本章目录

底层控制开发与实验验证

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 5 个教学单元

5.6.1 控制算法开发与测试
教材对应：第5.2.2.1节

5.6.2 位置控制与半自主模式
教材对应：第5.1.2.4、5.3.1节

5.6.3 控制器开发与代码生成
教材对应：第5.2.2.2节

5.6.4 软硬件在环仿真
教材对应：第5.2.2.2节

5.6.5 真机实验与结果复核
教材对应：第5.2.2.3、5.1.4节

5.6.1 控制算法开发与测试：实验目标

每前进一步，都增加一种验证证据

主线：姿态开发例程3.DesignExps；位置外环作为增量扩展。

阶段	输入 → 输出	本阶段记录
算法模型	目标、状态 → 控制请求	单位、方向、限幅、反馈来源
代码生成	控制模型 → 目标程序	模型摘要、配置、构建报告
在环仿真	程序、模拟状态 → 响应	误差、更新间隔、计算时间
物理试验	真实观测 → 真实动作	机体条件、保护、实际输出

安装版默认固件v1.12.3，本例推荐v1.14系列，确认见课件5.5「控制输出的版本边界」

5.6 底层控制开发与实验验证

5.6.1 控制算法开发与测试：控制器全图

先辨认输入、控制链和解锁旁路

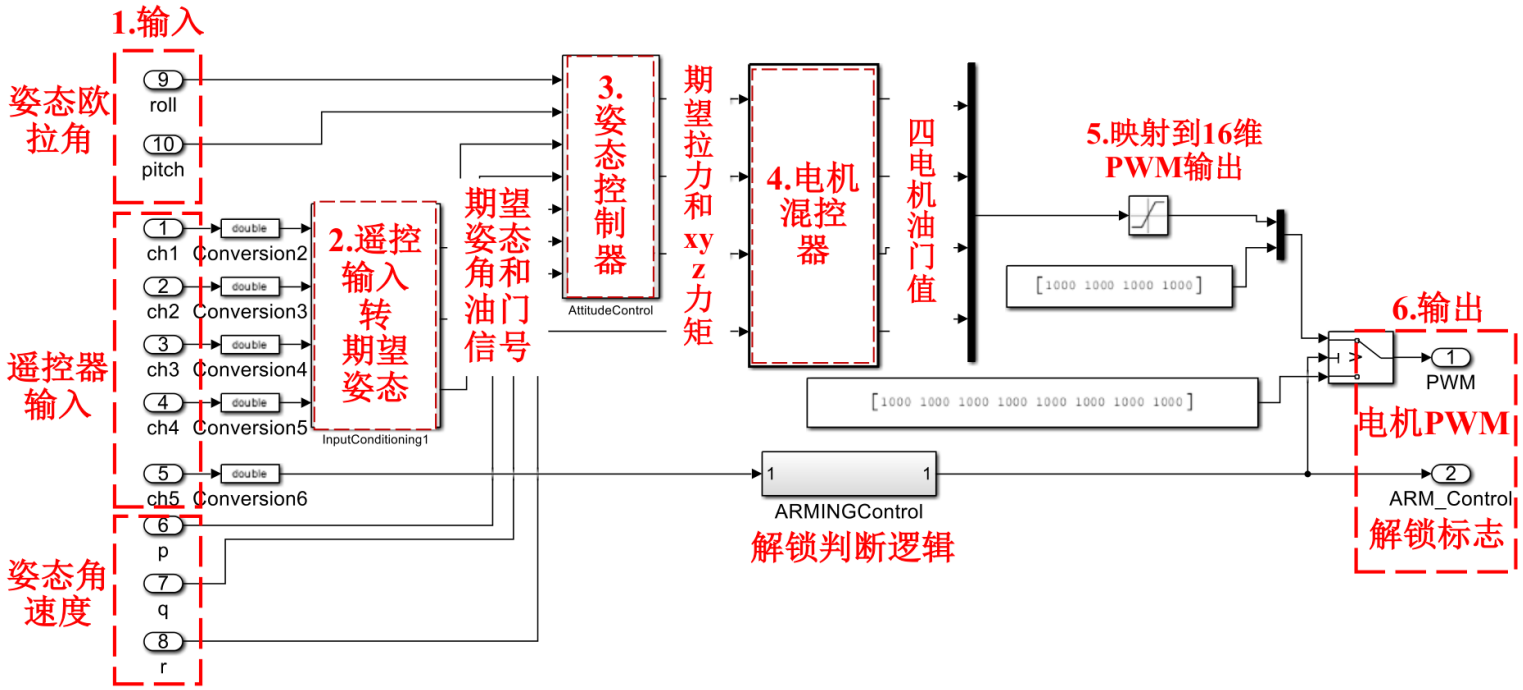


图5.7 四旋翼无人机姿态控制器框架图

CH5走解锁（arm）旁路；Exp1_AttitudeController.slx输出8维PWM，图中标为16维。

5.6.1 控制算法开发与测试：输入输出

端口的单位、方向和维数决定连接方式

端口	语义及单位	Exp1模型规则
CH1～CH4	滚转/俯仰/油门/偏航率 1100～1900 μs	CH1/2/4死区±40 μs CH3同样有死区
roll、pitch	滚转、俯仰欧拉角 单位rad	角度反馈 无偏航角输入
p、q、r	机体前右下三轴角速度 单位rad/s	r送入yaw_rate 偏航速率环存在
CH5 ARM_Control	脉宽输入 布尔解锁输出	CH5 ≥ 1500 μs 解锁输出为true
PWM	8维电机与辅助脉宽 单位μs	前4项：1000～2000 μs 后4项：1000 μs

来源：Exp1_AttitudeController.slx；CH1低于1500向左、CH2低于1500向前（教材约定）。

5.6.1 控制算法开发与测试：滚转计算

滚转角目标先进入姿态PI

给定：CH1=1660 μs，角度与角速度均为0，积分初值0；死区±40 μs。

$$\phi_{\mathrm{d}} = 0.5\frac{1660-1500}{400} = 0.2\ \mathrm{rad}$$

滚转角目标 → 姿态PI → 角速度请求

$$u_{\mathrm{att}} = \frac{0.6301386251}{1.2}(0.2-0) = 0.105023$$

÷400把1100～1900 μs归一化到±1，×0.5使满杆对应0.5 rad；死区外按原值计算。kFactor=1.2统一缩放各通道增益；积分贡献初值0，首步只含比例项。

