智能无人系统控制实践

第五章 滤波估计与底层控制

作者：戴训华 中南大学

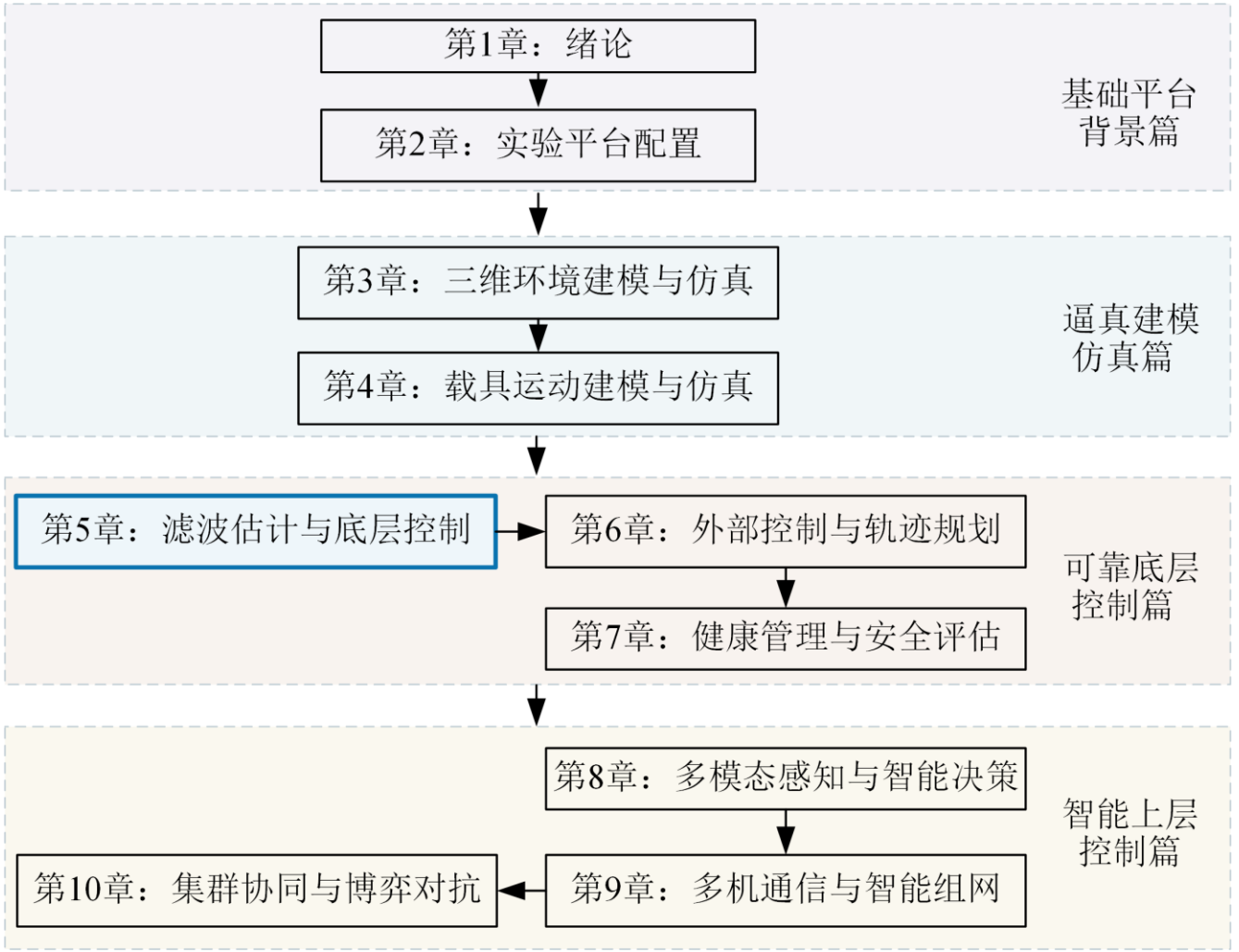
主页：https://faculty.csu.edu.cn/daixunhua

邮箱：dai.xh@csu.edu.cn

平台：https://rflysim.com

配套教材





教材：戴训华，全权，任雪峰. 智能无人系统控制实践[M]. 北京：电子工业出版社，2026.

本章学习目标

学完第五章能够完成什么

1. 解释估计与控制在反馈闭环中的分工
2. 完成一次滤波更新、控制计算与控制分配
3. 根据响应和控制输入评价并调整控制性能
4. 说明模型、固件、硬件及真机的分阶段验证

本章目录

滤波估计与底层控制：本章学习路线

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

5.1.1 无人系统控制原理

教材对应：第5.1.1.1节

5.1.2 底层控制的重要性

教材对应：第5.1.1.2节

5.1.3 滤波估计的重要性

教材对应：第5.1.1.3节

5.1.4 底层控制开发流程

教材对应：第5.1.1.4节、第5.1.2节

5.1.1 无人系统控制原理：模型与控制

运动模型与控制设计回答不同问题

运动模型	输入：拉力与力矩	→	模型	→ 输出：运动状态
控制设计	目标与状态反馈	→	控制器	→ 输出：执行器指令

- **被控对象：**接受调节的物理系统；本例是无人机机体。
- **被控量：**希望调节的变量；高度保持任务中的被控量是高度。
- **控制器：**根据目标与反馈计算修正指令；动作通过执行器影响机体。

5.1.1 无人系统控制原理：高度保持

相同油门为什么不总能保持高度

$$m\ddot{h} = T - mg + d$$

竖直一维模型：高度向上为正；NED竖直位置向下为正。

条件：水平姿态，阻力取零。

情形	拉力与重力的关系	运动变化
原质量，静止悬停	总拉力等于重力	竖直加速度为零
载荷增加，拉力不变	总拉力小于新的重力	开始向下加速
短时受到向下外力	竖直合力变为向下	高度与速度偏离原状态

