本章目录

PX4架构与控制开发接口

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

5.5.1 PX4自驾仪与代码架构

教材对应：第5.2.1.1–5.2.1.2节

5.5.2 常用接口及二次开发

教材对应：第5.2.3节

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联

教材对应：第5.2.1.3–5.2.1.4节

5.5.4 接口验证与模块替换

教材对应：第5.2.3、5.3.1节

5.5 PX4架构与控制开发接口

5.5.1 PX4自驾仪与代码架构：PX4角色与数据流

飞控把传感、估计与控制组织成软件链

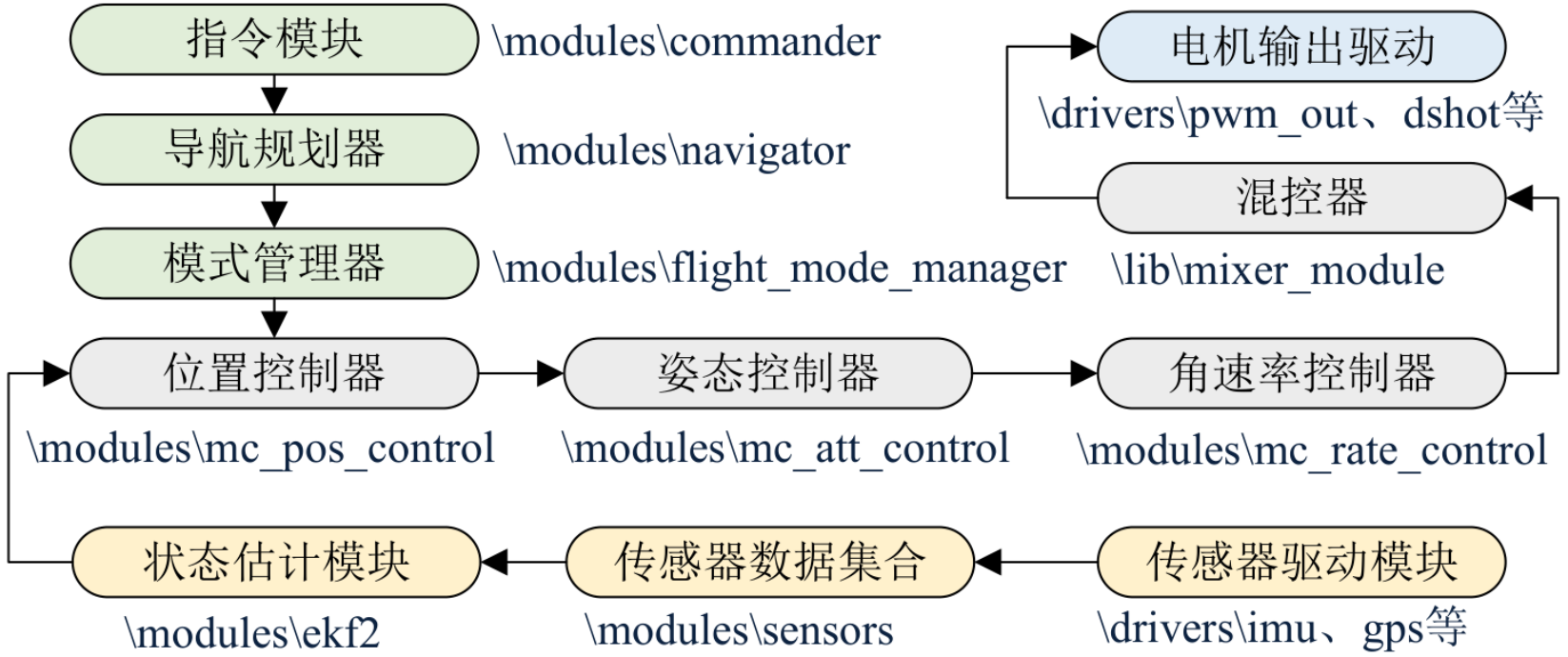


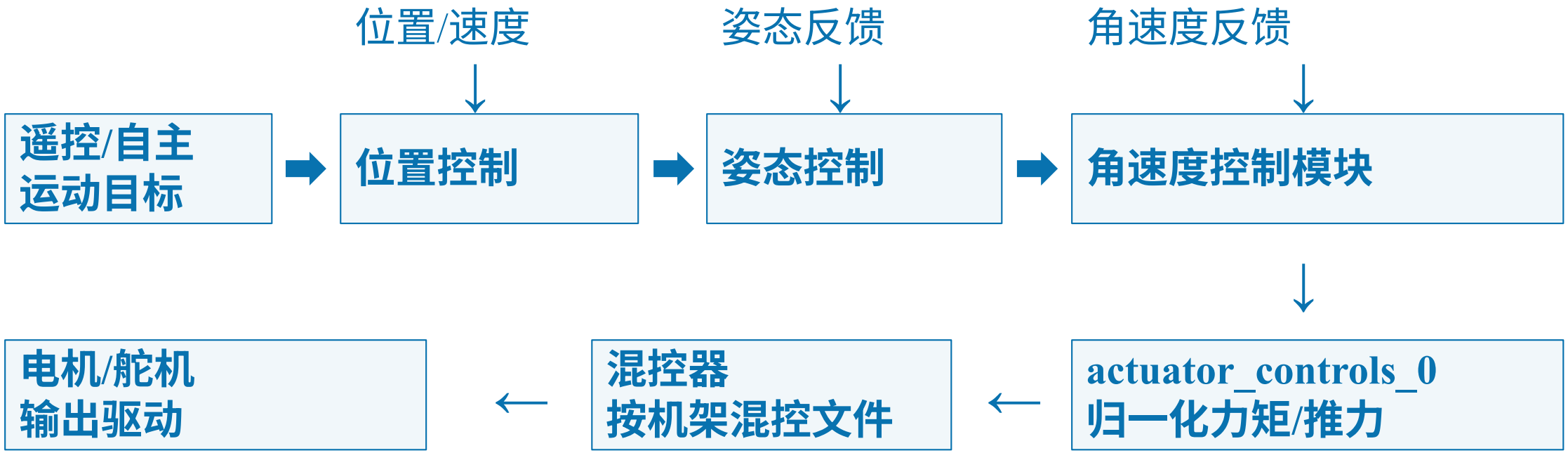
图5.5 PX4源码模块和控制流程图

黄：传感器驱动→数据集合→ekf2 提供状态；绿：指令、导航、模式管理定目标。
灰：位置→姿态→角速率控制，经混控器到电机输出驱动（安装版 v1.12.3 路径）。

5.5.1 PX4自驾仪与代码架构：v1.12.3多旋翼主链

估计状态与运动目标在控制器汇合

状态反馈：传感处理/估计提供位置、姿态与机体系角速度。



模式决定启用哪些环；推力目标沿链传递，速率误差只产生力矩请求。

5.5.1 PX4自驾仪与代码架构：PX4特点与取舍

模块化便于复用，运行资源仍然共享

模块复用：传感、估计、控制、任务与通信。
运行平台：飞控运行NuttX实时操作系统；仿真在Linux上运行。

WorkItem（工作项）：在共享工作队列线程中，执行一次被调度的计算。
v1.12.3的mc_rate_control是工作项，由角速度更新触发。

许可差异：PX4用BSD-3，可闭源分发；ArduPilot用GPLv3，发布衍生作品须开源。

执行方式	资源关系	开发约束
独立任务	自己的栈与任务优先级	仍受CPU、内存及调度限制
工作队列	同队列工作项共享线程与栈	避免阻塞；控制单次执行耗时

5.5.1 PX4自驾仪与代码架构：源码与资源定位

沿着数据流找到源码和学生包入口

问题	PX4 v1.12.3源码路径（[安装目录]/Firmware）
字段、单位与时间戳	msg/*.msg
状态估计与控制算法	src/modules/ekf2、mc_att_control、mc_rate_control