5.6.1 控制算法开发与测试：速率计算

速率环把归一化请求变为混控量

输入：姿态环输出0.105023；角速度0 rad/s，积分贡献初值0。

角速度请求
减归一化反馈 → **角速度PI**
roll_rate → **输出缩放**
增益1/10

$$u_{\text{rate}} = \frac{1.3153383656}{1.2}\left(u_{\text{att}} - \frac{0}{3}\right) = 0.115117$$

÷3：角速度反馈按3 rad/s归一化，再与请求比较。
×1/10：roll_rate输出乘0.1送入混控，滚转请求0.011512。
零初值首步静态算例；积分贡献随后按前向欧拉更新。

5.6.1 控制算法开发与测试：输出计算

四个电机增减关系可在一步计算中检查

进入混控：滚转请求 $R = 0.011512$；俯仰 $P = 0$；偏航 $Y = 0$；油门 $T = 0.5$。

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{bmatrix} = 1000 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + 1000 \begin{bmatrix} T + P - R + Y \\ T - P + R + Y \\ T + P + R - Y \\ T - P - R - Y \end{bmatrix} \quad (\mu s)$$

机头↑（俯视；增量单位μs）

M3 左前 顺时针 +11.51	**M1 右前** 逆时针 −11.51
M2 左后 逆时针 +11.51	**M4 右后** 顺时针 −11.51

$$\mathrm{PWM}_{1:4} = [1488.49,\ 1511.51,\ 1511.51,\ 1488.49]\ \mu s$$

左增右减 → 向右滚转

逐元素加1000 μs偏置，再限幅到1000～2000 μs；辅助5～8与锁定时输出均为1000 μs。

Quad X编号：M1右前、M2左后、M3左前、M4右后；油门0.5只用于通道检查。

5.6 底层控制开发与实验验证

5.6.1 控制算法开发与测试：数字闭环

真值反馈、估计反馈和显示各有用途



图5.8 控制器与动力学模型的闭环仿真框架图

真值反馈：隔离控制律；模拟传感器＋估计：检验估计与控制。

飞控估计反馈：纳入接口与延迟；三维模块只显示位姿，Pixhawk照片是图标。

5.6.1 控制算法开发与测试：启动与解锁

纯模型仿真：先启动，再解锁

入口：[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl/0.ApiExps/3.DesignExps/Readme.pdf

1. 保存已有工作 → 运行Init_control.m（清空工作区，加载参数与icon路径）。
   打开Exp2_ControlSystemDemo.slx；只运行控制器与机体模型。
2. 锁定起步：CH1/2/4=1500 μs；CH3=1100 μs，CH5=1100 μs。
   CH5低于1500，ARM_Control=false；先保存这组输入和参数。
3. 先启动RflySim3D → 点击模型“运行”；查看仿真时间和状态。
   时间须连续，姿态与角速度有更新；停更或异常则停止并恢复基准。
4. 在仿真中将CH5设为1600 μs → 核ARM_Control=true。
   保持CH1/2/4居中；解锁后才逐渐增加CH3，随后建立平稳基准。

纯模型回路，不接实体飞控或电机；解锁按钮文字以当前界面为准，核实际CH5与布尔输出。

5.6.1 控制算法开发与测试：测试与收尾

平稳基准上测试，按顺序结束与回退

承接：Exp2已在纯仿真中解锁；CH1/2/4居中，先保存输入与参数基准。

1. 缓增CH3：机体离地、垂直速度近零且姿态平稳时，记录CH3与PWM。
   油门基准随机体变化；静态算例的0.5只用于检查通道。
2. 只改CH1：1500 → 1560 → 1500 μs；CH2/4仍为1500 μs。
   记录目标、姿态、角速度、8维PWM及同一时基时间戳。
3. 预期：方向一致、目标撤回后响应衰减，输出受限、时间连续。
   方向反、数值异常、持续饱和，或无法取得平稳基准：停止并恢复基准。
4. 正常结束：姿态输入回中 → CH3降至1100 → CH5=1100上锁（disarm）。
   确认锁定输出，再停止模型、关闭三维程序；保存本次数据与输入记录。