h为高度；T为总拉力；m为质量；g为重力加速度；d为竖直外扰力（向上为正）。

5.1.1 无人系统控制原理：系统组成

目标、控制器与机体怎样形成反馈

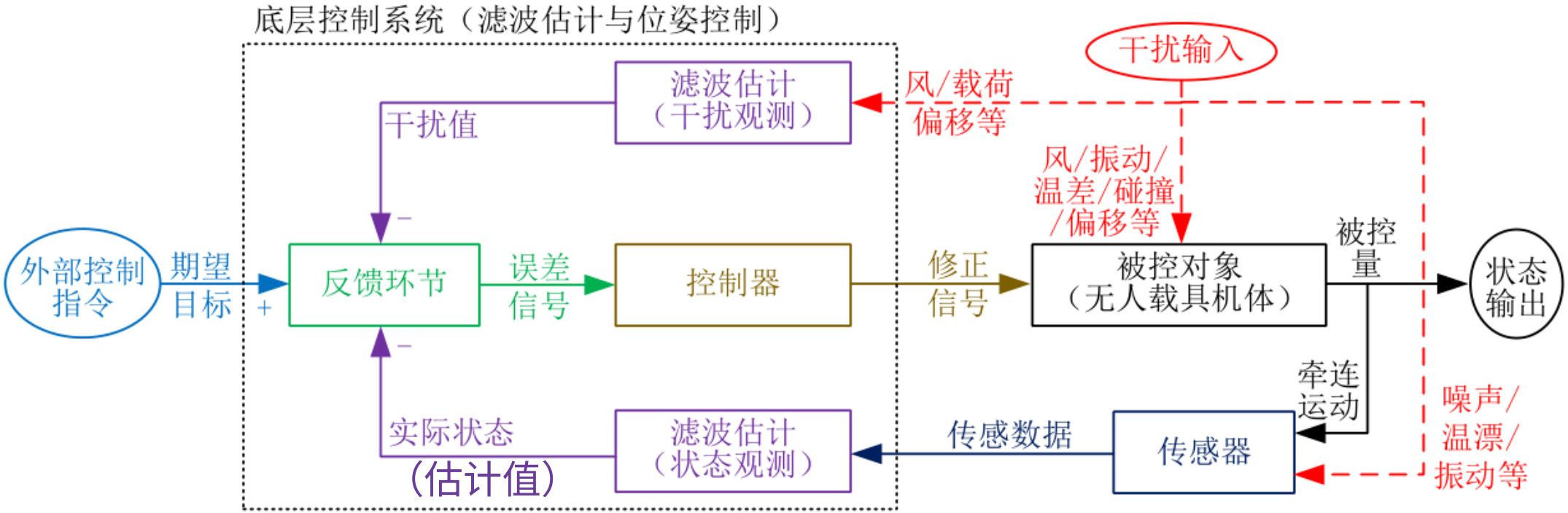
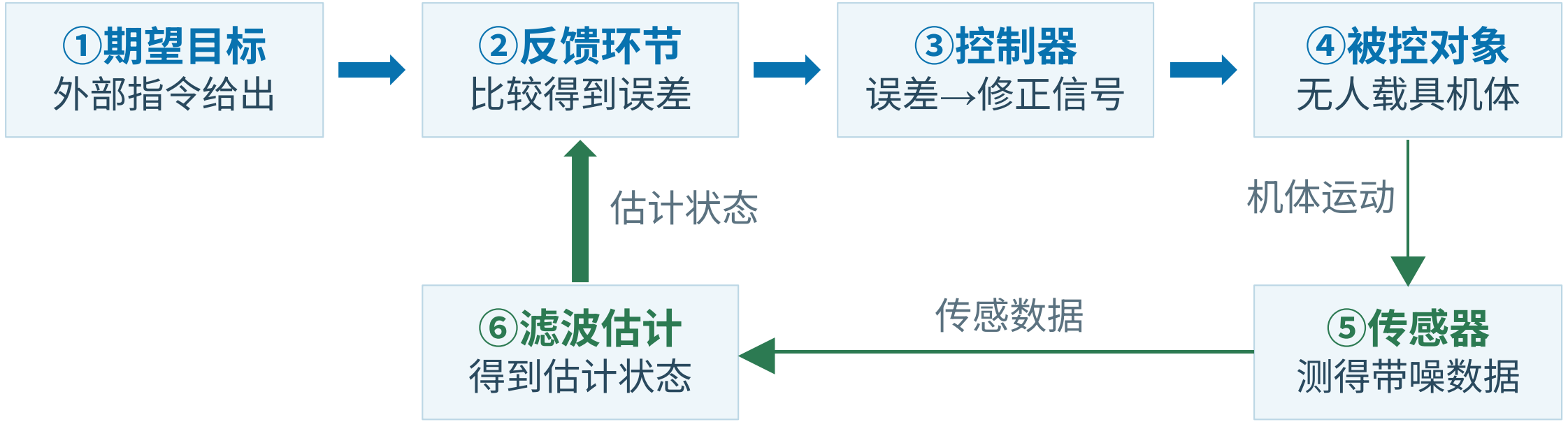


图5.1 无人系统控制原理

扰动由输入与观测推断，再换算为补偿量；图中省略相关连接。

5.1.1 无人系统控制原理：主环读图

沿主环读图5.1：比较、纠偏、测量、估计



- **反馈取估计状态：**图5.1中标为“实际状态”的反馈，取自滤波估计的输出。
- **扰动进入位置不同：**外力作用于机体，测量噪声先作用于传感器。

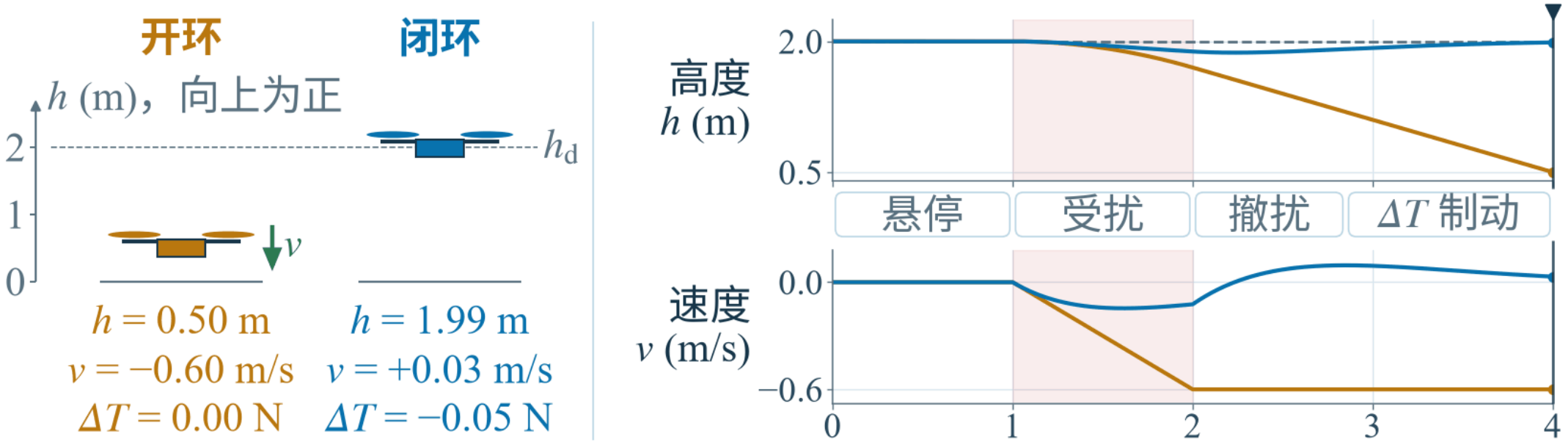
5.1.1 无人系统控制原理：开环与闭环

相同扰动下，反馈怎样改变运动

相同扰动：开环与闭环

$t = 4.00$ s

1–2 s 相同外力 $d = -0.60$ N 撤除后：开环保持下降，闭环靠 ΔT 回到 2 m 附近



$m = 1$ kg；$T = mg + \Delta T$；闭环 $\Delta T = 3e - 2.8v$，$e = h_d - h$，$h_d = 2$ m；开环 $\Delta T = 0$

图：同一扰动下开环与闭环的高度和速度响应（一维数值仿真）

5.1.1 无人系统控制原理：误差与动作

一次高度偏差怎样变成拉力修正

给定：目标2.0 m，估计1.8 m，质量1 kg，比例增益3 N/m。

条件：$v = 0$ m/s；$\hat{h}$为估计高度，h_d为目标高度（下标d表示期望）。

$$e = h_d - \hat{h} = 2.0 - 1.8 = 0.2\,\text{m}$$

$$\Delta T = K_p e = 3\ \text{N/m} \times 0.2\,\text{m} = 0.6\,\text{N}$$

$$T = mg + \Delta T = 9.81 + 0.6 = 10.41\,\text{N}$$

- **前馈与反馈：**重力前馈提供基本悬停拉力，反馈只补当前偏差。
- **连续运动：**动图闭环律中的$-2.8v$是速度反馈，提供阻尼；稳定性要看连续响应。