混控与硬件输出	src/lib/mixer、ROMFS/px4fmu_common/mixers；src/drivers
启动与机型配置	ROMFS/px4fmu_common/init.d

源码：[安装目录]/Firmware（安装版默认v1.12.3）；板卡配置：boards/。
例程根目录：[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl；接口总览：同目录API.pdf。
安装包版本：V5.01-20260831；每个例程先读同目录Readme.pdf。

5.5.1 PX4自驾仪与代码架构：控制输出的版本边界

输出路径随固件版本变化，先确认版本再选例程

v1.12.3（安装版默认）：actuator_controls_0 → 混控器 → 输出驱动

v1.14 及以上：vehicle_torque_setpoint + vehicle_thrust_setpoint
→ control_allocator → actuator_motors / actuator_servos → 输出驱动

① 默认版本
安装版PX4 v1.12.3
源码在[安装目录]/
Firmware

→

② 切换版本
重跑一键安装脚本，
在“PX4固件版本”项选；
免费版1.12、1.14，
完整版另含1.13、1.15–1.17

→

③ 确认版本
QGC的MAVLink控制台
执行 ver all，
读 FW version 一行

可选版本：来自安装包2.FirmwareZip目录；例程按其Readme推荐版本选。
版本不同：按「版本差异对照」页逐处对照接口差异。

5.5 PX4架构与控制开发接口

5.5.1 PX4自驾仪与代码架构：版本差异对照

换用其他版本时，逐处对照这五类接口差异

对照页（小标题）	v1.12.3（安装版默认）	v1.14 及以上
v1.12.3多旋翼主链	actuator_controls_0 →混控器	力矩/推力目标 →control_allocator
输入层级与方向	x/y/r∈[-1,1] 油门z∈[0,1]	roll/pitch/yaw throttle∈[-1,1]
输出语义的一步计算	推力比例 $T = z$	推力比例 $T = (\text{throttle} + 1)/2$
日志、参数与通信	无uXRCE-DDS	提供uXRCE-DDS （桥接ROS 2）
角速度模块输出接口约定	actuator_controls_0 control[3]∈[0,1]	vehicle_torque_setpoint vehicle_thrust_setpoint