判据依据同一小指令的数据；三维画面用于方向观察，不单凭画面判定闭环品质。

5.6.1 控制算法开发与测试：结果解释

三维画面看方向，闭环品质看同一次动作的数据



图5.9 Simulink联动三维仿真

同一次动作的三组数据

目标

阶跃时刻、幅值与撤回时刻。

状态

姿态、角速度及反馈来源。

输出

混控请求、PWM与限幅状态。

三维画面看方向、碰地或翻转；
指标读法：课件5.4
「阶跃响应指标」页。

本章目录

底层控制开发与实验验证

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 5 个教学单元

5.6.1 控制算法开发与测试
教材对应：第5.2.2.1节

5.6.2 位置控制与半自主模式
教材对应：第5.1.2.4、5.3.1节

5.6.3 控制器开发与代码生成
教材对应：第5.2.2.2节

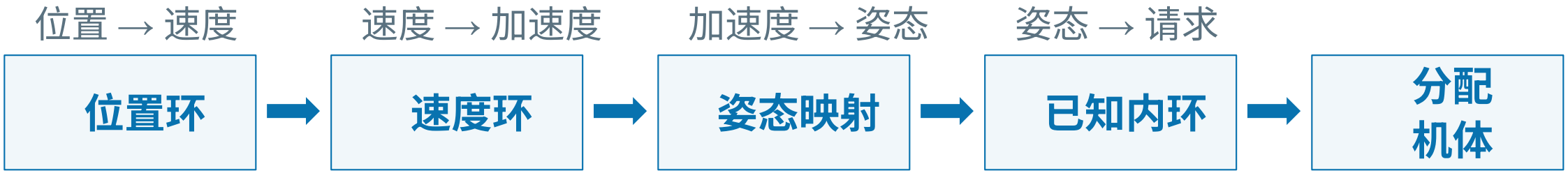
5.6.4 软硬件在环仿真
教材对应：第5.2.2.2节

5.6.5 真机实验与结果复核
教材对应：第5.2.2.3、5.1.4节

5.6.2 位置控制与半自主模式：位置外环

本例位置任务只增加外环与反馈

前置：稳定姿态内环；位置与速度反馈有效。坐标采用北东地（NED）、机体前右下。



新增记录：位置、速度、期望姿态；保留原内环及执行器量。

安装版入口：1.BasicExps/e6-PositionCtrl/e6.1/Sim

Init_control.m末尾打开PosControl_Sim.slx；机体参数与内环增益随本例程加载。

所有相对入口均位于[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl。

5.6.2 位置控制与半自主模式：位置模型

一米阶跃先经加速度限幅，再换算倾角目标

离线一维：目标1 m，初值位置与速度0；理想姿态内环。
NED北向、偏航0、近悬停；加速度在采样周期内保持不变。

$$a_k = \mathrm{clip}[k_x(1 - x_k) - k_v v_k, -1, 1] \ \mathrm{m/s^2}$$

位置与位置增益：x_k (m)，　$k_x = 2\ \mathrm{s^{-2}}$
速度与速度阻尼：v_k (m/s)，　$k_v = 2\ \mathrm{s^{-1}}$
加速度与采样：a_k ($\mathrm{m/s^2}$)，　$\Delta t = 0.002$ s
clip把加速度请求限制在±1 $\mathrm{m/s^2}$；倾角目标由加速度换算：

$\theta_\mathrm{d} = -\arctan(a_k/g)$（NED、偏航0：向北加速需低头，俯仰为负）。
同样递推至10 s，随后比较位置增益2与6的完整结果。

5.6.2 位置控制与半自主模式：位置一步计算

首个采样算出加速度、位移、速度与倾角

承接一维模型：代入目标1 m与零初值，计算首个0.002 s采样。

$$a_0 = \mathrm{clip}(2 \times 1 - 2 \times 0, -1, 1) = 1\ \mathrm{m/s^2}$$

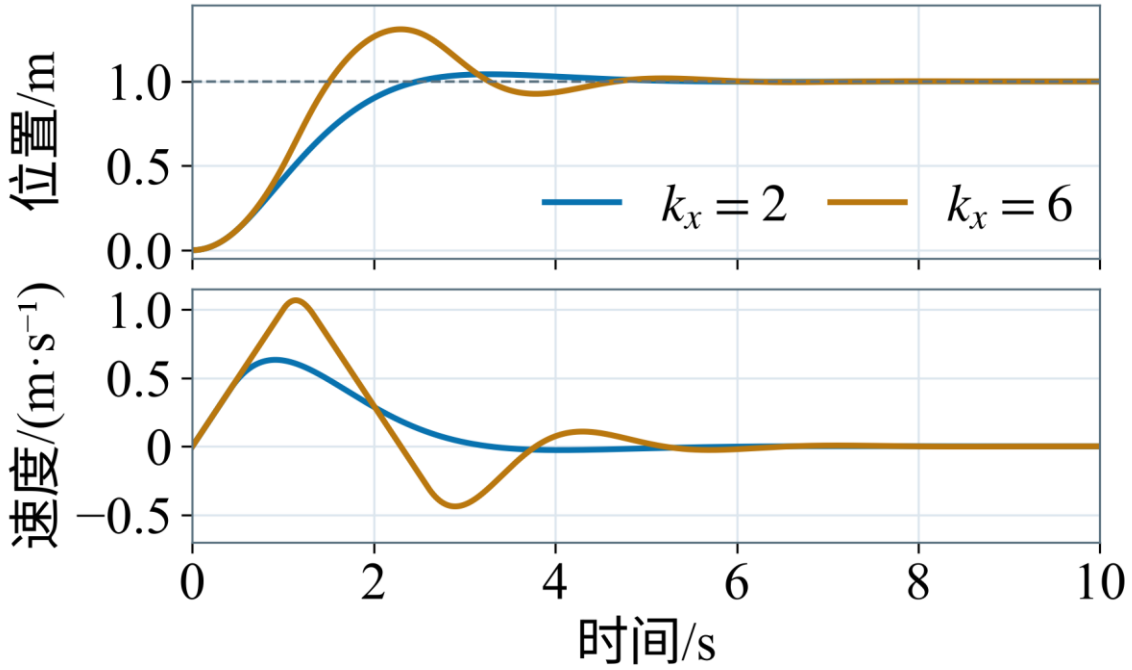
$$x_1 = 0 + 0 \times 0.002 + \frac{1}{2}(1)(0.002)^2 = 0.000002\ \mathrm{m}$$

$$v_1 = 0 + 1 \times 0.002 = 0.002\ \mathrm{m/s}, \quad \theta_\mathrm{d} = -\arctan(1/9.81) = -5.8204^\circ$$

结论：首步只前进0.000002 m；同样更新循环至10 s，得到完整位置结果。

5.6.2 位置控制与半自主模式：完整位置结果

更激进的外环可能增加超调和饱和



图：一米阶跃位置结果（教学算例）

指标	增益2	增益6
峰值 / m	1.0423	1.3088
超调 / %	4.23	30.88
2%调节 / s	4.326	4.450
饱和 / s	0.416	2.260
末值 / m	1.000067	0.999904
倾角 / °	5.8204	5.8204

2%调节：此后至10 s保持0.98～1.02 m；饱和时长含正负限幅；倾角取最大绝对值。

5.6.2 位置控制与半自主模式：半自主模式

同一拨杆在不同模式中表达不同目标

CH6三段开关切换三种模式：输入表达的目标改变，反馈要求随之改变。

模式	输入所表达的目标	保持与反馈要求
自稳	期望滚转/俯仰＋总推力	姿态、角速度有效 中心杆不定点
定高	期望姿态＋垂直运动需求	高度、垂直速度有效 中位保持高度
定点	水平＋垂直运动需求	位置、速度有效 切换时初始化保持目标

安装版：1.BasicExps/e7-SemiAutoCtrl/Readme.pdf

e7.1/Sim/StabilizeControl_Sim.slx（仿真）；e7.4/ModeSwitch_FLY.slx（实飞，CH6切换）

5.6.2 位置控制与半自主模式：仿真例程

先在纯仿真中看清位置解耦与自稳漂移

入口：1.BasicExps/e6-PositionCtrl/e6.1/Readme.pdf；e7-SemiAutoCtrl/e7.1/Readme.pdf

1. e6.1/Sim：运行Init_control.m，自动打开PosControl_Sim.slx。
   先打开RflySim3D，再点Run；仿真中修改ch1～ch4。
2. ch1→y向、ch2→x向、ch3→高度、ch4→偏航；双击Scope2看位置。
   预期：只改ch2时主要是x向位置变化，体现x、y通道解耦。
3. e7.1/Sim：运行Init_control.m，自动打开StabilizeControl_Sim.slx。
   模型在姿态输出上加了常值扰动，期望滚转、俯仰为0；点击运行。
4. 预期：滚转、俯仰趋近0；水平位置与高度逐渐漂移，自稳只稳姿态。
   结束：停止仿真；出现振荡先减小比例与积分增益，再查稳定裕度。