本章目录

滤波估计与底层控制：本章学习路线

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

5.1.1 无人系统控制原理

教材对应：第5.1.1.1节

5.1.2 底层控制的重要性

教材对应：第5.1.1.2节

5.1.3 滤波估计的重要性

教材对应：第5.1.1.3节

5.1.4 底层控制开发流程

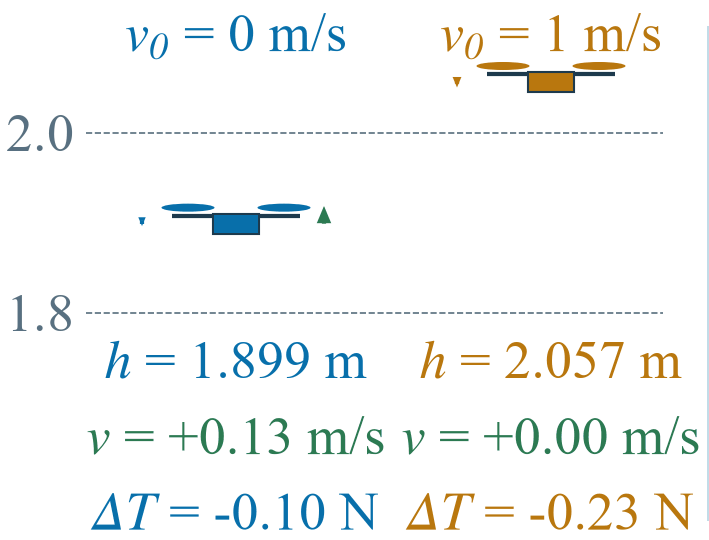
教材对应：第5.1.1.4节、第5.1.2节

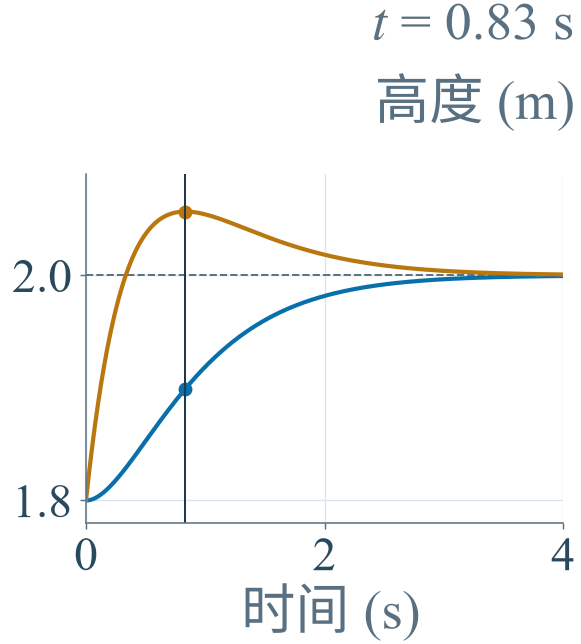
5.1.2 底层控制的重要性：惯性与响应

已经接近目标，为什么还会冲过去

减小拉力，不会立即停止上升

初始高度相同，初始速度不同





- **初始位置相同：** 距目标都是0.2 m。
- **速度不同：** 上升越快，越需提前减小拉力。
- **控制配合：** 位置反馈使其接近，速度反馈帮助减速。

图：同一控制律$\Delta T = 4e - 4v$下两种初始速度的高度响应（教学算例）

5.1.2 底层控制的重要性：底层与上层

运动目标仍要经过稳定控制才能执行

任务层 — **巡检一个位置，或沿给定路线运动**

↓ 逐层生成运动目标

运动目标 — **期望位置、速度、姿态或角速度**

↓ 目标交给相应控制环

底层控制 — **依据状态反馈调节位姿，落实到执行器**

外部给定的目标越底层（如姿态、角速度），外部程序承担的控制层越多。

自主任务的可靠性，首先受到底层运动能力的约束。

5.1.2 底层控制的重要性：扰动与不确定性

不同异常进入不同环节

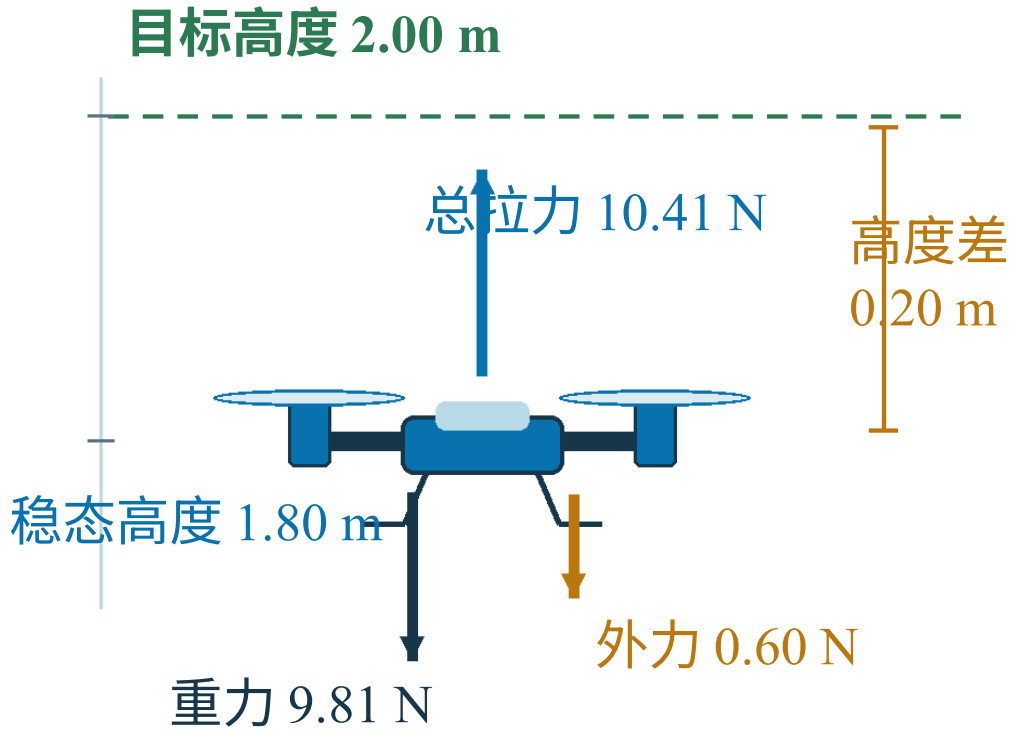
因素	先影响什么	优先观察的证据
外部扰动	机体受力和运动	速度变化、姿态偏移
测量噪声与漂移	传感器读数	原始测量、零偏与残差
执行器限制	实际力和力矩	请求量、实际量与限幅
模型不确定性	预测与真实响应的关系	质量、惯量及响应差异
故障与丢包	数据或部件可用性	时间戳、有效标志和状态切换

零偏：零输入时的输出偏差；残差：测量减预测；有效标志：标明数据是否可用。

5.1.2 底层控制的重要性：持续外力

持续外力下，为什么会停在目标下方

仍取1 kg机体、2 m目标和速度阻尼；持续受到向下0.60 N外力。



稳定且未限幅时，速度回到零，
比例项需持续抵消新增外力。

$$K_p e = 0.60\,\mathrm{N}$$

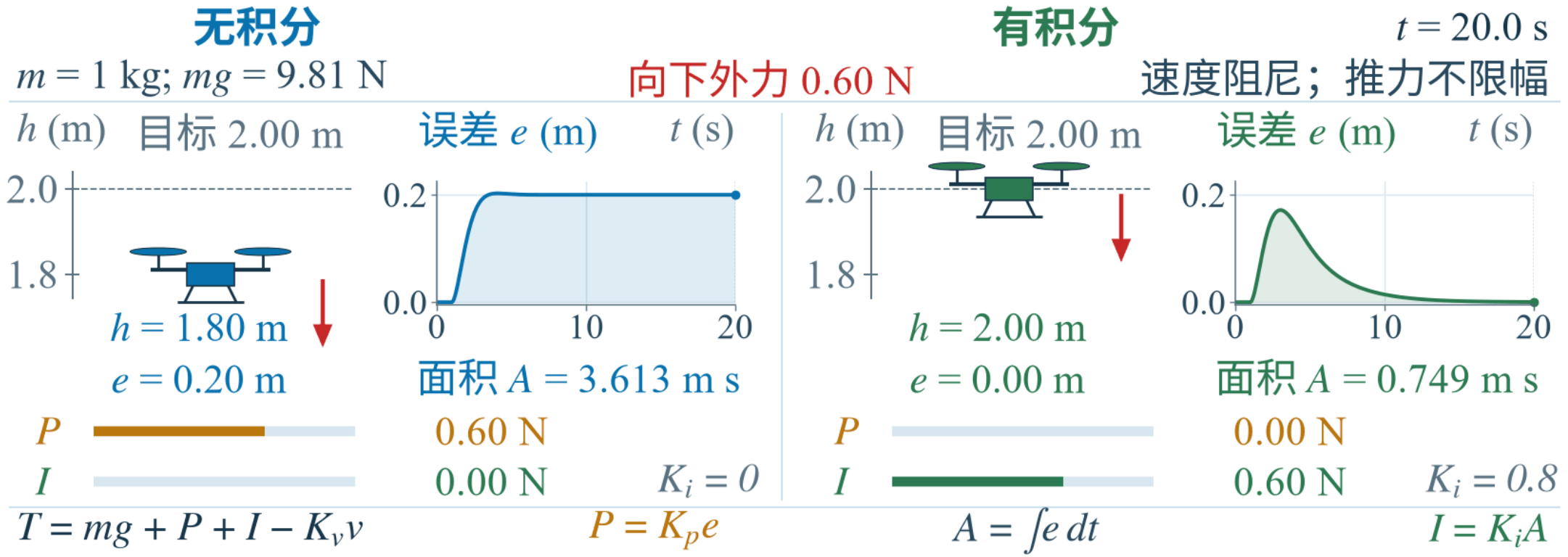
$$e = 0.60\,\mathrm{N} \div (3\ \mathrm{N/m}) = 0.20\,\mathrm{m}$$

$$h = 2.00 - 0.20 = 1.80\,\mathrm{m}$$

只靠比例补偿，必须留下误差。
怎样保留补偿，同时回到目标?