各例程Readme推荐版本：0.ApiExps的3、6、11号为1.14系列；
16、17号与1.BasicExps/e9为1.12.3；21号使用1.13。

本章目录

PX4架构与控制开发接口

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

5.5.1 PX4自驾仪与代码架构

教材对应：第5.2.1.1–5.2.1.2节

5.5.2 常用接口及二次开发

教材对应：第5.2.3节

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联

教材对应：第5.2.1.3–5.2.1.4节

5.5.4 接口验证与模块替换

教材对应：第5.2.3、5.3.1节

5.5.2 常用接口及二次开发：四类开发接口

四类接口分管建模生成、命令操作、通信与进阶模块

SimulinkPSP工具箱

封装传感器输入、执行器输出与
uORB读写，生成PX4接口代码
本节：「发布与订阅」「生成与运行链」
例程：6.uORB-Read-Write

MATLAB命令行接口

固件上传、编译、模块注册与控制器配置
如PX4Upload、PX4Build、PX4AppName
本节：「受控消息发布」等页的上传步骤
说明：API.pdf“MATLAB命令行接口”

外部通信接口

uORB：飞控内部模块交换数据
MAVLink：飞控与地面站、外部程序
本节：「日志、参数与通信」
例程：8.Mavlink-Msg-Echo

RflySimPSP进阶库

遥控输入：15.InputSourceAPI
执行器控制：16.CtrlsSingalsAPI
状态获取：11.StateDataGatAPI
本节：「输入层级与方向」等三页

总入口：[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl/API.pdf；例程目录都在其下的0.ApiExps中。

5.5.2 常用接口及二次开发：发布与订阅

uORB传递消息，不替控制器判定有效性



uORB是飞控内部的异步发布/订阅机制；时间戳以启动后μs计。
读取成功≠状态有效：还要检查更新、实例、有限值、归一化和估计健康。

$$t_{\text{age}} = t_{\text{now}} - t_{\text{sample}} = (1006000 - 1000000)\ \mu\text{s} = 6.0\ \text{ms}$$

uORB机制与实例说明（PX4 v1.12）
https://docs.px4.io/v1.12/en/middleware/uorb.html

5.5.2 常用接口及二次开发：状态与传感器字段

测量、估计与真值是三类不同信息

数据层	字段与量纲	坐标/来源
IMU/组合测量	sensor_combined.gyro_rad：rad/s accelerometer_m_s2：m/s^2	机体FRD；周期平均值
机体角速度	vehicle_angular_velocity.xyz：rad/s	机体FRD；偏置校正
估计姿态	vehicle_attitude.q[4]：无量纲	四元数：机体FRD →地球NED
仿真真值	专用groundtruth话题/模型接口	仅特定仿真来源可提供

FRD=前/右/下；NED=北/东/下。状态获取入口：
0.ApiExps/11.StateDataGatAPI/Readme.pdf（推荐1.14系列）。

5.5.2 常用接口及二次开发：输入层级与方向

遥控脉宽先校准，再映射成运动目标

教学标定：1100 / 1500 / 1900 μs；当前1700 μs。
r_{norm}为归一化杆量，ϕ_{sp}为滚转角目标；本例最大滚转20°，线性映射。

$$r_{\text{norm}} = \frac{1700 - 1500}{1900 - 1500} = 0.5$$

$$\phi_{\text{sp}} = 0.5 \times 20^\circ = 10^\circ = 0.1745 \text{ rad}$$

v1.12.3：manual_control_setpoint用x/y/r∈[-1,1]，油门z∈[0,1]。
x杆前推为正、对应负俯仰；v1.14及以上改用roll/pitch/yaw/throttle。

遥控：0.ApiExps/15.InputSourceAPI/Readme.pdf
外部目标（Offboard）：0.ApiExps/17.OffboardCtrlsAPI/Readme.pdf

5.5.2 常用接口及二次开发：执行器控制API

同一个输出数字必须带上接口层级

同目录模型文件	输入语义	后续环节
Exp1_HIL16CtrlsPWM.slx	16维PWM式数值 1000–2000	actuator_outputs_rfly →CopterSim inPWMs
Exp2_HIL16CtrlsNorm.slx	16维归一化数值 [-1,1]，按机型解释	封装转换→仿真执行器
Exp3_TorqueThrustCtrls4D.slx	三轴力矩与一维推力 均为归一化值	actuator_controls_0 →混控器→执行器

入口：0.ApiExps/16.CtrlsSingalsAPI（推荐1.12.3），步骤见「执行器控制例程」页。
16维仿真控制向量 ≠ 16路物理输出；物理输出路数由飞控硬件决定。

5.5.2 常用接口及二次开发：输出语义的一步计算

推力正负号取决于封装与坐标约定

TorqueThrustCtrls：归一化推力正值向上；PX4机体系FRD的z轴向下。
本例：手动角速度模式（姿态环关闭），T为集体推力比例∈[0,1]。
油门字段：v1.12.3为z∈[0,1]；v1.14及以上为throttle∈[-1,1]。

$$\text{v1.12.3：}\ T = z = 0.5; \qquad \text{v1.14及以上：}\ T = \frac{\text{throttle} + 1}{2} = \frac{0 + 1}{2} = 0.5$$

$$\mathbf{thrust}_{\text{body}} = [0,\ 0,\ -T] = [0,\ 0,\ -0.5], \qquad \text{control}[3] = T = +0.5$$