两例都是纯Simulink仿真，不需要飞控；HIL目录是硬件在环分支，步骤同「硬件在环启动」。

5.6.2 位置控制与半自主模式：切换与外环诊断

保留内环基准，定位新增部分的偏差

现象	对照记录	判断及动作
期望倾角长期贴限	位置/速度目标 期望姿态与限幅	检查目标/增益、扰动 与能力限制
指令温和 机体振荡	期望/实际姿态 角速度与时延	核内环跟踪和时序 保留外环基准
回中后漂移	目标初始化、速度 位置有效性	核模式语义和状态 暂不继续定点
切换时输出突跳	切换时刻、积分贡献 控制请求与输出	停止试验 恢复目标和参数基准

内环与机体保持基准；结束：回基准目标 → 上锁 → 停止模型。

本章目录

底层控制开发与实验验证

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 5 个教学单元

5.6.1 控制算法开发与测试
教材对应：第5.2.2.1节

5.6.2 位置控制与半自主模式
教材对应：第5.1.2.4、5.3.1节

5.6.3 控制器开发与代码生成
教材对应：第5.2.2.2节

5.6.4 软硬件在环仿真
教材对应：第5.2.2.2节

5.6.5 真机实验与结果复核
教材对应：第5.2.2.3、5.1.4节

5.6.3 控制器开发与代码生成：模型到固件

控制器与机体模型部署到不同位置



模拟物理运动：执行器量 → 位置、姿态、速度、模拟观测。



执行控制计算：目标、估计状态 → 控制请求；目标程序在软件在环（SITL）进程或真实飞控中运行。

5.6.3 控制器开发与代码生成：算法移植模板

把控制器子系统放进PSP接口模板

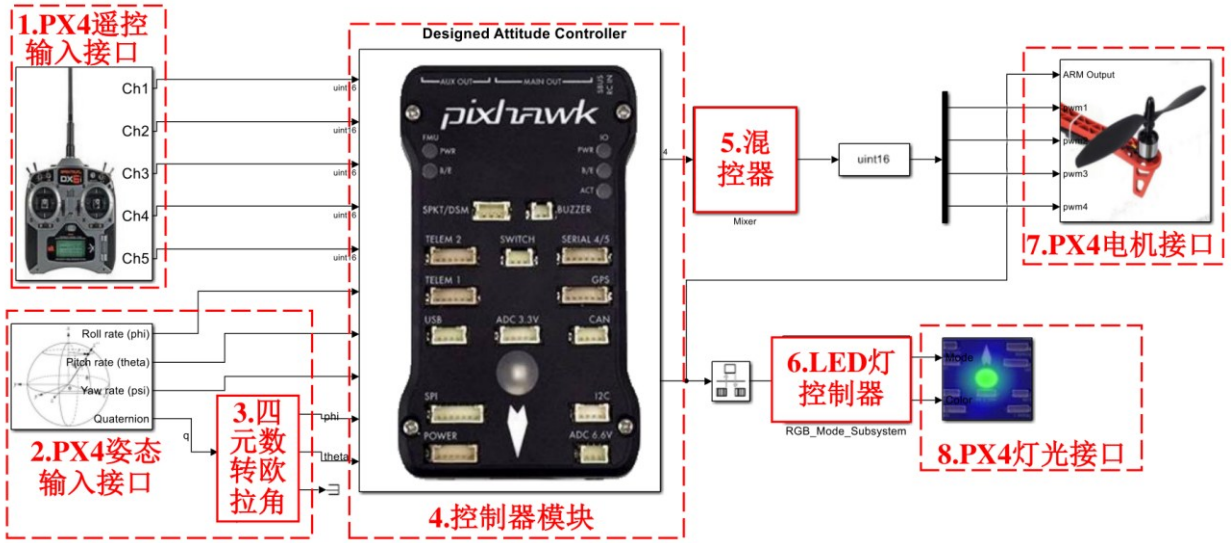


图5.10 四旋翼硬件在环框架图

模板： 空白模板

Exp3_BlankTemp.slx

示例： 图5.10即

Exp4_AttitudeSystemCodeGen.slx

移植： 控制器复制进④，按端口连①～③与⑤⑦

核对： 维数、单位、类型与步长

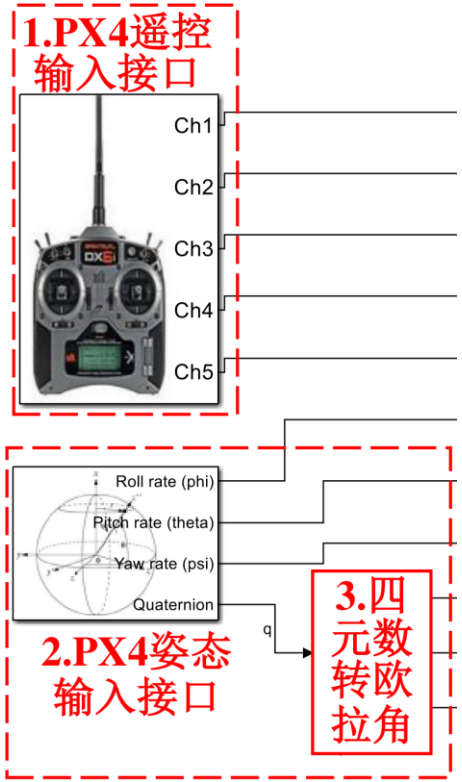