5.1.2 底层控制的重要性：积分补偿

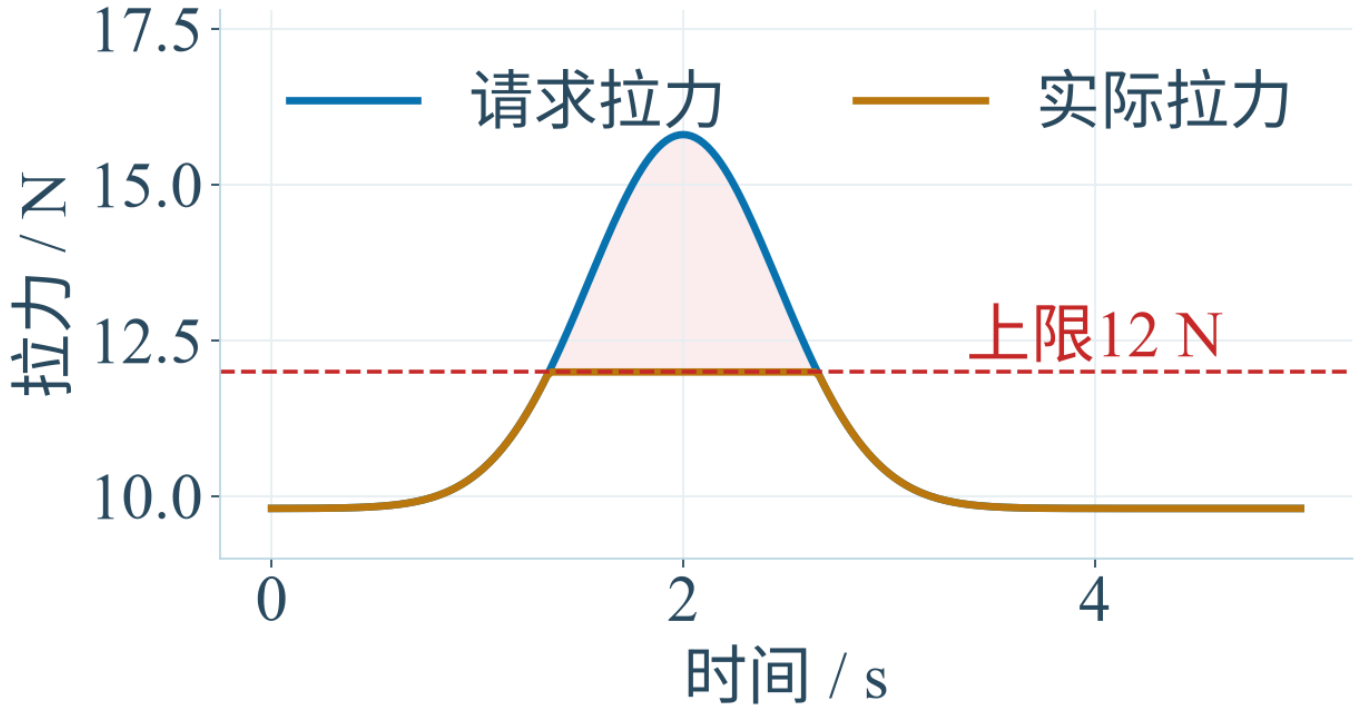
积分怎样把持续偏差变成补偿



图：误差趋零后，积分停止增长并保留补偿（持续外力数值算例）

5.1.2 底层控制的重要性：执行器限制

控制器算得出，执行器不一定做得到



图：拉力请求超过上限时出现执行缺口

- **请求量：**控制算法希望得到的作用。
- **实际量：**受电流、转速和机构行程等条件限制。
- **设计含义：**限幅时若积分继续推向饱和，需抗积分饱和。

本章目录

滤波估计与底层控制：本章学习路线

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

5.1.1 无人系统控制原理

教材对应：第5.1.1.1节

5.1.2 底层控制的重要性

教材对应：第5.1.1.2节

5.1.3 滤波估计的重要性

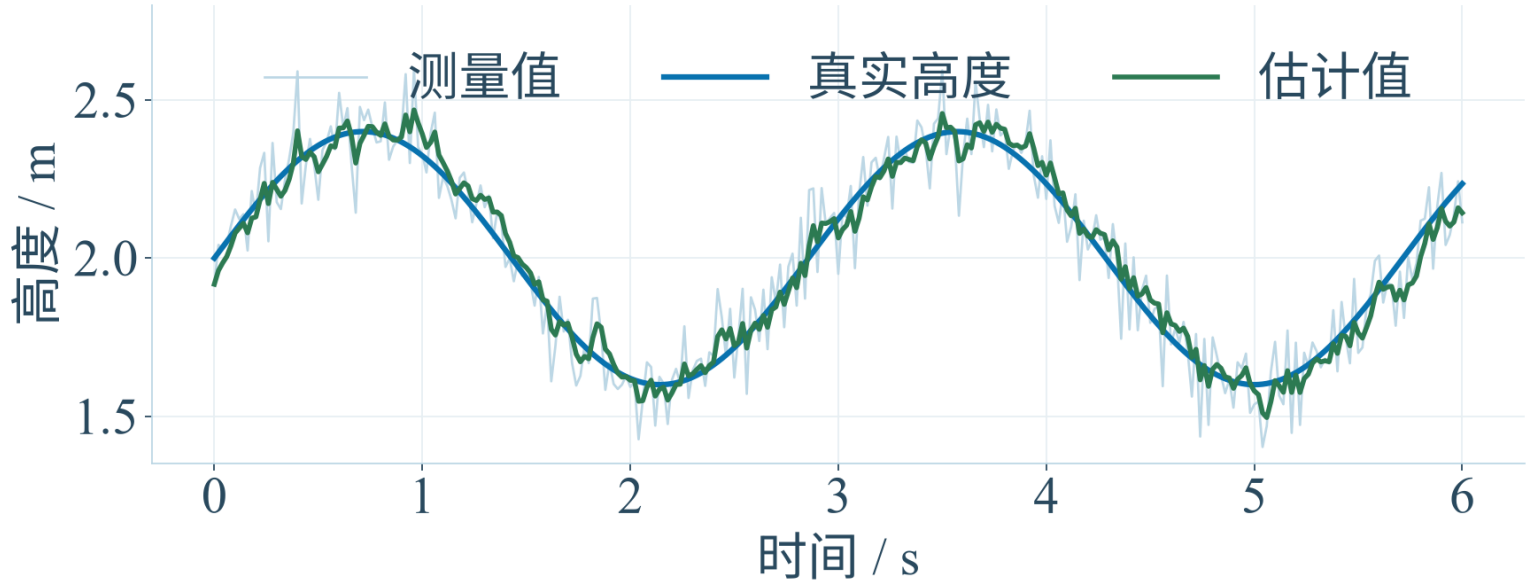
教材对应：第5.1.1.3节

5.1.4 底层控制开发流程

教材对应：第5.1.1.4节、第5.1.2节

5.1.3 滤波估计的重要性：状态与观测

真实状态、测量值和估计值并不相同



图：真实高度、带噪测量与一阶递推估计（教学算例，真值由已知模型给出）

真实状态	测量值	估计值
物体实际的运动状态	传感器提供的带误差信息	模型与观测共同形成的判断

5.1.3 滤波估计的重要性：信息互补

不同传感器提供不同的运动线索

信息来源	能提供的线索	主要限制
惯性测量单元（IMU）	陀螺测角速度；加速度计测比力	积分会累积误差；运动加速度影响重力参照
全球导航卫星系统（GNSS）	位置、速度及长期参照	遮挡和干扰可使信息退化
相机与视觉估计	图像特征变化辅助定位	依赖光照、纹理和运动条件
激光雷达	距离与几何结构辅助定位	雨雪雾及几何退化影响结果