actuator_controls_0 → **按机架混控** → **各电机量及硬件输出**

0.5是归一化推力比例，单位不是N；经混控后才成为各电机量。

5.5.2 常用接口及二次开发：执行器控制例程

用CH5切换控制权，验证生成模块接管输出

入口：0.ApiExps/16.CtrlsSingalsAPI/Readme.pdf（推荐1.12.3）；HITL（硬件在环）实验

① 编译上传
编译Exp1（PWM）
PX4Upload上传

→

② 启动HITL
CH5拨最低；
HITLRun填COM号

→

③ PX4控制
QGC一键起飞，
遥控可正常操纵

→

④ Simulink控制
上锁后CH5拨最高
自动解锁可起飞

预期与判据
CH5最高：QGC起飞无效，推油门上升
CH5拨回最低：转入Loiter悬停，
QGC可降落，PX4收回控制权
Exp2、Exp3同样操作，现象一致

常见失败与排查
编译报错：看诊断窗口，MATLAB≥2022b
上传失败：查USB、COM口与编译命令
CH5切换无效：查通道与isEnCtrl
注意：CH5拨最高会自动解锁

判据：控制权随CH5在PX4与Simulink之间交替，每次只有一方起作用。

5.5.2 常用接口及二次开发：日志、参数与通信

日志记录证据，参数改变运行值

用途	入口或机制	应检查的结果
保存数据	0.ApiExps/5.Log-Write-Read px4demo_log.slx：写.bin px4demo_log_qgc.slx：写.ulg	目标、状态、请求/实际输入 使用同一时间基准。
修改参数	0.ApiExps/10.QGC-Param-Tune PX4QGCTune.slx	默认：FLT=100，INT=50。 改后核对读数与生效时刻。
内外通信	uORB：飞控内部话题 MAVLink：飞控与地面站、外部程序	数据方向、话题与时龄 网络时延与丢包

SL_RFLY_FLT/INT：例程自定义的浮点/整型参数，在地面站QGroundControl中修改。
uXRCE-DDS（v1.14及以上）：飞控端客户端＋PC端代理，桥接选定uORB话题。

本章目录

PX4架构与控制开发接口

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

5.5.1 PX4自驾仪与代码架构
教材对应：第5.2.1.1–5.2.1.2节

5.5.2 常用接口及二次开发
教材对应：第5.2.3节

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联
教材对应：第5.2.1.3–5.2.1.4节

5.5.4 接口验证与模块替换
教材对应：第5.2.3、5.3.1节

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联：模型与固件关系

生成代码作为模块加入PX4运行环境

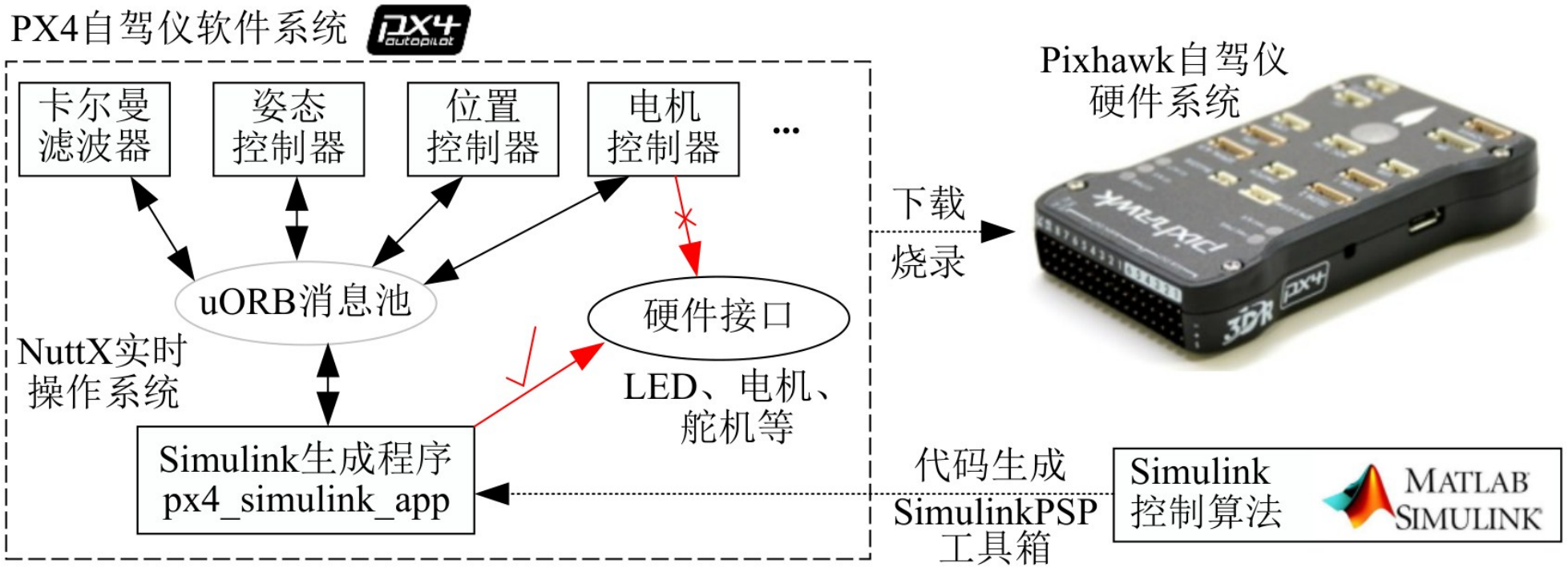


图5.6 Simulink控制器与PX4固件关系

红✗：原生电机控制输出被屏蔽；红✓：px4_simulink_app接管硬件输出。

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联：生成与运行链

模型、生成代码、固件与运行是不同阶段

Simulink模型 ➡ 生成C/C++代码 ➡ 目标编译/链接 ➡ .px4固件

TLC：目标语言编译器（Target Language Compiler），提供代码生成模板。
上行为生成链，下行为运行链；生成代码编入固件后按调度执行。

px4_simulink_app初始化 ➡ 周期或事件：读取→算法一步→发布

三类证据分开看：代码生成报告、编译出的.px4固件、板上运行信号。

入口：0.ApiExps/3.DesignExps/Readme.pdf（推荐1.14系列）
主模型：Exp4_AttitudeSystemCodeGen.slx。