1/250 s

①遥控；②角速度/四元数输入；③四元数转欧拉角；④控制；⑤混控；⑥⑧灯光；⑦电机。

接口细节见「模板接口」页；照片是接口模块图标，是否接实体硬件由验证阶段决定。

5.6.3 控制器开发与代码生成：模板接口

输入取遥控与姿态，输出经混控到电机



①CH1～CH5

uint16脉宽，单位μs

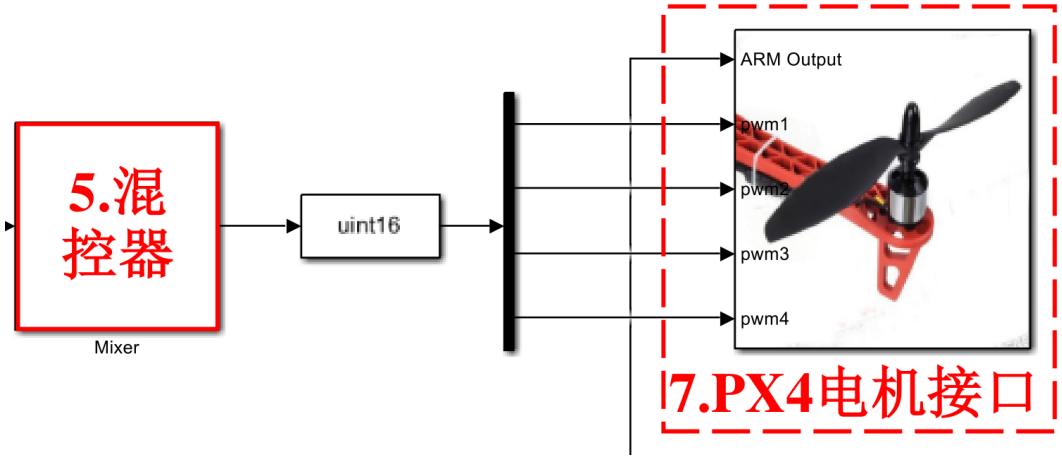
②角速度与四元数

Roll/Pitch/Yaw rate：

p、q、r，单位rad/s

③四元数→欧拉角

phi、theta，单位rad



④→⑤：4维控制请求进入Mixer混控

uint16：转为整数脉宽，接pwm1～pwm4

ARM Output：解锁信号，也送⑥灯光

图5.10（局部）左：①～③输入接口；右：⑤混控到⑦电机接口

5.6.3 控制器开发与代码生成：代码生成界面

硬件页、诊断和报告构成构建入口

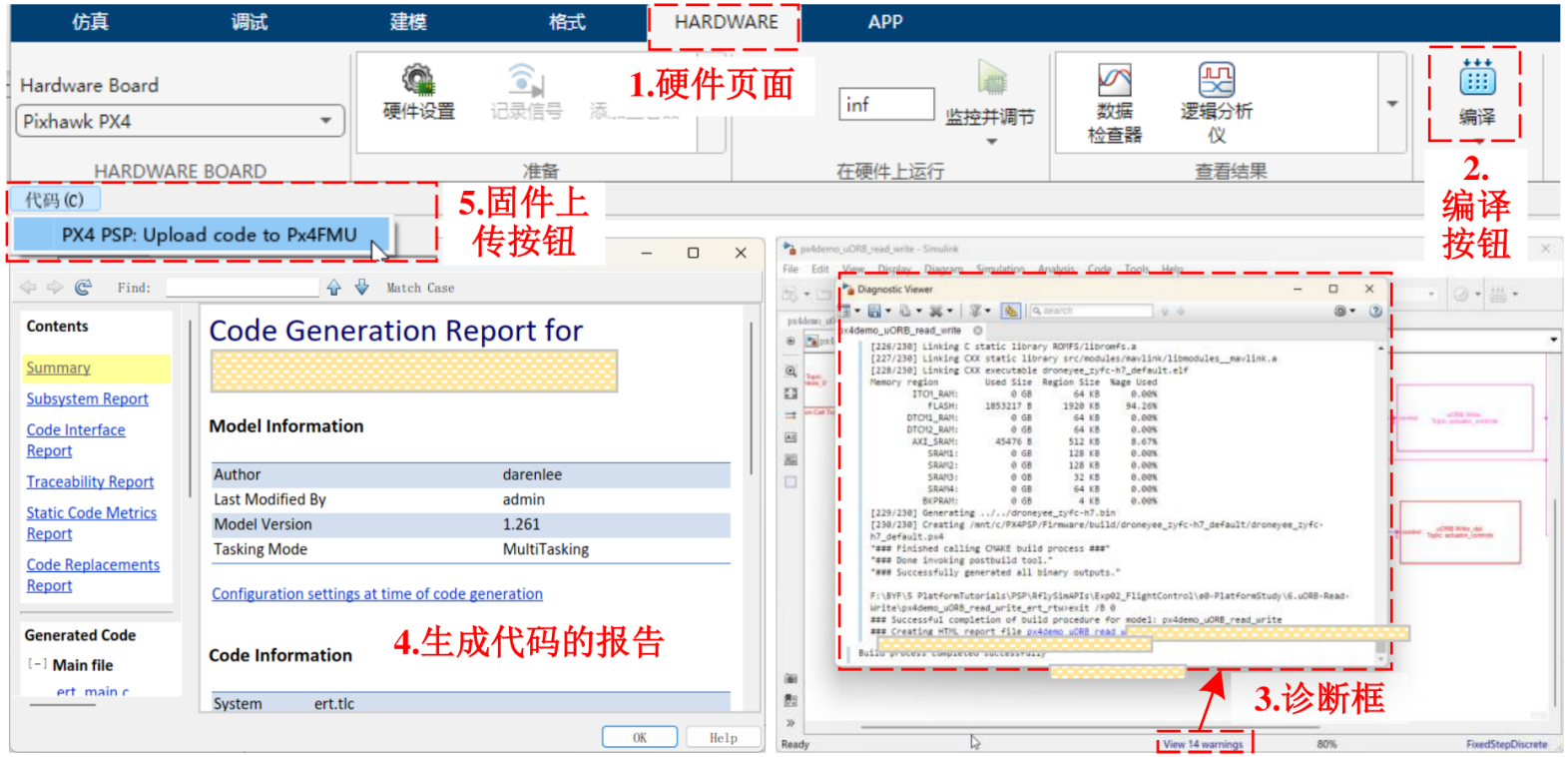


图5.11 Simulink代码自动生成流程图

①硬件页面

②编译

③诊断框

④生成代码报告

⑤上传固件

报告是教材示例；编译与上传是两个动作，上传用PX4Upload。

5.6.3 控制器开发与代码生成：离散实现

采样变快时，每步积分应相应变小

I为积分项对输出的贡献（已含Ki），不是原始误差积分。

恒定误差 $e = 0.2$ rad，积分增益 $K_i = 0.4\ \mathrm{s}^{-1}$，初值 $I_0 = 0$。

$$I_{k+1} = I_k + K_i e_k \Delta t$$

频率	每步代入	同样1 s的累计
250 Hz	$0.4 \times 0.2 \times 0.004 = 0.00032$ rad	$250 \times 0.00032 = 0.08$ rad
500 Hz	$0.4 \times 0.2 \times 0.002 = 0.00016$ rad	$500 \times 0.00016 = 0.08$ rad