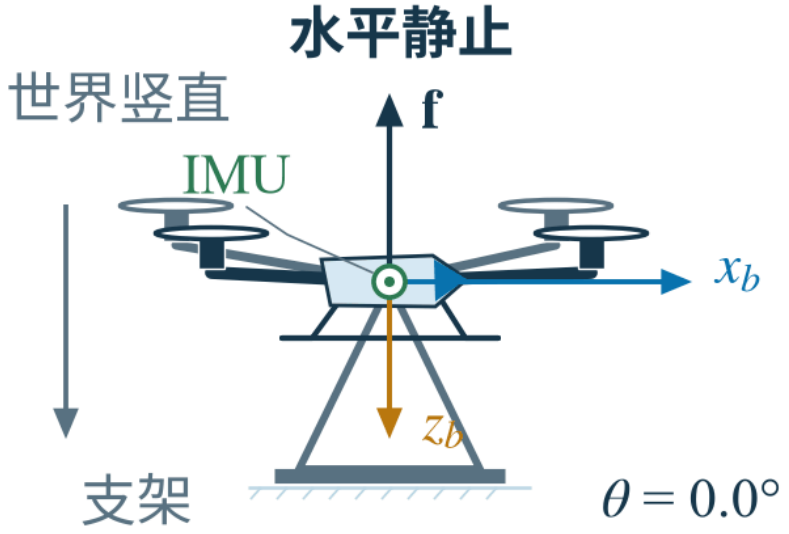
比力是单位质量非重力作用力：$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{a} - \boldsymbol{g}$（同一坐标系）。