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联：控制周期与时间预算

步长、执行耗时与数据时龄分别测量

教学时序（课堂设定的数值）：名义周期4 ms，名义频率250 Hz。

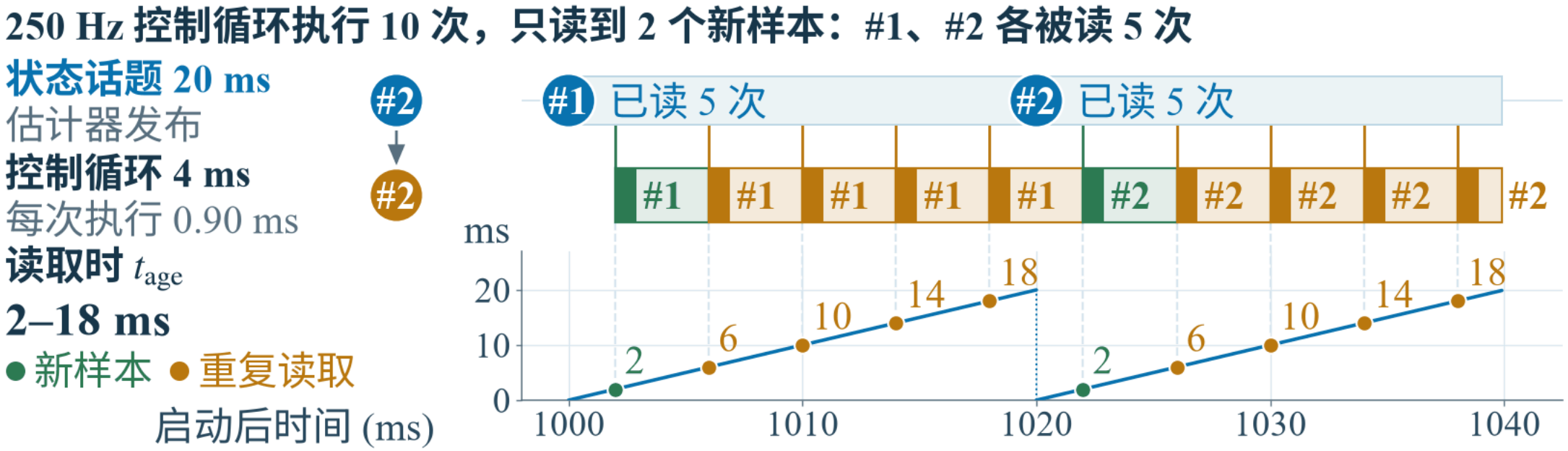
阶段	耗时/ms	计算
读取	0.10	获取最新有效样本
计算	0.65	控制器一步
发布	0.15	填写采样与发布时间戳
总计/余量	0.90 / 3.10	0.10+0.65+0.15=0.90；4.00-0.90=3.10

$$t_{\text{age}} = t_{\text{now}} - t_{\text{sample}} = (1008600 - 1008000)\,\mu\text{s} = 0.6\,\text{ms}$$

