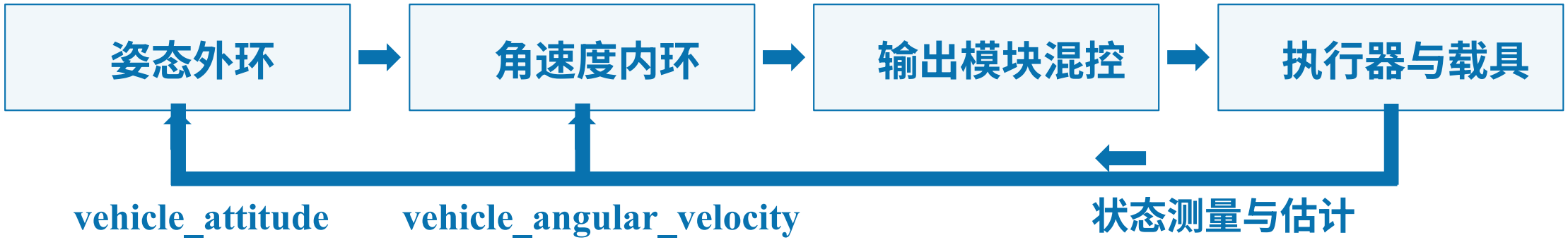
$p_{\mathrm{r}}／p_{\mathrm{m}}$：滚转角速度目标／测量；$\hat{\phi}$：估计滚转角；$\tau_{x,\mathrm{req}}$：滚转力矩请求。

$$\boldsymbol{\delta} = [0.5,0.1,0,0]^{\mathsf{T}} \Rightarrow \boldsymbol{\sigma} = [0.4,0.4,0.6,0.6]^{\mathsf{T}}$$

δ：归一化总推力与三轴力矩；σ：四路油门（式5.29，课件5.3，系数取1）。

5.8.3 系统集成与验证：内外环与混控

习题6参考：将控制结构接入PX4/uORB



内环发布actuator_controls_0（归一化力矩与油门）→ 混控 → actuator_outputs → PWM

核对FRD机体轴、归一化单位、时间戳、限幅与唯一输出源。
v1.14及以上改由control_allocator分配，见课件5.5「控制输出的版本边界」。

5.8.3 系统集成与验证：开发与放行证据

习题9：从仿真到真机逐阶段放行，并避免模块冲突

阶段	放行依据	失败回退
Simulink建模	坐标、单位与方向；仿真响应与约束	修模型、参数或信号
代码生成	C代码以px4_simulink_app编入固件	恢复构建与配置
SITL（软件在环）	固件闭环、消息频率与唯一发布者	停止新源，回基准
HITL（硬件在环）	真实飞控时序；仿真目标与反馈	停止仿真，恢复配置
真机准备	标定、通道、原生基准、回退与日志	按预案中止并复核

防冲突：整体接管时屏蔽原生电机输出；局部替换时该层话题只留一个发布者。

5.8 习题与课堂讨论

5.8.3 系统集成与验证：落地流程

习题9参考：RflySim+PX4+Simulink落地流程

① Simulink建模	→	② 代码生成	→	③ 编入固件
模型仿真闭环		Simulink Coder→C代码		px4_simulink_app
④ SITL	→	⑤ HITL	→	⑥ 真机
软件在环		硬件在环（HITLRun）		标定、回退与日志

回顾：课件5.6「模型到固件」「验证层级」；课件5.5「原生输出屏蔽选项」

整体接管电机输出

一键安装脚本第10项“是否屏蔽PX4自身控制器输出”选“是”，电机只由px4_simulink_app驱动；教材称“屏蔽PX4电机控制代码”。

只替换某一环

屏蔽原生模块对同一uORB话题的发布，该层只留一个发布者；e9例程即屏蔽actuator_controls_0。

5.8.3 系统集成与验证：模块替换例程

习题9例程：e9-ReplacePX4Module（固件1.12.3）

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl/1.BasicExps/e9-ReplacePX4Module/

入口：Readme.pdf、Init_control.m；需Pixhawk 6X、遥控器与接收机

步骤：屏蔽原生发布→编译烧录→HITL核对原发布停发→上传模型→自稳起飞

完整步骤与逐层验收：见课件5.5「模块替换例程」「局部替换验收」页

判据：基准正常且原发布停发；新源唯一有效，能起飞并控制姿态，偏航通道不如原生控制器

排查：用uORB监测actuator_controls_0，Inspector辅助查看回传数据

还原：实验改动了固件源码，结束后重跑一键安装脚本还原固件

5.8.3 系统集成与验证：失效保护

习题10：故障动作取决于剩余状态是否可信

故障	检测与状态依赖	参考处置
通信中断	命令超时／失联标志； 检查定位、姿态与能量	状态可用时按预设策略 保持、返航或降落
IMU异常	时间戳、健康与一致性； 姿态／角速度可信度下降	有效备份才切换； 状态不可用则进入降级策略
处置后	监测故障持续时间、 动作执行与状态有效性	达到中止条件时按预案 结束；保留事件日志

参考：返航依赖定位与姿态控制能力；处置按故障类型与剩余状态选择。

5.8.3 系统集成与验证：异常归因

输出请求顶格但位置不变，下一步测什么

人工情境：NED向下为正；目标高度1 m，即目标垂向位置−1 m。

时刻 / s	位置 / m	总拉力请求（归一化）	状态时间戳 / s
0.00	0.00	1.00	0.00
0.01	0.00	1.00	0.00
0.02	0.00	1.00	0.00