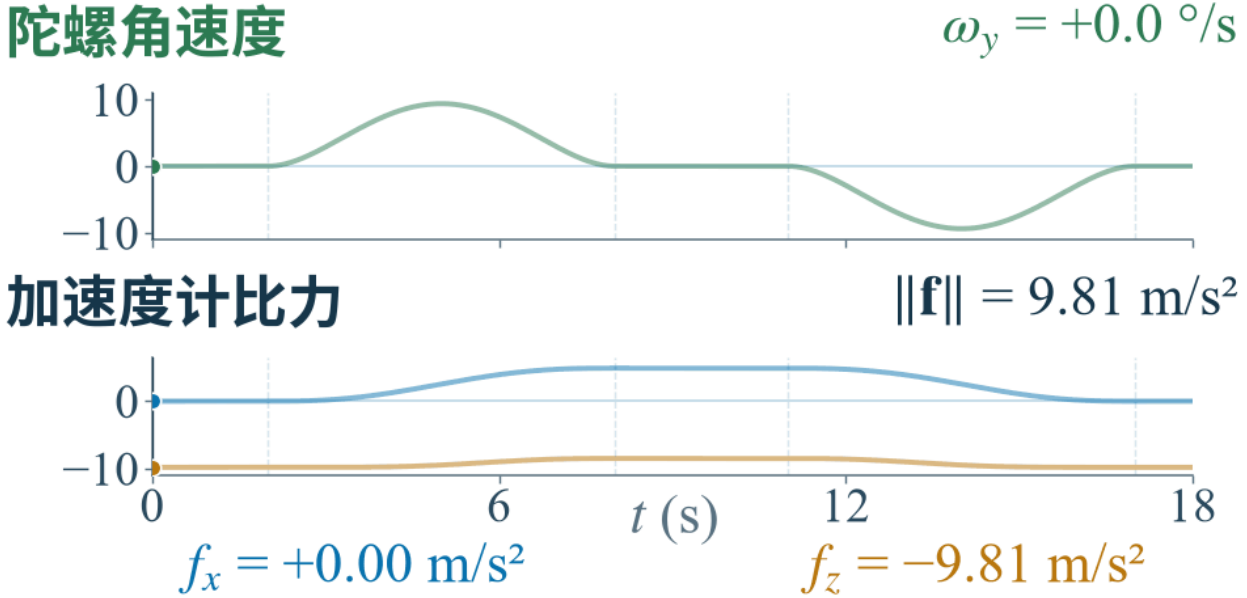
融合前先统一时间和坐标；重力方向本身不能确定偏航。

5.1.3 滤波估计的重要性：IMU读数

机体不动、转动、停住时，IMU分别读到什么

停住后：角速度归零，比力不归零





FRD：x 前 / y 朝外 / z 下

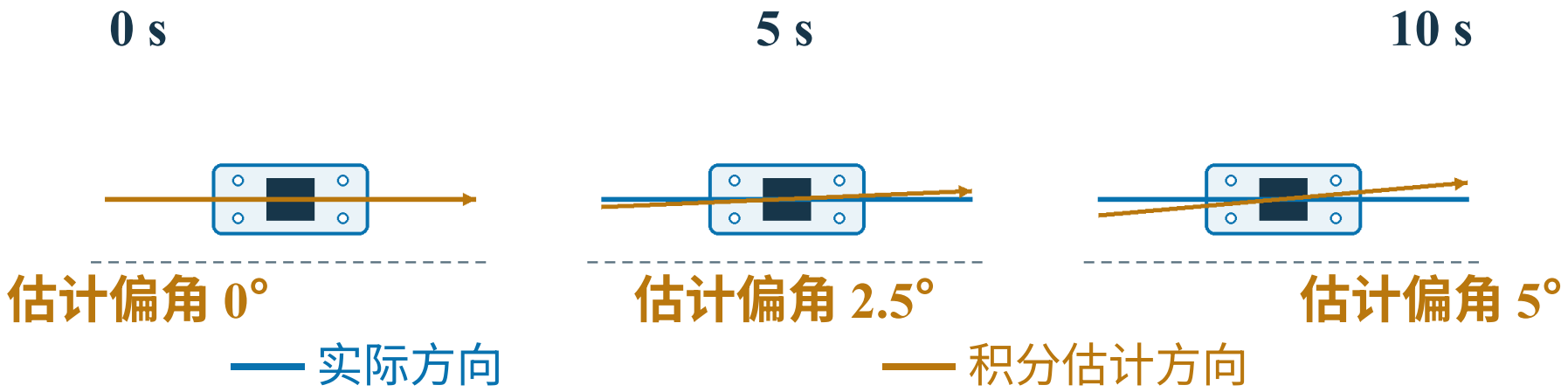
支架承重、转轴过 IMU；慢转，平移及偏轴加速度可忽略。

图：支撑慢转时，角速度在停住后归零，比力分量仍随倾斜改变

5.1.3 滤波估计的重要性：漂移与互补

陀螺积分为什么会漂移，其他观测怎样纠正它

机体保持水平；陀螺仍有0.5°/s残余偏置，积分结果会不断偏离。



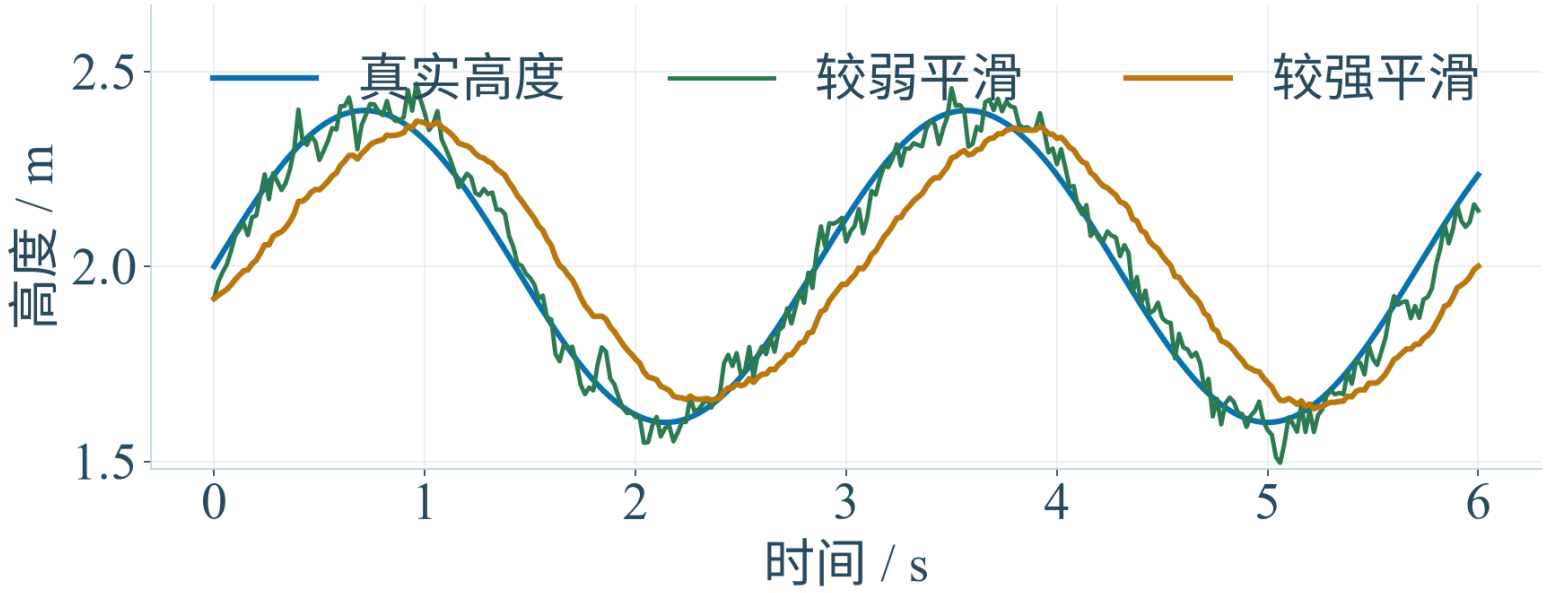
$$\Delta\theta = b_\omega \Delta t = 0.5^\circ/\mathrm{s} \times 10\,\mathrm{s} = 5^\circ$$