间隔4.1/3.9 ms：抖动±0.1 ms；还需统计最坏耗时和超期次数。

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联：控制频率与状态新鲜度

控制频率决定多久计算一次，不决定状态多新



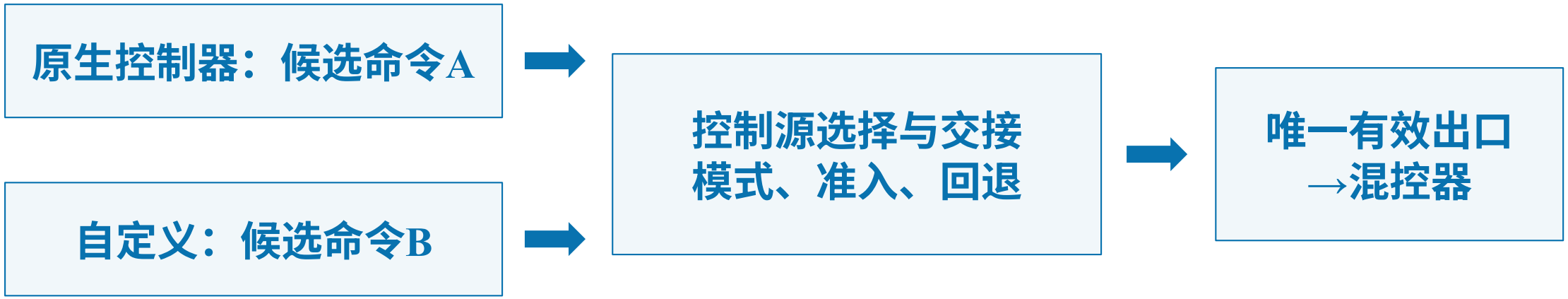
图：控制频率与状态新鲜度时序动画（示意；采样到发布延迟取0）

样本编号：新状态到达前，同一编号被读5次；10次中只有2次是新样本。

读取时龄：同一样本每重读一次，时龄增加4 ms，从2 ms增到18 ms才回落。

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联：输出控制权与仲裁

并行运行需要明确唯一有效控制源



标准uORB只传递消息：两路可以都计算，只能一路写有效输出。

屏蔽选项：一键安装脚本第10项“是否屏蔽PX4自身控制器输出”选“是”。
PSP（PX4硬件支持包）：屏蔽选择与四项功能见「原生输出屏蔽选项」页。

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联：原生输出屏蔽选项

一键安装脚本的屏蔽选项决定谁能驱动电机

SimulinkPSP工具箱：模型定制、代码生成、控制安全切换、跨平台兼容
屏蔽选项：一键安装脚本第10项“是否屏蔽PX4自身控制器输出”
教材称“屏蔽PX4电机控制代码”，即图2.4最后一项。

是：屏蔽Firmware中对电机的控制信号，防止与生成代码冲突。

否：不屏蔽，用于测试PX4自带控制算法；生成官方固件时选它。

自动：仅更新变化的文件。

actuator_controls_0：只屏蔽这一条uORB消息，支持FMU、DShot与各类载具。

自定义屏蔽：输入xlsx文件替换指定文件或字符串，可屏蔽某个模块的输出。

SITL（软件在环）不受影响：该选项不屏蔽PX4_SITL控制器输出，仿真照常进行。
恢复官方固件：重跑一键安装脚本选“否”，或执行PX4Official后再PX4Upload。

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联：整体与局部替换

接入层级决定保留哪些控制责任

接入方式	自定义模块负责	通常保留/需检查
外部位置目标	目标轨迹和任务逻辑	原生位置、姿态、速率及混控
局部角速度替换	速率误差→力矩 推力沿用上游目标	估计、上游目标、混控与安全
完整位姿控制	位置至力矩/推力的各控制环	估计与输出接口；完整模式交接

Offboard（外部计算机给目标）例程见「外部目标例程」页：0.ApiExps/17.OffboardCtrlsAPI。

替换边界越清楚，越能判断结果由哪个算法造成。

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联：外部目标例程

Offboard例程替换目标来源，原生控制链照常工作

入口：0.ApiExps/17.OffboardCtrlsAPI/Readme.pdf（推荐固件1.12.3）

① 编译烧录
编译Exp1位置模型
并烧录到飞控

→

② 启动HITL
CH5最低，管理员
运行HITLRun

→

③ 等待初始化
填COM号，等EKF
初始化完成

→

④ 进入Offboard
CH5拨最高：
1 s后自动解锁

预期与判据（Exp1位置目标）
滚转杆最右：向右飞10 m
俯仰杆最前：向前飞10 m
油门最上：上飞到20 m高
偏航杆最右：偏航π rad

常见失败与排查
编译找不到库：核对工具链与MATLAB
HITL连不上：管理员运行，查防火墙
进不了Offboard：查CH5与固件版本
注意：CH5拨最高会自动解锁

判据：QGC中飞机停在预设位置；后续控制和混控仍由PX4原生模块完成。

本章目录

PX4架构与控制开发接口

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

5.5.1 PX4自驾仪与代码架构
教材对应：第5.2.1.1–5.2.1.2节

5.5.2 常用接口及二次开发
教材对应：第5.2.3节

5.5.3 生成控制器与PX4架构关联
教材对应：第5.2.1.3–5.2.1.4节

5.5.4 接口验证与模块替换
教材对应：第5.2.3、5.3.1节

5.5.4 接口验证与模块替换：最小输入验证

只读验证先检查方向、量纲和时间

本例纯偏航：roll = pitch = 0；四元数按w/x/y/z排列。
一般情况下，机体系角速度不等于欧拉角变化率。

$$\mathbf{q} = [0.9961947,\ 0,\ 0,\ 0.0871557], \quad \omega_z = 0.2\ \text{rad/s}$$

$$\|\mathbf{q}\|_2 \approx 1, \quad \psi = 2\,\text{atan2}(0.0871557,\ 0.9961947) = 10^\circ$$

检查项	期望判读
方向与量纲	FRD→NED姿态；ω_z=0.2 rad/s
样本时龄	1006000-1000000=6000 μs，即6 ms

读接口：0.ApiExps/11.StateDataGatAPI/Readme.pdf；发布验证见「受控消息发布」页。
SITL控制台只读：listener vehicle_attitude -n 5；uorb top。

5.5.4 接口验证与模块替换：受控消息发布

发布成功还要检查接收值与退出状态

隔离HITL：不解锁、不接执行器；模型Exp3_uORB_write.slx；推荐1.14系列固件。

① **编译** 编译Exp3模型 → ② **USB上传** 执行PX4Upload → ③ **HITLRun启动** 等EKF初始化完成 → ④ **QGC中打开** MAVLink控制台