若500 Hz仍用0.004 s：$I_{500} = 500 \times 0.00032 = 0.16$ rad，积分翻倍。

离散PI按采样步长递推，与连续求解器ode4无关；还要核采样、时延与计算预算。

5.6.3 控制器开发与代码生成：生成配置

配置值应对应计算、时序和目标要求

配置	模型仿真Exp2	生成模型Exp4
基本步长	0.001 s	1/250 s = 0.004 s
硬件／代码目标	None／grt.tlc	Pixhawk PX4／ert.tlc
控制器实现	离散PI、前向欧拉、采样继承	离散PI、前向欧拉、采样继承
报告与求解器	报告关闭；不作为固件入口	报告开启；Solver字段ode4

grt.tlc生成通用仿真代码，ert.tlc生成嵌入式目标代码；ode4只求解连续部分。

例程Readme：编译命令px4_fmu-v6x_default，推荐v1.14系列；目标须匹配板型。

5.6.3 控制器开发与代码生成：构建证据

先核模型、目标和警告，再接受生成物

入口：Exp4_AttitudeSystemCodeGen.slx → 硬件（Hardware）→ 编译（Build）。

阶段产物	保存证据	失败时回到哪里
模型检查	模型名、初始化参数、库依赖	变量或库块缺失：初始化/依赖
代码生成	ert.tlc、目标板、代码报告	配置冲突：生成配置
目标编译	第一条错误、关键警告、资源预算	工具链/目标：匹配版本与板型
二进制输出	固件路径、SHA摘要、版本	产物未生成：保持旧基准

上传条件：构建无终止错误、板型匹配、执行器隔离；上传步骤见「硬件在环启动」页。

本章目录

底层控制开发与实验验证

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 5 个教学单元

5.6.1 控制算法开发与测试
教材对应：第5.2.2.1节

5.6.2 位置控制与半自主模式
教材对应：第5.1.2.4、5.3.1节

5.6.3 控制器开发与代码生成
教材对应：第5.2.2.2节

5.6.4 软硬件在环仿真
教材对应：第5.2.2.2节

5.6.5 真机实验与结果复核
教材对应：第5.2.2.3、5.1.4节

5.6.4 软硬件在环仿真：验证层级

模型仿真、软件在环和硬件在环各查一层

层级	控制程序／机体	新增证据
模型仿真	Simulink算法／计算机模型	公式、方向、限幅与连接
软件在环（SITL）	软件目标PX4程序／计算机模型	进程、消息回路、固件闭环
硬件在环（HITL）	真实飞控PX4程序／计算机模型	硬件执行时间、通信时序
真机实验	真实飞控程序／真实机体	真实传感器、执行器与环境

HITL不含真实电机与气动；3.DesignExps例程名中的“SIL”指模型仿真。

PX4硬件在环文档（v1.14版）：https://docs.px4.io/v1.14/en/simulation/hitl

5.6.4 软硬件在环仿真：软件在环启动

先构建生成控制代码，再启动固件SITL

姿态SITL入口：0.ApiExps/14.SITLVeriGenCodeFirm/2.AttitudeCtrlCodeGen/Readme.pdf

1. 3.DesignExps：Init_control.m → Exp5_AttitudeSystemCodeGen2.slx。
   Exp5输出接HITL专用归一化模块，仅用于仿真；硬件→编译（Build）。
2. MATLAB：PX4SitlSet，把SITL固件换成含本次生成代码的版本。
   等待构建完成并保存诊断；构建失败即停止，结果不计入。
3. [安装目录]/RflySimAPIs/SITLRun.bat → 输入1（仿真1架）；等待初始化。
   QGC启用虚拟摇杆；仿真解锁后缓增油门，记录平稳基准。
4. 基准上施加小姿态目标，记录目标、状态、请求、PWM和时间戳。
   异常停止并恢复；正常退出与PX4SitlRec恢复见「软件在环结束」页。