陀螺积分跟踪短时变化；准静态重力参照可纠正横滚、俯仰的慢漂移。

重力参照不能确定偏航；机体加速时，也不能把全部比力当作重力。

5.1.3 滤波估计的重要性：平滑与延迟

越平滑的反馈，不一定越适合控制



图：同一带噪数据下两种平滑强度的估计（只改变吸收新测量的比例，教学算例）

结论：较强平滑的波峰约晚0.3 s、低约0.03 m；较弱平滑更及时，但抖动更大。

估计的价值不只在平滑，还在于及时反映可用状态。

5.1.3 滤波估计的重要性：预测与校正

新测量到来前，先预测机体到了哪里

先预测，再用当前测量校正

旧速度估计 0.50 m/s；仅这 0.20 s 匀速近似



预测 $1.80 + 0.50 \times 0.20 = 1.90$ m

$t = 0.20$ s

创新 $2.00 - 1.90 = 0.10$ m



校正 $1.90 + 0.60 \times 0.10 = 1.96$ m

图：旧估计先预测到当前时刻，再按新观测的创新校正

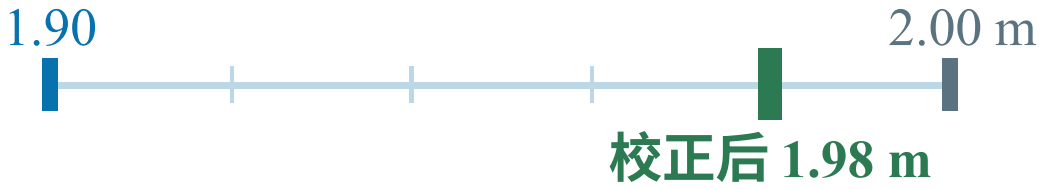
5.1.3 滤波估计的重要性：观测可信程度

观测质量变化时，估计应该怎样调整

同一时刻：预测高度1.90 m，新观测2.00 m；两者相差0.10 m。

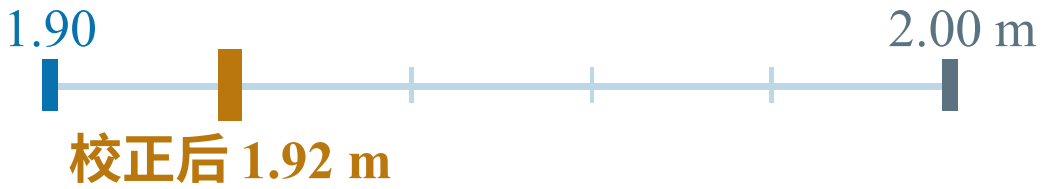
观测较可信

$$1.90 + 0.8 \times 0.10 = 1.98\,\mathrm{m}$$



观测噪声较大

$$1.90 + 0.2 \times 0.10 = 1.92\,\mathrm{m}$$



0.8与0.2是演示权重；卡尔曼滤波根据预测和观测的不确定程度计算权重。

没有新观测时继续预测；不能把上次测量当作新信息重复使用。

本章目录

滤波估计与底层控制：本章学习路线

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

5.1.1 无人系统控制原理

教材对应：第5.1.1.1节

5.1.2 底层控制的重要性

教材对应：第5.1.1.2节

5.1.3 滤波估计的重要性

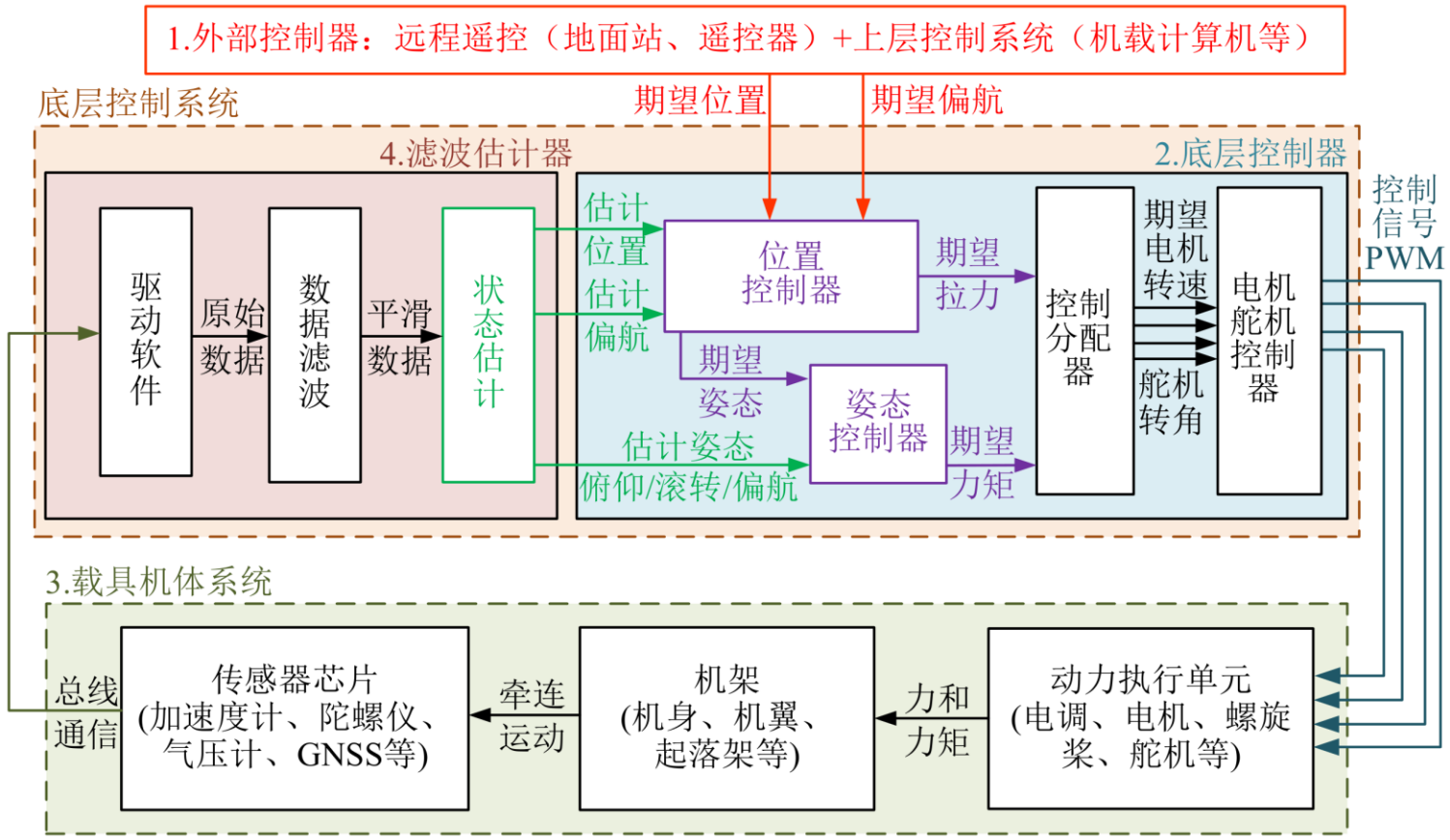
教材对应：第5.1.1.3节

5.1.4 底层控制开发流程

教材对应：第5.1.1.4节、第5.1.2节

5.1.4 底层控制开发流程：底层控制框架

图5.2：底层控制系统的四类模块



1. 外部控制器
给出期望位置与期望偏航

2. 底层控制器
位姿控制与控制分配

3. 载具机体系统
执行单元、机架、传感器

4. 滤波估计器
由传感数据估计状态

图5.2
无人系统底层控制系统框架

5.1.4 底层控制开发流程：观测链与动作链

沿观测与动作两条链读图5.2

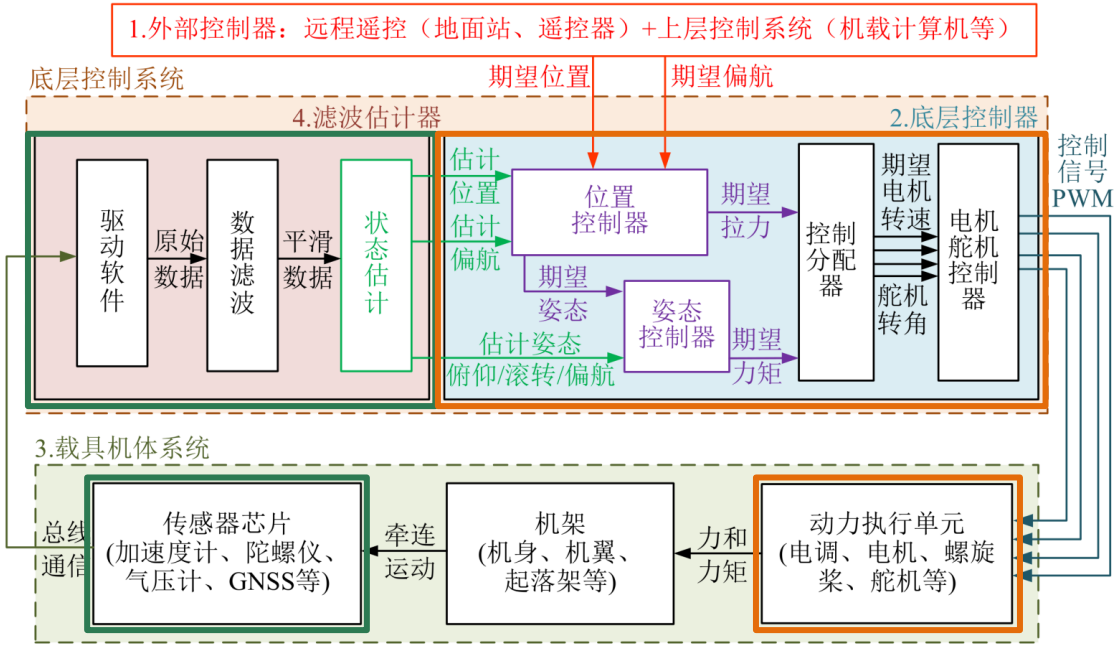


图5.2（缩略）：绿框为观测链，橙框为动作链

PWM（脉冲宽度调制）是图中的一种执行器信号形式。

观测链（绿框）：运动变成状态反馈

机体运动 → 传感器 → 驱动与滤波 → 状态估计 → 位置、姿态反馈

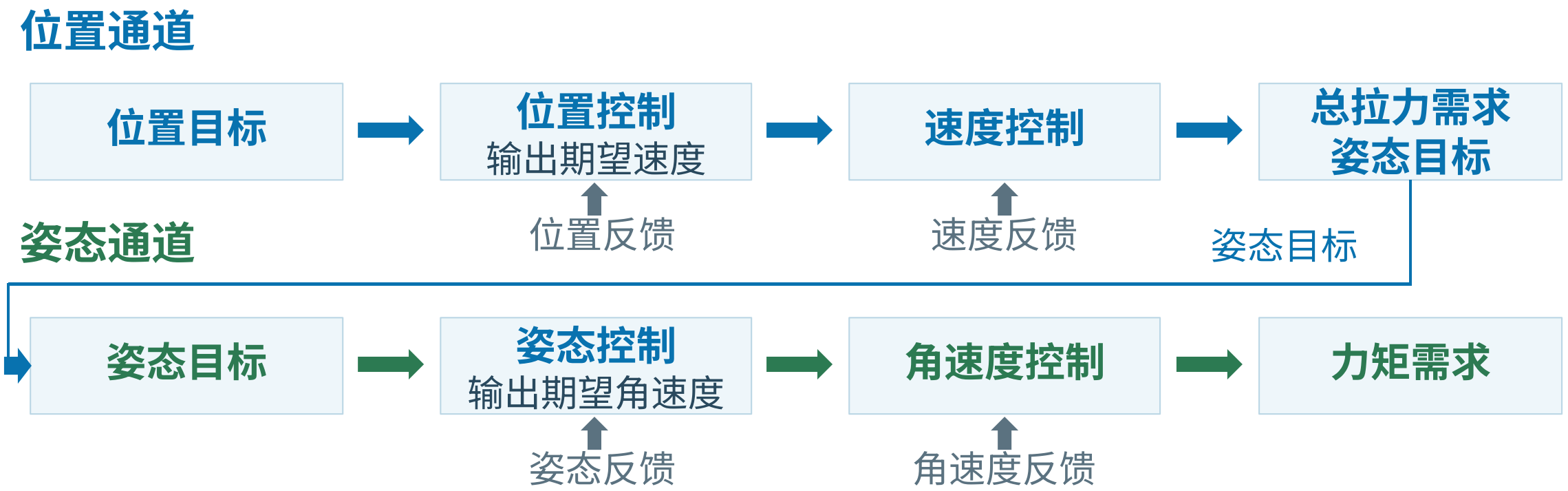
动作链（橙框）：目标变成实际作用

目标与反馈 → 位置、姿态控制 → 总拉力与力矩需求 → 控制分配与驱动 → 电机、舵机等执行器 → 真实力和力矩 → 新的机体运动

各模块按各自周期并行、持续运行。

5.1.4 底层控制开发流程：串级结构

运动目标通过多个控制层逐步落实



- **内外环：**内环须明显快于外环，外环才可把内环视为已跟上给定。
- **控制分配：**把总拉力需求与力矩需求，一起换算为各执行器指令。

5.1.4 底层控制开发流程：控制分配

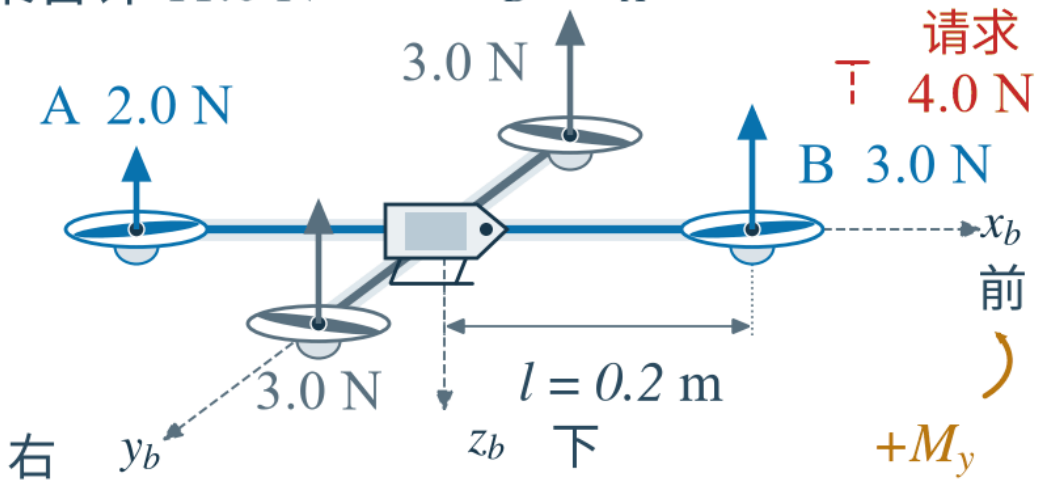
同样的电机，怎样既抬升又转动

同样的电机：共同增量与差动分配

两桨：3/3 → 2/4 → 2/3 N

四桨合计 11.0 N

$T_B - T_A = 1.0$ N



输入分配

两桨合力 **5.0 N**



$M_y = l(T_B - T_A)$ **+0.20 N m**



同增 差动 限幅

6 N 仅指所示一对，不是 1 kg 整机的悬停配平。

图：共同增力、对臂差动和单侧限幅对力与力矩的影响

5.1.4 底层控制开发流程：工作点与线性化

设计模型和验证模型各有用途

阶段	模型选择	主要回答的问题
理解规律	一维或单通道模型	力、速度、误差如何相互影响