期望核对项	未解锁分支／操作	接收侧检查
control[0] / [3] / [7]	1 / 4 / 8	listener rfly_px4 -n 5 数组float32[8]，按索引核对
timestamp / 更新率	uint64，启动后μs 频率由模型调度决定	uorb top -a；回车退出监视。 时间递增；统计更新频率。
正常结束	px4_simulink_app stop px4_simulink_app status	not started；复测频率为0。 旧样本按时龄判失效。

常见失败：命令不存在、stop后频率不降 → 保持未解锁，核对上传的固件与发布者。

入口：0.ApiExps/6.uORB-Read-Write/Readme.pdf 第5.3节（第9–13页）。

5.5.4 接口验证与模块替换：角速度模块输入接口约定

输入接口约定写到字段、单位与失效条件

接口约定：模块间约定的输入输出、单位、坐标系、频率与时序。

输入/发布责任	字段与单位/坐标	有效条件及处理
角速度测量 **传感处理模块**	vehicle_angular_velocity.xyz rad/s，body FRD	字段有限；样本时龄≤8 ms。 按timestamp_sample计算。
角速度/推力目标 **选定上游控制源** 均为body FRD	vehicle_rates_setpoint roll/pitch/yaw：rad/s thrust_body（3维）：归一化	字段有限，推力各轴[-1,1]。 目标时龄≤100 ms。 按timestamp计算。
控制模式 commander	vehicle_control_mode flag_armed flag_control_rates_enabled	已解锁、速率环启用、选本模块 条件失效即停止发布并回退。

本例：v1.12.3教学速率模块，非手动分支，4 ms周期；8 ms、100 ms为教学设定阈值。

5.5.4 接口验证与模块替换：角速度模块输出接口约定

输出接口约定同时约束数值与发布权

输出/消费者	语义与教学设计约束	发布规则
actuator_controls_0 control[0]–[2]→混控器	滚转/俯仰/偏航归一化力矩 本例各轴[-1,1]；非N·m	唯一选定控制源； timestamp_sample 记录陀螺样本时刻。
actuator_controls_0 control[3]→混控器	归一化油门（集体推力） 范围[0,1]；正值向上	推力沿用上游目标； 力矩/推力同一控制步； 发布时间：timestamp

$$\text{control}[0]\sim[3] = [0.10,\ -0.05,\ 0,\ 0.50]$$

$$\Delta t = t_{\text{pub}} - t_{\text{sample}} = (1008900 - 1008000)\,\mu\text{s} = 0.9\,\text{ms}$$

actuator_controls_0不带发布者字段：用控制源诊断、模式配置与发布路径验收。

5.5.4 接口验证与模块替换：控制源切换算例

切换前对齐状态，才能减小输出跳变

某轴归一化力矩：原生0.24；自定义比例贡献0.10、积分贡献0.04。
u_I表示积分项对输出的贡献，不是误差积分状态。

$$u_{\text{custom}} = 0.10 + 0.04 = 0.14, \quad \Delta u = 0.14 - 0.24 = -0.10$$

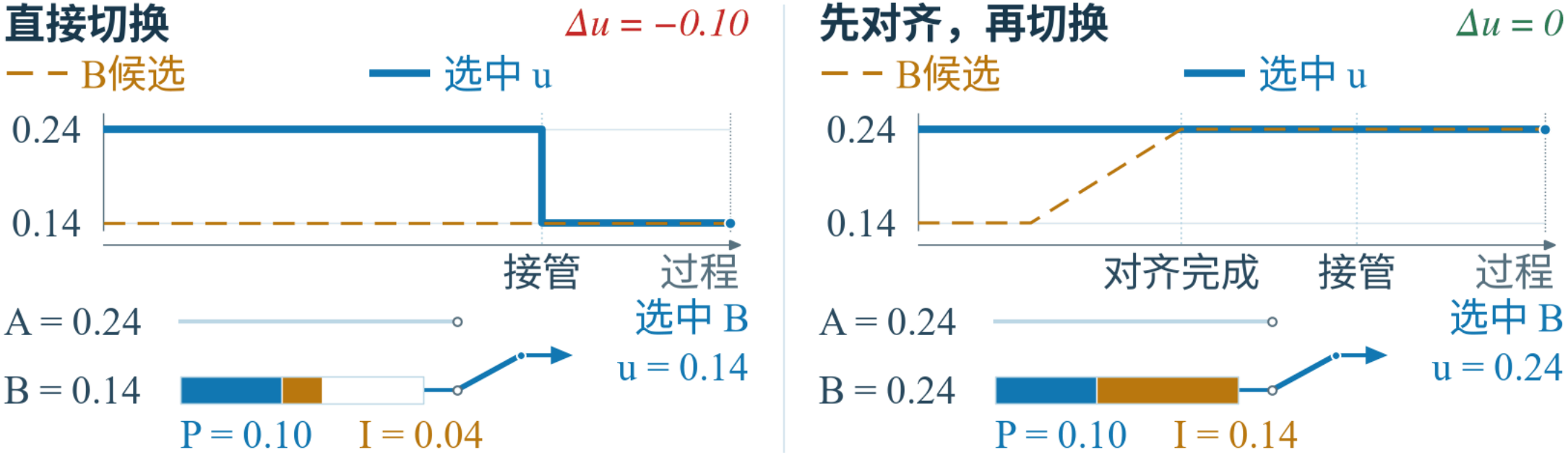
$$u_{I,\text{aligned}} = 0.24 - 0.10 = 0.14 \quad \Rightarrow \quad u_{\text{custom}} = 0.10 + 0.14 = 0.24$$