启动需管理员权限，会结束已运行的CopterSim；本例程限完整版使用。

5.6.4 软硬件在环仿真：软件在环结束

停止闭环后，恢复原SITL环境

正常结束顺序

1 **回基准并停止记录**

目标回中、油门降至基准、上锁；停止目标发送与日志采集。

2 **退出仿真进程**

按SITL终端提示退出；核固件进程及串口/网络占用已释放。

3 **恢复原环境**

MATLAB：PX4SitlRec（个人版及以上）；再核基准程序可用。

异常：停止请求 → 保存首个错误与原始日志 → 退出 → 恢复环境 → 回原参数基准。

5.01退出脚本会结束CopterSim、QGC、RflySim3D同名进程，影响并行任务。

5.6.4 软硬件在环仿真：硬件在环机架

机架配置选择的是模拟运行方式

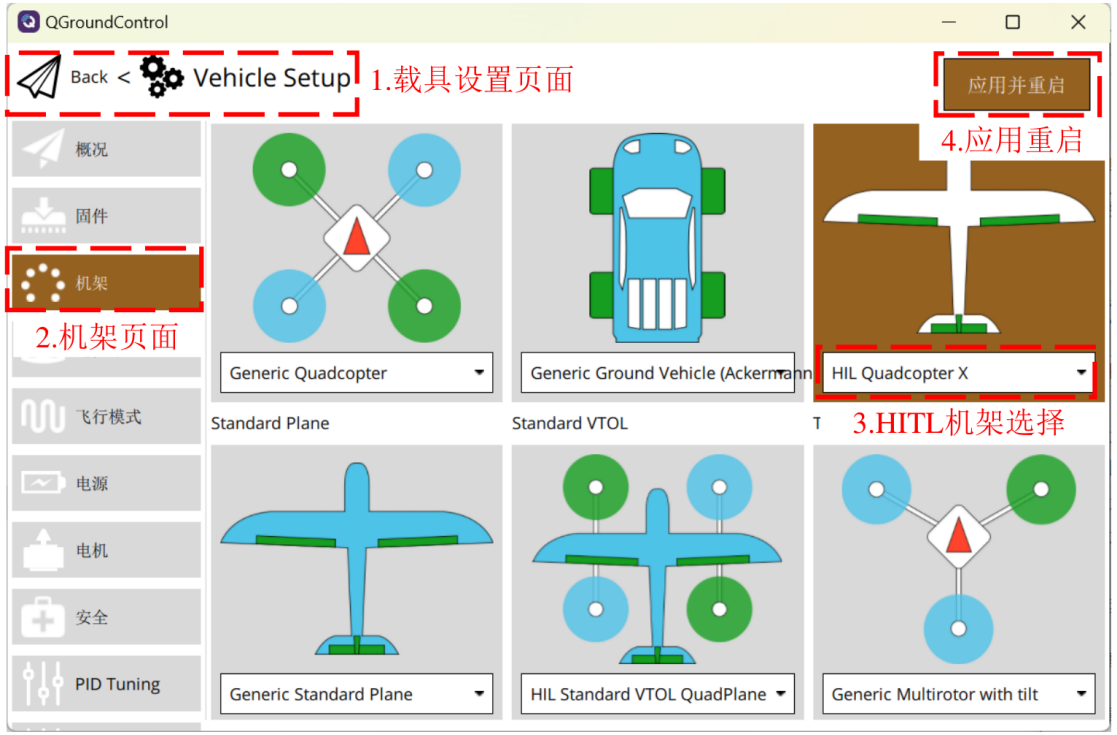


图5.12 硬件在环仿真QGC机架设置

①载具设置 → ②机架

③HIL Quadcopter X

④应用并重启

v1.12.3：HIL Quadcopter X 编号1001，自动设 SYS_HITL=1。
真实飞控＋模拟运动；物理执行器隔离。真机另选匹配机架。

5.6.4 软硬件在环仿真：硬件在环启动

上传本次固件、确认机架，再启动硬件在环

HITL入口：0.ApiExps/3.DesignExps/Readme.pdf第4.3节；模型Exp4_AttitudeSystemCodeGen.slx

1. 构建成功 → USB连接飞控 → MATLAB运行PX4Upload上传固件。
   写入及Verify通过、重启后核对新固件；也可点PX4 PSP: Upload code to Px4FMU。
2. QGC机架选HIL Quadcopter X（见「硬件在环机架」页）。
   Flight Modes中Emergency Kill switch为CH5；按提示完成遥控器校准。
3. 重新插入飞控 → 运行[安装目录]/RflySimAPIs/HITLRun.bat → 输入串口号。
   等CopterSim日志出现GPS 3D fixed & EKF initialization finished。
4. CH5解锁后LED点亮，推油门可见起飞；随后按「硬件在环验收」检查。
   结束：回中、上锁 → 在HITLRun窗口按任意键，脚本关闭三个程序。

上传会改写飞控固件：拆桨并核对板型后再执行；真机前在QGC改选实机机架。
排查：无COM端口先换数据线与USB口；日志不初始化则核串口号、退出QGC后重启脚本。

5.6.4 软硬件在环仿真：硬件在环验收

连接、状态、方向和时间都要留下证据

承接「硬件在环启动」：CopterSim显示EKF初始化完成后，按四个阶段依次验收。

准备	状态	受限测试	结束与回退
动作：核对HITL机架与参数，隔离执行器	**动作：**等EKF初始化完成	**动作：**小姿态目标，核CH5与通道方向	**动作：**回中、上锁，按键退出HITLRun
判据：端口不冲突，配置一致	**判据：**时间戳连续，停更即停	**判据：**方向均正确；饱和或超时即停	**判据：**端口已释放、日志已保存、基准已恢复

LED、串口、三维画面各只证明局部状态；还要核方向、时序与闭环响应。

5.6.4 软硬件在环仿真：跨阶段一致性

对齐任务、状态来源和时钟后再比较

固定条件	同步记录	比较量
同目标与初值	目标、姿态、角速度	误差、峰值、调节时间
同参数与约束	控制请求、输出、限幅	饱和时长、分配残差
明确状态来源	真值/模拟观测/估计状态	估计偏差、有效标志
对齐时间基准	采样/接收时刻，执行耗时	更新间隔、时龄、超时

同一时基相减得观测时龄，即课件5.5「控制周期与时间预算」页的数据时龄：

$$\Delta t_{\mathrm{age}} = t_{\mathrm{recv}} - t_{\mathrm{sample}} = 1.020 - 1.000 = 0.020\ \mathrm{s} = 20\ \mathrm{ms}$$

观测时龄不等于端到端控制延迟。

本章目录

底层控制开发与实验验证

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 5 个教学单元

5.6.1 控制算法开发与测试
教材对应：第5.2.2.1节

5.6.2 位置控制与半自主模式
教材对应：第5.1.2.4、5.3.1节

5.6.3 控制器开发与代码生成
教材对应：第5.2.2.2节

5.6.4 软硬件在环仿真
教材对应：第5.2.2.2节

5.6.5 真机实验与结果复核
教材对应：第5.2.2.3、5.1.4节

5.6.5 真机实验与结果复核：真机前置条件

把未覆盖的物理差异逐项补齐

核对对象	进入试验前确认	通过或终止条件
机体与传感器	机架、惯量、方向与校准	状态有效 变更后重新核对
执行器链	通道顺序、范围、响应方向	隔离/台架条件满足 异常终止
任务所需状态	姿态或定位、速度 及质量标志	失效时停止对应任务
试验等级	离线 台架 受限 实飞	负责人、场地 接管与终止规程

真机前先取官方固件基准；转离HITL时重新核机架与参数。

5.6.5 真机实验与结果复核：控制源切换

接管前后同时看目标、内部状态和输出

真机试验以PX4官方控制器作安全回退；切换前后总输出须连续。

接管前	切换时	回退后
状态有效、目标对齐	CH8≥1500：mode 0→2	QGC提示切回PX4
接管方积分预对齐	记录控制源与输出	核反馈与目标
总输出跳变≈0	计算输出跳变量	保存失败与恢复记录