局部设计	工作点附近的线性模型（满足叠加与齐次）	怎样选增益，局部响应是否稳定
扩大验证	完整非线性模型及扰动/限幅	大指令和模型差异下仍能否工作

- **本例工作点：** 无外扰的水平静止悬停；合力与合力矩为零，$T_0 = mg$。
- **局部线性化：** 在工作点附近对偏差量取一阶近似；推导见课件4.4.2。
- **共同基准：** 统一质量、惯量、单位、坐标与初值，再比较响应差异。
- **适用范围：** 局部小扰动下的结论，还需在大指令与限幅条件下验证。

5.1.4 底层控制开发流程：分阶段验证

每一阶段验证不同的真实部分

模型仿真	软件在环（SITL）	硬件在环（HITL）	真机实验
新增真实部分 控制算法计算	**新增真实部分** 控制固件进程及软件接口	**新增真实部分** 目标自驾仪硬件	**新增真实部分** 机体、执行器与真实环境
主要观察 控制方向、响应和限幅	**主要观察** 消息连接、调度与逻辑	**主要观察** 硬件连接、实时性和资源	**主要观察** 模型外差异与受限工况表现

模型仿真与软件、硬件在环：机体运动由仿真模型产生

真实机体与环境

每向后一步都保留前一阶段的基准，新出现的差异才能归因。

5.1.4 底层控制开发流程：RflySim开发支持

按当前问题选择对应例程

共同父目录：[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl/

学习任务	真实目录	关注点（对应课件）
传感器标定	1.BasicExps/e3-SensorCalib	偏置、尺度与校正残差（5.2）
滤波估计	1.BasicExps/e4-FilterDesign	姿态估计及噪声/延迟（5.2）
姿态控制	1.BasicExps/e5-AttitudeCtrl	内环结构与响应（5.4）
开发与生成	0.ApiExps/3.DesignExps	模型接入、仿真与代码生成（5.5–5.6）

各目录先读Readme.pdf；局部替换、模块切换、数据接口与日志在课件5.5–5.6展开。

5.1.4 底层控制开发流程：数据与结果

同一份日志，怎样比较不同姿态估计

沿用前面的e4-FilterDesign目录：
e4.1/Attitude_estimator0_fly.m 读取同目录的 logdata.mat

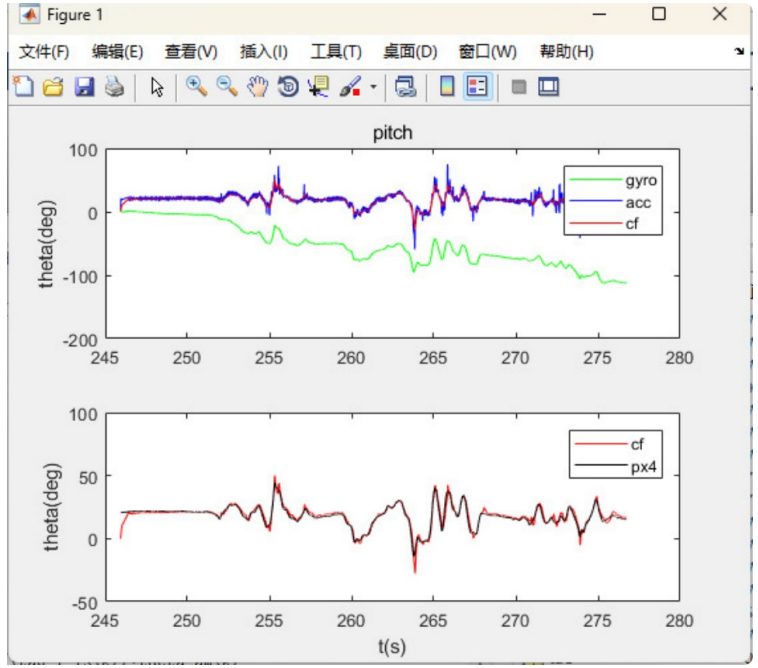
输入：带时间戳的IMU记录

timestamp；gx、gy；ax、ay、az
时间间隔由微秒换算为秒。

处理：同一数据，三种解算

gyro：陀螺积分
acc：重力参照
cf：两者互补

运行与参数比较见课件5.2。



图：例程俯仰结果；PX4也为估计值。

课堂讨论

轨迹不对，先从哪一环寻找证据

观察现象	先查看的量	参考判断
高度持续低于目标	目标、估计高度、拉力请求	区分偏置、负载与输出上限
测量明显抖动	原始量、估计量、时间戳	检查噪声、滤波和采样时序
控制输出长期顶格	请求量、执行器输出、限幅状态	先查动作余量，再讨论增益

追问：哪一种新增证据，能把两个可能原因区分开?

- 参考要点：外部高度参照有助于查估计偏置；执行器输出与限幅状态有助于查动作余量；实际受力需靠仿真真值或独立测量进一步核实。

课堂练习

换一组数据，完成一次高度纠偏计算

已知：质量1.5 kg，目标高度3.0 m，估计高度2.85 m，速度为0，比例增益4 N/m。

(1) 求误差e、修正量ΔT和总拉力T。
(2) 若执行器总拉力上限为15.0 N，这次修正能否全部实现？
(3) 若估计始终偏低0.10 m，最终估计高度稳定在3.0 m，真实高度多高？

参考要点

(1) $e = 0.15$ m；$\Delta T = 4 \times 0.15 = 0.60$ N；$T = 14.715 + 0.60 \approx 15.32$ N。
(2) 不能全部实现：实际只有15.0 N，修正量只实现约0.29 N，回升变慢。
(3) 估计稳定在3.0 m时，真实高度约3.10 m：估计偏差直接变成位置偏差。

本节小结

把状态看清，再把动作落实

- **控制的作用：**调整输入以改变运动；位置相同、速度不同，所需动作也不同。
- **估计的作用：**综合模型和观测形成状态反馈；既关心误差，也关心响应是否及时。
- **工程的约束：**执行器、采样时序、模型与环境共同决定可达到的性能。
- **开发流程：**串级分层落实；局部线性化设计，再逐级验证到真机。
- **易错点：**测量不是真值，反馈不保证稳定，请求量不一定能被执行器实现。

可信的状态反馈，是后续控制设计的起点。