- **控制源未接管／执行器受限：** 读实际发布者与执行器实现量。
- **状态停更／模型未推进：** 读状态更新率、时间戳与仿真时间。
- **方向或单位不符：** 核对NED符号与拉力方向；先区分原因，再改参数。

本章目录

习题与课堂讨论

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

5.8.1 概念与方法辨析

教材对应：第5.4节习题1–3

5.8.2 滤波与控制计算

教材对应：第5.4节习题4、5、7、8

5.8.3 系统集成与验证

教材对应：第5.4节习题6、9、10

5.8.4 综合设计与课堂讨论

基准、单项改进与报告复核

5.8.4 综合设计与课堂讨论：共同基准

每个设计都先交代对象、闭环与评价条件

任务：同一基准上选一个分支改进一个环节，按可复核报告示例提交。

对象／模型

检查： 工作点、状态、输入与坐标

证据： 模型、参数与适用范围

反馈来源

检查： 测量／估计／真值；采样

证据： 数据、时间戳与健康状态

控制／分配

检查： 环路、请求、实现量与限制

证据： 公式、信号图与输出记录

工况／指标

检查： 相同输入、初值、噪声与约束

证据： 响应、输入与失败条件

5.8.4 综合设计与课堂讨论：改进分支

选择一个主要环节，解释改善与代价

选题分支	主要改动	对照与验收
滤波参数	时间常数 观测权重	同一段数据 比较偏置、噪声与滞后
控制方法	抗饱和 基于模型的反馈	同模型、初值与限幅 比较响应与输入
输出约束	分配上限 失效执行器	同一控制请求 比较实现量与分配残差
机型迁移	对象模型 操纵量	同验证框架 检查新工作点与耦合

5.8.4 综合设计与课堂讨论：可复核报告示例

两种设置各有所长，但未同时满足两项指标

分析对象：人工俯仰通道数据；初始角0；步长0.01 s；陀螺偏置0.02 rad/s。

2–2.3 s加速度参照污染0.2 rad；只改变时间常数，其他输入与公式相同。

验收指标	时间常数0.1 s	时间常数0.5 s
10 s残差 < 0.2°	0.115°：满足	0.573°：未满足
脉冲峰值 < 6°	10.917°：未满足	5.700°：满足

- **结论：**两种设置均未同时满足全部指标；补充观测有效性与偏置处理。
- **交付：**数据、公式、参数、版本、曲线、失败条件及可重复计算步骤。

5.8.4 综合设计与课堂讨论：工程取舍

更复杂的算法何时值得采用

讨论情境	参考判断	需要的证据
噪声更小，延迟更大	由跟踪与稳定要求决定 是否接受延迟	同数据的误差、时延 与闭环响应
跟踪更快，输入更猛	执行器与能量限制优先 决定可实现程度	输入峰值、速率、饱和 与响应指标
模型更准，计算更重	运算完成时间要小于 该任务允许的时延	模型失配试验、最坏 计算时延与更新率

课后实践

题6、题7对应的例程

题6 · e5-AttitudeCtrl/e5.1（调参见课件5.4的e5.2）

入口： Sim/Init_control.m自动打开AttitudeControl_Sim.slx；HITL需Pixhawk 6X

判据： 仿真中姿态随遥控通道变化；线性分析得到Bode图并读出稳定裕度

题7 · e4-FilterDesign/e4.1（运行见课件5.2「e4.1与e4.2例程」页）

入口： Attitude_estimator0.m读随包e4_A.bin，只需MATLAB，无需飞控

判据： 输出gyro、acc、cf、px4四条俯仰角曲线；正常时cf无漂移且比acc平滑

目录均在[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl/1.BasicExps/下，各含Readme.pdf。

课后实践

题9、题10对应的例程

题9 · e9-ReplacePX4Module（固件1.12.3）

条件： Pixhawk 6X与遥控器；改动固件源码，步骤见课件5.5「模块替换例程」页

判据： 基准正常、原发布停发；新源唯一有效，自稳可起飞，偏航不如原生

题10 · e8-FailsafeLogic/e8.1（e8.4为遥控失联自动返航）

入口： Sim/Init_control.m打开e8_1_sim.slx，配合RflySim3D；HITL需Pixhawk 6X

判据： 手动模式切到返航得返航曲线；ch5设定由300改为500得着陆曲线

目录均在[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl/1.BasicExps/下，各含Readme.pdf。

本章小结

可靠底层能力需要估计、控制与验证共同成立

- **概念：**估计给出状态及可信度；底层控制在执行器限制内纠偏并经分配实现。
- **方法：**先定工作点与尺度，再算增益与一步输出；
  统一指标口径、固定工况比较，达到预设指标即停；
  按模型、SITL、HITL、真机逐级放行，每层只留一个控制源。
- **边界：**线性模型只在配平点附近成立；无约束最优遇到饱和要重算；
  换机型或空速范围后增益与验证要重做（增益调度）；话题随固件版本变化。
- **易错点：**估计当真值、忽略饱和、单位坐标与时间戳不一致、
  一步计算当完整仿真、编译成功当运行成功、v1.12.3与v1.14+话题混用、
  不同条件曲线直接比较、单一工况通过当全包线有效。

底层能力建立以后，上层决策才有可依赖的执行基础。