课件5.5：步骤见「控制源切换例程」页（v1.13固件），屏蔽见「输出控制权与仲裁」页。

RePX4Block：mode=0用PX4官方控制器；mode=2只屏蔽PX4的力矩与推力输出。

$u_{I,0} = u_{\mathrm{PX4}} - u_P$：积分贡献预置后输出连续（算例见课件5.5「控制源切换算例」）

5.6.5 真机实验与结果复核：切换演练

先在硬件在环中演练控制源切换

入口：0.ApiExps/21.SwitchPX4Simulink/Readme.pdf（要求v1.13固件）

1. 准备：按课件5.5「控制源切换例程」页完成编译、重编固件与上传。
   HITLRun启动后等EKF初始化；QGC确认机架与CH5急停。
2. 基准：QGC解锁起飞（PX4官方控制器，mode=0），飞行平稳。
   开始同步记录控制源、控制请求、实际输出与时间戳。
3. 切换：CH8≥1500切到Simulink（mode=2），拨回切回PX4（mode=0）。
   每次核对QGC提示与记录中的控制源是否一致。
4. 量化：用同一时基对齐，计算切换瞬间总输出跳变量与回退后的响应。
   跳变超出预设门限或PX4未接管：停在HITL排查，不进入真机。

切换异常：按课件5.5「控制源切换例程」页排查；结束时上锁，按键退出HITLRun。

5.6.5 真机实验与结果复核：日志复核

沿目标、状态、请求和输出定位偏差

目标	状态	控制请求	执行器命令
核对：数值、单位、时刻、控制源	**核对：**有效性、新息与时间戳	**核对：**误差、积分、限幅	**核对：**通道、方向、幅值、响应
归因：任务错误；切换目标未初始化	**归因：**估计失效、延迟、坐标不一致	**归因：**参数太激进；积分累积；冲突发布	**归因：**分配、执行器或机体差异

假设案例：状态标志失效时请求出现尖峰 → 先查状态与时间 → 再对同任务复验。

滤波自采（e4.1；入口见5.2）

log_data.slx上传：替换飞控固件
CH5拨上开始，拨下停止
e4_A.bin → Attitude_estimator0.m

控制日志（5.Log-Write-Read）

px4demo_log.slx → .bin
px4demo_log_qgc.slx → .ulg
PX4ReadLog读入MATLAB

5.6.5 真机实验与结果复核：结果记录

完成哪一阶段，就提交哪一阶段的证据

填表示例：北向1 m离线算例；理想姿态内环。

记录项	基准或结果	变更与回退
模型与输入	步长0.002 s；10 s；初值0	加速度限幅±1 m/s²不变
参数	位置增益2；速度阻尼2	位置增益6；速度阻尼2
完整结果	峰值1.0423 m；超调4.23%	峰值1.3088 m；超调30.88%
饱和/结束	0.416 s；终值1.000067 m	2.260 s；终值0.999904 m
证据范围	独立低维离线计算	平台试验需另交原始日志

回退：恢复增益2；保留两条数据。实测需记录版本与模型/参数摘要。

课堂讨论

模型正常、硬件在环振荡，先查什么

情境：相同小滚转目标在模型中正常，进入HITL后振荡。每项先找一条证据。

参考检查	可用证据	第一步动作
采样与时延	目标4 ms更新 反馈20 ms才更新	核周期与数据新鲜度
坐标与单位	模型用rad 硬件量却未转为rad	核单位转换与轴向
输出与控制权	PWM方向相反 两模块同时发布	核混控、通道 发布所有权
计算预算	执行超时	核耗时/机体基准
模型差异	执行器惯性不匹配	再调参

判据：每项都有数据和停止条件；先恢复基准，再做单因素对比。

课堂练习

换一组输入，重算控制链与积分步长

练习1　遥控脉宽到电机PWM

给定：CH1=1420 μs，滚转角−0.02 rad，p=0，积分初值0；T=0.5，P=Y=0。

增益同Exp1：求ϕ_d、u_{att}、速率环输出与四电机PWM，判断滚转方向。

练习2　改采样频率后的积分步长

教学离散PI从250 Hz改为400 Hz；误差恒为0.1 rad，积分增益0.5 s^{-1}，积分初值0。

代码若仍用步长0.004 s，1 s后积分贡献是多少？正确值是多少？

练习3　证据判断

HITL中LED已点亮、QGC显示已解锁，能否说明控制方向正确？

若不能，还要补哪条证据？

作答提示

每步写出代入的数值与单位；方向判断写出依据（哪一侧电机增大）。

参考要点

先算请求，再看电机增减与积分步长

练习1

$\phi_d = 0.5 \times (1420 - 1500)/400 = -0.1$ rad（死区外按原值）

姿态环：$u_{\text{att}} = 0.525116 \times (-0.1 + 0.02) = -0.042009$

$u_{\text{rate}} = 1.096115 \times (-0.042009 - 0/3) = -0.046047$，乘0.1得$R = -0.004605$

$\text{PWM}_{1:4} = [1504.60,\ 1495.40,\ 1495.40,\ 1504.60]\ \mu s$：右增左减 → 向左滚转。

练习2

正确步长1/400=0.0025 s：每步0.5×0.1×0.0025=0.000125 rad，400步得0.05 rad。

错用0.004 s：每步0.0002 rad，1 s得0.08 rad，是正确值的1.6倍。

练习3

不能：LED与解锁只说明输出已打开；还需CH1小阶跃，核滚转与PWM增减方向。

本节小结

用同一任务贯穿开发、验证与回退

保持同一任务

目标、参数、初值与约束可比；模板→构建→SITL→HITL逐阶段保存证据。

姿态主线 → 位置增量

内环保留；外环新增状态、限制与切换目标初始化。

正常结束与失败回退

仿真先停回路；真机按接管规程处置，落地上锁后再退出恢复。

易错点

模型仿真≠固件SITL；真值≠估计；编译≠闭环；HITL机架≠真机机架。

本节Exp1输出8维PWM，与课件5.5的16维Exp1_HIL16CtrlsPWM不同。

切换时mode=0为官方控制器、mode=2只屏蔽力矩推力；版本以例程Readme为准。

课件5.7：更换机型或算法后，按同样逻辑重新验证变化的环节。