交接阶段	需要一致或有定义的量
准入	目标、状态时龄、积分/滤波状态、输出限制
切换/异常	唯一控制源；交接时间；故障退出与可追踪回退

切换例程见「控制源切换例程」页：0.ApiExps/21.SwitchPX4Simulink（使用1.13固件）。

5.5.4 接口验证与模块替换：控制交接过程

先对齐积分贡献，再切换输出源



图：直接交接与积分预对齐交接的输出对照（单轴PI示意）

看时序： B先把积分贡献从0.04调到0.14；对齐期间，仍由A输出0.24。

再接管： 两个候选值相等后才选B；虚线表示候选值，不表示同时执行。

5.5.4 接口验证与模块替换：控制源切换例程

RePX4Block按遥控通道切换PX4与Simulink控制器

入口：0.ApiExps/21.SwitchPX4Simulink/Readme.pdf（使用1.13固件）

机制： TorqueThrustCtrls外层isEnCtrl为布尔0/1：CH8<1500为0，CH8≥1500为1。
开启自动屏蔽后，内部RePX4Block的mode对应0/2，分别使用PX4/Simulink控制器。

① 编译模型	② 重编固件	③ 上传启动	④ 切换验证
Init_control.m →编译Exp6模型	运行Firmware/ 6x_Start.bat	PX4Upload上传； HITLRun填COM号	QGC解锁起飞后 拨动CH8

预期与判据

切到Simulink：QGC提示
Switching to Simulink control!
拨回：Switching to PX4 control!
两种控制下CH1–CH4都可操纵

常见失败与排查

无提示：确认运行6x_Start.bat并重传
切换无效：查isEnCtrl、mode与CH8
设置：选自动屏蔽，关自动Loiter、arm
QGC机架：HIL Quadcopter X

延伸： 切换瞬间是否跳变，按「控制源切换算例」页检查积分预对齐。

5.5.4 接口验证与模块替换：局部替换验收

替换成功需要模块、消息与闭环证据

① 模块边界	② 发布控制权	③ 信号与时序	④ 模式与回退	⑤ 闭环结果
选定版本 与替换环； 保留估计、 混控、安全链	原路径 按设计退出； 自定义出口 唯一有效	字段、坐标、 单位、频率、 数据时龄 符合接口约定	准入、停止、 失效处理、 回退可追踪	同一基准工况 比较响应、 输入、限幅、 稳定余量

判定：五层依次通过才算替换成功；某层不通过就回到该层排查，先不调控制参数。

版本：v1.12.3替换actuator_controls_0的发布；v1.14及以上替换点随之改变。

替换例程见「模块替换例程」页（1.BasicExps/e9-ReplacePX4Module，推荐1.12.3）。

5.5.4 接口验证与模块替换：模块替换例程

屏蔽原生输出后，由Simulink发布actuator_controls_0

入口：1.BasicExps/e9-ReplacePX4Module/Readme.pdf（固件1.12.3）

① **准备：** 按Readme运行一键安装脚本，选固件1.12.3。
② **屏蔽：** 注释MulticopterRateControl.cpp的两处发布语句，用UNUSED标注变量。
③ **烧录：** 在WSL中按飞控编译命令编译，QGC烧录，校准遥控器并设飞行模式。
④ **确认：** HITL基准正常后核对原输出停发；仅不能起飞不足以判定屏蔽。
⑤ **接入：** 运行Init_control.m，编译Exp6模型，PX4Upload上传。
⑥ **飞行：** 遥控器切到自稳模式（CH5或CH6），解锁起飞。

预期与判据
能起飞并受姿态控制，效果通常不如原生
模型订阅角速度、姿态与遥控输入，
发布actuator_controls_0

常见失败与恢复
编译不通过：未用UNUSED标注变量
不起飞：确认处于自稳模式
实验后：改回源码或重跑一键安装脚本

课堂讨论

输出在两组数值间交替跳变，先查什么

顺序	参考排查
1 稳定基准	停止不受控动作；退回已知安全仿真工况
2 明确责任	固定版本、模式、输出实例与选定控制源
3 追踪发布	查模块状态与uorb top频率；时间戳不能辨认发布者
4 验证交接	只保留一路，看跳变是否消失；再测切换与失效回退
5 验收闭环	恢复唯一控制源，在同一工况复测，跳变消失

先确认控制权，再判断控制律：消息在变化只说明有人在发布。

本节小结

接入飞控要同时说明数据与控制权

读对数据 → 发布被正确接收 → 闭环与模式正确

架构：传感→估计→控制→混控/分配→输出；对内uORB、对外MAVLink。

输入接口约定：来源、字段、单位、坐标、时龄与失效处理。

输出接口约定：归一化语义、下游分配、唯一发布者（屏蔽原生输出）与回退。

版本边界：安装版默认v1.12.3（混控器），v1.14及以上改用控制分配器。

易错点：四元数当欧拉角；归一化值当SI量；
控制频率当状态新鲜度；发布成功当闭环正确。